

De invloed van het falen van gemalen op wateroverlast in polders

Vergeten de waterschappen een parameter in de watersysteemtoets?

Natasja Oostrum
juni 2019 - Delft

De invloed van het falen van gemalen op wateroverlast in polders

Vergeten de waterschappen een parameter in de watersysteemtoets?

door

Natasja Oostrum
juni 2019 - Delft

ter verkrijging van de graad van

Master of Science
in Civil Engineering

aan de Technische Universiteit Delft,
de openbare verdediging is op woensdag 26 juni om 15:30 uur.

Studentnummer: 4220315
Projectduur: september, 2018 – juni, 2019
Afstudeercommissie: prof. dr. ir. M. Kok TU Delft, voorzitter
ir. S. J. H. Rikkert TU Delft
dr. ir. O. A. C. Hoes TU Delft
ir. L. F. Mooyaart Royal HaskoningDHV, supervisor
ing. K. de Rooij Waterschap Brabantse Delta, supervisor

Een digitale versie van de thesis is beschikbaar op <http://repository.tudelft.nl/>.

Omslagfoto door Luciano de Graaf Fotografie



Voorwoord

Dit rapport is geschreven als eindschriftie voor de master Hydraulic Engineering met specialisatie Hydraulic Structures aan de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Royal HaskoningDHV en Waterschap Brabantse Delta.

Vanaf september 2018 tot juni 2019 heb ik met veel plezier gewerkt aan dit onderzoek over het falen van gemalen. Gedurende het schrijven van mijn scriptie kwam ik erachter dat het een zeer breed onderwerp is, hierdoor heb ik het onderwerp vanuit verschillende richtingen kunnen belichten. Dit was een leuke uitdaging, omdat ik ook dingen heb onderzocht en geleerd die niet direct aansluiten op mijn masterrichting zoals het modelleren in SOBEK en GIS.

Graag zou ik mijn volledige afstudeercommissie willen bedanken voor hun begeleiding en betrokkenheid tijdens het schrijven van mijn thesis. Allereerst wil ik Matthijs Kok, de voorzitter van de commissie, bedanken voor zijn nuttige feedback tijdens de voortgangsmoetingen. Ik wil Olivier Hoes graag bedanken voor zijn hulp bij het leren van de programma's SOBEK en GIS en zijn kritische houding ten opzichte van het academisch niveau van mijn onderzoek. Stephan Rikkert wil ik graag bedanken voor zijn uitgebreide en duidelijke feedback op elk tussenrapport. Ik wil Kees de Rooij en Leslie Mooyaart graag bedanken voor alle steun tijdens (de moeilijkere perioden van) mijn afstuderen. Kees de Rooij wil ik daarnaast ook bedanken voor het helpen met verzamelen van alle data en het wegwijs maken bij het waterschap. Leslie Mooyaart wil ik ook graag bedanken voor het altijd openstaan voor een korte brainstormsessie en zijn enthousiasme.

Ik wil graag mijn ouders en broers bedanken. Ondanks dat wij, als familie, een lastige periode achter de rug hebben die samenviel met het schrijven van mijn thesis, hebben zij mij altijd gesteund en geholpen waar mogelijk. Bedankt daarvoor!

Tot slot wil ik graag Royal HaskoningDHV en het Waterschap Brabantse Delta bedanken voor het beschikbaar stellen van hun faciliteiten en data. Ook alle collega's bij beide bedrijven wil ik bedanken voor de goede en gezellige werksfeer.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Natasja Oostrum
juni 2019 - Delft

Samenvatting

Waterschappen in Nederland toetsen elke zes jaar middels de watersysteemtoets of hun beheersgebied voldoet aan de wateroverlastnormen. De wateroverlastnormen waaraan getoetst wordt, zijn uitgedrukt in een norm met overstromingskansen waarop de bergings- en afvoercapaciteit van regionale wateren moeten zijn ingericht. In deze toetsing wordt op dit moment aangenomen dat het mogelijke falen van een gemaal verwaarloosbaar is bij het bepalen van inundatie in polders. Door deze aanname wordt de daadwerkelijke kans op inundatie mogelijk onderschat. De onderzoeksvraag van dit onderzoek is dan ook: *Wat is het effect van het falen van (polder)gemalen op de watersysteemtoets?*

Allereerst zijn de oorzaken van het falen van een gemaal geanalyseerd om de meest kwetsbare onderdelen van een gemaal te identificeren. Vervolgens is onderzoek gedaan naar de onbeschikbaarheid van gemalen en tot slot is onderzocht wat de gevolgen voor het poldersysteem zijn als een gemaal faalt. Deze analyses zijn uitgevoerd aan de hand van drie casestudies van het waterschap Brabantse Delta. Deze casestudies zijn Middelschans, Plukmade en Tonnekreek. Deze drie casestudies verschillen in pompcapaciteit, aantal pompen, watersysteem, gebiedsgrootte en landgebruik.

Voor de analyse van oorzaken van het falen van gemalen is gebruikgemaakt van het storingsmeldingenstelsel TMX van de gemalen bij Brabantse Delta. Uit deze analyse bleek dat veel storingsmeldingen niet direct leiden tot het uitvallen van het gemaal. Daarnaast liet de analyse zien dat de pompinstallatie, het krooshek en de vacuümpomp de meest kwetsbare onderdelen zijn van een gemaal.

In de analyse is onderscheid gemaakt tussen de gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen, onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen en onbeschikbaarheid door langdurig falen. De onbeschikbaarheid van de casestudies ligt tussen de 0.0% en 2.2%. Een onbeschikbaarheid van 2.2% is groot. Deze onbeschikbaarheid treedt op bij casestudie Middelschans. Momenteel is dit gemaal onder revisie bij Brabantse Delta. De onbeschikbaarheidsanalyse is uitgevoerd aan de hand van data van bedrijfsmeldingen, waterstanden en beheer/inslagpeilen van de gemalen.

De gevolgen van het falen van gemalen zijn bepaald met SOBEK-modellen die gebruikt zijn voor de watersysteemtoets van Brabantse Delta in 2014. Door in het model een gemaal tijdelijk stop te zetten is het falen van een gemaal nagebootst. Deze analyse liet zien dat de geïnundeerde oppervlakte, de inundatiediepte en de schade die optreedt door de inundatie afhankelijk zijn van het gebied. Wel is duidelijk dat bij alle casestudies het geïnundeerde oppervlak, de inundatiediepte en de schade toenemen op het moment dat gemalen falen. De inundatie is ook getoetst aan de wateroverlastnormen. Bij alle casestudies nam het geïnundeerde oppervlak dat niet aan de normen voldoet toe. Bij de casestudies Middelschans en Plukmade betrof de toename een klein percentage van het totale gebied. Bij de casestudie Tonnekreek was echter sprake van een significante toename van het oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet. Hier was sprake van een stijging tot 5.6% van het totale gebied dat niet voldoet. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het falen van gemalen een grote impact kan hebben op de mate waarin een gebied aan de wateroverlastnormen voldoet.

Het risico dat gemalen vormen voor polders is bepaald door de onbeschikbaarheid van de gemalen te combineren met de gevolgen van het falen van gemalen. Bij alle casestudies nam het risico op inundatie in polder op jaarbasis toe als het falen van gemalen mee werd genomen in de risicobepaling. Het extra risico op jaarbasis is € 60 bij de casestudie Middelschans (290 ha), € 106 bij de casestudie Plukmade (680 ha) en € 765 bij de casestudie Tonnekreek (3 390 ha). Bij de casestudies Middelschans en Plukmade is de stijging klein. Bij de casestudie Tonnekreek is de stijging groter.

De kans dat zowel een extreme neerslaggebeurtenis als onbeschikbaarheid van het gemaal optreedt, is klein. Op jaarbasis is de kans dat een neerslaggebeurtenis met de gemiddelde herhalingstijd van 2 jaar optreedt in combinatie met onbeschikbaarheid van gemaal Middelschans 0.9%, 0.7% in combinatie met onbeschikbaarheid van gemaal Plukmade en 0.2% in combinatie met onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek. Bij

een hogere gemiddelde herhalingstijd van de neerslaggebeurtenis, is deze kans bij alle casestudies 0.1% of minder. Uit de analyses is naar voren gekomen dat vooral de kans van optreden van zowel een extreme neerslaggebeurtenis als onbeschikbaarheid van het gemaal bepalend is voor het effect dat het falen van gemalen heeft op inundatie in polders. Door de (zeer) lage kans dat de gecombineerde gebeurtenis optreedt, kan geconcludeerd worden dat, ondanks dat de gevolgen van het falen van gemalen groot kunnen zijn, het falen van gemalen weinig effect heeft op polders.

English summary

Introduction

Every six years the Dutch water boards test the water systems in the water system assessment to see if the water systems still meet the flood standards set by the government. The flood standards are expressed in an allowed probability of flooding. Depending on the land use the allowed probability of flooding is once every 2, 10, 25, 50 or 100 years.

In the water system assessment the inundation due to local heavy rain in polders is determined. The inundation in polders is, in the current method of the water system assessment, only dependent on precipitation and the average return period of this precipitation. Due to the complex water system and many polders in the Netherlands the question has arisen if other factors should be considered as well in the determination of the probability of inundation in polders.

This research will focus on the effects of failure of pumping stations on inundation in polders and on the water system assessment. The research question is:

What is the effect of failure of pumping stations on the water system assessments?

The research is supported by the sub questions:

- *What are causes of failure of pumping stations?*
- *What is the level of unavailability of pumping stations?*
- *How big is the inundation in polders if failure of pumping stations is considered in the water system assessment?*
- *What damage corresponds with these inundation?*
- *What is the risk of unavailability of pumping stations on flooding in polders?*

Research method

The water board Brabantse Delta provided the necessary data for this research. The research method consist of 5 steps as depicted in Figure 1. The first step is a general analyses on how pumping stations work and what type of pumping stations are located in the water system of Brabantse Delta. In step 2 the failure of pumping stations is considered. The causes of failure of pumping stations are mapped by investigating data from the telemetry system TMX of Brabantse Delta. The unavailability of pumping stations is determined from data from Brabantse Delta as well. This is done by considering water levels, operating hours and target water levels. In step 3 the consequences due to failure of pumping stations are determined. By turning off a pumping station in a hydraulic model the inundation due to failure of pumping stations in polders is assessed. The corresponding damage is determined with a damage model. In step 4 the unavailability of pumping stations and the consequences due to failure of pumping stations are combined to find the additional risk pumping stations pose for inundation in polders. In step 5 the previous analyses will lead to a conclusion.

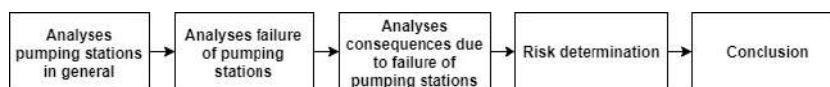


Figure 1: Research method

In the analysis three case studies from Brabantse Delta are used. These case studies are Middelschans, Plukmade and Tonnekreek. The three case studies vary in pump capacity, amount of pumps, water system size and land use in the water system. Pumping station Middelschans has one pump with a capacity of

$30\text{m}^3/\text{min}$. The direct drainage area is 292 ha and the complete water system is 480 ha. Pumping station Plukmade has one pump with a capacity of $60\text{m}^3/\text{min}$. The direct drainage area is 680 ha and the water system is 4 910 ha. Pumping station Tonnekreek is the biggest pumping station of the case studies. This pumping station has two pumps with a total capacity of $365\text{m}^3/\text{min}$. The direct drainage area and water system are 3 390 ha.

Failure of pumping stations

For a clear understanding of the analysis some definitions are set:

Failure of a pumping stations:

A pumping station fails when the pumping station is (partly) unavailable, caused by not (completely) functioning of the pumping station or by an operating error

Target water level (Dutch: streefpeil):

The target water level is the water level the water boards try to maintain in the water system

Pump switch on and pump switch off level (Dutch: inslagpeil en uitslagpeil):

The pump switch on and pump switch off level are the water levels at which the pumping station will turn on and turn off. The pump switch on level lies approximately 5 to 15 cm above the target water level and the pump switch off level approximately 5 to 15 cm below the target level

Causes of failure of pumping stations

The causes of failure of pumping stations are determined by analyzing data from TMX of Brabantse Delta. For 107 pumping stations every error notification is categorized and counted to identify which components of pumping stations are the most prone to errors. The failure categories are 'trash rack contaminated', 'trash rack other', 'control', 'vacuum pump', 'dry-running pump', 'pump installation', 'power supply', 'ventilation' and 'collective error'. Relatively the most error notifications are caused by the trash rack, the vacuum pump and the pump installation.

Unavailability of pumping stations

The unavailability for the case studies is determined by comparing water levels, switch on levels and operating hours of the pumping stations. In this research three different unavailability definitions are distinguished. The first one is the unavailability due to long-term failure:

$$Onb_{lf} = \frac{\text{Total time}_{\text{above switch on level, not pumping}}}{\text{Total time}_{\text{above switch on; level, not pumping}} + \text{operating hours}} \quad (1)$$

The average unavailability due to long-term failure is the same as the unavailability due to long-term failure, but takes into account the average amount of operating hours of the pumping station:

$$Onb_{gemlf} = \frac{\text{Total time}_{\text{above switch on level, not pumping}}}{\text{Total time}} \quad (2)$$

The unavailability due to not-noticeable failure gives an indication on how many times the initiation of a pumping station fails:

$$Onb_{nm} = \frac{\text{Failed switch on attempts}}{\text{Failed switch on attempts} + \text{Succeeded switch on attempts}} \quad (3)$$

The unavailability due to long-term failure is between 0.5% and 0.8% for the case studies. The average unavailability due to long-term failure is between 0.0% and 0.8%. The unavailability due to not-noticeable failure is between 1.1% and 2.19%. The unavailability due to long-term failure is used in the rest of the analysis.

The duration of the different unavailability events is determined in this analysis as well. The durations are categorized in events with a duration shorter than 2 hours, a duration between 2 and 24 hours, a duration between 24 and 48 hours and a duration longer than 48 hours.

Consequences of failure of pumping stations

The consequences of failure are determined using the hydraulic software SOBEK. The SOBEK-models used in this analysis are the models that are used in the water system assessment of Brabantse Delta in 2014. The models are adjusted to make it possible to turn off the pumping stations for different durations in combination with different precipitation events. In all three case studies the inundation depth and inundation surface increased when the pumping station was unavailable. In the case studies Middelschans and Tonnekreek the inundation depth and inundation surface kept increasing if the pumping station would fail for a longer duration. In the case studie Plukmade however the increase flattens. This is caused by the lay-out of the water system. If there is too much inundation around pumping station Plukmade a weir will open and the excess water will be drained by pumping station Emilia.

The damages that correspond with the inundations are calculated using the damage model WaterSchade-Schatter (2018). In all three case studies the damages increase in case of unavailability of the pumping station. The damage in case study Middelschans increases from €0 to € 5 000 when the pumping station fails for 2 hours (67.4% of all failure events have a duration smaller than 2 hours) in combination with a precipitation event with an average return period of 10 years. In the extreme case the pumping station shuts down for 48 hours (2.3% of all failure events have a duration between 24 and 48 hours), the damage increases to €18 000. Due to the lay-out of the water system of case study Plukmade the damage caused by unavailability of the pumping station flattens out. The damage in case study Tonnekreek increases faster. Failure of 2 hours (38.5% of all failure events have a duration smaller than 2 hours for pump 1 and 100% for pump 2) of the pumping station in combination with precipitation with an average return period of 10 years leads to an increase in damages of € 30 000. This is a increase of 13%. In the rare event the pumping station fails for 48 hours (11.4% of all failure events have a duration between 24 and 48 hours for pump 1 and 0% for pump 2) the damage increases to €2.3 mln.

The inundation surface area that does not comply with the flood standards of the water system assessment increases in the case studies Middelschans and Tonnekreek. In case study Plukmade there is no change in the surface area that does not meet the flood standards. In case study Middelschans the increase in surface area that does not comply with the flood standards has a maximum of 2.7 ha, which is 0.9% of the total surface area of the water system. The surface area that does not meet the flood standards in case study Tonnekreek increases with a maximum of 274.5 ha, which is 5.6% of the total surface area of the water system.

Risk determination

The risk of unavailability of pumping stations is determined by combining the probabilities of precipitation events and unavailability of the pumping stations with the damages caused by these combined events.

First an upper limit for the risk is determined. For the upper limit it is assumed that in case of failure of the pumping stations it will last for 24 hours. The upper limit of the risk is determined with the following formula:

$$R = \sum_{n=1}^{n=5} p_{onb} * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}, 24uur} + (1 - p_{onb}) * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

With p_{onb} the unavailability due to long-term failure, P_{Tn} the probability of a precipitation event with average return period Tn , $S_{Tn-\frac{1}{2}}$ the average damage in the probability distribution Tn en $Tn-1$ without failure of the pumping station and $S_{Tn-\frac{1}{2}, 24uur}$ the average damage in chance mass Tn en $Tn-1$ in case of failure with a duration of 24 hours.

The upper limit for risk of case study Middelschans increases from €502 to €607 per year when the failure of pumping stations is considered. For case study Plukmade the risk increases from €105 770 to €106 317 and for case study Tonnekreek the risk increases from €160 415 to €162 397.

The expected risk considers the chance of a certain unavailability duration in case of unavailability and can

be calculated with the following formula:

$$R = \sum_{n=1}^{n=5} p_{onb} * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * (p_{<2uur} * S_{Tn-\frac{1}{2},2uur} + p_{2<24uur} * S_{Tn-\frac{1}{2},24uur} + p_{24<48uur} * S_{Tn-\frac{1}{2},48uur}) + (1 - p_{onb}) * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

With $p_{<2uur}$ the probability that an unavailability event last shorter than 2 hours, $p_{2<24uur}$ the probability that an unavailability event last between 2 and 24 hours, $p_{24<48uur}$ the probability that an unavailability event last between 24 and 48 hours. These values are multiplied with the average damages of the chance masses (T_n and T_{n-1}) that occur by 2 hours unavailability ($S_{Tn-\frac{1}{2},2uur}$), 24 hours unavailability ($S_{Tn-\frac{1}{2},24uur}$) and 48 hours unavailability ($S_{Tn-\frac{1}{2},48uur}$).

The expected risk for case study Middelschans increases from € 502 to € 562. This is an increase of 12%. For case study Plukmade the expected risk increases from € 105 770 to € 105 876, which is an increase of €106 or 0.1%. For case study Tonnekreek the expected risk increases from € 160 415 to € 161 180, which is an increase of € 765 or 0.5%.

The probabilities that an extreme precipitation event occurs in combination with unavailability of the pumping station is determined. The probability that unavailability of the pumping station occurs at the same time with a precipitation event with an average return period of 2 years is for case study Middelschans 0.9%, for case study Plukmade 0.7% and for case study Tonnekreek 0.4%. The probability that unavailability of the pumping station occurs at the same moment as a precipitation event with an average return period higher than 2 years is equal or smaller than 0.1% for all case studies and can therefore be considered to be small.

Conclusion

The goal of this research was to develop a method to be able to determine the influence of failure of pumping stations on polder systems. This method is used throughout this research to answer the research question: *What is the effect of failure of pumping stations on the water system assessments?*

The case studies have maximum unavailability of 2.2% and a maximum pumping capacity of 170 m^3/min per pump. The water system areas in the case studies have little to no urban areas (or it is not modeled) and a surface area up to 5 000 ha. In the case studies Middelschans and Plukmade the effect of failure of pumping station on the inundated surface area that does not meet the flood standards of the water system assessment and the risk in the polders is not big. In case study Tonnekreek the inundated surface area that does not meet the flood standards of the water system assessment increases significantly. The case study has a (slight) increase in risk as well. However due to the (very) low probability of the occurrence of both an extreme precipitation event and unavailability of the pumping station the effect of failure of the pumping station is small. The case studies show that mainly the probability of occurrence of an extreme precipitation event in combination with unavailability of a pumping station is important in the determination of the effect of failure of pumping stations on inundation in polders. The probability of this combined event is small and even if the consequences due to failure of pumping stations can be large, it can be concluded that due to the small probability of occurrence the effect of failure of pumping stations on inundation in polders is small.

Recommendations

It is recommended for the water board Brabantse Delta to store more/more selective data. Storing this data can help in future research and makes it easier for the water board to evaluate water system related decisions from the past. In response to this research it is recommended to store the target water levels data, the switch on level data and switch of level data of the pumping stations and a notification if an error notification is fixed.

To improve the results of both this research and the water system assessment it is recommended to adjust the SOBEM-models. The models should be improved by including soil properties, surface level and sewer systems with overflow. The results from these models are a direct cause for changes and improvements in the water system and should therefore be as accurate as possible.

Furthermore it is recommended to determine the effects of the unavailability of the most critical pumping stations of Brabantse Delta. These are pumping stations with a large pumping capacity, pumping stations with a large water system with a surface area bigger than 5 000 ha and no back-up pumping station and pumping stations with a water system in which inundation quickly leads to a lot of damage (urban, industrial and greenhouse areas). The steps taken in this research can be used to determine the effects of failure of these pumping stations on the flood risk in polders.

This research has focused on the impact of failure of one pumping station in a water system. If more than one pumping station in the same water system, for example in case of a power failure, the consequences could be much larger. It would be recommended to investigate the probability that multiple pumping stations fail at the same time and what the consequences are in this scenario.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Samenvatting	v
English summary	vii
1 Inleiding	1
1.1 Aanleiding	1
1.2 Probleemstelling	2
1.3 Onderzoeksdoel.	2
1.4 Onderzoeksvraag	2
1.5 Aanpak en leeswijzer	2
2 Onderzoeksmethode	5
2.1 Gemalen algemeen	5
2.2 Falen van gemalen	5
2.2.1 Analyse gegevens storingen van gemalen	5
2.2.2 Analyse onbeschikbaarheid van gemalen	6
2.3 Gevolgen falen gemalen.	6
2.4 Risicobepaling	7
2.5 Casestudies	7
2.5.1 Middelschans	7
2.5.2 Plukmade	8
2.5.3 Tonnekreek	8
2.6 Randvoorwaarden en aannames	9
3 Gemalen algemeen	11
3.1 Soorten gemalen	11
3.2 Gemaal ontwerp	12
3.3 Pompopstellingen	13
3.4 Gemalen bij Brabantse Delta	14
4 Falen van gemalen	15
4.1 Definities	15
4.2 Falen van gemalen	15
4.3 Analyse gegevens storingen van gemalen	16
4.3.1 Gemalen Brabantse Delta	16
4.3.2 Middelschans	20
4.3.3 Plukmade	21
4.3.4 Tonnekreek	22
4.4 Analyse beschikbaarheid gemalen	22
4.4.1 Middelschans	23
4.4.2 Plukmade	24
4.4.3 Tonnekreek	26
5 Gevolgen falen gemalen	29
5.1 Modellerings	29
5.1.1 Middelschans	30
5.1.2 Plukmade	30
5.1.3 Tonnekreek	31

5.2	Analyse gevolgen falen gemalen	31
5.2.1	Middelschans	31
5.2.2	Plukmade	35
5.2.3	Tonnekreek	39
6	Risico's falen gemalen	45
6.1	Middelschans	46
6.1.1	Bovengrens risico	46
6.1.2	Verwacht risico.	46
6.2	Plukmade	47
6.2.1	Bovengrens risico	47
6.2.2	Verwacht risico.	48
6.3	Tonnekreek	48
6.3.1	Bovengrens risico	49
6.3.2	Verwacht risico.	49
7	Discussie	51
7.1	Limitaties beschikbare data	51
7.2	Limitaties SOBEK-modellering	51
7.3	Limitaties risicoberekening	52
7.4	Overige limitaties onderzoek	52
8	Conclusie	53
9	Aanbevelingen	55
	Bibliografie	57
A	literatuur	59
A.1	Polders	59
A.1.1	Poldertypes	59
A.1.2	Waterbalans in een polder	60
A.1.3	Polderafvoer	61
A.2	De watersysteemtoets.	62
A.2.1	wateroverlastnormen	62
A.3	De watersysteemtoets.	63
A.3.1	Systeemanalyse	64
A.3.2	Knelpuntenanalyse	66
A.3.3	Oplossingen	66
A.4	Conclusies literatuur	67
B	Pompcurves	69
C	Pompspecificaties casestudies	71
C.1	Middelschans	71
C.2	Plukmade	71
C.3	Tonnekreek	72
D	Uitgebreide faalboom gemalen	75
E	Analyse TMX meldingen	77
E.1	Totaal aantal meldingen per jaar	77
E.2	Met of zonder krooshekreiniger	78
E.3	Met of zonder vacüumpomp	79
E.4	Met of zonder droogloopbeveiliging	80
E.5	Per faal categorie	81
F	Sobek Modellering	83
F.1	SOBEK algemeen	83
F.1.1	Modules	83
F.1.2	Afvoer knopen	83
F.2	Modellering bij Brabantse Delta.	85

G	Sobek gevoeligheidsanalyse RR-module	87
H	Inundatiekaarten	91
H.1	Middelschans	91
H.1.1	Inundatie herhalingstijden.	91
H.1.2	Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalingstijden	92
H.1.3	Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingstijden.	93
H.1.4	Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingstijden.	94
H.1.5	Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingstijd van 10 jaar	95
H.2	Plukmade	97
H.2.1	Inundatie herhalingstijden.	97
H.2.2	Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalingstijden	98
H.2.3	Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingstijden.	98
H.2.4	Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingstijden.	99
H.2.5	Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingstijd van 10 jaar	100
H.3	Tonnekreek	102
H.3.1	Inundatie herhalingstijden.	102
H.3.2	Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalingstijden	103
H.3.3	Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingstijden.	104
H.3.4	Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingstijden.	105
H.3.5	Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingstijd van 10 jaar	106



Inleiding

1.1. Aanleiding

De waterschappen in Nederland toetsen elke zes jaar de watersystemen onder hun beheer op wateroverlast. Bij deze toetsing wordt bepaald in welke gebieden inundatie optreedt en of deze binnen de opgestelde normen valt. Ook het waterschap Brabantse Delta doet deze toetsing elke zes jaar. Momenteel wordt het falen van gemalen niet meegenomen bij het bepalen van de kans op wateroverlast. Brabantse Delta wil graag weten of door het niet meenemen van het falen van gemalen de omvang van wateroverlast onderschat wordt. Het waterschap wil dus weten wat de gevolgen zijn voor het poldersysteem als de gemalen falen. Het waterschap is voornamelijk benieuwd naar de invloed op de omvang van de inundatie en schade die optreedt, zodat bepaald kan worden of in de volgende toetsing het falen van gemalen mee moet worden genomen.

Er wonen veel mensen in de ongeveer 3 000 polders in Nederland (Vossenstein, 2015). Alleen de IJsselmeerpolders zijn al goed voor 5% van het totale oppervlak van Nederland. In deze polders wonen ruim 400 000 mensen (2.3% van de totale bevolking in Nederland) (CBS, 2018). Met zoveel polders en zoveel mensen die in een polder wonen, is het erg belangrijk dat polders droog blijven. De ongeveer 4 500 gemalen in Nederland zorgen ervoor dat in polders het waterpeil niet te hoog wordt en overtollig water uit polders wordt gepompt. Hierdoor zijn de polders niet continu onderhevig aan wateroverlast door hoge grondwaterniveaus en grote neerslaggebeurtenissen (De Nederlandse Gemalen Stichting, 2018).

De Nederlandse gemalen pompen het overtollig en ongewenste water weg uit polders en zorgen er daarmee voor dat de streefpeilen in de polders zo goed mogelijk worden gehandhaafd en geen ongewenste inundatie optreedt. Het is dan ook belangrijk dat gemalen een hoge beschikbaarheid hebben en goed werken. Echter, ook als een gemaal een hoge beschikbaarheid heeft, blijft de kans op falen en daardoor onbeschikbaarheid altijd aanwezig. In het geval van falen is een gemaal niet in staat het overtollige water weg te pompen en de gewenste waterpeilen te handhaven. Daardoor neemt de hoeveelheid water in een polder toe met als gevolg inundatie en wateroverlast.

De eisen die worden gesteld aan de beschikbaarheid van een gemaal, worden in de praktijk niet goed onderbouwd. Dit komt doordat nog weinig bekend is over welke gevolgen het heeft voor het poldersysteem als een gemaal niet beschikbaar is. Als de gevolgen van het falen en daarmee onbeschikbaar zijn van een gemaal beter bekend zouden zijn, kunnen de keuzes betreffende de eisen aan de betrouwbaarheid van een gemaal beter onderbouwd worden.

In de watersysteemtoets wordt de wateroverlast in de polder bepaald en getoetst aan de wateroverlastnormen die staan vermeld in de waterverordeningen van de provincies (Figuur A.3 in Bijlage A). De wateroverlastnormen zijn uitgedrukt in een norm met overstromingskansen waarop de bergings- en afvoercapaciteit van regionale wateren moeten zijn ingericht. Doordat weinig bekend is over de gevolgen van het falen en onbeschikbaar zijn van gemalen voor het poldersysteem, wordt dit nog niet gemodelleerd in de watersysteemtoets. Hierdoor wordt in de watersysteemtoets mogelijk onderschat wat de gevolgen zijn van wateroverlast in de polder. Door het falen en onbeschikbaar zijn van gemalen mee te nemen in de watersysteemtoets kan

wateroverlast nauwkeuriger worden bepaald en kan inzicht worden verworven in welk extra risico een gemaal vormt voor inundatie in polders.

1.2. Probleemstelling

Momenteel neemt waterschap Brabantse Delta de faalkans van gemalen niet mee in de bepaling van wateroverlast in de watersysteemtoets. Hierdoor is onbekend welke gevolgen het falen van gemalen heeft voor een polder en welke risico's die gemalen kunnen vormen voor inundatie in polders. Het falen van gemalen kan mogelijk de inundatiedieptes en hun gemiddelde herhalingstijd beïnvloeden. Deze beïnvloeden de schade en het risico in een polder. Als het falen van gemalen wel wordt meegenomen in de watersysteemtoets, zullen de berekende inundatiedieptes, schade en het risico nauwkeuriger en correcter zijn.

1.3. Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is het ontwikkelen van een methode om de invloed van het falen van gemalen op een poldersysteem te bepalen. Als dit doel is bereikt, kan de berekende wateroverlast uit de watersysteemtoets nauwkeuriger worden bepaald. Daarnaast kunnen de beschikbaarheidseisen voor het ontwerp van een gemaal beter worden onderbouwd.

1.4. Onderzoeksvraag

De probleemstelling en onderzoeksdoel leiden tot de volgende onderzoeksvraag:

Wat is het effect van het falen van (polder)gemalen op de watersysteemtoets?

Om deze onderzoeksvraag te kunnen beantwoorden, moeten eerst enkele deelvragen worden beantwoord:

- *Wat zijn aanleidingen tot falen van een gemaal?*
- *Wat is de onbeschikbaarheid van een gemaal?*
- *Wat zijn de inundatiedieptes in de polder als het falen van gemalen wordt meegenomen in de watersysteemtoets?*
- *Wat zijn de schades die optreden bij een deze inundatiedieptes?*
- *Wat is het risico dat de onbeschikbaarheid van een gemaal vormt voor in een polder?*

1.5. Aanpak en leeswijzer

Allereerst wordt de methode van het onderzoek opgesteld. Het onderzoek bestaat grofweg uit twee delen. Het eerste deel is gefocust op het falen van gemalen. Het tweede deel is gericht op de gevolgen van het falen van gemalen. Bij de analyses wordt gebruikgemaakt van data van het waterschap Brabantse Delta. In Hoofdstuk 2 wordt toegelicht hoe deze analyses worden uitgevoerd, welke stappen worden genomen en welke gegevens en modellen worden gebruikt.

Daarna wordt een literatuurstudie verricht. Deze levert meer inzicht op het probleem. Ook wordt de benodigde achtergrondinformatie verzameld en gerapporteerd. Deze achtergrondinformatie bestaat uit kennis over polders, gemalen en de watersysteemtoets. Deze informatie is te vinden in Hoofdstuk 3 en Bijlage A

In Hoofdstuk 4 is de eerste analyse te vinden. In het eerste deel van dit hoofdstuk wordt beschreven welke aanleidingen er zijn voor het falen van gemalen en in het tweede deel wordt de onbeschikbaarheid van de gemalen beschreven.

Hoofdstuk 5 behandelt de gevolgen van het falen van gemalen. In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de gevolgen van het falen van gemalen zijn bepaald en gemodelleerd en wat de gevolgen zijn betreffende inundatie en schade in polders.

De onbeschikbaarheid van gemalen en de gevolgen daarvan die in de eerdere hoofdstukken bepaald zijn, worden in Hoofdstuk 6 gecombineerd om het risico van het onbeschikbaar zijn van gemalen te bepalen.

Hoofdstuk 7 bevat de discussie. Hier worden de beperkingen van het onderzoek en de gebruikte modellen toegelicht. Ook wordt de bruikbaarheid van de resultaten besproken.

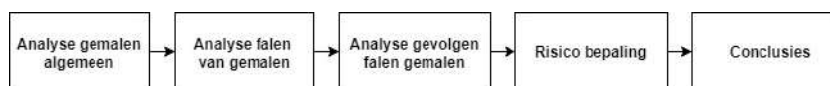
De verschillende analyses leiden tot de conclusie in Hoofdstuk 8. In dit hoofdstuk worden de belangrijkste bevindingen uit het onderzoek samengevat en wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvraag.

In Hoofdstuk 9, ten slotte, worden aanbevelingen gegeven voor vervolgonderzoeken en verdiepingen van dit onderzoek.

2

Onderzoeksmethode

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksmethode toegelicht. Figuur 2.1 toont de verschillende stappen van het onderzoek. In de eerste stap wordt onderzoek gedaan naar gemalen in het algemeen. Daarna wordt onderzoek gedaan naar het falen van gemalen. Hiervoor wordt gebruikgemaakt van data van Brabantse Delta. Het doel van deze analyse is de faalmechanismen, frequentie en duur van falen in kaart te brengen. Vervolgens worden de gevolgen van het falen van gemalen bepaald. In de vierde stap wordt het risico bepaald dat het falen van gemalen vormt voor wateroverlast in polders. Na deze analyses is het mogelijk om conclusies te trekken.



Figuur 2.1: Onderzoeksmethode

In de rest van dit hoofdstuk worden de verschillende stappen van het onderzoek verder toegelicht. Ook worden de casestudies die gebruikt worden in de analyses gepresenteerd. Tot slot worden in dit hoofdstuk de randvoorwaarden en aannames van dit onderzoek toegelicht.

2.1. Gemalen algemeen

Om het falen van gemalen beter te begrijpen, wordt onderzocht welke verschillende typen gemalen er zijn en hoe ze werken. Op basis van literatuur en empirische gegevens van Brabantse Delta wordt achterhaald welke faalmechanismen gemalen hebben. De gemalen van Brabantse Delta worden geanalyseerd, zodat duidelijk wordt wat voor gemalen in het gebied van Brabantse Delta aanwezig zijn. Hieruit moet naar voren komen hoeveel verschillende gemalen in het gebied aanwezig zijn en hoe deze kunnen worden gecategoriseerd. Hierbij kan gedacht worden aan categorisering aan de hand van aan de hand van het aantal pompen, de pompcapaciteit, de functie of het soort pomp.

2.2. Falen van gemalen

De analyse naar het falen van gemalen bestaat uit twee delen. Het eerste deel moet inzicht geven in aanleidingen van het falen van gemalen en het tweede deel moet inzicht geven in de faalfrequentie van een gemaal. Voordat deze twee analyses worden uitgevoerd, moet eerst worden bepaald wat de definitie is van het falen van een gemaal.

2.2.1. Analyse gegevens storings van gemalen

Om meer inzicht te krijgen in de mogelijke oorzaken van falen en de faalmechanismen van gemalen, wordt een analyse uitgevoerd aan de hand van storingsmeldingen uit het telemetriesysteem (TMX) van Brabantse Delta. Een groot deel van de gemalen bij Brabantse Delta is op dit systeem aangesloten. De errormeldingen worden gebruikt om te bepalen welke onderdelen het vaakst last hebben van een storing en het meest kwets-

baar zijn voor falen.

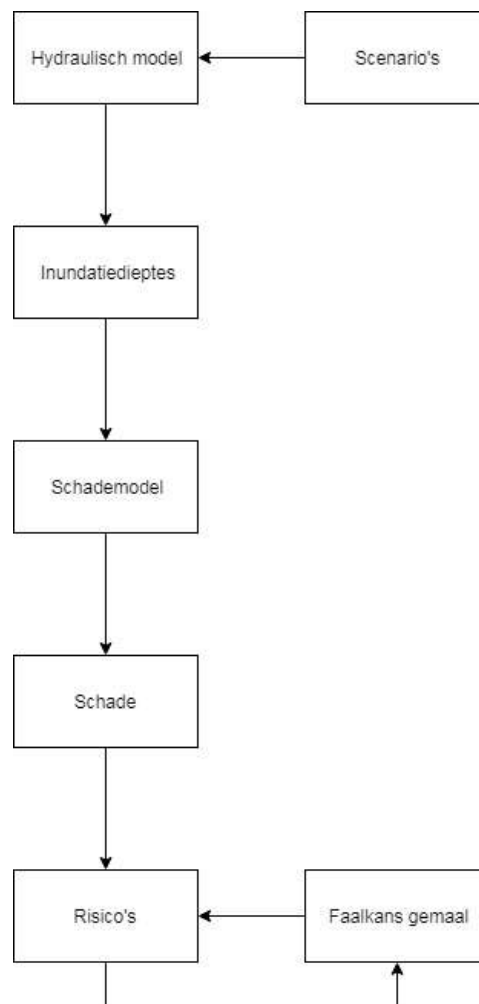
Met de peilbeheerders van Brabantse Delta wordt overlegd om erachter te komen wat de storingsmeldingen uit TMX in de praktijk betekenen.

2.2.2. Analyse onbeschikbaarheid van gemalen

Er wordt een analyse gedaan naar de onbeschikbaarheid van gemalen om meer inzicht te krijgen in de duur en frequentie van uitval. Hoe langer en vaker een gemaal niet werkt, des te groter de gevolgen. Voor het bepalen van de onbeschikbaarheid van gemalen wordt gebruikgemaakt van gegevens van Brabantse Delta. De waterstanden en de inslagpeilen worden vergeleken met de draaiuren van het gemaal. Als de waterstand voor het gemaal hoger is dan het inslagpeil en het gemaal pompt niet, wordt deze tijd aangeduid als onbeschikbaarheid van het gemaal.

2.3. Gevolgen falen gemalen

Het uitvallen van een gemaal kan leiden tot wateroverlast in polders, vooral tijdens extreme neerslaggebeurtenissen. Met behulp van een hydraulisch stroommodel wordt bepaald wat de gevolgen zijn van het falen van gemalen. Door in dit model het gemaal voor een bepaalde periode uit te zetten, kan het falen van een gemaal worden nagebootst. Uit dit hydraulisch model zullen inundatiedieptes komen. Vervolgens kan met een schademodel worden onderzocht wat de economische gevolgen zijn van deze inundaties. Ook worden de inundatiedieptes getoetst aan de wateroverlastnormen.



Figuur 2.2: Onderzoeksmethode gevolgen falen van gemalen

2.4. Risicobepaling

Aan de hand van de bepaalde onbeschikbaarheid en de gevolgen van het falen van gemalen wordt het risico bepaald dat falen van gemalen vormt op de wateroverlast. Het risico wordt gebruikt om te bepalen hoe groot de impact van het falen van gemalen is op het watersysteem.

2.5. Casestudies



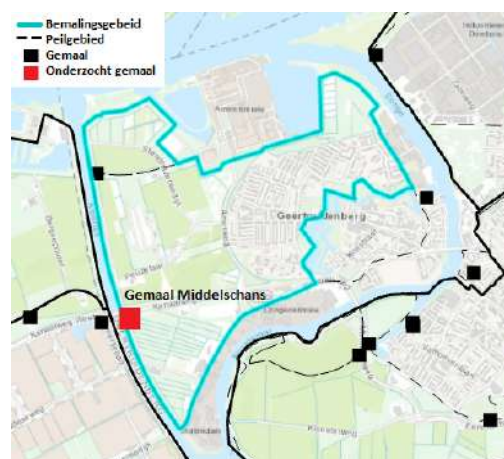
Figuur 2.3: Overzicht onderzochte gebieden/gemalen (Waterschap Brabantse Delta, 2019)

Voor dit onderzoek zijn drie relevante casestudies gekozen om de invloed te bepalen die het falen van gemalen heeft op het poldersysteem van Brabantse Delta. De gekozen casestudies verschillen in landgebruik, watersysteem, gemaal capaciteit en pompopstelling. De drie casestudies zijn Middelschans, Plukmade en Tonnekreek. In Figuur 2.3 zijn de drie bemalingsgebieden en hun gemalen afgebeeld. De pompspecificaties van elk van de gemalen staan in Bijlage C.

2.5.1. Middelschans



Figuur 2.4: Gemaal Middelschans op 20-11-2018



Figuur 2.5: Overzicht bemalingsgebied gemaal Middelschans (Waterschap Brabantse Delta, 2019)

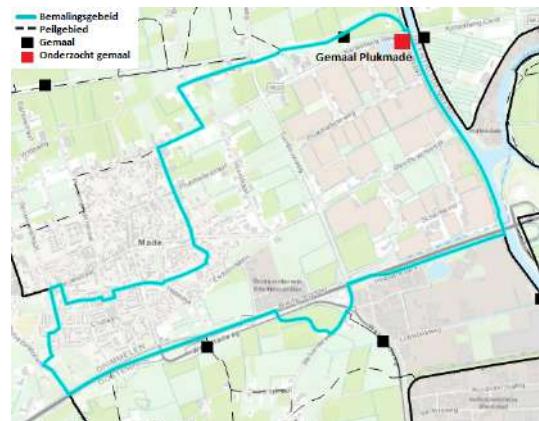
Gemaal Middelschans heeft één pomp met een maximale capaciteit van $30 \text{ m}^3/\text{min}$. Het directe maalgebied van Middelschans is ongeveer 292 ha en het watersysteem waar dit maalgebied onderdeel van is, heeft een oppervlak van ongeveer 480 ha. Het maalgebied van Middelschans bestaat uit één peilgebied. In het gebied is veel kwel aanwezig, gemiddeld tussen de 2.8 en 3.8 mm per dag. Verder loost het gemaal Standhazensedijk water op het maalgebied van Middelschans. Deze twee factoren zorgen ervoor dat gemaal Middelschans continu moet pompen om het beoogde waterpeil te behouden, zelfs als er geen neerslag is. Het gebied bestaat voornamelijk uit stedelijk gebied van de stad Geertruidenberg. Gemaal Middelschans loost op de Amertak,

deze waterweg stroomt naar het Hollandse Diep. Op dit moment doet Brabantse Delta onderzoek naar het maalg gebied van Middelschans om te bepalen of er een revisie nodig is van het watersysteem en het gemaal.

2.5.2. Plukmade



Figuur 2.6: Gemaal Plukmade op 20-11-2018



Figuur 2.7: Overzicht bemalingsgebied gemaal Plukmade (Waterschap Brabantse Delta, 2019)

Gemaal Plukmade heeft één pomp en de maximale pompcapaciteit van het gemaal is $60 \text{ m}^3/\text{min}$. Het directe bemalingsgebied is ongeveer 680 ha en het gebied van het watersysteem is ongeveer 4 910 ha. In het bemalingsgebied van Plukmade is één peilgebied aanwezig. Het bemalingsgebied bestaat voornamelijk uit kassen en voor een klein deel uit akkerbouw. Het gemaal Plukmade lost net als gemaal Middelschans op de Amertak, die doorstroomt naar het Hollandse Diep.

2.5.3. Tonnekreek



Figuur 2.8: Gemaal Tonnekreek op 20-11-2018



Figuur 2.9: Overzicht bemalingsgebied gemaal Tonnekreek (Waterschap Brabantse Delta, 2019)

Gemaal Tonnekreek heeft twee pompen, die elk van oorsprong een capaciteit hebben van $170 \text{ m}^3/\text{min}$. In 2017 is gemaal Tonnekreek gerenoveerd en bleek dat de totale capaciteit van het gemaal $365 \text{ m}^3/\text{min}$ is. Het maalg gebied van Tonnekreek is 3 671 ha en het watersysteem is ongeveer 5 702 ha. Het bemalingsgebied van Tonnekreek bevat 23 verschillende peilgebieden. Het gebied bestaat voornamelijk uit akkerbouw en enkele kleine dorpen. Het gemaal Tonnekreek lost op een uitloper van het Hollandse Diep.

2.6. Randvoorwaarden en aannames

In het onderzoek is een aantal randvoorwaarden en aannames gedaan. De drie meest belangrijke randvoorwaarden en aannames worden hier toegelicht.

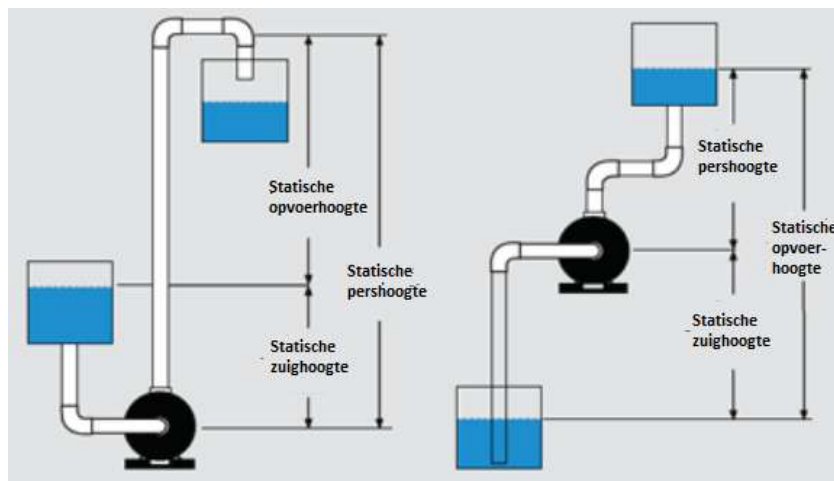
- Dit onderzoek focust zich enkel op afvoerende poldergemalen. Boezem- of andere gemalen worden buiten beschouwing gelaten. Deze keuze is gemaakt, omdat dit onderzoek zich focust op wateroverlast in polders en deze gemalen hier een directe impact op hebben.
- In dit onderzoek wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat meerdere gemalen tegelijk uitvallen, omdat het belangrijk is om eerst te bepalen wat de impact is van het uitvallen van éénemaal.
- Het installeren van noodpompen wordt gezien als een beheersmaatregel. Deze optie valt daarom onder stap 3 (oplossingen) van de watersysteemtoets en wordt daarom buiten beschouwing gelaten. In Bijlage A staan de stappen waaruit de watersysteemtoets bestaat.

3

Gemalen algemeen

Gemalen worden samen met stuwen gebruikt om het waterpeil in een polder te controleren. In Paragraaf A.1 is meer informatie te vinden over polders. Het waterpeil kan worden beïnvloed door met het gemaal water in of uit een polder te pompen.

In Figuur 3.1 zijn verschillende definities van opvoerhoogtes afgebeeld. In de afbeelding ontbreekt de dynamische opvoerhoogte. Dit is de statische opvoerhoogte plus de wrijvingsverliezen.



Figuur 3.1: Definities verschillende opvoerhoogtes, vertaald van National Pump & Energy (2018)

3.1. Soorten gemalen

Gemalen kunnen op meerdere manieren worden gecategoriseerd. Een van die manieren is aan de hand van het opvoerwerktuig. Hierin worden twee hoofdcategorieën onderscheiden, namelijk opvoerwerktuigen die werken aan de hand van drukverschillen gecreëerd door waaiers (ook wel opvoerwerktuigen met stroming door een pijp) en opvoerwerktuigen die op een andere manier water verplaatsen (De Nederlandse Gemalen Stichting, 2018).

In de eerste categorie vallen centrifugaalpomp (ook wel radiaalpompen), schroefpompen (ook wel axiaalpompen) en schroefcentrifugaalpomp (ook wel halfaxiaalpompen). De maximale opvoerhoogtes van deze pompen zijn respectievelijk 70-80 m, 8-9 m en 25 m (Hoes en van de Giesen, 2018).

In de tweede categorie vallen plunjerpompen, vijzels en het scheprad. Het scheprad is de oudste machine die water omhoog kan verplaatsen, maar wordt tegenwoordig vrijwel niet meer gebruikt. Bovendien is het scheprad niet bruikbaar in gebieden waarin het waterpeil sterk fluctueert. De maximale opvoerhoogte voor een scheprad is 2 m. Een vijzel is een ronddraaiende schroef in een koker. Door het draaien wordt het water omhoog getransporteerd.

Gemalen kunnen ook worden onderverdeeld naar functie. De vier functies die een gemaal kan hebben zijn afvoergemaal, aanvoergemaal, onderbemaling en opmaling. Het afvoergemaal is het meest voorkomende gemaal en wordt gebruikt om water uit een bepaald gebied te pompen. Een aanvoergemaal wordt gebruikt om water een bepaald gebied in te pompen. Onderbemaling heeft dezelfde functie als een afvoergemaal, maar werkt binnen het gebied van een ander gemaal. Opmaling heeft dezelfde functie als het aanvoergemaal, maar werkt net als de onderbemaling in het gebied van een ander gemaal.

3.2. Gemaal ontwerp

Het ontwerp van een gemaal is afhankelijk van de statische opvoerhoogte en het gewenste debiet. Het gemaal moet namelijk worden ontworpen, zodat het zo effectief mogelijk werkt en daarbij het gewenste waterpeil in de polder kan handhaven.

De pompcapaciteit van een gemaal is gebaseerd op het streefpeil in de polder en de opvoerhoogte. De totale opvoerhoogte is de statische opvoerhoogte plus de dynamische opvoerhoogte en kan in het geval van een ronde pijp worden bepaald met de volgende formule:

$$H = H_s + \Delta H_f + \Delta H_v = H_s + f \frac{L * u^2}{2 * D * g} + \sum \xi \frac{u^2}{2 * g} \quad (3.1)$$

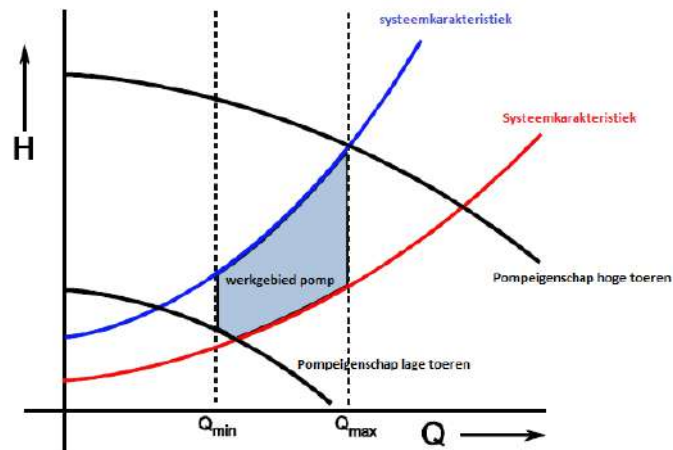
In deze formule is H de opvoerhoogte, H_s de statische opvoerhoogte (m), staat ΔH_f voor de wrijvingsverliezen (m), ΔH_v voor de lokale verliezen (m), f voor de Darcy-Weisbach wrijvingscoëfficiënt (-), L voor de lengte van de pijp (m), D voor de pijpdiameter (m), u voor de gemiddelde stroomsnelheid (m/s), g voor de gravitatie constante (m/s^2) en $\sum \xi$ voor de totale lokale verliezen (-). De wrijvings- en lokale verliezen zijn samen de dynamische opvoerhoogte.

De waarde van de wrijvingscoëfficiënt f (-) varieert tussen 0.01 en 0.1. Deze waarde kan worden bepaald met behulp van de Colebrook en White's formule:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.2)$$

Hierin is k de wandruwheid van de pijp (m), D de pijpdiameter (m) en Re het Reynoldsgetal (-).

In Figuur 3.2 is te zien hoe het werkgebied van een pomp wordt bepaald. De zwarte lijnen zijn de pompeigenschappen (Q-H relatie). Bij een hogere opvoerhoogte kan de pomp door wrijvingsverliezen minder debiet verpompen dan bij een lagere opvoerhoogte. De bovenste zwarte lijn staat voor de pompeigenschappen bij hoge toeren en de onderste zwarte lijn voor de pompeigenschappen bij lage toeren. De rode en blauwe lijnen geven de systeemkarakteristieken weer. De stippellijnen geven de minimale en maximale capaciteit weer. In het lichtblauw is het werkgebied van de pomp weergegeven. De pompcurve wordt gekozen in dit gebied, omdat de pomp dan werkt binnen de systeemkarakteristieken en de pompeigenschappen. In Bijlage B staat een praktijkvoorbeeld van het bepalen van het werkgebied van een pomp en de pompcurve.



Figuur 3.2: Werkgebied pomp, aangepast van Tukker en Kooij (2010)

De pompcurves inclusief wrijvingsverliezen kunnen van te voren worden bepaald met berekeningen en achteraf worden gecontroleerd door metingen te doen van de stroomsnelheid en toerentallen vlak voor of na de pomp of door een meetserie te maken van waterpeilen en debieten aan beide kanten van het gemaal. De meetseries zijn aan beide kanten van het gemaal nodig, omdat het debiet afhankelijk is van de opvoerhoogte.

3.3. Pompopstellingen

Nadat op basis van capaciteit en pompcurves een keuze is gemaakt voor een pomp, moet ook nog een aantal keuzes worden gemaakt betreffende de pompopstelling.

De eerste keuze die moet worden gemaakt, is of de pomp droog of nat wordt opgesteld. Bij een natte opstelling is de pomp onder water geïnstalleerd. Op hydraulisch niveau is er geen verschil tussen een natte en een droge opstelling. Daarom is de keuze tussen een natte of droge opstelling vaak een organisatorische beslissing. Een natte opstelling is economischer dan een droge opstelling, omdat deze vaak verticaal is opgesteld en daardoor een gunstiger in- en uitslag peil heeft. Echter, omdat bij onderhoud de gehele pomp uit het water moet worden gehesen, is het onderhoud van een natte opstelling ingewikkelder en duurder. Dit geldt vooral voor zware pompen (met een hogere capaciteit). Bij een droge opstelling is een vacuümpomp nodig om het gemaal op te starten. De vacuümpomp staat bekend als een kwetsbaar onderdeel van een gemaal, waardoor de voorkeur toch kan uit gaan naar een natte opstelling.



Figuur 3.3: Verticale pompopstelling gemaal Plukmade op 20-11-2018



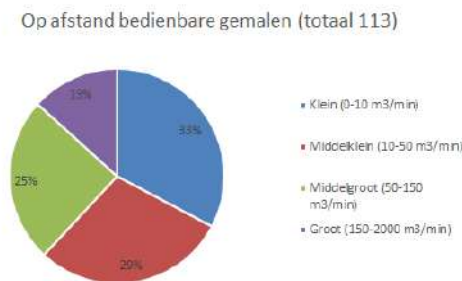
Figuur 3.4: Horizontale pompopstelling gemaal Nieuwkoop (Waterschap Rijnland, 2019)

Een andere variabele voor het opstellen van de pomp is of deze horizontaal of verticaal wordt geïnstalleerd. In Figuur 3.4 en 3.3 is het verschil tussen een horizontale en verticale opstelling te zien. Nat opgestelde

pompen worden eigenlijk altijd verticaal opgesteld, omdat dit de bevestiging aan de voetbocht eenvoudiger maakt. Vroeger werden nat opgestelde pompen ook weleens horizontaal geïnstalleerd om te zorgen dat de pomp langer gekoeld bleef door het water. Met moderne pompen is dit niet meer nodig. Droog opgestelde pompen kunnen zowel verticaal als horizontaal worden opgesteld. Meestal heeft de horizontale opstelling de voorkeur, omdat hierin het leidingwerk eenvoudiger is en er minder wrijvingsverliezen zijn. Bij een verticale oplossing zijn namelijk meer bochten nodig of moet het leidingwerk door de vloer. Zoals te zien is in Figuur 3.3, heeft ook gemaal Plukmade een verticale opstelling met leidingwerk door de vloer. Een afweging om toch voor een verticale opstelling te kiezen, is dat deze minder ruimte inneemt. Een ander voordeel van een verticale opstelling is dat de inlaat op het laagste punt zit, waardoor het in- en uitslagpeil gunstiger worden (Tukker en Kooij, 2010).

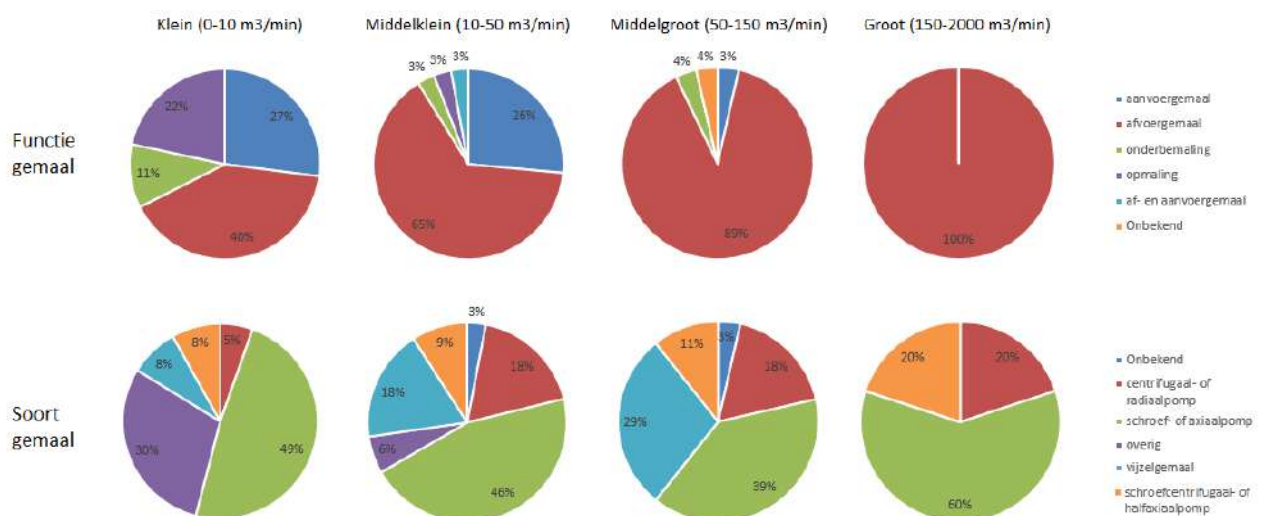
3.4. Gemalen bij Brabantse Delta

Het waterschap Brabantse Delta heeft 220 poldergemalen onder beheer. Van deze gemalen zijn de 113 belangrijkste op afstand bedienbaar. Deze zijn in Figuur 3.5 gecategoriseerd aan de hand van capaciteit in klein, middelklein, middelgroot en groot. De andere gemalen zijn minder van belang en zijn daarom niet meegenomen in het onderzoek.



Figuur 3.5: Op afstand bestuurbare gemalen Brabantse Delta

In Figuur 3.6 zijn samenvattende statistieken te vinden van de 113 op afstand bedienbare gemalen. Uit deze statistieken komt naar voren dat bij grotere gemalen de functie van het gemaal vaker afvoeren is. Kleinere gemalen hebben over het algemeen als functie onderbemaling of opmaling. De functie aanvoeren wordt het meest vervuld door kleine tot middelkleine gemalen. Daarnaast is opvallend dat in de categorie groot geen vijzelgemalen meer voorkomen. Verder komt in alle categorieën de schroef- of axiaalpom het meest voor.



Figuur 3.6: Statistiek functie en soort gemalen Brabantse Delta

4

Falen van gemalen

4.1. Definities

In dit hoofdstuk worden de diverse definities toegelicht die nodig zijn om de analyses goed te begrijpen.

Het falen van een gemaal:

Er is spraken van falen van een gemaal op het moment dat deze (deels) onbeschikbaar is, veroorzaakt door het niet (goed) functioneren van het gemaal of door een bedieningsfout.

Streefpeil:

Het streefpeil is vastgelegd in het peilbesluit en vormt de basis voor het peilbeheer. Een waterbeheerder heeft een wettelijke inspanningsverplichting om deze peilen zoveel mogelijk te handhaven (Artikel 5.2 lid 2 Waterwet). Afhankelijk van het jaargetijde is het streefpeil gelijk aan het zomer- of winterpeil.

Beheerpeil:

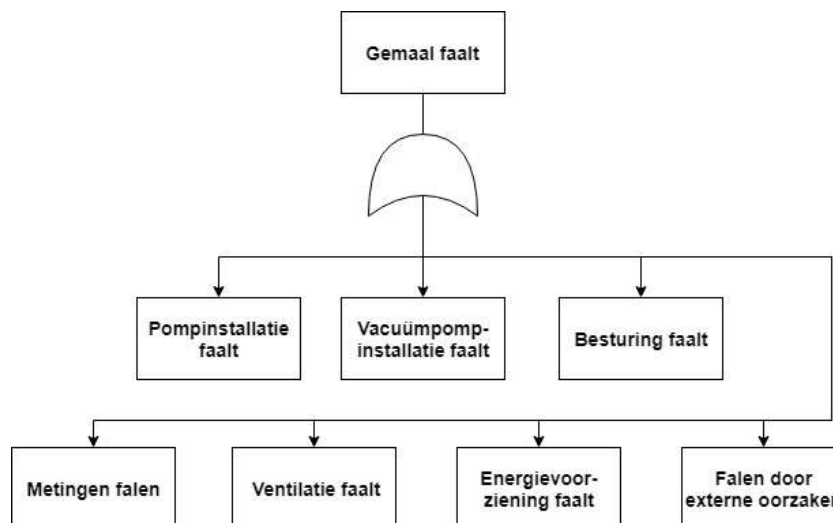
Het beheerpeil is het peil dat de peilbeheerders in de praktijk hanteren. Deze dient binnen de beheermarge rondom de streefpeilen te liggen.

In- en uitslagpeil:

Op het moment dat het waterpeil het inslagpeil overschrijdt dient een gemaal aan te gaan. Als het waterpeil vervolgens onder het uitslagpeil komt dient het gemaal te stoppen met pompen. Het inslagpeil ligt meestal 5 tot 15 cm boven het beheerpeil en het uitslagpeil 5 tot 15 cm onder het beheerpeil.

4.2. Falen van gemalen

Een gemaal kan op meerdere manieren falen. In Figuur 4.1 is een faalboom van gemalen weergegeven. Deze faalboom is gebaseerd op een onderdeel van een betrouwbaarheidsanalyse van een gemaal uitgevoerd door van der Sanden (2014). In Bijlage D staat een meer gedetailleerde faalboom.



Figuur 4.1: Faalboom gemalen met één pomp en één vacuümpomp gebaseerd op van der Sanden (2014)

Niet alle manieren van falen hebben dezelfde impact op een gemaal. Door stroomuitval vallen bijvoorbeeld alle pompen in een gemaal tegelijk uit. Bij technisch falen valt juist vaak slechts één pomp uit. Bij falen van het gehele gemaal heeft het gemaal geen pompcapaciteit meer, terwijl bij het uitvallen van slechts één pomp alleen sprake is van een reductie van de pompcapaciteit van het gemaal. Veel gemalen bij Brabantse Delta hebben slechts één pomp. In dit geval leidt het uitvallen van één pomp wel tot het volledig uitvallen van het gemaal.

De uitvaltijd van een gemaal kan variëren door een verschil in reparatietijd. Bij langere uitvaltijd is meer kans op hogere waterpeilen in de polder en daarmee op wateroverlast. In het geval van een lange uitvaltijd kan een noodpomp worden geïnstalleerd. Het waterschap Brabantse Delta is in het bezit van twintig noodpompen met een capaciteit variërend van $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ tot $45 \text{ m}^3/\text{min}$. Zoals uitgelegd in Paragraaf 2.6 wordt in de analyse geen rekening gehouden met de mogelijkheid tot het installeren van een noodpomp, omdat dit wordt gezien als een beheersmaatregel.

4.3. Analyse gegevens storingen van gemalen

Bij het waterschap Brabantse Delta wordt een groot deel van de gemalen en stuwen op afstand bediend. Deze gemalen en stuwen zijn aangesloten op een telemetriesysteem (TMX). TMX geeft automatische meldingen door over de gemalen en stuwen. Het geeft bijvoorbeeld de waterstanden voor en na het gemaal, maar ook storingsmeldingen. Deze data is geanalyseerd om inzicht te krijgen in manieren waarop gemalen kunnen falen.

4.3.1. Gemalen Brabantse Delta

De geanalyseerde gemalen zijn eerst gefilterd. Het eerste criterium waar de gemalen aan moeten voldoen is dat ze zijn aangesloten op TMX. Zonder deze aansluiting zijn er geen gegevens beschikbaar om te verwerken. Daarnaast zijn gemalen waarvan te weinig informatie over de opstelling beschikbaar is eruit gefilterd. Uiteindelijk zijn 107 gemalen meegenomen in de analyse, met in totaal 159 pompen over de periode van 2013-2018.

Alle meldingen uit TMX die zijn gebruikt in de analyse betreffen een storing, droogloop of alarmstatus. Dit zijn namelijk de meldingen die niet vallen onder de 'normale' meldingen en duiden op een fout in het gemaal. Vervolgens zijn de meldingen gecategoriseerd in acht faalopties. Deze zijn krooshek vervuild, krooshek overig, besturing, vacuümpomp, energievoorziening, pompinstallatie, droogloop, ventilatie en verzamel. In Tabel 4.1 is weergegeven welke storingsmeldingen vallen onder welke categorie, wat de meest voorkomende oorzaak is van deze storingsmelding volgens de peilbeheerders van Brabantse Delta en hoe de peilbeheerders de storing meestal oplossen. De verzamelstoring wordt gebruikt als visualisatie middel en is zichtbaar op de

overzichtskaart van Brabantse Delta. Op die manier kan een actuele inschatting worden gemaakt van welke gemalen in werking zijn en welke niet. De verzamelstoring wordt altijd gegeven met een andere storingsmeldingen en kan op zichzelf dus niet worden opgelost. In Bijlage D is te zien waar in de faalboom deze meldingen voorkomen.

Faalcategorie	Meest voorkomende storingsmeldingen	Meest voorkomende oorzaak storing	Meest voorkomende reparatie door peilbeheerder
Krooshek vervuild	'krooshek vervuild'	Vuil	Vuil verwijderen
Krooshek overig	'krooshekreiniger', 'krooshek status' 'krsh status'	Vuil, krooshekreiniger is te ver over de baan gereden door wind, looptijd overschreden, een enkele keer een olieleidingbreuk of groot voorwerp dat niet kan worden gegrepen door de krooshekreiniger	Vuil verwijderen, resetten
Besturing	'fase bewaking', 'softstarter' 'pomp communicatie' 'fout bij versturen bericht'	Instelfout bij aansluiting op TMX (meestal alleen eerste half jaar), software-update TMX	Aanpassen instellingen TMX, resetten
Vacuümpomp	'vacuüm niet bereikt' 'vacuüm status' 'vac status'	Vuil, aanzuigen van lucht, watertank te vol	Vuil verwijderen, resetten, glandpakking aandraaien, watertank legen
Droogloop	'droogloop'	Waterpeil te laag	Resetten, krooshek controleren en daar eventueel vuil verwijderen
Stroomvoorziening	'netfout' 'kabelbreuk' 'stroom te laag' 'kruis', 'netspanning'	Vuil, stroomuitval, door-geslagen stop	Vuil verwijderen, stop/aardlekschakelaar omzetten/vervangen
Pompinstallatie	'pomp status' 'f.o. status', 'moment op/neer/' dalend/stijgend' 'vijzel status' 'pomp draait niet' 'pomplijn' 'auma'	Vuil, vastgelopen mechanismen	Resetten, smeer aanbrenge, handmatig bewegen mechanismen
Ventilatie	'thermisch' 'therm' 'motortemperatuur', 'koelwater temperatuur'	Vuil, ouderdom gemaal	Vuil verwijderen, gemaal af laten koelen en vervolgens resetten, ramen en deuren openen om lucht af te koelen
Verzamel	'verzamel storing' 'storing algemeen' 'gemaal status'	Andere storingsmelding in het gemaal	Controleren andere storingsmeldingen

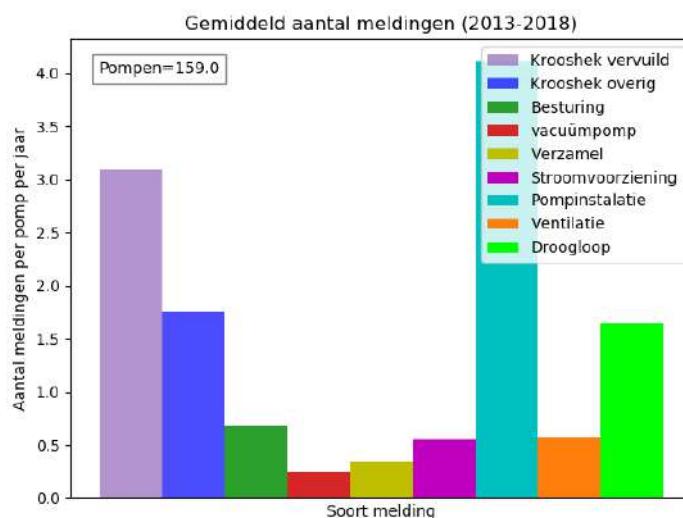
Tabel 4.1: Storingsmeldingen TMX gecategoriseerd met oorzaak van storingsmelding en meest voorkomende oplossing van de peilbeheerders van Brabantse Delta

Ongeacht welke storingsmelding gegeven wordt, is de oplossing meestal resetten van het gemaal en vuil verwijderen. Het komt zelden voor dat het probleem niet op deze manier kan worden opgelost en dat een monteur langs moet komen.

De storingsmeldingen zijn gebruikt om inzicht te verkrijgen in de manieren waarop een gemaal kan falen en hoe vaak een gemaal ongeveer in storing staat. Bij de resultaten moet wel de kanttekening worden gemaakt

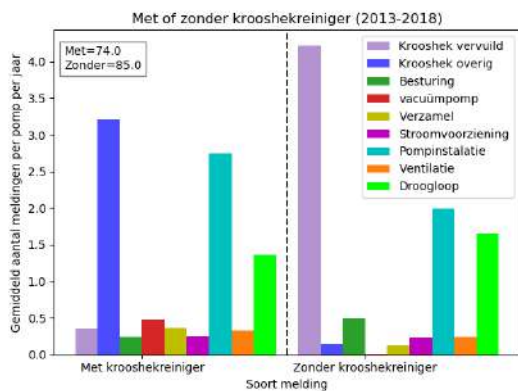
dat de duur van de storingsmeldingen onbekend is, omdat TMX geen melding geeft wanneer de storing is verholpen. Daarnaast zorgen niet alle storingsmeldingen ervoor dat een gemaal direct (deels) stopt met pompen. Door de benamingen van de meldingen en doordat in sommige gevallen dezelfde melding niet dezelfde oorzaak heeft, zijn de storingsmeldingen niet goed van elkaar te scheiden. Een voorbeeld hiervan is de melding "moment op". Dit is een melding die wordt gegeven op het moment dat een klep niet volledig kan sluiten. Als deze melding wordt gegeven voor een vlinder- of tolklep, zorgt dit ervoor dat de pomp uitslaat, terwijl als de melding wordt gegeven voor een terugslagklep het gemaal nog even door kan pompen. Dit zou kunnen worden opgelost door bij elk gemaal afzonderlijk te controleren wat elke melding exact betekent. Dit is voor dit onderzoek niet gedaan, omdat het doel van deze analyse is om een inzicht te verkrijgen in de faalmechanismen van een gemaal en dit doel ook wordt bereikt zonder deze scheiding. De laatste kanttekening die gemaakt moet worden bij deze analyse, is dat als een fout optreedt in TMX en meldingen niet doorkomen of dat een gemaal na een storingsmelding handmatig wordt bedient, dit niet wordt gezien in de TMX-meldingen.

Vanuit Brabantse Delta zijn de TMX-meldingen van 2013 tot en met 2018 beschikbaar voor de analyse. In Figuur 4.2 is het gemiddelde aantal TMX-storingsmeldingen per jaar per pomp over een periode van 2013 tot en met 2018 afgebeeld. De grafieken van de individuele jaren staan in Bijlage E. De grafiek laat zien dat de meeste meldingen te maken hebben met het krooshek of met de pompinstallatie. Hieruit kan worden geconcludeerd dat deze onderdelen van een gemaal het meest kwetsbaar zijn voor storingen.

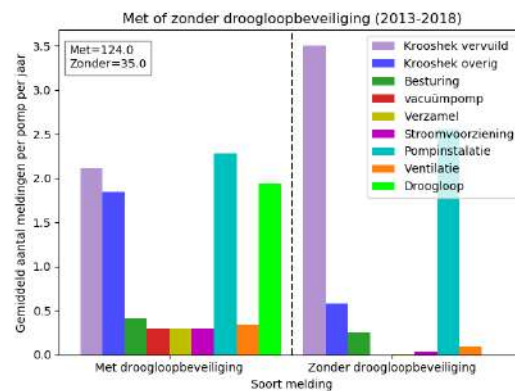


Figuur 4.2: Gemiddeld aantal-TMX meldingen per jaar per faalcategorie

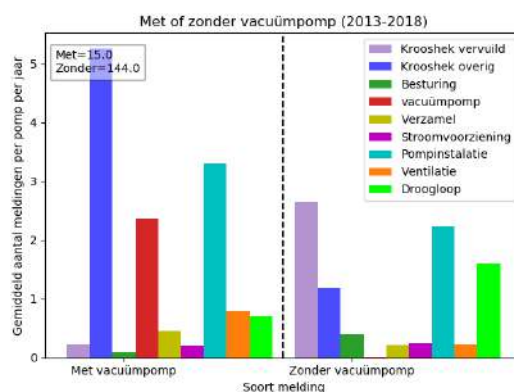
Om te bepalen of bepaalde onderdelen van een gemaal zorgen voor meer of minder storingen, is een aantal analyses uitgevoerd. In deze analyses is gekeken naar het verschil tussen gemalen met en zonder krooshekreiniger, gemalen met en zonder droogloopbeveiliging en gemalen met en zonder vacuümpomp. Figuur 4.3, 4.4 en 4.5 tonen het gemiddelde aantal storingen per jaar van de analyses. De grafieken van de afzonderlijke jaren staan in Bijlage E.



Figuur 4.3: Gemiddeld aantal TMX melding per jaar per faalcategorie



Figuur 4.4: Gemiddeld aantal TMX melding per jaar per faalcategorie



Figuur 4.5: Gemiddeld aantal TMX-meldingen per jaar per faalcategorie

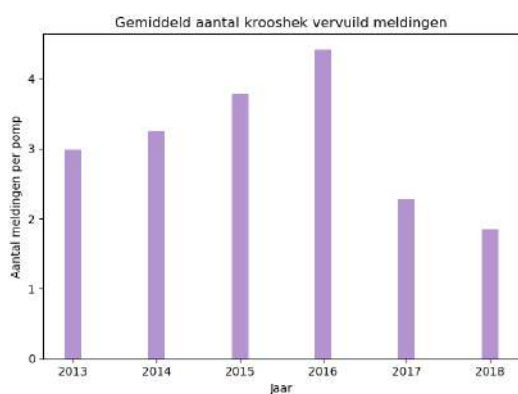
In de grafieken is te zien dat gemalen met een krooshekreiniger bijna geen meldingen hebben op het gebied van het "krooshek vervuild". Daar staat tegenover dat deze gemalen meer andere krooshek gerelateerde meldingen hebben. Meestal gaat het hier om een storing van de krooshekreiniger. Dit hoeft er niet direct toe te leiden dat pompen uitvallen, maar kan wel zorgen dat een krooshek vervuild raakt. In de grafieken is echter te zien dat dit bijna nooit voorkomt. Wel is te zien dat gemalen met een krooshekreiniger iets meer last hebben van oververhitting, problemen met de stroomvoorziening, de pompinstallatie en verzamelstoringen. Deze storingen worden echter niet perse veroorzaakt door de krooshekreiniger. Zo zijn gemalen met een krooshekreiniger vaak wat groter dan gemalen zonder. Wat precies de oorzaak blijft onduidelijk. Wel is te zien dat in alle jaren alle meldingen betreffende een vacuümpomp voorkomen bij een gemaal met krooshekreiniger. Dit komt doordat alle gemalen met een vacuümpomp een krooshekreiniger hebben.

Trends uit de grafieken van gemalen met of zonder droogloopbeveiliging laten zien dat het aantal meldingen betreffende de pompinstallatie iets hoger ligt bij gemalen zonder droogloopbeveiliging. Bij gemalen zonder droogloopbeveiliging wordt droogloop van de pomp niet geconstateerd en waardoor geen storingsmelding wordt gegeven. Ook hier is te zien dat alle meldingen betreffende vacuümpompen voorkomen bij gemalen met een droogloopbeveiliging. Dit komt doordat alle gemalen met een vacuümpomp ook een droogloopbeveiliging hebben.

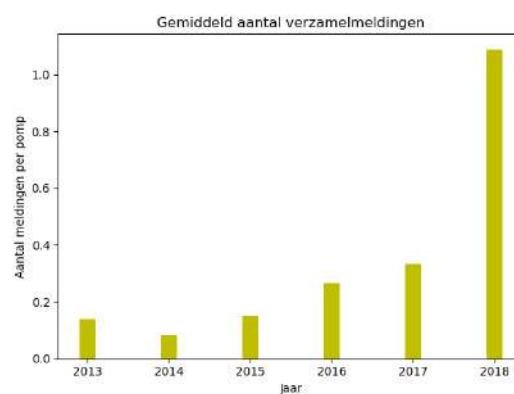
Het laatste onderscheid dat is gemaakt in deze analyse, is het verschil tussen gemalen met of zonder vacuümpomp. De vacuümpomp staat bekend als een kwetsbaar onderdeel dat vaak storings geeft, omdat de installatie volledig luchtdicht moet zijn om een vacuüm te kunnen bereiken. Om dit te waarborgen moet de glandpakking regelmatig worden aangedraaid. Vacuümpompen zijn nodig bij een droge opstelling of in het geval dat een gemaal een 'kattenrug'-opstelling heeft. Hiermee wordt mee bedoeld dat de pompleiding niet door, maar over de dijk heen ligt. Door het hoogteverschil is een vacuüm nodig om het water over de dijk te

pompen. Door de jaren heen heeft de vacuümpomp gemiddeld 2.25 storingen per jaar gegeven. Dit bevestigt dat de vacuümpomp een kwetsbaar onderdeel is. Een andere trend is dat gemalen met een vacuümpomp meer last hebben van oververhitting.

De laatste analyse die gedaan is over de TMX-meldingen, is de trend van het aantal meldingen per pomp over de jaren per faalcategorie. Hierin kan snel worden gezien in welke faalcategorie meer of juist minder meldingen zijn te zien en waar dus eventueel extra aandacht op moet worden gevestigd. In Figuur 4.6 en 4.7 zijn de meldingen betreffende 'krooshek vervuild' en 'verzamel' te zien. De overige grafieken staan in Bijlage E. Opvallend in deze analyse is dat na 2016 minder 'krooshek vervuild'- en ventilatiemeldingen te zien zijn. Dit kan verklaard worden doordat in 2016 uit een analyse van Brabantse Delta kwam dat veel kroosheken vaak vervuild waren. Daardoor zijn de peilbeheerders hier beter op gaan letten. Sindsdien is het aantal meldingen per pomp per jaar gehalveerd. Een andere opvallende trend is dat het aantal verzamelstoringen al jaren achter elkaar toe neemt. Doordat dit enkel een visualisatiemelding is en niet te zien is waaruit een verzamelstoring bestaat, kan niet worden gezegd hoe dit komt. Wel is te zien dat de extreme toename van het aantal verzamelstoringen in 2018 voornamelijk wordt veroorzaakt door de gemalen Tonnekreek en Emilia. Gemaal Tonnekreek is in 2016 gerenoveerd en gemaal Emilia is volledig nieuw opgeleverd in 2018. De meeste storingen die hier zijn opgetreden zijn daarom te wijten aan het feit dat de gemalen en het telemetriesysteem nog goed ingesteld moeten worden.



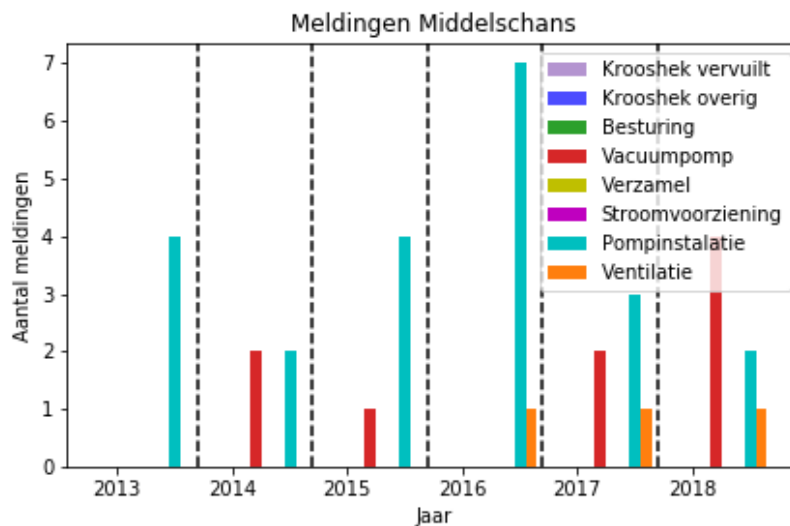
Figuur 4.6: Aantal TMX-meldingen krooshek vervuild



Figuur 4.7: Aantal TMX-meldingen verzamel

4.3.2. Middelschans

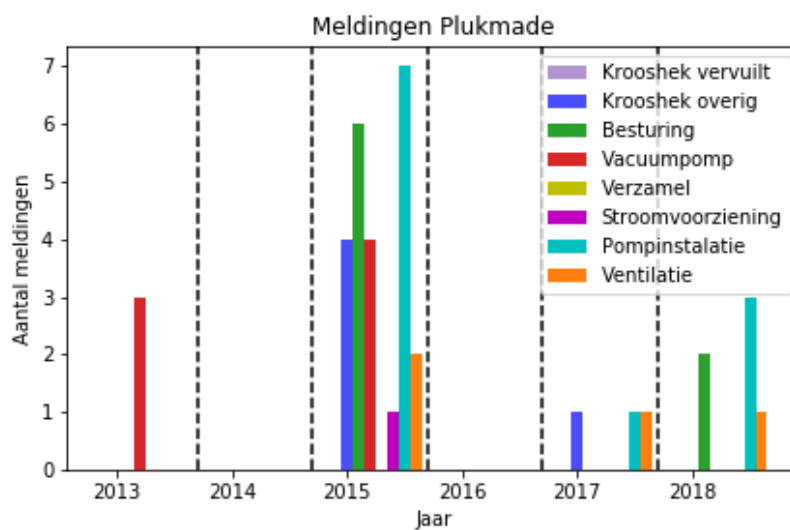
In Figuur 4.8 zijn de storingsmeldingen van gemaal Middelschans afgebeeld. Zoals eerder beschreven, wordt de vacuümpomp gezien als een kwetsbaar onderdeel van een gemaal. Dit is ook terug te zien in de storingsmeldingen van gemaal Middelschans. Het totaal aantal storingsmeldingen bij gemaal Middelschans ligt in de lijn der verwachting. Enkel in 2016 waren veel meldingen betreffende de pompinstallatie en in 2018 waren veel meldingen betreffende de vacuümpomp.



Figuur 4.8: TMX-meldingen gemaal Middelschans

4.3.3. Plukmade

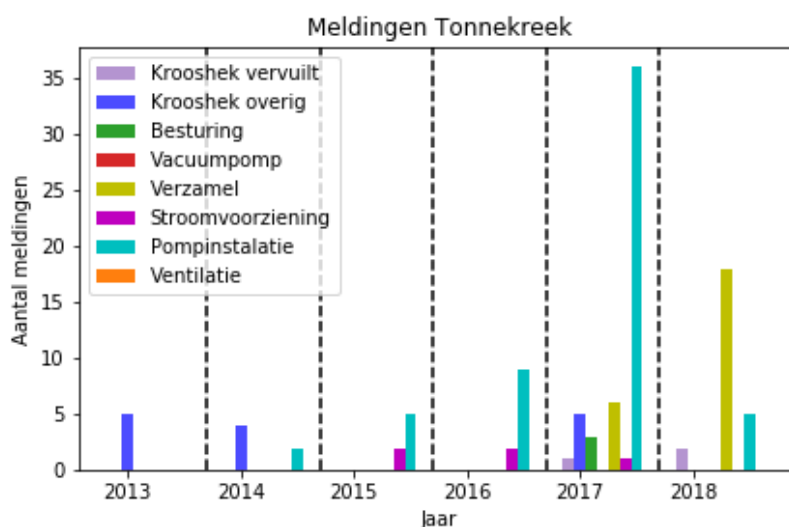
Zoals Figuur 4.9 laat zien was het aantal storingsmeldingen van gemaal Plukmade erg hoog in 2015. Om deze reden zijn in dat jaar veel reparaties verricht en is er veel onderhoud gepleegd. Hierdoor heeft het gemaal in 2016 storingsloos gedraaid. In 2017 en 2018 is weer een lichte toename in het aantal storings te zien.



Figuur 4.9: TMX-meldingen gemaal Plukmade

4.3.4. Tonnekreek

In Figuur 4.10 zijn de storingsmeldingen van gemaal Tonnekreek weergegeven. Het aantal meldingen bij dit gemaal zijn door de jaren heen toegenomen, behalve op het gebied van stoomvoorziening. Gemaal Tonnekreek is in 2016 gerenoveerd, waardoor het gemaal nu twee elektromotoren bezit in plaats van één elektromotor en één dieselmotor. Daarnaast is de stroomaansluiting verzaamd, waardoor meer toeren kunnen worden gemaakt en de capaciteit is vergroot. De renovatie heeft geduurd van 06-06-2016 tot en met 18-11-2016. Meldingen uit deze periode zijn dan ook niet meegenomen in de analyse. De renovatie kan de toename van het aantal meldingen in 2017 verklaren. Het heeft namelijk even tijd nodig tot een nieuwe opstelling volledig correct is afgesteld.



Figuur 4.10: TMX-meldingen gemaal Tonnekreek

4.4. Analyse beschikbaarheid gemalen

De beschikbaarheid van de gemalen Middelschans, Plukmade en Tonnekreek is bepaald aan de hand van data uit het telemetriesysteem (TMX) van Brabantse Delta. In TMX zijn de waterpeilen, beheerpeilen, streefpeilen en/of in- en uitslagpeilen en bedrijfsmeldingen van de pomp opgeslagen. De onbeschikbaarheid (%) van de gemalen wordt bepaald door te analyseren wanneer de waterpeilen de inslagpeilen overschrijden, maar niet in bedrijf zijn. Afhankelijk van de soort onbeschikbaarheid worden deze perioden/momenten gedeeld door de draaiuren, de totale tijdreeks of het aantal beroepen op het gemaal.

Van de beheer/in- en uitslagpeilen en bedrijfsmeldingen zijn alleen voor een korte periode (ongeveer 1 tot 1.5 jaar) data beschikbaar. Om toch een onbeschikbaarheidsanalyse te kunnen doen over een langere periode, is gebruikgemaakt van data die wel langer zijn opgeslagen. Aan de hand van toerentallen/frequenties van de pompen is bepaald wanneer het gemaal in bedrijf was. Als inslagpeilen zijn de maximale inslagpeilen per jaar bepaald aan de hand van grafieken van de waterpeilen. Op het moment dat het maximale inslagpeil per jaar wordt overschreden en de toerentallen/frequenties gelijk zijn aan nul, wordt het gemaal gemarkeerd als onbeschikbaar. Doordat gekeken wordt naar maximale inslagpeilen per jaar, is de onbeschikbaarheid die hiermee wordt bepaald een onderschatting van de echte onbeschikbaarheid. Echter, met deze analyse kan wel een indicatie worden gegeven van de onbeschikbaarheid op de meest kritische momenten.

In deze analyse worden drie verschillende soorten onbeschikbaarheid onderscheiden. Deze soorten en hoe ze worden berekend, worden hieronder toegelicht:

Onbeschikbaarheid door langdurig falen gemaal:

Een gemaal is onbeschikbaar op het moment dat deze niet pompt op het moment dat het gemaal water zou moeten afvoeren als het inslagpeil wordt overschreden. Deze onbeschikbaarheid wordt berekend met de

volgende formule:

$$Onb_{lf} = \frac{\text{Totale tijd}_{\text{boven inslagpeil, niet in bedrijf}}}{\text{Totale Tijd}_{\text{boven inslagpeil, niet in bedrijf}} + \text{draaiuren}} \quad (4.1)$$

Gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen gemaal:

De gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen is de onbeschikbaarheid die rekening houdt met het gemiddelde aantal draaiuren per jaar. De gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen van het gemaal wordt uitgedrukt in een percentage van de totale tijd. De gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen wordt berekend met de volgende formule:

$$Onb_{gem,lf} = \frac{\text{Totale tijd}_{\text{boven inslagpeil, niet in bedrijf}}}{\text{Tijd}_{\text{totaal}}} \quad (4.2)$$

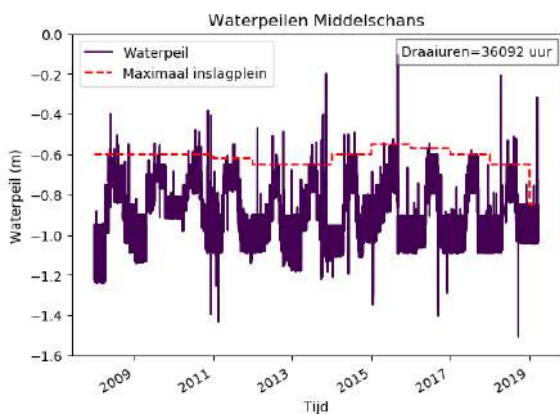
Onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen:

Een gemaal is onbeschikbaar door niet-merkbaar falen op het moment dat het gemaal faalt in een periode waarin geen beroep op het gemaal wordt gedaan. Om deze rede is dan niet een exact moment aan te wijzen waarop het gemaal gefaald heeft. Het falen van het gemaal wordt pas opgemerkt op het moment dat een beroep wordt gedaan op het gemaal. Deze onbeschikbaarheid geeft weer hoe vaak een gemaal niet opstart op het moment dat deze wordt opgeroepen en wordt berekend met:

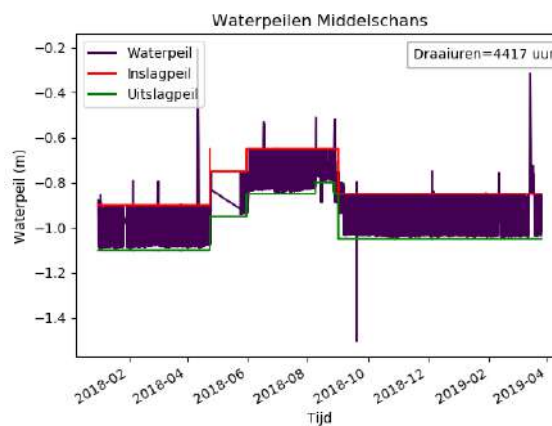
$$Onb_{nm} = \frac{\text{Gefaalde beroepen}}{\text{Gefaalde beroepen} + \text{Geslaagde beroepen}} \quad (4.3)$$

4.4.1. Middelschans

In Figuur 4.11 en 4.12 zijn de meetreeksen die zijn gebruikt voor de bepaling van de onbeschikbaarheid van gemaal Middelschans afgebeeld. Bij gemaal Middelschans zijn de waterpeilen, de in- en uitslagpeilen en de bedrijfsmelding opgeslagen in TMX voor een periode van ongeveer één jaar. Bij gemaal Middelschans zijn waterpeilen en toerentallen van de pompdata beschikbaar vanaf 2009.



Figuur 4.11: Waterpeilen en maximaal inslagpeil per jaar gemaal Middelschans (lange meetreeks)



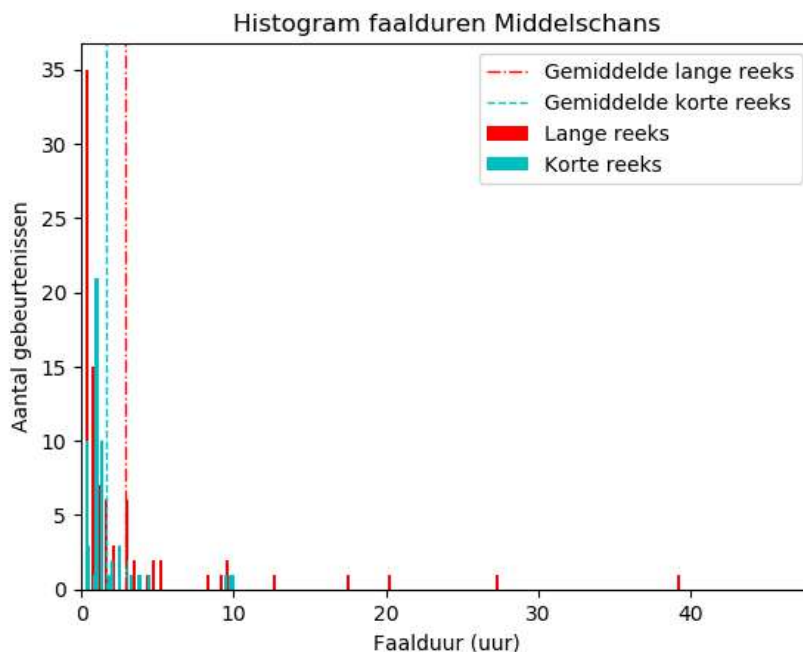
Figuur 4.12: Waterpeilen en in- en uitslagpeilen gemaal Middelschans (korte meetreeks)

In Tabel 4.2 is de berekende onbeschikbaarheid van gemaal Middelschans te vinden. Deze reeksen laten een groot verschil zien tussen de onbeschikbaarheid gebaseerd op de korte meetreeks en op de lange meetreeks. Zoals eerder is uitgelegd, komt dit door het ontbreken van data in de lange meetreeks. De gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen geeft de laagste onbeschikbaarheid op zowel de korte als lange meetreeksmethode. De onbeschikbaarheid is 0.8% op de korte meetreeks en 0.3% op de lange meetreeks. Onbeschikbaarheid door niet merkbaar falen geeft de hoogste onbeschikbaarheid op de korte termijn, namelijk 2.2%. De onbeschikbaarheid door langdurig falen is het hoogst bij de lange meetreeks, namelijk 0.7%.

	Onbeschikbaarheid door langdurig falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door merkbaar falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen gemaal (%)
Korte reeks	2.2	0.8	2.2
Lange reeks	0.7	0.3	0.3

Tabel 4.2: Onbeschikbaarheid gemaal Middelschans

In Figuur 4.13 zijn de faalduren van de verschillende faalgebeurtenissen afgebeeld. Het is duidelijk te zien dat de meeste faalgebeurtenissen kort duren. In Tabel 4.3 is te zien hoe de faalduren zich verdelen over de verschillende categorieën. In de meetreeksen komen geen faalduren van langer dan 48 uur voor. De gemiddelde faalduur is voor de korte meetreeks afgerond 2 uur en voor de lange meetreeks 3 uur.



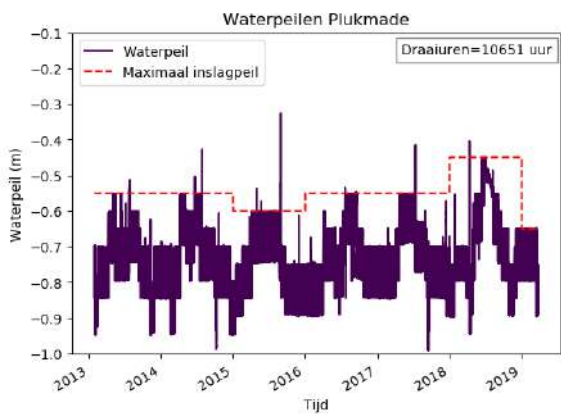
Figuur 4.13: Duur onbeschikbaarheid gemaal Middelschans

	Gemiddelde faalduur (uur)	Faalduur (%) <2 uur	Faalduur (%) 2<24 uur	Faalduur (%) 24<48 uur	Faalduur (%) >48 uur
Korte reeks	1.7	78.0	22.0	0.0	0.0
Lange reeks	2.9	67.4	30.3	2.3	0.0

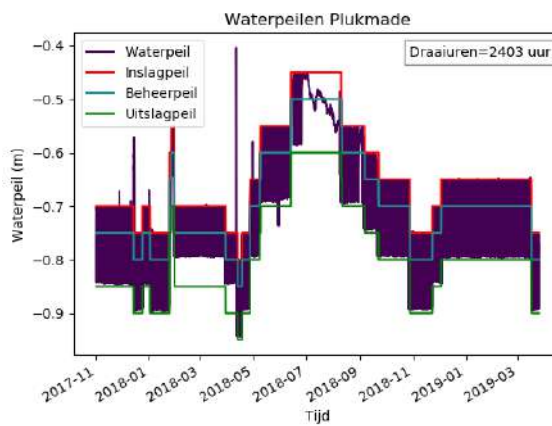
Tabel 4.3: Gegevens faalduren gemaal Middelschans met gemiddelde faalduur in uren en de faalduren in percentages van het totaal aantal gebeurtenissen

4.4.2. Plukmade

De data die zijn opgeslagen in TMX van gemaal Plukmade voor een periode van ongeveer 1 jaar zijn de waterpeilen, de beheerpeilen en de bedrijfsmeldingen. Aangenomen is dat het inslagpeil bij gemaal Plukmade altijd 5 cm boven het beheerpeil ligt en het uitslagpeil 10 cm onder het beheerpeil. In de praktijk worden de marges bij Brabantse Delta (bijna) nooit aangepast. Om deze rede is dit een geldige aanname. In Figuur 4.15 is te zien dat het een goede aanname is. In Figuur 4.14 is de lange meetreeks van gemaal Plukmade afgebeeld. De TMX-data van gemaal Plukmade zijn beschikbaar vanaf 2013. Voor gemaal Plukmade is de bedrijfsmelding van het gemaal voor de lange meetreeks gebaseerd op de frequenties van de frequentieregelaar van het gemaal.



Figuur 4.14: Waterpeilen en maximaal inslagpeil per jaar gemaal Plukmade (lange meetreeks)



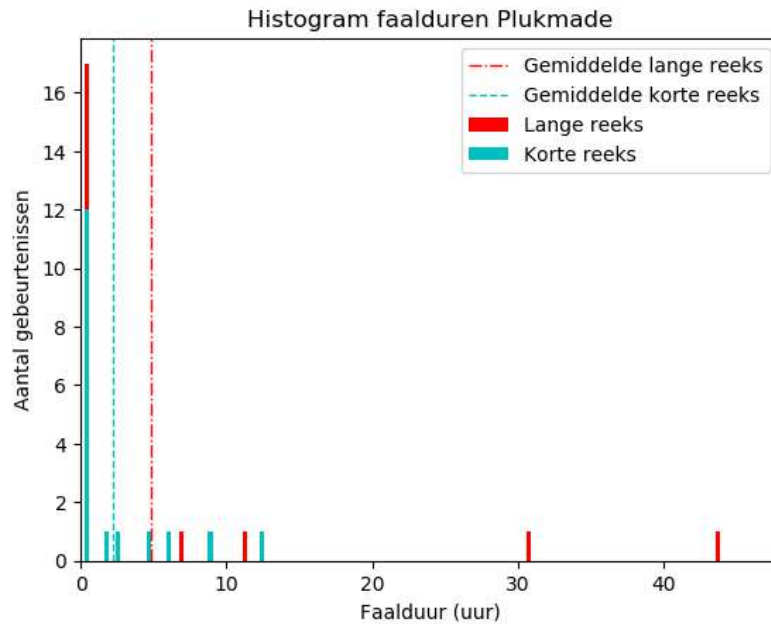
Figuur 4.15: Waterpeilen, inslag-, uitslag- en beheerpeilen gemaal Plukmade (korte meetreeks)

De bepaalde onbeschikbaarheid van gemaal Plukmade staat in Tabel 4.4. De onbeschikbaarheid van gemaal Plukmade ligt lager dan de onbeschikbaarheid van gemaal Middelschans. Ook bij deze case is de gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen het laagst namelijk 0.3% voor de korte meetreeks en 0.0% voor de lange meetreeks. Onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen is 1.7% voor de korte meetreeks en 0.4% voor de lange meetreeks. De onbeschikbaarheid door langdurig falen zijn 1.7% voor de korte meetreeks en 1.0% voor de lange meetreeks.

	Onbeschikbaarheid door langdurig falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door merkbaar falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen gemaal (%)
Korte reeks	1.7	0.3	1.7
Lange reeks	1.0	0.0	0.4

Tabel 4.4: Onbeschikbaarheid gemaal Plukmade

Zoals Figuur 4.16 laat zien, doen zich bij gemaal Plukmade minder faalgebeurtenissen voor dan bij gemaal Middelschans. Ook bij deze case zijn de meeste faalgebeurtenissen van korte duur. In Tabel 4.5 is weergegeven dat de gemiddelde faalduur voor de korte meetreeks ongeveer 2 uur is en voor de lange meetreeks 5 uur. In deze tabel is ook te zien hoe de faalgebeurtenissen zijn verdeeld over de verschillende categorieën.



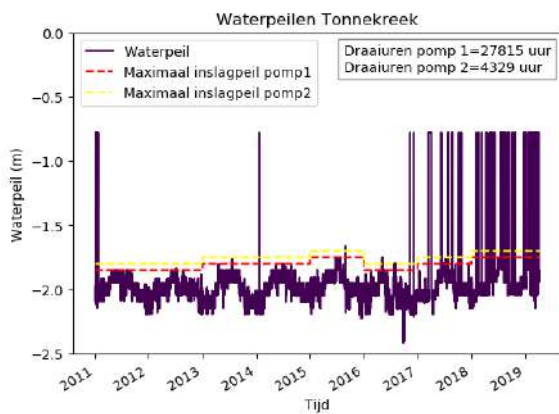
Figuur 4.16: Duur onbeschikbaarheid gemaal Plukmade

	Gemiddelde faalduur (uur)	Faalduur (%) <2 uur	Faalduur (%) 2<24 uur	Faalduur (%) 24<48 uur	Faalduur (%) >48 uur
Korte reeks	2.2	66.7	33.3	0.0	0.0
Lange reeks	4.9	81.0	9.5	9.5	0.0

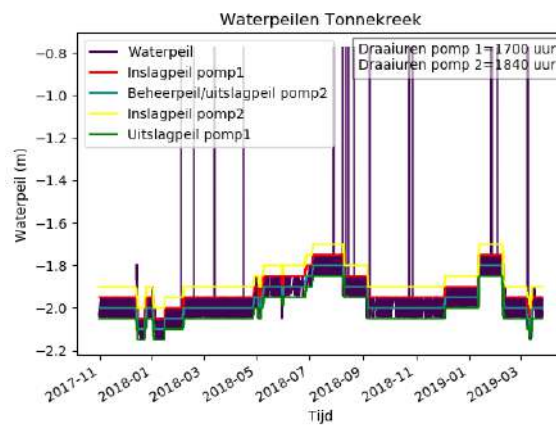
Tabel 4.5: Gegevens faalduren gemaal Plukmade met gemiddelde faalduur in uren en de faalduren in percentages van het totaal aantal gebeurtenissen

4.4.3. Tonnekreek

De meetreeksen van gemaal Tonnekreek zijn afgebeeld in Figuur 4.17 en 4.18. Van gemaal Tonnekreek zijn de waterpeilen, beheerpeilen en bedrijfsmelding opgeslagen voor een periode van ongeveer één jaar. Aangenomen is dat het inslagpeil van pomp 1 van gemaal Tonnekreek 5 cm boven het beheerpeil ligt en het inslagpeil van pomp 2 op 10 cm. Het uitslagpeil van pomp 1 is vastgesteld op 5 cm onder het beheerpeil en dat van pomp 2 op het beheerpeil. Voor de bepaling van de bedrijfsmeldingen van de lange meetreeks is gebruikgemaakt van toerentallen van pomp 1 en aan-/uit-meldingen van pomp 2 tot aan 2017. In 2017 is gemaal Tonnekreek gerenoveerd. Vanaf 2017 is de bedrijfsmelding gebaseerd op de frequenties van de frequentieregelaars van beide pompen. Daarnaast zijn de maximale inslagpeilen per jaar gebaseerd op de grafieken van de waterpeilen. Het inslagpeil van pomp 2 is vastgesteld op 5 cm boven pomp 1.



Figuur 4.17: Waterpeilen en maximaal inslagpeil per jaar gemaal Tonnekreek (lange meetreeks)



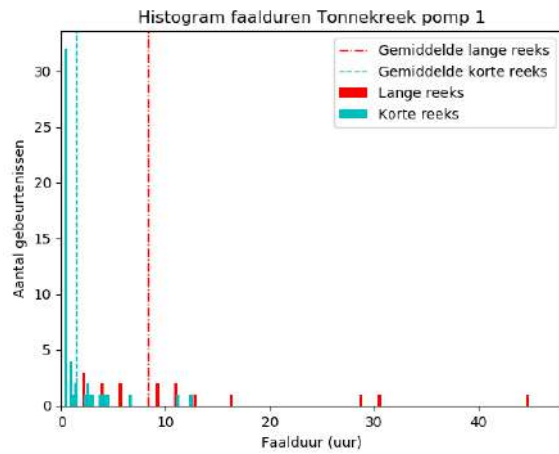
Figuur 4.18: Waterpeilen, inslag-, uitslag- en beheerpeilen gemaal Tonnekreek (korte meetreeks)

In Tabel 4.6 staat de berekende onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek. De onbeschikbaarheid van pomp 2 ligt veel lager dan de onbeschikbaarheid van pomp 1. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het feit dat pomp 2 veel minder draaiuren heeft dan pomp 1. Voor zowel pomp 1 als 2 is de gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen bijna gelijk aan 0. De onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen ligt wel hoger. Dit betekent dat bij dit gemaal vooral het opstarten voor problemen zorgt en het gemaal zelden uitvalt als het al draait. De onbeschikbaarheid van pomp 1 door niet-merkbaar falen is hoog, namelijk 11.4% voor de korte meetreeks en 1.5% voor de lange meetreeks. Bij pomp 2 is dit 1.0% en 2.5%. Bij langdurig falen is de onbeschikbaarheid voor pomp 2 ongeveer gelijk aan 0%. Voor pomp 1 is dit 5.4% voor de korte meetreeks en 1.4% voor de lange meetreeks. In de gehele meetreeks is niet voorgekomen dat beide pompen tegelijk zijn uitgevallen. Doordat pomp 1 en 2 dezelfde pompen zijn en uitval van de tweede pomp niet volledig onafhankelijk is van de eerste pomp zal de aannahme worden gemaakt dat de kans dat beide pompen uitvallen 10% is van de onbeschikbaarheid berekend voor pomp 1.

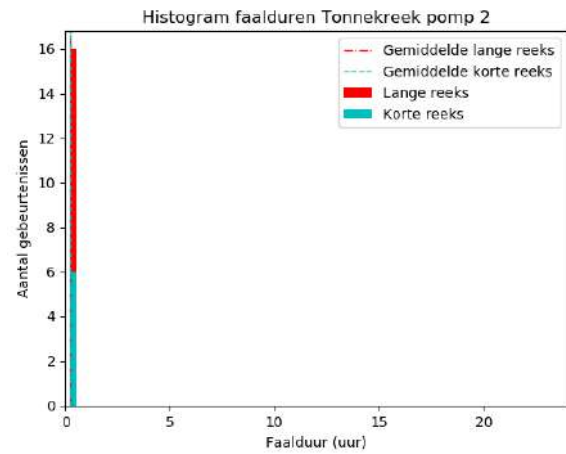
	Onbeschikbaarheid door langdurig falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door merkbaar falen gemaal (%)	Onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen gemaal (%)
Korte reeks pomp 1	5.4	0.6	11.4
Korte reeks pomp 2	0.1	0.0	1.5
Lange reeks pomp 1	1.4	0.0	1.0
Lange reeks pomp 2	0.2	0.0	2.5

Tabel 4.6: Onbeschikbaarheid gemaal Tonnekreek

Figuur 4.19 en 4.20 tonen de faalduren van de faalgebeurtenissen. Opvallend is dat bij pomp 2 enkel faalduren van een kwartier optreden. Ook bij pomp 1 zijn de meeste faalgebeurtenissen van korte duur, met enkele uitschieters tot 30 en 40 uur. In Tabel 4.7 zijn de verdelingen van deze faalduren weergegeven.



Figuur 4.19: Duur onbeschikbaarheid gemaal Tonnekreek pomp 1



Figuur 4.20: Duur onbeschikbaarheid gemaal Tonnekreek pomp 2

	Gemiddelde faalduur (uur)	Faalduur (%) <2 uur	Faalduur (%) 2<24 uur	Faalduur (%) 24<48 uur	Faalduur (%) >48 uur
Korte reeks pomp 1	1.5	76.5	23.5	0.0	0.0
Korte reeks pomp 2	0.3	100.0	0.0	0.0	0.0
Lange reeks pomp 1	8.3	38.5	50.0	11.4	0.0
Lange reeks pomp 2	0.3	100.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 4.7: Gegevens faalduren gemaal Tonnekreek met gemiddelde faalduur in uren en de faalduren in percentages van het totaal aantal gebeurtenissen

5

Gevolgen falen gemalen

5.1. Modellerings

Voor de modellering van de gevolgen van het falen van gemalen is gebruikgemaakt van software met een hydraulisch stroommodel. Bij Brabantse Delta wordt voor de watersysteemtoets gebruikgemaakt van SOBEK-modellen. Doordat deze modellen al beschikbaar en gevalideerd zijn met de werkelijkheid, is ervoor gekozen om gebruik te maken van deze modellen. Deze modellen zijn opgeknipt in een aantal gebieden. De gemalen Middelschans en Plukmade bevinden zich in het gebied Gat van den Ham en gemaal Tonnekreek bevindt zich in het gebied Tonnekreek.

In Bijlage F staat uitleg over het softwarepakket SOBEK en de opties voor modellering. Ook de details over de instellingen van de modellen van Brabantse Delta staan in deze bijlage.

Het falen van een gemaal kan in het SOBEK-model worden gemodelleerd door op korte afstand voor het gemaal een stuw te plaatsen met een PID-controller (Proportionele, Integreerende en Differentiërende controller). Een PID-controller kan in SOBEK worden gebruikt om een kunstwerk te besturen aan de hand van een hydraulische parameter. Daarnaast is het mogelijk om per zelfgekozen tijdstap de kruinhoogte van de stuw in te stellen. Op het moment dat het gemaal werkt, heeft deze stuw dezelfde hoogte als de bodem van het kanaal. Wanneer het gemaal niet werkt heeft de stuw een extreme hoogte, waardoor het water niet meer over de stuw kan stromen en dus ook niet wordt weggepompt. Door de gemalen voor verschillende duren uit te zetten, kan de impact van verschillende faalduren worden bepaald.

Vervolgens worden de berekende waterstanden geëxporteerd naar GIS. In GIS wordt de maximale waterstand per SOBEK-knoop gebruikt voor de verdere analyse. De waterstanden in het gehele gebied worden met behulp van Thiessenpolygoon om de SOBEK-knopen berekend. De kaart met waterstanden wordt gecombineerd met de AHN3-hoogtekaart in GIS om inundatiekaarten te verkrijgen.

De inundatiekaarten worden gebruikt om de schades te berekenen. Voor het berekenen van de schades is ervoor gekozen om gebruik te maken van de WaterSchadeSchatter. De WaterSchadeSchatter is het meest gebruikte schademodel dat waterschappen in Nederland gebruiken voor de watersysteemtoets om een inschatting te maken van de schade die optreedt door inundatie (Spijker, 2010). De reden dat de WaterSchadeSchatter veel wordt gebruikt, is dat dit schademodel ontworpen is om een goede schatting te kunnen maken van relatief kleine overstromingen (door neerslag) en hier daardoor ook geschikt voor is. Daarnaast is de WaterSchadeSchatter gebruiksvriendelijk. Meer informatie over de WaterSchadeSchatter en andere schademodelen staat in Bijlage A.

De schadeberekeningen zijn gedaan met een versie van WaterSchadeSchatter uit de periode april/mei 2019. Door een update van de WaterSchadeSchatter zijn in deze periode te hoge schades berekend voor woongebieden, bedrijventerreinen en sportterreinen. In Hoofdstuk 7 wordt hier verder op ingegaan.

Behalve voor het berekenen van de optredende schades, worden de inundatiekaarten ook gebruikt om de

optredende inundatie te toetsen aan de wateroverlastnormen van de watersysteemtoets. Dit wordt gedaan door te bepalen welke inundatie binnen en buiten de normen valt.

De doorgerekende scenario's zijn:

- Neerslag met gemiddelde herhalingstijden van 2, 10, 15, 25 en 50 jaar. Voor gemaal Tonnekreek is ook een run gedaan met neerslag met een gemiddelde herhalingstijd van 100 jaar.
- 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal in combinatie met neerslag met de verschillende gemiddelde herhalingstijden.
- Neerslag met een gemiddelde herhalingstijd van 10 jaar in combinatie met uitvalduren van het gemaal van 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 36 en 48 uur.

De run met de verschillende gemiddelde herhalingstijden van neerslag zorgt ervoor dat bekend wordt welke inundatie optreedt zonder dat een gemaal faalt. Dit scenario wordt gebruikt om de andere scenario's, waarin wel falen van gemalen optreedt, mee te vergelijken. Vanaf nu wordt naar dit scenario gerefereerd als controlecase. De gemiddelde herhalingstijden zijn gekozen, zodat deze overeenkomen met de gemiddelde herhalingstijden die in de watersysteemtoets in 2014 van Brabantse Delta zijn gebruikt. Het scenario waarin het gemaal 2, 24 en 48 uur uitvalt met verschillende gemiddelde herhalingstijden voor neerslag, moet inzicht verschaffen in de vraag of de grootte van de bui veel invloed heeft op de gevolgen van het falen van een gemaal. Het laatste scenario, waarin het gemaal voor dezelfde gemiddelde herhalingstijd verschillende uitvalduren heeft, moet inzicht verschaffen in het verschil in impact van de verschillende uitvalduren. Hierin zijn kleine tijdstappen gemaakt tot aan 24 uur uitval, omdat gemalen meestal niet voor langere tijd uitvallen en Brabantse Delta bij lang uitvallen noodpompen kan plaatsen. Om deze reden zijn de ontwikkelingen in de eerste 24 uur het meest relevant.

5.1.1. Middelschans

De SOBEK-modellering van het gebied Middelschans staat in Figuur 5.1. Het model heeft in totaal 215 rekenpunten waar de waterstanden worden bepaald en het watersysteem heeft een oppervlak van 480 ha. In Figuur 5.2 zijn de wateroverlastnormen te zien waaraan de inundatie getoetst wordt. Deze normen zijn uitgedrukt in minimale overstromingskansen waarop de bergings- en afvoercapaciteit van het gebied moeten zijn ingericht.



Figuur 5.1: SOBEK-modellering gebied Middelschans, enkel het netwerk met rekenpunten en gemalen is weergegeven

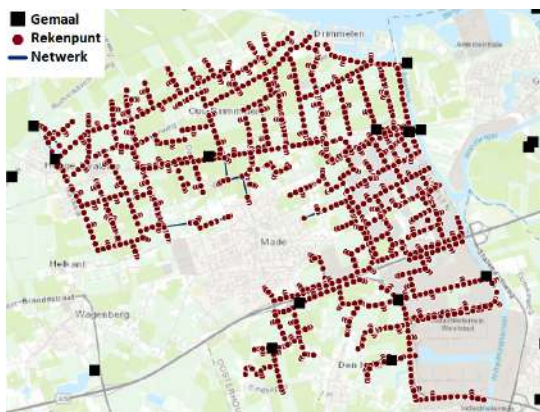


Figuur 5.2: Wateroverlastnormen gebied Middelschans (Waterschap Brabantse Delta, 2014)

5.1.2. Plukmade

In Figuur 5.3 is de SOBEK-modellering van het gebied Plukmade afgebeeld. Het model heeft 1 940 rekenpunten waar de waterstanden worden uitgerekend en het watersysteem heeft een oppervlak van 4 910 ha. In de SOBEK modellering van Plukmade zijn in totaal vijf gemalen aanwezig. In de casestudie wordt echter alleen gekeken naar de gevolgen van het falen van gemaal Plukmade, omdat in dit onderzoek geen rekening wordt

gehouden met de mogelijkheid dat meerdere gemalen tegelijk uitvallen. In Figuur 5.4 zijn de wateroverlastnormen van gebied Plukmade weergegeven.



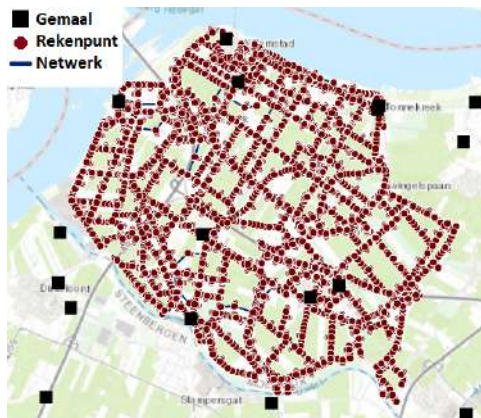
Figuur 5.3: SOBEK-modellering gebied Plukmade, enkel het netwerk met rekenpunten en gemalen is weergegeven



Figuur 5.4: Wateroverlastnormen gebied Plukmade (Waterschap Brabantse Delta, 2014)

5.1.3. Tonnekreek

Het gebied Tonnekreek heeft een grootte van 3 390 ha. De SOBEK-modellering van gebied Tonnekreek is te zien in Figuur 5.5. Het SOBEK model van Tonnekreek heeft in totaal 4 061 rekenpunten. In het model zitten in totaal drie gemalen, maar ook bij deze case wordt alleen gekeken naar het falen van één gemaal, namelijk gemaal Tonnekreek. De wateroverlastnormen van gebied Tonnekreek staan in Figuur 5.6.



Figuur 5.5: SOBEK-modellering gebied Tonnekreek, enkel het netwerk met rekenpunten en gemalen is weergegeven



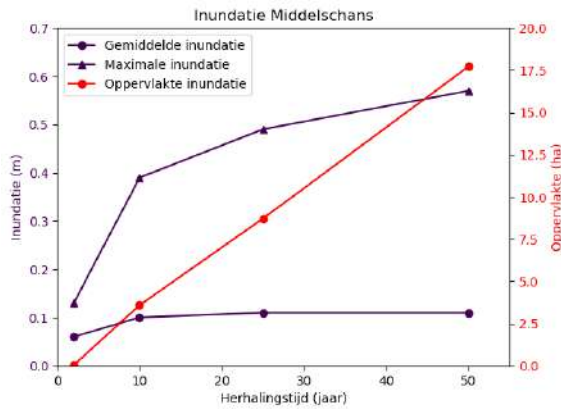
Figuur 5.6: Wateroverlastnormen gebied Tonnekreek (Waterschap Brabantse Delta, 2014)

5.2. Analyse gevolgen falen gemalen

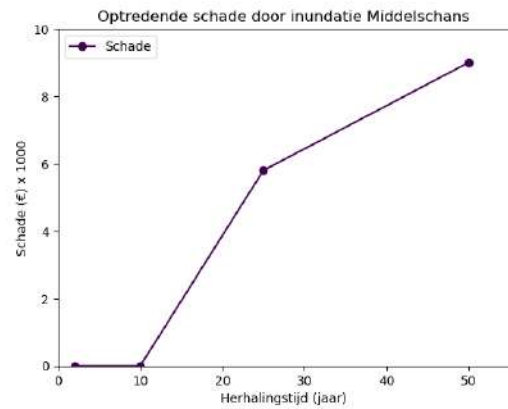
5.2.1. Middelschans

In Figuur 5.7 en 5.8 zijn de resultaten van de controlecase afgebeeld. Hierin is te zien dat de maximale inundatie en het geïnundeerde oppervlak toenemen bij een hogere gemiddelde herhalingstijd. De gemiddelde inundatie blijft constant over de verschillende gemiddelde herhalingstijden. Bij deze case is de schade die is berekend met de WaterSchadeSchatter bij een gemiddelde herhalingstijd van 2 en 10 jaar gelijk aan nul. Bij een gemiddelde herhalingstijd van 50 jaar stijgt deze tot € 9 000.

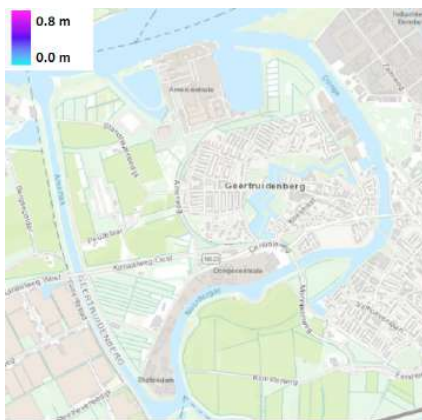
Hoe de inundatie zich ontwikkelt over het gebied is te zien in de kaarten van Figuur 5.9 en 5.10. In dit hoofdstuk zijn de inundatiekaarten van de laagste en hoogste gemiddelde herhalingstijd weergegeven. De inundatiekaarten van alle gemiddelde herhalingstijden staan in Bijlage H.



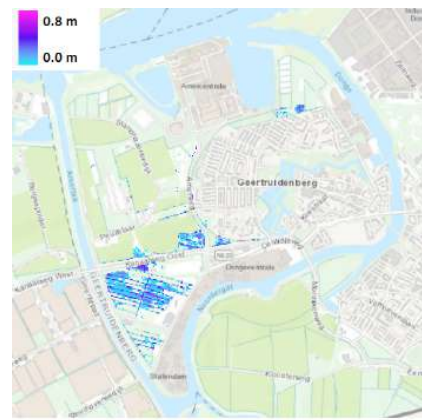
Figuur 5.7: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalings tijden bij gemaal Middelschans



Figuur 5.8: Schade door inundatie verschillende gemiddelde herhalings tijden neerslag gemaal Middelschans



Figuur 5.9: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalings tijd 2 jaar gemaal Middelschans



Figuur 5.10: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalings tijd 50 jaar gemaal Middelschans

In Tabel 5.1 is te zien hoeveel het geïnundeerde oppervlak binnen en buiten de norm van de watersysteemtoets valt. Hierin is te zien dat het gebied Middelschans niet volledig voldoet aan de wateroverlastnormen voor de verschillende gemiddelde herhalings tijden.

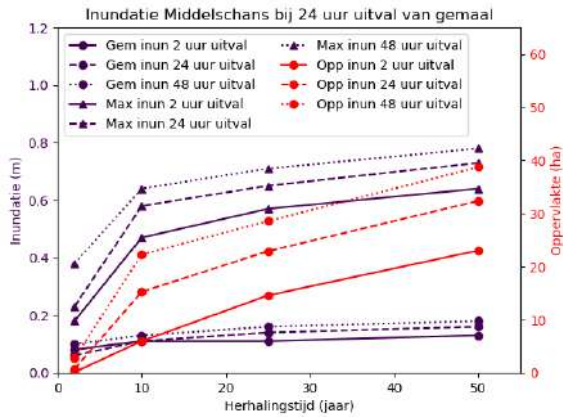
	Totaal geïnundeerd opp		Geïnundeerd opp binnen norm		Geïnundeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T10	3.6	0.8	3.3	0.7	0.3	0.1
T25	8.7	1.8	8.4	1.7	0.4	0.1
T50	17.7	3.7	17.1	3.6	0.6	0.1

Tabel 5.1: Geïnundeerd oppervlak dat binnen en buiten de wateroverlastnormen valt bij de verschillende gemiddelde herhalings tijden van gemaal Middelschans (controlecase)

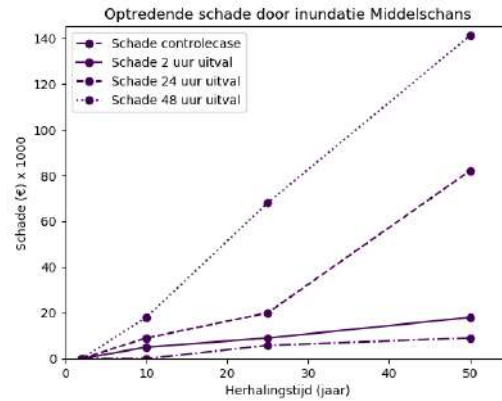
Bij uitval van 24 uur van het gemaal in combinatie met de neerslag van verschillende gemiddelde herhalings tijden is te zien dat de maximale inundatie die optreedt ongeveer een factor 1.5 groter is dan de inundatie in de controlecase. Ook de geïnundeerde oppervlakte is groter bij uitval van het gemaal. Bij een gemiddelde herhalings tijd van 10 jaar is de geïnundeerde oppervlakte ongeveer een factor 4 groter dan in de controlecase en bij een gemiddelde herhalings tijd van 50 jaar is deze ongeveer een factor 2 groter. Bij 24 uur uitval van het gemaal stijgt de schade bij alle gemiddelde herhalings tijden. Enkel bij een gemiddelde herhalings tijd van 2 jaar blijft de schade gelijk aan €0. Bij een gemiddelde herhalings tijd van 10 jaar treedt door uitval van het gemaal wel schade op waar eerder geen schade optrad. Bij een gemiddelde herhalings tijd van 50 jaar stijgt de

schade tot €82 000, dit is een factor 9 hoger dan in de controlecase.

In Figuur 5.13 en 5.14 is te zien hoe de inundatie in het gebied toeneemt bij een hogere gemiddelde herhalings-tijd. Ook is te zien dat de geïnundeerde oppervlakte groter is en de inundatie dieper dan bij de controlecase. De inundatiekaarten van alle gemiddelde herhalings-tijden staan in Bijlage H.



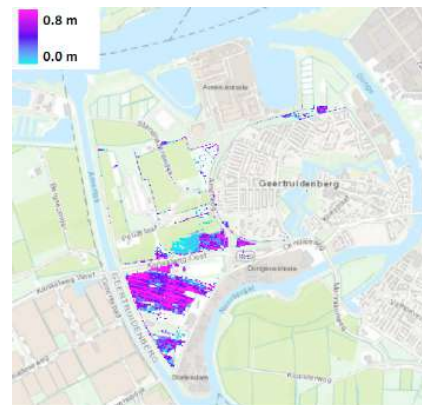
Figuur 5.11: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalings-tijden en 2, 24 en 48 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur 5.12: Schade door inundatie 2, 24 en 48 uur uitval bij verschillende gemiddelde herhalings-tijden gemaal Middelschans



Figuur 5.13: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur 5.14: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 50 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans

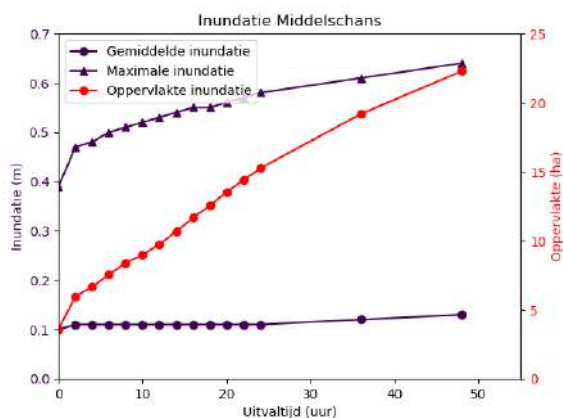
De toename van het geïnundeerde oppervlak dat niet binnen de normen van de watersysteemtoets valt, is te vinden in Tabel 5.2. In de tabel is te zien dat 24 uur uitvallen van het gemaal bij alle gemiddelde herhalings-tijden zorgt voor een toename van het geïnundeerde oppervlak dat niet binnen de norm valt. Zonder falen van het gemaal valt maximaal 0.1% van het gebied buiten de wateroverlastnormen en met falen van het gemaal 0.2% van het gebied. Ondanks dat dit een verdubbeling is van het gebied dat buiten de norm valt is dit slechts een klein deel van het gehele gebied.

		Geïndeerd oppervlak buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïndeerd oppervlak buiten norm (uitval)		Toename geïndeerd oppervlak buiten norm	
		ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	2 uur	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24 uur	0.0	0.0	0.7	0.2	0.6	0.2
	48 uur	0.0	0.0	2.7	0.9	2.7	0.9
T10	2 uur	0.3	0.1	0.4	0.1	0.1	0.0
	24 uur	0.3	0.1	1.1	0.2	0.8	0.1
	48 uur	0.3	0.1	1.8	0.4	1.5	0.3
T25	2 uur	0.4	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1
	24 uur	0.4	0.1	0.7	0.2	0.3	0.1
	48 uur	0.4	0.1	0.9	0.3	0.5	0.2
T50	2 uur	0.6	0.2	0.7	0.2	0.1	0.0
	24 uur	0.6	0.2	1.0	0.2	0.4	0.0
	48 uur	0.6	0.2	1.2	0.4	0.6	0.2

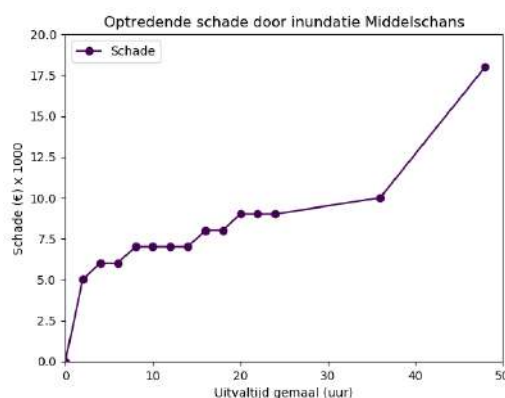
Tabel 5.2: Toename geïndeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal Middelschans voor de verschillende gemiddelde herhalingstijden

Het laatste scenario van gemaal Middelschans is het scenario waarin de gemiddelde herhalingstijd van 10 jaar van de neerslag wordt gebruikt en het gemaal voor verschillende duren uitvalt. In Figuur 5.15 is te zien dat de geïndeerde oppervlakte lineair toeneemt bij een langere uitval van het gemaal. Bij een uitval van 8 uur is de geïndeerde oppervlakte even groot als de geïndeerde oppervlakte als het gemaal niet uitvalt bij een neerslaggebeurtenis met een gemiddelde herhalingstijd van 25 jaar. Ook de maximale inundatie neemt toe bij een langere uitvalduur. De gemiddelde inundatie blijft wel gelijk. De schade die optreedt gaat omhoog bij een langere uitvalduur. In de eerste 2 uur en na 36 uur is de stijging relatief snel. Daartussenin is de toename in schade relatief klein. Dit is weergegeven in Figuur 5.16.

Figuur 5.17 en 5.18 tonen de toename van de inundatie in het gebied. In de figuren is duidelijk te zien dat de inundatie toeneemt bij een langere uitvalduur. Het gehele verloop van toename van inundatie staat in Bijlage H.



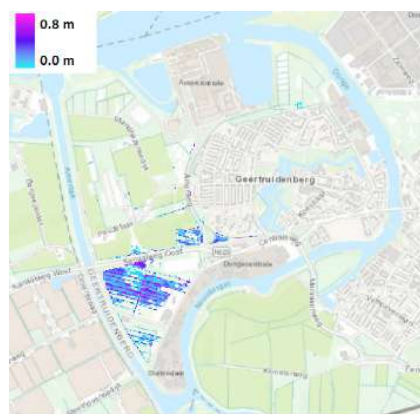
Figuur 5.15: Inundatie door neerslag met uitvalduren van gemaal Middelschans



Figuur 5.16: Schade door inundatie verschillende uitval duren gemaal Middelschans



Figuur 5.17: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsstijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur 5.18: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsstijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans

In Tabel 5.3 is een duidelijke toename te zien van het oppervlak dat niet aan de normen voldoet bij uitvallen van het gemaal. Na 2 uur uitval van het gemaal voldoet 0.1 ha extra niet meer aan de wateroverlastnormen en na 48 uur is dit 1.5 ha. Dit is echter slechts een klein deel van het gebied. Het falen van gemalen zorgt slechts voor een toename van 0.3% van het gebied dat niet meer voldoet aan de wateroverlastnormen.

	Geïnuundeerd opp buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïnuundeerd opp buiten norm (24 uur uitval)		Toename geïnuundeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
2 uur	0.3	0.1	0.4	0.1	0.1	0.0
4 uur	0.3	0.1	0.5	0.1	0.2	0.0
6 uur	0.3	0.1	0.5	0.1	0.2	0.0
8 uur	0.3	0.1	0.6	0.1	0.3	0.1
10 uur	0.3	0.1	0.7	0.1	0.3	0.1
12 uur	0.3	0.1	0.7	0.1	0.4	0.1
14 uur	0.3	0.1	0.8	0.2	0.4	0.1
16 uur	0.3	0.1	0.8	0.2	0.5	0.1
18 uur	0.3	0.1	0.9	0.2	0.5	0.1
20 uur	0.3	0.1	1.0	0.2	0.6	0.1
22 uur	0.3	0.1	1.0	0.2	0.7	0.1
24 uur	0.3	0.1	1.1	0.2	0.8	0.2
36 uur	0.3	0.1	1.4	0.3	1.1	0.2
48 uur	0.3	0.1	1.8	0.4	1.5	0.3

Tabel 5.3: Toename geïnuundeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door verschillende uitvaluren van het gemaal Middelschans bij een gemiddelde herhalingsstijden van 10 jaar

Bij alle scenario's is de schade die optreedt door inundatie bij een gemiddelde herhalingsstijd van 2 jaar gelijk aan nul. Bij een hogere gemiddelde herhalingsstijd treedt wel schade op, maar niet extreem veel. Bij de watersysteemtoets van Brabantse Delta uit 2014 kwam ook naar voren dat in dit gebied weinig schade optreedt door inundatie. De toegenomen schade bij uitval van het gemaal is relatief gezien erg hoog, maar dit is deels te wijten aan het feit dat de schade in de controlecase erg laag is. Ook is te zien dat bij de verschillende uitvalscenario's het oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet toeneemt. De grootste toename van de getoetste scenario's treedt op bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar en 48 uur uitval. Dit is een toename van bijna 1.5 ha. Dit is echter slechts een klein percentage van het gehele gebied.

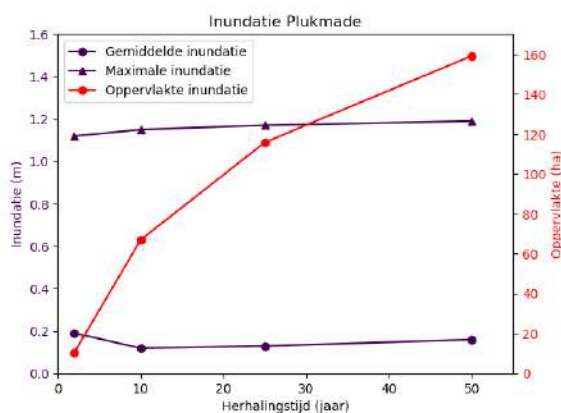
5.2.2. Plukmade

Het stroommodel van het gebied van Plukmade is ongeveer 680 ha. Hierdoor komen de maximale waterstanden niet in het gehele gebied op hetzelfde moment voor. Voor de berekeningen is wel gebruikgemaakt van alle piekwaterstanden. Dit is een kleine overschatting van een momentopname. Om te controleren

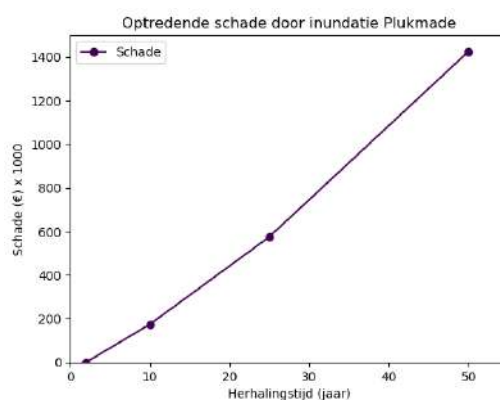
of deze overschatting acceptabel is, is een vergelijking gedaan met een momentopname voor een gemiddelde herhalingsjijd van 10 jaar. Voor de momentopname is gekeken naar een moment waarop veel pieken voorkomen (21-01 om 19:00 uur). De gemiddelde afwijking tussen de maximale waterstanden en de waterstanden van de momentopname is 0.1%. Dit is een acceptabele afwijking. Om deze reden zijn de maximale waterstanden zijn gebruikt voor de rest van de berekeningen.

Figuur 5.19 en 5.20 tonen de resultaten te zien van de controlecase. Hierin is te zien dat bij neerslag met een hogere gemiddelde herhalingsjijd zowel de gemiddelde inundatie als de maximale inundatie ongeveer gelijk blijven. Het geïnundeerde oppervlak neemt wel toe. De schade die hierbij optreedt neemt lineair toe met de gemiddelde herhalingsjijd. Deze schade is een stuk groter dan de schade die optreedt in het gebied Middelschans. Bij een gemiddelde herhalingsjijd van 10 jaar treedt een schade op van €174 000 en bij een gemiddelde herhalingsjijd zelfs een schade van €1 405 000.

De bijbehorende inundatiekaarten zijn te vinden in Figuur 5.21 en 5.22. In de kaarten is te zien dat bij een gemiddelde herhalingsjijd van 2 jaar bijna geen inundatie optreedt en bij een gemiddelde herhalingsjijd van 50 jaar wel. In Bijlage H staan de inundatiekaarten van de andere gemiddelde herhalingsjijden.



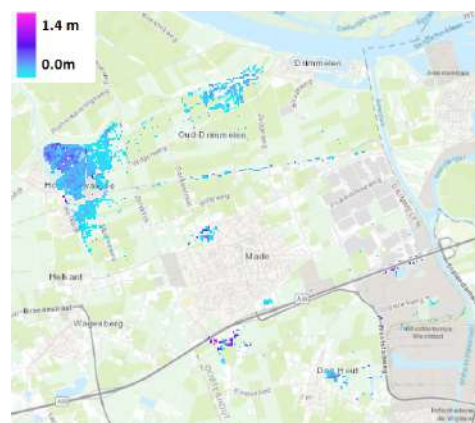
Figuur 5.19: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalingsjijden bij gemaal Plukmade



Figuur 5.20: Schade door inundatie verschillende gemiddelde herhalingsjijden neerslag gemaal Plukmade



Figuur 5.21: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsjijd 2 jaar gemaal Plukmade



Figuur 5.22: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsjijd 50 jaar gemaal Plukmade

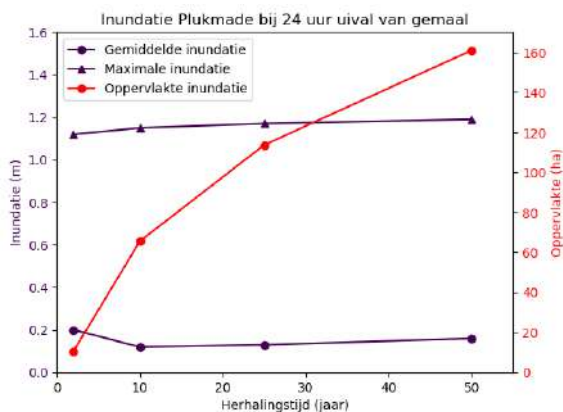
In Tabel 5.4 is weergegeven hoeveel van de inundatie in het gebied van Plukmade binnen en buiten de wateroverlasteisen valt. Te zien is dat bij een gemiddelde herhalingsjijd van 2 jaar het gebied buiten de norm het grootst is. Dit komt doordat enkel gebieden waar geen norm geldt (natuur) mogen inunderen bij deze gemiddelde herhalingsjijd. Deze norm komt nauwelijks voor in dit gebied. Daarnaast is in deze case te zien dat de toename van het gebied dat niet voldoet aan de wateroverlastnormen in verhouding tot het oppervlak

klein is.

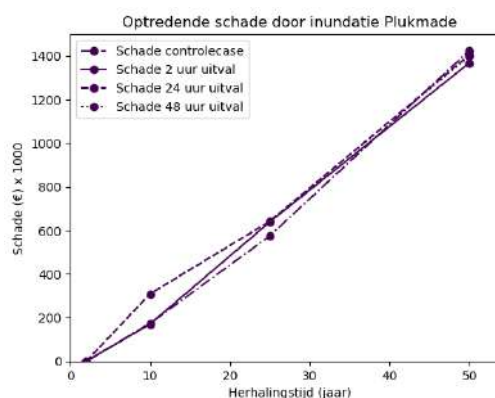
	Totaal geïnundeerd opp		Geïnundeerd opp binnen norm		Geïnundeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	10.6	0.2	5.3	0.1	5.3	0.1
T10	67.9	1.4	64.8	1.3	3.1	0.1
T25	116.5	2.4	113.9	2.3	2.6	0.1
T50	159.1	3.2	155.4	3.2	3.7	0.1

Tabel 5.4: Geïnundeerd oppervlak dat binnen en buiten de wateroverlastnormen valt bij de verschillende gemiddelde herhalingstijden van gemaal Plukmade (controlecase)

De resultaten van 2, 24 en 48 uur uitval van gemaal Plukmade zijn afgebeeld in Figuur 5.23 en 5.24. Hierin zijn geen verschillen te zien in inundatie en het inundatieoppervlak met de controlecase. Ook de bijbehorende schade is min of meer gelijk aan die van de controlecase. Dit betekent dat uitval van dit gemaal geen invloed heeft op de inundatie. Dit komt doordat bij een te hoog waterpeil in het bemalingsgebied van Plukmade een stuw wordt geopend, waardoor het water afgevoerd kan worden door gemaal Emilia. Ook in de inundatiekaarten in Figuur 5.25 en 5.26 is te zien dat de inundatie hetzelfde is als in de controlecase. In Bijlage H zijn de inundatiekaarten van de andere gemiddelde herhalingstijden en 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal te vinden.



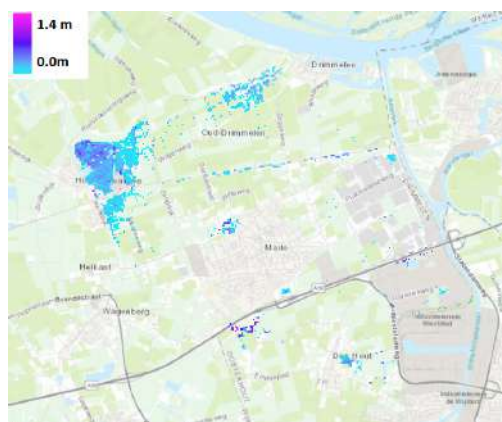
Figuur 5.23: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalingstijden en 2, 24 en 48 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur 5.24: Schade door inundatie 2, 24 en 48 uur uitval bij verschillende gemiddelde herhalingstijden gemaal Plukmade



Figuur 5.25: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur 5.26: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 50 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade

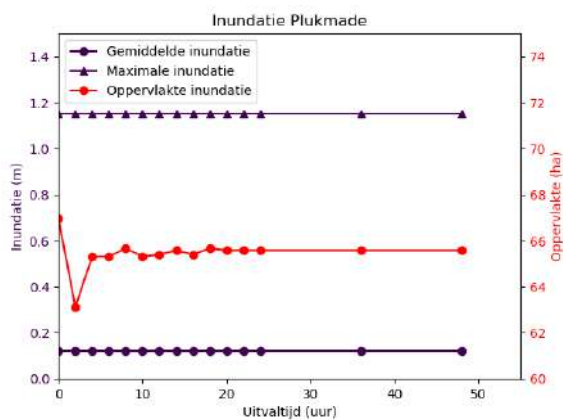
Het toegenomen geïnundeerde oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt is te vinden in Tabel 5.5. Door de systeemwerking met gemaal Emilia treedt geen toename op van het oppervlak dat niet aan de normen voldoet.

		Geïnundeerd oppervlak buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïnundeerd oppervlak buiten norm (uitval)		Toename geïnundeerd oppervlak buiten norm	
		ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	2 uur	5.3	1.8	5.2	1.8	-0.1	0.0
	24 uur	5.3	1.8	5.3	1.8	0.0	0.0
	48 uur	5.3	1.8	5.3	1.8	0.0	0.0
T10	2 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.0	0.0
	24 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
	48 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
T25	2 uur	2.6	0.9	2.6	0.9	0.0	0.0
	24 uur	2.6	0.9	2.9	1.0	0.3	0.1
	48 uur	2.6	0.9	2.9	1.0	0.3	0.1
T50	2 uur	3.7	1.3	3.6	1.2	-0.1	-0.1
	24 uur	3.7	1.3	3.9	1.3	0.2	0.0
	48 uur	3.7	1.3	3.9	1.3	0.2	0.0

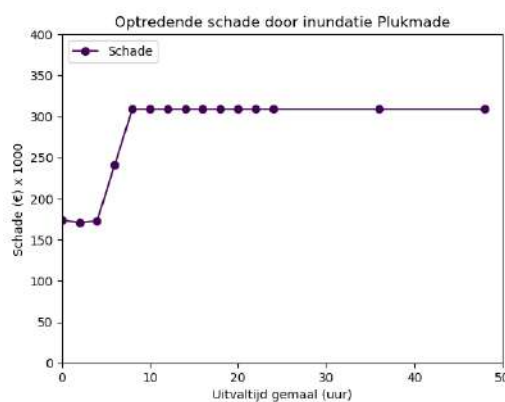
Tabel 5.5: Toename geïnundeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal Plukmade voor de verschillende gemiddelde gemiddelde herhalingsstijden

Ook in het laatste scenario is te zien dat uitval van het gemaal geen invloed heeft op de inundatie. In Figuur 5.27 en 5.28 is te zien dat bij de verschillende uitvalduren de inundatie en het inundatieoppervlakte gelijk blijven. Ook de bijbehorende schade blijft min of meer gelijk. In de eerste 4 uur na uitval neemt deze toe om daarna uit te vlakken en constant te blijven.

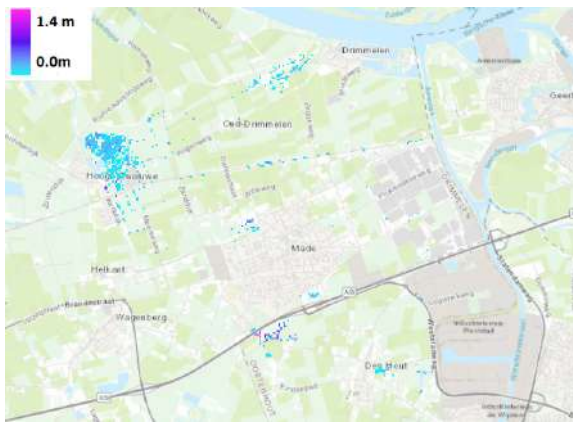
De inundatiekaarten in Figuur 5.29 en 5.30 van 2 uur uitval en 48 uur uitval bevestigen dat geen toename optreedt in inundatie bij een langere uitval van het gemaal. Voor de volledigheid staan de inundatiekaarten van de verschillende uitvalduren in Bijlage H. Echter, deze zijn allemaal gelijk aangezien geen toename optreedt in inundatie.



Figuur 5.27: Inundatie door neerslag met uitvalduren van gemaal Plukmade



Figuur 5.28: Schade door inundatie verschillende uitvalduren gemaal Plukmade



Figuur 5.29: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur 5.30: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade

In Tabel 5.6 is te zien dat een variërende uitvalduur geen invloed heeft op het oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet.

	Geïndeerd opp buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïndeerd opp buiten norm		Toename geïndeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
2 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.0	0.0
4 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.1	0.0
6 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.1	0.0
8 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.2	0.0
10 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.1	0.0
12 uur	3.1	0.1	3.1	0.1	0.1	0.0
14 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
16 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
18 uur	3.1	0.2	3.3	0.1	0.2	0.0
20 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
22 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
24 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
36 uu	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0
48 uur	3.1	0.1	3.2	0.1	0.1	0.0

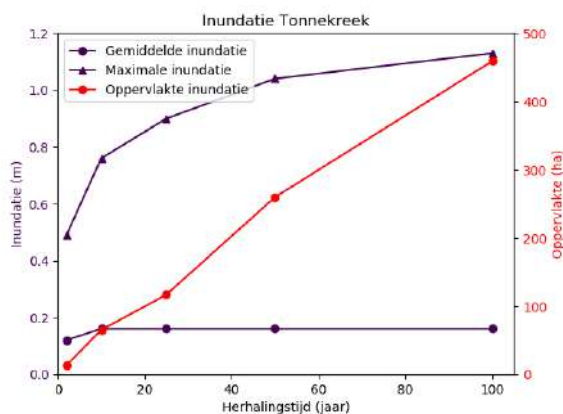
Tabel 5.6: Toename geïndeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door verschillende uitvalduren van het gemaal Plukmade bij een gemiddelde gemiddelde herhalingsijd van 10 jaar

Uitval van gemaal Plukmade heeft dus bijna geen invloed op de inundatie of schade die optreedt. Dit komt door de systeemwerking met gemaal Emilia, dat het overtollige water toch nog afvoert.

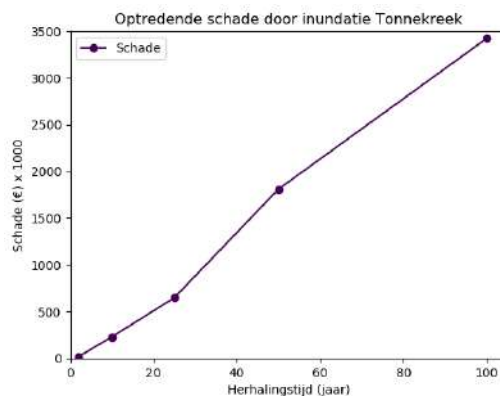
5.2.3. Tonnekreek

De resultaten van de controlecase van gemaal Tonnekreek staan in Figuur 5.31 en 5.32. In de figuren is te zien dat de maximale inundatie en het inundatieoppervlak groter worden bij een hogere gemiddelde herhalingsijd. De gemiddelde inundatie blijft wel constant. Ook de schade die optreedt door de inundatie neemt toe. Bij een gemiddelde herhalingsijd van 2 jaar is de schade € 0 en bij een gemiddelde herhalingsijd van 100 jaar is de schade ongeveer € 3 500 000.

Ook in de Figuren 5.33 en 5.34 is te zien dat de inundatie in het gebied flink toeneemt bij een hogere gemiddelde herhalingsijd. In Bijlage H zijn de inundatiekaarten van de verschillende gemiddelde herhalingsjiden terug te vinden.



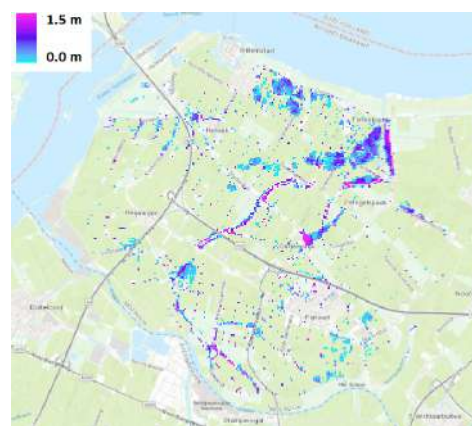
Figuur 5.31: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalingstijden bij gemaal Tonnekreek



Figuur 5.32: Schade door inundatie verschillende gemiddelde herhalingstijden neerslag gemaal Tonnekreek



Figuur 5.33: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 2 jaar gemaal Tonnekreek



Figuur 5.34: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingstijd 100 jaar gemaal Tonnekreek

In Tabel 5.7 is te zien hoeveel van de inundatie bij de verschillende gemiddelde herhalingstijden binnen en buiten de wateroverlasteisen valt. Opvallend is dat bij een gemiddelde herhalingstijd van 2 en 10 jaar de helft van het geïnundeerde oppervlak buiten de norm valt. Bij een hogere gemiddelde herhalingstijd wordt het geïnundeerde oppervlak dat buiten de norm valt lager. Dit komt doordat dit gebied voornamelijk bestaat uit landbouw, wat volgens de wateroverlastnormen gemiddeld 1 keer in de 25 jaar mag inunderen. Het percentage van het oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet is ook bij deze case klein. Bij een gemiddelde herhalingstijd van 100 jaar voldoet alles aan de normen. Dit komt omdat 100 jaar de hoogste norm is.

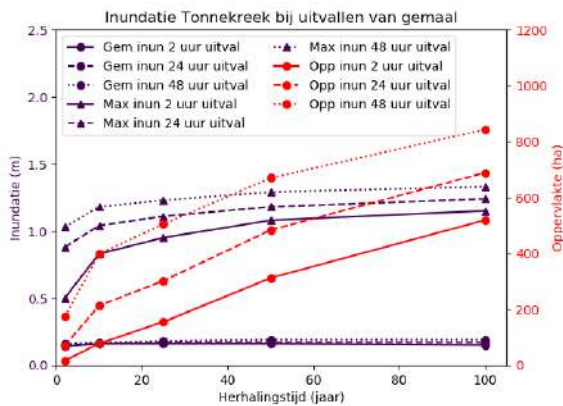
	Totaal geïnundeerd opp		Geïnundeerd opp binnen norm		Geïnundeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	13.1	0.4	6.8	0.2	6.3	0.2
T10	65.1	1.9	34.7	1.0	30.3	0.9
T25	116.8	3.5	103.7	3.1	13.1	0.4
T50	260.4	7.7	245.1	7.2	15.2	0.5
T100	459.1	13.5	459.1	13.5	0	0.0

Tabel 5.7: Geïnundeerd oppervlak dat binnen en buiten de wateroverlastnormen valt bij de verschillende gemiddelde herhalingstijden van gemaal Tonnekreek (controlecase)

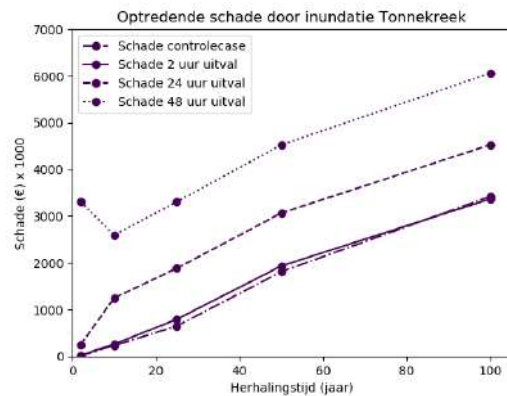
In Figuur 5.35 en 5.36 is te zien dat de gemiddelde en maximale inundatie bij 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal bij verschillende gemiddelde herhalingstijden van de neerslag ongeveer gelijk blijven. Wel neemt het

geïndeerde oppervlak toe. Het geïndeerde oppervlak bij een gemiddelde herhalingsjijd van 2 jaar is 5 keer groter dan in de controlecase en 1.5 keer groter bij een gemiddelde herhalingsjijd van 100 jaar. Ook is de schade die optreedt groter dan in de controlecase.

In de inundatiekaarten in Figuur 5.37 en 5.38 is te zien dat het geïndeerde oppervlak bij een gemiddelde herhalingsjijd van 2 jaar een factor 5 zo groot is als in de controlecase en bij een gemiddelde herhalingsjijd van 100 een factor 1.5 keer zo groot is. De inundatiekaarten van de andere gemiddelde herhalingsjijden zijn te vinden in Bijlage H.



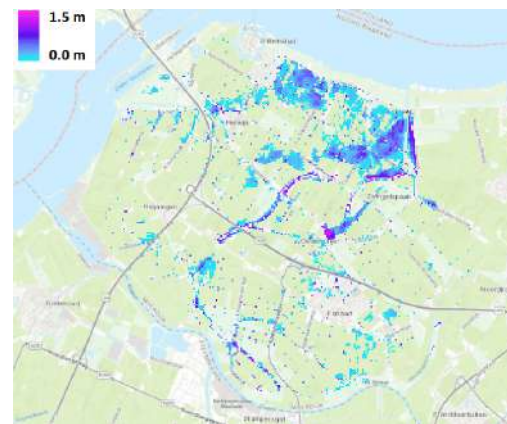
Figuur 5.35: Inundatie door neerslag met verschillende gemiddelde herhalingsjijden en 2, 24 en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur 5.36: Schade door inundatie 2, 24 en 48 uur uitval bij verschillende gemiddelde herhalingsjijden gemaal Tonnekreek



Figuur 5.37: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsjijd 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur 5.38: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsjijd 100 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek

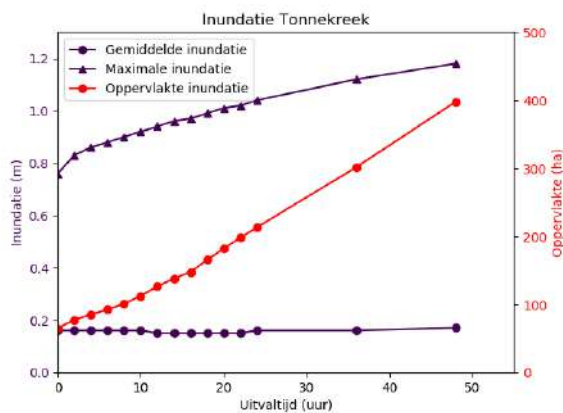
In deze case neemt het oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt aanzienlijk toe. Bij een gemiddelde herhalingsjijd van 10 jaar neemt dit oppervlak toe met 2.4% van het totale oppervlak. Dit staat gelijk aan een extra 117 ha die niet voldoen aan de wateroverlastnormen. Het is opvallend dat deze ferme stijging enkel optreedt bij een gemiddelde herhalingsjijd van 10 jaar. Bij een hogere gemiddelde herhalingsjijd is de toename erg klein. Dit komt doordat het grootste gedeelte van dit gebied bestaat uit landbouwgrond dat een wateroverlastnorm heeft van 1 keer in de 25 jaar.

		Geïndeerd oppervlak buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïndeerd oppervlak buiten norm (uitval)		Toename geïndeerd oppervlak buiten norm	
		ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
T2	2 uur	6.3	0.1	7.3	0.1	1.0	0.0
	24 uur	6.3	0.1	52.5	1.1	46.2	0.9
	48 uur	6.3	0.1	148.9	3.0	142.6	2.9
T10	2 uur	30.3	0.6	38.3	0.8	8.0	0.2
	24 uur	30.3	0.6	147.3	3.0	117.0	2.4
	48 uur	30.3	0.6	304.8	6.2	274.5	5.6
T25	2 uur	13.1	0.3	14.9	0.3	1.8	0.0
	24 uur	13.1	0.3	22.8	0.5	9.7	0.2
	48 uur	13.1	0.3	34.1	0.7	21.0	0.4
T50	2 uur	15.2	0.3	17.8	0.4	2.6	0.1
	24 uur	15.2	0.3	20.7	0.4	5.4	0.1
	48 uur	15.2	0.3	23.6	0.5	8.4	0.2
T100	2 uur	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	24 uur	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	48 uur	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

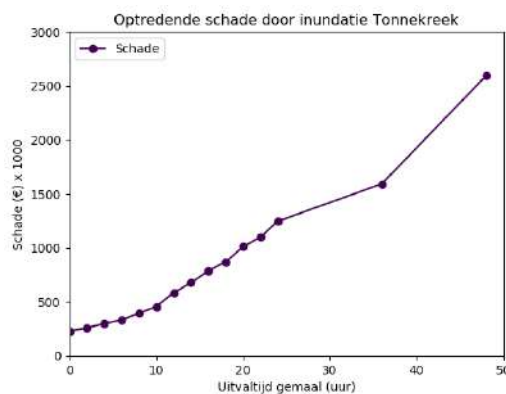
Tabel 5.8: Toename geïndeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door 2, 24 en 48 uur uitval van het gemaal Tonnekreek voor de verschillende gemiddelde herhalingsstijden

De resultaten van het laatste scenario van gemaal Tonnekreek zijn weergegeven in Figuur 5.39 en 5.40. Ook bij dit scenario is te zien dat de gemiddelde en maximale inundatie ongeveer gelijk blijven bij uitval van het gemaal. Het geïndeerde oppervlak bij uitval neemt wel toe. Dit gebeurt onder een ongeveer lineair verloop. Het geïndeerde oppervlak is bij uitval van 24 uur ongeveer een factor 5 groter dan bij de controlecase. De schade die optreedt neemt langzaam toe bij een langere uitval van het gemaal. Na 24 uur uitval neemt de optredende schade ineens veel meer toe. Dit komt, omdat op dat moment een gedeelte van een bedrijventerrein onder water komt te staan.

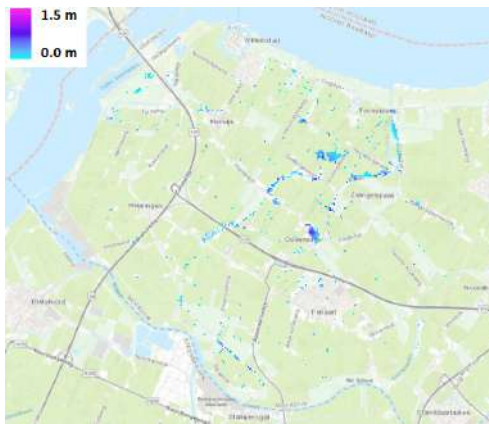
Zoals weergegeven in Figuur 5.41 en 5.42, is het geïndeerde oppervlak groter dan in de controlecase. Daarnaast is te zien dat de inundatie voornamelijk optreedt in het noordoosten van het gebied, in de buurt van gemaal Tonnekreek. Wanneer meer inundatie optreedt door een hogere gemiddelde herhalingsstijd van de neerslag, treedt de inundatie meer verspreid over het gebied op. Voor het volledige verloop van de toename in inundatie door verschillende uitvalduren van gemaal Tonnekreek wordt verwezen naar de inundatiekaarten in Bijlage H.



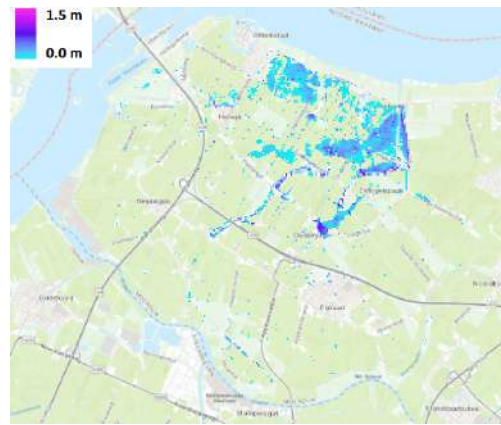
Figuur 5.39: Inundatie door neerslag met uitvalduren van gemaal Tonnekreek



Figuur 5.40: Schade door inundatie verschillende uitvalduren gemaal Tonnekreek



Figuur 5.41: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsstijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur 5.42: Inundatie door neerslag met gemiddelde herhalingsstijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek

In Tabel 5.9 is te zien dat er een flinke toename is van het geïnundeerde oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet door de onbeschikbaarheid van het gemaal. Bij 48 uur uitval loopt dit zelfs op tot een stijging van 8% van het gebied dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet. Dit komt neer op een stijging van 274 ha.

	Geïnundeerd opp buiten norm (controlecase, geen falen)		Geïnundeerd opp buiten norm		Toename geïnundeerd opp buiten norm	
	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp	ha	% van totaal opp
2 uur	30.3	0.6	38.3	0.8	8.0	0.2
4 uur	30.3	0.6	44.6	0.9	14.2	0.3
6 uur	30.3	0.6	50.8	1.0	20.5	0.4
8 uur	30.3	0.6	57.3	1.2	27.0	0.6
10 uur	30.3	0.6	66.1	1.4	35.8	0.7
12 uur	30.3	0.6	77.0	1.6	46.7	1.0
14 uur	30.3	0.6	87.4	1.8	57.1	1.2
16 uur	30.3	0.6	94.9	1.9	64.6	1.3
18 uur	30.3	0.6	109.1	2.2	78.8	1.6
20 uur	30.3	0.6	122.4	2.5	92.1	1.9
22 uur	30.3	0.6	135.8	2.8	105.4	2.2
24 uur	30.3	0.6	147.3	3.0	117.0	2.4
36 uur	30.3	0.6	220.6	4.5	190.3	3.9
48 uur	30.3	0.6	304.8	6.2	274.5	5.6

Tabel 5.9: Toename geïnundeerd oppervlak dat buiten de wateroverlastnormen valt door verschillende uitvalduren van het gemaal Tonnekreek bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar

Uitval van gemaal Tonnekreek heeft dus een grote invloed op het gebied. De schade neemt snel toe, net als het geïnundeerde oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet.

6

Risico's falen gemalen

Het woord risico kent verschillende definities. Volgens Burton et al. (2004) is de definitie van het risico: risico = kans*kwetsbaarheid. citetRiskLoss hanteert de definitie risico = kans*verliezen en Downing et al. (2004) definieert risico als verwachte verliezen. Een veel gebruikte definitie van risico bij natuurrampen is risico = kans*consequenties. Hierbij is een natuurramp gedefinieerd als "een gebeurtenis met het potentieel om schade toe te brengen". Deze definitie wordt onder andere gebruikt door Boer en Jones (2003), zoals geciteerd in Brooks (2003). Ook Helm (1996) gebruikte deze definitie al. Deze definitie wordt ook in dit onderzoek gebruikt.

Het risico van inundatie door neerslag zonder het falen van gemalen kan worden berekend door de kans op neerslag te combineren met de schade die optreedt:

$$R = \sum_{n=1}^{n=5} (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

Waarin P_{Tn} de gemiddelde overschrijdingskans is van de neerslag gebeurtenis met $n1=100$, $n2=50$, $n3=25$, $n4=10$ en $n5=2$ bij de casus van gemaal Tonnekreek en $n1=50$, $n2=25$, $n3=10$ en $n4=2$ bij de andere cases. $S_{Tn-\frac{1}{2}}$ is de gemiddelde schade van de controlocase van de kansmassa (Tn en $Tn-1$).

Door de onbeschikbaarheid van de gemalen, de gemiddelde herhalingstijd van de neerslag en de gevolgen van het falen van gemalen te combineren kan het risico worden bepaald. De bovengrens van het risico inclusief het falen van gemalen wordt met de volgende formule bepaald:

$$R = \sum_{n=1}^{n=5} p_{onb} * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2},24uur} + (1 - p_{onb}) * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}} \quad (6.2)$$

p_{onb} is de kans op onbeschikbaarheid door langdurig falen van het gemaal, $S_{Tn,24uur}$ is de gemiddelde schade bij 24 uur uitvallen van het gemaal van de kansmassa Tn en $Tn-1$. In Hoofdstuk 4.4 is de onbeschikbaarheid berekend. Er is uitgegaan van de onbeschikbaarheid berekend aan de hand van de korte meetreeks, omdat deze is gebaseerd op de meeste data. Bij de lange meetreeks zijn de inslagpeilen geschat, omdat deze niet waren opgeslagen. In deze berekening wordt ervan uitgegaan dat het gemaal in het geval van falen altijd 24 uur uitvalt. Dit is dus een overschatting, die gedaan is om een bovengrens van het risico te bepalen.

Het risico kan nauwkeuriger worden bepaald, door rekening te houden met de verschillende uitvalduren. De formule wordt dan:

$$R = \sum_{n=1}^{n=5} p_{onb} * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * (p_{<2uur} * S_{Tn-\frac{1}{2},2uur} + p_{2<24uur} * S_{Tn-\frac{1}{2},24uur} + p_{24<48uur} * S_{Tn-\frac{1}{2}}) + (1 - p_{onb}) * (P_{Tn} - P_{Tn-1}) * S_{Tn-\frac{1}{2}} \quad (6.3)$$

Hierin is $p_{<2uur}$ de kans dat bij onbeschikbaarheid het gemaal minder dan 2 uur onbeschikbaar is, $p_{2<24uur}$ is de kans dat het gemaal tussen de 2 en 24 uur onbeschikbaar bij onbeschikbaarheid van het gemaal en

$p_{24 < 48 \text{uur}}$ is de kans dat het gemaal tussen de 24 en 48 uur onbeschikbaar is bij onbeschikbaarheid van het gemaal. Deze zijn vermenigvuldigd met de gemiddelde schades bij de kansmassa (T_n en T_{n-1}) die optreden bij 2 uur ($S_{T_{n-\frac{1}{2}}, 2 \text{uur}}$), 24 uur ($S_{T_{n-\frac{1}{2}}, 24 \text{uur}}$) en 48 uur ($S_{T_{n-\frac{1}{2}}, 48 \text{uur}}$). De overige van de parameters zijn hetzelfde als in Formule 6.2.

Naast het risico is de gemiddelde herhalingstijd van de gecombineerde gebeurtenis uitgerekend om een indicatie te geven van hoe groot de kans is dat dit optreedt.

6.1. Middelschans

Tabel 6.1 bevat de gecombineerde herhalingstijd van een bepaalde neerslaggebeurtenis en het onbeschikbaar zijn van gemaal Middelschans. De kans dat de gecombineerde gebeurtenis optreedt, is dus zeer klein. De kans dat een neerslaggebeurtenis met een gemiddelde herhalingstijd van 2 jaar optreedt in combinatie met onbeschikbaarheid van 2.2% het gemaal in een jaar is 0.9%. Bij deze gemiddelde herhalingstijd zijn de gevolgen niet groot. Bij een hogere gemiddelde herhalingstijd is de kans van optreden van de gecombineerde gebeurtenis per jaar 0.1% of kleiner. De kans dat de gecombineerde gebeurtenis optreedt is dus zeer klein.

Gemiddelde herhalingstijd neerslaggebeurtenis (jaar)	Gemiddelde herhalingstijd gecombineerde gebeurtenis (jaar)
2	115
10	765
25	2 294
50	2 294

Tabel 6.1: Gecombineerde herhalingstijd van onbeschikbaar zijn van gemaal Middelschans en een bepaalde neerslaggebeurtenis

6.1.1. Bovengrens risico

De bovengrens van het risico dat optreedt in het gebied van gemaal Middelschans zonder en met het meenemen van onbeschikbaarheid van het gemaal staat in Tabel 6.2. Het risico op jaarbasis zonder falen van het gemaal is € 502 en met falen € 607. Dit is een toename van € 105, wat een toename is van 21% van het risico op jaarbasis.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen (€)	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	0	4 500	0	39	39
$R_{T10-T25}$	2 900	14 500	174	189	15
$R_{T25-T50}$	7 400	51 000	148	167	19
R_{T50}	9 000	82 000	180	212	32
R_{tot}			502	607	105

Tabel 6.2: Bovengrens risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Middelschans

6.1.2. Verwacht risico

Het verwachte risico is het berekende risico dat rekening houdt met de faalduren. De berekende schades van de kansmassa's staan in Tabel 6.3. Deze schades zijn gebruikt voor de berekening van het verwachte risico.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 2 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 24 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 48 uur (€)
T2-T10	0	2 500	4 500	9 000
T10-T25	2 900	7 000	14 500	43 000
T25-T50	7 400	13 500	51 000	104 500
T50	9 000	18 000	82 000	141 000

Tabel 6.3: Schades bij verschillende faalduren bij uitvallen van gemaal Middelschans

In Tabel 6.4 staat het verwachte risico. Dit is zonder falen € 502 per jaar en als er rekening gehouden wordt met het falen van gemalen € 562 per jaar. Dit is een stijging van € 60 per jaar, wat gelijk is aan een stijging van 12%.

	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	0	28	28
R_{T10-T25}	174	183	9
R_{T25-T50}	148	157	9
R_{T50}	180	194	14
R_{tot}	502	562	60

Tabel 6.4: Verwacht risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Middelschans

6.2. Plukmade

Bij deze casus is de onbeschikbaarheid van het gemaal iets lager dan bij gemaal Middelschans. Hierdoor is de kans dat de onbeschikbaarheid van het gemaal en een bepaalde neerslaggebeurtenis samen optreden ook lager. Dit is terug te zien in Tabel 6.5. Ook hier is de kans van optreden op jaarbasis van de gecombineerde gebeurtenis klein. De kans dat de neerslaggebeurtenis met een gemiddelde herhalingsperiode van 2 jaar voorkomt tijdens het onbeschikbaar zijn van het gemaal is 0.7% per jaar en bij hogere gemiddelde herhalingsperiodes van de neerslag zelfs minder dan 0.1%.

Gemiddelde herhalingsperiode neerslaggebeurtenis (jaar)	Gemiddelde herhalingsperiode gecombineerde gebeurtenis (jaar)
2	152
10	1 010
25	3 030
50	3 030

Tabel 6.5: Gecombineerde gemiddelde herhalingsperiode van onbeschikbaar zijn van gemaal Plukmade en een bepaald neerslaggebeurtenis

6.2.1. Bovengrens risico

De bovengrens van het risico per jaar voor de verschillende gemiddelde herhalingsperiodes zonder en met onbeschikbaarheid van gemaal Plukmade staan in Tabel 6.6. Het risico zonder rekening te houden met het falen van gemalen is € 105 770 en € 106 317 als er wel rekening mee wordt gehouden. Dit is een toename van € 547, wat gelijk is aan een stijging van 0.5%.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen (€)	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	87 000	154 500	34 800	35 246	446
R_{T10-T25}	374 500	475 500	22 470	22 570	100
R_{T25-T50}	1 000 000	1 023 500	20 000	20 008	8
R_{T50}	1 425 000	1 405 000	28 500	28 493	-7
R_{tot}			105 770	106 317	547

Tabel 6.6: Bovengrens risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Middelschans

6.2.2. Verwacht risico

De schades van de kansmassa's die zijn gebruikt voor de berekening van het verwachte risico staan in Tabel 6.7. De schades zijn gewogen aan de faalduren van deze casestudie om het verwachte risico te berekenen.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 2 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 24 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 48 uur (€)
T2-T10	87 000	855 00	154 500	154 500
T10-T25	374 500	405 000	475 500	475 500
T25-T50	1 000 000	1 003 500	1 023 500	1 021 000
T50	1 425 000	1 368 000	1 405 000	1 400 000

Tabel 6.7: Schades bij verschillende faalduren bij uitvallen van gemaal Plukmade

In Tabel 6.8 staat het verwachte risico van de onbeschikbaarheid van gemaal Plukmade. Het risico zonder rekening te houden met de onbeschikbaarheid van het gemaal is € 105 770 per jaar en € 105 876 als er wel rekening wordt gehouden met de onbeschikbaarheid van het gemaal. Dit is een stijging van € 106, ofwel 0.1% van het risico op jaarbasis. Dit risico is ongeveer een factor 5 kleiner dan de bovengrens van het risico.

	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	34 800	34 877	77
R_{T10-T25}	22 470	22 513	43
R_{T25-T50}	20 000	20 002	2
R_{T50}	28 500	28 483	-17
R_{tot}	105 770	105 876	106

Tabel 6.8: Verwacht risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Plukmade

6.3. Tonnekreek

De gemiddelde herhalings tijden van de onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek met een bepaalde neerslaggebeurtenis zijn te vinden in Tabel 6.9. De gecombineerde gebeurtenissen komen minder vaak voor dan bij de andere casussen. Dit komt doordat gemaal Tonnekreek twee pompen heeft en hierdoor is de kans dat het gemaal volledige onbeschikbaar is zeer klein. De kans dat een neerslaggebeurtenis met een gemiddelde herhalings tijd van 2 jaar optreedt in combinatie met onbeschikbaar zijn van het gemaal is 0.2% per jaar. De kans dat een neerslaggebeurtenis met een hogere gemiddelde herhalings tijd optreedt tegelijk met het onbeschikbaarheid van het gemaal is minder dan 0.1% en is dus klein.

Herhalingstijd neerslaggebeurtenis	Herhalingstijd neerslaggebeurtenis met onbeschikbaar zijn van gemaal	Kans van optreden in herhalingstijd T(%)
T2	460	0.43
T10	3 069	0.07
T25	9 208	0.02
T50	18 416	0.01
T100	18 416	0.01

Tabel 6.9: Gecombineerde herhalingstijd van onbeschikbaar zijn van gemaal Tonnekreek en een bepaald neerslaggebeurtenis

6.3.1. Bovengrens risico

De bovengrens van het risico van gemaal Tonnekreek met en zonder rekening te houden met de onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek staat in Tabel 6.10. Bij de bovengrens van het risico wordt vanuit gegaan dat als het gemaal onbeschikbaar is, deze altijd 24 uur uitvalt. De bovengrens van het risico is zonder rekening te houden met de onbeschikbaarheid van het gemaal € 160 415 en € 162 397 als er wel rekening wordt gehouden met de onbeschikbaarheid van het gemaal. Dit is een stijging van € 1 982 per jaar, wat gelijk staat aan een stijging van 1.2% op jaar basis.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen(€)	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	123 000	747 000	49 200	50 555	1 355
R_{T10-T25}	438 000	1 564 500	26 280	26 647	367
R_{T25-T50}	1 228 000	2 474 000	24 560	24 695	135
R_{T50-T100}	2 615 500	3 795 500	26 155	26 219	64
R_{T100}	3 422 000	4 526 000	34 220	34 280	60
R_{tot}			160 415	162 397	1 982

Tabel 6.10: Bovengrens risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Tonnekreek

6.3.2. Verwacht risico

In Tabel 6.11 staan de schades van de kansmassa's bij de verschillende uitvalsduren van gemaal Tonnekreek. Deze zijn gebruikt om het verwachte risico uit te rekenen.

	Gemiddelde schade kansmassa zonder falen (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 2 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 24 uur (€)	Gemiddelde schade kansmassa met falen 48 uur (€)
T2-T10	123 000	139 500	747 000	1 757 500
T10-T25	438 000	525 000	1 564 500	2 948 500
T25-T50	1 228 000	1 361 500	2 474 000	3 913 500
T50-T100	2 615 500	2 650 000	3 795 500	5 290 000
T100	3 422 000	3 368 000	4 526 000	6 058 000

Tabel 6.11: Schades bij verschillende faalduren bij uitvallen van gemaal Tonnekreek

Het verwachte risico met en zonder rekening te houden met de onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek staat in Tabel 6.12. Het verwachte risico zonder rekening te houden met de onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek is € 160 415 en € 161 180 als wel rekening wordt gehouden met de onbeschikbaarheid van gemaal Tonnekreek. De stijging is een factor 2.5 kleiner dan in de bovengrensberekening. De stijging is € 765, wat gelijk is aan een stijging van 0.5%.

	Risico zonder falen (€/jaar)	Risico met falen (€/jaar)	Toename (€/jaar)
R_{T2-T10}	49 200	49 715	515
R_{T10-T25}	26 280	26 429	149
R_{T25-T50}	24 560	24 617	57
R_{T50-T100}	26 155	26 179	24
R_{T100}	34 220	34 239	19
R_{tot}	160 415	161 180	765

Tabel 6.12: Verwacht risico van inundatie met of zonder falen van gemaal Tonnekreek

7

Discussie

In dit hoofdstuk worden de betrouwbaarheid van de resultaten en de beperkingen van het onderzoek besproken.

7.1. Limitaties beschikbare data

Een limitatie in dit onderzoek waren de beschikbare data. Dit had impact op de analyse van de storingsmeldingen van TMX en de bepaling van de berekende onbeschikbaarheid van de gemalen.

Doordat in TMX geen uitmeldingen worden opgeslagen na een storingsmelding, is het moeilijk te bepalen hoe lang een storing duurt. Daarnaast is onduidelijk of een storingsmelding met een reset is opgelost of dat het een langduriger probleem is. Dit zorgt ervoor dat elke storing nu geregistreerd is als storing, terwijl er storingsmeldingen zijn die direct zijn op te lossen en dus eigenlijk geen impact hebben. Verder is de benaming van de storingsmeldingen soms onduidelijk. De melding "moment op" duidt op het niet goed sluiten van een van de kleppen. Het is echter erg afhankelijk van welke klep niet sluit of de pomp blijft draaien of niet. Hierdoor was het niet mogelijk om de storingsmeldingen te scheiden in storingsmeldingen die leiden tot uitvallen van de pomp en storingsmeldingen waarbij dat niet gebeurt, terwijl dit wel de intentie was van deze analyse. Uit deze analyse is wel naar voren gekomen welke onderdelen relatief vaak last hebben van storingen en dus gevoeliger zijn voor storingen dan andere onderdelen van het gemaal. Ook is inzicht verkregen in hoeveel storingsmeldingen een gemaal per jaar heeft.

Daarnaast zijn de data met storingsmeldingen voor een korte periode beschikbaar. De data waren beschikbaar vanaf 2013 tot 2018. Een langere periode aan storingsmeldingen zou de analyse nauwkeuriger maken. Ook kan dan verschil worden gezien tussen het aantal storingen bij gemalen voor en nadat ze zijn gerenoveerd. Waardoor het nut van renovatie duidelijk wordt. Brabantse Delta heeft laten weten dat deze data vroeger wel werden opgeslagen, maar verloren zijn gegaan.

Voor de onbeschikbaarheidsanalyse waren niet veel data beschikbaar. De oudste data die beschikbaar waren, waren de waterstanden uit 2009 voor gemaal Middelschans, uit 2013 voor gemaal Plukmade en uit 2011 voor gemaal Tonnekreek. Voor de beheerpeilen/in- en uitslagpeilen waren slechts data van ongeveer één jaar beschikbaar. Voor een betrouwbare onbeschikbaarheidsanalyse is een zo lang mogelijke meetreeks nodig. Één jaar aan complete data is onvoldoende voor een goede onbeschikbaarheidsanalyse. De resultaten die uit deze analyse komen, moeten dan ook als indicatief worden gezien. Ook de analyse over de lange tijdreeks is indicatief. Door het ontbreken van beheerpeilen/in- en uitslagpeilen bij de lange meetreeksen is het nodig geweest hier een aanname te doen die de onbeschikbaarheid onderschat, maar deze wel telt op de meest kritische momenten.

7.2. Limitaties SOBEK-modellering

Een hydraulisch model kan nooit 100 % hetzelfde zijn als de werkelijkheid en heeft altijd zijn beperkingen. In dit geval is gekozen voor een SOBEK model. SOBEK is een 1D/2D model. In het 1D model (dat is gebruikt)

kan het water enkel stromen in het gegenereerde netwerk van het model. Dit is dan ook de eerste limitatie van de modellen die zijn gebruikt. Water dat over land stroomt is niet meegenomen in het model.

De SOBEK-modellen van Brabantse Delta zijn gebaseerd op de debieten van de gebieden en zijn ook zo gemodelleerd. Om deze reden is gebruikgemaakt van de 1D Flow-module van SOBEK. Hierin worden de debieten op laterale knopen in het model geforceerd. Om deze reden is het erg lastig om een ander neerslagevenement in het model in te voeren dan de al ingevoerde, bestaande neerslagevenementen met hun gemiddelde herhalings tijden, omdat de neerslag dan zou moeten worden geschaald naar de debieten in de punten. Daarnaast wordt door de keuze voor enkel de 1D Flow module van SOBEK een aantal processen buiten beschouwing gelaten. De RR-module (rainfall run-off module) in SOBEK is speciaal ontwikkeld voor het verwerken van neerslag in een stroommodel. In de RR-module worden onder andere grondsoort, maaiveldhoogte, infiltratie en landgebruik meegenomen in het stroommodel. Dit ontbreekt nu nog in de modellering.

Daarnaast zijn stedelijk gebied en de bijbehorende overstorten nog niet gemoduleerd in de SOBEK-modellen van Brabantse Delta. De invloed hiervan is vooral terug te zien in de resultaten van de modellering van het gebied van Middelschans, dat voor een groot deel bestaat uit stedelijk gebied. Het is bekend dat dit stedelijk gebied last heeft van wateroverlast, maar dit is niet in die mate terug te zien in de resultaten van de modellen. Dit zorgt mogelijk voor een onderschatting van het risico.

Ondanks dat de modellen hun beperkingen hebben (vooral bij stedelijk gebied), zijn deze modellen gevalideerd met de werkelijkheid door gebiedskenners van Brabantse Delta. Daarom wordt ervan uitgegaan dat de resultaten uit de modellen (redelijk) goed matchen met de werkelijkheid en daarom goed gebruikt kunnen worden om de impact van het falen van gemalen in kaart te brengen.

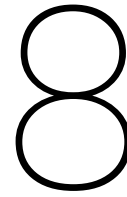
7.3. Limitaties risicoberekening

In de bovengrens risicoberekening is aangenomen dat als het gemaal onbeschikbaar is, deze 24 uur onbeschikbaar is. Hierdoor is het berekende risico een overschatting van de realiteit. Deze berekening kan echter wel een eerste indicatie geven van de bovengrens van het risico in het gebied. Het verwachte risico is ook berekend. Deze risicoberekening is realistischer dan de berekening van de bovengrens van het risico.

De schadeberekeningen zijn gedaan met de WaterSchadeSchatter met de versie van april/mei 2019. In deze versie zijn door een software-update te hoge schades berekend voor woongebieden, bedrijventerreinen en sportterreinen. In dit onderzoek zijn vooral relatieve waarden van de schades en het risico (het verschil tussen met en zonder falen) van belang. Om deze reden is gekozen om geen nieuwe schadeberekeningen te doen. De absolute berekende schades en het absolute berekende risico zijn hierdoor een overschatting.

7.4. Overige limitaties onderzoek

De vertaling van de berekende waterstanden in SOBEK naar de inundatiekaarten is gedaan met behulp van Thiessenpolygoonen in GIS. Deze methode geeft een representatief beeld van waar en hoeveel inundatie in een gebied optreedt. Het zou echter beter zijn om het water te laten stromen over een hoogtekaart met een 2D-model.



Conclusie

Het doel van dit onderzoek was om een methode te ontwikkelen om de invloed van het falen van gemalen op een poldersysteem te bepalen. Deze methode is in dit onderzoek gebruikt om antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag: *Wat is het effect van het falen van (polder)gemalen op de watersysteemtoets?*

Om de hoofdvraag te beantwoorden, is in dit onderzoek de relevantie van het meenemen van het falen van gemalen in de watersysteemtoets van de waterschappen onderzocht. Dit is gedaan aan de hand van drie casestudies van het waterschap Brabantse Delta.

Een gemaal heeft verschillende aanleidingen tot falen. Meestal de oorzaak vuil dat ergens in de installatie zit. De meeste storingen worden dan ook opgelost door vuil te verwijderen en het gemaal te resetten. Een enkele keer is er meer aan de hand en moet een monteur langs komen. Kwetsbare onderdelen die relatief vaak storing geven in een gemaal, zijn het krooshek/krooshekreiniger, de vacuümpomp en de pomp zelf.

In de analyse zijn drie verschillende soorten onbeschikbaarheid te onderscheiden. De gemiddelde onbeschikbaarheid door langdurig falen van de gemalen uit de drie casestudies ligt tussen de 0.0% en 0.8%. De onbeschikbaarheid door niet-merkbaar falen ligt tussen de 1.1% en 2.2%. Bij langdurig falen ligt de onbeschikbaarheid tussen de 0.5% en 2.2%. De onbeschikbaarheid door niet merkbaar falen is dus het hoogst. De casestudie met de hoogste onbeschikbaarheid is gemaal Middelschans. Een onbeschikbaarheid van 2.2% is hoog. Dit gemaal is al onder revisie door het waterschap. Voor de risicoberekening is de langdurige onbeschikbaarheid gebruikt.

Uit de resultaten komt naar voren dat de impact van het falen van gemalen in polders erg afhankelijk is van het gebied. Als inundatie optreedt in stedelijk of industrieel gebied loopt de schade vele malen sneller op bij inundatie dan wanneer enkel inundatie optreedt op grasland of natuur. Er is echter wel te zien dat in alle casestudies de inundatiediepte en schade (in eerste instantie) toeneemt. Bij het gebied van Plukmade vlakt deze toename uit door een systeemwerking met gemaal Emilia. Voordat dit uitvlakt, is de schade echter wel toegenomen met € 135 000, wat gelijk is aan een stijging van 78% (8 uur uitvallen). Bij de andere twee casestudies stijgen de inundatie en schade wel bij langere uitval van het gemaal. De schade bij gemaal Middelschans neemt snel toe bij uitval. In 67.4% van de faalgebeurtenissen is de faalduur korter dan 2 uur. De schade die optreedt bij 2 uur uitval bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar is € 5 000. Bij 48 uur uitval (2.3% van de faalgebeurtenissen ligt tussen de 24 en 48 uur) is er € 18 000 euro extra schade bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar. In de controlecase was de schade gelijk aan € 0. Daardoor is de percentuele stijging extreem hoog. Ook bij gemaal Tonnekreek neemt de schade snel toe. Hier is de stijging in schade na 48 uur uitval ongeveer € 2.3 mln bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar (11.4% van de faalgebeurtenissen van pomp 1 heeft een faalduur tussen de 24 en 48 uur, voor pomp 2 is dit 0%). Dit is gelijk aan een stijging van 1 000%. Ook bij korte uitvalduren stijgt de schade snel. Een faalduur van korter dan 2 uur komt in 38.5% van de faalgebeurtenissen voor bij pomp 1 en in 100% van de faalgebeurtenissen van pomp 2. Bij 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek treedt een extra schade van € 30 000 op bij een gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar. Dit is een stijging van 13%.

Bij alle casestudies neemt het percentage van het totale oppervlak dat inundeert buiten de wateroverlastnormen toe. Echter, bij het gebied Middelschans neemt dit toe met maximaal met 0.3% van het oppervlak van het gebied en bij het gebied Plukmade met 0.0% van het oppervlak van het gebied bij 48 uur uitval van het gemaal. Bij het gebied Tonnekreek is de invloed van het onbeschikbaar zijn van het gemaal op het oppervlak dat niet voldoet aan de wateroverlastnormen groter. Bij deze case is na 2 uur uitval van het gemaal al een grotere stijging te zien in het percentage van het totale oppervlak dan na 48 uur uitval in de eerdere cases. Na 2 uur uitval inundeert 8 ha extra, wat een stijging is van 0.2% van het oppervlak van het totale gebied. Na 24 uur is dit zelfs 117 ha en 2.4% en na 48 uur 274 ha en 5.6%. De impact van het onbeschikbaar zijn van het gemaal op het oppervlak dat niet voldoet aan de wateroverlastnormen is bij Middelschans en Plukmade dus zeer klein en bij Tonnekreek groot.

De onbeschikbaarheid, gemiddelde herhalingstijd van de neerslag en de resulterende schade zijn gebruikt om het risico door de onbeschikbaarheid van gemalen te bepalen. De stijging van het risico is bij gemaal Middelschans € 60 per jaar (290 ha). Bij Plukmade is de toename van het risico € 106 per jaar (680 ha). In beide gevallen is de toename van het risico niet groot. Bij gemaal Tonnekreek treedt de grootste toename op van het risico. Deze toename is € 765 (3 390 ha). Dit is gelijk aan een toename van 0.5% van het risico op jaarbasis.

De kans dat deze gecombineerde gebeurtenissen optreden, is zeer klein. Bij de gemalen Middelschans en Plukmade is het bij een gemiddelde herhalingstijd van de neerslaggebeurtenis van 2 jaar nog redelijk aannemelijk dat de gecombineerde gebeurtenis optreedt. De kansen van optreden per jaar zijn bij deze casestudies en bij deze gemiddelde herhalingstijd 0.9% en 0.7%. Bij gemaal Tonnekreek is deze kans echter slechts 0.2% doordat dit gemaal door de tweede pomp een lagere onbeschikbaarheid heeft dan de andere twee gemalen. Bij een gemiddelde herhalingstijd van 10 jaar of hoger is bij alle casussen de kans dat de gecombineerde gebeurtenis optreedt binnen een jaar 0.1% of zelfs kleiner. De kans van optreden van een extreme neerslaggebeurtenis in combinatie met onbeschikbaar zijn van een gemaal is dus zeer klein.

De analyses zijn gedaan op de casestudie Middelschans, Plukmade en Tonnekreek. Bij deze casestudies is de maximale onbeschikbaarheid 2.2% en de maximale pompcapaciteit $170 \text{ m}^3/\text{min}$ per pomp. De gebieden waarin de watersystemen liggen hebben weinig tot geen stedelijk gebied (of deze is niet opgenomen in de modellering) met een maximaal gebiedsoppervlak van ongeveer 5 000 ha. Bij de casestudies Middelschans en Plukmade is de impact van de onbeschikbaarheid van gemalen op het oppervlak dat niet aan de wateroverlastnormen voldoet en het risico niet groot. Echter, bij de casestudie Tonnekreek neemt het geïnundeerde oppervlak dat niet aan de wateroverlast voldoet aanzienlijk toe. Bij deze casestudie is ook een (lichte) stijging te zien van het risico. Echter, door de (zeer) lage kans van optreden van de gecombineerde gebeurtenis is het effect van het falen van gemalen ook in deze case erg klein. Uit de analyse kan worden geconcludeerd dat voor gemalen en gebieden met soortgelijke eigenschappen als in de casestudies, het effect van het falen van gemalen op de watersysteemtoets klein is.

In de casestudies komt naar voren dat vooral de gecombineerde kans van optreden van zowel een extreme neerslaggebeurtenis als onbeschikbaarheid van het gemaal belangrijk is in het bepalen van het effect dat het falen van gemalen heeft het watersysteem. De kans dat deze gecombineerde gebeurtenis optreedt, zal bij elke willekeurige casestudie laag zijn. Ondanks dat de gevolgen van het falen van gemalen groot kunnen zijn, zal het effect dat het falen van gemalen heeft in het algemeen klein zijn door de lage kans van optreden.

9

Aanbevelingen

Naar aanleiding van de discussie en conclusie worden in dit hoofdstuk aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoeken.

Een aanbeveling aan Brabantse Delta is om meer/selectiever data op te slaan. Wanneer deze data goed bijgehouden worden, helpt dit toekomstige onderzoeken. Daarnaast is het voor Brabantse Delta zelf handig om terug te kunnen kijken wat voor beslissingen in het verleden zijn gemaakt en wat hier de gevolgen van waren. Op die manier kunnen toekomstige beslissingen beter onderbouwd worden. Data die in ieder geval zouden moeten worden opgeslagen, zijn de beheerpeilen. Als deze voor een langere periode worden opgeslagen, kan worden teruggekeken wat de invloed hiervan was op de waterstand en kan soms ook verklaard worden waarom de waterstand op dat moment een bepaalde hoogte had. Daarnaast zorgt het opslaan van de beheerpeilen ervoor dat de onbeschikbaarheidsbepaling nauwkeuriger wordt. Naar aanleiding van dit onderzoek wordt ook aangeraden om de volgende data (die nog niet worden opgeslagen) voor een langere periode op te slaan: beheer/in- en uitslagpeilen (vooral aanpasmomenten), momenten van resetten van gemalen en uitmelding van errormeldingen.

Betreffende de SOBEK-modellen is het aan te raden om deze te controleren en te verbeteren. Voor de watersysteemtoets en dit onderzoek zouden de resultaten verbeteren als grondsoort, maaiveldhoogte en stedelijk gebied met overstorten worden meegenomen in de modellering. Door regelmatige veranderingen in het watersysteem moet deze modellering ook relatief eenvoudig aan te passen zijn. Aangezien de resultaten direct aanleiding zijn tot aanpassing en verbetering van het watersysteem is het aan te raden deze modellen zo nauwkeurig mogelijk te maken of om te kijken of andere modellen betere resultaten geven.

Aanbevolen wordt om ook van andere gemalen het risico door onbeschikbaarheid te bepalen. Hierin is het vooral belangrijk om de kritieke gemalen te identificeren waarop het falen van een gemaal grote impact heeft of waar de kans op falen van het gemaal groot is. Brabantse Delta kan dit doen door de volgende stappen te volgen:

1. Identificeer meest kritieke gemalen om eerst te onderzoeken
 - (a) Dit zijn belangrijke gemalen of gemalen die regelmatig moeten pompen en een hoge pompcapaciteit hebben.
 - (b) Dit zijn gemalen die geen/bijna geen systeemwerking hebben die eventueel falen opvangt of gemalen met een gebiedsgrootte groter dan 5 000 ha.
 - (c) Dit zijn gemalen die relatief belangrijke gebieden (gebieden waar inundatie snel tot grote schade leidt) droog moeten houden. Natuur heeft hierbij geen prioriteit omdat hier de wateroverlastnorm 0 jaar is. Stedelijk-industrieel en kassengebied hebben wel prioriteit.
2. Bepaal de onbeschikbaarheid van de gemalen

- (a) De onbeschikbaarheid kan op dezelfde manier worden bepaald als in dit onderzoek, aan de hand van inslagpeilen en draaiuren/toerentallen/frequenties. Zoals eerder beschreven, zou het handig zijn als deze data over langere termijn beschikbaar zijn.
3. Breng van deze gemalen de gevolgen van het falen in kaart met SOBEK
- (a) Het falen van een gemaal kan worden nagebootst door ongeveer 25 meter voor het gemaal een stuw te plaatsen en deze met een PID-controller omhoog te zetten gedurende de faaltijd. De rest van de tijd is deze stuw even hoog als de bodem.
 - (b) Doe eerst een run met een neerslaggebeurtenis met gemiddelde herhalingsstijd van 10 jaar in combinatie met 24 uur uitvallen van het gemaal. Vergelijk de inundatie met de originele run zonder falen. Mocht (bijna) geen verschil te zien zijn, dan kan worden geconcludeerd dat falen van het gemaal niet relevant is in dit gebied. In dit geval kan een volgend gemaal onderzocht worden.
 - (c) Doe runs met 2 en 4 uur falen om de invloeden van kort falen in kaart te brengen en runs met 24 en 48 uur om de invloed van lang falen in kaart te brengen. Doe dit ook voor andere gemiddelde herhalingsstijden. In dit onderzoek zijn meer runs gedaan, omdat zo het verloop van de gevolgen van gemalen in kaart kon worden gebracht.
 - (d) Toets de berekende schade aan de wateroverlastnormen.
 - (e) Bereken de schade veroorzaakt door de extra inundatie.
4. Doe een risico berekening
- (a) De risicoberekening kan worden gedaan op dezelfde manier als in dit onderzoek.

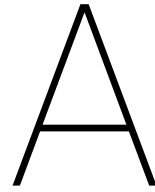
In dit onderzoek is alleen onderzocht wat het effect op polders is van het uitvallen van één gemaal. Aanbevolen wordt om ook het risico van het uitvallen van meerdere gemalen in één water systeem te onderzoeken. Het bovenstaande stappenplan kan hiervoor gevolgd worden. Alleen moet in de SOBEK-modellering niet één, maar meerder gemalen worden uitgezet. Daarnaast moet de kans dat meerdere gemalen tegelijk onbeschikbaar zijn in kaart worden gebracht. Deze onbeschikbaarheid kan niet op dezelfde manier worden bepaald als in dit onderzoek, omdat het falen van meerdere gemalen niet volledig onafhankelijk is van elkaar. Een stroomstoring zou bijvoorbeeld ervoor kunnen zorgen dat meerdere gemalen uitvallen.

Tot slot wordt aangeraden om vervolgonderzoek te doen naar het falen van boezemgemalen en de impact daarvan op het watersysteem. Het falen van boezemgemalen heeft waarschijnlijk niet zo snel direct invloed op de waterstanden in de polder, maar wel op de waterstanden in het boezemkanaal. Het waterniveau in een boezemkanaal heeft weer invloed op de stabiliteit van de primaire waterkeringen. Onderzoek zou kunnen aangeven of het falen van boezemgemalen mee zou moeten worden genomen in de toetsing van de primaire keringen.

Bibliografie

- Benninga, H. (2013). Vergelijken van methodes voor het berekenen van waterstanden bij regionale overschrijdingsnormen.
- Boer, R. en Jones, R. (2003). *Assessing current climate risks Adaptation Policy Framework: A Guide for Policies to Facilitate Adaptation to Climate Change*.
- Bosch, S., Hakvoort, H., Diermanse, F., en Verhoeve, C. (2006). Verantwoord omgaan met de nieuwe neerslagstatistiek.
- Bossenbroek, J. (2004). Statistiek vóóraf of statistiek achteraf?
- Brooks, N. (2003). *Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework*.
- Burton, I., Malone, E., en Huq, S. (2004). *Adaption policy frameworks for climate change: developing strategies, policies and measures*.
- CBS (2018). *Nieuw land: Wat de IJsselmeerpolders Nederland brachten*.
- De Graaf, B. en Versteeg, R. (2000). *Water overlast zo goed als zeker*.
- De Nederlandse Gemalen Stichting (2018). *Gemalen*.
- Downing, T., Butterfield, R., Cohen, S., Huq, S., Moss, R., Rahman, A., Sokona, Y., en Stephan, L. (2004). *Vulnerability indices climate change impacts and adaption*.
- Ernst, L. (1978). *Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables*.
- for Land Reclamation, I. I. en Improvement (1982). *Polders of the world*.
- Helm, P. (1996). *Integrated risk management for natural and technological disasters*.
- het Rijk, de provincies, het Samenwerkingsverband Interprovinciaal Overleg (IPO), en de Vereniging van Nederlandse Gemeenten en de Unie van Waterschappen (2007). *Nationaal Bestuursakkoord water*. <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/wetgeving-beleid/nationaal/@176067/nationaal/>. [Online; accessed 13-09-2018].
- Hoes, D. O. en van de Giesen, P. N. (2018). *Polders*. TU Delft.
- Hoes, O., Nelen, F., en van Leeuwen, E. (2013). *Waterschadeschatter (WSS), gebruikershandleiding*.
- Hoogheemraadschap van Rijnland (2013). *Water in cijfers 2013*. <https://www.rijn-land.net/plannen/downloads-plannen/water-in-cijfers-2013.pdf>. [Online; accessed 25-09-2018].
- Hooghoudt, d. (1940). *Bijdragen to de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond*.
- HydroLogic BV (2016). *Boezemstudie Rijnland, een studie naar de gevolgen van klimaatverandering (extreme neerslag) voor het boezemstysteem van het hoogheemraadschap van Rijnland*.
- Kraijenhoff van de Leur, D. (1958). *A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient*.
- Lendering, K., Schweckendiek, T., en Kok, M. (2018). *Quantifying the failure probability of a canal levee, Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*.
- National Pump & Energy (2018). *Figure: Pumping station information*.
- Prinsen, G., Hakvoort, H., en Dahm, R. (2009). *Neerslagafvoermodellering met SOBEK-RR*.

- Provincie Noord-Brabant (2018). Verordening water Noord-Brabant.
- Ramirez, J. (2000). Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics.
- Schuetze, T. (2011). Climate adaptive design with water in Dutch polders. *Water Science and Technology*.
- Slager, K. en Wagenaar, D. (2017). Standaardmethode 2017, Schade en slachtoffers als gevolg van overstromingen.
- Smith, K. (2004). Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster.
- Spijker, M. (2010). Werkgroep watersysteemtoets 2012-advies. STOWA.
- Thompson, D. (2006). The rational method.
- Tukker, M. en Kooij, K. (2010). Hydraulisch ontwerp en beheer afvalwaterpersleidingen, CAPWAT Handboek.
- van Beveren, G. en Krutwagen, M. (2018). Figuur pompcurves.
- van der Sanden, G. (2014). Gemaal Dongerdielen, Betrouwbaarheids- en beschikbaarheidsberekening.
- Velner, i. en Spijker, d. (2011). Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen van regionale wateroverlast.
- Vossenstein, J. (2015). *The Dutch and their Delta*. XPat Scriptum Publishers, 3rd edition.
- WaterSchadeSchatter (2018). www.waterschadeschatter.nl.
- Waterschap Brabantse Delta (2014). Watersysteemtoets.
- Waterschap Brabantse Delta (2019). Overzichtskaarten Geoweb.
- Waterschap Rijnland (2019). Figuur horizontale pompopstelling.
- Wesseling, J. (1991). CAPSEV, Steady state moisture flow theory program description, users manual.
- Witteveen + Bos (2014). Toetsing wateroverlast inzicht in de kans op inundatie vanuit waterlopen en de effectiviteit van maatregelen: achtergrondrapport.
- Zeeuw, J. en Hellinga, F. (1958). Neerslag en afvoer.



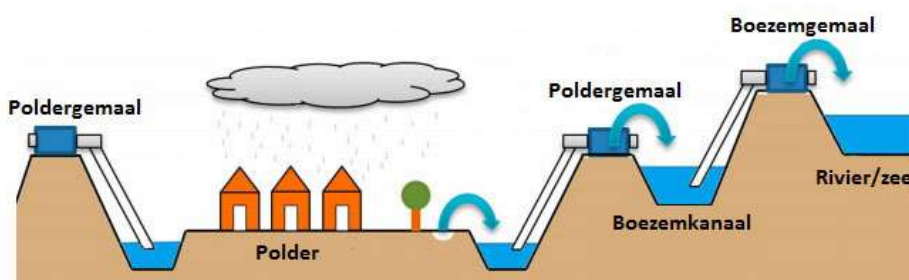
literatuur

A.1. Polders

Een polder is een (vaak laag liggend) stuk land, met een eigen gesloten en gecontroleerd watersysteem. In dit onderzoek is de definitie van polder gebaseerd op Hoes en van de Giesen (2018). Een polder is een stuk land die voldoet aan de volgende eisen:

- Alleen water uit de volgende bronnen komt het watersysteem in: neerslag, kwel, sluis- of inlaatwater voor onder andere irrigatie en doorspoelen van kanalen.
- De polder moet een waterafvoerconstructie hebben welke de afvoer kan controleren. Deze constructie behoort een stuw of gemaal te zijn.
- Het oppervlaktewaterpeil in een polder wordt kunstmatig beheerd om de gebruiksfunctie van de polder te faciliteren. Dit betekent dat het waterpeil in de polder onafhankelijk is van de waterpeilen in de gebieden eromheen.

In Figuur A.1 is een typische doorsnede van een polder afgebeeld. Zoals de afbeelding toont, hebben in Nederland veel polders een eigen boezemkanaal. Water moet dan vanuit het boezemkanaal alsnog naar een rivier of de zee worden gepompt. Gemalen die direct water verpompen vanaf een polder naar een boezemkanaal, rivier of zee, worden poldergemalen genoemd. Gemalen die water verpompen van een boezemkanaal naar een rivier of zee, worden boezemgemalen genoemd. In dit onderzoek is alleen gekeken naar poldergemalen.



Figuur A.1: Een typische doorsnede van een polder, aangepaste afbeelding van Lendering et al. (2018)

A.1.1. Poldertypes

Polders kunnen op verschillende manieren worden onderverdeeld. De meest gebruikte criteria waarop polders gecategoriseerd worden, zijn locatie, oorsprong, landgebruik en grondsoort.

Onderscheid aan de hand van landgebruik kan op meerdere manieren. In dit rapport zijn dezelfde landgebruikstypen aangehouden als in de provinciale verordening. Deze landtypen zijn grasland, akkerbouw, glas-tuinbouw en hoogwaardige land- en tuinbouw, gebieden bestemd voor hoofdinfrastructuur, spoorwegen en bebouwing (het Rijk et al., 2007). Binnen een polder kunnen meerdere landgebruiktypes voor komen. Daarnaast zijn er ook landgebruiktypes waar geen richtlijn voor is in de provinciale verordening, zoals natuur.

De locatie van de polder is vooral bepalend voor de manier van waterafvoer. Water uit een polder kan namelijk op drie manieren worden afgevoerd. Het water kan worden weggepompt met een gemaal naar het boezemkanaal, een rivier of de zee. Meestal ligt het water waarop geloosd wordt in dit geval hoger dan de polder. Een andere manier van water afvoeren is door gebruik te maken van zwaartekracht. Met een sluis of uitlaat kan het water vanzelf de polder uitstromen. In dit geval moet het water waarop geloosd wordt lager liggen dan de polder. Als laatste is een combinatie mogelijk van deze twee methoden. Een voorbeeld is een riviermonding, die onderhevig is aan getijden. Hier kan een combinatie worden toegepast. Bij laagwater wordt gebruikgemaakt van zwaartekracht en bij hoogwater wordt gebruikgemaakt van een gemaal (for Land Reclamation and Improvement, 1982).

In het onderscheidt van polders naar oorsprong wordt vooral gekeken naar de constructiemethode van de polder. In het verleden zijn in Nederland drie methoden veel gebruikt. Dit zijn veenontginning, droogmakerijen en indijking. Bij veenontginning zijn rechthoekige percelen lang de rivier drooggelegd. Het landschap dat hierbij ontstaan is, wordt slagenlandschap genoemd. Droogmakerijen zorgden ervoor dat meren konden worden gereclameerd. Bij deze vorm van landwinning werd veelal gebruik gemaakt van windmolens om het water uit het meer te pompen. De laatste categorie zijn polders die zijn ontstaan door indijking. Bij indijking zijn gebieden die onderhevig zijn aan getijden ingedamd (for Land Reclamation and Improvement, 1982).

Als laatste worden polders gecategoriseerd aan de hand van grondsoort. De grondsoort kan bepalend zijn voor de functie van de polder en voor de zetting van de grond in de polder. De grondsoorten die in Nederland het meest voorkomen in een polder zijn klei en veen, daarnaast zijn er ook enkele zand polders (Hoes en van de Giesen, 2018).

A.1.2. Waterbalans in een polder

In een waterbalans zijn de verschillende componenten binnen een watersysteem weergegeven. De meest algemene waterbalans is uitgedrukt in de volgende formule:

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - Q_{uit} \quad (\text{A.1})$$

De eerste term in de formule is de verandering in wateropslag, Q_{in} zijn de inkomende waterfluxen en Q_{uit} zijn de uitgaande waterfluxen. Voor een polder kan deze algemene formule worden omgeschreven naar:

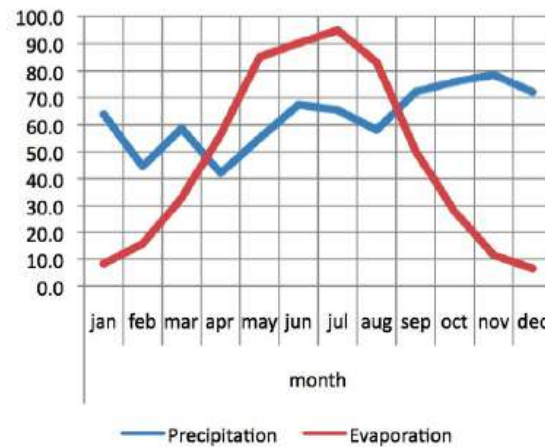
$$\Delta bs + \Delta bc = N + ES + S + L + I + WWTP - ET - IS - P - Q \quad (\text{A.2})$$

In deze formule zijn dezelfde drie hoofdtermen te onderscheiden. Het eerste gedeelte, de verandering in wateropslag, bestaat uit Δbs (grondopslag) en Δbc (oppervlaktewateropslag). Het tweede gedeelte, de inkomende waterfluxen, bestaat uit N (neerslag), ES (kwel), S (schutverlies), L (onderloopsheid of leakage), I (waterinlaat) en $WWTP$ (gezuiverd afvalwater). Het laatste gedeelte, de uitgaande fluxen, bestaat uit ET (verdamping), IS (wegzijging of neerwaartse kwel), P (productie van drinkwater) en Q (afvoer).

Teveel water in een polder wordt wateroverschot genoemd. Wateroverschot komt in de meeste polders het meest voor tussen 1 oktober en 31 maart. Dit komt doordat in de meeste polders neerslag het meest bepalend is voor het waterpeil in polder. Figuur A.2 toont in deze periode de neerslag groter is dan de verdamping. Doordat de inkomende waterfluxen groter zijn dan de uitgaande waterfluxen kan een wateroverschot ontstaan.

In sommige polders hebben naast neerslag, kwel en leakage rond constructies ook een grote invloed op de waterpeilen binnen een polder. Kwel kan worden onderverdeeld in diepe kwel en dijkkwel. Kwel treed op wanneer de grondwaterdruk zo hoog wordt, dat water bij de oppervlakte omhoog komt.

Wateroverschot in een polder zorgt ervoor dat het grondwaterpeil stijgt. Wanneer het grondwaterpeil hoger wordt dan het maaiveld spreken we van inundatie. Het verschil tussen het maaiveld en de waterstand wordt inundatiediepte genoemd. Als deze inundatie ongewenst is wordt er gesproken van wateroverlast.



Figuur A.2: Gemiddelde maandelijkse neerslag en verdamping per jaar in Nederland (periode 1971-2000)

De waterbalans kan worden gebruikt voor diverse modellen. Een voorbeeld van een model dat gebruik maakt van de waterbalans is het fluctuatiemodel. Dit model versimpelt de polder naar een watersysteem waarin alleen neerslag en verdamping optreden. Wateroverschot ontstaat wanneer meer neerslag (inkomende fluxen) dan verdamping (uitgaande fluxen) optreedt. Het wateroverschot resulteert vervolgens in inundatie. Volgens Schuetze (2011) kan met behulp van het fluctuatiemodel worden geconcludeerd uit Figuur A.2 dat tijdens de wintermaanden er een wateroverschot is van in totaal 313 mm en in de zomermaanden een watertekort van 122 mm. Hieruit wordt geconcludeerd dat in de zomer minimaal een opslag van 122 mm aan water beschikbaar moet zijn. Terwijl in de winter juist voldoende afvoercapaciteit beschikbaar moet zijn. Opgeslagen water uit de wintermaanden water kan worden gebruikt in de zomermaanden. Deze methode is echter een erge versimpeling van een polder en het klimaat. De meeste polders zijn onderhevig aan meer in- en uitgaande fluxen dan enkel neerslag en verdamping, daarnaast is het klimaat niet constant over het jaar en kan neerslag en verdamping grote verschillen hebben per dag. Hierdoor is de aanname dat er in de zomer een tekort aan 122 mm en in de winter overschot aan 313 mm niet realistisch. Deze methode kan wel gebruikt worden als eerste inschatting.

A.1.3. Polderafvoer

De run-off is bepalend voor de hoeveelheid water dat uit een polder moet worden gepompt. De run-off is de totale afvoer uit een drainagegebied. Op het laagste punt van het drainagegebied staat meestal een gemaal of andere uitlaatconstructie. De afvoer is afhankelijk van een aantal factoren. Factoren die deze ontwerpafvoer beïnvloeden zijn de helling van het drainage gebied, kwel, welke gewassen in het gebied worden verbouwd, wat de opslagcapaciteit is van de grond, de plantdichtheid en de afvoermethode. Enkele manieren om deze afvoer te bepalen zullen verder worden toegelicht.

The rationale methode

De rationale methode was ontwikkeld door Kuichling (1889, geciteerd door Thompson (2006)). Het is een simpele techniek voor het schatten van de ontwerpafvoer voor een drainagegebied in urbane gebieden. De rationale methode relateert de mogelijke run-off aan de intensiteit van de neerslag voor een vaste periode in een drainagegebied. De formule van de rationale methode is:

$$Q = C_u * C_i * A \quad (A.3)$$

In deze formule is Q de run-off afvoer, C_u de unit conversie-coëfficiënt, C de run-off-coëfficiënt, i de ontwerpneerslagintensiteit en A de oppervlakte van het drainagegebied. Deze relatie is uniek voor elk drainage

gebied en moet dus voor elk drainage gebied afzonderlijk bepaald worden.

Eenheidsafvoergolf

De eenheidsafvoergolf is een methode die ontwikkeld is door Sherman in 1932. De eenheidsafvoergolf is de directe afvoergolf ten gevolge van een vast volume van neerslag met een constante intensiteit, welke uniform over het drainagegebied valt. Meestal wordt aangenomen dat er 1 cm neerslag valt over het gehele gebied. Bij het maken van een eenheidsafvoergolf wordt aangenomen dat een drainagegebied lineair reageert. In realiteit zijn er bijna geen gebieden die lineair reageren, maar ondanks deze aanname zorgt de eenheidsafvoergolf alsnog over het algemeen voor representatieve waarden (Ramirez, 2000).

Aanbrengen van een statistische verdeling

Als een lange meetserie van de afvoer beschikbaar is, kan deze worden gebruikt om toekomstige afvoeren in te schatten. Dit wordt gedaan door statistische verdeling aan te brengen op de piekafvoeren uit de beschikbare data. Een nadeel van deze methode is dat enkel de piekafvoeren worden beschouwd. Het zou kunnen dat bij lage afvoeren een andere verdeling beter zou passen bij de data (Hoes en van de Giesen, 2018).

Drainageformules

De formule van Hooghoudt (1940) was de eerste drainageformule die rekening hield met grondwaterstromingen en werd voornamelijk gebruikt om een inschatting te maken van de drainage in een gebied. Deze formule is makkelijk te gebruiken en geeft het directe verband tussen de afvoer en het waterpeil tussen twee afvoerkanalen. Na publicatie van deze formule is er nog veel meer onderzoek gedaan naar drainageformules door onder Kraijenhoff van de Leur (1958), Zeeuw en Hellinga (1958) en Ernst (1978). Daarnaast zijn er ook (computer-) modellen ontwikkeld om de drainage van een gebied te bepalen door onder andere Wesseling (1991).

A.2. De watersysteemtoets

A.2.1. wateroverlastnormen

De waterschappen moeten elke zes jaar de watersysteemtoets uitvoeren. Deze toetsing wordt elke zes jaar herhaald, omdat in de toetsing de invloed van veranderingen in het watersysteem duidelijk kan worden gezien. In de watersysteemtoets wordt geëvalueerd of een polder nog voldoet aan de wateroverlastnormen. De wateroverlastnormen staan in Figuur A.3. De wateroverlastnormen zijn opgenomen in de provinciale verordeningen. Daarvoor waren de eisen onderdeel van het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW). Naast de wateroverlastnormen staan ook de klimaatscenario's van de KNMI die gebruikt moeten worden in de watersysteemtoets beschreven in de provinciale verordening.

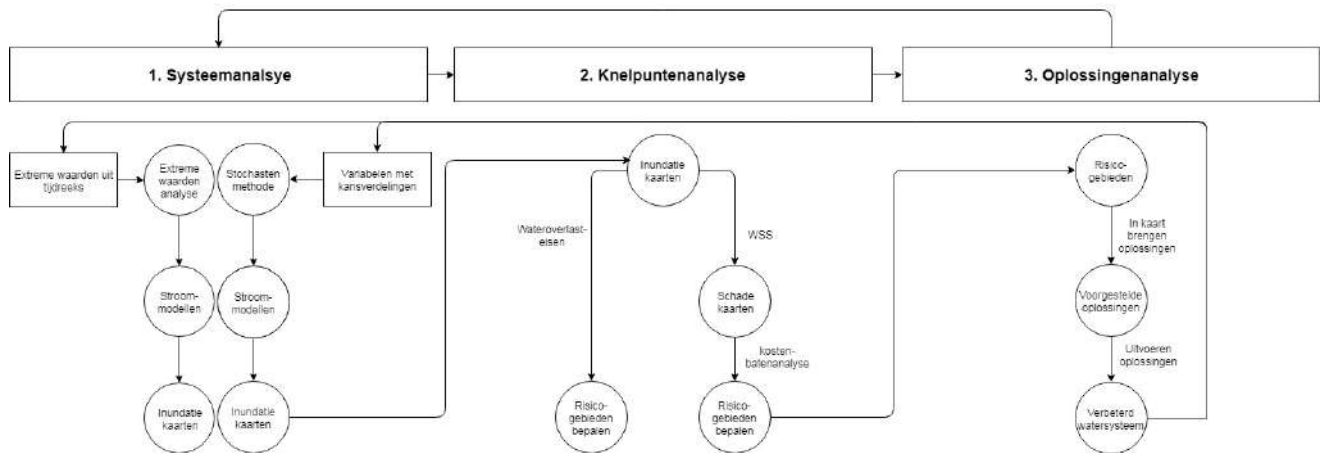
Artikel 2.3 Normen wateroverlast

- 1 Met het oog op de bergings- en afvoercapaciteit waarop regionale wateren moeten zijn ingericht, geldt binnen de bebouwde kom van een gemeente, zoals bedoeld in artikel 20 a van de Wegenverkeerswet 1994, als norm een overstromingskans van:
 - a. 1/100 per jaar voor gebieden die in een ruimtelijk plan bestemd zijn voor de doeleinden bebouwing, hoofdinfrastructuur en spoorwegen;
 - b. 1/10 per jaar voor overige gebieden.
- 2 Met het oog op de bergings- en afvoercapaciteit waarop regionale wateren moeten zijn ingericht, geldt buiten de bebouwde kom van een gemeente, zoals bedoeld in artikel 20 a van de Wegenverkeerswet 1994, als norm een overstromingskans van:
 - a. 1/100 per jaar voor gebieden met de ruimtelijke bestemming hoofdinfrastructuur en spoorwegen;
 - b. 1/50 per jaar voor glastuinbouw en hoogwaardige land- en tuinbouw;
 - c. 1/25 per jaar voor akkerbouw;
 - d. 1/10 per jaar voor grasland.
- 3 Voor bebouwing die is gelegen buiten de bebouwde kom geldt de norm van het omringende landgebruik, genoemd in het tweede lid, onder b, c of d, of de afwijkende norm op grond van het vierde lid.
- 4 In afwijking van het tweede lid geldt voor de gebieden buiten de bebouwde kom, zoals bedoeld in artikel 20 a van de Wegenverkeerswet 1994, aangegeven op bijlage II bij deze verordening geen norm, dan wel een hogere of een lagere norm.
- 5 Gedeputeerde Staten kunnen nadere regels stellen aangaande de toepassing van de voorgaande leden.
- 6 Gedeputeerde Staten kunnen een technische leidraad vaststellen voor de door het dagelijks bestuur te verrichten beoordeling van de bergings- en afvoercapaciteit van de regionale wateren. Deze strekt tot aanbeveling voor de beheerder.
- 7 Gedeputeerde Staten stellen na overleg met het dagelijks bestuur het tijdstip vast waarop de bergings- en afvoercapaciteit van de verschillende regionale wateren voldoet aan de in het eerste tot en met vierde lid opgenomen normen.

Figuur A.3: wateroverlastnormen provinciale verordening van Noord-Brabant (Provincie Noord-Brabant, 2018)

A.3. De watersysteemtoets

In 2012 publiceerde de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA), een standaard methode om de watersysteemtoets uit te voeren (Spijker, 2010). In deze richtlijn staat beschreven hoe de optredende waterpeilen binnen een polder kunnen worden bepaald. Deze waterpeilen worden vervolgens gecheckt met de wateroverlastnormen. Deze methode bestaat uit drie stappen. De eerste stap is de systeemanalyse, de tweede de knelpuntenanalyse en als laatste de oplossingenanalyse. De stappen staan afgebeeld in Figuur A.4.



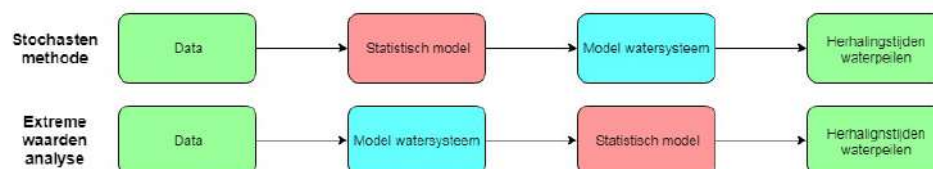
Figuur A.4: De watersysteemtoets

A.3.1. Systeemanalyse

In de eerste stap van de watersysteemtoets, de systeemanalyse, wordt het watersysteem beschouwd. Alle beschikbare informatie over het watersysteem wordt gecontroleerd en aangepast/aangevuld indien nodig. Daarnaast wordt de inundatie in een polder bepaald in deze stap.

In het meest linker gedeelte van Figuur A.4 staat de systeemanalyse. Deze bestaat uit drie stappen. De eerste stap is een analyse van de neerslagstatistiek. Deze neerslag leidt tot verschillende gemiddelde herhalings-tijden van neerslag in een polder. Deze informatie wordt in een stroommodel ingevoerd om de waterstanden in de polder uit te rekenen. De waterstanden worden dan verwerkt om de inundatiekaarten te verkrijgen. De meest gebruikte software met stroommodellen onder waterschappen is SOBEK (Spijker, 2010).

De analyse van de neerslagstatistiek kan op drie verschillende manieren worden uitgevoerd. Deze zijn de stochastenmethode, de tijdreeksmethode en de extreme waarden analyse. Bij de stochastenmethode wordt de statistiek toegepast op de input van het model, terwijl bij de tijdreeksmethode de statistiek wordt toegepast op de output van het model. Bij de extreme waarden analyse wordt de statistiek direct toegepast op de data zonder gebruik te maken van een model. In Figuur A.5 is het verschil tussen de stochastenmethode en de extreme waarden analyse weergegeven.



Figuur A.5: Verschil tussen de stochastenmethode en extreme waarden analyse (Gebaseerd op een Figuur van Bossenbroek (2004))

In de extreme waarden analyse wordt de gemiddelde herhalings-tijd van een variabele geschat. In deze analyse wordt een meetserie beschouwd van bijvoorbeeld neerslag/verdamping, waterpeilen of afvoeren. Door een statistische verdeling te passen op de extreme waarden van de meetserie worden de gemiddelde herhalings-tijden van de waterpeilen in een polder bepaald. De gemiddelde herhalings-tijden worden vervolgens geëxtrapoleerd.

De extreme waarden in de analyse kunnen op twee verschillende manieren worden bepaald. De eerste methode is the peak over threshold methode (POT) en de tweede is de methode van periodieke maxima. Bij de POT-methode wordt gebruikgemaakt van een drempelwaarde. Elke waarde die groter is dan deze drempelwaarde, wordt meegenomen in de analyse. Om ervoor te zorgen dat niet twee waarden uit dezelfde gebeurtenis worden geselecteerd kan er een minimaal interval tussen twee waarden worden gekozen. Voor de methode van periodieke maxima wordt een vaste periode gekozen, bijvoorbeeld een jaar of een hydrologisch jaar (1 okt- 30 sept). De meest extreme waarde uit deze periode worden gebruikt in de analyse. Een

nadeel van deze methode is dat het zou kunnen voorkomen dat twee extreme gebeurtenissen in het zelfde jaar optreden. In dat geval mist er een extreme waarde in de analyse (Benninga, 2013).

De statistische verdeling die wordt gebruikt op de extreme waarden hangt af van de manier waarop de extreme waarden zijn bepaald. Bij het gebruik van de POT-methode wordt een generaliseerde pareto verdeling (GPV) gebruikt (Bossenbroek, 2004). Bij de methode van periodieke maxima wordt de generaliseerde extreme waarden verdeling (GEW) gebruikt. De Gumbel, Frechet en Weibull verdeling zijn GEW-verdelingen en de Pareto en exponentiële verdeling zijn GPV-verdelingen. Om te bepalen welke van deze verdelingen het best past op de data kunnen de maximum-waarschijnlijkheid, de momentenmethode of de kans gewogen momenten worden gebruikt.

Bij de stochastenmethode wordt de statistiek toegepast op de input van het model. De variabelen die worden meegenomen in deze analyse zijn variabelen die het waterpeil beïnvloeden en (sterk) variëren over de tijd. Voorbeelden van deze variabelen zijn de hoeveelheid neerslag, de neerslagduur, de neerslagverdeling, de luchtvochtigheid en het initiële grondwaterpeil. Voor elk van de variabelen wordt een kansverdeling opgesteld. Vervolgens worden de waterpeilen ontstaan door combinaties van de verschillende variabelen berekend met een hydrologisch model. De gemiddelde herhalingstijden van het waterpeil in de polder wordt berekend door alle kansen van de verschillende variabelen met elkaar te vermenigvuldigen. In deze methode wordt aangenomen dat alle variabelen onafhankelijk zijn van elkaar. Doordat er veel mogelijke combinaties zijn worden over het algemeen niet alle opties gemodelleerd, maar worden de variabelen verdeeld in klassen en wordt er van elke klasse één representatieve waarde gekozen (Bosch et al., 2006).

Deze twee methoden zijn door diverse onderzoek vergeleken, onder andere door Bossenbroek (2004), Benninga (2013) en Velner en Spijker (2011). Uit al deze onderzoeken komt naar voren dat beide methoden voor- en nadelen hebben en dat de voorkeur voor de methode varieert.

Een voorbeeld van een onderzoek waarin duidelijk de voor- en nadelen van beide methoden naar voren komen, is gedaan door De Graaf en Versteeg (2000). In dit onderzoek zijn de twee methoden vergeleken aan de hand van vier criteria: berekening overschrijdingsfrequenties, inzicht in faalmechanismen, gegevensbehoefte en toepassingsmogelijkheden klimaatscenario's. De stochastenmethode scoorde bij drie van de vier punten hoger dan de extreme waarden analyse. De stochastenmethode geeft meer realistische waarden in het geval van extreme gebeurtenissen, omdat in de stochastenmethode de systeemwerking wordt meegenomen. Dit is belangrijk, omdat het gedrag van een watersysteem meestal anders is bij een extreme gebeurtenissen dan bij een gemiddelde gebeurtenis. De extreme waarde analyse daarentegen maakt geen gebruik van systeemeigenschappen. Daarnaast geeft de stochastenmethode een beter inzicht in de faalmechanismen. Het is relatief makkelijk om te bepalen welke factoren de gemiddeld herhalingstijden beïnvloeden en welke niet met deze methode. De reden hiervoor is dat deze factoren losse variabelen zijn in het model. In de extreme waarden analyse worden minder losse factoren meegenomen in het model, waardoor er minder inzicht is in de verschillende faalmechanismen en hun invloed. De derde factor waarop de stochastenmethode beter scoort is het meenemen van verschillende klimaatscenario's. In de extreme waarden analyse moet de gehele meetserie worden aangepast aan het nieuwe klimaatscenario en het gehele model opnieuw worden doorge-rekend, gevolgd door een extrapolatie. Dit is een erg tijdrovend proces. Terwijl bij de stochastenmethode enkel de kansverdelingen van de neerslag aangepast moet worden. Hierdoor hoeft niet het volledige model opnieuw worden doorge-rekend. Het criterium waar de extreme waarden analyse beter scoort is de benodigde data. Voor beide methoden is het nodig om meetseries van jaren te hebben, echter bij de stochastenmethode worden meer verschillende factoren gemodelleerd. Elk van deze factoren heeft een eigen onzekerheid, omdat niet altijd alle informatie over elke losse factor bekend is.

Bij de meeste waterschappen wordt het falen van gemalen niet meegenomen in de watersysteemtoets, ongeacht welke methode gebruikt wordt. Sommige waterschappen nemen in die berekeningen wel het falen van boezemgemalen mee. Het waterschap Rijnland maakt gebruik van de stochastenmethode en neemt het falen van boezemgemalen mee. In het gebied van Rijnland zijn vier boezemgemalen aanwezig en ongeveer 420 poldergemalen (Hoogheemraadschap van Rijnland, 2013). Voor het boezemgemaal station Katwijk is in 2014 een uitgebreide faalanalyse gedaan. Deze informatie is gebruikt om een faalkansverdeling te maken die gebruikt is in de stochastenmethode. Aangenomen is dat de andere drie gemalen; Gouda, Spaarndam en Halfweg, dezelfde faalkansverdeling hebben (HydroLogic BV, 2016).

De data uit de extreme waarden analyse of de stochastenmethode wordt gebruikt als invoer voor een stroommodel om inundatiekaarten te maken. het model dat bij veel waterschappen wordt gebruikt is SOBEK.

A.3.2. Knelpuntenanalyse

De volgende stap in de watersysteemtoets is de knelpuntenanalyse. In deze stap wordt gekeken of de bepaalde inundaties uit de systeemanalyse een probleem vormen. Dit wordt gedaan door te kijken naar het landgebruik op de geïnundeerde plekken. Er wordt gekeken of het gebied aan de wateroverlastnormen voldoen die staan gepresenteerd in Figuur A.3. In het geval dat de inundatie vaker voorkomt dan toegestaan volgens de wateroverlastnormen wordt dit gebied aangeduid als een knelpunt.

De meeste waterschappen doen behalve de officiële toetsing aan de wateroverlastnormen ook een risicoanalyse. In deze analyse is risico gedefinieerd als $\text{risico} = \text{kans} * \text{gevolgen}$. Een risicoanalyse geeft inzicht in de kosten en baten van het verbeteren van het watersysteem. Het waterschap kan dan onderbouwd beslissen of het nuttig is om te investeren in maatregelen tegen wateroverlast in een bepaald gebied.

Een hulpmiddel dat in Nederland onder andere wordt gebruikt voor het inschatten van gevolgen van wateroverlast is de WaterSchadeSchatter. De WaterSchadeSchatter heeft meerder schadecurves bij de inundatiediepte die afhankelijk zijn van het landgebruik. Door deze te combineren met hoogtekarten (AHN2/AHN3) en landgebruikskarten kan er een inschatting worden gemaakt van de schade die optreedt door wateroverlast. De landgebruikskarten in de WaterSchadeSchatter zijn een combinatie van vier verschillende karten: de Basisregistratie Adressen en Gebouwen (BAG), TOP10NL, CBS bodemgebruik en het landelijk grondgebruiksbestand Nederland van Alterra (LGN6). De resulterende kaart in de WaterSchadeSchatter heeft een resolutie van 0.5m x 0.5m. De WaterSchadeSchatter gebruikt de volgende formule voor het inschatten van de schade door inundatie:

$$Damage = max.directeschade * \gamma_{diepte} * \gamma_{duur} * \gamma_{seizoen} + indirecteschadeperdag * herstelltijd \quad (A.4)$$

In Formule A.4 is duidelijk te zien dat er door de WaterSchadeSchatter een onderscheidt wordt gemaakt tussen directe en indirecte schade. In de WaterSchadeSchatter worden de schades geschat aan de hand van reparatiekosten. Er kan worden gekozen voor lage, gemiddelde en hoge kosten (Hoes et al., 2013).

Een andere methode die vaak in Nederland wordt gebruikt voor het inschatten van schade door inundatie is de standaard methode 2017 (SSM2017), voorheen HIS-SSM. Deze methode is ontwikkeld om schades te berekenen bij grote overstroming en dus bij grote inundatiedieptes. Deze methode is daarom het meeste geschikt voor overstromingen vanuit de rivieren of de zee. Het is echter mogelijk om deze methode aan te passen en te gebruiken voor het berekenen van de schade die optreedt door kleinere inundatiedieptes. Deze methode maakt gebruik van de CBS bodemgebruikskarten 2008. Aan deze kaart zijn gemalen en zuiveringen toegevoegd, gebaseerd op informatie uit het waterstaatkundig informatiesysteem (WIS). Het aantal inwoners per cel is gebaseerd op waarden uit CBS Wijken- en buurten en het aantal auto's is het aantal inwoners vermenigvuldigd met 0.42. Als laatste wordt rekening gehouden met kwetsbare objecten, nationale monumenten, IED-installaties en beschermde gebieden die staan aangeduid in het Kaderrichtlijnwater (KRW). De resulterende resolutie van deze methode is 5m x 5m. Een van de redenen dat deze methode minder geschikt is voor het schatten van schades in polders is dat in de berekeningen uit wordt gegaan van zout water. Zout water geeft meer schade aan bijvoorbeeld landbouwgrond dan zoet water, hierdoor worden schades overschat met deze methode (Slager en Wagenaar, 2017).

A.3.3. Oplossingen

In de laatste stap van de watersysteemtoets worden mogelijke oplossingen gezocht voor de risicogebieden die in de knelpuntenanalyse zijn bepaald. Oplossingen kunnen een verbetering van het systeem zijn (verlaging van de kans van optreden) of het landgebruik van het gebied kan worden aangepast (verlaging van de wateroverlastnormen en gevolgen). Beide manieren zullen zorgen voor een verlaging van het risico. Voor deze stap in de watersysteemtoets is geen standaard methode beschikbaar.

A.4. Conclusies literatuur

Naar het falen van (grote) gemalen is onderzoek gedaan in de vorm van betrouwbaarheidsstudies. Bij deze onderzoeken gaat het echter altijd om individuele gemalen en is geen onderzoek gedaan naar hoe er een schatting kan worden gedaan van de faalkans op een snelle en generieke manier.

De watersysteemtoets wordt gebruikt door de waterschappen om te controleren of het watersysteem nog voldoet aan de wateroverlastnormen uit de provinciale verordening. De watersysteemtoets bestaat uit drie stappen, binnen deze stappen kan een aanpak worden gekozen door de waterschappen. De grootste keuze die hierin gemaakt moet worden is of het waterschap gebruik wilt maken van de stochasten methode, de extreme waarden analyse of de tijdsreeksmethode. Er is veel onderzoek gedaan naar de verschillende aanpakken en hun toepassing.

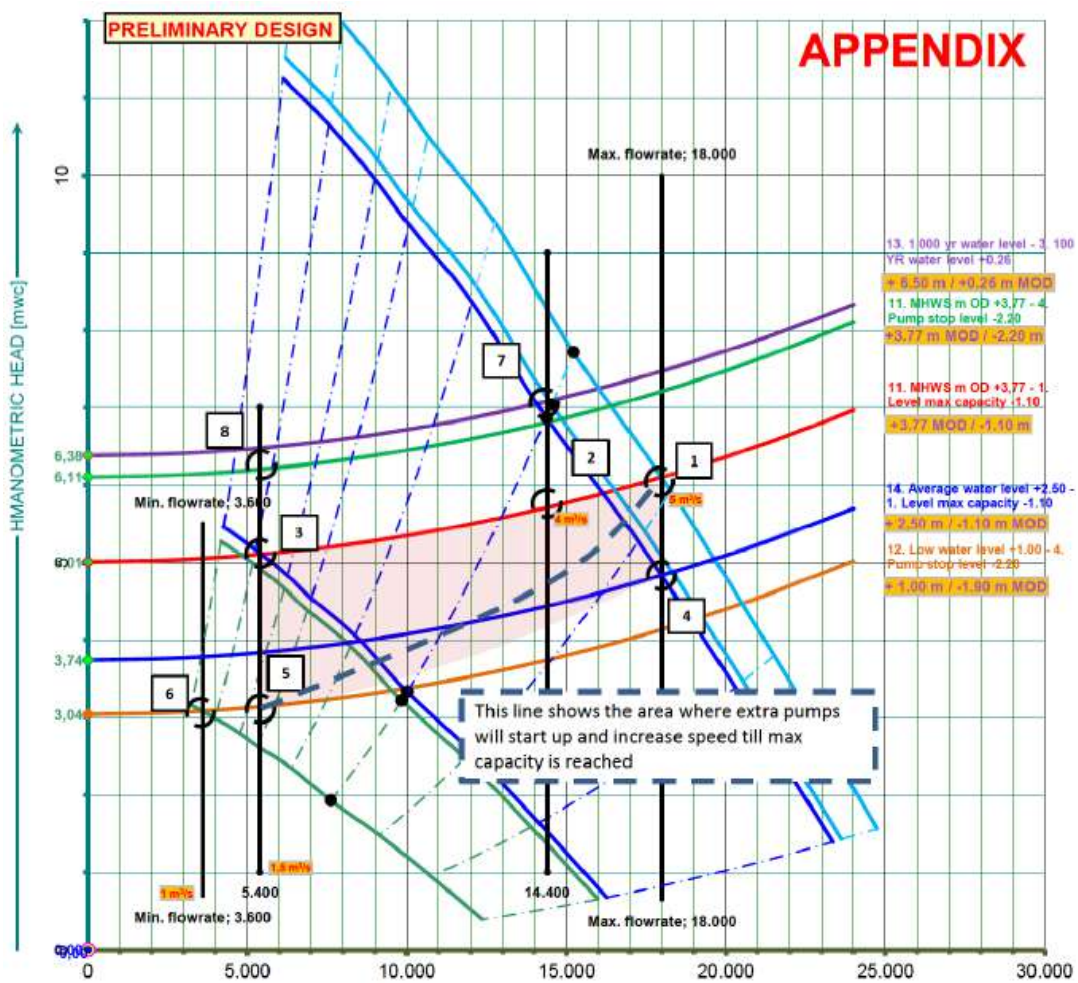
Er zijn verschillende manieren voor het modelleren van het watersysteem. De meeste waterschappen maken gebruik van het programma SOBEK.

Voor het inschatten van de schades in het watersysteem door inundatie zijn verschillende methoden beschikbaar. Veel gebruikte methoden in Nederland zijn de WaterSchadeSchatter en de standaard methode 2017. Hiervan is de WaterSchadeSchatter het meest geschikt voor het inschatten van schade door kleine inundatiedieptes. In polders wordt wateroverlast voornamelijk veroorzaakt door neerslag. Dit resulteert in het algemeen in kleine inundatiedieptes waardoor deze methode het best gebruikt kan worden voor het inschatten van schades in polders.

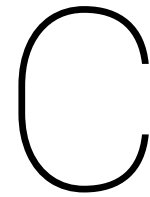
In de watersysteemtoets wordt op dit moment het falen van poldergemalen niet meegenomen. Enkele waterschappen nemen wel het falen van boezemgemalen in beschouwing. Er is nog geen onderzoek gedaan naar de gevolgen van het falen van poldergemalen voor het watersysteem. Hierdoor kan er slecht worden ingeschat of het falen van gemalen moet worden meegenomen in de watersysteemtoets.

B

Pompcurves



Figuur B.1: Praktijkvoorbeeld werkgebied pomp (van Beveren en Krutwagen, 2018)



Pompspecificaties casestudies

C.1. Middelschans

Gemaal Middelschans (GeoWeb: KGM00071, TMX: 1038)

Locatie: Geertruidenberg

Bouwjaar: 1979

Functie: Afvoergemaal

Draaiuren: 3982

Capaciteit: 30 m³/min

Aantal pomp(en): 1

Soort: Schroef- of axiaal pomp

Pomp: Onderwater propeller pomp PL 7050 – Flyght

Lage toeren: 609 rpm/ 42 Hz/ 26 m³/min

Hoge toeren: 725 rpm/ 50 Hz/ 30 m³/min

Aantal elektromotor(en):1

Elektromotor: module 35-24

Type: 8 AA

Vermogen: 27 kW

I: 50 A

U: 400 V

Aantal frequentie omvormer(s): 1

Frequentie omvormer: Sami GS- ABB

Aantal vacuümpomp(en): 1

Vacuüm pomp: 92 M 355- Flygt

Toeren: 1450 rpm/ 4 kW

Elektromotor vacuümpomp: SG 112 M4 - Stork

Vermogen: 4 kW

I: 8.9 A

U: 400 V

Overige onderdelen: Vacuümklep, vlinderklep, terugslagklep, krooshekreiniger, telemetrie besturing, polderpeilmeter, krooshekpeilmeter, droogloopbeveiliging

C.2. Plukmade

Gemaal Plukmade (GeoWeb: KGM00072, TMX: 1090)

Locatie: Made - Drimmelen

Bouwjaar:

Functie: Afvoergemaal
Draaiuren: 1241
Capaciteit: 60 m³/min

Aantal pomp(en): 1
Soort: Schroef centrifugaal- of halfaxiaal pomp
Pomp: 55 III 314 – BVOP of Bosman
Lage toeren: 529 rpm/ 30,5 Hz/ 30 m³/min
Hoge toeren: 637,6 rpm/ 35,5 Hz/ 45 m³/min

Aantal vacuümpomp(en): 2
Vacuümpomp: Sterling Fluid Systems BV.
Toeren:
Elektromotor vacuümpomp:
Vermogen:
I:
U:

Aantal elektromotor(en):1
Elektromotor: 735 omw/min - Leroy Somer
Type: S315MT
Vermogen: 75 kW
I: A
U: 400-690 V

Aantal frequentie omvormer(s): 1
Frequentie omvormer: VT230S-055H

Overige onderdelen: Vlinderklep, terugslagklep, krooshekreiniger, telemetrie besturing, droogloopbeveiliging

C.3. Tonnekreek

Gemaal Tonnekreek (GeoWeb: KGM00214, TMX: 7117)
Locatie: Tonnekreek
Bouwjaar: 1962
Functie: Afvoergemaal
Draaiuren:
Capaciteit: 364,8 (origineel: 2x 170) m³/min

Aantal pomp(en): 2
Soort: schroef centrifugaal- of halfaxiaal pomp
Pomp: BSV 130 - Stork
Toeren: 176 rpm/ 2.9 Hz/170 m³/min
Nagemeten: 172 rpm/ 160 m³/min/ 115 kW (1997)

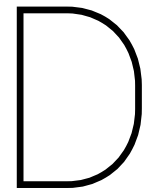
Aantal elektromotor(en):2
Elektromotor: Leroy - Somer
Type: P315 VLG 10
Vermogen: 132 kW
I: 300 A
U: 380 V

Aantal elektromotor(en):2
Elektromotor: K11R 355 M8 – VEM
Vermogen: 200 kW

Vollast toerental: 740 omw/min
Werkgebruik: 650-500 omw/min
I: 392 A
U: 3x400 V
Fr: 50 Hz

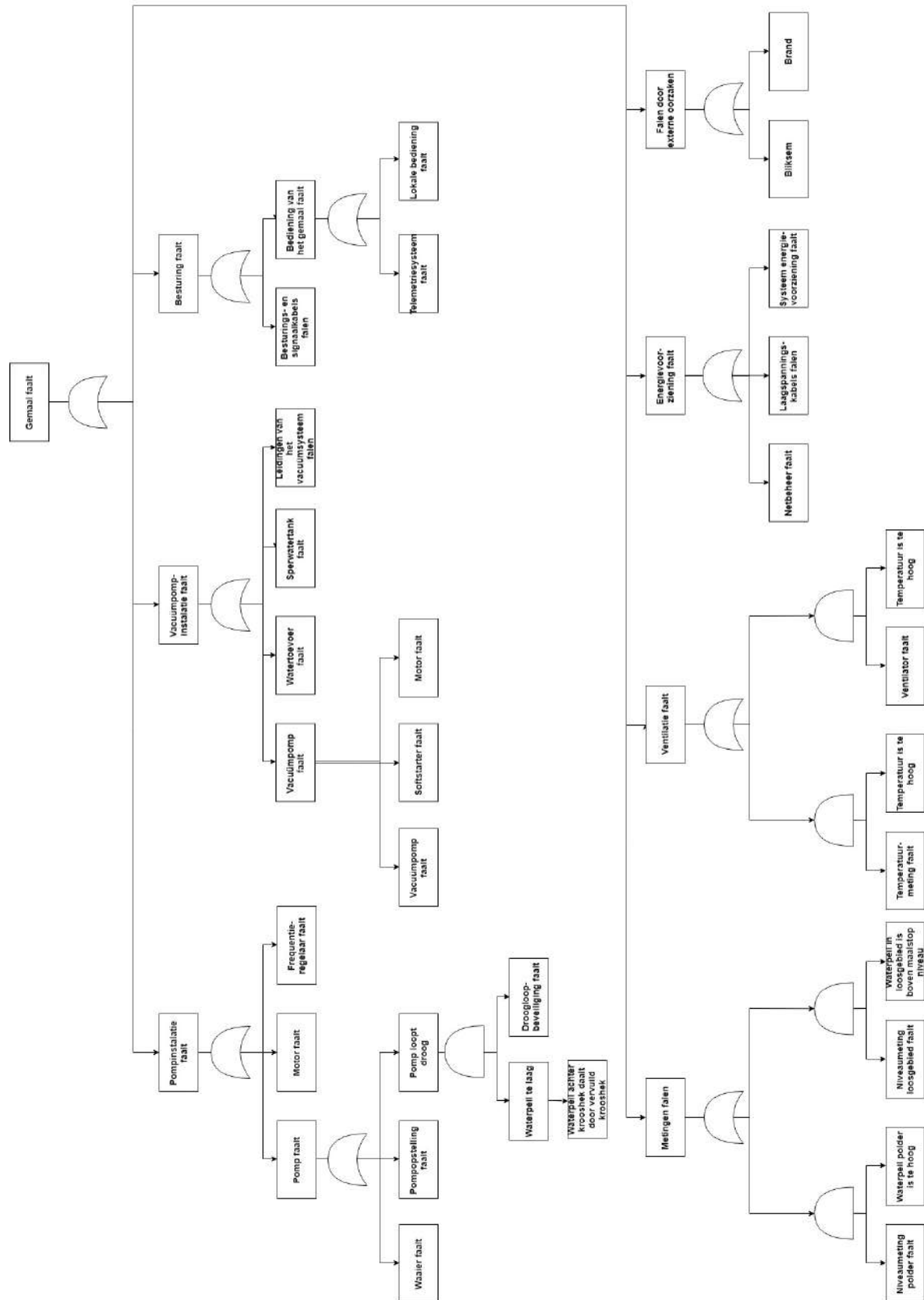
Aantal frequentie omvormer(s): 1 (alleen pomp 1)
Frequentie omvormer:

Overige onderdelen: vlinderklep, terugslagklep, krooshekreiniger, telemetrie besturing, polderpeilmeter, krooshekpeil-
meter, vetpomp, droogloopbeveiliging

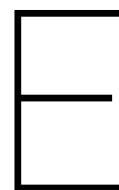


Uitgebreide faalboom gemalen

In Figuur D.1 is de meer gedetailleerde versie van de faalboom in Figuur 4.1 weergegeven.



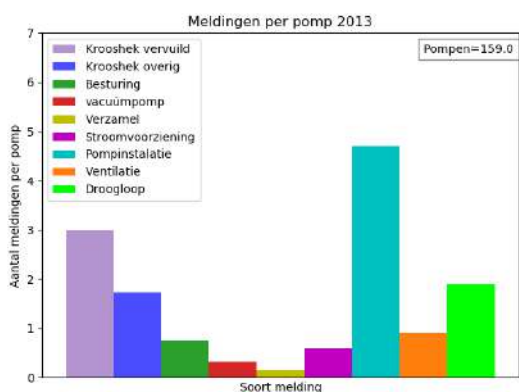
Figuur D.1: Faalboom gemalen met één pomp en één vacuumpomp gebaseerd op van der Sanden (2014)



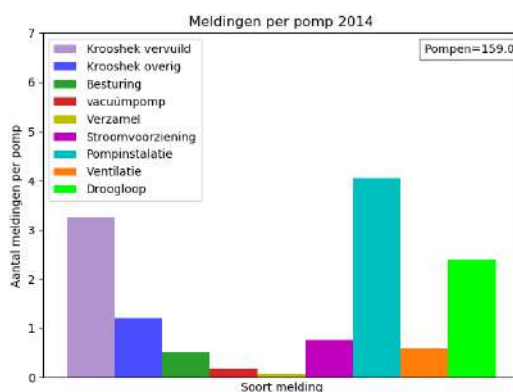
Analyse TMX meldingen

In dit hoofdstuk zijn alle resultaten van de analyse van de storingsmeldingen van TMX weergegeven. De data die is geanalyseerd is van 2013 tot en met 2018.

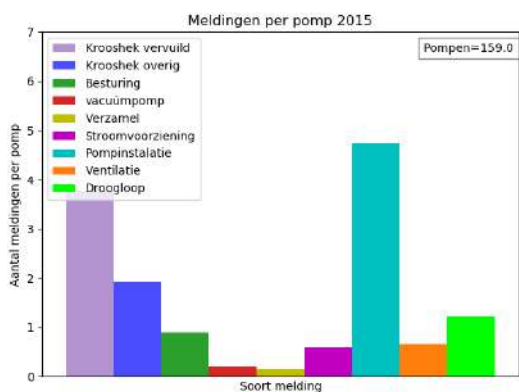
E.1. Totaal aantal meldingen per jaar



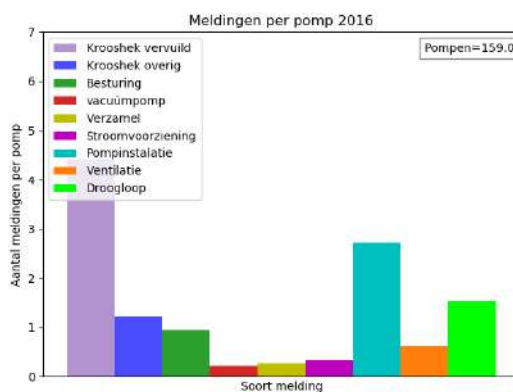
Figuur E.1: Aantal TMX melding 2013 per faalcategorie



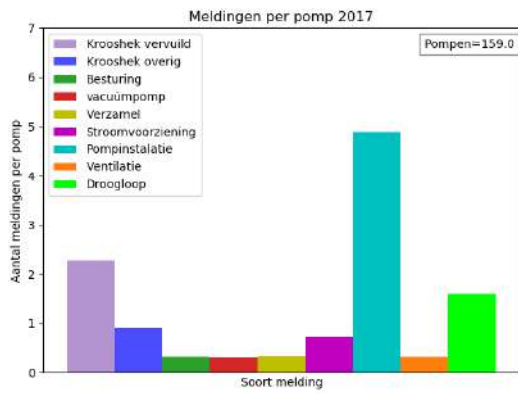
Figuur E.2: Aantal TMX melding 2014 per faalcategorie



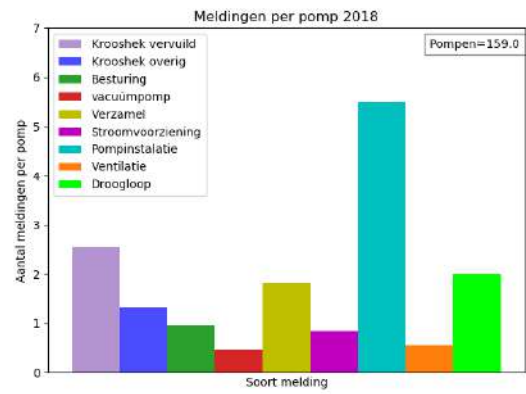
Figuur E.3: Aantal TMX melding 2015 per faalcategorie



Figuur E.4: Aantal TMX melding 2016 per faalcategorie

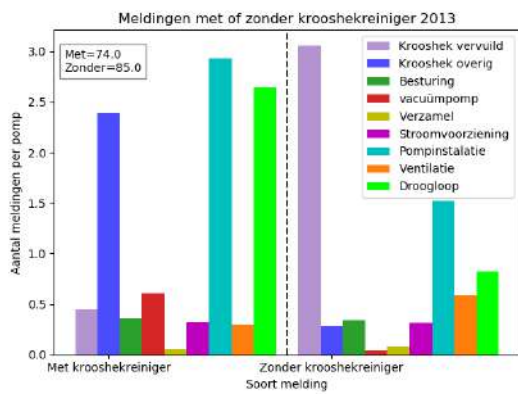


Figuur E.5: Aantal TMX melding 2017 per faalcategorie

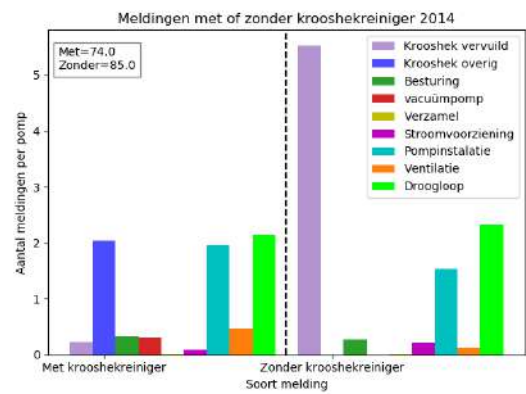


Figuur E.6: Aantal TMX melding 2018 per faalcategorie

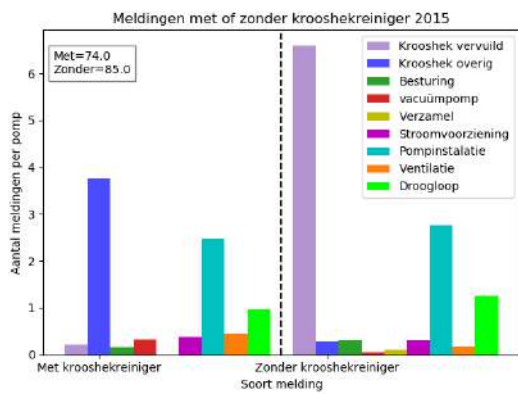
E.2. Met of zonder krooshekreiniger



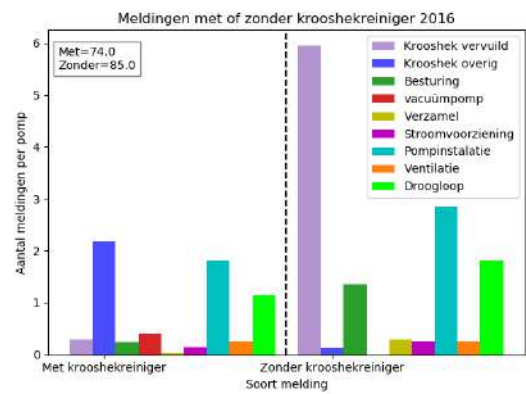
Figuur E.7: Aantal TMX melding 2013 per faalcategorie



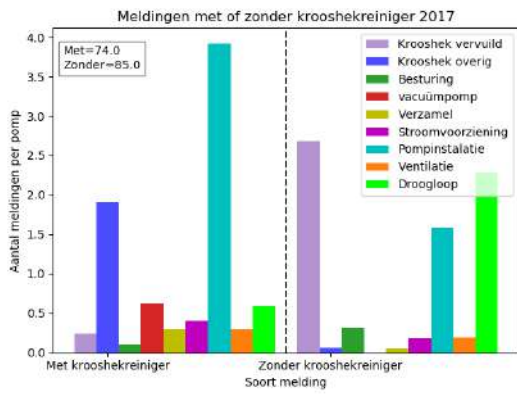
Figuur E.8: Aantal TMX melding 2014 per faalcategorie



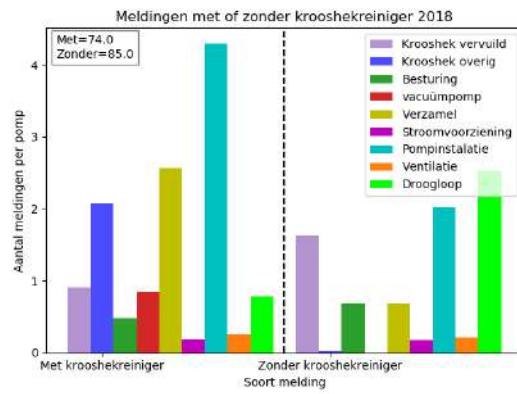
Figuur E.9: Aantal TMX melding 2015 per faalcategorie



Figuur E.10: Aantal TMX melding 2016 per faalcategorie

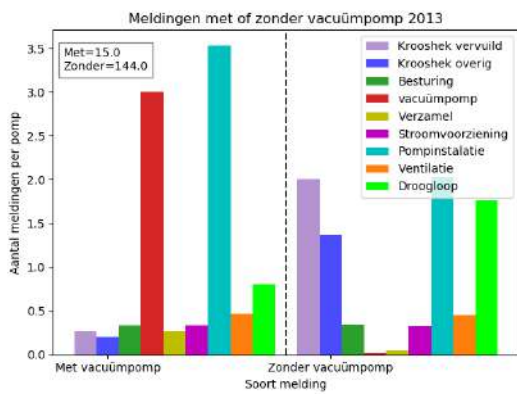


Figuur E.11: Aantal TMX melding 2017 per faalcategorie

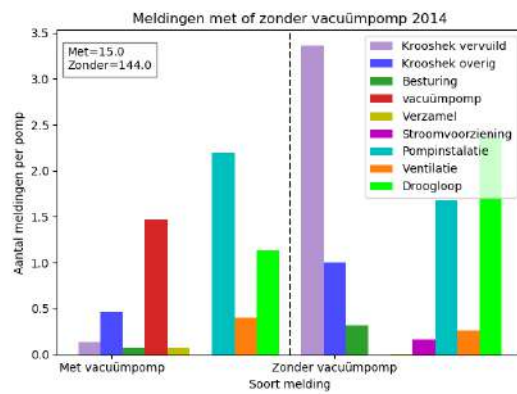


Figuur E.12: Aantal TMX melding 2018 per faalcategorie

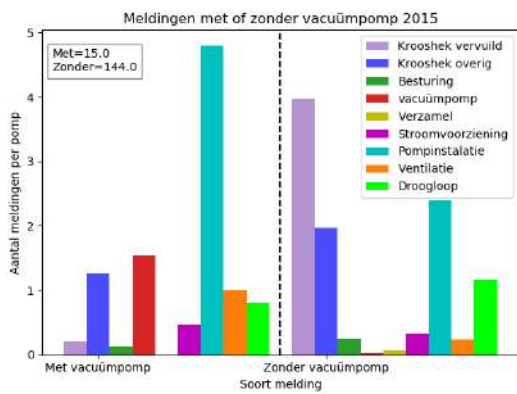
E.3. Met of zonder vacuümpomp



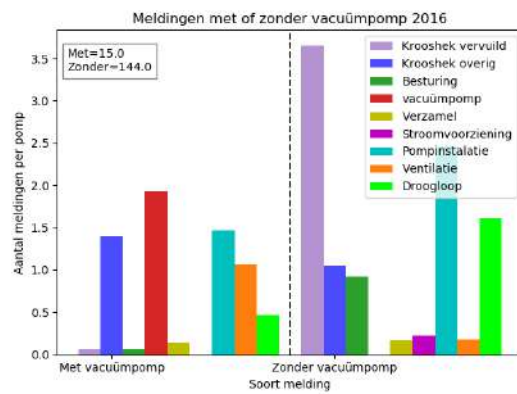
Figuur E.13: Aantal TMX melding 2013 per faalcategorie



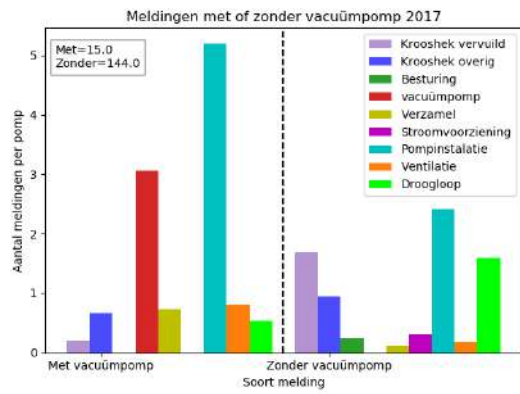
Figuur E.14: Aantal TMX melding 2014 per faalcategorie



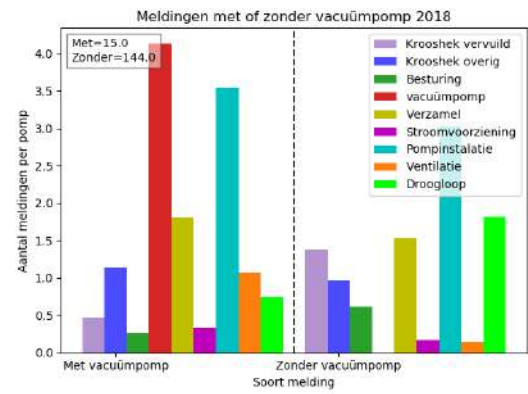
Figuur E.15: Aantal TMX melding 2015 per faalcategorie



Figuur E.16: Aantal TMX melding 2016 per faalcategorie

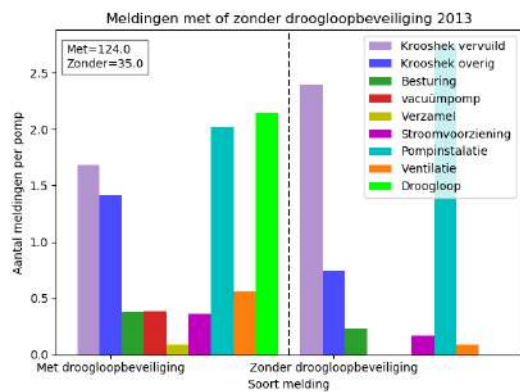


Figuur E.17: Aantal TMX melding 2017 per faalcategorie

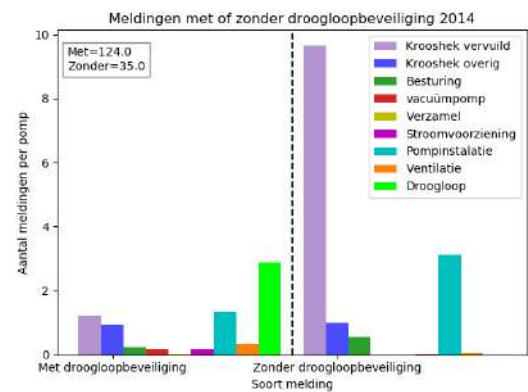


Figuur E.18: Aantal TMX melding 2018 per faalcategorie

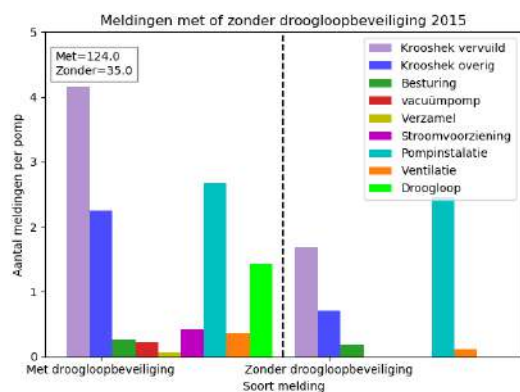
E.4. Met of zonder droogloopbeveiliging



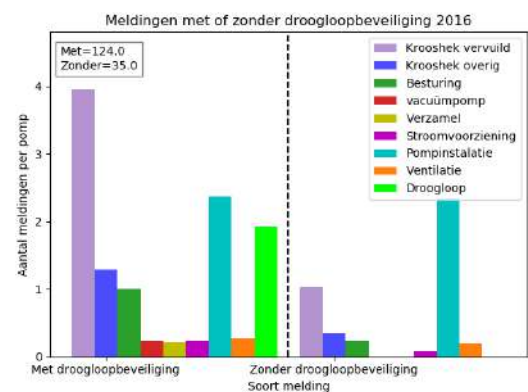
Figuur E.19: Aantal TMX melding 2013 per faalcategorie



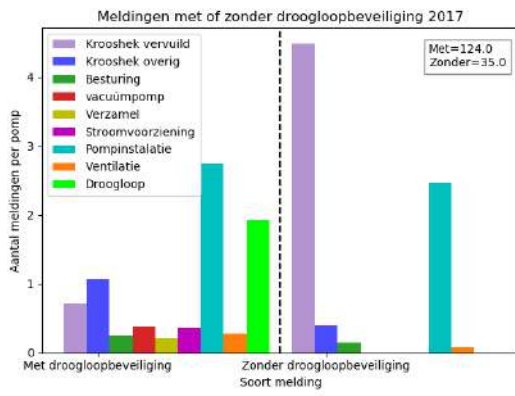
Figuur E.20: Aantal TMX melding 2014 per faalcategorie



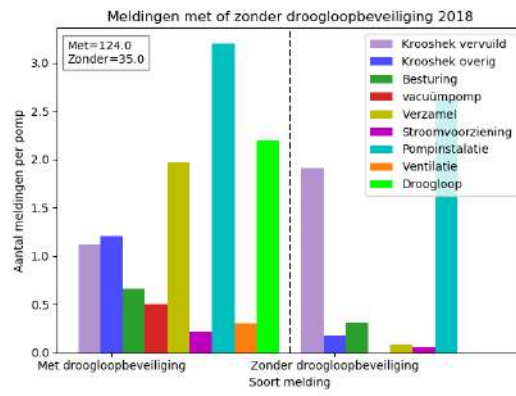
Figuur E.21: Aantal TMX melding 2015 per faalcategorie



Figuur E.22: Aantal TMX melding 2016 per faalcategorie

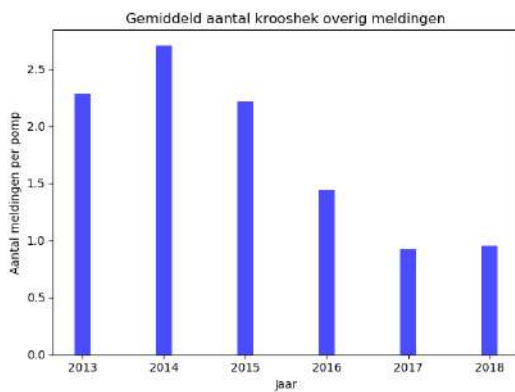


Figuur E.23: Aantal TMX melding 2017 per faal categorie

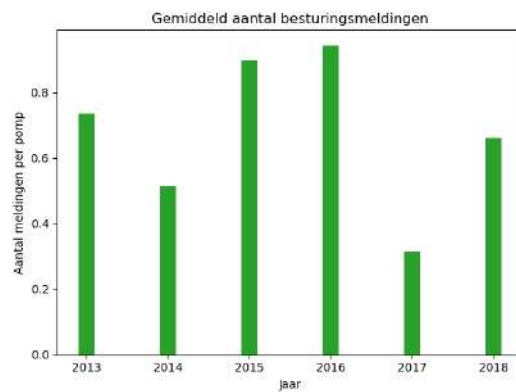


Figuur E.24: Aantal TMX melding 2018 per faal categorie

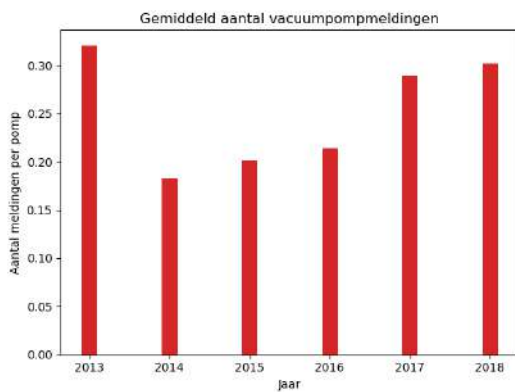
E.5. Per faal categorie



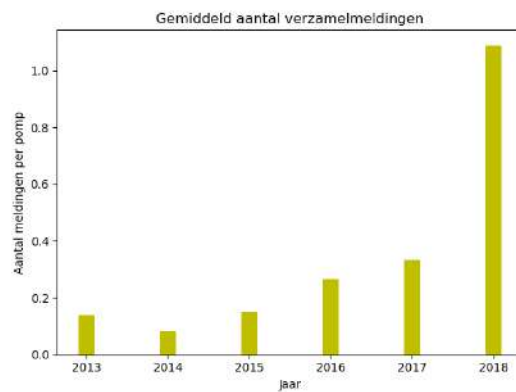
Figuur E.25: Aantal TMX meldingen krooshek overig



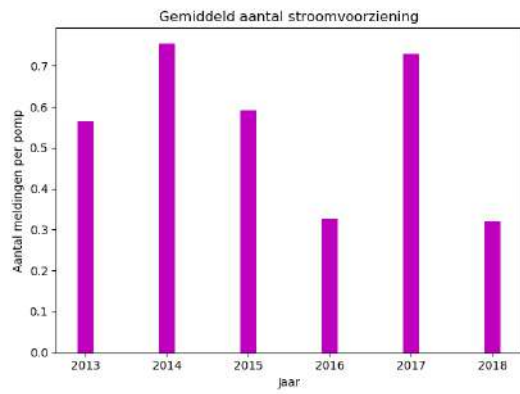
Figuur E.26: Aantal TMX melding besturing



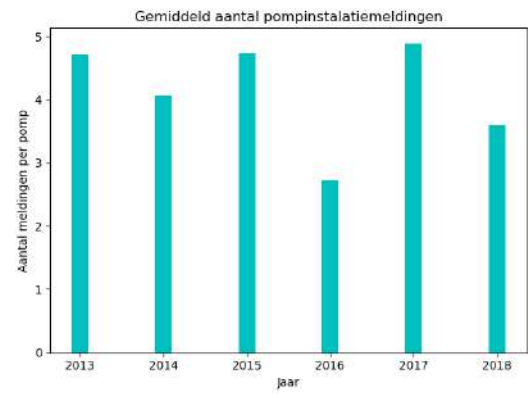
Figuur E.27: Aantal TMX meldingen vacuümpomp



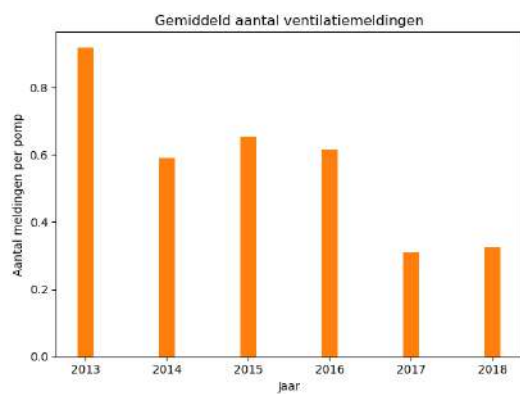
Figuur E.28: Aantal TMX melding verzamel



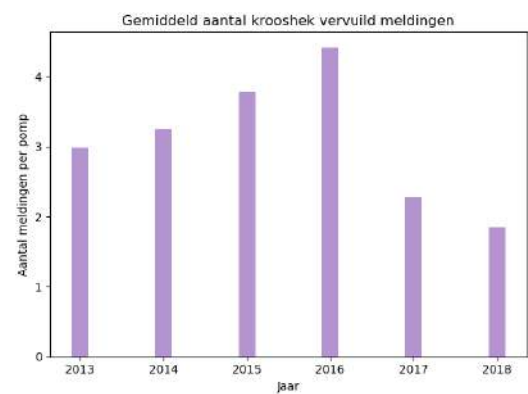
Figuur E.29: Aantal TMX meldingen stroomvoorziening



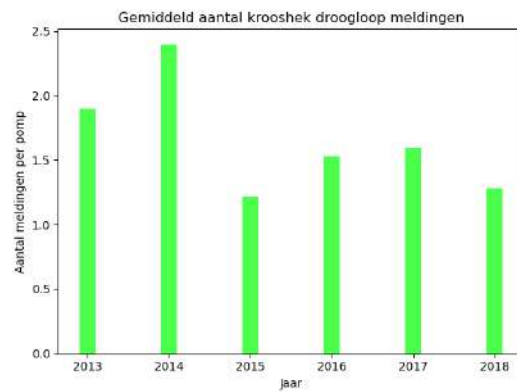
Figuur E.30: Aantal TMX melding pompinstallatie



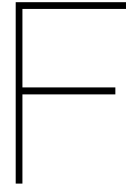
Figuur E.31: Aantal TMX meldingen ventilatie



Figuur E.32: Aantal TMX meldingen krooshek vervuild



Figuur E.33: Aantal TMX meldingen droogloop



Sobek Modelling

F.1. SOBEK algemeen

SOBEK is een softwarepakket uitgegeven door Deltares. Het software pakket wordt gebruikt voor 1D/2D modelleringen van waterstromen.

F.1.1. Modules

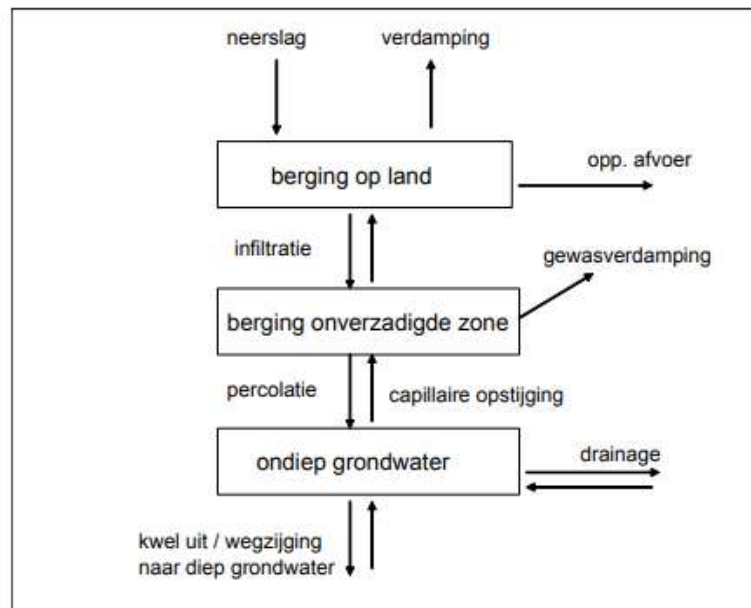
In het softwarepakket SOBEK zijn drie modules te onderscheiden. Deze zijn SOBEK-rural, SOBEK-Urban en SOBEK-River. SOBEK-rural wordt voornamelijk gebruikt voor de modellering van irrigatie, drainage, reservoirs en kanaalsystemen. SOBEK-urban wordt gebruikt voor stedelijke gebieden. Stedelijke afvoeren kunnen hierin worden gemodelleerd inclusief zuiveringsplanten, overstorten en riolering. SOBEK-River wordt voornamelijk gebruikt voor rivieren. Hierin wordt ook rekening gehouden met navigatie, zoet/zout water, morfologie en waterkwaliteit. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de SOBEK-rural module.

F.1.2. Afvoer knopen

In sobek is het mogelijk om afvoerende oppervlakten te modelleren als verschillende knopen. Deze zijn unpaved, paved, greenhouse, SCS, HBV en Sacramento. SCS, HBV en Sacramento zijn niet relevant voor dit onderzoek en zullen dus niet verder worden toegelicht. De unpaved, paved en greenhouse knopen zullen hier nader worden toegelicht.

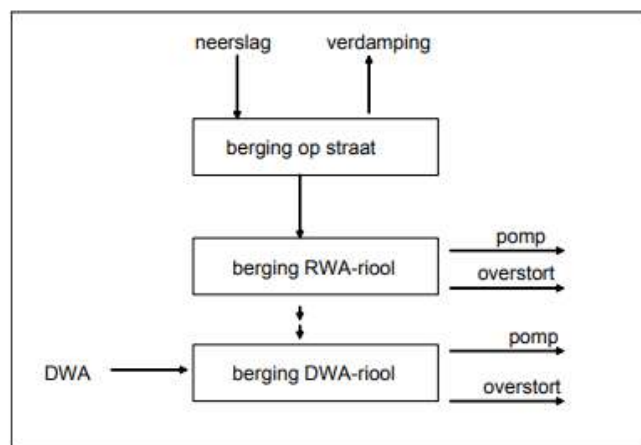
In Figuur F1 kan worden gezien hoe in sobek-RR een unpaved knoop wordt gemodelleerd. Een unpaved knoop wordt gebruikt voor het modelleren van een onverhard gebied. In een unpaved knoop worden berging op het land, in de onverzadigde zone en in het ondiepe grondwater van elkaar onderscheidt. De maximale waarden voor berging op land [mm], infiltratie [mm/uur], kwel [mm/dag], drainage formule en bijbehorende parameters, de grondsoort en het landgebruik kunnen worden ingevoerd. De verdamping is afhankelijk van het landgebruik en dan vooral of en wat voor soort gewassen er worden verbouwd.

Er zijn drie verschillende drainage formules die kunnen worden gebruikt voor een unpaved knoop. Deze zijn De Zeeuw-Hellinga, Ernst en Krayenhoff van de Leur.



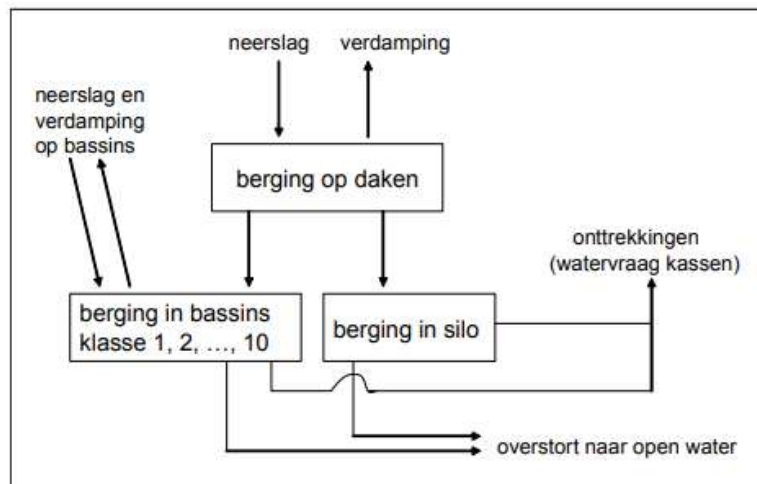
Figuur F.1: Modelling unpaved knoop sobek-RR (Prinsen et al., 2009)

Een paved knoop wordt gebruikt om verhard gebied te modelleren. De modellering van een paved knoop kan worden gevonden in Figuur E.2. Neerslag dat op straat valt wordt afgevoerd via het riool en kan verdampen op het moment dat het op straat blijft staan. Voor de rioolafvoer kan er worden gekozen tussen een gemixt systeem, een gescheiden systeem of een verbeterd gescheiden systeem. Bij een gemixt systeem worden regenwater en huishoudelijk afvalwater niet van elkaar gescheiden en bij een gescheiden systeem wel. De hoeveelheid huishoudelijk afvalwater (afhankelijk van het aantal inwoners), de berging op straat en in het riool en het soort systeem kan worden gekozen in de modellering.



Figuur E.2: Modelling paved knoop sobek-RR (Prinsen et al., 2009)

Kassengebied kan worden gemodelleerd met een greenhouse knoop. De modellering van deze knoop is te zien in Figuur E.3. In deze knoop kan de hoeveelheid opslag op daken, ondergrondse berging in een silo en berging in bassins worden ingevoerd.



Figuur F3: Modelling greenhouse knoop sobek-RR (Prinsen et al., 2009)

F.2. Modelling bij Brabantse Delta

In Tabel F.1 kunnen de instellingen worden gevonden die zijn gebruikt voor het model dat is gebruikt voor de modellering voor de gebieden Tonnekreek en Gat van de Ham. De drainageparameters zijn gekalibreerd op het gebied Tonnekreek.

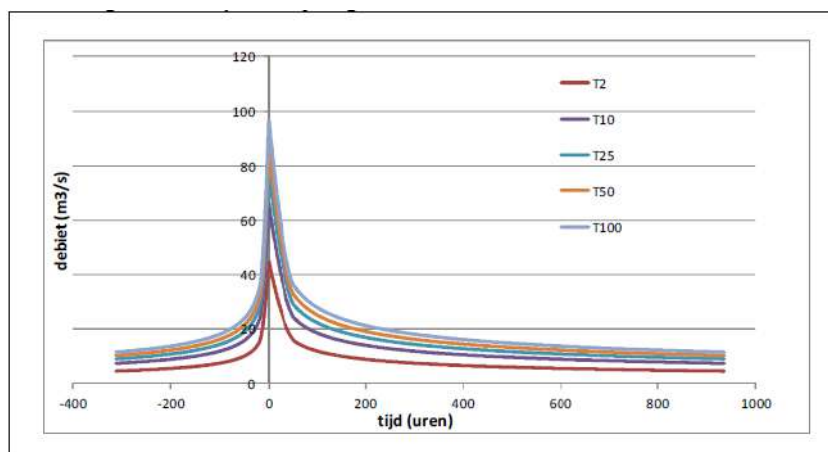
In SOBEK worden verschillende knopen met elkaar verbonden om zo een stroommodel te vormen. Afvoerende oppervlakten worden gemodelleerd als unpaved, paved, greenhouse, HBV, SCS of Sacramento knopen. De HBV, SCS en Sacramento knopen zijn niet relevant voor dit onderzoek en zullen dus ook niet verder worden toegelicht. In Bijlage F kan worden gevonden wat het verschil is tussen de unpaved, paved en greenhouse knopen, welke input deze vereisen en hoe ze gemodelleerd zijn. In het basis model van Brabantse Delta zijn alle afvoerende oppervlakte ingevoerd als zijnde unpaved knopen.

	Instelling	Waarde	Eenheid
Algemene instellingen	IDFLOW (Rural)	-	-
	Bodemsoort	zware klei(117)	-
	Berging op maaiveld	3	mm
	Infiltratie	5	mm/uur
	Kwel	2	mm/dag
Drainage parameters	Formule van Ernst	-	-
	Oppervlakteafvoer	1	dagen
	Horizontale stroming	100	dagen
	Toplaag (0-1 m)	10	dagen
	Tweede laag (1-10 m)	50	dagen
	Onderlaag (10-∞ m)	500	dagen

Tabel F.1: Instelling SOBEK modellen Brabantse Delta

De neerslag die is gebruikt in de modellen zijn gebaseerd op composiet hydrogrammen. Een composiet hydrogram is een afvoer-duurrelatie. Hierin is de herhalingsstijd voor elke tijdsduur gelijk, dit betekent dat dezelfde composiet hydrogram kan worden gebruikt voor een periode van één uur als voor twee weken. De composiet hydrogrammen zijn bepaald met een extreme waarden analyse op historische afvoerreksen (debietmetingen). De piekdebieten die volgen uit de extreme waarden analyse worden omgezet naar composiet hydrogrammen. Dit wordt gedaan met behulp van twee parameters: de discharge duration frequency-verbanden en de scheefheidsparameter. De discharge duration frequency-verbanden worden gebruikt voor het bepalen van de piek van de composiet hydrogram. De piek is namelijk gelijk aan een afvoer van één uur met gemiddeld debiet. De scheefheidsparameter wordt gebruikt voor het bepalen van de vorm van de com-

posiet hydrogram. De scheefheidsparameter bepaald de steilheid voor en na de piek.



Figuur F4: Voorbeeld composiet hydrogram Bovenmark (Witteveen + Bos, 2014)

Na het opstellen van de composiet hydrogrammen worden deze vertaald naar neerslagbuien, zodat deze kunnen worden ingevoerd in SOBEK. De ingevoerde neerslag zijn de composiet hydrogrammen gedeeld door de som van het oppervlakte keer de afvoerfactor. De ingevoerde oppervlakte op de knopen in het SOBEK model zijn niet de oppervlakte uit de praktijk maar een fictief oppervlak dat het product van de oppervlakte en de afvoerfactor is. De afvoerfactor is de gemiddelde afvoerfactor van de afwateringseenheid. Doordat het fictieve oppervlakte een factor 5 tot 10 groter is dan het echte oppervlakte is de ingevoerde neerslag dus relatief laag.

In SOBEK wordt de afvoer in de knopen berekend door de oppervlakte (in dit geval het fictieve oppervlakte) te vermenigvuldigen met de neerslag (in dit geval de neerslag gebaseerd op de composiet hydrogram). Dit resulteert per knoop in een afvoer die kan worden berekend met de volgende formule:

$$q_x = A_x * F_x * \frac{CH}{\sum_1^n A * F} \quad (E.1)$$

Waarin q_x de afvoer is in punt x in SOBEK, A_x het oppervlakte van het gebied behorende punt bij punt x, F_x de afvoerfactor van het gebied behorende bij punt x, CH de composiet hydrogram en $\sum_1^n A * F$ de som van alle oppervlakten maal de afvoerfactoren.

In Tabel F2 staan de verschillende neerslag scenario's die worden gebruikt door Brabantse Delta in de SOBEK modellen. Zoals te zien is in de tabel wordt er een onderscheid gemaakt tussen het de neerslag die valt op gebied Plukmade/Middelschans en Tonnekreek. Deze neerslagevenementen zijn verschillend, omdat de fictieve oppervlakten in de gebieden verschillen en op deze manier de debieten in de kanalen het meest overeenkomen met de werkelijkheid.

Herhalings ­ tijd	Totale neerslag (mm)	
	Plukmade/Middelschans	Tonnekreek
2 jaar	16.1	220.4
10 jaar	20.5	279.9
25 jaar	22.6	307.6
50 jaar	26.7	344.9
100 jaar	-	374.9

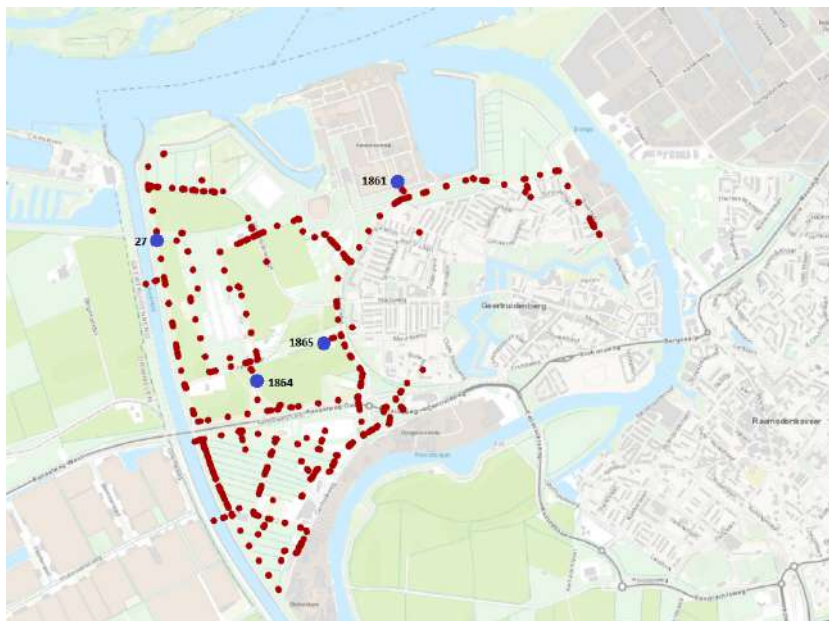
Tabel F2: Ingevoerde neerslag SOBEK modellen Brabantse Delta

G

Sobek gevoeligheidsanalyse RR-module

De gevoeligheid van de parameters in de RR-module van SOBEK is gecheckt door deze om de beurt aan te passen in het model. Dit is gedaan voor het gebied van Middelschans, omdat dit hydrologisch gezien een gesloten systeem is en een relatief klein gebied, waardoor de looptijd van het model redelijk snel is. In vier punten verspreid over het model zijn de piekwaterdieptes vergeleken met de piekwaterdieptes van het model met een veranderde parameter. Aan de hand van de verschillen kan geconcludeerd worden of een parameter veel of weinig invloed heeft in het model.

In Figuur G.1 zijn de vier punten te zien die zijn gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse. Dat zijn punt 27, 1861, 1864 en 1865. Deze punten zijn gekozen, omdat ze verspreid over het gebied liggen. De tabellen met de resultaten van de verschillende model runs zullen nader worden toegelicht.



Figuur G.1: Punten 27, 1861, 1864 en 1865 gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse

Uit de verschillende runs wordt een conclusie getrokken over de gevoeligheid van de verschillende parameters. Variatie in de parameters berging op het maaiveld, surface run-off en horizontale stroming hebben geen invloed op de waterstanden die uit de RR-module van SOBEK modellen komt.

Voor de parameter infiltratiecapaciteit heeft verhoging van de capaciteit geen invloed op de uitkomst van de stroommodellen, echter wanneer de infiltratiecapaciteit wordt verlaagd, daalt de gemiddelde maximale

waterstand met maximaal 5 mm. De parameter kwel heeft grote invloed op het model, 1 mm meer of minder kwel per dag zorgt direct voor een gemiddelde daling of stijging van 8 mm op de maximale waterstand. De drainagecoëfficiënten beïnvloeden het model het meest. Als de coëfficiënten een factor 10 groter of kleiner worden scheelt dit gemiddeld 19 a 20 mm in de maximale waterstand. Ook kleinere veranderingen in deze coëfficiënten beïnvloeden het model, in het geval dat de coëfficiënten een factor 1.5 groter worden stijgt de maximale waterstand gemiddeld met 5 a 6 mm.

In de RR-module is elke keer één coëfficiënt veranderd om zo de invloed van deze coëfficiënt te kunnen bepalen.

Punt	5 mm/uur	0 mm/uur	10 mm/uur	20 mm/uur
1864	0.59 m	0.63 m	0.58 m	0.58 m
1865	0.43 m	0.48 m	0.42 m	0.43 m
1861	0.26 m	0.30 m	0.24 m	0.24 m
27	0.94 m	0.96 m	0.91 m	0.91 m

Tabel G.1: Berekende waterstanden bij variërende infiltratie

Punt	3 mm	0 mm	10 mm	50 mm
1864	0.59 m	0.60 m	0.59 m	0.59 m
1865	0.43 m	0.43 m	0.43 m	0.43 m
1861	0.26 m	0.26 m	0.26 m	0.26 m
27	0.94 m	0.94 m	0.94 m	0.94 m

Tabel G.2: Berekende waterstanden bij variërende berging op maaiveld

Punt	2 mm/dag	0 mm/dag	1 mm/dag	3 mm/dag
1864	0.59 m	0.42 m	0.51 m	0.67 m
1865	0.43 m	0.26 m	0.35 m	0.51 m
1861	0.26 m	0.12 m	0.18 m	0.34 m
27	0.94 m	0.76 m	0.85 m	1.01 m

Tabel G.3: Berekende waterstanden bij variërende kwel

Punt	1 dag (min)	10 dagen (max)
1864	0.59 m	0.59 m
1865	0.43 m	0.42 m
1861	0.26 m	0.26 m
27	0.94 m	0.94 m

Tabel G.4: Berekende waterstanden bij variërende surface run-off

Punt	100 dagen	1 dag	1 000 dagen	100 000 dagen
1864	0.59 m	0.59 m	0.59 m	0.59 m
1865	0.43 m	0.42 m	0.42 m	0.42 m
1861	0.26 m	0.26 m	0.26 m	0.26 m
27	0.94 m	0.94 m	0.94 m	0.94 m

Tabel G.5: Berekende waterstanden bij variërende horizontale stroming

Punt	0-1 m : 10	0-1 m : 1	0-1 m : 15	0-1 m : 20	0-1 m : 50	0-1 m : 100
	1-10 m : 50	1-10 m : 5	1-10 m : 75	1-10 m : 100	1-10 m : 250	1-10 m : 500
	10-∞ : 500	10-∞ : 50	10-∞ : 750	10-∞ : 1 000	10-∞ : 2 500	10-∞ : 5000
1864	0.59 m	0.78 m	0.65 m	0.66 m	0.54 m	0.39 m
1865	0.43 m	0.61 m	0.48 m	0.51 m	0.28 m	0.24 m
1861	0.26 m	0.48 m	0.31 m	0.33 m	0.2 m	0.06 m
27	0.94 m	1.10 m	1.00 m	1.00 m	0.87 m	0.73 m

Tabel G.6: Berekende waterstanden bij variërende drainagecoëfficiënten

Punt	0-1 m : 10	0-0.5 m : 10	0-0.5 m : 10	0-1 m : 10	0-10 m : 10
	1-10 m : 50	0.5-1.5 m : 50	0.5-10 m : 50	1-5 m : 50	10-50 m : 50
	10 - ∞ : 500	1.5-∞ m : 500	10-∞ : 500	5-∞ m : 500	50-∞ m : 500
1864	0.59 m	0.45 m	0.42 m	0.59 m	0.73 m
1865	0.43 m	0.30 m	0.27 m	0.43 m	0.56 m
1861	0.26 m	0.12 m	0.10 m	0.26 m	0.40 m
27	0.94 m	0.79 m	0.76 m	0.94 m	1.18 m

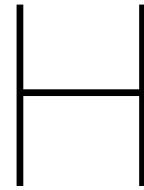
Tabel G.7: Berekende waterstanden bij variërende drainagecoëfficiënten

Punt	Uniform 1.6 m	AHN 3	AHN 3 Partieel rekenen	AHN 3 PAWN grondsoort	AHN3 PAWN grondsoort Partieel rekenen
	1864	0.59 m	0.67 m	0.38 m	0.60 m
1865	0.43 m	0.50 m	0.24 m	0.44 m	0.03 m
1861	0.26 m	0.36 m	0.14 m	0.28 m	0.00 m
27	0.94 m	1.01 m	0.72 m	0.94 m	0.56 m

Tabel G.8: Berekende waterstanden bij variërende rekeninstellingen

Punt	Grass	Pattatoes	Grain	Greenhouses	Flowers
1864	0.59 m	0.60 m	0.60 m	0.62 m	0.62 m
1865	0.43 m	0.44 m	0.44 m	0.46 m	0.46 m
1861	0.26 m	0.27 m	0.26 m	0.29 m	0.29 m
27	0.94 m	0.95 m	0.95 m	0.96 m	0.96

Tabel G.9: Berekende waterstanden bij variërende unpaved area coëfficiënten



Inundatiekaarten

In deze bijlage zijn de inundatiekaarten van de verschillende scenario's te vinden van de drie casestudies. De ontwikkeling van inundatie bij een hogere herhalingstijd van de neerslag of langere uitvalduur in het gemeal is te zien in de figuren.

H.1. Middelschans

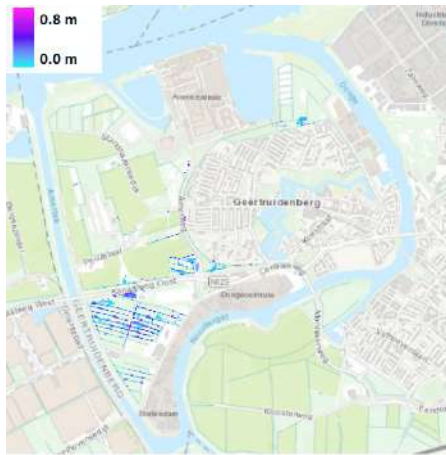
H.1.1. Inundatie herhalingstijden



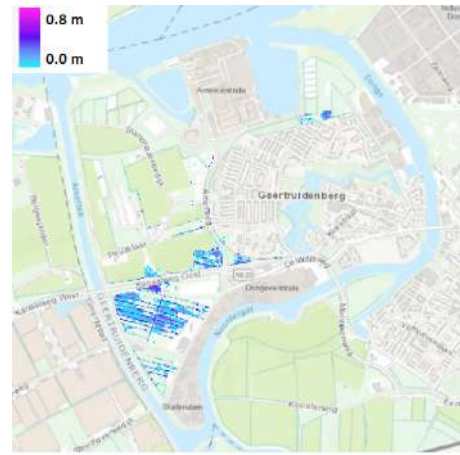
Figuur H.1: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 2 jaar
gemeal Middelschans



Figuur H.2: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar
gemeal Middelschans

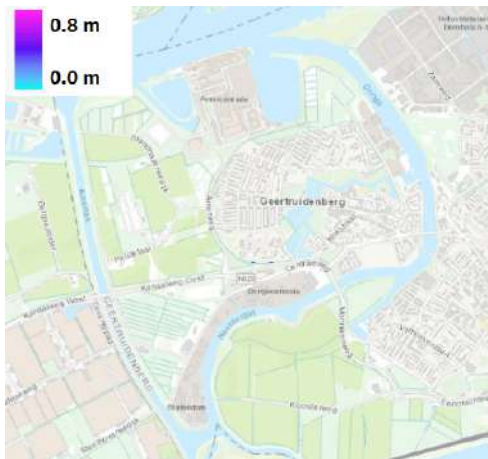


Figuur H.3: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 25 jaar
gemaal Middelschans



Figuur H.4: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 50 jaar
gemaal Middelschans

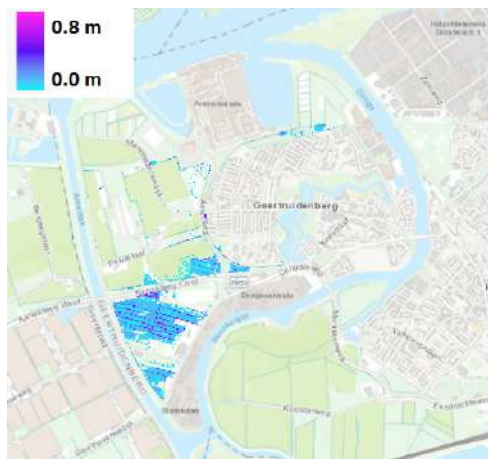
H.1.2. Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalings-tijden



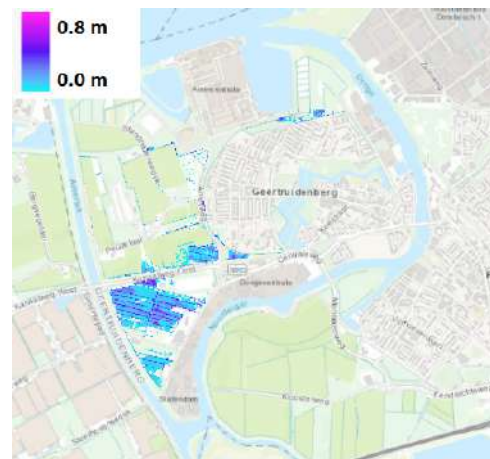
Figuur H.5: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 2 jaar en
2 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.6: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 10 jaar en
2 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.7: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 25 jaar en
2 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.8: Inundatie door neerslag met herhalings-tijd 50 jaar en
2 uur uitval van gemaal Middelschans

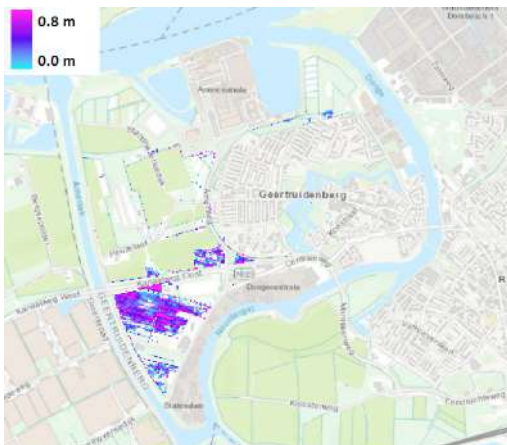
H.1.3. Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingsjiden



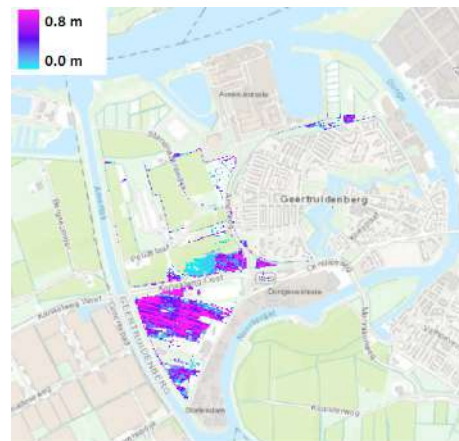
Figuur H.9: Inundatie door neerslag met herhalingsjtid 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.10: Inundatie door neerslag met herhalingsjtid 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans

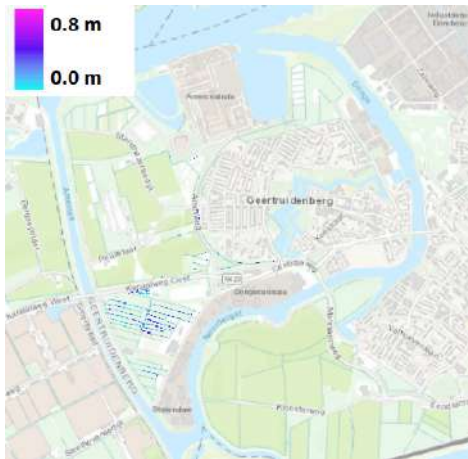


Figuur H.11: Inundatie door neerslag met herhalingsjtid 25 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans

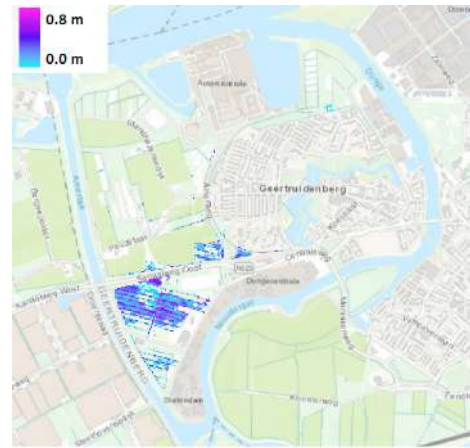


Figuur H.12: Inundatie door neerslag met herhalingsjtid 50 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans

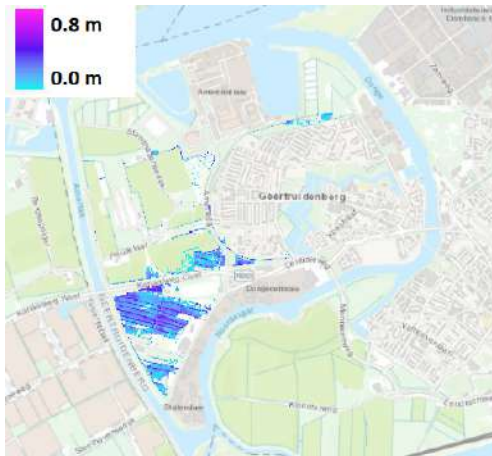
H.1.4. Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingsstijden



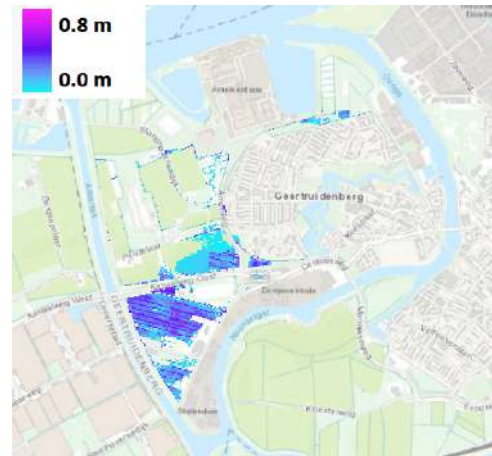
Figuur H.13: Inundatie door neerslag met herhalingsstijd 2 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.14: Inundatie door neerslag met herhalingsstijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.15: Inundatie door neerslag met herhalingsstijd 25 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.16: Inundatie door neerslag met herhalingsstijd 50 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans

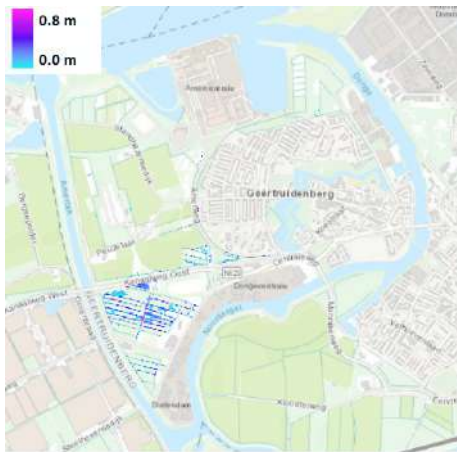
H.1.5. Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingstijd van 10 jaar



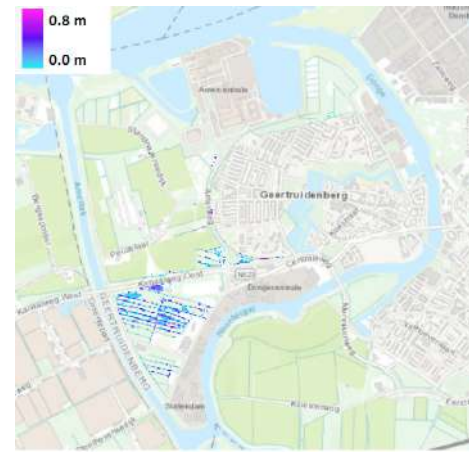
Figuur H.17: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.18: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 4 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.19: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 6 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.20: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 8 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.21: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 10 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.22: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 12 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.23: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 14 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.24: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 16 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.25: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 18 uur uitval van gemaal Middelschans



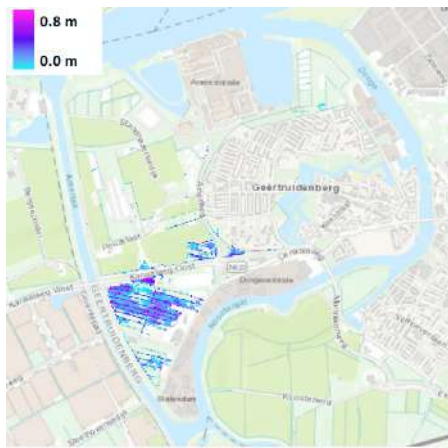
Figuur H.26: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 20 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.27: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 22 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.28: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Middelschans



Figuur H.29: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 36 uur uitval van gemaal Middelschans



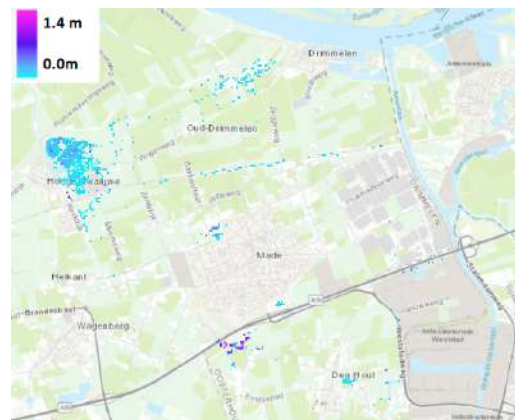
Figuur H.30: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Middelschans

H.2. Plukmade

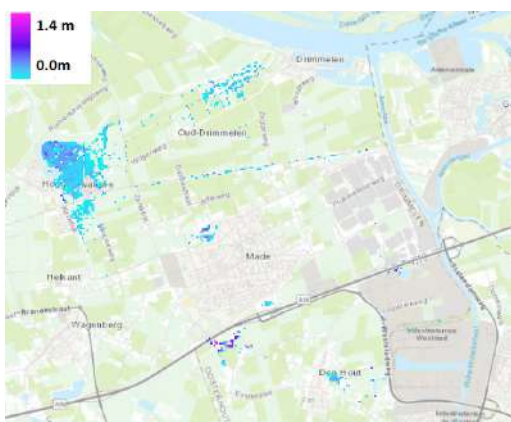
H.2.1. Inundatie herhalingsjijden



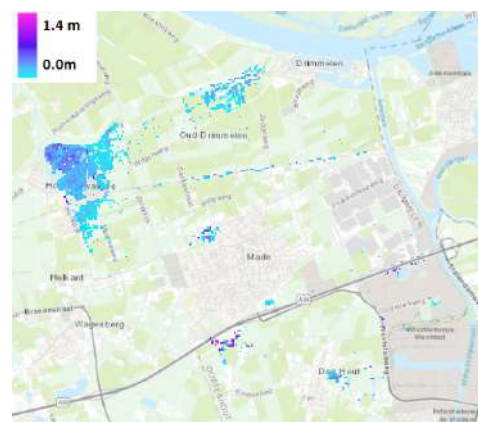
Figuur H.31: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 2 jaar gemaal Plukmade



Figuur H.32: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar gemaal Plukmade



Figuur H.33: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar gemaal Plukmade

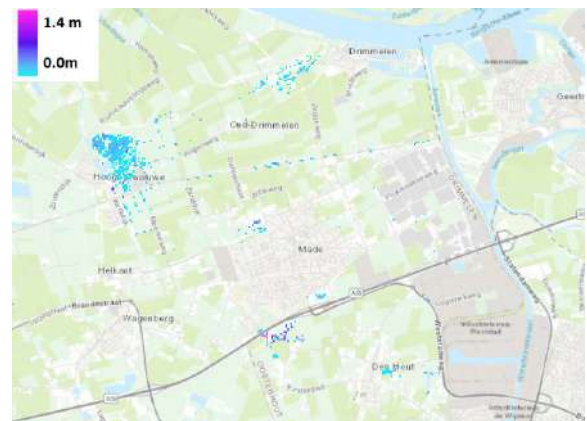


Figuur H.34: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar gemaal Plukmade

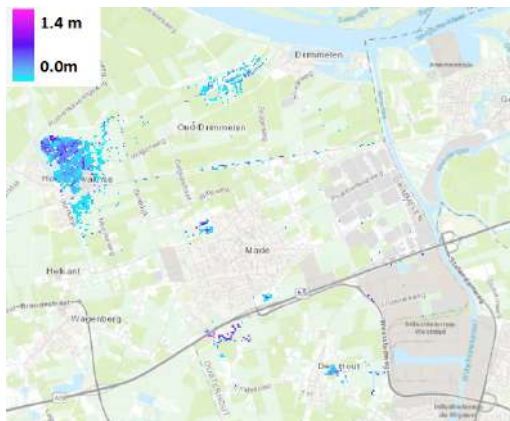
H.2.2. Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalingstijden



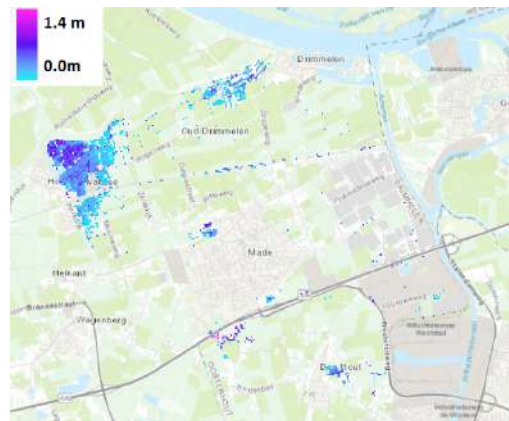
Figuur H.35: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 2 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.36: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.37: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 25 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade

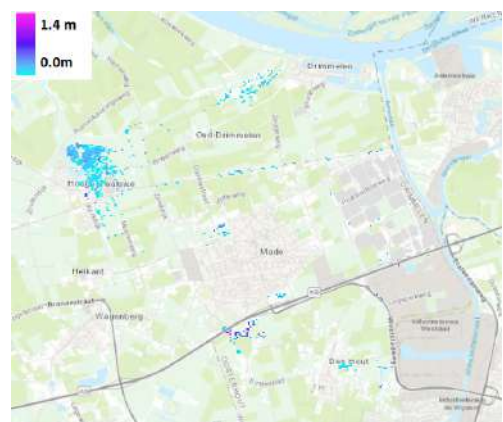


Figuur H.38: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 50 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade

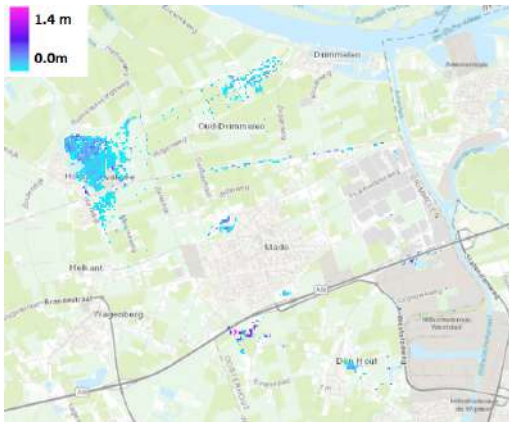
H.2.3. Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingstijden



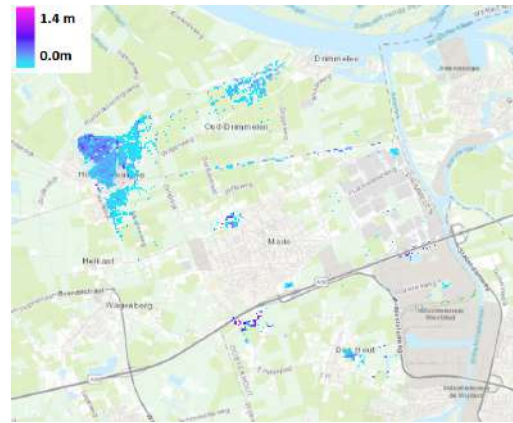
Figuur H.39: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.40: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.41: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.42: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade

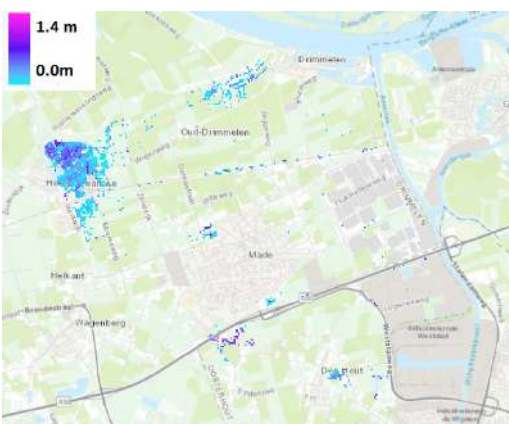
H.2.4. Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingsjijden



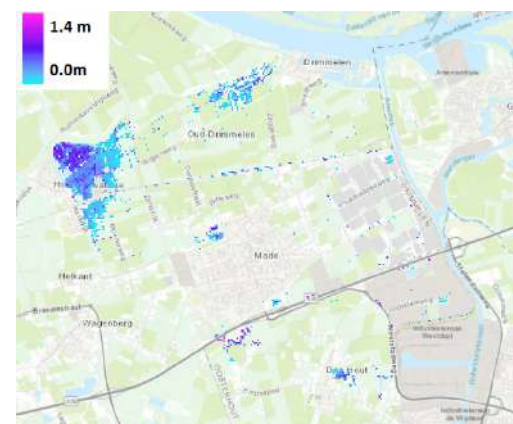
Figuur H.43: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 2 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.44: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade

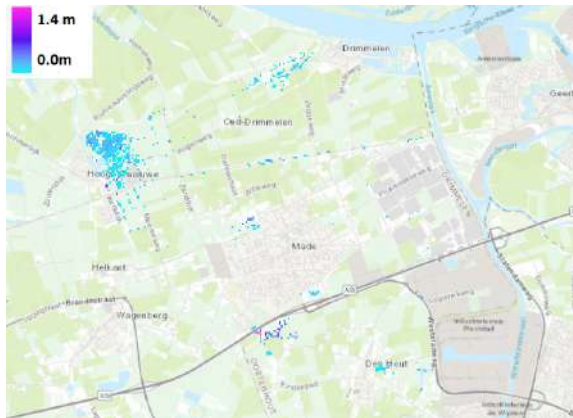


Figuur H.45: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade

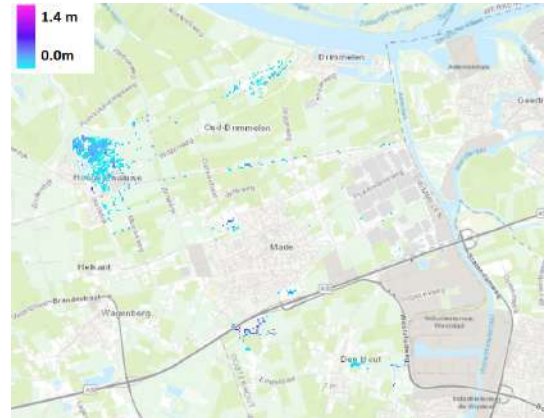


Figuur H.46: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade

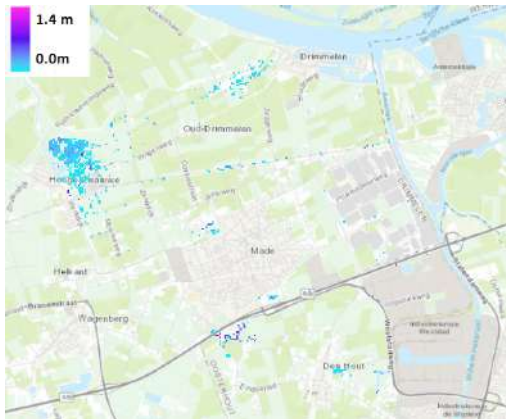
H.2.5. Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingsjijd van 10 jaar



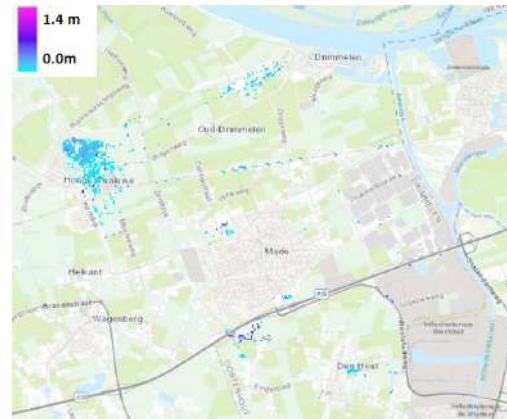
Figuur H.47: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Plukmade



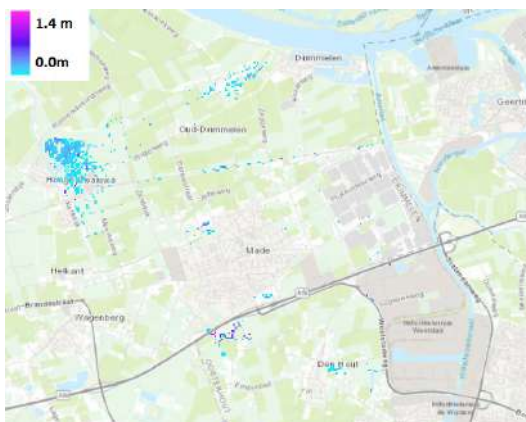
Figuur H.48: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 4 uur uitval van gemaal Plukmade



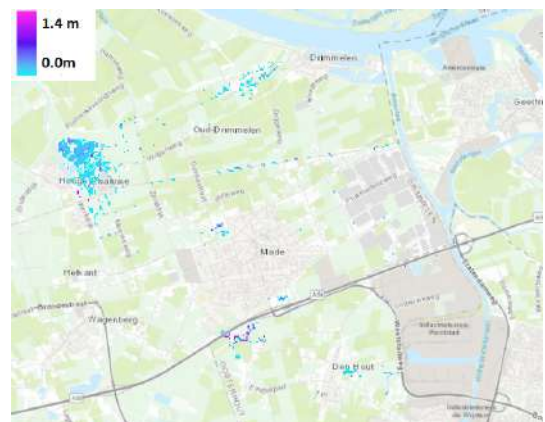
Figuur H.49: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 6 uur uitval van gemaal Plukmade



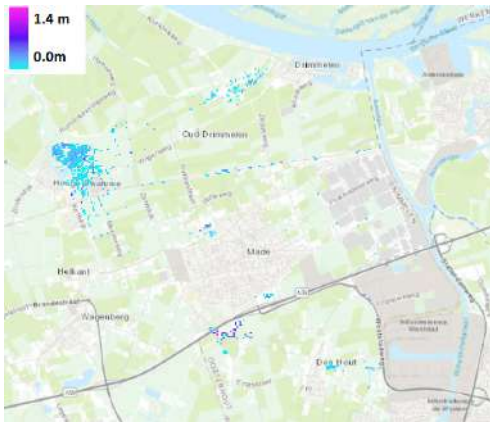
Figuur H.50: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 8 uur uitval van gemaal Plukmade



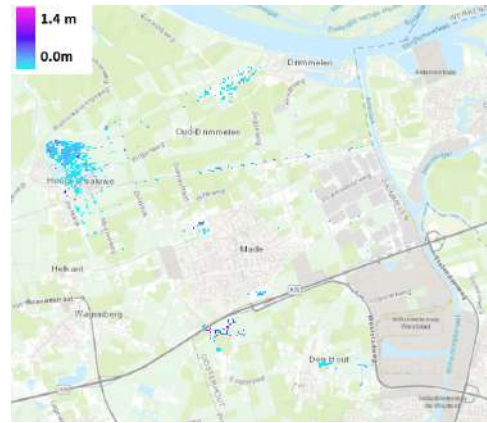
Figuur H.51: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 10 uur uitval van gemaal Plukmade



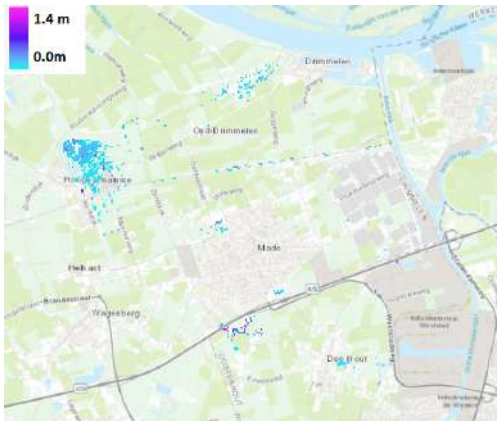
Figuur H.52: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 12 uur uitval van gemaal Plukmade



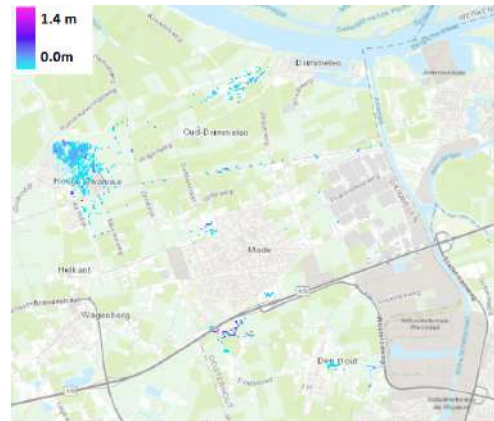
Figuur H.53: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 14 uur uitval van gemaal Plukmade



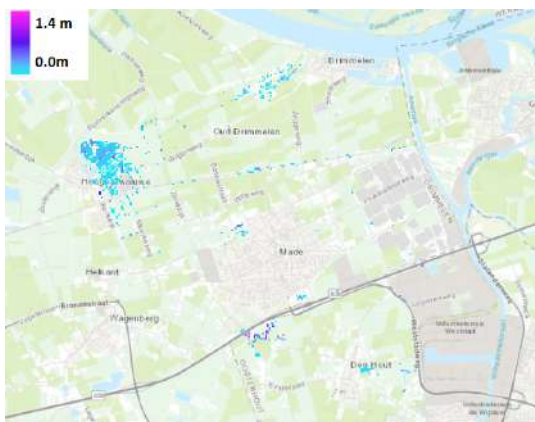
Figuur H.54: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 16 uur uitval van gemaal Plukmade



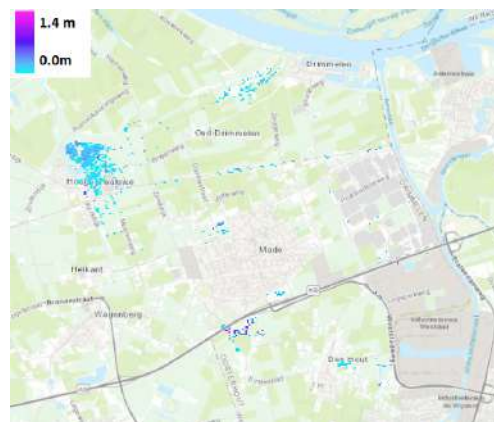
Figuur H.55: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 18 uur uitval van gemaal Plukmade



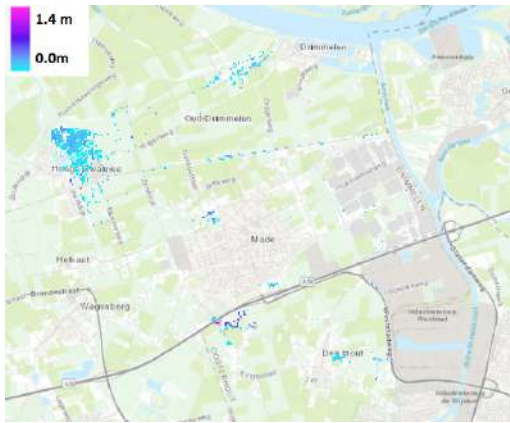
Figuur H.56: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 20 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.57: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 22 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.58: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.59: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 36 uur uitval van gemaal Plukmade



Figuur H.60: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Plukmade

H.3. Tonnekreek

H.3.1. Inundatie herhalingsjijden



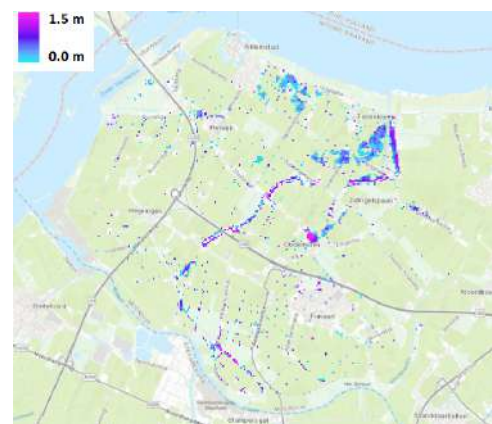
Figuur H.61: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 2 jaar gemaal Tonnekreek



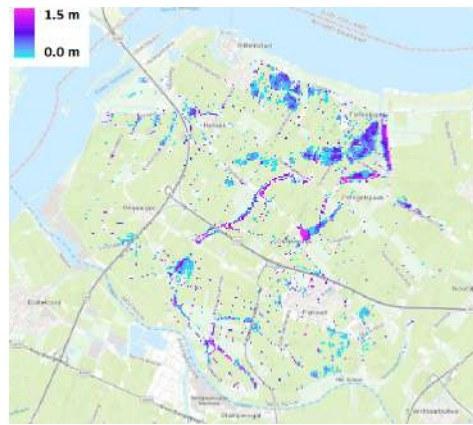
Figuur H.62: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar gemaal Tonnekreek



Figuur H.63: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar gemaal Tonnekreek



Figuur H.64: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar gemaal Tonnekreek

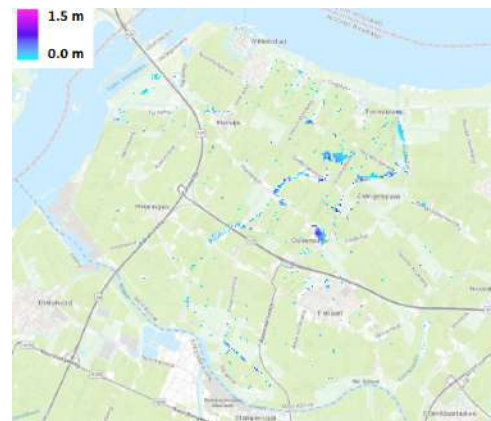


Figuur H.65: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 100 jaar
gemaal Tonnekreek

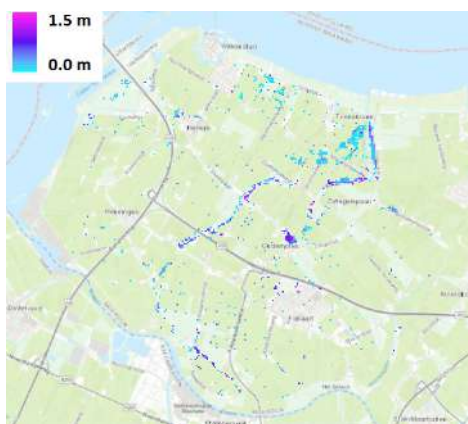
H.3.2. Inundatie 2 uur uitval verschillende herhalingstijden



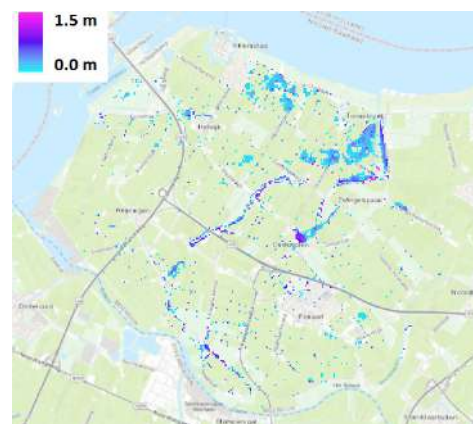
Figuur H.66: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 2 jaar en
2 uur uitval van gemaal Tonnekreek



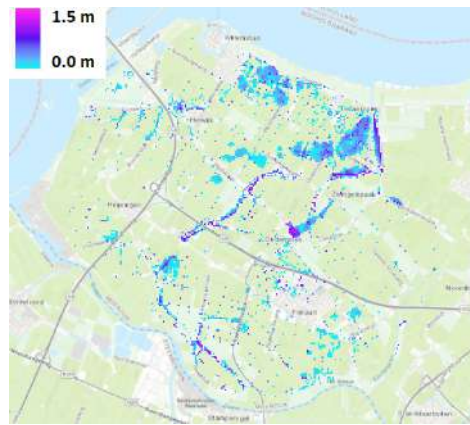
Figuur H.67: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 10 jaar
en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.68: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 25 jaar
en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.69: Inundatie door neerslag met herhalingstijd 50 jaar
en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek

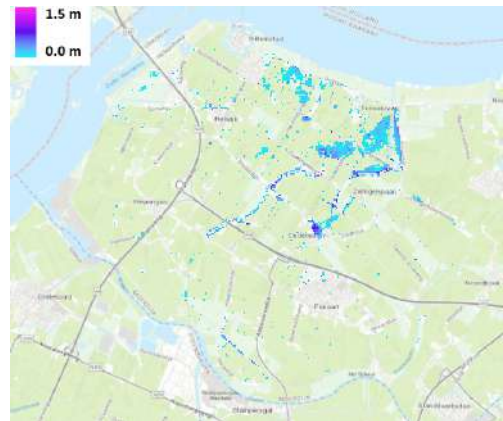


Figuur H.70: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 100 jaar en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek

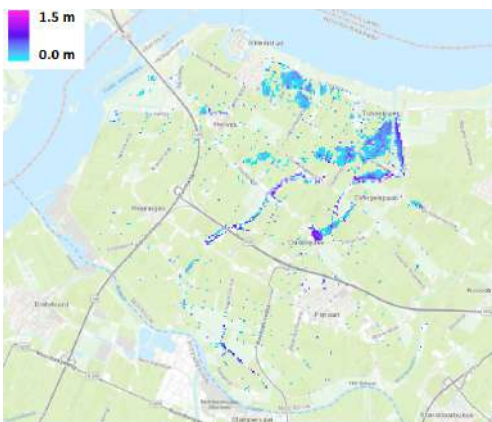
H.3.3. Inundatie 24 uur uitval verschillende herhalingsjijden



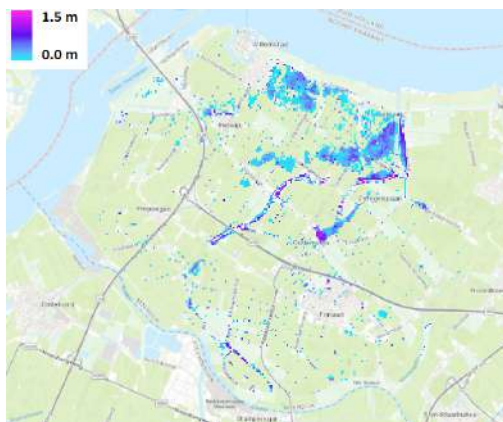
Figuur H.71: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 2 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek



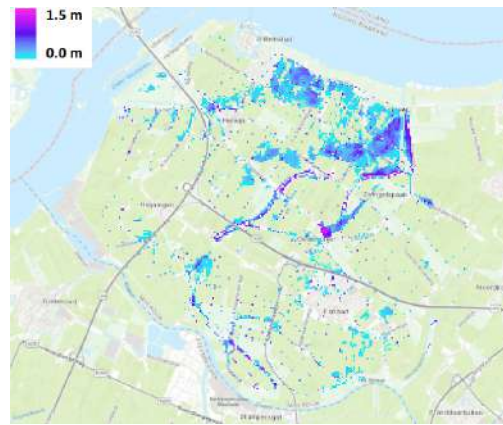
Figuur H.72: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.73: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek

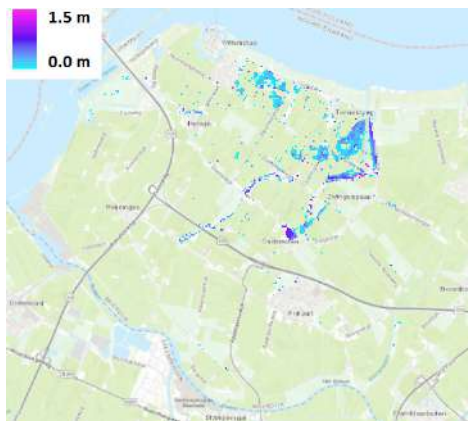


Figuur H.74: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek

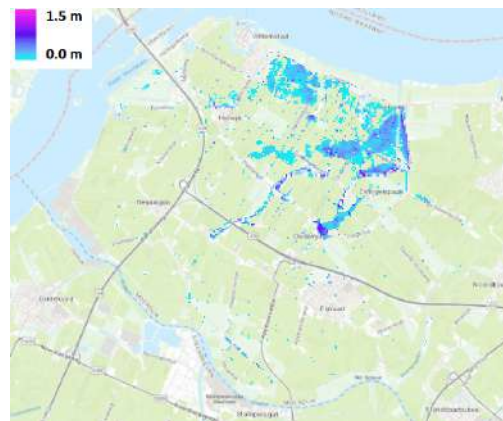


Figuur H.75: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 100 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek

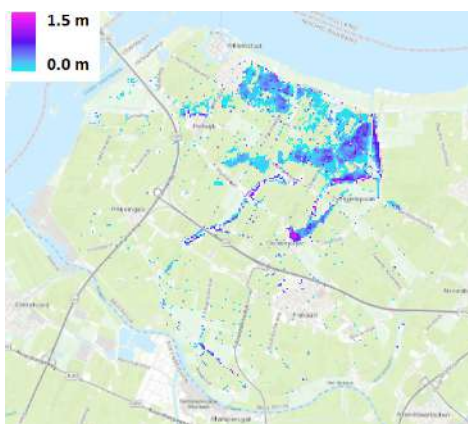
H.3.4. Inundatie 48 uur uitval verschillende herhalingsjijden



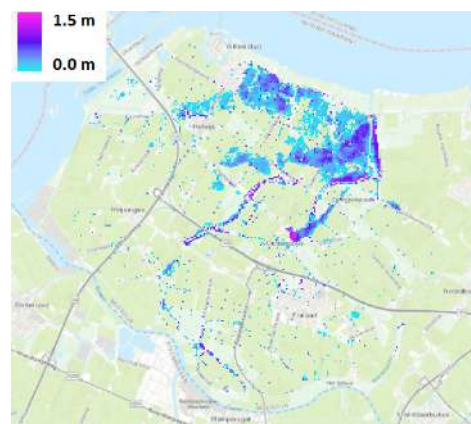
Figuur H.76: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 2 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek



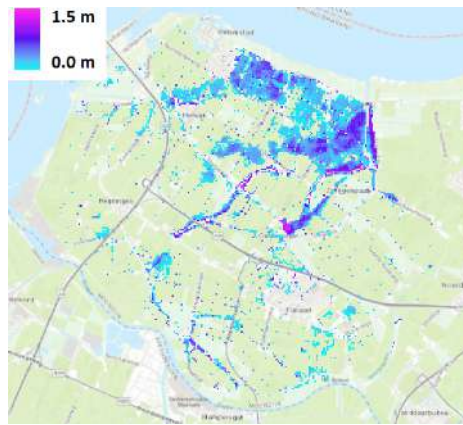
Figuur H.77: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.78: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 25 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek

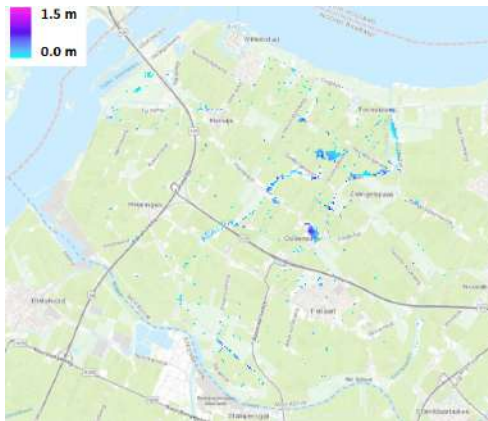


Figuur H.79: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 50 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.80: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 100 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek

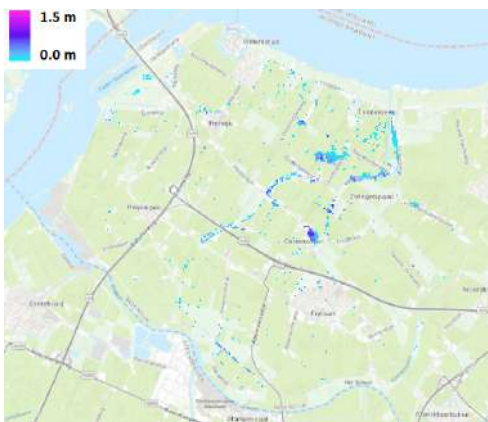
H.3.5. Inundatie verschillende uitvalduren bij een herhalingsjijd van 10 jaar



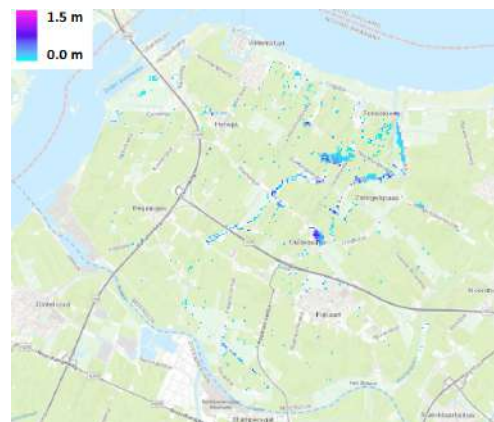
Figuur H.81: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 2 uur uitval van gemaal Tonnekreek



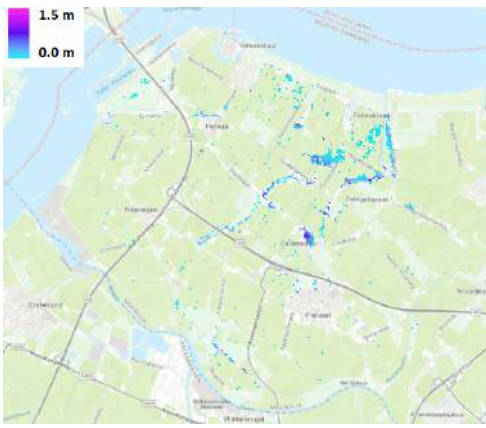
Figuur H.82: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 4 uur uitval van gemaal Tonnekreek



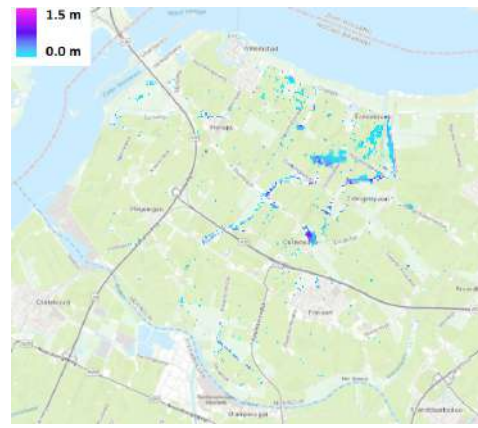
Figuur H.83: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 6 uur uitval van gemaal Tonnekreek



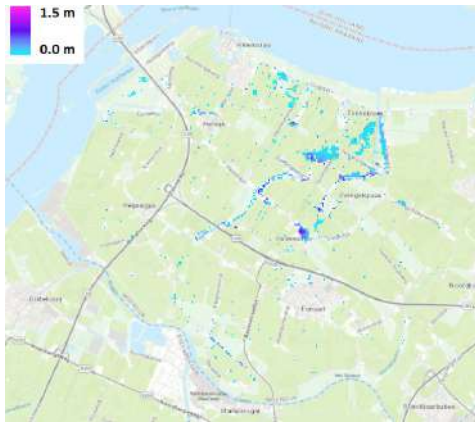
Figuur H.84: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 8 uur uitval van gemaal Tonnekreek



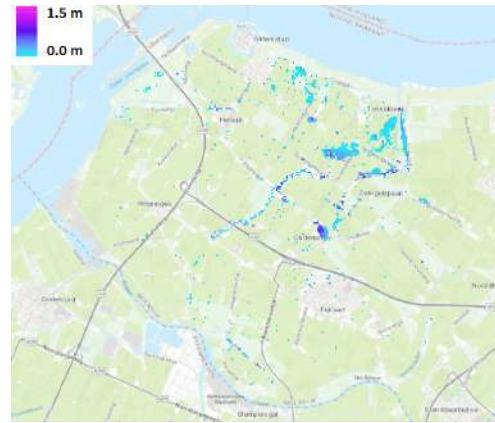
Figuur H.85: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 10 uur uitval van gemaal Tonnekreek



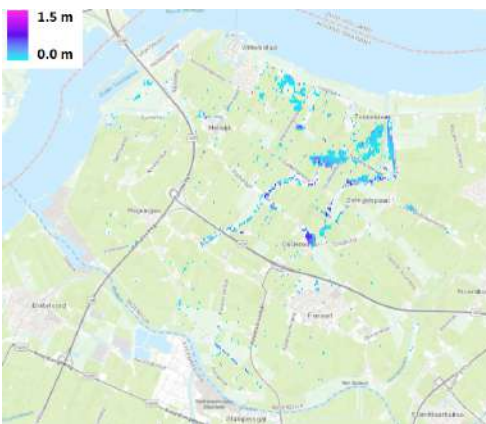
Figuur H.86: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 12 uur uitval van gemaal Tonnekreek



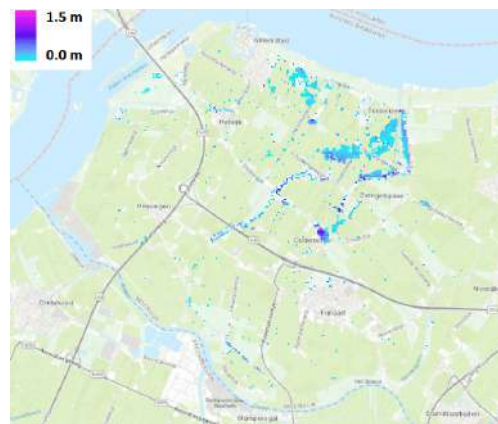
Figuur H.87: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 14 uur uitval van gemaal Tonnekreek



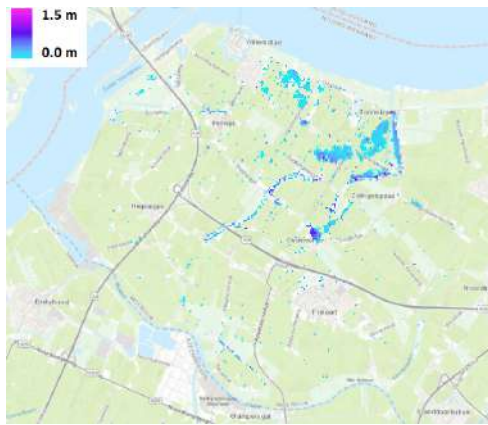
Figuur H.88: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 16 uur uitval van gemaal Tonnekreek



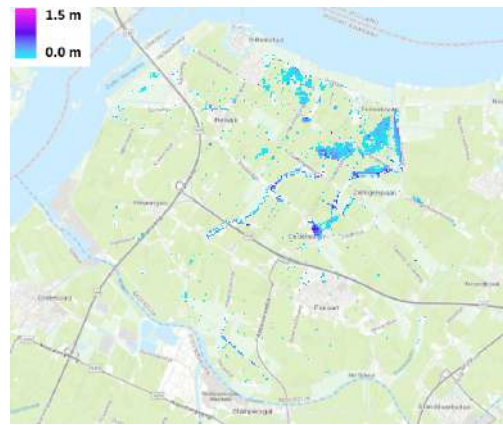
Figuur H.89: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 18 uur uitval van gemaal Tonnekreek



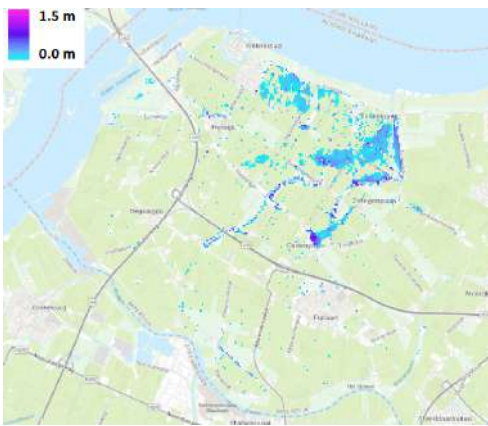
Figuur H.90: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 20 uur uitval van gemaal Tonnekreek



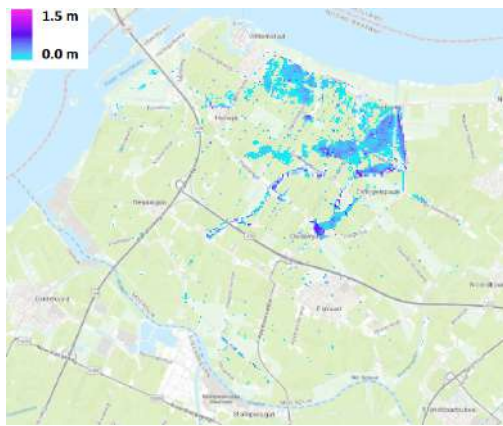
Figuur H.91: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 22 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.92: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 24 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.93: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 36 uur uitval van gemaal Tonnekreek



Figuur H.94: Inundatie door neerslag met herhalingsjijd 10 jaar en 48 uur uitval van gemaal Tonnekreek