

BODEMWARMTE VOOR WARMTEPOMPEN,
EXPERIMENTEEL ONDERZOEK NAAR
HET GEDRAG VAN
BODEMWARMTEWISSELAARS

door
Ing. A.D. Koppenol



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref. nr. : 82-09270
Dossier nr. : 8725-11220
Datum : juli 1982
P

Voordracht Vakantieleergang 1982

„Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigdvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
copie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.”

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten
en verplichtingen van opdracht-
gever en opdrachtnemer verwezen
naar de „Algemene Voorwaarden
voor Onderzoeks- en Ontwikke-
lingsopdrachten aan TNO, 1979”
dan wel de desbetreffende terzake
tussen partijen gesloten overeen-
komst.

INHOUDSOPGAVE

	<u>pag.</u>
SAMENVATTING	3
LIJST VAN SYMBOLEN	4
1. INLEIDING	5
2. WARMTEBRONNEN	6
3. BELANGRIJKSTE RESULTATEN VAN HET THEORETISCH ONDERZOEK	8
4. UITGEVOERD EXPERIMENTEEL ONDERZOEK	11
4.1 Meetopstelling en -programma	11
4.2 Meetresultaten	12
4.3 Toetsing van het rekenmodel	14
5. LOPENDE PROJECTEN	17
6. CONCLUSIES	19
7. VERWIJZINGEN	20
2 TABELLEN	
12 FIGUREN	

SAMENVATTING

Ter toetsing van het ontwikkelde rekenmodel voor horizontale bodemwarmtewisselaars werd een experimenteel onderzoek uitgevoerd aan een horizontale bodemwarmtewisselaar. Bovendien werd experimenteel onderzoek verricht aan een enkele verticale pijp, die opgebouwd was uit twee parallelle pijpen met een lengte van 10 m elk.

Metingen werden uitgevoerd, onafhankelijk van een warmtepompsysteem, gedurende een volledig stookseizoen en de daarop volgende zomerperiode. De overeenstemming tussen gemeten en berekende warmtestromen en bodemtemperaturen is goed als bevroering van de bodem in rekening gebracht wordt. Verder blijkt dat bij dezelfde water/glycol temperatuur de warmteonttrekking per strekkende meter pijp met de verticale pijp ca. tweemaal zo groot is als die voor de horizontale bundel.

Ook wordt ingegaan op de nu lopende projecten op het gebied van de verticale bodemwarmtewisselaars.

LIJST VAN SYMBOLEN

a	temperatuurvereffeningscoëfficiënt	[m ² /s]
d	uitwendige pijpdiameter	[m]
L	pijplengte	[m]
l	pijpafstand	[m]
s	pijpdiepte onder het maaiveld	[m]
y	horizontale coördinaat	[m]
z	verticale coördinaat	[m]
ε	specifieke warmteopbrengst	
	coefficient of performance (COP)	[-]
$\bar{\epsilon}$	over het stookseizoen gemiddelde specifieke warmteopbrengst	[-]
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	[W/mK]
φ _{2,max}	maximale warmtebehoefte van woning	[kW]

1. INLEIDING

De bedrijfseigenschappen en de economie van warmtepompinstallaties worden sterk bepaald door de warmtebron. Aan de eigenschappen en de gebruiksmogelijkheden van in aanmerking komende warmtebronnen moet dan ook veel aandacht besteed worden. In deze bijdrage wordt ingegaan op onderzoek van de afdeling Warmte- en Koudetechniek TNO naar de bodem als warmtebron voor de warmtepomp.

Achtereenvolgens komen aan de orde:

- een overzicht van de in aanmerking komende warmtebronnen voor de warmtepomp;
- de belangrijkste resultaten van het theoretisch onderzoek naar de bodem als warmtebron voor de warmtepomp [1];
- de resultaten van het experimentele onderzoek naar het gedrag van bodemwarmtewisselaars;
- de opzet van vier lopende projecten met verticale bodemwarmtewisselaar.

2. WARMTEBRONNEN

De warmtebronnen waarop warmtepompen kunnen worden aangesloten, zijn in twee hoofdgroepen in te delen:

- de natuurlijke bronnen buitenlucht, directe zonstraling, oppervlaktewater, grondwater en de bodem;
- afvalwarmte uit ventilatielucht, uit afvalwater of uit industriële processen.

Elk van deze warmtebronnen kent zowel voor- als nadelen, die tegen elkaar moeten worden afgewogen. Er is een groeiende belangstelling om verschillende warmtebronnen gecombineerd te gebruiken.

Bij de hiervoor genoemde natuurlijke warmtebronnen, die het meest voor verwarming van woningen en gebouwen in aanmerking komen, kan in het kort het volgende worden opgemerkt.

Buitenlucht heeft het grote voordeel overal en altijd beschikbaar te zijn, wat het mogelijk maakt om warmtepompen op grote schaal toe te passen en te komen tot seriefabricage van aggregaten. Door het milde zeeklimaat zijn de luchttemperaturen in Nederland gedurende het stookseizoen gemiddeld vrij hoog. Het is echter toch een nadeel dat bij de grootste warmtebehoefte de luchttemperatuur het laagst is. Bij koeltemperaturen beneden 0°C moet vanwege rijpvorming op de oppervlakken de warmtewisselaar regelmatig worden ontdooid.

Directe zonne-energie kan met behulp van de warmtepomp met zeer eenvoudige collectoren worden ingevangen. Vooral in Duitsland heeft men zich in de laatste jaren geworpen op de ontwikkeling van dak- en geveloppervlakken, waarmee warmte kan worden onttrokken aan zonstraling, maar tegelijk ook aan de buitenlucht. Hierbij is dus sprake van het boven bedoelde gebruik van meerdere warmtebronnen in combinatie. De bijdrage van de zonstraling zal overigens in Nederland in de wintermaanden relatief klein zijn door de dan gemiddeld geringe zonstralingsintensiteiten.

Oppervlaktewater is in Nederland ruim voorhanden, vooral in het westen van het land. Dit water ligt echter voor veel gebruikers toch te ver weg om toepassing ervan op grote schaal te kunnen verwachten. Andere bezwaren zijn de vrij lage watertemperaturen in de wintermaanden en de verontreiniging van de warmtewisselaar. Ook kunnen allerlei overheidsbepalingen een belemmering vormen.

Grondwater is als warmtebron voor warmtepompen fysisch bijzonder aantrekkelijk. De temperatuur ervan is relatief hoog en over het gehele jaar vrijwel constant (10-12°C). Het gebruik van grondwater voor niet drinkwater doeleinden wordt echter steeds moeilijker en aan deze warmtebron zal daarom in ons land geen grote toekomst zijn weggelegd. Wanneer het door de warmtepomp afgekoelde water weer in de grond wordt teruggevoerd is men bang voor verontreiniging als de installatie eens defect zou raken. Ook de niet geringe kosten voor de aanleg van het bronsysteem staan toepassing van warmtepompen op grondwater in de weg.

Bodemwarmte wordt de laatste jaren steeds meer van betekenis. Omdat de grond in ons land in het algemeen zeer vochtig is, zijn de thermische bodemcondities hier gunstig. Voor het grootste gedeelte van het Nederlandse grondoppervlak geldt, dat de grondwaterspiegel in de winter op minder dan 1 m onder het maaiveld ligt. Bodemwarmtewisselaars worden in het algemeen op een diepte van 1 tot 2 m (bij een horizontaal net) ingegraven en deze warmtewisselaars liggen daarom in Nederland in de winter vrijwel altijd in volledig met water verzadigde grond [1]. Bodemwarmtewisselaars van het horizontale type nemen een behoorlijk grondoppervlak in beslag, dat voor een eengezinswoning al gauw enkele honderden m² bedraagt. Momenteel wint daarom de idee snel veld om verticale bodemwarmtewisselaars toe te passen, waarbij mogelijk minder grondoppervlak nodig is. De huidige bodemwarmte warmtepompsystemen werken aan de koude zijde met indirecte koeling, dat wil zeggen door de bodemwarmtewisselaar stroomt een tussenmedium. Door hiervoor een milieuvriendelijke stof te kiezen kan worden tegemoetgekomen aan het bezwaar van mogelijke verontreiniging van het grondwater.

3. BELANGRIJKSTE RESULTATEN VAN HET THEORETISCH ONDERZOEK

Voor het ontwerpen van horizontale warmtewisselaars werd een mathematisch model opgesteld dat op een aantal punten is gebaseerd op een vereenvoudiging van de werkelijkheid [1], [2]. Aangenomen wordt dat het warmtetransport in de bodem uitsluitend optreedt door geleiding. Voorts wordt aangenomen dat in de lengterichting van de pijpen van een bodemwarmtewisselaar in de bodem geen warmte-transport optreedt. Er wordt derhalve van uitgegaan dat de bodemwarmtewisselaar een uniforme temperatuur bezit. Het warmtetransport in de bodem kan dan worden beschreven met een 2-dimensionaal model. Het model, schematisch weergegeven in figuur 1, wordt aan de bovenzijde begrensd door het maaiveld en aan beide zijden, op grond van symmetrie-overwegingen, door adiabatische vlakken. De onderzijde van het model wordt begrensd door een vlak met constante temperatuur, mits de afstand van dit vlak tot de pijpenbundel voldoende groot wordt gekozen. Vastgesteld werd dat op een diepte van 10 tot 15 m de bodemtemperatuur constant mag worden verondersteld.

De numerieke rekenprocedure, die gebaseerd is op de zogenaamde "eindige elementen methode", heeft als uitgangspunt de tijd-afhankelijke warmtebehoefte van een woning die van een elektrisch aangedreven warmtepomp en een vloerverwarmingssysteem is voorzien. Op elk tijdstip van het stookseizoen worden de pijptemperatuur en de bijbehorende temperatuurverdeling in het model berekend die resulteren uit de gewenste warmte-onttrekking aan de bodem. De variatie van de specifieke warmteopbrengst van de warmtepomp gedurende het stookseizoen wordt hierbij in rekening gebracht. De specifieke warmteopbrengst is de verhouding van de warmteopbrengst en de drijfenergie van de warmtepomp.

Bij het ontwerpen van een bodemwarmtewisselaar moeten verschillende parameters worden gekozen. Dit zijn de pijplengte, de pijpdiepte, de onderlinge pijpafstand en de pijpdiameter. Elk van deze parameters is enerzijds van invloed op de specifieke warmteopbrengst van de warmtepomp en anderzijds op de kosten van de installatie.

De specifieke warmteopbrengst wordt in de V.S. coefficient of performance (COP) genoemd. Om een indruk te krijgen van de invloed van de diverse ontwerpparameters van een bodemwarmtewisselaar op de COP van de warmtepomp werd een aantal berekeningen uitgevoerd. Uitgangspunt hierbij was een "standaard"-bodemwarmtewisselaar, zie voor de afmetingen figuur 2. Bij de berekeningen zijn verder de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem op 2,9 W/mK en de maximale warmtevraag van de woning op 10 kW gesteld. Bij de berekeningen werd elke parameter afzonderlijk over een zeker gebied gevarieerd. De resultaten van deze berekeningen zijn weergegeven in figuur 2. Hieruit blijkt dat in het gebied waarin de parameters werden gevarieerd de COP van de warmtepomp niet belangrijk verandert. De pijplengte heeft nog de grootste invloed op de COP. Ruwweg kan worden gesteld dat in het gehele gebied waarin de parameters werden gevarieerd, de over het stookseizoen gemiddelde COP van de warmtepomp $3,2 \pm 10\%$ bedraagt.

De invloed van de thermische eigenschappen van de bodem op de COP van de warmtepomp is niet groot; voor een bodem met een warmtegeleidingscoëfficiënt van respectievelijk 2,0 en 2,9 W/mK bedraagt de gemiddelde COP respectievelijk 3,09 en 3,18, een verschil van ca. 3%.

Behalve een netwerk van pijpen evenwijdig aan het aardoppervlak is een pijpenbundel loodrecht op het aardoppervlak een mogelijke uitvoeringsvorm van de bodemwarmtewisselaar. In elk van deze verticale pijpen wordt de vloeistof eerst omlaag gevoerd en vervolgens weer omhoog. Een verticale pijp kan bijvoorbeeld samengesteld zijn uit 2 concentrische pijpen of uit 2 naast elkaar liggende pijpen.

Voor het uitvoeren van een berekening ter vergelijking van het functioneren van een verticale en een horizontale bodemwarmtewisselaar is uitgegaan van een lengte van 10 m voor de pijpen van het verticale systeem. Een vergelijking van een enkele horizontale met een enkele verticale pijp, waarbij de warmtebehoefte van de woning en de totale pijplengte in beide gevallen hetzelfde is, is weergegeven in figuur 3.

Hierin is het verloop van de pijptemperatuur en de COP als functie van de tijd van het jaar weergegeven. Bij de berekening is de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem gesteld op 2 W/mK. Duidelijk is dat de verticale pijp beter functioneert dan de horizontale pijp. De laagste pijptemperatuur is bij de verticale pijp ca. 4,5 K hoger dan bij de horizontale pijp. De gemiddelde COP van de warmtepomp met de verticale pijp is ca. 7% hoger dan met de horizontale pijp, namelijk 3,31 in plaats van 3,11. De verticale pijp lijkt dus een duidelijk voordeel te hebben boven de horizontale pijp.

4. UITGEVOERD EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

Experimenteel onderzoek is in de eerste plaats uitgevoerd ter toetsing van het rekenmodel voor de horizontale bodemwarmtewisselaar [3]. In juni 1979 werd daartoe een horizontale bodemwarmtewisselaar geïnstalleerd op het TNO terrein in Apeldoorn. Uit het theoretisch onderzoek was gebleken dat de verticale pijp bepaalde voordelen had ten opzichte van de horizontale pijp. Daarom is tevens een enkele verticale pijp geïnstalleerd. Ook is nog een enkele horizontale pijp geïnstalleerd. Bodemonderzoek wees uit dat de grond voornamelijk uit zand bestaat.

4.1 Meetopstelling en -programma

De afmetingen van de drie geïnstalleerde bodemwarmtewisselaars zijn weergegeven in tabel 1. Om aanvoer en retour te verwezenlijken bestaat de verticale pijp in dit geval uit twee parallelle pijpen, die aan de onderzijde door middel van twee kniestukken met elkaar verbonden zijn. De diepte van het verticale systeem is 10 m. Voor alle drie warmtewisselaars is het pijpmateriaal polyethyleen. De warmtewisselaars werkten onafhankelijk van een warmtepomp-systeem. De horizontale bundel en de enkele verticale pijp waren verbonden met een buffervat in het laboratorium (zie figuur 4). De temperatuur van dit buffervat werd geregeld met een koelmachine. Het systeem was gevuld met een water-glycol mengsel (glycolpercentage 26%). De enkele horizontale pijp was aangesloten op een ander buffervat.

In de nabijheid van de bodemwarmtewisselaars werden in totaal 93 thermokoppels in de bodem geplaatst om de temperatuurdaling van de bodem ten gevolge van de warmte-onttrekking vast te stellen. Als referentie werden 9 thermokoppels geplaatst om de ongestoorde bodemtemperatuur op verschillende diepten te bepalen. Bodemtemperaturen zijn gemeten van 0,1 m tot 12 m beneden maaiveld. In figuur 5 is de locatie van een aantal thermokoppels weergegeven voor het midden van de horizontale bundel en voor de ongestoorde bodem.

Verder zijn de aanvoer- en retourtemperaturen en debieten van de bodemwarmtewisselaars, de buitenluchttemperatuur en het grondwater-niveau gemeten. Aanvoer- en retourtemperaturen zijn zo dicht mogelijk bij de warmtewisselaars gemeten.

Tijdens het stookseizoen (oktober 1979 t/m mei 1980) werd de gemiddelde glycol-watertemperatuur gevarieerd volgens een van te voren bepaald temperatuur/tijd programma. Gedurende de hierop volgende zomerperiode (juni t/m september 1980) vond geen circulatie in de horizontale bundel en de enkele verticale pijp plaats. Tijdens deze periode werd het temperatuurherstel van de bodem in de nabijheid van deze bodemwarmtewisselaars geobserveerd.

In het volgende zal alleen ingegaan worden op meetresultaten van de horizontale bundel en de enkele verticale pijp.

4.2 Meetresultaten

Tijdens de meetperiode varieerde het grondwaterpeil van 2,3 tot 3,0 m beneden het maaiveld. De horizontale pijpenbundel bevond zich derhalve gedurende de gehele meetperiode boven het grondwaterpeil. De verticale pijp bevond zich voor het grootste gedeelte beneden het grondwaterniveau (70-77%).

De ongestoorde bodemtemperatuur op verschillende diepten is voor de periode van september 1979 t/m september 1980 weergegeven in figuur 6. Duidelijk waarneembaar is de jaarlijkse fluctuatie, waarvan de amplitude afneemt en de fase verschuiving toeneemt met toenemende diepte. Op 10 m diepte is de jaarlijkse temperatuur fluctuatie nagenoeg uitgedempt. Op 1,5 m diepte (positie van de horizontale pijpenbundel) fluctueerde de ongestoorde bodemtemperatuur van 4,4°C in februari tot 15,7°C in augustus. De buitenlucht-temperatuur en de aardoppervlaktetemperatuur zijn nagenoeg gelijk. Het is duidelijk dat vanwege de hogere temperatuur in de winter de bodem een bepaald voordeel heeft boven lucht als warmtebron voor de warmtepomp.

De warmte-onttrekking met de horizontale pijpenbundel en met de enkele verticale pijp is weergegeven in figuur 7. Ook de gemiddelde water/glycol temperatuur, zowel voor de horizontale pijpenbundel als voor de enkele verticale pijp, en de ongestoorde bodemtemperatuur op een diepte van 1,5 m, zijn weergegeven in deze figuur. De water/glycol temperatuur was ingesteld van ca. 10°C in oktober tot ca. -6°C in januari en februari. Het verloop van de water/glycol temperatuur was voor beide warmtewisselaars nagenoeg hetzelfde. Het grootste verschil tussen de ongestoorde bodemtemperatuur en het water/glycol bedroeg ca. 12 K.

De grootste waarde voor de warmte-onttrekking met de horizontale bundel bedroeg ca. 18 W/m en voor de enkele verticale pijp ca. 40 W/m. Gedurende de periode van oktober 1979 t/m mei 1980 bedroeg de warmte-onttrekking met de horizontale pijpenbundel 76 kWh per strekkende meter pijp en met de enkele verticale pijp 169 kWh per strekkende meter. Bij de verticale pijp is hierbij uitgegaan van een totale lengte van 10 m, overeenkomend met de boorgatdiepte. De warmte-onttrekking met de verticale pijp was dus ca. 2 maal zo groot als die met de horizontale pijpenbundel. Het verticale systeem heeft dus een duidelijk voordeel boven het horizontale systeem. Opgemerkt dient te worden dat we in dit geval met een enkele verticale pijp te hebben. In geval van een verticale bundel zou de warmte-onttrekking per strekkende meter geringer geweest zijn vanwege onderlinge beïnvloeding van de pijpen.

De specifieke warmteopbrengst van de warmtepompinstallatie is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen de condensor en de verdamper. Bij het in figuur 7 gegeven verloop van de water/glycol temperatuur en een bepaald verloop van de water temperatuur van een vloerverwarmingssysteem (afgeleid van praktische installaties) bedraagt de gemiddelde COP over het stookseizoen 2,9. Hierbij is het energieverbruik van circulatie pompen buiten beschouwing gelaten. Voor een woning met een maximale warmtevraag van 10 kW en een totale warmtebehoefte over een stookseizoen van 18000 kWh zou dan 11800 kWh aan de bodem onttrokken moeten worden.

De totale warmte-onttrekking met de horizontale pijpenbundel bedroeg 19750 kWh. Dit betekent dat voor deze eengezinswoning een horizontale bodemwarmtewisselaar met een totale lengte van 155 m en een benodigd grondoppervlak van 155 m² voldoende zou zijn. De gemiddelde specifieke warmte-opbrengst van 2,9 is echter tamelijk laag. Wil men toch een hogere gemiddelde COP bereiken dan zal een grotere pijplengte en een groter grondoppervlak gekozen moeten worden.

De gemeten bodemtemperaturen op verschillende diepten in het midden van de horizontale pijpenbundel zijn weergegeven in figuur 8. Om een indruk te krijgen van de temperatuurdaling van de bodem door de warmte-onttrekking zijn ook ongestoorde bodemtemperaturen in deze figuur opgenomen. Op 1,5 m diepte op 0,5 m van de pijp bedroeg de temperatuurdaling van de bodem ca. 6 K. Op 1 m diepte, boven de pijp, was de daling ca. 4 K en op 5 m diepte ca. 3 K. Bevriezing van de bodem vond op tamelijk grote schaal plaats; de maximale diameter van de bevroren grond bedroeg ca. 1 m. Gedurende de zomerperiode (vanaf week 35) is het temperatuurherstel van de bodem nagenoeg volledig, zoals in figuur 8 waarneembaar is. Ook voor de enkele verticale pijp was het temperatuurherstel nagenoeg volledig.

4.3 Toetsing van het rekenmodel

Bij alle uitgevoerde berekeningen was het startpunt 1 oktober 1979. De gemeten bodemtemperaturen zijn gebruikt als initiële waarden. Voor de randcondities werden wekelijks gemiddelde waarden van de gemeten temperaturen gebruikt.

De eerste berekeningen zijn uitgevoerd voor de ongestoorde bodem met als doel de bepaling van de thermische eigenschappen van de bodem. Bij de ongestoorde bodem zijn er twee randcondities, namelijk het maaiveld en de bodem op een diepte van 10 m. Warmte-transport in de bodem treedt uitsluitend in verticale richting op. De overeenstemming tussen meet- en berekeningsresultaten is goed als voor de temperatuurvereffeningscoëfficiënt van de bodem een waarde van $1,18 \cdot 10^{-6}$ m²/s aangenomen wordt.

Resultaten van metingen en berekeningen zijn weergegeven in figuur 9. In deze figuur zijn gemeten en berekende bodemtemperaturen weergegeven op respectievelijk 1, 2, 4 en 5 m diepte als functie van de tijd van het jaar. De maximale afwijking tussen de gemeten en de berekende bodemtemperatuur op 2 m diepte bedraagt 0,6 K.

Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd voor de horizontale pijpenbundel. Bij de horizontale bundel zijn er drie randcondities namelijk het maaiveld, de bodem op 10 m diepte en het water/glycol mengsel. De wekelijks gemiddelde temperaturen van deze randcondities zijn weergegeven in figuur 10. De wekelijks gemiddelde temperatuur op 0,1 m diepte was minimaal $-2,6^{\circ}\text{C}$ in de derde week van januari en maximaal $21,6^{\circ}\text{C}$ in het begin van augustus. De temperatuur op 10 m diepte varieerde van $11,5^{\circ}\text{C}$ in januari tot $9,8^{\circ}\text{C}$ in juli en de water/glycol temperatuur bedroeg ca. 10°C in het begin van oktober en ca. -6°C in februari. Aan het einde van het stookseizoen, vanaf week 35, hebben we nog maar met twee randcondities te maken, namelijk het maaiveld (0,1 m diepte) en de bodem op 10 m diepte.

De invloed van de warmteweerstanden van het water/glycol mengsel en van de pijpwand worden in rekening gebracht. De toegepaste vloeistofsnelheid in de pijpenbundel was ongeveer 0,3 m/s, waarbij de stroming laminair is. De warmte-overdrachtscoëfficiënt van de vloeistof kan berekend worden op $120 \text{ W/m}^2\text{K}$. De warmtegeleidingscoëfficiënt van polyethyleen bedraagt $0,43 \text{ W/mK}$.

Bij deze berekeningen worden de volgende thermische eigenschappen van de bodem, afgeleid van metingen van de ongestoorde bodemtemperatuur en metingen aan de enkele horizontale pijp, gebruikt:

- temperatuurvereffeningscoëfficiënt : $1,18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- warmtegeleidingscoëfficiënt : $2,6 \text{ W/mK}$
- verhoging van de warmtegeleidingscoëfficiënt door bevriezing : 30%
- daling van de warmtegeleidingscoëfficiënt in de nabijheid van de pijp van week 31 t/m week 34 : ca. 50%

De wekelijks gemiddelde waarden voor de gemeten en de berekende warmte-onttrekking zijn weergegeven in figuur 11. Als de stollingswarmte niet in rekening gebracht wordt is de overeenstemming tussen de gemeten en de berekende warmte-onttrekking niet goed. Deze overeenkomst wordt aanzienlijk beter als de stollingswarmte, die vrijkomt bij bevriezing van de bodem, wel in rekening gebracht wordt. Het vrijkomen van de stollingswarmte wordt gesimuleerd door een grote warmtecapaciteit van de bodem over een klein temperatuurgebied. Van 0°C tot -1°C is de warmtecapaciteit van de bodem $120 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3\text{K}$. De afwijking tussen de gemeten en de berekende warmte-onttrekking bedraagt toch nog 17,5% in de periode van de weken 11 t/m 34. Bij de bundel treedt echter een zogenaamd "randeffect" op. Met de buitenste pijpen wordt meer warmte onttrokken aan de bodem dan met de binnenste pijpen. Het rekenmodel geldt echter voor een pijp midden in een oneindig uitgestrekte pijpenbundel. Uit een aanvullende berekening voor een enkele pijp, waarbij dezelfde randcondities als bij de pijpenbundel gebruikt zijn, is geschat dat voor de eerste 10 weken een correctiefactor van 1,04 en voor de resterende 24 weken een correctiefactor van 1,09 mag toegepast worden op de berekende warmte-onttrekking met de pijpenbundel. Als voor dit geschatte randeffect wordt gecorrigeerd is het verschil tussen de gemeten en de berekende warmte-onttrekking minder dan 10% geworden.

Enkele berekende en gemeten bodemtemperaturen in het midden van de bodemwarmtewisselaar zijn weergegeven in figuur 12. Als de vrijgekomen stollingswarmte bij bevriezing van de bodem in rekening gebracht wordt is de overeenstemming tussen gemeten en berekende temperaturen goed.

Met het beschikbare model kunnen derhalve betrouwbare ontwerp-berekeningen uitgevoerd worden voor horizontale bodemwarmtewisselaars.

5. LOPENDE PROJECTEN

Uit zowel het theoretisch als het experimenteel onderzoek was gebleken dat de verticale bodemwarmtewisselaar een bepaald voordeel heeft boven de horizontale bodemwarmtewisselaar. Bij gelijke pijplengte vindt warmte-onttrekking bij een hogere medium temperatuur plaats of bij gelijke medium temperatuur is de warmte-onttrekking per strekkende meter systeem groter.

Een belangrijk nadeel van de horizontale bodemwarmtewisselaar is het grote benodigde grondoppervlak (al gauw enkele honderden m²). Bij de verticale bodemwarmtewisselaar wordt de benodigde ruimte voor een groter gedeelte in de diepte gezocht, waardoor mogelijk minder grondoppervlak nodig is en de toepasbaarheid van de bodem als warmtebron voor de warmtepomp vergroot wordt.

Verder onderzoek is dan ook gericht op de verticale bodemwarmtewisselaar. Hierna wordt ingegaan op een viertal installaties met verticale bodemwarmtewisselaars in Nederland waarvan de belangrijkste gegevens zijn opgenomen in tabel 2.

De PGEM heeft in Wychen voor de verwarming van een rayonkantoor een monovalent warmtepomp systeem geïnstalleerd [4]. De verticale bodemwarmtewisselaar bestaat uit 30 pijpen met elk een lengte van 10 m. De 30 pijpen zijn verdeeld in drie groepen, die eventueel naar keuze kunnen worden afgeschakeld. Ontwerpberekeningen zijn door TNO uitgevoerd. Deze installatie is sinds voorjaar 1981 in bedrijf en werkt tot nu toe bevredigend. Metingen worden door de PGEM uitgevoerd.

In IJsselmuiden is sinds eind 1981 een bivalent warmtepompsysteem in bedrijf voor de verwarming van een woning. Dit is een particulier project. De verticale bodemwarmtewisselaar bestaat uit vier pijpen, waarvan de langste een lengte van 100 m heeft. De pijpen zijn parallel geschakeld en staan in één rij, met een onderlinge afstand van 5 m.

De derde installatie is in juli j.l. in Dalfsen geïnstalleerd. Dit is ook een particulier project. Het is een monovalent systeem voor verwarming van een woning. De pijpen van de bodemwarmtewisselaar zijn van staal. Ze staan niet loodrecht op het maaiveld, maar zijn vanuit één punt (1 x 1 m) onder een hoek pneumatisch in de grond gedreven. Gezien de relatief lage warmtevraag is de totale pijplengte tamelijk groot.

Aan laatstgenoemde twee installaties zullen in het kader van het nationaal onderzoekprogramma warmtepompen van het Projectbureau Energieonderzoek in het komen jaar door TNO metingen uitgevoerd worden. Tijdens het stookseizoen zal het functioneren van de warmtepompinstallatie en de afkoeling van de bodem gemeten worden. In de daarop volgende zomerperiode zal het temperatuurherstel van de bodem geobserveerd worden.

De vierde installatie is een TNO project en betreft een bivalent systeem voor verwarming van een eengezinswoning in een rij. De installatie zal zeer binnenkort operationeel zijn. Met het computer model zijn ontwerpberoeeningen uitgevoerd voor de verticale bodem warmtewisselaar. In dit geval wordt een uitgebreid meetprogramma uitgevoerd, waarbij ook een groot aantal bodemtemperaturen gemeten zullen worden. Na afloop van het meetprogramma zal een vergelijking plaatsvinden tussen experimentele en berekeningsresultaten.

In een aantal van de zojuist genoemde gevallen wordt tevens onderzoek verricht naar de grondwaterstroming.

Voor de genoemde projecten bestaan er grote verschillen in uitvoeringsvorm van de verticale bodemwarmtewisselaar. Vooral de diepte varieert nogal sterk: van 10 tot 100 m, terwijl de uitvoeringsvorm van de pijp en het toegepaste materiaal ook variëren. Bij diepe bodemwarmtewisselaars kan het nodig zijn kunstmatig warmte in de bodem te brengen. Dit hangt voor een groot deel af van de plaatselijke ondergrondse hydrologische omstandigheden. In IJsselmuiden is reeds geconstateerd dat het temperatuurherstel van de bodem rond de 100 m sectie volledig is, waarschijnlijk dankzij grondwaterstroming.

6. CONCLUSIES

- De overeenkomst tussen gemeten en berekende warmte-onttrekking en bodemtemperaturen voor de horizontale bodemwarmtewisselaar is goed. Met het beschikbare theoretische model kunnen derhalve betrouwbare ontwerpberekeningen uitgevoerd worden voor horizontale bodemwarmtewisselaars.
- Bij dezelfde gemiddelde water/glycol temperatuur is de warmte-onttrekking aan de bodem per strekkende meter pijp met een enkele verticale pijp tweemaal zo groot als voor een horizontale pijpenbundel. Door toepassing van verticale bodemwarmtewisselaars zou de toepassing van de bodem als warmtebron voor de warmtepomp mogelijkwijze sterk uitgebreid kunnen worden.
- Verder onderzoek naar de bodem als warmtebron voor de warmtepomp is op dit moment gericht op de verticale bodemwarmtewisselaar.

7. VERWIJZINGEN

- [1] Nievergeld, P.
De bodem als warmtebron en warmteopslag voor warmtepompen.
Klimaatbeheersing 9 (1980) nr. 3 blz. 107-116.

- [2] Nievergeld, P. et al.
Investigations on using the earth as a natural heat source
for heat pumps.
EEG rapport, EUR 6835, Luxemburg.

- [3] Nievergeld, P. et al.
Experimental investigations about using the earth as a heat
storage medium and as a heat source for heat pumps.
EEG rapport, EUR 7414 en MF, Luxemburg.

- [4] Agthoven, L.T.v., Wiskie, K.
Het installeren van een warmtepompinstallatie voor ruimte-
verwarming met warmte-onttrekking aan de aardbodem via
verticale bodemwarmtewisselaars.
Elektrotechniek 60 (1982) 3, blz. 133-139.

TABEL 1 EXPERIMENTEEL ONDERZOEK

	horizontale pijpenbundel	horizontale enkele pijp	verticale enkele pijp
pijplengte	250 m	20 m	20 m
pijpafstand	1 m	-	-
pijpdiepte	1,5 m	1,5 m	10 m
pijpdiameter	20/16 mm	20/16 mm	20/16 mm
grondoppervlak	250 m ²	-	-

TABEL 2 VERTICALE BODEMWARMTEWISSELAARS IN NEDERLAND (AUGUSTUS 1982)

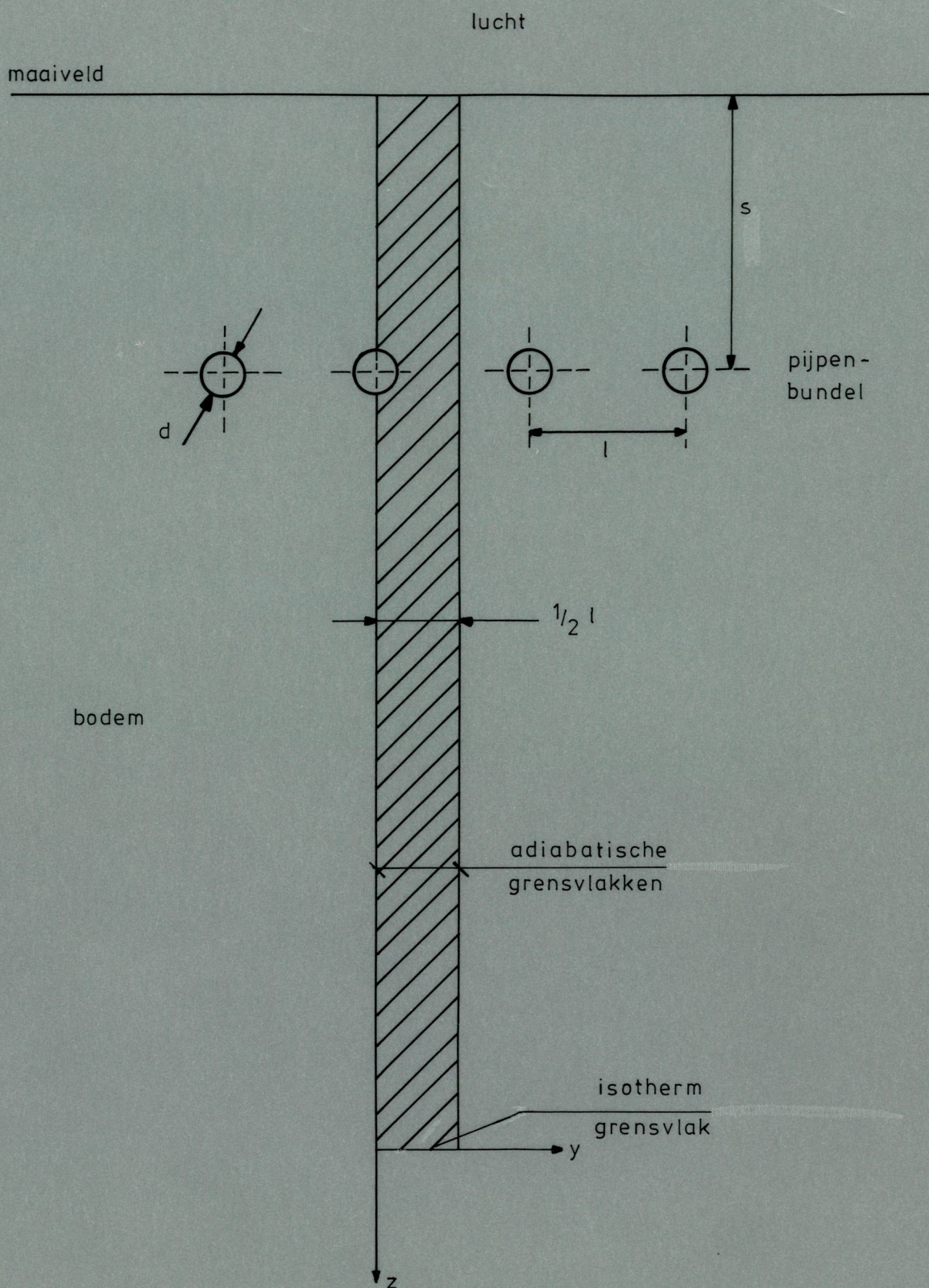
Plaats	Maximale warmtevraag (kW)	Type	Materiaal	Aantal pijpen	Pijplengte (m)	Totaal lengte verticaal (m)	Pijp afstand (m)	Uitwendige pijpdiameter (m)	Opmerkingen
Wychen	18	2 parallel	HPE	30	10	300	5	2 x 0,04	in 3 groepen
IJsselmuiden	18	concentrisch	PVC	4	resp. 100, 75, 60 en 40	275	5	0,09	in 1 rij
Dalfsen	10	concentrisch	staal/ kunststof	10	ca. 35	ca. 350	variërend	0,038	pijpen onder een hoek
Apeldoorn	9,3	concentrisch*	PVC	7	14,5	101,5	5	0,05	in 2 rijen

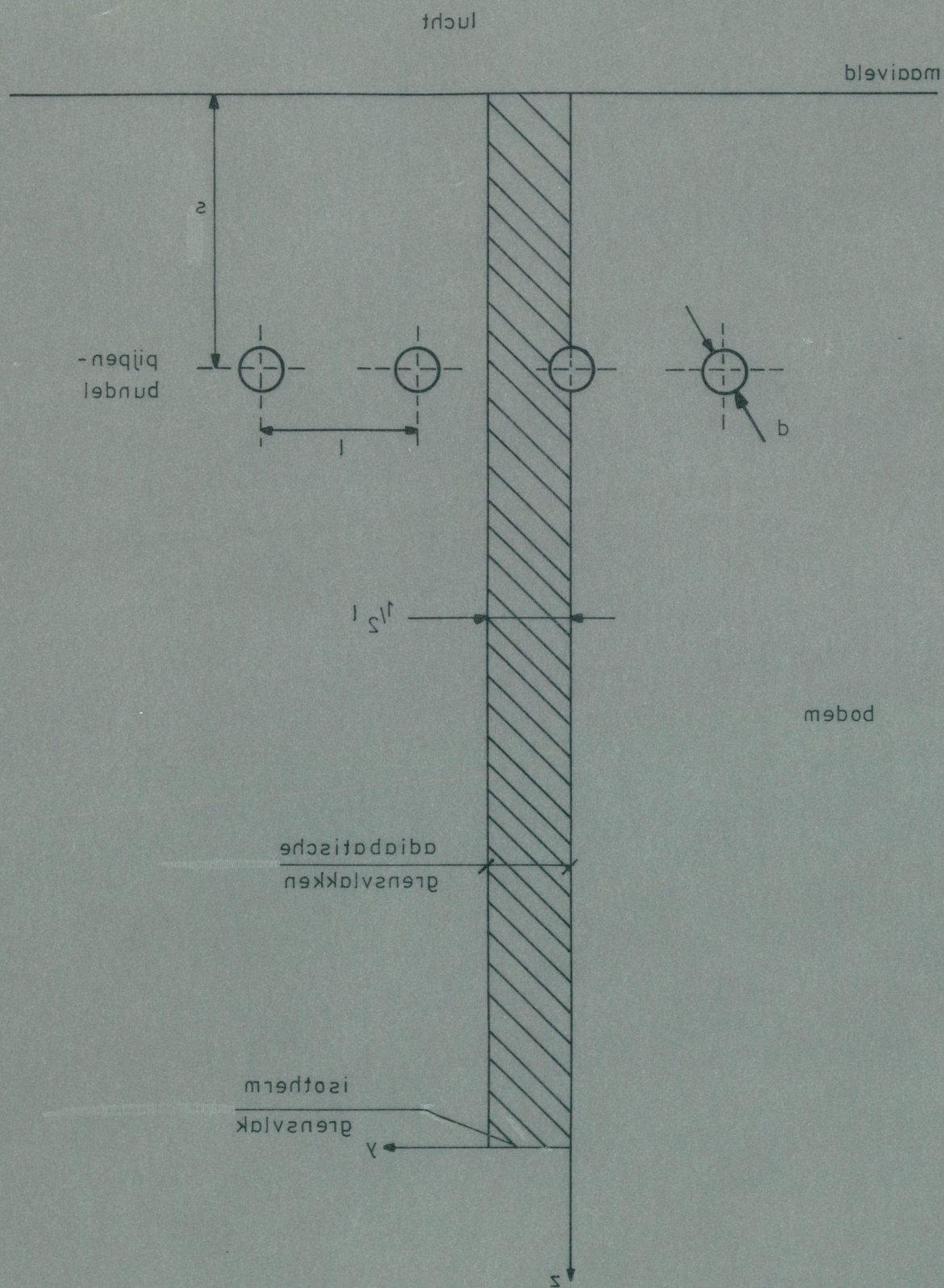
* de buiten- en binnenpijp zijn onderling verbonden door middel van elf schotten, hetgeen resulteert in 11 kanalen in plaats van een ringspleet.

TABEL 2 VERTICALE BODEMWARMTEWISSELAARS IN NEDERLAND (AUGUSTUS 1982)

Plaats	Maximale warmtevraag (kW)	Type	Materiaal	Aantal pijpen	Pijplengte (m)	Totaal lengte verticaal (m)	Pijp afstand (m)	Uitwendige pijpdiameter (m)	Opmerkingen
Wychen	18	2 parallel	HPE	30	10	300	5	2 x 0,04	in 3 groepen
IJsselmuiden	18	concentrisch	PVC	4	resp. 100, 75, 60 en 40	275	5	0,09	in 1 rij
Dalfsen	10	concentrisch	staal/ kunststof	10	ca. 35	ca. 350	variërend	0,038	pijpen onder een hoek
Apeldoorn	9,3	concentrisch*	PVC	7	14,5	101,5	5	0,05	in 2 rijen

* de buiten- en binnenpijp zijn onderling verbonden door middel van elf schotten, hetgeen resulteert in 11 kanalen in plaats van een ringspleet.





$$\varphi_{2, \max} = 10 \text{ kW}$$

$$\lambda = 2,9 \text{ W/mK}$$

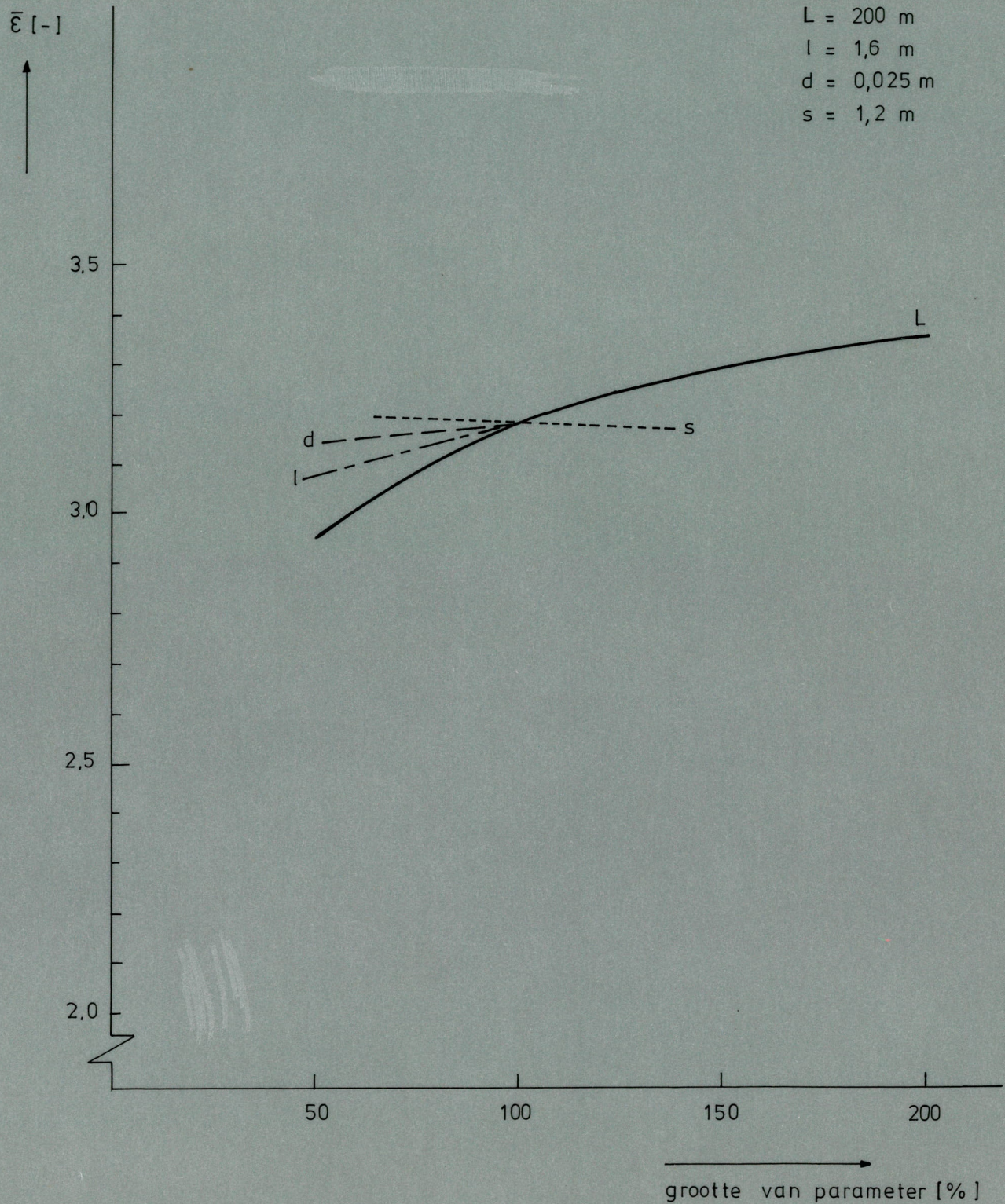
100 % - waarden :

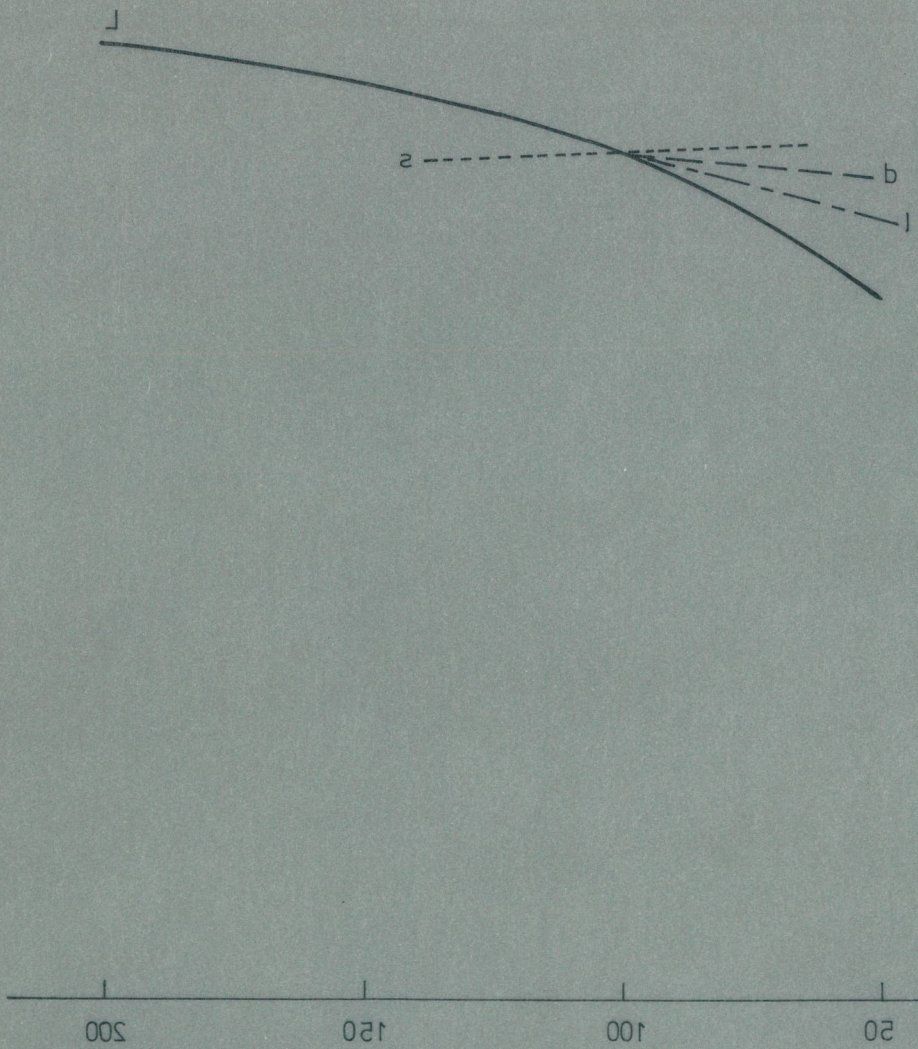
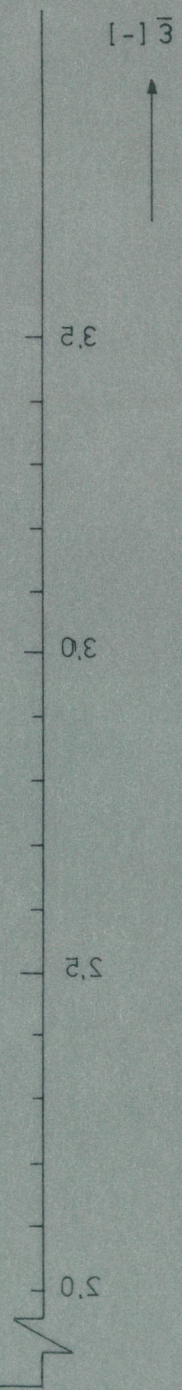
$$L = 200 \text{ m}$$

$$l = 1,6 \text{ m}$$

$$d = 0,025 \text{ m}$$

$$s = 1,2 \text{ m}$$





100 % - worden :

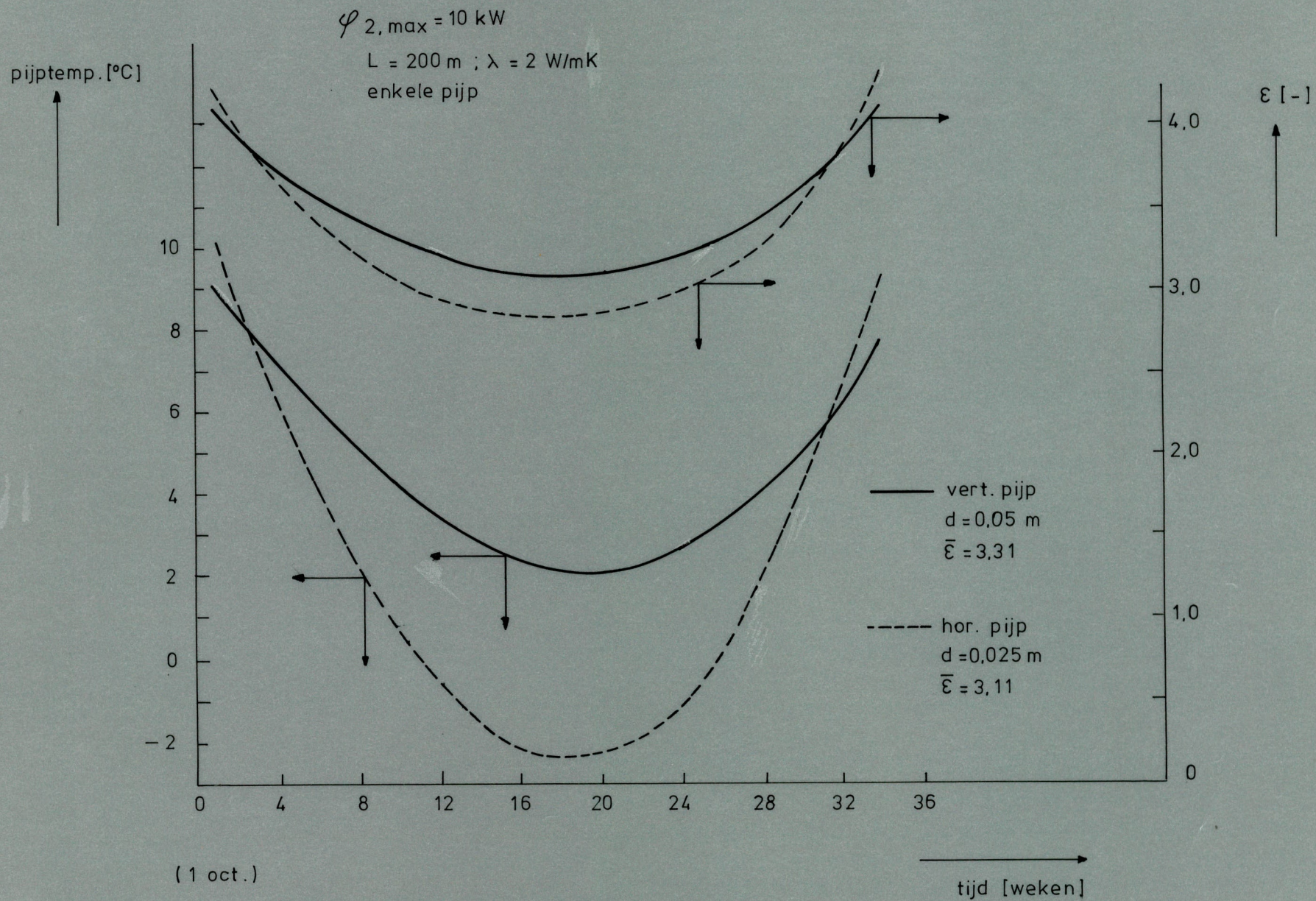
- $L = 200 \text{ m}$
- $l = 1,0 \text{ m}$
- $b = 0,025 \text{ m}$
- $z = 1,2 \text{ m}$

$\psi_{s, \max} = 10 \text{ kW}$
 $\lambda = 2,9 \text{ W/mK}$

grootte van parameter [%]

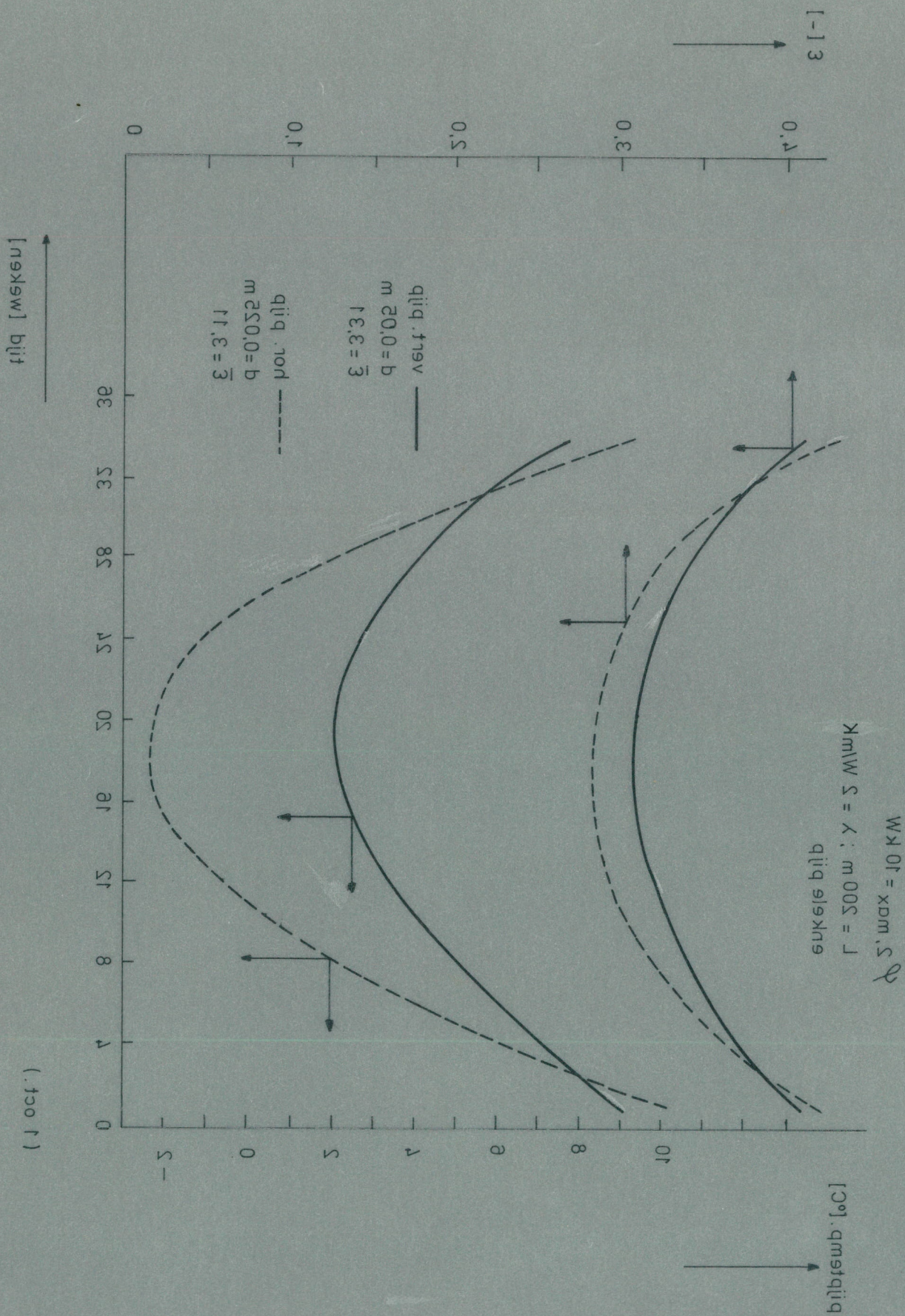
Invoel outwerparameters van een bodemwarte-
 wisselaar

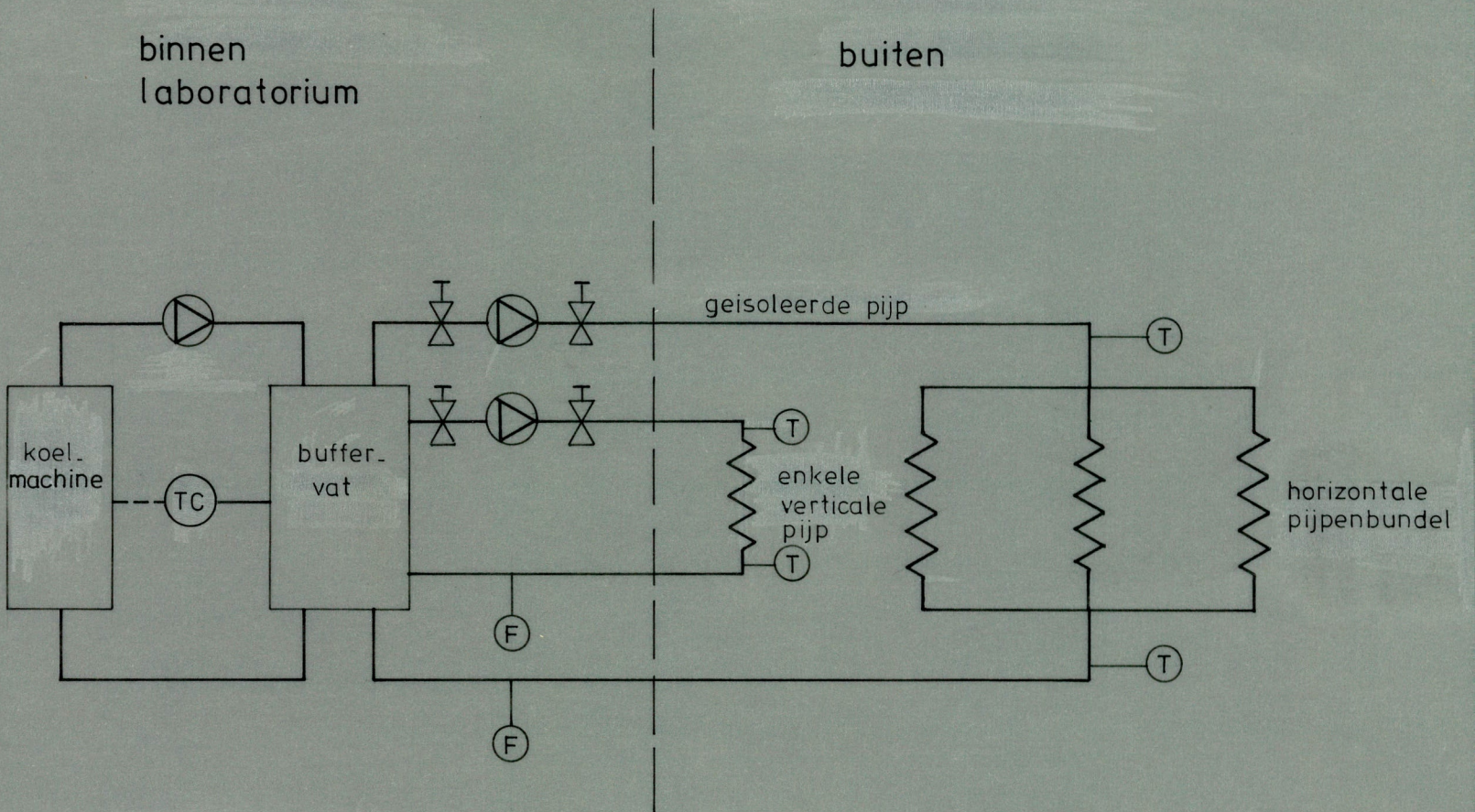
Fig.2
 11220
 MT-TNO



Pijptemp. en COP voor verticale en horizontale pijp.

Fig. 3
11250
MT-TNO

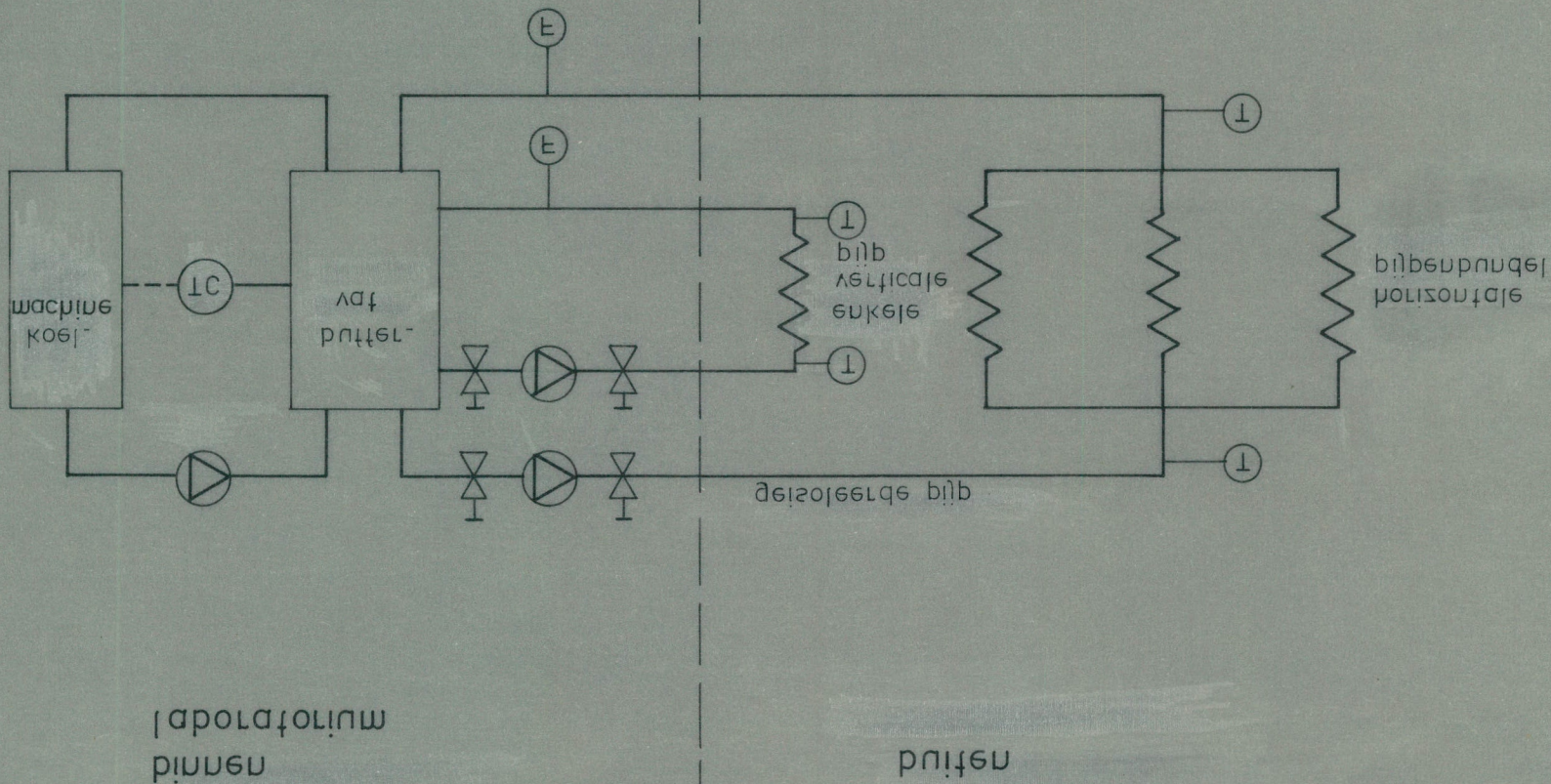


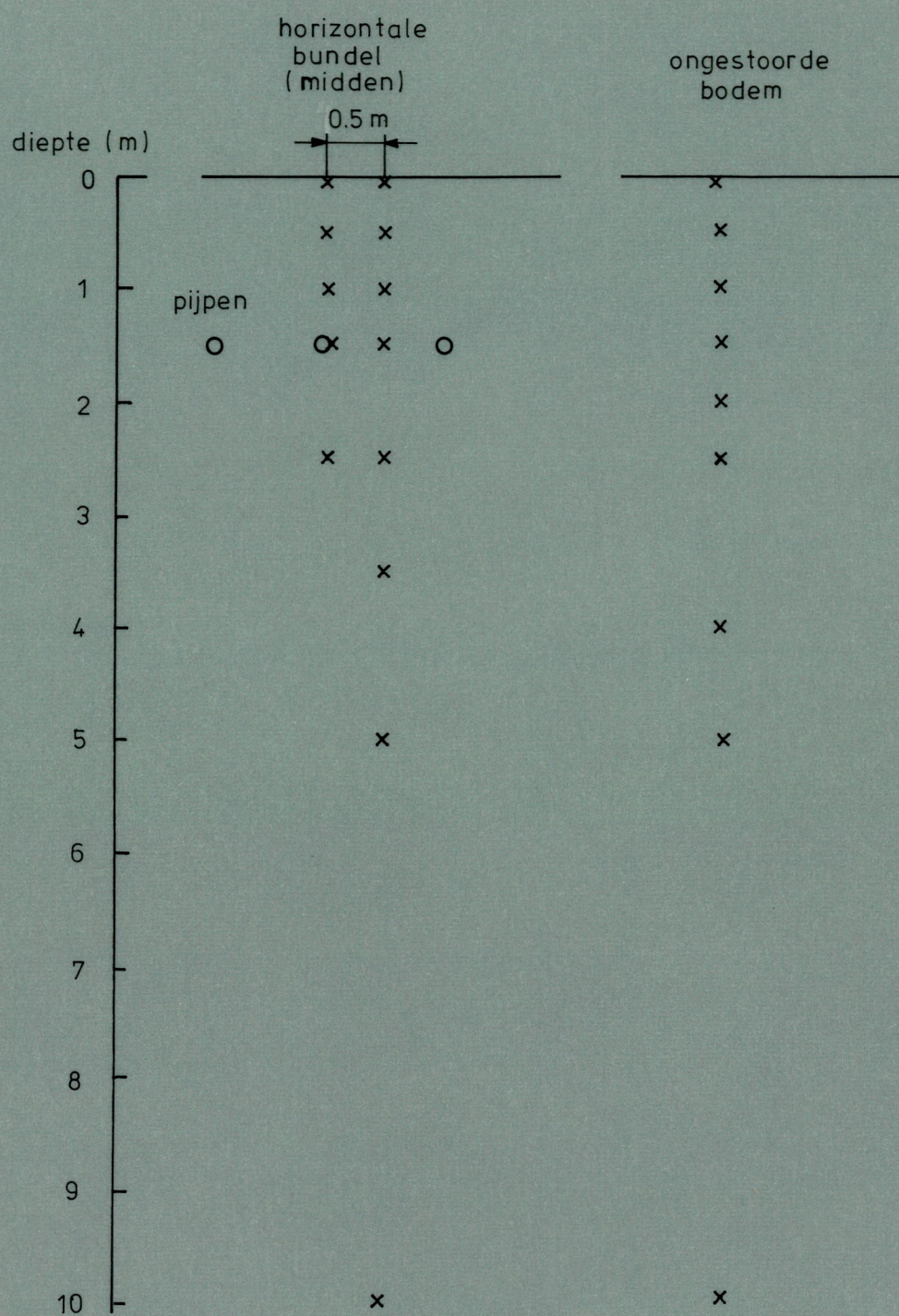


Schema opstelling horizontale pijpenbundel en enkele verticale pijp

ONT - TM
05511
A. pif

ne labudneqijq elatnosion gnillstago amehs
qijq elacitrav elakne



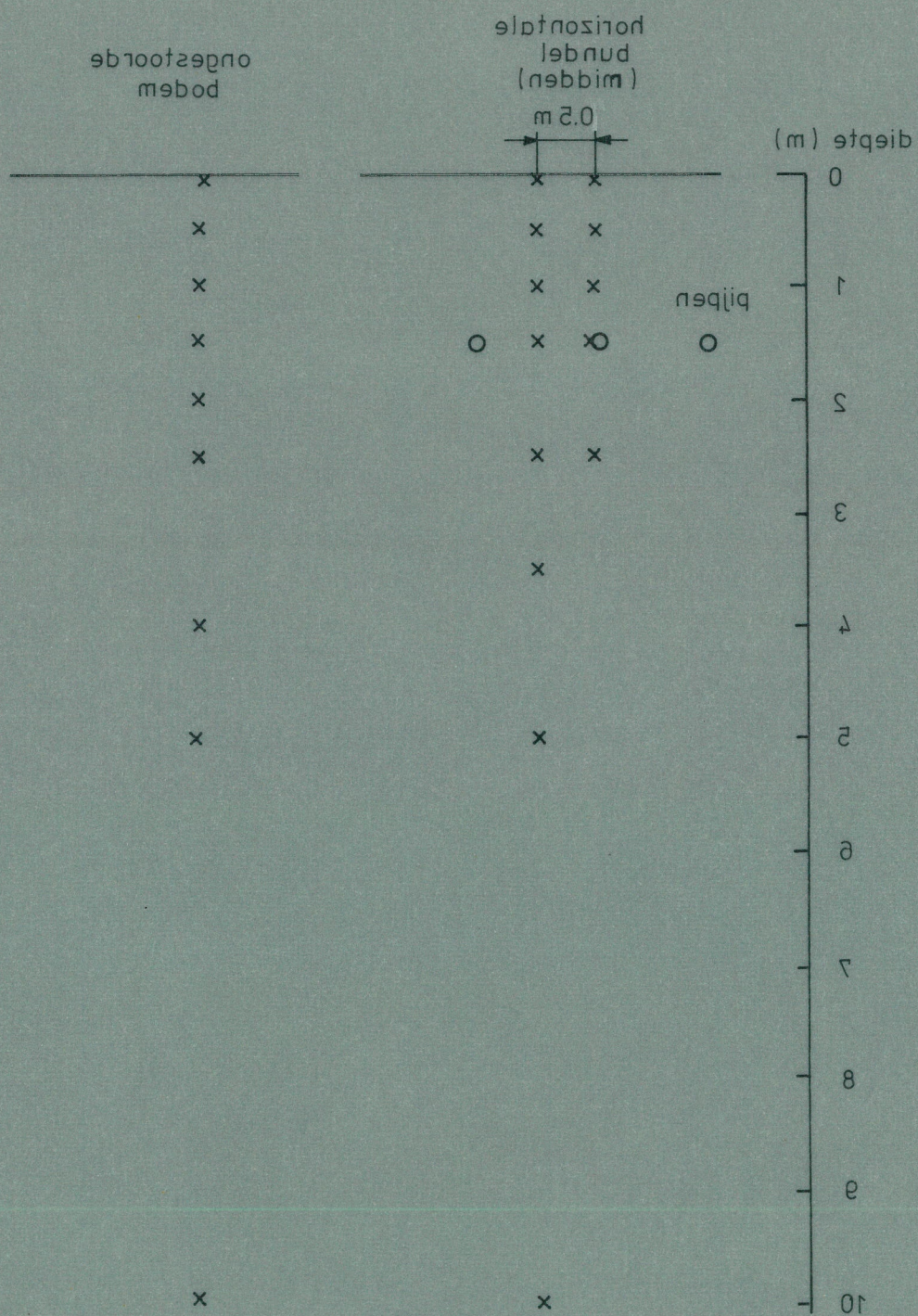


Locatie van een aantal thermokoppels

MT_TNO
11220
Fig.5

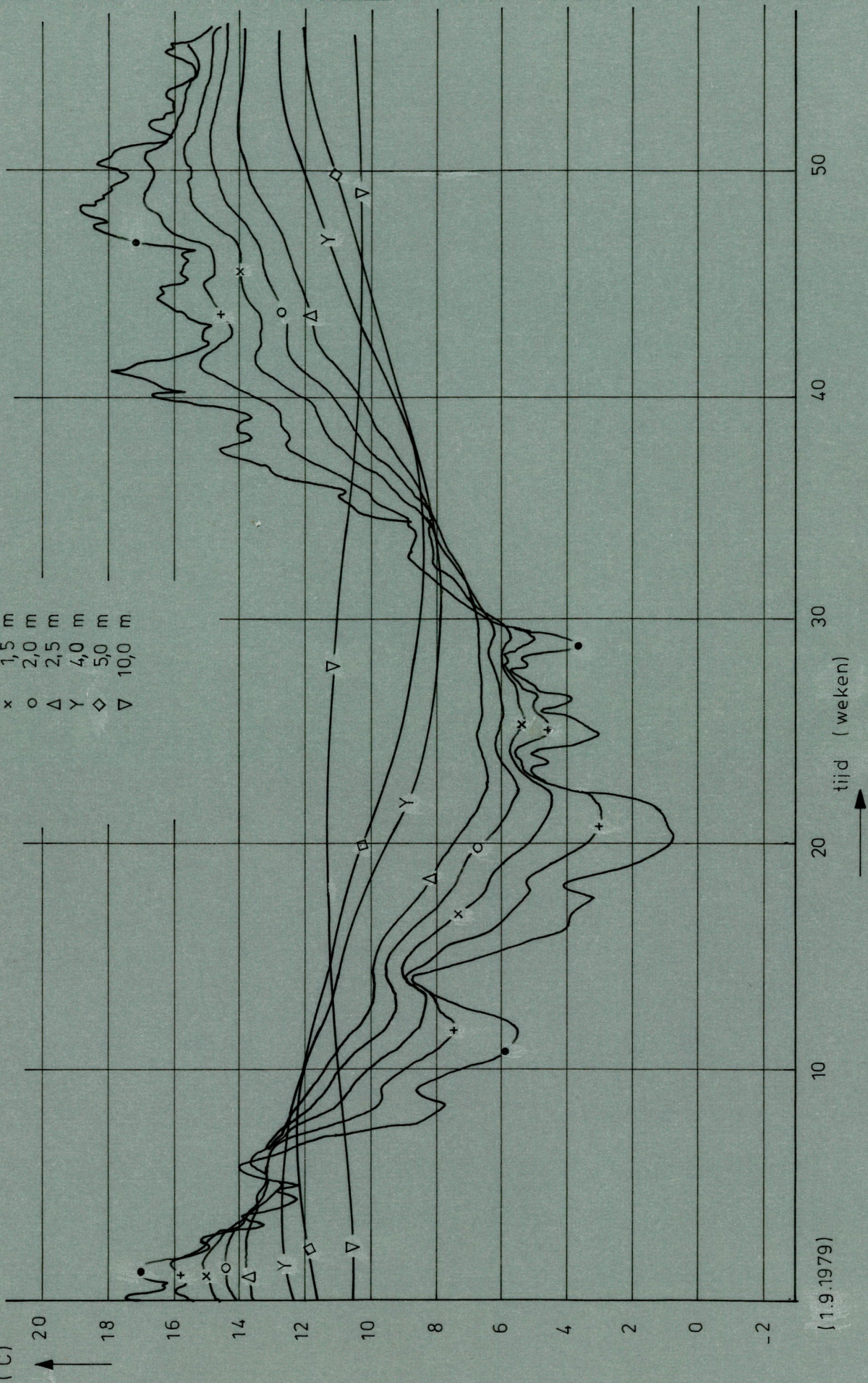
Locatie van een aantal thermokopels

Fig. 2
11220
MT-TNO



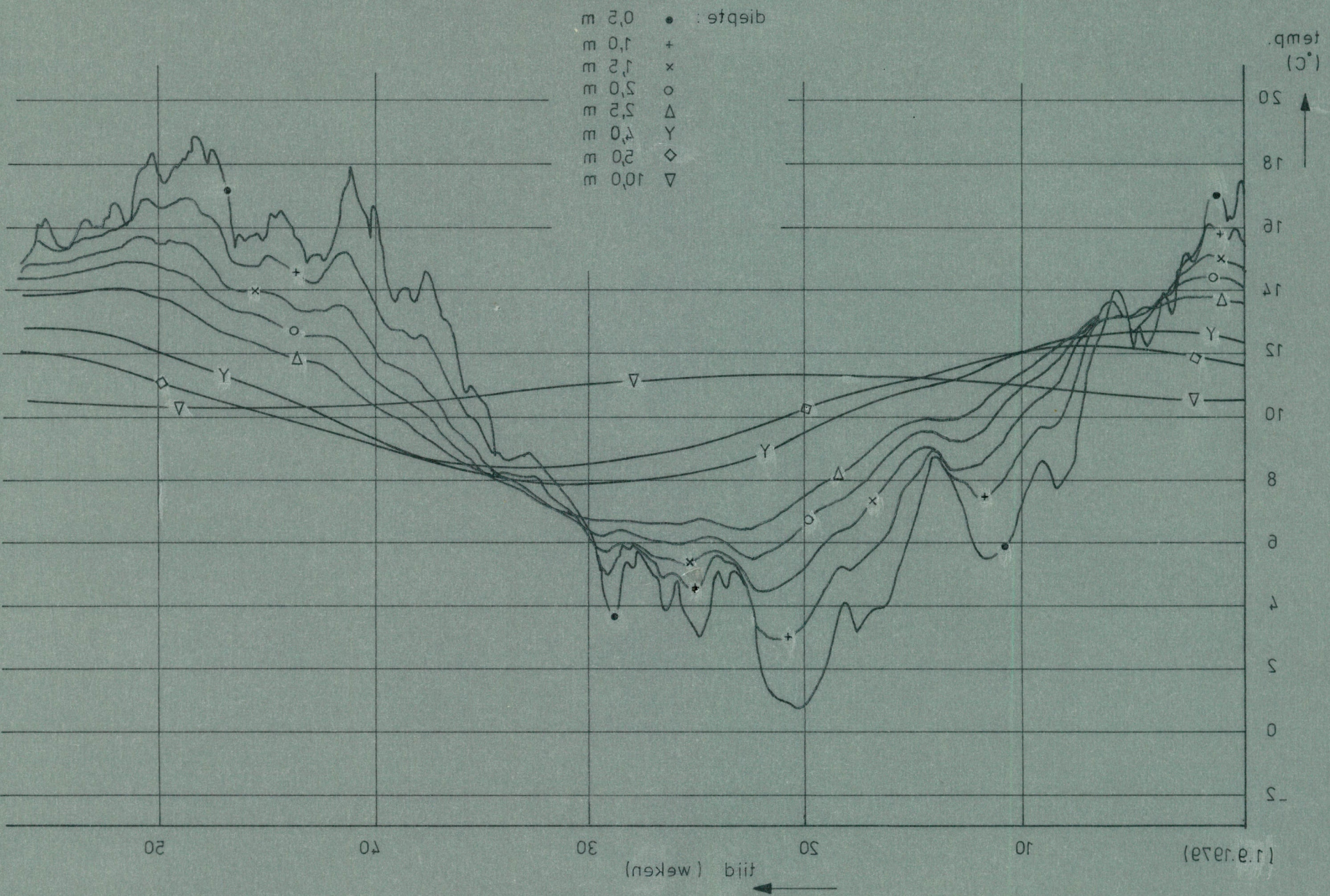
diepte :
 • 0,5 m
 + 1,0 m
 x 1,5 m
 o 2,0 m
 Δ 2,5 m
 Y 4,0 m
 ◇ 5,0 m
 ▽ 10,0 m

temp.
 (°C)



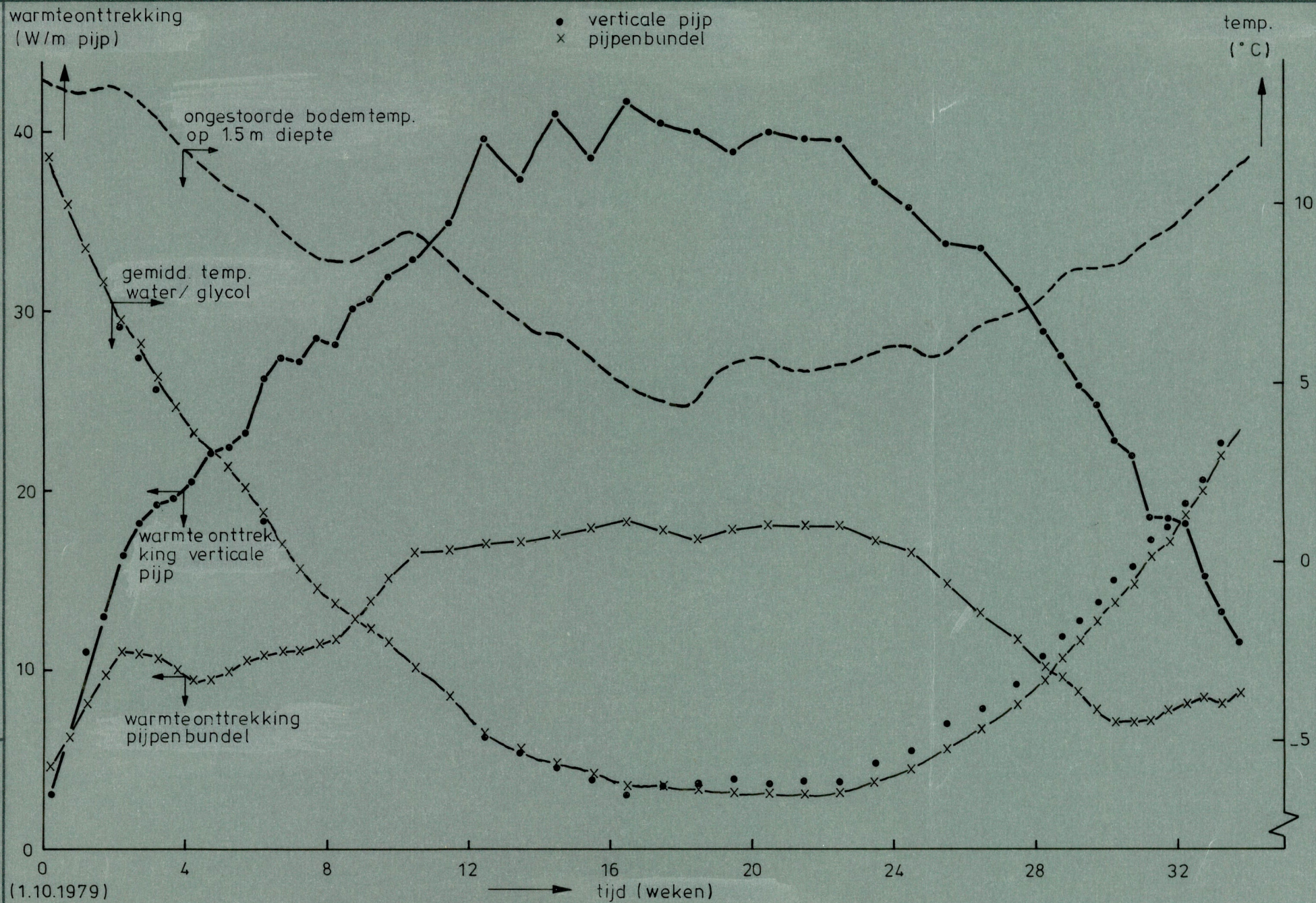
Ongestoorde bodemtemperatuur op verschillende diepten

MT_TNO
 11220
 Fig.6



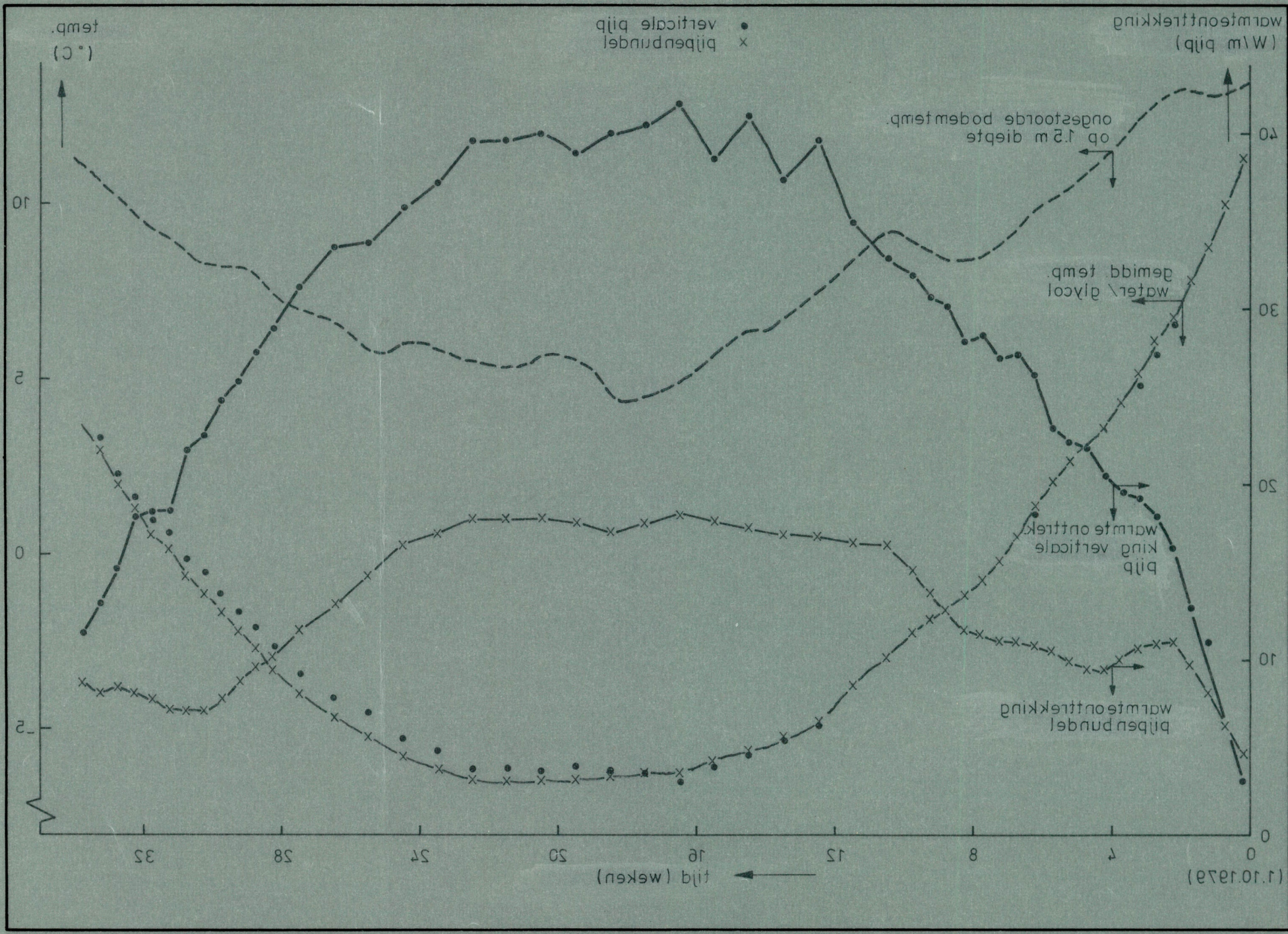
Gemeten warmteonttrekking met de pijpenbundel en de verticale pijp

MT-TNO
11220
Fig.7



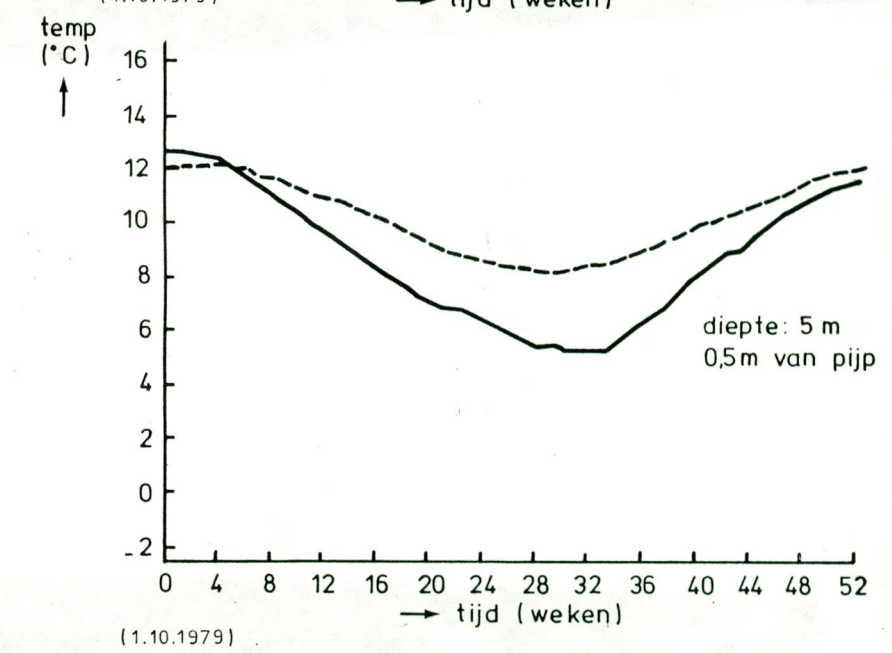
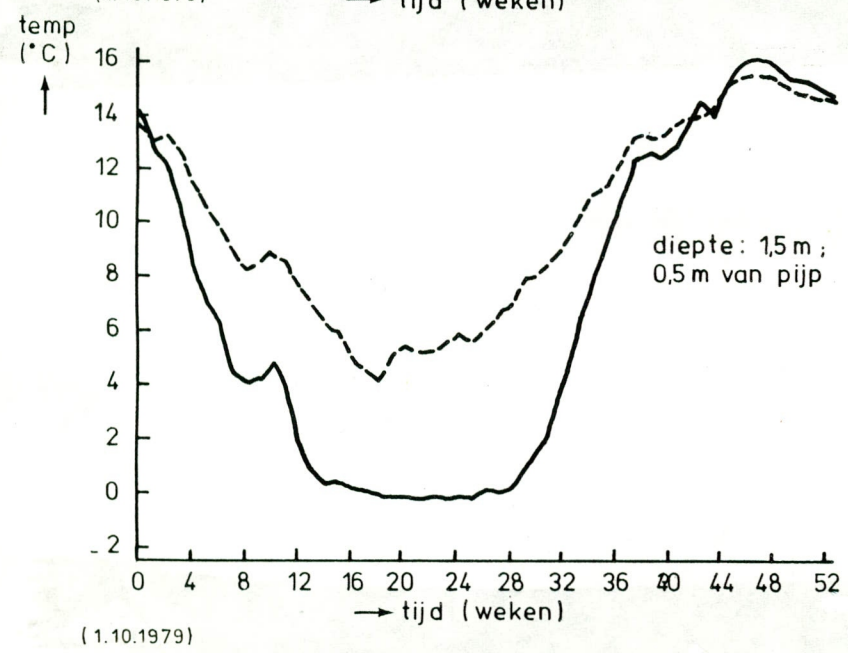
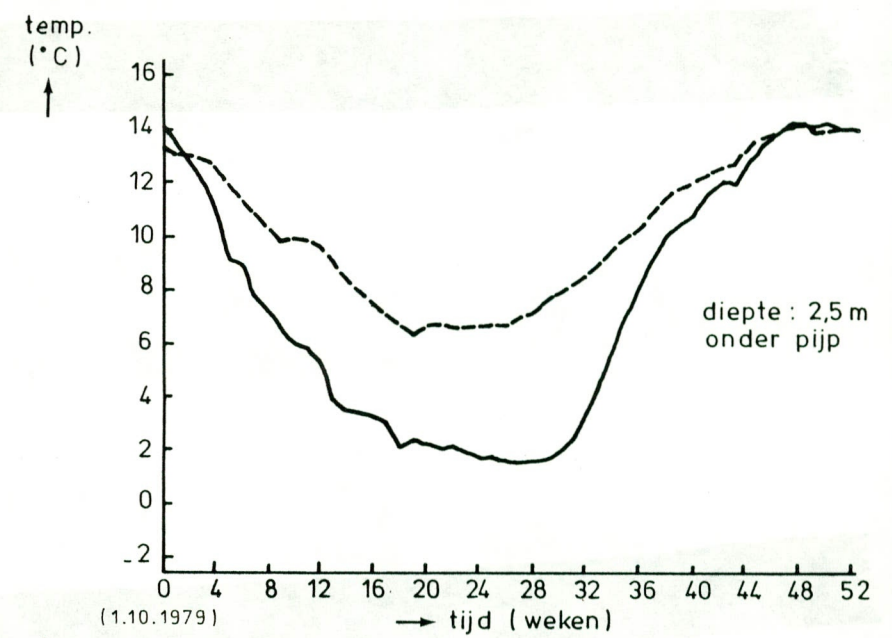
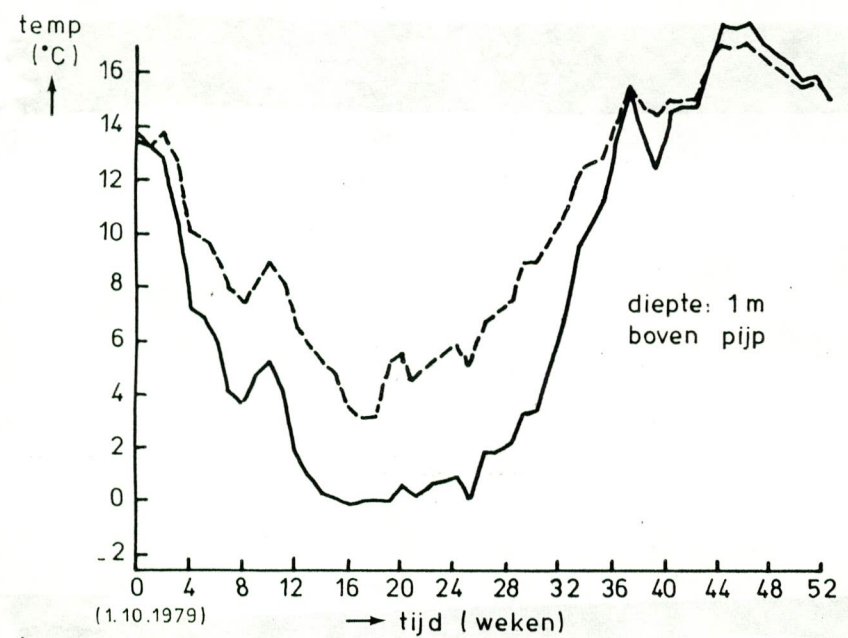
en de verticale pijp
Gemeten warmteonttrekking met de pijpverbundel

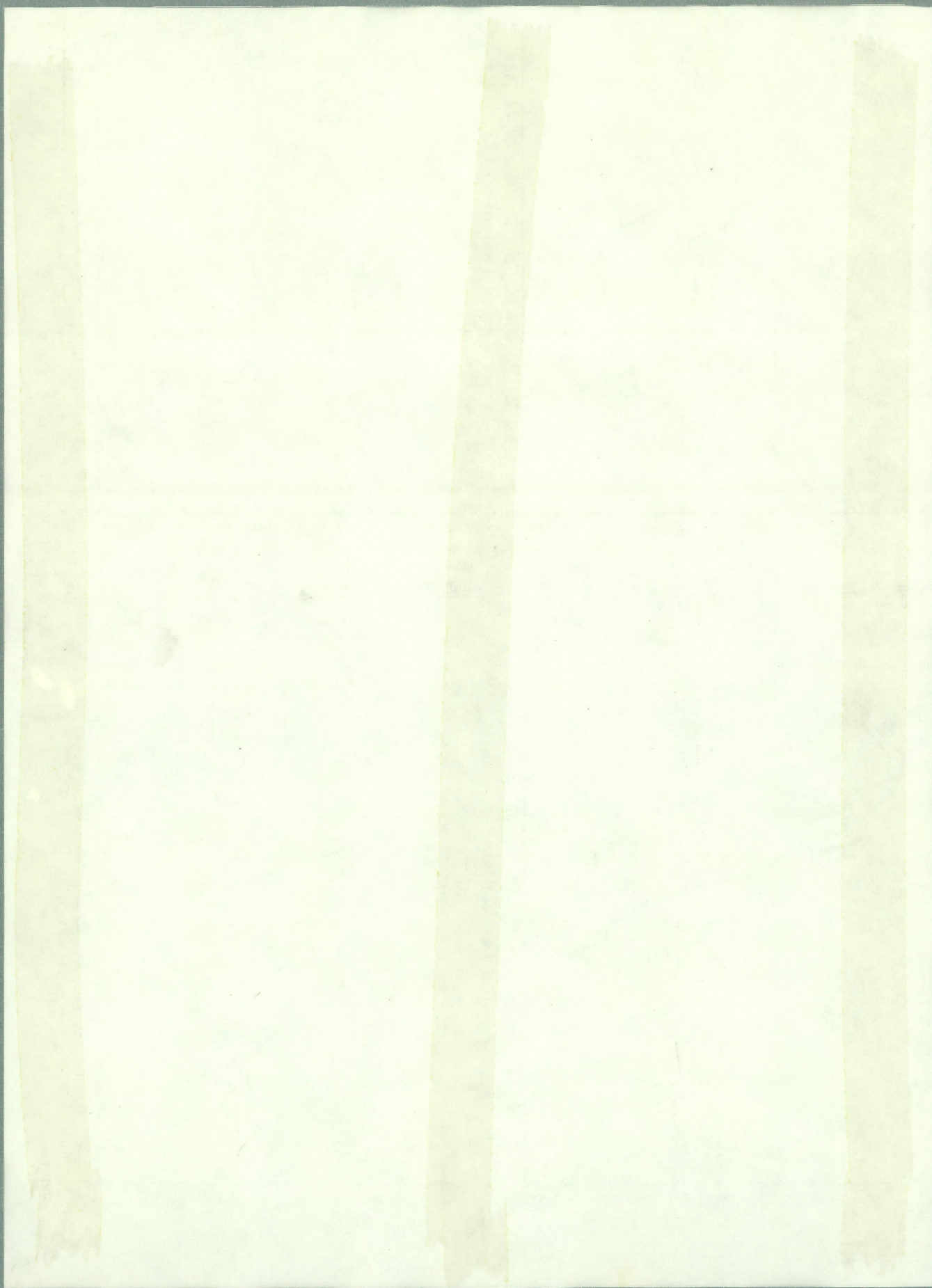
Fig. 2
11550
MT-110



————— ongestoorde bodemtemperatuur
 ————— bodemtemperatuur bij centrum pijpenbundel

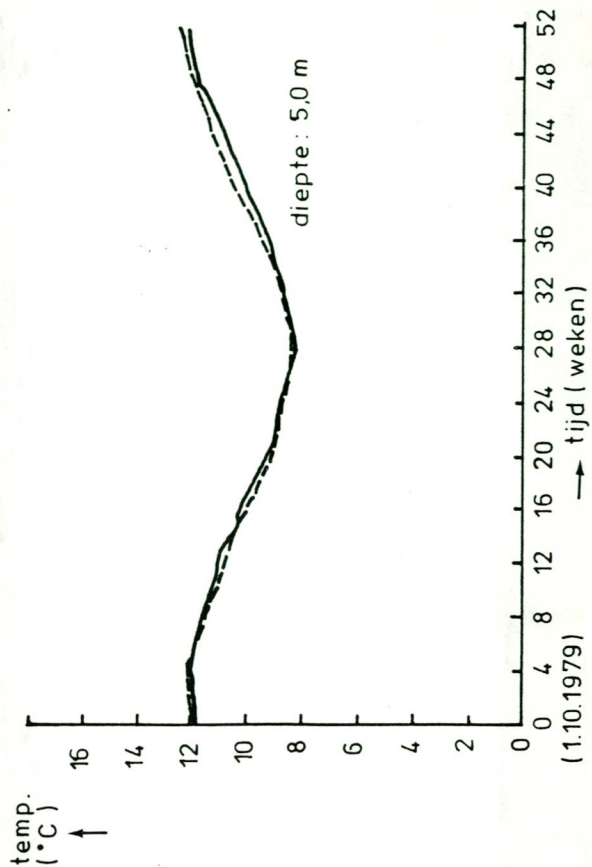
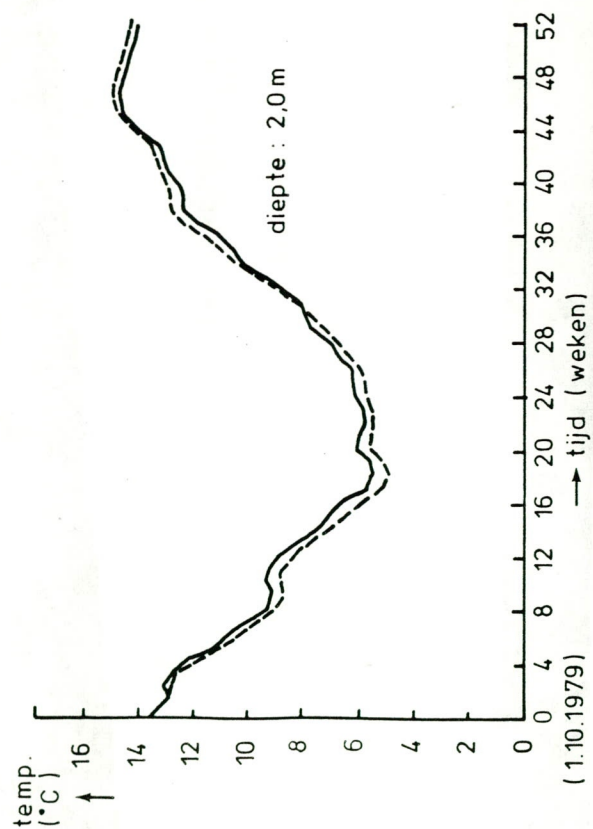
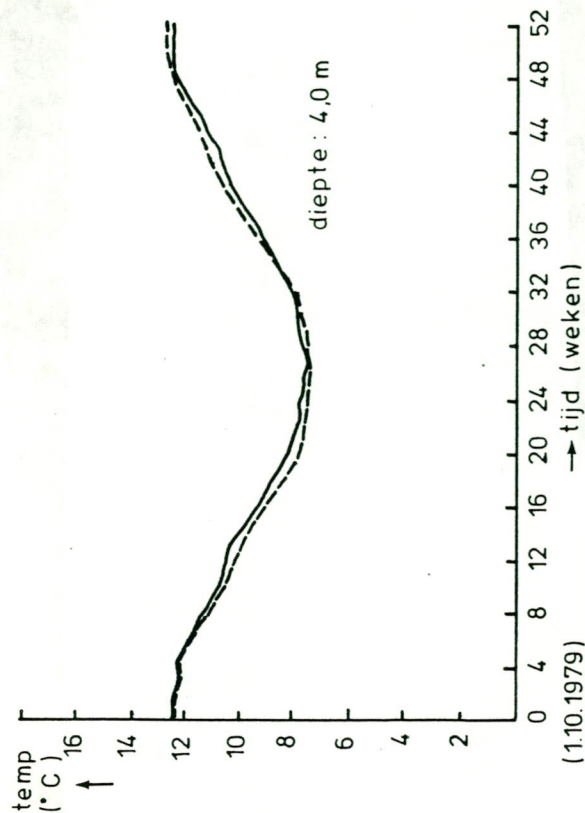
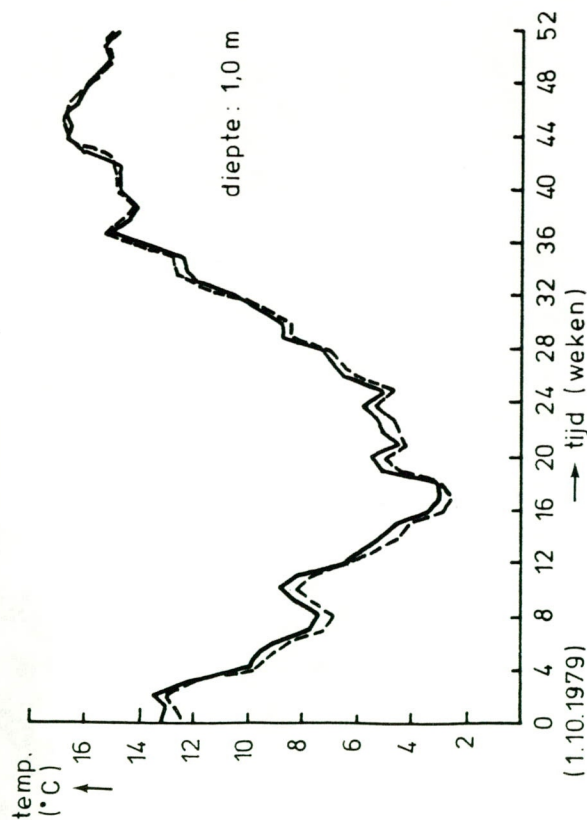
Gemeten temperatuurdeling bij de pijpenbundel





Gemeten temperatuurdeling bij de pijpbundel
ongestoorde bodemtemperatuur
bodemtemperatuur bij centrum pijpbundel

MT-TNO
11220
Fig. 8



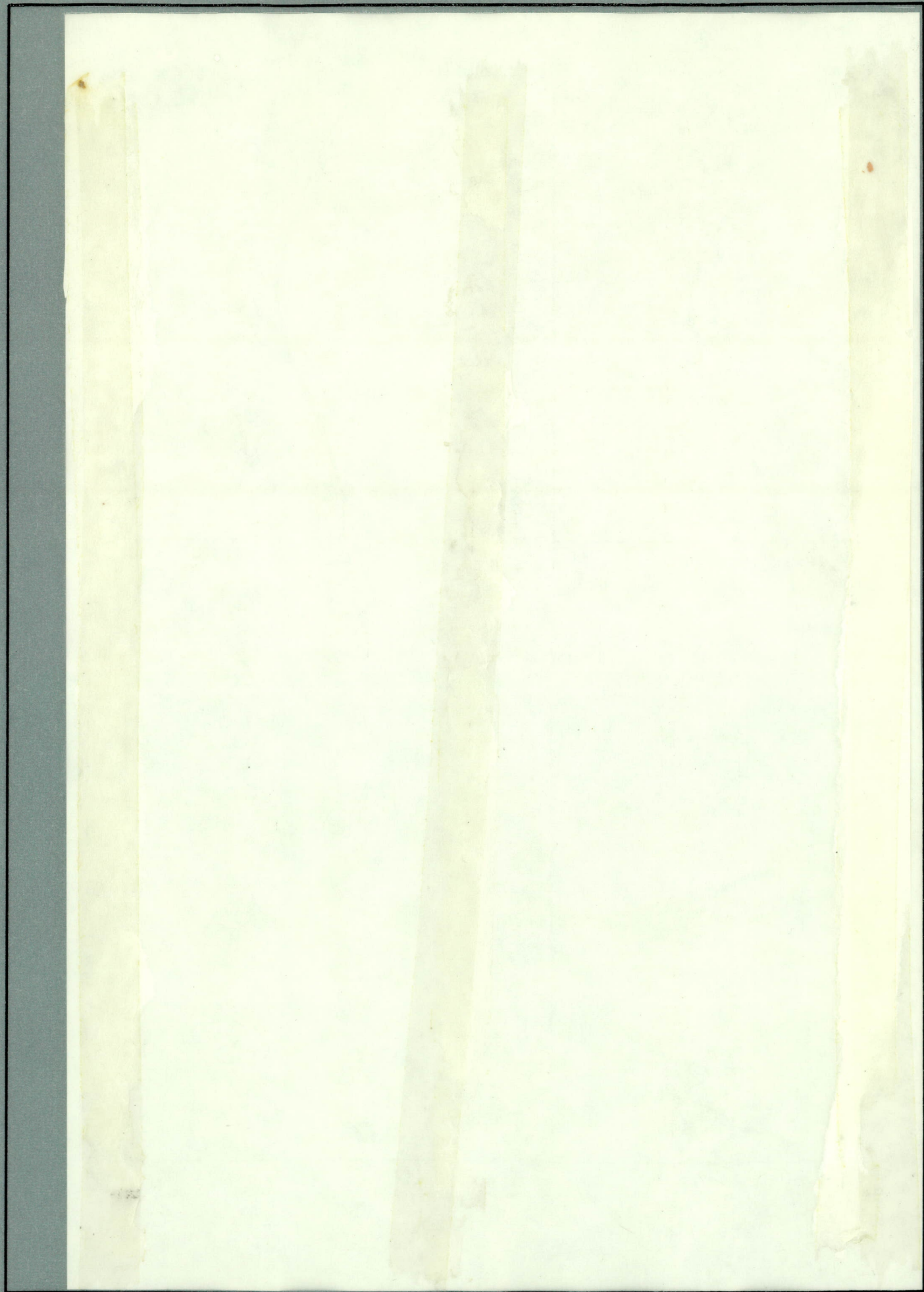
Vergelijking van metingen en berekeningen;
Ongestoorde bodemtemperatuur

— gemeten temperatuur
--- berekende temperatuur, $\alpha = 1,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

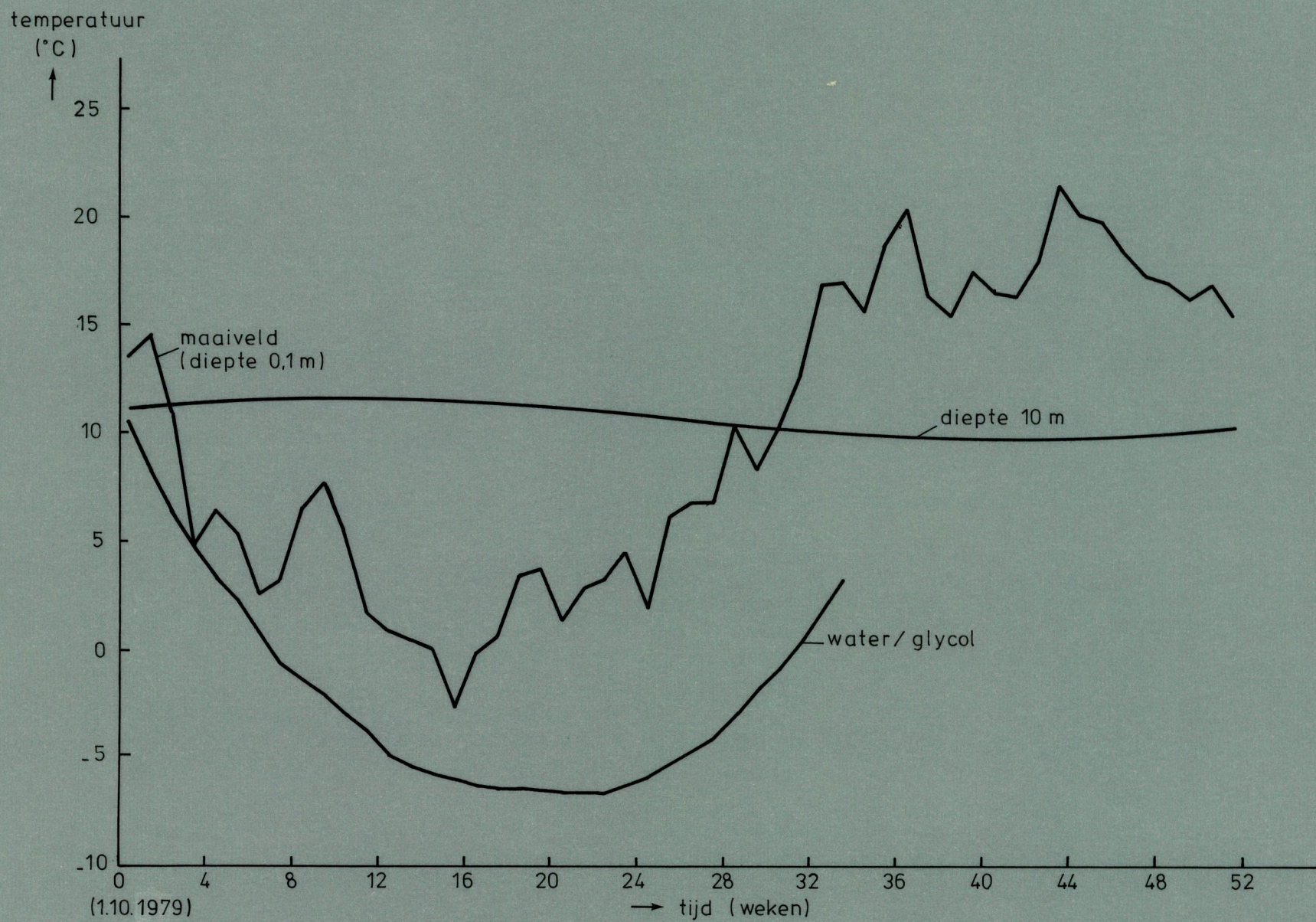
MT.TNO

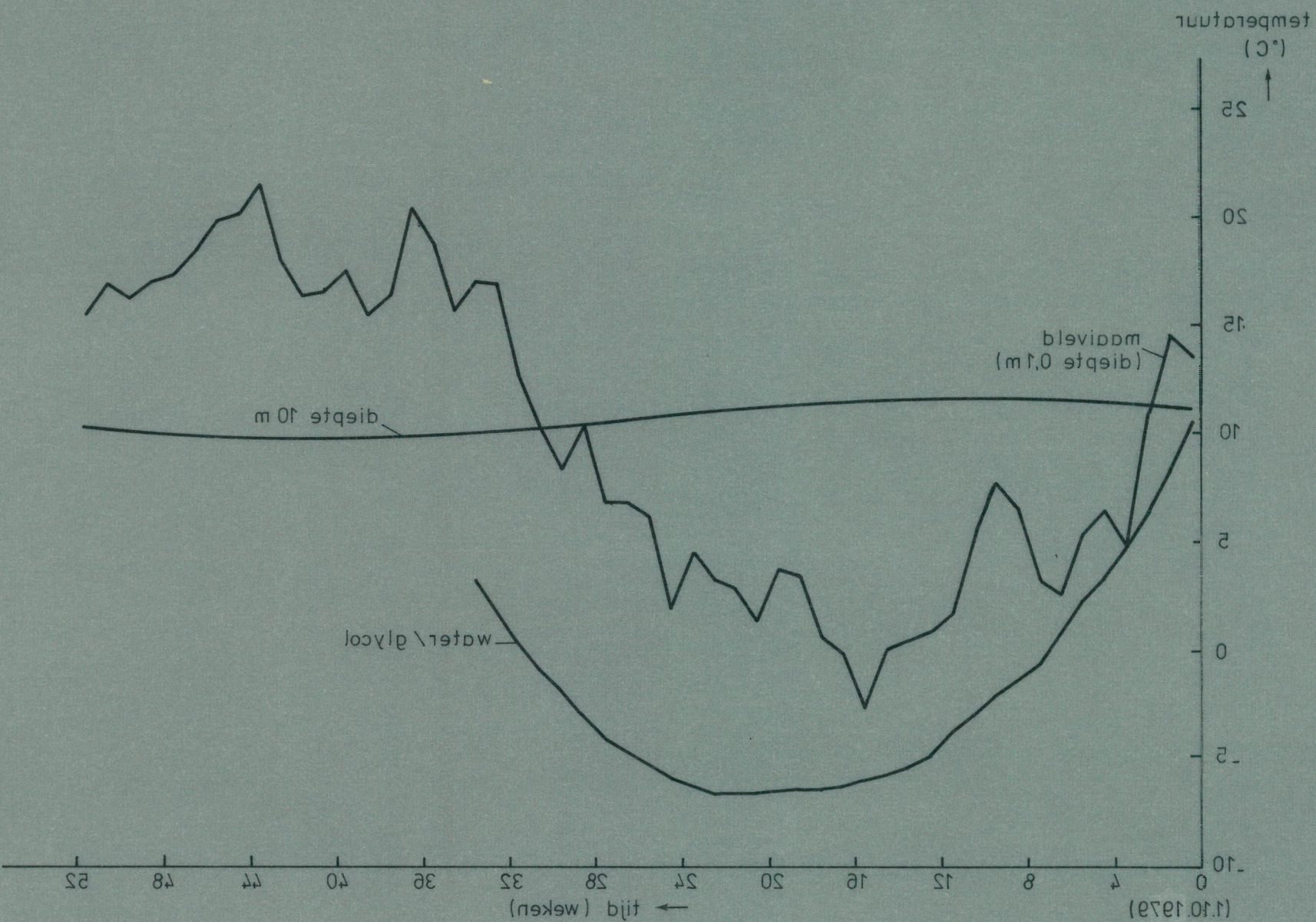
11220

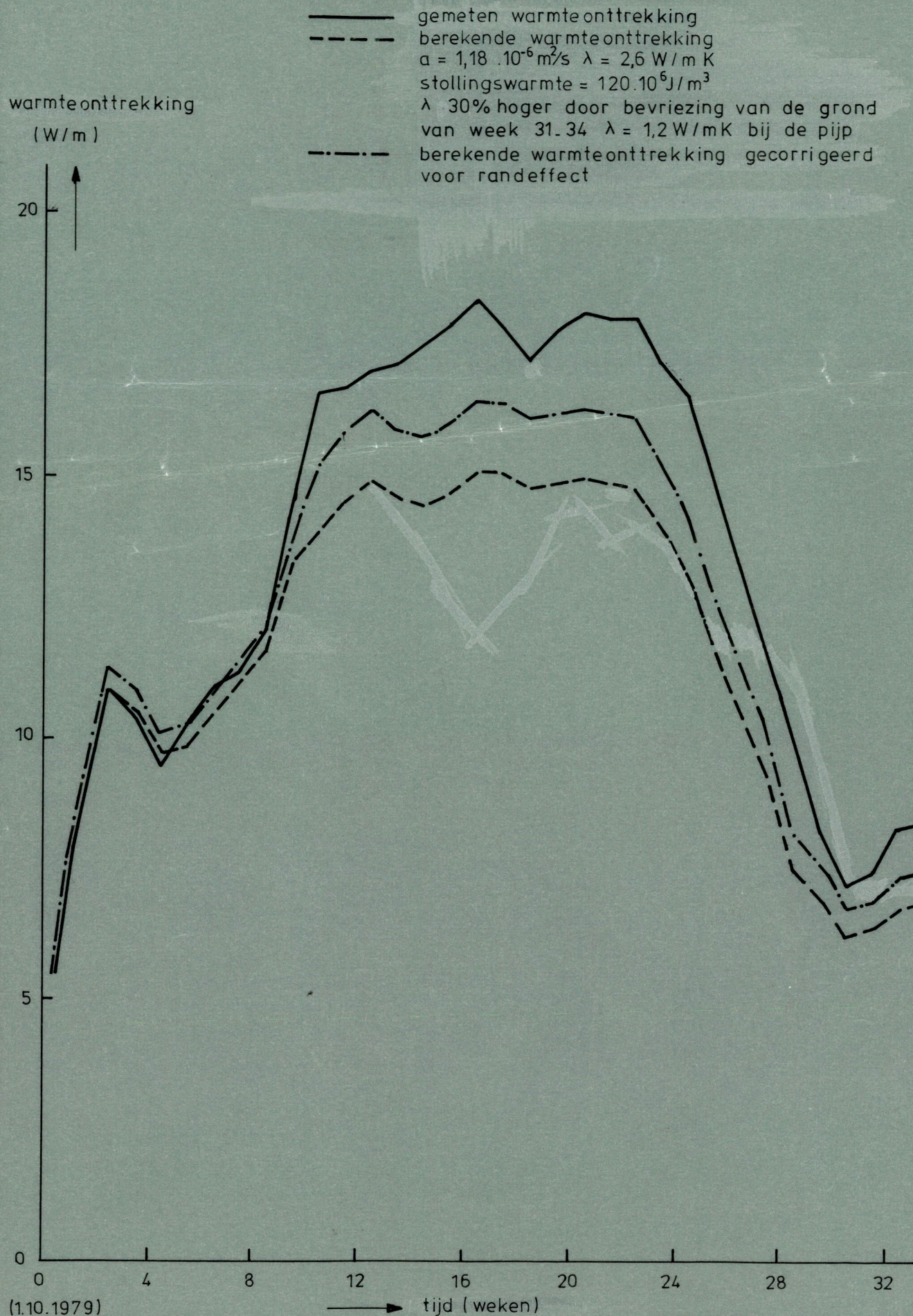
Fig. 9



MT-TM 055M Fig. 9	Ongeoorde bodemtemperatuur gemeten temperatuur berekende temperatuur, $a = 1.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ Vergelijking van metingen en berekeningen
----------------------------------	--

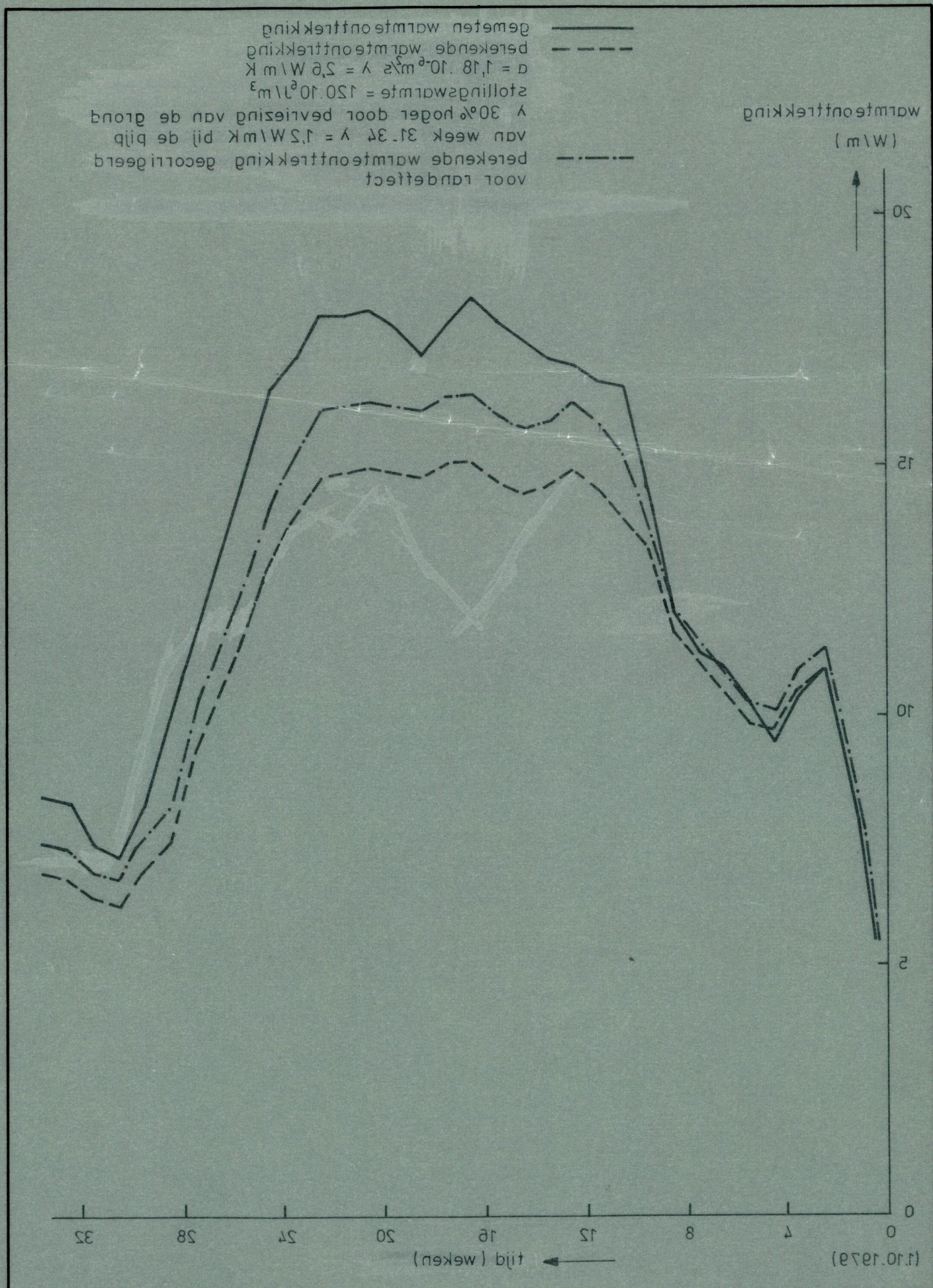






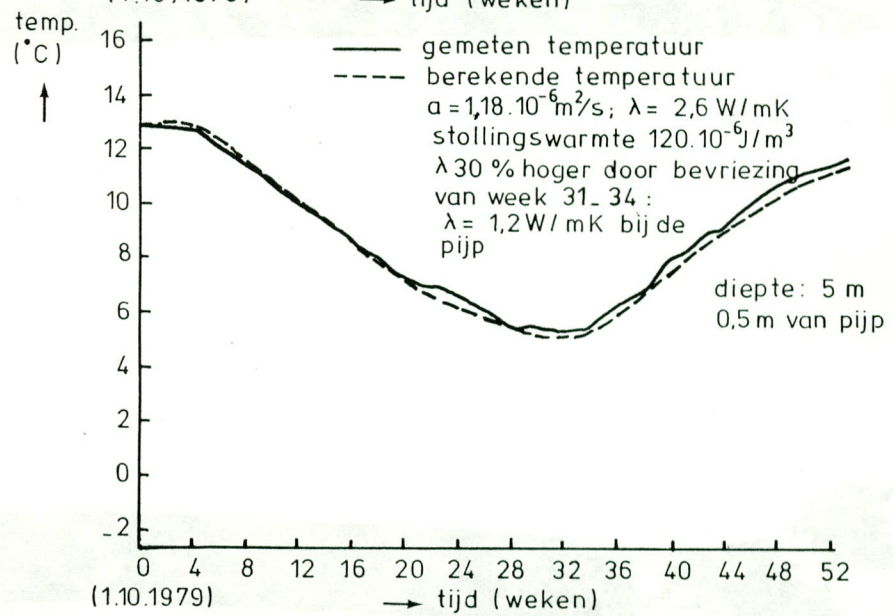
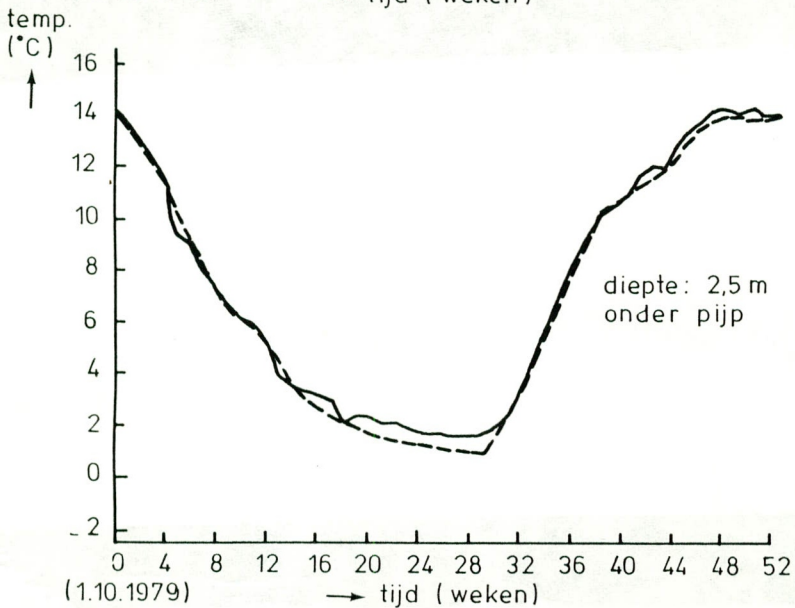
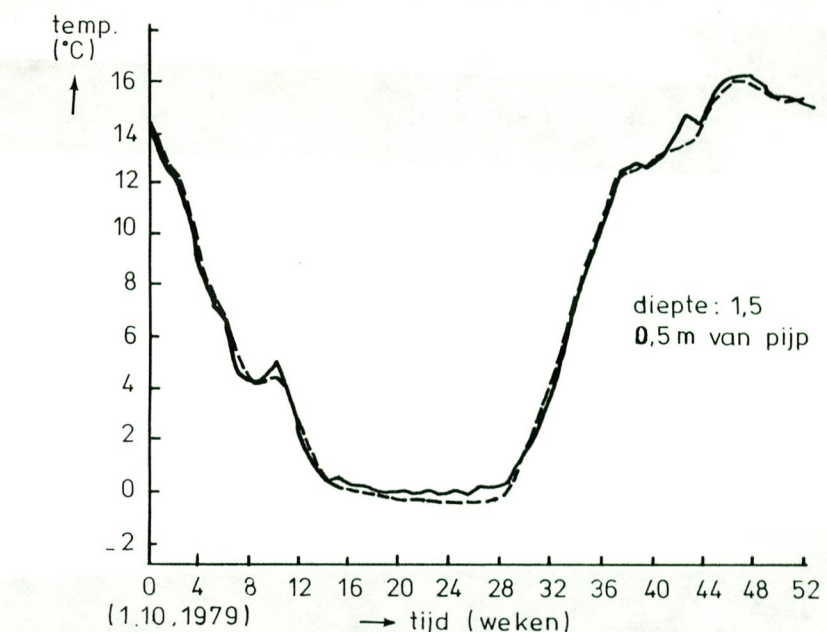
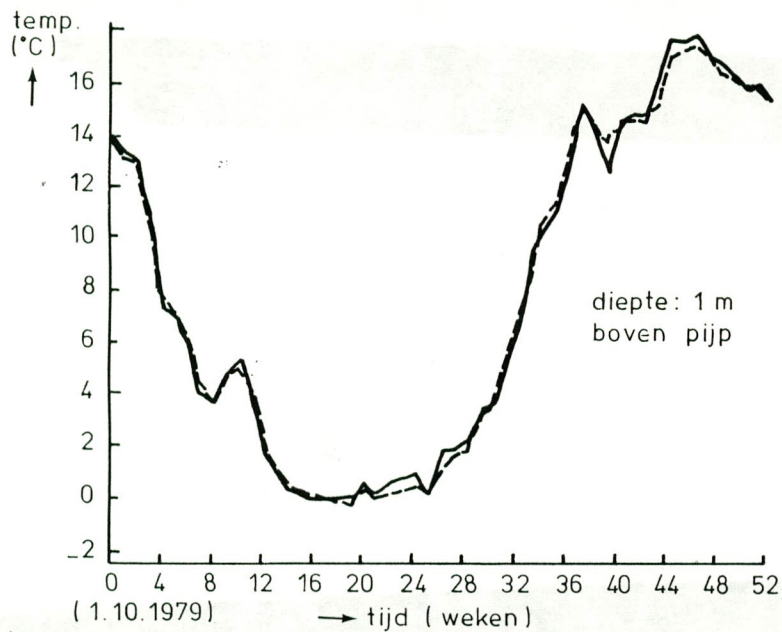
Vergelijking van metingen en berekeningen ;
 warmteonttrekking met de pijpenbundel

MT.TNO
 11220
 Fig.11



Vergelijking van metingen en berekeningen ;
warmteonttrekking met de pijpbundel

Fig.11
11220
MT-TNO



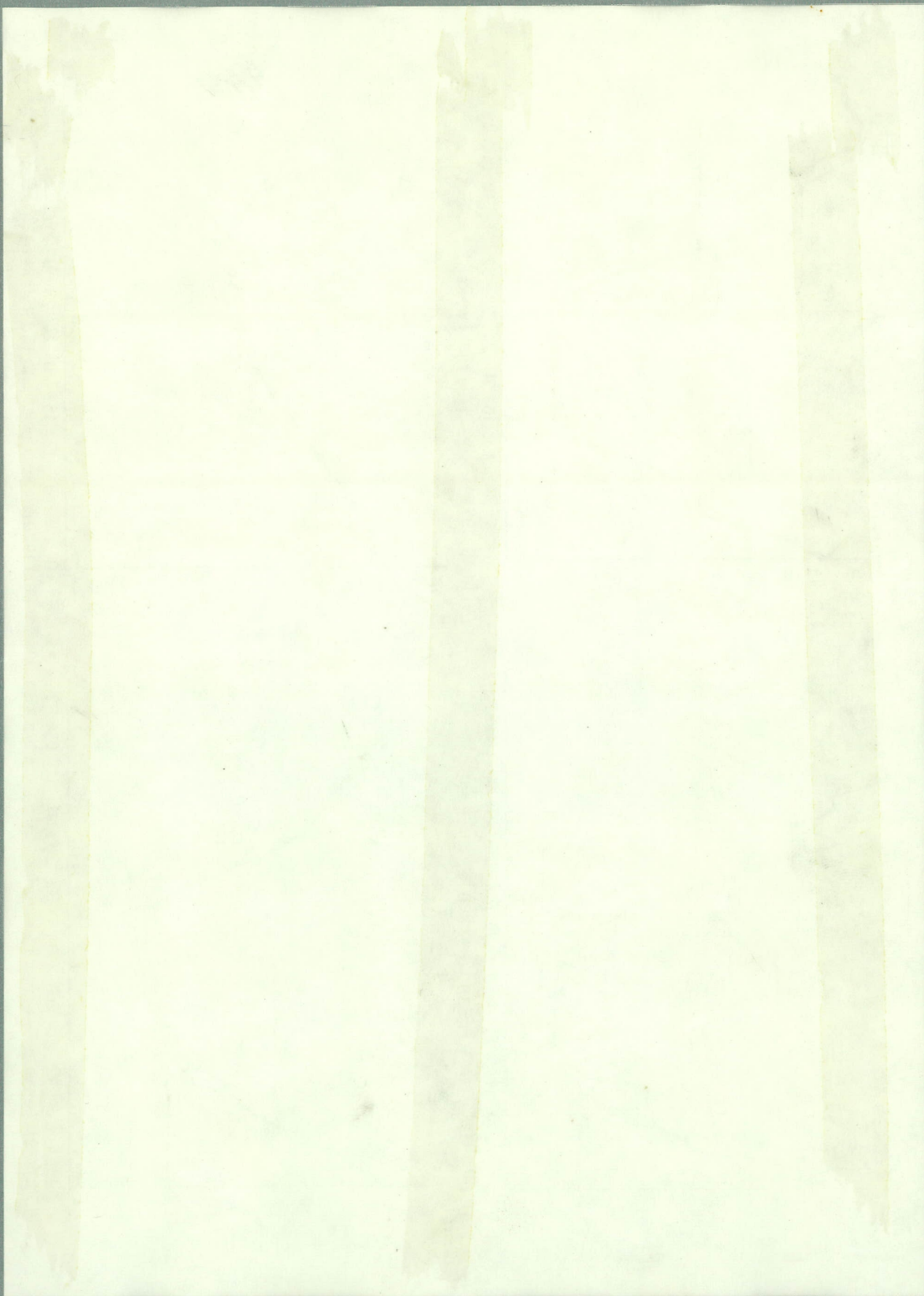


Fig. 15
11220
MT-TNO

Vergelijking van metingen en berekeningen;
bodemtemperatuur bij de bijeenkomst

..
ORIENTEREND ONDERZOEK NAAR DE BODEM
ONDER TUINBOUWKASSEN ALS WARMTEBRON
VOOR DE WARMTEPOMP

door
Ing. A.D. Koppenol



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref. nr. : 82-09264
Dossier nr: 8725-30199
Datum : juli 1982
N.P.

Bestemd voor :
Projectbureau Energieonderzoek

„Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigdvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
copie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.”

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten
en verplichtingen van opdracht-
gever en opdrachtnemer verwezen
naar de „Algemene Voorwaarden
voor Onderzoeks- en Ontwikke-
lingsopdrachten aan TNO, 1979”
dan wel de desbetreffende terzake
tussen partijen gesloten overeen-
komst.

INHOUDSOPGAVE

Pag.

1. INLEIDING

3

2. BEREKENINGSRESULTATEN

4

3. CONCLUSIES

5

1. INLEIDING

In opdracht van het Projectbureau Energieonderzoek is een oriënterend theoretisch onderzoek uitgevoerd naar de bodem onder tuinbouwkassen als warmtebron voor de warmtepomp. Hierbij is gebruik gemaakt van een bestaand rekenmodel. Uitgangspunten voor de berekeningen waren:

- Warmte-onttrekking aan de bodem vindt plaats door middel van verticale pijpen met een lengte van 10 m. De bovenkant van de pijp bevindt zich 0,9 m beneden het maaiveld. De pijpafstand is 3,2 m bij 3,0 m en de pijpdiameter 0,05 m.
- Voor de warmtegeleidingscoëfficiënt van de bodem is een waarde van 2 W/mK aangehouden en voor de warmtecapaciteit een waarde van 3 MJ/m³K.
- Verloop van de warmte-onttrekking per pijp volgens figuur 1. In het voor- en naseizoen (mei en september) is de warmtevraag kleiner dan in de overige maanden van het stookseizoen (respectievelijk 100W en 200W per pijp). Vanaf 1 november tot 15 december wordt er niet geteeld en is de verwarming afgeschakeld.
- Verloop van de aardoppervlaktetemperatuur in de kas volgens figuur 1.
- Bodemtemperatuur op 16 m beneden maaiveld bedraagt 10°C constant.

Uitgevoerd zijn 3 berekeningsgevallen. Allereerst de situatie waarbij geen warmte aan de bodem wordt onttrokken. Vervolgens de situatie waarbij warmte-onttrekking volgens figuur 1 plaats vond. Tot slot dezelfde situatie, echter met warmtetoevoer in de bodem door middel van het pijpsysteem. Van eind mei tot 1 september is hiertoe de pijptemperatuur op 20°C gehouden. Behalve het verloop van de temperatuur van deze verticale pijpen tijdens het stookseizoen is de temperatuurverdeling in de bodem, vooral tot ca. 0,5 m beneden het maaiveld van belang, dit in verband met invloed op de groei.

2. BEREKENINGSRESULTATEN

De warmte-onttrekking met de bodemwarmtewisselaar gedurende het stookseizoen bedraagt 98 kWh per m² grondoppervlak. De warmtevraag van de kas is ongeveer het viervoudige.

De bodemtemperatuur op 0,65 m diepte (op 0,9 m van de pijp) is weergegeven in figuur 2. Tijdens de periode van januari t/m mei ligt bij warmte-onttrekking deze temperatuur ca. 2 K lager dan zonder warmte-onttrekking. Bij warmte-onttrekking blijft de bodemtemperatuur op 0,65 m diepte juist boven 15°C. De pijptemperatuur verloopt bij warmte-onttrekking van ca. 7°C in de tweede helft van december tot 2,6°C aan het einde van april.

De warmtestroom vanuit de kas via het maaiveld naar de bodem is weergegeven in figuur 3. Er vindt een zekere mate van kortsluiting plaats: het warmteverlies naar de bodem neemt aanmerkelijk toe door de warmte-onttrekking aan de bodem. Deze toename van het warmteverlies bedraagt van eind januari t/m mei ca. 25% van de hoeveelheid warmte die aan de bodem onttrokken wordt.

Zonder kunstmatige regeneratie is de gemiddelde grondtemperatuur aan het begin van het tweede jaar ca. 4,5 K lager dan aan het begin van het eerste jaar (zie figuur 4). Zonder kunstmatige regeneratie zal de pijptemperatuur in het tweede jaar nog aanmerkelijk lager zijn. Met kunstmatige regeneratie, waarbij in de zomer een pijptemperatuur van 20°C is aangehouden, is de gemiddelde grondtemperatuur aan het begin van het tweede jaar ongeveer gelijk aan die van het begin van het eerste jaar (figuur 4).

3. CONCLUSIES

- Toepassing van de bodem onder de kas als warmtebron voor de warmtepomp lijkt niet zinvol door de aanmerkelijke toename van de warmtestroom van de kas via het maaiveld naar de bodem.
- Bij toepassing van de bodem onder de kas als warmtebron voor de warmtepomp is kunstmatige regeneratie in de zomer onmisbaar.

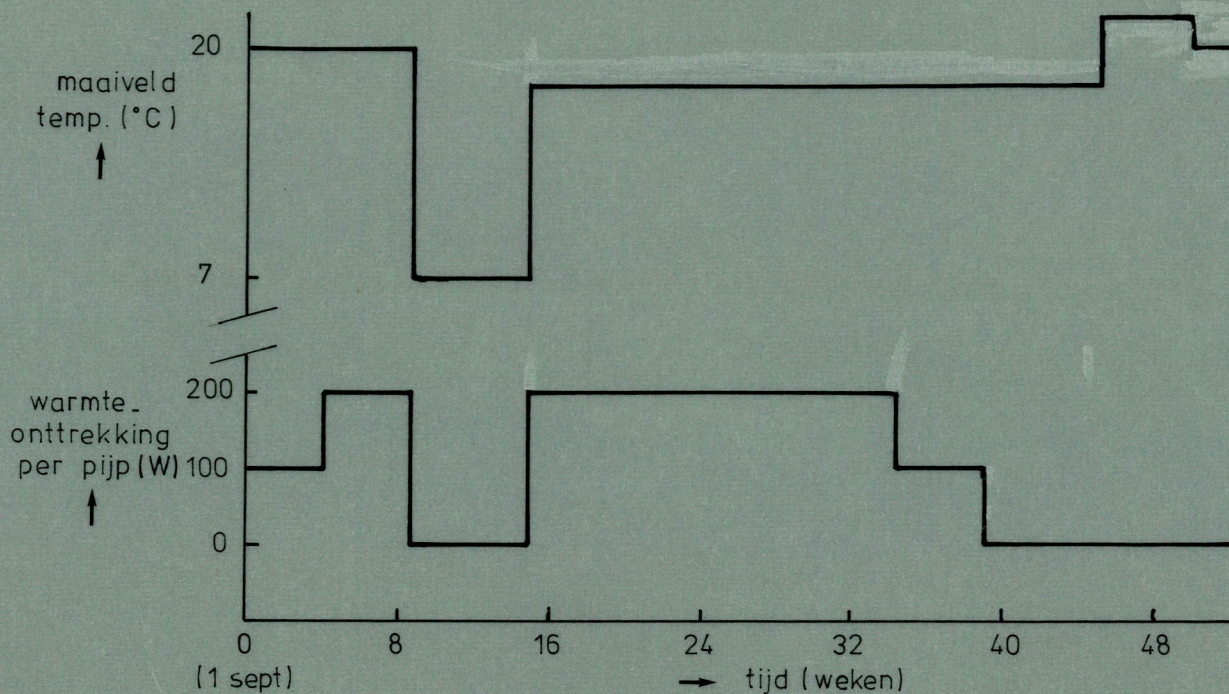


Fig.1 Verloop maaiveldtemp. en warmte.onttrekking per pijp

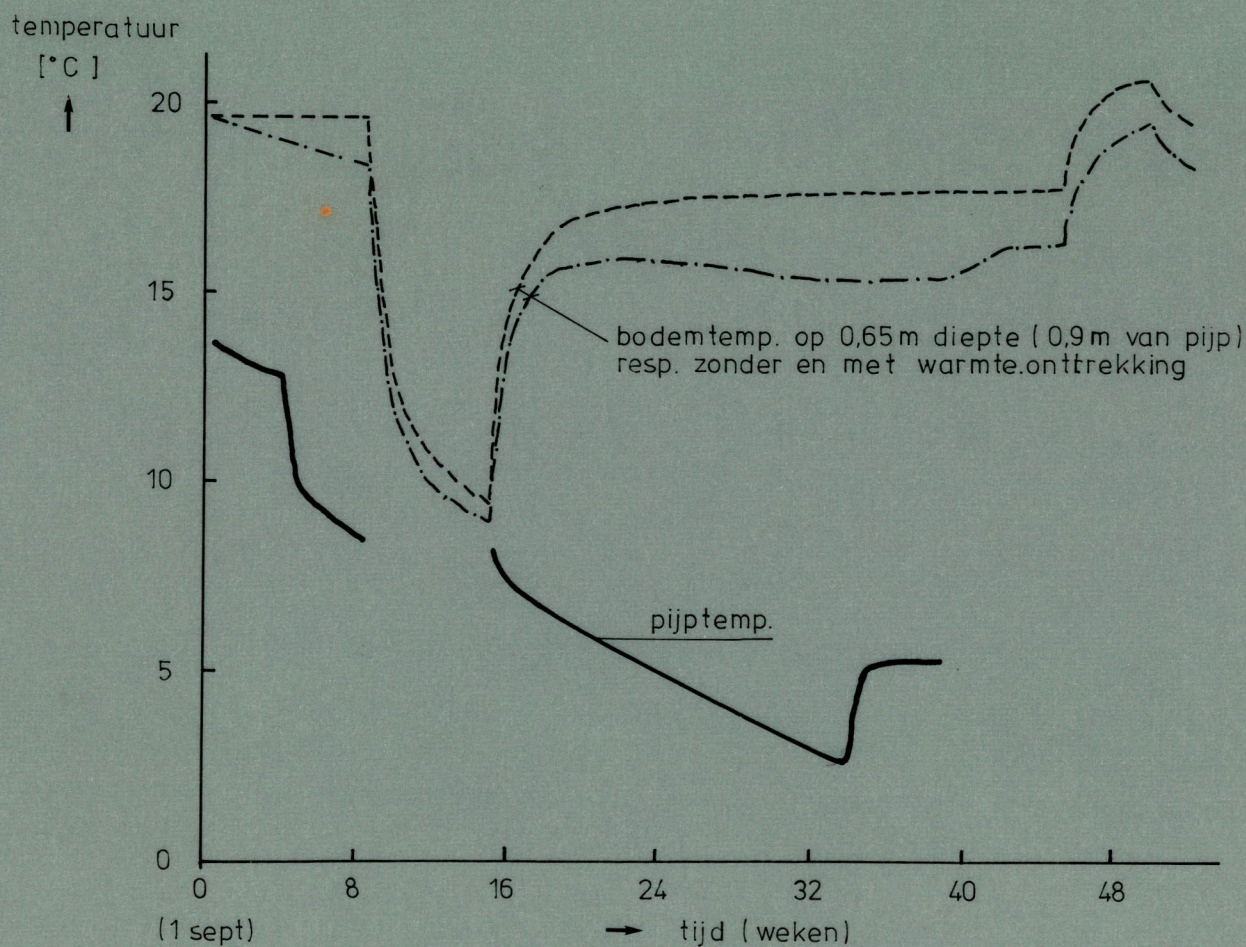


Fig. 2 Pijp- en bodemtemperatuur

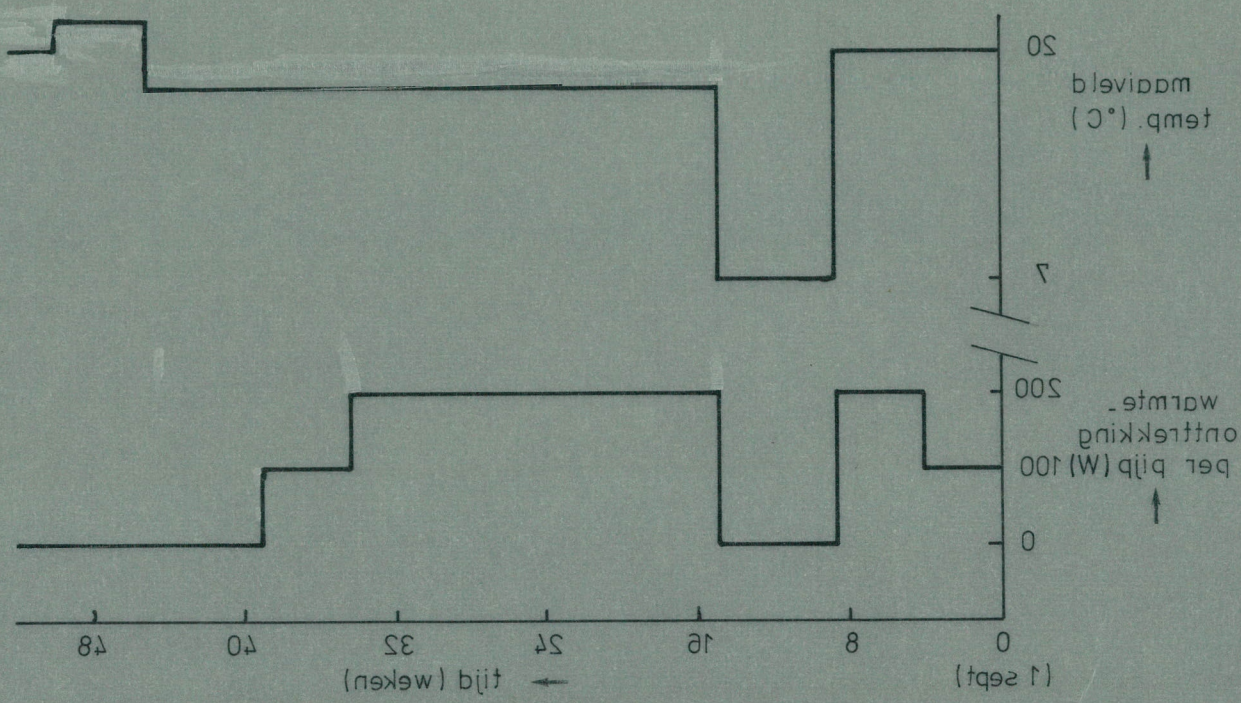


Fig. 1 Verloop maiveldtemp. en warmte-onttrekking per pijp

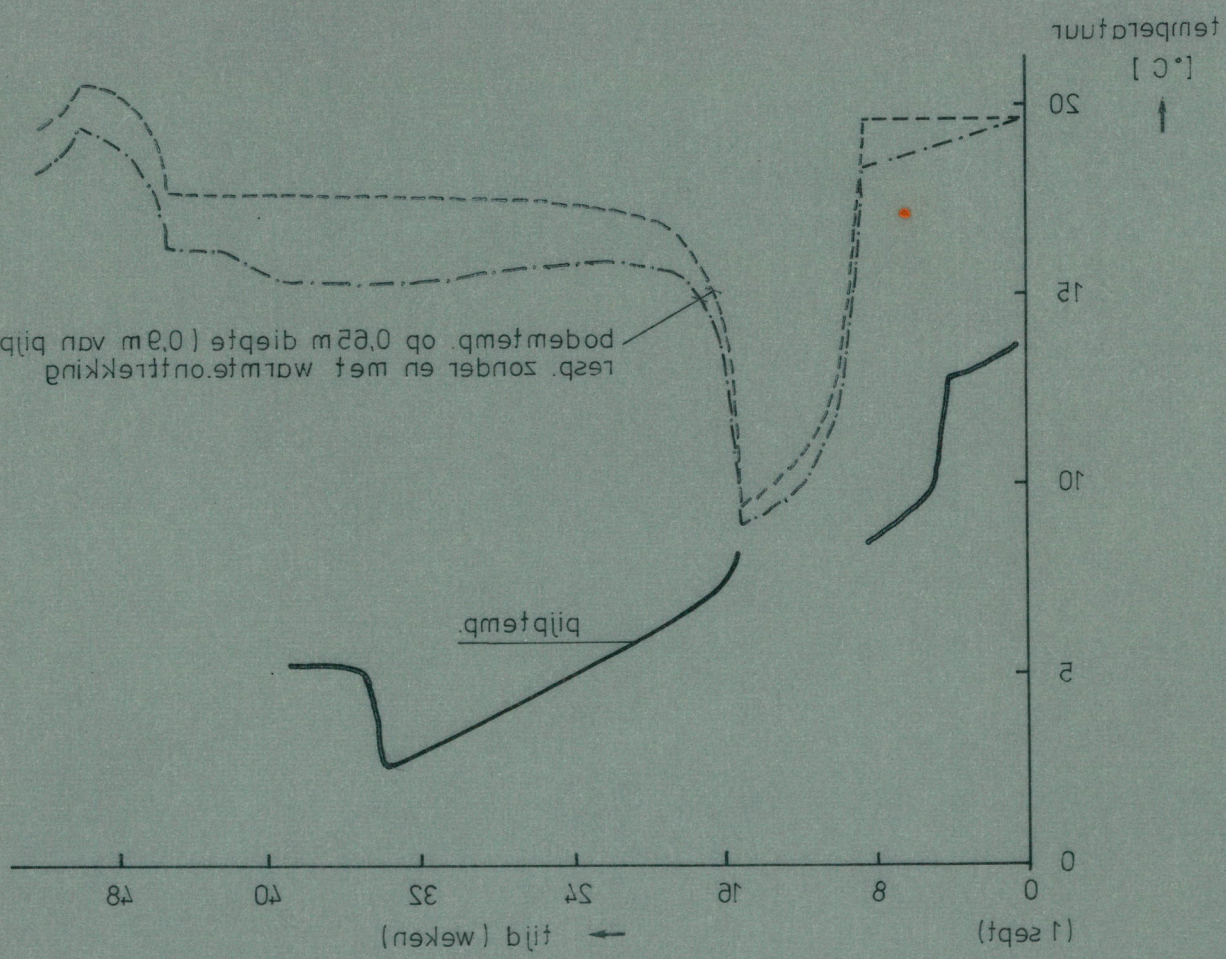
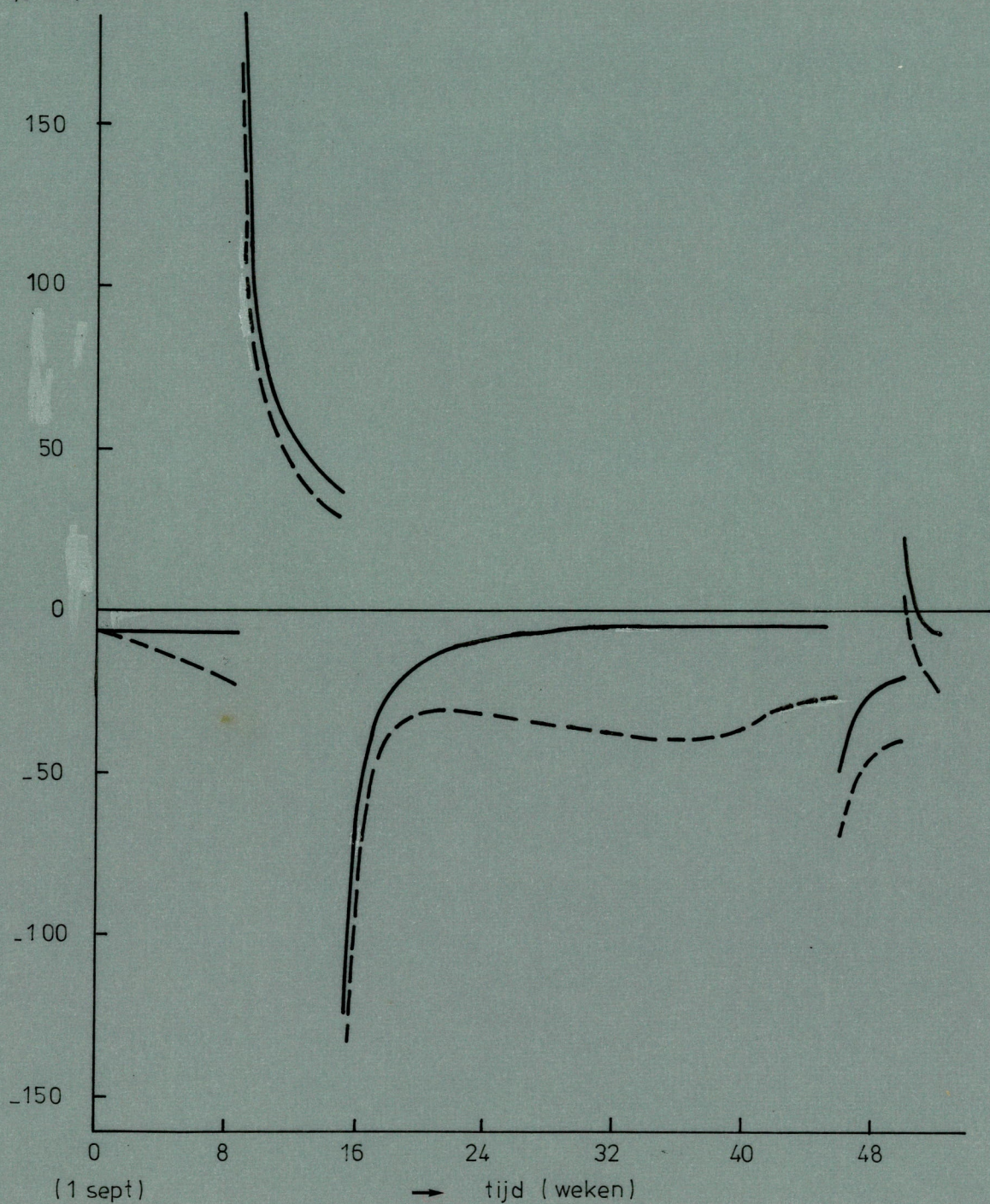
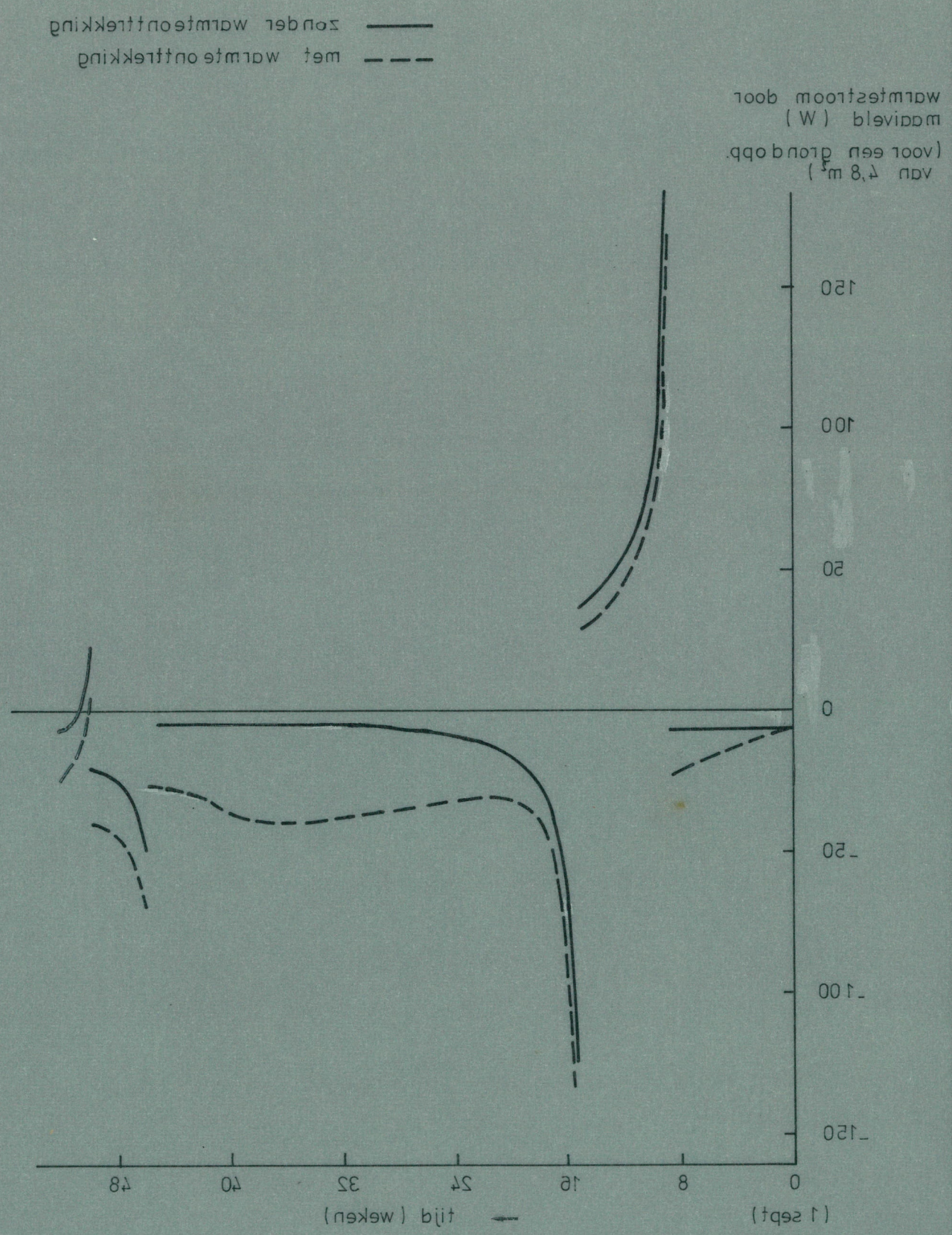


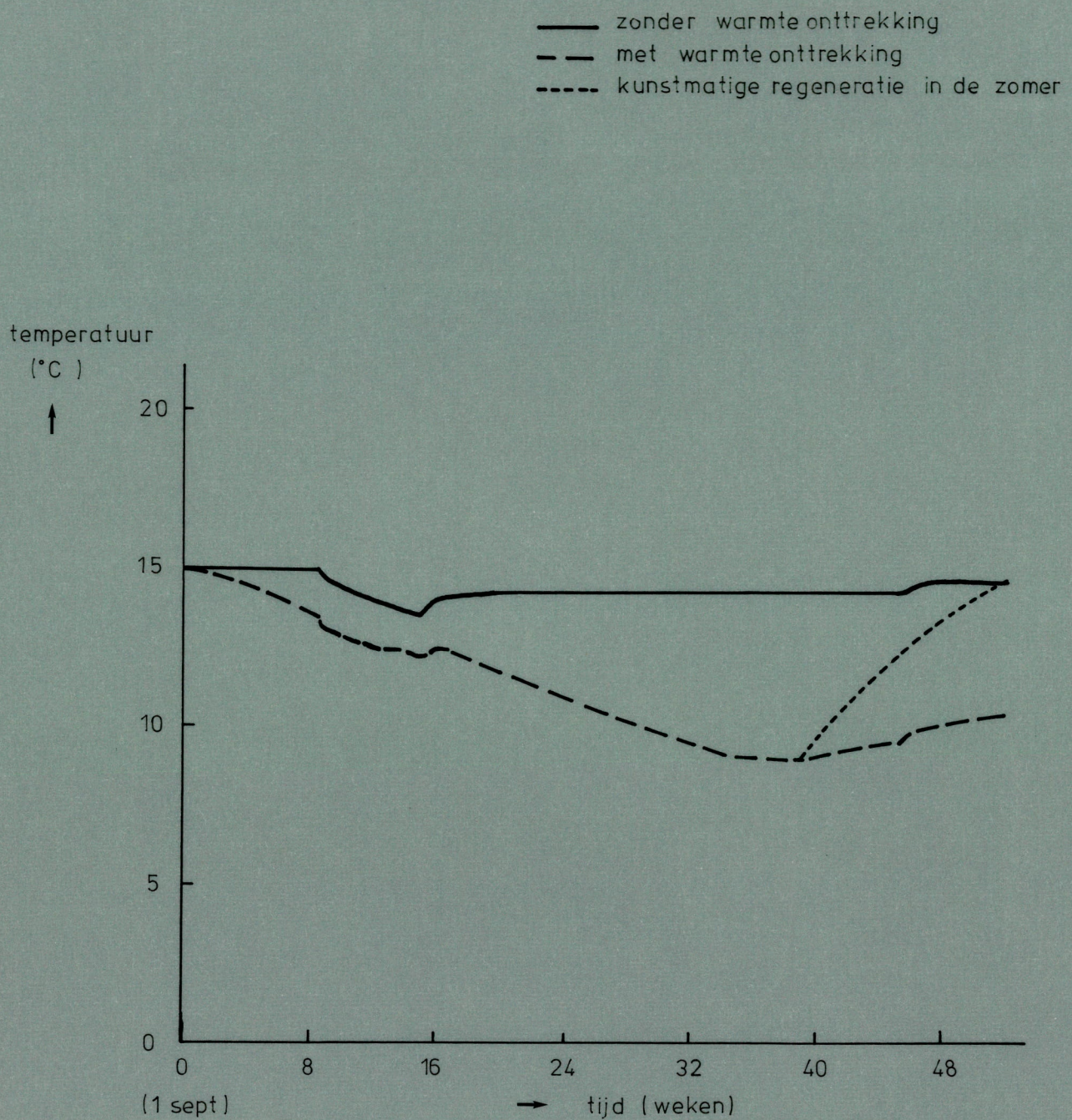
Fig. 2 Pijp- en bodemtemperatuur

warmtestroom door
maaiveld (W)
(voor een grond opp.
van 4,8 m²)

— zonder warmteonttrekking
- - - met warmteonttrekking







————— zonder warmte onttrekking
 - - - - - met warmte onttrekking
 kunstmatige regeneratie in de zomer

