

Pipingrisico bij dijken met lek naar het achterland

Om het pipingrisico in te schatten, hanteren wij de rekenregels van Sellmeijer. Deze rekenregels zijn een versimpeling van de fysische processen en daar door niet afdoende geënt op de realiteit. 3D- berekeningen brengen deze processen beter in beeld, maar zijn nog niet in betrouwbare modellen te gieten. Voor nu is het belangrijk te weten welke aannames ten grondslag liggen aan deze rekenregels.

Ondermijning van dijken door piping vormt een reëel veiligheidsprobleem voor onze primaire waterkeringen. In de huidige beoordelings- en ontwerpsystematiek van waterkeringen wordt vaak de rekenregel van Sellmeijer gebruikt om het risico van terug-schrijdende erosie te kwantificeren. Rekenregels, zoals die van Sellmeijer, zijn een versimpeling van de fysische processen bij piping, waarmee snel een indicatie van de veiligheid wordt verkregen. Als de lokale situatie te veel afwijkt van de modelaannames, neemt de toepasbaarheid af. De oorspronkelijke rekenregel stamt uit 1988 en is enkele malen aangepast aan nieuwe inzichten, wat heeft geleid tot de huidige vorm. Vanwege de aanpassingen is het voor degenen die de regel toepassen in de praktijk niet altijd inzichtelijk op welke aannames deze is gebaseerd, en in hoeverre dit overeenkomt met de lokale

IN 'T KORT - Piping

Ondermijning van dijken door piping vormt een reëel veiligheidsprobleem

Rekenregels zijn een versimpeling van de fysische processen

De toepasbaarheid neemt af als de situatie afwijkt van de modelaannames

Er is veel onderzoek gedaan naar piping en de vertaling naar ontwerprichtlijnen

$$\frac{\Delta H_c}{\gamma_n \gamma_b} > (\Delta H - 0,3d) \quad (1)$$

$$\Delta H_c = L F_{resistance} F_{scale} F_{geometry} \quad (2)$$

$$F_{resistance} = \frac{\gamma_p'}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \quad (2,1)$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4} \quad (2,2)$$

$$F_{geometry} = 0,91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2,8} - 1} + 0,04} \quad (2,3)$$

Vigerende faalcriterium voor het kritieke verval ΔH (1) op basis van de rekenregel van Sellmeijer (2). Zie de vigerende ontwerprichtlijnen voor de betekenis van de symbolen.

situatie waarop de rekenregel wordt toegepast. Dit maakt het lastig om op basis van de lokale situatie (dat wil zeggen: dijkgeometrieën, grondopbouw en randvoorwaarden) met een aangescherpte versie van de rekenregel te kunnen werken. Dit is een van de redenen waarom vrijwel altijd optimalisatiestudies volgen op de standaard werkwijze rondom piping.

Opzet van studie

Hieronder gaan we eerst in op de toestandkoming van de rekenregel. Daarna richten we ons op de geohydrologische aannames in de rekenregel: tweedimensionale grondwaterstroming zonder stroming naar het achterland. We onderzoeken de invloed van die geohydrologische aannames door in een 2D-, quasi-3D- en 3D-modelstudie te kijken naar het grondwaterstromingsbeeld rondom de pipe. Hierbinnen variëren we de hydraulische weerstand van de polderdeklaag, om de invloed van grondwaterstroming naar de polder (zgn. lek) te onderzoeken. Deze factoren spelen ook een belangrijke rol in de verschillen tussen Sellmeijer en het Shields-Darcy-model (publicaties in Land+Water uit 2020 en 2021).

Ontwikkeling en aannames

In de afgelopen eeuw is onderzoek gedaan naar de aandrijvende en weerstandsbiedende

processen van piping en de vertaling naar praktische ontwerprichtlijnen, zoals de rekenregel van Bligh (1910). In 1988 is de rekenregel van Sellmeijer opgesteld. De rekenregel is gebaseerd op een wiskundig model waarin de grondwaterstroming in de zandlaag, de stroming door de pipe en het krachtenevenwicht op de korrel worden beschreven.

Het model van Sellmeijer beschrijft het pipingproces in 2D, dat wil zeggen uniform over de lengte van het dijktraject. In het model wordt een gesimplificeerde dwarsdoorsnede van een ondoorlatende dijk op een homogene zandlaag van oneindige diepte beschreven. In de jaren erna is deze rekenregel drie keer aangepast tot de vorm in het vigerende beoordelingsinstrumentarium.

De eerste aanpassing in 1989 resulteerde in het toevoegen van een geometriefactor ($F_{geometry}$), die rekening houdt met een eindige dikte van de zandlaag (D). De geometriefactor volgt uit het curve-fitten van duizenden berekeningen met een numerieke variant (MSeep) van het Sellmeijer-model uit 1988, waarbij een ondoorlatende deklaag aan de polderzijde is gemodelleerd. De overige factoren volgen uit het analytische model en zijn later verder aangescherpt (kalibratie in 2011).

Vervolgens is er in 2006 een verschuiving geweest in het beschrijven van de krachten die op de zandkorrel werken van een vier-krachten evenwicht (eigengewicht, horizontale en verticale stromingsdruk en de sleepkracht) naar een twee-krachten evenwicht (eigengewicht en de sleepkracht).

In 2011 is een empirische aanpassing uitgevoerd op basis van labproeven, om rekening te houden met verschillende parameters gerelateerd aan de korrelstructuur (relatieve dichtheid, hoekigheid, uniformiteit). Hiervan is uiteindelijk alleen de korreldiameter d_{70} meegenomen in de rekenregel.

Bovengenoemde ontwikkelingen laten zien waar belangrijke aannames zijn gemaakt met betrekking tot de geohydrologische schematisering: tweedimensionale stroming, een homogeen zandpakket en een ondoorlatende deklaag aan de polderzijde. Daar waar de lokale situatie sterk afwijkt van deze aannames, is maatwerk nodig.

Geohydrologische modellen

In onze studie hebben we gekeken of we beter kunnen aansluiten bij de geohydrologische praktijk door inzichtelijk te maken welk deel van de grondwaterstroming daadwerkelijk naar de pipe stroomt, wanneer de weerstand van de binnendijkse deklaag varieert van zeer ondoorlatend naar doorlatend. Het deel dat naar de polder afstroomt, noemen we lek naar het achterland. We hebben hiervoor stationaire numerieke grondwatermodellen gebruikt in 2D, quasi-3D en 3D.

Als 2D-model is MSeep gebruikt inclusief pipingmodule, waarmee de kritieke condities voor het ontstaan van en voortgang van de pipe worden bepaald. Dit is hetzelfde model waarmee de geometriefactor van Sellmeijer is gefit. Als (quasi-)3D-model is het grondwatermodel MODFLOW (iMOD) gebruikt. Dit model bevat geen module om de pipeontwikkeling te berekenen, maar hierin hebben we een horizontale pipe en verticaal opbarstkanaal geschematiseerd door middel van een zeer doorlatende zone.

In iMOD is dezelfde rivierwaterstand opgelegd als de kritieke waterstand uit MSeep. In het quasi-3D-model is langs de gehele lengte van de dijk deze doorlatende zone aangelegd, en in het 3D-model is dit alleen gedaan voor een vlak van 1 bij 1 meter.

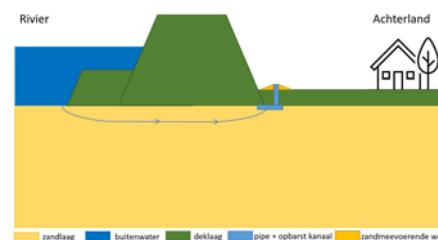
Om de resultaten van de 2D- en (quasi-)3D-modellen te kunnen vergelijken, hebben we het debiet uit de (zandmeevoerende) wel onder het kritieke verval (volgens MSeep) als proxy gebruikt. Dit debiet hangt af van het stroombeeld in het model en is gerelateerd aan de erosieve capaciteit van een pipe met vaste geometrie. Omdat de groeirichting en breedte van de pipe vastliggen in 2D-MSeep-simulaties en geheel onbekend zijn in de 3D-modellen, kan het weldebiet hier niet voor worden gecorrigeerd.

Resultaten

De resultaten laten zien dat het rekenen in 2D of 3D in de basis tot heel andere stroomlijngeometrieën leidt. Om het effect van het toevoegen van een derde dimensie – en dus die andere stroomlijngeometrieën – op het pipingrisico in beeld te krijgen gebruiken we het genormaliseerde debiet uit de geschematiseerde wel (bij het uittredepunt) als proxy. De aanname is hierbij dat een kleiner debiet betekent dat er minder water richting de pipe stroomt en dat hierdoor minder (snelle) erosie plaatsvindt.

2D- en quasi-3D-simulaties

In 2D zorgt verlaging van de binnendijkse deklaagweerstand (hogere k -waarde) ervoor dat minder stroomlijnen uiteindelijk richting het uittredepunt voeren. Daar het een 2D-model betreft, betekent dit dat enkel het bovenste deel van het watervoerend pakket (Deffectief) bijdraagt aan de groei van de pipe wanneer de binnendijkse deklaagweerstand afneemt. Dit in tegenstelling tot de rekenregel van Sellmeijer, waarin altijd met de totale dikte van het watervoerend pakket wordt gerekend. In 2D is het effect van lek met 10 tot 20



Beginnende pipe-vorming door terugschrijdende erosie.

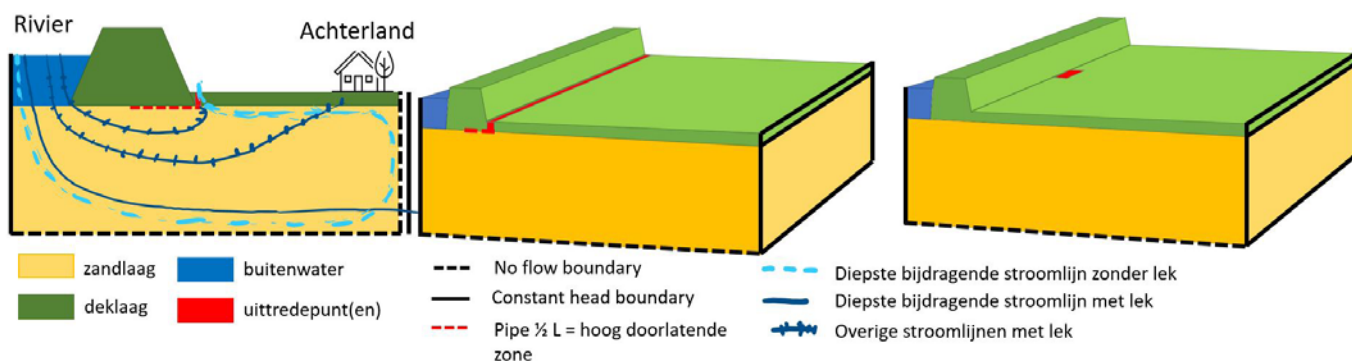
procent voor een volledig doorlatende deklaag, echter beperkt.

De verschillen tussen de 2D- en quasi-3D-simulaties worden toegedicht aan verschillen in de stromingsweerstand in de pipe door verschillen in modelbenadering tussen MSeep en iMOD. Daarnaast zou de fractie van het debiet als functie van de toestroomrichting een (deel van de) verklaring kunnen bieden. Dit dient echter nader onderzocht te worden. In 3D is er naast het effect langs de z -coördinaat ook een effect in de richting van de dijkstrekking (in het x,y -vlak). Hier leidt een afname van binnendijkse deklaagweerstand juist tot een afname van convergentie van de stroomlijnen in het x,y vlak bovenop het effect langs de z -coördinaat.

Lessons learned

In 2D-simulaties hebben veranderingen van de weerstand in de binnendijkse deklaag weinig invloed op het debiet. Dit komt doordat de gemodelleerde hoog doorlatende zones of pipes functioneren als drain en de stroming 'aantrekken' voordat dit kan afstromen naar het achterland.

In de 3D-simulatie treden grotere veranderingen in de weldebieten op bij een doorlatende binnendijkse deklaag dan in 2D- en quasi-3D-simulaties en komt het water in het uittredepunt terecht via heel andere stroombeelden, namelijk convergerende stroomlijnen. Die convergentie van stroomlijnen is een belangrijke voorwaarde voor het ontstaan van



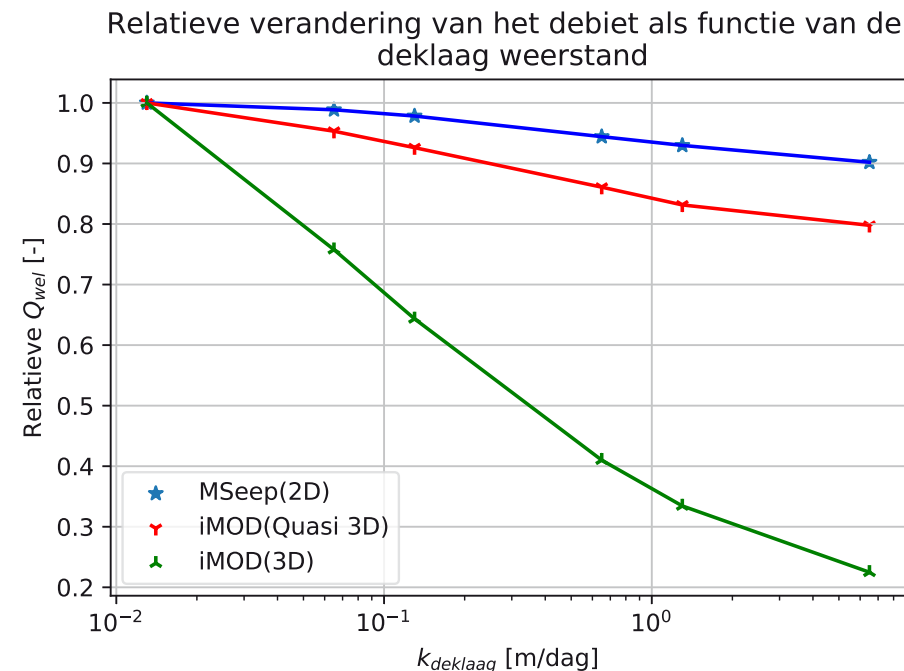
Links: 2D; midden: quasi-3D; rechts: 3D (gelijk aan quasi-3D, maar dan met een uittredepunt om convergente grondwaterstroming te realiseren). Er is een analyse gedaan om te bepalen of het model-domein en de randvoorwaarden invloed hebben op de modelresultaten. Dit bleek niet het geval.

wellen en daarmee van een pipe - en kan alleen in 3D-modellen tot uiting komen. De (a) symmetrie van het stroombeeld direct rondom een wel en het verloop hiervan door de tijd zou waardevolle inzichten kunnen geven in de groeirichting van de pipe.

Kortom, de resultaten laten zien dat het belangrijk is zicht te hebben op de mate van convergentie van de grondwaterstroming. Dit beïnvloedt de keus voor het rekenen in 2D of 3D aangezien bij ondoorlatende binnendijkse deklaag een 2D-berekening het pipingrisico wellicht onderschat, terwijl bij een doorlatende binnendijkse deklaag een 2D-berekening te conservatief zou kunnen zijn.

Aanbevelingen voor de praktijk

Het vertalen van deze bevindingen naar een pragmatische ontwerp oplossing is niet eenvoudig. De rekenregel van Sellmeijer is opgenomen in het WBI/OI en vanwege de wijze van totstandkoming kunnen nieuwe inzichten niet 'zomaar' worden geïmplementeerd. Wel kan gesteld worden dat de keuze voor rekenen in 3D in plaats van 2D zorgvuldig moet worden afgewogen door het regionale grondwaterstromingsbeeld en de heterogeniteit en doorlatendheid van de binnendijkse deklaag en zandlaag te karakteriseren. Dit kan worden meegenomen bij een beoordeling door na te denken welke lokale factoren er voor kunnen zorgen dat er dusdanig veel water naar de polder afstroomt, dat het nodig is om met een maatwerkoplossing te werken in plaats van de standaard Sellmeijer. Een voorbeeld hiervan is de Geohydrologische Aanpak Piping. De stroming naar wellen heeft over het algemeen een sterk 3D-karakter. Een



Vergelijking van de relatieve verandering van de weldebieten als functie van binnendijkse deklaagdoorlatendheid, relatief ten opzichte van het debiet bij een zeer ondoorlatende deklaag.

belangrijke beperking in het 3D rekenen aan piping is dat er geen model voor de praktijk beschikbaar is om grondwaterstroming en erosie in de pipe gekoppeld door te rekenen, zoals dat in het model MSeep/D-GeoFlow kan. Hiervoor is verder onderzoek nodig. Een dergelijk model is zeer nuttig voor gevoeligheidsberekeningen, bijvoorbeeld om een correctiefactor op het kritiek verval af te leiden voor allerlei lokale invloeden zoals 3D-stroming, deklaagweerstand, gelaagdheid en anisotropie. Op termijn kan de rekenregel

daarmee aangevuld worden, maar daarvoor dienen eerst de relevante fysische processen in samenhang te worden gemodelleerd. In de tussentijd is het van belang om de aannames bij de rekenregel in het achterhoofd te houden.

Lot Barendsen is adviseur Waterveiligheid; Willem-Bart Bartels is adviseur Waterveiligheid & Geohydrologie (beiden bij WSP); Joost Pol is PhD onderzoeker op het gebied van overstromingsrisico's aan TU Delft en adviseur bij HKV.



Drie zandmeevoerende wellen die zijn geobserveerd tijdens het hoogwater van afgelopen winter (februari 2021) langs de rechter oever van de Waal bij Ochten. (Foto: André Broere, WSP)