

# Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier 2

Een gebiedsbrede analyse en  
onderzoek naar klimaatbestendige  
bescherming tegen wateroverlast

**Interreg**   
EUROPESE UNIE  
**2 Seas Mers Zeeën**  
Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling

 Provincie  
Noord-Holland

 hoogheemraadschap  
Hollands  
Noorderkwartier

**HKV**  
LIJN IN WATER

**HydroLogic**

Nelen & Schuurmans







# Inhoud

Samenvatting .....	4
1 Inleiding.....	7
1.1 Aanleiding en globale opzet onderzoek	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Werkwijze	8
1.4 Leeswijzer	9
2 Visie en methodiek.....	10
2.1 Visie op klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast	10
2.2 Afbakening van het onderzoek	11
3 Richtpunt ontwerp en bodemverbetering .....	12
3.1 Inleiding	12
3.2 Richtpunt voor het ontwerp	12
3.3 Mogelijkheden bodemverbetering	16
3.4 Synthese	18
4 Onderzoek mogelijkheden noodbemaling .....	20
4.1 Inleiding	20
4.2 Methode	20
4.3 Resultaten	21
4.4 Synthese	23
5 Methodiek analyse poldergebieden.....	25
5.1 Inleiding	25
5.2 Methodiek klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast	27
5.3 Synthese nadere analyse Groot Limmerpolder	40
6 Resultaten gebiedsbrede analyse .....	41
6.1 Inleiding	41
6.2 Resultaten gebiedsbrede analyse	41
6.3 Effectiviteit maatregelen	49
6.4 Synthese resultaten poldergebieden	52
7 Nadere analyses.....	53
7.1 Kwetsbare gemalen	53
7.2 Ruimtelijke ontwikkelingen in de Zuidpolder	55
7.3 Reduceren van schade in stedelijk gebied (Westzaan)	61
7.4 Uitwisseling in de Schermer	66
7.5 Inzet bergingsgebied Zijpe-West	69
8 Referenties .....	72
Bijlage A Richtpunt voor ontwerp.....	73
A.1 Inleiding	73
A.2 Literatuuronderzoek	74
A.3 Effect klimaatverandering op afvoerrichtlijn	76

A.4	Naar een nieuwe afvoerrichtlijn	84
A.5	Achtergronden benodigde gemaalcapaciteit van polders (droogmakerijen)	91
Bijlage B	Effect bodemverbeterende maatregelen .....	103
Bijlage C	Tussenproducten.....	122
C.1	Inleiding	122
C.2	Afleiden statistiek en inundatiekaarten	123
C.3	Onderscheid plasvorming en inundatie vanuit watersysteem	125
C.4	Kwetsbaarhedenkaart	126
C.5	Ruimtekaart	127
C.6	Bepaling netto contante waarde van de schade en batenkaart	128
C.7	Vuistregel voor investeringsruimte	130
C.8	Kosten maatregelen Groot Limmerpolder	130
Bijlage D	Rekenmethodiek .....	133
D.1	Inleiding	133
D.2	Stochastische aanpak	133
D.3	Frequenties van de gebeurtenissen	136
D.4	Toelichting stochastenmethode	137
Bijlage E	Aanpak scenario boezem .....	141
E.1	Inleiding	141
E.2	Kaart met maalstoppeilen	147
E.3	Beschrijvingen resultaten per cluster	147
E.4	Overzichtskaart referentieberekeningen	155
E.5	Kaarten met resultaat per cluster	156
Bijlage F	Batenkaarten van de Groot Limmerpolder .....	166
Bijlage G	Kaartbeelden gebiedsbrede analyse .....	168
Bijlage H	Overzicht analyseresultaten alle poldergebieden. ....	188



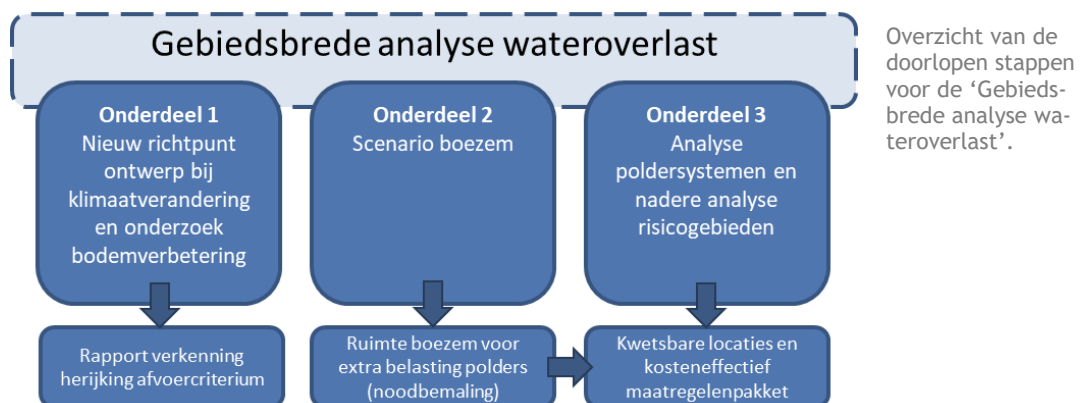
# Samenvatting

## Aanleiding

Het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) heeft de afgelopen jaren geïnvesteerd in het watersysteem om wateroverlast te beperken en het systeem te laten voldoen aan de geldende normen (NWB). Dit betekent echter niet dat er geen wateroverlast meer op kan treden. Het hoogheemraadschap heeft daarom in het waterprogramma aangegeven samen met de omgeving in te willen zetten op een verdere ontwikkeling naar een klimaat adaptieve leefomgeving. Om wateroverlast als gevolg van extreme neerslag te beperken, wil het hoogheemraadschap inzicht in de gevolgen van hevige neerslag, waarbij gebieden met elkaar kunnen worden vergeleken. Hiervoor is een gebiedsbrede analyse nodig.

## Aanpak

Het project is uitgevoerd door HKV en HydroLogic in nauwe samenwerking met Nelen & Schuurmans, Deltares en HHNK. De gebiedsbrede analyse bestaat uit 3 onderdelen. In onderdeel 1 is op basis van literatuur een nieuw richtpunt voor het ontwerp van het watersysteem bij klimaatverandering uitgewerkt en is aan het hoogheemraadschap advies gegeven over de herijking van de ontwerpnorm. Tevens is in onderdeel 1 onderzoek gedaan naar de mogelijkheden voor bodemverbetering om de gevolgen van hevige neerslag te beperken en is geanalyseerd of het wenselijk is bodemverbetering in de te onderzoeken maatregelen mee te nemen. In onderdeel 2 is onderzoek gedaan naar eventuele ruimte in het boezemsysteem om extra belasting door klimaatverandering via noodbemalingen op te vangen. Vervolgens is in onderdeel 3 de door Deltares en Nelen & Schuurmans opgezette methodiek verfijnd en voor het hele beheersgebied toegepast. Door de resultaten van de modelsimulaties en analyses van alle polders te combineren is een gebiedsbreed inzicht verkregen in het functioneren van het watersysteem bij wateroverlastsituaties.



## Nieuw richtpunt voor het ontwerp (onderdeel 1)

Op basis van onderzoek naar de herijking van het afvoercriterium wordt aanbevolen om de huidige ontwerpnorm te heroverwegen als gevolg van klimaatverandering en waar nodig ruimtelijk gedifferentieerd naar boven bij te stellen met inachtneming van locatie

specifieke aandachtspunten. Hierbij is het van belang om in overleg met betrokkenen aandacht te besteden aan de mogelijkheden voor bodemverbetering om de infiltratiecapaciteit te verbeteren. Het waterschap is een faciliterende rol geadviseerd op het gebied van kennis en proces met als doel dat agrariërs bodemaatregelen inzetten voor een betere gewasopbrengst, een vitalere bodem en waterhuishouding en daarmee risico's op schade als gevolg van klimaatverandering verminderen.

### Mogelijkheden noodbemaling boezem (onderdeel 2)

Op een deel van de boezem blijkt extra afvoer door noodbemaling een mogelijkheid om tijdelijke wateroverschotten te verdelen en schades in poldersystemen te beperken of zelfs te voorkomen. Een belangrijke vraag is evenwel of de noodbemaling tijdig kan worden geïnstalleerd en of de weersvoorspellingen in de aanloop naar de natte perioden voldoende nauwkeurig zijn (of worden) om daarop te kunnen anticiperen.

### Analyse poldersystemen en nadere analyse risicogebieden (onderdeel 3)

Herijking van de ontwerpnorm en noodbemaling bieden echter geen uitkomst voor de kortdurende, extreem hevige buien, waarbij een grote hoeveelheid neerslag in korte tijd valt en een deel van het water op het maaiveld blijft staan of via het maaiveld afstroomt. Om de negatieve gevolgen van dit type buien op te kunnen vangen, moeten de oplossingen in de polders zelf worden gezocht, bijvoorbeeld door overtollig water van schade-intensieve naar schade-extensieve gebieden te leiden. De mogelijkheden hiervoor zijn in een gebiedsbrede modelstudie onderzocht.

In de gebiedsbrede modelstudie (onderdeel 3) is het functioneren van het watersysteem tijdens extreme afvoersituaties onderzocht. Hierbij zijn per (cluster van) polder(s):

- de knelpunten inzichtelijk gemaakt;
- de omvang van risico's bepaald;
- de knelpunten bepaald die in het (hoofd)watersysteem door het hoogheemraadschap kunnen worden opgelost;
- de knelpunten bepaald die met samenwerkingspartners kunnen worden opgelost;
- de (kosten)effectiviteit van mogelijke maatregelen in het watersysteem afgeleid;
- een modellen database opgebouwd waarmee advies kan worden gegeven over diverse vraagstukken zoals herinrichting bij ruimtelijke ontwikkelingen, afwentelen van schades en ontwerp-vraagstukken.

De resultaten van de gebiedsbrede analyse tonen een verspreid inundatie- en schadebeeld over het gehele beheergebied, met een aantal lokale uitschieters. Ruim de helft van de schades wordt veroorzaakt door plasvorming. Hiervoor zouden landeigenaren (publiek of privaat) maatregelen kunnen treffen. Het andere deel van de schades wordt veroorzaakt door inundaties vanuit het watersysteem. In onderstaande tabel zijn de totale schades gegeven, opgesplitst naar schade door inundatie vanuit het watersysteem en schade door plasvorming en naar schades in het stedelijk gebied en het landelijk gebied.

Type inundatie	Schade [miljoen €]	Percentage [%]	Percentage per landgebruik [%]
Plasvorming stedelijk gebied	186	39	53
Watersysteem stedelijk gebied	67	14	
Plasvorming landelijk gebied	65	14	47
Watersysteem landelijk gebied	156	33	
Totaal	475	100	100

In het stedelijk gebied ontstaat de meeste schade door plasvorming. In het landelijk gebied ontstaat de meeste schade door inundatie vanuit het watersysteem. Hoewel de verdeling tussen de schade in het landelijke en stedelijk gebied procentueel dicht bij elkaar ligt, heeft het stedelijk gebied met 17% van het areaal naar verhouding een groot aandeel in het totale schaderisico.

Het onderzoek heeft zeer veel inzichten en informatie opgeleverd:

- Het onderzoek heeft het begrip van de systeemwerking vergroot en heeft inzicht gegeven in de belangrijkste kwetsbaarheden. Tevens heeft het onderzoek inzicht gegeven in de (kosten)effectiviteit van maatregelen om de gevolgen van extreme neerslag te minimaliseren.
- De resultaten geeft inzicht in de oorzaken van optredende wateroverlast. Hiermee kan het de wateroverlast gericht met de omgeving aanpakken. Ter ondersteuning hiervan biedt deze studie ook al een eerste inzicht in de kosten effectiviteit van veel voorkomende maatregelen.
- Met het onderzoek kan het watersysteem robuust worden ingericht. Het onderzoek biedt inzicht in de kwetsbare locaties voor wateroverlast, maar laat met de zogeheten 'ruimtekaart' ook zien welke (schade extensieve) locaties geschikt zijn voor de opvang van overtollig water als gevolg van extreme neerslag en welke afvoerroutes daarvoor essentieel zijn. Met deze inzichten leveren de resultaten ook belangrijke input voor de communicatie rondom initiatieven op het gebied van ruimtelijke ordening.
- Het onderzoek heeft een gebiedsdekkende modellendatabase opgeleverd. De modellen zijn op een hoog detailniveau vervaardigd en kunnen in vervolgvragen worden ingezet.



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding en globale opzet onderzoek

De afgelopen jaren heeft het hoogheemraadschap geïnvesteerd in de inrichting van het watersysteem om wateroverlast te beperken en het systeem aan de normen (NBW) te laten voldoen. Dit betekent echter niet dat er geen wateroverlast meer kan optreden. Het hoogheemraadschap heeft daarom in het waterprogramma aangegeven samen met de omgeving in te willen zetten op een verdere ontwikkeling naar een klimaat adaptieve leefomgeving, waarbij de bestrijding van wateroverlast zoals omschreven in het Deltaprogramma gezamenlijk wordt ingevuld (zie ook de visie in par. 2.1).

Om wateroverlast als gevolg van extreme neerslag te beperken, wil het hoogheemraadschap inzicht in de gevolgen van hevige neerslag, waarbij de verschillende gebieden met elkaar kunnen worden vergeleken. Het voorliggende onderzoek vormt de basis voor een nieuw programma van maatregelen -gericht op de reductie van wateroverlast- en op de positionering van het hoogheemraadschap als samenwerkingspartner die met de omgeving inzet op een klimaatbestendig watersysteem en klimaatbestendige ruimtelijke inrichting.

Om inzicht te verkrijgen in de gevolgen van de extreme neerslag is een modelonderzoek uitgevoerd. Met 3Di-modellen zijn op een hoog detailniveau de waterstromen en inundaties berekend om zo inzicht te verkrijgen in de werking van het huidige watersysteem en de gevolgen van extreme neerslag. Daarnaast is met de 3Di-modellen inzicht verkregen in de effectiviteit van maatregelen die het hoogheemraadschap zelf kan nemen en maatregelen die het hoogheemraadschap kan stimuleren met haar samenwerkingspartners.

De resultaten van de 3Di-modellen zijn gecombineerd tot gebiedsbrede figuren van de inundatieschades, inundatiedieptes en effectiviteit van de maatregelen in met name het watersysteem. Hiermee kunnen er gebiedsbrede analyses worden uitgevoerd, conclusies getrokken worden en kunnen polders worden vergeleken. Daarnaast is een aantal situaties verder uitgewerkt om te laten zien welke inzichten er zijn verkregen en hoe de resultaten zijn toe te passen bij ruimtelijke inrichtingsvraagstukken en ontwerp vragen.

## 1.2 Doelstelling

Het project heeft als doel een gebiedsbrede analyse uit te voeren naar wateroverlastproblematiek om per (cluster van) polder(s):

- de knelpunten inzichtelijk te maken;
- de omvang van risico's te bepalen;
- de knelpunten te bepalen die in het (hoofd)watersysteem door het hoogheemraadschap kunnen worden opgelost;
- de knelpunten te bepalen die alleen met samenwerkingspartners kunnen worden opgelost;
- de (kosten)effectiviteit van mogelijke maatregelen in het watersysteem af te leiden;
- een modellen database op te bouwen waarmee advies kan worden gegeven over diverse vraagstukken zoals herinrichting bij ruimtelijke ontwikkelingen, afwentelen van schades en ontwerp vraagstukken.

Daarnaast heeft het project als doel om gebiedsbrede inzichten te verkrijgen door de resultaten van de modelsimulaties en analyses van alle polders te combineren.

### 1.3 Werkwijze

Het project is uitgevoerd door HKV en HydroLogic in nauwe samenwerking met Nelen & Schuurmans, Deltares en HHNK. Enerzijds om het 3Di-instrumentarium zo effectief mogelijk in te zetten en anderzijds om tot een gestroomlijnde en consistente aanpak te komen waarmee kwetsbare locaties en (kosten)effectieve oplossingen kunnen worden geïdentificeerd. De hier gepresenteerde aanpak is een verfijning van de aanpak die door Deltares in samenwerking met Nelen & Schuurmans ter voorbereiding op dit project is opgezet (Ref. 1).

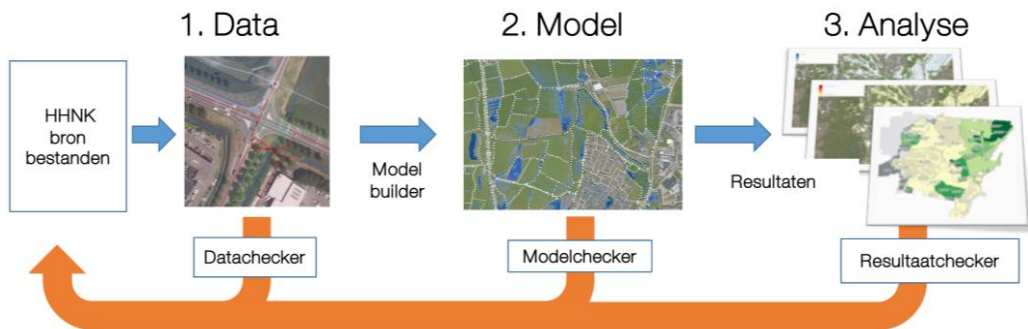
De gebiedsbrede analyse bestaat uit 3 onderdelen (Figuur 1). In onderdeel 1 is op basis van literatuur een nieuw richtpunt voor het ontwerp van het watersysteem bij klimaatverandering uitgewerkt en is aan het hoogheemraadschap advies gegeven over het vervolgtraject. Tevens is in onderdeel 1 onderzoek gedaan naar de generieke mogelijkheden voor bodemverbetering om de gevolgen van hevige neerslag te beperken en is geanalyseerd of het wenselijk is bodemverbetering in de te onderzoeken maatregelen mee te nemen. In onderdeel 2 is onderzoek gedaan naar eventuele ruimte in het boezemsysteem om extra belasting door klimaatverandering via noodbemalingen in de polders op te vangen. Vervolgens is in onderdeel 3 de door Deltares en Nelen & Schuurmans opgezette methodiek (Ref. 1) toegepast en verfijnd.



Figuur 1. Overzicht van de doorlopen stappen voor de 'Gebiedsbrede analyse wateroverlast'.

De verfijnde methodiek (Figuur 2) is in de periode 2018-2020 voor de 57 polderclusters van het hoogheemraadschap toegepast. In deze methodiek zijn vanuit de brondata rechtstreeks modellen opgebouwd door toepassing van diverse tools. Zo is er een datachecker ontwikkeld waarmee de volledigheid van de bronbestanden is gecontroleerd. Vervolgens zijn door middel van de modelbuilder geautomatiseerd 3Di-modellen opgebouwd. De modellen zijn verbeterd door diverse testberekeningen uit te voeren, de resultaten met de modelchecker te toetsen en te bespreken met gebiedskenners. Met de verbeterde modellen zijn de definitieve toetsingsommen uitgevoerd. De resultaten van alle polders zijn samengevat in deze rapportage. De resultaten per polder zijn als digitale bijlage aan dit rapport toegevoegd.

Parallel aan de modellering zijn verbeteringen aan de basisdata doorgevoerd. Hiervoor is een grotendeels geautomatiseerde datacontrole uitgevoerd en zijn opmerkelijke gegevens nader geanalyseerd en zo nodig besproken met gebiedsbeheerders. Alle op deze wijze in de data geconstateerde fouten zijn verbeterd en teruggekoppeld aan het hoogheemradschap zodat ze in de legger en beheersystemen kunnen worden aangepast. Op deze wijze kunnen vanuit de verbeterde brondata eenvoudig weer nieuwe modellen worden opgebouwd.



Figuur 2. Werkwijze bij modellering met terugkoppeling van de resultaten uit de diverse tools rechtstreeks naar de brondata.

## 1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de 'Visie op klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast' uiteengezet en is op hoofdlijnen een toelichting gegeven op de methodiek voor de nadere analyse. Tevens is in dit hoofdstuk een toelichting gegeven op de maatregelen die in het voorliggende project zijn onderzocht om de negatieve gevolgen van hevige neerslag te beperken.

In hoofdstuk 3 is het richtpunt voor ontwerp toegelicht. Hierin wordt de historische, huidige en toekomstige afvoerrichtlijn van het watersysteem beschouwd en advies gegeven over een herijking van de ontwerpnorm. Tevens zijn in hoofdstuk de resultaten gegeven van het verkennende onderzoek naar mogelijkheden voor bodemverbetering om de gevolgen van hevige neerslag te beperken.

In hoofdstuk 4 zijn de resultaten gegeven van het onderzoek naar de mogelijkheden voor noodbemaling vanuit de polders naar de boezem.

In hoofdstuk 5 is de toegepaste methodiek voor klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast uitgewerkt. Hierbij zijn ter illustratie de resultaten gegeven van de nadere analyse van de Groot-Limmerpolder. Detailinformatie van de andere polders kunnen worden ingezien in de digitale bijlage bij dit eindrapport.

In hoofdstuk 6 zijn de resultaten voor het hele beheergebied beschouwd waarbij regionale verschillen en opvallende zaken zijn geanalyseerd en gepresenteerd. Tot slot zijn in hoofdstuk 7 door middel van enkele voorbeelden een aantal fundamentele inzichten uitgewerkt welke gedurende dit onderzoek zijn opgedaan.



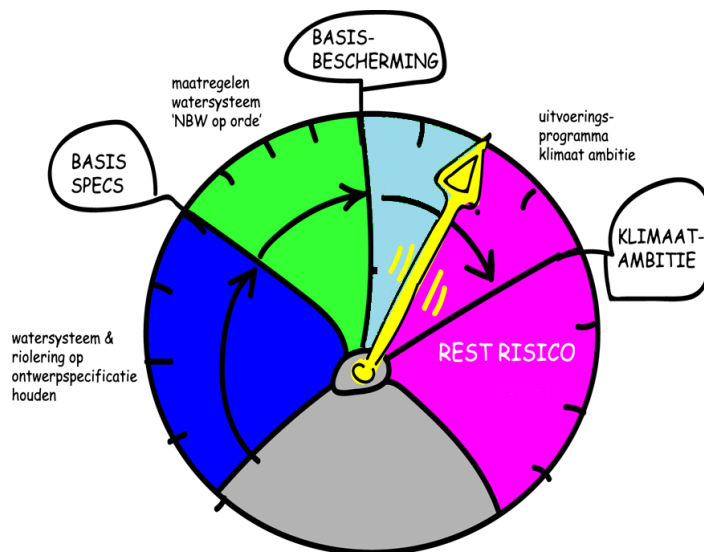
## 2 Visie en methodiek

### 2.1 Visie op klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast

Het hoogheemraadschap heeft het watersysteem ingericht conform ontwerpnormen, zodat het onder maatgevende omstandigheden voldoet aan de leggereisen voor maximaal toelaatbare opstuwing bij kunstwerken en verhang in de watergangen. Tevens zijn de watersystemen getoetst aan de normen voor wateroverlast zoals die zijn vastgelegd in de provinciale verordening. Daarbij zijn maatregelen gedefinieerd en vanaf 2006 uitgevoerd in een eerste programma wateropgave. De normen in de provinciale verordening zijn gebaseerd op het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) uit 2008 met het bijbehorende klimaatscenario uit 2006. De systematiek van het NBW en de provinciale verordening biedt ruimte om op basis van een kostenbatenanalyse een gebiedsnorm vast te stellen.

Wanneer een systeem volgens de geldende normen op orde is en een bepaalde basisbescherming is gerealiseerd (de 'basis specs' en 'basisbescherming' in Figuur 3), betekent dit niet dat het gebied bestand is tegen alle extreme buien. Als buien extremer zijn dan de buien waarvoor de basisbescherming is gerealiseerd, kan wateroverlast optreden terwijl het hoogheemraadschap aan haar zorgplicht heeft voldaan. Het hoogheemraadschap ziet in dit bereik boven de basisbescherming mogelijkheden voor de waterbeheerder om haar ingelanden beter van dienst te zijn ('klimaat ambitie' in Figuur 3).

Bij extremere buien kan water op onverwachte locaties op het maaiveld komen te staan of gaan stromen en kunnen onverwachte belastingen van het watersysteem ontstaan met grote gevolgen. Deze gevolgen kunnen mogelijk met relatief eenvoudige maatregelen worden voorkomen, door bijvoorbeeld water 'slimmer' te sturen. In het voorliggende onderzoek zijn daarom ook de gevolgen van deze extreme situaties in beeld gebracht, en is geanalyseerd voor welke inundaties het hoogheemraadschap primair verantwoordelijk is (inundaties vanuit het watersysteem), voor welke inundaties de grondeigenaar primair verantwoordelijk is (inundaties op het maaiveld als gevolg van plasvorming) en is onderzocht of deze inundaties met kosteneffectieve maatregelen kunnen worden verminderd of zelfs voorkomen.



Figuur 3. Klimaatambitie. (Deltares, 2017).

Overigens kunnen buien zodanig extreem zijn dat maatregelen om de wateroverlast te beperken niet meer kosteneffectief zijn; de kosten van de maatregelen zijn dan hoger dan de inundatieschade die ze reduceren. In het voorliggende onderzoek zijn daarom enerzijds de kosten van de maatregelen bepaald en anderzijds is de reductie van de inundatieschade (de baten) als gevolg van de maatregelen berekend. Bij een ongunstige kosten/baten verhouding kan onderbouwd worden besloten om (een deel van) de maatregelen niet te realiseren en inundaties te accepteren. Een mogelijkheid om de kosteneffectiviteit te verhogen is om de maatregelen te combineren met maatregelen die samenwerkingspartners in het gebied uitvoeren.

De gevolgen van extreme neerslag kunnen kortom niet alleen door het hoogheemraadschap worden opgelost (Ref. 1). Het hoogheemraadschap en haar samenwerkingspartners zijn dan ook naast hun individuele verantwoordelijkheid gezamenlijk aan zet om de gevolgen van extreme neerslag te beperken en zo mogelijk op te lossen. Resultaten uit het voorliggende onderzoek stellen het hoogheemraadschap in staat om goed onderbouwd en in overleg met haar omgeving ook het waterbeheer in het bereik boven de basisbescherming te verbeteren.

## 2.2 Afbakening van het onderzoek

In voorliggend onderzoek zijn gedetailleerde berekeningen en analyses uitgevoerd om te toetsen op de ontwerpspecificaties ('basis specs') en zijn maatregelen gedefinieerd om het watersysteem op orde te houden. Daarnaast zijn berekeningen en analyses uitgevoerd om de kwetsbare locaties en schaderisico's in beeld te brengen bij verschillende combinaties van extreme neerslag, en initiële bodemcondities.

De berekeningen en analyses zijn gedetailleerd wat betreft de resolutie en het detailniveau waarmee wateroverlast wordt berekend. De bepaling van de kans op inundaties is echter verkennend van karakter. Vanwege het detailniveau van de 3Di-berekeningen en de bijbehorende rekentijden is het niet mogelijk om alle berekeningen uit te voeren die nodig zijn voor het bepalen van statistiek van inundaties volgens de standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast (Ref. 5).

Gegevens over het rioleringsstelsel in het onderzoeksgebied is niet voor alle locaties beschikbaar of niet van het juiste detailniveau. Hierdoor is de keuze gemaakt om het effect van riolering te implementeren door basaal de berging in het rioleringsstelsel te verwerken in de bodemberging. Doordat de afvoercapaciteit van de riolering vereenvoudigd is geschematiseerd, wordt er op sommige locaties in stedelijk gebied teveel plasvorming of water op straat gesimuleerd. Daarnaast kan de wateroverlast vanuit het oppervlaktewater te klein zijn gesimuleerd doordat overstorten op het oppervlaktewater niet zijn geschematiseerd. Ook de specifieke inrichting van de drainage per perceel is niet meegenomen. Deze vereenvoudigingen zijn benoemd en meegenomen bij de beoordeling van de resultaten met de gebiedsbeheerders en het vormgeven van de maatregelen tegen wateroverlast.

## 3 Richtpunt ontwerp en bodemverbetering

### 3.1 Inleiding

In het voorliggende project is onderzoek gedaan naar de totstandkoming van de huidige ontwerpnorm in het beheergebied van HHNK en de gevolgen van klimaatverandering op de toekomstige ontwerpnorm. Op basis van de analyse is een richtpunt voor het ontwerp uiteengezet, waarbij is aangegeven welke aspecten aandacht behoeven (Bijlage A). Uit het onderzoek naar de afvoerrichtlijn bleek de hoeveelheid (bodem)berging een bepalende factor. Om te bepalen of en in welke mate bodemverbetering als een klimaatadaptatieve waterbeheersmaatregel kan worden gezien, is daarom tevens onderzoek gedaan naar concrete mogelijkheden voor bodemverbetering (Bijlage B). In dit hoofdstuk zijn de belangrijkste resultaten van het onderzoek naar de afvoerrichtlijn en de mogelijkheden voor bodemverbetering samengevat.

### 3.2 Richtpunt voor het ontwerp

#### 3.2.1 Literatuuronderzoek historie en ontwikkeling afvoerrichtlijn

Een groot gedeelte van het beheersgebied van het hoogheemraadschap is bemalen. Deze bemaling is noodzakelijk om de waterstand in een polder te reguleren. De dimensies van het watersysteem en de capaciteit van de gemalen worden meestal bepaald door uit te gaan van een afvoerintensiteit van 14,4 mm per dag. Dit betekent dat watersystemen zo worden ontworpen dat deze in staat zijn om dagelijks 14,4 mm af te voeren via het stelsel van watergangen, kunstwerken en gemalen.

Zelfstandig raadgevend deskundige op het gebied van regionaal waterbeheer en landbouwwaterhuishouding Jan van Bakel (de Bakelse Stroom), heeft in het najaar van 2017 een literatuuronderzoek verricht naar de historie en ontwikkeling van de afvoerrichtlijnen. In Bijlage A is deze volledige literatuurstudie terug te vinden. De volgende paragrafen geven een beknopte samenvatting van dit literatuuronderzoek.

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat er al eerder een analyse is gemaakt van de benodigde gemaalcapaciteit. Schultz (1996) geeft een gedegen overzicht van de historie van de richtlijnen voor de gemaalcapaciteit. De auteur geeft in zijn boek een overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen in het afleiden van de benodigde gemaalcapaciteit en stelt dat de benodigde gemaalcapaciteit afhangt van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden.

Er worden in de publicatie diverse bronnen aangehaald. De, voor zover bekend, oudste methode voor het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden wordt gegeven door Simons en Greve (1844). Simons en Greven rekenden met meetreeksen van het neerslagoverschot (neerslag – verdamping). Op basis van bijna honderd jaar waarnemingen van het neerslagoverschot van Zwanenburg kwamen zij op 129 mm/maand, ofwel 4,5 mm/dag.

Het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden voor de Wieringermeer werd gebaseerd op een enkele neerslaggebeurtenis, resulterend in een maatgevend waterbezwaar van 74,4 mm in 10 dagen, ofwel 7,5 mm/dag. Van Rossum en De Vries



(1967) verfijnden de Wieringermeermethode door rekening te houden met de vertraging tussen neerslag en afvoer.

Het berekenen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden in de Markerwaard werd gebaseerd op langjarige meetgegevens van de Noordoostpolder (neerslag, afvoer en peilen). Voor het waterbezwaar wordt veelal uitgegaan van landbouwkundig gebruik. Stedelijke gebieden en kassen reageren sneller op afvoer en natuurgebieden trager. Dit vertaalt zich in een ander waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden.

De benodigde gemaalcapaciteit is niet per definitie gelijk aan een het maatgevende waterbezwaar. Simons en Greve (1967) stellen dat de gemaalcapaciteit gelijk moet zijn aan het maatgevend waterbezwaar gedurende de maand die hiervoor is gekozen. In latere publicaties wordt een verband gelegd met de diepte van de ontwatering (i.c. de beschikbare bergingsmogelijkheden).

In Tabel 1 is de 'historische ontwikkeling' van de benodigde gemaalcapaciteit samengevat. De bemalingscapaciteit anno 1996 ligt volgens Schulz tussen 10 en 15 mm per dag.

Uit de literatuur blijkt dat er geen eenduidige methode is om de benodigde gemaalcapaciteit af te leiden. Wel is er een duidelijke ontwikkeling te zien in de manier waarop de afvoerrichtlijn wordt afgeleid, steeds met medeneming van nieuwe inzichten over klimaat, berging, grondgebruik en ont- en afwatering.

Tabel 1 Samenvatting van historische ontwikkeling van de benodigde gemaalcapaciteit.

Auteur(s)	Jaar	Gemaalcapaciteit	Opmerkingen
Simons en Greve	1844	4,5 mm/d	Vonden maatgevend neerslagoverschot van 196 mm/maand te hoog
Storm Buijsing	1864	5,9 mm/d	Neerslagoverschot natst bekende zomermaand
Elink Sterk	1897	8 mm/d	Neerslagoverschot 20-31 okt 1870
Beekman	1932	8 mm/d	Kortere periode is bepalend
Wieringermeer (Commissie Lovink)	1924	8 mm/d plus toeslagen voor kwel (102 mm/d) en voor revisie (3-4 mm/d)	
Visser		Afhankelijk van percentage open water en toelaatbare peilstijging	Geen literatuurverwijzing gevonden
Dibbits	1950	14,4 mm/d Noord-Holland 10 mm/d Groningen	Reductie bij grote polders
Boer en Kielman	1956	8 mm/d voor grasland en 14,4 mm/d voor bouwland	Neerslag van zes opeenvolgende dagen moet worden afgevoerd
Werkgroep ontwerptechniek	1967	11,5 mm/dag	Opbouw op basis van landgebruik die elk een

Auteur(s)	Jaar	Gemaalcapaciteit	Opmerkingen
			bepaalde afvoerintensiteit hebben
Klein	1968	14,5 mm/d	Gedetailleerde berekening met bepaalde regenduurlijn als input
Markerwaard	1985	11,9 mm/d bij 10% open water (over het algemeen hoger dan de werkelijkheid) en 60 cm peilstijging eens per 10 jaar	Simulatie van neerslag-afvoerproces; eisen aan toelaatbare peilstijging. Netto waterbezwaar van NOP als input

### 3.2.2 Effect klimaat op de afvoerrichtlijn

Op dit moment worden veel poldergebieden ingericht en beheerd volgens de afvoerrichtlijn van 14,4 mm/dag. Door allerlei maatschappelijke ontwikkelingen en klimaatverandering is het hanteren van deze norm echter niet meer vanzelfsprekend. Aanvullend op het literatuuronderzoek uit par. 3.2 is daarom onderzocht wat het zou betekenen als de afvoerrichtlijn op vergelijkbare wijze als in het verleden opnieuw zou worden afgeleid met inachtneming van klimaatverandering.

Hoewel er geen eenduidige methode blijkt om een nieuwe afvoerrichtlijn af te leiden, tonen de gegeven rekenvoorbeelden in het onderzoek (Bijlage A) aan dat klimaatverandering wel degelijk van grote invloed is op de benodigde afvoercapaciteit. In Tabel 2 Tabel 3 is als voorbeeld op basis van de regenduurlijnmethode de benodigde afvoercapaciteit gegeven voor een maatgevende situatie (T1), uitgaande van 20 mm berging in het oppervlaktewater en de bodem. Voor het klimaat rondom 1980 is de benodigde afvoercapaciteit 14 mm/dag. Voor het klimaat voor zichtjaar 2050 neemt de benodigde afvoercapaciteit toe tot 22 mm/dag, ofwel een toename van orde 60%.

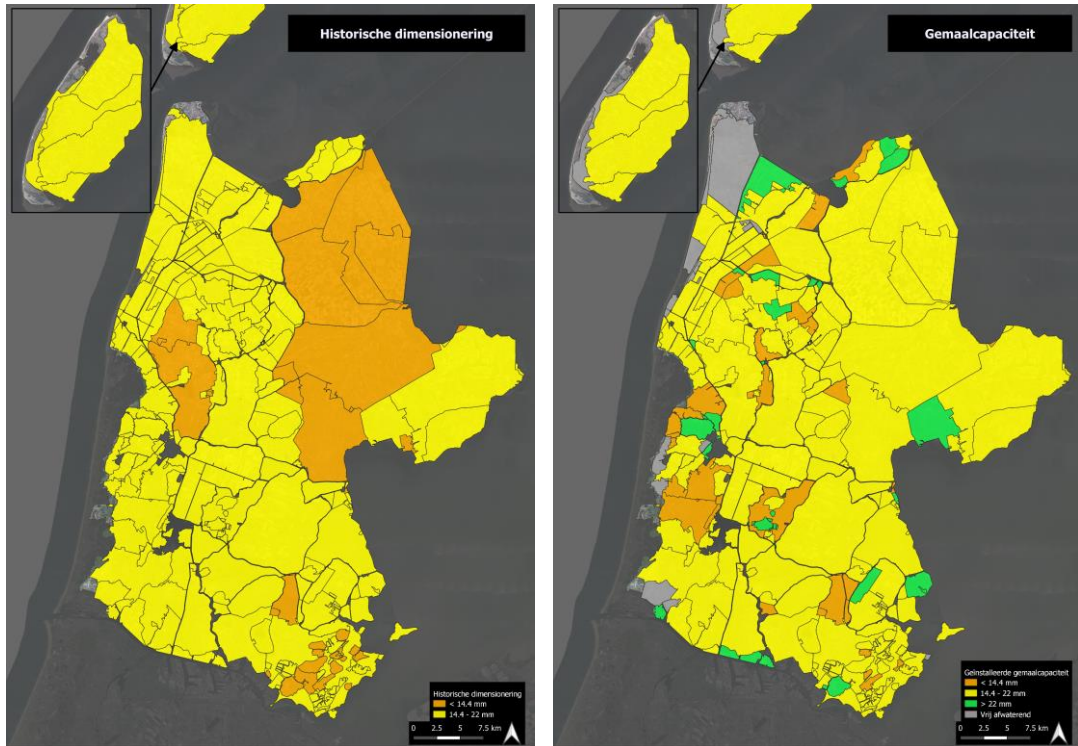
Tabel 2. Overzicht van de benodigde afvoercapaciteit voor T=1 (met 20mm berging).

	T = 1
<i>Berging:</i>	<i>20 mm berging</i>
1980	14 mm/dag
2015	18 mm/dag
2030	21 mm/dag
2050	22 mm/dag
2085	24 mm/dag

Het zondermeer verhogen van de afvoernorm in het hele gebied heeft echter enorme consequenties. Immers niet alleen de afvoercapaciteit van de watergangen en kunstwerken in de polders moeten worden opgehoogd, hetzelfde geldt voor het boezemsysteem. Daarbij heeft het verhogen van de afvoernorm tevens effect op de belasting op het hoofdwatersysteem. Met het toepassen van dezelfde norm voor het gehele gebied wordt bovendien geen rekening gehouden met de diversiteit in hydrologische eigenschappen en het gebruik van de gebieden. Zo bestaan sommige veenweidepolders bijvoorbeeld voor een groot deel uit relatief laagwaardige graslanden, terwijl in veel polders in de Noordkop hoogwaardige bloembollen worden geteeld.

### 3.2.3 Advies richtpunt ontwerp

Geadviseerd wordt de traditionele methode los te laten en met een verfijnde methodiek ruimtelijk gedifferentieerd de benodigde afvoercapaciteit te bepalen. De historische dimensionering van de watersystemen, die in de legger en onderhoudsprogramma's is verwerkt, geldt hierbij als ondergrens (zie ook de linker figuur in Figuur 4). Het is de taak van de waterbeheerders deze in stand te houden. In de rechter figuur van Figuur 4 is voor de volledigheid de huidige gemaalcapaciteit gegeven (juni 2020).



Figuur 4. De linker figuur toont de historische dimensionering de verschillende ruilverkavelingen. De rechter figuur toont de geïnstalleerde gemaalcapaciteit (juni 2020).

Om tot een robuuste, toekomstbestendige en goed onderbouwde inrichting te komen, dient daarbij het gehele spectrum aan hydrologische omstandigheden (van droog tot nat) te worden beschouwd op basis van een gebieds- en risicogerichte benadering. Het watersysteem dient daarbij zodanig te worden gedimensioneerd dat de (maatschappelijke) kosten/baten onder droge, gemiddelde en natte situaties worden geoptimaliseerd.

De gewenste afvoerrichtlijn dient het resultaat te zijn van een zorgvuldig gebiedsproces waarin gezamenlijk de klimaatambitie wordt vastgesteld. De afvoerrichtlijn varieert per type gebied, waarbij o.a. landgebruik, de beschikbare berging en het grondgebruik bepalend zijn voor de gewenste inrichting en onderhoud. Tijdens het gebiedsproces zal tevens blijken of nog andere locatiespecifieke aspecten en/of ontwikkelingen in beschouwing moeten worden genomen. Naar verwachting zal uit de gebiedsprocessen een goed onderbouwde, gezamenlijke keuze volgen voor een (ruimere) dimensionering. Zodoende gaan gebieden geleidelijk over naar een aangepaste en gedifferentieerde afvoerrichtlijn. Let wel dat eventueel ook een autonome verslechtering als gevolg van klimaatverandering kan worden geaccepteerd als geen kosteneffectieve maatregelen worden gevonden.

Voor een robuuste inrichting is daarom inzicht in de werking van het watersysteem essentieel. Zo blijken sommige watergangen op basis van het voorliggende onderzoek belangrijke afvoerroutes in wateroverlastsituaties en zijn ze cruciaal voor het herverdelen van overtollig water en daarmee de minimalisering van schade. Om de werking van deze routes te garanderen, kan het nodig zijn de afvoercapaciteit van deze watergangen te vergroten. Voorliggend onderzoek biedt de informatie die nodig is om gebiedsbreed dergelijke afvoerroutes in beeld te krijgen en na te gaan welke afvoercapaciteit van deze watergangen is vereist. In par. 7.2 is in het praktijkvoorbeeld van Volendam het belang van een dergelijke afvoerroute toegelicht.

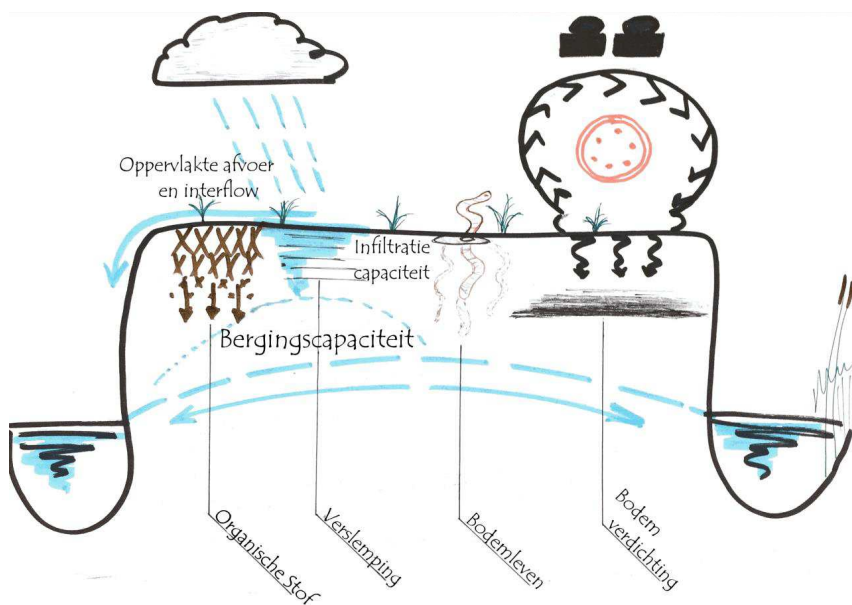
### 3.3 Mogelijkheden bodemverbetering

#### 3.3.1 Inleiding

Door diverse overheden wordt ook de functie van de bodem als een veelbelovende mogelijkheid gezien voor een klimaatadaptatieve waterbeheersmaatregel. In het kader van het voorliggende onderzoek (Figuur 1) is door Aequator onderzocht of (en zo ja hoe) bodemverbetering een positief effect heeft op de infiltratiecapaciteit en bodemberging om de gevolgen van hevige buien te verminderen. De effectiviteitsanalyse is op basis van literatuur en een expertoordeel uitgevoerd.

#### 3.3.2 Mogelijkheden bodemverbetering

Het onderzoek naar bodemverbetering heeft als doel een overzicht te geven van de effectiviteit van bodemverbetering op de verhoging van de bergings- en/of infiltratiecapaciteit van de bodem. In Figuur 5 is een schematisch profiel gegeven van enkele hydrologische bodemparameters die een rol kunnen spelen in bodemverbeterende maatregelen.



Figuur 5. Schematisch profiel van enkele hydrologische bodemparameters die een rol kunnen spelen in bodemverbeterende maatregelen.

Uit de verkennende literatuurstudie komt naar voren dat voor diverse maatregelen (nog) geen eenduidig beeld bestaat van de effecten en dat een vertaling naar hydrologische parameters slechts gedeeltelijk of voor specifieke bodems en omstandigheden geldt.

De volgende maatregelen zijn voor de verschillende bodemsoorten (klein, zand en veen) onderzocht:

- Organisch stof (OS) gehalte verhogen en dikte laag met organische stof verhogen;
- Verdichting bodem voorkomen en opheffen;
- Bodemleven verbeteren;
- Verslemping en verdichte toplaag tegengaan of opheffen.

De inschatting op basis van dit literatuuronderzoek en praktijkervaring is dat verhoging van het organisch stofgehalte maar een beperkt effect heeft op de bergingscapaciteit in de onverzadigde zone in natte situaties (GHG). Voor droge situaties (GLG) wordt het effect van toename in de OS en daarmee gepaard gaand bodemleven op de infiltratie- en bergingscapaciteit effectiever geacht. De vergroting van de bergingscapaciteit door verhoging van het gehalte OS voor bodems met een initieel laag OS-gehalte (<2%) ligt in de orde-grootte van 1 mm per procent verhoging organisch stof. Daarbij moet bedacht worden dat een dergelijke verhoging reeds grote inspanningen en een lange adem (jaren) vereist. Op polderniveau moet worden bekeken op welk percentage van de bodems een mogelijke verhoging van het OS-gehalte betrekking kan hebben.

Meer perspectief biedt het voorkomen van maaiveldafvoer en interflow door de verhoging van de infiltratiecapaciteit en het voorkomen of opheffen van structuurbederf en van de verdichting van lagen beneden de bouwvoor van intensief beteelde landbouwgronden. Daardoor kan bij hevige neerslag een grotere fractie van de neerslag in de grond infiltreren of doorstromen naar de onverzadigde zone beneden de bouwvoor. Daardoor wordt de bergingscapaciteit van de onverzadigde zone beter benut. Stel, deze is in de GHG-situatie gemiddeld 40 mm (voor zand- en kleigronden, Massop et al., 2012). In een situatie met hoge neerslagintensiteiten treden veel maaiveldafvoer en interflow op, waardoor de bergingscapaciteit in de bodem maar voor de helft wordt benut. Het opheffen van maaiveldafvoer en interflow kan voor zand- en kleigronden resulteren in een verhoging van de bergingscapaciteit in de onverzadigde zone met maximaal 20 mm. De precieze effecten zijn echter afhankelijk van de lokale omstandigheden en op voorhand moeilijk te kwantificeren.

Omdat is gebleken dat een deel van deze maatregelen naar verwachting niet of niet op korte termijn het beoogde resultaat zal halen en dat effecten van mogelijk effectieve maatregelen op voorhand niet (eenduidig) zijn te kwantificeren, is besloten de bodemverbetering in het voorliggende onderzoek niet als standaard maatregel te onderzoeken. Gezien de potentie is in de volgende paragraaf wel een procesadvies gegeven aan het hoogheemraadschap over mogelijkheden om hier vervolg aan te geven. Een uitgebreider procesadvies is gegeven in Bijlage A.

### 3.3.3 Procesadvies bodemverbetering

#### Lopende initiatieven

In het beheergebied van HHNK loopt op dit moment het programma 'Samenwerken aan bodem en water': een samenwerking tussen de hoogheemraadschappen Hollands Noorderkwartier en Rijnland, het hoogheemraadschap Amstel, Gooi en Vecht, de provincie Noord-Holland, LTO-Noord en Noord-Hollandse agrarische collectieven. Het programma



past binnen het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer van LTO. Binnen het programma 'Samenwerken aan bodem en water' is een omvangrijke maatregellijst opgesteld.

### Rol HHNK in het lopende programma

Geadviseerd wordt om het hoogheemraadschap een faciliterende rol op het gebied van kennis (watersysteem, waterkwaliteit en ecologie) en proces in te laten nemen. Om aan deze faciliterende rol concrete invulling te geven, wordt geadviseerd om de uiteenlopende maatregelen verder te clusteren en effectiviteit te koppelen aan diverse bedrijfssectoren en gebiedskenmerken.

Een actieve rol in de voorlichting, communicatie en kennisdeling wordt geadviseerd om vroegtijdige bewustwording en urgentie van de problematiek (al dan niet integraal) te creëren. Hierbij kan gedacht worden aan het organiseren van themabijeenkomsten, cursussen of demo's waarbij een actieve rol voor het hoogheemraadschap is weggelegd om kennis te delen over het watersysteem, de kansen en innovaties. Voor het hoogheemraadschap resulteert deze actieve rol in een betere sturing en inzicht in de verwachte effecten op de waterkwantiteit- en kwaliteit.

Het hoogheemraadschap kan definities stellen om vervolgens agrariërs binnen die definities meer ondernemersvrijheid te geven of op andere wijze in bedrijfsvoering of gebiedsgebruik te compenseren. Zo wordt verantwoordelijkheid gedeeld, ontstaat een gemeenschappelijk belang en kan een agrariër de maatregelen dusdanig inzetten dat het hem een betere gewasopbrengst, vitalere bodem en waterhuishouding oplevert en daarmee vermindering van risico's op schade als gevolg van klimaatverandering.

Maatschappelijke relevantie en een gezamenlijk belang van de maatregelen kan in specifieke gebieden aanzienlijk worden vergroot wanneer agrarisch gebied in de nabijheid van grootschalige kascomplexen en verhard stedelijk gebied ligt. In deze ruimtelijke situatie kunnen enkele maatregelen zoals tijdelijke waterberging aan maaiveld of een tijdelijk flexibel peilbeheer voor de ontlasting van waterproblematiek in stedelijk gebied zorgen en in een later stadium voordeel bieden voor de agrarisch ondernemer. Dit is echter maatwerk en sterk afhankelijk van locatie specifieke omstandigheden.

In zowel landelijk als stedelijk gebied liggen kansen om in samenwerking met de agrariërs door middel van bodemverbetering de infiltratiecapaciteit te verbeteren. Op polderniveau moet worden bekeken op welk percentage van de bodems en in welke mate deze maatregel effect kan hebben. In Bijlage A zijn in detail de resultaten van het onderzoek gegeven en is het procesadvies uitgewerkt.

## 3.4 Synthese

Voorliggend onderzoek toont aan dat als gevolg van klimaatverandering de afvoerrichtlijn van 14,4 mm/dag dient te worden heroverwogen. Daarbij dient echter goed te worden nagedacht over de wijze waarop hieraan invulling wordt gegeven. Geadviseerd wordt met een verfijnde methodiek ruimtelijk gedifferentieerd de benodigde afvoercapaciteit te bepalen, waarbij de historische dimensionering van de watersystemen (die in de legger en onderhoudsprogramma's is verwerkt) als ondergrens geldt. Let wel dat watersystemen van oudsher niet zijn ontworpen om extreme buien op te kunnen vangen waarbij een grote hoeveelheid water in korte tijd valt. Een verhoogde afvoerrichtlijn van 14 naar 22 mm/dag

zal voor dit type buien niet de oplossing zijn, aangezien een groot deel van het water door extreme, kortdurende buien niet direct tot afvoer komt, maar op het maaiveld blijft staan.

Voor dit type buien is het van belang dat de aanwezige bodemberging zo goed mogelijk wordt benut, door te zorgen dat de infiltratiecapaciteit op orde is. Uit het onderzoek naar bodemverbetering is echter gebleken dat een deel van de maatregelen niet of niet op korte termijn positief effect hebben op de beschikbare bodemberging en dat de effecten bovendien op voorhand niet altijd (eenduidig) zijn te kwantificeren. In het voorliggende onderzoek is bodemverbetering daarom niet als standaard maatregel onderzocht, maar is het waterschap een faciliterende rol geadviseerd op het gebied van kennis en proces. Dit alles met als doel dat agrariërs bodemmaatregelen inzetten voor een betere gewasopbrengst, vitalere bodem en waterhuishouding en daarmee risico's op schade als gevolg van klimaatverandering verminderen.

## 4 Onderzoek mogelijkheden noodbemaling

### 4.1 Inleiding

In het kader van voorliggend onderzoek heeft het hoogheemraadschap mogelijkheden onderzocht om met noodbemaling naar de boezem wateroverlast in de polders op te lossen. De afvoercapaciteit van de boezem is naar verwachting echter niet overal voldoende om noodbemaling bij te kunnen plaatsen. Daarom is onderzocht op welke locaties extra afvoer van polders met noodbemaling tot knelpunten leidt in het boezemsysteem. Aan dit onderzoek liggen twee gedachten ten grondslag:

- Een toename van 20% meer afvoer uit alle polders leidt tot problemen en eerdere maalstop op de boezem;
- In het geval van clusterbuien wordt het boezemsysteem niet overal even zwaar belast. Vanuit een deel van de polders is meer afvoer mogelijk naar de boezem, als de andere polders die afwateren op hetzelfde boezemsysteem minder of niet afvoeren.

Vanuit deze twee gedachten is het onderzoek gericht op (intensieve) clusterbuien die een beperkt deel van het gebied zwaar belasten. Onderzocht is welke inzet van noodbemaling -en dus forse lokale uitbreiding van gemaalcapaciteit- door de boezem verwerkt kan worden en op welke locaties in het boezemsysteem knelpunten ontstaan bij het toepassen van noodbemalingen.

In het onderzoek zijn de Schermerboezem (inclusief Schagerkoggeboezem) en de VRNK boezem beschouwd. De Amstelmeerboezem kent geen hydraulische knelpunten en heeft voornamelijk voldoende bergingsruimte en zal daardoor noodbemalingen vanuit de polders kunnen verwerken. Wel moet worden opgemerkt dat de Amstelmeerboezem te maken zal krijgen met een stijgende zeespiegel waardoor de afvoermogelijkheden (spui onder vrij verval) worden belemmerd. Het hoogheemraadschap werkt aan een plan (verbetering natte infrastructuur Noordkop) om een toekomstbestendige bemaling op de Amstelmeerboezem te realiseren.

### 4.2 Methode

Het beheergebied is opgedeeld in clusters van ca. 8000 ha. Dit is het oppervlak waarop de intensieve clusterbuien kunnen voorkomen én waarop inzet van de volledige noodbemalingscapaciteit van 1600 m<sup>3</sup>/min hydraulisch gezien mogelijk kan zijn. De volledige capaciteit aan noodbemalingen is steeds op een aantal locaties in een cluster opgelegd. Er is een worst-case benadering toegepast, waarbij de totaal beschikbare noodcapaciteit over drie tot vijf locaties in het gebied aan de 'uiteinden' van het boezemsysteem is verdeeld. Het risico hiervan is dat irreële afvoeren naar de boezem worden berekend, omdat het polderwater deze noodbemalingslocaties niet kan bereiken. Het voordeel is dat ook voor de uiteinden van het systeem inzicht verkregen wordt in de mogelijkheid voor extra belasting

Alle clusters zijn doorgerekend en per locatie op de boezem is de maximale optredende waterstand bepaald. Per locatie is getoetst of deze maximale waterstand het maalstoppeil overschrijdt of dat er nog ruimte is voor extra afvoer. De berekeningen zijn uitgevoerd met de Sobek modellen van de Schermer en VRNK van het hoogheemraadschap. Hierin zijn de nieuwe boezemgemalen bij Schardam en Monnikendam opgenomen.

In Bijlage E is meer informatie gegeven over de aanpak.

### 4.3 Resultaten

Figuur 6 en Figuur 7 geven een overzicht van de mogelijkheden om noodbemaling in te zetten op de boezem. Met kleuringen zijn de beschikbare capaciteiten weergegeven. Hieronder zijn de mogelijkheden globaal beschreven. De resultaten zijn gedetailleerd per cluster uitgewerkt en beschreven in Bijlage E.5.

In de Schermerboezem is in het algemeen ruimte voor noodbemaling, behalve in de boezemtakken die richting de duinen lopen. In het gebied Laag Holland is vanwege het lagere maalstoppeil minder ruimte dan in de rest van de Schermerboezem, maar ook hier is ruimte voor inzet van noodbemaling. In de VRNK boezem is gebiedsbreed geen ruimte voor noodbemaling zonder extra afvoermogelijkheden van de boezem (bijvoorbeeld door middel van aflaten richting de Schermerboezem). Lokale inzet van noodbemaling kan wel. Ook voor de Schagerkoggeboezem geldt dat alleen lokale inzet van noodbemalingen kan, voor inzet op het hele gebied heeft de boezem geen ruimte.

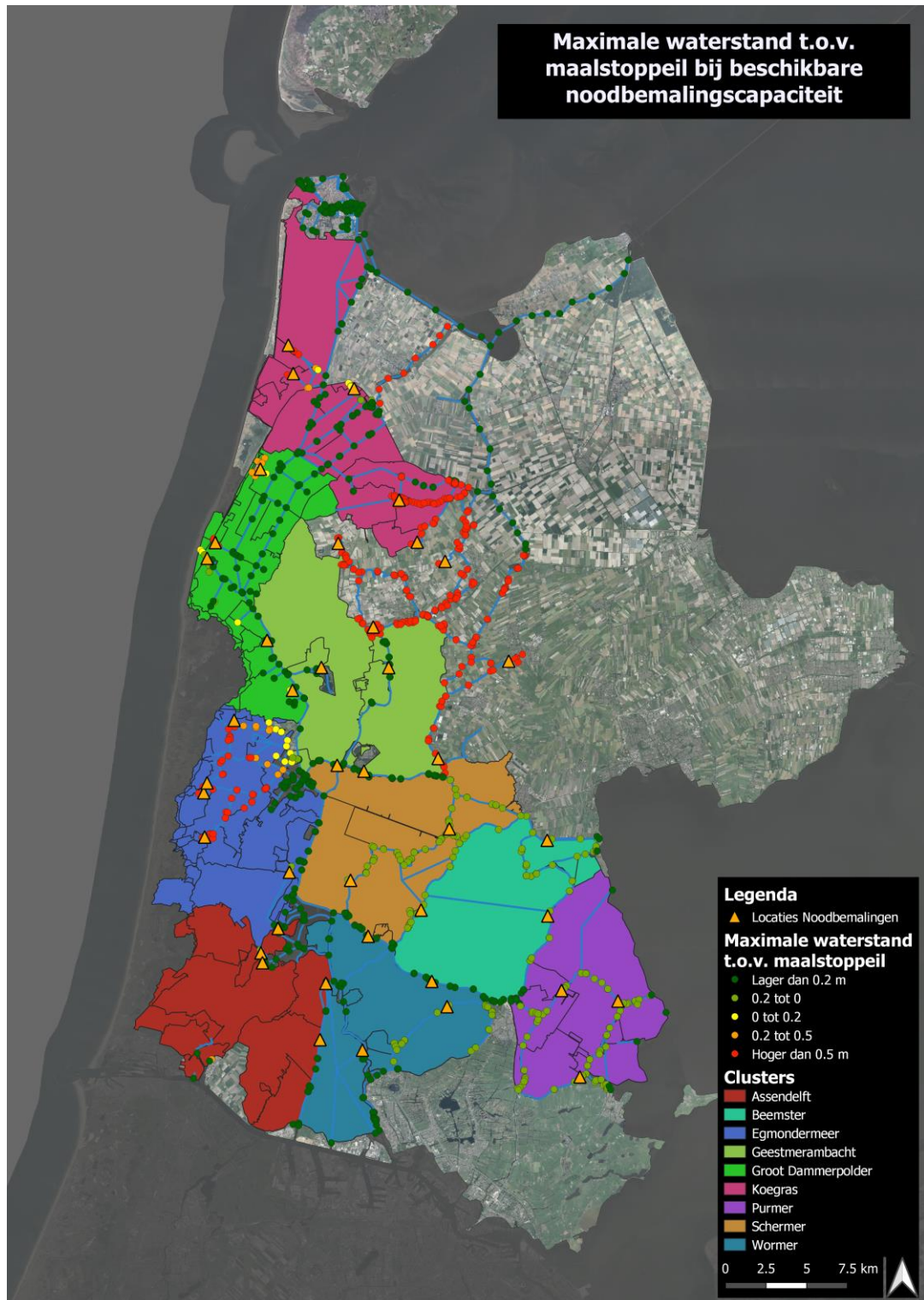
Door boezemsystemen in extreme situaties te koppelen, kan ruimte worden gevonden om de VRNK en de Schermerboezem extra te kunnen belasten met noodbemaling. Beide boezems moeten in die situatie extra kunnen afvoeren naar de omliggende boezemsystemen of polders (al dan niet met behulp van noodbemaling) via onderstaande locaties:

- De VRNK voert in calamiteitensituaties extra af naar de Schermerboezem via de locaties:
  - Rustenburg;
  - Roskamsluis.
- De VRNK voert in calamiteitensituaties extra af naar de Amstelmeerboezem via de locatie:
  - Oosterkolksluis.
- De Schermerboezem voert in een calamiteitensituaties extra af naar de Amstermeerboezem, en of via de Amstelmeerboezem naar de Wieringermeer (indien daar op dat moment ruimte beschikbaar is), via de locatie:
  - Molenkolksluis bij Kolhorn
  - Westfriese sluis bij Kolhorn



Figuur 6. Kaart met schatting van op de boezem beschikbare ruimte voor noodbemaaling.





Figuur 7. Resultaat berekeningen met beschikbare noodbemalingscapaciteit 1600 m<sup>3</sup>/min.

#### 4.4 Synthese

Op een deel van de boezem blijkt extra afvoer door middel van noodbemaling een mogelijkheid om tijdelijke wateroverschotten te verdelen en schades in poldersystemen te beperken of zelfs te voorkomen. Een belangrijke vraag hierbij is of de noodbemaling tijdig

kan worden geïnstalleerd en of de weersvoorspellingen in de aanloop naar de natte perioden voldoende nauwkeurig zijn (of worden) om daarop te kunnen anticiperen.

Let wel dat ook noodbemaling naar de boezem met name effectief is voor langer aanhoudende natte perioden en niet geschikt is voor de hevige, kortdurende buien. Voor dit type buien moeten de oplossingen met name binnen de polders zelf worden gezocht, waarbij het overtollig water in de polder zelf zodanig moet worden herverdeeld dat schade wordt geminimaliseerd (zie ook hoofdstuk 7).

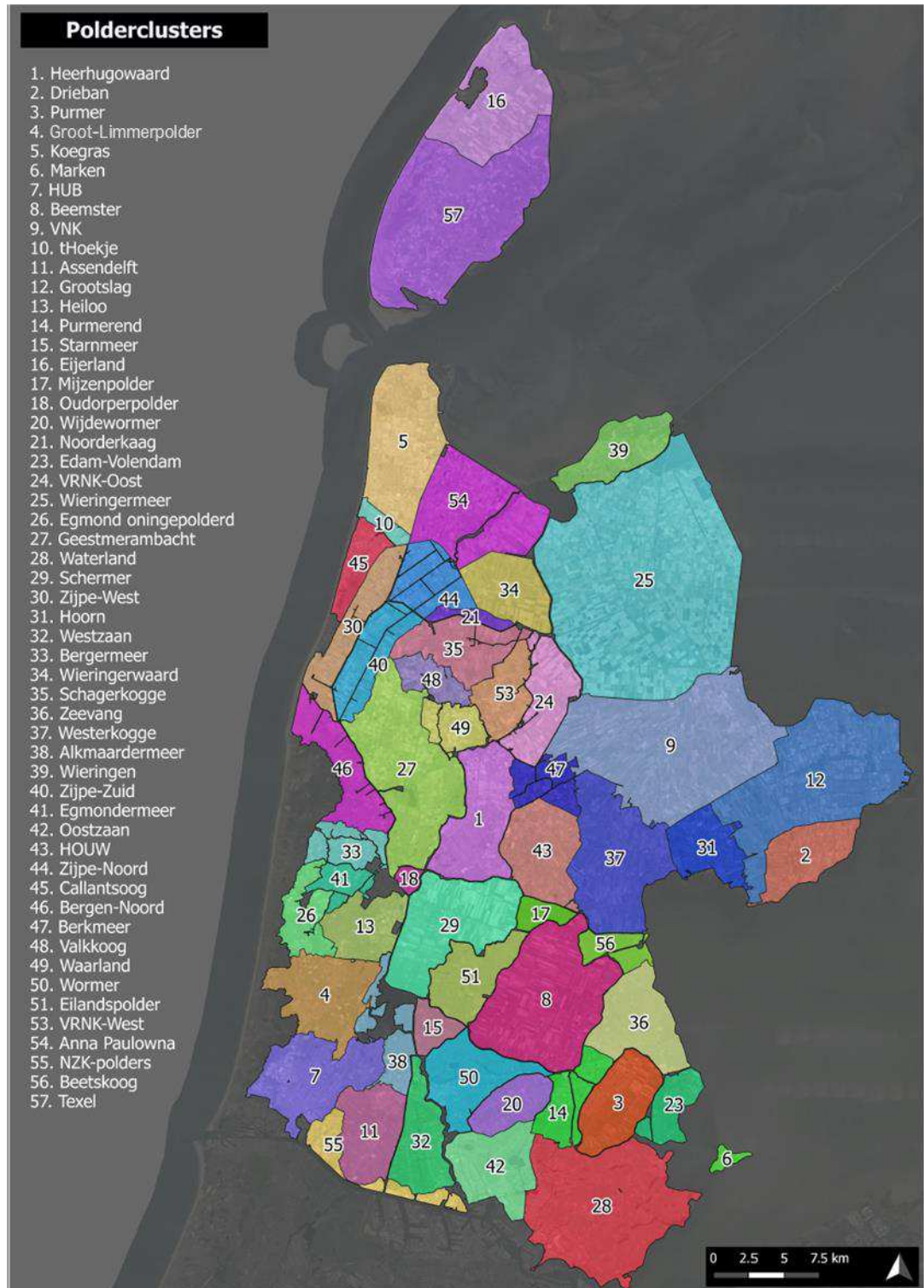
## 5 Methodiek analyse poldergebieden

### 5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk is de toegepaste methodiek voor klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast uitgewerkt. Hierbij zijn ter illustratie de resultaten gegeven van de nadere analyse van het poldercluster met de polders De Zien, de Castricumerpolder en de Groot-Limmerpolder, hierna genaamd: Groot-Limmerpolder (één van de pilotgebieden).

Allereerst is de referentiesituatie in kaart gebracht, waarna de effecten van de maatregelen zijn bepaald. De Groot-Limmerpolder geldt hier als voorbeeld voor de andere poldergebieden van HHNK. Van alle poldergebieden is vergelijkbare informatie en kaartmateriaal beschikbaar als van de Groot-Limmerpolder.

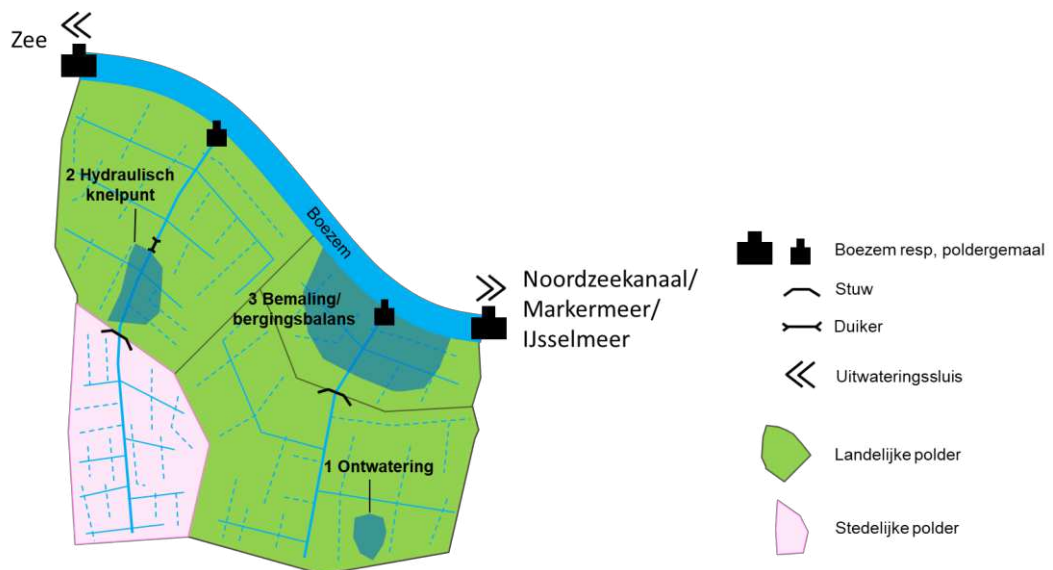
De resultaten van alle polderclusters, zoals weergegeven in Figuur 8, zijn gebiedsbreed uitgewerkt in hoofdstuk 6. In hoofdstuk 6 is ook een verzameltabel opgenomen met de analyseresultaten van alle poldergebieden. De informatie en kaarten van de per poldergebieden zijn opgeleverd in een aparte digitale bijlage bij dit rapport.



Figuur 8. Geanalyseerde polderclusters. Door het samenvoegen van enkele polder(cluster)s gedurende het werkproces ontbreken er enkele nummers (bijvoorbeeld nummer 19 en 52).

## 5.2 Methodiek klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast

De polders van het hoogheemraadschap beschikken over drainagemiddelen (greppels en drainbuizen) en een oppervlaktewatersysteem (waterlopen, duikers, bruggen, stuwen en gemalen) om overtollige neerslag op te vangen en af te voeren (Figuur 9). In extreme omstandigheden kunnen neerslaghoeveelheden zodanig groot worden dat de drainagemiddelen en het oppervlaktewatersysteem overbelast raken waardoor water op het maaiveld blijft staan of het maaiveld vanuit het oppervlaktewater inundeert. Daarnaast kunnen boezemwaterstanden te hoog worden en keringen falen als de toevoer naar de boezem groter wordt dan de beschikbare afvoercapaciteit naar het buitenwater. In dat geval kunnen poldergemalen een afvoerbepijking krijgen en kunnen bovenstrooms van de poldergemalen inundaties optreden.



Figuur 9. Schematische weergave van het oppervlaktewatersysteem en typen optredende inundaties.

In dit project zijn de inundaties gedetailleerd gesimuleerd met 3Di. Een belangrijk deel van het project bestaat uit de afweging of gesimuleerde inundaties realistisch en toelaatbaar zijn en of (kosten)effectieve maatregelen mogelijk zijn. Deze afweging is per polder gemaakt in een beheerdersoordeel met de gebiedsbeheerder en hydrologen van het hoogheemraadschap. Ter ondersteuning van deze afweging zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Uitvoeren van een hydraulische toetsing van de waterlopen en kunstwerken;
2. Maken van onderscheid tussen inundaties als gevolg van een beperkte ontwatering die leidt tot plasvorming (oorzaak 1 uit Figuur 9) en als gevolg van beperkingen in het oppervlaktewatersysteem (oorzaken 2 en 3 uit Figuur 9), leidend tot inundatie;
3. Opstellen van kwetsbaarhedenkaarten met een ruimtelijk beeld van de kwetsbare locaties voor inundaties;
4. Opstellen van een ruimtkaart die inzicht geeft in de mogelijkheden voor een betere verdeling van het overtollige water en de inundatieschade;
5. Bepalen van de contante waarde van de schade;
6. Schatten van de beschikbare investeringsruimte voor maatregelen;
7. Bepalen van de kosteneffectiviteit van mogelijke maatregelen.

In de volgende paragrafen zijn de genoemde stappen van de methode globaal beschreven. Een gedetailleerde uitwerking en de bijbehorende producten zijn opgenomen in Bijlage CBijlage A.

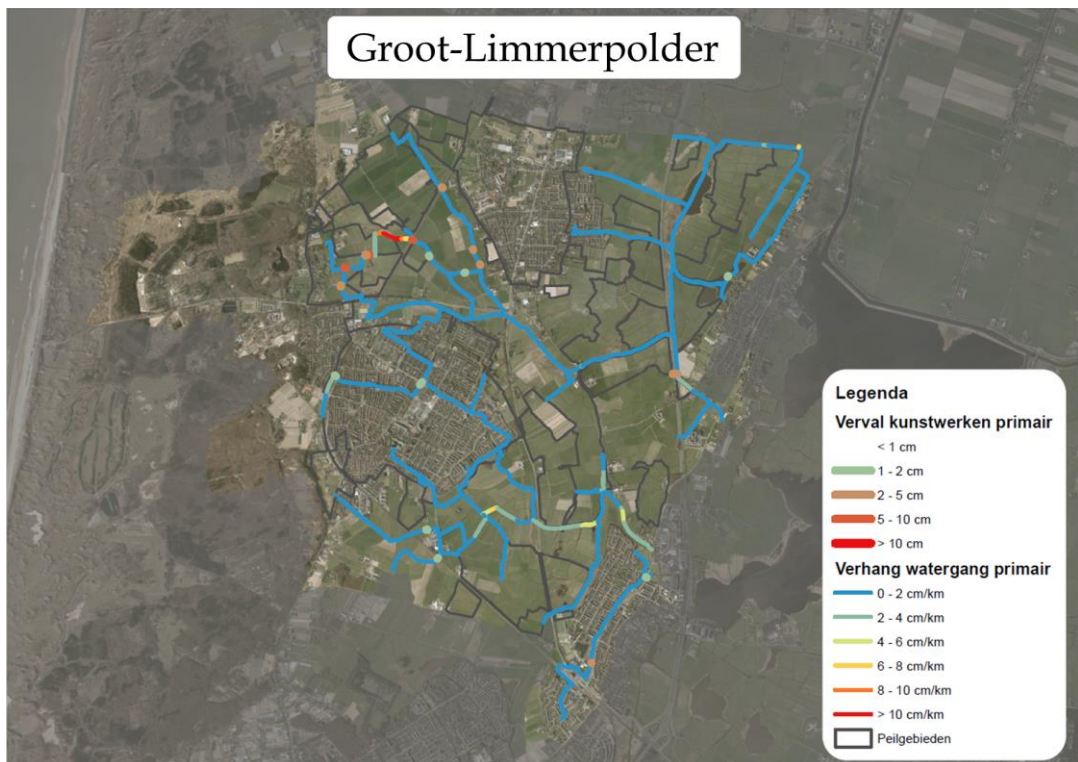


### 5.2.1 Hydraulische toetsing

Bij de hydraulische toetsing is het door het hoogheemraadschap beheerde watersysteem in een 3Di-model belast met een in de legger gedefinieerde maatgevende belasting. In de regel is dit de eerder genoemde 14,4 mm per dag. Vervolgens is getoetst of de waterstandstijgingen en stroomsnelheden voldoen aan de in de legger gestelde criteria. De hydraulische toetsing laat zien of de kunstwerken en waterlopen voldoen aan de legger onder jaarlijks voorkomende omstandigheden. Het hoogheemraadschap zal veelal aan deze criteria willen voldoen en zo nodig maatregelen willen doorvoeren om hydraulische knelpunten op te lossen en de beheersituatie te verbeteren. Resultaten van de hydraulische toets zijn per polcluster besproken in een werksessie met hydrologen, de gebiedsbeheerder, de watersysteemadviseur en regioadviseur. De resultaten zijn aan de hand van ervaringen in de praktijksituatie getoetst, waarna maatregelen zijn vastgelegd.

Met het 3Di-model van de Groot-Limmerpolder is een hydraulische toets uitgevoerd. Met de hydraulische toets is inzicht verkregen in de werking van het systeem onder maatgevende omstandigheden en zijn op basis van ontwerpnormen te krappe kunstwerken en watergangen geïdentificeerd.

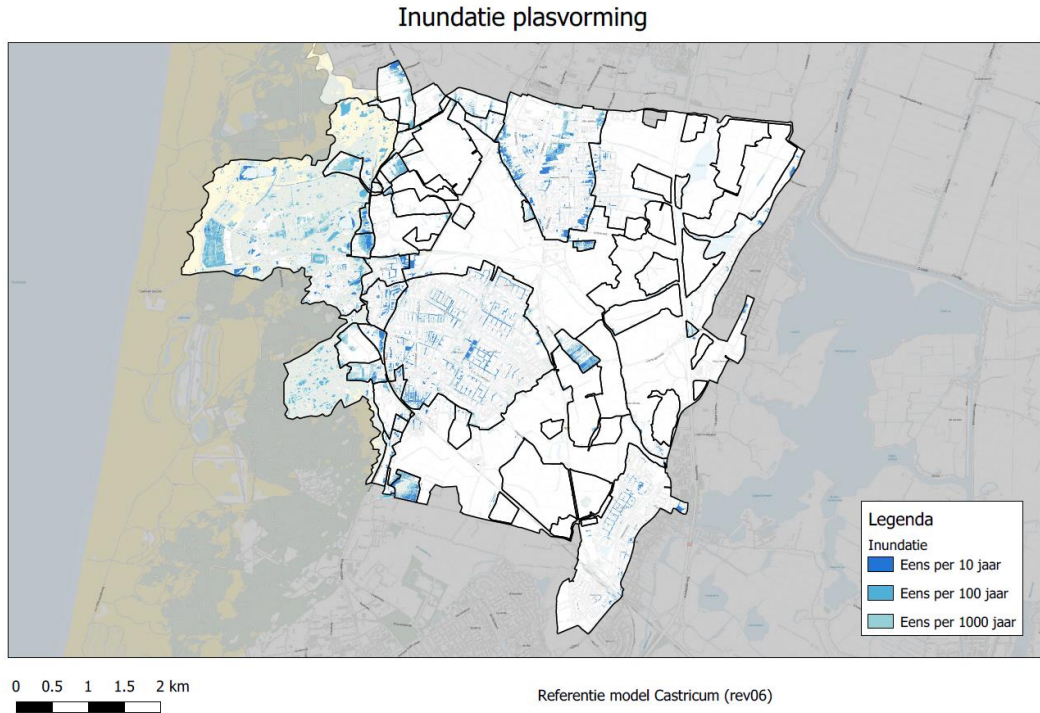
Op basis van het maximaal toegestane verval over kunstwerken en verhang in de watergangen zijn hydraulische knelpunten geïdentificeerd (Figuur 10). Locaties die wel als knelpunt uit de modelanalyse zijn gekomen, maar niet als zodanig werden herkend door de gebiedsbeheerders, zijn niet als hydraulisch knelpunt aangemerkt. Voor de locaties die wel als knelpunten zijn aangemerkt, zijn verbetervoorstellen opgenomen. Deze verbetervoorstellen zijn in het model verwerkt (zie voor details Tabel 17, Bijlage C.8).



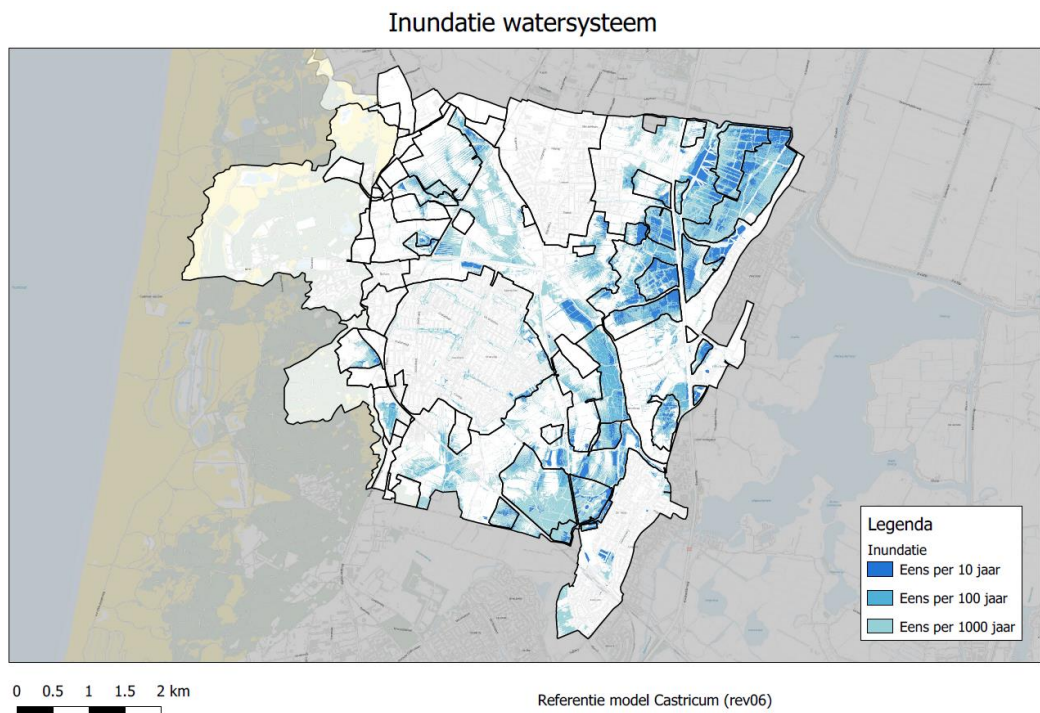
Figuur 10. Resultaten van de hydraulische toets in de Groot Limmerpolder.

### 5.2.2 Inundatiekaarten

Om wateroverlast inzichtelijk te maken zijn met het model 18 situaties doorgerekend (Bijlage C), waaruit de T10, T100 en T1000 inundatiekaarten zijn afgeleid (Bijlage C.2). Voor de analyse is op basis van de filterkaart onderscheid gemaakt naar inundatie als gevolg van plasvorming en inundatie vanuit het watersysteem (respectievelijk Figuur 11 en Figuur 12). Om de herkomst van water te kunnen bepalen, is voor zowel een piekbui als een blokbui onderzocht of inundaties vanuit plasvorming op het maaiveld of vanuit de watergang zijn ontstaan. Details van deze methode zijn gegeven in Bijlage C.3.



Figuur 11. Inundatie als gevolg van plasvorming.

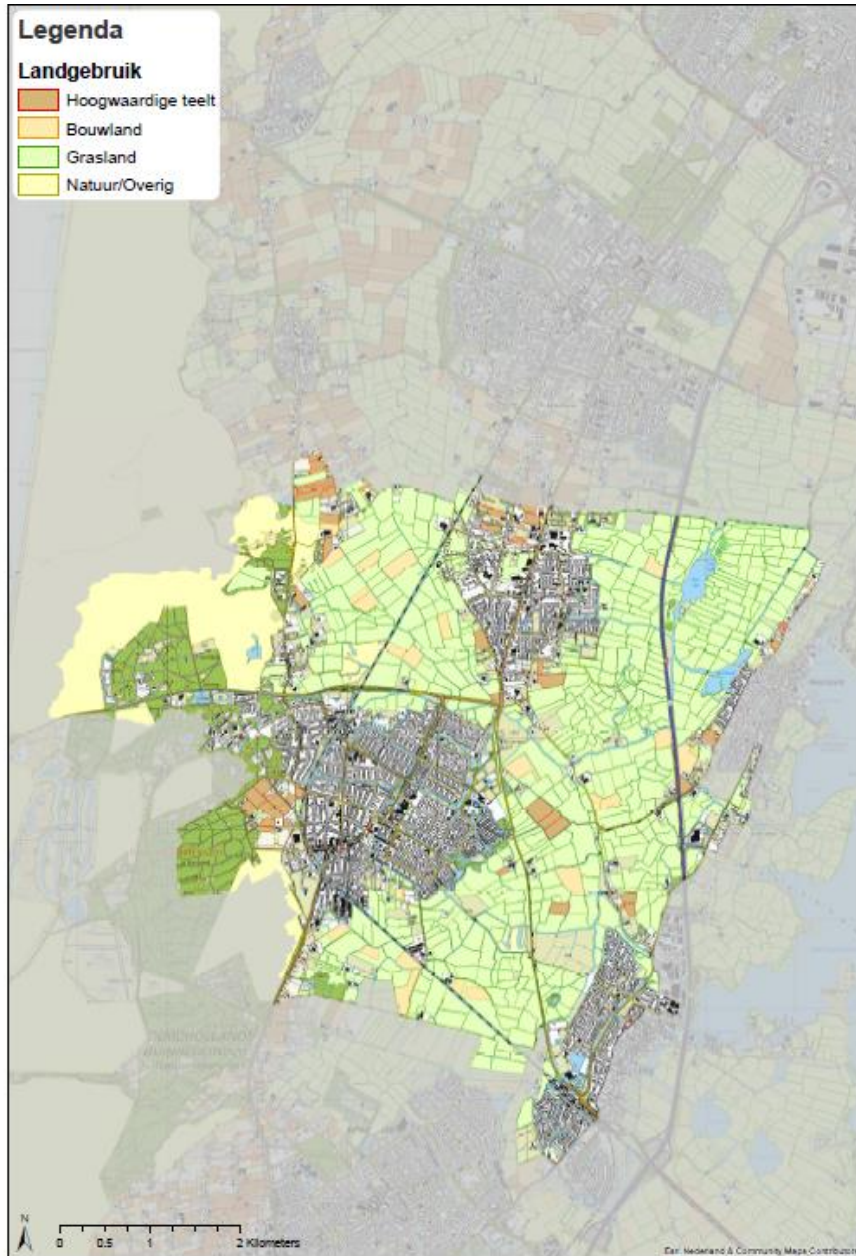


Figuur 12. Inundaties vanuit het watersysteem.



### 5.2.3 Kwetsbaarhedenkaarten

Op basis van de inundatiekaarten en het grondgebruik (Figuur 13) zijn kwetsbaarhedenkaarten vervaardigd (zie par. C.4 van Bijlage C). Hierbij is onderscheid gemaakt tussen kwetsbaarheden als gevolg van plasvorming (inundaties op het maaiveld, Figuur 14) en kwetsbaarheden als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem (Figuur 15).

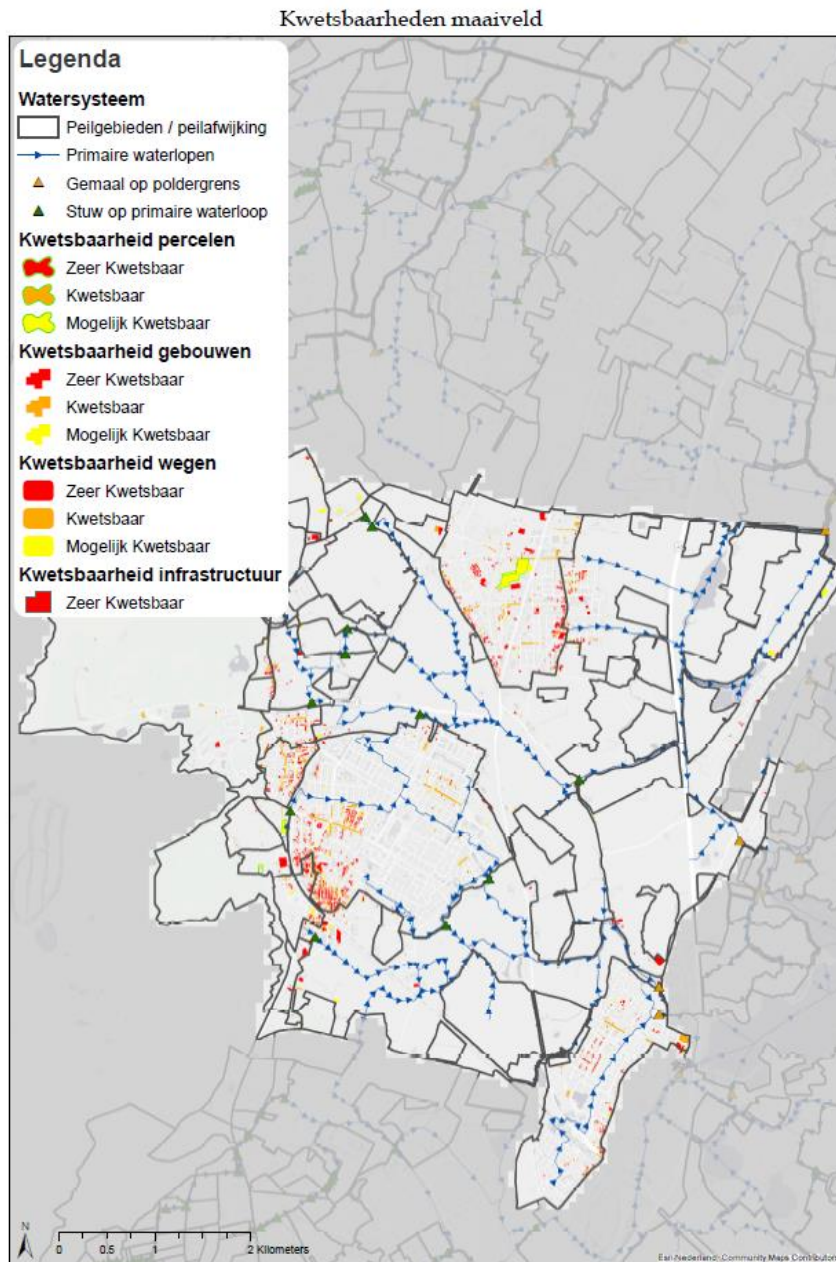


Figuur 13. Landgebruikskarta van de Groot Limmerpolder.

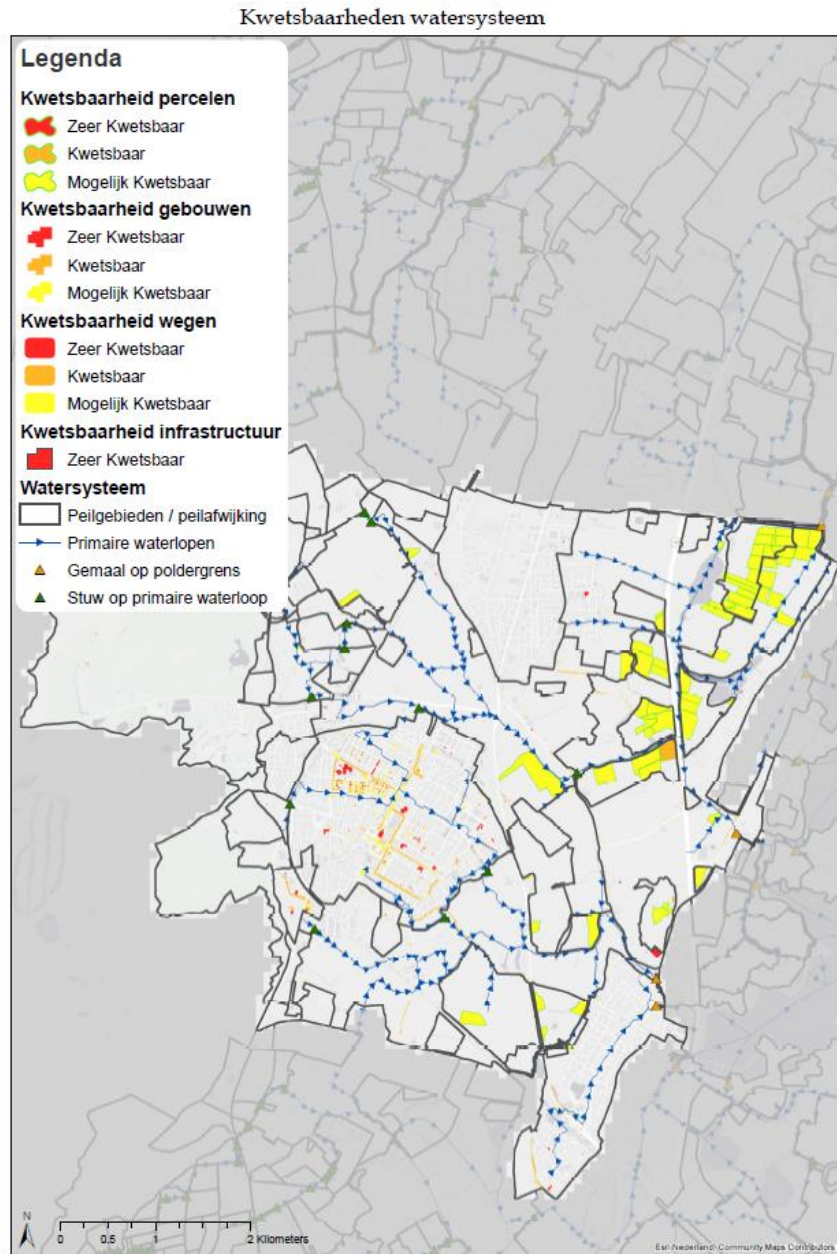
In dit onderzoek zijn twee mogelijke oorzaken van inundaties onderscheiden (zie Figuur 9 voor nummering in de onderstaande opsomming):

- **Ontwatering (1):** De capaciteit van de ontwateringsmiddelen is onvoldoende.
- **Beperkingen in het oppervlaktewatersysteem:** De afvoercapaciteit van kunstwerken is onvoldoende (2) of de afvoer/bergingscapaciteit van bemalen peilgebieden is onvoldoende (3).

Dit onderscheid is gemaakt omdat de oorzaak van belang is om te bepalen wie de meest effectieve maatregelen kan treffen voor het oplossen van knelpunten in geval van inundaties. Als inundaties optreden als gevolg van een beperkte ontwatering, zijn deze inundaties gecategoriseerd als plaspvorming. Het hoogheemraadschap heeft beperkte mogelijkheden om deze inundaties te voorkomen, omdat de drainagemiddelen in beheer zijn van de grondeigenaren. Als inundaties het gevolg zijn van beperkingen in het oppervlaktewaterstelsel, zijn deze gecategoriseerd als watersysteem. Het hoogheemraadschap heeft volop mogelijkheden om deze inundaties te voorkomen omdat ze het oppervlaktewaterstelsel beheert. De kwetsbaarhedenkaarten zijn opgesteld voor inundaties als gevolg van beperkingen in de ontwatering (plaspvorming) en als gevolg van beperkingen in het oppervlaktewaterstelsel (watersysteem).



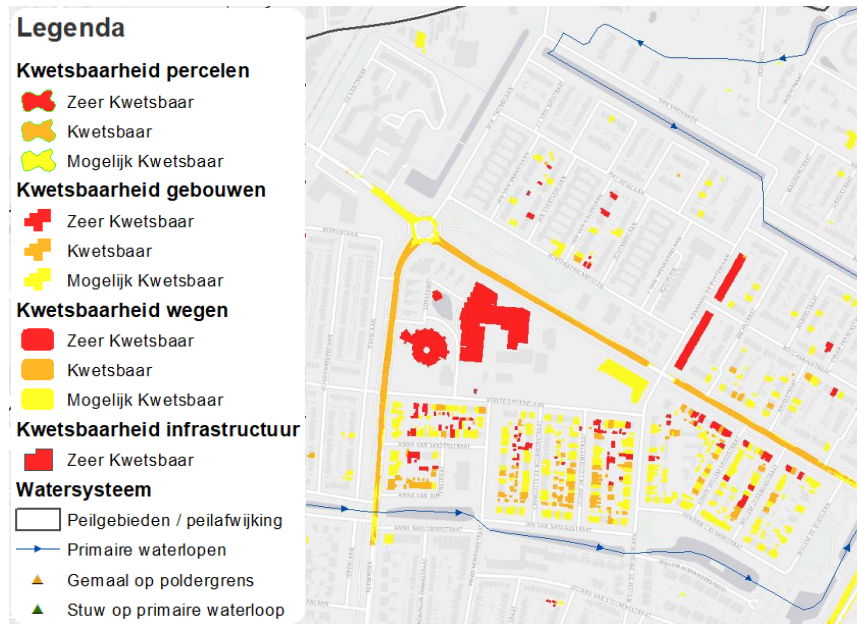
Figuur 14. Kwetsbaarhedenkaart als gevolg van plaspvorming (inundaties op het maaiveld).



Figuur 15. Kwetsbaarheden als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem.

Figuur 16 geeft een detailvoorbeeld van kwetsbaarheden als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem.



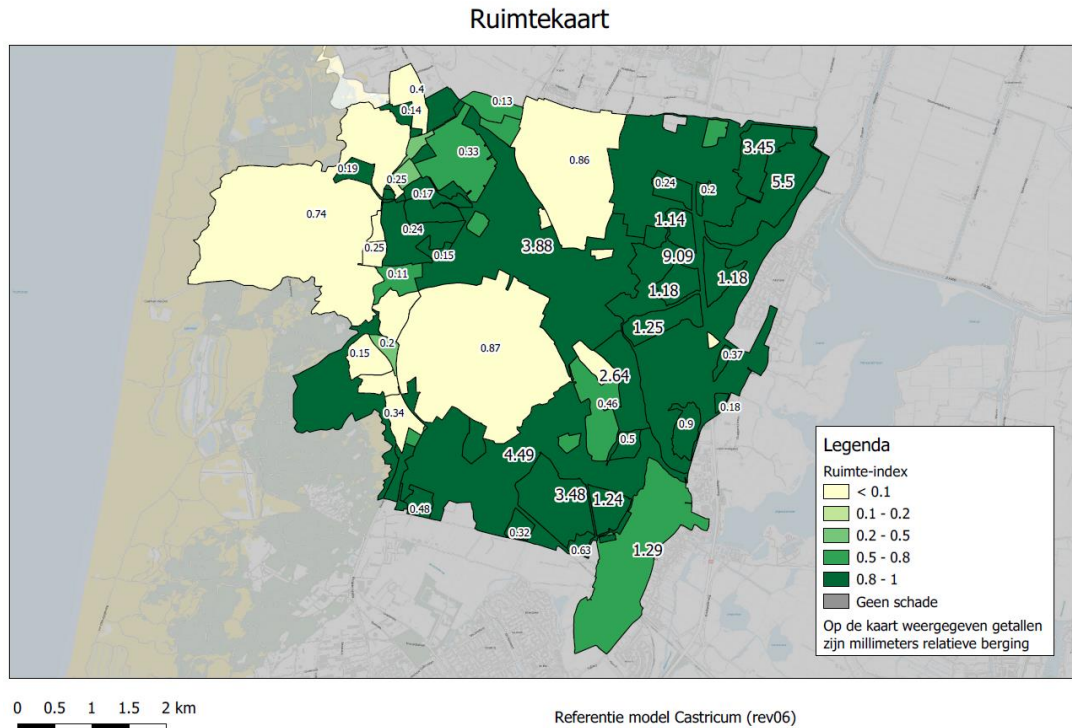


Figuur 16. Detailvoorbeeld van kwetsbaarheden in Casstricum als gevolg van inundatie vanuit het watersysteem.

#### 5.2.4 Ruimtekaart

De inrichting en sturing van het huidige oppervlaktewatersysteem zijn mogelijk niet optimaal voor extreme neerslagsituaties. Het kan bijvoorbeeld zo zijn dat gebieden met hoogwaardig grondgebruik inunderen, terwijl er in andere peilgebieden volop ruimte aanwezig is om dit overtollig water te bergen. De ruimtekaart presenteert ruimtelijk op welke locaties water tegen lage kosten (schade) in de polder kan worden geborgen en geeft daarnaast een indruk van de hoeveelheid water die daar zou kunnen worden geborgen.

In Figuur 17 is de ruimtekaart van de Groot Limmerpolder gegeven. De ruimte index per peilgebied is weergegeven in de kleur van het peilgebied. Het overall beeld geeft aan of de schade (per m<sup>3</sup>) gelijk verdeeld is in een polder en/of er ruimte is voor een betere verdeling van water bij extreme neerslag (zie par. C.4 van Bijlage C).



Figuur 17. Ruimtekaart Groot Limmerpolder.

Op basis van deze kaart is geconcludeerd dat de schade in het gebied niet gelijkmatig is verdeeld en dat in het noordoostelijke deel van het gebied relatief goedkoop water op het maaiveld kan worden geborgen. De absolute en relatieve berging (bepaald op basis van een extreme situatie) laten (tezamen met de inundatiekaarten) overigens zien dat er in die delen van het gebied al vrij veel water wordt geborgen.

Desondanks is op basis van de ruimtekaart de verwachting dat de schade in het stedelijke gebied kan worden verminderd wanneer een deel van het water uit de stedelijke kern van Castricum naar het oostelijk gelegen landelijke gebied wordt geleid.

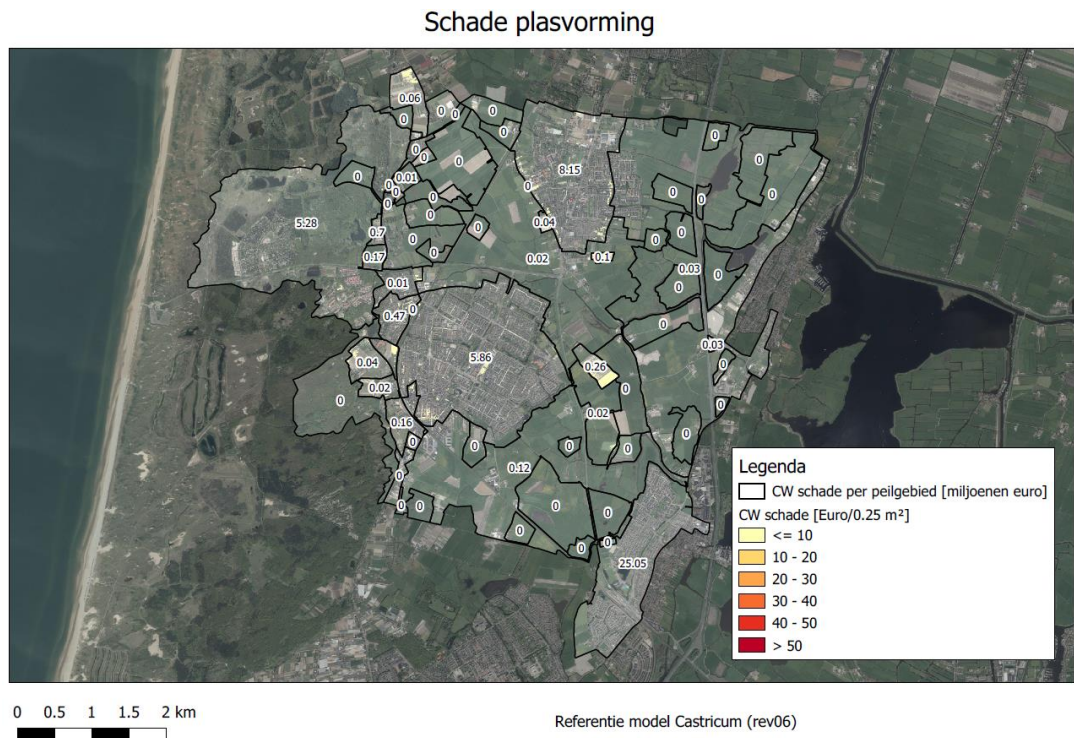
### 5.2.5 Contante waarde van de inundatieschade

Bij de definiëring van maatregelen is het belangrijk te weten waar de grootste inundatieschades optreden. De maatregelen kunnen vervolgens worden gericht op het minimaliseren van deze schade. De schade is uitgedrukt in de contante waarde van de inundatieschade per peilgebied (voor details zie Bijlage C.6). Hiermee zijn extreme schades (bijv. T10) tot zeer extreme schades (bijv. T1000) overzichtelijk in één getal gerepresenteerd. De contante waarde van de inundatieschade kan worden beschouwd als het bedrag dat nu gereserveerd moet worden om inundatieschade binnen een gestelde tijdshorizon te kunnen vergoeden. Voor deze tijdshorizon wordt veelal de afschrijvingstermijn of levensduur van een maatregel genomen. Hiervoor is een periode van 50 jaar gekozen.

Bij het bepalen van de contante waarde van de inundatieschade is net zoals voor de kwetsbaarheidskaarten onderscheid gemaakt in het deel dat het gevolg is van een beperkte ontwateringscapaciteit (plasvorming) en het deel dat het gevolg is van een beperkte capaciteit van het oppervlaktewatersysteem (watersysteem).

Het hoogheemraadschap wil voor kwetsbare locaties (kosten)effectieve maatregelen definiëren. Uitgangspunt daarbij is dat de maatregelen in verhouding staan tot de reductie van inundatieschade die kan worden bereikt. Hiertoe is de contante waarde van de schade bepaald voor de referentiesituatie en voor de situatie na het nemen van maatregelen. Het verschil hiertussen, de reductie van de (contante waarde van de) schade, is een maat voor de investeringen die gedaan kunnen worden om de wateroverlast en bijbehorende schade te voorkomen.

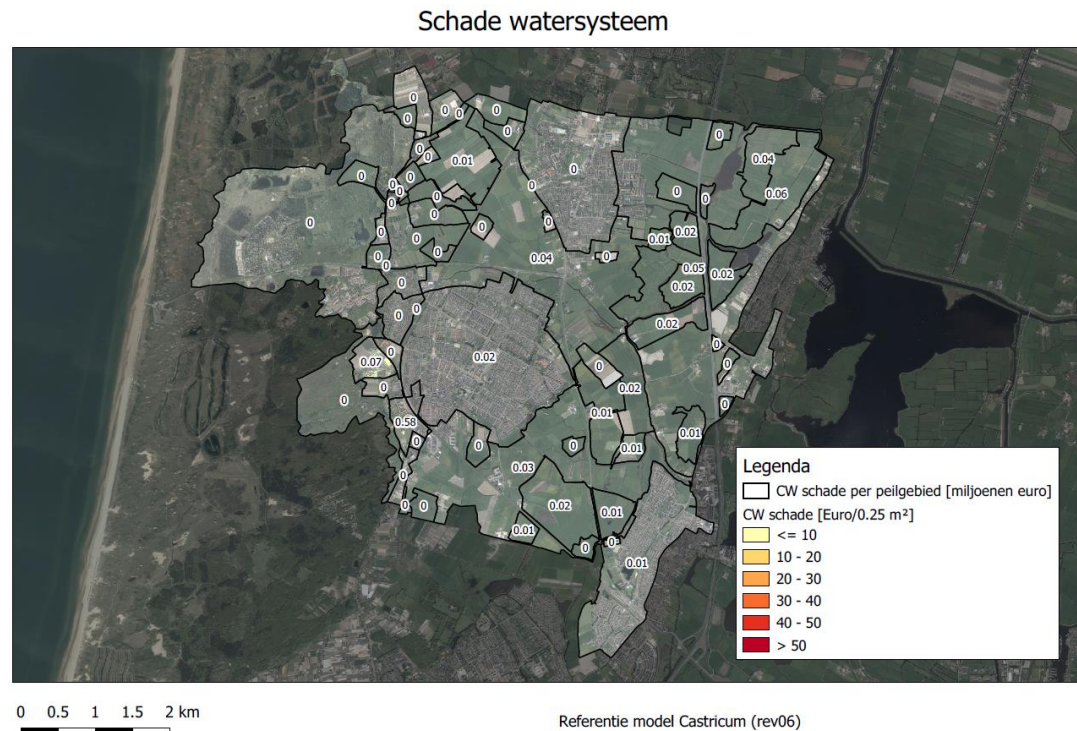
In Figuur 18 is de schade (contante waarde) per peilgebied gegeven als gevolg van plasvorming. Met name in de stedelijke gebieden van (een deel van) Uitgeest, Limmen, Castricum en het gebied ten westen van Bakkum treedt schade op.



Figuur 18. Contante waarde schade als gevolg van inundatie door plasvorming (op het maaiveld).

In Figuur 19 is de schade (contante waarde) per peilgebied gegeven als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem. Uit de schadekaart blijkt dat de meeste schade bij inundaties vanuit het watersysteem wordt veroorzaakt in het peilgebied direct ten zuidwesten van Castricum.





Figuur 19. Contante waarde schade als gevolg van inundatie vanuit het watersysteem.

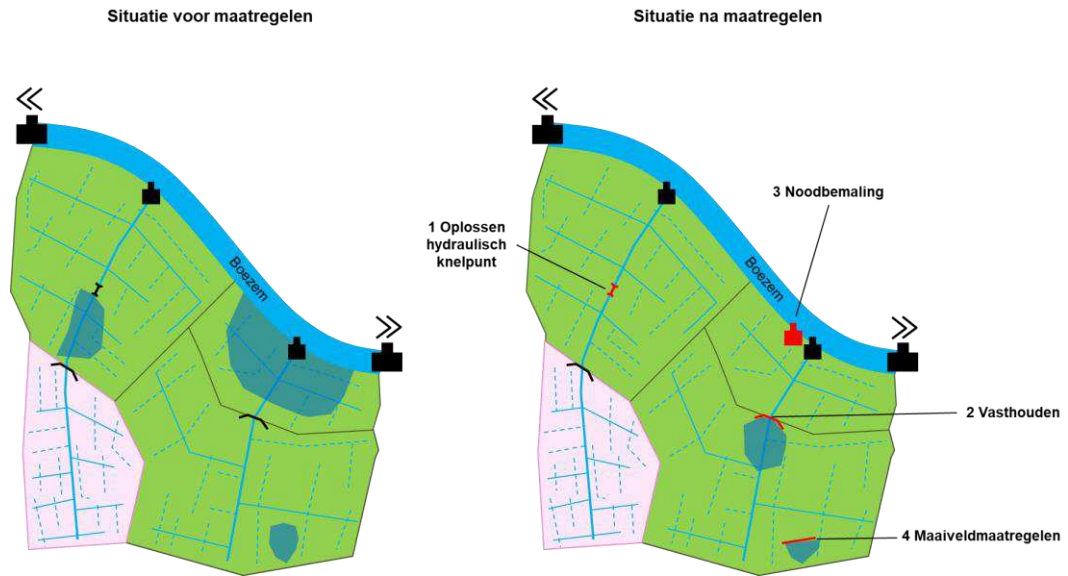
De contante waarde van de schade bedraagt ca. 48 miljoen Euro (contante waarde), waarbij ca. 47 miljoen Euro als gevolg van plasvorming en 1 miljoen Euro als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem.

### 5.2.6 Opstellen van mogelijke maatregelpakketten

Op basis van de hydraulische toets, de ruimtekaart en de kaart met de netto contante waarde van de inundatieschade zijn knelpunten benoemd. Voor het oplossen van deze knelpunten worden mogelijke maatregelpakketten opgesteld waarvoor de volgende typen maatregelen zijn beschouwd (Figuur 20):

1. Oplossen van hydraulische knelpunten in het oppervlaktewatersysteem;
2. Maatregelen gericht op het verminderen van de schaderisico's, in dit onderzoek met de term klimaatmaatregelen aangeduid
3. Calamiteitenverdeling van water;
4. Noodbemaling;
5. Maaiveldmaatregelen.





Figuur 20. Schematische weergave van het type maatregelen om wateroverlast te voorkomen.

Het **oplossen van hydraulische knelpunten** bestaat veelal uit het vergroten van de afvoercapaciteit van de waterlopen en/of de daarin aanwezige kunstwerken. Dit kan bijvoorbeeld door waterlopen te vergroten en stuwen te verbreden of te automatiseren.

De **klassieke NBW-maatregelen** bestaan uit de trits vasthouden, bergen en afvoeren. De ruimtkaart geeft inzicht waar in het watersysteem tegen de laagste kosten water kan worden vastgehouden en geborgen. Dit inzicht wordt gebruikt om het water in extreme situaties anders te verdelen. Dit kan bijvoorbeeld door bovenstrooms water vast te houden met geautomatiseerde stuwen. Of door overtollig water versneld af te voeren en te bergen in benedenstrooms gelegen gebieden waar de berging tegen een kleinere inundatieschade kan worden gerealiseerd.

Bij hevige neerslaggebeurtenissen die slechts een deel van het beheergebied treffen, zal er nog ruimte op de boezem zijn die kan worden benut. Door inzet van **noodbemaling** kan wateroverlast in de getroffen polders worden verminderd of voorkomen. In het project is onderzocht welke delen van de boezemsystemen deze extra aanvoer kunnen verwerken. Deze resultaten zijn verwerkt in overzichtelijke kaarten die tijdens de beheerdersoordelen kunnen worden gebruikt. Voor een verdere uitwerking hiervan verwijzen we naar Bijlage FBijlage E.

Als kwetsbaarheden als gevolg van een beperkte ontwatering (plasvorming) naar voren komen, kunnen **maaiveldmaatregelen** worden gedefinieerd om deze knelpunten op te lossen. Met de maatregelen wordt de stroming of berging van water op het maaiveld beïnvloed. Door bijvoorbeeld het aanleggen van greppels, kan overtollig water worden afgevoerd. Daarnaast kan maaiveldstroming worden beperkt door het aanleggen van lokale hoogtes of door het te bergen van overtollig water op verlaagde maaivelddelen.

In aanvulling op bovengenoemde mogelijke maatregelen, is in het project ook de effectiviteit van **bodemverbeteringsmaatregelen** onderzocht. Deze maatregelen zijn gericht op het vergroten van de bodemberging of de infiltratiecapaciteit van de bodem. Uit verkennend onderzoek in het kader van voorliggend project blijkt echter dat een deel van deze maatregelen naar verwachting niet of niet op korte termijn het beoogde resultaat halen en dat mogelijk effectieve maatregelen op voorhand niet (eenduidig) zijn te kwantificeren. Dit

type maatregel is dan ook niet toegevoegd aan de maatregelpakketten. Resultaten van het onderzoek naar bodemverbeteringsmaatregelen zijn samengevat in hoofdstuk 3.33.3.2 en uitgebreid weergegeven in Bijlage D

### Oplossingsrichtingen Groot-Limmerpolder

Tijdens een werksessie met de hydrologen van het waterschap en gebiedsbeheerders zijn de kaarten in samenhang gepresenteerd en bediscussieerd. Geconcludeerd werd dat er vooral veel schade optreedt in de stedelijke gebieden van Castricum, Limmen en Uitgeest en dat de ruimtekkaart mogelijkheden laat zien voor een betere verdeling van het water. Met name in het landelijk gebied in het noordoosten van het gebied kan het water naar verwachting tegen minder schade worden geborgen.

Op basis van de discussie zijn in overleg met hydrologen en gebiedsbeheerders mogelijke maatregelen gedefinieerd. Deze maatregelen bestaan enerzijds uit het oplossen van de hydraulische knelpunten (Figuur 10) en anderzijds uit een verbeterde sturing/verdeling van het water om de schade te beperken.

Als gevolg van de maatregelen daalt de waterstand en nemen de inundaties vanuit het watersysteem in diepte en omvang af. Met name de aangepaste sturing (vanuit het stedelijke gebied naar het landelijke gebied) en de inzet van noodbemaling blijken effectief onder extreme omstandigheden.

In het kader van het voorliggende onderzoek is een maatregelenpakket beschouwd dat gericht is op verbeteringen in het watersysteem, binnen de invloedssfeer van de waterbeheerder. De kaartbeelden laten echter veel kwetsbaarheden zien als gevolg van plasvorming. De oplossingsrichting ligt op die locaties in eerste instantie in aanpassingen in de ruimtelijke inrichting, buiten de invloedssfeer van de waterbeheerder. Het effect van maatregelen in het watersysteem kan in een vervolg op het voorliggende onderzoek nog uitgebreid worden met onderzoek naar verdere maatregelen in het watersysteem, maar bovenal met onderzoek naar de effectiviteit van maatregelen in de ruimtelijke inrichting.

#### 5.2.7 Kosteneffectiviteit van maatregelen

Na het beheerdersoordeel zijn mogelijke maatregelen geschematiseerd in de 3Di modellen, waarna opnieuw kwetsbaarhedenkaarten zijn afgeleid en de contante waarde van de schade na maatregelen is bepaald.

Voor het bepalen van de kosten-batenverhouding, is de contante waarde van de investeringskosten en de beheer- en onderhoudskosten bepaald. De contante waarde van de inundatieschade voor maatregelen was al bepaald. Nu is ook de contante waarde van de inundatieschade na het nemen van de mogelijke maatregelen bepaald.

### Kosteneffectiviteit mogelijke maatregelen Groot-Limmerpolder

In Tabel 3 zijn de gesommeerde schadebedragen gegeven uitgedrukt in de contante waarde. Tevens is in deze tabel de afname van de schade als gevolg van de maatregelen gegeven. Opvallend is dat de afname van de schade als gevolg van plasvorming (0,55 miljoen Euro) groter is dan de afname van schade als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem (0,06 miljoen Euro), terwijl de maatregelen hoofdzakelijk ingrijpen in het watersysteem.

De afname van de schade als gevolg van plasvorming komt vooral doordat de schade in Limmen fors afneemt (afname bedraagt 0,49 miljoen Euro). De inundaties (en daarmee de schade) in Limmen zijn geclassificeerd als plasvorming, omdat in dit deel van het gebied geen watergang is gemodelleerd (paragraaf C.3 van Bijlage C). Om de waterafvoer vanuit Limmen te verbeteren, is een ingreep in het watersysteem gepleegd; de bestaande duiker is vervangen door een open watergang. Met deze watersysteemmaatregel zijn de inundaties en schade als gevolg van plasvorming in Limmen afgenomen.

De totale afname van de schade bedraagt ca. 0,61 miljoen Euro (contante waarde), dit is een maat voor de investeringsruimte van de maatregelen.

Tabel 3. Totale contante waarde van de schade als gevolg van inundaties (miljoen Euro).

Situatie	Plasvorming	Watersysteem	Totaal
Referentie	46,7	1,1	47,8
Situatie na maatregelen	46,1	1,1	47,2
Afname schade	0,55	0,06	0,61

In Figuur 21 is de batenkaart gegeven. In deze kaart zijn de totale baten gegeven, omdat de watersysteemmaatregelen ingrijpen in zowel de schade als gevolg van plasvorming alsook de schade als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem. In Bijlage F zijn de batenkaarten gegeven waarbij onderscheid is gemaakt naar schade als gevolg van plasvorming en schade als gevolg van inundatie vanuit het watersysteem

Naast de baten zijn ook de kosten van de maatregelen geraamd. De investeringskosten, beheer- en onderhoudskosten van de maatregelen zijn op basis van gehanteerde eenheidsprijzen geraamd (zie bijlage C.8). Voor de investeringskosten is uitgegaan van een uitvoeringsperiode van 15 jaar. Voor de levensduur van de kunstwerken is uitgegaan van 50 jaar; voor deze periode is (indien relevant) rekening gehouden met beheer en onderhoud. In het voorbeeld van de Groot Limmerpolder betreft dit de onderhoudskosten voor het in stand houden van de noodbemaling. De investerings-, beheer- en onderhoudskosten van de maatregelen zijn geraamd op ca. 0,61 miljoen Euro.



Figuur 21. Afname schade (contante waarde) als gevolg van maatregelen (batenkaart).

### 5.3 Synthese nadere analyse Groot Limmerpolder

In het onderzoek naar klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast zijn met een 3Di-modelanalyse kwetsbare locaties in de Groot Limmerpolder geïdentificeerd. De totale schade als gevolg van extreme neerslag bedraagt ca. 48 miljoen Euro (contante waarde), waarvan ca. 47 miljoen Euro als gevolg van plasmvorming en 1 miljoen Euro als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem. De grootste schade wordt veroorzaakt door plasmvorming en treedt op in de stedelijke gebieden van (een deel van) Castricum, Uitgeest, Limmen en het gebied ten westen van Bakkum.

Tijdens een werksessie met gebiedskenners zijn maatregelen gedefinieerd die gericht zijn op verbeteringen in het watersysteem. Dit betreft het oplossen van hydraulische knelpunten, het herverdelen van water opdat inundaties minder schade veroorzaken en de inzet van extra (nood)bemaling. Als gevolg van de maatregelen daalt de waterstand en nemen de inundaties vanuit het watersysteem in diepte en omvang af. Met name de aangepaste sturing (vanuit het stedelijke gebied naar het landelijke gebied), de verbeterde afvoer vanuit het stedelijke gebied in Limmen en de inzet van extra gemaalcapaciteit leiden tot een afname van inundaties en tot een schadereductie.

De totale afname van de schade wordt geraamd op ca. 0,61 miljoen Euro (contante waarde). De contante waarde van de maatregelen (investeringskosten en beheer- en onderhoudskosten) is op basis van eenheidsprijzen geraamd op ca. 0,61 miljoen Euro. Voor deze polder bedraagt de kosten/baten verhouding 1,0.



## 6 Resultaten gebiedsbrede analyse

### 6.1 Inleiding

De analyse zoals die is beschreven voor de Groot Limmer polder (hoofdstuk 5), is uitgevoerd voor alle poldergebieden in het beheergebied. De resultaten van die analyses hebben van alle gebieden vergelijkbare informatie, kaarten en ook diverse inzichten opgeleverd. Om inzichten te verkrijgen voor het gehele beheergebied zijn de resultaten van de polders gecombineerd tot gebiedsbrede kaarten. Deze kaarten zijn met het hoogheemraadschap geanalyseerd en de inzichten daaruit zijn in dit hoofdstuk beschreven. Daarnaast is voor alle polders de effectiviteit van mogelijke maatregelen berekend en zijn de effecten in een kosten-batenverhouding uitgedrukt.

### 6.2 Resultaten gebiedsbrede analyse

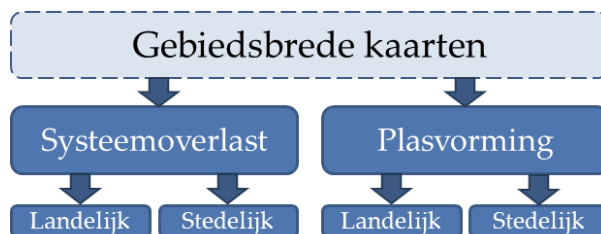
Om de resultaten inzichtelijk te kunnen presenteren op het niveau van het beheergebied, zijn karakteristieken afgeleid en gepresenteerd per peilgebied. Op basis van de hydraulische toets resultaten zijn de volgende resultaten afgeleid:

Maatgevende afvoeren

Op basis van de inundatierasters en schaderasters zijn de volgende karakteristieken bepaald:

- Inundatiepercentage
- T10 herhalingsstijd
- T100 herhalingsstijd
- T1000 herhalingsstijd
- Schade per hectare
- Inundatievolume per hectare
- Schade per kuub inundatie per hectare

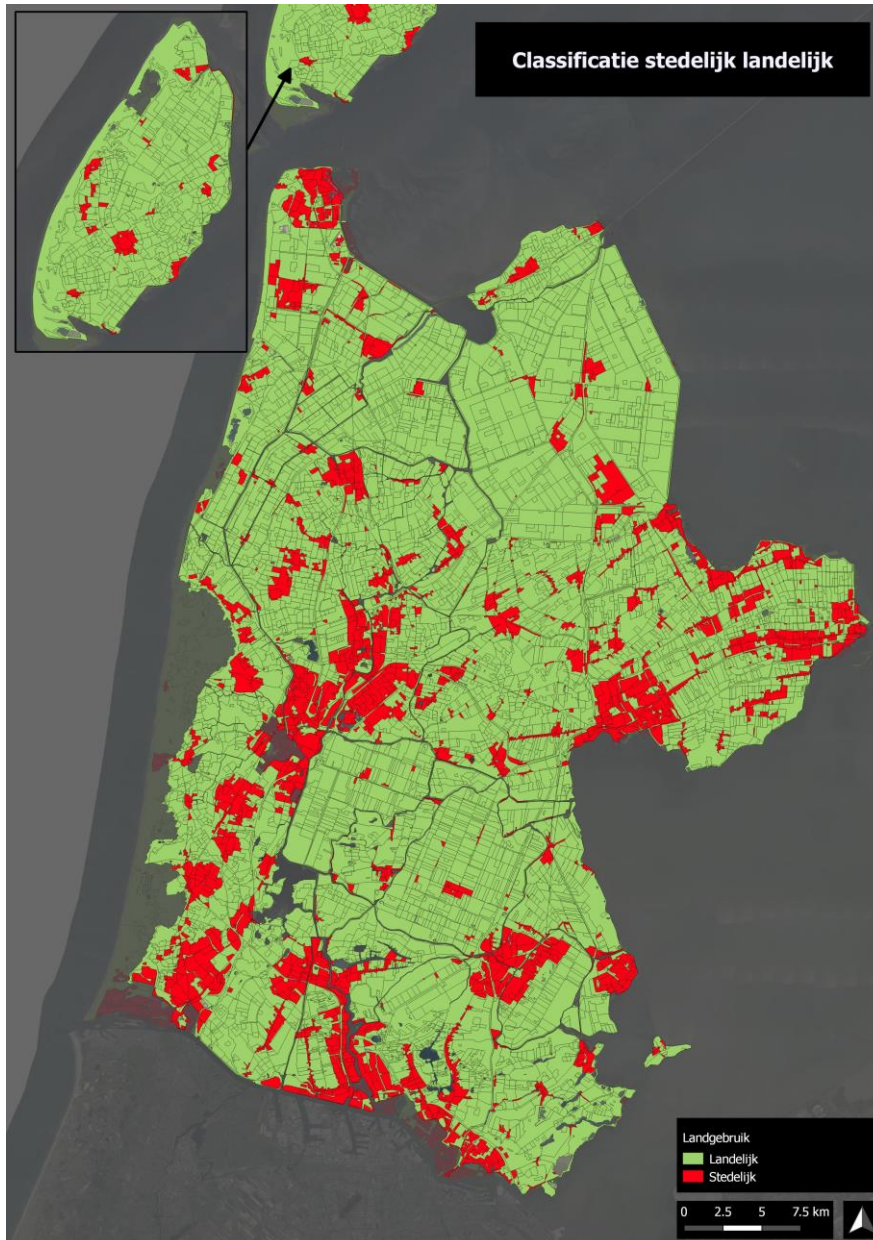
Bovengenoemde karakteristieken zijn gebiedsbreed bepaald, Daarnaast zijn de karakteristieken 2 tot en met 5 verder opgesplitst in het type inundatie (watersysteemoverlast of plasmvorming) en de locatie van inundatie (stedelijk of landelijk gebied, Figuur 22). Alle kaartbeelden die niet in dit hoofdstuk worden behandeld, zijn terug te vinden in Bijlage G.



Figuur 22. Overzicht opsplitsing van gebiedsbrede kaarten naar systeemoverlast/plasmvorming en landelijk stedelijk.

De splitsing in de analyses naar plasmvorming en watersysteemoverlast is gemaakt vanwege de verantwoordelijkheden voor de inundaties en schades (zie hoofdstuk 5.2). Inundaties en schades vanuit het watersysteem zijn de verantwoordelijkheid van het hoogheemraadschap, terwijl inundaties en schades door plasmvorming de verantwoordelijkheid van perceel eigenaren of de beheerder van de openbare ruimte zijn.

De splitsing naar stedelijk en landelijk is gemaakt, omdat effectieve maatregelen kunnen variëren voor stedelijk en landelijk gebied. Op basis van het onderscheid kunnen er gerichte maatregelen worden onderzocht. Voor de classificatie stedelijk/landelijk is een landgebruikskaart (zie Figuur 23) opgebouwd op basis van de BRT TOP100NL kaart. De klassen Bebouwd gebied en Overig uit de BRT zijn als stedelijk gebied geïdentificeerd. De resterende klassen zijn geïdentificeerd als landelijk gebied.

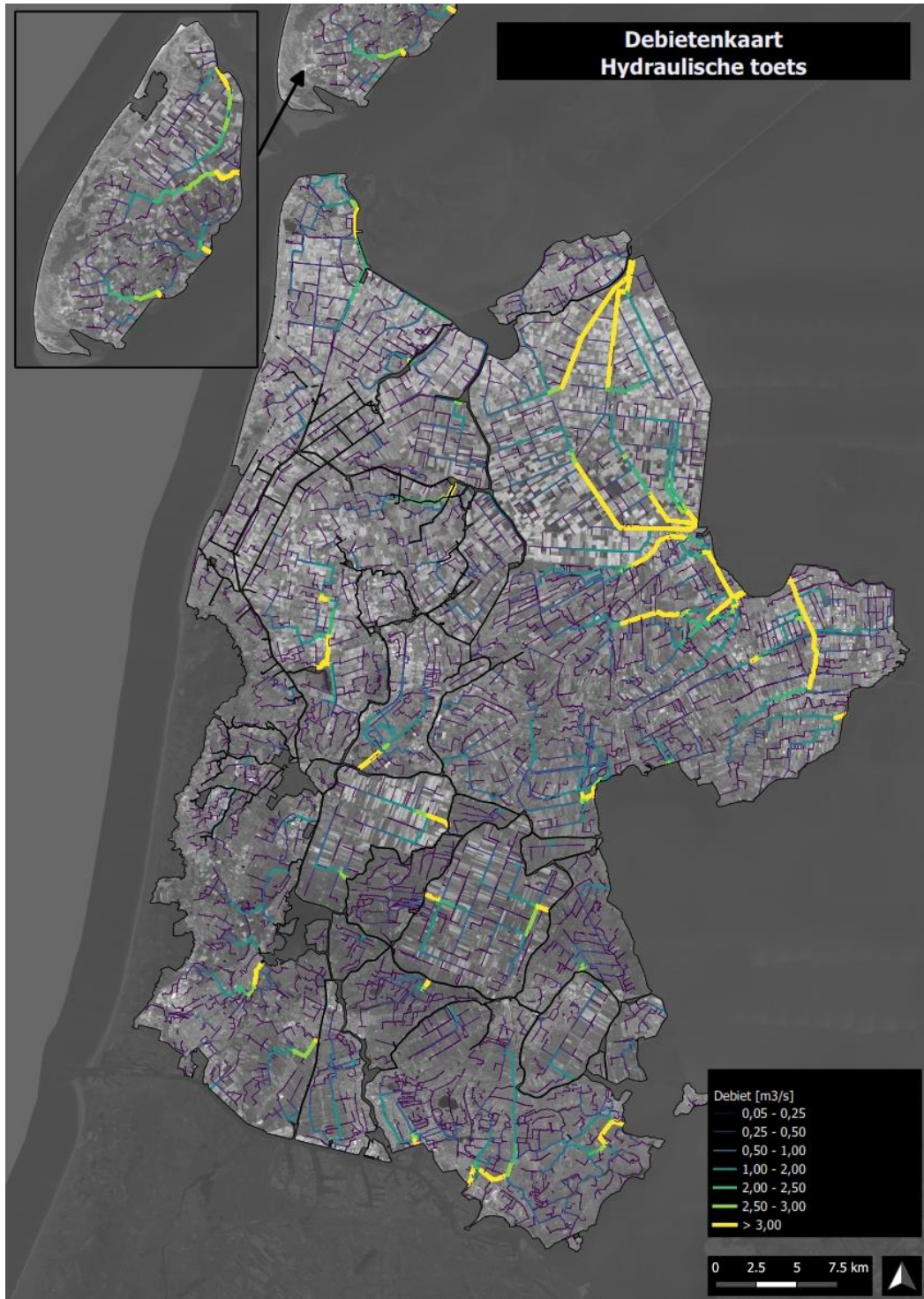


Figuur 23. Classificatie van stedelijke en landelijke gebieden.

In dit rapport wordt verwezen naar gebieden en bijbehorende polderclusternummers. Een overzicht van de toegepaste nummering en naamgeving is weergegeven in Figuur 8.

### 6.2.1 Maatgevende afvoeren voor ontwerpvragestukken

De uitgevoerde berekeningen voor de hydraulische analyse leveren de maatgevende afvoeren voor een situatie die eens per jaar voorkomt, zie Figuur 24. De verkregen debieten kunnen worden gebruikt bij ontwerpvragestukken voor het watersysteem. Naast deze gebiedsbrede debietenkaart zijn ook gebiedsbrede gegevens beschikbaar voor de stroomsnelheid en het verhang in de waterlopen en de opstuwing ten opzichte van streefpeil.



Figuur 24. Debietenkaart tijdens maatgevende afvoer.



## 6.2.2 Schade-intensieve regio's

Aan de hand van de inundatierasters zijn inundatiepercentages per peilgebied per herhalingsstijd (T10, T100 en T1000) bepaald (zie Bijlage G). Hieruit komt naar voren dat in zeer extreme situaties (T1000) het inundatiepercentage voor enkele locaties sterk toeneemt door inundatie vanuit het watersysteem. Een verdere uitsplitsing laat zien dat dit effect voornamelijk optreedt in landelijk gebied. De sterke toename van de inundatie hoeft echter niet tot hoge schades te leiden. Voor polder Waterland is het landgebruikstype bijvoorbeeld overwegend grasland, waardoor de inundatieschades relatief laag zijn. Het doel van voorliggend project is om kosteneffectieve maatregelen te onderzoeken. Daardoor is voor verdere analyse met name gefocust op gebieden met hoge schadebedragen.

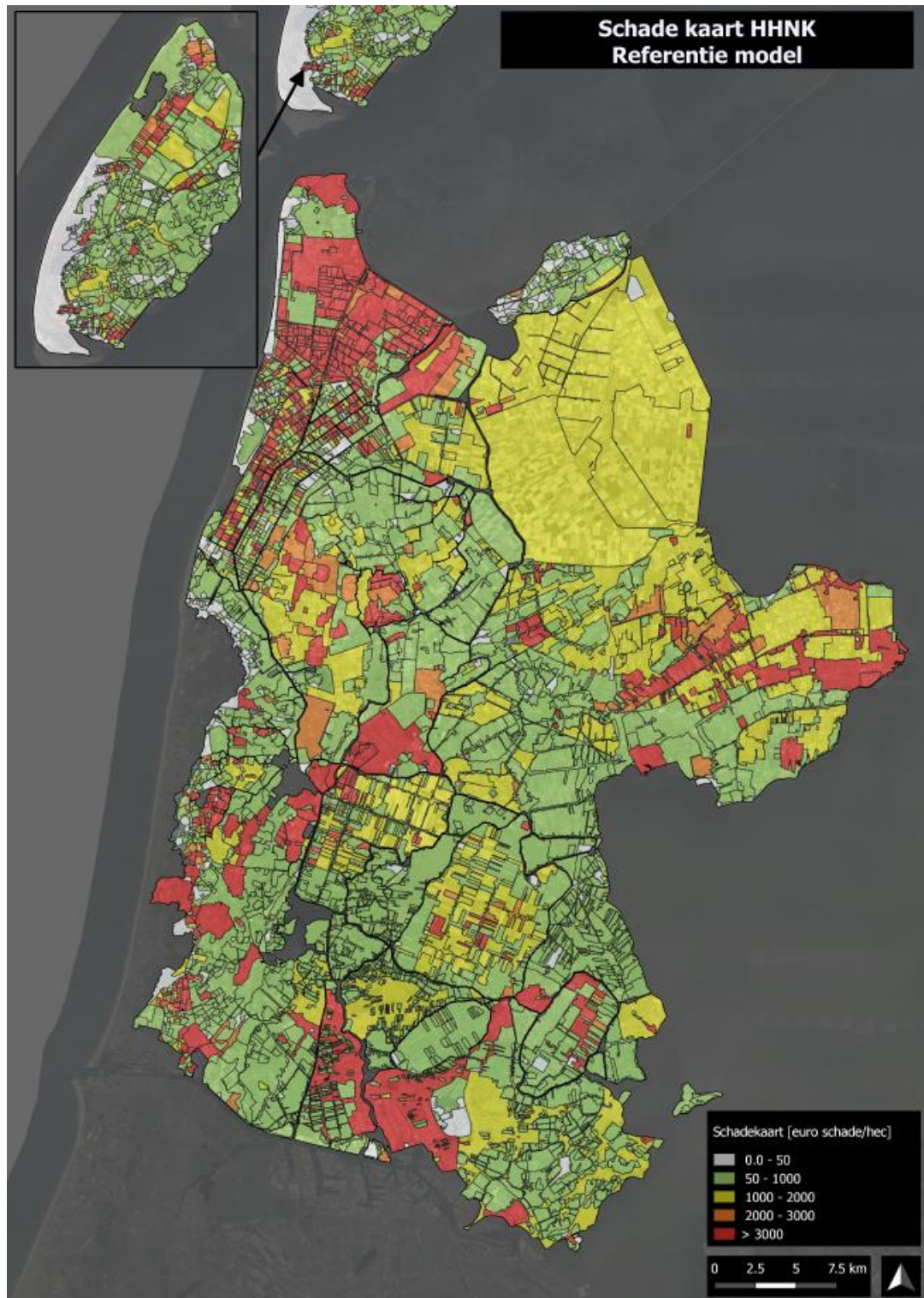
Gebieden met hoge schadebedragen zijn verder geanalyseerd op basis van het onderscheid in landgebruik (landelijk/stedelijk gebied) en in inundatievorm (plasvorming/watersysteem). Daaruit blijkt dat de schades in het stedelijk gebied voornamelijk ontstaan door plasvorming en minder door inundatie vanuit het watersysteem. In het landelijk gebied is dit juist omgekeerd, hier ontstaan schades voornamelijk door inundatie uit het watersysteem. Hieronder zijn de analyses in meer detail uitgewerkt.

### Totale schadebedragen

Om de schades op het niveau van het beheergebied te kunnen vergelijken en beoordelen, is voor alle peilgebieden schade per hectare als gevolg van plasvorming en inundatie vanuit het watersysteem bepaald (Figuur 25). De totale schade over het gehele beheergebied van HHNK bedraagt €475 miljoen voor de komende 50 jaar. De 50 jaar komt overeen met de afschrijvingstermijn van maatregelen die in het project is gehanteerd. Figuur 25 laat een verspreid schadebeeld zien met een aantal schade-intensieve gebieden, waaronder:

- Het gebied Koegras en Anna Paulowna (bij Den Helder), polderclusters 5 en 54 en het bollengebied ten zuiden hiervan in Zijpe West en poldercluster 30;
- Polder Grootslag en poldercluster 12 in het oosten van het beheergebied;
- Nabij stedelijk gebied in het midden van het beheergebied. Dit gebied bevat delen van Geestmerambacht, Heerhugowaard, Heiloo, Schermer en Oudorperpolder, respectievelijk polderclusters 27, 1, 13, 29 en 18;
- Het stedelijk gebied rond Zaandam (Oostzaan en Westzaan, respectievelijk polderclusters 42 en 32) in het zuiden van het beheergebied.
- Daarnaast laat deze figuur een aantal lokale uitschieters zien zoals Edam-Volendam, Purmerend en polderclusters 23 en 14.



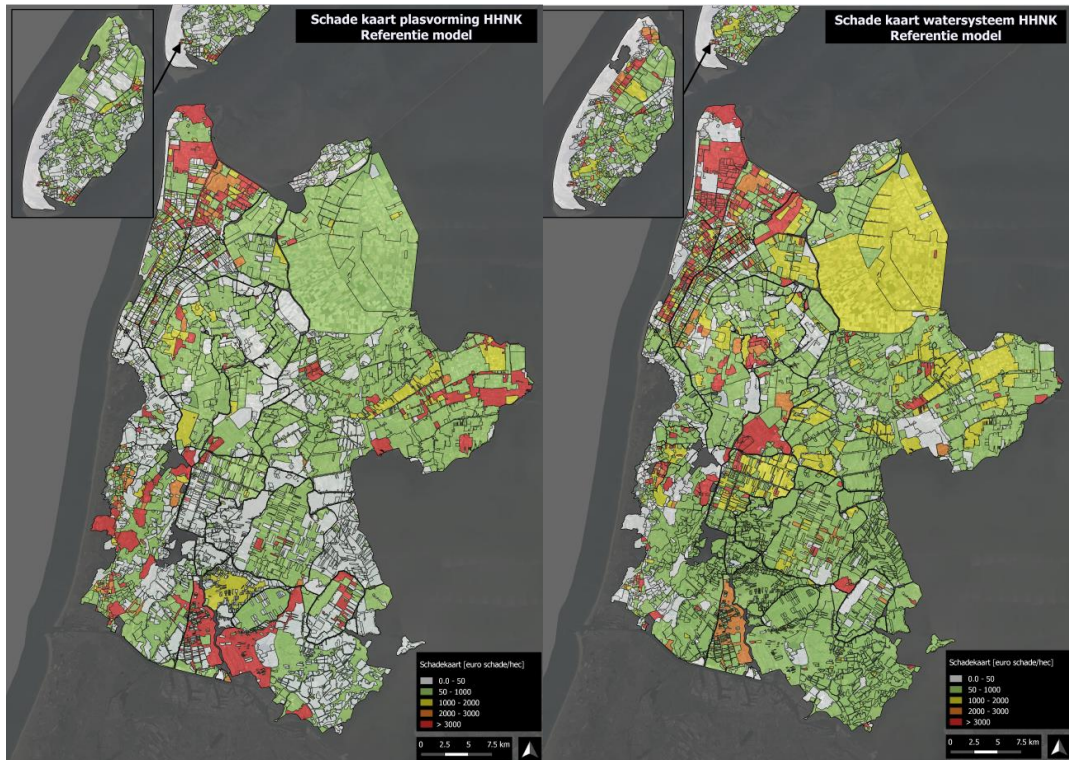


Figuur 25. Schade per hectare per peilgebied (plasvorming en watersysteem inundaties).

Voor ieder van de bovenstaande uitgelichte regio's is geanalyseerd of de schade wordt veroorzaakt door plasvorming, inundatie uit het watersysteem of een combinatie van beide. Vervolgens is er gekeken of de schade voornamelijk in het landelijk of het stedelijk gebied optreedt.

## Opsplitsing schadebedragen op basis van oorzaak van de inundaties

De hierboven weergegeven schadebedragen per hectare zijn opgesplitst naar schade veroorzaakt door plasvorming en schade veroorzaakt door inundaties vanuit het watersysteem (Figuur 26). Van de totale schade van €475 miljoen wordt €252 miljoen veroorzaakt door schade als gevolg van plasvorming en €223 miljoen door schade als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem.



Figuur 26. Schade per hectare per peilgebied. Linker figuur: overlast door plasvorming, rechter figuur: overlast vanuit het watersysteem.

In polders Koegras en Anna Paulowna in het noorden van het beheergebied ontstaat de schade door een combinatie van plasvorming en inundatie uit het watersysteem. In de Zijpe West, ten zuiden van deze twee polders, ontstaat de schade hoofdzakelijk door inundatie uit het watersysteem.

In de polder Grootslag, in het oosten van het beheergebied, wordt schade in het zuidelijke deel voornamelijk veroorzaakt door plasvorming. In het noordelijke deel ontstaat schade zowel door plasvorming als door inundatie vanuit het watersysteem.

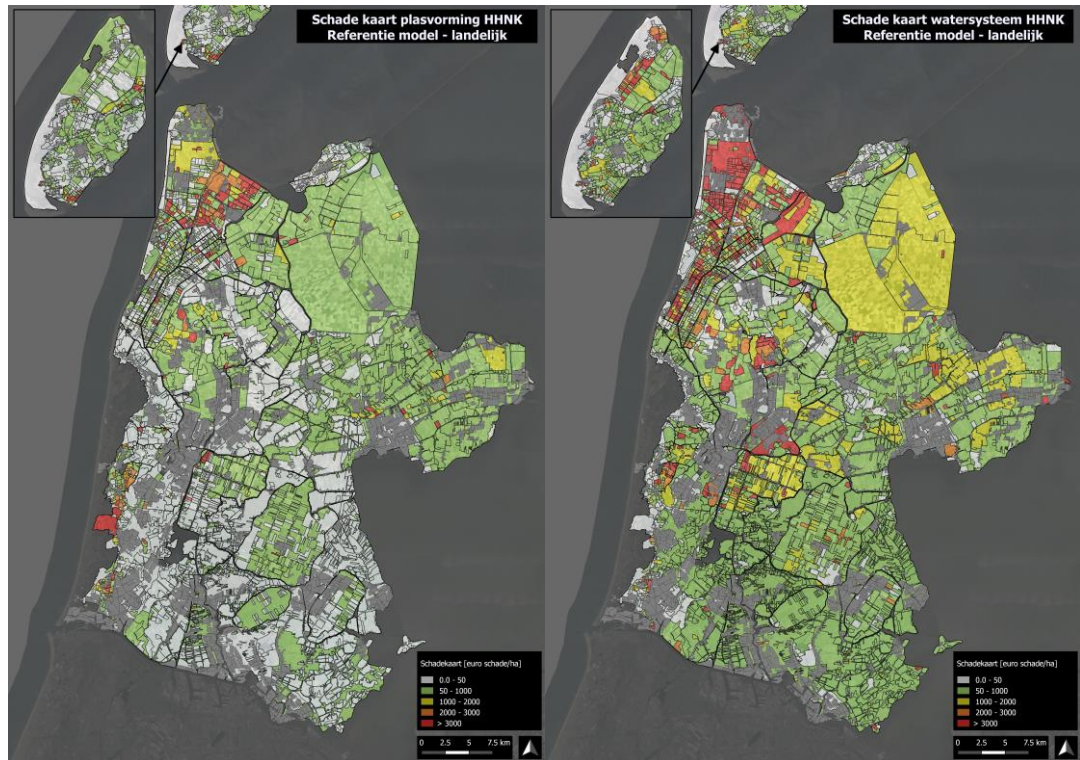
In de polders Geestmerambacht, Heerhugowaard, Heiloo en Oudorp rondom het centraal gelegen stedelijk gebied ontstaat de schade voornamelijk uit een combinatie van plasvorming en inundatie uit het watersysteem. In de Schermer is voornamelijk inundatie vanuit het watersysteem de oorzaak van schade.

De schade in Zaandam (gebied Oostzaan, poldercluster 42) wordt vooral veroorzaakt door plasvorming. In het naastgelegen Westzaan wordt de schade veroorzaakt door een combinatie van plasvorming en watersysteem inundaties.



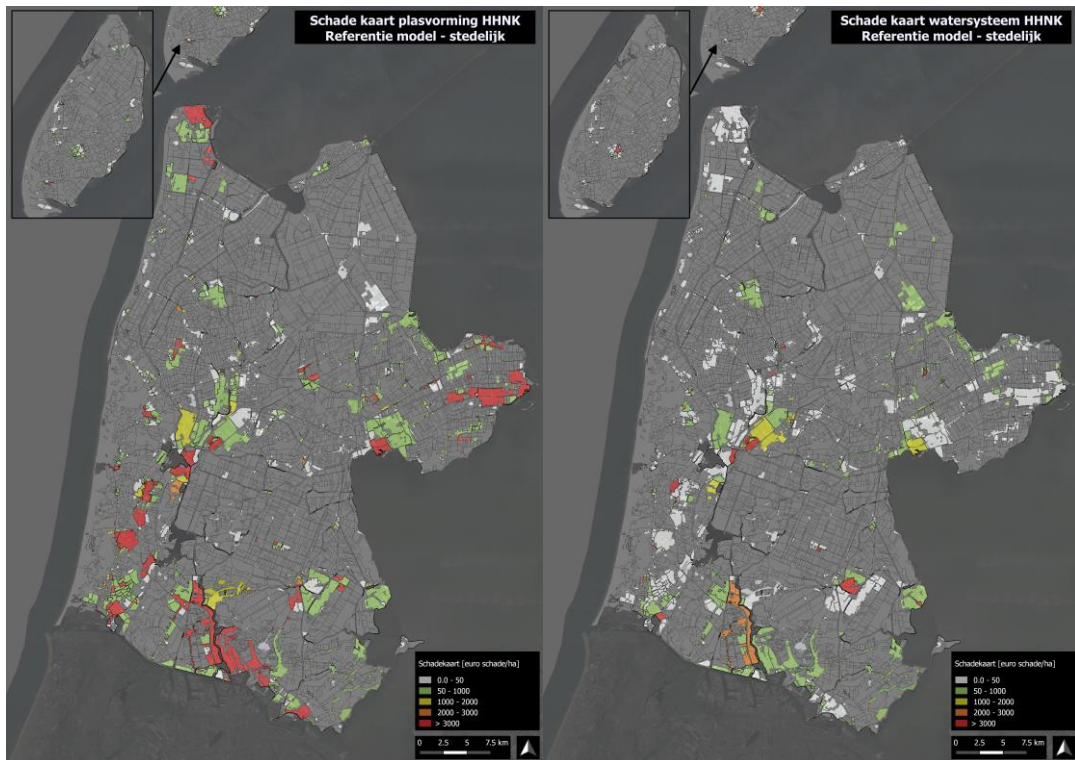
### Opsplitsing schadebedragen op basis van landgebruik

De naar oorzaak opgesplitste schade is verder opgedeeld naar schade in landelijk en stedelijk gebied. De schades in het stedelijk gebied ontstaan voornamelijk door plasvorming en minder door inundatie uit het watersysteem. In het landelijk gebied is dit juist omgekeerd, hier ontstaat schade voornamelijk door inundatie uit het watersysteem. Figuur 27 toont de schade in het landelijke gebied voor plasvorming (linker figuur) en door inundatie vanuit het watersysteem (rechter figuur).



Figuur 27. Schade per hectare per peilgebied in landelijk gebied. Linker figuur: door plasvorming, rechter figuur: door inundatie uit het watersysteem.

Figuur 28 toont de schade in het stedelijke gebied uitgesplitst voor plasvorming (linker paneel) en inundatie uit het watersysteem (rechter paneel).



Figuur 28. Schade per hectare per peilgebied in stedelijk gebied. Linker figuur: door plasvorming, rechter figuur: inundatie uit het watersysteem.

Schade in de polderclusters Koegras en Zijpe-West wordt voornamelijk veroorzaakt door inundatie vanuit het watersysteem in landelijk gebied (Figuur 27, rechter figuur). In deze regio vindt veel intensieve landbouw plaats, voornamelijk bollenteelt, veelal op percelen waar een onderbemaling aanwezig is. Van de onderbemalingen is de capaciteit vaak onbekend waardoor er voor de modellering een aanname gedaan is op basis van de beleidsregels. Hierin geldt dat de capaciteit van een onderbemaling maximaal 80 procent van de afvoernorm van de polder mag bedragen. De hoge schadebedragen in deze gebieden laten zien dat de combinatie van onderbemalingen en kapitaalintensieve landbouw voor hoge schadebedragen zorgen in de modelanalyses.

In de polder Anna Paulowna wordt de schade in het landelijk gebied veroorzaakt door een combinatie van plasvorming en inundatie vanuit het watersysteem. De schade ontstaat niet alleen in landelijk gebied. In de polder Koegras wordt ook een groot deel van de schade veroorzaakt door plasvorming in het stedelijk gebied (Figuur 28, linker figuur).

Ook in het oostelijk gelegen Grootslag komt naar voren dat schade in het landelijk gebied voornamelijk veroorzaakt wordt door inundatie uit het watersysteem en in het stedelijk gebied door plasvorming.

In de centraal gelegen polders Geestmerambacht, Heerhugowaard, Heiloo en de Oudorpolder geldt hetzelfde beeld. De Schermer, die zich kenmerkt door zijn grote aandeel landelijk gebied, kent hoofdzakelijk schade die veroorzaakt wordt door inundatie vanuit het watersysteem.

In de polders Oostzaan en Westzaan, respectievelijk polderclusters 42 en 32, in het zuiden van het beheergebied ontstaat voornamelijk schade in het stedelijk gebied. Voor de polder



Westzaan en de uitschieter in schade in Edam-Volendam, poldercluster 23, zijn de schadebeelden nader geanalyseerd, in respectievelijk Hoofdstuk 7.3 en Hoofdstuk 7.2.

Tabel 4 toont de optredende schade in het beheersgebied uitgesplitst naar oorzaak en locatie van optreden. Ook uit deze tabel blijkt dat schade in het stedelijk gebied voornamelijk wordt veroorzaakt door plasvorming en in het landelijk gebied door inundatie uit het watersysteem.

Tabel 4. Uitsplitsing van optreden schade in het beheersgebied uitgesplitst naar oorzaak en locatie.

Type inundatie	Schade [miljoen €]
Plasvorming stedelijk gebied	186
Watersysteem stedelijk gebied	67
Plasvorming landelijk gebied	65
Watersysteem landelijk gebied	156

### 6.3 Effectiviteit maatregelen

Voor alle polders waar gedurende het project mogelijke maatregelen zijn opgesteld, is de effectiviteit van de maatregelen onderzocht. De maatregelen zijn gericht op:

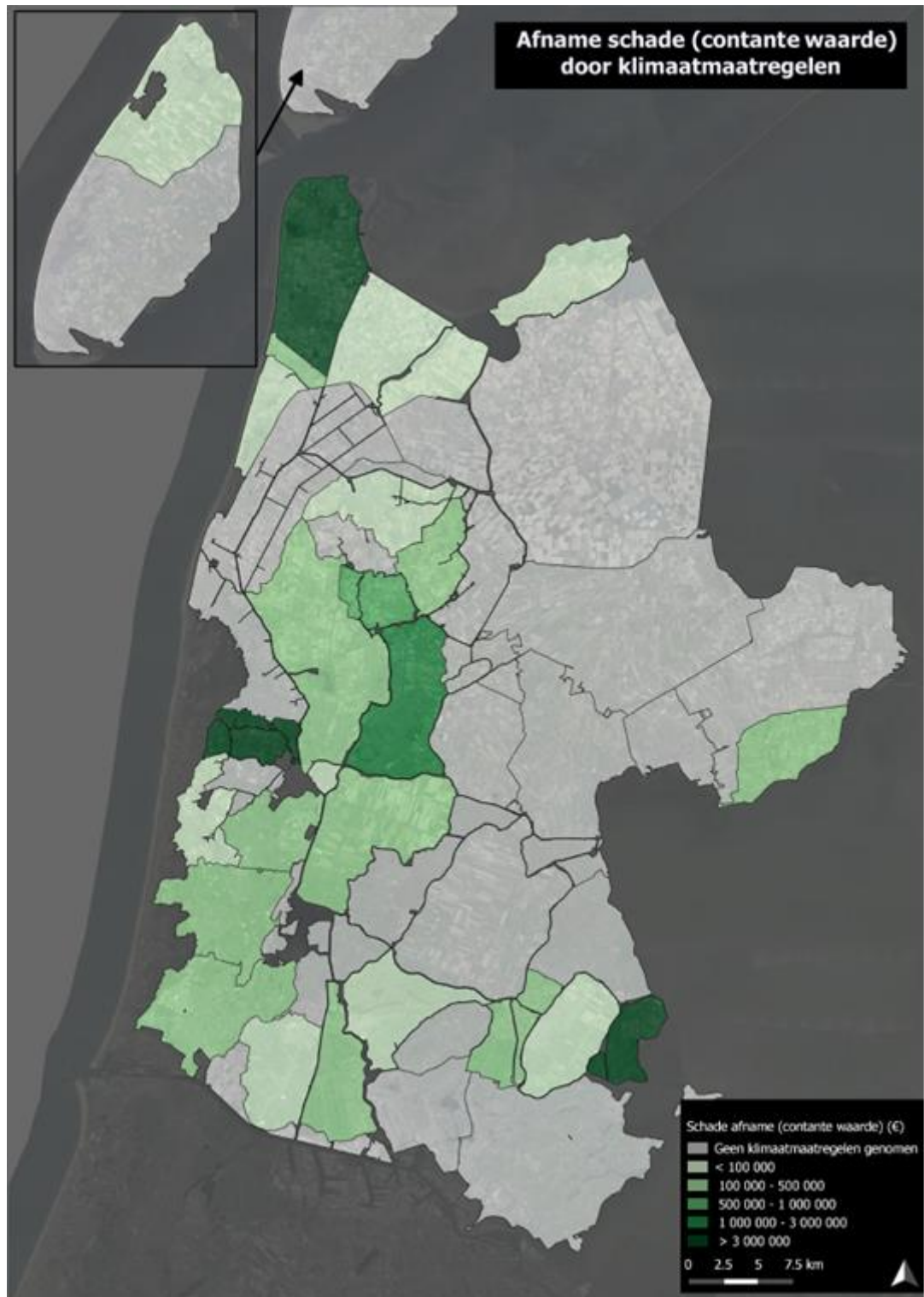
- Het oplossen van hydraulische knelpunten.
- Vergroting van de veerkracht van zowel het watersysteem als de ruimtelijke inrichting. Dit is een gemeenschappelijke opgave van het hoogheemraadschap en haar samenwerkingspartners.

Per polder zijn de volgende kentallen samengevat en weergegeven in Bijlage HTabel 17

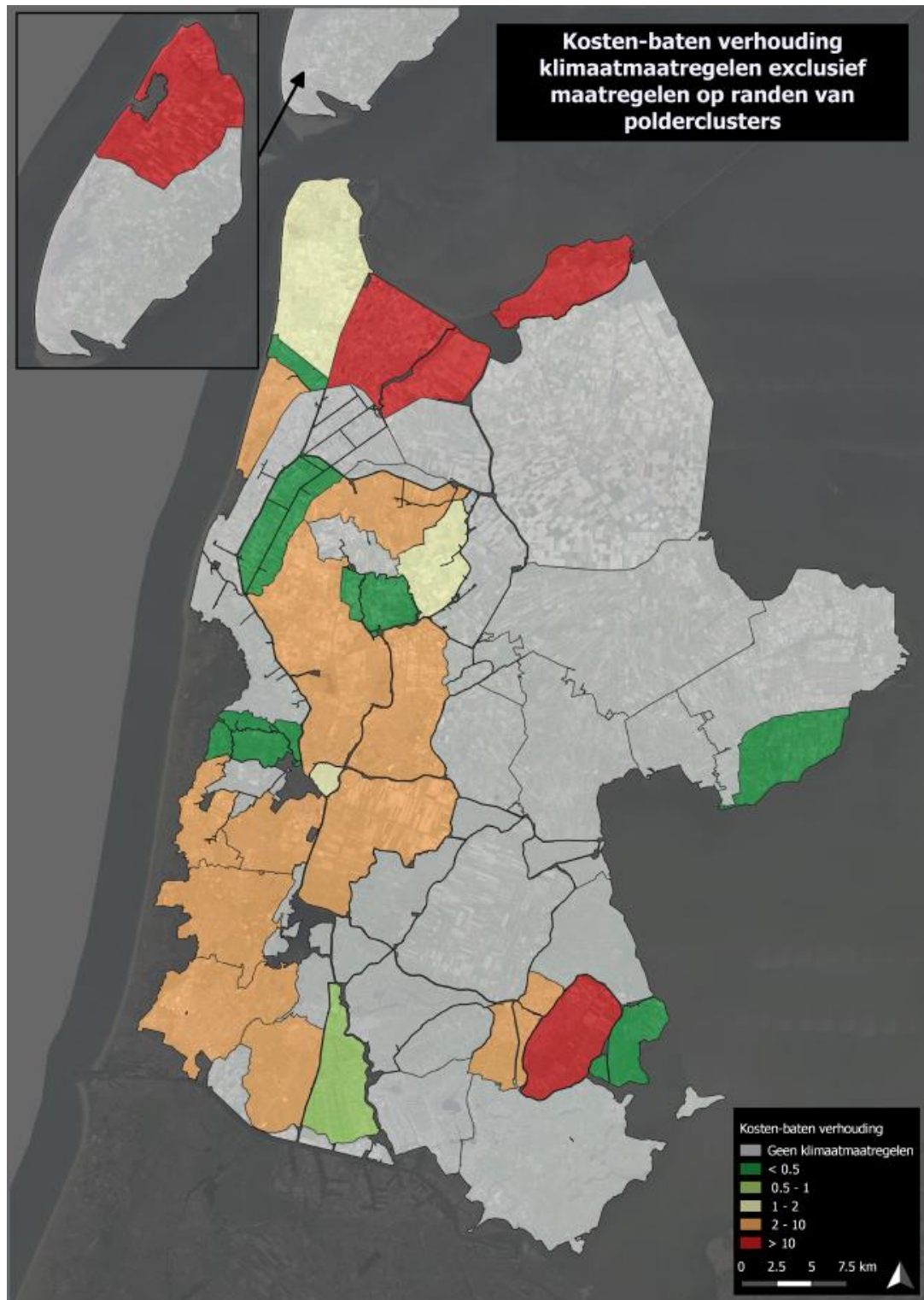
- Schade (contante waarde) voor maatregelen
- Schade (contante waarde) na maatregelen
- Investeringsruimte (baten)
- Kosten maatregelen
- Kosten-batenverhouding

Figuur 29 toont de afname van de contante waarde van de schade door de uitvoering van klimaatmaatregelen per poldercluster van licht- naar donkergroen. Hierin zijn polderclusters waarin enkel hydraulische maatregelen zijn genomen niet weergegeven omdat deze maatregelen zijn genomen op basis van de berekende opstuwings bij de maatgevende afvoer. Deze maatregelen hebben ook een effect bij boven maatgevende situaties.

Figuur 30 toont het effect van de klimaatmaatregelen op de kosten/baten verhouding. De baten zijn bepaald door de contante waarde van de schade te sommeren per poldercluster voor de referentie situatie (huidige situatie) en de situatie na het nemen van de maatregelen. Het verschil tussen deze twee situaties vormt de baten per poldercluster. Op basis van kentallen zijn de kosten per type maatregel uitgerekend en gesommeerd per poldercluster. Clusters waarin de contante waarde van de schade sterk afneemt, zijn in het donkergroen weergegeven. Omdat alle polderclusters individueel zijn doorgerekend, zijn effecten van maatregelen op de randen van ieder systeem, door bijvoorbeeld uitwisseling tussen polders, niet doorgerekend. Om een zuiver beeld te schetsen van de kosten/baten verhouding zijn de kosten van deze maatregelen op de randen van deze polderclusters niet meegewogen.



Figuur 29. Afname van de schade per poldercluster (baten) door inpassing van klimaatmaatregelen.



Figuur 30. Kosten/Baten verhouding van klimaat maatregelen per poldercluster, exclusief de kosten van maatregelen op randen.

Het totale pakket van maatregelen heeft een totale kostprijs van € 40,4 miljoen met een kosten-batenverhouding van 1,8. De kosten en baten zijn verrekend over een investeringstermijn van 50 jaar (tot 2070). De kosten van de maatregelen bestaan uit kosten voor het reduceren van hydraulische knelpunten en klimaatmaatregelen waaronder betere verdeling en flexibele sturing van hemelwater en klimaatbestendige ontwikkelingen (Tabel 5). De maatregelen op boezemniveau, zoals noodbemaling, zijn meegenomen in de kosten, echter zijn

de baten van deze maatregelen niet bepaald. Hierdoor komen deze maatregelen niet goed tot uitdrukking in de kosten-batenverhouding.

Tabel 5. Kosten van maatregelen opgesplitst in maatregelen ten behoeven van reductie hydraulische knelpunten en klimaatmaatregelen.

Type maatregelen	Kosten (mln. €)
Reductie hydraulische knelpunten	5,2
Klimaatmaatregelen	35,2
Totaal	40,4

## 6.4 Synthese resultaten poldergebieden

De gebiedsbrede analyses van de schades tonen een verspreid schadebeeld over het gehele beheergebied. Er zijn echter wel hotspots en lokale uitschieters aan te wijzen. Ruim de helft van deze schades worden veroorzaakt door plasvorming. Hiervoor zouden landeigenaren (publiek of privaat) maatregelen kunnen treffen. Het andere deel van de schades wordt veroorzaakt door inundaties vanuit het watersysteem. In Tabel 6 zijn de totale schades te zien voor de opsplitsingen in schade door inundatie vanuit het watersysteem en schade door plasvorming maar ook verder opgesplitst in schades in het stedelijk gebied en het landelijk gebied. Hierin is te zien dat in het stedelijk gebied de meeste schade ontstaat door plasvorming. In het landelijk gebied ontstaat de meeste schade door inundatie vanuit het watersysteem. De verdeling tussen de schade in het landelijke en stedelijk gebied ligt procentueel met respectievelijk 47% en 53% dicht bij elkaar. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat het stedelijk gebied met 17% van het areaal dus naar verhouding met de genoemde 53% dus een groot aandeel heeft in het totale schaderisico.

Tabel 6. Totale schades uitgesplitst over de verschillende landgebruik types en oorzaken.

Type inundatie	Schade [miljoen €]	Percentage [%]	Percentage per landgebruik [%]
Plasvorming stedelijk gebied	186	39	53
Watersysteem stedelijk gebied	67	14	
Plasvorming landelijk gebied	65	14	47
Watersysteem landelijk gebied	156	33	
Totaal	475	100	100

In Bijlage G zijn ook kaartbeelden opgenomen van de schade per kubieke meter inundatie volume, zowel voor stedelijke als landelijke inundatie. Hierin is zichtbaar dat er ruimte is om inundatieschade te verplaatsen vanuit schade-intensieve stedelijke gebieden naar schade extensieve landelijke gebieden. Ter illustratie: Voor een specifieke neerslaggebeurtenis (T100 blokbui met GGG bodemtoestand) blijft de schade per kuub inundatie in het landelijk gebied bijna overal onder de 5 euro/m<sup>3</sup> inundatie, terwijl lokaal in de stedelijke gebieden de schades oplopen tot boven de 300 euro/m<sup>3</sup> inundatie. Dit is verder uitgewerkt in het voorbeeld in hoofdstuk 7.2.



## 7 Nadere analyses

De resultaten uit de watersysteemanalyses en de gebiedsbrede analyses leveren veel informatie en waardevolle inzichten op over het watersysteem van HHNK. Hierdoor is er per polder een beeld van het functioneren van het watersysteem bij situaties die eens per jaar voor kunnen komen tot zeer extreme situaties die eens per 1000 jaar voor kunnen komen. In dit hoofdstuk is een aantal aansprekende voorbeelden uitgewerkt waaruit duidelijk wordt hoe de resultaten van deze studie kunnen bijdragen aan het begrip van de systeemwerking, het identificeren van de belangrijkste kwetsbaarheden en de inrichting van een robuust watersysteem.

In paragraaf 7.1 is op basis van de resultaten een gebiedsbrede analyse uitgevoerd om de gemalen te identificeren die tijdens hoogwatersituaties het meest kwetsbaar zijn voor inundaties. In paragraaf 7.2 is een voorbeeld voor de Zuidpolder uitgewerkt dat laat zien hoe de inzichten uit deze studie kunnen worden gebruikt bij advies over herinrichting van het watersysteem bij ruimtelijke ontwikkelingen. Daarnaast laat dit voorbeeld zien dat het watersysteem anders functioneert tijdens extreme situaties dan tijdens de maatgevende situaties. In paragraaf 7.3 is een maatregel in de polder Westzaan verder uitgewerkt, waarbij hoge schades in stedelijk gebied worden voorkomen door extra af te voeren naar landelijk gebied. In paragraaf 7.4 is een voorbeeld uitgewerkt waarbij een piekberging is ingezet om wateroverlast elders in het systeem te voorkomen. Ten slotte wordt dit hoofdstuk afgesloten met een voorbeeld van het vergroten van de robuustheid van het watersysteem door het koppelen van twee peilgebieden in de Schermer in paragraaf 7.5.

### 7.1 Kwetsbare gemalen

Voor het hele beheergebied zijn voor verschillende herhalingstijden gemalen geïdentificeerd waarbij er een inundatie van minimaal 20 centimeter optreedt aangrenzend aan het gemaal. Tabel 7 toont een overzicht van het aantal kwetsbare gemalen bij toepassing van deze criteria. In Figuur 31 zijn de gemalen te zien waarbij een inundatiediepte van meer dan 20 cm plaatsvindt. De T10 situatie is een vaker voorkomende situatie dan de T100 en de T1000 situatie. Dit betekent dat de gemalen bij deze laatste twee buien ook in- en onderen wanneer dat gebeurt bij de T10 bui. De kleuren van de gemalen zijn ook op deze manier weergegeven in de figuur.

Tabel 7. Aantal gemalen waarbij een inundatie van meer dan 20 cm optreedt, gesorteerd op pompcapaciteit.

Herhalingstijd inundatie	> 20 cm inundatie	Capaciteit (> 5 m <sup>3</sup> /min)	Capaciteit (>10 m <sup>3</sup> /min)
T10	65	22	11
T100	86	30	15
T1000	105	42	21



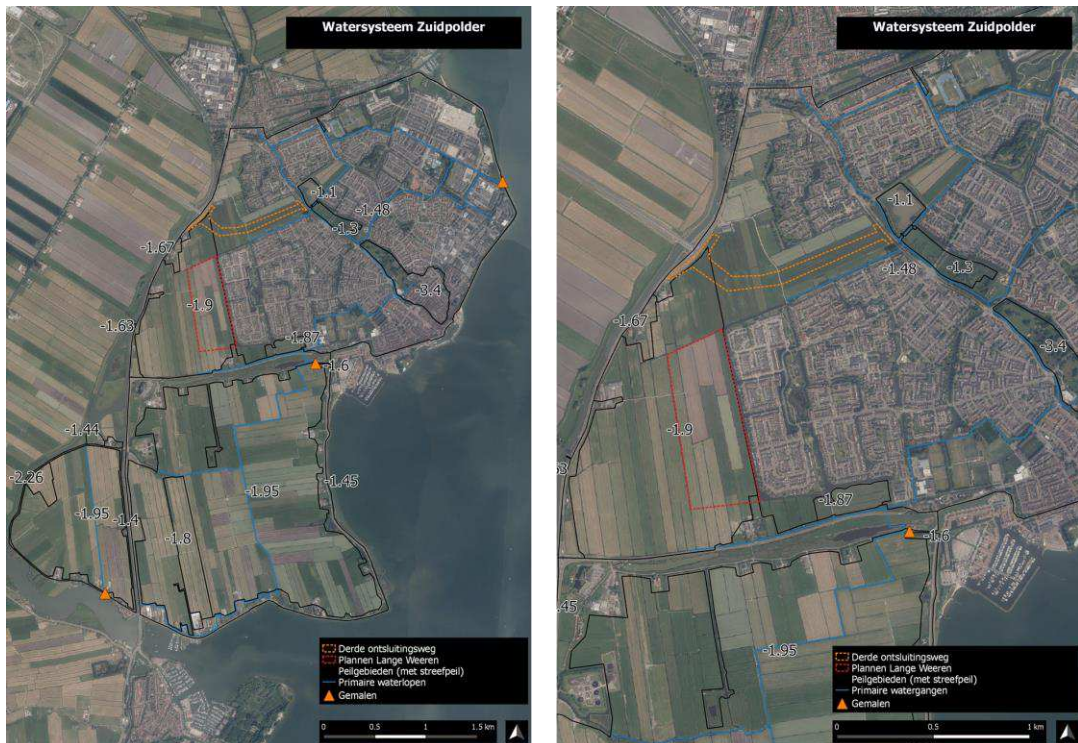
Figuur 31. Locatie van kwetsbare gemalen bij inundatie van meer dan 20 cm optreedt bij de diverse herhalingsstijden.

## 7.2 Ruimtelijke ontwikkelingen in de Zuidpolder

Het poldercluster Katvoed ligt in het oosten van het beheergebied van HHNK. Dit poldercluster bestaat uit de polders Katwoude Hogendijk en Lagendijk in het zuiden en de Zuidpolder in het noorden. Dit poldercluster wordt begrensd door de boezem en de provinciale weg N247 aan de westkant en door het Markermeer aan de oostkant. Het poldercluster heeft een oppervlak van 1385 hectare, hiervan is het zuidelijke deel (Katwoude Hogendijk/Lagedijk) voornamelijk landbouwgebied en het noordelijke deel (de Zuidpolder) voornamelijk stedelijk gebied.

In het noorden liggen de stedelijke kernen van Volendam en Edam. Het oppervlaktewater in het stedelijk gebied van Volendam en Edam heeft een streefpeil van NAP -1,48 m en wordt af via gemaal Volendam met een capaciteit van 100 m<sup>3</sup>/min naar het Markermeer. In het centrum van Volendam ligt een lager gelegen peilgebied (Volendammermeer) met een peil van NAP -3,40 m. Ook het landelijk gebied ten westen van Volendam heeft een lager peil van NAP -1,90 m. De drooglegging in het stedelijk gebied varieert van 1,0 m tot 1,6 m. De drooglegging in het landelijk gebied is kleiner, deze varieert tussen de 0,2 en 0,6 m.

In dit gebied zijn plannen voor nieuwbouwwijk Lange Weeren ten westen van Volendam en er liggen bouwplannen voor het aanleggen van een derde ontsluitingsweg naar Volendam. Deze ruimtelijke ontwikkelingen staan aangegeven in Figuur 32. De totale oppervlakte van deze ruimtelijke ontwikkelingen bedraagt 40 hectare, dit is ongeveer 30% van het landelijk gebied naast Volendam.



Figuur 32. Watersysteem Zuidpolder (links) met een detailkaart van de plangebieden van de ruimtelijke ontwikkelingen (rechts).

Tijdens de watersysteemanalyse bleek dat het watersysteem aan de hydraulische normen voldoet. Tijdens de extreme situaties (T100 en T1000) stijgen de waterstanden in het watersysteem en treden er op diverse locaties inundaties op. De blauwe pijlen in Figuur 33 laten zien hoe het gebied inundeert (overeenkomend met onderstaande nummering):

1. Het peilgebied Volendammeer in het centrum van Volendam inundeert;
2. Er wordt water geborgen in de piekberging ten zuiden van Volendam;
3. Het landelijk gebied ten westen van Volendam inundeert.

De inundatie van het Volendammeer zorgt voor veel schade. In de werksessie van deze polder is voorgesteld om de kades rond dit gebied te verhogen. De uitkomsten van het maatregelmodel tonen aan dat deze maatregel effectief is.

De piekberging ten zuiden van Volendam wordt in het model al bij een T10 situatie ingezet. In dit geval wordt hier ongeveer 10 000 m<sup>3</sup> water geborgen. Bij een T100 en T1000 situatie loopt dit op tot 14 000 m<sup>3</sup>.

Vanaf een T100 situatie inundeert het landelijk gebied ten westen van Volendam, waarbinnen de plangebieden van de ruimtelijke ontwikkelingen zich bevinden. Deze inundaties van het landelijke gebied verlichten de druk op het watersysteem wanneer de capaciteit van de piekberging bereikt is. Hierdoor blijven verdere waterstandstijgingen en ongewenste inundaties in Volendam en Edam uit. Deze inundaties van het lager gelegen landelijk gebied ontstaan als de waterstandstijging in het oppervlaktewater groter is dan 25 cm.

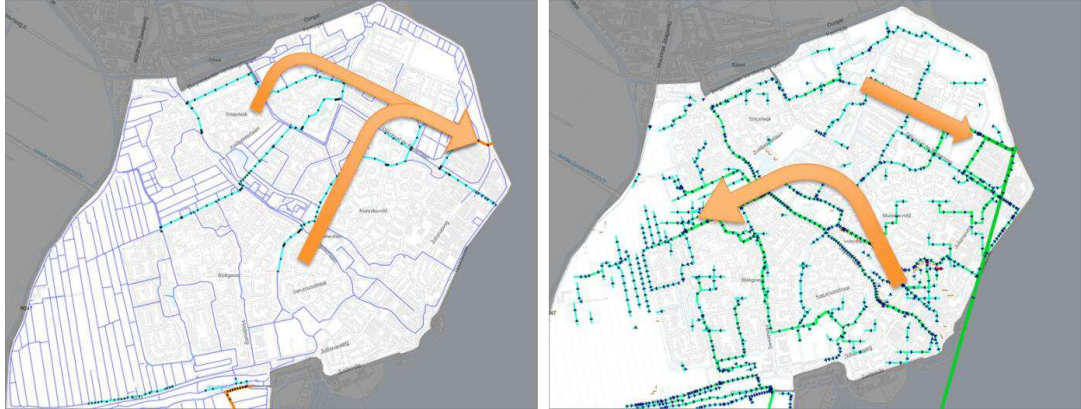




Figuur 33. Inundaties bij extreme situaties. De pijlen geven de richting van de stroming weer.

Figuur 33 laat zien dat ruimtelijke ontwikkelingen gepland zijn in het landelijk gebied dat inundeert in extreme situaties. Als hier een weg (oranje arcering) wordt aangelegd en woningen (rode arcering) worden gebouwd zal dat betekenen dat het gearceerde gedeelte wordt opgehoogd. In de huidige situatie is er in deze plangebieden ruimte voor inundaties bij extreme neerslaggebeurtenissen. Als deze ruimte in de toekomst afneemt komt het watersysteem in het stedelijke gebied bij extreme situaties meer onder druk te staan. Dit kan leiden tot ongewenste inundaties in het stedelijk gebied. De orde van grootte van deze ruimte is 85 000 m<sup>3</sup>. Dit is bepaald door de berging te bepalen bij een blok bui met een T1000 neerslagvolume. Deze berging zou bij realisatie van de ruimtelijke ontwikkelingen ergens anders moeten worden gevonden om hoge schades in het stedelijke gebied te voorkomen.

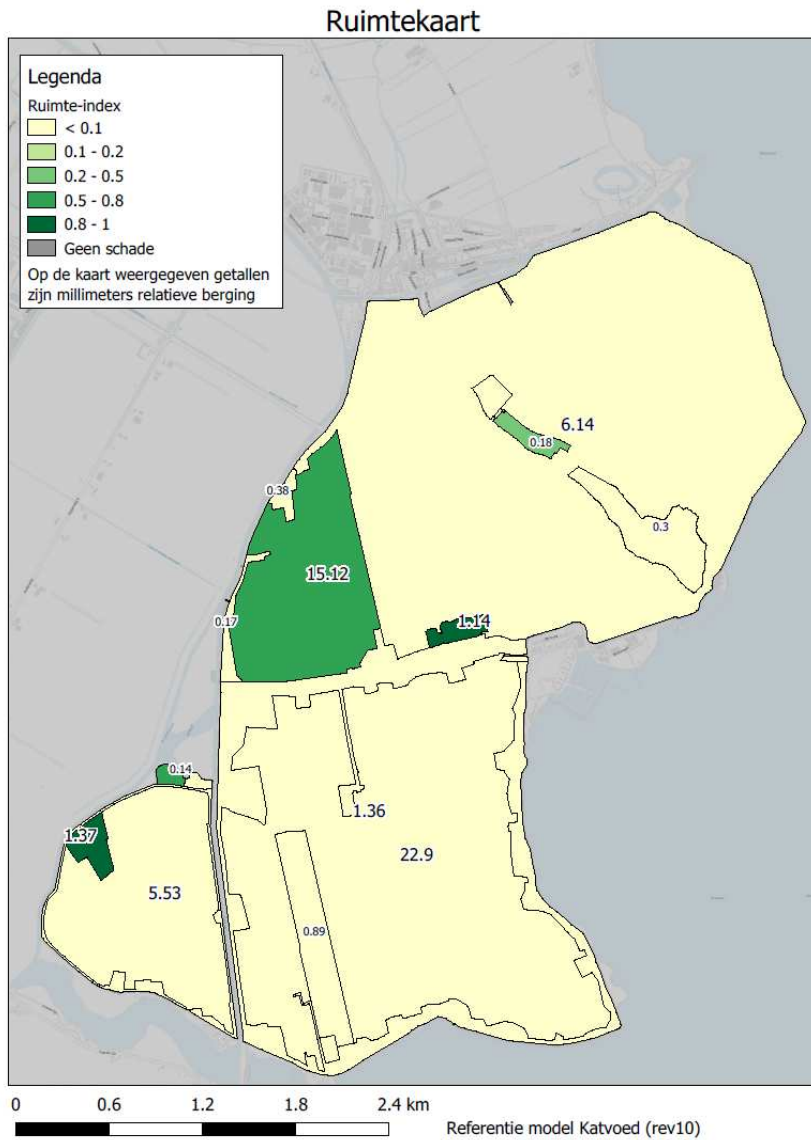
De stromingsrichting in het model laat ook zien dat het watersysteem zich anders gedraagt bij de extreme situaties (T10-T1000) dan bij de maatgevende situaties (T1). Tijdens de reguliere en maatgevende situaties stroomt het water naar het afvoergemaal Volendam, zie linker figuur in Figuur 34. In meer extreme situaties stijgen de waterstanden in het stedelijke watersysteem. Als de waterstanden te veel stijgen en stedelijk gebied zou inunderen, stroomt het water naar het lager gelegen landelijke gebied. Dit is terug te zien in de stromingsrichting in de rechter figuur in Figuur 34.



Figuur 34. Stromingsrichting bij maatgevende situatie (links) en bij extreme gebeurtenissen (rechts).

De ruimtkaart (Figuur 35) laat met de kleuring van de peilgebieden zien waar in de polder het water relatief het goedkoopste geborgen kan worden. In dit geval is het meest gunstig (groene kleur) om overtollig water op het maaiveld te 'bergen' in het peilgebied ten westen van Volendam en in de piekberging ten zuiden van Volendam. Dit komt overeen met hoe het systeem in de huidige situatie functioneert.

De kaart laat verder met getallen de berging van water per peilgebied zien, in aantallen millimeters neerslag gezien over het gehele poldercluster. Hieruit volgt dat er relatief weinig water wordt geborgen in de piekberging (1,1 mm). In het peilgebied waar de plannen zijn voor het woningbouwproject Lange Weeren wordt wel veel water geborgen (15,1 mm). Dit is de hoeveelheid berging op het maaiveld in het model bij een T1000 situatie. Na realisatie van de ruimtelijke ontwikkelingen zou de berging in dit peilgebied grotendeels verdwijnen. Daardoor zijn er geen peilgebieden meer met relatief hoge berging (getallen in de ruimtkaart) en waar het water goedkoop geborgen kan worden (groene kleur in de ruimtkaart). De kaart geeft ook aan dat er in de polder Katwoude Hogendijk ten zuiden van de Zuidpolder al veel water wordt geborgen (22,9 mm) maar dat het duur is om daar extra water te bergen (ruimte-index onder de 0,1).

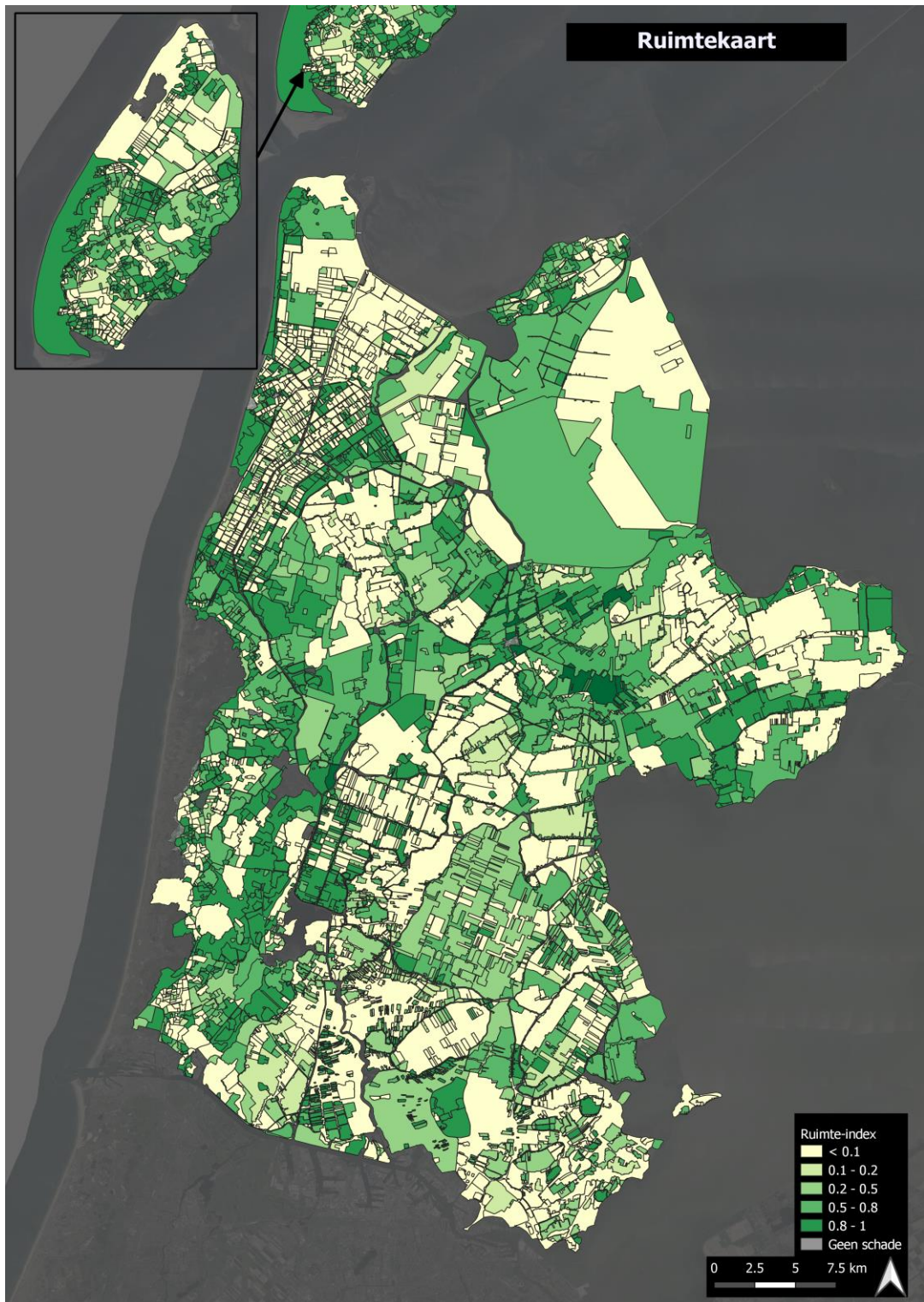


Figuur 35. Ruimtekaart Zuidpolder.

De watersysteemanalyse geeft inzicht in het functioneren van het watersysteem in de Zuidpolder bij zowel de maatgevende situatie (eens per jaar) als de extremen (eens per 10, 100 en 1000 jaar). Tijdens maatgevende situatie zijn er geen grote knelpunten in deze polder en stroomt het water naar het hoofdgemaal in Volendam. Bij meer extreme situaties nemen niet alleen de afvoerdebieten toe, maar verandert ook de stromingsrichting in een gedeelte van het watersysteem. Op basis van de uitgevoerde simulaties is het mogelijk om schade extensieve gebieden naast Volendam te identificeren die ruimte geven aan het watersysteem bij extreme neerslaggebeurtenissen.

Deze inzichten kunnen worden gebruikt om de impact van ruimtelijke ontwikkelingen op het watersysteem te analyseren en inzicht te geven in de vanuit de hydrologie geadviseerde ruimtelijke inrichting. In Figuur 36 is de ruimtekaart van het gehele beheergebied te zien.



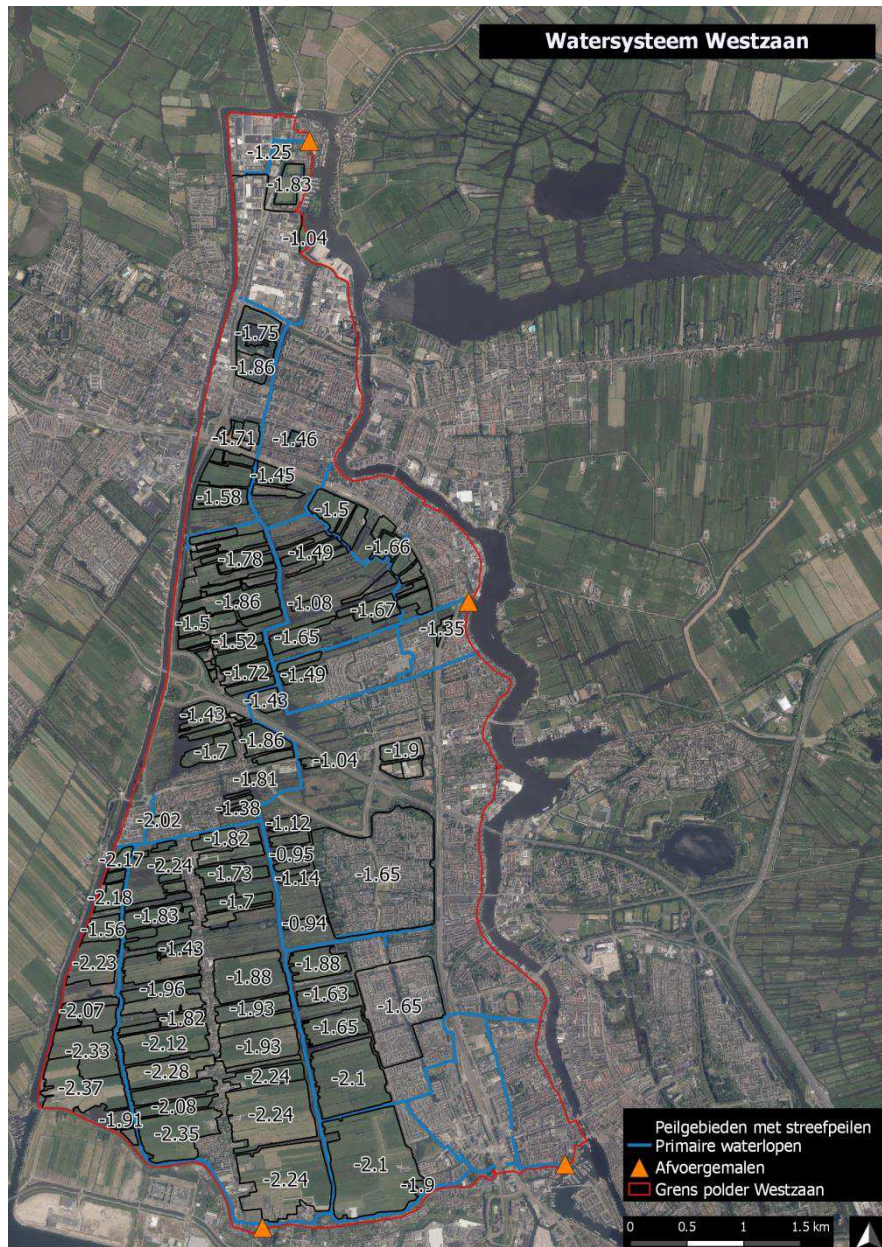


Figuur 36. Gebiedsbrede ruimtekaart.



### 7.3 Reduceren van schade in stedelijk gebied (Westzaan)

De polder Westzaan bevindt zich in het zuiden van het beheergebied. De polder heeft een oppervlak van 2400 hectare. Deze polder bevat stedelijk gebied in het noorden en oosten (gemeentes Zaandam en Koog aan de Zaan) en landelijk gebied in het westelijk deel van de polder. Het landelijk deel van de polder is een veenweidegebied. Het watersysteem van Westzaan bestaat uit één groot peilgebied (streefpeil -1,04 m NAP) en een groot aantal kleinere onderbemalingen. Het water wordt afgevoerd via de primaire watergangen in het hoofdpeilgebied naar de afvoergemalen op de zuid- en ostrand van de polder. Een overzicht van het watersysteem is gegeven in Figuur 37.



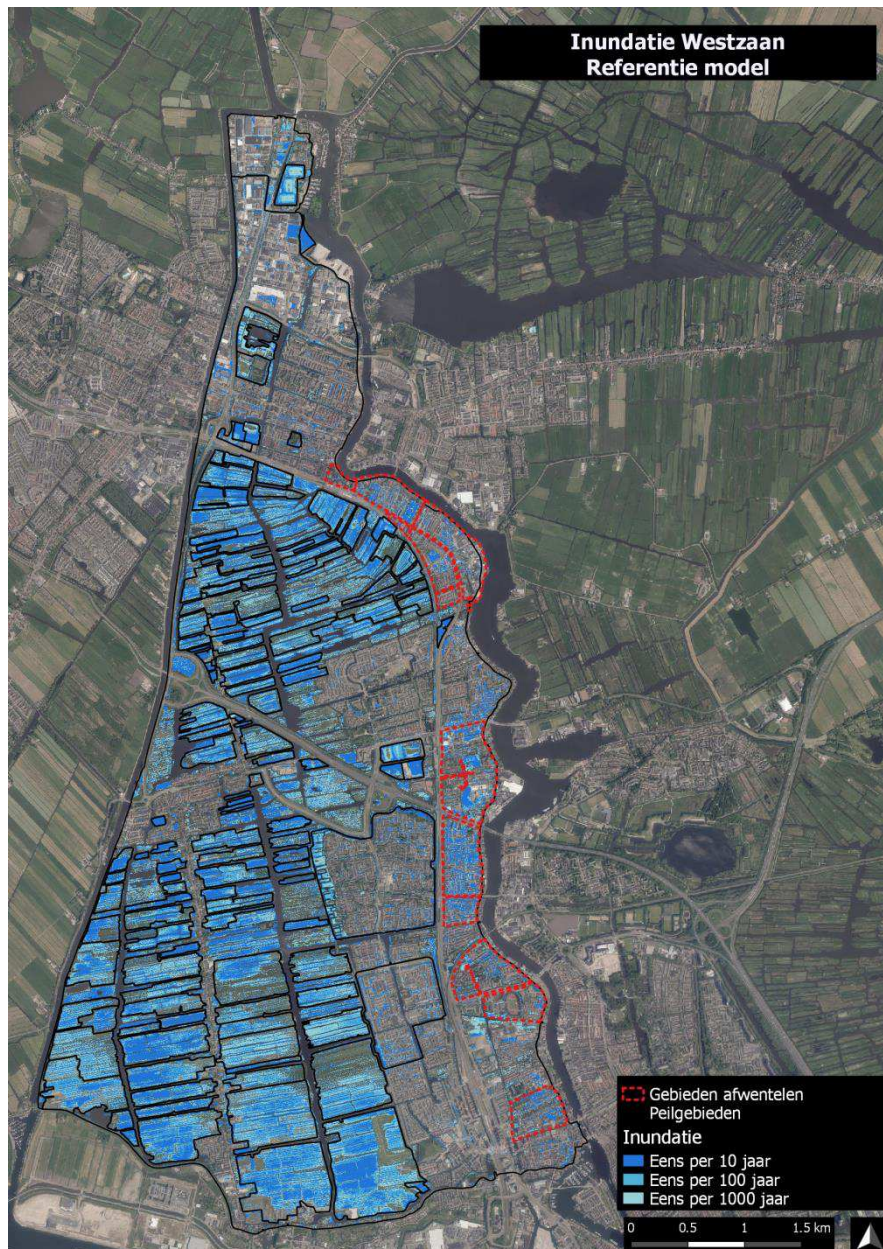
Figuur 37. Watersysteem Westzaan.

De simulaties laten zien dat er vanaf een T10 situatie ongewenste inundaties optreden in de stedelijke gebieden aan de oostrand van deze polder (zie Figuur 38). Deze inundaties



veroorzaken hoge (contante waarde van) schades, 4 miljoen euro schade veroorzaakt door inundatie vanuit het watersysteem en 12 miljoen door plasvorming.

Daarnaast treden er inundaties in het landelijke gebied op. Deze inundaties leiden echter niet tot hoge schades, omdat op deze locaties voornamelijk grasland aanwezig is. Alle landelijke peilafwijkingen (veelal onderbemalingen) in het westen zijn geïnundeerd (Figuur 38), maar de contante waarden van de schades in deze peilafwijkingen blijven beperkt tot maximaal € 40 000,- per peilafwijking.



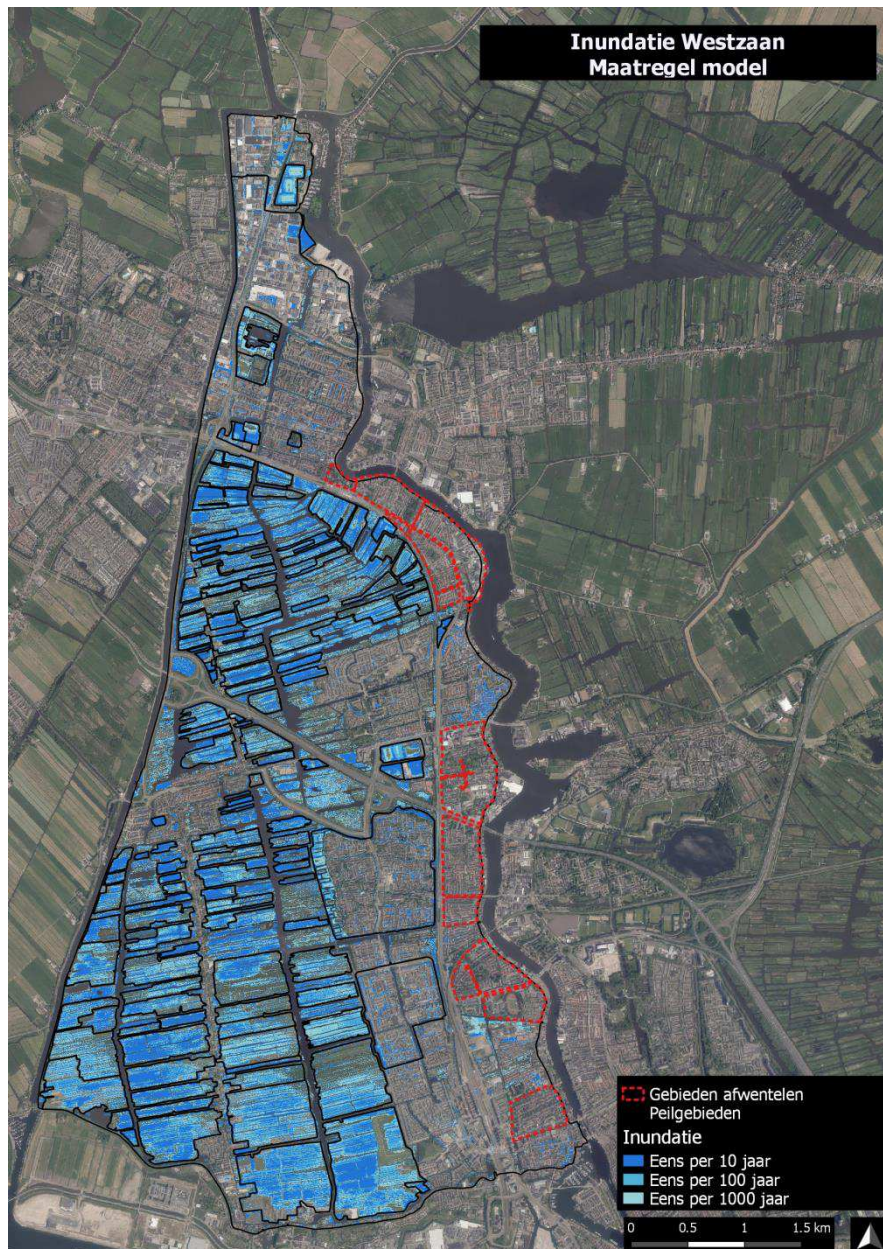
Figuur 38. Inundaties referentiemodel Westzaan.

Tijdens de werksessie voor deze polder is er daarom gekozen om te verkennen wat het effect is van het herverdelen van water tussen het stedelijk en landelijke gebied. Allereerst zijn hiervoor de stedelijke gebieden met de hoogste schadegetallen geïdentificeerd, deze zijn met een rode stippellijn gearceerd in Figuur 38. In samenspraak met de gemeente is de aanname gedaan dat in de toekomst ca. 40% van de inundaties (zowel plasvorming als

inundaties vanuit het watersysteem) lokaal kan worden gecompenseerd. De overige 60% van de inundaties wordt in dit scenario voorkomen door extra water af te voeren naar het landelijke gebied. Op basis van het geïnundeerde oppervlak en de inundatiedieptes is er berekend hoeveel water er extra moet worden afgevoerd naar het landelijke gebied. Dit volume is opgelegd aan het landelijke gebied door extra lateralen toe te voegen aan het model. Hierdoor wordt het watersysteem van het landelijke gebied zwaarder belast in de simulaties met maatregelen. Het volume dat hiermee wordt afgevoerd naar het landelijke gebied varieert van 12 000 m<sup>3</sup> bij een piekbui met een T10 neerslagvolume tot 46 000 m<sup>3</sup> bij een piekbui met een T1000 neerslagvolume. Het model is met deze extra belasting opnieuw doorgerekend.

Figuur 39 laat de inundaties bij een T10, T100 en T1000 situatie zien na het nemen van de maatregelen. In dit model is aangenomen dat het met de maatregelen gelukt is om 60 procent van inundaties uit de stedelijke gebieden af te voeren via het landelijke gebied en de overige inundaties te compenseren met lokale maatregelen. Daarom zijn er geen inundaties in de stedelijke gebieden na het doorrekenen van de maatregelen.





Figuur 39. Inundaties in het maatregelmodel van Westzaan.

Door de maatregelen is er in het model extra water toegevoegd aan het watersysteem ten westen van de stedelijke gebieden. Daarna is het model opnieuw doorgerekend om te bepalen wat het effect is op de berekende inundaties en schades. Figuur 40 laat zien hoeveel de inundatiediepte in het landelijke gebied is toegenomen of afgenomen na het nemen van de maatregelen. Hierop is te zien dat de inundatiediepte op diverse plekken in het landelijk gebied met ongeveer 3 cm is toegenomen. Op twee plekken is er na het nemen van de maatregelen afname van de inundatiediepte in het landelijke gebied te zien. In het noordoosten van deze polder is komt dit doordat de capaciteit van de pomp is vergroot als maatregel. In het midden van het gebied wordt de afname van de inundatiediepte veroorzaakt doordat een kade rond een onderbemaling niet goed in het referentiemodel zat.

Dit laat zien dat de extra belasting tot een beperkte toename leidt van de inundatiedieptes in het landelijke gebied.





Figuur 40. Verschilkaart inundatiediepte referentie model en maatregel model.

In Tabel 8 staat een overzicht van de schades die zijn berekend voor het referentiemodel en het model met maatregelen. Door het afvoeren van water via het landelijke gebied is er in totaal 8,2 miljoen minder schade, hiervan is 1,5 miljoen reductie door watersysteem schade en 6,7 miljoen reductie van plasvorming schade. In dit geval is er wel vanuit gegaan dat het mogelijk is om alle inundaties uit de stedelijke gebieden volledig af te wentelen, in de praktijk kunnen er schades overblijven na het nemen van deze maatregel. Bovenstaande theoretische analyse laat echter wel zien dat de schadeafname door maatregelen in het stedelijk gebied vele malen groter zal zijn dan de schadetoename in het landelijk gebied. Omdat het hier een theoretische benadering betreft zijn deze maatregelen niet opgenomen in de overzicht tabel in bijlage G en ook geen onderdeel van het totale maatregelpakket van 40,4 mln. zoals dat in Tabel 5 is opgenomen.

In het proces van Ruimtelijke Adaptatie ligt er in eerste instantie een opgave om te zorgen voor voldoende en aanvullende opvang in het stedelijk gebied zelf, met een daarbij horende ruimtelijke inrichting die om kan gaan met het tijdelijk opvangen en vasthouden van een neerslagoverschot. Pas als dit niet voldoende oplossing biedt komt in tweede instantie een oplossing in beeld waarbij wordt gezocht naar schademinimalisatie door een herverdeling tussen stedelijk en landelijk gebied.

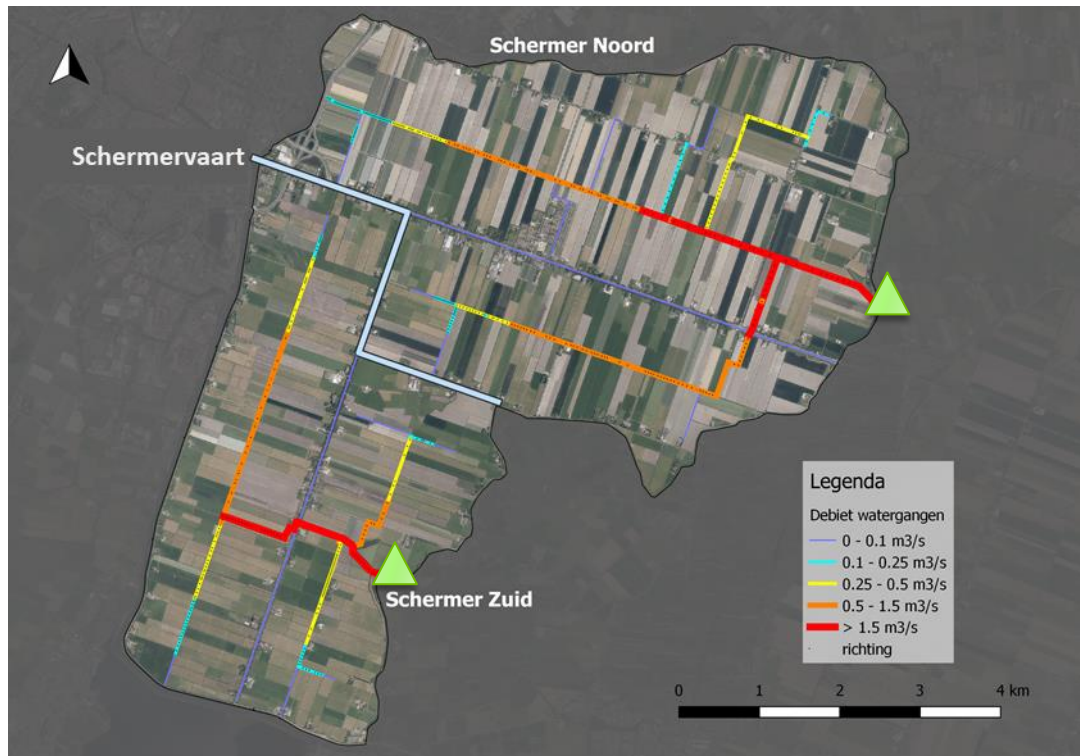
Tabel 8. Schadebedragen Westzaan bij het referentie- en theoretische maatregelmodel.

	Watersysteem schade [miljoen euro]	Plasvorming schade [miljoen euro]	Totaal schade [miljoen euro]
Referentiemodel	4,0	12,0	16,1
Maatregelmodel	3,6	5,6	9,2
Baten	0,4	6,4	6,8

De watersysteemanalyse van Westzaan geeft inzicht in de effectiviteit van de herverdeling van water in het landelijke en stedelijke gebied. In de stedelijke gebieden leiden inundaties snel tot hoge schades. In de landelijke gebieden treden ook inundaties op maar leiden deze vanwege het landgebruik niet tot hoge schades. Hierdoor is het mogelijk om deze schade extensieve ruimte naast de stedelijke gebieden te benutten tijdens extreme neerslagsituaties. De resultaten van het maatregelmodel laten zien dat afwenteling leidt tot een grote schadereductie. Dit principe kan ook worden toegepast om water af te wentelen van een polder(cluster) met hoge schade naar een nabijgelegen polder met lage schades. Daarnaast kan het ook worden toegepast tussen schade-intensieve landbouwgebieden zoals bollen-teelt en schade extensieve landbouwgebieden zoals grasland.

## 7.4 Uitwisseling in de Schermer

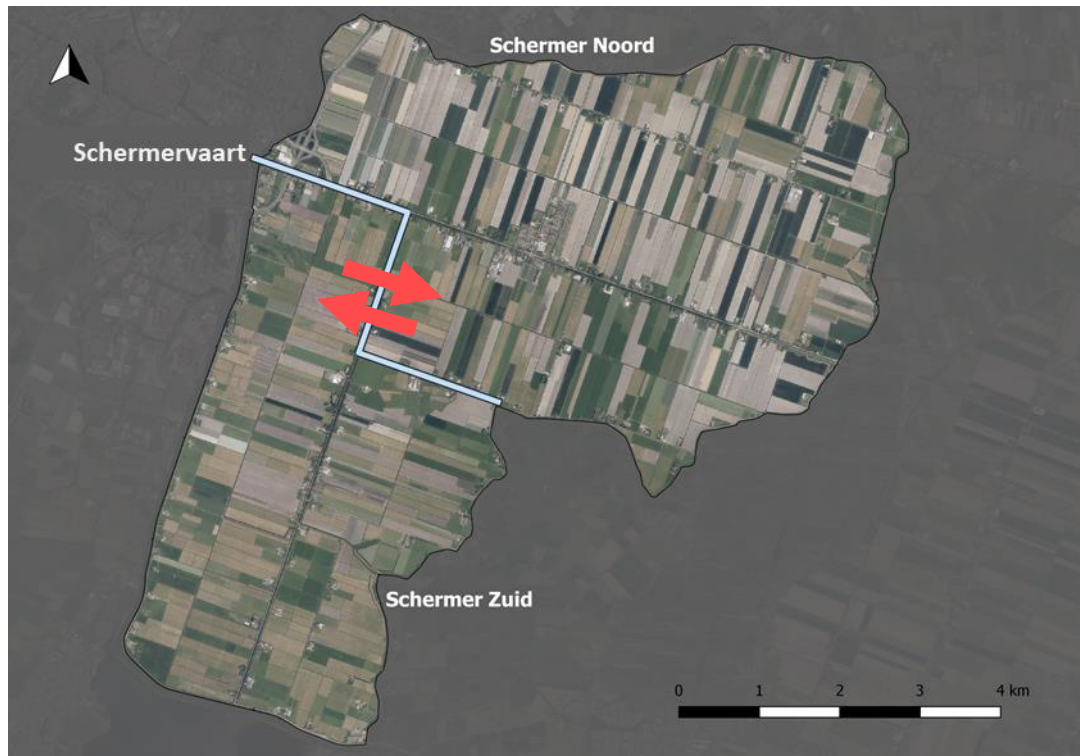
Afwatering in de Schermer vindt plaats via twee gemalen. Eén in de polder Schermer-Noord, één in de polder Schermer-Zuid. Deze polders zijn gescheiden door de Schermervaart; deze hoger gelegen binnenboezem voorkomt uitwisseling tussen de twee gedeelten (Figuur 41).



Figuur 41. Debiet in de Schermer, gescheiden in een noordelijk en zuidelijk deel door de Schermervaart.

Toen de Schermer nog uit 14 afdelingen bestond en met bijbehorende molens werd bemalen, was de Schermervaart de eerste trap in de bemaling. Later werd er gekozen voor elektrische bemaling en zijn de meeste afdelingen aan elkaar gekoppeld. Zo werden de polders Schermer-Noord en Schermer-Zuid geboren. De Schermer-Zuid blijkt echter kwetsbaarder voor wateroverlast dan de Schermer-Noord. Dit komt voornamelijk door het verschil in grootte van het bemalen peilgebied (het laagste peilgebied). In de vlakke Schermer-Noord beslaat dit bemalen gebied zo'n 60% van deze polder; in de Schermer-Zuid slechts 25%. De waterstand en daarmee de schade loopt daarom in het laagste peilgebied van de Schermer-Zuid relatief snel op. In de voorliggende studie is als maatregel in de Schermer een uitwisselingsmogelijkheid doorgerekend door het verbinden van de twee poldersystemen met een lange duiker onder de Schermervaart door. De streefpeilen zijn namelijk gelijk. Deze duiker zorgt ervoor dat – afhankelijk van de precieze neerslaggebeurtenis, inundatie wordt voorkomen door betere verdeling van het water en/of inundaties korter duren door betere benutting van beide gemalen (Figuur 42).





Figuur 42. Uitwisselingsmogelijkheid door inpassing van duiker tussen de Schermer-Noord en Schermer-Zuid.

De schadereductie na realisatie van deze uitwisselmogelijkheid is € 0,4 mln., circa 5% van het totaal. Dit kan mogelijk worden geoptimaliseerd door het toevoegen van een automatisch geregelde afsluiter op de duiker onder de Schermervaart. Hiermee kan het meest effectieve moment worden bepaald om de duiker te openen en om maximale schadereductie te realiseren.



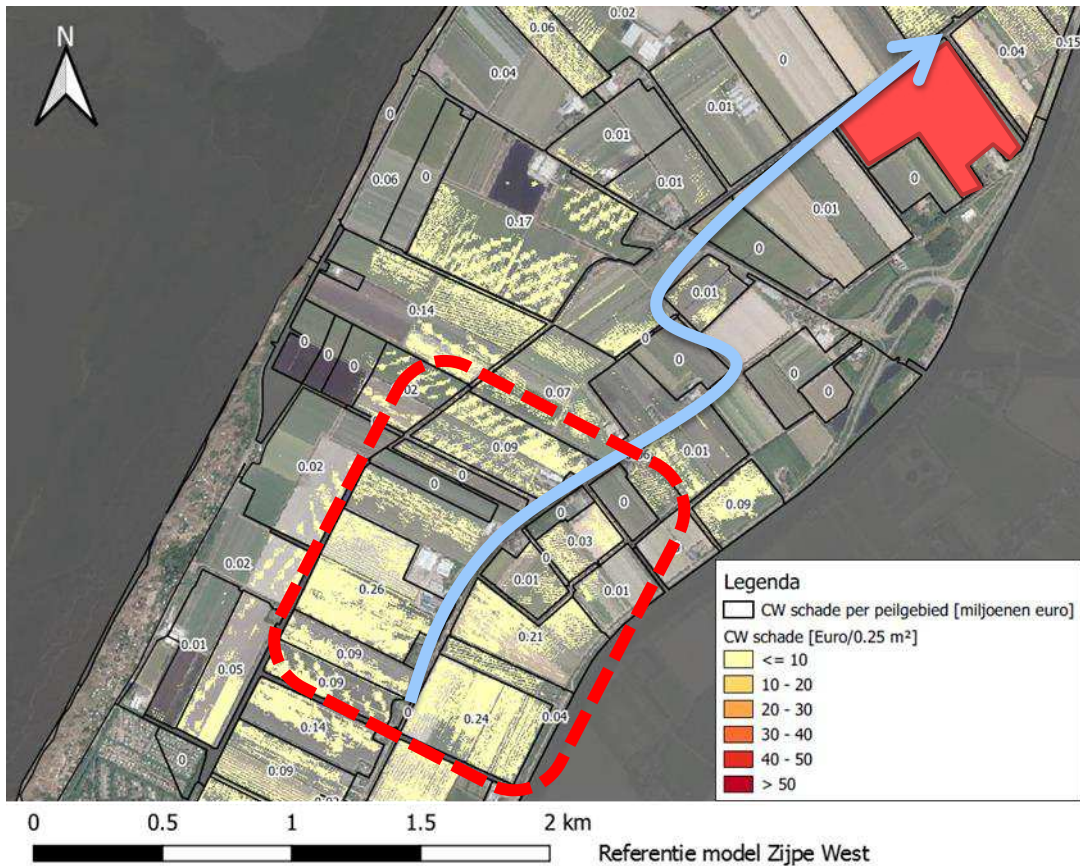
## 7.5 Inzet bergingsgebied Zijpe-West

In het noordwestelijke deel van het beheersgebied ligt poldercluster Zijpe-West. De polders bestaan veelal uit percelen met een onderbemaling waar bollen worden geteeld. Deze combinatie leidt tot relatief hoge schadebedragen in enkele peilgebieden. In het noordelijke deel van de Zijpe-West bevindt zich de waterberging 'De Stolpen' die bij extreme neerslag tijdelijk water opslaat. De polder wordt gescheiden door een uitloper van het boezem systeem waardoor neerslag in het noordelijke deel enkel via het noordelijke gemaal 'Z Uit' het systeem kan verlaten (Figuur 43).



Figuur 43. Debiet in de Zijpe-West op basis van de hydraulische toetsing.

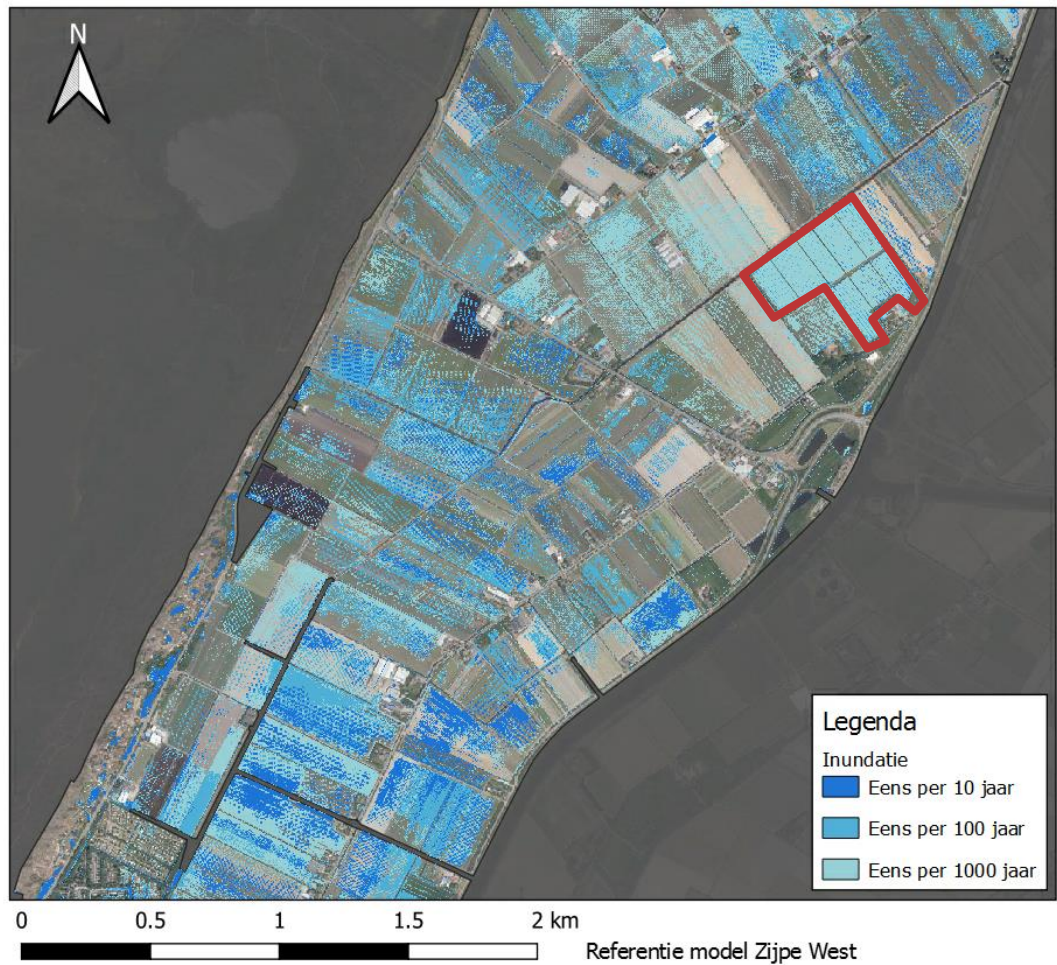
Tussen de scheiding van de boezemwatergang en de waterberging 'De Stolpen' ontstaat door inundatie vanuit het watersysteem schade verdeeld over meerdere peilgebieden (Figuur 44). De totale NCW van de schade binnen de stippellijn bedraagt circa € 1,5 mln.



Figuur 44. Uitsnede van NCW schade door inundatie uit het watersysteem ten noorden van de scheiding door de boezemwatergang.

Op basis van de inundatierasters (Figuur 45) is zichtbaar dat het waterbergingsgebied 'De Stolpen' (rode vlak op de kaart) enkel inundeert in een T1000 scenario terwijl er in het schade intensieve zuidelijke deel al inundatie optreedt in een T100 of zelfs T10 situatie. Op basis van de resultaten kan geconcludeerd worden dat het bergingsgebied nog niet optimaal functioneert en dat deze door effectievere inzet nog meer kan bijdragen aan de schadereductie. De effectiviteit van de inzet van bergingsgebieden in het gehele beheergebied kan met de ontwikkelde modellen verder worden onderzocht.





Figuur 45. Inundatie in het noordelijke deel van Zijpe West in een T10, T100 en T1000 scenario.

Dergelijke inzichten in de werking van het watersysteem kunnen op basis de voorliggende studie en bijbehorende gegevens voor het gehele beheersgebied worden verkregen en worden toegepast om zowel het huidige hydraulische knelpunten te reduceren als mede voor het ontwikkelen en inrichten van een toekomstbestendig en robuust watersysteem.

## 8 Referenties

Ref. 1. Deltares (2017). Brede Methodiek Wateroverlast. Naar een heldere klimaatambitie. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.

Ref. 2. Overeem, A en A. Buishand, 2012 Statistiek van extreme gebiedsneerslag in Nederland; De Bilt, KNMI Technical report TR-332

Ref. 3. Beersma J., Bessembinder, J., Brandsma, T. Versteeg, R., Hakvoort, H., Actualisatie meteogegevens voor waterbeheer 2015, Stowa rapport 2015-10, ISBN 978.90.5773.706.0, 2015.

Ref. 4. Naudin-Ten Cate, R., Tjooitink, T., Wentink, M., Cultuurtechnisch Vademecum, Handboek voor inrichting en beheer van land, water en milieu. ISBN: 90.5439.089.1, 2000.

Ref. 5. Velner, R., Spijker, M.J., Standaard werkwijze voor de toetsing van watersystemen aan de normen voor regionale wateroverlast. Stowa rapport 2011-31, ISBN: 978.90.5773.534.9, 2011.



## Bijlage A Richtpunt voor ontwerp

### A.1 Inleiding

Een groot gedeelte van het beheersgebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) is bemalen. Deze bemaling is noodzakelijk om het waterpeil in een polder te reguleren. De dimensies van het watersysteem en de capaciteit van de gemalen wordt meestal bepaald door uit te gaan van een afvoerintensiteit van 14.4 mm per dag. Dit betekent dat watersystemen zo worden ontworpen dat deze in staat zijn om dagelijks 14.4 mm af te kunnen voeren via het stelsel aan watergangen, kunstwerken en gemalen. Er wordt al decennia met deze afvoerrichtlijn als basis gerekend en gedimensioneerd. De vraag is: is deze richtlijn van 14.4 mm/d anno 2018 nog wel toepasbaar? Door allerlei maatschappelijke ontwikkelingen, maar ook door klimaatverandering, is het hanteren van deze richtlijn niet meer vanzelfsprekend.

#### A.1.1 Leeswijzer

De vraag die in dit rapport wordt behandeld is: "Leidt klimaatverandering tot een andere afvoerrichtlijn?" Daartoe is allereerst in hoofdstuk 2 een literatuuroverzicht gegeven van het ontstaan van de richtlijn voor o.a. het bepalen van gemaalcapaciteiten en de kanteekeningen die daarbij kunnen worden gezet. In hoofdstuk 3 is de literatuurstudie nader geanalyseerd, resulterend in een aanpak om effecten van klimaatverandering te vertalen naar een nieuwe afvoerrichtlijn. In hoofdstuk 4 is een aanzet gegeven voor een mogelijke aanpak voor het systeem specifiek bepalen van een afvoerrichtlijn.

#### A.1.2 Definities

Hieronder volgt een overzicht van de belangrijkste begrippen die gebruikt worden in de tekst.

De **afvoer** is de hoeveelheid water die over een zekere periode wordt afgevoerd. Uitgedrukt als  $m^3/dag$  (hierna  $m^3/d$ ; of andere tijdsperiode).

De **afvoerintensiteit** is de afvoer per eenheid van oppervlak. Uitgedrukt als  $m/d$  (of andere tijdseenheid),  $mm/d$  of  $l/s/ha$ .

Het **waterbezwaar** is de hoeveelheid water van een polder (stroomgebied) die in een bepaalde periode afgevoerd kan worden zonder dat dit leidt tot bergingsveranderingen in het open water. Uitgedrukt als  $m^3$ .

**Maatgevend** is een voorvoegsel om aan te duiden dat het gaat om een afvoer, afvoerintensiteit of waterbezwaar die medebepalend is voor de dimensionering van waterlopen en/of kunstwerken.

**Gemaalcapaciteit** is de maximale, door een gemaal te verpompen hoeveelheid water per tijdseenheid. Bijvoorbeeld uitgedrukt als  $\text{m}^3/\text{s}$  of  $\text{m}^3/\text{min}/100 \text{ ha}$ . Echter, veelal wordt de gemaalcapaciteit uitgedrukt als  $\text{mm}/\text{d}$ .

**Debiet** is de hoeveelheid water die door een gemaal/pomp/stuw per tijdseenheid daadwerkelijk wordt bemalen/verpompt/overgestort. Uitgedrukt als  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\text{l}/\text{s}$  en  $\text{m}^3/\text{min}$  voor gemalen.

Een **afvoerrichtlijn** is een typerend kengetal voor de daggemiddelde afvoerintensiteit die één keer per jaar wordt bereikt of overschreden.

## A.2 Literatuuronderzoek

Zelfstandig raadgevend deskundige op het gebied van regionaal waterbeheer en landbouwwaterhuishouding Jan van Bakel (de Bakelse Stroom), heeft in het najaar van 2017 een literatuuronderzoek verricht naar de historie en ontwikkeling van de afvoerrichtlijnen. In bijlage A is deze volledige literatuurstudie terug te vinden. De volgende paragrafen geven een beknopte samenvatting van dit literatuuronderzoek.

In het literatuuronderzoek blijkt dat er al eerder een analyse is gemaakt van de benodigde gemaalcapaciteit. Schultz (1996) geeft een gedegen overzicht van de historie van de richtlijnen voor de gemaalcapaciteit. De auteur geeft in dit boek een overzicht van de belangrijkste ontwikkelingen in het afleiden van de benodigde gemaalcapaciteit en stelt dat de benodigde gemaalcapaciteit afhangt van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden.

Er worden in de publicatie diverse bronnen aangehaald. De, voor zover bekend, oudste methode voor het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden wordt gegeven door Simons en Greve (1844). Simons en Greven rekenden met meetreeksen van het neerslagoverschot (neerslag – verdamping). Op basis van bijna honderd jaar waarnemingen van het neerslagoverschot van Zwanenburg kwamen zij op 129  $\text{mm}/\text{maand}$ , ofwel 4.5  $\text{mm}/\text{dag}$ .

Het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden voor de Wieringermeer werd gebaseerd op een enkele neerslaggebeurtenis, resulterend in een maatgevend waterbezwaar van 74,4  $\text{mm}$  in 10 dagen, ofwel 7,5  $\text{mm}/\text{dag}$ . Van Rossum en De Vries (1967) verfijnden de Wieringermeermethode waarbij de vertraging tussen neerslag en afvoer in rekening werd gebracht.

Het berekenen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden in de Markerwaard werd gebaseerd op langjarige meetgegevens van de Noordoostpolder (neerslag, afvoer en peilen). Voor het waterbezwaar wordt veelal uitgegaan van landbouwkundig gebruik. Stedelijke gebieden en kassen reageren sneller op afvoer en natuurgebieden trager. Dit vertaalt zich in een ander waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden.

De benodigde gemaalcapaciteit is niet per definitie gelijk aan een het maatgevende waterbezwaar. Simons en Greve (1967) stellen dat de gemaalcapaciteit gelijk moet zijn aan het maatgevend waterbezwaar gedurende de maand die hiervoor is gekozen. In latere publicaties wordt een verband gelegd met de diepte van de ontwatering (i.c. de beschikbare bergingsmogelijkheden).

In Tabel 9 is de 'historische ontwikkeling' van de benodigde gemaalcapaciteit samengevat. De bemalingscapaciteit anno 1996 ligt volgens Schulz tussen 10 en 15 mm/d.

Uit de literatuur blijkt dat er geen eenduidige methode is om de benodigde gemaalcapaciteit af te leiden. Wel is er een duidelijke ontwikkeling te zien in de manier waarop de afvoerrichtlijn wordt afgeleid, steeds met medeneming van nieuwe inzichten over klimaat, berging, grondgebruik en ont- en afwatering.

Tabel 9 Samenvatting van historische ontwikkeling van de benodigde gemaalcapaciteit.

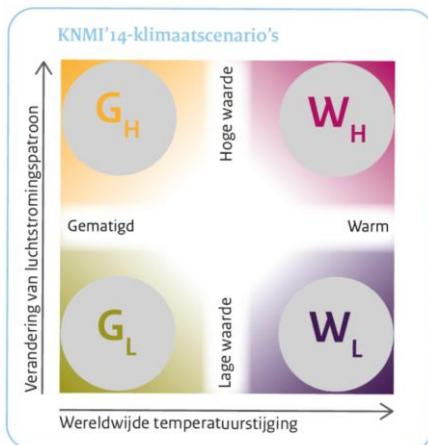
Auteur(s)	Jaar	Gemaalcapaciteit	Opmerkingen
Simons en Greve	1844	4,5 mm/d	Vonden maatgevend neerslagoverschot van 196 mm/maand te hoog
Storm Buijsing	1864	5,9 mm/d	Neerslagoverschot natst bekende zomermaand
Elink Sterk	1897	8 mm/d	Neerslagoverschot 20-31 okt 1870
Beekman	1932	8 mm/d	Kortere periode is bepalend
Wieringermeer (Commissie Lovink)	1924	8 mm/d plus toeslagen voor kwel (102 mm/d) en voor revisie (3-4 mm/d)	
Visser		Afhankelijk van percentage open water en toelaatbare peilstijging	Geen literatuurverwijzing gevonden
Dibbits	1950	14,4 mm/d Noord-Holland 10 mm/d Groningen	Reductie bij grote polders
Boer en Kielman	1956	8 mm/d voor grasland en 14,4 mm/d voor bouwland	Neerslag van zes opeenvolgende dagen moet worden afgevoerd
Werkgroep ontwerptechniek	1967	11,5 mm/dag	Opbouw op basis van landgebruik die elk een bepaalde afvoerintensiteit hebben
Klein	1968	14,5 mm/d	Gedetailleerde berekening met bepaalde regen-duurlijn als input

Markerwaard	1985	11,9 mm/d bij 10% open water (over het algemeen hoger dan de werkelijkheid) en 60 cm peilstijging eens per 10 jaar	Simulatie van neerslag-afvoerproces; eisen aan toelaatbare peilstijging. Netto waterbezwaar van NOP als input
-------------	------	--	---

### A.3 Effect klimaatverandering op afvoerrichtlijn

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat er geen eenduidige methode is om een afvoerrichtlijn af te leiden. Ook zijn de gegeven getallen in de literatuur niet altijd exact te reconstrueren doordat bepalende gegevens of aannames niet zijn vastgelegd. Om het effect van klimaatverandering te kunnen kwantificeren, zijn in dit hoofdstuk twee eenvoudige rekenexercities uitgevoerd in het verlengde van de wijze waarop dit historisch is gegroeid. In deze rekenvoorbeelden is een richtlijn afgeleid op basis van de historische klimatologische omstandigheden rond 1980, en deze zijn vervolgens vergeleken met de nieuwe klimatologische omstandigheden conform de meest recente KNMI'14 klimaatscenario's.

De KNMI'14 klimaatscenario's (KNMI, 2014) zijn een vertaling van de onderzoeksresultaten van het IPCC-rapport 2013 voor Nederland. De gegeven scenario's beschrijven samen het bereik waarbinnen de klimaatverandering zich in Nederland waarschijnlijk zal voltrekken. De vier KNMI'14-scenario's verschillen in de mate waarin de wereldwijde temperatuur stijgt ('Gematigd' en 'Warm') en in de mogelijke verandering van het luchtstromingspatroon ('Lage waarde' en 'Hoge waarde') (Figuur 46).



Figuur 46. Overzicht van de vier KNMI'14 klimaatscenario's.

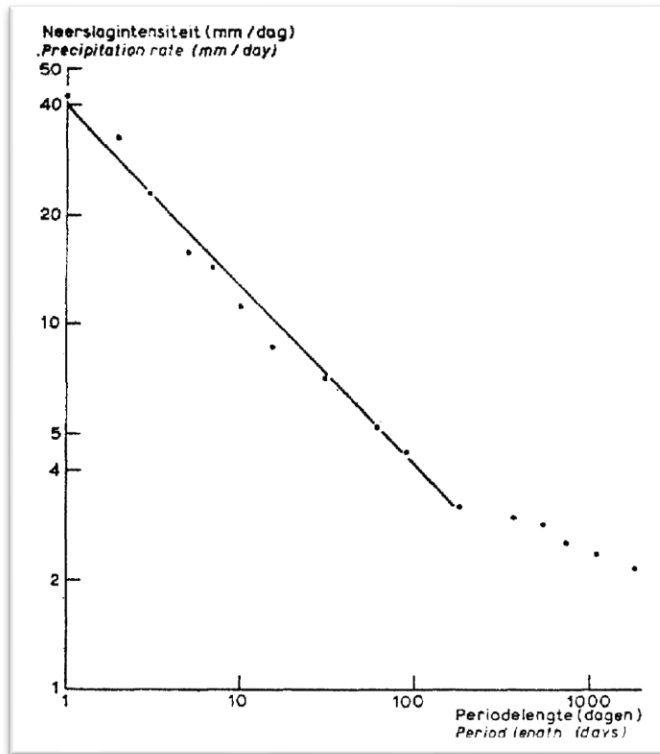
De warme (W) scenario's kenmerken sich durch eine stärkere weltweite Temperaturzunahme u. v. d. gemäßigten (G) Szenarien. Anno 2017 weisen alle Messungen darauf hin, dass das Klima sich entwickelt, konform dem warmen Szenario. In dem zweiten Rechenbeispiel von diesem Kapitel ist dann auch mit den Klimavoraussagen von Szenario Wh gerechnet.



### A.3.1 Rekenvoorbeelden

#### Neerslagintensiteit en periodelengte

In Wind (1967) wordt een analyse gemaakt van de neerslagintensiteit en de periodelengte. Het uitgangspunt is dat de intensiteit sterk afneemt met de lengte. Voor Utrecht wordt de neerslagintensiteit uitgezet tegen de periode lengte, Figuur 47.



Figuur 47. Analyse van de neerslagintensiteit en periodelengte voor neerslag gemeten in de wintermaanden bij Utrecht (Wind 1967).

Wind (1967) merkt verder op dat de hoeveelheid berging in hoge mate bepalend is hoeveel water er moet worden afgevoerd. Afhankelijk van de hoeveelheid beschikbare berging kan daarmee worden berekend hoeveel neerslag moet worden afgevoerd. Om te voorkomen dat de berging wordt overschreden, stelt de auteur dat de afvoerintensiteit maal de lengte van de beschouwde periode gelijk moet zijn aan de neerslag in die periode plus de berging. Hiervoor kan het bovenste gedeelte van deze grafiek (Figuur 47) worden uitgedrukt als:

$$afvoer = 400 / berging$$

Deze vergelijking geeft het minimum van berging (mm) + afvoer (mm/dag) keer het aantal dagen voor alle neerslagduren. Als waterbeheerder kan je dus een zekere keuze maken over welke duur je acceptabel vindt om de neerslag af te voeren. Afhankelijk van de duur zal je een zekere berging en afvoercapaciteit nodig hebben. Hiermee kan worden 'gekozen' voor een afvoer-bergingscombinatie die past bij het gebied om vervolgens het gebied als zodanig in te richten. Je weet dan dat je voor alle neerslagduren meer berging + afvoer hebt dan dat er neerslag valt volgens Figuur 47.

Met deze formule kan worden berekend wat de benodigde hoeveelheid berging is bij een gegeven afvoercapaciteit. Een realistische capaciteit van 12.5 mm/dag (geeft 14.4 mm/dag met 15% opslag voor kwel en over dimensionering) geeft een benodigde berging van 32 mm. 'Maatgevend' is dan een duur van 24 uur.

De maximaal te verwachten neerslagintensiteit neemt als gevolg van klimaatverandering echter toe. Hieruit volgt al direct dat bij gelijkblijvende afvoercapaciteit ook de hoeveelheid berging moet toenemen.

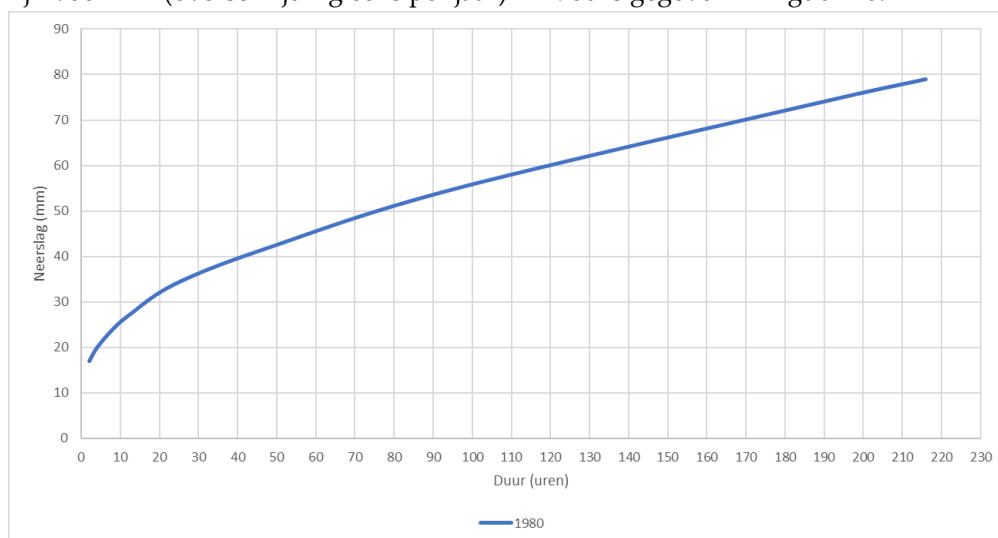
Nu gaat deze aanpak altijd uit van de maatgevende omstandigheden, omstandigheden die één keer per jaar voorkomen. Sommige gebieden kunnen echter van dusdanig (economisch) belang zijn, dat een hoger beschermingsniveau te rechtvaardigen is. Om bijvoorbeeld het watersysteem te dimensioneren op een neerslagsom die eens in de 10 jaar optreedt kan dezelfde aanpak worden gebruikt. In STOWA-rapport 2015-10 bedraagt de 24-uurs som voor een herhalingsstijd van 10 jaar 58,5 mm. Als je deze waarden gebruikt is bovenstaande vergelijking aan te passen tot:

$$afvoer = 850 / berging$$

Uitgaande van dezelfde afvoercapaciteit van 12.5 mm/dag komt de benodigde hoeveelheid berging nu uit op 68 millimeter. Een dusdanige hoeveelheid berging is enkel te vinden in polders met veel open water en/of diepe ontwatering. Veel polders in het gebied van HHNK zullen niet in staat zijn om 68 millimeter te bergen. Bij gelijkblijvende berging zou de benodigde afvoercapaciteit dan uitkomen op ruim 26 mm/dag.

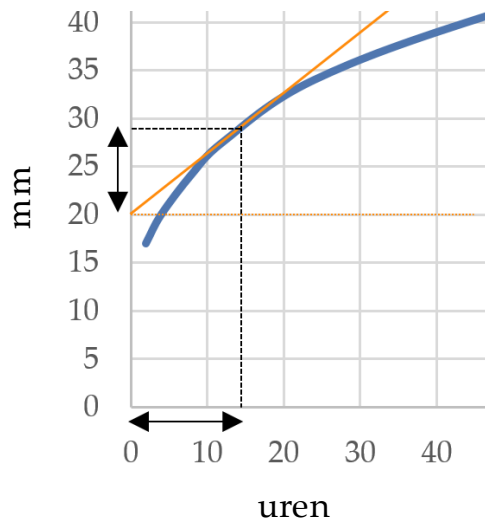
### Regenduurlijn methode

Een andere methode om de benodigde afvoercapaciteit op te stellen is door gebruik te maken van regenduurlijnen (Klein, 1968). De regenduurlijn beschrijft de hoeveelheid neerslag bij een bepaalde duur die met een bepaalde frequentie wordt overschreden. De regenduurlijn voor T=1 (overschrijding eens per jaar) in 1980 is gegeven in Figuur 48.



Figuur 48. Voorbeeld van de regenduurlijn bij een herhalingsstijd van 1 jaar, conform het klimaat van 1980.

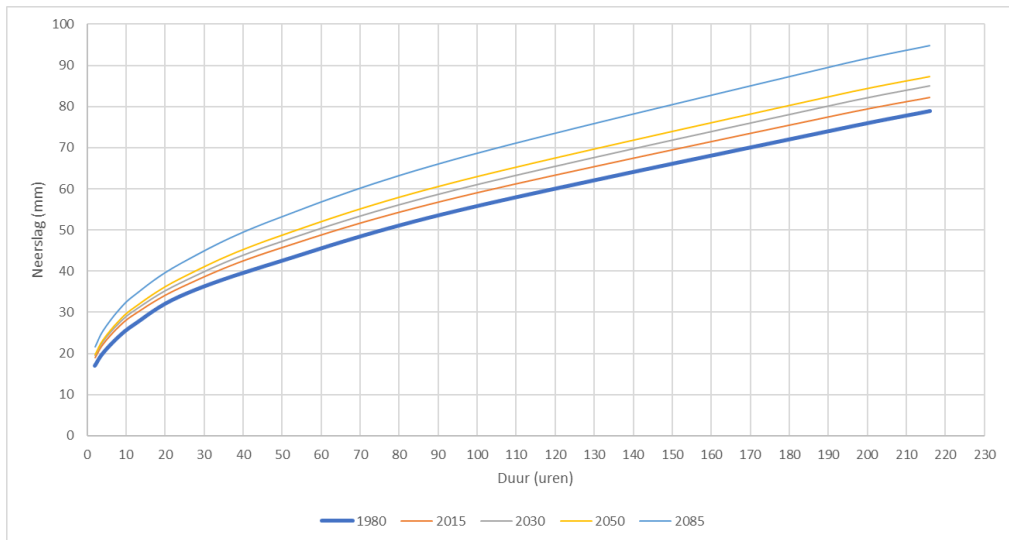
Uitgaande van een bepaalde hoeveelheid berging, bijvoorbeeld 20 millimeter, kan een raaklijn worden getrokken aan de regenduurlijn. Op basis van deze raaklijn is vervolgens af te leiden hoeveel millimeter moet worden afgevoerd, en binnen welke tijd, en daarmee dus een afvoercapaciteit (Figuur 49). Deze raaklijn raakt bij deze methode aan het maximale buivolume per tijdseenheid en berekent daardoor de benodigde afvoer voor alle mogelijke volume/tijd combinaties van een bui bij een bepaalde bergingscapaciteit. In het voorbeeld van Figuur 49 valt er 29 millimeter neerslag in 14 uur. Van deze 29 millimeter wordt er 20 mm geborgen. Dat betekent dat er 9 mm moet worden afgevoerd in 14 uur, ofwel ca. 15 mm/dag.



Figuur 49. Voorbeeld van de raaklijn aan de regenduurlijn. Gebaseerd op het snijpunt is vervolgens de afvoercapaciteit te bepalen

Gebaseerd op de KNMI'14 klimaatscenario's zijn nieuwe regenduurlijnen af te leiden. In STOWA-(2015) zijn de neerslagstatistieken voor het nieuwe klimaat afgeleid. Door de klimaatverandering zal de hoeveelheid neerslag toenemen, en daardoor zal de regenduurlijn verschuiven.

Deze nieuwe regenduurlijnen geven een vertaling van het veranderende klimaat (Figuur 50). Hieruit blijkt dat de neerslaghoeveelheid toeneemt. Nu kan dezelfde raaklijn analyse zoals uit Figuur 49 worden herhaald. Als we aannemen dat de hoeveelheid berging gelijk blijft, dan kan een nieuwe afvoercapaciteit worden afgeleid. Voor het huidige klimaat komt de benodigde afvoercapaciteit uit op ca. 18 mm/dag in 2015. Voor het richtjaar 2085 zou de afvoercapaciteit zelfs oplopen tot 24 mm/dag.



Figuur 50. Voorbeeld van de regenduurlijnen bij een herhalingstijd van 1 jaar, onder verschillende (richt)jaren. De regenduurlijnen voor de richtjaren zijn afgeleid van klimaatscenario Wh.

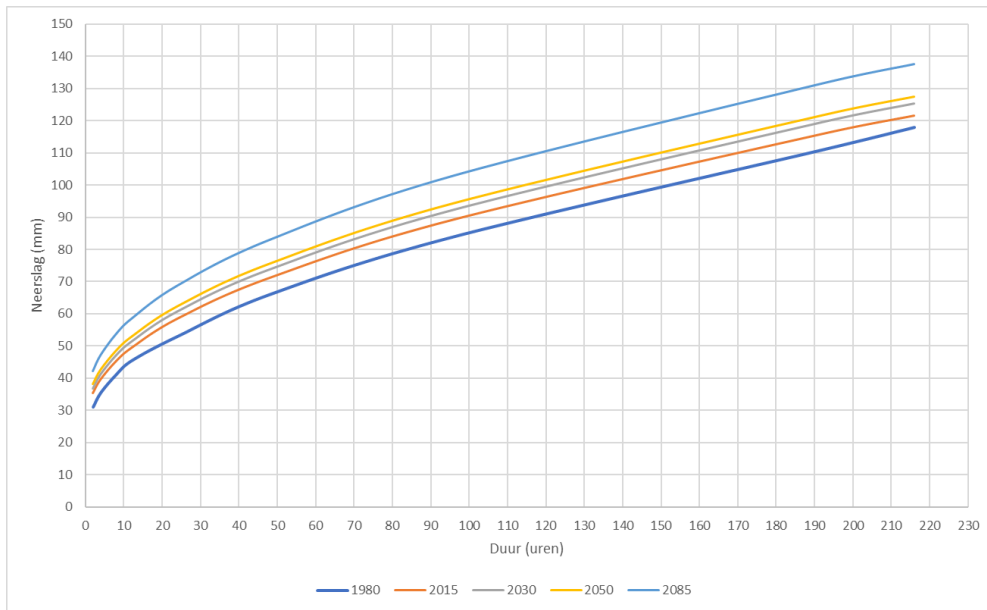
De voorgaande analyse beschrijft de benodigde afvoercapaciteit om de eens per jaar optredende neerslag deels te kunnen bergen (in dit geval 20 mm) en variabel af te kunnen voeren. Voor sommige gebieden kan het echter interessant zijn om een hogere richtlijn te hanteren. Gebieden met hoogwaardige landbouw en veel stedelijk gebied (kapitaalintensief landgebruik) zijn economisch waardevol. Hierdoor kan het economisch rendabel zijn om het watersysteem ruimer te dimensioneren. Immers de schade die zal ontstaan als het watersysteem niet meer in staat is om de neerslag af te voeren, is een orde groter dan in bijvoorbeeld grasland polders.

Ter illustratie is dezelfde raaklijn methode toegepast, maar nu op de regenduurlijnen behorende bij een herhalingstijd van 10 jaar (Figuur 51). Met de aanname dat afvoercapaciteit in 1980 gedimensioneerd is op 14.4 mm/dag, dan volgt uit de T=10 regenduurlijn dat de hoeveelheid berging 40 millimeter bedraagt. Voor alle regenduurlijnen van T=10 wordt dan ook gerekend met een hoeveelheid berging van 40 mm. De resultaten van deze analyse zijn gegeven in Tabel 10.

Tabel 10. Overzicht van de benodigde afvoercapaciteit voor T=1 (met 20mm berging) en T=10 (met 40mm berging).

	T = 1	T = 10
<i>Berging:</i>	<i>20 mm berging</i>	<i>40 mm berging</i>
1980	14 mm/dag	14 mm/dag
2015	18 mm/dag	20 mm/dag
2030	21 mm/dag	23 mm/dag
2050	22 mm/dag	25 mm/dag
2085	24 mm/dag	35 mm/dag





Figuur 51. Voorbeeld van de regenduurlijnen bij een herhalingsduur van 10 jaar, onder de klimatologische omstandigheden van verschillende (richt)jaren. De regenduurlijnen voor de richtjaren zijn afgeleid van klimaatscenario Wh.

### Ruimtelijke variabiliteit

De hoeveelheid beschikbare berging is sterk variërend per gebied. Het bodemtype, het landgebruik, de mate van ontwatering, etc. zijn allemaal van invloed op de hoeveelheid berging. Om een idee te krijgen van de gevoeligheid van de hoeveelheid berging voor deze variabelen zijn rekenvoorbeelden gegeven in Tabel 11. In deze tabel staan enkele combinaties van percentage open water, toelaatbare peilstijging, stedelijk gebied en bodem die voor verschillende gebieden binnen HHNK representatief zouden kunnen zijn en de grenzen en variatie van mogelijke berging aangeven. Voor stedelijk gebied wordt aangenomen dat hier geen water kan worden geborgen, voor de bodem nemen we in deze rekenexercitie aan dat 10% beschikbaar is voor berging. Door te variëren met de getallen blijkt dat de beschikbare hoeveelheid berging in dit voorbeeld tussen de 25 en 56 mm varieert.

Tabel 11 Enkele rekenvoorbeelden voor het aantal millimeter beschikbare berging bij variërend landgebruik. Voor de bodem wordt aangenomen dat 10% beschikbaar is voor berging.

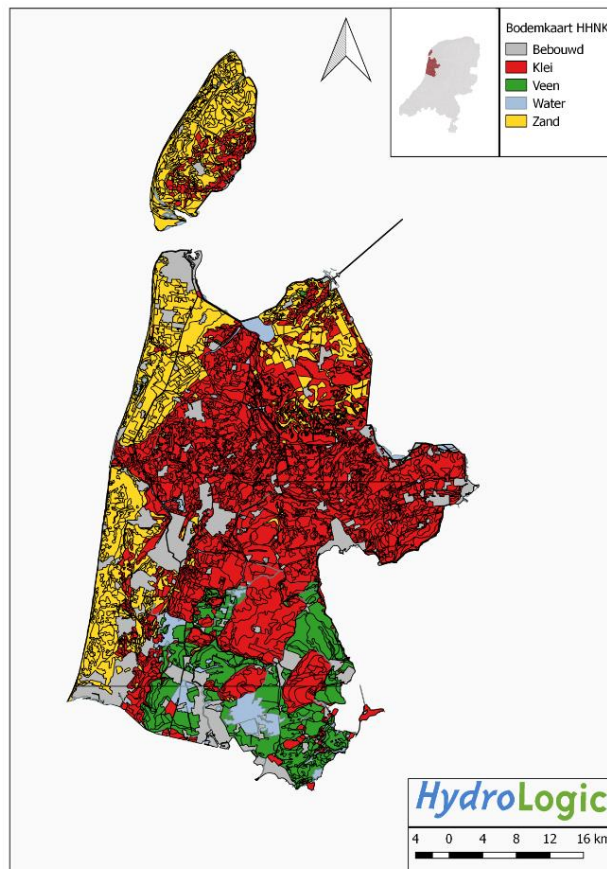
Open water	%	2%	2%	5%	5%	10%
Toelaatbare peilstijging (cm)		30	40	30	40	30
Berging OW (mm)		6.0	8.0	15.0	20.0	30.0
Bodem*	%	98%	98%	95%	90%	80%
GHG -MV (cm)		-20	-40	-20	-40	-20
Berging GW (mm)		19.6	39.2	19.0	36.0	16.0
Stedelijk	%	0%	0%	0%	5%	10%
Berging MV (mm)		0	0	0	0	0
Totale berging (mm)		25.6	47.2	34.0	56.0	46.0

In Tabel 12 is het effect gegeven van de bergingscapaciteit op de afvoernorm bij een aantal regenduurlijnen (Figuur 51). Bij een hogere bergingscapaciteit neemt de benodigde afvoercapaciteit (mm/dag) af. Overigens is de afvoercapaciteit met deze methode niet goed af te leiden bij een bergingscapaciteit lager dan 20 mm/dag.

Tabel 12. Effect bergingscapaciteit op de afvoernorm.

T=1					
Bergingscapaciteit	20mm	25mm	30mm	35mm	40mm
1980	14 mm/dag	9 mm/dag	6 mm/dag	5 mm/dag	< 5 mm/dag
2015	18 mm/dag	11 mm/dag	8 mm/dag	6 mm/dag	5 mm/dag
2030	21 mm/dag	12 mm/dag	8 mm/dag	6 mm/dag	5 mm/dag
2050	22 mm/dag	13 mm/dag	9 mm/dag	7 mm/dag	6 mm/dag
2085	24 mm/dag	18 mm/dag	12 mm/dag	9 mm/dag	7 mm/dag

Met de raaklijnmethode is voor de maatgevende situatie (eens per jaar optredende neerslag) op globale wijze onderzocht hoe de benodigde afvoercapaciteit door het gebied van het hoogheemraadschap kan variëren als gevolg van verschillende bodemtypen (en bergingsmogelijkheden). Hiertoe is het gebied van het hoogheemraadschap in drie bodemtypen ingedeeld: zand, veen en klei. Op basis van deze bodemtypen en grove kentallen (voor o.a. oppervlak open water, toegestane waterstandstijging en bodemberging) is een indicatie van de bergingscapaciteit gegeven. Hierbij is geen rekening gehouden met variatie in de ondergrond en locatiespecifieke kenmerken.



Figuur 52. De drie hoofd bodemtypen in het gebied van HHNK.

De bergingscapaciteit is als volgt geschat:

Zand: > 50 mm (m.u.v. het duingebied)

Klei: 20-25 mm

Veen: 10-25 mm

Op basis van de bodemberging kan met behulp van Tabel 12 een indicatie van de afvoercapaciteit worden gegeven. De variaties zijn groot, op basis van de gehanteerde regenduurlijnmethode varieert de afvoercapaciteit van < 5 mm/dag tot > 14 mm/dag. Het grootste deel van het gebied (klei) varieert tussen de 9 mm/dag en 14 mm/dag (gebaseerd op de 1980 regenduurlijn).

### Aandachtspunten bepalen afvoernorm

Voor de bepaling van de afvoerrichtlijn zijn in het voorliggend onderzoek met de regenduurlijnmethode de neerslag en de beschikbare berging beschouwd voor het bepalen van de benodigde afvoercapaciteit. Er zijn echter nog veel meer aspecten relevant voor de benodigde afvoercapaciteit die niet worden meegenomen in de gehanteerde methode. Zo zullen peilstijgingen langer duren bij een hoge bergingscapaciteit in combinatie met een lage afvoercapaciteit dan bij een lage bergingscapaciteit i.c.m. met een hoge afvoercapaciteit. Langdurigere waterstandstijgingen zullen landbouwopbrengsten negatief kunnen beïnvloeden. Factoren van invloed op de benodigde afvoercapaciteit zijn o.a.:

- verdamping
- kwel
- belasting door externe bronnen
- invloed boezemwaterstand/beheer
- wijze en mate van ontwatering
- doorlatendheid van de bodem
- hoeveelheid water reeds aanwezig
- temperatuur (bevroren gronden)

Uit het rekenvoorbeeld en de analyse voor het gebied van het hoogheemraadschap volgt dat de beschikbare hoeveelheid berging van grote invloed is op de benodigde afvoercapaciteit en ruimtelijke variatie hierin op enige wijze zou moeten worden meegenomen in een gebiedsspecifieke bepaling van de benodigde afvoerrichtlijn. Gebeurt dit niet, dan bestaat de kans op over- en/of onderdimensionering. Het hanteren van één afvoerrichtlijn voor het gehele beheergebied van Hollands Noorderkwartier verdient, gegeven de variabiliteit van in ieder geval het aspect berging, niet de voorkeur.

### A.3.2 Synthese

Het grote aantal processen, die elk ruimtelijk kunnen variëren, maakt dat er geen eenduidige methode is om een nieuwe afvoerrichtlijn af te leiden. De gegeven rekenvoorbeelden tonen echter wel aan dat klimaatverandering grote invloed heeft op de benodigde afvoercapaciteit als deze op vergelijkbare wijze wordt herijkt als in het verleden (één enkele afvoernorm voor het gehele gebied).

Met het toepassen van een enkele norm voor het gehele gebied wordt echter geen rekening gehouden met de diversiteit in hydrologische eigenschappen en het gebruik van de gebieden. Zo bestaan sommige droogmakerijen bijvoorbeeld voor een groot deel uit graslanden, terwijl in veel polders in de Noordkop hoogwaardige bloembollen worden geteeld. De schade die tijdens natte omstandigheden zou kunnen ontstaan verschilt substantieel en rechtvaardigt een andere afvoercapaciteit. Vanuit economisch perspectief is het logisch om voor de bollengebieden een grotere investering in afvoercapaciteit te doen in vergelijking

met de graslandpolders. Immers een grasland dat tijdelijk onder water staat levert nauwelijks schade op, maar als een bollenveld onder water komt te staan, dan kan de oogst als verloren worden beschouwd.

Er kan daarom ook worden gekozen voor het loslaten van de traditionele methode en met een verfijnde methodiek ruimtelijk gedifferentieerd de benodigde afvoercapaciteit te bepalen (rekening houdend met neerslag, berging en grondgebruik). Of een basis afvoercapaciteit als vertrekpunt met in een gebiedsproces de mogelijkheid deze zo nodig te vergroten. Let wel dat bij een vergroting van de afvoercapaciteit moet worden nagegaan of een opwaardering van het systeem van polder en boezem is vereist. In hoofdstuk A.3 is een eerste aanzet gedaan om te komen tot een nieuwe afvoermethodiek.

## A.4 Naar een nieuwe afvoerrichtlijn

### A.4.1 Mogelijkheden voor verhogen van de afvoerrichtlijn

Op dit moment worden veel gebieden ingericht en beheerd volgens de afvoerrichtlijn van 14,4 mm/dag. Voorliggend onderzoek toont echter aan dat de afvoer als gevolg van klimaatverandering toeneemt en dat de afvoerrichtlijn, maar ook de ontwerpmethodiek, daarop aangepast moeten worden. Op hoofdlijn worden drie mogelijkheden onderscheiden om te komen tot een nieuwe afvoerrichtlijn:

- een vaste afvoerrichtlijn voor alle gebieden;
- optimalisatie per polder;
- differentiatie per gebiedstype.

In de onderstaande paragrafen is een korte toelichting gegeven op de genoemde mogelijkheden. Uit hoofdstuk 3 blijkt echter reeds dat de eerste variant niet doelmatig is en geen gedegen basis biedt voor een klimaatadaptief watersysteem (hoewel de eenvoud van een vaste richtlijn ook zeker voordelen heeft, wat betreft de rechtsgelijkheid en communiceerbaarheid).

#### Gebiedsbreed verhogen van de afvoerrichtlijn

De analyses in het voorliggende onderzoek hebben laten zien dat de afvoerrichtlijn als gevolg van klimaatverandering zou moeten worden verhoogd (uitgaande van de regenduurlijnmethode). Dit heeft in potentie enorme consequenties. Immers niet alleen de afvoercapaciteit van polders moeten worden opgehoogd, hetzelfde geldt voor het boezemsysteem en deels ook het hoofdwatersysteem. Naar verwachting zal er ruimte zijn voor maatwerk en ontstaat er meer differentiatie om over- en onderdimensionering te voorkomen.

#### Optimaliseren per poldersysteem

Het ééndimensionaal verhogen van de generieke afvoerrichtlijn voor het totale beheergebied lijkt niet de gewenste route, omdat het beheergebied van HHNK de nodige variatie kent. Sommige grasland gedomineerde polders zullen veel minder schade ondervinden dan polders met veel stedelijk gebied en/of hoogwaardige teelt. In theorie is het mogelijk om voor elke polder een eigen optimale afvoercapaciteit af te leiden. Dit vergt echter veel



werk, bovendien is een dusdanig gedetailleerd onderscheid lastig te communiceren, zowel intern als naar de ingelanden.

### Optimaliseren per gebiedstype (hydrotypen)

Een mogelijke derde variant (tussenweg) is het beheergebied van HHNK opdelen in een overzichtelijk aantal karakteristieke gebiedstypen. Deze classificatie kan bijvoorbeeld plaatsvinden op basis van landgebruik, ontwateringsdiepte, beschikbare berging en percentage open water. Vervolgens kan voor elk type gebied een afvoerrichtlijn worden bepaald die in combinatie met de gebiedskarakteristieken leidt tot de gewenste performance van het watersysteem.

#### A.4.2 Eerste aanzet voor een nieuwe ontwerpmethodiek

Het hanteren van één (verhoogde) afvoerrichtlijn blijkt niet optimaal, omdat het totale beheergebied van HHNK een grote verscheidenheid aan gebiedstypen omvat (zand/klei/veen, - diep/ondiep ontwaterd - veel/weinig oppervlaktewater - gras/akker/stedelijk/bollen). Omdat de afvoerrichtlijn vanuit klimaatdoel aanpassing behoeft, wordt geadviseerd daarbij ook de methodiek te verfijnen en rekening te houden met de variatie van een gebied. Let wel dat hierbij een bepaalde mate robuustheid is gewenst om te voorkomen dat kleine wijzigingen in het gebied direct tot een andere norm zouden kunnen leiden. Het streven moet zijn het watersysteem op robuuste wijze in te richten.

In deze paragraaf is een aanzet gegeven voor een nieuwe ontwerpmethodiek. Hierbij is ingegaan op het gewenste ontwerp van een watersysteem (om te komen tot een optimale performance), waarna is aangegeven welke aspecten een rol spelen (beheer en onderhoud, gebiedskarakteristieken) en hoe modelonderzoek hierin een belangrijke rol kan spelen. Tot slot is een doorkijk gegeven naar de nadere uitwerking.

### Ontwerp watersysteem

Het doel van een (nieuwe) ontwerpmethodiek is een watersysteem te ontwerpen dat 'optimaal' presteert onder maatgevende omstandigheden. Onder optimaal wordt verstaan dat de inrichting van het systeem leidt tot een optimale verhouding tussen kosten (investering, in- en exploitatie van het watersysteem) en de baten (faciliteren van het grondgebruik, voorkomen van schade en het verhogen van de agrarische productie).

Om tot een robuuste, toekomstvaste en goed onderbouwde inrichting te komen, wordt geadviseerd het gehele spectrum aan hydrologische omstandigheden (van droog tot nat) te beschouwen op basis van een gebieds- en risicogerichte benadering. Hierbij dient te worden onderzocht op welke wijze de dimensionering van watersystemen in combinatie met het peilbeheer zorgen voor een betere functiefacilitering waarbij de droogteschade wordt verminderd en de risico's op natschade als gevolg van bijvoorbeeld hogere reguliere peilen kan compenseren.

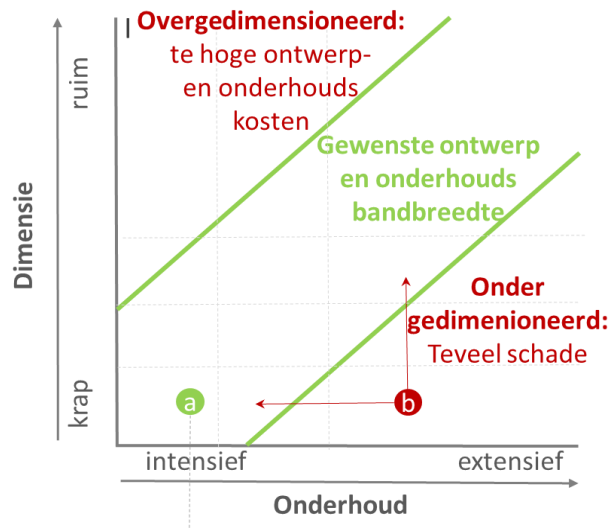
Het watersysteem dient daarbij zodanig te worden gedimensioneerd dat de (maatschappelijke) kosten/baten onder droge, gemiddelde en natte situaties worden geoptimaliseerd. Om tot een 'optimale' inrichting te komen, dient het gehele watersysteem te worden beschouwd waarbij de afwaterings- en ontwateringscapaciteit op elkaar zijn afgestemd. Een

vergroting van de ontwateringscapaciteit kan immers gevolgen hebben voor de benodigde gemaalcapaciteit. Let wel dat ook de ontwateringscapaciteit kan veranderen in de tijd. Ook hier zal gelden dat de mate van ontwatering zich verhoudt tot de waarde van het landgebruik en de fysieke omgeving. Het ontwerp kan worden afgestemd op logische/mogelijke gebruiksfuncties in het gebied (ook als dat voor een deel nog niet de feitelijke situatie betreft). Zo hoeft het watersysteem niet direct te worden veranderd als een boer beslist andere gewassen te gaan telen of zijn percelen te gaan draineren.

### Inrichting en onderhoud van een watersysteem

Voor een optimaal presterend watersysteem zijn er op hoofdlijn twee knoppen waarmee de waterbeheerder kan sturen: inrichting en onderhoud van de watergangen die in beheer zijn bij het waterschap. Een goed ontwerp hangt af van het bijbehorende onderhoudsregime en de benodigde afvoercapaciteit (volgend uit de ontwateringsdiepte, landgebruik, grondsoort, drainage, etc.) en het landgebruik. Optimaal is wanneer het watersysteem zo wordt ingericht en onderhouden dat met minimale kosten maximale opbrengst wordt gegenereerd (landbouw, natuur, etc.). Een te ruime dimensionering levert weliswaar minder schade op, maar dit hoeft niet in verhouding te staan tot het grotere ruimtebeslag en de bijbehorende kosten. Een te krappe dimensionering is ook onwenselijk. Hoewel dit goedkoper is, kan de schade in verschillende situaties fors toenemen.

In Figuur 53 zijn de mogelijkheden voor beheer en onderhoud van een watersysteem uitgewerkt. De basis zijn de twee assen die de twee stuurknoppen vertegenwoordigen. De groene band geeft het doelbereik van de waterbeheerder aan. Deze bandbreedte zal variëren per type gebied. Zo zullen zeeklei polders verschillen van veenweidegebieden.

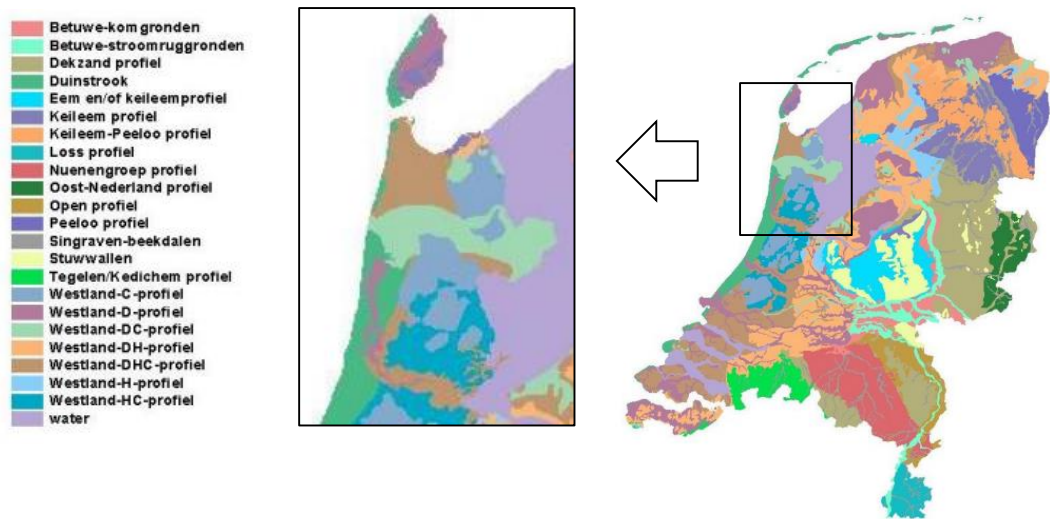


Figuur 53. Conceptuele opzet voor afleiden afvoernorm. Het watersysteem wordt gepositioneerd op de assen Onderhoud en Dimensie met als doel om deze in de 'groene' bandbreedte te houden.

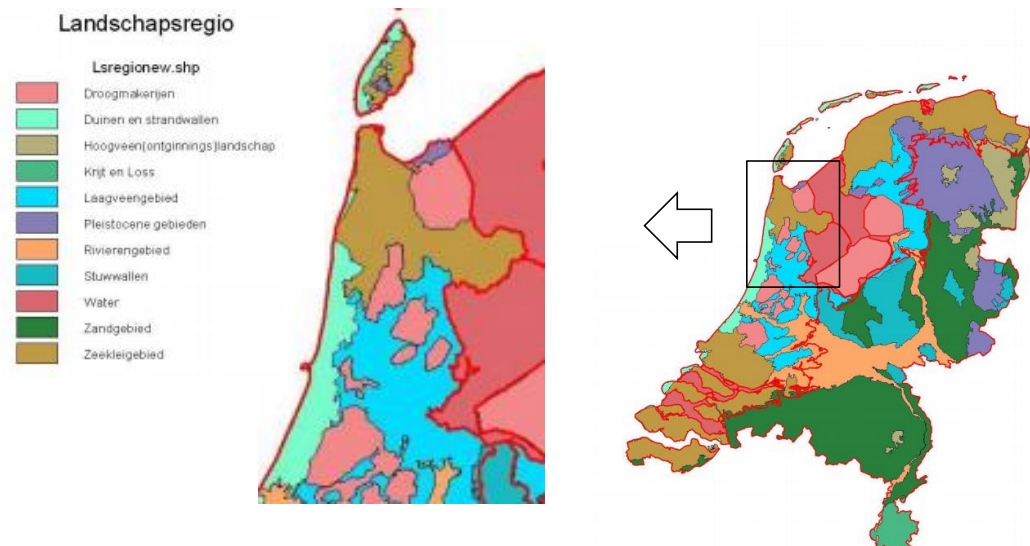
### Indeling in karakteristieke gebieden

Geadviseerd wordt om het beheergebied van HHNK op te delen in enkele karakteristieke hydrotypes (ca. 5 tot 10), waarna voor elk type gebied (modelmatig) de gewenste

inrichting wordt afgeleid, rekening houdend met het gewenste/benodigde beheer en onderhoud (de groene band uit Figuur 53). De hydrotypen (Figuur 54) en landschapsregio's (Figuur 55) kunnen als basis worden gebruikt voor deze indeling. Door deze figuren te combineren met het landgebruik (grasland/laagwaardig agrarisch landgebruik, hoogwaardig agrarisch landgebruik en stedelijk gebied) wordt een goed inzicht verkregen in de ruimtelijke variabiliteit van het gebied wat betreft fysische eigenschappen en het landgebruik.



Figuur 54. Hydrotypen in Nederland (uit hydrologie voor STONE).



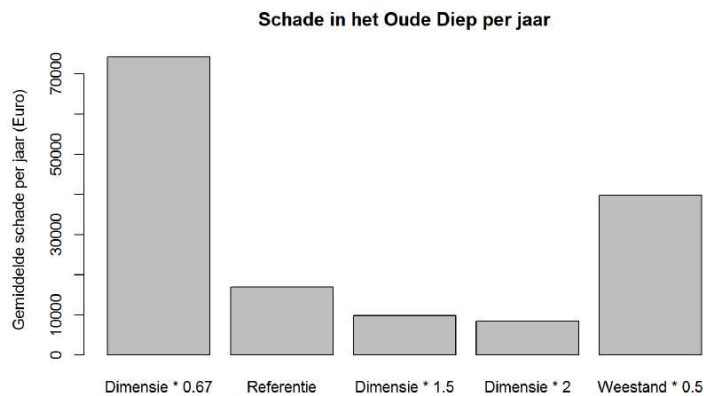
Figuur 55. Landschapsregio's in Nederland (uit hydrologie voor STONE).

### Modelonderzoek

Ter bepaling van de gewenste inrichting en onderhoud van het bestaande watersysteem wordt geadviseerd modelmatig onderzoek uit te voeren met als doel per hydro-/gebiedstype (Figuur 54 en Figuur 55) de groene band uit Figuur 53 vast te stellen en ieder gebied aan deze band te toetsen. In geval van afwijkingen kan worden bepaald wat nodig is om tot het gewenste ontwerp en onderhoud te komen. Met een gecombineerd grond- en

oppervlaktewatermodel kunnen verschillende dimensies van watergangen en onderhoudsregimes worden doorgerekend voor een grote variëteit aan droge, reguliere en natte omstandigheden, opdat het watersysteem -alle situaties overziend- optimaal functioneert. Op basis van de modelresultaten wordt de schade(reductie) bepaald in maatgevende situaties.

In Figuur 56 is ter illustratie het resultaat gegeven van een modelanalyse die HydroLogic en De Bakelse Stroom in opdracht van Waterschap Reest en Wieden voor het Oude Diep hebben uitgevoerd. Uit dit voorbeeld blijkt dat de schade fors toeneemt bij kleinere watergangen, terwijl de schadereductie beperkt is bij grotere watergangen.



Figuur 56. Voorbeeld van een modelanalyse waarbij voor verschillende dimensies en onderhoud van de watergang de schade is berekend voor natte situaties (uit: Een mogelijke aanpassing van de grondslagen voor dimensionering en onderhoud van waterlopen - HydroLogic)

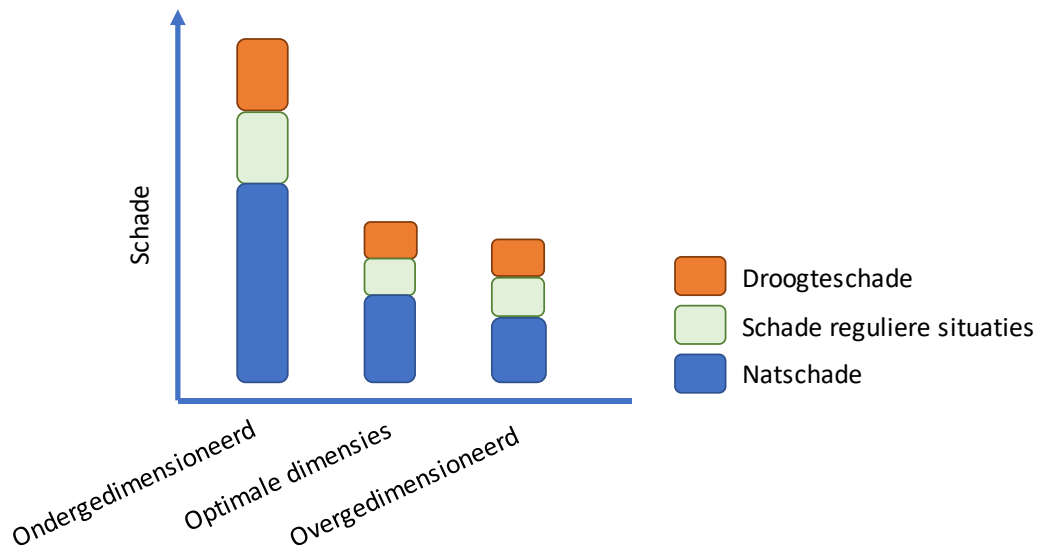
Tezamen met de investeringskosten voor de inrichting geven dergelijke resultaten inzicht in de kosten/batenverhouding op basis waarvan per gebied de gewenste (optimale) inrichting en het gewenste onderhoudssysteem kunnen worden bepaald. Tevens geeft het modelonderzoek per modelgebied een indicatie van de maatgevende afvoer waarmee in natte situaties rekening moet worden gehouden en de hoeveelheid aanvoer die in droge situaties is gewenst.

Door verschillende ontwerpen en onderhoudsregimes door te rekenen, wordt een optimum afgeleid voor de toekomstige inrichting van het watersysteem (kosten inrichting vs. schade). Let wel dat hiertoe een voldoende brede bandbreedte moet worden aangehouden om tot een zo robuust mogelijke inrichting te komen en te voorkomen dat de afvoerrichtlijn van een gebied bij beperkte wijzigingen zou moeten worden aangepast.

Door onderscheid te maken naar droogte- en natschade geeft het modelonderzoek tevens inzicht in de gevoeligheden van een gebied (treedt de meeste schade op in natte of juist droge situaties) en verschillen tussen de gebieden (in welke gebieden treedt de meeste gevolgschade op). Deze inzichten kunnen worden gebruikt om de gebieden te prioriteren (gebieden met de grootste kans op schade zouden prioriteit moeten krijgen in de uitvoering) en geven waardevolle inzichten voor het beheer en onderhoud en het operationele beheer. In Figuur 57 is een conceptuele figuur gegeven waarin voor drie dimensies (een ondergedimensioneerd, een optimaal en een overgedimensioneerd systeem) de natschade, droogteschade en schade voor reguliere situaties is gegeven. Deze figuur geeft inzicht in



de mate waarin de schade af- dan wel toeneemt bij aangepaste dimensies van het systeem. Zo is de natschade als gevolg van een ondergedimensioneerd systeem in dit voorbeeld groot en neemt deze fors af wanneer het systeem 'optimaal' wordt gedimensioneerd. De natschade neemt slechts beperkt af wanneer het systeem wordt overgedimensioneerd, terwijl de droogteschade en schade in reguliere situaties (als gevolg van opbrengstderving) vergelijkbaar blijven omdat deze in dit voorbeeld sterk samenhangen met een uitgekiend operationeel beheer.



Figuur 57. Conceptueel plaatje waarbij de schade voor verschillende dimensies is uitgedrukt voor natte, reguliere en droge situaties

Het voorgestelde onderzoek betreft eenmalig een gedegen modelonderzoek dat inzicht geeft in kosteneffectieve investeringen in het watersysteem. Aandachtspunten in het onderzoek zijn o.a.:

- de keuze van het modelconcept (koppeling grondwater-/oppervlaktewatermodel);
- het detailniveau analyse (indeling hydrotypen) en de doorvertaling naar de rest van het gebied;
- de wijze van schadebepaling (gebruik Waterwijzer, ...);
- de wijze waarop de kosten en schade worden bepaald (inrichting, opbrengstderving door afname agrarisch areaal, ...).

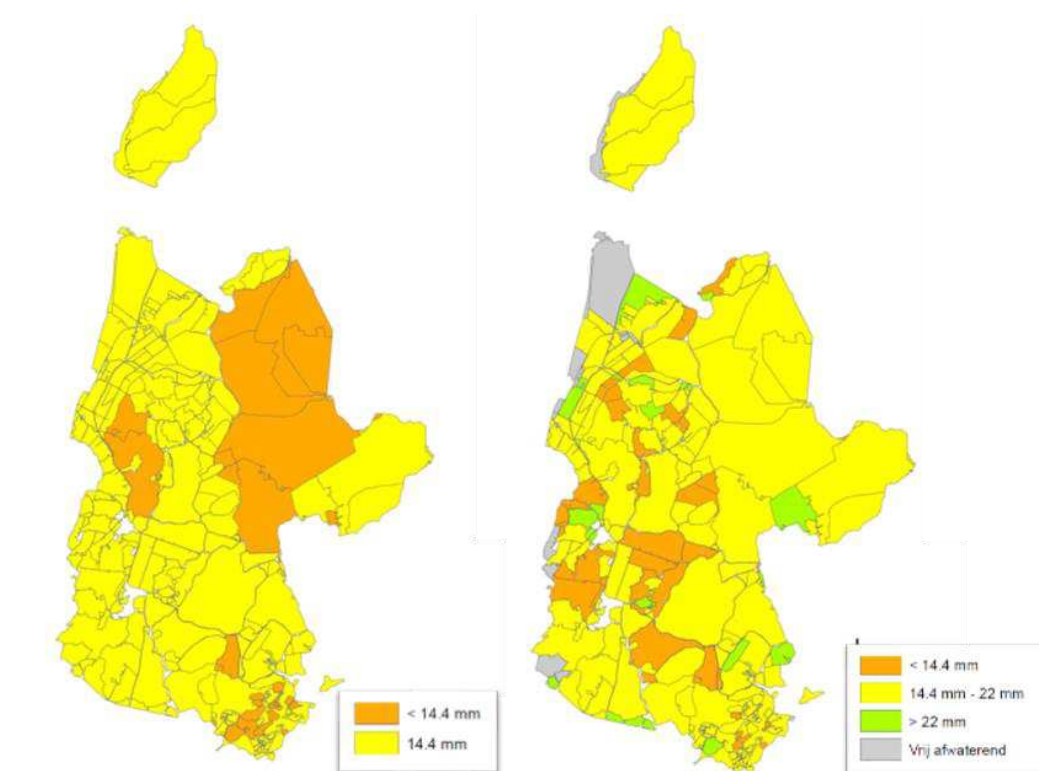
### Nadere uitwerking en vervolgvragen

Voor de nadere uitwerking wordt geadviseerd onderscheid te maken tussen de gewenste inrichting en onderhoud van bestaande watersystemen en de dimensionering van nieuw te realiseren watersystemen bij planvorming en vergunningverlening.

### Gebiedsbreed onderzoek bestaande watersystemen

Voor de bestaande systemen wordt geadviseerd op basis van modelonderzoek in het kader van klimaatadaptatie in gebiedsprocessen keuzes te maken aangaande de gewenste, toekomstige afvoerrichtlijn en de daarmee samenhangende inrichting en onderhoud (rekening houdend met klimaatverandering en kosteneffectiviteit). Hierbij geldt de historische dimensionering van de watersystemen, die in de legger en onderhoudsprogramma's is

verwerkt, als ondergrens. Het is de taak van de waterbeheerders deze in stand te houden (zie ook Figuur 58, linker figuur).



Figuur 58. In de linker figuur is de historische dimensionering vanuit de verschillende ruilverkavelingen. In de rechter figuur is de geïnstalleerde gemaalcapaciteit gegeven (bron: HHNK).

De gewenste afvoerrichtlijn zal het resultaat zijn van een zorgvuldig gebiedsproces waarin gezamenlijk de klimaatambitie wordt vastgesteld. De afvoerrichtlijn varieert per type gebied, waarbij o.a. landgebruik, de beschikbare berging en het grondgebruik bepalend zijn voor de gewenste inrichting en onderhoud. Tijdens het gebiedsproces zal tevens blijken of nog andere locatiespecifieke aspecten en/of ontwikkelingen in beschouwing moeten worden genomen. Naar verwachting zal uit de gebiedsprocessen een goed onderbouwde, gezamenlijke keuze volgen voor een (ruimere) dimensionering. Zodoende gaan gebieden geleidelijk over naar een aangepaste en gedifferentieerde afvoerrichtlijn. Let wel dat eventueel ook een autonome verslechtering als gevolg van klimaatverandering kan worden geaccepteerd als geen kosteneffectieve maatregelen worden gevonden.

Geadviseerd wordt de voorgestelde aanpak alvast voor 5 tot 10 representatieve gebiedstypen te beproeven en te bepalen hoe de toekomstige inrichting en het beheer en onderhoud van het systeem er uit moeten gaan zien (rekening houdend met klimaatverandering). Hierbij dient de (model)aanpak op basis van vooraf vastgestelde criteria (zoals kwaliteit, inhoudelijk correctheid, praktische werkbaarheid, etc.) te worden beoordeeld, geëvalueerd en waar nodig aangescherpt, waarna deze kan worden uitgerold naar het hele gebied.

### Planvorming en vergunning

Vooruitlopend op het gebiedsbrede (model)onderzoek voor de bestaande watersystemen dienen op korte termijn keuzes te worden gemaakt aangaande het gewenste

ontwerpcriterium voor nieuw te realiseren watersystemen bij planvorming en vergunning (rekening houdend met klimaatverandering). Uitgangspunt voor nieuwbouw en herstructurering is een robuust en toekomstgericht ontwerp. Op basis van voorliggend onderzoek lijkt een afvoercriterium van 22 mm per etmaal (bij een berging van ca. 20 mm) voor een groot deel van het gebied een realistisch kental voor het zichtjaar 2050. Vooruitlopend op het gebiedsbrede onderzoek, kan voorlopig van dit kental uit worden gegaan en als ontwerpcriterium worden gehanteerd voor planvorming en vergunningsvraagstukken. Geadviseerd wordt gelijktijdig te onderzoeken of dit kental in delen van het gebied moet worden verfijnd (als gevolg van ruimtelijke variatie). Hiervoor kan een QuickScan worden uitgevoerd waarbij een aantal karakteristieke kenmerken van het gebied in beschouwing worden genomen.

Geadviseerd wordt de aangepaste afvoerrichtlijn in de planvorming, planadvisering en vergunningverlening en beheerafdelingen van het hoogheemraadschap te incorporeren opdat hiermee rekening wordt gehouden bij vervanging van bestaande kunstwerken en/of realisatie van nieuwe kunstwerken (gemalen, stuwen, duikers en bruggen). De aangepaste afvoerrichtlijn dient daarmee als kompas voor toekomstige vraagstukken.

## A.5 Achtergronden benodigde gemaalcapaciteit van polders (droogmakerijen)

Literatuuroverzicht en voorstellen voor aanpassing op klimaatverandering

Opgesteld door: Jan van Bakel (Bakelse Stroom)  
 Ten behoeve van: Gebiedsbrede analyse van klimaatbestendige bescherming tegen wateroverlast in beheersgebied van HHNK (Richtpunt ontwerp)

### A.5.1 Inleiding

Een groot gedeelte van het beheersgebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) is bemalen. Deze bemaling is noodzakelijk om het waterpeil in een polder te reguleren. De dimensies van het watersysteem en de capaciteit van de gemalen wordt meestal bepaald door uit te gaan van een afvoerintensiteit van 14.4 mm per dag. Dit betekent dat watersystemen zo worden ontworpen dat deze in staat zijn om dagelijks 14.4 mm af te kunnen voeren via het stelsel aan watergangen, kunstwerken en gemalen. Er wordt al decennia met deze afvoerrichtlijn als basis gerekend en gedimensioneerd. De vraag is: is deze richtlijn van 14.4 mm/d anno 2018 nog wel toepasbaar? Door allerlei maatschappelijke ontwikkelingen, maar ook door klimaatverandering, is het hanteren van deze richtlijn niet meer vanzelfsprekend.

### A.5.2 Definities

De **afvoer** is de hoeveelheid water die over een zekere periode wordt afgevoerd. Uitgedrukt als  $m^3/d$  (of andere tijdsperiode)

De **afvoerintensiteit** is de afvoer per eenheid van oppervlak. Uitgedrukt als  $m/d$  (of andere tijdseenheid),  $mm/d$  of  $l/s/ha$ .

Het **waterbezwaar** is de hoeveelheid water van een polder (stroomgebied) die in een bepaalde periode afgevoerd kan worden zonder dat dit leidt tot bergingsveranderingen in het open water. Uitgedrukt als  $m^3$ .

**Maatgevend** is een voorvoegsel om aan te duiden dat het gaat om een afvoer, afvoerintensiteit of waterbezwaar die medebepalend is voor de dimensionering van waterlopen en/of kunstwerken.

**Gemaalcapaciteit** is de maximale, door een gemaal te verpompen hoeveelheid water per tijdseenheid. Bijvoorbeeld uitgedrukt als  $m^3/s$ . Echter, veelal wordt de gemaalcapaciteit uitgedrukt als mm/d. Hoewel niet correct zal dit in dit rapport ook worden gedaan.

**Debiet** is de hoeveelheid water die door een gemaal/pomp/stuw gedurende per tijdseenheid daadwerkelijk wordt bemalen/verpompt/overgestort. Uitgedrukt als  $m^3/s$  of l/s.

Een **afvoernorm** is een typerend kengetal voor de daggemiddelde afvoerintensiteit die 1 keer per jaar wordt bereikt of overschreden.

Bij raadpleging van de literatuur blijkt dat niet altijd de goede definities worden gehanteerd. Veelal wordt de term afvoer gebruikt als het om een afvoerintensiteit gaat en ook afvoer en debiet worden door elkaar gebruikt.

Het rapport van de **Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding (1968)** wordt de term maatgevende afvoer gebruikt waar het maatgevende afvoerintensiteit betreft. **Wind (1967)** gebruikt consequent de juiste termen: afvoerintensiteit en neerslagintensiteit. In het **Cultuurtechnisch Vademecum (1988)** wordt de term maatgevende afvoer gebruikt waar het een afvoerintensiteit betreft. In **Massop et al. (2017)** wordt de term maatgevende afvoer vervangen door afvoernorm. Door **Schultz (1996)** wordt de term waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden gebruikt waar het een waterbezwaarintensiteit. De daarvan af te leiden benodigde gemaalcapaciteit is eveneens een intensiteit.

### A.5.3 Literatuuroverzicht benodigde gemaalcapaciteit

Het startpunt van het literatuuronderzoek is het rapport van de **Werkgroep Afvoerberekeningen (1979)**. Hierin wordt wat betreft de capaciteit van gemalen verwezen naar oudere literatuur die hierna, voor zover nuttig, zal worden behandeld.

In het rapport van de **Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding (1968)** wordt voor de maatgevende afvoer(intensiteit) de waarde van 11,5 mm/d genoemd die in tabel 3 van het rapport wordt onderbouwd. Zie Figuur 59. Niet duidelijk is of dit ook de benodigde gemaalcapaciteit is.



Tabel 3. De opbouw van de maatgevende afvoer voor een poldergebied, bestaande uit onderdelen van verschillende hydrologische gesteldheid bij een maatgevende regenbui van 30 mm per etmaal

Aard van het gebied	Oppervlakte %	Intensiteit mm/etm	Afvoer mm/etm
Gedraineerd land	75 %	7	5,5
Gronden met oppervlakte-afvoer	15 %	20	3,0
Bebouwing, wegen e.d.	10 %	30	3,0
	100 %		11,5

Deze norm wordt in de praktijk verhoogd met de geschatte kwel en met 15 % als risico-factor voor onderbreking van de bemaling.

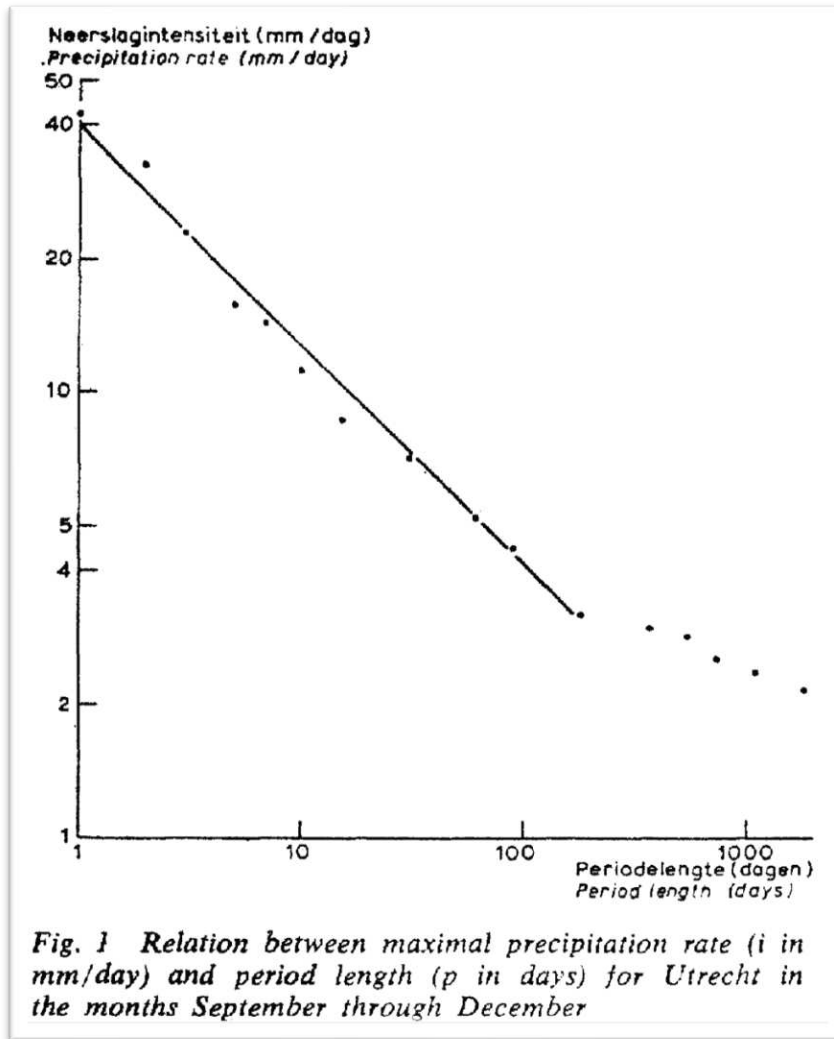
Figuur 59. Uitsnede uit rapport Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding (1968).

Merk op dat de maatgevende bui van 30 mm/d minder is dan de 34 mm/d die in **Buishand en Velds (1980)** voor T=1 jaar is vastgesteld. Merk verder op dat een toeslag van 15% in meerdere publicaties wordt genoemd. Inclusief die 15% toeslag kom je op 13.2 mm/d.

Opvallend is dat geen reductie wordt toegepast voor grote stroomgebieden omdat berekenbaar is en uit de literatuur bekend is (zie o.a. Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) dat de afvoerintensiteit afneemt bij groter wordende stroomgebieden.

Uit de literatuur is ook bekend dat de maatgevende afvoerintensiteit afhangt van het bergend vermogen in het stroomgebied. Zie o.a. **Wind, 1967**.

Uitgangspunt van de in deze publicatie beschreven analyse is dat de neerslagintensiteit sterk afneemt met de periodelengte. Het vertoont een verband zoals is weergegeven in Figuur 60.



Figuur 60. Uitsnede uit Wind (1967).

Om te voorkomen dat de berging wordt overschreden stelt de auteur dat de afvoerintensiteit maal de lengte van de beschouwde periode gelijk moet zijn aan de neerslag in die periode plus de berging.

Het rechte stuk kan in formules worden 'gevangen'. Na enige bewerkingen wordt het volgende eenvoudige verband afgeleid:

$$a = 400/b \tag{1}$$

waarin a is afvoerintensiteit (mm/d) en b is berging (mm). Deze vergelijking geeft het minimum van de berging (mm) plus de afvoer (mm/d) maal aantal dagen voor alle neerslaggebeurtenissen.

De maximale neerslagintensiteit van 40 mm/d voor een periodelengte van 1 dag is niet conform de moderne statistieken. In STOWA-rapport 2015-10 is voor een herhalingstijd van 10 jaar de 24 uur-duursom 58,5 mm. Als je deze waarden toepast leidt dit tot een verband ongeveer als volgt:

$$a = 850/b \tag{2}$$

Invullen van 12,5 mm/d (14,5 maal 0,85) in verg. [2] levert een benodigde bergingscapaciteit van 68 mm. Dat is een berging die past bij polders met relatief veel open water of polders met minder open water maar veel bergingsmogelijkheden in de onverzadigde zone bij het begin van de maatgevende periode. Daarbij moet worden aangetekend dat voor afwijkende periodelengtes de vergelijking niet meer opgaat omdat de factor voor toename van de neerslag niet gelijk blijft.

De belangrijke boodschap van dit artikel is dat maatgevende afvoerintensiteit en berging nauw met elkaar samenhangen. En in de praktijk van het waterbeheer wordt dit ook terdege beseft, getuige de in omloop zijnde 'tabellen' waarin een verandering van bergingscapaciteit kan worden vertaald in verandering in gemaalcapaciteit en v.v. Bij de keuze van de afvoercapaciteit en bergingsgetallen speelt echter meer dan de verwerking van extreme neerslag. Bij een hoge bergingscapaciteit in combinatie met een lage afvoercapaciteit zullen peilstijgingen langer duren dan bij een lage bergingscapaciteit i.c.m. met een hoge afvoercapaciteit. Ook dit zal in overweging moeten worden genomen bij de dimensionering omdat langdurige peilstijgingen de drooglegging en landbouwopbrengsten negatief kunnen beïnvloeden.

Er zijn dus meer aspecten die de keuze voor een bergingscapaciteit en een bemalingscapaciteit beïnvloeden, waardoor het 'keuzebereik' in de relatie tussen berging en afvoercapaciteit beperkter is dan bovenbeschreven doet vermoeden.

Het standaardwerk voor dimensionering van waterlopen en gemalen is het Cultuurtechnisch Vademecum (1988).

De basis voor de dimensionering van waterlopen en kunstwerken (en dus ook de gemalen) is de maatgevende afvoer (MA). Dat is de dagafvoer van een bepaald gebied die gemiddeld 1 à 2 dagen per jaar wordt overschreden. De daarbij behorende waterstand in de waterlopen is het zogenoemde Hoog Waternormpeil (HW-normpeil) of HW-lijn waaraan eisen worden gesteld ten aanzien van de drooglegging.

De MA wordt bepaald door voor het betreffende gebied onder te verdelen in unieke combinaties van bodemtype (bodemeenheid) en Gt-klasse en per onderscheiden combinatie het areaal te vermenigvuldigen met de maatgevende afvoerintensiteit (te ontleen aan de tabel in Figuur 61) en op te tellen.

Tabel 4.2.1. Richtlijnen voor de grootte van de maatgevende afvoer.

Bodemgesteldheid en Gt-klasse	maatgevende afvoer	
	$l \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$	$mm \cdot d^{-1}$
Drainage-behoefte gronden (polders) en gronden met Gt I, II en III	1,33 - 1,67	11,5 - 14,4
Zandgronden met Gt IV en V	1,00	8,6
Zandgronden met Gt V* en VI	0,67	5,8
Zandgronden met Gt VII	0,33	2,9
Bosgebieden en overige gronden zonder zichtbare afvoer met Gt VII	0,10	0,9

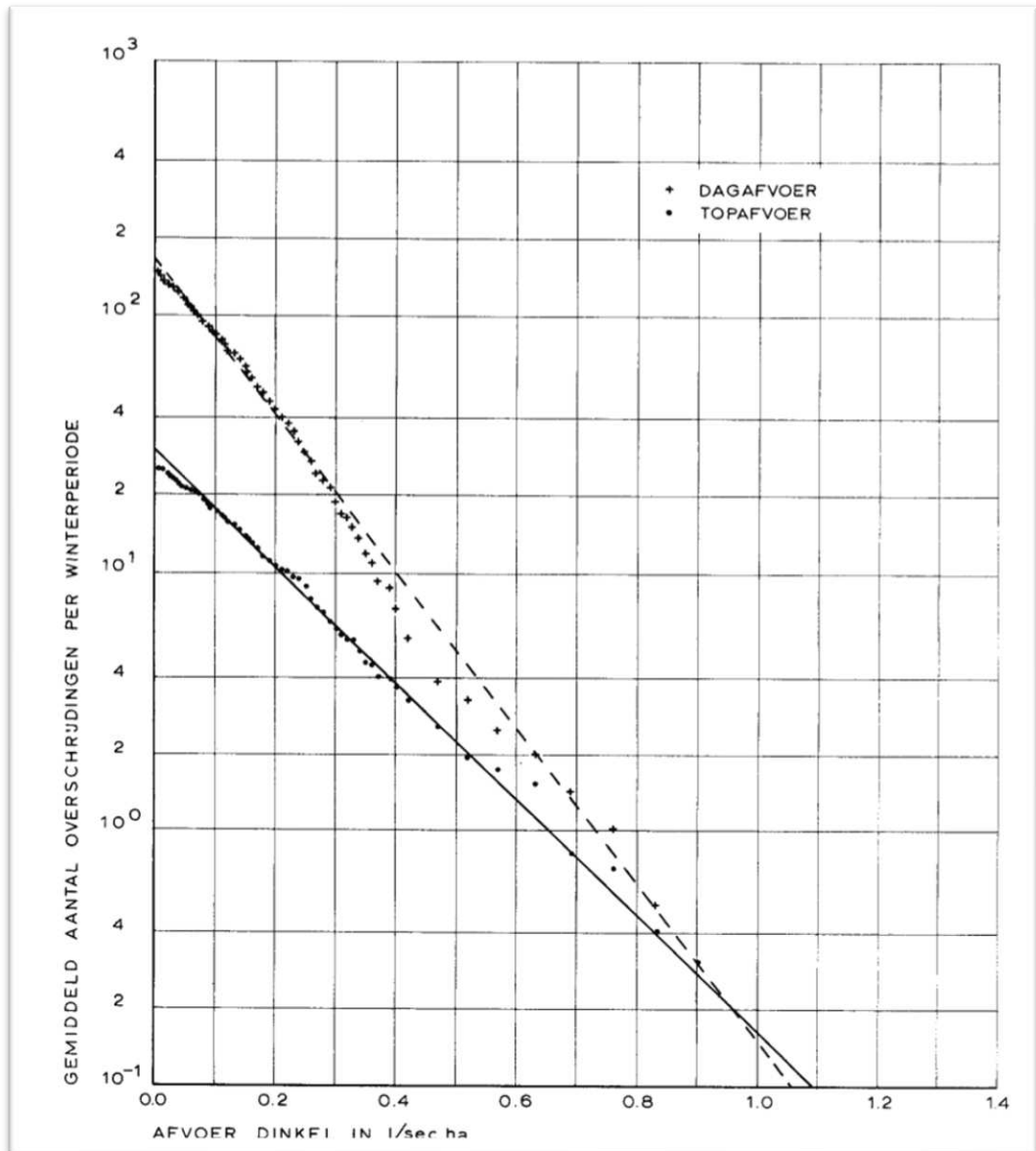
Opmerkingen bij tabel 4.2.1:

- Voor gebieden met kwel wordt de afvoernorm verhoogd.
- De Gt kan veranderen ten gevolge van werken aan het ontwaterings- en/of het afwateringssysteem. In Noord-Brabant wordt in zandgebieden bij verbetering van het primaire afwateringssysteem op basis van de normen uit de tabel, voor de kleinere waterlopen van een 25% lagere afvoernorm uitgegaan.

Figuur 61. Uitsnede uit Cultuurtechnisch Vademecum (1988).

Merk op dat de term afvoer is gebezigd waar afvoerintensiteit is bedoeld. Derhalve ook maatgevende afvoerintensiteit maar deze term is niet ingeburgerd. Daarom zal in het vervolg de term afvoernorm worden gebruikt. In Massop e.a. (2017) zijn voor waterschap Vechtstromen de achtergronden van de afvoernorm beschreven. Uit analyse van afvoeren leidde Blauw (1962) een half-logaritmisch verband af tussen overschrijdingsfrequentie en afvoerintensiteit. Zie als voorbeeld Figuur 62.





Figuur 62. Overschrijdingsfrequentie van de afvoer van de Dinkel in de winterperioden 1951/52 t/m 1960/1961 (ontleend aan Tweede Interimrapport van de Werkgroep Afvloeiingsfactoren, 1970).

Uit Figuur 62 is op te maken dat de frequentie waarbij een bepaalde afvoer wordt bereikt of overschreden, logaritmisches afneemt met de hoogte van de afvoer. Het op basis van dergelijke metingen afgeleide verband is dat de dagafvoer die 1 keer per 10 jaar wordt bereikt of overschreden ca. 1,5 maal zo groot is als de dagafvoer die 1 keer per jaar wordt bereikt of overschreden en dat de dagafvoer die 10 à 20 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden is ongeveer de helft is van de afvoer die 1 à keer per jaar wordt bereikt of overschreden. Deze verbanden zijn gebruikt om afvoeren te typeren.

Bij afspraak is de dagafvoer met een herhalingsstijd van 1 jaar (met een gemiddelde overschrijdingsfrequentie van 1 keer per jaar; overeenkomend met een herhalingsstijd van 1 jaar) de Maatgevende Afvoer (MA). Lagere of hogere typerende afvoeren worden uitgedrukt als getal maal MA, bijv. 0,5 MA of 2,0 MA.

De aanduiding 'maatgevend' komt voort uit het feit dat bij ontwerpen van waterlopen en kunstwerken je op voorhand moet weten welke afvoeren de waterloop of het kunstwerk na realisatie krijgt te verwerken.

**Schultz (1996)** geeft een gedegen overzicht van de historie van de normen voor de gemaalcapaciteit. Dit kan als volgt worden samengevat.

De benodigde gemaalcapaciteit hangt af van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden. Er worden in de publicatie diverse bronnen aangehaald.

De, voor zover bekend, oudste methode voor het bepalen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden wordt gegeven door Simons en Greve. Op basis van bijna honderd jaar waarnemingen van het neerslagoverschot van Zwanenburg kwamen zij op 129 mm/maand.

Het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden voor de Wieringermeer werden gebaseerd op een enkele neerslaggebeurtenis, resulterend in een maatgevend waterbezwaar van 74,4 mm in 10 dagen.

Van Rossum en De Vries verfijnden de Wieringermeermethode waarbij zij de vertraging tussen neerslag en afvoer in rekening werd gebracht. Deze methode is door Klein aangepast.

De Zeeuw en De Zeeuw en Hellinga karakteriseerden een stroomgebied door een enkele reactiefactor per deelsysteem voor de reactie van de afvoer op de neerslag. Daarmee is een neerslagreeks om te zetten in een afvoerreeks.

Het berekenen van het waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden in de Markerwaard is gebaseerd op langjarige gegevens van de Noordoostpolder (neerslag, afvoer en peilen).

Bij het waterbezwaar wordt veelal uitgegaan van landbouwkundig gebruik. Stedelijke gebieden en kassen reageren sneller op afvoer en natuurgebieden trager. Dit vertaald zich in een ander waterbezwaar onder maatgevende omstandigheden.

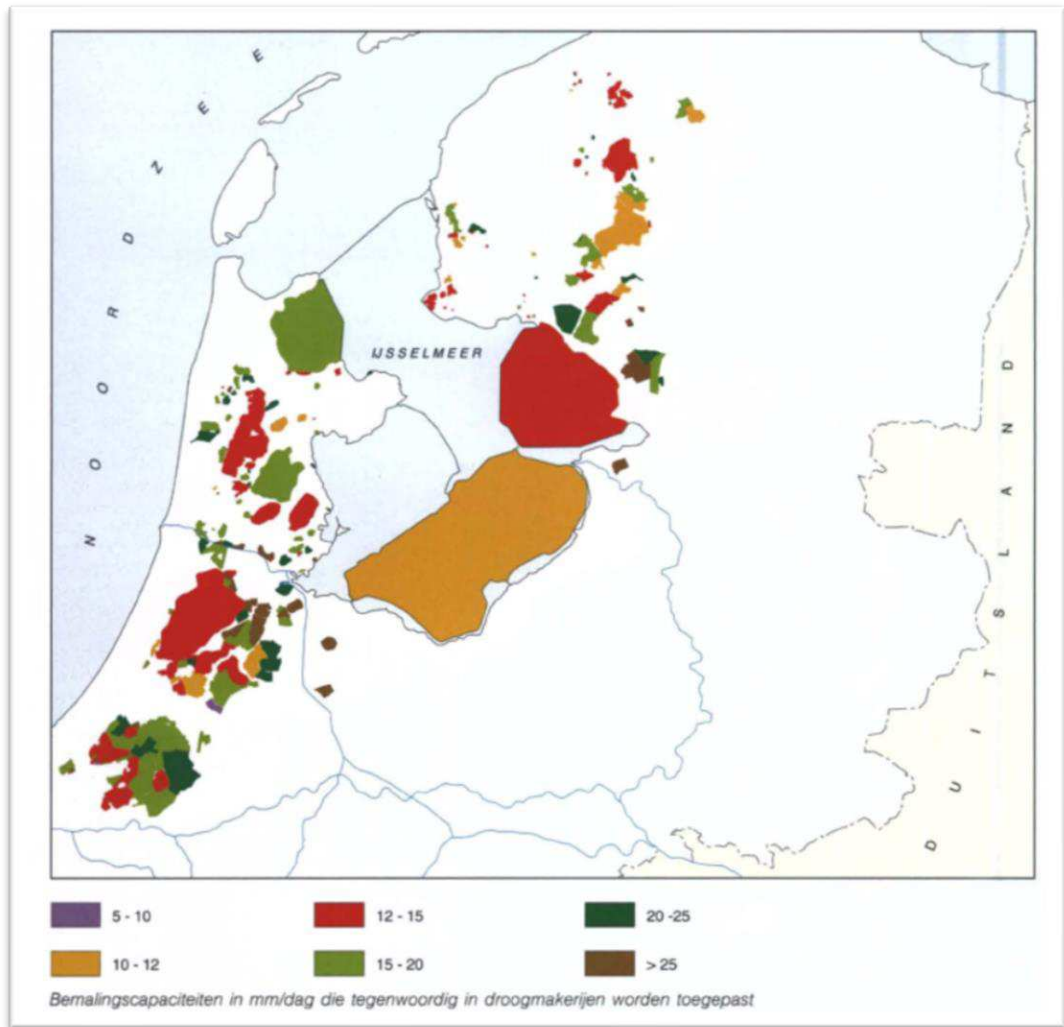
De benodigde gemaalcapaciteit is niet per definitie gelijk aan het maatgevende waterbezwaar. Simons en Greve stellen dat de gemaalcapaciteit gelijk moet zijn aan het maatgevend waterbezwaar gedurende de maand die hiervoor is gekozen. In latere publicaties wordt een verband gelegd met de diepte van de ontwatering (i.c. de beschikbare bergingsmogelijkheden).

In Tabel 13 is de 'historische ontwikkeling' van de benodigde gemaalcapaciteit samengevat.

Tabel 13. Samenvatting van historische ontwikkeling van de benodigde gemaalcapaciteit.

Auteur(s)	Jaar	Gemaalcapaciteit	Opmerkingen
Simons en Greve	1844	4,5 mm/d	Vonden maatgevend neerslagoverschot van 196 mm/maand te hoog
Storm Buijsing	1864	5,9 mm/d	Neerslagoverschot Natst bekende zomermaand
Elink Sterk	1897	8 mm/d	Neerslagoverschot 20-31 okt 1870
Beekman	1932	8 mm/d	Kortere periode is bepalend
Wieringermeer (Commissie Lovink)	1924	8 mm/d plus toeslagen voor kwel (102 mm/d) en voor revisie (3-4 mm/d)	
Visser		Afhankelijk van percentage open water en toelaatbare peilstijging	Geen literatuurverwijzing gevonden
Dibbits	1950	14,4 mm/d Nood-Holland 10 mm/d Groningen	Reductie bij grote polders
Boer en Kielman	1956	8 mm/d voor grasland en 14,4 mm/d voor bouwland	Neerslag van zes opeenvolgende dagen moet worden afgevoerd
Klein	1968	14,5 mm/d	Gedetailleerde berekening met bepaalde regenduurlijn als input
Markerwaard	1985	11,9 mm/d bij 10% open water en 60 cm peilstijging eens per 10 jaar	Simulatie van neerslag-afvoerproces; eisen aan toelaatbare peilstijging. Netto waterbezwaar van NOP als input

De bemalingscapaciteit anno 1996 ligt volgens de auteur tussen 10 en 15 mm/d. Figuur 63 geeft een landelijk overzicht.



Figuur 63. Uitsnede uit Schultz, 1996.

In polders met veel verstedelijking en kassen is er een hogere capaciteit geïnstalleerd. Dit sluit goed aan bij de bevindingen van **Hoes (2007)**. De eerste stelling uit dit proefschrift geeft dit goed weer. Zie Figuur 64.

1. Door de effecten van toegenomen welvaart, verstedelijking, bodemdaling en klimaatverandering zullen verbeteringsmaatregelen nodig zijn om de aanwezige berging- en afvoercapaciteit in polders aan te passen. De in het Nationaal Bestuursakkoord Water geformuleerde werknormen zijn ongeschikt voor het bepalen van het nut en de noodzaak van die te nemen verbeteringsmaatregelen.

Figuur 64. Uitsnede uit Hoes, 2007.

De in de laatste zin van stelling 1 genoemde werknormen heeft betrekking op toetsnormen waaraan het watersysteem minimaal moet voldoen. Echter, de strekking ervan kan ook van toepassing worden verklaard op de dimensionering van bestaande of nieuwe gemalen en watersystemen. Gebruik van normen voor toegestane peiloverschrijdingen is een 'zwakgebod'. De koninklijke weg is de benodigde gemaalcapaciteit te baseren op een klimaatbestendige (Maatschappelijke) KostenBatenAnalyse (M)KBA waarbij de risico's op



wateroverlast worden gewogen met de bijbehorende schade door wateroverlast. Voor een aanzet daartoe zie o.a. **Hakvoort et al. (2015)**. Uit dit rapport blijkt echter dat toepassing van een risicogerichte benadering niet eenvoudig is.

Tegenwoordig wordt ervan uitgegaan dat het gemaal een capaciteit moet bezitten die voldoende is om te grote peilstijging in het open water te voorkomen. Met polderspecifieke neerslag-afvoermodellen gekoppeld aan een hydraulische modellering van de hoofdwaterlopen en de daarin opgenomen kustwerken (waaronder het gemaal) kan, met geactualiseerde neerslag- en verdampingsgegevens als input, de dynamiek van de peilen worden berekend en door normen voor de peiloverschrijdingen te hanteren kan de benodigde gemaalcapaciteit worden 'terug gerekend'. Ook kan, door de actuele meteodata te vervangen door klimaatreeksen, worden bepaald wat klimaatverandering voor de benodigde klimaatverandering kan betekenen.

#### A.5.4 Evaluatie resultaten literatuuronderzoek

Door bestudering van diverse bronnen uit de literatuur is goed te achterhalen welke evolutie de dimensioneringsgrondslag voor poldergemalen heeft doorgemaakt. De meest bruikbare bron (Schultz, 1996) geeft een fraai overzicht zodat bestudering van primaire bronnen onnodig bleek.

In methodische zin is met name het rekening houden met de bergingsmogelijkheden in het oppervlaktewater en in de grond een belangrijke ontwikkeling. Daardoor kan de stap van maatgevende neerslag(intensiteit) naar maatgevend waterbezwaar naar benodigde gemaalcapaciteit worden gemaakt.

De ontwikkeling in benodigde gemaalcapaciteit is eveneens goed in beeld te brengen. Daarin is een duidelijke trend te onderscheiden: van 4,5 mm/d in 1844 tot ca. 14 mm/d in de huidige situatie (voor polders met overwegend landbouwkundig gebruik en zonder kwel).

Ook is uit het literatuuroverzicht te concluderen dat met veranderingen in landgebruik gaandeweg meer rekening werd gehouden.

In het Cultuurtechnisch vademecum (1988) wordt de maatgevende afvoer voor poldergebieden bepaald op 11,5 – 14,4 mm.d<sup>-1</sup> maal het oppervlakte, ongeacht het percentage open water. In principe is de MA niet gelijk aan de te realiseren gemaalcapaciteit. Bovendien is in poldergebieden het hydrologisch systeem ook gecompliceerder dan de afvoernorm 'los te laten' op het afwateringsstelsel: door de peilstijgingen zal de ontwatering van de drains worden gestremd. De overeenkomst tussen maatgevende afvoer(intensiteit) voor polders uit het Cultuurtechnisch Vademecum van 11,5 – 14,5 mm/d en de gebruikelijke gemaalcapaciteit van ca. 14 mm/d moet dan ook als toevallig worden beschouwd.

Een belangrijke conclusie is dat bepaling van de benodigde gemaalcapaciteit met de moderne methoden met gebruikmaking van normen voor peiloverschrijdingen een zwaktebod is. De normen voor peiloverschrijding zijn min of meer arbitrair. De stap van normgericht naar risicogericht is echter niet een-twee-drie gezet. En als het alleen maar gaat om de vraag of klimaatverandering kan leiden tot de noodzaak de bestaande gemaalcapaciteit en dimensionering van watersystemen aan te passen is wellicht een eenvoudiger benadering denkbaar.

#### A.5.5 Aangehaalde literatuur

Beekman, A.A., 1932. Nederland als polderland. Derde druk. W.J. Thieme & Cie. Zutphen.

Blaauw, H., 1962. Afvoernormen, Cultuurt. Tijdschrift 2(3).

- Boer, H.E. en J.A. Kielman, 1956. Rivieren, verdedigingswerken, dijken, duinen en stranden, waterschappen, polders en droogmakerijen. Vijfde druk. Geheel herzien en verbeterd door: J.L. den Daas, M. Ellerbroek en W.H.J. Hol. Kosmos, Amsterdam en Antwerpen.
- Buishand T.A. en C.A. Velds, 1980. Neerslag en verdamping. KNMI.
- Commissie Lovink, 1924. Verslag der Commissie tot het instellen van een hernieuwd onderzoek naar de baten, welke van de afsluiting en droogmaking der Zuiderzee mogen worden verwacht Landsdrukkerij, 's-Gravenhage.
- Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Studiekring voor Cultuurtechniek.
- Massop, H.Th.L., P.J.T. van Bakel en P.G.B. de Louw, 2017. Maatgevende afvoer en maai-veldafvoer in waterschap Vechtstromen. Beschouwing over de bruikbaarheid van afvoernormen voor bepaling van de maatgevende afvoer, als gevolg van veranderingen in de waterhuishouding en optreden van maai-veldafvoer. Alterra-rapport (in druk).
- Dibbits, H.A.M.C., 1950. Nederland – waterland. Een historisch-technisch overzicht. N.V. A. Oosthoek, Utrecht.
- Elink Sterk, A., 1874. Advies d.d. 13 november 1874.
- Hakvoort, H.A.M., P.J.T. van Bakel en M. Kok, 2015. Risicogerichte benadering van wateroverlast. Een verkenning. HKV/De Bakelse Stroom.
- Hoes, O.A.C., 2007. Aanpak wateroverlast in polders op basis van risicobeheer. Proefschrift TUD
- Klein, J.L., 1968. Polders. Technische Hogeschool Delft, Delft.
- Rijkswaterstaat, Directie Zuiderzeewerken en Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, 1985. De Waterstaatkundige hoofdstructuur van de Markerwaard Lelystad.
- Schultz, B., 1996. De waterbeheersing van droogmakerijen,
- Simons, G. en A. Greve, 1844. Verhandelingen over de stoombemaling van polders en droogmakerijen. Nieuwe verhandelingen van het Bataafs Genootschap. Negende deel. Rotterdam.
- Storm Buijsing, D.J., 1864. Handleiding tot de kennis der waterbouwkunde voor de kadetten der genie. Deel II, 3e druk. Broese, Breda.
- Werkgroep Afvoerberekeningen, 1979. Richtlijnen voor het berekenen van afwateringsstelsels in landelijke gebieden. Sectie en Studiekring voor Cultuurtechniek, Utrecht.
- Werkgroep Ontwerptechniek in de Waterhuishouding, Ontwerptechnische Aspecten van Waterbeheersingsplannen. ICW, Wageningen.
- Wind, G.P., 1967. Een eenvoudige relatie tussen afvoer, berging en neerslagintensiteit. Landbouwkundig Tijdschrift no. 4.

## Bijlage B Effect bodemverbeterende maatregelen

**EFFECTEN VAN BODEMVERBETERENDE  
MAATREGELEN OP DE BERGINGS- EN INFIL-  
TRATIECAPACITEIT VAN DE BODEM**

**Een verkennende studie**

Uitgebracht aan: Hydrologic B.V.  
Mevrouw J. de Graaf  
Postbus 2177  
3800 CD Amersfoort

Uitgebracht door: Aequator Groen & Ruimte bv  
Postbus 1171  
3840 BD Harderwijk

Auteur(s): Jouke Rozema (Aequator Groen & Ruimte)  
Jan van Bakel (De Bakelse Stroom)

Contactpersoon: Jouke Rozema, MSc.  
06-53151731

Datum: Concept: 11 januari 2018  
Definitief: 23 maart 2018



## 1. INLEIDING

### 1.1 Aanleiding

De functie van de bodem in relatie tot klimaatadaptatieve waterbeheersmaatregelen wordt op basis van onderzoek door betrokken overheden als een veelbelovende mogelijkheid tot het nemen van effectieve maatregelen gezien<sup>i,ii,iii</sup>. Binnen 'Gebiedsbrede analyse en onderzoek naar klimaatbestendige bescherming tegen neerslag en wateroverlast' is een deelvraag geformuleerd (stap 7: Scenario bodem) die zich richt op de functie en effectiviteit van bodemverbetering op de modelparameters infiltratiecapaciteit en bodemberging.

Voor deze gebiedsbrede analyse zijn een vijftal pilotgebieden aangewezen, welke, voor wat betreft de effectiviteit van bodemverbeterende maatregelen, representatief voor het gehele beheergebied van het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK) worden verondersteld.

De pilotgebieden zijn:

- Polder Koegras;
- Polder De Drieban;
- Polder Heerhugowaard;
- Polder De Purmer;
- Grootlimmerpolder.

Vooralsnog beperkt zich deze effectiviteitsanalyse op basis van literatuur en expertise tot deze vijf pilotgebieden.

### 1.2 Doel en potentie

Het doel van deze studie is een overzicht geven van de effectiviteit van bodemverbetering op de verhoging van de bergings- en/of infiltratiecapaciteit van de bodem. De studie heeft een verkenkend karakter. Indien bodemverbetering een effectieve maatregel blijkt, wordt door middel van een procesadvies aangegeven welke rol het waterschap in het proces kan innemen, rekening houdend met reeds opgestarte initiatieven en/of programma's. Na bepaling van de effectiviteit vertaalt Jan van Bakel (De Bakelse Stroom) de gegevens in wijzigingen van de parameterwaarden berging en infiltratiecapaciteit, die daarmee geschikt zijn voor verdere modelberekeningen.

### 1.3 Onderzoeksvragen en werkwijze

Om tot dit doel te komen worden de volgende onderzoeksvragen gesteld:

- Welke bodemverbeterende maatregelen zijn op basis van literatuuronderzoek effectief voor de verbetering van de infiltratiecapaciteit van de bodem en de bergingscapaciteit van water in de bodem? En zo ja in welke mate?
- Waar liggen kennisleemtes en onzekerheden?

Voor het procesadvies zijn de volgende onderzoeksvragen leidend:

- Welke rol kan het hoogheemraadschap innemen (voorkeursstrategie)?
- Welke bestaande programma's en instrumenten zijn voorhanden en zijn aanvullingen gewenst?
- Hoe kan op lopende programma's en bestaande instrumenten worden aangesloten?

Voor de beantwoording van de onderzoeksvragen is de volgende werkwijze aangehouden:

- Resultaat literatuuronderzoek en expert judgement in tabelvorm: hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de hoofdbodemsoorten (klei-, zandgronden en veen) en maatregeltypes (organisch stofgehalte verhogen en dikte van de wortelzone verhogen, verbetering van het bodemleven, voorkomen of opheffen van bodemverdichting en voorkomen of opheffen van verslemping).
- Resultaat procesadvies. Hierbij is d.d. 19 december 2017 telefonisch contact geweest met het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier. Gesproken is met de heer H. Bouman over de huidige positionering van HHNK en welke instrumenten ontwikkeld zijn, zodat hiermee in het procesadvies rekening kan worden gehouden. Vooralsnog is door HHNK een faciliterende positie ingenomen door geanonimiseerd te werken aan een platform waarop initiatieven uit het beheergebied samen komen, de opstelling van een lijst van maatregelen (inclusief voorziene subsidies en/of vergoedingen), factsheets per maatregelengroep wordt uitgewerkt door Water, Land en boeren. Vanaf 2018 zullen enkele gebieds-/ maatregelregisseurs worden aangesteld. Hun functie is om ondernemersgroepen te begeleiden bij het maken van de meest doelmatige gebiedsspecifieke keuzes. Tevens is de mate en wijze van monitoring van de geïmplementeerde maatregelen besproken (zie hoofdstuk 3).

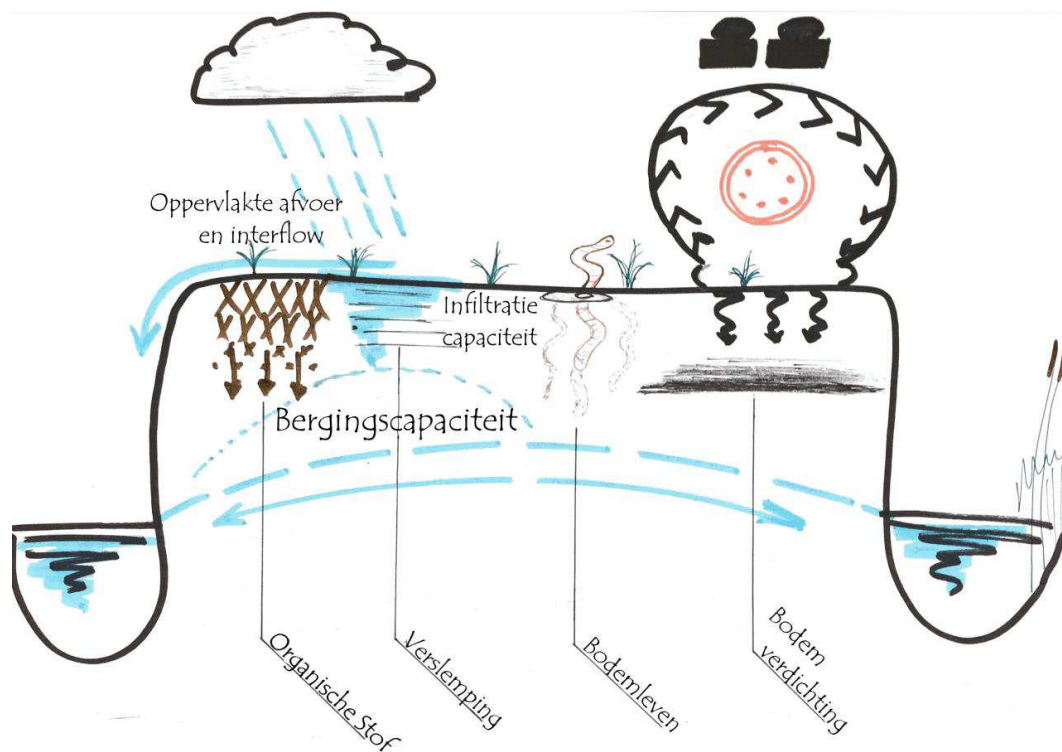
## 2. RESULTAAT LITERATUURONDERZOEK

### 2.1 Inleiding en definities

De vragen die bij het literatuuronderzoek centraal staan zijn: Welke bodemverbeterende maatregelen zijn effectief voor de verbetering van de infiltratiecapaciteit van de bodem en de bergingscapaciteit van water in de bodem? En bij welk bodemtype hebben deze maatregelen een verwacht positief effect?

Om dit effect in modelomgevingen kwantificeerbaar te maken, wordt ze waar mogelijk vertaald naar de verandering van de parameterwaarden infiltratiecapaciteit en bergingscapaciteit in de onverzadigde zone bij een grondwaterstand gelijk aan de GHG (Gemiddeld hoogste grondwaterstand). Dit is in overeenstemming met de uitgangspunten van 'Gebiedsbrede analyse en onderzoek naar klimaatbestendige bescherming tegen neerslag en wateroverlast'.

In onderstaand figuur zijn de functie van infiltratiecapaciteit en bergingscapaciteit samengebracht met de belangrijkste variabelen die naar verwachting invloed op deze parameters hebben. Deze variabelen vormen een samenvoeging van bodemverbeterende maatregelen en bestaan op hoofdlijnen uit vergroten en verdiepen van organisch stofgehalte in de bodem, opheffen en voorkomen van verdichtingen, verbeteren bodemleven (en daarmee verbeteren van de structuur), het tegengaan van verslemping en het tegengaan van afvoer via het maaiveld en interflow als gevolg van verslemping, verdichting en reliëf in het maaiveld. De termen die in onderstaande figuur en tabel 1 vermeld zijn, zijn vanwege de leesbaarheid van het document in het kader na-



der gedefinieerd.

**Figuur 1** - Schematisch profiel van enkele hydrologische bodemparameters en bodemverbeterende maatregelen op perceelsniveau.

#### Definities

GHG	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand. Om klimaatrepresentatief te zijn: het gemiddelde van de per hydrologisch jaar hoogste 3 14-daags waargenomen of berekende grondwaterstanden van een klimaatrepresentatieve periode (30 jaar).
Bergingscapaciteit	De maximale hoeveelheid water die op een bepaald moment in de onverzadigde zone van de bodem kan worden geborgen.
Infiltratiecapaciteit	De maximale hoeveelheid water die per tijdseenheid in de bodem kan zakken bij een gegeven omstandigheid (o.a. afhankelijk van de verzadigingsgraad).
Maaiveldafvoer	Oppervlakkig afstroming van neerslag en interflow-afstroming richting oppervlaktewater als gevolg van een onvoldoende infiltratiecapaciteit in combinatie met het maaiveld reliëf.
Interflow	(voornamelijk) Horizontale stroming van water in de onverzadigde zone dat het oppervlaktewater bereikt voordat het als grondwater wordt aangemerkt. Door storende en verdichte lagen in de bodem kan de infiltratiecapaciteit met diepte variëren en voor tijdelijke verzadiging boven de werkelijke grondwaterstand zorgen. Dit heet ook wel een schijngrondwaterstand. Drainagebuizen in een perceel creëren in zekere mate ook interflow en voeren versneld grondwater (o.a. neerslagoverschot en kwelwater) naar het oppervlaktewater af. De samenstelling van het water dat door drainagebuizen wordt afgevoerd kan sterk variëren en is afhankelijk van diverse locatie specifieke aspecten.
Organische stof (OS)	Het aanwezige dood organisch materiaal in de bodem afkomstig van planten en (in mindere mate) van dierlijke organismen. Organisch materiaal fungeert als buffer voor diverse processen in de bodem. Het bindt o.a. chemische stoffen, beïnvloedt de nutriëntenlevering, het bodemleven, de bewortelbaarheid en de waterdoorlatendheid. OS wordt door bodemleven en chemische processen met de tijd afgebroken en dient daarom aangevuld te worden.
Verslemping	Fijne lutum- en siltdeeltjes raken door inslag van regendruppels los en verstoppen poriën in de bodem. Verslemping is voornamelijk zichtbaar in de toplaag, maar kan ook op grotere diepte optreden wanneer een perceel onder te natte condities bewerkt wordt. Met name lichte klei- en zavelgronden zijn gevoelig voor verslemping. Ook de mate van organisch stof beïnvloedt de slempgevoeligheid van bodems.
Bodemleven	Alle levende organismen die zich in de bodem bevinden. Met name pendelende wormen spelen een rol in de bodemgesteldheid en op hydrologische effecten. Zij zorgen voor afbraak van OS, beschikbaar maken van nutriënten, behoudt en verbetering van bodemstructuur, menging van gronddelen, betere bewortelbaarheid en verhoging van de infiltratiecapaciteit (met name door grote graafgangen).
Bodemverdichting	Als gevolg van bewerking en belasting van de bovengrond en de ploegzool kan de dichtheid van delen van de bodem hoger worden. Een verdichte bodemlaag heeft een verhoogde bulkdichtheid t.o.v. andere bodemlagen. Zavelgronden lijken gevoeliger voor verdichting dan andere bodemsoorten.

Vanuit het perspectief van het waterschap is de bodem een reservoir of een serie van reservoirs, met als functie de neerslag te transformeren naar een afvoer naar het oppervlaktewater. Door deze transformatie worden de neerslagpieken afgevlakt. In zijn meest eenvoudige vorm kan de reservoirwerking van de bodem worden voorgesteld door 2 reservoirs:

- De onverzadigde zone: De inhoud (bergingscapaciteit) hangt af van de grondwaterstand en de bergingseigenschappen van de onverzadigde bodem (af te leiden van de zogenoemde pF-karakteristieken);
- Het maaiveld: Door plasvorming kan water op het maaiveld worden geborgen. De inhoud van dit reservoir (bergingscapaciteit hangt af van de waterstand van de plassen en de bergingseigenschappen van het maaiveld (af te leiden uit bijv. micro-, meso- en



macroreliëf). Plassen ontstaan als de grondwaterstand stijgt tot aan het maaiveld of doordat de neerslagintensiteit (lokaal) de infiltratiecapaciteit overschrijdt.

In bodems met een ondiep voorkomende weerstandbiedende laag (boven de freatische grondwaterstand) kan tijdens perioden met veel neerslag een schijngrondwaterstand optreden boven die weerstandbiedende laag, met onder de weerstandbiedende laag een laag die onverzadigd blijft. Het gevolg is dat niet de gehele bergingscapaciteit van de onverzadigde zone wordt benut en daarom kan frequenter maaiveldafvoer optreden. Daarnaast kan bij het optreden van schijngrondwaterstanden een afvoer over de weerstandbiedende laag, maar nog wel door de bodem (en eventueel via een aanwezig drainagestelsel) naar het oppervlaktewater optreden, de zogenoemde interflow.

Met de toename van de inhoud van een onverzadigd reservoir neemt in principe ook de afvlekking in de output af. De reactie op piekinput als gevolg van piekbuien op deze onverzadigde zone reservoirs vlakkt dus met een toename in oppervlak of volume af. Door bodemverbeterende maatregelen is in theorie de bergingscapaciteit van beide reservoirs in de onverzadigde zone te vergroten of de benutting ervan in situaties met hoge neerslagen te vergroten. In de praktijk is het reservoir 'plasvorming op maaiveld van percelen' er natuurlijk één met nadelige gevolgen voor de landbouw.

Daarnaast hangt de transformatie van neerslag in afvoer naar het oppervlaktewater af van de weerstand. Hoe kleiner de weerstand hoe sneller de afvoer. Omdat de weerstand van 'overdegrondse' maaiveldafvoer en de interflow klein is ten opzichte van de weerstand van de doordegrondse afvoer kan maaiveldafvoer leiden tot hoge afvoeren naar het oppervlaktewater. Afhankelijk van diepteligging en lokale bodemopbouw kan een drainagesysteem onder een perceel ook bijdragen aan interflow. Het effect van bodemverbeterende maatregelen op reductie van de piekafvoeren is dus sterk gerelateerd aan de lokale mogelijkheden om maaiveldafvoer en de kans op het optreden van schijngrondwaterstanden te verminderen. Idealiter gaat het om het homogeniseren van de verschillende weerstanden in het perceel tot aan het oppervlaktewater.

Essentieel is eveneens een verbetering van de oppervlaktewaterkwaliteit als gevolg van verminderde maaiveldafspoeling naar het oppervlaktewater. Omdat maaiveldafvoer (overdegrondse afvoer) in direct contact staat met de bouwvoor zijn de gehalten aan meststoffen in de regel hoger dan die van het grondwater dat ondergronds naar de ontwateringsmiddelen stroomt. Met de maaiveldafvoer kunnen ook bodemdeeltjes mee afspoelen met daaraan gehecht eutrofiërende en milieuvreemde stoffen. Mogelijk hebben de verbeteringen van het bodemleven en het verhogen van het organisch stofgehalte dus een kwaliteitsverbeterend effect op het uittredend grondwater naar het oppervlaktewater. Hierbij dient te worden opgemerkt dat in recente veldstudies<sup>1</sup> de verhoging van organisch stof in bepaalde bodemsoorten kan leiden tot een grotere stikstofbelasting van uittredend grondwater.

Het literatuuronderzoek en daarmee dit hoofdstuk heeft tot doel per hoofdbodemfractie inzicht te geven in de mate van effectiviteit van de verschillende maatregelen. Deze uitkomsten zijn per bodemsoort en per maatregeltype –inclusief referenties– overzichtelijk gemaakt in tabel 1. In deze tabel is per bodemverbeterende maatregel een beknopte beschrijving gegeven en zijn enkele specifieke aandachtspunten per hoofdbodemsoort uit literatuur vermeld.

## 2.2 Bodemsoorten in Noord-Holland o.b.v. pilotgebieden

Voor de literatuurstudie zijn de in de inleiding genoemde vijf pilotgebieden bestudeerd op de meest voorkomende bodemsoorten. Om vergelijking met literatuur mogelijk te maken zijn deze vervolgens geclusterd tot de hoofd bodemsoorten: kleigronden (inclusief zavelgronden), zandgronden en veen.

Hierbij wordt opgemerkt dat dit een sterke vereenvoudiging is t.o.v. van de werkelijkheid. Op basis van de bodemkaart zijn de bodemprofielen merendeels gelaagd, dat wil zeggen er zijn zandgronden met een kleidek, kleigronden met een zandondergrond en mogelijke (tussen)lagen van veen. De Bodemkaart van Noord-Holland is in 2016 geactualiseerd. Hierin zijn veel voorheen ongerijpte ondergronden opnieuw beoordeeld. Inmiddels zijn veel van deze gronden gerijpt tot tenminste 80 cm -mv. Bij dit rijpingsproces verbetert de structuur en wordt deze weerbaarder tegen veranderingen. Door de structuurverbetering kunnen op meso- en macroniveau scheuren in de kleilagen ontstaan welke tot verbeterde infiltratiecapaciteit en versnelde afvoer kunnen leiden<sup>iv</sup>. Ondanks de toename van scheuren in kleilagen kan bij dit proces ook het vermogen om snel vocht binnen het medium op te nemen verminderen. Door het ontwikkelen van preferente stroombanen kan de effectieve bergingscapaciteit van kleigronden door rijping sterk toenemen, maar alleen als zich diepere macroscheuren kunnen vormen (gekoppeld aan lutumgehalte van tenminste 17,5%).

## 2.3 Literatuuronderzoek

Uit de systeembeschrijving volgt dat bodemverbeterende maatregelen die mogelijk een verhogend effect hebben op de bergingscapaciteit van de onverzadigde zone en/of een verhogend effect op de infiltratiecapaciteit in beschouwing moeten worden genomen.

Uit het literatuuronderzoek komt naar voren dat de maatregelen onder zijn te verdelen in 4 categorieën:

1. Verhoging van het organisch stofgehalte van de onverzadigde zone resulteert in een andere vocht karakteristiek waardoor er per volume-eenheid meer water kan worden geborgen.
2. Het vergroten van de doorlatendheid van verdichte lagen beneden de bouwvoor c.q. het voorkomen dat die lagen ontstaan vermindert de kans op het optreden van schijngrondwaterstanden of plassen op het maaiveld en daarmee de kans op het optreden van interflow of maaiveldafvoer.
3. Verbetering van het bodemleven leidt tot een hogere infiltratiecapaciteit en daarmee tot een geringere kans op het optreden van maaiveldafvoer.
4. Het voorkomen of opheffen van verslemping vermindert de kans op het optreden van maaiveldafvoer.

Per categorie zijn in onderstaande tabel de geraadpleegde bronnen vermeld. Per bodemsoort zijn vervolgens de meest relevante bevindingen weergegeven. Op basis daarvan is met een kleur aangegeven wat de inschatting is van de effectiviteit op vergroting van de bergingscapaciteit en de infiltratiecapaciteit. Deze beoordeling is opgedeeld in effectief, beperkt effectief, niet effectief, onbekend op basis van literatuur en blanco wanneer er geen bruikbare literatuur beschikbaar is gevonden. Binnen deze studie is 'Effectief' toegekend wanneer voor het hoofdtype grondsoort in de gehele breedte van de gevonden literatuur potentie voor aanzienlijke verbetering te lezen is. 'Beperkt effectief' is toegekend wanneer de literatuur gedeeltelijk potentie aan de maatregel toeschrijft. Dit betekent ook dat er bepaalde grondsoorten of beperkingen aan het

onderzoek zijn waardoor mogelijk ook onduidelijke of negatieve gevolgen gekoppeld worden aan de betreffende

**Tabel 1: Overzicht literatuur en effectiviteit maatregel per hoofdfractie bodemsoort.**

	<b>Klei (inclusief zavelgronden)</b>	<b>Zand</b>	<b>Veen</b>
Nuancering o.b.v. bodemkaart van Nederland (1:50.000) <sup>y</sup>	Lokaal moerige gronden, ongerijpte kleigronden en zavelgronden.	Lokaal met kleidek, niet gerijpte klei-ondergrond of moerige grond.	Lokaal met kleidek of kleiige tussenlagen.
Voorkomensgebied <sup>3</sup>	Polder de Purmer (pilotgebied) Polder de Drieban (pilotgebied) Polder Heerhugowaard (pilotgebied) Polder de Beemster Overige oude zeeklei polders Bergings- en infiltratiecapaciteit is moeilijk te kwantificeren voor kleigronden door (verschillende mate van) zwel en krimp.	Koegraspolder (pilotgebied) Groot Limmerpolder (pilotgebied) Overige delen van geestgronden en binnen duinranden.	Broek in Waterland Ilperveld Eilandspolder Voor veengronden is de aanwezigheid en functioneren van het oppervlaktewater relevant. Berging en infiltratiecapaciteit van veengronden is moeilijk te kwantificeren door 'spons'-functie.

Tabelvervolg op volgende pagina vanwege leesbaarheid.

Bodemsoort Maatregelen	Klei (inclusief zavelgronden)	Zand	Veen
Organisch stof (OS) gehalte verhogen en dikte laag met organische stof verhogen <sup>1,3</sup>	<p><u>Algemeen:</u> OS verhogen heeft op zichzelf een beperkt effect. Indirecte effecten (hoger OS stimuleert bodemleven en structuurverbetering) wel effectief voor verhoging berging en infiltratiecapaciteit. Verhogen OS langdurig proces. Gronden met hoger OS hebben een lichte vermindering van draagkracht. Het vinden van de balans tussen verschillende mesten en OS-bevattende mengsels in de tijd is noodzakelijk om verhoogde uitspoeling richting oppervlaktewater te voorkomen.</p> <p>Toename poriegrootte en volume lucht in bodem. Kan leiden tot afname vochthoudend vermogen. Grasland heeft doorgaans geen aanvullend OS nodig wat opbrengst. Overige teelten hebben wel baat. Afname macroporiën (droogtescheuren) door verhogen OS, negatief effect op zware kleigronden mogelijk tot gevolg.</p>	<p>Tot 15% meer vochthoudend vermogen. Grasland heeft geen aanvullend OS nodig, overige teelten wel. Voor gronden met OS &lt; 2% is verhogen wel effectief.</p>	<p><u>Algemeen:</u> Veengrond heeft geen toegevoegd OS nodig.  Berging en infiltratiecapaciteit van veengronden is moeilijk te kwantificeren door 'spons'-functie.</p>
	Berging: beperkt effectief	Berging: beperkt effectief	
	Infiltratiecapaciteit: beperkt effectief	Infiltratiecapaciteit: beperkt effectief	
Verdichting bodem voorkomen en opheffen <sup>11</sup>	<p><u>Algemeen:</u> Veelal het gevolg van structuurbederf door zaai- en oogstbewerkingen. Als gevolg van verdichtingslagen in de bodem ontstaan schijngrondwaterstanden. Hiermee leiden verdichtingen tot vermindering van berging en infiltratiecapaciteit. Komt met name bij lichte zavelgronden en zandgronden. Opheffen heeft verhogend effect op het poriënvolume, bewortelingsdiepte, zuurstofvoorziening en verbetering draagkracht. Natte gronden zijn gevoeliger voor verdichting dan droge gronden. Verdichte gronden blijven langere tijd (bijna) volledig verzadigd. Het effect van het natuurlijk herstellend vermogen van de bodem is nog onvoldoende onderzocht.</p> <p>Bij gronden met kleigehalte &gt; 17,5% is droogtekrimp en daardoor scheurvorming krachtig mechanisme tot herstel<sup>4</sup>. Machinaal losmaken van zavelgrond heeft uitgewezen geen verbetering van bodemkwaliteit op te leveren.</p>	<p>Verdichting komt in zandgronden vaak tot op grotere diepte voor. Door de relatief hoge doorlatendheid, neemt bij verdichting de infiltratiecapaciteit beperkt af. Gelaagde zandgronden zijn gevoelig voor diepe verdichtingen, met schijngrondwaterstanden en verminderde berging tot gevolg.</p>	<p>Veengronden zijn van nature veerkrachtig met een groot herstellend vermogen. Voor kleilagen in veengrond of moerige lagen op klei of zand geldt een genuanceerder beeld.</p>
	Berging: beperkt effectief	Berging: beperkt effectief	
	Infiltratiecapaciteit: effectief	Infiltratiecapaciteit: effectief	
Bodemleven verbeteren <sup>1,7,8</sup>	<p><u>Algemeen:</u> Specifieke bioporiën (graafgangen en wormgangen &gt; 2 mm) zijn effectief voor het verhogen van de infiltratiecapaciteit. Door aanwezigheid van bodemleven en graafgangen kan OS en bodemmateriaal tot grotere diepte gemengd worden.</p>		



	<p>Direct gevolg van verhogen OS is toename bodemleven.</p> <p>Over de toename van de infiltratiecapaciteit zijn onvoldoende resultaten bekend.</p>		
	Berging: beperkt effectief,	Berging: beperkt effectief, met name toplaag biedt kans	
	Infiltratiecapaciteit: effectief	Infiltratiecapaciteit: effectief	
Verslemping en verdichte toplagen tegen gaan of opheffen	<p><u>Algemeen:</u></p> <p>Op verslempde bodems ontstaan tijdelijke plassen en schijngrondwaterstanden. Hierdoor blijft onder de verdichte toplaag potentiële berging onbenut. Verslemping van de toplaag veroorzaakt oppervlakkige maaiveldafvoer en afspoeling. De oorzaak van verslemping is deels te vinden in toename van piekbuien en afname van het kalkgehalte in de bovengrond.</p>		Veengronden met een klei/silt houdende deklaag zijn mogelijk gevoelig voor verslemping.
	Lichte zavel tot lichte kleigronden zijn het meest slempgevoelig.	Zandgrond in theorie niet gevoelig mits geen kleidek of lutum/silthoudende lagen aanwezig zijn.	
	Berging: beperkt effectief	Berging: n.v.t.	
	Infiltratiecapaciteit: effectief	Infiltratiecapaciteit: n.v.t.	

## Verklaring kleuren:

Groen: effectief

Oranje: niet effectief

Geel: beperkt effectief

Grijs: onbekend o.b.v. literatuur

Blanco: niet van toepassing

De beoordelingen zijn ongekwantificeerd en vormt daarmee een indicatie. Gekeken is naar het overall-effect zoals beschreven in de literatuur. Niet alle uitzonderingen zijn in bovenstaande tabel opgenomen. Daarvoor wordt verwezen naar de bronverwijzingen, nader gespecificeerd in de literatuurlijst.

### 3. PROCESADVIES

#### 3.1 Reeds ondernomen

De functie van de bodem in relatie tot klimaatadaptatieve maatregelen wordt op basis van onderzoek en ervaringen in uitgevoerde projecten (zoals 'Landbouw op Peil') onder het voetlicht gebracht<sup>1,2</sup>. In het beheergebied van HHNK loopt het programma 'Samenwerken aan bodem en water': een samenwerking tussen de hoogheemraadschappen Hollands Noorderkwartier en Rijnland, het waterschap Amstel, Gooi en Vecht, de provincie Noord-Holland, LTO-Noord en Noord-Hollandse agrarische collectieven, waarin onder andere de uitkomsten in dit programma worden geïmplementeerd. Het programma past binnen het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer van LTO. Voor HHNK zou daar dan ook de trekkersrol liggen.

Het hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier ziet in bodemverbeterende maatregelen potentie tot het verbreden van het pakket aan maatregelen waarmee het risico op neerslagoverlast kan worden verlaagd/beperkt. Bovenstaand literatuuronderzoek samengevat in tabel 1 onderschrijft dit gedeeltelijk en geeft inzicht waar nuancering gewenst is. De tabel maakt duidelijk dat per bodemsoort en maatregel de effectiviteit (sterk) kan verschillen. Concrete of eenduidige waarden per maatregel ontbreken met regelmaat.

Binnen het programma 'Samenwerken aan bodem en water' is een omvangrijke maatregellijst opgesteld (het concept ligt ter beoordeling). De doelstelling van het programma is dat aan het eind van de POP3-subsidieperiode (2021) tenminste 30 % van de agrariërs binnen het beheergebied tenminste één maatregel van de lijst binnen de bedrijfsvoering getroffen heeft. Het hoogheemraadschap is voornemens om de effectiviteit van de maatregelen op de volgende wijze te monitoren:

- Individuele registraties in de BRO via een online landbouw-water portaal Noord-Holland;
- Middels bestaande procesmonitoringsinstrumenten (oppervlaktewaterkwaliteit en -kwantiteit).

Het monitoren via deze bestaande instrumenten biedt mogelijk te weinig inzicht in de effecten van de genomen maatregelen. De mogelijkheid bestaat dat de effecten van de maatregelen overschaduw worden door andere grootschalige maatregelen (die het halen van de waterkwantiteits- en kwaliteitsopgaven tot doel hebben).

De maatregelenlijst houdt geen rekening met gebiedsspecifieke kenmerken of bedrijfssectoren binnen de landbouw. Dit kan resulteren in een verminderde effectiviteit terwijl 'op papier' aan de doelstelling wordt voldaan.

#### 3.2 Rol HHNK

De diverse betrokken overheden willen in de basis een regiefunctie hebben, om gedurende de uitrol van het programma initiatieven uit het gebied namens de agrarische collectieven te stimuleren. Hierbij wordt geadviseerd om het hoogheemraadschap een faciliterende rol op het gebied van kennis (watersysteem, waterkwaliteit en ecologie) en proces in te laten nemen.

Om deze faciliterende rol vanaf de start concrete invulling te geven, adviseren wij om de uiteenlopende maatregelen verder te clusteren en effectiviteit te koppelen aan diverse bedrijfssectoren en gebiedskenmerken. Het belang van clustering is tweeledig: het bied structuur en de mogelijkheid op sturing om voor en tijdens de implementatie van maatregelen effectiviteit en belangen op elkaar aan te laten sluiten. Hierbij kan gedacht worden aan de uitwerking van maatregelen op kaart of een effectiviteitsmatrix per sector of maatregelencluster. Innovaties (vanuit de sectoren) dienen hierbij uitdrukkelijk een plek te krijgen.

Een actieve rol in de voorlichting, communicatie en kennisdeling wordt geadviseerd om vroegtijdige bewustwording en urgentie van de problematiek (al dan niet integraal) te creëren. Hierbij kan gedacht worden aan het organiseren van themabijeenkomsten, cursus of demo's waarbij een actieve rol voor het waterschap is weggelegd om kennis te delen over het watersysteem, de kansen en innovaties. Dit biedt uitgelezen mogelijkheden om bewustwording te creëren en te versterken omtrent de gedeelde verantwoordelijkheden en belangen.

Bovenstaande heeft tot doel om diverse agrarische ondernemers concreet te verleiden om tot een (voorkeurs)keuze van maatregelen(en) te komen. Door hen te voorzien van inzicht in de mate van effectiviteit van voorkeursmaatregelen ontstaat een passende verwachting van de uitwerking en het bewustzijn van de individuele rol in de bredere context. Ook kunnen meerdere ondernemers worden verleid om gezamenlijk op gebiedsniveau maatregelen te nemen. Immers een dergelijke aanpak is voor alle partijen effectiever. Waar de belangen dusdanig ver uit elkaar liggen zal een extra inspanning en een langer tijdspad gekozen moeten worden.

Voor het hoogheemraadschap resulteert deze actieve rol in een betere sturing en inzicht in de verwachte effecten op de waterkwaliteit- en kwantiteit. Aequator Groen & Ruimte heeft veelvuldig en met positieve ervaringen bovenstaande processen begeleid en -met praktijkkennis- vorm en invulling gegeven voor diverse waterschappen.

Voorbeelden hiervan zijn vaak terug te voeren tot projecten waarin boeren actief zelf een lokale waterbeheerder worden (Landbouw op Peil, Flexibel peilbeheer m.b.v. POP-subsidies). Aan de voorkant kan het waterschap definities stellen om vervolgens agrariërs binnen die definities meer ondernemersvrijheid te geven of op andere wijze in bedrijfsvoering of gebiedsgebruik te compenseren. Zo wordt verantwoordelijkheid gedeeld, ontstaat een gemeenschappelijk belang en kan een agrariër de maatregelen dusdanig inzetten dat het hem een betere gewasopbrengst, vitalere bodem en waterhuishouding oplevert en daarmee vermindering van risico's op schade als gevolg van klimaatverandering.

Maatschappelijke relevantie en een gezamenlijk belang van de maatregelen kan in specifieke gebieden aanzienlijk vergroot worden wanneer agrarisch gebied in de nabijheid van grootschalige kascomplexen en verhard stedelijk gebied ligt. In deze ruimtelijke situatie kunnen enkele maatregelen zoals tijdelijke waterberging aan maaiveld of een tijdelijk flexibeler peilbeheer voor de ontlasting van waterproblematiek in stedelijk gebied zorgen en in een later stadium voordeel bieden voor de agrarische ondernemer. Dit is echter maatwerk en sterk afhankelijk van locatie specifieke omstandigheden. Wanneer het waterschap deze initiatieven bij collectieven signaleert, kan zij makkelijker met zowel agrarisch collectief als aanliggende gemeente communiceren, dan een agrarisch collectief ansich.

Rollen van andere partijen:

LTO-Noord: trekker DAW-programma.

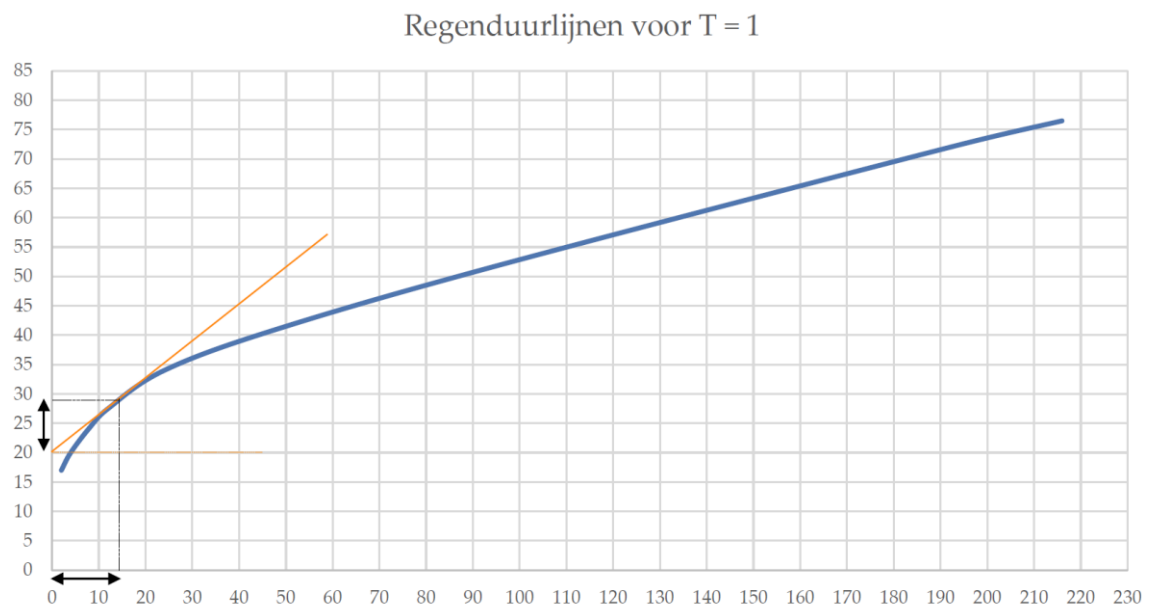
Collectieven: bundelen van mogelijkheden (diensten) op gebiedsniveau, verbinden en administreren van fysieke uitvoering maatregelen.

Provincie: verstrekker POP-3 subsidieprogramma.

De huidige POP3 subsidiestroom is afdoende voor de fysieke uitvoering van de maatregelen en kennisdeling door het hoogheemraadschap en samenwerking met marktpartijen. Er wordt nu nog weinig gebruik van de subsidie mogelijkheden gemaakt. In potentie kunnen met behulp van dit programma veel relevante maatregelen uitgevoerd en begeleid worden.

#### 4. VERTALING NAAR GEWENSTE GEMAALCAPACITEIT

In een publicatie van HydroLogic / HKV (in voorbereiding) is de methode beschreven om een verandering in de berging van water in een polder om te zetten in een verandering in gewenste gemaalcapaciteit: de regenduurlijnmethode. In het kort: de duurlijn van de neerslag met een bepaalde herhalingsstijd wordt uitgezet in een x,y-diagram. Op de y-as staat de hoeveelheid neerslag. Vervolgens wordt op de y-as de totale bergingscapaciteit in grondwater en oppervlaktewater in een polder uitgezet (uitgedrukt als mm waterschijf) en wordt een raaklijn getrokken aan de duurlijn. De helling van die raaklijn is de gewenste gemaalcapaciteit. Zie onderstaande afbeelding. De veronderstelling die daarbij hoort is dat de beschikbare bergingscapaciteit ook volledig wordt gebruikt. Voordeel uit deze analyse en het voortkomend inzicht is een nauwkeurigere bepaling en toekomstige verlaging van gemaalcapaciteiten.



**Figuur 2** – Voorbeeld van toepassing van de regenduurlijnmethode. De bergingscapaciteit in de polder is 20 mm. De raaklijn raakt de regenduurlijn op punt waar in 13 uur 29 mm neerslag valt. Dus is de benodigde gemaalcapaciteit:  $(29 - 20)/13$  is afgerond 16 mm/d.

Uit berekeningen uitgevoerd voor T= 10 jaar blijkt bijvoorbeeld dat bij toename van de bergingscapaciteit van 40 naar 45 mm de benodigde gemaalcapaciteit afneemt van 13,4 naar 9,0 mm/d. Daaruit blijkt dat vergroting van de bergingscapaciteit in een polder zeer effectief is om de benodigde gemaalcapaciteit terug te brengen c.q. om de gevolgen van klimaatverandering voor de benodigde gemaalcapaciteit op te vangen. Daarmee is de link te leggen met bodemverbeterende maatregelen en de effecten daarvan op het benutten van de bergingscapaciteit van de bodem.

De vraag die in dit hoofdstuk wordt behandeld is: zijn de bodemverbeterende maatregelen te vertalen in een verandering in berging van water in een polder.

De inschatting o.b.v. dit literatuuronderzoek en praktijkervaring is dat verhoging van het organisch stofgehalte maar een beperkt effect heeft op de bergingscapaciteit in de onverzadigde zone in de GHG-situatie. Voor een GLG-situatie wordt het effect van toename in OS en daarmee gepaard gaand bodemleven op de infiltratie- en bergingscapaciteit effectiever geacht. De vergroting van de bergingscapaciteit door verhoging van het gehalte OS voor bodems met een



initieel laag OS-gehalte (<2%) ligt in de orde grootte 1 mm per procent verhoging organisch stof. Daarbij moet bedacht worden dat een dergelijke verhoging reeds grote inspanningen en een lange adem (jaren) vereist. Op polderniveau moet worden bekeken op welk percentage van de bodems een mogelijke verhoging van het OS betrekking kan hebben.

Meer perspectief biedt het voorkomen van maaiveldafvoer en interflow door verhoging van de infiltratiecapaciteit en voorkomen of opheffen van structuurbederf en van de verdichting van lagen beneden de bouwvoor van intensief beteelde landbouwgronden. Daardoor kan bij hevige neerslag een grotere fractie in de grond infiltreren of doorstromen naar de onverzadigde zone beneden de bouwvoor. Daardoor wordt de bergingscapaciteit van de onverzadigde zone beter benut. Stel die is in de GHG-situatie gemiddeld 40 mm (Massop et al., 2012)<sup>vi</sup>. Stel verder: in een situatie met hoge neerslagintensiteiten treedt veel maaiveldafvoer en interflow op en wordt de bergingscapaciteit in de bodem maar voor de helft benut. Opheffen van maaiveldafvoer en interflow kan voor zand- en kleigronden dus resulteren in een verhoging van de bergingscapaciteit in de onverzadigde zone met maximaal 20 mm. Op polderniveau moet worden bekeken op welk percentage van de bodems deze reductie betrekking kan hebben.

## 5. AANBEVELINGEN TOT NADER ONDERZOEK

Op basis van deze verkennende studie naar de effecten van bodemverbeterende maatregelen op de bergings- en infiltratie capaciteit van de bodem volgen onderstaande opmerkingen en aanbevelingen tot nader onderzoek.

Uit de verkennende literatuurstudie komt naar voren dat voor diverse maatregelen (nog) geen eenduidig beeld bestaat en dat een vertaling naar hydrologische parameters slechts gedeeltelijk of voor specifieke bodems en omstandigheden geldt. Naar diverse onderzoeken in Nederland en daarbuiten wordt gerefereerd. Geen van de onderzoeken zijn daadwerkelijk in Noord-Holland of één van de pilotgebieden getoetst.

### Gebiedsonderzoek:

- Aanbevolen wordt om op polderniveau te kijken op welk percentage van de bodems een mogelijke verhoging van het OS gehalte betrekking kan hebben. Daarbij moet worden bedacht dat een verhoging van OS grote inspanningen en een lange adem (jaren) vereist.
- Het voorkomen van maaiveldafvoer en interflow biedt op korte termijn meer perspectief dan verhoging van het OS-gehalte. Het voorkomen of opheffen van structuurbederf en verdichte lagen onder de bouwvoor van intensief betaalde landbouwgronden kan direct tot een betere benutting van de bergingscapaciteit zorgen.
- Daarom wordt aanbevolen om op polderniveau de mate van bodemverdichting, verslemping en andersoortig structuurbederf op, in en onder de bouwvoor in de praktijk nader te bepalen. Hierdoor kan beter geduid worden hoeveel bergingscapaciteit in potentie onbenut blijft.

### Proces:

- Aanbevolen wordt om de faciliterende rol van het hoogheemraadschap vanaf de start concrete invulling te geven door de uiteenlopende lijst van maatregelen verder te clusteren en effectiviteit te koppelen aan diverse bedrijfssectoren en gebiedskenmerken. Hierbij kan gedacht worden aan de uitwerking van maatregelen op kaart of een effectiviteitsmatrix per sector of maatregelencluster.
- Innovaties (vanuit de sectoren) dienen uitdrukkelijk uitlichten.
- Door gebiedsspecifiek boeren en agrariërs te voorzien van inzicht in de mate van effectiviteit van (voorkeurs)maatregelen ontstaat een passende verwachting van de uitwerking en het bewustzijn van de individuele rol in de bredere context.
- Een actieve rol in de voorlichting, communicatie en kennisdeling wordt geadviseerd om vroegtijdige bewustwording en urgentie van de problematiek (al dan niet integraal) te creëren. Gedacht kan worden aan het organiseren van themabijeenkomsten, cursussen of demo's waarbij een actieve rol voor het waterschap is weggelegd om kennis te delen over het watersysteem, kansen en innovaties. Dit biedt uitgelezen mogelijkheden om bewustwording te creëren en te versterken omtrent de gedeelde verantwoordelijkheid.
- Ook kunnen meerdere ondernemers worden verleid om gezamenlijk op gebiedsniveau maatregelen te nemen. Immers een dergelijke aanpak is voor alle partijen effectiever.
- Aanbevolen wordt om het monitoringsproces van 'Samenwerken aan bodem & water' nader te specificeren. Met de huidige voorgenomen monitoringswijze, zoals telefonisch besproken met de heer Bouman, wordt de kans groot geacht dat de inspanningen en het effect van de maatregelen overschaduw worden door andere grootschalige maatregelen (die het halen van de waterkwantiteits- en kwaliteitsopgaven tot doel hebben).

## 6. REFERENTIES

- <sup>1</sup> Groenendijk, P., P., Schipper, R. Hendriks, J. Akker en M. Heinen, 2017. Effecten van verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit; Deelstudies Goede Grond voor een duurzaam atersysteem. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2811. 128 blz.
- <sup>2</sup> Swart, B., Broos, M., Schipper, P., Groenendijk, P., van Eekeren, N., van der Burgt, G-J., Janssen, G. en van Gaans, P., 2013. De invloed van bodemstructuur op het watersysteem – Een beschouwing op grond van een eerste onderzoek bij Waterschap vallei en Veluwe en aanbevelingen voor een vervolg. STOWA, Rapport 2013-13B.
- <sup>3</sup> Bot, A., Benites, J., 2005, The importance of soil organic matter – Key to drought-resistant soil and sustained food production. FAO, FAO soil bulletin 80.
- <sup>4</sup> Van den Akker, J., Hoogland, T., Hakvoort, H., Stoppelenburg, F., 2011, Berging in kleischeuren in de Flevoolders, NHV Stromingen 16, nummer 3.
- <sup>5</sup> Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50.000, actualisatie 2016.
- <sup>6</sup> Loveland, P., Webb, J., 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil and Tillage Research, Volume 70-1.
- <sup>7</sup> Groenendijk, P., 2017. Presentatie met aanvullende gegevens op 'Effecten verbetering bodemkwaliteit op waterhuishouding en waterkwaliteit', gedurende Deltaplan Zoetwater, d.d. 22 november 2017.
- <sup>8</sup> Hoving, I., de Boer, J., Goense, D., 2013, Presentatie HTBOM-Akkerbouw, bijeenkomst, d.d. 16 mei 2013.
- <sup>9</sup> Van Eekeren, N., 2015, Presentatie 'Effect landgebruik in de melkveehouderij, grasland en bouwland, op de bodemkwaliteit, NVWV bijeenkomst september 2015.
- <sup>10</sup> Van Eekeren, N., Bommelé, L., Bloem, J., Schouten, T., Rutgers, M., de Goede, R., Reheul, D., Brussaard, L., 2008, Soil biological quality after 36 years of ley-arable cropping, permanent grassland and permanent arable cropping, Applied Soil Ecology, 40, 432-446.
- <sup>11</sup> Wösten, J.H.M., Veerman, G.J., de Groot, W.J.M., Stolte, J., 2001, Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergrond in Nederland: de Staringreeks, Alterra-rapport 153.
- <sup>12</sup> De Lijster, E., van de Akker, J., Visser, A., Allema, B., van der Wal, A., Dijkman, W., 2016. Waarderen van bodemwatermaatregelen. CLM Onderzoek en Advies, CLM-912.
- <sup>13</sup> Van den Akker, J.J.H., de Groot, W.J.M., 2008, Een inventariserend onderzoek naar de ondergrondverdichting van zandgronden en lichte zavel, Alterra-rapport 1450.
- <sup>14</sup> Van den Akker, J.J.H., de Vries, F., Vermeulen, G.D., Hack-ten Broeke, M.J.D., Schouten, T., 2012. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra-Rapport 2409.
- <sup>15</sup> Beuving, J., 1984. Vocht- en doorlatendheidskarakteristieken, dichtheid en samenstelling van bodemprofielen in zand, zavel, klei en veengronden. ICW Wageningen, Rapport 10.

- <sup>16</sup> Paauw, J.G.M., van Balen, D., de Haan, J.J., de Haas, M.J.G., van der Draai, H., Bussink, D.W., 2011. Effecten bodem en structuurverbeteraars – onderzoek op klei, zand en dalgrond 2011. WUR, PPO 481.
- <sup>17</sup> Edwards, C.A., Shipitalo, M.J. 1998. Consequences of earthworms in agricultural soils: aggregation and porosity. In: Edwards, C.A., Earthworm Ecology. ST. Lucie Press, Boca Raton, p. 147-161.
- <sup>18</sup> van Eckeren, N., Bokhorst, J., Deru, J., de Wit, J., 2014. Regenwormen op het melkveebedrijf – Handreiking voor herkennen, benutten en managen, Louis Bolk Instituut, 2014-004-LdB.
- <sup>19</sup> Van Essen, E., Sloot, P., Lamberink, K., Pleijter, M., van Bakel, J., van der Schoot, J.R., Brolsma, K., Reijneveld, A., 2016. Kennisdocument verkenning bodemtrends en effecten op water in Flevoland. Aequator Groen & Ruimte.
- <sup>20</sup> Van Balen, D., Topper, C.G., van Geel, W.C.A., de Haan, J.J., de Haas, M.J.G., Bussink, D.W., 2015. Effecten bodem- en structuurverbeteraars – Onderzoek op kleigrond 2010-2014, Eindrapportage voor de provincie Flevoland, WUR, PPO 659.
- <sup>21</sup> De Boer, C.N., van Essen, E., Geenen, B.E.H., Hogervorst, F.A.N., Landbouwkundige effecten waterberging – Provincie Drenthe. DLV Adviesgroep.
- <sup>22</sup> Massop, H.TH.L., C. Kwakernaak en P.J.T. van Bakel, 2012. Fysieke onderlegger voor het Deltaprogramma. Alterra-rapport 2287.

# Bijlage C Tussenproducten

## C.1 Inleiding

Het hoogheemraadschap heeft ter voorbereiding op het voorliggende onderzoek Deltares en Nelen & Schuurmans gevraagd om een methodiek uit te werken waarmee de wateroverlast in kaart wordt gebracht (Ref. 1), om kwetsbare locaties en (kosten)effectieve maatregelen te definiëren.

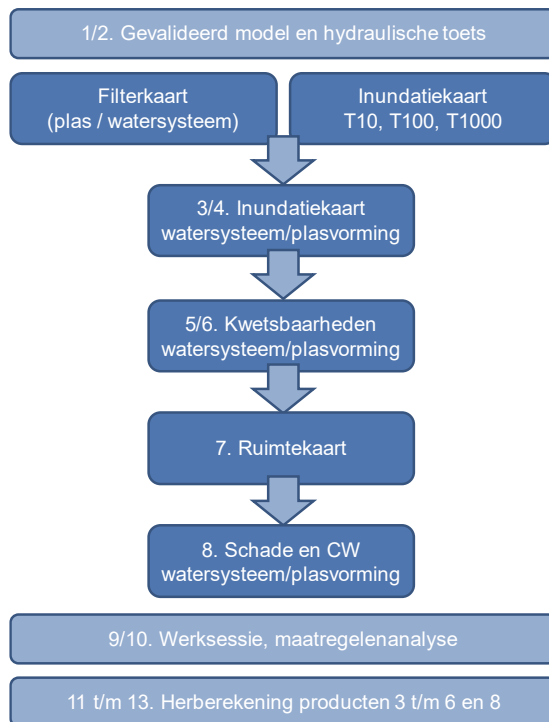
In het voorliggende project is de methodiek door het hoogheemraadschap, Deltares en Nelen & Schuurmans uitgedachte methodiek beproefd voor vier pilotgebieden en op de volgende onderdelen verfijnd (onderdeel 3 van de 'Gebiedsbrede analyse wateroverlast', Figuur 1, par. 1.3):

- afleiden van statistiek en inundatiekaarten voor een T10, T100 en T1000 situatie;
- inzicht in de herkomst van water door onderscheid te maken in inundaties als gevolg van plasmvorming en inundaties vanuit het watersysteem;
- vervaardiging van de kwetsbaarhedenkaart;
- vervaardiging van een kaart met de contante waarde van de schade;
- vervaardiging van een ruimtekaart die inzicht geeft in de mogelijkheden voor een kosteneffectieve verdeling van het water.

De volgende paragrafen geven een toelichting op de verfijnde producten. Figuur 65 geeft een overzicht van de producten en werkwijze die is gevolgd om te komen tot een maatregelenpakket.

In stap 1 van de methodiek is een 3Di model van de huidige situatie opgesteld en gevalideerd. Met dit model is in stap 2 een hydraulische toets uitgevoerd om het watersysteem te toetsen aan de leggereisen. Met het model zijn daarna hoogwaterberekeningen uitgevoerd en inundatiekaarten opgesteld voor herhalingsstijden van 10, 100 en 1000 jaar. Hierbij is met een filterkaart onderscheid gemaakt in inundaties als gevolg van plasmvorming (buiten de directe invloedssfeer van het hoogheemraadschap) en inundaties vanuit het watersysteem (stap 3/4). Op basis van de gefilterde inundatiekaarten zijn kwetsbaarhedenkaarten afgeleid voor inundaties als gevolg van plasmvorming en inundaties vanuit het watersysteem (stap 5/6). De ruimtekaart (stap 7) geeft inzicht in de mogelijkheden voor de optimale verdeling van de hoeveelheid water bij extreme neerslag. Tevens zijn de schade en contante waarde van de schade bepaald. De resultaten zijn tijdens een werksessie besproken met gebiedskenners, waarna maatregelen zijn gedefinieerd, kosten van de maatregelen zijn geraamd, de tussenresultaten opnieuw zijn afgeleid en ook een kaart is gemaakt van de vermeden schade, ofwel de baten van de maatregelen.





Figuur 65. Overzicht van de te realiseren (tussen)producten om inzicht te krijgen in de effecten van extreme neerslag en mogelijke maatregelen te definiëren.

Als de hiervoor genoemde stappen zijn doorlopen heeft het hoogheemraadschap voor het beschouwde gebied:

- een gevalideerd 3Di model;
- inzicht in de locaties waar het watersysteem niet voldoet aan de leggereisen;
- inzicht in de geïnundeerde gebieden in extreme situaties (T =10, 100 en 1000 jaar);
- inzicht in de kwetsbaarheden met onderscheid in grondgebruik;
- inzicht in welke kwetsbaarheden het zelf kan aanpakken (watersysteem) en voor welke kwetsbaarheden samenwerkingspartners moeten worden benaderd;
- inzicht in de mogelijke maatregelen in het watersysteem en kosten daarvan;
- inzicht in de schadebedragen en de maximale investeringsruimte;
- inzicht in de kosteneffectiviteit van maatregelen.

## C.2 Afleiden statistiek en inundatiekaarten

In de methodiek zijn twaalf gebeurtenissen gedefinieerd waarmee wateroverlast kan worden geanalyseerd, opgebouwd uit twee buitypen (piekbui en blokbui), drie klassen van neerslagvolume (T10, T100 en T1000) en drie bodemtoestanden (GLG, GG en GHG). De gebeurtenissen zijn gegeven in Tabel 14.

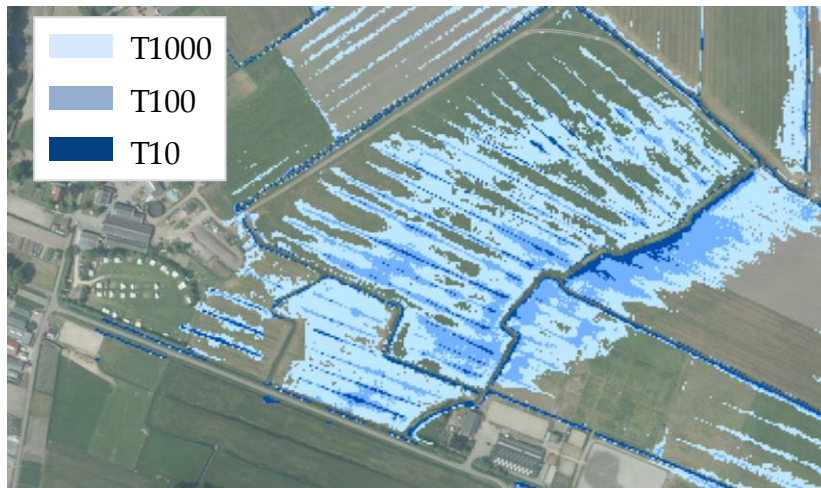
Tabel 14. Geselecteerde gebeurtenissen (Ref. 1).

Nr.	Buivolume (herhalings-tijd)	Buiduur (uur)	Bodemtoestand
1	T10	2 (Piekbui)	GG
2	T100	2 (Piekbui)	GG
3	T1000	2 (Piekbui)	GG
4	T10	2 (Piekbui)	GLG
5	T100	2 (Piekbui)	GLG
6	T1000	2 (Piekbui)	GLG
7	T10	2 (Piekbui)	GHG
8	T100	2 (Piekbui)	GHG
9	T1000	2 (Piekbui)	GHG
10	T10	48 (Blok-bui)	GG
11	T100	48 (Blok-bui)	GG
12	T1000	48 (Blok-bui)	GG
13	T10	48 (Blok-bui)	GLG
14	T100	48 (Blok-bui)	GLG
15	T1000	48 (Blok-bui)	GLG
16	T10	48 (Blok-bui)	GHG
17	T100	48 (Blok-bui)	GHG
18	T1000	48 (Blok-bui)	GHG

Aan de gebeurtenissen waren in de oorspronkelijke methodiek, behalve de herhalings-tijd van het neerslagvolume, nog geen kansen toegekend. Voor de analyse is het echter zinvol te weten met welke frequentie een ongewenste inundatie optreedt. Bovendien is de kans van de gebeurtenis nodig om de contante waarde van de schade (en daarmee uiteindelijk de investeringsruimte) te kunnen bepalen. Daarom zijn in de verfijnde methode extra stochasten gedefinieerd, uitgaande van de in Tabel 14 gedefinieerde gebeurtenissen:

- neerslagvolume in drie klassen (T10, T100 en T1000);
- buitype in twee klassen (piekbui en blok-bui);
- bodemtoestand in drie klassen (GLG, GG en GHG).

Hiermee zijn in totaal 18 gebeurtenissen ( $3 \times 2 \times 3$ ) gedefinieerd. Voor elk van de gebeurtenissen zijn frequenties afgeleid uit de kansverdelingen van de onderliggende stochasten. De gebeurtenissen zijn gesimuleerd met het 3Di-model, waarbij per gebeurtenis en per pixel een inundatiediepte en frequentie bekend is. De overschrijdingsfrequenties (of herhalings-tijden) zijn vervolgens bepaald door per gebeurtenis en dus inundatiediepte de frequenties van de gebeurtenissen te sommeren die in die pixel tot een hogere waterstand leiden. Deze analyse leidt per pixel tot een discrete relatie tussen waterstand en overschrijdingsfrequentie (of herhalings-tijd). Om te komen tot inundatiediepte-kaarten bij herhalings-tijden van 10, 100 en 1000 jaar is de waterstand logaritmisch geïnterpoleerd tussen deze discrete realisaties (zie B.4).



Figuur 66. Voorbeeld van een inundatiekaart in de Groot Limmerpolder met daarbij onderscheid naar T10, T100 en T1000 inundaties.

### C.3 Onderscheid plasvorming en inundatie vanuit watersysteem

Om tot effectieve maatregelen te komen, is inzicht in de herkomst van water noodzakelijk. Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt tussen plasvorming als gevolg van neerslag en inundatie vanuit het watersysteem (als gevolg van hoge waterstanden). Het hoogheemraadschap kan door het treffen van maatregelen met name invloed uitoefenen op inundaties vanuit het watersysteem.

Om de herkomst van water te kunnen bepalen, is voor zowel een piekbui als een blokbui onderzocht of inundaties vanuit plasvorming op het maaiveld of vanuit de watergang zijn ontstaan. In het kort zijn daartoe de volgende analyses uitgevoerd:

- Allereerst is bepaald of inundaties een directe verbinding hebben met de watergang. In dat geval is (bij beperkte waterstandsverschillen tot 5 cm) de inundatie geclassificeerd als inundatie vanuit het watersysteem.
- Als er te grote waterstandsverschillen zijn geconstateerd in een directe verbinding tussen de 1D watergangen en de 2D rekencellen ( $> 10$  cm), is de inundatie als mogelijke modelfout geclassificeerd.
- Als er geen verbinding is geconstateerd tussen de 1D watergang en 2D rekencellen, is de inundatie als plasvorming geclassificeerd.

In Figuur 67 is een detailvoorbeeld gegeven van de Groot Limmerpolder. In dit voorbeeld zijn in het groen de cellen gegeven die representatief zijn voor inundaties vanuit het watersysteem en in het rood de cellen die representatief zijn voor inundaties als gevolg van plasvorming op het maaiveld.



Figuur 67. Detailuitsnede van de filterkaart. In het groen de cellen die representatief zijn voor inundatie vanuit het watersysteem (gelegen aan een watergang) en in het rood de cellen die representatief zijn voor inundatie als gevolg van plasvorming op het maaiveld.

## C.4 Kwetsbaarhedenkaart

Op basis van de inundatiekaarten zijn kwetsbaarhedenkaarten vervaardigd, waarin de kwetsbare objecten/locaties zijn geïdentificeerd en tevens een inschatting is gegeven van de mate van kwetsbaarheid (variërend van mogelijk kwetsbaar tot zeer kwetsbaar). Het hoogheemraadschap heeft onderstaande klimaatambitie uitgesproken:

- geen ondergelopen gebouwen en woningen;
- hoofdwegen blijven begaanbaar;
- vitale infrastructuur blijft functioneren;
- landbouwpercelen met kapitaalintensieve gewassen geen noemenswaardige schade.

De kwetsbaarhedenkaart is op basis van deze vier onderdelen opgezet, waarbij de uitgangspunten zijn gehanteerd zoals die in Tabel 15 zijn opgenomen.

Tabel 15. Overzicht van de classificering t.b.v. kwetsbaarhedenkaart.

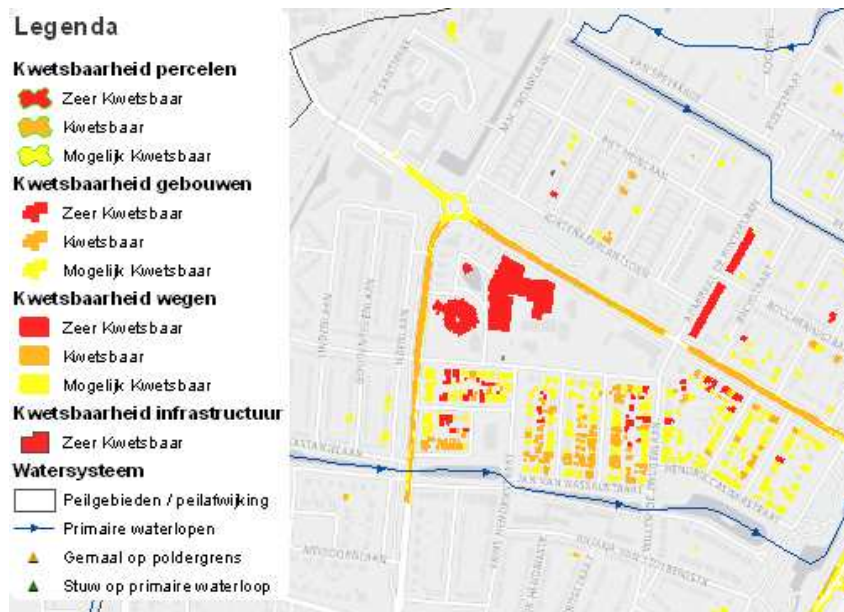
Onderdeel klimaatambitie	Criterium	Toepassing	T10	T100	T1000
Gebouwen en woningen	15 cm tegen de gevel	Alle gebouwen	ZK	K	MK
Landbouwpercelen kapitaalintensief	20% inundatie	Bollen, fruitteelt, kassenbouw	ZK	K	MK
Landbouwpercelen overig	20% inundatie	Akkerbouw	K	K	
		Grasland	MK		
Begaanbaarheid wegen	15 cm op de weg	A-wegen	ZK	ZK	ZK
		N-wegen	ZK	ZK	K
		Wijkontsluitingswegen	K	K	MK
Vitale infrastructuur	15 cm tegen vitale functie	Alle vitale functies	ZK	ZK	ZK

MK Mogelijk kwetsbaar

K Kwetsbaar

ZK Zeer kwetsbaar

In Figuur 68 is een voorbeeld gegeven van kwetsbaarheden in Castricum als gevolg van inundaties vanuit het watersysteem.



Figuur 68. Detailvoorbeeld van kwetsbaarheden in Castrium als gevolg van inundatie vanuit het watersysteem.

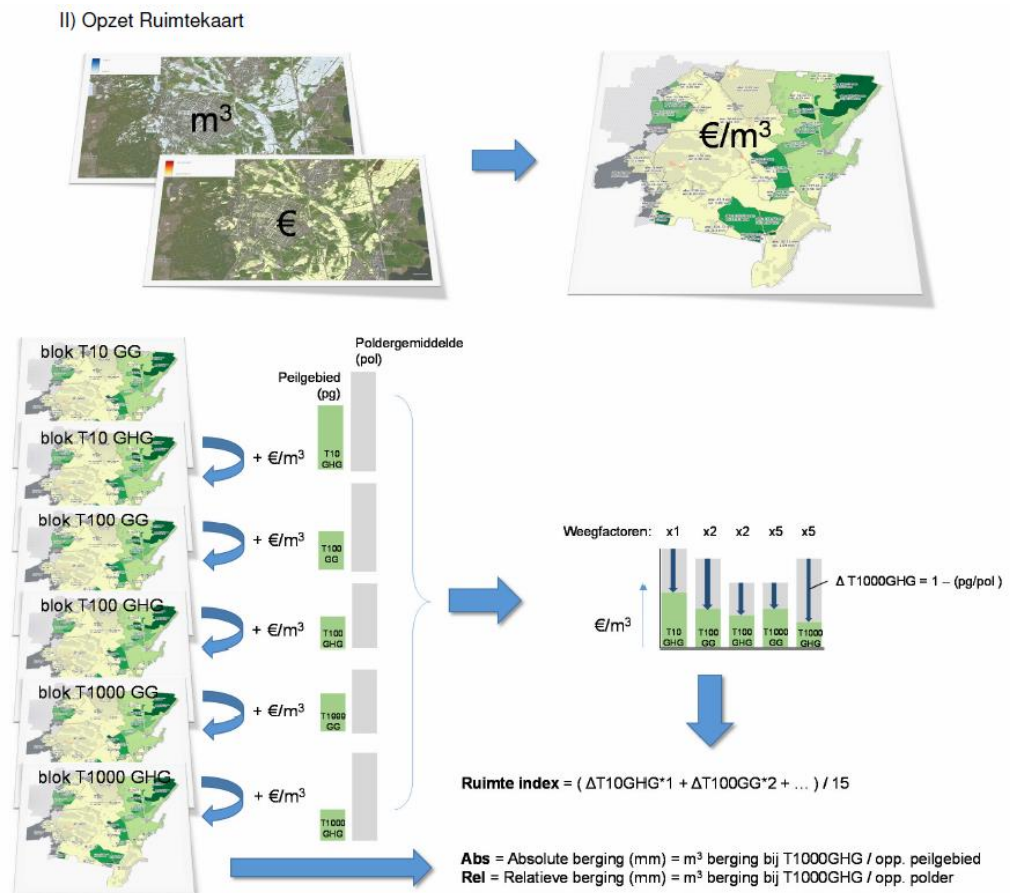
## C.5 Ruimtekaart

Per polder of deelgebied is een ruimtekaart vervaardigd die inzicht geeft in de verdeling van schade per  $m^3$ . Op basis van schadeberekeningen is onderzocht of de schade enigszins gelijk is verdeeld of dat er ruimte is voor een betere verdeling van water in geval van extreme neerslag. Hiertoe is stapsgewijs onderzocht in welke mate de kosten toenemen, bij extra  $m^3$ 's berging (ten opzichte van het poldergemiddelde). Door middel van weegfactoren tellen de extremere scenario's zwaarder mee in deze analyse (Figuur 69).

Op de kaart is de absolute en relatieve berging weergegeven. De absolute berging geeft een indicatie van de hoeveelheid berging in een peilgebied. Deze waarde kan worden gebruikt om de peilgebieden te vergelijken (welk gebied houdt zijn eigen broek op en welke niet).

De relatieve berging geeft een indicatie van hoeveel van de totale neerslag bij de blokbui GHG T1000 GHG wordt geborgen op het maaiveld in een peilgebied ten opzichte van het hele model. De neerslagsom van deze bui is ongeveer 135mm, als er bij een peilgebied 15mm staat betekent dit dat 15mm van de 135mm die op het hele gebied gevallen is geborgen wordt in het betreffende peilgebied. Deze waarde geeft aan of een peilgebied eventueel kan worden ingezet om een knelpunt in een ander gebied te verminderen door de waterverdeling te optimaliseren.





Figuur 69. Schematische weergave van de totstandkoming van de ruimtekaart.

## C.6 Bepaling netto contante waarde van de schade en batenkaart

Om tot kosteneffectieve maatregelen te komen, dient de schade te worden bepaald en contant te worden gemaakt over een bepaalde periode. Hiertoe is op basis van de (door Lizard) gegenereerde schadekaarten en de kansen van de gebeurtenissen (Tabel 18) een jaarlijkse verwachtingswaarde van de schade berekend.

Deze jaarlijkse schade is vervolgens met de discontovoet verdisconteerd over een periode van 50 jaar, om de contante waarde te bepalen (ofwel de totale kosten van de schade over 50 jaar, omgerekend naar de kosten van vandaag). Door de schadevermindering en kosten van een systeemmaatregel hier ook nog in te verwerken kan de netto contante waarde worden berekend van systeemmaatregelen.

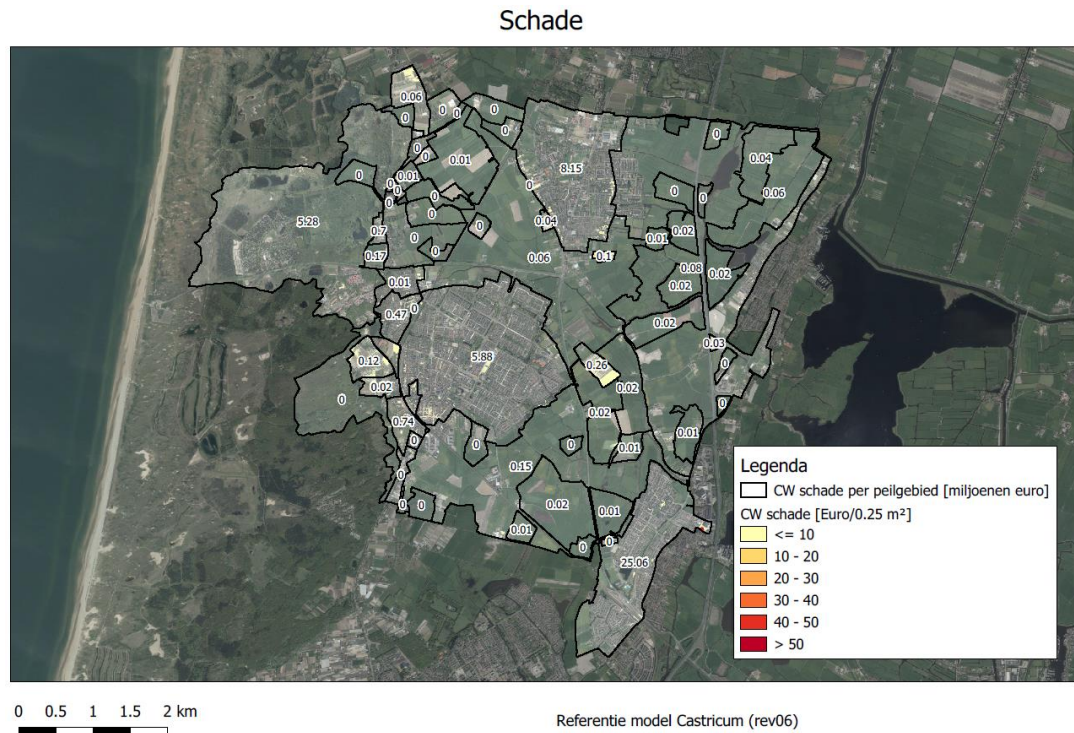
De volgende stappen zijn doorlopen ter bepaling van de netto contante waarde:

- De 3Di berekeningen resulteren in een schadekaart per gesimuleerde gebeurtenis (18 schadekaarten). Per gebeurtenis en dus ook per kaart is de frequentie van voorkomen bekend. De jaarlijks verwachte schade is bepaald door de schade voor alle pixels in de kaarten te vermenigvuldigen met de frequenties van de betreffende gebeurtenissen en het resultaat vervolgens over alle kaarten per pixel te sommeren.
- De schades worden gefilterd op watersysteem en plasvorming op basis van een shapefile met de classificatie van de inundatie-oorzaak.
- Deze gefilterde jaarlijkse schades worden verdisconteerd naar de contante waarde CW van de schade. Hiervoor is uitgegaan van een ontwerpduur van 50 jaar, een

discontovoet (DV) van 4% (n), en de volgende formule waarmee de jaarlijks verwachte schade is vermenigvuldigd:

$$\frac{1 - (1 - DV)^n}{DV}$$

- Als laatste is de contante waarde van de schade per peilgebied en polder gesommeerd. De ligging van de peilgebieden en de bijbehorende polders zijn bepaald op basis van de door het hoogheemraadschap aangeleverde peilgebieden shapefile, welke gelijk is aan de shapefile die is toegepast bij het opstellen van het 3Di-model. Figuur 70 geeft een voorbeeld van het resultaat.



Figuur 70. Voorbeeld van de contante waarde van de schade voor de Groot Limmerpolder.

## C.7 Vuistregel voor investeringsruimte

De effectiviteit van de maatregelen is uitgedrukt in de volgende kosten-batenverhouding:

$$KB_{ratio} = \frac{K}{Sv - Sn} \text{ met } Sn = a \times Sv \text{ geeft } KB_{ratio} = \frac{K}{Sv(1 - a)}$$

Waarin:

- K = contante waarde van de kosten van de maatregelen
- Sv = contante waarde van de schade voor de maatregelen
- Sn = contante waarde van de schade na de maatregelen
- a = Sn/Sv

Voor het bepalen van de kosten-batenverhouding, is de contante waarde van de investeringskosten en de beheer- en onderhoudskosten bepaald. Bij het eerste programma wateropgave beoordeelde het hoogheemraadschap de kosteneffectiviteit op basis van de  $KB_{ratio}$  als volgt:

- 0-5 Kosteneffectief
- 5-10 Minder kosteneffectief
- >10 Niet kosteneffectief

In het eerste programma wateropgave werd vervolgens besloten dat in alle gebieden gemiddeld tot een kostenbatenverhouding van 1,5 maatregelen vanuit het hoogheemraadschap konden worden gefinancierd. Het eerste programma wateropgave was echter gericht op het behalen van de norm zoals die in het NBW en later de provinciale verordening werd vastgelegd.

## C.8 Kosten maatregelen Groot Limmerpolder

De kosten van de maatregelen zijn bepaald om te onderzoeken of de maatregelen kosteneffectief zouden worden uitgevoerd. In Tabel 16 zijn de eenheidsprijzen gegeven die door het hoogheemraadschap zijn gehanteerd. Deze eenheidsprijzen zijn gebruikt voor een indicatie van de kosten van de maatregelen.

Tabel 16. Eenheidsprijzen maatregelen Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (oktober 2018).

Omschrijving	Eenheid	Stichtingskosten
Waterloop verbreden (klei-, zandgronden agrarische productiegrond)	km	€ 144 000,-
Grondverwerving (gemiddelde prijs)	€ 8,-	m <sup>2</sup>
grond ontgraven / vervoer en afzet/verwerking	€ 14,-	m <sup>3</sup>
diepte ontgraving	2	m <sup>1</sup>
aangenomen gemiddelde verbreding per kant	2	m <sup>1</sup>
Duiker vervangen voor grotere diameter (eenvoudig / onverharde dam)	st.	€ 15 000,-
Duiker vervangen voor grotere diameter (moeilijk / onder weg / grotere afmeting)	st.	€ 52 500,-
Automatisering bestaande stuw	st.	€ 16 000,-

Omschrijving	Eenheid	Stichtingskosten
Nieuwe automatische stuw	st.	€ 40 000,-
Aanleg waterberging	ha	€ 200 000,-
Vergroting gemaalcapaciteit / aanleg nieuw gemaal	m <sup>3</sup> /min	€ 24 000,-
Automatisering bestaand kunstwerk (inlaat / duiker als verdeelwerk in gebiedsregeling)	st.	€ 25 000,-
Investeringskosten voor het hebben van noodpompen	ha	€ 3,35
Beheerkosten (jaarlijks terugkerende kosten)	Eenheid	Jaarlijkse kosten
Nieuwe waterlopen in beheer	km	€ 2 250
Nieuwe stuwen	per stuw	€ 1 500
Waterberging	ha	€ 2 500
Gemaalcapaciteit	m <sup>3</sup> /min	€ 500
Nieuwe duikers	per duiker	€ 100
Inzet en onderhoudskosten noodbemaling	ha	€ 3,75

In Tabel 17 is een overzicht gegeven van de maatregelen die voor de Groot Limmerpolder zijn gedefinieerd en doorgerekend, inclusief een grove schatting van totale kosten op basis van de door het hoogheemraadschap aangeleverde kentallen (Tabel 16). De maatregelen zijn onderverdeeld in hydraulische maatregelen die worden getroffen om hydraulische knelpunten op te lossen en klimaatmaatregelen waarmee het water in extreme situaties beter over het systeem wordt verdeeld.

De totale investeringskosten van de maatregelen zijn op basis van de gehanteerde eenheidsprijzen geraamd op ca. € 494 100,-. De jaarlijkse beheer en onderhoudskosten van de inzet van noodbemaling zijn op basis van gehanteerde eenheidsprijzen voor de GLP geraamd op € 11 194,- (excl. BTW).

Deze kosten zijn vervolgens contant gemaakt volgens de formule:

$$PV = An \times \frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t}$$

Waarin:

PV = contante waarde (Present Value)

An = jaarlijkse kosten

r = rente

t = termijn (in jaren)

Voor de investeringskosten is uitgegaan van een uitvoeringsperiode van 15 jaar en voor de levensduur van de kunstwerken is uitgegaan van 50 jaar (voor deze periode is (indien relevant) rekening gehouden met beheer en onderhoud. In het voorbeeld van de Groot Limmerpolder betreft dit de onderhoudskosten voor het in stand houden van de noodbemaling. De contante waarde van deze maatregelen bedraagt € 606 706,-.

Tabel 17. Overzicht en kenmerken van de maatregelen.

Type	ID	Omschrijving	Ingreep	Geschatte kosten
Hydraulische maatregelen (watersysteem)	A	Duiker vervangen door een open watergang.	Graven open watergang over een lengte van 150 m.	€ 21 600,-
	B	Verruimen van de twee duikers onder het spoor (complex)	Plaatsen grotere duikers 1: 17 m lang (1.2 vierkant) 2: 10.6 m lang (1.3 vierkant)	€ 105 000,-
	C	Verruimen van 3 duikers op het krappe tracé (eenvoudig)	Plaatsen drie grotere duikers: 1: 8 m lang, 1.3 m vierkant 2: 9.5 m lang, 1.3 m vierkant 3: 5 m lang, 1.3 m vierkant	€ 45 000,-
	C	Verruimen van 1 duiker op het krappe tracé (complex)	Plaatsen één grotere duiker: 1.5 m lang, 800 mm rond	€ 52 500,-
	C	Verruimen van de watergangen op het krappe tracé	Vergraven watergangen over een lengte van 1250 m.	€ 180 000,-
Klimaat maatregelen (watersysteem)	1	Afvoer van Castricum stedelijk naar GLP landelijk	Aangepaste sturing	€ 16 000,-
	2	Automatisering stuw Schulpvaart en koppeling GLP landelijk met Castricum landelijk	Aangepaste sturing	€ 16 000,-
	3	Afvoer van Castricum stedelijk naar Castricum landelijk	Aangepaste sturing	€ 16 000,-
	4	Afvoer Uitgeest (De Zien) naar Castricum landelijk of naar 4300-2 (peilgebied LNH)	Aangepaste sturing	€ 16 000,-
	5	Koppeling GLP landelijk naar Castricum landelijk	Aangepaste sturing	€ 16 000,-
	6	Plaatsen extra capaciteit (let op, zijn jaarlijkse onderhoudskosten mee gemoeid)	Inzet noodbemaling	€ 10 000,-
<b>Totaal investeringskosten</b>				<b>€ 494 100,-</b>
<b>Totaal beheer en onderhoud per jaar</b> <i>Inzet noodbemaling, jaarlijkse kosten gedurende 50 jaar</i>				<b>€ 11 194,-</b>
<b>Contante waarde</b> <i>Rekening houdend met een periode van 15 jaar voor de investeringskosten en 50 jaar voor B&amp;O</i>				<b>€ 606 706,-</b>



# Bijlage D Rekenmethodiek

## D.1 Inleiding

Voor het project Gebiedsbrede analyse Wateroverlast is een methodiek opgezet om de wateroverlast te analyseren en om locaties met hoogwaardig grondgebruik die kwetsbaar zijn voor inundaties te identificeren (Ref. 1). Het hoogheemraadschap wil voor deze kwetsbare locaties in overleg met de omgeving om te bezien hoe wateroverlast kan worden voorkomen door maatregelen van het hoogheemraadschap, maar ook door maatregelen van grondeigenaren en andere overheden. Uitgangspunt daarbij is dat de maatregelen in verhouding staan tot de reductie van inundatieschade die kan worden bereikt.

In de 'Brede methodiek wateroverlast' zijn twaalf gebeurtenissen gedefinieerd waarmee de wateroverlast kan worden geanalyseerd, opgebouwd uit twee buitypen (piekbui en blokbui), drie klassen van neerslagvolume (T10, T100 en T1000) en drie bodemtoestanden (GLG, GG en GHG) (Tabel 14). In totaal zouden hiermee 18 combinaties of gebeurtenissen kunnen worden gemaakt. In de methodiek zijn 12 van deze combinaties geselecteerd op basis van *"maatgevendheid van de extreme neerslag én de representativiteit voor alle mogelijke extreme events qua vorm, duur, buivolume en initiële conditie"* [Ref. 1, pag. 32].

Aan de gebeurtenissen zijn, behalve de kans op het neerslagvolume, geen kansen toegekend. Dit maakt het analyseren lastig, want als er een ongewenste inundatie optreedt, wordt al snel de vraag gesteld hoe vaak een dergelijke inundatie voorkomt. Bovendien is de kans van de gebeurtenis nodig om de contante waarde van de schade te bepalen die nodig is om de investeringsruimte te bepalen. Deze aspecten zijn zonder toekenning van kansen niet goed te bepalen. Een T100 bui met een GLG bodemtoestand komt bijvoorbeeld minder vaak voor dan een T100 bui met een GG bodemtoestand en heeft misschien dezelfde inundaties tot gevolg als een T10 bui met een GG bodemtoestand.

Deze bijlage beschrijft de afleiding van de kansen van de gebeurtenissen en de wijze waarop hiermee statistiek van inundaties en schade kan worden bepaald met een stochastische aanpak. Voor het bepalen van de kwetsbaarheden is het daarbij voldoende om te kunnen beschikken over inundatiekaarten bij herhalingstijden van 10, 100 en 1000 jaar. Voor het bepalen van de contante waarde van de schade is het voldoende om voor een eerste inschatting te beschikken over schadekaarten bij diezelfde herhalingstijden.

Voor lezers die niet bekend zijn met de stochastische aanpak verwijzen we naar Bijlage D.4 'Toelichting stochastenmethode'.

## D.2 Stochastische aanpak

In de voorgestelde methode zijn de volgende stochasten gedefinieerd, uitgaande van de in Tabel 14 gedefinieerde gebeurtenissen:

- Neerslagvolume in drie klassen (T10, T100 en T1000);
- Buietype in twee klassen (piekbui en blokbui);
- Bodemtoestand in drie klassen (GLG, GG en GHG).

Hiermee zijn er in totaal 18 gebeurtenissen (=3x2x3) onderscheiden. Voor elk van de gebeurtenissen is hieronder beschreven hoe we de frequenties afleiden. De gebeurtenissen

worden gesimuleerd met het 3Di model. Per gebeurtenis en per pixel zijn een inundatiediepte en inundatieschade en bijbehorende frequentie bekend. Op basis van deze resultaten zijn de overschrijdingsfrequenties (of herhalingstijden) van de inundatiediepte en inundatieschade bepaald.

### D.2.1 Uitwerking van de stochast neerslagvolume

Het neerslagvolume is in drie klassen ingedeeld, te weten T10, T100 en T1000. Voor elke klasse is in het project 'Brede methodiek wateroverlast' een neerslagvolume vastgesteld op basis van de meteostatistiek van 2015 voor het huidige klimaat en voor neerslagregio Gemiddeld [Ref. 3]. Op basis van deze meteostatistiek is de jaarlijkse frequentie van de klasse bepaald (Tabel 18). In de tabel is onderscheid gemaakt tussen zomer(halfjaar) en winter(halfjaar), omdat de GHG/GG/GLG andere kansen hebben in zomer en winter én de kans op neerslag in de zomer en winter sterk verschilt. Dit heeft invloed op de uiteindelijke kans op inundaties.

In principe zou ook onderscheid kunnen worden gemaakt in de onderhoudstoestand van de watergangen in de zomer en winter. Dat is niet gebeurd, omdat het aantal te simuleren gebeurtenissen hiermee zou verdubbelen tot 36.

Let wel dat in de 3Di modellen standaard wordt gerekend met een Manning ruwheid in de waterlopen van  $0.0333 \text{ s/m}^{1/3}$ , ofwel met een Strickler ruwheid van  $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Een dergelijke ruwheidswaarde is representatief voor schone tot zeer schone watergangen [Ref. 4]. Een dergelijke begroeiingstoestand komt overeen met waterlopen in de winter na maaionderhoud. Voor de zomersituatie zal de begroeiing dichter zijn en zal de hydraulische ruwheid ook groter zijn.

Tabel 18. Frequenties van neerslagvolume klassen (/jaar) voor neerslagregio Gemiddeld.

Herhalingstijd	Klasse volume	Duur 2 uur		Duur 2 dagen		
		Zomer	Winter	Klasse volume	Zomer	Winter
<b>10 jaar</b>	35 - 45 mm	0.070	0.000	70-85 mm	0.071	0.015
<b>100 jaar</b>	45 - 80 mm	0.033	0.000	85-135 mm	0.030	0.005
<b>1000 jaar</b>	> 80 mm	0.001	0.000	>135 mm	0.001	0.000

Uit de tabel is op te maken dat de frequentie van de piekbui (2 uur) in de zomer veel groter is dan in de winter. De tabel toont bovendien dat ook de frequentie van het volume van de blokbui (2 dagen) in de zomer altijd hoger is dan in de winter. Een bui met een dergelijke volume komt in de zomer ongeveer 5 keer vaker dan in de winter.

We gaan in de uitwerking uit van onafhankelijkheid van de piekbui en de blokbui. Deze aanname is gerechtvaardigd, omdat het om sterk verschillende buitypen gaat die niet tegelijkertijd voorkomen. De piekbui is bij wijze van spreken representatief voor neerslaggebeurtenissen van tot 12 à 24 uur en de blokbui is representatief voor neerslaggebeurtenissen langer dan 24 uur.

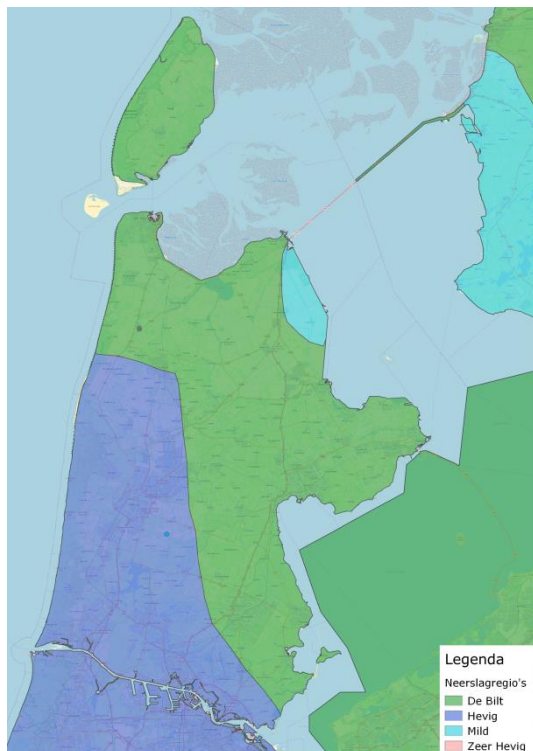
Een aanzienlijk deel van het beheergebied van het hoogheemraadschap ligt in neerslagregio Hevig (Figuur 71). Daarnaast is er een klein deel dat in de neerslagregio Mild ligt. Voor

dit laatste gebied gaan we uit van een bovengrensbenadering en kiezen we neerslagregio Gemiddeld.

Tabel 19 presenteert de frequenties van de neerslagvolumeklassen voor de neerslagregio Hevig [Ref. 3]. De frequenties van de piekbui (duur 2 uur) veranderen niet door wijziging van de neerslagregio (zie ook het achtergrondrapport bij meteobase.nl en [Ref. 3]). De frequenties van de volumes nemen wel toe voor de blokbui (duur 48 uur). De kans op een T1000 wordt daarmee ongeveer 1.5 maal zo groot.

Tabel 19. Frequenties van neerslagvolumeklassen (/jaar) voor neerslagregio Hevig.

Herhalingstijd	Klasse volume	Duur 2 uur		Duur 2 dagen		
		Zomer	Winter	Klasse volume	Zomer	Winter
<b>10 jaar</b>	35 - 45 mm	0.070	0.000	70-85 mm	0.107	0.024
<b>100 jaar</b>	45 - 80 mm	0.033	0.000	85-135 mm	0.049	0.008
<b>1000 jaar</b>	> 80 mm	0.001	0.000	>135 mm	0.002	0.000



Figuur 71. Neerslagregio's in het beheergebied.

## D.2.2 Uitwerking van de stochast bodemtoestand

De stochast bodemtoestand bestaat uit drie klassen:

- GLG = de gemiddeld laagste grondwaterstand;
- GG = de gemiddelde grondwaterstand;
- GHG = de gemiddeld hoogste grondwaterstand.

De gemiddeld laagste grondwaterstand wordt vastgesteld op basis van metingen van grondwaterstanden op de 14<sup>e</sup> en 28<sup>e</sup> van de maand. Per jaar worden de drie laagste grondwaterstanden geselecteerd en gemiddeld over minimaal 8 jaar. Het resultaat hiervan is de

GLG. De GHG wordt op een vergelijkbare manier vastgesteld, alleen worden niet de drie laagste, maar de drie hoogste grondwaterstanden geselecteerd. De gemiddelde grondwaterstand is de gemiddelde grondwaterstand over alle metingen in de beschouwde periode. Tabel 20 presenteert de kans op een GLG, GG en GHG in de zomer en de winter.

Tabel 20. Kans op een bodemtoestand (-).

Bodemtoestand	Zomer	Winter
<b>GLG</b>	0.25	0.00
<b>GG</b>	0.75	0.75
<b>GHG</b>	0.00	0.25
<b>Totaal</b>	1.00	1.00

De GLG klasse heeft 3 realisaties per jaar. De GLG komt niet voor in de winter (kans van 0). In de zomer zijn er 12 grondwaterstandmetingen en heeft de GLG een kans van 3/12, ofwel 0.25. De GHG komt niet voor in de zomer (kans van 0) en heeft in de winter een kans van 3/12, ofwel 0.25. De resterende kans kennen we toe aan de gemiddelde toestand. Hierbij merken we op dat er wel degelijk een kans is dat een GHG in de zomer voorkomt, zoals na een zeer nat voorjaar of sowieso een natte zomer. We baseren de afleiding van de kansen hier echter op de wijze waarop de metingen zijn vastgesteld. Hierdoor komt de kans op de GHG in de zomer op 0. Daarnaast merken we op dat we ons in de stochastenmethode doorgaans niet baseren op de GLG, GG en GHG, maar op de kansverdeling van de bodemtoestand gebaseerd op de grondwaterstandsmetingen.

### D.3 Frequenties van de gebeurtenissen

Tabel 21 geeft de frequenties van de 18 mogelijke gebeurtenissen voor neerslagregio Gemiddeld en Hevig gesorteerd naar frequentie Gemiddeld. De gebeurtenissen met een hoge frequentie staan boven in de tabel en komen relatief vaak voor. Deze gebeurtenissen hebben een grote bijdrage aan de kans op wateroverlast.

Tabel 21. Frequenties van de gebeurtenissen voor neerslagregio Gemiddeld en Hevig gesorteerd op frequentie voor neerslagregio Gemiddeld.

Ranking	Volume	Duur (uur)	Bodemtoestand	Gemiddeld (Frequentie /jaar)	Hevig (Frequentie /jaar)
1	T10	48	GG	0.0645738	0.0983098
2	T10	2	GG	0.0528658	0.0528658
3	T100	48	GG	0.0261543	0.0430073
4	T100	2	GG	0.0249892	0.0249892
5	T10	48	GLG	0.0178397	0.0266786
6	T10	2	GLG	0.0175137	0.0175137
7	T100	2	GLG	0.0083107	0.0083107
8	T100	48	GLG	0.0075837	0.0122997
9	T10	48	GHG	0.0036849	0.0060913
10	T100	48	GHG	0.0011344	0.0020360
11	T1000	2	GG	0.0009116	0.0009116
12	T1000	48	GG	0.0007890	0.0015115
13	T1000	2	GLG	0.0003037	0.0004630
14	T1000	48	GLG	0.0002436	0.0003037
15	T10	2	GHG	0.0001083	0.0001083
16	T1000	48	GHG	0.0000194	0.0000409
17	T100	2	GHG	0.0000191	0.0000191
18	T1000	2	GHG	0.0000001	0.0000001

#### D.4 Toelichting stochastenmethode

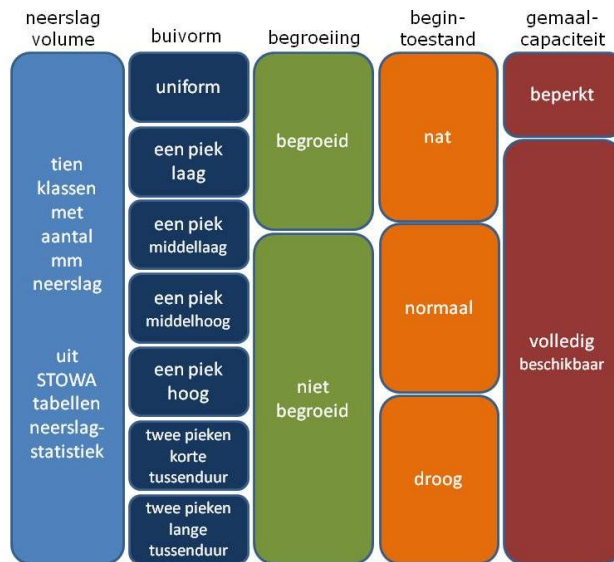
Bij gebruik van de stochastenmethode worden allereerst de variabelen bepaald die als stochast worden meegenomen. Een stochast is een "toevalsgrootheid", of anders gezegd een grootheid waarvan je niet precies weet hoe groot die is, maar wel een indruk hebt van de kans dat deze een bepaalde grootte heeft. Als bijvoorbeeld met een dobbelsteen wordt gegooid, is op voorhand niet bekend welke waarde wordt, maar is wel bekend dat de kans op een "6"  $1/6$  zal zijn. Van te voren is onbekend wanneer het gaat regenen maar de kans op een extreme bui is (op basis van de neerslagstatistiek) wel bekend.

Als de stochasten gedefinieerd zijn is per stochast de toestanden bepaald die de stochast aan kan nemen. Bij het gooien met een dobbelsteen zijn dat de uitkomsten 1, 2, 3, 4, 5, 6. Voor het volume van een regenbui kan dit variëren van 0 mm per dag tot meer dan 100 mm per dag.

Aan deze toestanden wordt vervolgens een kans gekoppeld. Voor het gooien met de dobbelsteen is de kans voor elke uitkomst even groot, namelijk  $1/6$ . Voor het neerslagvolume zijn de kansen niet even groot. De kans op een droge dag is groter dan de kans op een dag met tussen de 10 en 20 mm neerslag en die kans is weer veel groter dan de kans op meer dan 100 mm neerslag. Aan elke mogelijke uitkomst van de stochast wordt een kans gekoppeld die tot 1 optelt.

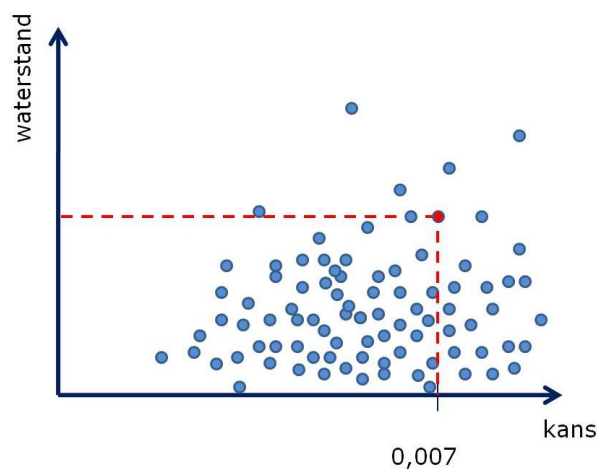


Het model waarmee we de waterstanden berekenen heeft begin- en randvoorwaarden (input) nodig. Sommige input nemen we mee als stochast: het buivolume, het buipatroon en de begintoestand van de bodem. Maar ook de gemaalcapaciteit en de begroeiingsgraad van de watergangen zouden als stochast meegenomen kunnen worden. Deze stochasten met hun mogelijke toestanden, zijn weergegeven in Figuur 72.



Figuur 72. Factoren die bij kunnen dragen aan de mate van en kans op wateroverlast.

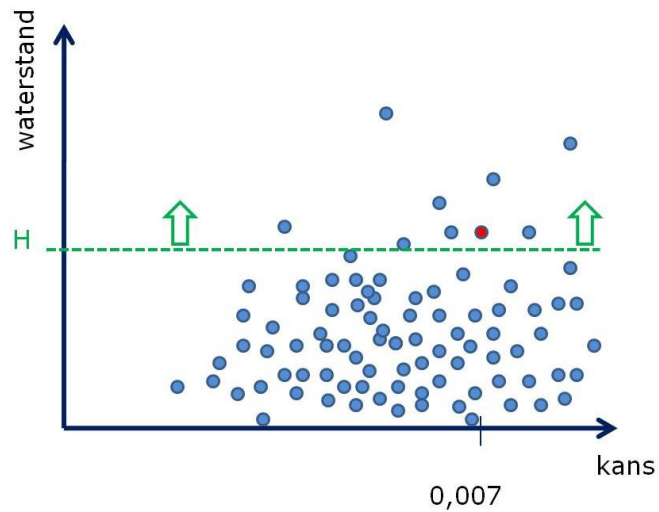
Voor elk van de stochasten is een mogelijke toestand gekozen. Als wordt verondersteld dat de stochasten onafhankelijk zijn (de beschikbare gemaalcapaciteit is bijvoorbeeld niet afhankelijk van de begroeiingsgraad van de watergangen) dan is de kans op de combinatie van toestanden gelijk aan het product van de individuele kansen. De berekende maximale waterstand met bijbehorende gecombineerde kans levert zo één puntje in de waterstands-kans grafiek. In Figuur 73 is hier een voorbeeld van gegeven. Het rode puntje geeft de berekende maximale waterstand behorende bij een toestand met de gecombineerde kans van 0.007.



Figuur 73. Voorbeeld van een waterstands-kans grafiek.

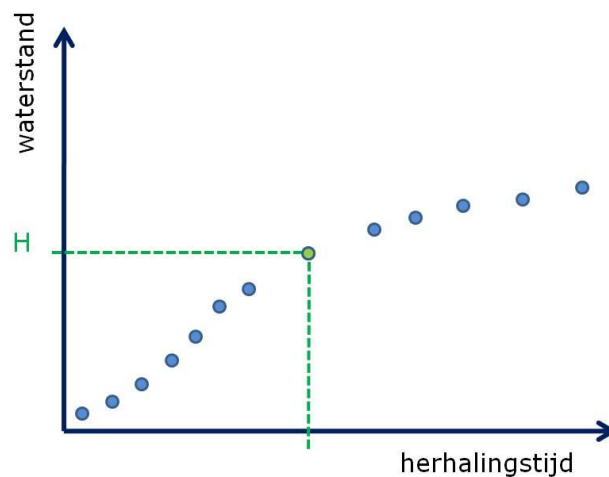
Door nu alle mogelijke combinaties van toestanden van de stochasten door te rekenen ontstaat een wolk van punten in de waterstands-kans grafiek. De som van de kansen van al

deze punten telt op tot 1 (immers alle combinaties zijn doorgerekend). Op basis van deze grafiek (Figuur 74) wordt vervolgens de overschrijdingskans bepaald.



Figuur 74. Van kans naar overschrijdingskans.

De gemiddelde herhalingstijd behorende bij de overschrijding van de betreffende waterstand is nu middels de relatie van Langbein (1949) gelijk aan  $1/(-\ln(1-\text{overschrijdingskans}))$ . Dit levert één puntje in waterstands-herhalingstijd grafiek (Figuur 75). Op deze manier kunnen voor alle maximale waterstanden de overschrijdingskans en herhalingstijd worden berekend. Vervolgens kan met de waterstanden die horen bij de overschrijdingskansen 1/50, 1/80 en 1/100 per jaar de bijbehorende inundatie worden berekend en de toetsing worden uitgevoerd.



Figuur 75. Herhalingstijd en bijbehorende maximale waterstand.

Met deze methode is expliciet gemaakt dat verschillende omstandigheden kunnen leiden tot dezelfde waterstand. Een heftige bui op een droge ondergrond kan dezelfde maximale waterstand opleveren als een minder heftige bui op een natte ondergrond. Het is niet mogelijk om aan de hand van de kans op een bepaalde combinatie van stochasten direct de

overschrijdingskans van deze waterstand te bepalen. Daarvoor zullen altijd alle mogelijke combinaties moeten worden doorgerekend. Een situatie die een kans van voorkomen heeft van 1/1000 per jaar kan best leiden tot een waterstand die een overschrijdingskans heeft van 1/100 per jaar.

# Bijlage E Aanpak scenario boezem

## E.1 Inleiding

In deze bijlage is de aanpak voor het scenario boezem uitgewerkt. Onderzocht is op welke locaties in de boezem ruimte is voor het bijplaatsen van de noodbemaling. Voor de analyse zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Indeling van het gebied in clusters van polders die de door middel van noodbemaling extra afvoer op de boezem zetten;
2. Bepalen locatie van extra belasting op de boezem;
3. Doorrekenen boezemmodel met afvoer poldergemalen en noodbemaling;
4. Beoordelen waar de extra belasting van de boezem wel en niet mogelijk is;
5. Definiëren en uitvoeren van aanvullende berekeningen met reële minder- of meer noodbemaling capaciteit;
6. Bespreken resultaten met hoogheemraadschap.

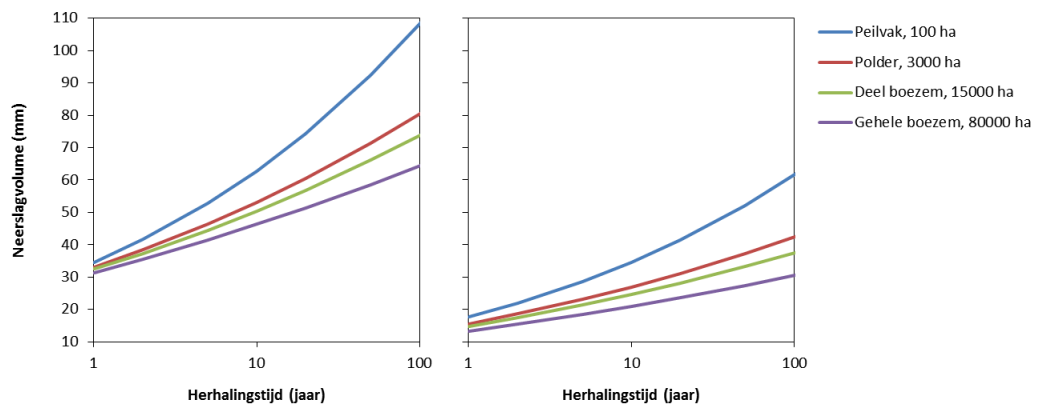
### 1. Clustering van polders

Uitgangspunt is een extra belasting van de boezem door clusterbuien. Deze buien zijn beperkt in omvang. De omvang van het gebied waarop dergelijke buien vallen is mede bepalend voor de clustering van polders:

- Wanneer wordt uitgegaan van kleinere gebieden, onderschatten we de belasting op de boezem
- Wanneer wordt uitgegaan van grotere gebieden wordt de belasting op de boezem overschat en worden feitelijk geen clusterbuien meer beschouwd, maar grotere depressies die een andere belasting op het systeem vormen. De overlast door grotere depressies is niet op te vangen met noodbemaling, omdat deze een te groot deel van de boezem belasten.

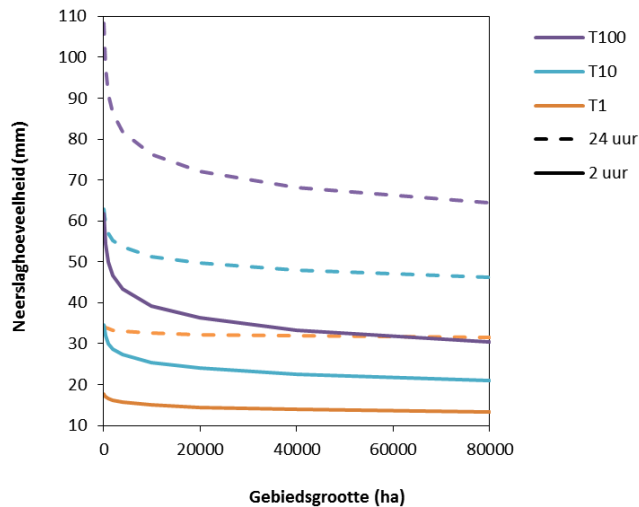
Op basis van de gebiedsreductie van de neerslag, zoals onderzocht door het KNMI (onder andere Ref. 2) is een eerste schatting gemaakt van de grootte van polderclusters. Deze gebiedsreductie geeft aan dat de kans op een extreme gemiddelde neerslaghoeveelheid over een groot gebied kleiner is dan de kans op een extreme neerslaghoeveelheid over een klein gebied. De mate van reductie hangt, naast de grootte van het gebied, af van de herhalings-tijd van de neerslag (hoe groter de herhalings-tijd, hoe groter de reductie) en de duur van de neerslag (hoe korter de duur, hoe groter de reductie).

In Figuur 76 is de relatie tussen neerslagvolume en gebiedsgrootte weergegeven voor 2 uren en 4 gebiedsgrootten. In de figuur is bijvoorbeeld te zien dat het neerslagvolume bij een duur van 2 uur (rechterzijde) en een herhalings-tijd van 100 jaar op de gehele boezem ongeveer de helft is van het neerslagvolume in een klein peilgebied van 100 ha.



Figuur 76. Herhalingstijd van de neerslag voor oplopende gebiedsgrootten, links voor een neerslagsom van 24 uur, rechts voor een neerslagsom van 2 uur.

Een andere manier om dit te presenteren is als neerslaghoeveelheid als functie van de gebiedsgrootte, zoals weergegeven in Figuur 77. In die figuur is bijvoorbeeld te zien dat de neerslaghoeveelheid bij hoge herhalingstijden sterk afneemt tot gebiedsgrootten van 20000 ha. Bij nog grotere gebiedsgrootten is de afname beperkt. De helft van de neerslagreductie bij 80000 ha wordt bereikt bij 2000 ha, 80% van de reductie wordt bereikt bij een oppervlak van 15000 ha. Het grootste deel van de reductie zit binnen 15000 ha, wat daarmee als de maximale gebiedsgrootte is beschouwd. Bij grotere gebiedsgrootten wordt niet meer gesproken van clusterbuien, maar is neerslag ten gevolge van depressies belangrijker en verandert de gebiedsreductie nog maar beperkt bij toenemende oppervlakte.



Figuur 77. Neerslaghoeveelheid als functie van de gebiedsgrootte voor 2 uur (doorgetrokken lijn) en 24 uur (onderbroken lijn) en herhalingstijden van 1, 10 en 100 jaar.

Op basis van bovenstaande beschouwing is de maximale grootte van een cluster bepaald. Daarnaast kan ook vanuit de beschikbare capaciteit aan noodbemaling worden berekend hoe groot een gebied realistisch gezien kan zijn waarbij deze capaciteit volledig ingezet kan worden. Bij een maximale noodbemalingscapaciteit van 1600 m<sup>3</sup>/min geldt het volgende:

- Als het dubbele van de poldergemaalcapaciteit aan noodbemaling wordt geïnstalleerd - wat bij een poldergemaalcapaciteit van 14 mm/dag (1,62 l/s/ha) een aanvullende

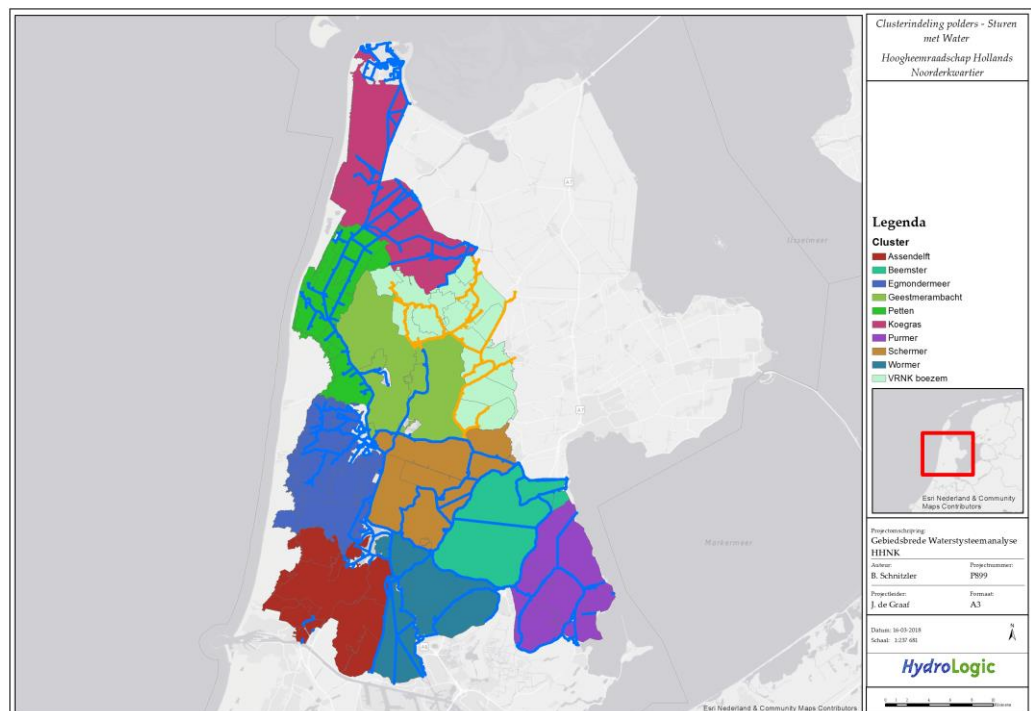


noodbemalingscapaciteit van 28 mm/dag (3,24 l/s/ha) betekent – kan een oppervlak van circa 8000 ha van noodbemaling worden voorzien.

- Als die noodbemalingscapaciteit op verschillende plekken aan de randen van polders kan worden geïnstalleerd (in de praktijk zo veel mogelijk waar de wateroverlast het grootst is) lijkt een dergelijke uitbreiding voor de waterhuishouding in de polder realistisch. Als de enige mogelijke locatie voor noodbemaling het gemaal van de polder is, is een dergelijke uitbreiding waarschijnlijk te groot, omdat zoveel water vanuit de polder de gemaallocatie waarschijnlijk niet kan bereiken.
- Als de gebiedsclusters veel kleiner worden dan 8000 ha is de inzet van de volledige noodbemalingscapaciteit waarschijnlijk te groot voor de bestaande infrastructuur in de polders. We zien dan ook als realistische minimale grootte van te clusteren gebieden een oppervlak van circa 8000 ha.

Samen met de maximale gebiedsgrootte van circa 15000 ha die volgt uit de analyse van de neerslag is daarom als uitgangspunt voor de gebiedsgrootte van de te clusteren gebieden 8000 tot 10000 ha gehanteerd.

De clusters zijn vervolgens op basis van de verwachte gevolgen op de boezem gekozen, waarbij de clusters die de boezem het zwaarst zullen belasten als eerste zijn geanalyseerd. Hierbij wordt bijvoorbeeld gedacht aan een cluster bij de Purmer en Zeevang en een cluster bij Egmondermeer en Bergermeer (waarbij dit eerste cluster mogelijk minder belastend wordt als de aanpassingen aan de boezem in de vorm van de twee gemalen en compartimenteringswerken worden doorgevoerd). De opbouw van de clustering is zodanig vormgegeven dat zoveel mogelijk inzicht wordt verkregen en de hoeveelheid door te rekenen clusters daardoor kan worden beperkt. Bijvoorbeeld: als het water uit cluster 2 (Egmondermeer) door de boezem zonder problemen kan worden verwerkt en afgevoerd in noordelijke richting, weten we dat extra afvoer uit gebieden ten noorden hiervan ook niet tot problemen op dat deel van de boezem zullen leiden. Figuur 78 toont de clusters.

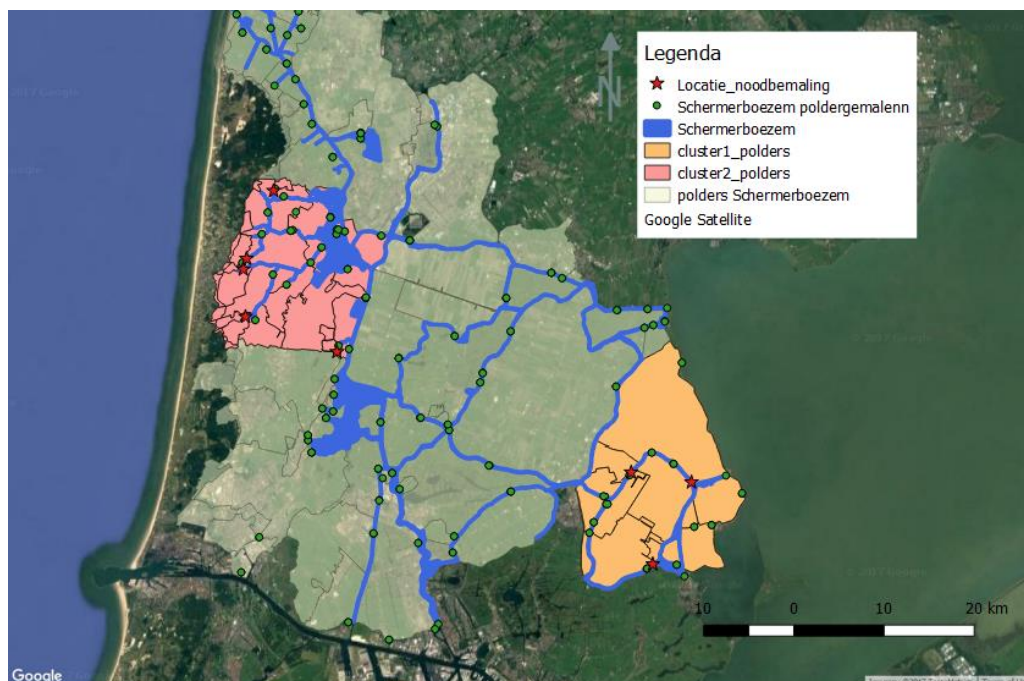


Figuur 78. Clusterindeling.

## 2. Bepalen locatie van extra belasting op de boezem

Per cluster is de boezem stationair belast met de afvoer van de poldergemalen op maximale capaciteit plus de afvoer van de noodbemalingen. Hiervoor is de totale capaciteit van de noodbemalingen verdeeld over een aantal locaties in het cluster. In overleg met het hoogheemraadschap is een keuze gemaakt voor één onderstaande opties:

1. Om mogelijke lokale knelpunten te achterhalen wordt uitgegaan van een (bijna) worst-case benadering. De totaal beschikbare noodcapaciteit wordt hiertoe verdeeld over bijvoorbeeld drie tot vijf locaties in het gebied aan de 'uiteinden' van het boezemsysteem. Het risico hiervan is dat irreële afvoeren naar de boezem worden berekend, omdat dit water vanuit de polder deze noodbemalingslocaties niet kan bereiken.
2. Aangesloten wordt bij de bestaande infrastructuur door extra capaciteit te plaatsen bij de bestaande poldergemalen. De totaal beschikbare noodcapaciteit wordt verdeeld over de poldergemalen, waarbij de capaciteit van de poldergemalen als verdeelsleutel wordt gebruikt. Het risico hiervan is dat lokale knelpunten mogelijk niet worden opgespoord. Dit is alleen relevant in die gevallen waar bovenstrooms van de knelpunten noodpompen geplaatst kunnen worden.



Figuur 79. Locaties noodpompen in cluster 1 Purmer en cluster 2 Egmondermeer volgens voorstel 1 - worst case benadering.

## 3. Doorrekenen boezemmodel met afvoer poldergemalen en noodbemaling

Voor elk cluster is het boezemmodel stationair doorgerekend met afvoer uit het cluster. Deze afvoer is de maximale afvoer van de poldergemalen en de noodpompen. Er is gerekend met een stationaire belasting omdat het hydraulisch functioneren van de boezem wordt onderzocht en berging geen rol speelt. Aangenomen wordt dat de overige polders, buiten het cluster, geen water afvoeren. Deze aanname is onderbouwd in de keuze van de clusters.

De berekeningen met inzet van noodbemalingscapaciteit zijn uitgevoerd met Sobek modellen van de Schermer en VRNK boezem, aangeleverd door het hoogheemraadschap (SB\_2017.lit en VRNK2017.lit in Sobek versie 2.15.003). Dit zijn gekoppelde RR en CF modellen. Hierin hebben we de nieuwe boezemgemalen bij Schardam en Monnikendam

opgenomen. We nemen de noodbemalingen in de modellen op door middel van lateral flow nodes met een constant debiet. Daarnaast leggen we een bui met een constante intensiteit van 60 mm/dag op aan de polders binnen het betrokken cluster, om te zorgen dat die poldergemalen maximaal afvoeren. Er is geen rekening gehouden met directe neerslag op de boezem (deze is op nul gezet), omdat inzicht is gewenst is in welke afvoer uit de polders voor welke belasting zorgt. Er is in eerste instantie niet gerekend met eventuele overlaten op andere boezems, dit kan beschouwd worden als de resultaten daar aanleiding toe geven. De boezem voert alleen af via de boezemgemalen en staat initieel op boezempeil.

#### 4. Beoordelen waar de extra belasting van de boezem wel en niet mogelijk is.

Per cluster is beoordeeld of de boezem deze extra belasting aankan of dat dit voor knelpunten zorgt door de berekende maximale waterstanden op de boezem te vergelijken met maalstoppeil.

#### 5. Definiëren en uitvoeren van aanvullende berekeningen met reële minder- of meer noodbemaling capaciteit.

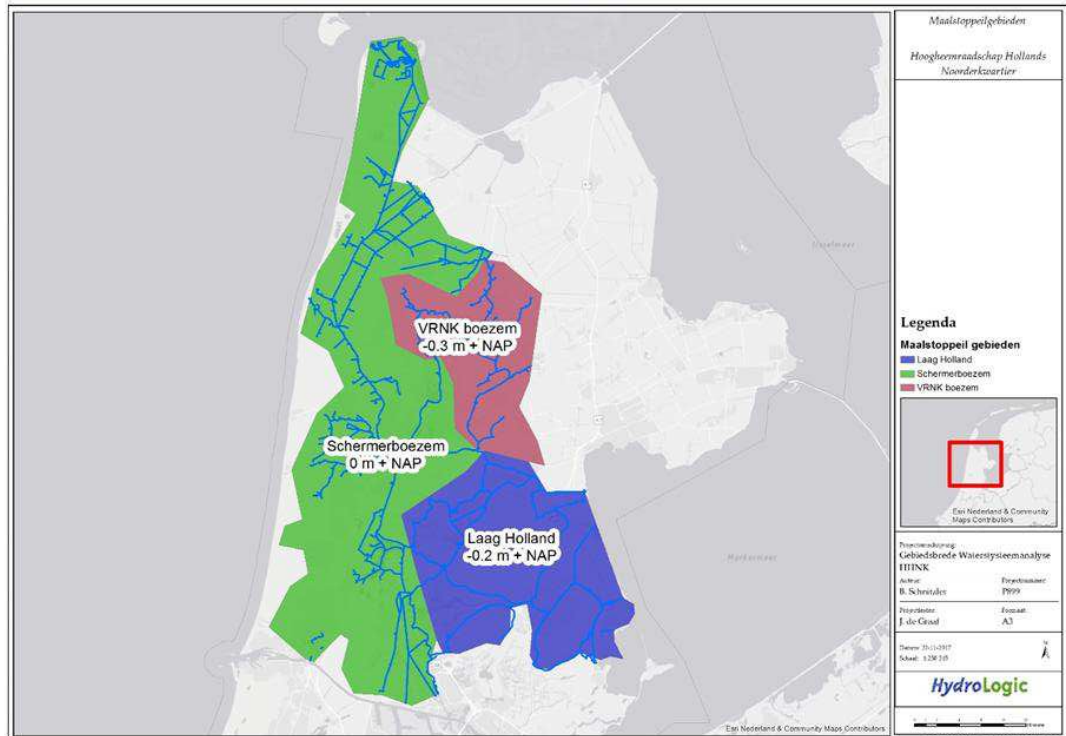
Als in stap 4 geconcludeerd is dat de boezem op een bepaalde locatie de belasting aankan, is de capaciteit van de noodpompen daar verhoogd. Als er knelpunten ontstaan is de capaciteit verlaagd.

#### 6. Bespreking met hoogheemraadschap

We leggen onze bevindingen in een werksessie voor aan specialisten van het hoogheemraadschap. Het doel van de werksessie is de specialisten te informeren over de mogelijkheden van noodbemalingen en samen een beeld te krijgen van wat reële mogelijkheden zijn.



## E.2 Kaart met maalstoppeilen



## E.3 Beschrijvingen resultaten per cluster

### Globale beeld

Figuur 80 toont de maximale waterstanden op de boezem ten opzichte van maalstoppeil (bij inzet van de beschikbare noodcapaciteit van 1600 m<sup>3</sup>/min (26,7 m<sup>3</sup>/s) per cluster). De driehoeken in de kaart zijn de locaties van de noodbemalingen. De rondjes tonen de maximale waterstand op de boezem (over alle berekeningen), waarbij:

- Rode locaties: de maximale waterstand is fors (> 0,5 m) hoger dan het maalstoppeil.
- Oranje en gele locaties: de waterstand is respectievelijk 0,2 tot 0,5 en 0 tot 0,2 m hoger dan het maalstoppeil.
- Lichtgroene en groene locaties: de maximale waterstand is respectievelijk 0 tot 0,2 m en meer dan 0,2 m onder maalstoppeil. Hier is nog extra ruimte voor noodbemalingen op de boezem.

Alle grotere knelpunten (rode locaties) worden veroorzaakt door:

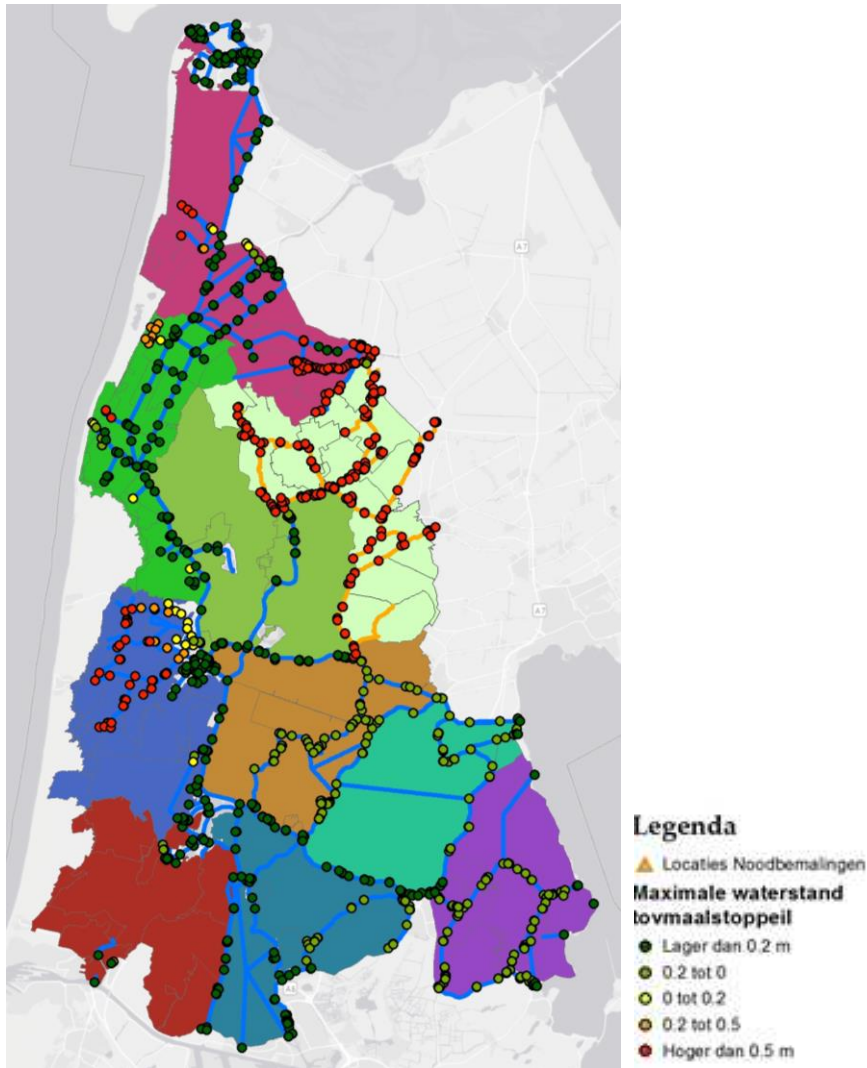
- De poldergemaalcapaciteiten en de noodbemalingscapaciteiten zijn hoger dan de boezemgemaalcapaciteit (VRNK);
- De poldergemaalcapaciteiten en de noodbemalingscapaciteiten zijn hoger dan de tussenboezemgemaalcapaciteit (oostelijk deel cluster Koegras);
- Hydraulische knelpunten.

De kleinere knelpunten (oranje en gele locaties) worden alle veroorzaakt door hydraulische knelpunten.



In de Schermerboezem is in het algemeen ruimte voor noodbemaling, behalve in de boezemtakken die richting de duinen lopen. Vooral achter Alkmaar is geen ruimte voor extra noodbemaling. Dit blijkt ook in de praktijk, ook zonder noodbemaling zijn hier problemen bij grote neerslagintensiteiten. In het gebied Laag Holland (zie voor de ligging Bijlage E.4) is er iets minder ruimte dan in de rest van deze boezem (veel lichtgroene in plaats van groene locaties). Doordat het maalstoppeil hier lager is dan in de rest van de Schermerboezem is hier veelal minder ruimte dan op andere delen van de Schermerboezem. Maar op de meeste locaties veroorzaakt de noodbemaling in Laag Holland slechts een waterstandsverhoging van 5 centimeter en is er dus nog ruimte voor noodbemalingscapaciteit. In de VRNK boezem is geen ruimte voor volledige inzet van de noodbemaling. Lokale inzet van een kleinere capaciteit van noodbemaling kan wel. Bij grootschalige problematiek zou minimaal ook afgelaten moeten worden op het naburige boezemstelsel. Dit geldt ook voor de Schagerkoggeboezem, alleen zijn daar geen aflatmogelijkheden.

Hieronder zijn de resultaten van de berekening met beschikbare noodbemaling en de optimalisatie in meer detail per cluster geanalyseerd. In Bijlage E.5 zijn kaarten met de resultaten van de referentie- en optimalisatieberekeningen opgenomen, met in de optimalisatiekaarten per noodbemaling de capaciteit. De clusters zijn op alfabetische volgorde beschreven.



Figuur 80. Resultaat referentieberekeningen met beschikbare noodbemalingscapaciteit 1600 m<sup>3</sup>/min.

### Assendelft

#### Referentie

Dit cluster heeft met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling verdeeld over vijf locaties nog ruimte op de boezem.

#### Optimalisatie

Voor de optimalisatie wordt ingeschat dat de capaciteit van de noodbemalingen kan worden vermenigvuldigd met een factor twee, dus tot 3200 m<sup>3</sup>/min in totaal. Verdubbeling van de noodbemalingscapaciteit levert op één locatie een klein knelpunt op (Assendelft#4 in bijlage D). Hier is sprake van een lokaal hydraulisch knelpunt bij de toegepaste capaciteit van 642 m<sup>3</sup>/min. De referentiebelasting van 318 m<sup>3</sup>/min leidt niet tot een knelpunt. Op de andere locaties levert ook de verdubbeling van de noodbemalingscapaciteit nauwelijks waterstandsverhogingen op. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

### Beemster

#### Referentie

Dit cluster biedt met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling nog ruimte op de boezem.

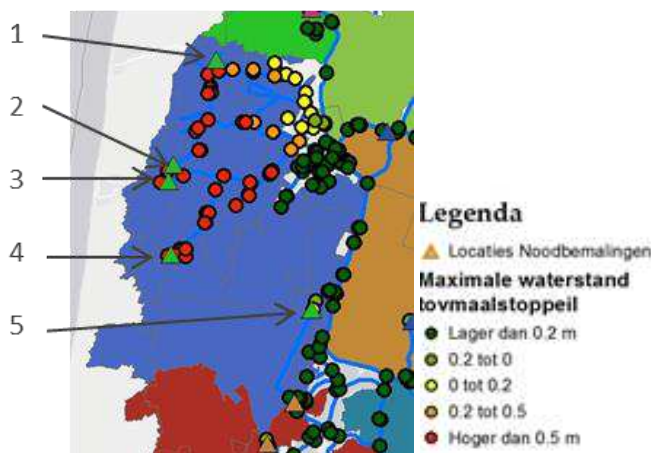
### Optimalisatie

In dit cluster is ruimte voor extra afvoer op het boezemsysteem. De capaciteit van de noodbemaling kan worden verdubbeld tot 3200 m<sup>3</sup>/m. Dit levert waterstandsverhogingen op de boezem op, maar de het maalstoppeil wordt niet overschreden. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## Egmondermeer

### Referentie

De vier noodbemalingen in het westelijke deel van het cluster (locatie 1 tot en met 4 in Figuur 81) zorgen gezamenlijk voor een overbelasting van het lokale watersysteem. De meest zuidelijke noodbemaling (locatie 5) heeft ook een iets te hoge capaciteit voor het lokale watersysteem. In dit cluster is benedenstrooms op de boezem nog veel ruimte beschikbaar.



Figuur 81. Berekende maximale waterstanden in het cluster Egmondermeer.

### Optimalisatie

De capaciteit van de noodbemalingen op locaties 1 t/m 4 (locaties in Figuur 81) is gehalveerd tot 162 m<sup>3</sup>/min. De reductie van de noodbemalingscapaciteit zorgt voor vermindering van de knelpunten op de boezem, maar levert nog steeds een te hoge belasting. We concluderen dat hier geen of nauwelijks noodbemaling mogelijk is. De capaciteit van de zuidelijke noodbemaling (locatie 5) is met 25% gereduceerd tot 240 m<sup>3</sup>/min, waardoor de maximale waterstand onder het maalstoppeil blijft. We zien dat de bovenstroomse waterlopen in dit cluster te weinig ruimte bieden voor noodbemaling, maar dat er meer benedenstrooms wel ruimte is voor extra afvoer naar de boezem. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## Geestmerambacht

### Referentie

Dit cluster biedt met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling nog ruimte op de boezem.

### Optimalisatie

Voor de optimalisatie wordt voor dit cluster ingeschat dat de capaciteit van de noodbemalingen kan worden vermenigvuldigd met een factor twee, tot 3200 m<sup>3</sup>/min in totaal oftewel 1068 m<sup>3</sup>/min per noodbemalingslocatie. Deze vergroting van de noodbemalingscapaciteit levert geen knelpunten op. Ook bij deze capaciteit is er ruimte over op de boezem. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

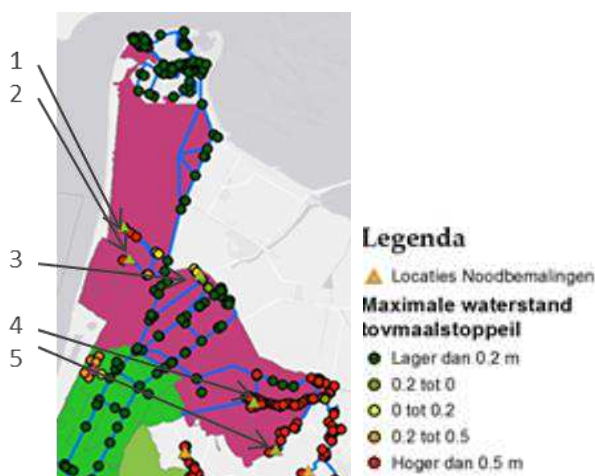
## Koegras

### Referentie

In het cluster Koegras is in de berekening met een totale belasting van 1600 m<sup>3</sup>/min op een deel van de boezem nog ruimte (maximale waterstand > 0,2 m onder maalstoppeil), maar zijn er ook delen van de boezem waar de waterstand door de noodbemalingen oploopt tot ruim boven maalstoppeil, zie Figuur 82. Dit is gerelateerd aan de locatie van de noodbemalingen.

De twee noodbemalingen aan de westkant (locatie 1 en 2 in Figuur 82 hebben een te hoge capaciteit en zijn ver bovenstrooms gelegen. Deze bovenstroomse boezemwatergangen hebben niet voldoende afvoercapaciteit voor de noodbemaling (opgelegde afvoer is 320 m<sup>3</sup>/min per locatie).

De waterstanden bij de noodbemaling in het noordoosten (locatie 3 in Figuur 82) stijgen tot precies het maalstoppeil. Deze is min of meer optimaal. De twee noodbemalingen op locatie 4 en 5 liggen in de tussenboezem. De tussenboezembemalingscapaciteit is 336 m<sup>3</sup>/min terwijl de capaciteit van de poldergemalen 342 m<sup>3</sup>/min is. Hier is dus geen ruimte voor noodbemalingen, wat leidt tot te hoge waterstanden op de tussenboezem als noodbemalingen worden toegepast. Benedenstrooms in het cluster Koegras is nog wel ruimte op de boezem beschikbaar.



Figuur 82. Berekende maximale waterstanden in het cluster Koegras.

### Optimalisatie

De noodbemalingen aan de westkant (locatie 1 en 2) zijn gereduceerd met 75% tot 80 m<sup>3</sup>/min. Hier ontstaan echter nog steeds knelpunten. Geconcludeerd wordt dat er op deze locaties geen noodbemaling mogelijk is. De noodbemaling op locatie 3 (320 m<sup>3</sup>/min) benut de ruimte op de boezem in de referentie al optimaal en is dus niet aangepast in de optimalisatie. De twee noodbemalingen aan de oostkant op de tussenboezem (locatie 4 en 5) zijn verwijderd in de optimalisatie, waardoor de knelpunten hier weg zijn. De resultaten op kaart zijn opgenomen in Bijlage E.5.

## Petten

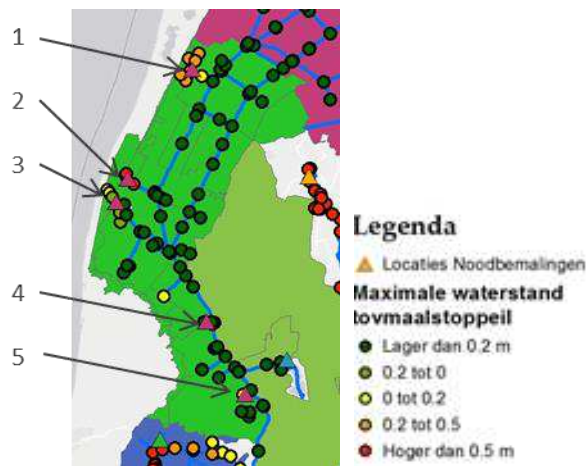
### Referentie

Figuur 83 toont de ruimte op de boezem in het cluster Petten. De locaties van de noodbemalingen zijn van noord naar zuid gegeven:

1. Hier vormen krappe watergangen hydraulische knelpunten. In de optimalisatie halveren we hier de noodbemalingscapaciteit.

- Hier vormen een (veel) te krappe watergang en duikers hydraulische knelpunten. Hier is geen noodbemaling mogelijk. In de optimalisatie leggen we hier geen noodbemaling op.
- Hier is opstuwung als gevolg van een duiker die een hydraulisch knelpunt vormt (duiker rond 500 mm). Deze duiker ligt bovenstrooms van de noodbemaling. We verwachten niet dat extra noodbemaling in de praktijk tot knelpunten leidt, dus we laten deze noodbemaling staan in de optimalisatie.
- Hier is voldoende ruimte op de boezem. We verdubbelen de noodbemaalingscapaciteit in de optimalisatie.
- Hier vormen een krappe watergang en duiker hydraulische knelpunten. In de optimalisatie nemen we hier een noodbemaalingscapaciteit op die 25% lager is.

Benedenstrooms op de boezem is nog wel ruimte beschikbaar.



Figuur 83. Berekende maximale waterstanden in het cluster Petten.

### Optimalisatie

Van noord naar zuid wordt per noodpomplocatie het volgende geconcludeerd (de nummers corresponderen met de locaties in Figuur 83):

- De noodbemaling in het noorden is gereduceerd met 50% (tot 162 m<sup>3</sup>/min). De waterstanden stijgen hier nu tot slechts 2 cm boven het maalstoppeil, waar dat in de basisberekening 40 cm was. We concluderen dat hier op de boezem ruimte is voor een noodbemaalingscapaciteit van ongeveer 120 m<sup>3</sup>/min.
- Hier is geen noodbemaling opgelegd en zijn er daardoor geen knelpunten meer op de boezem.
- Het knelpunt dat hier wordt berekend is niet gerelateerd aan de noodbemaling maar aan een krappe duiker. De boezem biedt voldoende ruimte voor de noodbemaling van 318 m<sup>3</sup>/min.
- De reductie van de noodbemaalingscapaciteit op andere locaties is aan de vierde locatie toegevoegd. Deze levert nu 882 m<sup>3</sup>/min en de boezem kan dit goed verwerken. Hier zou in principe nog meer noodcapaciteit geplaatst kunnen worden.
- Hier is de capaciteit van de noodbemaling gereduceerd met 25% tot 240 m<sup>3</sup>/min. Hiermee wordt het maalstoppeil net niet bereikt, dus er is op de boezem ruimte voor deze noodbemaalingscapaciteit.

De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.



## Purmer

### Referentie

Dit cluster biedt met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling nog ruimte op de boezem.

### Optimalisatie

Voor de optimalisatie wordt voor dit cluster ingeschat dat de capaciteit van de noodbema-lingen kan worden vermenigvuldigd met een factor twee tot 3200 m<sup>3</sup>/min. De maalstoppei-len worden door verdubbeling van de noodbemalingscapaciteit met maximaal 5 centime-ter overschreden. We concluderen dat de extra afvoer van 1600 m<sup>3</sup>/min (beschikbare nood-capaciteit) ruim past, maar dat een verdubbeling van deze afvoer te veel is voor de boe-zem. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## Schermer

### Referentie

Dit cluster biedt met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling nog ruimte op de boezem.

### Optimalisatie

Voor de optimalisatie wordt voor dit cluster ingeschat dat de capaciteit van de noodbema-lingen kan worden vermenigvuldigd met een factor twee tot 3200 m<sup>3</sup>/min in totaal. De noodbemalingscapaciteiten zijn hiervoor vergroot tot 1068 m<sup>3</sup>/min per locatie. Hierdoor stijgen de waterstanden in het midden van het cluster tot 3 centimeter boven het maalstop-peil. We concluderen dat deze vergroting van de noodcapaciteit te veel is. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## VRNK

### Referentie

In de VRNK boezem worden de maalstoppeilen overal met meer dan 0,2 m overschreden. Voor de VRNK boezem is de boezembemaling capaciteit 1400 m<sup>3</sup>/min, waar de polderge-malen een capaciteit hebben van 1008 m<sup>3</sup>/min. Er is dus maximaal 392 m<sup>3</sup>/min afvoercapa-citeit voor de noodbemaling beschikbaar op de boezem, terwijl een de noodbemalingsca-paciteit van 1600 m<sup>3</sup>/min is opgelegd. Vooralsnog gaan we niet uit van de inzet van een noodoverlaat naar een andere boezem. In de optimalisatie brengen we daarom de noodbe-malingscapaciteit terug naar 390 m<sup>3</sup>/min om de VRNK boezem niet vol te laten lopen.

### Optimalisatie

De totale noodbemalingscapaciteit is gereduceerd tot 390 m<sup>3</sup>/min verdeeld over vijf loca-ties. In de meer benedenstroomse delen van de boezem is hier voldoende afvoercapaciteit voor. In de bovenstroomse delen ontstaan wel knelpunten, met name in de meeste zuide-lijke boezemwatergang. Er is dus in de VRNK boezem ruimte voor een beperkte extra be-lastig vanuit noodpompen (maximaal 390 m<sup>3</sup>/min), mits deze niet bovenstrooms op het boezemsysteem lozen. De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## Wormer

### Referentie

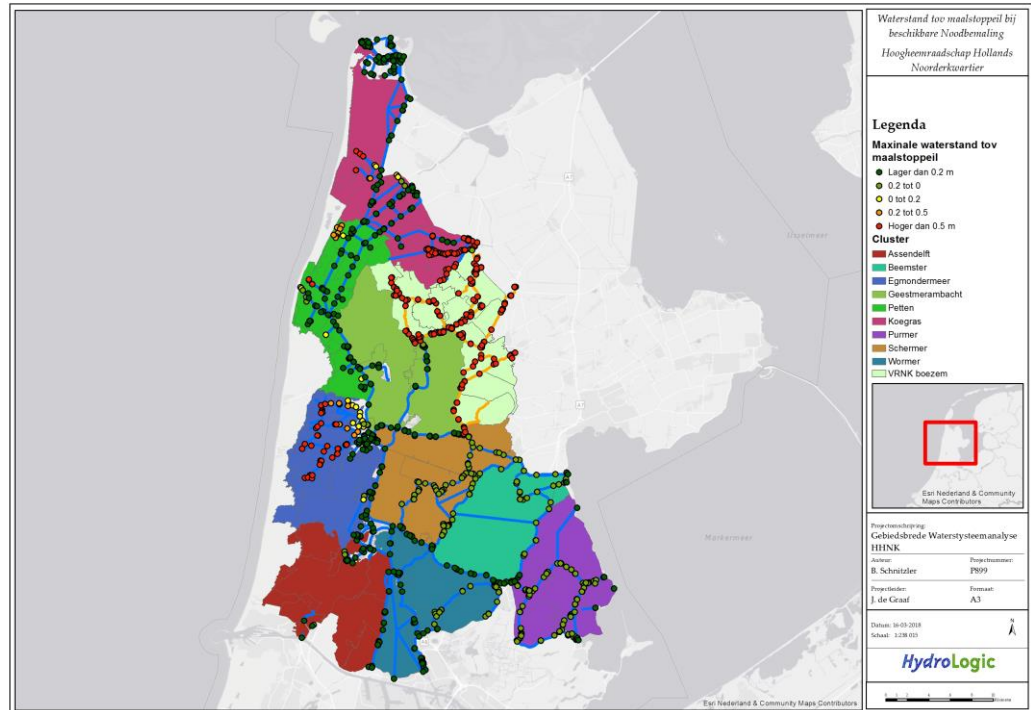
Dit cluster biedt met inzet van 1600 m<sup>3</sup>/min aan noodbemaling nog ruimte op de boezem.

### Optimalisatie

Voor de optimalisatie wordt voor dit cluster ingeschat dat de capaciteit van de noodbema-lingen kan worden vermenigvuldigd met een factor twee tot 3200 m<sup>3</sup>/min. Deze verdubbe-ling van de noodbemalingscapaciteit levert wel waterstandsverhogingen op, maar bereikt

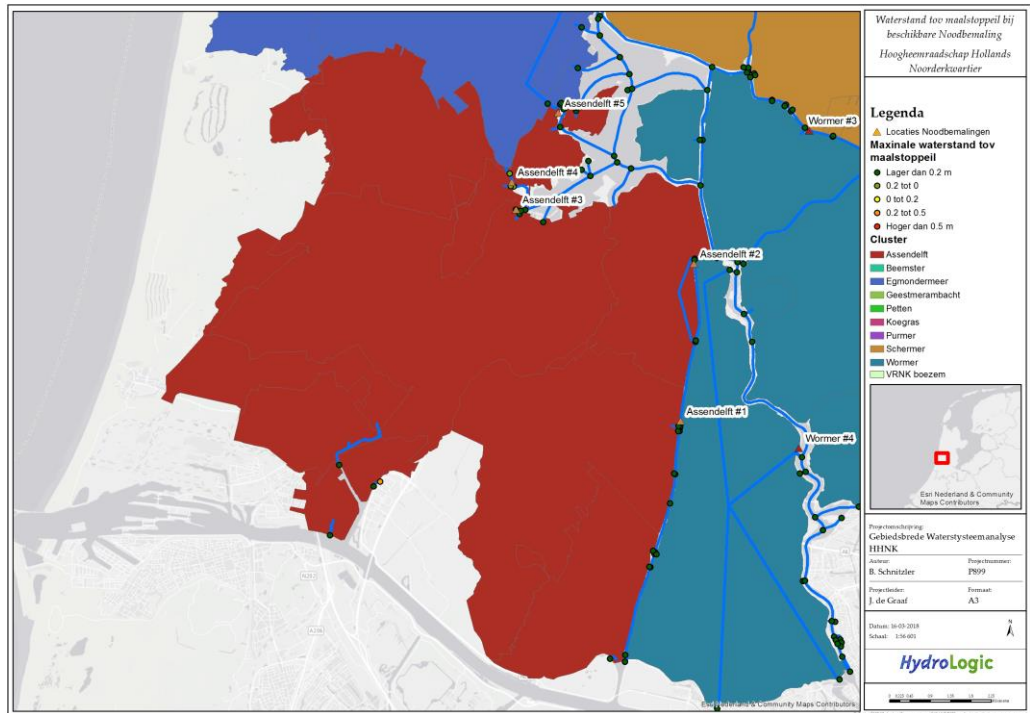
de maximale waterstand het maalstoppeil net niet. Hier is dus ruimte voor op de boezem.  
De resultaten op kaart zijn opgenomen in E.5.

## E.4 Overzichtskaart referentieberekeningen

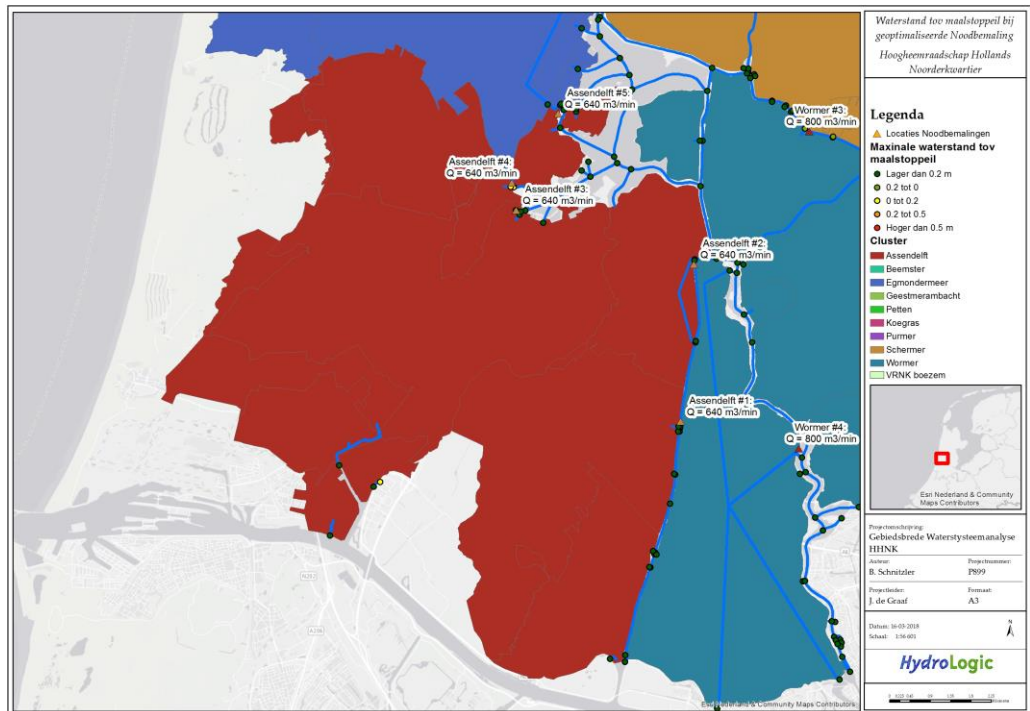


## E.5 Kaarten met resultaat per cluster

### Assendelft

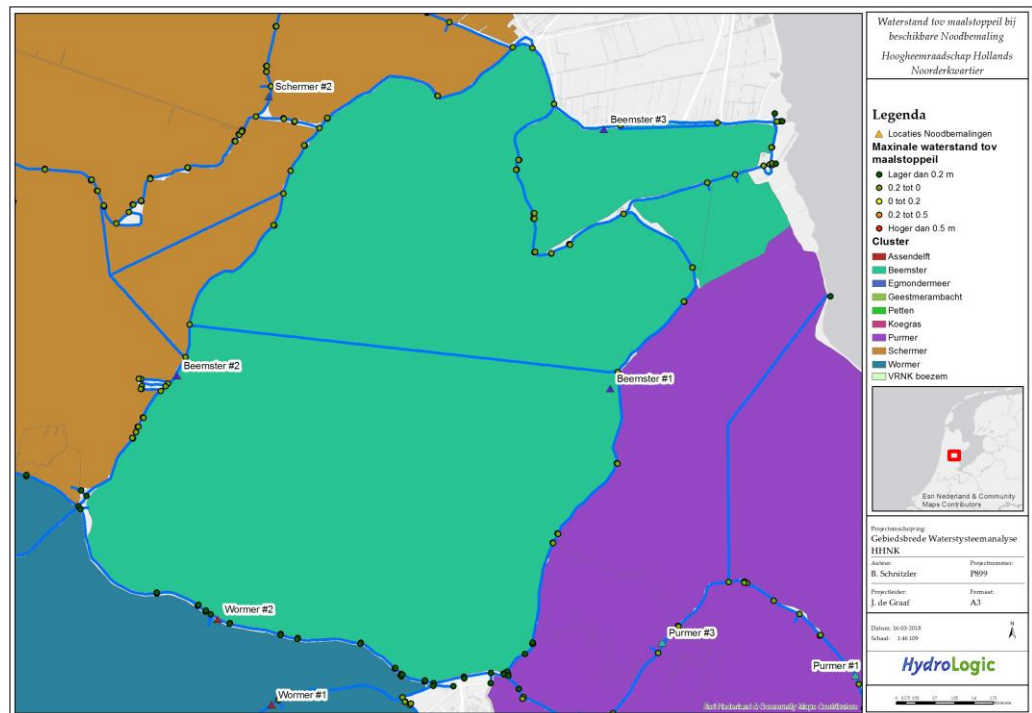


Referentie Assendelft

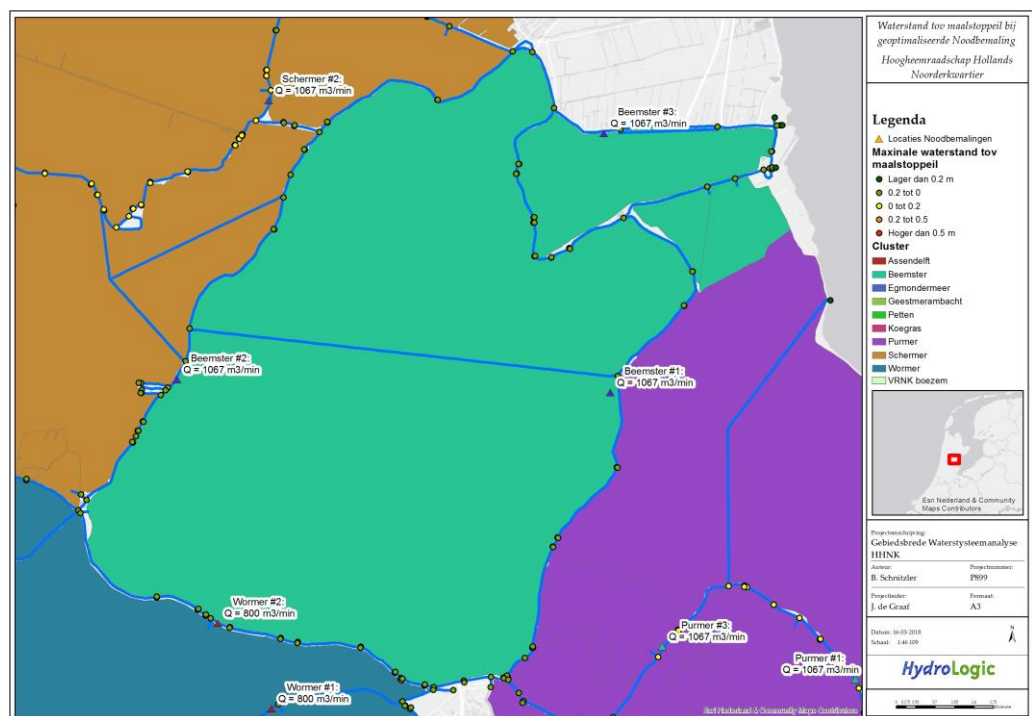


Optimalisatie Assendelft

## Beemster



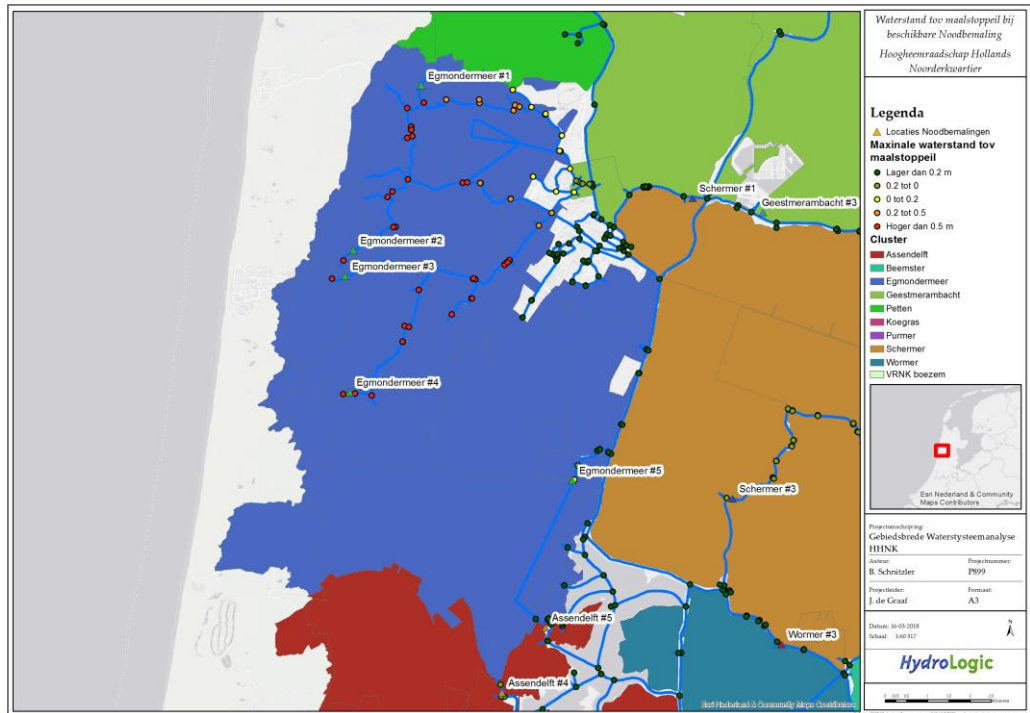
## Referentie Beemster



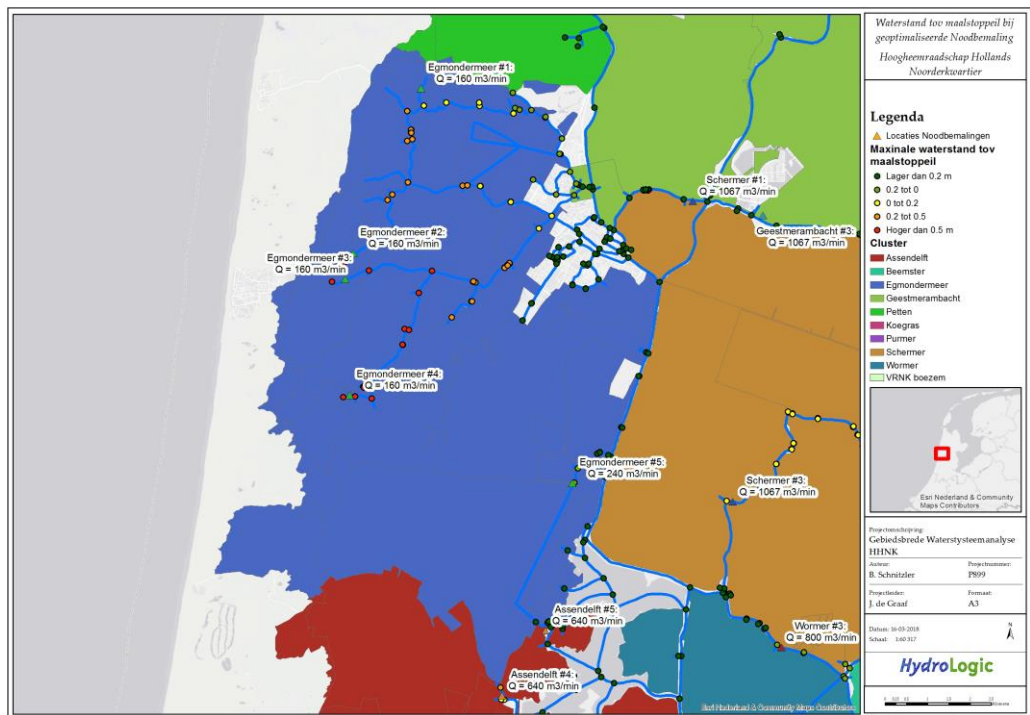
## Optimalisatie Beemster



## Egmondermeer

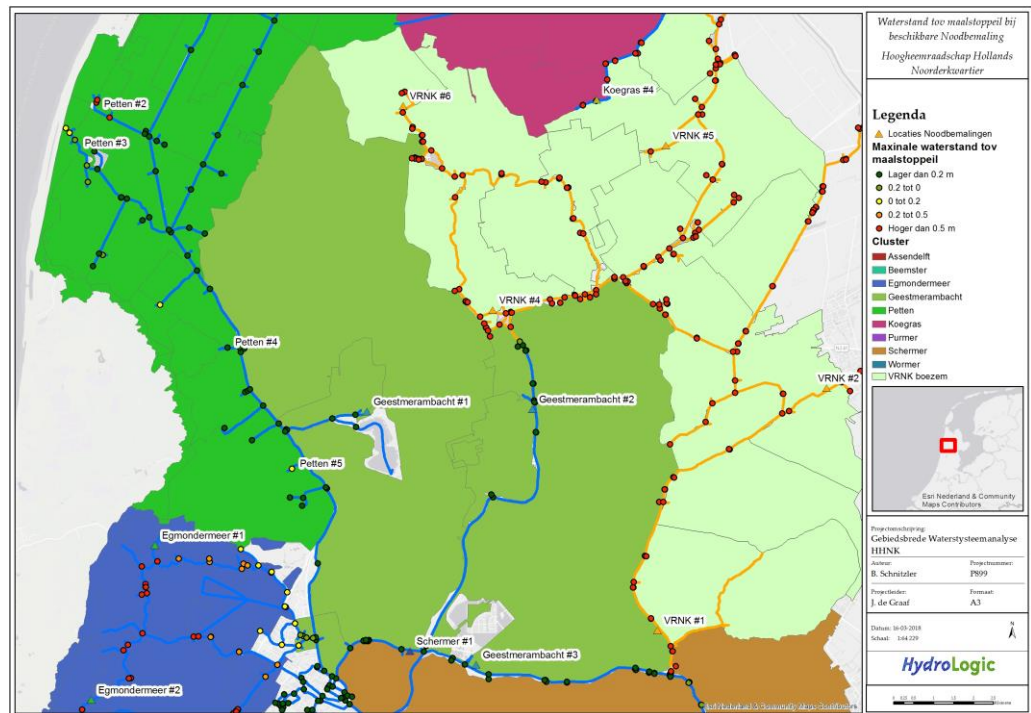


## Referentie Egmondermeer

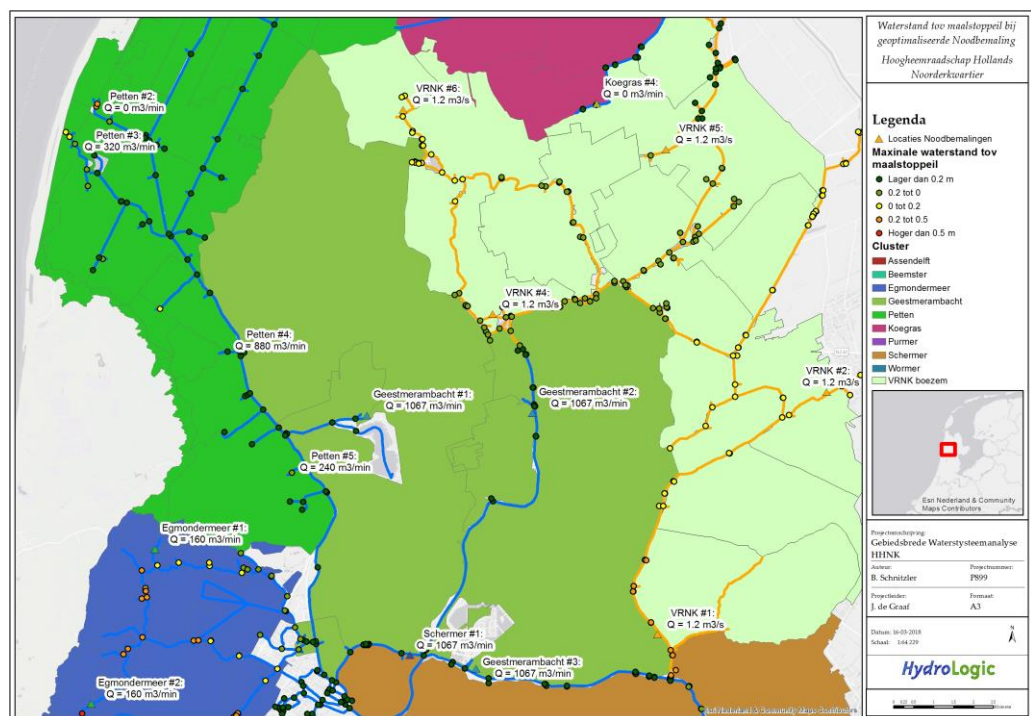


## Optimalisatie Egmondermeer

## Geestmerambacht

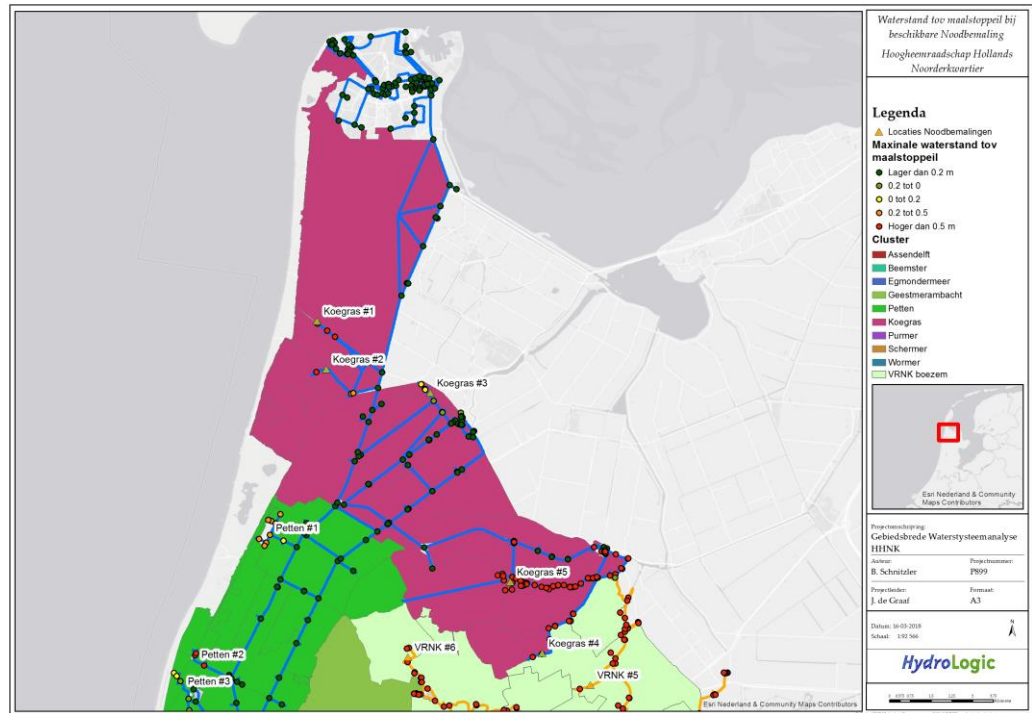


## Referentie Geestmerambacht

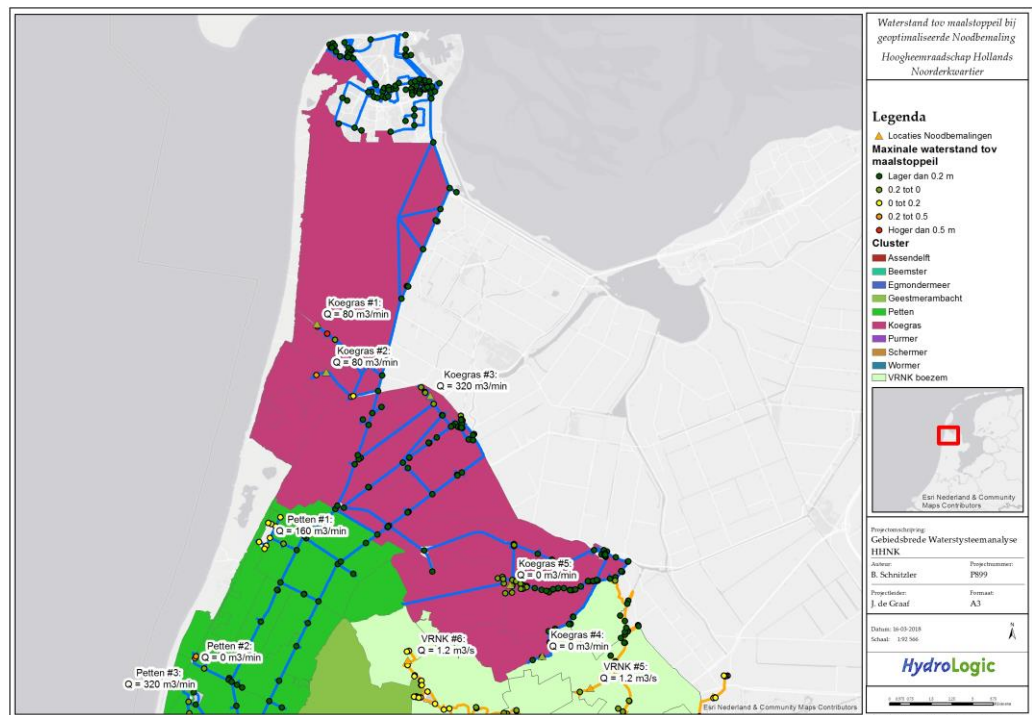


## Optimalisatie Geestmerambacht

# Koegras



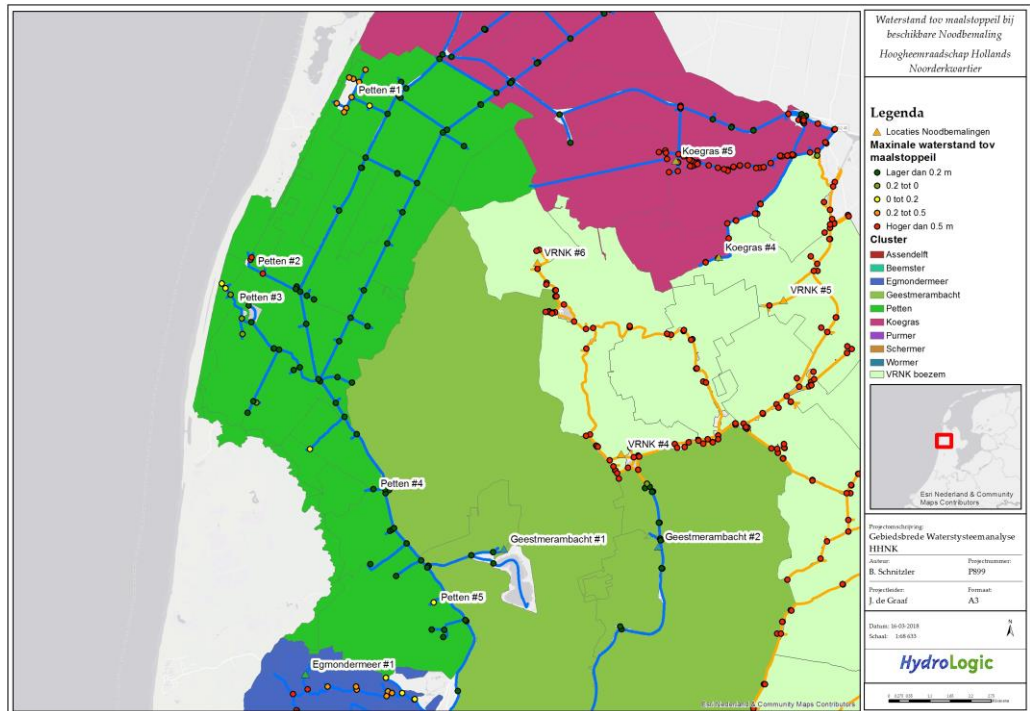
Referentie Koegras



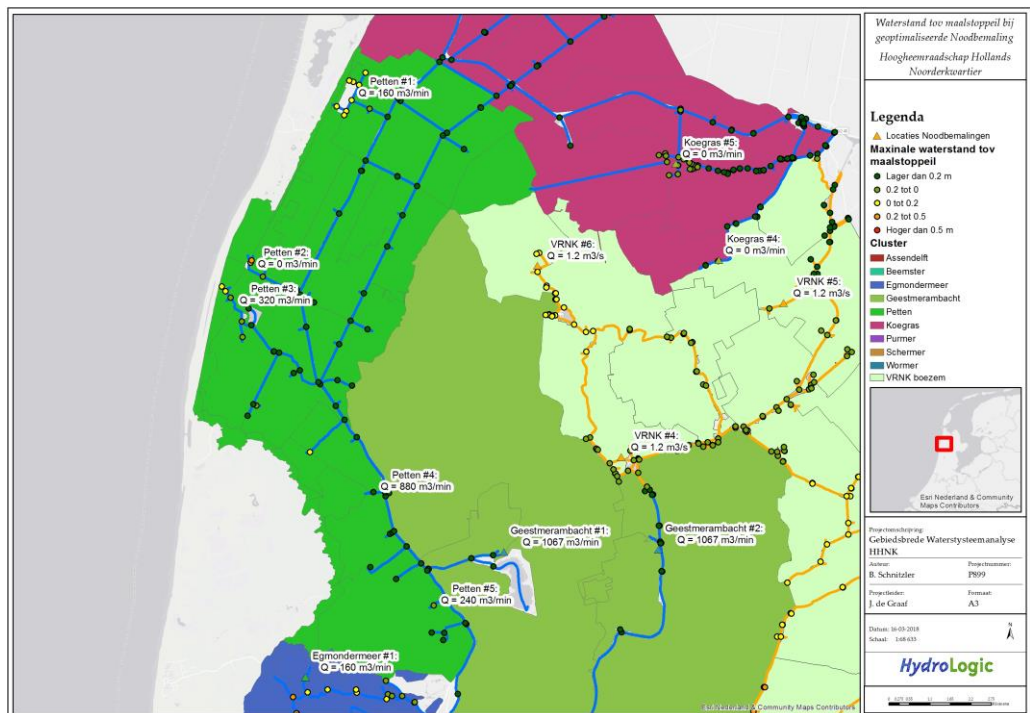
Optimalisatie Koegras



## Petten

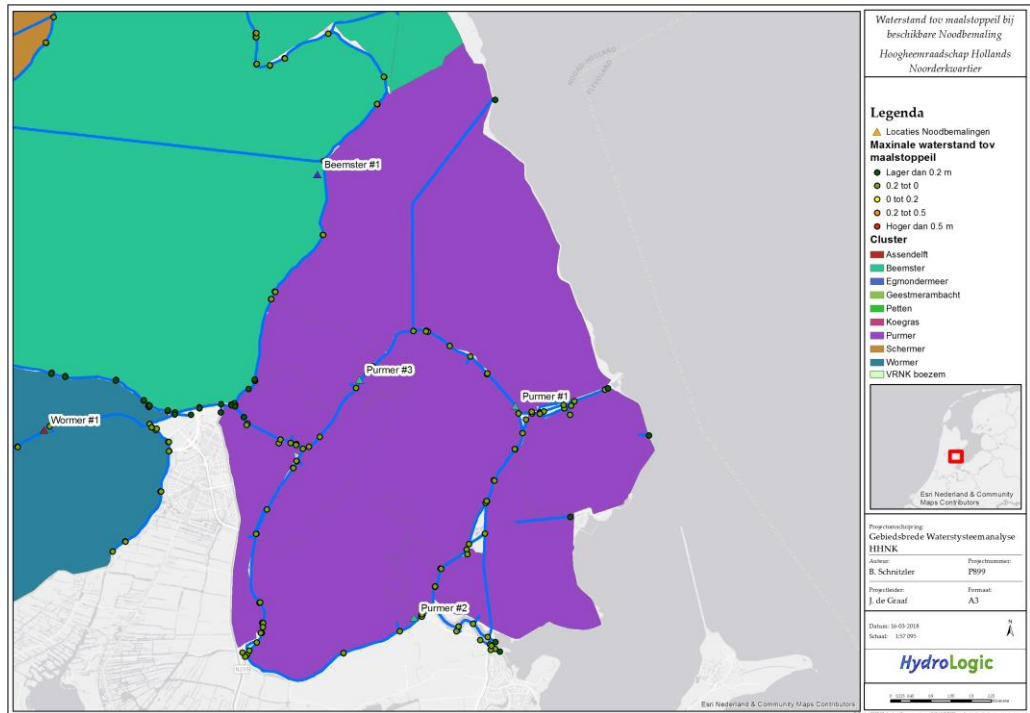


## Referentie Petten

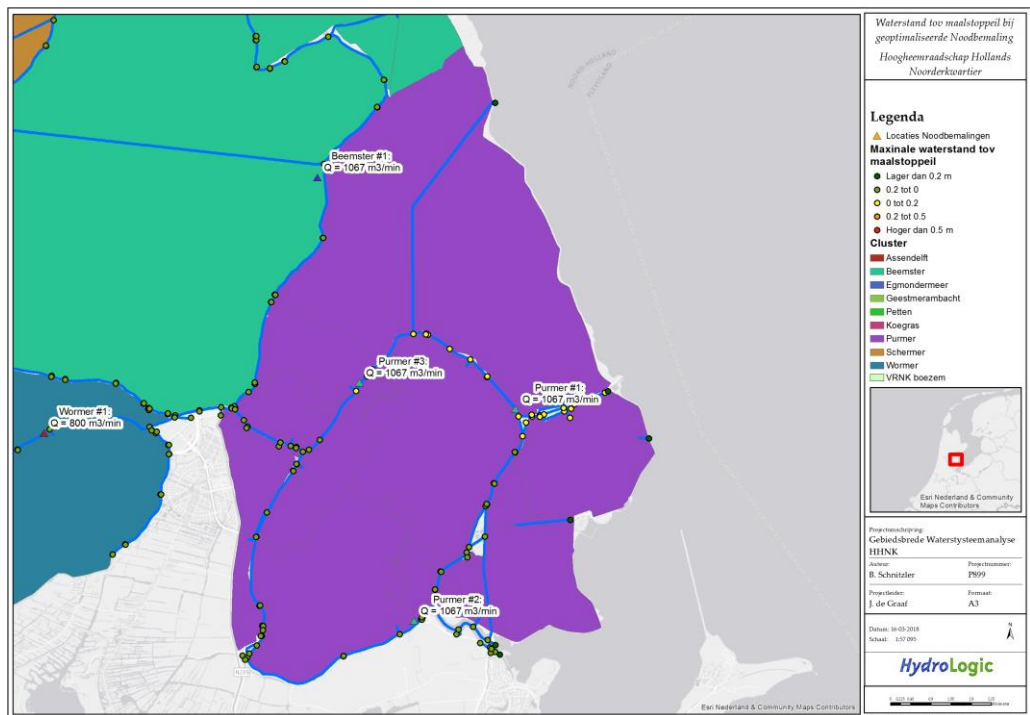


## Optimalisatie Petten

## Purmer



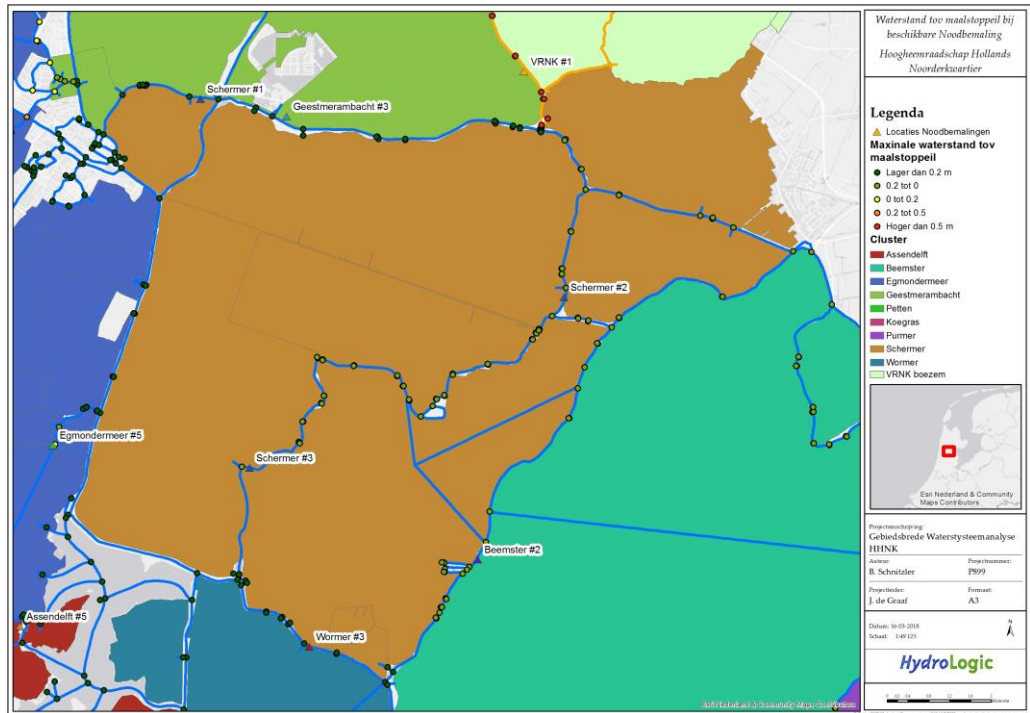
## Referentie Purmer



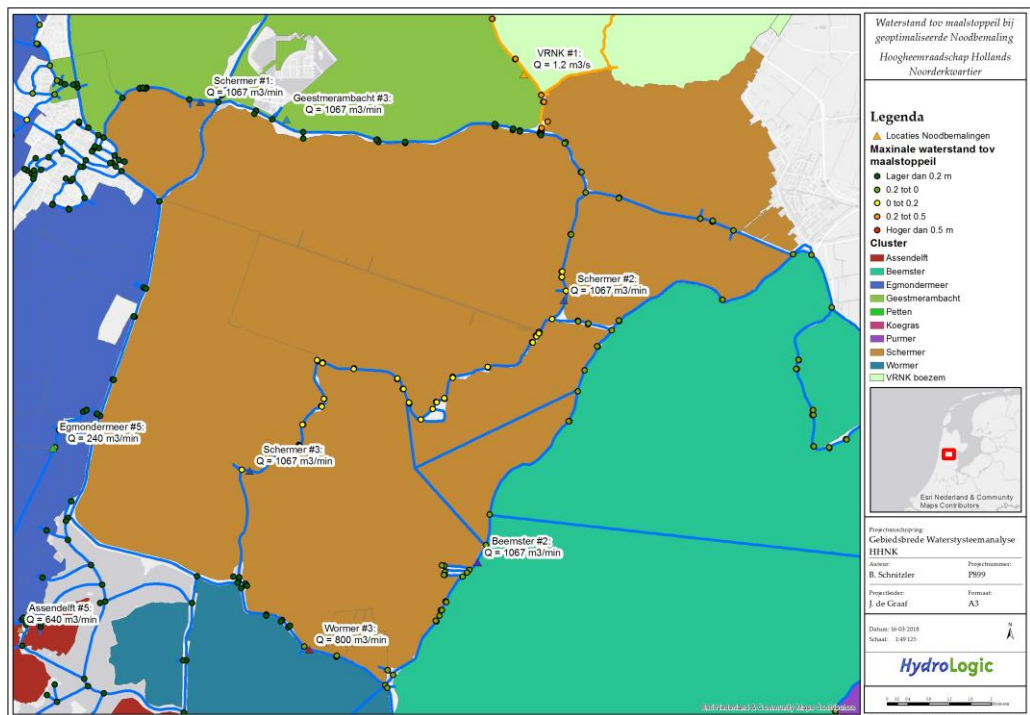
## Optimalisatie Purmer



## Schermer

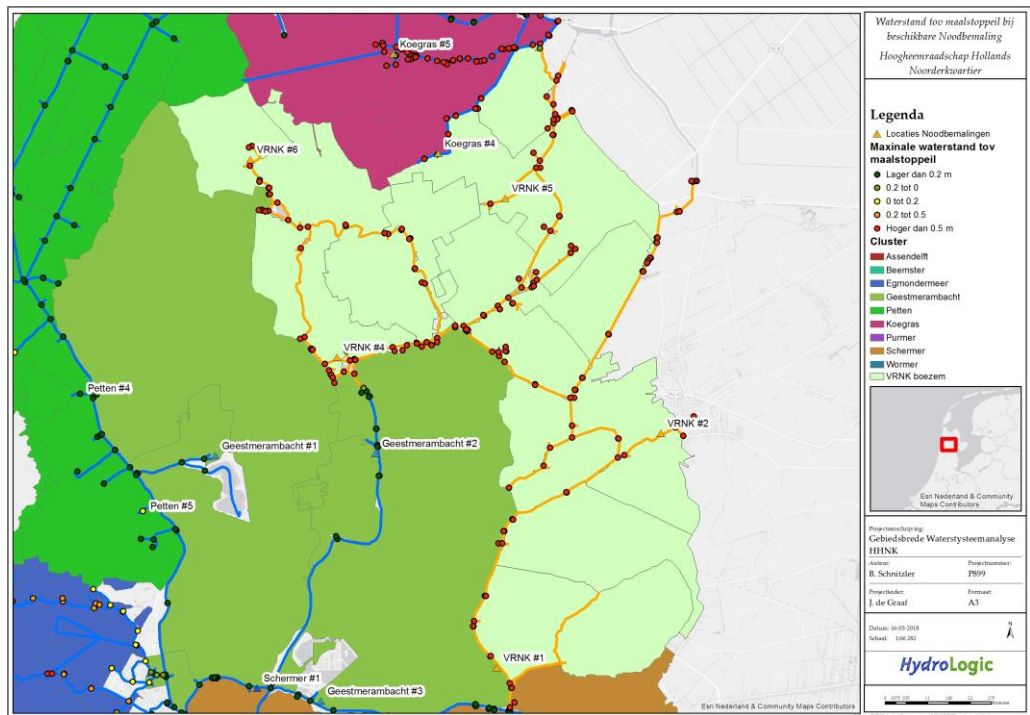


Referentie Schermer

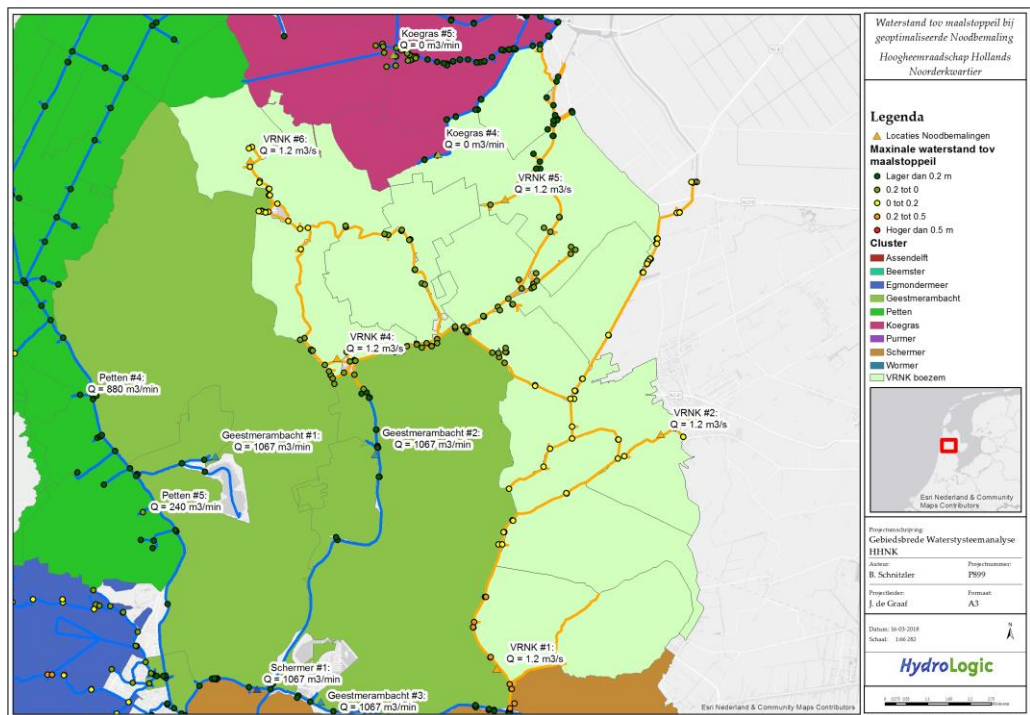


Optimalisatie Schermer

# VRNK

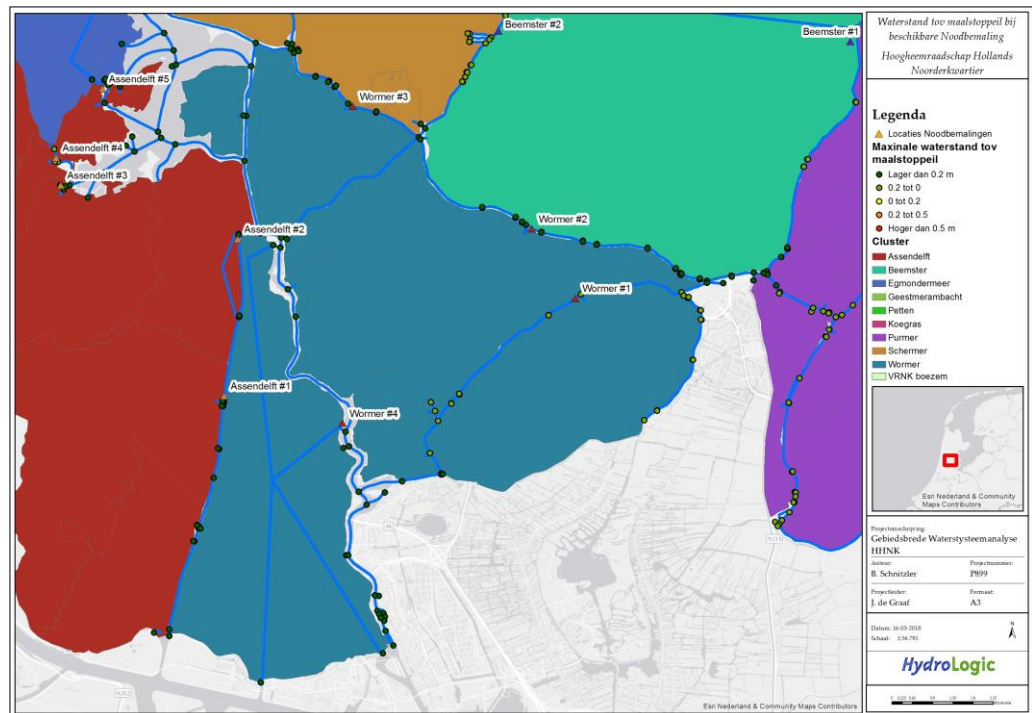


Referentie VRNK

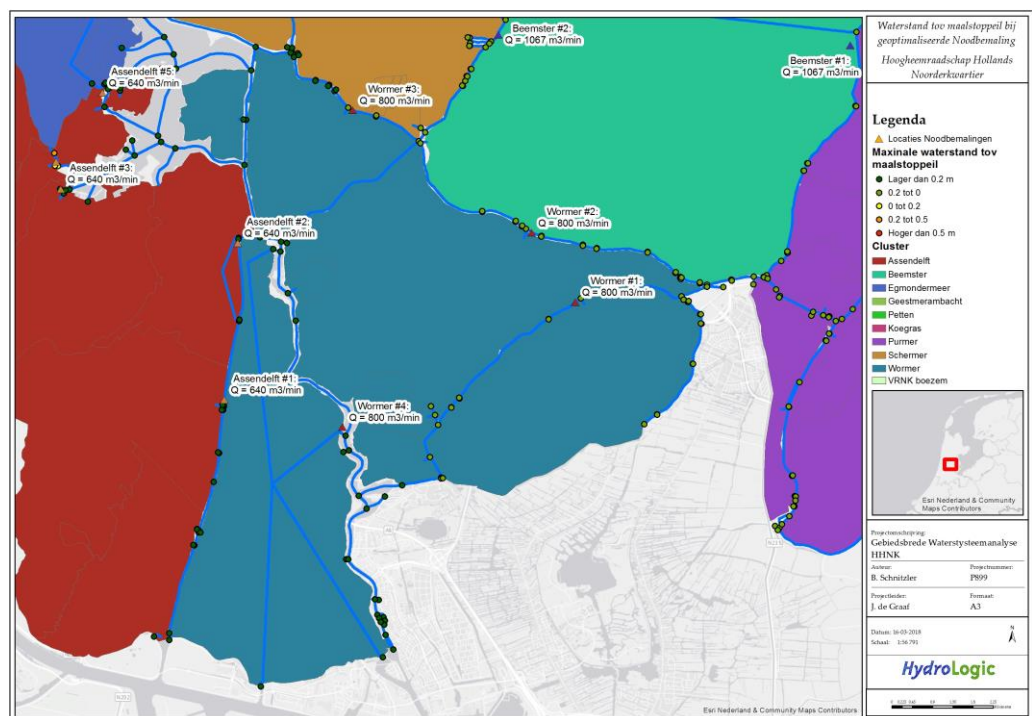


Optimalisatie VRNK

# Wormer



# Referentie Wormer



# Optimalisatie Wormer



## Bijlage F Batenkaarten van de Groot Limmerpolder



Figuur 84. Batenkaart als gevolg van afname van inundaties uit het watersysteem.



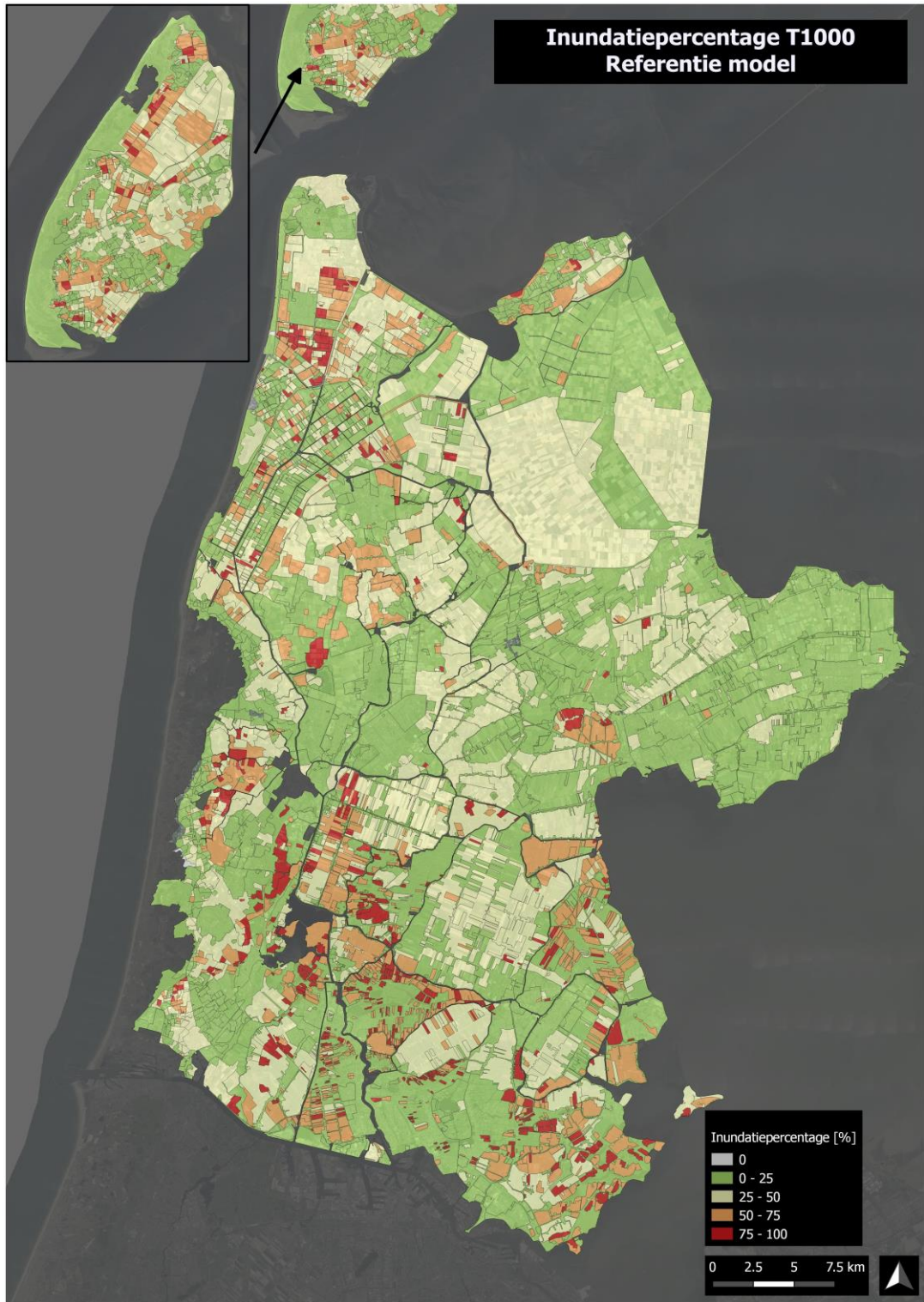
Figuur 85. Batenkaart als gevolg van afname plasvorming.



## Bijlage G Kaartbeelden gebiedsbrede analyse

### Inundatiepercentage

Op basis van de gebiedsbrede inundatierasters is een inundatiepercentage per peilgebied afgeleid voor inundaties met een herhalings tijden van T10, T100 en T1000. Hierin is onderscheid gemaakt naar inundatie uit het watersysteem en inundatie door plasvorming. Figuur 86, Figuur 87 en Figuur 88 toont respectievelijk het totale inundatiepercentage per peilgebied, het inundatiepercentage door inundatie uit het watersysteem en het inundatiepercentage door plasvorming met een herhalings tijd van 1000 jaar.

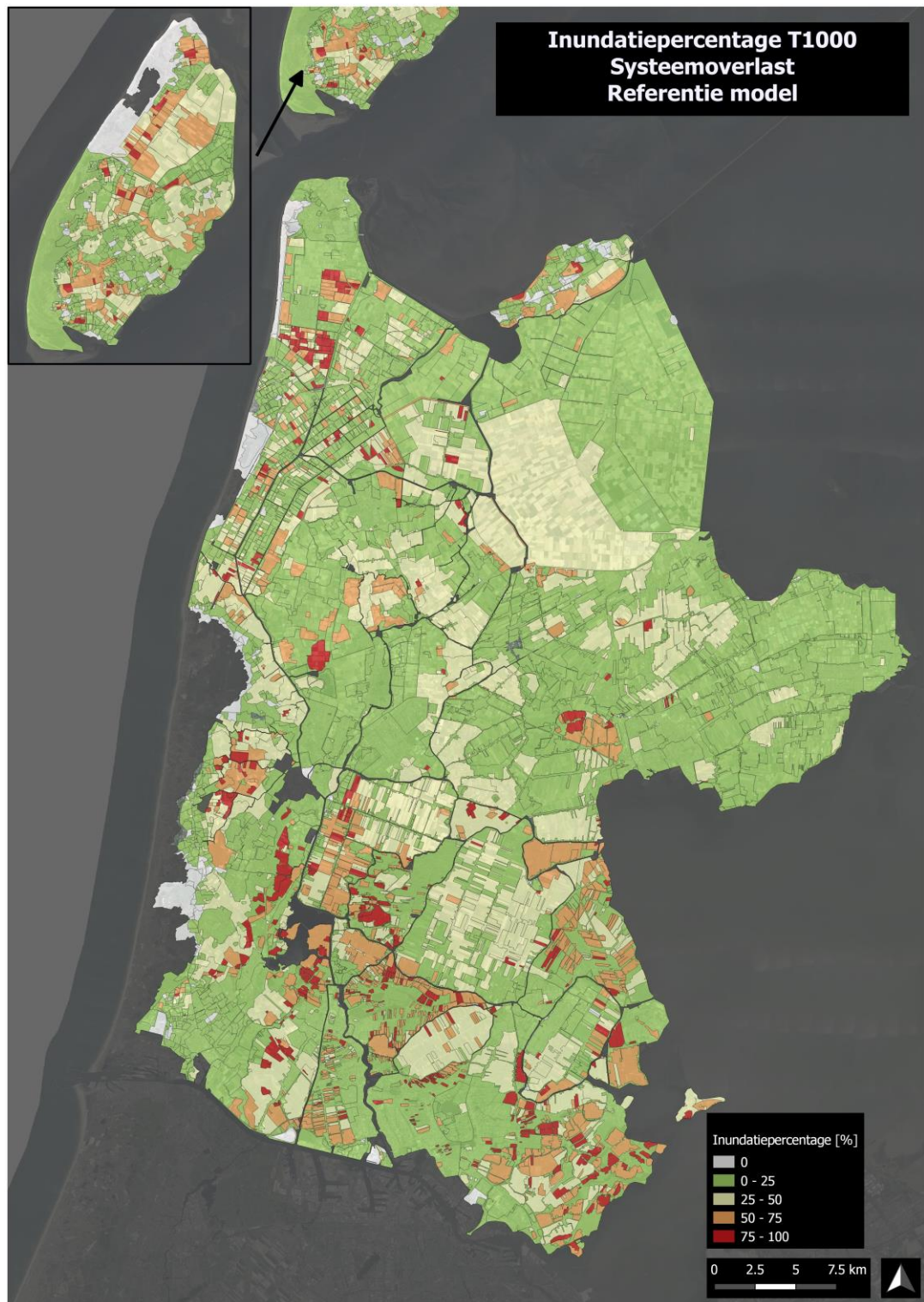


Figuur 86. Inundatiepercentage per peilgebied bij een T1000 herhalingstijd.



Figuur 87. Inundatiepercentage per peilgebied door plasvorming bij een T1000 herhalingsjijd.





Figuur 88. Inundatiepercentage per peilgebied door inundatie uit het watersysteem bij een T1000 herhalingsstijd.

### *Landelijk gebied*

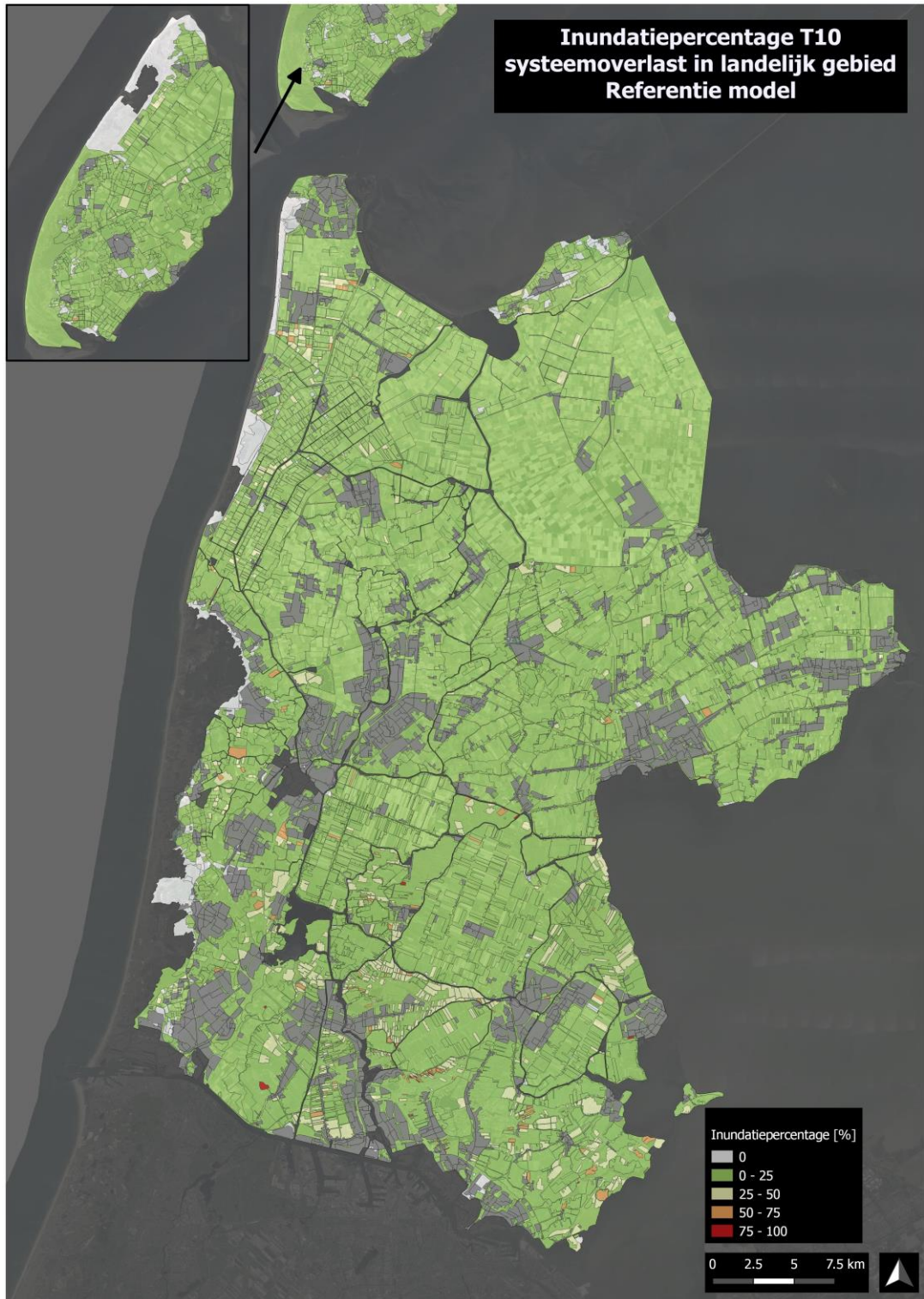
Figuur 89, Figuur 90 en Figuur 91 tonen het inundatie percentage van het landelijk gebied door inundatie vanuit het watersysteem met herhalingsstijden van respectievelijk 10, 100 en 1000 jaar.

Deze kaarten laten zien dat bij een toename van de herhalingstijd er een aantal polders zijn waar het inundatiepercentage, in vergelijking met de andere polders, sterk toeneemt, waaronder:

- Koegras
- Schermer
- Wormer
- Eilandspolder
- Waterland

In het noordoostelijke deel van het beheersgebied, in bijvoorbeeld de polders Wieringermeer, Vier Noorder Koggen en Grootslag, is zichtbaar dat het inundatiepercentage slechts in kleine mate toeneemt voor het overgrote deel van de peilgebieden.



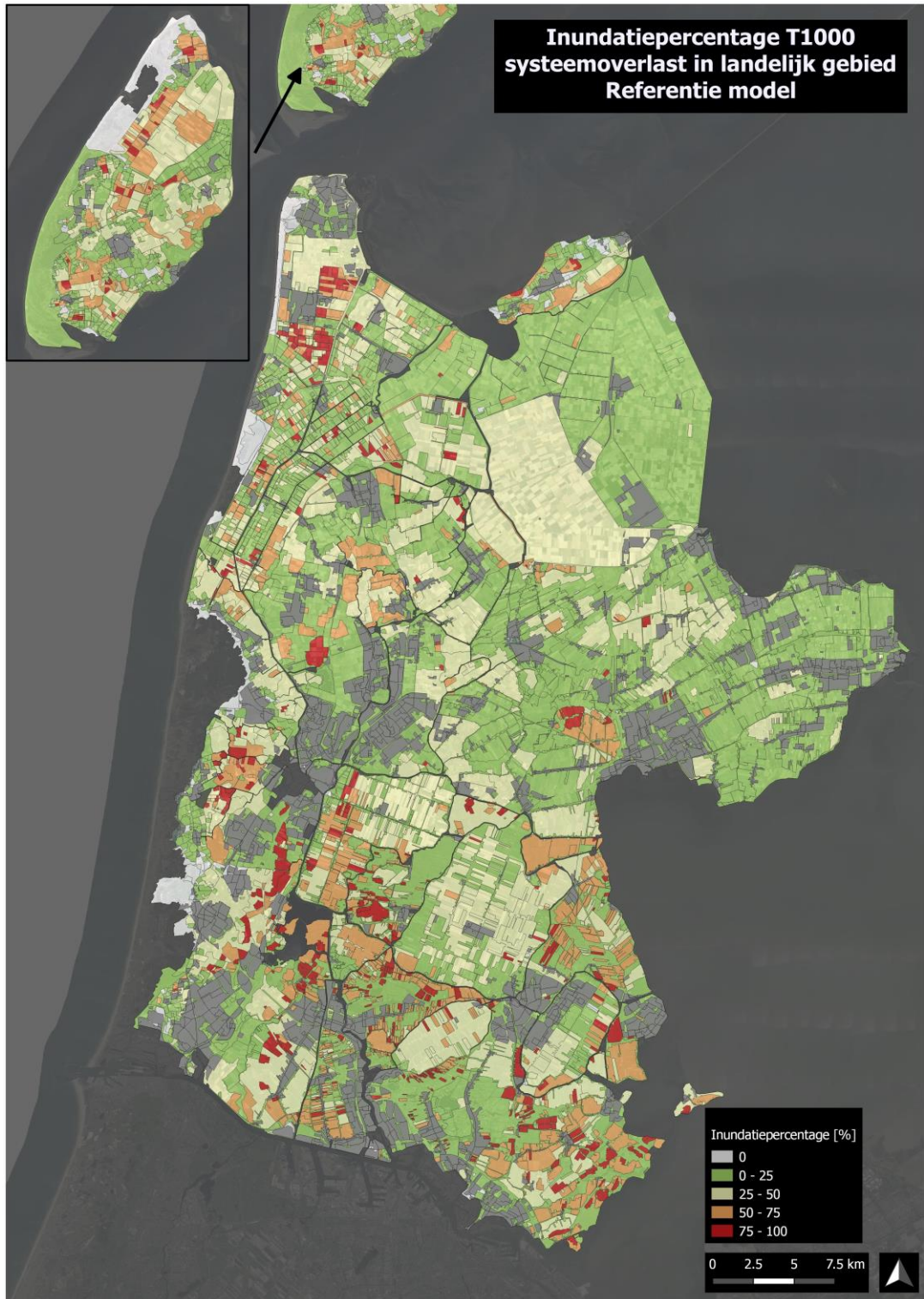


Figuur 89. Inundatiepercentage in het landelijk gebied door inundatie uit het watersysteem met een T10 herhalingsstijd. Stedelijk gebied is gemaskeerd door middel van grijze vlakken.



Figuur 90. Inundatiepercentage in het landelijk gebied door inundatie uit het watersysteem met een T100 herhalingsijd. Stedelijk gebied is gemaskeerd door middel van grijze vlakken.

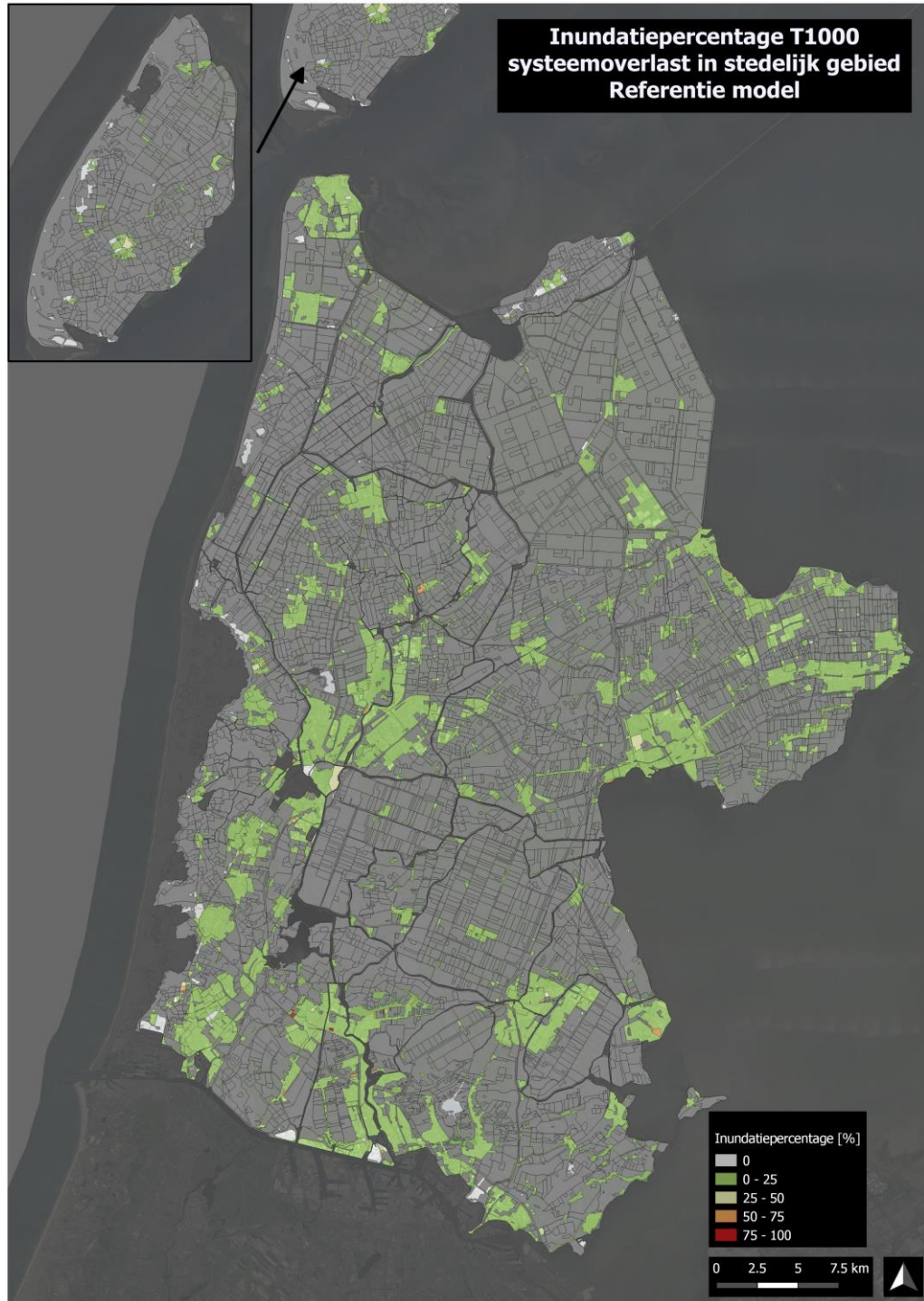




Figuur 91. Inundatiepercentage in het landelijk gebied door inundatie uit het watersysteem met een T1000 herhalingstijd. Stedelijk gebied is gemaskeerd door middel van grijze vlakken.

### Stedelijk gebied

In de onderstaande figuren is het inundatiepercentage verder gefilterd op het stedelijke gebied. Voor het stedelijke gebied zijn er kaarten met inundatiepercentage afgeleid voor een T10, T100 en T1000 situatie. Het inundatiepercentage blijft bij alle drie de kaarten bijna overal onder de 25%. Dit is bijvoorbeeld ook te zien voor inundatiepercentage door het watersysteem bij een T1000 situatie in Figuur 92.

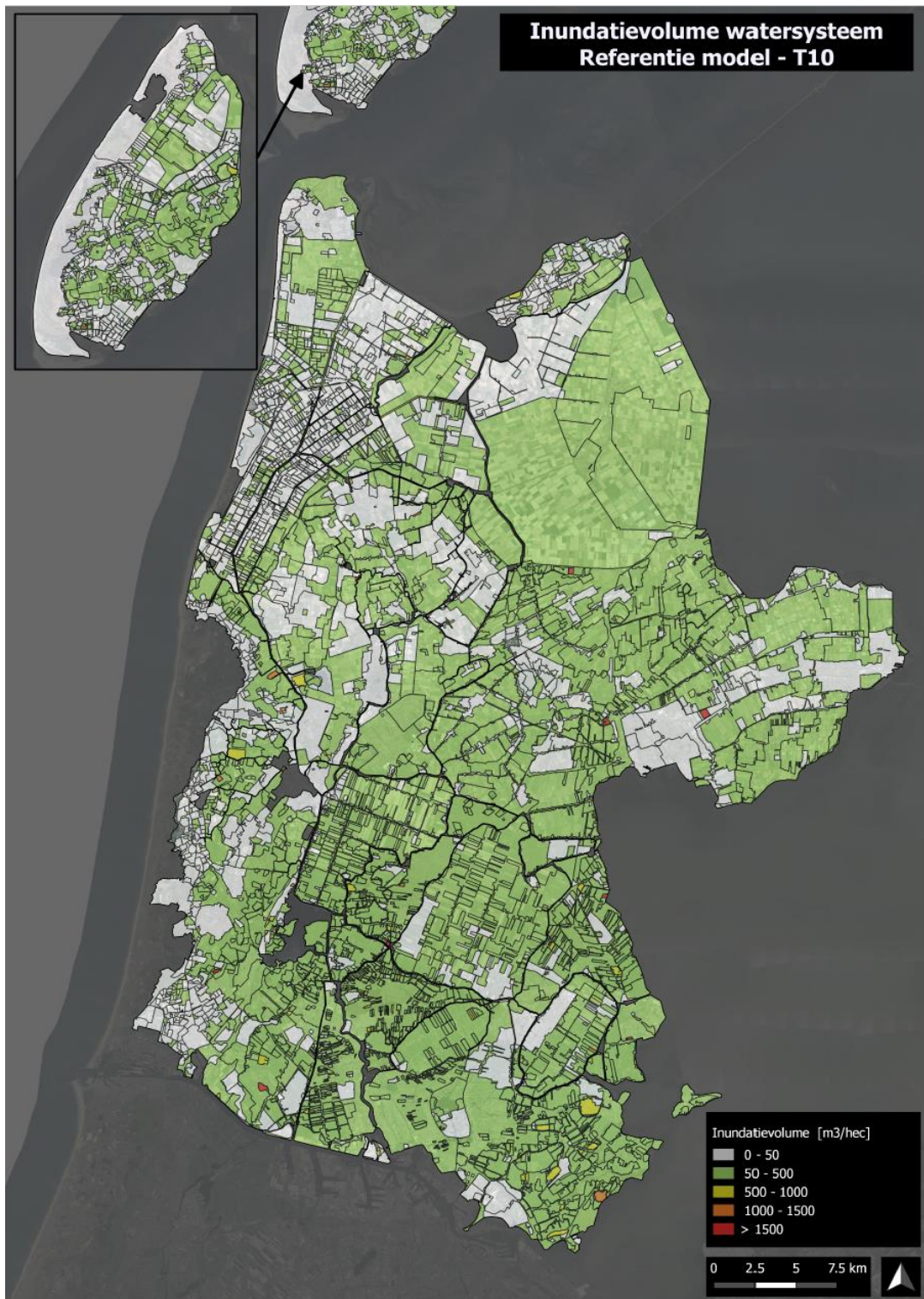


Figuur 92. inundatiepercentage in het stedelijke gebied door watersysteemoverlast bij een T1000 situatie.

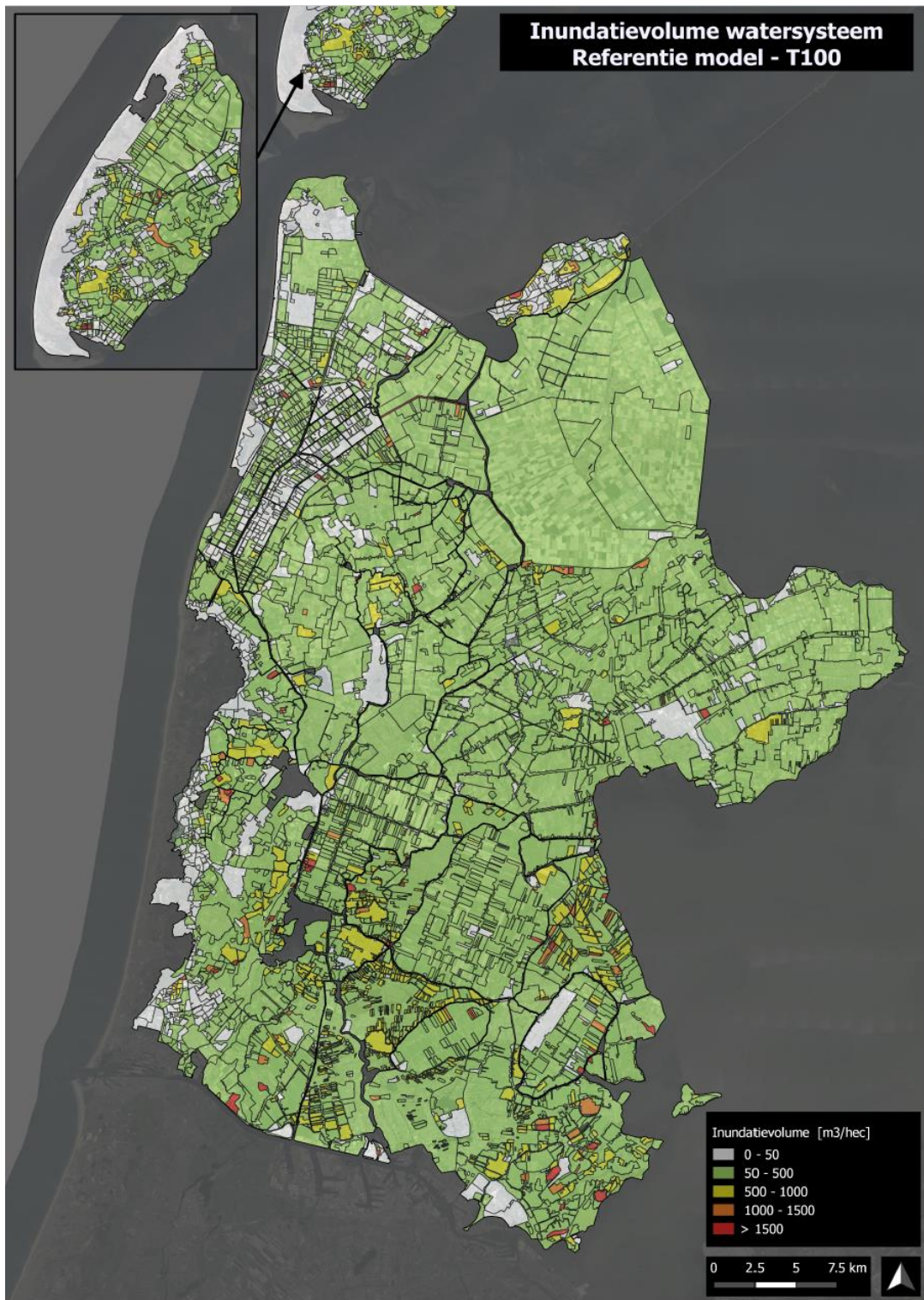
## Inundatievolume per hectare

Om de inundaties vanuit het oppervlaktewater voor het gehele beheergebied te kunnen vergelijken zijn inundatie volumes per hectare per peilgebied afgeleid. Dit is te zien in de gebiedsbrede overzichtskaarten in Figuur 93, Figuur 94 en Figuur 95 voor een T10, een T100 en een T1000 scenario. Tijdens het T10 scenario zijn er vrijwel geen grote inundatievolumes aanwezig. Bij een T100 scenario nemen de inundatievolumes toe. De toegenomen inundatie volumes per hectare zijn verspreid maar voornamelijk aanwezig in het zuidelijke deel van het gebied. Vervolgens is het goed te zien dat er tijdens een T1000 scenario nog meer peilgebieden naar voren komen met hogere inundatievolumes per hectare. Het inundatiebeeld bij de T1000 situatie is meer verspreid over het gehele beheergebied. Opvallend is het lage inundatievolume per hectare bij het bollengebied rondom Den Helder terwijl hoge schades zichtbaar zijn. Bij Wieringermeer is er eveneens een laag inundatievolume per hectare te zien. Dit wijst op kapitaal intensieve landbouw en stedelijk gebieden die getroffen worden.



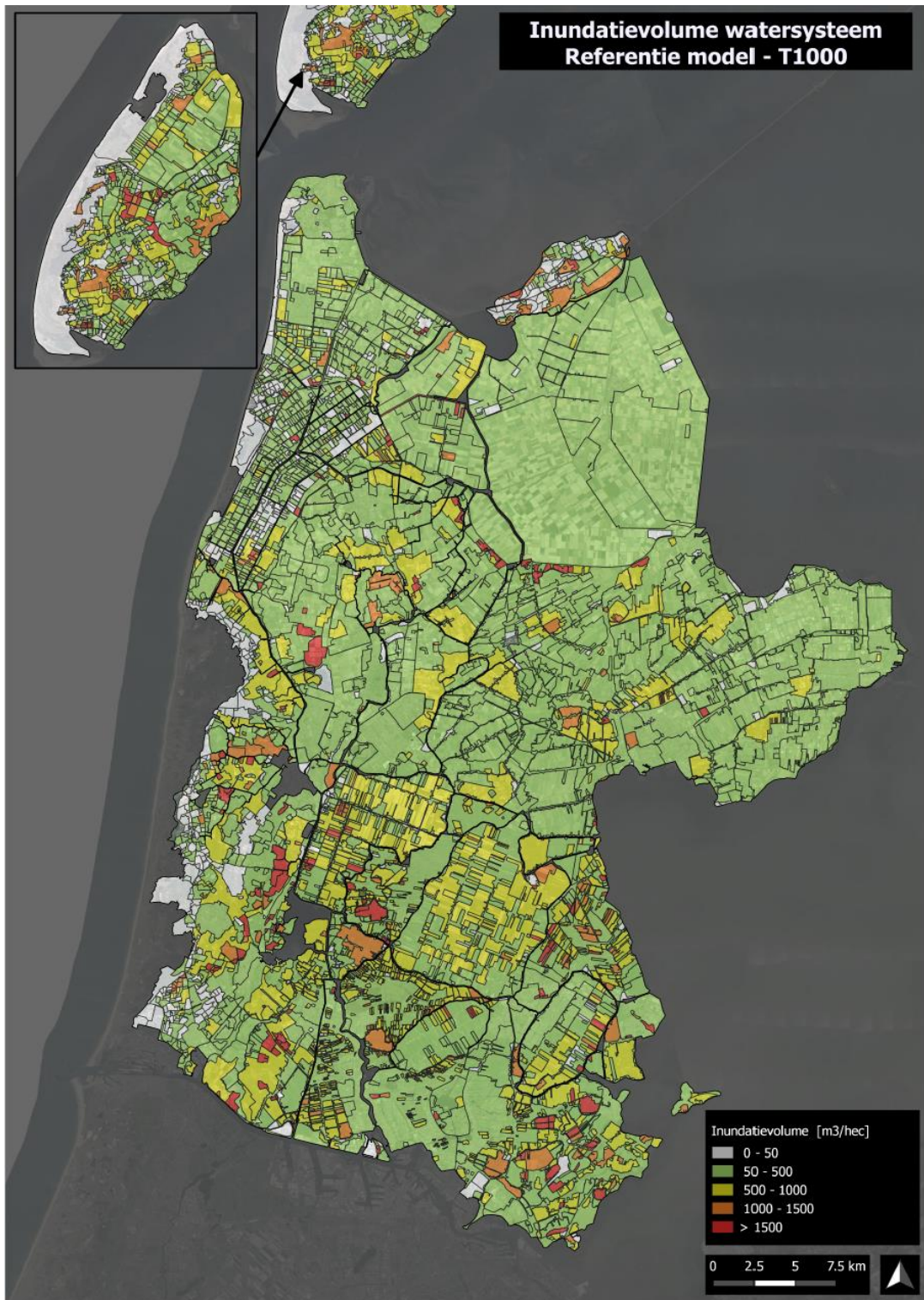


Figuur 93. Inundatie volume bij een T10 scenario.



Figuur 94. Inundatie volume bij een T100 scenario.

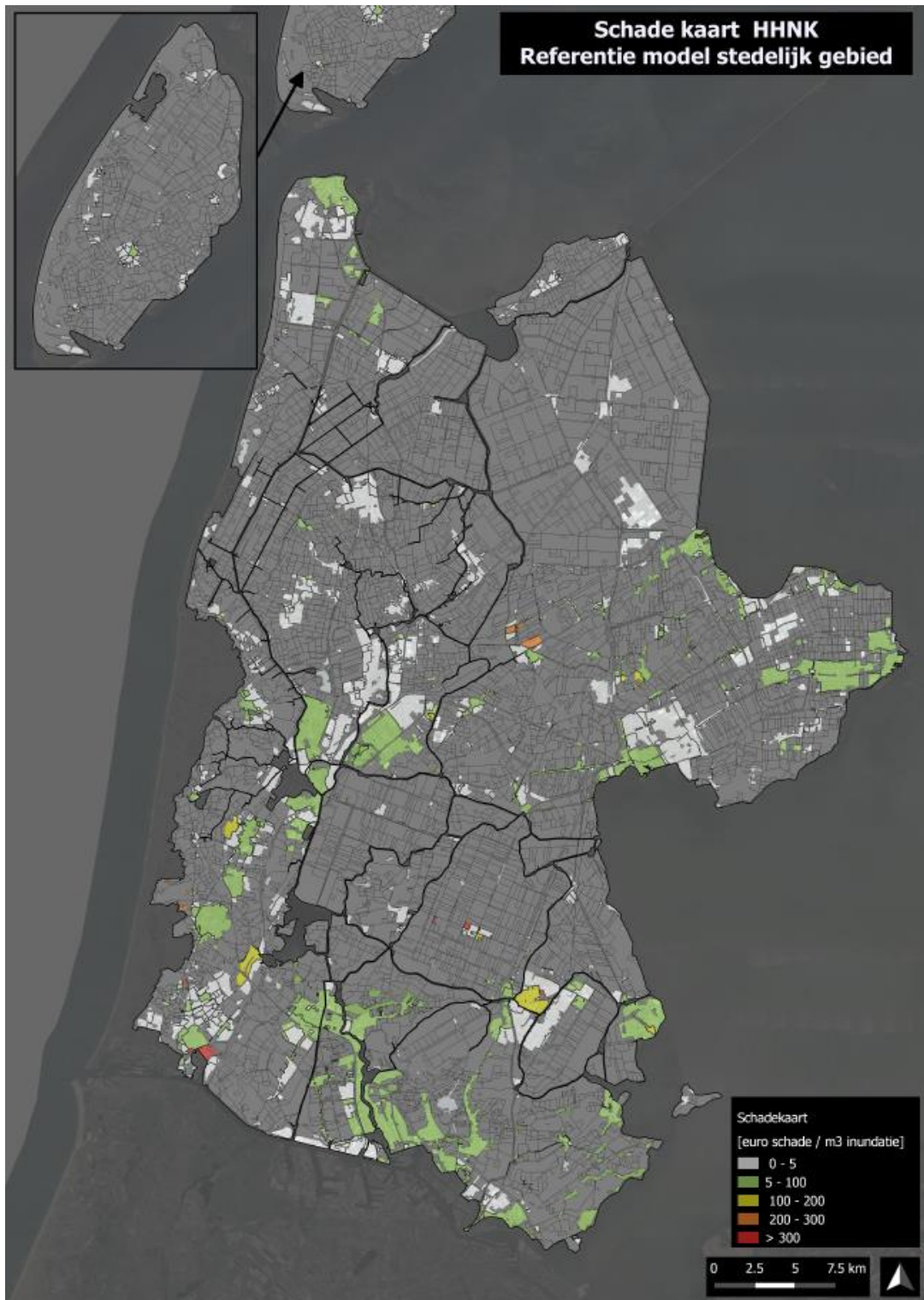




Figuur 95. Inundatie volume bij een T1000 scenario.

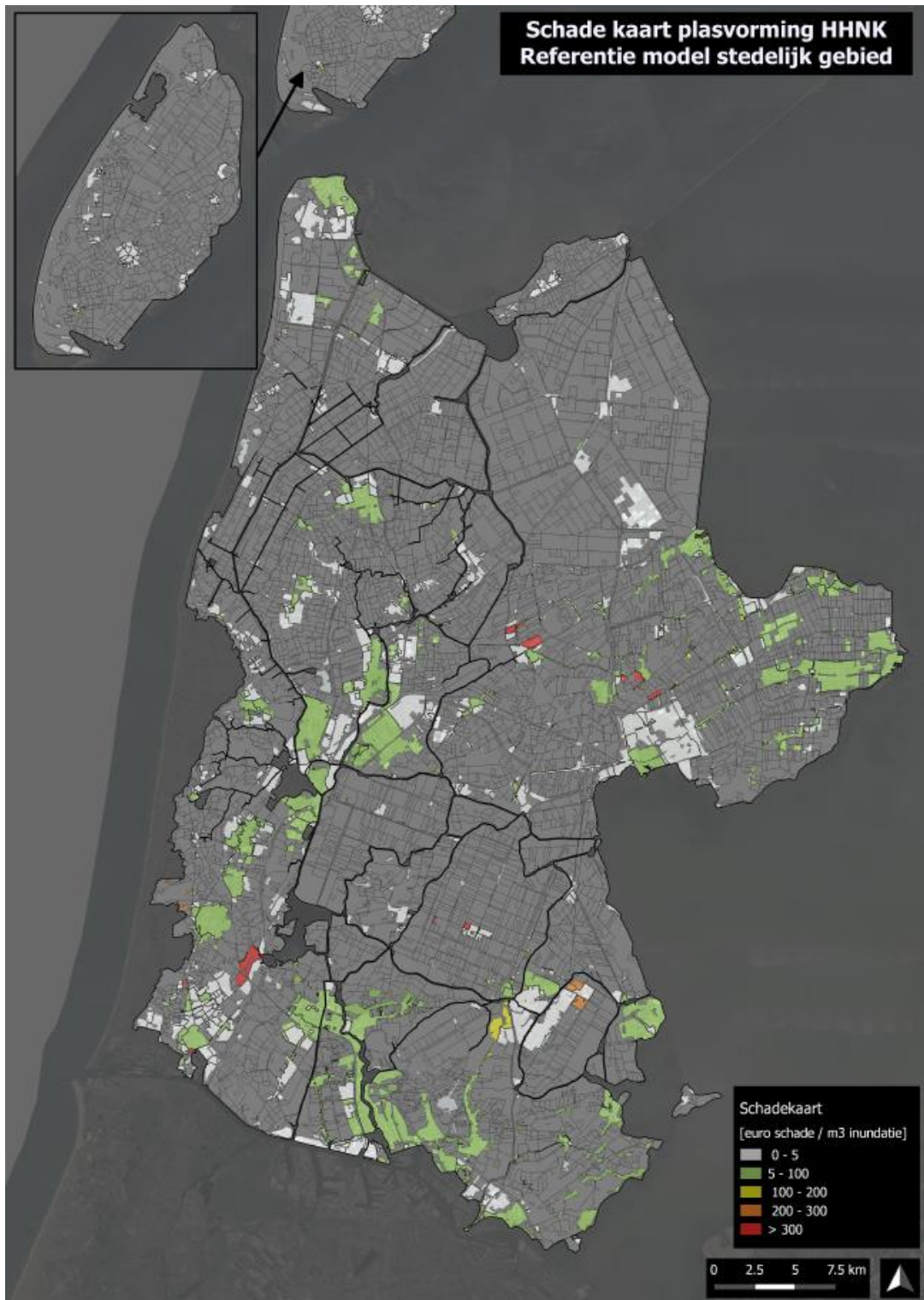
## Schade per kuub per hectare

Om gebiedsbreed schade extensieve en schade intensieve gebieden te identificeren zijn er kaarten afgeleid met de schade per volume eenheid inundatie (€/m<sup>3</sup>) per peilgebied voor een bui met een neerslaghoeveelheid met een herhalingsstijd van eens per 100 jaar, een gemiddelde bodemtoestand (GGG) en waarbij alle neerslag binnen 2 uur valt (piek bui). De schades per kuub inundatie zijn gefilterd naar het stedelijke gebied (Figuur 96). In deze kaarten is te zien dat de VNK polders een aantal rode gebieden aangeven waar hoge schades per geïnundeerde kuub naar voren komen. Castricum, De Beemster en Purmer komen ook naar voren als gebieden met hoge schades per kuub inundatie. Deze kaarten laten zien dat bij deze neerslaggebeurtenis de schades per kuub inundatie voor het landelijke gebied onder de 100 euro/kuub blijven. Dit biedt mogelijkheden voor het afwentelen van schade vanuit de schade intensieve gebieden.

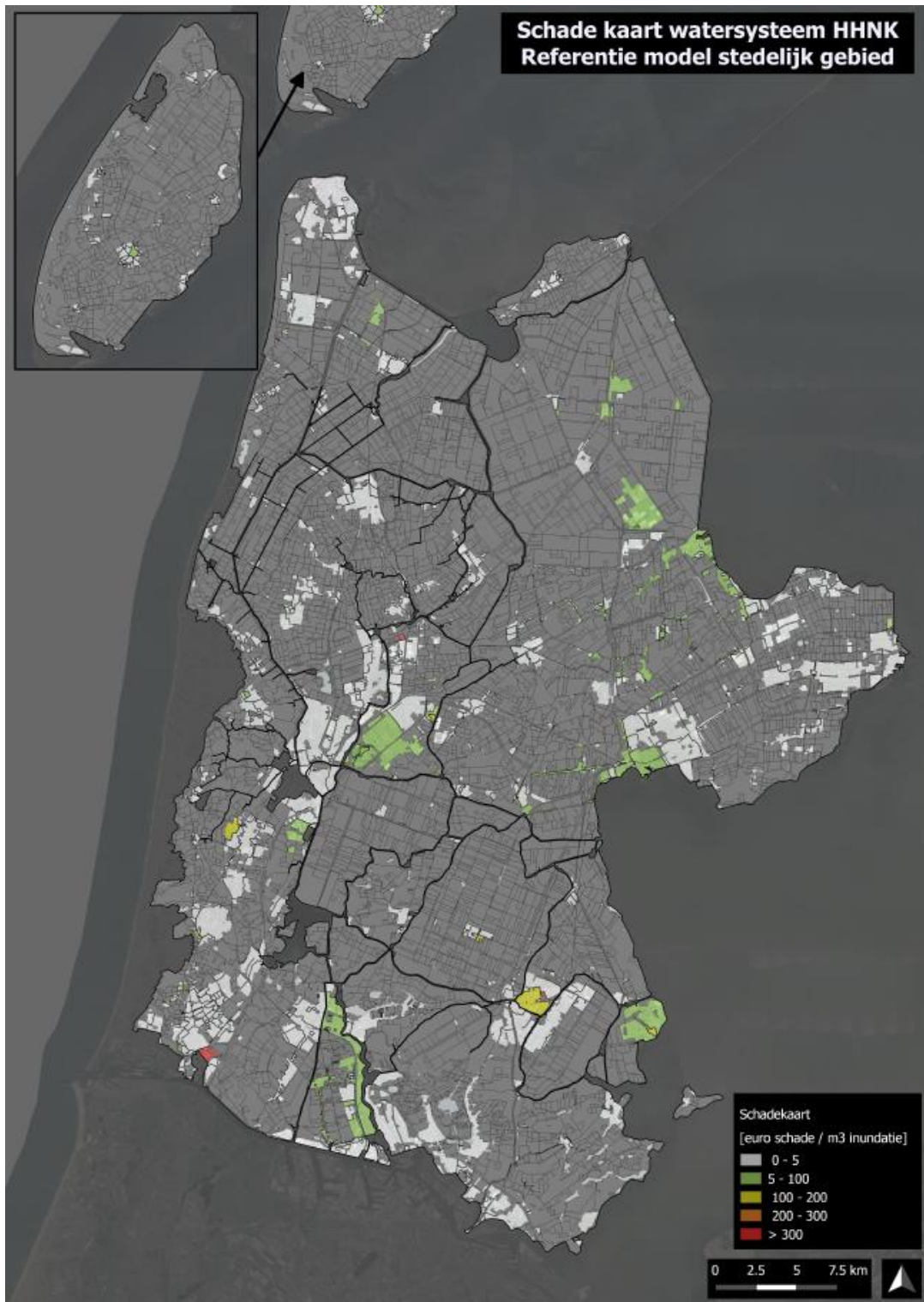


Figuur 96. Schade per kuub inundatie voor het stedelijk gebied.





Figuur 97 Schade per m<sup>3</sup> inundatievolume in het stedelijke gebied door plasvorming bij een T1000 situatie.



Figuur 98. Schade per m3 inundatievolume in het stedelijke gebied door watersysteemoverlast bij een T1000 situatie.

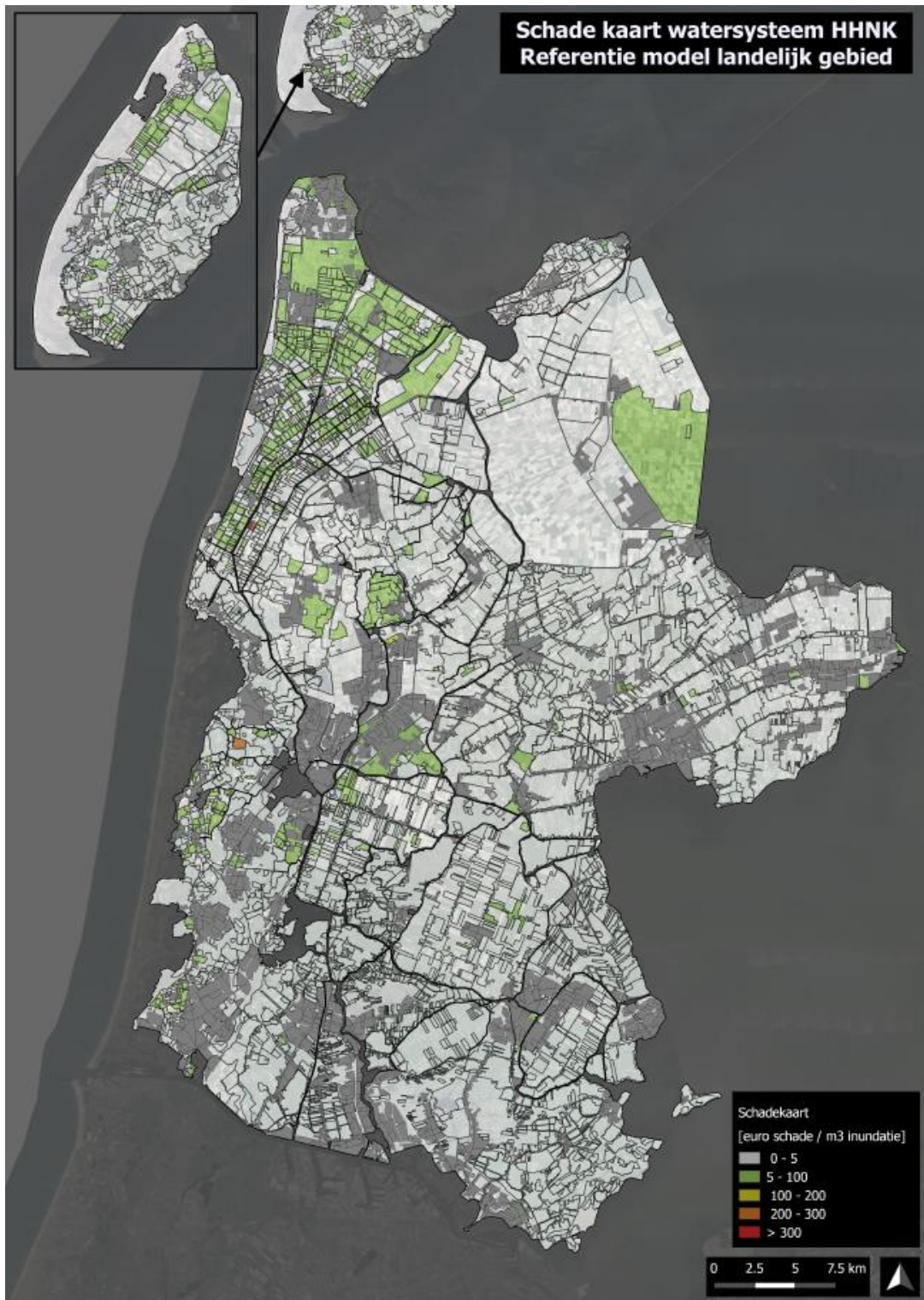




Figuur 99. Schade per kuub inundatie voor het landelijk gebied behorende bij een T100 blokbui.









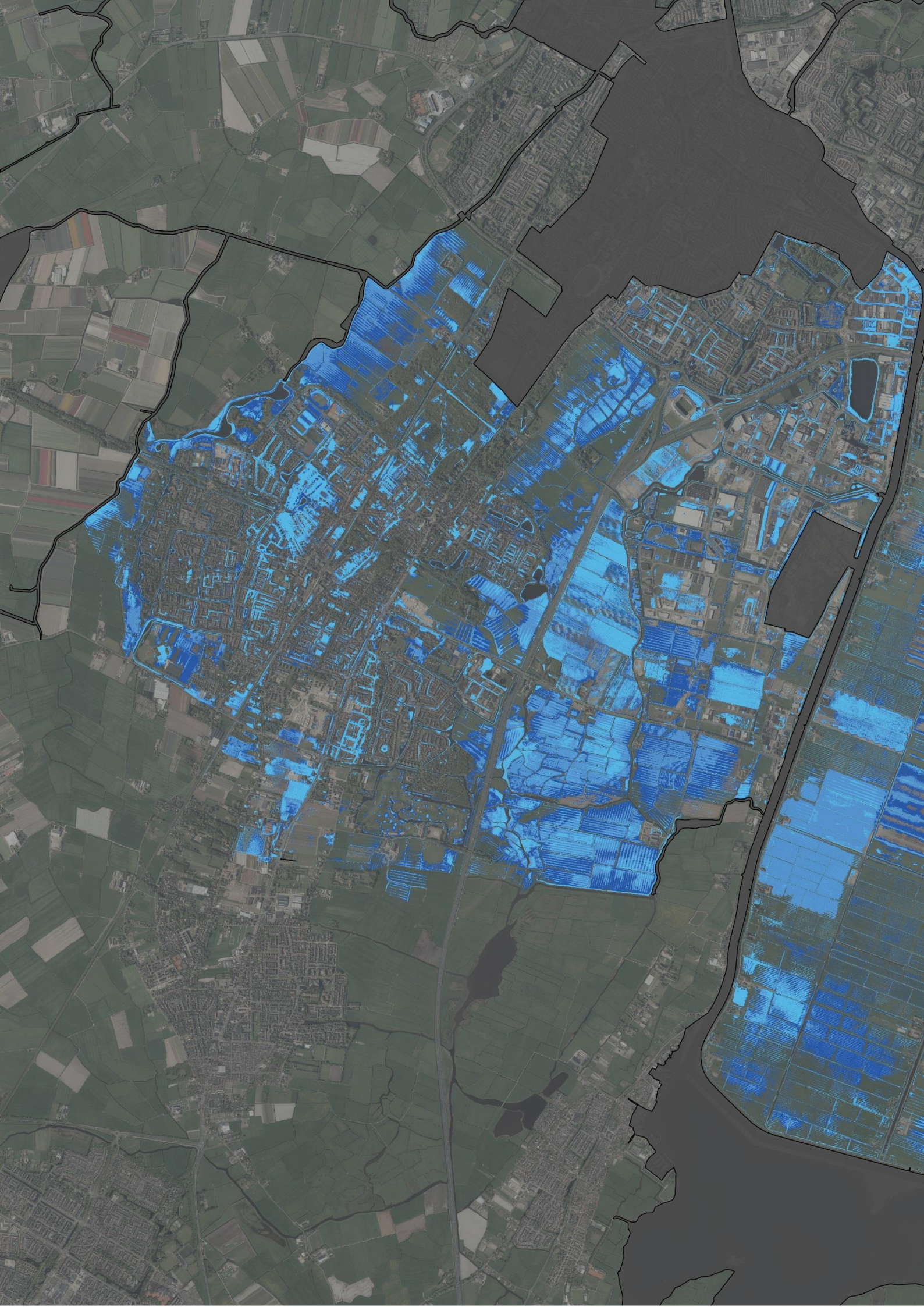
## Bijlage H Overzicht analyseresultaten alle poldergebieden.

Nr.	Deelgebied	CW voor maatregelen (€ mln.)	CW na maatregelen (€ mln.)	Investeringsruimte (€)	Kosten maatregelen watersysteem (contante waarde) (€)		K/B verhouding	
					Totaal	klimaatadaptatie	klimaat adaptatie	totaal
1	Heerhugowaard	22.6	20.7	1.9	4 140 502	4 140 502	2.3	2.2
2	Drieban	2.7	2.3	0.4	830 173	118 596	0.3	2.1
3	Purmer	8.1	8.1	0.0	633 986	633 986	51.9	15.9
4	Groot Limmer polder	47.9	47.3	0.6	2 407 225	1 961 226	4.1	3.9
5	Koegras	40.6	36.0	4.6	5 629 459	5 629 459	1.2	1.1
6	Marken	0.1	0.1	0.0	18 531	18 531	n.v.t.	n.v.t.
7	HUB	32.7	32.5	0.2	2 105 131	2 105 131	9.9	9.9
8	Beemster	17.2	17.2	0.0	417 241	417 241	n.v.t.	n.v.t.
9	VNK	29.1	29.1	0.0	1 032 318	1 032 318	n.v.t.	n.v.t.
10	t Hoekje	2.7	2.5	0.1	11 860	11 860	0.1	0.1
11	Assendelft	3.3	3.3	0.0	495 934	61 872	3.3	25.3
12	Grootslag	19.2	19.2	0.0	102 214	13 267	n.v.t.	n.v.t.
13	Heiloo	36.0	35.9	0.1	626 930	605 992	5.5	4.9
14	Purmerend	22.4	22.3	0.1	386 023	386 023	3.3	1.9
15	Starnmeer	0.2	0.2	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
16	Eierland	5.1	5.0	0.1	1 390 439	1 390 439	22.5	12.1
17	Mijzen	0.2	0.2	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
18	Oudorp	2.1	2.1	0.0	47 438	47 438	1.1	1.1
20	Wijdewormer	0.4	0.4	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
21	Noorderkaag	0.6	0.6	0.0	22 237	0	n.v.t.	n.v.t.
23	Edam Volendam Katwoude	6.8	1.4	5.3	440 288	440 288	0.1	0.1
24	VRNK-Oost (Groet Braakpolder / Oosterpolder Niedorp)	1.8	1.8	0.0	456 241	224 516	n.v.t.	n.v.t.

Nr.	Deelgebied	CW voor maatregelen (€ mln.)	CW na maatregelen (€ mln.)	Investeringsruimte (€)	Kosten maatregelen watersysteem (contante waarde) (€)		K/B verhouding	
					Totaal	klimaatadaptatie	klimaat adaptatie	totaal
25	Wieringermeer	34.2	34.2	0.0	6 426 293	5 135 492	n.v.t.	n.v.t.
26	Binnenduinrand Egmond	6.0	6.0	0.0	0	0	9.9	0.0
27	Geestmerambacht	11.3	10.9	0.4	2 042 178	2 042 178	4.8	4.8
28	Waterland	9.3	9.3	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
29	Schermer	8.2	7.7	0.4	2 738 362	2 738 362	6.5	4.1
30	Afdeling Z / Zijpe west	6.9	6.9	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
31	Oosterpolder Hoorn	3.4	3.4	0.0	330 436	330 436	n.v.t.	n.v.t.
32	Polder Westzaan	16.1	15.9	0.2	119 626	119 626	0.5	0.5
33	Bergermeer	4.9	1.5	3.4	104 362	104 362	0.03	0.03
34	Wieringerwaard	3.2	3.2	0.0	130 895	130 895	n.v.t.	n.v.t.
35	Schagerkogge	1.4	1.3	0.1	286 388	286 388	3.5	3.5
36	Zeevang	0.7	0.7	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
37	Westerkogge	3.4	3.4	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
38	Alkmaardermeerpolders	0.2	0.2	0.0	310 813	310 813	n.v.t.	n.v.t.
39	Wieringen	0.8	0.8	0.0	794 043	794 043	181.9	110.7
40	Zijpe en Hazepolder zuid	2.8	2.8	0.0	177 894	0	0.0	24.6
41	Egmondermeer	1.3	1.3	0.0	131 465	61 872	n.v.t.	n.v.t.
42	Oostzaan	13.8	13.8	0.0	256 313	256 313	n.v.t.	n.v.t.
43	HOUW (Hensbroek, Obdam, Ursem, Wogmeer)	2.8	2.8	0.0	451 462	451 462	n.v.t.	n.v.t.
44	Zijpe en Hazepolder noord	3.9	3.9	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
45	Callantsoog	1.7	1.6	0.0	487 503	185 617	7.8	20.4
46	Bergen oost + noord (Verenigde polders t/m Leipolder)	1.4	1.4	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
47	De Kaag, Lage Hoek, Berkmeer, Veenhuizen	0.7	0.7	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
48	Valkkoog Schagerwaard	1.1	1.1	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
49	Waarland woudmeer Speketer	2.7	2.6	0.1	13 267	13 267	0.0	0.2
50	Wormer en Jisperveld	2.4	2.4	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
51	Eilandspolder	0.6	0.6	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
53	VRNK west / Niedorperkogge west	1.9	1.6	0.3	366 329	366 329	1.3	1.3
54	Anna Paulowna	21.8	21.8	0.0	867 703	867 703	41.6	41.6

Nr.	Deelgebied	CW voor maatregelen (€ mln.)	CW na maatregelen (€ mln.)	Investeringsruimte (€)	Kosten maatregelen watersysteem (contante waarde) (€)		K/B verhouding	
					Totaal	klimaatadaptatie	klimaat adaptatie	totaal
55	NZK polders	1.0	1.0	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
56	Beetskoog	0.2	0.2	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
57	Texel zuid	6.1	6.1	0.0	44 474	0	0.0	114.5
99	Zwartendijkspolder	0.0	0.0	0.0	0	0	n.v.t.	n.v.t.
A	Schermerboezem	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1 482 452	1 482 452	n.v.t.	n.v.t.
B	VRNK-boezem	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	2 223 677	2 223 677	n.v.t.	n.v.t.
C	Amstelmeerboezem	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0	0	n.v.t.	n.v.t.
<b>Totaal:</b>		<b>475,4</b>	<b>456,7</b>	<b>18.8</b>	<b>41,2</b>	<b>33,7</b>	<b>1,8</b>	<b>2,2</b>







# Colofon

De studie Bescherming Wateroverlast Noorderkwartier 2 (BWN2) is uitgevoerd in opdracht van het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en is opgeleverd in december 2020. Aan de studie hebben behalve de genoemde personen vele adviseurs, gebiedsbeheerders en specialisten van het hoogheemraadschap meegewerkt. Resultaten en tussenresultaten zijn in het kader van het Ruimtelijk Adaptatieproces gedeeld en besproken met tal van gemeenten en belanghebbenden.

De studie is mede tot stand gekomen met financiële steun vanuit de provincie Noord-Holland en de Europese Unie (cofinanciering door het Europees Fonds voor Regionale Ontwikkeling in het kader van STAR2C's, Interreg 2 Zeeën-Programma 2014-2020)

## Rapportstatus

Definitief

## Team opdrachtgever

Marcel Boomgaard, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Wouter van Esse, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Wietse van Gerwen, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Anne Groot Kormelink, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Matthijs Hekstra, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Jeroen Hermans, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Niel de Jong, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Michael Pieterse, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier  
Maarten Poort, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (projectleider)

## Opdrachtnemers

De studie is uitgevoerd door Hydrologic en HKV lijn in water in samenwerking met Nelen & Schuurmans

## Team opdrachtnemers

Marcel Alderlieste, HydroLogic  
Ruben Boelens, HydroLogic  
Janneke de Graaf, HydroLogic (projectleider)  
Bertus de Graaff, HKV  
Hugo Hagedooren, HKV  
Doeke Kampman, Nelen & Schuurmans  
Anne Leskens, Nelen & Schuurmans  
Ralf Linneman, HydroLogic  
Guus Rongen, HKV  
Bram Schnitzler, HydroLogic  
Emiel Verstegen, Nelen & Schuurmans  
Nils van der Vliet, HKV