

# *Verbetering bodemtemperatuurmetingen*

## *Improvement of soil temperature measurements*



***A.N. Mazee***

KNMI

Instrumentele Afdeling

***R. Jilderda***

KNMI

Waarnemingen en Modellen-Klimatologische Dienst

21 maart 2005

# Inhoudsopgave

Inhoudsopgave .....	2
1 Abstract .....	3
2 Inleiding .....	5
2.1 De huidige situatie en zijn problemen (begin 2001) .....	5
3 Warmtestroom in de bodem .....	6
3.1 Bodemeigenschappen van invloed op de warmtehuishouding .....	8
4 Nieuw systeem van plaatsen sensoren .....	10
5 De vergelijking van de meetwaarden .....	11
5.1 Vergelijkende berekeningen te De Bilt .....	11
5.2 De $\delta$ -methode .....	11
5.2.1 De vergelijking in De Bilt .....	12
5.2.2 De vergelijking in Wilhelminadorp .....	14
5.3 Resultaten van de metingen op basis van dempingsdiepte .....	15
6 Conclusie .....	17
Bijlage A. Typeringen van de bodem ter plaatse van de metingen .....	18
(a) De Bilt Teststation (261) .....	18
(b) De Bilt Operationeel (260) .....	18
(c) Wilhelminadorp .....	19
Bijlage B. Tekening mal 04-04-073 .....	20
Bijlage C. Tekening kuil en plaatsing sensoren .....	21
Bijlage D. Protocol plaatsing Bodemtemperatuur sensoren .....	22
Bijlage E. Literatuuroverzicht: .....	23

## 1 Abstract

KNMI measures soil temperature at four locations in the Netherlands. Measurements are carried out with standard electrical sensors (PT-500 clamped in stainless steel shaft) at five different depths. These depths are 5, 10, 20, 50 and 100 cm below soil surface level.

At regular time intervals the sensors need calibration. In 2001 at some locations the validity of calibration was out of date and at one location even some sensors did not function anymore. Replacement of these sensors was therefore necessary. However the usual method of installation needed improvement. With this method the sensors were laid down in a dug pit and covered by loose soil. This soil needed a long time of settlement before representative measurements could take place.

To avoid this problem a new way of installation was applied. In this method the sensors are placed in pre-drilled holes in one of the walls of a dug pit of sufficient depth. To assure the right depths a mould was constructed with small holes at distances from the top of the mould corresponding to the required depths of measurements (see appendix B). Together with the mould a long drill was constructed of which the diameter is slightly smaller than the shaft of the sensor. In the pit the mould is strict vertically hanged down with its flange on the surface. Through the holes in the mould holes are drilled in the side wall of the pit. After removal of the mould the sensors are placed in these pre-drilled holes. The slightly smaller diameter of the hole compared to the diameter of the sensor shaft assures close contact of the sensor to the soil. Moreover the soil surrounding the sensor is hardly disturbed.

Because of the presence of a second measuring site at Wilhelminadorp and De Bilt, the results of the measurements of the newly installed sensors could be compared. During the digging of the pit the soil type was described and classified according to the usual system in The Netherlands (De Bakker en Schelling, 1966).

In this report two methods are explained to assess the results of the measurements. The first method uses a simple model to describe the changes in soil temperature, if certain soil specific parameters (heat conductivity and heat storage coefficient) are known. Both parameters determine the so-called extinction depth, which in turn can be calculated from the amplitude or phase shift at the three top depths in soil temperature. During June 2001 daily values for the extinction coefficient for both soil temperature measuring sites were determined. The results showed only small daily variations at the site with the newly installed sensors. Also there was a high correspondence in the extinction depths calculated from the amplitude and the phase shift at this site. The extinction depth was calculated from values of the heat conductivity and heat storage coefficient depending on soil moisture content for several soil types found in literature. The calculated values for the extinction depth at the site with the newly installed sensors showed agreement with the calculated values from literature for comparable soil types.

The results calculated from the measurements at the old site showed less satisfactory results. Up to a depth of 50 cm the soil is of the same type on both sites at The Bilt. Assuming that the extinction depth at both sites is equal, the most probable measuring depths at the old site for the three upper sensors were calculated. These calculations showed deviations up 7 cm from the required depth. During the excavation of these sensors a year later the actual depths were measured. The correspondence between the actual and calculated depths appeared to be remarkable close.

The second method, called the  $\delta$ -method, calculates a parameter ( $\delta$ ), which describes the correspondence between two sites on the same location. Calculations were carried out on measurements before and after the installation of new sensors at one site. On the same time the old sensors at the same site were excavated and the actual depths were measured. Especially the

sensors at the three top depths showed large deviations from the required depths. The jump in the value of  $\delta$  on the installation date is largely explained by those deviations. The variation of  $\delta$ , being the same before and after installation, shows that a time for settlement of the soil is unnecessary and that representativity of the measurements is guaranteed from the day of installation onwards.

## 2 Inleiding

De bodemtemperatuurmetingen worden door het KNMI in Nederland op 4 plaatsen verricht. Er deden zich problemen voor bij de meetopstellingen en wel de volgende:

- Van een deel van de sensoren was de ijktermijn verstreken, of waren zelfs defect en dienden dus vervangen te worden.
- De manier waarop deze sensoren tot op heden werden aangebracht, was nogal problematisch door de verstoring van de grond die de methode veroorzaakte.

Deze problemen gaven aanleiding tot het zoeken van een nieuw systeem van aanbrengen van bodemtemperatuur-sensoren, waardoor de verstoring geringer was en de nauwkeurigheid van het aanbrengen constanter was.

Met behulp van vergelijkende metingen werd de nieuwe methode van inbrengen van sensoren gecontroleerd en werd de zettingstermijn van de bodem bepaald.

De resultaten van dit onderzoek zijn vastgelegd in het navolgende document.

### 2.1 De huidige situatie en zijn problemen (begin 2001)

Voor het bepalen van bodemtemperaturen worden sensoren ingegraven. Deze sensoren zijn van het standaardtype dat bij het KNMI in gebruik is: Pt 500 opnemers met een RVS omhulling.

De standaard diepten voor het meten van bodemtemperaturen zijn: 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm en 100 cm.

- In De Bilt zijn twee sets bodemtemperatuursensoren in gebruik. Een set voor station 260 en een set voor teststation 261.
- In Wilhelminadorp is een dubbele set aanwezig, de tweede set ligt daar sinds 22 maart 2000.
- In Nieuw Beerta is een set ingegraven. De sensoren op 5 en 10 cm diepte functioneren niet meer.
- In Marknesse is een set ingegraven.

Deze sensoren zijn tot voor kort "ingegraven", dat wil zeggen dat er een kuil werd gegraven waarin de sensoren werden gelegd met steeds een gedefinieerde laag aarde. Hierbij was nodig de aarde gedurende een lange tijd te laten inklinken om de oorspronkelijke pakking te herkrijgen, zodat de metingen representatief zijn voor de natuurlijke situatie. Deze methode heeft als bezwaar dat de diepte waarop de sensoren komen te liggen niet goed te definiëren is en bovendien, dat er een lange zettingstermijn gehanteerd dient te worden. Deze inklinktermijn werd op een half jaar geschat. Om in deze periode toch te kunnen meten was een **tweede** set nodig, die al eerder was ingegraven.

De ijktermijn van temperatuursensoren is op 3 jaar gesteld. De meeste sensoren zijn al langer aanwezig.

### 3 Warmtestroom in de bodem

In de loop van de tijd ondergaat de bodem een temperatuurverandering, die overdag het gevolg is van beschijning door de zon. In het grensvlak van bodem en atmosfeer wordt zonne-energie omgezet in warmte. Een deel van deze warmte wordt uitgestraald. Het andere deel wordt benut voor verwarming van de atmosfeer, verdamping en opwarming van de diepere ondergrond. Gedurende de nacht overheerst de uitstraling en de hiervoor benodigde warmte komt deels uit de bodem, waardoor deze afkoelt. De warmtebeweging in de bodem vindt plaats door geleiding en dit proces is goed met een eenvoudig fysisch model te beschrijven, indien de bodem isotroop wordt verondersteld (zie literatuur 1)

Het verticale warmtetransport per eenheid van oppervlakte is recht evenredig met de temperatuurgradiënt en te beschrijven als:

$$B = -\lambda \frac{dT}{dz}$$

De veranderingen van de temperatuur in een dun laagje grond tengevolge van het warmtetransport volgen uit de wet van behoud van energie:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial B}{\partial z}$$

In beide vergelijkingen geldt:

$B$	verticaal warmtetransport	[W/m <sup>2</sup> ]
$T$	temperatuur	[°C]
$z$	diepte beneden maaiveld	[m]
$t$	tijd	[s]
$\lambda$	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/m·°C]
$\rho$	soortelijke massa	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C$	soortelijke warmte	[J/kg·°C]

Substitutie van de eerste vergelijking in de tweede levert:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Vanwege de dagelijkse en jaarlijkse gang van de zon heeft de temperatuur aan de oppervlakte een periodiek karakter. Dit periodiek karakter wordt op andere diepten voortgezet en deze veronderstelling geeft de volgende oplossing voor diepte  $z$ :

$$T = \bar{T} + A_{a0} e^{-z/D_a} \cos(\omega_a t - z/D_a) + A_{d0} e^{-z/D_d} \cos(\omega_d t - z/D_d) \dots\dots\dots(1)$$

In deze vergelijking geldt verder:

$\bar{T}$	gemiddelde temperatuur, op alle diepten en door gehele jaar constant	[°C]
-----------	--	------

$A_{a0}$	amplitude aan de oppervlakte in jaarlijkse gang	[°C]
$D_a$	dempingsdiepte, geldend voor jaarlijkse gang	[m]
$\omega_a$	cirkelfrequentie van de jaarlijkse gang	[rad/s]
$A_{d0}$	amplitude aan de oppervlakte in dagelijkse gang	[°C]
$D_d$	dempingsdiepte, geldend voor dagelijkse gang	[m]
$\omega_d$	cirkelfrequentie van de dagelijkse gang	[rad/s]

Dempingsdiepte en cirkelfrequentie voor dag en jaar zijn niet gelijk en zijn volgens onderstaand schema uit de duur voor de betreffende periode te berekenen:

$$\omega = \frac{2\pi}{P_T} \quad \text{en}$$

$$D = \sqrt{\frac{2\lambda}{\omega\rho C}}$$

$$P_T \quad \text{duur van de periode (jaar of dag)} \quad [\text{s}]$$

Vanwege de lage cirkelfrequentie in de jaarlijkse gang, kan de bijdrage hiervan in vergelijking 1 over een gehele dag constant geacht worden. De bijdrage is echter wel voor iedere diepte verschillend. Voor een willekeurige dag en voor een zekere diepte  $z$  kan vergelijking 1 vereenvoudigd worden tot:

$$T = \bar{T}_z + A_z \cos\{\omega_d t - \varphi(z)\} \dots\dots\dots (2)$$

In deze vergelijking geldt:

$$\bar{T}_z \quad \text{gemiddelde temperatuur op diepte } z \quad [^\circ\text{C}]$$

$$A_z = A_0 e^{-z/D} \quad \text{amplitude op diepte } z \quad [^\circ\text{C}]$$

$$\varphi(z) = z/D \quad \text{faseverschuiving op diepte } z \quad [\text{rad}]$$

Met behulp van de kleinste kwadraten methode kan vergelijking 2 “gefit” worden aan alle meetwaarden voor een gegeven diepte en op een bepaalde dag. Op deze wijze is voor de vijf meetdiepten de amplitude en de faseverschuiving vast te stellen. Vanwege de hoge mate van demping is maar weinig signaal terug te vinden in de temperatuur op 0,50 m en 1,00 m beneden maaiveld. Voor berekening aan de dagelijkse gang zijn deze weinig geschikt en worden verder buiten beschouwing gelaten. Uit zowel de relatie voor de amplitude als de relatie voor de faseverschuiving kan de dempingsdiepte ook middels de kleinste kwadraten methode bepaald worden. Vanwege het verschillend karakter van de relatie en enige immer aanwezige anisotropie hoeven de waarden niet altijd overeen te komen.

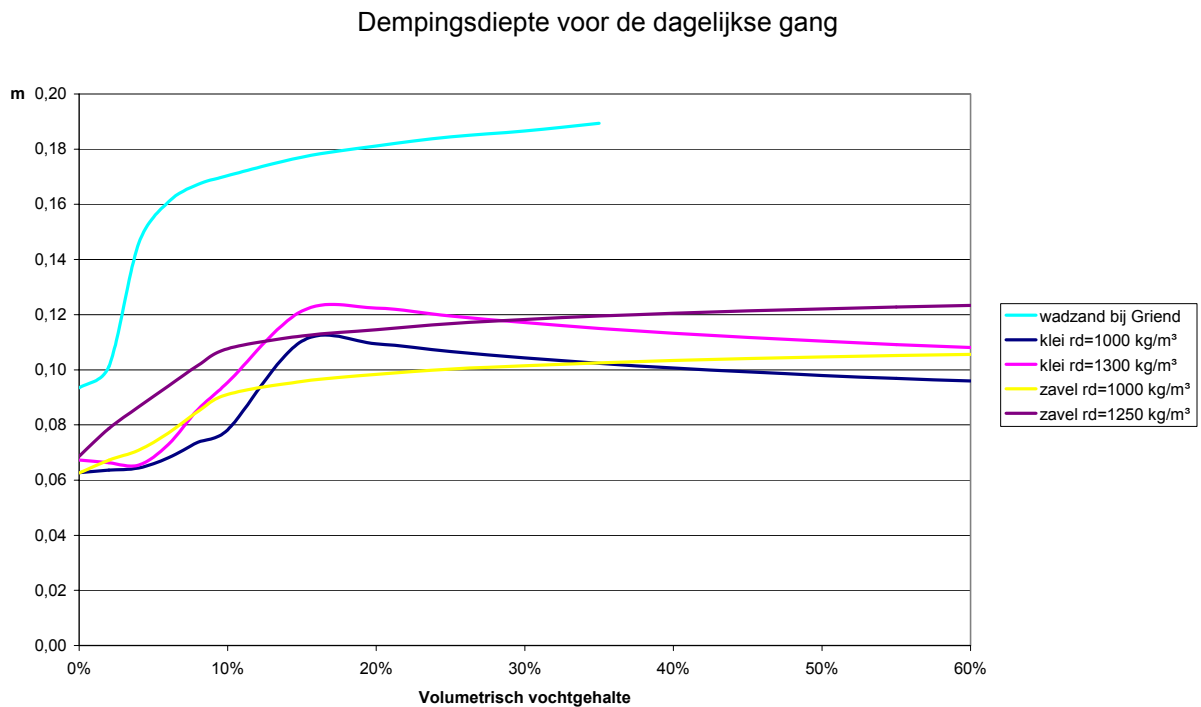
Indien van een bodem de soortelijke massa, soortelijk warmte en de warmtegeleidingscoëfficiënt bekend zijn kan de dempingsdiepte ook direct berekend worden. Zoals uit vervolg blijkt is vooral het bepalen van de warmtegeleidingscoëfficiënt geen eenvoudige zaak.

### **3.1 Bodemeigenschappen van invloed op de warmtehuishouding**

Onder bodem wordt de bovenste verweerde bovenlaag van de aardkorst verstaan. In Nederland bestaat deze in de regel uit zacht korrelig materiaal van heterogene samenstelling. Dit materiaal vormt het minerale deel van de bodem. Door groei en afsterven van planten kan de bodem verder verrijkt zijn met volledig verteerde (humus) en halfverteerde plantenresten. Een verzamelterm hiervoor is organische stof. Doordat de bodemkorrels niet precies op elkaar passen is er nog ruimte voor lucht of water. Deze ruimte wordt aangeduid met de term poriënvolume. Vanwege het levende karakter van de bodem is de samenstelling in de loop van de tijd wisselend. In de loop van de seizoenen varieert het organische stofgehalte met de snelheid van plantengroei en -afsterving. De snelheid van verandering hierin is in de regel laag en per dag verwaarloosbaar. Dit proces vindt bovendien hoofdzakelijk in de toplaag (bouwvoor) van de bodem plaats. Het poriënvolume daarentegen is gevuld met vocht en lucht in een sterk wisselende verhouding. Na een regenbui raken de poriën immers gevuld met water, dat door verdamping langzaam weer verdwijnt. Vanwege de hoge soortelijke warmte van water en de sterke invloed hiervan op de warmtegeleiding blijkt het vochtgehalte van grote invloed te zijn op de warmtehuishouding. Voor de lucht in de bodem geldt precies het omgekeerde en is de invloed verwaarloosbaar. Ook dit proces vindt slechts plaats in de bovenste deel van de bodem (gedeelte boven de grondwaterspiegel of onverzadigde zone)

Het product van soortelijke massa en de soortelijke warmte is eenvoudig te berekenen, als de samenstelling van de bodem bekend is. Dit getal is eenvoudigweg de som van de overeenkomstige producten van de samenstellende delen. De warmtegeleidingscoëfficiënt is echter alleen proefondervindelijk te bepalen. Bovendien loopt het verband met het vochtgehalte van bodem tot bodem sterk uiteen. Uit de literatuur zijn enkele gevallen bekend en de hieruit berekende dempingsdiepte voor de dagelijkse gang is in Figuur 1 weergegeven.





*Figuur 1 Dempingsdiepte voor de dagelijkse gang voor enkele bodemtypen*

Van het wadzand bij Griend is bekend, dat het om een zandplaat gaat in de Waddenzee ten zuiden van Terschelling. De bodem bestaat hoogst waarschijnlijk uit fijn zand, maar kan ook grof zand zijn, van mariene oorsprong. Zavel is in het algemeen materiaal, wat voor 8 – 25 % van het droog volumegegewicht uit lutum (korrelgrootte: 0 – 2  $\mu\text{m}$ ) bestaat. Klei bestaat voor meer dan 25% uit lutum.

## 4 Nieuw systeem van plaatsen sensoren

Begin 2001 is het systeem bedacht om de sensoren zodanig in de grond aan te brengen dat de grond waarin gemeten zal gaan worden, zo min mogelijk wordt verstoord.

Hiertoe wordt een kuil met een rechte wand gegraven. Met behulp van een mal (zie Figuur 2 en Figuur 3) worden op een gedefinieerde plaatsen gaten in de wand gestoken waarin, als de mal verwijderd is, de sensoren aangebracht worden. Zie ook tekening 04-04-073 in de bijlage op pagina 19 en het complete

protocol, eveneens in de bijlage.

Om de sensoren, die na het verstrijken van de ijktermijn vervangen moeten worden, makkelijk en met zo min mogelijk schade uit te kunnen graven worden de kabels langs een staf geleid, zodat deze naderhand makkelijk teruggevonden kunnen worden.

De aarde die uit de kuil komt wordt in lagen bewaard en laag voor laag weer in de kuil terug gestort.

Op 14 mei 2001 zijn de sensoren van station De Bilt, 261 vervangen door nieuwe, deze zijn volgens het nieuwe systeem in de grond aangebracht.



*Figuur 2 De Mal*

In Nieuw Beerta functioneerden de sensoren op 5 en 10 cm diepte niet meer. Op 6 juni 2001 is een nieuwe set geplaatst volgens de nieuwe methode.



*Figuur 3 Voorboren*

## 5 De vergelijking van de meetwaarden

In De Bilt zijn twee sets bodemtemperatuursensoren aanwezig, één set voor station 260 en één set voor het teststation 261. Vanaf eind 2000 is de data van deze sensoren op 10-minuut basis voor onderzoeksdoeleinden gearcheveerd.

In Wilhelminadorp is een dubbele set aanwezig, die daar sinds 22 maart 2000 ligt.

Vanaf 8 maart 2001 worden alle sensoren van alle stations ingewonnen en gearcheveerd.

Bij het vernieuwen (en uitgraven van de oude) van sensoren bleek dat de oude sensoren feitelijk dieper (zijn komen te liggen) of reeds lagen. Het vermoeden bestaat dat de sensoren van 260 ook dieper liggen.

Om te kunnen vergelijken hoe de sensoren zich gedragen en hoe de bodem zich herstelt na het graven, inbrengen van de sensoren en vervolgens dichten van het gat, is een methode van controle bedacht. In eerste instantie werden meetwaarden van de sensoren op een bepaalde diepte van elkaar afgetrokken en vergeleken. Er viel toen op dat de meetwaarden van de twee sets in Wilhelminadorp beter met elkaar overeen kwamen dan die van de twee sets in de Bilt, hetwelk logisch is want de sensoren in Wilhelminadorp liggen vlak naast elkaar en zijn op dezelfde manier ingebracht. Die in de Bilt liggen verder uit elkaar, bovendien verschilt de opbouw van de bodem en de grondsoort ter plaatse. Voor de vergelijking is in eerste instantie alleen gebruik gemaakt van grafische voorstellingen. Nadat de set sensoren van station 261 is vervangen werden de verschillen (vooral van de 5 en 10 cm temperatuur) te groot. Er is gezocht naar een methode om toch onder de wisselende omstandigheden een vergelijking te maken. Het vergelijken van het absolute verschil is onder wisselende weersomstandigheden niet mogelijk omdat dat afhankelijk is van het dag - nacht verschil.

### 5.1 Vergelijkende berekeningen te De Bilt

Met behulp van de formules in paragraaf 3: Warmtestroom in de bodem is een eenvoudig model, dat de warmtehuishouding in isotrope grond beschrijft, te maken.

Uit doorrekening, van de 10-minuut waarden van de bodemtemperatuur gedurende de maand juni 2001 te De Bilt, met behulp van dit model, blijken de resultaten van het operationele station niet met het teststation overeen te stemmen. Het geconstateerde verschil wordt veroorzaakt door de onjuiste ligging van met name de temperatuursensoren op 0,05 m, 0,10 m en 0,20 m beneden maaiveld op het operationele station.

### 5.2 De $\delta$ -methode

Bij de vergelijking zal de 260-5 cm temperatuur tussen 261-5 cm en 261-10 cm liggen.

Voor deze sensoren kan een  $\delta$  bepaald worden waarbij de verschillen tussen

260-5 cm en  $\delta * (261-5 \text{ cm}) + (1-\delta) * (261-10 \text{ cm})$  minimaal zijn. Is deze waarde van  $\delta$  voor verschillende periodes ongeveer gelijk dan kan dit als een eigenschap van de sensoren-grond combinatie gezien worden.

Er wordt bij deze redenering alleen gerekend met de warmtegeleiding en niet de warmte opslag. Met de door de warmteopslag ontstane fase verschuiving wordt daardoor geen rekening gehouden. Er bestaat een model<sup>1</sup> dat wel rekening houdt met de warmteopslag en de warmtegeleiding van de bodem. Uit de demping en de faseverschuiving van de temperatuurvariatie kan dan de diepte van de sensor bepaald worden.

---

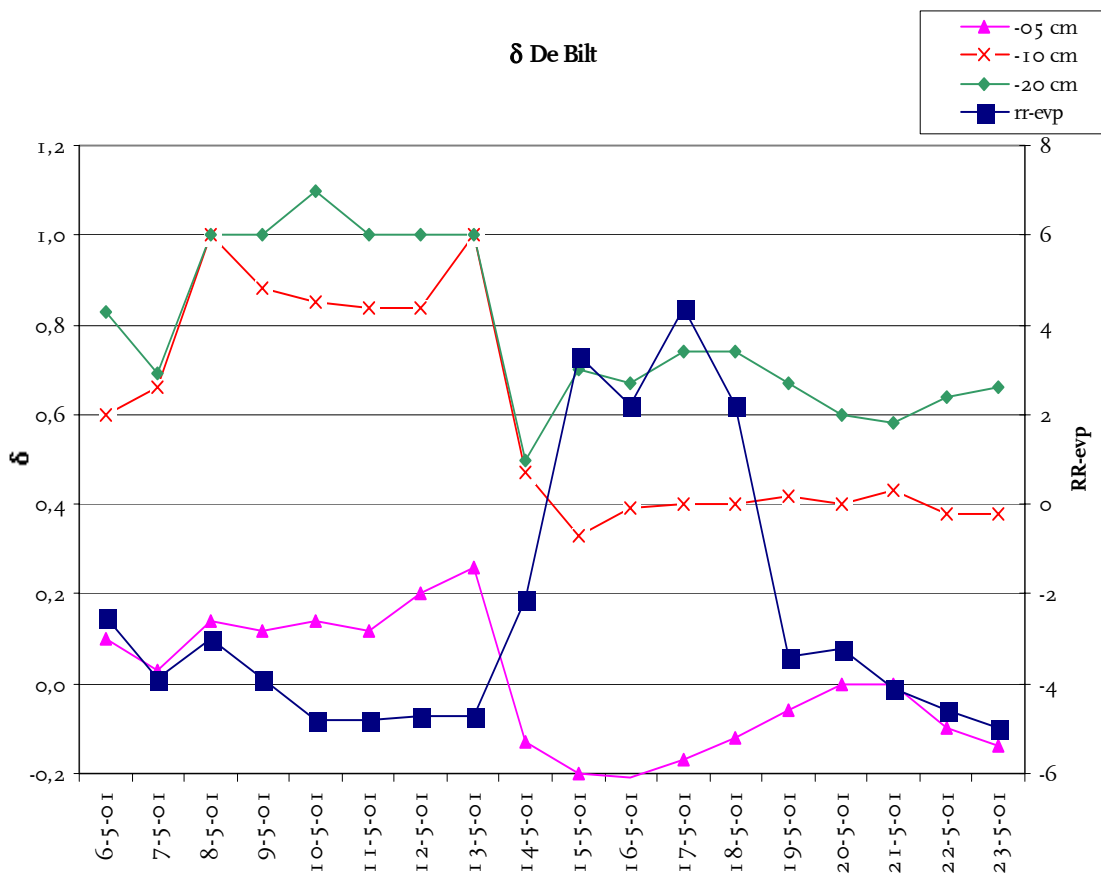
<sup>1</sup> Zie literatuur 1 en 2

Vooral voor sensoren die relatief dicht bij elkaar in de grond geplaatst zijn geven het model en mijn berekeningsmethode vergelijkbare resultaten. De bepaling van de  $\delta$  is in feite de bepaling van de diepte van de sensor gerelateerd aan (bekende) andere sensoren.

Hiervoor kan ook het boven gemelde model gebruikt worden. Voor de voorkomende gevallen komen hier sterk vergelijkbare resultaten uit. Zie ook voor verdere uitleg van deze methode hoofdstuk 5.1 .

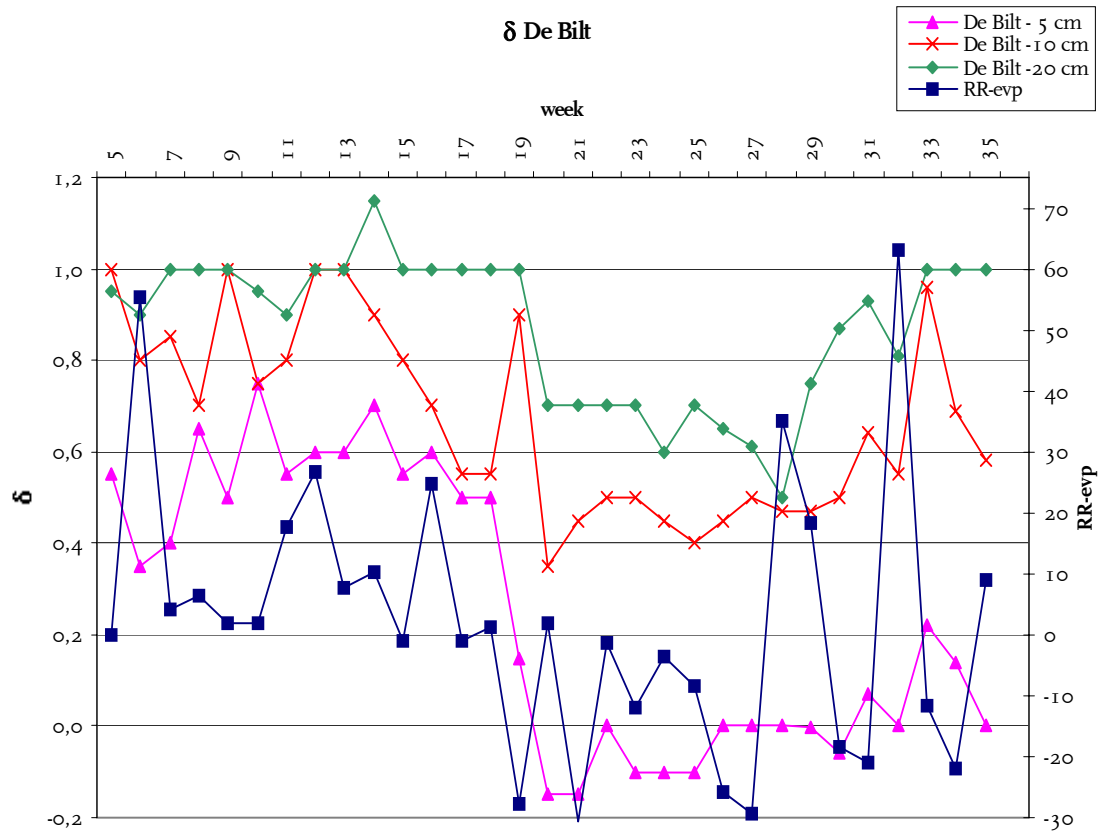
### 5.2.1 De vergelijking in De Bilt

Voor de sensoren in De Bilt zijn de  $\delta$ -factoren bepaald. De eerste grafiek geeft de factoren weer op dagbasis beginnend op 6 mei 2001 en eindigend op 23 mei 2001. Op 14 mei 2001 zijn de bodemtemperatuursensoren van station 261, volgens de nieuwe methode, vervangen. Uit de grafiek in Figuur 4 blijkt dat na 1 à 2 dagen geen verschil meer te constateren is.



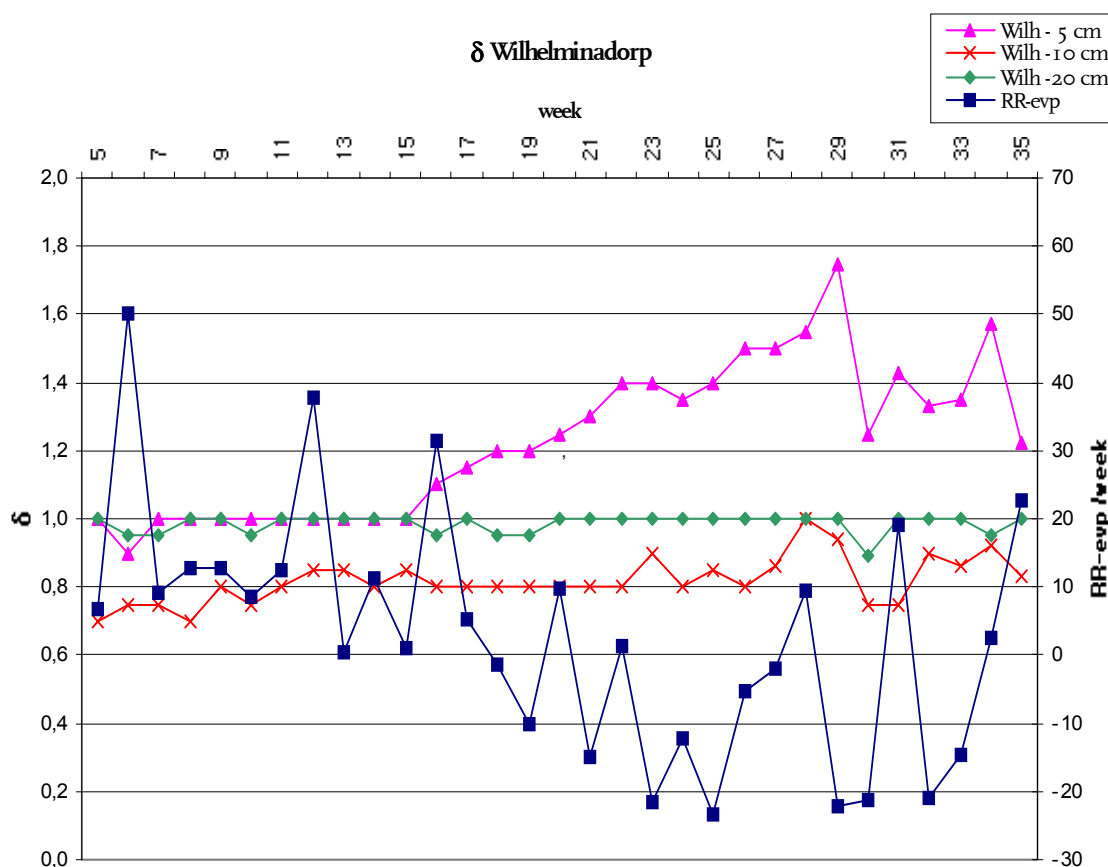
Figuur 4 delta's op dagbasis

Op 14 mei 2001, (week 20) zijn de nieuwe sensoren geplaatst. Het blijkt dat de delta's na week 20 weer vrijwel stabiel zijn en dat de schommelingen niet groter zijn dan in de periode ervoor.



*Figuur 5 delta's op weekbasis*

### 5.2.2 De vergelijking in Wilhelminadorp



Figuur 6 delta's voor Wilhelminadorp

Als controle kunnen voor Wilhelminadorp de  $\delta$ 's bepaald worden. Deze dienen dan over het hele jaar gelijk te zijn., omdat er geen sensoren verwisseld zijn.

In Figuur 6 valt op dat de  $\delta$ 's redelijk constant zijn en niet ver van de factor 1 liggen. Voor de sensor op -5 cm blijkt er wel een verschil te ontstaan na week 15. De verklaring moet worden gezocht in de mate van vocht verzadiging van de toplaag. De lichtblauwe lijn geeft de (neerslag - verdamping) weer. Omstreeks week 15 gaat de verdamping de overhand krijgen. Wordt de verticale vochtstroom meegerekend, dan moet in die periode de toplaag begonnen zijn met op te drogen.

### **5.3 Resultaten van de metingen op basis van dempingsdiepte**

In tabel 1 zijn de resultaten van de berekeningen uit de metingen (10-minuut waarden uit het AWS) over de maand juni 2001 te De Bilt weergegeven. De berekeningen zijn uitgevoerd, zoals in de paragraaf over warmtehuishouding in de bodem is beschreven. In de kolom onder  $D_A$  is de dempingsdiepte berekend uit de amplitude weergegeven en onder  $D_\tau$  staat dezelfde grootte, maar dan berekend uit de faseverschuiving. De berekeningen zijn zowel voor het operationele als het teststation uitgevoerd. Bovendien is het cumulatief potentieel neerslagoverschot in de tabel opgenomen, welke als kwalitatieve maat voor het vochtgehalte beschouwd kan worden.

Datum	operationeel		teststation		neerslag mm	Referentie- gewasverdamoping mm	Neerslag- overschot mm
	D <sub>A</sub> m	D <sub>τ</sub> m	D <sub>A</sub> m	D <sub>τ</sub> m			
1 jun 2001	0,11	0,09	0,09	0,08	.	2,2	-3,6
2	0,10	0,08	0,07	0,07	14,9	1,2	9,1
3	0,11	0,10	0,08	0,08	4,5	1,9	12,4
4	0,13	0,16	0,10	0,12	0,4	1,8	10,9
5	0,15	0,25	0,12	0,12	.	3,8	9,1
6	0,15	0,19	0,10	0,13	1,0	3,2	6,3
7	0,13	0,13	0,09	0,10	2,6	3,5	5,7
8	0,13	0,12	0,09	0,09	0,3	3,7	2,5
9	0,12	0,12	0,09	0,09	.	2,9	-1,2
10	0,12	0,14	0,09	0,10	.	2,3	-4,1
11	0,12	0,15	0,09	0,11	0,7	3,6	-5,7
12	0,12	0,18	0,09	0,11	0,2	2,2	-9,1
13	0,12	0,18	0,10	0,12	.	3,9	-11,3
14	0,12	0,16	0,10	0,11	.	4,3	-15,2
15	0,14	0,17	0,10	0,11	.	2,9	-19,5
16	0,12	0,13	0,08	0,09	17,1	2,4	-5,3
17	0,13	0,16	0,09	0,10	3,2	1,6	-4,5
18		-0,04	0,07	-0,04	9,1	1,3	3,0
19	0,13	0,18	0,09	0,12	0,1	4,2	1,8
20	0,13	0,18	0,09	0,12	.	4,2	-2,4
21	0,13	0,12	0,08	0,09	.	3,4	-6,6
22	0,12	0,11	0,08	0,08	.	2,5	-10,0
23	0,13	0,20	0,10	0,13	.	3,5	-12,5
24	0,12	0,16	0,09	0,11	.	3,6	-16,0
25	0,12	0,17	0,09	0,11	.	5,4	-19,6
26	0,12	0,17	0,09	0,11	.	5,3	-25,0
27			0,09	0,08	1,1	2,4	-29,2
28	0,12	0,17	0,09	0,11	.	4,1	-31,6
29	0,12	0,16	0,09	0,10	.	3,6	-35,7
30	0,12	0,14	0,09	0,09	0,7	3,2	-38,6
min	0,10	0,08	0,07	0,07			
gem	0,12	0,15	0,09	0,10			
max	0,15	0,25	0,12	0,13			
std	0,01	0,04	0,01	0,02			

Tabel 1

Uit Tabel 1 blijkt een geringe van dag tot dag variatie van de dempingsdiepte. Voor het teststation is de goede overeenkomst van de dempingsdiepte berekend uit de amplitude en die uit de faseverschuiving opvallend. Voorts is er nauwelijks samenhang met het cumulatief potentieel neerslagoverschot te ontdekken, hetgeen misschien het gevolg is van het ondiepe grondwater en de aan-



wezige leem, die voor capillaire opstijging zorgt <sup>2</sup>. Voor het teststation blijken verder de waarden goed te vallen op de onderste vier curven in figuur 1. De hogere waarden van het operationele station lijken beter te passen bij de bovenste curve in figuur 1. In een van de bijlagen zijn de resultaten van de bodemopname ten tijde van de installatie van de temperatuursensoren op het teststation weergegeven. Hieruit blijkt, dat het minerale deel overeenstemming vertoont met het wadzand. Het gehalte aan organische stof zal te De Bilt hoger zijn, omdat in het wadzand naar verwachting nog weinig bodemvorming heeft plaatsgevonden. Organische stof zorgt voor vermindering van de dempingsdiepte, zodat de curve voor de dempingsdiepte te De Bilt naar verwachting lagere waarden zal vertonen dan die voor het wadzand. Hieruit valt te concluderen, dat de dempingsdiepte voor het operationele station te hoog uitvalt.

Nadere analyse van het dagelijks verloop van de bodemtemperatuur leert, dat voor de opgegeven diepte de temperatuur in vergelijking met die van het teststation wel erg gedempt is. Door nu de berekende dempingsdiepte van het teststation maatgevend te beschouwen voor het operationele station kan bij de gevonden amplitudes op het operationele station de passende diepten berekend worden. Uit deze berekening voor de temperaturen op 0,05 m, 0,10 m en 0,20 m blijken respectievelijk de diepten 0,12 m, 0,15 m en 0,23 m beter bij de gevonden amplitudes te passen. Complete doorrekening geeft ook een betere overstemming met de amplitude berekend uit de faseverschuiving te zien. Tenslotte bleek bij het uitgraven op het teststation met name de drie bovenste temperatuursensoren dieper dan voorgeschreven te liggen.

Bij het vervangen van de sensoren van het operationele station, bleken de sensoren op respectievelijk 0,11 m, 0,14 m en 0,23 m te liggen.

## **6 Conclusie**

De in dit document beschreven methode van plaatsen van sensoren voor het meten van bodemtemperatuur is een enorme verbetering ten opzichte van het tot op heden gebruikte systeem. Doordat de sensoren nauwkeuriger en met zeer weinig verstoring ingebracht kunnen worden is de positionering van de sensoren beter. Doordat de verstoring zo gering is kan de zettingstermijn op circa twee dagen gesteld worden. Feitelijk zijn de gegevens direct bruikbaar. Dit levert een aanzienlijke besparing op.

---

<sup>2</sup>) zie literatuur 1 en 2

**Bijlage A. Typeringen van de bodem ter plaatse van de metingen**

(a) De Bilt Teststation (261)

Opname: 13 mei 2001  
Profielbeschrijving:

Diepte beneden maaiveld	Omschrijving
0 – 50 cm	Zwak lemig, humushoudend fijn zand (zwart)
50 – 83 cm	Zwak lemig fijn zand met bruine vlekken
> 83 cm	Geel matig fijn zand

Grondwaterstand: 1,20 m beneden maaiveld

Typering:

- Volgens het systeem van bodemclassificatie (De Bakker en Schelling, 1966) is de aanduiding voor dit type bodem een lage enkeerdgrond, zie literatuur <sup>2)</sup>.
- Op de bodemkaart van Nederland, schaal 1: 50.000, valt dit bodemtype in de legenda-eenheid EZg21 en beweegt de grondwaterspiegel zich gemiddeld tussen minder dan 40 cm (GHG) en tussen de 80 à 120 cm (GLG) beneden maaiveld (Gt II)<sup>3</sup>.

Grondwaterstand: > 1,20 m beneden maaiveld

(b) De Bilt Operationeel (260)

Opname: 15 mei 2003

Profielbeschrijving:

Diepte beneden maaiveld	
0 – 82 cm	Zwak lemig, humushoudend fijn zand (zwart)
82 – 87 cm	Zwak lemig, fijn zand met bruine vlekken
> 87 cm	Geel matig fijn zand

Grondwaterstand: > 1,10 m beneden maaiveld

Typering:

- Volgens het systeem van bodemclassificatie (De Bakker en Schelling, 1966) is de aanduiding voor dit type bodem een lage enkeerdgrond, zie literatuur <sup>2)</sup>.
- Op de bodemkaart van Nederland, schaal 1: 50.000, valt dit bodemtype in de legenda-eenheid EZg21 en beweegt de grondwaterspiegel zich gemiddeld tussen minder dan 40 cm (GHG) en tussen de 80 à 120 cm (GLG) beneden maaiveld (Gt III)<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> GHG = gemiddeld hoogste grondwaterstand

GLG = gemiddeld laagste grondwaterstand

Gt = grondwatertrap

<sup>4</sup> GHG = gemiddeld hoogste grondwaterstand

(c) Wilhelminadorp

Opname: 24 juli 2003

Profielbeschrijving:

Diepte beneden maaiveld	Omschrijving
0 – 5 cm	Licht veraarde lichte zavel
> 5 cm	Lichte zavel met brokken klei

Grondwaterstand: > 1.20 m beneden maaiveld

Typering:

- Volgens het systeem van bodemclassificatie (De Bakker en Schelling, 1966) is de aanduiding voor dit type bodem een poldervaaggrond, bestaande uit kalkrijke klei met profielverloop 2.
- Op de bodemkaart van Nederland, schaal 1 : 50.000, valt dit bodemtype in de legenda-eenheid Mn82A en beweegt de grondwaterspiegel zich gemiddeld tussen de 40 à 80 cm (GHG) en dieper dan 120 cm (GLG) beneden maaiveld (Gt VI)<sup>5</sup>.

Opmerking:

- Het terrein is onderdeel van een oud pad, waardoor tussen 10 en 50 cm beneden maaiveld de grond vermengd is met puin, dat als verharding diende. Aan de rand van het terrein, waar de temperatuursensoren zijn ingestoken, komt dit puin niet voor.

---

GLG = gemiddeld laagste grondwaterstand

Gt = grondwatertrap

GHG = gemiddeld hoogste grondwaterstand

GLG = gemiddeld laagste grondwaterstand

Gt = grondwatertrap ddeld laagste grondwaterstand

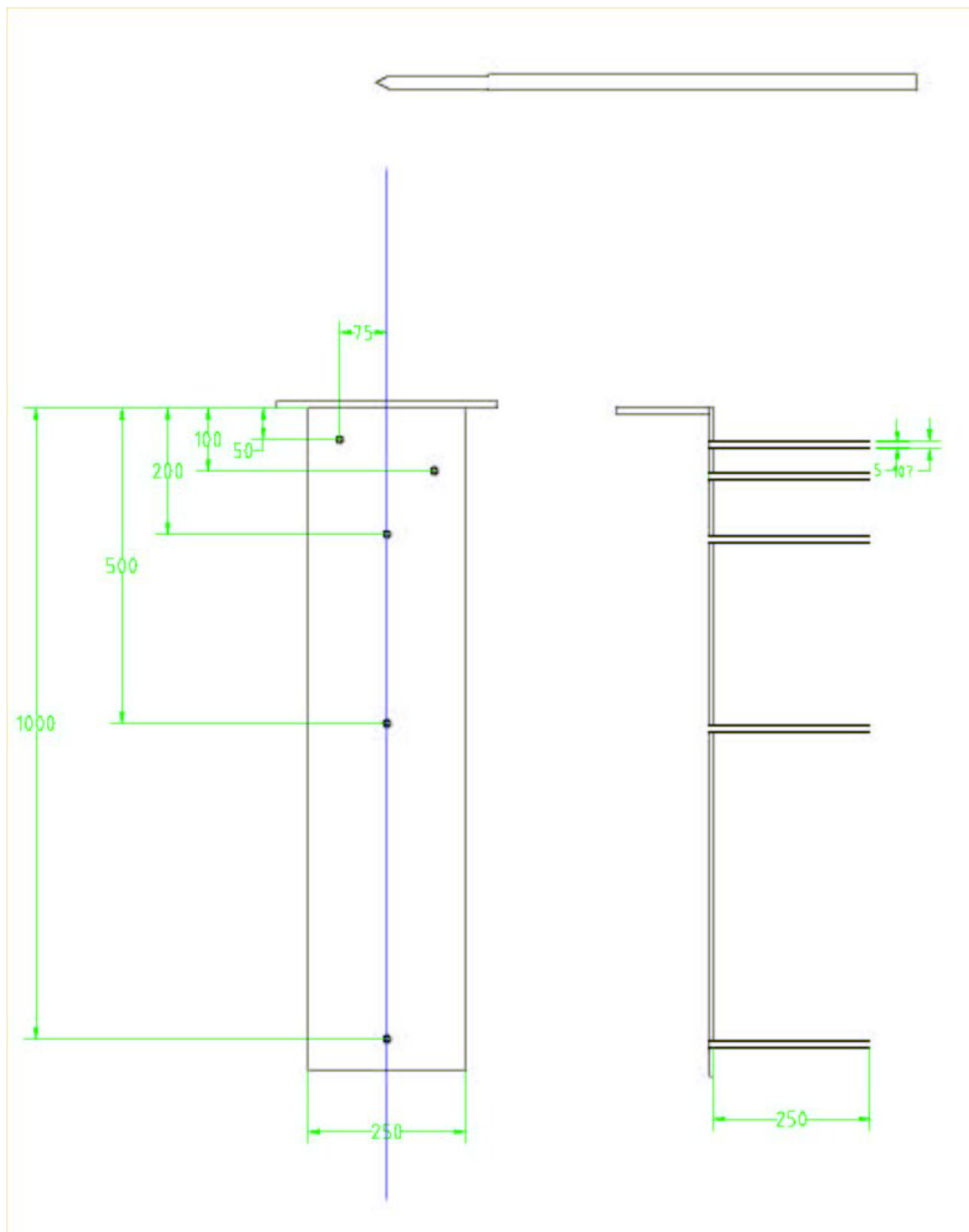
Gt = grondwatertrap

<sup>5</sup> GHG = gemiddeld hoogste grondwaterstand

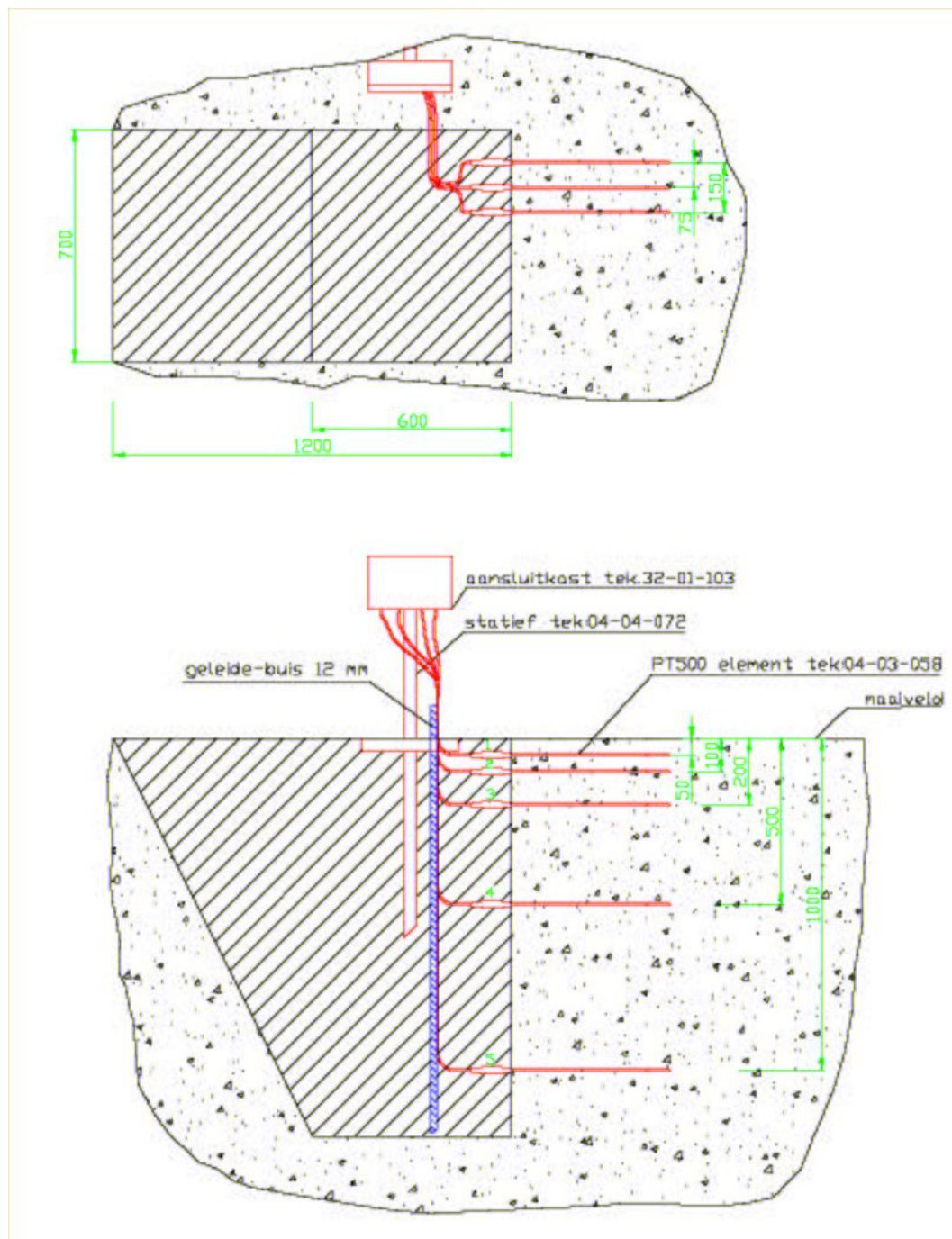
GLG = gemiddeld laagste grondwaterstand

Gt = grondwatertrap

**Bijlage B. Tekening mal 04-04-073**



Bijlage C. Tekening kuil en plaatsing sensoren



## **Bijlage D. Protocol plaatsing Bodemtemperatuur sensoren**

- De plaats waar de kuil gegraven staat op tekening en moet van te voren door Stations Beheer gemarkeerd worden met piketpaaltjes.
- De plaats waar de sensoren in de grond gestoken zullen worden moet vlak zijn en moet eventueel met wat extra aarde geegaliseerd worden.
- De kuil wordt volgens tekening gegraven
  - De top laag van 10 cm wordt verwijderd en apart gelegd om later inclusief gras, weer als top laag aangebracht te worden.
  - De aarde wordt verwijderd in ca. 4 lagen van ca. 25 cm verwijderd. De lagen worden apart gelegd om later in de zelfde volgorde terug gestort te kunnen worden.
  - Stations Beheer houdt toezicht.
- De verticale wand, waar de sensoren in geplaatst worden wordt glad gemaakt, zodat het bodemprofiel door Stations Beheer opgenomen kan worden. (foto)
- De mal wordt op maaiveldhoogte geplaatst. Met behulp van een waterpas of schietlood wordt de mal verticaal geplaatst.
- Voor het bepalen van maaiveldhoogte wordt het gras zo kort mogelijk geknipt en worden oneffenheden in de bodem plat gedrukt of op een andere manier verwijderd.
- De gaten voor de sensoren worden met de bijbehorende priem voorgestoken.
- De mal wordt verwijderd.
- De geleide staf wordt op de bodem van de kuil geplaatst, er wordt een laagje aarde van ca. 5 cm op gelegd.
- De sensoren worden in de daarvoor bestemde gaten gestoken en maximaal doorgedrukt.
- De kabels van de sensoren worden met wurgbandjes aan de geleide staf vastgemaakt. Het overblijvende deel van de wurgbandjes moet van de sensoren af wijzen, zodat deze als indicatie kunnen dienen bij het opnieuw graven van de kuil als de sensoren vervangen dienen te worden. Op de plaats waar de kabels de grond verlaten wordt een flexibele bescherming aangebracht die tot ca. 10 cm boven grond doorloopt.
- MSB Controleert of alle sensoren naar behoren functioneren.
- De kuil wordt dicht gemaakt. Laag voor laag en in dezelfde volgorde, wordt de aarde terug gestort. Iedere laag wordt stevig aangedrukt c.q. voorzichtig aangestampt. Indien er aarde overblijft, dan wordt dit boven op de kuil gelegd, zodat als e.e.a. inklinkt het boven oppervlak gelijk wordt. De top laag met gras wordt weer aangebracht.
- MSB Controleert nogmaals of alle sensoren naar behoren functioneren.
- Na enige weken wordt (door of in overleg met Stations Beheer) gecontroleerd of het gras is aangeslagen, eventueel wordt (deels) nieuw gras gelegd.

**Bijlage E. Literatuuroverzicht:**

1. Grondtemperaturen  
P.C.T. van der Hoeven, W.N. Lablans  
WR-92-05 KNMI
2. Bodemkunde van Nederland  
W.P. Locher en H. de Bakker