

Analyseer dijkdrainage analytisch met een online quickscan

DAVÍD BRAKENHOFF, HENDRIK MEUWESE & MARK BAKKER

In opdracht van de POV Piping is een online quickscantool voor drainagetechnieken ontwikkeld. De website (www.drainagequickscan.nl) maakt een inschatting van de kosten en het waterbezwaar die gemoed zijn met het installeren van een drainagesysteem om veiligheid tegen piping te realiseren. De tool is bedoeld als ondersteunend middel tijdens een verkenningstraject voor dijkversterkingsprojecten. Dit artikel beschrijft hoe de Python module TimML is uitgebreid om de berekeningen mogelijk te maken. De grondwaterstroming is stationair berekend in een doorsnede-model op basis van analytische elementen.

Artikel

Inleiding

Piping is een faalmechanisme bij dijken dat kan optreden als de deklaag achter de dijk opbarst (een "wel"). Bij hoge stroomsnelheden richting de wel wordt zand meegevoerd en treedt er terugschrijdende erosie op. Als dit proces lang genoeg aanhoudt ontstaat er een directe verbinding tussen polder en rivier (een "pipe") die uiteindelijk de stabiliteit van de dijk in gevaar brengt. Een drainagesysteem bij dijken draineert het onderliggende watervoerende pakket en verlaagt daarmee de stijghoogte. Hierdoor wordt opbarsten voorkomen en vermindert de kans dat piping optreedt. Dit type drainagesystemen wordt op een aantal plaatsen toegepast, bijvoorbeeld als grindkoffer bij de Spijkse Dijk en verticale bronnen in Jaarsveld, Opijnen en Schoonhovense Veer-Langerak (POV Drainagetechnieken, 2018). Eén van de voordelen van een drainagesysteem boven een klassieke dijkversterking is het zeer beperkte ruimtebeslag.

De Project Overstijgende Verkenning Piping (POV Piping) heeft aangetoond dat drainage bij dijken vaak niet als oplossing wordt overwogen bij dijkversterkingsprojecten (de Groot en Meuwese, 2017). Dit terwijl deze techniek mogelijk meerwaarde heeft ten opzichte van traditionele versterkingstechnieken (denk aan het ophogen van dijken en verbreden van bermen in stedelijk gebied). Eén van de redenen die geïdentificeerd werd, was het gebrek aan ervaringsgetallen van drainagesystemen in de verkenningfase van dijkversterkingsprojecten: Hoeveel water komt eruit? Wat kost het? Om deze reden is een online tool ontwikkeld die een inschatting geeft van de kosten en het waterbezwaar bij het toepassen van drainage bij dijken. De tool berekent het debiet van een drainagesysteem en ook een schatting van de kosten voor aanleg en beheer (de Jong en Meuwese, 2018). Op die manier wordt in de verkenningfase van een dijkversterkingsproject een beeld verkregen van de inzetbaarheid van een drainagesysteem waarmee een vergelijking gemaakt kan worden met andere dijkversterkingstechnieken. De tool is beschikbaar via www.drainagequickscan.nl.

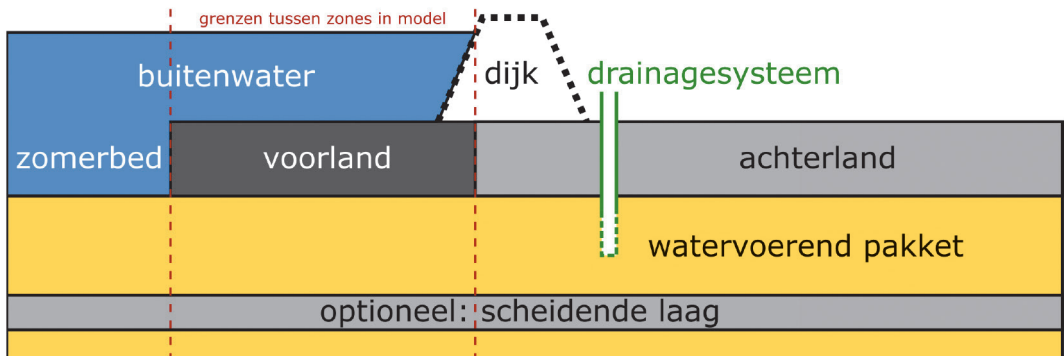
Een iteratief ontwerpproces start wanneer uit de quickscan volgt dat drainagetechnieken een interessante optie zijn. De te volgen stappen, waaronder het ontwerp van de winmiddelen, zijn beschreven in van Meurs e.a. (2018).

Model conceptualisatie

De geohydrologische berekening is uitgevoerd in een doorsnede, hetgeen betekent dat de stromingsrichting loodrecht op de lengteas van de dijk staat. Deze vereenvoudiging is verantwoord omdat door de langgerekte vorm van dijken deze stromingsituatie al snel wordt benaderd. Deze vereenvoudiging komt ook de snelheid van de berekening ten goede, waardoor de gebruikservaring van de tool prettig blijft.

De geohydrologische opzet van de doorsnede is zo gekozen dat deze het merendeel van de Nederlandse dijken met een piping-probleem omvat, een beperkte invoer van de gebruiker vergt en snel rekent. De gemaakte aannames zijn besproken met een klankbordgroep bestaande uit experts op het gebied van dijken, dijkversterkingen, geotechniek en geohydrologie. Het resultaat is de doorsnede in afbeelding 1. Het watervoerende pakket is uniform over de doorsnede en kan worden doorsneden door een scheidende laag. De deklaag kent drie verschillende zones qua bovenrandvoorwaarde en bodemopbouw:

- Het zomerbed van de rivier;
- Het voorland;
- Het achterland (het binnendijkse systeem).



Afbeelding 1 Schematische doorsnede van het conceptuele doorsnede model.

De eerste zone (in de tool ligt deze altijd aan de linkerzijde) betreft het zomerbed van de rivier. In de praktijk snijdt de onderzijde van de rivier vaak tot in de eerste watervoerende laag. De stijghoogte vlak onder het zomerbed van de rivier ligt dichtbij de rivierwaterstand. In het doorsnedemodel is voor deze zone aangenomen dat de deklaag vrijwel afwezig is (in het model is een slecht doorlatende laag met een weerstand van 1 dag ingevoerd). Het maatgevende rivierpeil is als bovenrandvoorwaarde opgelegd. In het model is deze zone als half-oneindig beschouwd, hetgeen betekent dat de rivier minstens een breedte van drie keer de spreidingslengte heeft, oftewel een breedte van $3\sqrt{kD}$ meter.

De tweede zone betreft het voorland. In hoogwater situaties staat dit deel van de doorsnede ook onder water, maar is er nog een slecht doorlatende deklaag aan-

wezig bovenop de eerste watervoerende laag. Hierdoor is er minder uitwisseling tussen de eerste watervoerende laag en het oppervlaktewater. Deze zone wordt in het model ingevoerd met een deklaag, met daar bovenop de rivierwaterstand als bovenrandvoorwaarde. De dikte en verticale doorlatendheid van deze laag kunnen door de gebruiker ingevoerd worden. Deze zone loopt door tot aan de kruin van de dijk. De breedte van de dijk is verwaarloosd ten opzichte van de breedte van de rivier en het achterland.

De derde zone betreft het achterland, het gebied achter de dijk. In dit gebied wordt het polderpeil als bovenrandvoorwaarde gehanteerd. Ook in dit deel is een deklaag aanwezig met een dikte en verticale doorlatendheid die door de gebruiker ingevoerd kunnen worden. Deze parameters kunnen anders zijn dan de weerstand van de deklaag in het voorland. In het model is deze zone ook als half-oneindig ingevoerd, en loopt vanaf het einde van het voorland (dus vanaf de kruin van de dijk) tot oneindig. Hierdoor hoeft er geen punt gekozen te worden waarop er een binnendijkse randvoorwaarde wordt opgelegd (bijvoorbeeld een vaste stijghoogte rand gelijk aan polderpeil).

Er zijn in het model geen individuele watergangen opgenomen in het achterland, en ook geen kwelsloot. De interactie tussen de eerste watervoerende laag en het achterland wordt samengevat in een vast peil en een weerstand. Dit is een sterke vereenvoudiging van het systeem waardoor het stromingspatroon vlak onder de deklaag in het achterland niet meer lijkt op wat er in de werkelijkheid zou optreden. Het doel van de tool is echter om een schatting te geven van de stroming naar het drainagesysteem onder hoogwateromstandigheden in het watervoerende pakket, en niet om de exacte stroming naar de deklaag in kaart te brengen. Om deze reden zijn de watergangen in het achterland weggelaten.

Modelleren van drainagesystemen

De vereiste stijghoogte is bij alle drainagesystemen hetzelfde en kan door de gebruiker op verschillende manieren worden opgegeven. De standaard optie is om de verlaging van de stijghoogte op te geven ten opzichte van de huidige situatie, bijvoorbeeld 1 meter lager dan in de situatie zonder drainage. De tweede optie is om aan de hand van het gewicht van de deklaag de tool te laten berekenen welke stijghoogte maximaal toelaatbaar is zodat opbarsten niet optreedt. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een op te geven veiligheidsfactor.

Een uitgangspunt bij het maken van de tool was dat de tool geschikt moest zijn om de meest gangbare systemen voor drainage bij dijken door te rekenen. Uit eerder praktijkonderzoek (de Groot en Meuwese, 2017) is gebleken dat de volgende systemen het meest worden toegepast:

- Horizontale drainage (geboord of gegraven);
- Grindkoffers;
- Verticale ontlastbronnen (putten).

Ieder van deze systemen is op een andere manier toegepast in het doorsnedemodel, waarbij het berekenen van verticale bronnen een speciaal geval is, omdat de oplossing van een puntonttrekking niet in een doorsnede berekend kan worden.

Horizontale drainage

Horizontale drainage is in het model opgenomen als oneindige lijnonttrekking met een vaste stijghoogte. De eerste watervoerende laag in het model wordt automatisch opgedeeld in meerdere sub-lagen om de onvolkomenheid van de drainage-middelen mee te nemen. De opdeling van het watervoerende pakket in sub-lagen is afhankelijk van de invoer van de gebruiker. De horizontale drain geldt over een hoogte van 1 m (de kleinste laagdikte die in het model wordt toegepast).

Grindkoffer

De grindkoffer wordt gemodelleerd door een extra inhomogeniteit op te nemen in het model in het achterland met een breedte gelijk aan de ingevoerde breedte van de grindkoffer. Een grindkoffer is alleen een effectief drainagemiddel als deze het watervoerende pakket raakt. Daarom wordt de hele deklaag afgegraven en vervangen door grind. Uiteraard is dit alleen kostentechnisch interessant bij dunne deklaagen (tot circa 3 m). In de grindkoffer wordt het peil geregeld met een stuw, dus in het model wordt de bovenrandvoorwaarde in de grindkoffer gelijkgesteld aan de ingevoerde stijghoogte.

Verticale bronnen

Het berekenen van een oplossing met verticale bronnen vereist een extra stap omdat de oplossing van een puntonttrekking niet in een doorsnede berekend kan worden vanwege de eindige lengte van het drainagesysteem en de afstand tussen de putten. Er is gebruik gemaakt van de mogelijkheid om twee verschillende analytische elementen modellen bij elkaar op te tellen via superpositie. Het eerste model berekend het benodigde debiet, en het tweede model herverdeelt dat debiet vanuit een lijnonttrekking naar verticale bronnen. Door deze twee modellen te combineren kan op een efficiënte manier drainage met bronnen worden doorgerekend zonder een volledig 3D model. (In een volledig 3D model moeten meer randvoorwaarden ingevoerd worden met een tragere berekening als gevolg.)

In beide modellen wordt rekening gehouden met de verschillen in bodemopbouw tussen het zomerbed, het voorland en het achterland. Een visualisatie van deze berekening met twee modellen is weergegeven in afbeelding 2. In de afbeelding zijn de verschillende zones duidelijk aangegeven.

Model 1: doorsnede model met een oneindig lange lijnonttrekking (afbeelding 2b)

Het eerste model berekent een doorsnede met een oneindig lange lijnonttrekking in alle lagen waarin de verticale bronnen een filter hebben (in de tool hebben de bronnen standaard een filterlengte van 5 meter). Uit dit model wordt de afvoer per strekkende meter van de lijnonttrekking berekend. Dit debiet wordt gebruikt als invoer in het tweede model.

Model 2: quasi-3D model met verticale bronnen (afbeelding 2c)

Het tweede model is een quasi-3D model waar de verticale bronnen in gemodelleerd worden. Over de lengte waarover het drainagesysteem wordt toegepast, wordt in dit tweede model een lijninjectie ingevoerd die water weer in het model stopt met hetzelfde debiet als de onttrekking uit het eerste model. Ook worden de putten in het model toegevoegd. Het onttrekkingsdebiet per put is gelijk aan het debiet

berekend in het eerste model gedeeld door het totale aantal putten. Er wordt netto dus geen water onttrokken uit dit model. Het onttrokken water wordt eigenlijk verdeeld vanuit een horizontale drain naar verticale putten.

Om rekening te houden met de verschillen in bodemopbouw van het zomerbed, het voorland en het achterland (de inhomogeniteiten) in het quasi-3D model worden langs de randen van de zones elementen toegevoegd die eisen dat de stijghoogte en de flux aan beide zijdes van de rand gelijk zijn. Omdat het model quasi-3D is gelden deze randvoorwaarden langs de lijnen die de randen tussen de verschillende zones vormen. Deze lijnelementen worden over een afstand in het model gelegd zodanig dat ze voorbij het punt reiken waar er nog een significante invloed van de putten wordt verwacht. Met andere woorden, de randvoorwaarden worden voldoende ver doorgetrokken zodat ze geen invloed hebben op de oplossing.

Het resultaat (afbeelding 2d)

Als beide modellen bij elkaar opgeteld worden komt daar de oplossing uit voor een rij van putten achter een dijk. Momenteel wordt in de tool nog een iteratie toegepast omdat het benodigde debiet om aan de verlagingseis te voldoen op een punt halverwege twee bronnen, hoger ligt dan het benodigde debiet als een lijnonttrekking wordt toegepast. Dit kan in de toekomst nog geoptimaliseerd worden door een nieuw analytisch element toe te voegen aan TimML.

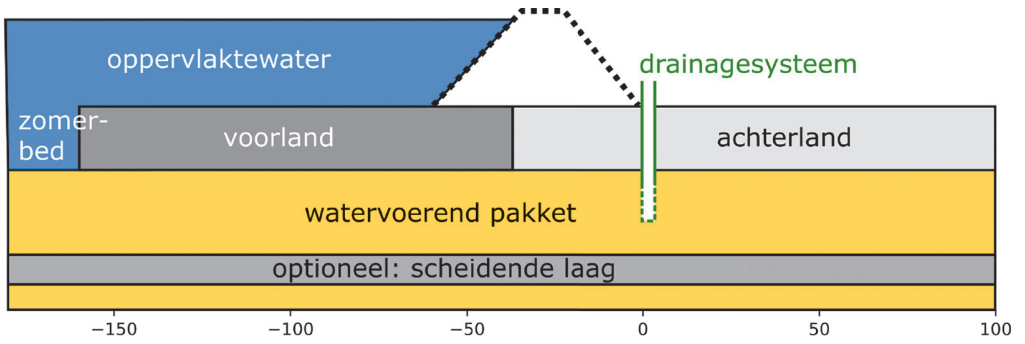
TimML: twee 'nieuwe' analytische elementen

Het doorsnedemodel is opgesteld in TimML, een open source Python module voor het berekenen van grondwaterstroming met analytische elementen in systemen met meerdere lagen. Voor een uitgebreide omschrijving van TimML wordt verwezen naar de website van de software (zie link aan het einde van dit artikel), of naar Bakker en Strack (2003) voor de achterliggende wiskunde. Kort samengevat veronderstelt een analytisch elementen model dat de grondwaterstroming een superpositie is van alle elementen die invloed hebben op de stroming. Elke eigenschap van het landschap die een interactie heeft met het grondwater wordt beschreven middels een analytische vergelijking. De stijghoogte of stroming op een bepaalde locatie is dan de som van de bijdragen van alle individuele invloeden op die locatie volgens die vergelijkingen. Een voordeel van analytische elementen ten opzichte van een numeriek model is dat er geen grid nodig is.

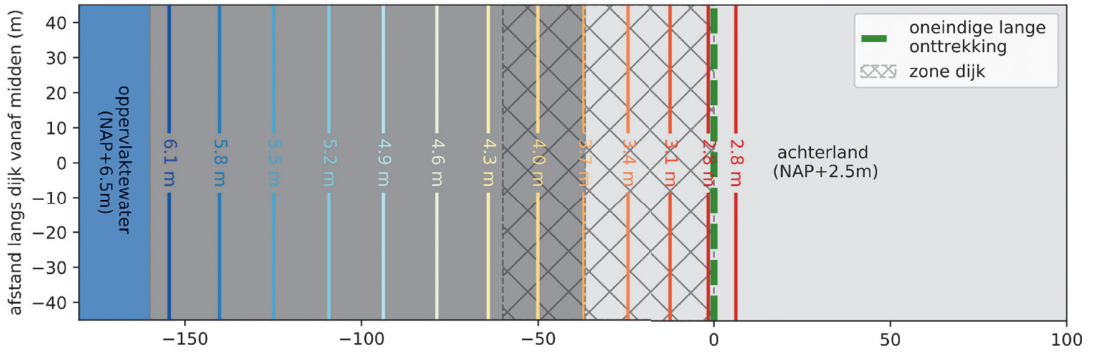
In het kader van dit project is TimML uitgebreid met functionaliteit om doorsnede modellen door te rekenen. Hiervoor zijn nieuwe elementen aan de software toegevoegd:

- 1D inhomogeniteiten, elementen waarmee de eerder omschreven zones met verschillende eigenschappen qua bovenrandvoorwaarde of bodemopbouw in het model worden ingevoerd;
- 1D lijnonttrekkingen, bijvoorbeeld oneindig lange drains, die zowel met een vaste stijghoogte als een vast debiet ingevoerd kunnen worden.

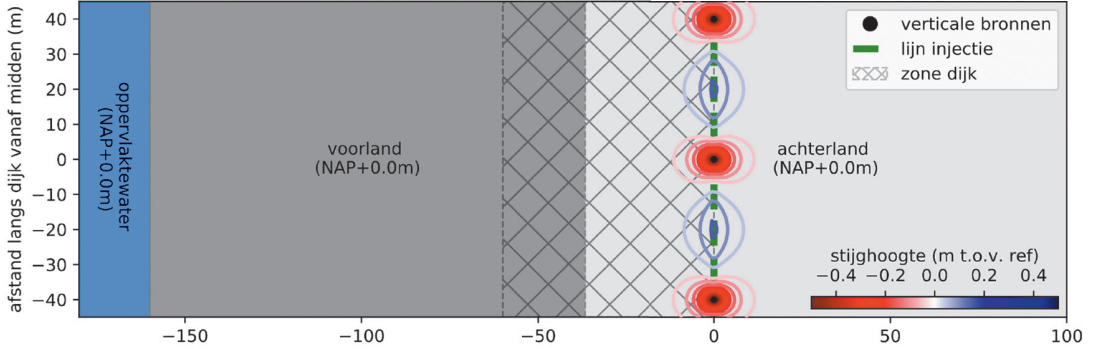
Inhomogeniteiten in doorsnede modellen zijn in TimML "StripInhom" genoemd, naar de Engelse vertaling van 'strook'. In feite zijn dit oneindig lange stroken (haaks op de doorsnede) met ieder zijn eigen verschillende eigenschappen die naast el-



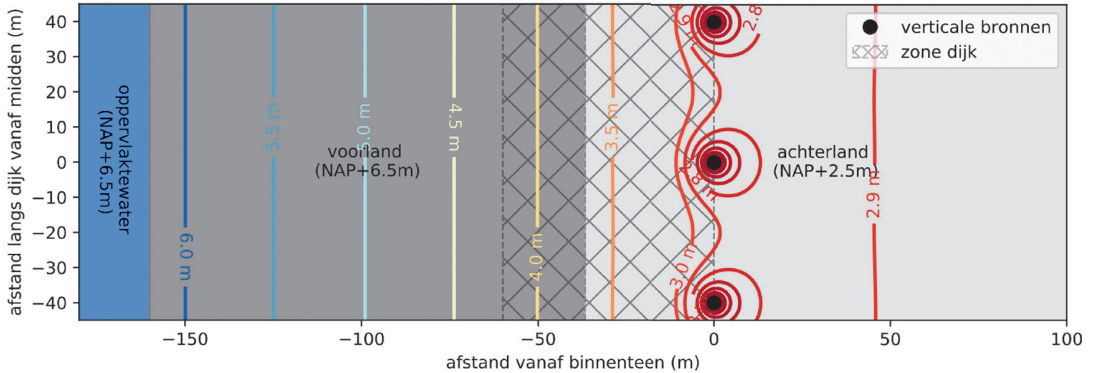
Model 1: doorsnede met oneindig lange onttrekking



Model 2: quasi-3D model met verticale bronnen



Resultaat: stijghoogte 1^e vwp van model 1 + model 2



◀ Afbeelding 2 Visualisatie van uitleg hoe de oplossing voor verticale bronnen is berekend. Van boven naar onder: a) een doorsnede van het model, b) de berekende stijghoogtes in het 1e wattervoerende pakket van het model met een oneindig lange onttrekking, c) de stijghoogtes van het model met verticale bronnen en een equivalente lijninjectie, d) de resulterende stijghoogte als de oplossing van model 1 en model 2 bij elkaar opgeteld worden.

kaar worden gelegd (transmissiviteit, weerstand van slecht doorlatende lagen en de bovenrandvoorwaarde mogen verschillen maar het aantal lagen moet gelijk zijn). Om ervoor te zorgen dat de grondwaterstroming vanuit een inhomogeniteit naar de volgende klopt worden er randvoorwaardes gedefinieerd op de rand tussen de inhomogeniteiten.

In analytische elementen modellen worden deze randvoorwaarden middels elementen aan het model toegevoegd. Op het grensvlak tussen twee inhomogeniteiten wordt een element gelegd met als eis dat de stijghoogte links en rechts van het element gelijk aan elkaar zijn. Dit element heet in TimML 'HeadDiffLineSink1D'. Tijdens het oplossen van het model worden de sterktes (de debieten) van de elementen in het model zo bepaald dat aan deze voorwaarde voldaan wordt. Ook wordt een vergelijkbaar tweede element toegevoegd, de 'FluxDiffLineSink1D', die eist dat de stroming (de afgeleide van de stijghoogte maal de transmissiviteit) links en rechts van het element gelijk is.

De oneindige lange lijnonttrekking is in TimML opgenomen als LineSink1D. Als voorbeeld is hier de analytische formule van dit element voor 1 laag zonder intrede-weerstand opgenomen. De formule zal veel geohydrologen bekend voorkomen:

$$h(x) = \frac{q}{kD} \lambda \exp\left(-\frac{x-x_c}{\lambda}\right), \quad \text{voor } x \geq x_c \quad (1)$$

waarbij

- h : stijghoogte op x [m]
- q : onttrekkingsdebiet [$\text{m}^3/\text{d}/\text{m}$]
- kD : transmissiviteit van de aquifer [m^2/dag]
- x : locatie waarop je de stijghoogte wilt berekenen [m]
- x_c : locatie van het element [m]
- λ : spreidingslengte (voor een doorsnede met 1 aquifer gelijk aan \sqrt{kDc}) [m]

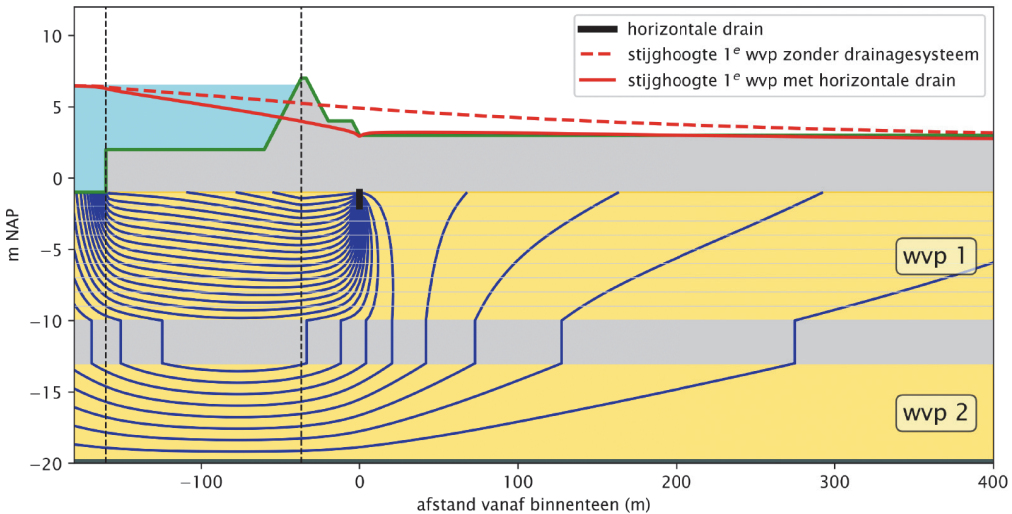
Voor een element waarbij de stijghoogte wordt opgelegd wordt het model opgelost zodanig dat de berekende q de ingevoerde stijghoogte oplevert op de locatie van dat element.

Met deze elementen is het mogelijk om grondwaterstroming in een doorsnede bij een dijk met een drainagemiddel op te lossen.

Resultaten en visualisatie

De tool rekent het stijghoogteverloop langs de doorsnede en het debiet van het drainagesysteem uit voor de referentiesituatie en per type drainagesysteem (grindkoffer, verticale bronnen en horizontale drain). In afbeelding 3 zijn zowel het stijghoogteverloop als de stroomlijnen weergegeven voor een doorsnede met een

horizontale drain. Ook de stijghoogte van het referentiemodel zonder drainagesysteem is weergegeven.



Afbeelding 3 Stijghoogteverloop in eerste watervoerende pakket met en zonder drainagesysteem. De stroomlijnen geven aan hoe de grondwaterstroming zich verdeelt in de doorsnede. De verticale zwarte stippellijnen geven de grenzen tussen de verschillende zones weer.

Uit afbeelding 3 wordt duidelijk hoe het drainagesysteem de stijghoogte in de eerste watervoerende laag beïnvloedt. De stroomlijnen geven een indicatie van de verdeling van de stroming over de doorsnede; tussen elke twee stroomlijnen stroomt dezelfde hoeveelheid water.

De kwel naar de polder en het drainagesysteem wordt in elk model berekend door de som te nemen van de stroming onder de dijk. Door de opzet van het model stroomt al het water uiteindelijk vanuit de rivier naar het drainagesysteem of de polder, dus de flux onder de dijk is gelijk aan de totale kwel. Een vergelijking van de totale kwel met het referentiemodel zonder drainagesysteem geeft aan hoe de totale kwel toeneemt als gevolg van het drainagesysteem. De kwel naar het achterland wordt berekend door het debiet van het drainagesysteem van de totale kwel af te trekken. Een vergelijking met het referentiemodel laat zien dat de kwel naar het achterland afneemt als gevolg van het drainagemiddel bij hoogwater.

Conclusie en discussie

De quickscantool is een krachtige maar tegelijk relatief eenvoudige tool voor het doorrekenen van drainage bij dijken. Met TimML kan relatief snel een gedetailleerd model worden opgesteld en doorgerekend (de tool rekent minder dan 1 minuut) zonder dat een ingewikkeld rekengrid hoeft te worden opgesteld. Met de introductie van twee nieuwe elementen in TimML is deze berekening nu mogelijk en voor alle TimML gebruikers beschikbaar gesteld. Het toegankelijk maken van de tool via een website betekent dat de drempel om deze tool te gebruiken laag is. De tool is daarmee geschikt om in de verkenningsfase van dijkversterkingsprojecten inzicht te geven over de toepassing van drainagesystemen bij dijken.

Uiteraard zijn er zijn nog uitbreidingen en verfijningen te bedenken voor deze tool zoals bijvoorbeeld het toepassen van kwelschermen, of het expliciet opnemen van (kwel)sloten in de deklaag. Omdat de tool in Python is geschreven zijn dergelijke uitbreidingen relatief eenvoudig toe te voegen. De code achter de tool is online beschikbaar via Github: <https://github.com/drainagequickscan/drainagequickscan>.

Lezers bij wie interesse voor TimML gewekt is, worden doorverwezen naar de TimML website www.github.com/mbakker7/timml waar ook een uitgebreide voorbeeld notebook staat met de nieuwe doorsnede mogelijkheden van TimML.

Literatuur

- Bakker, M., Strack, O.D.L.** (2003) Analytic Elements for Multiaquifer Flow; in: Journal of Hydrology, 271(1-4), 119-129.
- de Groot, B., Meuwese, H.D.C.** (17 januari 2017) Handreiking Drainagesysteem in de Verkenning (HWBP POV Piping); referentie: HTN117-1/17-000.672
- Meuwese, H., Brakenhoff, D., Senhorst, H., Niemeijer, H.** (2019) Drainagesystemen bij dijkversterking; in: Land+Water nr. 5 - mei 2019 pagina 21.
- de Jong, I., Meuwese H.D.C.** (5 september 2018) Eindrapportage Quickscan-tool drainagetechnieken. referentie: 100710/18013.54.
- van Meurs, G.A.M., Niemeijer, H., van Meerten, J.J., Langhorst, O.S., Meuwese, H.D.C.** (mei 2018) POV Drainagetechnieken.

Summary Designing drainage systems for dikes with an online quick scan tool

Drainage systems for dikes control the phreatic groundwater level or the groundwater head in the aquifer below the top confining layer. This can reduce the risk of dike failure through piping. Drainage systems are not often considered in the early phases of dike reinforcement projects because decision makers are not familiar with the design and costs of such systems. This is unfortunate because drainage-based solutions can be advantageous when compared to traditional reinforcement methods. One advantage is the much smaller footprint of a drainage-based solution compared to increasing the width or height of a revetment. An online tool (www.drainagequickscan.nl) was developed to help decision makers gain insight into drainage-based solutions. The tool calculates the extra discharge for three types of drainage system and estimates the life cycle costs of these systems. The three different drainage systems are vertical wells, horizontal drains, and a gravel ditch. The discharge is calculated using groundwater models created with the open source Python module TimML, an analytic element model for multi-layer groundwater simulations. New analytic elements were added to TimML to allow simulations in a cross-section. This article describes the elements that were added to TimML and how the geohydrological calculations were conducted.

Auteurs

DAVÍD BRAKENHOFF

Artesia, Korte Weistraat 12, 2871 BP Schoonhoven
d.brakenhoff@artesia-water.nl

HENDRIK MEUWESE

Witteveen+Bos, Postbus 2397 3000 CJ Rotterdam
hendrik.meuwese@witteveenbos.com

MARK BAKKER

Technische Universiteit Delft, Stevinweg 1, 2628 CN Delft
mark.bakker@tudelft.nl