

# Techniek van waterveiligheid in Durgerdam

Collegebundel dijkversterking Durgerdam



## **Auteurs:**

Bert Kappe (HHNK)  
Matthijs Kok, Richard Jorissen en Martin Schepers  
(expertteam dijkversterking Durgerdam)

November 2018

# Inhoudsopgave

Voorwoord	4
Samenvatting	5
<b>1 Inleiding</b>	<b>6</b>
<b>2 Nieuwe normering</b>	<b>9</b>
2.1 Aanvaardbaar risico	10
2.2 Norm voor Durgerdam	11
2.3 Faalkansbegroting	12
<b>3 Van norm naar technisch ontwerp</b>	<b>13</b>
3.1 Werken met de faalkansbegroting	13
3.2 Verloop van de veiligheid tijdens de levensduur van de dijk	14
3.3 Toetsen en ontwerpen	15
3.4 Maatregelen per mechanisme	16
<b>4 Veiligheidsopgave voor Durgerdam</b>	<b>17</b>
4.1 Waterstanden en golven	18
4.2 Hydraulisch Belasting Niveau	20
4.3 Toeslagen voor klimaat en buistoten (slingeringen)	21
4.4 Toeslag voor bodemdaling, zetting en klink	22
4.5 Huidige kruinhoogte	23
4.6 Benodigde kruinhoogte	25
4.7 Veiligheidsopgave macro-instabiliteit	26
4.8 Conclusies veiligheidsopgave	28
<b>5 Knoppen voor technisch ontwerp Durgerdam</b>	<b>29</b>
5.1 De verschillende knoppen	29
5.2 Knop 1: Faalkansbegroting	29
5.3 Knop 2: Levensduur en klimaatscenario	29
5.4 Knop 3: Schematisatie en modellering	30

5.4.1	Hydraulische randvoorwaarden	30
5.4.2	Nadere analyse over slingering in het Markermeer	33
	Tijdens de interactie met bewoners is er ook twijfel gerezen of de toeslag voor	33
5.4.3	Bodemdaling, zetting en klink	34
5.4.4	Gebruiken gedetailleerde, huidige dijkprofielen	36
<b>5.5</b>	<b>Knop 4: Reductie van belastingen</b>	<b>37</b>
<b>5.6</b>	<b>Knop 5: Vergroten sterkte</b>	<b>39</b>
<b>5.7</b>	<b>Overzicht en doorwerking bouwstenen</b>	<b>42</b>
<b>5.8</b>	<b>Combinaties van bouwstenen in Durgerdam-West</b>	<b>45</b>
<b>5.9</b>	<b>Afsluiting</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Bewonersalternatieven</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Vervolgstappen</b>	<b>53</b>

## Voorwoord

Deze collegebundel is geschreven met als doel om elkaar, bewoners van Durgerdam, en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (HHNK), beter te begrijpen. Een dijkversterking is een ingrijpende gebeurtenis voor het dorp dat praktisch op de dijk is gebouwd. Daarom is het van het grootste belang dat de nut en noodzaak en het hoe en waarom van de dijkversterking wordt begrepen.

De bundel is ontstaan uit de behoefte om de uitleg van de collegeavonden van het “expertteam dijkversterking Durgerdam” over de dijkversterking nog eens na te kunnen lezen. Beschreven zijn de waterveiligheidsopgave voor Durgerdam en de manieren waarop dijken kunnen bezwijken; de zogenoemde faalmechanismen. Voor elk waterveiligheidsprobleem zijn er verschillende alternatieven die de opgave (gedeeltelijk) kunnen oplossen. In dit dictaat wordt dit inzichtelijk gemaakt aan de hand van ‘knoppen’. De mogelijke bijdrage van elke ‘knop’ is in beeld gebracht, zodat bewoners inzicht krijgen in het effect op de veiligheidsopgave die de verschillende mogelijke oplossingen (kunnen) hebben. Het uiteindelijke ontwerp zal bestaan uit een combinatie van de verschillende ‘knoppen’.

De collegeavonden en de gesprekken met bewoners, experts en hoogheemraadschap hebben geleid tot een zogenoemde “1-tekst notitie” met uitgangspunten voor het dijkontwerp. Deze notitie is een belangrijk resultaat van het participatieproces en daarom als bijlage toegevoegd.

## Samenvatting

De dijk in Durgerdam beschermt het achterland tegen overstromingen. Deze dijk voldoet niet aan de gestelde eisen in de Waterwet en moet worden versterkt. Deze collegebundel bevat een overzicht van de achtergrond voor de veiligheidsnorm voor Durgerdam, de veiligheidsopgave voor Durgerdam en een overzicht van mogelijke oplossingen om het veiligheidstekort op te heffen.

De veiligheidsnorm voor Durgerdam is afgeleid vanuit het concept van *aanvaardbaar* risico. In de Waterwet zijn hiervoor normen in de vorm van aan acceptabele overstromingskans opgenomen. Deze eis is 1/1000 per jaar voor het traject waarvan Durgerdam onderdeel van is. Dit betekent dat gemiddeld één keer in de 1000 jaar een overstroming voor kan komen. Het traject is ongeveer 30 km lang, en dat betekent dat de eis voor Durgerdam nog strenger moet zijn dan 1/1000. Immers, ook andere delen van het traject dragen bij aan de overstromingskans. De hoogte van de norm hangt onder andere samen met het aantal mogelijke slachtoffers en de kosten voor het verkleinen van het risico, en veel waterkeringen hebben een veel strengere eis dan het traject waar Durgerdam onderdeel van uitmaakt.

Voor de *overstromingskans* zijn de *hydraulische belasting* en de *sterkte van de dijk* van belang. De kracht van de golven die een dijk tijdens een storm moet weerstaan wordt samen met de waterstand de *hydraulische belasting* genoemd. Deze hydraulische belasting is bepalend voor de hoogte van de dijk. Aan de orde komt onder andere het meerpeil, de 'scheefstand' van het meer en de hoogte van de golven. Ook worden de gebruikte toeslagen uitgelegd (dat zijn relatief kleine bijtellingen voor factoren die niet in de rekenmodellen zijn opgenomen, zoals de statistische- en modelonzekerheden).

De dijk in Durgerdam is bij de toetsing in 2006 niet *sterk* genoeg gebleken: de dijk is afgekeurd op macro-instabiliteit en bekleding. De nieuwe normering uit 2016 heeft gevolgen voor de beoordeling: de dijk is ook niet op alle locaties hoog genoeg.

Het stabiliteitsprobleem van de dijk in Durgerdam kan worden opgelost met behulp van de zogenoemde restbreedtebenadering. De diepe glijvlakken van de dijk zijn voldoende stabiel. De ondiepe afschuivingen van het binnentalud zijn relatief ongevaarlijk. De dijk is sterk genoeg en mocht het binnentalud onverhoopt toch bezwijken, dan resteert een dijk die nog steeds het water kan keren.

Dan blijft over het hoogteprobleem, de kerende hoogte. Voor de bewoners van de dijk is het van het grootste belang dat de nieuwe dijk zoveel mogelijk aansluit bij het profiel van de huidige dijk. Ook het hoogheerraadschap wil een dijkverhoging als dat kan voorkomen, om het uitzicht over het Markermeer voor de bewoners zoveel als mogelijk in stand te houden.

Er zijn verschillende manieren om dit technische vraagstuk op te lossen, er zijn verschillende knoppen om aan te draaien: de faalkansbegroting, de levensduur en het klimaatscenario, de schematisatie en de modellering, de reductie van de belastingen en het vergroten van de sterkte. Een mogelijke maatregel om de hoogte van de waterkering te beperken is het kleiner maken van het effect van golven, bijvoorbeeld door ze te laten breken op een voorland, of door het talud flauwer of ruwer te maken of door een berm aan te leggen.

In een overzichtsgrafiek zijn de effecten van alle mogelijke individuele maatregelen weergegeven. Het is gebleken dat de hoogte-opgave kan worden gereduceerd, door bijvoorbeeld meer gedetailleerd naar de zetting in de afgelopen 10 jaar te kijken. Er blijft nog wel een beperkte hoogte-opgave over, en deze kunnen met de voorgestelde maatregelen worden opgelost. Dit is de uitdaging die nog resteert: het maken van een integraal en passend ontwerp, op basis van de uitgangspunten die in deze bundel zijn aangegeven.

## 1 Inleiding

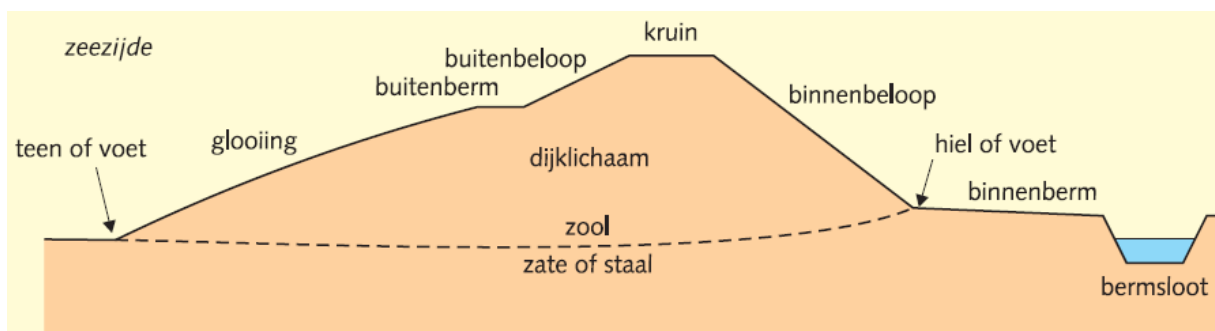
*De dijk in Durgerdam beschermt het achterland tegen overstromingen. Deze dijk voldoet niet aan de gestelde eisen in de Waterwet en moet worden versterkt. Dat betekent dat er iets aan de sterkte van of belastingen op de dijk moet worden gedaan. De sterkte van een dijk hangt af van vorm van de dijk, de geometrie, de ondergrond, de opbouw, de gebruikte materialen en eventuele hulpconstructies. Een alternatief is het verminderen van de belastingen op de dijk, bijvoorbeeld door de kracht van de golven, de golfbelasting, te verkleinen of waterstanden te verlagen. In dit hoofdstuk wordt een algemene introductie gegeven over de bouw, de geometrie, van dijken en manieren waarop dijken worden belast en kunnen bezwijken als ze niet sterk genoeg zijn.*

Waterkeringen vormen een essentieel onderdeel van de bescherming van Nederland tegen overstromingen. Zo ook in Durgerdam: de dijk beschermt het achterland tegen overstromingen vanuit het Markermeer. Maar de dijk in Durgerdam is veel meer dan alleen een waterkering<sup>1</sup>. De dijk vertoont een grillig verloop, dat sterk is beïnvloed door natuurlijke omstandigheden, door dijkdoorbraken en reparaties. Ze zijn oorspronkelijk gebouwd met schep en kruiwagen. Hun verloop is veelal in het werk zelf tot stand gekomen, proefondervindelijk en door schade en schande wijs geworden. Vooral de talrijke doorbraken zorgden in de loop van de tijd voor een bochtig tracé: ter plaatse van de doorbraak werden door de geconcentreerde stroming diepe poelen, zogenaamde wielen, uitgesleten, waar de nieuwe dijk met een bocht omheen werd gelegd. Ook de bescheiden knik in de dijk bij Durgerdam is op die wijze ontstaan. De schilderachtige esthetiek van deze dijken is veelvuldig door schilders en tekenaars vastgelegd.

Maar de dijk is door het waterschap afgekeurd omdat hij niet aan de wettelijke normen voldoet. Daarom wordt de dijk versterkt. Maar wat zijn nu de relevante onderdelen van de dijk, vanuit het perspectief van veiligheid?

### Onderdelen van de dijk

Van buitendijks (de waterkant) naar binnen kunnen de volgende elementen worden onderscheiden: de teen of voet, de glooiing, de buitenberm, het buitenbeloop (-talud), de kruin, het binnenbeloop (-talud), de hiel of voet, de binnenberm en de bermsloot. De zool, zate of staal is de onderkant van het dijklichaam. Zie figuur 1 voor een dwarsdoorsnede.



Figuur 1. Dwarsdoorsnede van een dijk

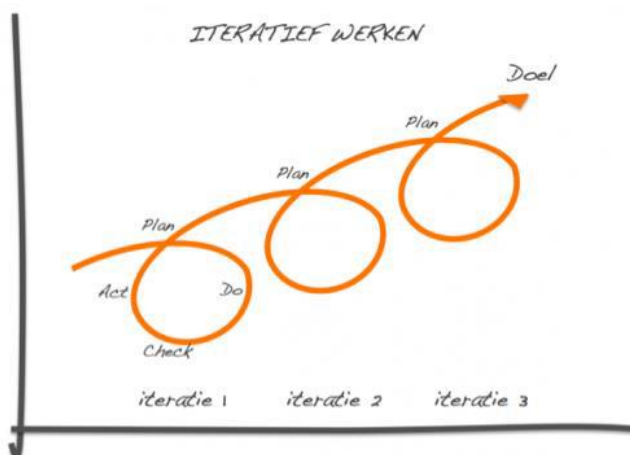
Naast de geometrie is ook de samenstelling van de ondergrond en het materiaal waarmee de dijk is gebouwd van groot belang voor de veiligheid. Veel gebruikte materialen zijn zand en klei, maar ook veen kan onderdeel van de kering zijn. De samenstelling heeft invloed op de sterkte.

Door welke factoren wordt nu de geometrie van de waterkering in Durgerdam bepaald? En welke vrijheidsgraden (knoppen) zitten er in het ontwerp om de kering weer aan de norm te laten

<sup>1</sup> Vervolg van de alinea ontleend aan: Frits Palmboom, Atlas van het IJsselmeergebied, 2018

voldoen? Dit dictaat geeft hierop een antwoord. Hiervoor is het nodig om in te gaan op de norm voor de waterkering in Durgerdam, op toekomstige ontwikkelingen in het gebied, op de verschillende faalmechanismen van waterkeringen, en tot slot op de knoppen waaraan gedraaid kan worden bij het vinden van een oplossing. In dit dictaat worden deze oplossingen als bouwstenen gepresenteerd. Deze bouwstenen kunnen vervolgens worden gebruikt bij het maken van een landschappelijk wenselijke oplossing, want een dijk biedt meer dan waterveiligheid. Het is een betekenisvolle plek in het landschap met veel functies zoals wonen, werken, recreëren en natuur. Daarom is het nodig om in nauw overleg tussen de ontwerpers van de dijk als waterkering, vaak werkzaam bij het waterschap, en de ontwerpers van een dijk als onderdeel van het landschap, vaak werkzaam bij de provincie of gemeente, tot een voor alle partijen acceptabel ontwerp van de dijk te komen (vaak wordt dit 'optimalisatie van het ontwerp' genoemd). Het bijzondere van de dijkversterking in Durgerdam is dat er door waterschap, provincie en gemeente wordt gewerkt aan een gezamenlijk, integraal ontwerp waar de dijkversterking onderdeel van uitmaakt.

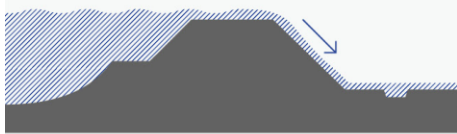
Het maken van een ontwerp is niet een eenmalige activiteit, maar vindt in een aantal stappen plaats, in een iteratief proces. Schematisch is dit weergegeven in Figuur 2. Immers, na de eerste stap in het ontwerpproces wordt ontdekt wat er nu wel en wat er niet (of nauwelijks) toe doet, en wordt vervolgens op zoek gegaan naar nieuwe informatie en nieuwe oplossingsrichtingen. Dat is ook in het ontwerpproces in Durgerdam gebeurd. Voorbeelden hiervan zijn: het verbreden van de weg halverwege de vorige eeuw waardoor de kantdijk afgegraven en verplaatst moest worden (want de dijk was destijds toch te hoog omdat deze als slaperdijk werd gezien na het gereedkomen van de Afsluitdijk). Een tweede voorbeeld van nieuwe informatie is het analyseren van de recente bodemdaling met behulp van satellieten. In deze collegebundel zullen we dit iteratief proces zo veel als mogelijk zichtbaar maken.



Figuur 2. Ontwerpen is een iteratief proces

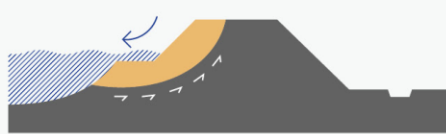
### Faalmechanismen

Dijken kunnen op verschillende manieren bezwijken. Deze manieren noemen we faalmechanismen. Een faalmechanisme treedt op als de belasting groter is dan de sterkte van de dijk. Op het moment dat het waterschap voor een dijk constateert dat de waterkering niet meer aan de veiligheidsnorm voldoet, wordt deze afgekeurd. Deze norm is door de rijksoverheid aangegeven in de Waterwet: *het waterschap moet de dijk verbeteren als de kering niet meer aan de eisen voldoet, en de Rijksoverheid betaalt daar voor de helft aan mee.* De faalmechanismen van grondconstructies zijn weergegeven in figuur 3. Naast de grondconstructies zijn ook zogenaamde kunstwerken (zoals sluizen) aanwezig in waterkeringen, maar dit is in Durgerdam niet het geval, dus daarom besteden we daar in dit dictaat geen aandacht aan.



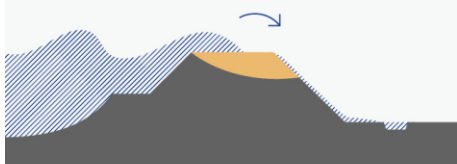
### Overlopen

Overstroming door een waterstand hoger dan de kruin, eventueel in combinatie met golfoverslag. De kering kan hierbij door doorgaande erosie bezwijken.



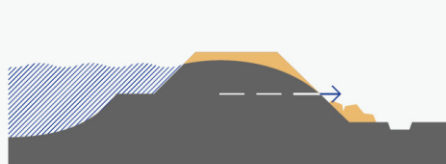
### Macro-instabiliteit buitentalud

Afschuiven van het buitentalud bij snelle daling van de buitenwaterstand na hoogwater (macro-instabiliteit buitenwaarts).



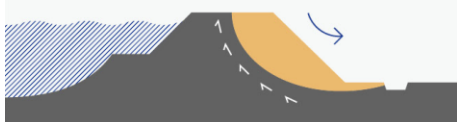
### Golfoverslag

Doorgaande erosie van kruin, binnentalud en-/of teen door de kracht van het water bij golfoverslag of overlopen.



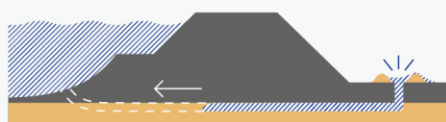
### Micro-instabiliteit

Instabiliteit van het binnen- (of buiten-) talud door uittredend kwelwater door het grondlichaam.



### Macro-instabiliteit binnentalud

Afschuiven van het binnentalud, hetzij door waterdruk tegen de kering en verhoogde waterspanning in de ondergrond, hetzij door infiltratie van het overstromend water bij een combinatie van hoge waterstand en golfoverslag.



### Opbarsten en piping

Piping als gevolg van kwelstroming door de ondergrond waarbij grond wordt meegevoerd en dijk wordt ondermijnd.



### Erosie buitentalud

Erosie van het buitentalud (bekleding) door golven of stroming.

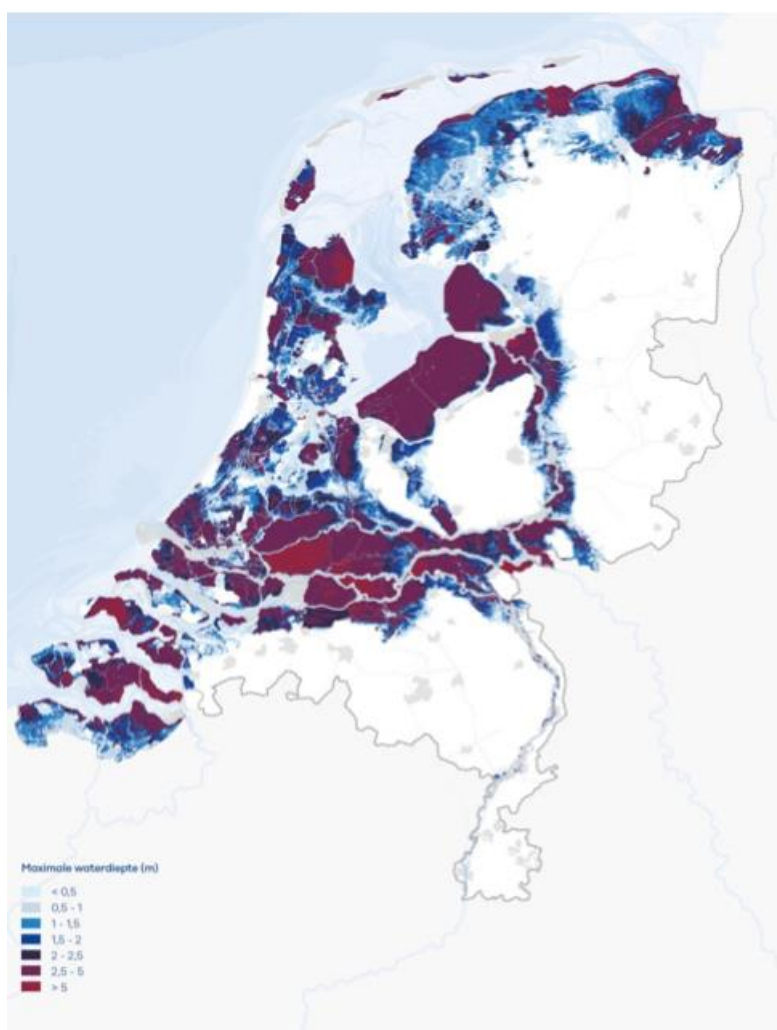
Figuur 3. Faalmechanismen (bron: <https://www.enwinfo.nl/index.php/publicaties/grondslagen>)



## 2 Nieuwe normering

*Hoe is Nederland beveiligd tegen overstromingen? In tegenstelling tot veel andere landen heeft Nederland ervoor gekozen om de normen voor onze waterkeringen in een wet op te nemen. In 1995 was dat voor het eerst in de Wet op de Waterkering, en sinds 2006 zijn de normen opgenomen in de Waterwet. Sinds 1 januari 2017 zijn de normen, als één van de belangrijkste uitkomsten van het Deltaprogramma, op de meeste plaatsen aangescherpt.*

Overstromingen vormen van oudsher een bedreiging voor Nederland. De bescherming tegen het water is een belangrijke voorwaarde om in Nederland te kunnen wonen en werken. Figuur 4 geeft het overstroombare deel van Nederland weer: dat is niet alleen het deel dat onder zeeniveau ligt, maar ook de delen van Nederland die kunnen overstromen bij hoge rivierafvoeren. De overheid vindt het voorkómen van overstromingen van groot belang. De bescherming tegen hoogwater is dan ook wettelijk verankerd in de Waterwet, die de basis voor een blijvende beveiliging tegen overstromingen vormt.



*Figuur 4. Nederland kan voor ca. 60% overstromen vanuit de zee, de meren en de grote rivieren met mogelijke waterdieptes van meer dan 5 m tot gevolg.*

bron: <https://www.enwinfo.nl/index.php/publicaties/grondslagen>

## 2.1 Aanvaardbaar risico

In Nederland ligt een uitgebreid stelsel van waterkeringen dat mensen en goederen beschermt tegen overstromingen. Door onzekerheid over de sterkte en belastingen van deze keringen is altijd sprake van een overstromingsrisico. De vraag is wat een *aanvaardbaar* risiconiveau is. Dit hangt onder andere samen met het aantal mogelijke slachtoffers en de kosten voor het verkleinen van het risico.

Het risico van een overstroming is op meerdere manieren te beheersen. Ten eerste is de kans op een overstroming te verkleinen door waterkeringen te versterken of de belasting op de kering te verlagen, bijvoorbeeld door rivierverruiming of het gebruik maken van een gemaal. Ten tweede zijn de omvang van de schade en het aantal slachtoffers te beïnvloeden via de ruimtelijke inrichting, bijvoorbeeld door niet te bouwen in laaggelegen gebieden. Ten derde zijn de gevolgen te beperken door te zorgen voor goede evacuatiemogelijkheden en rampenbeheersing. Ingegeven door de historie van overstromingen en de toenemende bevolkingsdruk is in Nederland al lang geleden de keuze gemaakt om in te zetten op het voorkómen van overstromingen door waterkeringen te bouwen of te versterken. Dit betekent niet dat het beperken van gevolgen niet zinvol is; een strategische keuze om op de langere termijn de gevolgen niet te laten toenemen zou zeer verstandig kunnen zijn. Echter, in Nederland is de meest doelmatige manier om het overstromingsrisico te verkleinen bijna altijd het verkleinen van de kans op een overstroming. Daarom is in Nederland een uitgebreid stelsel van keringen gemaakt. Dat stelsel van 'primaire' keringen en dijktrajecten is vastgelegd in bijlage I van de Waterwet. De wet regelt ook de aanleg en het beheer van waterstaatswerken zoals de dijken.

### Twee principes

De nieuwe normen in de Waterwet (die van toepassing zijn sinds 1 januari 2017) zijn afgeleid van het overstromingsrisico dat aanvaardbaar wordt gevonden voor gebieden die bescherming genieten van primaire keringen. De normen voor deze gebieden berusten op de volgende twee principes:

- A. Iedereen moet kunnen rekenen op dezelfde minimale bescherming: het basisbeschermingsniveau, uitgedrukt in Lokaal Individueel Risico (LIR). Door de Tweede Kamer is er gekozen voor een basisbeschermingsniveau van 1/100.000 in een jaar, dat wil zeggen dat achter de keringen de kans op overlijden kleiner moet zijn dan 1/100.000. Merk op dat in Nederland de (gemiddelde) actuele kans op overlijden door een verkeersongeval circa een factor 3 groter is: circa 1/34.000 (circa 500 doden /17 miljoen inwoners per jaar);
- B. Waar de gevolgen van een overstroming zeer groot zijn, is een kleinere overstromingskans passend, op basis van het groepsrisico en een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA). In de MKBA speelt het economisch risico (overstromingskans vermenigvuldigd met de economische schade) een belangrijke rol.

Op hoofdlijnen geldt: hoe groter de potentiële gevolgen, des te strenger de bijbehorende normen. Grote gevolgen kunnen bestaan uit veel slachtoffers of grote economische schade. Daarnaast kunnen de gevolgen groot zijn als grote maatschappelijke verstoring optreedt bij overstroming van bijzondere objecten zoals de kerncentrale bij Borssele.

De normen voor de dijktrajecten in geheel Nederland variëren van 1/100 tot 1/1.000.000 per jaar. Deze normen leiden ertoe dat het risico (het LIR, het Lokaal Individueel Risico, en het economische risico) in de overstroombare delen van Nederland vrijwel gelijk is. De overstromingskansnormen gelden voor zogenaamde dijktrajecten. Dit zijn delen van de oorspronkelijke dijkringen, de ring van dijken die een gebied beschermt tegen hoogwater. De dijktrajecten zijn bepaald door rekening te houden met het overstroombare gebied en de omvang van de schade. De afmetingen van een waterkering worden naast de norm ook door de lengte van het traject bepaald (zie verderop in dit dictaat, aan het einde van paragraaf 2.2.).

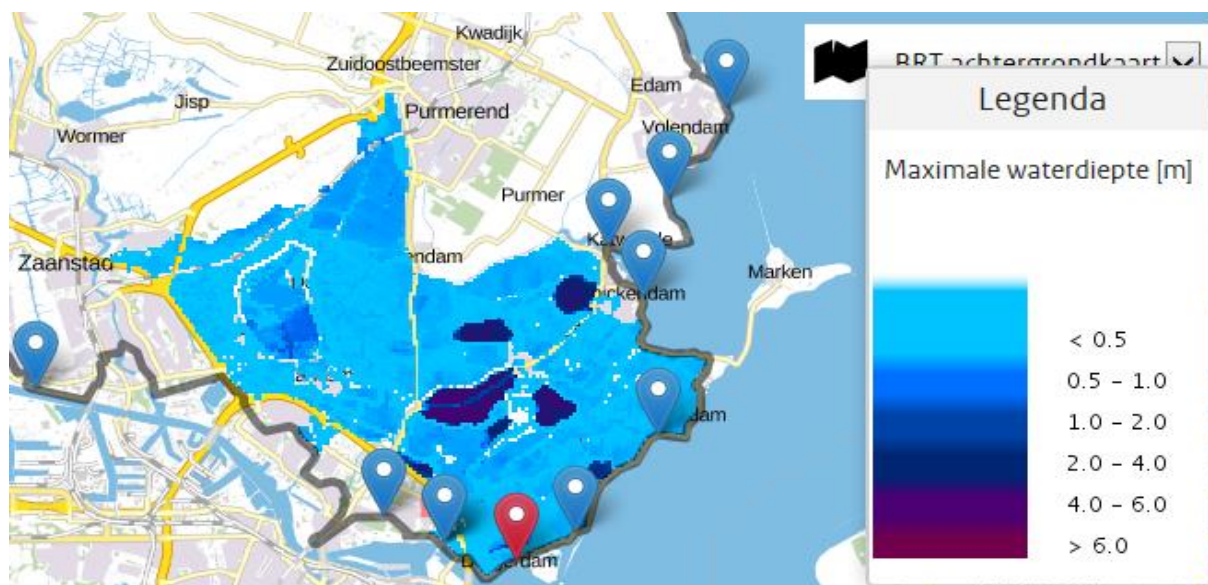
## 2.2 Norm voor Durgerdam

Durgerdam is onderdeel van dijktraject 13-8, dat loopt van Volendam tot Amsterdam, en is in totaal 28,8 km lang. Zie figuur 5 voor de ligging (de zwart gemarkeerde lijn).



Figuur 5. Ligging van dijktraject 13-8 (Volendam-Amsterdam)

De eis voor dit traject is dat de jaarlijkse overstromingskans kleiner moet zijn dan 1/1.000. Dit is een relatief soepele eis, vergeleken met andere dijktrajecten in Nederland. Er zijn dijktrajecten die moeten voldoen aan een veel strengere eis, dus een veel kleinere kans op overstroming, bijvoorbeeld 1/10.000 of zelfs 1/100.000. Deze relatief soepele eis voor de dijk bij Durgerdam wordt mede ingegeven door het gegeven dat de gevolgen van een overstroming hier geringer zijn dan in vele andere delen van Nederland, maar dat ze nog wel steeds voor maatschappelijke ontwrichting zorgen. Het overstromingsscenario in figuur 6 laat de gevolgen zien bij een doorbraak in Durgerdam, en dit scenario resulteert in tientallen slachtoffers, omdat slechts een deel van de bevolking voorafgaand aan de overstroming geëvacueerd kan worden, en meer dan een half miljard euro aan economische schade. Circa 21.000 inwoners worden direct getroffen door de overstroming en ook veel bedrijven. De inwoners die niet vooraf zijn geëvacueerd zullen na de overstroming hun huis moeten verlaten.



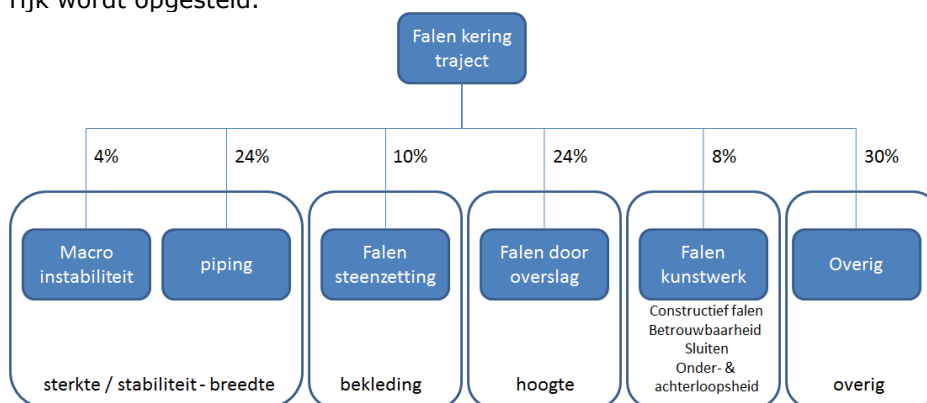
Figuur 6. Waterdiepte als gevolg van een dijkdoorbraak bij Durgerdam (bron: <https://www.basisinformatie-overstromingen.nl/liwo/>)

De vraag is hoe we de eis voor de dijkvakken in Durgerdam kunnen afleiden. Immers, de eis in de Waterwet geldt voor het hele dijktraject tussen Volendam en Amsterdam. Daarbij moeten we rekening houden met het feit dat de kering ook op andere plekken dan Durgerdam kan falen, en dat de waterkering op meerdere manieren kan falen (meerdere faalmechanismen). Hoe we de eis voor Durgerdam kunnen afleiden wordt in het volgende hoofdstuk besproken.

## 2.3 Faalkansbegroting

De norm van 1/1000 uit de Waterwet heeft betrekking op de (jaarlijkse) faalkans: de kans op het verlies van het waterkerend vermogen van een dijktraject, in dit geval Volendam-Amsterdam. Omdat een dijk op meerdere manieren kan falen (de faalmechanismen) wordt de toelaatbare faalkans (de norm) verdeeld over deze mechanismen. De 'faalkansbegroting' is dan de verdeling van de toelaatbare ruimte in faalkansen over de verschillende faalmechanismen van een waterkering zodat de combinatie van deze faalkansruimten de maximale toelaatbare faalkans van de waterkering niet overschrijdt. Deze door de norm bepaalde maximaal toelaatbare faalkans noemen we ook wel overstromingskansnorm.

Met een faalkansbegroting wordt deze overstromingskansnorm dus verdeeld over verschillende faalmechanismen. Er wordt daarbij geen rekening gehouden met correlaties tussen faalmechanismen. Er is voor heel Nederland een zogenaamde 'standaard' verdeling opgesteld; deze is weergegeven in figuur 7. Deze faalkansbegroting per traject is afkomstig uit het Ontwerp-instrumentarium 2014, een technische leidraad voor het ontwerp van waterkeringen die door het rijk wordt opgesteld.<sup>2</sup>



*Figuur 7. Standaard faalkansbegroting voor waterkeringen*

Als een kering faalt, is de kans op falen gelijk aan 1. Als deze nooit kan falen, is deze kans gelijk aan 0. Een dijk kan om verschillende redenen bezwijken ofwel falen. Er zijn, zoals hierboven aangegeven, verschillende faalmechanismen. Deze mechanismen worden in de huidige aanpak als onafhankelijk van elkaar verondersteld (de aanpak wordt veel complexer als dat niet verondersteld wordt, daar wordt wel onderzoek naar gedaan op de TU Delft). Als de verschillende kansen onafhankelijk zijn, dan mogen we de kansen bij elkaar optellen. In de bovenstaande figuur zijn alle kansen opgeteld 100%.

Naast deze mechanismen speelt ook nog de ruimtelijke dimensie: de waterkering kan niet alleen in Durgerdam falen, maar ook op andere locaties. Om hiermee rekening te houden worden alle schakels in de ketting even sterk gemaakt, omdat de zwakste schakel immers de sterkte van de ketting bepaalt. Maar daarnaast geldt ook nog dat een langere ketting een grotere faalkans heeft dan een kortere ketting, bijvoorbeeld indien alle schakels dezelfde (niet volledig bekende) sterkte

<sup>2</sup> Zie artikel 2.5 van de Waterwet.

hebben. Dit noemen we het lengte-effect en dit wordt meegenomen in de berekeningen voor beoordeling en ontwerp van waterkeringen.

### 3 Van norm naar technisch ontwerp

*Normen zijn verankerd in de Waterwet, maar hoe wordt nu op basis van een abstracte norm (een overstromingskans) bepaald hoe hoog en hoe sterk een waterkering moet zijn en welke geometrie daarbij hoort?*

#### 3.1 Werken met de faalkansbegroting

De norm voor de waterkering in Durgerdam wordt afgeleid uit de norm voor het dijktraject Volendam-Amsterdam. Omdat er ook meerdere mechanismen zijn, wordt de norm verdeeld over meerdere faalmechanismen, de faalkansbegroting. Deze faalkansbegroting in figuur 6 geldt voor een gemiddeld dijktraject in Nederland. Maar... elke dijk is anders. Daarom kan de faalkansbegroting aangepast worden op basis van de feitelijke situatie van de dijk. Een voorbeeld daarvan voor Durgerdam is dat de kans op *piping* nagenoeg nihil is. Piping is het proces waarbij door kwel het zand in de ondergrond van de dijk wegstroomt, waardoor de dijk kan instorten. Zie figuur 3 in hoofdstuk 1. In Durgerdam zit er geen zand in de ondergrond, maar klei (zand wordt alleen op heel grote diepte gevonden). Piping kan niet optreden, of beter, de kans daarop is heel erg klein. Die kans mag dan door de ontwerper verkleind worden van 24% naar bijvoorbeeld 4% of zelfs 0%. Dat maakt het mogelijk dat de kans op bezwijken van de dijk als gevolg van een ander faalmechanisme mag worden vergroot. In het geval van Durgerdam is de kans op falen als gevolg van macro-instabiliteit, als gevolg van de toegenomen druk in het grondwater, vergroot van 4% naar 24% (indien voor piping nog 4% beschikbaar wordt gehouden). Dat betekent dat de eis aan de dijk voor dit faalmechanisme minder streng wordt en er dus minder hoeft te veranderen aan de toestand van de huidige dijk.

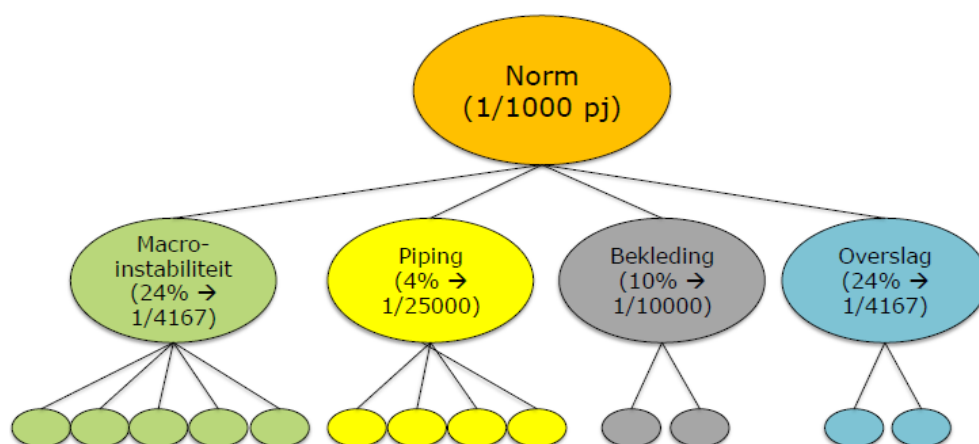
##### **Voorbeeld werken met faalkansbegroting**

Met een voorbeeld kan het werken met de faalkansbegroting worden verduidelijkt. De norm voor de jaarlijkse kans op overstroming, 1/1000 voor het traject waar Durgerdam in ligt, wordt op basis van de faalkansbegroting vertaald naar ontwerpeisen per doorsnede. Bij de norm van 1/1000 en de kansruimte voor macro-instabiliteit is 4% dan is de kans  $4/100 \times 1/1000 = 4/100.000 = 1/25.000$  dat de dijk mag bezwijken als gevolg van macro-instabiliteit. Is de kansruimte echter 24%, dan is kans  $24/100 \times 1/1000 = 24/100.000 \approx 1/4000$  dat de dijk mag bezwijken als gevolg van macro-instabiliteit: de eis is minder streng geworden waardoor de kans op deze manier van bezwijken groter wordt. Daarnaast moet natuurlijk ook nog rekening gehouden met de verschillende locaties waarop de waterkering door dit mechanisme kan falen. Houden we bijvoorbeeld rekening met 20 onafhankelijke plekken waar de kering kan falen, dan wordt de eis een factor 20 scherper, namelijk circa 1/80.000.

##### **Voorbeeld voor golfoverslag**

Een tweede voorbeeld kan gegeven worden voor golfoverslag. De kans daarop wordt bepaald door de kruinhoogte van de dijk. De norm, de ondergrens, is 1/1000 per jaar. De kansruimte is 24%, wat betekent dat de kans op falen door overslag 1/24 is van  $1/1000 \approx 1/4000$  (exact is dit 1/4167). Het is redelijk om in het normtraject Hoorn-Amsterdam rekening te houden met 2 onafhankelijke locaties waar de kering kan falen (door 2 verschillende oriëntaties van de dijk op de windrichting), dan is het zogenaamde lengte effect gelijk aan 2, wat betekent dat de kans een factor 2 kleiner wordt:  $\approx 1/8000$  (exact is dit 1/8.334). Als deze uitkomst vergeleken wordt met de oude norm, de oude kans op overschrijding van de maatgevende belasting, is dat vergelijkbaar: 1/10.000 is niet veel kleiner dan 1/8.000. Overigens geldt dat ook voor de eis voor macro-instabiliteit: in de systematiek met de oude norm was dat de kans op falen door het mechanisme macro-instabiliteit

voor een dijkvak kleiner dan 10% van de oude norm 1/10.000 moest zijn, dat is dan 1/100.000, wat vergelijkbaar is met de nieuwe eis van 1/80.000. In figuur 8 is de aangepaste faalkansbegroting voor het dijktraject waarin Durgerdam ligt, aangegeven.



*Figuur 8. Aangepaste Faalkansbegroting voor dijktraject waarin Durgerdam ligt. In deze figuur zijn de kunstwerken niet meegenomen en ook is niet meegenomen dat de kering kan falen op meerdere onderdelen van het traject (lengte-effect)*

### **Voorbeeld verdere optimalisatie faalkansbegroting**

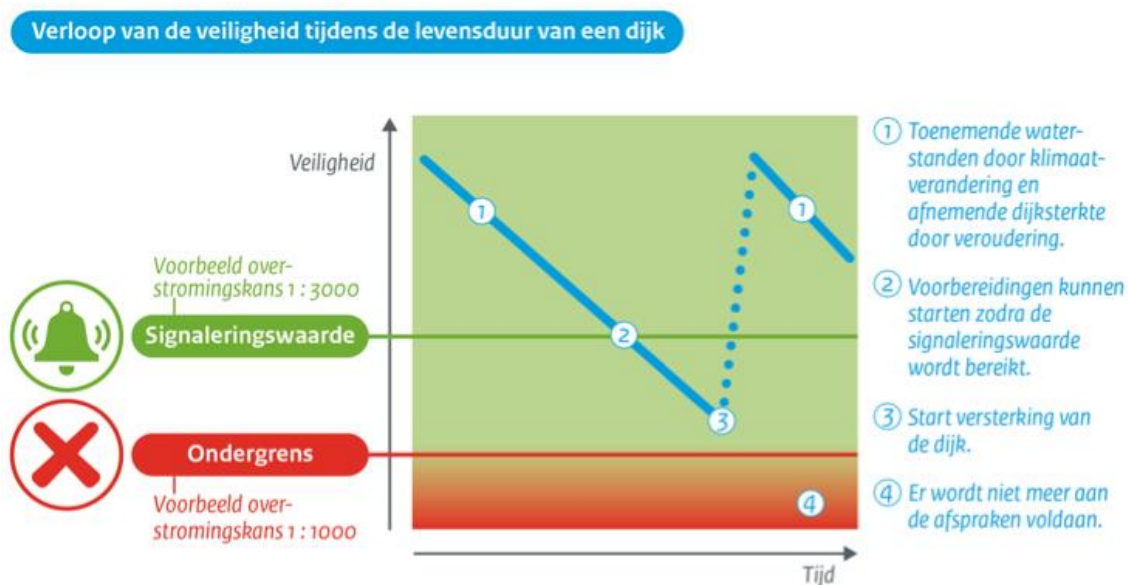
In een faalkansbegroting is vooral de orde van grootte van belang: enkele procenten meer of minder aan een faalmechanisme verandert nauwelijks iets aan de geometrie van de dijk. Wel kan er, als daar aanleiding voor is, nog verder geoptimaliseerd worden. Zo lijkt de bijdrage van 4% voor piping nog relatief hoog, omdat het aannemelijk is dat dit mechanisme niet kan optreden. Als er in het dijktraject geen kunstwerken aanwezig zouden zijn, kan ook het budget van 8% (figuur 7) toegevoegd worden aan bijvoorbeeld het mechanisme overslag, waardoor de dijk minder hoog hoeft te worden. In Durgerdam zijn geen kunstwerken maar naar opgave van het Hoogheemraadschap zijn in het traject Volendam-Durgerdam wel kunstwerken aanwezig, zodat het faalkansbudget van kunstwerken niet overgeheveld kan worden. Stel hypothetisch dat het budget van piping (4%) en kunstwerken (8%) overgeheveld wordt naar overslag, dan verandert het faalkansbudget voor golfoverslag van orde 1/8000 naar orde 1/5500, waarmee dan de waterkering een decimeter lager mag zijn. Dit is vooral theoretisch. Het ontwerpinstrumentarium biedt wel de mogelijkheid om per dijktraject de faalkansbegroting te veranderen, maar op dijksectie niveau, dat is een kleiner deel van een dijktraject, bestaat deze mogelijkheid niet (omdat het dan nagenoeg onmogelijk wordt om de faalkans van het traject te bepalen).

## **3.2 Verloop van de veiligheid tijdens de levensduur van de dijk**

De wetgeving gaat uit van een norm waaraan de dijk moet voldoen. Voldoet de dijk niet, dan moet de dijk versterkt worden. Maar de voorbereiding van de dijkversterking neemt jaren in beslag door de wettelijke procedure die daar voor staat. Een planprocedure die 10 jaar duurt is eerder regel dan uitzondering. De nieuwe wetgeving heeft daarom een signaleringswaarde ingebouwd gekregen, die een factor 3 strenger is dan de norm. Voldoet de dijk niet aan die signaleringswaarde, dan is de situatie daarmee nog niet onveilig, want de dijk voldoet nog aan de norm, de ondergrens, maar wel dient de voorbereiding van de dijkversterking gestart te worden door te beginnen met de planprocedure.

Bij het ontwerp van de dijk wordt rekening gehouden met de toekomstige belasting van de dijk, bijvoorbeeld de verwachte belasting in de situatie over vijftig jaar. De dijk wordt zo ontworpen dat

deze ruimschoots aan de ondergrens voldoet. Maar na verloop van tijd wordt de signaleringswaarde opnieuw niet gehaald, door de zetting van de dijk en bijvoorbeeld de klimaatverandering. Dan start het proces opnieuw. Bij een versterking van een dijk wordt er rekening mee gehouden dat deze meer dan enkele decennia meegaat. In figuur 9 is het proces van toename en afname van de veiligheid in de loop van de tijd weergegeven.



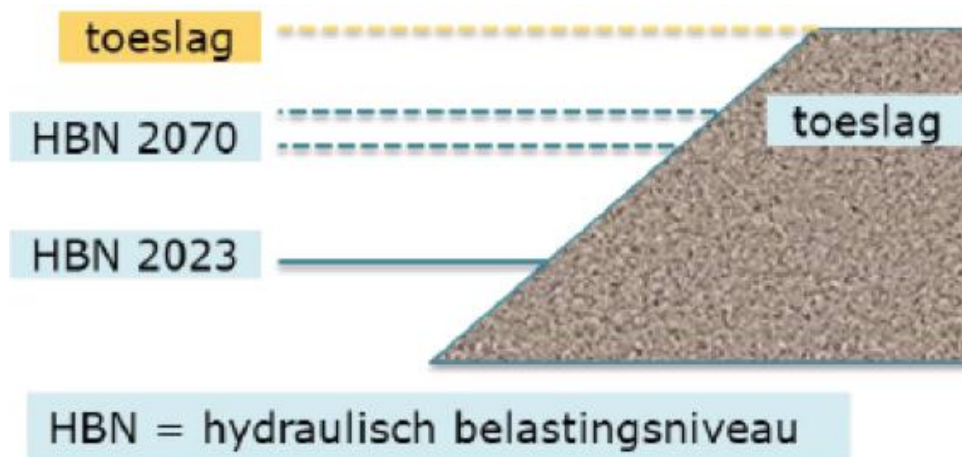
Figuur 9. Veiligheid (op de y-as) in de loop van de tijd (op de x-as). Bij het ontwerpen van waterkeringen wordt veelal een levensduur van 50 jaar aangehouden omdat dit economisch verstandig is en omdat een dijkversterking overlast geeft, overlast die je zoveel mogelijk wilt beperken

De grafiek begint vlak na een dijkversterking: de veiligheid van de dijk is groot. Door bodemdaling, zetting, klink en klimaatverandering neemt de veiligheid van de dijk af. De kans op bezwijken van de dijk en daarmee de kans op een overstroming neemt toe. De signaleringswaarde wordt bereikt bij punt 2 van de grafiek. Dat is het startpunt voor de planvorming van de volgende dijkversterking.

### 3.3 Toetsen en ontwerpen

Bij de toetsing van de dijk, de beoordeling of de dijk nog veilig is, wordt uitgegaan van de huidige belasting, de huidige hoogte en breedte en het toelaatbare overslagdebiet. Een overslagdebiet van 10 liter per meter per seconde, 600 liter per meter per minuut, is alleen toelaatbaar als het binnentalud erosiebestendig is. De uitkomsten van de toetsing (met de nieuwe normen) moeten volgens de Waterwet elke 12 jaar (voor het eerst weer in 2023) gerapporteerd worden aan het parlement.

Bij het ontwerpen wordt uitgegaan van toekomstige belastingen, die onder invloed staan van het klimaat, en een toeslag voor bodemdaling, zetting en klink en het toelaatbare overslagdebiet. Ook wordt getoetst met de signaleringswaarde (voor het dijktraject waar Durgerdam in ligt is de norm 1/3.000), maar het ontwerp wordt zodanig gemaakt dat de kering na de geplande levensduur (veelal 50 jaar, maar het mag ook korter als dat verstandig is, dit wordt door het waterschap besloten) voldoet aan de ondergrens (voor het dijktraject waar Durgerdam in ligt is de norm, de ondergrens, de eerder genoemde 1/1.000).

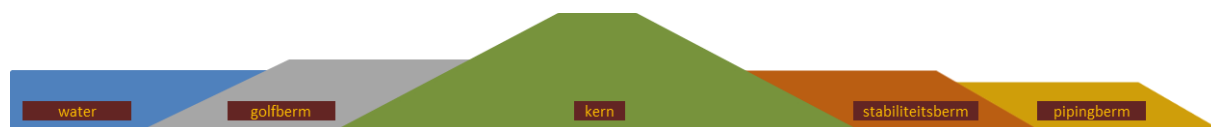


Figuur 10. Principeplaatje: verschil tussen toetsen (HBN2013) en ontwerpen (HBN2070, bij een levensduur van 50 jaar van de versterking)

### 3.4 Maatregelen per mechanisme

De faalmechanismen zijn beschreven in hoofdstuk 1. Per faalmechanisme is er een aantal maatregelen toepasbaar om de faalkans door dit faalmechanisme te verkleinen:

- Overloop of golfoverslag: de golven kunnen kleiner gemaakt worden door het aanbrengen van een golfbreker of een voorland, met een buitenberm voor de dijk, met een flauwer buitentalud of met een ruwer buitentalud. Ook kan overslag beperkt worden door kruinverhoging. En meer overslag kan worden toegestaan door het binnentalud van de dijk overslagbestendig te maken, maar dit is weer nadelig voor macrostabiliteit doordat het gewicht op de dijk toeneemt;
- Macro-instabiliteit: de dijk kan stabielier gemaakt worden door gewicht aan de binnenkant van de dijk aan te brengen. Let op: niet óp de dijk. Dat kan door een flauwer binnentalud te maken, door een binnenberm te maken of door constructies in de dijk aan te brengen, zoals damwanden, ankers of nagels. Soms werkt drainage ook. Dijkverhoging heeft een negatieve invloed op het stabiliteitsvraagstuk: de dijk wordt hoger en dus zwaarder, waardoor deze gemakkelijker inzakt, bijvoorbeeld bij hoog water of veel regen.
- Micro-instabiliteit: De kans hierop kan worden verkleind door een meer waterdichte bekleding aan te brengen. Ook een flauwer binnentalud kan helpen, of drainage.
- Erosie van het buitentalud (bekleding): dit kan worden tegengegaan door het effect van de kracht van de golven te reduceren, bijvoorbeeld door zwaardere bekleding aan te brengen.



Figuur 11. Principeschets van maatregelen om de dijk te versterken



## 4 Veiligheidsopgave voor Durgerdam

Wat is nu de opgave voor de waterkering in Durgerdam? Hoe hoog en/of hoe sterk moet de kering daar worden? En hoe spelen andere functies dan veiligheid een rol? De dijk in Durgerdam is veel meer dan een waterkering alleen. De dijk wordt gebruikt om aan te wonen en om te recreëren. Sinds 2004 is de dijk een provinciaal monument. En het is de meest gefotografeerde dijk van Nederland. Maar de dijk is in 2006 ook afgekeurd door het Hoogheemraadschap vanuit de functie 'het keren van water'.

In dit hoofdstuk wordt de veiligheidsopgave voor de waterkering in Durgerdam nader beschouwd. Het waterschap heeft de waterkering in Durgerdam in drie dijkvakken verdeeld (zie figuur 12):

1. EA-11 Polder IJdoorn. Vóór de dijk liggen hier de Hoeckelingsdam en de polder IJdoorn.
2. EA-12 Durgerdam. Kenmerkend zijn het hoge voorland, met lagere en kortere golven als gevolg, en de bebouwing op de dijk.
3. EA-13 Durgerdam-West. De golven zijn hier weer hoger en langer door het ontbrekende voorland. De dijk is voor 50% bebouwd.



Figuur 12. De vier dijkvakken in Durgerdam

In deze bundel wordt vooral ingegaan op de vakken EA12 en een deel van EA-13. De belangrijkste (maatgevende) condities voor waterstanden en golven zijn er bij oost-noordoostenwind en bij golven uit oostelijke richting, zie figuur 13.



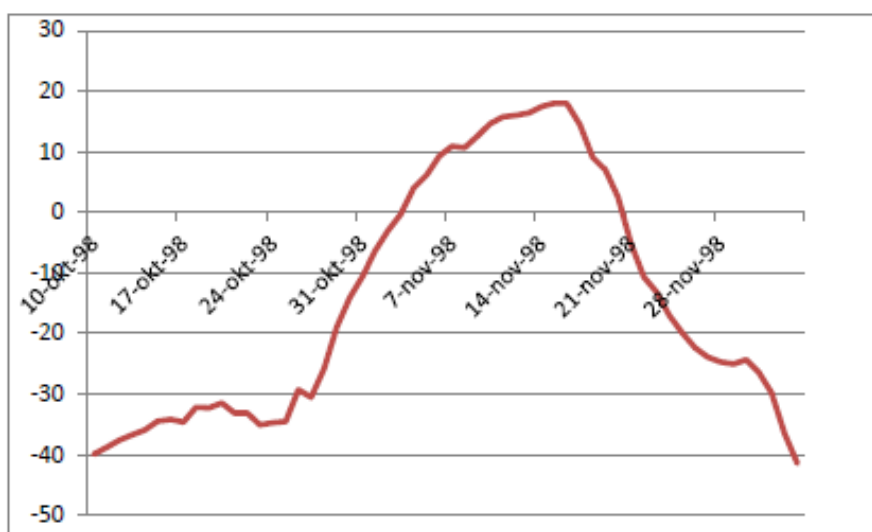
Figuur 13. Inzoomen op Durgerdam

In 2006 is de dijk getoetst en afgekeurd op macro-instabiliteit en bekleding. In 2011 is de dijk opnieuw getoetst, wat niet tot nieuwe inzichten heeft geleid. De nieuwe normering (die van toepassing is sinds 1 januari 2017) heeft wel gevolgen voor de beoordeling. Macro-instabiliteit is het belangrijkste faalmechanisme, maar de dijk is ook niet op alle locaties hoog genoeg.

## 4.1 Waterstanden en golven

De dijk moet niet alleen de kracht van golven tijdens een zware storm kunnen weerstaan, maar ook de (grond)waterdruk bij een langdurig hoge waterstand op het Markermeer. Voor de gecombineerde kracht van golven en hoogwaterstanden gebruiken we de term hydraulische belasting. Het Hydraulisch Belasting Niveau (HBN) is samengesteld uit waterstanden en golven en geeft aan hoe hoog de kering moet worden. Maar dit niveau hangt ook af van de eigenschappen van de dijk: de geometrie, de helling en ruwheid van het buitentalud en ook de oriëntatie van de dijk ten opzichte van de golfrichting. De hydraulische belastingen op waterkeringen worden bepaald met behulp van het rekenmodel Hydra-NL. Dit is het standaard programma van Rijkswaterstaat waarmee de toets- en ontwerpwaterstanden worden berekend. Hierin zijn alle verschillende hydraulische omstandigheden (waterstanden, windrichting en -snelheid, golfhoogte en -periode) opgenomen en kunnen beheerders en adviseurs per dijk de maatgevende condities bepalen. We kunnen echter ook afzonderlijk naar waterstanden en golven kijken, dit geeft een beter inzicht hoe het HBN is opgebouwd.

Hierbij maken we grofweg onderscheid tussen twee belastinggevallen: een extreem hoog meerpeil of een extreem zware storm. Een extreem hoog meerpeil kan optreden bij periodes van grote rivierafvoeren, veel neerslag en weinig spuimogelijkheden om dit water op zee kwijt te raken. Dit belastinggeval is vooral van belang voor de geotechnische faalmechanismen zoals macrostabiliteit en piping. Bij deze hoge waterstand kunnen dijken verzadigd raken en daardoor hun stabiliteit verliezen. In extreme gevallen kunnen dijken overlopen. Uit Hydra-NL is een extreem meerpeil van NAP+1,2 meter afgeleid (zonder klimaattoeslagen). In figuur 14 is de verhoging van het meerpeil in het najaar van 1998 getoond.



Figuur 14. Verhoging van het (gemiddelde) meerpeil van het Markermeer in het najaar van 1998

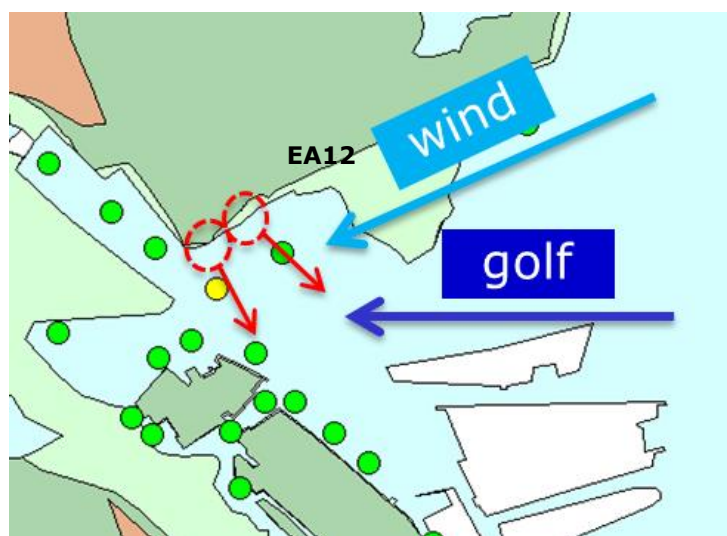
Zoals hierboven aangegeven zijn deze hoge meerpeilen niet maatgevend voor het bepalen van de vereiste hoogte van de dijk in Durgerdam, maar wel voor de macrostabiliteit van de dijk. Voor de hoogte van de dijk zijn combinaties van een laag meerpeil (streefpeil NAP-0,3 m) met een extreme storm bepalend. Tijdens een sterke storm uit ONO-richting wordt het water vanaf de Houtribdijk richting Durgerdam geblazen. Hierdoor komt het water 'scheef' te staan, waardoor bij Durgerdam een aanzienlijke verhoging van de waterstand kan ontstaan. Uit metingen blijkt ook dat de berekende scheefstand ook daadwerkelijk optreedt. En bij de Houtribdijk treden dan lagere waterstanden op. Uiteindelijk zijn hier aanvullende vragen over gesteld, die hebben geleid tot een aanvullende notitie over scheefstand waarin een en ander nader wordt uitgelegd – zie hiervoor de bijlage over scheefstand.

De storm veroorzaakt ook **golven**. Golven zijn er in allerlei soorten en maten tijdens een storm. Echter, alleen de hoogste golven zijn bepalend voor het dijkontwerp. Een vaak gehanteerde maat in de waterbouwkunde is de significante golfhoogte  $H_s$ , dat is de 'gemiddelde hoogte van de hoogste éénderde deel van de golven tijdens een storm'. De golfhoogte tijdens de ontwerpcondities is bepalend voor het dijkontwerp (althans voor de kruinhoogte). We richten ons in het vervolg op de dijkvakken in het dorp: EA12 en een deel van EA13.

In het model Hydra-NL zijn voor Durgerdam twee uitvoerpunten (01263 in groen en 01260 in geel) beschikbaar, zie figuur 15. In beide uitvoerpunten worden de golven beïnvloed door de aanwezigheid van de polder IJdoorn en omliggende dammen. Dit effect zit niet in Hydra-NL gemodelleerd. Om de gevoeligheid van de ontwerpcondities te onderzoeken is in eerste instantie voor beide uitvoerpunten onderzocht wat de maatgevende hydraulische belastingen zijn voor een standaarddijk met een talud van 1:3. De resultaten zijn opgenomen in tabel 1.

Traject	MP [m]	h [m]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$\beta_i$ [-]	$V_w$ [m/s]	$\beta_w$ [-]
01263	-0,26	1,07	<b>0,82</b>	<b>3,30</b>	97,4	23	60
01260	-0,31	1,10	<b>0,71</b>	<b>2,76</b>	85,1	24	60

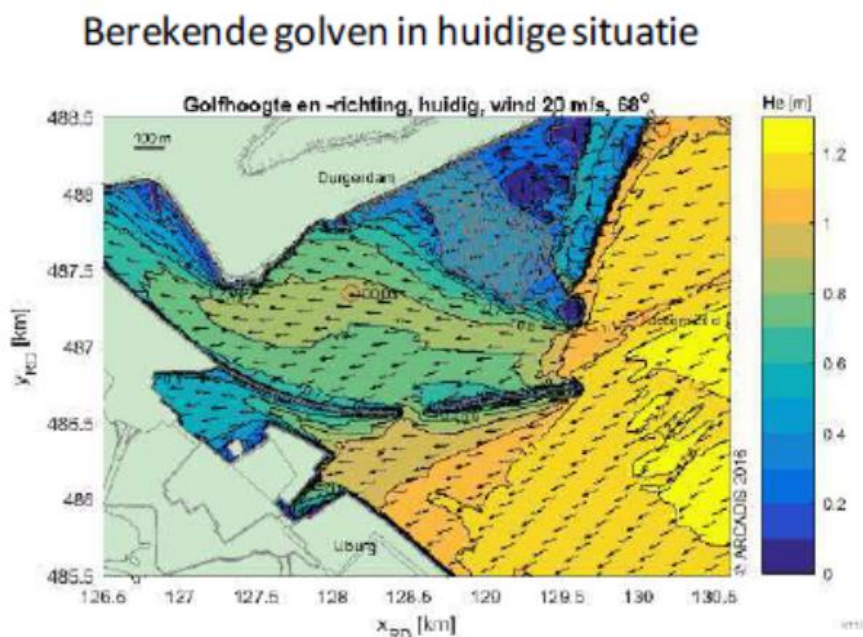
Tabel 1 Meerpeil (MP), waterstanden (h), golven (significante golfhoogte  $H_s$ , golfperiode  $T_p$  en golfrichting  $\beta_i$ ), windsnelheid  $V_w$  en windrichting  $\beta_w$  op 2 uitvoer locaties van Hydra-NL



Figuur 15. Dominante wind en golf richtingen. Bij EA12 is een voorland aanwezig

Tabel 1 laat zien dat ook bij lage meerpeilen door scheefstand een hoge waterstand mogelijk is. De (scheve) waterstand voor de dijk is slechts een decimeter lager dan de extreme waterstand uit het andere belastinggeval, waarbij de waterstand in het hele meer verhoogd is. Verder rekent Hydra-NL behoorlijke golven uit. Opvallend is dat het minder beschutte uitvoerpunt 01260 lagere en kortere golven laat zien dat het meer beschutte punt 01263. Dit strookt niet met het verwachte gedrag. Een nader onderzoek naar de juiste hydraulische condities is dan ook nodig om het generieke landelijke HYDRA-model voor Durgerdam goed toe te passen. Voor het bepalen van de veiligheidsopgave wordt in eerste instantie een eenvoudige correctie voor het effect van het voorland aangehouden.

In figuur 16 is met een verfijnder hydrodynamisch model (Delft-3D) nagegaan wat de invloed is van het voorland. Zoals verwacht reduceert dit voorland de golfhoogte, waardoor de waterkering minder hoog hoeft te worden aangelegd. Het Hoogheemraadschap moet er dan wel op toezien in de zorgplicht dat dit voorland intact blijft.



Figuur 16. Berekende golven in huidige situatie. Het is duidelijk dat nabij het voorland minder hoge golven voorkomen (kleur blauw)

Het aanwezige voorland reduceert de golven van traject EA-12. Een eenvoudige correctie van de golven resulteert in tabel 2. Op basis van het voorland is het nodig om de golven van traject EA-12 te reduceren. In Tabel 2 is te zien dat de significante golfhoogte nabij het voorland is teruggebracht tot 0,40 meter, minder dan de helft van de 0,86 m uit tabel 1. De overige randvoorwaarden blijven ongewijzigd. Bij wijze van eerste iteratie worden voor Durgerdam-Haven de uitvoer van het punt 01263 aangehouden en voor Durgerdam-West de uitvoer van het punt 01260. Dit is voldoende voor een eerste iteratie, maar een nadere analyse van de hydraulische randvoorwaarden is noodzakelijk. In paragraaf 5.4 (Knop 3: Modelleren en schematisatie) wordt dit nader toegelicht.

Traject	MP [m]	h [m]	$H_s$ [m]	$T_p$ [s]	$\beta_i$ [-]	$V_w$ [m/s]	$\beta_w$ [-]
01263	-0,26	1,07	<b>0,40</b>	<b>3,30</b>	97,4	23	60
01260	-0,31	1,10	<b>0,71</b>	<b>2,76</b>	85,1	24	60

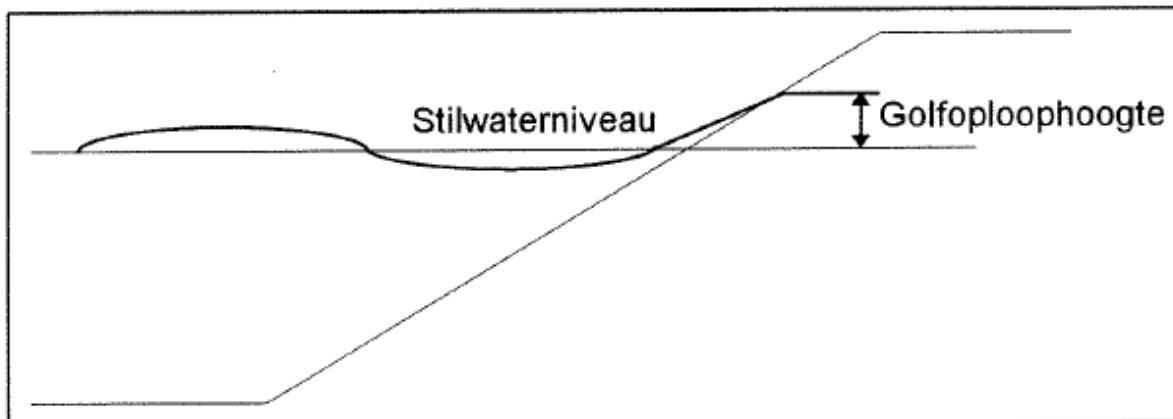
Tabel 2 Gecorrigeerde golfhoogte (zie Tabel 1) door het meenemen van de invloed van het voorland op de golfhoogte

## 4.2 Hydraulisch Belasting Niveau

Het hydraulisch belasting niveau is de vereiste kruinhoogte van een dijk bij een combinatie van waterstand, golfhoogte, golfperiode, golfrichting en geometrie van de dijk. De waterstanden en golfhoogten uit tabel 2 kunnen gebruikt worden om de benodigde hoogte van de dijk te bepalen. Hier speelt het toelaatbare overslagdebiet een belangrijke rol. Bij een debiet van 0,1 l/m/s worden

er geen eisen aan het binnentalud gesteld, en bij 10 l/m/s moet het binnentalud erosiebestendig zijn, waardoor er eisen moeten worden gesteld aan de kleilaag en de bekleding van het binnentalud van de dijk. Gelet op de complexe situatie van bebouwing op en in het binnentalud, gaan we in het vervolg ervan uit dat het niet wenselijk is om eisen te stellen aan het binnentalud, waardoor er wel een hoogtepoging is (die echter ook opgelost kan worden door de golfhoogtes te beperken, bijvoorbeeld door een flauwer talud).

Voor het bepalen van de hoogte van de waterkering moet met de golfoploop rekening worden gehouden, dit is een andere variabele dan de significante golfhoogte in Tabel 1 of 2. In figuur 16 is een principe schets opgenomen hoe de golfoploop wordt bepaald. De golfoploop wordt bijvoorbeeld bepaald door de helling van het talud.



Figuur 17 De definitie van golfoploop(hoogte)

Als een golf bij een talud arriveert, zal de golf tegen het talud oplopen en uiteindelijk een niveau bereiken dat belangrijk hoger kan zijn dan de golftop zelf. Een kwantitatieve maat voor de golfoploop is de golfoploophoogte. Deze wordt gedefinieerd als de, in verticale zin gemeten, grootste hoogte boven het gemiddelde waterniveau voor het talud, bereikt door de tegen het talud oplopende golf. Taludeigenschappen zoals de ruwheid, de porositeit en het al dan niet aanwezig zijn van een berm leiden tot reductie van de golfoploop. Voor de berekening van de golfoploop zijn verschillende formules beschikbaar. De meest simpele en zeer oude formule is de formule van Hunt:  $R = H_s L_0^{1/2} \tan a$  waarin:  $R$  = golfoploop [m];  $H_s$  = significante golfhoogte [m];  $L_0$  = golflengte in diep water [m];  $a$  = taludhelling [-]. Voor golfsteilheden van 4% leidt dit tot de ook zeer oude Deltse formule:  $R = 8 H_s \tan a$ . Bij een 1:4 talud is de golfoploop  $R = 2 \times H_s$ . Aan deze formule worden veelal nog andere factoren zoals de ruwheid toegevoegd.

### 4.3 Toeslagen voor klimaat en buistoten (slingeringen)

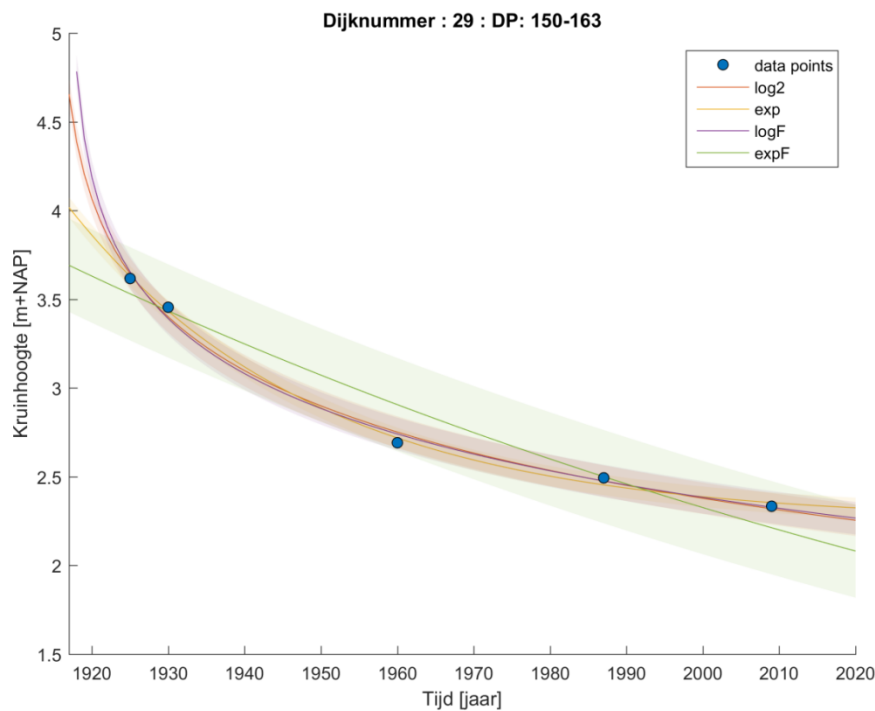
Binnen het Deltaprogramma is afgesproken om het W+ scenario van het KNMI als uitgangspunt te gebruiken. Dit betekent bijvoorbeeld een toeslag van 85 cm voor het jaar 2100 langs de kust. Omdat het Markermeer een gecontroleerd watersysteem is, kan deze toeslag niet direct toegepast worden voor het Markermeer. Als ontwerpuitgangspunt geldt dat de toeslag voor het klimaat voor het Markermeer 10 cm bedraagt in het jaar 2070 en is als volgt afgeleid (bron: Afleiden Hydraulische Ontwerprandvoorwaarden Marken, Deltares, memo, 23 september 2015): "Als onderdeel van klimaatscenario's dient rekening te worden gehouden met een toename van het Markermeerpeil met 50% (W+-scenario) van de toename van het IJsselmeerpeil. Het IJsselmeerpeil en Markermeerpeil blijven tot 2050 gelijk, zo is afgesproken in de Deltabeslissing IJsselmeergebied, onderdeel van het Deltaprogramma. Na 2050 zal het meerpeil van het Markermeer door zeespiegelstijging en toenemende neerslag gaan meestijgen met het IJsselmeer. Er wordt verondersteld dat een derde deel van dit klimaateffect kan worden afgevoerd naar het IJsselmeer. Dit betekent dat in de periode van 2050 tot en met 2075 rekening moet worden

gehouden met een lineaire toename van het wintermeerpeil<sup>3</sup> van het Markermeer met +10cm. Het plafond van +10cm op het Markermeer is derhalve in 2075 bereikt, daarna wordt het peil constant verondersteld tot 2100”.

In de HYDRA-modellen worden zogenaamde slingeringen van het meerpeil niet meegenomen (hiervoor worden ook termen als meerpeilslingeringen, seiches, buistoten, buioscillaties en zelfs meteo-tsunami gebruikt). Wij gebruiken hier de term 'slingeringen', en deze bestaan uit zeer lange staande golven die in havenbekkens, estuaria en meren bij eigenperioden van het systeem op kunnen treden, mogelijk versterkt als gevolg van resonantie. Typische tijdschalen van deze slingeringen liggen tussen 10 minuten en 6 uur, en typische verticale uitwijkingen variëren voor Nederlandse situaties van enkele centimeters tot ongeveer een meter. Vanwege hun trage karakter zijn de slingeringen niet met het oog waar te nemen maar ze zijn wel herkenbaar in waterstandsmetingen. Voor de toeslag vanwege slingeringen wordt veelal een waarde van 0,1 m gehanteerd (conform de "Leidraad Zee- en Meerdijken, Basisrapport, december 1999, pag. 9).

#### 4.4 Toeslag voor bodemdaling, zetting en klink

Bij het ontwerpen en beoordelen van waterkeringen spelen naast klimaatverandering **B**odemdaling, **Z**etting en **K**link (BZK) een belangrijke rol. In het verleden zien we deze daling: de kruinhoogte van de dijk is na de versterking in 1920 in minder dan een eeuw ruim een meter gezakt, en dat is gemiddeld zo'n 1,4 cm per jaar, zie hiervoor figuur 18.



Figuur 18. Historische kruindaling van waterkering Durgerdam en voorspelling.

De blauwe punten geven de gemeten waarden aan, en de metingen laten zien dat de kering in de periode 1925-2010 nagenoeg een 1,2 meter is gezakt (1,4 cm/jaar)! Voor een planperiode van 50 jaar is daarom in eerste instantie gerekend met een totale bodemdaling, zetting en klink van 50 centimeter (1 cm/jaar).

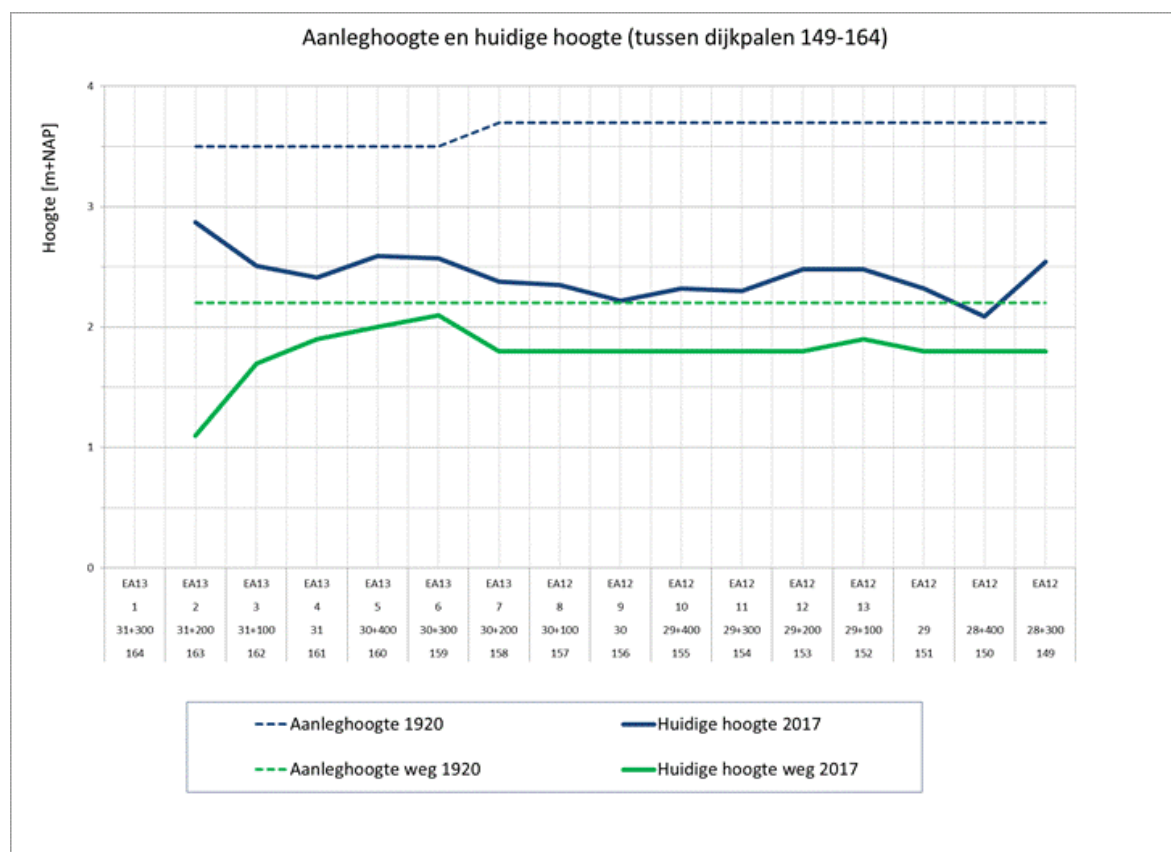
<sup>3</sup> Er wordt gerekend met het wintermeerpeil omdat het stormseizoen, en de daarmee samenhangende hoge belastingen van de dijk, in de winter valt.

Tijdens de bijeenkomsten met de bewoners is gesuggereerd om de bodemdaling te analyseren met behulp van nieuwe metingen. Er werd namelijk aan getwijfeld of de bodemdaling van 1 cm/jaar nog wel representatief is voor de toekomstig te verwachten daling. Het Hoogheemraadschap heeft hier positief op gereageerd en heeft aan het bedrijf Skygeo gevraagd om met behulp van satelliet metingen de bodemdaling nader te analyseren. Dit is ook uitgevoerd en de resultaten zullen worden toegepast bij het verdere ontwerp. In paragraaf 5.3 (Knop 2: Levensduur en klimaatscenario) wordt dit nader toegelicht.

Een andere overweging om nader naar BZK te kijken is het feit dat na de aanleg van de Afsluitdijk in 1932, de tuimelkade bij Durgerdam in 1938 vanwege een wegverbreding is afgegraven en verplaatst en verlaagd. De data in figuur 18 zijn hier NIET voor gecorrigeerd. Daarmee is het niet goed mogelijk om op basis van de beschikbare data een goede inschatting voor bodemdaling, zetting en klink te maken.

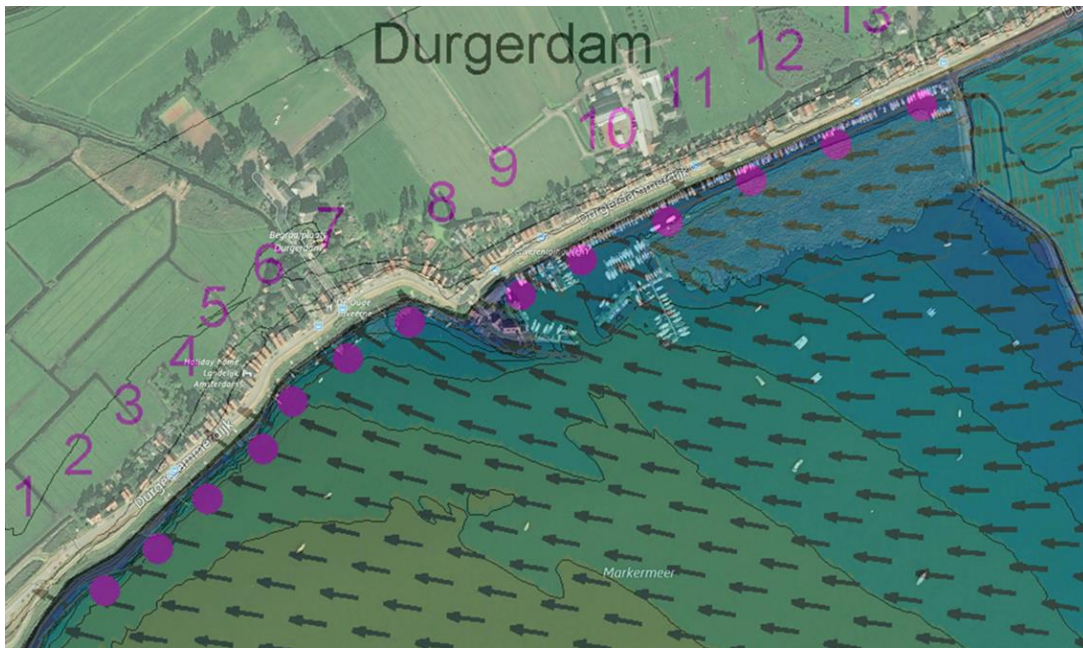
#### 4.5 Huidige kruinhoogte

De huidige kruinhoogte is circa 2,4 meter, maar varieert wel iets (enkele decimeters) in lengterichting. Zie hiervoor figuur 19. Opvallend is dat het verschil tussen de kering en de weg in loop van de afgelopen 100 jaar nagenoeg verdwenen is.



*Figuur 19. Aanleghoogte en huidige hoogte van waterkering en de weg in Durgerdam*

De ligging van de locaties uit figuur 19 is in figuur 20 weergegeven.



Figuur 20. Ligging van de locaties in figuur 19



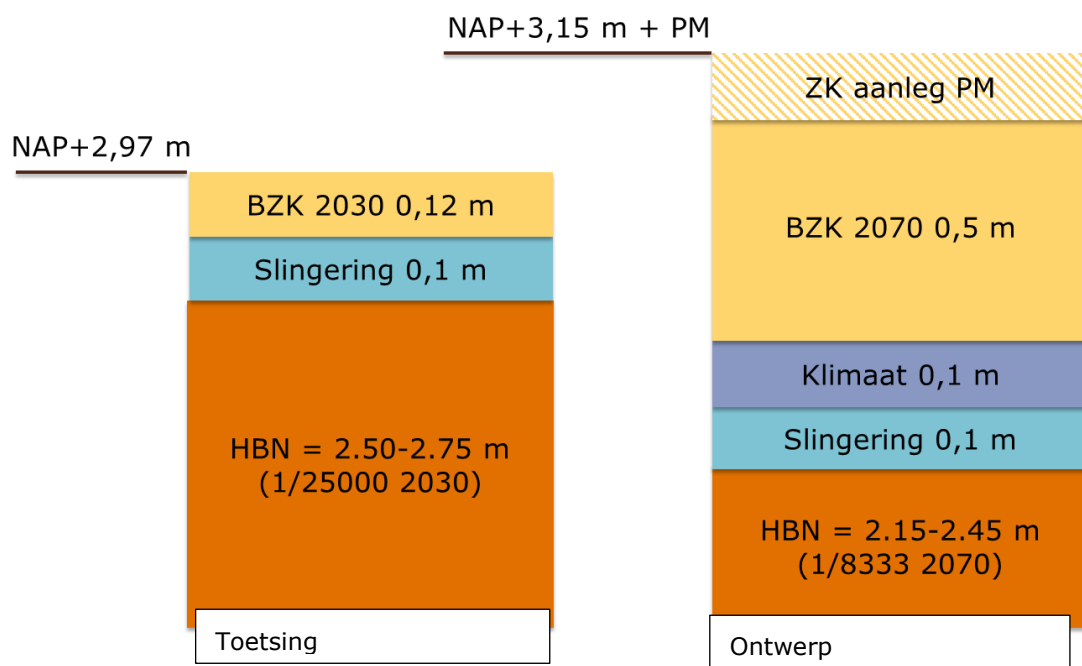
## 4.6 Benodigde kruinhoogte

Voor het bepalen van de veiligheidsopgave is uitgegaan van de signaleringswaarde (1/3000 per jaar) en rekening houdend met de faalkansbegroting en het lengte-effect is dit een toetseis van 1/25000 per jaar voor de kruinhoogte (faalmechanisme golfoverslag). Als daarbij het hydraulisch belastingniveau wordt berekend, dan leidt dit voor een 1:3 talud zonder berm tot een vereiste kruinhoogte van maximaal NAP+2,97 meter. Dat is hoger dan de aanwezige kruinhoogte, waardoor het maximale veiligheidstekort ongeveer 0,6 meter bedraagt. Nu valt hier nog wel het een en ander aan te optimaliseren, maar er is vooralsnog een duidelijke veiligheidsopgave wat betreft de hoogte.

Overigens is Durgerdam een bijzondere situatie wanneer we naar de ondergrens en de signaleringswaarde kijken voor de kruinhoogte van de dijk. Voor het ontwerpen gebruiken we de ondergrens (die is milder dan de signaleringswaarde en komt voor de kruinhoogte neer op 1/8333 per jaar). Het hydraulisch belastingniveau is daarmee fors lager. Met de toeslagen voor klimaat en BZK komt de vereiste kruinhoogte voor 2070 op maximaal NAP+3,15 meter, locatie 01260, nog te vermeerderen met een toeslag voor versnelde bodemdaling, zetting en klink na aanleg. Doordat ten opzichte van andere gebieden de doorwerking van het klimaateffect gering is, verschillen de vereiste kruinhoogtes voor 2023 en 2070 niet zoveel. De strengere signaleringswaarde wordt min of meer gecompenseerd door het zettingsverschil.

Traject	$h_k$ [m]	slingering [m]	BZK [m]	klink en zetting [m]	totaal [m]
01263	3,21+0,1	0,1	0,5	PM	3,91+PM
01263-golfcorrectie	2,15+0,1	0,1	0,5	PM	2,85+PM
01260	2,45+0,1	0,1	0,5	PM	3,15+PM

Tabel 3. Vereiste kruinhoogtes 2070 (met en zonder golfcorrectie)



Figuur 21. Globale Kruinhoogte in 2023 (benodigde hoogte in Beoordeling, linker balk in de figuur) en 2070 (benodigde ontwerphoogte bij levensduur van 50 jaar, rechter balk in de figuur) voor de Durgerdammerdijk, locatie 01260 (bij een overslagdebiet van 0,1 l/m/s)

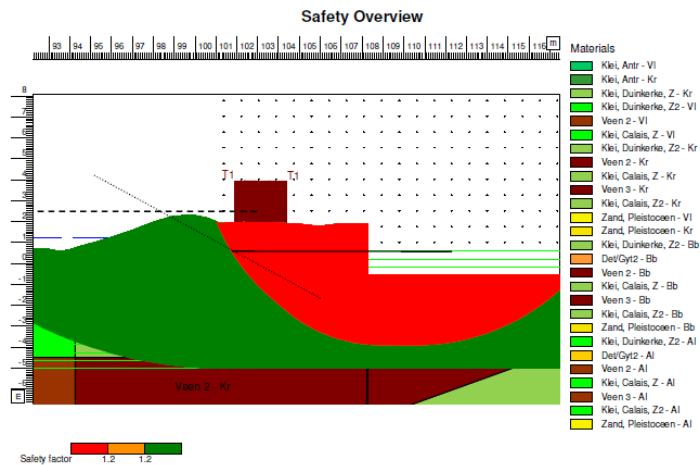
#### 4.7 Veiligheidsopgave macro-instabiliteit

Voor het beoordelen van dit faalmechanisme wordt gewerkt met zogenaamde glijvlakken; dat zijn vlakken waarlangs een deel van de waterkering kan afschuiven. Deze vlakken kunnen meer oppervlakkig zijn of dieper gelegen.

De schematisatie van de ondergrond is gebaseerd op een uitgebreide verzameling grondgegevens die beschikbaar zijn en ook zijn benut door het waterschap. De verkeersbelasting is meegenomen in de berekening omdat de weg ook bij maatgevende omstandigheden gebruikt moet kunnen worden voor bijvoorbeeld het transport van zandzakken en, in het ergste geval, voor een evacuatie. In de schematisatie zijn de woningen niet meegenomen en geschematiseerd als een 'gat in de dijk'. De woningen op de dijk spelen echter in de realiteit wel een rol in de vraag of de dijk stabiel genoeg is. Woningen die op staal gefundeerd zijn kunnen wel een probleem vormen, want dan rusten de muren rechtstreeks op de bodem, de dijk, en kan het gewicht van huizen immers als contragewicht werken. Het gewicht van de woningen maakt de dijk wel in deze gevallen veelal stabiel ten opzichte van de aanname van een 'gat in de dijk'. Geconstateerd wordt dat er gewerkt is conform de leidraden en praktijk. In meer algemene zin blijft de vraag of de praktijk van een 'gat in de dijk' nog wel passend is bij de veiligheidsfilosofie in de nieuwe normering.

De diepe glijvlakken van de dijk in Durgerdam zijn voldoende stabiel. De stabiliteitsfactor van Spencer moet groter zijn dan 1,16 om te voldoen aan de veiligheidseis voor macro-instabiliteit. In dat geval is de kracht die het grondlichaam, de dijk, op zijn plaats houdt groter dan de kracht die de dijk wil laten afschuiven. Als de factor gelijk is aan 1, zijn de weerstrevende en de aandrijvende kracht met elkaar in evenwicht. Vaak wordt een factor groter dan 1 gehanteerd, omdat er een extra marge wordt gehanteerd voor de onzekerheid in de grondeigenschappen. Voor alle profielen is deze voldoende volgens de onderzoeksgegevens van het Hoogheemraadschap.

De ondiepe glijvlakken zijn dat niet, met name vanwege de bebouwing. Echter, de dijk is zodanig breed dat een ondiep glijvlak naar verwachting niet leidt tot een overstrooming: er blijft nog een deel van de dijk staan zodat de dijk het water blijft keren: het restprofiel is voldoende breed (restbreedtebenadering).



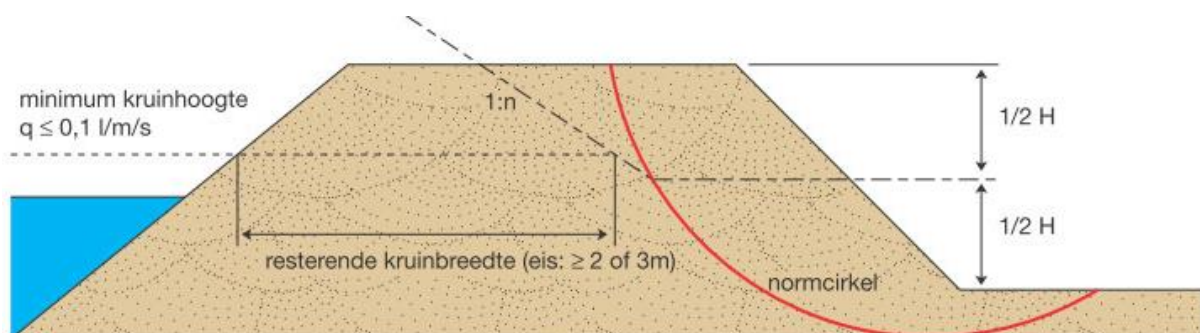
Figuur 22. Uitkomst van berekening van een diep glijvlak met de verkeersbelasting op top van de dijk, voorgesteld als een bruin blok. Het huis is weggelaten in de schematisatie


### Mogelijke aanscherping van het stabiliteitstekort

Er zijn in theorie drie manieren waarop een mogelijk berekend stabiliteitstekort aangescherpt kan worden, zodat de veiligheidsopgave mogelijk verdwijnt, of minder groot wordt:

1. Accepteren van de voor de dijk ongevaarlijke afschuiving. Er blijft een restprofiel staan waarmee de waterkerende werking van de dijk blijft bestaan. De dijk bezwijkt niet, en er vindt geen overstrooming plaats. Zie figuur 19 voor een voorbeeld van een glijvlak met een restbreedte die voldoende is.
2. Een andere mogelijkheid is ook nog de bebouwing meenemen in de berekeningen, waardoor de waterkering sterker kan worden beoordeeld (zie boven).
3. Een derde mogelijkheid is dat met 'bewezen sterkte' en probabilistisch rekenen wordt aangetoond dat de dijk sterker is dan tot nu toe is aangenomen. [Zie ook het rapport 'Kansrijkheid pompen en bewezen sterkte Markermeerdijken HWBP2, I&M 14 december 2015]. Vooralnog is het niet nodig om bewezen sterkte mee te nemen voor Durgerdam, omdat er geen opgave is voor dit mechanisme: de dijk is sterk genoeg en als het binnentalud onverhoopt toch zou bezwijken resteert een dijk die nog steeds het water kan keren.

Het voorstel van het expertteam is om de voor de waterveiligheid ongevaarlijke afschuivingen te accepteren.





*Figuur 23. Voorbeeld van glijvlak (rode lijn) in de waterkering met zogenaamde restbreedte benadering*

## **4.8 Conclusies veiligheidsopgave**

1. Ook bij de nieuwe normen is er een veiligheidsopgave in Durgerdam, evenals dat zo was bij de toetsing van de waterkering in 2006 en 2011;
2. Effecten van de nieuwe norm zijn: opgave voor macro-instabiliteit blijft en hoogte-opgave komt er bij, mede door de keuze om het binnentalud te ontzien (laag overslagdebiet van 0,1 l/m/s).
3. De macro-instabiliteitsopgave lijkt oplosbaar mits enige schade wordt geaccepteerd bij de ontwerpcondities (accepteren van relatief kleine afschuivingen die niet tot een overstroming leiden);
4. Er zijn op verzoek van het expertteam door de Alliantie meerdere berekeningen uitgevoerd met betrekking tot de ontwerpbelastingen. Deze opgave blijven ongeveer gelijk, waardoor geconcludeerd kan worden dat deze stabiel zijn ten aanzien van de gehanteerde uitgangspunten, en daardoor ook betrouwbaar zijn voor het maken van een ontwerp.

## 5 Knoppen voor technisch ontwerp Durgerdam

*De veiligheidsopgave geeft aan waar de versterking van de waterkering aan moet voldoen. Maar er zijn nog vele oplossingen denkbaar. Als voorbeeld noemen we het beperken van de golfhoogtes: de kering hoeft daardoor niet of minder verhoogd te worden. Ontwerpen is ook kiezen: aan welke combinatie van oplossingen (instellingen van knoppen) wordt de voorkeur gegeven? Naast veiligheid spelen hier natuurlijk ook diverse andere overwegingen, zoals landschap, natuur, recreatie en meer. In dit hoofdstuk gaan we in op de knoppen die vanuit veiligheid naar voren komen.*

### 5.1 De verschillende knoppen

De volgende knoppen kunnen worden onderscheiden voor het maken van een ontwerp die aan de wettelijke veiligheidseisen voldoet:

- Knop 1: Faalkansbegroting
- Knop 2: Levensduur en klimaatscenario
- Knop 3: Schematisatie en modellering
- Knop 4: Reductie hydraulische belastingen
- Knop 5: Vergroten sterkte

Deze knoppen komen een voor een aan de orde in de volgende paragrafen.

### 5.2 Knop 1: Faalkansbegroting

In hoofdstuk 3 hebben we gezien hoe de norm voor een traject opgesplitst kan worden in de diverse faalmechanismen. Daarin hebben we gezien dat piping onwaarschijnlijk is vanwege de grondgesteldheid, en dat betekent dat de bijdrage voor piping verlaagd kan worden van 24% naar 4%, omdat het onwaarschijnlijk is dat piping optreedt in het traject Volendam-Durgerdam. Het kan echter ook niet volledig uitgesloten worden dat piping nog ergens kan optreden. Dit is weliswaar een strengere eis voor piping, maar dat heeft in dit geval geen consequenties (omdat piping immers onwaarschijnlijk is). Daardoor ontstaat de ruimte om voor macro-instabiliteit binnenwaarts de bijdrage in de faalkansbegroting juist te vergroten van 4% tot 24%. Hierdoor worden de eisen die aan dit mechanisme worden gesteld iets milder en de benodigde stabiliteitsfactoren iets kleiner. Deze optimalisatie is al door Alliantie Markermeerdijken<sup>4</sup> toegepast.

In theorie is het zelfs mogelijk om de eis voor piping verder te reduceren naar een bijdrage van 0%, en het resterende faalkansbudget van 4% toe te kennen aan overloop/overslag of macro-instabiliteit. Dit zou echter nauwelijks iets opleveren. Voor beide mechanismen is het faalkansbudget nu 24% en een verhoging naar 28% heeft nauwelijks effect. Daarmee is voor het ontwerp het vertrekpunt de tabel met aangepaste faalkanseisen.

### 5.3 Knop 2: Levensduur en klimaatscenario

In hoofdstuk 4 is al aangegeven dat bij het ontwerpen gekozen wordt voor een bepaalde levensduur van de maatregel. De maatregel wordt zodanig vormgegeven dat de maatregel nog steeds voldoet aan het einde van de levensduur. Wordt er bijvoorbeeld rekening gehouden met een bodemdaling van 1 cm per jaar, dan zal de bodem na vijftig jaar gezakt zijn met 50 cm. Een levensduur van vijftig jaar is de standaard levensduur. Een kortere levensduur van bijvoorbeeld 25 jaar is mogelijk en valt te overwegen als de versterkingsmaatregelen op zichzelf veel extra zettingen veroorzaken. Door stap voor stap met een beperkte maatregel te werken kunnen de

---

<sup>4</sup> In december 2015 is het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier (zijnde de beheerder van de Markermeerdijken) een alliantie aangegaan met een consortium van marktpartijen onder leiding van Boskalis. In deze vorm werkt de aannemer in nauwe samenwerking met het hoogheemraadschap het ontwerp van de versterking uit en bepaalt de wijze van uitvoering.

zettingen worden beperkt. Ook een langere levensduur kan toegepast worden en die keuze kan in beeld komen als de versterkingsmaatregel na het aanbrengen niet meer kan worden aangepast (bijvoorbeeld de sterkte van een diepwand). Welke levensduur de voorkeur verdient hangt af van een analyse van kosten (vaste kosten en variabele kosten) en andere effecten (hinder voor de omgeving, kosten beheer & onderhoud) over een langere periode (zeg 100 jaar).

Voor de situatie bij Durgerdam is de doorwerking van klimaatverandering zeer beperkt en leidt dit zeker niet tot een afweging om van de standaardlevensduur van 50 jaar af te wijken. Het effect van bodemdaling, zetting en klink is groter: in eerste instantie is hier 50 centimeter autonoom en, als de dijk wordt verhoogd, komt nog een onbekende versnelde zetting bij. Als bijvoorbeeld bij een levensduur van 25 jaar (BZK = 25 centimeter) geen kruinverhoging nodig is, dan valt het te overwegen om van de standaard levensduur van 50 jaar af te wijken.

## 5.4 Knop 3: Schematisatie en modellering

De derde knop waaraan gedraaid kan worden is de schematisatie die binnen de modellen gebruikt wordt en de keuze van de modellen. Idealiter worden meerdere benaderingen gebruikt om zicht te krijgen op extreme omstandigheden die nog niet gemeten zijn. Immers, elk model is een schematisatie van de werkelijkheid, maar het geeft wel zicht op de omstandigheden die we niet kunnen meten (omdat ze nog niet zijn opgetreden), maar wel kunnen verwachten. Bij het bepalen van de veiligheidsopgave zijn er twee onderdelen geïdentificeerd, die beter gemodelleerd (of geschematiseerd) kunnen worden. Dat zijn de hydraulische randvoorwaarden en de bodemdaling, zetting en klink. Daarnaast is de schematisatie van het dijkprofiel vervangen door de gedetailleerde, huidige profielen van de dijk.

Wat betreft de geotechniek zijn bekende optimalisaties van de modellering en schematisaties het meenemen van bewezen sterkte, het effect van bebouwing als onderdeel van de waterkering en probabilistisch rekenen. In paragraaf 4.7 is onderbouwd dat met de keuze voor een restprofielbenadering de macro-instabiliteit van het binnentalud niet leidt tot een veiligheidsopgave. Daarom is het voor Durgerdam niet (meer) nodig om de modellering en schematisatie van macro-stabiliteit verder te verfijnen, mits ook uit meer gedetailleerde berekeningen blijkt dat deze restprofielbenadering kan worden toegepast. Als dat onverhoopt niet het geval is, dan bieden mogelijk de andere optimalisatiemogelijkheden een oplossing.

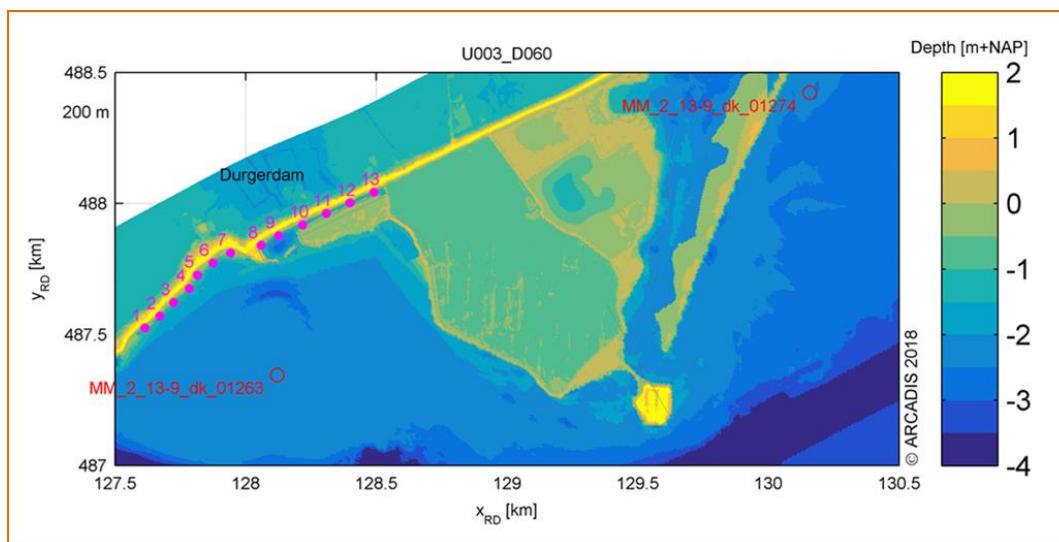
### 5.4.1 Hydraulische randvoorwaarden

In het model Hydra-NL wordt maar ten dele rekening gehouden met hoge voorlanden. Concreet wordt het beschuttende effect van de polder IJdoorn (en de dammen, die daar liggen) niet goed meegenomen. Het model Delft-3D houdt hier wel rekening mee en bij het afleiden van de veiligheidsopgave is op basis van een enkele berekening met dit model de golfhoogte (berekend in het uitvoerpunt 01263) voor Durgerdam-Haven gehalveerd en is voor Durgerdam-West de uitvoer van het punt 01260 gebruik (hoewel dit verderop ligt). In combinatie met de uitgangspunten (norm, faalkansbegroting, overslagdebiet, levensduur, klimaat, BZK, geometrie van de dijk) leidt dit tot de vereiste kruinhoogte zoals weergegeven in tabel 3, § 4.6. De uitgangspunten zijn:

- Zichtjaar 2070: 0,1 meter toeslag voor klimaat (ZSR)
- Talud 1:3 en kritiek overslagdebiet = 0,1 l/m/s
- Bodemdaling, zetting en klink (BZK) = 0,5 meter
- Extra klink en zetting afhankelijk van eventuele dijkverhoging (PM)

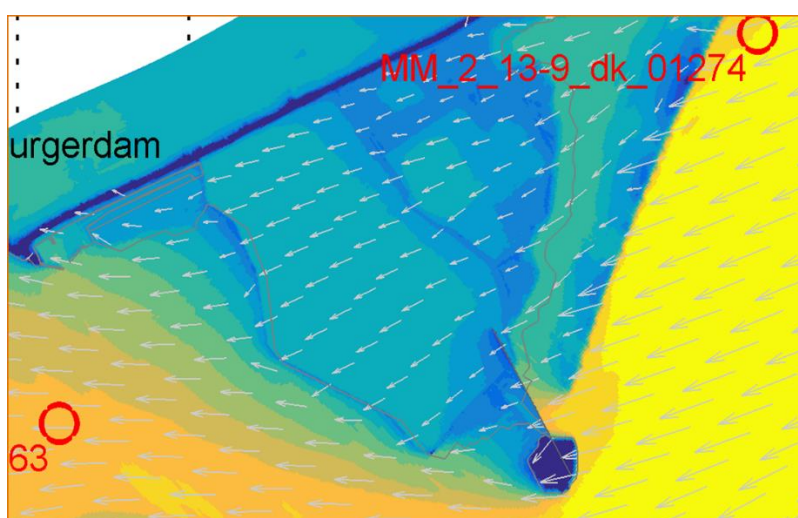
De huidige hoogte is ongeveer NAP+2,40 meter, er is dus een hoogte-opgave van 50-70 centimeter.

De Alliantie Markermeerdijken heeft ten behoeve van de optimalisatie van de golfrandvoorwaarden een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. De opzet van deze gevoeligheidsanalyse is om de met Hydra-NL berekende golven in het uitvoerpunt 01263 (dat ligt het dichtste bij Durgerdam) te corrigeren op basis van de resultaten van Delft-3D. Die correctie gebeurt door te vermenigvuldigen met de verhouding van de door Delft-3D berekende golven in het uitvoerpunt 01263 en op de locaties van de dijk. In figuur 24 is aangegeven voor welke locaties er op basis van de Hydra-NL berekeningen gecorrigeerde golven worden berekend.



Figuur 24. Ontwerplocaties voor Durgerdam (1-7 West en 8-13 Haven) en het Hydra-NL uitvoerpunt 01263

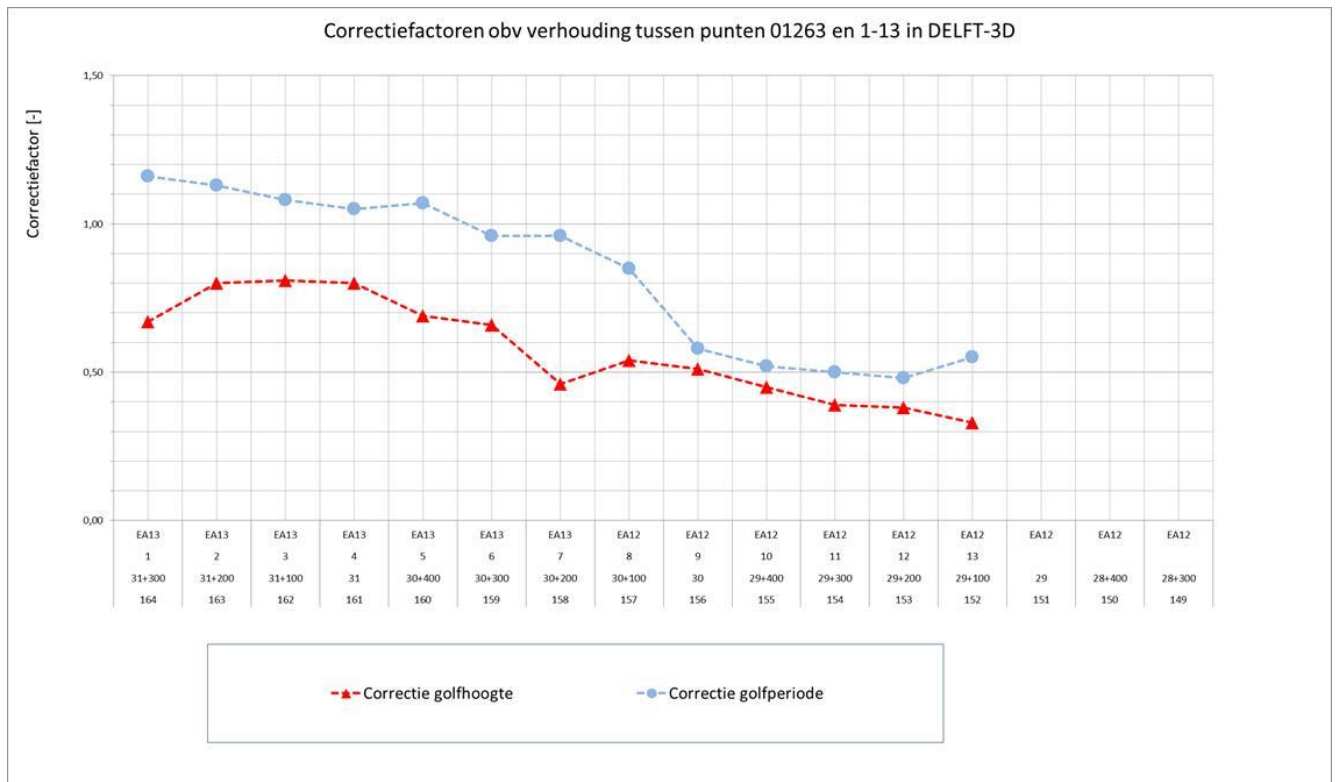
In figuur 25 zijn de golven (golfhoogte en -richting) in en rond de polder IJdoorn weergegeven bij maatgevende omstandigheden (waterstand iets boven NAP, windsnelheid ONO 24 m/s). Duidelijk is te zien dat de haven van Durgerdam via de polder IJdoorn te maken krijgt met golven en niet rechtstreeks vanaf het Markermeer. En verder is te zien dat de polder IJdoorn ervoor zorgt dat de golven lager worden en bijdraaien (meer loodrecht op de dijk). Verder laat Delft-3D met name voor Durgerdam-West zien dat de golfperiode van Hydra-NL wat aan de korte kant is (De betreffende correctiefactor is daar groter dan 1).



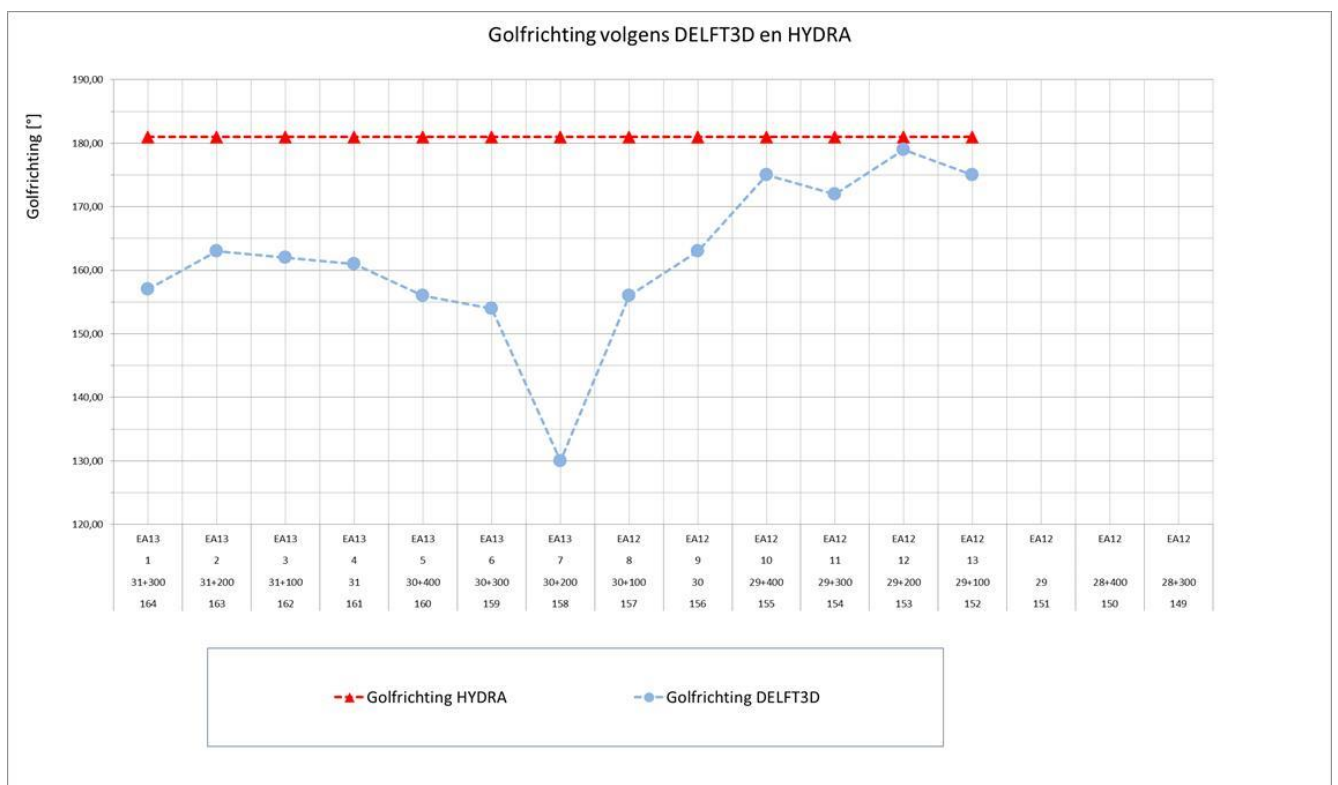
Figuur 25. Golfpatroon in en rond de polder IJdoorn

Figuur 26 laat zien welke correctiefactoren op de golfhoogte, -periode respectievelijk golfrichting zijn afgeleid. Omdat in Durgerdam-haven de golven sterk bepaald worden door het voorland, en in

de Hydra-modellen het voorland niet is opgenomen (uitvoerpunt ligt in het Markermeer), wordt voorgesteld om bij het ontwerp de golfrichting uit Delft-3D te gebruiken.



Figuur 26. Correctiefactoren voor de golfhoogte en golfperiode



Figuur 27. Correctie voor de golfrichting



De correctiefactoren voor de golfhoogte zijn allemaal kleiner dan 1. Dat was ook te verwachten omdat Durgerdam nu eenmaal beschermt ligt. Het is dan ook logisch dat de laagste correctiefactoren (grootste correcties) voor de 8-13 in de haven worden gevonden. De correctiefactor bedraagt hier 0,5 of minder. Dit komt aardig overeen met de eerste iteratie waarbij de met Hydra NL berekende golfhoogte (0,8 m) is gehalveerd tot 0,4 meter. Voor Durgerdam-West zijn de correctiefactoren 0,8 of lager en dat leidt tot golfhoogtes, die overeenkomen met de eerste iteratie die bij het bepalen van de veiligheidsopgave is gehanteerd.

De correctiefactoren voor de golfperiode zijn in Durgerdam-West groter dan 1. Dat heeft een negatief effect op de veiligheidsopgave (die wordt groter). Dit effect is vrij fors omdat bij langere golven de golfoploop en -overslag sterk toeneemt.

In tabel 4 zijn voor de locaties 1-13 de hydraulische randvoorwaarden weergegeven op basis van de gevoeligheidsanalyse. Deze tabel vervangt dus de hydraulische randvoorwaarden uit de tabel 2. Voor de punten 8-13 zijn tussen haakjes extra waarden voor golfhoogte en -periode opgenomen. Deze waarden beginnen bij punt 13 op 0 en laten zien welke golven lokaal binnen de haven worden opgewekt. Deze waarden zijn geldig als de haven kan worden afgeschermd tegen golven afkomstig uit de polder IJdoorn.

HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN				
Nr	h	Hs	T <sub>p</sub>	β
1	1,07	0,56	3,83	157
2	1,07	0,67	3,73	163
3	1,07	0,68	3,56	162
4	1,07	0,67	3,47	161
5	1,07	0,58	3,53	156
6	1,07	0,55	3,17	154
7	1,07	0,39	3,18	130
8	1,07	0,45 (0,45)	2,81 (2,38)	156
9	1,07	0,43 (0,41)	1,91 (2,27)	163
10	1,07	0,38 (0,37)	1,72 (2,13)	175
11	1,07	0,33 (0,32)	1,65 (1,94)	172
12	1,07	0,32 (0,24)	1,58 (1,66)	179
13	1,07	0,28 (0,00)	1,82 (0,00)	175

Tabel 4. Hydraulische belastingen na de gevoeligheidsanalyse

#### 5.4.2 Nadere analyse over slingering in het Markermeer

Tijdens de interactie met bewoners is er ook twijfel gerezen of de toeslag voor 'slingeringen' wel noodzakelijk is. De vraag was met name of deze 'slingeringen' wel op kunnen treden bij oostenwind. Zoals aangegeven in hoofdstuk 4.4 bestaan slingeringen uit zeer lange staande golven die in het Markermeer bij eigenperioden van het systeem op kunnen treden,

mogelijk versterkt als gevolg van resonantie. Om deze toeslag te onderbouwen is door HHNK opdracht gegeven aan Deltares en KNMI om deze toeslag nader te analyseren. De onderbouwing is weergegeven in de notitie "Advies Meerpeilslingeringen Durgerdam", november 2018. Conclusie in deze notitie is dat 'in principe de sturende fenomenen en resulterende seiches bij Durgerdam ook kunnen optreden bij maatgevende omstandigheden, dat wil zeggen bij stormen uit het Noordoosten'. De vraag is vervolgens hoe groot de amplitude is van de slingeren (die nog niet in de metingen zitten) en hoe het zit met de kans van gelijktijdig optreden van een slingingering en maatgevende oostenwind. Ook deze vragen worden in de notitie beantwoord, en de slingeren uit de meetgegevens bij de Schellingwoudebrug zijn geanalyseerd. Geadviseerd wordt om een toeslag van 0,1 m te hanteren voor de verwachtingswaarde van deze toeslag, en dat is dezelfde toeslag die ook in hoofdstuk 4.4 wordt vermeld. Deze verwachtingswaarde heeft echter ook een bandbreedte, die wellicht ook in de orde van 0,1 m valt. Onder andere door de korte meetreeks bestaat over de hoogte van de toeslag dus onzekerheid. Vooral nog resulteert deze onzekerheid niet in een verhoging van de toeslag.

#### 5.4.3 Bodemdaling, zetting en klink

Bij het bepalen van de veiligheidsopgave is uitgegaan van de bodemdaling, zetting en klink zoals weergegeven in figuur 18. Bij een levensduur van 50 jaar betekent dit 50 cm extra bodemdaling, zetting en klink, zonder dat er rekening is gehouden met extra zetting die ontstaat bij het verhogen van de kruin.

De Alliantie Markermeerdijken heeft op verzoek van bewoners en experts satellietwaarnemingen van de hoogte van de Durgerdammerdijk laten analyseren door het bedrijf Skygeo uit Delft. De uitkomsten van deze analyse zijn op 11 april 2018 besproken met het expertteam, het waterschap, de Alliantie Markermeerdijk en een bewoner van de Durgerdammerdijk.

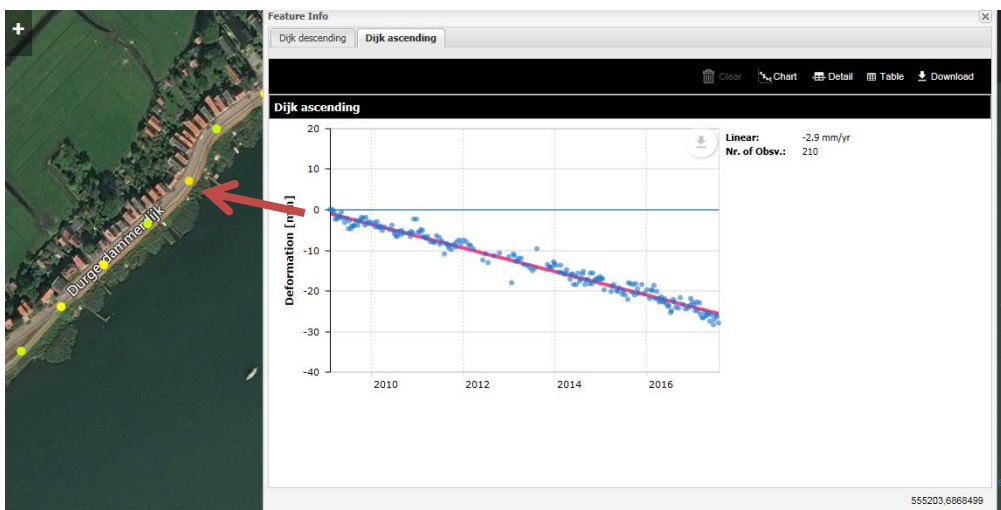


Figuur 27. Bespreking van de analyse van satellietmetingen op 11 april 2018 (foto: M. Kok)

In de figuren 21, 22 en 23 zijn de uitkomsten van de analyse weergegeven. In figuur 28 zijn de vele punten weergegeven die in de periode 2009-2017 zijn waargenomen. De kleuren geven de gemiddelde daling weer in mm per jaar. Uit al deze punten zijn alleen de punten op de dijk geselecteerd, en gemiddeld over trajecten van 100 meter (in de lengte richting van de dijk). Dit is weergegeven in figuur 29, waarin voor één van de locaties ook de individuele waarnemingen in het 100 meter traject zijn geploteerd. Uit de figuur is duidelijk een (consistente) daling te zien van de waterkering in het afgelopen decennium, maar wel beduidend minder dan 1 cm/jaar.



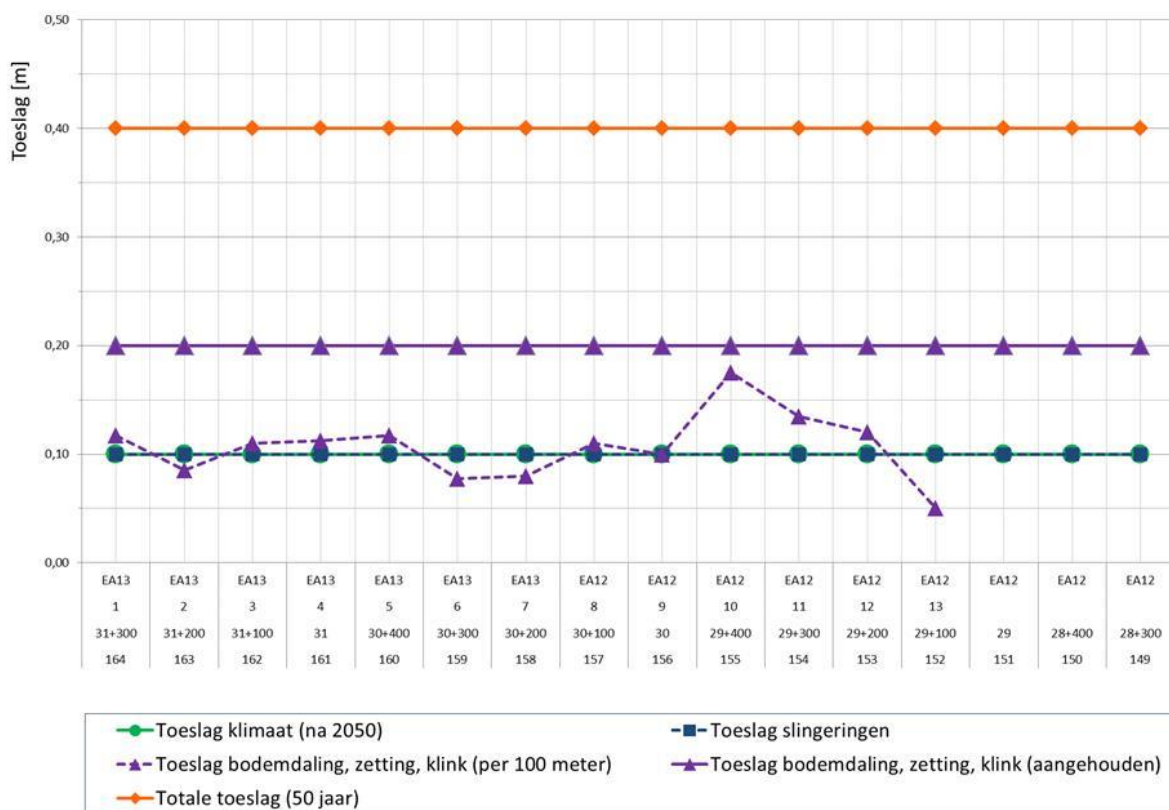
Figuur 28. Overzicht van satelliet metingen rondom de Durgerdammerdijk. De kleuren geven de gemiddelde daling per jaar weer (in mm)



Figuur 29. Voorbeeld van een uitkomst van de daling van de dijk (in mm)

In figuur 30 is voor elke 100 meter punt de daling weergegeven per jaar (de gestippelde lijn met de driehoekjes). We zien dat het nog best veel verschilt van locatie tot locatie, en ook dat de maximale daling minder is dan 4 mm per jaar. In figuur 30 zijn ook de andere toeslagen (klimaat, slingering) weergegeven, zoals eerder in hoofdstuk 4 besproken.

Toeslagen voor het bepalen kruinhoogte (tussen dijkpalen 149-164)



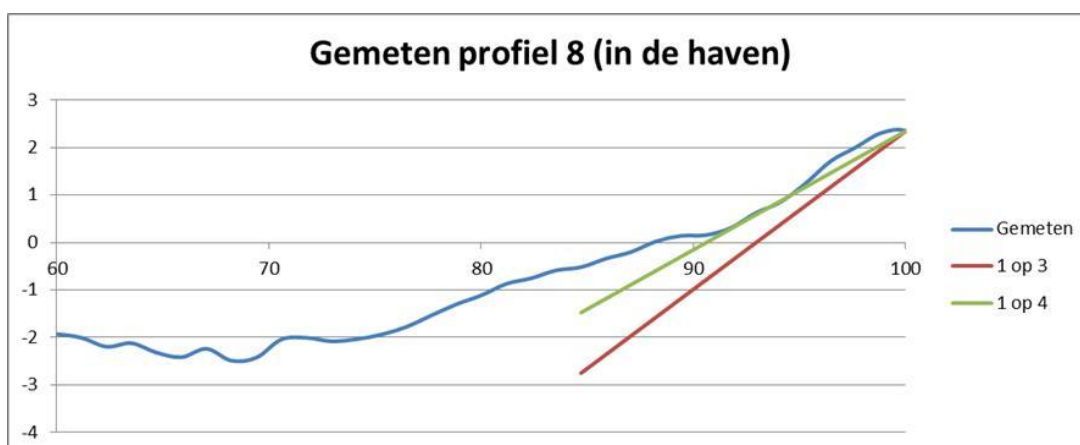
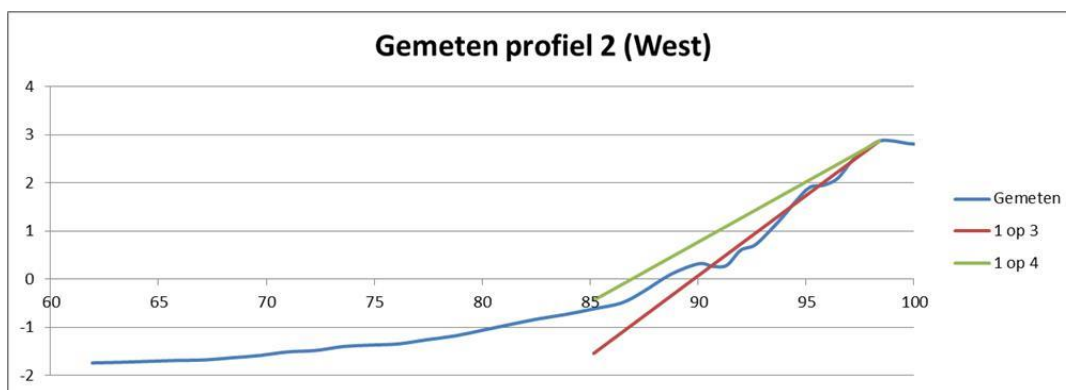
Figuur 30. De verschillende toeslagen voor de Durgerdammerdijk samengevoegd

Voor bodemdaling wordt een toeslag aangehouden van 4 mm per jaar, met een levensduur van 50 jaar is dat in totaal 20 cm. De gestippelde lijn met de driehoekjes is de bodemdaling per 100 m direct volgend uit de satellietmetingen. Dit betekent dat de toeslag voor een levensduur van 50 jaar is teruggebracht van 70 centimeter tot 40 centimeter.

De overweging voor een kortere levensduur komt hiermee in een ander daglicht te staan. Bij een levensduur van 25 jaar zou de toeslag 30 centimeter worden omdat alleen de toeslag voor bodemdaling, zetting en klink halveert (van 20 cm in 50 jaar naar 10 cm in 25 jaar). De overige toeslagen blijven gelijk. Daarmee is het weinig zinvol meer om een levensduur van 25 jaar te overwegen.

#### 5.4.4 Gebruiken gedetailleerde, huidige dijkprofielen

Voor het bepalen van de effecten van maatregelen kunnen we ook nog een stap verder gaan. De eerste stap is om de te kijken naar de werkelijke profielen van de dijken. In alle berekeningen is uitgegaan van een 1:3 profiel, maar in de werkelijkheid ligt vaak een ander profiel. Ter illustratie is figuur 31 een profiel in de haven weergegeven. Het werkelijk profiel is flauwer dan een 1:3 profiel, en dat betekent ook dat de golfloop minder zal zijn en dat het HBN ook lager uit zal vallen.



Figuur 31. Twee gemeten profielen, in de haven is het profiel veel flauwer dan 1:3 profiel

Vervolgens zijn voor elk van de 13 doorsnedes de eigenschappen van de profielen bepaald, zie hiervoor Tabel 5.

Nummer	Kruinhoogte [m+NAP]	Talud [-]	Bermbreedte [m]	Bermhoogte [m+NAP]	Dijknormaal [°]
1	-	1:3	-	-	135
2	2,87	1:3	2	0,30	135
3	2,51	1:3	2	0,50	135
4	2,41	1:2½	6	0,20	135
5	2,59	1:3	6	0,20	135
6	2,57	1:3	6	0,20	135
7	2,38	1:3	6	0,20	135
8	2,35	1:4	4	0,20	150
9	2,22	1:4	4	0,20	150
10	2,32	1:4	4	0,20	150
11	2,30	1:3	-	-	150
12	2,48	1:3	-	-	150
13	2,48	1:4	-	-	150

Tabel 5 Eigenschappen van profielen in de 13 doorsnedes

## 5.5 Knop 4: Reductie van belastingen

Een mogelijke maatregel om de hoogte van de waterkering te beperken is het kleiner maken van het effect van golven, bijvoorbeeld door ze te laten breken op een voorland, door het talud flauwer of ruwer te maken of door een berm aan te leggen. Ook combinaties van maatregelen zijn vanzelfsprekend mogelijk.

### Aanbrengen van extra voorland

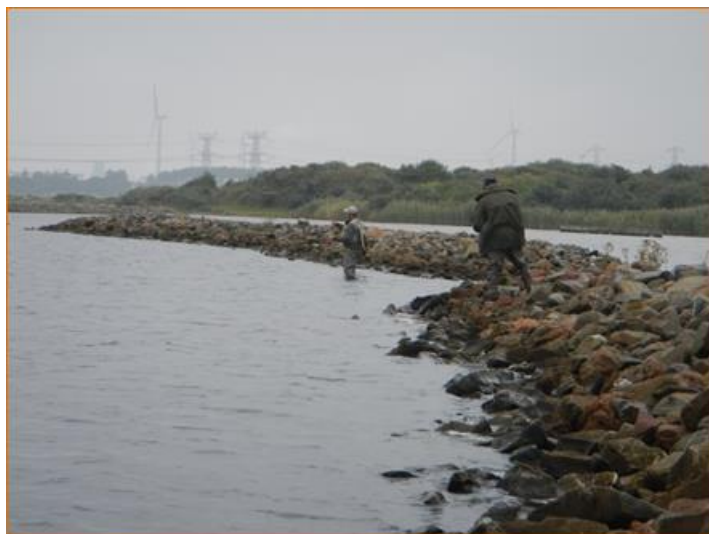
Een eenvoudige vuistregel is dat de golfhoogte op een voorland beperkt is tot maximaal 50% van de waterdiepte en dat betekent:

- Voorland op NAP+1 meter: vrijwel geen golven
- Voorland op NAP: golven maximaal 50 cm
- Begroeiing (wilgen) kan effect versterken. Let op: dit zijn wilgen op het voorland, niet op de dijk

### Aanbrengen van golfbreker

Effectiviteit is afhankelijk van breedte en hoogte (vrijboord):

- Golfbreker: 5 meter brede kruin op NAP
- Reductie golfhoogte  $\approx$  20% bij onderwater golfbrekers (NAP en lager)
- Grotere reducties (tot wel 80%) zijn haalbaar bij hogere golfbrekers (NAP+1 en hoger)



Voorbeeld van een golfbreker

### Drijvende golfbreker

Voordeel van een drijvende golfbreker is dat deze meestijgt met waterstand als deze door de windopzet stijgt (bijvoorbeeld een steiger). De effectiviteit van drijvende golfbrekers is vooral afhankelijk van breedte. Een drijvende golfbreker van acht meter breed geeft een maximale golfreductie van 60% (hier van toepassing in verband met korte golven).

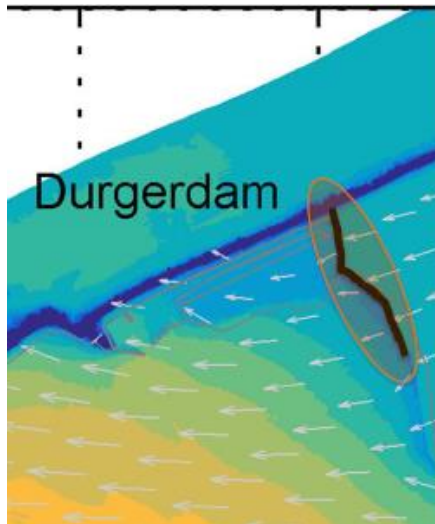


Voorbeelden van drijvende golfbrekers

### Voorlanddijk

Een andere maatregel om het effect van de golven te reduceren is het aanleggen van een voorlanddijk. Deze mogelijkheid is heel laat in het proces gegeneerd, in feite als een bijvangst

van de gevoeligheidsanalyse en door goed naar de figuren waarin de richting van de golven staat aangegeven, zie figuur 32. De golven lopen haast parallel aan de dijk, waardoor deze door een voorlanddijk (die al aanwezig is, de kade rond de IJdoornpolder) wordt tegengehouden. Wel dient dan de huidige dijk van de polder IJdoorn de golven afkomstig uit de polder IJdoorn daadwerkelijk tegen te houden. Een voorlopige inschatting is dat deze huidige verhoogd moet worden (tot ca 2,5 m) met een iets flauwer talud (1:6).



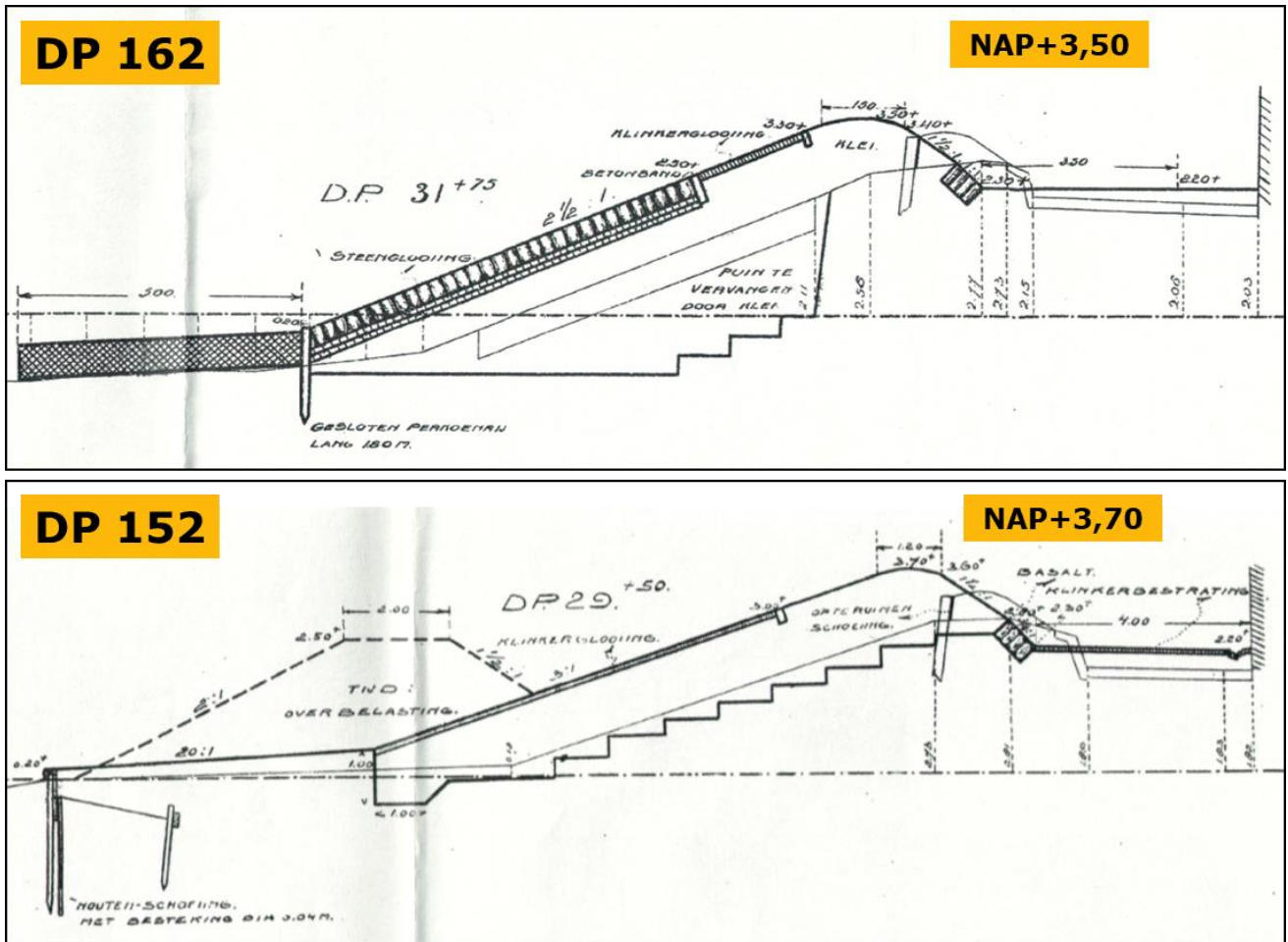
Figuur 32. Voorlanddijk

## 5.6 Knop 5: Vergroten sterkte

De sterkte van de waterkering kan op vele manieren vergroot worden. Voor de hoogte-opgave geldt bijvoorbeeld dat de tuimellade kan worden verhoogd.

*Hogere dijk, bijvoorbeeld herstellen hoogte van tuimeldijk*

In figuur 33 staat het ontwerp weergegeven van de waterkering bij Durgerdam zoals deze destijds in de jaren 20 van de vorige eeuw is aangelegd. Opvallend is dat de aanleghoogte in de haven van Durgerdam (DP157) 20 centimeter meer is dan in Durgerdam-West (DP163). De huidige inzichten zijn dat de golfbelasting in Durgerdam-West hoger is dan in de haven en dat de dijk in Durgerdam-West dan ook hoger zou moeten zijn.



Figuur 33. 'As built' tekeningen van de dijkversterking rond 1920

Eerder in de collegebundel is in figuur 19 te zien wat de huidige hoogte van de kruin (tuimelkade) en de weg (dijklichaam) in relatie tot de aanleghoogtes is. Hieruit zou op te maken zijn dat de tuimelkade ongeveer 1,5 meter is gezakt en dat de weg slechts enkele decimeters is gezakt. Nader onderzoek (onder andere via oude ansichtkaarten en het raadplegen van de archieven van het waterschap) leerde dat in 1937 de tuimelkade is afgegraven in het kader van een verbreding van de weg. Dit werd destijds mogelijk geacht door de aanleg van de Afsluitdijk.

#### Aanpassing buitentalud

Een flauwer buitentalud geeft minder hoge golven, een helling van 1:6 halveert de golfoploop (ten opzichte van een 1:3 talud).

Een ruwer buitentalud in de vorm van grove breukstenen) reduceert golfoploop met 45%, natuursteen met 25% (ten opzichte van gras en/of gladde bekleding).





Voorbeeld ruwer talud: Kunstmatige ribbels in de Hondsbossche Zeewering en Pettemer Zeewering



Huilblock (reductie 25%)



Kunstmatige ribbels (reductie 15-30%)



Vilvoordse steen (reductie 15%)



golfploop door het ruwe talud wordt geremd, in vergelijking met het dijkgedeelte daarachter



Haringmanblokken (reductie 10%)



Basalt (reductie 10%)

*Figuur 34. Voorbeelden van een ruwer buitentalud*

#### *Aanbrengen van een berm*

Een berm op 'stormvloedniveau' (NAP+1,07 meter) reduceert golfoploop met maximaal 40%, waarbij een breedte van een kwart van de golflengte al voldoende is. Rekening houdend met de golven uit tabel 4 varieert de vereiste afmeting van de berm van 4 tot 6 meter. Verdere reductie is nog mogelijk wanneer berm als hoog voorland gaat werken, hiervoor is maatwerkberekening nodig. Lagere bermen zijn ook mogelijk, maar die zijn minder effectief dan een berm op 'stormvloedniveau'.

#### *Stabieler dij*

Voor de stabiliteitsopgave kunnen de volgende maatregelen worden getroffen:

- Flauwer binnentalud: strijdig met behoud bebouwing op binnentalud
- Binnenberm: strijdig met behoud bebouwing op binnentalud
- Grondverbetering en/of constructieve oplossingen: alleen als ondiepe glijcirkels onacceptabel zijn

Er is vooralsnog geen stabiliteitsopgave, zodat deze bouwstenen niet verder zijn beschouwd.

## **5.7 Overzicht en doorwerking bouwstenen**

In figuur 35 is het ontwerpproces met knoppen en bouwstenen (knoppen 4 en 5) samengevat. Na de nodige optimalisaties van de modellen en schematisaties kan met behulp van de bouwstenen nu worden gezocht naar oplossingen voor de waterveiligheid. Deze zoektocht is gericht op oplossingen, die de impact van de dijkversterking op de landschappelijke en functionele betekenis van de huidige dijk beperken. Zo is er nauwelijks ruimte voor een kruinverhoging en is een buitenwaartse versterking in de haven ook vrijwel onmogelijk.

#### Opgave:

- Macro-instabiliteit binnentalud (ondiepe glijcirkels ivm schematisatie huizen)
- Kruihoogte-tekort

#### Knop 1: Faalkansbegroting

- Afwezigheid piping → Optimalisatie toegepast

#### Knop 2: Levensduur en klimaat

- 50 jaar als vertrekpunt; optie 25 jaar

#### Knop 3: Schematisatie en modellen

- Hydraulica: HYDRA-NL, aanwezigheid voorland, DELFT-3D
- Bodemdaling, zetting, klink: satellietwaarnemingen
- Geometrie: gedetailleerde, huidige profielen
- Geotechniek: uitgebreide verzameling grondgegevens, restprofiel-benadering voor ondiepe glijcirkels, bewezen sterkte overbodig

#### Knop 4: Reductie belastingen

- Hoog voorland
- Voorlanddijk (haven)
- Golfbreker (eventueel drijvend)

#### Knop 5: Vergroten sterkte

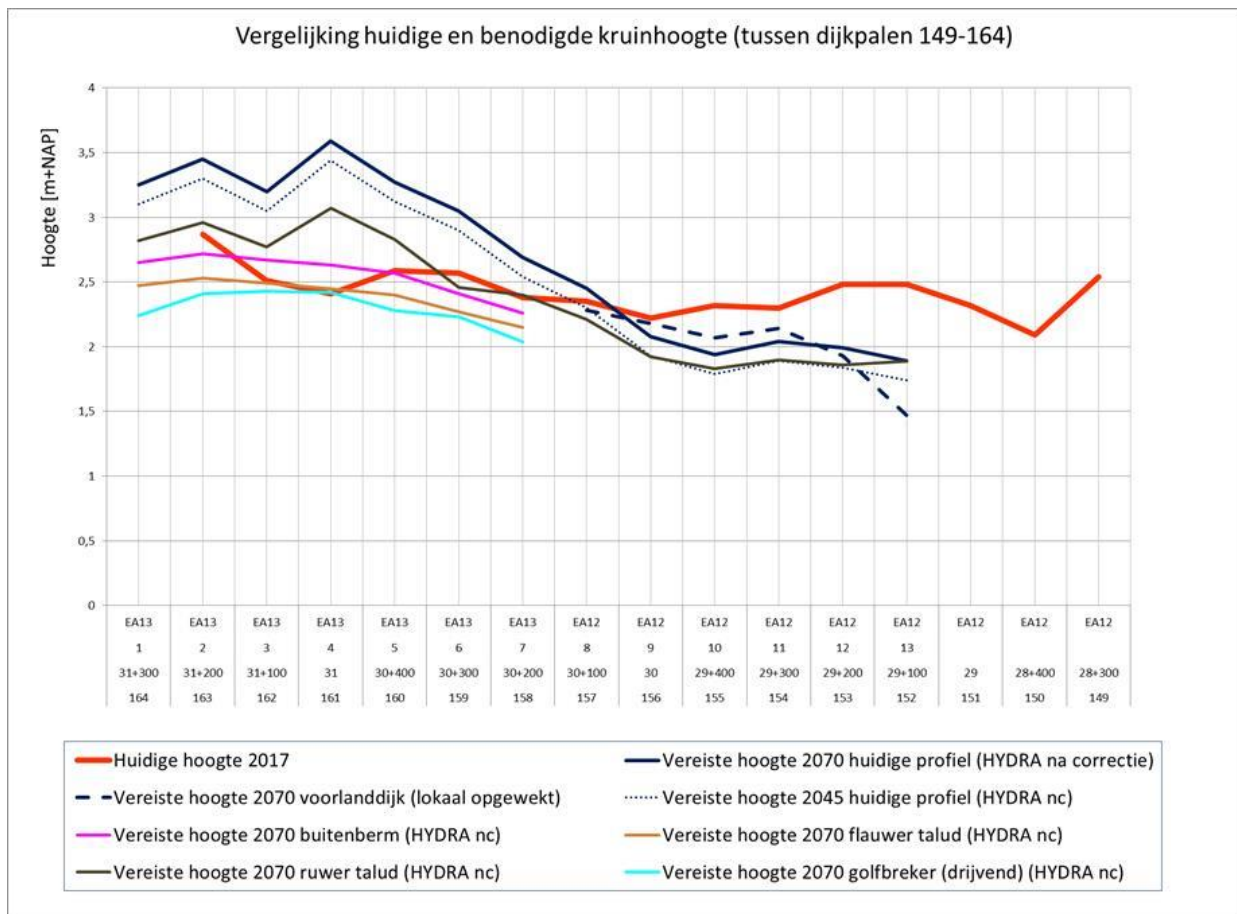
- Verhoging kruin tuimelkade
- Flauwer buitentalud
- Ruwer buitentalud
- Buitenberm

#### Twee ontwerpbenaderingen:

- Voorkom verhoging kruin → maatregelen buitentalud en/of voorland
- Verhoging kruin tuimelkade → herstel historische dijk

Figuur 35. Overzicht ontwerpen met knoppen en bouwstenen

Met de bouwstenen zijn voor alle 13 locaties langs de Durgerdammerdijk berekeningen gemaakt van de vereiste kruihoogte in 2070 (en 2045). In figuur 36 en tabel 6 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven.



Figuur 36. Resultaten bouwstenen

Nr	HYDRAULISCHE RANDVOORWAARDEN				BEREKENDE KRUINHOOGTE							
	h	Hs	T <sub>p</sub>	β	h <sub>k</sub> 2070	h <sub>k</sub> 2045	h <sub>k</sub> lokaal	h <sub>k</sub> berm	h <sub>k</sub> flauw	h <sub>k</sub> ruw	h <sub>k</sub> golfbr	
1	1,07	0,56	3,83	157	3,25	3,10		2,65	2,47	2,82	2,24	
2	1,07	0,67	3,73	163	3,45	3,30		2,72	2,53	2,96	2,41	
3	1,07	0,68	3,56	162	3,20	3,05		2,67	2,49	2,77	2,43	
4	1,07	0,67	3,47	161	3,59	3,44		2,63	2,45	3,07	2,42	
5	1,07	0,58	3,53	156	3,27	3,12		2,57	2,40	2,83	2,28	
6	1,07	0,55	3,17	154	3,05	2,90		2,41	2,27	2,46	2,23	
7	1,07	0,39	3,18	130	2,69	2,54		2,26	2,15	2,40	2,04	
8	1,07	0,45 (0,45)	2,81 (2,38)	156	2,45	2,30	2,28			2,21		
9	1,07	0,43 (0,41)	1,91 (2,27)	163	2,08	1,93	2,18			1,92		
10	1,07	0,38 (0,37)	1,72 (2,13)	175	1,94	1,79	2,07			1,83		
11	1,07	0,33 (0,32)	1,65 (1,94)	172	2,04	1,89	2,14			1,90		
12	1,07	0,32 (0,24)	1,58 (1,66)	179	1,99	1,84	1,93			1,86		
13	1,07	0,28 (0,00)	1,82 (0,00)	175	1,89	1,74	1,47			1,89		

Tabel 6. Resultaten bouwstenen

Voor Durgerdam-Haven (punten 8-13) is duidelijk te zien dat de veiligheidsopgave fors is teruggebracht. Alleen voor punt 8 is een minimale kruinverhoging nodig. Dit kan worden voorkomen door het aanbrengen extra ruwheid op het buitentalud. Als mag worden uitgegaan van lokaal opgewekte golfhoogte, dan vervalt de opgave in de haven volledig. Dit is zeer waarschijnlijk, maar vereist wel een verdere optimalisatie van de gebruikte hydraulische modellen.

Voor Durgerdam-West (punten 1-7) is te zien dat de veiligheidsopgave wel is teruggebracht. Opvallend is dat de vereiste kruinhoogte bij punt 4 (met een huidig buitentalud van 1:2,5) fors hoger is dan bij de overige punten. Door dit talud aan te passen kan deze piek in de figuur worden gladgestreken. Verder leidt de combinatie van hogere golven en vooral een langere golfperiode wel tot constructieve maatregelen. Met een flauwer talud of een drijvende golfbreker verdwijnt de opgave volledig. Met een berm of een ruwer talud wordt de opgave sterk gereduceerd.

## 5.8 Combinaties van bouwstenen in Durgerdam-West

De informatie over het effect van de verschillende knoppen (bouwstenen) kan gebruikt worden om, zo nodig, combinaties te maken van de bouwstenen. Voor Durgerdam-West gaat vanuit diverse oogpunten (landschap, beheer, ..) de voorkeur uit naar een berm. Om dan de kruinverhoging te minimaliseren is gekeken naar een combinatie van een berm met een ruwer talud.

## 5.9 Afsluiting

Het werken met bouwstenen die een antwoord geven op de veiligheidsopgave heeft een wezenlijke bijdrage geleverd aan de ontwerp-vraag in Durgerdam. Zo is bijvoorbeeld de veiligheidsopgave lager uitgevallen dan eerder was voorzien, en zijn verschillende oplossingen (zoals een ruwer talud) in beeld gebracht. Ook de gevoeligheidsanalyse voor de hydraulische randvoorwaarden was zeer nuttig: deze analyse heeft aangetoond dat Hydra-NL antwoorden produceert voor Durgerdam, die reproduceerbaar zijn, heeft aanpassing gegeven voor de golfhoogten van Durgerdam West en met name voor Durgerdam-Haven, en het heeft geleid tot een extra bouwsteen door Durgerdam-Haven.

Het iteratief ontwerp proces heeft, conform de theorie daarover, bijgedragen aan de oplossing. Zo zijn de toeslagen voor bodemdaling, zetting en klink beter onderbouwd, en is de totale toeslag nagenoeg gehalveerd (van 0,7 m naar 0,4 m).

Voor Durgerdam-West geldt dat haast geen kruinverhoging nodig is als bijvoorbeeld een berm van 5 meter op 1 m NAP wordt aangelegd, maar andere oplossingen zijn ook goed mogelijk. Zo werkt een ruwer buitentalud ook goed. Een besluit hierover zal worden gemaakt tijdens het maken van het definitief ontwerp, in samenspraak met de bewoners.

## 6 Bewonersalternatieven

*Onderstaande beschrijvingen van alternatieven zijn - tenzij anders vermeld - herformuleringen van de ingediende alternatieven door de bewoners. Het is in een participatieproces altijd van groot belang dat er volop aandacht is voor deze alternatieven, en de haalbaarheid ervan.*

Sinds 2008 zijn er door bewoners en belanghebbenden verschillende oplossingen aangedragen voor het veiligheidsprobleem ten aanzien van de Markermeerdijken. Door deze inbreng uit de omgeving is er nieuwe kennis opgedaan en er zijn nieuwe inzichten vergaard. Er zijn algemene oplossingsrichtingen aangedragen zoals het onderzoek naar de sterkte van het veen, het plaatsen van pompen in de Houtribdijk en 'bewezen sterkte'. Naast deze algemene oplossingsrichtingen zijn

er uit de omgeving van de Markermeerdijken, zo ook uit Durgerdam, specifieke oplossingsrichtingen voor de lokale problematiek aangedragen. In totaal zijn er drie alternatieve varianten specifiek voor Durgerdam ingediend: door dhr. Oosterhof, dhr. Mulder, en dhr. Porsius. Het alternatief van dhr. Oosterhof kent een tweede variant, die is ingebracht door dhr. Burger.

Bovengenoemde oplossingsrichtingen, de algemene oplossingen en Durgerdam-specifieke oplossingen, zijn door de onafhankelijke experts tijdens de collegeavonden op 8 januari en 15 januari 2018 in spoor 1 aan de orde gekomen en nader uitgediept.

Algemene oplossingsrichtingen:

- Dijken op Veen
- Pompen in de Houtribdijk
- Bewezen sterkte

Specifieke oplossingsrichtingen:

- Dhr Oosterhof: De 'extreem buitenom'-variant;
- Dhr. Burger: Variant op extreem buitenom;
- Dhr. Mulder: De damwand door het riet;
- Dhr. Porsius: Het afvangen van golven in het Buiten-IJ.

### **Dijken op Veen**

De resultaten van het onderzoek naar Dijken op Veen is een goed voorbeeld van kennisontwikkeling op het gebied van versterkingsoplossingen. Uit de onderzoeken naar Dijken op Veen is gebleken dat veen sterker is dan aanvankelijk werd gedacht. Het onderzoek naar Dijken op Veen omvat een langdurig onderzoektraject, bestaande uit:

- praktijkproeven (2010-2011);
- de vertaalslag van onderzoek resultaten naar ontwerpmethodiek (2011 – 2014);
- de implementatie van de ontwerpmethodiek (2015-2016).

De resultaten van het onderzoek naar Dijken op Veen zijn verwerkt in de veiligheidsopgave van de Markermeerdijken. In de nieuwe normering van 2017 wordt er gerekend met de resultaten van het onderzoek naar Dijken op Veen. Een complicerende factor die van toepassing is op een aantal delen van het tracé is een onderliggende laag van humeuze klei. Deze slappe kleilaag in dezelfde ondergrond zorgt ervoor dat de sterkte van het veen voor een belangrijk deel teniet wordt gedaan.

Voor Durgerdam geldt ook dat deze slappe kleilaag in de ondergrond aanwezig is. Verschillende grondonderzoeken in Durgerdam tonen aan dat het effect van de implementatie van Dijken op Veen in Durgerdam helaas zeer gering is. De veiligheidsopgave verandert daardoor ook in Durgerdam niet of nauwelijks.

### **Pompen in de Houtribdijk**

Rijkswaterstaat heeft in 2015 op verzoek van de minister onderzoek gedaan naar het effect van de het plaatsen van extra pompen in de Houtribdijk en het effect hiervan op de opgave voor de dijkversterking. De conclusies van deze studie zijn in september van dat jaar aan de minister gepresenteerd waarna de laatste vragen over de studie in november/december zijn beantwoord. (onderzoek rapportage "Syntheserapport pompen Markermeerdijken HWBP2").

Harold van Waveren, specialist waterveiligheid van Rijkswaterstaat, heeft in het eerste college op 8 januari 2018 een toelichting gegeven op de resultaten van dit onderzoek. Het belangrijkste resultaat uit deze bevindingen luidt dat door de toepassing van pompen weliswaar een waterstanddaling van 60 cm haalbaar is, maar dat deze oplossing niet rendabel is. In de meest

positieve kostenraming blijkt nog altijd een fundamenteel kostenverschil met deze oplossingsrichting ten opzichte van maatregelen aan de dijk zelf. Een belangrijk punt dat hier onder andere in meespeelt is dat ondanks de plaatsing van de pompen en de kosten die dit met zich meebrengt, er volgens RWS nog altijd een forse dijkversterkingsopgave resteert (de waterkering is op veel plaatsen niet stabiel genoeg, en de waterstand heeft daar in beperkte mate invloed op). Daarnaast is het kostenbesparende en veiligheidseffect op andere tracés dan het traject Hoorn - Amsterdam te gering.

Op basis van deze conclusie heeft de minister in december 2015 besloten definitief af te zien van het plaatsen van pompen in de Houtribdijk en HHNK opdracht gegeven de versterkingsopgave van de Markermeerdijken verder ter hand te nemen.

### **Bewezen sterkte**

Bewezen sterkte is een methodiek die uitgaat van de reeds bewezen sterkte van de dijk tijdens maatgevende omstandigheden. Het onderzoek naar bewezen sterkte is uitgevoerd door het onafhankelijk onderzoeksinstituut Deltares.

Op basis van de resultaten van dit onderzoek heeft Deltares in samenwerking met Rijkswaterstaat vastgesteld in welke situaties bewezen sterkte van toepassing kan zijn. Hieruit zijn twee toepassingsvoorwaarden vastgesteld. Door het werken met deze toepassingsvoorwaarden wordt de kans op succes voor het goedkeuren van de dijk met bewezen sterkte het grootst geacht. De voorwaarden zijn:

- alleen afkeuring op het faalmechanisme 'binnenwaartse stabiliteit';
- voor de dijk ligt geen hoog voorland.

In theorie verkleint 'bewezen sterkte' de stabiliteitsopgave van de dijk. Echter, bij Durgerdam is de stabiliteitsopgave gebaseerd op ondiepe glijvlakken die – gegeven de schematisering – de veiligheid van het achterland niet in gevaar brengen. De diepe glijvlakken zijn voldoende stabiel. Dat maakt dat – onder voorwaarden – ervan uitgegaan mag worden dat bij het afschuiven van het binnentalud het restprofiel van de dijk voldoende breed blijft om water te blijven keren.

Naast de geometrie (voldoende ruimte; dat wil zeggen een voldoende brede dijk) is de belangrijkste voorwaarde dat onder maatgevende omstandigheden het overslagdebiet kleiner is dan 0,1 l/m/s. Omdat er geen stabiliteitsprobleem voor Durgerdam is, is het niet nodig om de methodiek voor bewezen sterkte toe te passen.

### **Alternatief dhr. Oosterhof: Volledig buitenom of 'maximaal buitenom'**

In de zomer van 2016 is er tijdens een bewonersbijeenkomst in Durgerdam voorgesteld te onderzoeken of een 'volledig buitenom'-variant een mogelijke oplossingsrichting is voor de waterveiligheidsopgave aan de Markermeerdijk in Durgerdam. In november 2016 heeft dhr. Oosterhof hierop een alternatief ingediend met daarin dezelfde principe oplossing, het afsluiten van het Buiten-IJ met daarin een kering voor het scheepvaartverkeer. Zie onderstaande tekeningen (ingediend exemplaar dhr. Oosterhof en eerdere variant Alliantie).



Figuur 35. Alternatief Volledig buitenom. Links de variant van dhr. Oosterhof, rechts de variant van de Alliantie Markermeerdijken

#### *Probleemstelling*

Het principe van maximaal buitenom gaat over het verhogen en versterken van de bestaande dijk van Polder IJdoorn. De geleidedam langs de Pampusgeul wordt in dit geval opgewaardeerd tot een waterkering waarbij beide trajecten middels een kering met elkaar worden verbonden. Deze oplossing is gericht op traject EA12, E13 en het traject richting de Oranjesluizen. Feitelijk wordt de primaire kering in deze variant verplaatst van de Durgerdammerdijk naar een nieuw aan te leggen kering verder van Durgerdam waarbij het Buiten-IJ wordt afgesloten van het IJ-meer (zie bovenstaande tekeningen).

#### *Aangedragen oplossing*

Leidende principe in dit aangedragen alternatief is dat golven volledig buiten het Buiten-IJ blijven en het waterpeil middels een nieuw aan te leggen kering kan worden beheerst. Door het gebruik van bestaande landschapscontouren, bestaande dijken en waterkerende elementen blijft het karakter van Durgerdam en het Vuurtoreneiland behouden.

#### *Impact van de oplossing*

Deze oplossing heeft de volgende punten tot gevolg in de ontwerpogave:

- Er zijn geen uitgebreide grove technisch gedreven aanpassingen in het landschap noodzakelijk;
- Het karakter van Durgerdam en het Vuurtoreneiland blijft behouden;
- De oplossing is zonder directe risico's in uitvoering voor bebouwing in de omgeving;
- Via water en land zijn strekdam en polderdijk goed bereikbaar tijdens uitvoering en beheer zonder overlast voor de omgeving;
- Ingrepen aan het tracé Durgerdam-west tot aan de Oranjesluizen blijven voor de toekomst bespaard.

#### *Kostenanalyse*

Voor de buitenom-variant heeft de Alliantie Markermeerdijken een globale kosteninschatting gemaakt voor het realiseren van de dijk en het plaatsen van een nieuwe kering die voldoet aan de norm van Rijkswaterstaat die rekening houdt met de scheepvaartklasse van de Pampusgeul. Afhankelijk van nadere specificatie liggen de kosten voor deze oplossing tussen de 150 en 200 miljoen euro.

#### *Analyse van de buitenom-variant, alternatief dhr. Oosterhof*

Het alternatief 'maximaal buitenom' leidt tot een ander waterkeringsysteem. Het beschreven positieve effect van dit alternatief voor Durgerdam (geen maatregelen) treedt eigenlijk alleen maar op als de huidige primaire waterkering wordt afgewaardeerd tot regionale kering en de kering buitenom de waterveiligheidsfunctie volledig overneemt. Dat heeft ook impact op de waterhuishouding, want de kering in de Pampusgeul moet gesloten worden als het waterpeil in het



Markermeer stijgt of als er een ONO-storm wordt verwacht. Verder zal de dijk in het nieuw aan te leggen tracé van begin Polder IJdoorn tot de aan te leggen kering buiten een forse afmeting moeten hebben (orde NAP+5 meter) om de overstromingsbestendigheid van Polder IJdoorn te garanderen. In plaats van de hoogte zou hierin ook de keuze gemaakt kunnen worden om de breedte in te gaan. Feit blijft dat er een fikse opgave voor Polder IJdoorn blijft bestaan. Daarnaast zullen de kosten voor een beweegbare kering in de Pampusgeul aanzienlijk zijn. Innovaties zijn wellicht mogelijk maar niet per definitie kostenbesparend. Ter illustratie: de kosten voor de Ramspolkering (Zwarte Water) waren €100 miljoen (prijspeil 2000).

Een ander aandachtspunt is de vraag of de sluitfrequentie van de beweegbare kering in de Pampusgeul niet zodanig hoog is dat de vaarweg Amsterdam-Lemmer te vaak wordt gestremd. Een optie zou dan zijn om de Oranjesluizen op te verwijderen en in plaats van een beweegbare kering in de Pampusgeul een nieuwe scheepvaartsluis te bouwen.

De variant 'maximaal buitenom' raakt ook de waterhuishouding. In de huidige situatie is het gehele Markermeer beschikbaar als boezemwater voor Amsterdam. Het verkleinen van deze boezem maakt de waterhuishouding in Amsterdam nog complexer dan het nu al is. De huidige waterhuishouding in Amsterdam kenmerkt zich door zeer smalle marges (1-2 decimeter). Het verkleinen van het boezemoppervlak betekent dat waterbeheerders in het gebied een extra opgave krijgen. Als de waterhuishouding op het Buiten-IJ (achter de nieuwe kering buitenom) ongewijzigd blijft en de beweegbare kering in de Pampusgeul alleen bij een verwachte ONO-storm wordt gesloten, dan is het nog maar de vraag of de huidige Durgerdammerdijk wel kan worden afgewaardeerd, en of deze variant daadwerkelijk betekent dat er geen veiligheidsopgave overblijft. Dit is afhankelijk van het beoogde beheerregime van de nieuwe kering.

Van dit plan is geen specifieke kostenraming gemaakt, maar op voorhand is te zeggen dat dit alternatief een veelomvattend en dus ook kostbaar plan is ten opzichte van de waterveiligheidsopgave van Durgerdam. De kostenanalyse zal dezelfde grootte orde hebben als de buitenom variant, omdat de variant dezelfde principe oplossing is. De vraag is dan verder ook nog welke meerwaarde deze oplossing meebrengt voor andere functies. Een dergelijk plan is alleen haalbaar als er meerdere maatschappelijke doelen mee worden gediend. Denk hierbij aan grootschalige gebiedsontwikkeling in het kader van de metropool regio Amsterdam of ontwikkelingen van soortgelijke grootte.

### **Variante dhr. Burger op de maximaal buitenom-variant**

In reactie op het concept van dit document heeft dhr. Burger een variant aangeleverd in reactie op de maximaal buitenom variant. De variant van dhr. Burger gaat uit van dezelfde principes als de maximaal buitenom van dhr. Oosterhof maar varieert in deze dat na versterking van de Hoeckelingsdam en de nieuwe dam tussen de vaargeul ten hoogte van het Vuurtoreneiland, IJburg fase II bij de versterking wordt betrokken.

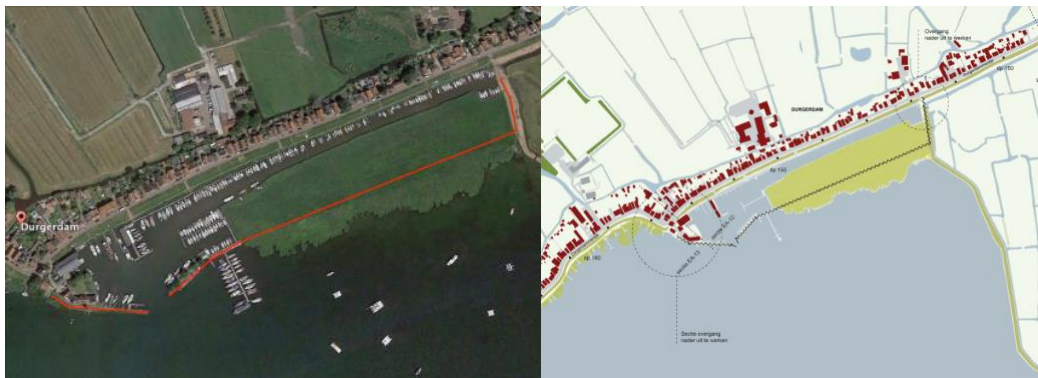




De leidende principes met betrekking tot deze variant is niet wezenlijk anders dan de in beschouwing genomen buitenomvariant van Dhr. Oosterhof. Het betrekken van IJburg II bij de versterkingsopgave sluit aan bij het herzien van de orde grote waarin de daadwerkelijke versterkingsopgave voor Durgerdam valt. De impact van het plan en de consequenties voor overige systemen in de omgeving zoals ter sprake komt in bovenstaande analyse is daarmee van dermate grote dat deze vooralsnog niet op lijkt te wegen tegen de daadwerkelijke veiligheidsopgave van de Durgerdammerdijk.

### **Alternatief dhr. Mulder: Damwand door het riet**

In juli 2016 heeft dhr. Mulder een alternatief ingediend bij de Alliantie Markermeerdijken. Dit was voordat bekend was dat de scope werd uitgebreid met het Westeind van Durgerdam. Het alternatief van dhr. Mulder focust op het oostelijk deel van de Durgerdammerdijk van de kapel tot aan Polder IJdoorn, zie onderstaande tekeningen (ingediend exemplaar dhr. Mulder en uitwerking Alliantie).



### *Probleemstelling*

De conditie van de dijk is onvoldoende om een maatgevende omstandigheid te keren waarbij de dijk kan verzwakken en bezwijken. Het doordrenken van de dijk door een lange periode van hoogwater is hiervan de voornaamste oorzaak. Het waterpeil stijgt langzaam gedurende een periode die langdurig (weken) aanhoudt. In tegenstelling tot de stormvloedkering waarbij adequate bescherming geboden moet worden, is de situatie voor een maatgevende situatie bij Durgerdam een langzamer proces. Dit proces kan vroegtijdig worden gesignaleerd door een aantal factoren als:

- Langdurige regenval in Nederland;
- Langdurige regenval in Duitsland en Frankrijk;
- Smeltwater uit de Alpen;

- Een weerssituatie die langdurige oostenwind met zich meebrengt waardoor het niveau van de Waddenzee te hoog is voor benodigde afvoer van het IJsselmeerwater.
- Etc.

#### *Analyse van de aangedragen oplossing*

De oplossing voor het gebied van de kapel tot aan Polder IJdoorn ligt in het afsluiten van de haven door het aanbrengen van een damwand door het bestaande rietland met een hoogte van 1.20m NAP (vergelijkbaar met een maatgevende waterstand bij een maatgevende storm). Ook de havendam wordt voorzien van een damwand. De haven wordt vervolgens afgesloten met een sluisdeur waarbij de waterstand vervolgens door middel van pompen gereguleerd kan worden op een hoogte van +0,5m NAP.

Door het afsluiten van de haven van het Buiten-IJ wordt voorkomen dat er tijdens maatgevende omstandigheden een waterpeil wordt bereikt waarbij de dijk kan verzadigen en bezwijken. Het exacte waterpeil in de haven kan worden bepaald na extra onderzoek naar wat de dijk kan verdragen zonder te bezwijken. De sluisdeur van om en nabij 27m breed kan worden opgeslagen bij de Oranjesluizen en indien een maatgevende situatie dreigt met een drijvende bok worden geplaatst tussen de twee damwandeinden in de havenmonding (waarmee overigens ook een nieuwe faalkans wordt geïntroduceerd).

Uit het resterende afgesloten wateroppervlak van 53.000m<sup>2</sup> kan met behulp van pompen het overtollig regenwater en golfoverslag worden afgevoerd.

#### *Impact van de oplossing*

Deze oplossing heeft de volgende punten tot gevolg in de ontwerpogave:

- De dijk blijft in de huidige staat behouden;
- Het Buiten-IJ blijft buiten beschouwing;
- De haven blijft bestaan in de huidige vorm;
- De damwand door het rietland is lager dan het riet en daarom niet zichtbaar (enkel wanneer het riet net gemaaid is);
- Afhankelijk van de locatie van de damwand blijft de rest van het rietland, slootzijde en buitenzijde, intact.
- Het gedeelte van de haven van Zeilvereniging Het Y zal aan de buitenzijde enigszins worden aangetast;
- De monumentale werf naast de kapel heeft aandacht nodig. Afhankelijk van de exacte hoogte moet bepaald worden of dit een probleem is.

#### *Analyse van damwand door het riet*

Het alternatief is een maatwerkoplossing alleen voor tracé deel EA12B (bij de haven). Vanuit technisch perspectief is het alternatief mogelijk onder de voorwaarde dat ook het restprofiel, de macrostabiliteit, voldoet. Bij de gestelde hoogte van de damwand en de sluisdeur van 1.20m boven NAP vindt er nog altijd een significante golfoverslag plaats. De gestelde pompcapaciteit zou daarom hoger moeten liggen dan uitgewerkt in het ingediende voorstel of de damwand zou nog wat hoger moeten worden aangebracht. Het hebben van een sluisdeur op afstand lijkt vanuit het beheerdersperspectief geen wenselijke oplossing. Het zou de voorkeur hebben om een dergelijke deur in te bouwen. Afgezet tegen de veiligheidsopgave lijkt dit alternatief relatief omvangrijk. De golven in dit gedeelte van Durgerdam zijn namelijk al relatief laag (0,4m), waardoor de dijk met relatief overzichtelijke maatregelen (verhoging huidige tuimelkade, berm, flauwer of ruwer talud) voldoende veilig gemaakt kan worden. Ook zouden steigers bij wijze van drijvende golfbrekers kunnen worden toegepast.

Bovendien spelen bij het damwand-alternatief nog issues met betrekking tot duurzaamheid (afhankelijk van gekozen damwandtype) en natuurwetgeving (afhankelijk van plaats van damwand).

#### *Kosten*

De expert inschatting van deze variant is dat de kosten veel hoger zullen zijn dan de kosten voor het aanpassen van de waterkering in Durgerdam.

### **Alternatief dhr. Porsius: Afvangen van golven op het Buiten-IJ**

Het alternatief dat Dhr. Porsius in juni 2017 heeft ingediend gaat uit van het principe dat het probleem wordt aangepakt bij de bron. Het alternatief gaat uit van het principe dat door de golven op te vangen voordat deze het Buiten-IJ in komen, deze geen bedreiging vormen voor de dijk. Zie onderstaande tekeningen (ingediend exemplaar dhr. Porsius en uitwerking Alliantie).



#### *Probleemstelling*

De dijk in Durgerdam is niet veilig genoeg omdat hij niet hoog genoeg is om de golven bij zware storm te kunnen keren. In eerdere varianten is onderzocht hoe deze golven kunnen worden gebroken om impact op de dijk te verlichten. De golfbrekervariant is hier het uitgewerkte voorbeeld van. De vraag is alleen waarom de golven zo kort voor de dijk moeten worden gebroken en of deze niet al in een voorstadium kunnen worden beperkt, door deze bijvoorbeeld te breken voordat ze het Buiten-IJ binnenkomen.

#### *Beschrijving van de aangedragen oplossing*

De oplossing die dhr. Porsius heeft aangedragen zorgt ervoor dat de golven worden afgevangen voordat deze het Buiten-IJ binnenkomen. Door de bestaande strekdam, evenwijdig aan de Pampusgeul, te verlengen kan worden voorkomen dat bij een zuidoosten wind golfslag naar binnen wordt gestuwd. Hiermee is een eerste probleem opgelost, de opgestuwde golfslag vanuit het zuidoosten. Vervolgens kan er een krib worden aangelegd ten zuiden van het vuurtoreneiland. Een krib tussen de gele wrak ton en de vaargeul duwt de golven bij een maatgevende oostenwind naar de overzijde. Als er vervolgens aan de overzijde vanaf de strekdam een of meer kribben worden aangelegd worden de golven hierop stukgeslagen. Het verlengen van de strekdam en het aanleggen van de verschillende kribben kan uiteraard gebeuren zonder hierbij de scheepvaart te hinderen. Op deze manier wordt de golfhoogte beperkt zonder hiervoor in de directe nabijheid van Durgerdam aanpassingen te verrichten.

#### *Impact van de oplossing*

Door het breken van golven op voorhand, blijft de situatie in Durgerdam in zijn huidige vorm behouden. Verderop nabij de strekdam worden kribben aangelegd. Deze moeten op een dermate locatie worden aangebracht dat ze de scheepvaart niet hinderen. Daarnaast zullen deze nauwelijks zichtbaar zijn vanuit Durgerdam gezien de afstand tot de daadwerkelijke dijk.

### *Analyse van de oplossing*

Er is een beknopte analyse uitgevoerd van het aangedragen alternatief van toepassing op dijk tracé EA12B en EA13. Het alternatief is technisch te realiseren met als voorwaarde dat het restprofiel volgens de restbreedte benadering (de macro instabiliteit) geaccepteerd wordt.

De resultaten van de eerder door de alliantie uitgevoerde geavanceerde golfberekeningen laten zien dat voor de haven de golfdoordringing bij maatgevende omstandigheden over Polder IJdoorn dominant is. Daarmee blijft ondanks deze maatregel de veiligheidsopgave voor tracé EA12 bestaan.

Voor Durgerdam West (EA13) zou het alternatief mogelijk effect kunnen hebben. Daarbij moet wel rekening worden gehouden met het gegeven dat er ondanks het opvangen van golven buitenaf nog altijd golven tussen de golfbreker en de voet van de dijk (klein beetje tussen de golfbrekers door en vervolgens weer opgewekt door de wind) zullen groeien tot aan de voet van de dijk. Al bij relatief kleine golfhoogtes (vanaf 0,4 meter) blijven er nog altijd maatregelen aan de dijk noodzakelijk om aan de veiligheidsopgave te voldoen. Daarmee lijkt dit alternatief niet erg doelmatig: de maatregelen aan de dijk blijven nodig.

### *Kosten*

Omdat dit alternatief om technische redenen niet voldoet zijn de kosten van dit alternatief niet bepalend voor de afweging. Om hierboven genoemde redenen is besloten geen kostenraming op kentallen te maken.

## **7 Vervolgstappen**

Op basis van de "1-tekst notitie" met uitgangspunten voor het dijkontwerp (zie de bijlage) zullen verschillende inpassingsontwerpen worden gemaakt. Vervolgens zal een 'vergunningontwerp' worden gemaakt op basis waarvan een vergunning zal worden aangevraagd. Het definitief ontwerp zal gemaakt worden na het verkrijgen van de vergunning.