

Darcy op de helling: hoe ver reikt vernatting van beekdalen?

JORIS SCHAAP EN JAN VAN BAKEL

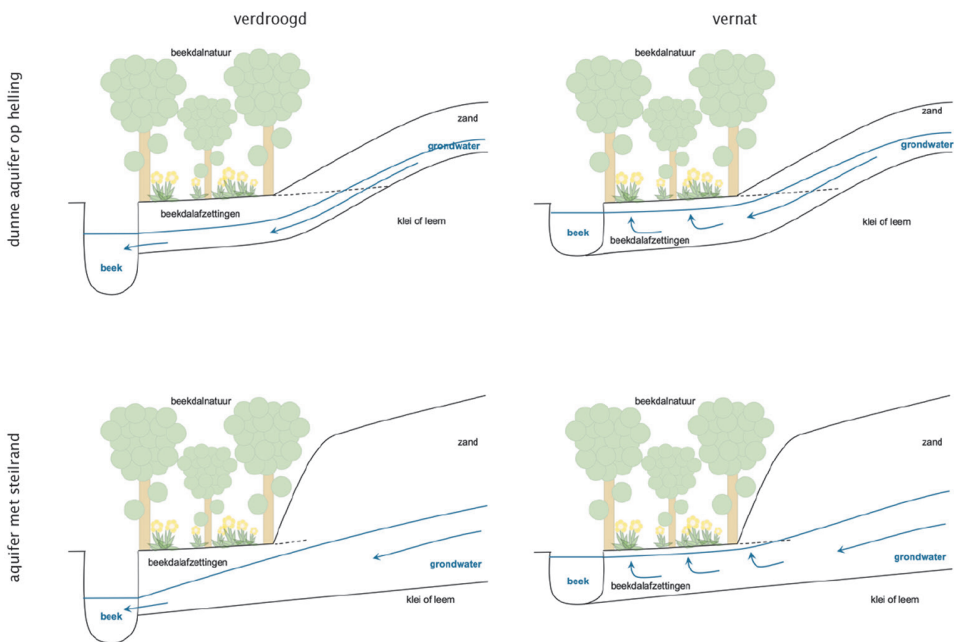
Hoe ver reikt grondwaterstandsverhoging door in een beekdal, als er vernattingsmaatregelen zoals het verhogen van de beekbodem en/of hogere beekpeilen zijn voorzien? In dit artikel stellen we een methode voor die hydrologische ingrepen in het oppervlaktewaterstelsel vertaalt naar grondwatereffecten in dunne aquifers op aangrenzende hellende percelen: Darcy op de helling. Bij wijze van voorbeeld beschouwen we twee beekdalsystemen in Natura2000-gebieden in Twente, die veelvuldig voorkomen bij stuwwallen met een ondiepe hydrologische basis: 1) een dunne aquifer op een helling en 2) een dikkere aquifer op een helling met een steilrand. Met elementaire hydrologie laten we zien dat de doorwerking relatief beperkt is in hellende gebieden en dat vernatting van beekdalen te bereiken is zonder grote natschade aan hellende agrarische percelen.

Artikel

Inleiding

Beekdalen zijn door hun ligging in het landschap van nature rijk aan veel bijzondere plantensoorten die specifieke eisen stellen aan vochtigheid, zuurgraad en voedselrijkdom. In veel beekdalen komen kwelafhankelijke soorten voor, die afhankelijk zijn van continu natte omstandigheden, het vaak basenrijke grondwater en periodieke overstromingen. Tegenwoordig heeft deze bijzondere vegetatie echter regelmatig te lijden onder verdroging: door te diepe ontwatering van (gekanaliseerde) beken zijn grondwaterstanden in het beekdal te laag, komt (basenrijk) grondwater niet meer tot in de wortelzone en overheersen droge en nutriëntenminnende soorten (afbeelding 1). Het gevolg is een verlies aan biodiversiteit.

Natuurorganisaties en overheden willen verdroogde beekdalen en hun vegetatie herstellen, onder andere om Natura2000-doelen te realiseren. Eén van de meest voorkomende maatregel is het verhogen van de beekbodem en daarmee het oppervlaktewaterpeil. Maar wat is het effect van deze verhoging op het grondwater in het beekdal? Dat is een belangrijke vraag voor het inschatten van natuurherstel, maar ook voor eventuele natschade op nabijgelegen landbouwpercelen. Vooral de boven- en middenlopen van beken komen vaak voor in (licht) hellend gebied, waarbij het beekdal is ingesleten in een hoger liggende omgeving. Wij stellen een methode voor om het effect van een oppervlaktewaterstandsverhoging op de grondwaterstand in hellende gebieden te voorspellen: Darcy op de helling. Hierbij leggen we de focus op verhoging van grondwaterstanden. Met elementaire hydrologie en twee praktijkvoorbeelden van beeksystemen op de stuwwallen van Twente laten we zien dat de doorwerking in hellende gebieden relatief beperkt is.



Afbeelding 1 Bijzondere vegetatie in beekdalen lijdt onder verdroging: door te diepe ontwatering van (gekanaliseerde) beken zijn grondwaterstanden in het beekdal te laag en komt (basenrijk) grondwater niet meer in de wortelzone (afbeeldingen links). Een veel gebruikte maatregel is om de beekbodem te verhogen (rechts). In dit artikel behandelen we een methode om de grondwaterverhoging te bepalen in twee typische beekdalsituaties: een beek met een dunne hellende aquifer (boven) en een beek in een ingesleten beekdal met een steilrand (onder).

Beeksystemen in Oost-Nederland

In Noordoost-Twente ontspringen veel beken die door beekdalen naar rivieren als de Regge en de Dinkel stromen. Veel van deze beken ontspringen op de hoger gelegen stuwwallen van Oost-Nederland, zoals de stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal-Enschede. Dit stuwwallen-beekdalenlandschap bevat veel reliëf, waardoor bij sterke gradiënten bronnen en permanente kwel voorkomen. Een deel van de beekdalen is in de tweede helft van de twintigste eeuw in het kader van ruilverkavelingen genormaliseerd en verdiept ten behoeve van een betere ontwatering van landbouwpercelen. Tegenwoordig bestaat een deel van het stuwwallen-beekdalenlandschap uit natuurgebieden met een Natura2000-beschermingsstatus.

De stuwwallen van Ootmarsum en Oldenzaal-Enschede bestaan voor een groot deel uit opgestuwde en zeer slecht doorlatende tertiaire klei en keileemafzettingen. Het verschil tussen de stuwwal van Ootmarsum en die van Oldenzaal-Enschede is vooral de diepte van de hydrologische basis. Bij Ootmarsum is het doorlatende pakket ongeveer 1 - 10 m dik, terwijl bij Oldenzaal-Enschede de aquifers over het algemeen zeer dun zijn, in de orde van 0,5 - 2 m dik. Het pakket bestaat veelal uit tertiair grof zand of grind en dekszandafzettingen. In de dalen van de stuwwal komen fluvio-periglaciale en beekafzettingen voor, die heterogeen van aard en over het algemeen goed doorlatend zijn. Grondwater kan door de doorlatende afzettingen (lateraal) naar beken en sloten stromen. Omdat het stuwwallen-beekdalenlandschap

sterk geaccidenteerd is, is de helling in het terrein een belangrijke sturende factor voor de stroming van het (grond)water.

Voor dit gebied is geen geschikt regionaal grondwatermodel beschikbaar. De effecten van inrichtingsmaatregelen, zoals peilverhoging of beekboderverhoging, moeten wel in beeld gebracht worden om de vernatting van beekdalnatuur te kwantificeren en om eventuele natschade op nabijgelegen landbouwpercelen te berekenen. Daarom stellen we in dit artikel een methode voor die hydrologische ingrepen in het oppervlaktewatersysteem vertaalt naar grondwatereffecten in het bovenste watervoerende pakket (aquifer) op de aangrenzende *hellende* percelen. Dit is een conceptuele benadering waarbij de praktijksituatie vereenvoudigd is tot een aquifer op een helling die gedraineerd wordt door een waterloop. In dit artikel beschouwen we twee beekdalsystemen die veelvuldig voorkomen bij stuwwallen met een ondiepe hydrologische basis: 1) een dunne aquifer op een helling, en 2) een dikkere aquifer op een helling met een steilrand (zie afbeelding 1).

Theorie

Voor het berekenen van de stroming van grondwater op een helling gaan we uit van een stationaire situatie die voldoet aan de volgende elementaire hydrologische wetmatigheden:

- de wet van Darcy, en
- het continuïteitsprincipe.

Voor grondwaterstroming geldt zoals bekend de **wet van Darcy** (Darcy, 1856), die met de aanname van Dupuit (de verticale component van grondwaterstroming is te verwaarlozen ten opzichte van de horizontale component) tot de grondwaterstromingsvergelijking voor het niet-lineaire debiet q (in m^2/d) leidt:

$$q = -kh \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

Waarbij:

q debiet (m^2/d)

k doorlatendheid (m/d)

h stijghoogte (m)

x afstand tot oppervlaktewater (m)

De theorie van grondwaterstroming in hellend terrein is door Boussinesq (1877) geformuleerd op basis van de Darcy-vergelijking, waarbij het coördinatenstelsel evenwijdig aan de hellende ondoorlatende laag staat. Voor meer achtergrondinformatie over deze vergelijking en de afleiding, zie onder andere Childs (1971). In de Nederlandse situatie met een geringe hellingshoek (< 5 graden) is het verantwoord Darcy toe te passen, met de x -as horizontaal. Hierbij veronderstellen we dat de dikte waarover verzadigde grondwaterstroming plaatsvindt (h_d) niet loodrecht aan de helling is, zoals Boussinesq veronderstelt, maar loodrecht op het x -vlak zoals in afbeelding 2 is weergegeven. Wij noemen deze benadering 'Darcy op de helling'. Bij grondwaterstroming in een helling maken we verschil tussen de stijghoogte h waarover de verzadigde stroming plaatsvindt (h_d) en de stijghoogte h waarvan we de gradiënt dh/dx bepalen. De grondwaterstand $h(x)$ is afhankelijk van $h_d(x)$ en de

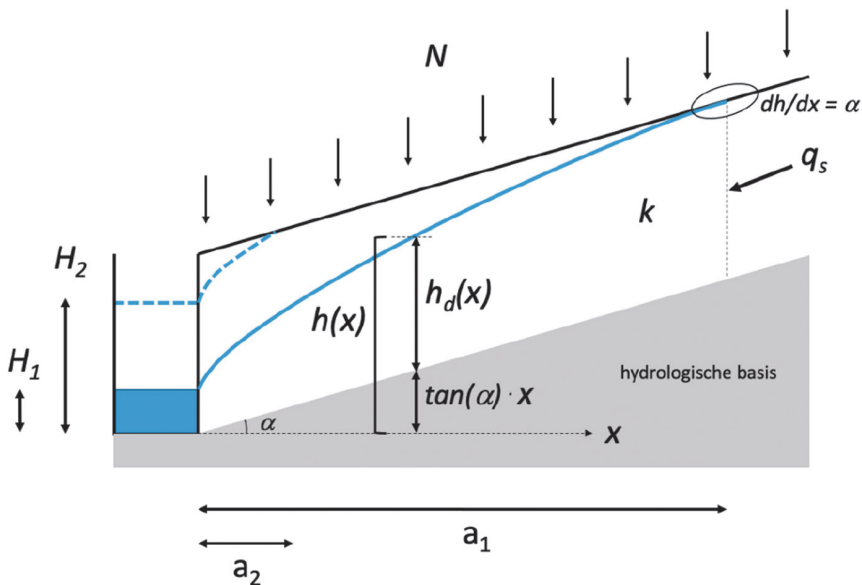
hoogte van de hellende hydrologische basis met hellingshoek α (zie afbeelding 2):

$$h(x) = h_d(x) + \tan(\alpha) \cdot x \quad (2)$$

Invullen in formule 1 voor het debiet geeft:

$$q = -k(h(x) - \tan(\alpha) \cdot x) \frac{dh}{dx} \quad (3)$$

In de situatie van een dunne en hellende aquifer, is de grondwaterstand op afstand x van de watergang afhankelijk van het oppervlaktewaterpeil H , de doorlatendheid k , de hellingshoek α , de neerslag N (om precies te zijn, de grondwateraanvulling) en de toestroming van een maximale hoeveelheid grondwater q_s vanaf de bovenliggende helling. Deze situatie is schematisch weergegeven in afbeelding 2.



Afbeelding 2 De grondwaterstand in een dunne hellende aquifer schematisch weergegeven. De grondwaterstand met stijghoogte $h(x)$ is afhankelijk van het oppervlaktewaterpeil H , doorlatendheid k , de dikte van verzadigde grondwaterstroming $h_d(x)$, de hellingshoek α , de neerslag N en de toestroming van een maximale hoeveelheid grondwater q_s vanaf de bovenliggende helling.

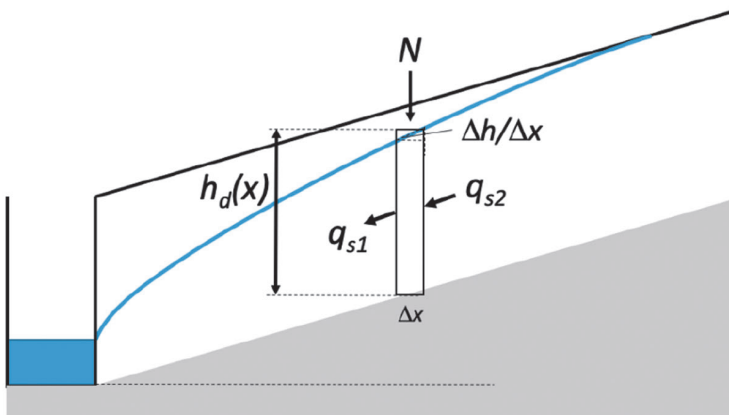
Waarbij:

- $H_{1,2}$ oppervlaktewaterpeilen (m)
- $h(x)$ grondwaterstand in de aquifer (m)
- $h_d(x)$ dikte verzadigde grondwaterstroming (m)
- k doorlatendheid van de bodem (m/d)
- N neerslag (m/d)
- q_s waterstroming vanaf helling (m/d)
- $a_{1,2}$ afstand tot volledig verzadigd pakket (m) waar geldt $dh/dx = \alpha$
- α hellingshoek ($^\circ$)

Voor het discretiseren van de grondwaterstroming maken we gebruik van het **conti-**

nuiteitsprincipe. Dit houdt in dat in een stationaire situatie de massa vloeistof die een bepaald volume-element instroomt, gelijk is aan de massa die datzelfde volume uitstroomt. In het geval van pseudo-tweedimensionale stroming wordt dat een oppervlakte-element in plaats van een volume-element. Voor de dunne aquifer op de helling discretiseren wij ons domein naar elementen met hoogte $h_d(x)$ en breedte Δx (zie afbeelding 3). De ingaande fluxen zijn de netto neerslag ($N \cdot \Delta x$) en instroming vanaf hoger gelegen gebieden (q_{s2}), de uitgaande flux is de uitstroming naar het lager gelegen gebied (q_{s1}).

Voor het oplossen van de wet van Darcy op de helling zijn daarnaast randvoorwaarden nodig. De linker randvoorwaarde wordt bepaald door het oppervlaktewaterpeil H . De rechter randvoorwaarde is gelegen op die plek waar de $\Delta H/\Delta x$ gelijk is aan de hellingshoek α . Vanaf dit punt is de aquifer volledig verzadigd en is het debiet maximaal. Het maximale debiet dat van de helling af kan stromen (q_s) is afhankelijk van de maximale dikte van de aquifer D , de doorlatendheid k en de helling. Deze laatste factor bepaalt immers de maximale $\Delta H/\Delta x$ in de wet van Darcy. Het achterland tot de waterscheiding (in veel gevallen een greppel of sloot) waar neerslag kan infiltreren en voor grondwateraanvulling zorgt moet daarvoor wel groter of gelijk zijn aan deze q_s . De q_s is gemaximaliseerd omdat er oppervlakkige afstroming optreedt zodra het dunne doorlatende pakket bovenstrooms verzadigd raakt (of de infiltratiecapaciteit overschreden wordt). We maken de aanname dat oppervlakkige afstroming direct in de beek terecht komt en niet meer infiltreert naar het grondwater.



Afbeelding 3 Het continuïteitsprincipe (voor een 2D controlevolume) toegepast op de grondwaterstroming in een hellende aquifer.

Grondwateraanvulling draagt bij aan de grondwaterstroming over de afstand waarop de grondwaterspiegel kan opbollen (afstand a_1 in afbeelding 2) en is dus afhankelijk van de ligging van de rechter randvoorwaarde. Deze randvoorwaarde bevindt zich op de plek waar $\Delta H/\Delta x$ gelijk is aan hellingshoek α en waar de aquifer volledig verzadigd is. Het totale debiet dat naar de beek stroomt hangt af van het inkomende debiet van de rechter randvoorwaarde q_s en de grondwateraanvulling over het opbollende deel (a) van het freatisch pakket:

$$q = q_s + N \cdot (a - x) \quad (4)$$

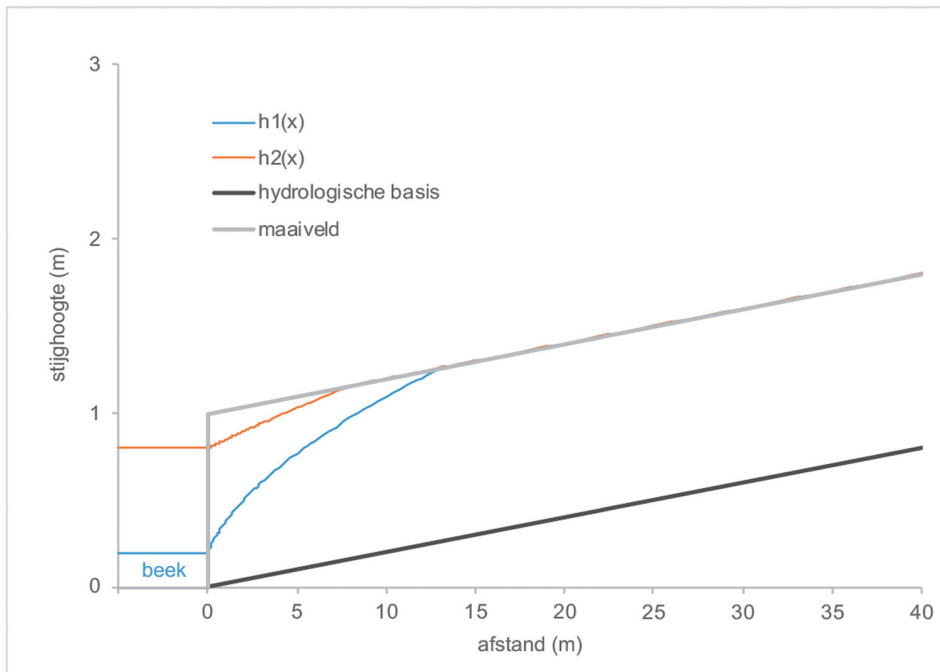
Deze term invullen in formule 3 en omschrijven levert de uitdrukking voor de helling van het freatisch vlak:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{q_s + N(a - x)}{k \cdot (\tan(\alpha) \cdot x - h(x))} \quad (5)$$

De helling van het freatisch vlak is per afstandstap Δx numeriek doorgerekend met de eindige-volumemethode. De afstand waarbij het grondwater het maaiveld bereikt (de rechter randvoorwaarde) is op voorhand niet bekend, dus deze moet iteratief bepaald worden.

Toepassing 1: Dunne aquifer op helling

Stel een situatie voor waarbij een beekbodemophoging zorgt voor een beekpeilverandering van 0,2 m naar 0,8 m, waarbij de oorspronkelijke beekbodemdiepte de basis is. Hierbij gaan we uit van een stationaire wintersituatie met een grondwateraanvulling van 2,5 mm/dag. Dit komt ongeveer overeen met een GHG-situatie. De dikte van het doorlatende pakket D is 1 m en de hellingshoek is $1,1^\circ$. De afstand tussen het begin van de volledig verzadigde aquifer (bij rechter randvoorwaarde waar $\Delta H/\Delta x = \alpha$) tot de eerstvolgende bovenstroomse waterscheiding is minimaal 200 m. Deze afstand gebruiken we om te bepalen of de neerslag die bovenstrooms valt voldoende is om voor grondwater aan het maaiveld te zorgen bij de rechter randvoorwaarde q_s . De verzadigde doorlatendheid stellen we op 1 m/dag. Deze



Afbeelding 4 De afname van de invloedsafstand van een beekpeilverhoging tijdens een natte wintersituatie. In de huidige situatie bij een beekpeil van 0,2 m zorgt dat voor een opbolling tot een afstand van 12 m in het perceel (h_1). Bij ophoging van het beekpeil naar 0,8 m is de verzadiging in het perceel bereikt bij een afstand van 8 m (h_2).

randvoorwaarden komen goed overeen met praktijksituaties van beekdalen op de stuwwal van Oldenzaal-Enschede. Met deze voorwaarden en iteratief doorrekenen van het model komt het grondwater op 12 m van de beek aan maaiveld. Deze orde van grootte is in overeenstemming met de wintersituatie in het veld, waarbij hellende percelen op korte afstand van de beek al verzadigd zijn. In een toekomstige situatie met beekpeilverhoging van 0,6 m dagzoomt de grondwaterstand op 8 m afstand van de beek (zie afbeelding 4). Hierdoor is er nauwelijks natschade op het rechts gelegen agrarische perceel.

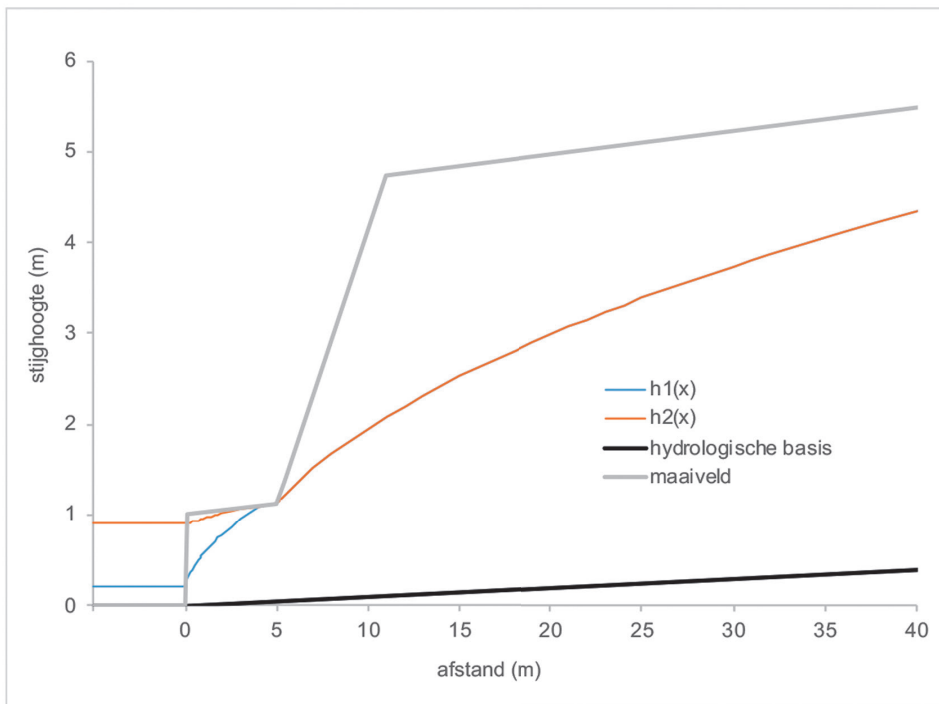
Toepassing 2: Aquifer met steilrand

Het beekdal is een relict van een smeltwaterdal en is dus veel breder dan de huidige beek, met een steilrand gevormd door smeltend gletsjerwater. Een voorbeeld van zo'n beek is de Hazelbekke op de Stuwwal van Ootmarsum. In het veld is duidelijk waarneembaar dat aan de rand van het beekdal grondwater uittreedt. Een indirect bewijs is het voorkomen van paarbladig goudveil (*Chrysosplenium oppositifolium*), een kwelminnende soort die alleen voorkomt in permanent natte omstandigheden (zie afbeelding 5).



Afbeelding 5 Beekdalrand met paarbladig goudveil tussen zwarte els in het beekdal van de Hazelbekke op de stuwwal van Ootmarsum.

De grondwaterstroming in een beekdal met steilrand is gemodelleerd met een pseudo-tweedimensionaal model met de eigenschappen zoals die bij de Hazelbekke voorkomen: de dikte van de aquifer en het doorlaatvermogen zijn zodanig aangepast dat bij een neerslagoverschot van 1 mm/d er een opbolling ontstaat die ook in het veld waargenomen is. In het veld bij de Hazelbekke zijn op ongeveer die afstand enige bronnen aanwezig die permanent water voeren. Vervolgens is het effect van een verhoging van de beekwaterstand van 0,8 naar 0,1 m - mv gesimuleerd. In afbeelding 6 is het resultaat van deze berekening weergegeven. Het grondwater dagzoomt aan de rand van het beekdal. Daar treedt ook het meeste grondwater uit. Circa 80% van het neerslagoverschot van het bovenstroomse gebied wordt hier afgevangen. De rest stroomt door naar de beek en treedt dus niet uit als kwel, mits het doorlaatvermogen niet afneemt in de richting van de beek. Niet zichtbaar in de afbeelding is dat op ca. 150 m afstand van de beek ook grondwater aan het maaiveld uittreedt, zodra de grondwaterspiegel het maaiveld raakt in het hoger gelegen gebied. Buiten het beekdal aan de rechterzijde van de steilrand is geen effect van een beekpeilverhoging op de grondwaterstanden waarneembaar.



Afbeelding 6 Situatie van een beekdal met steilrand waarbij de grondwaterstand voor en na beekpeilverhoging is weergegeven met respectievelijk h_1 en h_2 .

Het effect van de verhoging van de beekwaterstand op de grondwaterstand beperkt zich dus tot het beekdal. Het bolle verloop van de grondwaterstand in het beekdal bij een laag beekpeil is een gevolg van het afnemende doorlaatvermogen (D neemt af) bij lager wordende grondwaterstanden richting de beek. Bij een hoog beekpeil is de afname van het doorlaatvermogen richting de beek geringer en is het verloop van de grondwaterstand minder bol. Maar door het hogere beekpeil kan de grondwaterstand het maaiveld dichter bij de beek aansnijden. In beide gevallen wordt het doorstroomd debiet bepaald door het doorlaatvermogen op de plek waar het grondwater het maaiveld aansnijdt en de helling van het maaiveld in het beekdal.

Ook blijkt uit simulaties dat hydrologische veranderingen buiten het beekdal geen noemenswaardig effect hebben op de grondwaterstand en de grondwaterstroming in het beekdal zelf. Een verhoging van de grondwateraanvulling buiten het beekdal leidt bijvoorbeeld tot meer uittredend grondwater aan de rand van het beekdal, maar heeft geen effect op de grondwaterstand in het beekdal. De steilrand deelt het hydrologisch systeem op in twee werelden die maar weinig contact met elkaar hebben.

Discussie en conclusie

De voorgestelde methode is bedoeld voor het kwantificeren van de invloedsafstand van peilveranderingen op de grondwaterstand in hellende gebieden met dunne aquifers en in een stationaire situatie. Voorwaarde is dat de dikte van het doorlatende pakket en de profielopbouw bekend zijn en het grondwater geschemati-

seerd kan worden in één hellende aquifer. De rekenvoorbeelden laten zien dat een beekpeilverhoging in hellende gebieden met dunne aquifers of steilranden maar beperkt doorwerkt op de grondwaterstand. De berekening is wel gevoelig voor een aantal factoren die afgeleid moeten worden vanuit de veldsituatie. Dan gaat het met name om de afstand van volledige verzadiging van het freatische pakket (rechter randvoorwaarde) tot de waterscheiding, de doorlatendheid k , de dikte van het doorlatende pakket en de vereenvoudiging tot een constante hellingshoek. Deze variabelen zijn in de praktijk niet altijd nauwkeurig te bepalen. Een gevoeligheidsanalyse op deze parameters kan inzicht geven in de bandbreedte van mogelijke uitstralingseffecten. Daarnaast verdient het aanbeveling om de effecten tijdens drogere periodes (in het traject GHG -> GLG) te onderzoeken. Daarvoor moet het huidige model aangepast worden, omdat bij neerslagtekort de rechter randvoorwaarde niet meer voldoet. Als grondwata aanvulling uitblijft ontstaat er een holle grondwaterspiegel en reikt het grondwater niet meer tot aan maaiveld, waardoor de waterstroming vanaf de helling q_s niet meer toereikend is.

Een cruciale aanname in de methode is dat de veronderstelling van Dupuit opgaat, ook bij de beekdalrand waar veel water uittreedt. In essentie treedt daar een radiale stroming op naar het knikpunt in de helling bij de steilrand waarbij de verticale component van de stromingsrichting niet zonder meer te verwaarlozen is. Het hangt ook af van de dikte van de aquifer en de aanwezigheid van weerstandbiedende laagjes (anisotropie) in welke mate de Dupuit-veronderstelling opgaat. Er is geen reden aan te nemen dat bij de steilrand weerstandbiedende lagen aanwezig zijn, het is immers een erosierand. Een manier om de extra weerstand als gevolg van radiale stroming toch in te schatten kan met de equivalentlaag volgens Hooghoudt (1940). Een eenvoudige rekensom met reële waarden (h_a is 2 m, L is 40 m en natte omtrek 0,5 m) leert ons dat de equivalentlaagdikte d 1,7 m is. Deze reductie van 15 % ten opzichte van h_a betekent dat de berekende opbolling op 40 m van de steilrand in werkelijkheid 15% hoger is en het grondwater op geringere afstand van de steilrand zal dagzomen. Ook zal er 15% minder grondwater aan de steilrand uittreden. Voorbij de steilrand, richting de beek, zal het doorstroomd debiet echter gelijk blijven. Een tweedimensionale modellering die de verticale component van de grondwaterstroming niet verwaarloost, kan meer inzicht bieden in het effect van radiale stroming.

Wat betreft kwel is de gangbare opvatting dat de kwelintensiteit in beekdalen hoog is, en essentieel voor het voorkomen van kwelafhankelijke beekdalnatuur. Daarnaast wordt vaak verondersteld dat door verhoging van het beekpeil de kwel in het beekdal sterk toeneemt, ten koste van de toestroming van grondwater naar de beek zelf. De modelresultaten met 'Darcy op de helling' indiceren wel een duidelijke verhoging van de grondwaterstand in het beekdal door verhoging van het beekpeil, maar slechts een beperkte invloed op de kwelstroom naar het beekdal. De resultaten van deze aanpak kunnen betekenen dat we met andere ogen moeten kijken naar de noodzaak van hydrologische maatregelen in en rond het beekdal ten behoeve van vernatting van natuur.

Literatuur

- Boussinesq, J.** (1877) Essai sur la theorie des eaux courantes; in: *Mem. Acad. Sci. Inst. Fr.*, 23, 252-260.
- Childs, E.C.** (1971) Drainage of groundwater resting on a sloping bed, in: *Water Resources Research*, 5, 1256-1263.
- Darcy, H.P.G.** (1856) Les fontaines publiques de la ville de Dijon; Parijs.
- Hooghoudt, S.B.** (1940) Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond, in: *Versl. Landbouwk. Ond.*, 46, 515-707.

Summary Darcy on an inclined plane: the influence of raised surface water levels on groundwater levels in stream valleys.

What's the influence of raised surface water levels or raised flow beds on the groundwater levels in a stream valley? In this paper we propose a method to determine the effect of raised surface water levels on groundwater levels in shallow and inclined aquifers: Darcy on an inclined plane. The method is demonstrated with two practical examples from the field. We consider two stream valley systems in Natura2000 conservation areas in the Eastern part of the Netherlands, which are frequently found in regions with ice-pushed ridges and a shallow hydrological base: 1) a shallow inclined aquifer and 2) a thicker inclined aquifer with a deep eroded valley and a steep edge. With elementary hydrology we show that the lateral effects of raised surface water levels on groundwater levels are relatively limited in sloping areas, and that re-wetting of stream valleys can be achieved without major oxygen stress to adjacent inclined agricultural land.

Auteurs

JORIS SCHAAP
Badus Bodem & Water, Wageningen
(info@badus.nl)

JAN VAN BAKEL
De Bakelse Stroom, Wageningen
(info@debakelsestroom.nl)