

# Temperatuurmetingen als tracer voor kwel of infiltratie: toepassing in een Drents bosveen

WOUTER BEEKMAN EN DAVID BRAKENHOFF

*De richting en snelheid van grondwaterstroming zijn in het veld lastig direct te bepalen en worden daarom vaak indirect afgeleid met behulp van een benadering op basis van de vergelijking van Darcy. De toepassing van tracers is eigenlijk de enige mogelijkheid om grondwaterstroming direct vast te stellen. Echter, het toedienen en vervolgens registreren en interpreteren van tracers is bewerkelijk en blijft daarom experimenteel. Gebruik van natuurlijke tracers is eleganter uit bodemhygiënisch oogpunt, maar kent vergelijkbare beperkingen. In een aantal gevallen kan de grondwatertemperatuur als tracer worden gebruikt, een parameter die frequent en goed kan worden bepaald.*

*In deze studie hebben we onderzocht wat temperatuurmetingen in een ondiep veenprofiel (1.5 meter dik) kunnen zeggen over de verticale waterbeweging (kwel of infiltratie) op die locatie. Uit deze analyse is gebleken dat het temperatuurprofiel niet verklaard kan worden met een model dat uitgaat van een uniforme verticale waterbeweging gekoppeld aan een sinusvormige jaarcyclus van de temperatuurrandvoorwaarde. Het temperatuurprofiel blijkt wel te passen op een dynamisch tweedimensionaal grondwatermodel van de testlocatie met de gemeten luchttemperatuur als randvoorwaarde. Korte termijn fluctuaties van de temperatuur aan maaiveld dringen meer dan een meter door in de bodem en moeten dus worden beschouwd in de interpretatie. Voor het temperatuurprofiel blijken daarnaast dynamiek en heterogeniteit van de stroming dominant boven de gemiddelde verticale stromingscomponent. Ondiepe temperatuurmetingen zijn dus vooral waardevol als verificatie van de werking van een topsysteemmodel, maar bieden onafhankelijk daarvan geen aanvullend hydrologisch inzicht.*

Artikel

## Inleiding

Warmte verplaatst zich door de bodem via geleiding en via grondwaterstroming. Omdat de warmtecapaciteit van water relatief groot is, is de verbreiding van infiltrerend water met een afwijkende temperatuur te volgen in een daartoe ingericht meetnet. Hieruit zijn in principe de stroomsnelheid en de richting te herleiden. Dit principe wordt toegepast om inzicht te verwerven in de stroming rond infiltratie-systemen (Des Tombe, 2016) en bij geohydrologische anomalieën (Bense, 2004). Dit principe wordt ook toegepast bij het schatten van de verticale flux in beekdalen (Anibas e.a., 2012) en in veentjes (Wirdum, 1991). In de bovengrond vormt verticale stroming vaak een belangrijke component. Een veel voorkomend vraagstuk betreft de vaststelling van de intensiteit van wegzijging dan wel kwel. Het meten van de temperatuur is in deze zone relatief simpel, maar het detecteren van verticale stroming op basis van temperatuur-

profielen vormt een uitdaging, omdat de hydrologische omstandigheden in de bovengrond sterk dynamisch kunnen zijn en omdat warmteconvectie in deze zone concurreert met warmtegeleiding.

In dit artikel analyseren we temperatuurmetingen in een klein veensysteem in het Dwingelderveld in Drenthe aan de hand van de volgende vraagstelling: *Kan op basis van één (of meerdere) temperatuurprofielen de hydrologie van een bosveentje worden gekarakteriseerd; en omgekeerd: kan met een eenvoudig hydrologisch modelschema het gemeten temperatuurprofiel worden gereconstrueerd.*

En meer specifiek:

- *Kan het verticale temperatuurprofiel worden gesimuleerd met een stationair één-dimensionale analytisch model?*
- *Is het verticale temperatuurprofiel beter te simuleren met een hydrologisch geoptimaliseerd numeriek niet-stationair tweedimensionaal model?*

De aanname van stationaire één-dimensionale stroming, betekent dat de eventuele kwel of wegzijging zich alleen in de verticaal afspeelt en constant is in de tijd. De randvoorwaarden voor de temperatuurverdeling in de bodem worden gegeven door het temperatuurverloop aan maaiveld en de temperatuur van eventueel opwellend water. Deze situatie is analytisch beschreven en toegepast door o.a. Wirdum (1991). De warmte eigenschappen van de bodem en de intensiteit van de verticale waterbeweging worden afgeleid op basis van de fit op het gemeten temperatuurprofiel.

In een niet-stationair numeriek schema kunnen dynamische hydrologische randvoorwaarden worden meegenomen. Een tweedimensionaal schema biedt daarnaast meer vrijheid om de waterbeweging te sturen. Gekozen is om het schema te baseren op een kolommodel met neerslag, verdamping, wegzijging en laterale afstroming. De temperatuurrandvoorwaarden zijn identiek aan die van het één-dimensionale model en ontleend aan metingen op een nabijgelegen weerstation. De waterfluxen in dit model worden afgeleid van een fit op de gemeten grondwaterstanden. De warmte-eigenschappen van de bodem worden opgelegd, op basis van literatuurwaarden. Het gemeten temperatuurprofiel dient in dit geval als controle op de plausibiliteit van het hydrologische model.

## Veldcondities

Het karakteriseren van de hydrologie van een veensysteem gebeurt vaak, bij gebrek aan metingen, op basis van een algemeen begrip hoe een dergelijk systeem zou moeten functioneren en hoe het historisch mogelijk heeft gefunctioneerd. Een overzicht daarvan is opgenomen in Sevink, et al. (2014). De veentjes in het Dwingelderveld in Drenthe kennen volgens de huidige inzichten twee mogelijke ontstaansgeschiedenissen:

1. Een depressie in een keileemveld of een keileemveld van voldoende omvang, waarop de afwatering stagnaert.
2. Een Pingoruïne, die geleidelijk is gevuld met organisch materiaal, waaruit zich een stagnatielaag heeft ontwikkeld.

Pingoruïnes komen veel voor in Drenthe, in verschillende mate van gaafheid (<http://www.pingoruïnes.nl>, 2019). De ontstaanswijze laat ook een grote dichtheid toe: door capillaire werking kan in een permafrostgebied een kiemplaats radiaal uitdijen tot een omvangrijke ijslens. In een periglaciaal milieu kunnen deze ijsbergen overstoven raken met dekzand, die na smelting een kuil overlaten. In kwelzones kunnen onder de permafrost laag ijslenzen dieper onder de grond ontstaan, waardoor de bovenliggende bodem omhoog wordt gedrukt en deels afglijdt naar de rand. Na smelting blijven in die gevallen een soort bomkraters over, die geleidelijk dicht stuiven en dichtgroeien. Er zijn dus meerdere manieren waarop deze bijzondere accidentering kan zijn ontstaan, waarbij als belangrijkste voorwaarde geldt dat de vorstgrens moet reiken tot in zones met watertoevoer (French, 1996). Hoe dan ook, de laatste ijstijd heeft op veel plaatsen de basis gelegd voor de bijzonder gevarieerde afwisseling van natte en droge milieus, die we nu in de dekzandgebieden van Drenthe aantreffen.

Het onderzoek richtte zich op enkele bosvenen in het Dwingelderveld, waarvan één in dit artikel nader wordt uitgelicht: het veen met de illustere codenaam NB3 (zie afbeelding 1). Zoals in vrijwel alle venen in het Dwingelderveld is de huidige hydrologie van het veen onafhankelijk van de regionale hydrologie: de freatische grondwaterstand beweegt zich circa 3 meter boven de stijghoogte die onder het veen wordt gemeten. Dat betekent dat in de waterbalans de vaak moeilijk te controleren terugkoppeling met het diepere grondwater kan worden verwaarloosd.



Afbeelding 1 Impressie van veen NB3

## Theorie ontwikkeling temperatuurprofiel

De warmte-indringing in de bodem onder invloed van het seizoensverloop van de buitentemperatuur onder stationaire hydrologische condities kan analytisch worden benaderd. Van Wirdum (1991) hanteert daarvoor de volgende formulering.

$$T(t, z) = Tm - A0 * \exp(-\alpha * z) * \cos(\omega * t - \beta * z) \quad (1)$$

- Met:
- $T(t, z)$  - temperatuur in tijd en diepte (°C)
  - $Tm$  - gemiddelde temperatuur (°C)
  - $A0$  - amplitude van het jaarlijkse temperatuurverloop (°C) aan maaiveld
  - $z$  - diepte (m)
  - $\omega$  - hoeksnelheid temperatuurcyclus (rad/s)
  - $t$  - tijd (s)
  - $\alpha$  - dempingsparameter (m<sup>-1</sup>)
  - $\beta$  - faseverschuiving (m<sup>-1</sup>)

Het temperatuurprofiel is volledig afhankelijk van de dempingsfactoren  $\alpha$  en  $\beta$ , waarin de eigenschappen van de bodem en de hydrologische conditie worden samengevat. Deze termen zijn op de volgende wijze verbonden met de fysische eigenschappen van de bodem (Des Tombe, 2016):

$$\alpha = \frac{W}{2 * D_h} + \frac{\sqrt{2}}{4 * D_h} * \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16 * D_h^2 * \omega^2}} \quad (1)$$

en:

$$\beta = \frac{(\sqrt{2} * \omega)}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16 * D_h^2 * \omega^2}}} \quad (2)$$

met:  $W = \frac{\rho_w c_w}{\rho c_b} * \theta_w * qz$  warmtetransport via convectie in de waterfase

$D_h = \frac{kT_b}{\rho c_b}$  warmtetransport via geleiding in de bodem

$\Omega = 2 * \pi / (365 * 24 * 3600)$  hoeksnelheid van de temperatuur-jaarcyclus

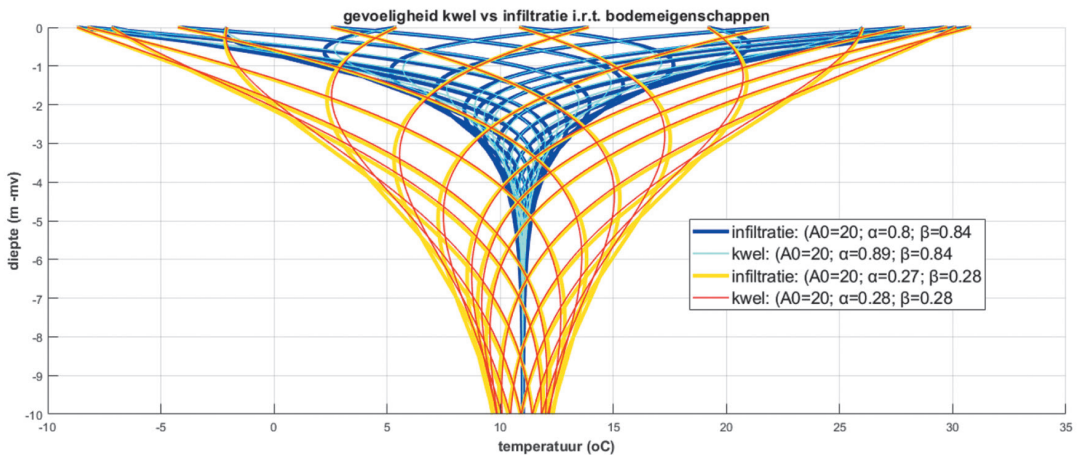
met:  $\rho c_b = \theta_s * \rho_s * c_s + \theta_w * \rho_w * c_w$  warmtecapaciteit bodem  
 $kT_b = \theta_s * k_s + \theta_w * k_w$  warmtegeleidbaarheid bodem  
 $\theta_w = 1 - \theta_s$  porositeit bodem (watergevuld)

met:

$\rho_w$	soortelijk gewicht water	1000	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_s$	soortelijk gewicht bodemmateriaal	1100 - 2710	kg/m <sup>3</sup>
$c_w$	warmtecapaciteit water	4200	J/(kg°C)
$c_s$	warmtecapaciteit bodemmateriaal	835	J/(kg°C)
$k_w$	warmtegeleidbaarheid water	0.58	W/(m°C)
$k_s$	warmtegeleidbaarheid bodemmateriaal	0.25 - 5	W/(m°C)
$\theta_s$	volumepercentage grond	0.1 - 0.7	(-)
$qz$	verticale waterbeweging	-5 - 5 * (1e-3 * (24 * 3600))	m/s

Uit deze ontleding van de formule voor temperatuurindringing blijkt dat de twee parameters  $\alpha$  en  $\beta$  uit formule (1) niet onafhankelijk zijn en dus ook niet als zodanig kunnen worden gefit op metingen.

Op basis van het theoretische verband tussen de parameters, kan het temperatuur-profiel voor verschillende bodemtypes en voor verschillende niveaus van de verticale waterbeweging worden begrensd. In afbeelding 2 zijn theoretische temperatuurprofielen weergegeven, waarbij onderscheid is gemaakt tussen verschillende bodemtypes (respectievelijk organische en minerale grond) en verticale stromingsflux (respectievelijk 1 mm kwel en infiltratie).



Afbeelding 2 Gevoeligheid van kwel c.q. infiltratie (1 mm/dag), in relatie tot andere bodemeigenschappen: de blauwe lijnen betreffen een organische bodem, de geelrode lijnen geven een kenmerkend theoretisch temperatuurprofiel in een minerale (verzadigde) grond.

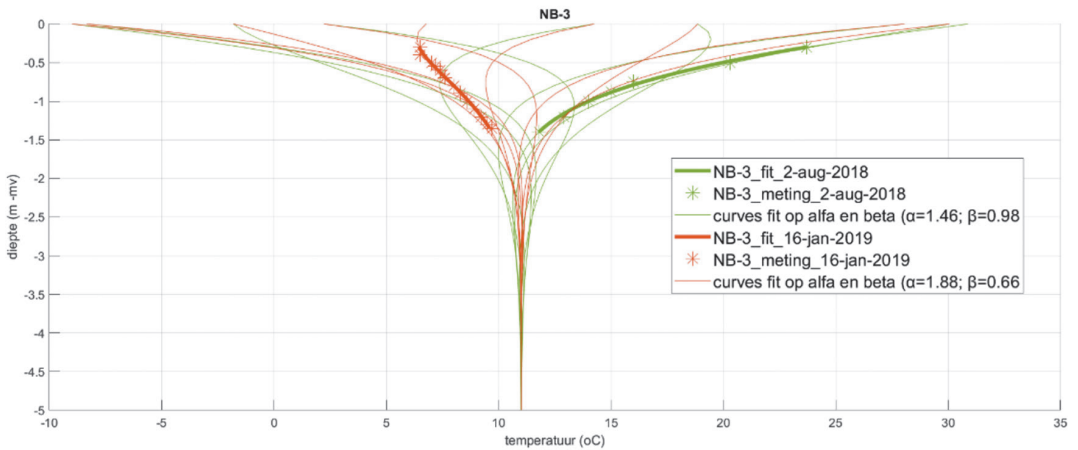
Uit afbeelding 2 blijkt dat het temperatuurprofiel met name gevoelig is voor verschillen in het bodemtype. De bijdrage van de verticale waterbeweging (bij een fluxintensiteit in de orde van 1 mm/dag) aan de ontwikkeling van het temperatuurprofiel is zeer beperkt: dergelijke theoretische verschillen vallen ruimschoots binnen de marge die bereikt kan worden met variaties in bodemeigenschappen.

## Veldmetingen

### Toetsing aan theoretische profielen

In het bosveen NB-3 in het Dwingelderveld zijn in augustus 2018 en in januari 2019 temperatuurprofielen bepaald met de door Wirdum (2014) ontwikkelde prikstok. Per meetdatum zijn de metingen gefit aan het theoretische verband conform formule (1), met de volgende vrijheidsgraden:

1. Een fit waarbij  $\alpha$ ,  $\beta$  en timing apart worden geoptimaliseerd op de zomer metingen en op de wintermetingen. Het resultaat van deze fit is weergegeven in afbeelding 3. (De fit op de onderliggende parameters blijkt een vrijwel identiek resultaat op te leveren.)



Afbeelding 3 Fit van  $\alpha$  en  $\beta$  voor de zomer- en wintermetingen op de theoretische profielcurves (met een temperatuuramplitude van 20 °C). Tevens is het bijbehorende theoretische temperatuurverloop over het jaar met een interval van 50 dagen weergegeven.

Uit afbeelding 3 blijkt dat de metingen met deze vrijheidsgraden goed gefit kunnen worden. Zowel de zomermetingen als de wintermetingen leiden tot een amplitude van circa 20 °C. De betrouwbaarheidsrange van de parameters is echter aanzienlijk. De geoptimaliseerde hydrologische condities bij deze profielen komen uit op hoge kwelfluxen, waar een kleine infiltratieflex wordt verwacht. De centrale schatting voor het zomer-temperatuurprofiel bedraagt 6 mm/dag en in de winter loopt het verder op tot 18 mm/dag. Hydrologisch gezien moeten dergelijke fluxen op deze plek als onmogelijk worden gekwalificeerd omdat er sprake is van een infiltratiesituatie.

Zonder deze forse kwelcomponent kunnen de metingen niet goed gefit worden op de theoretische curves. Het optimalisatie resultaat van de zomermetingen en de wintermetingen zijn redelijk vergelijkbaar (zie *Tabel 1*), maar hydrologisch onwaarschijnlijk. In de hydrologische beschrijving mist dus een belangrijke factor.

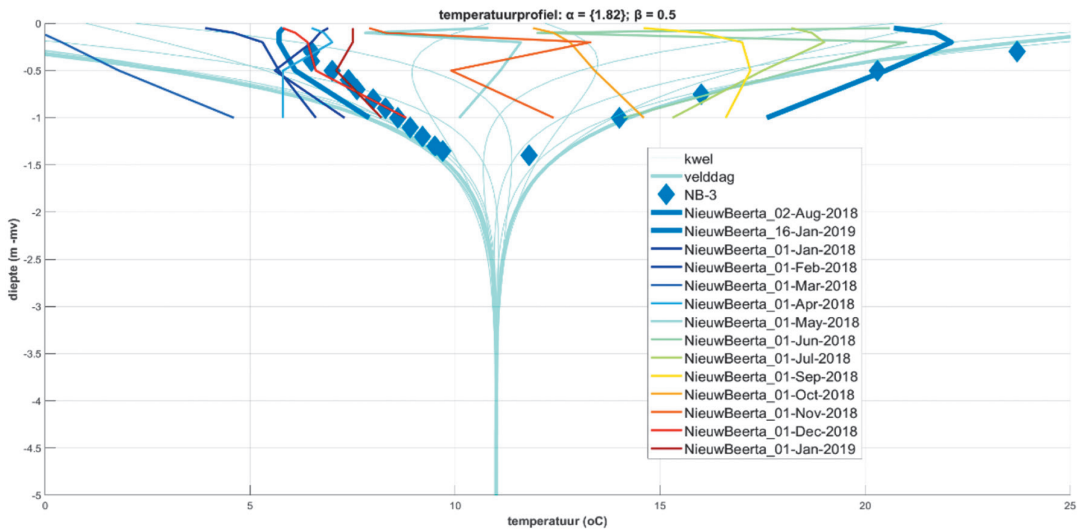
Tabel 1 gefitte waarden bodemparameters

situatie	s.g. bodem $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	warmtecapaciteit bodem C (J/(kg°C))	warmtegeleidbaarheid bodem k (W/(m C))	porievolume bodem ( $\theta$ (-))	Kwel (mm/d)
Zomer	2699	1200	0,25	0,57	6
Winter	2443	1120	0,46	0,23	18

### Unciteit van de gemeten temperatuurprofielen

In het ondiepe deel van het bodemprofiel zijn de gradiënten groot en vormt warmtegeleiding het belangrijkste mechanisme voor de temperatuurverdeling. Uit de theoretische beschouwing bleek dat de temperatuurdoordringing sterk afhankelijk is van het bodemtype. Dit aspect is getoetst door de veldmetingen in het veen te vergelijken met de bodemtemperatuurmetingen die op enkele weerstations worden gedaan. In Afbeelding 4 zijn de metingen weergegeven in samenhang met de metingen op het nabije weerstation Nieuw Beerta, waar in

de bovenste meter op vijf dieptes de temperatuur permanent wordt gemeten. Het blijkt inderdaad dat de metingen sterk vergelijkbaar zijn qua amplitude aan maaiveld. De temperatuurdoordringing lijkt op dit weerstation groter, corresponderend met een meer minerale en drogere bodem en/of afwezigheid van kwel. Over het dieptebereik van de metingen is het onderscheid echter niet overtuigend. Uit de metingen op het weerstation blijkt ook dat in de top van het profiel een sterke temperatuurvariatie kan optreden, ten gevolge van korte termijn gebeurtenissen: een forse regenbui, enkel koele dagen, enkele hete dagen etc. Dit benadrukt het risico bij het afleiden van de waterbeweging uit een profielmeting in relatie tot de standaardcurve voor dat moment.



Afbeelding 4 Analytische temperatuurprofielen versus gemeten maandelijkse temperatuurprofielen op station Nieuw Beerta en veldmetingen in het veentje.

### Conclusie confrontatie veldmetingen aan theorie

Uit zowel de metingen als de theoretische gevoeligheid voor veranderingen in de verticale waterbeweging blijkt dat de analytische oplossing voor de temperatuurindringing vaak goed kan worden gefit op gemeten temperatuurprofielen. Echter deze fit zegt vervolgens weinig over de hydrologie van die locatie, noch over de bijbehorende bodemparameters.

Hierbij spelen de volgende factoren een rol:

- Temperatuurgeleiding speelt in de bovengrond een grotere rol dan convectie via verticale waterbeweging (op de meeste locaties). Daarom is de marge klein voor het detecteren van stroming.
- Het temperatuurverloop aan maaiveld, variaties in bodemeigenschappen (door gelaagdheid en grondwaterstandsveranderingen) en laterale (grond) waterstroming beïnvloeden het temperatuurprofiel van de bovenste meters. De aanname van een homogeen profiel met stationaire stroming staat daar te ver van af.

Kortom, de temperatuurprofielen vormen geen robuuste ingang voor het detecteren van kwel of het kwantificeren van wegzijging in de meeste veentjes met een subtiele hydrologische dynamiek.

## Numerieke modellering temperatuurprofielen

### Het hydrologische schema

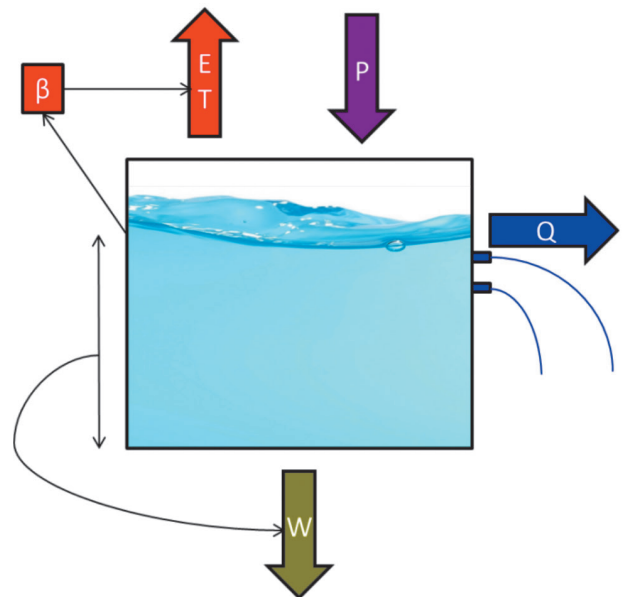
De numerieke modellering van temperatuurprofielen op een bepaalde locatie vergt een hydrologisch concept, dat in overeenstemming is met de metingen. Daartoe is van de meetlocatie een waterbalans opgesteld. De freatische dynamiek van het veentje kan op basis van de peilregistraties worden ontleed in kwantificeerbare componenten en in componenten met een onbekende dynamiek. De waterbalans kan worden beschreven met:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{N - ET - W - Q}{n}$$

Met:	$\frac{dh}{dt}$	- verandering in grondwaterstand
	$N$	- neerslag
	$ET$	- verdamping
	$W$	- wegzijging
	$Q$	- afvoer via oppervlaktewater
	$n$	- effectieve bergingscoëfficiënt

Van deze posten worden alleen de neerslag en de potentiële verdamping gemeten. Daarnaast weten we dat de actuele verdamping afhankelijk is van de van de ruwheid en de verdampingsregulatie eigenschappen van de vegetatie en dat wegzijging en oppervlakkige afvoer beide afhankelijk zijn van de waterstand in het veen. Met deze conceptuele toevoegingen kan het veensysteem worden geschematiseerd met het volgende 'bak-model' (afbeelding 5). Het schema legt verbanden tussen de waterstand enerzijds en de verdamping, wegzijging en afvoer anderzijds. Deze relaties zijn lineair verondersteld, maar verder onderwerp van de optimalisatie. Dit bakmodel bestaat dus uit één reservoir, waarin neerslag valt ( $P$ ). Water verlaat het bakje via verdamping ( $ET$ ), afstroming ( $Q$ ) en wegzijging ( $W$ ). De terugkoppelingen in het model zijn weergegeven in Afbeelding 6.

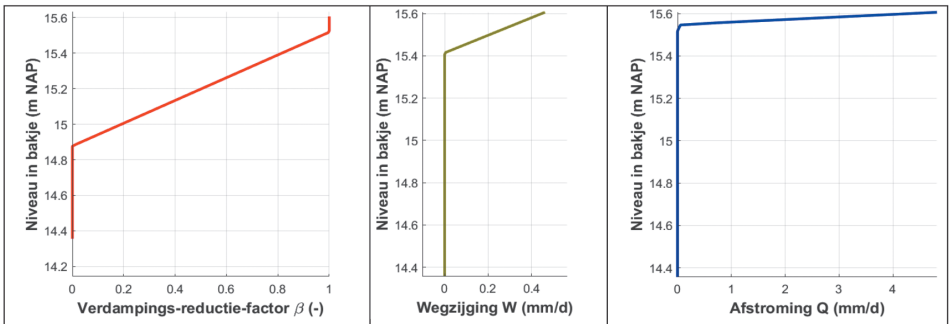
- De verdamping is afhankelijk van de potentiële verdamping en de diepte van de grondwaterstand.
- De wegzijging is enkel afhankelijk van de waterstand in het bakje: we gaan uit van het concept van een schijnspiegelsysteem. Er is in dit model geen relatie met de waterstand in een dieper pakket.
- De afstroming hangt af van het niveau in het bakje, waarbij de afstroming op twee niveaus kan knikken.



Afbeelding 5 Overall schema van het 'bak-model'.

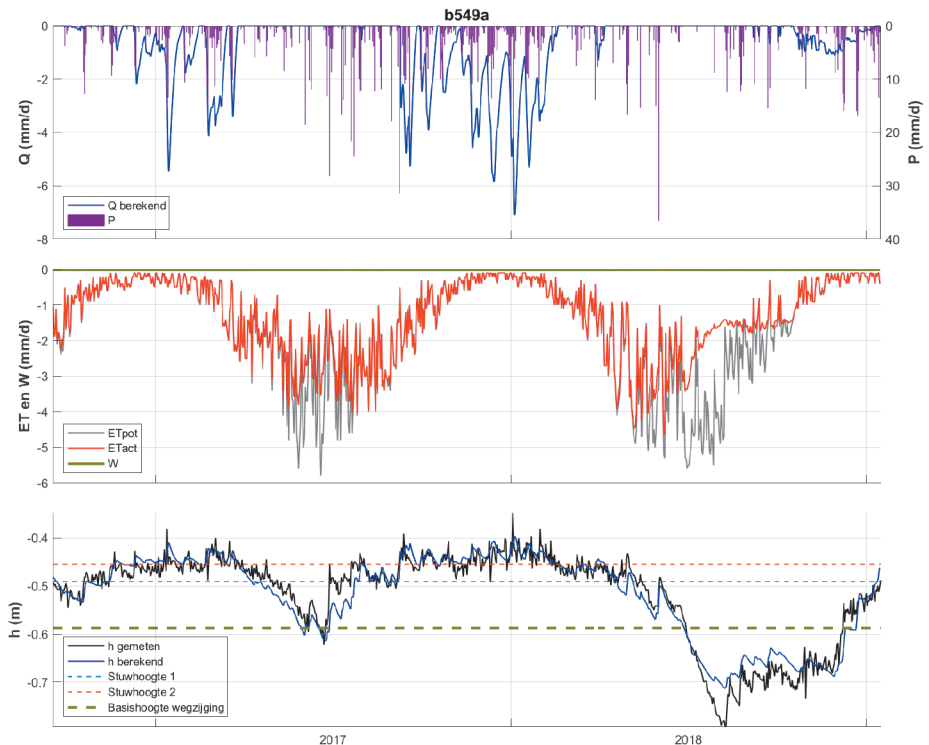


Deze drie relaties veroorzaken allen een hogere verliespost bij een hogere waterstand in het bakje. De berging speelt in al deze relaties een impliciete rol en wordt in de optimalisatie van de grondwaterstandsreeks aan dit schema medebepaald.



Afbeelding 6 De drie stijghoogte-afhankelijke terugkoppelingen van de uitgaande fluxen.

De differentiaalvergelijking van het model wordt opgelost door middel van de standaard oplossingsmethode in MATLAB. De ijking van het model is gericht op het matchen van de stijghoogte. Door de wegzijing op de getoonde wijze afhankelijk te maken van de waterstand in het bakje en door het optreden van



Afbeelding 7 Het resultaat van het balansmodel voor ven NB-3, meetpunt b549a. In de bovenste twee grafieken staan de verschillende fluxen in en uit het bakje, terwijl in de onderste grafiek het niveau in het bakje is weergegeven.

verdampingsreductie kan in het model voldoende water in het profiel worden vastgehouden. Het model is gefit aan de grondwaterstandsmetingen in het ven. Het resultaat van de ijking voor dit meetpunt is weergegeven in Afbeelding . De daarbij afgeleide bergingscoëfficiënt is vastgesteld op 0.6.

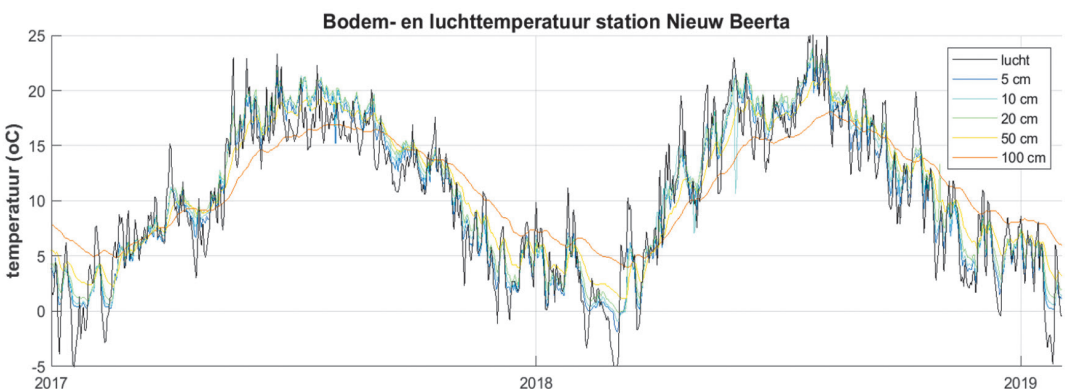
Uit Afbeelding 7 blijkt dat dit model een redelijke benadering van de dynamiek van het freatische peil geeft. Volgens deze beschrijving wordt de veen-hydrologie gekenmerkt door een zeer geringe wegzijging, een forse verdampingsreductie in de zomer en een behoorlijke oppervlakkige afvoer in de winter.

### **Simulatie temperatuurprofiel**

Het analytische model voldoet niet om de temperatuurmetingen te koppelen aan een constante verticale flux, waaruit geconcludeerd kan worden dat de waterhuishouding niet goed beschreven kan worden met een stationaire situatie. Het blijkt wel mogelijk om de hydrologische dynamiek in de veenlaag met behulp van een eenvoudig model te beschrijven. De vraag is of deze hydrologie vervolgens ook beter correspondeert met het gemeten temperatuurprofiel. Deze toetsing is uitgewerkt met de numerieke modelsoftware SEAWAT (Langvin e.a., 2008). Het model beschrijft met behulp van een 43-laags schema het opgestelde bakmodel. De bodem is daarin geschematiseerd als een tweelaags systeem: 1.4 meter veen op zand. De rand-fluxen (afstroming, wegzijging, neerslag en verdamping) worden uit het bakmodel overgenomen. Voor de temperatuurverdeling aan de top van de kolom zijn twee randvoorwaarden vergeleken:

- de actuele gemiddelde dagtemperatuur
- de op het KNMI-station van Nieuw Beerta gemeten bodemtemperatuur op 50 cm diepte.

Het model houdt geen rekening met andere energie overdrachten (zoals verdamping en instraling), anders dan verdisconteerd in de temperatuurrandvoorwaarde. Deze temperatuur (zie afbeelding 8) is ook aan de neerslag meegegeven.



Afbeelding 8 Bodemtemperatuurmetingen op KNMI-station Nieuw Beerta

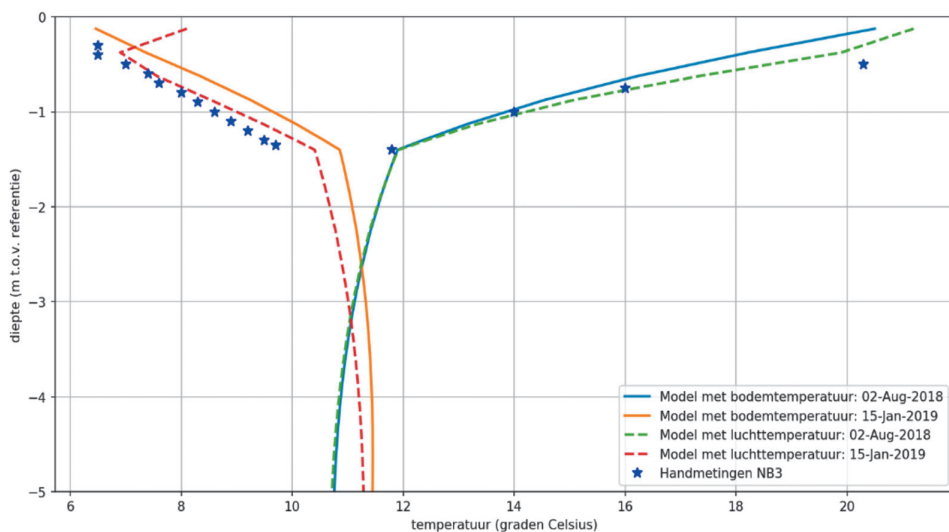
De bodemparameters zijn op basis van literatuurwaarden opgelegd (en dus niet geoptimaliseerd aan de hand van de metingen), zoals opgenomen in Tabel 2.

Tabel 2 gehanteerde modeleigenschappen temperatuurprofiel veenkolom.

eigenschap	symbool	waarde	eenheid	herkomst
freatische berging	$\theta$	0,6	(-)	optimalisatie
Porositeit zand ondergrond	$\theta_w$	0,3	(-)	aanname
Soortelijk gewicht zand	$\rho_{\text{bulk}}$	1820	kg/m <sup>3</sup>	Literatuur
Soortelijk gewicht veen	$\rho_{\text{bulk}}$	508	kg/m <sup>3</sup>	"
Warmtecapaciteit water	cs_fluid	4183	J/(kg <sup>o</sup> C)	"
Warmtecapaciteit veenbodem	cs_veen	835	J/(kg <sup>o</sup> C)	"
Warmtecapaciteit zandbodem	cs_zand	835	J/(kg <sup>o</sup> C)	"
Geleidbaarheid veenbodem	kt_bulk	0,45	W/(m <sup>o</sup> C)	"
Geleidbaarheid zandbodem	kt_bulk	2,97	W/(m <sup>o</sup> C)	"
Geleidbaarheid water	kt_fluid	0,58	W/(m <sup>o</sup> C)	"

Op basis van deze eigenschappen wordt het temperatuurprofiel op de velddag berekend, zoals weergegeven in Afbeelding 9. Uit de afbeelding blijkt dat:

- het model de metingen op beide meetdagen (zowel de zomersituatie als de wintersituatie) goed beschrijft.
- het hydrologische concept van de locatie: d.w.z. een vrijwel stagnant veen, dat soms overloopt, wordt ondersteund door de temperatuurmetingen.
- de luchttemperatuur lijkt een iets betere beschrijving van de temperatuur-randvoorwaarde op te leveren dan een (elders) gemeten bodemtemperatuur als bovenrand.



Afbeelding 9 Temperatuurprofiel berekend met het kolommodel op respectievelijk 2 augustus 2018 en 16 januari 2019 (inclusief metingen).

## Conclusies

Temperatuur is een relatief makkelijk meetbare parameter van het grondwater. Het meten van de temperatuur in het diepe grondwater is echter niet perse eenvoudig. In het ondiepe grondwater, zeker in zachte bodems (veen), kan de temperatuur met behulp van een prikstok wel relatief eenvoudig worden gemeten.

Temperatuurmetingen van het grondwater kunnen dienen als tracer voor grondwaterstroming. In het diepe grondwater wordt de temperatuur niet gedomineerd door de temperatuurdynamiek aan maaiveld, wat de interpretatie van temperatuurmetingen vereenvoudigt. De temperatuur van het ondiepe grondwater wordt voor een belangrijk deel bepaald door de interactie met het atmosferische systeem. De gemiddelde temperatuur van het infiltrerende water bepaalt de temperatuur op de overgang naar 'diep' grondwater, maar in de bovenste meters fluctueert de temperatuur door het jaar sterk. Dat gegeven speelt een belangrijke rol in de condities voor het bodemleven.

Deze studie beantwoordde de vraag op welke wijze de lokale hydrologie van invloed is op de temperatuurhuishouding van de bovengrond en omgekeerd: in hoeverre de lokale hydrologie kan worden afgeleid uit een gemeten temperatuurstratificatie in de bovenste meter(s). Deze vraag is onderzocht in een geïsoleerd veentje met een relatief goed afgebakende waterbalans.

Uit het onderzoek is gebleken dat de gevoeligheid van het temperatuurprofiel voor verticale stroomsnelheden in de orde van grote van 1 mm/dag beperkt is. Het temperatuurprofiel wordt bij een dergelijke fluxintensiteit gedomineerd door geleiding en convectie speelt dan een kleine rol. De bodemeigenschappen domineren de demping en doordringing van het temperatuursignaal vanaf maaiveld. Op basis van metingen van een temperatuurprofiel kunnen dus geen conclusies worden getrokken over de hydrologische karakterisering van de locatie.

In de bovenste bodemlaag, op het grensvlak van grondwater en atmosfeer zijn de fluxen echter veel groter dan 1 mm/dag, maar in de orde van de neerslagintensiteit. Dat gegeven wordt in de analytische oplossing niet beschreven, maar kan in een numerieke beschrijving wel worden meegenomen. Voor het beschouwde proefgebied kon een eenvoudig bakmodel worden opgesteld, dat goed past op de gemeten hydrologische dynamiek. De met dit model berekende fluxen werden opgelegd aan een schematisatie in SEAWAT om het temperatuurverloop te simuleren. Dit model leverde een goede fit met het gemeten temperatuurprofiel, zowel voor de zomermetingen als voor de wintermetingen. De temperatuurmetingen vormen daarmee een bevestiging van het gekozen hydrologische schema.

In zijn algemeenheid kunnen temperatuurmetingen een onafhankelijke toets bieden bij de modellering van grondwaterstroming in topsystemen.

## Literatuur

- Anibas C., B. Verbeiren, K. Buis, J. Chormanski, L. de Doncker, T. Okruszko, P. Meire, O. Batelaan** (2012) A hierarchical approach on groundwater-surface water interaction in wetlands along the upper Biebrza River, Poland; in: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol 16, pag 2329-2346.
- Bense V.** (2004) Ruimtelijke en temporele variaties van ondiepe grondwatertemperatuur als tracer voor grondwaterstroming rondom de Peelrandbreuk nabij Uden; in *Stromingen* vol 2004, nummer 4.

- Des Tombe B.** (2016) Simulating heat transfer through the unsaturated zone of MAR systems. *MSc Thesis*, Delft University of Technology.
- French H M.** (1996) *The Periglacial Environment*; Willey.  
*http://www.pingoruines.nl* (2019); Landschapsbeheer Drenthe.
- Langevin C.D., Thorne, D.T., Jr. Dausman, A.M., Sukop, M.C., Guo, Weixing** (2008) SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport; U.S. Geological Survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22.
- Sevink J., C. Geujen, B. van Delft, M.G. Schouten, L. van Tweel-Groot** (2014) De veenbasis: kenmerken en effecten van ontwatering, in relatie tot behoud en herstel van de Nederlandse hoogvenen - een literatuurstudie; VBNE, Driebergen.
- Wirdum G. van** (2014) The T-EC probe -User's manual adapted to the probe and meter.
- Wirdum G. van** (1991) Vegetation and hydrology of floating rich-fens; Thesis University of Amsterdam.

### Summary Temperature measurements as a tracer for seepage or infiltration

*Temperature is often an overseen parameter in hydrological system analysis, while it is easy to measure and often measured when using electronic devices like water-level loggers, EC-meters and many others. Temperature, however, can be used not only for device-correction, but also for system analysis in many ways. One application is unraveled in this study: the use of temperature measurements in isolated small peat systems to describe the local hydrology. It is shown that during the year temperature in the upper two meter of the soil profile is highly variable, up to the rather impermeable lower base of the peat. However, it proves to be impossible to reduce the local hydrology to a simple homogenic vertical flow pattern. Temperature measurements, even repeated and on different depth, does not provide information on hydrological dynamics, even not for the rather constant leaky loss over the peat base in many settings. However, when you have a hydrological concept of the local phreatic dynamics, temperature measurements can provide an additional prove of the consistency of that hydrological model.*

#### Auteur

WOUTER BEEKMAN  
Artesia  
w.beekman@artesia-water.nl

David Brakenhoff  
Artesia

