18A.54

Destratificatie met behulp van een bellenzuil.

Snelheids- en temperatuurmetingen in het Biesbosch-bekken honderd en dertig Juni 1976

H. Römgens Rapportnr. R 1976 10D

Vloeistofmechanica

Afd. Weg- en Waterbouwkunde

Technische Hogeschool Delft

DESTRATIFICATIE MET BEHULP VAN EEN BELLENZUIL.

SNELHEIDS - EN TEMPERATUURMETINGEN IN HET BIESBOSCH-BEKKEN

HONDERD EN DERTIG JUNI 1976

Rapport nr. R 1976 10 D

Ten geleide

De destratificatieproeven m.b.v. een bellenzuil, inhoudende temperatuur- en snelheidsmetingen, in het Biesbosch-bekken Honderd en Dertig zijn verricht in het kader van de Limnologische Werkgroep Brabantsche Biesbosch.

Ik heb deze metingen in juni 1976, de uitwerking ervan, en het schrijven van dit verslag gedaan als deelontwerp bij lector J. Kalkwijk (lab. voor Vloeistofmechanica), voor mijn afstuderen aan de afdeling der Civiele Techniek, Technische Hogeschool te Delft (afd. Civiele Gezondheidstechniek).

Deze metingen waren mogelijk door de bereidwillige medewerking van het bedrijf de Brabantsche Biesbosch, die gedurende de metingen twee medewerkers ter beschikking stelde, alsmede de boot en de temperatuursonde. Nogmaals bedankt hiervoor.

Verder wil ik C. Kranenburg (lab. voor Vloeistofmechanica) en L. Goossens (vakgroep Fysische Technologie) bedanken voor hun medewerking, en ook de studenten van Fysische Technologie, die bij de metingen geholpen hebben.

november 1976

H. Römgens

Delft

Inhoud pagina

1	Inleiding	2
1.1	Bestaande ideeën over menging ten gevolge van een bellenzuil	3
2	Prototype-metingen	6
2.1	Beschrijving van het prototype: het bekken Honderd en Dertig	6
2.2	Metingen en meetapparatuur	6
2.3	Meetprogramma en windgegevens	9
3	Meetresultaten	14
3.1	Methode van uitwerken	14
3.2	Weergave van de meetresultaten	18
4	Interpretatie van de meetresultaten	19
4.1	De temperatuurprofielen	19
4.2	De snelheidsprofielen	28
4.3	Verband tussen de temperatuurprofielen en de snelheidsprofielen	36
5	Conclusies	39
	Literatuurlijst	40

1 Inleiding

De prototype-metingen in juni 1976 in het spaarbekken Honderd en Dertig in de Brabantsche Biesbosch zijn verricht in het kader van de Limnologische Werkgroep Brabantsche Biesbosch (LWBB). Het spaarbekkenbedrijf de Brabantsche Biesbosch zal uiteindelijk, als alles volgens planning verloopt, opgebouwd zijn uit 4 spaarbekkens, 2 zuiverings- en 2 voorraadbekkens, die gevoed worden met maaswater. Hieruit volgt al het tweeledig doel van spaarbekkens, nl. een eerste natuurlijke zuivering van het aangevoerde water en de opslag van water in tijden van slechte kwaliteit of verminderde rivierafvoer.

De twee zuiveringsbekkens, Petrusplaat en Honderd en Dertig, die in 1973 in bedrijf genomen zijn, zorgen door een verblijftijd van minstens vier weken voor de fysische zelfreiniging van het water; er treedt een kwaliteitsverbetering van het aangevoerde water op door vermindering van het gehalte aan zwevende stof, zuurstofverrijking, afbraak van organische stof, oxidatie van ammoniak en een verbetering van de smaak van het water. Bovendien wordt aan het water chloor toegevoegd en loog voor een hardheidscorrectie.

Tot 1973 betrok Rotterdam en omgeving drinkwater uit de Rijn. Door de toenemende kwaliteitsverslechtering van het rijnwater in de zestiger jaren besloot men over te gaan op het schonere maaswater. Als de kwaliteit van het water t.g.v. een ongeluk of een foutieve lozing bovenstrooms op de rivier, of door een verminderde afvoer sterk afneemt, is het gedurende langere tijd onmogelijk om maaswater naar de bekkens aan te voeren. Om deze periode te overbruggen moet er een voorraad gevormd worden. Hiertoe zijn twee voorraadbekkens gepland, waarvan een, de Gijster, in uitvoering is.

Het is de bedoeling, dat in de toekomst benevens Rotterdam en omgeving ook Noord-West Brabant en Zeeland industrie- en drinkwater betrekken uit de Biesbosch. Het hangt dus van de ontwikkeling van de waterbehoefte af, of het vierde bekken, de Zuiderklip, nog uitgevoerd wordt. Bij vol bedrijf is men in staat 500 miljoen m^3 water per jaar te leveren.

De LWBB werd eind 1973 opgericht en heeft tot doel regels voor het ontwerpen van nieuwe spaarbekkens en het beheer ervan op te stellen. De werkgroep is onderverdeeld in twee subgroepen, nl. subgroep Menging en subgroep Kinetiek. De subgroep Menging is gevormd om problemen, die samenhangen met temperatuurgradiënten, anaerobie in de onderlaag en algenconcentraties in spaarbekkens, te bestuderen.

In het voorjaar en in de zomer treedt in een meer of bekken thermische stratificatie op, doordat het water aan de oppervlakte door zoninstraling wordt verwarmd, terwijl het diepere water de gemiddelde bodemtemperatuur behoudt. De dichtheid van water neemt af naarmate de temperatuur meer van 4 ^{o}C verschilt. Hierdoor ontstaat een stabiele gelaagdheid, waarbij het warme en lichtere oppervlaktewater boven het koele en zwaardere bodemwater drijft.
Algengroei kan optreden onder invloed van zonlicht en bij voldoende aanbod van voedingsstoffen in het water (vnl. stikstof en fosfor). Het eutrofe maaswater heeft massale algengroei tot gevolg, hetgeen de kwaliteit van het water nadelig beïnvloedt en problemen schept bij de zuivering. Omdat algen zonlicht nodig hebben, bevinden ze zich alleen in de bovenlaag van het bekken; hier is het water door de foto-synthese dan ook vaak oververzadigd met zuurstof. Sterven de algen echter af, dan zakken ze naar beneden; hierbij wordt zuurstof verbruikt en kan zelfs anaerobie optreden. Wanneer de stratificatie niet door wind of andere invloeden is opgeheven, treedt er geen menging op tussen de lagen en het gevolg is dan een zuurstofloze onderlaag, waarin t.g.v. rotting giftige, smaakverslechterende stoffen kunnen ontstaan.
In de Biesbosch probeert men dit probleem te ondervangen m.b.v. luchtinjectie vanaf de bodem van het bekken. Deze bellenzuilen moeten voor voldoende menging tussen de lagen zorgen, zodat de gelaagdheid zoveel mogelijk wordt voorkomen. Een tweede effect van de luchtinjectie is mogelijkerwijs, dat door turbulente menging de algengroei binnen redelijke grenzen blijft. ~~Hierover bestaat echter nog onzekerheid.~~
Het doel van de metingen is, om uitgaande van een gestratificeerde situatie bij gunstige weersomstandigheden (zon en weinig wind) het effect van één bellenzuil te bepalen.

1.1 Bestaande ideeën over menging ten gevolge van een bellenzuil

Er is niet zoveel literatuur bekend, waarin het gedrag van bellenzuilen beschreven wordt. Ik heb me hier dan ook beperkt tot bestaande ideeën in de vakgroep Fysische Technologie (afdeling Natuurkunde), met name het afstudeerverslag van Groot en v.d. Heyden (3), en tot ideeën, aanwezig bij het Lab. voor Vloeistofmechanica (afdeling der Civiele Techniek) (4). Hierbij zij wel vermeld, dat door de metingen in juni en verder modelonderzoek weer andere inzichten zijn ontstaan.
In het genoemde verslag worden twee situaties onderscheiden, nl. de isotherme en de gestratificeerde situatie. Het isotherme model bestaat uit een afstromende laag, die door entrainment en afnemende snelheid dikker

wordt en wanneer de dikte gelijk is aan de halve diepte geleidelijk omkeert en overgaat in een daaronder liggende terugstromende laag (figuur 1).

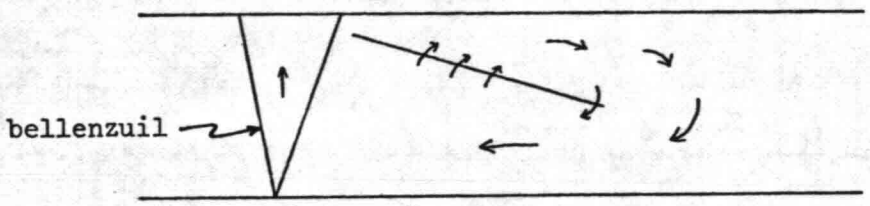


fig. 1 isotherme situatie

In de gestratificeerde situatie ontstaat er rond de bellenzuil een gebied dat voor een gedeelte isotherm is, en een gebied, waarin zich een afstromende tussenlaag heeft gevormd. Hier vindt menging plaats van kouder water uit het hypolimnion met warmer water uit het epilimnion. Op grotere afstand van de bellenzuil treedt in dit model nagenoeg geen menging meer op en blijft er sprake van een stabiele gelaagdheid. Er zou dan een drielagensysteem ontstaan: een afstromende tussenlaag ongeveer ter hoogte van het metalimnion, terugstroming naar de bellenzuil in epi- en hypolimnion. Aangezien het bekken eindig is, neemt de snelheid van de afstromende laag naar de kant toe af. De dikte van de tussenlaag neemt dan in de tijd toe, totdat het bekken isotherm is, aangenomen dat er geen nieuwe opwarming plaats vindt.
In de gelaagde toestand zou men ook kunnen veronderstellen, dat het near-field het karakter van de isotherme situatie behoudt, d.w.z. een dikker wordende afstromende laag, die overgaat in terugstroming in het hypolimnion; het terugstromende epilimnion ligt hier dan bovenop en wordt "op afstand gehouden" door de stuwdruk van de afstromende laag. Een deel van het water hieruit mengt met epilimnionwater en vormt zo de tussenlaag(zie fig. 2).

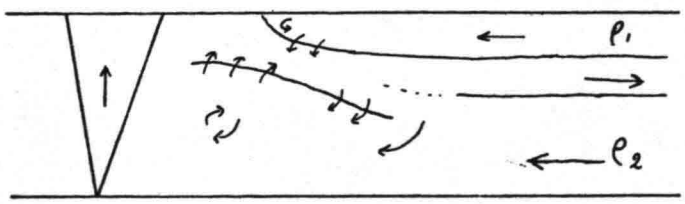


fig. 2 gestratificeerde situatie

Het gebied rond de bellenzuil, waar de menging plaats vindt, heet het near-field; onder het far-field wordt verstaan het gebied op grotere

afstand van de bellenzuil, waar zich een stabiel drie-lagen-systeem heeft ontwikkeld. De tussenlaag heeft door de menging een dichtheid ρ waarvoor geldt:

$$\rho_1 < \rho < \rho_2 \quad .$$

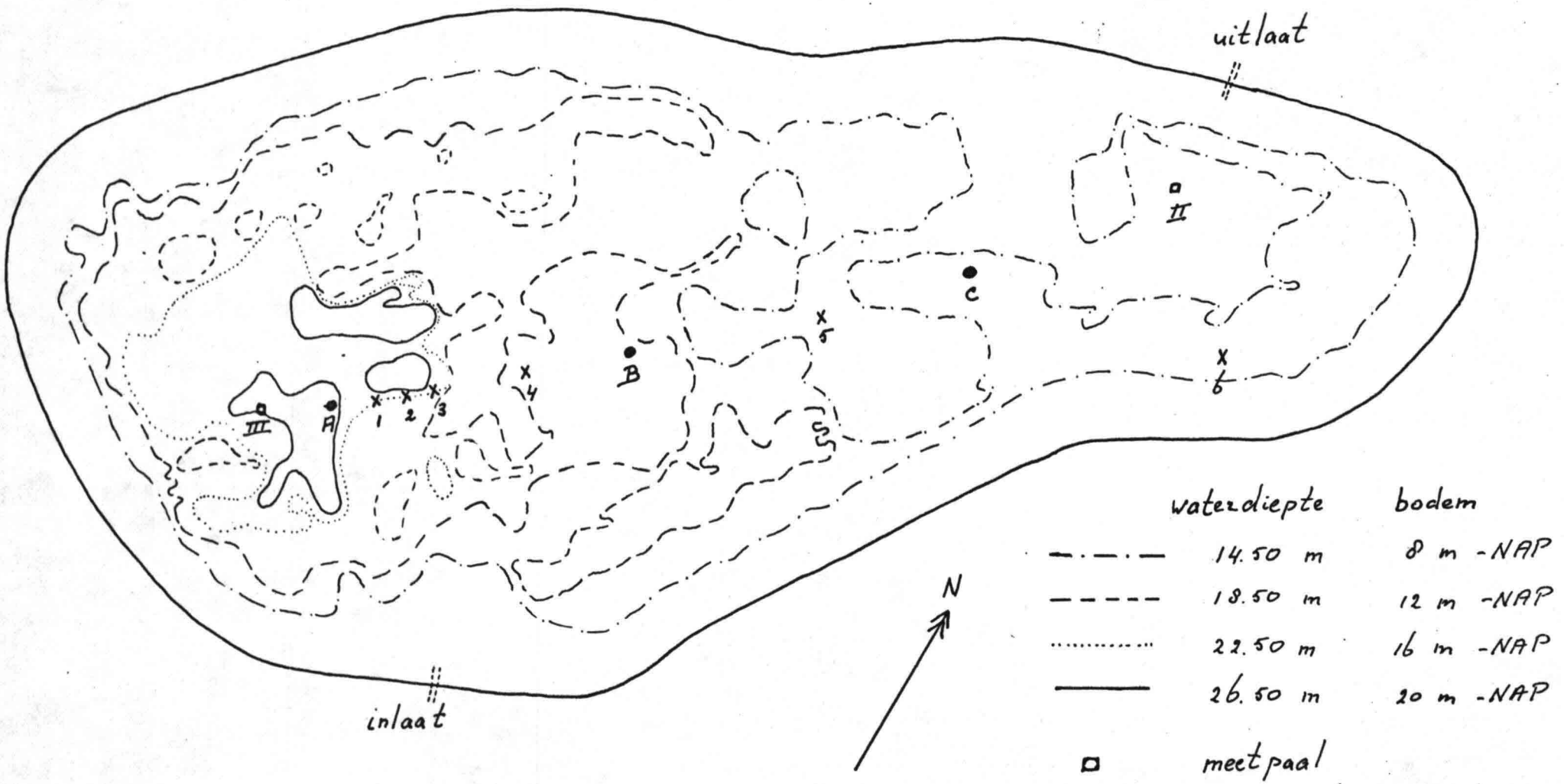
2 Prototype-metingen

2.1 Beschrijving van het prototype: het bekken Honderd en Dertig

In het kader van de subgroep Menging zijn in juni 1976 temperatuur- en snelheidsmetingen verricht in het spaarbekken Honderd en Dertig. Dit bekken heeft een oppervlakte van 219 ha en een maximale inhoud van 32 miljoen m^3, de waterdiepte varieert van 13 tot 27 meter, de bodem bevindt zich op een diepte van -6m tot -20m NAP en de dijkhoogte is +8.50 m NAP. In de "130" zijn drie bellenzuilen geplaatst. In figuur 3 is een plattegrond van het bekken getekend; hierin zijn ook de dieptelijnen, de bellenzuilen en de meetpalen aangegeven. Bellenzuil A heeft een capaciteit van 12 m^3 lucht/minuut, de beide anderen B en C elk 6 m^3 lucht/minuut.

2.2 Metingen en meetapparatuur

De temperatuurmetingen zijn gedaan door twee medewerkers van het bedrijf de Brabantsche Biesbosch, die ons gedurende het hele meetprogramma hebben begeleid. Deze metingen zijn verricht met een sonde, die ook door het bedrijf ter beschikking was gesteld.
Voor de snelheidsmetingen is de mini-AKWA van de T.P.D. in Delft gebruikt; deze akoustische snelheidsmeter, die vlak voor de meetperiode gereed kwam, berust op het principe, dat een signaal, dat door twee transducenten, die tegenover elkaar staan opgesteld, tegelijkertijd wordt uitgezonden, eerder wordt ontvangen, als het in de richting van de waterstroom is uitgezonden, dan in een richting tegen de stroom in.Dit tijdverschil is dan een maat voor de snelheidscomponent in die richting.
De mini-AKWA bevat twee paar transducenten; deze meten 2 componenten van de snelheidsvector, die een hoek van 90 graden met elkaar maken. Hiermee kunnen de richting en de grootte van de snelheden in het horizontale vlak bepaald worden.
In fig. 4 en 5 zijn twee foto's van de akoustische meter afgedrukt; fig. 4 toont het hele meetinstrument, in fig. 5 zijn de vier transducenten aan het einde van de meter te zien.
Gedurende proefmetingen, waarbij de akwa aan een stel drijvers in het water werd gehangen, bleek de invloed van de golfslag en de schommeling van de boot te groot te zijn: de meter hing niet stil en bovendien veranderde de ingestelde richting ten gevolge van de stroming. Om deze nadelen te voorkomen is gebruik gemaakt van een constructie, waarbij d.m.v. gewichten op de bodem van het bekken het drijverstel met de meter ca. 85 cm.



figuur 3 : plattegrond van het bekken "130"
schaal 1 : 10.000

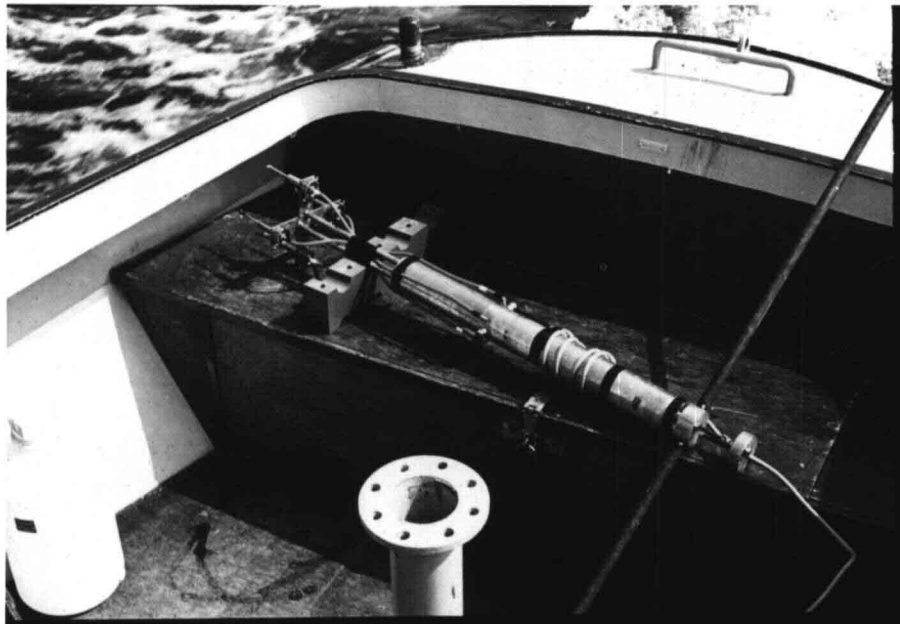


fig. 4

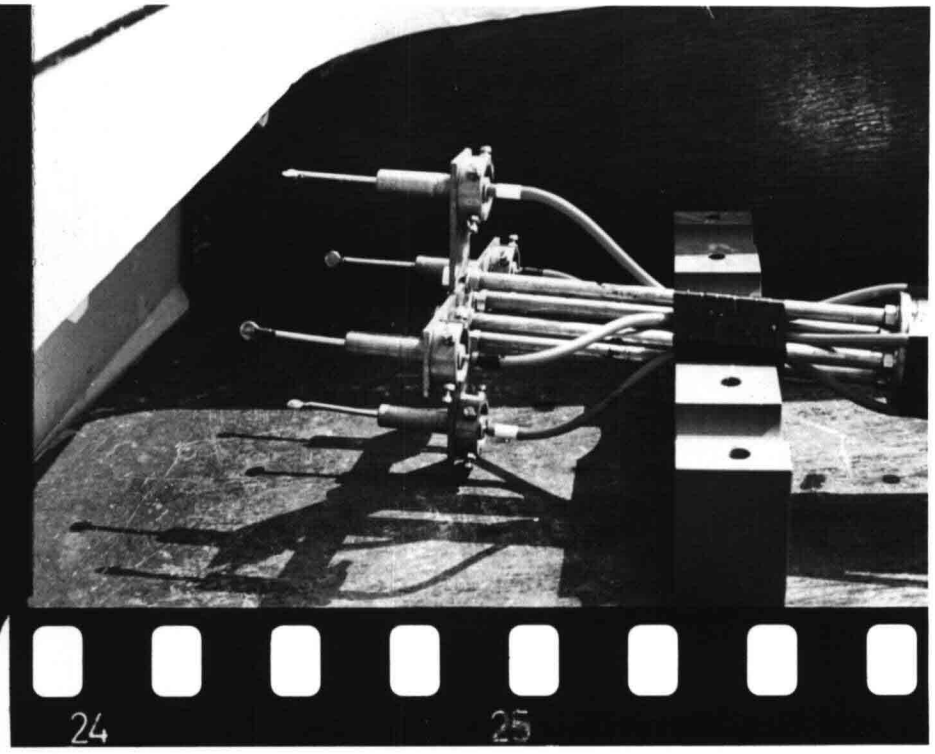


fig. 5

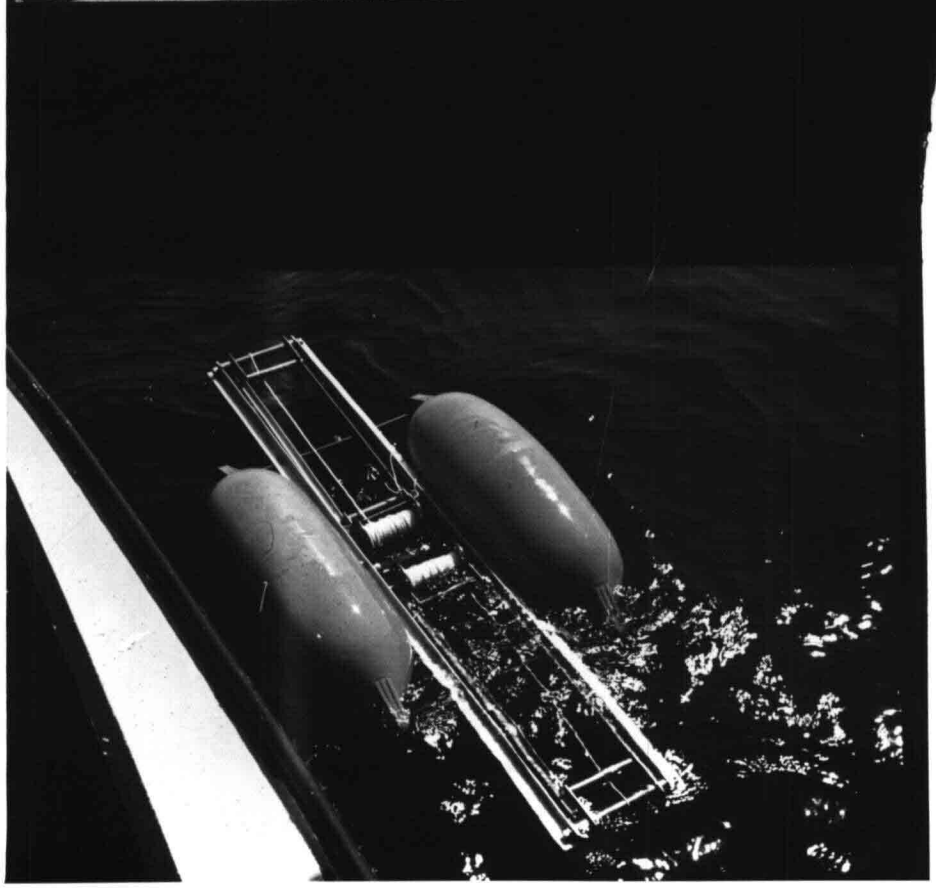


fig. 6

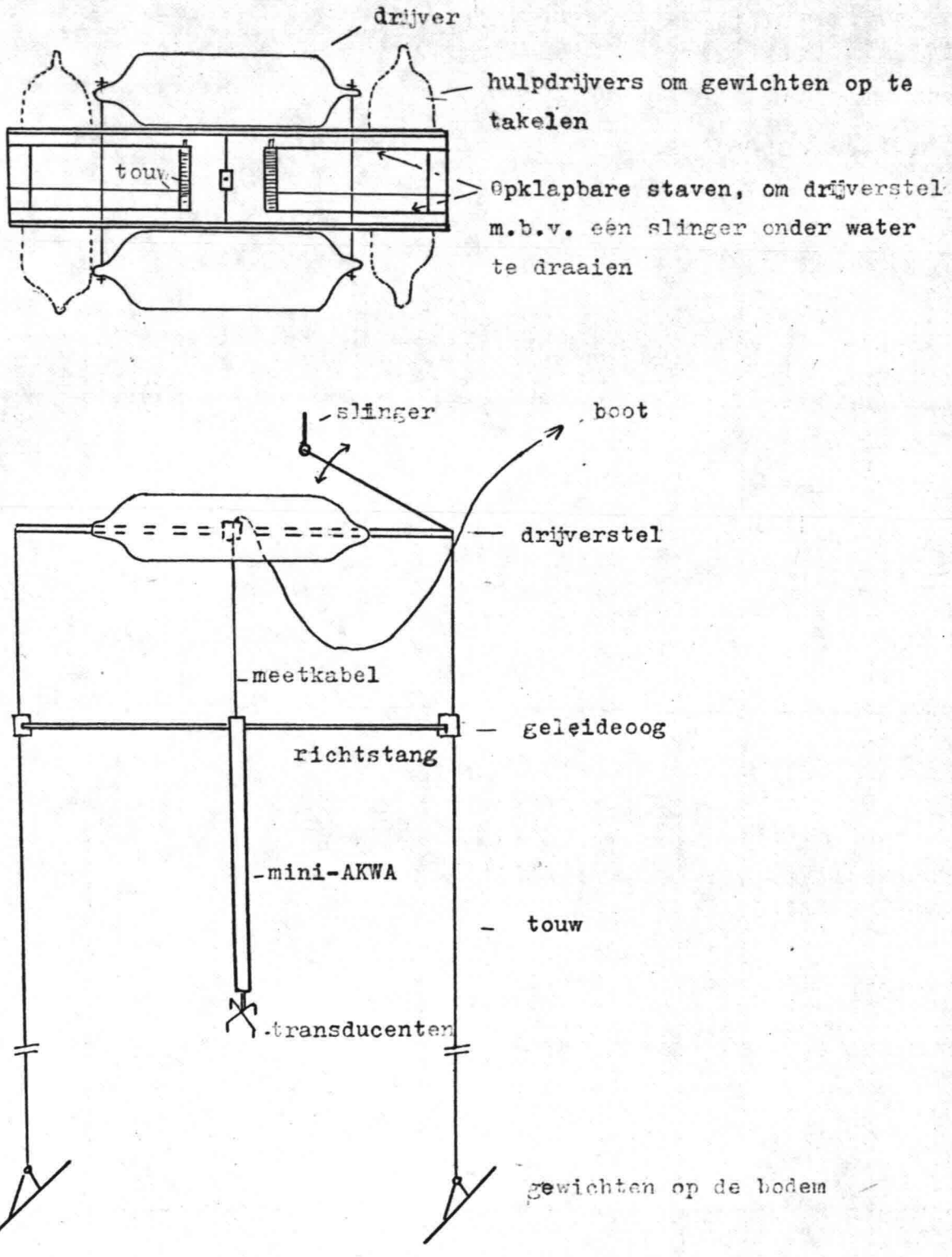
onder het wateroppervlak wordt getrokken. Dit gaf aanzienlijk betere meetresultaten: de invloed van de golven en de boot was veel minder, het drijverstel lag stabiel in het water en veranderde gedurende de meting niet van richting.
Deze constructie heeft wel het nadeel , dat het geheel minder hanteerbaar wordt; voor het verhangen van de meter naar een andere diepte moet het drijverstel telkens weer boven water gehaald worden, zodat, gezien de grote diepte van het bekken in het near-field, op de meeste dagen maar één verticaal is gemeten. In fig. 7 is een schets van de meetopstelling in het prototype gegeven; een foto van het drijverstel is afgedrukt in fig. 6.

2.3 Meetprogramma en windgegevens

Voordat de destratificatieproeven gestart konden worden, moest het temperatuurverschil tussen het wateroppervlak en de bodem ca. $5^{o}C$ zijn, zodat er sprake was van een goede gelaagdheid. Temperatuurmetingen op 9 juni wezen uit dat dit verschil over het hele bekken aanwezig was; bovendien werd op dat ogenblik een periode van mooi weer verwacht, hetgeen noodzakelijk was, omdat de wind de gelaagdheid verstoort en daarmee ook de opzet van de metingen, nl. de invloed van de bellenzuil te meten, zou doorkruisen. Op 10 juni om 11.51 uur is de diepe luchtinjectie A bij meetpaal III aangezet (zie fig. 3).
Hierna is op acht plaatsen in het bekken gemeten; in fig. 3 zijn deze punten in de plattegrond van het bekken aangegeven. De afstanden van de acht meetpunten tot de bellenzuil A bedragen :

punt 1	: 80 m	punt 4	: 340 m
punt 2	: 130 m	punt 5	: 860 m
punt 3	: 180 m	punt 6	: ca. 1500 m
meetpaal III	: 120 m	meetpaal II	: 1570 m

Op de dagen 9,11,12,14 t/m 18,21 en 22 juni zijn temperatuurmetingen verricht in alle bovenstaande punten, op 10 juni alleen bij de meetpalen.
De snelheidsmetingen verliepen iets moeilijker. Uit proefmetingen was al gebleken, dat het meten van één verticaal zoveel tijd in beslag zou nemen, dat in het diepe gedeelte van het bekken maar één meting per dag verricht kon worden. Oorzaak hiervan zijn de fluctuaties in de stroomsnelheid, zodat de meettijd per diepte niet te kort genomen werd, het verhangen van de meter met drijfconstructie en het verplaatsen van de boot, akties, die beide nogal wat tijd in beslag namen.
Een nare bijkomstigheid was het defect raken van de akwa, doordat water binnendrong in de holle buis van het instrument. Dit gebeurde op vrijdag



figuur 7 : meetopstelling (niet op schaal)

11 juni; hierdoor zijn de metingen op 11 en 12 juni onbruikbaar geworden vanwege een te groot verloop van het nulpunt gedurende de dag en een herhaaldelijke verstoring van het signaal. 14 juni is het instrument bij de T.P.D. gerepareerd, zodat de metingen een dag later hervat zijn. Het meetprogramma zag er, wat betreft de snelheidsmetingen, als volgt uit :

10 juni : metingen bij meetpaal III en meetpaal II op resp. 6 m. en 7 m diepte, na het aanzetten van de bellenzuil. Vanaf 13.00 uur heeft de meter tot 11 juni 9.00 uur 's morgens bij meetpaal II gehangen.

15 juni :	10.00 - 13.00 uur	punt 4
	13.35 - 15.00 uur	punt 5
16 juni :	10.45 - 15.00 uur	punt 1
17 juni :	10.00 - 14.00 uur	punt 2
18 juni :	10.15 - 12.45 uur	punt 4
	13.40 - 15.00 uur	punt 5
21 juni :	12.45 - 15.00 uur	punt 1
22 juni :	10.00 - 12.00 uur	punt 2
	12.45 - 15.00 uur	punt 4

Doordat het bekken "130" alleen per boot bereikbaar is, en bovendien het nulpunt van de meter aan wal bepaald werd, konden de eigenlijke metingen pas om ca. 10.00 uur beginnen en moesten we ook al om 15.00 uur ophouden. Op 21 juni is een falende generator de oorzaak van het late begintijdstip; bovendien werden op die dag ook eerst monsters genomen door de medewerkers van de Biesbosch.

De weersomstandigheden zijn gedurende de meetperiode goed geweest, met over het algemeen veel zon. De windsnelheden, die gemeten zijn op een hoogte van 10 m boven de Petrusplaat, zijn samengevat in tabel 1. De wind is meestal zwak tot matig geweest; een uitzondering hierop vormt het weekend van 19 en 20 juni met gemiddelde windsnelheden van 10 á 12 m/s.

tabel 1 : windgegevens van 10-6-'76 t / m 22-6-'76

dag	uren	gemiddelde windsnelheid (m/s)	windrichting
10 juni	0.00 - 9.00	6 à 7	
	9.00 - 17.00	4	NW
	17.00 - 24.00	3	N
11 juni	0.00 - 15.00	1	
	15.00 - 21.00	2 á 3	draaiend
	21.00 - 24.00	0	W tot Z
12 juni	0.00 - 7.00	2	Z tot ZW
	7.00 - 9.00	4.5	ZW
	9.00 - 16.00	8 á 9	W
	16.00 - 24.00	7 afnemend tot 4	W
13 juni	0.00 - 11.00	4	W
	11.00 - 16.00	5	W later NW
	16.00 - 24.00	4 afnemend tot 1	N tot NW
14 juni	0.00 - 7.00	1	draaiend
	7.00 - 10.00	3 á 4	W
	10.00 - 18.00	5	W
	18.00 - 24.00	1	NW
15 juni	0.00 - 6.00	3	ZW
	6.00 - 11.00	4	W tot N
	11.00 - 17.00	5 à 6	NW
	17.00 - 20.00	7	NW
	20.00 - 24.00	5	NW later N
16 juni	0.00 - 8.30	5	N
	8.30 - 11.00	6	N
	11.00 - 20.00	5	N
	20.00 - 24.00	2 à 3	N
17 juni	0.00 - 6.00	3	N
	6.00 - 9.00	4	N
	9.00 - 16.00	1 à 2	NO
	16.00 - 19.00	5	N tot NO
	20.00 - 24.00	1	N
18 juni	0.00 - 5.00	1	N
	5.00 - 10.00	3 à 4	ZW later W
	10.00 - 13.00	6	W
	13.00 - 24.00	4	W

vervolg tabel 1

dag	uren	gemiddelde windsnelheid (m/s)	windrichting
19 juni	2.00 - 10.00	6 à 7	W
	10.00 - 16.00	9 à 10	W
	16.00 - 18.00	3	
	18.00 - 24.00	8 later 11 à 12	ZW tot W
20 juni	2.00 - 13.00	10 (6-13)	ZW tot W
	13.00 - 16.00	12 (7-20)	W
	16.00 - 21.00	4	W
	21.00 - 24.00	2	W
21 juni	1.00 - 3.00	4 à 5	ZW tot W
	3.00 - 16.30	3	ZW 13.00 W
	16.30 - 19.30	2	W tot NW
	19.30 - 24.00	0	NW later N
22 juni	0.00 - 8.50	0	
	9.00 - 11.00	1 à 2	draaiend
	11.00 - 13.00	0	
	13.00 - 17.30	1	
	17.30 - 20.00	2 à 3	N tot NO
	20.00 - 24.00	1 à 2	NO

3 Meetresultaten

3.1 Methode van uitwerken

De temperatuurmetingen vragen geen verdere uitwerking, aangezien de waarden direct afgelezen worden op het meetinstrument. Op de snelheidsmetingen moeten echter enkele bewerkingen worden toegepast, die ik hieronder in 't kort zal beschrijven.

Elk paar transducenten meet één component van de snelheid, die op een recorder wordt geregistreerd. De plus-richting van de recorder komt overeen met de + richting, zoals die is aangegeven op de akoustische meter. Het probleem, dat ontstaat, is het nulpunt van de beide meetlijnen te bepalen. Dit is in eerste instantie op 10 juni geprobeerd, door een plastic zak rond de transducenten te binden, hetgeen jammerlijk mislukte, doordat de zak kapot ging. Daarna is de meter 180 graden gedraaid; uit het verspringen van het signaal op de recorder kan dan het nulpunt globaal gevonden worden.

Op de volgende dagen is het nulpunt steeds bepaald, door de meter op de wal in een emmer water te plaatsen. Hierin vindt practisch geen waterstroming plaats en ook is de invloed van schommelingen afwezig; er werd dan ook een vrijwel constant signaal verkregen. Dit is steeds aan het begin en het einde van een meetdag gedaan. Het verloop gedurende een dag varieerde van 1 tot 4 mm/s, welk verschil bij de uitwerking over de hele dag verspreid is aangenomen.

De mini-AKWA is temperatuurgevoelig, hetgeen tot gevolg heeft, dat het nulpunt van de meetlijnen verloopt bij een temperatuursverandering. Dit is duidelijk te zien in tabel 2, waarin de uitkomsten van een laboratoriumtest bij de T.P.D. zijn opgenomen. Hierbij moet vermeld worden, dat de gevoeligheid van de recorder 1 volt bedroeg, en dat de meetlijnen I en II resp. schaaldeel 30 en 70 aanwezen, als de recorder niet aangesloten was op de akoustische meter. Aangezien de temperatuur in het bekken over de diepte varieert van 15 tot 20 ^{0}C, is m.b.v. tabel 2 een korrektie toegepast.

temperatuur (^{0}C)	nulpunt I t.o.v. sd 30 (mm/s)	nulpunt II t.o.v. sd 70 (mm/s)
10	-21	-6,5
15	-14,5	-6,5
20	-12	-7,5 à -8
25	- 9	-9

tabel 2 : nulpuntverloop van de akwa bij temperatuursverandering

De beide meetlijnen I en II staan loodrecht op elkaar en leveren de componenten V_I en V_{II} op. Bij niet te grote fluctuaties in de stroomsnelheden is het mogelijk, de gemeten waarden direct te middelen en daarmee $V_{I\ gem}$ en $V_{II\ gem}$ te bepalen. De gemiddelde stroomsnelheid volgt dan uit :

$$V_{gem} = \sqrt{V_{I\ gem}^{\ 2} + V_{II\ gem}^{\ 2}}$$

De hoek, die de snelheidsvector maakt met de positieve richting van meetlijn I, is :

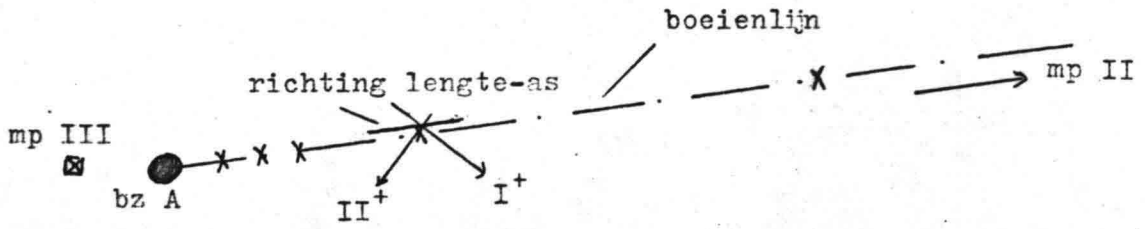
$$\alpha_{gem} = \text{arctg} \frac{V_{II\ gem}}{V_{I\ gem}} \qquad \text{(zie ook grafiek 1)}$$

Wanneer de variaties in V_I en V_{II} te groot zijn, dus de gemiddelde waarden moeilijk geschat kunnen worden, zijn V_{gem} en α_{gem} op een bepaalde diepte berekend uit een aantal combinaties van V_I en V_{II}. Dit levert in zo'n geval nauwkeuriger waarden op voor V_{gem} en α_{gem}.
Vervolgens moeten de snelheden qua grootte en richting nog gekorrigeerd worden m.b.v. grafiek 2. De korrektiefactoren c en $\Delta\alpha$ als functie van α_{gem} leggen dan de werkelijke grootte en richting van de snelheidsvector vast volgens :

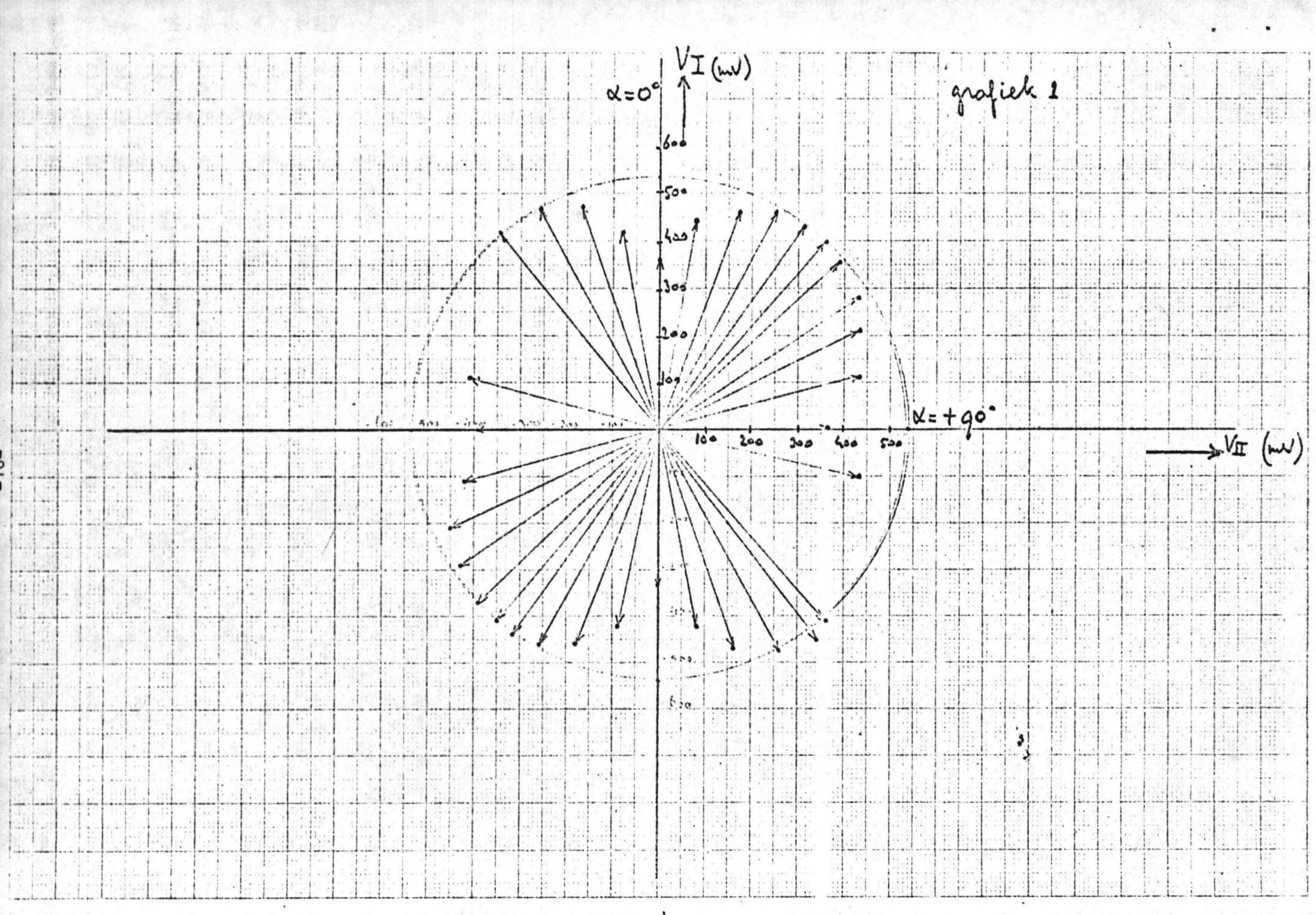
$$V_{werk} = c \times V_{gem}$$

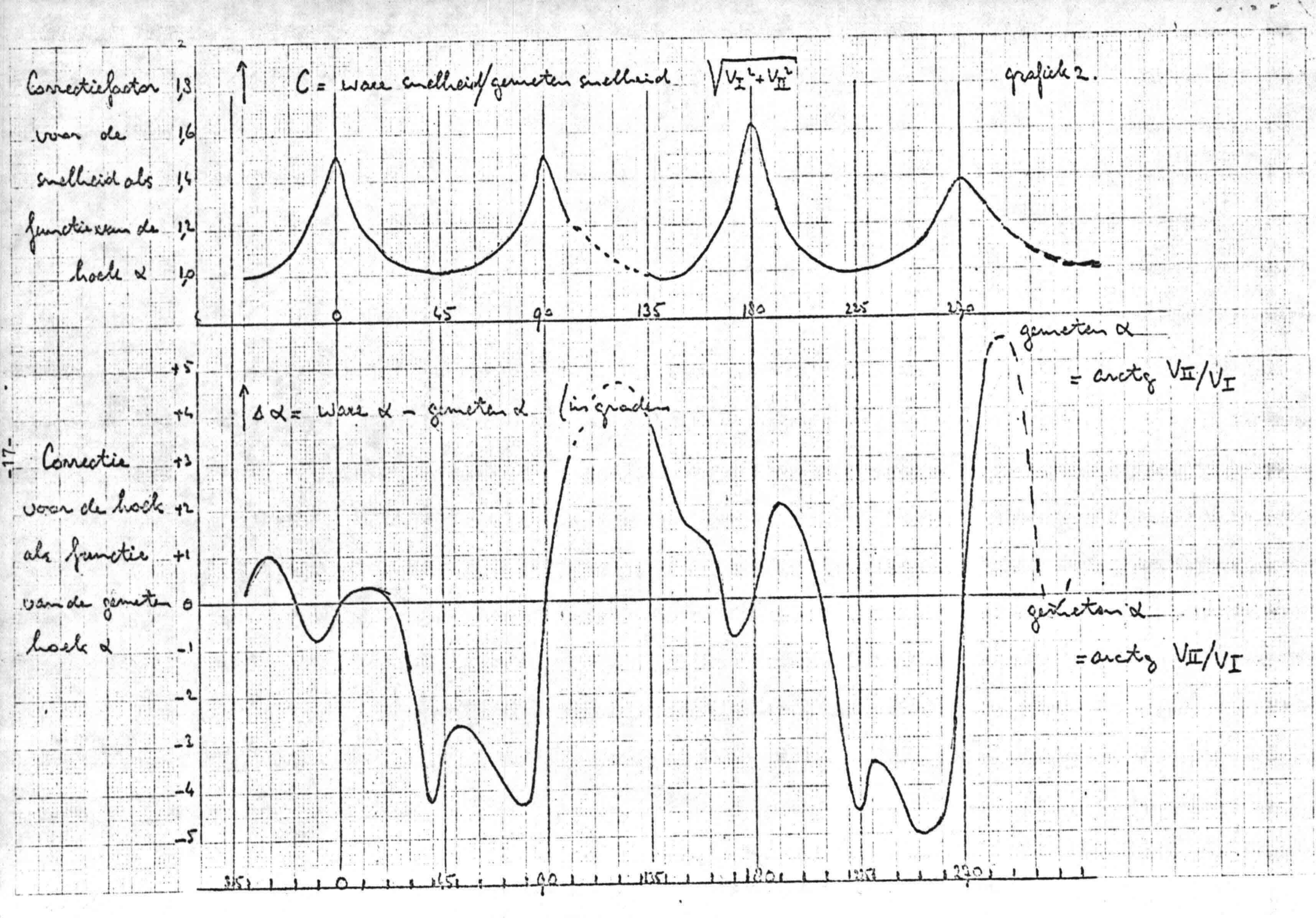
$$\alpha_{werk} = \alpha_{gem} + \Delta\alpha$$

De minimale en maximale waarden van V en α zijn berekend uit de hiervoor maatgevende combinaties van V_I en V_{II}, en op dezelfde wijze als hierboven gekorrigeerd.
Tot slot moet dan nog de positieve richting van meetlijn I vastgelegd worden t.o.v. de boeienlijn in het bekken, dit is de lijn van bellenzuil A naar meetpaal II. De positieve I-richting maakt een hoek van 45 graden met de lengte-as van het drijverstel. Het probleem, dat zich hierbij voordeed, is, dat het niet mogelijk bleek te zijn de hoek, die de lengte-as maakt met de boeienlijn, op te meten met een sextant. Hierdoor zagen we ons genoodzaakt tot een ietwat provisorische oplossing, nl. het drijverstel zodanig te water laten, dat de lengte-as evenwijdig aan de boeienlijn ligt (zie fig.8)



figuur 8 : situering van het drijversysteem


grafiek 1
V_I (mV)
α=0°
600
500
400
300
200
100
α=+90°
100
200
300
400
500
V_{II} (mV)


Correctiefactor voor de snelheid als functie van de hoek α
C = ware snelheid/gemeten snelheid
$\sqrt{V_I^2 + V_{II}^2}$
grafiek 2.
1,3
1,6
1,4
1,2
1,0
0
45
90
135
180
225
270
Δα = ware α − gemeten α (in graden)
Correctie voor de hoek als functie van de gemeten hoek α
+5
+4
+3
+2
+1
0
-1
-2
-3
-4
-5
gemeten α
= arctg V_{II}/V_I
gemeten α
= arctg V_{II}/V_I
-17-

Aangezien de boeien duidelijk in één lijn lagen en meetpaal III als referentiepunt kon dienen, is de fout, die hierbij gemaakt wordt, toch niet zo groot : maximaal $\pm 5^{0}$ bij de meting op 15 juni, maar in de andere gevallen $\pm$ 2 à 3^{0}.

3.2 Weergave van de meetresultaten

De resultaten zijn weergegeven in temperatuur- en snelheidsprofielen. In de temperatuurprofielen is op de horizontale as de temperatuur uitgezet en op de verticale as de diepte; verder spreken deze profielen voor zich. In de snelheidsprofielen is verticaal de diepte uitgezet, terwijl horizontaal de grootte van de snelheid staat geschreven en de hoek α, die de snelheidsvector maakt met de boeienlijn (b.z. - mp II); hier staan ook de minimale en maximale waarden bij vermeld. De richting van de pijl komt overeen met de richting van de stroming in het bekken op die diepte, uiteraard in het horizontale vlak. In figuur 9 wordt dit aan de hand van een voorbeeld nog eens verduidelijkt :

diepte	V_{gem}	$V_{min-max}$	α_{gem}	$\alpha_{min-max}$
2.03	18	2 - 36	309	272 - 453
2.85	46	37 - 50	287	284 - 299
		etc.		

1 cm ≙ 100 mm/s

diepte in m., V in mm/s, α in graden.

figuur 9 : voorbeeld van een snelheidsprofiel

Een pijl naar boven, d.w.z. $\alpha = 0^{0}$, duidt op afstroming van de bellenzuil af; een pijl naar beneden, $\alpha = 180^{0}$, wijst toestroming naar de bellenzuil aan. De verticale lijn in het snelheidsprofiel stelt dus in het horizontale vlak de boeienlijn voor.

De nauwkeurigheid van V en α spreekt door de aangegeven min. en max. waarden voor zich. De meettijd op een bepaalde diepte varieerde van 5 tot 20 minuten, afhankelijk van de fluctuaties in de stroomsnelheid. Omdat het drijverstel voor iedere meting onder water gedraaid moest worden, is de aangegeven diepte een weinig onnauwkeurig : de fout hierin bedraagt maximmaal $\pm$ 0,10 m.

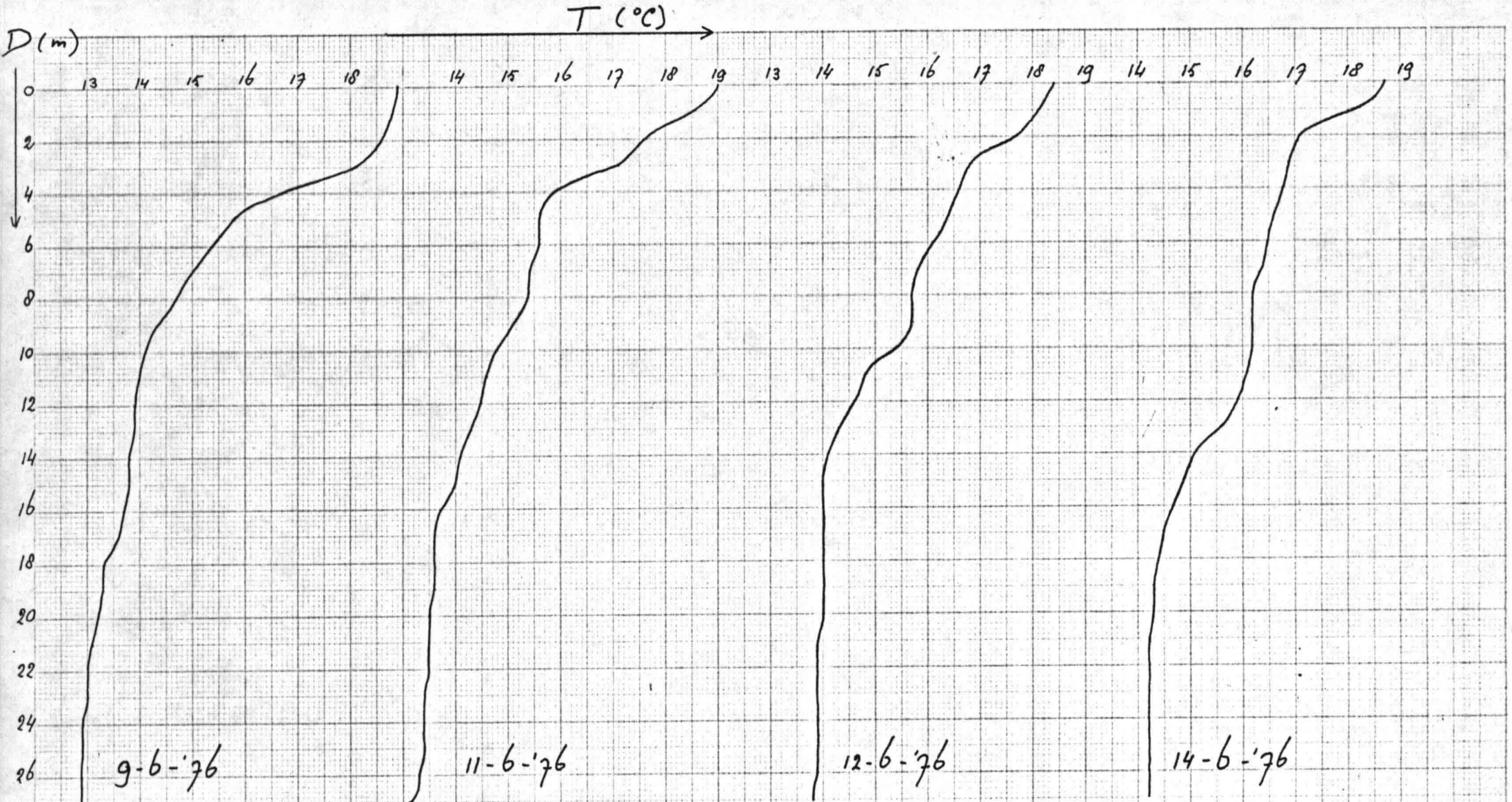


Fig. 10 : Temperatuurprofielen van punt 1 (80 m)

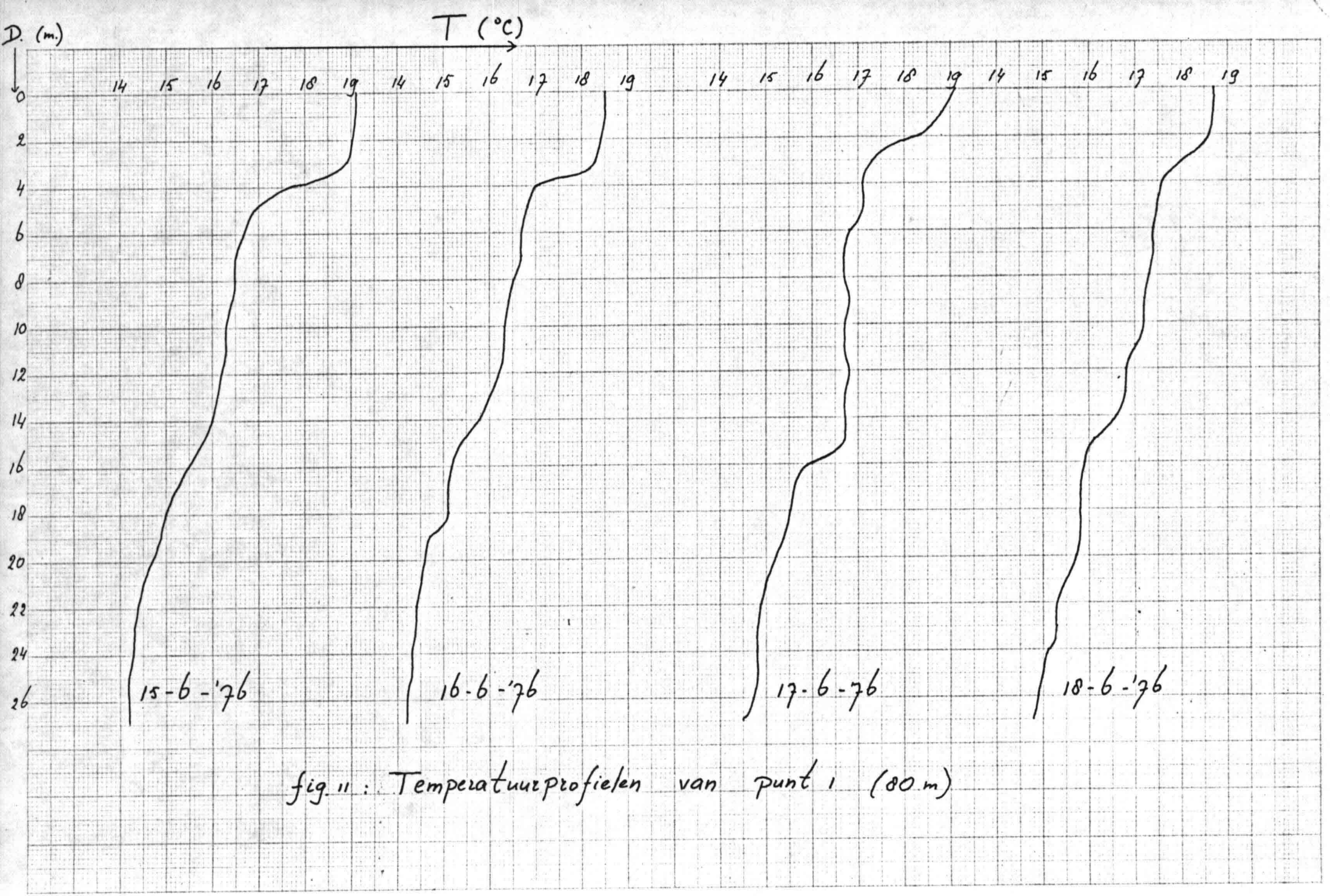


fig. 11 : Temperatuurprofielen van punt 1 (80 m)

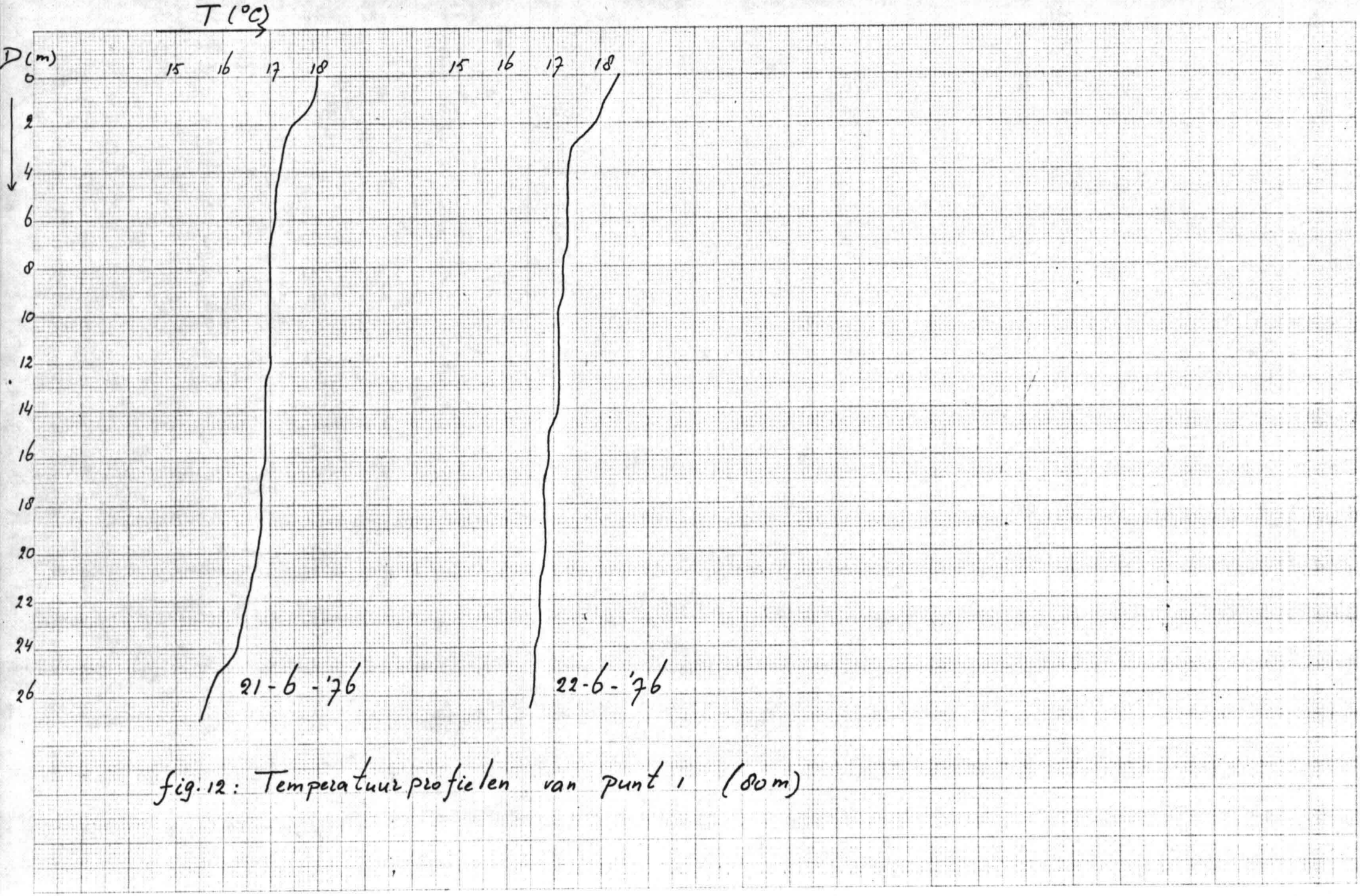


fig. 12: Temperatuur profielen van punt 1 (80 m)

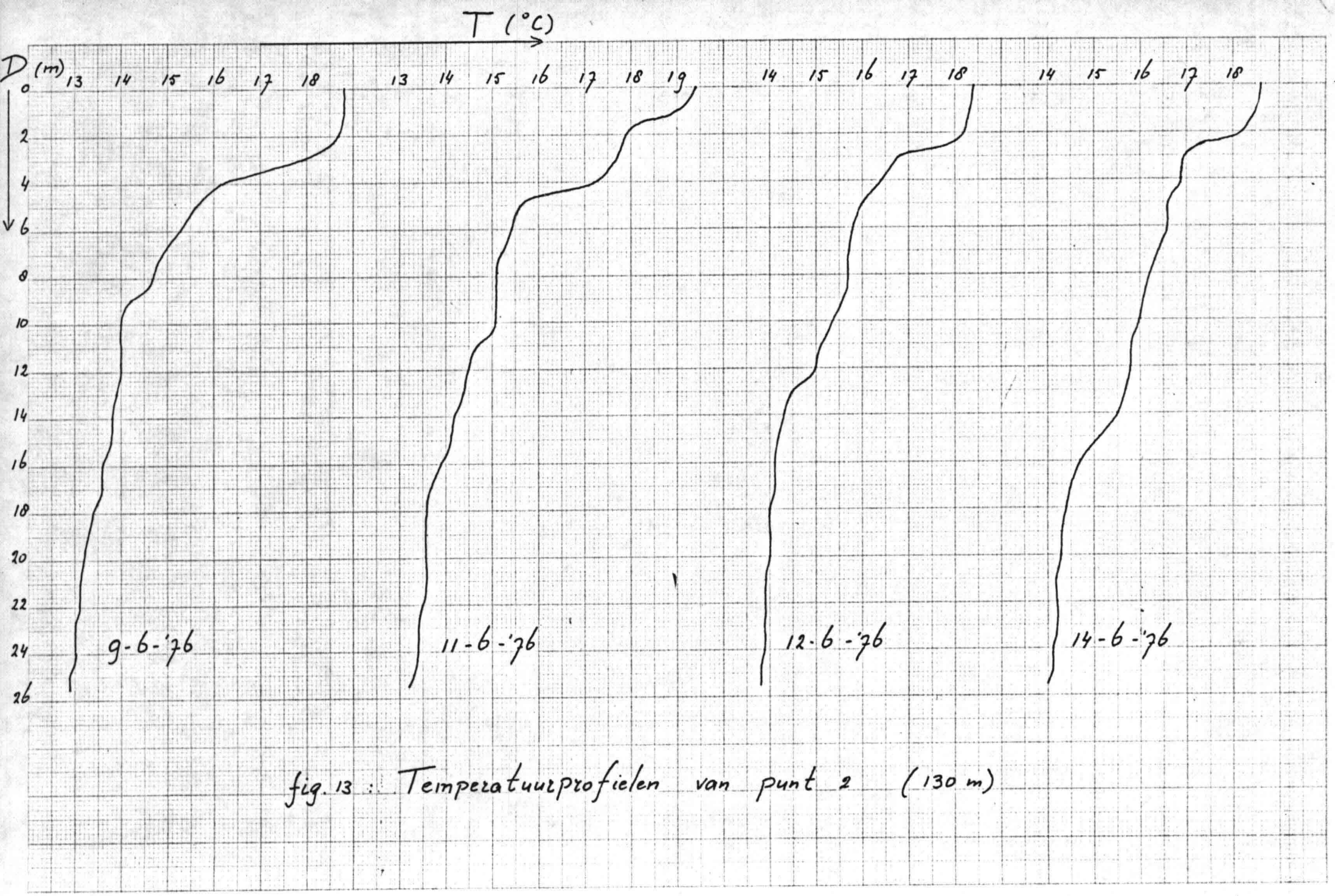


fig. 13 : Temperatuurprofielen van punt 2 (130 m)

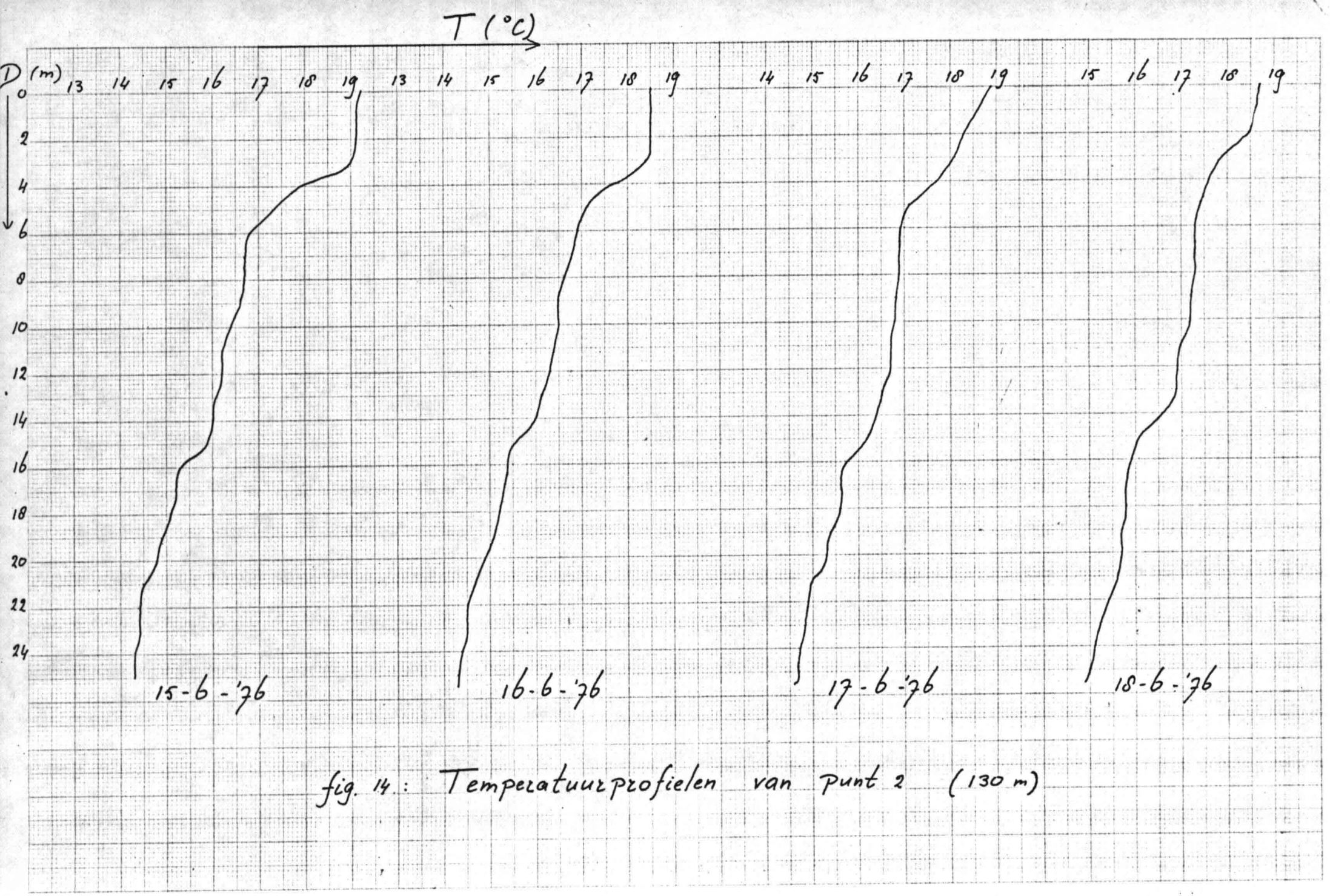


fig. 14: Temperatuurprofielen van punt 2 (130 m)

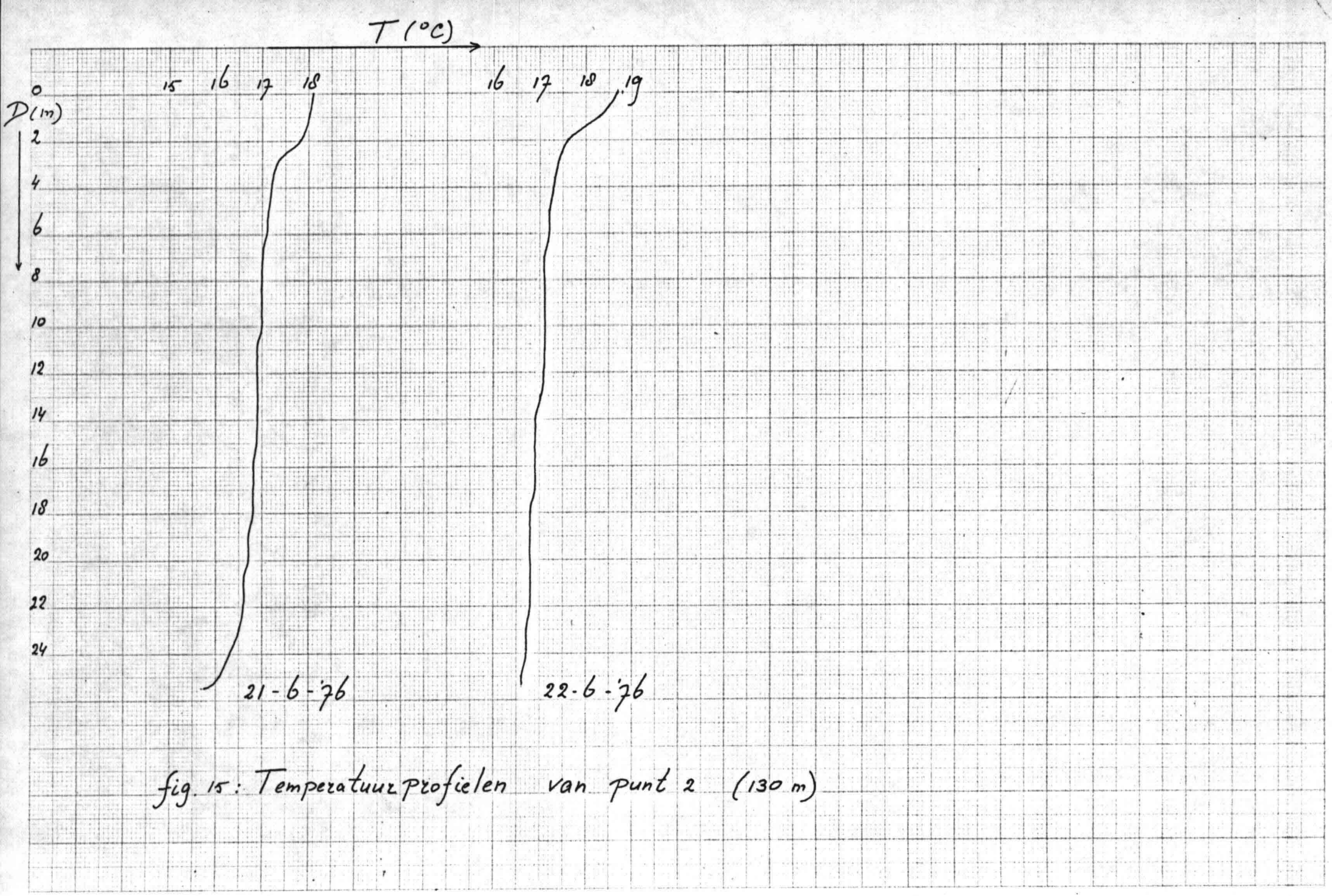


fig. 15: Temperatuur profielen van punt 2 (130 m)

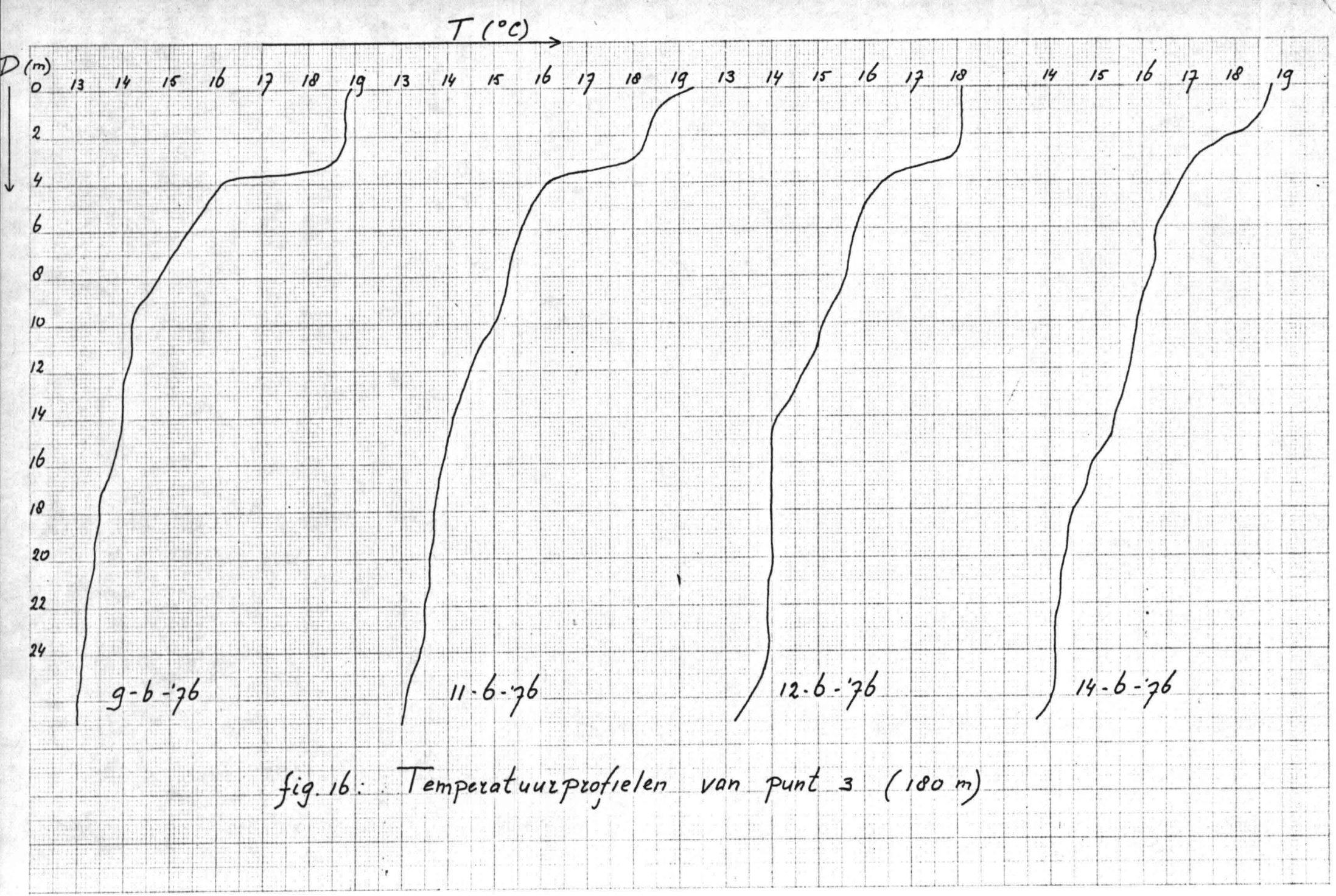


fig. 16: Temperatuurprofielen van punt 3 (180 m)

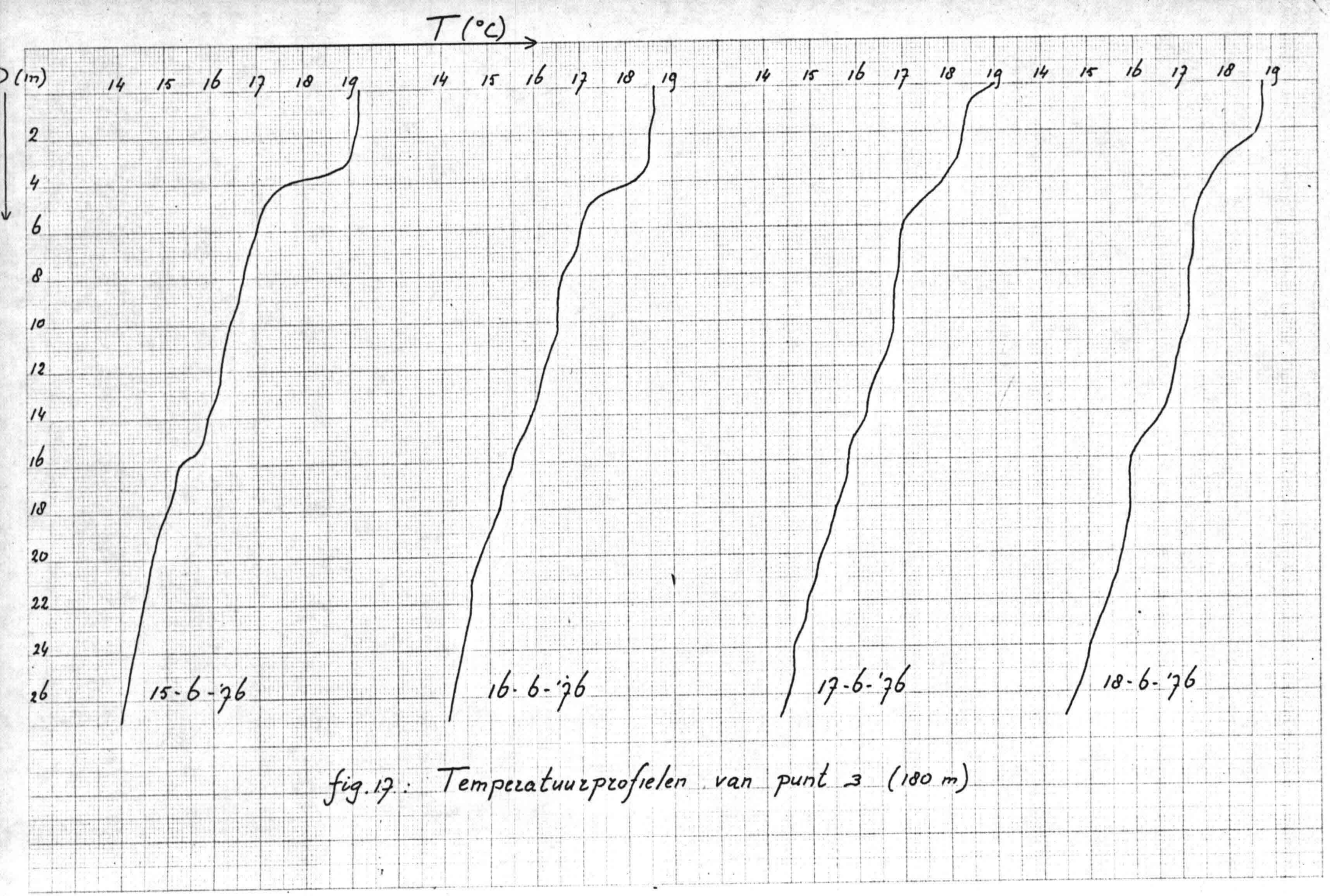


fig. 17: Temperatuurprofielen van punt 3 (180 m)

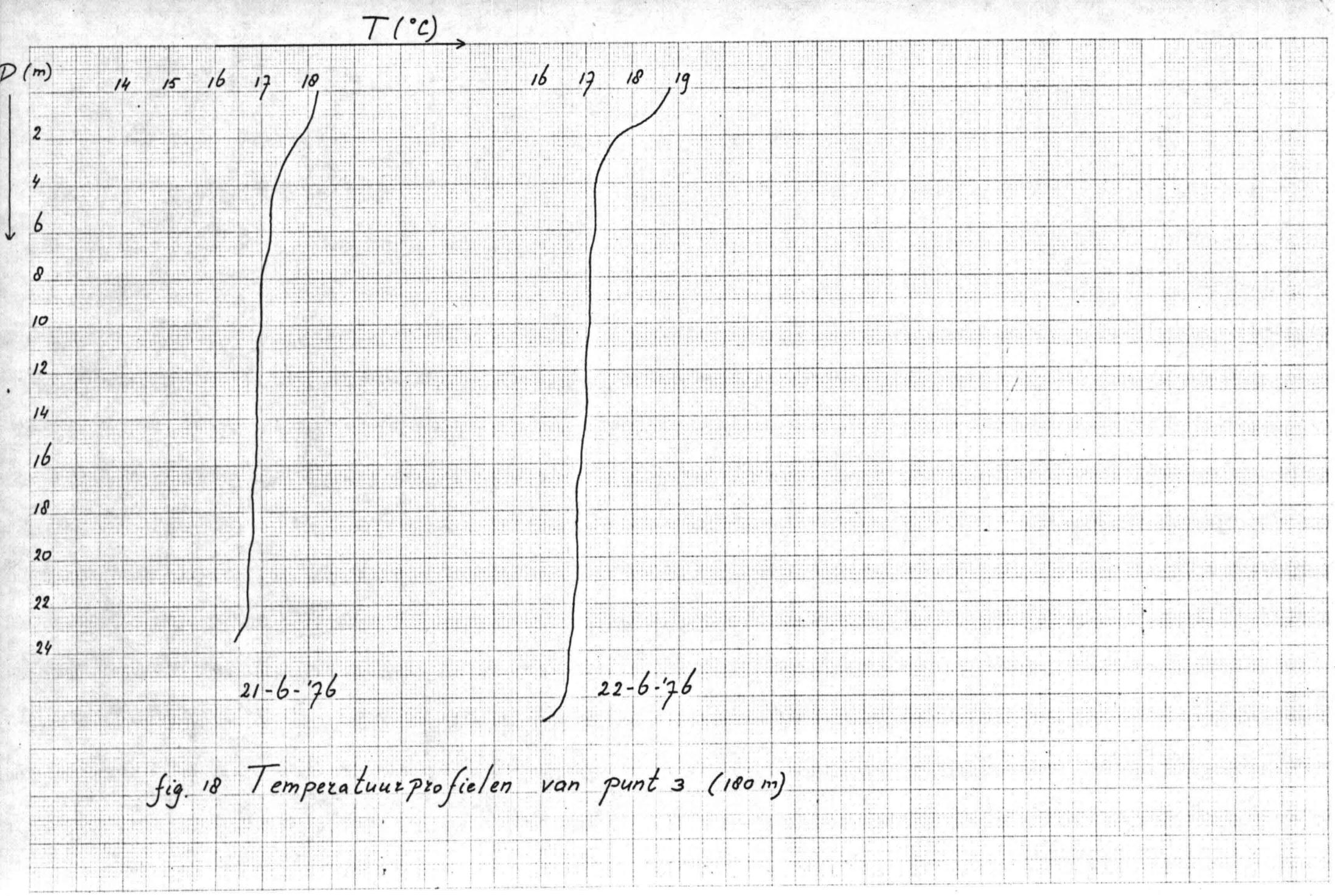


fig. 18 Temperatuurprofielen van punt 3 (180 m)

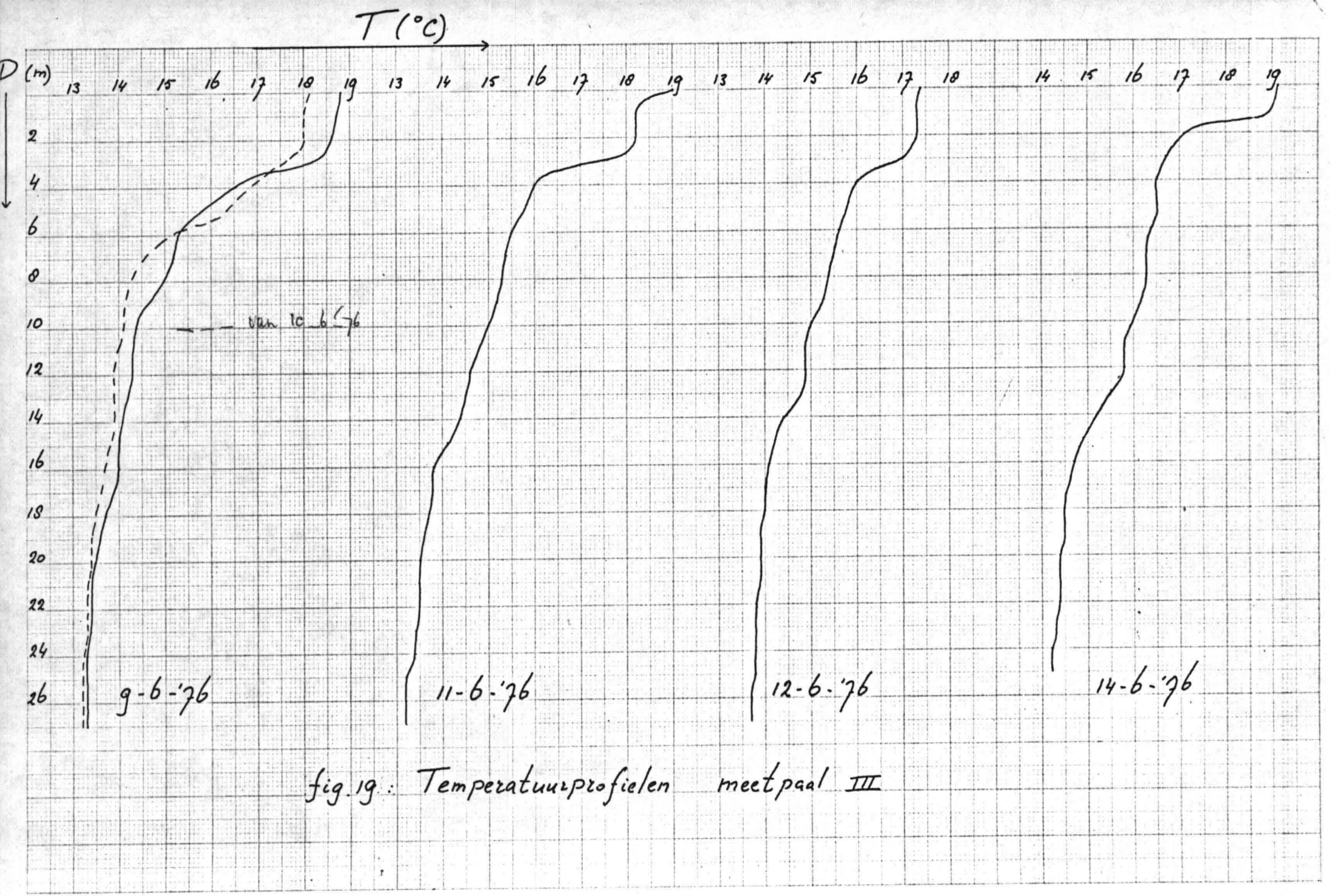


fig. 19: Temperatuurprofielen meetpaal III

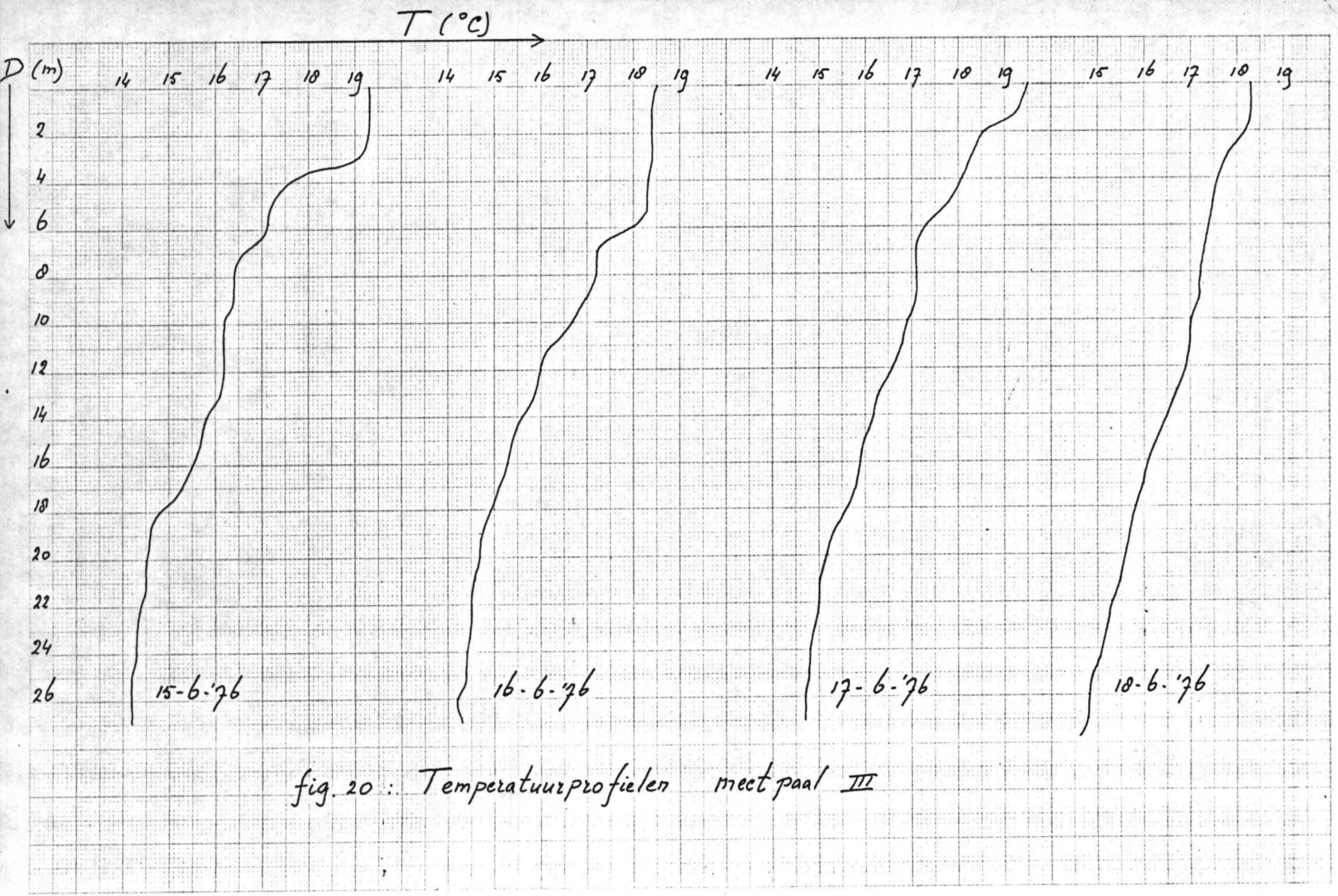


fig. 20 : Temperatuurprofielen meetpaal III

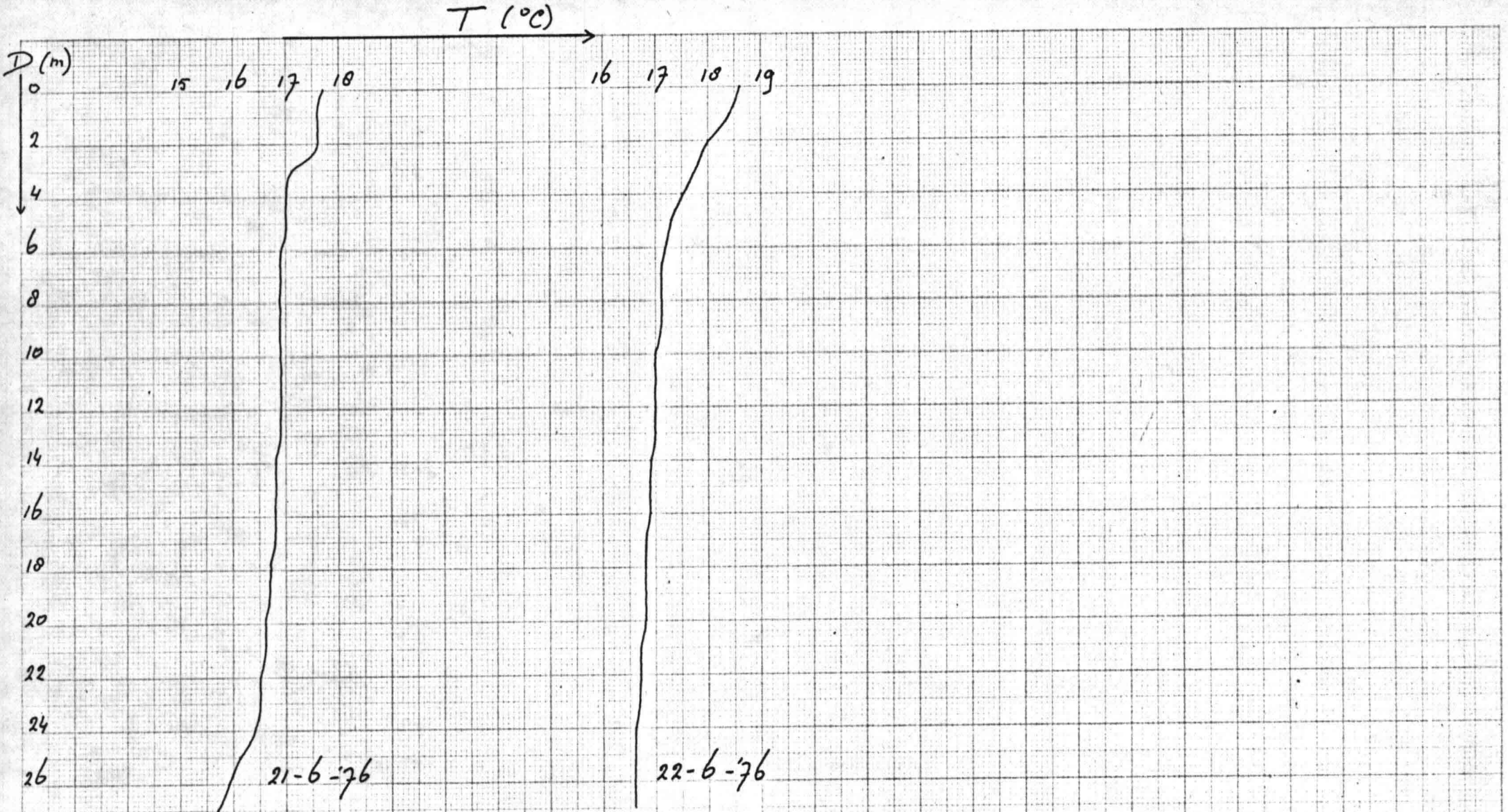
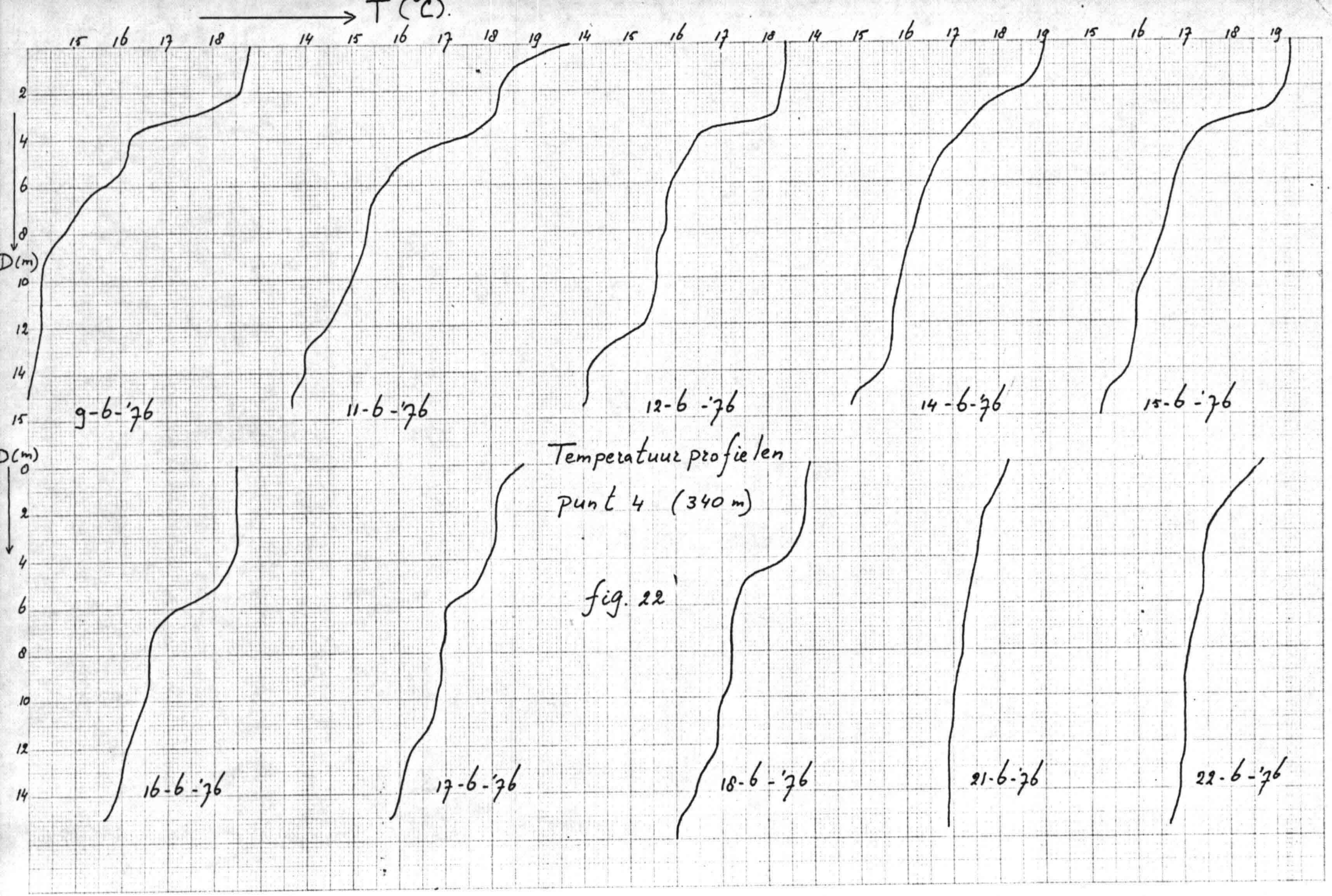


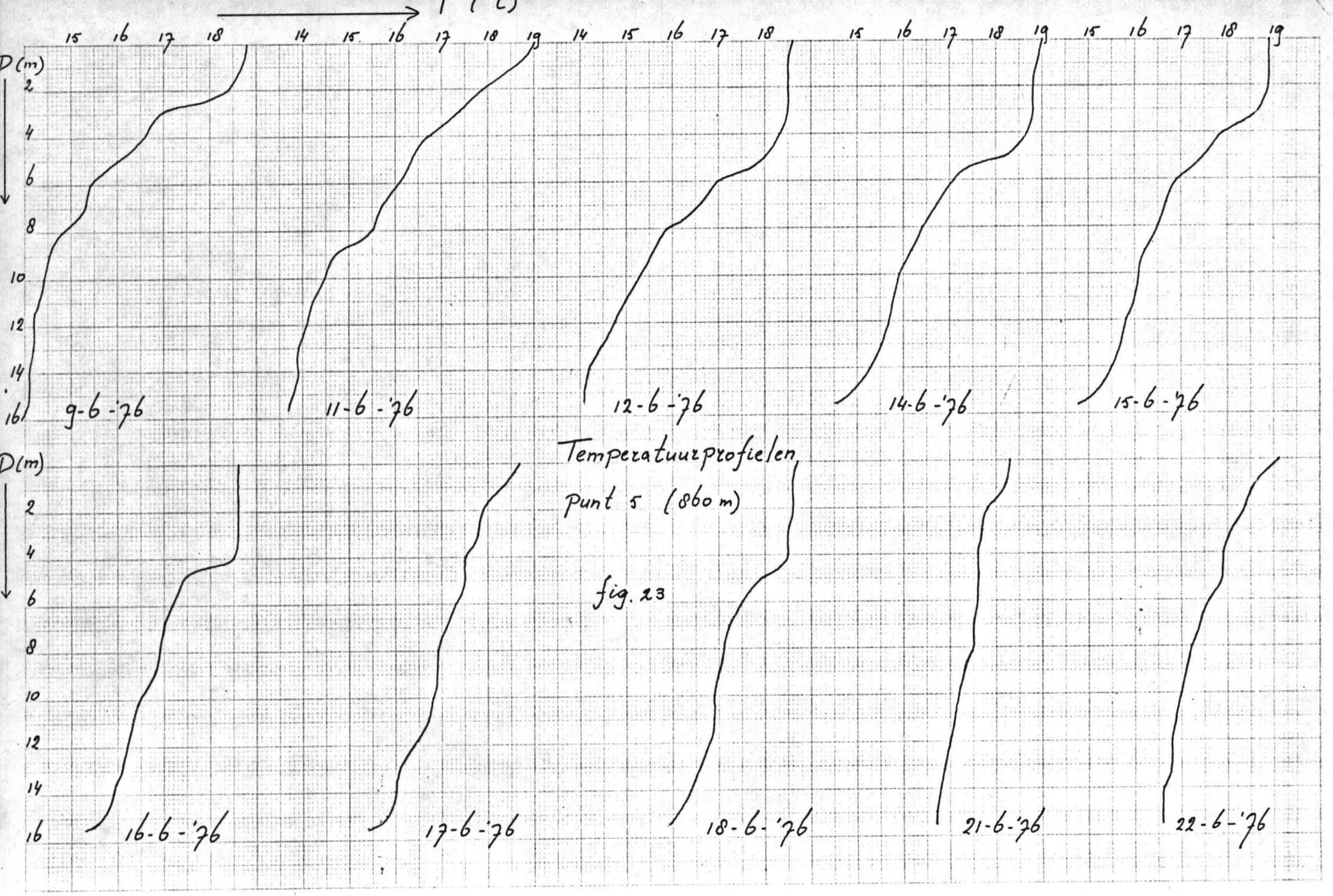
fig. 21 : Temperatuurprofielen meetpaal III



Temperatuur profielen

punt 4 (340 m)

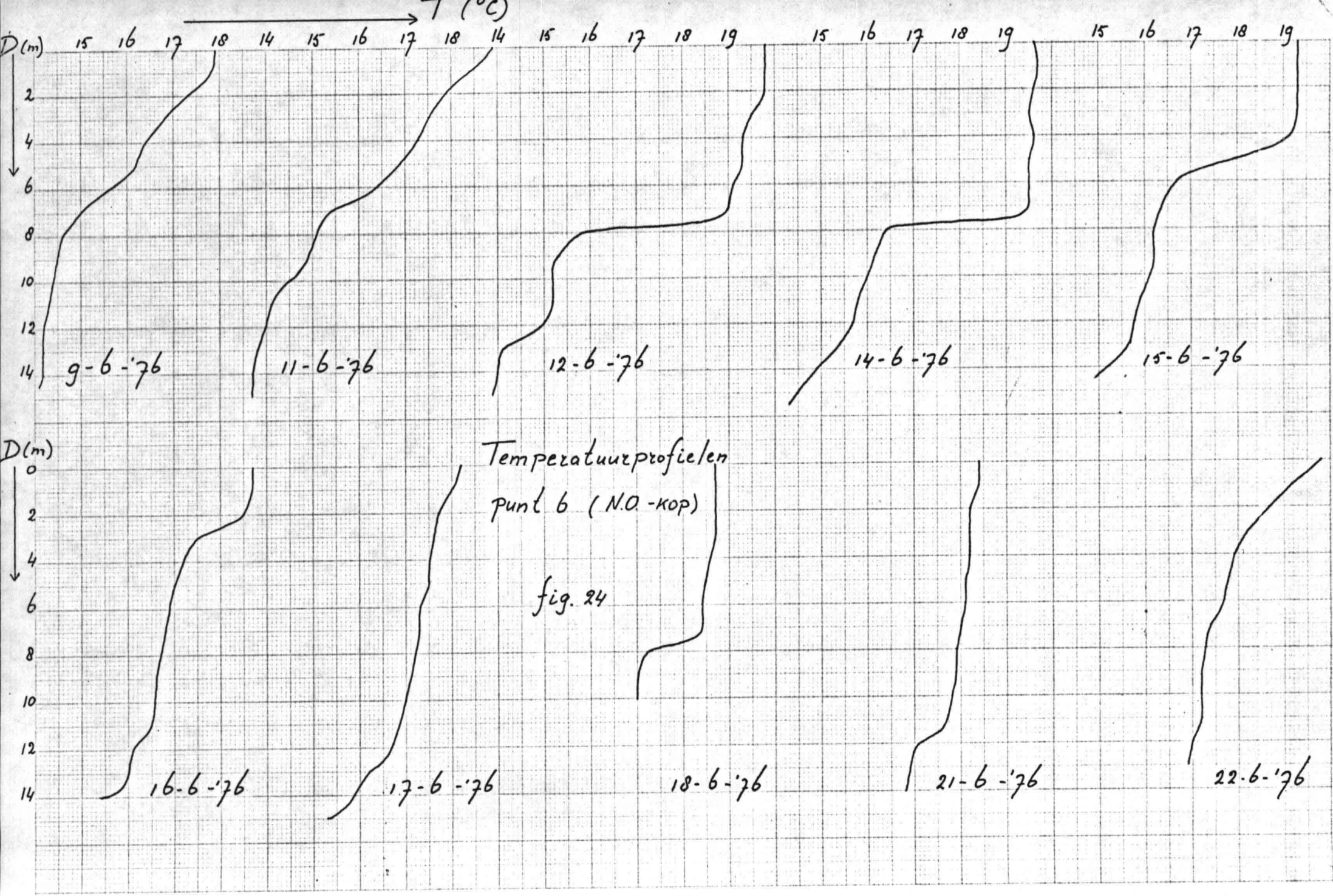
fig. 22



Temperatuurprofielen

Punt 5 (860 m)

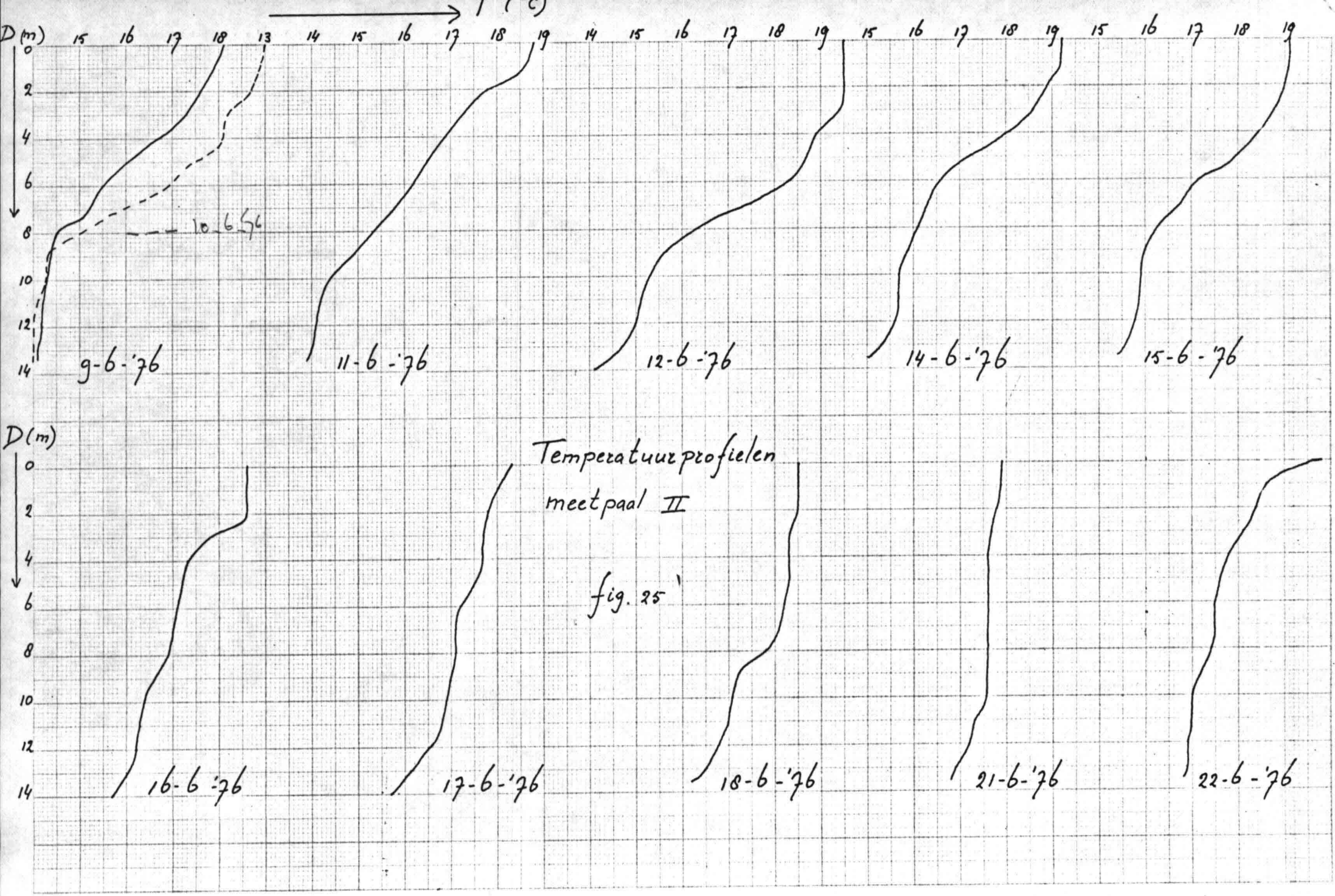
fig. 23



Temperatuurprofielen

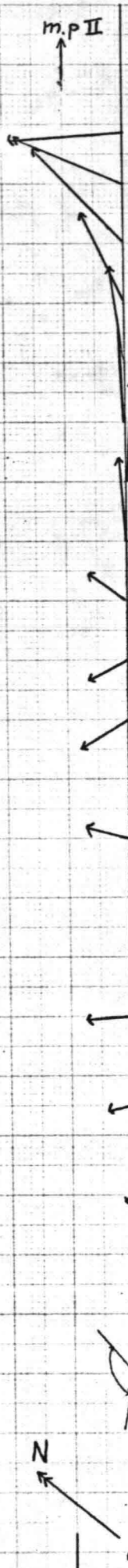
punt 6 (N.O.-kop)

fig. 24



Temperatuurprofielen
meetpaal II

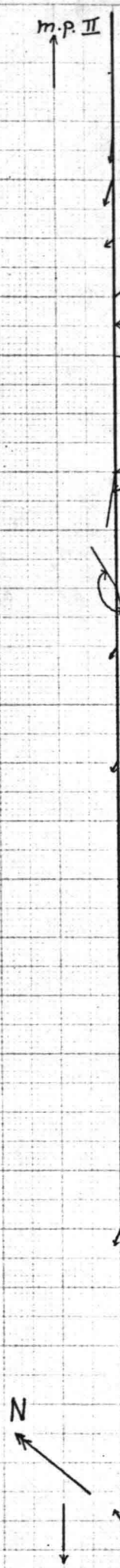
fig. 25



d (m)	$V_{gem.}$	min - max (mm/s)	α_{gem}	min - max (gr.)
2.03	94	85 - 111	267	259 - 271
2.85	99	84 - 115	292	285 - 298
3.85	109	72 - 126	315	296 - 333
4.85	86	63 - 127	335	306 - 360
5.85	80	58 - 133	352	330 - 371
6.85	82	70 - 108	359	345 - 22
7.85	86	70 - 119	3	-6 +10
8.85	69	21 - 121	356	295 - 19
9.85	38	17 - 60	307	256 - 370
10.85	39	20 - 51	243	227 - 260
11.85	45	26 - 60	240	222 - 252
13.85	35	28 - 53	285	270 - 309
16.85	37	32 - 42	267	263 - 278
18.35	21	18 - 31	258	249 - 264
19.85	11	9 - 15	224	184 - 250
22.85		1 - 9		190 - 321
25.85	10	8 - 14	231	204 - 256

Snelheidsmeting 16-6-1976 fig. 26

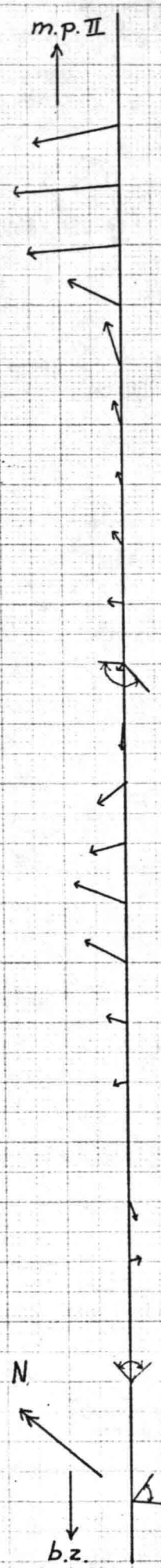
punt 1 : 80 m



d (m)	Vgem.	min - max (mm/s)	α gem.	min - max (gr.)
2	28	22 - 38	185	169 - 198
2.85	23	14 - 30	198	192 - 204
3.85	8	5 - 12	237	213 - 299
4.85	9	7 - 10	54	23 - 90
5.85	10	7 - 13		0 - 94
7.85	8	6 - 11		57 - 189
9.85	9	4 - 18		168 - 330
10.85	10	3 - 13	209	167 - 245
12.85	9	7 - 12	207	200 - 215
14.85	13	11 - 15	161	153 - 166
16.85	18	17 - 18	120	119 - 124
18.85	10	5 - 17	125	105 - 148
20.85	15	10 - 19	206	196 - 217
22.85	8	5 - 13	139	138 - 148
25.85	7	3 - 10	324	315 - 338

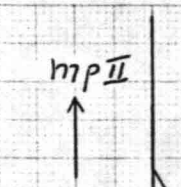
b.z. Snelheidsmeting 21-6-1976 punt 1 : 80 m

fig. 32



d (m)	$V_{gem.}$	min - max (mm/s)	$\alpha_{gem.}$	min - max (gr.)
2.	73	71 - 77	259	256 - 261
2.85	87	83 - 89	266	263 - 269
3.85	74	55 - 96	266	263 - 269
4.85	47	43 - 53	297	288 - 322
5.85	38	24 - 53	343	284 - 353
6.85	18	17 - 21	346	339 - 353
7.85	10	8 - 13	344	310 - 351
8.85	13	7 - 19	327	296 - 355
9.85	11	8 - 15	277	260 - 284
10.85	8		138°	- 274
11.85	23	21 - 24	184	180 - 189
12.85	26	21 - 29	232	228 - 239
13.85	29	23 - 33	255	251 - 260
14.85	44	42 - 46	292	291 - 294
15.85	36	35 - 39	298	291 - 305
16.85	14	5 - 26	287	268 - 299
17.85	11	10 - 12	258	255 - 261
19.85	13	11 - 16	160	157 - 163
20.85	7	6 - 10	79	62 - 113
22.85	2	0 - 2	318	- 48
24.85	9	6 - 12	38	- 95

fig. 28 : Snelheidsmeting 17-6-1976 punt 2 : 130 m

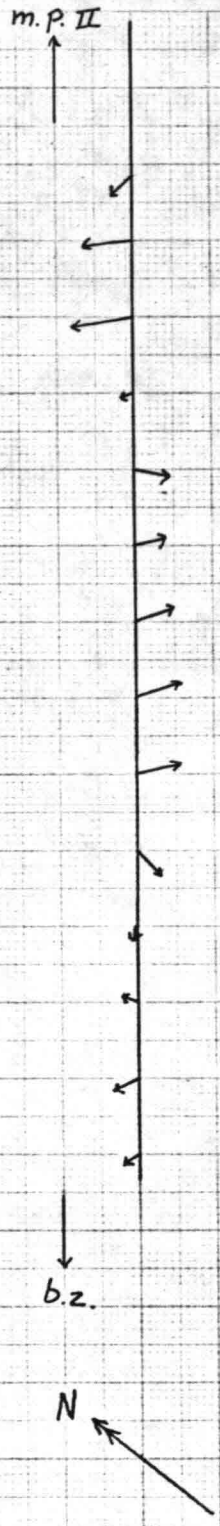


d (m)	Vgem	min-max (mm/s)	dgem	min-max
2	36	32-39	150	146-155
2.85	21	17-23	139	128-148
3.85	14	13-14	103	99-105
4.85	11	9-16	82	72-92
5.85	9	6-13	235	205-252
6.85	11	8-14	240	235-246
8.85	8	4-11	284	264-345
10.85	15	12-18	298	290-310
13.85	30	26-33	317	309-334
15.35	19	17-23	273	267-286
16.10	15	13-19	260	256-277
16.85	15	12-17	238	235-241
18.85	11	6-21	214	190-227
21.85	7	6-8	142	107-179
23.85	14	13-14	200	193-209

fig. 29: Snelheidsmeting 22-6-1976 punt 2 : 130 m

d (m)	V gem	min - max (mm/s)	d gem	min - max (gr.)
2	18	2 - 36	309	272 - 453
2.85	46	37 - 50	287	284 - 299
3.85	49	36 - 63	287	284 - 293
4.85	13	9 - 22	287	270 - 302
5.85	14	11 - 16	350	345 - 364
6.85	17	14 - 21	383	380 - 386
7.85	15	15 - 15	351	351 - 356
8.85	12	9 - 17	359	347 - 384
9.85	15	12 - 20	60	47 - 70
10.85	11	8 - 14	268	259 - 278
12.85	5	2 - 10	261	219 - 317
13.85	6	4 - 10	215	208 - 227
14.85	24	20 - 26	205	205 - 207

fig. 30 : Snelheidsmeting 15-6-1976 punt 4 : 340 m

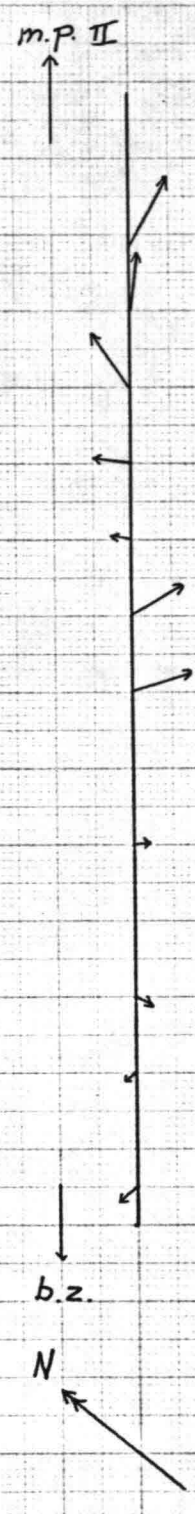


d (m)	V_{gem}	min - max ($^{mm}/_{s}$)	α_{gem}	min - max (gr.)
2	17	2 - 27	237	0 - 360
2.85	33	27 - 41	265	258 - 273
3.85	42	34 - 50	262	253 - 267
4.85	5	4 - 9	248	238 - 255
5.85	22	17 - 25	101	92 - 106
6.85	21	21 - 23	78	75 - 84
7.85	23	22 - 24	71	68 - 74
8.85	28	26 - 33	72	68 - 76
9.85	26	18 - 30	78	77 - 80
10.85	20	18 - 21	138	130 - 146
11.85	8	7 - 8	188	184 - 197
12.85	11	9 - 12	286	268 - 311
13.85	17	14 - 18	246	244 - 252
14.85	13	11 - 15	239	229 - 248

fig. 31 : Snelheidsmeting 18-6-1976 punt 4 : 340 m

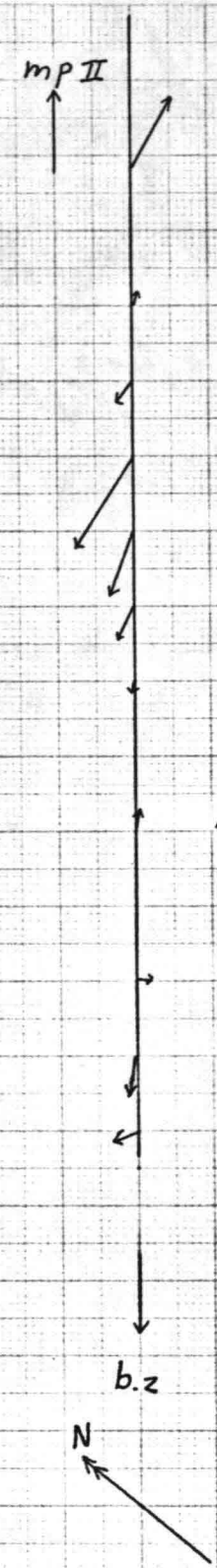
d (m)	$V_{gem.}$ min-max (mm/s)		$\alpha_{gem.}$ min-max (gr.)	
2	64	59 - 70	282	281 - 283
2.85	51	49 - 52	301	299 - 302
3.85	38	35 - 50	283	271 - 303
4.85	24	23 - 27	272	268 - 291
5.85	27	26 - 29	291	276 - 305
6.85	22	20 - 23	350	346 - 354
7.85	20	16 - 23	334	326 - 346
8.85	9	8 - 11	17	14 - 20
10.85	6	5 - 8	128	117 - 142
12.85	5	5 - 6	26	24 - 31
14.85	18	17 - 18	239	238 - 240

fig. 32 : Snelheidsmeting 22-6-1976 punt 4 : 340 m



d (m)	Vgem	min-max (mm/s)	α gem	min-max (gr.)
2	49	39 - 77	28	22 - 39
2.85	37	36 - 41	6	-5 32
3.85	44	41 - 29	326	318 - 340
4.85	25	21 - 28	276	275 - 282
5.85	12	10 - 15	279	272 - 290
6.85	39	32 - 43	59	54 - 64
7.85	39	36 - 40	73	68 - 78
9.85	11	8 - 13	83	78 - 87
11.85	10	?	116	?
12 85	8	6 - 9	235	223 - 248
14.35	16	13 - 18	229	228 - 235

fig. 33 : Snelheidsmeting 15-6-1976 punt 5 : 860 m



d (m)	V gem	min-max (mm/s)	d gem	min-max (gr.)
2	54	48-71	28	20-34
3.85	7	2-14	16	333-45
4.85	16	6-26	216	205-267
5.85	71	61-82	212	210-213
6.85	45	44-46	200	198-203
7.85	23	20-26	205	202-211
8.85	6	5-10	184	151-213
10.85	4	1-8	8	315-45
12.85	7	5-10	94	79-104
13.85	21	18-22	182	180-184
14.85	16	15-18	245	243-247

fig. 34: Snelheidsmeting 18-6-1976 punt 5: 860 m

4 Interpretatie van de meetresultaten

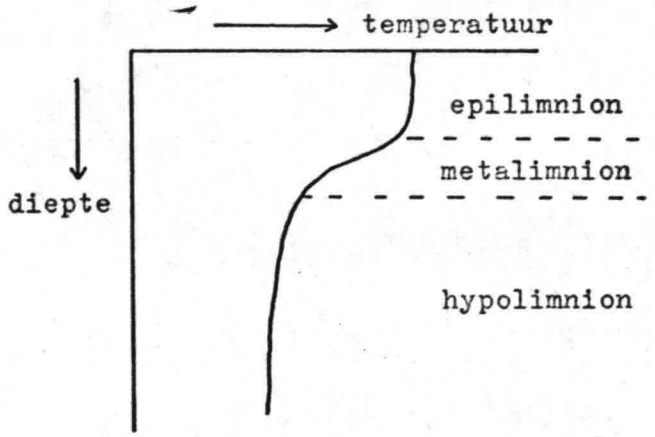
4.1 De temperatuurprofielen

In de inleiding is al vermeld, dat ten gevolge van zoninstraling en het verticale transport van warmte, temperatuurverschillen met daarmee gepaard gaande dichtheidsverschillen optreden in een bekken. Op grond van de temperatuur van het water kan men een bekken of een meer, waarin thermische stratificatie voorkomt, verdelen in drie zones :

het epilimnion - de bovenlaag, waarin het water over een bepaalde diepte min of meer dezelfde relatief hoge temperatuur heeft

het metalimnion - het gebied, waarin de temperatuur over een korte afstand in de richting van het diepere water sterk daalt, ook wel spronglaag genaamd

het hypolimnion - het diepste gedeelte, waarin het water een relatief lage temperatuur heeft.



figuur 35 : thermische stratificatie

Met metalimnion wordt hier bedoeld de eerste spronglaag, die zich onder het wateroppervlak bevindt. Het blijkt namelijk dat op grotere diepte in het hypolimnion (14-16 m) nog een tweede temperatuursprong plaatsvindt; deze overgang is weliswaar minder scherp, maar is toch in het near-field en in mindere mate in het far-field duidelijk waar te nemen (zie b.v. fig. 10,11, 13,14,22).

Om de vergelijking van de temperatuurprofielen van de verschillende punten iets makkelijker te maken, zijn ze in de figuren 36 en 37 nog eens allemaal per dag in één grafiek uitgezet.

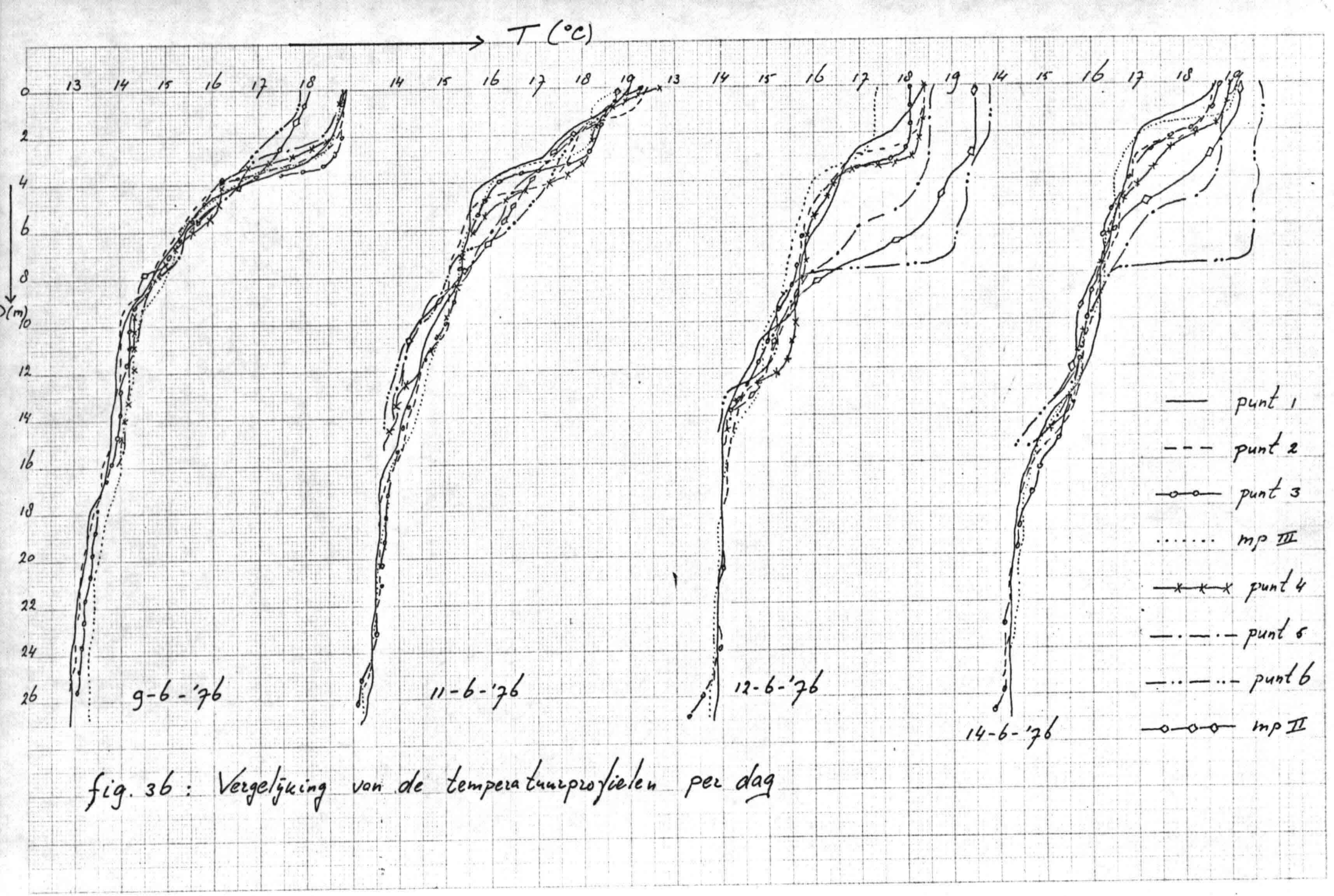


fig. 36: Vergelijking van de temperatuurprofielen per dag

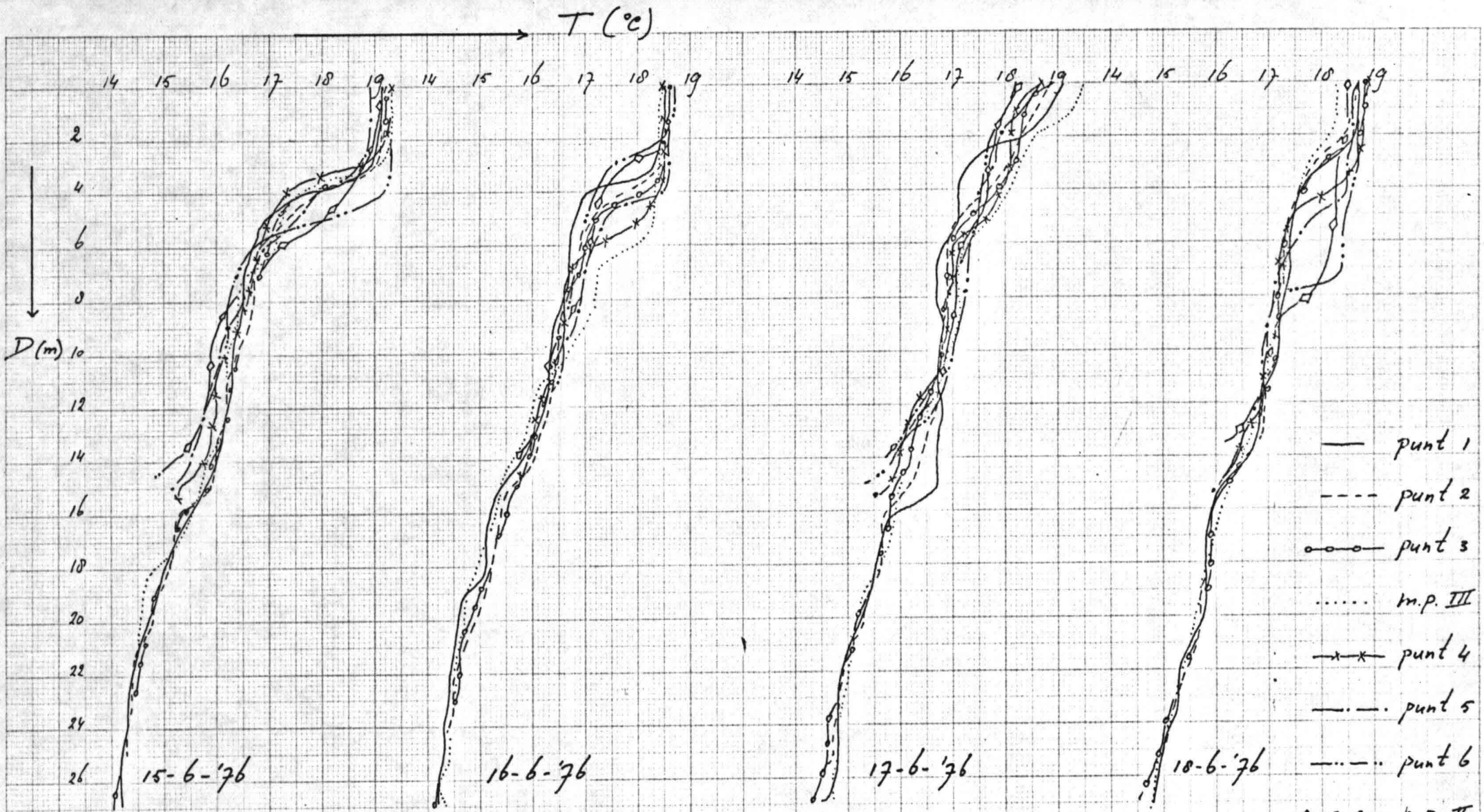


fig. 37: Vergelijking van de temperatuurprofielen per dag

De beginsituatie over het hele bekken op 9 juni voor het aanzetten van de bellenzuil kan horizontaal als tamelijk homogeen beschouwd worden; alleen de curven van punt 6 en mp II vertonen een duidelijke afwijking van 1 ^{o}C in het epilimnion. Na het aanzetten van de bellenzuil is de horizontale homogeniteit op 12-6 en 14-6 duidelijk slechter, met name in het epilimnion. De punten 5,6 en mp II vertonen een dikker en warmer epilimnion dan de punten in het near-field en punt 4. Het hypolimnion blijft bij alle punten gelijk. Op 15-6 is het verschil opgeheven en is het bekken weer redelijk homogeen. Dit kan betekenen, dat de invloed van de bellenzuil pas op 15-6 merkbaar is geworden bij de punten 5, 6 en mp II, ofwel, dat de afstromende laag pas op 14-6 of 15-6 punt 5 (860 m) bereikt.
Gesteld, dat de afstromende laag (b.v. 5m dik) op 12-6 een plaats bereikt heeft tussen 340 m en 860 m van de bellenzuil, dan kan een afstromingsdebiet berekend worden :

Q = 23 m^3/s, als de laag een punt op 500 m in 2 dagen heeft bereikt en Q = 33 m^3/s voor een punt op 600 m.Deze waarden zijn lager dan de waarden, die uit de metingen van '75 volgden: 50 - 85 m^3/s; hierin is de bijdrage van het hypolimnionwater 25 m^3/s, berekend uit de zakking van de sprong-laag, die toen zeer duidelijk optrad.
Aangezien het bekken op 15-6 weer homogeen is, zou men ook kunnen veronderstellen,dat zich tussen 14-6 en 15-6 over het hele bekken een tussenlaag heeft gevormd, die b.v. 5 m dik is; zoals later uit de snelheidsmetingen zal blijken,is dit een redelijke aanname voor de dikte van de menglaag.Hieruit volgt een afstromingsdebiet van 25 m^3/s, wanneer de menglaag zich 5 dagen na het aanzetten van de bellenzuil over het hele bekken verspreid heeft, en van 31 m^3/s, als dit na 4 dagen het geval is.Deze waarden komen overeen met de hierboven berekende debieten.
Gedurende de metingen van dit jaar is de spronglaag op vrijwel dezelfde diepte gebleven, hetgeen betekent, dat de menglaag aan de onderkant van het metalimnion afstroomt. Het hypolimnionwater zal dus een grotere bijdrage leveren aan de afstromende laag dan het epilimnionwater, immers de dichtheid van de tussenlaag is hoger dan de gemiddelde dichtheid van het metalimnion.
Bij de ideevorming omtrent het mechanisme, waardoor de afstromende laag gevormd wordt, kan fig. 38 behulpzaam zijn. Hierin is een eenmalige meting van een verticaal op de rand van de bellenzuil, dus in het omhoogkomende water, weergegeven in vergelijking met de temperatuurprofielen uit het near-field. Tot 5 m diepte blijken deze vrijwel gelijk te lopen. Aan de rand van de stijgende water- en luchtkolom heeft dus al een menging plaatsgevonden van kouder bodemwater met warmer hypolimnionwater. Het koudere water in het centrum van de bellenzuil daarentegen schiet omhoog naar het oppervlak, met als gevolg, dat de temperatuur daar lager is. Dit water stroomt dan

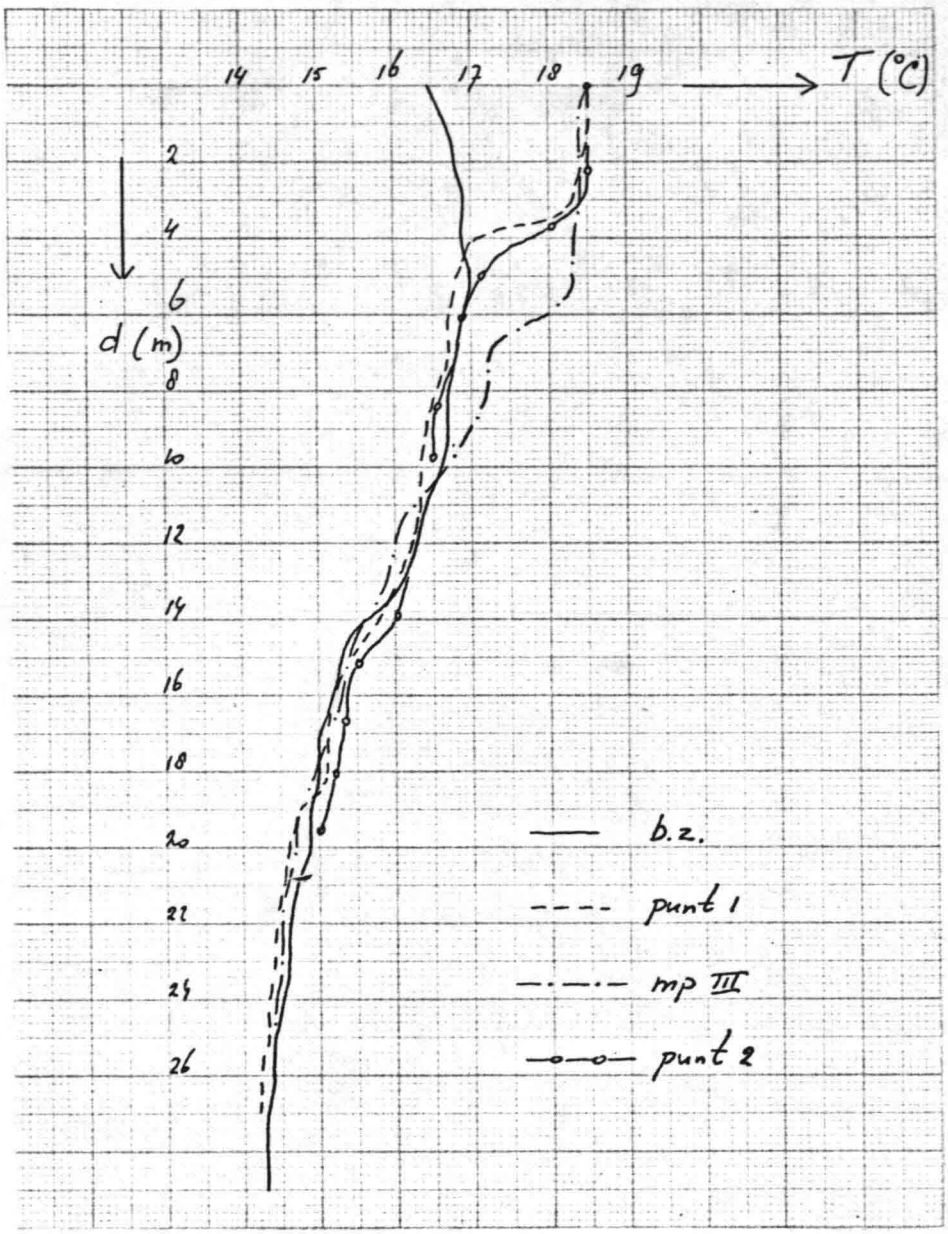


fig 38 : temperatuurprofielen van het near-field op 16-6

van de bellenzuil af en mengt met water uit het epilimnion.
Ook de wijze van opwarmen is verschillend t.o.v. het vorige jaar. Hiertoe zijn in fig. 39 en 40 de temperatuurprofielen per punt in één grafiek uitgezet. Over hele bekken warmt het hypolimnion per dag 0,2 à 0,5 ^{o}C op en schuift dus per dag een stukje evenwijdig aan zichzelf op. In het epilimnion is een dergelijke systematische opwarming niet te zien. Tijdens de metingen in 1975, toen het epilimnion 10 à 11 m dik was, trad deze verschuiving in het hypolimnion niet op.
Ook in de manier van opwarmen wijken punt 6 en mp II af: er vormt zich t/m 12-6 een dik epilimnion (resp. 7,5 en 4 m), dat gedurende deze dagen in tegenstelling tot het near- field ook opwarmt. Aangezien vanaf 8 juni een

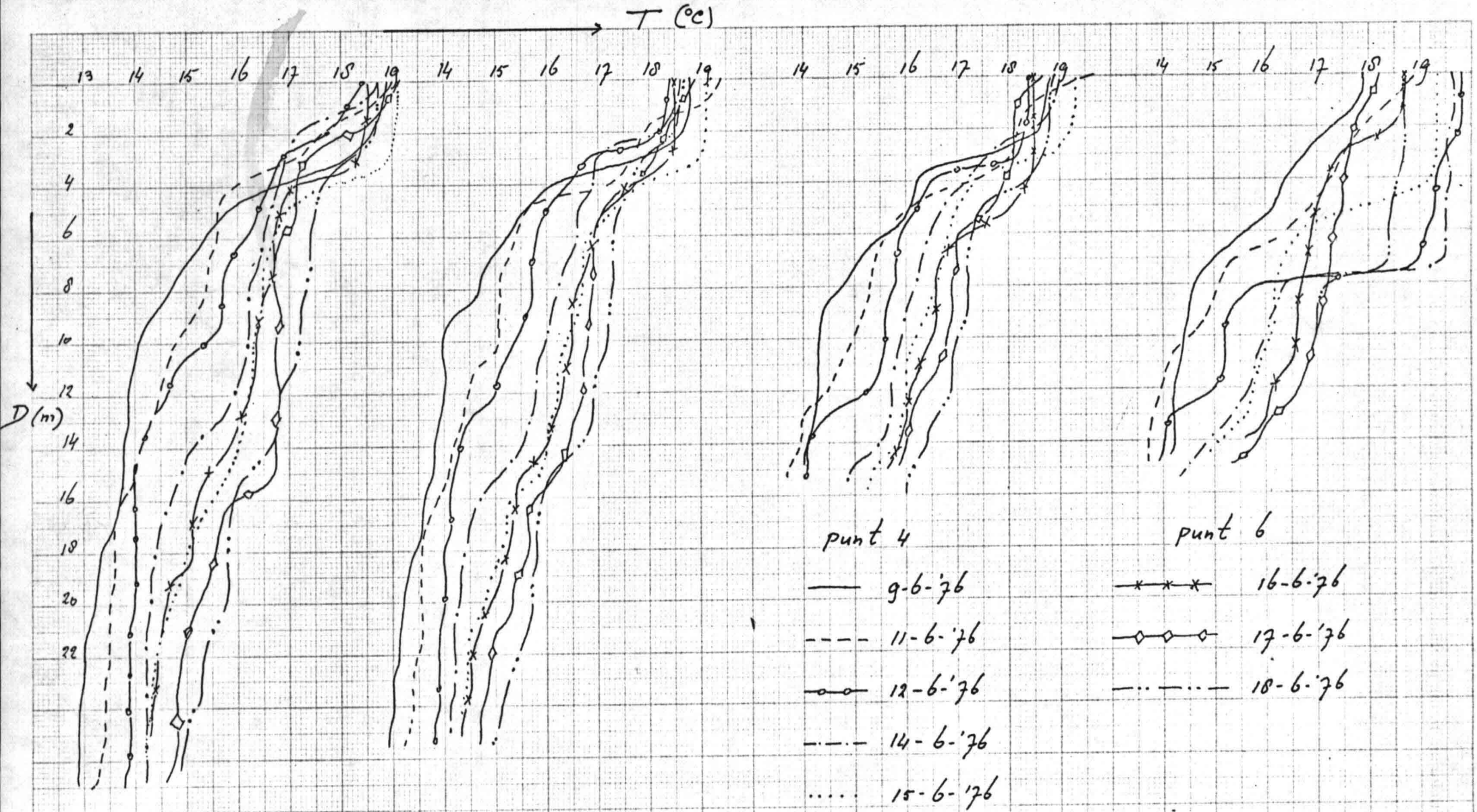


fig. 39 : Vergelijking temperatuurprofielen per meetpunt.

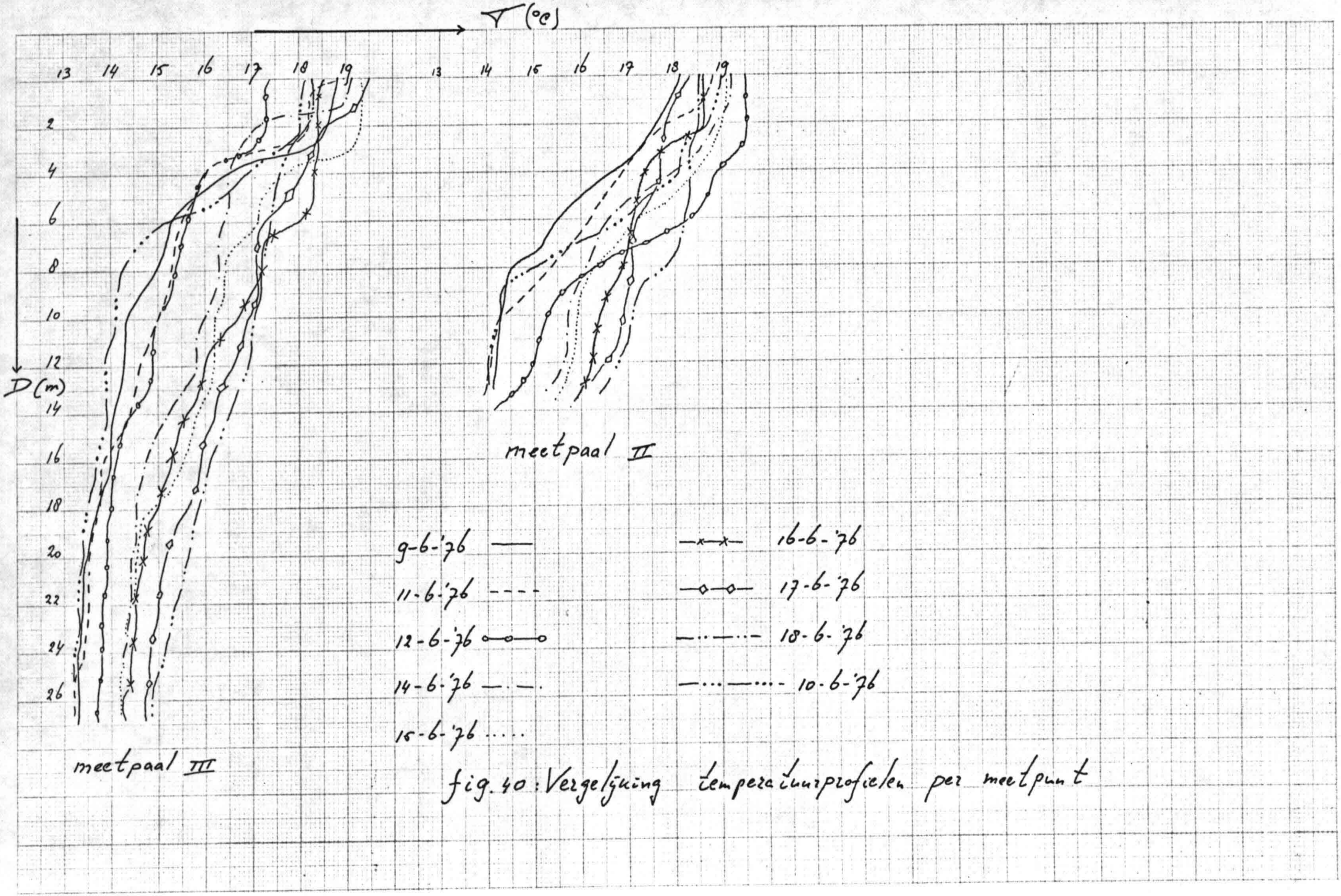


fig. 40: Vergelijking temperatuurprofielen per meetpunt

periode met warm weer begonnen is, kan dit, analoog aan een meer, gewoon opwarming zijn, zonder dat hier van effect van een bellenzuil sprake is. Immers de punten dichtbij de bellenzuil vertonen dit verschijnsel niet en bovendien gaat de spronglaag omhoog, koelt het epilimnion af tot een temperatuur, gelijk aan die van het epilimnion in het near-field, en vindt verder alleen opwarming van het hypolimnion plaats. Ook dit zou kunnen wijzen op een vertraagde werking van de bellenzuil in het noord-oostelijk deel van het bekken. Een mogelijkheid, die hierbij ook een rol kan spelen, is, dat de inlaatstroom t.g.v. wind uit westelijke tot zuidwestelijke richting een warmer epilimnion veroorzaakt in de NO-kop.

Over het geheel genomen zijn er nogal wat verschillen met de in de inleiding genoemde ideeën omtrent de afstroming t.g.v. de bellenzuil. Verwacht werd, dat water uit hypo- en epilimnion mengt en een tussenlaag vormt, die alsmaar dikker wordt, tot het bekken isotherm is; hierbij zou het hypolimnion een constante temperatuur behouden en de spronglaag dikker moeten worden. Het hypolimnion warmt echter op, hetgeen veroorzaakt zou kunnen worden door een verticale wateruitwisseling tussen de lagen, waarbij warmte naar de onderste laag wordt getransporteerd. Het geringe verschil in de dichtheid van de afstromende laag en het daaronder liggende hypolimnion en, zoals later zal blijken, het relatief grote snelheidsverschil tussen de lagen vergroten de kans op menging ter plaatse van het grensvlak van de lagen. Dit verklaart echter niet de systematische opwarming van het hypolimnion.

Over de invloed van de wind nog het volgende : uit figuur 41 volgt het effect, dat de storm in het weekend van 19 en 20 juni heeft gehad. Het bekken is door de windstoten van maximaal 20 m/s helemaal gemengd. Als uiteindelijk resultaat van de bellenzuil moeten dus de temperatuurprofielen van 18-6 beschouwd worden, waarbij nog een aanzienlijk temperatuurverschil tussen wateroppervlak en bodem bestaat.

T.g.v. de wind treedt menging op in het epilimnion door verticale wateruitwisseling. Op dagen, dat de windsnelheid 5 m/s of hoger is, blijkt het epilimnion een vrijwel konstante temperatuur te hebben (12,14,15,16,18 juni). Op de overige dagen treedt een temperatuurgradiënt op in het epilimnion, doordat de opgenomen hoeveelheid warmte met de diepte afneemt en het water niet geheel gemengd wordt.

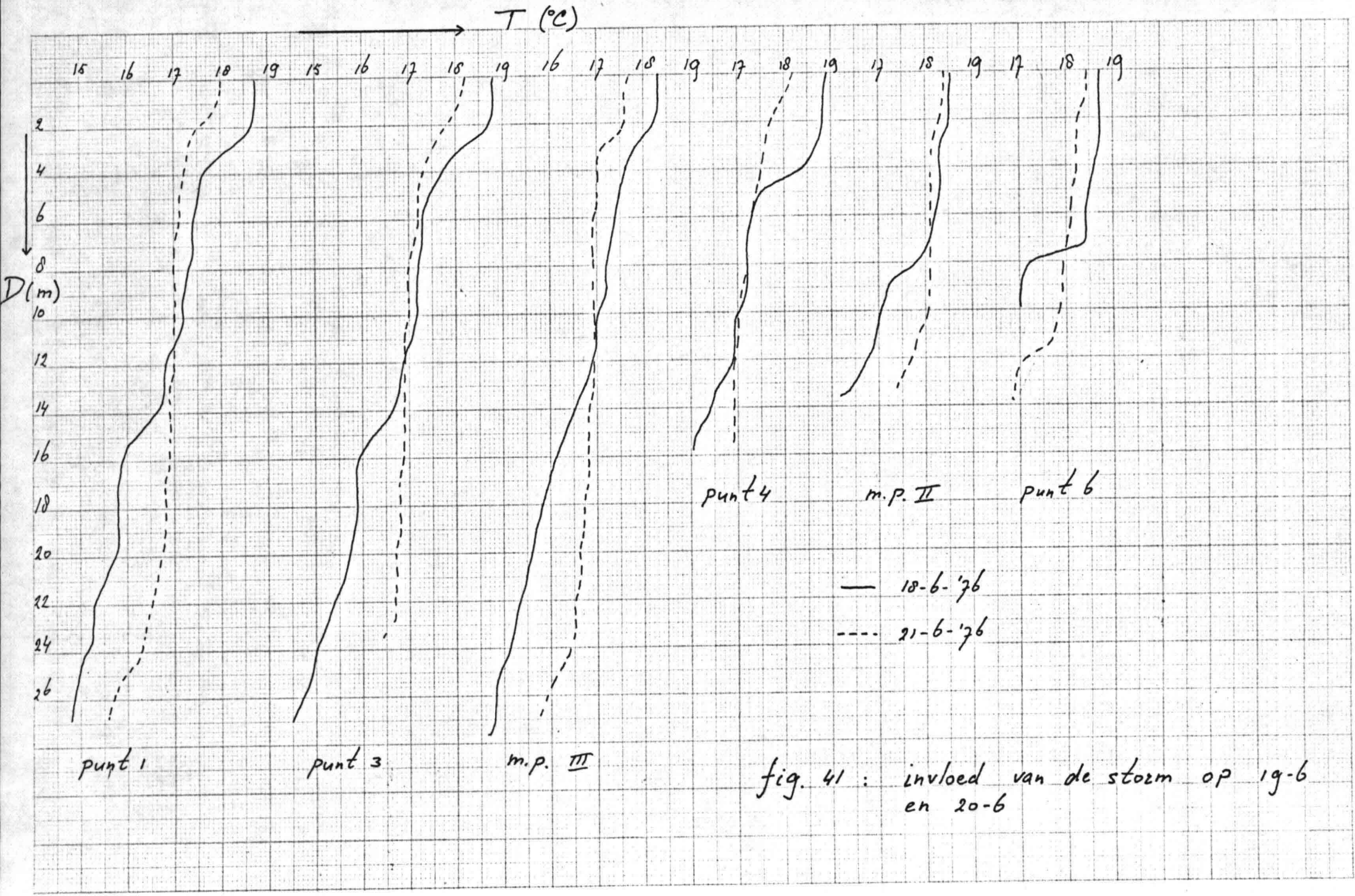


fig. 41 : invloed van de storm op 19-6 en 20-6

4.2 De snelheidsprofielen

Bij de snelheidsprofielen is het drie-lagensysteem verdeeld in :

de bovenlaag - hierin stroomt het relatief warmere water naar de bellenzuil toe;

de tussenlaag of menglaag : in deze zone stroomt het water van de bellenzuil af;

de onderlaag - het relatief koudere water, dat in het hypolimnion naar de bellenzuil toestroomt.

Dit verschil in terminologie is noodzakelijk, omdat de menglaag niet met het metalimnion samenviel, maar dieper lag.

- Meting op 10 juni

Na het aanzetten van de bellenzuil zijn bij meetpaal III op een diepte van 6 m gedurende een half uur de stroomsnelheden gemeten, om een begingolf te registreren (zie fig. 42). In van te voren opgezette berekeningen (4) zou een punt op 100 m afstand van de bellenzuil door het front van de menglaag bereikt worden tussen 15 en 60 minuten na het starten van de luchtinjectie, afhankelijk van verwaarlozing van de wrijving resp. traagheid. Uitgaande van een debiet van 10 m^3/s zouden de snelheden liggen tussen 82 resp. 12 mm/s.

Uit fig. 42 volgt,dat de menglaag de meetpaal III (op 120 m afstand) bereikt na ca. 26 min. met een snelheid van 10 mm/s. De radiale component bedraagt dan 4mm/s; onderweg moeten de snelheden van het front dus veel groter zijn geweest. De eerste verandering na 10 min en 30 sec. is waarschijnlijk het gevolg van het opzij drukken van het water in het epi- en metalimnion door het opkomende water van de bellenzuil. De lage snelheden duiden misschien op een grotere invloed van de wrijving, hoewel het ook best mogelijk is, dat de snelheden in de loop der tijd groter worden, omdat het mengdebiet geleidelijk wordt opgebouwd. Helaas zijn de metingen te vroeg afgebroken,om dit te constateren.

Vlak voor het passeren van het front en direct erna zijn twee temperatuurmetingen gedaan bij meetpaal III; deze temperatuurprofielen vertonen vrijwel geen verschil.

Vervolgens heeft de akwa tot vrijdag 11-6 aan meetpaal II gehangen op een diepte van 7 m. De gemeten waarden zijn uitgezet in fig. 43. De hoeken β en γ zijn in fig. 44 aangegeven.

fig. 44 : de hoeken β en γ

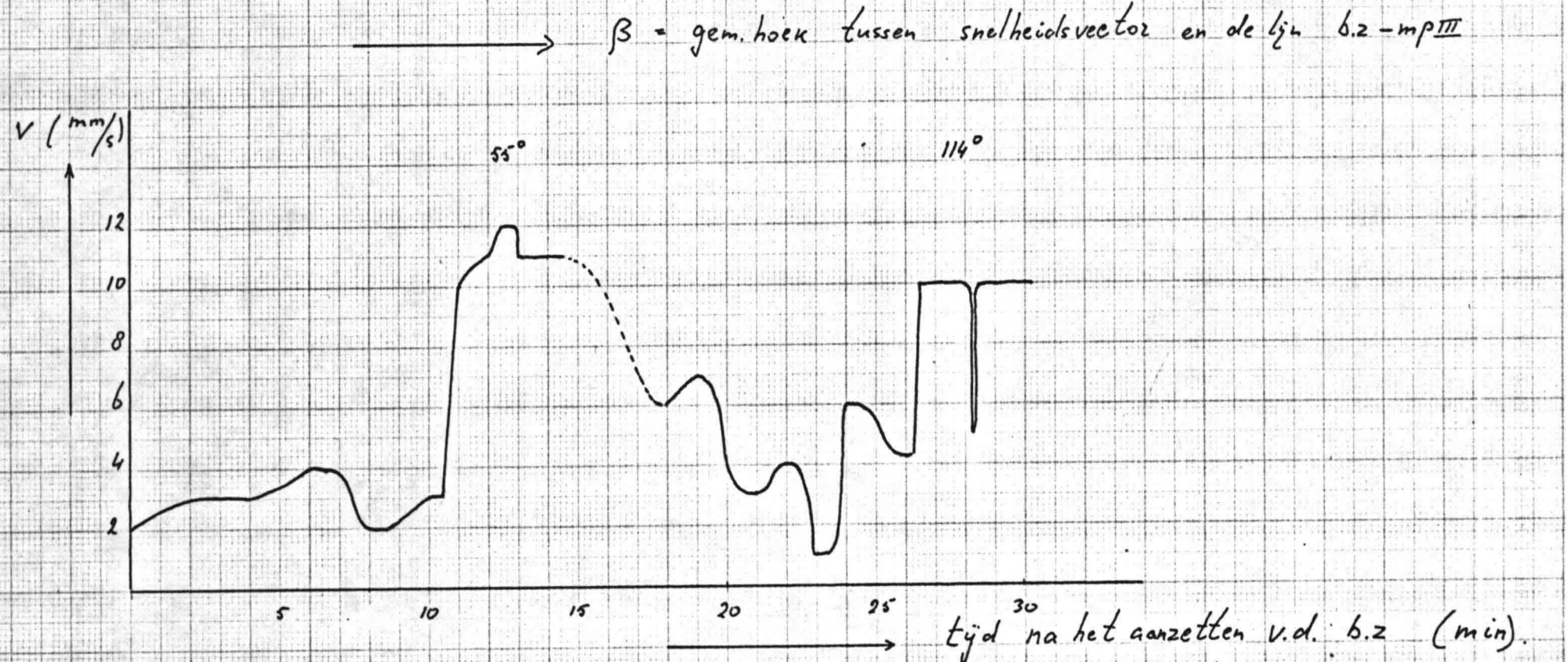


fig. 42: Verloop snelheden na het aanzetten van de bellenzuil
bij meetpaal III diepte 6 m 10-6-'76

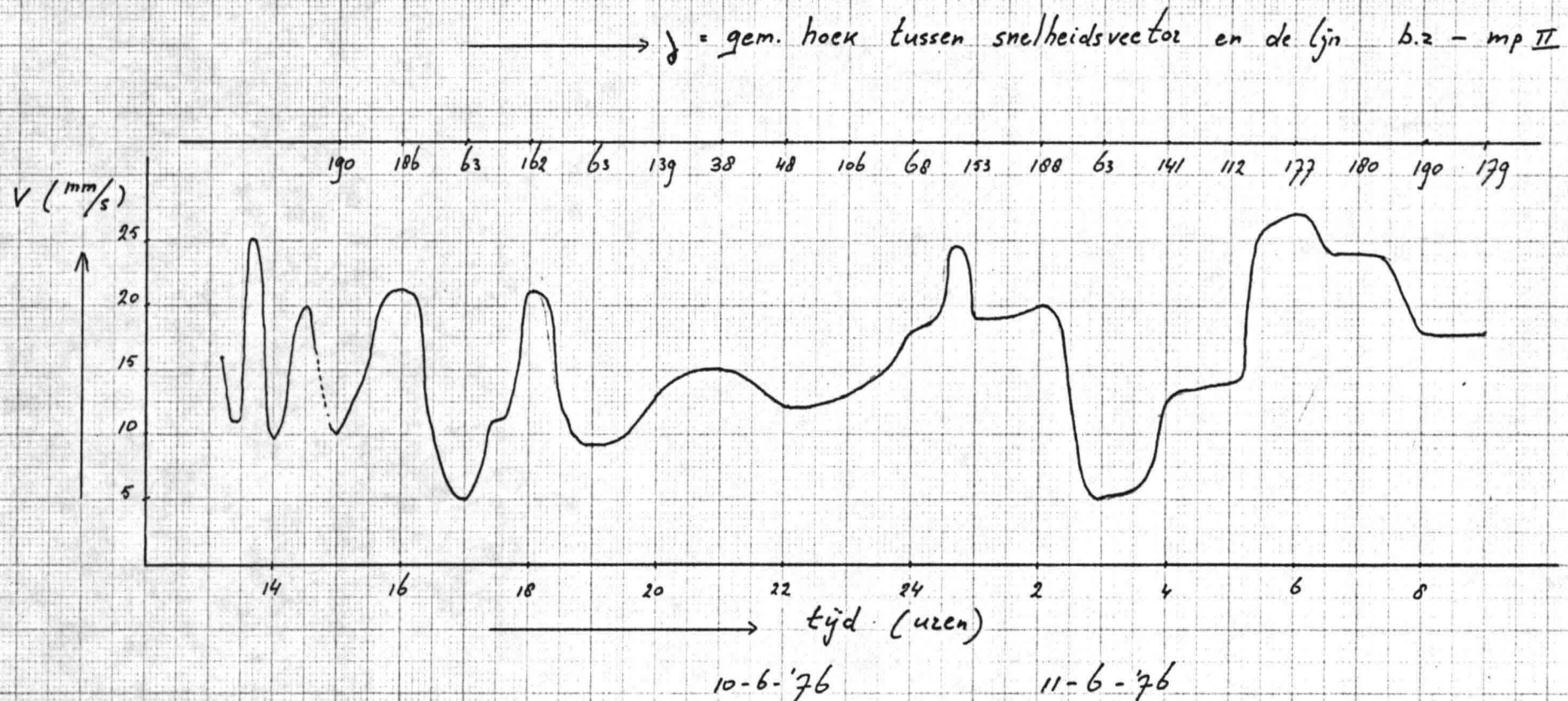


fig. 43: Verloop v.d. snelheden bij meetpaal II na het aanzetten van de bellenzuil op 10-6-'76 om 11.51 u. diepte 7 m

De papiersnelheid en de gevoeligheid van de recorder waren te laag, om plotselinge veranderingen waar te kunnen nemen. Er treden wel fluctuaties in de snelheden op, maar in hoeverre dit de menglaag is, kan moeilijk bepaald worden. Merkwaardig is wel, dat de snelheden zo hoog zijn, temeer daar het deze dag vrijwel windstil was.

- Overige metingen

Opvallend aan de snelheidsprofielen is,dat in de meeste gevallen niet voldaan wordt aan de voorwaarde van radiale continuiteit (zie fig. 26 t/m 34). Dit is ook te zien in fig. 45 t/m 47, waarin de radiale componenten van drie metingen zijn uitgezet tegen de diepte. Alleen het profiel van 17-6 voldoet aan de continuiteitsvoorwaarde. Uitgaande van radiale afstroming moet door een cilindervormig oppervlak rond de bellenzuil evenveel in- als uitstromen. Het is niet ondenkbaar, dat wandeffecten, inlaatstroming en wind een afwijking in de radiale symmetrie ten gevolge hebben, waardoor de radiale continuiteit niet meer opgaat.De variatie in de hoek α, die soms erg groot is, kan hierbij ook van invloed zijn, evenals de verandering, die gedurende de tijd, dat gemeten wordt, optreedt in de snelheid. Immers de snelheid op de bodem wordt 4 à 5 uur later gemeten dan de snelheid onder het oppervlak.

Een ander opmerkelijk verschijnsel is de hoge tangentiële component van de snelheden.Het kan aannemelijk gemaakt worden, dat de coriolisversnelling een sterk spiralende beweging veroorzaakt in de drie lagen. In de afstromende laag is dit effect sterker naarmate de afstand tot de bellenzuil toeneemt, zodat het vooral merkbaar is in het far-field. Deze afwijking heeft een richting van 90^{0}, uitgedrukt in de hoek α(zie fig. 9). In de boven- en onderlaag is de invloed het grootst in de omgeving van de bellenzuil en is de richting van de spiraal precies tegengesteld ($\alpha = 270^{0}$). Als gevolg van deze spiralende beweging treedt wrijving op tussen de lagen, die het effect verminderen.(5).

Deze coriolis-effecten zijn in de metingen op 16-6 (punt 1), 17-6 (punt 2), 15-6 en 18-6 (punt 4) duidelijk terug te vinden (fig. 26,27,30,31): in het near-field wordt voornamelijk de toestroming beinvloedt en in het far-field op 340 m treedt het effect in alle lagen op, hoewel de tangentiële componenten minder groot zijn.

De metingen na de storm geven, zeker in het near-field, afwijkende resultaten: op 21-6 in punt 1 (fig. 27) is het coriolis-effect veel minder merkbaar, de snelheden zijn relatief laag, de hoekafwijking is geringer, en bovendien treedt bijna alleen maar terugstroming op. De storm heeft het bekken helemaal gemengd en de bestaande stromingen verdrongen, zodat het stromingsbeeld t.g.v. de bellenzuil zich opnieuw moet instellen. Ook is de

invloed van de coriolisversnelling tijdsafhankelijk, waardoor het verklaarbaar is, dat hij niet merkbaar is op 21-6.
De metingen op 22-6 geven wat betreft punt 4 een snelheidsprofiel overeenkomstig 15-6, waarbij opgemerkt dient te worden, dat op deze afstand van de bellenzuil de coriolisinvloed nog steeds merkbaar is in de bovenlaag en nauwelijks in de tussenlaag. Wat betreft punt 2 komt er een vreemd profiel uit de bus: lage snelheden, precies tegenovergestelde hoekafwijkingen dan in andere profielen, terwijl het bovendien windstil weer was.
In punt 5 (860 m) wordt de stroming t.g.v. de bellenzuil sterker beïnvloed door wind, wandeffecten of horizontale circulatiestromen. Dit is te concluderen uit het afwijkend beeld, dat de snelheidsmetingen in punt 5 geven t.o.v. punt 4 : op 18-6 treedt hier afstroming in de bovenlaag en toestroming in de menglaag op, hetgeen op een circulatielus in het horizontale vlak zou kunnen wijzen. Er is wel een duidelijke gelaagdheid te zien.
Het is jammer, dat de metingen vóór 15 juni mislukt zijn, zodat in het beginstadium van de stroming t.g.v. de bellenzuil geen waarden beschikbaar zijn, om het begin van de gelaagdheid in de diverse punten vast te stellen.

- Debietberekening

Op de mogelijke oorzaken van de afwijking in de radiale symmetrie is op de vorige bladzijde al gewezen. Er is een poging gedaan, om m.b.v. de gemeten snelheden in drie gevallen de toe- en afstromingsdebieten te bepalen. Hierbij is de radiale continuiteit van de profielen in orde gebracht, door de nullijn evenwijdig aan zichzelf op te schuiven; er wordt dus een extra translatie op het cilindervormig oppervlak rond de bellenzuil gesuperponeerd. In fig. 45 t/m 47 zijn deze berekeningen uitgevoerd voor de metingen op 16,17, en 18 juni. Voor alle drie gevallen is de translatie over de hele diepte aangenomen en voor de meting op 16-6 is deze extra snelheid ook alleen in de boven- en tussenlaag aangebracht.
De afstromingsdebieten zijn beduidend hoger, dan uit de temperatuurprofielen volgt, en opmerkelijk is ook het verschil tussen punt 1 en punt 2 met een debiet van 202 resp. 79 m^3/s.De toestroming is bij punt 1 en 2 in de onderlaag groter dan in de bovenlaag, maar bij punt 4 is dit weer omgekeerd. Wat dat betreft is er ook verschil tussen geval A bij punt 1 (translatie over de hele diepte) en geval B (translatie alleen bovenin): de debieten zijn in geval B lager, maar de bijdrage uit de bovenlaag is nu groter dan uit de onderlaag.

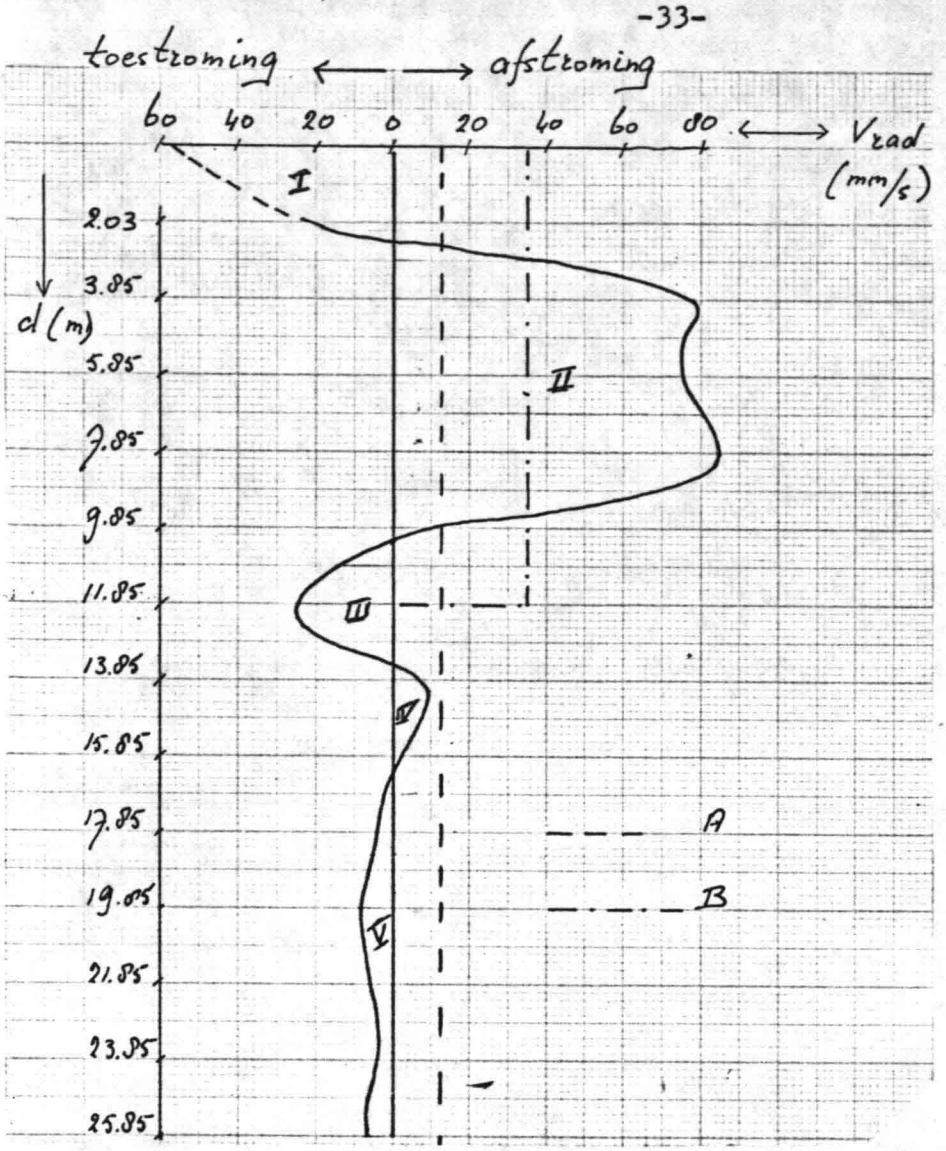


fig. 45 : radiaal snelheidsprofiel v.d. meting op 16 juni bij punt 1

Debietberekening

	t.o.v. nullijn	t.o.v. nullijn A	t.o.v. nullijn B
opp. I	: 60 m.mm/s	93 m.mm/s	150 m.mm/s
opp. II	: 500	402	252
opp. III	: 50	308	50
opp. IV	: 12		12
opp. V	: 60		60

T.o.v. de eigenlijke nullijn is de totale afstroming (opp. II+IV = 512 m.mm/s) groter dan de toestroming (opp. I+III+V = 170 m.mm/s). Het profiel is op 2 manieren continu gemaakt, door de nullijn evenwijdig te verschuiven naar 13 mm/s (A) en door enkel de nullijn van I en II te verschuiven naar 35 mm/s. Het debiet is dan: $Q = 2\pi r.a.v_r$; a is de laagdikte, v_r is de radiale snelheidscomponent, r is de afstand tot de bellenzuil. Het oppervlak van de gebieden I, II, etc. is dus $a.v_r$. De debieten zijn in m^3/s :

	geval A	geval B	
$Q_{afstr.}$ =	202	126	(+ 7 m^3/s in IV)
$Q_{toestr.\ in\ bovenlaag}$ =	47	75	
$Q_{toestr.\ in\ onderlaag}$ =	155	55	

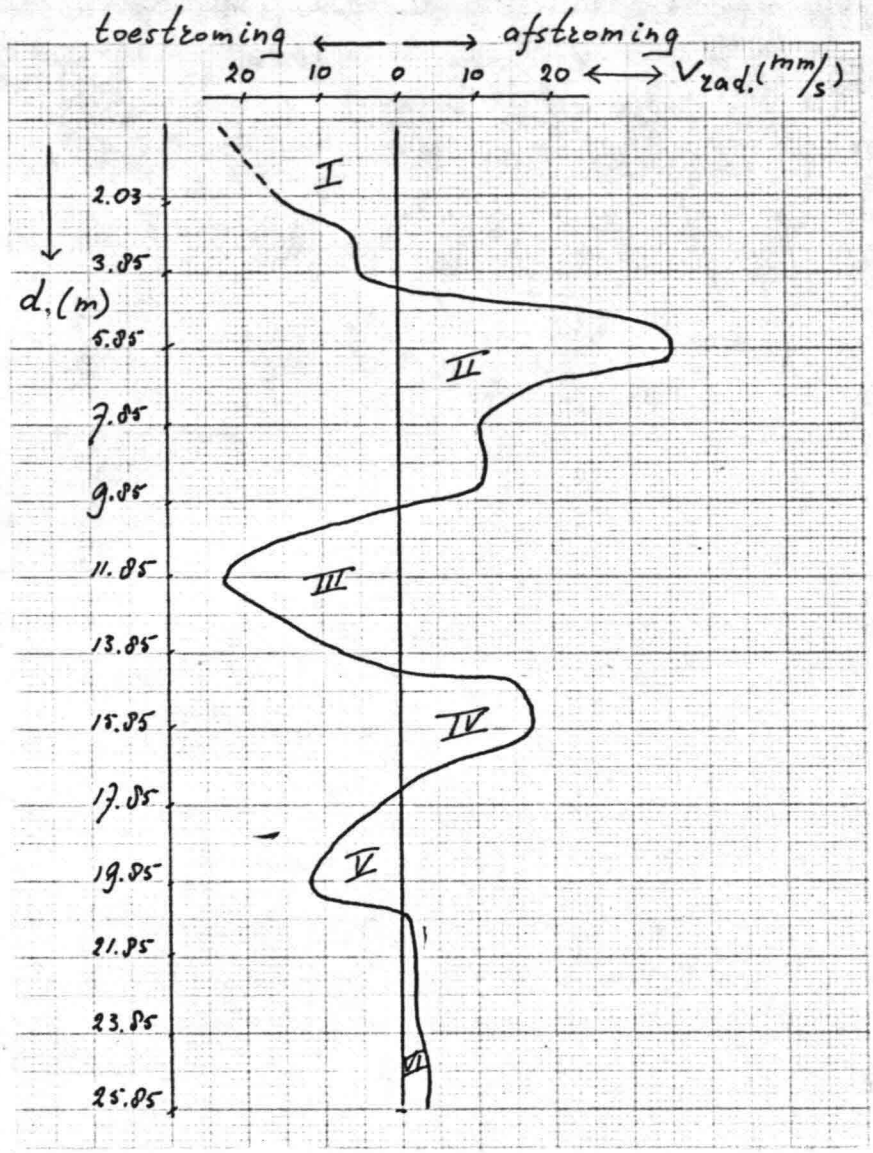


fig. 46 : radiaal snelheidsprofiel van de meting op 17 juni bij punt 2

- Debietberekening

Deze is op dezelfde manier uitgevoerd als in fig 45. Dit profiel voldoet wel aan de voorwaarde van continuiteit. De debieten zijn in m^3/s:

$Q_{afstr.\ in\ menglaag}$ = 79

$Q_{afstr.\ in\ IV\ en\ VI}$ = 26

$Q_{toestr.\ in\ bovenlaag}$ = 44

$Q_{toestr.\ in\ onderlaag}$ = 67

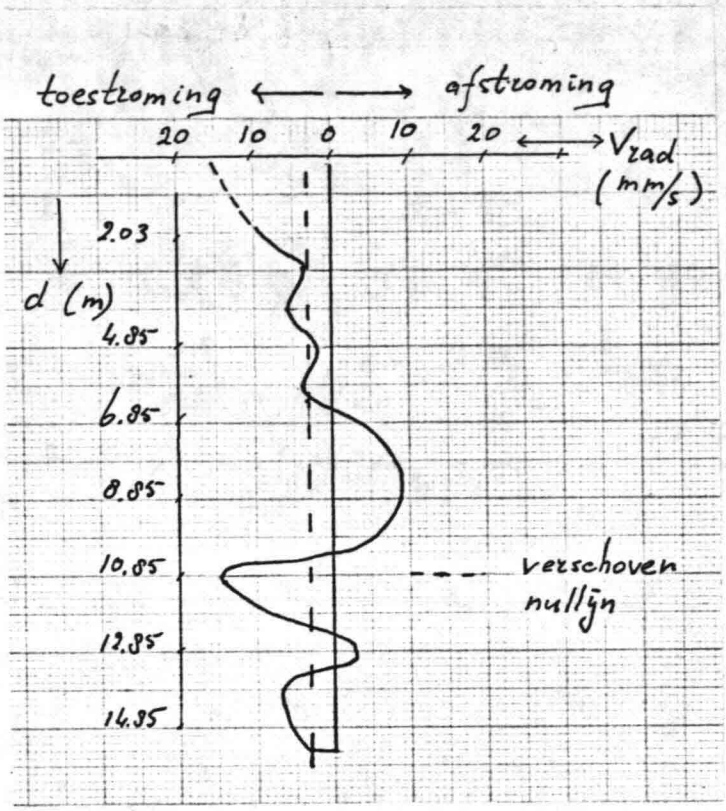


fig. 47 : radiaal snelheidsprofiel van de meting op 18 juni bij punt 4

- Debietberekening

Dit profiel voldoet niet aan de voorwaarde van radiale continuiteit, zodat hier de nullijn verschoven is. De debieten zijn in m^3/s:

$Q_{afstr.\ in\ menglaag} = 80$

$Q_{afstr.\ in\ IV} = 10$

$Q_{toestr.\ in\ bovenlaag} = 58$

$Q_{toestr.\ in\ onderlaag} = 32$

4.3 Verband tussen de temperatuurprofielen en de snelheidsprofielen

Het verschil in terminologie van de drie lagen bij de beide profielen vloeit voort uit het feit, dat het metalimnion en de menglaag niet dezelfde zone zijn in het bekken. De bovengrens van de tussenlaag bevond zich of in het onderste deel van het metalimnion, of aan de bovenkant van het hypolimnion (zie fig. 48).

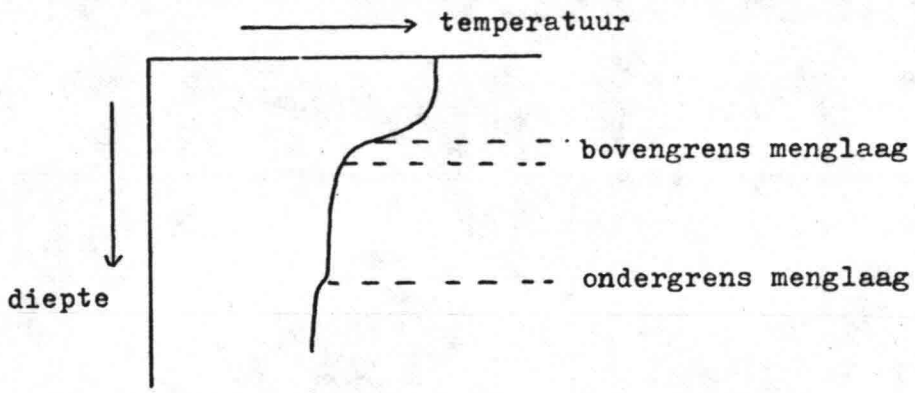


fig. 48 : onder- en bovengrens van de menglaag

De ondergrens van de tussenlaag is soms wel min of meer in het hypolimnion te onderscheiden, in de vorm van een knik of kleine sprong in de temperatuurcurve. Als voorbeeld de meting van 18-6 punt 4 : afstroming over de diepte van 5,5-10,5 m en de temperatuursprong van 3,5-4,5 m., terwijl op 10 m diepte een kleine sprong zit (zie fig. 22 en 31).
De genoemde knik in de temperatuurcurve is niet in alle metingen aanwezig en bovendien is hij niet zo duidelijk, dat in temperatuurprofielen, waarbij geen snelheidsmeting gedaan is, daaruit de ondergrens van de tussenlaag te bepalen is. Daarom is het niet mogelijk, om uit de temperatuurprofielen sec de plaats van de menglaag te schatten, ook al omdat de bovengrens niet eenduidig vastligt.
Uit de vergelijking van de temperatuurprofielen en de snelheidsprofielen volgt, dat de dichtheid van de afsromende laag ongeveer even groot is , als de dichtheid in het bovenste gedeelte van het hypolimnion. Dit zou erop kunnen wijzen, dat in het hypolimnion al een intensieve menging optreedt door een verticale wateruitwisseling in het near-field. Dit volgde eerder al uit fig. 38 en ook het radiale snelheidsprofiel van de meting op 17-6 in punt 2 (fig. 46) wijst in die richting: beneden 10 m treedt toestroming op van water met een dichtheid, die nauwelijks verschilt van die van het afstromende water. Om dit te bevestigen, zouden meer meetgegevens van de snelheden ter beschikking moeten staan.
Met het oog op eventuele menging tussen de lagen, in de buurt van het grensvlak, is m.b.v. het getal van Richardson (R_i) de stabiliteit op di-

verse meetpunten onderzocht. Wanneer het dichtheidsverschil van twee lagen kleiner wordt en het snelheidsverschil groter, zal de kans op menging tussen twee lagen toenemen. Bij een waarde van R_i kleiner dan 0,25 á 1 is de gelaagdheid instabiel. Voor de berekening en uitkomsten zie tabel 3. Hierbij is als grensvlak steeds een laag ter dikte van 1 m genomen, tenzij anders is vermeld.
Hieruit volgt wel een indicatie, dat de stabiliteit afneemt, naarmate een punt dichter bij de bellenzuil ligt. Echter ook in punt 4 treedt instabiliteit op, ongeveer op een diepte van 4-5 m en 9-10 m, dus op de grens van de tussenlaag met de bovenlaag resp. de onderlaag.

- De diepe put bij de bellenzuil

Zoals op blz. 18 al is vermeld, bevindt zich in het near-field op een diepte van 14-16 m een tweede spronglaag in het hypolimnion. De temperatuur daalt dan ca. 1 ^{o}C. Beneden deze spronglaag vertonen de snelheidsprofielen zeer lage snelheden. Aangezien het far-field een diepte heeft van ca. 14-15 m., wekt dit de indruk op, dat de put vrij geïsoleerd ligt t.o.v. het bovenste gedeelte van het hypolimnion (zie ook fig. 46). Desondanks vindt er ook op deze diepte opwarming van het hypolimnion plaats, in tegenstelling tot de metingen in 1975 (3). Ook dit zou weer kunnen wijzen op de al eerder genoemde verticale wateruitwisseling, waarbij warmte naar beneden wordt getransporteerd.

Tabel 3 : berekening van de Richardson-getallen

Het Richardson-getal is als volgt gedefinieerd :

$$R_i = \frac{g\left|\frac{d\varrho}{dz}\right|}{\bar{\varrho}\left(\frac{du}{dz}\right)^2} \approx \frac{g.\Delta\varrho.\Delta z}{\bar{\varrho}.(\Delta u)^2}$$

Hierin is : $\frac{d\varrho}{dz}$ de dichteidsgradiënt over de diepte

$\frac{du}{dz}$ de snelheidsgradiënt over de diepte

Bij 16 ^{0}C is $\frac{d\varrho}{dT} = \frac{0{,}162\ kg/m^3}{^0C}$; $\bar{\varrho} \approx 1000\ kg/m^3$

Voor z is 1 m. genomen, tenzij anders vermeld wordt. R_i kan dan benaderd worden als: $R_i = \frac{0{,}162.\ 9{,}81.1}{1000} \cdot \frac{\Delta T}{(\Delta u)^2} = 1{,}59.10^{-3}.\ \frac{\Delta T}{(\Delta u)^2}$

meting op diepte (m)	16-6 punt1 R_i	17-6 punt 2 R_i	15-6 punt 4 R_i	18-6 punt 4 R_i
2,44	0,074(Δz=0,82)	0,88(Δz=0,82)	0,53(Δz=0,82)	5,91(Δz=0,82)
3,35	0,99	2,82	266	0,94
4,35	0,397	0,57	0,43	1,08
5,35	0,254	0,32	1,61	1,98
6,35	0	0,20	2,39	0
7,35	2,94	0	1,96	0
8,35	0,66	9,95	35	26,5
9,35	0,057	0	1,61	0,38
10,35	0,629	0,49-1,75	0,51	0
11,35	2,26	0	8,86(Δz=2)	2
12,35		0,60		
12,85	1,24(Δz=2)			
13,35		1,65	4,45	
14,35		0,87	2,45	
15,35	27,6 (Δz=3)	6,36		
16,35		1,31		
17,60	0,93(Δz=1,5)	0		
19,10	5,66(Δz=1,5)			
21,35	?			
24,35	?			

5 Conclusies

- De mini-AKWA is een geschikt instrument, om stroomsnelheden te meten; alleen het drijversysteem, waaraan de meter hangt, zou handzamer kunnen zijn.
- De bellenzuil vermindert in de periode van 10-6 t/m 18-6 het temperatuurverschil tussen oppervlak en bodem met 2 ^{o}C.
- Storm heeft een sterk mengende uitwerking op het bekken; het temperatuurverschil werd door de storm op 19-6 en 20-6 verminderd met ca. 2 ^{o}C.
- De menglaag viel niet samen met het metalimnion, maar lag lager.
- Uit de temperatuurmetingen volgt, dat de invloed van de menglaag pas 2 à 3 dagen na het starten van de luchtinjectie merkbaar werd in het verste gedeelte van het far-field; hierbij kunnen de wind en de inlaatstroming echter ook een belangrijke rol vervullen.
- Verticale wateruitwisseling tussen de lagen speelt waarschijnlijk een rol bij de opwarming van het hypolimnion.
- Een schatting van de afstromingsdebieten levert bij de temperatuurmetingen waarden op in de grootte-orde van 25-30 m^3/s. Uit de snelheidsprofielen volgen hogere waarden: ca. 80 m^3/s en in één geval zelfs 200 m^3/s. Hierbij dient in acht genomen te worden, dat aan de voorwaarde van radiale continuiteit in de snelheidsprofielen niet wordt voldaan.
- De diepe put bij de luchtinjectie , die aanstond, ligt tamelijk geïsoleerd t.o.v. het hypolimnion boven een diepte van 14-16 m.

Literatuur

1 P.L. Knoppert — Het spaarbekkenproject "Brabantsche Biesbosch", H_2O,1973, vol. 2, nr. 6, blz. 32

2 G. Oskam — Enkele limnologische aspecten van de Biesbosch bekkens. H_2O, 1974, vol. 7, nr. 17, blz. 363.

3 S. Groot, H.N.C.M. vd Heijden — Afstudeerverslag, lab. voor Fysische Technologie, 1976.

4 C. Kranenburg — Voorlopig model voor het ontstaan van een menglaag, lab. voor Vloeistofmechanica 1976.

5 C. Kranenburg — Invloed van de coriolisversnelling op de gelaagde stroming in het far-field van een bellenzuil, lab. voor Vloeistofmechanica, juli 1976

6 M.E. Ford — Air injection for control of reservoir limnology, Journal of the American Waterworks Association, 1963, blz. 267.

7 G.E. Hutchinson — A treatise on limnology, deel I, 1957.