
Effecten van thermische opslagsystemen

Berekeningen en metingen

N. Buik
A. Willemsen
C.M.J. Verbeek

Inleiding

De laatste jaren wordt koude-/warmteopslag in de bodem steeds vaker en op steeds grotere schaal toegepast. Het gevolg hiervan is dat koude-/warmteopslagsystemen dichterbij elkaar komen te liggen en dat de thermische invloedsgebieden van de gezamenlijke systemen groter worden. Ook de kans dat er reeds andere grondwatergebruikers in nabijheid aanwezig zijn neemt hierdoor toe. Een goed voorbeeld van een andere grondwatergebruiker is een drinkwaterwinning. In veel gevallen wordt een drinkwaterwinning door verschillende zones beschermd. Bij de koude-/warmteopslagsystemen ten behoeve van Philips High Tech Campus (HTC) in Eindhoven, Mariënborg in Nijmegen en het BAM-kantoor in Bunnik zijn of worden de bronnen gerealiseerd in deze zones. In dergelijke gevallen is het van belang dat het thermische invloedsgebied van een nieuw te realiseren koude-/warmteopslagsysteem nauwkeurig berekend kan worden.

Om de thermische effecten van een koude-/warmteopslag te berekenen gebruikt IF Technology (IF) het computermodel HstWin. Dit programma is afgeleid van HST 3D (Heat and Solute Transport), een programma dat oorspronkelijk is ontwikkeld door Kipp (1987). Het is met name geschikt voor het modelleren van processen waarbij dichtheidsafhankelijke stroming een rol speelt. Dit maakt het programma niet alleen geschikt voor het rekenen aan zaken waarbij thermisch transport een rol speelt, maar ook voor het rekenen aan bijvoorbeeld zoet-/zoutstroming.

IF gebruikt dit programma sinds 1989 en heeft de afgelopen jaren een groot aantal verbeteringen aangebracht. Deze veranderingen maken het model meer geschikt voor het rekenen aan koude-/warmteopslagsystemen. Tevens is het model recentelijk omgezet naar Windows.

Gezien alle veranderingen die zijn aangebracht en het grote belang van betrouwbare thermische berekeningen was het wenselijk het model opnieuw te toetsen. Voor deze toet-

N. Buik en A. Willemsen zijn werkzaam bij IF Technology, Postbus 605, 6800 AP Arnhem, telefoon (026) 443 15 41, e-mail n.buik@iftechnology.nl en a.willemsen@iftechnology.nl. C.M.J. Verbeek is werkzaam bij Verbeek Consultant, e-mail cmjvrb@worldonline.nl.

sing is gebruik gemaakt van analytische oplossingen voor thermisch transport en van meetgegevens.

Toetsing aan analytische oplossingen

Het transport van warmte in aquifers wordt bepaald door een aantal mechanismen. Het belangrijkste mechanisme is het convectief transport van warmte via de grondwaterstroming. Het transport van een thermisch front wordt vertraagd door warmteopname door het korrelskelet. Daarnaast zal door warmtegeleiding energie naar boven- en onderliggende lagen stromen.

HstWin is vergeleken met een analytische oplossing die de temperatuur weergeeft langs een stroomlijn in een aquifer, waarbij energie verloren gaat door een bovenliggende laag met een eindige dikte. De analytische oplossing beschrijft de stationaire eindsituatie waarbij de hoeveelheid energie die in de aquifer wordt gebracht gelijk is aan de hoeveelheid die via de afsluitende laag wordt afgevoerd. Uffink (1981) geeft aan dat in deze stationaire situatie het temperatuurverloop in de aquifer als volgt kan worden berekend:

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left(\frac{-\lambda_l \cdot \tau}{2 \cdot C_w \cdot a \cdot n \cdot D_{aq}}\right) \quad (1)$$

waarin:

T	:	temperatuurverandering ten opzichte van de omgevingstemperatuur	[K]
T_0	:	temperatuurverschil tussen de infiltratie- en de omgevingstemperatuur	[K]
λ_l	:	warmtegeleiding van de bovenliggende laag	[W/(mK)]
τ	:	verblijftijd thermisch front	[s]
C_w	:	warmtecapaciteit water	[J/(m ³ K)]
a	:	dikte van de bovenliggende laag	[m]
n	:	porositeit	[-]
D_{aq}	:	dikte van de aquifer	[m]

Om HstWin met de analytische oplossing te vergelijken is een tweedimensionaal (2D) model opgezet. Tabel 1 geeft een overzicht van de invoerparameters. HstWin berekent het temperatuurverloop als functie van de afstand en de analytische oplossing de temperatuur na een bepaalde verblijftijd. Indien de snelheid van het thermisch front berekend wordt, kan dit met de verblijftijd eenvoudig in een afstand worden omgerekend. De snelheid van het thermisch front kan met behulp van de volgende formule bepaald worden (Uffink, 1981):

$$\frac{v_{th}}{v_w} = \frac{C_w \cdot n}{C_w \cdot n + (1-n)C_r} \quad (2)$$

met

$$v_w = \frac{k \cdot I}{n} \quad (3)$$

en

$$x = \frac{v_{th} \cdot \tau}{3600 \cdot 24} \quad (4)$$

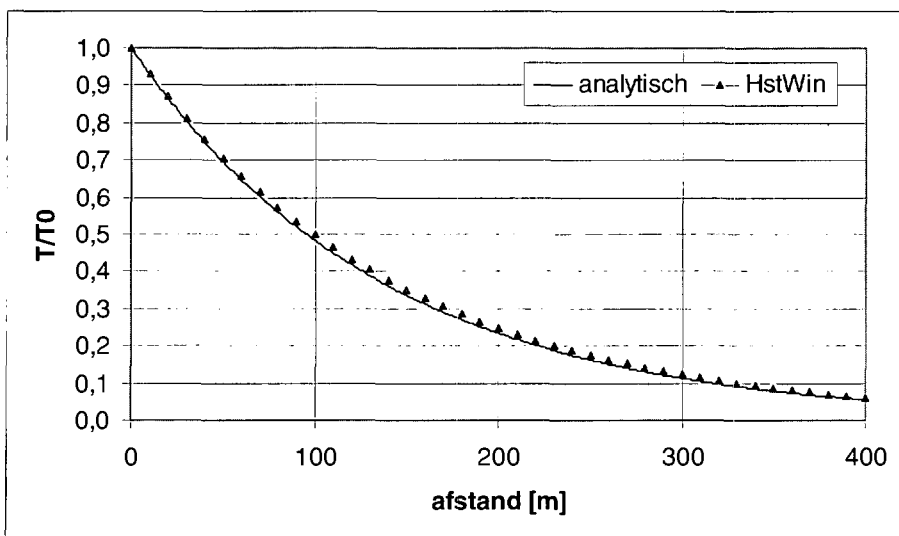
waarin:

C_r	:	warmtecapaciteit droog sediment	[J/(m³K)]
v_{th}	:	stroomsnelheid van het thermische front	[m/d]
v_w	:	stroomsnelheid van het grondwater (poriesnelheid)	[m/d]
k	:	permeabiliteit	[m/d]
I	:	stijghoogtegradiënt	[-]
x	:	afstand	[m]

Tabel 1: Invoerparameters.

parameter	waarde	eenheid
lengte van het model	800	(m)
temperatuurverschil tussen de infiltratie- en de omgevingstemperatuur (T_0)	4	(K)
knooppuntsafstand (Δx)	1	(m)
warmtecapaciteit droog sediment (C_r)	1,5	(MJ/(m³K))
warmtecapaciteit water (C_w)	4,2	(MJ/(m³K))
warmtecapaciteit afsluitende laag (waterverzadigd) (C_i)	2,5	(MJ/(m³K))
warmtegeleiding aqulifer (λ_{aa})	2,5	(W/(mK))
warmtegeleiding boven- en onderliggende laag (λ_i)	1,7	(W/(mK))
porositeit (n)	0,35	(-)
dikte aqulifer (D_{aa})	20	(m)
dikte bovenliggende laag (a)	10	(m)
permeabiliteit (k)	20	(m/d)
stijghoogtegradiënt (I)	1	(‰)
tijd (t)	400	(jaar)
maximale tijdstap (Δt)	0,5	(jaar)

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in figuur 1a.



Figuur 1a: Resultaten van de toetsing van HstWin aan een analytische oplossing voor warmteverlies door een bovenliggende laag met een eindige dikte (analytische oplossing; stationair, HstWin: na 400 jaar).

Bovenstaande toetsing beschrijft een stationair proces. Aangezien in de praktijk veelal een niet-stationaire situatie zal optreden, is ook hiervoor een toetsing uitgevoerd. Bij deze toetsing is gebruik gemaakt van een analytische relatie die is afgeleid door Lauwerier (1955). Deze relatie beschrijft het effect van geleiding van warmte naar boven- en onderliggende lagen op het warmtetransport in een aquifer.

$$T(\tau, t) = \operatorname{erfc} \frac{\frac{\tau}{\beta}}{2 \sqrt{\frac{(t - \tau)}{\beta}}} \quad (7)$$

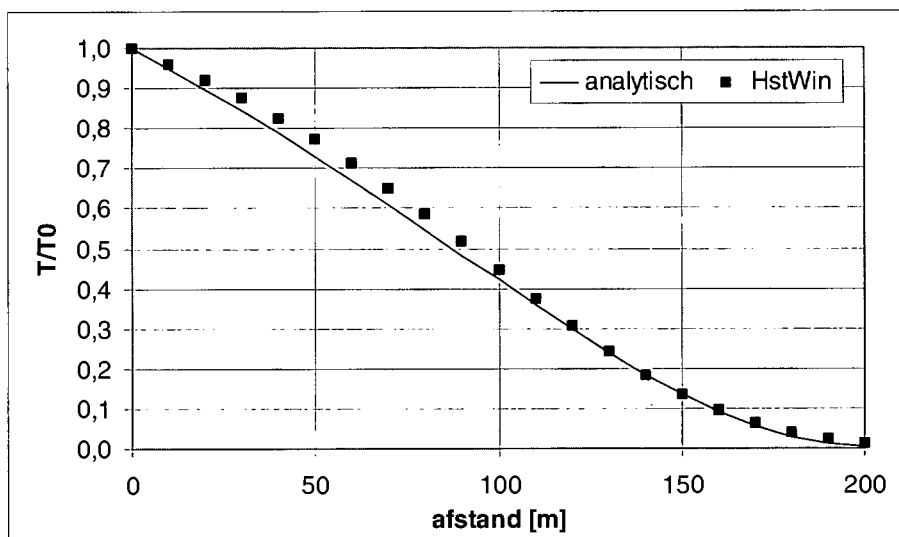
met

$$\beta = \left(\frac{C_a}{C_l} \right)^2 \frac{(D_{aq} / 2)^2}{\lambda_l / C_l} \quad (8)$$

waarin:

t	:	tijd sinds start infiltratie	[s]
β	:	tijdconstante	[s]
C_l	:	warmtecapaciteit boven- en onderliggende laag	[J/(m³K)]
C_a	:	warmtecapaciteit van de aquifer	[J/(m³K)]

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in figuur 1b.



Figuur 1b: Resultaten van een toetsing van HstWin aan een analytische oplossing voor warmteverlies door twee afsluitende lagen met een oneindige dikte (na 20 jaar; niet-stationair).

Een gevolg van het numeriek oplossen van de transportfunctie is dat het thermische front wordt uitgesmeerd. Deze uitsmering wordt veroorzaakt door numerieke dispersie. Door de numerieke dispersie lijkt het of de warmtegeleidingscoëfficiënt groter is dan dat hij in werkelijk is. Deze effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt kan met behulp van de onderstaande formule worden bepaald (Smith en Chapman, 1983):

$$\lambda_{eff} = \lambda_{aq} + \alpha_L \cdot k \cdot I \cdot C_w \quad (5)$$

α_L	:	longitudinale dispersiviteit	[m]
λ_{aq}	:	warmtegeleiding van de aquifer	[W/(mK)]

De grootte van de numerieke dispersie kan bij een achterwaarts rekenschema als volgt berekend worden (Holzbecher, 1998):

$$\alpha_{L,num} = \frac{\Delta x}{2} + \frac{C_w}{C_a} \cdot u \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (6)$$

u	:	Darcy-snelheid	[m/d]
-----	---	----------------	-------

De eerste term is de numerieke dispersie die veroorzaakt wordt door de discretisatie in de ruimte en tweede term wordt veroorzaakt door de discretisatie in de tijd. Na het invullen van de waarden uit tabel 1, blijkt dat de warmtegeleidingscoëfficiënt met circa 3,6 W/(mK) toeneemt. De effectieve warmtegeleidingscoëfficiënt in de aquifer wordt hierdoor 6,1 W/(mK).

Uit de figuren 1a en 1b blijkt dat het temperatuurverloop berekend met HstWin goed overeenkomt met de verschillende analytische oplossingen. Gezien de grootte van de numerieke

dispersie is deze overeenkomst frappant. Klaarblijkelijk wordt het temperatuurverloop in de aquifer hoofdzakelijk bepaald door de geleiding die plaatsvindt naar afsluitende lagen en niet door de geleiding in de aquifer zelf. Hierdoor heeft de dispersie vrijwel geen invloed op het temperatuurverloop in de aquifer.

Uit het voorgaande wordt geconcludeerd dat HstWin het convectief warmtetransport in een aquifer en warmtegeleiding naar boven- en onderliggende lagen goed simuleert.

Vergelijking met meetgegevens

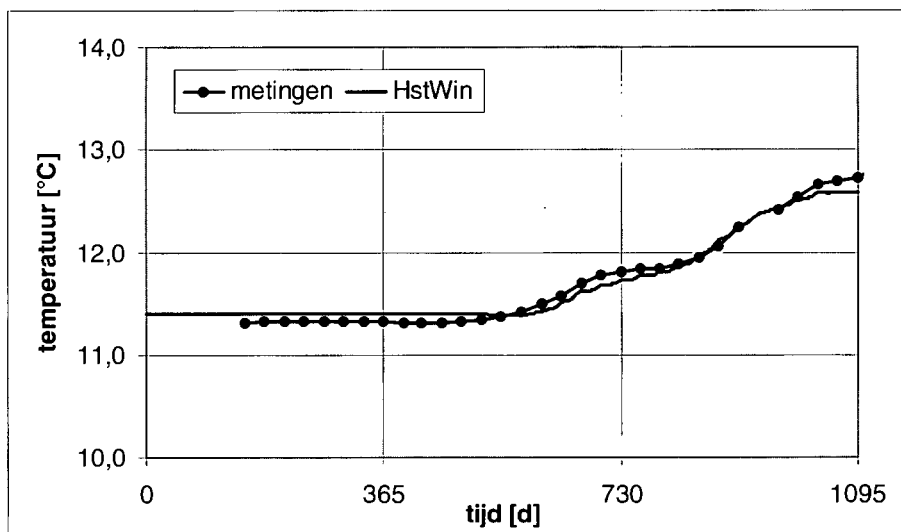
Een volgende stap is om met het programma een aantal praktijksituaties door te rekenen en de resultaten hiervan te vergelijken met meetgegevens. Dit is gedaan voor een tweetal projecten. Het eerste project is een koudeopslagsysteem dat gerealiseerd is bij het Philips Competence Centre (PCC) in Eindhoven en het tweede project is een systeem dat gerealiseerd is ten behoeve van een kunststoffabriek in Hardenberg.

Philips

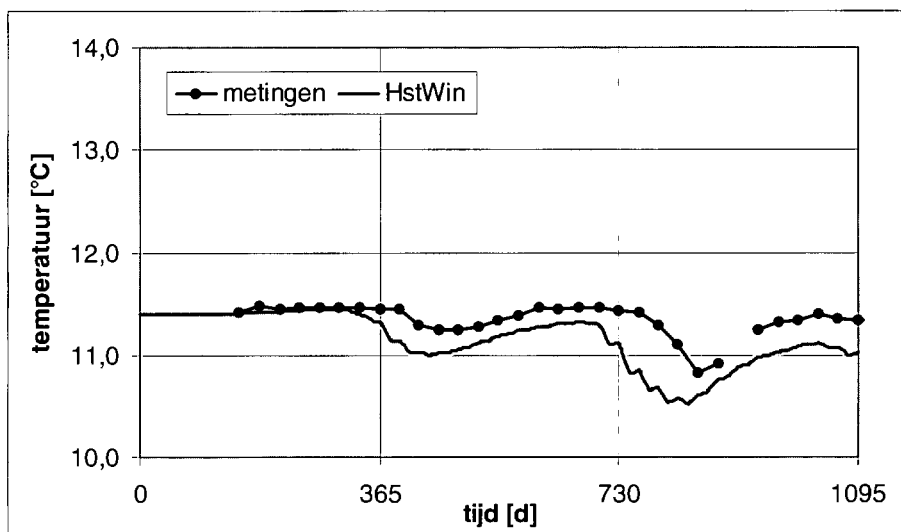
Op het terrein van het PCC zijn twee meetbronnen aanwezig. In deze meetbronnen zijn in de jaren 1996 tot en met 1998 maandelijks metingen gedaan om de temperaturen van de bodem vast te stellen. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een 2D model. Een 2D model bestaat uit één laag met een dikte die gelijk is aan de filterlengte. De temperatuur in deze laag is constant met de diepte. Om de gemeten waarde te kunnen vergelijken met de berekende, dienen de gemeten temperaturen gemiddeld te worden over het filtertraject.

Een factor die bepalend kan zijn voor de resultaten van het model is de grootte van de dispersiviteit. Als vuistregel wordt vaak aangenomen dat de longitudinale dispersiviteit ongeveer een tiende van de afgelegde weg bedraagt (Gelhar e.a., 1985). Op basis van deze schatting zou een afstand van 80 m, van de warme bron tot meetbron 1, een dispersiviteit opleveren van 8 m. De numerieke dispersiviteit (afhankelijk van de discretisatie in de tijd en ruimte) in HstWin bedraagt op deze afstand echter 3 m. In de berekening met HstWin wordt daarom een extra dispersiviteit van 5 m opgegeven.

In de figuren 2a en 2b zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven.



Figuur 2a: Meetgegevens meetbron 1 versus berekening HstWin.



Figuur 2b: Meetgegevens meetbron 2 versus berekening HstWin.

Uit de figuren blijkt dat de met HstWin berekende temperaturen in meetbron 1 goed overeen komen met de gemeten temperaturen en dat ze in meetbron 2 een kleine afwijking vertonen. Een verklaring voor deze afwijking is dat de dispersiviteit die is ingevoerd in HstWin bepaald is aan de hand van de afstand tussen de warme bron en meetbron 1. De afstand tot meetbron 2 is kleiner, waardoor ook de werkelijke dispersiviteit kleiner zal zijn, terwijl in het model maar één waarde opgegeven kan worden voor het hele gebied. Een kleinere dispersiviteit heeft tot gevolg dat het thermische front minder wordt uitgesmeerd, hetgeen tot gevolg heeft dat de berekende temperaturen hoger komen te liggen. Uit berekeningen met een kleinere dispersiviteit blijkt dat de gemeten en berekende tempera-

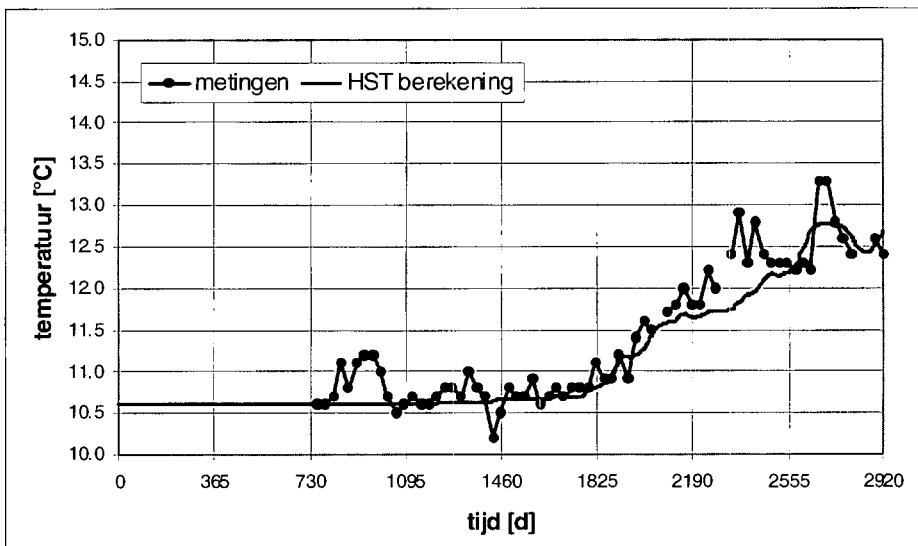
turen in meetbron 2 inderdaad een betere fit opleveren. Het gevolg is echter dat de fit in meetbron 1 slechter wordt.

Wavin

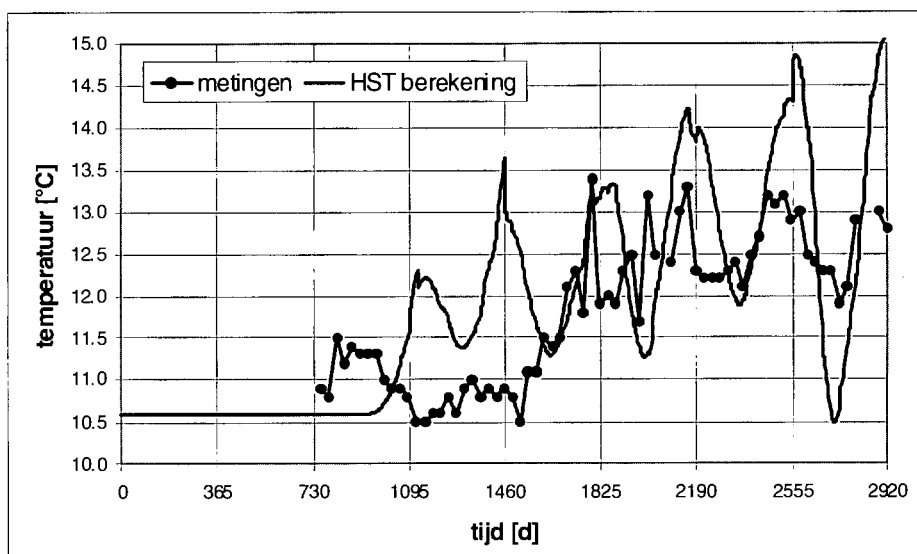
Op het terrein van WAVIN te Hardenberg is voor de proceskoeling van een aantal kunststofverwerkende bedrijven sinds medio 1996 een koudeopslag-/recirculatiesysteem in bedrijf. Het opgewarmde grondwater wordt in de winter gekoeld met oppervlaktewater, waarna het geïnfiltrerd wordt. Met HstWin is de periode van 1996 tot 2002 doorgerekend aan de hand van de gemeten debieten en infiltratietemperaturen. Over de verdeling van de waterhoeveelheid over de acht infiltratiebronnen is geen gedetailleerde informatie bekend. Hierom wordt er van uitgegaan dat de waterhoeveelheid gelijkmatig (tijd en ruimte) over de bronnen verdeeld wordt. In de praktijk worden de infiltratiebronnen die het dichtsbij de 15 onttrekkingsbronnen liggen met name in de winter gebruikt en de gene die het verst liggen met name in de zomer. In het model is hiermee geen rekening gehouden, omdat alleen een arbitraire verdeling opgegeven had kunnen worden. Aangezien voor de berekeningen gebruik gemaakt is van een 2D-model, kan maar één filterlengte opgegeven worden. Voor deze filterlengte is daarom de gemiddelde filterlengte aangehouden.

Op basis van de vuistregel dat de longitudinale dispersiviteit een tiende bedraagt van de afgelegde weg zou op basis van de afstand tussen infiltratiebron IZ5 en onttrekkingsbron BZ14, een dispersiviteit gelden van 12 m. De numerieke dispersiviteit bedraagt op deze afstand 4 m. In de berekening met HstWin wordt daarom een extra dispersiviteit opgegeven van 8 m.

In de figuren 3a en 3b zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven.



Figuur 3a: Meetgegevens bron BZ13 versus berekening HstWin.



Figuur 3b: Meetgegevens bron BZ14 versus berekening HstWin.

Uit figuur 3a (BZ13, onttrekkingsbron) blijkt dat de berekende en gemeten temperaturen redelijk met elkaar overeen komen. Het verloop van de berekende temperaturen is echter minder grillig dan het verloop van de gemeten temperaturen. Dit verschil is waarschijnlijk te wijten aan het feit de waterverdeling over de infiltratiebronnen in werkelijkheid anders is dan voor de berekeningen is opgegeven.

Uit figuur 3b (BZ14, onttrekkingsbron) blijkt dat het temperatuurverloop berekend met HstWin een veel grilliger verloop heeft dan het gemeten temperatuurverloop. Dit heeft te maken met het feit dat de belasting van de onttrekkingsbronnen in werkelijkheid afhankelijk is van het seizoen. Bij de berekeningen is hiermee geen rekening gehouden. Dit aspect speelt met name bij BZ14, omdat deze bron veel dichtbij de infiltratiebronnen is gesitueerd dan BZ13.

Uit de figuren/berekeningen blijkt dat een meetbron die dichtbij de infiltratiebronnen gesitueerd wordt, veel invloed ondervindt van de bedrijfsvoering en de waterverdeling over de verschillende bronnen. Een meetbron op enige afstand wordt hier veel minder door beïnvloed. Dit is logische aangezien de thermische effecten op enige afstand van een opslag hoofdzakelijk bepaald worden door de totale waterhoeveelheden per jaar en niet zozeer door het tijdstip waarop dit water geïnfiltreerd wordt.

Discussie

Uiteraard is er aan de in figuur 2 en 3 gepresenteerde berekeningen het één en ander voorafgegaan. Zo bleek het nodig om de dispersiviteit te verhogen (eerst werd alleen gewerkt met de numerieke dispersie) om een goede overeenkomst te verkrijgen. Ook bleek het belangrijk dat een aantal andere geohydrologische parameters nauwkeurig worden

opgegeven: met name de grootte en richting van de regionale stroming heeft een grote invloed op de doorbraakcurves.

Een computermodel als HstWin wordt vooral gebruikt voor een voorspelling van de te verwachten temperaturen in de omgeving van de opslag. Uit de gepresenteerde figuren blijkt dat het model voldoende nauwkeurig is voor het doel, mits alle benodigde invoergegevens bekend zijn. De onnauwkeurigheid wordt dus vooral bepaald door twee hoofdfactoren: [1] de mate waarin de geohydrologie bekend is (stromingsrichting en -grootte, dispersiviteit) en [2] de mate waarin het gebruik van de opslag bekend is. Voor een goede voorspelling van het temperatuurveld in de ondergrond is het (uiteraard) van groot belang dat de geïnfilterde waterhoeveelheden en temperaturen overeen komen met de werkelijkheid. Uit een recentelijk uitgevoerde evaluatie van een aantal projecten (DWA, 2002) blijkt dat in veel gevallen de waterhoeveelheden en infiltratietemperaturen in de praktijk anders uitpakken dan volgens het ontwerp. In die gevallen zullen bij een voorspelling de berekende effecten niet overeen komen met de werkelijke effecten. De voorspelde invloedsgebieden worden overigens zelden overschreden, omdat meestal minder energie wordt opgeslagen dan geprognostiseerd.

Conclusies

- 1 Uit de vergelijking tussen HstWin en de analytische oplossingen blijkt dat HstWin het warmtetransport in de bodem goed simuleert.
- 2 Uit de vergelijking blijkt tevens dat de warmtegeleiding naar boven en onderliggende lagen een grote rol speelt bij het warmtetransport door de aquifer.
- 3 De geohydrologische gegevens die nodig zijn voor een goede voorspelling van het thermisch invloedsgebied (en van een eventuele invloed op een nabij gelegen winning) zijn met name: grootte en richting van de regionale grondwaterstroming, dispersiviteit en pakketdikte. De grootte van de dispersie is moeilijk in te schatten, maar in de hier weergegeven gevallen bleek de vuistregel: dispersiviteit is 1/10 van de afgelegde weg, redelijk te kloppen.
- 4 Uit de vergelijking tussen de meetgegevens van Wavin en de berekeningen blijkt dat de bedrijfsvoering een grote invloed heeft op de nauwkeurigheid van de voorspelling met HstWin. Uit ervaringen van IF blijkt dat dit niet alleen bij Wavin het geval is, maar dat dit eigenlijk voor de meeste de koude-/warmteopslagprojecten geldt. In het algemeen kan gesteld worden dat de belangrijkste factor die de nauwkeurigheid van de voorspelling met HstWin bepaalt, de mate is waarin het energiegebruik van het gebouw nauwkeurig voorspeld kan worden. Aangezien dit mede afhangt van het klimaat en van de wisselende eisen van bewoners van gebouwen, is dit de minst eenvoudig te voorspellen parameter.
- 5 Op grond van bovenstaande kan gesteld worden dat het geen zin heeft veel energie te stoppen in het verbeteren van de modellering van het gedrag van warm en koud water in de bodem, als men de effecten van koude-/warmteopslag beter wil voorspellen. Als men dat laatste nodig zou vinden, dan kan men zich het best richten op het beter voorspellen van het gebruik van de opslag door de beheerder van de installatie.

Meer informatie over het programma HstWin is te vinden op de website van IF Technology, www.iftechnology.nl. Op deze website is tevens een gratis demoversie van het programma te downloaden.

Literatuur

- DWA (2002)** Evaluatie monitoringprojecten met betrekking tot energieopslag in de bodem; NOVEM nummer 2019-01-04-04-0004, bestelnummer 4700001068.
- Gelhar, L.W., A. Mantoglou, C. Welty en K.R. Rehfeldt (1985)** A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media; EPRI, Palo Alto, CA 94303.
- Holzbecher, E. (1998)** Modeling density-driven flow in porous media: Principles, Numerics, and Software; Springer, Berlin.
- Kipp, K.L. (1987)** HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional ground-water flow systems; USGS, Water-Resources Investigation Report 86-4095.
- Lauwerier, H.A. (1955)** The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid; in: *Appl. Sci. Res.* A5, pag 150–154.
- Smith, L. en D.S. Chapman (1983)** On the thermal effects of groundwaterflow: 1. Regional scale systems; in: *Journal of Geophysical Research*, nr 88, B1, pag 593–608.
- Uffink, G.J.M. (1981)** De afvlakking van temperatuurvariaties in het grondwater door warmte-uitwisseling tussen het watervoerende pakket en de boven- en onderliggende pakketten; R.I.D.-mededeling '81-4, Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening, Voorburg.