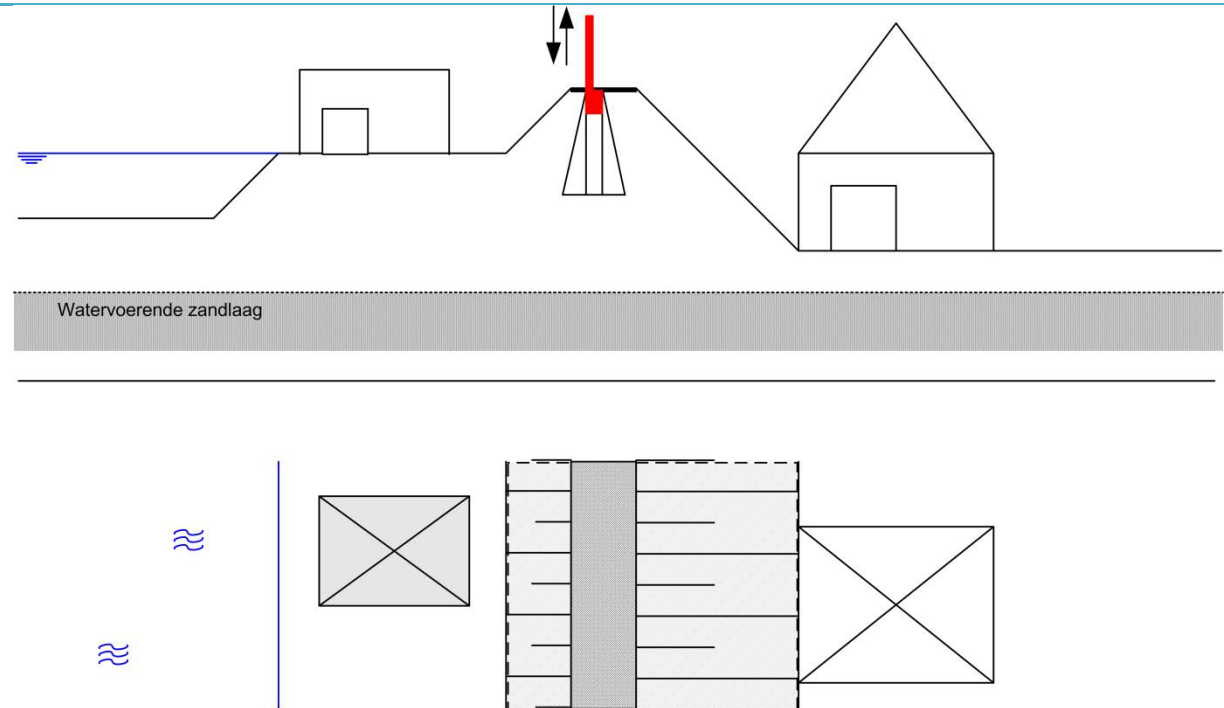


## Beweegbare waterkeringen

### Beschrijving oplossing

Om voldoende kerende hoogte te realiseren, is het een mogelijkheid om beweegbare, tijdelijke, niet-mobiele waterkeringen te realiseren. Deze waterkeringen zitten ingeklapt/opgevouwen in de kruin van de dijk en kunnen opgezet worden of komen uit zichzelf omhoog tijdens hoogwater. Een aantal voorbeelden van dit type waterkeringen zijn eXtra, vlotterkering, self closing flood barrier (SCFB), Dutchdam, etc.



### Veiligheid

- Doordat de waterkering een tijdelijk karakter krijgt, ontstaat een extra onzekerheid in het functioneren van de kering, bijvoorbeeld door falen van bewegende onderdelen of menselijke fouten (indien van toepassing).
- Alleen de hoogteopgave wordt met een beweegbare kering opgelost, de stabiliteitsopgave niet.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing rondom de dijk kan behouden blijven. Er is alleen ruimte in de kruin van de dijk benodigd.

### Uitvoerbaarheid

- Overlast op de omgeving is beperkt (uitvoering is relatief snel en materieel is licht).

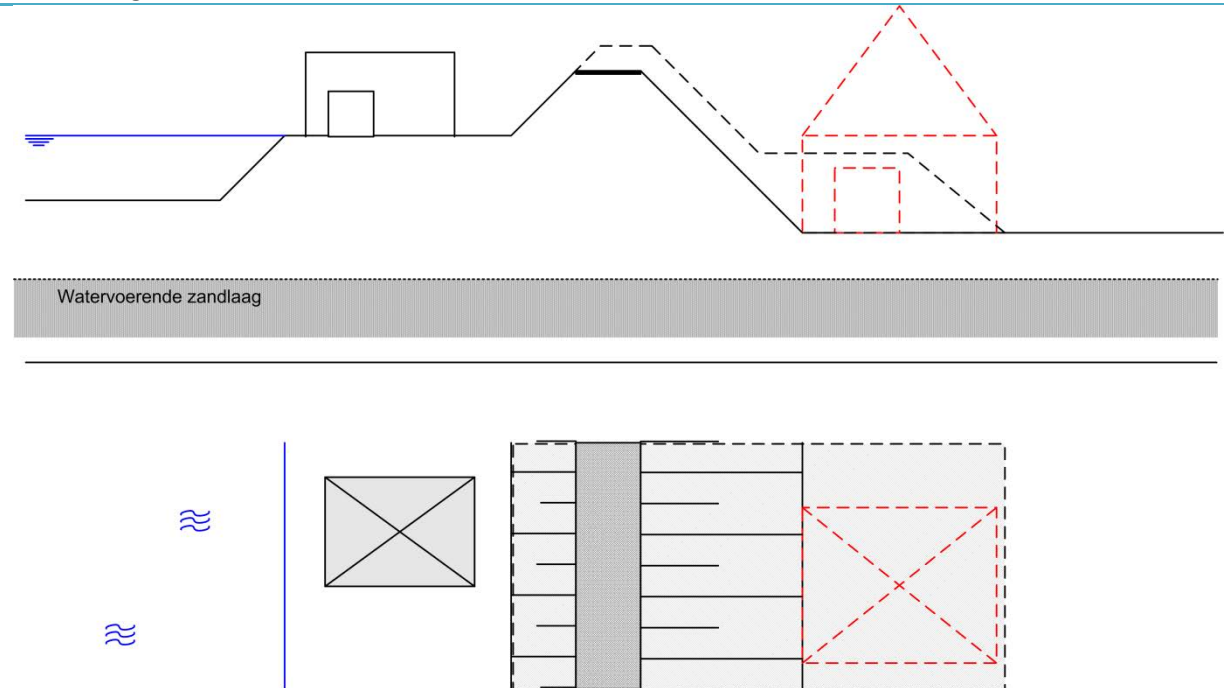
### LCC

- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige verhogingen aan de dijk.
- Achterstallig onderhoud kan leiden tot falen waterkering
- Levensduur is onbekend.

## Binnenwaartse grondoplossing

### Beschrijving oplossing

Een traditionele oplossing voor het versterken van een dijk, is het uitbreiden van het grondlichaam. Dit houdt in dat er ruimte benodigd is, in dit geval wordt deze ruimte aan de binnenzijde van de dijk gezocht. Aangezien er hier langs een groot deel van het dijktraject bebouwing aanwezig is in of achter de dijk, zal deze bebouwing plaats moeten maken indien voor deze oplossing wordt gekozen. Deze oplossing wordt veelvuldig gekozen bij dijkversterkingen, met name in gebieden zonder bebouwing.



### Veiligheid

- Een dijkversterking in grond is een bewezen en veilige oplossing, waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing dient plaats te maken voor de dijk. Dit houdt in dat huizen dienen te worden opgekocht of (indien mogelijk) verplaatst/opgevijseld. Hierdoor is de impact op de omgeving zeer groot.

### Uitvoerbaarheid

- Indien bebouwing behouden dient te worden, wordt de uitvoering complex (opvijselen / verplaatsen bebouwing).
- Indien bebouwing wordt verwijderd, is de uitvoering relatief eenvoudig.
- Invloed van zettingen op de omgeving en uitvoeringsstabiliteit is een belangrijke factor.

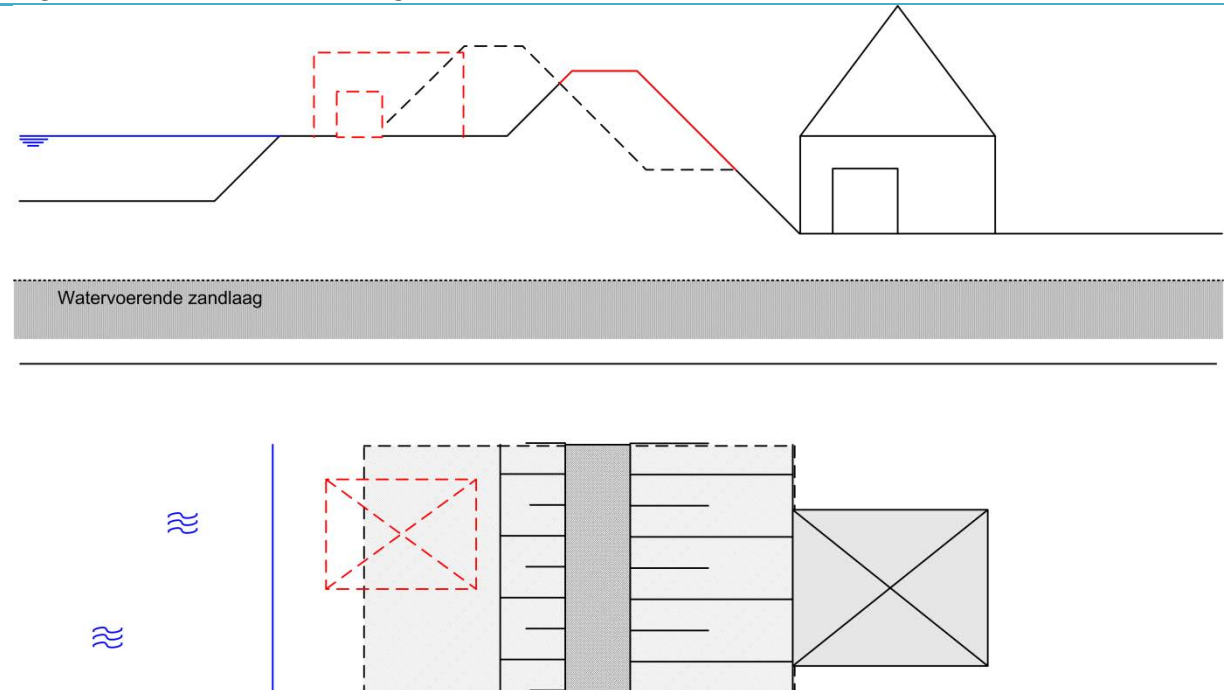
### LCC

- Er kan toekomstgericht worden ontworpen, zodat de dijk uitbreidbaar is.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk
- Voor de levensduur van een dijk in grond wordt vaak maximaal 50 jaar aangehouden

## Buitenwaartse versterking in grond

### Beschrijving oplossing

Een traditionele oplossing voor het versterken van een dijk, is het uitbreiden van het grondlichaam. Dit houdt in dat er ruimte benodigd is, in dit geval wordt deze ruimte aan de buitenzijde van de dijk gezocht. Aangezien er hier langs een groot deel van het dijktraject bebouwing aanwezig is aan weerszijden van de dijk, zal de buitenwaartse bebouwing plaats moeten maken indien voor deze oplossing wordt gekozen. Deze oplossing wordt veelvuldig gekozen bij dijkversterkingen, met name in gebieden waar binnenwaarts geen ruimte is maar buitenwaarts wel.



### Veiligheid

- Een dijkversterking in grond is een bewezen en veilige oplossing, waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing dient plaats te maken voor de dijk. Dit houdt in dat huizen dienen te worden opgekocht of (indien mogelijk) verplaatst/opgevijseld. Hierdoor is de impact op de omgeving zeer groot.

### Uitvoerbaarheid

- Indien bebouwing behouden dient te worden, wordt de uitvoering complex (opvijzelen / verplaatsen bebouwing).
- Indien bebouwing wordt verwijderd, is de uitvoering relatief eenvoudig.
- Invloed van zettingen op de omgeving en uitvoeringsstabiliteit is een belangrijke factor.

### LCC

- Er kan toekomstgericht worden ontworpen, zodat de dijk uitbreidbaar is.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk.
- Voor de levensduur van een dijk in grond wordt vaak maximaal 50 jaar aangehouden.

## Maatregelen in het achterland

### Beschrijving oplossing

Een maatregel in het achterland kan bijdragen aan het voorkomen of beperken van schade als gevolg van overstromingen. Door slim gebruik te maken van de inrichting van het achterland door bijvoorbeeld het aanleggen van dijken of bergingsgebieden kunnen de gevolgen van eventuele overstromingen worden beperkt. Als voorbeeld waarmee de kansrijkheid van maatregelen in het achterland kan worden getest zijn de effecten van een dijk aan de oostzijde van Krimpen uitgewerkt. De effecten worden inzichtelijk gemaakt door middel van twee overstromingssimulaties. De eerste overstromingssimulatie betreft de referentie situatie met een dijkdoorbraak ten noordoosten van Krimpen (**Fig. 1**, breslocatie 3 met waterstandsverlooppijn 3 uit het rapport 'HydroLogic (2016). P805 Overstromingsanalyse Hollandsche IJssel D04'). De overstroming leidt volgens de modelstudie tot ca. 190 slachtoffers, 61 100 getroffen en €1 610 miljoen schade. Ruimtelijk gezien is de grootste schadepost het stedelijke gebied van Krimpen aan de IJssel. De N210 aan de zuidzijde van Krimpen aan de IJssel kan in samenwerking met een dijk aan de oostzijde van Krimpen (zie rode lijn in **Fig. 2** voor de locatie van de dijk) het stedelijke gebied van Krimpen beschermen tijdens overstromingen. De benodigde dijkhoogte is -0.5 m + NAP. In **Fig. 2** is het overstromingsbeeld gegeven na een dijkdoorbraak, rekening houdend met de dijk aan de oostzijde van Krimpen aan de IJssel. Met de dijk leidt een overstroming tot ca. 120 slachtoffers, 35 900 getroffen en € 1 079 miljoen schade.

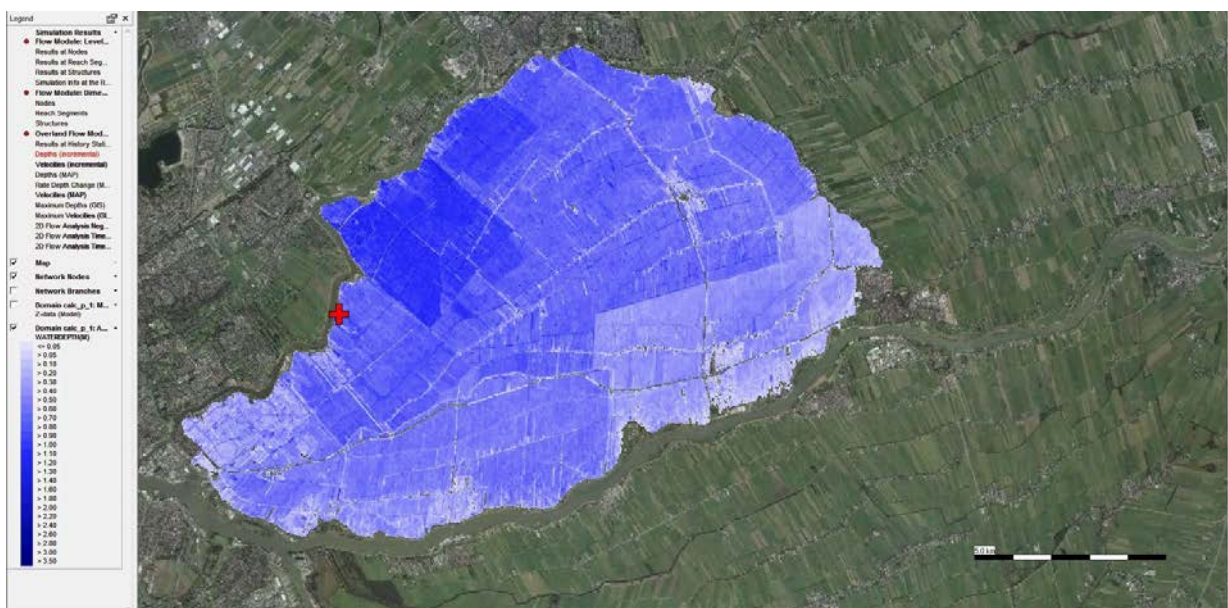


Fig. 1. Overstromingsanalyse zonder maatregelen in het achterland.



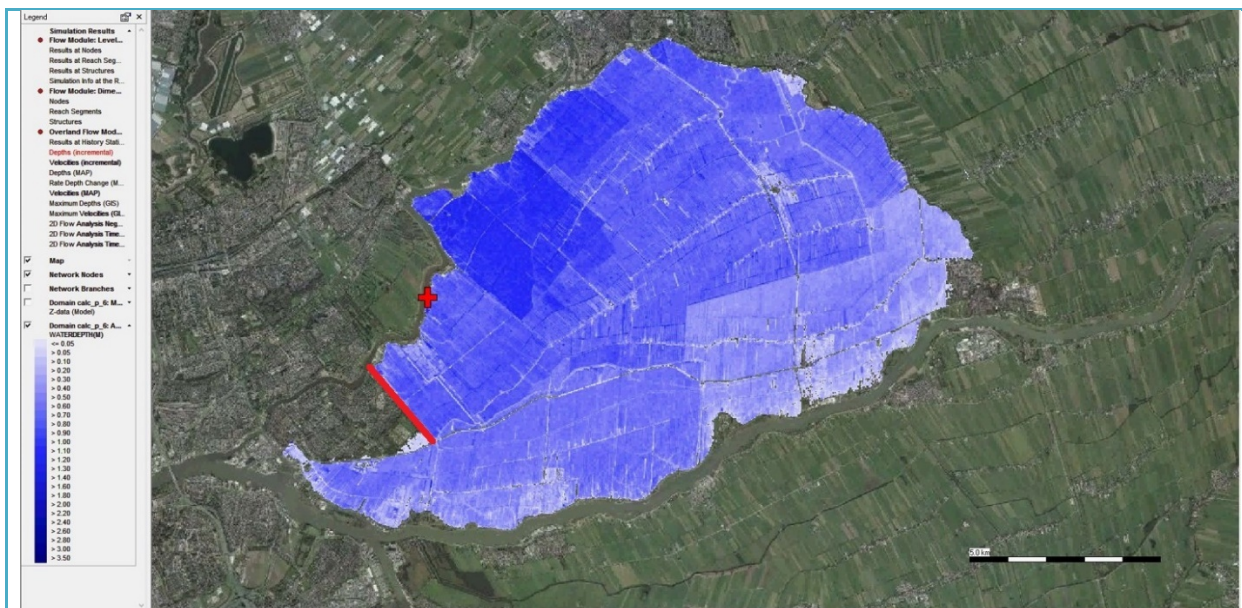


Fig. 2. Overstromingsanalyse met een maatregel in het achterland. De maatregel betreft het plaatsen van een dijk met een hoogte van  $-0.5 \text{ m} + \text{NAP}$ . De dijk is met een rode lijn weergegeven.

### Veiligheid

- De maatregel draagt bij aan het beperken van gevolgschade bij een eventueel falen van de Hollandsche IJssel dijk en draagt daarmee bij aan de veiligheid. De maatregel heeft geen effect op de faalkans van de waterkering.
- Of de verhoging van veiligheid voldoende is, hoe dit doorwerkt in de normering en aansluit op de Wetgeving, dient nader onderzocht te worden.

### Inpasbaarheid

- Mogelijk is een compartimentering beter inpasbaar dan een versterking van de bestaande waterkering. Naar verwachting zal een compartimentering echter ook leiden tot ruimtelijke knelpunten aangezien het achterland niet is ingericht of bestemd als waterkering.

### Uitvoerbaarheid

- Mogelijk geeft het achterland meer ruimte en betere uitvoerbaarheid dan een versterking van de bestaande waterkering.

### LCC

- De levensduur en beheer en onderhoud is vergelijkbaar met een groene dijk.

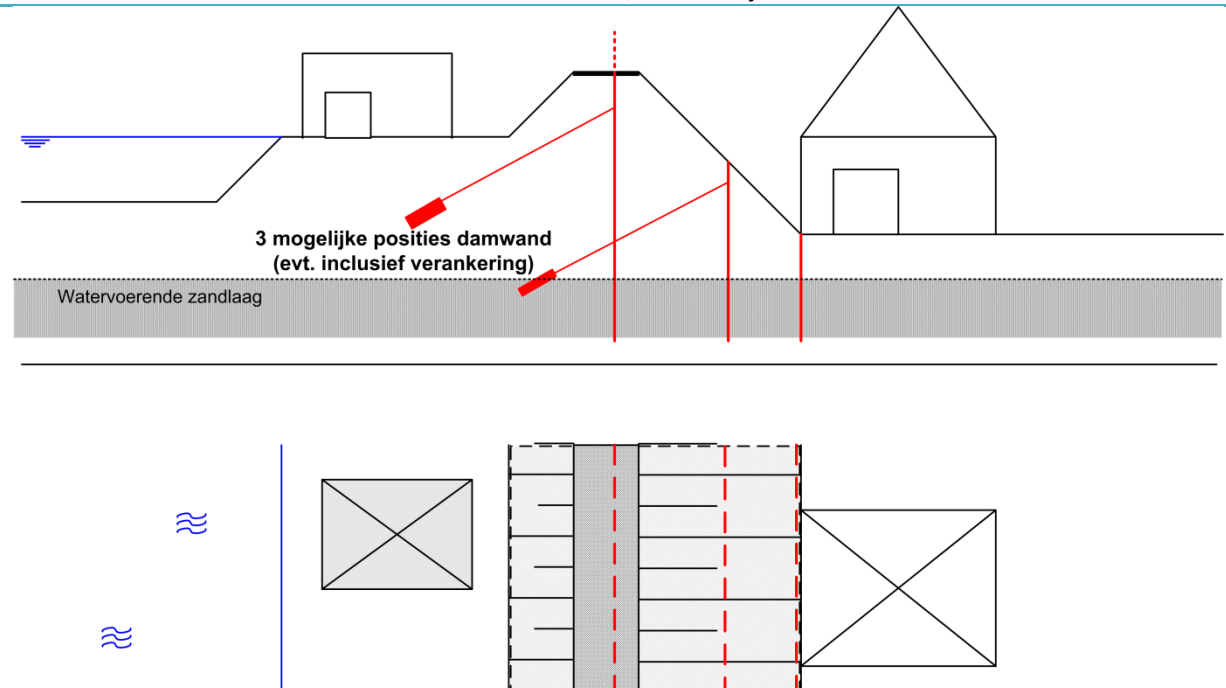
## Damwand (type I of type II)

### Beschrijving oplossing

Indien er weinig ruimte beschikbaar, wordt er vaak voor een constructieve oplossing gekozen. Een damwand kan worden aangebracht

- als constructief scherm: in de kruin, teen of het talud (als bijdrage in de sterkte)
- of als vervangende waterkering: in de kruin.

De damwand dient al dan niet verankerd te worden, afhankelijk van de stabiliteit.



### Veiligheid

- Een dijkversterking door middel van een damwand is een bewezen en veilige oplossing, waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- Indien het hoogtetekort afwezig of beperkt is (max 10 à 20 cm) dan is een damwand goed inpasbaar in de kruin.
- Indien het talud/de teen vrij is van objecten dan is de damwand goed inpasbaar in het talud/de teen (ten behoeve van de stabiliteit).

### Uitvoerbaarheid

- Het plaatsen van een damwand brengt overlast met zich mee voor de omgeving: het benodigde materieel is relatief zwaar en de uitvoering neemt tijd in beslag.
- Invloed van trillingen op de bebouwing: risico op schade. Damwanden kunnen ook 'trillingsvrij' worden aangebracht (drukken), dit brengt kosten met zich mee en beperkte toepasbaarheid.

### LCC

- De damwand kan weliswaar toekomstbestendig (voldoende sterk) worden ontworpen, maar dit kan slechts in beperkte mate, in verband met de inpasbaarheid van een ophoging.
- Geen tot weinig onderhoud nodig.
- Voor de levensduur van een damwand wordt vaak 100 jaar aangehouden.
- Damwanden zijn vaak van staal: stalen damwanden zijn relatief belastend voor het milieu

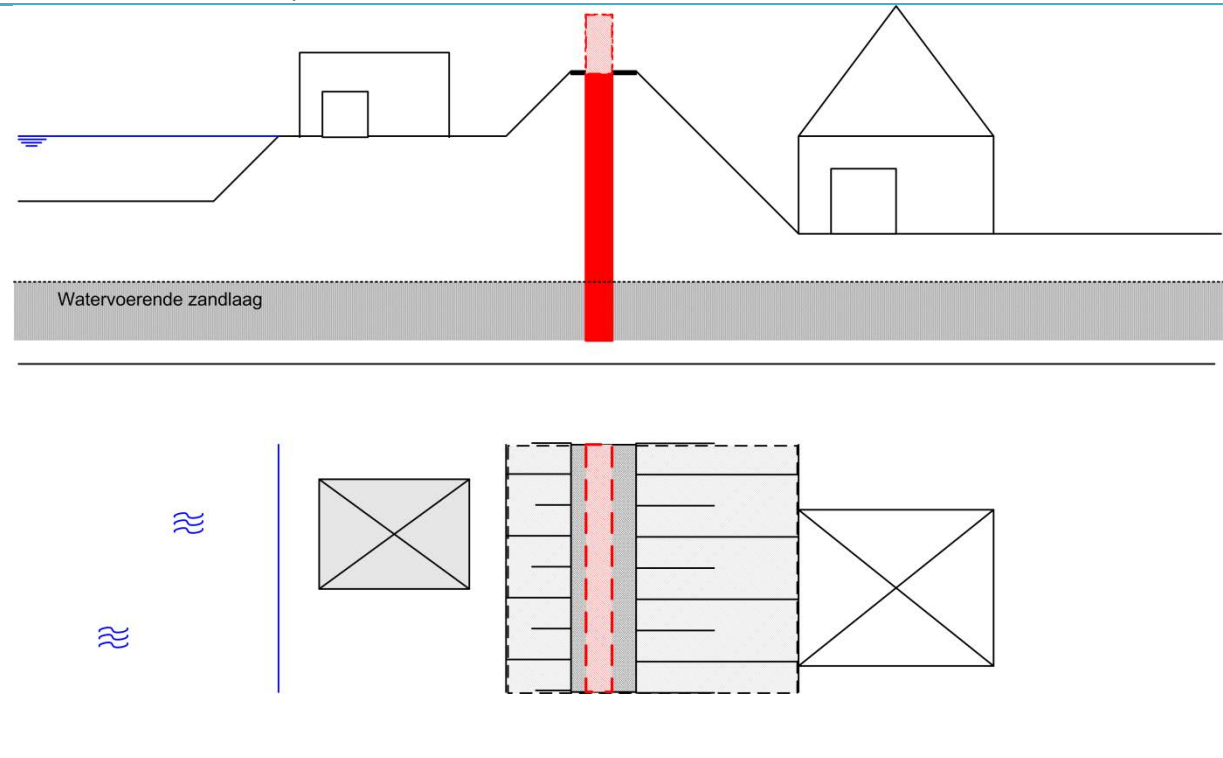
(CO2-footprint)

-

## Diepwand (type I of type II)

### Beschrijving oplossing

Indien er weinig ruimte beschikbaar is voor de versterking van een dijk, wordt er vaak voor een constructieve oplossing gekozen. Een diepwand is een gewapend betonnen wand die kan worden aangebracht in de kruin (als vervangende waterkering: sterkte en hoogte). Een andere optie is om de diepwand aan te brengen in het talud (als bijdrage in de sterkte o.a. tegen macrostabiliteit). Een alternatief voor een diepwand is een kistdam.



### Veiligheid

- Een dijkversterking door middel van een diepwand is een bewezen en veilige oplossing waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- Indien het hoogtetekort afwezig of beperkt is (max 10 à 20 cm) dan is een diepwand goed inpasbaar voor hoogte en stabiliteit. Wanneer in de kruin of in het talud aangebracht dan kan de diepwand zonder problemen ingepast worden in de omgeving.

### Uitvoerbaarheid

- Het plaatsen van een diepwand kan eenvoudig uitgevoerd worden. Desalniettemin worden de diepwanden met relatief zwaar materieel aangebracht vanaf de kruin of het binnentalud.
- Geen trillingshinder tijdens uitvoering.

### LCC

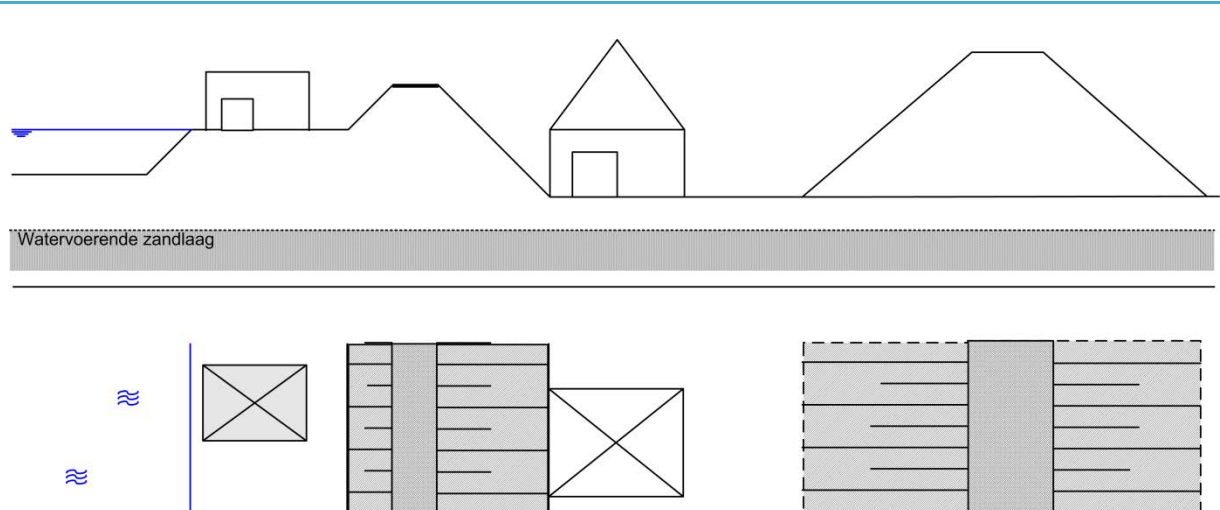
- De diepwand kan toekomstbestendig worden ontworpen, zodat de dijk verder kan worden opgehoogd.
- Vrijwel geen beheer en onderhoud noodzakelijk.
- Voor de levensduur van een diepwand wordt vaak 100 jaar aangehouden.



## Dijkverlegging binnenom

### Beschrijving oplossing

Een oplossing voor het versterken van een dijk, is het verleggen van het grondlichaam naar het achterland. De reden hiervoor is het feit dat in of achter de dijk vaak bebouwing aanwezig is en daarom een binnenwaartse versterking in grond niet mogelijk of wenselijk is. Het houdt in dat er ruimte benodigd is, in dit geval wordt dit in het achterland van de dijk gezocht. Aangezien langs een groot deel van het dijktraject bebouwing aanwezig is in of achter de dijk, zal de dijk achter deze bebouwing langs moeten gaan.



### Veiligheid

- Een dijkverlegging in grond is een bewezen en veilige oplossing, waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing direct achter de dijk hoeft niet plaats te maken voor de nieuwe dijk. Er kan worden gekozen de dijk te verleggen naar het achterland waar ruimte is. Desalniettemin is de impact op de omgeving groot, aangezien er een complete dijk opnieuw opgebouwd dient te worden (groot ruimtebeslag) en aangezien er bijna overal langs het dijktraject veel bebouwing aanwezig is.

### Uitvoerbaarheid

- Indien bebouwing niet aanwezig is of wordt verwijderd, is de uitvoering relatief eenvoudig.
- Invloed van zettingen nieuw dijkvak op de omgeving en uitvoeringsstabiliteit.

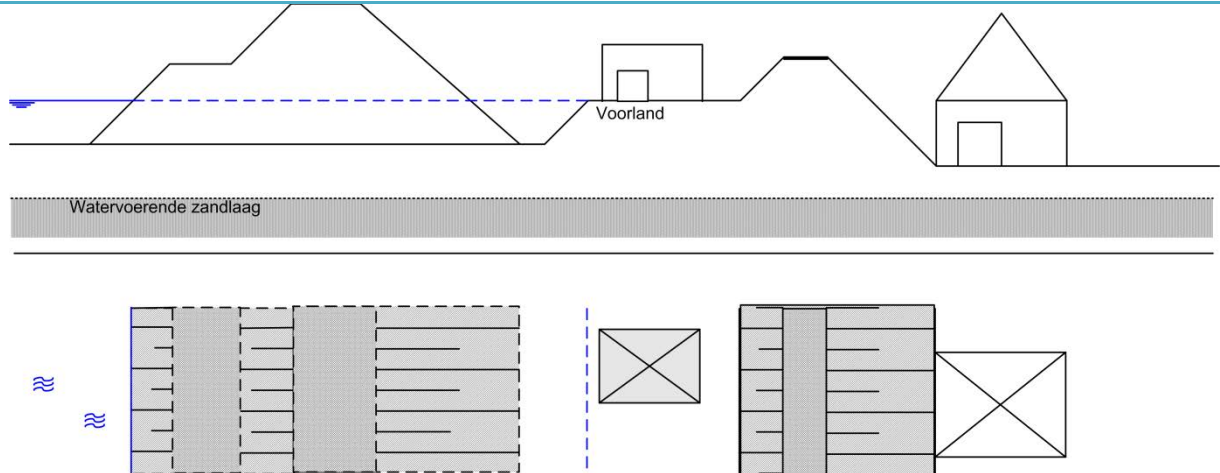
### LCC

- Er kan er goed toekomstgericht worden ontworpen, zodat de dijk uitbreidbaar is.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk
- Voor de levensduur van een dijk in grond wordt vaak maximaal 50 jaar aangehouden

## Dijkverlegging buitenom

### Beschrijving oplossing

Een oplossing voor het versterken van een dijk, is het verleggen van het grondlichaam naar het voorland. De reden hiervoor kan zijn dat direct voor de dijk bebouwing aanwezig is en daarom een buitenwaartse versterking niet mogelijk is. Het houdt in dat er ruimte benodigd is, in dit geval wordt dit in het voorland van de dijk gezocht.



### Veiligheid

- Een dijkverlegging in grond is een bewezen en veilige oplossing, waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing direct voor de dijk hoeft niet plaats te maken voor de nieuwe dijk. Er kan worden gekozen de dijk te verleggen naar het voorland (mits er ruimte is). Desalniettemin is de impact op de omgeving groot, aangezien er een complete dijk opnieuw opgebouwd dient te worden (groot ruimtebeslag) en aangezien er bijna overal langs het dijktraject veel bebouwing aanwezig is.
- Oplossing kan ook worden gevonden in een constructie op de waterlijn

### Uitvoerbaarheid

- Indien bebouwing behouden dient te worden, wordt de uitvoering complex (opvijzelen / verplaatsen bebouwing).
- Indien bebouwing niet aanwezig is of wordt verwijderd, is de uitvoering relatief eenvoudig.
- Invloed van zettingen nieuw dijkvak op de omgeving en uitvoeringsstabiliteit. Voorland bestaat mogelijk uit slappe grond.

### LCC

- Er kan er goed toekomstgericht worden ontworpen, zodat de dijk uitbreidbaar is.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk
- Voor de levensduur van een dijk in grond wordt vaak maximaal 50 jaar aangehouden

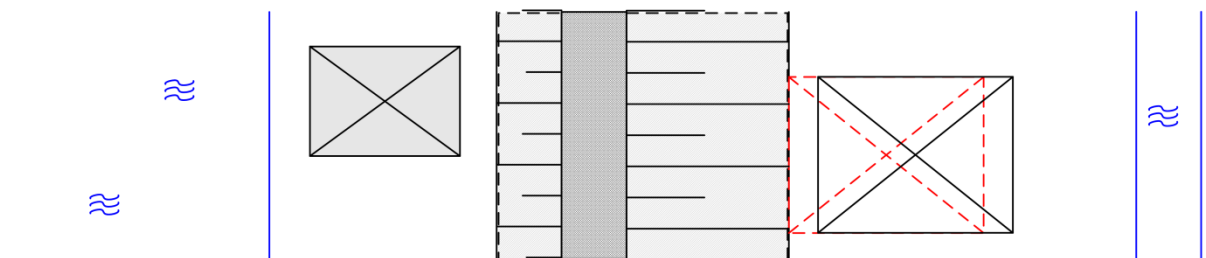
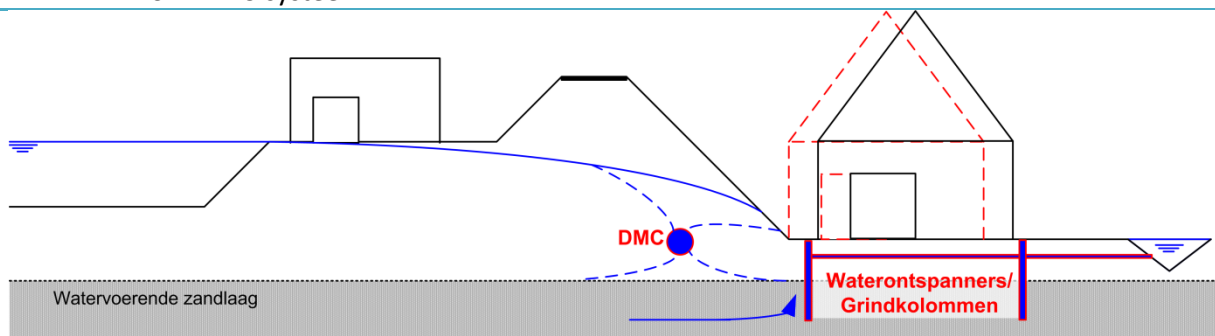
## Drainagetechnieken

### Beschrijving oplossing

Een hoge stijghoogte in het watervoerende pakket werkt negatief op de stabiliteit van de waterkering (macro en piping) indien er sprake is van opdrukken of opdrijven. Een verlaging van de stijghoogte ter plaatse van de binnenteen of binnenberm kan daarom een bijdrage leveren aan de stabiliteit van de waterkering. Verder kan een hoge waterstand in de dijk (freatisch vlak) voor instabiliteit zorgen (zowel micro als macro). Een verlaging van de waterspanning in de dijk (freatisch vlak) kan zorgen voor verhoging van de stabiliteit van de dijk.

Het verlagen van de stijghoogte en het beheersen van waterspanningen kan op de volgende manieren:

- Onttrekken van water uit het watervoerende pakket, bijvoorbeeld door verticale drainage aan de binnenzijde van de dijk:
  - o Waterontspanners
  - o Grindkolommen
- Monitoren en beheersen waterspanning (freatisch vlak) in de waterkering en onttrekken van water uit het watervoerende pakket onder de dijk:
  - o DMC-systeem



### Veiligheid

- Drainagetechnieken kunnen een bijdrage leveren aan de macrostabiliteit (en tegen piping). De hoogte opgave wordt hiermee niet opgelost.
- Achterstallig onderhoud kan een nadelige effect hebben op de waterveiligheid.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing rondom de dijk kan naar waarschijnlijkheid behouden blijven. Er is weinig aanvullende ruimte benodigd.

### Uitvoerbaarheid

- Overlast op de omgeving is beperkt, enige hinder tijdens uitvoering.
- Op plaatsen waar bebouwing direct in of aan de dijk ligt kan de impact van de aanleg groter zijn.

### LCC

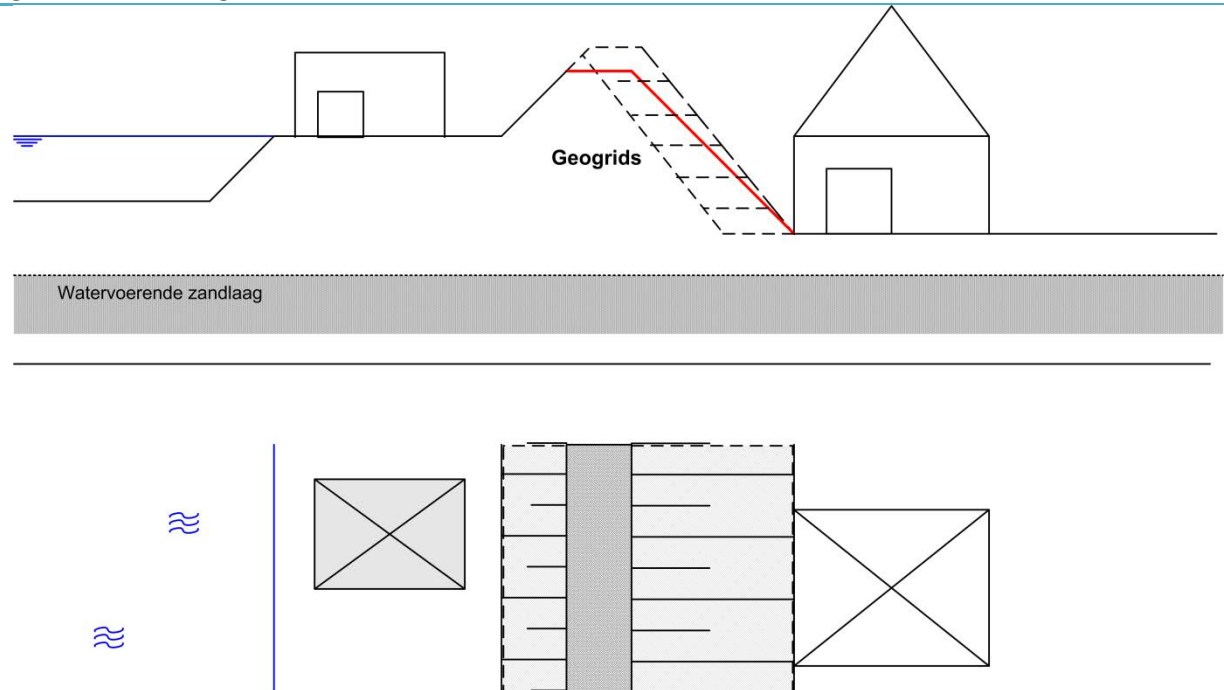
- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige dijkverhoging
- Levensduur is onbekend.

- Achterstallig onderhoud kan een nadelige effect hebben op de waterveiligheid.

## Geogrids

### Beschrijving oplossing

Een dijk kan versterkt worden met behulp van geogrids (geotextiel elementen gevuld met grond). Door deze elementen kan het binnentalud steiler aangelegd worden doordat de grond meer draagkrachtig wordt. Dit houdt in dat er vrijwel geen extra ruimte benodigd is rondom de dijk, maar dat toch aan de stabiliteits- en hoogteopgave kan worden voldaan. De oplossing wordt veelvuldig gebruikt in de wegenbouw.



### Veiligheid

- Bij geogrids draagt het geotextiel bij aan de sterkte, in welke mate is echter niet eenduidig vastgelegd in richtlijnen. Geogrids worden in de wegenbouw veelvuldig toegepast, in de waterbouw wordt de oplossing ook gezien. Nog geen bewezen oplossing voor waterkeringen.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing die zich niet in het talud bevindt hoeft geen plaats te maken voor de dijkversterking. Hierdoor is de impact op de omgeving beperkt. Wel moet het talud van de dijk op de schop.

### Uitvoerbaarheid

- Een dijk met geogrids elementen van geotextiel is eenvoudig uit te voeren. Objecten in het dijk talud kunnen een belemmering vormen.

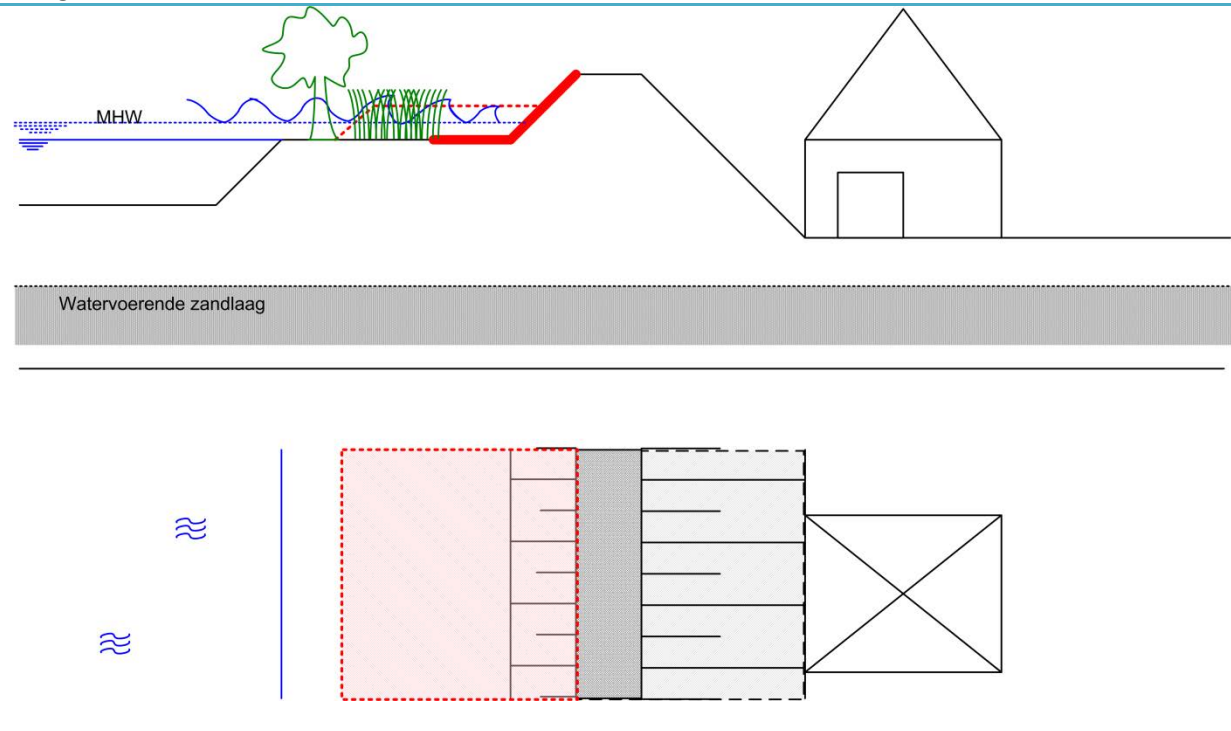
### LCC

- Geogrids zijn niet uitbreidbaar en hiermee niet toekomstgericht.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk.
- Voor de levensduur van een geotextiel wordt 20-100 jaar aangehouden. Met de keuze voor een bepaald geotextiel kan de dijk dus duurzaam ontworpen worden (dijk levensduur meestal 50 jaar).
- Inspectie van het geotextiel is niet zonder meer mogelijk

## Golfremmende maatregel

### Beschrijving oplossing

Indien er een hoogtetekort is voor de waterkering, kan er gekozen worden voor golfremmende maatregelen aan de buitenzijde van de waterkering. Door deze maatregel worden de golven die de waterkering belasten geremd. Daardoor zal de golfoploop en overslag minder zijn en zal de waterkering niet of minder drastisch verhoogd hoeven worden. Voor golfremmende maatregelen kan gedacht worden aan een verruwing van het talud d.m.v. bekleding van (stenen of betonnen) elementen (bijvoorbeeld hillblocks, basaltblokken, breuksteen, etc), door het plaatsen van vegetatie (bijvoorbeeld riet, gras, struiken of bomen) of het creëren van een buitenberm. Een berm zal het meest effectief zijn als de hoogte ervan ongeveer overeenkomt met de maatgevende hoogwaterstand.



### Veiligheid

- Een dijkversterking door middel van een golfremmende maatregel op het talud (in de vorm van een bekleding) is een bewezen en veilige oplossing waarbij alleen de hoogteopgave, mits niet te groot, kan worden opgelost. De stabiliteitsopgave voor de dijk wordt hiermee niet opgelost
- Golfremmende maatregelen met vegetatie brengen onzekerheid met zich mee en zijn minder effectief dan verruwing van het talud met elementen of een buitenberm.

### Inpasbaarheid

- Indien het buitentalud vrij is, of als er ruimte is op het voorland, dan is een golfremmende maatregel goed inpasbaar. Vegetatie heeft meer ruimte.

### Uitvoerbaarheid

- Het plaatsen van een golfremmende maatregel kan eenvoudig uitgevoerd worden door het plaatsen van een (stenen) bekleding. Het planten van vegetatie is onzeker en is afhankelijk van factoren zoals groei en sterfte.
- De buitenzijde van de waterkering, voorland of buitentalud, moet onder handen genomen worden. Verder is de impact op de omgeving klein.

### LCC

- Een golfremmende maatregel levert een beperkte bijdrage aan een reductie van het



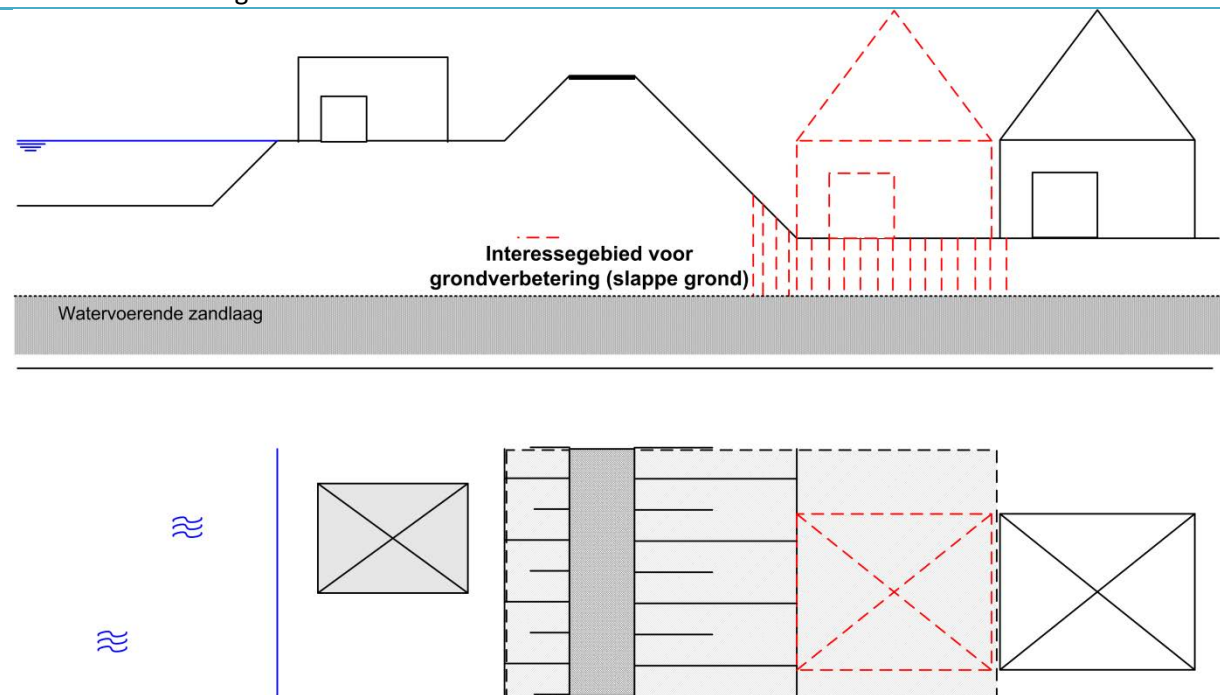
hoogtetekort en is hierdoor niet toekomstbestendig; bij veranderend klimaat zal de maatregel niet meer effectief zijn.

- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk. In het geval van vegetatie is er mogelijk meer onderhoud noodzakelijk.

## Grondverbetering

### Beschrijving oplossing

Een oplossing voor het versterken van een dijk, is het verbeteren van de grond in of onder het huidige dijklichaam of langs de binnenteen van de dijk. Voorbeelden van grondverbetering zijn vervanging door zwaardere of sterkere grond, chemische verbetering (injectietechnieken om grondeigenschappen te verbeteren), vacuüm (consolidatie) of consolidatie. Onder de dijk kan grondverbetering bodemdaling voorkomen. De meest slappe grond in het dijktraject is aanwezig in de binnenteen van de dijk. De slappe grond ter plaatse van de maatgevende glijcirkel (of in de teen of eventueel in het talud) wordt versterkt of vervangen zodat de (macro)stabiliteit wordt verbeterd (door sterkere grond of zwaardere grond). Omdat er langs een groot deel van het dijktraject bebouwing aanwezig is in of achter de dijk, moet deze bebouwing plaats maken indien de binnenteen vervangen wordt.



### Veiligheid

- Grondverbetering is een bewezen oplossing waarbij het probleem met macrostabiliteit kan worden opgelost. Is veelvuldig gebruikt in weg- en waterbouw projecten.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing dient mogelijk plaats te maken voor de grondverbetering. Hierdoor kan de impact op de omgeving significant zijn. (je kan er voor kiezen de grondverbetering van de teen alleen toe te passen t.p.v. dijktrajecten zonder bebouwing)
- Grondverbetering van het binnentalud kan relatief eenvoudig gerealiseerd worden.

### Uitvoerbaarheid

- Indien de binnenteen vervangen moet worden en de aanwezige bebouwing behouden dient te worden, wordt de uitvoering complex (opvijzelen/verplaatsen bebouwing).
- Indien de binnenteen vervangen moet worden en de bebouwing wordt verwijderd (of binnenteen wordt alleen vervangen waar geen bebouwing aanwezig is), is de uitvoering relatief eenvoudig.
- Indien de grond onder de dijk verbeterd/vervallen wordt, dan moet gehele dijk ontgraven worden.

### LCC

- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige verhogingen aan de dijk.
- Beheer en onderhoud gelijk aan de huidige praktijk.

- Voor de levensduur van een dijk in grond wordt vaak maximaal 50 jaar aangehouden.

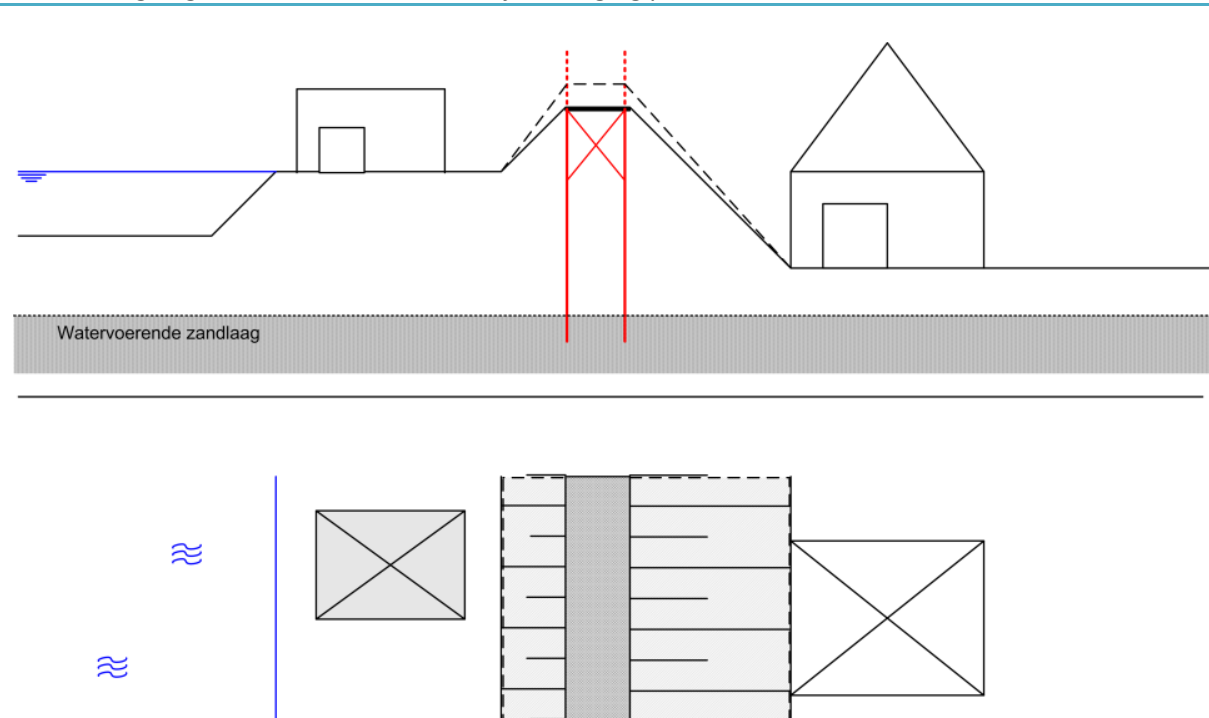
| Voordelen                                                                      | Nadelen                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| relatief kleine impact op de omgeving (behalve als binnenteen wordt vervangen) | hoogteopgave kan niet verbeterd worden                              |
| bewezen oplossing                                                              | wanneer grond onder dijk verbeterd wordt is de uitvoering complexer |
| onderhoud zoals gebruikelijk                                                   |                                                                     |
| relatief goedkope oplossing                                                    |                                                                     |
| grondverbetering onder dijk kan bodemdaling vertragen/voorkomen                |                                                                     |

## Kistdam (type I)

### Beschrijving oplossing

Indien er weinig ruimte beschikbaar is voor de versterking van een dijk, wordt er vaak voor een constructieve oplossing gekozen. Een kistdam wordt aangebracht in de kruin (als vervangende waterkering: sterkte voor o.a. macrostabiliteit en hoogte). Een kistdam in een dijk is een constructie bestaande uit twee damwanden, een in de binnenkruinlijn, de ander in de buitenkruinlijn.

Kistdammen worden toegepast wanneer een verankering van een enkele damwand niet mogelijk is door bijvoorbeeld bebouwing aan beide zijden. De kistdam dient tot in de watervoerende zandlaag geplaatst te worden. Met een kistdam in de kruin kunnen de taluds aan beide kanten van de dijk steiler aangelegd worden wanneer een dijkverhoging plaatsvindt.



### Veiligheid

- Een dijkversterking door middel van een kistdam is een bewezen en veilige oplossing waarbij zowel de hoogteopgave als de opgave voor stabiliteit kan worden opgelost.

### Inpasbaarheid

- Indien het hoogtetekort afwezig of beperkt is (max 10 à 20 cm) dan is een kistdam goed inpasbaar voor hoogte en stabiliteit. Wanneer in de kruin aangebracht dan kan de kistdam zonder problemen ingepast worden in de omgeving.

### Uitvoerbaarheid

- Een kistdam wordt met relatief zwaar materieel aangebracht vanaf de kruin.
- Mogelijk trillingshinder tijdens uitvoering.

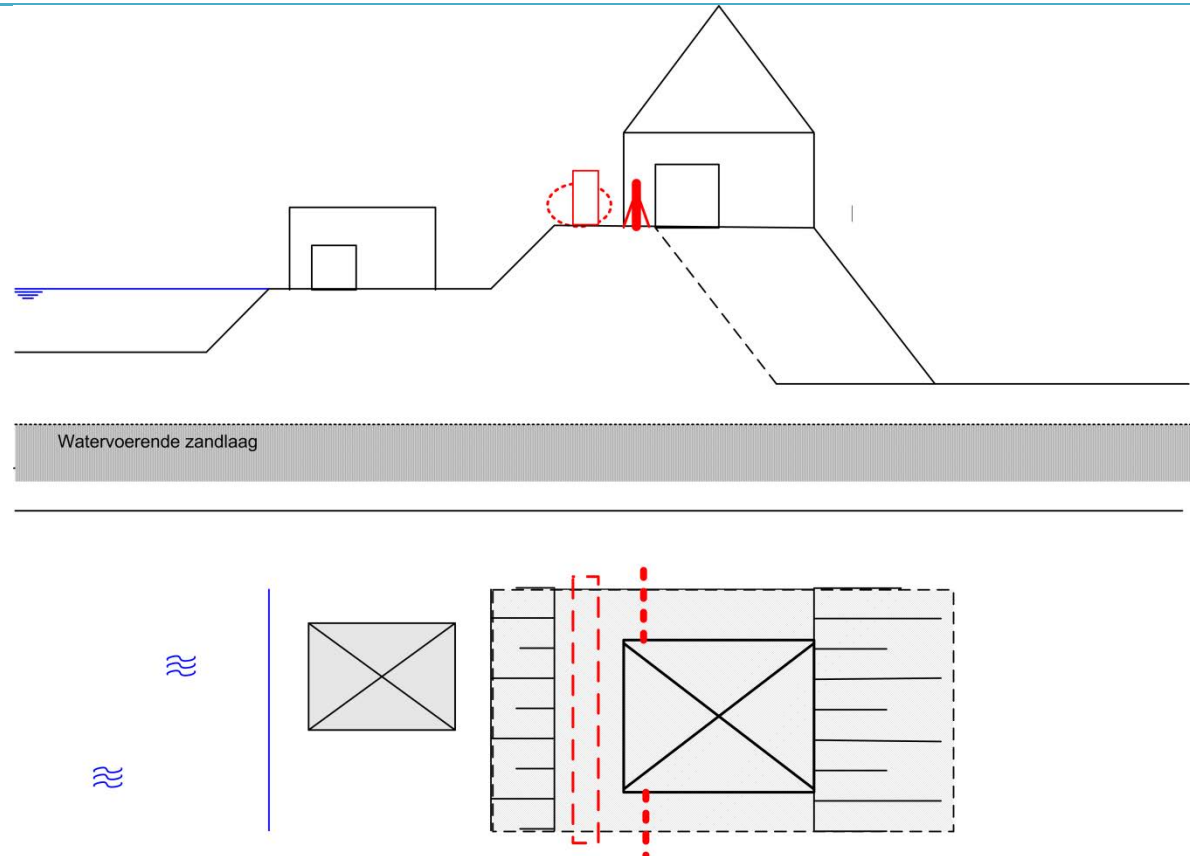
### LCC

- De kistdam kan toekomstbestendig worden ontworpen, zodat de dijk verder kan worden opgehoogd.
- Vrijwel geen beheer en onderhoud noodzakelijk.
- Voor de levensduur van een kistdam wordt vaak 100 jaar aangehouden.

## Tijdelijke waterkeringen

### Beschrijving oplossing

Om voldoende kerende hoogte te realiseren, is het een mogelijkheid om tijdelijke, mobiele waterkeringen te realiseren op of langs de dijk. Deze waterkeringen zijn mobiel en kunnen dus opgezet worden op de kruin van de dijk of bijv tussen de huizen wanneer hoogwater de dijk bedreigt. Het betreft dus eigenlijk een noodoplossing om een hoogwater te kunnen keren. Een aantal voorbeelden van dit type waterkeringen zijn: coupures tussen huizen, Geotextiel tubes, Water-gate, SLAMdam, Box Barrier, Tubebarrier, etc.



### Veiligheid

- Doordat de waterkering een tijdelijk karakter krijgt, ontstaat een extra onzekerheid in het functioneren van de kering. De betrouwbaarheid kan afnemen doordat er bijvoorbeeld fouten kunnen worden gemaakt bij het opzetten van de kering of doordat bewegende onderdelen verminderd functioneren.
- De stabiliteitsopgave voor de dijk wordt met tijdelijke keringen niet opgelost. De hoogteopgave, mits niet te groot, kan wel opgelost worden (tijdelijk).

### Inpasbaarheid

- De bebouwing rondom de dijk kan behouden blijven.

### Uitvoerbaarheid

- Geen overlast op de omgeving (alleen tijdens hoogwater. Uitvoering is relatief snel en materieel is heel licht).
- Effect op bestaande waterkering (door gewicht van kering wanneer hij bijvoorbeeld gevuld is met zand of water) tijdens hoogwater dient in de gaten gehouden te worden.

### LCC

- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige verhogingen aan de dijk.
- Levensduur is onbekend.

## Toestaan overslagdebiet

### Beschrijving oplossing

De hoogte van het toegestane overslagdebiet is bepalend voor de ontwerphoogte van dijken. Des te hoger het toegestane overslagdebiet, des te lager de ontwerphoogte van dijken.

De gevolgen van overslagdebiet op het achterland zijn onzeker. Door middel van een hoogte-bergingrelatie per peilgebied en het daarop te bergen overslagvolume kunnen de gevolgen van het overslagdebiet inzichtelijk worden gemaakt. Voor een gemiddeld overslagdebiet van 1 en van 5 l/s/m zijn de inundaties inzichtelijk gemaakt in respectievelijk Fig. 1 en Fig. 2.

Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het overslagdebiet wordt alleen opgelegd aan het dijktraject dat behoort tot de scope van het project KIIK.
- De watergangen in de polder zijn voorafgaand aan het berekenen van overslagdebiet op peilniveau.
- Het overslagdebiet heeft een duur van 24 uur.
- Er wordt niet bemalen.
- De windrichting is constant en 315 graden ten opzichte van het noorden. Overslagdebiet wordt gereduceerd afhankelijk van de hoek tussen de windrichting en de dijknormaal.

Uit Fig. 1 blijkt dat een overslagdebiet van 1 l/s/m is op te vangen in de watergangen, de waterstandstijgingen ten opzichte van het peilniveau zijn zodanig laag dat er geen of nauwelijks inundaties optreden. Bij een overslagdebiet van 5 l/s/m zijn de waterstandstijgingen groter en treden er wel inundaties op (Fig. 2).

Voor de schadeberekening is waterschadeschatter gebruikt. De waterschadeschatter is gebruikt omdat deze beter presteert bij lagere inundaties tot in de orde grootte van enkele decimeters (Vreeken (2013). Schadeberekening HIS-SSM en de WaterSchadeSchatter).

Voor de schadeberekening met de Waterschadeschatter zijn de standaard uitgangspunten van de Waterschadeschatter gebruikt met uitzondering van de duur van de overlast. Deze is, net als de duur van het overslagdebiet, op 24 uur ingesteld. De resulterende schadetallen berekend met Waterschadeschatter bedragen voor een overslagdebiet van 1 l/s/m € 0.31 miljoen en voor een overslagdebiet van 5 l/s/m € 1.02 miljoen.





Fig. 1. Inundaties al gevolg van een overslagdebiet van 1 l/s/m over de scope van het project KIJK.

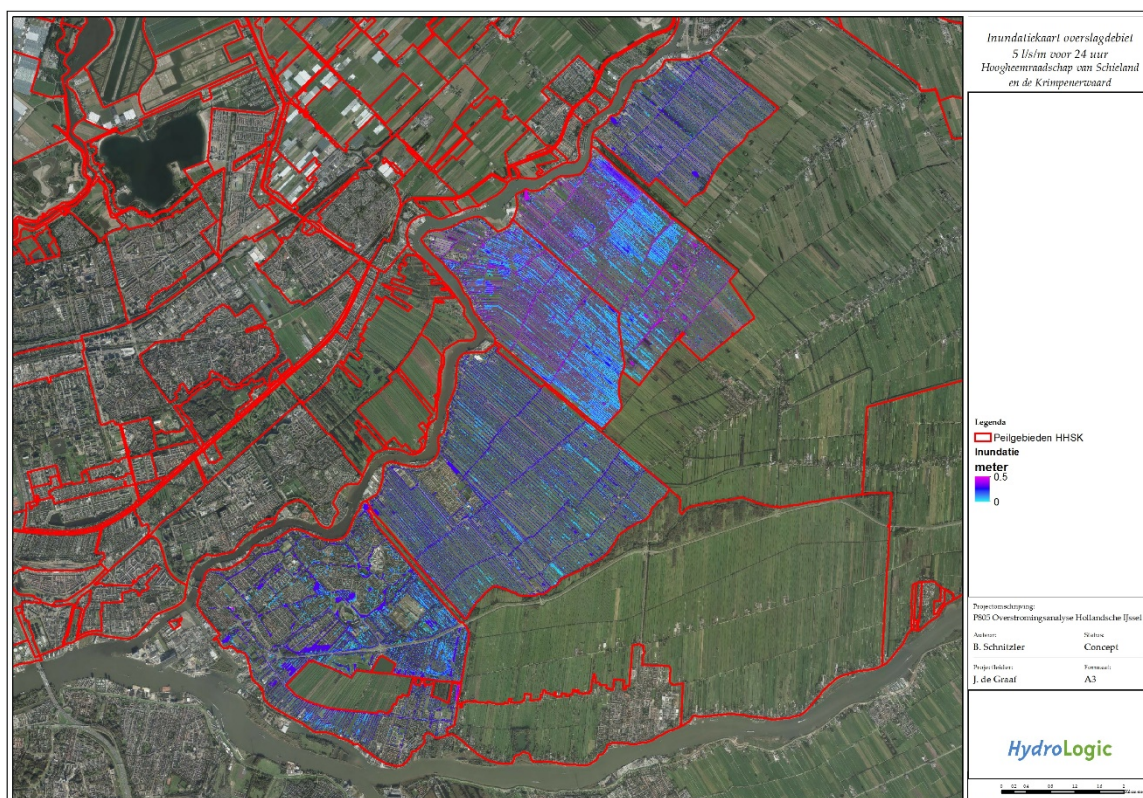


Fig. 2. Inundaties al gevolg van een overslagdebiet van 5 l/s/m over de scope van het project KIJK.



**Veiligheid**

- Het alternatief draagt bij aan de veiligheid doordat het toestaan van een bepaald overslagdebiet kan bijdragen aan het verminderen van de hoogteopgave. Het alternatief draagt niet bij aan het verbeteren van de macrostabiliteit. Er zijn kanttekeningen bij hoger overslagdebiet zoals, grotere erosie en hogere infiltratie. Dit zou juist tot verslechtering kunnen leiden van onder andere macrostabiliteit.

**Inpasbaarheid**

- In principe behelst dit alternatief het achterwege laten van een verhoging en is daarmee goed inpasbaar. Mogelijk dient wel de bekleding van de waterkering verbeterd te worden.

**Uitvoerbaarheid**

- In principe behelst dit alternatief het achterwege laten van een verhoging en is daarmee goed inpasbaar. Mogelijk dient wel de bekleding van de waterkering verbeterd te worden.

**LCC**

- Het alternatief zal vermoedelijk tot een lagere investering leiden doordat een verhoging van de waterkering achterwege kan worden gelaten. Impliciet wordt hiermee meer overlast (schade) in het achterland toegestaan gedurende de beheerfase.

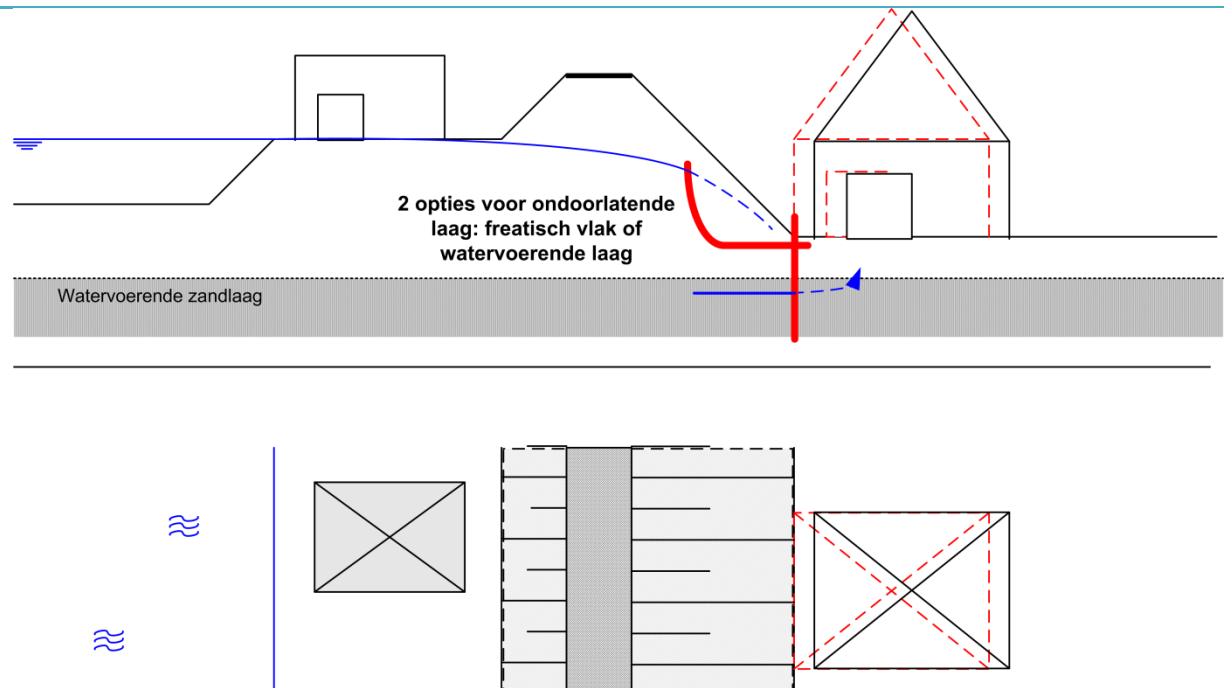
## Vergroten ondoorlatendheid

### Beschrijving oplossing

Een hoge stijghoogte in het watervoerende pakket werkt negatief op de stabiliteit van de waterkering (macro en piping) indien er sprake is van opdrukken of opdrijven. Het onderbreken van waterstroming vanuit de watervoerende zandlaag ter plaatse van de binnenteen of binnenberm kan daarom een bijdrage leveren aan de stabiliteit van de waterkering (door gewicht tegen opbarsten te vergroten). Verder zorgt een hoge waterstand in de dijk (freatisch vlak) voor instabiliteit (zowel micro als macro). Een verhoging van de weerstand tegen de waterspanning in de dijk (freatisch vlak) kan zorgen voor verhoging van de stabiliteit van de dijk. Beiden problemen kunnen aangepakt worden door het vergroten van ondoorlatendheid (van de grond):

- Beperken van de waterstroming in de watervoerende zandlaag en/of fixatie van freatisch vlak in de waterkering:
  - o Constructie (bijv. kwelscherm)
  - o Vergroten ondoorlatendheid lokale grond (d.m.v. product, bijv. SoSeal)

Deze methode is ook effectief tegen piping, wanneer de waterstroom in de watervoerende zandlaag wordt onderbroken.



### Veiligheid

- Deze maatregel kan een bijdrage leveren aan de macrostabiliteit van de dijk (ook tegen piping). De hoogte opgave wordt hiermee niet opgelost.

### Inpasbaarheid

- De bebouwing rondom de dijk kan behouden blijven. Er is weinig aanvullende ruimte benodigd.

### Uitvoerbaarheid

- Overlast op de omgeving is beperkt. Wellicht dat tijdens uitvoering wat hinder zal plaatsvinden.
- Op plaatsen waar bebouwing direct in of aan de dijk ligt kan de impact van de aanleg groter zijn of kan er voor gekozen worden het systeem niet te plaatsen vanwege ruimtegebrek.

### LCC

- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige dijkverhoging
- Levensduur is onbekend.
- Onderhoud is vrijwel niet nodig. Monitoring van waterspanningen is belangrijk



## Verhogen bresdrempel

### Beschrijving oplossing

De schade als gevolg van een dijkdoorbraak wordt bepaald door de waterstand, de stroomsnelheid van het water, de stijgsnelheid en het landgebruik van het achterland. De waterstanden, de stroomsnelheid en de stijgsnelheid zijn onder andere afhankelijk van de waterdiepte als gevolg van een dijkdoorbraak. Uit overstromingsanalyses is gebleken dat de bresdrempel (ondergrens van een bres) bepalend is voor de hoeveelheid water die door een bres heen stroomt. De bresdrempel is het laatste niveau in een bres. In de meeste gevallen is dit gelijk aan de hoogte van het achterland. In andere gevallen kan de hoogte van het voorland maatgevend zijn.

Het effect van een verhoogde bresdrempel is inzichtelijk gemaakt door voor breslocatie 6 met waterstandsverlooplijn 2 uit het rapport 'HydroLogic (2016). P805 Overstromingsanalyse Hollandsche IJssel D04' twee overstromingsanalyses uit te voeren. Bij deze overstromingsanalyses is enerzijds het niveau van het achterland maatgevend voor de bresdrempel en anderzijds is het niveau van het voorland maatgevend voor de bresdrempel. In Fig. 1 en Fig. 2 is het verschil te zien tussen een overstromingsanalyse met een bresdrempel van

-2.4 m + NAP (achterland maatgevend) en 2.7 m + NAP (voorland maatgevend). Bij de overstromingsanalyse waarbij het achterland maatgevend is voor de bresdrempel is worden bijna 600 slachtoffers en meer dan 67 000 getroffen berekend en bedraagt de schade € 2 141 miljoen schade. Wanneer het voorland maatgevend is voor de bresdrempel worden geen slachtoffers en ongeveer 110 getroffen berekend en bedraagt de schade € 1,65 miljoen schade.

Mogelijkheden om de bresdrempel te verhogen zijn onder andere het verhogen van het achterland of het voorland. Daarnaast zijn het plaatsen van damwanden of dijkverankering mogelijke oplossingen voor het verhogen van de bresdrempel.



Fig. 1. Overstromingsanalyse met een bresdrempel van -2.4 m + NAP

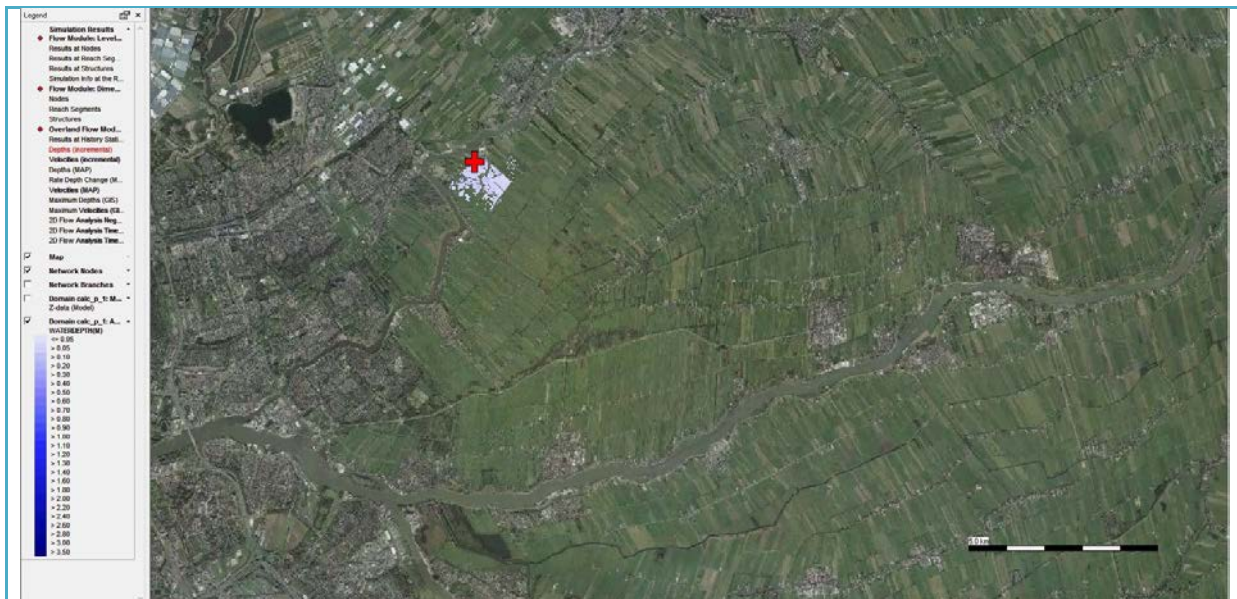


Fig. 2. Overstromingsanalyse met een bresdrempel van 2.7 m + NAP

### Veiligheid

- Als gevolg van de maatregel treedt er veel minder schade op. De maatregel treedt in principe in werking als het dijklichaam is gefaald (macrostabiliteit) en is daarmee gericht op acceptabele schade. Daarmee heeft de maatregel geen effect op de hoogteopgave.

### Inpasbaarheid

- De maatregel kan ingepast worden binnen het bestaande profiel.

### Uitvoerbaarheid

- In vergelijking met constructieve maatregelen kan de maatregel lichter worden uitgevoerd.

### LCC

- De investering is lager in vergelijking met constructieve damwanden die tot toetshoogte wordt aangelegd.. De kosten voor beheer en onderhoud zullen vergelijkbaar zijn.



## Systeemwerking Hollandse IJssel

### Beschrijving oplossing

**Hoog water** op de Hollandse IJssel wordt vooral bepaald door hoog water op de Nieuwe Maas, het sluitregime van de Algerakering en de kans op niet sluiten van de Algerakering en in mindere mate door bemaling op de Hollandse IJssel.

Het verlagen van hoog water op de Hollandse IJssel kan op de volgende manieren:

1. Verlagen van de faalkans van de Algerakering (met als uiterste toestand afdammen van de Hollandse IJssel)
2. Verlagen van het sluitpeil van de Algerakering
3. Het eerder inzetten van een maalstop op de Hollandse IJssel
4. Actief verlagen van het peil op de Hollandse IJssel door pompen of gecontroleerde overstroming

Voor oplossing 2 en 3 is een gesloten Algerakering noodzakelijk. Deze oplossing wordt effectiever als de faalkans van de Algerakering afneemt. Oplossing 4 is ook het meest effectief bij een gesloten Algerakering, maar kan ook worden toegepast om de piek van het hoogwater te verlagen.

Het **hydraulisch belastingniveau** is een combinatie van hoog water en golfoploop door wind. Hoogwater op de Nieuwe Maas heeft een vrij sterke correlatie met windbelasting, maar de windbelasting is niet gecorreleerd met het falen van de SVK. Daardoor bestaat de kans dat de combinatie gesloten SVK met maximale golfopzet op delen van de dijk maatgevend is. In dat geval kan een aanpassing van het sluit- en maalregime (oplossing 2 en 3) deze piekbelasting verlagen. Het beperken van golfaanval op de dijk door maatregelen op de Hollandse IJssel is mogelijk door:

5. aanleggen van voorlanden of eilanden/golfbrekers voor de oever
6. plaatsen van windschermen



### Veiligheid

- De hoogte opgave kan hiermee worden opgelost.
- De maatregelen voor hoogwater kan de stabiliteitsopgave verkleinen.

### Inpasbaarheid

- De maatregelen voor het verlagen van het peil vragen weinig ruimte met uitzondering van oplossing 4. Oplossing 4 vereist een grote open ruimte in het achterland.
- het verlagen van het hydraulisch belastingniveau heeft wel een belangrijke ruimtelijke



component en een relatief grote impact op de omgeving (verandering ruimtelijk beeld, mogelijke stremming vaarverkeer, afname berging)

- De bebouwing rondom de dijk kan behouden blijven. Er is geen aanvullende ruimte benodigd op de dijk zelf.

#### **Uitvoerbaarheid**

- Overlast op de omgeving is beperkt

#### **LCC**

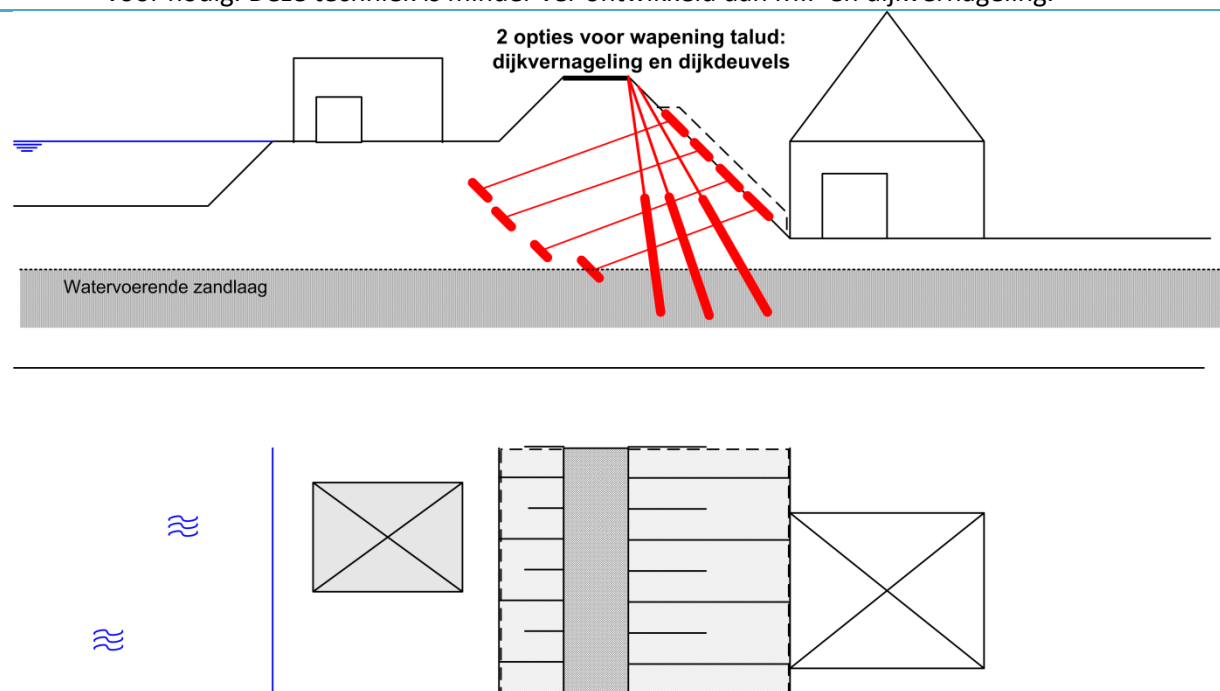
- De oplossing is toekomstgericht als het gaat om toekomstige dijkverhoging
- Beheer en onderhoud ligt deels bij derden
- Levensduur is afhankelijk van mate van ingreep, maar in alle gevallen uitbreidbaar

## Wapening talud

### Beschrijving oplossing

Er worden kunststof of stalen elementen (evt met grout) aangebracht als wapening in het dijkta-  
lud, om schuif- en/of druk- en trekkrachten in de dijk te kunnen opnemen. Op deze manier wordt de  
schuifsterkte van het glijvlak versterkt en de macrostabiliteit vergroot. Het wapenen van grond is al  
vaker in de wegenbouw en spoorbouw toegepast. Er bestaat onderscheid tussen o.a. dijkvernageling  
met trekelementen vanaf het talud tot onder de dijk en dijkstabilisatie d.m.v. elementen die vanaf de  
kruin aangebracht worden in de richting van de teen tot in de diepe zandlaag. Bij macroinstabiliteit  
worden beide type elementen vooral op dwarskracht belast. Praktijkvoorbeelden:

- **Dijkvernageling:** De grond wordt gewapend d.m.v. een groot aantal nagels in het talud met  
een hoek van 10 graden t.o.v. de horizontaal. De nagels reiken niet tot de draagkrachtige  
zandlaag. De nagels bestaan uit een kern van kunststof of staal met grout eromheen voor de  
aanhechting met de grond. Ze worden na plaatsing voorgespannen. Een nadeel is dat het  
gehele talud opgehaald moet worden. Er heeft een pilot plaatsgevonden bij een  
dijkversterkingproject Vianen.
- **JLD Dijkstabilisator:** De JLD dijkstabilisator is een vorm van dijkvernageling. De elementen zijn  
van een basaltvezel versterkt kunststof en worden in de grond op spanning gebracht, zodat  
de elementen voldoende sterkte kunnen leveren aan de dijk. Er is een pilot uitgevoerd bij  
Purmerend.
- **Mixed-In-Place kolommen (MIP):** Elementen die vanaf de kruin en talud in de richting van de  
teen tot aan de draagkrachtige zandlaag aangebracht worden. Een droog bindmiddel wordt  
met een kraan onder druk ingeblazen in het talud en met vochtige grond gemengd. Het  
resultaat is dat na verharding gestabiliseerde 'grondkolommen' in het talud en onder de teen  
zijn ontstaan. Hiermee is MIP een vorm van grondverbetering die resulteert in constructieve  
stabiliteitselementen in de dijk. Hiervoor is relatief zwaar materieel nodig. Ook toe te passen  
als kwelscherm.
- **Dijkdeuvels:** Zware stalen buizen die vanaf de kruin tot in de draagkrachtige zandlaag reiken.  
De uiteinden van de elementen zijn omhuld met een kous die volgeperst wordt met een  
cement/bentoniet mengsel en wat zorgt voor de krachtsafdracht. Relatief zwaar materieel  
voor nodig. Deze techniek is minder ver ontwikkeld dan MIP en dijkvernageling.



### Veiligheid

- Het wapenen van grond is nog geen bewezen oplossing, hoewel verschillende methodes beproefd zijn in zowel andere werkvelden (wegenbouw) en landen (MIP bijv. in Scandinavië, Japan, VS en Duitsland) als door middel van pilots in dijkprojecten. Deze (succesvolle) pilots leiden naar verwachting op de middellange termijn tot een erkenning als geschikt alternatief voor een dijkversterking.
- De hoogteopgave kan niet worden opgelost.

#### **Inpasbaarheid**

- De bebouwing rondom de dijk kan (gedeeltelijk) behouden blijven. Er is alleen ruimte in het talud of op de kruin benodigd.

#### **Uitvoerbaarheid**

- De wapeningselementen voor vernageling worden met relatief licht materieel aangebracht vanaf de kruin of het binnentalud. Voor deuvels en MIP kolommen is zwaarder materieel nodig.
- Objecten in de grond kunnen de uitvoering belemmeren.
- Overlast op de omgeving is beperkt (uitvoering is relatief snel).

#### **LCC**

- De oplossing is niet toekomstgericht als het gaat om toekomstige verhogingen aan de dijk. Het bijplaatsen van wapening om de stabiliteit in de toekomst verder te verbeteren is wél mogelijk.
- Levensduur is onbekend.
- Inspectie en onderhoud van nagels/elementen is relatief complex.