

IMPACT VAN DE NATTE WINTER 2023-2024 OP BOEZEMKADEN

LESSEN VOOR DIJKVEILIGHEID: OPGETREDEN
SCHADES EN FREATISCHE LIJNEN



RAPPORT

2025
32

IMPACT VAN DE NATTE WINTER 2023-2024 OP BOEZEMKADEN

LESSEN VOOR DIJKVEILIGHEID: OPGETREDEN SCHADES EN FREATISCHE LIJNEN

RAPPORT

2025

32

ISBN 978.94.6479.111.2



COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 2180
3800 CD Amersfoort

AUTEURS Bart Strijker, HKV Lijn in Water / TU Delft

BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Douwe Yska, hoogheemraadschap Schieland en de Krimpenerwaard
Jannes Haanstra, hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Teun Hanzen, hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Erik Vastenburg, hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Henk van Hemert, Rijkswaterstaat WVL / STOWA
Oscar van Dam, STOWA

VORMGEVING Buro Vormvast

STOWA STOWA 2025-32

ISBN 978.94.6479.111.2

De inhoud van deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden in de publicatie, of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud ervan.

STOWA spant zich in de rechthebbenden van in de uitgave gebruikte afbeeldingen te respecteren conform het auteursrecht. Indien u desondanks van mening bent dat uw rechten in het geding zijn, dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

TEN GELEIDE

NEERSLAG ALS DRIJVENDE KRACHT ACHTER DIJKINSTABILITEIT: LESSEN UIT EEN UITZONDERLIJK NATTE WINTER

De winter van 2023-2024 was uitzonderlijk nat, met neerslaghoeveelheden die gemiddeld eens in de 10 tot 100 jaar voorkomen. Deze situatie bood een unieke kans om de invloed van extreme neerslag op de stabiliteit van boezem- en polderkaden te onderzoeken. Bij de meeste kaden traden geen grote problemen op, maar lokaal—bij Delfland en Rivierenland—waren er wel afschuivingen, verzakkingen en lekkages. Juist daar viel ook extreem veel neerslag in enkele dagen tijd.

Van boezempeil naar freatische lijn¹: een nieuw perspectief op stabiliteit

Deze schades traden op ondanks een geringe verhoging van de boezemwaterstanden, wat het belang van de neerslag op stabiliteit van dijken laat zien. De neerslag op de dijk kan deze doen verzadigen en de stabiliteit verslechteren. Deze studie biedt waterbeheerders nieuwe inzichten en handelingsperspectieven om hun beheer toekomstbestendiger, kosteneffectiever en veiliger te maken.

Onderzoek met directe toepasbaarheid

Door een combinatie van schade-inventarisaties, peilbuismetingen en analyse van freatische lijnen zijn de volgende lessen getrokken:

- **Neerslag is een onderschatte risicofactor:** Schades traden op ondanks beheersbare boezempeilen, waarbij niet de boezemwaterstand maar juist de neerslag de belangrijkste factor bleek.
- **Nieuwe indicatoren voor stabiliteit:** Het monitoren van de boezemwaterstand alleen is onvoldoende. Waterschappen wordt geadviseerd ook neerslag en freatische lijnen te monitoren.
- **Handelingsperspectief voor beheerders:** Door het inrichten van meetraaien en het gebruik van tijdreeksmodellen kunnen waterschappen kritieke situaties beter signaleren en anticiperen.
- **Kosteneffectieve veiligheid:** Door beter inzicht in de werkelijke belasting kunnen maatregelen gericht worden ingezet, wat leidt tot efficiënter beheer.

Door betere monitoring en signalering van grondwaterstanden kunnen waterschappen beter anticiperen op risico's. Dat voorkomt schade, maakt beheer effectiever, en draagt bij aan klimaatadaptatie en efficiënter gebruik van middelen.

1 De freatische lijn in grond is in wezen de hypothetische positie van het grondwater waar de waterdruk gelijk is aan de atmosferische druk. Boven die lijn is, afhankelijk van de grondsoort, een zekere zone aanwezig waarin zich door capillaire opstijging ook grondwater bevindt: de capillaire zone. Capillaire opstijging is het proces waarbij water in de bodem vanuit de grondwatertafel tussen poriën en openingen tussen de bodemdeeltjes omhoog wordt gezogen.

SAMENVATTING

LESSEN VOOR DIJKVEILIGHEID

Hoge grondwaterstanden in boezem- en polderkaden zijn de drijvende kracht voor afschuivingen en als gevolg daarvan overstromingen. Actueel inzicht in en duiding van de effecten van grondwaterstanden is daarom nodig voor een adequaat veiligheidsbeeld van deze kaden, zowel bij de reguliere toetsing op veiligheid (koude fase) als in daadwerkelijke hoogwatersituaties (warme fase).

Grondwaterstanden in kaden geven hoge waarden hoofdzakelijk door extreme neerslaggebeurtenissen van enkele dagen volgend op een natte periode waarbij de grondwaterstand initieel al hoog is. Deze hoge waterstanden zijn dus niet zozeer als gevolg van fluctuaties in de boezemwaterstand. Deze waarnemingen zijn gedaan in de winter van 2023-2024, welke uitzonderlijk nat was met ook extreme neerslag over periodes van één tot vier dagen.

Voor waterschappen in het midden en zuidwesten van het land zijn terugkeertijden ingeschat van gemiddeld eens in de 10 tot 100 jaar. Deze studie evalueert de impact van deze natte winter op boezem- en polderkaden en trekt lessen voor dijkveiligheid, specifiek voor dijkstabiliteit. De focus ligt op opgetreden schades en grondwaterstanden. De volgende lessen zijn getrokken op basis van een inventarisatie bij waterschappen naar de schades en metingen, verspreid over West-Nederland:

1. **Wel schade door extreme neerslag, geen grote problemen met kades.** Bij twee waterschappen, Delfland en Rivierenland, waren er lokaal schades tijdens de natte winter (afschuivingen, verzakkingen en lekkages). Bij deze twee waterschappen vonden ook de hoogste neerslagsommen plaats over periodes van één tot vier dagen. Tegelijkertijd, traden bij het gros van de kaden geen problemen op wat in potentie informatie geeft over de sterkte van deze kaden.
2. **Boezemwaterstand in combinatie met grondwaterstand is een betere indicator voor de actuele stabiliteit.** De boezemwaterstand werd door elk waterschap gebruikt als indicator voor de belastingsituatie, welke beheersbaar was tijdens de natte winter. Hierdoor zagen veel waterschappen de vele neerslag zonder verhoogde boezemwaterstand niet als relevante belastingsituatie. Dit is een tekortkoming in de huidige signalering, waarbij deze winter heeft laten zien dat de boezemwaterstand niet een volledig dekkende maat is voor de stabiliteit van kaden. Voor een vollediger veiligheidsbeeld is het nodig om het effect van neerslag op de initieel aanwezige grondwaterstanden te beschouwen, en dat ook als indicator te gebruiken voor dijkstabiliteit.
3. **Keuzes bij de schematisatie van de freatische lijn zijn sterk bepalend voor de verwachte stabiliteit.** De metingen laten zien dat de maximaal gemeten grondwaterstanden tussen de dwarsprofielen een grote variatie hebben, variërend van een vrijwel volledig verzadigde dijk tot een grondwaterstand van twee meter onder het maaiveld. Voor de schematisering van de freatische lijn binnen veiligheidstoetsen adviseren we om expliciet een keuze te maken wat deze lijn zou moeten weerspiegelen: is dat een veilige keuze (95%-percentiel) of een beste schatting (gemiddelde waarde)?

4. Stijging grondwaterstand in extreme situaties (T100) bedraagt, ten opzichte van de jaarlijkse grondwaterstand (T1), veelal enkele decimeters. Uit de metingen en eerdere modelstudies volgt dat extreme grondwaterstanden dicht bij de jaarlijkse waarden liggen. Dit is berekend door te kijken naar de extra neerslag bij extremere gebeurtenissen en hoe de grondwaterstand hierdoor zal stijgen. Gemiddeld neemt de grondwaterstand met 15 tot 30 cm toe tussen de jaarlijkse (T=1 jaar) en extreme situatie (T=100 jaar), afhankelijk van de duur van de neerslagperiode.

STOWA IN HET KORT

HOE WE WERKEN

STOWA is het kennis- en innovatiecentrum voor regionale waterbeheerders in Nederland; de waterschappen en provincies. We helpen ze met het verkrijgen van nieuwe kennis en inzichten die nodig zijn om de opgaven van de regionale waterbeheerders beter te kunnen uitvoeren. Dat doen we door kennisvragen te formuleren en te selecteren in programmacommissies. We zetten ons onderzoek uit bij een keur aan experts, adviesbureaus, instituten en universiteiten, die we begeleiden tijdens hun werk. We zorgen voor de beschikbaarstelling en verspreiding van de kennis, inzichten en antwoorden aan de gezamenlijke waterbeheerders. We stimuleren de uitwisseling van kennis en ervaringen, via bijeenkomsten, werkgroepen, excursies, conferenties en communities of practice. We werken samen met onder andere ministeries, Rijkswaterstaat, gemeenten, drinkwaterbedrijven.

WAT WE ONDERZOEKEN

Inhoudelijk richt STOWA zich op alle onderdelen van waterbeheer, van waterkering en stedelijk waterbeheer tot waterzuivering en watersystemen. Belangrijke thema's daarbij zijn klimaatadaptatie, waterveiligheid, waterkwaliteit en ecologie, energietransitie en circulaire economie.

De kennisvragen die STOWA beantwoordt liggen meestal op technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied. Onze kennis is altijd gericht op de praktijk van regionale waterbeheerders. Dat is waar we voor staan, als Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.

WIE WE ZIJN

STOWA is als kennisorganisatie onafhankelijk, onpartijdig en transparant. De afnemers van onze kennis moeten erop kunnen vertrouwen dat de inhoud van onze rapporten objectief en representatief is. Alleen zo kan onze kennis worden ingezet voor beter waterbeheer en innovaties die antwoord geven op de uitdagingen van vandaag en morgen. Het is aan regionale waterbeheerders zelf te bepalen hoe ze de kennis van STOWA in de praktijk gebruiken. STOWA kan daarbij een rol spelen als adviseur, maar is geen uitvoerder of regisseur.

STOWA is een stichting die de richtlijnen volgt voor organisaties zonder winstoogmerk (RJ-640). In ons jaarverslag is daarom naast de cijfermatige jaarrekening onder meer ook een directieverslag over de stichting, haar activiteiten en kentallen opgenomen.

IMPACT VAN DE NATTE WINTER 2023-2024 OP BOEZEMKADEN LESSEN VOOR DIJKVEILIGHEID: OPGETREDEN SCHADES EN FREATISCHE LIJNEN

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INTRODUCTIE	1
1.1	Aanleiding	1
1.2	Doel en werkzaamheden	2
2	DE NATTE WINTER VAN 2023-2024	3
2.1	Belastingsituatie bij boezem- en polderkaden	3
2.2	Meteorologische duiding	4
3	SCHADES EN SIGNALLEN VOOR WATERVEILIGHEID	8
3.1	Reacties waterschappen	8
3.2	Probleemgevallen en schades	10
3.2.1	Specificatie probleemgevallen en schades	10
3.3	Signaleren belastingsituaties	10
3.4	Overzicht bevindingen inventarisatie	11
4	DUIDING FREATISCHE LIJN	12
4.1	Gebruikte peilbuismetingen	12
4.1.1	Een eerste beeld op basis van meerjarige meetreeksen	12
4.1.2	Ingezoomd op de natte winter 2023-2024 en relevante neerslagduur	13
4.2	Metingen en schematiseringen in veiligheidstoetsen	15
4.2.1	Schematisering freatische lijn bij veiligheidstoetsingen	15
4.2.2	Vergelijking maximaal gemeten grondwaterstanden met de schematisering van freatische lijnen	16
4.2.3	Verklarende dijkenmerken voor ligging freatische lijn	19
4.3	Reflectie op extreme grondwaterstanden	21
4.3.1	Een plateauzone van extreme grondwaterstanden bij boezemkaden	21
4.3.2	Waarom liggen extremen relatief dicht bij jaarlijkse situaties?	22

5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	26
5.1	Lessen dijkveiligheid	26
5.2	Aanbevelingen	27
5.2.1	Beheer en beleid	27
5.2.2	Vervolganalyses	27
6	REFERENTIES	29
BIJLAGE A	INVENTARISATIE PROBLEEMGEVALLEN	30
BIJLAGE B	MAXIMALE NEERSLAG BIJ SCHADELOCATIES	33
BIJLAGE C	MOMENT VAN DE MAXIMALE NEERSLAG IN NEDERLAND	34
BIJLAGE D	SCHEMATISERING FREATISCHE LIJNEN	37
BIJLAGE E	MAXIMAAL GEMETEN GRONDWATERSTANDEN TEN OPZICHTE VAN SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN	39
BIJLAGE F	PEILBUISMETINGEN BOVEN MAAIVELD	40

1

INTRODUCTIE

1.1 AANLEIDING

Het winterhalfjaar van 2023-2024 was uitzonderlijk nat in Nederland. In de maanden oktober, november en februari viel twee keer zoveel neerslag als normaal. De gevallen neerslag in de polders van West-Nederland werd afgevoerd via polder-boezemsystemen, waarbij gemalen overuren draaiden om de waterstanden te beheersen. Langs de waterlopen van de polder-boezemsystemen liggen polder- en boezemkaden², voortaan kaden genoemd, welke essentieel zijn voor het functioneren van de watersystemen en bescherming bieden aan de lagergelegen polders. Deze kaden worden beheerd door de waterschappen. Figuur 1 toont de ligging van deze kaden.

Figuur 1

Kaart van Nederland met de genormeerde regionale keringen in zwart en water in blauw. De polder- en boezemkaden zijn hier een subset van en liggen hoofdzakelijk langs de kustpolders en in het rivierenland



Waterschappen toetsen of de kaden veilig genoeg zijn, voeren inspecties uit en nemen maatregelen wanneer de veiligheid onvoldoende is. Dit wordt gedaan voor verschillende faalmechanismen waaronder de binnenwaartse macrostabiliteit van dijken. De belasting op de dijken varieert door het jaar heen door het verkeer op de dijk en door variaties in het niveau van de grondwaterstand in de dijk. Hoge grondwaterstanden leiden tot hoge water- spanningen in de grond en daardoor tot een afname van de schuifweerstand, waardoor een kade kan afschuiven. Voor de stabiliteit is de ligging van de freatische lijn (= het verloop van

² Een boezemkade is een dijk die een polder scheidt van de boezem en een polderkade scheidt de polder van een andere waterloop dan de boezem, vaak een tussenboezem.

de grondwaterstand in de kade vanaf het buitentalud tot in het nabije achterland) van groot belang.

De natte winter van 2023-2024 biedt een interessante kans om de ontwikkeling van gemeten freatische grondwaterstand te analyseren en het functioneren van boezem- en polderkaden te evalueren. Hieruit zijn lessen te trekken voor dijkveiligheid.

1.2 DOEL EN WERKZAAMHEDEN

Het doel van deze studie is om de impact van de natte winter van 2023-2024 op de boezem- en polderkaden te evalueren en hieruit lessen te trekken voor dijkveiligheid. De winterperiode is in deze studie gedefinieerd als de maanden oktober tot en met maart. De nadruk ligt daarbij op opgetreden schades en de gemeten (freatische) grondwaterstanden.

Om dit doel te bereiken zijn de volgende werkzaamheden verricht:

1. inventariseren van opgetreden probleemgevallen en schades bij boezem- en polderkaden;
2. vergelijken van de gemeten grondwaterstanden in boezem- en polderkaden met de schematiseringen van de freatische lijn binnen toetsingen op stabiliteit en koppelen aan verschillende dijkenmerken;
3. duiding geven aan extreme grondwaterstanden in boezem- en polderkaden en hoe deze zich verhouden ten opzichte van jaarlijkse optredende waarden.

De resulterende inzichten dragen bij aan een beter begrip van de freatische lijnen en het belang daarvan voor de veiligheid van boezem- en polderkaden in Nederland.

Hoofdstuk 2 beschouwt de natte winter van 2023 en 2024. Zowel de belastingen bij boezem- en polderkaden als de meteorologische situatie van de natte winter van 2023-2024 worden geduid. Vervolgens beschrijft hoofdstuk 3 de uitkomsten van de inventarisatie naar opgetreden probleemgevallen en schades bij de waterschappen. In hoofdstuk 4 worden peilbuismetingen geanalyseerd. De gemeten grondwaterstanden worden vergeleken met schematiseringen die binnen veiligheidstoetsen worden gebruikt. Vervolgens worden verschillen in grondwaterstanden bij dijken gekoppeld aan dijkenmerken en sluit het hoofdstuk af met een reflectie op extreme grondwaterstanden. De conclusies en aanbevelingen staan in hoofdstuk 5.

2

DE NATTE WINTER VAN 2023-2024

2.1 BELASTINGSITUATIE BIJ BOEZEM- EN POLDERKADEN

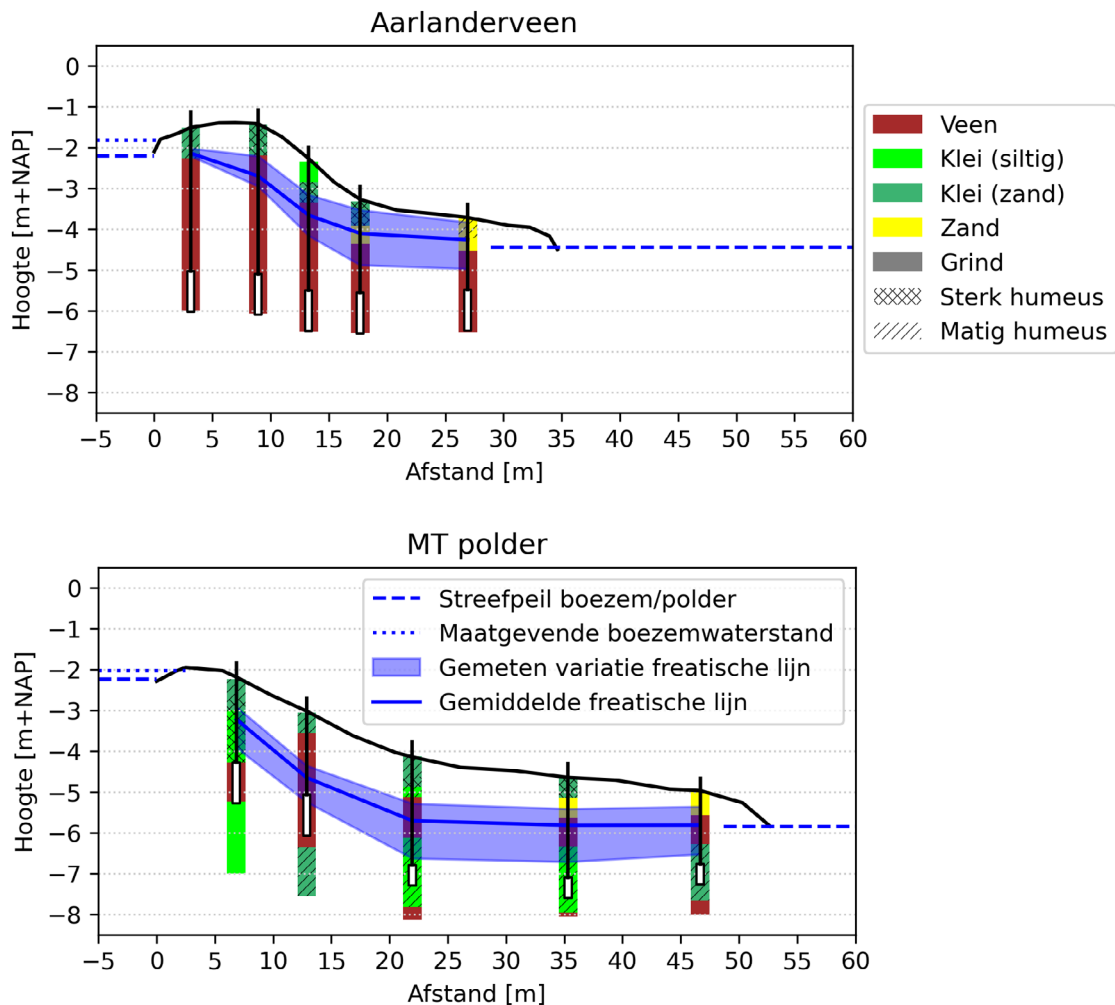
Voor boezem- en polderkaden zijn overwegend de binnenwaartse stabiliteit en hoogte de meest relevante faalmechanismen. Bij deze faalmechanismen kan een onderscheid worden gemaakt tussen de belasting en de sterkte. Voor het faalmechanisme binnenwaartse stabiliteit, hierna aangeduid als stabiliteit, omvat de belasting een hoge buitenwaterstand, gepaard met hoge freatische grondwaterstanden en vaak een verkeersbelasting, terwijl de sterkte wordt bepaald door de schuifweerstand van de grond. Uit stabiliteitsberekeningen volgt dat het maatgevende glijvlak voor stabiliteit vaak start in de kruin en niet in de boezem. Hierdoor heeft de buitenwaterstand zelf geen directe invloed op de stabiliteit, maar alleen via de indringing van buitenwater in het dijklichaam.

De verkeersbelasting varieert over de tijd: dagelijks rijden voertuigen over de dijk, en soms ook zwaar verkeer. Tijdens calamiteiten kan een weg dienen als evacuatie-route of moeten dijkinspecteurs over de dijk kunnen rijden. Een hoge verkeersbelasting vermindert de stabiliteit, en als dit samenvalt met een hoge freatische grondwaterstanden verslechtert de situatie verder. Hoge freatische grondwaterstanden bij boezem- en polderkaden kunnen ontstaan door een combinatie van hoge boezemwaterstanden en neerslag op de dijk, waarbij veelal de neerslag een grotere rol speelt. Dit blijkt uit peilbuismetingen: in Figuur 2 zijn twee voorbeelden van boezemkaden weergegeven, waarbij de doorgetrokken lijn (–) het streefpeil aangeeft, en de gestippelde lijn (:) de maatgevende condities markeert. De fluctuaties van de freatische lijn (weergegeven als het blauwe vlak) worden veroorzaakt door neerslag en zijn ordes groter dan de potentiële stijging van de boezemwaterstand van het streefpeil naar de maatgevende condities, een stijging die meestal slechts enkele decimeters bedraagt.

Een verhoogde boezemwaterstand beïnvloedt het niveau van de freatische lijn. Deze invloed is echter beperkt, doordat een verhoogde waterstand in veel boezemsystemen slechts enkele dagen aanhoudt. Hierdoor kan het buitenwater beperkt in de dijk indringen³. Ook kunnen damwanden en beschoeiingen langs de boezem de infiltratie van water beperken. Deze geringe impact van de waterstand op de grondwaterstanden in het dijklichaam geldt wanneer de boezem- en polderkaden bestaan uit een slecht doorlatende kern van klei of veen en zonder direct contact tussen boezemwater en de zandondergrond. Voor deze situaties zal de neerslag op de dijk een belangrijkere rol spelen voor hoge freatische lijnen in boezem- en polderkaden en de stabiliteit.

3 Op basis van de volgende formule uit TRWD kan de indringingsdiepte I geschat worden $I = \sqrt{(2kdt/n_z)}$, waarbij k de doorlatendheid is (0.25 -1 m/d), d de waterdiepte (2m), t de duur van het hoogwater (2-3 dagen) en n_z de porositeit (0.4). Tussen haakjes staan geschatte waarden, waarbij de indringingsdiepte circa 2-4 meter is.

Figuur 2 Dwarsdoorsnede van twee meetlocaties, waarbij verticale balken met kleuren de locaties met de peilbuizen aangeven en de aanwezige ondergrond op basis van handboringen. Het blauwe vlak toont de gemeten variatie van de freatische lijn gedurende de 4-jarige meetperiode, met de gemiddelde positie aangegeven door een doorgetrokken lijn. Daarnaast zijn de streefpeilen van zowel de boezem als de polder zichtbaar, inclusief de maatgevende boezemwaterstand

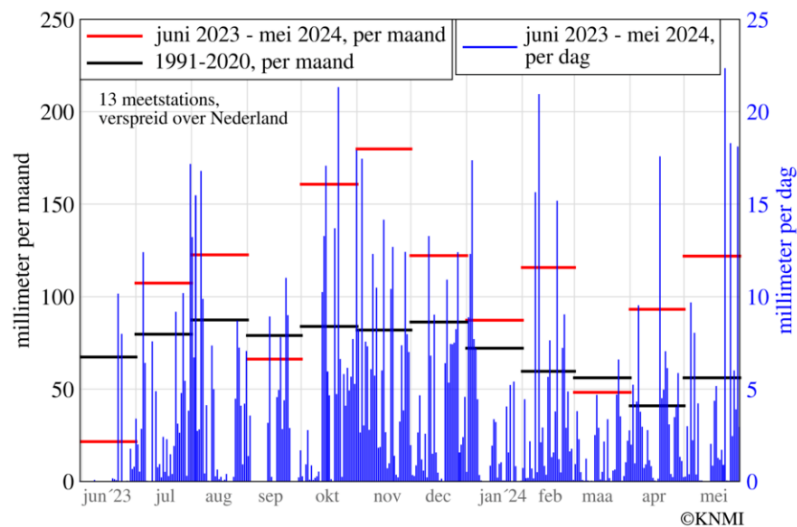


2.2 METEOROLOGISCHE DUIDING

Het jaar 2023 was het natste jaar sinds het begin van de meetreeksen in 1906. Landelijk viel gemiddeld 1152 mm neerslag, gebaseerd op de landelijke P13-neerslagstations (KNMI, 2024). Hiermee werd het record van 1998 verbroken (1109 mm), een jaar waarin tweemaal een periode van wateroverlast optrad. Vooral in delen van Zuid-Holland, zoals Delfland en Goeree-Overflakkee, vielen grote hoeveelheden neerslag, met driedaagse neerslaghoeveelheden van gemiddeld ongeveer 150 mm over een groot gebied. In deze perioden steeg het boezempeil van de Delflandse boezem op meerdere plekken boven de kruin van kaden uit. Er zijn geen kaden doorgebroken. Deze extreme meerdaagse neerslaghoeveelheden hebben in de winter van 2023-2024 niet plaatsgevonden, waarbij de extremititeit vooral zat in de extreme maandelijkse en meermaandelijke neerslaghoeveelheden. De herhalingsperiode van de maximaal opgetreden gebiedsgemiddelde neerslag voor een periode van 90 dagen tussen oktober en december 2023 is geschat op ordegrrootte 100 tot 200 jaar (HKV, 2024). De maanden november en oktober waren met respectievelijk 180 mm en 160 mm neerslag beiden circa tweemaal zo nat als normaal, zie Figuur 3.

Figuur 3

Maandelijkse en dagelijkse neerslag in de periode juni 2023 t/m mei 2024. Gemiddelde van de P13-metstations verspreid over Nederland. (Bron: KNMI)



De neerslag op een kade leidt tot een verhoging van de freatische lijn, doordat de neerslag in de bodem infiltreert en hier tijdelijk geborgen wordt. Na verloop van tijd draineert het water uit de dijk richting de polder en/of diepere grondlagen en daalt de freatische lijn. Afhankelijk van de snelheid waarmee een dijk draineert is een specifieke neerslagduur van belang; bij een snel drainerende dijk zijn kortdurende neerslaggebeurtenissen met een hoge neerslagintensiteit het relevantst, terwijl bij trage drainage juist langdurige neerslaggebeurtenissen met een groot neerslagvolume relevanter zijn.

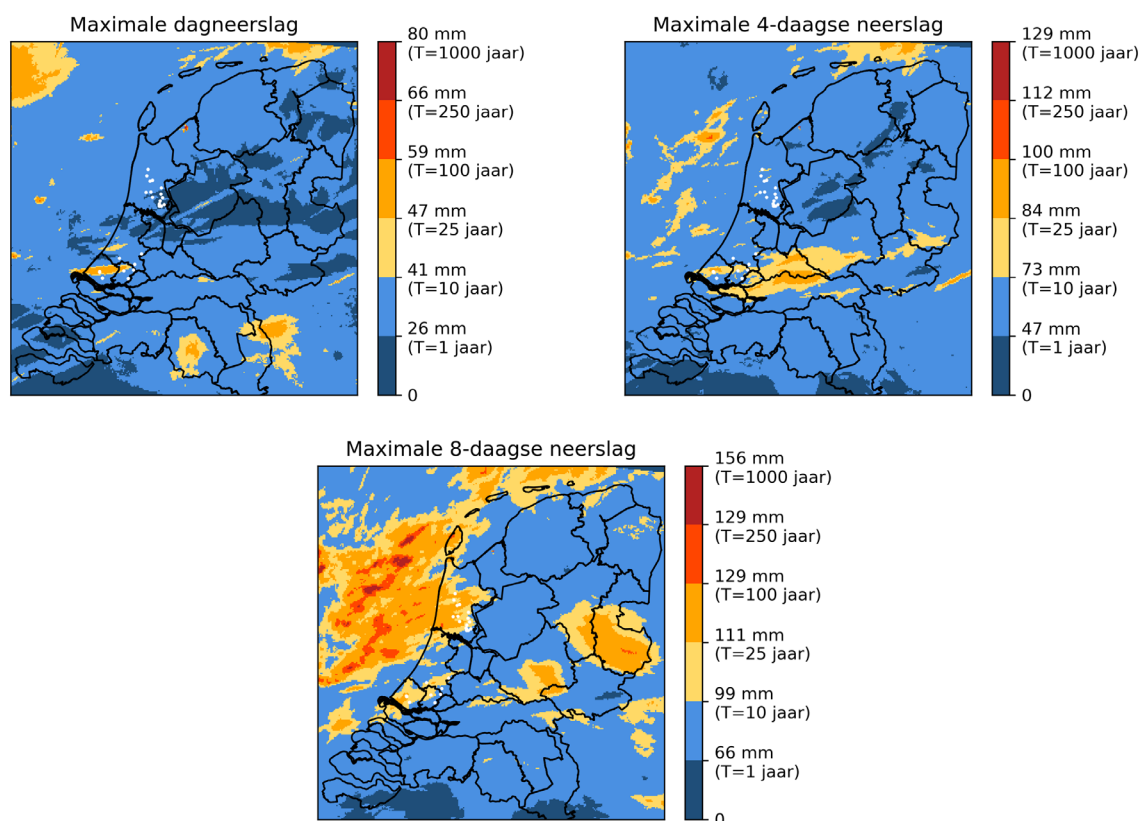
Op dit moment is er geen beeld van welke neerslagduren voor de polder- en boezemkaden relevant zijn. Hierom is gekeken naar de maximale gevallen neerslag tijdens de natte winter voor verschillende duren, namelijk dag-, vierdaagse- en achtdaagse neerslag, zie Figuur 4. Deze duren zijn gekozen op basis van beschikbare neerslagstatistiek (STOWA, 2019) en de inschatting dat neerslagduur korter dan één dag irrelevant is vanwege het relatief trage drainage van grondwatersystemen. Verder reageert de grondwaterstand in kaden veelal binnen één dag op de gevallen neerslag. Deze snelle respons komt doordat de grondwaterstanden veelal ondiep liggen, meestal enkele decimeters tot een meter onder het maaiveld. Daarnaast zal de grond boven de grondwaterstand bodemstructuur bevatten die leiden tot hogere doorlatendheden dan klei onder de grondwaterstand. Deze structuurvorming komt door biologische activiteiten, als graven van dieren (wormen, insecten, mollen) en door worteling van vegetatie, en scheuren die optreden door het krimpen en zwellen als gevolg van het droog en nat worden van klei. Typische doorlatendheden van gestructureerde klei zijn 1-10 m/dag, terwijl zonder structuurvorming het kleiner dan 0.1 m/dag kan zijn (TAW, 1996).

De extremiteiten van de neerslaghoeveelheden in Nederland hangen af van de beschouwde duur. Op basis van radarbeelden van het KNMI is het ruimtelijk beeld van de gevallen neerslag geanalyseerd⁴.

4 Hiervoor is het Final reanalysis international radar composite gebruikt van het KNMI. Op 21 november 2024 is hierover gecommuniceerd door Meteobase dat binnen dit product onder- en overschattingen zijn opgetreden in de periode 2019 tot februari 2023. Gemiddeld over Nederland over alle regenmeterlocaties en over een jaar is er geen duidelijke onderschatting in dagsommen, maar op individuele locaties van handregenmeters van het KNMI wel, met name op maandbasis. De oorzaak is een te glad correctieveld, berekend op basis van handregenmeters voor de hele final reanalysis dataset. De verwachting is dat het ruimtelijk beeld niet veel zal veranderen, maar de extremiteit wellicht wel.

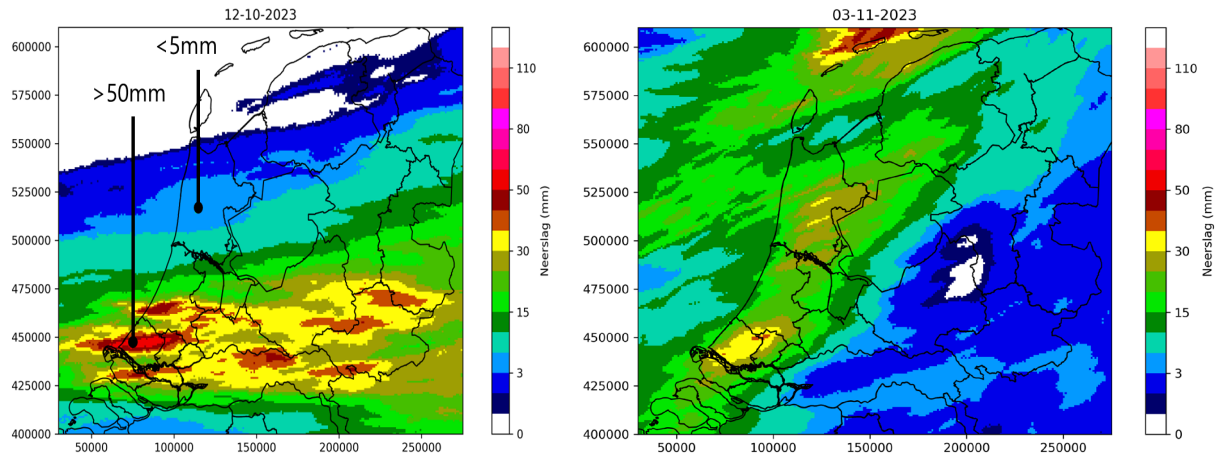
Tijdens het winterhalfjaar van 2023-2024 was voornamelijk de dagneerslag lokaal bij Delfland en HHSK extreem, met terugkeertijden tussen de 25 tot 100 jaar, zie Figuur 4. Het gebied met extreme vierdaagse neerslagsommen breidt zich uit richting HDSR en Rivierenland, waarbij in een gebied van 70 bij 30 km neerslaghoeveelheden voorkwamen die gemiddeld eens in de 10 tot 100 jaar verwacht worden op basis van puntstatistiek. Voor de achtdaagse neerslaghoeveelheid was het op andere plekken extreem, zoals bij Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier en waterschap Vechtstromen. Op sommige plekken waren lokaal de neerslaghoeveelheden zelfs extremer dan eens in de 100 jaar.

Figuur 4 De maximale neerslaghoeveelheden voor verschillende duren die plaatsvonden tijdens de winter van 2023-2024, waarbij in de kleurschaal is afgestemd op de bijbehorende terugkeertijden van neerslaghoeveelheden (op basis van Final reanalysis international radar composite en winterstatistiek in klimaatregio R). De witte punten geven de beschouwde peilbuismeetlocaties weer, zie paragraaf 4.1



De extreme dag- en vierdaagse neerslaghoeveelheden waren onder meer het gevolg van een uitzonderlijke neerslag op 12 oktober in Midden-Nederland, zie Figuur 5. Dit laat ook zien dat neerslag zeer lokaal kan zijn, waardoor bij het ene waterschap meer problemen kunnen optreden dan bij het andere waterschap.

Figuur 5 Hevige lokale neerslag op 12 oktober boven Delfland met neerslaghoeveelheden van meer dan 50 mm, terwijl bij Hoogheemraadschap Holland Noorderkwartier minder dan 5 mm neerslag viel (linker paneel). Op 3 november was het de 8^e dag op rij dat het regende, waarbij lokaal ook meer dan 30mm viel (rechter paneel)



3

SCHADES EN SIGNALLEN VOOR WATERVEILIGHEID

3.1 REACTIES WATERSCHAPPEN

In totaal zijn veertien waterschappen benaderd om een beeld te krijgen van 1) de opgetreden problemen en schades tijdens de natte winter en 2) of het waterschap de opgetreden belasting-situatie signaleert als relevante of kritieke belastingssituatie voor polder- en boezemkaden. Deze waterschappen hebben regionale keringen in het beheergebied, zie Figuur 6, waarbij sommige waterschappen ook aangaven niet de typische boezemkaden in het beheergebied te hebben; de waterstanden fluctueren hier meer en qua randvoorwaarden lijken ze meer op keringen langs de regionale rivieren. Dit waren waterschappen Scheldestromen, Brabantse Delta en Drents Overijsselse Delta.

Figuur 6 De waterschappen die benaderd zijn voor de inventarisatie. Links de dekking van de waterschappen op de kaart en rechts in een lijst



In de paragrafen 3.2 en 3.3 zijn de reacties op de gestelde vragen samengevat. In deze paragrafen staan de gestelde vragen aan waterschappen *schuingedrukt* en zijn vergelijkbare reacties samengevoegd om zo een overzichtelijk beeld te geven. Alle reacties van de waterschappen staan in Bijlage A. De reacties van waterschappen met probleemgevallen en schades staan uitgebreider beschreven in paragraaf 3.2.1. Verder is in paragraaf 3.4 een totaaloverzicht gegeven van de bevindingen uit de inventarisatie.

Let op! De reacties van de benaderde personen bevatten veelal een oordeel over de gebeurtenissen. De één beschouwt een kleine afschuiving bij een teensloot als schade, terwijl een ander dit niet noemenswaardig vindt. Bij het stellen van vragen is geprobeerd objectief te blijven en oordeelvorming te beperken.

3.2 PROBLEEMGEVALLEN EN SCHADES

Zijn er door de natte winter van 2023-2024 problemen opgetreden bij polder- en boezemkaden, aanvullend op de normale situatie? Zo ja, kunt u de problemen omschrijven?

- **Geen problemen of minimale impact (12 waterschappen):**

Afgelopen jaren zijn veel regionale keringen versterkt. Lokaal verhoogde waterstanden traden op bekende plekken op en beperkte maatregelen zoals plaatsen van zandzakken en tijdelijke pompinstallaties zijn ingezet. Lokaal zijn kleine afschuivingen of verzakkingen bij de teensloot of buitentalud (micro-instabiliteit) opgetreden.

- Wetterskip, AGV, HHSK, Rijnland, Noorderzijlvest, HHNK, Hunze & Aa's, WDOD, Brabantse Delta, Hollandse Delta, Scheldestromen en HDSR.

- **Schade(s) en herstelmaatregelen (2 waterschappen):**

Lokaal afschuivingen, verzakkingen en lekkages (2 waterschappen).

- Delfland en Rivierenland.

3.2.1 SPECIFICATIE PROBLEEMGEVALLEN EN SCHADES

Met name bij Delfland waren meerdere gevallen van schades aan de kaden:

- Regionale keringen bij de N468 tussen Schipluiden en Maasland. Deze kering was al in slechte staat door vervorming en verzakking, maar deze is aanzienlijk achteruitgegaan tijdens de natte winter van 2023-2024;
- De polderkade bij de Bovendijk in Den Haag (verzakking);
- De regionale kering bij de tramkade in Schipluiden (afschuiving);
- De regionale keringen bij de Vlaardingse kade (lekkage en verschuiving).

Figuur 7 Verzakkingen langs de regionale keringen bij de N468 tussen Schipluiden en Maasland (links). De sloot naast de dijk is gedempt en volgestort met zand om de dijk te verstevigen (rechts)



Ook bij Rivierenland was schade:

- Bij een smalle kering, waar al eerder problemen waren, is een binnentalud afgeschoven. Het lijkt erop dat het alleen gaat om een bovenste laag grond aan de binnenzijde: een bekledingslaag niet dieper dan 0,5m. Een echte glijcirkel is niet gezien, ook geen scheuren in het asfalt op de kruin van de weg. Over de weg rijdt regelmatig zwaar verkeer (vrachtwagens) en de teensloot ligt direct aan de binnentoe.

3.3 SIGNALEREN BELASTINGSITUATIES

Wordt de natte winter van 2023-2024 beschouwd als een relevante belastingsituatie voor polder- en boezemkaden binnen uw waterschap en is daarop actie ondernomen?

- **Ja, maar niet beduidend meer dan andere jaren (12 waterschappen):**

Waterpeilen waren relatief stabiel en beheersbaar en maatgevende waterstanden werden niet bereikt.

- Wetterskip, AGV, HHSK, Rijnland, Noorderzijlvest, Rivierenland, Hunze & Aa's, WDOOD, Brabantse Delta, Hollandse Delta, Scheldestromen en HDSR.
- **Relevante belastingsituatie (2 waterschappen):**
Maatgevende waterstanden werden niet bereikt, maar door de vele neerslag werd dit wel gezien als relevante belastingsituatie.
 - Delfland en HHNK.

Hanteert het waterschap een signaleringswaarde om potentieel kritieke situaties bij boezemkaden die te nat worden, te identificeren?

- **Een signaleringswaarde voor boezemwaterstanden (11 waterschappen)** is in gebruik, maar geen specifieke signaleringswaarde voor natte situaties in de dijk.
 - Wetterskip, AGV, HHSK, Rijnland, Noorderzijlvest, Hunze & Aa's, WDOOD, Brabantse Delta, Hollandse Delta, Scheldestromen en Delfland.
- **Wel de intentie/wil, maar nog in ontwikkeling (3 waterschappen):** freatische lijn is te relateren aan neerslag, maar nog in ontwikkeling, mede door gebrek aan langjarige metingen.
 - HHNK, Rivierenland en HDSR.

3.4 OVERZICHT BEVINDINGEN INVENTARISATIE

Bij de meeste waterschappen zijn geen problemen ontstaan of had de natte winter een minimale impact op de kaden. Bij twee waterschappen, Delfland en Rivierenland, waren lokaal schades door afschuivingen, verzakkingen en lekkages. Dit leidde niet tot waterveiligheidsproblemen, maar vroeg wel de nodige inzet van deze waterschappen. Dit waren schades die niet in normale winters optraden. De dagelijkse en meerdaagse neerslag op deze locaties was uitzonderlijk hoog (T=10-100 jaar, afhankelijk van de neerslagduur, zie bijlage C), wat het belang van de neerslag op dijken aangeeft. Tegelijkertijd geeft deze extreme neerslag in de winter ook informatie over de sterkte en de stabiliteit van veel dijken, omdat bij het gros van de dijken geen problemen zijn opgetreden.

Verder beschouwden veel waterschappen de natte winter niet als een relevante belastingsituatie voor dijken, omdat de boezemwaterstanden beheersbaar zijn gebleven. De waterstanden in de boezem dienen bij alle waterschappen als belangrijkste indicator voor de belastingsituatie en dijkveiligheid. Voor het faalmechanisme hoogte is de boezemwaterstand ook belangrijk, waar bij een verhoogde waterstand overloop en/of overslag kan plaatsvinden, wat de dijk kan doen bezwijken. Voor stabiliteit is de boezemwaterstand minder relevant. De stabiliteit van een boezemkade wordt vooral bepaald door de waterspanningen in de dijk, die grotendeels afhankelijk zijn van neerslag op de dijk en minder van de boezemwaterstand. Enkele waterschappen hebben aangegeven dat ze naast de boezemwaterstand, ook het effect van neerslag op de freatische lijn / waterspanningen willen beschouwen als belastingsituatie.

Dit laatste is een belangrijke hiaat voor alle waterschappen; om inzicht te hebben in de stabiliteit van dijken, tijdens een dreigende situatie, is het monitoren van freatische lijnen relevant. Dit kan gedaan worden met metingen of modellen die neerslag door vertalen naar de freatische lijn.

4

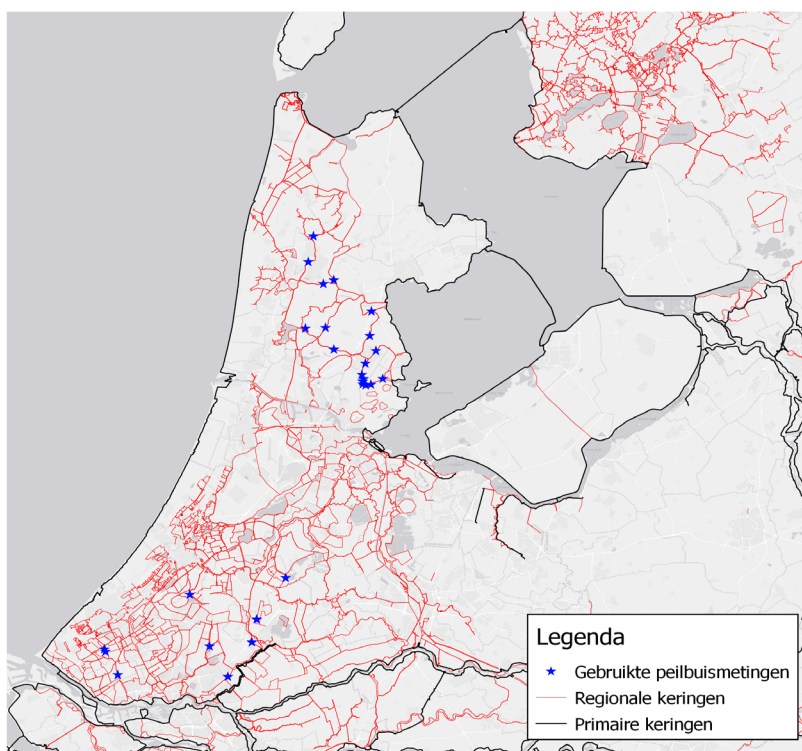
DUIDING FREATISCHE LIJN

4.1 GEBRUIKTE PEILBUISMETINGEN

Voor het duiden van de opgetreden freatische lijnen zijn peilbuismetingen van meerdere waterschappen gebruikt, waar gedurende de winter 2023-2024 is gemeten. In totaal zijn 28 meetraaien gebruikt: 18 bij HHNK, 4 bij Delfland, 3 bij HHSK en 3 bij Rijnland. In deze meetraaien zijn 111 bruikbare ondiepe peilbuizen in dijklichamen geïnstalleerd. Figuur 8 toont de locaties van de gebruikte metingen. De tien meetraaien binnen Delfland, Rijnland en HHSK zijn onderdeel van het onderzoek *droogte bij regionale keringen*, uitgevoerd in het kader van het Ontwikkelings-programma Regionale Keringen (ORK) bij de STOWA en in samenwerking met Rijkswaterstaat. Aanvullend zijn metingen uit het peilbuismeetnet bij de regionale keringen van HHNK gebruikt, waar binnen het programma *Waterveiligheid anno 2030* vele meetraaien zijn ingericht. De andere benaderde waterschappen gaven aan dat tijdens de natte winter 2023-2024 geen additionele peilbuismetingen zijn uitgevoerd.

Figuur 8

Overzicht van gebruikte locaties waar tijdens de natte winter peilbuismetingen zijn uitgevoerd



4.1.1 EEN EERSTE BEELD OP BASIS VAN MEERJARIGE MEETREEKSEN

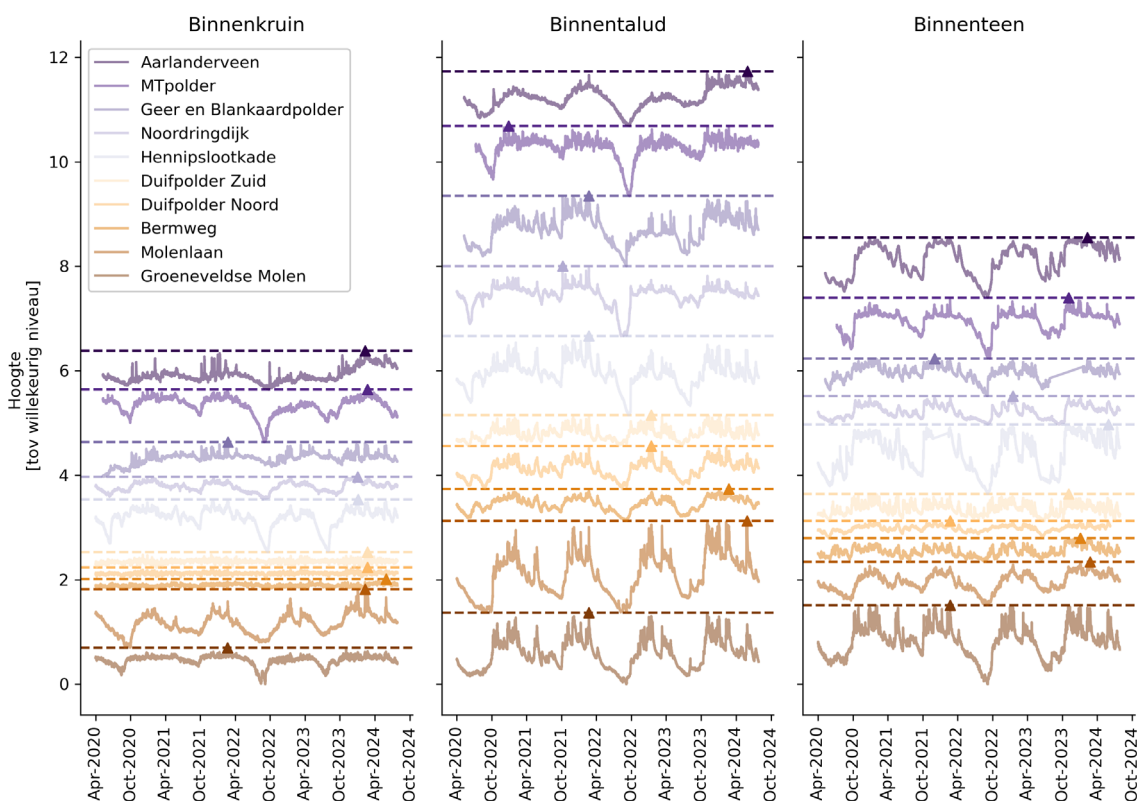
De lengte van de verzamelde meetreeksen variëren van circa twee jaar tot meer dan vier jaar. Om een eerste beeld te krijgen van hoe hoog de grondwaterstanden in de natte winter waren, zijn de meetreeksen in de binnenkruin, binnentalud en binnenteen bekeken waar langer dan vier jaar is gemeten, zie Figuur 9. De grootste variaties vinden plaats in het binnen-

talud, waar de grondwaterstand gemiddeld ruim één meter fluctueerde in de afgelopen vier jaar. Dit komt doordat de grondwaterstand hier het verst van de boezem en een eventueel aanwezige teensloot ligt, en hiermee de grootste opbolling kan plaatsvinden.

Bij de binnenkruin en binnenteen zijn de fluctuaties kleiner: gemiddeld 0,6 tot en met 0,85 meter. De maximale gemeten grondwaterstanden in de meetreeks zijn gemarkeerd met het symbool ▲ op het piekmoment en met horizontale lijnen (–) voor het bijbehorende niveau.

Tijdens de winter van 2023-2024 bereikten ongeveer 50% van de peilbuizen hun hoogst gemeten grondwaterstand. Daarnaast vonden bij 25% van de peilbuizen de maximale grondwaterstand plaats in februari 2022 en 15% in mei 2024. Eind mei 2024 piekten grondwaterstanden door de aanhoudend natte maanden april en mei, gevolgd door een hoge dagneerslag op 29 mei. Verder is opvallend dat de maximale grondwaterstand vrijwel elke winter, meerdere keren, wordt benaderd en de grondwaterstand consequent hoog blijft. Uit de meerjarige peilbuismetingen bij tien locaties blijkt dat bij 43 van de 46 meetpunten de maximale grondwaterstanden in de winter van 2023-2024 binnen 10 cm van de hoogste waarde binnen de gehele reeks liggen. Dit wijst erop dat de grondwaterstanden in deze winter uitzonderlijk hoog waren binnen de 4,5-jarige meetreeksen.

Figuur 9 Peilbuismetingen in het binnentalud van de dijk, waarbij de driehoek (▲) de maximaal gemeten grondwaterstand aangeeft en de gestreepte lijn (–) het bijbehorende niveau

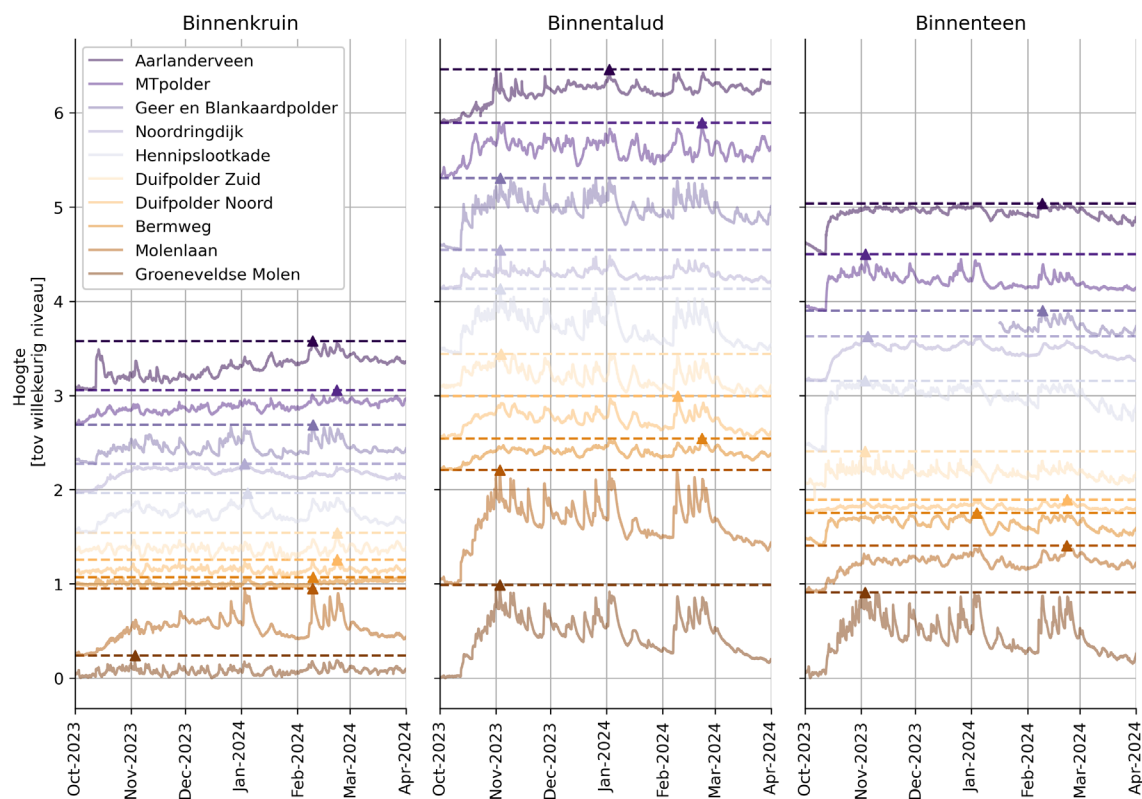


4.1.2 INGEZOOMD OP DE NATTE WINTER 2023-2024 EN RELEVANTE NEERSLAGDUUR

In de winter van 2023-2024, verspreid over de tien eerder onderzochte meetlocaties, vonden de maximale grondwaterstanden niet op één moment plaats, maar verspreid rond vier dagen: 3 november, 3 januari, 9 februari en 22 februari, zie Figuur 10. Vergelijking van deze momenten met het verloop van de neerslaghoeveelheden, over verschillende duren, laat

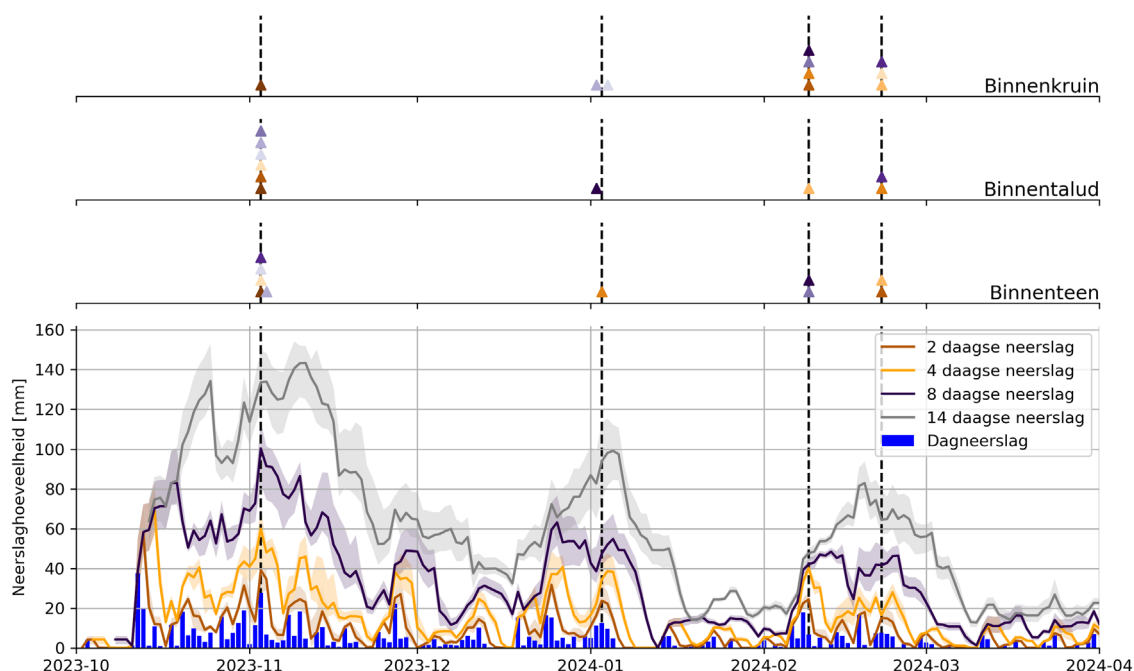
zien dat de pieken in grondwaterstanden vaak samenhangen met extreme één- tot vierdaagse neerslagsommen, volgend op een nattere periode, zie Figuur 11.

Figuur 10 Peilbuismetingen in het binnentalud van de dijk, waarbij de driehoek (▲) de maximaal gemeten grondwaterstand in de winter 2023-2024 aangeeft en de gestreepte lijn (--) het bijbehorende niveau



De pieken in de achtdaagse neerslagsommen vinden ná de piekmomenten van de grondwaterstanden plaats, wat erop wijst dat kortere neerslagduren belangrijker zijn. De neerslagsom over veertien dagen laat geen verband zien met de maximale grondwaterstanden. Verder valt op dat de extreemste dag- tot vierdaagse neerslag op 13 oktober plaatsvond. Dit was na een droge periode waarin de grondwaterstanden nog relatief laag waren na de zomer, wat niet leidde tot een extreme grondwaterstand. Dit laat zien dat de initiële condities, samen met de extreme neerslag, een belangrijk rol hebben voor de totstandkoming van extreme grondwaterstanden in kaden.

Figuur 11 Het verloop van de neerslaghoeveelheden voor verschillende duren bij de tien meerjarige meetlocaties, waarbij de doorgetrokken lijn het gemiddelde is en het vlak de bandbreedte (onder). Boven de grafiek staan de piekmomenten van de grondwaterstanden voor de binnenkruin, binnentalud en binnenteen



4.2 METINGEN EN SCHEMATISERINGEN IN VEILIGHEIDSTOETSSEN

4.2.1 SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN BIJ VEILIGHEIDSTOETSINGEN

Voor veiligheidstoetsingen worden stabiliteitsanalyses van dijken uitgevoerd, waarbinnen de ligging van de freatische lijn tijdens normcondities geschematiseerd moet worden. Elk waterschap heeft zijn eigen schematisering, welke veelal gebaseerd zijn op de richtlijnen in het Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken (TAW, 2004). Voor de waterschappen waarvoor de peilbuismetingen geanalyseerd zijn staan in Tabel 1 de manier van schematiseren weergegeven. De ligging van de freatische lijn wordt afgeleid op basis van 1) het profiel van de dijk 2) de waterstanden in boezem en teensloot. Op enkele profielpunten (snijpunt boezem-dijk, binnenkruin, binnenteen, etc.) wordt de hoogte van de grondwaterstand gedefinieerd, waartussen lineair geïnterpoleerd wordt.

De hoogte van de grondwaterstand bij een profielpunt kan afhangen van de buitenwaterstanden (boezempeil, polderpeil of maatgevend boezempeil) of de hoogte van het maaiveld.

De manieren waarop de freatische lijnen zijn geschematiseerd bij de waterschappen, lijken erg op elkaar, met kleine verschillen. Noemenswaardige verschillen zijn:

- HHNK laat de freatische lijn van de buitenkruin (hoogte Maatgevend Boezempeil, MBP) naar de binnenkruin afnemen met een *offset*, welke groter wordt naarmate de kruin breder is, met een verhouding van 1:10. Als de binnenkruin vijf meter breed is, daalt de freatische lijn 0.5m vanaf de buitenkruin tot de binnenkruin met een maximum van de helft van het verval, dat gedefinieerd is als het boezempeil minus het polderpeil. Bij de andere waterschappen wordt bij de binnenkruin het boezempeil aangehouden met eventueel een vaste verlaging, zoals 20cm bij Delfland;
- Bij HHNK en HHSK wordt de insteek van een berm gebruikt als profielpunt waaraan de freatische lijn wordt gerelateerd, terwijl andere waterschappen dat niet doen.

Wanneer in het profiel een knik zit door een binnenberm kan zonder dit profielpunt de freatische lijn anders geschematiseerd worden.

Tabel 1 Verschillende manieren waarop de freatische lijn wordt geschematiseerd op basis van enkele profielpunten in een dwarsprofiel. In Figuur 12 is een voorbeeld van een dijkdoorsnede te zien waarin de profielpunten zijn aangegeven

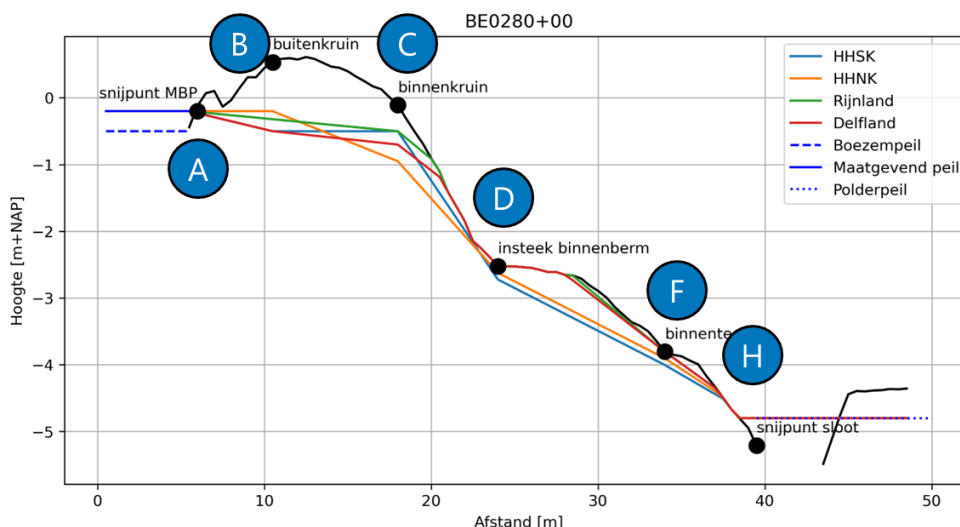
	Snijpunt boezem-dijk	Buitenkruin	Binnenkruin	Insteek berm	Kruin berm	Binnenteen	Insteek sloot	Snijpunt sloot-dijk
	A	B	C	D	E	F	G	
HHNK	MBP	MBP	MBP-off	MV-0.1	MV-0.1	MV-0.1	PP	PP
HHSK	MBP	BP	BP	MV-0.2	-	MV-0.2	-	PP
Rijnland	MBP	-	BP	-	-	MV	-	PP
Delfland	MBP	BP	BP-0.2	-	-	MV	-	PP

* BP=Boezempeil, MBP=Maatgevend Boezempeil, PP=Polderpeil, MV=Maaiveld, $off = \max((1:10) * \text{kruinbreedte}, 0.5 * (BP-PP))$

Deze verschillen in schematisering zijn ook te zien in Figuur 12, waarbij voor een dijkprofiel verschillende schematiseringen zijn toegepast. Een beeld hoe de schematiseringen uitpakken voor andere dijkprofielen is weergegeven in Bijlage D.

Door de freatische lijn te schematiseren op basis van profielpunten wordt deze methode breed toepasbaar voor dijken. Echter, regionale keringen hebben vaak afwijkende dijkprofielen waarin bijvoorbeeld een binnenteen of insteek van een sloot ontbreekt. Ook de keuze voor de positie van de binnenkruinlijn is weinig eenduidig. Dit maakt de schematisatie van de freatische lijn minder eenduidig en afhankelijk van keuzes van beheerders of adviseurs.

Figuur 12 De schematisatie van de freatische lijn bij een dijk langs de Beemster op basis van de richtlijnen van verschillende waterschappen



4.2.2 VERGELIJKING MAXIMAAL GEMETEN GRONDWATERSTANDEN MET DE SCHEMATISERING VAN FREATISCHE LIJNEN

Bij elke meetraai zijn de benodigde gegevens, als profielen en informatie over buitenwaterstanden, verzameld om de freatische lijn te schematiseren. Het profiel is afgeleid op basis van het maaiveldraster AHN4, waarna de profielpunten zijn gedefinieerd in samenspraak met het waterschap. Ook zijn de streefpeilen voor de boezem en polder, evenals het maatgevende boezempeil verzameld. Op deze manier kan voor elke meetraai de freatische lijn geschematiseerd en vergeleken worden met de maximaal gemeten grondwaterstanden tijdens de natte winter. Het vergelijken van de maximaal gemeten grondwaterstanden met de schematisering

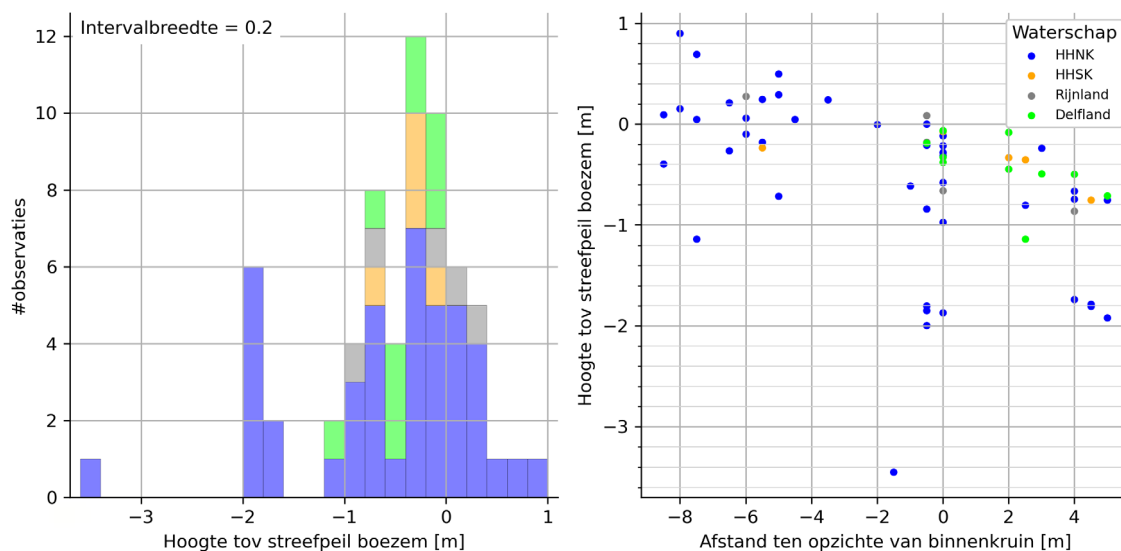
is gedaan op twee manieren. Allereerst is afzonderlijk ingezoomd op de grondwaterstanden in de kruin- en taludzone. Vervolgens zijn alle maximaal gemeten grondwaterstanden in peilbuizen vergeleken met twee schematiseringen: die van HHSK en HHNK. In bijlage E zijn ook figuren opgenomen waarin de metingen worden vergeleken met de schematisatie van Delfland en Rijnland. De hoofdrapportage focust op HHSK en HHNK, vanwege hun betrokkenheid binnen het project.

MAXIMAAL GEMETEN GRONDWATERSTANDEN IN KRUIN- EN TALUDZONE

Bij de schematisering van de freatische lijn in de veiligheidstoetsing is onderscheid te maken in twee zones, namelijk de kruinzone (boezemwater t/m binnenkruin) en taludzone (binnenkruin t/m teensloot). In de kruinzone is de freatische lijn gerelateerd aan het boezempeil, terwijl in de taludzone, op de binnenkruin na, de freatische lijn wordt gerelateerd aan het maaiveld, zoals in Tabel 1 is weergegeven.

Het histogram in Figuur 13 laat zien dat het merendeel van de maximaal gemeten grondwaterstanden in de kruinzone onder het boezempeil liggen. Echter, in 30% van de peilbuis-metingen ligt de grondwaterstand hoger dan het boezempeil. Dit vindt voornamelijk plaats rond de buitenkruin. Dit is waarschijnlijk niet veroorzaakt door een verhoogde boezemwaterstand, maar door extra opbolling als gevolg van neerslag. De buitenwaterstanden waren immers beheerst. Ter hoogte van de binnenkruin reikten de grondwaterstanden tot aan het boezempeil (rechter paneel in Figuur 13 bij afstand 0 m), met de mediane maximale grondwaterstand op 30 cm daaronder⁵.

Figuur 13 Linker paneel: een histogram van de maximale gemeten grondwaterstanden van peilbuizen in de kruinzone ten opzichte van het boezempeil t/m de binnenkruin. Rechter paneel: maximale grondwaterstanden ten opzichte van boezempeil uitgezet tegen de afstand ten opzichte van de binnenkruin



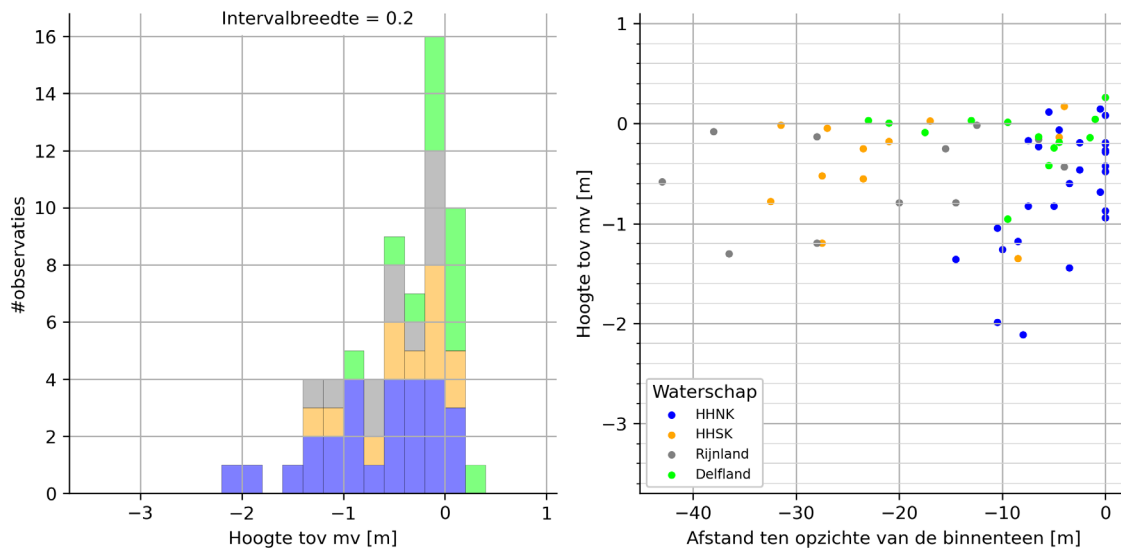
Bij de taludzone zijn de gemeten maximale grondwaterstanden ten opzichte van het maaiveld vergeleken (Let op: het maaiveldniveau varieert van de teen naar de binenkruin). Ongeveer de helft van de gemeten grondwaterstanden ligt hoger dan 25cm onder het maaiveld, zie het histogram Figuur 14. Hoge grondwaterstanden komen zowel bij de binnenteen, als bij het binnentalud voor (rechter paneel in Figuur 14). Bij de binnenteen is de mediane waarde van

⁵ Er zijn twee uitschieters met grondwaterstanden van 60 cm boven het boezemstreefpeil. Na inspectie lijken deze metingen visueel betrouwbaar, maar mogelijk infiltreert neerslag via het boorgat van de peilbuis, waardoor deze niet representatief zijn voor de grondwaterstand in de dijk.

de maximaal gemeten grondwaterstanden 20cm onder maaiveld. Verder zijn daar grondwaterstanden boven het maaiveld gemeten. De bovenkant van freatische peilbuizen liggen enkele decimeters boven het maaiveld, waardoor ook grondwaterstanden boven maaiveld gemeten kunnen worden (zie ook bijlage E voor meetreeksen waarin bovenkant peilbuis staat aangegeven).

Doordat een peilbuis op enkele meters diepte meet, kan door grondwaterstroming in de ondergrond de grondwaterstand hoger zijn dan het maaiveldniveau.

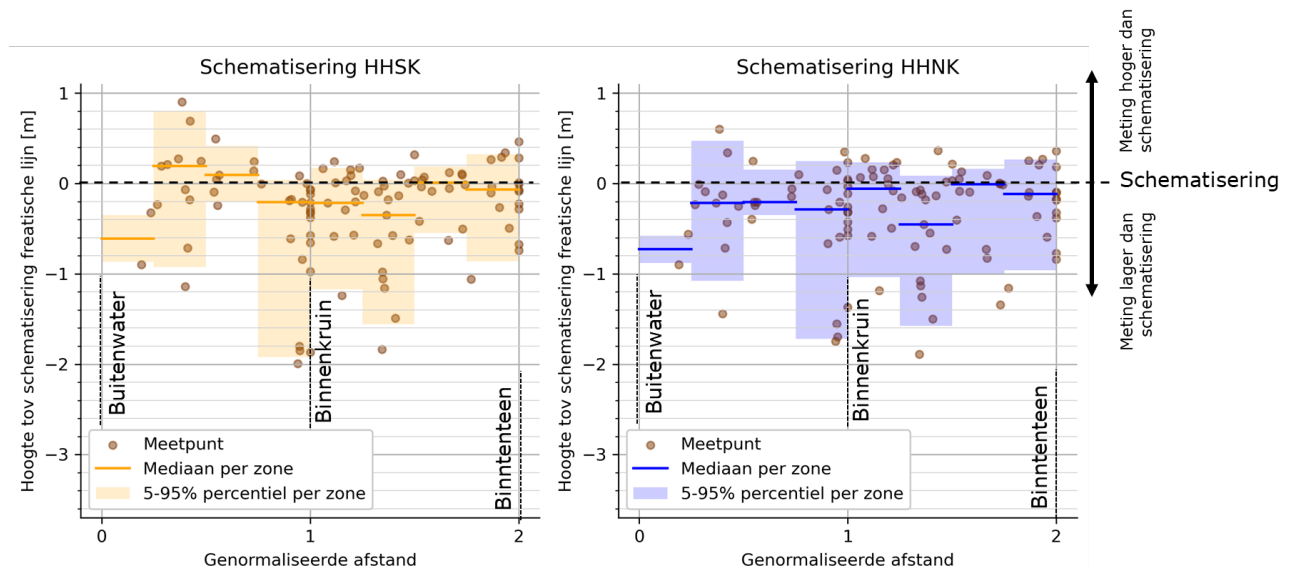
Figuur 14 De maximaal gemeten grondwaterstanden t.o.v. maaiveld voor de peilbuizen in de taludzone in een histogram (links) en uitgezet tegenover de afstand ten opzichte van de binnenteen (rechts). De binnenteen ligt bij de waarde 0 op de horizontale as en het binnentalud ligt daar links van



MAXIMAAL GEMETEN GRONDWATERSTAND TEN OPZICHTE VAN SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN

Vervolgens zijn alle peilbuismetingen tezamen beschouwd en vergeleken met de geschematiseerde freatische lijn voor HHSK en HHNK. Deze vergelijking is lastig te visualiseren, omdat de freatische lijn een 2D-variabele is en dwarsprofielen van dijken variëren in lengte. Hierom is het dwarsprofiel genormaliseerd tussen drie punten, waarbij 0 het snijpunt met het buitenwater is, 1 de binnenkruin en 2 de binnenteen. Zo ontstaat een consistent beeld om de maximaal gemeten grondwaterstanden ruimtelijk te vergelijken met de verschillende schematiseringen van de freatische lijn. Vervolgens zijn per zone in het dwarsprofiel de gemiddelde waarden en de 5%-95%-percentielen van de verschillen bepaald, zoals weergegeven in Figuur 15. De brede bandbreedte van de 5-95% percentielen valt op, vooral rond de binnenkruin (0.75-1). Dit is echter niet verrassend; de geohydrologie van boezemdijken met een heterogene grondopbouw en verschillende dijkprofielen brengen veel variatie met zich mee. De mediane maximaal gemeten grondwaterstanden liggen veelal onder de schematisering, behalve in de kruin bij HHSK, maar het 95%-percentiel steekt in het dwarsprofiel er consequent net bovenuit.

Figuur 15 Het verschil tussen de maximaal gemeten grondwaterstanden en de schematisering van de freatische lijn langs het dwarsprofiel wat is genormaliseerd (0=buitenwater, 1=binnenkruin, 2=binnenteen)



Een belangrijke keuze is wat de schematisering van de freatische lijn tijdens normcondities moet weerspiegelen; is dat een veilige keuze of een verwachte waarde. Wanneer dat een veilige keuze is, bijvoorbeeld een ligging die voor 95% van de gevallen niet hoger zal liggen, is het nodig om de schematisering van de freatische lijn te verhogen: de freatische lijn ligt in veel gevallen dicht tegen het maaiveld aan, zie ook Figuur 14. Wanneer het een beste schatting is, of een verwachte waarde, voor de freatische lijn tijdens normcondities, dan kan de freatische lijn enkele decimeters lager geschematiseerd worden.

4.2.3 VERKLARENDE DIJKKENMERKEN VOOR LIGGING FREATISCHE LIJN

De ligging van de maximaal gemeten grondwaterstanden in de winter 2023-2024 wordt gerelateerd aan dijkkenmerken. Wanneer er verklarende dijkkenmerken bestaan, kan dit waardevolle informatie opleveren voor de dijkbeheerder, met name voor dijken waar geen metingen zijn verricht; immers wordt het overgrote deel van de kaden niet bemeten. In Tabel 2 staan dijkkenmerken die zijn bekeken als verklarende dijkkenmerken.

Tabel 2 De dijkkenmerken en aanwezige variatie binnen de 28 meetraaien

Dijkkenmerken	Variatie
Dijkopbouw	Veendijk, Kleidijk, Zanddijk
Breedte dijk (afstand boezem en poldersloot)	10 tot 55 meter
Gradiënt in dijk (verval / breedte dijk)	1:5 tot 1:25
Bodemdiepte boezemwater	0.5 tot 2 meter
Aanwezigheid asfaltweg	Ja of nee
Constructie waterkant (e.g. damwand, kwelscherm)	Ja of nee *

* de constructie bij de waterkant is niet beschouwd in deze studie. Slechts twee dijken hadden, voor zover bekend, een kwelscherm / kleikist, waarbij uit de metingen geen duidelijk differentiërend effect volgt.

Deze kenmerken zijn gekoppeld aan de peilbuismetingen, waarbij per locatie één peilbuis geselecteerd. Deze peilbuis is geplaatst in de binnenkruin of boven in het talud, waarbij de maximaal gemeten grondwaterstand ten opzichte van het boezempeil is beschouwd.

De dijkkenmerken splitsen zich op in categorische variabelen, die in afzonderlijke klassen worden ingedeeld, en continue variabelen, die een variërende numerieke waarde kunnen

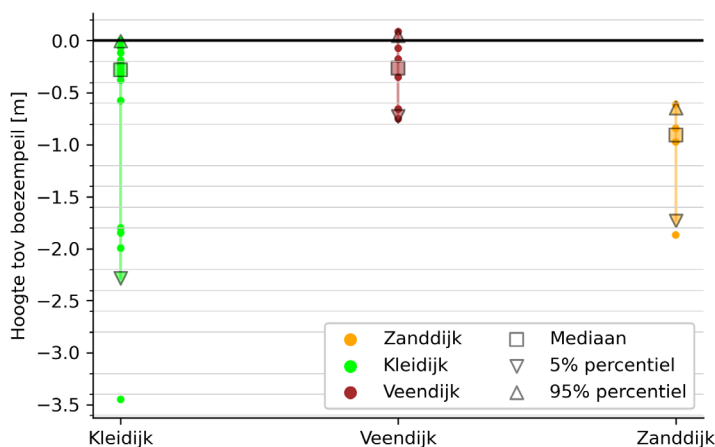
aannemen. Voor categorische variabelen (dijkopbouw en aanwezigheid asfaltweg) is per categorie de variatie vergeleken op basis mediaan en 5-95%-percentielen. Voor continue variabelen zijn scatterplots gemaakt waarbij kwadratische (2^e orde) polynomen zijn gefit als hulpmiddel om een verband vast te leggen.

De resultaten zijn weergegeven in de Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18. Bij de vier aanwezige zanddijken ligt de maximale grondwaterstand meer dan een halve meter onder het boezempeil, wat duidelijk afwijkt van de andere dijkopbouwen. Tussen klei- en veendijken is geen duidelijk verschil waarneembaar, behalve dat bij kleidijken een paar uitschieters aanwezig zijn waar het niveau van de grondwaterstand 2 m lager dan het boezempeil kan zijn. Deze uitschieters zijn niet te verklaren aan de hand van andere dijkenmerken. Wanneer vervolgens naar naar de andere dijkenmerken wordt gekeken, is er geen eenduidig verband tussen de dijkenmerken en de grondwaterstand.

Bij vergelijkbare dijkenmerken, bijvoorbeeld een steile dijk met een gradiënt van 0.16 (of 1:6), kan de grondwaterstand bij de binnenkruin rond het boezempeil liggen, maar ook 2 tot 3 meter daaronder. Dit heeft een grote impact op de stabiliteit, maar is niet met de beschouwde dijkenmerken te differentiëren.

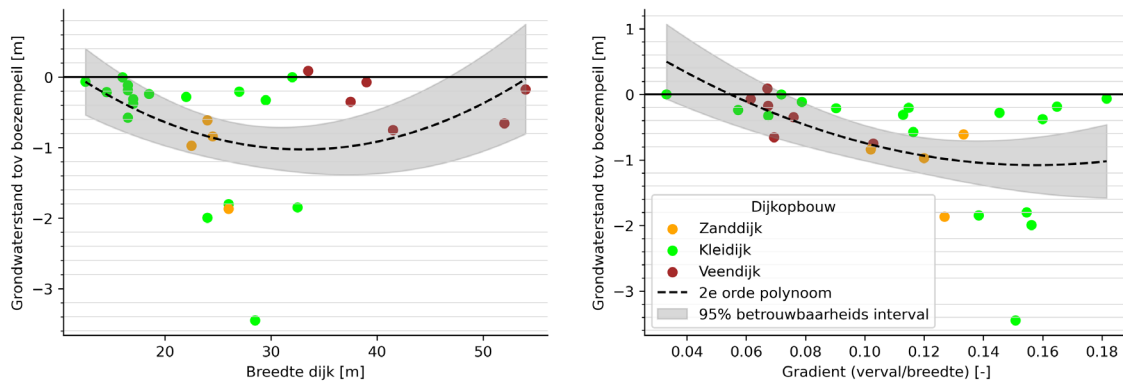
Concluderend geeft deze analyse geen eenduidig verband weer tussen de vijf dijkenmerken en de maximaal gemeten grondwaterstand bij de binnenkruin. Het is lastig om de invloed van één dijkkenmerk te isoleren op basis van de huidige analyse-aanpak; de variatie in de grondwaterstand kan veroorzaakt worden door een combinatie van dijkenmerken. Dit maakt de vergelijking lastig, evenals het opstellen van richtlijnen voor een adequate schematisatie van de freatische lijn. Naast de variatie in dijkenmerken speelt ook de heterogeniteit in de ondergrond een rol. Het onderscheiden van veen- en kleidijken is op papier logisch, maar in de praktijk is de dijk kern veelal een mix van grondsoorten. Dit maakt dat de grondwaterstand in een dijk lastig te voorspellen is.

Figuur 16 De grondwaterstand bij de binnenkruin ten opzichte van het boezempeil voor dijken met verschillende dijkopbouwen



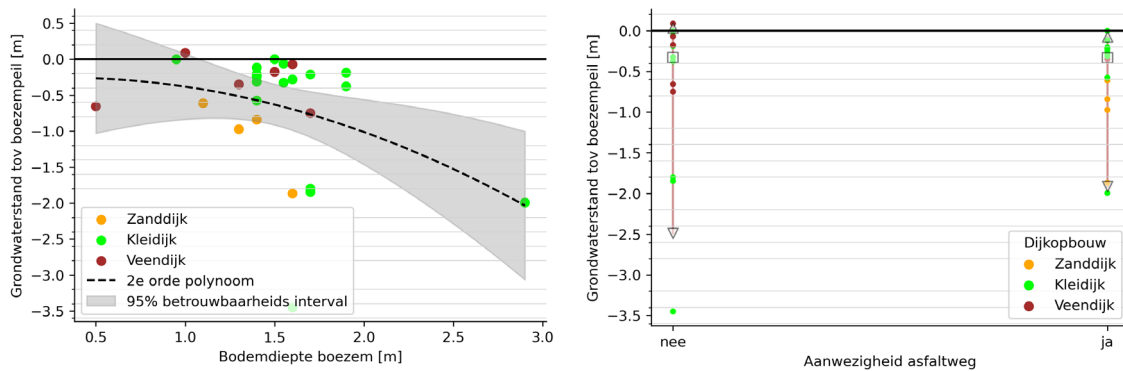
Figuur 17

De grondwaterstand bij de binnenkruin ten opzichte van het boezempeil uitgezet tegenover geometrische kenmerken van de dijk, namelijk de breedte (links) en de gradiënt (rechts)



Figuur 18

De grondwaterstand bij de binnenkruin ten opzichte van het boezempeil uitgezet tegenover de bodemdiepte van de boezem (links) en de aanwezigheid van een asfaltweg op de kruin (rechts)



4.3 REFLECTIE OP EXTREME GRONDWATERSTANDEN

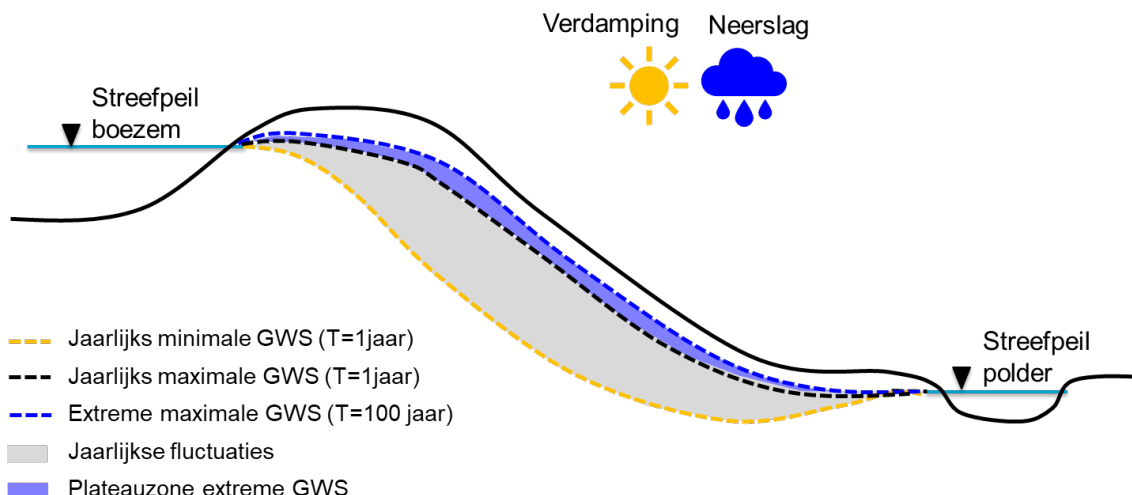
4.3.1 EEN PLATEAUZONE VAN EXTREME GRONDWATERSTANDEN BIJ BOEZEMKADEN

In eerdere studies is de extreme ligging van de freatische lijn bij zes verschillende boezem- en polderkaden ingeschat (HKV, 2023; HKV, 2024b). De basis van deze studies zijn peilbuis-metingen, waarna voor elk meetpunt een tijdreeksmodel is opgezet en betrouwbare modellen zijn geselecteerd. Deze modellen verklaren de grondwaterstanden van verschillende kaden op basis van neerslag en verdamping. Met deze modellen zijn vervolgens langjarige grondwaterstanden gesimuleerd en is de grondwaterstandstatistiek afgeleid, bij herhalingstijden van $T=1, 10, 100$ en 1000 jaar. Voor de zes beschouwde kaden blijkt dat freatische grondwaterstanden die gemiddeld eens in de 100 jaar voorkomen maximaal 20 centimeter boven jaarlijks ($T=1$ jaar) optredende grondwaterstanden liggen. In Strijker & Kok (2024) zijn in totaal 35 peilbuizen in het talud van verschillende boezemkaden geanalyseerd met een vergelijkbare methodiek. In deze set lag de $T100$ -situatie gemiddeld 30cm boven de $T1$ -situatie, met een bandbreedte van 5 tot 100 cm .

Naast deze modelstudies is ook voor de peilbuismetingen van deze studie te zien dat de maximaal gemeten grondwaterstand vrijwel elke winter wordt benaderd (Figuur 9). In sommige gevallen wordt dit maximum bereikt doordat de grondwaterstand het maaiveld bereikt en extra neerslag niet infiltreert maar oppervlakkig afstroomt. Echter, er zijn ook gevallen waarbij het maaiveld niet wordt bereikt en de jaarmaxima allemaal dicht bij elkaar liggen. Het fenomeen dat extreme grondwaterstanden dicht bij jaarlijkse waarden liggen,

wordt de plateauzone van extreme grondwaterstanden genoemd. De plateauzone is een zone van enkele decimeters begrenst door de jaarlijks optredende en de extreme grondwaterstanden, zoals in Figuur 19 conceptueel is weergegeven. Het is geen harde grens vanaf waar de grondwaterstanden niet meer verder stijgen, aangezien het denkbaar is dat de grondwaterstand toch nog wat extremer zal zijn met extra neerslag. Zowel metingen als modeluitkomst, wijzen aan dat de extreme freatische lijnen dicht bij jaarlijkse optredende situaties liggen. In de komende paragrafen wordt gereflecteerd hierop; **hoe kan het dat extreme grondwaterstanden dicht bij jaarlijkse waarden liggen?**

Figuur 19 Schematische weergave van de variatie van de freatische lijn binnen het jaar (grijze vlak) en de plateauzone waarbinnen de freatische lijn fluctueert bij extreme situaties (blauwe vlak)



4.3.2 WAAROM LIGGEN EXTREMEN RELATIEF DICHT BIJ JAARLIJKSE SITUATIES?

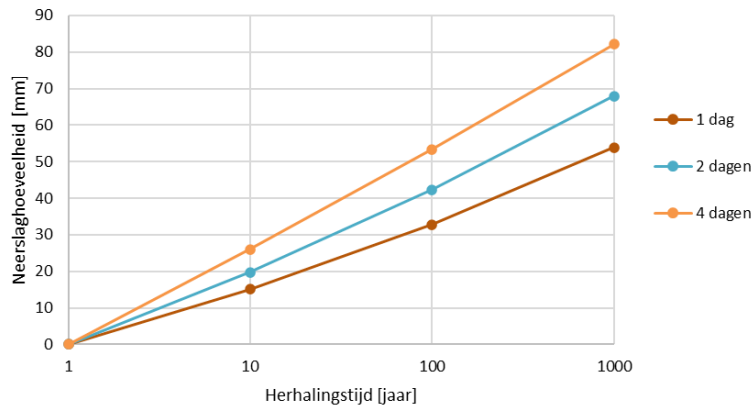
Bij peilbuismeetreeksen in boezemkaden is te zien dat de grondwaterstand toeneemt door neerslaginfiltratie, waarna deze uitzakt doordat water uit de dijk draineert richting de teensloot.

De infiltratie gaat in veel gevallen snel, binnen een dag, wat leidt tot een gepiekt verloop van de grondwaterstand, zie Figuur 9. De uitzakking is een gradueler proces. Deze dynamiek verschilt per dijk en gezamenlijk bepalen deze twee aspecten tot hoever de grondwaterstand kan stijgen onder extreme omstandigheden. Zonder te weten welke neerslagduur relevant is voor een boezemkade, kan een beeld verkregen worden van hoeveel extra grondwaterstandstoename te verwachten is boven op de jaarlijks maximale grondwaterstand (T=1 jaar situatie). Dit is gedaan door de neerslagstatistiek voor verschillende uren (STOWA, 2019) te combineren met de grondwaterstandverhoging als gevolg van neerslag.

De neerslagstatistiek beschrijft neerslagvolumes voor verschillende tijdsduren en hun herhalings-tijden voor jaarrond- en winterperioden, gedefinieerd als november t/m februari (STOWA, 2019). Uit de winterstatistiek is op te maken dat de neerslagvolumes die gemiddeld eens per 100 jaar voorkomen 30 tot 55 mm hoger zijn dan de jaarlijks optredende neerslag-sommen, afhankelijk van de neerslagduur, zie Figuur 20.

Figuur 20

Extra neerslaghoeveelheid ten opzichte van de T=1 jaar-situatie voor verschillende neerslagduren



De vervolgvraag is dan; tot hoeveel extra grondwaterstandstoename leidt deze neerslag? Dit hangt af van de bergingsmogelijkheid in de ondergrond, waarbij een grondwaterstand stijgt wanneer het volume lucht in de grond wordt gevuld met water. Op basis van de verzadigingsgraad (S) en de porositeit (n) van de grond boven de grondwaterstand kan het volume lucht in een volume grond geschat worden, evenals de grondwaterstandstoename (ΔH):

$$\Delta H = N / (1 - S)n$$

waarbij N de neerslaghoeveelheid is die geborgen moet worden in de grond. Op basis van typische getallen voor een erg natte kleigrond ($S=0,8$, $n=0,5$) is te zien dat de grondwaterstand toeneemt met 10 mm als gevolg van 1 mm neerslag. Deze aanpak is sterk versimpeld en heeft beperkingen, doordat verschillende grondlagen met verschillende bergingseigenschappen aanwezig zijn, welke ook afhangen van de diepte van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld. Ook is de grondwaterstroming in een dijk dynamischer dan hierboven aangenomen, waarbij water zich herverdeelt in de onverzadigde zone en ook horizontale grondwaterstroming plaatsvindt, waardoor de grondwaterstand in het talud ook gevoed kan worden door neerslag die op de kruin valt.

Op basis van een tijdreeksanalyse van peilbuismetingen kan ook achterhaald worden wat de grondwaterstandstijging als gevolg van neerslag is. Een tijdreeksmodel gebruikt responsfuncties om de bijdrage van variabelen aan de grondwaterstandfluctuaties af te leiden. Deze responsfuncties zijn te karakteriseren met (zie linker paneel in Figuur 21):

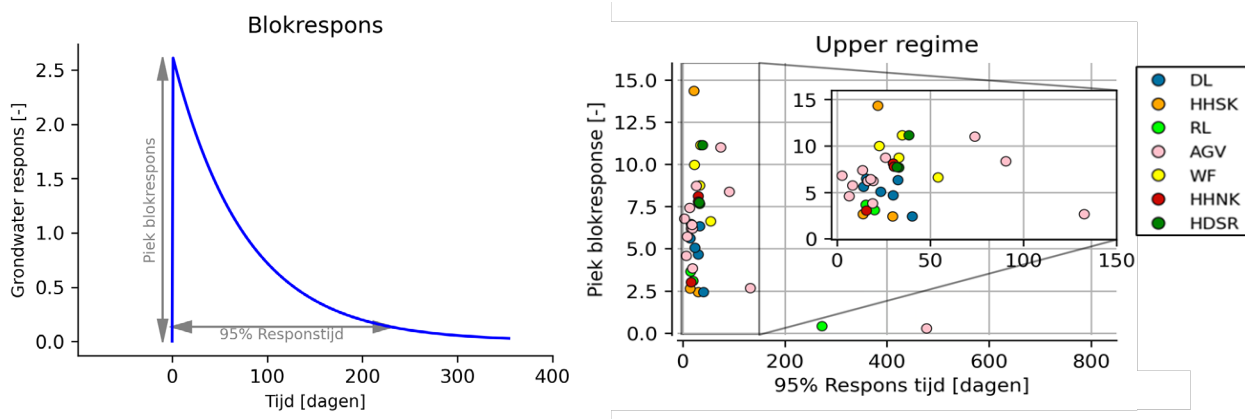
- De 95%-responstijd: maat voor snelheid waarmee het grondwater uitzakt;
- De piekblokrespons: de grondwaterstandverhoging bij 1 mm neerslag.

Strijker & Kok (2024) heeft karakteristieken van de responsfuncties van de grondwateraanvulling (neerslag minus verdamping) afgeleid bij 35 peilbuizen in het binnentalud van boezemkaden, zie rechter paneel in Figuur 21. In die studie werd onderscheid gemaakt tussen hoge en lage grondwaterstanden vanwege hun verschillende reacties op neerslag en verdamping. Deze studie richt zich specifiek op extreem natte situaties en is daarom gefocust op enkel de piekblok-respons bij hoge grondwaterstanden (*upper regime*). De gemiddelde piekblokrespons is 5.5 [-], met een bandbreedte van 0.3 tot 14.5 [-]. De kade met de hoogste piekblokrespons is de Hennepslootkade, welke binnen beheergebied van het Hoogheemraadschap van Schieland en Krimpenerwaard ligt, welke in meer detail is bekeken in HKV (2023). Hieruit volgde dat de grondwaterstanden in deze kade erg hoog zijn en jaarlijks het maaiveld bereiken. Bij een grondwaterstand dicht onder maaiveld is de berging van water kleiner dan bij diepe grond-

waterstanden, doordat het vochtgehalte van de onverzadigde zone hoger is als gevolg van de capillaire werking vanuit de verzadigde zone en daardoor het volume luchtge vulde poriën in de grond lager is. Dit niet-lineaire effect, evenals oppervlakkige afstroming, zijn lastig te modelleren met tijdreeksmodellen, omdat het veelal extreme situaties zijn die beperkt voorkomen in de meetreeks.

Figuur 21

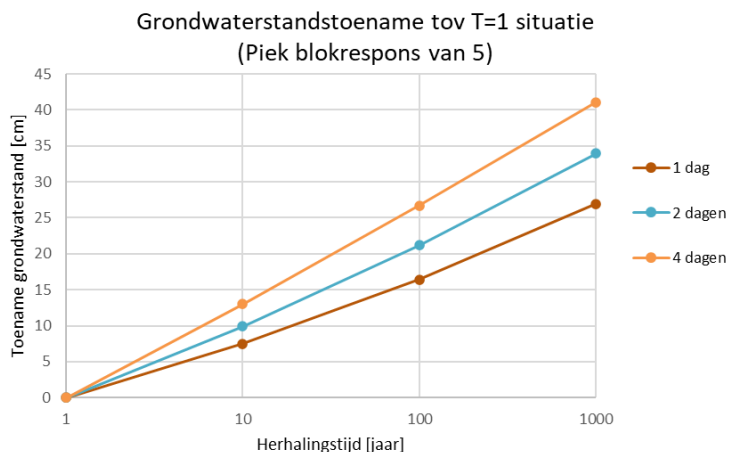
Links: visualisatie van de piekblokrespons en de 95% responstijd van de impulsresponsefunctie. Rechts: de karakteristieke kenmerken van de tijdreeksmodellen opgesteld voor 35 peilbuizen in het talud van verschillende boezem- en polderkaden, waarbij de kleuren aangeven binnen welk waterschap de kade ligt (uit Strijker & Kok (2024))



Nu er inzicht is in de grondwaterstandstoename door neerslag, kan bepaald worden hoeveel extra grondwaterstandstoename boven op de jaarlijks maximale grondwaterstand te verwachten is, zie Figuur 22. Met een gemiddelde piekblokrespons van 5 [-] neemt de grondwaterstand toe met 15 tot 30 cm tussen de jaarlijkse ($T=1$ jaar) en extreme situatie ($T=100$ jaar), afhankelijk van de relevante neerslagduur. Bij een grotere piekblokrespons van 11 [-] bedraagt de toename van de grondwaterstand 35 tot 60 cm, terwijl bij een kleinere piekblok-respons van 2,5 de toename tussen de 10 en 15 cm ligt.

Figuur 22

De grondwaterstandstoename ten opzichte van de $T=1$ jaar-situatie voor verschillende neerslagduren



Deze redeneerlijn laat zien dat de extremen in sommige gevallen slechts enkele decimeters boven de jaarlijkse situaties liggen, terwijl dit bij andere dijken kan oplopen tot meerdere decimeters. Hierbij is uitgegaan dat de mate van uitzakking binnen een bepaalde duur niet verandert.

In werkelijkheid is te verwachten dat deze uitzakking toeneemt bij hogere grondwaterstanden, doordat de hydraulische gradiënt in de dijk dan groter wordt. Ook kunnen de grondwaterstanden begrensd worden door het maaiveld of de structuurvorming in de bodem. Wanneer de grondwaterstand verder stijgt, kan structuurvorming ook een drainerende werking hebben, omdat dit de doorlatendheid verhoogd. Dit resulteert in kleinere toenames van de grondwaterstand bij extreme situaties.

5

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

5.1 LESSEN DIJKVEILIGHEID

Het doel van deze studie is om de impact van de natte winter 2023-2024 op de boezem- en polderkaden te evalueren en hieruit lessen te trekken voor dijkveiligheid, met de focus op opgetreden schades en freatische lijnen. Deze winter was meteorologisch uniek vanwege de extreme maandelijkse- en meermaandelijkse neerslaghoeveelheden. Daarnaast waren de neerslagsommen over periodes van één tot vier dagen uitzonderlijk bij enkele waterschappen in het midden en zuidwesten van het land, met terugkeertijden van gemiddeld eens in de 10 tot 100 jaar (voor de betreffende neerslagduren).

Deze neerslaghoeveelheden veroorzaakten bij de meeste waterschappen geen problemen en hadden een minimale impact op de kaden. Bij twee waterschappen, Delfland en Rivierenland, zijn lokaal schades (afschuivingen, verzakkingen en lekkages) opgetreden. Bij deze twee waterschappen vonden ook de hoogste neerslagsommen plaats over periodes van één tot vier dagen, die waarschijnlijk het meest relevant zijn voor de stabiliteit van boezem- en polderkaden. Ondanks de geringe verhoging van boezemwaterstanden traden deze schaden op, wat het belang van de neerslag op dijken laat zien. Verder zagen veel waterschappen de extreme neerslaghoeveelheden niet als relevante belastingsituatie, omdat de boezemwaterstanden beheersbaar bleven. De boezemwaterstand wordt door elk waterschap gebruikt als indicator voor de belastingsituatie. Dit is een tekortkoming in de huidige signalering, waarbij deze winter heeft laten zien dat de boezemwaterstand niet een volledig dekkende maat voor de veiligheid van boezemkades is. Extreme neerslag kan een significante belastingsituatie zijn, die zich afzonderlijk van een verhoogde waterstand kan voordoen. Daarom dient neerslag, die grondwaterstanden in dijken doet stijgen en de stabiliteit verslechterd, opgenomen te worden in draaiboeken en calamiteitenplan van waterschappen.

Vervolgens zijn peilbuismetingen uit 28 meetraaien geanalyseerd, door de maximaal gemeten grondwaterstanden in de winter te vergelijken met de schematiseringen van freatische lijnen in veiligheidstoetsen. De maximaal gemeten grondwaterstanden binnen de dwarsprofielen vertonen een grote spreiding, variërend van een vrijwel volledig verzadigde dijk tot een grondwaterstand van twee meter onder het maaiveld. De gemeten grondwaterstanden tussen het snijpunt met het buitenwater en de binnenkruin lagen regelmatig hoger dan het boezempeil. Bij de binnenkruin reikten de grondwaterstanden tot het boezempeil, met een mediane maximale grondwaterstand 30 cm daaronder. Bij het binnentalud en binnenteen lag de mediane maximale grondwaterstand rond 20 cm onder het maaiveld. Bij vergelijking van de maximaal gemeten grondwaterstanden met de bij veiligheidstoetsen gehanteerde schematiseringen ligt de mediane waarde onder de schematisatie, terwijl het 95%-percentiel in het dwarsprofiel consequent boven de schematisering uitkomt. Verder is gekeken naar een verband tussen de grondwaterstand bij de binnenkruin en verschillende dijkkenmerken, namelijk de bodemopbouw, geometrie van de dijk, bodemdiepte boezem en aanwezigheid van een asfaltweg. Op de bodemopbouw na, was er geen eenduidig verband te vinden. Bij de bodemopbouw was onderscheid te maken tussen veen/kleidijken en zanddijken, waarbij bij zanddijken de grondwaterstand onder de kruin lager dan 50cm onder het boezempeil lag.

Als laatste is gereflecteerd op extreme grondwaterstanden, welke dicht bij de jaarlijkse waarden liggen. Dit volgt uit de metingen en eerdere modelstudies. Deze studie geeft een redenatie hoe het komt dat extreme grondwaterstanden dicht bij jaarlijkse waarden liggen. Dit is gedaan door de neerslagstatistiek te koppelen met de grondwaterstandstoename, gebaseerd op tijdreeksanalyses van verschillende peilbuismetingen. Hieruit volgt dat, afhankelijk van de relevante neerslagduur van een dijk, gemiddeld de grondwaterstand met 15 tot 30 cm toeneemt tussen de jaarlijkse ($T=1$ jaar) en extreme situatie ($T=100$ jaar). Naast de verklaring vanuit neerslagstatistiek en grondwaterstandstoename, zijn ook nog aanvullende fysische verklaringen voor de begrenzing. Allereerst laten metingen zien dat dijken erg nat worden en de grondwaterstanden begrensd kunnen zijn door het maaiveld. Ook kan structuurvorming in de bodem de waterstandstoename beperken, doordat de hoge doorlatendheid een drainerende werking heeft wanneer grondwaterstanden tot daar reiken. Deze hoge doorlatendheid is te verwachten, aangezien veel peilbuismetingen, zelfs in klei en veen, een snelle en sterke response vertonen.

5.2 AANBEVELINGEN

5.2.1 BEHEER EN BELEID

Op basis van deze conclusies volgen de volgende aanbevelingen voor beheer en beleid:

- De alarmniveaus van waterschappen zijn grotendeels gericht op waterstanden en in veel mindere mate op andere parameters die de dijkveiligheid bepalen. Voor de stabiliteit van een dijklichaam spelen waterspanningen een cruciale rol, welke bij boezem- en polderkaden voornamelijk worden gedreven door neerslag. Hierom **adviseren we alarmniveaus af te stemmen op waterspanningen in dijklichamen om kritieke belastingsituaties te identificeren**. Dit kan met metingen, maar ook met inschattingen met tijdreeksmodellen, afhankelijk van het gewenste detailniveau. Voor metingen adviseren we om raaien in te richten met tenminste 3 peilbuizen in de binnenkruin, talud en binnenteen. Afhankelijk van het profiel en de aanwezigheid van een knip punt en/of binnenberm, kan een extra peilbuis een beter beeld geven van het verloop van de freatische lijn.
- **We bevelen aan om bewust een keuze te maken wat de geschematiseerde freatische lijn tijdens normcondities zou moeten weerspiegelen: is dat een veilige keuze (95%-percentiel) of een beste schatting (mediane waarde)?** De peilbuismetingen laten zien dat de maximaal gemeten grondwaterstanden tussen de dwarsprofielen een grote variatie hebben. In sommige gevallen is het talud volledig verzadigd, terwijl in andere gevallen de grondwaterstand meer dan één meter onder het maaiveld ligt. Voor een veilige schatting van de freatische lijn op basis van de variatie tussen dwarsprofielen, zou een volledig verzadigde dijk in de taludzone, met het boezempeil bij de binnenkruin en een opbolling richting het buitenwater verstandig zijn. Wanneer het een beste schatting van de freatische lijn tijdens normcondities is, dan kan de freatische lijn enkele decimeters lager geschematiseerd worden.

5.2.2 VERVOLGANALYSES

Voor een verdere verfijning van inzichten en het dichtn van kennisleemtes adviseren we om de volgende punten te onderzoeken:

- In sommige gevallen is een kade nagenoeg helemaal verzadigd en bereiken grondwaterstanden een maximum rond het maaiveld. Ook als de grondwaterstanden decimeters tot een meter onder maaiveld liggen, kunnen extreme waarden dichtbij jaarlijks optredende grondwaterstanden liggen (de plateauzone). Dit resultaat volgde uit eerdere studies, waarbij deze studie een verklaring hiervoor geeft (paragraaf 4.3). Deze kleine belasting-

variaties verlagen nog steeds de stabiliteit van een dijk, maar hoeveel precies? Dit varieert van dijk tot dijk, maar enkele stabiliteitsberekeningen voor boezemkaden en rivierdijken laten zien dat de faalkans een factor 10 kan toenemen bij een 10-30cm hogere freatische lijn, afhankelijk van de dijkenmerken en sterkte onzekerheid. **We adviseren om het effect van deze kleine belastingvariatie op de stabiliteit verder te kwantificeren voor een aantal typologieën van boezem- en polderkaden, evenals hoe om te gaan met geringe belastingvariaties binnen veiligheidstoetsen.** Hoe realistisch zijn schematisaties van dijken in stabiliteitsberekening, gegeven dat de extreme belastingniveaus dicht bij jaarlijkse niveaus liggen? Wat stelt deze klein belastingvariatie voor eisen aan de schematisering van de sterkte en haar onzekerheden? Kunnen onzekerheden in de sterkte gereduceerd worden met *reliability updating* technieken?

- Binnen deze studie zijn schades geïnventariseerd, waaruit volgde dat verschillende schades, veelal verzakkingen en vervormingen, hebben plaatsgevonden tijdens de natte winter 2023-2024. **We raden aan om deze schades gedetailleerder te analyseren: waar en wanneer traden ze op, en kunnen ze worden gelinkt aan hevige neerslag op dat moment en die locatie?** Was hierbij sprake van verhoogde boezemwaterstanden, of waren de schades uitsluitend het gevolg van neerslag?
- In de toekomst wordt extremere neerslag verwacht, wat kan leiden tot extremere grondwaterstanden. Ook kunnen doorlatendheden in de toekomst veranderen door bijv. scheurvorming en droog-nat cycli, welke op zijn beurt kunnen leiden tot andere grondwaterstanden. **Verder onderzoek is nodig om het effect van klimaatverandering op de stabiliteit van regionale keringen te kwantificeren; naast labonderzoek en modellering zijn ook veldmetingen, met bijvoorbeeld peilbuismetingen, essentieel.**
- Breid de analyse uit met aanvullende peilbuismetingen die beschikbaar zijn, om een vollediger beeld te krijgen van de freatische lijn in boezemkaden en de schematisering binnen veiligheids-toetsingen. Een andere studie verzamelde peilbuismetingen in boezemkaden in een dataset met 108 meetreeksen van 48 verschillende locaties, waarvan meer dan 30 locaties toegevoegd kunnen worden aan deze studie. Deze data is online beschikbaar: <https://doi.org/10.4121/4004f445-b71b-4996-bd7d-10b1fafbc86b.v1>

6

REFERENTIES

ENW, 2024.

Water tegen de dijk. *Het functioneren van waterkeringen tijdens het winterhoogwater 2023/2024 (2024).*

HHNK, 2024.

Bestuurlijke voortgangsrapportage regionale keringen 2023. 24.0289257.

HKV, 2024a.

Duiding hoogwater meren. In opdracht van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS, WVL). PR5137.10. Auteurs: Kuijper, B., Nicolai, R., Caspers, J., Botterhuis, T.

HKV, 2024b.

Waterhuishouding regionale keringen Rijnland. *Extreme freatische lijnen in regionale keringen en veranderende klimaatomstandigheden.* In opdracht van HH Rijnland. PR5181.10. Auteurs: Strijker B. & de Snoo I

HKV, 2023.

Tijdreeksanalyse boezemkaden: *Tijdreeksanalyse van freatische lijnen in boezemkaden in het beheergebied van HHSK.* In opdracht van HH van Schieland en de Krimpenerwaard. PR4877.10. Auteur: Strijker B.

KNMI, 2024.

De staat van ons klimaat 2023: *Nederlands weer in tijden van klimaatverandering.*

STOWA, 2019.

Neerslagstatistiek en-reeksen voor het waterbeheer 2019 (Vol. 19). Auteurs: Beersma, J., Hakvoort, H., Jilderda, R., Overeem, A., & Versteeg, R.

Strijker & Kok, 2024.

The dynamics of peak head responses at Dutch canal dikes and the impact of climate change. *EGUsphere*, 2024, 1-36.

TAW, 1996

Technisch rapport Klei voor dijken. Rijkswaterstaat, DWW.

TAW, 2004.

Technisch rapport waterspanningen bij dijken Waterkeringen (TAW). TR26-DWW-2004-057, isbn 90.269. 5565.3. Auteurs: Van der Meer, M. T., Niemeijer, J., Post, W. J., & Heemstra, J.

Provincie Zuid-Holland, 2023.

Samenvatting voortgangsrapportages regionale waterkeringen Zuid-Hollandse Waterschappen

BIJLAGE A

INVENTARISATIE PROBLEEMGEVALLEN

1. Zijn er door de natte winter van 2023-2024 problemen opgetreden bij polder- en boezemkaden, aanvullend op de normale situatie? Zo ja, kunt u de problemen omschrijven?

Waterschap Hunze & Aa's	Jazeker. Er waren in ons beheergebied 2 hoogwatergolven achter elkaar. De eerste daarbij is het calamiteitenplan in werking getreden en bij de tweede golf waren de maatregelen reeds uitgevoerd, deze golf verliep relatief rustig. Vóór de kerst zagen we het hoogwater al aankomen en hebben we alle zeilen bijgezet om in ieder tot een verwachte waterstand van 1,15 m NAP alles klaar te hebben. Uiteindelijk was de voorspelde golfhoopte hoger dan de uiteindelijke hoogwaterstand. • Waar we vooral druk mee waren is het inspecteren van de rivier de Hunze vanwege graverij in de kering. Dit is een groene zone voor de bever, wat betekent dat hij overal welkom is, ook in onze waterkeringen...1 keer per dag is de waterkering geïnspecteerd. • Een aantal kwetsbare trajecten (3) waar versterkingsprojecten lopen werden 1 maal daags geïnspecteerd. • Een aantal overige keringen bleek aan de lage kant te zijn, hier hebben we met zandzakken de kade opgehoogd. • Overall in ons beheergebied was sprake van schade aan het talud in kleine hoofdwatgangen en schouwsloten. Schade aan taluds langs grote hoofdwatgangen in de boezem zijn weinig opgetreden.
Waterschap Noorderzijlvest	Nee, in de afgelopen jaren hebben we ca. 125 km regionale keringen versterkt, en op een klein deel (welke nog niet versterkt was, maar waar nu de werkzaamheden in gang zijn) waren we genooddakt om zandzakken te plaatsen i.v.m. kans op overloop.
Wetterskip Fryslân	Nee, niet bekend/veelbetekend.
HH Hollands Noorderkwartier	• De grote hoeveelheid neerslag heeft niet geleid tot grootschalig verhoogde watertanden op de boezem. Vanwege de hoeveelheid neerslag is er wel extra geïnspecteerd op "bekende plekken". Toen zijn er geen problemen geconstateerd op onze boezemkades. • Begin november is er op de Schermerboezem lokaal sprake geweest verhoogde waterstanden (omgeving Egmondermeer). Dat is een bekende plek, waar de boezem krap is (belemmert de afvoer). • Ook op het Noordzeekanaal was het hoog water, maar dat had te maken met een storing in de spuikokers in IJmuiden (RWS). • Verder hebben wij, ondanks de vele neerslag, dus geen problemen gehad met onze boezemkades.
HH Amstel, Gooi en Vecht	Nee, er zijn geen situaties bij ons bekend van schadebeelden als gevolg van de grote neerslag hoeveelheden.
HH van Rijnland	Voor mijn gevoel niet meer dan gebruikelijk maar je kan het feitelijk nagaan. In de eerste bijlage heb ik daartoe een overzicht uit ons onderhoudsbeheerssysteem (Ultimo) gehaald met de correctieve (storing primair proces) dus niet gepland werkzaamheden rond deze winterperiode waarin per melding een korte omschrijving is opgenomen. Hierbij nog wel de kanttekening dat van begin februari tot 1 april de jaarlijkse voorjaarsinspectie waterkeringen wordt uitgevoerd waardoor er mogelijk overlap met correctieve melding aanwezig is. Het is lastig om dit onderscheid aan te brengen tussen inspectiemelding en correctieve melding omdat de inspectie uit meerdere honderden meldingen bestaat.
HH van Delfland	Ja, er zijn aanvullend op de normale situatie een aantal problemen opgetreden. Bijvoorbeeld bij de regionale keringen bij de N468 tussen Schipluiden en Maasland. Deze kering was al in slechte staat (vervorming en verzakking) maar deze is aanzienlijk achteruitgegaan tijdens de natte winter van 2023-2024. Andere locaties waar problemen zijn opgetreden betreffen: de polderkade bij de Bovendijk in Den Haag (verzakking), de regionale kering bij de tramkade in Schipluiden (afschuiving) en de regionale keringen bij de Vlaardingse kade (lekkage en verschuiving).
HH Schieland en de Krimpenerwaard	Nee
De Stichtse Rijnlanden	Nee, er zijn geen problemen gesignaleerd als gevolg van extra natte periode.
Waterschap Rivierenland	Ja, bij ons is op een locatie een binnentalud afgeschoven, dit is een smalle kering waar we al eerder problemen mee hebben gehad. Het lijkt erop dat het alleen gaat om een bovenste laag grond aan de binnenzijde dus meer een bekledingslaag niet dieper van 0,5 m. Een echte glijcirkel is niet gezien, ook geen scheuren in het asfalt op de kruin van de weg. Over de weg rijdt regelmatig zwaar verkeer (vrachtwagens) en er ligt een teensloot strak tegen de binnenteen aan. Deze zwakke plek bestaat al langer en is al vaker opgeknapt door de grond weer aan te helen. Nu is er een zwaardere beschoeiing geplaatst waarmee we het talud beter op zijn plek willen houden.
Waterschap Hollandse Delta	Nee

Waterschap Drents Overijsselse Delta	Zand meevoerende wellen en lokale kleine afschuivingen in teensloten en een kleine afschuiving in het buitentalud t.p.v. van eerder uitgevoerde werkzaamheden.
Waterschap Brabantse Delta	Wegens mijn verlof van de afgelopen weken heb ik je mail nog niet kunnen beantwoorden. Wij hebben binnen ons gebied denk ik niet het soort boezemkades zoals we die elders in Nederland kennen. Ook van de dijken die wij zelf hebben aangewezen als zijnde boezemkade hebben we vorige winterperiode geen problematische observaties. Ik denk dan ook dat wij helaas weinig kunnen bijdragen aan deze analyse.

2. Wordt de natte winter van 2023-2024 beschouwd als een relevante belastingsituatie voor polder- en boezemkaden binnen uw waterschap en is daarop actie ondernomen?

Waterschap Hunze & Aa's	Ons maatgevend hoogwater op de boezem is 1,5 m NAP, dit hoogwater was net boven de 1,1 m NAP. Het was uitzonderlijk nat maar niet een van de natste. In 2019 is er een hoger water geweest (1,2 m NAP) en 2012 was zeer extreem. 1995 de extreemste, maar dit was voor masterplan kaden. Vrijwel alle acties die in dan plan stonden zijn uitgevoerd. Dit merk je ook, er is veel rust tijdens hoogwaters. We kennen ons gebied goed en de écht zwakke plekken zijn vrijwel allemaal opgelost.
Waterschap Noorderzijlvest	De situatie van 2023-2024 wordt niet specifiek gebruikt als referentie, alle melding tijdens een hoog waterperiode worden gebruikt om ons stelsel van waterkeringen op sterkte en hoogte te houden.
Wetterskip Fryslân	Ja, maar niet beduidend meer dan andere jaren. Er was geen aanleiding voor extra actie.
HH Hollands Noorderkwartier	Er is geen sprake geweest van maatgevende waterstanden op de boezem. Qua grondwaterstanden zou het best een heel relevante belastingsituatie (misschien wel maatgevend) geweest kunnen zijn. We meten echter nog niet lang genoeg (en nog niet overal in het gebied) om daar een uitspraak over te kunnen doen.
HH Amstel, Gooi en Vecht	Nee, het waterpeil in de boezem is nagenoeg stabiel gebleven rond streefpeil (NAP -0,40m). De hogere waterstand heeft hooguit 2 dagen geduurd en was niet meer dan 20 cm gestegen. Dit was nog ruim beneden MaatgevendBoezemPeil (MBP) van NAP +0,00 m.
HH van Rijnland	-
HH van Delfland	Ja deze wordt gezien als relevante belastingsituatie ook voor waterhuishouding. Er is geen evaluatiesessie gehouden. Wel is er extra gemonitord op de regionale kering bij de N468 (momenteel wordt deze kering elke twee weken visueel geïnspecteerd en een keer in de maand inmeten door RPS).
HH Schieland en de Krimpenerwaard	Nee
De Stichtse Rijnlanden	Nee, hier is geen sprake van. Maatgevende boezempeilen zijn afgeleid van maalstoppeilen. Deze zijn hard en worden in alle gevallen gehandhaafd. Met andere woorden, deze worden nooit overschreden en hebben daarmee geen impact op freatische lijnen meer dan waar al mee gerekend wordt. Neerslag dat rechtstreeks op de dijk valt en hiermee extra verweking veroorzaakt is geen mechanisme waar op geanticipeerd wordt in beheer- of onderhoudsprocessen.
Waterschap Rivierenland	De afgelopen winter was relevant, maar we hebben niet veel bijzonderheden geconstateerd, daardoor is verder ook geen actie ondernomen.
Waterschap Hollandse Delta	Voor regionale keringen zijn geen extra maatregelen getroffen
Waterschap Drents Overijsselse Delta	Ja we gaan nu werken aan betere waterstand verwachtingen voor het regionale systeem en een aantal peilmeters wordt aangepast en krijgen een groter meetbereik. Voor een aantal gevallen hebben we inmiddels herstel/verbeter werken uitgevoerd en er zijn wat evaluatiepunten opgepakt. Allemaal kleinschalig werk.
Waterschap Brabantse Delta	-
Waterschap Scheldestromen	

2a. Hanteert het waterschap een signaleringswaarde om potentieel kritieke situaties bij boezemkaden die te nat worden, te identificeren?

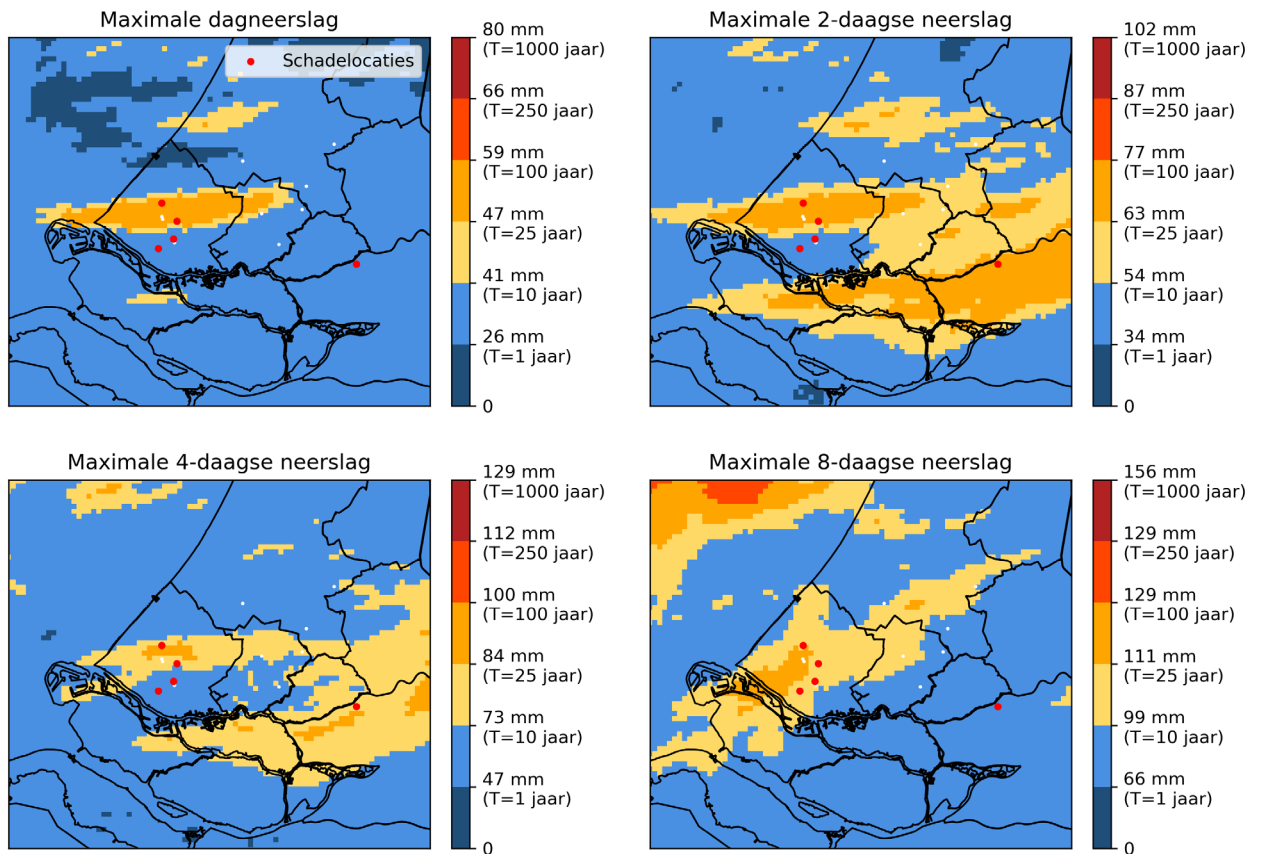
Waterschap Hunze & Aa's	Jazeker. We hebben een calamiteitenplan waarin allerlei acties beschreven staan die moeten worden uitgevoerd tijdens een bepaald waterniveau. Dit plan start bij 0.7 m NAP (normaalpeil = 0,53 m NAP) Een kade moet bij bijvoorbeeld 1,00 m NAP worden afgesloten vanwege hoogte tekort, dit staat in het calamiteitenplan. Ook noodmaatregelen staan hierin (voor nog niet versterkte trajecten, dit zijn er niet veel meer).
Waterschap Noorderzijlvest	-
Wetterskip Fryslân	Niet met peilbuismetingen. Wel met verwachte extreme neerslag en extreme neerslagtekort/uitdroging
HH Hollands Noorderkwartier	Die richting willen we wel op. Daar is ons nieuwe meetprogramma binnen 'Waterveiligheid 2030' voor opgezet.
HH Amstel, Gooi en Vecht	Nee, daar wordt niet op gemonitord en hebben geen signaleringswaarde.
HH van Rijnland	Niet voor natte situaties maar wel voor droogte.
HH van Delfland	We maken gebruik van een bedieningsstrategie, waarbij voor een aantal locaties (voornamelijk in de buurt van gemalen) een signaleringswaarde opgesteld. Deze signaleringswaarde geeft aan welke waterhoogte maximaal aanwezig mag zijn gedurende 48 uur.
HH Schieland en de Krimpenerwaard	Nee

De Stichtse Rijnlanden	Nee, helaas niet zou ik zeggen. We beraden ons wel over een nieuw monitoringsplan waaruit dit zou kunnen volgen.
Waterschap Rivierenland	Op dit moment hanteren we nog een boezemwaterstand op diverse plekken, dat zijn laagtes in het systeem waar het water als eerste de kruin over loopt. We hebben op dit moment nog geen signaleringswaarde over hoe nat de keringen zijn. Daar monitoren we nog niet op. De hoogte van de freatische lijn is wel goed te relateren aan de neerslag, dan gaat het ook over de duur van de neerslag en de hoeveelheid.
Waterschap Hollandse Delta	Nee
Waterschap Drents Overijsselse Delta	Bij een aantal faalmechanismen voor primaire keringen middels een dashboard van de beoordeling (realtime en vooruitkijkend op basis van verwachtingen) de ervaringen en de inspecties. Dit hebben we voor de primaire keringen ook voor de kunstwerken ingericht. Voor de regionale en overige keringen hebben wij dit nog niet op basis van de beoordeling. Maar we leggen we vanuit de schouw en vanuit de ervaringen kritieke locaties vast we noemen dit aandachtspunten hoogwater. Van die locaties wordt een signaleringspeil en een sluitpeil vastgelegd (sluitpeil is in dit geval het peil waarbij een actie uitgevoerd moet zijn, bv een bekramming aanbrengen. We hebben besloten om deze benaming gelijk te houden met de actie benaming voor kunstwerken)
Waterschap Brabantse Delta	-
Waterschap Scheldestromen	

BIJLAGE B

MAXIMALE NEERSLAG BIJ SCHADELOCATIES

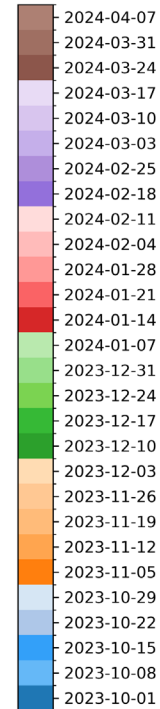
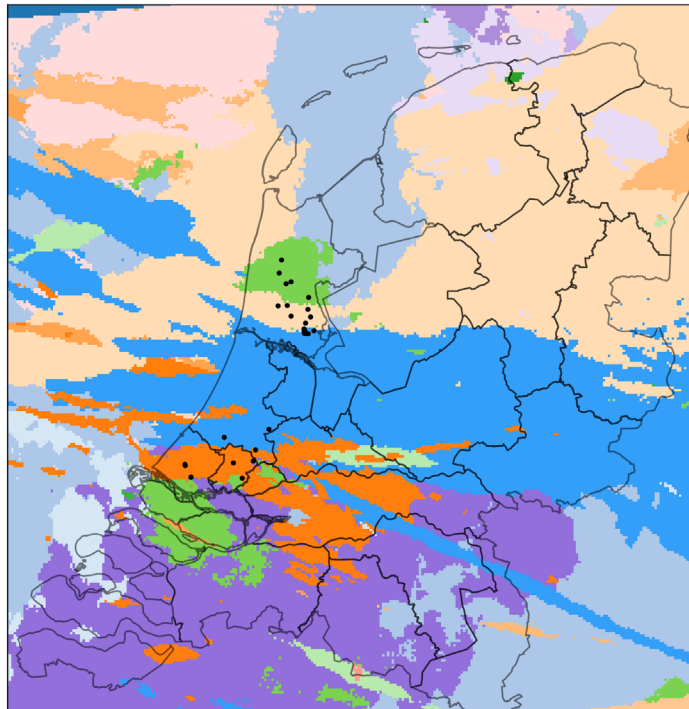
Een ruimtelijk beeld van de maximale neerslaghoeveelheden en de locaties waar schades plaatsvonden.



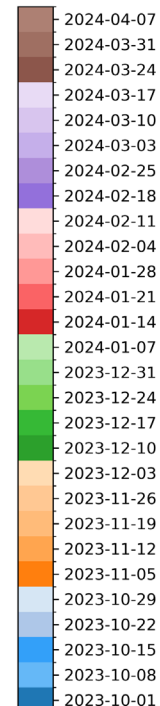
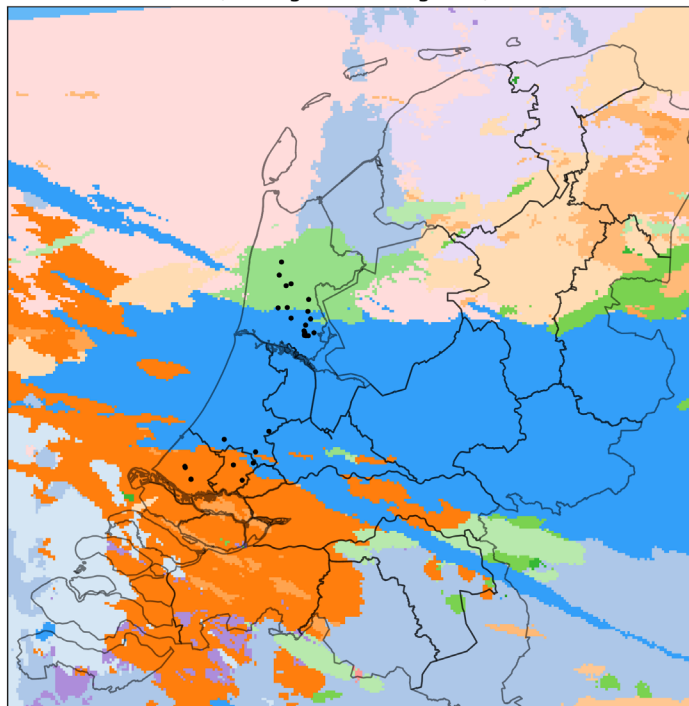
BIJLAGE C

MOMENT VAN DE MAXIMALE NEERSLAG IN NEDERLAND

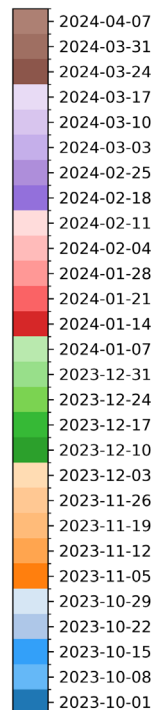
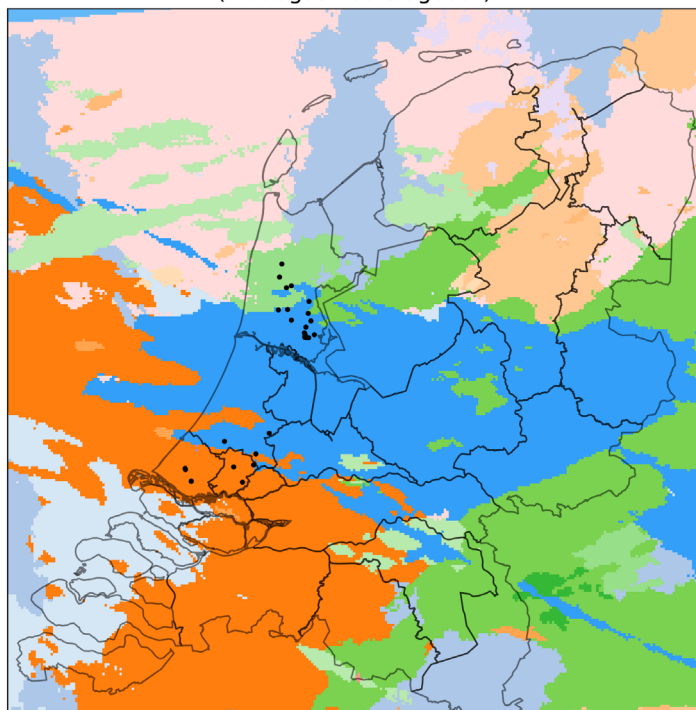
Periode maximale neerslaghoeveelheid
(1 daagse neerslagduur)



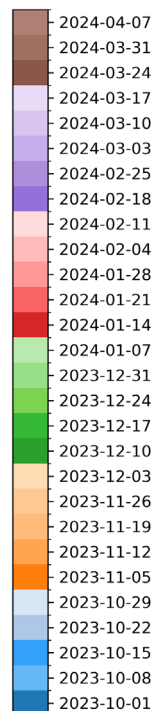
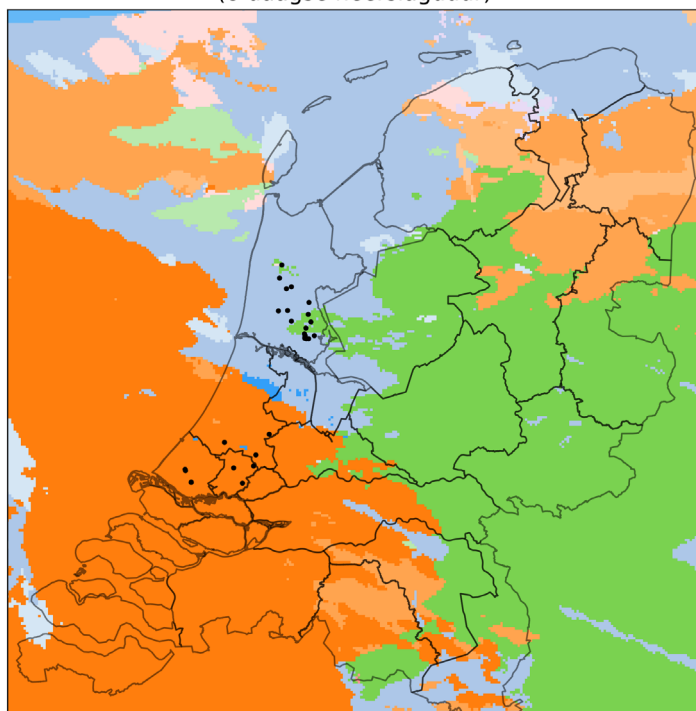
Periode maximale neerslaghoeveelheid
(2 daagse neerslagduur)



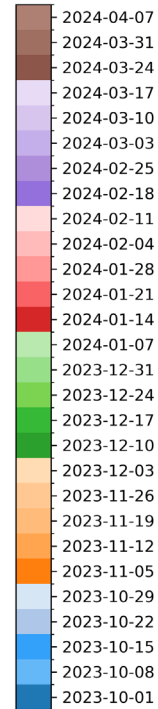
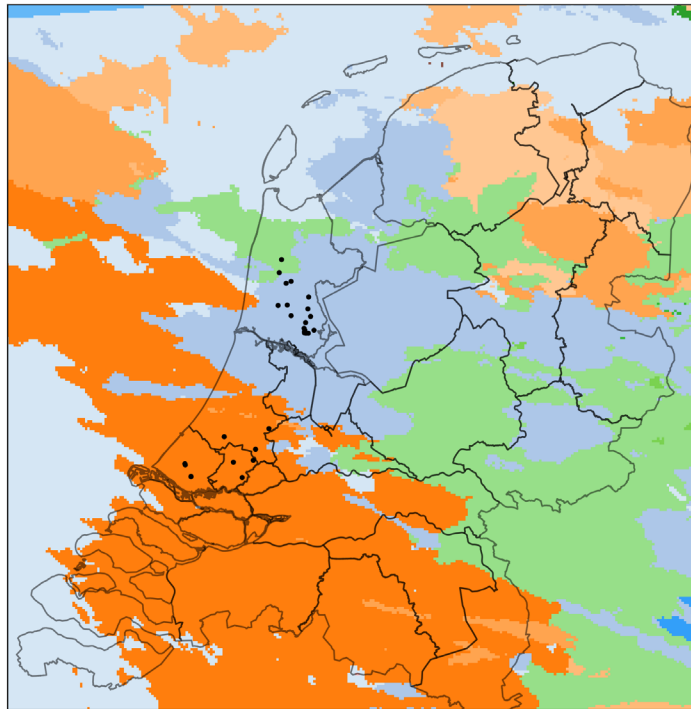
Periode maximale neerslaghoeveelheid
(4 daagse neerslagduur)



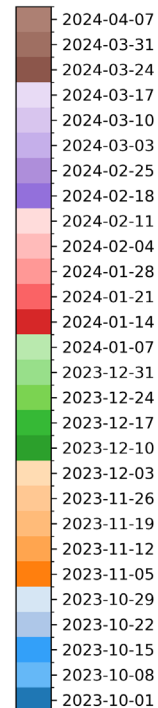
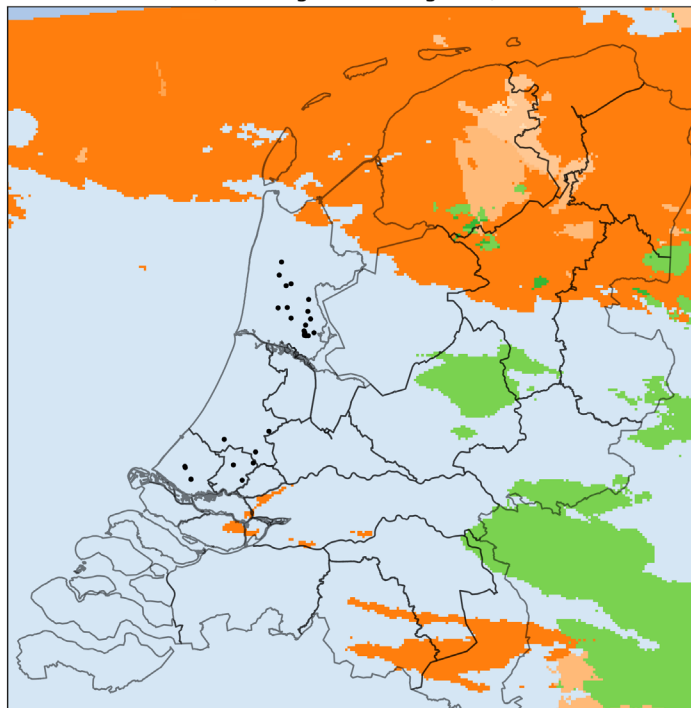
Periode maximale neerslaghoeveelheid
(8 daagse neerslagduur)



Periode maximale neerslaghoeveelheid
(14 daagse neerslagduur)



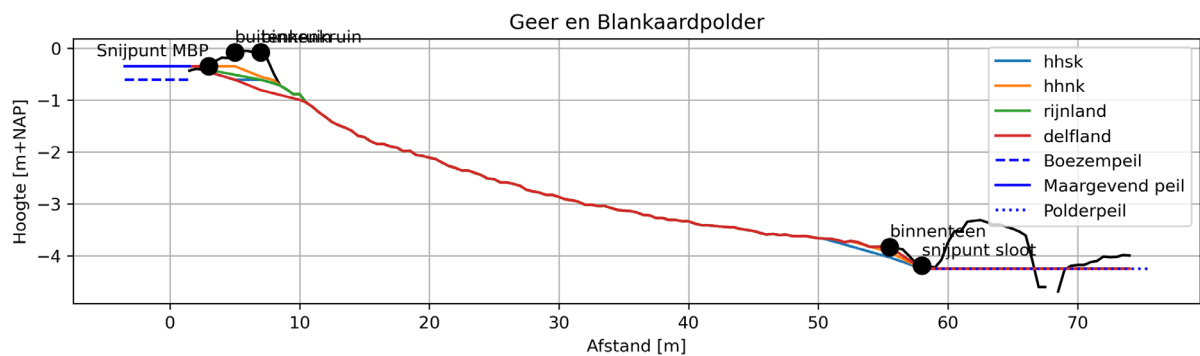
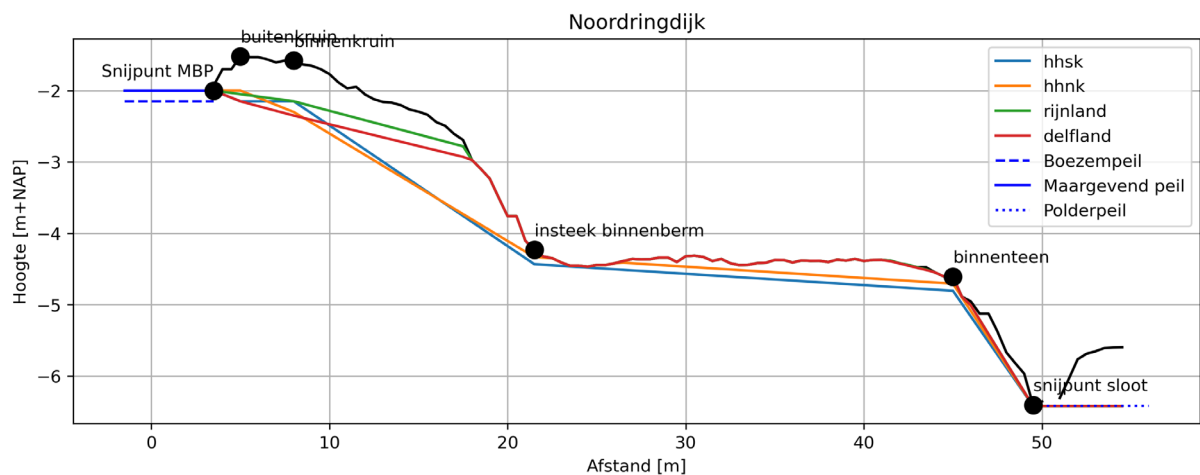
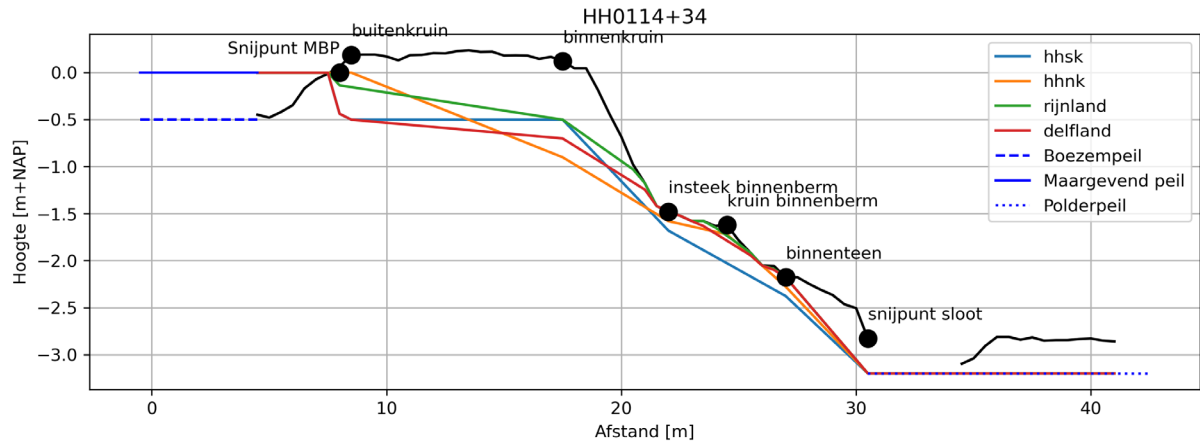
Periode maximale neerslaghoeveelheid
(30 daagse neerslagduur)

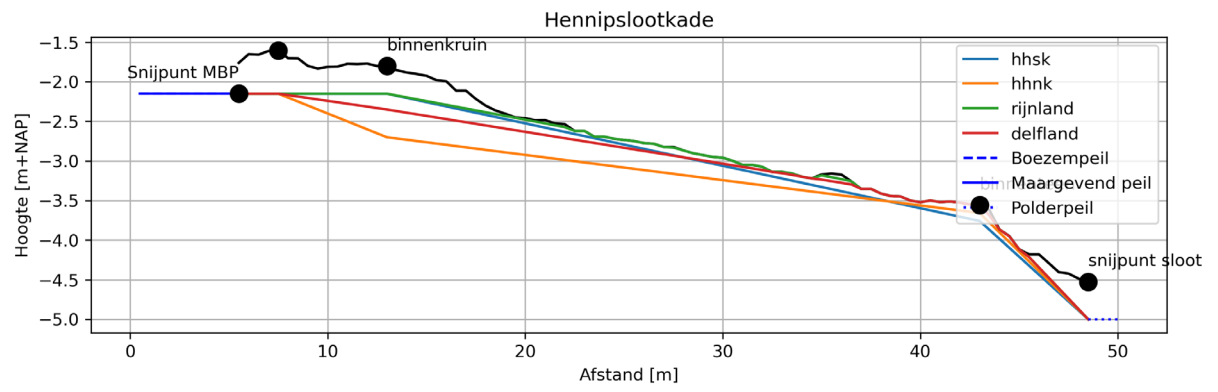


BIJLAGE D

SCHEMATISERING FREATISCHE LIJNEN

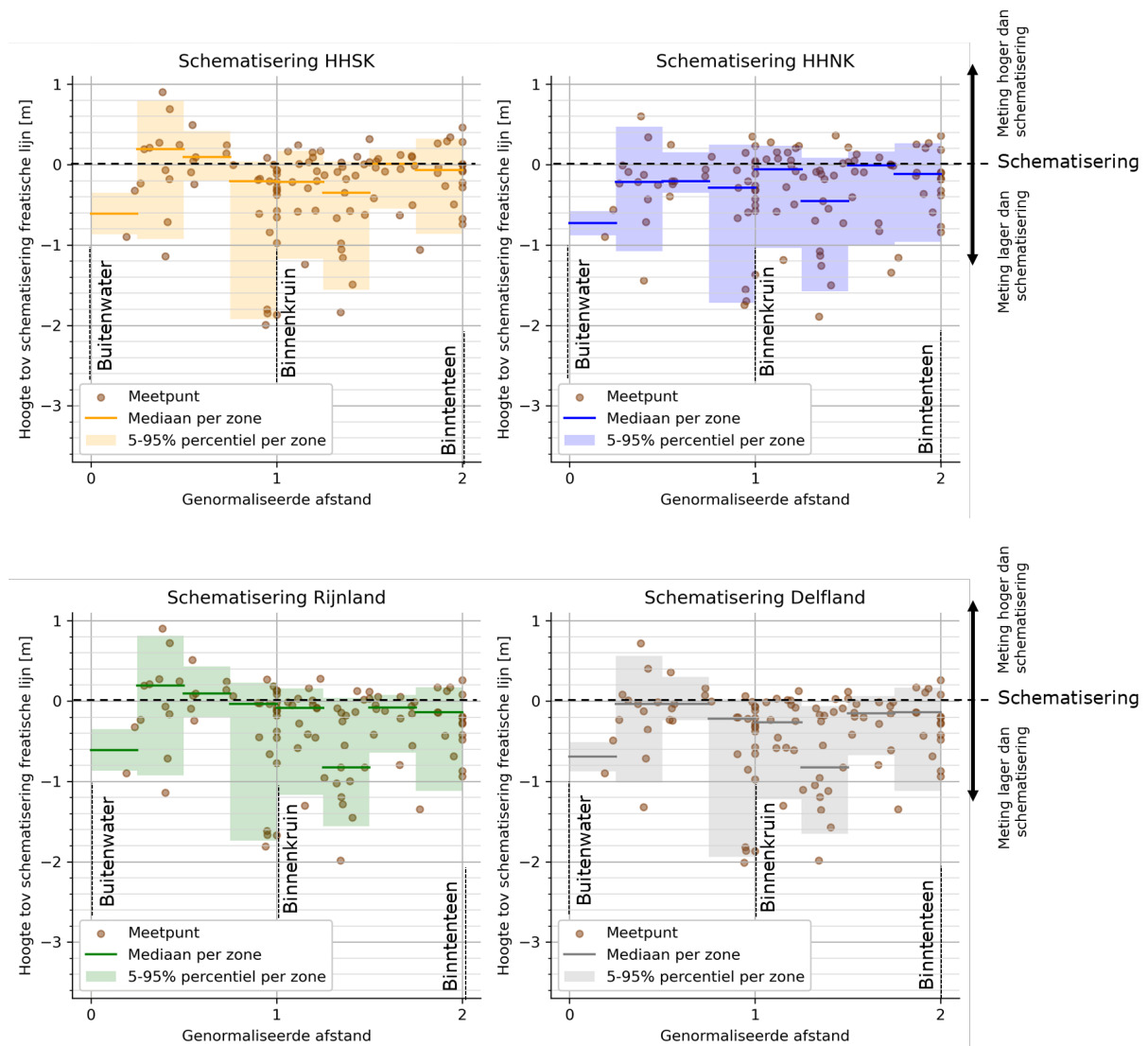
Voor een aantal verschillende polder- en boezemkaden is de schematisering van de freatische lijn van verschillende waterschappen weergegeven.ik





BIJLAGE E

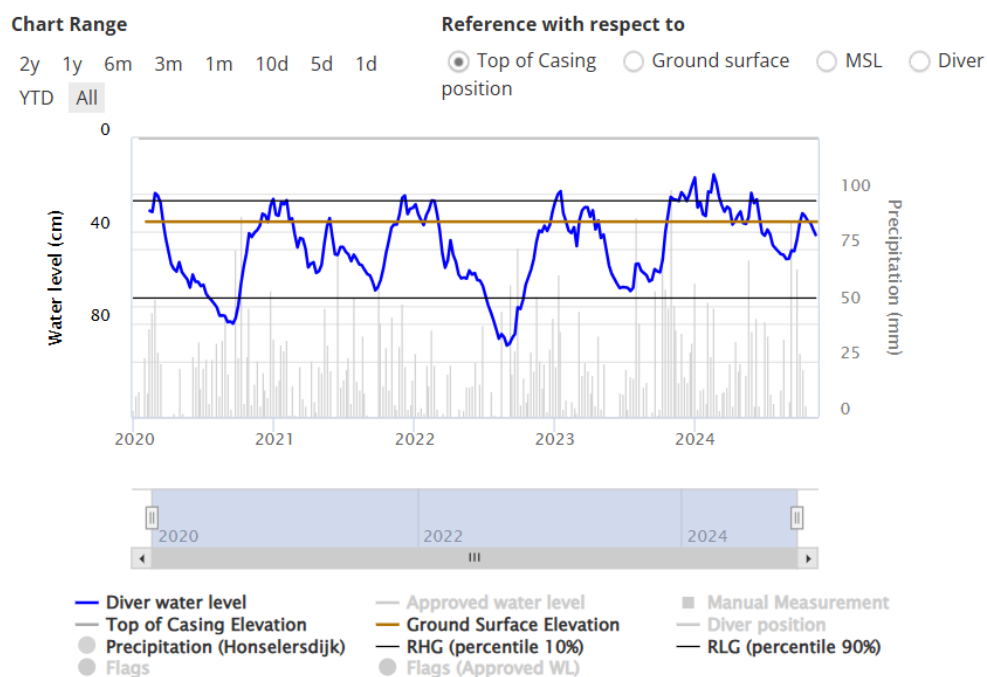
MAXIMAAL GEMETEN GRONDWATERSTANDEN TEN OPZICHTE VAN SCHEMATISERING FREATISCHE LIJN



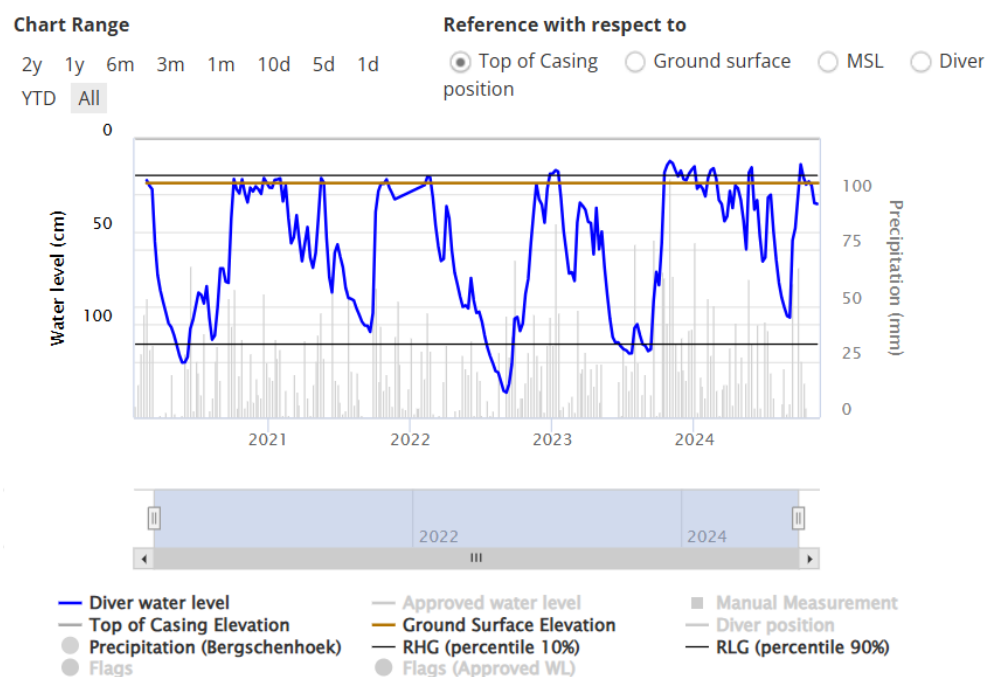
BIJLAGE F

PEILBUISMETINGEN BOVEN MAAIVELD

Water levels molenlaan_4_001



Water levels hennipsloot_5_001



DANKWOORD

Voor dit onderzoek is gebruikgemaakt van peilbuismetingen en reacties op inventarisatievragen door verschillende waterschappen. We danken de waterschappen die meetdata beschikbaar hebben gesteld: de hoogheemraadschappen Hollands Noorderkwartier, Schieland en de Krimpenerwaard, Rijnland en Delfland. Verder bedanken we alle veertien waterschappers, en hun collega's, die de tijd hebben genomen om hun ervaringen en bevindingen tijdens de natte winter te delen. Hun inbreng heeft dit onderzoek mogelijk gemaakt. Tot slot dank aan een ieder uit de begeleidingscommissie voor hun betrokkenheid en meedenken tijdens het onderzoek.