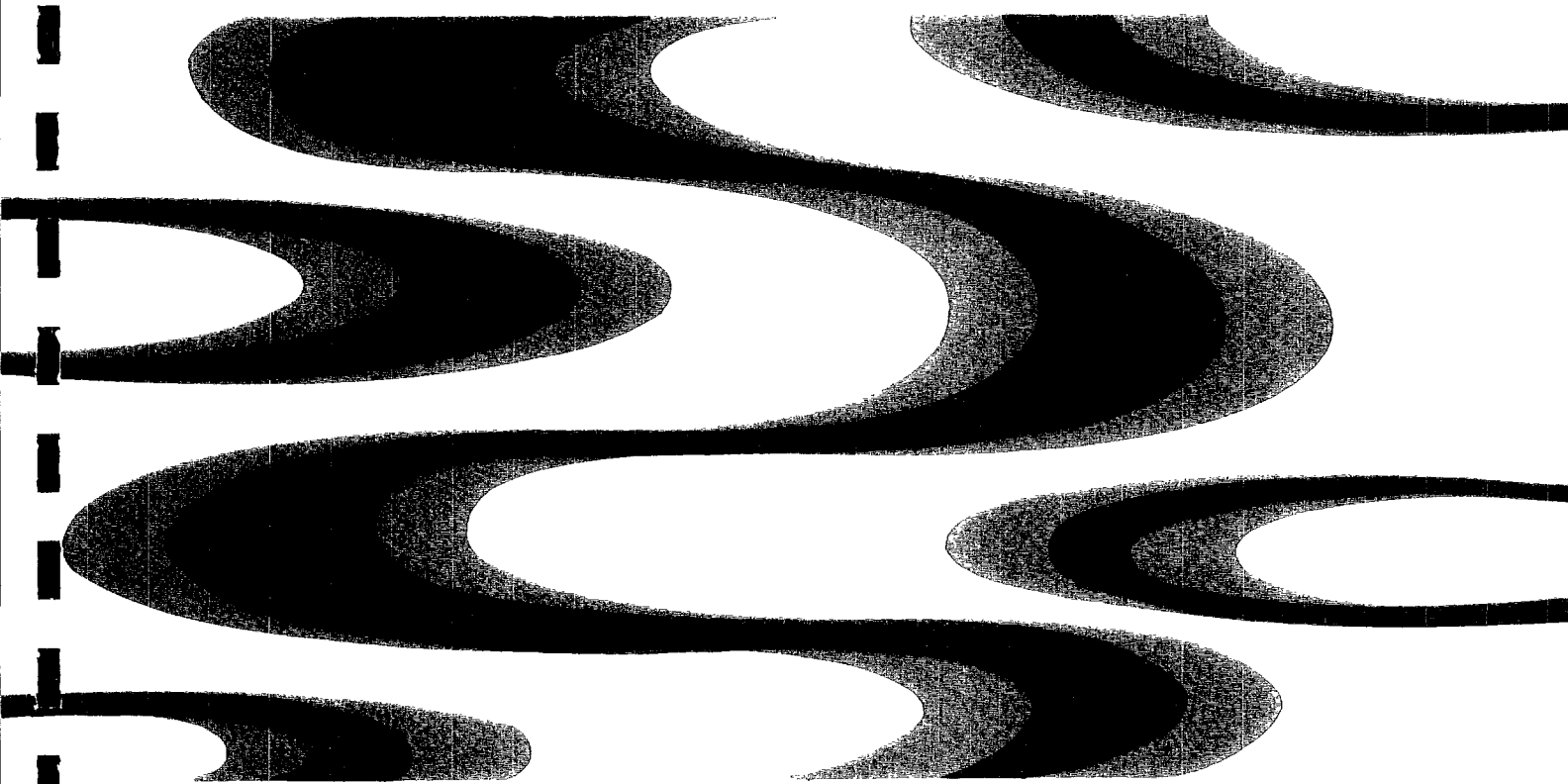


rijkswaterstaat



ARCHITEXE PLAAR

directie waterhuishouding  
en waterbeweging

S-75.006

RAPPORT RSWS 215

OPSPORING VAN KWELPLAATSEN EN ZAND-  
BANEN MIDDELS WARMTEBEELDEN 1979

Werkgroep Stralingstemperatuur  
Hydrologie

| <u>Inhoud</u>                                            | <u>Bladzijde</u> |
|----------------------------------------------------------|------------------|
| 1. Samenvatting en conclusies                            | 1                |
| 2. Inleiding en probleemstelling                         | 3                |
| 3. Vooronderzoek en keuze van het proefveld              | 6                |
| 4. Metingen                                              | 19               |
| 4.1. Het meetstation                                     | 19               |
| 4.2. Grondmetingen                                       | 23               |
| 4.3. Atmosferische stabiliteit                           | 33               |
| 4.4. Relatie tussen grondwaterpotentialen en rivierstand | 52               |
| 4.5. Luchtwaarnemingen                                   | 71               |
| 4.6. Kweldetectie                                        | 79               |
| 5. Stralingstemperatuurmodel                             | 88               |
| 6. Aanbevelingen voor verder onderzoek                   | 124              |
| Appendix I Afleiding stralingstemperatuurmodel           | 125              |
| Appendix II Afleiding atmosferisch model                 | 132              |
| Appendix III Warmtestroomdichtheid en temperatuur        | 137              |

## 1. Samenvatting en conclusies

Het onderzoek naar de toepasbaarheid van thermografie vanuit een vliegtuig voor het waarnemen van kwelplaatsen en met klei bedekte zandbanen langs de grote rivieren heeft tot de volgende resultaten en conclusies geleid.

1. Inventarisatie van kwelplaatsen, waar het grondwater onder invloed van een hoge rivierwaterstand vrijelijk aan het oppervlak treedt, blijkt in winter en voorjaar mogelijk te zijn op grond van het temperatuurverschil tussen het grondwater (warmer) en het oppervlak (kouder). De mate van succes of volledigheid hangt af van de soort vegetatie en het landgebruik (boomgaard, opstallen, e.d.).

Het verdient voorkeur om 's winters of in de vroege lente te vliegen. Voordeel kan getrokken worden uit sneeuwbedekking en vorst (zie hoofdstuk 4.6.). Zo'n inventarisatie kan nooit volledig zijn, ook al omdat het een snel veranderend verschijnsel betreft.

2. De langdurige meetreeksen met het grondmeetstation onder verschillende weers- en vochtigheidsomstandigheden hebben aangetoond, dat er faseverschillen in de oppervlaktetemperaturen optreden.

Dit heeft een model geïnduceerd, waarmee faseverschillen in de oppervlaktetemperatuur kunnen worden berekend, op basis van thermische eigenschappen van de grond en de opgedrongen warmtegolven. De orde-grootte van het faseverschil is 15 min. Geconstateerd moet worden dat de vegetatiedikte (in dit geval gras) van overheersend belang is bij de totstandkoming van de oppervlakte-stralings-temperatuur. Gebruik van dit model voor het bepalen van de juiste vluchtperioden boven een doelgebied doet de betekenis van de thermografie voor kwelwaarneming sterk toenemen. (Zie hoofdstuk 5.)

3. De stabiliteitsparameter  $\zeta$ , bepaald door de fluxdichtheden van impuls, voelbare warmte en waterdamp in de atmosferische grenslaag, geeft een inzicht in de verhouding tussen twee turbulente produktietermen.

Is  $\zeta > 1$ , dan zal de turbulentie van thermische aard zijn.

Is  $\zeta < 1$ , dan zal de turbulentie van kinetische aard zijn.

Bovendien geldt, indien  $\zeta > 0$  is, dat beide produktietermen elkaar tegenwerken, terwijl indien  $\zeta < 0$  is, dat deze elkaar versterken (zie hoofdstuk 4.3.).

4. Onderzoek naar de (lineaire) relatie tussen het grondwaterpotentialiaal

en de wassende rivierstand heeft aangetoond, dat de rivierstand van 24 uur tevoren de grondwaterpotentialiaal bepaalt.

De barometerdruk bleek niet van invloed te zijn op de grondwaterstand (zie hoofdstuk 4.4.).

5. De warmtebeelden tonen duidelijk de invloed aan van de structuur van de grenslaagturbulentie op de temperatuurverdeling aan het oppervlak. Daar de turbulentiestructuur in de grenslaag niet behoorde tot dit projectonderzoek, werd daar geen onderzoek naar verricht. Geconstateerd moet worden dat deze invloed groot is en dat kennis hieromtrent noodzakelijk is, wil de thermografie tot een meer absolute meettechniek worden ontwikkeld.

Aanbevolen wordt dit onderwerp tot verder studieterrein van de werkgroep te maken, gezien de samenstelling en aanwezige kennis. Opgemerkt wordt dat deze kennis tevens van nut is bij toepassing van andere luchtwaarnemingstechnieken (b.v. radar), omdat daarbij ook invloeden van de grenslaagturbulentie op het wateroppervlak waarneembaar zijn.

6. De kosten voor het verkrijgen van warmtebeelden ligt op ongeveer f 4.000,-- per vlieguur (gemiddelde totale kosten 1977, exclusief 18% B.T.W.) bij een vliegsnelheid van 65 m/s.

Interpretatie van een traject van 15 km duurt ongeveer 2 werkweken. Verificatie in het veld is hierbij niet inbegrepen, maar verdient de aandacht, omdat moet kunnen worden vastgesteld of de met behulp van thermisch infrarood waargenomen kwelplaatsen ook werkelijk kwelplaatsen zijn.

7. Pogingen om met behulp van thermische opnamen met klei bedekte zandbanen te detecteren zijn niet geslaagd. Eventuele mogelijkheden op dit gebied zullen nader onderzocht moeten worden.

## 2. Inleiding en probleemstelling

Het Centrum Onderzoek Waterkeringen (COW) van de directie Waterhuishouding en Waterbeweging zoekt, in verband met zijn aandeel in de taak voor dijkverbeteringen langs de grote rivieren, naar middelen om op relatief eenvoudige en snelle wijze een overzicht te verkrijgen van kwelplaatsen of plaatsen waar mogelijk kwel kan optreden.

Daarvoor kwam ook in aanmerking de thermografie, w.o. waarneming van oppervlaktetemperatuurverdelingen vanuit een vliegtuig wordt verstaan.

De thermografie valt met enige andere meettechnieken onder de term moderne luchtwaarneming, voor welke toepassing Rijkswaterstaat onderzoek verricht. Dit onderzoek vindt bij verschillende diensten plaats. Aan de Meetkundige Dienst is de coördinatie van alle activiteiten opgedragen. De coördinatie van het onderzoek voor toepassing van moderne luchtwaarnemingstechnieken (Engels: remote sensing, Duits: Fernerkundung, Frans: télédétection) is opgedragen aan de Contactgroep Remote Sensing Waterstaat (RSWS), terwijl de uitvoering daarvan in hoofdzaak berust bij de Fysische Afdeling van de directie Waterhuishouding en Waterbeweging. Het onderzoek naar toepassing vindt plaats in een aantal werkgroepen, die naar groepen van toepassingsgebieden zijn te onderscheiden. Het gehele onderzoek vindt plaats in samenwerking met het Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium (NLR) voor de vluchtuitvoering en het Fysisch Laboratorium-TNO voor instrumentele ondersteuning en interpretatie.

In de loop van het onderzoek naar stralingstemperatuur van gronden is tevens ondersteuning verkregen van de Afdeling Speurwerk van de Nederlandse Heidemaatschappij, speciaal met betrekking tot de microklimatologische aspecten. Voor de beantwoording van de vraag van het COW over toepassing van thermografie voor het waarnemen van kwel langs een rivier, werd het project Kwel Waal ingesteld binnen de werkgroep Stralingstemperatuur. Bovengenoemde instellingen zijn daarin vertegenwoordigd.

Voor de thermografie wordt gebruik gemaakt van een instrument, dat de warmtestraling in het verre infrarood systematisch over het terrein meet en vastlegt, meestal op een film. Daardoor ontstaat een beeld van dat terrein: het warmtebeeld.

De temperatuurverdeling aan het oppervlak wordt mede bepaald door het hydrologisch regiem in de onderliggende bodemlagen. Voor de interpretatie van warmtebeelden is naast kennis van de geologische opbouw van de oppervlaktelagen ook kennis over de invloed van factoren als vegetatie, bodemruwheid en microklimatologie vereist.

De vraagstelling bij toepassing van thermografie in het bodemonderzoek is in twee afzonderlijke delen te splitsen, n.l. het waarnemen van kwelplaatsen en het waarnemen van met klei bedekte zandbanen. In het eerste geval welt het grondwater vrijelijk door een gat in de bodem naar het oppervlak en beïnvloedt een relatief klein oppervlak. Indien het grondwater belangrijk afwijkt in temperatuur van het grondoppervlak (enige graden of meer), dan komt de thermografie neer op het waarnemen van "bronnen". Hiervoor is een hoog geometrisch scheidend vermogen nodig en laat (veelal) een lager thermisch scheidend vermogen toe.

In het tweede geval wordt de grondwaterstand over grotere oppervlakten verhoogd, zonder de opbouw van de bodem te verstoren.

Door verschil in thermische eigenschappen van de bodem met zandbaan en die daarnaast, kunnen relatief geringe temperatuurverschillen ontstaan, die dergelijke plekken aantonen. Dan is een hoog thermisch scheidend vermogen vereist, terwijl een geringer geometrisch scheidend vermogen veelal toelaatbaar is. Opgemerkt wordt dat nooit aan beide eisen op dezelfde wijze kan worden voldaan omdat deze tegenstrijdig zijn. Door gebruik te maken van magneetbandregistratie van het signaal is het mogelijk het thermisch scheidend vermogen van het apparaat volledig te benutten, terwijl het geometrisch scheidend vermogen voor dit systeem gehandhaafd blijft.

Waarnemingen werden gedaan aan beide verschijnselen, maar binnen de werkgroep werd het waarnemen van zandbanen als uitgangspunt gekozen voor de uitvoering van het meetprogramma, omdat dit de zwaarste eisen oplegde aan het onderzoek.

Als gevolg van het feit dat de jaarlijkse temperatuurcyclus van het diepere grondwater sterk vertraagd die van het oppervlakkige grondwater en dus die van de oppervlaktestralingstemperatuur volgt, mocht worden verwacht dat er een groot temperatuurverschil zal ontstaan tussen het welwater en de oppervlaktetemperatuur.

Zeker geldt dit voor de late winterperiode, waarin de grondtemperaturen aan de oppervlakte het minimum bereiken.

In overleg met het COW werd langs de Waal het traject tussen Tiel en Gorkum gekozen, met het oog op bestaande kennis van de situatie en gegevens over kwelplaatsen.

Van interesse was een ongeveer 300 m brede strook achter de dijk, aan weerszijden van de rivier.

Voor een meer gedetailleerde studie van de kwelplaatsen en regelmatige

veldverkenning tijdens een hoogwaterperiode werd binnen het genoemde traject een beperkt gebied gekozen, n.l. de rechteroever tussen Tiel en Gorkum.

In dat beperkte traject werd, na intensieve voorverkenning, een perceel in Het Hoogland gekozen, waar met een grondstation een langdurige meting van temperaturen tijdens de winterperiode werd uitgevoerd. Met grondboringen kwam vast te staan dat daar een stelsel verzande kreekarmen lag in een open terrein. Temperatuurmetingen op de zandbaan en op een referentieplaats daarnaast waren tijdens het experiment en bij de interpretatie een onmisbare steun. Reeds vóór de winter werd het grondstation geplaatst en tot het voorjaar is het in werking gebleven.

Het project werd in 1974 aangeboden, maar eerst volledig uitgevoerd in de winter van 1976/1977. In de twee voorgaande jaren zijn geen belangrijke hoogwaterafvoeren opgetreden. In de winter van 1976/1977 trad een hoge afvoer op, met drie opvolgende toppen.

Dit rapport werd samengesteld uit bijdragen van de werkgroepleden. Daarbij werd terwille van een versneld gereedkomen van dit rapport de literatuurverwijzing per hoofdstuk gehandhaafd en aangeduid tussen rechte haken [].

Aan dit rapport werkten mee:

|                               |                                      |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| prof.dr.ir. L. Wartena        | Landbouw Hogeschool Wageningen       |
| ir. A. Jacobs                 | Heidemij, afd. Speurwerk             |
| dr.ir. G.P. de Loor           | Fysisch Lab. TNO                     |
| ir. P. Hogeboom               | Fysisch Lab. TNO                     |
| ir. H.W. Brunsveld van Hulten | Directie Wat. en Wat., eindredactie. |

### 3. Vooronderzoek en keuze van het proefveld

#### 3.1. Inleiding

Om inzicht te krijgen in de processen die optreden en om de verkregen warmtebeelden correct op hun waarden te interpreteren, is het noodzakelijk een lange reeks grondwaarnemingen te verrichten. Het doel van het vooronderzoek is een zo gunstig mogelijke situering van het meetstation.

Aan de situering van het station zijn de volgende eisen gesteld:

- 1e. Het station moet zo goed mogelijk liggen op de overgang van een gebied waarbij hoge rivierstanden veel en weinig kwel optreedt.
- 2e. De grondwaarnemingen mogen door aerodynamische oorzaken niet verstoord worden.

In eerste instantie heeft, gezamenlijk met Rijkswaterstaat en het Fysisch Laboratorium, een veldverkenning plaatsgevonden. Uit deze veldverkenning kwamen een drietal meetplaatsen naar voren, die om aerodynamische redenen gunstig waren en die mogelijk om bodemkundige redenen ook in aanmerking kwamen (zie overzichtskaart). Derhalve vond hierna een eerste bodemkundig onderzoek plaats op deze drie lokaties. De resultaten hiervan worden in dit rapport besproken. Nadat de eerste resultaten van deze drie lokaties bekend waren, bleek het wenselijk te zijn om van één en meer gedetailleerd bodemkundig onderzoek te verrichten (lokatie II) en een mogelijke vierde meetplaats (lokatie IV) hier nog aan toe te voegen. De resultaten hiervan zijn ook in dit hoofdstuk opgenomen. De uiteindelijke keuze viel op locatie II.



### 3.2. Resultaten bodemkundig onderzoek

#### Lokatie I

- Situatie : Tielerwaard, Waalbandijk hm 286 - 305. De lokatie wordt gekarakteriseerd door een kolk aan de binnenzijde van de bandijk. Rondom de kolk ligt kwelland, dat door een kwelkade is afgesloten van de polder. De bandijk is ter plaatse van het kwelland aan de binnenzijde versterkt met een banket.
- Oppervlakte : ca. 25 ha.
- Cultuurtoestand : Oostelijk deel grasland, westelijk deel zowel bouwland als boomgaarden.
- Maaiveldhoogte : Maaiveld van + 1,00 m tot + 3,00 m t.o.v. NAP kweldam ca. + 3,00 m t.o.v. NAP (zie tekening 1 en 2).
- Onderzoek : Ten behoeve van het kwelonderzoek, zijn rond het kwelland een vijftal diepboringen verricht. Verder stonden een groot aantal (ca. 50) ondiepe en diepe boringen aan weerszijden van de dijk ter beschikking.
- Grondgesteldheid : Op tekening 1 en 2 is de zanddiepte t.o.v. NAP aangegeven. Hieruit blijkt dat op de meeste plaatsen het afsluitende kleipakket meer dan 2,00 m is. Wel zijn een aantal weladers aangetroffen. Dit zijn lekken in het afsluitende pakket, die in verbinding staan met het goed doorlatende zandpakket. Door de grondgesteldheid in deze lokatie mag verwacht worden, dat bij hoge rivierwaterstanden op diverse plaatsen kwelwater aan de oppervlakte zal treden.

- Lokatie II : (Het Hoogland)
- Situatie : Tielerwaard, Waalbandijk hm 343 - 350  
Op 20 à 60 m van de dijk ligt een kwelkade.
- Oppervlakte : ca. 15 ha.
- Cultuurtoestand : Oostelijk deel bouwland, westelijk deel grasland.
- Maaiveldhoogte : Van NAP + 1,30 m tot + 1,80 m.
- Onderzoek : Ten behoeve van het kwelonderzoek zijn achter de kwelkade een 5-tal boringen verricht tot maximaal 5,20 m beneden maaiveld. Verder stonden ter beschikking een aantal ondiepe boringen langs de dijk aan zowel de binnenzijde als de buitenzijde.
- Grondgesteldheid : Door de aanwezigheid van oeverafzettingen en geulafzettingen binnen genoemd gebied is de diepteligging van het zand sterk gevarieerd.
- Op tekening 3 is een overzicht gegeven van deze zanddiepte t.o.v. NAP. Zoals uit deze gegevens blijkt, ligt het zand tussen dijk en kwelkade met een uitloper in noord-oostelijke richting op 2,00 à 3,00 m beneden maaiveld. Achter de kwelkade en buiten de geulafzetting komt het zand veelal dieper dan 5,00 m beneden maaiveld voor. Buitendijks ligt het zand vooral aan de westzijde van de lokatie dicht onder de oppervlakte. Op plaatsen waar de zanddiepte niet groter is dan 2,00 à 3,00 m bestaat de afdekkende laag uit zavel en lichte kleilagen. Daar waar het zand vrij diep voorkomt, bestaat de afdekkende laag uit lichte tot soms zeer zware klei (kom). Deze kleilagen worden beneden 2,50 m beneden maaiveld plaatselijk door venige of zelfs pure veenlagen onderbroken. De verticale doorlatendheid van het dikke klei- en veenpakket zal naar schatting gering zijn. De dunnere kleilagen, die op de zandruggen liggen, zullen door een betere structuur meer waterdoorlatend zijn.

Lokatie III

- Situatie : Tielerwaard, Waalbandijk hm 352 - 356  
De kwelkade genoemd bij lokatie II sluit in deze lokatie bij hm 354 aan op de dijk.  
De westzijde van de lokatie wordt begrensd door een poldergemaal en de daarop aansluitende poldervaart.
- Oppervlakte : ca.6 ha.
- Cultuurgrond : Overwegend bouwland.
- Maaiveldhoogte : Van NAP + 1,10 m tot + 1,40 m.
- Onderzoek : Ten behoeve van het kwelonderzoek zijn op 50 à 100 m van de dijk een 3-tal boringen tot maximaal 5,20 m beneden maaiveld gemaakt.  
Verder stonden ter beschikking een aantal ondiepe en diepe boringen aan weerszijden van de dijk.
- Grondgesteldheid : Op tekening 4 is de zanddiepte aangegeven t.o.v. NAP.  
Hieruit blijkt dat buitendijks het zand hoog in het profiel voorkomt en slechts door een dunne kleilaag wordt afgedekt. Deze zandige afzettingen zetten zich tot bij het gemaal aan de binnenkant van de dijk door. Elders vindt een snelle overgang plaats van een dun kleidek buitendijks naar een dik kleidek binnendijks. De dunne kleilagen bestaan overwegend uit zavel en lichte klei. Waar het afdekkende kleipakket groter is dan 4,00 à 5,00 m komen lichte tot zeer zware kleilagen voor afgewisseld door enkele venige of pure veenlagen.

Lokatie IV

- Situatie : Tielerwaard, Waalbandijk hm 410 - 414  
De lokatie wordt gekarakteriseerd door een kolk aan de zuidwestzijde (hm 413 - 414).  
Langs de dijk is de kolk over een breedte van ca. 30 m met zand gedempt.
- Oppervlakte : ca. 15 ha.
- Cultuurgrond : Overwegend grasland. Noordelijk van de kolk ligt een boomgaard.
- Maaiveldhoogte : In het midden langs de oostgrens van de lokatie komen hoogten voor van NAP - 0,10 m tot - 0,50 m.  
Elders ligt het terrein op NAP + 1,10 m à + 0,30 m.
- Onderzoek : Deze lokatie is intensief afgeboord. In het kader van het kwelonderzoek werden een 18-tal boringen tot maximaal 5,20 m beneden maaiveld gemaakt. Verder stonden ter beschikking een aantal ondiepe en diepe boringen aan weerszijden van de dijk.
- Grondgesteldheid : Binnendijks is in de gehele lokatie geen zand aangetroffen boven NAP - 5,00 m. Diepboringen langs de dijk geven een zanddiepte aan van NAP - 6,50 m tot - 8,00 m. Buitendijks komt het zand wel hoog in het profiel voor en wel op 1,00 à 2,00 m beneden maaiveld.  
Tekening 5 geeft de zanddiepten aan t.o.v. NAP.  
Het afdekkende kleipakket bestaat overwegend uit lichte tot zware kleilagen. Alleen in het noordwesten van de lokatie (boven de kolk) wordt binnen 1,00 m een zandige overslag aangetroffen van enkele decimeters dik. De dieper liggende kleilagen worden regelmatig onderbroken door venige en veenlagen. Veendikten van 1,00 à 1,50 m komen wel voor. De verticale-doorlatendheid van de klei- en veenlagen zal naar schatting zeer klein zijn.

### 3.3. Resultaten detailonderzoek en conclusies

Indien de resultaten van de grondboringen op de vier lokaties vergeleken worden, blijkt om bodemkundige redenen lokatie II de meest geschikte te zijn voor plaatsing van het grondwaarnemingsstation. Vanuit de aerodynamische eisen werd ook reeds de voorkeur voor lokatie II uitgesproken. Voor alle zekerheid is voor deze lokatie nog een gedetailleerder onderzoek gedaan. Hierbij zijn 36 diepboringen verricht. De resultaten van dit extra onderzoek zijn samen met het eerste onderzoek verwerkt in tekening 6. Het verloop van de zandbaan op deze tekening komt duidelijker naar voren hetgeen voor de positionering van de verschillende meetinstrumenten van groot belang is.



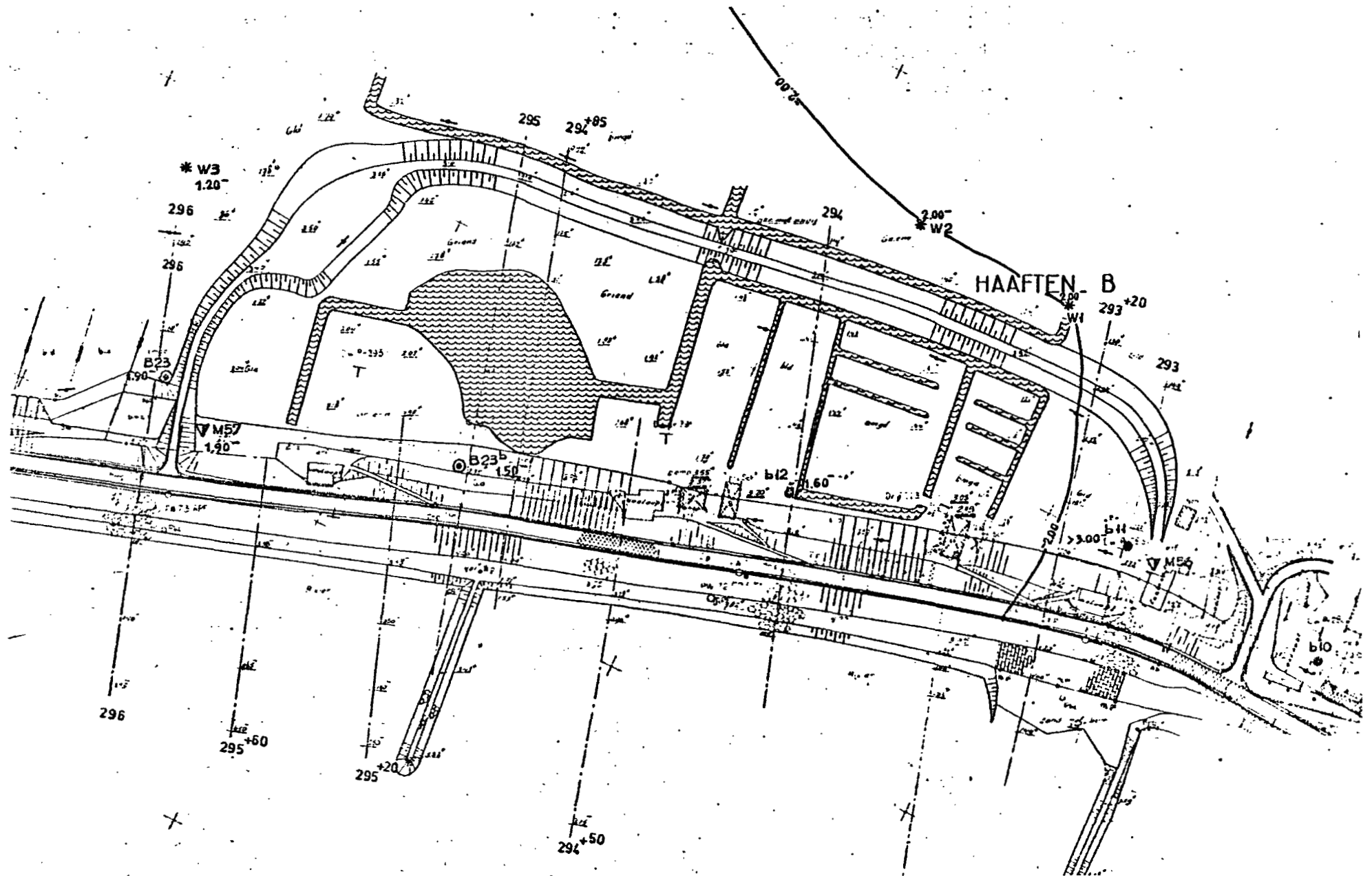
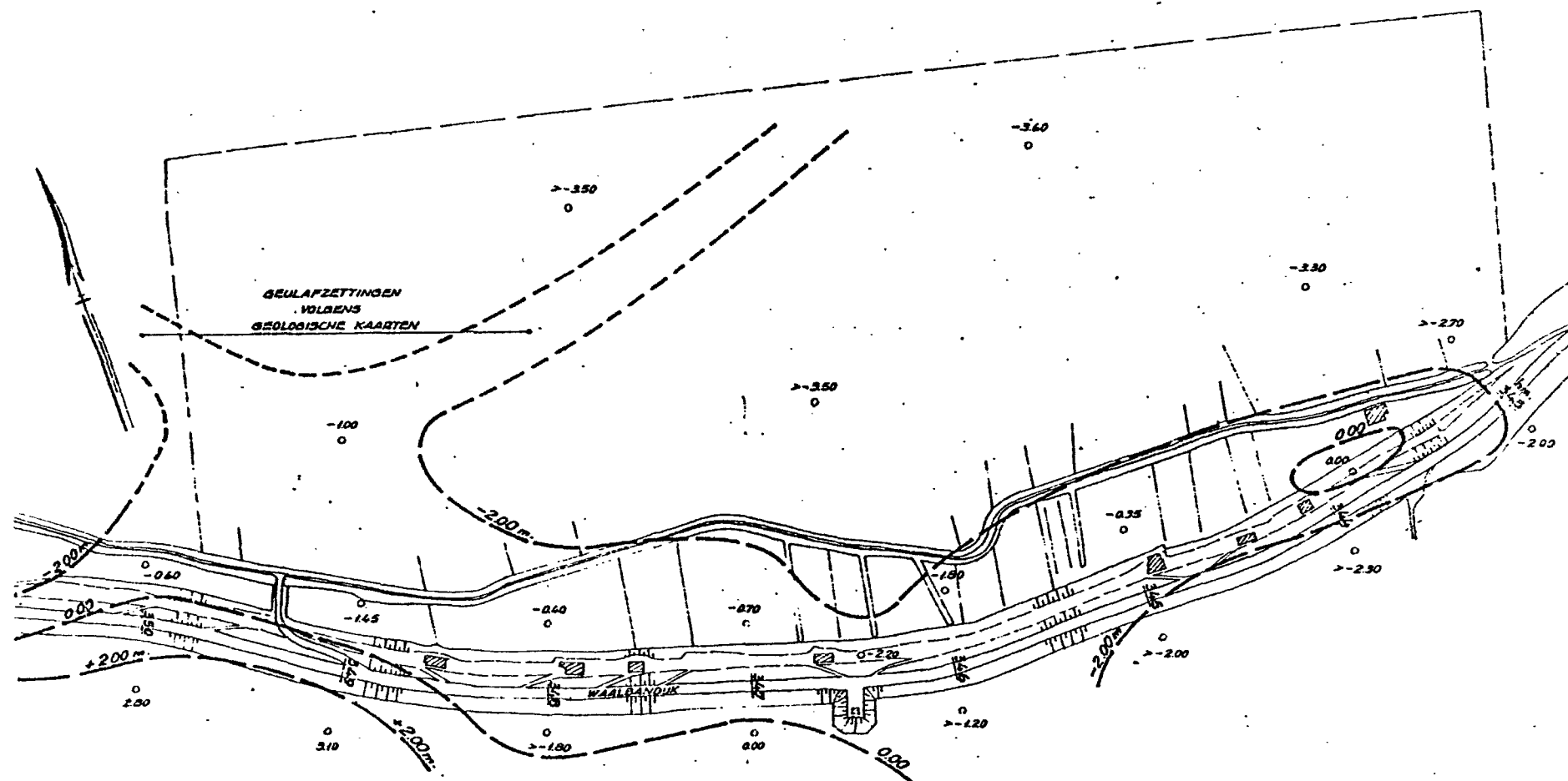


Fig 1. Ligging van de zandbaan op lokatie I langs de Waal.







2.50 DIEPTE ZANDONDERGROND IN m t.o.v. N.A.P.

SITUATIE OVERGENOMMEN  
EN VERKLEIND VAN  
KAARTEN 1:1000 VAN  
POLDERDISTRICT TIJLER-  
WAARD.

Fig 3. Ligging van de zandbaan op lokatie II langs de Waal.



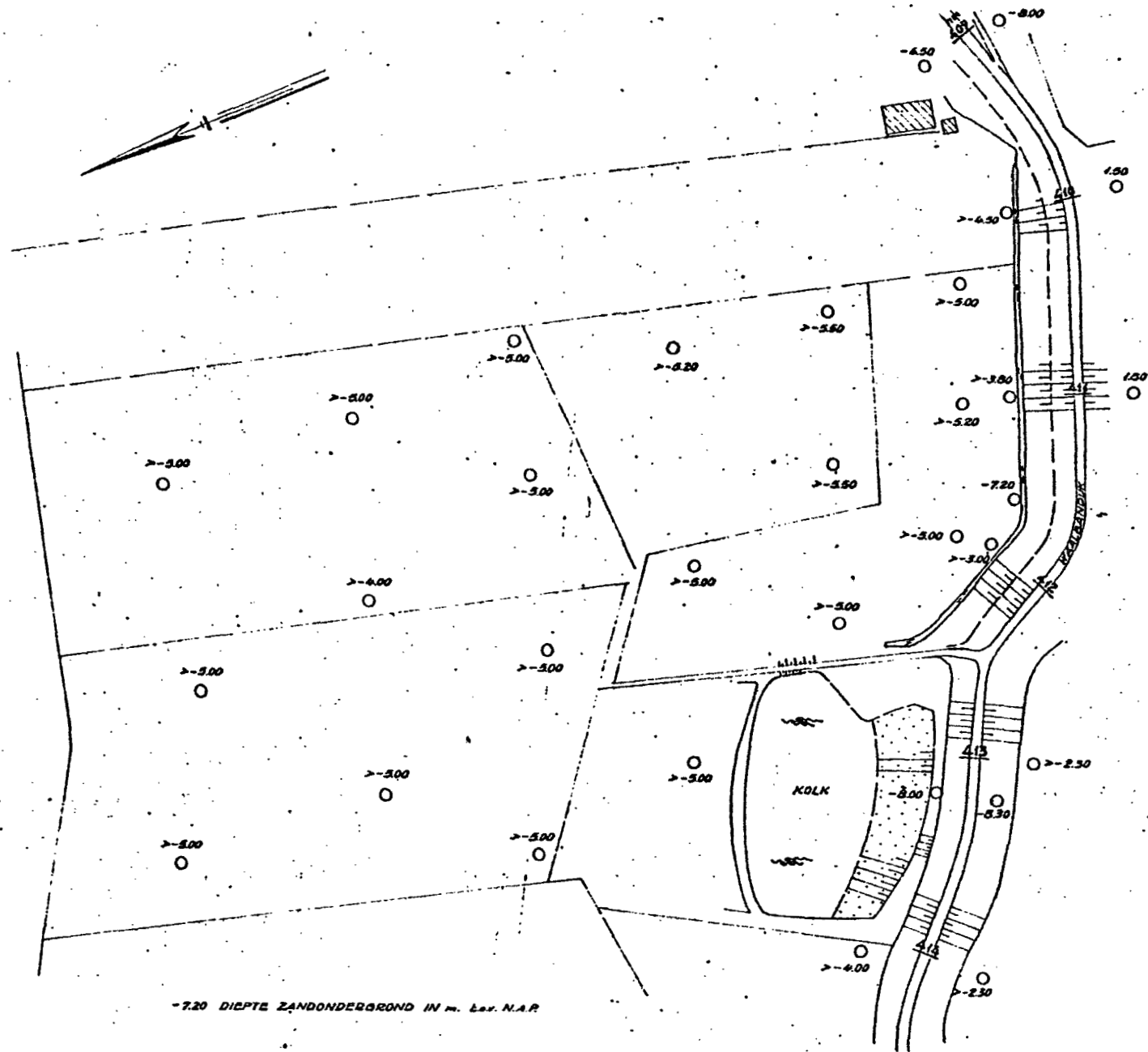
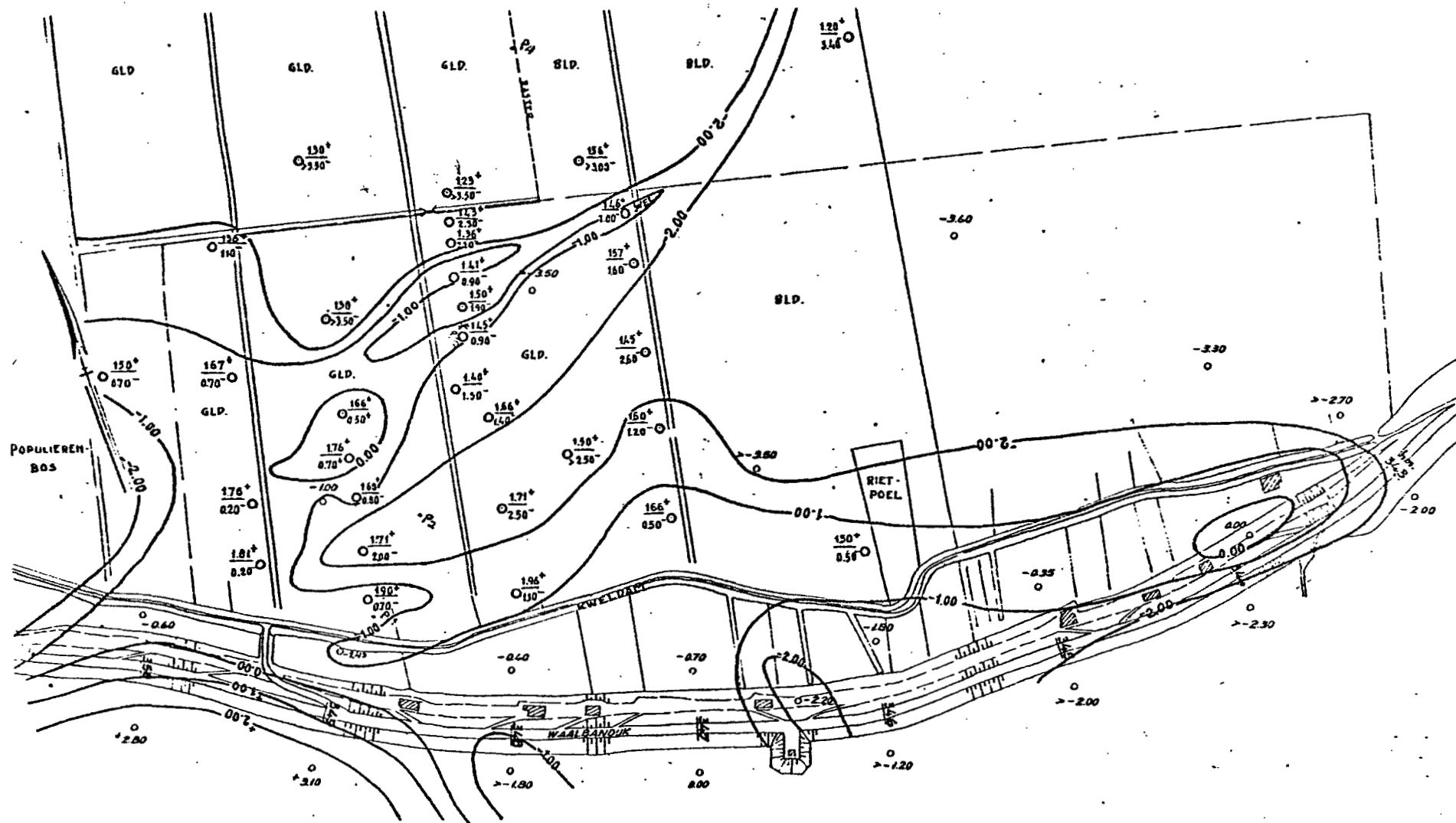


Fig 5. Ligging van de zandbaan op lokatie IV langs de Waal.



\* 2.80 DIEPTE ZANDONDERGROND IN m. t.o.v. N.A.P.

PLAATS DIEPSOeking  $\frac{1.81^+}{0.20^-}$  MAAIPELPHOOGTE IN m. t.o.v. N.A.P.  
 BEGIN DIEPTE ZAND IN m. t.o.v. N.A.P.

SITUATIE OVERNOMMEN  
 EN VERKLEIND VAN  
 KAARTEN 1:1000 VAN  
 POLDERDISTRICT TIJLER-  
 WAARD.

Fig 6. Ligging van de zandbaan op lokatie II langs de Waal, uit gedetailleerd veldonderzoek.

#### 4. Metingen

##### 4.1. Het meetstation

Het meetstation omvat een weerstation, potentiaalbuizen en een serie extra thermometers en stralingsmeters, die geplaatst zijn op twee terreinen in lokatie II (Het Hoogland), die representatief geacht werden op grond van het geologisch vooronderzoek (hoofdstuk 3) voor een gebied zonder (veld I) en met onderliggende zandbaan (veld II). Voor een algemeen overzicht van micro-meteorologische meetinstrumenten zie [1].

##### 4.1.1. Het weerstation

Het weerstation registreert:

- windsnelheid en
- windrichting (samen op een hoogte van 2 m),
- luchtdruk,
- luchttemperatuur en
- relatieve luchtvochtigheid in een weerkastje op een hoogte van 1,50 m,
- inkomende zonnestraling en
- albedo,
- neerslag,
- turbulentie.

Hiervoor zijn de volgende opnemers toegepast:

De windrichtings- en windsnelheidsgever zijn van het fabrikaat Thiess en zijn in één opstelling gecombineerd (type 4.3320). Hiervoor werd door de Heidemaatschappij een integrator gemaakt voor gebruik samen met de turbulentiemeter.

De luchtdruk wordt gemeten met een barogever, eveneens van het fabrikaat Thiess (type 3.1150).

De luchtthermometer is een nikkelweerstand (1000 $\Omega$ ; NI-1000, fabrikaat Wallac Oy) gemonteerd in een stralingsscherm (fabrikaat Fysisch Laboratorium) en opgesteld in een weerhut (Thiess, type 1.2175.03).

De thermometer wordt geaspireerd m.b.v. een kleine ventilator (Pabst axiaal, typenr. 2050) die in de zijkant van de hut is gemonteerd en de lucht uit de hut zuigt langs de thermometer.

De hygrometer is een haarhygrogever, fabrikaat Thiess (typenr. 1000).

Inkomende zonnestraling en albedo worden gemeten m.b.v. een albedometer van de fa. Kipp, type CM7 ( $R_1 = 10,1\Omega$ ;  $1 \text{ W/cm}^2$  geeft een EMK van 123 mV). Deze albedometer is door de Heidemaatschappij voorzien van een aspiratie-inrichting om dauwvorming op de glazen bolletjes te voorkomen.

De regenval wordt gemeten met een regenmeter gefabriceerd op het Fysisch Laboratorium naar een ontwerp van de PTT. Deze meter is bedoeld als "rain rate"-meter. De meting geschiedt als volgt: onderaan de opvangschaal zit een speciale tuit voorzien van een druppelvormer die de waterstroom omzet in een serie druppels van ongeveer gelijke afmetingen; deze druppels worden vervolgens geteld. In het oorspronkelijke ontwerp geschiedt dit tellen m.b.v. een microfoon (waar de druppels op vallen), maar in het door ons toegepaste model door het onderbreken van een lichtbundeltje. Voor toepassing in de winter kan de opvangschaal verwarmd worden. Tenslotte wordt de turbulentie gemeten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een sonische anemometer (fabrikaat Kaiyo Denki, type PAT-112-1, [2]).

Het principe van deze opnemer komt op het volgende neer. Van twee zend-ontvangsystemen die vertikaal en tegengesteld t.o.v. elkaar staan opgesteld wordt tegelijkertijd een geluidsimpuls uitgezonden. Het verschil in reistijd van beide geluidsimpulsen is een maat voor de snelheidscomponent van het medium tussen dit zend-ontvangsysteem. Deze impulstreinen hebben een frequentie van 100kHz en een herhalingsfrequentie van 440 Hz. Met deze opnemer kunnen dus snelle verticale snelheidscomponenten gemeten worden. Deze worden vervolgens gekwadraterd en over een zeker tijdsinterval geïntegreerd. Het uiteindelijke resultaat is de turbulentie-intensiteit, welke iets vertelt over de "wildheid" van de atmosfeer op dat moment [3].

Alle gevers van het fabrikaat Thiess, uitgerust met weerstanden, zijn voorzien van weerstanden van 2 k $\Omega$  i.p.v. de standaarduitvoering met 40 - 50 - 40  $\Omega$ .

Alle bijbehorende registratie-apparatuur is op het Fysisch Laboratorium ontworpen en gebouwd. Ze is aangebracht in een caravan die thermisch geïsoleerd is en waarin de temperatuur geregeld kan worden.

De registratie is digitaal. Voor de opslag wordt het cassetterecorder-systeem, ontwikkeld en gebouwd door het Fysisch Laboratorium, toegepast. De waarnemingen geschieden om de 5 minuten of om het kwartier. Alle gegevens verschijnen ook nog analoog op een viertal Kipp papier-recorders.

#### 4.1.2. De overige sensoren

Naast opnemers voor de directe weergegevens zijn temperatuuropnemers geplaatst op een plek boven de zandbaan (veld II) en op een plek in het

er naast liggend veen (veld I) om een indruk te krijgen van de temperatuuropbouw in en stralingstemperatuurverschillen tussen beide meetvelden.

Op het "zand" en het "veen" werd elk een serie van 3 z.g.n. "raampjes" aangebracht. Elk "raampje" is een groep van 4 weerstanden (NI-1000, Wallac Oy) boven elkaar. Zij zijn geplaatst op de hoeken van een driehoek met zijden van ongeveer 10 m. De 4 weerstanden zijn zó geplaatst in het "raampje" (of laddertje) dat de bovenste +3 cm boven de bodem (in het gras) uitkomt, de volgende op de grond rust, de derde -3 cm onder de grond zit en de vierde -6 cm. Van elke groep van 3 "raampjes" staan de 3 weerstanden per diepte in serie. Op deze wijze wordt een zekere middeling verkregen over het terrein.

Binnen elke driehoek zijn daarnaast 4 sondes geplaatst: pennen met op het uiteinde een Ni-weerstand (NI-1000, Wallac Oy) die ingebracht worden op resp. -10 cm, -20 cm, -40 cm en -100 cm.

Voor het registreren van de grondwaterpotentialen is nabij veld I een zelfregistrerende lymnograaf geplaatst (type HWK-p10). Bij de overbrenging van dit instrument is een potentiometer aangebracht om zo tevens de mogelijkheid te hebben de meetgegevens centraal te kunnen verwerken. De schrijver met vlotteroverbrenging is geplaatst op een 4 m lange aluminiumbuis met een diameter van 0,14 m. Het filter had een lengte van 0,50 m en is geplaatst op een diepte van 2,70 m- m.v.

Naast deze opnemer is een controle-potentiaalbuis aangebracht. Ten einde de potentialen in een raai loodrecht op de rivier te kunnen meten, zijn bovendien op diverse plaatsen potentiaalbuizen geplaatst. Deze zijn 3m- m.v. ingeboord en de filterlengte bedroeg 0,15 m.

#### 4.1.3. Radiometrische metingen

Op beide testvelden worden een aantal radiometrische metingen uitgevoerd.

Op elk testveld wordt de netto-straling gemeten m.b.v. een netto-stralingsmeter van het fabrikaat Middleton [4]. Deze stralingsmeters werden door de Heidemaatschappij van een aspiratie-inrichting voorzien om dauwvorming op de plastic bolletjes te voorkomen.

Hiernaast werd de radiometrische temperatuur en het radiometrisch temperatuurverschil gemeten van de twee testplaatsen. Het temperatuurverschil wordt gemeten m.b.v. 2 groepen van z.g.n. "hoedjes", op elke testplaats een groep van 3 die in serie staan, om een zekere uitmiddeling

te verkrijgen. De driehoek is  $60^{\circ}$  verschoven t.o.v. die gevormd door de "raampjes". Deze twee groepen van 3 zijn vervolgens in een brug opgenomen m.b. waarvan het temperatuurverschil tussen de twee testplaatsen kan worden vastgelegd.

Het betreft hier een experimentele opstelling (aangeduid als DIFRAD). De opnemers zijn op het Fysisch Laboratorium ontworpen. In principe bestaat elke stralingsthermometer uit een thermistor (Uni-Curve, type UUA 3571,  $5 \text{ k}\Omega$  bij  $25^{\circ}\text{C}$ ), aangebracht op een dun koperfolie van  $20 \text{ mm } \varnothing$  dat vrij hangt in een iets ruimere aluminium cilinder van  $25 \text{ mm}$  lang en wel  $5 \text{ mm}$  van het open uiteinde. De naar binnen gerichte zijde (waarop ook de thermistor is bevestigd) is glanzend gepolijst, de voorkant is wit gespoten (om invloeden van het gereflecteerde zonlicht te verminderen). Het geheel is opgenomen in schuimplastic en afgesloten met een polyethyleen foelie (doorlatendheid meer dan 90% in het thermisch IR). Het geheel is aangebracht onder een stralingsscherm (het kegelvormige "hoedje"). Er wordt vanuit gegaan dat het albedo op de beide meetplaatsen gelijk is (dunne grasmat), waardoor de waargenomen verschillen als temperatuurverschillen kunnen worden geïnterpreteerd.

Gebaseerd op hetzelfde concept werd ook een absolute radiometer ontworpen (aangeduid als ABSRAD). Hierbij is uit gegaan van de stralingsthermometer zoals ontworpen door Stoutjesdijk [5]. Deze vergelijkt de stralingstemperatuur van het te meten object met die van een glazen venster, dat vanuit het huis voor de ingang van de cilinder geschoven kan worden. Door deze handeling wordt de stralingstemperatuur van het te meten object inclusief de albedo vergeleken met de huistemperatuur van het instrument (glas venster) inclusief de albedo van het object. De albedo valt dan uit de vergelijking. In ons geval is dit als volgt bereikt. In een koperblok met twee parallelle cilindervormige kamertjes zijn twee dunne koperfoelies met elk een thermistor opgehangen op dezelfde wijze als hierboven voor de "hoedjes" beschreven. Het ene kamertje is afgesloten met een polyethyleen foelie, het andere met een glazen plaatje. Het weerstandsverschil (door het temperatuurverschil) tussen beide thermistors wordt geregistreerd, samen met de temperatuur van het koperblok (deze laatste weer met een nikkelweerstand).

Over deze stralingsmeters zal een apart rapport verschijnen. Opgemerkt zij nog dat vergelijking van de absolute radiometers met een PRT-5 van Barnes en van deze radiometers met de gemiddelde temperatuur op 0 en  $+3 \text{ cm}$  als hier gemeten een correlatie opleverde van 0,99 (met een standard error of estimate van  $0,3$  tot  $0,6^{\circ}\text{C}$ ).



### Literatuur

- [1] J.L. Monteith: "Survey of Instruments for Micrometeorology"; I.B.P. Handbook No. 22; Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Victoria, 1972.
- [2] Y. Mitsuta: "Sonic Anemometer-Thermometer for Atmospheric Turbulence Measurements."
- [3] G. v.d. Abeele, A. Jacobs, C. Palland:  
"Measurements of sensible heat transfer in the surface layer as part of an automatic station for hydrological purposes."  
Techn. Conf. on Automatic Weather Stations,  
University of Reading (England), 1976.
- [4] J.P. Funk: "A Net Radiometer Designed for Optimum Sensitivity and a Ribbon Thermopile Used in a Miniature Version"; J. Geophys. Res. 67 (1962), pp. 2753-- 2760.
- [5] P.H. Stoutjesdijk: "On the Measurement of the Radiant Temperature of Vegetation Surfaces and Leaves"; Wentia 15 (1966) pp. 191 -- 202.

### 4.2. Grondmetingen

- 4.2.1. Fig. 4.1. geeft de temperatuur weer op een diepte van 100 cm (gedeelte van een jaarlijkse temperatuurgolf). Veld II ("zand") loopt voor op I, een verschijnsel dat we ook voor de dagelijkse temperatuurgolf zullen opmerken (zie par. 4.2.6.).

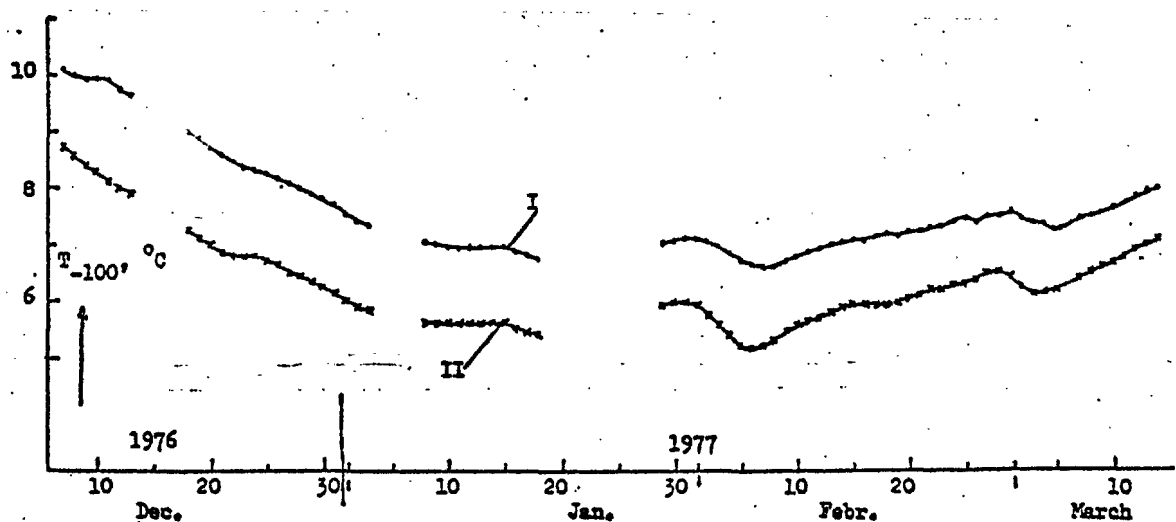


Fig. 4.1. Verloop van de temperatuur (daggemiddelde) op 1 m diepte gedurende de meetperiode.

- 4.2.2. Fig. 4.2. Geeft de gemiddelde dagtemperatuur op verschillende dieptes voor een aantal dagen uit de gehele meetperiode.

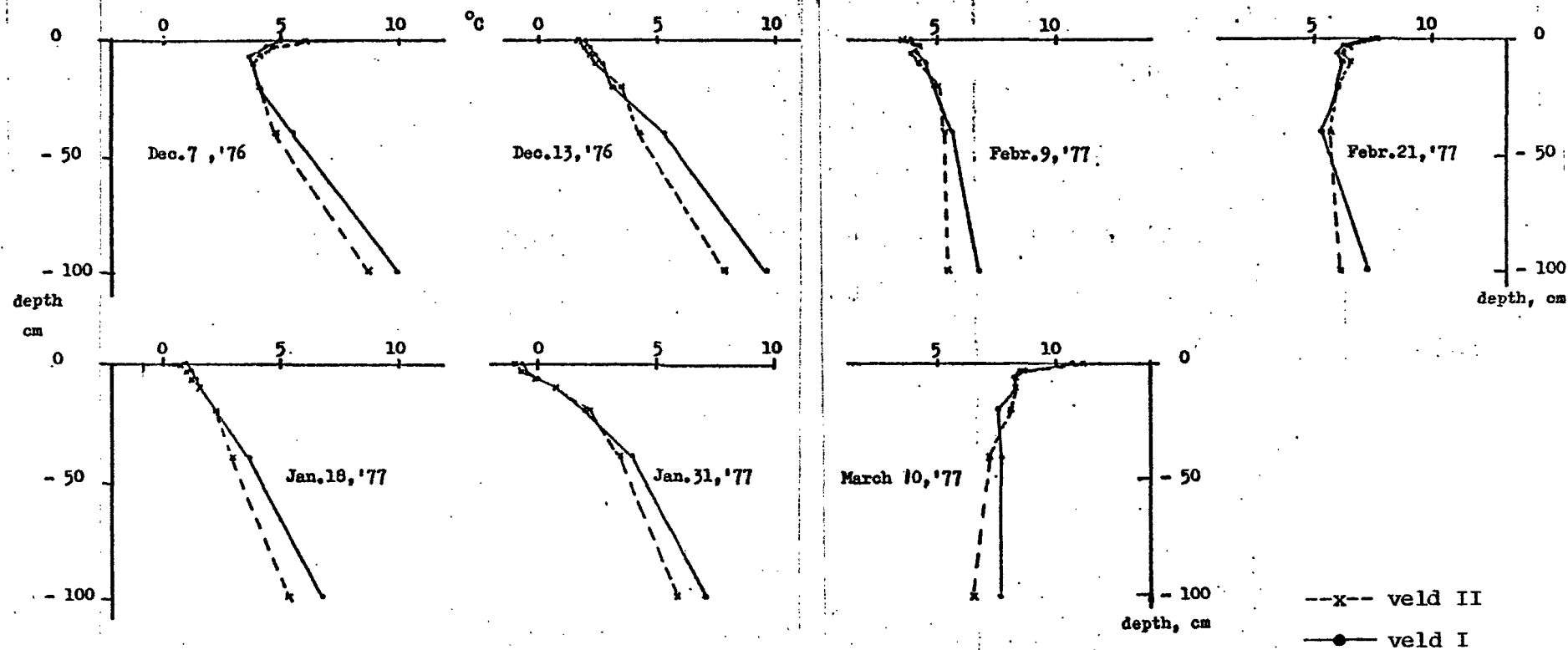


Fig. 4.2. Gemiddelde dagtemperatuur als functie van de diepte, voor verschillende dagen.

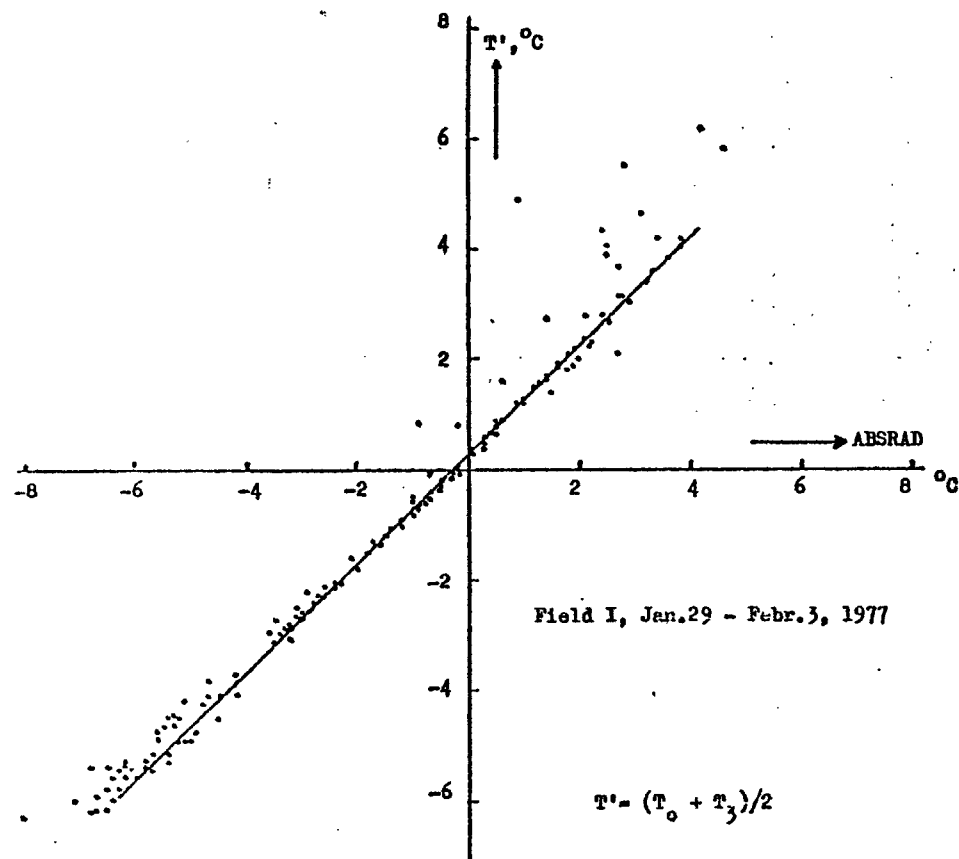
4.2.3. Temperaturen werden gemeten op -3, 0 en +3 cm, in de hoop een indruk te krijgen van de oppervlaktetemperatuur in de twee testgebieden. Daartoe werd nagegaan hoe deze metingen correleerden met de metingen van de absolute radiometer (ABSRAD). Eerst werd uitgegaan van uurgemiddelden en de beste correlatie werd gevonden tussen ABSRAD en het gemiddelde van de temperaturen op 0 en +3 cm. Dit alles geschiedde uit de hand om een eerste indruk te verkrijgen. Een voorbeeld van de methode wordt gegeven in de grafieken van fig. 4.3. De zo gevonden regressievergelijkingen worden samengevat in tabel 4.1.

| Period              | Regression formula       |
|---------------------|--------------------------|
| Field I             |                          |
| 7/XII - 11/XII 1976 | ABSRAD = 1.061 T' - 0.75 |
| 29/I - 3/II 1977    | ABSRAD = 1.002 T' - 0.33 |
| 8/II - 15/II 1977   | ABSRAD = 0.997 T' - 0.50 |
| 7/III - 13/III 1977 | ABSRAD = 0.973 T' - 0.60 |
| Field II            |                          |
| 7/XII - 11/XII 1976 | ABSRAD = 1.00 T' - 0.40  |
| 29/I - 3/II 1977    | ABSRAD = 1.001 T' + 0.20 |
| 8/II - 15/II 1977   | ABSRAD = 0.976 T' + 0.30 |
| 7/III - 13/III 1977 | ABSRAD = 0.940 T' + 0.37 |

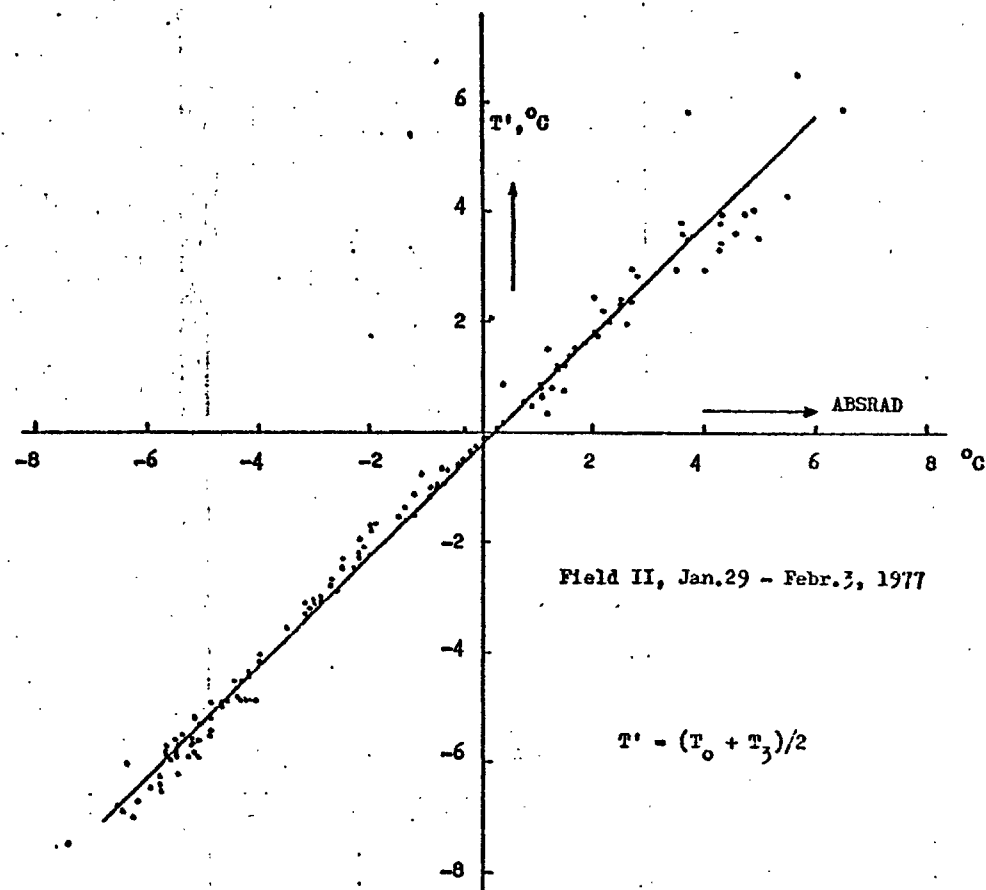
TABEL 4.1.

Regressie ABSRAD vs T' zoals grafisch bepaald

$$T' = (T_0 + T_3) / 2$$



Veld I



Veld II

Fig. 4.3. Grafiek van uurgemiddelden van  $T'$  versus ABSRAD.  $T' = (T_0 + T_3)/2$   
Periode 29 jan. - 3 febr. 1977.

Vervolgens werd dit m.b.v. de computer verder onderzocht door toepassing van regressie-analyse op alle gegevens voor een periode aan het begin en aan het einde van de meetperiode. Hierbij werd tevens nagegaan of het referentievlak misschien op een andere plaats komt te liggen dan halverwege, zoals boven aangenomen. Bovendien werd rekening gehouden met een mogelijk faseverschil tussen de opnemers (zie ook par. 4.2.6.).

Er is een lineair verloop aangenomen voor de temperatuur tussen  $T_0$  (oppervlak) en  $T_3$  (+ 3 cm, in de vegetatie). De resultaten zijn neergelegd in tabel 4.2.

| Height of<br>ref. plane<br>(cm)    | Time diff.<br>with regard<br>to $T_0$ (min.) | Correlation<br>coefficient | Stand. error<br>of estimate | Regression<br>formula<br>$Y = \text{ABSRAD}$<br>$X = T'$ |
|------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>Field I March 8 - 10, 1977</b>  |                                              |                            |                             |                                                          |
| 0.0                                | 0                                            | 0.988                      | 0.582                       | $Y = 1.053 X - 1.17$                                     |
| 0.75                               | 0                                            | 0.991                      | 0.502                       | $Y = 0.971 X - 0.568$                                    |
| 1.5                                | 0                                            | 0.993                      | 0.458                       | $Y = 0.899 X - 0.036$                                    |
| 2.25                               | 0                                            | 0.993                      | 0.443                       | $Y = 0.836 X + 0.436$                                    |
| 3.0                                | 0                                            | 0.993                      | 0.450                       | $Y = 0.780 X + 0.854$                                    |
| 0                                  | 5                                            | 0.991                      | 0.521                       | $Y = 1.055 X - 1.192$                                    |
| 0                                  | 10                                           | 0.990                      | 0.530                       | $Y = 1.054 X - 1.185$                                    |
| 0                                  | 15                                           | 0.988                      | 0.575                       | $Y = 1.052 X - 1.165$                                    |
| 1.5                                | 5                                            | 0.994                      | 0.430                       | $Y = 0.9 X - 0.043$                                      |
| 1.5                                | 10                                           | 0.994                      | 0.423                       | $Y = 0.9 X - 0.046$                                      |
| 1.5                                | 15                                           | 0.994                      | 0.426                       | $Y = 0.9 X - 0.048$                                      |
| 2.25                               | 5                                            | 0.994                      | 0.431                       | $Y = 0.836 X + 0.432$                                    |
| 2.25                               | 10                                           | 0.994                      | 0.426                       | $Y = 0.836 X + 0.430$                                    |
| 2.25                               | 15                                           | 0.994                      | 0.423                       | $Y = 0.836 X + 0.428$                                    |
| <b>Field II March 8 - 10, 1977</b> |                                              |                            |                             |                                                          |
| 0.0                                | 0                                            | 0.989                      | 0.615                       | $Y = 0.991 X + 0.533$                                    |
| 1.5                                | 0                                            | 0.988                      | 0.635                       | $Y = 0.955 X + 0.58$                                     |
| 3.0                                | 0                                            | 0.986                      | 0.682                       | $Y = 0.919 X + 0.645$                                    |
| 0                                  | 5                                            | 0.989                      | 0.604                       | $Y = 0.991 X + 0.53$                                     |
| 0                                  | 10                                           | 0.987                      | 0.665                       | $Y = 0.988 X + 0.552$                                    |
| 0.75                               | 5                                            | 0.989                      | 0.607                       | $Y = 0.973 X + 0.548$                                    |
| 0.75                               | 10                                           | 0.988                      | 0.638                       | $Y = 0.973 X + 0.554$                                    |
| 1.5                                | 5                                            | 0.988                      | 0.623                       | $Y = 0.955 X + 0.574$                                    |
| 1.5                                | 10                                           | 0.988                      | 0.633                       | $Y = 0.956 X + 0.572$                                    |
| <b>Field I Dec. 9 - 12, 1976</b>   |                                              |                            |                             |                                                          |
| 1.5                                | 5                                            | 0.983                      | 0.360                       | $Y = 0.969 X - 0.609$                                    |
| <b>Field II Dec. 9 - 12, 1976</b>  |                                              |                            |                             |                                                          |
| 0.75                               | 0                                            | 0.989                      | 0.314                       | $Y = 1.041 X - 0.305$                                    |

Tabel 4.2. Regressie ABSRAD vs  $T'$ .

Deze tabel suggereert dat voor veld I het frequentievlak iets hoger boven het bodemoppervlak ligt dan voor veld II. Toch voldoet het gemiddelde van de temperaturen  $T_0$  en  $T_3$ , zoals door ons verder gehanteerd ook goed.

4.2.4. Doordat de temperatuur op een aantal dieptes wordt gemeten zijn wij in staat iets over de thermische eigenschappen van de bodem te zeggen. Dit kan een hulp zijn bij de interpretatie van de gevonden contrasten in de warmtebeelden. Een voorbeeld is de dempingsdiepte  $D$ . In een homogeen medium moet de amplitudo van de dagelijkse temperatuurzwaaai afnemen met de diepte volgens een  $e$ -macht [1], [2]. Door de temperatuurzwaaai (dagelijkse) uit te zetten als functie van de diepte is de dempingsdiepte vast te stellen: de diepte  $D$  dus waar deze zwaaai is afgenomen tot  $1/e$ . Fig. 4.4. geeft een voorbeeld van de gevolgde methode.

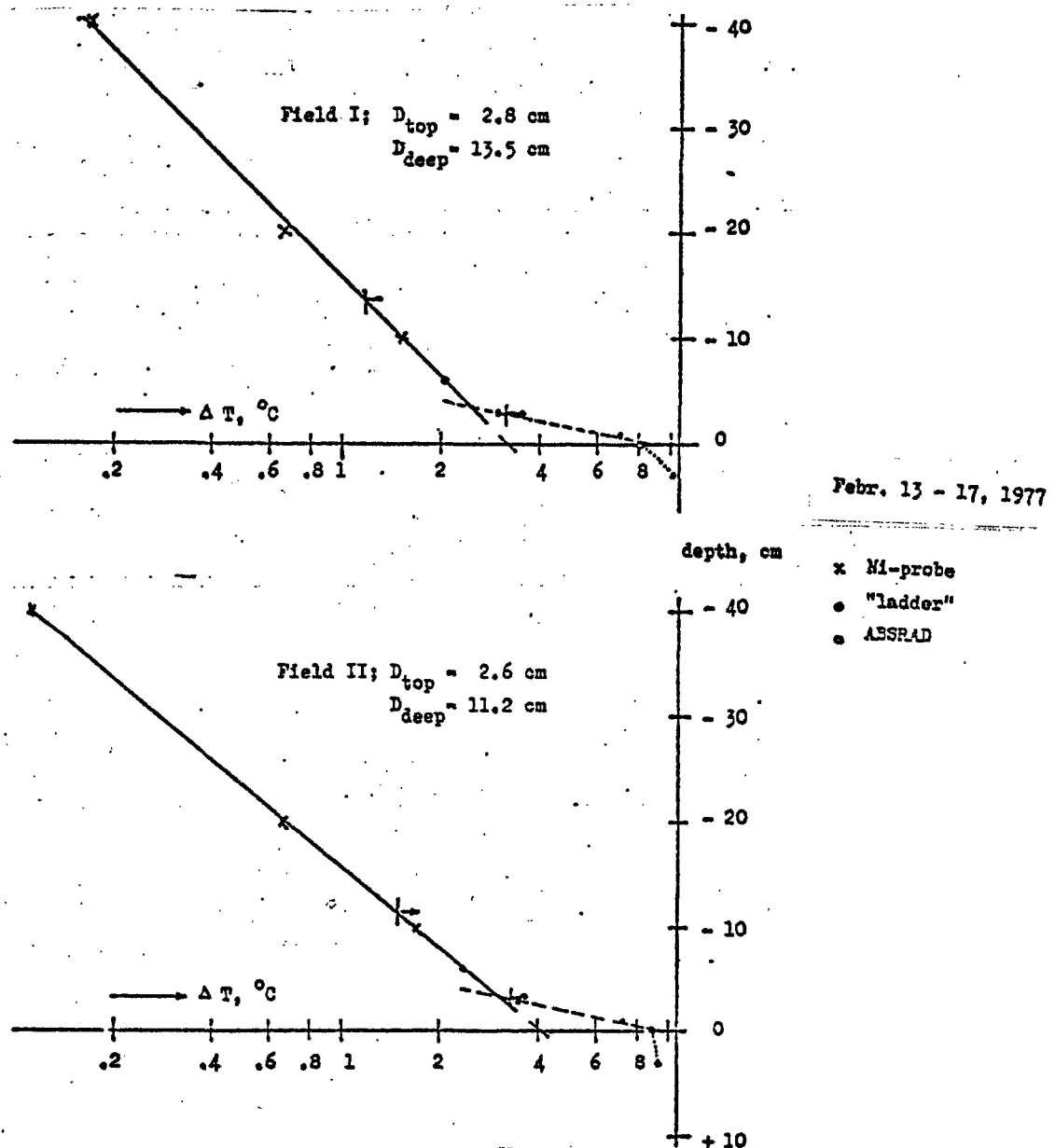


Fig. 4.4. Bepaling van de dempingsdiepte  $D$ .

Zoals dit voorbeeld laat zien moeten er twee lagen worden aangenomen: een toplaag (wortelzone) met een dikte van 3,5 tot 4 cm en de diepere ondergrond. De tabel 4.3. geeft de resultaten voor diverse tijdstippen in de gehele meetperiode.

| Period      | Damping Depth D. (cm) |      |                      |           |
|-------------|-----------------------|------|----------------------|-----------|
|             | Field I<br>toplayer   | deep | Field II<br>toplayer | deep      |
| 1976        |                       |      |                      |           |
| 6 - 13/XII  | 3.5                   | 14.5 | 3.5                  | 13        |
| 1977        |                       |      |                      |           |
| 10 - 19/I   | 3.0 - 3.7             | 19   | 2.5                  | 15        |
| 4 - 6/II    | 3.5                   | -    | 3.8 - 4              | -         |
| 29/I - 2/II | 1.5                   | -    | 1.4                  | -         |
| 8 - 14/II   | 3                     | 13.5 | 3                    | 12.5 - 13 |
| 13 - 17/II  | 2.8                   | 13.5 | 2.6                  | 11.2      |
| 22 + 23/II  | 3.2                   | 13.5 | 3.3                  | 12        |
| 7 - 14/III  | 2.5                   | 12.5 | 3                    | 12        |

Tabel 4.3. Dempingsdiepte D voor verschillende tijdstippen.

Deze tabel suggereert dat de dempingsdiepte voor veld II ("zand") steeds iets kleiner is dan die voor veld I ("klei"). De gevonden waardes stemmen redelijk overeen met die welke door de Heidemaatschappij gemeten zijn in het laboratorium aan monsters genomen in maart 1977, direct na de meetperiode. Voor deze monsters (inclusief topklaag) wordt door hen gevonden: 11,3 cm (veld II) en 11,5 cm (veld I).

- 4.2.5. Wat ons uiteindelijk interesseert zijn de temperatuurcontrasten (temperatuurverschillen) tussen veld I en II. Een algemene beschouwing van al het gemeten materiaal toont aan dat er geen contrasten zijn op dagen met dichte bewolking (geringe dagelijkse temperatuurzwaai) en regen. De periodes met zon werden daarom nader bekeken. Gebruik werd gemaakt van de uurgemiddeldes. Dit resulteerde in de grafieken van fig. 4.5. voor drie periodes: één aan het begin, één aan het einde en één in het midden van de meetperiode. Getoond wordt het temperatuurcontrast (temperatuurverschil) tussen veld II en I ( $T_{II} - T_I$ ) als functie van de tijd. Deze metingen suggereren een toename van het contrast in de ochtend en een sterke terugval rond het middaguur. Dit is merkwaardig omdat (zie alle betreffende literatuur) bij een verschil in warmtecapaciteit alleen tussen twee stukken terrein het maximum contrast juist rond het middaguur zou moeten optreden. Een verklaring kan worden gevonden met de resultaten uit de volgende paragraaf 4.2.6.

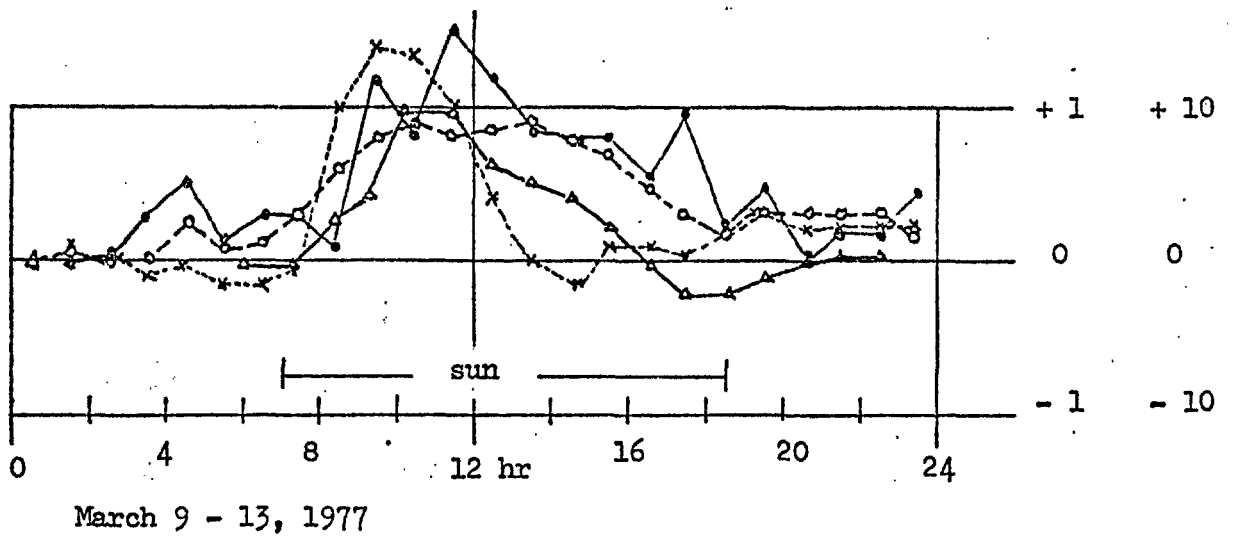
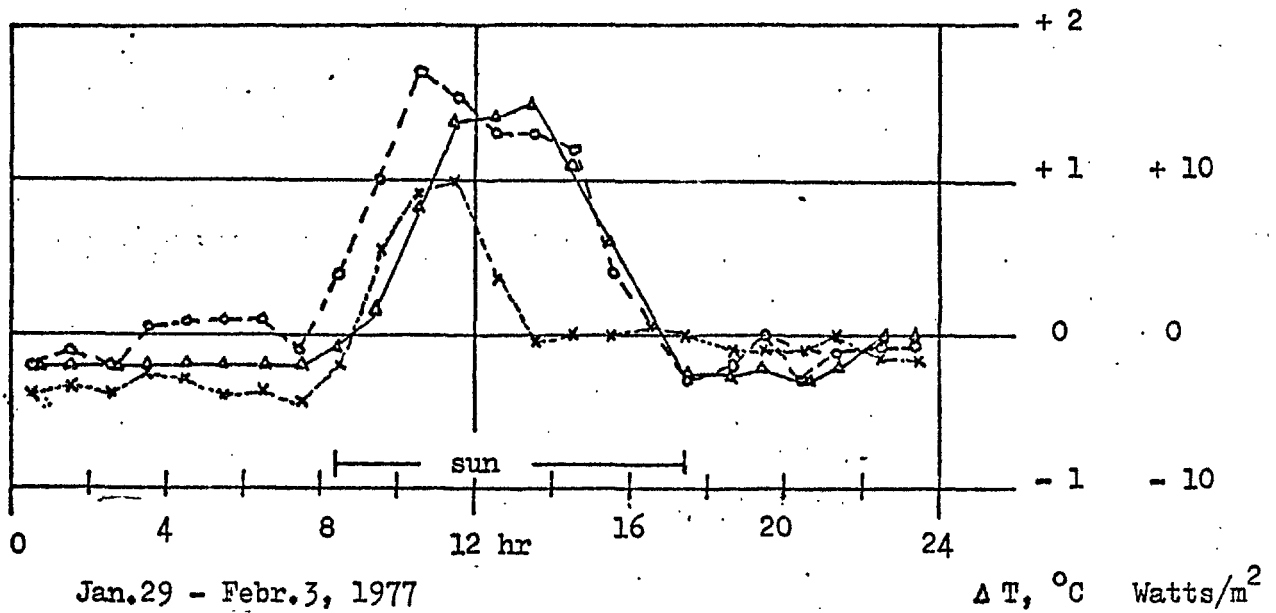
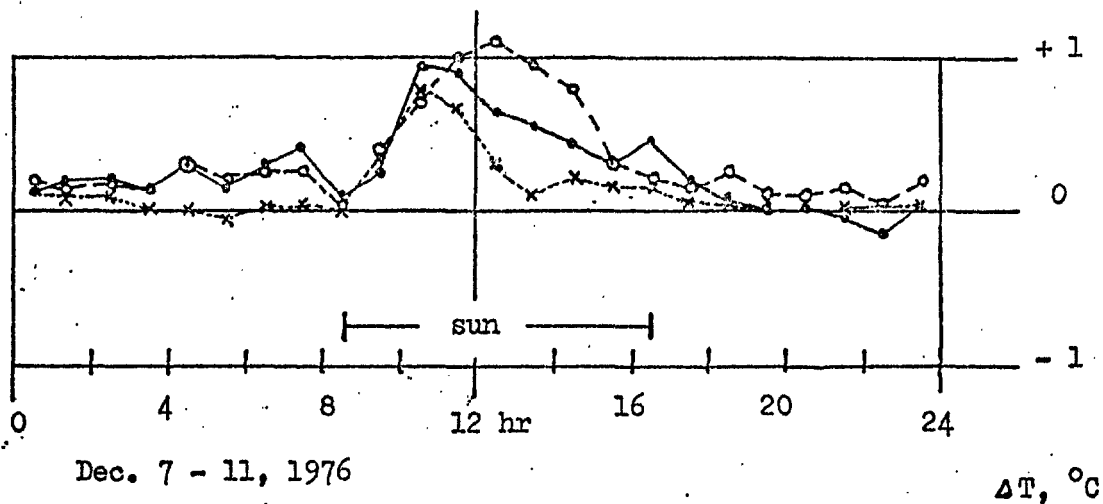


Fig.4.5. Gemeten temperatuurs-contrasten (uit uurgemiddeldes).

- x  $\Delta T$
- DIFRAD
- $\Delta\text{ABSRAD}$
- Δ  $\Delta\text{NETRAD}$



4.2.6. Een nauwkeurige analyse van de metingen van de dagelijkse temperatuur-gang toont een faseverschil aan tussen de twee meetvelden. De temperatuur-maxima van veld II lopen steeds vóór op die van veld I en wel in de orde van één kwartier. Een nauwkeuriger analyse door Fouriertransformatie van de tijdreeksen bevestigt dit, zoals tabel 4.4 laat zien voor twee periodes: één aan het begin en één aan het einde van de meetperiode.

| Sensor      | Dec. 9 - 12 1976 |        | March 8 - 10 1977 |        |
|-------------|------------------|--------|-------------------|--------|
|             | Phase (degrees)  | Time   | Phase (degrees)   | Time   |
| Solarimeter | - 176            | 12hr16 | - 168             | 12hr48 |
| Albedometer | - 175            | 12hr20 | - 167             | 12hr52 |
| Air temp.   | - 154            | 13hr44 | - 109             | 16hr44 |
| Field I     |                  |        |                   |        |
| T(+3)       | - 159            | 13hr24 | - 136             | 14hr56 |
| ABSRAD      | - 157            | 13hr32 | - 134             | 15hr04 |
| NETRAD      | - 170            | 12hr40 | - 165             | 13hr00 |
| T(0)        | - 151            | 13hr56 | - 131             | 15hr16 |
| T(-3)       | - 128            | 15hr28 | - 105             | 17hr00 |
| T(-6)       | - 106            | 16hr56 | - 88              | 18hr08 |
| T(-10)      | - 84             | 18hr24 | - 76              | 18hr56 |
| T(-20)      | 13               | 0hr52  | - 44              | 21hr04 |
| Field II    |                  |        |                   |        |
| T(+3)       | - 160            | 13hr20 | - 136             | 14hr56 |
| ABSRAD      | - 160            | 13hr20 | - 137             | 14hr52 |
| NETRAD      | - 172            | 12hr32 | - 166             | 12hr56 |
| T(0)        | - 156            | 13hr36 | - 135             | 15hr00 |
| T(-3)       | - 132            | 15hr12 | - 112             | 16hr32 |
| T(-6)       | - 111            | 16hr36 | - 94              | 17hr44 |
| T(-10)      | - 88             | 18hr08 | - 83              | 18hr28 |
| T(-20)      | 10               | 0hr40  | - 42              | 21hr12 |

Tabel 4.4. Tijd van optreden van het maximum van de 24-uurscyclus

Dit heeft belangrijke consequenties voor het waargenomen contrast (temperatuurverschil) tussen veld I en II. Zonder dit faseverschil zou dit contrast rond de middag maximaal moeten worden (0,8 tot 1°C).

Het waargenomen faseverschil verschuift dit maximum een paar uur terug naar het midden van de morgen en doet dit contrast kort na de middag wegvallen, precies zoals in de grafieken van fig. 4.5. wordt gevonden. Een beetje rekenen leert overigens, dat dit faseverschil ook voor een temperatuurverschil in de ochtend zou zorgen als de dagelijkse temperatuurzwaai voor beide gebieden hetzelfde zou zijn.

Een aanzet tot een verklaring van dit verschijnsel zal worden gegeven in hoofdstuk 5. Het is een belangrijk verschijnsel, dat van invloed kan zijn op veel beschouwingen die in de literatuur bestaan o.m. over "heat capacity mapping".

Literatuur

- [1] W.R. van Wijk (editor): "Physics of Plant Environment"; North Holland Publ. Cy, Amsterdam, 1966.
- [2] Monteith, J.L. (editor): "Vegetation and the Atmosphere"; Academic Press, London, New York, San Fransisco, 1975.

#### 4.3. De atmosferische stabiliteit

##### 4.3.1. Inleiding

De atmosferische stabiliteit is een belangrijk gegeven om allerlei processen eenvoudig en systematisch te kunnen interpreteren. Deze stabiliteit kan uitgedrukt worden in een kengetal. Het wetenschappelijk meest gangbare kengetal is het kengetal  $\zeta$ . Om de fysische betekenis van dit getal goed te kunnen begrijpen zal hiervan een korte afleiding worden gegeven.

Vervolgens zal worden afgeleid, hoe uit de beschikbare meetgegevens dit kengetal kan worden bepaald. In enige tabellen zijn alle cijfers (over de periode (1976-12-09/12) en (1977-03-08/10)) waarmee gerekend is gegeven.

De verkregen waarden voor dit kengetal zijn in grafiek uitgezet. Tot slot wordt kort ingegaan op enige fysische achtergronden van dit kengetal en hoe dit moet worden geïnterpreteerd.

#### 4.3.2. Afleiding stabiliteitsparameter $\zeta$

Voor de turbulente kinetische energievergelijking geldt:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = P_m + P_a + \epsilon \quad (1)$$

Waarin:  $E$  = kin. turb. energie =  $\frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$  (sommatie-conventie volgens Einstein)

$P_m$  = mechanische productie

$$= u_*^2 \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_3} \approx \frac{u_*^3}{x \cdot x_3}$$

$P_a$  = archimedes productie

$$= \frac{g}{\bar{\rho}} \overline{\rho' u'_3}$$

$\epsilon$  = dissipatie

Per definitie is de stabiliteitsmeter  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{P_a}{P_m} = \frac{\kappa \cdot x_3 \cdot g \cdot \overline{\rho' u'_3}}{\bar{\rho} \cdot u_*^3} = \frac{x_3}{L} \quad (2)$$

met de Monin-Obukhov-lengte

$$L = \frac{\bar{\rho} \cdot u_*^3}{\kappa \cdot g \cdot \overline{\rho' u'_3}} \quad (3)$$

Nu is af te leiden, dat geldt (zie [1])

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \overline{\rho' u'_3} &= - \frac{1}{\bar{T}} \cdot \overline{T' u'_3} - 0,622 \overline{\xi' u'_3} \\ &= - \frac{1}{\bar{T}} \cdot \frac{q_{se}}{\bar{\rho} \cdot c_p} - 0,622 \cdot \frac{q_{ev}}{\bar{\rho} \cdot \mathcal{L}} \\ &= - \frac{1}{\bar{T}} \cdot \frac{q_{se}}{\bar{\rho} \cdot c_p} \cdot \left( 1 + 0,622 \frac{c_p}{\mathcal{L}} \cdot \frac{\bar{T}}{\beta} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

waarin:  $q_{se}$  = voelbare warmte,  $c_p$  = specifieke soortelijke warmte

$q_{ev}$  = verdampingswarmte,  $\mathcal{L}$  = latente energie

$\beta = \frac{q_{se}}{q_{ev}}$  de zgn. Bowen-verhouding

$\zeta$  = specifieke vochtigheid

(4) ingevuld in (3) geeft vervolgens:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_H} \cdot \left( 1 + 0,622 \cdot \frac{c_p}{L} \cdot \frac{1}{\beta} \right) \quad (5)$$

met

$$L_H = \frac{-u_*^3}{\frac{\kappa g}{T} \cdot \frac{q_{se}}{\bar{\rho} \cdot c_p}}$$

Uitdrukking (5) is ook te schrijven als:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_H} + \frac{1}{L_E}$$

$$\text{waarin } L_E = \frac{-u_*^3}{0,622 \kappa g \cdot \frac{q_{ev}}{\bar{\rho} L}}$$

Dit heeft het grote voordeel dat fysisch gezien de stabiliteit opgesplitst is in twee termen.

De  $L_H$  (= voelbare warmte stabiliteitslengte) die alleen door de voelbare warmte wordt bepaald en de  $L_E$  (= verdamping stabiliteitslengte) die alleen door de verdamping wordt bepaald.

#### 4.3.3. Bepaling $\zeta$ uit de metingen

Om de stabiliteitsmeter  $\zeta$  te bepalen, moeten de volgende grootheden bekend zijn:  $q_{ev}$ ,  $q_{se}$ ,  $u_*$ ,  $\bar{T}$ .

##### Bepaling $q_{ev}$ :

In de winter geldt dat  $q_{ev} \approx q_{ev}(P)$ , de zgn. potentiële verdamping. Af te leiden is, (zie [2]) dat hiervoor geldt:

$$q_{ev}(P) = f. \frac{\Delta(q_{ra}^{ne} + q_{c0}) + \gamma.E^*(\bar{u}_1, R.H.)}{\Delta + \gamma^*}$$

Opmerking: voor de betekenis van de gebruikte symbolen zie bovengenoemde literatuur.

##### Bepaling $q_{se}$ :

Deze wordt bepaald uit de restterm van de energiebalans aan het aardoppervlak volgens:

$$q_{se} = - (q_{ra}^{ne} + q_{c0} + q_{ev}(P))$$

Opmerking: in deze balans, is de metabolische energieterm verwaarloosd, hetgeen in de winter toegestaan is.

##### Bepaling $u_*$ :

Deze grootheid wordt voornamelijk bepaald uit de turbulentiemeting  $\sigma_{u_3}$ . Tussen  $\sigma_{u_3}$  en  $u_*$  bestaat een bekende relatie (zie [3])

$$\sigma_{u_3} / u_* = f(\zeta)$$

Door deze relatie in te vullen in vergelijking (2), kan m.b.v. de bovengenoemde grootheden via iteratieve weg de stabiliteitsparameter  $\zeta$  bekend worden.

In de tabellen 1 t/m 6 zijn alle gemeten grootheden voor de perioden (1976-12-09/12) en 1977-03-08/10) weergegeven die nodig waren voor de berekeningen. Tevens staan hier alle berekende grootheden in vermeld.

Tenslotte zijn in de figuren 1 t/m 7 voor de desbetreffende perioden de stabiliteitsmeter  $\zeta$  als functie van de tijd uitgezet.

#### 4.3.4. Interpretatie van de stabiliteitsparameter $\zeta$ .

Uit de afleiding is te zien, dat de waarde van  $\zeta$  voornamelijk wordt bepaald door de fluxdichtheden van impuls, voelbare warmte en waterdamp. Het is beslist niet zo dat deze parameter hoofdzakelijk bepaald wordt door één van de hierboven genoemde grootheden of een combinatie hiervan. Eenvoudig blijkt dit uit de figuur 8. Hierin is de som van voelbare en latente warmte uitgezet tegen de parameter  $\zeta$ . Duidelijk is hieruit te zien, dat er geen éénduidig verband bestaat tussen de uitgezette grootheden.

Hoe moet deze parameter dan wel geïnterpreteerd worden? Uit de afleiding volgt dat dit getal een verhouding is tussen twee turbulente productietermen. Dus deze verhouding geeft aan die productieterm welke overheerst. Is dit getal absoluut bijvoorbeeld groter dan 1, dan overheerst de Archimedes (thermische) term. Dus de turbulentie en alles wat er mee samengaat (b.v. het uitwisselingsmechanisme) zal van thermische aard zijn. Bovendien heeft het kengetal nog een teken, het kan zowel positief als negatief zijn. Is dit getal negatief, dan wil dit zeggen, dat beide productietermen elkaar versterken dus dat ze beide meewerken om de totale turbulentie te vergroten. Daarentegen indien dit getal positief is, zullen beide productiemechanismen elkaar tegenwerken. In een grenslaag kan alleen de Archimedesterm van teken veranderen. Dit wil dan zeggen dat in dit geval de Archimedesterm kinetische turbulente energie zal "dissiperen".

#### Literatuur

- [1]. Monin en Yaglom: Statistical Fluid Mechanics, I, MIT Press, Cambridge, Mass., London, 1973, 2 nd print.
- [2]. Monteith, J.L.: Principles of Environmental Physics, E. Arnold Publ. 1973.
- [3]. Businger, J.A.: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, Journ. Atmosph. Sc., Vol. 28, 1970, pp. 181-189.

| datum      | t<br>(m.e.t.) | $q_{ra}^{ne}$<br>(W m <sup>-2</sup> ) | $\Delta T$<br>(K) | $\bar{q}_{co}$<br>(W m <sup>-2</sup> ) | $\bar{u}_1$<br>(m s <sup>-1</sup> ) | R.H.<br>(-) | T<br>(°C) | $\bar{q}_{ev}(P)$<br>(W m <sup>-2</sup> ) | $\bar{q}_{se}$<br>(W m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u3}$<br>(m s <sup>-1</sup> ) | $U_{\Sigma}$<br>(m s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\tau$<br>(-) |
|------------|---------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------|---------------|
| 1976-12-09 | 0:30          | -60                                   | -0,2              | 10                                     | 4,25                                | 0,87        | 6,1       | 0                                         | -50                                    | 0,446                                 | 0,339                                | 73,6     | 0,014         |
|            | 1:30          | -60                                   | -0,3              | 15                                     | 3,69                                | 0,87        | 5,7       | 0                                         | -45                                    | 0,354                                 | 0,267                                | 39,8     | 0,025         |
|            | 2:30          | -50                                   | -0,3              | 15                                     | 3,00                                | 0,88        | 5,2       | 0                                         | -35                                    | 0,270                                 | 0,201                                | 21,8     | 0,046         |
|            | 3:30          | -60                                   | -0,4              | 19                                     | 2,50                                | 0,89        | 4,7       | 0                                         | -39                                    | 0,205                                 | 0,146                                | 7,53     | 0,133         |
|            | 4:30          | -71                                   | -0,5              | 24                                     | 2,50                                | 0,90        | 4,2       | 0                                         | -46                                    | 0,215                                 | 0,153                                | 7,33     | 0,136         |
|            | 5:30          | -40                                   | -0,5              | 24                                     | 1,94                                | 0,90        | 4,2       | 0                                         | -16                                    | 0,184                                 | 0,135                                | 14,5     | 0,069         |
|            | 6:30          | -10                                   | -0,2              | 10                                     | 2,00                                | 0,90        | 4,6       | 0                                         | 0                                      | 0,164                                 | 0,126                                | 00       | 0,000         |
|            | 7:30          | -10                                   | -0,2              | 10                                     | 2,50                                | 0,90        | 4,7       | 0                                         | 0                                      | 0,245                                 | 0,188                                | 00       | 0,000         |
|            | 8:30          | -30                                   | -0,2              | 10                                     | 2,38                                | 0,91        | 4,6       | 0                                         | -20                                    | 0,214                                 | 0,158                                | 18,7     | 0,053         |
|            | 9:30          | -40                                   | -0,4              | 19                                     | 2,50                                | 0,91        | 4,4       | 0                                         | -21                                    | 0,215                                 | 0,159                                | 18,0     | 0,056         |
|            | 10:30         | 0                                     | -0,2              | 10                                     | 2,56                                | 0,88        | 5,4       | 12                                        | -2                                     | 0,246                                 | 0,189                                | 536      | 0,002         |
|            | 11:30         | 30                                    | 0                 | 0                                      | 2,31                                | 0,84        | 6,8       | 23                                        | 7                                      | 0,219                                 | 0,165                                | -50,0    | -0,020        |
|            | 12:30         | 40                                    | 0,3               | -15                                    | 2,81                                | 0,78        | 7,4       | 27                                        | -2                                     | 0,323                                 | 0,248                                | 9660     | 0,000         |
|            | 13:30         | 30                                    | 0,3               | -15                                    | 2,81                                | 0,72        | 7,5       | 27                                        | -12                                    | 0,306                                 | 0,234                                | 119      | 0,008         |
|            | 14:30         | 60                                    | 0,3               | -15                                    | 3,13                                | 0,75        | 7,8       | 41                                        | 4                                      | 0,344                                 | 0,264                                | -255     | -0,004        |
|            | 15:30         | -40                                   | 0                 | 0                                      | 3,13                                | 0,75        | 6,2       | 0                                         | -40                                    | 0,379                                 | 0,287                                | 55,9     | 0,018         |
|            | 16:30         | -70                                   | -0,4              | 19                                     | 2,42                                | 0,77        | 4,8       | 0                                         | -51                                    | 0,385                                 | 0,291                                | 45,5     | 0,022         |
|            | 17:30         | -70                                   | -0,6              | 29                                     | 2,06                                | 0,80        | 4,0       | 0                                         | -41                                    | 0,414                                 | 0,315                                | 71,7     | 0,014         |
|            | 18:30         | -70                                   | -0,6              | 29                                     | 2,19                                | 0,83        | 3,4       | 0                                         | -31                                    | 0,241                                 | 0,178                                | 17,1     | 0,059         |
|            | 19:30         | -70                                   | -0,7              | 34                                     | 2,69                                | 0,83        | 2,7       | 0                                         | -36                                    | 0,231                                 | 0,169                                | 12,5     | 0,080         |
|            | 20:30         | -70                                   | -0,8              | 39                                     | 2,25                                | 0,83        | 2,3       | 0                                         | -31                                    | 0,254                                 | 0,189                                | 20,3     | 0,049         |
|            | 21:30         | -70                                   | -0,7              | 34                                     | 2,56                                | 0,82        | 2,5       | 0                                         | -36                                    | 0,282                                 | 0,210                                | 24,3     | 0,041         |
|            | 22:30         | -60                                   | -0,8              | 39                                     | 2,69                                | 0,81        | 2,5       | 0                                         | -21                                    | 0,296                                 | 0,224                                | 50,4     | 0,020         |
|            | 23:30         | -60                                   | -0,8              | 39                                     | 2,31                                | 0,82        | 2,5       | 0                                         | -21                                    | 0,243                                 | 0,182                                | 26,9     | 0,037         |

$\Delta T = T(-0,03) - T(-0,06)$

R.H. = rel. vochtigheid.

$\lambda = 1,46 \text{ W.K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Tabel 1



| datum      | t<br>(m.e.t.) | $q_{ra}^{ne}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\Delta T$<br>(K) | $\bar{q}_{co}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{U}_1$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\bar{T}$<br>(°C) | R.H.<br>(-) | $\bar{q}_{ev}(P)$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{q}_{se}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u_3}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\zeta$<br>(-) | U <sub>ж</sub><br>(m.s <sup>-1</sup> ) |
|------------|---------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------|----------------|----------------------------------------|
| 1976-12-10 | 0:30          | -70                                   | -0,7              | 34                                     | 2,42                                | 2,2               | 0,82        | 0                                         | -36                                    | 0,213                                  | 9,45     | 0,106          | 0,155                                  |
|            | 1:30          | -70                                   | -0,8              | 39                                     | 2,50                                | 1,6               | 0,84        | 0                                         | -31                                    | 0,208                                  | 10,3     | 0,096          | 0,151                                  |
|            | 2:30          | -70                                   | -0,8              | 39                                     | 2,25                                | 1,5               | 0,84        | 0                                         | -31                                    | 0,218                                  | 12,2     | 0,082          | 0,159                                  |
|            | 3:30          | -70                                   | -0,8              | 39                                     | 1,88                                | 1,6               | 0,84        | 0                                         | -31                                    | 0,130                                  | 1,94     | 0,515          | 0,086                                  |
|            | 4:30          | -70                                   | -0,8              | 39                                     | 1,69                                | 1,6               | 0,84        | 0                                         | -31                                    | 0,125                                  | 1,69     | 0,591          | 0,082                                  |
|            | 5:30          | -70                                   | -0,9              | 44                                     | 1,75                                | 1,2               | 0,84        | 0                                         | -26                                    | 0,103                                  | 1,07     | 0,938          | 0,067                                  |
|            | 6:30          | -70                                   | -0,9              | 44                                     | 1,56                                | 1,3               | 0,84        | 0                                         | -26                                    | 0,089                                  | 0,66     | 1,52           | 0,057                                  |
|            | 7:30          | -60                                   | -0,8              | 39                                     | 1,81                                | 1,4               | 0,84        | 0                                         | -21                                    | 0,107                                  | 1,56     | 0,646          | 0,070                                  |
|            | 8:30          | -50                                   | -0,7              | 34                                     | 2,50                                | 1,4               | 0,83        | 0                                         | -16                                    | 0,170                                  | 11,0     | 0,091          | 0,123                                  |
|            | 9:30          | -20                                   | -0,7              | 34                                     | 2,25                                | 1,9               | 0,83        | 13                                        | 1                                      | 0,171                                  | -103     | -0,009         | 0,130                                  |
|            | 10:30         | 0                                     | -0,7              | 34                                     | 1,88                                | 2,7               | 0,82        | 21                                        | 13                                     | 0,132                                  | -4,02    | -0,249         | 0,084                                  |
|            | 11:30         | 40                                    | -0,4              | 19                                     | 2,13                                | 4,1               | 0,79        | 35                                        | 24                                     | 0,183                                  | -7,12    | -0,140         | 0,125                                  |
|            | 12:30         | 50                                    | 0                 | 0                                      | 2,31                                | 4,9               | 0,76        | 35                                        | 15                                     | 0,254                                  | -37,8    | -0,027         | 0,190                                  |
|            | 13:30         | 40                                    | 0,3               | -15                                    | 2,31                                | 5,9               | 0,73        | 26                                        | 1                                      | 0,252                                  | -247     | -0,004         | 0,193                                  |
|            | 14:30         | 0                                     | 0,2               | -10                                    | 2,25                                | 5,8               | 0,73        | 10                                        | -20                                    | 0,252                                  | -33,1    | -0,030         | 0,189                                  |
|            | 15:30         | -40                                   | -0,2              | 10                                     | 2,00                                | 4,8               | 0,76        | 0                                         | -30                                    | 0,242                                  | 18,0     | 0,056          | 0,179                                  |
|            | 16:30         | -60                                   | -0,4              | 19                                     | 1,63                                | 3,8               | 0,79        | 0                                         | -41                                    | 0,181                                  | 4,54     | 0,220          | 0,126                                  |
|            | 17:30         | -70                                   | -0,6              | 29                                     | 2,69                                | 2,8               | 0,80        | 0                                         | -41                                    | 0,282                                  | 21,1     | 0,047          | 0,210                                  |
|            | 18:30         | -50                                   | -0,7              | 34                                     | 2,63                                | 2,2               | 0,81        | 0                                         | -16                                    | 0,271                                  | 50,8     | 0,020          | 0,205                                  |
|            | 19:30         | -50                                   | -0,7              | 34                                     | 2,81                                | 3,0               | 0,81        | 0                                         | -16                                    | 0,301                                  | 70,5     | 0,014          | 0,229                                  |
|            | 20:30         | -50                                   | -0,7              | 34                                     | 2,81                                | 3,0               | 0,82        | 0                                         | -16                                    | 0,315                                  | 81,1     | 0,012          | 0,240                                  |
|            | 21:30         | -40                                   | -0,6              | 29                                     | 3,31                                | 1,8               | 0,82        | 0                                         | -11                                    | 0,288                                  | 90,4     | 0,011          | 0,220                                  |
|            | 22:30         | -10                                   | -0,5              | 24                                     | 3,44                                | 2,2               | 0,83        | 0                                         | 14                                     | 0,351                                  | -129     | -0,008         | 0,268                                  |
|            | 23:30         | -10                                   | -0,4              | 19                                     | 3,50                                | 2,3               | 0,86        | 0                                         | 9                                      | 0,410                                  | -325     | -0,003         | 0,314                                  |

| tum      | t<br>(m.e.t.) | $\Delta T$<br>(K) | $\bar{q}_{co}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{U}_1$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | R.H.<br>(-) | $\bar{T}$<br>(°C) | $q_{ev}^{(P)}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $q_{ra}^{ne}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{q}_{ge}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u3}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $U_x$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\tau$<br>(-) |
|----------|---------------|-------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------|---------------|
| 76-12-11 | 0:30          | -0,4              | 19                                     | 3,13                                | 0,88        | 2,6               | 0                                      | -40                                   | -21                                    | 0,416                                 | 0,318                         | 144      | 0,007         |
|          | 1:30          | -0,4              | 19                                     | 1,88                                | 0,86        | 2,7               | 0                                      | -40                                   | -21                                    | 0,216                                 | 0,160                         | 18,3     | 0,055         |
|          | 2:30          | -0,5              | 24                                     | 2,50                                | 0,80        | 2,4               | 0                                      | -40                                   | -16                                    | 0,298                                 | 0,227                         | 68,3     | 0,015         |
|          | 3:30          | -0,6              | 29                                     | 4,13                                | 0,86        | 1,5               | 0                                      | -20                                   | 9                                      | 0,413                                 | 0,317                         | -332     | -0,003        |
|          | 4:30          | -0,6              | 29                                     | 1,75                                | 0,89        | 1,0               | 0                                      | -60                                   | -31                                    | 0,166                                 | 0,115                         | 4,65     | 0,215         |
|          | 5:30          | -0,6              | 29                                     | 3,00                                | 0,84        | 1,3               | 0                                      | -70                                   | -41                                    | 0,357                                 | 0,270                         | 45,0     | 0,022         |
|          | 6:30          | -0,7              | 34                                     | 2,56                                | 0,85        | 1,3               | 0                                      | -50                                   | -16                                    | 0,297                                 | 0,226                         | 67,6     | 0,015         |
|          | 7:30          | -0,6              | 29                                     | 2,50                                | 0,83        | 1,8               | 0                                      | -60                                   | -31                                    | 0,278                                 | 0,208                         | 27,3     | 0,037         |
|          | 8:30          | -0,5              | 24                                     | 2,31                                | 0,81        | 2,0               | 0                                      | -50                                   | -16                                    | 0,259                                 | 0,196                         | 44,0     | 0,023         |
|          | 9:30          | -0,6              | 29                                     | 2,81                                | 0,82        | 2,2               | 17                                     | -10                                   | 2                                      | 0,320                                 | 0,246                         | -446     | -0,002        |
|          | 10:30         | -0,4              | 19                                     | 3,06                                | 0,82        | 3,1               | 27                                     | 20                                    | -26                                    | 0,370                                 | 0,282                         | 87,2     | 0,012         |
|          | 11:30         | -0,2              | 10                                     | 3,88                                | 0,81        | 4,4               | 49                                     | 70                                    | 31                                     | 0,469                                 | 0,358                         | -126     | -0,008        |
|          | 12:30         | 0,2               | -10                                    | 5,38                                | 0,79        | 5,3               | 49                                     | 70                                    | 11                                     | 0,500                                 | 0,384                         | -372     | -0,003        |
|          | 13:30         | 0,2               | -10                                    | 6,25                                | 0,72        | 5,8               | 62                                     | 70                                    | -2                                     | 0,538                                 | 0,414                         | 3010     | 0,000         |
|          | 14:30         | 0,1               | -5                                     | 5,94                                | 0,73        | 5,5               | 47                                     | 40                                    | -12                                    | 0,493                                 | 0,379                         | 581      | 0,002         |
|          | 15:30         | 0                 | -0                                     | 5,69                                | 0,75        | 5,4               | 33                                     | 10                                    | -23                                    | 0,467                                 | 0,358                         | 208      | 0,005         |
|          | 16:30         | -0,1              | 5                                      | 4,81                                | 0,75        | 5,3               | 22                                     | -10                                   | -27                                    | 0,409                                 | 0,312                         | 112      | 0,009         |
|          | 17:30         | -0,1              | 5                                      | 4,06                                | 0,80        | 4,8               | 14                                     | -10                                   | -19                                    | 0,357                                 | 0,272                         | 105      | 0,009         |
|          | 18:30         | -0,2              | 10                                     | 3,44                                | 0,80        | 4,5               | 6                                      | -30                                   | -26                                    | 0,275                                 | 0,207                         | 32,4     | 0,031         |
|          | 19:30         | -0,4              | 19                                     | 3,81                                | 0,81        | 4,1               | 6                                      | -40                                   | -27                                    | 0,312                                 | 0,236                         | 46,5     | 0,022         |
|          | 20:30         | -0,4              | 19                                     | 4,31                                | 0,81        | 4,2               | 0                                      | -50                                   | -31                                    | 0,362                                 | 0,275                         | 63,1     | 0,016         |
|          | 21:30         | -0,3              | 15                                     | 3,69                                | 0,81        | 4,2               | 0                                      | -40                                   | -25                                    | 0,295                                 | 0,223                         | 41,6     | 0,023         |
|          | 22:30         | -0,4              | 19                                     | 3,19                                | 0,82        | 3,8               | 0                                      | -60                                   | -41                                    | 0,242                                 | 0,177                         | 12,7     | 0,079         |
|          | 23:30         | -0,4              | 19                                     | 3,31                                | 0,82        | 3,8               | 0                                      | -40                                   | -21                                    | 0,255                                 | 0,191                         | 31,4     | 0,032         |

Voor verklaring symbolen zie Tabel 1

Tabel 3

| Datum      | t<br>(m.e.t.) | $q_{ra}^{ne}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\Delta T$<br>(K) | $q_{co}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{U}_1$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\bar{T}$<br>(°C) | R.H.<br>(-) | $q_{ev}$ (P)<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $q_{se}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u_3}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $U_{\Sigma}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\zeta$<br>(-) |
|------------|---------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------|----------------|
| 1976-12-12 | 0:30          | -40                                   | -0,5              | 24                               | 2,75                                | 3,4               | 0,81        | 0                                    | -16                              | 0,184                                  | 0,135                                | 14,5     | 0,069          |
|            | 1:30          | -40                                   | -0,5              | 24                               | 2,94                                | 3,6               | 0,80        | 0                                    | -16                              | 0,221                                  | 0,165                                | 26,5     | 0,038          |
|            | 2:30          | -40                                   | -0,4              | 19                               | 3,63                                | 3,9               | 0,80        | 0                                    | -21                              | 0,312                                  | 0,237                                | 59,5     | 0,017          |
|            | 3:30          | -50                                   | -0,5              | 24                               | 2,38                                | 2,9               | 0,82        | 0                                    | -26                              | 0,202                                  | 0,147                                | 11,5     | 0,087          |
|            | 4:30          | -60                                   | -0,6              | 29                               | 1,56                                | 2,3               | 0,84        | 0                                    | -31                              | 0,136                                  | 0,091                                | 2,28     | 0,439          |
|            | 5:30          | -30                                   | -0,6              | 29                               | 2,25                                | 2,9               | 0,84        | 0                                    | -1                               | 0,203                                  | 0,156                                | 356      | 0,003          |
|            | 6:30          | -40                                   | -0,5              | 24                               | 3,25                                | 3,6               | 0,81        | 0                                    | -16                              | 0,319                                  | 0,243                                | 84,4     | 0,012          |
|            | 7:30          | -40                                   | -0,4              | 19                               | 3,88                                | 3,6               | 0,82        | 0                                    | -21                              | 0,341                                  | 0,260                                | 78,4     | 0,013          |
|            | 8:30          | -50                                   | -0,4              | 19                               | 3,19                                | 3,3               | 0,82        | 0                                    | -31                              | 0,316                                  | 0,238                                | 41,2     | 0,024          |
|            | 9:30          | -10                                   | -0,3              | 15                               | 3,06                                | 3,7               | 0,81        | 2                                    | 3                                | 0,321                                  | 0,246                                | -449     | -0,002         |
|            | 10:30         | 20                                    | -0,1              | 5                                | 3,63                                | 4,8               | 0,83        | 24                                   | 1                                | 0,330                                  | 0,253                                | -586     | -0,002         |
|            | 11:30         | 30                                    | 0,1               | -5                               | 4,13                                | 5,3               | 0,83        | 26                                   | -1                               | 0,310                                  | 0,239                                | -1670    | -0,001         |
|            | 12:30         | 30                                    | 0,1               | -5                               | 2,81                                | 4,8               | 0,85        | 20                                   | 5                                | 0,205                                  | 0,155                                | -55,7    | -0,018         |
|            | 13:30         | 40                                    | 0,1               | -5                               | 2,19                                | 4,7               | 0,86        | 22                                   | 13                               | 0,171                                  | 0,122                                | -12,0    | -0,083         |
|            | 14:30         | 20                                    | 0,1               | -5                               | 2,25                                | 4,8               | 0,87        | 13                                   | 2                                | 0,176                                  | 0,134                                | -79,0    | -0,013         |
|            | 15:30         | -10                                   | -0,1              | 5                                | 1,56                                | 4,3               | 0,88        | 3                                    | -8                               | 0,100                                  | 0,069                                | 3,94     | 0,254          |
|            | 16:30         | -30                                   | -0,3              | 15                               | 1,50                                | 3,6               | 0,89        | 0                                    | -15                              | 0,090                                  | 0,059                                | 1,26     | 0,795          |
|            | 17:30         | -20                                   | -0,4              | 19                               | 1,13                                | 3,0               | 0,91        | 0                                    | -1                               | 0,076                                  | 0,056                                | 16,6     | 0,060          |
|            | 18:30         | -20                                   | -0,4              | 19                               | 1,44                                | 2,9               | 0,92        | 0                                    | -1                               | 0,084                                  | 0,063                                | 23,0     | 0,043          |
|            | 19:30         | -30                                   | -0,4              | 19                               | 0,88                                | 2,6               | 0,92        | 0                                    | -11                              | 0,080                                  | 0,052                                | 1,20     | 0,836          |
|            | 20:30         | -20                                   | -0,5              | 24                               | 0,81                                | 2,2               | 0,92        | 0                                    | 4                                | 0,074                                  | 0,037                                | -1,22    | -0,823         |
|            | 21:30         | -10                                   | -0,5              | 24                               | 0,94                                | 2,1               | 0,92        | 0                                    | 14                               | 0,076                                  |                                      |          |                |
|            | 22:30         | -20                                   | -0,5              | 24                               | 0,75                                | 1,8               | 0,92        | 0                                    | 4                                | 0,083                                  | 0,050                                | -3,00    | -0,334         |
|            | 23:30         | -30                                   | -0,6              | 29                               | 0,44                                | 1,6               | 0,92        | 0                                    | -1                               | 0,067                                  | 0,049                                | 10,8     | 0,093          |

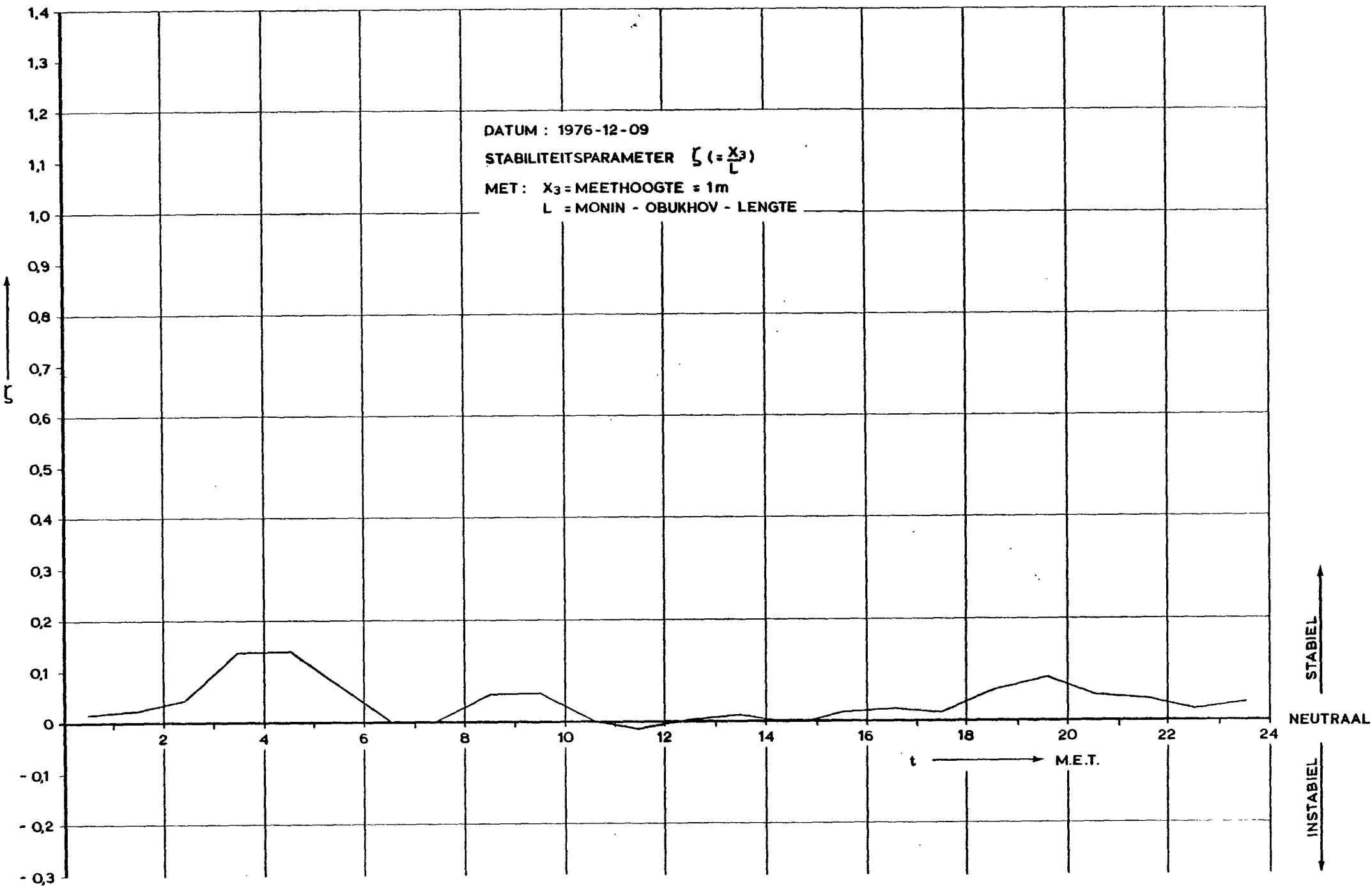
Voor verklaring symbolen zie Tabel 1

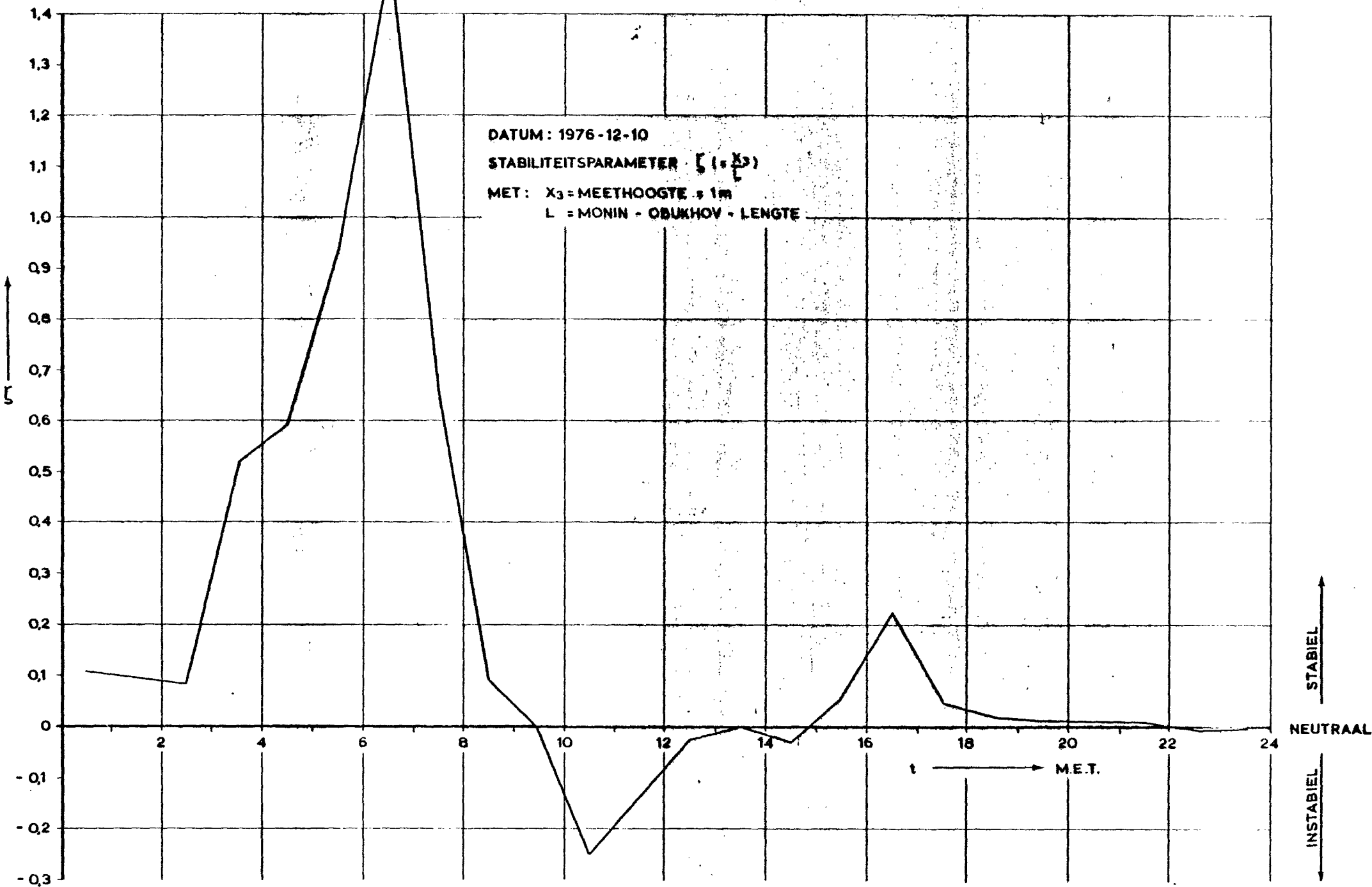
Tabel 4

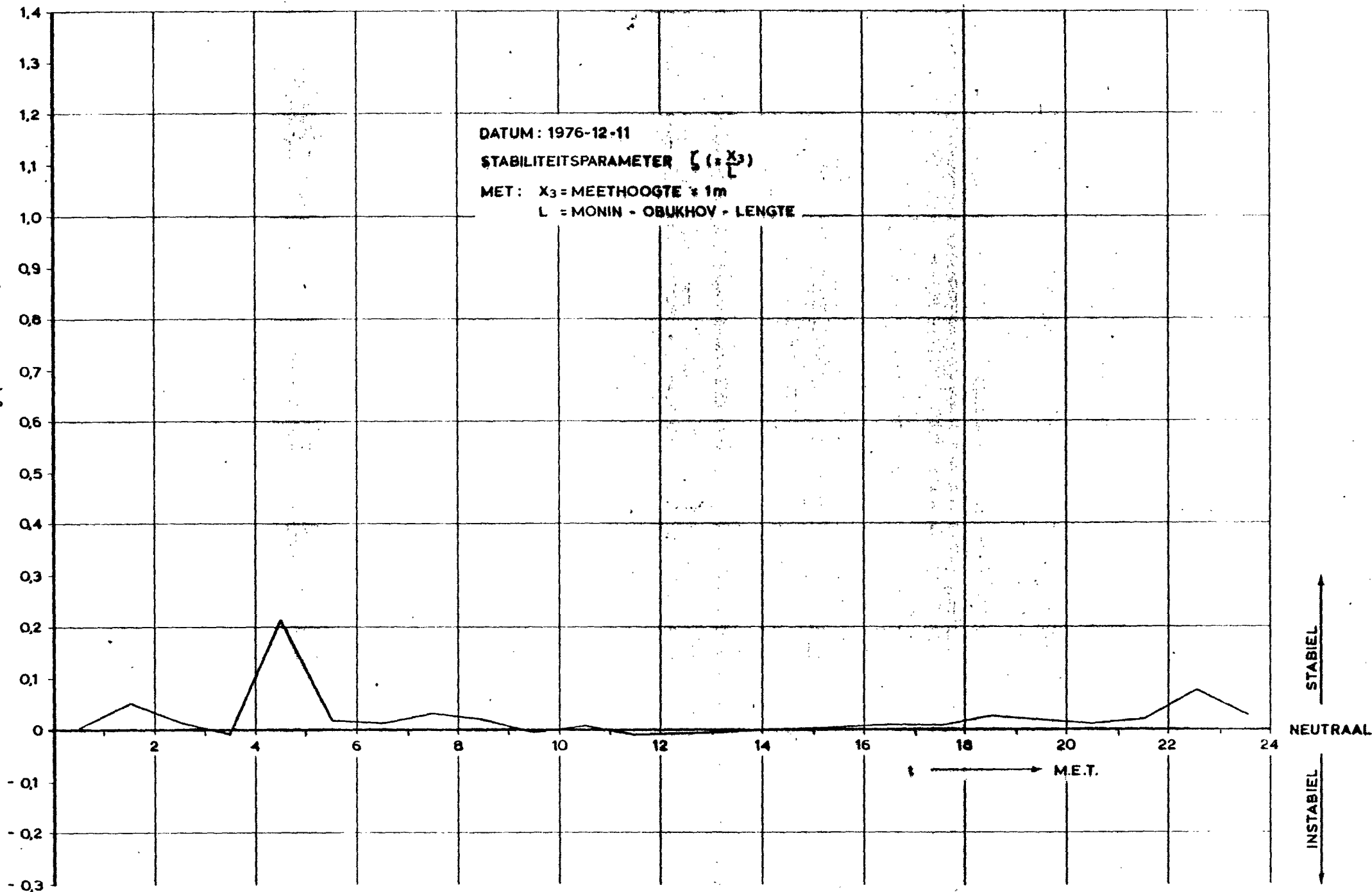
onrealistisch t.g.v. wegvallen  
↓ wind

| Datum      | t<br>(m.e.t.) | $q_{ra}^{ne}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\Delta T$<br>(K) | $q_{co}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{U}_1$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\bar{T}$<br>(°C) | R.H.<br>(-) | $\bar{q}_{ev}$ (P)<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{q}_{se}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u_3}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $U_{\Sigma}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\tau$<br>(-) |
|------------|---------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|----------|---------------|
| 1977-03-08 | 0:30          | 0                                     | 0,1               | -5                               | 3,96                                | 9,2               | 0,89        | 0                                          | -5                                     | 0,277                                  | 0,212                                | 180      | 0,006         |
|            | 1:30          | 0                                     | 0,1               | -5                               | 4,19                                | 9,1               | 0,90        | 0                                          | -5                                     | 0,285                                  | 0,218                                | 196      | 0,005         |
|            | 2:30          | 0                                     | 0,1               | -5                               | 5,40                                | 9,2               | 0,87        | 0                                          | -5                                     | 0,346                                  | 0,266                                | 353      | 0,003         |
|            | 3:30          | -20                                   | 0                 | 0                                | 5,40                                | 8,6               | 0,86        | 0                                          | -20                                    | 0,335                                  | 0,255                                | 78,2     | 0,013         |
|            | 4:30          | -60                                   | -0,1              | 5                                | 5,25                                | 7,9               | 0,88        | 0                                          | -55                                    | 0,315                                  | 0,234                                | 22,1     | 0,045         |
|            | 5:30          | -40                                   | -0,1              | 5                                | 5,31                                | 7,8               | 0,89        | 0                                          | -35                                    | 0,324                                  | 0,244                                | 34,1     | 0,029         |
|            | 6:30          | -20                                   | -0,1              | 5                                | 4,94                                | 7,9               | 0,89        | 5                                          | -20                                    | 0,311                                  | 0,236                                | 63,2     | 0,016         |
|            | 7:30          | -10                                   | -0,1              | 5                                | 5,10                                | 7,8               | 0,89        | 10                                         | -15                                    | 0,337                                  | 0,257                                | 112      | 0,009         |
|            | 8:30          | 30                                    | 0                 | 0                                | 4,42                                | 8,4               | 0,88        | 27                                         | 3                                      | 0,336                                  | 0,258                                | -333     | -0,003        |
|            | 9:30          | 70                                    | 0,2               | -10                              | 4,15                                | 8,8               | 0,86        | 44                                         | 16                                     | 0,303                                  | 0,229                                | -60,1    | -0,017        |
|            | 10:30         | 70                                    | 0,3               | -15                              | 4,10                                | 9,1               | 0,84        | 44                                         | 11                                     | 0,312                                  | 0,237                                | -90,5    | -0,011        |
|            | 11:30         | 130                                   | 0,4               | -20                              | 3,96                                | 9,5               | 0,82        | 74                                         | 36                                     | 0,293                                  | 0,216                                | -23,5    | -0,043        |
|            | 12:30         | 180                                   | 0,6               | -29                              | 4,04                                | 10,5              | 0,78        | 102                                        | 49                                     | 0,275                                  | 0,197                                | -13,2    | -0,076        |
|            | 13:30         | 160                                   | 0,6               | -29                              | 3,40                                | 11,0              | 0,73        | 94                                         | 37                                     | 0,228                                  | 0,159                                | -9,04    | -0,111        |
|            | 14:30         | 200                                   | 0,7               | -34                              | 3,50                                | 11,8              | 0,68        | 121                                        | 45                                     | 0,235                                  | 0,162                                | -7,81    | -0,128        |
|            | 15:30         | 130                                   | 0,7               | -34                              | 3,83                                | 11,8              | 0,67        | 87                                         | 6                                      | 0,203                                  | 0,151                                | -28,2    | -0,035        |
|            | 16:30         | 40                                    | 0,4               | -20                              | 2,15                                | 11,6              | 0,69        | 32                                         | -12                                    | 0,135                                  | 0,097                                | 8,81     | 0,113         |
|            | 17:30         | 0                                     | 0,2               | -10                              | 0,67                                | 11,2              | 0,73        | 4                                          | -14                                    | 0,084                                  | 0,054                                | 1,10     | 0,905         |
|            | 18:30         | -10                                   | 0                 | 0                                | 0,25                                | 10,5              | 0,76        | 1                                          | -11                                    | 0,051                                  | 0,032                                | 0,28     | 3,56          |
|            | 19:30         | -30                                   | -0,2              | 10                               | 0,79                                | 9,6               | 0,80        | 0                                          | -20                                    | 0,112                                  | 0,074                                | 1,93     | 0,518         |
|            | 20:30         | -50                                   | -0,3              | 15                               | 2,13                                | 9,0               | 0,80        | 0                                          | -35                                    | 0,096                                  | 0,061                                | 0,61     | 1,64          |
|            | 21:30         | -40                                   | -0,3              | 15                               | 1,58                                | 8,0               | 0,83        | 0                                          | -25                                    | 0,079                                  | 0,050                                | 0,47     | 2,14          |
|            | 22:30         | -60                                   | -0,5              | 24                               | 1,75                                | 7,1               | 0,87        | 0                                          | -36                                    | 0,074                                  | 0,046                                | 0,26     | 3,85          |
|            | 23:30         | -60                                   | -0,6              | 29                               | 1,69                                | 6,4               | 0,89        | 0                                          | -31                                    | 0,073                                  | 0,046                                | 0,29     | 3,44          |

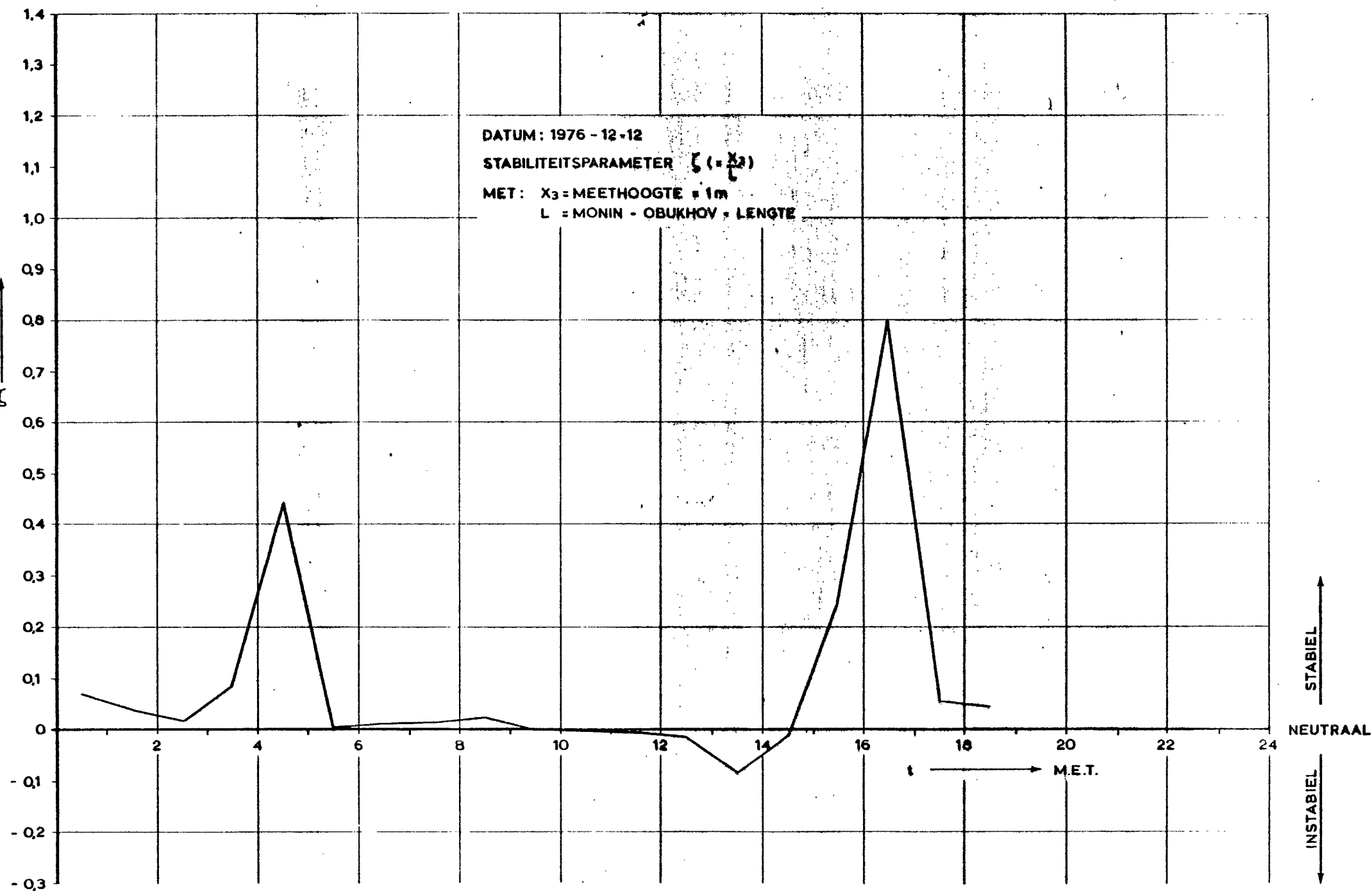
| Datum     | t<br>(m.e.t.) | $\theta_{ra}^{ne}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\Delta T$<br>(K) | $q_{co}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{U}_1$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $\bar{T}$<br>(°C) | R.H.<br>(-) | $\bar{q}_{ev}(P)$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\bar{q}_{se}$<br>(W.m <sup>-2</sup> ) | $\sigma_{u3}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | $U_{\Sigma}$<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | L<br>(m) | $\zeta$<br>(-) |
|-----------|---------------|--------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------|-------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------|----------------|
| 977-03-09 | 0:30          | -60                                        | -0,8              | 39                               | 1,79                                | 5,8               | 0,91        | 0                                         | -21                                    | 0,072                                 | 0,045                                | 0,42     | 2,39           |
|           | 1:30          | -60                                        | -0,9              | 44                               | 1,65                                | 5,1               | 0,92        | 0                                         | -16                                    | 0,078                                 | 0,050                                | 0,73     | 1,38           |
|           | 2:30          | -60                                        | -0,9              | 44                               | 2,10                                | 4,8               | 0,92        | 0                                         | -16                                    | 0,080                                 | 0,051                                | 0,79     | 1,27           |
|           | 3:30          | -50                                        | -0,9              | 44                               | 1,13                                | 4,3               | 0,91        | 0                                         | -6                                     | 0,075                                 | 0,050                                | 1,93     | 0,519          |
|           | 4:30          | -60                                        | -0,9              | 44                               | 1,88                                | 4,2               | 0,92        | 0                                         | -16                                    | 0,073                                 | 0,046                                | 0,59     | 1,71           |
|           | 5:30          | -50                                        | -0,8              | 39                               | 1,90                                | 3,8               | 0,92        | 0                                         | -11                                    | 0,072                                 | 0,046                                | 0,84     | 1,19           |
|           | 6:30          | -60                                        | -0,9              | 44                               | 2,42                                | 4,0               | 0,91        | 0                                         | -16                                    | 0,097                                 | 0,064                                | 1,51     | 0,662          |
|           | 7:30          | -30                                        | -0,7              | 34                               | 2,81                                | 4,6               | 0,89        | 8                                         | -4                                     | 0,135                                 | 0,101                                | 281      | 0,032          |
|           | 8:30          | 20                                         | -0,3              | 15                               | 2,98                                | 5,7               | 0,85        | 26                                        | 9                                      | 0,131                                 | 0,088                                | -6,35    | -0,158         |
|           | 9:30          | 100                                        | 0,4               | -19                              | 3,44                                | 8,1               | 0,78        | 58                                        | 23                                     | 0,172                                 | 0,114                                | -5,43    | -0,184         |
|           | 10:30         | 180                                        | 1,1               | -54                              | 3,46                                | 10,5              | 0,72        | 92                                        | 34                                     | 0,173                                 | 0,104                                | -2,88    | -0,347         |
|           | 11:30         | 220                                        | 1,6               | -78                              | 3,88                                | 13,3              | 0,65        | 120                                       | 22                                     | 0,186                                 | 0,126                                | -6,83    | -0,146         |
|           | 12:30         | 270                                        | 2,0               | -97                              | 4,30                                | 15,3              | 0,61        | 155                                       | 18                                     | 0,202                                 | 0,142                                | -10,3    | -0,097         |
|           | 13:30         | 260                                        | 2,0               | -97                              | 5,08                                | 16,8              | 0,58        | 169                                       | -6                                     | 0,239                                 | 0,185                                | -99,2    | -0,010         |
|           | 14:30         | 220                                        | 1,8               | -88                              | 5,67                                | 17,5              | 0,57        | 160                                       | -28                                    | 0,255                                 | 0,192                                | 40,7     | 0,025          |
|           | 15:30         | 150                                        | 1,6               | -78                              | 5,67                                | 17,6              | 0,56        | 124                                       | -52                                    | 0,261                                 | 0,192                                | 15,5     | 0,065          |
|           | 16:30         | 60                                         | 1,0               | -49                              | 4,71                                | 17,1              | 0,56        | 73                                        | -62                                    | 0,212                                 | 0,149                                | 5,45     | 0,183          |
|           | 17:30         | 0                                          | 0,6               | -29                              | 4,04                                | 16,2              | 0,58        | 36                                        | -65                                    | 0,162                                 | 0,107                                | 1,86     | 0,537          |
|           | 18:30         | -50                                        | 0,2               | -10                              | 3,75                                | 14,8              | 0,61        | 9                                         | -69                                    | 0,158                                 | 0,104                                | 1,54     | 0,651          |
|           | 19:30         | -60                                        | 0                 | 0                                | 2,79                                | 13,7              | 0,64        | 0                                         | -60                                    | 0,123                                 | 0,079                                | 0,77     | 1,31           |
|           | 20:30         | -50                                        | -0,1              | 5                                | 3,13                                | 13,2              | 0,65        | 0                                         | -45                                    | 0,141                                 | 0,093                                | 1,68     | 0,596          |
|           | 21:30         | -50                                        | 0                 | 0                                | 3,48                                | 12,8              | 0,65        | 0                                         | -50                                    | 0,157                                 | 0,105                                | 2,16     | 0,463          |
|           | 22:30         | -50                                        | 0,1               | -5                               | 4,13                                | 13,6              | 0,64        | 0                                         | -55                                    | 0,211                                 | 0,148                                | 5,57     | 0,180          |
|           | 23:30         | -50                                        | 0                 | 0                                | 4,08                                | 12,7              | 0,67        | 0                                         | -50                                    | 0,208                                 | 0,146                                | 5,92     | 0,169          |

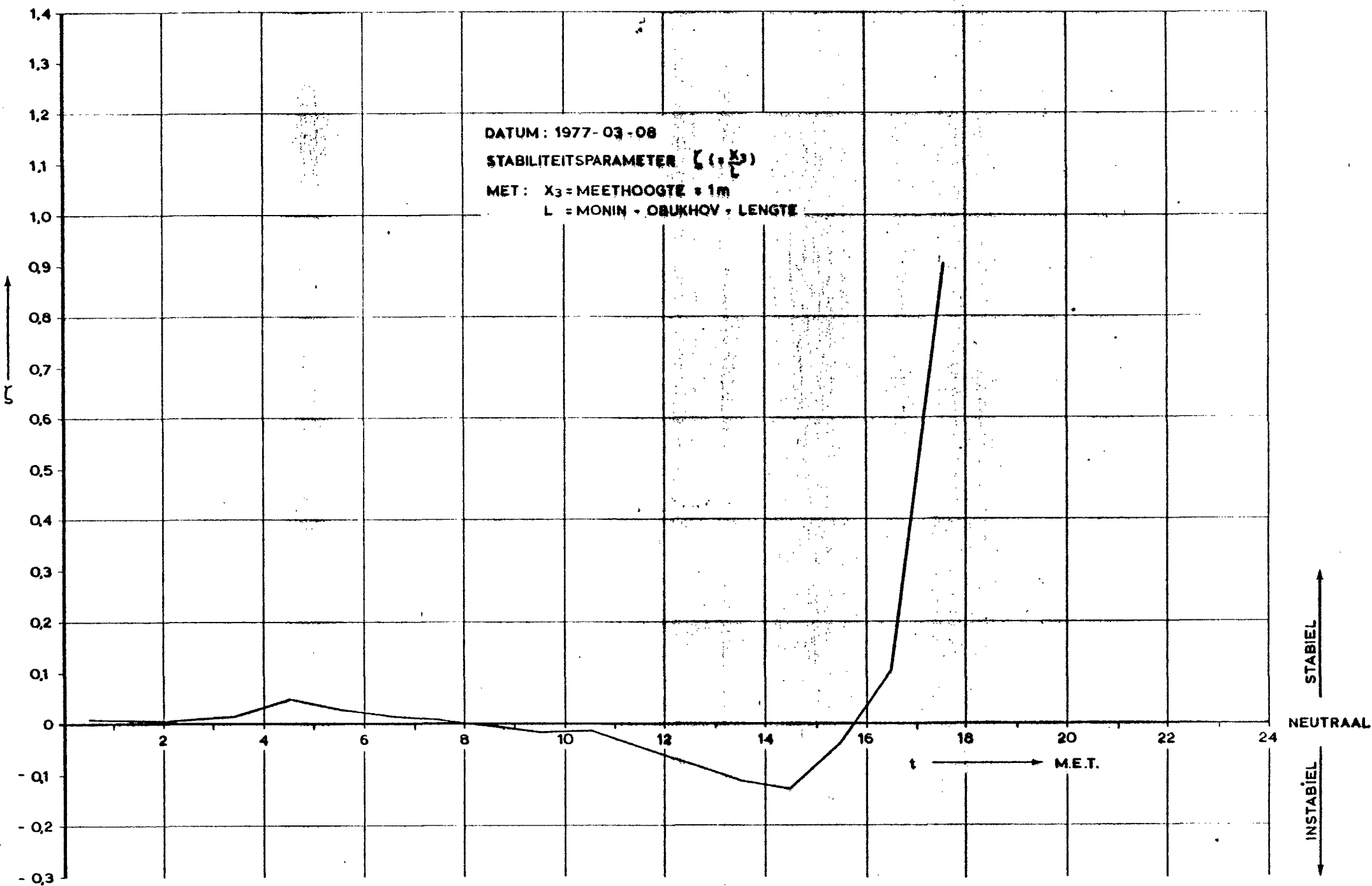


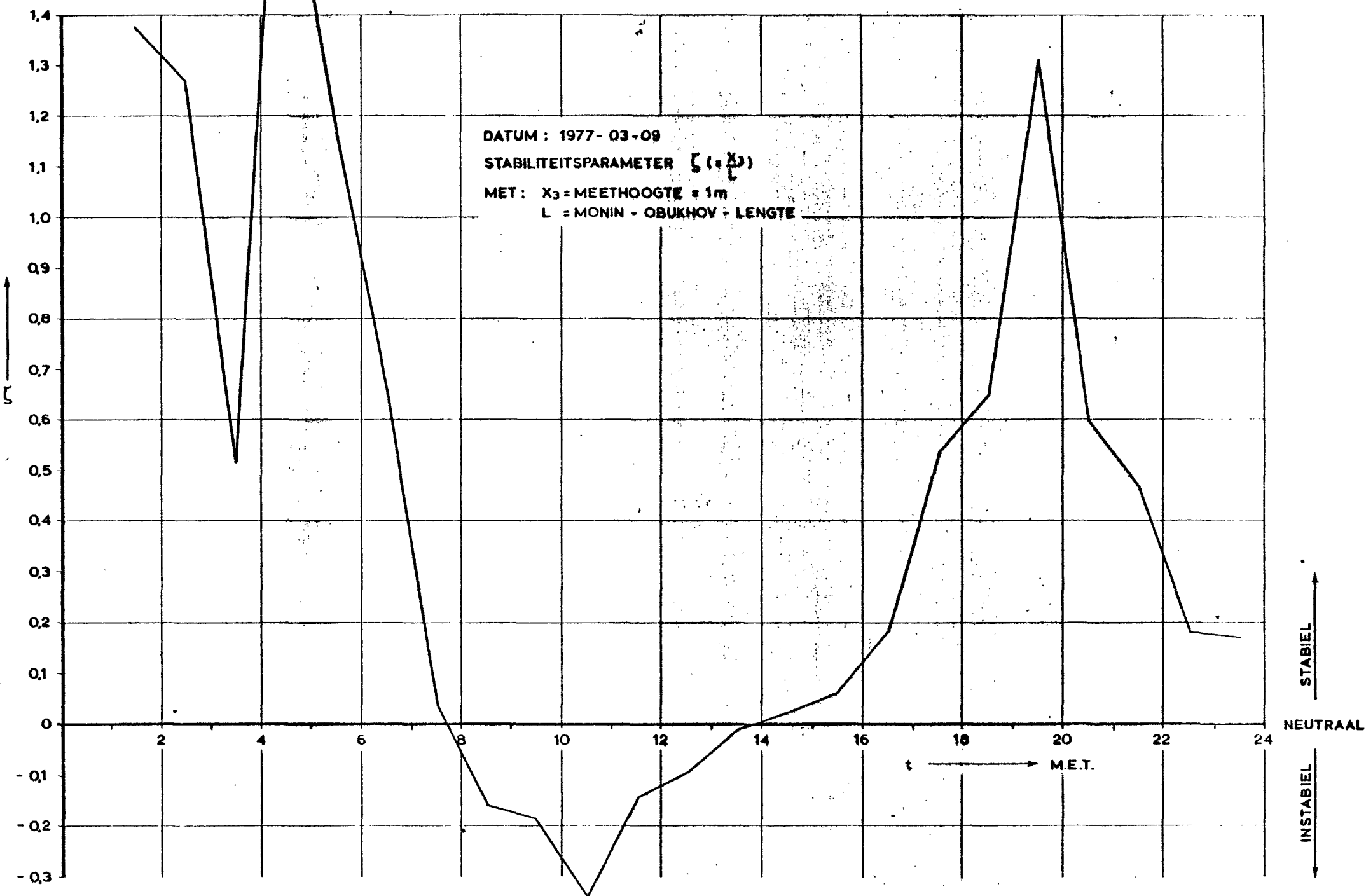


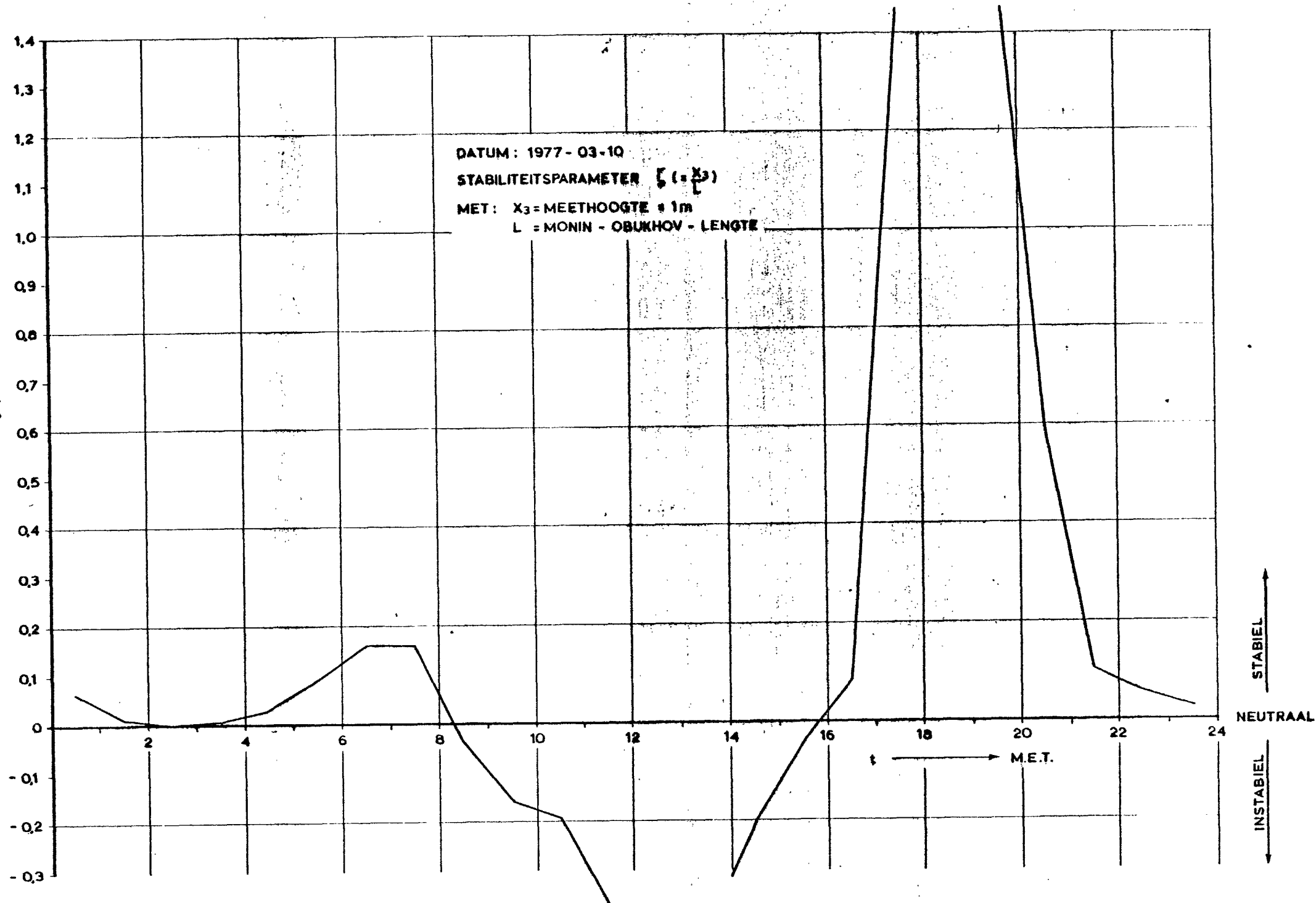










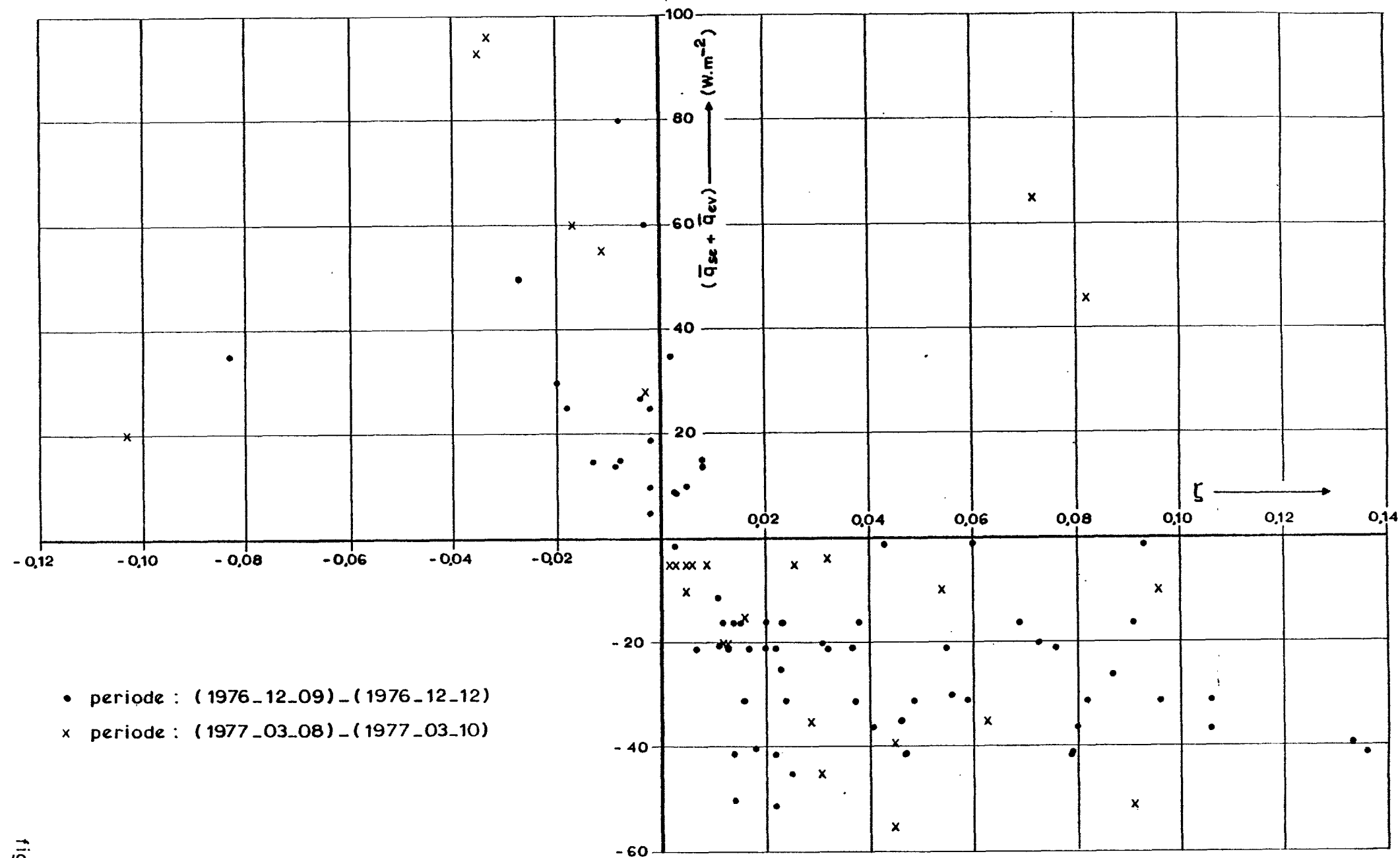


DATUM: 1977 - 03-10

STABILITEITSPARAMETER  $\zeta (= \frac{X_3}{L})$

MET:  $X_3$  = MEETHOOGTE + 1m

L = MONIN - OBUKHOV - LENGTE



#### 4.4. Relatie tussen grondwaterpotentialen en rivierstand

##### 4.4.1. Samenvatting

De mogelijkheid is onderzocht of de grondwaterpotentiaal op een aan te geven plaats voorspeld kan worden uit rivierstanden en neerslagen. Op basis van een meetreeks is een mathematische uitdrukking afgeleid.

Voor de grondwaterpotentiaal  $P_t$  van de buis, aangegeven in fig. 5, op tijdstip  $t$  gaf de volgende relatie een bevredigend resultaat:

$$P_t = 0,11836 R_{t-24} + 0,00983 N_t + 0,01367 N_{t-12} \\ + 0,01132 N_{t-24} + 0,00941 N_{t-36} + 0,00813 N_{t-48} + 0,40827 \text{ (in mNAP)}$$

waarin  $t-12$ ,  $t-24$  etc. duiden op tijdstippen 12 uur, 24 uur etc. vóór het tijdstip  $t$ .

De rivierstand  $R$  is de buitenwaterstand te Herwijnen, de neerslag  $N$  is ter plaatse gemeten. De fouten in de voorspelling zijn te vinden in fig. 11 en 12. De barometerstand bleek geen invloed te hebben op de grondwaterstand.

Deze formule kan ook gebruikt worden om de grondwaterpotentiaal met behulp van verwachte neerslagen en eventuele rivierstanden te voorspellen. De verwachting dat ook voor andere plaatsen op overeenkomstige wijze methoden van het voorspellen van grondwaterpotentialen kunnen worden opgesteld, lijkt gerechtvaardigd.

##### 4.4.2. Inleiding

Voor stabiliteitsproblemen van rivierdijken is de grondwaterpotentiaal vaak van groot belang. Voor beheersmaatregelen kan het van praktisch belang zijn op bepaalde plaatsen over een verwachting van de veranderingen in de grondwaterpotentiaal te kunnen beschikken. In dat geval kunnen tijdig maatregelen worden genomen als stopzetting van bemaling, dijkbewaking e.d.

In dit rapport is een poging gedaan de grondwaterpotentiaal van een (overigens vrij willekeurig gekozen buis) te relateren aan rivierstanden en neerslagen. Omdat vaak wordt beweerd dat de luchtdruk een niet verwaarloosbare invloed op de grondwaterstand heeft, is ook deze in de beschouwingen meegenomen. De bewering wordt overigens door de hier

gebruikte metingen niet gestaafd.

Bestaat eenmaal een model dat de grondwaterpotentiaal kan verklaren uit metingen, dan kunnen ook potentialen voorspeld worden uit te verwachten neerslagen en rivierstanden. De poging om tot een model te komen is hier met een zeer korte reeks waarnemingen geslaagd.

De betrouwbaarheid kan opgevoerd worden door langere waarnemingsreeksen te analyseren.

#### 4.4.3. Probleemstelling

Na is te gaan of de mogelijkheid bestaat een methode te ontwerpen waarbij de grondwaterpotentiaal op een aan te geven plaats voorspeld kan worden uit gemeten grootheden, zoals rivierstanden, neerslagen en luchtdruk. Eventueel zouden voor voorspellingen op "iets" langere termijn ook prognoses van de uitgangsgrootheden gebruikt kunnen worden. Te zoeken valt naar een mathematische uitdrukking die de grondwaterpotentiaal in verband brengt met de rivierstanden, de neerslagsommen en de atmosferische druk op hetzelfde tijdstip en/of voorgaande tijdstippen.

De gekozen uitdrukking moet geverifieerd worden.

#### 4.4.4. Het materiaal

Bij het onderzoek zijn met het meetstation bruikbare gegevens verzameld in de perioden:

30 december 1976 t/m 3 januari 1977

8 januari 1977 t/m 22 januari 1977

28 januari 1977 t/m 25 februari 1977

27 februari 1977 t/m 5 maart 1977

7 maart 1977 t/m 13 maart 1977

Van de rivierstanden zijn uittreksels van een naburige peilschrijver (Herwijnen) ter beschikking over de perioden:

25 december 1976 t/m 3 januari 1977

15 januari 1977 t/m 28 februari 1977.

Het langste gemeenschappelijke interval strekt zich uit van 29 januari 1977 t/m 25 februari 1977. Deze reeks is gebruikt voor het exploratieve gedeelte van het onderzoek.

De fluctuaties van de grondwaterpotentialen gaven de indruk dat volstaan kon worden met gemiddelden over een interval van 12 uur. Voor de exploratie is een maximale tijdsverschuiving van 16 tijdsintervallen gebruikt. Er bleven 39 waarnemingen over voor het onderzoek. In fig. 1, 2, 3 en 4 zijn de gegevens afgebeeld. In figuur 1 is aangegeven waar het

tijdstip  $t = 0$  ligt. De plaatsen van de meetopstellingen zijn aangegeven in fig. 5.

#### 4.4.5. De methoden

Er is gebruik gemaakt van standaard software van de terminal, aangesloten aan de rekenmachine van Honeywell-Bull. Ter beschikking staan:

- A regressie ("mul-regression")
- B stapsgewijze regressie ("mul-correlation")
- C factoranalyse ("euro: fac")

In alle drie gevallen wordt een lineair verband verondersteld. Voor  $x$  en  $y$  mogen functies gebruikt worden als log en sinus, mits de transformatie is uitgevoerd voorafgaand aan de analyse.

##### ad A regressie

Alle fouten worden toegeschreven aan meetfouten bij  $y$  (in dit geval de grondwaterpotentiaal). De meetfouten moeten rond -nul- schommelen en de reikwijdte moet gelijk zijn over het gehele traject dat  $y$  in getalwaarde kan doorlopen. Het rekenmodel is verder slechts geldig als de meetfouten onderling onafhankelijk zijn.

Bestuderingen van de afwijkingen na toepassing van de regressie kan fouten in de aannames aan het licht brengen of ook fouten in het lineaire model zelf.

##### ad B stapsgewijze regressie

De "verklaring" van de afhankelijke variabele door één onafhankelijke variabele is nooit compleet. Stapsgewijze regressie zoekt eerst die onafhankelijke variabelen op die zoveel mogelijk de afhankelijkheid verklaart.

Daarna komen die onafhankelijken aan de beurt, die zoveel mogelijk van het overblijvende niet verklaarde gedeelte voor hun rekening nemen.

Vallen alle overige onafhankelijken in het reeds verklaarde gedeelte, dan komen ze niet aan bod.

##### ad C factoranalyse

Wanneer een onafhankelijke variabele perfect lineair zou samenhangen met de afhankelijke dan is de correlatie-coëfficiënt tussen beide in absolute waarde gelijk aan 1. Zijn er meer dan één onafhankelijke variabelen dan kunnen deze op hun beurt samenhang vertonen onderling en met de afhankelijke.



Is ook deze samenhang perfect dan zijn een of meer van de onafhankelijke overbodig. Met factoranalyse is te onderzoeken in hoeverre er overbodigheid is. Bij factoranalyse worden nieuwe variabelen ingevoerd, factoren genaamd. De interpretatie van deze factoren in termen van de oorspronkelijke variabelen is een moeilijke zaak.

#### 4.4.6. De berekening

1. Eerst is met factoranalyse onderzocht hoeveel variabelen minstens in aanmerking komen als onafhankelijken. Tevens is gepoogd deze variabelen op te sporen.
2. Met stapsgewijze regressie is nagegaan of aanvullingen mogelijk zijn.
3. Tenslotte is met regressie naar een afronding gestreefd.

Als basis voor de berekeningen zijn slechts een beperkt aantal variabelen in te voeren. De rivierstanden zijn opgenomen op de tijdstippen  $t$  tot en met  $t-16 \times 12$  uur. De neerslagsommen strekken zich uit van  $t$  tot en met  $t-8 \times 12$  uur. De reeks voor de rivierstanden is langer gekozen dan die voor de neerslagsommen, omdat de rivierstand op een tijdstip veel meer beïnvloed wordt door zijn voorganger dan de neerslagsom. De atmosferische druk is slechts genomen op hetzelfde tijdstip als de grondwaterpotentiaal.

Hieraan ligt de verwachting ten grondslag dat als de luchtdruk al invloed heeft, deze hiermee voldoende in rekening is gebracht.

De rivierstanden worden in het vervolg aangeduid met  $R$ , de neerslagsommen met  $N$ , de atmosferische druk met  $D$  en de grondwaterpotentiaal met  $P$ .

#### A factoranalyse

Voor de berekeningen worden de variabelen getransformeerd volgens

$$FF_i = \frac{F_i - \bar{F}}{S_F}$$

waarin

$F_i$  de waarneming

$\bar{F}$  het rekenkundig gemiddelde van  $F$

$S_F$  de standaardafwijking van  $F$

De gebruikte getransformeerde variabelen worden aangeduid met  $RR$ ,  $NN$ ,  $DD$  en  $PP$  naar analogie met het bovenstaande.

Het resultaat is:

$$PP_t = 0,79201 x_1 - 0,53627 x_2 + 0,01812 x_3 - 0,00600 x_4 \\ + 0,00201 x_5 - 0,14199 x_6$$

De nieuwe variabelen  $x_i$ , de factoren, zijn onderling orthogonaal. De eerste twee nemen  $(0,79201^2 + 0,53627^2) = 0,91$  ( $\times 100\%$ ) van de verklaring van  $PP_t$  voor hun rekening. Voor de overige 4 is dit slechts 2%. De rest van PP kan niet verklaard worden met dit model. In een poging de  $x_i$  te benoemen zoeken we de onafhankelijke variabelen met de hoogste coëfficiënt op  $x_i$ , in uitdrukkingen als de bovenstaande. Dit leidt met de twee eerste  $x_i$  tot

$$PPT = 0,76493 RR_{t-24} + 0,55070 RR_{t-156}$$

Deze laatste uitdrukking kunnen we weer terug transformeren naar de oorspronkelijke variabelen. Dit levert

$$P_t = 0,08709 R_{t-24} + 0,06525 R_{t-156} + 0,40176$$

Het lijkt wat merkwaardig dat de rivierstand 156 uur geleden zo'n grote invloed heeft. Hierop wordt bij de bespreking teruggekomen.

#### B stapsgewijze regressie

Uit het voorgaande is duidelijk geworden dat  $R_{t-24}$  en  $R_{t-156}$  belangrijk zijn. Het vertrouwen dat er geen toevoegingen meer mogelijk zijn is niet gerechtvaardigd.

We voeren als potentiële onafhankelijke in, de rivierstanden van  $t$  tot en met  $t-156$ ; de neerslagsommen van  $t$  tot en met  $t-84$  en de druk op tijdstip  $t$ .

Het resultaat is

$$\begin{aligned} P_t = & 0,09960 R_{t-24} + 0,03702 R_{t-156} \\ & + 0,00547 N_t + 0,00935 N_{t-12} + 0,00641 N_{t-24} \\ & + 0,00348 N_{t-36} + 0,00323 N_{t-48} + 0,00106 D_t \\ & - 0,64661 \end{aligned} \quad (1)$$

#### C regressie

De bewerkingen van factoranalyse en stapsgewijze regressie hebben tot effect dat alleen variabelen naar voren komen die goed passen in het verklaringsmodel. Het is echter voor te stellen dat de invloed van de neerslag nog verder in de tijd teruggaat. De bijbehorende coëfficiënten kunnen dan met de gebruikte criteria niet meer van nul worden onderscheiden.

Dat wil niet zeggen dat ze dan ook nul moeten zijn. Ook ten aanzien van de rivierstanden kan de vraag opkomen of er niet iets aan de hand kan zijn zoals bij de neerslagsommen.

Voor de berekeningen worden de rivierstanden opgenomen tot en met (t - 15x12 uur) en de neerslagsommen tot en met (t- 6x12 uur).

Dit zijn twee tijdstappen meer dan in de stapsgewijze regressie gevonden is.

De atmosferische druk blijft op  $t = 0$ .

De berekening levert op:

$$\begin{aligned}
 P_t = & - 0,10670 R_t & + 0,00560 N_t & + 0,00171 D_t \\
 & + 0,21701 R_{t-12} & + 0,01164 N_{t-12} & - 0,97712 \\
 & - 0,00269 R_{t-24} & + 0,00700 N_{t-24} & \\
 & + 0,07353 R_{t-36} & + 0,00333 N_{t-36} & \\
 & - 0,11003 R_{t-48} & + 0,00365 N_{t-48} & \\
 & + 0,21451 R_{t-60} & + 0,00352 N_{t-60} & \\
 & - 0,20950 R_{t-72} & + 0,00149 N_{t-72} & \\
 & + 0,11723 R_{t-84} & & \\
 & - 0,13323 R_{t-96} & & \\
 & + 0,13517 R_{t-108} & & \\
 & - 0,05464 R_{t-120} & & \\
 & + 0,10581 R_{t-132} & & \\
 & - 0,08781 R_{t-144} & & \\
 & + 0,03265 R_{t-156} & & \\
 & - 0,06657 R_{t-168} & & \\
 & + 0,07005 R_{t-180} & &
 \end{aligned}$$

De negatieve coëfficiënten van de rivierstanden zijn tegen de verwachting in. Opvallend is het alternerend gedrag. De laatste twee termen van de neerslagsom geven geen bijdrage meer aan de verklaring van de grondwater-potentiaal.

De coëfficiënten van de rivierstanden kunnen niet gehandhaafd worden. De wisseling van tekens kan veroorzaakt zijn door de onderlinge afhankelijkheid van de rivierstanden. Laten we  $R_{t-180}$  weg, dan veranderen we de invloed van deze afhankelijkheid. Het alternerend gedrag blijkt na deze ingreep verdwenen te zijn. Uit de voorgaande berekeningen zijn  $R_{t-24}$  en  $R_{t-156}$  als meestbelovende tevoorschijn gekomen. Kiezen we deze twee termen en de eerste vijf termen van de neerslagsommen, dan ontstaat de reeds op andere wijze gevonden uitdrukking (1). Overigens wekt het alternerend gedrag de indruk dat misschien een elegantere oplossing te vinden is, b.v. door introductie van afgeleiden naar de tijd, hetgeen neerkomt op een filtering van de meetgegevens.

#### 4.4.7. De residuen

Uitdrukking (1) is een benadering voor de gemeten grondwaterpotentialen. De wijze van rekenen waarmee uitdrukking (1) is vastgesteld, is slechts gerechtvaardigd als de residuen beschreven kunnen worden met de normaalverdeling. De variantie moet constant zijn en het gemiddelde gelijk aan nul.

De verschillen tussen gemeten en geschatte waarden zijn uitgezet in fig. 6, gerangschikt naar de tijd.

Uit de figuur is geen relatie te ontdekken. De resten zijn ook uitgezet tegen de gemeten waarde van de grondwaterpotentiaal (fig. 7). Over het gehele bereik van de gemeten waarde moet het gemiddelde gelijk zijn aan nul. Tevens moet de variantie rond het gemiddelde bij alle gemeten waarden gelijk zijn. Aan beide voorwaarden wordt voldaan volgens de figuur.

#### Controle

Bij de berekeningen zijn een aantal waarnemingen niet gebruikt, waarop uitdrukking (A) wel toegepast kan worden. Twee ervan zijn op 22 januari, welke datum niet voorkomt op de figuren 1 t/m 4. De overigen liggen tussen 31 januari en 6 februari. Passen we het model toe, dan worden op 22 januari afwijkingen gevonden van 18 en 19 cm, dat is vijf keer groter dan de grootste fout uit fig. 6. Bovendien geeft de uitdrukking (1) in alle 13 gevallen hogere grondwaterpotentialen aan dan gemeten zijn. Deze constatering geeft aanleiding de uitdrukking (1) kritisch te bezien.

Nu kan de uitdrukking in principe wel bruikbaar zijn, maar door de gekozen steekproef stelselmatig verkeerde schattingen bevatten voor de coëfficiënten. Ook kan de vorm van de uitdrukking niet juist zijn. De eerste mogelijkheid is enigszins onderzocht door de coëfficiënten opnieuw te berekenen op basis van waarnemingsreeksen, waarin de in de eerste alinea bedoelde gegevens zijn opgenomen. Hiermee is het beschikbare onafhankelijke toetsingsmateriaal niet meer als zodanig te gebruiken.

Er ontstaat:

$$\begin{aligned} P_t = & 0,11792 R_{t-24} & + 0,05515 R_{t-156} \\ & + 0,00505 N_t & + 0,00828 N_{t-12} & + 0,00636 N_{t-24} \\ & + 0,00432 N_{t-36} & + 0,00362 N_{t-48} & + 0,00033 D_t \\ & - 0,03571 \end{aligned}$$

De beide grootste fouten zijn gehalveerd. De invloed van D verdwijnt. De residuen zijn uitgezet in fig. 8 en 9, analoog aan fig. 6 en 7. Er is in fig. 8 een verband te zien met de tijd. Uit fig. 9 is een tendens op te merken dat de gemiddelde fout verschuift met de hoogte van de potentiaal.

#### 4.4.8. Bespreking

Voor de "verklaring" van de grondwaterpotentiaal is de rivierstand van 24 uur geleden een belangrijke component. Ze zijn tegen elkaar uitgezet in fig. 10. Het verband met de tijd is aangebracht door pijlen. De tijdstippen waarop neerslag is gevallen zijn aangegeven met een N. De indruk ontstaat dat hellingtangenten wel eens afhankelijk zouden kunnen zijn van de afgeleide naar de tijd. Als de rivierstanden weer omlaag gaan, dan blijft de grondwaterpotentiaal achter. Hier is verder niet aan gerekend.

In zowel uitdrukking (1) als (2) komt de term  $R(t-156)$  voor. Uit fig. 2 blijkt dat de toppen ongeveer  $2 \times 13$  tijdstappen uit elkaar liggen.

Laten we  $R(t-156)$  weg, dan verandert (B) in:

$$\begin{aligned} P_t = & 0,11836 R_{t-24} + 0,00983 N_t + 0,01367 N_{t-12} \\ & + 0,01132 N_{t-24} + 0,00941 N_{t-36} + 0,00813 N_{t-48} \\ & + 0,40827 \end{aligned} \quad (3)$$

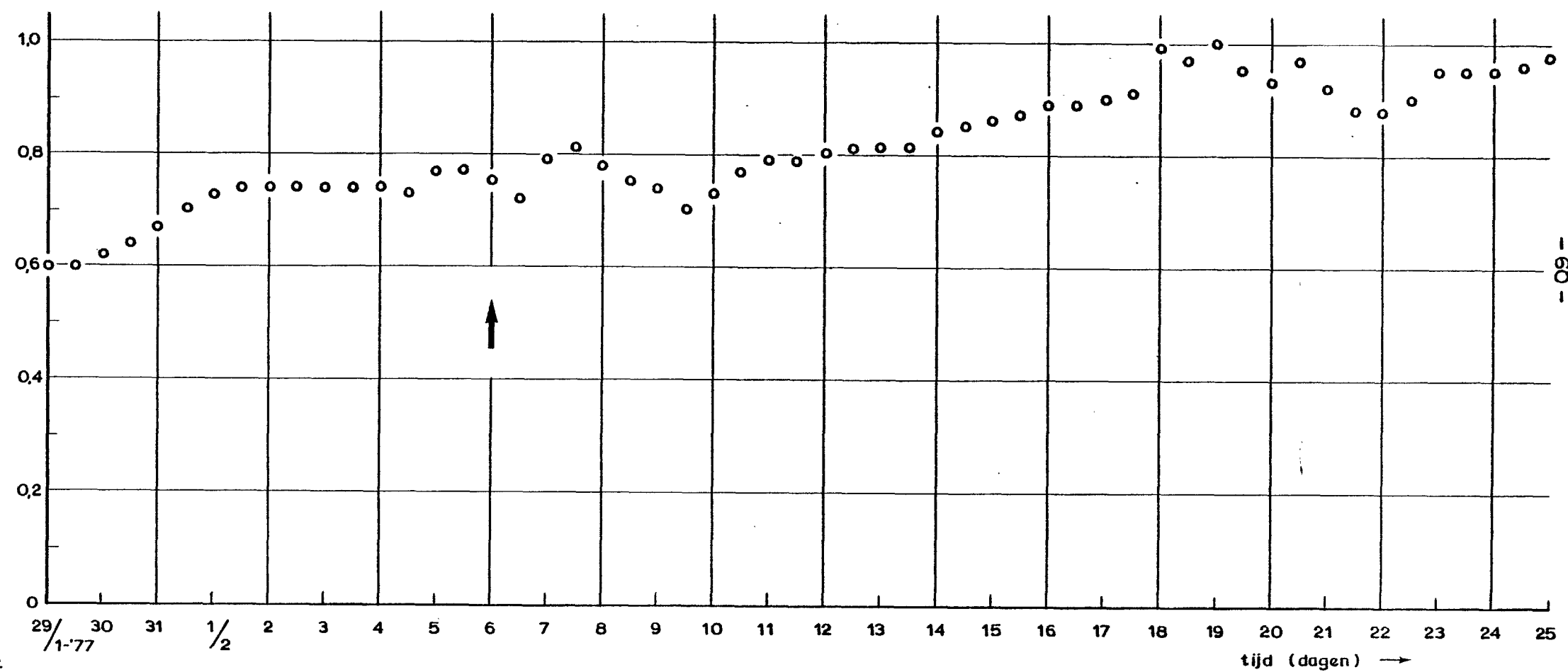
De residuen zijn uitgezet in fig. 11.

Ter completering van het beeld zijn de residuen in fig. 12 ook aangegeven ten opzichte van de gemeten grondwaterpotentiaal.

Wanneer op hydrologische overwegingen een lineair model acceptabel is, kan het model verbeterd worden door uitbreiding van het cijfermateriaal. Toepassing van de hier gevonden uitdrukkingen op lage rivierstanden is minder juist.

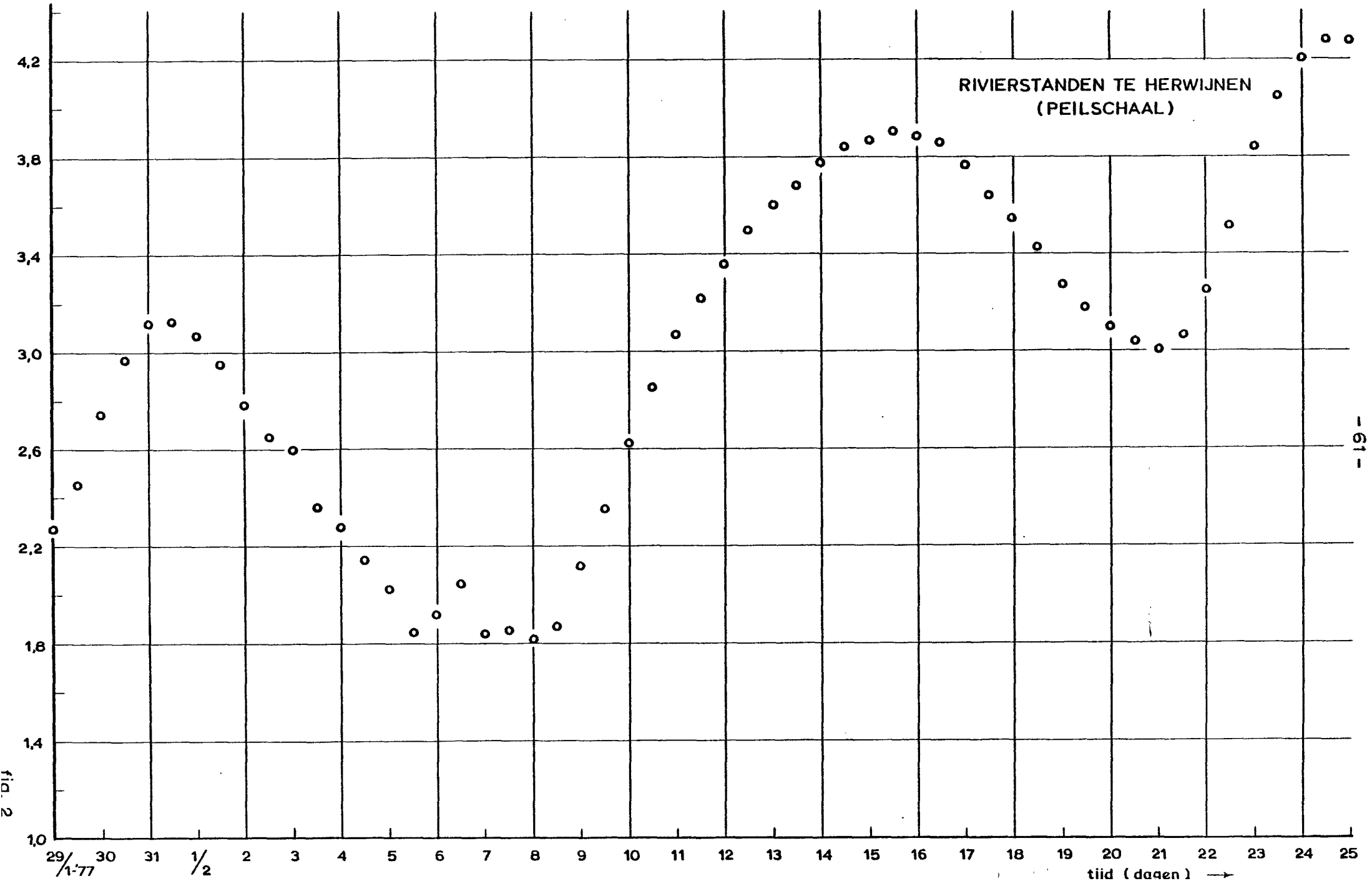
# POTENTIALBUIJS

m+N.A.P.



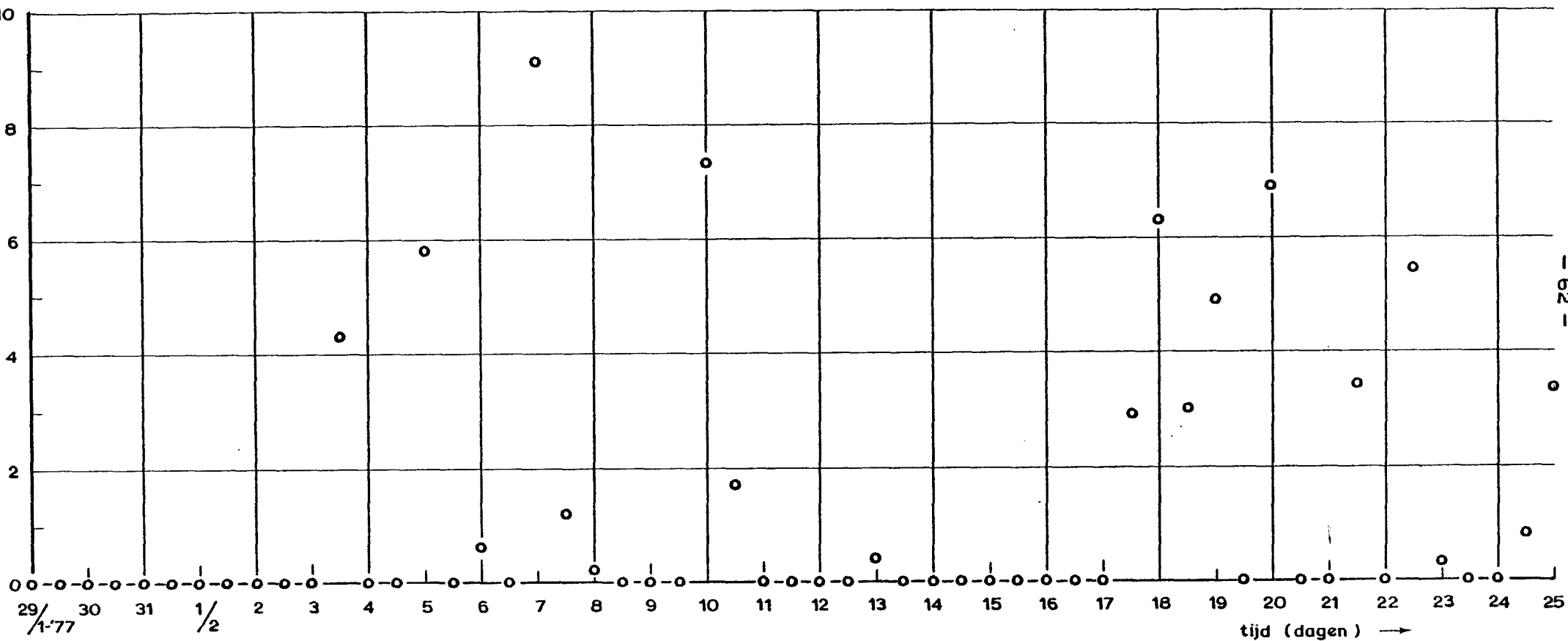
-60-

m+N.A.P.



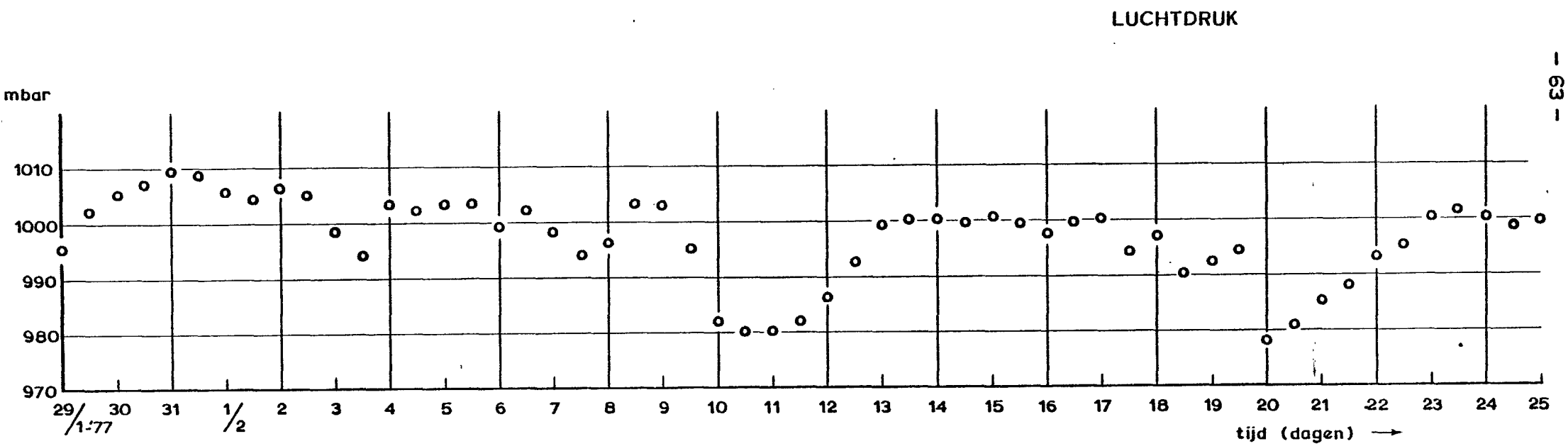
# NEERSLAGSOM

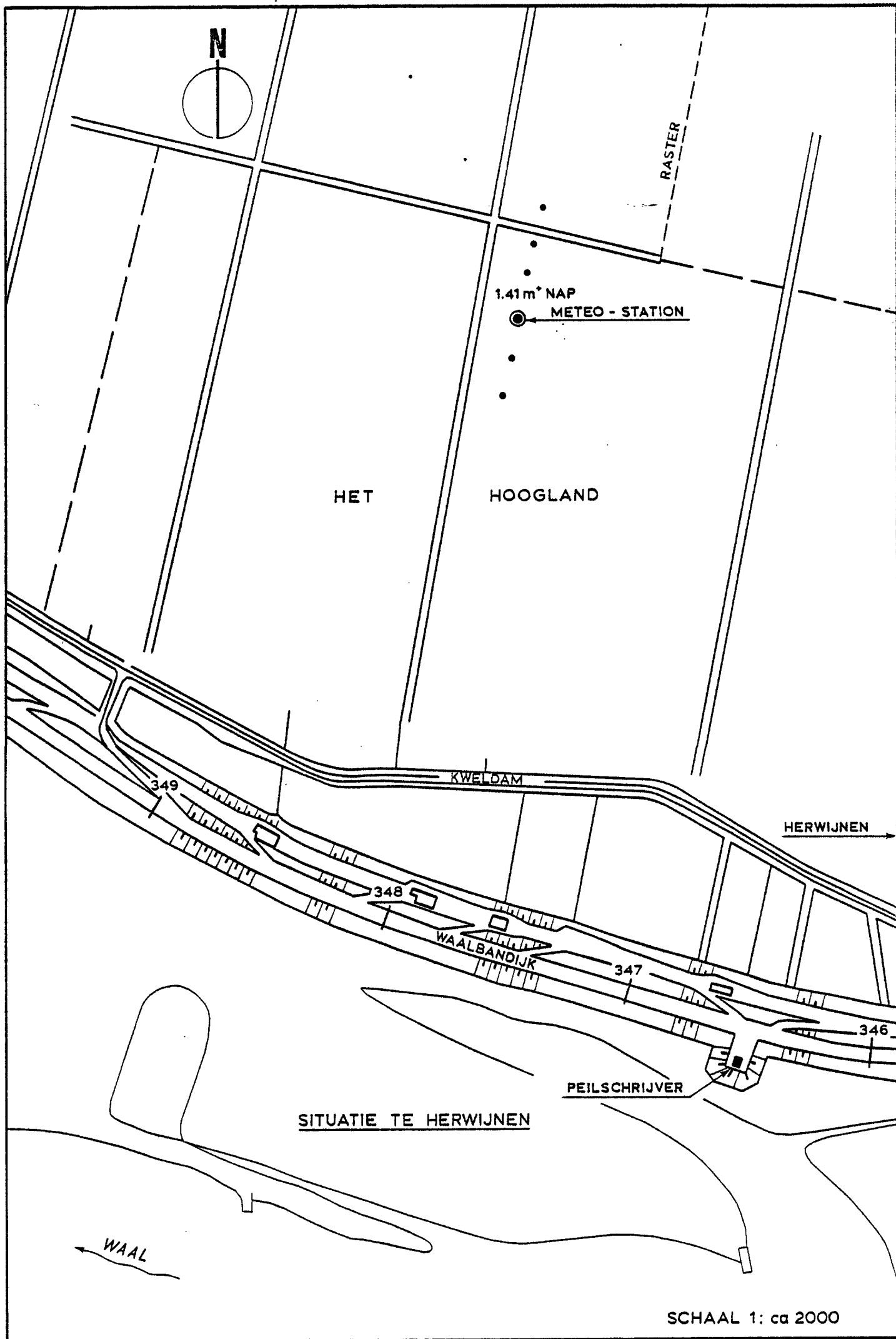
mm



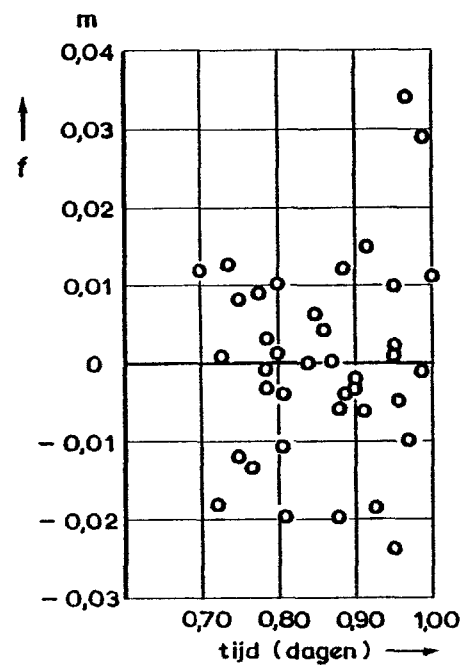
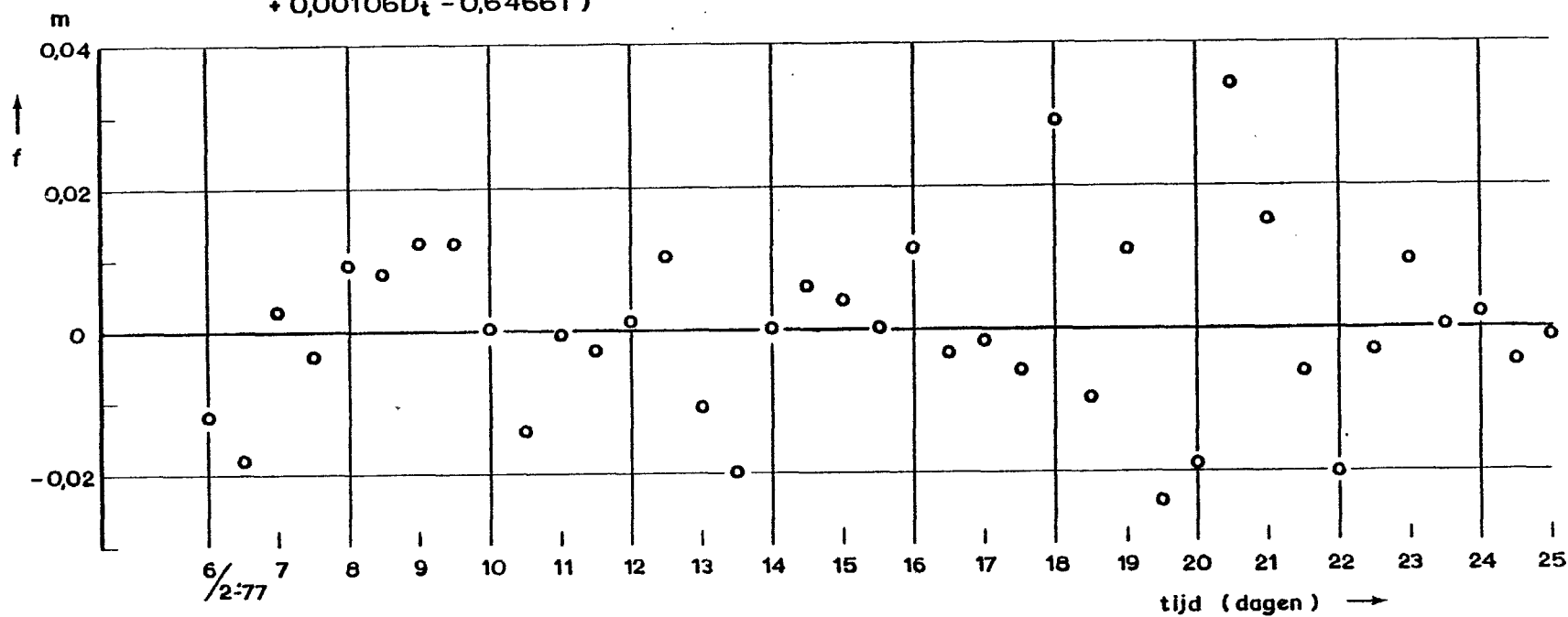
- 62 -





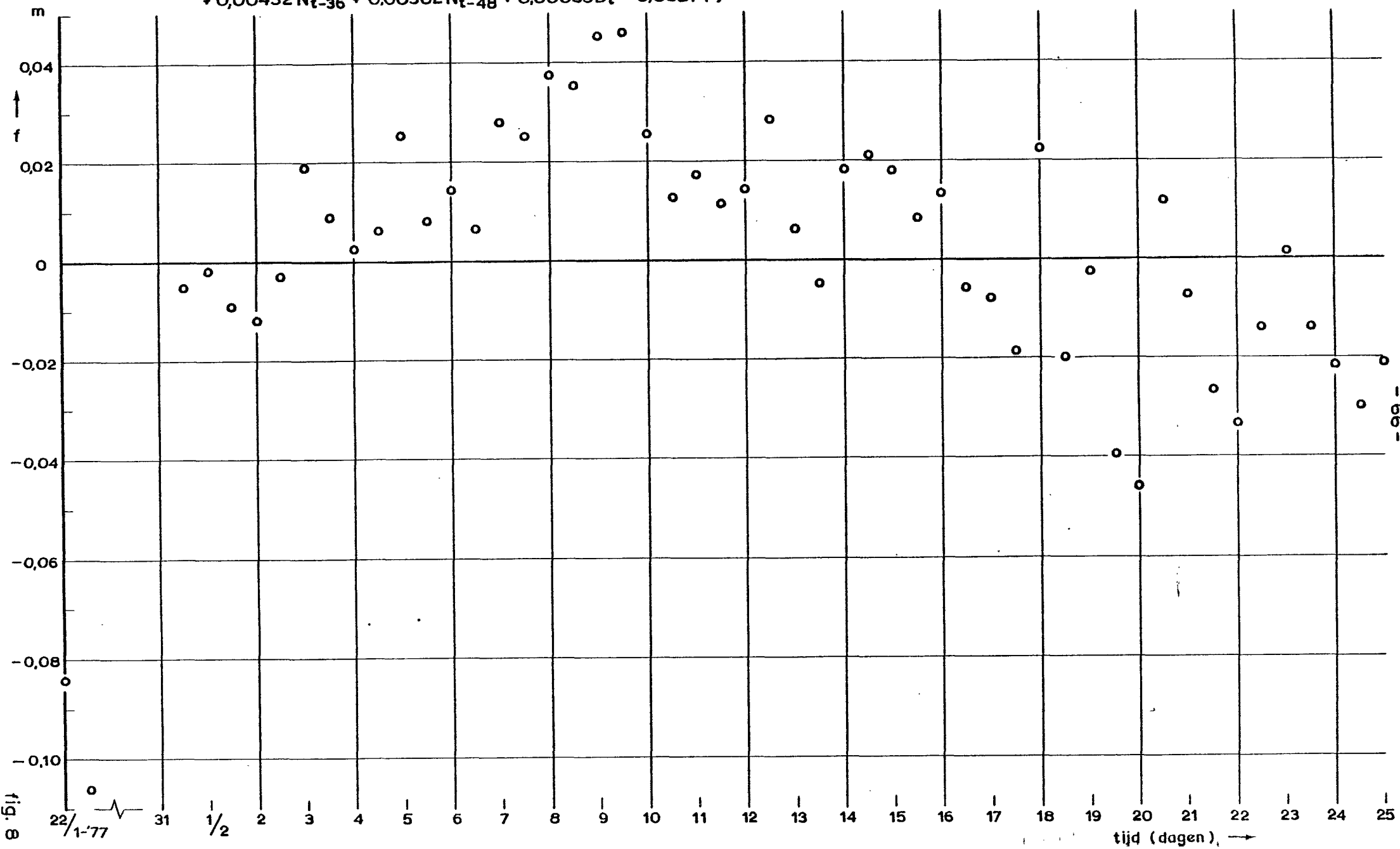


$$f = P_t - (0,09960R_{t-24} + 0,03702R_{t-156} + 0,00547N_t + 0,00935N_{t-12} + 0,00641N_{t-24} + 0,00348N_{t-36} + 0,00323N_{t-48} + 0,00106D_t - 0,64661)$$

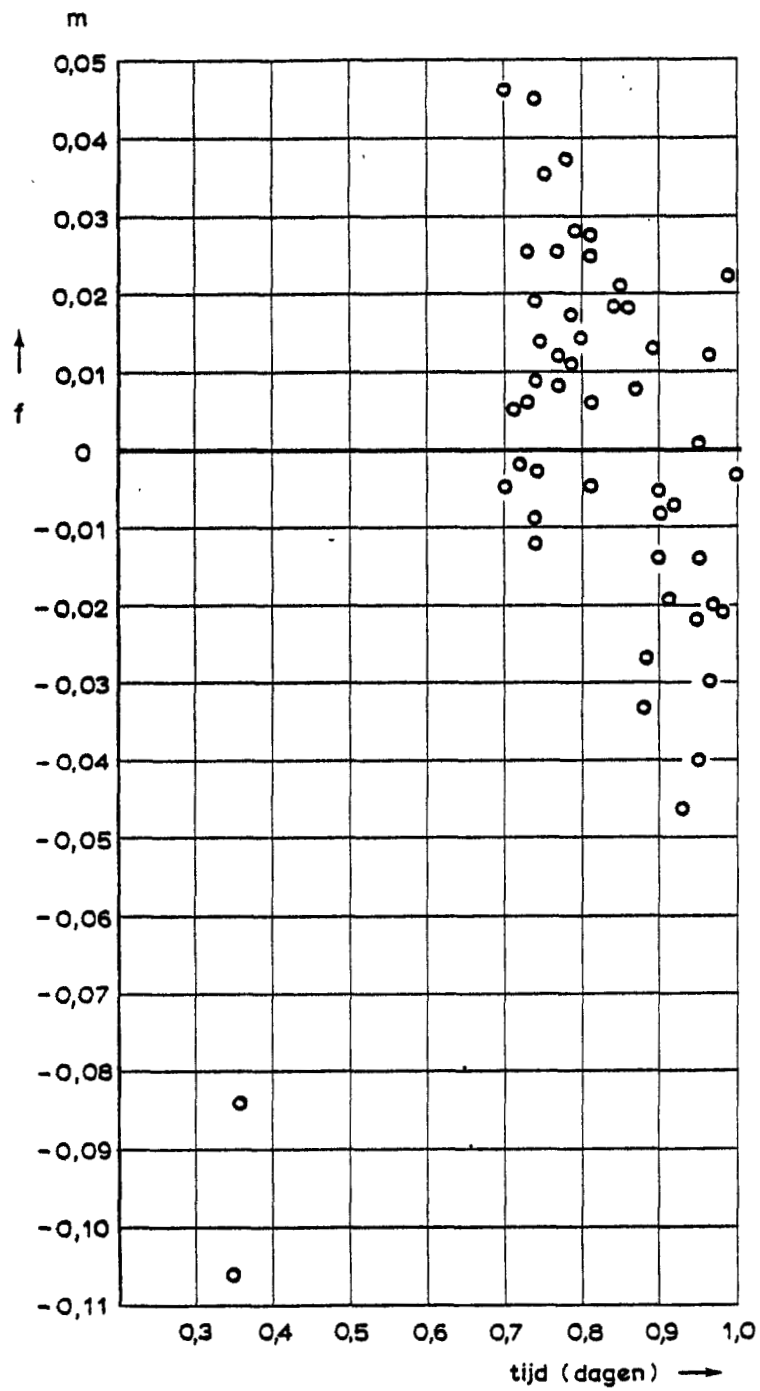


GEMETEN GRONDWATERPOTENTIAL

$$f = P_t - (0,11792R_{t-24} + 0,05515R_{t-156} + 0,00505N_t + 0,00828N_{t-12} + 0,00636N_{t-24} + 0,00432N_{t-36} + 0,00362N_{t-48} + 0,00033D_t - 0,03571)$$

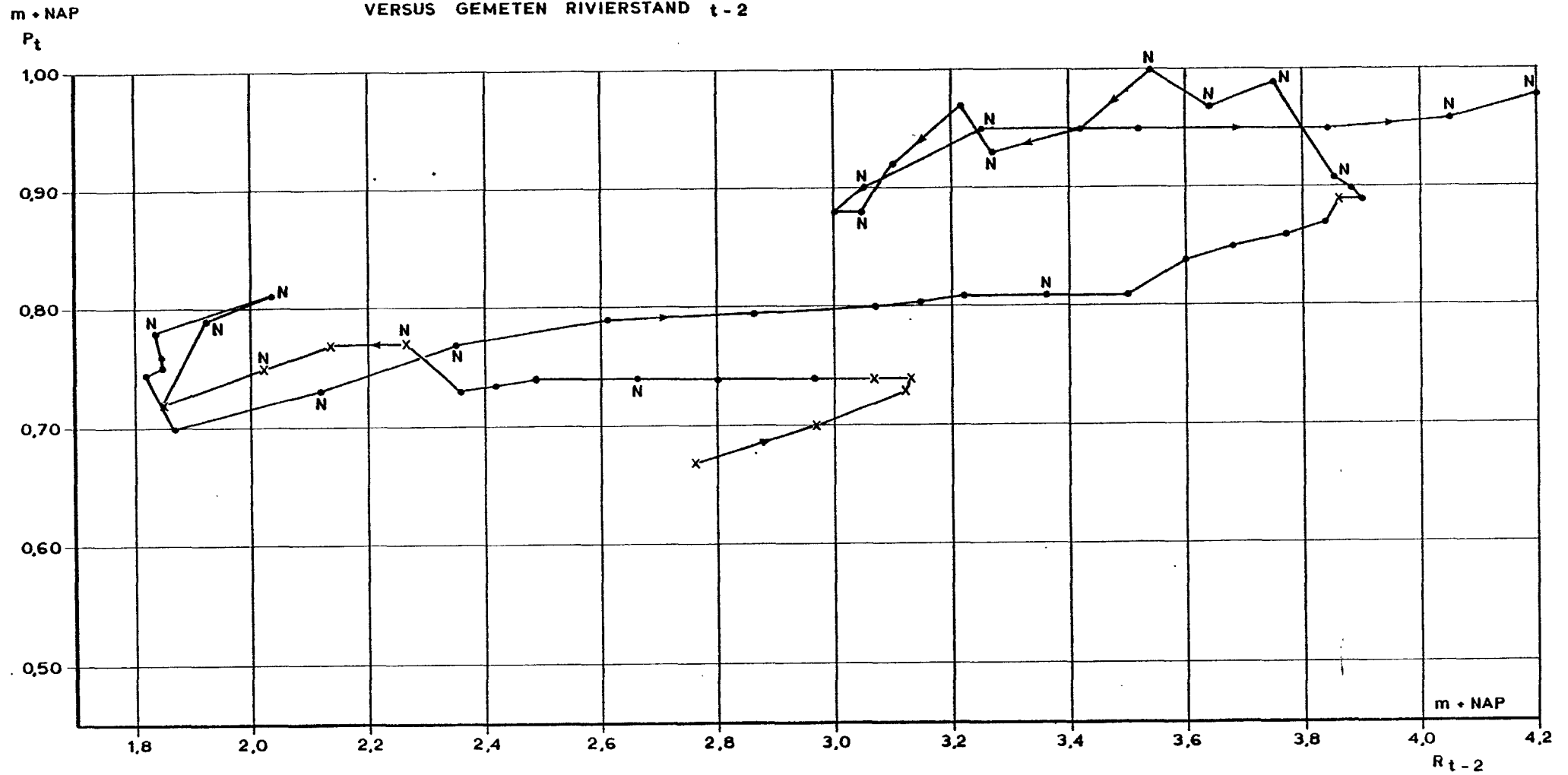


$$f = P_t - ( 0,11792 R_{t-24} + 0,05515 R_{t-156} + 0,00505 N_t + 0,00828 N_{t-12} + \\ + 0,00636 N_{t-24} + 0,00432 N_{t-36} + 0,00362 N_{t-48} + \\ + 0,00033 D_t - 0,03571 )$$

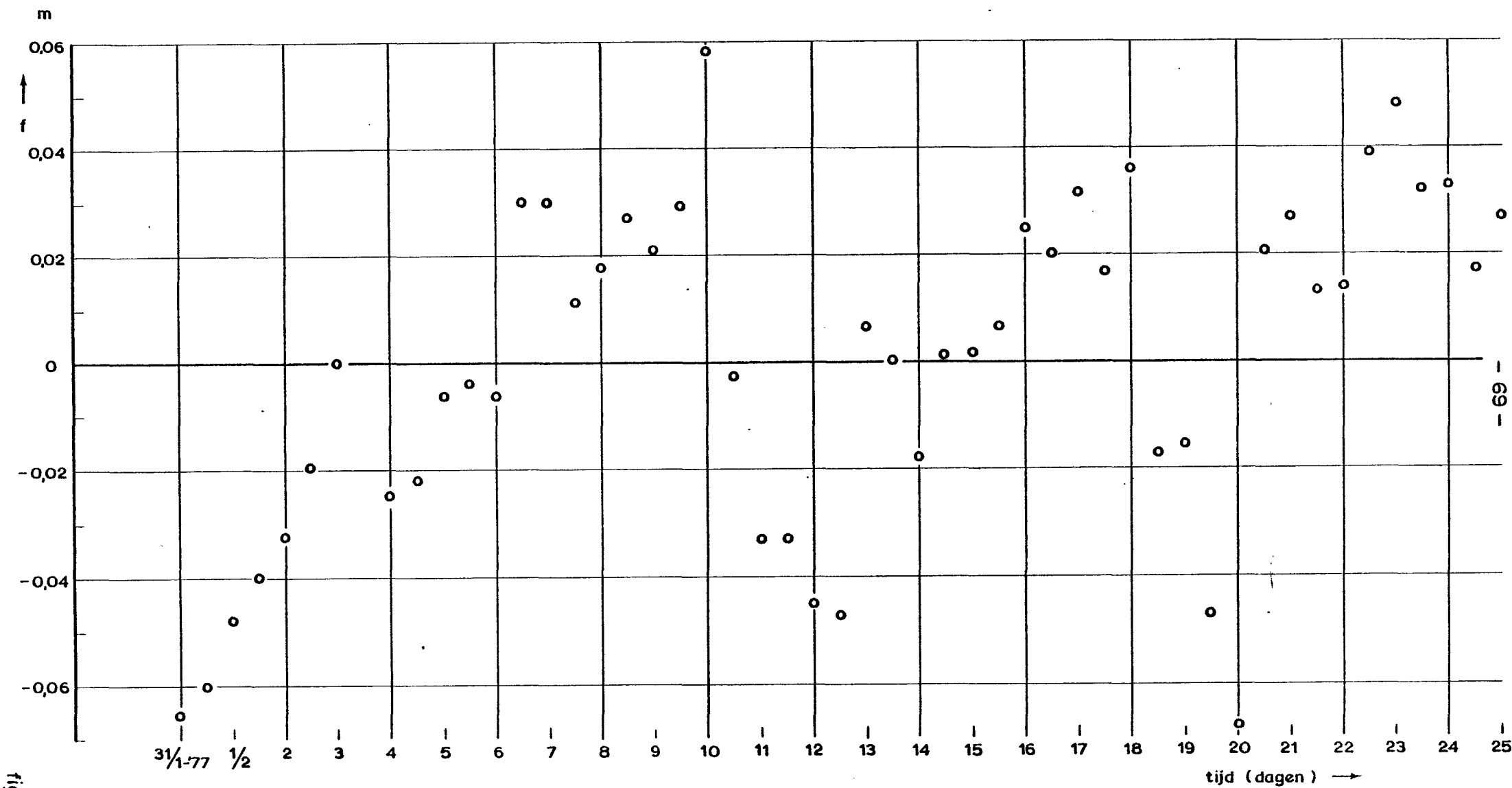


GEMETEN GRONDWATERPOTENTIALAAL

GEMETEN GRONDWATER - POTENTIAAL  $P_t$   
 VERSUS GEMETEN RIVIERSTAND  $t-2$



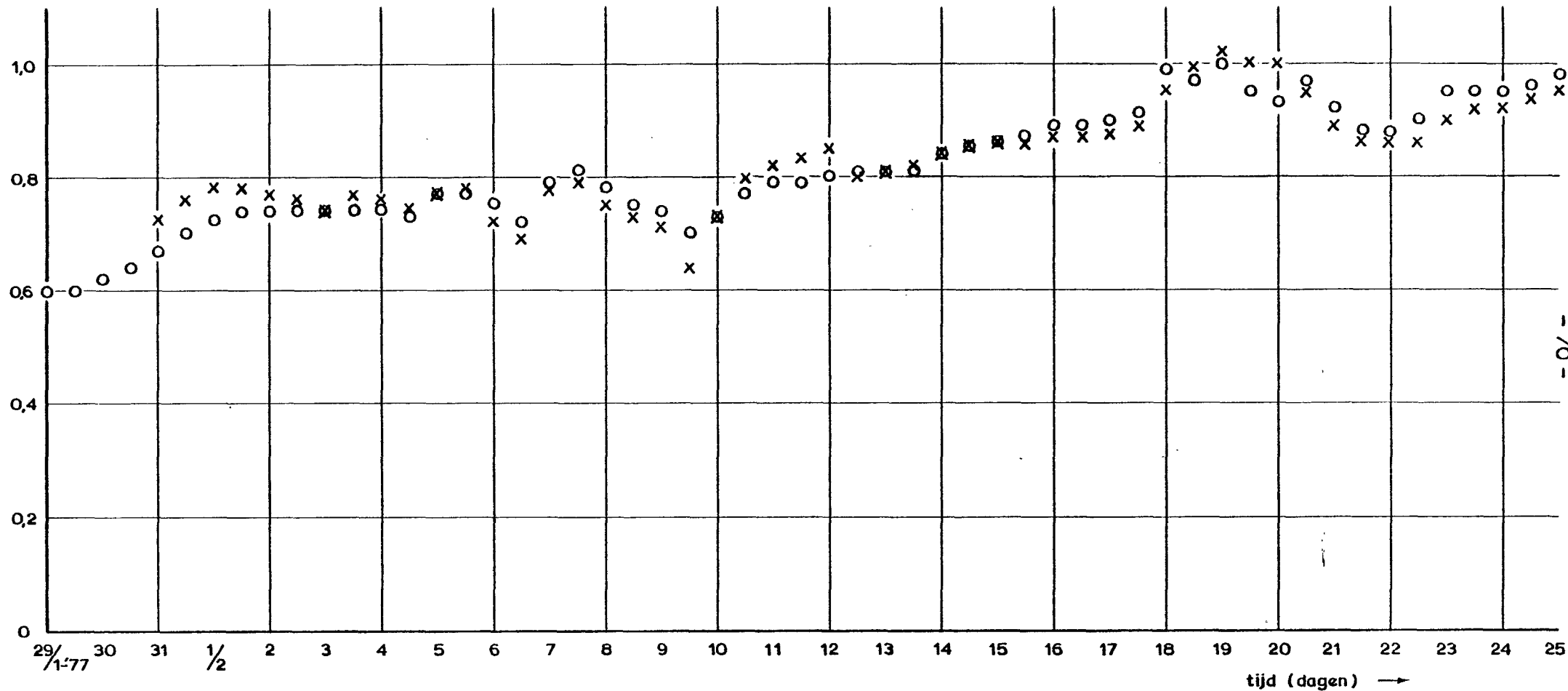
$$f_t = P_t - (0,11836 R_{t-24} + 0,00983 N_t + 0,01367 N_{t-12} + 0,01132 N_{t-24} + 0,00941 N_{t-36} + 0,00813 N_{t-48} + 0,40827)$$



O GEMETEN POTENTIALAAL BUIS (als fig.1)

$$x P_t = 0,11836 R_{t-24} + 0,00983 N_t + 0,01368 N_{t-12} + 0,01132 N_{t-24} + 0,00941 N_{t-36} + 0,00813 N_{t-48} + 0,40827$$

m+N.A.P.



-70-



#### 4.5. Luchtwaarneming

##### 4.5.1. Algemeen

Als doel werd gesteld onderzoek te verrichten naar kweldetectie en zo mogelijk toepassing voor een snelle inventarisatie van kwel over grotere gebieden. Het was noodzakelijk eerst inzicht te verkrijgen in de opbouw van de stralingstemperatuur en de momenten waarop het maximale temperatuurcontrast optreedt. Dit omvat het grootste gedeelte van het rapport. Omdat de nodige gegevens voorhanden waren, is als onderdeel een begin gemaakt met het verwerven van inzicht in automatische verwerking van de warmtebeelden met computers. Daarvoor was nodig het resulterende beeldsignaal digitaal op magneetband vast te leggen en dit later verder te verwerken. In deze paragraaf zullen de luchtwaarnemingen worden behandeld en wel de wijze van uitvoeren van vluchten alsook de verdere beeldinterpretatie en beeldverwerking. Resultaten werden verkregen met false color fotografie en warmtebeelden, waarover het navolgende handelt. In tabel I is een overzicht van de vluchten voor de warmtebeelden opgenomen.

##### 4.5.2. False color fotografie

False color fotografie wordt bedreven met standaard camera's en een speciale kleurenfilm. Deze film heeft drie kleurlagen, die gevoelig zijn in respectievelijk groen, rood en nabij infrarood ( $0,560 - 1,0 \mu\text{m}$ ). Om dit spectrale gebied weer te geven, worden de kleuren in de afbeelding verschoven naar  $0,450 - 0,760 \mu\text{m}$ , waardoor een valse kleur ontstaat. Groen wordt blauw, rood wordt groen en infrarood wordt rood weergegeven. Dit proces verklaart de naam. False color fotografie wordt veel toegepast voor gewasonderzoek, omdat daarmee verschillen in ontwikkelingstoestand van gewassen soms duidelijk herkenbaar kunnen zijn. Gewassen die een normale ontwikkeling doormaken, reflecteren de straling in het nabij-infrarood zeer sterk. Gewassen, die geen normale ontwikkeling doormaken, door omstandigheden in de bodem (teveel of te weinig vocht, onvoldoende voeding, etc.) of door ziekte, hebben dit hoge reflectievermogen veelal niet. In het beeld komt een dergelijk gewas dan ook rose tot uiting, terwijl een gezond gewas een rode kleur vertoont, vanwege de kleurverschuiving. Dit betekent dat verschillen in de oppervlaktelagen indirect kunnen worden waargenomen.

De false color fotografie werd in het onderzoek toegepast in de hoop dat een hoge rivierstand de kwelplekken zodanig had beïnvloed, dat op die gebieden de vegetatie i.c. gras, bij het begin van de groeicyclus in het voorjaar, verschillen in groeistadium zou vertonen en dus verschillend

Tabel I      Uitvoering van vluchten voor warmtebeelden 1977

| vlucht-<br>nummer | datum | tijd        | wind-<br>richting | wind--<br>snelheid<br>(kts) | luchttemperatuur (°C) |               |              |
|-------------------|-------|-------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------|--------------|
|                   |       |             |                   |                             | Schip-<br>hol         | nacht<br>max. | dag-<br>max. |
| 1113              | 31-1  | 11.47-13.53 | 150               | 10                          | 2                     | - 5           | 2.8          |
| 1114              | 1-2   | 10.41-12.23 | 170               | 7-8                         | 2-0                   | - 3.9         | 2.9          |
| 1115              | 1-2   | 14.37-16.12 | 160-180           | 11-10                       | 2                     | - 3.9         | 2.9          |
| 1116              | 3-2   | 11.37-13.37 | 160               | 21-20                       | 0-2                   | - 2           | 4.5          |
| 1117              | 16-2  | 14.02-15.41 | 110-190           | 5-4                         | 5-6                   | 3.3           | 6.5          |
| 1118              | 17-2  | 13.39-15.18 | 150-140           | 14-12                       | 5-4                   | 1.4           | 7.3          |
| 1119              | 22-2  | 13.17-15.08 | 200               | 16                          | 9                     | 4.5           | 11.6         |
| 1120              | 28-2  | 13.52-15.35 | 250-280           | 7                           | 4-5                   | - 4.3         | 5.8          |
| 1121              | 1-3   | 06.52-08.36 | 170-160           | 5-8                         | 0                     | - 0.5         | 5.1          |
| 1122              | 1-3   | 10.20-12.00 | 160-150           | 8-12                        | 2-4                   | - 0.5         | 5.1          |
| 1125              | 17-3  | 10.09-11.38 | 210-230           | 14-15                       | 11                    | -             | -            |
| 1126              | 17-3  | 13.26-15.32 | 230-210           | 15-14                       | 12-14                 | -             | -            |

in kleur op de beelden tevoorschijn zou komen. Dergelijke verschillen in groeistadium zijn zeer kort van duur, omdat het niet alleen de vochtigheid in de grond is die dit bepaalt, maar ook de zonne-instraling en de luchttemperatuur. Een juiste toepassing van deze fototechniek vergt daarom een goede kennis van de momenten waarop dergelijke contrasten optreden en wat de oorzaken zijn die deze verschillen voortbrengen. In dit onderzoek is false color fotografie gebruikt als een hulpmiddel bij de interpretatie van de warmtebeelden, hoewel op een geheel ander tijdstip werd waargenomen.

T.a.v. de kwaliteit van de informatie uit de false-colorbeelden moet worden opgemerkt, dat in de dagen direct voorafgaand aan de vlucht een langdurige regenperiode is voorafgegaan. Dit heeft de verschijnselen nogal genivelleerd. Omdat er te weinig relatie is met de informatie uit de warmtebeelden, die gestaafd kan worden, is het niet zinvol geacht om de interpretatie uit de false-colorbeelden in dit rapport op te nemen. De bruikbaarheid van deze techniek voor beeldwaarneming in perioden van hoge rivieraafvoer (eind winter) wordt bovendien niet groot geacht.

#### 4.5.3. Warmtebeelden

Voor het waarnemen van de stralingstemperatuurverschillen aan het grondoppervlak, wordt gebruik gemaakt van een z.g. infrared line scanner (IRLS) van het type Singer Reconofax VI, dat ingebouwd is in het Queen Air Laboratoriumvliegtuig van het NLR. Daarbij wordt een brede strook onder het vliegtuig systematisch lijn voor lijn afgetast met een ronddraaiende spiegel (zie fig. 1). De ontvangen straling (8 - 14 m) wordt naar een daarvoor gevoelig element geleid, dat een spanning afgeeft. De fluctuaties in de straling variëren de afgegeven spanning. Na versterking wordt de afgegeven spanning weer omgezet in een lichtsignaal, dat varieert met de spanningsfluctuaties. Dit lichtsignaal wordt op een lichtgevoelige film geprojecteerd, die evenredig met de snelheid van het vliegtuig eenparig wordt getransporteerd. Op deze wijze wordt een beeld van het afgetaste terrein opgebouwd, in termen van temperatuurverschillen. De stralingstemperatuur op de wijze gemeten is een relatieve temperatuur.

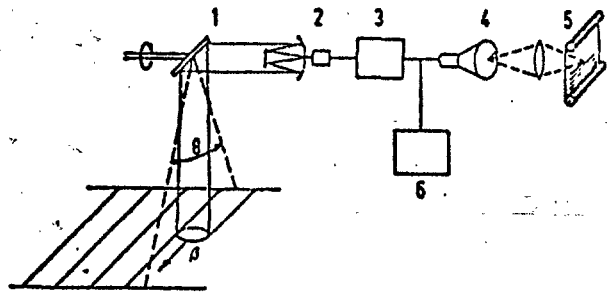


Fig. 1. Principe van de infrared line scanner (IRLS)

- 1) aftasten met spiegelsysteem, 2) detector, 3) versterker,
- 4) kathodestraalbuis waarop de intensiteitsgemoduleerde lijn zichtbaar wordt, 5) lichtgevoelige film, 6) signaalrecorder.

Het signaal van het stralingsgevoelige element wordt ook op magneetband (FM) geregistreerd. Dit heeft als voordeel dat het totale temperatuursbereik van het systeem volledig wordt benut, hetgeen bij beeldvorming op film maar ten dele mogelijk is.

Voor het waarnemen van kwelplekken heeft men een redelijk groot geometrisch scheidend vermogen nodig, terwijl een laag thermisch scheidend vermogen veelal toelaatbaar is. Dit laatste vanwege het grote temperatuurverschil tussen grondwater en oppervlaktetemperatuur ( $5 \text{ à } 7^{\circ}\text{C}$ , zie par. 4.6.).

Voor het waarnemen van zandbanen heeft men echter een groot thermisch scheidend vermogen nodig bij een relatief laag geometrisch scheidend vermogen. Dit vanwege het feit dat het temperatuurverschil hier klein is ( $1 - 1,5^{\circ}\text{C}$ , zie par. 4.2.) bij een groot oppervlak.

Voor de Reconofax is het geometrisch en het thermisch scheidend vermogen een vast gegeven. Een verbetering van het thermisch scheidend vermogen - ten koste overigens van het geometrisch scheidend vermogen - kan nog worden bereikt door het signaal te digitaliseren en m.b.v. een computer een ruimtelijke integratie van het signaal uit te voeren (zie par. 4.5.5.). Bovendien kunnen correcties worden doorgevoerd op het signaal, die nodig zijn t.g.v. atmosferische storingen. Men meet door een dikke luchtlaag heen die een eigen, afwijkende stralingstemperatuur heeft en bijdraagt aan het ontvangen signaal.

Naast het beeldsignaal zijn ook nog andere grootheden in het vliegtuig geregistreerd. Eén daarvan is de stralingstemperatuur, recht onder het vliegtuig gemeten, met een absoluut metende stralingsthermometer (BARNES IT4A), radiometer genoemd.

Dit instrument vergelijkt de inkomende stralingshoeveelheid met een inwendige temperatuurbron, die geijkt is.

Een vergelijk van dit signaal met de stralingstemperatuur in het midden van het beeld maakt de relatieve temperatuurverdeling in het beeld tot een absolute, binnen de meetnauwkeurigheid.

#### 4.5.5. Digitale verwerking

Het doel van de digitale verwerking van het scannerbeeld is tweeledig, namelijk:

- 1) verbetering van het contrast door een verlaging van het ruisniveau in het beeld;
  - 2) bepaling van de temperaturen in absolute grootte in het warmtebeeld.
- Er ontstaat dan in feite een temperatuurkaart van het gebied.

Door computerverwerking van het gedigitaliseerde beeld is het mogelijk met wiskundige berekeningen de gestelde doelen te bereiken op een gecontroleerde en nauwkeurige wijze.

Verlaging van het ruisniveau in het beeld kan op verscheidene manieren bereikt worden. In ons geval is ruimtelijke integratie de meest voor de hand liggende methode. Later zal blijken waarom.

De absolute groottebepaling van temperaturen in het beeld kan geschieden door regressie-analyse toe te passen onder gebruikmaking van meetgegevens van de Barnes IT-4a radiometer aan boord van het vliegtuig en vooral ook door gebruikmaking van temperatuurgegevens van het meetstation, de rivierwatertemperatuur, enz.

Voor de digitale verwerking van de warmtebeelden is in de onderhavige experimenten uitgegaan van het analoge videosignaal van de scanner, dat met behulp van een instrumentatierecorder in FM-mode op magneetband is vastgelegd. Bij het vastleggen van het videosignaal is informatie verloren gegaan: de frequentieband van het videosignaal bedraagt namelijk 0-200 KHz, terwijl de recorder slechts het gebied van 0-40 KHz registreert. Dit betekent voor het beeld een verminderde geometrische resolutie. Voor het onderhavige project (detectie van zandbanen) vormt dit echter geen probleem.

Alvorens tot digitaliseren over te kunnen gaan, moeten er enige berekeningen aan de te vormen beeldelementen verricht worden. Hiertoe is in fig. 1 het videosignaal getekend, zoals dat voor de A-D conversie is gebruikt.



Fig. 1. Het gemodificeerde videosignaal.

Het oorspronkelijke videosignaal gaat vergezeld van een synchronisatiesignaal. Deze twee signalen zijn nu tot één gecombineerd. Het spanningsniveau tussen de beeldlijnsignalen is constant en heeft een waarde die in de beeldlijnsignalen zelf niet kan voorkomen. Dit maakt scheiding en synchronisatie van de beeldlijnen in de computer mogelijk.

Het videosignaal beslaat een frequentieband van 0-40 KHz. De bemonsteringsfrequentie moet dus minimaal 80 KHz bedragen. De schrijftijd voor een beeldlijn bedraagt 2 ms; de scanner geeft 400 beeldlijnen per seconde af. In het digitale beeld zal een beeldlijn uit minimaal  $2 \text{ ms} \times 80 \text{ KHz} = 160$  beeldpunten bestaan. De randen van het beeld kunnen weggelaten worden, aangezien deze geen interessante informatie bieden en bovendien een grote geometrische vertekening vertonen. Door aan beide zijden 20 beeldpunten weg te laten, ontstaan beeldlijnen bestaande uit 120 beeldpunten. De schijnbare beeldhoek van de scanner bedraagt nu nog  $90^\circ$  in plaats van  $120^\circ$  voor de werkelijke beeldhoek. De schijnbare openingshoek bedraagt:

$$\frac{90^\circ}{123 \text{ beeldpunten}} = 0.75^\circ = 13 \text{ mrad.}$$

Vliegend op een hoogte van 300 meter correspondeert een beeldpunt met een lengte van ca. 5 meter in de scanrichting. Om tot vierkante beeldelementen te komen, moeten nu alle beeldlijnen, die gedurende een verplaatsing van 5 meter in de vliegrichting ontstaan, samengenomen worden. Bij een vliegsnelheid van 60 m/s zijn dit er ongeveer

$$\frac{5 \text{ m}}{60 \text{ m/s}} \times 400 \text{ s}^{-1} = 33 \text{ lijnen}$$

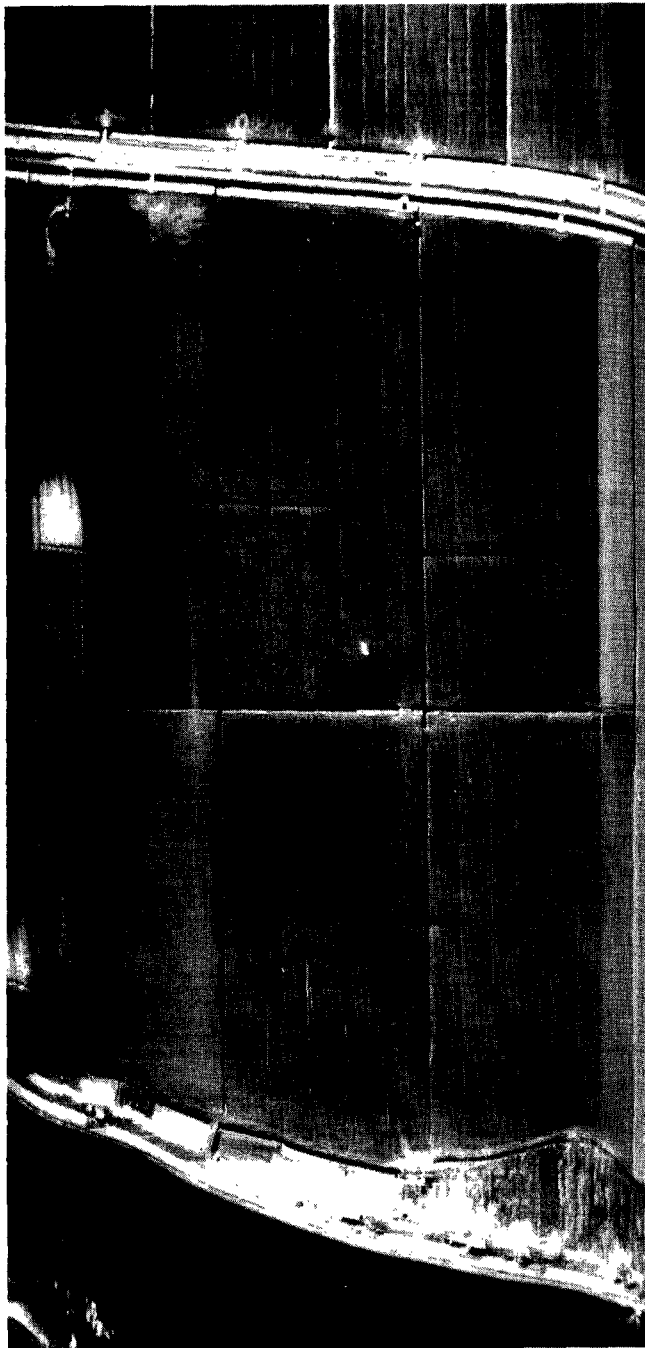
Het ruisniveau in het digitale beeld is nu afgenomen door de verminderde videobandbreedte en het samen nemen van een aantal beeldlijnen. De verbetering bedraagt een factor:

$$\sqrt{\frac{200 \text{ KHz} \times 33}{40 \text{ KHz}}} = 13.$$

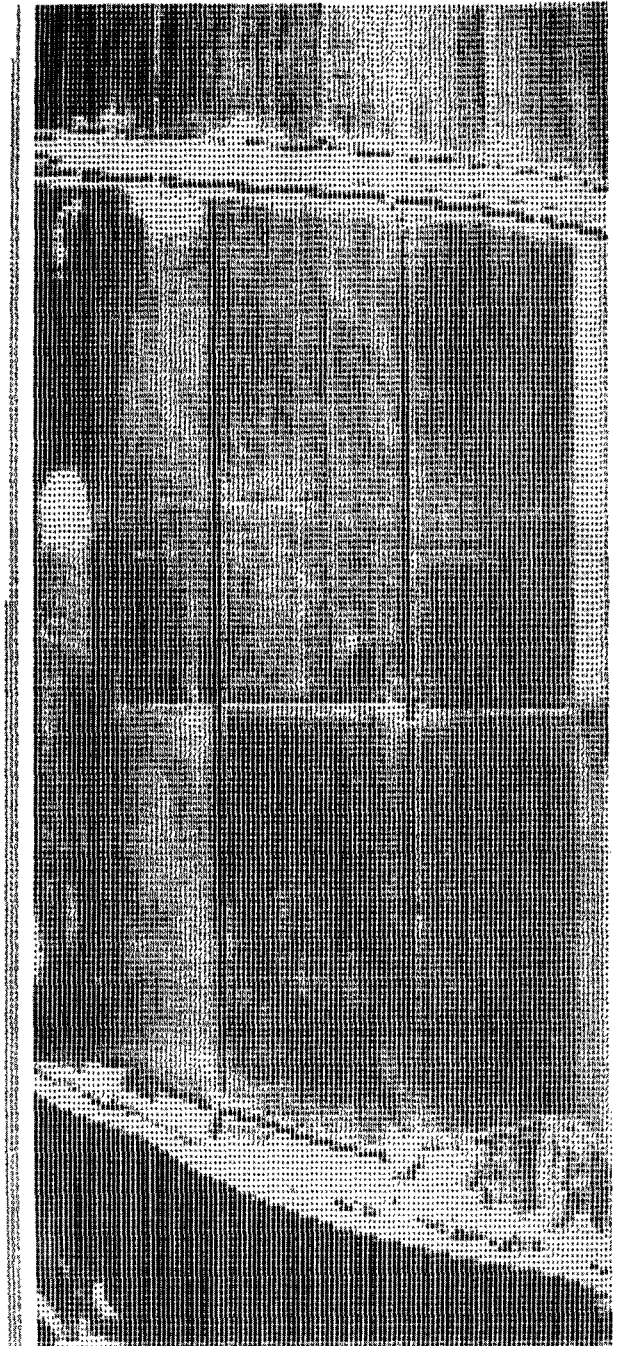
Het thermisch scheidend vermogen van de scanner bedraagt circa  $0,3^{\circ}\text{K}$ ; in het digitale beeld is dit verbeterd tot ongeveer  $0,025^{\circ}\text{K}$ . In het aldus gedigitaliseerde beeld is de verbetering goed waarneembaar. Door verhoging van het contrast worden details zichtbaar die in de film van de Reconofax in de ruis zijn verdwenen!

Foto 2 geeft een indruk van het verkregen resultaat. Bij gebrek aan een beeldverwerkend systeem is een regeldrukker als beeldvormend middel gebruikt. Het aantal onderscheiden grijsniveau's bedraagt 16. De werkelijk verkregen contrastomvang komt hierdoor niet goed tot uiting. De foto is opgebouwd uit  $223 \times 120$  beeldpunten. Foto 1 toont het overeenkomstige beeld van de Reconofax. Het verbeterde contrast ten koste van het geometrisch scheidend vermogen is duidelijk waarneembaar. De zandbaan is echter nog steeds niet te onderscheiden. Aangezien het beeld nu digitaal beschikbaar is op CCT (computer compatible tape), kan een temperatuurkaart van het gebied gemaakt worden, indien enkele op de grond gemeten referentiepunten aanwezig zijn.

Omdat hieruit echter geen verbeteringen of nieuwe resultaten te verwachten zijn, is dit deelonderzoek niet verder uitgevoerd. Ook de beelden van andere voor het project gemaakte vluchten toonden na digitalisering met betrekking tot de zandbaan geen resultaat.



1



2

Foto 1: IR opname van de meetsite gemaakte met de Reconofax scanner op 31-1-1977 rond 12.30 uur (vluchtnr. 1113).

(Zwart is warm, wit is koud)

Foto 2: Als foto 1, echter met gebruikmaking van digitale verwerkings-technieken waarbij ten koste van het geometrisch scheidend vermogen een verbetering van het dynamisch scheidende vermogen is verkregen. (Zwart is warm, wit is koud).



#### 4.6. Kweldetectie

##### 4.6.1. Probleemstelling en uitvoering

De probleemstelling die in dit hoofdstuk zal worden behandeld, is als volgt geformuleerd:

Is het mogelijk om met thermografie kwelplaatsen over een groot traject langs een rivier snel en op relatief eenvoudige wijze te localiseren en welke conclusies kunnen getrokken worden uit een vergelijk met waarnemingen in het veld verricht?

Als kwelplaats wordt daarbij aangeduid een plek van kleine omvang, waar het grondwater, onder invloed van een hoge rivierwaterstand vrijelijk aan het oppervlak treedt.

Voor waarneming met thermografie moest aan de volgende voorwaarden worden voldaan.

- 1) een voldoende groot temperatuurverschil tussen kwelwater en oppervlakte-temperatuur van de omliggende gronden;
- 2) een voldoende open zicht van boven af, dus geen bladerbedekking; dit betekent waarnemen in de winterperiode;
- 3) het optreden van een hoge rivierwaterstand, dus veelal in de winter en het vroege voorjaar.

Het gebied waar overheen gevlogen werd, is gekozen aan de Waal tussen Tiel en Gorkum. Voor een algemeen overzicht werd over dit gebied evenwijdig aan de dijk gevlogen op een hoogte van 1000 ft., waarbij een brede strook van meer dan 300 m werd afgetast. Regelmatige veldverkenning langs de rechteroever van het gehele gebied werd uitgevoerd.

Regelmatige meting van watertemperatuur met een kwikthermometer en stralingstemperatuur met een radiometer (Barnes PRT-5) werd langs de rechteroever, tussen Tiel en Gorkum uitgevoerd. De watertemperaturen in kwelplaatsen die met grondwaarnemingen konden worden gelocaliseerd, werden gemeten. In het traject tussen Tiel en Gorkum werden een drietal plaatsen gekozen waar in meer detail warmtebeelden werden opgenomen, door op een lagere hoogte (500 ft.) te vliegen dan bij het algemeen overzicht (1000 ft.) en de vluchtlijnen loodrecht op de dijk te kiezen. In Het Hoogland stond het grondstation opgesteld, waar o.a. grondtemperaturen werden geregistreerd.

In tabel I (par. 4.5.) zijn de data en tijden opgenomen, waarop de diverse vluchten werden uitgevoerd.

#### 4.6.2. Vergelijk tussen warmtebeelden en grondwaarnemingen

Uit de warmtebeelden (zowel overzicht als detail) van de locaties Tuil, Hellouw, Herwijnen, Het Hoogland en Dalem werden de kwelplaatsen in kaart gebracht. De temperatuur van het kwelwater was 5 tot 7 graden hoger dan de oppervlaktetemperatuur van de grond. Op dezelfde kaart werden de plaatsen die met de grondverkenning waren gelocaliseerd, aangegeven (zie respectievelijk figuren 3 t/m 7). In tabel II zijn de gegevens verzameld.

Tabel II. Aantal kwelplaatsen uit warmtebeelden en grondverkenningen.

| <u>Lokaties</u> | <u>Warmtebeeld</u> | <u>Grondverkenning</u> | <u>Samenvallend</u> |
|-----------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Tuil            | 9                  | 5                      | -                   |
| Hellouw *       | 9                  | 14                     | 5                   |
| Herwijnen       | 4                  | -                      | -                   |
| Het Hoogland ** | 14                 | 6                      | 3                   |
| Dalem           | 4                  | 1                      | -                   |
| Totalen:        | 40                 | 26                     | 8                   |

\* boomgaard en opstallen

\*\* bouwland en grasland

De gegevens over kwel in het gekozen traject tussen Tuil en Gorkum betreffen een momentopname bij een bepaalde rivierstand.

Het optreden van nieuwe kwelplaatsen hangt af van een verhoogde rivierwaterstand en vormt dus een wisselend verschijnsel.

De warmtebeelden geven nooit een volledige inventarisatie bij een bepaalde rivierstand, maar wel voor een zeer groot gedeelte. Verificatie van de resulterende kaart in het veld wordt bemoeilijkt, doordat de gegevens pas 1½ à 2 weken na opname beschikbaar komen, zodat het rivierpeil weer sterk is gezakt en dus ook de situatie is veranderd.

De inventarisatie is daarom echter nog wel goed bruikbaar om veldonderzoek te richten naar gebieden die een hoog aantal kwelplaatsen vertonen.

Uit Tabel II blijkt, dat er een verschil zit in het aantal kwelplaatsen op de diverse locaties, die soms bij de grondwaarneming hoger is dan bij

de warmtebeelden of omgekeerd. Gaan we na wat voor soort bedekking het betreft, dan zijn de verschillen redelijk verklaarbaar. Bij Hellowou betreft het b.v. veel boomgaard en opstallen, hetgeen voor de thermografie obstakels vormt.

Men kijkt er niet altijd loodrecht van boven in.

Daarentegen geeft Het Hoogland een beter resultaat te zien voor de warmtebeelden, omdat het daar hoofdzakelijk bouwgrond en weiland betreft, dus open gebieden.

Bij Tuil, waar het een mengvorm met open stukken betreft, geeft de grondverkenning weer minder kwelplaatsen aan. Opmerkelijk is echter dat het in dit geval allemaal kwelplaatsen betreft, die op beider wijze apart zijn waargenomen. Dit is ook het geval in Herwijnen en Dalem, terwijl daar geen detailopnamen met warmtebeelden zijn gemaakt.

De verhouding van het aantal kwelplaatsen, bepaald met thermografie tot die uit grondverkenningen, is als 3 : 2. Indien we ons alleen tot de niet-gemeenschappelijke kwelplaatsen beperken zelfs als 2 : 1. Dit betekent dat de thermografie meer kwelplaatsen localiseerde dan men via de terreinverkenning heeft vastgelegd. Opgemerkt wordt dat voor deze doeleinden het niet nodig is veelvuldig op verschillende momenten van de dag te vliegen, doch dat met enkele vluchten op de juiste momenten kan worden volstaan. Wel is een "dichte" bedekking met vluchtlijnen gewenst. Het succes van de warmtebeelden kan groter zijn, indien het terrein minder "obstakels" bevat, zoals bebouwing en hoge groenbedekking en indien er voldoende "dichte" bedekking met vluchtlijnen is gekozen.

Verder zijn de grootte van de temperatuurverschillen tussen grondwater en oppervlaktetemperatuur en de mate van kwel mede bepalend. Indien de velden en bossen bedekt zijn met sneeuw, in de vroege ochtenduren of ook wel wanneer het vriest, kan men met thermografie succesvol werken.

#### 4.6.3. Conclusies

Het waarnemen van kwelplaatsen langs een rivier met behulp van thermografie is mogelijk gebleken. Het opsporen van kwelplaatsen is met name van belang bij hoge rivieraafvoeren, waarbij de zandmeevoerende wellen een bedreiging vormen voor de stabiliteit van de dijken. Onder deze omstandigheden dient een bewakingssysteem te functioneren dat betrouwbare informatie levert over alle gevaarlijke plekken. Voor dit laatste is thermografie niet geschikt, aangezien uitwendige omstandigheden de inzetbaarheid beïnvloeden. Dit betreft dan met name de bedekking van de

bodem door vegetatie (b.v. boomgaarden) waardoor bepaalde kwelplaatsen aan de waarneming kunnen worden onttrokken, en het mogelijk ontbreken van temperatuursverschillen van voldoende grootte tussen wel en omgeving. Dit laatste is uiteraard van belang om de wellen te kunnen waarnemen, en is afhankelijk van de weersomstandigheden. De achtergronden van de verschillen tussen de met behulp van thermografie waargenomen en de in het veld opgespoorde kwelplaatsen zijn niet grondig onderzocht. Verificatie in het veld van de met behulp van thermografie waargenomen wellen zou een noodzakelijke stap zijn in een dijkbewakingssysteem en maakt het toepassen van thermografie als zodanig extra moeilijk. Afgezien van deze verificatie zou al een interpretatietijd van 2 werkweken voor 15 km nodig zijn.

Concluderend kan worden gesteld, dat onder bepaalde (weers)omstandigheden op bepaalde plaatsen (geen hoge vegetatie) kwelplaatsen kunnen worden waargenomen met behulp van thermografie (bij de dan heersende rivierafvoer), maar deze techniek niet geschikt kan worden ingezet als dijkbewakingssysteem. Pogingen om met behulp van thermische opnamen met klei bedekte zandbanen te detecteren zijn niet geslaagd. Eventuele mogelijkheden op dit gebied zullen nader onderzocht moeten worden.

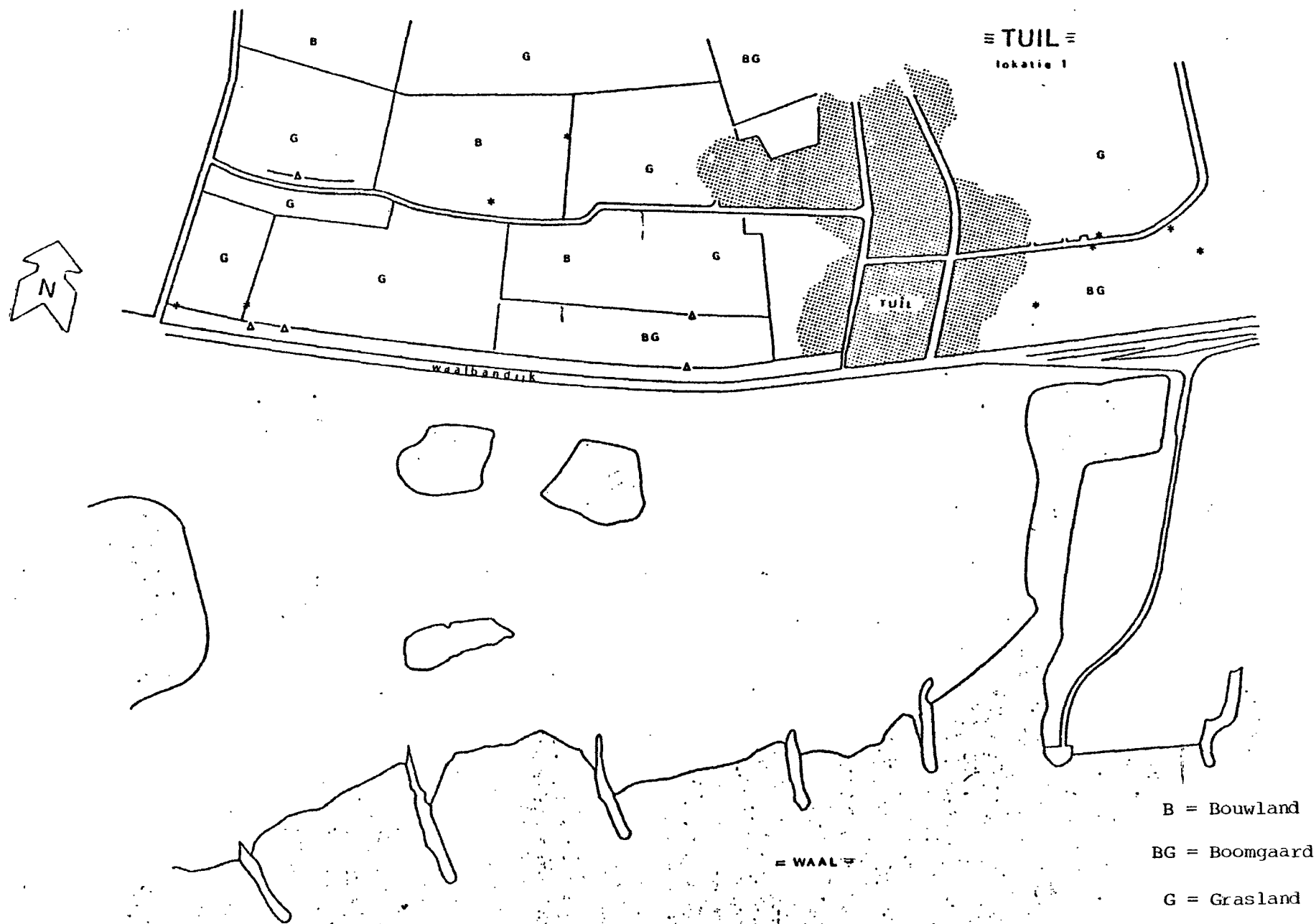


Fig. 3. Locatie Tuil, een vergelijk van warmtebeeld (\*\*) en veldverkenning (Δ) voor kwelplaatsen.



Fig. 4. Locatie Hellouw, een vergelijking van warmtebeeld (\*) en veldverkenning (Δ) voor de kwelplaatsen.

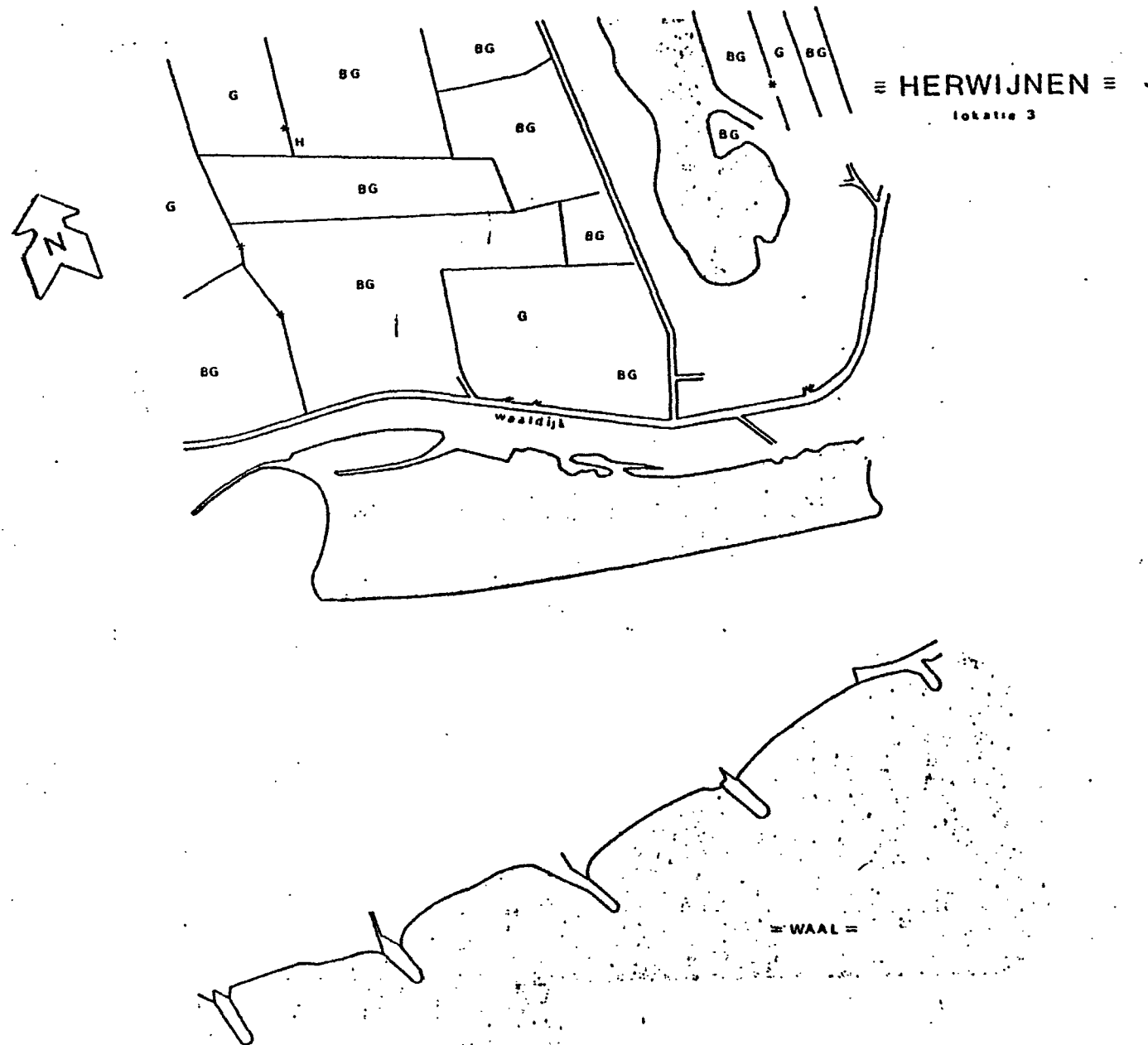


Fig. 5. Locatie Herwijnen, een vergelijk van warmtebeeld (\*) en veldverkenning (Δ) voor de kwelplaatsen.

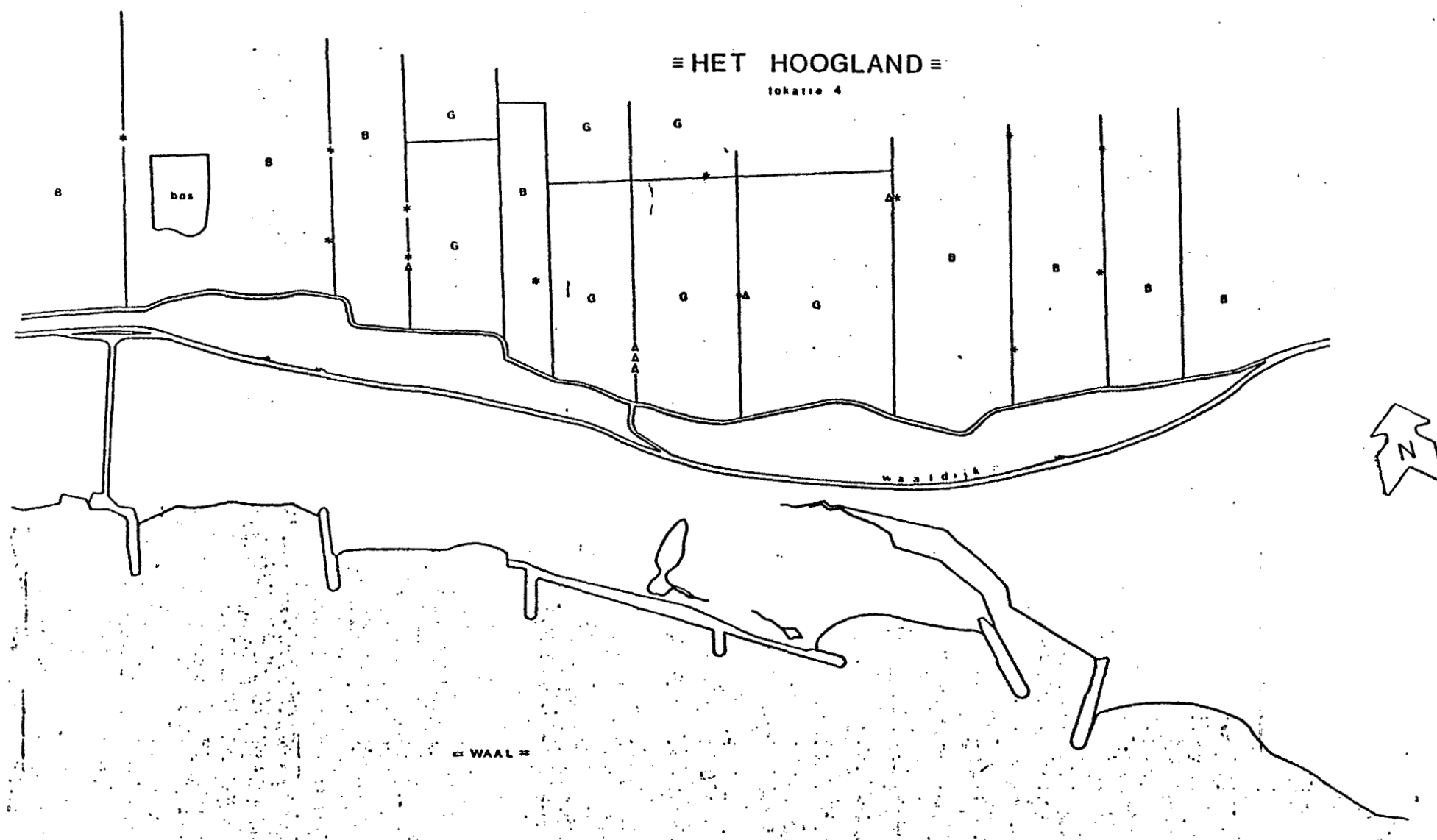
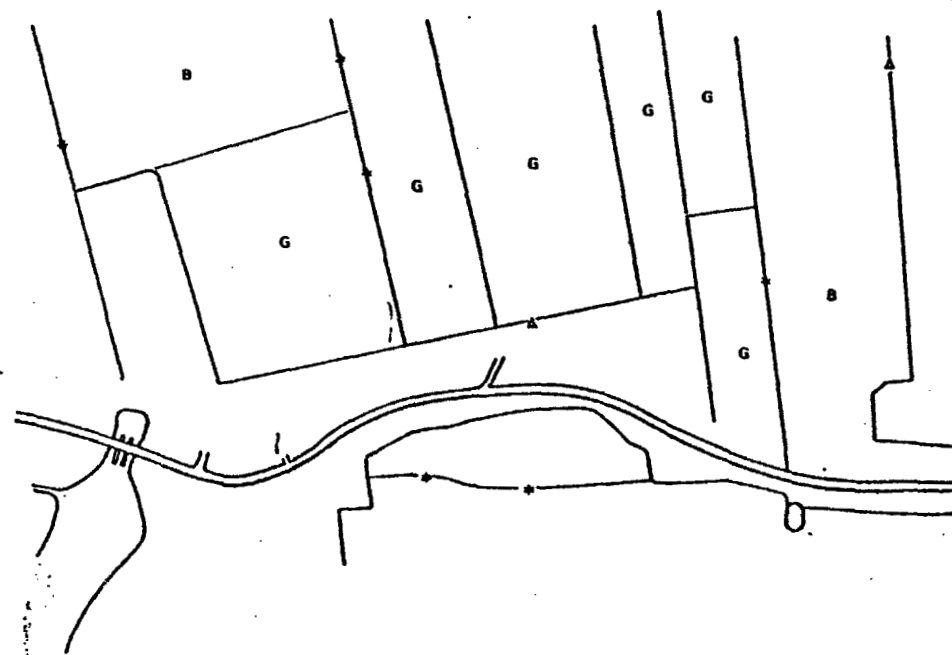
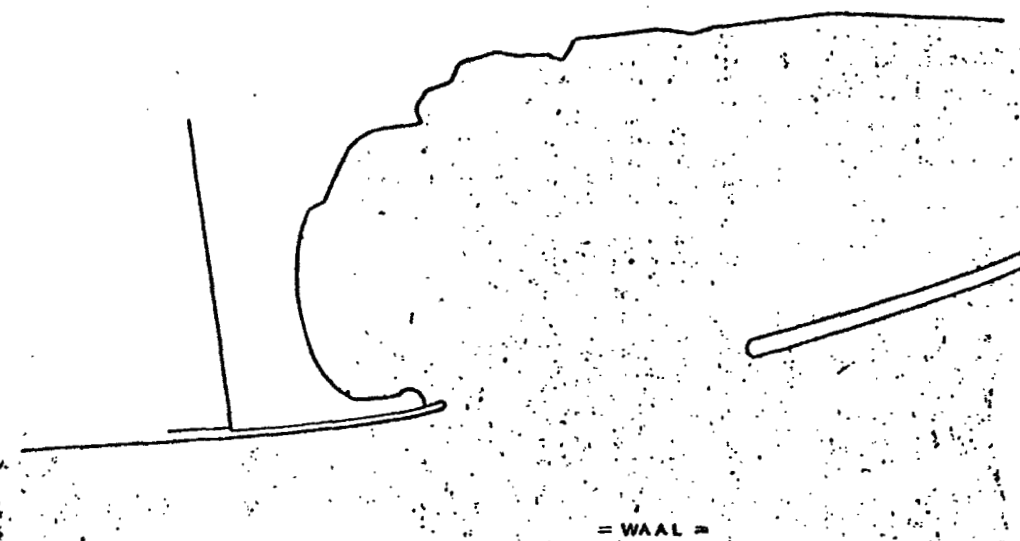


Fig. 6. Locatie Het Hoogland, een vergelijk van warmtebeelden (\*) en veldverkenning (Δ) voor kwelplaatsen.





≡ DALEM ≡  
lokatie 5



≡ WAAL ≡

Fig. 7. Locatie Dalem, een vergelijk van warmtebeelden (※) met veldverkenning (Δ) voor kwelplaatsen.

## 5. Stralingstemperatuurmodel

### 5.1. Samenvatting:

In het hiervolgende, worden enige modellen gepresenteerd, die ten doel hebben om gemeten faseverschillen in de oppervlaktetemperatuur tussen twee verschillende terreinen te kunnen verklaren. Deze modellen zijn alle nog van zeer eenvoudige aard. Daarom moeten de verkregen resultaten niet als te absoluut worden gezien, maar meer als tendensen. Gebleken is dat kleine verschillen in de bodemparameters het gemeten effect onvoldoende kunnen verklaren. Daarentegen is wel te voorschijn gekomen, dat het effect van de gewaslaag zeer groot is en dat daarom in toekomstige berekeningen de modelering van deze laag beslist ter hand moet worden genomen.

### 5.2. Doelstelling:

Het doel van de berekeningen die in dit hoofdstuk worden behandeld is na te gaan welke factoren grote invloed hebben op de geconstateerde faseverschillen van de stralingstemperatuur tussen klei en zand.

In een soortgelijk onderzoek in de Tielerwaard werd geconstateerd dat smalle zandbanen in een uitgestrekt kleigebied, grotendeels in gebruik als grasland, faseverschillen te zien geven.

Deze faseverschillen zijn zo groot, dat de contrasten tegen het einde van de ochtend verdwijnen om 's middags tegengesteld weer te voorschijn te komen. De vraag is nu in hoeverre dit verschijnsel uit het verschil in bodemeigenschappen verklaard kan worden. Omdat het smalle zandbanen in uitgestrekte terreinen van andere bodemgesteldheid ("klei") betreft, lijkt het waarschijnlijk dat de transporteigenschappen van de atmosfeer in hoofdzaak door de omgeving worden bepaald.

De grootste thermografische contrasten worden doorgaans gevonden op heldere dagen, wat er op wijst, dat de inkomende zonnestraling op de dag zelf de belangrijkste oorzaak is.

De inkomende kortgolvlige straling tezamen met de gedurende het etmaal weinig fluctuerende inkomende thermische straling van de atmosfeer dekken de verwarming en de afkoeling van de lucht, de verdamping, de verwarming en de afkoeling van de bodem en de thermische uitstraling. Nemen we de stralingstermen tezamen als de nettostraling, dan ligt het voor de hand dat tengevolge van een faseverschuiving van de stralingstemperatuur de faseverandering van de nettostraling gering zal zijn. Het is voor

oriënterende berekeningen dan ook niet bezwaarlijk de faseverschuiving van de nettostraling te berekenen t.o.v. de stralingstemperatuur en achteraf deze verschuiving als een faseverandering van de stralings-temperatuur te interpreteren, uiteraard met tegengesteld teken. Voor de gekozen onderzoeksperiode is de verdamping klein. Daarom wordt verondersteld dat de fase-invloed voor correctie van de nettostraling met de latente warmtestroom verwaarloosd mag worden. Om dit doel te verwezenlijken zijn een aantal modellen doorgerekend, die in het hiervolgende aan de orde komen. Om snel een overzicht te krijgen van de overeenkomsten en verschillen tussen deze modellen, is in figuur 1 het een en ander schematisch weergegeven. De resultaten van de modelberekeningen moeten vergeleken worden met werkelijk gemeten groot-heden, om deze op hun waarden te kunnen beoordelen. Daarom zijn in de figuren 2 t/m 7 gemeten temperaturen over 2 verschillende perioden weer-gegeven. De metingen vonden plaats op 2 verschillende proefvelden (veld I en veld II). Voor bijzonderheden omtrent de meetplaatsen en meetmethoden wordt verwezen naar de hoofdstukken 3 en 4 in dit rapport.

### 5.3. Toegepaste bodemparameters

Om te kunnen rekenen, moeten van de twee proefvelden de meest relevante bodemparameters bekend zijn. Deze zijn daarom na monsternamen in het laboratorium bepaald. In tabel 1, zijn voor beide proefvelden de temperatuurvereffeningscoëfficiënt  $a$  en de warmtecapaciteit  $C$  weergegeven.

Tabel 1. Enige gemeten bodemparameters

|                                             | veld I (klei)        | veld II (zandbaan)   |
|---------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| $a \text{ (m}^2 \text{ s}^{-1}\text{)}$     | $0,50 \cdot 10^{-6}$ | $0,45 \cdot 10^{-6}$ |
| $C \text{ (Jm}^{-3} \text{ K}^{-1}\text{)}$ | $2,9 \cdot 10^6$     | $3,0 \cdot 10^6$     |

$a$  = temperatuurvereffeningscoëfficiënt

$C$  = warmtecapaciteit

### 5.4. Model 1

De fysische achtergronden en de rekenwijze die ter grondslag liggen aan dit model, zijn beschreven in Appendix 1.

Voor een gekozen toestand van de atmosfeer werd met een sinusvormig ver-loopende oppervlakte-temperatuur met een amplitude van  $7,5^\circ\text{K}$  de som

$q_{se} + q_{co}$  berekend. De resultaten zijn in tabel 2 en fig. 8 weergegeven. Bovendien zijn in figuur 9 de temperatuur en de waterfluxdichtheden ( $q_{se} + q_{co}$ ) aan het maaiveld voor beide velden weergegeven. Hierbij is veld I als referentie genomen en op werkelijke klokketijd gezet.

Tabel 2

Amplitude en fase van  $q_{se} + q_{co}$ , bij halfoneindige atmosfeer en bodem, waarbij de bodem homogeen en isotroop is.

|                          | veld I (klei) | veld II (zandbaan) | verschil           |
|--------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| fase (rad)               | 0,456         | 0,451              | 0,005 (ca. 1 min.) |
| amplitude ( $W m^{-2}$ ) | 211,4         | 209,8              | 1,6                |
| $T_1$ (K)                | 7,5           | 7,5                | --                 |

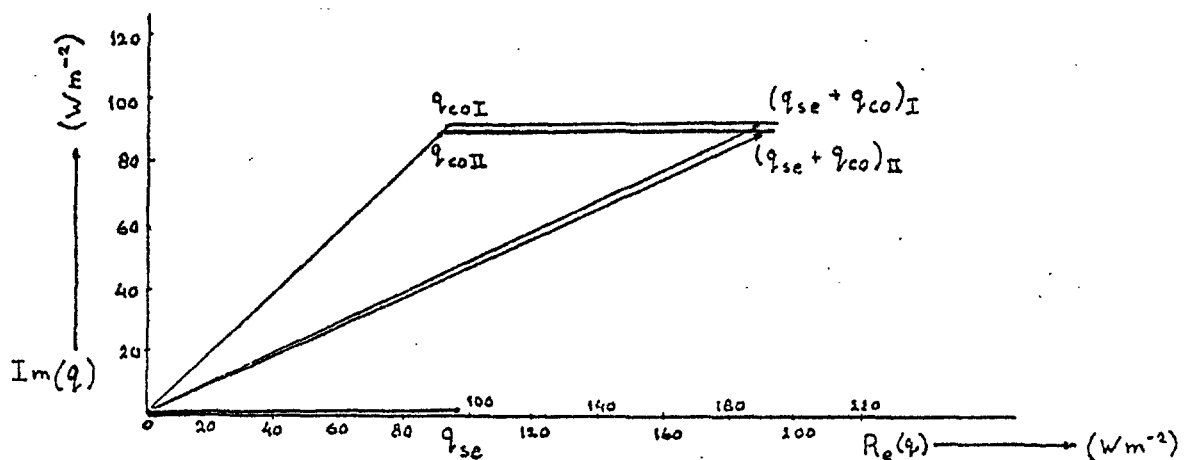


fig 8.

Het resultaat is duidelijk. Om gemeten faseverschillen van ca. 0,5 h te kunnen verklaren, moet het model er anders uit zien. Bovendien is de totale warmtestroom te groot.

### 5.5. Model 2

Het rekenmodel werd vervolgens uitgebreid met de volgende twee facetten:

- 1<sup>e</sup>. De atmosfeer werd niet meer halfoneindig verondersteld, maar eindig. Op de hoogte L werd een inversie verondersteld die alle uitwisseling onderdrukt. Als inversiehoogte werd gekozen  $L = 150$  m.
- 2<sup>e</sup>. Als temperatuur werd de grondtoon van de gemeten oppervlaktetemperatuur genomen.

Voor de volledige afleiding van dit model, wordt verwezen naar Appendix 2.

De warmtestroom in de atmosfeer wordt bij  $L = 150$  m duidelijk kleiner. Tengevolge van de kleinere temperatuurzwaai, is echter de bodemwarmtestroom ook sterk afgenomen en bijgevolg tevens de invloed hiervan op de fase. Enkele resultaten zijn te vinden in tabel 3.

Bovendien zijn in figuur 10 de temperatuur en de warmtestroomdichtheid ( $q_{se} + q_{co}$ ) aan het maaiveld alsmede de verschillen weergegeven.

Tabel 3

Enige met model 2 gevonden waarden

|                          | veld I (klei) | veld II (zandbaan) | verschil           |
|--------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| fase (rad)               | 0,826         | 0,830              | 0,004 (ca. 1 min.) |
| amplitude ( $W m^{-2}$ ) | 74,3          | 78,0               | 3,7                |
| $\bar{T}_1$ (K)          | 2,66          | 3,04               | -0,38              |

Zoals uit de resultaten blijkt, zijn de resultaten m.b.v. dit model nog niet bevredigend. Daarom werd het model verder uitgebreid.

#### 5.6. Model 3

Uit metingen in paragraaf 4.2. bleek uit het verloop van de bodemtemperaturen, dat er duidelijk sprake is van twee verschillende bodemlagen. Uit de metingen werden voor de toplaag van beide velden de bodemparameters en dikte bepaald om zo het bodemmodel als een twee-lagenmodel te kunnen beschrijven. Deze gevonden waarden zijn in tabel 4 weergegeven.

Tabel 4

De bodemgegevens voor de toplaag van velden I en II.

|                                                          | veld I (noord)      | veld II (zuid)      |
|----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| dempingsdiepte toplaag (m)                               | $2,5 \cdot 10^{-2}$ | $3,0 \cdot 10^{-2}$ |
| dikte toplaag (m)                                        | $5,5 \cdot 10^{-2}$ | $3,0 \cdot 10^{-2}$ |
| warmtegeleidingscoëff. ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | $7,0 \cdot 10^{-2}$ | $1,0 \cdot 10^{-1}$ |
| warmtecapaciteit ( $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ )       | $3,08 \cdot 10^6$   | $3,08 \cdot 10^6$   |

Voor de gebruikte formules voor de beschrijving van het twee-lagen model, wordt verwezen naar Appendix 3.

Enige met model 3 verkregen resultaten, zijn gegeven in tabel 5 en in figuur 11.

Tabel 5

Enige met model 3 gevonden waarden.

|                          | veld I (klei) | veld II (zandbaan) | verschil           |
|--------------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| fase (rad)               | 0,865         | 0,861              | -0,004 (ca. 1 min) |
| amplitude ( $W m^{-2}$ ) | 38,1          | 46,1               | 8,0                |
| $\hat{T}_1$ (K)          | 2,66          | 3,04               | -0,38              |

De resultaten zijn nog niet bevredigend, maar wel te verwachten. Wat is immers het geval? De dikte  $d$  van de toplaag is ongeveer even groot als de dempingsdiepte ervan. Dat houdt in dat de laag zich bijna als een half-oneindig medium gedraagt. Het resultaat daarvan is, dat de bodemwarmtestroom geringer wordt en dus de invloed op de totale warmtestroom geringer. De fase zelf verandert daardoor nauwelijks.

#### 5.7. Model 3<sup>a</sup>

Het leek vervolgens zinvol om het effect van het twee-lagen model verder uit te werken. Daarom werd voor één plek (veld I) het geheel nogmaals doorgerekend maar nu met een toplaag van slechts 10 mm. Bovendien werd hierbij behalve de grondtoon ook de eerste boventoon meegenomen. Enige resultaten met dit model berekend zijn gegeven in tabel 6 en figuur 12 en worden hier vergeleken met het één-laag model 2.

Tabel 6

Enige met model 3a gevonden waarden

|                                                   | één-laag model<br>(model 2) | twee-lagen model<br>(model 3a) | verschil           |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------|
| fase grondtoon (rad)                              | 0,826                       | 0,865                          | -0,039 (ca 9 min)  |
| fase 1 <sup>e</sup> boventoon (rad)               | 0,549                       | 0,633                          | -0,084 (ca 19 min) |
| amplitude grondtoon ( $W m^{-2}$ )                | 74,3                        | 38,2                           | 36,1               |
| amplitude 1 <sup>e</sup> boventoon ( $W m^{-2}$ ) | 20,0                        | 22,0                           | -2,0               |
| $\hat{T}_1$ (K)                                   | 2,66                        | 2,66                           | --                 |
| $\hat{T}_2$ (K)                                   | 1,41                        | 1,41                           | --                 |

Het verkregen resultaat lijkt hoopgevend. Wanneer het resultaat van figuur 12 vergeleken wordt met de metingen, bijvoorbeeld met die van figuur 5<sup>d</sup>, dan begint al wat overeenstemming te komen.

#### 5.8. Model 4

Vervolgens werd aan de modellering van het probleem verder gewerkt. De gewaslaag heeft een dempende invloed. De temperatuur werd zo goed mogelijk gemeten op het grondoppervlak. Dit houdt echter in dat de vertragende invloed van de gewaslaag er boven niet in rekening wordt gebracht. De stralingsuitwisseling vindt ten dele ook boven het grondoppervlak plaats. Het zou weleens kunnen zijn dat de tekorten van het model vooral gezocht moeten worden in een te grove benadering van de gewas- en strooisellaag.

Om hieromtrent aanwijzingen te krijgen werd verondersteld dat de temperatuur werd gemeten aan de bovenzijde van een halfoneindig medium (homogene, isotrope grond) maar aan de bovenzijde bedekt door een laagje van 10 mm met een dempingsdiepte zoals gemeten (paragraaf 4.2.). Aanleiding tot dit model was o.a. het feit dat de begroeiing op de kleilaag duidelijk veel ruwer was dan op de zandbaan.

Voor resultaten zie tabel 7, en figuur 13. De resultaten voor veld I voor zowel de grondtoon als de eerste boventoon zijn niet vergeleken met de resultaten verkregen met model 3a.

Tabel 7

Enige met model 4 verkregen resultaten.

|                                                   | twee-lagen model<br>(model 3a) | twee-lagen model<br>(model 4) | verschil          |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| fase grondtoon (rad)                              | 0,865                          | 0,611                         | 0,254 (ca 58 min) |
| fase 1 <sup>e</sup> boventoon (rad)               | 0,633                          | 0,462                         | 0,171 (ca 39 min) |
| amplitude grondtoon ( $W m^{-2}$ )                | 38,2                           | 48,2                          | 10,0              |
| amplitude 1 <sup>e</sup> boventoon ( $W m^{-2}$ ) | 22,0                           | 27,9                          | 5,9               |
| $\hat{T}_1$ (K)                                   | 2,66                           | 2,66                          | --                |
| $\hat{T}_2$ (K)                                   | 1,41                           | 1,41                          | --                |

Een vergelijking van beide modellen geeft een groot faseverschil te zien. Ook de vergelijking van de resultaten van figuur 13 met de metingen op het nulniveau vertonen een duidelijke overeenstemming (zie figuur 5<sup>d</sup>). Als conclusie mag hieraan verbonden worden, dat het zeer belangrijk is bij modelberekeningen de gewaslaag op de juiste wijze mee te nemen. Tot nu toe wordt bij modelsituaties altijd uitgegaan van een zogenaamde "platgeslagen" gewaslaag. Uit de laatste modelberekening blijkt overduidelijk, dat juist door deze gewaslaag een enorme faseverschuiving optreedt.

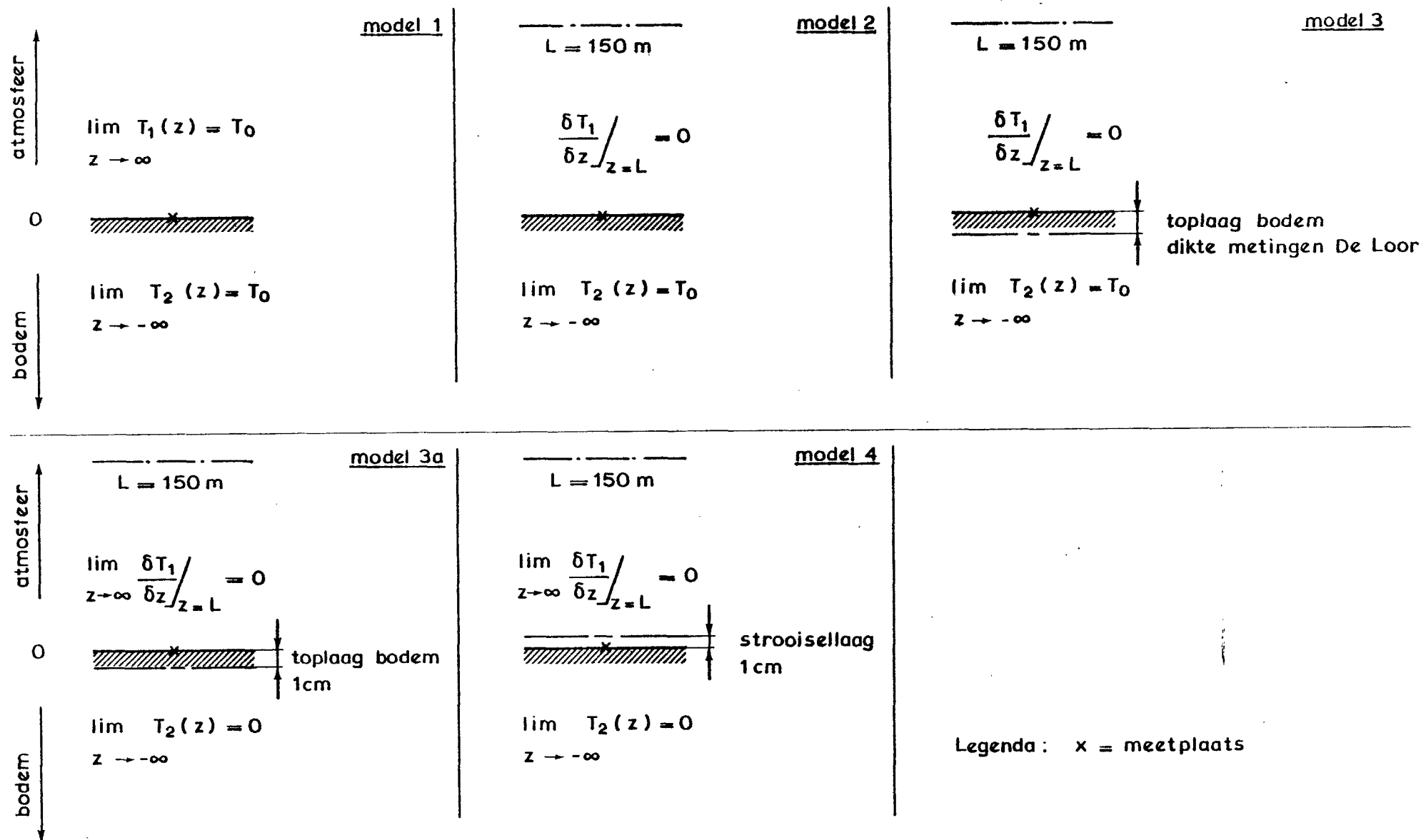
Dus modellering van deze laag mag voor het verklaren van allerlei processen en effecten niet achterwege worden gelaten.

Tenslotte werden de berekende warmtestromen, bepaald met model 4, vergeleken met de gemeten nettostraling, verminderd met de latente warmtestroomdichtheid. De gevonden waarden zijn in fig. 14 weergegeven.

In deze figuur is te zien, dat de orde van grootte goed overeenstemt. Wat wel opvalt is dat de gemeten en berekende waarden een groot faseverschil te zien geven. De belangrijkste reden hiervoor kan zijn dat bij de berekende waarden alleen rekening gehouden is met de grondtoon en de eerste boventoon, terwijl in de gemeten waarden alle mogelijke frequenties zitten. Dit heeft op de grootte van de zwaai weinig invloed, maar wel op de fase.



# OVERZICHT VAN DE VERSCHILLENDE MODELLEN



(K)  
↑  
 $\Delta T$

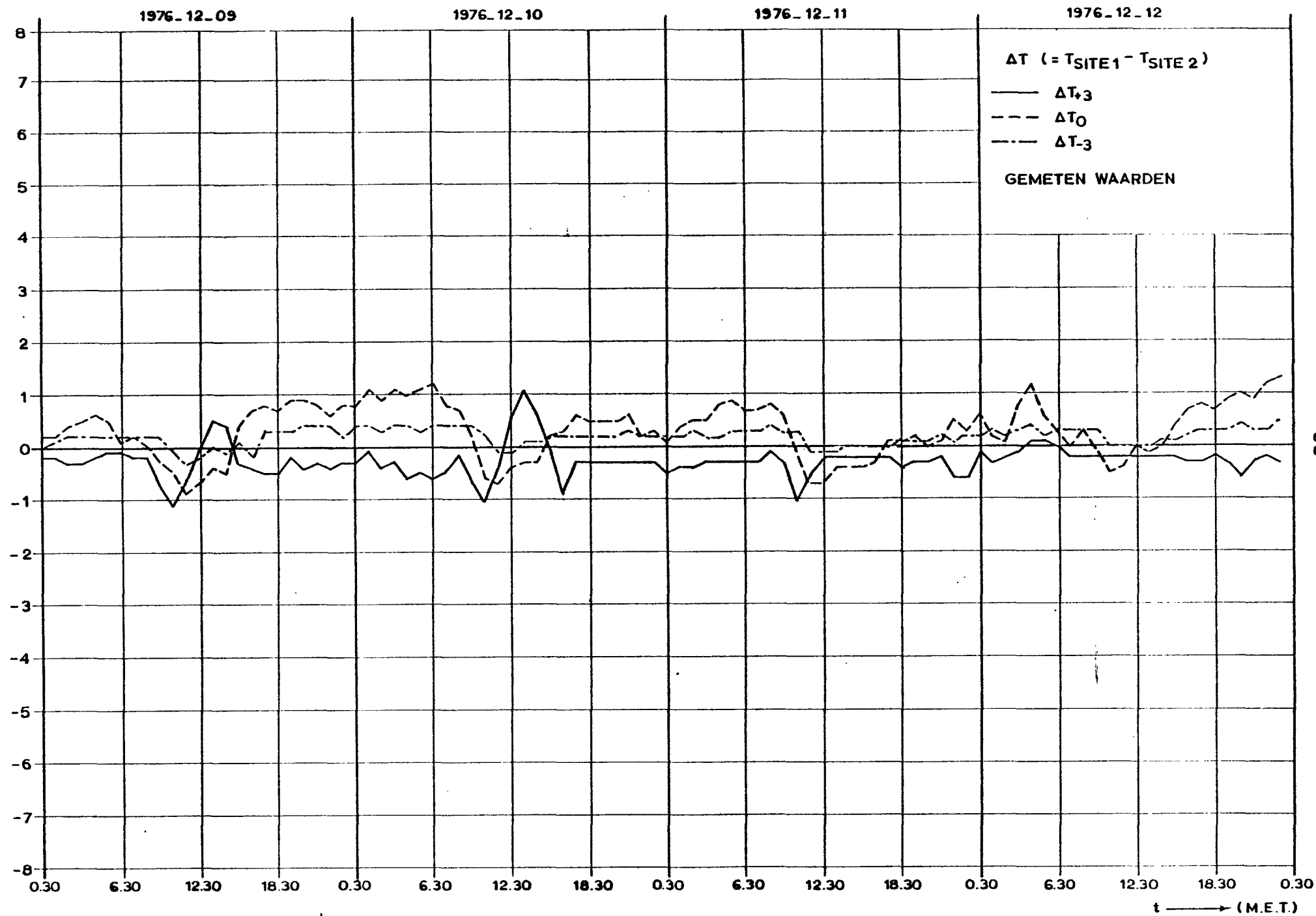
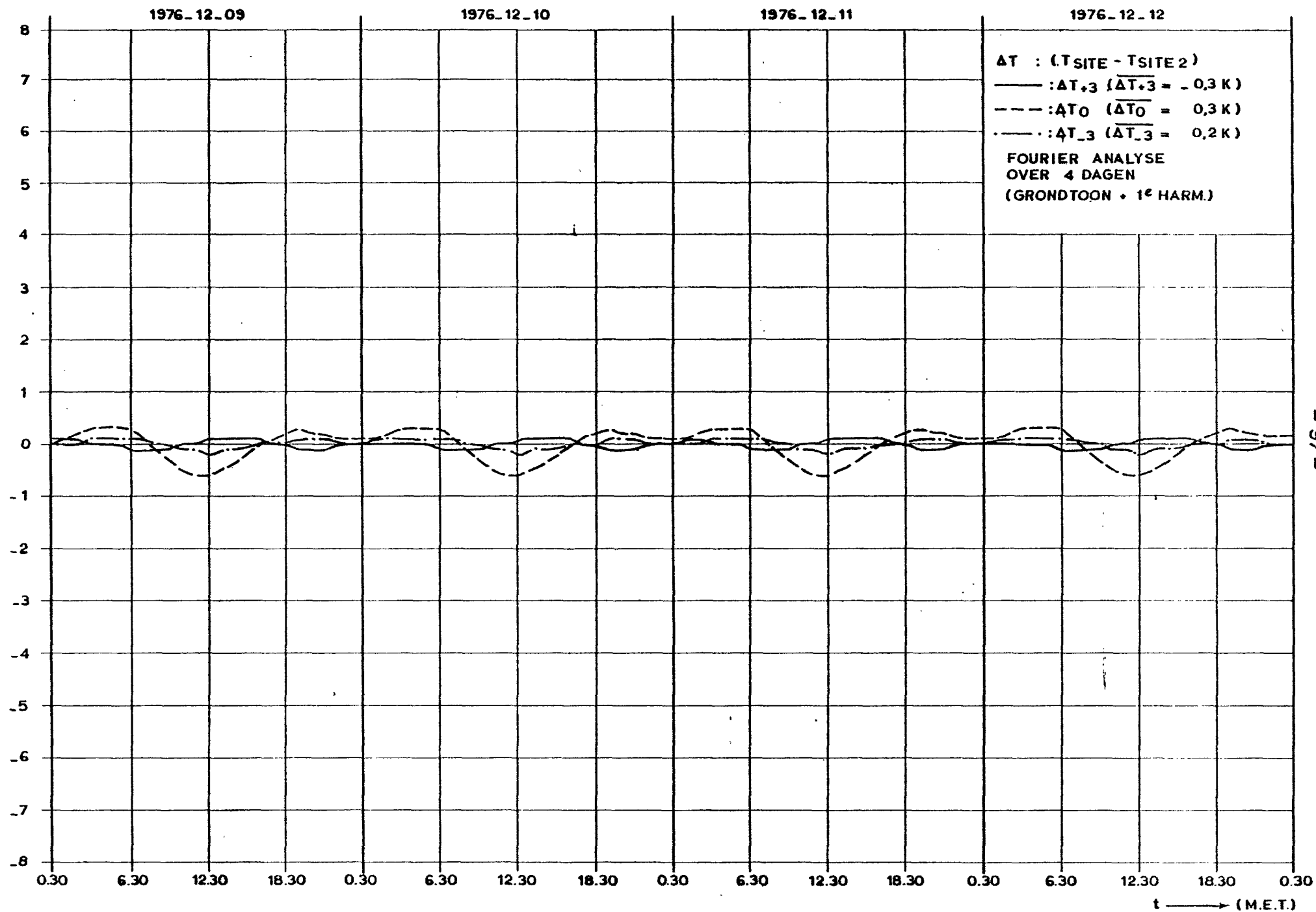


fig. 2 A

(K)  
↑  
 $\Delta T$



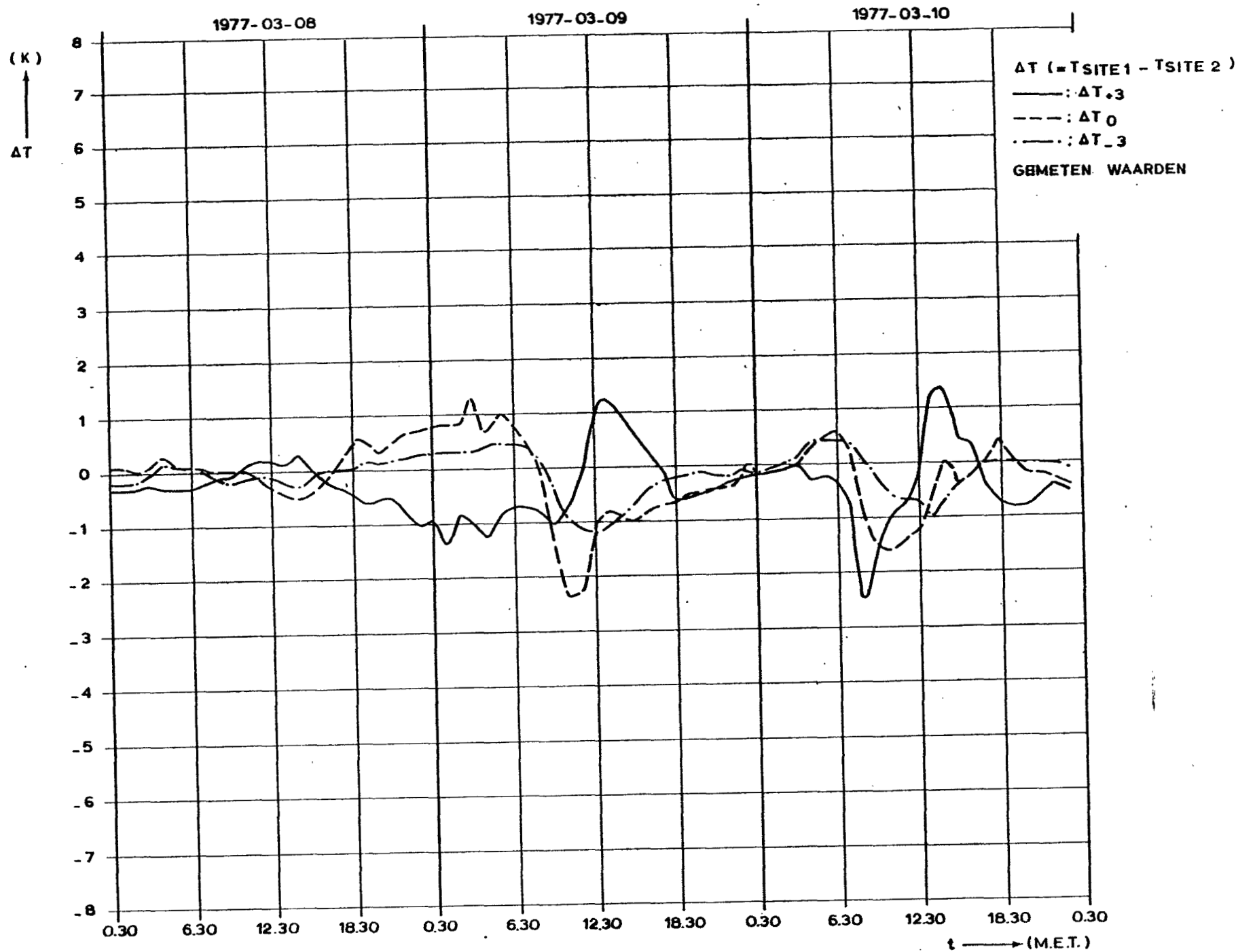
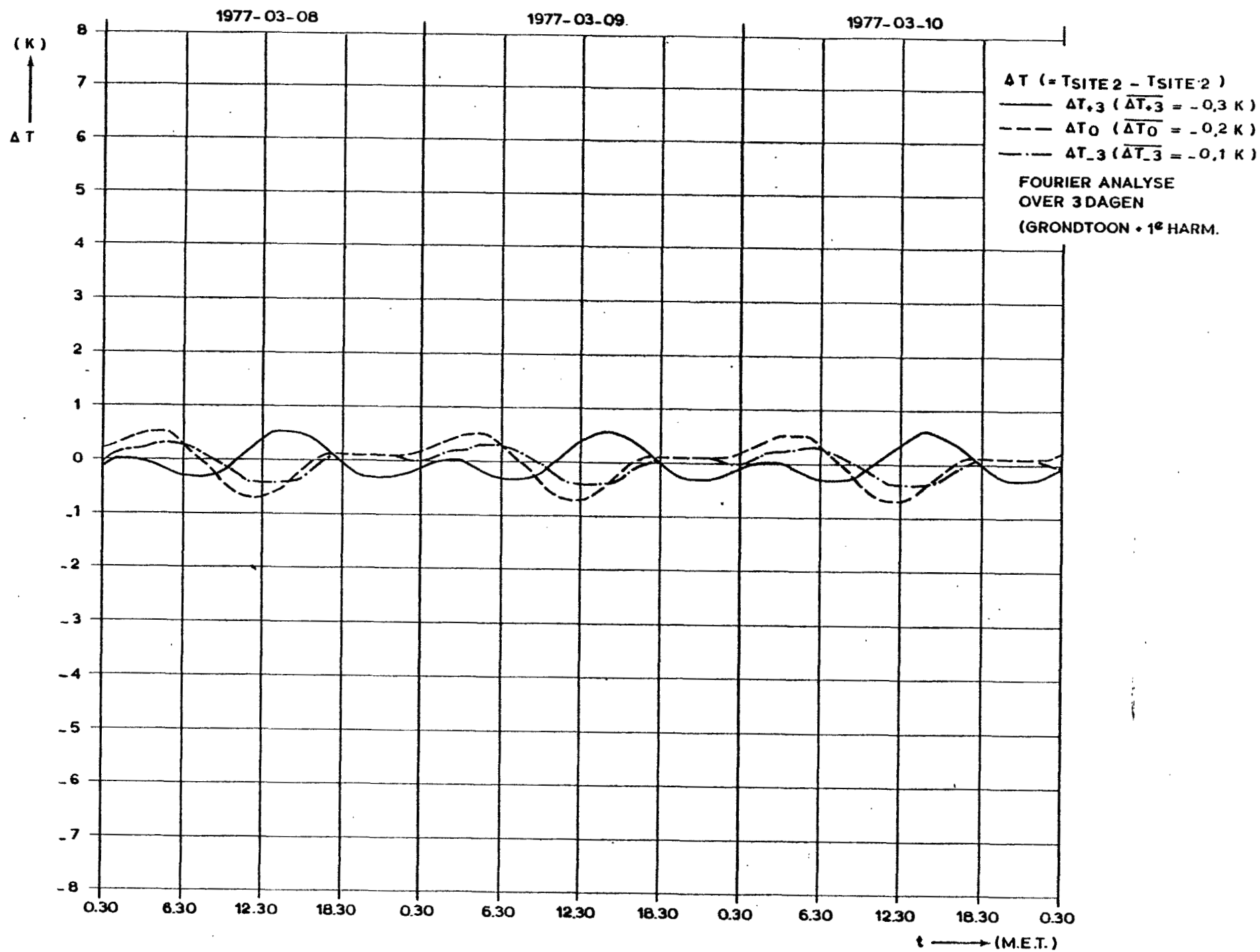


fig. 2C



(K)  
↑  
 $T_s$

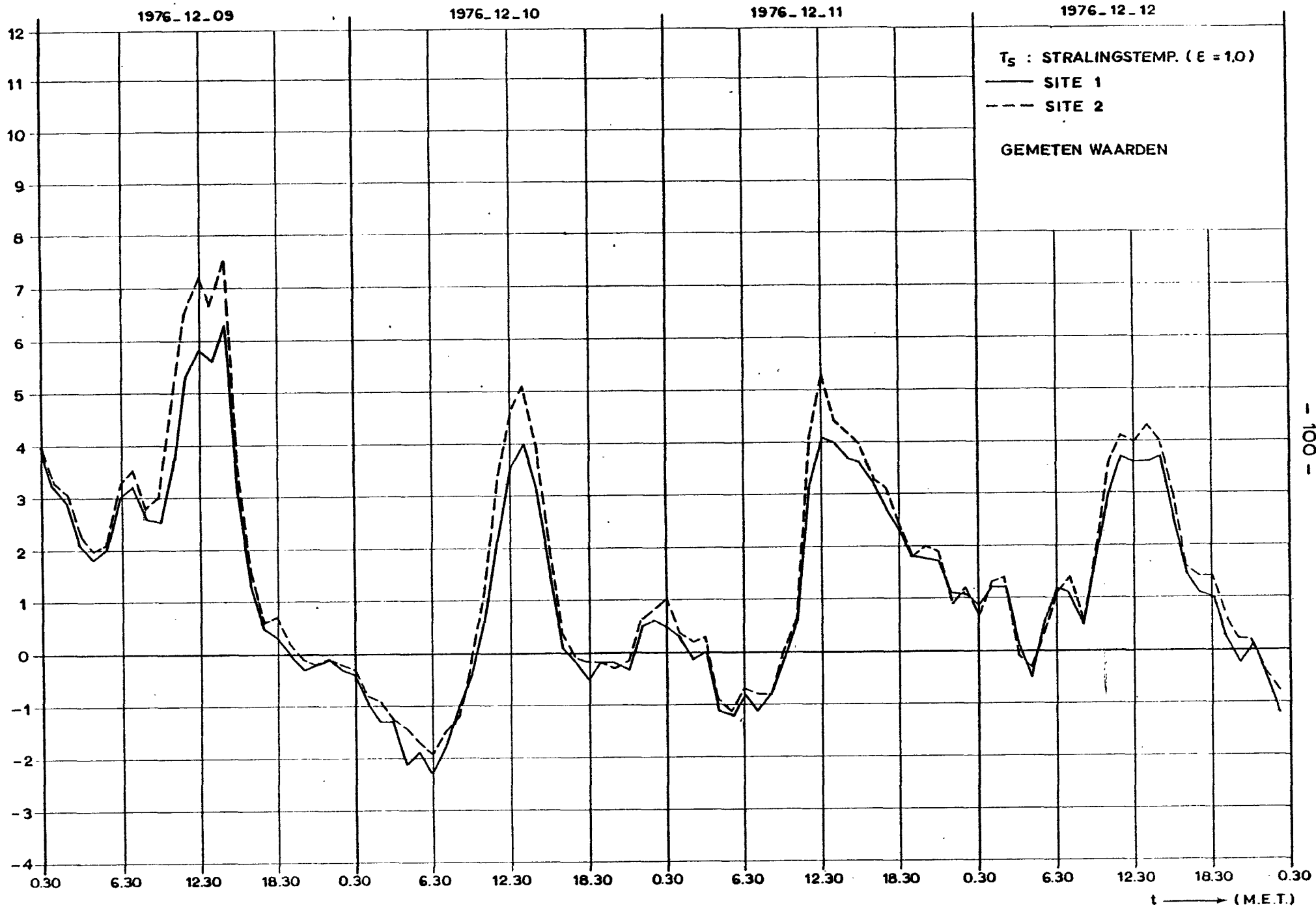
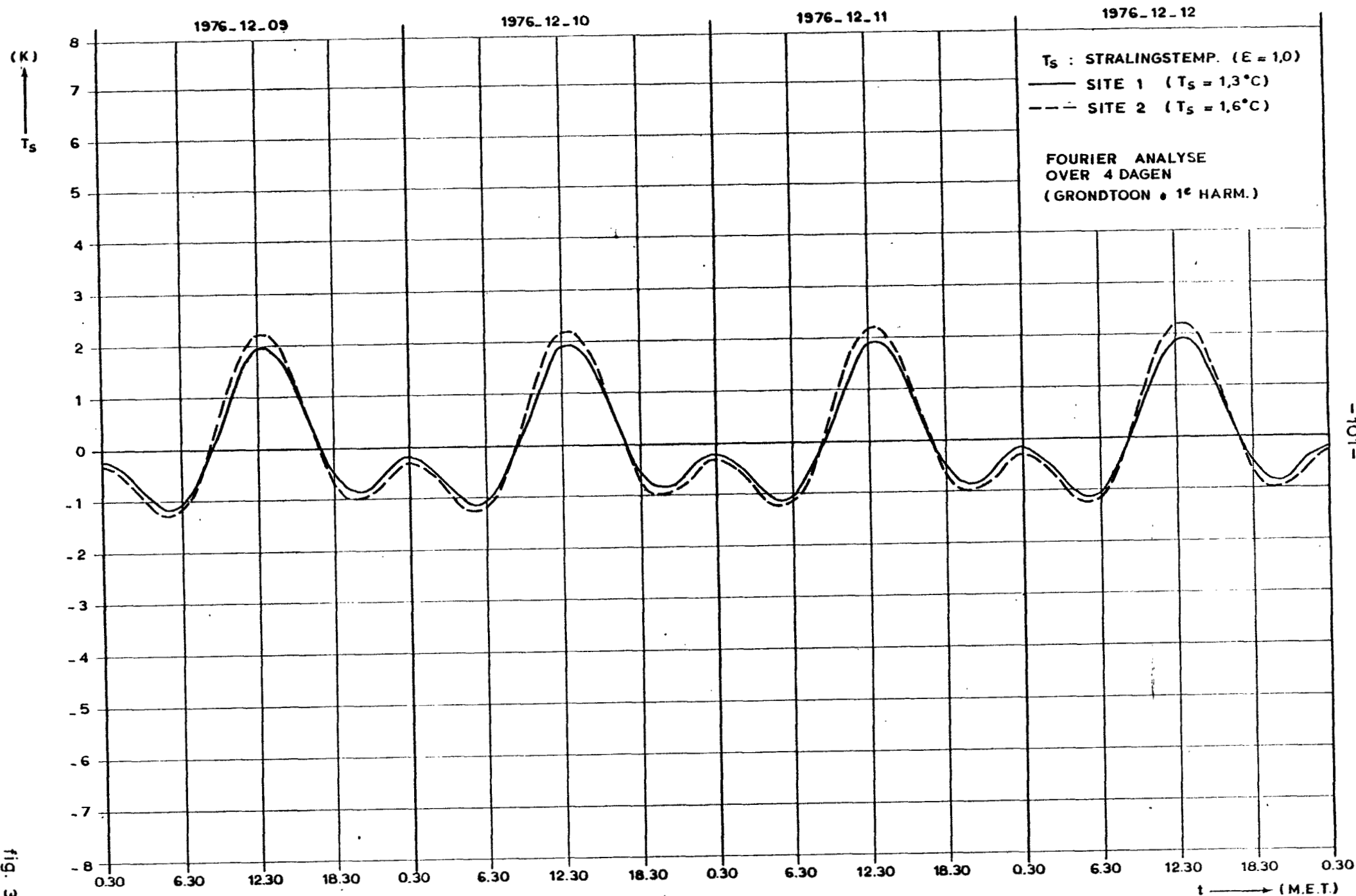


fig. 3A



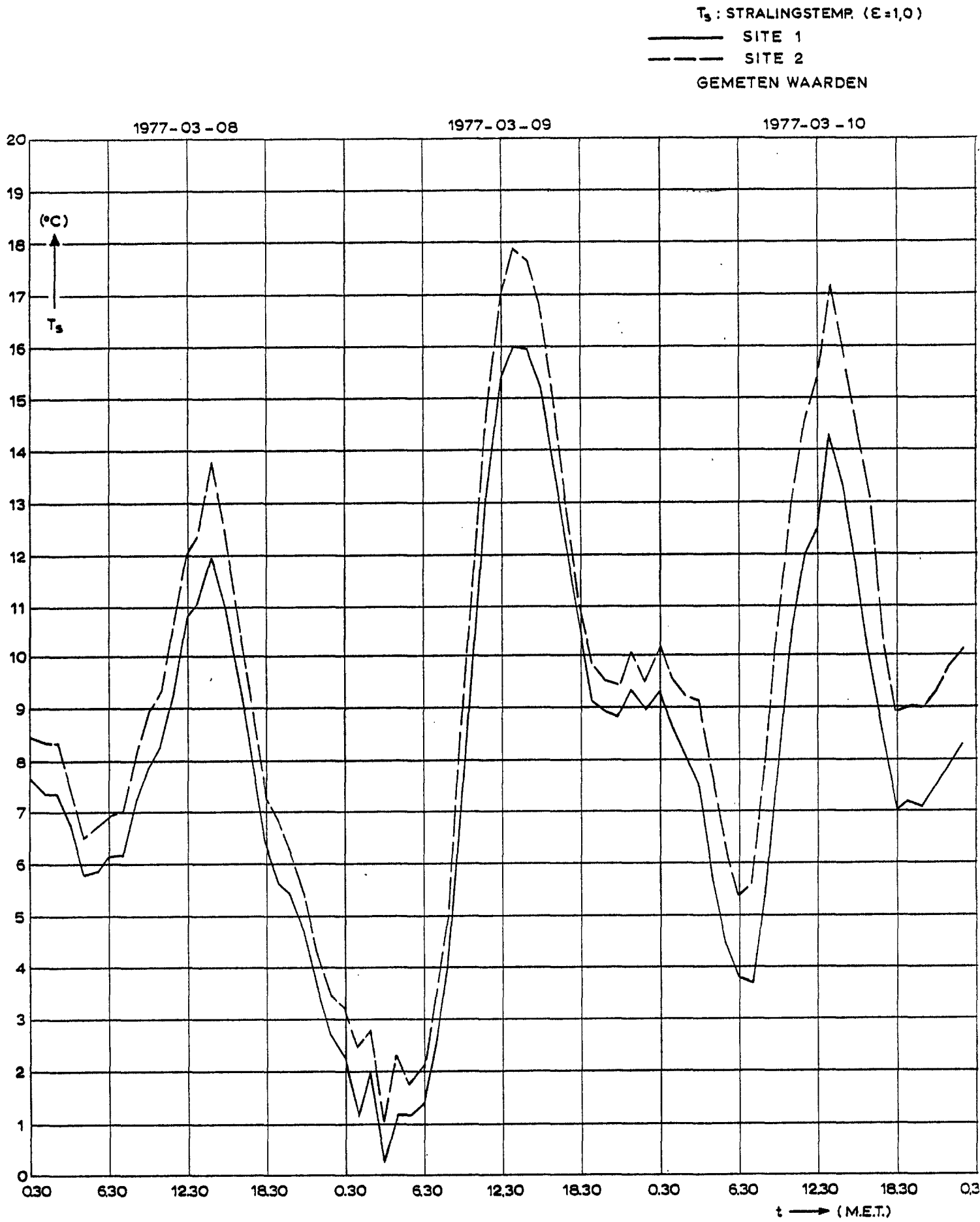
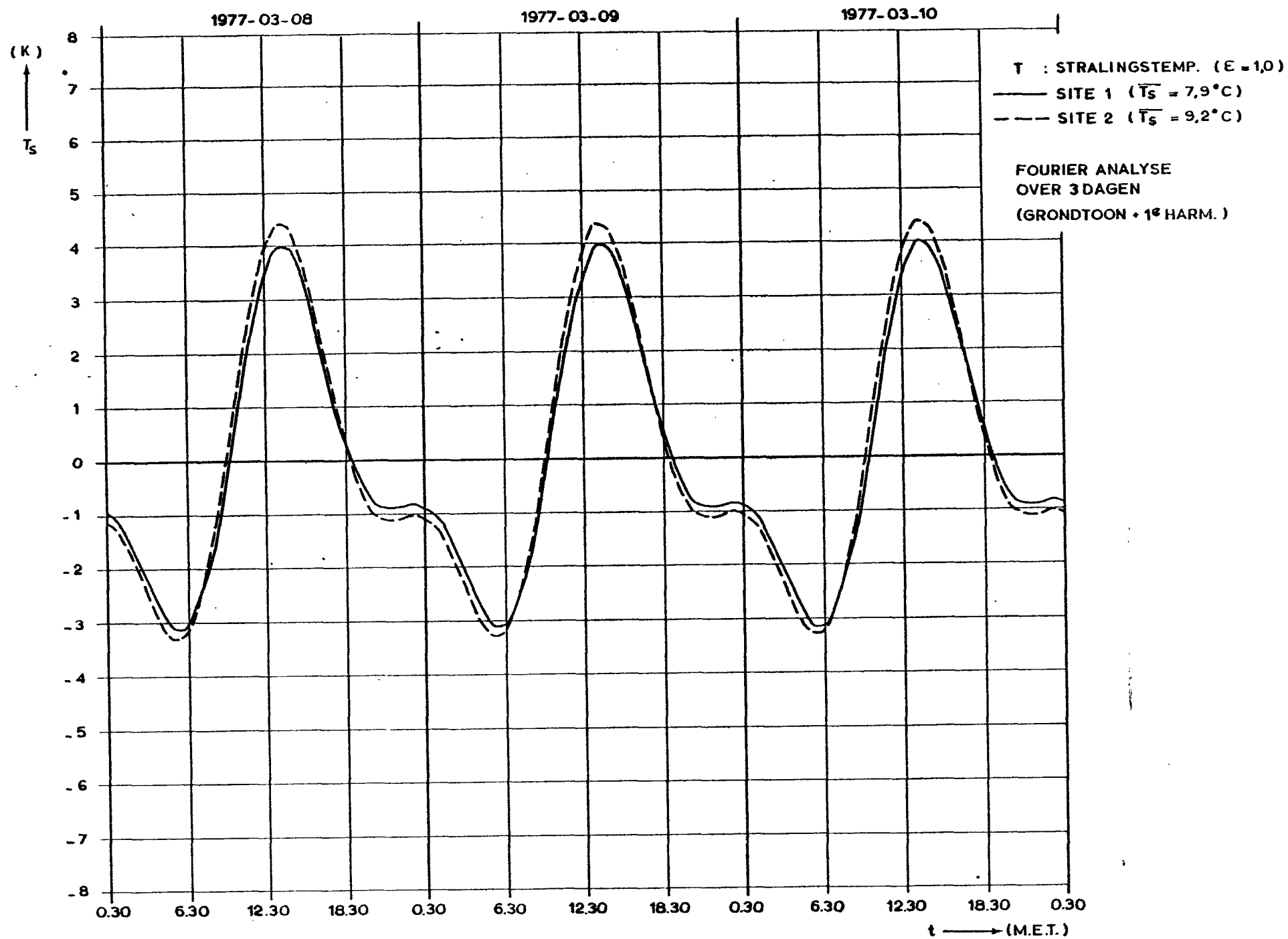
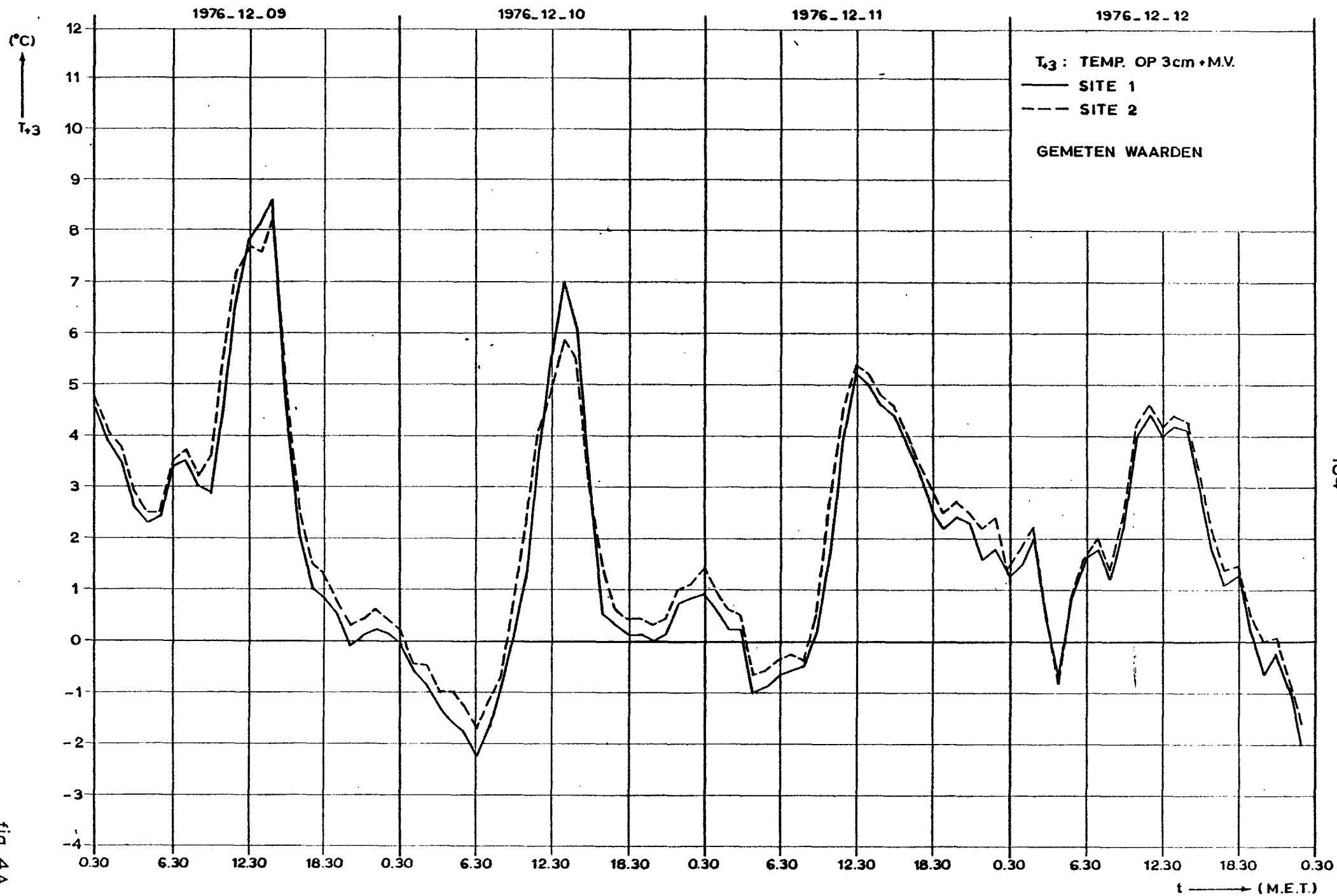


fig. 3C







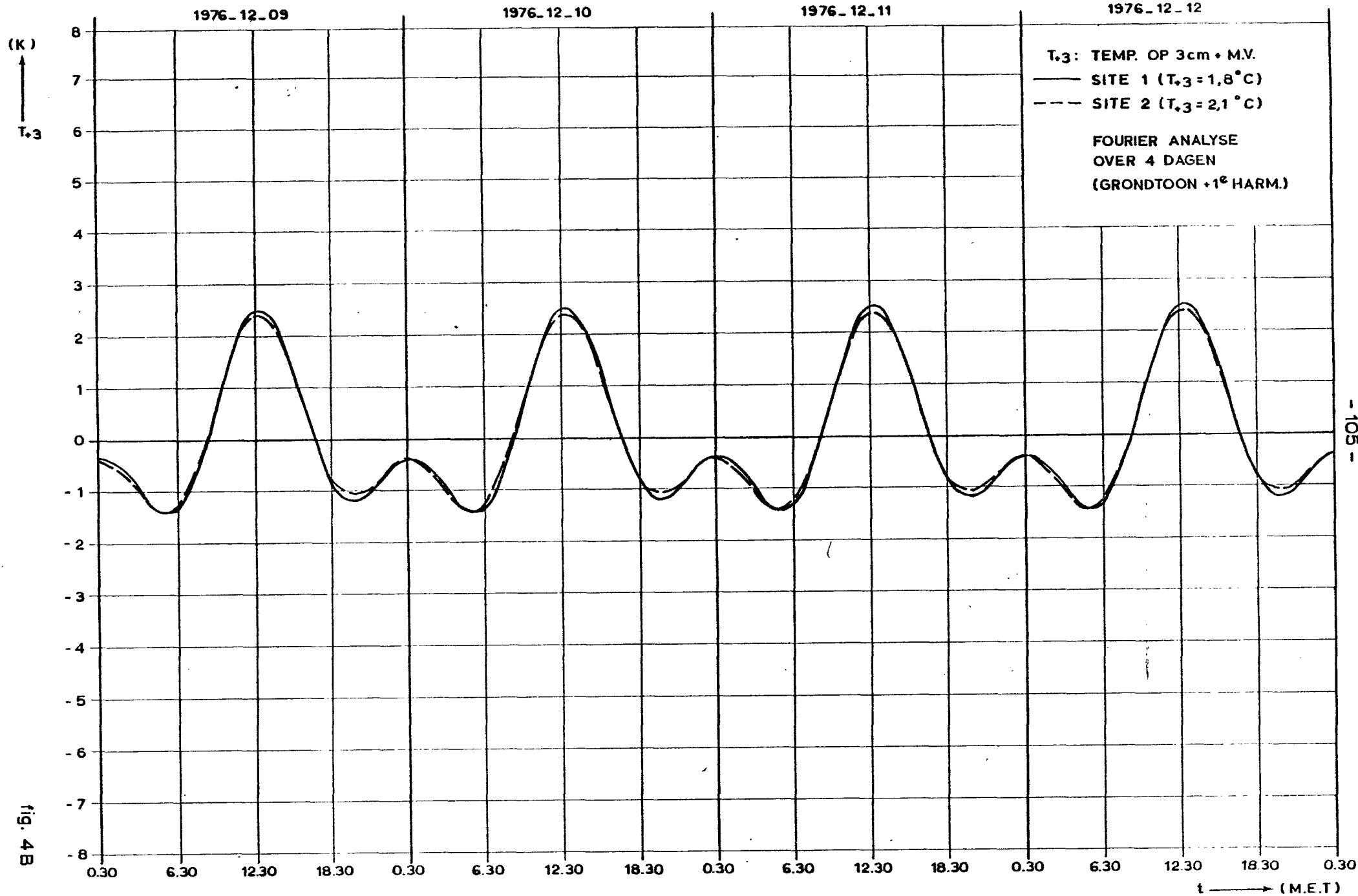


fig. 4B

T<sub>3</sub> : TEMP. OP 3cm + NAP  
— SITE 1  
- - - SITE 2  
GEMETEN WAARDEN

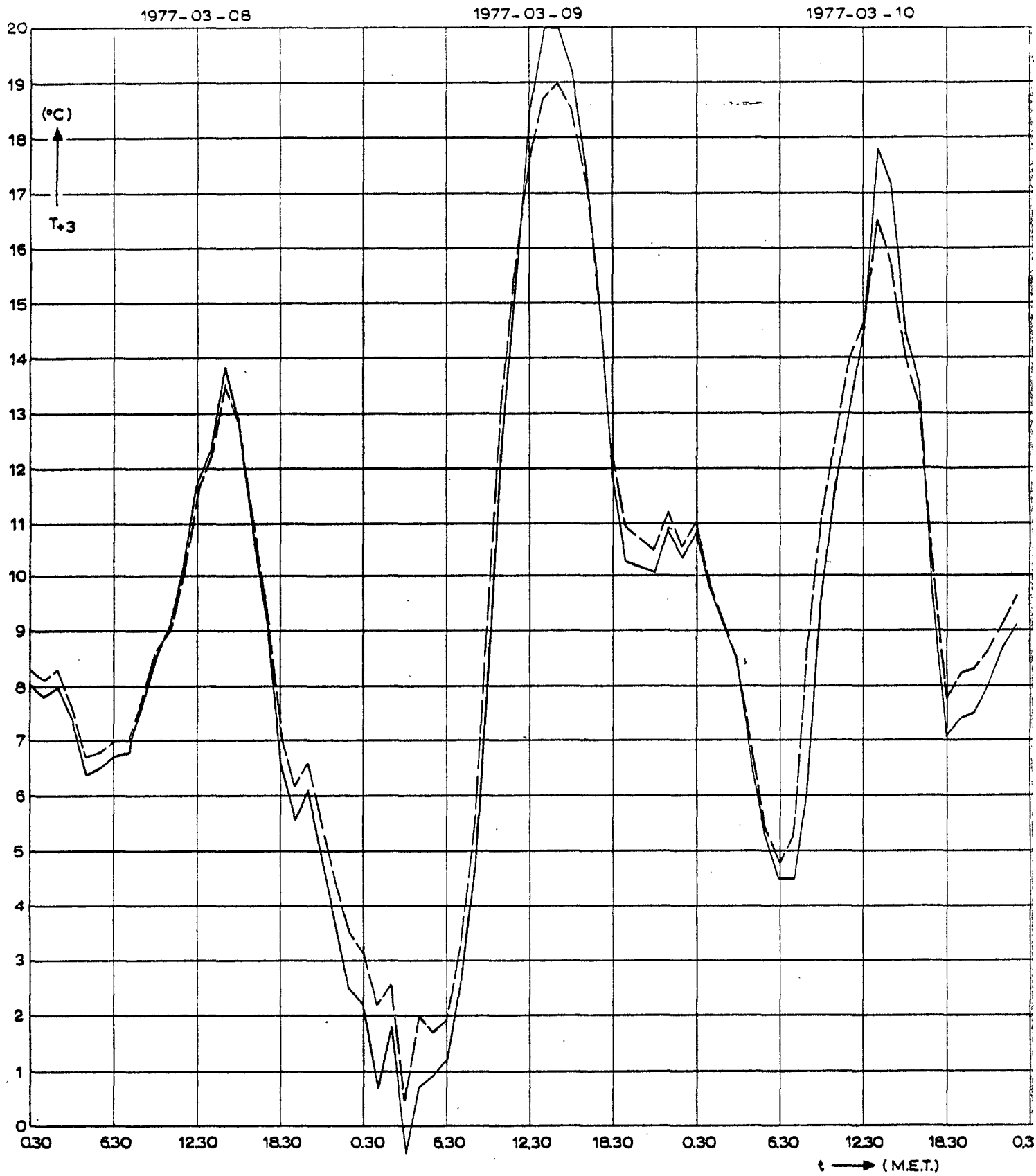
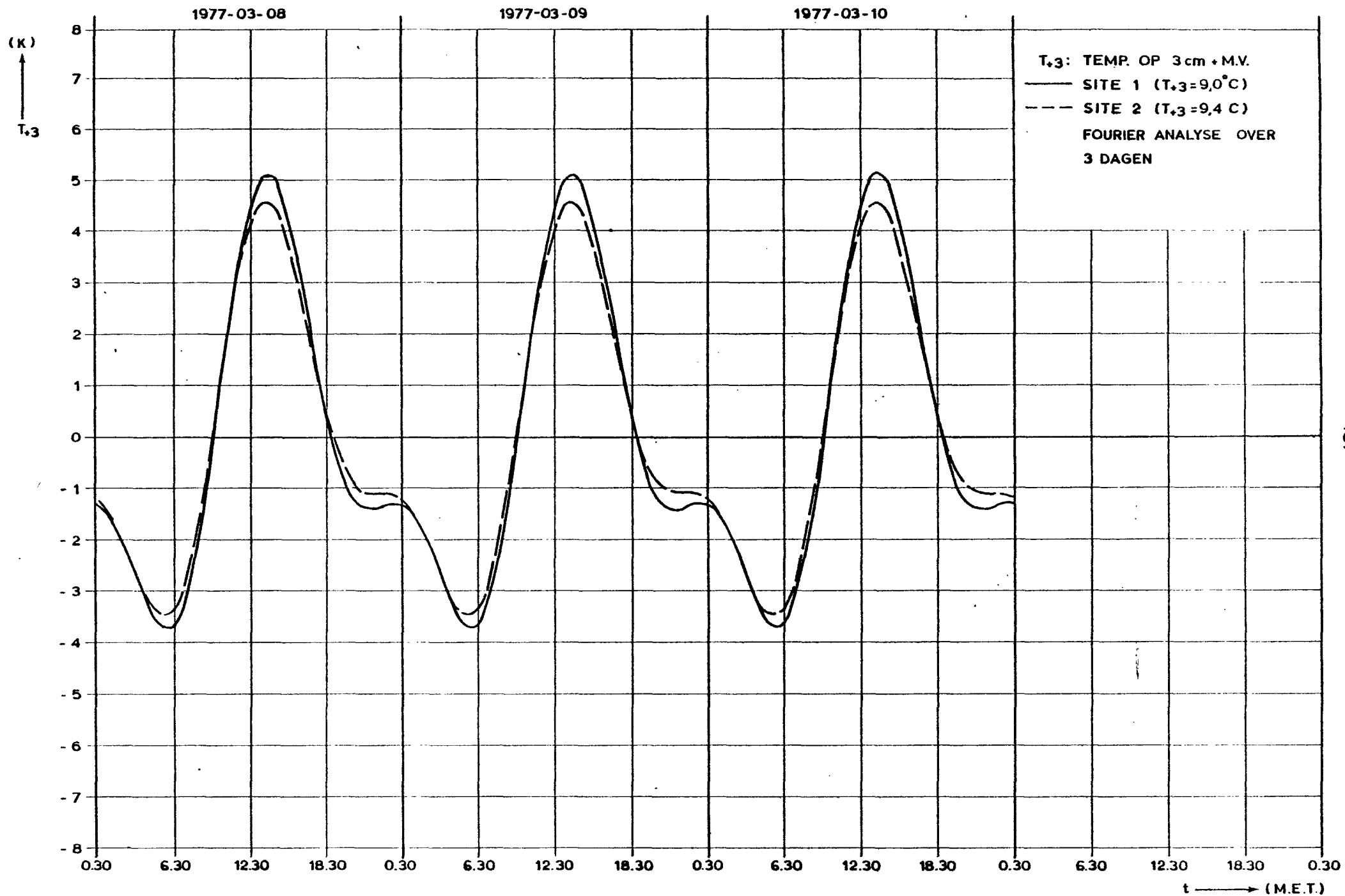
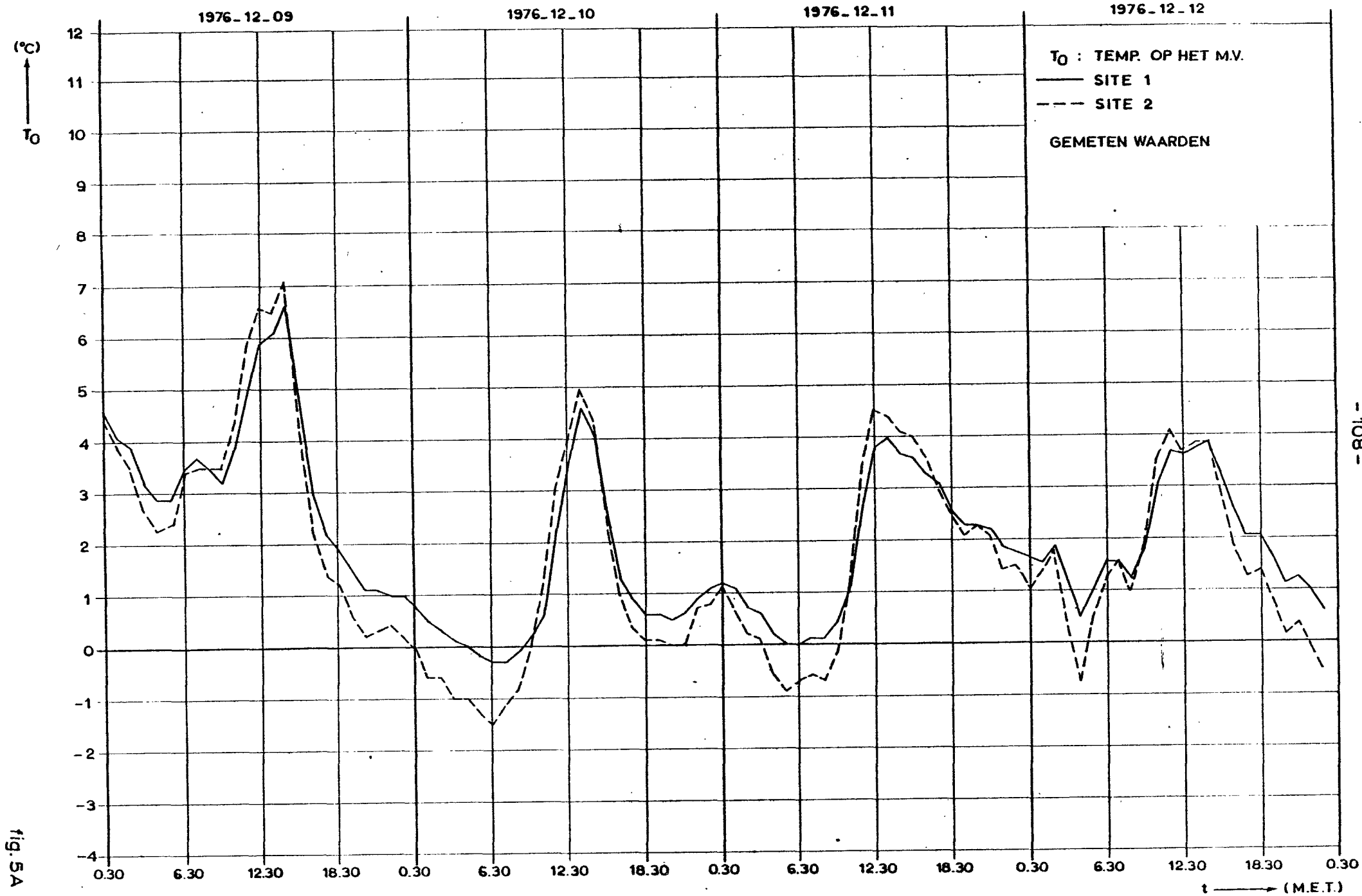
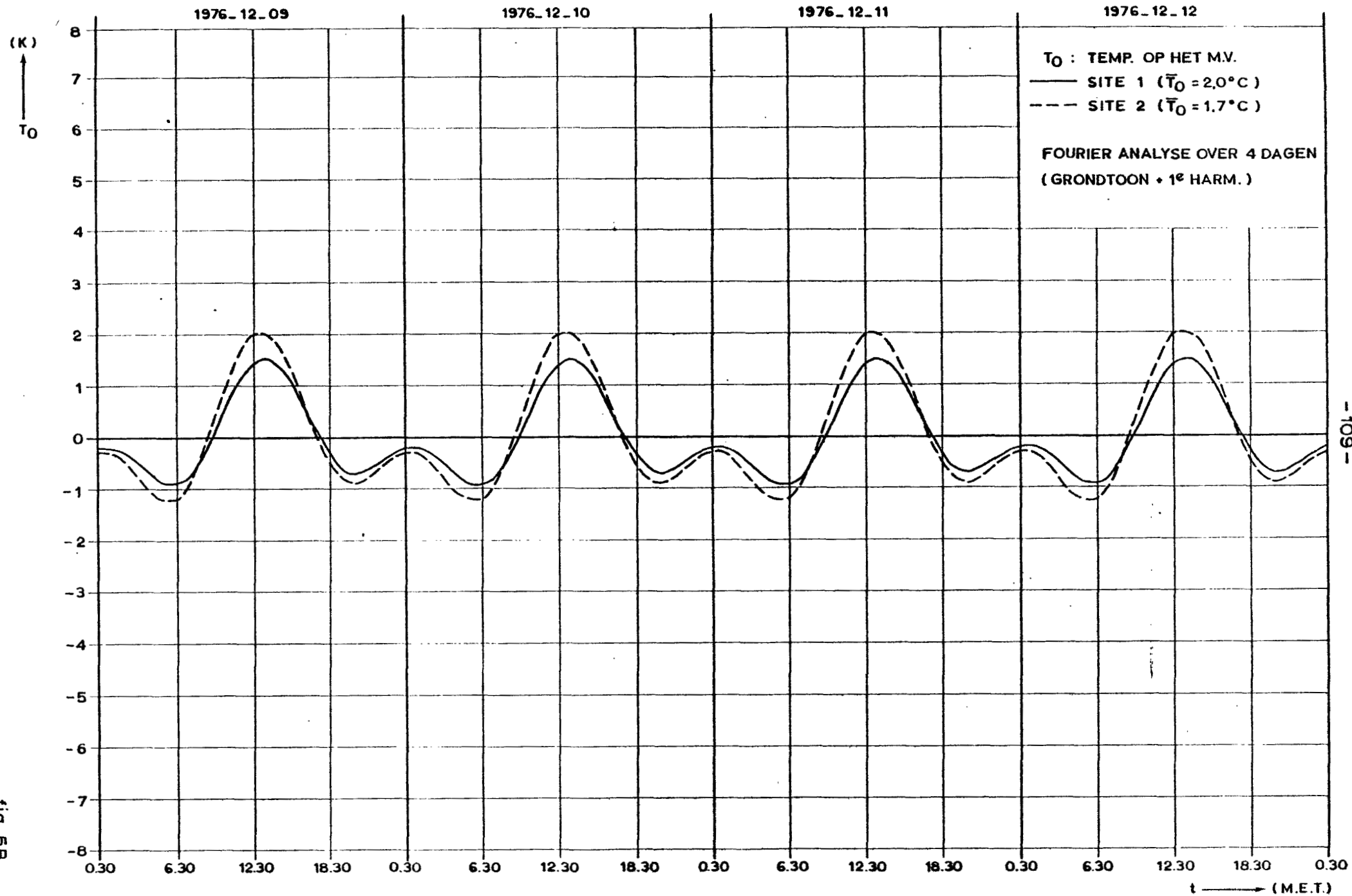


fig. 4C







T<sub>0</sub> : TEMP. OP HET M.V.  
— SITE 1  
--- SITE 2  
GEMETEN WAARDEN

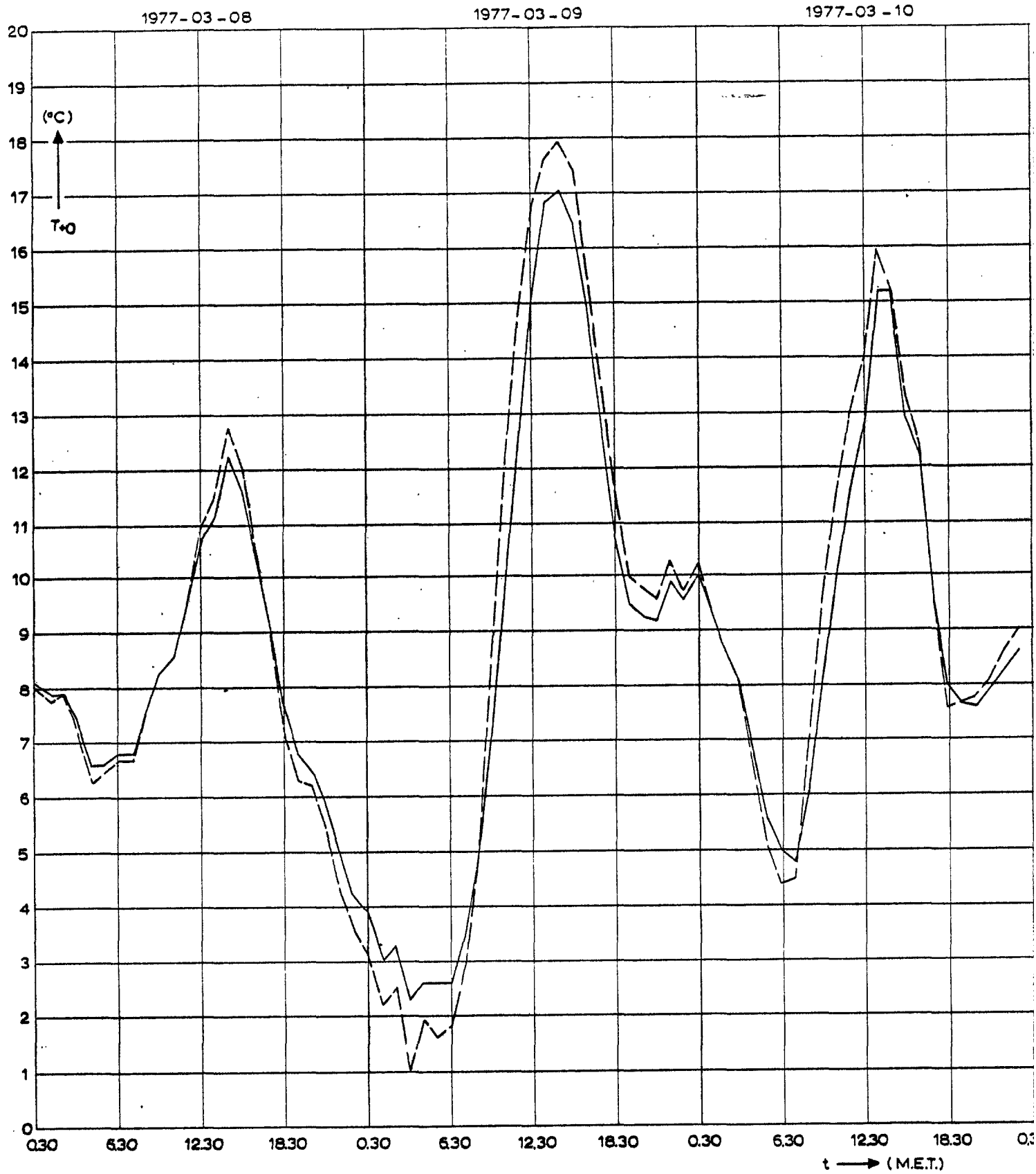
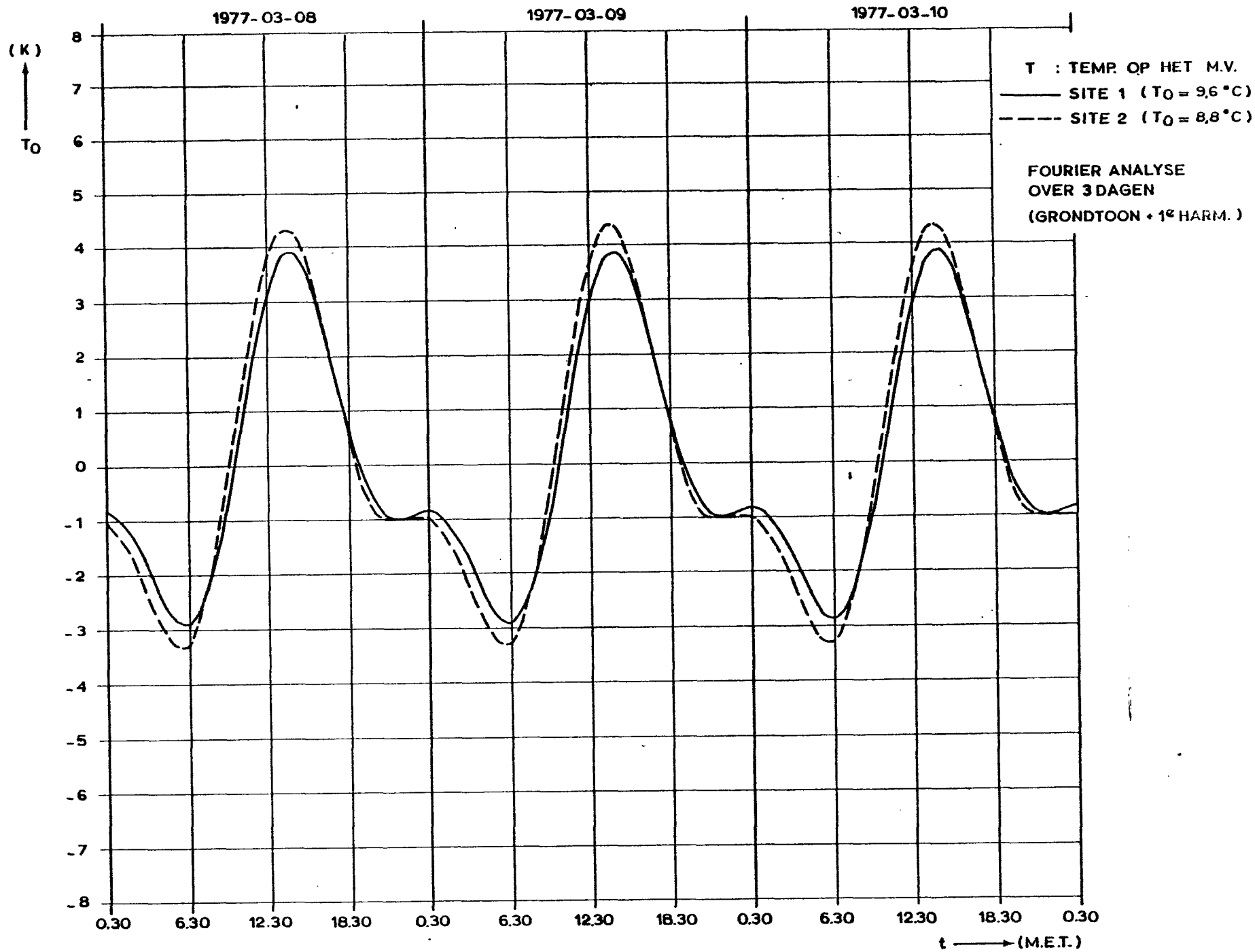


fig. 5C





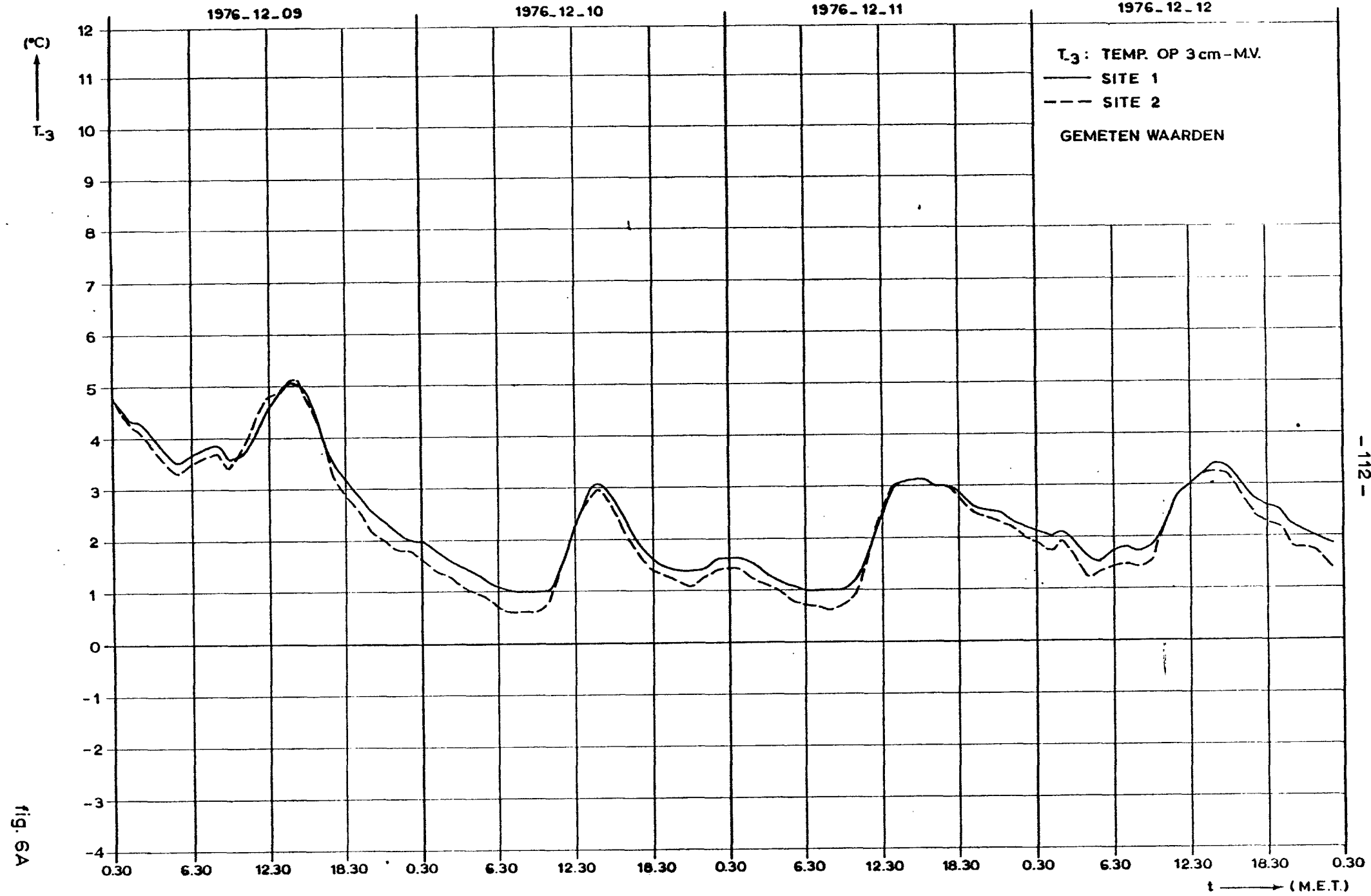
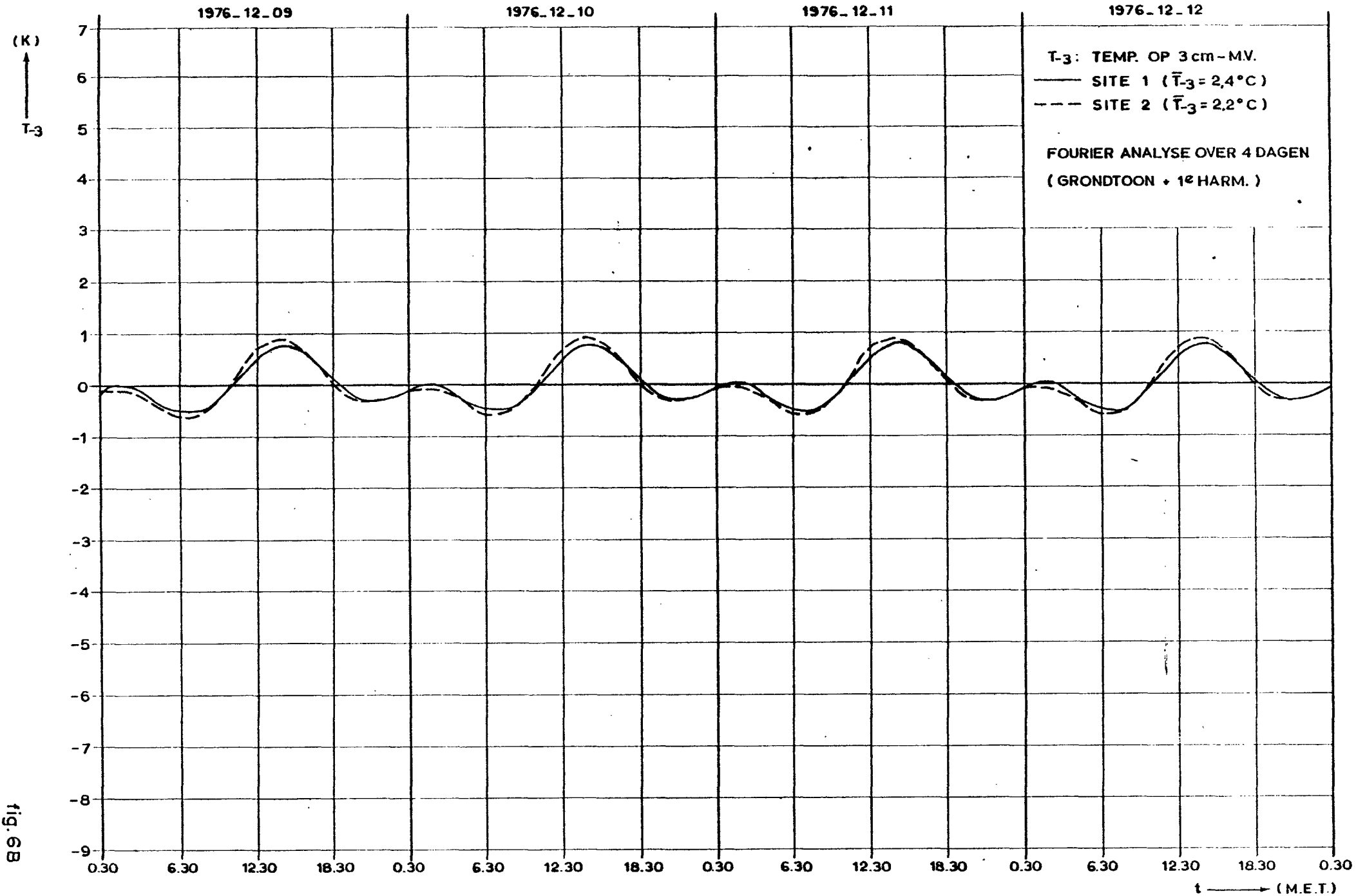


fig. 6A



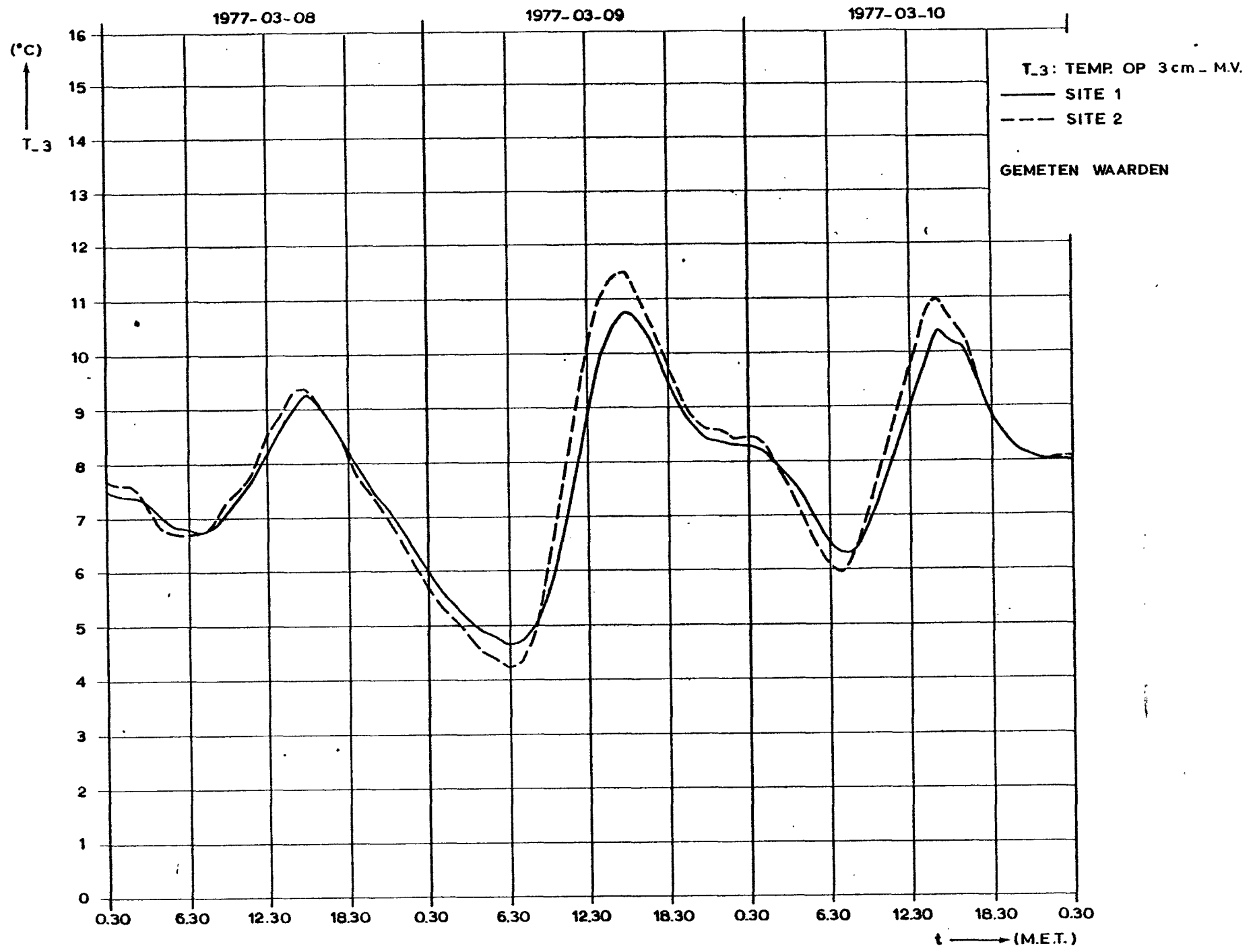
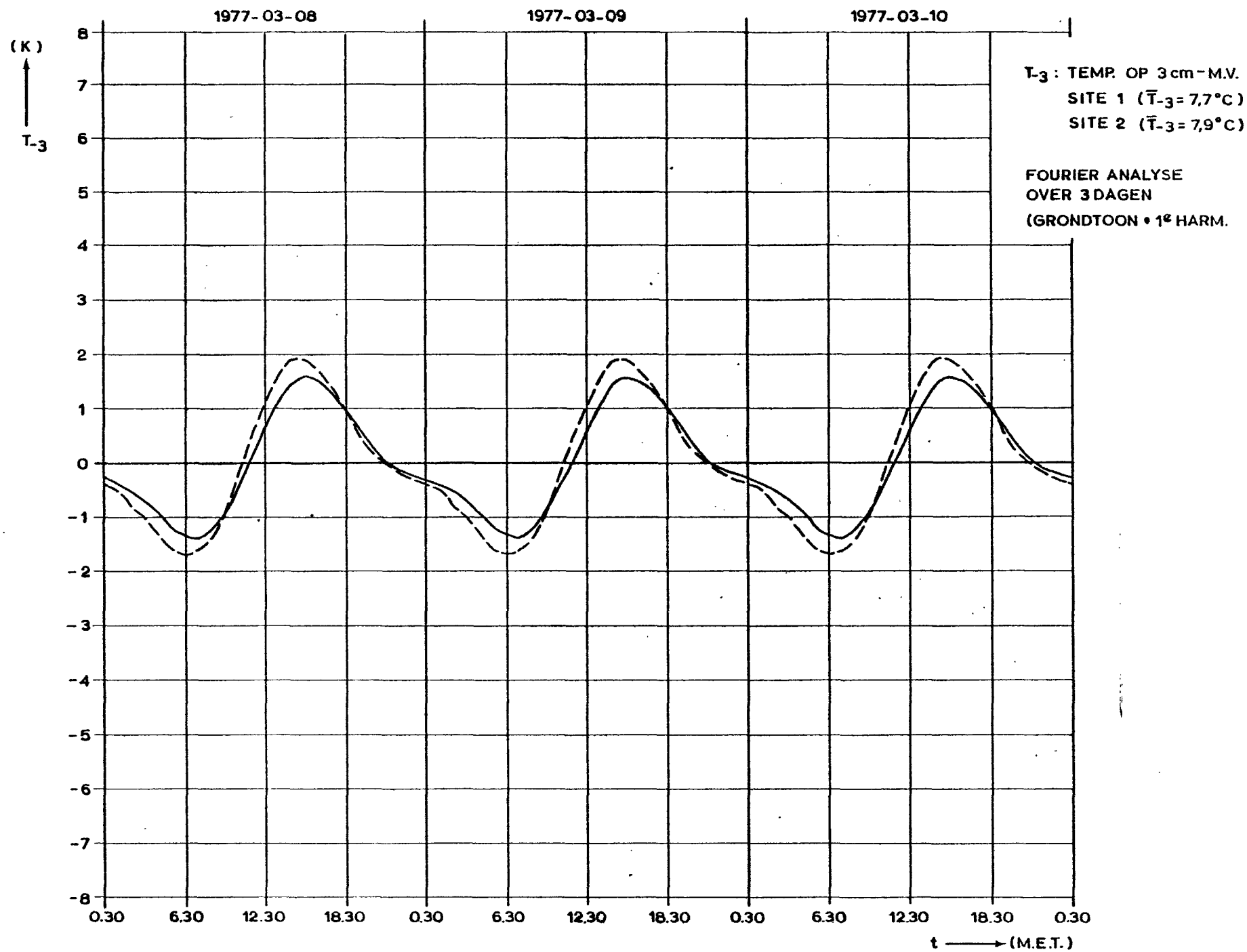


fig. 6D



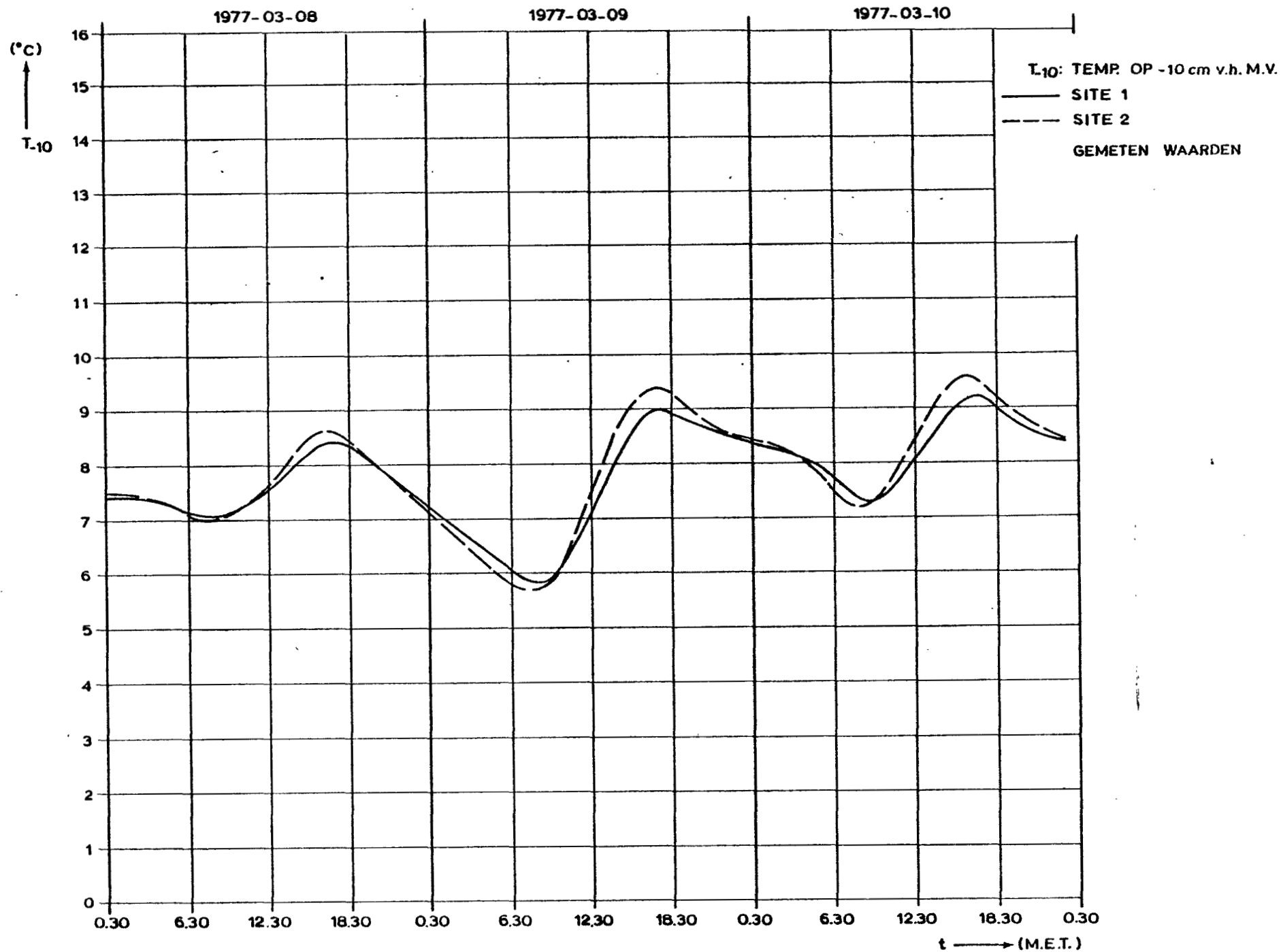
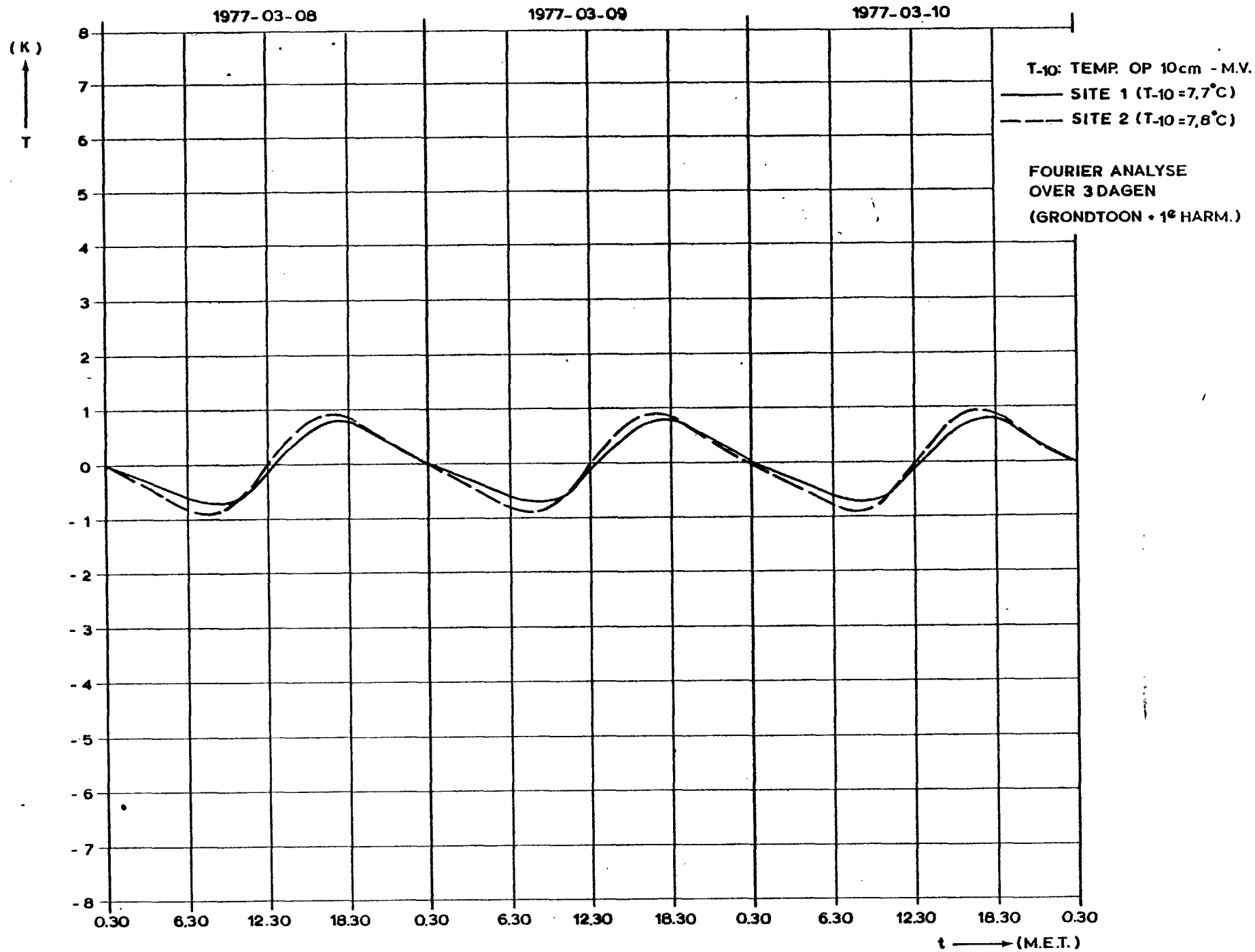
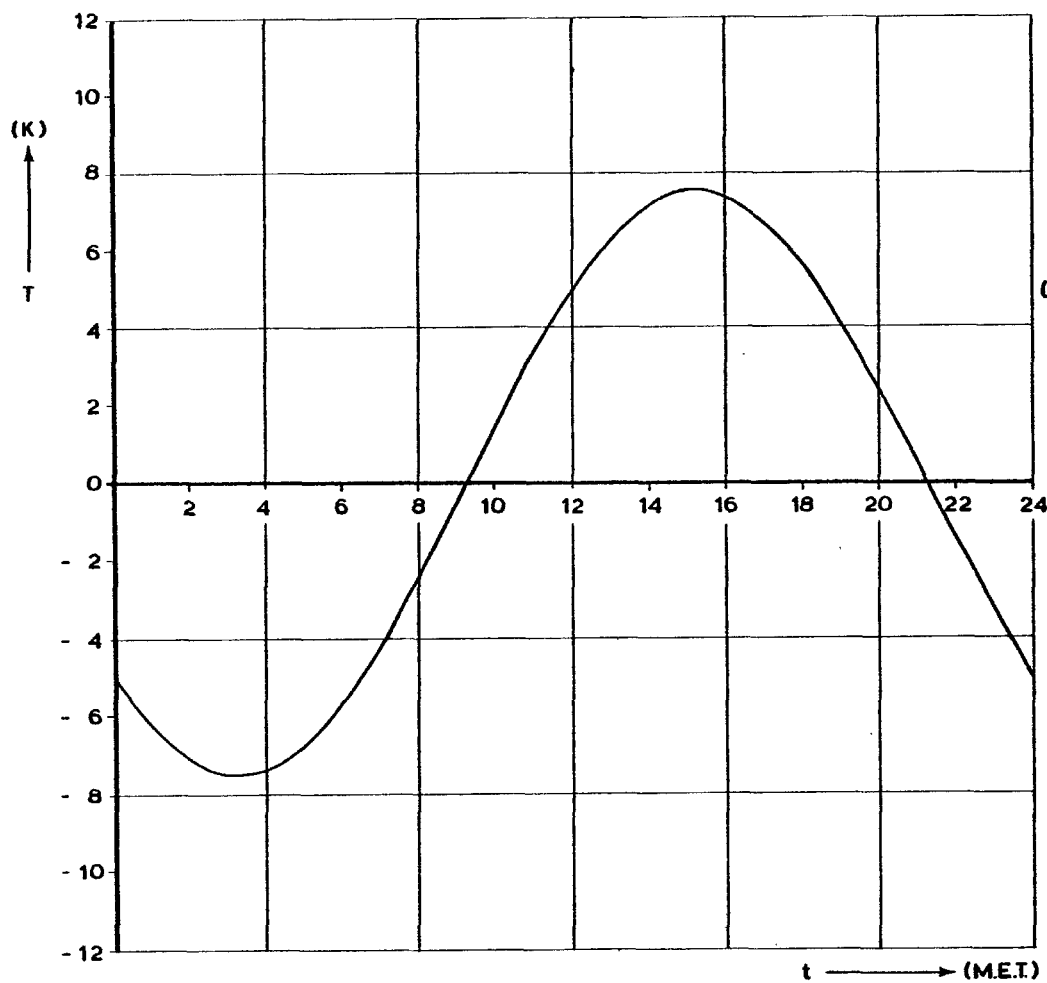


fig. 7A

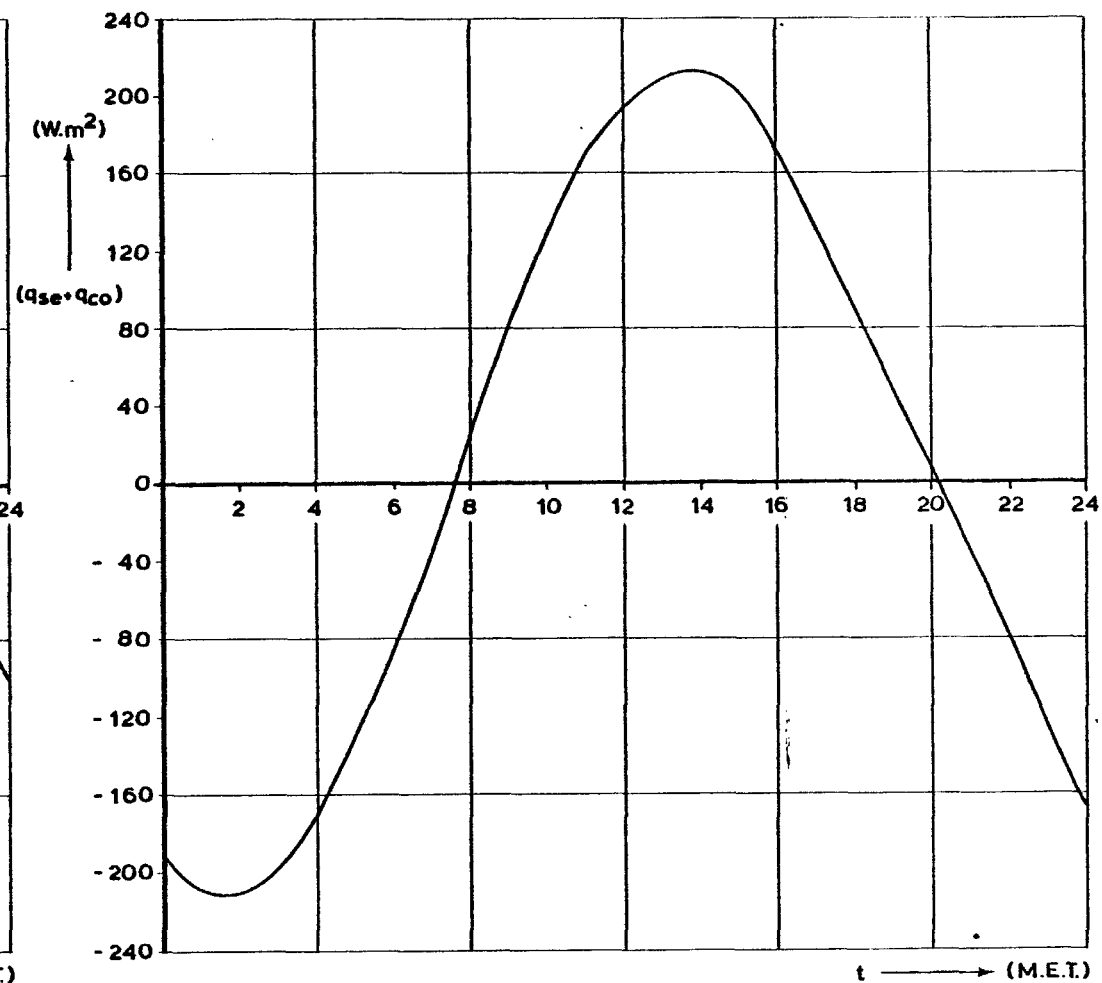


# REKENRESULTATEN MODEL 1 MET ENKEL DE GRONDTOON

——— TEMP. SITE I  
 - - - - - TEMP. SITE II } VALLEN NAGENOEG SAMEN



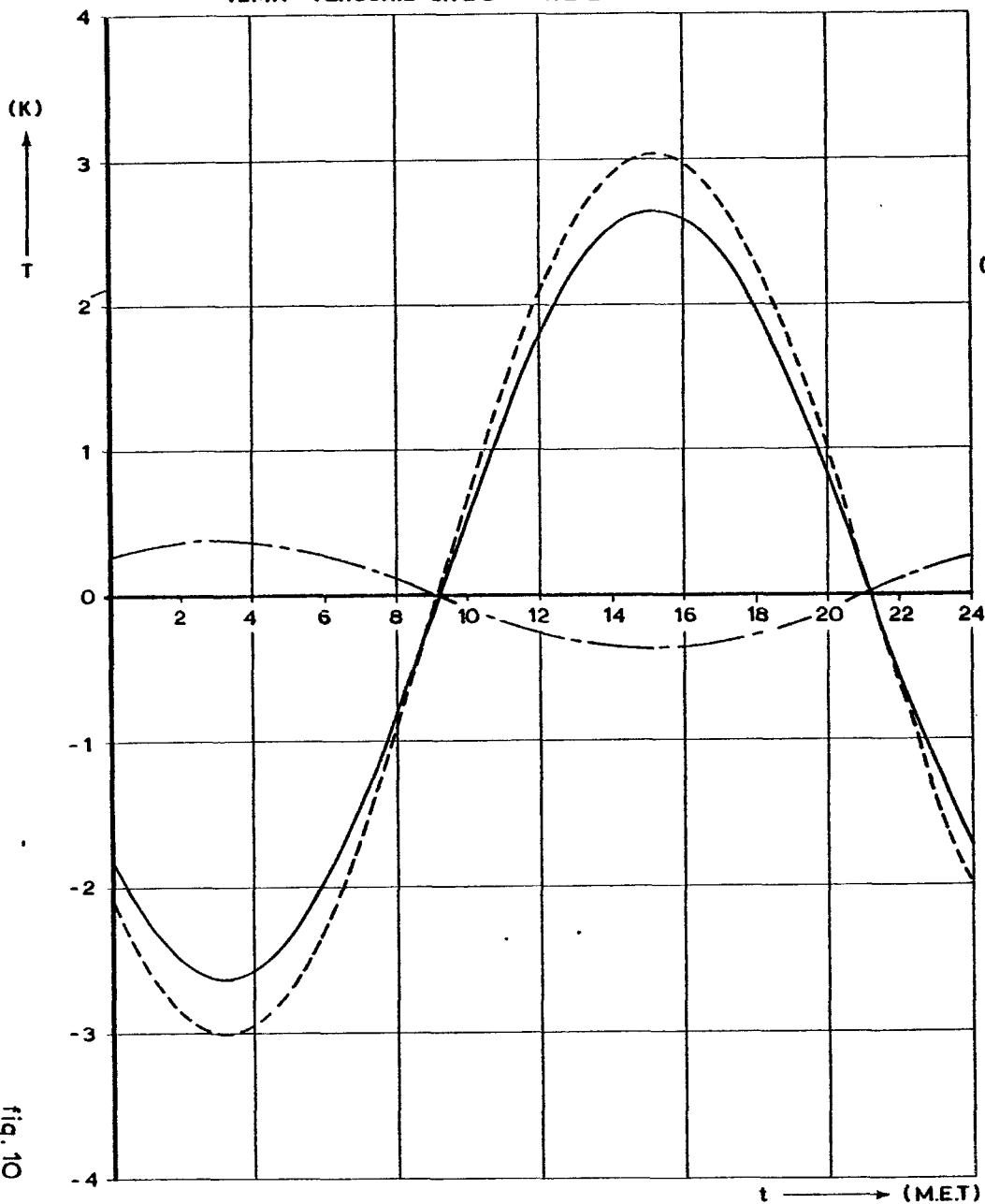
——— ( $q_{se} + q_{co}$ ) SITE I  
 - - - - - ( $q_{se} + q_{co}$ ) SITE II } VALLEN NAGENOEG SAMEN



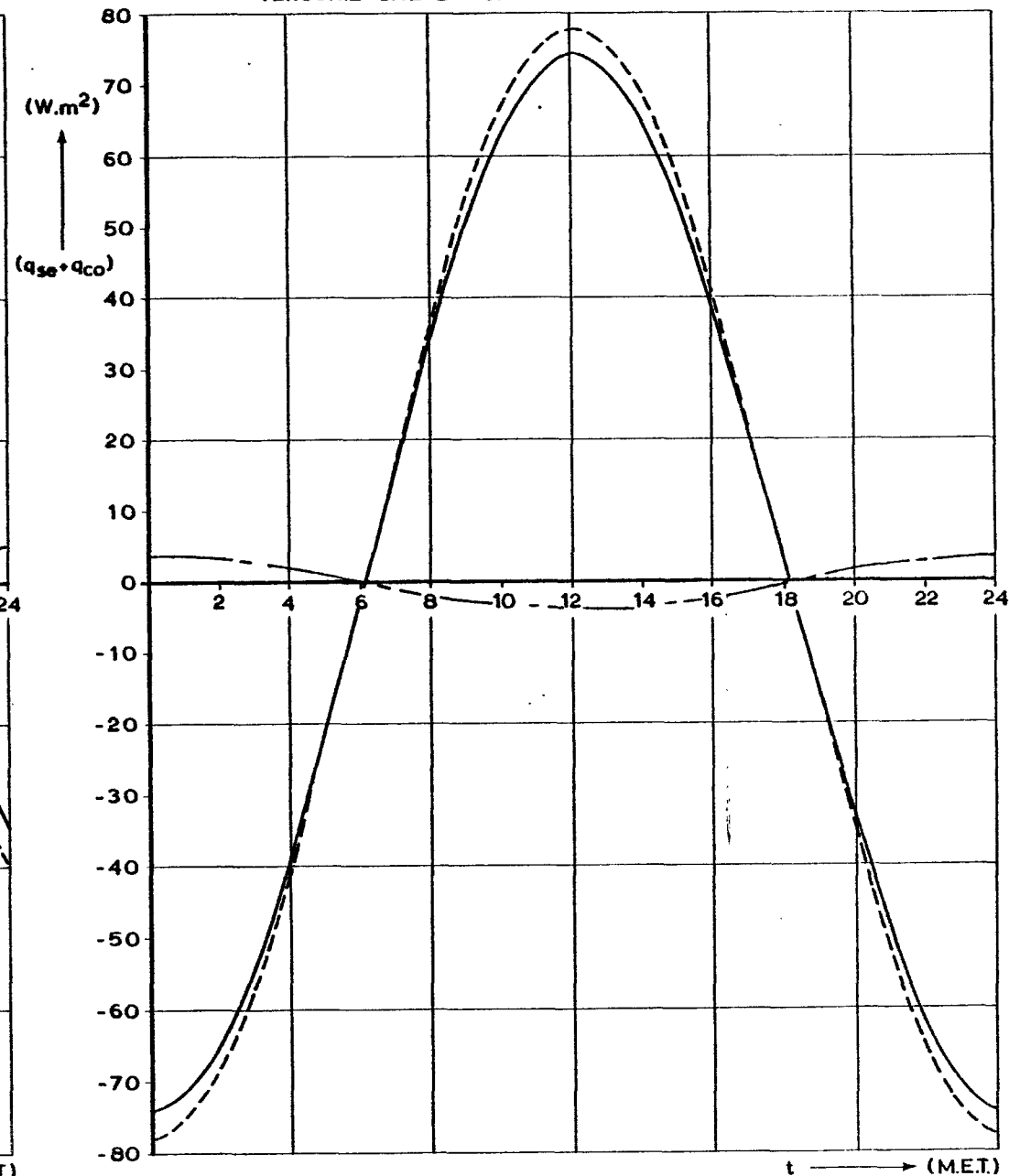


# REKENRESULTATEN MODEL 2 MET ENKEL DE GRONDTOON

— TEMP. SITE I  
 - - - TEMP. SITE II  
 - · - TEMP. VERSCHIL SITE I - SITE II

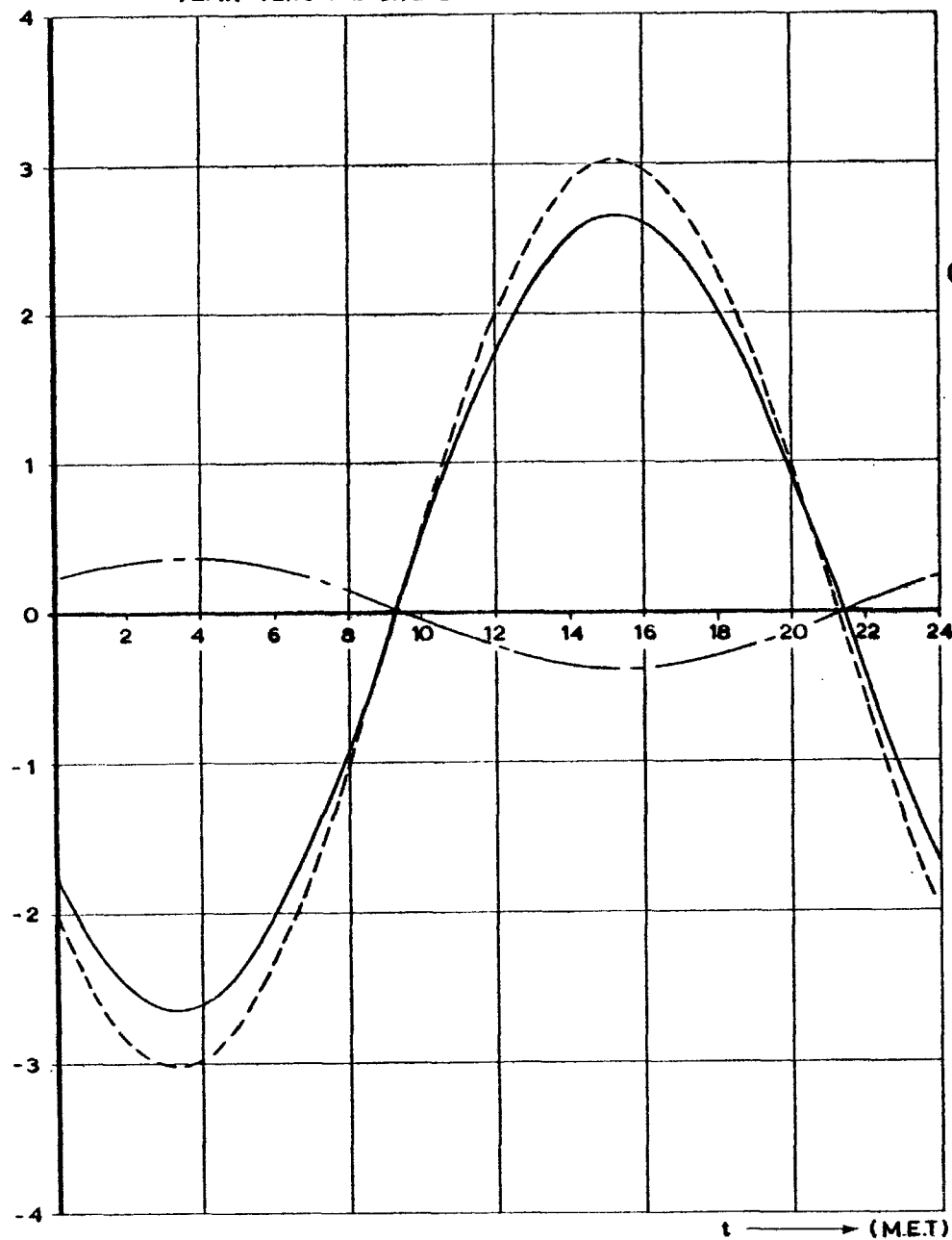


—  $(q_{se} + q_{co})$  SITE I  
 - - -  $(q_{se} + q_{co})$  SITE II  
 - · - VERSCHIL SITE I - SITE II

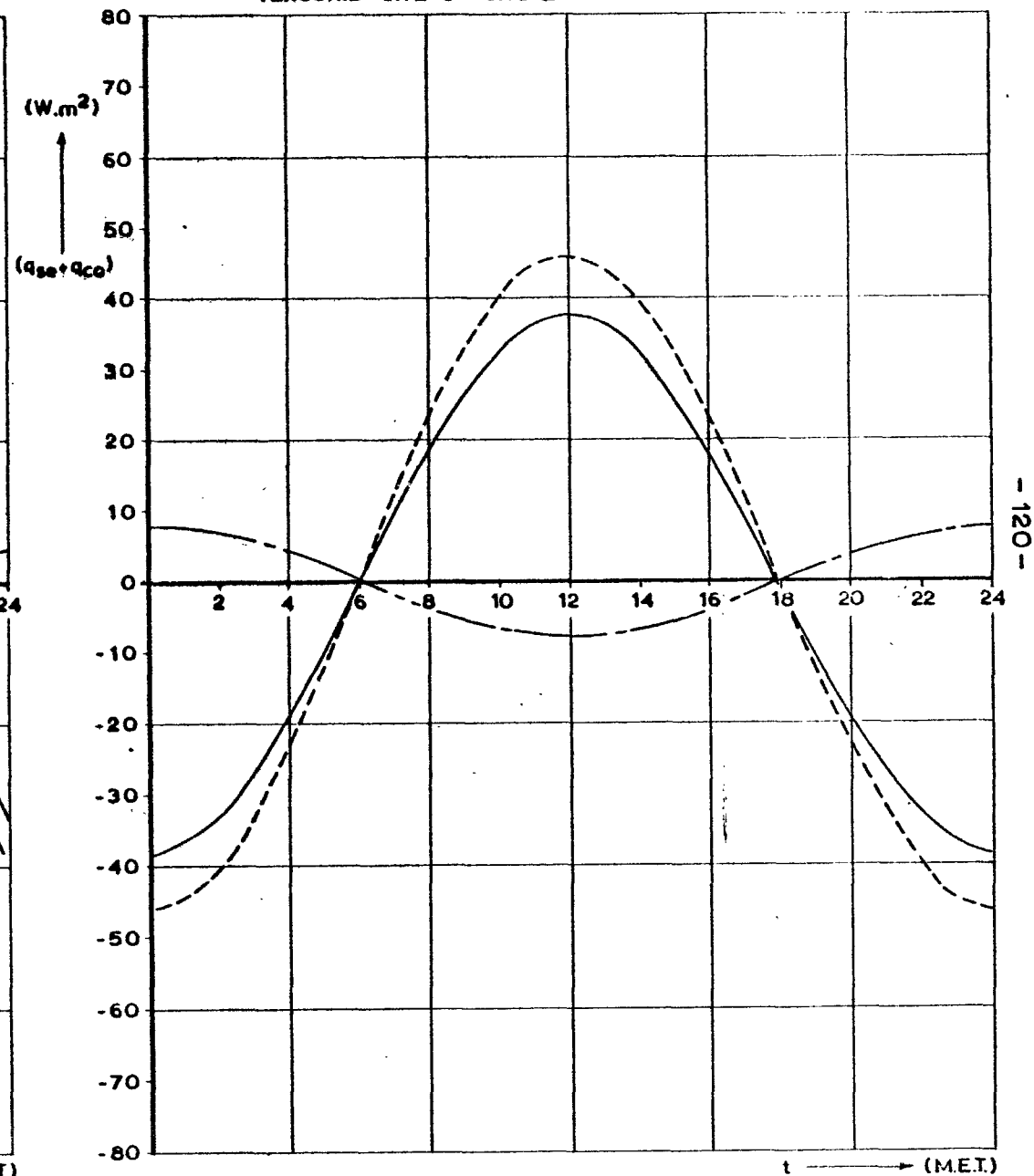


# REKENRESULTATEN MODEL 3 MET ENKEL DE GRONDTOON

——— TEMP. SITE I  
 - - - - TEMP. SITE II  
 - · - · TEMP. VERSCHIL SITE I - SITE II

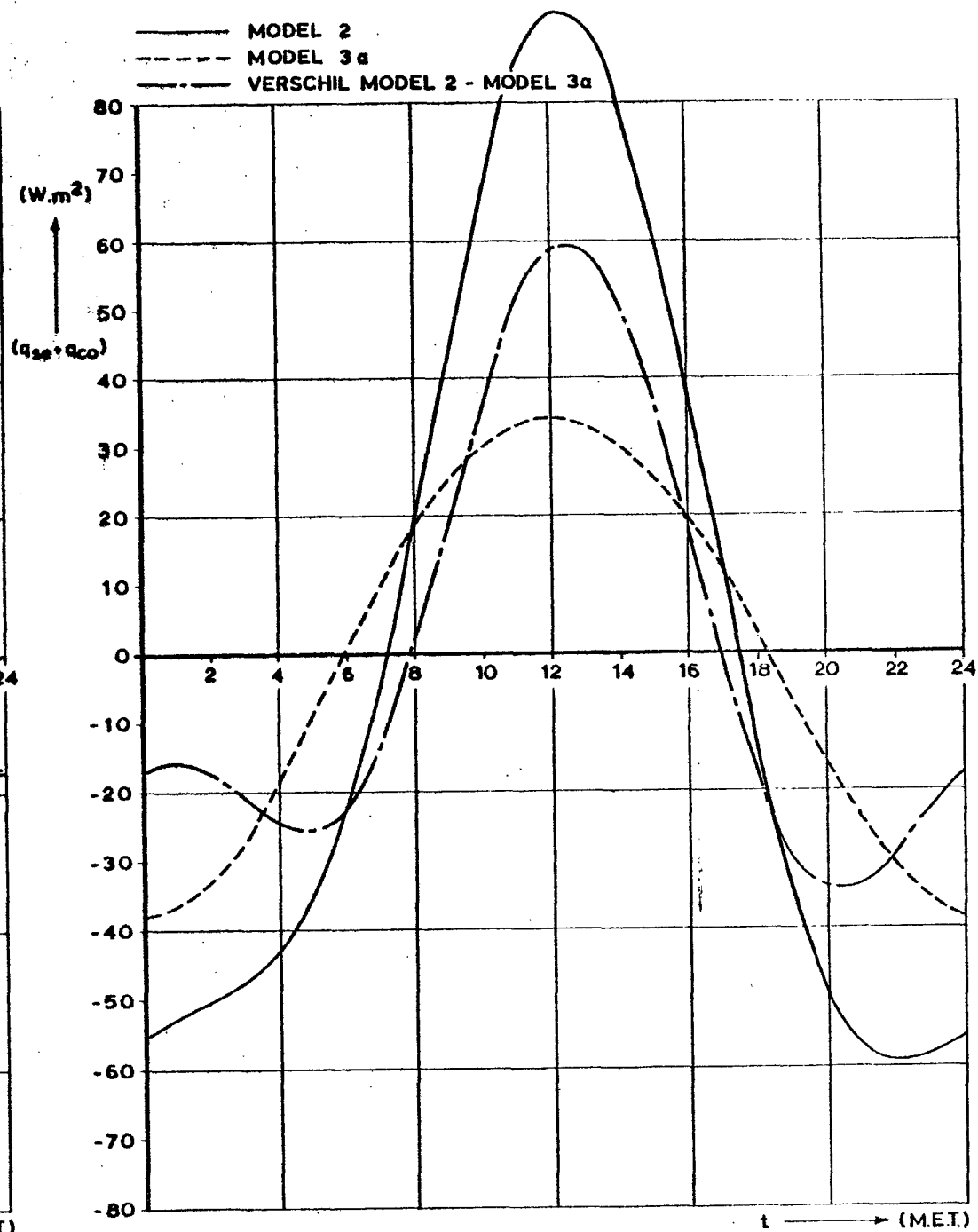
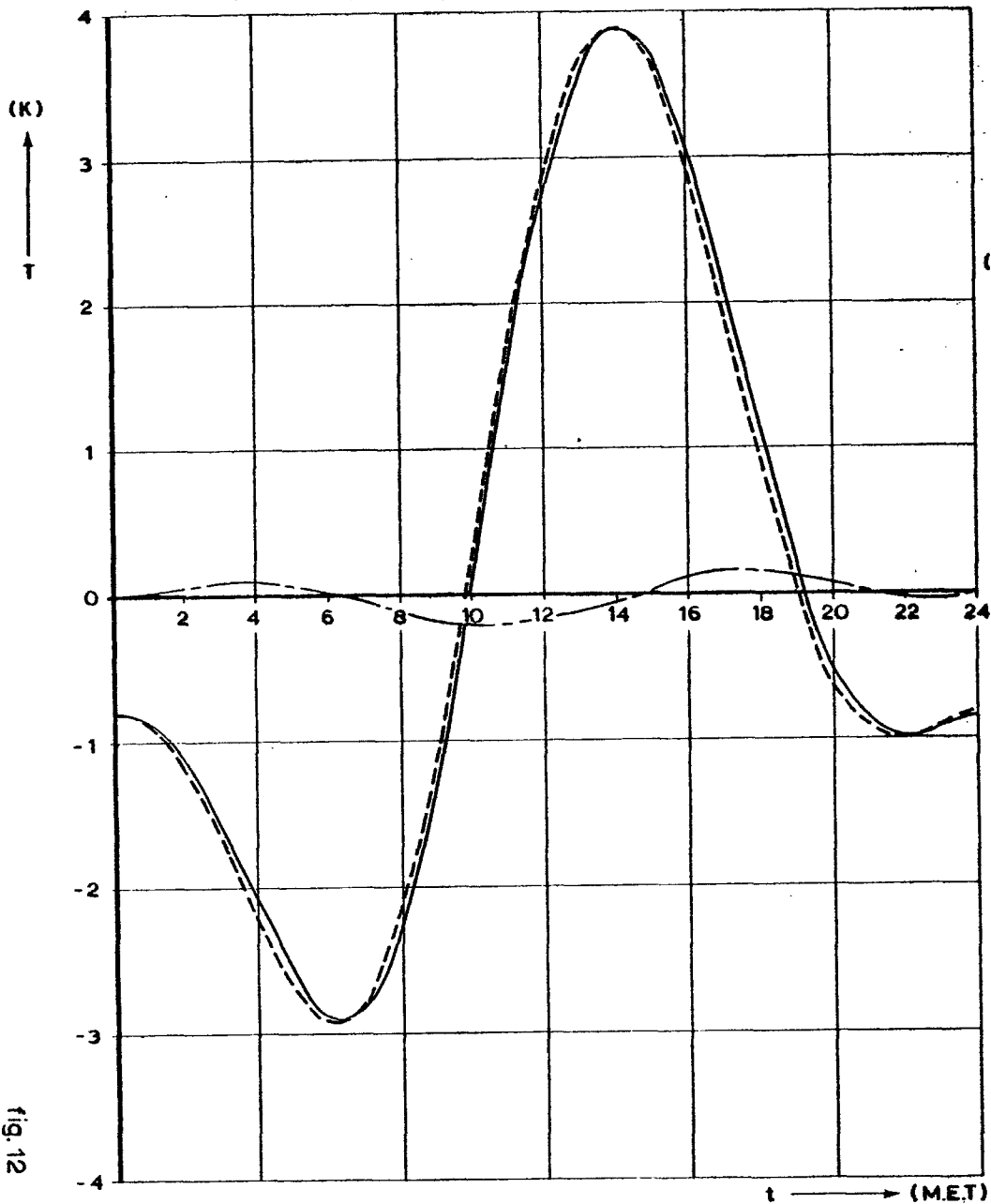


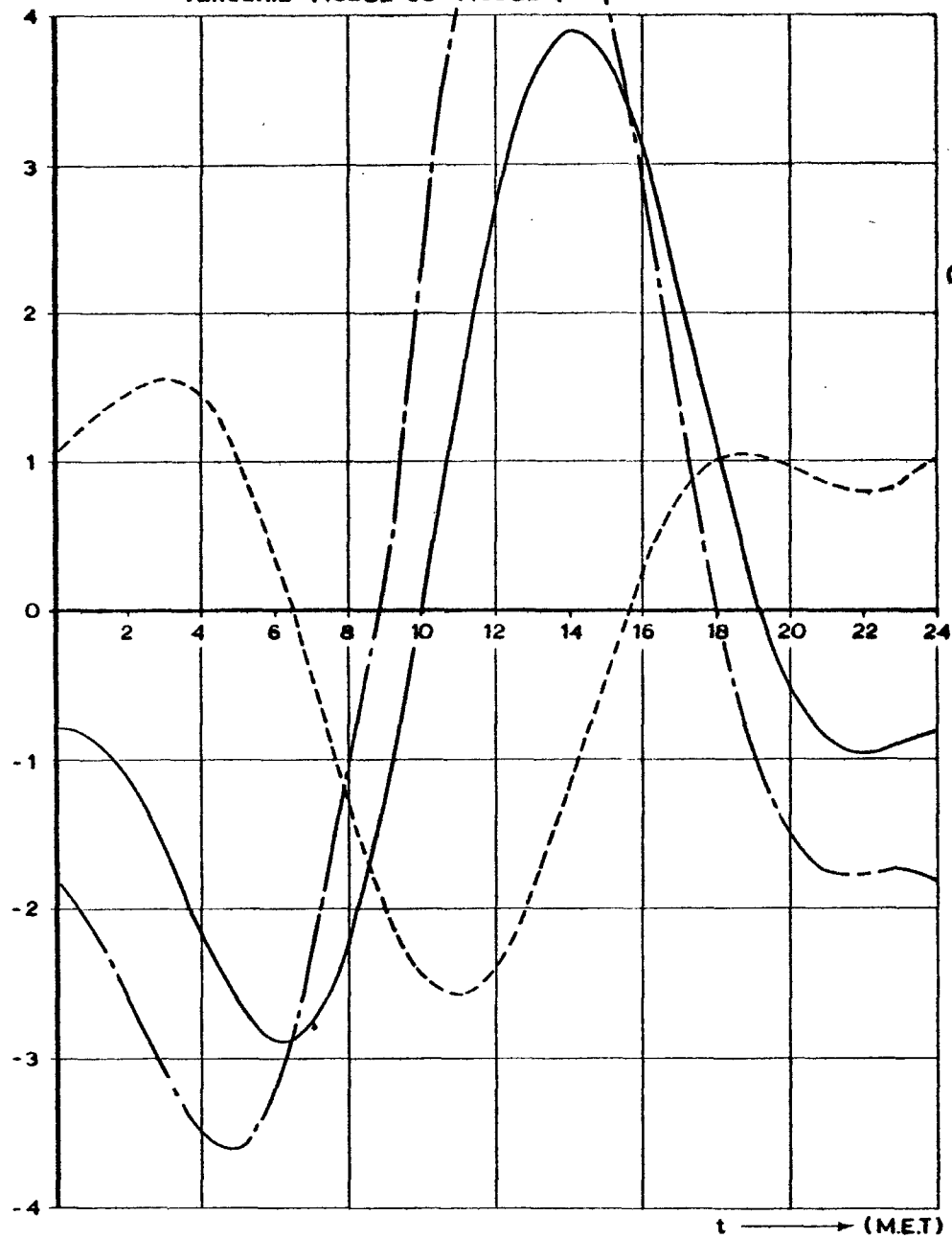
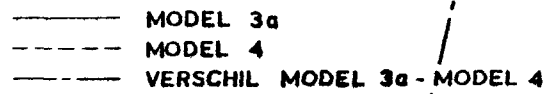
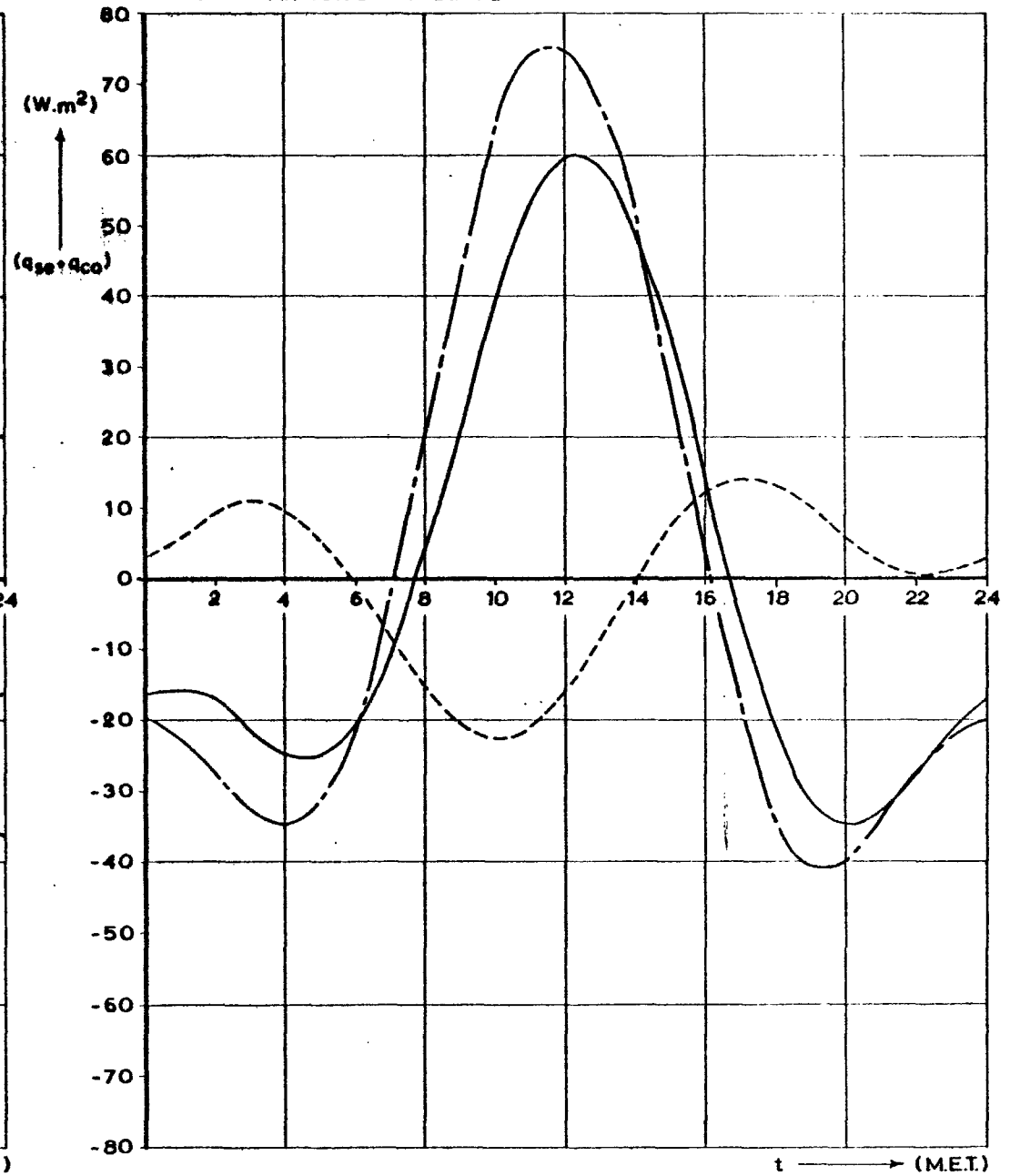
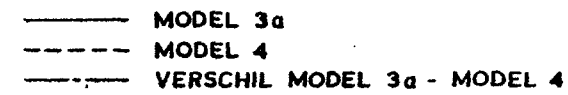
——— ( $q_{se} + q_{co}$ ) SITE I  
 - - - - ( $q_{se} + q_{co}$ ) SITE II  
 - · - · VERSCHIL SITE I - SITE II



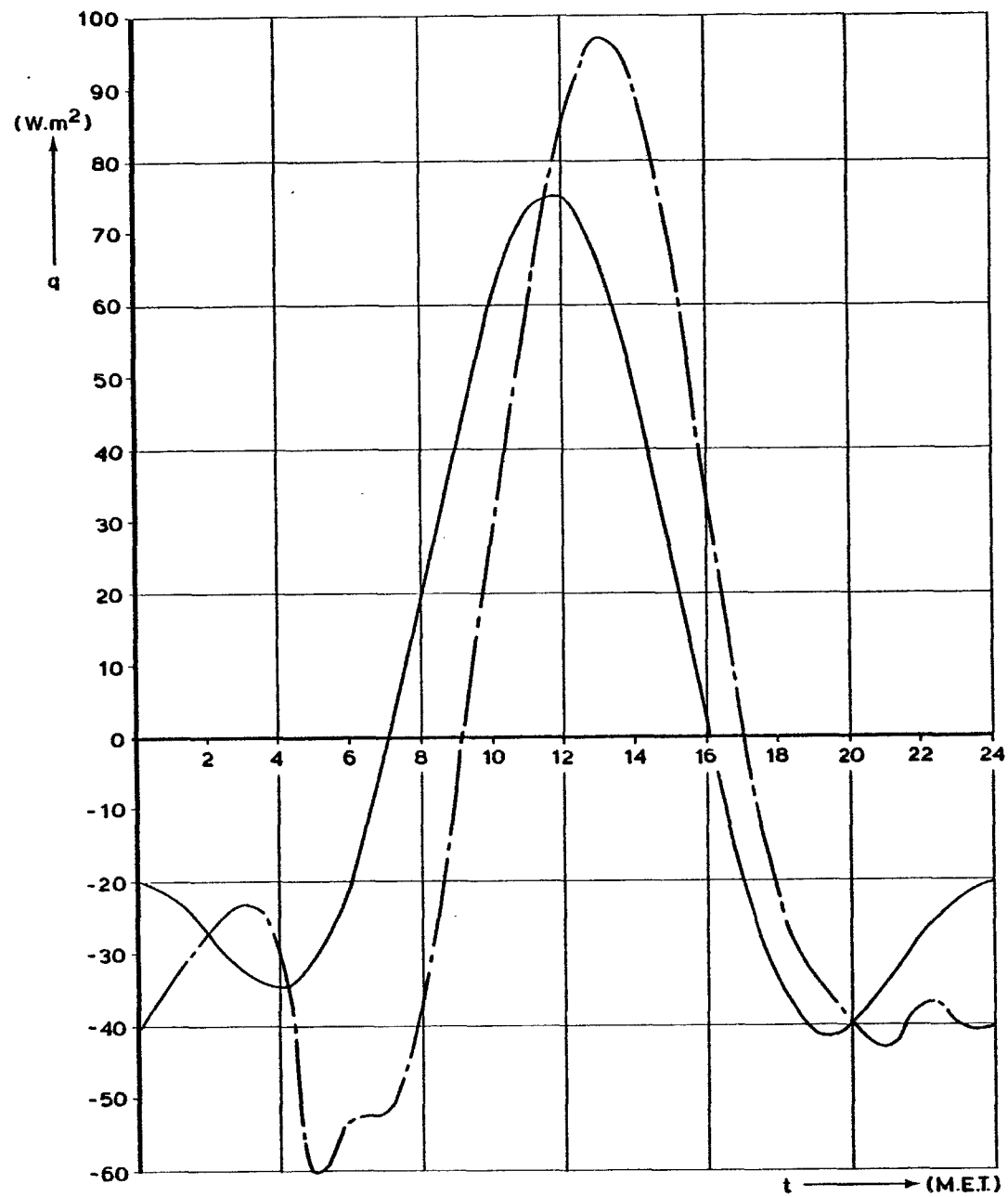
# REKENRESULTATEN GRONDTOON + 1<sup>e</sup> BOVENTOON OP SITE I

——— MODEL 2  
 - - - MODEL 3 a  
 - - - VERSCHIL MODEL 2 - MODEL 3 a





**fig. 13**



PERIODE (1977-03-08) - (1977-03-10)

-----  $q_{\text{ra}}^{\text{ne}} + q_{\text{ev}}$  : GEMIDDELD OVER DE PERIODE

—————  $q_{\text{se}} + q_{\text{co}}$  : BEREKEND M.B.V. MODEL 4

MET GRONDTOON EN 1<sup>o</sup> BOVENTOON

## 6. Aanbevelingen voor verder onderzoek

Wederom is gebleken, dat het mogelijk is om, mits onder de juiste omstandigheden en tijdvakken gevlogen, uit met IRLS verkregen gegevens van stralingstemperaturen van gewassen conclusies over thermische eigenschappen van de onderliggende bodem te trekken. Een belangrijk verschijnsel, met name faseverschuiving is opgespoord en dit biedt perspectieven om beter dan voorheen geschikte vluchttijdstippen en vluchtomstandigheden te bepalen.

Hiervoor is enerzijds fysisch onderzoek van het gedrag van stralings-, warmte- en vochttransport in de vegetatielaag nodig.

Anderzijds is bijtijds toetsen van ontwikkelde ideeën in het veld zeer gewenst.

Op vele beelden zijn ook weer de bekende "vegen" in de windrichting te onderkennen. Nu inzicht in de structuur van turbulente transporten begint te ontstaan, lijkt het de moeite waard vluchtgegevens te analyseren en nieuwe vluchten uit te voeren gecombineerd met op deze structuur gerichte grondwaarnemingen.

Het ligt voor de hand dit onderzoek in samenwerking met instellingen te doen die zich met grenslaagonderzoek van de atmosfeer bezighouden, zoals het KNMI en de afdeling Natuur- en Weerkunde van de Landbouwhogeschool te Wageningen.

In dezelfde richting zijn mogelijkheden bij het onderzoek naar de invloed van obstakels zoals huizen, gebouwen, windsingels enz. op de uitwisseling van warmte en vocht tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. Toepassingen zijn vooral te verwachten in Hydrologie, Meteorologie en Milieuzorg (waaronder luchtverontreiniging).

Applicatieonderzoek is op verschillende terreinen denkbaar.

Uit het verslag blijkt reeds dat vele kwelplaatsen uit de opnamen gevonden werden die in het veld aanvankelijk over het hoofd werden gezien.

Hoewel ook vele kwelplaatsen in het veld wel en van uit de lucht niet werden gevonden, lag een beduidend gedeelte hiervan op plaatsen (veelal onder geboomte of in rietbegroeiing) waar zij uit de lucht niet waargenomen konden worden. Het veldonderzoek zou zich in eerste instantie tot dergelijke plaatsen kunnen beperken.

Aangezien de IRLS opnamen snel ter beschikking staan, is het de moeite waard ook voor andere toepassingen na te gaan in hoeverre snelheid, nauwkeurigheid en kosten tegengestelde aspecten vertonen en tegen elkaar moeten worden afgewogen.

## Appendix I

### Inleiding

Vaak is men vooral geïnteresseerd in de verschillen in thermische straling van dichtbij elkaar gelegen percelen of perceelsgedeelten. Praktische problemen zijn daarbij onder welke weersomstandigheden en op welk uur van de dag gevlogen moet worden om de meeste kans op zo groot mogelijke temperatuurverschillen te hebben.

Tot de voornaamste energie-overdrachtsprocessen in een gewaslaag behoort de absorptie van zichtbaar licht en nabij infrarood met golflengtes van 300 nm tot 3  $\mu$ m. Deze heeft een duidelijke dagelijkse gang met een grondtoon van 24 h. Hogere harmonische termen spelen een belangrijke rol, wat direct duidelijk is als we de inkomende straling in genoemd golflengtegebied, (in de meteorologie de globale straling geheten), tegen de tijd uitzetten. Een voorbeeld van de globale straling is weergegeven in fig. 1. Uit deze figuur blijkt dat de globale straling niet kan worden weergegeven door slechts 1 harmonische term.

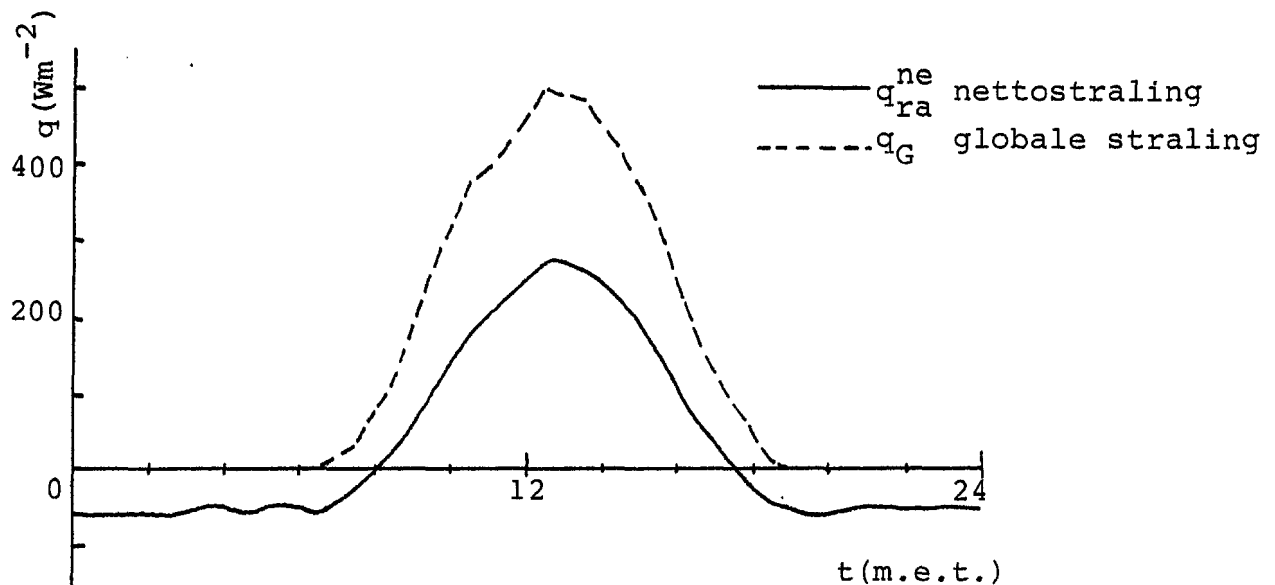


Fig. 1. Dagelijkse cyclus van de globale en de netto-straling.

Een voorbeeld van de netto-straling is ook weergegeven in fig. 1. Uit deze figuur is te zien, dat de netto-straling al veel beter gerepresenteerd kan worden door een harmonische. Merk op dat de netto-straling 's avonds en 's nachts negatief is.

Onder werkelijke omstandigheden, moet altijd gewerkt worden met de zg. ware zonnetijd (W.Z.T.). De ware zonnetijd kan afhankelijk van het jaargetijde en de lengtegraad nogal wat afwijken van de lokale tijd b.v. de Midden Europese Tijd (M.E.T.). Om hiervan een indruk te krijgen is in TABEL 1 het verschil tussen M.E.T. en W.Z.T. voor verschillende tijdstippen en lengtegraden weergegeven. Vooral moet men op dit verschil bedacht zijn, als in de zomer de zg. zomertijd wordt ingevoerd, welke dan overeenstemt met de Oost Europese Tijd (O.E.T.).

| Oosterlengte: | 3°30'  | 4° | 4°30' | 5° | 5°30' | 6° | 6°30' | 7° | Oosterlengte: | 3°30'  | 4° | 4°30' | 5° | 5°30' | 6° | 6°30' | 7° |
|---------------|--------|----|-------|----|-------|----|-------|----|---------------|--------|----|-------|----|-------|----|-------|----|
| jan.          | 1. 49  | 47 | 45    | 43 | 41    | 39 | 37    | 35 | jan.          | 5. 50  | 48 | 46    | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 |
|               | 8. 52  | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |               | 12. 51 | 49 | 47    | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 |
|               | 11. 54 | 52 | 50    | 48 | 46    | 44 | 42    | 40 |               | 15. 52 | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
|               | 16. 56 | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 |               | 20. 52 | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
|               | 21. 57 | 55 | 53    | 51 | 49    | 47 | 45    | 43 |               | 25. 52 | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
|               | 26. 58 | 56 | 54    | 52 | 50    | 48 | 46    | 44 |               | 30. 53 | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
|               | 31. 59 | 57 | 55    | 53 | 51    | 49 | 47    | 45 | aug.          | 4. 52  | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
| febr.         | 5. 60  | 58 | 56    | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 |               | 9. 53  | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |
|               | 10. 60 | 58 | 56    | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 |               | 14. 51 | 49 | 47    | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 |
|               | 15. 60 | 58 | 56    | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 |               | 18. 50 | 48 | 46    | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 |
|               | 20. 60 | 58 | 56    | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 |               | 24. 48 | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 |
|               | 25. 59 | 57 | 55    | 53 | 51    | 49 | 47    | 45 |               | 29. 47 | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 |
| mart.         | 2. 58  | 56 | 54    | 52 | 50    | 48 | 46    | 44 | sept.         | 3. 46  | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 |
|               | 7. 57  | 55 | 53    | 51 | 49    | 47 | 45    | 43 |               | 8. 44  | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 | 32    | 30 |
|               | 12. 56 | 54 | 52    | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 |               | 13. 42 | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 | 30    | 28 |
|               | 17. 55 | 53 | 51    | 49 | 47    | 45 | 43    | 41 |               | 18. 40 | 38 | 36    | 34 | 32    | 30 | 28    | 26 |
|               | 22. 53 | 51 | 49    | 47 | 45    | 43 | 41    | 39 |               | 23. 39 | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 | 27    | 25 |
|               | 27. 52 | 50 | 48    | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 |               | 28. 37 | 35 | 33    | 31 | 29    | 27 | 25    | 23 |
| apr.          | 1. 50  | 48 | 46    | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 | okt.          | 3. 35  | 33 | 31    | 29 | 27    | 25 | 23    | 21 |
|               | 6. 48  | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 |               | 8. 34  | 32 | 30    | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 |
|               | 11. 47 | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 |               | 13. 32 | 30 | 28    | 26 | 24    | 22 | 20    | 18 |
|               | 16. 46 | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 |               | 18. 31 | 29 | 27    | 25 | 23    | 21 | 19    | 17 |
|               | 21. 45 | 43 | 41    | 39 | 37    | 35 | 33    | 31 |               | 23. 30 | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 | 18    | 16 |
|               | 26. 44 | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 | 32    | 30 |               | 28. 30 | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 | 18    | 16 |
| mai.          | 1. 43  | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 | nov.          | 2. 30  | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 | 18    | 16 |
|               | 6. 43  | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 |               | 7. 30  | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 | 18    | 16 |
|               | 11. 42 | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 | 30    | 28 |               | 12. 30 | 28 | 26    | 24 | 22    | 20 | 18    | 16 |
|               | 16. 42 | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 | 30    | 28 |               | 17. 31 | 29 | 27    | 25 | 23    | 21 | 19    | 17 |
|               | 21. 42 | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 | 30    | 28 |               | 22. 32 | 30 | 28    | 26 | 24    | 22 | 20    | 18 |
|               | 26. 43 | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 |               | 27. 33 | 31 | 29    | 27 | 25    | 23 | 21    | 19 |
|               | 31. 43 | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 | dec.          | 2. 36  | 33 | 31    | 29 | 27    | 25 | 23    | 21 |
| jun.          | 5. 44  | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 | 32    | 30 |               | 7. 37  | 35 | 33    | 31 | 29    | 27 | 25    | 23 |
|               | 10. 45 | 43 | 41    | 39 | 37    | 35 | 33    | 31 |               | 12. 39 | 37 | 35    | 33 | 31    | 29 | 27    | 25 |
|               | 15. 46 | 44 | 42    | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 |               | 17. 42 | 40 | 38    | 36 | 34    | 32 | 30    | 28 |
|               | 20. 47 | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 |               | 22. 44 | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 | 32    | 30 |
|               | 25. 48 | 46 | 44    | 42 | 40    | 38 | 36    | 34 |               | 27. 47 | 45 | 43    | 41 | 39    | 37 | 35    | 33 |
|               | 30. 49 | 47 | 45    | 43 | 41    | 39 | 37    | 35 |               |        |    |       |    |       |    |       |    |

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.

TABEL 1 Tijdverschillen in minuten tussen Midden Europese Tijd (M.E.T.) en ware zonnetijd (W.Z.T.).

De geabsorbeerde straling wordt over een aantal warmtestromen verdeeld. Hierdoor wordt o.a. de temperatuur van de gewaslaag bepaald.

Ook deze temperatuur, of beter de temperaturen van verschillende onderdelen van de planten zullen periodieke verschijnselen zijn.

Toepassing van warmtebeelden berust erop, dat verschillen in thermische eigenschappen van gewas en bodem zullen resulteren in (interpreteerbare) verschillen van de termische uitstraling, zeg gemakshalve de gewastemperatuur.

Nu zijn via de gewastemperatuur alle warmtestromen met elkaar gekoppeld.



Dat wil zeggen dat wijziging van één der fluxen de zwaai en de fase van alle andere fluxen in principe zal wijzigen, dus ook de zwaai en de fase van de gewastemperaturen.

Verandering van de zwaai is reeds lang bekend en vormt de basis voor de interpretatie van warmtebeelden. Over de faseverschuiving is echter veel minder bekend.

Grondmetingen op twee plekken grasland bij het kwelonderzoek Waal winter '77 toonden een duidelijke faseverschuiving van de thermische uitstraling, wat geïnterpreteerd werd als een verschuiving van de gewastemperatuur. Dit was een bevestiging van eerder in de Alblasserwaard eveneens op grasland gevonden resultaten. De voornaamste warmtestroom die in het onderhavige geval gewijzigd kon worden lijkt de warmtestroom in de grond te zijn.

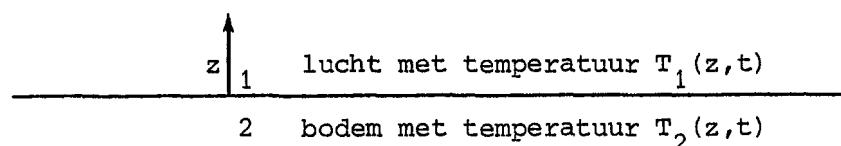
Niet zo verwonderlijk, want de grond van eerder verkregen resultaten werd het thermografisch onderzoek juist verricht uitgaande van de veronderstelling dat de gewastemperatuur door de verschillen in thermische bodemeigenschappen wordt beïnvloed.

Het doel van het voorliggende onderzoek is na te gaan of verschillen in thermische eigenschappen inderdaad in staat zijn de gevonden verschillen in fase en zwaai te verklaren.

Model: Ten behoeve van deze gevoeligheidsanalyse wordt een model gebruikt dat rigoreus vereenvoudigd is.

De voornaamste veronderstellingen zijn de volgende:

1. Het grensvlak bodem/lucht is vlak en is een goed gedefiniëerd oppervlak. De gewaslaag is a.h.w. "platgeslagen".
2. Alle warmte-overdrachten van gewas naar atmosfeer en terug worden verondersteld exact aan het oppervlak plaats te vinden. Een extinctiecoëfficiënt voor stralingsabsorptie heeft infinitesimale afmetingen.
3. Alle horizontale fluxen zijn verwaarloosbaar.
4. Van de energiebalans aan het oppervlak worden alleen de voelbare warmtestroom in de lucht ( $H_{se}$ ) en die in de bodem ( $H_{co}$ ) beschouwd.
5. Grond is homogeen.
6. Zowel grond als lucht worden halfoneindig beschouwd.



7. De oppervlaktetemperatuur  $T$  wordt opgedrukt en heeft de volgende vorm:

$$z = 0 : T_1 = T_2 = T_0 + Ae^{i\omega t}, \quad \omega = \frac{2\pi}{86400} \text{ rad s}^{-1}$$

De complexe vorm van de temperatuur is nodig om de fase van warmtestromen te kunnen bepalen.

8. De warmtestroom in de lucht wordt beschreven door de volgende differentiaalvergelijking

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \alpha (z+z_0) \frac{\partial T_1}{\partial z} \right\}, \text{ met } \alpha(z+z_0) = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_{p,1}} \quad (1)$$

voor neutrale omstandigheden.

9. De warmtestroom in de bodem wordt beschreven door de volgende differentiaalvergelijking voor homogene grond

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \text{ met } a = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_{p,2}} \quad (2)$$

$$10. z = \infty : T_1 = T_2 = T_0$$

Indien de verdamping gering is, wordt verondersteld dat de fase van  $H_{se} + H_{c0}$  weinig gevoelig is voor veranderingen in  $H_{c0}$ , terwijl de oppervlaktetemperatuur dit wel is.

Dit is een veronderstelling die door metingen bevestigd zou moeten worden.

Het betekent dat de variaties in de som van de balanstermen:  $H_{se} + H_{c0} + H_{sh} + H_{zo}^{ai}$  in hoofdzaak wordt opgevangen door de eigen uitstraling  $H_{zo}^{su}$ , dus door de oppervlaktetemperatuur.

De faseverschuiving van  $H_{se} + H_{c0}$  t.g.v. verschillen in thermische eigenschappen van de bodem kan vervolgens getransformeerd worden tot een faseverschuiving van de oppervlaktetemperatuur.

#### Oplossing van $H_{c0}$

Veronderstel  $T_2(z,t) = T_2(t) \times T_2(z)$ . Substitutie in (2) levert met de randvoorwaarden (zie bijv. Carslaw en Jaeger).

$$\left. \begin{aligned} T_2(z,t) &= Ae^{z/D} e^{i(\omega t + z/D)} \\ \text{en} \quad H_{c0}(0,t) &= -\rho c_p \sqrt{a\omega} Ae^{i(\omega t + \frac{\pi}{4})} \end{aligned} \right\} \quad D = \sqrt{\frac{2a}{\omega}}; \quad a = \lambda/\rho c_p$$

N.B.: In de literatuur vindt men deze formules steeds met in de exponenten het tegengestelde teken voor  $z$ . Dat komt omdat  $z$  hier negatief is genomen, verder van het oppervlak af.

### Oplossing van $H_{se}$

Weer wordt gezocht naar een oplossing van het type  $T_1 = T_1(t) \times T_1(z) + c_1$ .

De d.v. (2) gaat er dan met  $T_1(t) = e^{i\omega t}$  als volgt uitzien

$$(z+z_0) T_1''(z) + T_1'(z) = \frac{i\omega}{\alpha} T_1(z).$$

Hier is een Besselfunctie van te maken door de transformatie

$$x = \sqrt{\frac{4\omega(z+z_0)}{\alpha}} \text{ in te voeren.}$$

$$\text{Dit levert } x^2 T_1''(x) + x T_1'(x) - ix^2 T_1(x) = 0$$

Deze oplossing kan geschreven worden als

$$c J_0(ze + \frac{3}{4}\pi i), c_3 H_0^{(1)}(ze + \frac{3}{4}\pi i) \text{ of } c_4 H_0^{(2)}(ze - \frac{3}{4}\pi i)$$

Er is nog één integratieconstante nodig. De laatste twee worden nul voor  $z \rightarrow \infty$  en kunnen dus gebruikt worden daar  $z$  reëel is geldt

$$z_{\text{Re}} e^{\frac{3}{4}\pi i} = z_{\text{Re}} \sqrt{i} \quad \text{en} \quad z_{\text{Re}} e^{-\frac{3}{4}\pi i} = -z_{\text{Re}} \sqrt{i}$$

Getabelleerd is  $H_0^{(1)}(x\sqrt{i})$  vandaar dat de keuze valt op  $c_3 H_0^{(1)}(ze + \frac{3}{4}\pi i)$  gebruik makende van de eigenschap dat

$$H_0^{(1)}(z\sqrt{-i}) = -\{H_0^{(1)}(z\sqrt{i})\}^* \text{ waarin } * \text{ de complex toegevoegde betekent.}$$

De volledige oplossing kan nu, na terugtransformatie en met gebruikmaking van de randvoorwaarden, geschreven worden:

$$T_1 = T_0 + A e^{i\omega t} \{H_0^{(1)}\left(\frac{4i\omega(z+z_0)}{\alpha}\right)\}^{\frac{1}{2}*} / \{H_0^{(1)}\left(\frac{4i\omega z_0}{\alpha}\right)\}^{\frac{1}{2}*}$$

De warmte-stroomdichtheid aan het oppervlak, dus  $z=0$ , is

$$H_{se,0} = -\left(\frac{\lambda}{\partial z} T_1\right)_{z=0}$$

Gebruik makende van de eigenschap  $\frac{d}{dx} \{H_0^{(1)}(x\sqrt{i})\} = -\sqrt{-i} \{H_1^{(1)}(x\sqrt{i})\}^*$

$$\text{levert dit } H_{se,0} = A(\rho_1 c_{p,1}) (\alpha \omega z_0)^{\frac{1}{2}} \frac{\{H_1^{(1)}(\frac{4i\omega z_0}{\alpha})\}^{\frac{1}{2}*}}{\{H_0^{(1)}(\frac{4i\omega z_0}{\alpha})\}^{\frac{1}{2}*}} e^{i(t + \frac{3}{4}\pi)}$$

Voor de berekeningen moeten wegens de kleine waarden van de argumenten ontwikkelingen worden gebruikt en wel

$$H_0^{(1)}(x\sqrt{i}) = \frac{1}{2} + \frac{x^2}{2\pi} \left( \ln \frac{\gamma x}{2} - 1 \right) + \left( \frac{2}{\pi} \ln \frac{\gamma x}{2} \right) i \quad |x| \leq 0,1$$

$$\frac{d}{dx} \{H_0^{(1)}(x\sqrt{i})\} = \frac{x}{\pi} \left( \ln \frac{\gamma x}{2} - \frac{1}{2} \right) + \frac{2}{\pi x} i \quad |x| \leq 0,1$$

met  $\alpha = 0,12 \text{ m/s}$ ,  $z_0 = 0,01 \text{ m}$ ,  $A = 7,5 \text{ K}$

wordt

$$H_{se} = 98,4 e^{(0,144 + i\omega t)} i \text{ W/m}^2$$

voor  $t = 0$ :  $H_{se} = \{97,5 + 0,143 i\} \text{ W/m}^2$

Het faseverschil tussen  $H_{se}$  en  $T_0$  is dus  $0,144 \text{ rad} \hat{=} 0,55 \text{ h}$ .

Voor  $H_{c0}$  vonden we een faseverschil van  $\frac{\pi}{4} \text{ rad} = 3 \text{ uur!}$

De fase van de som wordt nu berekend met

$$\rho_2 c_{p,2} = 2,9 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}; a = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; A = 7,5 \text{ K}; t=0$$

$$H_{c0} = 92,5 (1 + i) \text{ W/m}^2.$$

Dit levert  $\Delta\theta_{res} = \arctg \left( \frac{92,5 + 0,143}{92,5 + 97,5} \right) \approx \arctg 0,487 \approx 0,456 \text{ rad} \hat{=} 1,75 \text{ h}$ .

Voor  $\rho_2 c_{p,2} = 3 \times 10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$  en  $a = 0,45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

komt er  $1,73 \text{ h}$ , dus een tijdsverschil van 1 à 2 minuten.

Dit lijkt geen verklaring van gevonden faseverschillen op te leveren.

Nemen we echter eens een verschil van  $\rho c_p \sqrt{a}$  van een factor 2. We weten dat verschillen tussen  $\sqrt{a}$  van een factor 5 voorkomen. Vooral een iets dikkere laag plantenresten kunnen  $\rho c_p$  wel een factor  $10^2$  of  $10^3$  doen verlagen, maar exacte gegevens zijn er nauwelijks over bekend.

Dit zou betekenen dat voor  $t=0$   $H_{c0} \approx 45 (1+i) \text{ W/m}^2$

en

$$\Delta\theta_{res} = \arctg \left( \frac{45 + 0,143}{45 + 98,5} \right) = \arctg 0,317 = 0,31 \text{ rad} \hat{=} 1,85 \text{ h}.$$

Het verschil wordt nu ruim een half uur en is zeer interessant.

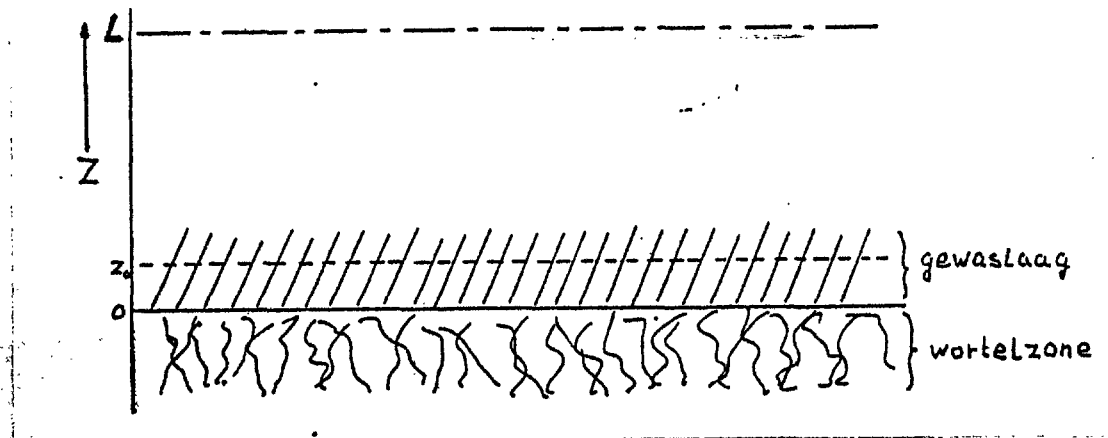
### Conclusie

1. Faseverschuiving van de orde van kwartieren van de oppervlaktetemperatuur als gevolg van verschillende thermische eigenschappen van de grond is mogelijk.
2. De thermische eigenschappen van de bovenste grondlagen zijn hierbij van groot belang. Gegevens hierover zijn er nauwelijks. Mogelijk levert literatuuronderzoek nog iets op.

3. Uitbreiding van het model is noodzakelijk. Hierbij is gedacht aan een uit twee lagen opgebouwde bodem (zie appendix 3).
4. Invloed van de gebruikte grootheden voor de atmosfeer moet nog worden nagegaan. Dit zal in appendix 2 gedaan worden.

## Appendix II

### Model 2: Het atmosferische model



Aannamen: 1. Kies een coördinatenstelsel met de  $z$  als verticaal.

Het nulpunt wordt gekozen op een afstand  $z_0$  boven het grondoppervlak. Het grondoppervlak heeft dus een coördinaat  $z = -z_0$ . Alle transporten worden verondersteld verticale fluxen op te leveren, netto horizontale fluxen worden verwaarloosd.

De ruwheidshoogte  $z_0$  is gedefinieerd als de hoogte boven het maaiveld waar een logaritmisch windprofiel onder neutrale omstandigheden in een evenwichtsgrenslaag naar beneden geëxtrapoleerd een windsnelheid nul oplevert.

2. Alle transporten van warmte in de lucht kunnen worden beschreven met de d.v.

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \alpha(z+z_0) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right\} \quad \text{voor } 0 < z < L-z_0 \quad (1)$$

$$\alpha(z+z_0) = K = k u^* (z+z_0)$$

met voor  $k = 0,38$

$$\alpha = 0,38 u^*$$

3. Verdamping is in het beschouwde tijdvak klein verondersteld en samengevoegd met de nettostraling.

De energiehuishouding van de laag tussen  $z = 0$  en  $z = -z_0$  kan worden beschreven met

$$q_{c0} + q_{se} + \left( q_{ra}^{ne} + q_{ev} \right) = 0 \quad (2)$$

4. Op  $z = 0$  geldt  $T_{0,t} = T_0 + \hat{A}e^{i\omega_1 t}$  (3)

met  $\omega_1 = \frac{2\pi}{86400} \text{ rad}$

5. Op  $z = L - z_0$  geldt  $q_{se}|_{L-z_0} = 0$ , dus er wordt geen warmte naar  $z (L - z_0)$  afgevoerd.

Met  $q_{se}|_z = -\lambda \frac{\partial T(z,t)}{\partial z}$  levert dit

$\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}|_{z=L-z_0} = 0$  (4)

6. De warmtestroom in de bodem wordt beschreven door de d.v. voor homogene isotrope grond:

$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha_s \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right)$  voor  $z < -z_0$  met  $\alpha_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_{p,s}}$  (5)

waarbij  $s$  op soil slaat.

7. Voor  $z = -z_0$  geldt  $T(-z_0, t) = T_0 + \hat{A}e^{i\omega_1 t}$  (6)

M.a.w. de laag in het gewas  $-z_0 < z < 0$  wordt verondersteld geen warmtecapaciteit en een oneindig groot warmtegeleidingsvermogen te hebben.

8. Voor  $z = -\infty$  geldt  $T(-\infty, t) = T_0$  (7)

9. Uit metingen in gebieden als de Tielerwaard en de Alblasserwaard blijkt dat kleine gebieden met afwijkende thermische bodemeigenschappen, zoals een zandbaan in een klei- of veengebied een duidelijke faseverschuiving te zien geven in de temperatuur op  $z + z_0 = +0$ , dus de "oppervlaktetemperatuur".

#### De oplossing van $q_{se}$

In de literatuur is te vinden dat indien verondersteld wordt dat

$T_s(z,t) = T_s(t) \times T_s(z)$  (8)

Een oplossing wordt gegeven door

$$T_s(z, t) = T_0 + \hat{A} e^{z/D_1} e^{i(\omega_1 t - z/D_1)} \quad (8a)$$

met  $D_1 = \sqrt{\frac{z\alpha}{\omega_1}}$  en  $\alpha_s = \frac{\lambda_s}{\rho_s c_{p,s}} \quad (z < -z_0)$

$$q_{c0}(0, t) = -\rho_s c_{p,s} \sqrt{\alpha_s \omega_1} \hat{A} e^{i(\omega_1 t + \pi/4)} \quad (9)$$

In de literatuur vindt men deze formules met de exponent voor  $z$  een tegenovergesteld teken. Dat komt omdat hier  $z$  negatief is genomen van het oppervlak af en gebruikelijk is deze positief te nemen.

#### De oplossing van $q_{se}$

Wederom wordt gezocht naar een oplossing van het type

$$T(z, t) = T(z) \times T(t) + c_1 \quad (10)$$

De d.v. gaat met  $T(t) = e^{i\omega t}$  over in

$$(z + z_0) T''(z) + T'(z) = \frac{i\omega_1}{\alpha} T(z) \quad (10a)$$

Met de transformatie  $x = \sqrt{\frac{4\omega_1(z+z_0)}{\alpha}}$  en  $T_z \rightarrow T_x$

$$\text{levert dit } x^2 T_x'' + x T_x' - ix^2 T_x = 0 \quad (10b)$$

De afgeleiden zijn naar het argument  $x$ .

De meest praktische algemene oplossing luidt

$$T_x = A J_0(x i^{1/2}) + B K_0(x i^{1/2}) \quad (11)$$

$$T_z = A J_0\left(i^{1/2} \frac{4\omega_1(z+z_0)}{\alpha}\right) + B K_0\left(i^{1/2} \frac{4\omega_1(z+z_0)}{\alpha}\right) \quad (12)$$

Met  $A$  en  $B$  complexe constanten. Neem:  $A = a+bi$

$$B = -c+di$$

Voor de randvoorwaarde op  $z = L$  is  $\frac{\partial T(z, t)}{\partial z}$  nodig.

Daartoe schrijven we

$$T_z = A(\text{ber } x + i \text{ bei } x) + B(\text{ker } x + i \text{ kei } x) \quad (12a)$$



$$\begin{aligned} \frac{dT_z}{dz} &= A \frac{d}{dx} J_0 (xi^{\frac{3}{2}}) \frac{dx}{dz} + B \frac{d}{dx} K_0 (xi^{\frac{1}{2}}) \frac{dx}{dz} = \\ &= \sqrt{\frac{\omega_1}{\alpha(z+z_0)}} \{A(\text{ber}'x + i \text{bei}'x) + B(\text{ker}'x + i \text{kei}'x)\} \end{aligned} \quad (13)$$

noem  $x$  voor  $z = L - z_0$ ,  $x_L$

(4) en (13) leveren na invulling van  $A$  en  $B$  en na splitsing van reëel en imaginair deel

$$\left. \begin{aligned} a \text{ber}'x_L - b \text{bei}'x_L + c \text{ker}'x_L - d \text{kei}'x_L &= 0 \\ a \text{bei}'x_L + b \text{ber}'x_L + c \text{kei}'x_L + d \text{ker}'x_L &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Voor de onderzijde geldt  $x_0 = \sqrt{\frac{4\omega_1 z_0}{\alpha}} = 0(10^{-2})$

Dit houdt in dat  $\text{ber } x_0 \approx 1$ ,  $\text{ker } x_0 \approx 0,1159 - \ln x_0$ ,

$$\text{bei } x_0 \approx 0, \quad \text{kei } x_0 \approx -\frac{\pi}{4}$$

Dit levert met (3) en (12a)

$$T_{0,t} = T_0 + e^{i\omega_1 t} \{a + bi + (c + di)(\text{ker } x_0 - \frac{\pi}{4} i)\} \quad (15)$$

en

$$\hat{A} = a + bi + (c + di)(\text{ker } x_0 - \frac{\pi}{4} i) \quad (16)$$

Hieruit volgt

$$\left. \begin{aligned} a + c \text{ker } x_0 + \frac{\pi}{4} d &= \hat{A} \\ b - \frac{\pi}{4} c + d \text{ker } x_0 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(14) en (17) zijn vier 1e graadsvergelijkingen in  $a$ ,  $b$ ,  $c$  en  $d$ . Hiermede kan (10) worden opgelost.

### Berekeningen

$\hat{A}$  en  $L$  moeten worden bepaald uit metingen, evenals  $\alpha_s$ . Vooral  $\hat{A}$  en  $L$  zijn sterk tijdsafhankelijk. Uit de metingen van het meetstation in de winter '76-'77 werd de periode 8 t/m 10 maart 1977 gekozen. (zie par. 4.1.)

$\hat{A}$  voor de grondtoon met  $\omega_1 = \frac{2\pi}{86400} \text{ rad s}^{-1}$  en  $\hat{A}_1$  voor de 1<sup>e</sup> boventoon. met  $\omega_1 = \frac{4\pi}{86400} \text{ rad s}^{-1}$  bleken de belangrijkste bijdrage tot de dagelijkse temperatuurvariatie te leveren. Dit bleek uit de resultaten van de complexe Fourierreeks-presentatie toegepast op de metingen van de oppervlakte-temperatuur. (Zie par. 4.2.)

Als referentie werden de metingen op het kleipakket (veld I) aangehouden. De waarnemingsplaats op de zandbaan is veld II genoemd.

|             | veld I                          | veld II                         |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|
| $\hat{A}_0$ | $\hat{A}_{10} = 2,65 \text{ K}$ | $\hat{A}_{20} = 3,03 \text{ K}$ |
| $\hat{A}_1$ | $\hat{A}_{11} = 1,41 \text{ K}$ | $\hat{A}_{21} = 1,54 \text{ K}$ |

Het zwakste punt van het model is waarschijnlijk de aanname dat  $K$  en  $L$  niet tijdsafhankelijk zijn.

Het is zelfs zo dat  $L$  in feite gedurende de tijd dat de verticale partiële temperatuurgradiënt positief is, niet kan worden gedefinieerd.

De maximale hoogte waarop menging overdag mogelijk geacht moet worden werd bepaald uit de radiosonde-waarnemingen van De Bilt ("Temps").

Voor de beschouwde periode werd hiervoor gemiddeld  $L = 1100 \text{ m}$  gevonden.

Daarnaast werd geschat dat als een redelijke "gemiddelde" waarde  $L = 150 \text{ m}$  genomen kan worden.

Voor het gebied werd geschat  $z_0 = 0,03 \text{ m}$ .

Tenslotte werd voor het kleipakket (veld I) genomen  $\rho_{so} c_{p_{so}} = 2,9 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$   
 $\alpha_{so} = 0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

en voor de zandbaan (veld II)  $\rho_{so} c_{p_{so}} = 3 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$   
 $\alpha_{so} = 0,45 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Voor hogere harmonische gelden dezelfde oplossingen. De eindoplossingen mogen worden gesuperponeerd. De totale warmtestroom kan worden geschreven als

$$q_{\text{tot}} \Big|_{z=0} = \left| q_A^{(1)} \right| e^{i(\omega_1 t + \psi_1)} + \left| q_A^{(2)} \right| e^{i(\omega_2 t + \psi_2)}$$

### Appendix III

De formules die voor temperaturen en warmtestroomdichtheden in de bodem bij een tweelagenprobleem werden gebruikt, zijn te vinden in Van Wijk [1].

Een samenvatting voor de grondtoon luidt:

$$T(0,1) = T_0 + \hat{A}_1 \sin(\omega_1 t + \psi_1) + \hat{A}_2 \sin(\omega_1 t + \psi_2 - 2d/D_1)$$

$$\text{met } \psi_1 = \arctg\left(\frac{re^{-2d/D_1} \sin(2d/D_1)}{1 + re^{-2d/D_1} \cos(2d/D_1)}\right)$$

$$\psi_2 = \psi_1 - (2d/D_1)$$

$$r = \frac{\sqrt{\lambda_1 C_1} - \sqrt{\lambda_2 C_2}}{\sqrt{\lambda_1 C_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2}}$$

$$\hat{A}_1 = \hat{A} \left[ 1 + r^2 e^{-4d/D_1} + 2 re^{-2d/D_1} \cos(2d/D_1) \right]^{-1/2}$$

waarbij  $\hat{A}$  de totale amplitude aan het oppervlak van de gemeten temperatuur,  $\hat{A}_1$  de amplitude van de indringende golf aan het opp. en  $\hat{A}_2$  de amplitude van de gereflecteerde golf aan het oppervlak.

$$\hat{A}_2 = \hat{A}_1 e^{-2d/D_1}$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{2\alpha_1}{\lambda_1 C_1}}$$

Voor de hogere harmonische gelden overeenkomstige formuleringen.

De tot hiertoe gegeven formules werden gebruikt in de modellen 3, 3a en 4.

In model 4 werd bovendien gebruik gemaakt van

$$T_d = \hat{A}_1 (1 + r) e^{-d/D_1}$$

---

[1] Van Wijk, W.R., Physics of Plant Environment,  
North Holland Publ. Cie., Amsterdam, 1963.



# CENTRUM VOOR ONDERZOEK WATERKERINGEN

Hooftskade 1  
's-Gravenhage  
Tel. (070) 88 93 70

S-95.006

Aan het Hoofd van de Fysische Afdeling  
van de Rijkswaterstaat, directie  
Waterhuishouding en Waterbeweging,  
Hooftskade 1,  
2526 KA Den Haag

Uw kenmerk: 77-FA-67W brief van: 18-11-77 Ons kenmerk:

's-Gravenhage, 3 februari 1978

Behandeld door: ing. A.v. Apeldoorn nr.: 160

Onderwerp: Opsporing kwelplaatsen <sup>Bijlagen:</sup> langs de  
Waal tussen Tuil en Gorkum, met  
warmtebeelden. Rapport RSWS 172/13  
77-FA

Naar aanleiding van vragen van het C.O.W. of op relatief eenvoudige en snelle wijze een overzicht is te verkrijgen van kwelplaatsen langs een rivier, is indertijd een onderzoek gestart naar de mogelijkheid tot toepassing van thermografie. Voor dit onderzoek dat door uw afdeling wordt gecoördineerd, werd een projectgroep ingesteld waarin diverse instellingen en diensten, waaronder het C.O.W., vertegenwoordigd zijn. Door ir. H.W. Brunsveld-van Hulten van uw afdeling is naar aanleiding van het onderzoek een rapport opgesteld: "13 77-FA Opsporing kwelplaatsen langs de Waal tussen Tuil en Gorkum met warmtebeelden", welk rapport mij in november j.l. werd toegezonden.

Daar het onderzoek mede door een vertegenwoordiger van het C.O.W. begeleid werd heeft het mij enigszins bevreemd dat eerder genoemd rapport niet in conceptvorm aan ons om commentaar is gezonden, maar direct op grotere schaal is verspreid. In de vergadering van de projectgroep van 16 december 1977 is reeds medegedeeld dat het C.O.W. nog enkele kritische aantekeningen bij het rapport zou willen plaatsen. Ter voldoening hieraan doe ik u die hierbij toekomen.

- De nadere omschrijving van de begrippen welplaats en met klei bedekte zandbaan lijkt minder gelukkig.

\* Het is niet in alle gevallen zo dat het water bij een welplaats

(doorgaans "wel" genoemd) "vrijelijk door een gat in de bodem" welt; de wel is veelal meer te zien als een plek van beperkte omvang waar de samenhang van de oppervlaktelaag c.q. lagen verstoord is door het uitstromende grondwater.

In het geval van de met klei bedekte zandbaan dringt het grondwater, net als bij de wellen, door de oppervlaktelagen heen, alleen nu over grotere gebieden en zonder de structuur van de oppervlaktelagen te verstoren.

Opgemerkt moet worden dat wellen meestal aangetroffen worden in gebieden met een t.o.v. de omgeving hooggelegen, door een dunnere kleilaag afgedekte, zandondergrond, d.w.z. ter plaatse van zandbanen.

Uiteraard zal kwel, zowel in de vorm van wellen als in de vorm van het geleidelijk penetreren door de afdekkende kleilaag van een zandbaan, zich in het algemeen slechts voordoen bij voldoende hoge rivierstanden.

- In dit commentaar zullen wij voor de duidelijkheid "welplaatsen" aanduiden als wellen en zullen wij onder met klei bedekte zandbanen verstaan die gedeelten van de zandbanen waar de klei-afdekking niet doorbroken is.
- Ten onrechte wordt er op blz. 2 van het rapport gesproken over een "urgentie" ten aanzien van het traject Tiel-Gorkum, een zekere urgentie geldt niet in het bijzonder voor dit dijkvak en zelfs niet voor deze rivier.
- Het lijkt er op dat de plaatsnamen Tuil en Tiel in het rapport wel eens verwisseld zijn.
- Ik zou het op prijs hebben gesteld indien vermeld was op wiens initiatief het op blz. 2 genoemde grondstation werd ingericht.
- De o.a. op blz. 2 genoemde "extreem hoge afvoer" was bepaald niet extreem te noemen. De overschrijdingsfrequentie van de maximaal opgetreden afvoer van  $6280 \text{ m}^3/\text{sec}$  bij Lobith is 0,7 à 0,8 maal per jaar.
- Op blz. 3 wordt gesteld dat in dit rapport alleen de vragen ten aanzien van het waarnemen van de wellen wordt behandeld. Dit is in tegenspraak met het gestelde in het hoofdstuk "Probleemstelling en uitvoering". De probleemstelling zoals die in dat hoofdstuk geformuleerd wordt, met de daarbij ver-

melde definitie van een kwelplaats, bestrijkt zowel de wellen als de met klei bedekte zandbanen.

Met klei bedekte zandbanen waar het grondwater (nog) niet door de oppervlaktelagen dringt vallen hier dus buiten evenals plaatsen waar onder andere (meer extreme) omstandigheden wellen kunnen ontstaan.

Deze probleemstelling komt overeen met de vraag die indertijd door het C.O.W. is gesteld.

- De zin op blz. 3 onderaan "Daarbij werden de watertemperaturen.....gemeten" zou mijns inziens moeten worden gewijzigd en aangevuld om dan als volgt te luiden: "Daarbij werd de stralingstemperatuur van de bodem bepaald met een stralingsthermometer, type..... . Bovendien werden de in die gebieden aanwezige wellen opgespoord en in kaart gebracht en werd de watertemperatuur in de wellen gemeten".
- De inrichting van een grondstation en het bijsturen van het experiment m.b.v. de grondmetingen was alleen van belang voor de met klei bedekte zandbanen.
- Het is niet duidelijk wat de betekenis is van de symbolen ( $\Delta$ ,\*) op fig. 3 t/m 7.
- De vergelijking tussen d.m.v. warmtebeelden geconstateerde kwelplaatsen en bij grondverkenning gevonden kwelplaatsen heeft alleen betrekking op de wellen, althans, voorzover het de grondverkenning betreft.  
De vergelijking is voorts gebaseerd op een interpretatie van warmtebeelden door leken op dit gebied.  
Tenslotte zijn de met behulp van de warmtebeelden bepaalde "kwelplaatsen" niet in het terrein geverifieerd: d.w.z. dat er geen enkele garantie is dat het hier ook werkelijk om kwelplaatsen gaat.  
Om deze redenen is het moeilijk in te zien wat de zin is van een beschouwing over de verhouding van het aantal kwelplaatsen bepaald met thermografie tot die uit grondverkenningen.
- De op blz. 5 en 6 gegeven beschouwing over warmtebeelden en dagelijkse temperatuurgang heeft uitsluitend betrekking op het opsporen van met klei bedekte zandbanen als bedoeld in de inleiding.

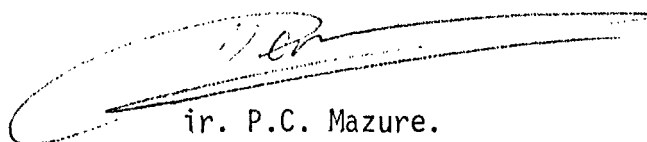
- Ten aanzien van de in het rapport genoemde conclusies neem ik gezien het voorgaande aan dat hier met "kwelplekken" bedoeld wordt op "wellen".
- De conclusie dat het inventariseren van wellen heel goed mogelijk zou zijn lijkt ons uit de hier gepresenteerde gegevens niet juist. Afgezien van de hiervoor gemaakte opmerkingen blijkt uit de tabel op blz. 4 dat van de 26 in het terrein aangetoonde wellen er 18 gemist worden in een inventarisatie met thermografie. Dit betekent dat de inventarisatie slechts 31% van de aanwezige wellen zou omvatten, hetgeen inderdaad zeer zeker niet volledig is te noemen. Een terreinverkenning die hierop gebaseerd wordt zou dan ook zeer onvolledige resultaten opleveren.

Op de laatste bijeenkomst (16-12-'77) van de projectgroep is inmiddels afgesproken dat:

1. de met thermografie bepaalde wellen bij hoogwater in het terrein geverifieerd zullen worden;
2. de interpretatie van de warmtebeelden nogmaals, dit maal door deskundigen op dit gebied, zal plaatsvinden;
3. nagegaan zal worden of de bekende welplaatsen toch niet zichtbaar waren op de warmtebeelden.

Het gevaar van subjectiviteit door vermenging van de punten 2 en 3 dient hierbij te worden onderkend.

Het Hoofd van het Centrum,



ir. P.C. Mazure.