

SBW Piping - Hervalidatie piping

**HP4. 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen
onder een dijk ter bepaling piping-gevoeligheid**

Jitse Puijsma
Frans Barends

Titel

SBW Piping - Hervalidatie piping

HP4. 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen onder een dijk ter bepaling piping-gevoeligheid

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat Waterdienst

Project

1200187-009

Kenmerk

1200187-009-GEO-0001

Pagina's

31

Trefwoorden

Piping, grondwaterstroming, heterogeniteit

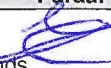
Samenvatting

Doel van het project SBW Hervalidatie piping is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingregels en deze te verkleinen of te elimineren.

Variaties in de ondergrond beïnvloeden het fenomeen piping op een complexere wijze dan in eenvoudige vuistregels kan worden uitgedrukt. Ter bepaling van de pipinggevoeligheid is in dit rapport de grondwaterstroming onder een dijk beschouwd voor een verscheidenheid aan situaties. Een lagenpakket is gemodelleerd met een grindlaag die zich bevindt op verschillende diepten en met verschillende uitgestrektheden in 2D en 3D. Het effect van de ligging van de grindlaag op het stromingsbeeld is bepaald aan de hand van eindige elementenberekeningen met het pakket ABAQUS.

De verticale stroomsnelheden in een gebied ter plaatse van de teen zijn een maat voor de pipinggevoeligheid. Voor piping-gevoeligheid wordt doorgaans naar het verticale verhang gekeken dit is gelijk aan de $-q_z/k$, de verticale stroomsnelheid gedeeld door de doorlatendheid van de desbetreffende laag. Dit betekent dat de resultaten van verticale stroomsnelheid direct gebruikt kunnen worden voor de bepaling van de piping-gevoeligheid, aangezien het verticale verhang als maat hiervoor gezien wordt. Het is waargenomen dat de aanwezigheid van verschillende lagen een significant effect heeft op de piping-gevoeligheid.

Bij de uitvoering van een full-scale proef in het veld staat de vraag centraal of voor een vrij ingewikkelde geometrie van de grondopbouw zou moeten worden gekozen, omdat deze ook in de praktijk kan voorkomen. Uit het onderzoek volgt dat het verhang dat bij een wat ingewikkelder geometrie optreedt numeriek kan worden berekend zo dat een eenvoudige geometrie bij de uitvoering van een full-scale proef voldoende is.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-10-06	Ir. Jitse Puijksma Prof. dr. Frans Barends		Ir. Ulrich Förster 		Ing. Harm Aantjes	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Introductie	1
1.2 Doelstelling SBW Hervalidatie piping	2
1.3 Doel van het onderzoek 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen	2
1.4 Aanpak	2
1.5 Leeswijzer	2
2 Piping-gevoeligheid	3
3 2D grondwaterstromingsberekeningen	4
3.1 Berekening en postprocessing	4
3.2 Resultaten voor grindlaag op diepte 3 m	5
3.3 Resultaten voor grindlaag op 5 en 10 m diepte	7
4 3D grondwaterstromingsberekeningen	11
4.1 Resultaten van de 3D stromingsberekeningen	11
5 Vergelijk piping-gevoeligheid van schaalproeven en Deltagootproeven met en zonder pipe	14
5.1 Gebruikte geometrieën	14
5.2 Resultaten berekeningen zonder pipe	15
5.3 Berekeningen met pipe	16
6 Conclusies en aanbevelingen	20
6.1 Conclusies	20
6.2 Aanbevelingen	21

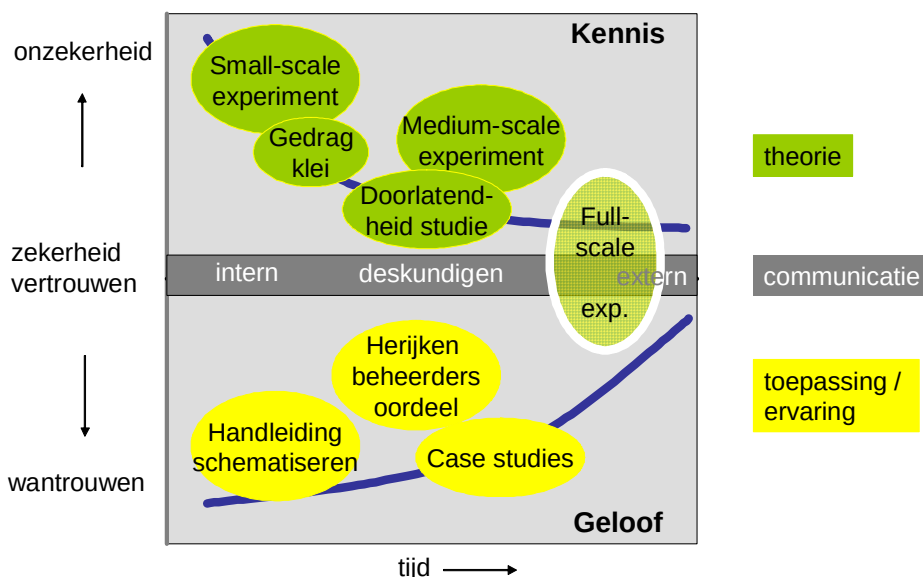
A Vergelijk EEM met analytische oplossingen

1 Inleiding

1.1 Introductie

In het project Veiligheid Nederland in Kaart I kwam piping als een dominant faalmechanisme naar voren, hetgeen niet aansluit bij het beheerdersoordeel. Nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van de resultaten van de pipinganalyses binnen VNK wees uit dat de kans op piping, bij een betere schematisatie, kleiner zou worden maar nog steeds groter is dan verwacht. Ook vanuit de historie zijn aanwijzingen dat het pipingmechanisme relevanter kan zijn dan tot nu toe gedacht. Het is niet uit te sluiten dat de kans op piping is onderschat en onveilige procedures rondom het schematiseren en voorschrijven van rekenmodellen zijn opgesteld. Nadere validatie van rekenmodellen is nodig.

Teneinde de onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels in beeld te krijgen en deze te verkleinen of te elimineren is het onderzoeksspoor SBW Hervalidatie Piping opgestart. Het onderzoeksspoor kent twee deelsporen. Een theoretisch en praktisch spoor. In het theoretische spoor worden door middel van laboratorium- en bureauonderzoek de verschillende kenmerken die een rol spelen bij piping geïdentificeerd en zo mogelijk gekwantificeerd. Het theoretische spoor leidt tot meer kennis van het pipingmechanisme en uiteindelijk tot bevestiging of aanpassing van de bestaande rekenregel. Het praktische spoor leidt tot handvatten om de aangepaste rekenregel op een juiste manier te kunnen toepassen. De handvatten moeten het vertrouwen in de rekenregels vergroten. Het plan van aanpak van SBW Hervalidatie Piping is schematisch in onderstaande figuur weergegeven.



Figuur 1.1 Overzicht plan van aanpak SBW Hervalidatie Piping

Een validatie van de aangepaste rekenregel vindt plaats met full-scale proeven in de IJkdijkfaciliteit.

1.2 Doelstelling SBW Hervalidatie piping

Doelstelling van het programma Sterkte & Belastingen Waterkeringen (SBW) is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels en deze eventueel te verkleinen of elimineren. De doelstelling van SBW Hervalidatie piping is, zoals de naam al zegt, een hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer. De hervalidatie leidt in 2010 tot een hernieuwde versie van het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen (TRZW).

1.3 Doel van het onderzoek 2D/3D EEM grondwaterstromingsberekeningen

Variaties in de ondergrond beïnvloeden het fenomeen piping op een complexere wijze dan in eenvoudige vuistregels kan worden uitgedrukt. Met behulp van 2D en 3D grondwaterstromingsberekeningen met een Eindige Elementen Model (EEM) zal de invloed van de variaties in de watervoerende laag en de afdekkende lagen er omheen op de pipinggevoeligheid worden onderzocht en zal een karakteristieke gradiënt in de buurt van het uittreepunt als functie van doorlatendheidsverschillen worden bepaald.

2D en 3D grondwaterstromingsberekeningen zijn nodig om beter te kunnen voorspellen wat waar en wanneer in het veld tijdens de full-scale validatie proeven in de IJkdijkfaciliteit gaat gebeuren. De situatie is in werkelijkheid - vanwege de natuurlijke variabiliteit - complexer dan in analytische sommen wordt verondersteld. De methode van Sellmeijer betreft een ideale situatie en dient als referentie.

1.4 Aanpak

Ter bepaling van de pipinggevoeligheid is grondwaterstroming onder een dijk beschouwd voor een verscheidenheid aan situaties. Een lagenpakket is gemodelleerd met een grindlaag die zich bevindt op verschillende diepten en met verschillende uitgestrektheden in 2D en 3D.

De verticale stroomsnelheden in een gebied ter plaatse van de teen zijn een maat voor de pipinggevoeligheid. Het effect van de ligging van de grindlaag op het stromingsbeeld is bepaald aan de hand van eindige elementenberekeningen met het pakket ABAQUS. De aanwezigheid van een grindlaag heeft in bepaalde situaties een aanzienlijke invloed op de stroomsnelheid ter plaatse van de teen en ter plaatse van een sloot. De piping-gevoeligheid is sterk afhankelijk van de samenstelling van het lagenpakket onder een dijk.

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt kort beschreven op welke wijze in dit rapport naar piping-gevoeligheid is gekeken door middel van grondwaterstromingsberekeningen. Hoofdstuk 3 beschrijft de uitgevoerde 2D berekeningen waarin de geometrie gevarieerd is en het effect daarvan op de piping-gevoeligheid. Hoofdstuk 4 geeft de uitgevoerde 3D berekeningen weer. Hoofdstuk 5 beschrijft additionele berekeningen uitgevoerd voor het vergelijken van de Deltagootproef met schaalproeven en de invloed van een aanwezige pipe voor de grondwaterstroming. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken en aanbevelingen voor vervolgonderzoek gegeven.

2 Piping-gevoeligheid

In het beschouwen van piping wordt vaak gesproken over de stromingsdruk die volumegewicht van korrels onder water overschrijdt. Een veel gebruikte formule voor het punt waar dit juist optreedt is:

$$|i| = \frac{\gamma_n - \gamma_w}{\gamma_w}$$

Hier is i_v het verticale verhang, γ_n het volumiek gewicht van verzadigde grond, en γ_w het volumiek gewicht van water. In cohesieloze grond is het gewicht van de korrels bij dit verhang niet meer voldoende voor evenwicht. Voor grondwaterstroming is dit verhang gelijk aan:

$$i = -\frac{q_z}{k}$$

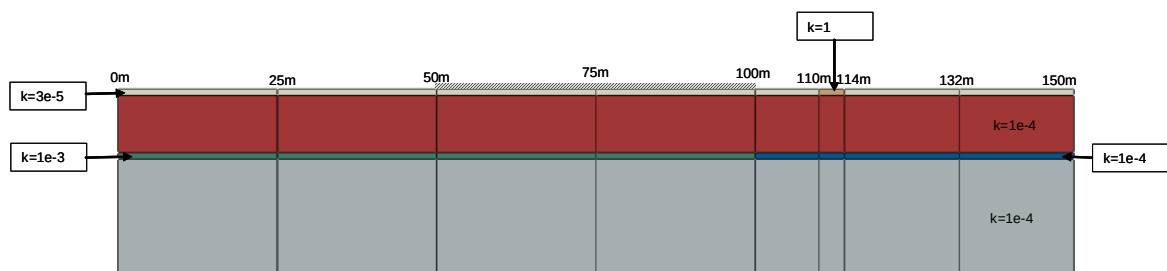
Waarin q_z de verticale stroomsnelheid is en k de doorlatendheid.

Gegeven eenzelfde grondsoort (gelijke k) aan het maaiveld kan door bestuderen van de verticale stroomsnelheid iets gezegd worden over de piping-gevoeligheid. In dit rapport is de verticale stroomsnelheid bestudeerd voor verschillende situaties, zoals grindlagen op zekere diepte en met verschillende uitgestrektheden onder de dijk of naast de dijk in 2D en 3D. Door het vergelijken van de verticale stroomsnelheid voor deze verschillende berekeningen in het gebied van de teen van de dijk kan gezien worden welke situaties meer gevoelig zijn voor piping.

3 2D grondwaterstromingsberekeningen

In Figuur 3.1 is de basisgeometrie voor de 2D eindige elementenberekeningen weergegeven. Uitgaande van deze geometrie is een verscheidenheid aan berekeningen gemaakt voor variabele laagindeling. De pipinggevoeligheid is daarbij bekeken op basis van de verticale stroomsnelheid, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk.

Het lagenpakket van het model in Figuur 3.1 is in totaal 30 m dik. De onderzijde van het model is ondoorlatend. Het model is 150 m lang en tussen 50 en 100 m is dijk aanwezig, hier gemodelleerd als een ondoorlatende rand. Aan de linker zijkant van het model en aan het maaiveld links tussen 0 en 50 m is een stijghoogte van 5 m voorgeschreven. Aan de rechter zijkant en aan het maaiveld rechts een stijghoogte van 0 m. Het beperken van het stijghoogteverschil tot 5 m in de berekeningen is in feite geen beperking, aangezien de grondwaterstroming een lineaire berekening betreft en de resulterende stroomsnelheid is rechtevenredig met het opgelegde stijghoogteverschil. De resultaten kunnen dus altijd worden bepaald voor een andere stijghoogte zonder een extra stromingsberekening uit te voeren.



Figuur 3.1 Basisgeometrie voor de 2D berekeningen.

Het model heeft voor het grootste deel een doorlatendheid van $1e-4$ m/s, zie Figuur 3.1, op de bovenste laag en de grindlaag (groene gedeelte) na. De bovenste laag is 1 m dik en heeft een doorlatendheid van $3e-5$ m/s. Tussen 110m en 114 m is hierin een sloot aangebracht door het materiaal een doorlatendheid van 1 m/s te geven. De grindlaag heeft een doorlatendheid van $1e-3$ m/s. In Figuur 3.1 ligt de grindlaag op een diepte van 10 m en strekt zich uit van de linkerzijde van het model $x=0$ m tot de teen bij $x=100$ m. In de berekeningen is de grindlaag altijd gemodelleerd met een dikte van 1 m, op drie verschillende diepten, 3 m, 5 m en 10 m en met verschillende begin en eind x-posities. Deze x-posities kunnen de waarden aannemen van de horizontale opdeling van het model, zie Figuur 3.1. dit zijn afstanden van 0, 25, 50, 75, 100, 110, 114, 132 en 150 m. Hierdoor is het mogelijk om tussen verschillende afstanden de locatie van het grind te variëren.

3.1 Berekening en postprocessing

De berekening betreft een verzadigd systeem gebaseerd op Darcy stroming dat met eindige elementen opgelost wordt. Als uitvoer is gekeken naar de verticale stroomsnelheid aan het maaiveld. De stroomsnelheden in de teen en ter plaatse van de sloot zijn daarbij maatgevend.

Opgemerkt dient te worden dat de exacte oplossing van het beschreven probleem singulier is in het punt van de teen. Dat wil zeggen dat de verticale stroomsnelheid daar naar oneindig gaat. In het elementenmodel is de stroomsnelheid daar niet oneindig. Dit omdat het een

discreet mesh betreft. Maar er geldt hoe fijner het mesh, hoe hoger de stroomsnelheid in de teen. Dit fenomeen is uitgebreid beschreven in Appendix A, waar de eindige elementenmethode is vergeleken met analytische oplossingen. Daar is ook geconstateerd dat bij een gegeven fijnheid van het mesh de oplossing in de derde knoop vanaf de teen zeer dicht bij de exacte oplossing zit. Wordt bijvoorbeeld met lineaire elementen gewerkt met een elementgrootte van 10 cm, dan is op 20 cm van de teen de gevonden stroomsnelheid nauwkeurig berekend, zie ook Appendix A voor een beschrijving hiervan.

In de berekeningen bevindt de derde knoop zich op 1.25 meter van de teen, zowel in het 2D als het 3D model. Hiermee worden de resultaten tussen 2D en 3D onderling vergelijkbaar. Er dient dus rekening gehouden te worden met het feit dat de gegeven stroomsnelheden niet de maximale zijn, dus een absolute uitspraak over piping voor een gegeven berekening kan niet gedaan worden. De oplossingen komen wel nauwkeurig overeen met exacte oplossing en kunnen daarom onderling voor de gegeven situaties goed worden vergeleken. Dit betekent dat uit de berekeningen wel bepaald kan worden welke situatie meer gevoelig is voor piping dan een andere.

3.2 Resultaten voor grindlaag op diepte 3 m

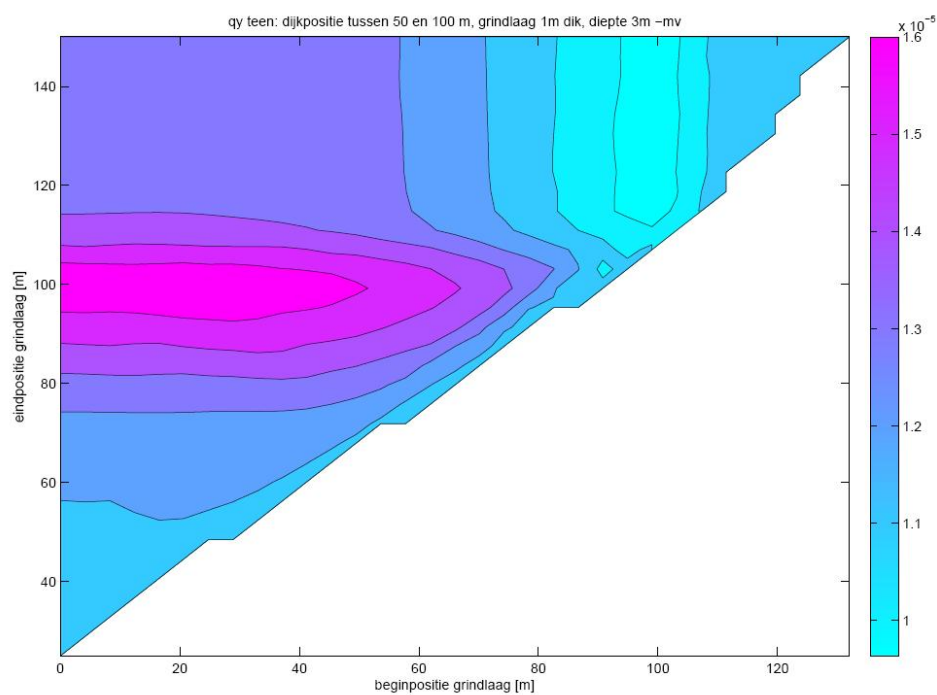
Voor het geval dat de grindlaag op een diepte van 3 m ligt is iedere mogelijke ligging van het grind tussen de posities 0, 25, 50, 75, 100, 110, 114, 132 en 150 m doorgerekend (zie geometrie in Figuur 3.1). Dit zijn in totaal zijn 36 berekeningen gemaakt. Het grind kan bijv. liggen tussen 0 en 25 m, tussen 0 en 50 m, tussen 0 en 75 m tussen 0 en 100 m etc. en vervolgens tussen 25 en 50 tussen 25 en 75 etc. tot alle 36 mogelijkheden zijn aftast.

zoals vermeldt in de vorige paragraaf is de verticale stroomsnelheid uit het model gehaald in de derde knoop vanaf de teen (afstand 1.25 m van teen) en in het midden van de sloot (op $x=112$ m) is. Figuur 3.2 en Figuur 3.3 laten de resultaten zien.

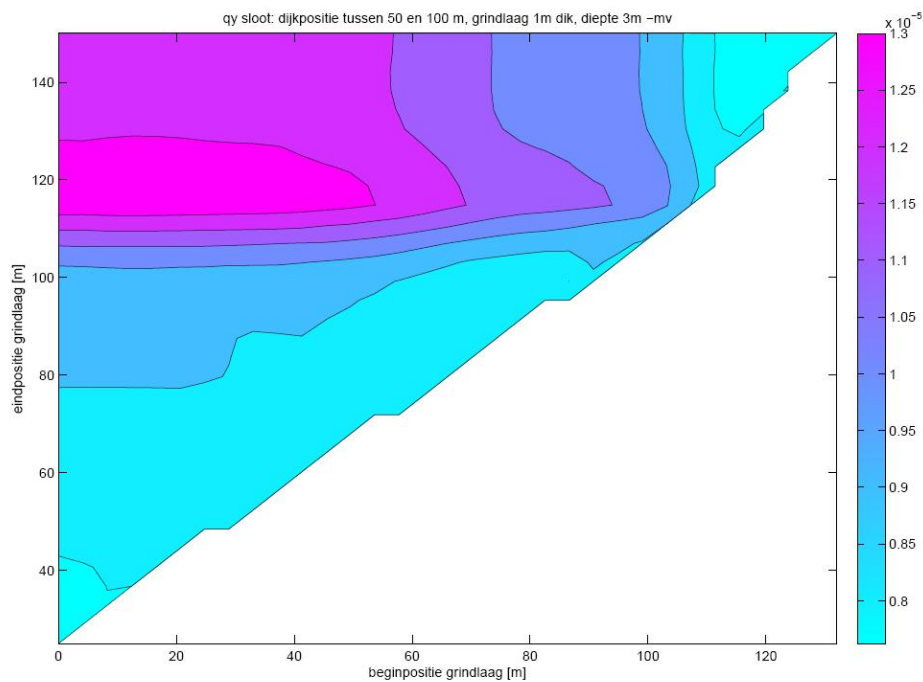
Horizontaal is de beginpositie van het grind uitgezet, verticaal de eindpositie. Voor de mogelijke combinaties ontstaat op deze wijze een contourplot van de verticale stroomsnelheid. Te zien is dat de hoogste stroomsnelheden in de teen bereikt worden als de grindlaag eindigt ter plaatse van de teen op 100 m en begint voor het begin van de dijk $x < 50$ m. De hoogste verticale stroomsnelheden in de sloot worden bereikt als de grindlaag eindigt ter plaatse van het eind van de sloot op 114 m en eveneens begint voor de dijk, $x < 50$ m.

De situatie zonder grindlaag is niet weergegeven in de figuur. De stroomsnelheden zijn ongeveer hetzelfde als die voor de grindlaag die begint op 0 m en eindigt op 25 m. Meer naar het roze toe is de stroomsnelheid hoger in de figuur en meer naar het lichtblauw toe is de stroomsnelheid lager. Het kan dus gezien worden dat de stroomsnelheden aan de teen het laagst zijn wanneer de grindlaag begint ter plaatse van de teen op 100 m en doorloopt tot 132 m of verder. Stroomsnelheden ter plaatse van de sloot reduceren niet significant ten opzichte van de situatie zonder grindlaag, slechts een beetje, wanneer de grindlaag begint voor de sloot en zich uitstrekt tot het eind van het model.

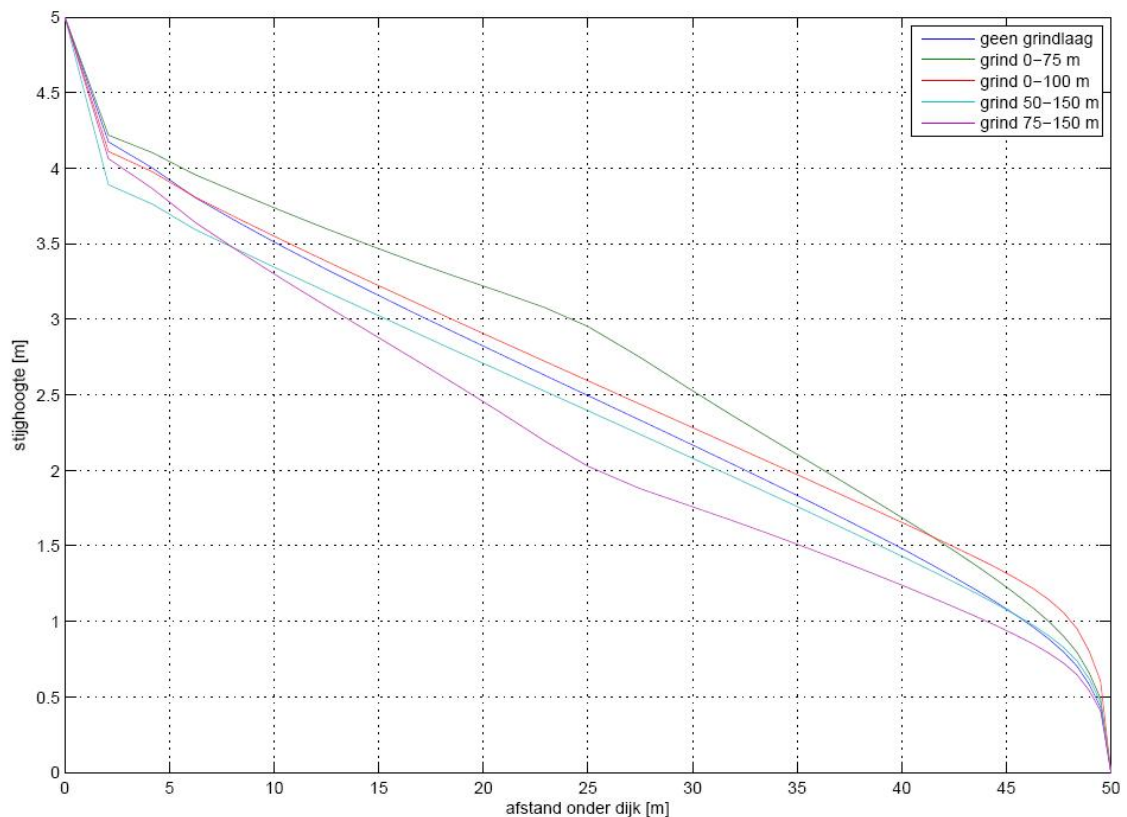
In Figuur 3.4 is voor enkele van de berekeningen het stijghoogteverloop onder de dijk geplott. De verschillen zijn klein. De stijghoogte moet verlopen van 5m naar nul, dit is opgelegd in de berekeningen. Te zien is dat de twee berekeningen waar de grindlaag eindigt halverwege de dijk en begint halverwege de dijk de grootste verschillen laten zien. Dit omdat het grind beter doorlatend is en het stijghoogteverloop ietwat vlakker.



Figuur 3.2 stroomsnelheid in 3^e knoop van de teen (1.25 m afstand)



Figuur 3.3 verticale stroomsnelheid in midden van de sloot.



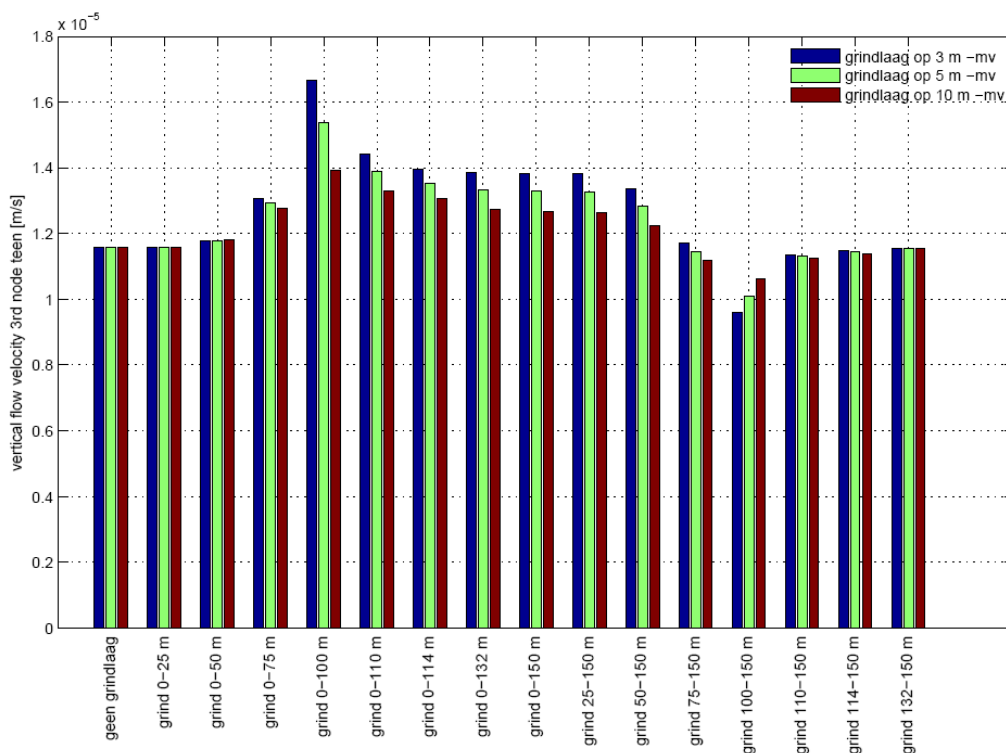
Figuur 3.4 Stijghoogte onder de dijk voor enkele simulaties bij grindlaag op 3 m diepte.

3.3 Resultaten voor grindlaag op 5 en 10 m diepte

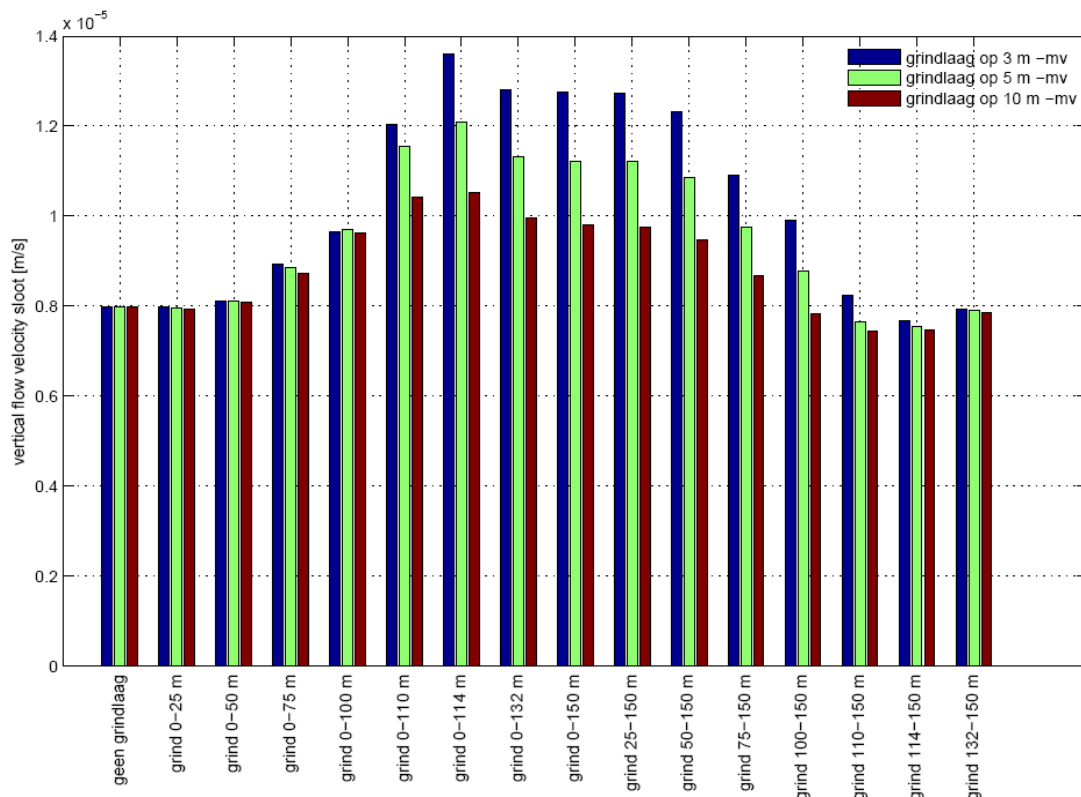
Om te zien wat de invloed is van de diepteligging van de grindlaag zijn ook berekeningen uitgevoerd voor de grindlaag op 5 m en 10 m diepte. Voor deze situatie is niet het volledige aantal van 36 berekeningen uitgevoerd, maar een subset daarvan. Deze subset is gekozen aan de hand van de meest relevante situaties die zich voordeden in de berekeningen voor de 3m diepe laag.

Eerst begin van de laag $x=0$ gekozen en het eindpunt is gevarieerd van $x=25, 50, 75, 100, 110, 114, 132$ en 150 . Vervolgens is het eindpunt op 150 m gehouden en het begin verlegd, bus begin op $x=25, 50, 75, 100, 110, 114$ en 132 m.

De verticale stroomsnelheid in de derde knoop vanaf de teen (op 1.25 m afstand) en ter plaatse van het midden van de sloot, zijn in staafdiagrammen geplot samen met de resultaten voor de grindlaag op 3 m diepte, zie Figuur 3.5 en Figuur 3.5 verticale stroomsnelheden op 3^e knoop van de teen, voor grindlaag op 3, 5 en 10 m.



Figuur 3.5 verticale stroomsnelheden op 3^e knoop van de teen, voor grindlaag op 3, 5 en 10 m.

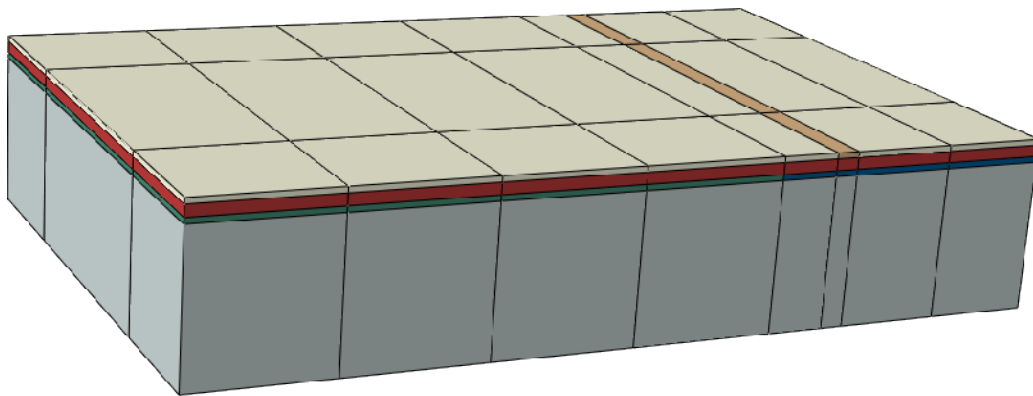


Figuur 3.6 Verticale stroomsnelheden ter plaatse van midden van de sloot voor een grindlaag op 3, 5 en 10 m diepte.

Duidelijk te zien is de afnemende invloed met toenemende diepte van de grindlaag. De situaties waarbij het grind van $x=0$ tot aan de teen doorloopt resulteren in de hoogste stroomsnelheden in de teen ongeacht de diepteligging. Waar de grindlaag doorloopt tot het eind van de sloot op 114 m is de stroomsnelheid ter plaatse van de sloot het hoogst ongeacht de diepteligging van de grindlaag. Wanneer de grindlaag ondieper ligt is de toename het grootst ten opzichte van de situatie zonder grindlaag. De pipinggevoeligheid is dus voor deze situatie dus groter voor ondiepere grindlaag. Ligt daarentegen de grindlaag vanaf de teen op $x=100$ tot aan het eind van de model, zien we de grootste reductie van de stroomsnelheid ter plaatse van de teen. Deze reductie is het groter naarmate de grindlaag ondieper is, de pipinggevoeligheid neemt voor deze situatie derhalve af naarmate de grindlaag ondieper ligt op die locatie.

4 3D grondwaterstromingsberekeningen

Het 2D model uit het vorige hoofdstuk is uitgebreid in de 3^e richting. De totale breedte van het model is 100 m. In een doorsnede is hetzelfde mesh aangehouden als in het 2D model. Het gebruikte model is weergegeven in onderstaande Figuur 4.1. De grindlaag is doorgezet tot de teen, dus tot een afstand van 100 m, aangezien dit de maximum stroomsnelheid opleverde nabij de teen als gezien werd in het vorige hoofdstuk. Dus in de doorsnede is de ligging vastgelegd. Nu is de ligging van de grindlaag over de breedte gevarieerd. De volgende varianten zijn doorerekend: helemaal geen grindlaag, grindlaag over gehele breedte, grindlaag over middelste 50 m, middelste 20 m en middelste 10 m van het model. Als laatste variant is ook gerekend met een zandstrook van 10 m breed in het midden van het model en daarbuiten grind tot aan de teen.

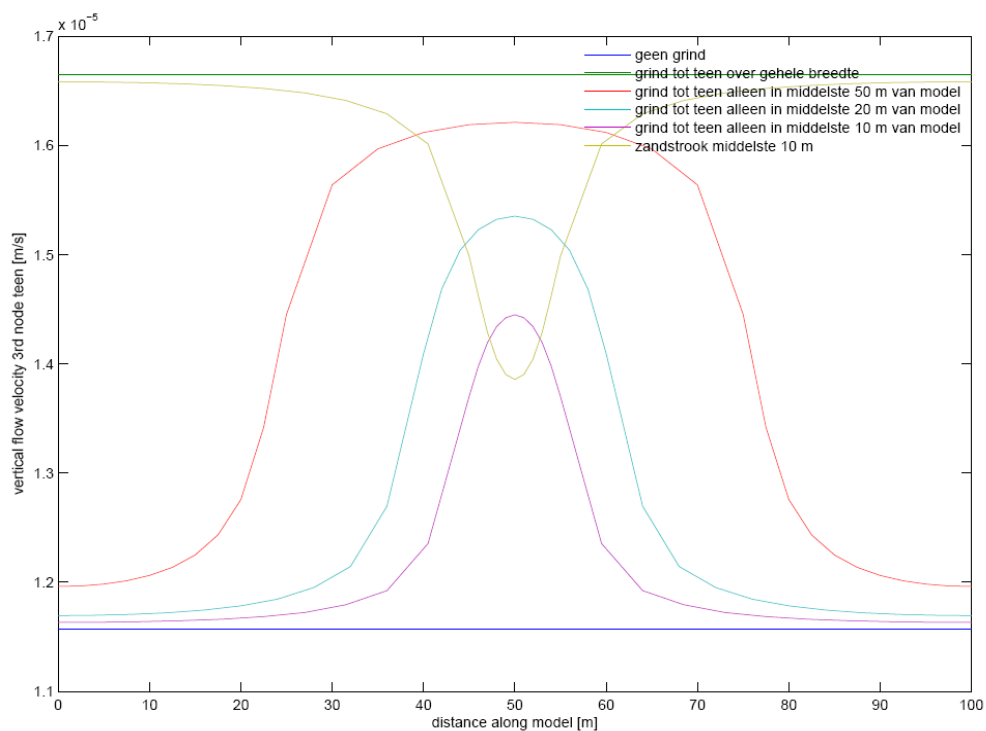


Figuur 4.1 gebruikt 3D model

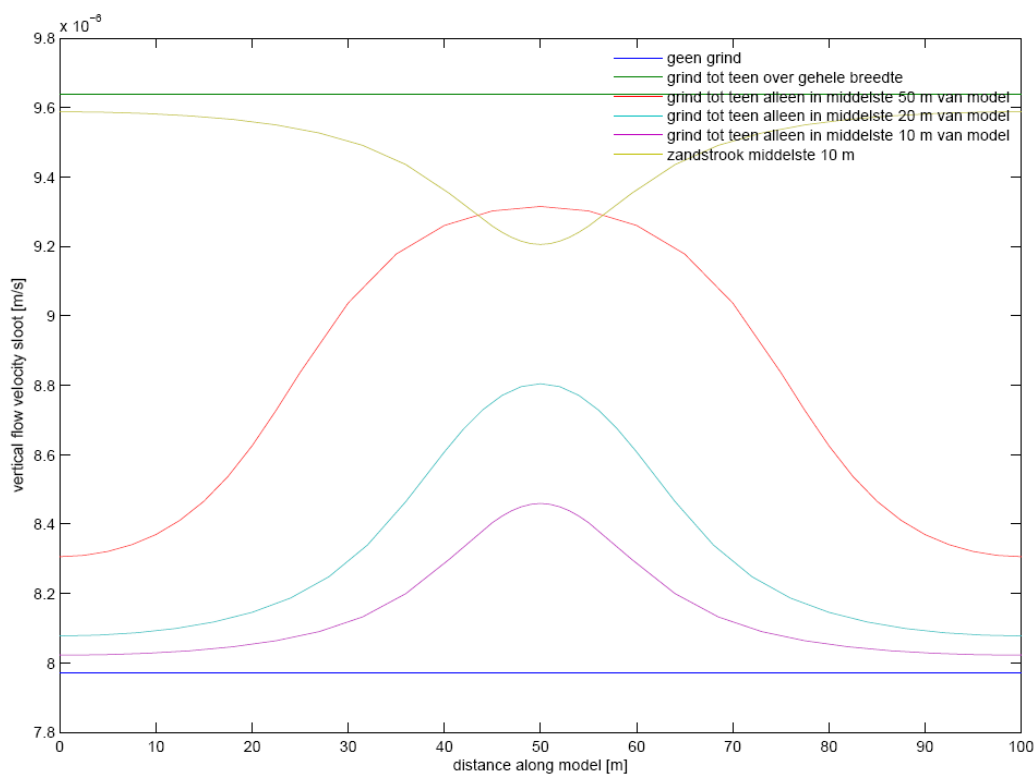
4.1 Resultaten van de 3D stromingsberekeningen

Doordat in het mesh in dwarsdoorsnede identiek is aan het 2D mesh is voor het geval dat er geen grindlaag is of wanneer de grindlaag over de gehele breedte ligt, het model eigenlijk 2-dimensionaal. In dit geval is de resulterende stroomsnelheid over de gehele breedte constant en identiek aan die gevonden werd in het 2D model tot op 3 decimalen nauwkeurig (voor de teen is dit $1.157 \cdot 10^{-4}$ m/s voor situatie zonder grind en $1.665 \cdot 10^{-4}$ m/s voor grind over gehele breedte). De resultaten voor een strook grind liggen tussen de situatie zonder grind en grind over gehele breedte in. De berekening met zandstrook van 10 m laat een soort van invers beeld zien, aan de randen wordt de 2D oplossing van volledige grindlaag benaderd, in het midden duikt de stroomsnelheid naar beneden. Voor deze situatie kan gezegd worden dat de piping-gevoeligheid lager is wanneer de grindlaag een eindige breedte heeft en afneemt wanneer de breedte van de grindlaag afneemt.

Als resultaat is de verticale stroomsnelheid geplot als functie van de breedte op 3 knopen van de teen (ook in het 3D model op 1.25 afstand van de teen). Tevens is de verticale stroomsnelheid geplot als functie van de breedte ter plaatse van het midden van de sloot. Resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.2 en Figuur 4.2 Resultaten 3D berekeningen ter plaatse van teen als functie van de breedte positie.



Figuur 4.2 Resultaten 3D berekeningen ter plaatse van teen als functie van de breedte positie.



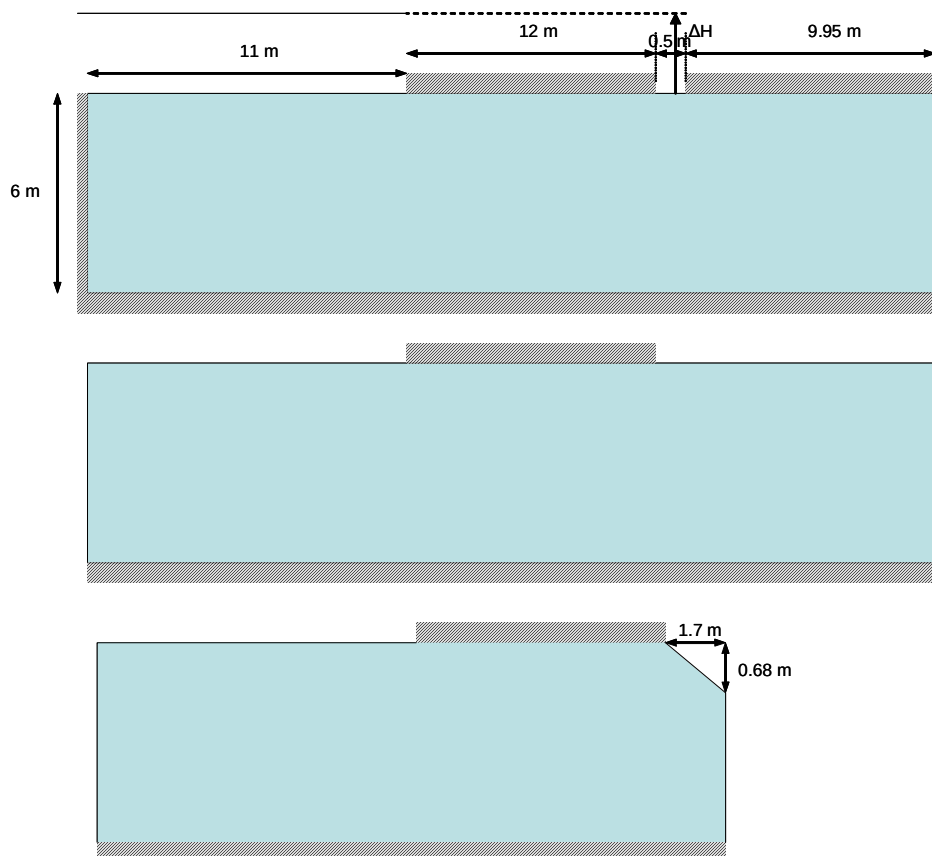
Figuur 4.3 Resultaten 3D berekeningen ter plaatse van midden van de sloot als functie van de breedte-positie.

5 Vergelijk piping-gevoeligheid van schaalproeven en Deltagootproeven met en zonder pipe

Voor recent uitgevoerde schaalproeven is de piping-gevoeligheid bekeken en vergeleken met de proeven uitgevoerd in de Deltagoot. Hiertoe zijn berekeningen uitgevoerd in 2D op soortgelijke wijze als in hoofdstuk 3. Stroomsnelheden en debieten nabij de teen zijn vergeleken voor de situatie met en zonder pipe. De pipe is gemodelleerd als een zone met hogere doorlatendheid die zich vanaf de teen uitstrekt verder onder de dijk. De doorgerkende situatie is voor een pipe van 5 m lengte.

5.1 Gebruikte geometrieën

Onderstaande Figuur 5.1 laat de drie geometrieën zien die zijn doorgerkend. De bovenste is de Deltagootproef T3 waar rechts van de dijk alleen door de sloot water kan stromen, de tweede variant is open en symmetrisch en is de variant waarvoor ook een analytische oplossing bestaat. Voor de derde variant is het model rechts van de dijk ingekort en afgeschuind en is qua verhouding gelijk aan de gedane schaalproeven. Tussen links en rechts van de dijk is een stijghoogteverschil van $\Delta H = 5\text{ m}$ opgelegd. Doorlatendheid van het zandpakket is 10^{-4} m/s genomen. Vanwege lineairiteit van de oplossing is de oplossing schaalbaar met doorlatendheid en stijghoogte zoals eerder besproken.

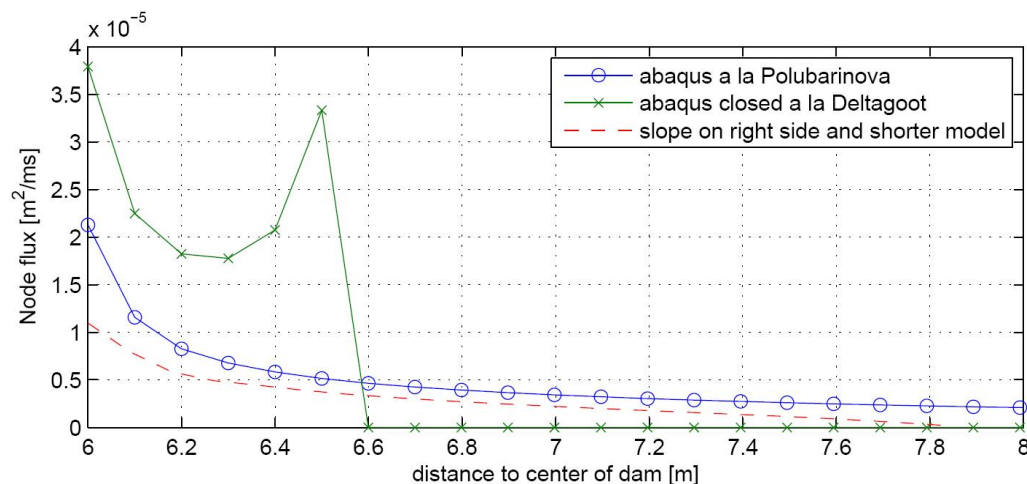


Figuur 5.1: Opzet berekeningen ter bepaling van verschillen in stromingsbeeld tussen de Deltagootproef en schaalproeven.

De geometrieën zijn doorerekend in 2D met een elementgrootte van ongeveer 10 cm ter plaatse van de teen. Voor de situatie met pipe is de bovenste rij elementen van 10 cm hoog vanaf de teen tot 5 m onder de dijk vervangen door een materiaal met een hogere doorlatendheid, zie paragraaf 5.3.

5.2 Resultaten berekeningen zonder pipe

De resultaten zijn weergegeven in Figuur 5.2. Te zien is dat het met platen afgesloten maaiveld in de Deltagootproef tot een grotere stroomsnelheid leidt ter plaatse van de sloot dan wanneer de platen er niet zijn (geometrie nr. 2). Het verkorte schaalmodel laat nog meer reductie zien van de verticale stroomsnelheid. De piping-gevoeligheid van de Deltagootproef is dus relatief groot.



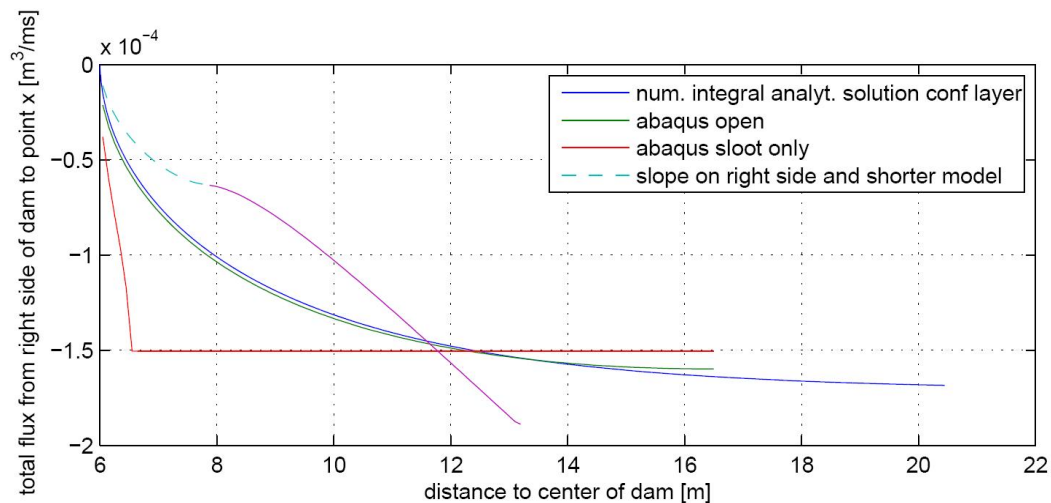
Figuur 5.2 Verschillen in grondwaterstroming tussen de Deltagoot proef en schaalproef. Flux uit het model aan het maaiveld binnendijs vanaf de teen en het totaaldebiet door het maaiveld als functie van de afstand tot het centrum van de dijk.

In onderstaande Figuur 5.3 Figuur 5.2 is tevens het totaaldebiet weergegeven. Dit is het totaaldebiet dat stroomt door het maaiveld tussen de teen tot een zekere afstand verderop (hier uitgedrukt in afstand tot het centrum van de dijk, de teen is op 6m).

Hier is te zien dat het debiet (geïntegreerd vanaf de teen) constant wordt vanaf het eerst bereikt wordt vanaf 6.5 m van de teen. Dit is precies waar de platen beginnen en daar stroomt niets door. De constante waarde is juist wat er door de sloot stroomt in de Deltagootproef.

Voor de open geometrie neemt het debiet voortdurend toe met de afstand, hoewel de lijn horizontaal gaat lopen en er een constante waarde bereikt lijkt te zijn. Analytisch kan aangetoond worden dat dit debiet inderdaad eindig is en een maximum heeft, zie appendix A. Interessant is de observatie dat het totaaldebiet voor de open situatie hoger ligt dan in de Deltagootgeometrie. Dit is omdat er door het wegnemen van de platen minder weerstand in het systeem zit.

Voor de geometrie van het schaalmodel is het debiet langs de afschuining gegeven met een stippellijn en daarna is de flux nog over de hoogte geïntegreerd aan de rechterzijde van het model. Het totaal ligt weer boven die van de tweede geometrie. Dit vanwege het feit dat de weerstand het laagst is in de schaalmodel geometrie met afschuining.

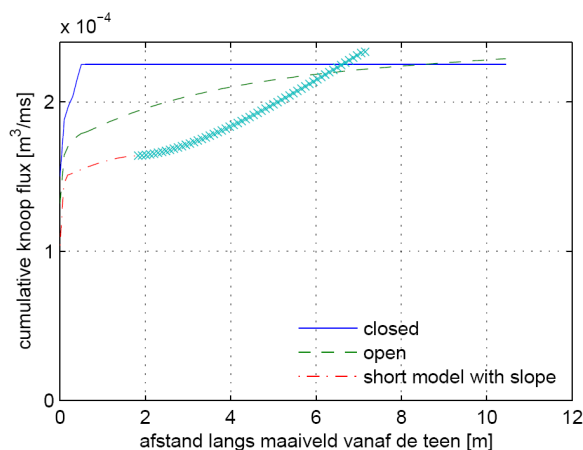


Figuur 5.3 Verschillen in grondwaterstroming tussen de Deltagoot proef en schaalproef. Totaaldebiet door het maaiveld als functie van de afstand, geïntegreerd van de teen tot deze afstand.

5.3 Berekeningen met pipe

Zoals aangegeven is in ieder van de drie geometrieën een pipe gelegd van 5 m lengte vanaf de teen onder de dijk. Dit is de lengte die waargenomen werd in de Deltagootproef T3. De hoogte van de pipe is gelijk aan de meshfijnheid daar, 10 cm. De doorlatendheid van de pipe in het model is zodanig gemaakt dat de relatie tussen debiet en verhang de resultaten van Deltagootproef T3 benadert. Het verhang in de proef bij deze 5 m pipe was ca 1.9 m en de resulterende $Q=15$ l/min.

In Figuur 5.4 is het totaaldebiet weergegeven resulterend uit de berekeningen.



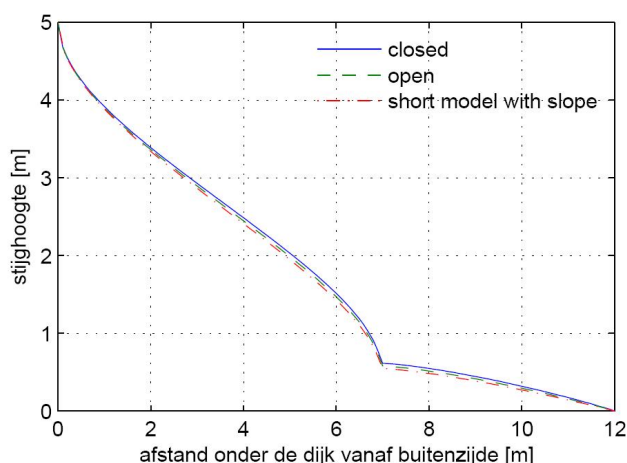
Figuur 5.4 Totaal debiet in de berekeningen met 5m pipe

Voor de Deltagootgeometrie komt er $2.25 \cdot 10^{-4}$ m³/m/s door de sloot. Aangezien de goot 5 m breed was komt dit totaal op $1.125 \cdot 10^{-3}$ m³/s, ofwel 67.5 l/min. De doorlatendheid van de Deltagootproef werd verder geschat op $5.11 \cdot 10^{-4}$ m/s, in tegenstelling tot de hier gebruikte $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4. Dus ter vergelijking dienen de rekenresultaten geschaald te worden met een factor $5.11E-4/1E-4=0.51$. Daarnaast was het verhang in de proef bij 5m pipe lengte gelijk aan 1.9 m, dus ter vergelijking met de proef dient het uit de berekening resulterend debiet ook nog vermenigvuldigd te worden met de factor $1.9/5=0.38$. Dit mag gedaan worden omdat de Darcy stroming lineair is. Dus de resultaten schalen ook lineair met het verhang en doorlatendheid. Worden beide factoren meegenomen, dan wordt het totaaldebiet $67.5 \cdot 0.38 \cdot 0.11 = 13.1$ wat in de buurt komt van de 15 l/min uit de proef.

Met de aanwezigheid van de pipe met hoogte 10 cm in combinatie met de gekozen doorlatendheid (100 keer groter dan de doorlatendheid van het zandpakket) kan dus het debiet van de proef bij benadering teruggevonden worden.

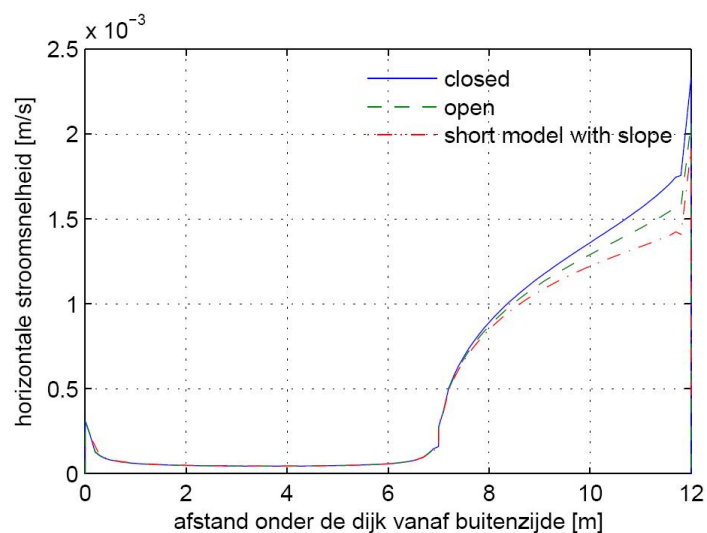
Het stijghoogtepatroon onder de dijk is gegeven in Figuur 5.5. Wat opvalt is dat dit slechts geringe verschillen vertoont voor de verschillende geometrieën, Deltagootproef, open situatie en schaalproef. Hoe hoger de doorlatendheid van de pipe wordt gemaakt, hoe dichter de stijghoogte naar nul gaat in de pipe. De pipe begint op 7 m afstand onder de dijk. Dit is ook waar de stijghoogtefiguur een knik laat zien, het stijghoogteverloop in de pipe is relatief vlak en zal vlakker worden naarmate de doorlatendheid van de pipe toeneemt.



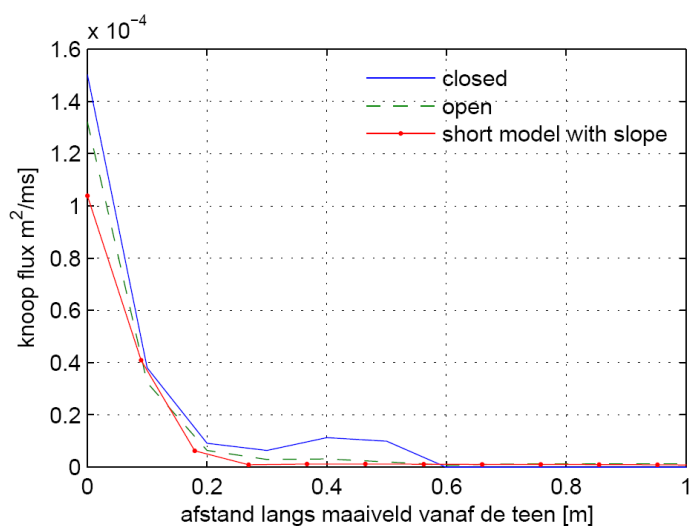
Figuur 5.5 Stijghoogte onder de dijk in de berekeningen met 5m pipe in de drie geometrieën

In Figuur 5.6 is de horizontale stroomsnelheid onder de dijk weergegeven en in Figuur 5.7 de verticale flux aan het maaiveld vanaf de teen. Hier is de verticale flux nog altijd het hoogst voor de Deltagoot geometrie, maar de verschillen in debiet ter plaatse van de sloot tussen de drie geometrieën zijn kleiner voor de situatie met pipe (ca factor 1.5) dan voor de situatie zonder pipe (ca factor 3.5).

Er kan dus geconcludeerd worden dat zou dezelfde pipe ontstaan zijn in de verschillende proeven dat het stromingsbeeld dichter bij elkaar ligt, terwijl voor de situatie zonder pipe, de piping-gevoeligheid in de Deltagootproef duidelijk hoger is.



Figuur 5.6 Horizontale stroming onder de dijk in de berekeningen met 5 m pipe.



Figuur 5.7 Flux door het maaiveld vanaf de teen in de berekeningen met 5m pipe.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Op basis van het gedrag van een logaritmische singulariteit (bron in een stromingsveld) en de lineaire interpolatie van EEM is de informatie van de derde knoop vanaf de knoop met een singulariteit nauwkeurig en relevant. De (verticale) Darcy-snelheid in die knoop is gekozen als kritieke maat om de relatieve invloed van heterogeniteiten van het globale stromingsveld te kunnen beoordelen.

Voor piping-gevoeligheid wordt doorgaans naar het verticale verhang gekeken dit is gelijk aan de $-q_z/k$, de verticale stroomsnelheid gedeeld door de doorlatendheid van de desbetreffende laag. Dit betekent dat de resultaten van verticale stroomsnelheid direct gebruikt kunnen worden voor de bepaling van de piping-gevoeligheid, aangezien het verticale verhang als maat hiervoor gezien wordt.

Uit de berekeningen kunnen volgende conclusies worden getrokken:

- Het is waargenomen dat de aanwezigheid van verschillende lagen een significant effect heeft op de piping-gevoeligheid. Voor de gekozen dijkbreedte van 50 m, kan de aanwezigheid van een grindlaag op 3 m diepte die volledig onder de dijk doorligt tot 1.4 maal het verhang opleveren (nabij de teen) ten opzichte van de meer homogene situatie zonder grindlaag. Ter plaatse van een sloot op 10 m afstand van de teen kan dit oplopen tot 1.7 keer het verhang ten opzichte van de meer homogene situatie zonder grindlaag.
- Het verhang kan ook afnemen door aanwezigheid van een grindlaag. Dit gebeurt als de grindlaag begint bij de teen en zich binnendijs uitstrekt.
- Ligt de grindlaag dieper, dan is het effect minder uitgesproken. Is de grindlaag beperkt in breedte in 3D dan is het effect ook minder uitgesproken, hoe smaller de grindlaag, hoe kleiner de toename (afname voor geval vanaf de teen) van het verhang.
- De hier gepresenteerde stroomsnelheden kunnen niet in absolute zin gebruikt worden voor toetsing op piping, dit vanwege het singuliere gedrag nabij de teen. Voor de gemodelleerde situatie zou een exacte oplossing een oneindig grote stroomsnelheid opleveren in de teen en in een zeker klein gebiedje rond de teen altijd hoger liggen dan het piping-criterium.
- In de berekeningen voor het vergelijk van de piping-gevoeligheid van de Deltagootproef met recent uitgevoerde schaalproeven is gezien dat voor de Deltagootproef, waar het maaiveld binnendijs was afgesloten met platen en horizontaal het model ook dicht was, de piping-gevoeligheid hoger is dan voor een situatie met open maaiveld en een open rand.
- Berekeningen zijn uitgevoerd met een stijghoogteverschil van 5 m. De resultaten schalen lineair met het stijghoogteverschil, door schaling kan ook voor een ander stijghoogteverschil de debieten worden afgeleid. De resultaten zijn ook lineair schaalbaar met de doorlatendheid (gegeven dat dezelfde verhoudingen in doorlatendheid worden gehanteerd voor de lagen onderling als in de berekeningen).

Bij de uitvoering van een full-scale proef in het veld staat de vraag centraal of voor een vrij ingewikkelde geometrie van de grondopbouw zou moeten worden gekozen, omdat deze ook in de praktijk kan voorkomen. Uit het onderzoek volgt dat het verhang dat bij een wat

ingewikkelder geometrie optreedt numeriek kan worden berekend zo dat een eenvoudige geometrie bij de uitvoering van een full-scale proef voldoende is.

6.2 Aanbevelingen

In de gebruikte 3D EEM modellen (bijvoorbeeld ABACUS) is het piping-erosieproces zelf niet opgenomen. Aangezien het pipingproces op microniveau optreedt, werkt het bij benadering als een singulariteit en kan het met de derde-knoop-observatie worden beoordeeld. Bij stromingsvelden met andere heterogeniteiten is daarom de verandering van de Darcy-snelheid in de derde knoop relevant. Die verandering is ook afhankelijk van de lokale mesh-grootte. Voorgesteld wordt om die vast te leggen op 0,25 m. Aldus wordt op eenvoudige wijze het relatieve verschil in snelheid in de derde knoop vastgesteld bij de vergelijking van het stromingsveld voor een uniforme grondlaag en het stromingsveld met een bepaalde heterogeniteit. Dit relatieve verschil wordt aangeduid met een factor f .

Bij de beoordeling van piping kan nu het model MSeep, dat uitgaat van een uniforme grondlaag, worden aangepast voor de heterogene situatie door via een representatieve doorlatendheid te zorgen dat nabij de start van het pipingproces (het singulariteitspunt) de daarmee overeenkomende stromingssnelheid optreedt. Vanwege lineariteit in grondwaterstroming kan dit gebeuren met een aanpassing van de doorlatendheid van de uniforme grondlaag door gebruik te maken van bovengenoemde factor f : $K_{\text{repr}} = fK$, waarin K de doorlatendheid is van de zandlaag bij de pipe in de heterogene situatie.

De vorm, locatie en lengte van mogelijke doorlatende deelgrondlagen (lensen) in een heterogeen grondpakket zijn van invloed op de bepaling van de meest kritieke situatie nabij de start van piping (het singulaire punt). Daartoe zijn meerdere berekeningen voor verschillende scenario's nodig. Immers, gedurende het proces verplaatst het singuliere punt zich. Om uit te zoeken of bij doorgaande piping de lokale Darcy-snelheid ook blijft groeien wordt aanbevolen in de 3D EEM simulatie de actuele pipe te modeleren als een dunne zone met een doorlatendheid van 100 keer de lokale zanddoorlatendheid, en in die zone te constateren of de (afvoer)snelheid blijft toenemen. Is er een moment dat die afneemt, dan betekent dat dat het stromingsveld zich op een andere wijze ontwikkelt dan via een groeiende pipe. Dit is, zoals gezegd, afhankelijk van de dikte, de lokale diepte, horizontale positie en lengte van de doorlatende lens (het lokale KD-effect). Dan blijkt dat ofwel de pipe zich kan voortzetten in verticale richting (heave), waarbij grotere weerstand te overbruggen is, of er zou geen verdere erosie optreden. Afhankelijk van de pipe-lengte die optreedt bij de situatie dat de (afvoer)snelheid niet meer groeit, kan een oordeel worden gevormd over doorgaande piping of stagnerende piping. Voor de in dit rapport getoonde scenario's wordt aanbevolen de corresponderende stromingsvelden te kwantificeren.

In de bovengenoemde 3D EEM simulaties is alleen het stromingsveld geanalyseerd bij geschematiseerde (door erosie veroorzaakte) pipingstructuur. Of erosie daadwerkelijk optreedt hangt af van micro-schaal aspecten, die slechts met experimenten zijn te kwantificeren. De erosie is met name afhankelijk van de geometrieschaal, omdat het pipingproces op micro-niveau niet-lineair is. Ook het 3D-effect en – wat vaak voorkomt – een twee-lagen zandopbouw (onder grof, boven fijn) verdient onderbouwing op ware schaal. Deze 3D EEM rekenmethodiek dient daarom door een full-scale proef in het veld te worden gevalideerd door de op bepaalde plekken voorspelde lokale gradiënten te meten.

De verhouding tussen de globale geometrieschaal (kleine proef, grote proef) en de sleepkrachten op de korrels is in de theorie niet-lineair. Het kritieke verhang is afhankelijk van

de geometrieschaal, want de korrelmaat blijft dezelfde. Een full-scale proef is belangrijk om de afhankelijkheid van de geometrieschaal te kunnen verdisconteren.

Ten aanzien van het echte erosiemechanisme bij doorgaande/stagnerende piping in complexere heterogeniteit zijn goed geconditioneerde observatieproeven op passende laboratoriumschaal relevant. Daarvoor is een proef op ware schaal ongeschikt (de precieze opbouw is te complex voor garantie op succes op ware schaal). Het losmaakmechanisme is tot nu toe nog niet goed begrepen. Het is van groot belang inzicht te krijgen in het losmaakmechanisme van korrels. Hoe komen de korrels los uit het zandpakket en hoe bezinken ze eventueel weer? De uitkomsten van deze proeven zijn belangrijk om voor doorgaande piping een praktische uitbreiding van Sellmeijer's regel te definiëren.

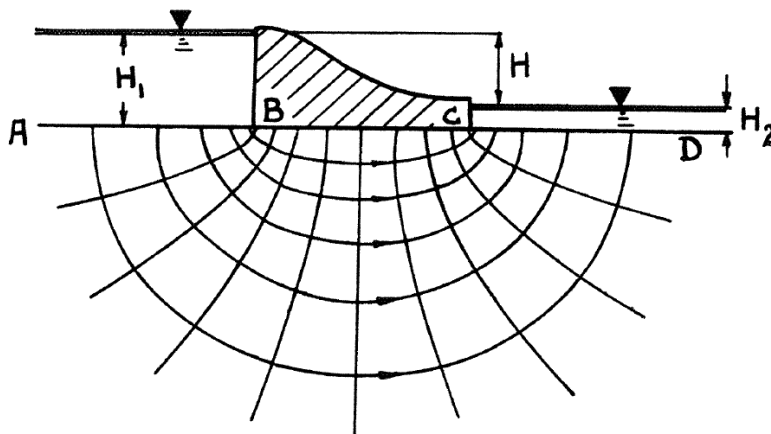
A Vergelijk EEM met analytische oplossingen

Ter controle van de nauwkeurigheid van de eindige elementenberekeningen worden twee eenvoudige gevallen de resultaten vergeleken met analytische oplossingen.

A.1 Analytische oplossingen voor stroming onder een ondoorlatende dijk

Beschouw stroming onder een ondoorlatende dijk met breedte $2b$, aangedreven door een stijghoogteverschil H . De dam is gelegen op een halfruimte met permeabiliteit k , zie Figuur 6.1.

Figuur 6.1: stroming onder een ondoorlatende dam op een halfruimte met stijghoogte verschil H , uit Polybarinova-Kochina.



De dam is zo gelegen dat het maaiveld is $y=0$ en $x=0$ is het centrum van de dam, begin en eindpunten van de dam zijn $x=-b$ en $x=b$. De analytische oplossing voor de verticale stroomsnelheid aan het maaiveld (zie Polybarinova-Kochina) aan de rechterzijde is:

$$v = \frac{kH}{\pi\sqrt{x^2 - b^2}}$$

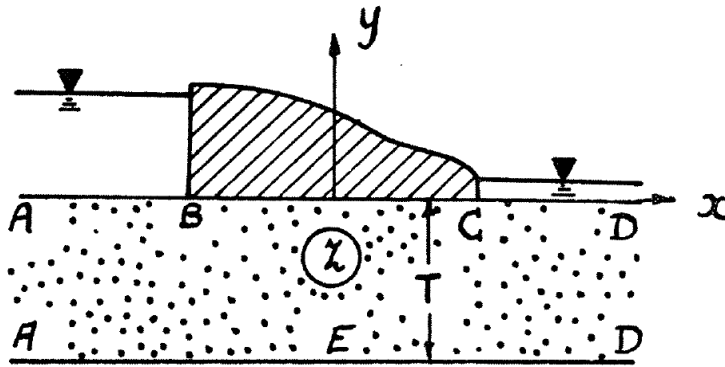
Te zien is dat dit oneindig wordt als $x=b$. Als het totaaldebiet uitgerekend wordt tussen het punt $x=b$ en een punt x_0 met $x_0 > b$ dan is het resultaat:

$$Q = \frac{kH}{\pi} \ln \left(\frac{x_0 + \sqrt{x_0^2 - b^2}}{b} \right)$$

Dit is eindig.

Beschouw nu hetzelfde probleem, maar nu op een eindig dikke doorlatende laag met permeabiliteit k en dikte T , zie onderstaande Figuur 6.2.

Figuur 6.2: stroming onder een ondoorlatende dam op een laag met dikte T met stijghoogte verschil H , uit Polybarinova-Kochina.



De analytische oplossing voor de verticale stroomsnelheid aan het maaiveld aan de rechterzijde is:

$$v = \frac{kH\pi}{4KT} \frac{\cosh\left(\frac{\pi b}{2T}\right)}{\sqrt{\sinh\left(\frac{\pi(b+x)}{2T}\right)\sinh\left(\frac{\pi(x-b)}{2T}\right)}}$$

K is hierin:

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-m\sin^2\varphi}}, \quad \text{met } m = \tanh^2\left(\frac{\pi b}{2T}\right)$$

Deze integraal is de complete elliptische integraal van de eerste soort over m , een standaard Matlabfunctie. Het is eenvoudig te zien dat als de laagdikte naar oneindig gaat we de uitdrukking voor de dam op oneindige halfruimte weer terugkrijgen.

Een totaal debiet tussen punt $x=b$ en een punt x_0 met $x_0 > b$ dan is hier lastiger uit te rekenen, aangezien de functie v moeilijk of niet te primitiveren is.

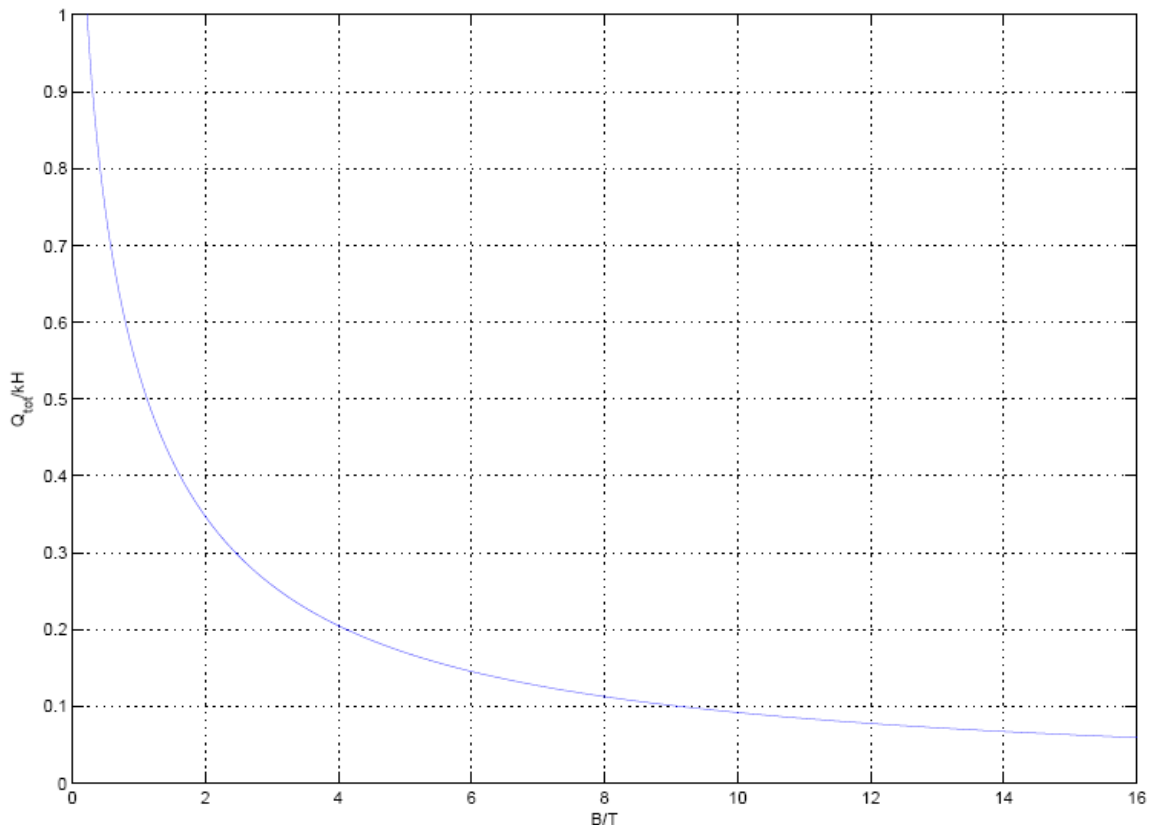
Polubarinova geeft wel een uitdrukking voor het totaaldebiet wat onder de dijk doorstroomt, dit is:

$$Q = \frac{kHK'}{2K}$$

hierin is

$$K' = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - m'^2 \sin^2 \varphi}}, \text{ met } m' = 1 - m$$

Als Q dimensieloos gemaakt wordt door te delen door kH , dan kan een grafiek gemaakt worden van Q/kH tegen de B/T , de breedte van de dijk $B=2b$ gedeeld door de laagdikte: De resulterende figuur is als volgt:

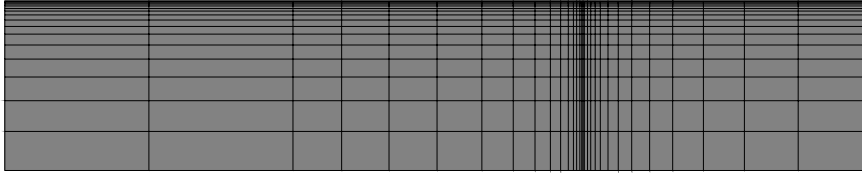


Deze is identiek aan de figuur uit Polubarinova.

A.2 EEM oplossing voor stroming onder een ondoorlatende dijk

Een 2D EEM berekening is gemaakt voor een situatie met een ondoorlatende dijk die 50 m breed is op een 30 m dikke laag met permeabiliteit $1e-4$ m/s. Het model is 150 m breed, dus 50 voor de dijk en 50 m na de dijk. Meshverfijning is toegepast rondom het punt waar de analytische oplossing singulier is. Als stijghoogte is opgelegd 5m voor de dijk, en 0m na de dijk, dit is zowel bovenop het model gedaan als op de linker- en rechterkant. Ter plaatse van de dijk is bovenop het model ondoorlatend. Het model heeft een grof mesh bestaande uit 480 elementen, maar ter plaatse van het singulier punt is de meshafmeting ongeveer 25 cm. Het gebruikte model is weergegeven in Figuur 6.3.

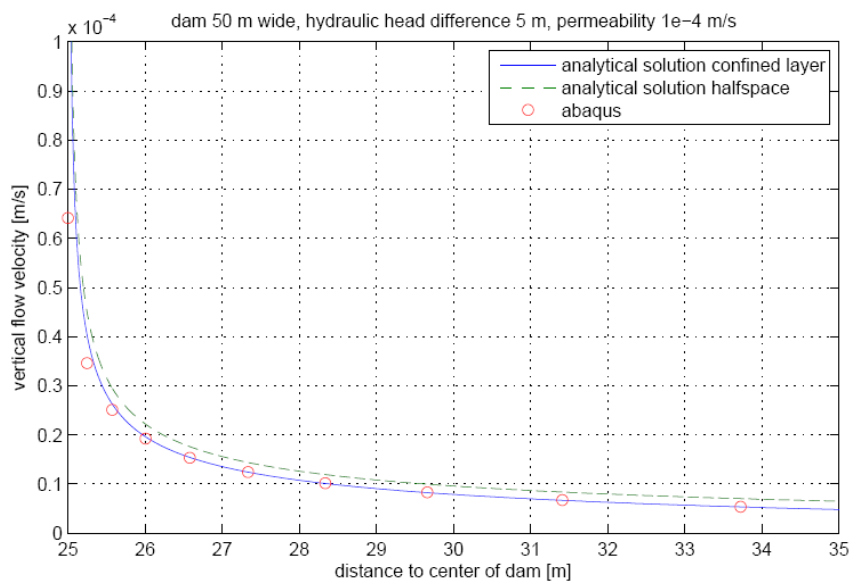
Figuur 6.3 Eindige elementenmodel voor bepalen van stroming onder een ondoorlatende dijk op een laag van 30 m dikte.



over de hoogte heeft het mesh 16 elementen met een bias van 50 keer zo fijn boven als onder. De 50 m links naast de dijk heeft 2 elementen, de eerste 25 m van de dijk 3 elementen, de tweede 25 m 10 elementen met een bias van 25 keer zo fijn naar het singuliere punt toe. De 50 m rechts naast de dijk zijn gemeshed met 15 elementen en een bias van 50 keer zo fijn naar het singuliere punt. Totaal is $16 \cdot (2+3+10+15) = 16 \cdot 30 = 480$ elementen.

Het resultaat van de berekening, de verticale stroomsnelheid, is geplot in onderstaande Figuur 6.4.

Figuur 6.4 Verticale stroomsnelheid geplot tegen de afstand tot de teen. Abaqus resultaten vergeleken met analytische oplossingen.



Duidelijk te zien is het verschil tussen de analytische oplossing van de eindige dikke laag en de halfruimte. Vanaf de derde meshknoop (op ca 25.5 m in de grafiek) vanaf het singulier punt komt de Abaqus oplossing goed overeen met de analytische oplossing. Dit schijnt een algemeen geaccepteerd feit te zijn. Dit betekent dat met een knoopafstand Δx er op een positie ca $2\Delta x$ van het singuliere punt een goede benadering is van de analytische oplossing. Binnen deze afstand richting de teen, gaat de analytische oplossing naar oneindig en wijkt dus enorm af van de numerieke oplossing die eindig is.

A.3 Afschatting singulier gedrag

Gezien werd dat in de derde knoop vanaf de teen de numerieke oplossing goed de analytische oplossing benadert, maar op afstanden dicht bij de teen de analytische oplossing naar oneindig gaat. Wat er op kleinere afstanden gebeurt dan de derde knoop, zou

afgeschat kunnen worden door uit te gaan van de oplossing in de 3e knoop, uitgaande van de plaatsafhankelijkheidsfunctie van de analytische oplossing voor een halfruimte:

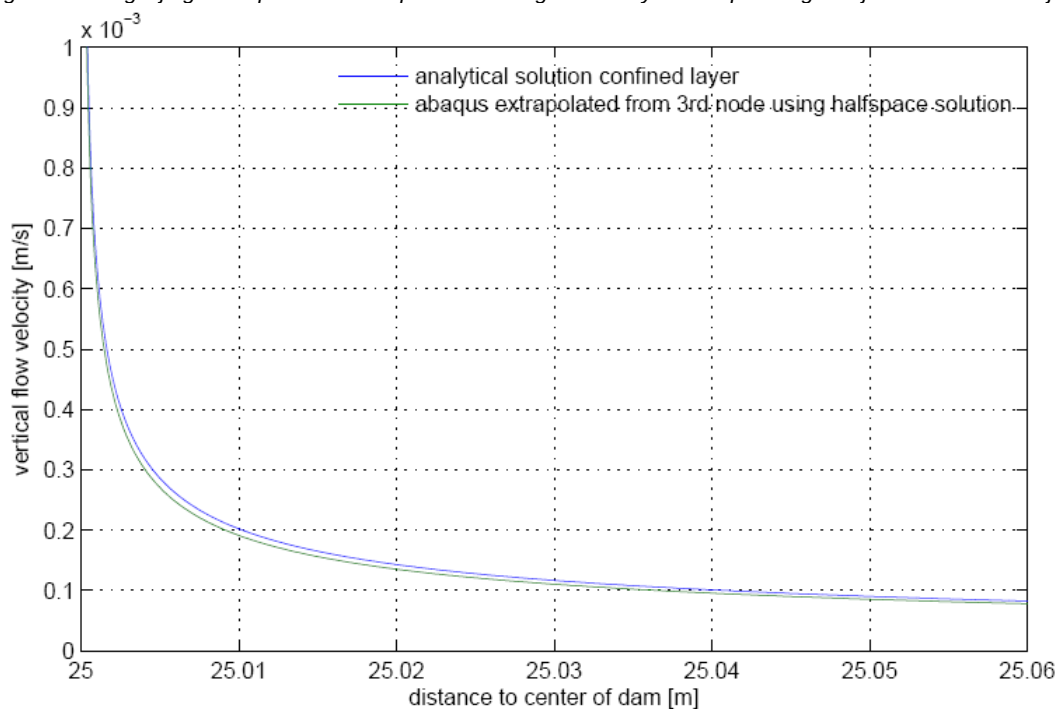
$$v = \frac{A}{\sqrt{x^2 - b^2}}, \quad x < x_3$$

waarbij x_3 de afstand van de derde knoop tot het singulier punt is. De constante A kan bepaald worden door de stroomsnelheid ter plaatse van dit punt gelijk te stellen aan de FEM oplossing ter plaatse van de derde knoop v_3 :

$$A = v_3 \sqrt{x_3^2 - b^2}$$

Voor bovengemaakte FEM berekening is dit uitgevoerd en de resultaten zijn weergegeven in Figuur 6.5 voor de eerste 6 centimeter.

Figuur 6.5 vergelijk geëxtrapoleerde Abaqus berekening met analytische oplossing nabij de teen van de dijk.



Te zien is dat dit voor deze situatie een goede overeenkomst oplevert tussen geëxtrapoleerde FEM oplossing en analytische oplossing. Bijvoorbeeld op 1 cm van het singulier punt is de stroomsnelheid al 2e-3, dit is bij doorlatendheid van 1e-4 een verhang van 2.

Uiteraard zal de extrapolatie minder goed zijn voor complexere laagindelingen, waarvoor geen analytische oplossing meer bestaat. Het kan desondanks gebruikt worden om debieten af te schatten.