



# Onderzoek gordingen

De Innovatie versneller/Waterschap Rivierenland

4 oktober 2023

Project Onderzoek gordingen  
Opdrachtgever De Innovatie versneller/Waterschap Rivierenland

Document De Innovatie versneller/Waterschap Rivierenland  
Status Definitief 02  
Datum 4 oktober 2023  
Referentie 136390/23-015.767

Projectcode 136390  
Projectleider Ir. T. Naves  
Projectdirecteur Ir. D.J. Focks

Auteur(s) Ir. T. Naves, ir. I.J.M. Schrijver, A.D. Sewcharan MSc  
Gecontroleerd door Expertpanel: dr.ir. H.J. Lengkeek, J. Lankhorst, A. van Houwelingen, H.J. Lodder  
Goedgekeurd door Ir. T. Naves

Paraaf



Adres Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.  
Leeuwenbrug 8  
Postbus 233  
7400 AE Deventer  
+31 (0)570 69 79 11  
www.witteveenbos.com  
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veeelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

# INHOUDSOPGAVE

<b>1</b>	<b>INLEIDING</b>	<b>5</b>
1.1	Aanleiding en achtergrond	5
1.2	Onderzoeksvraag	5
1.3	Achtergrond toepassing gording conform de PPL	5
1.4	Opbouw van het onderzoek	6
1.5	Afbakening en scope van het onderzoek	6
<b>2</b>	<b>KWALITATIEVE ANALYSE (INTERVIEWS)</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>EVALUATIE EEMDIJKPROEF</b>	<b>8</b>
3.1	Inleiding	8
3.2	Membraanwerking	8
3.2.1	Bevindingen membraanwerking Eemdijkproef	9
3.2.2	Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen	10
3.3	Vervormingen	11
3.3.1	Bevindingen vervormingen Eemdijkproef	11
3.3.2	Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen	12
3.4	Plastisch gedrag damwanden	13
3.4.1	Bevindingen Eemdijkproef	13
3.4.2	Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen	14
3.5	Bevindingen/conclusie evaluatie Eemdijkproef	15
<b>4</b>	<b>CONSTRUCTIEVE ANALYSE GORDINGEN</b>	<b>16</b>
4.1	Inleiding	16
4.2	Uitgangspunten	16
4.3	Gevoeligheidsanalyse ongesteunde lengte gording	17
4.4	Gevoeligheidsanalyse horizontale veerstijfheid	18
4.5	Gevoeligheidsanalyse profiel	19
4.6	Variant 2 (analyse kabelwerking)	21
4.7	Bevindingen/conclusie analyse gordingen	23

<b>5</b>	<b>GEBEURTENISSENBOOM</b>	<b>24</b>
5.1	Algemene beschrijving gebeurtenissenboom	24
5.2	Gebeurtenissenboom in relatie tot de huidige ontwerpmethodiek	26
5.3	Functie van de gording in relatie tot de gebeurtenissenboom	27
5.4	Bevindingen/Conclusie Gebeurtenissenboom	27
<b>6</b>	<b>PLAXIS 3D ANALYSE</b>	<b>29</b>
6.1	Inleiding	29
6.2	Doel 3D analyse	29
6.3	Case: Moordrecht	29
6.4	Aanpak	30
6.5	Uitgangspunten berekening	30
6.5.1	Geometrie	30
6.5.2	Grondparameters	31
6.5.3	Modellering damwand	32
6.5.4	3D mesh	33
6.5.5	Fasering	34
6.6	Resultaten Plaxis 3D analyse	35
6.6.1	Validatie 3D model	35
6.6.2	Effect van gordingen	35
6.7	Bevindingen/conclusie Plaxis 3D analyse	38
<b>7</b>	<b>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>	<b>39</b>
7.1	Conclusies	39
7.2	Aanbeveling	39
7.3	Aanbevelingen buiten de scope van dit onderzoek	41
<b>8</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>42</b>
	Laatste pagina	42
	<b>Bijlage(n)</b>	<b>Aantal pagina's</b>
I	Interviews Expertpanel	8
II	Parameter Plaxis 2D en 3D	2

# 1

## INLEIDING

### 1.1 Aanleiding en achtergrond

In de huidige ontwerpmethodiek (PPL [ref. 4.] is opgenomen dat redundantie van een langsconstructie in het ontwerp moet worden geborgd. Daarom is in de PPL opgenomen dat herverdeling van de belasting moet worden verzekerd en dat ook onverankerde damwanden van een gording voorzien moeten worden (§4.3 van de PPL).

Voor verankerde wanden is dit zondermeer gebruikelijk in de civiele praktijk. Bij verankerde damwanden worden gordingen met name toegepast om de belasting van de damwand te verdelen naar de ankers, en om in het geval van ankeruitval de krachten over te kunnen brengen naar omliggende ankers en damwandplanken.

Voor onverankerde wanden daarentegen niet, en de doelmatigheid van deze gording is onvoldoende duidelijk. Naar aanleiding daarvan is er door Waterschap Rivierenland een project specifieke werkwijze opgesteld om de gordingen bij onverankerde damwanden onder bepaalde voorwaarden **niet** toe te passen. Deze werkwijze is mede aanleiding geweest voor dit onderzoek. Het doel van dit onderzoek is om tot een algemene toepasbare methodiek te komen voor het toepassen van gordingen bij onverankerde damwanden.

In dit onderzoeksrapport worden de resultaten gepresenteerd van het onderzoek naar de nut en noodzaak van gordingen bij onverankerde langsconstructies in waterkeringen en worden aanbevelingen gedaan hoe hiermee om te gaan bij toekomstige projecten.

### 1.2 Onderzoeksvraag

Het advies zal zich richten op het beantwoorden van de volgende vragen:

- 1 onder welke condities is het toepassen van een gording bij een onverankerde damwand zinvol?
- 2 in het geval een gording noodzakelijk is, hoe dient deze dan ontworpen te worden?

### 1.3 Achtergrond toepassing gording conform de PPL

Een belangrijk vertrekpunt voor dit onderzoek is de beschrijving die de PPL geeft betreffende het nut en de noodzaak van de gording. In de PPL is het volgende opgenomen:

*De vereiste redundantie moet in het ontwerp worden geborgd. Daarvoor moet aan het constructiesysteem reservecapaciteit worden gegeven, moet de mogelijkheid tot herverdeling van belasting worden verzekerd en moeten constructiedelen zo worden gedimensioneerd dat ductiel bezwijken optreedt]. .....[Om herverdeling mogelijk te maken moeten naast verankerde wanden ook vrijstaande wanden, met of zonder openingen, van een doorgaande gording worden voorzien.] (§4.3 [ref. 4.]*

Naast bovenstaande omschrijving uit de PPL is door de schrijvers van de PPL ook aangegeven dat het doel van de gording met name gericht is op de onzekerheden op de berekende vervormingen in een EEM-berekening en dat een gording kan bijdragen aan het voorkomen van te grote (verschil)vervormingen:

*Bij onverankerde doorgaande damwanden zijn ook gordingen noodzakelijk. Door het aanbrengen van een doorlopende gording vindt er herverdeling plaats van de krachten in de constructie en zal de gording tevens bij plaatselijk vervormen van de wand verschillen in uitbuiging haaks op de damwand beperken.* (§11.10.4 [ref. 4.]

## 1.4 Opbouw van het onderzoek

Voor het onderzoek wordt er vanuit een aantal verschillende invalshoeken gekeken naar het nut en de noodzaak voor het toepassen van gordingen bij onverankerde wanden in waterkeringen:

- 1 **interviews** met externe experts (zie *Expertpanel*) om zo vanuit verschillende invalshoeken en met verschillende projectervaringen input op te halen voor het onderzoek, zie hoofdstuk 2;
- 2 **evaluatie Eemdijkproef**, in 2017 zijn grootschalige proeven uitgevoerd te Eemdijk waarbij veel inzichten zijn opgedaan met betrekking tot het vervormings- en bezwijkgedrag van onverankerde damwanden. Deze inzichten zijn samengevat in hoofdstuk 3;
- 3 **constructieve analyse**, middels een relatief simpel raamwerkmodel zijn verschillende gevoeligheidsanalyses uitgevoerd die inzicht geven in het gedrag van een gording bij een onverankerde damwand. Dit is nader uitgewerkt in hoofdstuk 4;
- 4 **gebeurtenissenboom**, om inzichtelijk te maken hoe de gording een functie vervult binnen het bezwijkproces van een dijk versterkt met een onverankerde damwand is een gebeurtenissenboom opgesteld en beschouwd hoe dit past binnen de huidige ontwerpfilosofie, zie hoofdstuk 5;
- 5 **Plaxis 3D**, om het gedrag en de bijdrage van de gording te beschouwen in het dijkprofiel zijn Plaxis 3D analyses uitgevoerd voor situaties met en zonder gordingen om zo een relatieve vergelijking te maken wat betreft de bijdrage van de gording, zie hoofdstuk 6.

Tot slot worden alle inzichten bij elkaar gebracht. Dat leidt tot de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek die zijn uitgewerkt in hoofdstuk 7.

### Expertpanel

Het onderzoek wordt uitgevoerd door Witteveen+Bos in samenspraak met een expertpanel. Het expertpanel deelt de kennis en ervaring ten behoeve van dit onderzoek in de vorm van interviews. Het expertpanel borgt tevens de kwaliteit van het onderzoek. Het expertpanel bestaat uit:

- Arny Lengkeek (Witteveen+Bos + strategieteam DIV);
- Jørn Lankhorst (Gebroeders de Koning);
- Andries van Houwelingen (Royal HaskoningDHV);
- Herman Jaap Lodder (HHSK + strategieteam DIV).

## 1.5 Afbakening en scope van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om een advies te geven met betrekking tot het toepassen van gordingen bij onverankerde damwanden. Voor de verdere ontwerpmethodiek en filosofie wordt uitgegaan van de aanpak zoals nu beschreven in de POV publicatie langconstructies [ref. 1].

# 2

## KWALITATIEVE ANALYSE (INTERVIEWS)

Als startpunt voor dit onderzoek naar gordingen zijn interviews met experts afgenomen. In bijlage I is per expert een verslag van het interview toegevoegd. De interviews zijn aan de start van het onderzoek belangrijk geweest om richting te geven in het onderzoek. De belangrijkste punten zijn in onderstaande tabel kort beschreven met daarbij de verwijzing naar het hoofdstuk waar dit verder is uitgewerkt en toegelicht.

Tabel 2.1 Resultaten en aanbevelingen interviews

	Constatering/aanbeveling experts	Hoe meegenomen in het onderzoek
functie gording	de experts geven veelal een mogelijke redenering voor de functie van een gording zoals herverdelen of gelijkmatige vervormingen maar allen hebben ze vraagtekens in hoeverre de gording doelmatig is met het oog op waterveiligheid	dit is uiteindelijk ook het doel van dit onderzoek om dit nader uit te lopen en te onderbouwen (zie inleiding H1)
membraanwerking	er wordt veelal gerefereerd naar de Eemdijkproef en de membraanwerking die daar is geobserveerd bij een doorgaande damwand zonder gording	dit is nader beschouwd en uitgewerkt in §3.2
ontwerpfilosofie	in de huidige ontwerpfilosofie zit geen, het ontwerp wordt veelal gemaakt voor een conservatieve snede waarbij de damwand al alle belasting kan opnemen. Het toepassen van de gording levert hierbij geen lichtere damwand op	dit is nader beschouwd in hoofdstuk 5
lengte herverdeling	indien de gording dient voor het herverdelen van een lokale zwakke plek in de ondergrond, dan dient een gording her te verdelen over grote afstanden (> 10 m). Een lichte gording lijkt hiervoor niet geschikt	dit is nader geanalyseerd op basis van een raamwerkmodel in hoofdstuk 4
discontinue wand (1)	een discontinue wand heeft geen membraanwerking zoals bij een doorgaande wand	dit heeft met name een relatie met de vereiste redundantie en herverdelingscapaciteit. Dit is onderdeel van de gebeurtenissenboom in hoofdstuk 5
discontinue wand (2)	discontinue wanden zijn mogelijk gevoelig voor rotatie van het paneel	aanbevelingen hierover zijn gedaan in de Eemdijkproef, zie §0, en ook in de Plaxis 3D-analyse zijn hierover enkele constateringen gedaan, zie §6.6.2
lokale externe belastingen	een gording lijkt primair geschikt voor het herverdelen van lokale 'externe' belastingen zoals bij een verankerde damwand. Maar ook bij een onverankerde damwand kan een gording gebruikt worden bij een lokale externe belasting zoals een verkeerslast, kraanbelasting of aanvaarbelasting	dit is in dit onderzoek niet nader uitgewerkt maar wel opgenomen in de aanbevelingen, zie §7.2
detaillering verbindingen	de verbinding tussen de gording en de damwand is een complexe verbinding die veel aandacht behoeft. De verbinding kan zowel op langskracht, druk en trek worden belast. Er is voldoende werkruimte nodig en is tijdrovend	deze punten zijn geen redenen om geen gording toe te passen, maar zijn wel meegenomen in de aanbevelingen van dit onderzoek, zie §7.2

# 3

## EVALUATIE EEMDIJKPROEF

### 3.1 Inleiding

In 2017 is een aantal grootschalige proeven uitgevoerd om het gedrag van damwanden in waterkeringen te onderzoeken in de buurt van het plaatsje Eemdijk. Als onderdeel van deze bezwijkproeven zijn onder andere enkele vrijstaande damwanden tot bezwijken belast middels Pull-Over proeven (POT) en is een met een damwand versterkte dijk tot bezwijken gebracht. Bij de POT proeven was de damwand voorzien van een gording, bij de met een damwand versterkte dijk is geen gording toegepast. Toch kunnen veel inzichten die zijn opgedaan bij deze proeven ook bruikbaar voor dit onderzoek naar het toepassen van gordingen bij onverankerde damwanden.

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de proef die een relatie hebben met het toepassen van gordingen besproken. Voor een verdere beschrijving van de proeven en alle resultaten wordt verwezen naar het Eindrapport proefprogramma [ref. 1].

### 3.2 Membraanwerking

Zoals ook al uit de interviews naar voren komt, is te verwachten dat doorgaande damwanden al herverdelingscapaciteit hebben als gevolg van membraanwerking. Daarbij wordt met name gerefereerd aan de resultaten van de Eemdijkproef.

In §0 zijn alle constatering en conclusies vanuit de Eemdijkproef met betrekking tot membraanwerking opgenomen. Dit zijn dus allemaal citaten uit de het eindrapport Eemdijkproef [ref. 1].

In de citaten worden een aantal afkortingen gebruikt:

- FSP: Full Scale Proef;
- FSP-blauw: Full Scale Proef van de met damwand versterkte dijk;
- POT: Pull Over Test.



### 3.2.1 Bevindingen membraanwerking Eemdijkproef

#### Beschrijving afschuifproces (conform bijlage D.2 [ref. 1.]

Afbeelding 3.1 Afschuifproces

Tabel 3. 59 sec: geen wijzingen meer in het beeld ten opzichte van sec 19, de waterstand in het bassin is nu weer gelijk aan het laagste punt van de geknikte damwand. Ondanks dat de damwand volledig is uitgeknikt, is deze niet verder naar voren gekomen. De damwand is namelijk gaan hangen aan de naastgelegen planken die minder vervormen. Uiteindelijk is later vastgesteld dat alleen de 2 buitenste damwandplanken niet bezweken en geknikt zijn. De damwanden zijn ook uitgerekt in langsricting, ongeveer 2 cm per enkele plank



#### Beantwoording kennisvraag (§6.6.1 van [ref. 1.]

*Wat is het waterkerende vermogen van de blauwe dijk uitgaande van de elastische capaciteit van de damwand en na bereiken van een plastisch scharnier?*

Na falen van de damwand (niet zozeer een plastisch scharnier) ontstaat er een situatie waarin nog steeds sprake is van gedeeltelijk waterkerend vermogen. Dat komt doordat ten eerste het binnentalud niet geheel verdwijnt na afschuiving en zelfs na aanzienlijke overslag (circa 100 l/m/s) de kleibekleding niet is weggespoeld. Het komt ten tweede door het samenwerken van de damwandplanken in de lengte-as van de dijk, doordat deze met de sloten zijn verbonden. Door deze zogenaamde membraanwerking van de damwand als geheel waardoor deze niet verder is doorgesneden. De bovenkant van de damwand is in de middenraai uiteindelijk 6,5 m naar voren gekomen en 2,0 m gezakt, dat is 1m lager dan de hoogste waterstand in het bassin.

*In hoeverre heeft de damwand invloed op de bezwijk lengte (nu 50 m) die moet worden meegenomen in het bepalen van de betrouwbaarheidsindex?*

- het gedrag na bezwijken van de onverankerde damwandconstructie laat zien dat de damwandconstructie na bezwijken nog steeds bijdraagt aan de sterkte van het systeem; de damwand is niet weg en de waterkering fungeert nog als een soort van overlaat (ingebiede deel van de wand onder het constructief bezweken stuk):
  - bij een doorgaande wand is er sprake van spreiding in de langsricting, over een veel grotere lengte dan bij een groene dijk. Uiteindelijk zal na falen bij grote deformaties de dijk niet meer voldoen aan de hoogte-eis. Dit tekort aan hoogte kan ook bij een doorgaande wand plaatsvinden over een lengte van zowel groter als kleiner dan de bezwijk lengte die wordt meegenomen in het bepalen van de betrouwbaarheidsindex;
- duidelijk waarneembaar is dat bij de continue onverankerde damwandconstructie de planken sterkte aan elkaar ontleen via de sloten, waardoor in de lengte-as van de dijk een vorm van herverdeling van spanningen tussen de damwandplanken mogelijk is:
  - bij een discontinue damwand zijn wel de planken binnen een paneel, maar niet de panelen onderling via de sloten aan elkaar gekoppeld. Dit beperkt de mogelijkheid tot herverdeling in de lengte-as van de waterkering, waardoor er (net als bij niet constructief versterkte dijken) over relatief kleine lengtes grote vervormingen zullen kunnen optreden. Dit wekt de indruk dat bij een continue damwand ten behoeve van de macrostabiliteit het lengte-effect (dat de mechanisme-gevoelige lengte van het dijktraject weergeeft en bij macrostabiliteit 50 m is) gunstiger kan worden aangehouden dan bij een niet versterkte dijk. Er wordt ingeschat dat dit bij doorlopende wanden een gewichtsbesparing in de orde van grootte van ~10 % kan opleveren. Bij niet gekoppelde panelen zou de lengte-effect factor 50 m moeten blijven.

### Conclusies werkelijk sterkte- en stijfheidsgedrag (§7.1.1 van [ref. 1.]

Ook na bezwijken bleek de continue damwandconstructie in de proef nog steeds aan het waterkerende vermogen bij te dragen. Dit geeft te denken voor praktijksituaties met discontinue wanden: bij bezwijken van een discontinue damwand (voor geohydrologie) zou water de grond tussen de panelen kunnen uitspoelen. Een continue damwand lijkt daarmee aanzienlijk meer robuust.

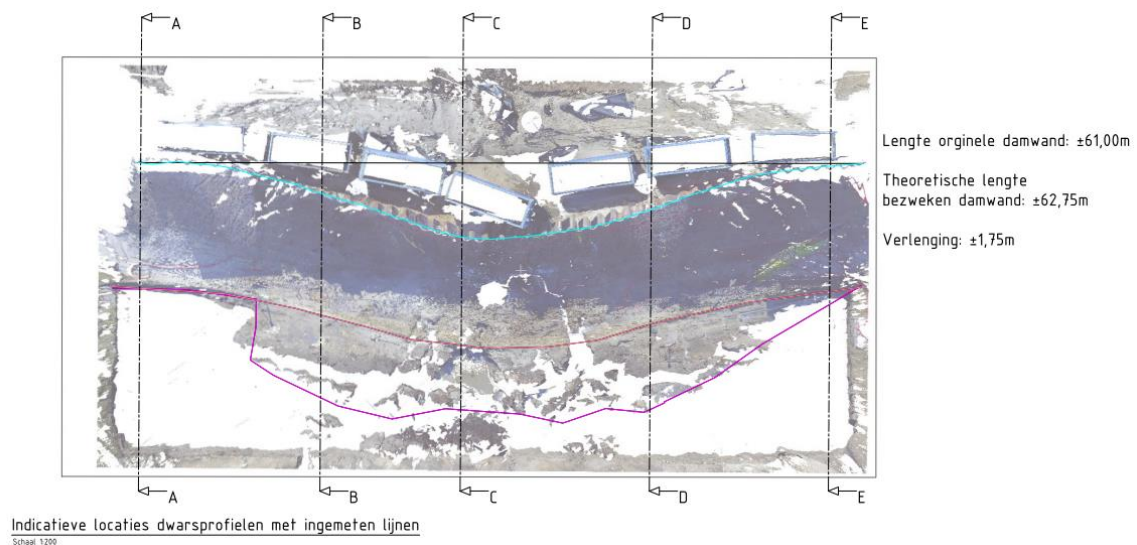
### Aandachtspunten voor TR langsconstructies (§7.2.2 van [ref. 1.]

Onderstaand een overzicht van een aantal concrete suggesties voor optimalisatie die aan het TR Langsconstructies wordt meegegeven en, na gericht onderzoek (op basis van de resultaten uit de POT- en FSP-proeven), in de toekomst kunnen worden opgenomen:

- continue wanden. Vanuit stabiliteitsoogpunt hebben continue wanden de voorkeur boven discontinue wanden vanwege de herverdelingscapaciteit van een continue wand in de lengte-as van de waterkering;
- discontinue wanden. De reden om een discontinue wand voor te schrijven komt voort uit de eis dat de geohydrologie niet beïnvloed mag worden. Uit de proef blijkt dat het voordelen biedt als een continue wand wordt toegepast, omdat continue wanden na bezwijken nog steeds kunnen bijdragen aan het waterkerende vermogen van de waterkering als geheel. Daarom lijkt verdere optimalisatie van versterkingen met langsconstructies mogelijk door onderzoek naar een continue wand die de geohydrologie niet beïnvloed (bijvoorbeeld naar damwandplanken met gaten erin);
- lengte-effect factor. Als gevolg van de grote herverdelingscapaciteit in de lengte-as van de dijk is voor continue langsconstructies een beloning op zijn plaats, waarbij kan worden gedacht aan een grotere mechanisme-gevoelige lengte (bij piping wordt bijvoorbeeld met  $a = 300$  m gerekend). Er wordt ingeschat dat dit bij doorlopende wanden een gewichtsbesparing in de orde van grootte van  $\sim 10$  % kan opleveren.

### Verlenging op basis van 3D scan (bijlage G van [ref. 1.]

Afbeelding 3.2 3D scan



### 3.2.2 Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen

De bevindingen van de Eemdijkproef hebben laten zien dat de doorgaande damwandplanken samenwerken in de lengte-as van de dijk doordat deze met sloten zijn verbonden. Daarbij wordt opgemerkt dat de membraanwerking voorkomt dat een damwand 'verder doorknipt'. De membraanwerking van een onverankerde damwand wordt gemobiliseerd bij grote vervormingen. Deze membraanwerking zorgt er dus primair voor dat na het bezwijken van de damwanden de totale zakking van de kruin beperkt blijft. Dit heeft een gunstig effect op de waterveiligheid doordat membraanwerking er bij een met een damwand versterkte dijk er voor zorgt dat de gevolgen bij bezwijken beperkt blijven. Hierbij wordt de kanttekening

gemaakt dat dit heeft niet direct een relatie heeft met het toepassen van een gording maar heeft vooral betrekking op de overall veiligheidsfilosofie van een met een damwand versterkte dijk.

Of een gording extra bijdraagt aan de membraanwerking is niet onderzocht bij de Eemdijkproef. Echter, vanuit de interviews wordt geconstateerd dat het toepassen van een gording mogelijk zelfs een negatieve invloed kan hebben op de membraanwerking in de damwand, doordat de damwand bij toepassing van een gording mogelijk onvoldoende ruimte krijgt om te kunnen verlengen (elastisch te vervormen). Wanneer de gording bezwijkt, komt de volledige belasting op de eerstvolgende verbinding, waardoor de damwandconstructie bezwijkt als een soort van ritsluiting die kapot wordt getrokken.

### 3.3 Vervormingen

De gedachte achter het voorschrijven van de gording bij een onverankerde damwand is voor een deel om onzekerheden af te dekken omtrent de berekende vervormingen in een EEM-analyse en om daarmee ongewenste (verschil)vervormingen te voorkomen.

In deze paragraaf is een overzicht weergegeven van de belangrijkste onderzoeksbevindingen in relatie tot het vervormingsgedrag en hoe goed de rekenmodellen de werkelijke vervormingen kunnen voorspellen.

#### 3.3.1 Bevindingen vervormingen Eemdijkproef

##### Hoe goed presteren de rekenmodellen (§6.6.3 van [ref. 1.]

*We kunnen concluderen dat (net als voor de groene dijk) de sterkte van de grond op basis van gemiddelde DSS waarden bij grote rek bij de bezwijkproef (dus niet in de aanlegfase) een te lage sterkte geeft en te grote deformatie, en dat de lage sterkte het te slappe gedrag nog eens versterkt in de berekeningen. Uitgaande van de best fit is er inderdaad een goede fit mogelijk, waarbij moet worden uitgegaan van pieksterktes op basis van de TA proef en bijbehorende lage rekken bij falen c.q. hoge stijfheden. Overall kan worden gesteld dat het goed mogelijk is de FSP-blauw na te rekenen.*

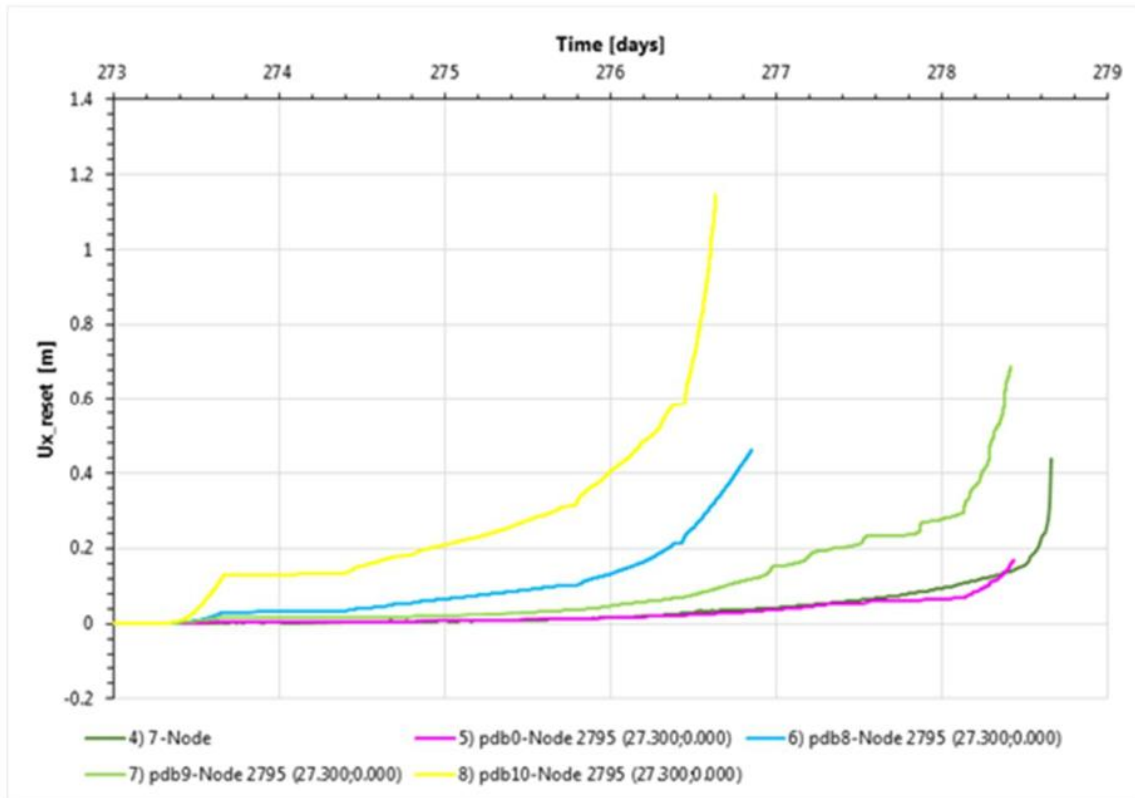
##### Conclusies werkelijk sterkte- en stijfheidsgedrag (§7.1.1 van [ref. 1.]

*De (ongedraineerde) vervorming van de dijk blijkt sterk gerelateerd aan de stabiliteit van de dijk of damwandconstructie. Dit kan betekenen dat het voldoende is om alleen de sterkte en stabiliteit in de uiterste grenstoestand te beoordelen, en dat (streng) vervormingseisen alleen in de aanlegfase relevant zijn. Op basis van dit inzicht kan onnodige verzwaring worden voorkomen (sterk situatie-afhankelijk, orde van grootte ~20 % bij lange onverankerde damwanden). Om een zinnige analyse van vervormingen te maken moet worden gerekend met gemiddelde waarden voor zowel sterkte- als stijfheidsparameters (zie ook Subparagraaf 7.2.1).*

Ter illustratie is in [ref. 1.] een vergelijking gemaakt tussen de gemeten en berekende vervormingen, zie afbeelding 3.3. Hierin is:

- 4) gemeten vervorming;
- 5) postdictie van de vervorming met verwachtingswaarden van de sterkte en stijfheid;
- 6) postdictie van de vervorming met karakteristieke waarde voor de sterkte en verwachtingswaarde van de stijfheid;
- 7) postdictie van de vervorming met verwachtingswaarde voor de sterkte en karakteristieke waarde van de stijfheid;
- 8) postdictie van de vervorming met de karakteristieke waarde van de sterkte en stijfheid.

Afbeelding 3.3 Verloop van gemeten en berekende horizontale vervormingen [ref. 1.]



### 3.3.2 Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen

De postdictieberekeningen van de FSP blauw hebben laten zien dat de aangehouden sterkte van de grond veel impact heeft op de berekende vervormingen. De modellen zijn in staat gebleken om het bezwijkgedrag goed te modelleren maar dan moet worden uitgegaan van de verwachtingswaarde van de pieksterkte bij kleine rekken (dus hoge stijfheid).

Indien voor een ontwerpberekening de karakteristieke sterkte en stijfheidseigenschappen worden toegepast, dan worden de vervormingen sterk overschat zoals de vergelijking tussen de ontwerpberekening en de meetresultaten ook heeft laten zien.

Dit resultaat geeft te denken in hoeverre de berekende vervormingen, uitgaande van karakteristieke stijfheid en sterkte, gebruikt moeten worden bij het ontwerp en toepassing van gordingen en of gordingen noodzakelijk zijn om (berekende) vervormingen te minimaliseren.

### 3.4 Plastisch gedrag damwanden

Zoals in §3.2.2 is geconstateerd, wordt membraanwerking gemobiliseerd bij grote vervormingen. Deze vervormingen zijn dermate groot dat in de meeste gevallen ook sprake is van plastisch gedrag in de flens van de damwanden. Daarom wordt in deze paragraaf een overzicht gegeven van de bevindingen in de Eemdijkproef met betrekking tot het plastisch gedrag van damwanden.

#### Achtergrond plastisch gedrag:

De EN 1993-5 geeft al richting over hoe hiermee om te gaan. De norm onderkent daarbij de volgende 4 doorsnedeklassen:

- klasse 1: doorsnede waarbij een plastische analyse met momentherverdeling uitgevoerd kan worden en waarbij de rotatiecapaciteit getoetst wordt;
- klasse 2: doorsnede waarbij een elastische analyse uitgevoerd wordt, maar waarbij gebruik gemaakt wordt van de plastische moment capaciteit van de doorsnede;
- klasse 3: doorsnede die ontworpen moet worden met een elastische analyse en elastische verdeling van de spanningen voor de doorsnede;
- klasse 4: doorsnede waarbij lokale effecten zoals knik of plooi de weerstand beïnvloeden.

Een damwandprofiel dat in klasse 2 valt, valt ook automatisch in klasse 1. Het verschil is dat bij een klasse 1 doorsnede een plastische analyse wordt uitgevoerd waarbij ook rotatiecapaciteit gecontroleerd moet worden en herverdelingscapaciteit wordt benut.

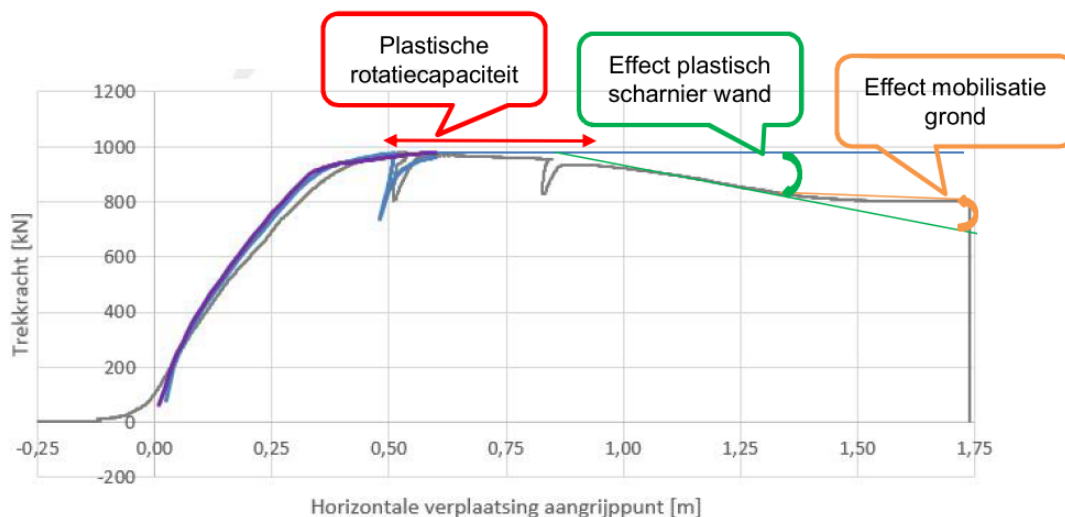
Opgemerkt wordt dat de PPL expliciet voorschrijft dat er in de uiterste vezel geen vloeï mag optreden en dat er dus alleen rekening gehouden mag worden met de elastische capaciteit (vergelijkbaar met de Klasse 3 conform de EN 1993-5).

#### 3.4.1 Bevindingen Eemdijkproef

##### Bezwijkgedrag AZ26 (§3.6.1 [ref. 1.]

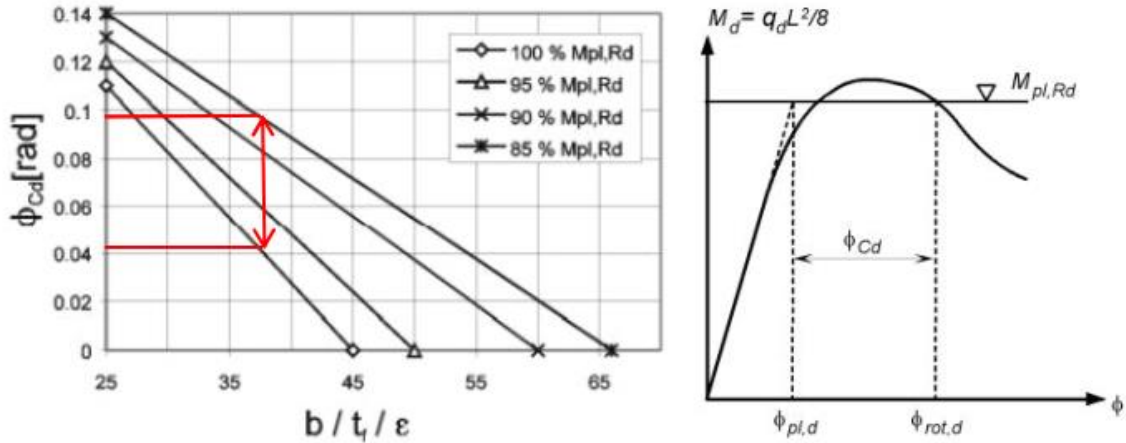
Het paneel van de drie dubbele AZ26 planken bestaat uit profielen uit doorsnedeklasse 2 en de configuratie heeft daarom rotatiecapaciteit na het bereiken van de maximale sterkte, zie ook afbeelding 3.4. Naarmate de vervorming toeneemt blijft in eerste instantie de trekkracht nagenoeg gelijk, pas bij grotere vervormingen is een duidelijke teruggang van de kracht te zien als gevolg van het plastisch bezwijken van het profiel. Net als bij het paneel van de drie dubbele AZ13-700 planken zie je, als de vervorming nog verder toeneemt, de afname van trekkracht minder worden omdat er steeds meer grond wordt gemobiliseerd.

Afbeelding 3.4 Bezwijkgedrag drie dubbele AZ26 configuratie [ref. 1.]



Conform EN 1993-5 zal het AZ26-profiel na bereiken van de maximale plastische momentcapaciteit nog 0,06 rad verder kunnen roteren waarbij nog minimaal 85 % van de momentcapaciteit behouden blijft, zie afbeelding 3.5.

Afbeelding 3.5 Plastic rotation angle Z-profiel AZ26 [EN 1993-5]



#### Conclusies over plastisch gedrag §7.1.6 [ref. 1.]

Aangezien de resultaten uit de POT-proeven geen enkele reden geven om te veronderstellen dat het niet zou mogen, wordt er aanbevolen om voor de constructieve toets van damwandprofielen aan te sluiten op de EN 1993-5, waarbij er voor relatief zware profielen die in doorsnedeklasse 2 vallen gerekend mag worden met de plastische momentcapaciteit. Dit geldt bij discontinue wanden onder de voorwaarde dat panelen uit minimaal drie dubbele damwandplanken bestaan. Met deze aanbevolen optimalisatie wordt een gewichtsbesparing van ~15 % gerealiseerd. Voor smallere damwandpanelen is binnen dit proefprogramma niet aangetoond dat ook de plastische momentcapaciteit wordt behaald.

#### 3.4.2 Constatering in relatie tot het onderzoek naar gordingen

De Eemdijkproef heeft laten zien dat een damwand na het overschrijden van de elastische momentcapaciteit nog veel herverdelingscapaciteit heeft, wat ook aansluit op de EN 1993-5. Ervan uitgaande dat een damwand ontworpen wordt conform de PPL waarbij alleen rekening wordt gehouden met elastische momentcapaciteit, dan heeft deze damwand dus ook zonder gording nog veel reststerkte en herverdelingscapaciteit (rotatiecapaciteit).

De PPL stelt dat het systeem zo ontworpen moet worden dat herverdeling mogelijk is en dat ductiel bezwijken optreedt (zie ook §1.3). De Eemdijkproef laat zien dat de onverankerde stalen damwand ductiel bezwijkt middels vloeien van de damwand. Naarmate de vervorming van de damwand groter wordt, zullen de staalspanningen herverdeeld worden en wordt ook de plastische capaciteit benut. Op basis van de Eemdijkproef kan worden geconstateerd dat een gording niet nodig is in verband met herverdelen en ductiel bezwijken omdat de damwand dit ook al kan doen zonder een gording.

### 3.5 Bevindingen/conclusie evaluatie Eemdijkproef

Bij de Eemdijkproef is een met damwand versterkte dijk tot bezwijken gebracht en dit heeft veel inzicht gegeven in het vervormingsgedrag van de dijk.

Doorgaande damwanden kunnen samenwerken in de lengte-as van de dijk doordat deze met sloten verbonden zijn. Deze 'membraanwerking' zorgt er met name voor dat bij grote vervormingen/bezwijken van de damwand de totale zakking van de kruin beperkt blijft.

In de huidige ontwerpsystematiek worden standaard strenge vervormingseisen opgelegd. Daarbij wordt standaard gerekend met de karakteristieke sterkte- en stijfheidseigenschappen van de grond. De Eemdijkproef heeft inzichtelijk gemaakt dat daarmee de vervormingen sterk overschat worden.

De vervormingstoets is dus al conservatief en het lijkt daarom niet doelmatig om ook nog een extra gording voor te schrijven om eventuele onzekerheden in de vervormingen af te dekken. Bij een eventuele vervormingstoets op maat waarbij afgeweken wordt van de standaard vervormingseisen, kan het toepassen van een gording mogelijk wel zinvol zijn om zo te grote (verschil)vervormingen af te dekken.

Een damwand in een waterkering heeft al redundantie doordat in de huidige richtlijn staat dat enkel de elastische momentcapaciteit gebruikt mag worden. Echter, de wat zwaardere damwanden, die veel worden toegepast bij dijkversterkingen, hebben ook een plastische momentcapaciteit en rotatiecapaciteit. Een stalen damwand kan dus na het overschrijden van de elastische momentcapaciteit nog heel veel herverdelen zonder dat daar een gording voor nodig is.



# 4

## CONSTRUCTIEVE ANALYSE GORDINGEN

### 4.1 Inleiding

In POVM Langsconstructies paragraaf 4.3 wordt redundantie van de damwandconstructie geëist. Om de beoogde herverdeling mogelijk te maken, wordt toepassen van een gording voorgeschreven. Herverdeling zou kunnen optreden als op 1 locatie de doorsnede zwakker ten opzichte van een naastgelegen locatie. Een dergelijke verzwakking kan bijvoorbeeld optreden als gevolg van een lokale zwakke plek in de ondergrond.

Om het gedrag van de gordingen te bepalen is er middels een raamwerkmodel een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd tussen de volgende parameters:

- horizontale veerstijfheid ter hoogte van de gording;
- ongesteunde lengte gording;
- verschillende gordingprofielen.

Er is een basismodel gebouwd en vanuit dit model is er een gevoeligheidsanalyse gedaan die in de volgende paragrafen beschreven wordt.

Ook is er onderzocht of er een kabelwerking optreedt (variant 2) bij fixatie van de opleggingen in de horizontale richting. Hierbij is er gekeken wat het effect van de axiale kracht is in de gording.

### 4.2 Uitgangspunten

In tabel 4.1 zijn de parameters voor de gevoeligheidsanalyse weergegeven.

Tabel 4.1 Paramaters gevoeligheidsanalyse

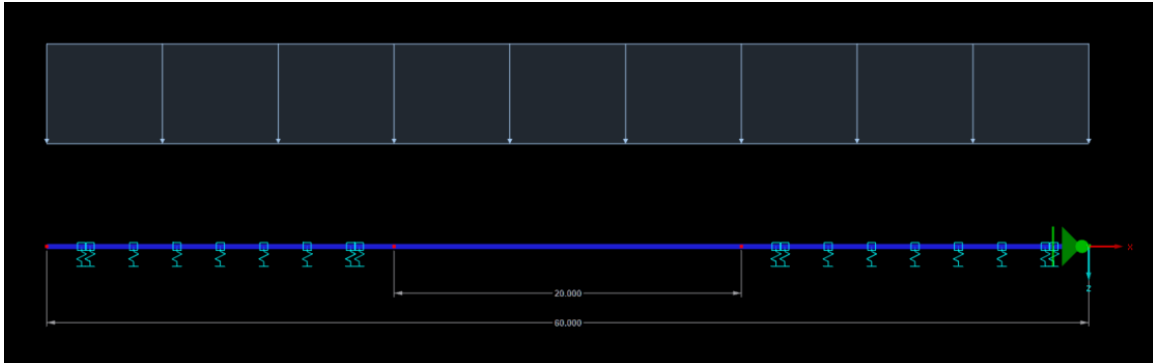
Parameters	Waarde	Eenheid
ongesteunde lengte (1/3L)	10/20/40	meter
veerstijfheid (k)	100/1.000/10.000	kN/m <sup>2</sup>
profiel	HEB 140/320/1000	-

Het basismodel bestaat uit een HEB 320 profiel en heeft een totale lengte van 60 meter met verende opleggingen over 1/3L aan de uiteinden en een ongesteunde lengte van 1/3L (20 meter) in het midden. De veerstijfheid (k) is gelijk aan 1.000 kN/m<sup>2</sup>. Er wordt uitgegaan van een lijnlast van 10, 20, 40 en 100 kN/m die respectievelijk optreden. Bij variant 1 is translatie bij de steunpunten in horizontale richting niet verhinderd en treedt er derhalve buiging zonder normaalkracht in de gording op.



In dit model is het uitgangspunt van een constante belasting. In werkelijkheid zal deze belasting variabel zijn en ook afhankelijk van de vervorming. Wanneer een gording ontworpen wordt dient daar dus ook rekening mee gehouden te worden. Echter voor het doel van dit onderzoek om inzicht te krijgen in het gedrag van de gording is deze schematisatie voldoende geschikt.

Afbeelding 4.1 Basismodel

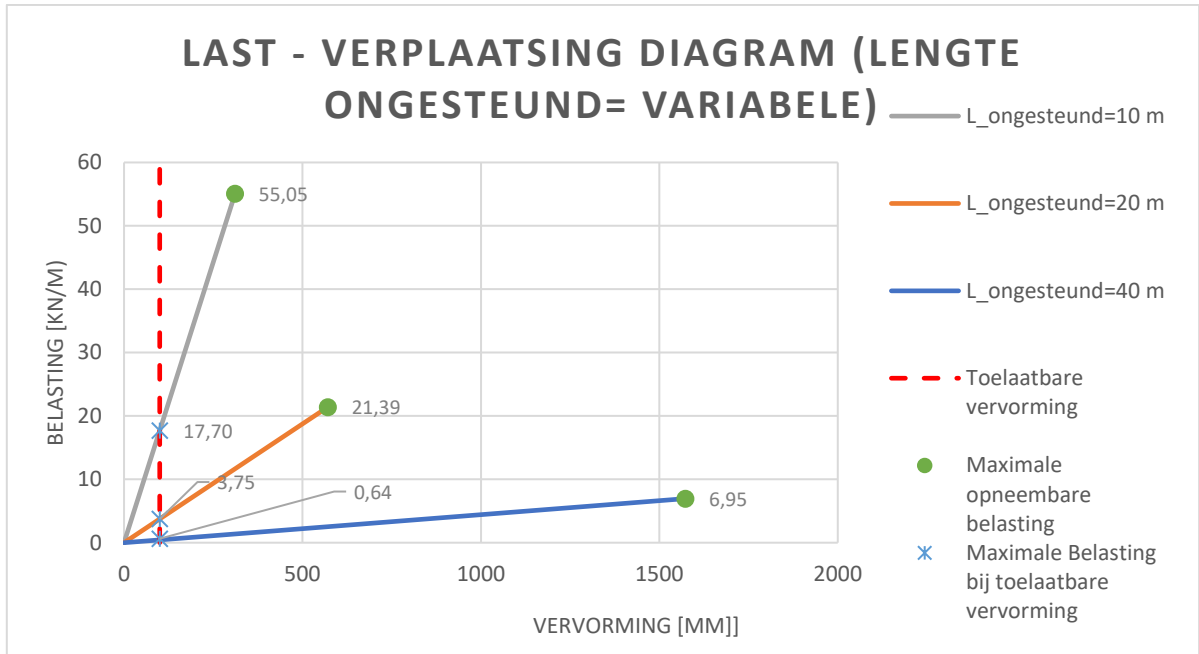


### 4.3 Gevoeligheidsanalyse ongesteunde lengte gording

In tabel 4.1 zijn de parameters van de ongesteunde lengte voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. In afbeelding 4.2 is de last-verplaatsing diagram te zien. Er ontstaat een lineair verband tussen de belasting en de verplaatsing. Door gebruik te maken van lineaire interpolatie is de belasting opgevoerd of afgevoerd totdat de elastische capaciteit is bereikt. Voor de vloeigrens is uitgegaan van  $355 \text{ N/mm}^2$  behorend bij staalkwaliteit S355.

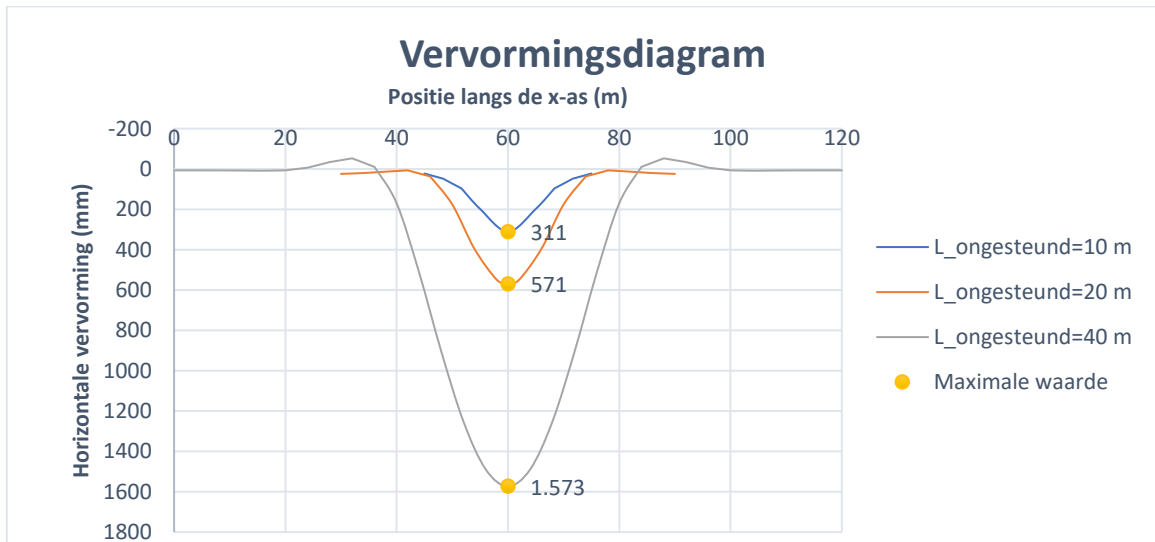
In het last-verplaatsing diagram is te observeren dat wanneer de ongesteunde lengte van de gording groter wordt, de verplaatsing ook groter wordt. De opneembare belasting wordt kleiner bij het vergroten van de ongesteunde lengte. Bij het verkleinen van de ongesteunde lengte wordt de verplaatsing kleiner en de opneembare belasting groter. Volgens POVM langsconstructies is de toelaatbare verplaatsing gelijk aan 100 mm. De maximale belasting bij de toelaatbare vervorming is weergegeven in afbeelding 4.2.

Afbeelding 4.2 Last-verplaatsing diagram (lengte ongesteund = variabel), Oranje lijn is het basismodel



In afbeelding 4.3 is het vervormingsdiagram langs de x-as weergegeven. Met de maximale waarde wordt bedoeld de maximale opneembare belasting voordat de constructie begint te vloeien.

Afbeelding 4.3 Vervorming diagram langs de x-as( lengte ongesteund = variabel)

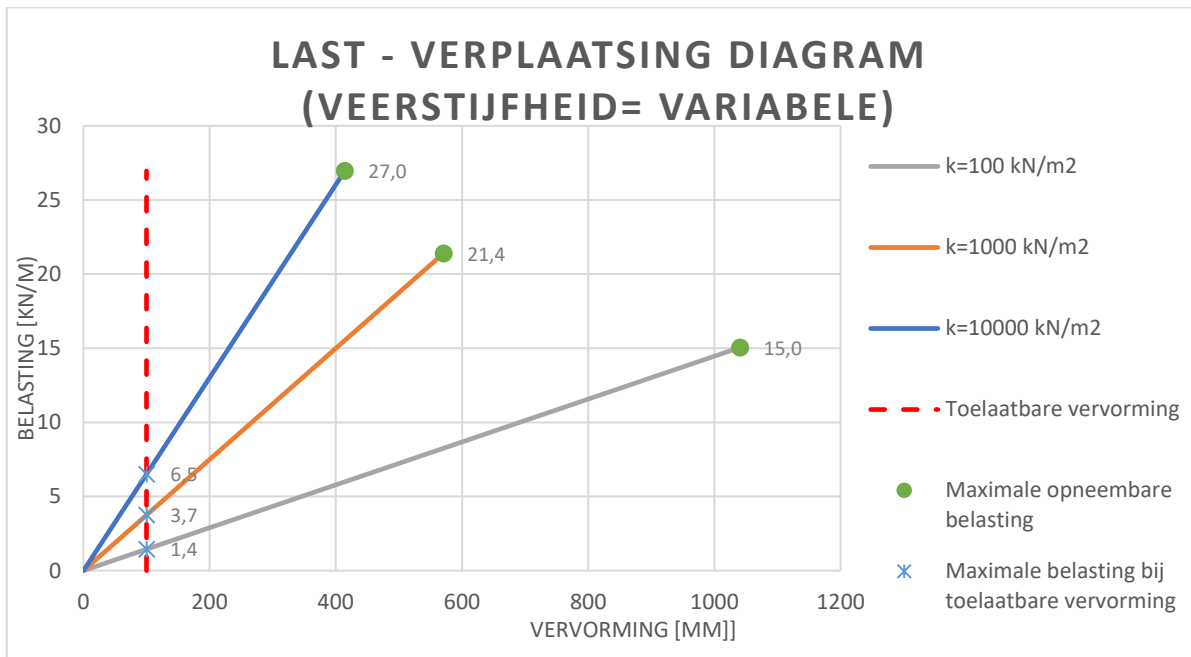


#### 4.4 Gevoeligheidsanalyse horizontale veerstijfheid

In tabel 4.1 zijn de parameters voor de veerstijfheid voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. In afbeelding 4.4 is het last-verplaatsing diagram te zien. In het last-verplaatsing diagram is te observeren dat wanneer de stijfheid van de verende oplegging groter wordt, de constructie een grotere belasting aan kan voordat het zijn elastische capaciteit heeft bereikt. Ook is te zien dat de verplaatsing kleiner wordt bij het verhogen van de veerstijfheid. Volgens POVM Langsconstructies is de toelaatbare

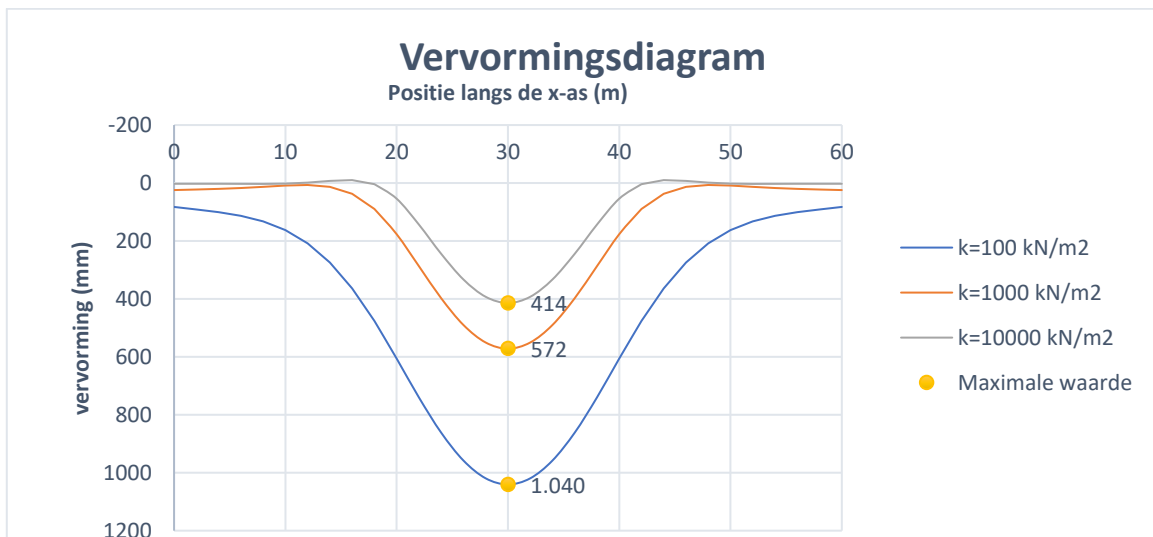
verplaatsing gelijk aan 100 mm. De maximale belasting bij de toelaatbare vervorming is weergegeven in afbeelding 4.4.

Afbeelding 4.4 Last-verplaatsing diagram (veerstijfheid = variabel)



In afbeelding 4.5 is het vervormingsdiagram langs de x-as weergegeven. In deze afbeelding is te observeren dat de vervorming kleiner wordt bij het verhogen van de stijfheid.

Afbeelding 4.5 Vervorming diagram langs de x-as( veerstijfheid= variabel)

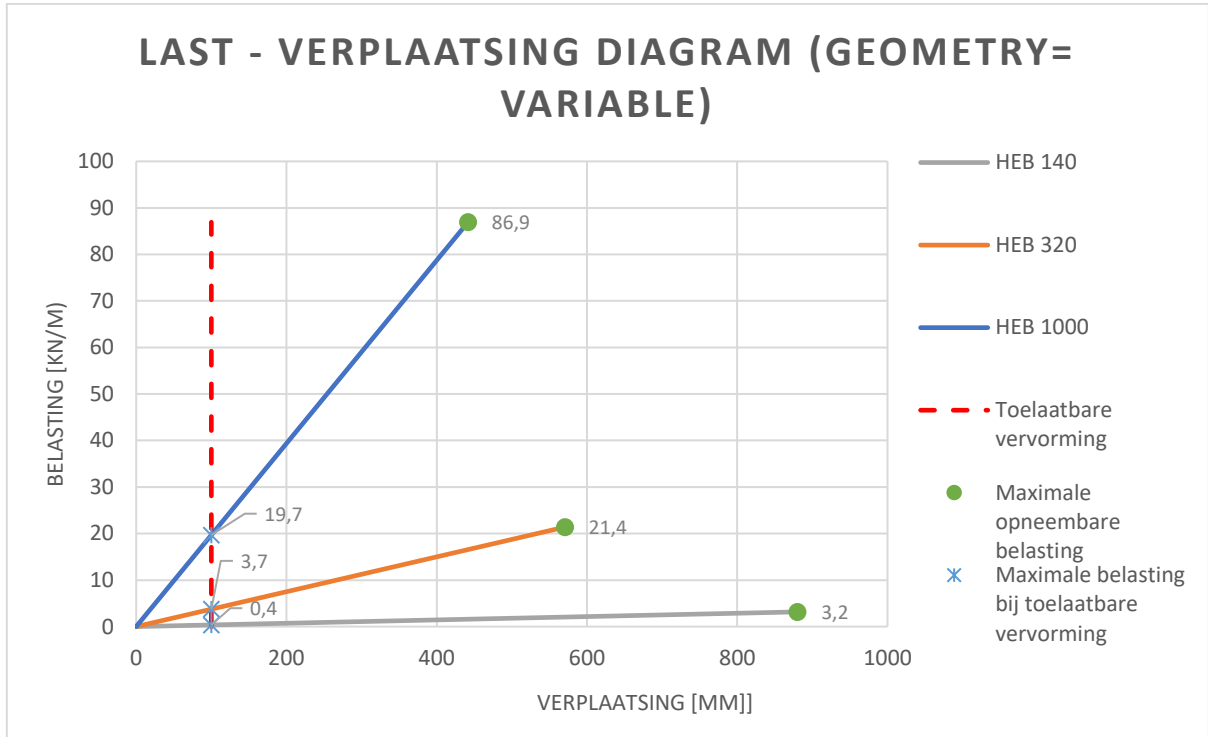


## 4.5 Gevoeligheidsanalyse profiel

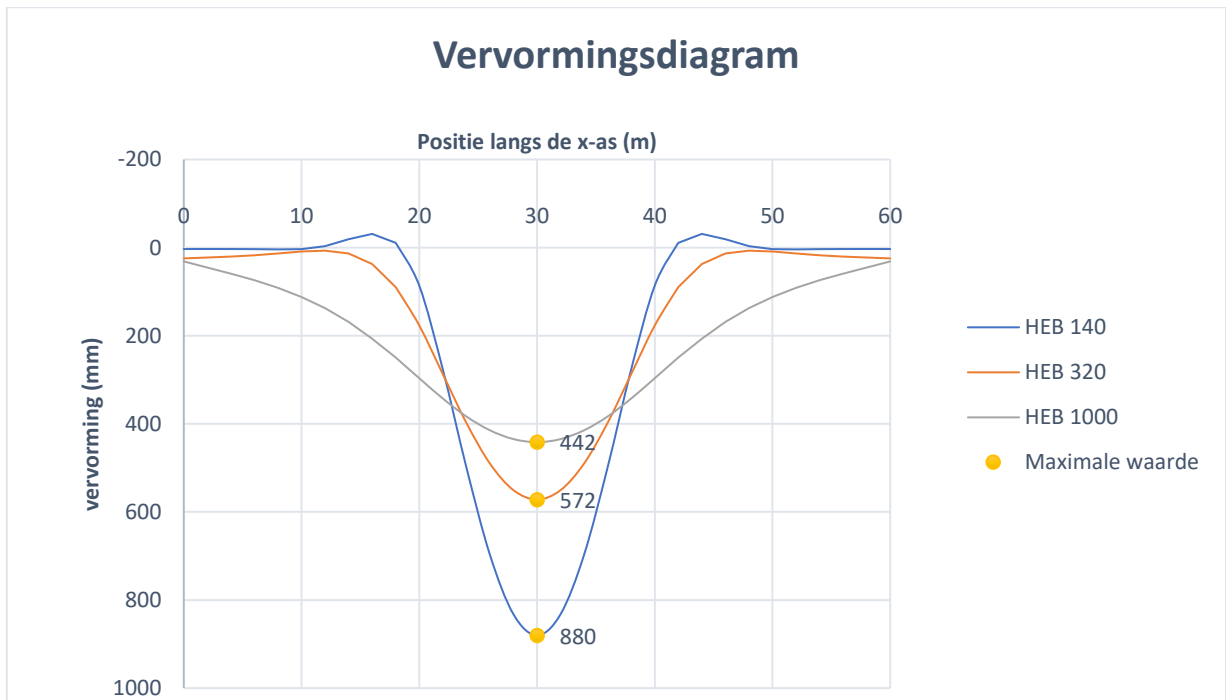
In tabel 4.1 zijn de verschillende soorten profielen voor het uitvoeren van de gevoeligheidsanalyse weergegeven. In afbeelding 4.6 is het last-verplaatsing diagram te zien. In het last-verplaatsing diagram is te observeren dat bij het toepassen van een groter profiel, de maximale verplaatsing kleiner wordt. Ook kan de

constructie een grotere belasting aan voordat het zijn elastisch capaciteit heeft bereikt. Bij het toepassen van een kleiner profiel wordt de verplaatsing groter en de maximale opneembare belasting kleiner. Volgens POVM langsconstructies is de toelaatbare verplaatsing gelijk aan 100 mm. De maximale belasting bij de toelaatbare vervorming is weergegeven in afbeelding 4.6.

Afbeelding 4.6 Last-verplaatsing diagram (geometrie = variabel)



Afbeelding 4.7 Vervorming diagram langs de x-as( profiel = variabel)



## 4.6 Variant 2 (analyse kabelwerking)

De gording speelt een belangrijke rol bij het optreden van kabelwerking in onverankerde damwanden. De gording fungeert als een soort trekband die de wand ondersteunt en de belastingen verdeelt. De damwand is door zijn vorm niet stijf in het vlak ten opzichte van de gording. Lokale uitbuiging van de damwand zal leiden tot opspannen van een (lange) gording vergelijkbaar met een kabel.

Om kabelwerking te benutten zal plastische vervorming van de gording toegestaan moeten worden. De gording zal immers eerst moeten vervormen door buigend moment waarna een normaalkracht in de gording kan ontwikkelen.

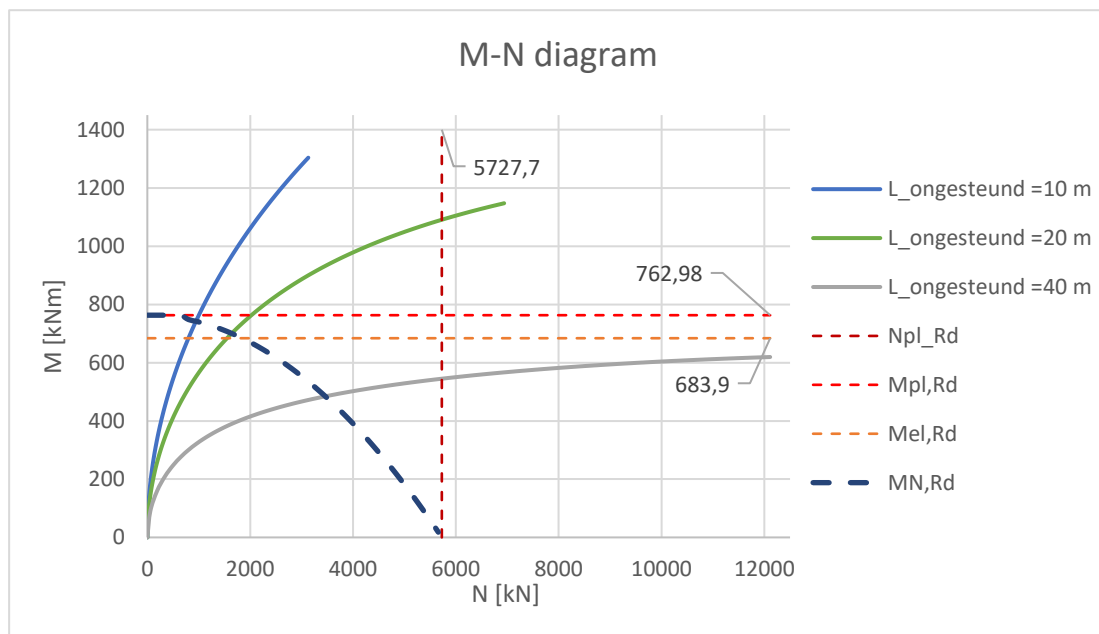
Bij de analyse van de kabelwerking is het basismodel (variant 1) als uitgangspunt genomen waarbij de uiteinden horizontaal zijn vast gezet. Hierbij zijn drie varianten in overweging genomen voor de ongesteunde lengte, namelijk 10, 20 en 40 meter.

In afbeelding 4.8 is het moment-normaalkracht diagram weergegeven. De gereduceerde rekenwaarde van het vloeimoment ( $M_{n,Rd}$ ) ten gevolge van de normaalkracht ( $N_{Ed}$ ) is bepaald volgens artikel 6.2.9 van NEN-EN 1993-1-1. De bijbehorende formule wordt hieronder weergegeven:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right)^2 \right]$$

Uit het M-N diagram is duidelijk te zien dat naarmate de ongesteunde lengte toeneemt, de normaalkracht ook groter wordt en het buigend moment kleiner. Na (plastisch) bezwijken onder buiging zullen vervormingen toenemen en zal nog een natraject optreden door kabelwerking. Het progressieve bezwijkmechanisme is niet meegenomen. Ook valt op te merken dat naarmate de optredende normaalkracht de plastische normaalkracht nadert, het gereduceerde moment naar nul neigt.

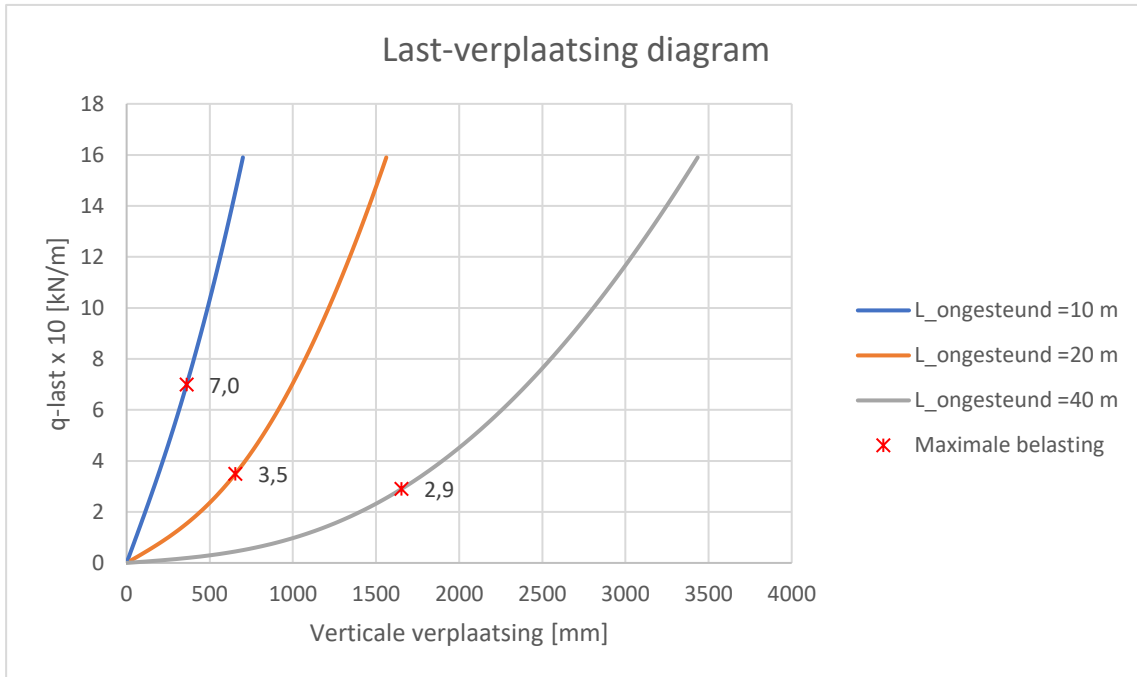
Afbeelding 4.8 Moment-Normaalkracht diagram (variant 2)



Het last-verplaatsing diagram is gegeven in

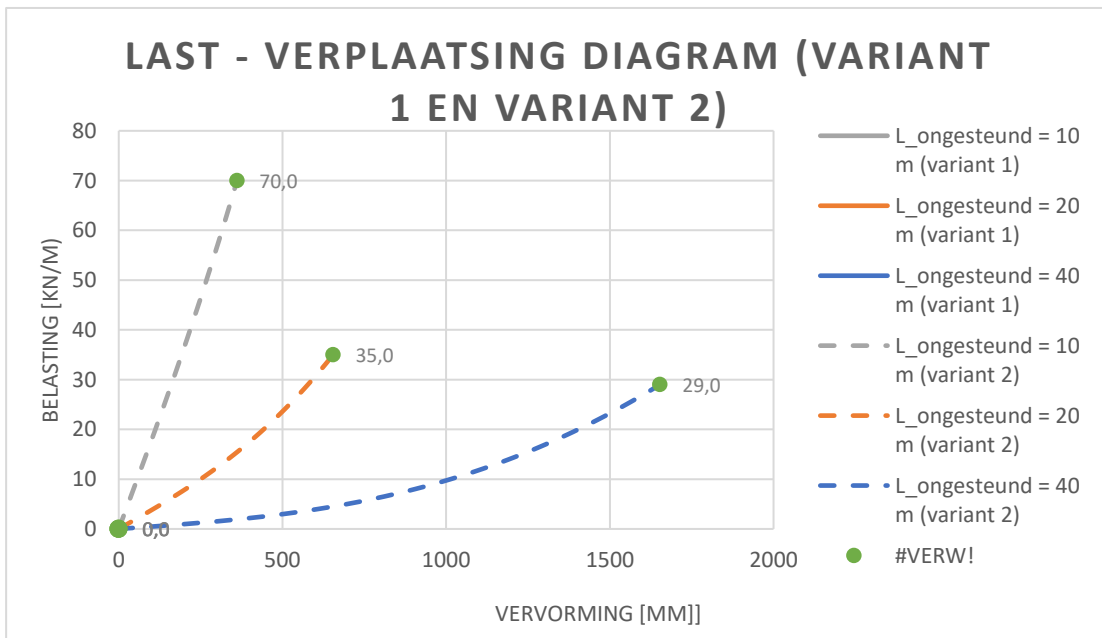
afbeelding 4.9. Uit het last-verplaatsingsdiagram is te zien dat naarmate de ongesteunde lengte groter wordt, de verplaatsing ook groter wordt. Bovendien valt op dat het last-verplaatsingsdiagram een niet-lineair verloop begint te vertonen bij toenemende ongesteunde lengte.

Afbeelding 4.9 Last-verplaatsing diagram (variant 2)



In afbeelding 4.10 is het last-verplaatsingsdiagram tussen variant 1 en variant 2 weergegeven. Uit het last-verplaatsingsdiagram kan worden geconcludeerd dat de constructie een hogere belasting kan weerstaan voordat het bezwijkt. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van een normaalkracht in variant 2.

Afbeelding 4.10 Last-verplaatsing diagram (variant 1 en variant 2)



## 4.7 Bevindingen/conclusie analyse gordingen

In dit hoofdstuk is een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd voor het toepassen van gordingen bij onverankerde damwanden, waarbij gevarieerd is met:

- horizontale veerstijfheid ter hoogte van de gording;
- ongesteunde lengte gording;
- verschillende gordingprofielen;
- fixatie van de gording.

De gevoeligheidsberekeningen laten logische resultaten zien: een grotere overspanning, lagere stijfheid of een lichtere gording leiden allemaal tot grotere vervormingen. Maar wat ook opvalt is dat de gording bij kleine vervormingen maar heel weinig belasting zal opnemen. Afhankelijk van de configuratie varieert dat tussen de 0,3 en 20 kN/m bij een maximale vervorming van 10 cm, waarbij wordt opgemerkt dat de bovengrens alleen maar haalbaar is met een hele zware gording of hele kleine overspanning. Een hele lichte gording, zoals in de PPL wordt gesuggereerd (HEB140), zal minder dan 1 kN/m mobiliseren.

Wanneer veel grotere vervormingen worden toegestaan zal de gording ook meer kracht kunnen mobiliseren. Echter, dat betekent vaak de damwand dan al plastisch aan het vervormen zal zijn en ook dat de verschil vervormingen weer relatief groot worden.

Het toevoegen van een axiale fixatie zorgt ervoor dat de gording meer belasting zal opnemen. Echter gaat dit pas meespelen bij grote vervormingen waarbij het midden van de gording meer dan 0,5 m verplaatst. Dit is ook enigszins vergelijkbaar met de membraanwerking zoals geobserveerd in de Eemdijkproef, waarbij is geconstateerd dat membraanwerking pas bij hele grote vervormingen een rol gaat spelen.

# 5

## GEBEURTENISSENBOOM

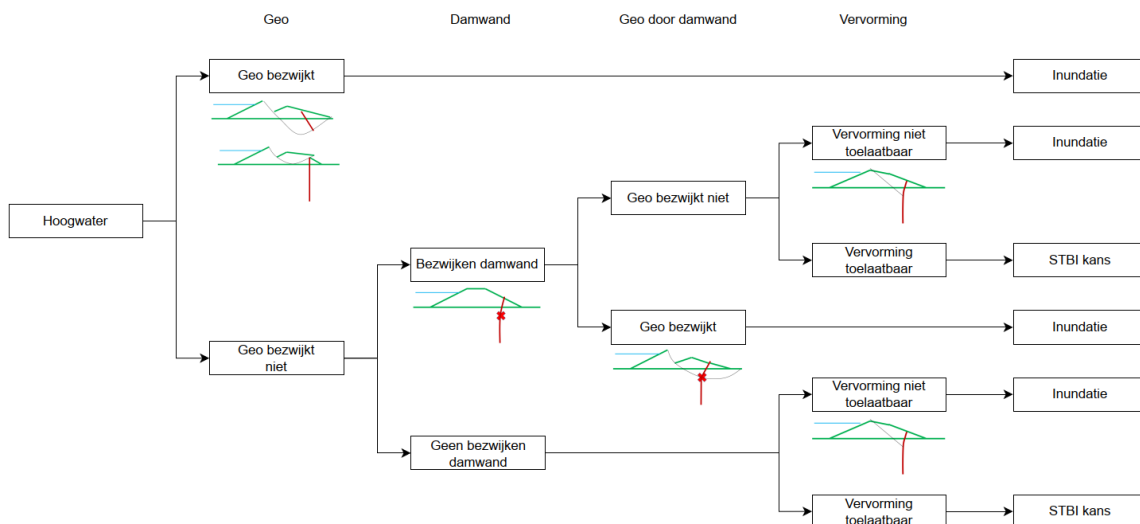
Om inzichtelijk te maken hoe de gording een functie vervult binnen het bezwijkproces van een dijk die is versterkt met een onverankerde damwand, is een gebeurtenissenboom opgesteld en beschouwd hoe dit past binnen de huidige ontwerpfilosofie. In §5.1 is de gebeurtenissenboom op hoofdlijnen beschreven. In §5.2 is beschreven hoe dit past binnen de huidige veiligheidsfilosofie die wordt toegepast en ten slotte is in §5.3 beschouwd welke functie de gording hierin vervult.

### 5.1 Algemene beschrijving gebeurtenissenboom

Om inzichtelijk te maken hoe een gording bij kan dragen aan de waterveiligheid is een gebeurtenissenboom opgesteld waarin het bezwijken van een dijk met een onverankerde damwand is beschreven, zie afbeelding 5.1. Daarbij worden de volgende gebeurtenissen beschreven:

- 1 geotechnisch bezwijken<sup>1</sup> met de damwand intact;
- 2 bezwijken van de damwand;
- 3 geotechnisch bezwijken<sup>1</sup> waarbij de damwand bezweken is;
- 4 vervorming (zakken van de kruin).

Afbeelding 5.1 Gebeurtenissenboom onverankerde damwand



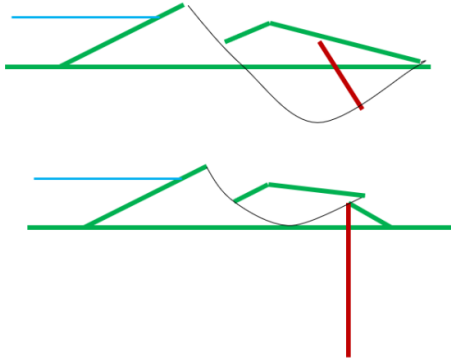
<sup>1</sup> Uitgangspunt voor deze gebeurtenissenboom is dat in het geval geotechnisch bezwijken optreedt de kruinvervorming altijd dermate groot is dat inundatie optreedt. Strikt genomen zou je hier ook 2 gebeurtenissen kunnen definiëren waarbij 1) de vervorming niet toelaatbaar is en bij 2) de vervorming toelaatbaar is. Met name voor een brede dijk kan dit een rol spelen vergelijkbaar met de restbreedte benadering voor groene dijken.



### 1) GEO bezwijken: afschuiving met de damwand intact

Uitgangspunt is dat de damwand intact is. Bij deze gebeurtenis treedt een geotechnische afschuiving op boven/onder de damwand waarbij dit direct leidt tot een kruindaling en overlopen van de waterkering. In deze situatie blijft de damwand zelf intact. Bezwijken is dus onafhankelijk van de sterkte van de damwand.

Afbeelding 5.2 Gebeurtenis: afschuiving met de damwand intact

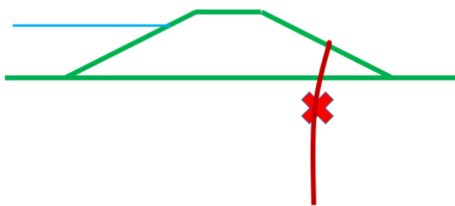


### 2) Bezwijken damwand

Indien 'geotechnisch bezwijken met de damwand intact' niet optreedt, is de volgende gebeurtenis het bezwijken van de damwand. De damwand overschrijdt dus de maximale sterkte. Dit betekent dat de damwand zal gaan 'vloeien' en daarmee meer gaan vervormen, de damwand zal wel altijd 1 geheel blijven en aan elkaar verbonden. Hierbij wordt wel de kanttekening gemaakt dat de sterkte van de damwand op verschillende manieren gedefinieerd kan worden, dit wordt ook nader toegelicht in §5.2.

Aangezien de damwand volledig is ingebed in de grond, betekent het overschrijden van de sterkte van de damwand niet automatisch inundatie van het achterland.

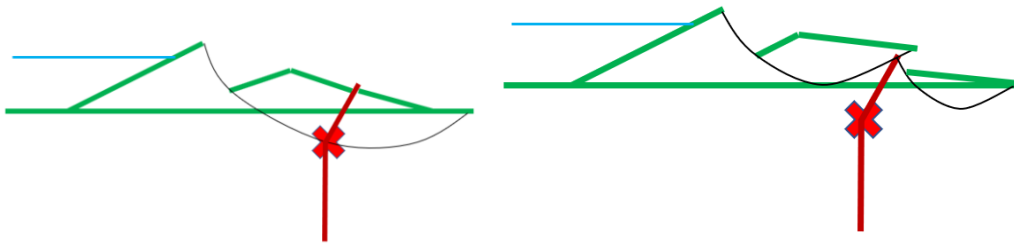
Afbeelding 5.3 Gebeurtenis: bezwijken damwand



### 3) Geo bezwijken: Afschuiving na bezwijken damwand

Bij gebeurtenis 1) is de damwand nog intact. Echter, als gevolg van het bezwijken van de damwand zou er mogelijk alsnog geotechnisch bezwijken kunnen optreden waarbij het glijvlak mogelijk door de damwand gaat of waarbij er 2 glijvlakken tegelijk ontstaan voor en achter de damwand. De exacte vorm van dit glijvlak zal heel sterk afhankelijk zijn van de (rest)sterkte van de damwand.

Afbeelding 5.4 Gebeurtenis: afschuiving na het bezwijken van de damwand



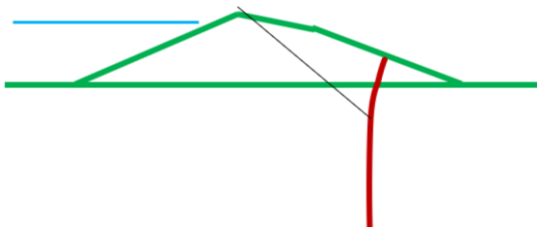
#### 4) Vervormingen

Uiteindelijk treedt inundatie van het achterland op doordat de kruindaling te groot is waardoor het dijklichaam overloopt. Dit kan direct gebeuren als gevolg van een geotechnische afschuiving, als direct gevolg van het bezwijken van de damwand of doordat het dijklichaam meer kan vervormen zonder dat afschuiven en/of bezwijken van de damwand optreed (maar dus wel te grote vervormingen).

Met name de situatie waarin de damwand bezwijkt hoeft het niet meteen te resulteren in een te grote kruindaling. Zoals ook in §0 is geconstateerd, kan een damwand nog over veel rotatiecapaciteit beschikken. De sterkte van de damwand neemt dan niet of nauwelijks af, de vervormingen worden wat groter en er wordt dan meer grond gemobiliseerd wat ervoor kan zorgen dat de kruindaling beperkt blijft.

In deze situatie zou een gording een functie kunnen vervullen om herverdeling bij grote vervormingen mogelijk te maken om zo de totale vervorming te kunnen reduceren en daarmee de hoeveelheid overloop te beperken.

Afbeelding 5.5 Gebeurtenis: ontoelaatbare vervormingen



## 5.2 Gebeurtenissenboom in relatie tot de huidige ontwerpmethodiek

De stappen in de gebeurtenissenboom sluiten in beginsel goed aan op de stappen in de ontwerpmethodiek.

In de huidige ontwerpmethodiek van een constructieve dijkversterking geldt dat een dijk die constructief wordt versterkt net zo veilig moet zijn als een dijk met een volledig in grond uitgevoerde versterking. Dat betekent dat de totale toelaatbare faalkans voor een dijk met constructieve elementen gelijk is aan de toelaatbare faalkans voor een gronddijk. Daarbij wordt conform de PPL de toelaatbare faalkans voor macrostabiliteit bij toepassing van stabiliteitsverhogende constructies gelijkmatig verdeeld over drie hoofd faaloorzaken, te weten geotechnisch falen (GEO), constructief falen (STR) en falen met betrekking tot grond-constructie-interactie (SSI):

$$P_{f;toelaatbaar;dsn;GEO} = P_{f;toelaatbaar;dsn;STR} = P_{f;toelaatbaar;dsn;SSI} = \frac{P_{f;toelaatbaar;dsn}}{3}$$

In het geval van een onverankerde damwandconstructie, waarbij geen rekening gehouden hoeft te worden met falen door onvoldoende houdkracht van de verankering, wordt het aandeel van falen met betrekking tot grond-constructie-interactie niet verder verdeeld over geotechnisch en constructief falen, maar blijft de toelaatbare kans voor geotechnisch en constructief falen gelijk aan 33 % van de totale toelaatbare faalkans. Daardoor ontstaat er enige robuustheid in het ontwerp van onverankerde stabiliteitsverhogende damwandconstructies.

Conform de PPL wordt de toelaatbare kans van (constructief) falen niet verder verdeeld over de verschillende elementen van de damwandconstructie. Daarnaast wordt in de ontwerpberekeningen ook geen rekening gehouden met de stijfheid van de gording. Dat betekent dat de damwand op zichzelf al over voldoende doorsnedecapaciteit beschikt om de belastingen die werkzaam zijn op de damwandconstructie op te kunnen nemen. Daarmee resulteert de toepassing van een gording bij onverankerde damwanden wel in extra taaierheid van de damwandconstructie, maar draagt deze (rekenkundig) niet direct bij aan een reductie van de kans van bezwijken.

In de huidige richtlijn is het uitgangspunt dat geotechnisch bezwijken, of het bezwijken van de damwand, direct leidt tot kruindaling met overstroming tot gevolg. Voor de geotechnische stabiliteit lijkt dit logisch doordat een afschuiving veelal gepaard zal gaan met grote vervormingen. Voor de sterkte van de damwand lijkt dit zeer conservatief. In de huidige methodiek wordt verondersteld dat wanneer de elastische capaciteit wordt bereikt, de waterkering direct bezwijkt met overstromen tot gevolg. Zoals ook is geconstateerd bij de Eemdijkproef, heeft een damwand na het bereiken van de elastische capaciteit nog heel veel (rest)sterkte en herverdelingscapaciteit. De opvolgende gebeurtenissen waarbij er alsnog geotechnisch bezwijken optreedt of waarbij de vervormingen niet toelaatbaar zijn, worden hierbij buiten beschouwing gelaten.

Verder is in de huidige methodiek een strenge toetsing opgenomen voor de vervormingen gebaseerd op de karakteristieke sterkte en stijfheidseigenschappen met daar bovenop nog een partiële factor om tot een rekenwaarde van de vervorming te komen. Om dan nog extra zekerheid te krijgen over de (verschil)vervormingen zou dan nog een gording moeten worden toegepast.

### 5.3 Functie van de gording in relatie tot de gebeurtenissenboom

Vanuit de huidige ontwerpmethodiek lijkt het toepassen van de gording met name gericht op het herverdelen van verschilvervormingen. Het standaard voorschrijven van een gording om deze reden lijkt niet doelmatig. Zoals ook in hoofdstuk 4 is geconstateerd, zal een gording bij een onverankerde wand pas wat gaan doen bij grote vervormingen. Echter zijn deze vervormingen dermate groot dat de constructie dan rekenkundig al als bezwiken is verondersteld, aangezien met de elastische capaciteit wordt gerekend.

Eventueel zou ook nog beredeneerd kunnen worden dat de gording een functie heeft voor het herverdelen van krachten na het bezwijken van de damwand om zo extra redundantie toe te voegen. Echter heeft de damwand van zichzelf al dermate veel herverdelingscapaciteit dat een gording daarvoor niet noodzakelijk lijkt. Daar bovenop geldt ook nog dat de damwand zonder gording al moet voldoen aan de faalkanseisen.

### 5.4 Bevindingen/Conclusie Gebeurtenissenboom

In dit hoofdstuk is een gebeurtenissenboom voor het bezwijken van een onverankerde damwand opgesteld. Deze gebeurtenissenboom geeft een duidelijk overzicht van de gebeurtenissen en hoe zich dat verhoudt tot de faalmechanismen die nu in de huidige ontwerpmethodiek worden beschouwd.

Hieruit volgt dat er bij de toetsing van de sterkte van de damwand veel (rest)sterkte onbenut wordt gelaten. Na het bezwijken van de damwand worden alle vervolgebeurtenissen buiten beschouwing gelaten. In 'werkelijkheid' heeft deze damwand mogelijk nog heel veel Plastische capaciteit totdat de vervormingen ontoelaatbaar zijn.

Ook wordt binnen de huidige filosofie voor de onverankerde damwand 33 % van de faalkansruimte onbenut gelaten in het geval van een onverankerde damwand. Ook hier zit dus weer enige robuustheid in het huidige ontwerp van een onverankerde damwand.

Voor het voorkomen van ontoelaatbare vervormingen kan de gording mogelijk ook een functie hebben. Echter, zoals ook in hoofdstuk 4 is geconstateerd zal een gording pas gaan functioneren bij grote vervormingen. De standaard vervormingstoets is in de huidige methodiek al dermate streng dat daarvoor een gording geen toegevoegde waarde heeft. Enkel wanneer van de standaard vervormingseisen wordt afgeweken kan de gording mogelijk helpen om te grote (verschil)vervormingen te voorkomen.

# 6

## PLAXIS 3D ANALYSE

### 6.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is er vanuit verschillende invalshoeken gekeken naar de functie van een gording bij een onverankerde langsconstructie. Om inzichtelijk te maken hoe een systeem van een langsconstructie met een gording in 3D reageert, zijn 3D analyses uitgevoerd.

### 6.2 Doel 3D analyse

Het doel van de 3D analyse is om vergelijkende analyses te maken waarbij verschillende situaties met en zonder gording met elkaar worden vergeleken om zo inzichtelijk te maken wat de bijdrage van de gordingen is. Daarbij zal met name gekeken worden naar het vervormingsgedrag en de krachtswerking in de damwanden en gording.

### 6.3 Case: Moordrecht

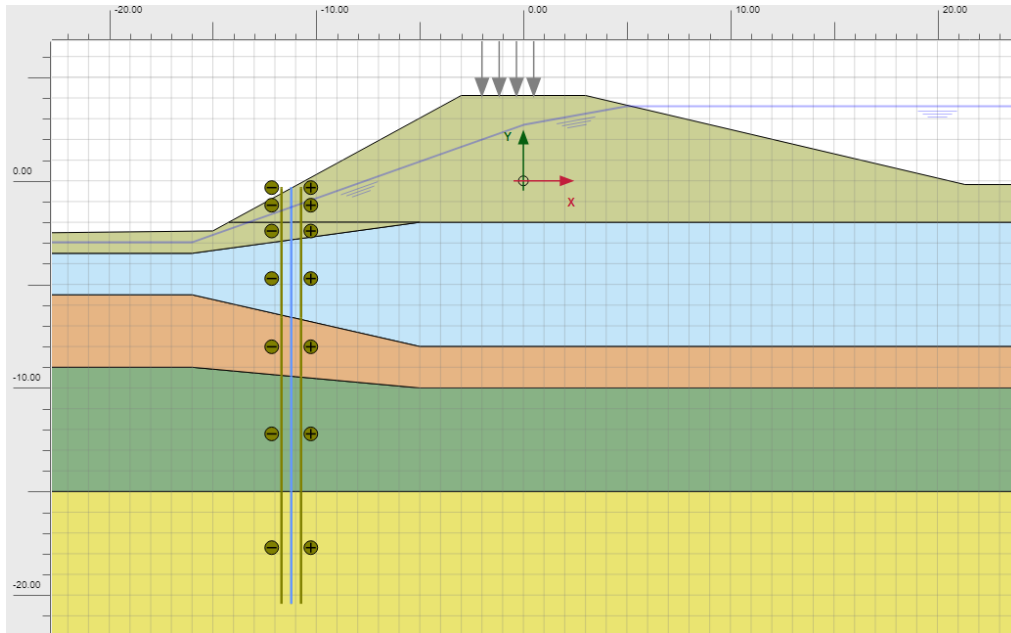
Voor deze 3D analyse is een naar een case gezocht met een dik slappe lagen pakket en lange damwanden en relatief grote vervormingen om zo het effect van de gordingen zo goed mogelijk inzichtelijk te maken.

Er is gekozen voor de case Moordrecht omdat deze situatie ook een lange damwand heeft van circa 20 m lang en een slappe lagen pakket van circa 13 m dik. Deze case is ook gebruikt in het onderzoek naar snijden van grond [ref. 3.].

Hierbij wordt opgemerkt dat deze case als 'inspiratie' is gebruikt. Enkele uitgangspunten zijn aangepast ten behoeve van dit onderzoek zodat dit beter aansluit op het onderzoeksdoel en de huidige ontwerppraktijk.

- het model is versimpeld zodat het geschikter is voor een 3D analyse. Zo zijn de grondlagen simpeler geschematiseerd en is het verloop van het maaiveld versimpeld;
- er is een fictieve verzwakking gemodelleerd in 3D om zo verschilvormingen te creëren;
- in het originele ontwerp zat een openingspercentage van 50 %, dit sluit niet aan op de huidige ontwerppraktijk en daarom zijn in deze analyse 3-dubbele damwandpanelen met 1 paneel opening toegepast (openingspercentage 25 %). Om wel een vergelijkbare stijfheid te hebben zijn lichtere, AZ26-700N, damwandplanken toegepast.

Afbeelding 6.1 Dwarsprofiel Moordrecht



## 6.4 Aanpak

Voor het opzetten van het 3D model is een stapsgewijze aanpak gevolgd om zo ook de nauwkeurigheid van het model te verifiëren:

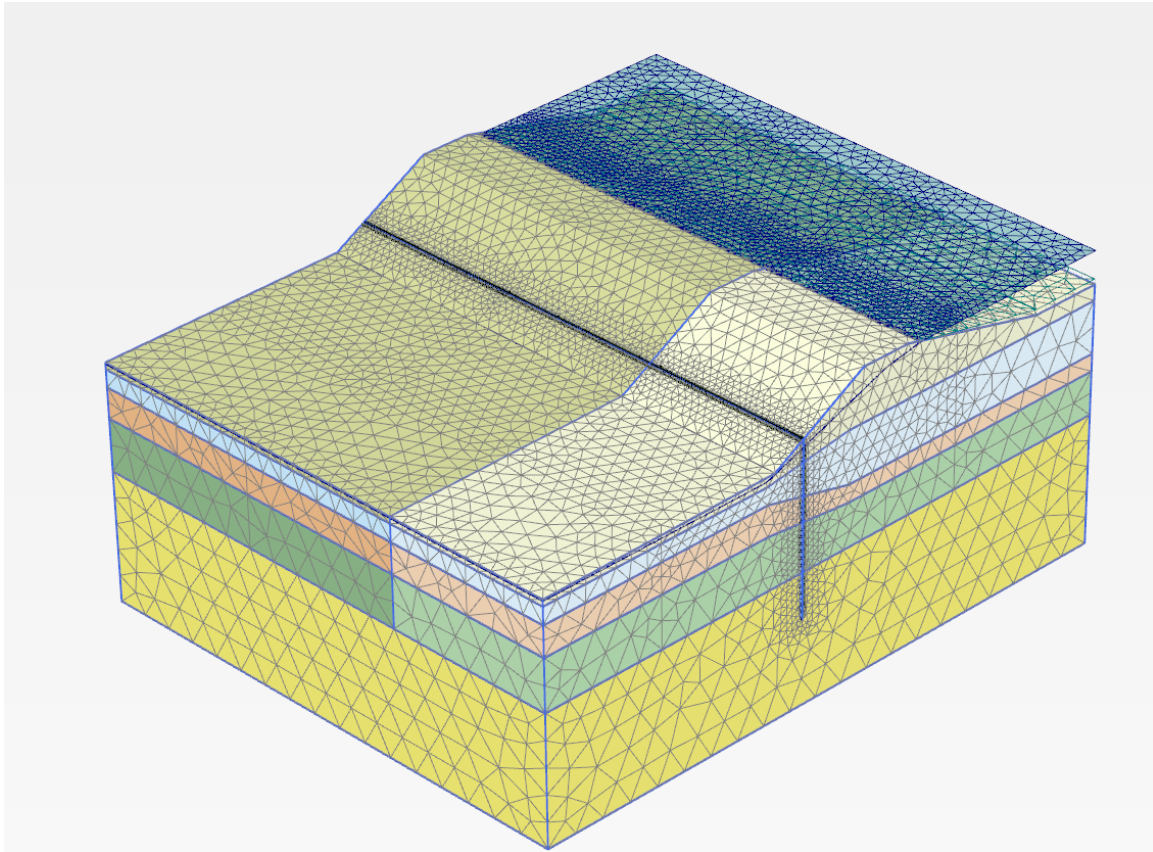
- 1 2D model;
- 2 gevoeligheidsberekeningen in 2D om de uitgangspunten voor de lokale verzwakking vast te stellen;
- 3 2D profiel 'extrapoleren' naar 3D;
- 4 resultaten van het 3D profiel worden vergeleken met het 2D profiel om zo de nauwkeurigheid van het 3D model te kunnen duiden;
- 5 in 3D de openingen en de lokale verzwakking modelleren;
- 6 Gevoeligheidsberekeningen met en zonder gording.

## 6.5 Uitgangspunten berekening

### 6.5.1 Geometrie

Uitgangspunt voor het 3D model is een lokale verzwakking van circa 40 m breed. De totale lengte van het model is 3 x de lengte van de zwakke plek dus 120 m breed. Uitgangspunt zijn damwandpanelen van 1,4 m breedte. De aangehouden breedte van het model is uiteindelijk afgestemd op een veelvoud van 1,4 m en daarom is een totale breedte van 121,8 m aangehouden. Er is een half symmetrisch model toegepast van 60,9 m breed, zie afbeelding 6.2. In deze afbeelding is de lokale verzwakking licht gekleurd.

Er is gekozen voor een scherpe overgang tussen de reguliere grondlagen en de verzwakte grondlagen om zo een zo duidelijk mogelijk effect van de gording te kunnen laten zien. In werkelijkheid zal deze overgang wat geleidelijker zijn.



## 6.5.2 Grondparameters

De parameterset wordt overgenomen vanuit het ontwerp van traject 14-1 [ref. 4.]. Daarbij wordt voor deze 3D analyse enkel de M1 set<sup>1</sup> gebruikt. Hierbij wordt opgemerkt dat dit dus de gedraineerde sterkte eigenschappen betreft.

Voor de kleilagen wordt het HS model toegepast en voor de zandlaag het MC model (in lijn met de ontwerp berekeningen). Een overzicht van de parameters is toegevoegd in bijlage II.

### Lokale verzwakking

Om het effect van de gording te kunnen onderzoeken wordt een verzwakking<sup>2</sup> van de grondlagen gemodelleerd. Middels een aantal Plaxis 2D gevoeligheidsberekeningen is het effect van gereduceerde sterkte- en stijfheidseigenschappen van de cohesieve lagen inzichtelijk gemaakt, de resultaten zijn weergegeven in tabel 6.1.

Wat opvalt is dat enkel het verlagen van de stijfheid weinig effect heeft, daarom worden voor de lokale verzwakte grondlagen zowel de grondsterkte en de grondstijfheid verlaagd. Verder is tijdens de berekeningen geconstateerd dat bij een reductie van de sterkte en stijfheid van 20 % het numerieke proces moeizaam verloopt en de rekentijd snel toeneemt. Er is daarom gekozen voor een reductie van 15 %. Dit

<sup>1</sup> De term M1 volgt uit de OSPW methodiek en betreft de niet-associatieve set met karakteristieke grondsterkte eigenschappen zonder rekenwaarden.

<sup>2</sup> Opgemerkt wordt dat ook andere lokale verzwakkingen mogelijk zijn, zoals een geul of restprofiel. In die gevallen wordt dat meegenomen in de ontwerpdoorsnede, waaruit de dimensionering volgt voor de betreffende doorsnede. Dit is dus geen discontinuïteit waarvoor de gording bedoeld is/afdoende is om deze 'op te vangen'.

leidt tot meer dan een verdubbeling van de vervormingen van de damwand en lijkt daarmee voldoende voor dit onderzoek.

Tabel 6.1 Gevoeligheidsberekeningen Plaxis 2D: verzwakking grond cohesieve lagen

Variant	Sterkte reductie in %	Stijfheidsreductie in %	SF [-]	U <sub>x;kop</sub> [mm]	Mveld [kNm/m]
1 Basis*	0	0	1,56	194	151
2	-10	0	1,41	317	246
3	-15	0	1,34	393	297
4	-2	0	1,27	557	410
5	0	-1	1,56	211	165
6	0	-15	1,57	220	173
7		-2	1,57	229	180
8	-10	-10	1,42	341	262
9	-15	-15	1,35	429	329
10	-20	-20	1,28	627	458

\* AZ26-700N 25 % opening).

### 6.5.3 Modelling damwand

De damwand wordt in Plaxis 3D op 2 manieren gemodelleerd, zie ook afbeelding 6.3:

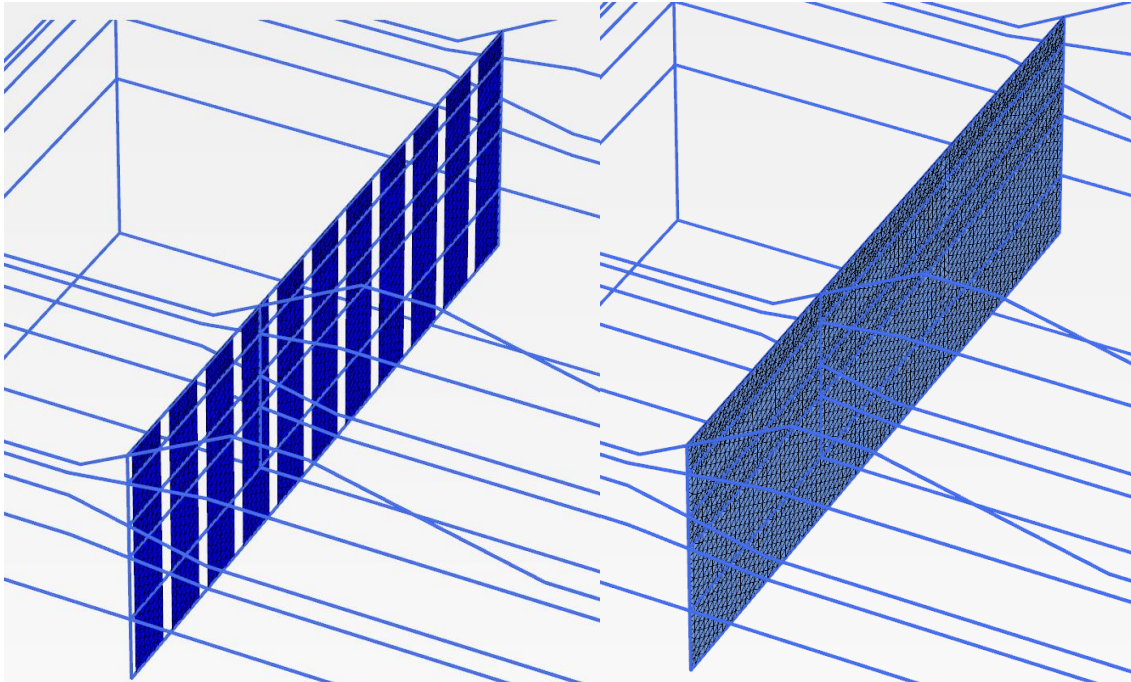
- 1 een discontinue wand met openingen. De damwand wordt in dat geval gemodelleerd met de daadwerkelijke stijfheidseigenschappen van het damwand profiel;
- 2 een doorgaande wand met equivalente stijfheidseigenschappen. Deze modellering is vergelijkbaar met de modellering zoals in de Plaxis 2D analyse.

De uiteindelijke hoeveelheid toegepaste damwand (hoeveelheid sterkte en stijfheid) is voor beide manieren van modeleren zoals hierboven beschreven dus gelijk.

Er is voor gekozen om de damwand als een platte plaat te modelleren om zo een robuust model te hebben. In afbeelding 6.4 zijn de aangehouden damwandeigenschappen in de 3D analyse weergegeven.



Afbeelding 6.3 Schematisering damwandprofiel. L: discontinue wand R: doorgaande wand



Afbeelding 6.4 Damwandeigenschappen

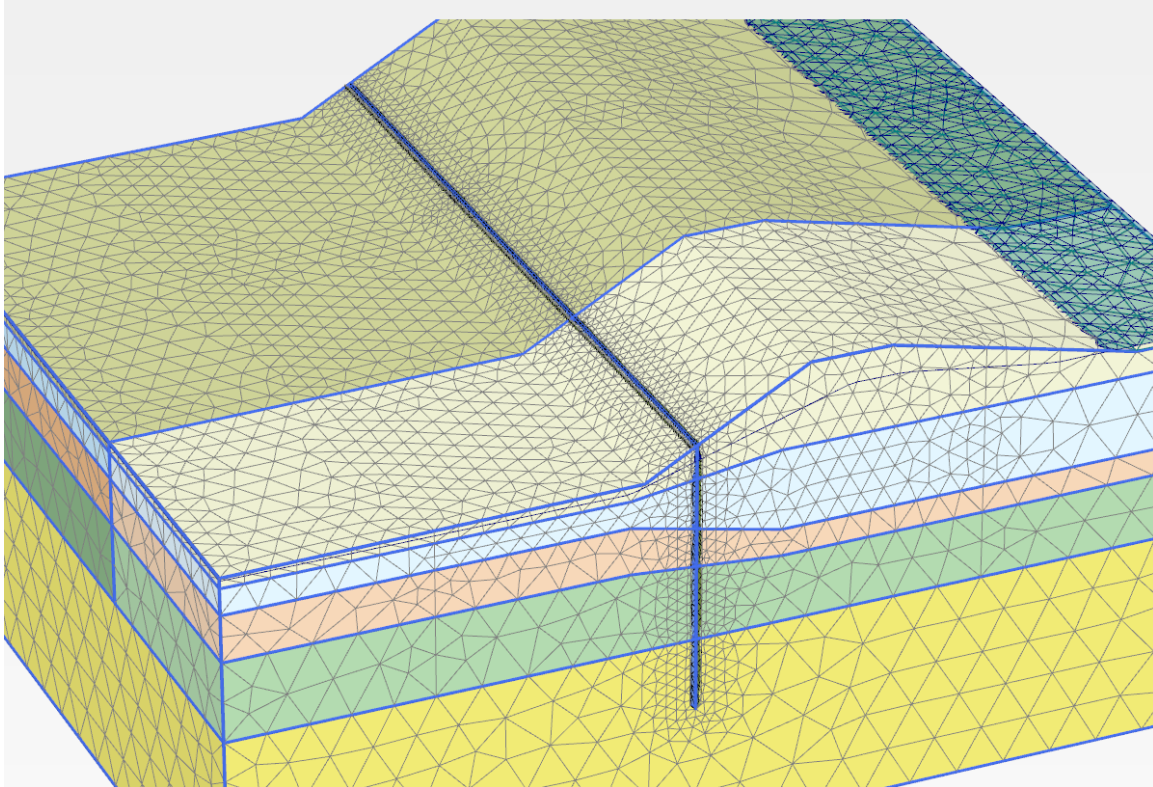
Material set			
Identification number		1	2
Identification		AZ 26-700N	AZ 26-700N equivalent
Comments		Gecorrodeerd, reductiefactor 0,84	Gecorrodeerd, reductiefactor 0,84
Colour		<span style="color: blue;">■</span> RGB 0, 0, 255	<span style="color: blue;">■</span> RGB 122, 163, 240
Material type		Elastic	Elastic
Properties			
d	m	0,4580	0,4580
$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	2,462	1,847
Isotropic		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
$E_1$	kN/m <sup>2</sup>	656,7E3	492,5E3
$E_2$	kN/m <sup>2</sup>	13,13E6	9,850E6
$\nu_{12}$		0,000	0,000
$G_{12}$	kN/m <sup>2</sup>	656,7E3	492,5E3
$G_{13}$	kN/m <sup>2</sup>	329,3E3	247,0E3
$G_{23}$	kN/m <sup>2</sup>	1,098E6	823,3E3
Rayleigh $\alpha$		0,000	0,000
Rayleigh $\beta$		0,000	0,000
Prevent punching		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## 6.5.4 3D mesh

Het betreft een relatief groot model en daarom is geprobeerd enkel een fijne mesh toe te passen in de zones waar dat nodig is. De aangehouden mesh is weergegeven in afbeelding 6.5, met name rondom de damwanden is een fijne mesh toegepast, ook in de dijkkern is de mesh relatief fijn en daarbuiten wordt de mesh langzaam grover.

De mesh-fijnheid is globaal vergelijkbaar met de mesh zoals is toegepast in de 2D analyse. Hierbij wordt wel opgemerkt dat in Plaxis-2D standaard 15-knoops elementen worden toegepast die aanzienlijk nauwkeuriger zijn dan de 10-knoops elementen die in Plaxis 3D worden toegepast.

Afbeelding 6.5 Mesh 3D analyse



### 6.5.5 Fasering

In afbeelding 6.6 is de aangehouden fasering in Plaxis 3D weergegeven. Er is een relatief simpele fasering aangehouden waarbij na de initiële belastingstappen een hoogwatersituatie wordt gemodelleerd, gevolgd door een phi-c reductie (pcr).

Afbeelding 6.6 Fasering



## 6.6 Resultaten Plaxis 3D analyse

### 6.6.1 Validatie 3D model

De eerste stap in het opzetten van het 3D model is het omzetten van het 2D model naar een 3D model en het vergelijken van de resultaten. In tabel 6.2 is de vergelijking weergegeven voor een model met een doorgaande damwand en daaruit volgt dat de resultaten goed overeenkomen. Het 3D model geeft iets gunstigere resultaten maar dit verschil wordt acceptabel geacht.

Tabel 6.2 Vergelijking Plaxis 2D-3D (doorgaande damwand)

	Plaxis 2D*	Plaxis 3D	
SF	1,56	1,63	[-]
$U_{x,wand}$	194	187	[mm]
$M_{max}$	151	148	[kNm/m]

\*  $R_{inter} = 0,5$  (klei)/0,67 (zand).

In tabel 6.3 zijn de resultaten weergegeven voor het model met de discontinue damwand. Wat opvalt is dat in het 3D model de SF toeneemt en de vervormingen en het moment afnemen ten opzichte van het 2D model met een doorgaande wand. Dit effect is ook waargenomen bij het onderzoek naar snijden van grond [ref. 3.] en is te verklaren door het effect van de interface.

*In de case van Moordrecht is standaard een relatief lage interface waarde aangehouden. Deze interface is in feite een verzwakking van het grondgedrag rondom de damwand. Bij een equivalente plaat is er over het volledige oppervlak een interface aanwezig. Echter bij het modelleren van een wand met openingen is de interface niet over het volledige oppervlakte aanwezig (alleen ter plaatse van de damwand). In de zone waar de opening zit is er sprake van grond-grond interactie en dus geen interface. [ref. 3.]*

In tabel 6.3 is tevens het resultaat gepresenteerd van een 2D analyse waarbij de interface sterkte gecorrigeerd is voor de openingen. Deze resultaten laten net als de doorgaande damwand zeer vergelijkbare resultaten zien.

Tabel 6.3 Vergelijking Plaxis 2D-3D (Discontinue damwand)

	Plaxis 2D* (R=0,63/0,75)	Plaxis 3D + Openingen	
SF	1,63	1,70	[-]
$U_{x,wand}$	128	133	[mm]
$M_{max}$	112	118**	[kNm/m]

\*  $R_{inter} = 0,63$  (klei)/0,75 (zand).

\*\* omgerekend van het moment in het paneel naar een gemiddelde waarde per strekkende meter.

### 6.6.2 Effect van gordingen

Om de impact en functie van gordingen inzichtelijk te maken zijn 3D analyses gemaakt zonder gording, met een HEB320-gording en met een HEB1000-gording. Voor deze vergelijking is dus ook de verzwakking gemodelleerd. Daarbij is zowel gekeken naar de situatie met een doorgaande damwand en een discontinue damwand.

In tabel 6.4, tabel 6.5 en afbeelding 6.7, afbeelding 6.8 en afbeelding 6.9 is een overzicht van de resultaten gepresenteerd waarbij er van  $x=0$  tot  $x=20$  m een lokale verzwakking in de ondergrond aanwezig is. De resultaten laten zien dat het toepassen van een gording heel weinig effect heeft op het vervormingsgedrag en de belasting van de damwand. Zelfs bij een hele zware gording (HEB1000) nemen de vervormingen en het buigend moment maar met maximaal 7 % af.

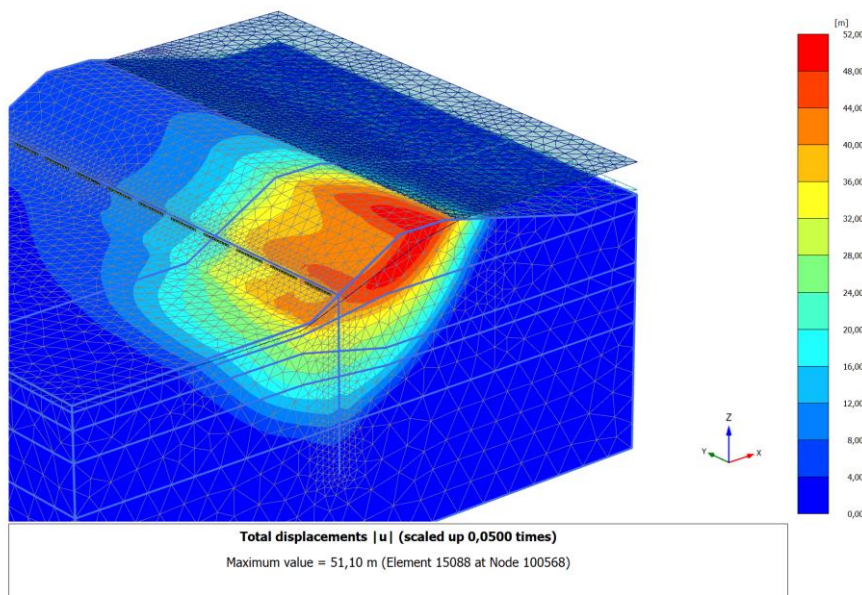
Tabel 6.4 Vergelijking Gordingen - Doorgaande damwand

	Geen Gording	HEB320	HEB1000	
SF	1,55	1,55	1,56	[-]
$U_{x,wand}$	389	391 (~0 %)	371 (-5 %)	[mm]
$M_{max}$	302	309 (+2 %)	293 (-3 %)	[kNm/m]

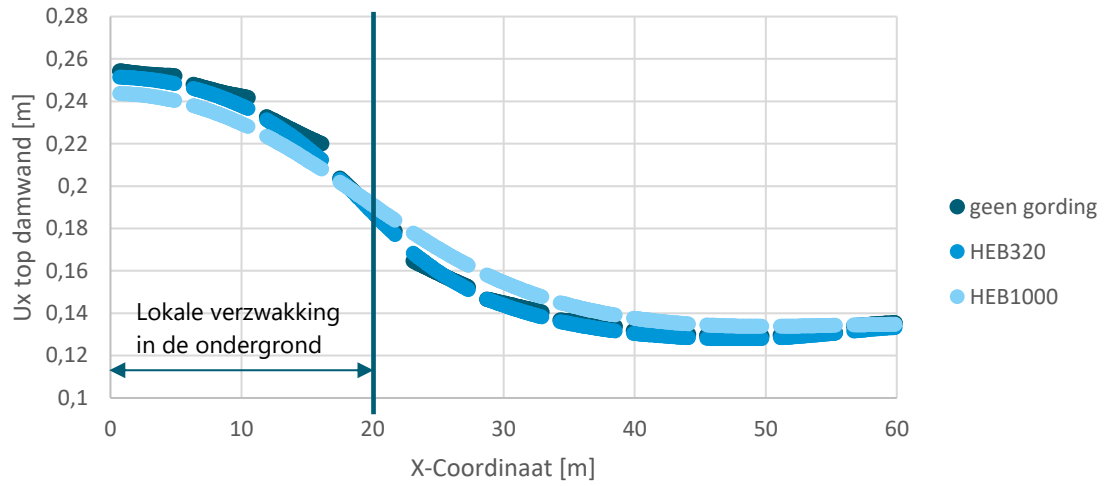
Tabel 6.5 Vergelijking Gordingen - Discontinue damwand

	Geen Gording	HEB320	HEB1000	
SF	1,58	1,61	1,62	[-]
$U_{x,wand}$	258	255 (-1 %)	245 (-5 %)	[mm]
$M_{max}$	286	283 (-1 %)	267 (-7 %)	[kNm/m]

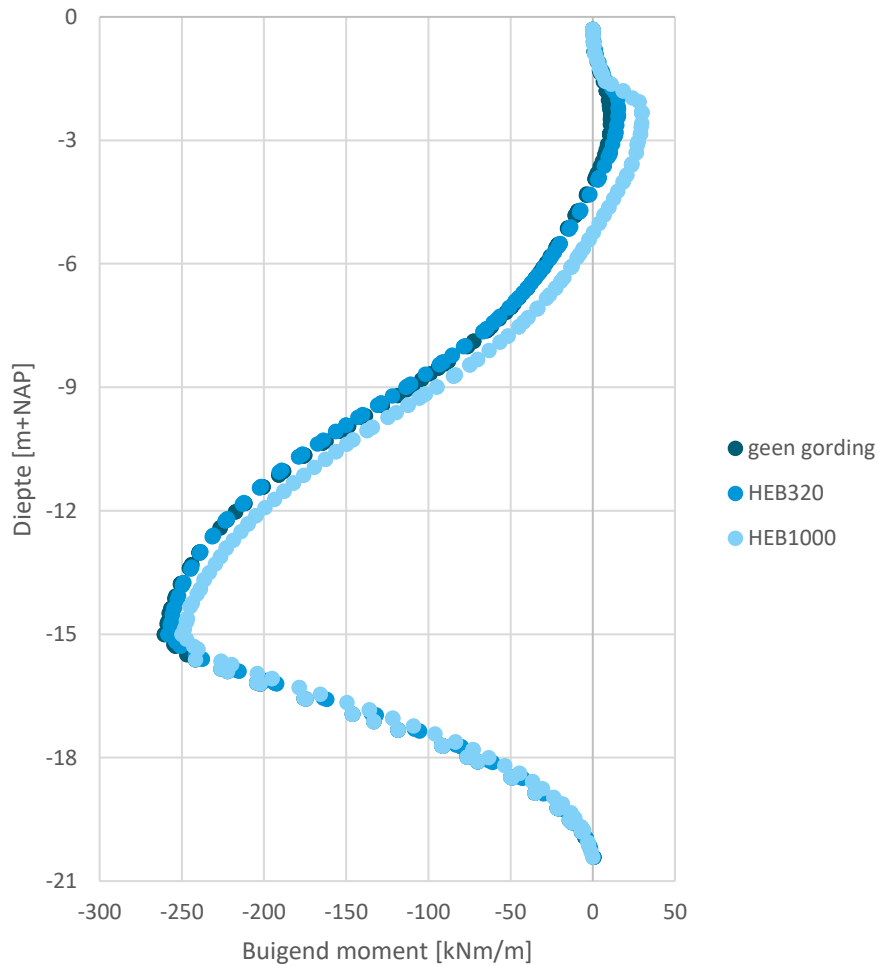
Afbeelding 6.7 Bezwijkvlak Plaxis 3D



Afbeelding 6.8 Horizontale vervormingen top discontinue damwand



Afbeelding 6.9 Buigend moment discontinue damwand



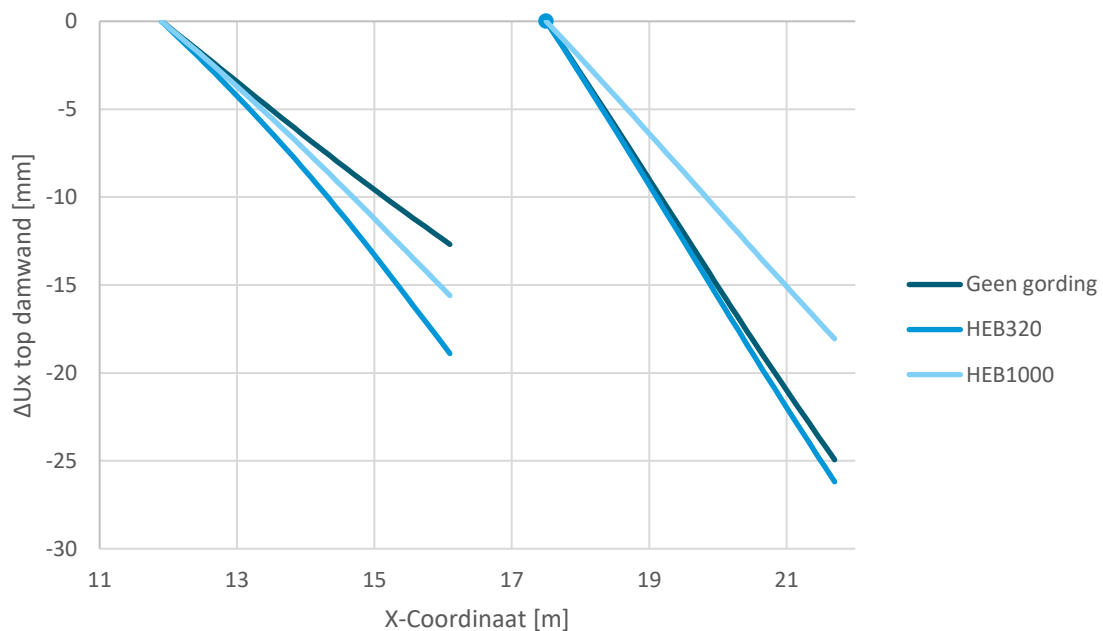
### Rotatie damwandpanelen

In afbeelding 6.8 is te zien dat de totale vervorming van de damwand niet veel verschilt voor de configuraties. Wat wel opvalt is dat er een verschil is te zien tussen de rotatie van de damwandpanelen. Voor 2 damwandpanelen is hierop ingezoomd, zie afbeelding 6.10, hier is de verschilvervorming gepresenteerd ten opzichte van de rand van het damwandpaneel dat het meeste vervormt. Dit betreft dus in feite de rotatie van het damwandpaneel.

Voor het linker paneel (X-coördinaat 11,9 - 16,1) is te zien dat gording juist zorgt voor een grotere rotatie ten opzichte van het paneel zonder gording. Het toepassen van de gording heeft dan dus een ongunstig effect.

Voor het rechter paneel (X-coördinaat 16,9 - 21,7) is de rotatie groter. In dit geval zorgt de HEB1000 voor een kleine afname van de rotatie van het damwandpaneel ten opzichte van de situatie zonder gording. De situatie met de HEB320 gording geeft nagenoeg geen verschil met de situatie zonder gording.

Afbeelding 6.10 Relatieve verschil vervorming per damwandpaneel



## 6.7 Bevindingen/conclusie Plaxis 3D analyse

De resultaten van de 3D analyse laten zien dat het toepassen van een gording heel weinig effect heeft op het gedrag van de damwand in het geval van een lokale verzwakking van orde grootte 40 m breed. Naarmate de stijfheid van de gording toeneemt wordt het effect op het gedrag van de damwand groter. Echter laat de Plaxis 3D analyse zien dat, zelfs als er een HEB1000 wordt toegepast, dit resulteert in slechts een beperkte afname van 7 % op het buigend moment en een 5 % afname van de vervorming bij een discontinue damwand. De resultaten van de doorgaande damwand geven een vergelijkbaar beeld waarbij het effect van de gording nog kleiner is. De conclusie dat het effect van de gording beperkt is sluit ook goed aan op de bevindingen in de constructieve analyse in hoofdstuk 4.

Ook met het oog op het voorkomen van verschilvervorming (rotatie) van de damwandpanelen laat de Plaxis 3D analyse zien dat enkel een hele zware gording hier een beperkt gunstig effect heeft. Een lichte gording kan dan zelfs een ongunstig effect hebben.



# 7

## CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 7.1 Conclusies

In dit onderzoek is onderzocht onder welke condities het toepassen van een gording bij een onverankerde damwand zinvol is. Daarvoor is vanuit een aantal verschillende invalshoeken gekeken wat de functie van de gording is en wat dit betekent voor de waterveiligheid.

De constructieve gevoeligheidsanalyse en de Plaxis 3D analyse hebben laten zien dat een gording weinig tot niets doet bij kleine vervormingen. Pas bij echt grote (verschil)vervormingen in de orde van 0,5 m zal de gording kracht gaan herverdelen op de voorwaarde dat een relatief stijve gording wordt toegepast.

Dergelijke grote vervormingen betekenen dat de damwand veelal plastisch moet vervormen. Zoals ook in de Eemdijkproef en bij het opstellen van de Gebeurtenissenboom is geconstateerd, is het in de huidige ontwerpmethodiek niet toegestaan om te rekenen met plastisch gedrag van de damwanden. Dit betekent in feite dat de gording binnen de huidige systematiek geen functie heeft doordat de damwand zelf al aan alle eisen voldoet. De vervormingen van de damwand worden bepaald zonder gording en vervolgens wordt het effect van deze vervormingen op het functioneren van de waterkering beoordeeld. Uit de analyse blijkt dat een gording geen doelmatige maatregel is om deze vervormingen te beperken voor situaties waar deze (te) groot zijn.

Gesteld zou kunnen worden dat een gording wel bijdraagt aan het verkleinen van de kans dat na bezwijken van de damwand inundatie optreedt zoals ook in de gebeurtenissenboom is toegelicht. Daarbij wordt opgemerkt dat een doorgaande damwand van zichzelf al kan herverdelen door membraanwerking in de sloten, zoals ook de Eemdijkproef heeft laten zien. Voor een situatie met damwandpanelen zou hiervoor een gording gebruikt moeten worden. Het is echter niet mogelijk hier een ontwerp voor te maken zolang we geen plasticiteit van de damwanden toestaan. De volledige doelbetrouwbaarheid wordt nu toegekend op het bezwijken van de damwanden, eventuele kansen van opvolgende gebeurtenissen worden niet meegenomen.

De enige functie die dan resteert is het voorkomen van (verschil)vervormingen. Hoewel verschilvervormingen niet direct leiden tot inundatie van een achterland, kunnen mogelijke onzekerheden hiermee worden afgedekt. Echter heeft de Eemdijkproef laten zien dat in de huidige methodiek de vervormingen zeer conservatief worden berekend aangezien we uitgaan van zowel laag karakteristieke sterkte en stijfheidsparameters. Daarnaast wordt er binnen de huidige methodiek ook nog een modelfactor van 1,3 toegepast op de berekende vervorming. De vervormingstoets is hiermee al dermate conservatief dat het toepassen van een gording voor het voorkomen van te grote lokale vervormingen niet meer doelmatig is.

### 7.2 Aanbeveling

De PPL stelt dat het systeem zo ontworpen moet worden dat herverdeling mogelijk is en dat ductiel bezwijken optreedt (zie ook §1.3). Een onverankerde stalen damwand zal van zichzelf altijd ductiel bezwijken middels vloeien van de damwand zoals ook bij de Eemdijkproef is geobserveerd. Naarmate de vervorming van de damwand groter wordt, zullen de staalspanningen herverdeeld worden en wordt ook de plastische

capaciteit benut. Daarnaast zal bij groter wordende vervormingen ook herverdeling in de grond plaatsvinden als gevolg van boogwerking en spanningsspreiding. De constructieve gevoeligheidsanalyse en de Plaxis 3D analyse hebben laten zien dat een gording hier niet veel aan toevoegt. De vervormingstoets is in de huidige methodiek dermate conservatief dat ook hier een gording geen toegevoegde waarde heeft.

Daarom wordt aanbevolen om de eis voor het standaard toepassen van een gording bij een onverankerde damwand te laten vervallen onder de volgende voorwaarden:

- er worden warmgewalste damwandprofielen<sup>1</sup> toegepast;
- bij een discontinue damwand worden damwandpanelen van minimaal 2-dubbele damwandprofielen toegepast (in lijn met de PPL [ref. 1.]);
- de damwand wordt ontworpen op basis van de elastische momentcapaciteit<sup>2</sup>.

Zolang er enkel op de elastische momentcapaciteit getoetst wordt en geen mogelijkheid is om kansen toe te kennen aan vervolgebeurtenissen na het (elastisch) bezwijken van damwanden, heeft de gording geen toegevoegde waarde.

Het toepassen van een gording wordt ook niet gezien als een 'goedkope' maatregel waar je veel robuustheid voor terug krijgt. Het realiseren van de verbinding van de gording betreft complexe en dure werkzaamheden met name op locaties met weinig ruimte. Het realiseren van de gordingen is ook tijdrovend in verband met het vele laswerk voor het realiseren en keuren van de verbindingen waardoor ook de overlastduur voor de omgeving relatief lang is. Voor grote projecten gaat het hier al snel om kilometers gording en besparingen van minimaal EUR 150.000 per kilometer (uitgaande van een lichte gording). Voor projecten zoals IJsselwerken en Meanderende Maas betekent dat al snel een besparing van M€ 1 per project.

Indien niet aan de eerder genoemde voorwaarden wordt voldaan en er toch een gording ontworpen moet worden dan wordt aanbevolen om de gording te modelleren in het damwandmodel om zo de krachtswerking en vervormingsgedrag te analyseren. Dit kan door het maken van een 3D model met een lokale verzwakking zoals in dit onderzoek is gedaan of middels een 2D model waarbij de gording als een veerwaarde wordt meegenomen.

Daarnaast zijn er enkele specifieke uitzonderingssituaties denkbaar waar het toepassen van een gording wenselijk is. De gording kan met name gebruikt worden voor het spreiden van een lokale externe belasting die direct aangrijpt op de constructie. Bijvoorbeeld bij een puntbelasting vlak achter de damwand, aanrij- of aanvaarbelasting. In dat geval kan de gording simpelweg ontworpen worden op basis van de puntbelasting en de gewenste spreidingslengte vergelijkbaar met het ontwerp van een bolderbelasting op een kademuur. Een boven belasting van een weg valt hier niet onder, daarbij kan ervan uitgegaan worden dat de belasting via de wegfundering en de ondergrond voldoende spreidt zodat dit gezien kan worden als een verdeelde belasting.

---

<sup>1</sup> De sloten van warmgewalste damwandprofielen zijn dermate sterk dat een damwand eerst zal vloeien op de hoekpunten van het damwandprofiel en niet in het slot. Voor een koudgewalst profiel zijn de sloten veel minder sterk en is het onzeker of de damwanden ook bij grote vervormingen in het slot blijven.

<sup>2</sup> Dit is conform de PPL die voorschrijft dat er in de uiterste vezel geen vloeï mag optreden en dat er dus alleen rekening gehouden mag worden met de elastische capaciteit (vergelijkbaar met de Klasse 3 conform de EN 1993-5). Indien er ooit voor gekozen wordt ook een toets op de plastische doorsnede capaciteit (klasse 2) toe te staan dan is ook de aanbeveling om de eis voor de standaard gording te laten vervallen. Dit met de gedachte dat de damwand dan nog steeds ductiel zal bezwijken en nog beschikt over rotatie capaciteit.



### 7.3 Aanbevelingen buiten de scope van dit onderzoek

Zoals ook in de inleiding benoemt is het doel van dit onderzoek om een advies te geven met betrekking tot het toepassen van gordingen bij onverankerde damwanden. Door de opzet van dit onderzoek waarbij er vanuit verschillende invalshoeken en samen met enkele expert naar dit onderzoek is gekeken zijn er enkele onderwerpen geconstateerd en uitgewerkt die achteraf niet direct binnen de scope van dit onderzoek vallen maar toch de moeite waard zijn om op te merken:

- membraamwerking heeft een gunstig effect op de waterveiligheid doordat dit er bij een met een doorgaande damwand versterkte dijk er voor zorgt dat de gevolgen bij bezwijken beperkt blijven. Je zou dit mee kunnen nemen in de overall veiligheidsfilosofie bij het lengte effect zoals ook al bij de Eemdijkproef is aanbevolen;
- tijdens de interviews en expertsessies is veelvuldig gesproken de plastische momentcapaciteit van damwanden. Alle experts onderschrijven de aanbeveling vanuit de Eemdijkproef om ook de toetsing op de plastische momentcapaciteit conform de EN 1993-5 toe te staan;
- de opgestelde gebeurtenissen boom laat zien dat er bij de toetsing van de sterkte van de damwand veel (rest)sterkte onbenut wordt gelaten. In de huidige systematiek wordt na het bezwijken van de damwand alle vervolg gebeurtenissen buiten beschouwing gelaten. In 'werkelijkheid' heeft deze damwand mogelijk nog veel (Plastische) capaciteit tot dat de vervormingen ontoelaatbaar zijn. Om dit volledig uit te nutten voor de ontwerppraktijk lijkt niet wenselijk maar bij het beoordelen van bestaande constructies kan dit mogelijk veel opleveren;
- de Plaxis 2D en 3D analyses hebben laten zien dat de keuze voor de interface sterkte een belangrijke impact heeft op de uitkomst. De ervaring van experts is dat een te lage interface sterkte leidt tot onrealistische uitkomsten. Bij sommige projecten wordt bewust van de standaard  $R_{inter} = 0,66$  afgeweken om ongewenste effecten te voorkomen. Vanuit de expertsessie komt de aanbeveling om dit nader te onderbouwen zodat landelijk dezelfde aanpak gevolgd kan worden binnen projecten.

# 8

## REFERENTIES

- [ref. 1.] POV Macrostabilliteit, POVM Langsconstructies, Maart 2020.
- [ref. 2.] POV Macrostabilliteit, Eindrapport proefprogramma, Product V (definitief), November 2018, v2
- [ref. 3.] Witteveen+Bos, Onderzoek snijden van grond, 13 Januari 2022, Definitief.
- [ref. 4.] Fugro, Versterking Capelle en Moordrecht - Uitvoeringsontwerp Oosteinde Moordrecht, d.d. 7 juni 2016.

Bijlage(n)







## BIJLAGE: INTERVIEWS EXPERTPANEL




## BIJLAGE: PARAMETERS PLAXIS 2D EN 3D

### Hardening Soil model

Material set					
Identification number		2	4	6	7
Identification		KLEI, Gorkum zwaar - M1 HS	Veen - M1 HS	KLEI, antropogeen - M1 HS	KLEI, Tiel - M1 HS
Material model		Hardening soil	Hardening soil	Hardening soil	Hardening soil
Drainage type		Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)
Colour		 RGB 136, 178, 133	 RGB 230, 181, 132	 RGB 203, 208, 149	 RGB 195, 229, 249
Comments					
General properties					
$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	15,70	11,00	17,50	16,60
$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	15,70	11,00	17,50	16,60
Stiffness					
$E_{50}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	4000	1000	4000	3000
$E_{oed}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	2000	540,0	2000	1500
$E_{ur}^{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	16,00E3	4000	16,00E3	12,00E3
power (m)		0,8000	0,5000	0,8000	0,8000
Alternatives					
Use alternatives		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
$C_c$		0,1725	0,6389	0,1725	0,2300
$C_s$		0,01941	0,07762	0,01941	0,02587
$e_{init}$		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Strength					
$c_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	0,000	3,000	7,600	4,800
$\phi$ (phi)	°	28,20	26,60	24,20	25,00
$\psi$ (psi)	°	0,000	0,000	0,000	0,000
Stiffness					
Stiffness		Standard	Standard	Standard	Standard
Strength					
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual
$R_{inter}$		0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
Consider gap closure		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
K0 settings					
$K_0$ determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
$K_{0,x}$		0,5274	0,5522	0,5901	0,5774
$K_{0,z}$		0,5274	0,5522	0,5901	0,5774
Overconsolidation					
OCR		1,000	1,000	1,000	1,000
POP	kN/m <sup>2</sup>	0,000	0,000	0,000	0,000

## MC model

Material set		
Identification number		5
Identification		ZAND, matig - M1
Material model		Mohr-Coulomb
Drainage type		Drained
Colour		RGB 234, 228, 113
Comments		
General properties		
$\gamma_{\text{unsat}}$	kN/m <sup>3</sup>	18,00
$\gamma_{\text{sat}}$	kN/m <sup>3</sup>	20,00
Stiffness		
E	kN/m <sup>2</sup>	30,00E3
$\nu$ (nu)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m <sup>2</sup>	11,54E3
$E_{\text{oad}}$	kN/m <sup>2</sup>	40,38E3
Strength		
$c_{\text{ref}}$	kN/m <sup>2</sup>	0,000
$\phi$ (phi)	°	32,50
$\psi$ (psi)	°	2,500
Stiffness		
Stiffness		Standard
Strength		
Strength		Manual
$R_{\text{inter}}$		0,6700
Consider gap closure		<input checked="" type="checkbox"/>
K0 settings		
$K_0$ determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		<input checked="" type="checkbox"/>
$K_{0,x}$		0,4627
$K_{0,z}$		0,4627

