

**KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT**

Verslagen

V-312

H.R.A. Wessels

**Correcties voor voorwaarts verstrooid licht bij
transmissometers (K.N.M.I. korte basis).**

De Bilt, 1979

Publikatienummer: K.N.M.I. V-312.

Kon. Nederlands Meteorologisch Instituut,
Postbus 201,
3730 AE De Bilt,
Nederland.

U.D.C.: 551.508.92

1. Inleiding en samenvatting.

In de zestiger jaren werden in de burgerluchtvaart mogelijkheden tot het starten en landen bij runway-visual-range (RVR)-waarden beneden 500 m gerealiseerd. De toen aanwezige transmissometers met een basislengte van 160 m zijn bij een RVR beneden 300 m (overdag) à 500 m ('s nachts) onvoldoende nauwkeurig. Daarom werden gedurende de laatste jaren transmissometers met een basislengte van 16 m aan de bestaande apparaten toegevoegd.

Bij nader onderzoek, dat in paragraaf 2 is samengevat, werd geconcludeerd, dat in het gebruikte ontwerp detectors met een te groot gezichtsveld waren toegepast. Dit geeft aanleiding tot fouten ten gevolge van voorwaarts verstrooid licht. Dientengevolge kan de RVR met maximaal ca. 15% overschat worden. Met de in paragraaf 5 gepresenteerde tabellen wordt voor het gemiddelde effect van deze fout gecorrigeerd. De dan nog resterende afwijkingen zullen in het algemeen minder dan $\pm 6\%$ bedragen.

2. Korte beschrijving van het onderzoek betreffende de strooilichtfout.

Transmissometers meten de hoeveelheid licht, die uit een lichtbundel (tussen een projector en een detector) wordt onderschept ten gevolge van reflectie, breking en buiging (= verstrooiing) aan de zich in die bundel bevindende mistdruppeltjes of andere aerosoldeeltjes. Het is echter niet te vermijden dat een deel van het aan die deeltjes voorwaarts verstrooide licht toch in de detector komt. Dit geldt te meer naarmate de openingshoek van de detector groter is.

Dit probleem is eerder onderzocht door Middleton (1949), maar diens resultaten zijn niet algemeen toepasbaar op een willekeurige transmissometer. Daarom zijn theoretische berekeningen uitgevoerd waarbij:

- a. voor de (axiaal symmetrische) apertuur van zowel projector als detector twee varianten zijn onderscheiden voor zowel de lichtsterkte van de projector als de gevoeligheid van de detector:
 - a.1. tot de rand van de apertuur constant, daarbuiten nul, resp.
 - a.2. naar de rand van de apertuur geleidelijk afnemend.

b. homogeen verdeelde waterdruppel-aerosolen met de Mie-theorie zijn doorgerekend voor resp.:

b.1. uniforme druppeltjes

b.2. druppels verdeeld volgens een zg. gammaverdeling

b.3. een realistisch bimodaal spectrum.

Het biedt voordelen om de strooilichtfout te definiëren als de relatieve fout in de transmissie $(T' - T)/T$ gedeeld door de totale extinctie $\ln(1/T)$ tussen projector en detector, dus

$$S = \frac{T - T'}{T \ln T} \quad (1)$$

- ad b1, a1. Voor een uniforme druppelspectrum d.w.z. bij gegeven verhouding α tussen de druppeldiameter a en de golflengte λ

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \quad (2)$$

blijkt als resultaat van numerieke berekeningen dat de strooilichtfout S onafhankelijk is van de basislengte van de transmissometer, maar uitsluitend een functie is van de halve openingshoeken θ en ψ van resp. projector en detector. Zie hiervoor de gestreepte krommen in fig. 1.

- ad b1, a2. De getrokken krommen in fig. 1 geven de resultaten voor een projectorbundel, waarvan de intensiteit als functie van de hoek θ met de as afneemt volgens

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{\pi \theta}{2} \right) \quad (3)$$

met θ als de openingshoek, waardoor de lichtintensiteit tot 50% van de axiale waarde gedaald is. Vergelijking (3) vormt een goede benadering voor intensiteitsverdelingen, die bij transmissometerlampen gemeten zijn.

De verschillen tussen beide series krommen in fig. 1 zijn blijkbaar gering. Een eventuele hoek-afhankelijke detectorgevoeligheid kan op analoge wijze verwerkt worden en blijkt dan eveneens weinig invloed te hebben.

- ad b2. De resultaten ad a1. blijven vrijwel ongewijzigd geldig voor een niet-uniform spectrum van mistdruppels, zoals bijvoorbeeld een gamma-verdeling. De druppeldiameter a in vergelijking (2) moet dan vervangen worden door de diameter, die het meest tot de waterinhoud bijdraagt.
- ad b3. De totale zichtverslechtering in mist kan gedeeltelijk worden toegeschreven aan de groei van alle hygroscopische condensatiekernen in vochtige lucht, maar voor het merendeel aan het geringere aantal kernen dat tot echte mistdruppeltjes uitgroeit. Het onderscheid tussen beide categorieën druppels ligt ongeveer bij een diameter van 5 μm . Kleinere druppels vertonen wat betreft de verdeling van het verstrooide licht een minder uitgesproken maximum in voorwaartse richting en zij dragen daarom vrijwel niet bij tot de strooilichtfout, Toch kunnen ze - vanwege hun grote aantal - een aanzienlijk deel van de extinctie voor hun rekening nemen.

De uit fig. 1 af te lezen fout houdt slechts rekening met de berekende extinctie van de "grote" druppels. De werkelijke waarde van S (bij gegeven T) kan daarom iets kleiner zijn.

3. Experimentele vaststelling van de strooilichtfout; Correcties voor de Cabauw-zichtmeter.

Bij gegeven θ , ψ en T kan de druppelgrootte-parameter α nog verschillende waarden hebben, zodat zelfs bij een uniform druppelspectrum niet te verwachten is, dat bij een gegeven transmissie een vaste waarde van de fout S hoort. Eventuele correcties voor deze fout moeten daarom experimenteel worden vastgesteld en dan uiteraard gebaseerd zijn op de mistdruppelspectra die op de betreffende locatie het meeste voorkomen.

Ten behoeve van een experimentele verificatie van de resultaten van paragraaf 2 was een transmissometer beschikbaar met $\theta = \psi = 0.0015$ rad volgens variant a1. Mits $\alpha < 200$ blijft vertoont dit instrument vrijwel geen strooilichtfout (vgl. fig. 1).

Deze goede transmissometer is onder meer vergeleken met een transmissometer zoals te Cabauw wordt gebruikt voor mistonderzoek langs de 200 m mast.

Bij deze vergelijking echter, was de basislengte 16 m in plaats van de te Cabauw gebruikte 10 m. De verdere specificaties worden in paragraaf 4 vermeld.

De resultaten van de vergelijking zijn in fig. 2 geïllustreerd. Teneinde op paragraaf 2 aan te sluiten zijn de gemeten verschillen ook omgewerkt met vergelijking (1) en vervolgens in fig. 3 geplot. De opgetreden S-waarden vertonen bij gegeven transmissie een grote spreiding. Met lineaire regressie blijkt dat de fout S bij afnemende transmissie iets toeneemt (zie lijn in fig. 3).

De grote spreiding in fig. 3 komt misschien gedeeltelijk op rekening van meetfouten (bijv. spinrag in de lichtbundel). Ook mag geconcludeerd worden dat in verschillende misten zeer verschillende druppelgrootten kunnen overheersen. De "effectieve" α kan blijkbaar zo groot worden dat fouten nabij de maximale waarde (ca. 0.5) mogelijk zijn.

Hoewel er een goed lineair verband tussen T' en T bestaat (streeplijn in fig. 2) is een daarop gebaseerde correctie niet realistisch bij lage transmissies, omdat bij $T = 0$ ook $T' = 0$ moet zijn. Gezien het voorgaande ligt het voor de hand de regressielijn uit fig. 3 voor correcties te benutten. De betreffende "S"-lijn is ook in fig. 2 weergegeven.

Voor toepassing van deze correcties te Cabauw gelden twee restricties. Ten eerste kan op grotere hoogte het druppelspectrum i.h.a. afwijken ten opzichte van dat aan de grond, ook al zou de transmissie gelijk zijn. Ten tweede wordt bij 10 m basislengte dezelfde transmissie pas in een dichtere mist bereikt. Beide factoren hebben tot gevolg dat bij gegeven transmissie de druppels wat groter zullen zijn dan bij de in fig. 2 gebruikte metingen. De afwijkingen te Cabauw worden daarom misschien door fig. 2 en fig. 3 wat onderschat.

4. Correcties voor de korte-basis-transmissometer.

Voor het onderhavige probleem resteert nog de vertaling van de resultaten van fig. 2 naar de 16 m transmissometers van de vliegvelden.

In die apparaten wordt dezelfde lamp gebruikt als te Cabauw: Philips Attralux PAR-36; 6V, 35W. Uit metingen blijkt dat de lichtverdeling aan vergelijking (3) voldoet met $\theta = 0.035$ rad.

De openingshoek van de Cabauw-detector wordt bepaald door een diafragma (straal $r_1 = 5$ mm) met op een afstand $l = 328$ mm daarachter een lichtgevoelige cel met gemiddelde straal $r_2 = 2$ mm. Bij de zg. korte-basis-transmissometer bevindt zich een detectorcel met een straal van 5,5 mm op 624 mm achter eenzelfde voorste diafragma. Andere diafragma's in de detector spelen geen rol ten aanzien van het gezichtsveld, doch dienen om storend daglicht te onderscheppen en om luchtstromingen in de detector te verminderen.

De effectieve openingshoek Ψ van beide detectors, d.w.z. de hoek waarbij de gevoeligheid ten opzichte van de as gehalveerd is, volgt uit eenvoudige geometrische overwegingen (fig. 4). We onderstellen dat het gevoelige deel van de cel cirkelvormig is met straal r_1 . Het deel van het cel oppervlak, dat rechtstreeks licht van buiten kan ontvangen, is dan

$$\frac{1}{2\pi r_1^2} \left(r_1^2 \arccos \frac{r_1^2 + l^2 \psi^2 - r_2^2}{2r_1 l \psi} + r_2^2 \arccos \frac{r_2^2 + l^2 \psi^2 - r_1^2}{2r_2 l \psi} - r_1 l \psi \sin \arccos \frac{r_1^2 + l^2 \psi^2 - r_2^2}{2r_1 l \psi} \right). \quad (4)$$

Als ψ oploopt van $(r_1 - r_2)/l$ tot $(r_1 + r_2)/l$, daalt de fractie (4) van 1 tot 0. Voor de effectieve openingshoek moet (4) de uitkomst 0.5 leveren. We vinden zo $\Psi = 0.0148$ rad en $\Psi = 0.0075$ rad voor resp. de Cabauw en de 16 m vliegveld-transmissometers. Deze hoeken hangen vooral af van r_2 en l en slechts weinig van r_1 .

Het is onder bepaalde voorwaarden mogelijk om de meetresultaten van fig. 2 om te rekenen naar een transmissometer met een twee keer kleinere detector-apertuur. Men kan bijvoorbeeld fig. 1 gebruiken en bij gelijke α en θ van kromme "C" naar kromme "K" gaan.

Voor waarden van $\alpha < \text{ca. } 70$ blijkt dit neer te komen op een halvering van de fout S , maar als (voor grote α) de fout al bijna maximaal is, heeft verkleinen van de openingshoek veel minder effect.

De hier aangegeven procedure is niet geheel correct omdat het mistdruppelspectrum in het algemeen bimodaal is, zodat α niet precies gedefinieerd is en fig. 1 niet exact geldig. Omdat de bovengenoemde reductie-factor (bij overgang "C" \rightarrow "K") maar langzaam varieert bij toenemende α , zal het eindresultaat toch voldoende nauwkeurig zijn.

Het resultaat van de omrekening is in fig. 5 weergegeven. Ook hier is lineaire regressie van S tegen T toegepast.

5. Conclusies, correctietabellen.

In analogie met de Cabauw-zichtmeters (paragraaf 3) kan de in fig. 5 gepresenteerde regressielijn gebruikt worden voor correctie van de KNMI-16 m-transmissometers, die rond 1977 op de vliegvelden in gebruik kwamen. De afgelezen transmissie T' moet dan verminderd worden met

$$T - T' = - T \ln T (0.122 - 0.059T). \quad (5)$$

Desgewenst kan ook een expliciete formule voor T als functie van T' worden opgesteld. Met een dergelijke correctie vervangen we een min of meer grote overschatting van het zicht door een veel geringere over- of onderschatting.

Met behulp van de transmissie wordt op de vliegvelden in een speciale kleine computer de RVR bepaald. Invoergegevens zijn de transmissie T , de basislengte L , de met de Rijksluchtvaartdienst afgesproken baanlichtintensiteit I en de bij de heersende achtergrondhelderheid behorende gemiddelde drempelgevoeligheid E_d van het oog. Tabel I geeft de ongecorrigeerde transmissiegrenzen (in % opgegeven) tussen welke bepaalde RVR-waarden gemeld moeten worden. De kop van de tabel vermeldt de gebruikte formules voor vurenzicht en soms voor dagzicht (T^* ; overdag te gebruiken indien kleiner dan T).

Binnen het omliggende gebied is de nauwkeurigheid van de RVR-bepaling beter dan 5% indien tenminste de transmissie op 1% nauwkeurig is (Schonwald en Müller, als geciteerd in Middleton 1952, p. 199).

Tabel II geeft de met vergelijking (5) gevonden correcties op de 16 m-kolommen van Tabel I. In het zichtgebied waarvoor de korte basis bestemd is, kan de onderhavige correctie maximaal één klasse verschil opleveren. Zo zal in plaats van 200 m na correctie meestal 175 m gerapporteerd worden.

Strikt genomen vertoont ook de lange-basis-transmissometer een strooilichtfout, doch die blijft i.h.a. beneden 1%, hetgeen van dezelfde orde van grootte is als andere meetfouten. Van correcties voor de 160 m-basis-transmissometers is daarom afgezien.

Het vermijden van de strooilichtfout is natuurlijk te verkiezen boven de toepassing van correcties. Bij het onderhavige instrument zal daartoe de detector-opening ca. 5x kleiner moeten worden (o.a. uit fig. 1 af te leiden). Dit heeft echter het grote nadeel dat de detector niet de gehele lamp zou "zien", zodat de uitrichting zeer kritisch wordt. Een goede 16 m-basis-transmissometer moet daarom ook met een andere projector zijn toegerust.

Lijst van symbolen.

L	basislengte van transmissometer.
R	runway visual range (RVR).
I	baanlichtintensiteit in richting piloot.
E_d	drempelgevoeligheid van oog.
T, T'	transmissie, afgelezen op transmissometer, resp. exact gemeten en met strooilichtfout.
T^*	transmissie behorend bij meteorologisch dagzicht voor 5% contrast.
S	genormaliseerde strooilichtfout.
θ, ψ	hoeken t.o.v. optische as gemeten vanuit projector resp. detector.
θ, Ψ	halve openingshoek van de projector (detector) dan wel de hoek waarvoor de lichtsterkte (gevoeligheid) tot 50% van de waarde op de as is gedaald.

- l, r_1, r_2 ontwerpgegevens detector (fig. 4).
 a druppeldiameter.
- $\alpha = \frac{a\pi}{\lambda}$ grootteschaal ten opzichte van de golflengte λ
van het gebruikte licht.

Literatuur.

- W.E. Knowles Middleton 1949 The effect of the angular aperture of a telephotometer on the telephotometry of collimated and non-collimated beams. *J. Opt.Soc.Am.*, **39**, 576-581.
- W.E. Knowles Middleton 1952 Vision through the atmosphere. Univ. of Toronto, o.a. pp. 177 e.v.

TRANSMISSOMETER-TABLE I (cf. Section 5) $100T = 100 \times (E_d r^2 / I)^{L/R}$

$$100T^* = 100 \times e^{-3T/R}$$

I (cd)		E _d (lux)		DAY 10 ⁻³		3.10 ⁻⁴		10 ⁻⁴		3.10 ⁻⁵		10 ⁻⁵		NIGHT 8.10 ⁻⁷	
DAY	NIGHT	R(m)	L(m)	16	160	16	160	16	160	16	160	16	160	16	160
		< 50		7.6		5.1		3.6		2.5		1.7		0.8	
8000	↑	50		21.3		16.4		13.0		10.1		8.0		4.6	
8000		75		34.3		28.3		23.7		19.6		16.4		11.0	
8000		100		45.0		38.6		33.5		28.7		25.0		18.1	
8000		125		53.4	0.2	47.0	0.1	41.8		36.8		32.7		25.0	
8000	I	150		56.9	0.4	51.0	0.1	46.1		41.3		37.4		29.7	
14500		175		61.3	0.8	55.7	0.3	51.0	0.1	46.3		42.4		34.7	
18000		200		69.1	2.5	64.0	1.2	59.7	0.6	55.2	0.3	51.5	0.1	43.8	
20000		250		74.8	5.5	70.1	2.9	66.1	1.6	62.0	0.8	58.5	0.5	51.1	0.1
21000	↓	300		79.0	9.5	74.8	5.5	71.1	3.3	67.3	1.9	64.0	1.2	60.3	0.6
21000	↑	350		82.3	14.2	78.4	8.8	75.5	5.7	71.5	3.5	68.4	2.3	64.9	1.3
21000		400		84.9	19.4	81.3	12.6	78.2	8.5	74.9	5.6	72.0	3.8	68.7	2.4
20500		450		86.8	24.4	83.6	16.6	80.7	11.7	77.6	7.9	74.9	5.6	71.8	3.7
20500		500		88.5	29.3	85.4	20.7	82.7	15.0	79.9	10.6	77.4	7.7	74.4	5.2
20500		550		89.8	34.0	86.9	24.7	84.4	18.4	81.8	13.4	79.4	10.0	76.7	7.0
20500		600		90.9	38.7	88.3	28.8	85.9	22.0	83.4	16.3	81.2	12.5	78.6	9.0
20000	0.3 I	650		91.9	42.8	89.4	32.5	87.2	25.3	84.8	19.2	82.7	15.0	80.2	11.1
20000		700		92.7	46.9	90.4	36.3	88.3	28.7	86.0	22.2	84.0	17.6	81.7	13.3
19500		750		93.4	50.5	91.2	39.7	89.2	31.9	87.1	25.0	85.2	20.1	83.0	15.4
19500		800		94.5	57.1	92.5	46.1	90.8	37.9	88.8	30.6	87.1	25.2	85.1	19.9
19000		900		95.3*	61.9	93.6	51.7	92.0	43.3	90.2	35.8	88.7	30.0	86.8	24.3
18500	↓	1000		95.7*	64.6	94.4	56.5	92.9	48.1	91.3	40.4	89.9	34.4	89.6	33.3
18500	↑	1100		96.1*	67.0	95.1	60.8	93.8	52.5	92.3	44.7	90.9	38.6	90.7	37.5
18000		1200		96.4*	69.1	95.7	64.4	94.4	56.3	93.0	48.5	91.8	42.4	91.5	41.3
18000		1300		96.6*	71.0	96.2	67.9	95.0	59.8	93.7	52.2	92.5	46.0	92.3	44.8
17500		1400		96.9*	72.6	96.6	70.7	95.5	62.9	94.2	55.3	93.1	49.2	92.9	48.0
17500		1500		97.0*	74.1	97.0	73.4	95.9	65.7	94.7	58.3	93.7	52.2	93.5	51.1
17000	0.1 I	1600		97.2*	75.4	97.2*	75.4	96.2	68.1	95.2	60.8	94.2	54.9	94.0	53.7
17000		1700		97.4*	76.6	97.4*	76.6	96.6	70.5	95.5	63.4	94.6	57.5	94.4	56.3
16500		1800		97.5*	77.7	97.5*	77.7	96.8	72.5	95.9	65.5	95.0	59.7	94.8	58.6
16500		1900		97.6*	78.7	97.6*	78.7	97.1	74.4	96.2	67.6	95.3	61.9	95.1	60.8
16000	↓	2000		97.7*	79.6	97.7*	79.6	97.3	76.1	96.4	69.4	95.6	63.8	96.3	68.8
16000	0.03 I >	> 2000												(95.4 0.1 I)	(62.7 0.1 I)

TRANSMISSOMETER-TABLE II (cf. Section 5) 100T', CORRECTED FOR FORWARD SCATTERING.

I (cd)		E _d (lux)		DAY 10 ⁻³		3.10 ⁻⁴		10 ⁻⁴		3.10 ⁻⁵		10 ⁻⁵		NIGHT 8.10 ⁻⁷	
DAY	NIGHT	R(m)	L(m)	16	160	16	160	16	160	16	160	16	160	16	160
		< 50		9.9		6.9		5.0		3.6		2.5		1.3	
8000		50		24.9		19.7		16.0		12.8		10.4		6.3	
8000		75		38.0		32.1		27.4		23.1		19.7		13.8	
8000		100		48.4		42.2		37.2		32.5		28.7		21.5	
8000		125		56.4		50.3		45.3		40.5		36.4		28.7	
8000	I	150		59.7		54.1		49.5		44.9		41.1		33.5	
14500		175		63.9		58.6		54.1		49.7		45.9		38.4	
18000		200		71.2		66.4		62.4		58.1		54.6		47.3	
20000		250		76.5		72.1		68.4		64.5		61.2		54.2	
21000		300		80.4		76.5		73.0		69.5		66.4		62.9	
21000		350		83.5		79.8		76.7		73.4		70.5		67.2	
21000		400		85.9		82.5		79.7		76.6		73.9		70.8	
20500		450		87.7		84.7		82.0		79.1		76.6		73.7	
20500		500		89.2		86.4		83.8		81.2		78.9		76.1	
20500		550		90.5		87.8		85.4		83.0		80.8		78.3	
20500		600		91.5		89.1		86.8		84.5		82.4		80.0	
20000	0.3 I	650		92.4		90.1		88.0		85.8		83.8		81.5	
20000		700		93.2		91.0		89.1		86.9		85.1		82.9	
19500		750		93.8		91.8		89.9		87.9		86.2		84.1	
19500		800		94.9		93.0		91.4		89.5		87.9		86.1	
19000		900		95.6*		94.0		92.5		90.8		89.4		87.7	
18500		1000		96.0*		94.8		93.4		91.9		90.6		90.3	
18500		1100		96.3*		95.4		94.2		92.8		91.5		91.3	
18000		1200		96.6*		96.0		94.8		93.4		92.3		92.0	
18000		1300		96.8*		96.4		95.3		94.1		93.0		92.8	
17500		1400		97.1*		96.8		95.8		94.6		93.5		93.4	
17500		1500		97.2*		97.2		96.2		95.0		94.1		93.9	
17000	0.1 I	1600		97.4*		97.4*		96.4		95.5		94.6		94.4	
17000		1700		97.6*		97.6*		96.8		95.8		94.9		94.8	
16500		1800		97.7*		97.7*		97.0		96.2		95.3		95.1	
16500		1900		97.8*		97.8*		97.3		96.4		95.6		95.4	
16000		2000		97.8*		97.8*		97.5		96.6		95.9		96.6	
16000	0.03 I	> 2000												(95.7)	

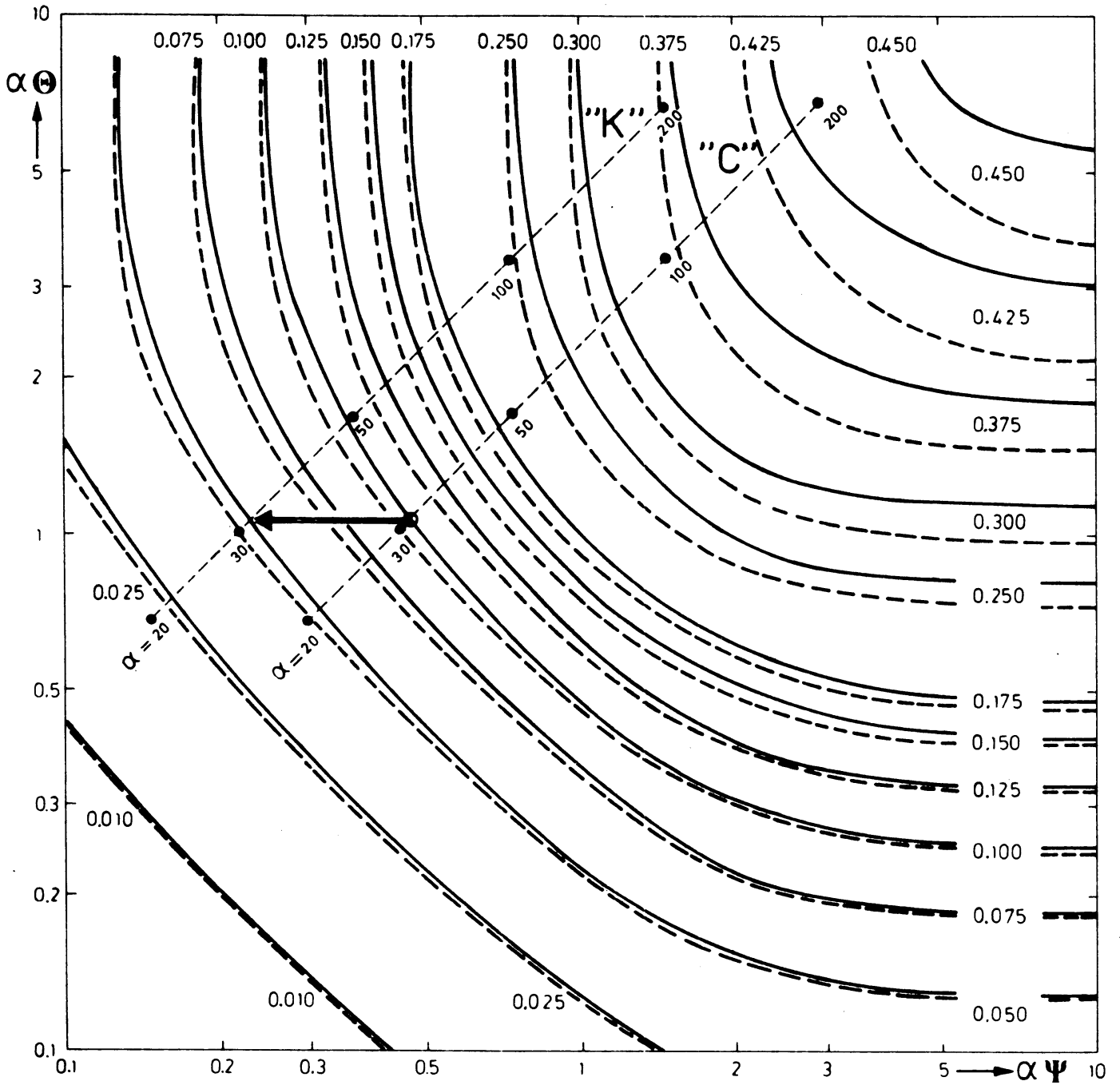


Fig.1. Isopleten van de strooilichtfout S , berekend voor uniforme druppeltjes; resp. voor de in paragraaf 2 beschreven gevallen a. 1 (streeplijnen) en a. 2 (getrokken krommen). Voor twee transmissometers "C" = Cabauw en "K" = vliegvelen, is S als functie van de druppelgrootteparameter α af te lezen.

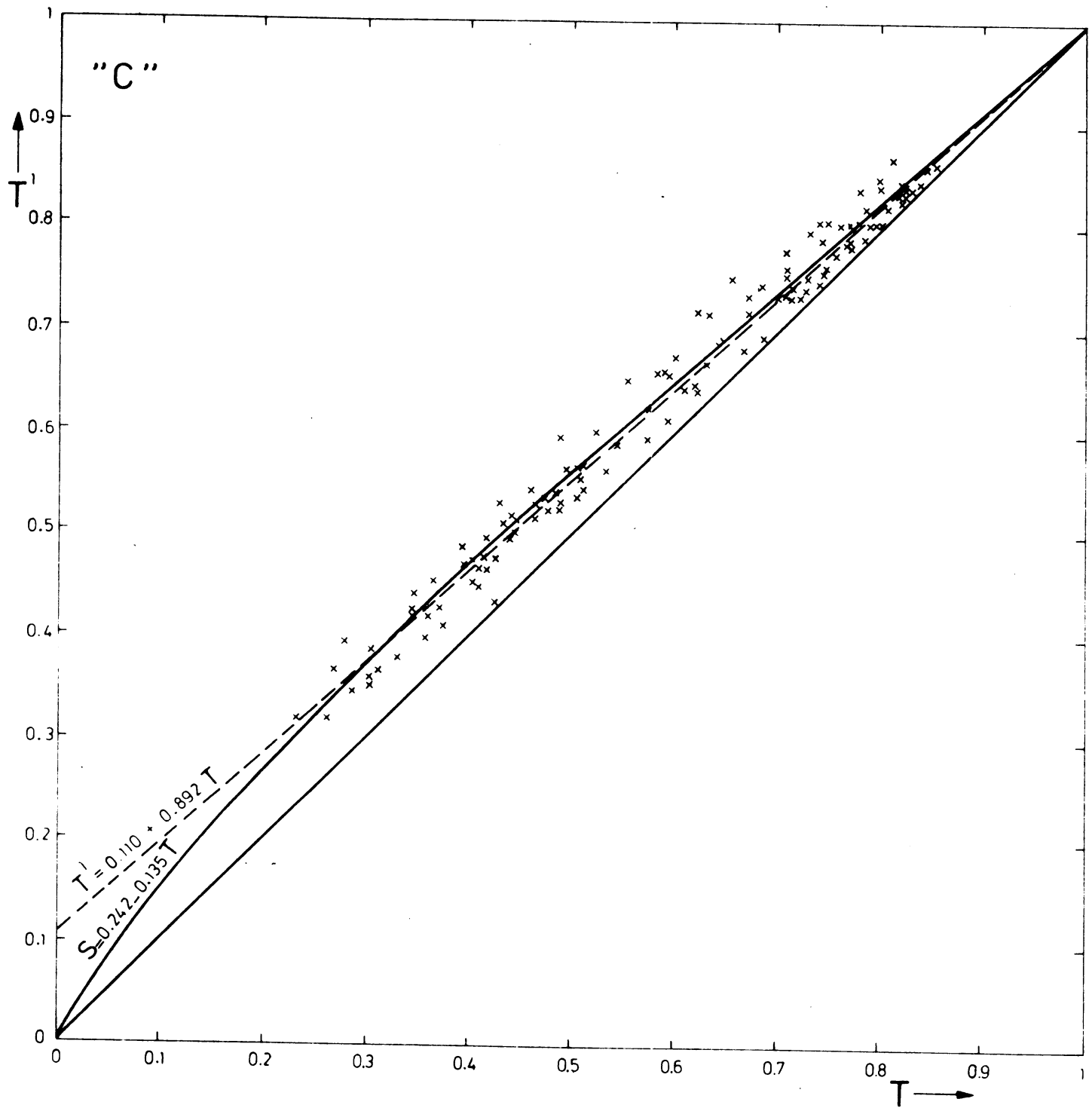


Fig. 2. Metingen te De Bilt, nov. 1977 tot nov. 1978. Vergeleken zijn uurlijks verkregen 10- min. gemiddelden van twee transmissometers, die in paragraaf 4 zijn beschreven. Waarnemingen bij daglicht of bij sterk fluctuerend zicht zijn niet gebruikt. De ingetekende regressie-lijnen worden in paragraaf 3 toegelicht.

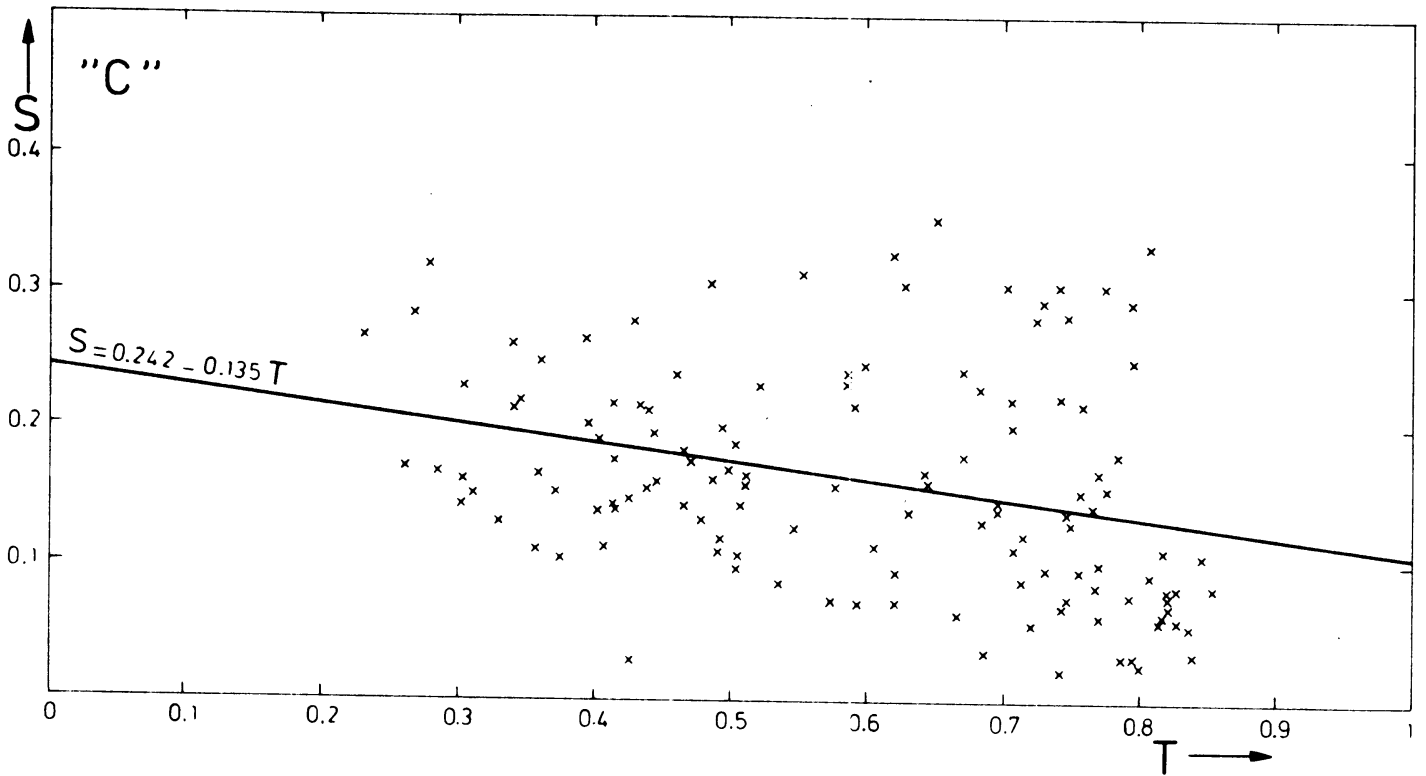


Fig. 3. Gemeten strooilichtfouten van de (gewijzigde) Cabauw-transmissometer te De Bilt. De getrokken lijn is gevonden door middel van lineaire regressie.

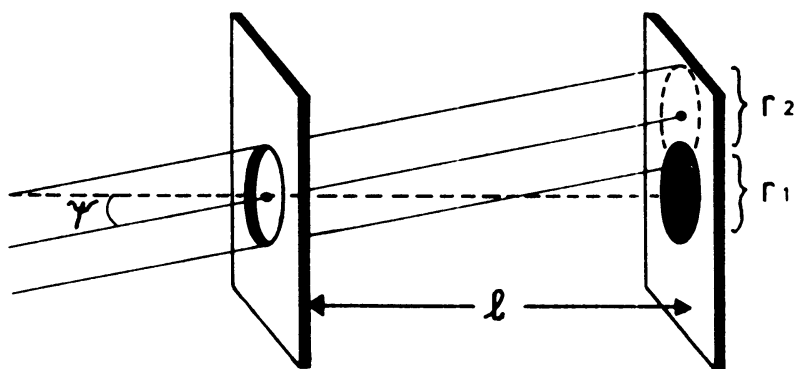


Fig. 4. Bij de afleiding van de hoekafhankelijkheid van de gevoeligheid van de detector.

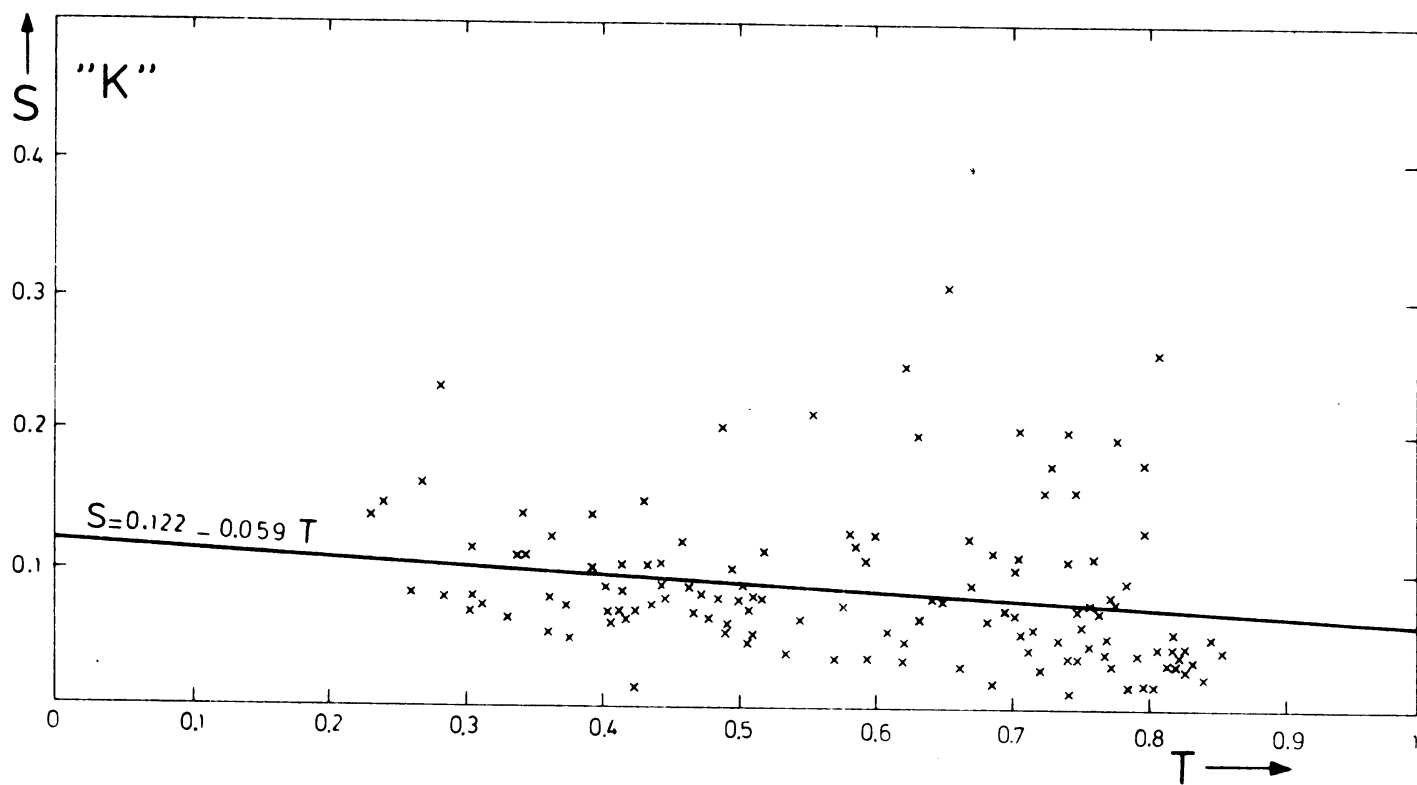


Fig. 5. Reductie van de gegevens uit fig. 3. in verband met de kleinere detector-opening van de korte-basis-transmissometer.