

Begrijpen we het watersysteem?

Floris Verhagen¹, Teun Spek², Flip Witte³,
Bernard Voortman³, Eddy Moors⁴, Erik Querner⁴,
Gé van den Eertwegh⁵ en Jan van Bakel⁶

De waterbel van De Veluwe staat volop in de belangstelling. Deze waterbel zorgt voor een continue stroom naar de beken en sprengen. Maar snappen we wel voldoende hoe het watersysteem werkt? Op basis van twee werksessies is beschikbare kennis op een rij gezet en zijn kennisleemtes gesignaleerd.

De conclusie is dat we nog lang niet alles weten over de verdamping en over het transport van water in de onverzadigde zone, twee processen die van grote invloed zijn op de beekafvoer.

Inleiding

Kunnen we de werking van het watersysteem op de Veluwe verklaren en beschrijven op basis van de huidige proces- en systeemkennis en de beschikbare metingen van grondwaterstanden en beekafvoeren? Om deze vraag te beantwoorden heeft de provincie Gelderland het initiatief genomen om het watersysteem van de Veluwe goed onder de loep te nemen. In de afgelopen jaren is veel onderzoek gedaan naar delen van het systeem, vaak naar aanleiding van actuele beleidsvragen. De enige manier waarop naar het geheel werd gekeken was door modellen te ontwikkelen. Praktijkkennis, zoals via de analyse van meetreeksen, kreeg minder aandacht. De provincie vond het tijd om, los van de actuele vragen, met een aantal experts rond de tafel te gaan zitten om zo tot gezamenlijke conclusies over het functioneren van het systeem als geheel te komen. En waar dat niet lukte om tot aanbevelingen te komen voor de programmering van onderzoek.

¹ Royal HaskoningDHV, Amersfoort (floris.verhagen@rhdhv.com)

² Provincie Gelderland, Arnhem (t.spek@gelderland.nl)

³ KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein
(Flip.witte@kwrwater.nl en b.voortman@kwrwater.nl)

⁴ WUR-Alterra, Wageningen (eddy.moors@wur.nl en erik.querner@wur.nl)

⁵ KnowH2O, Berg en Dal (eertwegh@knowh2o.nl)

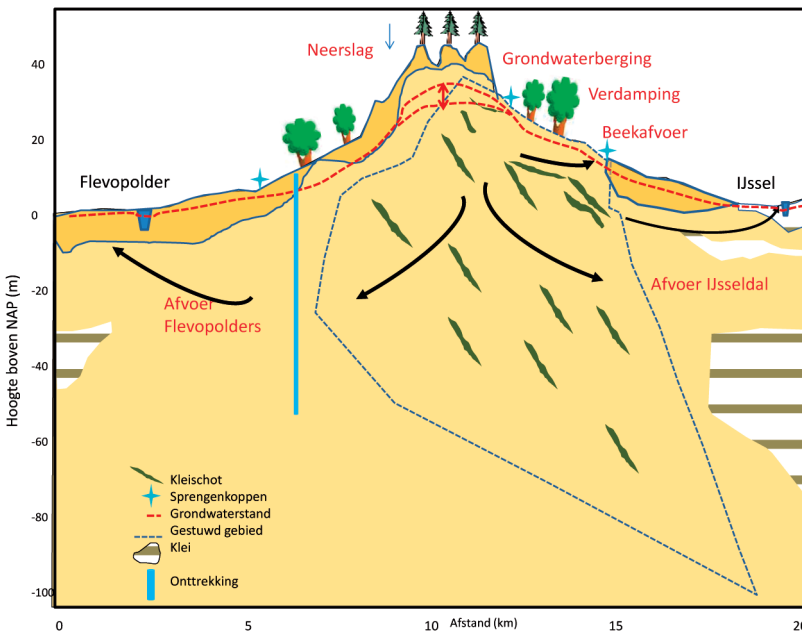
⁶ Bakelse Stroom, Wageningen (info@debakelsestroom.nl)

Deelnemers werksessies

Jan van Bakel (Bakelse Stroom), Almer Bolman (Waterschap Vallei en Veluwe), Gé van den Eertwegh (FutureWater, thans KnowH2O), Lisette Eikelenboom (Waterschap Vallei en Veluwe), Jolijn van Engelenburg (Vitens), Rien Helderma (student Larenstein), Frederik Jansen (student Larenstein), Jasper Jansen (RHDHV), Eddy Moors (Alterra), Theo van de Nes (Stichting tot behoud beken en Veluwse sprengen en beken), Teun Spek (Provincie Gelderland), Floris Verhagen (RHDHV), Bernard Voortman (KWR), Flip Witte (KWR), Erik Querner (Alterra). Rob Bonte (RHDHV) leidde de bijeenkomsten.

Modelstudies om het watersysteem van de Veluwe te begrijpen zijn uiterst waardevol. Zo is al in de jaren tachtig een regionaal grondwatermodel opgezet ten behoeve van de systeembeschrijving van de Veluwe (Iwaco, 1992). Het proefschrift van Hans Gehrels (1999) is een standaardwerk waarin veel van de belangrijkste principes van de werking van het Veluwewatersysteem zijn uitgelegd. In 2012 is een start gemaakt met een nieuwe regionaal grondwatermodel (AZURE) dat de gehele Veluwe en zijn omgeving bevat. Na deze modelstudies zijn we echter tot de conclusie gekomen dat het nog steeds erg moeilijk is om de werking van het grondwatersysteem te doorgronden en dat het niet goed genoeg lukt het systeem op een gewenste ruimtelijke en temporele wijze te simuleren. Daarnaast blijft het een uitdaging de waterbalans kloppend te krijgen.

Daarom heeft de provincie een groep van 15 wetenschappers en gebiedskenners tweemaal een dag bij elkaar gebracht. Tussentijds werd 'huiswerk' uitgevoerd op deelonderwerpen. Na dialoog en studie ontstond overeenstemming over wat we wel, maar ook wat we nog niet weten over het watersysteem van de Veluwe. Dit artikel geeft een weerslag van de resultaten van deze bijeenkomsten. Na een schets van het water-



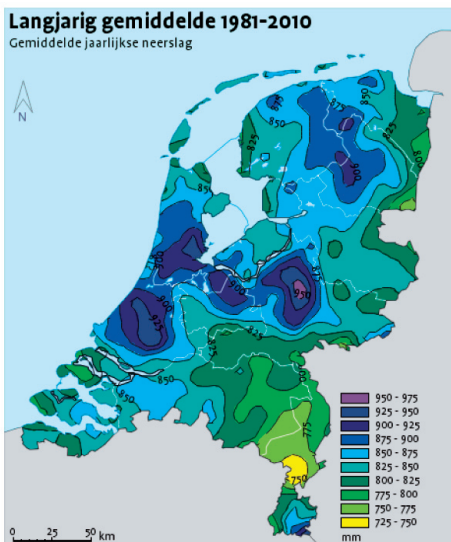
Afbeelding 1: Schematische voorstelling van de geohydrologie van de Veluwe.

systeem volgen we stapsgewijs de route van het water, van regen en verdamping, via stroming in de onverzadigde zone naar het grondwater tot de afvoer via beken en de diepere ondergrond naar de omliggende gebieden. We beschrijven wat we weten en begrijpen over het watersysteem, maar ook wat we nog niet begrijpen en nader moeten onderzoeken.

Voor de waterbalans en de beschrijving van het Veluwe-systeem hebben we keuzes gemaakt voor de systeemgrenzen. De bovenkant is het maaiveld met de vegetatie, een grenslaag waar vocht via de vegetatie wordt uitgewisseld met de atmosfeer (Afbeelding 1). Als ondergrens kiezen we de ondoorlatende basis (dieper dan 100m-NAP), als zijgrenzen de plaatsen waar het infiltrerende water uiteindelijk aan maaiveld kan komen om daarna uit te treden in een beek of spreng. We nemen de onttrekkingen uit het grondwatersysteem mee en bespreken de transportprocessen van water in het ondergrondse systeem.

Neerslag

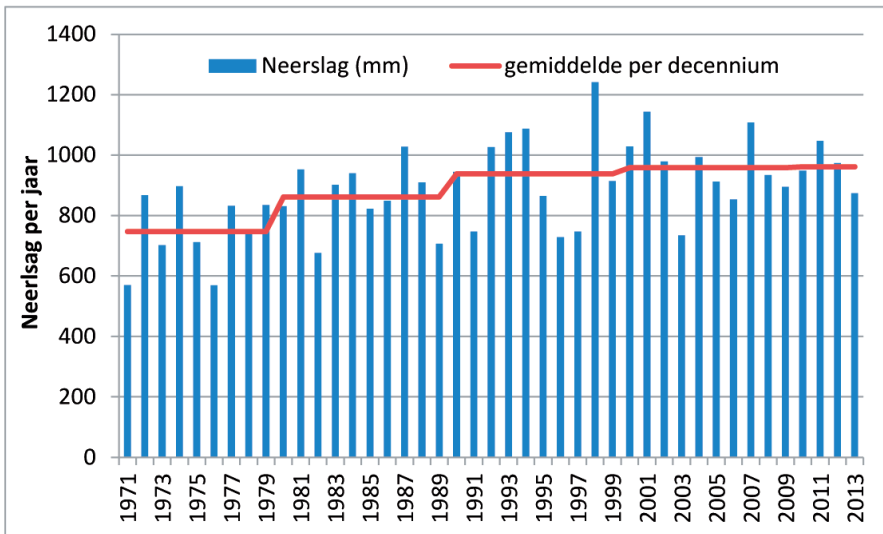
Op de Veluwe valt langjarig gemiddeld de meeste neerslag van heel Nederland (afbeelding 2). De hoeveelheid neerslag verschilt sterk per jaar. In het droge jaar 1976 viel het minste regen, voor station Deelen was dat 569 mm/j. In het jaar 1998 viel daar ruim twee keer zo veel neerslag, wel 1241 mm/j.



Afbeelding 2: Gemiddelde neerslag in Nederland voor de periode 1981-2010 (bron KNMI, 2011).

De gemiddelde jaarlijkse neerslagsom per decennium laat een opgaande lijn zien van ongeveer 750 mm/j in de zeventiger jaren van de vorige eeuw tot ruim 950 mm/j in het lopende decennium. Neerslag is de grootste post op de waterbalans van de Veluwe, een nauwkeurige schatting hiervan is van wezenlijk belang. De onzekerheid waarmee de neerslag op een punt van een station bepaald kan worden hangt af van factoren als de opstelling van de regenmeter en voorkomende windvelden (De Bruin, 1977; Buishand en Velds, 1980) en bedraagt 5 à 10%. Voor de Veluwe als gebied moeten we een vlakdekkende schatting maken van de neerslag, om de zogenaamde gebiedsneerslag te bepalen.

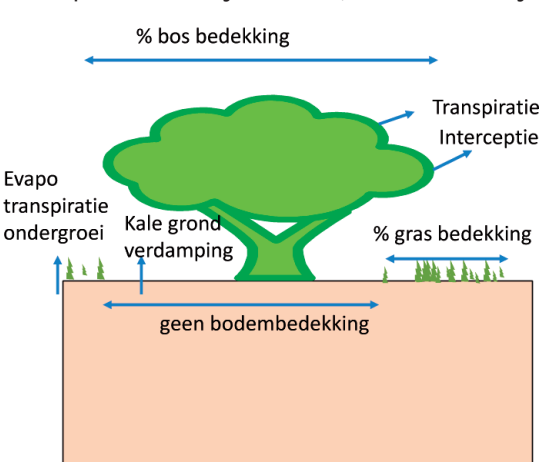
Hiervoor werden voorheen veelal Thiessenpolygonen gebruikt. De onzekerheid in de gebiedsneerslag wordt vooral bepaald door de punten en daarmee gebieden waar de neerslag niet wordt gemeten. De ruimtelijke interpolatie van de meetdata is dan van invloed op de onzekerheid. De onzekerheid kan verkleind worden door aanvullend gebruik te maken van regenradar-data, die het KNMI sinds ruim 10 jaar beschikbaar heeft. Op de website meteobase.nl kunnen vlakdekkende gegevens gebaseerd op meetstations en radargegevens vanaf het jaar 2000 worden opgevraagd.



Afbeelding 3: Gemiddelde neerslag per jaar gemeten te KNMI station Deelen [mm/j].

Systeemiaag 1: Focus op verdamping

In laag Nederland is de vochtvoorziening van de vegetatie vaak zo goed dat de vegetatie optimaal kan verdampen. De werkelijke (actuele) verdamping is dan vrijwel gelijk aan de potentiële verdamping. Fouten in de berekening van het neerslagoverschot zijn daarom onder normale weersomstandigheden relatief beperkt. Op de Veluwe, met droge zandgronden en een diepe grondwaterspiegel, kan de werkelijke verdamping door vochtgebrek in de wortelzone van de bodem echter drastisch teruglopen. Doordat dit proces moeilijk nauwkeurig na te bootsen is, vooral door gebrek aan kennis over het verdampingsgedrag van de vegetatie bij droogte, zijn er fouten in de grondwateraanvulling te verwachten. Deze kunnen in modellen gecompenseerd worden door modelparameters bij te stellen, maar uiteindelijk kan dit tot verkeerde voorspellingen



Afbeelding 4: Onderdelen van het verdampingsproces.

leiden. Schatting van de werkelijke verdamping is een onderwerp dat de laatste jaren weer sterk onder de aandacht is gekomen. Er wordt momenteel gewerkt aan een NHV-special waarin de meest recente kennis over verdamping is verwerkt. Afbeelding 4 geeft een versimpeld overzicht van de verschillende onderdelen van het verdampingsproces. Water kan verdampen als opgevangen regenwater op de bladeren (interceptie), via de bodem (bodemverdamping), en via de huidmondjes van bladeren (transpiratie). De grootte van de verdamping

wordt behalve door meteorologische omstandigheden en hoeveelheid beschikbaar water (die afhankelijk is van de bodemeigenschappen) bepaald door het type vegetatie of gewas.

Metten van verdamping

Verdamping kan op verschillende manieren bepaald worden. Met remote sensing kan aan de hand van warmtebeelden een schatting worden gemaakt. Of op een veel kleinere schaal kan in een proefopstelling met lysimeters (waterbalans) of micro-meteorologische meetopstellingen (transport van gassen) de verdamping worden bepaald. In de jaren negentig ontstond discussie over de rol van bossen op de verdamping en de grondwaterstand. Daarom is toen door Alterra onderzoek gedaan met micro-meteorologische metingen. Een dergelijke meetopstelling staat sinds 1994 op de Veluwe in het Loobos (nabij Kootwijk) in een gebied met grove den (Moors, 2012). Elders op de Veluwe wordt op een beperkt aantal locaties onderzoek gedaan, zoals bij Arnhem, het Edese bos en het Speulderbos. Met het onderzoek van de afgelopen 20 jaar is veel meer inzicht ontstaan in het verdampingsgedrag van verschillende boomsoorten.

Voor gemiddelde situaties kan in bos de verdamping redelijk geschat worden. Maar de onzekerheid neemt toe in het geval dat de bodem sterk uitdroogt of interceptieverdamping een grote rol speelt (Moors, 2012). De onzekerheden in de berekening van de verdamping worden geschat op 20-40 % (zie o.a. Allen e.a. 2011; Bosveld en Moors, 2014). Dit is de onzekerheid voor een goede schatting op één punt. Voor een afzonderlijk punt is een uitgebreide meetcampagne nodig om inzicht te krijgen in het verdampingsgedrag. Dit is slechts één punt op de Veluwe. Daarmee hebben we nog geen vlakdekkende cijfers om een betrouwbare berekening voor de totale werkelijke verdamping van de Veluwe te maken.

Berekenen van verdamping, de theorie

De werkelijke verdamping meten voor de gehele Veluwe is dus niet mogelijk. Daarom wordt in Nederland vaak teruggegrepen op een modelbenadering. De referentieverdamping is gedefinieerd als de verdamping van een referentiegewas, meestal een kort gewas (10-15 cm hoog gras) dat de bodem volledig bedekt, en waarvan het bladoppervlak droog is en de plantenwortels optimaal van water worden voorzien. De potentiële verdamping van een begroeid oppervlak wordt dan bepaald uit een combinatie van gewasfactoren en referentieverdamping. De potentiële verdamping is de verdamping onder ideale omstandigheden en afhankelijk van het type vegetatie, de bedekking van de bodem en bedekkingsgraad van de bladeren. In werkelijkheid zal er minder water verdampen, wanneer er onvoldoende vocht beschikbaar is voor de vegetatie. Zo ontstaat de werkelijke verdamping.

Verdamping berekend

Ondanks de hiervoor genoemde kanttekeningen is voor de Veluwe met een diepe grondwaterstand de potentiële verdamping berekend voor enkele representatieve situaties

qua bosbedekking, boomsoort en ondergroei (Tabel 1). Te zien is dat de potentiële verdamping van de grove den en het loofbos, de meest voorkomende vegetaties op de Veluwe, potentieel ongeveer evenveel verdampen. Donker naaldbos, zoals sparrenbos, kan meer verdampen, maar dit bostype komt maar beperkt voor op de Veluwe. De mate van ondergroei of de bosbedekking heeft een grotere invloed dan het bostype zelf.

We hebben vervolgens de werkelijke verdamping voor vier voorkomende land/bodemgebruiksvormen op de Veluwe berekend met een 1D-onverzadigdezonemodel en een diepe grondwaterstand, kenmerkend voor de Veluwe.

In tabel 1 is te zien dat hoewel de potentiële verdamping tussen grove den en loofbos relatief weinig verschilt, de grondwateraanvulling onderling veel verschilt. Loofbos geeft ruim 70 mm meer grondwateraanvulling per jaar. Indien er op de hele Veluwe alleen loofbos, en geen naaldbos zou zijn, zou de grondwaterstand in het centrum van de Veluwe tot wel 3 meter stijgen. (Gehrels, 1999). Kale grond en heide verdampen duidelijk minder en geven dus meer grondwateraanvulling dan de bosgebieden.

Type	Bedekking bos (%)	Ondergroei gras (%)	$E_{\text{potentieel}}^7$ (mm/j)	$E_{\text{interceptie}}$ (mm/j)	$E_{\text{transpiratie}}$ (mm/j)	E_{bodem} (mm/j)	$E_{\text{werkelijk}}^8$ (mm/j)	Grondwateraanvulling (mm/j)
Loobos	67	90	788	154	350	284	–	–
Grove den	100	0	818	230	522	66	681	152
	85	50	776	196	443	137	–	–
	70	100	825	161	365	299	–	–
Loofbos	100	0	741	250	425	66	609	224
	85	50	710	212	361	137	–	–
	70	100	771	175	298	299	–	–
Kaal zand	–	–	332	–	–	332	261	569
Heide	–	–	587	61	433	94	494	339

Tabel 1: Gemiddelde jaarlijkse potentiële en werkelijke verdamping (berekend) voor verschillende bossituaties op de Veluwe en het Loobos (Kootwijk).

Vergelijking tussen metingen en berekeningen

De hoeveelheden neerslag en werkelijke verdamping verschillen aanzienlijk per jaar. Voor de locatie Loobos hebben we de gemiddelde werkelijke verdamping uitgerekend en vergeleken met de gemeten verdamping (afbeelding 5). Voor het Loobos bedraagt de berekende jaarlijkse werkelijke verdamping 591 mm voor de periode 1997-2012. De gemeten verdamping op deze locatie bedraagt gemiddeld 557 mm per jaar, dit is 6% minder. Voor 1998, een uitgesproken nat jaar, werd een opvallend lage verdamping gemeten in relatie tot voorgaande jaren en ook tot de berekende hoeveelheid verdamping. Voor een meetpunt waar veel en lang gemeten is, en voor meetpunten met een

⁷ Voor de referentieverdamping zijn gegevens van De Bilt gebruikt en boskarakteristieken van Dolman e.a. (2000). Bron: Querner en Moors, 2013

⁸ Neerslag Harskamp gemiddeld 1951-2013: 833 mm; Worteldiepte bos 2 m; Worteldiepte heide 0.8 m; Diepte van de grondwaterspiegel is 10 meter onder maaiveld



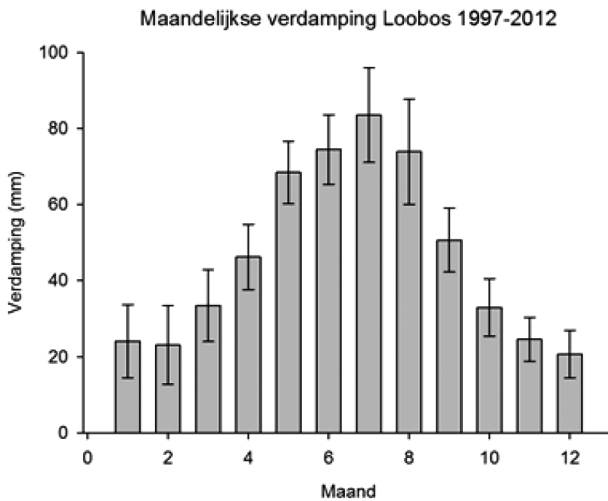
Afbeelding 5: Gemeten en berekende werkelijke verdamping in het Loobos (mm/j) voor de periode 1997-2012 (Querner en Moors, 2013)⁹.

vrij ondiepe grondwaterstand, kunnen we de werkelijke verdamping dus goed berekenen. Maar voor andere punten op de Veluwe is minder bekend. In 2011 is een landelijke vergelijking gemaakt van de werkelijke verdamping via remote-sensing beelden, bestaande (micro)meteorologische meetgegevens op puntniveau met de eddy correlatie methode en diverse hydrologische regionale geohydrologische modellen (STOWA, 2014). De afwijking tussen het NHI en de remote-sensing data is het grootst op de Veluwe. Uit de vergelijking kwamen duidelijke verschillen tussen de remote-sensing data en de modellen. De puntwaarnemingen kwamen veel beter overeen met de remote-sensing data, maar het meetpunt met de grootste afwijking ligt bij het Loobos op de Veluwe. Conclusie is daarom dat we zowel niet zeker weten of we de verdamping goed meten als ook of we de verdamping goed berekenen op de Veluwe.

Door de expertgroep is geconcludeerd dat er nog niet genoeg metingen beschikbaar zijn voor een gebiedsdekkende analyse. Remote sensing, van satellieten tot drones, bieden goede perspectieven om een gebiedsdekkend beeld van de werkelijke verdamping te krijgen.

Bij het bepalen van de verdamping moet rekening worden gehouden met de variabiliteit van het systeem. Zoals eerder getoond, verschilt de verdamping per bostype of landgebruik. Daarnaast varieert de verdamping gedurende de maand (afbeelding 6). In de zes zomermaanden is de verdamping in het Loobos ongeveer 400 mm; in de zes wintermaanden ongeveer 160 mm. Voor het Loobos zit de piek in de verdamping in juli, wanneer de bomen vol in het blad zitten en op volle kracht zijn. Echter voor bijvoorbeeld grasverdamping ziet de curve gedurende het jaar er weer anders uit, met een meer gelijkmatige verdamping gedurende de zomermaanden. Kortom, er is variabiliteit per type vegetatie en per tijdsperiode.

⁹ In de metingen van 1998 ontbreken door de hevige neerslag relatief veel data in de eddy-correlatie metingen; als hiervoor gecorrigeerd wordt dan is de totale verdamping 703 mm



Afbeelding 6: Gemeten maandelijkse verdamping in het Loobos in de periode 1997-2012 (zie voor methodiek Moors, 2012).

Trends in verdamping

De trend van de afgelopen decennia is dat de bosbedekking en de ondergroei met gras en struiken toeneemt. Jaarlijks wordt maar 55% van de bijgroei gekapt (Stichting Probos, 2013). Daardoor neemt de bosbedekking en dientengevolge ook de verdamping toe. Het bosbeheer is de laatste decennia ook aanmerkelijk veranderd. Opstanden van monocultuur hebben plaats gemaakt voor bossen met meer variatie in leeftijd en soorten. De mate van ondergroei heeft een grote invloed op de verdamping. Het effect van variatie in ondergroei en dynamiek in bosbeheer op de verdamping kunnen we nog niet kwantificeren. We weten dus onvoldoende in welke mate het bosbeheer van de afgelopen decennia invloed heeft gehad op de werkelijke verdamping en grondwaterstand.

Ook de grootte van het klimaateffect is nog niet goed bekend. In de meest recente KNMI scenario's wordt het gemiddeld 1.0°C warmer in 2030 met een toename van 2.5% in potentiële verdamping (KNMI, 2014). Ook het klimaateffect is onzeker. In het meest extreme KNMI scenario (WH) wordt het gemiddeld 2.3°C warmer in 2050 met een toename van 7% in potentiële verdamping. Echter de vraag is of de werkelijke verdamping ook toeneemt. Als de zomer droger wordt, zal de waterbeschikbaarheid en daarmee de werkelijke verdamping in die periode afnemen. De vegetatie zal zich aanpassen aan de nieuwe omstandigheden. Als er in het winterseizoen meer neerslag valt, zal de grondwateraanvulling op jaarbasis zelfs kunnen toenemen en daarmee het vochttekort kunnen afnemen (Witte e.a, 2012).

Systeemlaag 2 - Onverzadigde zone

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat het moeilijk is om een schatting te maken van de hoeveelheid water die werkelijk verdampt voor de Veluwe als geheel. En dus van

de hoeveelheid water die overblijft om het grondwater aan te vullen. Het water dat niet verdamt in bodem en vegetatie zal namelijk kunnen percoleren in de onverzadigde zone.

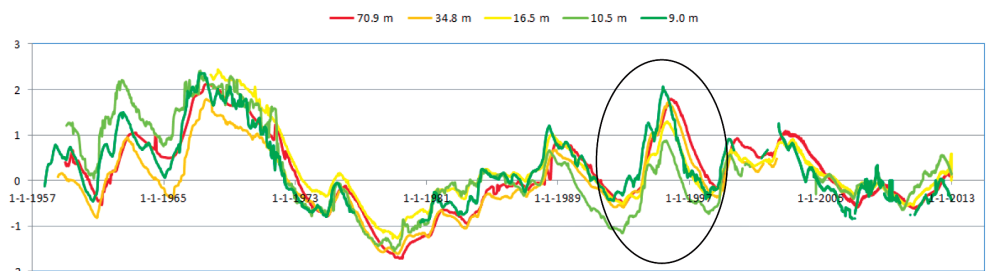
De dikke onverzadigde zone op de Veluwe, maximaal 70 m, zorgt ervoor dat pieken in neerslag worden afgevlakt in de tijd. We moeten hierbij onderscheid maken tussen de werkelijke transporttijd en de reactietijd. De werkelijke transporttijd is de tijd die het duurt voor een waterdruppel om een weg af te leggen. Uit tracer-onderzoek met tritium is afgeleid (Meinardi, 2003) dat de reistijd van een waterdruppeltje naar het grondwater van de Veluwe varieert tussen ongeveer 3 en 11 jaar, afhankelijk van de diepteligging van het filter.

De reactietijd (ook wel vertragsfactor genoemd) is de tijd tussen de neerslagimpuls aan maaiveld en de bijbehorende piek grondwaterstand. De reactietijd is lastig te bepalen in de praktijk, omdat droge en natte tijden elkaar binnen een paar maanden afwisselen. Bij een dikke onverzadigde zone zoals de Veluwe middelen deze pieken uit. De reactietijd is wel veel sneller dan de werkelijke transportsnelheid, vaak in de orde van maanden, dat wordt veroorzaakt door het effect van transport van drukgolven (zuigspanning) in de onverzadigde zone.

Het meten van de reactietijd

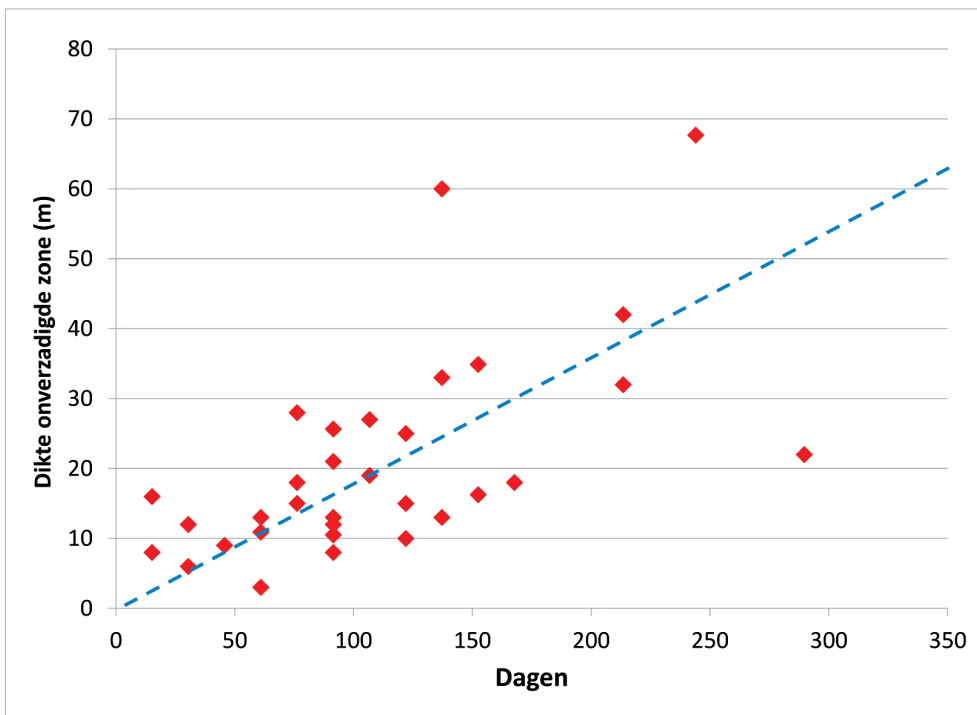
De reactietijd van een neerslagimpuls is al in de studie Grondwater Midden Nederland (IWACO, 1992) in de negentiger jaren voor de Veluwe bepaald uit peilbuiswaarnemingen. In deze studie is een relatie afgeleid tussen de mate van vertraging en de dikte van de onverzadigde zone. Deze relatie wordt sindsdien nog steeds gebruikt als handvat voor grondwatermodellen: een 10 meter dikke onverzadigde zone heeft een vertraging van ongeveer 5 maanden; een 45 meter dikke onverzadigde zone van 12 maanden.

Afgelopen jaar is opnieuw naar de reactietijd in grondwaterstanden op de Veluwe gekeken (Helderman, 2013). Een geschikte periode om naar de reactietijd te kijken is de piek in 1995/1996, veroorzaakt door een natte periode augustus 1994 - maart 1995. Na deze periode was het erg droog. De piek in grondwaterstand eind 1996 - begin 1997 moet daarom wel veroorzaakt zijn door de natte periode 1994-1995.



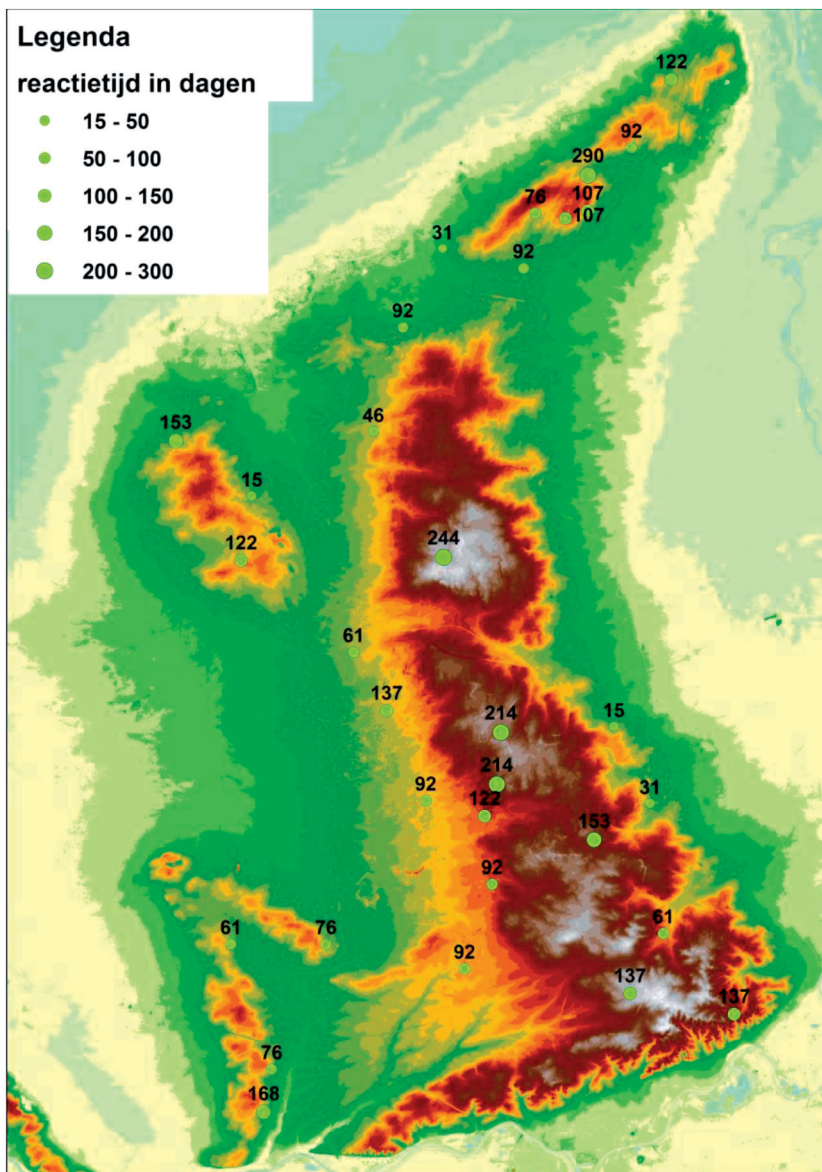
Afbeelding 7: Gemeten grondwaterstanden ten opzichte van 1957 op vijf verschillende locaties met verschillende dikte in onverzadigde zone (van 9 tot 71 meter dik). In de cirkel de grondwaterpiek van eind 1996.

Afbeelding 7 geeft het verloop in grondwaterstanden op vijf verschillende locaties, met een verschillende dikte in onverzadigde zone. Het algemene patroon in grondwaterstanden over de periode 1957-2013 is overal op de Veluwe hetzelfde. In de afgelopen 50 jaar komen 12 echte pieken voor, veroorzaakt door meerjarige perioden van meer dan gemiddelde neerslag. De afwisselende dalingen en stijgingen worden bepaald door de variatie in regenval door de jaren heen. De jaren '60 van de vorige eeuw waren relatief nat, gevolgd door de droge jaren '70. Eind 1996 bereikt het grondwater voorlopig het hoogste punt van de laatste 20 jaar. Op dit moment zijn de grondwaterstanden ongeveer twee meter lager dan in de jaren zestig, maar bijna twee meter hoger dan het laagste punt eind jaren zeventig. Dit patroon geldt voor alle locaties of peilbuizen. Bij een dikke onverzadigde zone van 70,5 m (rode lijn in Afbeelding 7) is het patroon meer gedempt en vertraagd ten opzichte van een dunnere onverzadigde zone (9 m dik: groene lijn). Vertraging in de piek van eind 1996 tussen het ondiepe en diepe filter is ongeveer een half jaar. Voor 45 meetpunten verspreid over de Veluwe is de reactietijd uitgezet (Afbeelding 8).



Afbeelding 8: Reactietijd in dagen ten opzichte van de dikte van de onverzadigde zone per meetpunt (Jansen, 2013).

De mate van fluctuatie en de snelheid van reageren verschillen per peilbuis (afbeelding 8). De reactietijd neemt globaal toe met de dikte. Peilbuizen met een dikke onverzadigde zone reageren langzamer dan ondiepe buizen met een dunne onverzadigde zone, maar er is geen duidelijk lineair verband met de diepte. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door lokale factoren zoals de geologie en bodemopbouw ter plekke, maar ook door de laterale voortplanting van grondwaterstandsverhogingen. Afbeelding 9 laat zien dat de reactietijden aan de randen van de Veluwe absoluut korter zijn dan centraal op de Veluwe. Afgezien hiervan zijn er geen regionale verschillen (Jansen, 2013).



Afbeelding 9: Reactietijd in dagen waarop de grondwaterpiek eind 1996 plaats vindt (Jansen, 2013).

Berekening van de reactietijd

De dikste onverzadigde zone op de Veluwe ligt nabij Hoog Soeren, ten westen van Apeldoorn. De nabijgelegen peilbuis B33A0227 (rode lijn in Afbeelding 6) heeft een onverzadigde zone van 70 meter en een reactietijd van ongeveer 8 tot 10 maanden. De berekening met een 1D-onverzadigdezonemodel (Hydrus 1D, Šimůnek e.a., 2008) geeft een veel tragere reactietijd. Met een gemiddelde aanvulling van 340 mm per jaar duurt het volgens het model 61 maanden voordat een drukgolf in de onverzadigde zone

het grondwater bereikt. Voor een relatief dunne onverzadigde zones (10 m) komen de modelsimulaties veel beter overeen met de waarnemingen. Voor deze buizen werd een responstijd van 8,7 maanden gesimuleerd bij een gemiddelde aanvulling van 340 mm/j. Het is duidelijk dat voor de dikke onverzadigde zone het proces niet goed wordt gesimuleerd.

Verschil tussen gemeten en berekende reactietijd

Waarom reageert het grondwater toch sneller dan verwacht? Volgens ons zijn er vier mogelijke redenen:

1. De bodemfysische eigenschappen zijn wellicht anders dan aangenomen in het model. De berging in de onverzadigde zone is (extreem) gevoelig voor de onverzadigde doorlatendheid in het traject waarbij deze gelijk is aan de neerwaartse stroming.
2. De reactie in grondwaterstand wordt ook bepaald door de grondwaterstanden in de omgeving met soms dunnere onverzadigde zones. De reactie in neerslagimpuls wordt zo via deze dunne onverzadigde zone en vervolgens het freatische grondwater doorgegeven.
3. Grondwater kan door preferente stroming van water in de onverzadigde zone op bepaalde plekken veel sneller stromen. Al deze “speldenprikken” zorgen er voor dat de reactietijd kleiner wordt. In het proefschrift van Gehrels is ook ingegaan op preferente stroming. Er werd geconcludeerd (Gehrels, 1999) dat preferente stroming dominant in de wortelzone is onder grasland en heide, maar dat op basis van zuurstof-18 metingen wordt verwacht dat onder de wortelzone de diffuse stroming in de onverzadigde zone weer dominant wordt. Op beboste locaties kunnen preferente stromingen tot op veel grotere dieptes aanhouden (Gehrels, 1999). Mogelijk komen onder bossen preferente stroombanen voor langs penwortels.
4. Er treedt stroming op langs de scheef gestelde kleischotten of leemlagen in de bodem. Water kan zich zo verzamelen en op bepaalde plekken geconcentreerd naar de diepte stromen. Dit kan gezien worden als een ‘trechtereffect’.

Mogelijk is het een combinatie van mechanismen.

Systeemlaag 3 - de afvoer via beken

De Veluwe staat bekend om zijn beken en sprengen, vooral aan de oostzijde van de Veluwe. Veluwse beken worden vrijwel helemaal gevoed door grondwater. Door de zandige bodems speelt oppervlakkige afstroming, ook tijdens piekbuien, een geringe rol. De grootte van de afvoer is daarom direct gerelateerd aan de hoogte van de grondwaterstand. Wanneer de grondwaterstand ruim boven de beekbodem ligt is er sprake van een stabiele afvoer (Helderman, 2013). Als de grondwaterstand onder het niveau van de beekbodem zakt, valt de aanvoer naar de beek weg. Het niveau van de grondwaterstand zoals gepresenteerd in afbeelding 7 zegt dus ook wat over de afvoer

van de bovenlopen van de Veluwe beken. Op de flanken van de Veluwe wordt de grondwaterstand meer bepaald door de seizoenen en dus kortere trends in regenval. Op basis van deze relatie is dus te verwachten dat de gemiddelde beekafvoer de afgelopen 40 jaar niet verder is afgenomen. Hoeveel precies weten we niet, omdat dit niet goed gemeten is. Zelfs tegenwoordig wordt er nog maar heel weinig gemeten aan beekafvoer. De reden is dat het relatief duur is om één meetinstallatie te installeren, terwijl er tientallen kleinere beeklopen zijn in het sprengengebied. Voor een beeld van fluctuaties in beekafvoer zijn we aangewezen op visuele waarnemingen in het veld en enkele meetopstellingen. Uit veldwaarnemingen is bekend dat de bovenlopen van beken in 2003 over lange trajecten droog vielen. We bevelen daarom aan om beekafvoeren te gaan meten, want deze kunnen ons veel vertellen over het Veluwe-systeem. Dit is in lijn met de oproep om een NHV-werkgroep Verbetering Afvoerschattingen op te richten.

Synthese - de waterbalans

Tot slot, kunnen we nu met de voorgaande kennis een waterbalans opstellen voor het kerninfiltratiegebied van de Veluwe (125.000 ha)? De gemiddelde hoeveelheid neerslag (950 mm/j) is redelijk goed bekend (zie afbeeldingen 2 en 3). Op basis van de werkelijke verdamping (tabel 1) en de verdeling van het landgebruik, geeft dit een geschatte verdamping van ongeveer 575 mm/j (tabel 2). Dit leidt tot een neerslagoverschot van 375 mm/j. De afvoer van sprengbeken is globaal bekend uit afvoermetingen; de onttrekkingen zijn, zover geregistreerd, goed bekend.

Balanspost	(mm/j)	Miljoen m ³ /j
Neerslag	950 (+)	1188 (+)
Verdamping	575 (-)	719 (-)
Sprengbeken	36 (-)	45 (-)
Onttrekkingen	72 (-)	90 (-)
Restpost met uitstroming naar Flevopolder, IJsseldelta, Gelderse Vallei, Betuwe en overige onttrekkingen.	267 (-)	334 (-)
TOTAAL UIT	950	1188

Tabel 2: Samenvattende langjarig gemiddelde waterbalans (1981-2010) voor de Veluwe.

De waterbalans is sterk versimpeld, omdat droge en natte jaren elkaar afwisselen. Het neerslagoverschot kan daarom van jaar tot jaar sterk verschillen. Het neerslagoverschot wordt door berging in de bodem gebufferd, zodat de effecten op de grondwateraanvulling minder groot zijn. Op basis van een simpele bodemwaterbalans, rekening houdend met buffering kan de jaarlijkse grondwateraanvulling 75 miljoen m³/jaar (63 mm/jaar) meer of minder zijn. In extreem droge of natte periodes kan de grondwateraanvulling wel 200 miljoen m³/jaar (160 mm/jaar) afwijken van het jaarlijks gemiddelde. De natuurlijke fluctuaties in grondwateraanvulling zijn dus groter dan wat er onttrokken wordt door beken en winningen.

Conclusies en aanbevelingen

Door een groep van experts bij elkaar te brengen was het mogelijk om overeenstem-

ming te krijgen over wat we wel, maar ook nog niet weten over de werking van het Veluwe-watersysteem. Er bestaan nog veel onzekerheden over vooral de verdamping, onverzadigde zone en de beekafvoer.

De verdamping speelt een grote rol en kan onvoldoende nauwkeurig bepaald worden voor de gehele Veluwe. We hebben hiervoor te weinig nauwkeurig inzicht in de relatie tussen waterbeschikbaarheid in de bodem en het verdampingsproces. Wanneer we dit inzicht wel krijgen, kunnen we ook beter begrijpen en voorspellen wat de effecten zullen zijn van veranderd bosbeheer of klimaatveranderingen. Een betere schatting van de werkelijke verdamping is daarom zeer gewenst. Combinatie van technieken zoals remote sensing en tracers en metingen aan de grond met lysimeters kunnen daarbij helpen.

De dikke onverzadigde zone heeft een groot dempend effect op de reactie van de grondwaterstanden en beekafvoeren op het neerslagoverschot. Alleen langjarige trends zijn daarin zichtbaar; geen seizoenfluctuaties. De freatische grondwaterstand hoog op de Veluwe reageert veel sneller op het neerslagoverschot dan volgens de theorie over vochttransport in de onverzadigde zone wordt voorspeld. De door ons verkende hypothesen hebben niet geleid tot eenduidige oplossingen. Hier kunnen metingen helpen, om het proces in meer detail te begrijpen.

Beekafvoeren zijn afhankelijk van de grondwaterstanden in het Veluwe-systeem. Hun reactie op het weer hangt niet alleen af van de onverzadigde zone, maar ook van de (vaak aanzienlijke) vertraging die optreedt in de verzadigde zone. Metingen van beekafvoeren kunnen dus kennis opleveren over het gedrag van het hydrologisch systeem van de Veluwe. Omdat de Veluwe een langzaam reagerend systeem is, zal er minimaal 5 tot 10 jaren moeten worden gemeten, om de langjarige fluctuaties te kunnen meten. Als een relatie gelegd kan worden tussen grondwaterstand en beekafvoer is een minder lange meetperiode mogelijk.

Literatuur

Allen, R.G., L.S. Pereira, T.A. Howell en M.E. Jensen (2011) Evapotranspiration Information Reporting: I. Factors Governing Measurement Accuracy; *Agricultural Water Management*, 98-2011, PAG 899-920

Bosveld, F. en E.J. Moors (2014) Het meten van verdamping; NHV Special (in voorbereiding)

Bruin, H.A.R. de (1977) The accuracy of measuring areal precipitation with a rain gauge network. Precipitation and measurements of precipitation. CHO-TNO Verslagen en mededelingen 23: 17-46

Buishand, T.A. en C.A. Velds (1980) Neerslag en verdamping. Klimaat van Nederland I. KNMI

Dolman, H., E.J. Moors, J.A. Elbers, W. Snijders en Ph. Hamaker (2000) De rol van bossen in de waterhuishouding van Nederland. Alterra, Wageningen. 8 Sept 2000

- Elbers, J.A. E.J. Moors en C.M.J. Jacobs** (2010) Gemeten actuele verdamping voor twaalf locaties in Nederland. Wageningen: Alterra Wageningen UR, 2010 (Alterra - Rapport)
- Gehrels, J.C.** (1999) Groundwater Level Fluctuations; Proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam. 270 pag, 1999, ISBN 90-75739-04-4
- Helderman, R.** (2013) (Grond)watersysteemanalyse De Veluwe, complex? Bodem, grondwater- en afvoeranalyses voor een eenduidige beschrijving van het Veluwesysteem; Afstudeerrapport Larenstein uitgevoerd bij de provincie Gelderland. Juli 2013
- IWACO** (1992) Onderzoek grondwaterbeheer Midden Nederland (GMN); Modelling watersysteem. Juli 1992
- Jansen, F.** (2013) Watersysteemanalyse de Veluwe, Op weg naar een helder beeld van het Veluwe water; Afstudeerrapport Larenstein uitgevoerd bij de provincie Gelderland. November 2013
- KNMI** (2014) KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 34 pp
- Meinardi, C.R** (2003) Reistijden in de bodem en aanvulling van het grondwater uit het Landelijk Meetnet (LMG) en de Provinciale Meetnetten Grondwaterkwaliteit (PMG); RIVM rapport 714801027/2003
- Moors, E.J.** (2012). Water Use of Forests in the Netherlands; PhD-thesis Vrije Universiteit Amsterdam, the Netherlands. 290p
- Querner, E.P. en E.J. Moors** (2013). Presentatie op werksessie van de Provincie Gelderland (12 sept 2013)
- Šimůnek, J., M. Šejna, H. Saito, M. Sakai en M.T. van Genuchten** (2008) The Hydrus-1D Software Package for Simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 4.0, HYDRUS Software Series 3; Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside
- Stichting Probos** (2013) Kerngegevens Bos en Hout in Nederland. Uitgave december 2013
- STOWA** (2014). Vergelijking van enkele schattingsmethoden voor de actuele verdamping. STOWA rapport 2014-18. Ruben Caljé en Frans Schaars (Artesia), Joost Heijkers (HDSR)
- Witte, J. P. M., Runhaar, J., van Ek, R., van der Hoek, D. C. J., Bartholomeus, R. P., Batelaan, O., van Bodegom, P. M., Wassen, M. J., and van der Zee, S. E. A. T. M.** (2012) An ecohydrological sketch of climate change impacts on water and natural ecosystems for the Netherlands: Bridging the gap between science and society, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3945-3957, 10.5194/hess-16-3945-2012, 2012

