

Een "irradiance" meter
ijking, theorie en experimenten

door

L. van de Vate

NEDERLANDS INSTITUUT VOOR ONZERZOEK DER ZEE

PUBLICATIES EN VERSLAGEN

nummer 1971 - 8

13159

Een "irradiance" meter
ijking, theorie en experimenten

door

L. van de Vate

Rechtelijke bescherming

VAN INZAKE VAN DE RECHTEN VAN DE NEDERLANDSE OVERHEID

NEDERLANDS INSTITUUT VOOR ONZERZOEK DER ZEE

PUBLICATIES EN VERSLAGEN

nummer 1971 - 8

Een "irradiance" meter
ijking, theorie en experimenten

door

L. van de Vate

Intern verslag

over

werkzaamheden verricht als doctorale studie

in het tijdvak juni 1969 - januari 1970

aan

het NIOZ te Texel

voor

Prof. P. Groen

Instituut voor Aardwetenschappen

Vrije Universiteit Amsterdam

onder supervisie van

Prof. H. Postma

NEDERLANDS INSTITUUT VOOR ONDERZOEK DER ZEE

PUBLICATIES EN VERSLAGEN:

nummer 1971 - 8

Een "irradiance" meter

IJking

Theorie en Experimenten

door

L. van de Vate

intern verslag

Inhoud

<u>Doel van de metingen</u>	2
<u>Inleiding</u>	2
1. <u>Beschrijving en werking van de meetapparatuur</u>	3
1.1. <u>Onderwatergedeelte</u>	3
1.1.1. <u>Fotofet</u>	5
1.1.2. <u>Licht-frequentie omzetschakeling</u>	7
1.1.3. <u>Stabilisatieschakeling</u>	9
1.1.4. <u>Filterschakeling</u>	10
1.1.5. <u>Filterdraaisysteem</u>	10
1.2. <u>Bovenwatergedeelte</u>	12
1.3. <u>Meetkast</u>	12
1.3.1. <u>Digitaal-analoogconverter en fetvoltmeter</u>	13
1.3.2. <u>Voeding en stabilisatie van de voeding</u>	14
1.3.3. <u>Filterstuurschakeling en filterschakeling</u>	14
2. <u>IJking</u>	15
2.1. <u>Beschrijving van de ijkopstelling</u>	16
2.2. <u>Inleidende metingen</u>	18
2.3. <u>IJkmetingen</u>	24
3. <u>Foutendiscussie</u>	29
3.1. <u>Niet-loodrecht invallend licht</u>	29
3.2. <u>Onderdompelingseffect (Immersionseffect)</u>	30

4.	<u>Theorie</u>	30
4.1.	Inleiding.....	30
4.2.	Verband tussen de verstrooiingscoëfficiënt b en de verzwakkingscoëfficiënt K van de irradiance.....	32
4.3.	Verstrooiingscoëfficiënt volgens de Mie-theorie.....	37
4.4.	Relatie tussen de verzwakkingscoëfficiënt K en de gewichtskoncentratie C van het gesuspendeerde materiaal	40
4.5.	Uitdrukking voor de grootte orde van het aantal deeltjes per volume-eenheid	41
5.	<u>Metingen en resultaten</u>	43
5.1.	Meetmethode.....	43
5.2.	Metingen.....	45
5.3.	Resultaten.....	45
6.	<u>Konklusies</u>	56
	Geraadpleegde literatuur.....	59

Doel van de metingen.

Het doel van de in dit verslag weergegeven metingen is in de eerste plaats het ijken van een lichtmeter voor bepaling van de absolute grootte van de benedenwaartsgerichte bestralingssterkte (Irradiance) van daglicht in zee voor diverse golflengten, en in de tweede plaats het onderzoek naar een relatie tussen de verticale lichtverzwakking enerzijds en de concentratie van het gesuspendeerde materiaal in zeewater anderzijds.

Inleiding.

Met name van de zijde van marinebiologen is er belangstelling voor absolute metingen van de energiestroomdichtheid in zee in verband met het grote belang daarvan voor de primaire produktie (Unesco '66). Voor metingen van de energiestroomdichtheid met betrekking tot voornoemde produktieprocessen is door het Nederlands Instituut voor Onderzoek der

Zee op Texel, een lichtmeter ontwikkeld.

Aangezien de lichtenergie in absolute maat gemeten moet worden, is een ijking tegenover een geijkte stralingsmeter (radiometer) noodzakelijk. Deze ijking vormt een basis voor de meetnauwkeurigheid van de lichtmeter, terwijl de metingen die aan de ijking vooraf gingen een goed inzicht verschaffen omtrent voor- en nadelen van de stralingsmeter. Zowel de ijking alsmede de inleidende metingen zijn van dermate groot belang dat hieraan een speciaal gedeelte van dit verslag zal worden gewijd.

In het nu volgende gedeelte zal eerst uitgebreid aandacht worden geschonken aan een beschrijving van de lichtmeetapparatuur.

1. Beschrijving en werking van de meetapparatuur.

Het geheel aan meetapparatuur is te verdelen in een onderwater- en een bovenwatermeetgedeelte. Beide gedeelten zijn verbonden met een boven water geplaatste meetkast, welke de meetsignalen opvangt, omzet en ze registreert.

1.1. Onderwatergedeelte.

Dit meetgedeelte dient ter bepaling van de benedenwaartsgerichte bestralingsterkte (E_d) van het daglicht in het water. Voor directe E_d metingen is het gebruikelijk dat een diffuse collector, d.i. meestal een glasplaat met daarop een dun laagje opaalglas, die geplaatst wordt tussen een lichtgevoelig element (fotocel, fototransistor, thermozeuil, fotomultiplicatorbuis) en een lichtbron. Ook hier wordt dit systeem toegepast. Als lichtgevoelig element wordt gebruik gemaakt van een fotofet (photosensitive field-effect transistor, type P 102, Siliconix inc.). Genoemde transistor bevindt zich in een houdertje waar bovenop een lensje is geplaatst, voor bundeling van het opvallende licht. Voor afmetingen zie fig. 1. Bovendien bevinden zich in het onderwatergedeelte nog 3 elektronische circuits en een kleurfilter-draaisysteem. Eén circuit (no. 1) is voor het omzetten van de fotostroom afkomstig van de fotofet in een reeks spanningsimpulsen met bepaalde frequentie, een tweede circuit (no. 2)

voor stabilisatie van de voedingsspanning van het vorige circuit en een derde circuit (no. 3) verzorgt het functioneren van het kleurfilter-draai-systeem. De voedingsspanning (24V, wisselspanning) wordt van af de meetkast aangevoerd door een 2 aderige kabel, waarvan één ader als nulleider dienst doet. Deze kabel geleidt ook de spanningsimpulsen van het eerste circuit naar de meetkast. Metingen met een 1-aderige kabel en het zeewater als aarding bleken sterk aan allerlei storingen onderhevig te zijn.

De drie meetcircuits en de fotofet zijn alle stevig te bevestigen op een klein metalen frame, dat in een aan één zijde afgesloten messing koker geschoven kan worden. En wel zodanig dat alleen het lensje van de fotofet die geplaatst is in het middelpunt van een cirkelvormig, juist in de koker passend metalen plaatje, nu nog te zien is aan de open zijde van de koker (Fig. 2). De as van de detektiebundel van de fotofet valt nu samen met de as van de koker. De open zijde van de buis wordt verder afgesloten door een cirkelvormige opaalglazen plaat met dezelfde diameter als de koker, deze wordt door een omsluitende ring, die op de koker geschroefd kan worden, vastgeklemd. Bovendien bevindt zich tussen de glazen plaat en de buis nog een rubber O-ring, die bij het aanschroeven van de omsluitende ring voor een voortreffelijke waterdichte afsluiting van de koker zorgt.

De koker is aan de binnenzijde voorzien van een hardplastic laag om contact tussen schakelelementen van de drie circuits en het koperen huis, dat geaard is via één van de twee aders van de kabel, te voorkomen. De andere ader (toevoer voeding, afvoer impuls) is aan de buitenzijde aangesloten op een waterdicht schroefkontakt hetwelk door de wand heen loopt en in verbinding staat met de aansluiting aan de achterzijde van het metalen frame.

Volgens metingen in de druktank is de afgesloten koker waterdicht en drukbestendig tot een diepte van zeker 30 meter.

Achtereen volgens zullen nu de diverse onderdelen van het onderwatergedeelte behandeld worden.

1.1.1. Fotofet.

De fotofet is een speciale field-effect transistor (fet), die in staat is de straling tussen 400 en 1100 nm te meten. Dit element combineert de schakeling en karakteristieke eigenschappen van een fotodiode met die van een versterker met hoge ingangsimpedantie en lage ruis.

Een fet is eigenlijk geen echte transistor, want er is geen basisgebied waar minderheidsladingsdragers doorheen moeten vloeien. De werking lijkt meer op die van een elektronenbuis. De konstruktie is meestal als volgt: in een staafje halfgeleider i.c. silicium van het n-type, zijn 2 gedeelten van het p-type aangebracht die samen een "poort" vormen, waardoor een elektronenstroom moet lopen (zie fig. 5)*). Bij het grensvlak van beide typen treedt een kontaktpotentiaalverschil op. Doordat de fotofet een fet is met geïntegreerde fotodiode, komen er bij opvallend licht nog meer pos. en neg. ladingsdragers beschikbaar, hetgeen een toename in het genoemde spanningsverschil oplevert. Een aangelegde spanning tussen n- en p-gedeelte met $V_n > V_p$ geeft eveneens een vermeerdering in spanningsniveauverschil (zie fig. 6). Als nu $V_{ds} > 0$ (b.v. V_{ds} pos. en s geaard) dan zal er een voortdurende elektronenstroom van s naar d lopen. Door middel van een verandering in het spanningsveld V_{gs} , b.v. door een wijziging in de hoeveelheid opvallend licht, zal nu de voornoemde elektronenstroom evenredig versterkt of verzwakt worden. Voor verduidelijking zie ook de karakteristieken uit fig. 7.

Goed beschouwd ontstaat er dus een elektrisch veld in het poortgebied, dat des te dieper doordringt naarmate de poortspanning (V_{gs}) groter is en welke de elektronenstroom in toenemende mate versnelt of verzwakt.

Bezien we even de schematische weergave in fig. 8, dan blijkt dat er bij een bepaalde hoeveelheid opvallend licht een stroom λI_g door R_g gaat lopen, hetgeen een spanningsverschil λV_g oplevert. Dit spanningsverschil λV_g vermenigvuldigd met een factor λ resulteert in een λI_d , waarvan de verzadi-

*) De figs 3 en 4 zijn als foto's uit dit verslag weggelaten.

gingswaarde wordt bepaald door R_L .

$$\text{Er geldt dus: } \lambda I_g \cdot R_g = \lambda V_g$$

$$\lambda V_g \cdot \alpha = \lambda I_d \text{ en ook } \lambda I_d \cdot R_L = \lambda V_{ds}$$

$$\text{dus: } \lambda V_{ds} = \lambda I_g (R_g \cdot R_L) \cdot \alpha.$$

De toename van de elektronenstroom van s naar d, t.g.v. een toename in de hoeveelheid opvallend licht wordt dus tevens bepaald door de grootte van R_g . B.v. bij toenemende grootte van R_g zal (I_g, α, R_L konstant) λI_d toenemen en dus tevens de lichtgevoeligheid van de fotofet.

Belangrijk is dat de fotostroom, die in het poortgebied ontstaat, lineair met de intensiteit van het opvallende monochromatische licht toeneemt. Het verband tussen de straling die de lens van de fotofet binnenkomt en de resulterende "poortstroom" is $1.2 \mu A/mW/CM^2$ voor een straling van 900 nm. Bij achromatisch* licht moet rekening gehouden worden met de spectrale verdeling van de gevoeligheid van de fotofet. Bepalend voor genoemde gevoeligheid is in de eerste plaats het kristalmateriaal (i.c. Si), in de tweede plaats het type glas van de lens en verder: de reflectie van het silicium oppervlak, het type van de verontreiniging aangebracht in het silicium en de zuiverheid van het kristal. Volgens fabrieksopgave is de doorlaat van de lens uniform binnen het spectrale bereik van de fotofet. De spectrale gevoeligheid is weergegeven in fig. 9.

Wanneer de fotofet gebruikt wordt voor detectie van licht met steeds geringer intensiteit, zullen de temperatuur-variatiën van de diverse fotofetparameters een toenemende rol gaan spelen en zodoende de gevoeligheid van de fotofet beperken. Dit is vooral van toepassing op de stroom R_g in keerrichting, in het geval dat R_g erg groot is.

Voor de donkerstroom, dat is de lekstroom die optreedt indien de fotofet onbelicht is, wordt opgegeven dat deze verdubbelt voor elke 10 graden temperatuurstijging.

*) Niet monochromatisch.

Een vergelijking met enige andere lichtgevoelige elementen zal de keuze van de fotofet als lichtmeter ietwat duidelijker mogen maken.

a. De fotokonduktor (gekombineerd met versterker) is veel trager dan de fotofet, en de fotostroom is niet noodzakelijk lineair met de hoeveelheid opvallend licht. Het spectrale bereik is wat verder uitgebreid naar langere golflengten. De gevoeligheid is ongeveer hetzelfde.

b. De combinatie van twee fotodioden met versterker levert een meetapparaat dat sneller is dan de fotofet, eenzelfde spectraal bereik en eenzelfde spectrale gevoeligheid heeft. De optredende ruis is echter veel groter hetgeen resulteert in een lagere gevoeligheid dan bij de fotofet.

e. De fototransistor heeft een gevoeligheid die aanmerkelijk lager (\pm 500 maal kleiner) ligt dan bij de fotofet.

d. De lagere ruis en de kortere responstijd van de fotomultipliatorbuis maken dit element bijzonder geschikt. Bovendien is de donkerstroom aanzienlijk geringer dan bij de fotofet, namelijk het 1/2000ste deel. Echter de stroomversterking van de fotofet is net zo groot, tenminste voor de lagere frequenties. Ook is de schakeling van de fotobuis veel uitgebreider en zijn de optredende spanningen veel hoger dan bij de fet. Tenslotte is de prijs van een fotomultiplicatorbuis veel hoger dan van een fet.

Vergeleken met de meest gebruikte lichtgevoelige meetelementen is de fotofet dus een gevoelige, lineaire en stabiele lichtdetector, die veel eigenschappen gemeen heeft met de andere meetelementen en bovendien enige bijzondere eigenschappen die hem uitstekend bruikbaar maken voor vele doeleinden.

1.1.2. Licht-frequentie omzetschakeling.

Het eerste circuit is de zogenaamde licht-frequentie omzetschakeling. Hierin is ook de fotofet opgenomen. Voor schakelschema en blokschema zie fig. 10.

In het kort komt de werking van deze schakeling neer op het omzetten van de fotostroom in een reeks spanningspulsen met een specifieke frequentie,

welke bepaald wordt door de grootte van de energie van het opvallende licht. Bovendien vindt terugkoppeling van de gevormde pulsen naar de fotofet plaats, om "vastlopen" van de fotofet voor hogere intensiteiten te voorkomen, en tevens de lineariteit te bevorderen.

Op de fotofet vallend licht heeft een toeneming in de stroom van S naar D tot gevolg, waardoor een toenemend spanningsverschil optreedt over C_1 , dat wordt overgebracht op een uni-junction transistor. Deze zet de spanning om in een reeks pulsen met bepaalde frequentie. De pulsen worden op de fotofet teruggekoppeld via C_2 , een diode, een regelbare weerstand en een transistor gekoppeld aan een weerstand van $100\text{ K}\Omega$.

De noodzaak voor de aanwezigheid van een tegenkoppelschakeling is aangegeven in punt 2.2.8.

De werking berust op het doen afnemen van de lichtgevoeligheid van de fotofet als de energie van het opvallende licht boven een vastgestelde waarde komt, zodat een verzadiging van de uitgangsfrequentie voor hogere intensiteiten niet kan optreden.

De teruggekoppelde pulsen, lopende van A naar C_2 , worden door de diode D en condensator C_3 omgezet in een gelijkspanning, die komt te staan op de basis van T_2 . Bij T_2 is een weerstand van $100\text{ K}\Omega$ opgenomen, die parallel staat met R_g . Eveneens parallel met R_g staat de variabele weerstand R_{var} van de transistor zelf. Deze is, indien T_2 niet geleid, praktisch oneindig groot. De totale R_g , bestaande uit R_g , R_{var} en $100\text{ K}\Omega$, wordt dan hoofdzakelijk bepaald door R_g zelf. Doch voor geleidende toestand van T_2 is R_{var} aanmerkelijk kleiner. In een dergelijk geval is de varvangingsweerstand van R_g , R_{var} ; en $100\text{ K}\Omega$ kleiner dan, of gelijk aan R_g en wordt de fotofet dus minder lichtgevoelig. Geleiding van T_2 treedt op als de basisspanning boven een bepaalde drempelwaarde, instelbaar m.b.v. R_1 en R_2 , komt. Naarmate de energie van het opvallende licht toeneemt, wordt ook de frequentie van de teruggekoppelde pulsen hoger met als gevolg dat de spanning op de basis van T_2 toeneemt. Door een juiste afregeling van R_1 en R_2 en een geschikte keuze van R_3 wordt de basisspanning

welke bepaald wordt door de grootte van de energie van het opvallende licht. Bovendien vindt terugkoppeling van de gevormde pulsen naar de fotofet plaats, om "vastlopen" van de fotofet voor hogere intensiteiten te voorkomen, en tevens de lineariteit te bevorderen.

Op de fotofet vallend licht heeft een toeneming in de stroom van S naar D tot gevolg, waardoor een toenemend spanningsverschil optreedt over C_1 , dat wordt overgebracht op een uni-junction transistor. Deze zet de spanning om in een reeks pulsen met bepaalde frequentie. De pulsen worden op de fotofet teruggekoppeld via C_2 , een diode, een regelbare weerstand en een transistor gekoppeld aan een weerstand van 100 K Ω .

De noodzaak voor de aanwezigheid van een tegenkoppelschakeling is aangegeven in punt 2.2.8.

De werking berust op het doen afnemen van de lichtgevoeligheid van de fotofet als de energie van het opvallende licht boven een vastgestelde waarde komt, zodat een verzadiging van de uitgangsfrequentie voor hogere intensiteiten niet kan optreden.

De teruggekoppelde pulsen, lopende van A naar C_2 , worden door de diode D en condensator C_3 omgezet in een gelijkspanning, die komt te staan op de basis van T_2 . Bij T_2 is een weerstand van 100 K Ω opgenomen, die parallel staat met R_g . Eveneens parallel met R_g staat de variabele weerstand R_{var} van de transistor zelf. Deze is, indien T_2 niet geleid, praktisch oneindig groot. De totale R_g , bestaande uit R_g , R_{var} en 100 K Ω , wordt dan hoofdzakelijk bepaald door R_g zelf. Doch voor geleidende toestand van T_2 is R_{var} aanmerkelijk kleiner. In een dergelijk geval is de vervangingsweerstand van R_g , R_{var} ; en 100 K Ω kleiner dan, of gelijk aan R_g en wordt de fotofet dus minder lichtgevoelig. Geleiding van T_2 treedt op als de basisspanning boven een bepaalde drempelwaarde, instelbaar m.b.v. R_1 en R_2 , komt. Naarmate de energie van het opvallende licht toeneemt, wordt ook de frequentie van de teruggekoppelde pulsen hoger met als gevolg dat de spanning op de basis van T_2 toeneemt. Door een juiste afregeling van R_1 en R_2 en een geschikte keuze van R_3 wordt de basisspanning

afvlakking van de gelijkspanning en een thyristor. voor beveiliging bij overbelasting.

Aan de linkerzijde zijn de beide verbindingen met de meetkast aangegeven. In de toevoerleiding naar PM 41 (24 V. wisselsp.) bevindt zich een smoorespoel. Deze belet de spanningspulsen, welke bij A op de verbindingskabel worden gezet, om kortgesloten te worden via de gelijkrichtcel. De smoorespoel vormt voor de 24 V geen beletsel vanwege de relatief lage frequentie. Een dergelijke smoorspoel is ook in de meetkast opgenomen zodat ook daar de pulsen niet kortgesloten kunnen worden.

1.1.4. Filterschakeling.

Het derde circuit regelt het draaisysteem van de kleurfilters. Zie fig. 12 voor het schakelschema.

In dit circuit zijn opgenomen een motortje en een spoeltje met kern, waarvan de functies verderop worden beschreven. Beide reageren alleen op gelijkspanning. De toegevoerde spanning vanaf de meetkast is echter een wisselspanning, zodat geen netto effect in motortje en spoeltje optreedt. Het indrukken van de filtertoets in de filterstuurschakeling (zie fig. 15) in de meetkast heeft tot gevolg dat het negatieve gedeelte van de wisselspanning wegvalt.

Er resulteert een ruwe positieve gelijkspanning, die voldoende is om motortje en het spoeltje te laten werken gedurende de tijd welke de filtertoets is ingedrukt.

1.1.5. Filterdraaisysteem.

Het filterdraaisysteem of filtermechanisme bestaat uit een cirkelvormig plaatje, dat indirect aangedreven wordt door een motortje, zodat het plaatje kan draaien rond zijn middelpunt in een vlak evenwijdig aan het plaatje waarin de fotofet is bevestigd. Het motortje en het filterplaatje bevinden zich aan tegenovergestelde zijden van het plaatje, waarin de fotofet zit. Het filterplaatje bevindt zich boven de fotofet d.i. tussen de fotofet

en het opaalglas in, echter nog wel onder de bovenrand van de koker. Het motorasje, dat door de fotofetplaat heen steekt, staat loodrecht op het vlak van het plaatje en is voorzien van een tandradje, dat grijpt in de vertandingen aan de rand van het filterplaatje (zie fig. 3). In het filterplaatje zijn vier cirkelvormige openingen aangebracht, waarin de kleurfilters geplaatst kunnen worden. Voor afmeting van de diverse onderdelen zie fig. 2. Het draaipunt van het filterplaatje is nu zodanig tussen de fotofet en de rand van de koker gekozen, dat bij draaing telkens een andere opening (met een ander kleurfilter) voor de fotofet verschijnt. Het motortje gaat draaien indien het daarvoor een signaal krijgt vanuit de meetkast en wanneer het filterplaatje niet geblokkeerd zou worden, zou het even rond blijven draaien. Dit blokkeren geschiedt door een pennetje, dat door de fotofetplaat heen omhoog steekt en dicht bij de rand tegen uitsteekels aan de onderzijde van het filterplaatje aankomt. Genoemd ijzeren pennetje bevindt zich aan de onderzijde van de fotofetplaat in de kern van een spoeltje. Loopt er door dit spoeltje geen gelijkstroom, dan wordt het pennetje door een veertje gedeeltelijk uit het spoeltje getild, tegen het filterplaatje aangedrukt en blokkeert het.

Door een signaal vanaf de meetkast naar het spoeltje via toevoerkabel en derde circuit en naar het motortje, is het mogelijk een korte tijd een gelijkstroompje te laten lopen, welke in de kern een kortstondig magnetisch veld opwekt, dat het pennetje terug in het spoeltje trekt, zodat het motortje gaat draaien.

Het filter is nu niet geblokkeerd en onder invloed van de draaikracht van het motortje gaat het filterplaatje draaien, net zolang tot het pennetje weer omhoog schiet en de draaibeweging blokkeert. De duur van de gelijkstroomstoot door het spoeltje wordt nu zodanig gekozen, dat het filterrevolver juist één opening verder kan draaien.

Het is dus mogelijk steeds een ander kleurfilter voor de fotofet te laten verschijnen.

De kleurfilters zijn gelatinefilters van Wratten (65, 29 en 98), die tussen

twee cirkelvormige glazen plaatjes met ieder een dikte van 2 millimeter zijn geplaatst. De glazen plaatjes zijn slechts aan de randen aan elkaar gekit. Ze passen precies in de openingen van het filterplaatje.

1.2. Bovenwater meetgedeelte.

Dit gedeelte dat gebruikt wordt voor registratie van het benedenwaarts-gerichte lichtveld boven water, is nagenoeg identiek aan het onderwater-gedeelte.

Aangezien dit meetgedeelte boven water blijft zal er geen lastige polarisatie optreden en is er geen reden waarom de spanningspulsen hier gesuperponeerd zouden moeten worden op een wisselspanning. Het stabilisatiecircuit voor de voedingsspanning is hier dan ook niet aanwezig, dit is opgenomen in de meetkast. Dat betekent een ruimtebesparing zodat deze koker 5 cm korter is dan die van het onderwatergedeelte. Deze koker is, alhoewel het niet strikt noodzakelijk is, waterdicht en drukbestendig tot een diepte van zeker 25 meter. De toevoerkabel loopt door de zijwand heen. Met behulp van een O-ring en een schroefstelsel is deze doorgang waterdicht afgesloten. De koker kan cardanisch opgehangen worden, zodat het opaalglas onder normale omstandigheden zo goed mogelijk horizontaal geplaatst blijft.

Een tweede kenmerkend verschil met de onderwatercel is de waarde voor R_g in het schakelschema uit fig. 10. De waarde voor R_g is hier $33 M\Omega$ en niet $120 M\Omega$.

1.3. Meetkast.

Dit onderdeel bevindt zich boven water en dient in de eerste plaats voor het ontvangen en weergeven van de spanningspulsfrequentie van de beide lichtmeetgedeelten en in de tweede plaats voor het regelen van het filterdraaisysteem. Bovendien wordt vanuit de meetkast de stabilisatie van de voedingsspanning voor de bovenwatercel verzorgd, alsmede voor het filterwisselsysteem. De belangrijkste functionele onderdelen van de meetkast zullen nu wat nader bezien worden.

1.3.1. Digitaal-analoog converter en Fetvoltmeter.

De spanningspulsen, afkomstig van beide meetcellen worden toegevoerd aan een zogenaamde Digitaal-analoog converter (voor schakel- en blokschema zie fig. 13) waar de pulsen worden gestabiliseerd en omgezet in een gelijkspanning, die toegevoerd wordt aan een spanningsmeter.

Het eerste gedeelte van deze schakeling is een pulsshaper, waar de van de onderwatercel afkomstige pulsen, die sterk variëren in breedte en hoogte een weinig "bijgeschaafd" worden zonder evenwel hun frequentie te veranderen. Voor de pulsen van de bovenwatercel is de pulsshaper overbodig. Zij worden direkt geleid naar het volgende onderdeel, de monostabiele multivibrator.

In de monostabiele multivibrator vindt een vastlegging van de breedte van de pulsen plaats. Deze is bepaald op 0,3 millisecon. De daarop volgende spannings-hoogtestabilisator geeft de pulsen een konstante hoogte van ongeveer 15 Volt. De zogenaamde pompintegrator zet ze dan weer om in een gelijkspanning, die toegevoerd wordt aan een logaritmisch circuit, waar nog een laatste bijregeling van het verband tussen lichtenergie en uitgangsspanning mogelijk is (zie punt 2.2.8.), voordat de nu verkregen uitgangsspanning U_{uit} op de μA meter (bereik: 0 - 500 μA) gezet wordt. De uitslag van de μA meter is een maat voor de energie van het opvallende licht. De μA meter is opgenomen in een brugschakeling met o.a. twee fets, waardoor nog een stroomversterking optreedt, De brugschakeling in zijn geheel heet Fetvoltmeter.

De regelbare weerstand van 1 k Ω rechts onder in het schakelschema uit fig. 13 C is voor de nulpuntsinstelling van de μA meter. Bij A is een keuzemogelijkheid voor aansluiting van boven- of onderwatercel op de μA meter. Bij B bevindt zich een bereikschakelaar. Door voor R_b een 5-tal verschillende waarden (R_{b1} t/m R_{b5}) te kiezen is het mogelijk het totale bereik van de μA meter te verdelen in vijf gedeelten waarvan de maximale waarde telkens volledige meteruitslag oplevert.

Indien gewenst kan de uitgangsspanning ook op een recorder gezet

worden. Aansluitingen daarvoor zijn aanwezig. Evenals voor een digitale voltmeter, zodat digitale uitlezing van de lichtenergie mogelijk is. Bovendien is een niet gecodeerde digitale uitgang voor bijvoorbeeld de aansluiting van een printer unit aanwezig, waar tevens een frequentiemeter kan worden aangesloten.

1.3.2. Voeding en stabilisatie van de voeding.

De digitaal-analoog converter en de fetvoltmeter functioneren met behulp van een gestabiliseerde gelijkspanning van 17,25 Volt, die afkomstig is uit een stabilisatieschakeling zoals weergegeven in fig. 14. Links in het schema is een transformator opgenomen voor omzetting van 220 Volt, 50 Hz. in 24 Volt, 50 Hz. Laatstgenoemde wordt gelijkgericht door de PM-cel en daarna afgevlakt door C_1 (5000 μ F).

Nu volgen twee stabilisatiegedeelten voor spanningsstabilisatie.

In het eerste gedeelte zijn twee dioden (15P2) geplaatst voor de compensatie van de temperatuurafhankelijke Zenerspanning, afkomstig van de Zenerdioden Z_5 en Z_{12} .

Ook bij deze schakeling is een beveiliging tegen overbelasting aangebracht in de vorm van een thyristor (2N4146). Als extra bescherming dient een 0,5 A zekering.

Het tweede stabilisatiegedeelte dient als extra stabilisatie voor de aan de pompintegrator toegevoerde spanning.

Ook de voeding voor de meetversterker en de pulsgenerator van de bovenwatercel is afkomstig van voornoemde stabilisatieschakelingen.

Apart van bovengenoemde schakelingen staat een stabilisatiecircuit voor de voedingsspanning van de filterstuurschakeling.

Zie ook fig. 14. Dit circuit is duidelijk eenvoudiger en de stabilisatie is dan ook minder goed dan bij het bovengenoemde. Echter voldoende voor de filtercircuits.

1.3.3. Filterstuurschakeling en filterschakeling.

Het filterstuurcircuit (zie fig. 15) regelt het signaal aan de drie filtercircuits (zie fig. 12), waardoor het filtermechanisme gaat werken. Twee filtercircuits bevinden zich in de meetcellen, het derde in de meetkast. Het stuurcircuit is aangesloten op de voedingstransformator, dus op 24 Volt wisselspanning en tevens op een gestabiliseerde gelijkspanning van 20 Volt. Zolang de filterschakelaar geopend blijft, staat er op de uitgang (zie fig. 15) van het stuurcircuit naar de filtercircuits een wisselspanning van 24 Volt.

Zowel het spoeltje als het motortje werken nu niet. Het sluiten van genoemde schakelaar doet de spanning op de basis van transistor T_1 stijgen. T_1 gaat geleiden, waardoor de spanning op de basis van T_2 daalt. Immers de spanning over diode D_1 wordt geringer. Door een juiste keuze van de samenstellende schakelementen resulteert het een en ander in een uitschakeling van T_2 . M.a.w. uitgang B van de filterstuurschakeling is nog alleen via D_2 en een gelijkrichtcel op de voedingstransformator aangesloten, zodat een ruwe gelijkspanning overblijft, welke toegevoerd wordt aan de filtercircuits, waarin het spoeltje en het motortje nu in werking treden.

In fig. 12 is R_1 een regelbare weerstand van 5 KOhm, waarmee de draaisnelheid van het motortje te regelen is. Thyristor Th_1 dient voor beveiliging tegen eventuele overbelasting.

Het filtercircuit in de meetkast, waaraan ook een filterdraaisysteem met kleurfilters is gekoppeld, is volledig identiek aan dat van de meetcellen. Het is de bedoeling dat alle drie de filtersystemen synchroon draaien en men dus in de meetkast kan zien welke kleurfilter voor de meetcellen is gedraaid.

De totale schakeling van boven- en onderwatergedeelte plus meetkast is in blokschema weergegeven in fig. 16.

2. IJking.

Het meetprincipe van de ijking is het vergelijken van de meetwaarde van een radiometer (stralingsmeter in milliwatt/cm²) op een bepaalde afstand van

een lichtbron met die van het onderwater- en bovenwatermeetgedeelte op dezelfde afstand. Dit vergelijken geschiedt voor verschillende energiewaarden door neutrale lichtverzwakkende filters in de lichtbundel aan te brengen. Bovendien bestaat de mogelijkheid kleurfilters te plaatsen, zodat de meetwaarden in een nauwere spectraalband gezien kunnen worden.

2.1. Beschrijving opstelling.

De ijking vindt plaats op een optische bank in een donkere kamer. De opbouw is in grote lijnen symmetrisch t.o.v. het midden van de optische bank. In het midden van de bank bevindt zich een lamp op een vaste afstand boven de as van de optische bank. De lamp (een halogeen gloeilamp van 650 Watt, Osram, type 64540) is omgeven door een lampehuis, dat het licht van de lamp behalve bij enige ventilatie-openingen zo goed mogelijk afschermt. Aan weerszijden van het lampehuis, in de richting van de bank, zijn op de hoogte van de lamp twee kokertjes, met hun as evenwijdig aan de as van de optische bank, in het huis aangebracht.

Deze kokertjes zijn voorzien van kapjes, met in het middelpunt een ronde diafragma-opening.

Op korte afstand (zie fig. 17) bevindt zich aan beide zijden van de lamp een vierkant scherm met een opening in het centrum van ongeveer dezelfde diameter als de diafragma-opening in het kokertje en bovendien op dezelfde hoogte.

Op een afstand van ± 30 cm staat een identiek scherm met eenzelfde diafragma-opening op dezelfde hoogte als het voorgaande scherm.

Tussen beide schermen is een waterfilter ter lengte van ± 10 cm geplaatst. Aan de buitenzijde van het scherm S_1 , gerekend vanaf de lamp, bevindt zich een draaisysteem, waarmee neutraal filters (= grijsfilters met constante lichtverzwakkende filterfactor) voor de diafragma-opening gedraaid kunnen worden. Achter het scherm S_1 of S_4 (voor aanduiding van de schermen zie fig. 17) kan in een houder onder- of bovenwatercel geplaatst worden, zodanig dat de as van de koker, die samenvalt met de as van de detectie-

bundel van de fotofet, evenwijdig loopt aan de as van de optische bank. Bij juiste plaatsing van de meetcel zal de as van de lichtbundel, welke afkomstig is van de lamp en gaat door drie diafragma-openingen en een waterfilter, samen moeten vallen met de as van de koker. Voor de stralengang zie fig. 17.

Ook is het mogelijk de sensor, dat is het stralingsgevoelig element van de radiometer, in de lichtbundel te plaatsen.

De radiometer (YSI model 65) bestaat uit een thermistor bolometer, een kompenenserende thermistor, een bereikverdeler, een met behulp van een chopper (triller) gestabiliseerde gelijkspanningsversterker en een meter voor de aflezing.

De twee thermistors, welke zich in de sensor bevinden, zijn twee onderdelen van een brug van Wheatstone, waarvan de uitgangsspanning direct evenredig is met de opvallende stralingsenergie. Het uitgangssignaal wordt versterkt en weergegeven op de meter.

Temperatuurskompensatie wordt verkregen door combinatie van de twee thermistors.

Beide zijn bevestigd in een koperen blokje en wel zodanig dat elke temperatuursverandering van het blokje op beide thermistors wordt overgebracht. Dus veranderingen in de omgevingstemperatuur beïnvloeden beide thermistors in gelijke mate en er treedt geen wijziging in het uitgangssignaal van de Wheatstone brug op.

Eén van de thermistors is bevestigd op een zilveren plaatje, dat met een zwarte, absorberende verf is bedekt. Deze thermistor is aan opvallend licht blootgesteld via een kwartsglasraampje. De andere thermistor is voor straling van buitenaf afgeschermd en meet alleen energie met betrekking tot de temperatuur van het blokje.

Volgens gegevens van de fabrikant heeft de radiometer een konstante uitgang voor een golflengtegebied van 280 tot 2600 nm bij een konstante hoeveelheid ingangsenergie. Het spectraalgebied waarin de ijking plaats vindt valt ruimschoots in dit gebied.

Alvorens tot de beschrijving van de eigenlijke ijking over te gaan, wordt een beknopt overzicht gegeven van de inleidende metingen.

2.2. Inleidende metingen.

Deze hadden betrekking op:

2.2.1. De keuze van de lamp. Ideaal is een lamp met hoge konstante lichtopbrengst en lange levensduur. Ook moet ze gemakkelijk te verwisselen zijn. Het meest geschikt leek daarom de Jodium-kwarts lamp van 650 Watt (Osram, type 64540). De levensduur is echter maar 15 uur, bij een gloeispanning van 80% van de maximale waarde evenwel 30 uur (de emissiekromme is weergegeven in graf. 6).

2.2.2. De konstruktie van een lampehuis, dat de aanzienlijke hoeveelheid van de lamp afkomstige warmte kan weerstaan.

2.2.3. Het beperken van de hoeveelheid warmtestraling en infrarood, die in het licht van de gloeilamp aanwezig is. Hiertoe werd een waterfilter met gunstig gekozen lengte in de lichtbundel aangebracht.

2.2.4. Het nauwkeurig bepalen van de filterfaktor van de neutraalfilters. (De filterfaktor is het getal waarmee de hoeveelheid door het filter doorgelaten licht vermenigvuldigd moet worden om de op het filter vallende hoeveelheid te krijgen).

Een correctie op de normale filterfaktor bleek noodzakelijk, vermoedelijk t.g.v. infraroodstraling welke niet of nauwelijks door de filters verzwakt wordt en toch nog in geringe mate door het waterfilter heen gaat.

2.2.5. Het verminderen van de temperatuurgevoeligheid van de radiometer. Deze gaf vooral in de lagere energiebereiken (0-0.25 en 0-1.0 milliwatt/cm²) een niet te verwaarlozen verloop met de temperatuur. Door middel van een

betere isolatie van de sensor t.o.v. de omgeving en een vergroting van het koperen blokje (snellere warmteafvoer) is genoemde temperatuurgevoeligheid tot een minimum beperkt.

2.2.6. Het verminderen van de gevoeligheid van de radiometer voor netspanningsfluctuaties. De beschikbare stabilisator was te traag om enigszins stabiliserend te werken. Hierin is wel een geringe verbetering gebracht door aansluiting van een netontstoringfilter tussen radiometer en het net. De toestand bleef echter verre van ideaal.

Bovendien had ook de meetkast van beide meetcellen met deze moeilijkheid te kampen. Een redelijke oplossing was daar het aanbrengen van dempingscondensatoren op gunstige plaatsen.

Daar het in de eerste plaats noodzakelijk is om de lamp op konstante gloeispanning te houden werd deze via een regelbare spanningsstabilisator op het net aangesloten.

2.2.7. Het verkrijgen van een gunstig verloop van de donkerspanning U_{Do} , dit is de uitgangsspanning in onbelichte toestand, met de temperatuur, voor zowel onder- als bovenwatercel.

Dit onderdeel behoort samen met het hiernavolgende tot de meest tijdrovende, aangezien genoemde afhankelijkheid in eerste instantie bijzonder ongunstig is, dat wil zeggen: er werd een zeer groot verloop van de donkerstroom met de temperatuur gemeten. Slechts door het uitproberen van steeds weer nieuwe waarden van de schakelementen in het schakelschema uit fig. 10 en het inpassen van extra transistoren, weerstanden en condensatoren is uiteindelijk een "minimaal ongunstige" temperatuursafhankelijkheid bereikt, waarbij de lichtgevoeligheid van de lichtmeters niet al te sterk is afgenomen (zie graf. 2).

Het is namelijk zo, dat de aangebrachte wijzigingen om de donkerstroom

minder temperatuurgevoelig te maken doorgaans resulteren in een afnemende lichtgevoeligheid van de lichtmeter. Dat is duidelijk het geval bij de plaatsing van N.T.C.-weerstand en diodes in de schakeling, meestal parallel op R_4 (zie fig. 10) voor compensatie van de lekstroom van de uni-junction transistor (2N2647).

Bovendien is hun temperatuurstabiliserende werking gering vanwege het bij punt 2.2.8. ter sprake komende terugkoppelsysteem.

Elke spanningsvariatie ten gevolge van temperatuursveranderingen van N.T.C. of diode wordt eenvoudig teruggekoppeld en de werking grotendeels te niet gedaan.

Om de gecompliceerdheid van de temperatuurafhankelijkheid te benadrukken moet opgemerkt worden dat niet alleen de fotofet temperatuurgevoelig is, doch ook alle andere halfgeleiderelementen, zoals transistoren en diodes. De aanwezigheid ervan in de schakeling van fig. 10 maakt het dus niet eenvoudiger.

Voor een aantal gevallen is in grafiek 1 de donkerspanning U_{do} uitgezet tegen de temperatuur.

2.2.8. Het samenstellen van een zo goed mogelijk logaritmisch verband tussen de hoeveelheid opvallend licht en de uitgangsspanning voor beide cellen. Vanuit praktisch oogpunt bezien is dat het meest voor de hand liggend.

Genoemd verband moest na elke wijziging met betrekking tot de donkerstroom-temperatuurgevoeligheid opnieuw nagegaan worden.

Lage waarden van de uitgangsspanning, dat wil zeggen waarden slechts een weinig gelegen boven die van de donkerspanning U_{do} , bij een relatief hoge lichtenergiewaarde, zijn een aanduiding voor een geringe lichtgevoeligheid. Bij de eerste metingen werden steeds weer curven verkregen zoals in grafiek 3 weergegeven zijn. U_{do} is daar enkellogaritmisch uitgezet tegen de relatieve lichtenergie. De toenemende lichtverzwakking wordt bewerkstelligd door het aanbrengen van neutraalfilters met toenemende filterfaktor in de licht-

bundel.

Daaruit blijkt dat er voor hogere energiewaarden een soort verzadiging in de uitgangsspanning optreedt. Met behulp van een frequentieafhankelijk terugkoppelingssysteem is hierin een gunstige verandering aan te brengen (zie grafiek 3).

Een aantal karakteristieke curven voor diverse waarden van enkele schakel-elementen uit de licht-frequentie omzetschakeling zijn opgenomen in grafiek 4.

Zeer goed bruikbaar zijn de krommen welke:

- a. een zo groot mogelijk verschil in uitgangsspanning U_{uit} geven voor de lagere lichtenergiewaarden (hoge lichtverzwakking),
- b. bij de hoogste lichtverzwakking een U_{uit} geven welke nog merkbaar verschilt van U_{do} ,
- c. voor de lagere en middelhoge energiewaarden geen al te sterke kromming bezitten.

Punt a en b hebben betrekking op een zo groot mogelijke lichtgevoeligheid van de schakeling.

Punt c op het zogenaamde "recht trekken" van de krommen tot er een zuiver logaritmisch verband bestaat. Dit recht trekken geschiedt met behulp van een juiste afstelling van de logaritmische circuits in de meetkast. Grafisch gezien komt het neer op het herleiden van de kromme (zie fig. 18) tot een rechte (op enkellogaritmisch grafiekpapier) en wel uitgaande van de rechterzijde van de kromme (zie stippellijn).

Volledigheidshalve moet vermeld worden, dat bovengenoemde metingen verricht zijn met opaalglas voor de fotofet en zonder kleurfilters.

Belangrijk is dat, aangezien naast de donkerspanning ook de uitgangsspanning voor de lagere energiewaarden enigszins temperatuurafhankelijk is, de omgevingstemperatuur tijdens de metingen zo konstant mogelijk gehouden moet worden.

In dit geval tussen de 24 en 25^o Celcius.

2.2.9. Het vergelijken van beide meetcellen voor wat betreft:

2.2.9.1. De uitgangsspanning-lichtenergie curven.

De opzet was twee identieke meetcellen te vervaardigen zodat verwacht mocht worden dat bovengenoemde curven eveneens nagenoeg gelijk zouden zijn. Helaas bleek hiervan in de praktijk weinig te kloppen. De bovenwatercel was duidelijk lichtgevoeliger dan de onderwatercel. Aangezien de onderwatercel optimaal was afgeregeld bleef als enige eenvoudige oplossing over het wijzigen van R_g bij de bovenwatercel. De waarde van R_g werd verlaagd van 120 M Ω tot 33 M Ω .

De oorzaak van het verschil in voornoemde curven moet hoogst waarschijnlijk gezocht worden in het niet volledig gelijk zijn van de verschillende overeenkomstige onderdelen waarbij vooral gedacht wordt aan de beide fotofets. Echter ook de verschillen tussen zogenaamd identieke transistoren, condensatoren en weerstanden kunnen een niet te verwaarlozen rol spelen.

2.2.9.2. De donkerspanning-temperatuur curven.

De donkerspanning U_{do} als functie van de temperatuur bleek voor beide meetcellen vrijwel dezelfde vorm te bezitten, behoudens een optredend verschil beneden 2° C. Door een geringe spanningswijziging m.b.v. R_2 (fig. 10) zijn de beide curven ongeveer gelijk gemaakt (zie graf. 2).

2.2.10. Het nagaan of beide meetcellen misschien van interferentiefilters voorzien konden worden. Deze zijn echter zeer smalbandig (10-12 nm) hetgeen gekombineerd met een maximale doorlaat van gem. 35% een veel te grote afname van de lichtgevoeligheid zou betekenen. Beter bruikbaar zijn de breedbandige gelatinefilters.

2.2.11. Het bepalen van de spectrale doorlaat van de, tussen glas gekitte, gelatine kleurfilters op een Zeiss spectrofotometer. Zie graf. 5.

De spectrale transmissie van het opaalglas was helaas niet te bepalen,

zodat aangenomen wordt dat het opaalglas een uniforme doorlaat bezit.

2.2.12. De stralengang en de energieverdeling van het lamplicht op de bank.

Het lag in de bedoeling deze zo goed mogelijk symmetrisch ten opzichte van de lamp te maken, d.w.z. rechts en links dezelfde stralengang en verder op gelijke afstanden rechts en links van de lamp gelijke energiewaarden. Onvolmaakt-heden van konstruktieve aard verhinderden echter het bereiken van een bruik-bare symmetrische toestand. De rechterzijde van de optische bank wordt dan ook alleen nog gebruikt voor kontrolemetingen van de lichtintensiteit van de lamp gedurende de ijking, met behulp van de radiometer. De ijking vindt plaats aan de linkerzijde van de bank.

2.2.13. De energieverdeling in een dwarsdoorsnede van de lichtbundel. Er is geen homogene energieverdeling aanwezig. In het centrum van de licht-bundel worden steeds de hoogste energiewaarden gemeten. Naar de randen treedt een afname op. Met behulp van de sensor van de radiometer is het energieverloop in de doorsnede bepaald. Gemiddeld over de hele dwarsdoor-snede is de energiewaarde 90% van de maximale in het centrum van de bundel. De maximale waarde is bij metingen steeds de meetwaarde van de radiometer.

2.2.14. Het effectief lichtverzamelend oppervlak van het opaalglas in de meetcellen. Hieronder wordt verstaan het snijvlak van de detectiekegel van de fotofet met de opaalglazen laag. Dit snijvlak is een cirkel met een oppervlakte van, volgens metingen en berekeningen, ongeveer 1 cm^2 . Dat komt neer op een cirkeltje met een straal van ongeveer 5,5 mm rond het middelpunt van het opaalglas. Alleen licht dat daarop valt kan de fotofet bereiken. Om interne lichtverstrooiing in de ruimte tussen het opaalglas en de fotofetplaat te voorkomen zijn het fotofetplaatje, de zijwanden van de koker en het filterplaatje met een matzwarte verflaag bedekt.

2.2.15. De temperatuurafhankelijkheid van het stabilisatiecircuit van de

voedingsspanning van de bovenwatercel. Genoemd circuit bevindt zich in de meetkast en bleek temperatuurgevoelig te zijn. Door plaatsing van twee gunstig gekozen dioden is een duidelijk minder temperatuurgevoelige schakeling verkregen. Het blijft echter wenselijk de meetkast niet te gebruiken bij een omgevingstemperatuur beneden de 15° of boven 35° C.

2.2.16. De reproduceerbaarheid van een energiemetwaarde op de bank.

Van zeer grote invloed zijn:

a. De omgevingstemperatuur.

Naarmate deze minder variabel is, verkrijgen we een grotere reproduceerbaarheid.

b. De stabiliteit van de netspanning.

c. De afstandinstelling van sensor en meetcellen op de bank.

d. De stand van schermen, waterfilters en lamp ten opzichte van elkaar.

Daartoe is de gehele opstelling zo goed als trillingsvrij opgesteld.

Variaties in de onder a,b,c en d genoemde grootheden resulteren in een onnauwkeurigheid van de gemeten energiewaarde.

Voor de diverse energiebereiken verschilt de relatieve fout in een meetwaarde.

En wel voor:

0	-	0.05 milliwatt/cm ²8%
0.05	-	0.5	"5%
0.5	-	5	"5%
5	-	50	"3%
50	-	200	"3%

2.3. IJkmetingen.

Zoals reeds in het begin van dit hoofdstuk in het kort werd beschreven komt het ijken neer op het vergelijken van de meetwaarden van radiometer en meetcellen op gelijke afstand van de lamp.

Na al de beschouwingen over temperatuurafhankelijkheid is het duidelijk dat

ijken met een redelijke nauwkeurigheid alleen kan plaatsvinden bij een konstante omgevingstemperatuur, i.c. $24,5 \pm 0,5^{\circ}$ C. Het vergelijken van de meetwaarden vindt slechts aan één zijde van de lamp plaats; de linkerzijde. De rechterzijde dient alleen (zie punt 2.2.11) voor controle van de lichtstroom gedurende de metingen aan de andere zijde.

De meetmethode is nu als volgt:

De sensor van de radiometer wordt op een bepaalde afstand, links van scherm 1, in de lichtbundel geplaatst en wel zodanig dat deze de maximale energiewaarde daar ter plaatse meet.

Afstand en energiewaarde worden genoteerd. Hierna vindt overbrenging van de sensor naar de rechterzijde van de bank plaats voor registratie van eventuele variaties in de lichtstroom.

Op dezelfde afstand als de sensor komt nu, ook aan de linkerzijde, één van de meetcellen te staan zodanig dat de lichtbundel loodrecht op het midden van het opaalglas invalt.

Een nadere verklaring van de uitdrukking: "op dezelfde afstand" is noodzakelijk. Indien sensor en meetcel zich op dezelfde afstand van de lamp bevinden is de afstand van de lamp tot het kwartsglasraampje vlak voor de thermistor in de sensor gelijk aan de afstand van de lamp tot aan de opaalglazen laag van de meetcel.

De grootte van de doorsnede van de lichtbundel is zo gekozen, dat het gehele effectief lichtverzamelend oppervlak van het opaalglas is verlicht.

De hoeveelheid op de fotofet vallend licht wordt omgezet in een bepaalde uitgangsspanning, waarvan de grootte maatgevend is voor de grootte van de energie van het opvallend licht (zie punt 2.2.8.).

De uitgangsspanning ondergaat enige bewerkingen en **resulteert uiteindelijk** in een wijzeruitslag op de μA meter in de meetkast. M.a.w. de wijzeruitslag is een maat voor de energie van het op het opaalglas vallende licht.

Aangezien de fotofet een spektrale gevoeligheid bezit zullen

lichtbundels van gelijke energiegrootte maar van verschillende golflengten niet eenzelfde uitgangsspanning opleveren en dus ook geen gelijke wijzeruitslag. Ieder van de te gebruiken kleurfilters zal dus zijn eigen uitgangsspanning-lichtenergie-curve bezitten, welke bepaald zal moeten worden.

De μ A meter heeft 5 meetbereiken, die vastgelegd worden door de keuze van R_b in fig. 13. In eerste instantie is R_b een regelbare weerstand.

De ijking van een meetbereik verloopt als volgt:

Gesteld dat het meetbereik loopt van 0 tot p milliwatt/cm² dan wordt met behulp van de sensor gezocht naar de afstand waarop een energie van $10/9$ maal p milliwatt/cm² aanwezig is.

Immers de radiometer meet de maximale waarde in het centrum van de lichtbundel. De gemiddelde waarde is 90% van deze maximale waarde. Genoemde maximale waarde wordt gemeten zonder verzwakkend neutraalfilter in de lichtbundel.

Achtereenvolgens worden nu via het draaisysteem van scherm S_1 diverse neutraalfilters met toenemende filterfaktor in de lichtbundel aangebracht. De maximale waarde en de daaruit berekende gemiddelde waarde voor de lichtenergie zijn dus voor ieder van de neutraalfilters vastgelegd voor de afstand waarop de sensor is geplaatst. De sensor dient verder alleen voor controle op de konstante grootte van de lichtenergie.

Op dezelfde afstand van de lamp, als waarop de sensor was geplaatst, komt aan de linkerzijde één van beide meetcellen te staan. Er is geen neutraalfilter in de lichtbundel, dus er valt gemiddeld p milliwatt/cm² op het effectief lichtverzamelend oppervlak van het opaalglas. Dit is de maximale waarde van het desbetreffende bereik en die moet dus overeenkomen met volledige wijzeruitslag van de μ A meter in de meetkast. Dan moet echter wel de meter op nul gesteld zijn voor onbelichte toestand van de meetcel, hetgeen geschiedt door afdekken van de meetcel en op nul zetten van de μ A meter m.b.v. R_1 in fig. 13.

Verwijderen van de afdekking en instellen van de juiste waarde van R_b

levert nu voor p milliwatt/cm² volledige wijzeruitslag.

Volledige meteruitslag wil zeggen 100 schaaldelen uitslag op de lineaire schaal van de μ A meter.

Een aantal tussenliggende energiewaarden voor dit meetbereik wordt verkregen door de neutraalfilters in de lichtbundel aan te brengen.

De energiewaarden zijn reeds bepaald met de radiometer, de overeenkomstige waarden uitgedrukt in schaaleenheden zijn af te lezen op de μ A meter.

Indien deze procedure voor alle meetbereiken en voor alle kleurfilters, ook voor het geval zonder kleurfilter, wordt uitgevoerd, verkrijgen we daarmee een aantal ijkkrommen, die een direkt verband geven tussen wijzeruitslag en lichtenergiegrootte voor de diverse spektraalbanden. De krommen zijn echter alleen geldig voor de temperatuur waarbij de ijking heeft plaats gevonden.

De geijkte meetbereiken zijn, indien geen kleurfilter aanwezig is:

meetbereik 1	:	0 - 200 milliwatt/cm ²
"	2	: 0 - 50 "
"	3	: 0 - 5 "
"	4	: 0 - 0.5 "
"	5	: 0 - 0.05 "

Meetbereik 1 en 2 zijn niet geijkt met de jodiumlamp aangezien de maximale energiewaarde bij de gebruikte opstelling niet veel hoger dan 5 milliwatt/cm² was. Een Xenon lamp (emissiekromme zie graf. 6), die normaal gebruikt wordt voor het bepalen van fluorescentiespectra, levert duidelijk hogere energiewaarden op vergelijkbare afstanden. De ijkkrommen van Xenon- en Jodiumlamp blijken in de gedeelten waar overlapping optreedt, zeer goed overeen te stemmen.

Bovenstaande gegevens en metingen hebben alle tot doel de μ A meter van een zo nauwkeurig mogelijk geijkte schaalverdeling te voorzien. In de praktijk bleek het wijzerinstrument echter verre van ideaal; het was

gevoelig voor storingen uit het elctriciteitsnet en bovendien voor allerlei mechanische trillingen. Het verloop van de wijzeruitslag met de temperatuur leverde eveneens problemen op.

Door gebruik te maken van een digitale voltmeter (zie fig. 16) kan de uitgangsspanning digitaal afgelezen worden, dan komen de eerstgenoemde storingen te vervallen en wordt een kortere responsietijd verkregen. Het is dan echter wel noodzakelijk een kromme te konstrueren, die het verband aangeeft tussen de hoeveelheid opvallend licht en de uitgangsspanning. Deze ijk-kromme is voor het geval zonder kleurfilter weergegeven in graf. 7 en 8, voor zowel onder- als bovenwatercel.

Indien ook de ijk-krommen van de kleurfilters zijn bepaald, is het mogelijk onderlinge verhoudingsgetallen te berekenen, waarin de spectrale responsie van de fotofet tot uitdrukking komt. Gekombineerd met de transmissiewaarden van de kleurfilters en gegevens over de emissiespektra van de lampen resulteert dit in de bepaling van een korrektiefactor, zodat de energiewaarden voor de verschillende kleurfilters onderling vergelijkbaar zijn en direkt zijn te halen uit één ijk-kromme, b.v. de zonder-kleurfilter-kromme (graf. 7 en 8). De juiste energiewaarde bij een meting met een kleurfilter wordt verkregen na vermenigvuldiging van de via de uitgangsspanning verkregen energiewaarde met de betreffende korrektiefactor van het filter. De korrektiefactoren zijn aangegeven in de ijk-grafieken.

Zoals in 2.2.8. vermeld is wordt het verband tussen lichtenergie en uitgangsspanning nog beïnvloed door de omgevingstemperatuur van de meetcellen. Deze is vooral van invloed op de lagere energiewaarden. Door nu de ijking van de meetcellen bij een aantal omgevingstemperaturen uit te voeren is het mogelijk een bundel van ijk-kurven te konstrueren, waaruit de lichtenergie volgt als funktie van de temperatuur en de uitgangsspanning. Iedere kurve van de bundel is geldig voor een bepaalde konstante temperatuur. Aangezien er tussen temperatuur en donkerspanning een vastgelegd verband bestaat (graf. 2) is elke kurve geldig voor een vaste waarde van de donkerspanning. Deze is aangegeven bij iedere kromme. Tussenliggende

waarden worden verkregen via interpolatie.

Opgemerkt moet worden, dat de waarde van de donkerspanning een meer direkte aanduiding is voor de thermische toestand van de meetcel dan de grootte van de omgevingstemperatuur.

De temperatuur van het omgevende water bleek slechts dan maatgevend te zijn, wanneer de meetcel gedurende enige tijd (\pm 60 min.) in water van konstante temperatuur is ondergedompeld.

De interne waterproductie van de schakelelementen van de meetcellen speelt hierbij een rol.

3. Foutendiscussie.

De relatieve fout, die optreedt in een energiewaarde wordt enerzijds bepaald door de relatieve fout in de uitgangsspanningswaarde en anderzijds door de relatieve fout in de ijkwaarde voor de lichtenergie. (zie 2.2.16).

Bovendien is de nauwkeurigheid van de korrektiefactoren evenals die van de berekende temperatuurkurven van belang.

De relatieve fout in een energiemeting wordt dan:

voor het energiebereik	10	-	200	milliwatt/cm ²	4 %		
"	"	"	0,05	-	10	"	6 %
"	"	"	0,001	-	0,05	"	10%

Van invloed op de nauwkeurigheid van de energiewaarden zijn mogelijk nog de twee hiernavolgende effecten.

3.1. Niet-loodrecht invallend licht.

De transmissiekurven van de kleurfilters zijn geldig voor loodrecht op de filters invallend licht. Een verandering in genoemde krommen treedt op als het licht scheef invalt.

Aas (1969) heeft daar uitgebreid aandacht aan besteed.

Daar de kleurfilters tussen het opaalglas en de fotofet zijn geplaatst kunnen allerlei invalshoeken van het licht voorkomen. Bepalend voor de invalshoek zijn echter de vorm en de grootte van de detektiebundel van de

fotofet. Deze bestaat uit een kegel met halve tophoek van ongeveer 10 graden. De as van de kegel staat loodrecht op het filteroppervlak. De toegestane invalshoek van het licht op het filter is dus gering. Zonder ernstige fouten te maken kunnen de transmissiecurven voor loodrecht invallend licht aangehouden worden. Dit is door meting met een spectrofotometer bevestigd.

3.2. Onderdompelingseffekt (Immersionseffekt).

Het onderdompelingseffekt is een golflengteafhankelijk verschijnsel, dat een verandering in de gevoeligheid van de lichtmeetcel veroorzaakt. Het treedt op wanneer de meetcel in het water wordt geplaatst.

Een gedeelte van het licht, dat in het opaalglas doordringt wordt verstrooid in achterwaartse richting naar de glas-lucht overgang, als de cel zich boven water bevindt. Is de invalshoek bij genoemde overgang groter dan $\pm 41^\circ$, dan wordt het licht totaal gereflekteerd en bestaat de kans, dat het toch nog het lichtgevoelig element bereikt.

In water is die kritische hoek echter $\pm 63^\circ$, d.w.z. al het terugverstrooide licht met invalshoek tussen 41° en 63° treedt naar buiten bij onderdompeling in water. Kortom de gevoeligheid van de fotometer is in water geringer dan in lucht.

Gedurende de ijking van de fotometer en navolgende experimenten is wel enige aandacht aan het immersionseffekt besteed, doch niet voldoende voor het bepalen van een konkrete waarde voor de gevoeligheidsafname. Voor een vergroting van de nauwkeurigheid van de meetwaarden is het bijzonder aanbevelenswaardig alsnog genoemde afname te bepalen (zie b.v. Aas, 1969 & Smith, 1969).

4. Theorie.

4.1. Korte inleiding.

Het spektrum van stalingsenergie van zon en hemel omvat aan het oppervlak het golflengtegebied van 290 tot 3000 nm.

Wanneer deze energie het zeeoppervlak passeert en in het zeewater doordringt wordt ze verzwakt door de gekombineerde actie van twee processen namelijk: verstrooiing en absorptie.

Absorptie is eenvoudigweg gedefinieerd als omzetting van stralingsenergie in andere vormen van energie, voornamelijk warmteenergie. Verstrooiing betekent de afbuiging van de rechtlijnige voortplanting van een bundel en wordt bewerkstelligd door deeltjes en watermoleculen. Ten gevolge van de grote absorptie van langgolvig licht door water zal de stralingsenergie zich na enige meters water voornamelijk in het zichtbare gedeelte van het spektrum bevinden (op enig ultraviolet na).

De benedenwaartsgerichte bestralingssterkte^{*}) in een punt van een horizontaal oppervlak (=downward irradiance = E) is gedefinieerd als de stralingsflux, die komt uit de bovenste halfruimte ($0 - 180^{\circ}$) en valt op een (infinitesimaal) vlakje van het horizontale oppervlak, welke het beschouwde punt bevat, gedeeld door de oppervlakte van dat (infinitesimale) oppervlakje. ($E = dF/dA$; F = stralingsflux, A = opp.).

De bestralingssterkte onder water bestaat uit drie gedeelten te weten: direkt zonlicht, licht van de hemel (wolken etc. voornamelijk diffuus) en verstrooid licht.

Direkt zonlicht en licht van de hemel ondergaan een exponentiële verzwakking bij toenemende diepte. Dat is niet het geval bij het verstrooide licht.

Immers het ontbreekt aan de oppervlakte, terwijl het maximaal is op een diepte die afhangt van de lichtverzwakking. In totaal zal de lichtverzwakking dus niet exakt exponentieel zijn.

De grootte van de bestralingssterkte op een bepaalde diepte in het water wordt behalve door verzwakkingsprocessen in het water ook nog bepaald door de kondities van het lichtveld boven water. Veranderingen in genoemd lichtveld kunnen optreden als gevolg van wijzigingen in de bewolgingsgraad en de zonhoogte. Wolken veranderen de spektrale verdeling

^{*}) Indien vermeld wordt: bestralingssterkte of irradiance is voortaan bedoeld: benedenwaartsgerichte bestr.st. of irr.

van het licht, speciaal in het infrarood.

Met afnemende zonshoogte wordt de afgelegde weg door het water langer, zodat minder licht tot een gegeven diepte doordringt.

De spektrale verdeling van de bestralingssterkte onder water is enerzijds vastgelegd door de verdeling van het bovenwaterlichtveld en anderzijds door de selectieve verzwakkingsprocessen in het water (voornamelijk absorptie is selectief). Van geringe invloed is nog de selectieve reflectie aan het oppervlak.

Vanzelfsprekend wordt de transmissie van de irradiance voor diverse golflengten door de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal en "yellow substance" in het water. Genoemde hoeveelheden worden in sterke mate beïnvloed door allerlei dynamische processen.

Getracht zal worden in het navolgende gedeelte een verband te leggen tussen de verzwakking van de irradiance en de hoeveelheid gesuspendeerd materiaal.

4.2. Verband tussen de verstrooiingscoëfficiënt en de verzwakkingscoëfficiënt voor irradiance (beperkte opp. laag).

In troebel tot zeer troebel water wordt de lichtverzwakking grotendeels bepaald door verstrooiing aan gesuspendeerd materiaal. Als c de extinktiecoëfficiënt voorstelt en b de verstrooiingscoëfficiënt dan geldt voor bovengenoemde watermassa's: $b \approx c$. (Definities van Jerlov, 1968).

Om het probleem van de lichtvoortplanting in water niet te gekompliceerd te maken wordt afgezien van meermalen verstrooid licht (multiple scattering), d.w.z. alleen enkelvoudig verstrooid licht is van belang. In het algemeen is deze vereenvoudiging alleen geldig voor de dicht bij het wateroppervlak gelegen waterlagen. De bestralingssterkte (irradiance) van een (horizontale) oppervlakte-eenheid in het water is dan de som van de direkte bestralingssterkte van de zon (evt. wolken etc.) en de bestralingssterkte t.g.v. éénmalig verstrooid licht afkomstig van lichtverstrooiende-volume-elementen in het water.

Als de zon de enige directe lichtbron is dan wordt de irradiance op een horizontaal oppervlakje in het water op een diepte z (z pos. naar beneden) gegeven door (Jerlov, 1968):

$$E_z = E_0 e^{-cz \cdot \sec j} \left(1 + \frac{\sec j}{+c} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{B(\alpha) \sin \alpha}{\sec \alpha - \sec j} \cdot (1 - e^{-cz(\sec \alpha - \sec j)}) d\phi d\alpha \right) \quad (1)$$

waarbij: E_0 = Irradiance op een hor. oppervlakje juist onder het wateroppervlak (milliwatt/cm²).

z = Diepte inwater.

j = Brekingshoek van de lichtbundel (zie fig. 19).

ϕ en α bepalen de richting van de verstrooide bundel.

= Hoek tussen verstrooide en oorspronkelijke lichtbundel.

$B(\alpha)$ = Verstrooiingsfunctie.

Voor de zon in het zenith ($j=0^\circ$, $\alpha=\alpha$) wordt de uitdrukking voor E_z :

$$E_z = E_0 e^{-cz} \left(1 + \frac{1}{c} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{B(\alpha) \sin \alpha}{\sec \alpha - 1} \cdot (1 - e^{-cz(\sec \alpha - 1)}) d\phi d\alpha \right); \quad (2)$$

nu is $e^{-cz(\sec \alpha - 1)} \approx 1 - cz(\sec \alpha - 1) + \frac{(cz)^2 \cdot (\sec \alpha - 1)^2}{2}$ voor z niet te groot.

$$\text{Dan wordt: } \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{B(\alpha) \sin \alpha}{\sec \alpha - 1} (1 - e^{-cz(\sec \alpha - 1)}) d\phi d\alpha =$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{B(\alpha) \sin \alpha}{\sec \alpha - 1} (cz(\sec \alpha - 1) - \frac{(cz)^2 (\sec \alpha - 1)^2}{2}) d\phi d\alpha =$$

$$cz \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \sin \alpha d\phi d\alpha - \frac{(cz)^2}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \sin \alpha (\sec \alpha - 1) d\phi d\alpha =$$

$$2\pi (cz) \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \sin \alpha d\alpha - \frac{2\pi (cz)^2}{2} \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} d\alpha +$$

$$\frac{+2\pi(cz)^2}{2} \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \sin\alpha \, d\alpha.$$

Verwaarlozen we de achterwaartse (=neg. z - richting) verstrooiing dan geldt:

$$b = 2\pi \int_0^{\pi/2} B(\alpha) \sin\alpha \, d\alpha$$

$$\text{zodat: } \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{B(\alpha) \sin\alpha}{\sec\alpha - 1} (1 - e^{-cz(\sec\alpha - 1)}) \, d\phi \, d\alpha \approx$$

$$czb - \frac{(cz)^2}{2 \cos\alpha} b + \frac{(cz)^2}{2} \cdot b \quad \text{met } \cos\alpha \text{ is een gemiddelde waarde voor } \cos\alpha,$$

die volgt uit gegevens van Kozlyaninov

Voor E_z is nu de uitdrukking:

(1957).

$$E_z = E_0 e^{-cz} \left(1 + \frac{1}{c} \left((cz)b - \frac{(cz)^2}{2 \cos\alpha} + \frac{(cz)^2}{2} b \right) \right)$$

$$= E_0 e^{-cz} \left(1 + zb - \frac{z^2 bc}{2 \cos\alpha} + \frac{z^2 c}{2} b \right)$$

Als $c \approx b$ dan:

$$E_z \approx E_0 e^{-bz} \left(1 + zb - \left(\frac{z^2}{2 \cos\alpha} - \frac{z^2}{2} \right) b^2 \right)$$

$$E_0 e^{-bz} (1 + zb - 0.01 z^2 b^2) \quad \text{waarbij } \frac{1}{\cos\alpha} = 0.98$$

(Hierbij wordt vooruit gelopen op het feit dat de metingen betrekking hebben op watermassa's met daarin aanwezige relatief grote deeltjes, zodat de verstrooiing sterk voorwaarts is gericht. Kozlyaninov (1957) en Jerlov & Fukuda (1960).

Bij benadering geldt: $e^{-bz} = 1 - bz$ (zie ook blz. 42)

$$\text{zodat: } E_z \approx E_0 (1 - bz) (1 + zb - 0.01 b^2 z^2)$$

$$\text{of } \frac{E_z}{E_0} \approx 1 - 1.01 b^2 z^2$$

(3)

De metingen van de irradiance op diverse diepten leveren een verzwakkings-
 koëfficiënt K op, die gedefinieerd is door:

$$E_z = E_0 e^{-K \cdot z} \quad (4)$$

met E_z = irradiance op diepte z .

E_0 = " juist onder het wateropp.

z = diepte.

Als j de brekingshoek is (zie fig. 19), welke volgt uit

$$\frac{\sin(90-h_s)}{\sin j} = n \quad (5)$$

met h_s = zonnehoogte in graden

n = brekingsindex van water $\approx 4/3$

dan wordt (4):

$$E_z = E_0 e^{-K_0 \cdot z \sec j} \quad (6)$$

waarbij K_0 de verzwakkingskoëfficiënt voor-
 stelt voor het geval de zon in het zenith
 staat.

Uit (4) en (6) volgt dan:

$$K_0 = K \cdot \cos j. \quad (\text{Jerlov, Nygard, 1969}) \quad (7)$$

Voor de zon in het zenith, zoals verondersteld bij (2) geldt:

$$E_z = E_0 e^{-K_0 z} \text{ waarbij } K_0 \text{ volgt uit (7)}$$

$$\text{of } \frac{E_z}{E_0} = e^{-K_0 \cdot z}$$

Uit (3) en (8) volgt dan:

$$1 - 1.01 b^2 z^2 \approx e^{-K_0 \cdot z} \approx 1 - K_0 z + \left(\frac{1}{2}\right) K_0^2 z^2$$

$$\text{of } K_0 z - \left(K_0^2/2 + 1.01 b^2\right) z^2 \approx 0 \quad (z \neq 0)$$

$$\text{zodat: } b = \sqrt{\frac{K_0/z - K_0^2/2}{1.01}} \quad (9)$$

$$\text{met } (0 \leq K_0 \leq \frac{2}{z})$$

$$\text{of m.b.v. (7): } b = \sqrt{\frac{K \cos j}{z} - \frac{K^2 (\cos j)^2}{2}} \quad (10)$$

1.01

Duidelijk is dat als $K_0 > 2/z$, b niet gedefinieerd is. Dat is het gevolg van de beperkte geldigheid van (9) en (10).

(9) en (10) zijn slechts geldig voor bepaalde waarden van de optische diepte cz en wel $cz \approx 0.5$.

De grootte van cz is vastgelegd door de grootte van c en de waarde van z .

De waarde van z wordt beheerst door 3 factoren:

1. De benaderingen $e^{-bz} = 1 - bz$
en $e^{-cz(\sec\alpha - 1)} = 1 - cz(\sec\alpha - 1) - \frac{(cz(\sec\alpha - 1))^2}{2}$

Door z zo klein mogelijk te kiezen worden de benaderingen steeds beter en daarmee de formule voor b .

2. De aanname $c \approx b$.

Deze veronderstelling is slechts juist als z niet te klein genomen wordt, aangezien bij het gebruikte lichtverstrooiingsmodel (geen multiple scattering, Jerlov, 1968) de radiantie van het éénmalig verstrooide licht op een horizontaal oppervlakje in het water een maximum heeft op een diepte:

$$z_m = \frac{1}{c} \cdot \cos j, \text{ (Jerlov, 1968).}$$

zodat dus zeer dicht onder het oppervlak zeker niet zal gelden:
 $c \approx b$.

3. Geen meervoudige verstrooiing.

(10) is alleen geldig voor éénmalig verstrooid licht. Bij toenemende diepte z neemt ook de meervoudige verstrooiing toe m.a.w. z mag niet te groot worden.

Als z gekozen wordt ongeveer 0.25 m is in voldoende mate voldaan aan punt 1 en 2. Het blijft echter een open vraag of voor de gekozen waarde van z de meervoudige verstrooiing verwaarloosbaar is t.o.v. het éénmalig verstrooide licht.

In dit verband kan opgemerkt worden, dat door Jerlov (1955) verstrooiingsmetingen zijn uitgevoerd betreffende verschillende in zeewater voorkomende stoffen (mineralen, kalkachtige verbindingen

e.d.), die aantonen dat de verstrooiing evenredig is met het totale oppervlak van de aanwezige lichtverstrooiende deeltjes, mits de deeltjesgrootte meer dan 2λ is. Deze relatie is zo goed als onafhankelijk van de gewichtskoncentratie van het gesuspendeerde materiaal. Verstrooiing evenredig met het totale deeltjesoppervlak betekent bij gegeven gemiddelde deeltjesgrootte: verstrooiing evenredig met het totale deeltjesaantal. Kortom de verstrooiing zou ten naaste bij enkelvoudig (geringe "multiple scattering") zijn.

Neem $z = 0.25$ m dan wordt (9):

$$b = \sqrt{\frac{4K_0 - \frac{k^2}{2}}{1.01}} \quad \text{met: } 0 \leq K_0 \leq 8 \text{ m}^{-1} \quad (11)$$

$$\text{of } b = \sqrt{\frac{4 K \cos j - (1/2)K^2 (\cos j)^2}{1.01}} \quad \text{met } 0 \leq K \cos j < 8 \text{ m}^{-1} \quad (12)$$

4.3. Verstrooiingscoëfficiënt volgens Mie.

De Mie-theorie geeft voor de verstrooiingscoëfficiënt van een suspensie (gekaracteriseerd door speciale voorwaarden; zie verder) bij invallend monochromatisch licht de volgende uitdrukking:

$$b = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n F_i N_i D_i^2 \quad (13)$$

Waarbij dan: N_i = aantal deeltjes met diameter D_i en effectieve oppervlak-tecoëfficiënt F_i .

F_i heet ook wel efficiency faktor (meestal aangeduid met de letter K) en wordt gedefinieerd als het dimensieloze getal, dat gelijk is aan het quotient van de door een deeltje verstrooide energie uit de invallende bundel en de energie van de bundel, die geometrisch gezien door het deeltje wordt tegengehouden.

F is een funktie van D , de golflengte van het licht en de relatieve bre-

kingsindex van het deeltje. Burt (1956) heeft een diagram gekonstrueerd waaruit F aan de hand van gegevens over golflengte van het licht, brekingsindex en diameter gevonden kan worden. Dit diagram geldt alleen voor deeltjes met een diameter kleiner dan 5μ . Voor deeltjes groter dan 10μ blijkt F weinig te variëren en de waarde 2.0 aan te nemen, onafhankelijk van de golflengte van het licht.

Bovenstaande uitdrukking voor b is geldig onder de volgende vereenvoudigende voorwaarden:

1. Het gesuspendeerde materiaal bestaat uit bolvormige, geen licht-absorberende deeltjes.
2. De deeltjes zijn onderling onafhankelijk, d.w.z. de afstand tussen de deeltjes is minstens driemaal de radius.
Het is dan toegestaan de intensiteiten van door diverse deeltjes verstrooid licht te sommeren.
3. Er is geen "multiple scattering" m.a.w. de totale verstrooiing is evenredig met het aantal lichtverstrooiende deeltjes.

Gesteld dat aan voornoemde 3 punten voldaan kan worden en is bovendien de volledige grootteverdeling bekend alsmede de bijbehorende efficiëncy-factoren, dan levert (13) b.

Voor een suspensie met deeltjes van gelijke grootte en gelijke F-waarden volgt uit (13)

$$b = \frac{\pi}{4} FND^2 \quad (14)$$

Daarbij is $N =$ aantal deeltjes per m^3
 $= \frac{\text{koncentratie gesusp. materiaal}}{\text{massa van 1 deeltje}}$

$$N = \frac{C}{G},$$

nu is $G = 1/6 (\pi D^3 \rho)$, $(\rho = \text{dichtheid van een deeltje})$

$$\text{zodat } N = \frac{6C}{\pi D^3}$$

Substitutie in (14) geeft

$$b = \frac{3}{2} \frac{F}{D^3} \cdot C = H \cdot C \quad (15)$$

Volgens Burt (1955) is er een afwijking van de theorie van Mie als de deeltjes niet volledig bolvormig zijn. Deze afwijking is echter gering zolang de relatieve brekingsindex van de deeltjes kleiner is dan ongeveer 2.00.

Vanwege de in de praktijk voorkomende heterogene samenstelling wat betreft aard en grootte van de deeltjes is het noodzakelijk een zogenaamde effectieve diameter D_{eff} in te voeren (zie ook Otto 1966). D_{eff} is dan gedefinieerd als de waarde van D , welke de waarde van H oplevert, die gemeten is voor een bepaalde suspensie

Het lineaire verband (15) is voor een dergelijke suspensie met variabele deeltjesgrootte en -aard alleen geldig als de relatieve samenstelling van de suspensie dezelfde blijft voor verschillende concentratiewaarden.

Op analoge wijze als D_{eff} is te definiëren een effectieve optische diameter $D_{\text{eff.opt.}}$ volgens:

$$\frac{F(D_{\text{eff.opt.}})}{D_{\text{eff.opt.}}} = \frac{2}{3} \cdot H \quad (16)$$

waarbij:

$F(D_{\text{eff.opt.}})$ de waarde van F is voor de gegeven effectieve optische diameter en voor de relatieve brekingsindex van de deeltjes.

De uitdrukking voor b wordt dan:

$$b = \frac{3}{2} \frac{F(D_{\text{eff.opt.}})}{D_{\text{eff.opt.}}} \cdot C \quad (17)$$

Het verband tussen K en C volgt direkt door substitutie van (7) zodat:

$$K = \frac{8 - \sqrt{64 - 8.08 \frac{(3F (D_{\text{eff. opt.}}) C^2)}{2 D_{\text{eff. opt.}}^3}}}{2 \cos j} \quad (18)$$

Voor praktische toepasbaarheid van (18) is het noodzakelijk enige gegevens over het gesuspenderde materiaal te substitueren. Gegevens over de effectieve optische diameter voor het betreffende meetgebied (= voornamelijk Waddenzee; zie Metingen en resultaten) zijn te vinden bij Postma (1961) en Otto (1966). Gemiddeld is $D_{\text{eff. opt.}}$ ongeveer 14.5μ . Volgens Burt (1956) is dan $F (D_{\text{eff. opt.}})$ ongeveer 2.00. Bovendien wordt gesteld, dat het gesuspenderde materiaal voornamelijk uit kwarts bestaat, zodat $\rho = 2.65 \text{ gr/cm}^3$.

De brekingsindex van kwarts is 1.16 (< 2.00), zodat de door Burt (1955) vermelde afwijking van de Mie theorie gering zal zijn. De waarde van $D_{\text{eff. opt.}}$, die ruim boven 2μ is gelegen waarborgt volgens Jerlov (1955) een zo klein mogelijke invloed van de multiple scattering.

Voornoemde numerieke waarden voor diverse grootheden resulteren, rekening houdend met de eenheden van de verschillende componenten, uiteindelijk in:

$$K = \frac{8 - \sqrt{64 - 0.05C^2}}{2 \cos j} \quad (19)$$

$$\text{met } 0 \leq C \leq 35.8 \text{ mg/l}$$

4.5. Bepaling van de grootte orde van N (aantal deeltjes/ m^3).

Uitgaande van $b = \frac{\pi}{4} F (D_{\text{eff. opt.}}) \cdot N \cdot D_{\text{eff. opt.}}^2$

of:

$$N = \frac{4}{\pi} \frac{b}{F(D_{\text{eff. opt.}}) D_{\text{eff. opt.}}^2} \quad (20)$$

4.4. Verband tussen de verzwakkingscoëfficiënt K en de concentratie C van het gesuspenderde materiaal (voor een beperkte opp. laag).

(17) is geldig onder de voorwaarden vermeld in 4.3.

(11) is slechts toepasbaar als voldaan aan de voorwaarden uit 4.2, terwijl $z = 0.25$ m.

Van groot belang is uiteraard de aangenomen dieptebeperking voor wat betreft de geldigheid van de laatste formule.

(17) en (11) leveren tezamen:

$$\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) \cdot C}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} = \sqrt{\frac{4 K_0 - \frac{1}{2} K_0^2}{1.01}}$$

of:

$$\left(\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) \cdot C}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} \right) = \frac{4 K_0 - \frac{1}{2} K_0^2}{1.01}$$

of:

$$K_0^2 - 8 K_0 + 2.02 \left(\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) \cdot C}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} \right)^2 = 0$$

zodat:

$$K_{0,2} = 4 \pm \frac{1}{2} \sqrt{64 - 8.08 \left(\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) \cdot C}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} \right)^2}$$

De laatste uitdrukking is geldig onder de gekombineerde voorwaarden van de twee aan het begin vermelde vergelijkingen voor b.

Niet in aanmerking komt:

$K_0 = 4 + \frac{1}{2} \sqrt{64 - 8.08 \frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) \cdot C^2}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho}}$, want gevallen waar K_0 afneemt bij toenemende C worden niet beschouwd.

In hoeverre de overblijvende uitdrukking voor K_0 een goede benadering van het exacte verband tussen K_0 en C is zal door metingen uitgewezen moeten worden.

met b uit (11) volgt dan:

$$N = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{4 K_o - \left(\frac{1}{2}\right) K_o^2}}{1.01} F(D_{\text{eff.opt.}}) D_{\text{eff.opt.}}^2 \quad (21)$$

Ook deze formule is alleen bruikbaar onder de voorwaarden waarvoor (11) en (17) gelden (b.v. beperkte opp. laag).

Verwerking van de waarden voor $F(D_{\text{eff.opt.}})$ en $D_{\text{eff.opt.}}$ (zie 4.4)

levert:

$$N = 0.3 \cdot x \cdot 10^{10} \cdot \sqrt{\frac{4K_o - \left(\frac{1}{2}\right)K_o^2}{1.01}} \quad (22)$$

Voor het onderzochte gesuspendeerde materiaal.

Nauwkeuriger vorm van enige formules.

Uitgaande van een betere benadering voor e^{-bz} (zie blz. 34):

$$e^{-bz} = 1 - bz + \frac{1}{2} b^2 z^2$$

wordt (3):

$$\frac{E_z}{E_o} = 1 - 0.51 b^2 z^2$$

zodat (9):

$$b = \frac{\sqrt{\frac{K_o}{z} - \frac{1}{2} K_o^2}}{0.51} \quad \text{met } 0 \leq K_o \leq \frac{2}{z} \text{ m}^{-1}$$

met $z = 0.25 \text{ m.}$:

$$b = \frac{\sqrt{4 K_o - \frac{1}{2} K_o^2}}{0.51} \quad \text{met } 0 \leq K_o \leq 8 \text{ m}^{-1}$$

(17) en (11) leveren dan:

$$\frac{3 F(D_{\text{eff.opt.}}) C}{D_{\text{eff.opt.}} \rho} = \sqrt{\frac{4 K_o - \frac{1}{2} K_o^2}{0.51}}$$

of:

$$K_o = 4 - \frac{1}{2} \sqrt{64 - 4 \cdot 08 \left(\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) C^2}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} \right)}$$

zodat (18) wordt:

$$K = \frac{8 - \sqrt{64 - 4 \cdot 08 \left(\frac{3 F (D_{\text{eff.opt.}}) C^2}{2 D_{\text{eff.opt.}} \rho} \right)}}{2 \cos j}$$

en (19):

$$K = \frac{8 - \sqrt{64 - 0.025 C^2}}{2 \cos j}, \text{ waarbij } 0 \leq C \leq 50.6 \text{ mg/l}$$

C in mg/l

K in m⁻¹

en (22):

$$N = 0.3 \times 10^{10} \sqrt{\frac{4 K_o - \frac{1}{2} K_o^2}{0.51}}$$

N.B. Bovenstaande formules worden verder in dit verslag niet gebruikt.

5. Metingen en resultaten.

5.1. Meetmethode.

Voor meting van de benedenwaartsgerichte bestralingssterkte moet in ieder geval gezorgd worden, dat het opaalglas van beide meetcellen horizontaal geplaatst wordt. Daartoe is de onderwatercel aangebracht in het centrum van een metalen rad (zie fig. 20) hetwelk op de afgebeelde manier is opgehangen aan een boom, die buitenboord gedraaid kan worden.

De bovenwatercel is Cardanisch opgesteld op een gunstig gekozen plaats aan dek.

De temperatuurafhankelijkheid van beide cellen brengt de noodzaak met zich mee om óf de omgevingstemperatuur (water of lucht) te meten óf de donkerspanningswaarde te bepalen.

Om tevoren aangegeven redenen is voor het laatste gekozen. Voor dat doel is de meetcel voorzien van een zwarte afdekkap, die over het opaalglas

heen geschoven kan worden en aldus de cel volledig voor buitenlicht afsluit.

Voor wat betreft de bovenwatercel is de procedure eenvoudig: het afdekkapje is met de hand aan te brengen en te verwijderen. De waarde van de donkerspanning is af te lezen op de digitale voltmeter. De afgedekte onderwatercel wordt op ongeveer 50 cm onder het oppervlak enige tijd in het water gehangen, zodat aangenomen mag worden dat na verloop van tijd een thermische evenwichtstoestand is bereikt waarbij de donkerspanning niet noemenswaardig meer verandert. Hierna vindt aflezing van de donkerwaarde en verwijdering van de afdekkap plaats. Gedurende de metingen op grotere diepten is het niet mogelijk de donkerspanning te bepalen, zodat de waarde uit de oppervlakte laag aangehouden moet worden, met eventueel een correctie, die volgt uit de verticale temperatuursverandering en het verband tussen temperatuur en donkerspanning.

Wanneer eenmaal de waarde van de donkerspanning bekend is, volgt de lichtenergiewaarde uit de ijkgrafiek met behulp van de uitgangsspanningswaarde en eventuele correctiefactoren.

De metingen met de bovenwatercel zijn steeds uitgevoerd met een dun (± 2 mm) waterlaagje op het opaalglas, voor nabootsing van de energietoestand juist onder het wateroppervlak.

De eerste meting van de lichtenergie met de onderwatercel vindt plaats zo dicht mogelijk onder het oppervlak. De diepte is afhankelijk van golfhoogte, slingeringen van het schip e.d.

Voor alle kleurfilters en voor het geval zonder kleurfilter worden de uitgangsspanningen genoteerd, waarbij om en om de onder- en bovenwatercel worden beschouwd voor eenzelfde filter. Zodoende is het mogelijk de veranderingen in het onderwaterlichtveld t.g.v. wijzigingen in het lichtveld boven water snel te registreren en hiervoor te corrigeren.

Op een aantal diepten wordt steeds hetzelfde programma afgewerkt. Dit resulteert tenslotte in een overzicht wat betreft het lichtenergieverloop in een waterkolom.

5.2. Metingen.

De metingen zijn uitgevoerd vanaf de "Ephyra", een onderzoekingschip van het N.I.O.Z. op Texel. De meetstations zijn gelegen in de Waddenzee (Texelstroom) en bovendien vanaf het Marsdiep tot aan het lichtschip "Texel".

De ligging ervan is weergegeven in fig 21 t/m 23, bijbehorende data, tijden, hoog- en laagwatertijden, diepten, weerscondities en plaatsaanduidingen via kodering van boeien zijn te vinden in tabel 1 en 2.

Op genoemde stations werden in de eerste plaats, op diverse diepten, metingen ter bepaling van de grootte van de benedenwaarts gerichte "irradiance" uitgevoerd.

In de tweede plaats zijn oppervlaktewatermonsters (m.b.v. een puts) genomen, evenals monsters van grotere diepten (Nansen waterscheppers), met het doel de concentratie (mg/l) van het gesuspendeerde materiaal in het water en de watertemperatuur te bepalen.

De diepte waarop de watermonsters genomen worden is afhankelijk van de aard van het onderwaterlichtveld.

De concentratiebepaling vindt in het laboratorium plaats met behulp van een op het N.I.O.Z. gebruikelijke filtratiemethode, die voldoende nauwkeurigheid waarborgt.

Een aanduiding voor de troebelheid van het oppervlaktewater is voor elk meetstation verkregen door een Secchischijfmeting (zie tabel 3).

Om mogelijke fouten t.g.v. schaduwvorming door de scheepsromp te voorkomen zijn de metingen met de onderwatercel altijd uitgevoerd aan de zonzijde van het schip. Bij een gedeeltelijk bedekte hemel is doorgaans alleen gemeten gedurende de tijd dat de zon onbedekt was.

5.3. Resultaten.

Aan de hand van metingen van de "irradiance" op diverse diepten en voor diverse golflengten (435, 500 en 655 nm,) is het mogelijk E (milliwatt/cm²) enkellog. uit te zetten tegen de diepte (m.), zodat de helling van de

verkregen curve de verzwakkingscoëfficiënt van de irradiance in het betreffende golflengtegebied oplevert. Voor alle meetstations zijn dergelijke grafieken gemaakt (graf. 9 t/m 32), terwijl de berekende waarden voor K zijn vervat in tabel 4. De gemiddelde concentratie (mg/l) van het gesuspendeerde materiaal, dat aangetroffen werd in de onderzochte waterlaag is opgenomen in tabel 3.

De K-waarden zijn gemiddelden over de aangegeven diepte-intervallen. De metingen zonder kleurfilter zijn een aanduiding voor bepalingen van de irradiance in de golflengteband van maximale transmissie, mits de transmissie van genoemd spektraalgebied duidelijk véél groter is dan voor de omringende golflengten.

In tabel 5 is de transmissie (in %/m) voor de gebruikte golflengten en diverse stations weergegeven.

Transmissie (in %) is gedefinieerd door: $T = \frac{E_z}{E_0} \cdot 100$; het betreft dan de transmissie over het diepteverloop 0 tot z.

3 meter is voor 6 van de 24 stations (B3 t/m B6, D5 en D6) de maximale diepte waarop nog meetbaar licht wordt aangetroffen.

Bovendien is voor 7 (A1, B1, B2, D3, D4, E1, E4), van de overige 18 meetreeksen met geen van de 3 kleurfilters nog licht te meten beneden 3 meter, slechts zonder kleurfilter zijn diepere waarnemingen mogelijk. Niet meer dan 4 stations (C3 t/m C5 en D2) leverden metingen dieper dan 10 meter.

Het blijkt dat bij bijna alle metingen het blauw (435 nm) te voorschijn komt als het golflengtegebied met de geringste transmissie (hoogste K-waarden). Er is echter één uitzondering en wel op station C5, waar relatief helder water werd aangetroffen (zie b.v. de Secchidiepten). Voor 3 meetstations (C3, C4 en D2) is de grootte van de irradiance nu eens minimaal in het blauw, dan in het rood. (655 nm)

Na enige meters blijft er in absolute maat voor rood het meest over. Behalve bij 4 stations: C3 t/m C5 en D2, waar groen (500 nm) de grootste transmissie bezit.

Bij station B6, gelegen in het Malzwin, is de situatie onduidelijk vanwege

de grote troebelheid van het water.

Aan het oppervlak of juist daaronder is de irradiance in het groen het grootste, dan volgt die in het blauw, terwijl rood duidelijk de kleinste van de drie is. Het verschil tussen de bestralingssterkten in het blauw en in het groen is meestal niet groot.

De gevens over de spektrale verdeling van daglicht (wolkenloze hemel, zons-
hoogte $\pm 45^\circ$) volgens Kimball (1924) stemmen daarmee goed overeen.

In de eerste meter water is voor zo goed als alle stations, waar betreffende deze laag metingen zijn verricht, de verzwakking in het rood het kleinst (minimale K-waarden). De verzwakking van het groen is meestal iets geringer dan van het blauw.

Vaak is al na 1 meter de irradiance in het rood het grootst. Betreft het een station met relatief helder water zoals bij C3, C4, C5 of D2 dan is de afname beneden 1 meter voor rood groter dan voor groen, soms ook groter dan voor blauw.

Een station met relatief troebel water geeft beneden 1 meter een blijvende maximale transmissie voor het rood, zodat dus de irradiance in het rood groter blijft dan die in het groen en het blauw.

De golflengte van maximale transmissie (= minimale K-waarde) ligt bij de stations C3 t/m C5, D1 en E1 ongeveer in het groen (500 nm). Deze stations bevinden zich, op E1 na, alle buitengaats (zie fig. 21 t/m 23). Bij de overige stations, behalve C2, is de maximale transmissie gelegen in het langgolvig gebied (± 600 nm). Al deze metingen hebben plaats gevonden of in de Texelstroom of in het Marsdiep of in een van de stroomgaten (Westgat of Molengat) d.w.z. onder de direkte invloed van de ebstroom van de Waddenzee.

Het is een bekend verschijnsel dat b.v. afname van de transmissie in zijn geheel, het kortgolvig gedeelte van het spektrum meer doet verminderen dan het langgolvig gebied m.a.w. bij afnemende transmissie treedt een verschuiving van de golflengten van maximale transmissie naar grotere golflengten op. Evenzo geldt het omgekeerde.

Voorname verschuiving is het gevolg van selectieve lichtabsorptie door deeltjes en "Yellow substance" (zie fig. 24 en 25).

Duidelijk is bovenvermelde verschuiving te zien bij de grafieken van C1 t/m C4. De toenemende transmissie als gevolg van de overgang van troebel naar helder water valt goed waar tenemen aan de toenemende steilheid van de E-z curven (vgl. ook de bijbehorende K-waarden, Secchidiepten en vaar-route). Resultaat van de grotere transmissie is de verschuiving van de golflengte van maximale transmissie van het rode naar het groene golflengtegebied.

Eenzelfde verloop in K-waarden als bij C1 t/m C4 zou te verwachten zijn bij de reeks B1 t/m B4. Echter B3 en B4 geven duidelijk hogere waarden voor K dan verwacht mocht worden op grond van de K-waarden van B1 en B2 en de positie van de stations B3 en B4.

De oorzaak daarvan ligt in de gedurende die tijd lopende ebstroom welke relatief troebel water naar buiten voert, hetgeen ook merkbaar is aan de hogere concentratiewaarden en geringere Secchidiepten voor B3 en B4.

Bij E1 t/m E4 is de situatie niet zo duidelijk. De vloedstroom brengt relatief helder water de Texelstroom op, zodat daardoor voor de stations E2, E3 en E4 mogelijk lagere K-waarden optreden dan voor E1. Van belang is ook de weersconditie voor deze stations, namelijk bewolkt en regen. Toevallig fungeerde de dekcel niet, zodat ook nog moeilijk na te gaan is in hoeverre het lichtveld boven water gelijk is gebleven.

Jerlov (1968) merkt in dit verband op dat de metingen bij bedekte zon moeilijk vergelijkbaar zijn met die bij onbedekte zon wegens het verschil in bovenwaterlichtveld. Immers in het eerste geval heeft het lichtveld een duidelijk diffuus karakter terwijl in het tweede geval sprake is van een gericht lichtveld. Het zou optimistisch zijn te veronderstellen, dat een dergelijk verschil geen invloed zou hebben op de waarde van K.

In de reeks D2 - D1 - D3 - D4 - D6 - D5 is de toename van K opvallend, terwijl ook de golflengte van maximale transmissie zeer duidelijk verschuift van het kortgolfige naar het langgolfige gebied van het spectrum.

Ook de concentratiewaarden vertonen een toename. De Secchidiepten passen

goed in het geschetste beeld door hun optredende afname. De totale transmissie neemt af als gevolg van de overgang van helder (buiten het Molengat) naar relatief troebel water (Texelstroom). Een verscherping van deze overgang, als gevolg van de lopende ebstroom, is opgetreden.

De A-serie geeft een overeenkomstig beeld te zien als de D-serie. Het feit dat de E - z curven en vooral die van blauw en groen afbuigen naar de E-as (b.v. A1, A3, C2, C3 en C5) is het gevolg van (zie ook inleiding theorie) de verandering van de radiantie van het verstrooide licht met de diepte. Genoemde radiantie is nul aan het oppervlak en maximaal op enige afstand eronder.

Een aantal malen (B5, C1, C4, C5) komt het voor dat de verzwakking in het geval zonder kleurfilter groter is dan met een van de kleurfilters voor de lichtmeter (zie K- en T-waarden). De oorzaak daarvan ligt in de spektrale gevoeligheid van de fotofet welke zijn maximum heeft in het infrarood (950 nm) waar juist water bijzonder sterk absorbeert (toenemende absorptie met de diepte).

De posities MD, T5, T11 en WG16 zijn meerdere malen gebruikt als meetstation.

Zo is op MD gemeten in geval van station A1, D4 en E1.

Vergelijking van de K-waarden (over een opp. laag van ± 3 mtr) levert:

$$K_{E1} > K_{D4} > K_{A1}$$

Tijdens de E1-meting loopt er een vloedstroom terwijl bij D4 een vrijwel maximale ebstroom aanwezig is. Verwacht mag worden relatief helder water voor E1 en dus: $K_{E1} < K_{D4}$

Blijkbaar zijn de E-metingen inderdaad (zie terug) moeilijk vergelijkbaar met de andere experimenten (hoewel in dit geval de C-waarden de relatie $K_{E1} > K_{D4}$ bevestigen).

Ten gevolge van de maximale ebstroom bij D4 is er een grote toevoer van gesuspendeerd materiaal van de wadden (zand, klei, ijzeroxide en resten van schelpen e.d.).

A1 staat ook nog duidelijk onder invloed van de ebstroom, te zien aan

de concentratiewaarden en de Secchidiepten.

Merkwaardig is het dat, ondanks de grotere C-waarden en geringere Secchidiepten van A1., ten opzichte van D4, toch geldt: $K_{D4} > K_{A1}$.

Op positie T5 is driemaal gemeten B2, D6 en E2.

Uit de K-tabel blijkt:

$$K_{E2} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} K_{D6} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} K_{B2} \quad (\begin{matrix} > \\ < \end{matrix} = \text{gedeeltelijk groter,} \\ K_{E2} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} K_{B2} \quad \quad \quad \text{"} \quad \text{kleiner}).$$

Gerekend naar de getijfase zou te verwachten zijn dat $K_{D6} > K_{B2}$, want op D6 werd gemeten ± 1 uur voor LW. en op B2 ± 4 uur voor LW., zodat vermoedelijk in het geval van D6 relatief troebeler water aanwezig zou zijn. Inderdaad is $K_{D6} > K_{B2}$ terwijl ook de Secchidiepten voor B2 groter is dan voor D6. Echter de concentratie van het gesuspendeerde materiaal is voor D6 kleiner dan voor B2.

Het lijkt voor de hand liggend dat hier de aard van het gesuspendeerde materiaal een rol speelt bij de lichtverzwakking.

Dat de K-waarden van E₂, ondanks een aanwezig zijnde vloedstroom hoger liggen dan bij D6 en B2 is vermoedelijk ook hier te wijten aan de weersconditie van de E-serie, hoewel de concentratiewaarden genoemde hogere waarden zouden rechtvaardigen.

Bij T11 is eveneens driemaal gemeten: B1, D5 en E4.

De K-tabel geeft:

$$K_{D5} > K_{E4} > K_{B1}$$

De metingen van station D5 zijn verricht in de ebstroom; er is dus relatief troebel water aanwezig.

Tijdens E4 is het HW., d.w.z. relatief helder water, aanwezig. Op B1 is gemeten ± 1 uur na HW.

Volgens stroomkaarten van de Waddenzee is 1 uur na HW (Den Helder) de ebstroom op dit station nog niet merkbaar; er is zelfs nog een zwakke vloedstroom aanwezig. M.a.w. er is geen toename van de concentratie van het gesuspendeerde materiaal, eerder een verdere afname. Inderdaad is de

koncentratie (zie tabel 3) voor B1 kleiner dan voor E4 en die weer kleiner dan van D5.

Het verschil in concentratiewaarden tussen D5 en E4 is vrij groot evenzo het verschil in K-waarde. Het verloop in K-waarde wordt nog eens bevestigd door de waarden van de Secchidiepte (afnemend bij toenemende K).

Opvallend is het dat hier een E-station wel verklaarbare gegevens oplevert hetgeen bij MD en T5 niet het geval was.

WG 16 is een positie waar tweemaal metingen zijn verricht: B4 en C1. B4 bevindt zich in de periode dat de ebstroom maximaal is.

Tijdens C1 is het ongeveer hoog water. Dus ingeval B4 duidelijk troebeler water aanwezig dan bij C1. Inderdaad: $C = 26.1$ mg/l voor B4 tegen 16.3 voor C1, ook de Secchidiepte voor B4 is geringer dan voor C1.

Te verwachten is dan $K_{B4} \approx K_{C1}$ hetgeen inderdaad gemeten wordt.

Na het voorafgaande zal het duidelijk zijn, dat de getijfase een grote invloed heeft op de waarde van K. Het is mogelijk dat het alleen een concentratie wijziging betreft, die door het getij wordt veroorzaakt, doch ook de aard of de grootte van de deeltjes kan gewijzigd zijn. Om hierin meer inzicht te verkrijgen is K uitgezet tegen C in grafiek 33 t/m 36 voor de diverse spectraalgebieden.

Bij beschouwing van graf. 33 t/m 36 valt in de eerste plaats het verschil in K - C afhankelijkheid tussen eb- en vloedsituatie op. Met eb loopt de K - C lijn steiler dan bij vloed, d.w.z. bij toenemende C is de toename van K voor eb groter dan voor vloed.

Een mogelijke eenvoudige verklaring daarvoor is te geven met behulp van gegevens van Postma (1954) betreffende transport van gesuspendeerd materiaal in de Waddenzee en het Marsdiep en aan de hand van enige simpele relaties, welke nu eerst volgen.

Indien verondersteld wordt dat de lichtverzwakking evenredig is met het totale oppervlak O van de lichtverstrooiende deeltjes en dat in 1 m^3 suspensie zich N deeltjes met gemiddelde diameter D bevinden, dan geldt:

$$K (:) 0 = N \pi D^2 \quad (23)$$

De gewichtskoncentratie C van het gesuspenderde materiaal is gegeven door:

$$C = 1/6 \cdot N \pi D^3 \rho \quad (\rho = \text{gem. dichtheid deeltjes})$$

Stel er zijn 2 suspensies gegeven met gelijke ρ , dan zal gelden:

$$C_1 = 1/6 \cdot N_1 \pi D_1^3 \rho \quad (24)$$

$$C_2 = 1/6 \cdot N_2 \pi D_2^3 \rho \quad (25)$$

(23) en (24) geven:

$$K_1/C_1 (:) 6/D_1 \rho \quad (26)$$

idem:

$$K_2/C_2 (:) 6/D_2 \rho \quad (27)$$

zodat:

$$\frac{K_1/C_1}{K_2/C_2} (:) \frac{D_2}{D_1} \quad (28)$$

Gegevens van Postma brengen aan het licht dat hoge zandconcentraties (= concentratie van gesusp. materiaal met $D > 40 - 60 \mu$) alleen voorkomen in het Marsdiep en nabije omgeving. De concentraties nemen af zowel vanuit het Marsdiep naar de Waddenzee als naar de Noordzee.

Alleen de stromingen in het Marsdiep zijn sterk genoeg om grote hoeveelheden zand in suspensie te brengen. Het gevolg daarvan is dat bij vloed transport van materiaal met relatief grote diameter naar binnen plaats vindt, de Texelstroom op en het Malzwin in.

De deeltjes die door getijstromingen in de Waddenzee in suspensie gebracht en tijdelijk gehouden worden zijn slibdeeltjes en duidelijk geringer in omvang dan de zanddeeltjes (slib zeker $< 30 - 40 \mu$). Het mogelijke gevolg daarvan is dat bij eb de gemiddelde deeltjesdiameter, in de Texelstroom en het Malzwin, kleiner is dan bij vloed.

Er geldt dus: $D_{eb} < D_{vloed}$

en dus volgens (28): $K_{eb}/C_{eb} > K_{vl.}/C_{vl.}$

M.a.w. een grotere helling bij eb dan bij vloed voor het verband tussen K en C.

Bij (24 en 25) is verondersteld dat de gemiddelde dichtheid van de deeltjes in het water zowel bij eb als vloed gelijk is. Er wordt daarbij uitgegaan van de veronderstelling dat de hoofdbestanddelen van het gesuspendeerde materiaal steeds van kwartsachtige aard blijven (gem. dichtheid: 2.65 gr/cm^3).

Opmerkelijk is het dat op het snijpunt van eb- met vloedrechte stations zijn gelegen uit het Marsdiep of direkte omgeving. Blijkbaar is het verband tussen K en C hier vrij konstant, d.w.z. grotendeels onafhankelijk van eb en vloodsituatie. Misschien is dat een gevolg van de bijzonder grondige menging van het water welke daar veroorzaakt wordt door de sterke getijstroming. Het water behoudt dan ruwweg hetzelfde optische karakter.

Een aantal metingen valt bijzonder ver buiten de geschetste K - C relaties.

Een gedeelte van de E- serie geeft duidelijk te hoge waarden voor K t.o.v. de vloedrechte; een gevolg van een reeds eerder besproken weersinvloed. De meetseries die verder naar buiten plaats hebben gevonden (C_3 , C_4 , C_5 en D_2) liggen hoewel het metingen bij eb betreft niet op de ebcurve.

Enerzijds is dit niet zo verwonderlijk daar de invloed van de ebstroom, die door het Marsdiep loopt, op een dergelijke afstand van de kust gering is, anderzijds zijn deze metingen evenals D_4 en D_6 verricht bij zeer zwakke wind, in tegenstelling tot de A, B en E serie tijdens welke er een matige wind stond.

In welke mate dergelijke windinvloeden doorwerken in de K en C waarden is onbekend.

Mogelijk is het gestippelde verband tussen C_3 , C_4 , C_5 , D_4 en D_6 gerechtvaardigd; de waarden van D_3 en D_5 bevestigen een dergelijke relatie niet.

Bevestigend voor het feit, dat de metingen op de Noordzee moeilijk vergelijkbaar zijn met die op de Waddenzee is het verband tussen K en $1/S$ ($S = \text{Secchidiepte}$). De Noordzeewaarden geven een grotere regelmaat te zien dan de overige metingen. (zie graf. 37).

De waarde van de konstante α in de relatie

$$K = \alpha (1/S) + \beta \quad (\alpha, \beta = \text{konstanten}).$$

komt vrij goed overeen met gemeten waarden door:

Joseph en Wattenberg: 2.19 (Otto, 1966)

Le Grand: 1.50 (troebel water) (Otto, 1966)
4.01 (helder water)

Gemeten waarden voor α :

Noordzee : 3.75

Waddenzee : 2.14

Terugkerend naar de grafieken 33 t/m 36 valt het op dat de ebwaarden een vrij grote spreiding vertonen in tegenstelling tot de vloedwaarden, die vrij goed op een rechte passen. Mogelijk moet de oorzaak daarvan gezocht worden in de toenemende onnauwkeurigheid van de lichtmeter voor afnemende grootte van de irradiance.

Bovendien moet benadrukt worden dat invloeden zoals bodemgesteldheid, getijstroomafwijkingen en snelheids- en richtingsveranderingen van de wind moeilijk navolgbaar zijn.

Voor een nauwkeuriger oorzaaksaanduiding van diverse afwijkingen zijn zeker meer metingen nodig dan de hier vermelde 24.

In graf. 33 is ook de theoretische kromme bijgetekend, die gegeven is door (19).

Voor het middengedeelte en het rechteruiteinde is er een redelijke mate van overeenstemming met de praktijk.

Het linkeruiteinde ligt duidelijk te laag vergeleken met de metingen. De oorzaak is dat het theoretisch verband geldt voor troebel tot zeer troebel water, zodat C dus niet te klein mag worden zoals bij het linkereinde het geval is. De theoretische kromme past zo te zien beter bij het ebverband dan bij de vloedwaarden.

De K - C relaties voor de kleurfilters geven een overeenkomstig beeld als die zonder kleurfilter. De verhouding K/C is voor rood groter

dan voor het geval zonder filter, zowel voor eb als vloed. Voor groen weer groter dan voor rood, terwijl blauw de grootste waarden voor K/C geeft.

Dus:

$$(K_{eb}/C_{eb})_{bl.} > (K_{eb}/C_{eb})_{gr.} > (K_{eb}/C_{eb})_{rood} > (K_{eb}/C_{eb})_{zonder}$$

en idem voor de vloedwaarden.

Genoemd verloop in de grootte van K/C is het gevolg van selectieve licht-absorptie-processen in het water door de aanwezigheid van gesuspendeerd materiaal, "Yellow substance" en de watermoleculen zelf.

Voor een aantal stations is de waarde van de verstrooiingscoëfficiënt (voor de zon in het zenith) bepaald m.b.v. (11).

K_0 wordt daarbij berekend uit (7) waarbij j volgt uit (5).

De waarden van b zijn samengevat in tabel 6; ze zijn geldig voor een diepte van 0,25 m. en bovendien onder alle geldigheidsvoorwaarden van (11) en (17).

Bij alle metingen is de verstrooiing in het rood het kleinst, in het blauw het grootst. Gewoonlijk is echter de verstrooiing aan gesuspendeerd materiaal met een diameter groter dan 2λ niet golflengteafhankelijk (Jerlov, 1968).

Absorptie is dit echter wel.

De invloed daarvan moet, ten gevolge van het gebruik van (11) met daarin K_0 , merkbaar zijn. K_0 is immers een totale verzwakkingscoëfficiënt en omvat daardoor ook verzwakking t.g.v. absorptie.

De kromme voor b die als functie van K_0 , volgt uit (11) is weergegeven in graf. 38.

Vergelijking met fig. 26 doet merken, dat indien deze grafiek uitgebreid zou worden voor kust- en binnenwateren en misschien een overeenkomst zou zijn met bovengenoemd verband tussen b en K_0 .

Een bepaling van grootte orde N is te maken m.b.v. (22). Een opsomming van deze waarden is gegeven in tabel 7.

Vermelde waarden voor N zijn slechts geldig onder de reeds tevoren aangegevide voorwaarden van (11) en (17).

In grafiek 39 is N als functie van $1/S$ getekend. Alhoewel enige stations op tamelijk grote afstand van de getrokken rechte liggen, lijkt het verband redelijk lineair. De relatie is gegeven door:

$$N = [2.05 (1/S) + 3.0] \cdot 10^9.$$

Een duidelijke afname van het aantal deeltjes per volume-eenheid bij toenemende S.

6. Konklusies.

De resultaten van de lichtverzwakkingsmetingen op de Waddenzee en de Noordzee komen behoudens de extreme gevallen (relatief zeer hoge en zeer lage concentraties) redelijk overeen met de theoretisch te verwachten waarden. Metingen van Otto (1966) in de Waddenzee betreffende het verband tussen de extinktiecoëfficiënt en de concentratie van het gesuspendeerde materiaal geven meestal een overeenkomstig beeld voor eb- en vloedwaarden, als in het verband tussen K en C te zien is.

Door het grote aantal verschillen in meetkondities bij de diverse stations is het zinvoller in eerste instantie voor ieder station apart een betrouwbaar verband tussen K en C vast te leggen, dan direkt te trachten voor het gehele gebied, waarin metingen plaatsgevonden hebben, een dergelijke relatie vast te leggen.

Vast staat dat veel meer metingen nodig zijn om voor het gehele gebied een goed gefundeerde relatie tussen voornoemde grootheden te bepalen.

Het feit dat bepaalde grootheden evenals een aantal vermelde relaties slechts toepasbaar zijn onder een aantal beperkte voorwaarden, is het gevolg van de keuze van het lichtverzwakkingsmodel beschreven door Jerlov (1968) en een aantal aannamen.

Indien geen gebruik wordt gemaakt van genoemd model en vereenvoudigende aanname, bijvoorbeeld door het introduceren van "multiple scattering", dan zal een verband tussen K en C hoogstwaarschijnlijk slechts te bereiken zijn via een uitgebreide en ingewikkelde numerieke weg.

Bevorderend voor de betrouwbaarheid van de relatie tussen K en C en voor de juiste grootten van N en b, is de kennis van de grootteverdeling

van de deeltjes.

Tevens kan dan een uitdrukking als "gemiddelde deeltjesgrootte" in een gebied met vrij grote variaties in deeltjes omvang, achterwege blijven.

Samenvattend kan gezegd worden dat een juiste beoordeling van de resultaten een grote kennis vereist omtrent vele factoren, die van geografische, meteorologische, hydrodynamische en biologische aard zijn en welke alle op verschillende wijze de lichtvoortplanting in het water beïnvloeden.

Aangezien de in dit verslag vermelde metingen de eerste waren, welke met de gebruikte lichtmeter zijn uitgevoerd, is het noodzakelijk dat enige afsluitende opmerkingen omtrent betrouwbaarheid, bruikbaarheid en nauwkeurigheid gemaakt worden.

De lichtmeter lijkt betrouwbaar (na diverse moeilijkheden van elektronische aard) door de vrij goede overeenkomst tussen de resultaten van de metingen enerzijds en literatuurwaarden en theoretische gegevens anderzijds. Door een groter aantal metingen zal moeten blijken in hoeverre de betrouwbaarheid van blijvende aard is. Herijking van de lichtmeter kan eventueel na enige tijd noodzakelijk blijken. Indien opaalglas met grotere drukbestendigheid gebruikt wordt, is de meter ook zeer goed bruikbaar voor metingen op de Noordzee beneden 30 m. Wat betreft spektrale metingen zou het interessant zijn te onderzoeken of de lichtmeter niet zodanig gewijzigd kan worden, dat een groter aantal kleurfilters voor de fotofet geplaatst kan worden, waardoor een completer beeld ontstaat van de verzwakking van het daglicht in zijn geheel, en bovendien de golflengte van maximale transmissie nauwkeuriger bepaald kan worden.

Het gebruik van interferentiefilters is niet mogelijk voor metingen op de Waddenzee door de resulterende te grote gevoeligheidsvermindering, echter wel voor Noordzeemetingen.

Enigszins teleurstellend is de geringe grootte van het effectief lichtverzamelend oppervlak ten opzichte van het totale oppervlak van het opaalglas. Dit heeft beslist een nadelige invloed op de meetnauwkeurigheid.

Echter de keuze van de fotofet als lichtgevoelig element met de er op bevestigde optiek tegen te grote divergentie van de detectiebundel brengt dat met zich mee.

De vrij grote onnauwkeurigheid voor kleine energiewaarden ($0 - 0.05$ milliwatt/cm²) van de radiometer, in de ijkopstelling heeft natuurlijk ook zijn invloed op de nauwkeurigheid van de lichtmeter. Ook wat betreft de gevoeligheid heeft de radiometer een nadelige invloed; de lichtgevoeligheid van de fotofet is duidelijk groter dan die van de radiometer.

De grote temperatuurafhankelijkheid van de lichtmeter is niet bevorderlijk voor een precieze bepaling van de grootte van de lichtenergie.

Niettegenstaande voornoemde nadelige invloeden is de nauwkeurigheid van de lichtmeter, vergeleken met elders in gebruik zijnde lichtmeetapparatuur voor daglichtmetingen in zee, beslist redelijk te noemen.

Bovendien is nog een vergroting van de meetnauwkeurigheid te verkrijgen door een precieze bepaling van de invloed van het onderdompelings (Immersion) effect.

Literatuur.

- AAS, E., 1969. On submarine irradiance measurements. Kjøbenhavns Universitet, Inst. for Fys. Oc. Rep. no 6, 1969.
- ANON, 1966. Unesco technical papers in marine science, nr. 2.
- BURT, W.V., 1955. Interpretation of spectrophotometer readings on Chesapeake Bay waters. - J. mar. Res. 14 (1): 33-46.
- BURT, W.V., 1956. A light-scattering diagram. - J. mar. Res. 15 (1): 76-80.
- JERLOV, N.G., 1955. The particulate matter in the sea as determined by means of the Tyndall meter. - Tellus. 7 (2): 218-225
- JERLOV, N.G., 1968. Optical Oceanography, Elsevier, Amsterdam.
- JERLOV, N.G. & K. NYGARD, 1969. Influence of solar elevation on attenuation of underwater irradiance. Kjøbenhavns Univers., Inst. for Fys. Oc. Rep. no 4, 1969.
- KIMBALL, H.H., 1924. Records of total radiation intensity and their relation to daylight intensity. - Mon. Weath. Rev. 52: 473.
- KOZLYANINOV, M.V., 1957. New instrument for measuring the optical properties of sea water. - Trans. Inst. Okeanol. Akad. Nauk S.S.S.R., 25: 134.
- OTTO, L., 1966. Light attenuation in the North Sea and the Dutch Wadden Sea in relation to disc visibility and suspended matter. - Neth. J. Sea Res. 3 (1): 28-51.
- POSTMA, H., 1954. Hydrography of the Dutch Wadden Sea. - Archs. neerl. Zool. 10 (4): 1-106.
- POSTMA, H., 1961. Suspended matter and Secchi disc visibility in coastal waters. - Neth. J. Sea Res. 1 (3): 359-390.
- SMITH, R.C., 1969. An underwater spectral irradiance collector. - J. mar. Res. 27 (3) 341-351.

Tabel I.

Gegevens Meetstations

Datum	Tijd	Boei of Deccapositie	Water- diepte (m)	Bewolking	Secchi- diepte (m)	Aanduiding Meetstation
2 april	11.00	MD	21	ged. bewolkt	0.75	A1
"	12.00	T3	15	"	0.75	A2
"	14.00	T15	15	"	0.70	A3
7 april	10.00	T11	21	"	0.95	B1
"	11.00	T5	18	"	1.00	B2
"	12.00	MG8	12	"	0.60	B3
"	13.00	WG16	10	"	0.75	B4
"	14.00	MG14	24	"	0.80	B5
"	15.30	M15	12	"	0.50	B6
8 april	09.30	WG16	6	voll. bewolkt	1.00	C1
"	10.30	MR	23	"	3.25	C2
"	11.30	GE 39-00 RC 5-00	24,5	onbewolkt	3.75	C3
"	13.00	GE 39-00 RC 8-00	24	voll. bewolkt	6.00	C4
"	13.30	GE 39-00 RC 10-50	27	onbewolkt	6.75	C5
9 april	11.00	MG	13.5	" "	2.50	D1
"	12.00	GD 45-50 RC 8-50	21	"	4.50	D2
"	12.45	MG4	6	" (x)	1.00	D3
"	13.45	MD	24	" (x)	1.00	D4
"	15.30	T11	15	" (x)	0.50	D5
"	15.45	T5	16.5	" (x)	0.75	D6
16 april	14.00	MD	20	voll. bew. + regen	1.00	E1
"	14.30	T5	17	"	1.00	E2
"	15.00	T9	15	"	1.00	E3
"	15.30	T11	19	"	0.90	E4

Verklaring van enige plaatsaanduidingen:

MD..= groene wrakton Marsdiep, T..= Texelstroom, MG..= Molengat, WG..= Westgat, M..= Malzwin, MR..= brulboei achter de Keizersbult, MG..= uiterton Molengat, (x)..= zeer lichte nevel voor de zon.

Tabel II.
Hoog- en laagwatertijden voor Den Helder
(M.E.T.)

Datum	H.W.	L.W.
2 april	03.08 uur	09.51 uur
	16.09 "	23.12 "
7 april	08.41 uur	03.00 uur
	21.00 "	14.56 "
8 april	09.17 uur	03.32 uur
	21.30 "	15.30 "
9 april	09.49 uur	03.57 uur
	21.58 "	16.50 "
16 april	02.55 uur	09.20 uur
	15.32 "	22.20 "

Tabel III.

Secchidiepten (S) en Koncentratiewaarden (C).

Station	S m	C mg/l	ΔZ^* m
A1	0.75	23.1	0-3
A2	0.75	23.5	0-3
A3	0.70	36.0	0-2
A3	0.70	30.0	2-5
B1	0.95	20.8	0-3
B2	1.00	23.0	0-3
B3	0.60	38.4	0-3
B4	0.75	26.1	0-3
B5	0.80	34.5	0-3
B6	0.50	41.7	0-3
C1	1.00	16.3	0- 4
C2	3.25	6.8	0- 6
C2	3.25	8.5	6-10
C3	3.75	6.0	0- 9
C3	3.75	8.6	9-13
C4	6.00	2.9	0- 9
C4	6.00	5.2	9-17
C5	6.75	3.3	0-15
C5	6.75	4.1	15-25
D1	2.50	14.7	0- 5
D2	4.50	6.2	0-10
D3	1.00	32.0	0- 3
D4	1.00	17.9	0- 2
D4	1.00	22.4	2- 5
D5	0.45	70.8	0-15
D6	0.65	16.7	0- 3
E1	1.10	25.3	0-3
E2	1.10	25.1	0-3
E3	1.00	29.0	0-3
E4	0.95	26.3	0-3

* ΔZ is diepte interval waarvoor gemiddelde C-waarde geldt.

Tabel IV.

Verzwakkingscoëfficiënt voor diverse stations en diepteintervallen
(ΔZ).

station	ΔZ	$K_{655\text{nm}}$ rood	$K_{500\text{nm}}$ groen	K_{435} blauw	K_{zonder}
A1	0- 3	1.62	2.76	3.03	1.38
A2	0- 3	1.57	2.66	3.34	1.46
A3	0- 2	2.42	3.16	5.03	2.03
A3	2- 5	2.44			2.37
B1	0- 3	1.68	2.48	2.86	1.48
B2	0- 3	2.10	2.67	2.97	1.56
B3	0- 1	3.72	5.06	7.30	3.20
B3	1- 3				3.85
B4	0- 3	2.09	2.13	3.17	1.74
B5	0- 1	2.89	4.80	7.57	3.20
B5	1- 3				3.70
B6	0- 1	7.46	8.25	8.35	5.27
B6	1- 3				2.98
C1	0- 4	1.10	1.87	2.16	1.13
C2	0- 6	1.28	1.13	1.37	0.73
C2	6-10	1.32			1.26
C3	0- 9	1.13	0.87	0.99	0.69
C3	9-13				0.76
C4	0- 9	0.42	0.25	0.76	0.37
C4	9-17	0.73	0.62		0.32
C5	0-15	0.57	0.20	0.44	0.25
C5	15-25				0.18
D1	0- 5	1.83	1.85	2.05	1.14
D2	0-10	1.03	0.92	1.00	0.61
D3	0- 3	1.84	2.89	3.31	1.66
D4	0- 2	2.20	2.90	5.10	2.09
D4	2- 5				2.79
D5	0- 1,5	4.58	6.09	6.40	3.95
D6	0- 3	3.14	3.17	5.56	2.29
E1	1- 3	3.49	6.05	6.90	3.15
E2	1- 3	4.84	7.25	8.60	2.29
E3	1- 3	3.20	3.00	3.08	2.17
E4	1- 3	3.29	3.66	3.12	1.61

Tabel V.

Transmissie (% per meter) voor diverse stations en diepteintervallen

station	ΔZ	T_{655}	T_{500} (ΔZ)	T_{435}	T_{zonder}
A1	0- 3	19.7	6.3	4.8	25.2
A2	0- 3	20.9	7.0	3.5	23.3
A3	0- 2	8.9	4.3	0.7	13.2
A3	2- 5	8.7			9.4
B1	0- 3	18.7	8.6	5.7	22.7
B2	0- 3	12.4	6.9	5.2	21.1
B3	0- 1	2.4	0.6	0.07	4.1
B3	1- 3				2.1
B4	0- 3	12.3	11.9	4.2	17.6
B5	0- 1	5.6	0.8	0.05	4.1
B5	1- 3				2.5
B6	0- 1	0.06	0.03	0.02	0.5
B6	1- 3				5.1
C1	0- 4	33.4	15.4	11.5	32.2
C2	0- 6	27.8	27.8	25.4	46.5
C2	6-10	26.7			28.4
C3	0- 9	32.2	42.0	11.5	50.3
C3	9-13				47.0
C4	0- 9	66.0	78.0	46.7	69.0
C4	9-17	46.3	53.8		72.5
C5	0-15	56.5	82.0	64.5	78.0
C5	15-25				83.6
D1	0- 5	16	15.6	13.0	32.0
D2	0-10	35.8	39.8	36.8	54.5
D3	0- 3	15.9	5.5	3.6	19.0
D4	0- 2	11.1	5.5	0.6	12.3
D4	2- 5				6.2
D5	0- 1,5	1.0	0.2	0.2	2.0
D6	0- 3	4.4	4.2	0.4	10.1
E1	1- 3	3.0	0.2	0.1	4.3
E2	1- 3	0.8	0.07	0.02	10.1
E3	1- 3	4.1	5.0	4.6	11.5
E4	1- 3	3.7	2.6	4.4	19.8

Tabel VI.
Verstrooiingscoëfficiënt b (M^{-1}) van een beperkte opp. laag.

station	b 655nm	b 500nm	b 435nm	b zonder
A1	1.80	2.24	2.42	1.43
A2	1.80	2.38	2.40	1.36
B1	1.60	2.22	2.35	1.42
B2	1.76	2.44	2.60	1.55
B3	2.21	2.56		2.07
B4				2.66
B5	2.13	2.52		1.97
B6	2.57	2.82		2.65
C1	2.16	2.16	2.46	1.77
C2				1.81
C3				1.12
C4				1.02
C5				1.18
D1	2.06	2.55	2.60	1.69
D2	1.87	2.42	2.41	1.20
D3	2.35	2.51		1.77
D4	2.44	2.73		2.45
D5				2.66
D6	2.24	2.69		1.90

Tabel VII.

Grootte orde deeltjesconcentratie N (m⁻³).

station	N	station	N
A1	4.3 x 10 ⁹	C3	3.4 x 10 ⁹
A2	4.1 "	C4	3.1 "
B1	4.3 "	C5	3.6 "
B2	4.7 "	D1	5.1 "
B3	6.3 "	D2	3.6 "
B4	8.1 "	D3	5.4 "
B5	6.0 "	D4	7.3 "
B6	8.0 "	D5	8.1 "
C1	5.4 "	D6	5.8 "
C2	5.5 "		

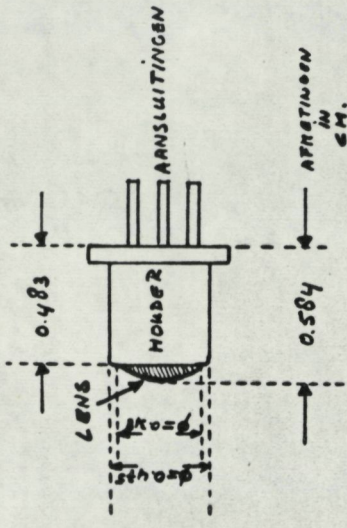


FIG. 1.: ZIJ-AANZICHT FOTOFET P-102.

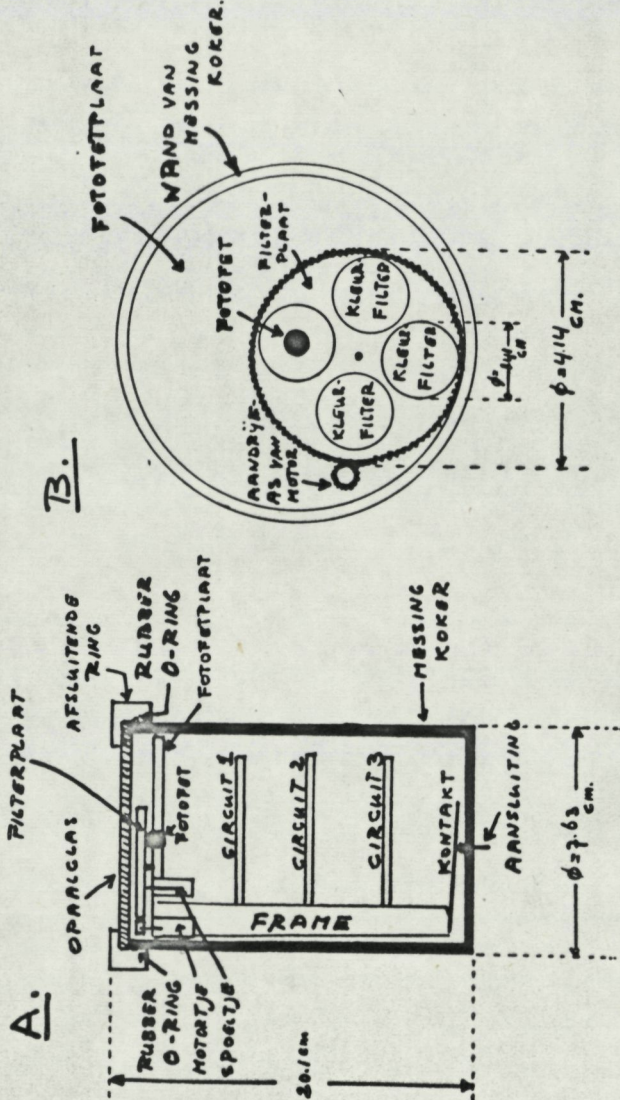


FIG. 2.: A. VERTIKALE DOORSNEDEN ONDER WATER CEL.
B. BOVENAANZICHT MESTCEL (ZONDER OPALGLAS.).

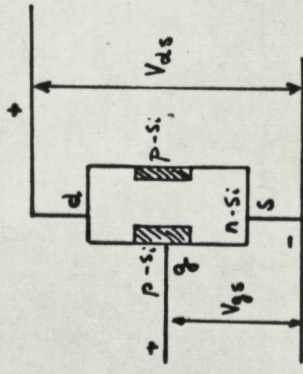


FIG. 5.: SCHEMA FET.

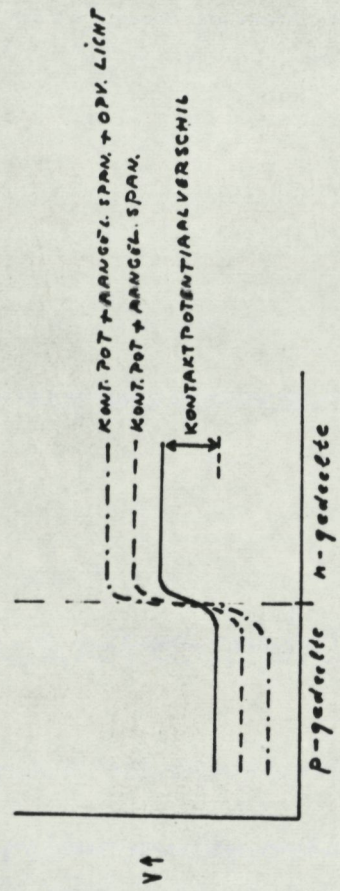


FIG. 6.: POTENTIALVERSCHIL TUSSEN P-EN N GEDEELTE VAN DE FOTOFET.

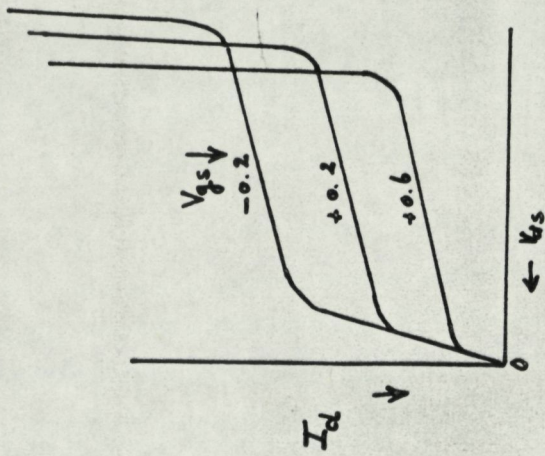


FIG. 7.: SCHETS V.D. KARAKTERISTIEKEN VAN DE FOTOFET.

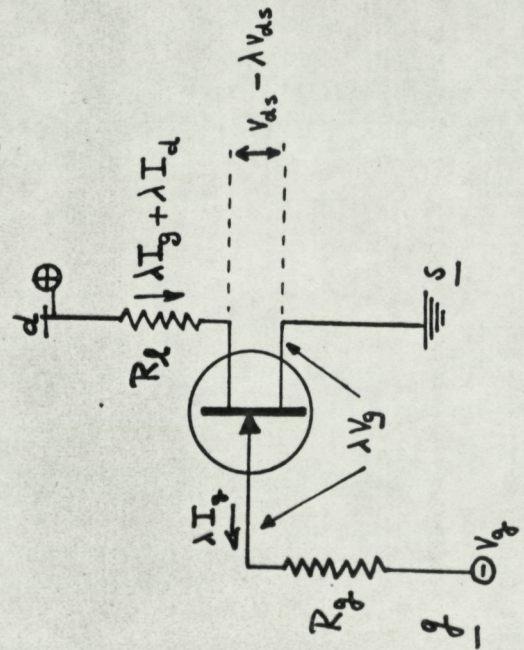


FIG. 8.: SCHEMA VAN DE FOTOFETSCHAKELING.

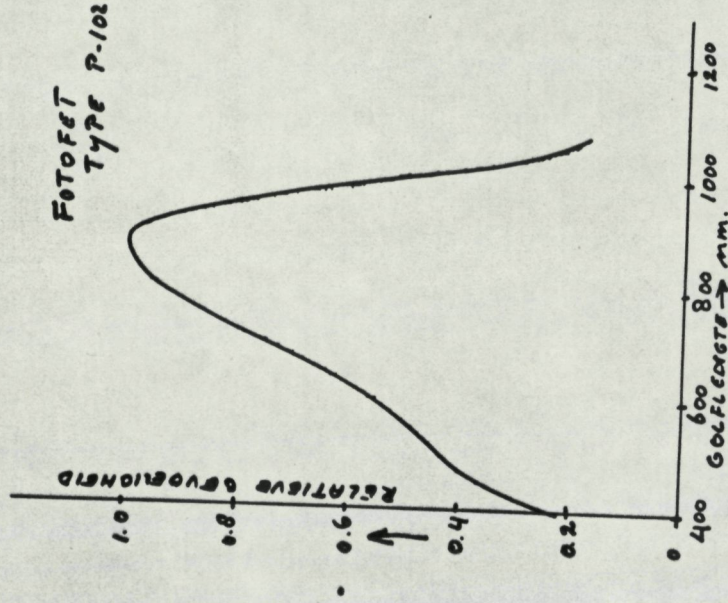


FIG. 9.: SPECTRALE GEVOELIENHEID FOTOFET TYPE P-102.

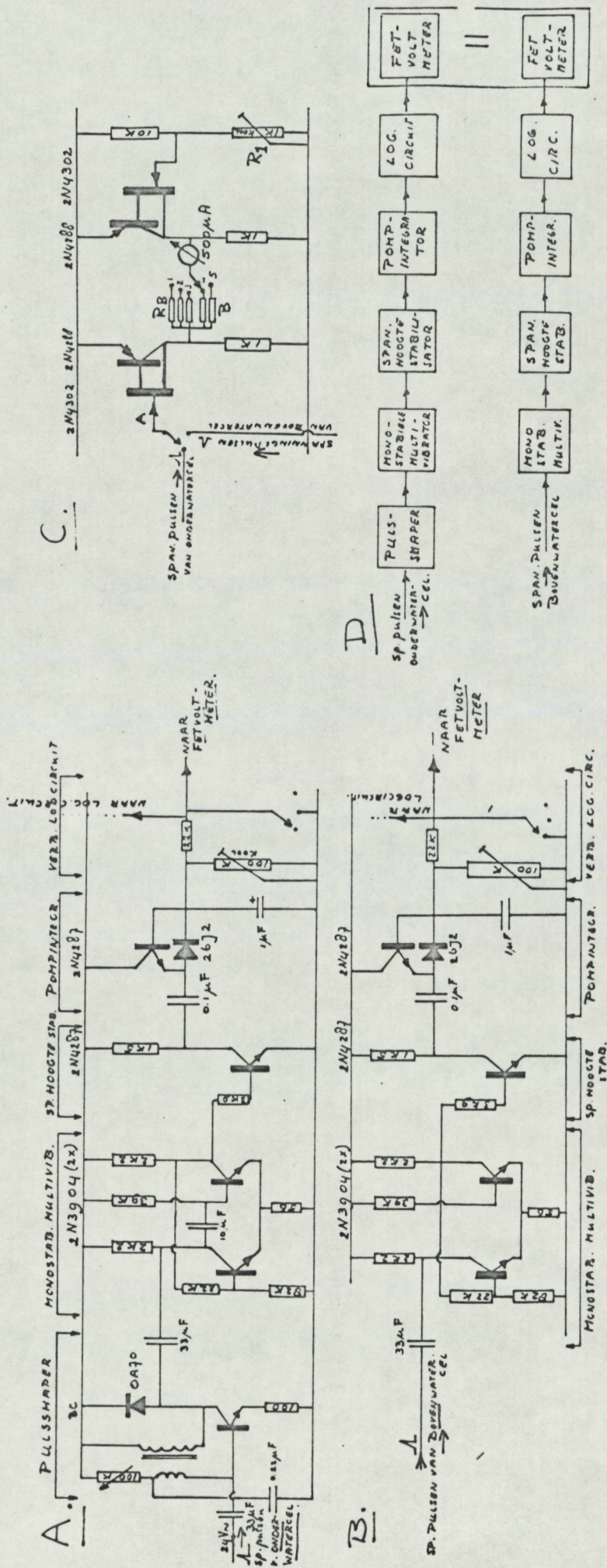


FIG. 13 : A. DIGITAAL-ANALOOG CONVERTER VOOR ONDERWATERCEL SPANNINGSPULSEN.
 B. DIGITAAL-ANALOOG CONVERTER VOOR BOVENWATERCEL SPANNINGSPULSEN.
 C. SCHAKELSHEMA FETVOLT-METER.
 D. BLOKSHEMA DIGITAAL-ANALOOG CONVERTER, LOG. CIRCUIT EN FETVOLT-METER.

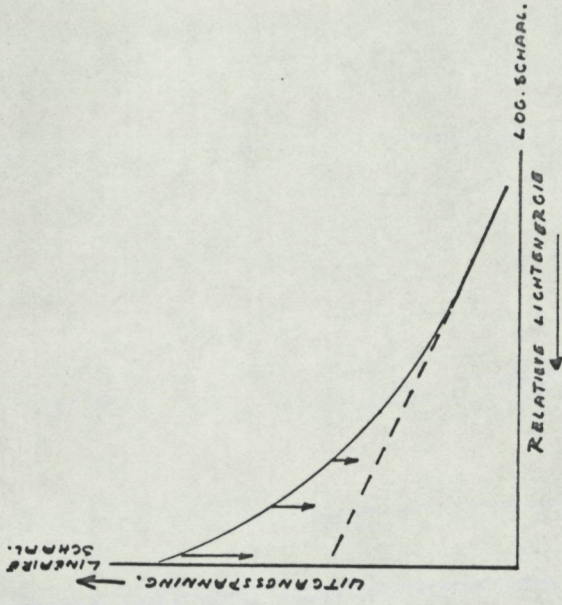


FIG. 18.: RECHTTOEKREUNSLÓGARITHMISCHE CURVE.
(GETROKKEN LYN → STIPPELIJN).

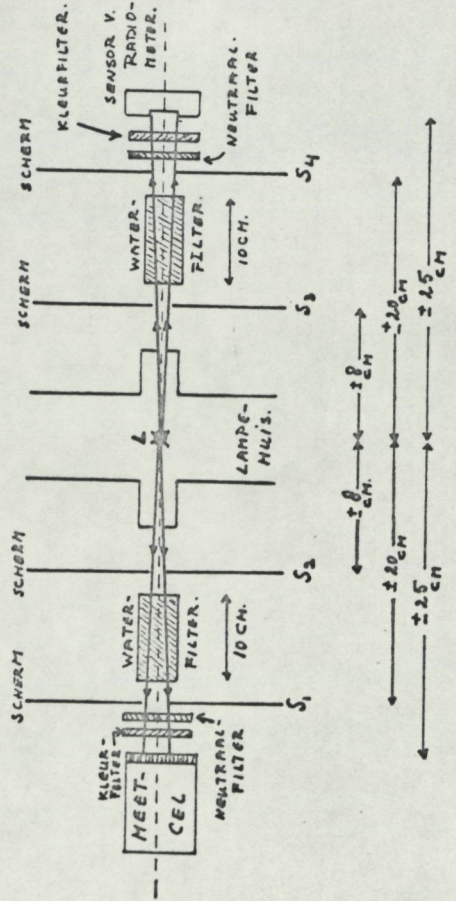


FIG. 17.: SCHEMATISCH OVERZICHT VAN DE UJKOPSTELLING.

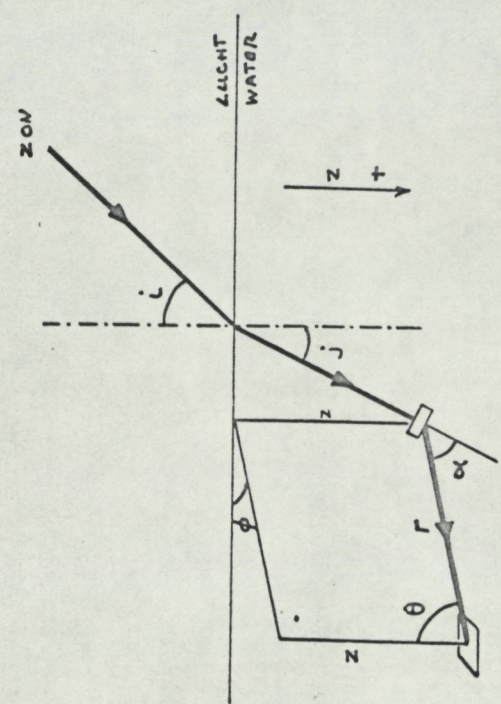


FIG. 19.: HORIZONTAL VERJUTRINGSMODEL.

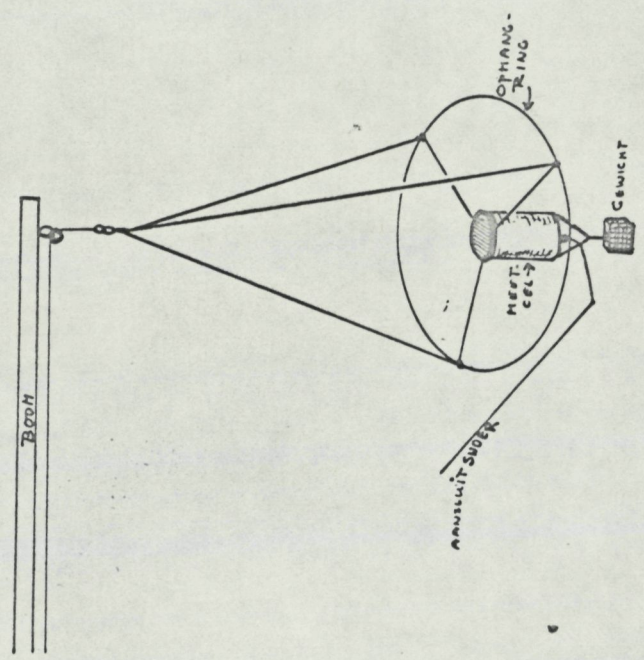
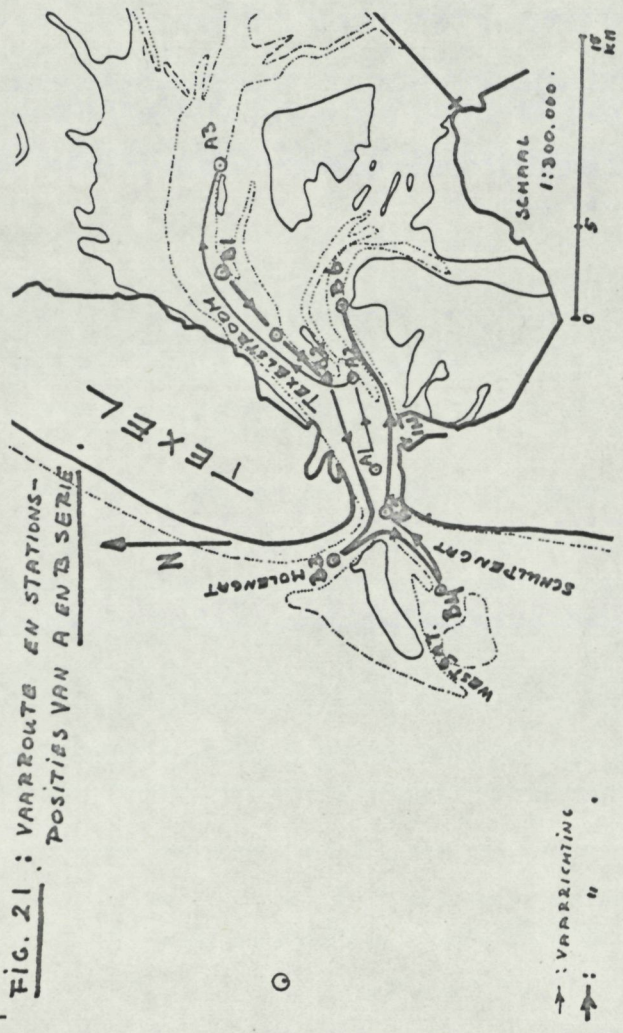


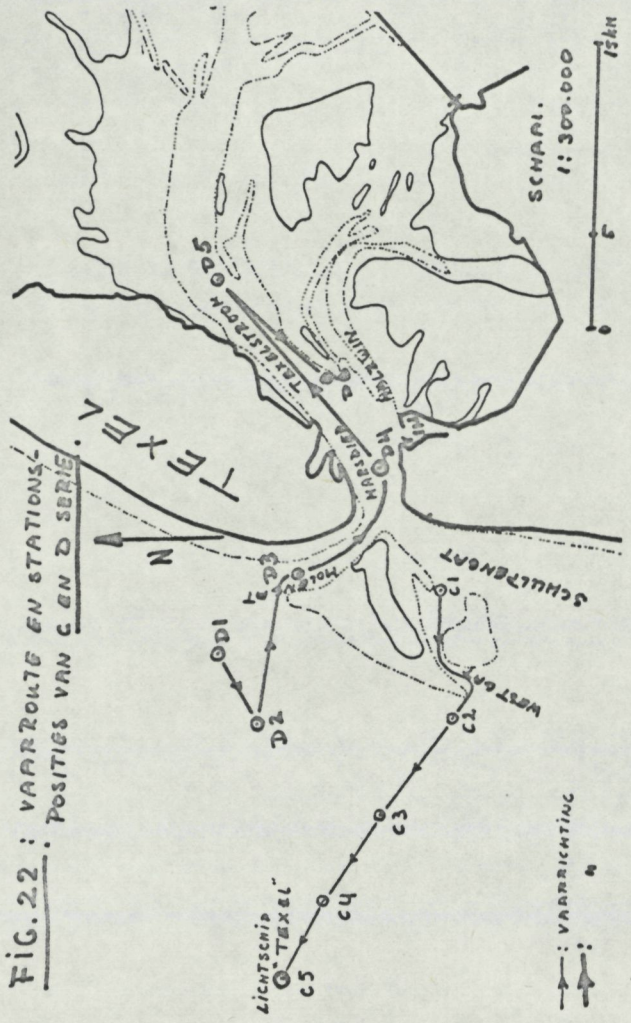
FIG. 20.: OPHANGING FOTOMETER (ONDERWATER CEL).

FIG. 21 : VAARROUWTE EN STATIONS-
POSITIES VAN A EN B SERIE.



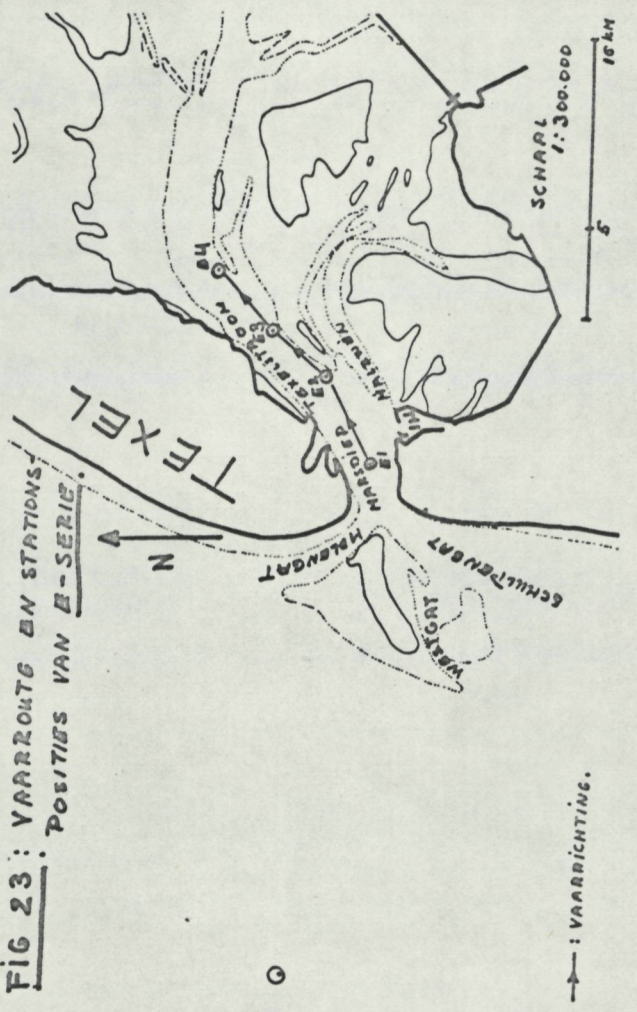
↑ : VAARRICHTING
↑ : " "

FIG. 22 : VAARROUWTE EN STATIONS-
POSITIES VAN C EN D SERIE.



↑ : VAARRICHTING
↑ : " "

FIG 23 : VAARROUWTE EN STATIONS-
POSITIES VAN E-SERIE.



↑ : VAARRICHTING.

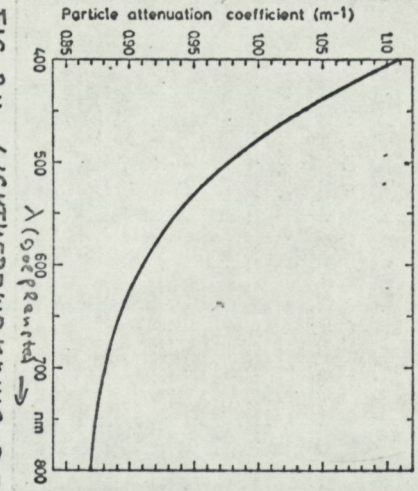


FIG. 24. LICHTVERZWAKKING DOOR DEELTJES ALS PUNKTIE VAN DE GOLFLENGETE V.M. LICHT. (Jerlov, '68)

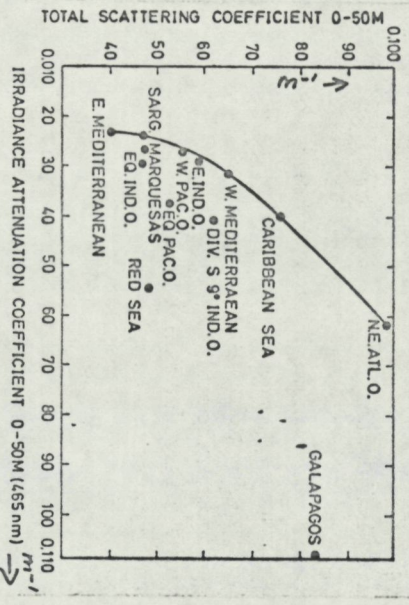


FIG. 26. VERBAND TUSSEN K (465 nm) EN k VOOR ENIGE ZEE-GEBIEDEN.

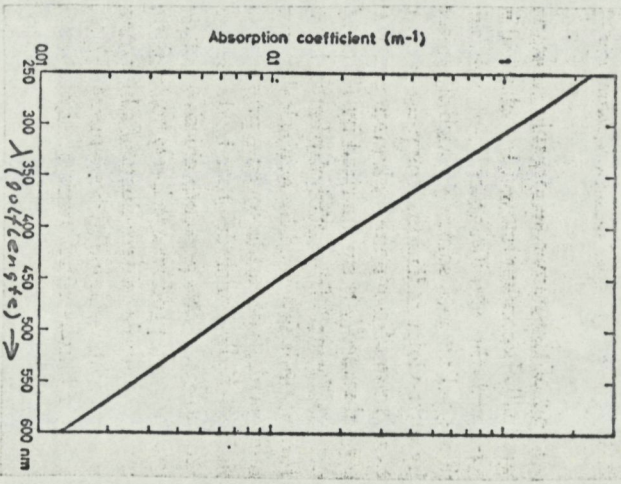
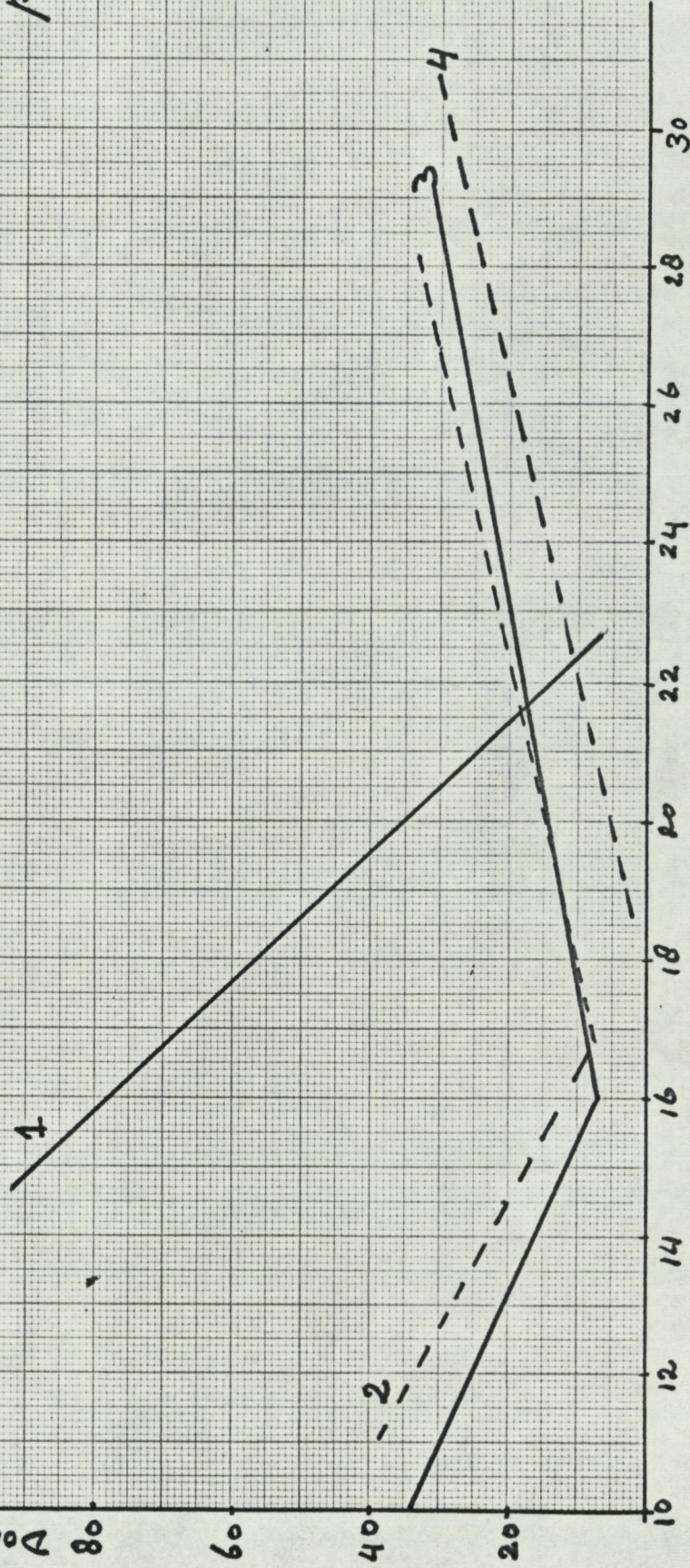


FIG. 25. ABSORPTIECOEFFICIENT VAN YIELDIG SUURSTOF ALS FUNKTIE VAN DE GOLFLENGETE λ . (Jerlov, '68)

GRAF. 1.

VERBAND DONKERSPANNING - TEMPERATUUR
VOOR EEN 4-TAL GEVALLEN.

DONKERSPANNING \rightarrow (mV)



ZIE OOK FIG. 10

1.: $R_5 = 1 k\Omega$; $R_4 = 220 \Omega$
 R_6 EN C_2 ONTBREKEN.

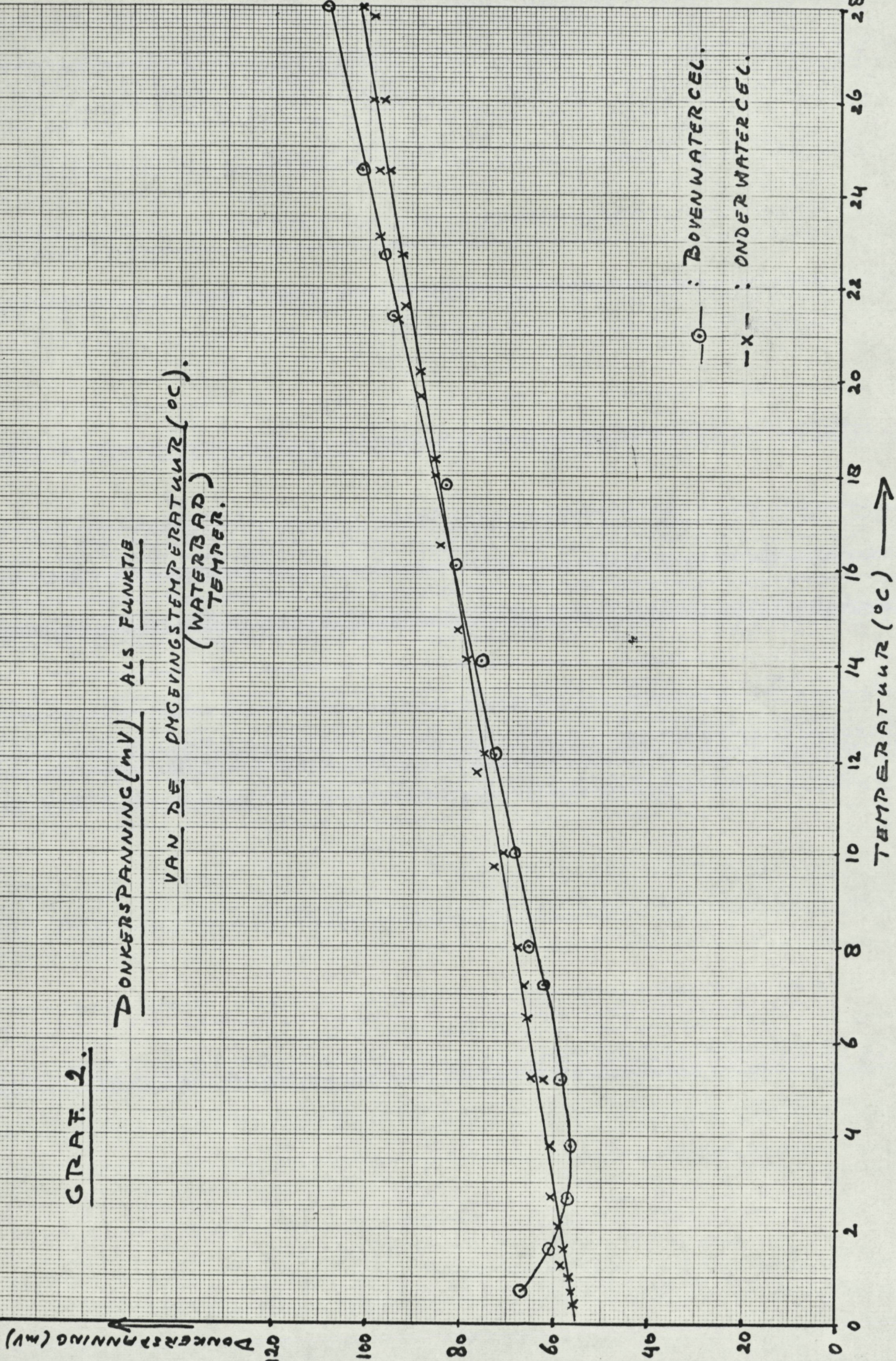
2.: N.T.C. parallel op R_5
rest als 1.

3.: DIODE parallel op R_5
rest als 1.

4.: N.T.C. parallel op
potentiometer R_7 .
rest als 1.

GRAF. 2.

DONKERSPANNING (mV) ALS FUNKTIE
VAN DE OMGEVINGSTEMPERAATUUR (°C)
(WATERBAD)
TEMPER.



GRAF. 3.

INVLOED TEGENKOPPELING OP
VERZADIGING V.D. WITG. SPANNING.

RELATIEVE UITGANGSPANNING →

VERZADIGINGSPUNT
WITG. S.P.

ZONDER
TEGENKOPPELING

MET
TEGEN-
KOPPELING

RELATIEVE RESTRIKTINGS-
STERKTE

GRAF. 4.

INVLOED VAN R_g -WAARDE EN GROOTTE
VAN TEGENKOPPELING OP
UITGANGSPANNING - RESTRIKTINGSSTERKTE
BAND.

A: $R_g = 33 M\Omega$

B: $R_g = 66 M\Omega$

C: $R_g = 120 M\Omega$

D: $R_g = 120 M\Omega$
EN GROTERE
TEGENKOPPELING
(LAGERE R_1)

RELATIEVE UITGANGSPANNING → (mV)

RELATIEVE RESTRIKTINGS-
STERKTE

A₁

B₁

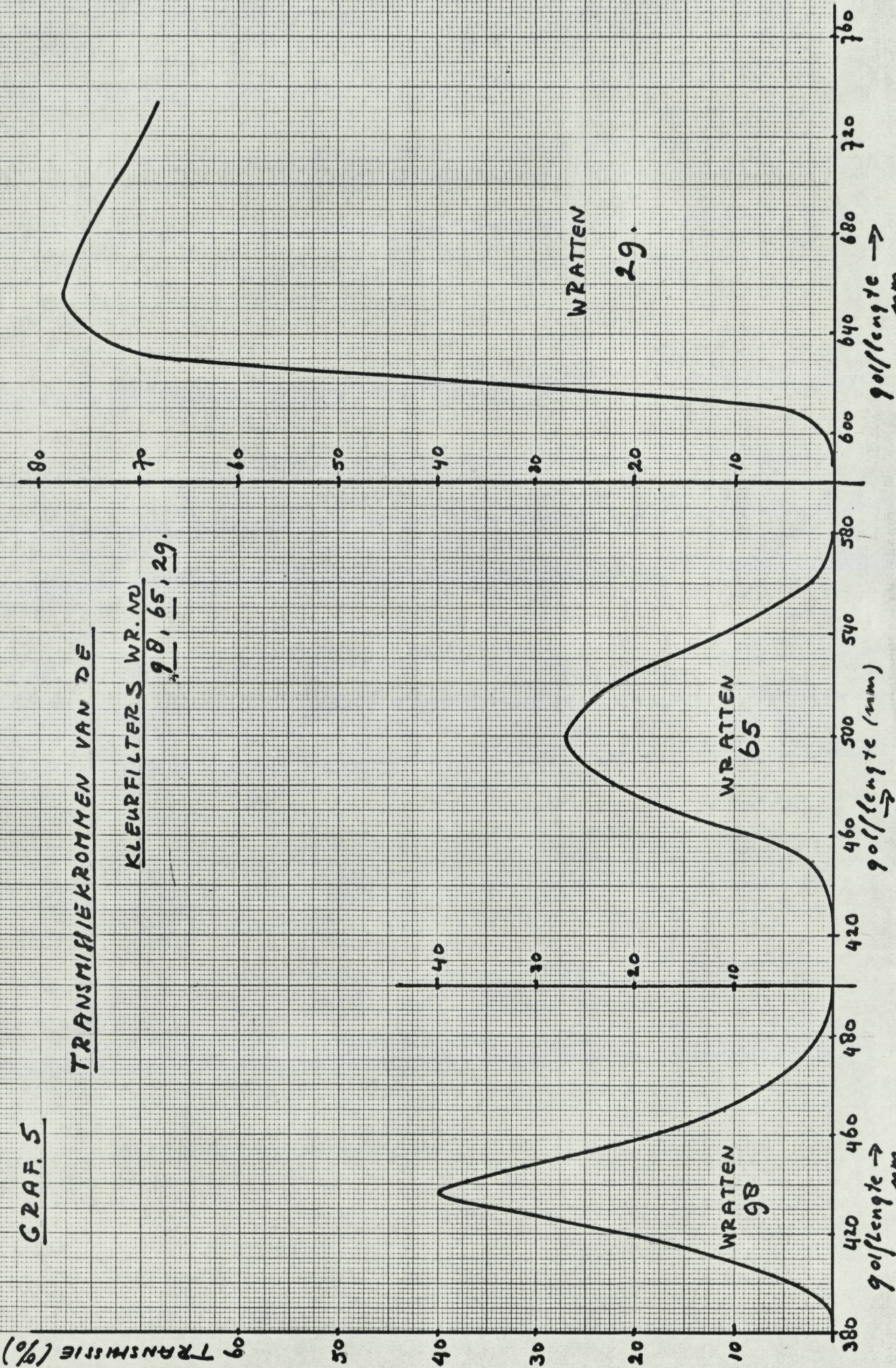
D₁

C₁

GRAF. 5

TRANSMISSIEKROMMEN VAN DE

KLEURFILTERS WR. NO
98, 65, 29.



GRAF. 6.

EMISSIEKROMME VAN

OSRAM LAMP TYPE 64540.

REL. ENERGIEDICHTHEID

5

4

3

2

1

400

500

600

700

GOLFLENGTE →

EMISSIEKROMME

XENON
LAMP

2

3

4

5

6

7

8

9

10

REL. ENERGIEDICHTHEID

GOLFLENGTE (nm) →

400

440

480

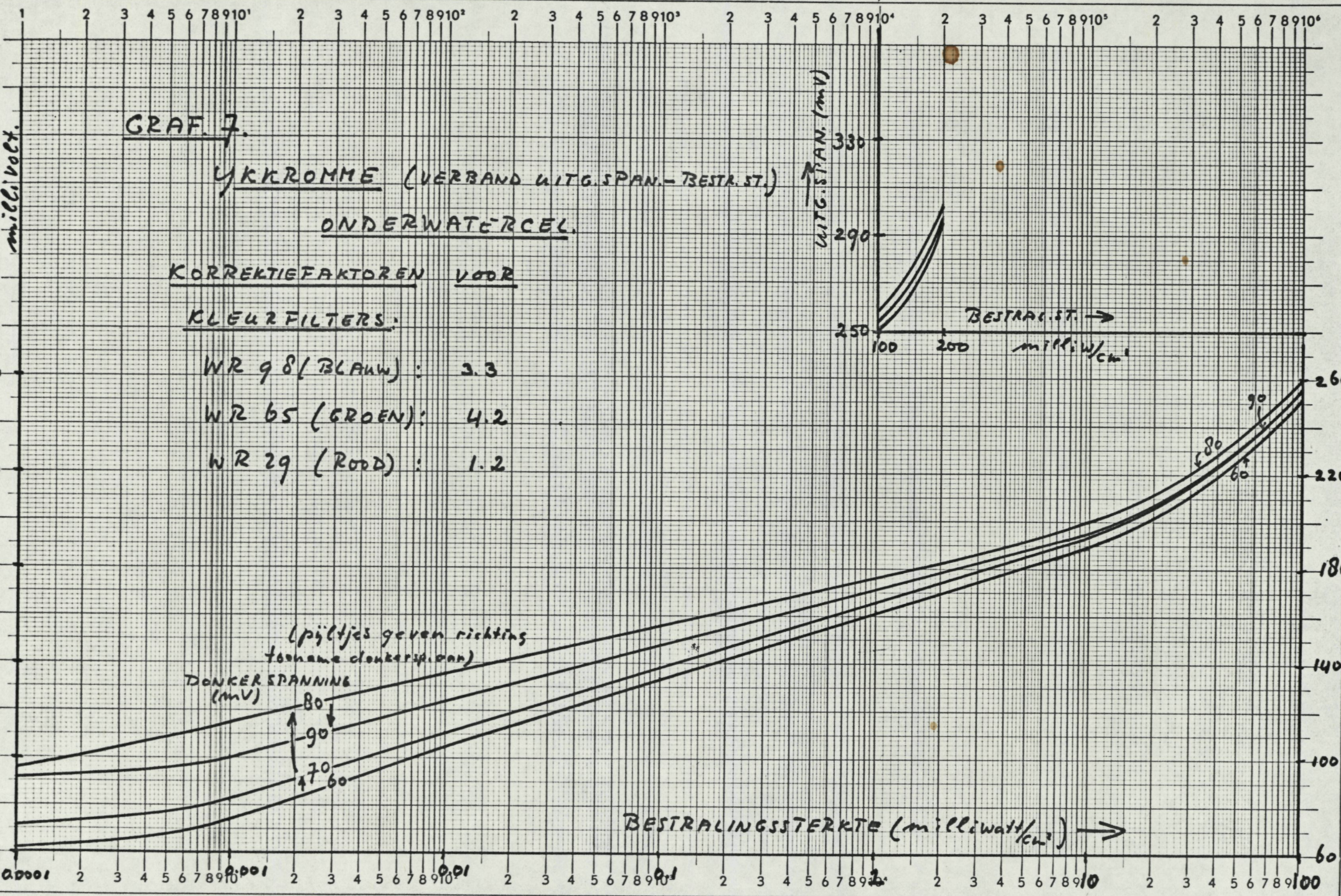
520

560

600

640

680



GRAF. 8.

IJKROMME

BOVENWATERCEL

(VERBAND UITGANGSSPAN. -
BESTRALINGSST.)

KORREKTIEFAKTOREN VOOR

KLEUR FILTERS:

WR. 98 (blauw) : 3.3

WR. 65 (groen) : 4.2

WR. 29 (rood) : 1.2

UITGANGSSPANNING
(millivolt).

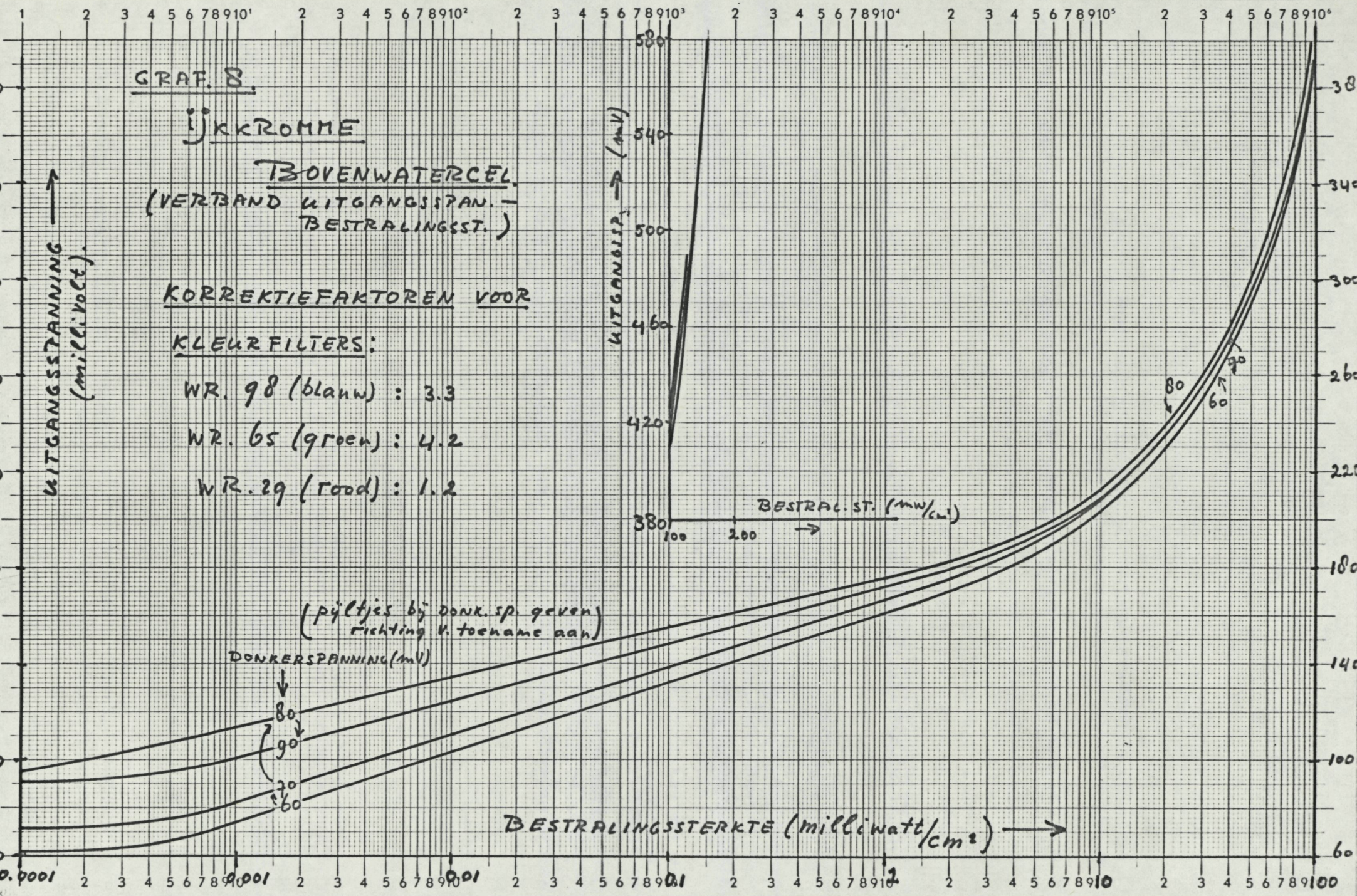
UITGANGSP. (mV)

BESTRAL. ST. (mw/cm²)

BESTRALINGSSTERKTE (milliwatt/cm²)

(pijltjes bij donk. sp. geven
richting v. toename aan)

DONKERSPANNING (mV)



IRRADIANCE (milliwatt/cm²)

1 0.0001 2 3 4 5 6 7 8 9 10¹ 0.001 2 3 4 5 6 7 8 9 10² 0.01 2 3 4 5 6 7 8 9 10³ 0.1 2 3 4 5 6 7 8 9 10⁴ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10⁵ 0

GRAF. NO. 9
STATION A1.

GRAF. NO. 10
STATION A2.

665 nm

500 nm

435 nm

665 nm

500 nm

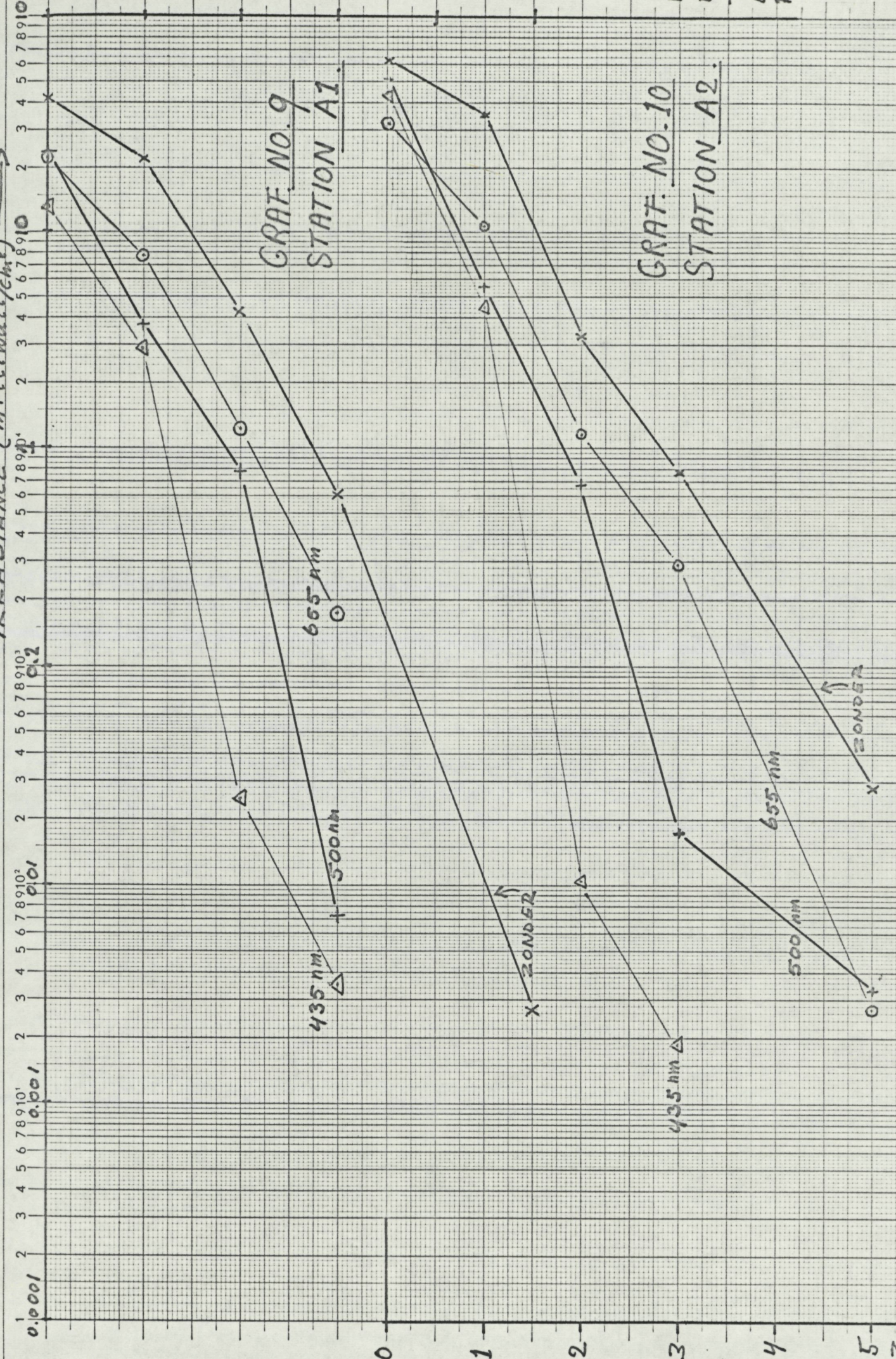
ZONDER

ZONDER

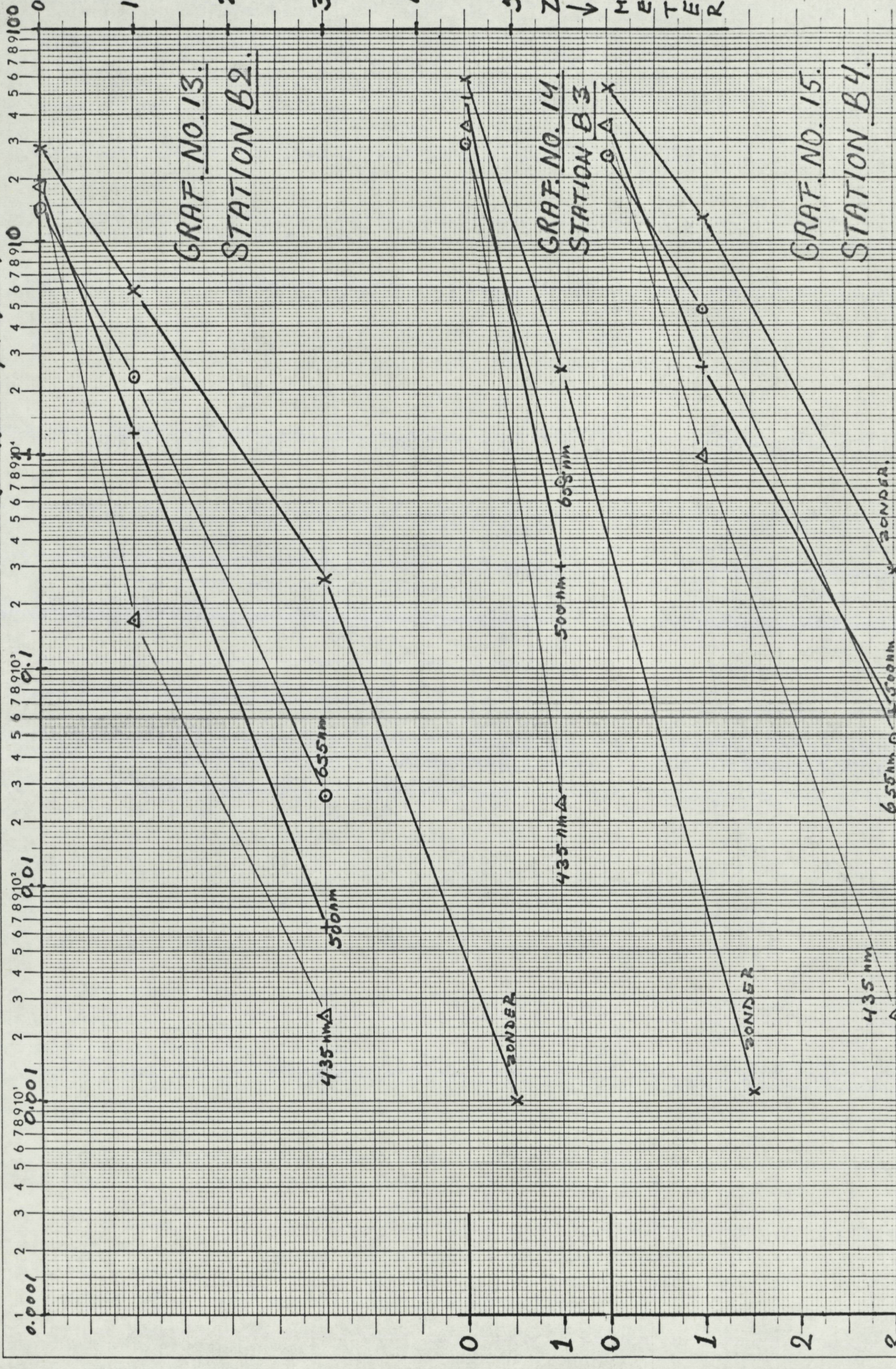
435 nm

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Z ↓ METER



IRRADIANCE (milliwatt/cm²) →



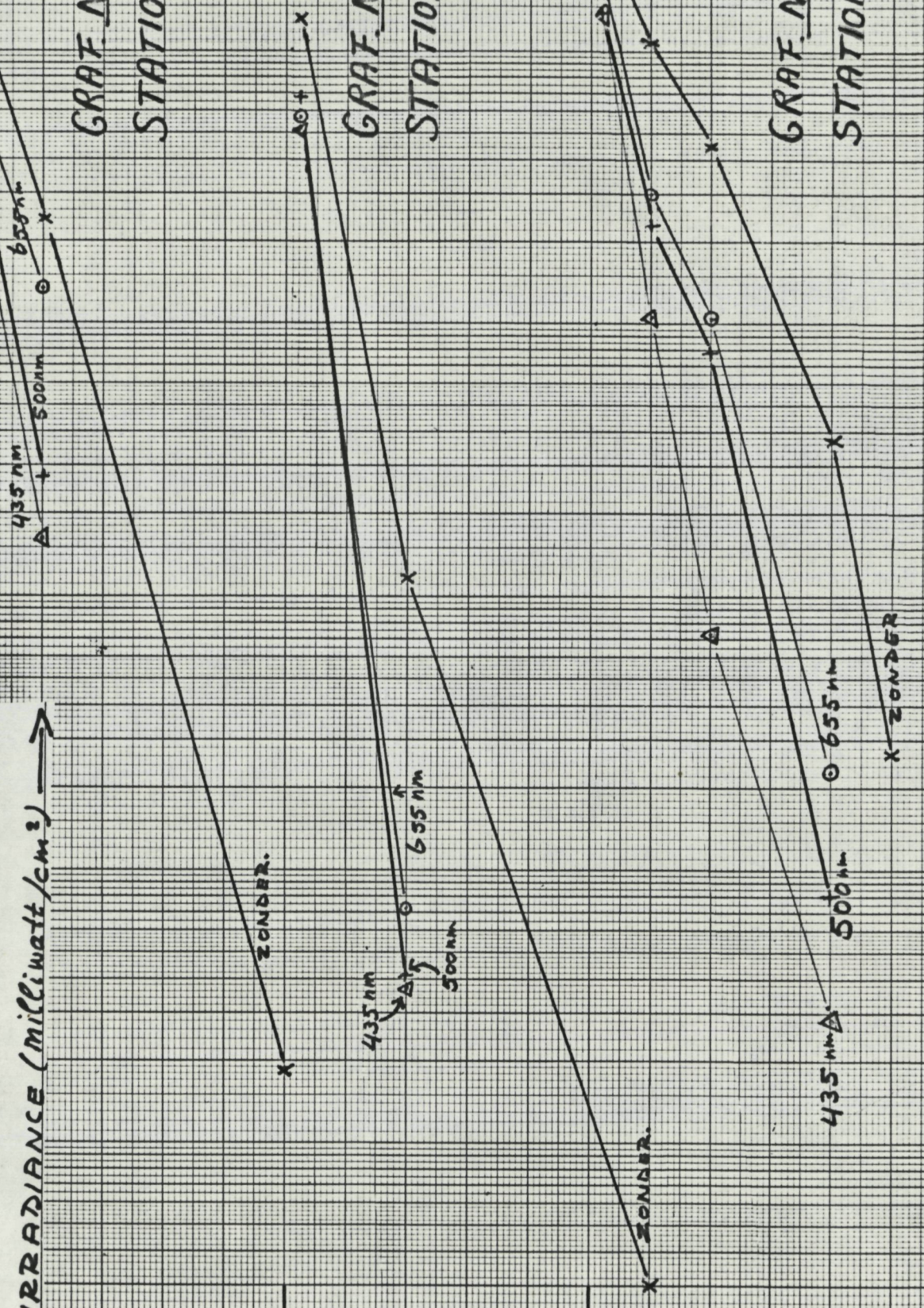
1
0.0001
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹
0.001
2
3
4
5
6
7
8
9
10²
0.01
2
3
4
5
6
7
8
9
10³
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁵
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁶
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁷
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁸
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁰
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹¹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹²
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹³
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁴
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁵
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁶
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁷
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁸
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10¹⁹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁰
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²¹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²²
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²³
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁴
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁵
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁶
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁷
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁸
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10²⁹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁰
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³¹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³²
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³³
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁴
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁵
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁶
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁷
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁸
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10³⁹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁰
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴¹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴²
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴³
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁴
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁵
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁶
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁷
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁸
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁴⁹
0.1
2
3
4
5
6
7
8
9
10⁵⁰

IRRADIANCE (milliwatt/cm²)

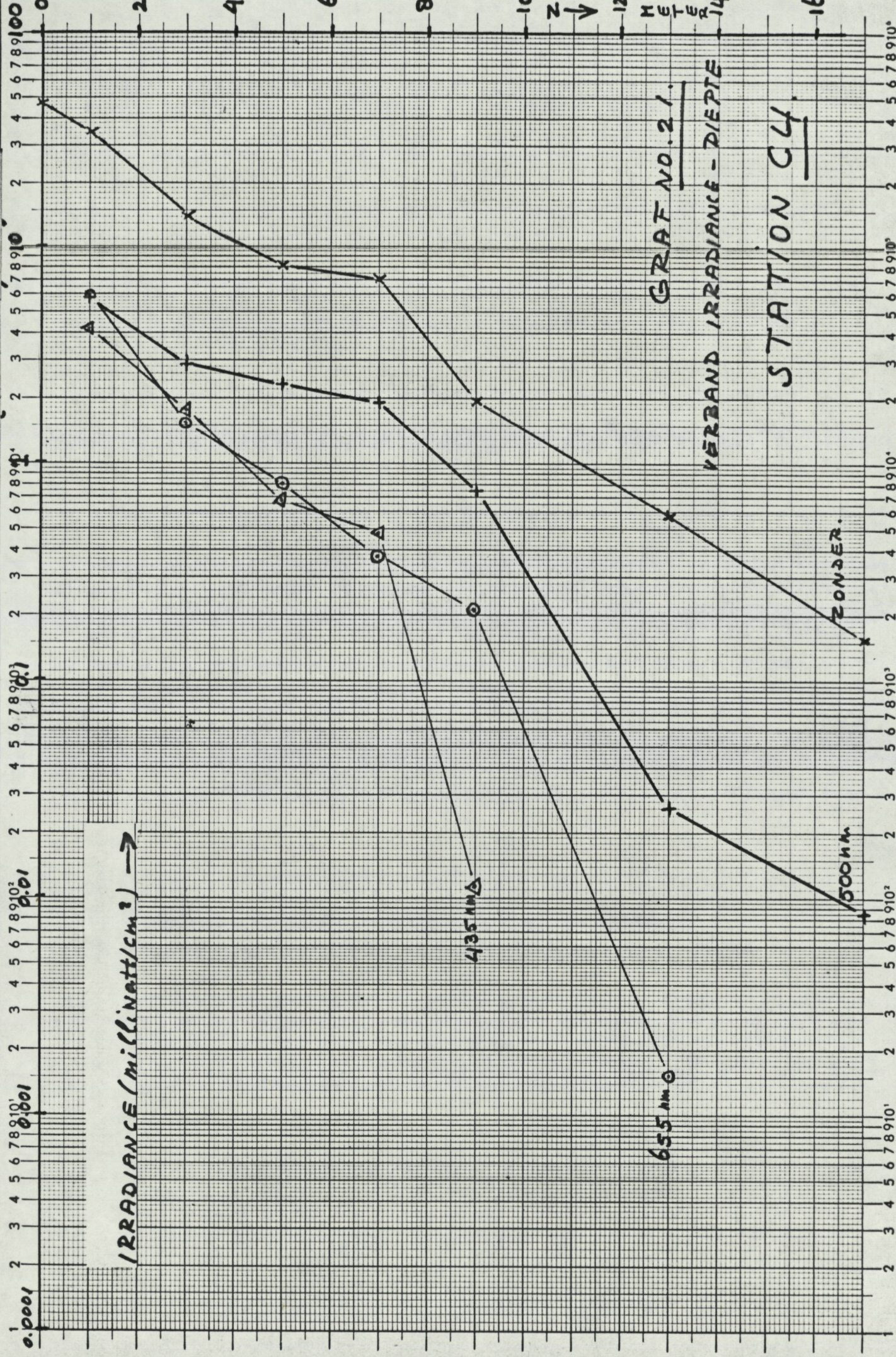
GRAF. NO. 16
STATION B5.

GRAF. NO. 17
STATION B6.

GRAF. NO. 18
STATION C1.



VERBAND IRRADIANCE - DIETERE



IRRADIANCE (milliwatt/cm²) →

435 nm

655 nm

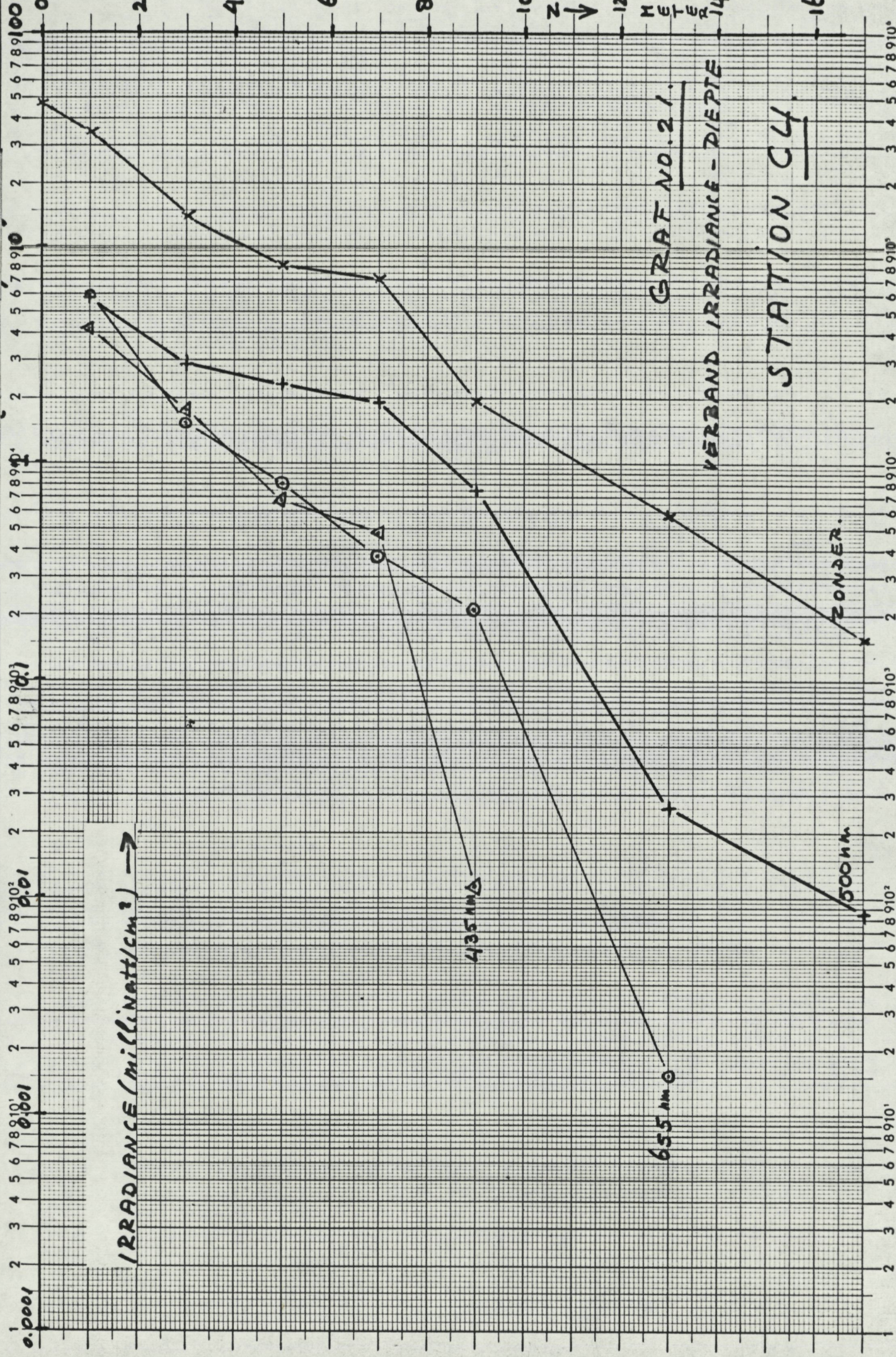
500 nm

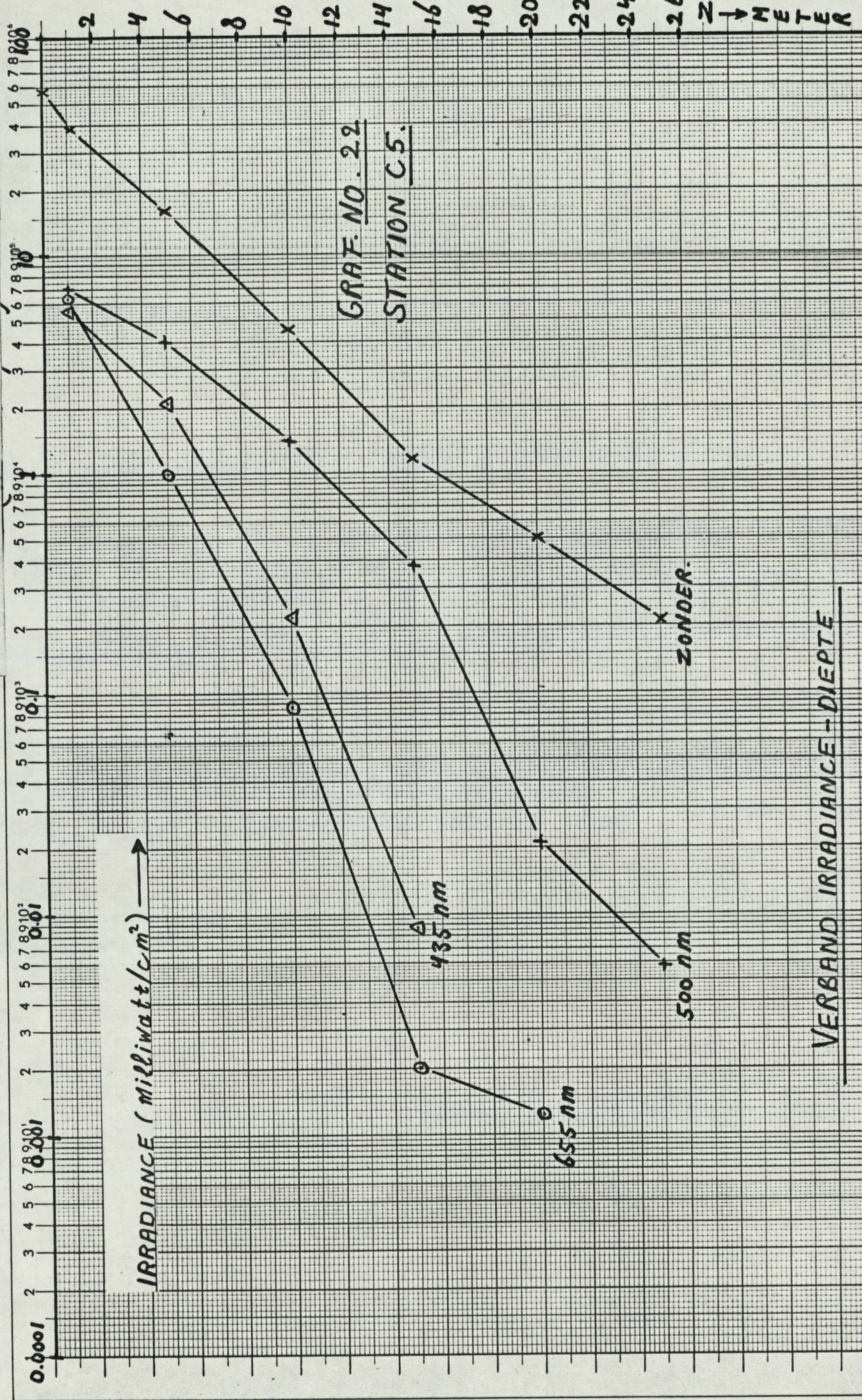
GRAF NO. 21.

VERBAND IRRADIANCE - DIEPTE

STATION C4.

ZONDER.



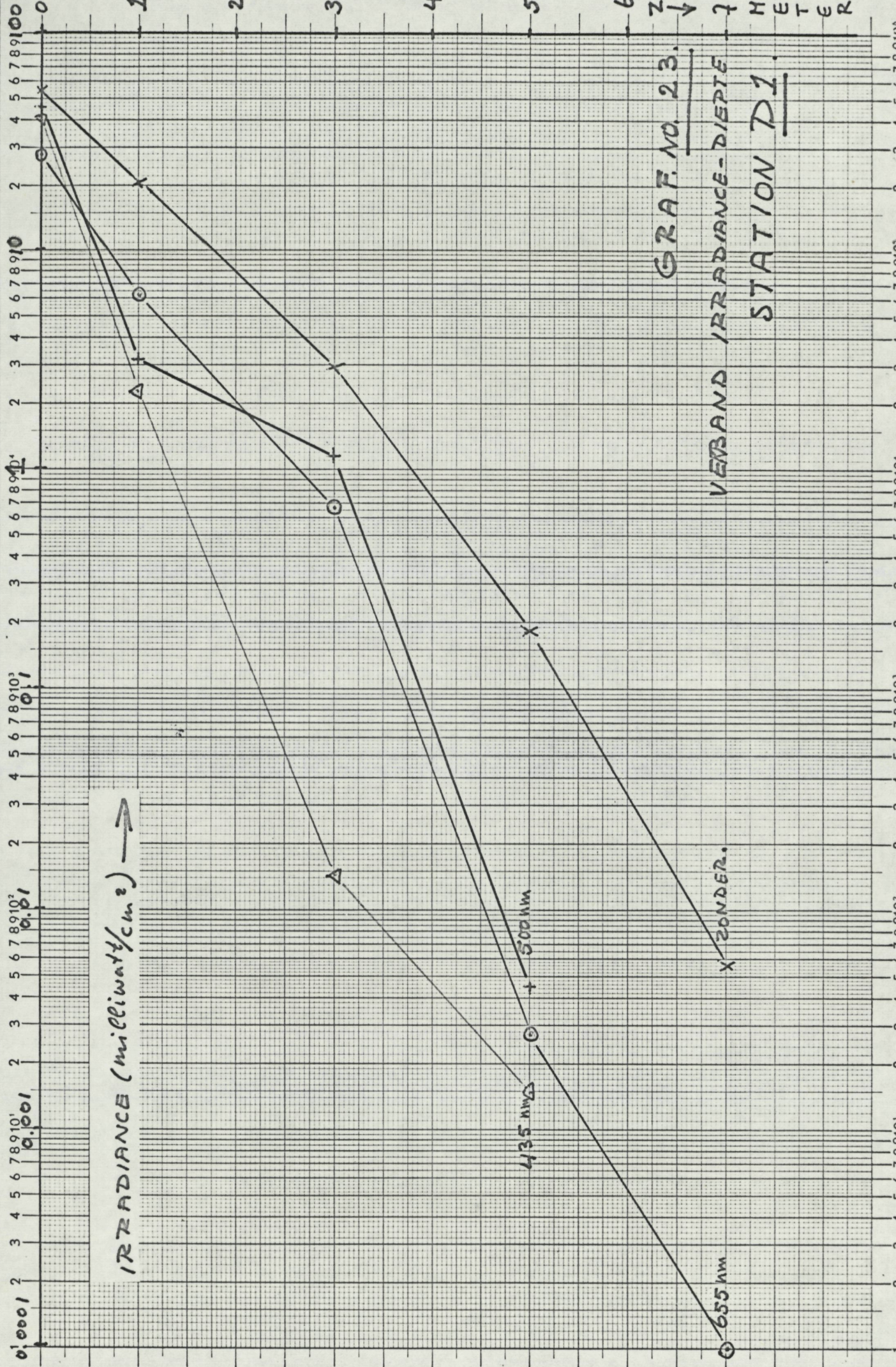


VERBAND IRRADIANCE-DIEPTE

GRAF. NO. 23.

VERBAND IRRADIANCE-DIEPTE

STATION D1.



0.0001 2 3 4 5 6 7 8 9 0.001 2 3 4 5 6 7 8 9 0.01 2 3 4 5 6 7 8 9 0.1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 1 2 3 4 5 6 7 8 9 100

IRRADIANCE (milliwatt/cm²) →

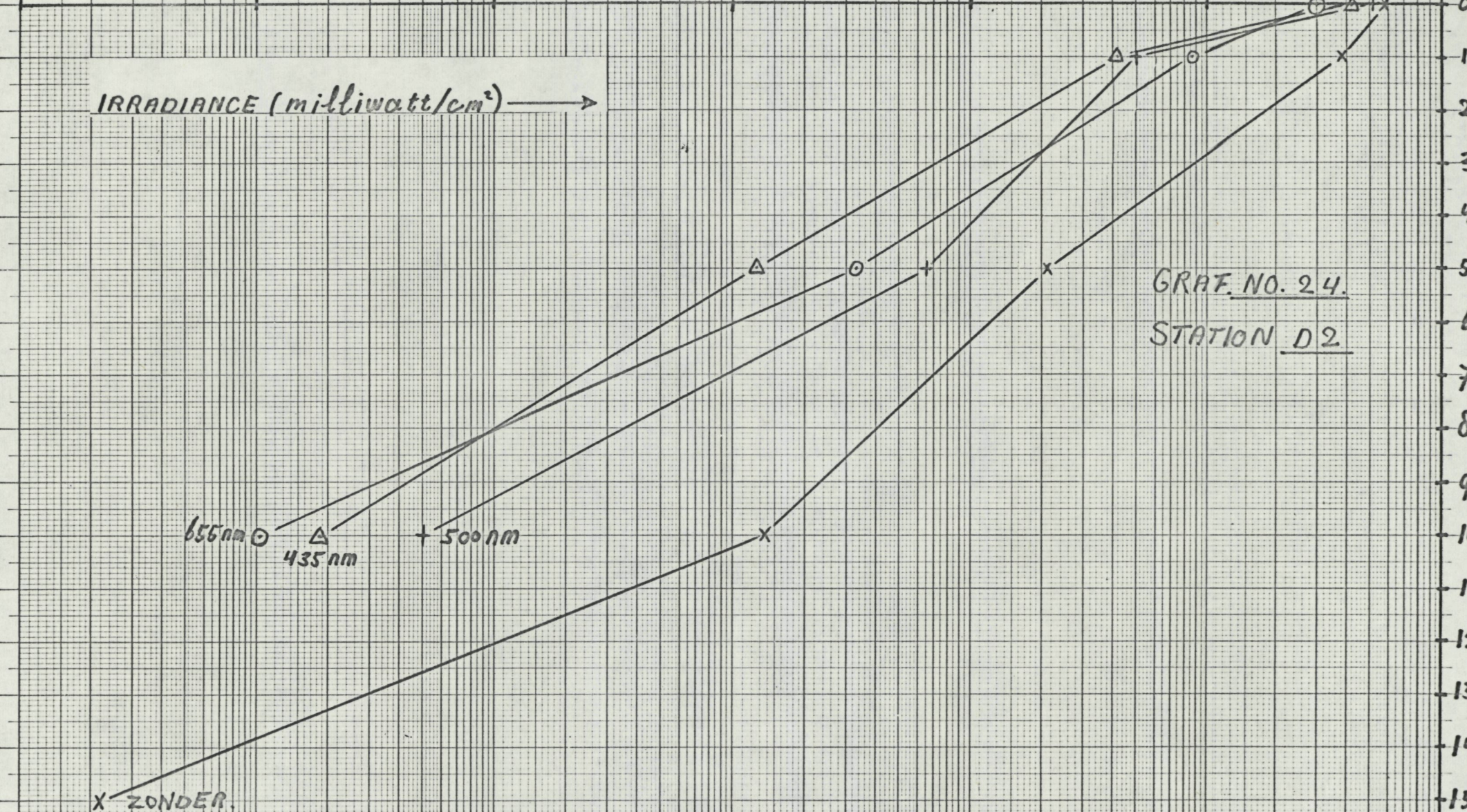
GRAF. NO. 24.
STATION D2

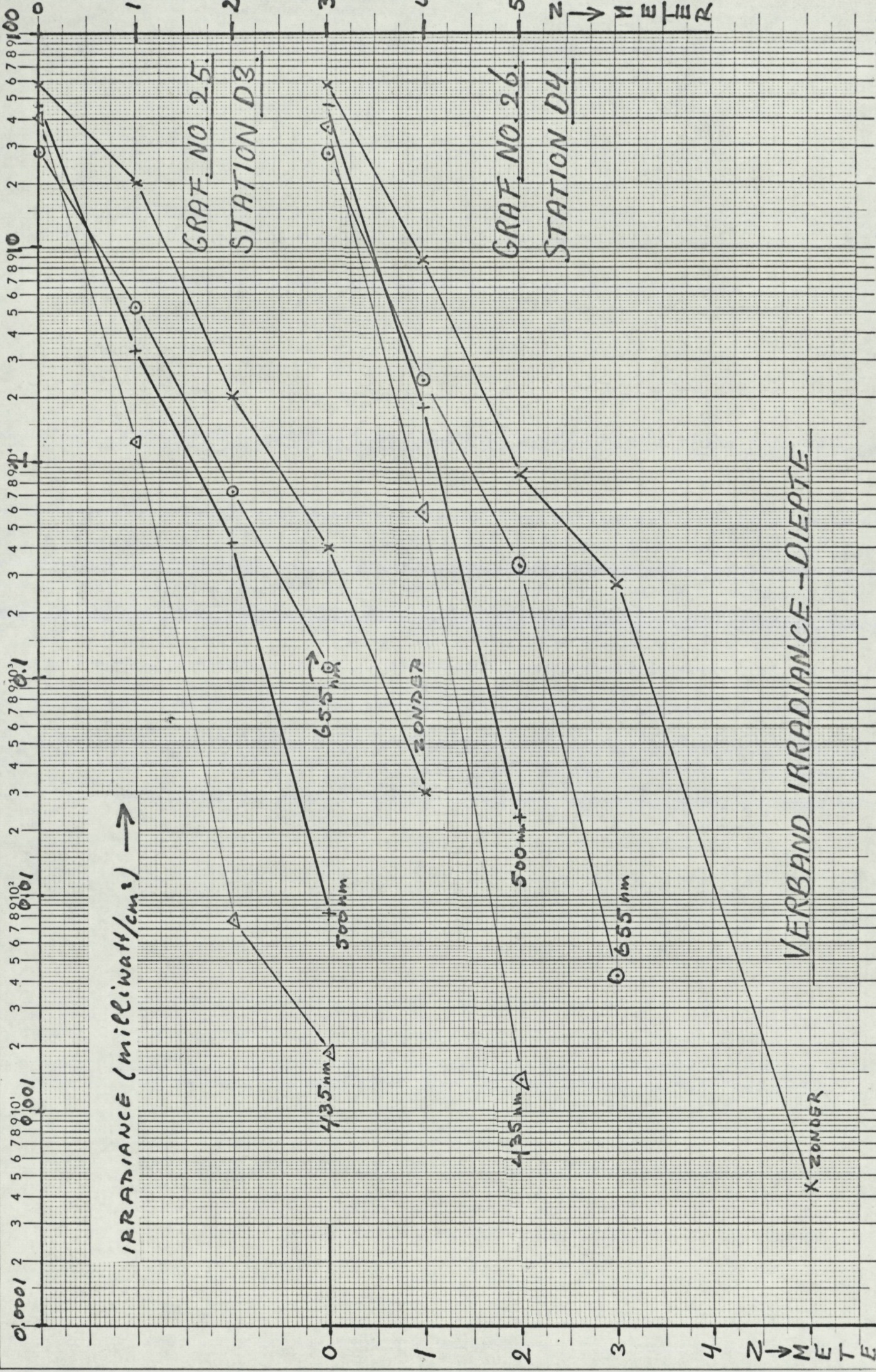
655 nm ○
435 nm △
500 nm +

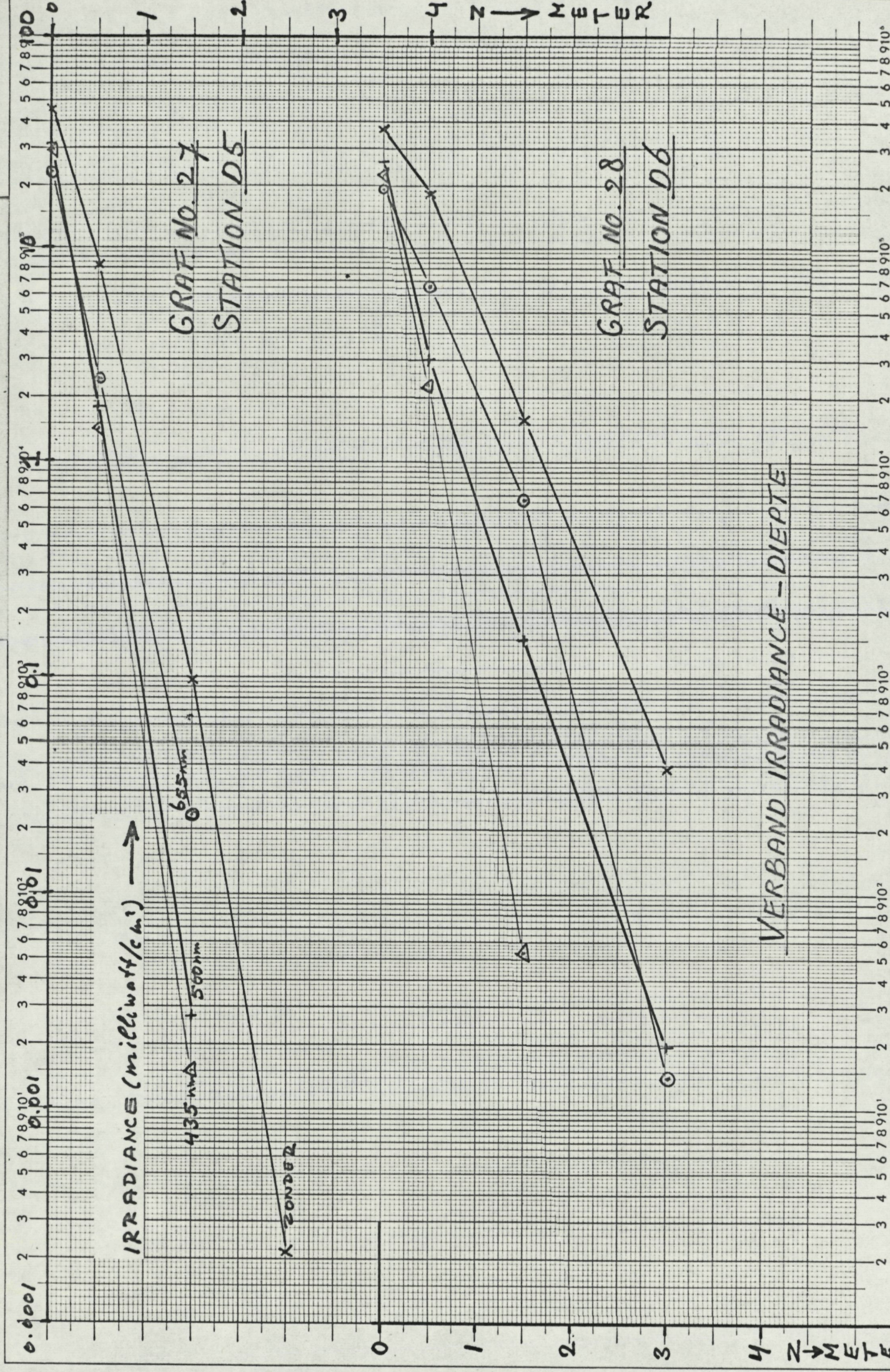
X ZONDER.

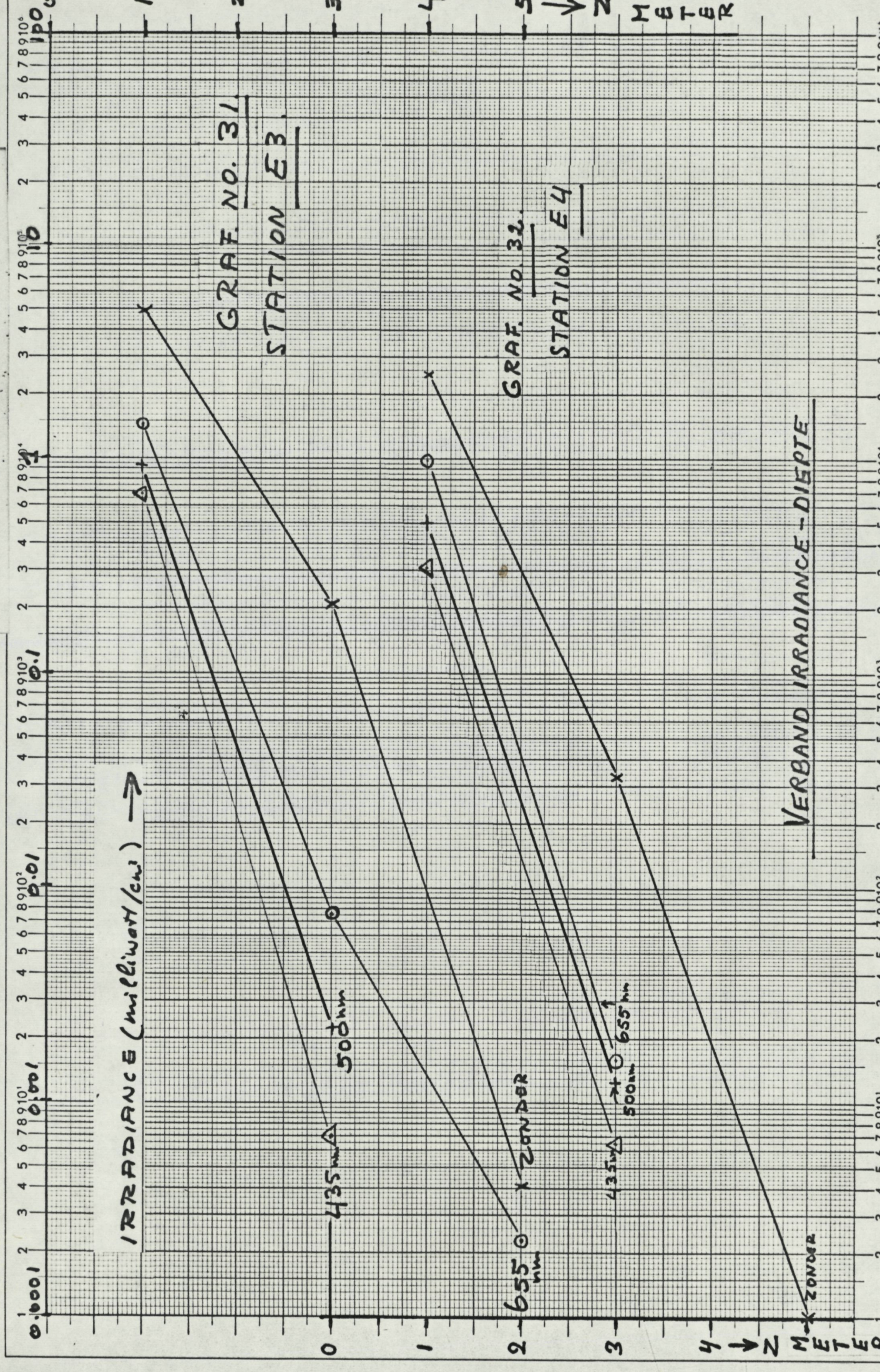
VERBAND IRRADIANCE - DIEPTE

Z
I
V
E
T









IRRADIANCE (milliwatt/cm²) →

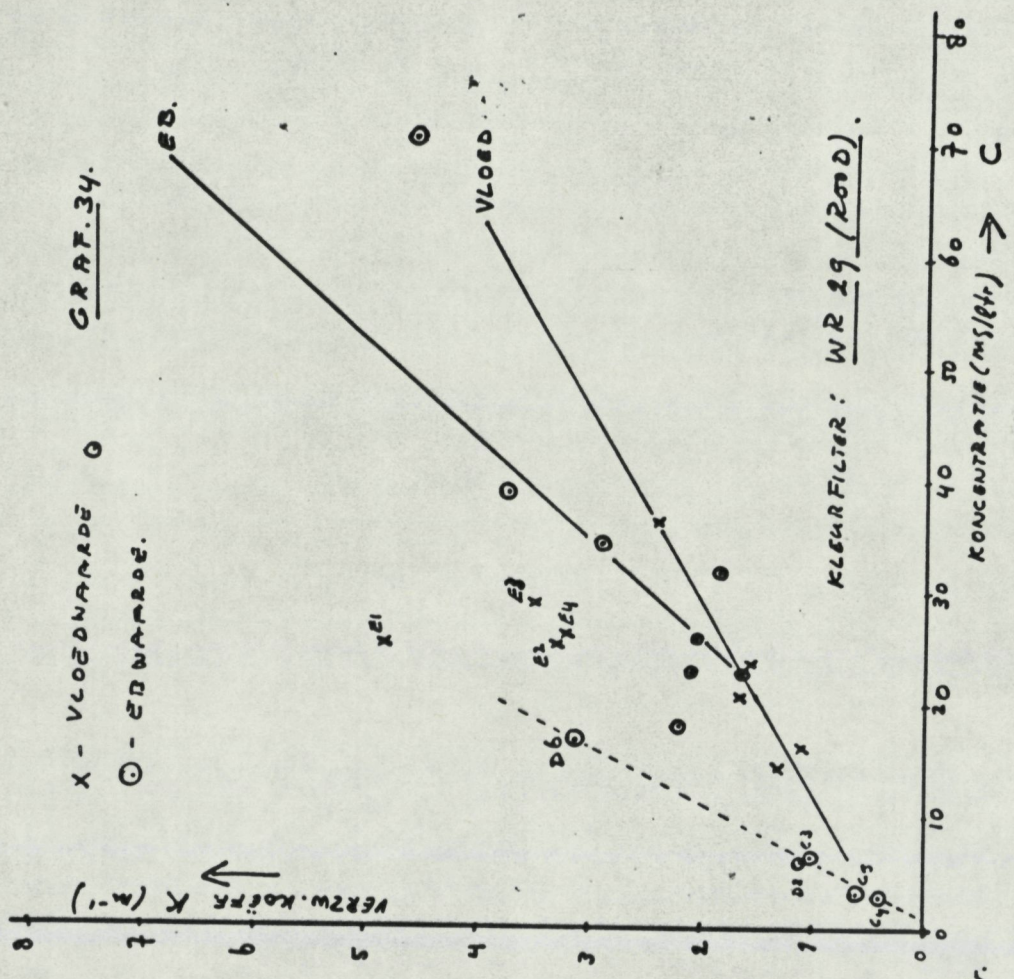
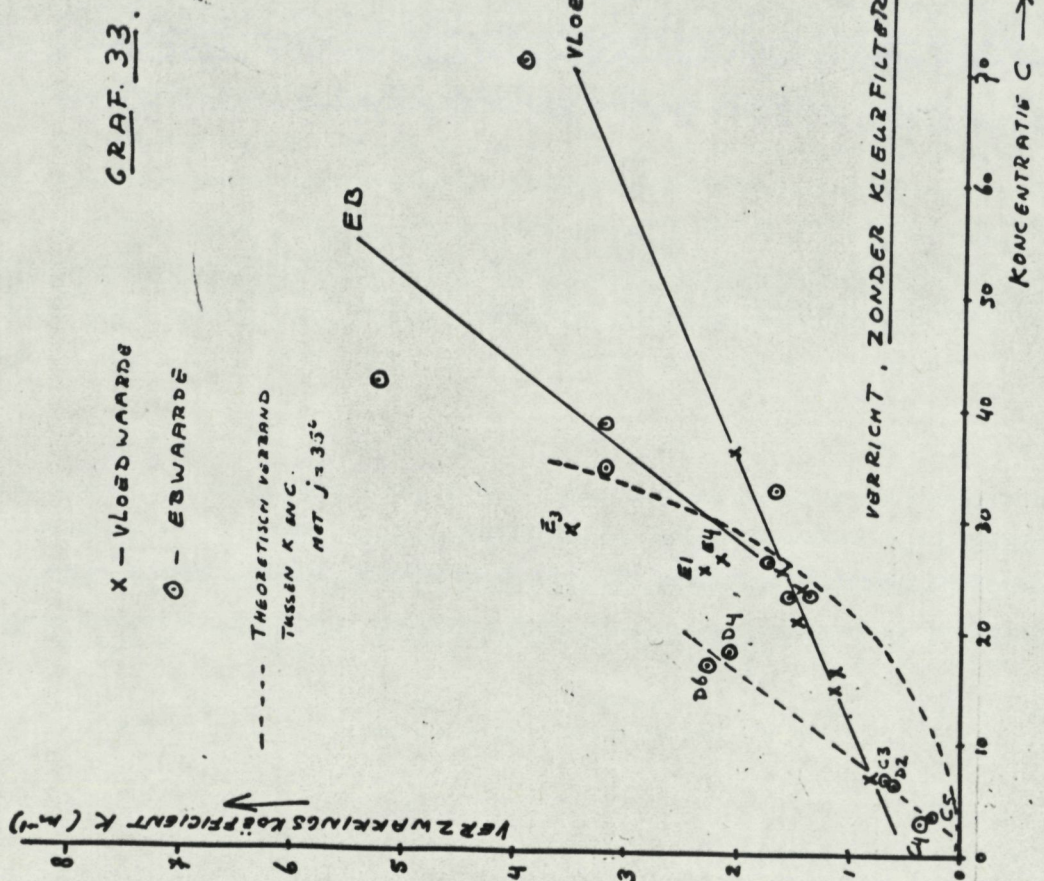
GRAF. NO. 31.
STATION E3

GRAF. NO. 32.
STATION E4

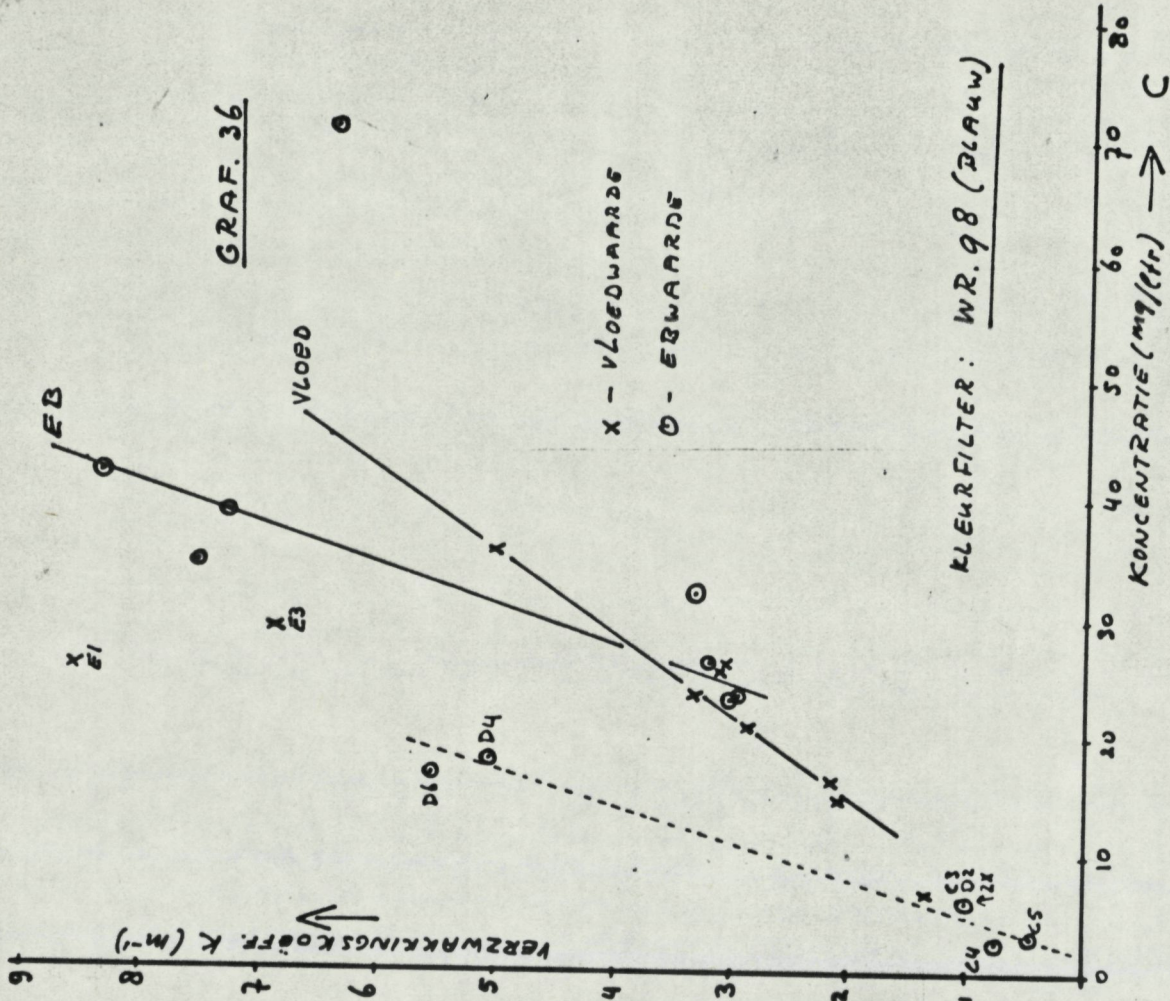
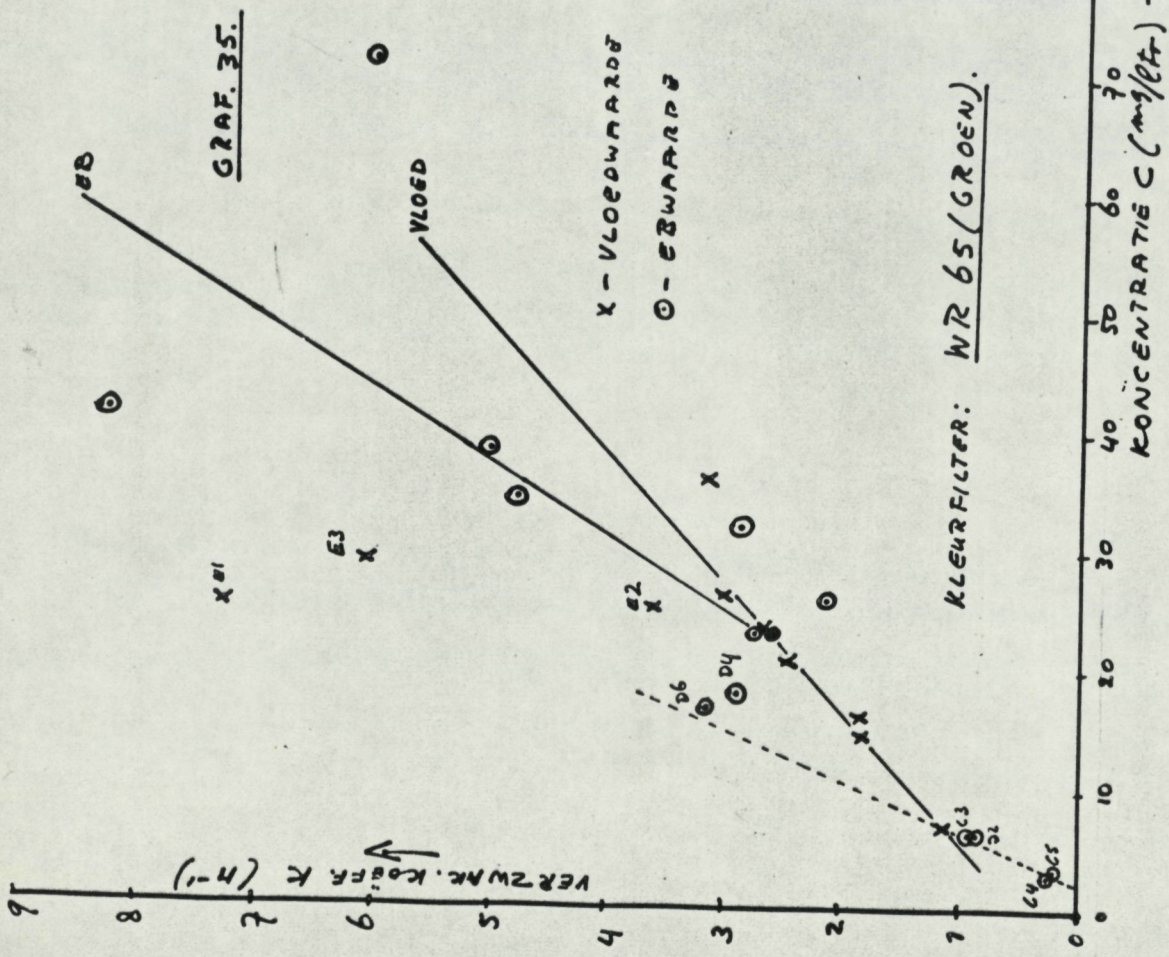
VERBAND IRRADIANCE-DIEPTE

↓ Z METER

4 ↓ Z METER



VERBAND VERZWAK. KOEFF. K EN KONCENTRATIE C.
 VOOR METINGEN OP 2.7.8.9 EN 16 APRIL



VERBAND VERZW. KOEFF. K EN KONCENTRATIE C
 VOOR METINGEN OP 2, 7, 8, 9 EN 16 APRIL

GRAF. 37.

VERBAND VERZWAK. KOEFF. K

(GEMIDD. WAARDE OVER ΔZ = SECCMI-DIEPTÉ - OPP.)

EN $\frac{1}{S}$ (S = SECCMI-DIEPTÉ)

KLEURFILTER: GEËEN

VERZWAK. KOEFF. K (m⁻¹)

NOORDDEESTATIONS

$\alpha = 2.14$

$\alpha = 3.75$

$K = \alpha \frac{1}{S} + \beta$

