

## BIJLAGE D: VOORBEELD SCHEMATISEREN EN GEVOELIGHEIDSANALYSE

### D.1 Inleiding

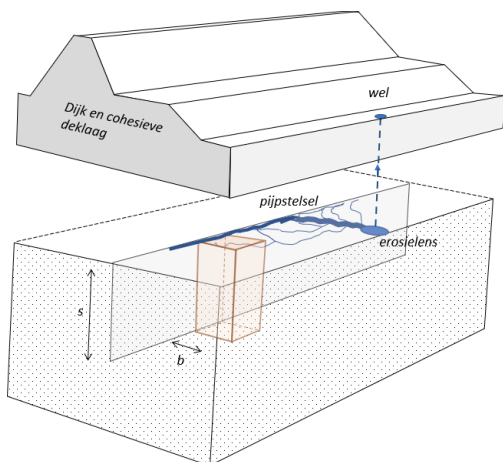
Binnen het ontwikkelspoor “Ontwikkelstappen rekenmethodieken heave” heeft het project dijkversterkingsproject Wijk bij Duurstede – Amerongen (WAM), onderdeel van Sterke Lekdijk, in samenwerking met De Innovatie versneller piping (DIV|Piping) gevoeligheidsberekeningen uitgevoerd voor een denkbeeldige case die past bij de gebiedskenmerken van deze projectlocatie. Het doel van de analyses is om inzicht te krijgen in het effect van schematiserings- en modelkeuzen op de het ontwerp.

### D.2 Modellen en criteria

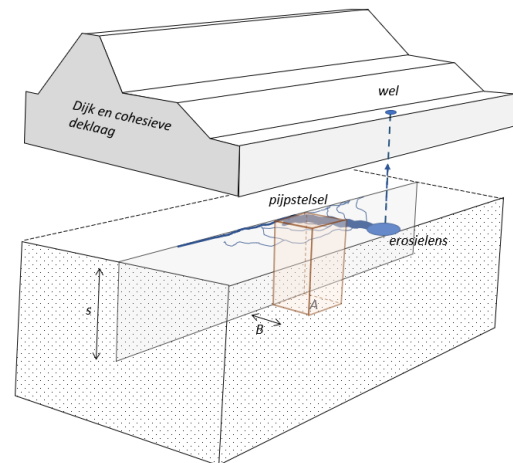
Voor het bepalen van vereiste veiligheid ten aanzien van hydraulische grondbreuk zijn twee verschillende modellen beschouwd:

- de gemiddelde gradiëntenmethode (GGM)
- de verticale evenwichtsmethode (VEM)

Beide methoden zijn beschreven in hoofdstuk 4 van deze publicatie. De figuren D-1 en D-2 geven twee voorbeelden van mogelijke prismavormige moten grond waarvan het verticaal evenwicht kan worden beschouwd bij toepassing van de methode VEM.

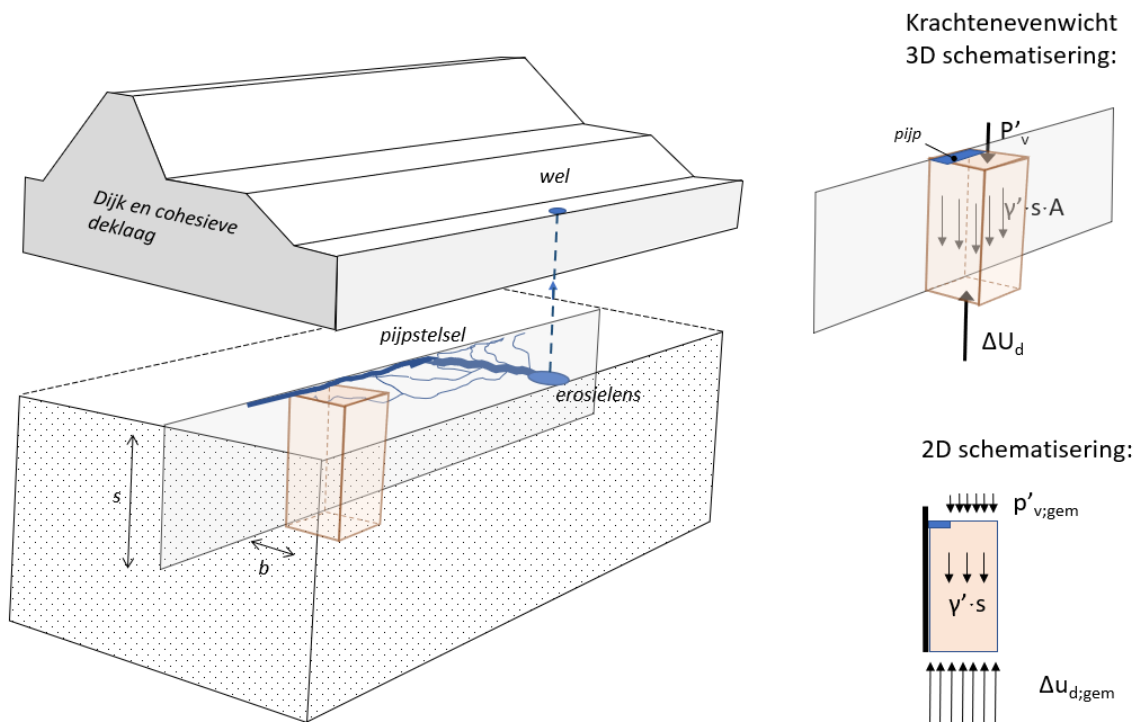


*Figuur D-1: Prisma ter plaatse van langspijp achter de wand*

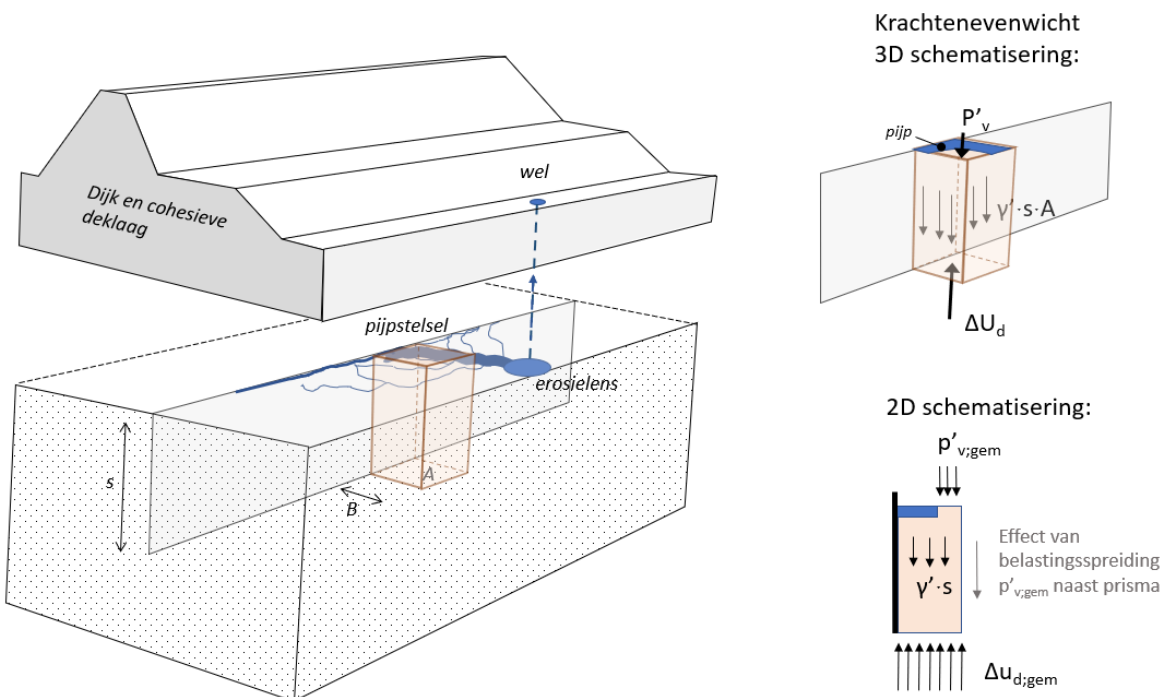


*Figuur D-2: Prisma ter plaatse van meest brede deel van pijpstelsle achter de wand*

In de figuren D-3 en D-4 is een vertaling gemaakt van de 3D situatie naar een 2D doorsnede waarvoor tweedimensionale grondwaterstromingsberekeningen kan worden uitgevoerd. Figuur D-3 hoort bij het prisma zoals is weergegeven in Figuur D-1 en Figuur D-4 hoort bij het prisma zoals is weergegeven in Figuur D-2.



Figuur D-3: Prisma ter plaatse van langspijp achter de wand



Figuur D-4: Prisma ter plaatse van breedste deel van pijpselsle achter de wand

De verticale evenwichtsmethode beschouwt de effectieve spanning op het grondvlak van de prisma op het niveau gelijk aan onderkant heavescherm. Op basis van beide methodes kan een Safety Factor (SF) voor heave afgeleid worden. Beide methodes zijn hieronder kort uitgewerkt. Voor een uitgebreide beschrijving van de modellen en criteria wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van de hoofdtekst van deze publicatie.

### Gemiddelde Gradiënten Methode:

Opmerking vooraf: Hieronder is de gemiddelde gradiënten methode toegepast op de gemiddelde gradient binnen een prisma met de breedte  $b=0,5$  s. Opgemerkt wordt dat de gemiddelde gradienten methode vaak wordt toegepast over een veel smaller prima dan hier is weergegeven (Baumgart- Davidenkoff methode). Dit leidt tot een wat hogere gradiënt  $i_{gem}$  dan hier is weergegeven.

$$SF_{GM} = \frac{i_c}{i_{gem}}$$

Met:

$$i_{gem} = \frac{\Delta\varphi_{gem}}{S}$$

$$\Delta\varphi_{gem} = \varphi_{ok\ scherm;gem} - \varphi_{ok\ deklaag;gem}$$

Waarbij:

- $i_c$ : kritieke hydraulische gradiënt.  $i_c = \frac{\gamma_{zand} - \gamma_{water}}{\gamma_{water}} = 1,0$  wanneer  $\gamma_{water} = 10 \text{ kN/m}^3$  en  $\gamma_{zand} = 20 \text{ kN/m}^3$
- $\Delta\varphi_{gem}$ : Gemiddelde optredend verhang over hoogte van het scherm binnen het prisma
- $s$  = inbeddingsdiepte van het scherm in het zand

### Verticale evenwichtsmethode:

$$SF_{VEM} = \frac{p'_{gem} + \gamma'_{zand} \times s}{\Delta u_d}$$

Met:

$$p_{gem}' = p_{gem} - p_{water}$$

$$\Delta u_d = \Delta\varphi_{gem} \gamma_{water}$$

$$\Delta\varphi_{gem} = \varphi_{ok\ scherm;gem} - \varphi_{ok\ deklaag;gem}$$

Waarbij:

- $p_{gem}'$ : effectieve bovenbelasting op bovenzvlak van prisma [kPa]
- $p_{gem}$ : totaal spanning door bovenbelasting op bovenzvlak van prisma [kPa]
- $p_{water}$ : gemiddelde waterdruk op bovenzvlak van prisma [kPa]
- $s$ : inbeddingsdiepte van het scherm in het zand [m]
- $\Delta u_d$ : Gemiddelde resulterende opwaartse waterdruk over de hoogte van het prisma [kPa]
- $\varphi_{ok\ scherm;gem}$ : gemiddelde stijghoogte ter plaatse van het grondvlak van het prisma [m t.o.v. NAP]
- $\varphi_{ok\ deklaag;gem}$ : gemiddelde stijghoogte ter plaatse van het bovenzvlak van het prisma [m t.o.v. NAP]

## **D.3 Geometrie dijk en positie scherm**

In de case is uitgegaan van een dijkgeometrie zoals is aangegeven in Figuur D-5. Er is ook een analyse uitgevoerd voor een situatie zonder berm en deklaag, zoals weergegeven in Figuur D-6. Voor de case is uitgegaan van een situatie zonder watergang in het achterland.

De locatie van het scherm in het dwarsprofiel (x-positie) is bepaald op basis van overwegingen vanuit het beheer.

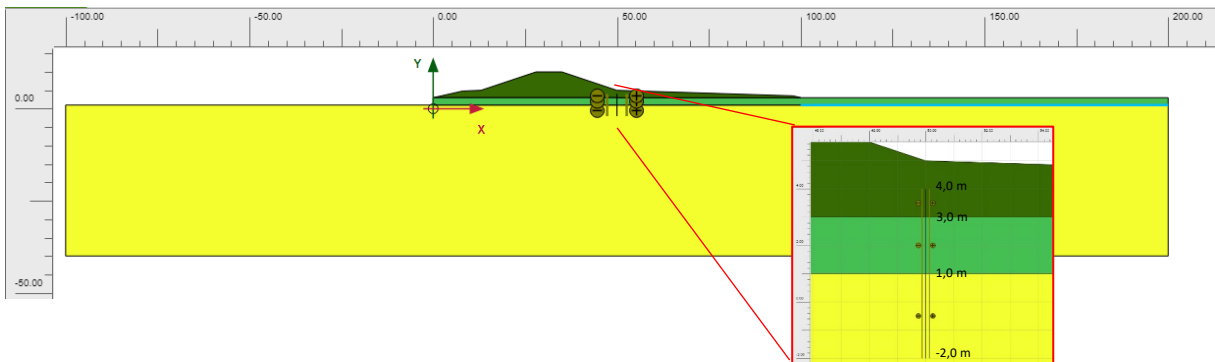
Als startpunt van de analyse is uitgegaan van 3,0 m inbeddingsdiepte van het scherm in de zandlaag. Bij deze inbeddingsdiepte is de veiligheidsfactor SF afgeleid.

De berm is geschematiseerd met een lengte van 50 m vanaf de binnenteen van de kering en is kenmerkend voor het beschouwde gebied. De berm heeft ter plaatse van het heavescherm een hoogte van 2,0 m.

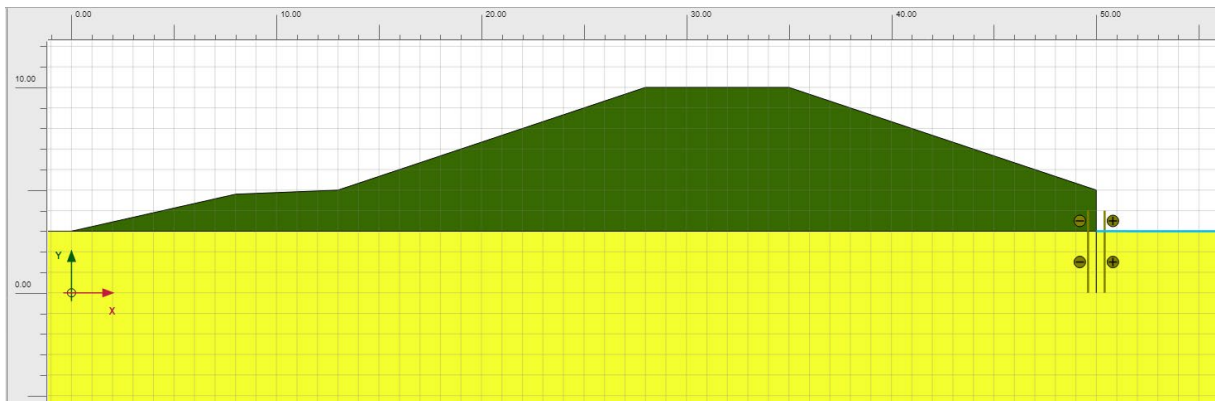
#### D.4 Geohydrologische randvoorwaarden en parameters

Tijdens het uitwerken van de case zijn onderstaande geohydrologische randvoorwaarden aangehouden:

- Voorlandweerstand is behoudend geschematiseerd door geen deklaag op het voorland mee te nemen ter plaatse van het 100 brede voorland, zie Figuur D-5.
- De grenspotential is in het gehele achterland geschematiseerd als drain. Deze begint vanaf de binnenteen en heeft daarmee een vaste positie (behalve bij de schematisering zonder berm, dan begint deze direct bij het scherm). Zie Figuur D-5 en Figuur D-6. Het voordeel van een drain is dat deze niet kan gaan voeden.
- De stijghoogte in de erosiepijp ( $\phi_{\text{pijp}}$ ) is standaard gelijkgesteld aan het maaiveldniveau in het achterland. Er is daarbij dus geen drukval of slurryweerstand meegenomen in het pijpstelsel (0,0d). Voor anisotropie zand  $a = 5$  zijn tevens berekeningen gemaakt met een slurryweerstand in het opbarstkanaal van 0,3d (dus  $\phi_{\text{pijp}} = \text{mv-niveau} + 0,3d$  i.p.v.  $\phi_{\text{pijp}} = \text{mv-niveau}$ ).



Figuur D-5 Gehanteerde geometrie met deklaag en berm



Figuur D-6 Gehanteerde geometrie zonder deklaag en berm

In de gevoeligheidsanalyse is gevarieerd met de dikte van de deklaag: de deklaagdiktes die zijn toegepast zijn 0 m zonder berm, 0 m met berm, 2 m, 4 m en 6 m. Boven een deklaagdikte van 6,0 m wordt verwacht dat de kans op het optreden van een zandmeevoerende wel dermate klein is dat geen aanvullende pipingmaatregelen nodig zijn.

De volgende geohydrologische parameters zijn aangehouden:

- horizontale en verticale doorlatendheid van de deklaag en de dijk: 0,005 m/d

- horizontale doorlatendheid van het zand: 50 m/d
- anisotropie van het zand: er is gevarieerd tussen  $a = 1, 5$  en  $a=10$ . Waarbij  $a=k_{hor}/k_{vert}$
- Meerlaagsheid in het zand is niet beschouwd

De volgende geotechnische parameters zijn aangehouden:

- volumegewicht van de zandlaag:  $\gamma_{sat;zand} = 20 \text{ kN/m}^3$
- volumegewicht van de deklaag:  $\gamma_{sat;deklaag} = 15 \text{ kN/m}^3$
- volumegewicht van het bermmateriaal:  $\gamma_{sat;zand} = 17 \text{ kN/m}^3$

#### D.5 Parameters en randvoorwaarden pijpstelsel

Gebaseerd op de schetsen in Figuur D-3 en D-4 zijn er drie fysische processen afgeleid ten aanzien van de schematisering van het pijpstelsel. Deze verschillende schematiseringen staan hieronder opgesomd en zijn gevisualiseerd in Tabel D-1.

- T-pijp: één enkele smalle langspijp. Deze situatie komt het best overeen met Figuur D-3.
- (langs)pijpveld: meerdere smalle langspipes verdeeld over de breedte van de heave gevoelige zone.
- Megapijp: één enkele zeer brede langspijp, met een breedte gelijk aan de heave gevoelige zone. Deze situatie komt het best overeen met Figuur D-4.

Deze verschillende schematiseringen resulteren in verschillende  $\Delta\phi_{gem}$ . De  $\Delta\phi_{gem}$  wordt bepaald met een grondwaterstromingsberekening in PLAXIS. Voor de breedte van het prisma is standaard uitgegaan van 1,5 m (conform Terzaghi,  $s / 2 = 1,5 \text{ m}$ , en  $s = 3,0 \text{ m}$ , zoals in deze case wordt gehanteerd) om de  $\Delta\phi_{gem}$  te bepalen. Alleen bij de T-pijp is aanvullend ook uitgegaan van een relatief zeer smal prisma, in dit geval met een breedte van 0,25 m waarmee meer wordt aangesloten op de methode Baumgart-Davidenkoff.

Met de verschillende pijpschematisaties en randvoorwaarden zijn verschillende scenario's doorgerekend waarin is gevarieerd in deklaagdikte en anisotropie.

	Schematiseringen	schematiseringonzekerheid	
T-pijp (1)	<p><math>B = 0,25 \text{ m}</math></p> <p><math>\phi_{ok.deklaag;gem}</math></p> <p><math>\phi_{pijp}</math></p> <p><math>\phi_{Grenspot.}</math></p> <p><math>s = 3 \text{ m}</math></p> <p><math>k_{hor}/k_{vert} = 1, 5 \text{ of } 10</math></p> <p><math>\phi_{ok.scherm;gem}</math></p> <p><math>b = 0,25 \text{ m}</math></p>	<p><u>GM-T-smal</u></p> <p>Nihil (meest conservatieve scenario)</p>	
	<p><math>B = 0,25 \text{ m}</math></p> <p><math>\phi_{ok.deklaag;gem}</math></p> <p><math>\phi_{pijp}</math></p> <p><math>\phi_{Grenspot.}</math></p> <p><math>s = 3 \text{ m}</math></p> <p><math>k_{hor}/k_{vert} = 1, 5 \text{ of } 10</math></p> <p><math>\phi_{ok.scherm;gem}</math></p> <p><math>b = s/2 = 1,5 \text{ m}</math></p>	<p><u>GM-T</u></p> <p>- Breedte van prisma (waarover uitmiddeling plaatsvindt)</p>	<p><u>VEM-T</u></p> <p>- Breedte van prisma waarover evenwicht wordt beschouwd</p> <p>- Gunstige effect van de bovenbelasting</p>
(Langs)pijpveld (2)	<p><math>B = s/2 = 1,5 \text{ m}</math></p> <p><math>\phi_{ok.deklaag;gem}</math></p> <p><math>\phi_{pijp}</math> (3 x 0,25m)</p> <p><math>\phi_{Grenspot.}</math></p> <p><math>s = 3 \text{ m}</math></p> <p><math>k_{hor}/k_{vert} = 1, 5 \text{ of } 10</math></p> <p><math>\phi_{ok.scherm;gem}</math></p> <p><math>b = s/2 = 1,5 \text{ m}</math></p>	<p><u>GM-veld</u></p> <p>- Breedte van prisma (waarover uitmiddeling plaatsvindt)</p> <p>- Gunstige ontlastwerking (langs)pijpveld</p>	<p><u>VEM-veld</u></p> <p>- Breedte van prisma waarover evenwicht wordt beschouwd</p> <p>- Mogelijk gunstige ontlastwerking (langs)pijpveld</p> <p>- Gunstige effect van de bovenbelasting</p>
Megapijp (3)	<p><math>B = s/2 = 1,5 \text{ m}</math></p> <p><math>\phi_{ok.deklaag;gem}</math></p> <p><math>\phi_{pijp}</math></p> <p><math>\phi_{Grenspot.}</math></p> <p><math>s = 3 \text{ m}</math></p> <p><math>k_{hor}/k_{vert} = 1, 5 \text{ of } 10</math></p> <p><math>\phi_{ok.scherm;gem}</math></p> <p><math>b = s/2 = 1,5 \text{ m}</math></p>	<p><u>GM-mega</u></p> <p>- Breedte prisma waarover uitmiddeling plaatsvindt</p> <p>- Gunstige ontlastwerking megapijp</p>	<p><u>VEM-mega</u></p> <p>- Breedte van prisma waarover evenwicht wordt beschouwd</p> <p>- Mogelijk gunstige ontlastwerking (langs)pijpveld</p> <p>- Gunstige effect van de bovenbelasting (25% meegenomen)</p>

Tabel D-1 uitwerking scenario's case WAM

## D.6 Uitkomsten gevoeligheidsanalyse

### D.6.1 Overzicht en uitleg bij uitgerekende scenario's

Voor diverse parameters is de gevoeligheid van de veiligheidsfactor (SF) volgens twee modellen bepaald:

- de Verticaal Evenwichts Methode (VEM)
- de Gemiddelde Gradiënten Methode (GM)

De gevoeligheden van SF voor de volgende parameters is onderzocht:

- Deklaagdikte
- Pijpstelsel schematisaties
- Pakkingsdichtheid
- Anisotropie

In alle gepresenteerde figuren is met de deklaagdikte gevarieerd en in alle figuren zijn de resultaten bij berekening met zowel de methode VEM als de methode GM gepresenteerd. Voor de overige parameters is het volgende als referentiewaarde genomen:

- Pijpstelsel: brede pijp met breedte gelijk aan de helft van de inbeddingsdiepte ( $0,5 \times 3\text{m} = 1,5\text{m}$ )
- Pakkingsdichtheid overeenkomend met  $\gamma_{\text{sat,zand}} = 20 \text{ kN/m}^3$  (verwachtingswaarde)
- Anisotropie factor  $a=5$  (verwachtingswaarde)

In de figuren met resultaten is steeds rechtsboven in de figuur een leeswijzer afgebeeld die de verbanden van de lijnen en symbolen weergeeft. In de legenda zijn de codes weergegeven voor iedere berekening. Deze code is opgebouwd aan de hand van de volgende structuur: Rekenmethode – pijp schematisatie – evt. smalle heave zone - Anisotropie. Verder zijn op de x-as twee nulpunten geplot. Het verschil tussen de nulpunten is dat bij het eerste nulpunt, zonder berm is gerekend. Bij het tweede nulpunt is wel gerekend met een berm.

In de onderstaande paragrafen wordt nader ingegaan op de invloed van de deklaagdikte, de 0,3d-regel, de schematisatie en anisotropie. Daarin wordt ook nader ingegaan op de verschillen tussen de VEM en GM.

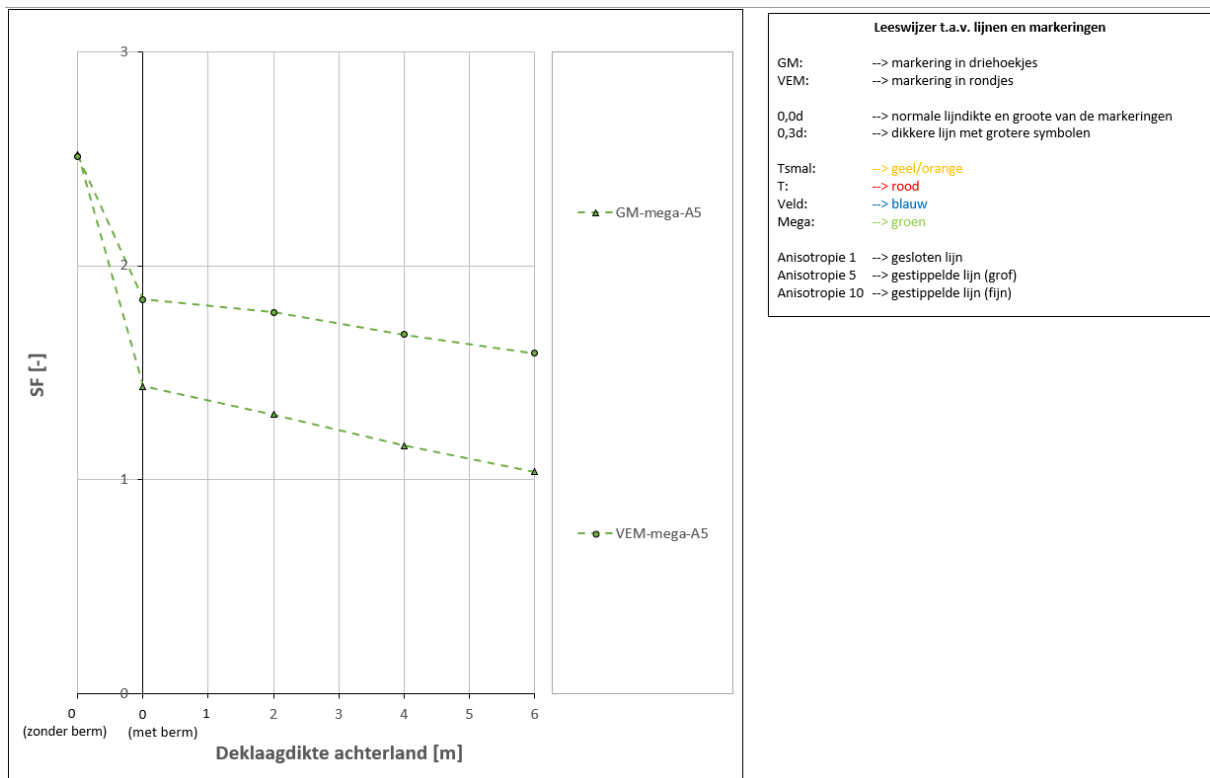
Naast de hier gepresenteerde resultaten is een gevoeligheidsanalyse van het mesh in Plaxis uitgevoerd waarbij is gekeken of een fijner mesh zorgt voor andere resultaten. Uit deze niet gepresenteerde analyse is gebleken dat het verschil minimaal is.

### D.6.2 Invloed deklaagdikte

In Figuur D-8 zijn alle resultaten van alle scenario's weergegeven waarbij niet is gerekend met de 0,3d-regel. In Figuur D-4 is te zien dat bij de GM een dikkere deklaag resulteert in een lagere SF. Dit is het geval bij alle schematisaties en bij alle anisotropieën. Dit wordt afgebeeld in Figuur D-8 door alle dunne lijnen met driehoeksymbolen. Hieruit blijkt dat een dikkere deklaag zorgt voor een vrijwel lineaire afname in de SF voor alle scenario's. Deze lineaire afname is voor alle scenario's vrijwel gelijk. Deze afname van de SF is grotendeels te verklaren door een hoger grenspotentiaal bij een dikkere deklaag. Bij een hoger grenspotentiaal is de stijghoogte bij o.k.-scherm groter worden, waardoor het verval over het scherm groter wordt. Dit resulteert in een lagere SF naarmate de deklaag dikker wordt.

In Figuur D-8 zijn ook alle resultaten van de scenario's weergegeven waarbij is gerekend met de VEM (ronde symbolen). Er is duidelijk te zien dat bij de VEM een dikkere deklaag juist resulteert in een iets hogere SF. Dit is vooral te verklaren door de effectieve belasting van de deklaag die wordt meegenomen in de VEM. Naarmate de deklaag dikker wordt, neemt deze effectieve belasting toe. Omdat er ook een hoger grenspotentiaal wordt meegenomen, is de stijging van de SF minimaal. De effectieve belasting wordt niet meegenomen bij de GM, waardoor bij toenemende deklaagdikte er een groter verschil ontstaat tussen de GM en VEM.

De scenario's waar geen berm is gemodelleerd, resulteren in dezelfde SF bij de GM en VEM. Bij de GM neemt de SF toe als er geen berm meer is. Dit komt voornamelijk doordat de binnendijkse randvoorwaarde (water op maaiveldniveau) is opgeschoven. Dit heeft een ontlastende werking voor de potentiaal aan de onderzijde van het scherm. Bij de VEM-methode neemt de SF juist af als er geen berm is, als gevolg van het ontbreken van een effectieve bovenbelasting op de zandlaag, hetgeen harder doorwerkt dan de verschuiving van de binnendijkse randvoorwaarde (water op maaiveldniveau).



Figuur D-8 Invloed van de deklaagdikte

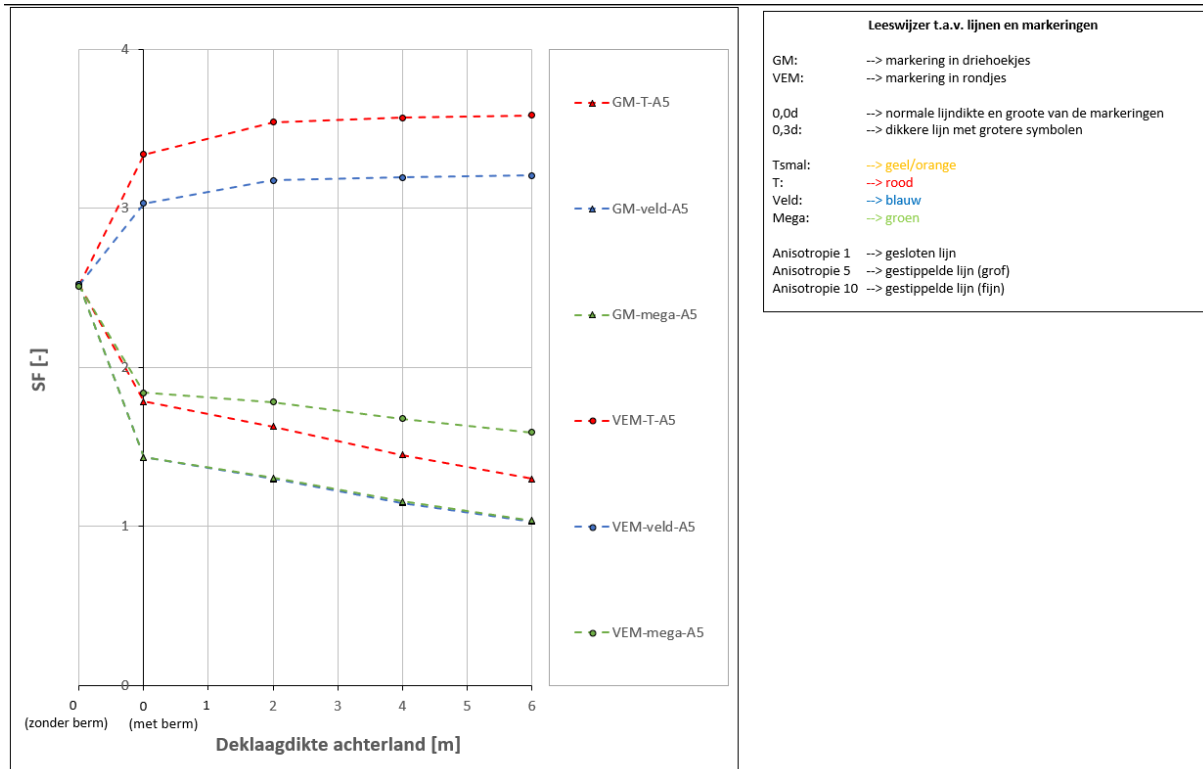
### D.6.3 Invloed breedte pijp

De verschillende fysische processen resulteren in verschillende pijp schematisaties en breedtes van de heave zone. Deze hebben invloed op grondwaterstroming en daarmee op de SF. Bij de GM is te zien dat bij alle anisotropieën de T-pijp i.c.m. een 1,5m breed prisma, resulteert in de hoogste SF. De T pijp met een smalle heave zone resulteert daarentegen in de laagste SF. De megapijp en het pijpveld liggen hier tussenin en verschillen minimaal ten opzichte van elkaar. Dit is te zien in Figuur D-9 door de verschillende kleuren lijnen met elkaar te vergelijken, die ronde symbolen hebben. Verder valt op dat bij een anisotropie van 1 de verschillen tussen de verschillende pijpgroei scenario's het



grootste zijn en bij anisotropie 5 en 10 de verschillen kleiner zijn. Dit is te zien in Figuur D-9 door de verschillen tussen de lijnen met dezelfde contour en verschillende kleur met elkaar te vergelijken.

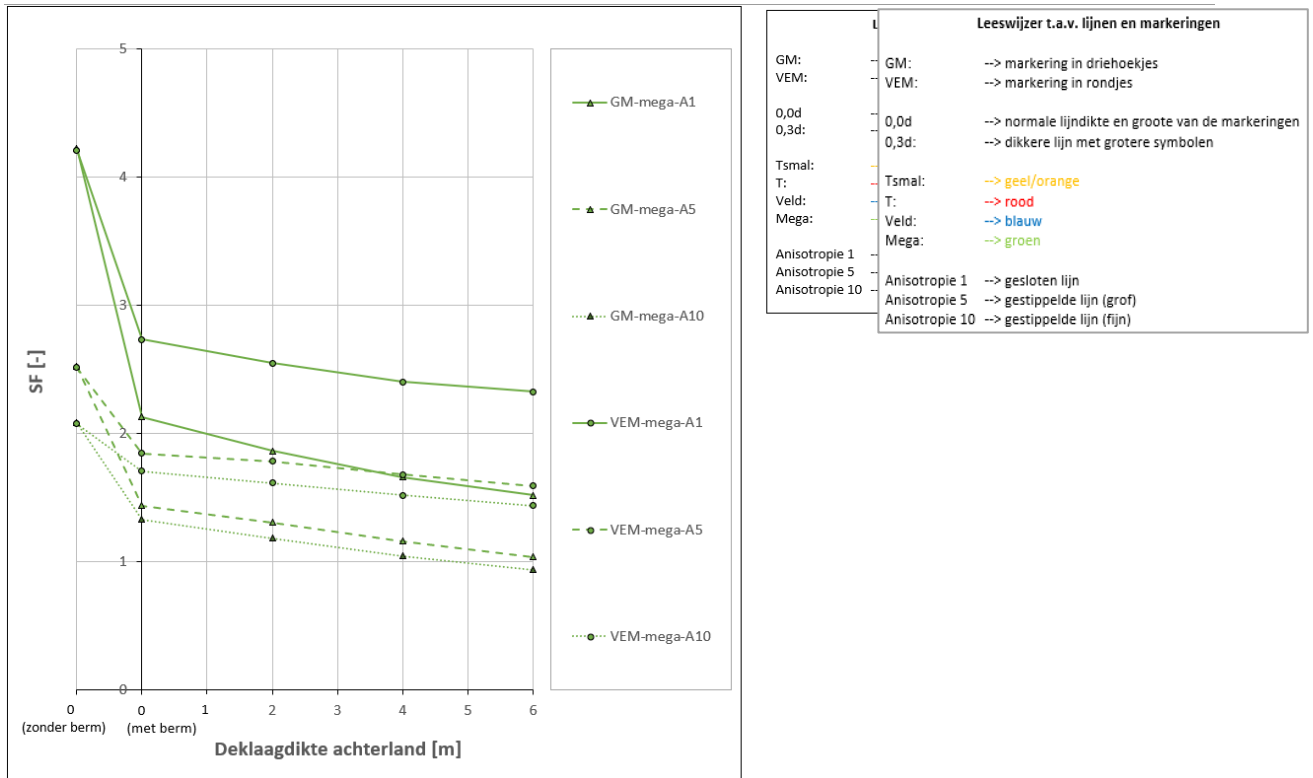
Bij de VEM zijn alleen de T-pijp en het (langs)pijpveld doorgerekend. Hier is voor gekozen omdat de T-pijp i.c.m. de smalle heave zone en de mega pijp resulteren in dezelfde SF bij de verschillende rekenmethodes. De smalle heavezone is daarnaast niet realistisch i.c.m. de VEM. In Figuur D-9 is te zien dat ook bij de VEM methode de T-pijp bij alle anisotropieën het gunstigste is en een hogere SF wordt berekend dan bij het (langs)pijpveld.



Figuur D-9 Invloed pijpstelsel schematisering, "mega" refereerd naar pijpbreedte gelijk aan 0,5 x inbeddingsdiepte (=1,5m)

#### D.6.4 Anisotropie

In Figuur D-10 is te zien dat bij beide modellen de invloed van anisotropie ongunstig is. Dit betekent dat bij een hogere anisotropie een lagere SF wordt berekend bij zowel de GM als VEM. Deze ongunstige invloed is te verklaren doordat bij een hoge anisotropie de verticale doorlatendheid lager is, waardoor de stijghoogte aan de onderzijde van het scherm hoger wordt. Wat daarin opvalt is dat het verschil in SF tussen a=1 en a=5 aanzienlijk groter is dan tussen a=5 en a=10.

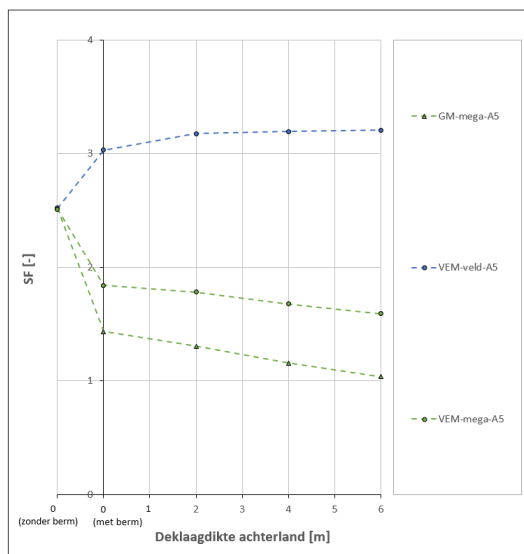


Figuur D-10 Invloed anisotropie

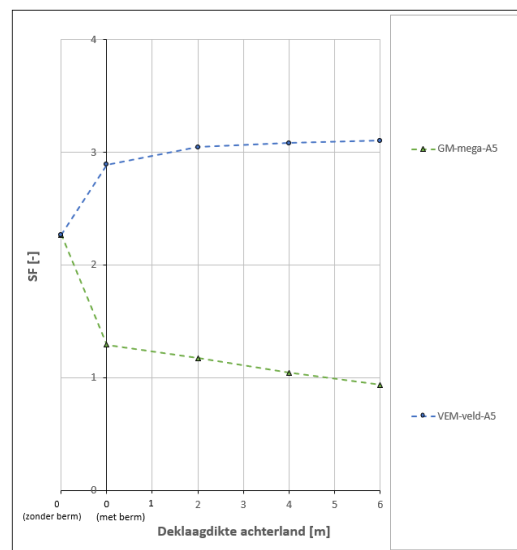
### D.6.2.5 Invloed pakkingsdichtheid zand

In de tot nu toe gepresenteerde resultaten is uitgegaan van een verzadigd volumegewicht van 20 kN/m<sup>3</sup> voor het zand.

In de figuren D-11 en D-12 zijn respectievelijk de berekeningsresultaten voor  $\gamma_{\text{verzadigd}} = 20 \text{ kN/m}^3$  en  $i_c = 1,0$  (basis berekeningen) én  $\gamma_{\text{verzadigd}} = 19 \text{ kN/m}^3$  en  $i_c = 0,9$  weergegeven. De SF's zijn voor alle berekeningsmethodes en schematiseringen zijn iets lager ( $\Delta SF = -0,1$  a  $-0,3$ ) bij de losse pakking.



Figuur D-11: Resultaten bij  $\gamma_{\text{verzadigd}} = 20 \text{ kN/m}^3$  en  $i_c = 1,0$



Figuur D-12: Resultaten bij  $\gamma_{\text{verzadigd}} = 19 \text{ kN/m}^3$  en  $i_c = 0,9$  (let wel: scenario VEM-mega-A5 ontbreekt hier)

#### *D.6.6 Overall conclusie*

Het belangrijkste resultaat van de GM- en VEM-berekeningen is dat de VEM in vrijwel alle scenario's resulteert in een hogere SF, behalve wanneer er geen deklaag en berm aanwezig zijn (oftewel geen bovenbelasting), dan zijn de SF-waarden gelijk aan elkaar. Dit is te zien door in gepresenteerde figuren de lijnen met dezelfde kleur en contour, maar met andere symbolen, te vergelijken. Verder is te zien dat naarmate de deklaag dikker wordt, het verschil tussen de GM en VEM groter wordt. Dit komt doordat de VEM-methode bij een dikkere deklaag een grotere effectieve belasting op de zandlaag meeneemt, wat gunstiger is. In de GM-methode wordt dit aspect niet opgenomen.

## Referenties bij bijlage D:

- [1] Grondmechanica, Arnold Verruijt, Technische Universiteit Delft, 2001
- [2] NEN-EN9997-1 Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1 algemene regels, april 2012