

3D Stroming bij Piping

3D grondwaterstroming bij piping – Rivierenland

Definitief rapport





Samenvatting

Piping is een belangrijk faalmechanisme, waarop dijken getoetst worden. De algemene indruk bij aanvang van deze studie, was dat de faalkans voor piping bij dijken met de huidige methodiek wordt overschat. De huidige toetsing is gebaseerd op de rekenregel van Sellmeijer. De basis voor deze rekenregel wordt gevormd door een tweedimensionale (2D) schematisatie van de ondergrond. Hierbij wordt aangenomen dat de grondwaterstroming en pipe-stroming 2D is. In deze studie wordt verondersteld dat welvorming (met piping tot gevolg) leidt tot radiale toestroom van grondwater. Dat is een situatie die bij uitstek beschouwd wordt als een driedimensionale (3D) stromingssituatie. Deze studie betreft een modelstudie naar grondwaterstroming rondom piping in een 2Den 3D-schematisatie. Geconcludeerd wordt dat voor een realistische weergave van de stroming in de beschouwde situaties een 3D-model nodig is; in die situaties stagneert pipe-groei in een 3D-model, waar in een 2D model pipegroei doorzet tot aan de rivier.

Colofon

Documenttitel	3D Stroming bij Piping
Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Verantwoordelijke bij opdrachtgever	Laura Taal
Status	Definitief rapport
Datum	5 februari 2021
Projectnummer	201104
Auteur	Arjen Oord
Kenmerk	AW_023_AO_201104
Collegiale toetsing door	Arjen Roelandse
Vrijgegeven door	Jouke Velstra

Disclaimer

Aan dit rapport kunnen geen rechten worden ontleend. De auteurs zijn niet verantwoordelijk voor eventuele fouten of consequenties. Aanvullingen of verbeteringen zijn welkom via info@acaciawater.com

Inhoudsopgave

1	Inleid	Jing
	1.1	Algemeen
	1.2	Aanleiding
	1.3	Achtergrond
	1.4	Leeswijzer
2	Aan	pak
	2.1	Algemeen
	2.2	Modelomgeving MODFLOW
	2.3	Criterium voor erosielensvorming
	2.4	Beschrijving conceptuele model
	2.5	Weerstand van de pipe
	2.6	Casussen
3	Resu	Itaten1
	3.1	Algemeen
	3.2	Rivierdijk I
	3.3	Projectgebied WoS - dijkpaal DD202
	3.4	Projectgebied TiWa - Dijkpaal TG160
4	Discu	Jssie24
	4.1	Evaluatiemethode
	4.2	Doorlatendheid van het erosiekanaal
	4.3	De rol van het achterland
	4.4	Overige factoren
	4.5	Validatie
5	Cond	clusies en Aanbevelingen
6	Litero	3tuur

] Inleiding

1.1 Algemeen

Piping is een belangrijk faalmechanisme, waarop dijken getoetst worden. De algemene indruk bij aanvang van deze studie, was dat de faalkans voor piping bij dijken met de huidige methodiek soms wordt overschat. De huidige toetsing is gebaseerd op een rekenmodel en daarvan afgeleide rekenregel van Sellmeijer (Sellmeijer *et al.*, 1989 en Förster *et al*, 2012). De basis voor de rekenregel wordt gevormd door een tweedimensionale (2D) schematisatie van de ondergrond. Hierbij wordt aangenomen dat de grondwaterstroming en pipe-stroming 2D is. Deze studie veronderstelt dat welvorming (de initiële fase in het piping mechanisme) leidt tot radiale toestroom van grondwater. Een situatie die bij uitstek beschouwd wordt als een driedimensionale (3D) stromingssituatie. Deze rapportage behandelt de resultaten van een studie naar het gedrag van grondwaterstroming rondom piping. Daarbij is een vergelijking gemaakt tussen een 2D- en 3D-schematisatie van het proces aan de hand van een grondwatermodel.

1.2 Aanleiding

Huidige modellen gaan uit van een 2D benadering met een afgesloten benedenstroomse randvoorwaarde. Waterschap Rivierenland (hierna: WSRL) ziet in de praktijk dat welvorming 3D (radiale toestroom) is en dat de mate van lek naar het achterland invloed heeft op het ontstaan van wellen. De huidige rekenregel is mogelijk niet altijd toepasbaar voor een 3D-stromingssituatie. Radiale toestroom van grondwater en grootschalige geohydrologische processen, zoals kwel en andere "lek" naar het achterland kunnen niet eenvoudig vertaald worden naar parameters die gebruikt worden voor de modellen waarmee nu de kans op piping wordt berekend. Het verwerken van deze processen in een model leidt mogelijk tot andere inzichten. In onderstaande figuur is een foto te zien waarin een hoogwatersituatie leidt tot 'lek' in een groot gebied achter de dijk. Deze lek speelt vermoedelijk een remmende rol in pipevorming.





Figuur 1: Lek in het achterland bij hoogwater (1995) WSRL, KM880 (bron: beeldbank Rijkswaterstaat).

In de huidige methodiek wordt verondersteld dat na initiatie van de pipe (bijvoorbeeld na het opbarsten van ondiepe klei-of veenlagen), het ontstane uitstroompunt en de pipe oneindig breed zijn. In werkelijkheid is in de initiële fase van piping vaak sprake van een zand meevoerende wel (al dan niet in een watergang); een relatief klein uittredepunt, zie onderstaande figuur. Het komt ook voor dat er een sloot in lengterichting van de dijk aanwezig is. Als er over een groot deel van de lengte van de sloot terugschrijdende erosie zou optreden (zoals bijvoorbeeld gesimuleerd in de ijkdijk) zou er veel meer sprake van een 2D situatie, zeker als er onder de bodem van de sloot geen deklaag aanwezig is. Het doel van deze studie is om inzichtelijk te maken hoe de grondwaterstroming in beide situaties (2D en 3D) afwijkt en wat de gevolgen kunnen zijn voor piping.



Figuur 2: Een wel achter de dijk (bron: TAW, 1999).

1.3 Achtergrond

Stromend grondwater kan tot erosie van gronddeeltjes leiden, waardoor de mechanische en geohydrologische eigenschappen van de grond gaan veranderen. Dit proces resulteert uiteindelijk in een reductie van grondstabiliteit met ernstige consequenties voor de veiligheid van het achter de waterkering liggende gebied. Piping is gedefinieerd als het ontstaan van holle ruimte onder een waterkering (dijk, dam of kunstwerk), ten gevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd (Förster *et al*, 2012).

De erosie wordt door grondwaterstroming veroorzaakt, waardoor een of meer kanalen in het grondlichaam kunnen ontstaan. De kanalen kunnen uitgroeien en uiteindelijk een kortsluiting vormen tussen de buitenzijde van de waterkering en het maaiveld of waterbodem aan de binnenzijde. Zodra er kortsluiting ontstaat, zal erosie van grond versneld plaatsvinden. In het geval van onder loopsheid (erosie van de ondergrond) leidt dit tot het verzakken van de waterkering en kan uiteindelijk tot een doorbraak leiden.

In een door Deltares en Acacia Water uitgevoerde studie is modelmatig onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van erosielenzen en piping onder invloed van 3Dgrondwaterstroming (De la Loma *et al*, 2020). In dat onderzoek is het gedrag van de ontwikkeling van de erosielens in een schaalmodel met een enkel uitstroompunt vergeleken en gesimuleerd aan de hand van numerieke grondwatermodellen. Die studie toont aan dat het optreden van erosielensvorming en aansluitend piping sterk beïnvloed wordt door de 3D geohydrologische situatie. In de betreffende situatie is echter geen directe vergelijking gemaakt tussen een 2D- en 3D-schematisatie van pipevorming. Deze studie zal zich juist op die vergelijking richten.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de aanpak van het onderzoek uiteengezet. In hoofdstuk 3 worden de resultaten van de modelwerkzaamheden behandeld. Hoofdstuk 4 wordt gewijd aan discussie van de aannames en duiding van de resultaten. Hoofdstuk 5 omvat de conclusies en aanbevelingen



2 Aanpak

2.1 Algemeen

In dit onderzoek is het gedrag van de grondwaterstroming en erosielensvorming onderzocht aan de hand van een numeriek grondwatermodel. Er zijn drie casussen geselecteerd, waarvan telkens een 2D-doorsnedemodel en een 3D-model is opgesteld. In het 2D-model is het uittredepunt (een wel) als een lijnelement gemodelleerd. In het 3D model is het uittredepunt als puntelement gemodelleerd.

Piping is een verschijnsel dat kan optreden bij hoge waterstanden van het buitenwater. Bij een voldoende hoge buitenwaterstand kunnen achtereenvolgens de volgende fasen optreden (Förster *et al*, 2012):

- a) Opbarsten van de afdekkende laag, indien aanwezig.
- b) Het ontstaan van wellen.
- c) Het eroderen van de zandlaag.
- d) Het ontstaan van doorgaande pipes.
- e) Verbreden van het doorgaande kanaal (ruimproces).
- f) Bezwijken van de waterkering.

De in deze studie uitgevoerde modellering heeft betrekking op de fasen (b) het ontstaan van wellen tot en met (d) het ontstaan van doorgaande pipes. Voor het modelleren van de stromingssituatie is gebruik gemaakt van MODFLOW.

Voor de initiële fase (het ontstaan van een wel) is een stationair stromingsmodel opgesteld, waarin de wel is opgenomen. Instroom vindt plaats vanuit de rivier en uitstroom vanuit de wel. Vervolgens is in het model getoetst of er sprake is van overschrijding van een van tevoren vastgesteld criterium (zie paragraaf 2.3). Indien sprake is van een overschrijding van het criterium in modelcellen, is in deze cellen een hoge doorlaatfactor ingevoerd; deze vertegenwoordigen de erosielens. Vervolgens is het model met de nieuwe verdeling van doorlatendheden (k-waarden) doorgerekend en opnieuw getoetst of er buiten de erosielens sprake is van een overschrijding. Dit proces is iteratief herhaald totdat de erosielens de buitenteen bereikt of de groei stabiliseert (een evenwichtssituatie). De eindsituatie is telkens voor de 2D- en 3D-modellen vergeleken, om te zien of er verschillen optreden.

2.2 Modelomgeving MODFLOW

Voor het stromingsmodel is door Acacia Water gebruik gemaakt van de modelcode MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005) in combinatie met Flopy in Python. Flopy is een open source code waarmee MODFLOW gerund kan worden en het geeft de vrijheid om de input en output voor MODFLOW op maat te veranderen met zelf-geprogrammeerde code in python (Bakker *et al.*, 2016). Op deze manier kan de k-waarde van het stromingsmodel aangepast worden op basis van het per cel berekende specifieke debiet.

2.3 Criterium voor erosielensvorming

In het voorgaande onderzoek (De la Loma *et al.*, 2020) is de erosielensvorming gesimuleerd door de doorlatendheid van modelcellen aan te passen, zodra een criterium voor zandtransport wordt overschreden. Dit criterium is destijds gebaseerd op de gradiënt van de stijghoogten. De gradiënt hangt, naast het rivier- en polderpeil, af van de doorlatendheid van de ondergrond, met name in de 3D-modellen.

Gegeven een doorlatendheid is het specifiek debiet direct afhankelijk van de gradiënt Aangezien het specifiek debiet als output wordt gegenereerd door het model is hier gekozen voor het specifieke debiet (hierna: de stroomsnelheid in m/dag) in de modelcellen als criterium voor de mobilisatie van zand en erosie.

Om de modellen met elkaar te kunnen vergelijken is de stroomsnelheid waarbij mobilisatie optreedt puur modelmatig bepaald, maar niet gebaseerd op fysica. Bij de gegeven eigenschappen van het grondwatersysteem is per casus de kritieke stroomsnelheid vastgesteld, waarbij in de 2D-situatie de dijk niet voldoet aan de criteria voor piping op basis van de rekenregel van Sellmeijer. Er wordt bij die stroomsnelheid gesimuleerd dat terugschrijdende erosie plaatsvindt tot aan de buitenteen van de dijk. Deze minimale stroomsnelheid waarop piping optreedt is voor elke casus individueel vastgesteld door *trial-and-error*. Dit per casus vastgestelde criterium is vervolgens ook gehanteerd in de 3D-situatie. Vervolgens is telkens getoetst of in de 3D-situatie eveneens terugschrijdende erosie plaatsvindt tot aan de buitenteen, of dat eerder stagnatie plaatsvindt.

Er is hier geen onderzoek gedaan naar de stroomsnelheden waarbij mobilisatie van zand plaatsvindt. Dat is voor deze vergelijkingsstudie ook niet van belang; het gekozen criterium is immers in beide (2D en 3D) modellen gehanteerd, waardoor vergelijking van de resultaten valide is, ongeacht de realiteitswaarde van het gekozen getal. Hierop wordt dieper ingegaan in de discussie (hoofdstuk 4). Daarnaast is een versimpeling toegepast; er is geen onderscheid gemaakt in het criterium voor horizontale en verticale erosie om interpretatie van de resultaten te vergemakkelijken.

2.4 Beschrijving conceptuele model

Opzet model

In deze rapportage worden 3 casussen beschouwd. Elke casus is op een vergelijkbare manier geschematiseerd in het model. Daarom is gekozen voor een generieke opbouw van het grondwatermodel, waarin telkens modelparameters en dimensies aangepast kunnen worden. In het grondwatermodel is de ruimtelijke schematisatie ingedeeld aan de hand van de volgende aspecten:

- Breedte van de rivier.
- Voorlandlengte.
- Dijkbreedte.



- Lengte van de polder.
- Positie van het uittreepunt.

Een schematisatie van de grondwatersituatie is weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 3: Schematisatie van de grondwatersituatie (bron: WSRL).

De rivier aan de linkerzijde van het model is gemodelleerd als bovenrand. De polder bevindt zich aan de rechterzijde. De totale modellengte (langs de x-as) wordt dus bepaald door de gezamenlijke lengte van de componenten rivier, voorland, dijk en polder. De breedte van het model is voor de 2D modellering niet van belang, aangezien het een doorsnedemodel betreft. Er is in die situatie sprake van parallelle stroming, loodrecht op de rivier.; een doorsnedemodel geeft de grondwaterstroming weer per eenheid van breedte, ongeacht de locatie van de doorsnede. Voor de 3D modellering is de breedte wel van belang; een te smal model zorgt ervoor dat de stroming naar de wel wordt beïnvloed. In feite zouden zowel de lengte van de polder als de breedte van het model gekozen moeten worden aan de hand van de spreidingslengte van het achterland. Een nadere uitleg is opgenomen in onderstaand kader. Om de rekentijd beperkt te houden, is echter gekozen voor een maximale breedte van 100m. De implicaties van deze keuze worden behandeld in hoofdstuk 4. De lengte van de polder is in de modelsommen gevarieerd, om de invloed hiervan vast te stellen. De modelschematisatie is weergegeven in onderstaande figuren.







ACACIAWATER

Figuur 5: Bovenaanzicht van het conceptuele model voor een 2D situatie met een uittredelijn (links) en een 3D situatie met een enkel uittredepunt (rechts). De rivier en het uittredepunt zijn weergegeven in donkerblauw, het voorland in lichtblauw en de polder in geel.

De rol van de deklaag bij parallelle (2D) en radiale (3D) stroming (het poldereffect)

In onderstaande serie van figuren wordt het belang van grondwaterstroming in het achterland op versimpelde wijze geïllustreerd. In de bovenste figuur is een bovenaanzicht van stroming van een hoge stijghoogte links (bijvoorbeeld een rivier) naar een lage stijghoogte aan de rechterzijde

(bijvoorbeeld een polder) weergegeven. Er is sprake van parallelle stroming loodrecht op de rivier. In de middelste figuur is de situatie weergegeven waarbij water uittreedt in een lijnelement (een opbarstkanaal). Alle stroming vindt nu plaats tussen de rivier (links) en het opbarstkanaal. Stroomafwaarts vindt geen stroming meer plaats. Gezien de parallelle stroming heeft de breedte van het model geen invloed op de stromingssnelheid.

In de onderste figuur is op dezelfde afstand van de rivier een uittredepunt gemodelleerd (een wel). Zichtbaar is dat radiale stroming plaatsvindt naar dit punt. Stroomafwaarts van dit punt stroomt grondwater naar de rechter modelrand toe.



Daaruit volgt dat geohydrologische

omstandigheden stroomafwaarts van dit punt (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een lekke deklaag – het 'poldereffect') invloed uit kunnen oefenen op het gehele stromingspatroon, in tegenstelling tot de situatie in de middelste figuur. De breedte van het model en de afstand tot aan de rechter modelrand beïnvloeden in deze situatie eveneens het stromingspatroon. In een situatie met radiale stroming speelt het 'poldereffect' een rol in de stroomsnelheden rondom het uittredepunt; een juiste weergave van de polder (dimensies en hydraulische eigenschappen) zijn belangrijk voor het berekenen van de stroomsnelheiden rondom de wel.

Randvoorwaarden

Het model is aan de onder- en buitenzijden als ondoorlatend gemodelleerd; er vindt geen stroming plaats over deze randen. Aan de bovenrand van het model zijn verschillende randvoorwaarden gehanteerd, afhankelijk van de positie in het landschap. Een samenvatting van de randvoorwaarden is gegeven in onderstaande tabel.

Tabel 1: Overzicht van de randvoorwaarden.

Туре	Randvoorwaarde	
Rivier	Constant head boundary	
Voorland	General Head Boundary	
Dijk	Dichte bovenrand	
Uittredepunt/opbarstkanaal	Constant Head Boundary	
Polder	Drain	

De rivier is gemodelleerd aan de hand van een vaste stijghoogte (een *Constant Head Boundary* of CHB in MODFLOW). Dat houdt in dat in de bovenste modellaag een vaste stijghoogte optreedt in het watervoerend pakket, die gelijk is aan het rivierpeil. Er is aangenomen dat er geen intreeweerstand is onder de rivier, wat een versimpeling is in de schematisatie. Dit is vooral gedaan om de figuren zo duidelijk mogelijk te kunnen

presenteren. Voor de wel is eveneens gebruik gemaakt van dit type randvoorwaarde; de stijghoogte in het uittredepunt (3D) of de uittredelijn (2D) is vast en het model berekent de bijbehorende afvoerdebieten.

Het voorland, indien aanwezig, is gemodelleerd aan de hand van een stijghoogteafhankelijke randvoorwaarde. Daarbij worden de in- en uitstroom in de cel gemodelleerd aan de hand van een hoogte (in dit geval het rivierpeil) en een weerstand (de weerstand van eventuele kleilagen in het voorland). De stijghoogte in het watervoerend pakket is in deze schematisatie altijd lager dan het rivierpeil. Voor deze randvoorwaarde is gebruik gemaakt van de MODFLOW-randvoorwaarde *General Head Boundary* (GHB). Het model berekent de stijghoogte en het infiltratiedebiet voor elke cel.

De polder is gemodelleerd als een drainerende bovenrand (de *Drain* of DRNrandvoorwaarde in MODFLOW). Het model berekent per cel de stijghoogte en afvoer in de cellen aan de hand van een vast peil (drainageniveau of in dit geval het polderpeil) en de weerstand van de deklaag. In deze modelschematisatie is geen rekening gehouden met de weerstand van de waterlopen die het polderpeil beheersen. Ook hier is de overweging geweest om het model zo eenvoudig en eenduidig mogelijk te schematiseren.

Alle modellagen zijn gemodelleerd als spanningswaterpakket. Het watervoerend pakket is aan de bovenzijde ondoorlatend, waar geen randvoorwaarden zijn gemodelleerd. Dit is het geval ter plaatse van de ligging van de dijk; er is geen sprake van verticale stroming van- en naar het dijklichaam zelf.

2.5 Weerstand van de pipe

In de numerieke aanpak bestaan enkele beperkingen in het modelmatig opnemen van enkele fenomenen rondom piping. Eén ervan is dat in MODFLOW wordt uitgegaan van laminaire stroming. Indien de aanname wordt gedaan dat stroming in de pipe laminair is, kan de pipe worden opgenomen door preferente stromingscellen te definiëren. Dat houdt in dat er gebruik wordt gemaakt van een hoge doorlaatfactor in cellen waar terugschrijdende erosie heeft plaatsgevonden. Het kiezen van een zinvolle doorlaatfactor voor preferente stromingscellen is niet eenduidig.

Het meest eenvoudig zou zijn om een zeer hoge waarde te kiezen (bijvoorbeeld $1 \cdot 10^5$ m/dag). Dit heeft als gevolg dat alle preferente stromingscellen een stijghoogte hebben die (nagenoeg) gelijk is aan de stijghoogte in het uitstroompunt. Dit is echter geen realistische weergave van de stromingssituatie in een pipe; de pipes ontwikkelen als een vertakt netwerk van meerdere pipes, die vanuit het uittreepunt ontstaan (zie bijvoorbeeld Silvis, 1991, weergegeven in onderstaande figuur). Elke van deze pipes heeft een beperkte hoogte en breedte (in de experimenten van Silvis, 1991 betrof dit enkele millimeters hoog en 10 à 15 mm breed). Ook is geen sprake van een gladde wand; het omringend medium betreft een zandlichaam en de vorm van de pipe is vaak grillig. In de pipe is dus sprake van weerstand tegen stroming als gevolg van de beperkte dimensies van een pipe en de wandruwheid van de pipe. Daardoor treedt binnen een pipe drukverval of opstuwing op. De mate van opstuwing in de pipe is onder andere gerelateerd aan de hoeveelheid water die afgevoerd moet worden, de dimensies van de pipe en de wandruwheid.



Figuur 6: Waargenomen vertakking van pipes in de Deltagoot proeven (Silvis, 1991). De schaal is 5 bij 4 m.

Dit gedrag kan goed worden gesimuleerd door de doorlatendheid in geërodeerde cellen niet te hoog te kiezen. In het voorgaande modelonderzoek naar 3D-stroming en piping (De la Loma *et al.*, 2020) is uitgegaan van een doorlatendheid van 10 maal de bulkdoorlatendheid van het omringende materiaal. Deze factor is tevens gehanteerd in dit onderzoek.

De implicaties van deze keuze worden behandeld in de discussie (hoofdstuk 4).

2.6 Casussen

In deze rapportage zijn drie casussen uitgewerkt. In alle casussen is er sprake van een hoogwatersituatie. De eerste casus is een synthetische casus, terwijl de twee overige casussen gebaseerd zijn op een dijktraject in het beheergebied van WSRL, waar daadwerkelijk sprake is van een zandmeevoerende wel. Het gaat om de volgende casussen:

- Casus 1: Rivierdijk I (onderzoeksrapport zandmeevoerdende wellen)
- Casus 2: Projectgebied WoS (dijkpaal DD202, nabij Oosterhout)
- Casus 3: Project TiWa (dijkpaal TG160, nabij Opijnen).

De toetsing ten aanzien van piping is niet uitgewerkt in deze rapportage. De toetsing van casus 1 is uitgewerkt in Förster *et al* (2012). Voor het uitgewerkte traject wordt niet voldaan aan de eisen die ten aanzien van piping worden gesteld. De toetsing voor casus 2 en 3 is uitgewerkt door WSRL en beide trajecten voldoen niet aan de eisen. In de onderstaande paragrafen wordt een beschrijving gegeven van elke casus en van de (geo)hydrologische omstandigheden per casus. Deze eigenschappen zijn gehanteerd in het opzetten van de numerieke grondwatermodellen. De resultaten van de berekeningen worden behandeld in hoofdstuk 3.



2.6.1 Rivierdijk 1

Deze casus is beschreven in de rapportage 'Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (Deltares, 2012). Er is uitgegaan van een fictieve dijk in het bovenrivierengebied. De beschouwde dijkstrekking is 2 km lang, van hectometerpaal (hmp) 1 tot 21.

De dijk is op ongeveer 300 meter afstand van het zomerbed van de rivier gelegen. Het terrein aansluitend aan de dijk buiten deze strekking is in gebruik als landbouwgrond. De breedte van het voorland en de dijk zijn variabel. Voor deze casus is uitgegaan van de situatie, zoals aanwezig ter hoogte van hmp 1, waar het voorland vrijwel afwezig is. Een algemene schematische doorsnede is weergegeven in onderstaande figuur. De eigenschappen van het dijktraject hmp 1 zijn samengevat in onderstaande tabel.



Figuur 7: Schematische doorsnede van het dijkprofiel Rivierdijk I.

Eigenschap	Waarde
Dikte deklaag [m]	1,4
Verval [m]	4,80
Verval - 0.3d [m]	4,38
kh pleistocene zandlaag [m/dag]	75
Dikte watervoerendpakket [m]	20
kD-waarde watervoerendpakket [m2/dag]	1.500
Afstand wel tot binnenteen [m]	0
Afstand wel tot buitenteen [m]	31
Breedte dijk [m]	30
Weerstand voorland [dagen]	28
Voorlandlengte [m]	1
Weerstand achterland [dagen]	28
Spreidingslengte (λ) Achterland [m]	205

Tabel 2: Eigenschappen van de casus Rivierdijk I

Op basis van een extreem conservatieve aanname dat de stijghoogte in de watervoerende zandlaag gelijk is aan de buitenwaterstand, treedt opbarsting op. Dat betekent dat getoetst moet worden of de dijk voldoet aan de eisen voor piping aan de hand van Sellmeijer. Belangrijke parameters in de formule van Sellmeijer zijn de doorlatendheid en de korreldiameter. De doorlatendheid is 8,7*10⁴ m/s en de karakteristieke ondergrens van de korreldiameter d70 is gelijk aan 0,34 mm. Met deze gegevens kan de formule van Sellmeijer worden toegepast. Geconcludeerd wordt dat in het gehele traject de vereiste kwelweglengte (berekend volgens de methode van Sellmeijer) groter is dan de aanwezige kwelweglengte. Er wordt dus niet voldaan aan de veiligheidseis ten aanzien van piping. Voor een uitwerking van de toetsing wordt verwezen naar de betreffende rapportage.

2.6.2 Projectgebied WoS - dijkpaal DD202

Deze casus is geselecteerd door waterschap Rivierenland. Deze locatie wordt geacht representatief te zijn voor project Kop van de Betuwe. Kenmerkend is de relatief geringe weerstand van deklagen in het voor- en achterland (orde 2-10 dagen weerstand). De afstand van de wel tot de binnenteen van de dijk is circa 40 m. Deze locatie is gelegen in de Kop van de Betuwe (Betuwe (Sprok - Sterrenschans - Heteren) en Wolferen Sprok). De geselecteerde locatie ligt ter hoogte van dijkpaal DD202.

De ligging is weergegeven in onderstaande figuur. In de figuren is een lichtblauwe stip te zien; dit is het gekozen uittredepunt, waarvan de gegevens in onderstaande tabel zijn samengevat. Net naast deze lichtblauwe stip is een tweede blauwe stip te zien; dit is een locatie waar een zand meevoerende wel optreedt bij hoogwater. Op basis van de door WSRL uitgevoerde toetsing is de kwelweglengte 38 m te kort en voldoet dit traject niet aan de veiligheidseisen ten aanzien van piping. De nabijgelegen zand meevoerende wel illustreert deze uitkomst. De eigenschappen van deze locatie zijn samengevat in onderstaande tabel.



Figuur 8: Ligging van de casus projectgebied WoS – dijkpaal DD202. In de rode cirkel zijn het gekozen uittredepunt en de locatie van een zand meevoerende wel (blauw) weergegeven.

Tabel 3: Eigenschappen van de casus WoS – dijkpaal DD202

Eigenschap	Waarde
Dikte deklaag [m]	0,13
Verval [m]	5,92
Verval - 0.3d [m]	5,88
kh pleistocene zandlaag [m/dag]	47,6
Dikte watervoerend pakket [m]	23
kD-waarde watervoerend pakket [m2/dag]	1.095
Afstand wel tot binnenteen [m]	39,8
Afstand wel tot buitenteen [m]	79,6
Breedte dijk [m]	40
Weerstand voorland [dagen]	1,2
Voorlandlengte [m]	36,3
Weerstand achterland [dagen]	9,3
Spreidingslengte (λ) Achterland [m]	100,9



2.6.3 **Projectgebied TiWa – Dijkpaal TG160**

Deze locatie is gelegen ter hoogte van dijkpaal TG160, nabij Opijnen. Bij dit traject hebben de deklagen in voor- en achterland een iets hogere weerstand dan bij bovenstaand traject.

De ligging is weergegeven in onderstaande figuur. De gegevens van de locatie zijn in onderstaande tabel samengevat. Op basis van de door WSRL uitgevoerde toetsing is de kwelweglengte minder dan een meter te kort en voldoet dit traject net niet aan de veiligheidseisen ten aanzien van piping. Ook hier is sprake van een nabijgelegen zand meevoerende wel.



Figuur 9: Ligging van de casus projectgebied TiWa – dijkpaal TG160. In de rode cirkel zijn het gekozen uittredepunt (rood) en de locatie van een zand meevoerende wel (blauw) weergegeven.

Eigenschap	Waarde
Dikte deklaag [m]	1,9
Verval [m]	6,12
Verval - 0.3d [m]	5,55
kh pleistocene zandlaag [m/dag]	75
Dikte watervoerendpakket [m]	64
kD-waarde watervoerendpakket [m2/dag]	4.800
Afstand wel tot binnenteen [m]	15
Afstand wel tot buitenteen [m]	49
Breedte dijk [m]	34
Weerstand voorland [dagen]	50
Voorlandlengte [m]	183
Weerstand achterland [dagen]	115
Spreidingslengte (λ) Achterland [m]	740

Tabel 4: Eigenschappen van de casus WoS – dijkpaal DD202

3 Resultaten

3.1 Algemeen

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van de modelberekeningen uitgewerkt. In onderstaande paragrafen is voor elk van de drie casussen de stromingssituatie beschreven in de initiële fase (welvorming) en de fase van terugschrijdende erosie. Hierbij wordt telkens eerst de 2D-situatie beschreven en daarna de 3D-situatie. Per casus wordt afgesloten met een vergelijking tussen 2D en 3D. Discussie en duiding van de resultaten worden in hoofdstuk 4 behandeld.

3.2 Rivierdijk I

3.2.1 **2D berekeningen**

Initiële fase

Het berekende stijghoogteverloop en de stromingsvectoren zijn weergegeven in onderstaande figuren. In het bovenaanzicht zijn de stijghoogtelijnen (isohypsen) weergegeven. Het bovenaanzicht is weergegeven met een breedte van 40 m. Zoals in het voorgaande hoofdstuk beschreven doet de modelbreedte in de 2D-situatie niet ter zake voor de resultaten.

Toestroom van water vindt plaats via de rivier. Onder de dijk is de stroming voornamelijk horizontaal. Aan de polderzijde neemt de stroomsnelheid toe, nabij de uittredelijn. Er is sprake van horizontale toestroom vanaf de voor- en achterzijde van de uittredelijn en verticale toestroom van grotere diepte. De hoogste stroomsnelheid treedt direct stroomopwaarts van het uittreepunt op (ter plaatse van de teen van de dijk). Een deel van het water stroomt onder het uittreepunt door om vervolgens vanaf de polderzijde naar het uittreepunt te stromen. De maximale stroomsnelheid bedraagt direct naast de wel 33 m/dag.







In deze schematisatie verlaat een groot deel van het water dat via de rivier is ingetreden het model via een veel smallere zone van 1 m breed (de uittredelijn). In dit model wordt slechts 1% van het rivierwater afgevoerd via de polder. Vrijwel al het water wordt afgevoerd via de uittredelijn met een zeer beperkte rol van de polder. Indien de lengte van de polder wordt vertienvoudigd, neemt dit percentage met slechts 5% toe.

Zone	In	Uit	
Rivier (1/m)	1.220 (100%)	-	
Voorland	~0 (0%)	-	
Polder	-	10 (1%)	
Wel	-	1.210 (99%)	
Totaal	1.220	1.220	

Tabel 5: Waterbalans Rivierdijk I (2D) per 100 m modelbreedte (y-richting) in de initiële fase.

Terugschrijdende erosie

Voor dit model is een berekening uitgevoerd waarbij na elke iteratie de doorlatendheid van modelcellen is aangepast (factor 10 vergroot, zie hoofdstuk 2) om terugschrijdende erosie te kunnen simuleren in cellen waar het criterium voor stroomsnelheid wordt overschreden. Vervolgens is het model opnieuw doorgerekend met de nieuwe verdeling van doorlatendheden. Zoals beschreven in hoofdstuk 2 is de stroomsnelheid (hier gedefinieerd als het specifieke debiet of de Darcy-snelheid) als toetsingswaarde gebruikt. Er is gezocht naar de stroomsnelheid waarbij in de 2D-situatie nog net erosie tot aan de rivier plaatsvindt. De waarde waarbij dit optreedt is 19 m/d. In onderstaande figuur is de stromingsrichting van het grondwater weergegeven. Daarnaast zijn de isolijnen (of isohypsen) van de waterdruk in de ondergrond weergegeven. Waar de isolijnen dichter bij elkaar liggen is de stroomsnelheid groter. De bruinrode kleur geeft aan waar erosie optreedt. In de figuur is te zien dat nabij het uittreepunt sprake is van een holtevorming tot een wat grotere diepte. Onder de dijk is sprake van horizontale ontwikkeling van de pipe. Nabij het intreepunt nemen de stromingssnelheden eveneens toe op grotere diepte, waardoor ook hier sprake is van een wat diepere erosie. In werkelijkheid zullen anisotropie en een hoger criterium voor verticale mobilisatie van sediment de ontwikkeling in de diepte beperken (zie hoofdstuk 4).

Het stijghoogteverloop tussen het in- en uittreepunt is na het uitruimen van de pipe vrijwel lineair tussen het in- en uittreepunt. Vrijwel alle stroming tussen het in- en uittreepunt vindt nu plaats via de pipe. Het uitstroomdebiet is vrijwel verdubbeld en meer dan 99% van het water verlaat het model via de wel; net als in de initiële situatie (voorafgaand aan erosie) speelt het achterland geen rol van betekenis in de waterbalans. Bij een toename van de polderlengte (factor 10) neemt dit iets af tot 98%.



Figuur 11: Doorsnede van het 2D model Rivierdijk I na terugschrijdende erosie (eindsituatie). De bruinrode kleur geeft aan waar erosievorming is gemodelleerd. De erosie heeft doorgezet tot aan de buitenteen van de dijk.

3.2.2 **3D berekeningen**

Initiële fase

Voor deze berekeningen is de wel als één modelcel in het model opgenomen; een enkele modelcel met een vaste stijghoogte gelijk aan het polderniveau. Ook hier is eerst een berekening gemaakt zonder terugschrijdende erosie (de initiële fase, net na opbarsten), zie onderstaande figuren.

In de doorsnede is te zien dat er over het grootste deel van de dijk sprake is van een vrij lage gradiënt. Pas in de directe omgeving van de wel, neemt de gradiënt sterk toe, waar radiale toestroom plaatsvindt. De maximale stroomsnelheid bedraagt direct naast de wel 160 m/dag (5 maal sneller dan in de 2D situatie).





Figuur 12: In de bovenste figuur is het bovenaanzicht (uitsnede) weergegeven van de casus Rivierdijk I (3D). In de onderste figuur een lengtedoorsnede loodrecht op de dijk.

In deze schematisatie met een modelbreedte (y-richting) van 100 m verlaat een groot deel van het water dat via de rivier is ingetreden (69%) het model via een enkele modelcel. Daardoor concentreert de stroming zich sterk rondom het uittreepunt. Het verschil met de 2D schematisatie is dat een deel van het water hier langs de wel kan stromen, naar het achterland. De totale intree vanuit de rivier is door het kleinere uitstroomoppervlak (één punt) 20% kleiner dan in de 2D schematisatie, waarbij water kan uittreden over de volle breedte van het model.

	In	Uit
Rivier	1.766 (100%)	0
Voorland	~0 (0%)	-
Polder	0	548 (31%)
Wel	0	1.218 (69%)
Totaal	1.766	1.766

Tabel 6: Waterbalans Rivierdijk I (3D) per 100 m modelbreedte (y-richting) in de initiële fase.

Terugschrijdende erosie

Het model is aangepast zodat na elke iteratie de doorlatendheid van modelcellen aangepast wordt (een factor 10 vergroot, zie hoofdstuk 2 in die cellen waar het criterium voor stroomsnelheid wordt overschreden). Daarbij is hetzelfde snelheidscriterium gebruikt als in het 2D-model. De waarde waarbij dit optrad in het 2d model was 19 m/d.

In deze situatie zijn de initiële stroomsnelheden rondom de wel groter dan in een 2D situatie. In eerste instantie is er sprake van een vrij snelle ontwikkeling van een erosielens. Deze lens breidt zich uit in alle richtingen (radiaal, maar ook verticaal) als gevolg van de radiale stroming rondom de wel. In onderstaande figuur is te zien dat nabij het uittreepunt sprake is van een holtevorming tot een wat grotere diepte. Onder de dijk is sprake van horizontale ontwikkeling van de pipe. In tegenstelling tot de 2D situatie stopt de terugschrijdende erosie bij een gelijk criterium voor erosie voordat de rivier wordt bereikt. Op grotere afstand van het uittreepunt neemt de gradiënt af, waardoor de stroomsnelheid onder de hier gebruikte kritische waarde ligt en erosie stopt. In de volgende sectie wordt duiding gegeven aan deze conclusie, door de 2D en 3D situatie met elkaar te vergelijken.





Vergelijking 2D en 3D

Om duidelijk uiteen te kunnen zetten waarom een 3D situatie modelmatig minder snel leidt tot volledige terugschrijdende erosie en dijkfalen, is het verloop van de stijghoogte voor beide situaties in één figuur weergegeven, zie Figuur 15. De figuur geeft een lengtedoorsnede door de pipe, loodrecht op de dijk (grijs), met aan de linkerzijde de rivier (blauw) en aan de rechterzijde de polder (geel). Het front van de pipe is als rode stippellijn weergegeven. In de linker figuur is de initiële stromingssituatie weergegeven, waarbij een wel is ontstaan, maar nog geen terugschrijdende erosie heeft plaatsgevonden. In de rechterfiguur is het stijghoogteverloop weergeven waarbij in beide gevallen erosie heeft plaatsgevonden tot de eindpositie voor de 3D situatie; na deze iteratie vindt er geen progressie van de pipe meer plaats. Let wel: in het 2D-model groeit de wel verder door na deze iteratie.

Het verloop van de stijghoogte is in de 2D-situatie vrijwel lineair tussen de rivier en het uittredepunt. In het verloop van de initiële stijghoogten in de 3D situatie is duidelijk het effect van radiale stroming te zien; een sterke toename van de gradiënt nabij de wel. Dat betekent dat in de initiële situatie de stroomsnelheden rondom de put veel hoger zijn in de 3D- dan in de 2D-situatie (een factor 5), waardoor erosie ook sterker zal optreden. Naarmate de afstand vanaf het originele uittredepunt toeneemt, neemt de gradiënt in de 3D situatie echter af, terwijl deze in de 2D situatie vrijwel gelijk blijft. De kleinere gradiënt en daarmee de kleinere stroomsnelheid zorgt er in de 3D situatie dus voor dat de erosie eerder stagneert dan in de 2D situatie.

Uit de voorgaande analyse blijkt dat het afvoerdebiet vanuit het uitstroompunt in het 3D model (een enkele modelcel) in de initiële fase vrijwel gelijk is aan het afvoerdebiet in een 2D model (een uitstroomkanaal van 100 m). Wanneer een erosielens vormt, geldt dat in een 3D-situatie dit debiet door een veel kleiner geërodeerd volume stroomt dan in een 2D-situatie. Analoog aan stroming door een leiding, neemt de drukhoogte in de pipe toe met de afstand en wordt het verschil met de omgevingsstijghoogte -en daarmee de stroming naar de erosielens- kleiner. Dit effect hangt samen met de voor de pipe gekozen doorlatendheid. Hierop wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 4.



Figuur 14: Stijghoogteverloop (zijaanzicht – doorsnede loodrecht op de dijk) bij een 2D en 3D situatie. Ter verduidelijking zijn de rivier (blauw), de dijk (grijs) en de polder (geel) als zones weergegeven in de figuur. De rode stippellijn geeft de positie van maximale erosie aan voor de 3D situatie. De initiële situatie (net na opbarsten) is weergegeven in de linker figuur en de situatie waarbij in het 3D-model stagnatie van de erosie plaatsvindt in de rechterfiguur. NB: in het 2D-model vindt in volgende iteraties nog wel erosie plaats.

Ter controle van de modelresultaten is een vergelijking gemaakt van de maximale stroomsnelheid die optreedt in het modeldomein buiten de geërodeerde zone. Zoals beschreven in hoofdstuk 2 is het model iteratief doorgerekend. Na elke berekening wordt opnieuw getoetst of er sprake is van stroomsnelheden boven het vastgestelde criterium. In de betreffende cellen vindt erosie plaats, waarna het model opnieuw wordt doorgerekend. De iteraties kunnen worden gezien als tijdstappen in de terugschrijdende erosie. In Figuur 15 wordt voor elke tijdsstap in het model de stroomsnelheid net buiten de erosiezone weergegeven. In de initiële fase (op 60 meter van het intredepunt) is in het 3D model de stroomsnelheid hoog. Daarna neemt de snelheid in het 3D model steeds verder af. Op een gegeven moment duikt de stroomsnelheid onder het criterium, waardoor de erosie stopt. In de 2D situatie is de stroomsnelheid initieel (op 60 m vanaf het intredepunt) lager, maar neemt de stroomsnelheid na een initiële afname, na iedere verplaatsing van de erosiegrens richting het intredepunt, weer toe. Dit leidt uiteindelijk tot volledige erosie tot aan de rivier.



Figuur 15: Maximum stroomsnelheid (het specifieke debiet) net buiten de erosielens.

Conclusies

De stroomsnelheid naar een uittreepunt (3D) is in de initiële fase (welvorming) hoger dan de stroomsnelheid in een 2D-model. In deze casus is de afvoer in de wel (3Dsituatie) even groot als de uitstroom naar een lijnelement van 100 m lang (2D-situatie). Door opstuwing in de erosielens (er stroomt veel meer water uit via een klein oppervlak) wordt in de 3D-situatie het verschil met de omgevingsstijghoogte kleiner dan in de 2Dsituatie. Hierdoor neemt de stroomsnelheid rondom de erosielens af en stagneert de pipe.

3.3 Projectgebied WoS - dijkpaal DD202

3.3.1 2D berekeningen

Initiële run

Vanaf de buitenteen van de dijk tot aan het uittreepunt is sprake van een vrijwel constante gradiënt. De wel ligt 40 m achter de binnenteen van de dijk. Het tussenliggend poldertraject heeft een beperkte invloed op de stroomsnelheid. Het stromingsveld wordt gedomineerd door de wel. De maximale stroomsnelheid nabij de wel ligt lager dan in de casus Rivierdijk I met 11 m/dag. De waterbalans is weergegeven in onderstaande tabel. De rol van de polder is in deze casus belangrijker met een afvoer van 27% van het ingetreden water.



Figuur 16: Het stijghoogteverloop, de stromingsrichting en de isohypsen voor WoS - DD202 in een doorsnede loodrecht op de dijk.



Tabel 7: Waterbalans WoS –DD202 (2D) per 100 m modelbreedte (y-richting) in de initiële fase.

	In	Uit
Rivier	2781 (56%)	-
Voorland	2160 (44%)	-
Polder	0	1324 (27%)
Wel	0	3617 (73%)
Totaal	4941	4941

Terugschrijdende erosie

Op de gemodelleerde locatie is sprake van een zand meevoerende wel. De kritische snelheid waarbij terugschrijdende erosie doorzet tot aan de rivier is een stuk lager dan in de voorgaande casus (5 m/d). Deze snelheid is vastgesteld als de laagste snelheid waarbij volledige terugschrijdende erosie plaatsvindt in de 2D situatie. In realiteit is er op deze locatie een zand meevoerende wel aanwezig, maar er is geen sprake van dijkfalen. Voor deze situatie geldt dat niet wordt voldaan aan het criterium voor piping op basis van de rekenregel, terwijl in praktijk geen sprake is van dijkfalen. De modelresultaten zijn weergegeven in onderstaande doorsnede.



Figuur 17: Doorsnede van het 2D model Rivierdijk I na terugschrijdende erosie. De bruinrode kleur geeft aan waar erosievorming is gemodelleerd. De erosie heeft doorgezet tot aan de buitenteen van de dijk.

3.3.2 **3D berekeningen**

Initiële run

Ook hier vindt intree plaats over de hele breedte van de rivier. In het bovenaanzicht is te zien dat de horizontale stroming nabij de rivier nog niet is beïnvloed door de wel; de stroming is loodrecht op de dijk, over de gehele breedte van het model. Nabij de wel buigen de isohypsen af en vindt radiale stroming (van alle zijden) naar de wel plaats. In de doorsnede is te zien dat er over het grootste deel van de dijk sprake is van een vrij lage gradiënt. Pas in de directe omgeving van de wel neemt de gradiënt sterk toe.



Figuur 18: In de bovenste figuur is het bovenaanzicht (uitsnede) weergegeven van de casus WoS – DD202 (3D). In de onderste figuur een lengtedoorsnede over de gehele modellengte loodrecht op de dijk.

De waterbalans is weergegeven in onderstaande tabel. De afvoer vanuit het uittreepunt is veel kleiner dan in de 2D situatie. De rol van de polder is in de 3D schematisatie dominanter dan in de 2D situatie; 89% van het water wordt afgevoerd via de polder. De maximale stroomsnelheid nabij de wel bedraagt 56 m/dag.

Zone	In	Uit
Rivier	2.018 (56%)	-
Voorland	1.567 (44%)	-
Polder	-	3.202 (89%)
Wel	-	384 (11%)
Totaal	3.586	3.586

Tabel 8: Waterbalans WoS – DD202 (3D) per 100 m modelbreedte (y-richting) in de initiële fase.

Terugschrijdende erosie

In deze situatie zijn de stroomsnelheden rondom de wel groter dan in een 2D-situatie. In eerste instantie is er sprake van een vrij snelle ontwikkeling van een erosielens. Deze lens breidt zich uit in alle richtingen (radiaal, maar ook verticaal) als gevolg van de radiale stroming rondom het gat. Als gevolg van kleine (numerieke) afwijkingen in de stroming, splitst de pipe zich op enige afstand van de wel. Beide pipes stagneren op ongeveer hetzelfde punt.





Figuur 19: Bovenaanzicht van het 3D model WoS – DD202 na terugschrijdende erosie. De bruinrode kleur geeft aan waar erosievorming is gemodelleerd. De erosie stagneert in dit model.

Vergelijking 2D en 3D

Het verloop van de stijghoogte voor beide situaties (2D en 3D) is weergegeven in onderstaande figuren. In de linker figuur (initiële fase) is duidelijk te zien dat de gradiënt (en dus de stroomsnelheid) rondom de wel veel groter is in de 3D-situatie, maar de invloed op grotere afstand is beperkt. In de fase van terugschrijdende erosie (rechter figuur) is, net als in de casus Rivierdijk I te zien dat de gradiënt in de 3D-situatie met toenemende afstand van de wel kleiner is dan in de 2D-situatie, wat leidt tot stabilisatie van de erosie in dit model.



Figuur 20: stijghoogteverloop (zijaanzicht) bij een 2D en 3D situatie in de initiële fase (links) en bij terugschrijdende erosie (rechts). Ter verduidelijking zijn de rivier (blauw), de dijk (grijs) en de polder (geel) als zones weergegeven in de figuur. In de rechterfiguur is het stijghoogteverloop weergegeven voor een situatie waarbij de terugschrijdende erosie in het 2D en 3D- model tot hetzelfde punt zijn ontwikkeld (en waarbij 3D stagneert).

Conclusies

In de casus WoS – DD202 stagneert de terugschrijdende erosie bij de gehanteerde modelparameters en gekozen kritische snelheid, terwijl in de 2D-situatie de groei doorzet tot aan de buitenteen van de dijk. De rol van de polder is in de 3D-situatie veel groter in de afvoer van het grondwater, maar ook in de 2D-situatie speelt de polder via kwel een rol in de afvoer van grondwater, als gevolg van de afstand tussen de binnenteen en de wel. Dat is een duidelijk verschil met casus 1, waar het achterland een zeer beperkte rol heeft in de waterbalans.

3.4 Projectgebied TiWa – Dijkpaal TG160

3.4.1 **2D berekeningen**

Initiële fase

De derde case heeft het langste voorland. De wel ligt 15 m achter de binnenteen van de dijk. Het stromingsveld wordt gedomineerd door de wel. Van het ingetreden water verlaat 98% het model via de wel en 2% via de polder (lengte 150 m). Een verdubbeling van de lengte van de polder (300 m) verandert deze verhouding niet. De maximale stroomsnelheid nabij de wel is 20 m/dag. De waterbalans is weergegeven in onderstaande tabel.



Figuur 21: Het stijghoogte verloop, de stromingsrichting en de isohypsen voor TiWa – TG160 in een doorsnede loodrecht op de dijk (2D).

Rivier	637 (90%)		
Voorland	73 (10%)		
Polder		16 (2%)	
Wel		694 (98%)	
Totaal	710	710	

Tabel 9: Waterbalans TiWa –TG160 (2D) per 100 m modelbreedte (y-richting) in de initiële fase.

Terugschrijdende erosie

De kritische snelheid waarbij modelmatig terugschrijdende erosie doorzet tot aan de rivier, is 4,5 m/dag. Deze snelheid is vastgesteld als de laagste snelheid waarbij volledige terugschrijdende erosie plaatsvindt in de 2D situatie. De resultaten van de modelberekeningen zijn weergegeven in onderstaande doorsnede.





Figuur 22: Doorsnede van het 2D model TiWa – TG160 na terugschrijdende erosie. De bruinrode kleur geeft aan waar erosievorming is gemodelleerd. De erosie heeft doorgezet tot aan de buitenteen van de dijk.

3.4.2 **3D berekeningen**

Initiële fase

Als gevolg van de vrij hoge weerstand van de deklaag, is de stijghoogte in dit model op enige afstand van de wel vrij hoog (4.4 m). In onderstaande doorsnede is te zien dat er over het grootste deel van de dijk sprake is van een vrij lage gradiënt, in tegenstelling tot de 2D-situatie. Pas in de directe omgeving van de wel neemt de gradiënt sterk toe.



Figuur 23: Het stijghoogte verloop, de stromingsrichting en de isohypsen voor TiWa – TG160 in een doorsnede loodrecht op de dijk (3D).

De waterbalans is weergegeven in onderstaande tabel. De rol van de polder is in de 3D schematisatie dominanter dan in de 2D situatie. In totaal wordt 13% via de polder afgevoerd als kwel. Als de polderlengte wordt verdubbeld, nemen de toestroom vanuit de rivier en de afvoer van de polder beide toe. De totale hoeveelheid water die via de wel wordt afgevoerd (en dus de stoomsnelheid) neemt echter nauwelijks af. De maximale stroomsnelheid nabij de wel bedraagt 56 m/dag.

[abel 10: Water	balans WoS –	DD202 (3D)	per 100 m	modelbreedte	(y-richting) in	de initiële fase.
-----------------	--------------	------------	-----------	--------------	-----------------	-------------------

Zone	In	Uit	
Rivier	1570 (90%)	-	
Voorland	179 (10%)	-	
Polder	-	580 (13%)	
Wel	-	1.169 (67%)	
Totaal	1749	1.749	

Terugschrijdende erosie

In deze case ontwikkelt modelmatig een vrij brede en diepe erosielens. De ontwikkeling van de erosielens stagneert op minder dan 10 m voor de teen van de dijk, zie onderstaande doorsnede.



Figuur 24: Bovenaanzicht van het 3D model TiWa – TG1160 na terugschrijdende erosie. De bruinrode kleur geeft aan waar erosievorming is gemodelleerd. De erosie stagneert in dit model.

Vergelijking 2D en 3D

Het verloop van de stijghoogte voor beide situaties (2D en 3D) is weergegeven in onderstaande figuren. In de linker figuur (initiële fase) is duidelijk te zien dat de gradiënt (en dus de stroomsnelheid) rondom de wel veel groter is in de 3D-situatie. In de fase van terugschrijdende erosie (rechter figuur) is te zien dat de gradiënt in de 3Dsituatie met toenemende afstand van de wel kleiner is dan in de 2D-situatie, wat leidt tot stabilisatie van de erosie in dit model. Het verschil in de gradiënt tussen 2D en 3D is minder groot dan in voorgaande casussen.



Figuur 25: Stijghoogte verloop (zijaanzicht) bij een 2D en 3D situatie in de initiële fase (links) en bij terugschrijdende erosie (rechts). In de rechterfiguur is het stijghoogte verloop weergegeven voor een situatie waarbij de terugschrijdende erosie in het 2D en 3D- model tot hetzelfde punt zijn ontwikkeld (en waarbij 3D stagneert).

Conclusies

In de casus TiWa – TG160 stagneert de terugschrijdende erosie bij de gehanteerde modelparameters en gekozen kritische snelheid, terwijl in de 2D-situatie de groei doorzet tot aan de buitenteen van de dijk.





4.1 Evaluatiemethode

Bij vergelijkingsstudies is het van belang om een indicator vast te stellen aan de hand waarvan situaties vergeleken kunnen worden. In eerste instantie is het verschil in de initiële stroomsnelheid (dus voorafgaand aan erosie) tussen een 2D- en een 3D-situatie vergeleken.

Het hanteren van de initiële stroomsnelheid bleek echter weinig geschikt voor een zinvolle vergelijking; het globale gedrag van radiale stroming is bekend – en daarmee ook het inzicht dat in de initiële situatie de stroomsnelheid naar een punt altijd hoger is dan de stroomsnelheid naar een lijnelement over de volledige breedte van het model. De initiële stroomsnelheid zegt weinig over het doorzetten van pipe-groei. Er is daarom gekozen om de stroomopwaartse ontwikkeling van de pipe als criterium te hanteren. Dit maakt een directe vergelijking van de eindsituatie in een 2D- en 3D-situatie mogelijk.

4.2 Doorlatendheid van het erosiekanaal

In deze studie is uitgegaan van een vaste correctie van de doorlatendheid in de ondergrond voor cellen waar erosie plaatsvindt. De mate van opstuwing (die een belangrijke rol speelt in het stagneren van het piping-proces), hangt af van de gehanteerde doorlatendheid in modelcellen; het verhang in de pipe beïnvloedt de mate waarin stagnatie van het pipingproces optreedt. Het is niet eenduidig om een representatieve doorlatendheid te kiezen voor geërodeerde cellen. Het is daarom van belang om de rol van de gehanteerde aannames te evalueren.

Van Esch *et al.* (2013) beschrijft een numerieke methode om de ontwikkeling van het erosiekanaal te simuleren, waarbij een 2D-stromingsmodel gekoppeld wordt aan een vergelijking voor vloeistofstroming in een open ruimte; de pipe wordt gezien als een horizontale opening met een oneindig uitgestrekte breedte. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het door Sellmeijer (1988) afgeleide evenwicht voor erosie in een horizontaal erosiekanaal. De equivalente intrinsieke permeabiliteit (κ) wordt afgeleid voor het erosiekanaal. Deze numerieke methode wordt gehanteerd in het door Deltares ontwikkelde softwarepakket D-Geo Flow.

Aangezien in deze studie gebruik wordt gemaakt van 3D-stroming, moet een andere benadering worden gevolgd; de pipe kan hier niet worden gezien als een horizontale opening met een oneindige breedte. Het doel van deze paragraaf is niet om een alternatief te bieden voor de in Van Esch *et al.* (2013) gehanteerde methode, maar om te toetsen of de gehanteerde aannames voor de doorlatendheid in de pipe verdedigbaar zijn.

Laminaire stroming van een niet samendrukbare vloeistof met een constante viscositeit van μ door een cirkelvormige buis met radius *a* beschreven aan de hand van de

vergelijking van Hagen-Poiseuille (zie bijvoorbeeld Huyakorn & Pinder 1983). In deze sectie is deze vergelijking omgeschreven naar een gemiddelde stroomsnelheid v als functie van de drukgradiënt $\frac{dp}{dt}$:

$$v = -\frac{a^2}{8\mu} \frac{dp}{dl}$$

Uitgaande van een constant drukverval in de pipe, kan deze vergelijking ook uitgedrukt worden als een stijghoogteverschil $\frac{dh}{dl}$:

$$v = -\frac{\rho g a^2}{8\mu} \frac{dh}{dl}$$

met het specifiek volumegewicht van grondwater ρ [M/L³].

Darcy beschrijft laminaire stroming door een medium door:

$$v = -K\frac{dh}{dl}$$

met doorlaatfactor K [L²/T]. De intrinsieke permeabiliteit κ [L²] is onafhankelijk van de vloeistofeigenschappen en wordt gegeven door:

$$\kappa = K \frac{\mu}{\rho g}$$

Hieruit volgt dat de equivalente intrinsieke permeabiliteit (κ_e)van een pipe met radius *a* wordt gegeven door:

$$\kappa_e = \frac{a^2}{8}$$

Hiermee is een parameter beschikbaar gekomen om de hier gehanteerde aannames voor de doorlaatfactor (K) van geërodeerde cellen te toetsen ($\kappa = 1,35 \cdot 10^{-7}$ K voor grondwater van 10 ° C). De dimensies van de pipe worden hier niet afgeleid aan de hand van het evenwicht voor erosie (dat valt buiten de scope van deze studie), maar er wordt gebruik gemaakt van een bereik van realistische pipe-dimensies. Daarbij moet nog wel rekening gehouden worden met de celdimensies in relatie tot de dimensies van de pipe (in de modelcellen van 1x1x1 m is sprake van zowel onverstoord bodemmateriaal als van pipes). Het gewogen gemiddelde van de doorlaatfactor (*K*₀) wordt daarom gebruikt om de equivalente doorlatendheid van de cel te bepalen op basis van het volume (*V*₀):

$$\overline{K} = \frac{\sum_{i=1}^{V} V_i x_i}{\sum_{i=1}^{V} V_i}$$

Om te toetsen of de gehanteerde doorlatendheden voor geërodeerde cellen overeenkomen met een reële situatie waarin pipes in de ondergrond ontstaan, is de intrinsieke doorlatendheid van een pipe voor verschillende diameters bepaald en omgerekend naar een doorlaatfactor, zie onderstaande tabel.

Tabel 11:Equivalente doorlatendheid van modelcellen bij verschillende pipe diameters.

a (m)	K _P (m²)	K _p (m/d)	\overline{K} (m/d)		
			Case 1	Case 2	Case 3
0	0	0	75	47,6	75
0,01	1,25.10-5	93	75	47,6	75



0,05	3,13.10-4	2.315	93	65,4	93
0,10	1,25 10 ⁻³	9.259	363	337	363
0,20	5,00·10 ⁻³	37.037	4720	4696	4720

a : straal pipe

 κ_{p} : equivalente intrinsieke permeabiliteit van pipe met straal a

K_p : equivalente doorlatendheid van pipe met straal a

 \overline{K} : gewogen gemiddelde doorlatendheid van een cel met dimensies 1x1x1 m, uitgaande van een enkele pipe per cel.

Een veel waargenomen vorm van zandmeevoerende wellen is een erosiegat dat tot onder de deklaag doorloopt (Burger *et al.*, 2018), met bovenin een vrij grote diameter, zoals te zien is in onderstaande figuur. In het onderzoek van Burger *et al.* (2018) en in onderstaande figuur (rechts) is te zien dat de grootte van de pipe op grotere diepte snel afneemt tot enkele millimeters. In praktijk ontwikkelt terugschrijdende erosie zich als een netwerk van kleine pipes (zie bijvoorbeeld Silvis. 1991). Het hanteren van een diameter van enkele millimeters tot een decimeter voor de dimensies van de pipe lijkt dan ook voor de hand te liggen voor het bepalen van de equivalente doorlatendheid.



Figuur 26: Een drooggevallen zandmeevoerende wel met links een foto van het fenomeen, zoals te zien aan maaiveld (zie de punt van de laars voor schaal) en rechts de dimensies op grotere diepte na afgraving (bron: WSRL, <u>https://www.youtube.com/watch?v=wNfW0rhhzkU&feature=youtu.be</u>).

Voor de verschillende cases is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, waarbij getoetst is bij welke doorlaatfactor van geërodeerde modelcellen stabilisatie van het erosieproces plaatsvindt. Voor case 1 (Rivierdijk I) is de afstand vanaf de rivier waarop stagnatie van de erosie plaatsvindt uitgezet tegen de gehanteerde doorlaatfactor voor geërodeerde modelcellen, zie onderstaande figuur. Te zien is dat bij een gemiddelde equivalente doorlaatfactor (van de hele cel) van 2.000 m/dag of meer geen stagnatie meer plaatsvindt. Dit komt overeen met een straal van de pipe van 0,18 m (een diameter van 0,36 m). De in het veld en proeven waargenomen dimensies van de pipe zijn (voordat een doorbraak plaatsvindt) veel kleiner (orde millimeters tot centimeters). De maximale doorlaatfactor waarbij nog stagnatie plaatsvindt is voor case 2 en 3 globaal gelijk aan case 1.

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyse wordt, gezien de bekende optredende dimensies van pipes, afgeleid dat de gehanteerde aannamen voor de doorlatendheid van modelcellen niet leiden tot een onderschatting van de stroomsnelheden.



Figuur 27: De afstand vanaf de rivier waarop stagnatie plaatsvindt is uitgezet tegen de gehanteerde doorlaatfactor voor geërodeerde modelcellen. De positie van de wel is als rode stippellijn weergegeven en de positie van de rivier als blauwe lijn. Indien de stagnatie ter hoogte van de rivier plaatsvindt is sprake van een doorbraak van de pipe (wat kan leiden tot dijkfalen).

In het door Deltares ontwikkelde D-Geo Flow worden het erosieproces en pipestroming, gekoppeld met een grondwatermodel gemodelleerd. De doorlatendheid van de pipe heeft daarmee een meer expliciet karakter dan de methode die hier is gehanteerd. Indien de in D-Geo Flow gehanteerde methode ook ingezet kan worden in een 3D-stromingsmodel (waarbij met name de equivalente intrinsieke permeabiliteit met een representatieve breedte ingezet kan worden), kan een vergelijkingsstudie waardevolle inzichten geven in de toepassing van een 3D-model voor toetsing met betrekking tot piping.

4.3 De rol van het achterland

Zoals in hoofdstuk 2 is beschreven, is de rol van het achterland in een 3D-model groter dan in een 2D-model. Doordat in een 3D-model water langs de wel kan stromen, heeft een lekke deklaag een dempend effect op de optredende stijghoogten achter de dijk (in hoofdstuk 2 aangeduid als het 'poldereffect'). In deze paragraaf is dat effect modelmatig inzichtelijk gemaakt.

In onderstaande figuren is het afvoerdebiet van de wel weergegeven tegen de gemodelleerde lengte van de polder voor casus 2 (projectgebied WoS - dijkpaal DD202). Hierin is zichtbaar dat een langere polder leidt tot een afname van het afvoerdebiet uit de wel. In theorie moet de gemodelleerde lengte van het achterland zodanig zijn, dat er geen verandering meer optreedt in de modelresultaten bij verdere verlenging. Een te kort model zorgt voor een overschatting van de debieten (en dus van de erosie) in de pipe. In zowel een 2D als 3D model geldt dat er geen verschil meer optreedt in het berekende debiet boven een gemodelleerde lengte van 300 m. Ook is te zien dat de afname van het debiet in het 2D-model met toenemende modellengte vrij klein is (<10%tussen het maximum en minimum), terwijl de gemodelleerde afvoerdebieten in het 3Dmodel veel groter zijn (~25% verschil tussen het maximum en minimum). Voor het 3Dmodel is ook de invloed van een breder model weergegeven; een grotere modelbreedte leidt tot een hogere afvoer door de pipe. Een te smal model leidt tot een onderschatting van het afvoerdebiet. In casus 2 treden geen grote verschillen meer op wanneer een model verder verbreed wordt dan 100 m; deze breedte is toegepast in hoofdstuk 3. Uit deze analyse van casus 2 blijkt dat in een 3D-schematiesatie de rol van het achterland substantieel groter is dan in een 2D-model. De relatieve veranderingen hangen overigens sterk samen met de spreidingslengte.



Deze resultaten lijken in tegenspraak met het eerder uitgevoerde onderzoek naar de rol van de modelbreedte op het gedrag van terugschrijdende erosie (De la Loma *et al.*, 2020). De daar gepresenteerde resultaten waren echter voor een casus met een dichte bovenrand, waarbij het poldereffect juist niet optreedt. In dit onderzoek zijn juist situaties beschouwd met een sterke lek door de deklaag.



Figuur 28: Het afvoerdebiet uit de wel is gerelateerd aan de hoeveelheid water die modelmatig afgevoerd kan worden via het achterland (de polder). Daarbij is de afvoer uitgedrukt als percentage van het maximum (de relatieve verandering). In de linker figuur is deze afname met toenemende lengte weergegeven voor een 2D model en in de rechterfiguur voor een 3D-model, voor 2 verschillende waarden van modelbreedte.

4.4 Overige factoren

De rol van de modelresolutie op de stromingssnelheid dichtbij de wel is niet onderzocht, maar het is bekend dat deze sterk toeneemt naarmate dichter bij de wel. De gehanteerde resolutie van het model is daarmee mogelijk van invloed op de uitkomst. Enerzijds zal de equivalente doorlatendheid voor geërodeerde cellen hoger zijn, anderzijds is het doorstroomvolume per cel kleiner. Nader onderzoek kan inzicht geven in het effect op de resultaten.

Verder is in deze studie gebruik gemaakt van een stationair stromingsmodel; in elke iteratie is sprake van een evenwichtssituatie met betrekking tot de grondwaterstroming. In werkelijkheid is er juist sprake van een hoogwatergolf, waarbij de hoogste waterstanden van tijdelijke aard zijn. De rol hiervan kan onderzocht worden met een niet-stationaire grondwatermodel, waarbij de hoogwatergolf tijdsafhankelijk wordt doorgerekend.

Verschillende factoren die nog beschouwd kunnen worden om de omstandigheden waaronder stagnatie van de pipe-groei in een 3D-model plaatsvindt te duiden, zijn (zie ook De La Loma *et al*, 2020):

- Anisotropie: wat is de invloed van anisotropie op de vorming van de lens?
- Locatie wel: wat is de invloed van de locatie van de wel (verder weg van de dijk of dichterbij de dijk) op de horizontale ontwikkeling?.
- Lengte achterland eventueel in combinatie met breedte.
- Dikte en weerstand van de deklaag.
- Dikte van het watervoerend pakket.

Ook speelt mogelijk turbulente stroming een rol in de mate van opstuwing. In de gebruikte modelsoftware wordt uitgegaan van laminaire stroming. Het is mogelijk om de rol van turbulente stroming te evalueren met behulp van de uitbreiding MODFLOW-Conduit Flow Process (CFP), waarin preferente stroming (zoals een pipe) kan worden gemodelleerd en de rol van turbulentie wordt meegenomen, indien sprake is van turbulente stroming (Shoemaker *et al.*, 2008). Deze methode is in deze studie niet getest.

4.5 Validatie

De hier gepresenteerde resultaten zijn geënt op een aantal casussen, waarbij niet wordt voldaan aan de eisen ten aanzien van piping. In een tweetal casussen is bekend dat er een zandmeevoerende wel aanwezig is. Er zijn diverse studies, waarbij de rol van 3Dstroming (in schaalmodellen) is bestudeerd. Een belangrijke vervolgstap is om de modellen te valideren aan de hand van uitgevoerde proeven. Daarbij is het juist zinvol als in de (schaal)proeven eveneens een vergelijking wordt gemaakt tussen een 2D- (een wel) en een 3D-schematisatie (lijnvormige uittreding over de volledige breedte).



5 Conclusies en Aanbevelingen

Aanpak

In de huidige toetsingsmethodiek voor piping wordt gebruik gemaakt van een 2Dschematisatie. Bij een wel is echter vaak sprake van radiale toestroom van grondwater; een situatie die bij uitstek driedimensionaal is (toestroom van alle zijden). In dit onderzoek is een directe vergelijking gemaakt tussen de rol van grondwaterstroming rondom piping in een twee- en driedimensionaal grondwatermodel.

Terugschrijdende erosie

De initiële fase wordt gedefinieerd als de fase direct nadat opbarsten van de deklaag is opgetreden. Het gedrag van radiale stroming (3D) en tweedimensionale (2D) stroming zijn sterk afwijkend. In de 2D-situatie is de stroomsnelheid van het grondwater tussen de rivier en de wel over het hele traject vrijwel gelijk. In de 3D-situatie is als gevolg van radiale toestroom de stroomsnelheid rondom de wel veel groter, terwijl de stroomsnelheid in de pipe op grotere afstand juist lager is dan in de 2D-situatie.

Terugschrijdende erosie is hier gemodelleerd aan de hand van een iteratief model, waarin per tijdstap wordt bepaald of erosie plaatsvindt. Hierbij is uitgegaan van een toetsingscriterium waarbij in het 2D- model sprake is van erosie tot aan de buitenteen van de dijk. Vervolgens is een vergelijking gemaakt met een 3D-model met dezelfde omstandigheden. In de hier behandelde casussen blijkt dat de pipe zich in een 3D-model stabiliseert, na een gedeeltelijke pipevorming. Een verklaring is gevonden in het stromingsgedrag in de pipe. In de pipe is sprake van weerstand tegen stroming als gevolg van de beperkte dimensies van de pipe. De mate van opstuwing in de pipe is onder andere gerelateerd aan de hoeveelheid water die afgevoerd moet worden, die in een 3D-situatie groter is. Met toenemende afstand van het uittreepunt zal de druk in de pipe steeds meer gaan lijken op de omgevingsstijghoogte, waardoor de toestroom naar de pipe afneemt en pipegroei kan stoppen. In de 2D situatie is dat veel minder het geval.

Conclusie

Onder de hier gemodelleerde omstandigheden leidt een 3D-model van de grondwaterstroming en terugschrijdende erosie tot stagnatie van de pipe, terwijl in de 2D-modellering doorgroei plaatsvindt tot aan de rivier.

Aanbevelingen

De vergelijking tussen 2D- en 3D-stroming is hier voor een beperkt aantal situaties beschouwd. Het verdient aanbeveling om dit onderzoek uit te breiden, waarbij variaties in de leklengte, de rol van anisotropie en de in de pipe gehanteerde weerstand worden beschouwd. Ook is het van belang dat deze resultaten worden vergeleken met uitgevoerde (schaal)proeven, waarbij de rol van 3D-stroming is bestudeerd. Verder verdient het aanbeveling om de hier gesimuleerde situaties te simuleren met het door Deltares ontwikkelde D-Geo Flow, waarin het erosieproces en pipestroming, gekoppeld met een grondwatermodel worden gemodelleerd. Met name de mogelijkheid om dit in 3D te modelleren kan inzicht geven in de relevantie van 3D-modellen in piping-studies.

6 Literatuur

Bakker, M., Post, V., Langevin, CD., Hughes, JD., White, J. T., Starn, J. J., & Fienen, M. N. (2016). Scripting MODFLOW Model Development Using Python and FloPy. Groundwater, 54(5), 733-739. https://doi.org/10.1111/gwat.12413/epdf

Burger, S., De la Loma Gonzalez, B., Kruisdijk, E., Velstra, J., 2018. POV piping - wellen onderzoek: Monitoren en karakteriseren van wellen & piping bij waterkeringen, Acacia Water.

Van Esch J.M., Sellmeijer J.B., Stolle D., 2013. Modeling transient groundwater flow and piping under dikes and dams, 3rd international symposium on computational geomechanics (ComGeo III), 2013/8

De la Loma Gonzalez, B., Burger, S., Van Beek, V., Noordam, A., 2020, KvK Piping deelproject 016 - Geohydrologische situatie bij een 3D uitstroom, Acacia Water en Deltares, AW_272.2_SB_190953

Förster,U. Van den Ham, H., Calle, E. Kruse, G., 2012, Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, Deltares, 1202123-003

Huyakorn, P. S. & Pinder, G. F. (1983). Computational Methods in Subsurface Flow. Academic Press.

Shoemaker, W.B., Kuniansky, E.L., Birk, S., Bauer, S., and Swain, E.D., 2008, Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A24, 50 p.

Sellmeijer, J.B. (1989): On the Mechanism of Piping under impervious Structures. Proefschrift Technische Universiteit Delft, 1989.

Sellmeijer, J.B., Calle, E.O.F., Sip, J.W. (1989): Influence of Aquifer Thickness on Piping below Dikes and Dams. Int. Symp. on Analytical Evaluation of Dam related Safety Problems. Org. by ICOLD & Danish and Icelandic National Committees on Large Dams, Copenhagen

1989.

Silvis, F., 1991. Verificatie Piping Model: Proeven in de Deltagoot - Evaluatierapport.

TAW (1999): Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen. Uitgever: Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen i.o.v. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, maart 1999, zie www.enwinfo.nl.



van Hogendorpplein 4 2805 BM Gouda

Telefoon: 0182 – 686 424 Internet: www.acaciawater.com Email: info@acaciawater.com