

LS

Berichte
aus dem
Institut für Meereskunde
an der
Christian-Albrechts-Universität Kiel

Nr. 50

1978

WIND-, TEMPERATUR- UND FEUCHTEPROFILE
ÜBER DER OSTSEE WÄHREND DES MESSPROJEKTES
" KIELER BUCHT " 1976

VON

Heinz-Theo Mengelkamp

DOI 10.3289/IFM_BER_50

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde
Abt. Maritime Meteorologie

Düsternbrooker Weg 20
D 2300 K i e l 1

ISSN 0341-8561

WIND-, TEMPERATUR- UND FEUCHTEPROFILE
ÜBER DER OSTSEE WÄHREND DES MESSPROJEKTES
" KIELER BUCHT " 1976

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung
des Grades eines Diplommeteorologen des
Fachbereiches Mathematik-Naturwissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von: Heinz-Theo Mengelkamp

Referent: Prof. Dr. P. Speth

Koreferent: Prof. Dr. Fr. Defant

Kiel 1978

ZUSAMMENFASSUNG

Vom 14. April bis zum 25. Oktober 1976 wurden innerhalb des Experiments 'Kieler Bucht 76' an einem Meßmast in der Kieler Bucht vertikale Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile gemessen. In dieser Arbeit werden Kriterien aufgestellt, die die Profile danach beurteilen, ob sie anwendbar sind für eine Berechnung der Grenzschichtparameter nach der Theorie von MONIN und OBUKHOV (1954). Es zeigt sich, daß eine Berechnung mit der Profilmethode nur dann sinnvoll ist, wenn die Höhendifferenzen der gemessenen Parameter groß genug sind, so daß die Steigung der Profile einen bestimmten Grenzbeitrag nicht überschreitet. Weiter werden Kriterien aufgestellt, nach denen die Profile auf Fehler bei der Meßanordnung untersucht werden können.

Die Profile werden durch eine ausgleichende logarithmisch-lineare Kurve angenähert, und es werden für die Windprofile die Schubspannung u_+ , der Transportkoeffizient c_D , die Rauigkeitshöhe z_0 und die Stabilitätsfunktion ϕ_M und deren Steigung α_M bestimmt. Für die Temperatur- und Feuchteprofile werden die entsprechenden Parameter berechnet. Der Mittelwert für c_D bei labiler Dichteschichtung beträgt $c_D = (2.05 \pm 0.5) \times 10^{-3}$, bei stabiler Schichtung $c_D = (1.31 \pm 0.15) \times 10^{-3}$, und für c_H ergibt sich ein Mittelwert von $c_H = (1.2 \pm 0.58) \times 10^{-3}$, während der Transportkoeffizient für die Berechnung des Feuchteflusses c_E als Funktion der Feuchtedifferenz angegeben werden muß, wobei c_E mit zunehmender Feuchtedifferenz abnimmt. Die Rauigkeitshöhe z_0 nimmt Werte zwischen 10^{-3} mm und 1 mm an, zunehmend mit wachsender Windgeschwindigkeit. Im selben Bereich liegt z_0 für die Temperaturprofile, während z_E für die Feuchteprofile zwischen 100 mm und 10^{-1} mm liegt, abnehmend mit wachsender Feuchtedifferenz.

Die Grenzschichtparameter zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Dichteschichtung und nehmen bei labilen Verhältnissen höhere Werte an als bei stabiler Schichtung.

Die Stabilitätsfunktionen zeigen im wesentlichen einen identischen Verlauf, wobei die Steigung für die Windprofile im stabilen Bereich etwas größer ist als die Steigung der Stabilitätsfunktionen für die Temperatur- und Feuchteprofile, die Werte zwischen 6 und 7 annimmt,

ABSTRACT

Vertical wind-, temperature- and humidity profiles have been measured at a mast in the Kiel Bight during the experiment "KIBU 76" from 14 April to 25 October 1976. In this report the profiles will be checked for a determination of the boundary-layer parameters by the MONIN-OBUKHOV-theory. It is shown that a determination by this method is senseless, when the differences in height of the measured parameters are so small, that the slope of the profiles is greater than a definite limit. Also criteria will be presented, which check the profiles for errors in the measuring system.

The profiles are fitted by a log-linear curve, and for the wind-profiles the friction-velocity u_* , the drag-coefficient c_D and the roughness-length z_0 are determined and also the universal function ϕ_M and the slope α_M of this function. The same parameters are calculated for the temperature- and humidity profiles. The drag-coefficient c_D has in unstable conditions the mean value $c_D = (2.05 \pm 0.5) \times 10^{-3}$, in stable conditions $c_D = (1.31 \pm 0.15) \times 10^{-3}$ and the mean value for c_H is $c_H = (1.2 \pm 0.58) \times 10^{-3}$. On the other hand the coefficient c_E for the calculation of the moisture flux has to be a function of the humidity differences and c_E is decreasing with increasing humidity difference.

The boundary-layer parameters are highly dependend on stability and for stable conditions they are smaller than for unstable conditions.

The universal functions ϕ_M , ϕ_H and ϕ_E are meanly identical but the slope of $\phi_M(z/L)$ in stable conditions is a little greater than that of ϕ_H and ϕ_E , which have a slope in the range of 6 to 7.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Einleitung	1
2. Beschreibung der Meßanlage und der gemessenen Daten	1
3. Bestimmung der Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile	6
3.1. Profile bei neutraler Schichtung	6
a. Ableitung der logarithmischen Ansätze	6
b. Berechnung der Grenzschichtparameter	7
c. Bestimmung der Transportkoeffizienten	8
3.2. Profile bei nicht-neutraler Schichtung	9
a. Ableitung der Profile nach MONIN und OBUKHOV	9
b. Berechnung der Grenzschichtparameter	10
c. Bestimmung der Transportkoeffizienten	11
d. Bestimmung der Stabilitätsfunktionen und der Richardson-Zahl	12
4. Stabilitätseinteilung	14
5. Auswahlkriterien für die Windprofile	17
6. Ergebnisse der Windprofilmessungen	23
6.1. Bestimmung von u_+ , c_D und z_0	23
6.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion	34
7. Auswahlkriterien für die Temperaturprofile	38
8. Ergebnisse der Temperaturprofilmessungen	42
8.1. Bestimmung von θ_+ , c_H und z_θ	42
8.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion	46
9. Auswahlkriterien für die Feuchteprofile	50

	Seite
10. Ergebnisse der Feuchteprofilmessungen	54
10.1. Bestimmung von Q_+ , c_E und z_E	54
10.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion	59
Schlußbemerkung	63
11. Literaturverzeichnis	65
12. Anhang -	70
Ergebnisse für die einzelnen Meßserien	

1. EINLEITUNG

Im Rahmen einer Untersuchung über die physikalischen Vorgänge in der Kieler Bucht soll im Institut für Meereskunde in Kiel ein numerisches Mehrschichtenmodell für dieses Gebiet entwickelt werden. Als Randbedingungen für dieses Modell müssen die Einflüsse der Atmosphäre auf die Meeresoberfläche ermittelt werden. Um die vertikalen Flüsse von Impuls, sensibler und latenter Energie zu bestimmen, wurden die dafür notwendigen meteorologischen Parameter an einem fest verankerten Mast von April bis Oktober 1976 gemessen. Da solche kontinuierlichen Messungen nur zeitlich begrenzt durchgeführt werden können, ist es notwendig, mit Hilfe dieser Messungen die Abhängigkeit der Grenzschichtparameter von einfach zu messenden Größen zu bestimmen, so daß eine Berechnung des Austausches auch ohne solch aufwendige Meßapparaturen möglich ist (Bulk-Methode).

Ziel dieser Arbeit ist es, die gemessenen Profile anhand der Grenzschichttheorie auf ihre Brauchbarkeit zu überprüfen und dann Funktionen für die Grenzschichtparameter aufzustellen. Dabei soll die Anwendbarkeit des Neutralen Ansatzes (PRANDTL 1932) und des Stabilitätsansatzes (MONIN und OBUKHOV 1954) untersucht und eine Bestimmung der Stabilitätsfunktionen versucht werden.

2. BESCHREIBUNG DER MESSANLAGE UND DER GEMESSENEN DATEN

Die zur Berechnung der Profile erforderlichen Messungen wurden vom 14. April bis zum 25. Oktober 1976 an einem auf dem Meeresboden feststehenden Mast durchgeführt. Der Standort des Mastes ca. 10 sm nördlich des Kieler Leuchtturms (s. Abb. 1) garantiert vom Land weitgehend unbeeinflusste Messungen. In vier Höhen mit logarithmisch äquidistanten Abständen wurden die Temperatur, die Feucht-

temperatur und die Windgeschwindigkeit bestimmt. Außerdem wurden in der 3. Höhe die Windrichtung und die einfallende kurzwellige Strahlung und an der Meeresoberfläche die Wassertemperatur gemessen. Die wahre Meßhöhe über der Meeresoberfläche wird mit Hilfe eines Drucksensors, der 4 Meter unterhalb eines mittleren Nullniveaus angebracht war und den Wasserstand über seinem Niveau angibt, ermittelt. Das Strahlungsgerät war nach Süden, die Ausleger mit den anderen Meßgeräten nach Westen, der in diesem Gebiet vorherrschenden Windrichtung, ausgerichtet. Die gemessenen Größen wurden über vier Minuten gemittelt und auf dem Funkweg ins Institut übertragen. Gleichzeitig wurden die Daten am Mast auf ein digitales Tonband aufgezeichnet, um Datenausfälle durch Störungen des Funkweges zu vermeiden.

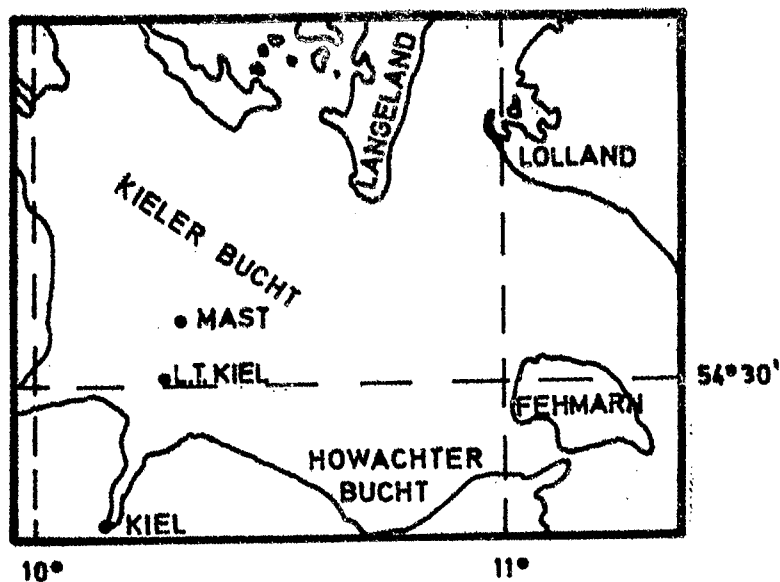


Abb. 1

Lageplan der Messanlage

Tabelle 1: Anordnung der Meßfühler

Niveau	Höhe (m)	gemessene Parameter
4	6.63	T ₄ TF ₄ U ₄
3	3.17	T ₃ TF ₃ U ₃ dd S
2	1.30	T ₂ TF ₂ U ₂
1	0.28	T ₁ TF ₁ U ₁
0	0.00	T _w
	-4.00	P

Vom 11. August 1976 an betrug die Höhe des 4. Niveaus 7.01 m,

- T = Trockentemperatur 1/100°C
- TF = Feuchttemperatur 1/100°C
- U = Windgeschwindigkeit cm/sec
- dd = Windrichtung Grad
- S = Einstrahlung Watt/m²
- T_w = Wassertemperatur 1/100°C
- P = Wasserstand über dem Drucksensor cm

Die wahre Meßhöhe z berechnet sich nach $z = z_m + (400-P)$ in cm.

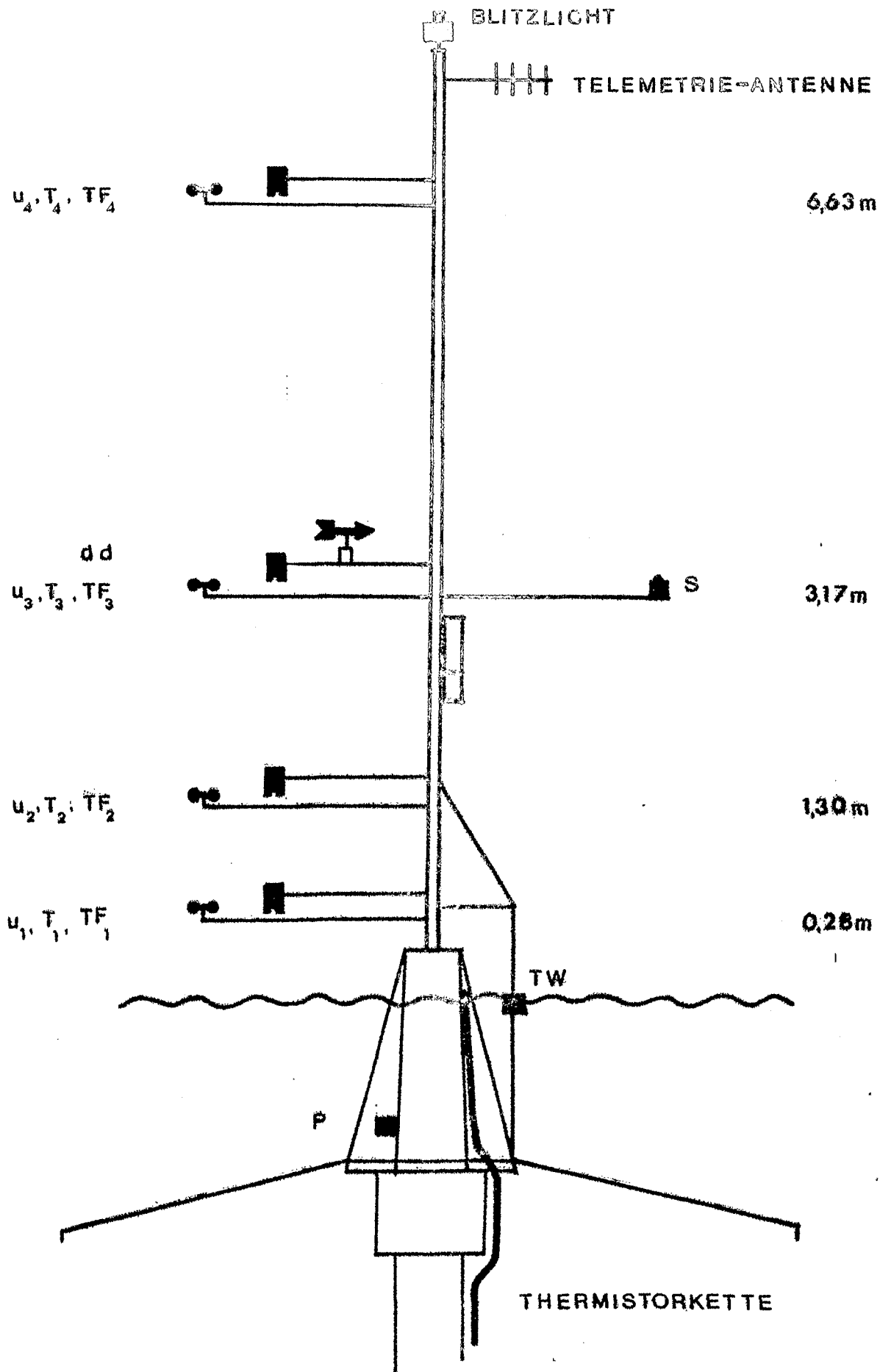


Abb. 2

Schematische Darstellung des Meßmastes

SYMBOLLISTE

c_D	Transportkoeffizient für den Impulsfluß
c_E	Transportkoeffizient für die latente Wärme
c_H	Transportkoeffizient für die sensible Wärme
c_P	spezifische Wärme bei konstantem Druck
E	Transport latenter Wärme
g	Erdbeschleunigung
H	Transport sensibler Wärme
k	von Kármán Konstante
l	Verdunstungswärme
L	Monin-Obukhov-Länge
q	spezifische Feuchte
q_w	Sättigungsfeuchte an der Wasseroberfläche entsprechend der Wassertemperatur
q_+	Feuchtemaß
RI_z	Richardson-Zahl für die Höhe z
RI_v_z	virtuelle Richardson-Zahl für die Höhe z
T	Temperatur
u	Windgeschwindigkeit
u_+	Schubspannungsgeschwindigkeit
z_0	Integrationskonstante für das Windprofil
z_θ	Integrationskonstante für das Profil der potentiellen Temperatur
z_E	Integrationskonstante für das Feuchteprofil
z/L	Stabilitätsparameter
z	Höhe über dem Wasserspiegel
$\alpha_{M,H,E}$	Steigungsmaß der Stabilitätsfunktionen
θ	potentielle Temperatur
θ_v	virtuelle potentielle Temperatur
θ_w	potentielle Temperatur der Wasseroberfläche
θ_+	Temperaturmaß
ρ	Dichte der Luft
ϕ_M	Stabilitätsfunktion für das Windprofil
ϕ_H	Stabilitätsfunktion für das Profil der potentiellen Temperatur
ϕ_E	Stabilitätsfunktion für das Feuchteprofil
τ	Schubspannung

3. BESTIMMUNG DER WIND-, TEMPERATUR- UND FEUCHTEPROFILE

3.1. Profile bei neutraler Schichtung

a. Ableitung der logarithmischen Ansätze

Mit Hilfe des Mischungsansatzes von PRANDTL (1932) ergeben sich für die Transporte von Impuls, sensibler und latenter Wärme die Beziehungen:

$$\tau = \rho k^2 z^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

$$H = -c_p \rho (k^2 z^2 \frac{\partial u}{\partial z}) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2)$$

$$E = -l \rho (k^2 z^2 \frac{\partial u}{\partial z}) \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3)$$

Aus diesen Gleichungen folgt für die Gradienten der Windgeschwindigkeit, der potentiellen Temperatur und der spezifischen Feuchte:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_+}{kz} \quad (4) \quad \text{mit } u_+ = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_+}{kz} \quad (6) \quad \text{mit } \theta_+ = - \frac{H}{c_p \rho u_+} \quad (7)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_+}{kz} \quad (8) \quad \text{mit } q_+ = - \frac{E}{l \rho u_+} \quad (9)$$

Die Gleichungen 4, 6 und 8 sind die für neutrale Schichtung gültigen Beziehungen des Wind-, Temperatur- und Feuchteprofils. Sie ergeben jedoch eine unrealistische, unbegrenzte Scherung an der Oberfläche ($z=0$). Um diese unendliche Scherung zu vermeiden, werden Oberflächenrauigkeitshöhen z_0 , z_θ und z_E eingeführt. Den Gleichungen 4, 6 und 8 entsprechen dann die Gleichungen 10, 11 und 12.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_+}{k(z+z_0)} \quad (10) \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_+}{k(z+z_\theta)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_+}{k(z+z_E)} \quad (12)$$

Da der Temperaturgradient bei neutraler Schichtung aber gerade verschwindend klein wird, ist eine Berechnung nach Gl. 6 und 11 wenig sinnvoll, und deswegen wird in dieser Arbeit das Temperaturprofil bei neutraler Schichtung nicht berechnet.

Durch Integration über die Höhe folgt aus der Gl. 10

$$u(z) = \frac{u_+}{k} \ln(z) - \frac{u_+}{k} \ln(z_0) \quad (13)$$

mit $u(z_0) = 0$;
entsprechend aus Gl. 11

$$\theta(z) - \theta(z_0) = \frac{\theta_+}{k} \ln(z) - \frac{\theta_+}{k} \ln(z_0) \quad (14)$$

wobei z_0 die Höhe ist, in der θ gleich der potentiellen Temperatur der Wasseroberfläche ist, also $\theta(z_0) = \theta_w$. Obwohl BUSINGER (1973) feststellt, daß zwischen der Höhe z_0 und der Wasseroberfläche ein nicht unerheblicher Temperaturgradient besteht, ist die Annahme im Rahmen der Genauigkeit dieser Theorie berechtigt, zumal nur mit den Differenzen $\theta(z) - \theta(z_0)$ gerechnet wird.

Aus der Gl. 12 folgt:

$$q(z) - q(z_E) = \frac{q_+}{k} \ln(z) - \frac{q_+}{k} \ln(z_E) \quad (15)$$

wobei z_E die Höhe ist, in der q der Sättigungsfeuchte bei der Wassertemperatur T_w entspricht, also $q(z_E) = q_w$. Im ersten Term auf der rechten Seite der Gleichungen 13, 14 und 15 wurden jeweils z_0 , z_0 und z_E gegenüber z vernachlässigt.

b. Berechnung der Grenzschichtparameter

Die Gl. 13 ist eine Geradengleichung, die auch in folgender Form geschrieben werden kann:

$$y = ax + b \quad (16)$$

mit $y = u(z_i)$

$$x = \ln(z_i)$$

$$a = \frac{u_+}{k} \quad \text{oder } u_+ = a \cdot k \quad (17)$$

$$b = -\frac{u_+}{k} \ln(z_0) \quad \text{oder } z_0 = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (18)$$

und für den Gradienten gilt: $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{z}$ (19)

Die Steigung der Geraden wird durch u_+ und der Schnittpunkt mit der y -Achse durch z_0 und u_+ bestimmt.

Durch die Messung der Windgeschwindigkeit in vier Niveaus sind vier Wertepaare (x_i, y_i) bekannt, und es ist möglich, mit der Methode der kleinsten Quadrate die Ausgleichsgerade und damit die Konstanten a und b zu bestimmen. Dann sind auch u_+ , z_0 und der vertikale Windgradient bekannt.

Analog werden die entsprechenden Parameter für das Feuchteprofil bestimmt.

Für die von Kármán-Konstante wird $k = 0.4$ gesetzt.

c. Bestimmung der Transportkoeffizienten

Wenn die Profile des Windes, der Temperatur und der Feuchte nicht bestimmt werden können, weil nur die mittleren vertikalen Differenzen Luft-Wasser der Parameter bekannt sind, berechnet man die vertikalen Flüsse von Impuls, sensibler und latenter Wärme nach der Bulk- oder Parameterisierungsmethode und setzt für den Impulsfluß

$$\tau = \rho c_D \bar{u}^2 \quad (20)$$

für den Fluß sensibler Wärme

$$H = -c_p \rho c_H u \Delta \theta \quad (21)$$

und für den Feuchtefluß

$$E = - l \rho c_E u \Delta q \quad (22)$$

wofür eine genaue Kenntnis der Transportkoeffizienten c_D , c_H und c_E erforderlich ist.

Aus der Gl. 20 folgt mit den Gln. 5 und 13 der Transportkoeffizient für den Impulsfluß

$$c_D = \left| \frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right|^2 \quad (23)$$

aus der Gl. 21 mit den Gln. 7 und 14 der Koeffizient für den Wärmefluß

$$c_H = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_\theta}\right)} \quad (24)$$

und aus der Gl. 22 mit den Gln. 9 und 15 der Koeffizient für den Feuchtefluß

$$c_E = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_E}\right)} \quad (25)$$

Für z_0 und z_E werden die nach Gl. 18 berechneten Werte eingesetzt. Die Berechnung für z_θ ist bei neutraler Schichtung nicht sinnvoll und deswegen wird auch c_H nach Gl. 24 nicht berechnet.

3.2. Profile bei nicht-neutraler Schichtung

a. Ableitung der Profile nach MONIN und OBUKHOV (1954)

Um die Gln. 4, 6 und 8 auch für nicht-neutrale Schichtung anwendbar zu machen, entwickelten MONIN und OBUKHOV (1954) aus dimensionsanalytischen Betrachtungen ein Temperaturmaß

$$T_+ = - \frac{H}{c_p \rho u_+} \quad (26)$$

und als Maß für den Turbulenzzustand ein Längenmaß

$$L = - \frac{u_+^3}{(k g H / c_p \rho T)} \quad (27)$$

einen dimensionslosen Windgradienten

$$\phi_M \left(\frac{z}{L} \right) = \frac{kz}{u_+} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (28)$$

und einen dimensionslosen Temperaturgradienten

$$\phi_H \left(\frac{z}{L} \right) = \frac{kz}{\theta_+} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (29)$$

Für den Feuchtegradienten kann man ebenso ansetzen

$$\phi_E \left(\frac{z}{L} \right) = \frac{kz}{q_+} \frac{\partial q}{\partial z} \quad (30)$$

Die den Gln. 4, 6 und 8 entsprechenden, auch für nicht-neutrale Schichtung gültigen Gleichungen lauten nun:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_+}{kz} \phi_M \left(\frac{z}{L} \right) \quad (31)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta_+}{kz} \phi_H \left(\frac{z}{L} \right) \quad (32)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{q_+}{kz} \phi_E \left(\frac{z}{L} \right) \quad (33)$$

Diese Gradienten sind durch die Funktionen ϕ_M , ϕ_H und ϕ_E von L und damit vom Turbulenz- und Stabilitätszustand abhängig. Die Funktionen ϕ_M , ϕ_H und ϕ_E werden als Stabilitätsfunktionen bezeichnet.

b. Berechnung der Grenzschichtparameter

Die Funktionen ϕ_i können in eine Potenzreihe entwickelt werden, wobei die Entwicklung nach dem linearen Glied abgebrochen werden kann, wenn die Rechnungen auf den Fall $\frac{z}{L} < 1$ beschränkt werden (SWINBANK 1964). Für das Windprofil folgt dann

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_+}{kz} \left(1 + \alpha \frac{z}{L}\right) \quad (34)$$

und nach Integration zwischen der Rauigkeitshöhe z_0 und der Höhe z

$$u(z) = \frac{u_+}{k} \ln(z) - \frac{u_+}{k} \ln(z_0) + \frac{u_+}{k} \frac{\alpha}{L} z \quad (35)$$

mit $u(z_0) = 0$, wobei im letzten Glied z_0 gegenüber z vernachlässigt wurde. Diese logarithmisch-lineare Funktion kann auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$u(z) = a \ln(z) + b + c \cdot z \quad (36)$$

mit $a = \frac{u_+}{k}$ oder $u_+ = a \cdot k$ (37)

$$b = -\frac{u_+}{k} \ln(z_0) \text{ oder } z_0 = \exp\left(-\frac{b}{a}\right) \quad (38)$$

$$c = \frac{u_+}{k} \frac{\alpha}{L} \text{ oder } \alpha = \frac{c}{a} \cdot L \quad (39)$$

und für den Gradienten gilt: $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{a}{z} + c$ (40)

$u(z)$, z und $\ln(z)$ sind für 4 Höhen gemessen worden. Aus den 4 Gleichungen (36) für jedes Profil können die Konstanten a , b und c mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden. Aus den Gln. 37, 38 und 40 lassen sich dann u_+ , z_0 und der Windgradient berechnen. In der Gleichung 39 steht die unbekannte Monin-Obukhov-Länge L ; die Bestimmung von α erfordert deswegen die Ableitungen in Abschnitt 3.2.d.

Die Parameter der Temperatur- und Feuchteprofile werden nach der gleichen Methode berechnet mit den den Gln. 14 und 15 analogen Integrationskonstanten.

c. Bestimmung der Transportkoeffizienten

Die Ableitung der Transportkoeffizienten erfolgt analog der Ableitung im neutralen Fall, wenn statt der Gln. 13, 14 und 15 die Stabilitätsansätze für das Wind-, Tempe-

ratur- und Feuchteprofil gemäß Gl. 34 eingesetzt werden. Die Gleichung des Transportkoeffizienten für den Impulsfluß lautet dann:

$$c_D = \frac{k^2}{\left| \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \alpha_M \frac{z}{L} \right|^2} \quad (41)$$

und für den Wärmefluß:

$$c_H = \frac{k^2}{\left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \alpha_M \frac{z}{L} \right) \left(\ln\left(\frac{z}{z_\theta}\right) + \alpha_H \frac{z}{L} \right)} \quad (42)$$

und für den Feuchtefluß:

$$c_E = \frac{k^2}{\left(\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \alpha_M \frac{z}{L} \right) \left(\ln\left(\frac{z}{z_E}\right) + \alpha_E \frac{z}{L} \right)} \quad (43)$$

Diese Transportkoeffizienten sind ebenso wie die Richardson-Zahl, das Stabilitätsmaß $\frac{z}{L}$, die Gradienten der Profile und α höhenabhängig. Alle diese Parameter werden in dieser Arbeit auf die Höhe 3, also etwa auf die geometrische Mitte der Meßhöhen bezogen.

d. Bestimmung der Stabilitätsfunktionen und der Richardson-Zahl

Die Gradientenform der Richardson-Zahl kann direkt aus Profilmessungen berechnet werden

$$Ri_z = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (44)$$

Das Temperaturmaß T_+ aus Gl. 26 mit Gl. 27 wird für θ_+ in Gl. 32 eingesetzt. Das ergibt für den Gradienten der potentiellen Temperatur

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{u_+^2 T}{k^2 z g L} \left(1 + \alpha_H \frac{z}{L} \right) \quad (45)$$

und mit Gl. 31 folgt aus Gl. 44 der Zusammenhang zwischen der Stabilitätslänge L und der Richardson-Zahl:

$$Ri_z = \frac{z}{L} \frac{1}{(1 + \alpha \frac{z}{L})} \quad (46)$$

Hierbei wurde die Gleichheit von α_M und α_H vorausgesetzt. Mit dem Ausdruck für L aus Gl. 39 kann α hieraus bestimmt werden

$$\alpha = \frac{c \cdot z}{Ri_z (a + c \cdot z)} \quad (47)$$

Mit den Gln. 39 und 47 sind jetzt die zur Bestimmung der Stabilitätsfunktionen erforderlichen Größen bekannt,

Um bei der Berechnung der Richardson-Zahl den Einfluß eines Wasserdampfgradienten auf die Dichteschichtung zu berücksichtigen, wird in Gl. 44 statt des Gradienten der potentiellen Temperatur der Gradient der virtuellen potentiellen Temperatur eingesetzt. Dieser wird gemäß Gl. 40 nach Ausgleich der Profile der virtuellen potentiellen Temperatur bestimmt.

Aus den gemessenen Trocken- und Feuchttemperaturen wird für jede Höhe die spezifische Feuchte q und daraus die virtuelle potentielle Temperatur in jeder Höhe berechnet. Der Druck wird dabei als konstant $p = 1013$ mb angenommen.

Die Gradientenform der virtuellen Richardson-Zahl

$$Riv_z = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta_v / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \quad (48)$$

wird zur Berechnung von α in Gl. 47 eingesetzt.

4. STABILITÄTSEINTEILUNG

Die Stabilitätseinteilung der Profile wurde nach Gl. 48 vorgenommen.

Bei der Berechnung der Grenzschichtparameter zeigte sich, daß der Stabilitätsansatz auch bei neutralen Schichtungsverhältnissen kleinere Werte lieferte als der Neutrale Ansatz (s. Abb. 7 und Abschn. 6.1.). Um nach einer groben Stabilitätseinteilung (Bulk-Methode) für alle Schichtungsverhältnisse eine exakte Richardson-Zahl zu berechnen, wurden zu ihrer Berechnung einmal die mit dem Neutralen Ansatz und dann die mit dem Stabilitätsansatz berechneten Gradienten in Gl. 48 eingesetzt. Die so berechneten Richardson-Zahlen sind in Abb. 3 und 4 gegeneinander aufgetragen. In dieser Darstellung wurden die Profile des Zeitraums vom 28.5. bis zum 8.6.1976 verwendet.

Im stabilen Bereich ($Ri > 0.01$) sind die mit dem Neutralen Ansatz berechneten Richardson-Zahlen (RiN) immer etwas größer als die mit dem Stabilitätsansatz berechneten (RiS), die im stabilen und labilen Bereich als richtig angenommen werden. Im schwach labilen ($Ri < -0.01$) und im neutralen Bereich zeigen die mit verschiedenen Ansätzen berechneten Richardson-Zahlen keinen systematischen Unterschied (im Gegensatz zu den Grenzschichtparametern), so daß bei allen Schichtungsverhältnissen die mit dem Stabilitätsansatz berechneten Gradienten zur Bestimmung der Richardson-Zahl eingesetzt werden können.

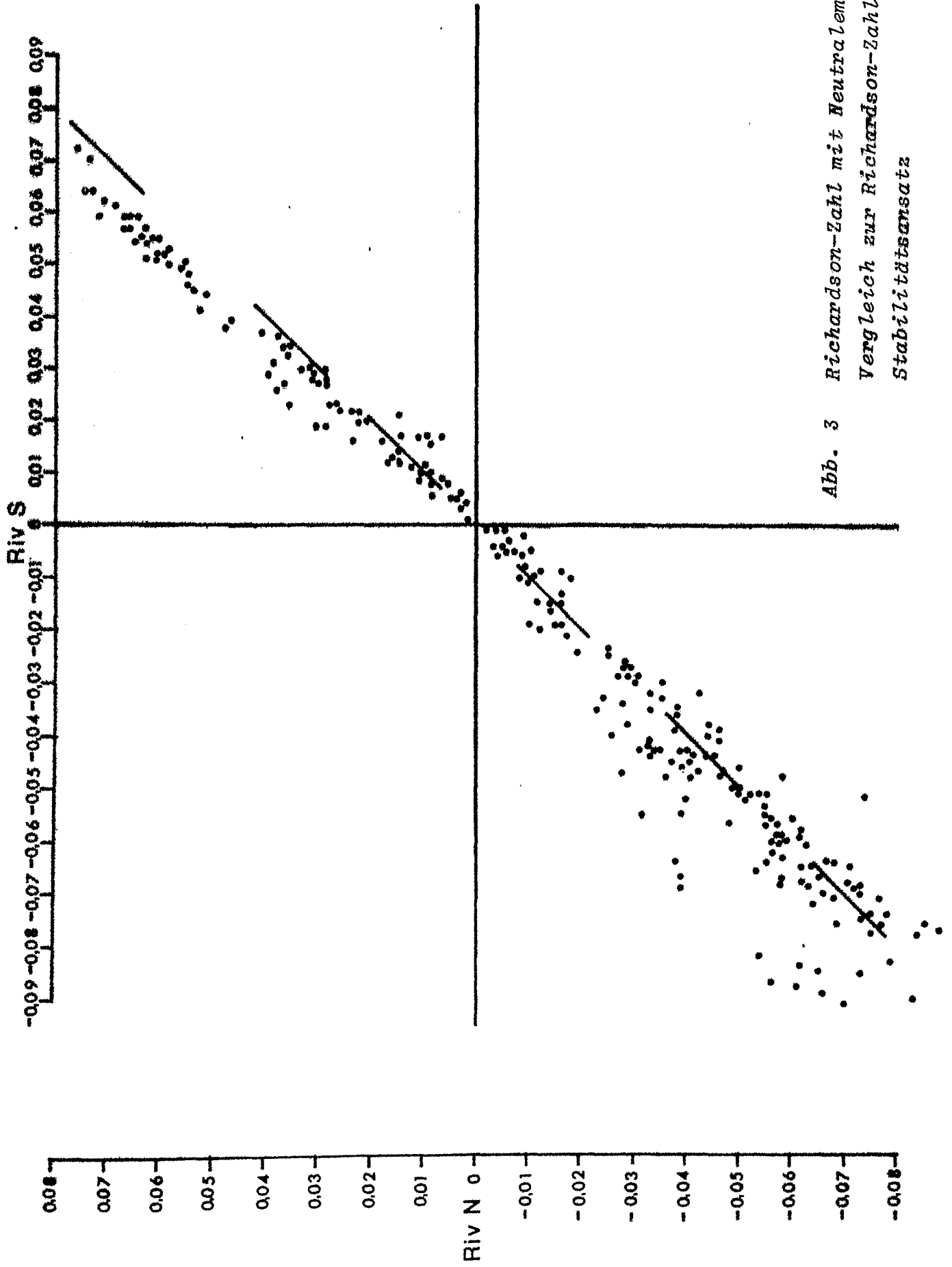


Abb. 3 Richardson-Zahl mit Neutralem Ansatz im Vergleich zur Richardson-Zahl mit dem Stabilitätsansatz

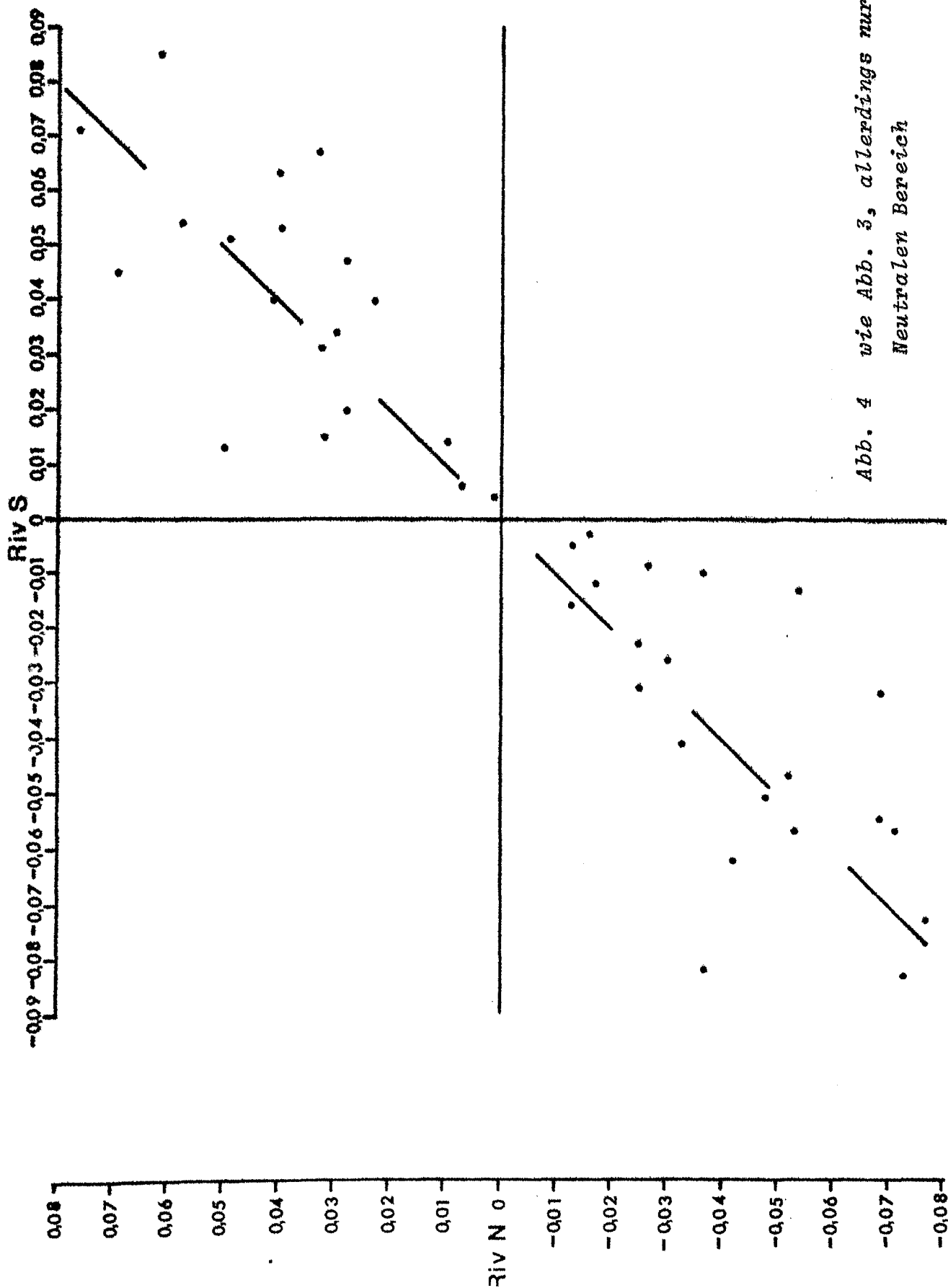


Abb. 4 wie Abb. 3, allerdings nur für den Neutralen Bereich

5. AUSWAHLKRITERIEN FÜR DIE WINDPROFILE

Die gemessenen vierminütigen Profile wurden über vier Profile gemittelt, so daß mittlere Profile über 16 Minuten vorlagen. Systematische Meßfehler z.B. durch Abbrechen einer Schale oder Ausfall eines Anemometers werden durch diese Mittelung nicht ausgeglichen, da dieser Fehler bis zum Auswechseln des Anemometers in allen Profilen auftrat. Da die Meßfühler nach Westen, der in diesem Gebiet vorherrschenden Windrichtung, ausgerichtet waren, mußte mit Störungen der Windprofile durch den Mast bei Ostwinden gerechnet werden. Diese Störungen in einzelnen Profilen könnten allenfalls bei plötzlichen Windrichtungsänderungen durch die Mittelung ausgeglichen werden.

Um ein Kriterium für die Güte der Windprofile zu erhalten, wurden zunächst die Profile der vierten Meßserie nach Gl. 36 ausgeglichen und die Grenzschichtparameter nach den Gln. 37, 38 und 41 bestimmt. Diese Werte wurden mit denen anderer Autoren (z.B. BROCKS und KRÜGERMEIER 1970, KRÜGERMEIER 1975, BEHREND 1976, SHEPPARD, TRIBBLE u. GARRATT 1972) verglichen. Im allgemeinen konnte eine größenordnungsmäßige Übereinstimmung festgestellt werden. Die von diesen Werten stark abweichenden Ergebnisse konnten durch eine Analyse der gezeichneten Profile auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

1. die Windgeschwindigkeit in einer Höhe ist kleiner als in einer darunterliegenden (Abbrechen einer Schale, Störungen bei Ostwind, bei Windgeschwindigkeiten kleiner als 2 m/s)
2. die Windgeschwindigkeit in mehreren Höhen ist kleiner als in einer darunterliegenden (Abbrechen mehrerer Schalen, häufig bei Ostwind und sehr kleinen Windgeschwindigkeiten)

3. zu steile, fast senkrechte Profile

(bei Ostwinden, wenn die oberen Höhen gestört waren, bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten und dadurch zu kleinen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Höhen)

Eine genauere Analyse der Störungen bei Ostwind ergab:

bei einer Windrichtung zwischen 70° und 90° eine zu kleine Anzeige in der 2. Höhe

bei einer Windrichtung von etwa genau 90° gleichmäßige, am einzelnen Profil daher nicht erkennbare Störungen in allen Höhen

bei einer Windrichtung zwischen 105° und 140° große Störungen in der 3. Höhe, verursacht durch das Strahlungsmeßgerät, das in der 3. Höhe senkrecht zum Anemometer nach Süden angebracht war.

Um außer diesen 'sichtbaren' Fehlern ein Maß für die Güte der Profile zu bekommen, wurde die Summe der Abweichungsbeträge der gemessenen Windgeschwindigkeiten von den nach der Ausgleichskurve Gl. 36 bestimmten Windgeschwindigkeiten für jedes Profil bestimmt. Diese Summe erwies sich als abhängig von der Windgeschwindigkeit. Abb. 5 zeigt diese Abhängigkeit für die Profile der 1. Meßserie. Als Kreuze eingezeichnet sind die Abweichungsfehler der Profile bei Ostwind. Eine überwiegende Zahl der Profile bei Ostwind zeigt gegenüber den anderen Profilen eine sehr große Abweichungssumme. Die scheinbar noch guten Profile bei Ostwind sind die gleichmäßig gestörten, die natürlich keine zu große Abweichungssumme zeigen. Die eingezeichnete Kurve liegt gerade so, daß die Profile, deren Abweichungssumme unterhalb dieser Geraden liegt, Werte für die Grenzschichtparameter noch innerhalb der erwarteten Größenordnung liefern. Dabei wurde bei Windgeschwindigkeiten über 3 m/s für z_0 ein minimaler Wert von 10^{-6} mm zugelassen. Von dem Punkt 3 m/s für u_4 und 6 cm/s für

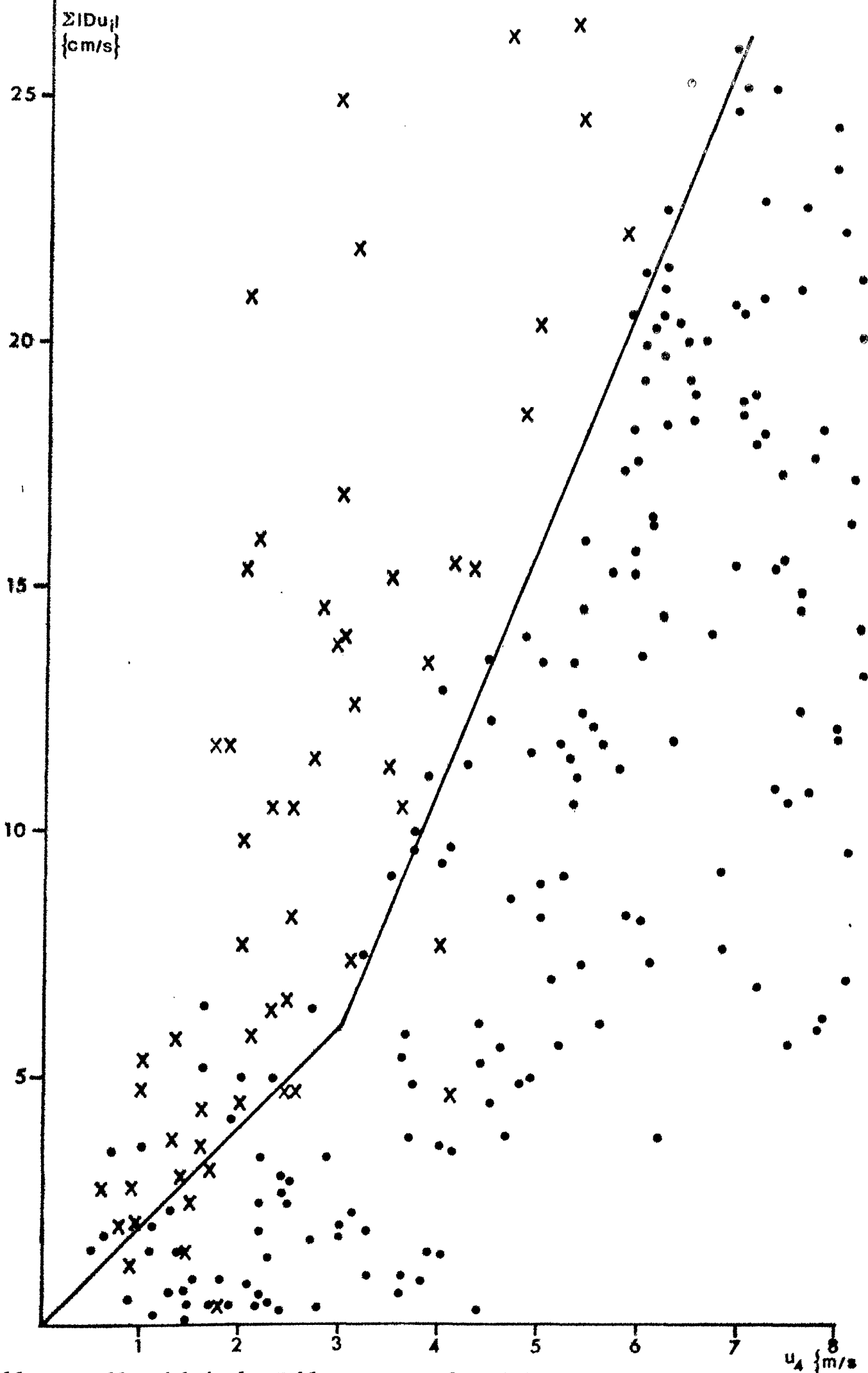


Abb. 5 Abhängigkeit der Fehlersumme von der Windgeschwindigkeit (s. Text)

$\sum |Du_i|$ wurde die Kurve einfach durch den Nullpunkt gelegt, um Profile mit u_4 kleiner als 2 m/s nicht grundsätzlich durch diese Fehlerbedingung auszuschließen. Die Funktion der Kurve ist

$$\text{für } u_4 \text{ größer } 3 \text{ m/s: } \sum |Du_i| = 5 u_4 - 9 \quad (49)$$

$$\text{für } u_4 \text{ kleiner } 3 \text{ m/s: } \sum |Du_i| = 2 u_4 \quad (50)$$

wobei die Du_i in cm/s und die u_4 in m/s einzusetzen sind.

Aus diesen Überlegungen ergaben sich folgende Auswahlkriterien für die Windprofile:

1. Profile bei einer Windrichtung von 70-130 Grad werden nicht berücksichtigt.
2. Ist die Windgeschwindigkeit in mehreren Höhen kleiner als in einer darunterliegenden Höhe, so werden die Profile nicht berücksichtigt.
3. Ist die Windgeschwindigkeit in nur einer Höhe kleiner als in einer darunterliegenden, so werden diese Profile nicht berücksichtigt. In diesem Fall wurde zunächst eine Ausgleichung der restlichen 3 Höhen vorgenommen. Es zeigte sich jedoch, daß ein großer Teil dieser Profile trotz Vernachlässigung der gestörten Höhe von ähnlichen Profilen stark abweichende Werte lieferten.
4. Liegt die Summe der Abweichungsbeträge eines Profils oberhalb der Funktionen (49) oder (50), so wird dieses Profil nicht berücksichtigt.
5. Ist die Konstante a in Gl. 36 kleiner als 0,05 m/s, so wird das Profil nicht berücksichtigt. Dieses Kriterium eliminiert zu steile Profile, die nur bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten vorkommen (u_4 kleiner 1 m/s). Diese Bedingung verhindert zwar ein z_0 , das mit abnehmender Windgeschwindigkeit gegen Null geht, eine Berechnung der Profile bei so kleinen Windgeschwindigkeiten erscheint jedoch nicht sinnvoll, da die Anemometer nur bis zu einer minimalen Windgeschwin-

digkeit von 3 m/s geeicht wurden, und die Streuung der Anzeige bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten die Größenordnung der wahren Messung erreichen kann. Durch diese Bedingung wird für z_0 ein minimaler Wert von etwa 10^{-14} mm zugelassen.

Für die Mehrzahl der fehlerhaften Profile würde das 1. Kriterium ausreichen, da die Fehler der Punkte 2 bis 5 vorwiegend bei Ostwinden auftreten. Die anderen Kriterien kommen zur Anwendung, wenn die schon genannten Fehler an den Meßgeräten auftreten. Eine zu kleine Anzeige des untersten Anemometers kann nur durch das 4. Kriterium berücksichtigt werden.

Die Messungen wurden vom 14. April bis zum 25. Oktober 1976 vorgenommen. In dieser Arbeit wurden jedoch die Profile erst vom 28. Mai an berechnet, da die Daten vor diesem Zeitpunkt wegen häufigen Ausfalls der Funkübertragungen sehr lückenhaft sind und auch noch nicht auf ein digitales Tonband am Mast aufgezeichnet wurden. Der Zeitraum vom 28.5. bis zum 25.10. wurde in acht etwa gleichlange Meßserien aufgeteilt.

In der Tabelle 2 sind für die einzelnen Meßserien und für den gesamten Zeitraum aufgetragen die Anzahl aller vorhandenen Windprofile, die Anzahl der berechneten Profile, unterteilt für neutrale (N), stabile (S) und labile (L) Schichtung, und die Anzahl der nach den einzelnen Auswahlkriterien nicht berechneten Profile. Eine genauere Analyse der Ursachen für die Ausfälle soll bei der Darstellung der einzelnen Meßserien im Anhang gegeben werden. Über den gesamten Zeitraum konnten nur 42.5 % der Windprofile ausgewertet werden, da 19.2 % wegen Ostwinden, 10.1 % wegen Profilverfehlern nach dem 2. und 3. Kriterium, 25 % aufgrund der Fehlerfunktion (4. Kriterium) und 3.1 % wegen des 5. Kriteriums ausfielen.

In den Abschnitten 6, 8 und 10 sind die Ergebnisse der Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile für den gesamten Zeitraum wiedergegeben, die als Mittelwerte aus den einzelnen Meßserien gebildet wurden.

		MS 1	MS 2	MS 3	MS 4	MS 5	MS 6	MS 7	MS 8	gesamter Zeitraum
		28.5.- 8.6.	9.6.- 25.6.	27.6.- 16.7.	16.7.- 6.8.	6.8.- 27.8.	27.8.- 13.9.	13.9.- 2.10.	3.10.- 25.10.	28.5.- 25.10.
alle Pro- file		1046	1323	1796	1876	1759	1059	760	1897	11 516
be- rech- nete Pro- file	N	272	465	89	182	205	645	68	411	2 337
	S	167	313	178	196	123	16	12	195	1 200
	L	106	67	196	284	173	214	139	187	1 366
Aus- fälle durch Krite- rium	1	266	118	491	50	555	40	369	326	2 215
	2+3	51	17	183	228	357	51	27	249	1 163
	4	131	316	626	909	335	65	129	367	2 878
	5	53	27	33	27	11	28	16	162	357
Gesamt- zahl der berech- neten Profile		545	845	463	662	501	875	219	793	4 903
Gesamt- zahl der Aus- fälle		501	478	1333	1214	1258	184	541	1104	6 613

Tabelle 2: Aufstellung der Windprofile
(Mittelwerte über 16 Minuten)

6. ERGEBNISSE DER WINDPROFILMESSUNGEN

6.1. Bestimmung von z_0 , u_+ und c_D

In diesem Abschnitt werden die Grenzschichtparameter u_+ , z_0 und c_D als Funktionen der Windgeschwindigkeit in der 4. Höhe u_4 dargestellt. Es wird dabei unterschieden zwischen labiler ($Ri < -0.01$), fast neutraler ($-0.01 \leq Ri \leq 0.01$) und stabiler Schichtung ($Ri > 0.01$).

In der Abb. 6 ist die Krümmung der Windprofile dargestellt, wie sie im Idealfall erwartet wird.

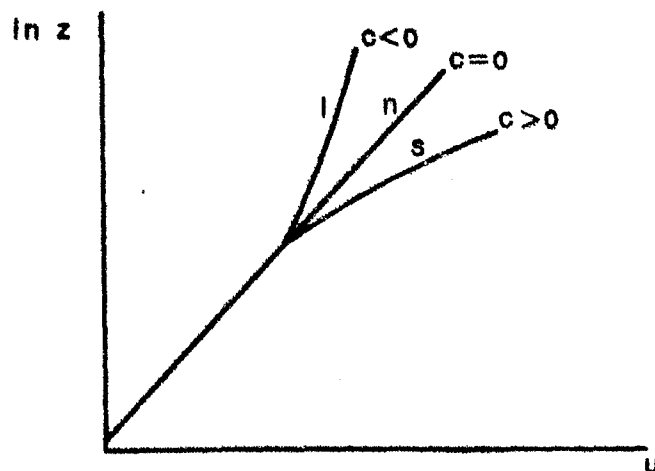


Abb. 6 Windscherung bei labiler (l), neutraler (n) und stabiler (s) Schichtung und Vorzeichen der Konstanten c im Krümmungsterm der Gl. 36

Da das Windprofil eine positive Steigung hat, sind die Konstanten a und b in der Gl. 36 immer positiv. Die Konstante c beschreibt die Krümmung des Profils und macht somit eine Aussage über die Schichtungsverhältnisse. Bei neutraler Schichtung ist das Windprofil nicht gekrümmt, die Konstante c also gleich Null und die Gl. 36 geht in Gl. 16 für den neutralen Fall über. Ein positives c bedeutet ein stärkeres Anwachsen der Windgeschwindigkeit mit der Höhe als im neutralen Fall, wie es bei sta-

biler Schichtung erwartet wird. Bei labiler Schichtung dagegen wird ein langsames Anwachsen des Windes mit der Höhe erwartet, also ein negatives c , da die stärkere Vermischung für einen Ausgleich der Lufteigenschaften sorgt. Für das Windprofil nach Gl. 36 gilt also im Idealfall:

bei labiler Schichtung $a > 0, b > 0, c < 0$

bei neutraler Schichtung $a > 0, b > 0, c = 0$

bei stabiler Schichtung $a > 0, b > 0, c > 0$

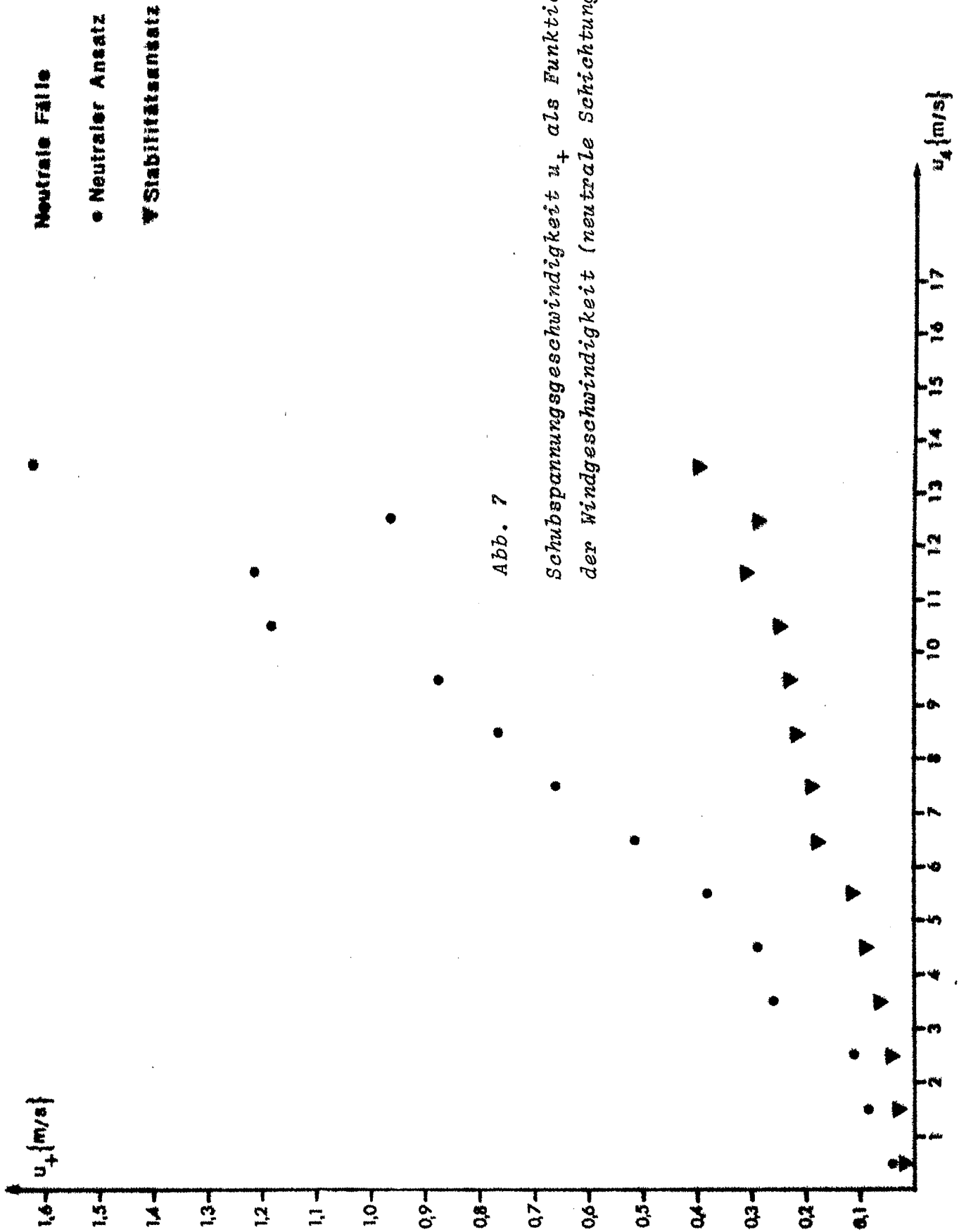
Bei der Ausgleichung der Profile nach Gl. 36 zeigte sich jedoch bei labilen Schichtungsverhältnissen, daß bei vielen Profilen die Konstante c wider Erwarten nicht negativ wurde. Bei diesen Profilen, die trotz labiler Schichtung einen positiven Krümmungsterm aufweisen, der allerdings immer sehr klein ist (c kleiner 0.02), führt eine Aussage über den Stabilitätszustand durch das Vorzeichen der Konstanten c zu einem falschen Ergebnis, d.h., daß die Krümmung des Windprofils nicht immer eindeutig ein Zeichen für den Stabilitätszustand ist. Wenn bei der Ausgleichung die Konstante c trotz labiler Schichtung positiv wird, wird die Konstante a , d.h. die Steigung des Profils, kleiner als es normalerweise bei labiler Schichtung der Fall ist, und es scheint berechtigt, diese Profile den neutralen Profilen zuzurechnen, die ja eine geringere Steigung als labile Profile haben. Auf die Schwierigkeit, die Krümmung der Profile zu bestimmen, weisen auch BROCKS und KRÜGERMEIER (1970) hin: "Die Stabilität bewirkt im wesentlichen eine unterschiedliche Neigung der Profile, und bei den normal vorkommenden Stabilitäten ist die Krümmung so gering, daß der Entscheid, ob es sich um 'neutrale' oder 'nicht-neutrale' Dichteschichtung handelt, allein aus dem Aussehen der Profile nur sehr schwer getroffen werden kann".

In den Darstellungen sind also die Profile bei neutraler Schichtung und die, die bei labiler Schichtung einen positiven Krümmungsterm aufweisen, als 'neutrale Fälle' zusammengefaßt.

Bei Ausgleich der Profile bei neutraler oder fast neutraler Dichteschichtung zeigte sich, daß bei einer überwiegenden Zahl der Profile die Konstante c nicht verschwindend klein wurde, so daß auch bei fast neutraler Schichtung noch ein nicht unerheblicher Unterschied zwischen den Gl. 36 und 16 besteht. Dieser Unterschied ist in der Abb. 7 für die Schubspannung u_+ dargestellt. Die fast neutralen Fälle wurden einmal mit dem Neutralen Ansatz (Gl. 16) und einmal mit dem Stabilitätsansatz (Gl. 36) berechnet. Es besteht eine doch recht große Differenz zwischen den Werten, die mit der Windgeschwindigkeit wächst, und es scheint angebracht, auf alle Profile - auch bei neutraler Schichtung - den Stabilitätsansatz (Gl. 36) anzuwenden, da dieser eine exaktere Ausgleichung der Profile ermöglicht als der Neutrale Ansatz,

In den Abb. 9, 10 und 11 sind u_+ , c_D und z_0 als Funktionen der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Die Profile wurden mit dem Stabilitätsansatz berechnet, und es wurde unterschieden zwischen labiler (Kreuze), fast neutraler (Kreise) und stabiler (Dreiecke) Dichteschichtung. Die Zahlen am oberen Rand der Abb. 9 sind die Anzahl der jeweilig berechneten Profile. Sie gelten auch für die Abb. 10 und 11. Eingezeichnet sind die Mittelwerte über u_+ -Bereiche im Abstand von 1 m/s.

Die Abb. 9 zeigt ein Anwachsen der Schubspannungsgeschwindigkeit u_+ mit der Windgeschwindigkeit, das den Darstellungen anderer Autoren entspricht (KRÜGERMEIER 1975, POND, PHELPS, PASQUIN, McBEAN and STEWART 1971). Auch die Beträge von u_+ stimmen größenordnungsmäßig mit den Berechnungen anderer Autoren überein. Die Differenz zwischen den u_+ -Werten bei verschiedenen Schichtungsverhältnissen entspricht der unterschiedlichen Neigung des Windprofils, das bei labiler Schichtung im Mittel weniger steil ist als bei stabiler Schichtung. Dies wird in der Abb. 8 deutlich, die nicht wie Abb. 6 nur die Krümmung bei unterschiedlicher Dichteschichtung andeutet,



x stabile Schichtung
 ▼ stabile Schichtung
 • neutrale Schichtung

7	44	129	140	189	246	246	192	67	57	17	9	3		
26	86	174	152	148	184	160	116	88	22	6	4	3		
1	9	29	87	198	212	364	315	325	275	155	106	74	22	2

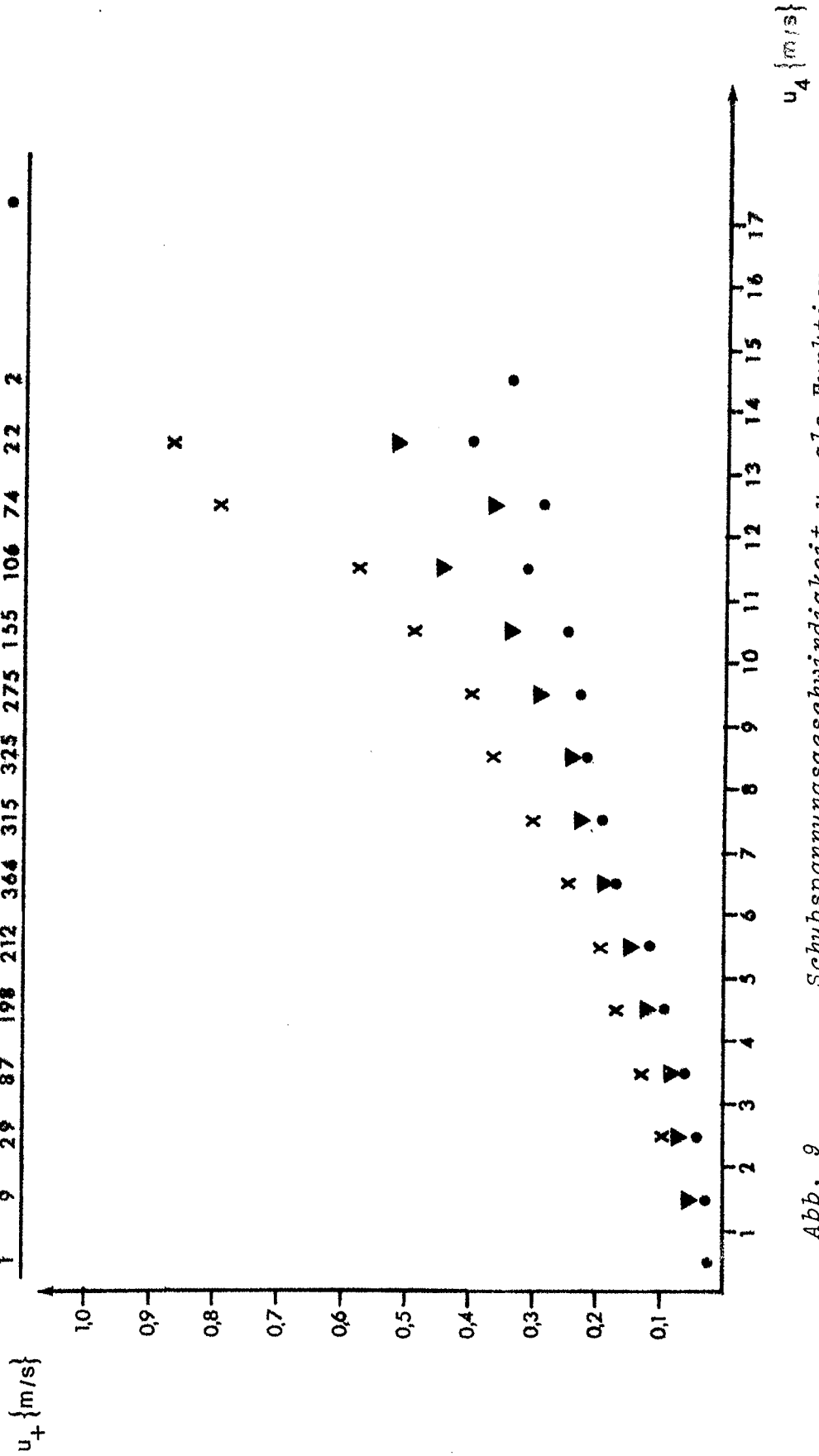


Abb. 9 Schubspannungsgeschwindigkeit u_+ als Funktion der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Dichteschichtung

sondern auch die unterschiedliche Steigung berücksichtigt. Dieser Unterschied scheint sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit zu vergrößern.

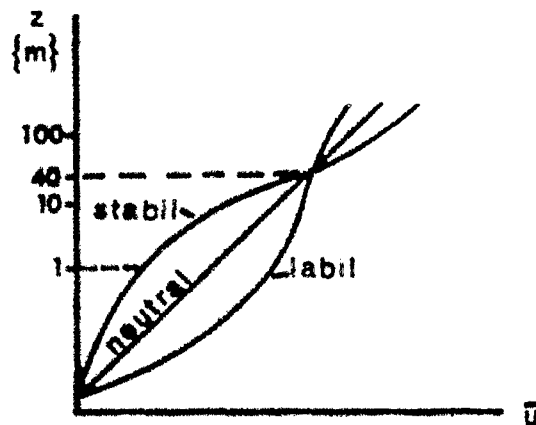


Abb. 8 Schematische Windprofile für unterschiedliche Dichteschichtung
(aus HALTNER u. MARTIN (1957))

In den Abb. 10 a,b,c ist der Transportkoeffizient c_D für den Impulstransport bei labiler, stabiler und neutraler Schichtung gegen die Windgeschwindigkeit aufgetragen. Die etwas zu hohen Werte bei kleinen Windgeschwindigkeiten (um 2 m/s) sind wohl auf ungenaue Messungen in diesem Bereich zurückzuführen. Bis etwa 5 m/s scheint der Transportkoeffizient konstant zu sein, um dann mit höheren Windgeschwindigkeiten anzusteigen. Bei neutraler Schichtung ist c_D ab 8 m/s wieder annähernd konstant, so daß von einer Treppenfunktion gesprochen werden könnte; die stabilen und labilen Fälle zeigen dieses Verhalten jedoch nicht. Der Unterschied zwischen labiler und stabiler Schichtung ist sehr deutlich und war wegen des bei labilen Verhältnissen größeren Austausches zu erwarten. Der Wert bei labiler Schichtung ist teilweise mehr als doppelt so groß wie der bei stabiler Schichtung, und bei Transportberechnungen nach Gl. 20 scheint eine Unterschei-

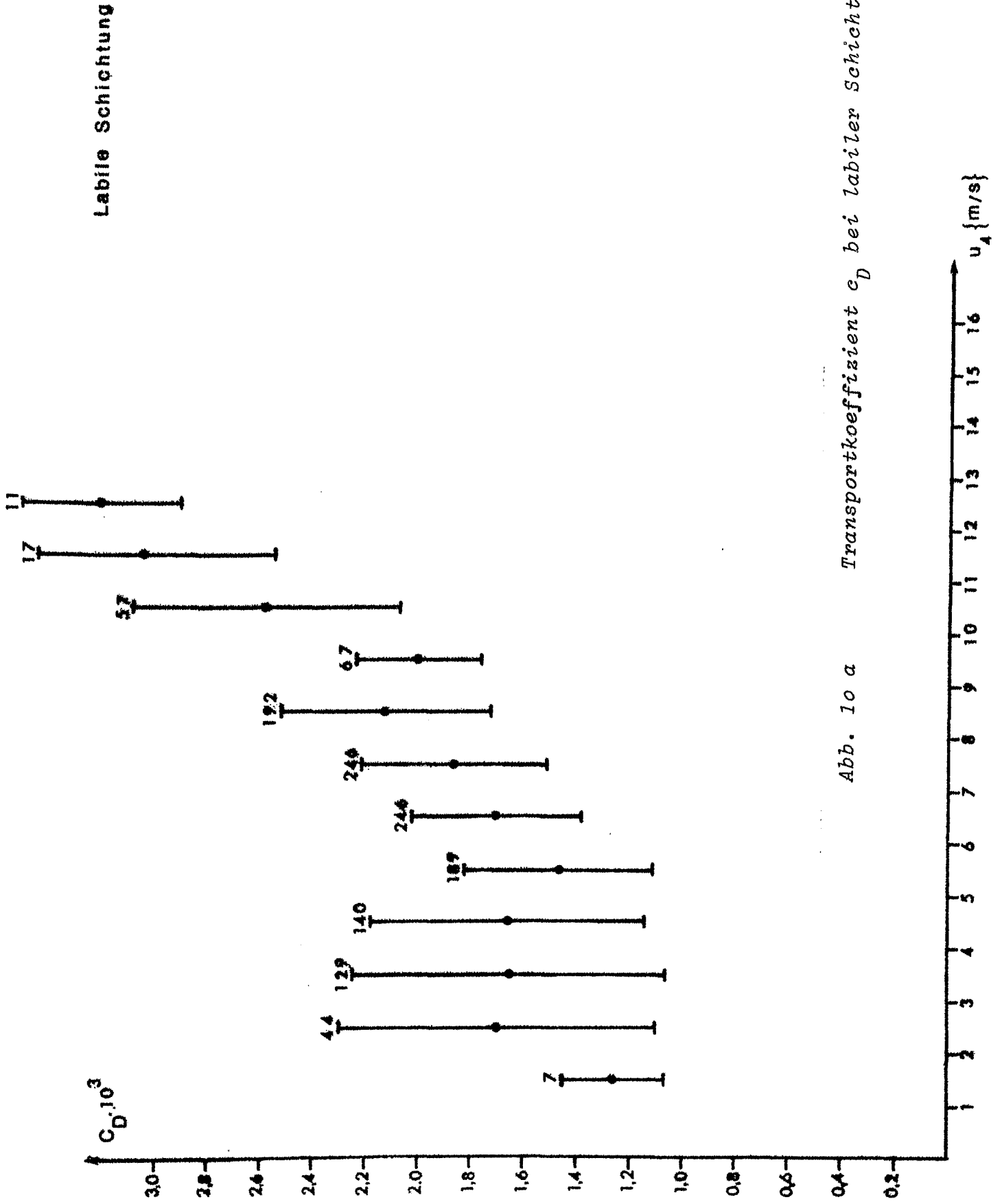


Abb. 10 a Transportkoeffizient c_D bei labiler Schichtung

Stabile Schichtung

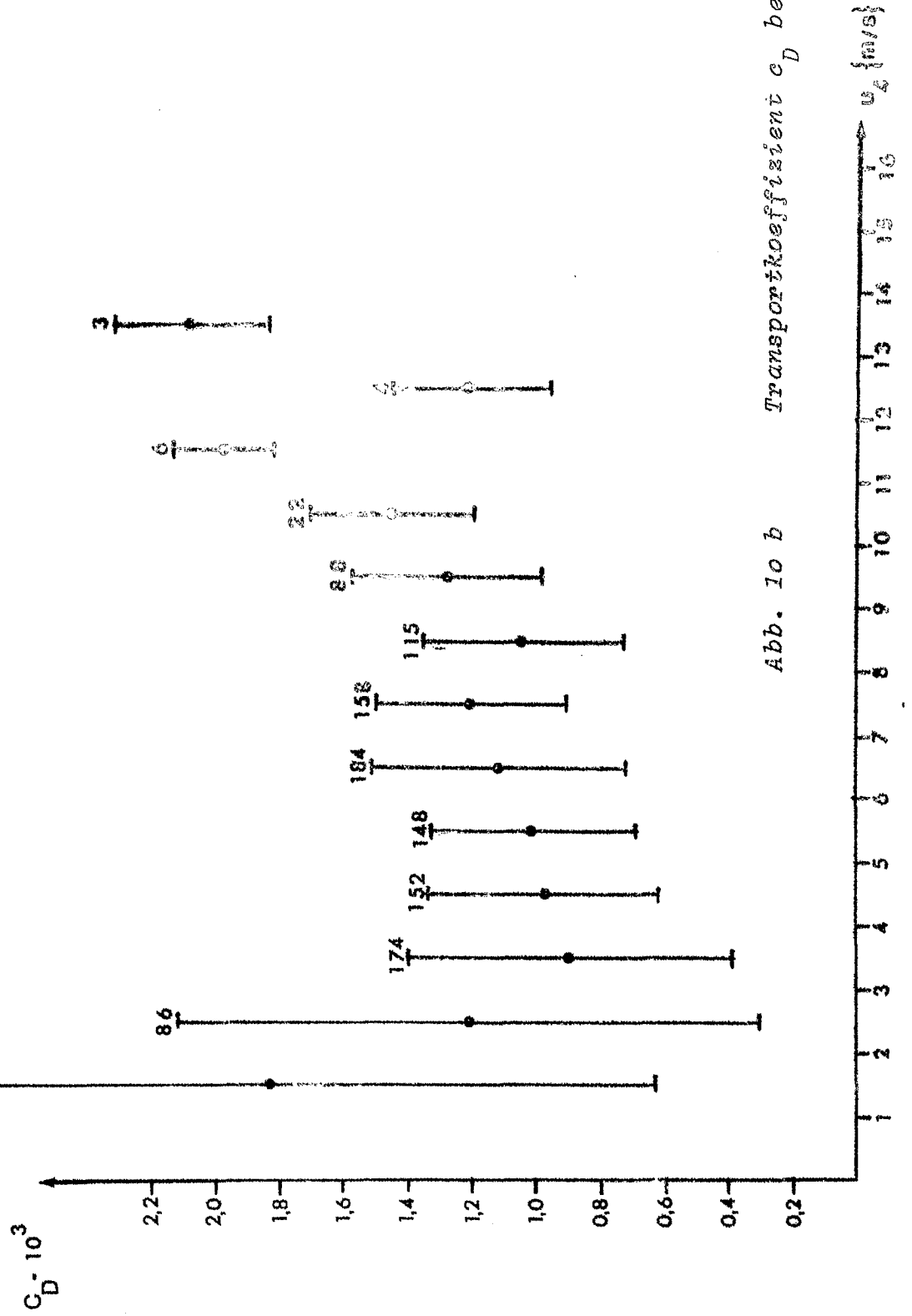
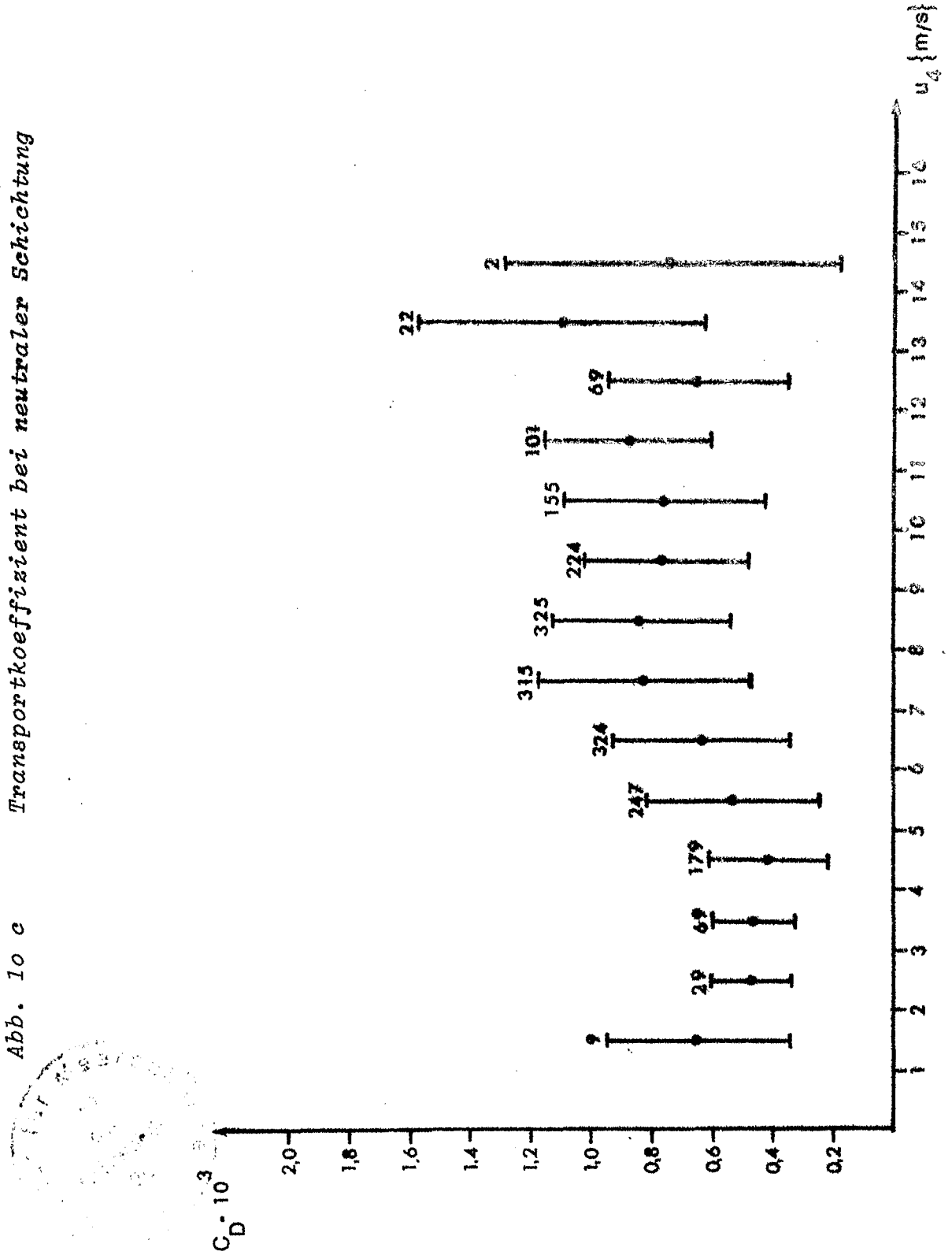


Abb. 10 b Transportkoeffizient c_D bei stabiler Schichtung

Neutrale Schichtung

Abb. 10 c Transportkoeffizient bei neutraler Schichtung



dung nach Schichtungsverhältnissen notwendig zu sein. Die Tabelle 3 zeigt die Mittelwerte aus den Abb. 10 a, b, c.

Tabelle 3 Mittelwerte des Transportkoeffizienten c_D

u_4 -Bereich	0 - 6 m/s	6 - 14 m/s
labil	$(1.56 \pm 0.51) \times 10^{-3}$	$(2.67 \pm 0.37) \times 10^{-3}$
stabil	$(1.19 \pm 0,52) \times 10^{-3}$	$(1.43 \pm 0.33) \times 10^{-3}$
neutral	$(0.51 \pm 0.23) \times 10^{-3}$	$(0.81 \pm 0.32) \times 10^{-3}$

In der Tabelle 4 sind die Werte des Transportkoeffizienten verschiedener Autoren dargestellt, die die Profile überwiegend bei schwach labiler Schichtung berechneten. BROCKS und KRÜGERMEIER (1970) und WU (1969) stellen ein leichtes Anwachsen von c_D mit der Windgeschwindigkeit fest, während SHEPPARD, TRIBBLE and GARRATT (1970) einen sehr steilen, linearen Anstieg mit der Windgeschwindigkeit finden und HOEBER (1968) keine Abhängigkeit sieht. KRÜGERMEIER (1975) und HASSE (1968) zeigen eine leichte Abnahme des Transportkoeffizienten von labiler zu stabiler Schichtung, die jedoch sehr viel kleiner ist als in Abb. 10 a.

Die Werte für z_0 in Abb. 11 entsprechen etwa denen anderer Autoren. BROCKS und KRÜGERMEIER (1970) geben für einen Windgeschwindigkeitsbereich von 4 bis 8 m/s für z_0 Werte von 10^{-4} mm bis 10 mm an. Der Mittelwert bei BEHREND (1976) liegt bei $z_0 = 0.65$ mm. BROCKS und KRÜGERMEIER finden allerdings bei stabiler Schichtung größere Werte für z_0 als bei labiler, was im Gegensatz zu Abb. 11 steht und nach Gl. 23 nicht möglich ist, da diese Gleichung für z_0 und c_D ein gleichzeitiges Anwachsen oder Abnehmen erfordert, und c_D eindeutig bei labiler Schichtung größer ist als bei stabiler. Ein Anwachsen der Rauigkeitshöhe mit der Windgeschwindigkeit ist in Abb. 11 erkennbar und entspricht den Darstellungen von BROCKS und KRÜGERMEIER (1970) und BEHREND (1976).

- x labile Schichtung
- ▼ stabile Schichtung
- neutrale Schichtung

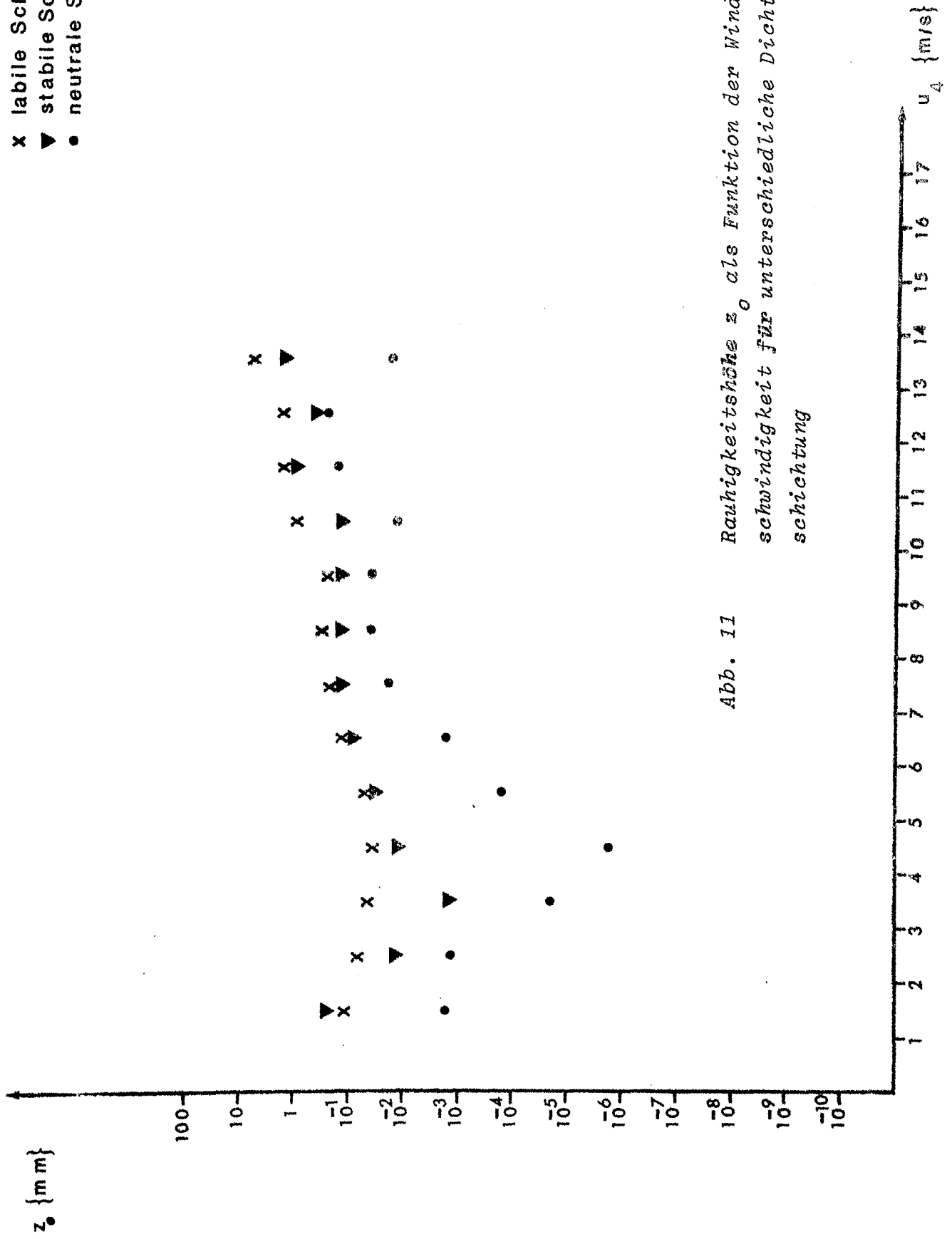


Abb. 11 Rauigkeitshöhe z_0 als Funktion der Windgeschwindigkeit für unterschiedliche Dichteschichtung

Tabelle 4: Einige Werte des Transportkoeffizienten anderer Autoren bezogen auf die Höhe $z = 10 \text{ m}$

Quelle	Meßort	Methode	u-Bereich	$c_D \times 10^3$
BROCKS und KRÜGERMEIER (1970)	Ostsee	Profile	4-12 m/s	$1,36 \pm 0,21$
KRÜGERMEIER (1975)	Ostsee/ Nordsee	Profile	$\bar{u}=7,4 \text{ m/s}$	$1,46 \pm 0,14$
HASSE (1968)	Ostsee	Eddy Flux	$\bar{u}=8,6 \text{ m/s}$	$1,29 \pm 0,24$
SHEPPARD, TRIBBLE u. GARRATT (1972)	See in Irland	Profile	2-16 m/s	$0,6 - 1,8$
POND, PHELPS, PAQUIN, McBEAN, STEWART (1971)	BOMEX	Eddy Flux	4-7 m/s	$1,52 \pm 0,4$
WU (1969)	Ozean- daten	Profile	$0-15 \text{ m/s}$ $u > 15 \text{ m/s}$	$0,5 \times u_{10}$ $2,6$
HOEBER (1969)	Atlantik	Profile	5-11 m/s	$1,23 \pm 0,25$

6.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion

Die Stabilitätsfunktion $\phi_M\left(\frac{z}{L}\right) = 1 + \alpha \frac{z}{L}$ wird aus den Gln. 47 und 39 für das 3. Niveau bestimmt. In der Abb. 13 sind die Funktionen der Profile bei labiler und stabiler Schichtung eingetragen als Mittelwerte für z/L - Bereiche von 0.1.

Im labilen Bereich ist die Stabilitätsfunktion entsprechend der geringeren Windscherung kleiner als 1, wird 1 für $z/L = 0$, steigt dann schnell an bis zu einem Wert von 3 bei $z/L = 0.2$ und nimmt dann mit anwachsender Stabilität bei einer geringeren Steigung höhere Werte an.

YAGLOM (1976) gibt eine gute Zusammenstellung der Funktion verschiedener Autoren, die in Abb. 12 wiedergegeben ist. Zum Vergleich sind einige repräsentative Werte der Abb. 13 als Kreise eingezeichnet.

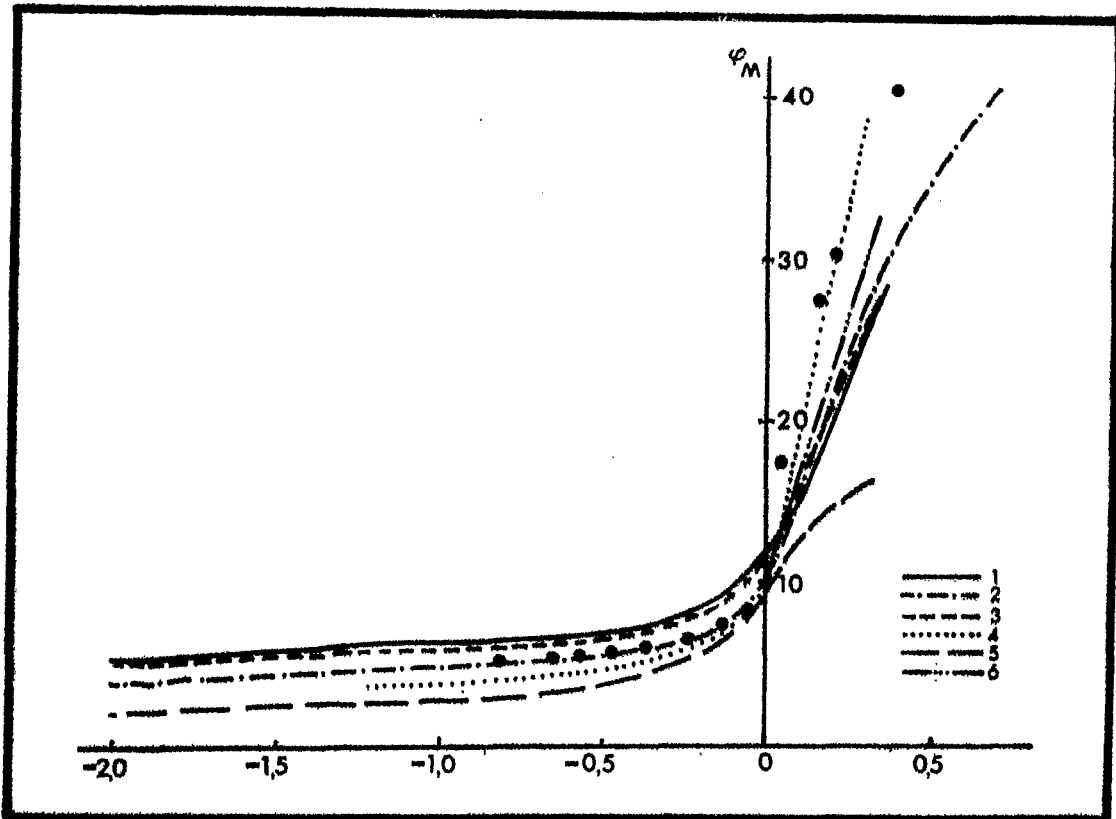


Abb. 12 Stabilitätsfunktionen verschiedener Autoren
nach YAGLOM (1976)
Kreise: Eigene Messungen

Die Steigung im stabilen Bereich ist etwas größer als bei den meisten anderen Autoren, ansonsten ist jedoch eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

In der Abb. 14 ist α_M gegen z/L aufgetragen, sie zeigt also die Steigung der Funktion $\phi_M \left(\frac{z}{L} \right) = 1 + \alpha_M \frac{z}{L}$, und entsprechend der unterschiedlichen Steigung der Funktion in Abb. 13 ist α_M nicht, wie oft angenommen, eine Konstante, sondern hat im labilen Bereich einen Wert zwischen 0.1 und 2 ansteigend zu schwach labiler und neutraler Schichtung, bei der α_M Werte bis über 17 annimmt. Dies entspricht

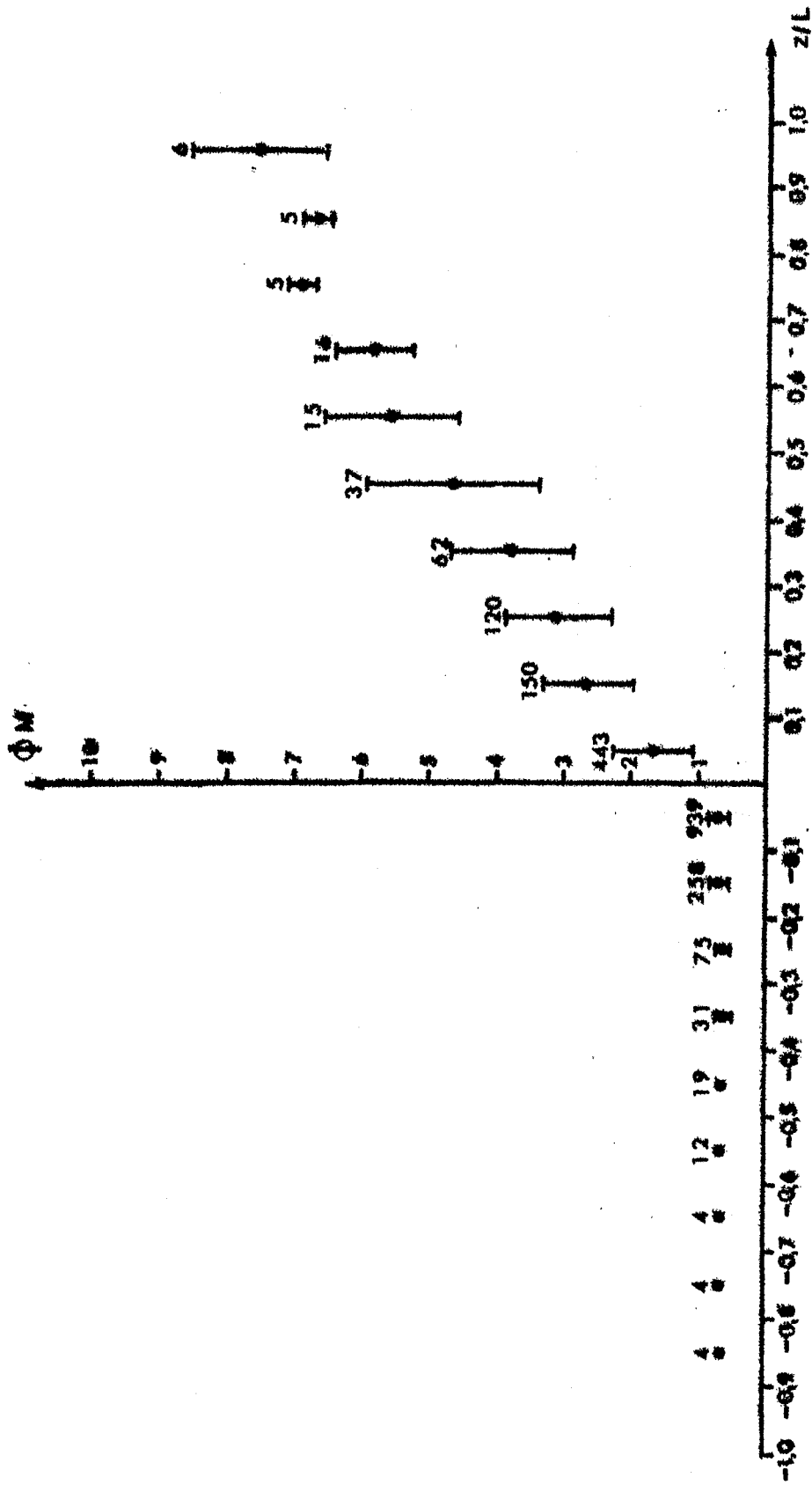
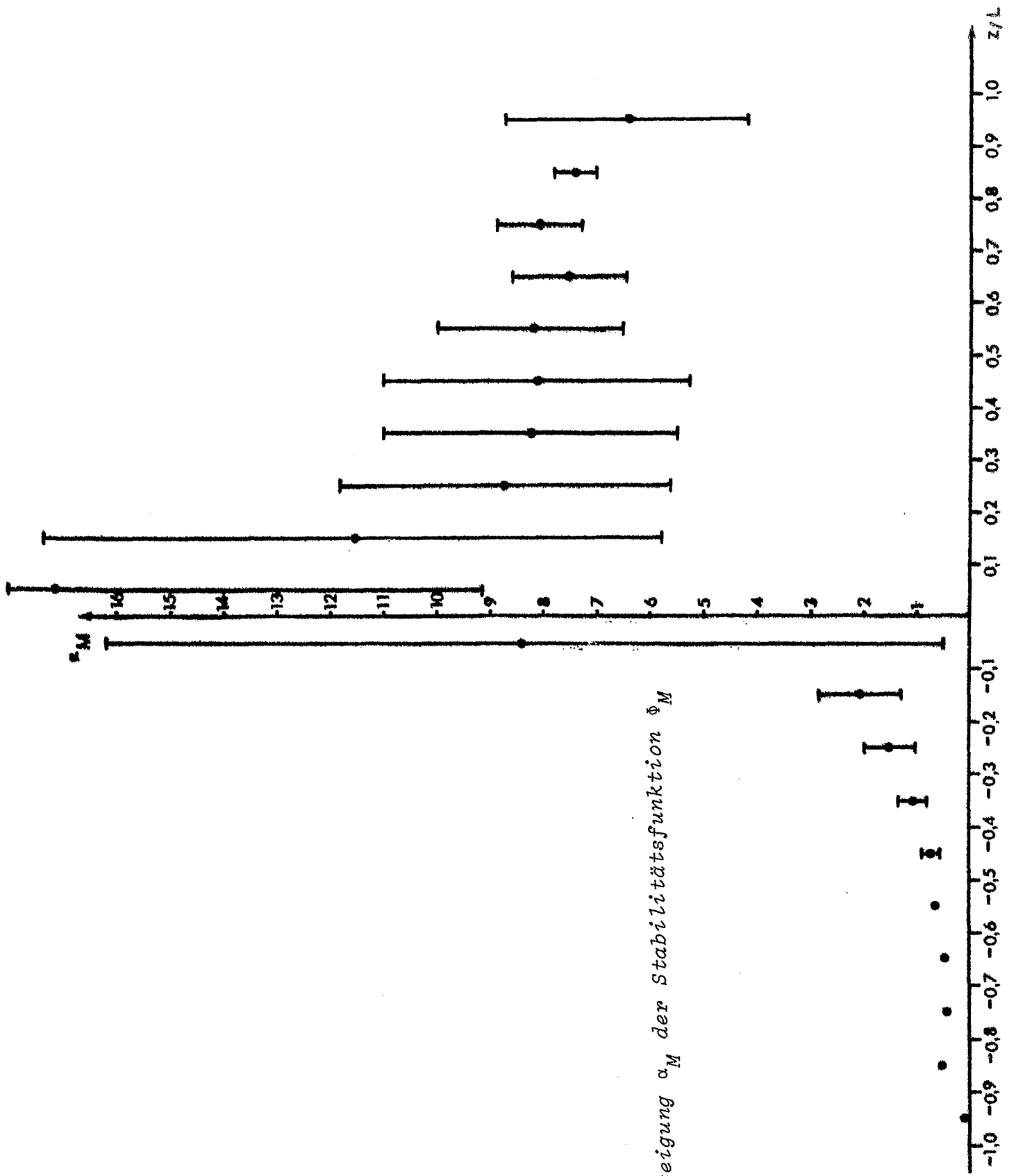


Abb. 13 Stabilitätsfunktion $\phi_M(z/L)$



bb. 14 Steigung α_M der Stabilitätsfunktion ϕ_M

der sehr großen Steigung der Funktion ϕ_M in diesem Bereich. Mit zunehmender Stabilität nimmt α_M kleinere Werte an und geht auf etwa 6 bis 7 zurück. Die Krümmung des Windprofils ändert sich demnach bei labiler Schichtung kaum, wechselt beim Übergang von labiler zu stabiler Schichtung relativ schnell die Krümmungsrichtung und nimmt dann gleichmäßig mit zunehmender Stabilität zu.

In der Literatur wird oftmals für α_M ein konstanter Wert von 4 angenommen. Dies scheint nach Abb. 14 nur bei schwach labiler Schichtung (z/L etwa gleich -0.1) berechtigt zu sein. Eine Erklärung für die Annahme dieses Wertes ist vielleicht, daß die meisten Messungen im schwach labilen Bereich vorgenommen wurden.

7. AUSWAHLKRITERIEN FÜR DIE TEMPERATURPROFILE

Die Auswahlkriterien für die Temperaturprofile ergeben sich aus den Überlegungen in den Abschnitten 3.1. (neutrale Profile werden nicht berechnet) und 5 (gleichmäßige Zu- oder Abnahme ist gefordert) und aus den Forderungen, die Abb. 15 für die Konstanten der Ausgleichsfunktion aufstellt. In dieser Abbildung ist das Temperaturprofil dargestellt, wie es im Idealfall erwartet wird.

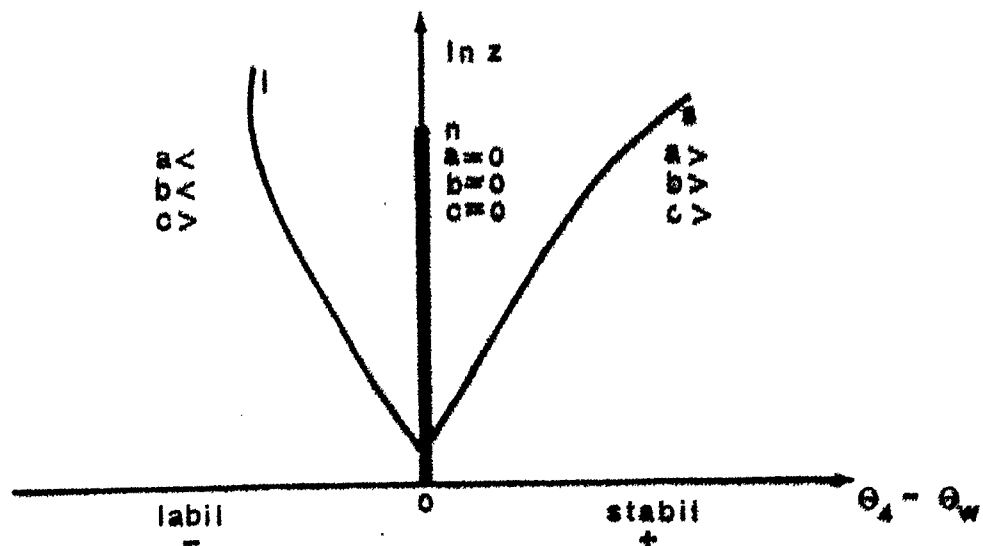


Abb. 15 Temperaturprofil bei labiler (l), neutraler (n) und stabiler (s) Schichtung und Vorzeichen der Konstanten a , b und c der Gl. (36)

Für die Konstanten der Ausgleichsfunktion Gl. 36 gelten also folgende Bedingungen:

- bei stabiler Schichtung: $a > 0, b > 0, c > 0$
- bei neutraler Schichtung: $a = 0, b = 0, c = 0$
- bei labiler Schichtung: $a < 0, b < 0, c > 0$

Der Stabilitätszustand wird also durch das Vorzeichen der Konstanten a und b bestimmt, und nicht wie bei dem Windprofil durch die Konstante c , die beim Temperaturprofil immer größer als 0 sein muß. Dies zeigt die Abb. 15, die im labilen wie im stabilen Fall nur eine positive (d.h. im Uhrzeigersinn) Krümmung zuläßt. Auch die Gl. 47 fordert diese Bedingung, wenn vorausgesetzt wird, daß α_H immer positiv sein soll.

Die Auswahlkriterien für die Temperaturprofile sind folgende:

1. Neutrale Fälle werden nicht berücksichtigt.
2. Bei stabiler Schichtung wird eine kontinuierliche Zunahme der Temperatur mit der Höhe gefordert, bei labiler Schichtung wird eine kontinuierliche Abnahme der Temperatur mit der Höhe gefordert.
3. Bei stabiler Schichtung muß für die Konstanten der Ausgleichsfunktion gelten: $a > 0.02, b > 0$;
bei labiler Schichtung muß für die Konstanten der Ausgleichsfunktion gelten: $a < -0.02, b < 0$.
Der Wert $|a| = 0.02$ als minimale Steigung ergab sich nach Vergleich der Ergebnisse von Profilen mit größerer und kleinerer Steigung. Profile, bei denen $|a|$ kleiner als 0.02 ist, sind so steil, daß sie den neutralen Fällen zuzurechnen sind, bei denen ja eine Bestimmung der Grenzschichtparameter nicht sinnvoll ist.
4. Bei Ausfall des Wasserthermometers wird das Temperaturprofil nicht berechnet. Ausfälle konnten durch eine Zeitreihenanalyse genau datiert werden.

5. Für die Berechnungen des Transportkoeffizienten c_H und der Stabilitätsfunktion müssen die Ergebnisse der Windprofilmessung herangezogen werden (s. Gl. 42 und 47). Für die Berechnung dieser Parameter gelten zusätzlich die Auswahlkriterien der Windprofile.
6. Für die Berechnung der Stabilitätsfunktion muß die Forderung $c > 0$ erfüllt sein. Für die Grenzschichtparameter θ_+ , c_H und z_0 wurde diese Bedingung nicht aufgestellt, da die Konstante c bei der Berechnung dieser Parameter keinen Einfluß hat.

Die Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über die Temperaturprofile und die Anzahl der nach den einzelnen Kriterien ausgefallenen Messungen. 35.1 % aller Profile können wegen des 2. Kriteriums nicht berechnet werden, d.h., sie zeigen bei stabiler (labiler) Schichtung keine kontinuierliche Zunahme (Abnahme) mit der Höhe. Diese Bedingung hätte vielleicht gelockert werden müssen, und eine gewisse diskontinuierliche Zu- oder Abnahme hätte zugelassen werden sollen. Eine Verbesserung der Ergebnisse wäre dadurch allerdings nicht erreicht worden. 8.8 % der Profile können nicht berechnet werden, da das Wasserthermometer defekt war, 5.3 % müssen ausfallen, da sie zu steil sind, und 17.3 % aller Fälle sind neutral, so daß für die Grenzschichtparameter θ_+ und z_0 nur 33.5 % aller Profile berechnet werden konnten. Der Transportkoeffizient c_H konnte aus 21.6 % der Profile bestimmt werden, und die Stabilitätsfunktion ϕ_H nur aus 17.2 %.

		MS 1	MS 2	MS 3	MS 4	MS 5	MS 6	MS 7	MS 8	gesamter Zeitraum
		28.5.- 8.6.	9.6.- 25.6.	27.6.- 16.7.	16.7.- 6.8.	6.8.- 27.8.	27.8.- 13.9.	13.9.- 2.10.	3.10.- 25.10.	28. 5.- 25.10.
alle Profile		1045	1361	1795	1874	1485	1059	1030	1382	11 031
berech- nete Profile	S	124	339	134	20	119	23	6	18	783
	L	507	251	276	418	188	654	305	315	2 914
neutrale Fälle	1	74	282	335	559	98	87	268	203	1 906
Ausfälle durch Kriterium	2	260	359	948	674	621	232	221	560	3 875
	3	80	108	102	55	38	63	41	97	584
	4		22		148	421		189	189	969
(c_H, ϕ, α)	5	326	137	199	165	133	96	183	78	1 317
(ϕ, α)	6	184	210	187	98	116	451	237	312	1 795
Gesamtzahl der Aus- fälle durch Kriterium 1-4		414	771	1385	1436	1178	382	619	1049	7 234
Gesamtzahl der berech- neten Profile (ohne Ausfäl- le nach 5+6)		631	590	410	438	307	677	311	333	3 697

Tabelle 5: Aufstellung der Temperaturprofile
(Anzahl der Mittelwerte über 16 Minuten)

8. ERGEBNISSE DER TEMPERATURPROFILMESSUNGEN

8.1. Bestimmung von θ_+ , c_H und z_θ

In den Abb. 16, 17 und 18 sind das Temperaturmaß θ_+ , der Transportkoeffizient c_H und die Integrationskonstante für das Temperaturprofil, z_θ , gegen die Differenz $\theta_4 - \theta_w$ dargestellt.

Abb. 16 zeigt einen ziemlich gleichmäßigen Anstieg von θ_+ mit der Temperaturdifferenz $\theta_4 - \theta_w$. Dieses war zu erwarten, da θ_+ die Steigung des Temperaturprofils angibt, und diese Steigung ja im wesentlichen von der Temperaturdifferenz $\theta_4 - \theta_w$ bestimmt wird. Die Abbildung bestätigt, daß die Ausgleichung nach Gl. 36 eine gute Annäherung an die Temperaturprofile darstellt.

Der Transportkoeffizient c_H , in Abb. 17 dargestellt, nimmt den größten Wert bei nahe neutraler Schichtung an und fällt dann zu größerer Stabilität und Labilität ab. Das bedeutet, daß der sensible Wärmefluß nicht linear mit der Temperaturdifferenz anwächst (das wäre bei einem konstanten c_H der Fall), sondern die Steigung mit zunehmender Stabilität oder Labilität geringer wird.

KRÜGERMEIER (1975) gibt aus APEX-Messungen für c_H einen Wert von $(1.53 \pm 0.35) \times 10^{-3}$ aus Profilmessungen an, und aus Eddy correlation - Messungen $(1.45 \pm 0.25) \times 10^{-3}$ bis $(2.52 \pm 0.89) \times 10^{-3}$. POND, PHELPS, PAQUIN, McBEAN and STEWART (1971) bestimmen c_H nach der Eddy-Flux- und der Dissipationsmethode und erhalten einen Wert von 0.9×10^{-3} bis 14×10^{-3} . HASSE (1968) gibt einen Wert von 1×10^{-3} an, und BUSINGER (1975) und FISSEL, POND und MIYAKE (1976) halten einen Wert von 1.5×10^{-3} für angemessen. Die Abb. 17 zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Angaben dieser Autoren. Im labilen Bereich beträgt der Mittelwert 1.15×10^{-3} , im stabilen 1.30×10^{-3} .

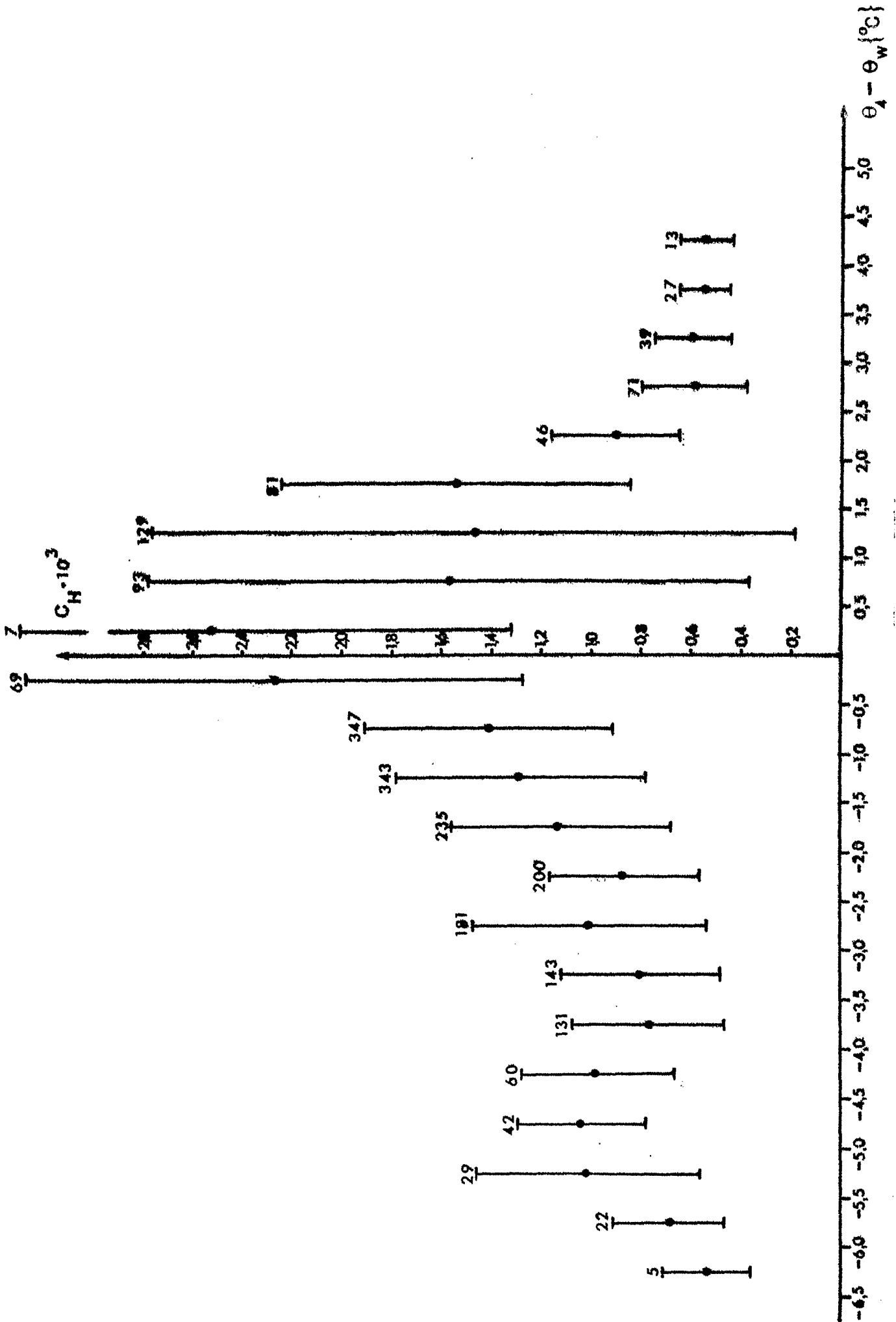


Abb. 17 Transportkoeffizient c_H als Funktion der Differenz $\theta_4 - \theta_w$

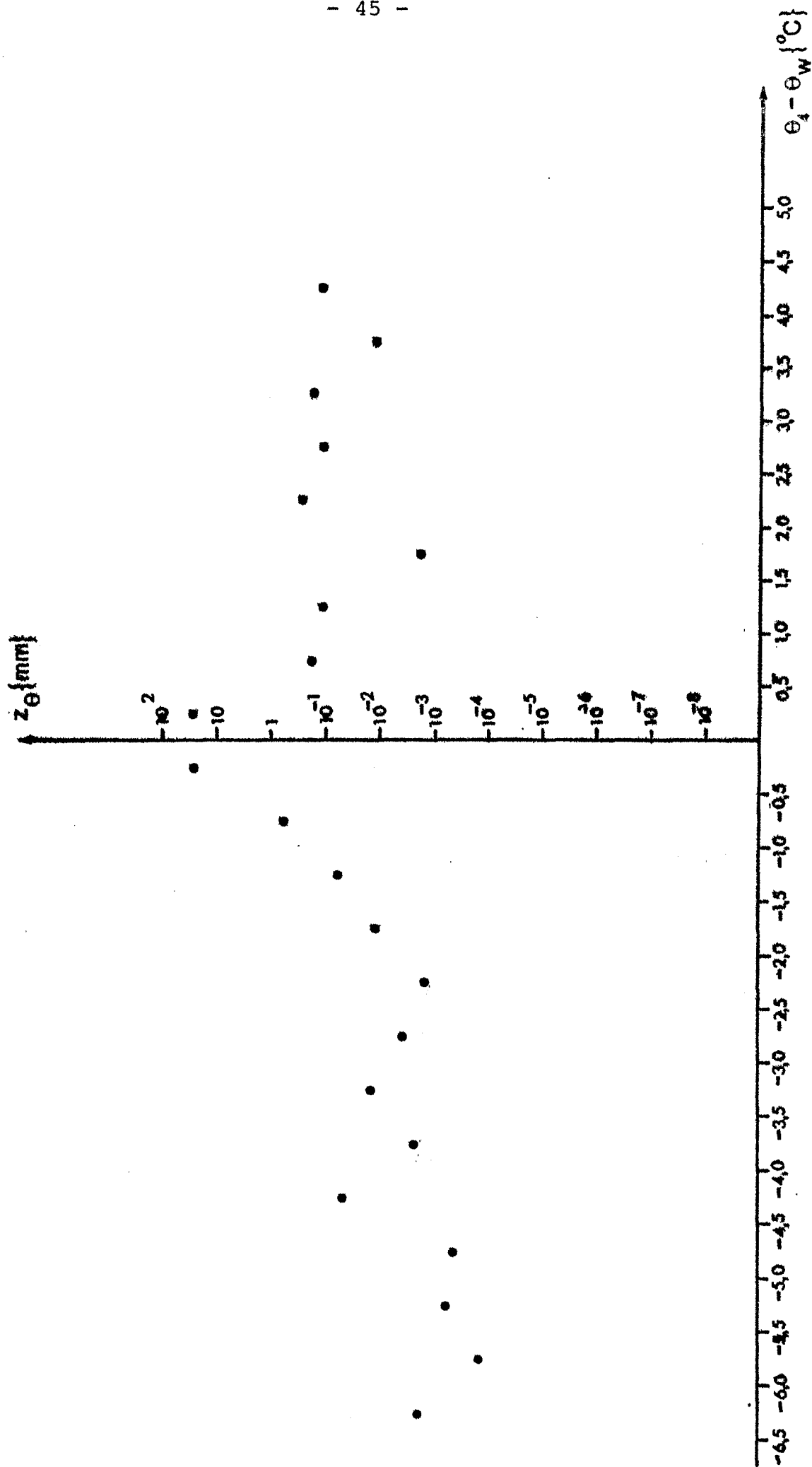


Abb. 18 z_{θ} als Funktion der Differenz $\theta_1 - \theta_w$

In der Abb. 18 ist z_{\ominus} dargestellt, also die Höhe, in der die Lufttemperatur den Wert der Wassertemperatur annimmt. Erwartungsgemäß ist z_{\ominus} bei nahe neutraler Dichteschichtung am größten und hat einen Wert von etwa 40 mm. Im stabilen Bereich schwankt z_{\ominus} um 0,1 mm und nimmt bei labiler Schichtung Werte um 0,01 mm an, wobei es mit zunehmender Labilität abnimmt.

8.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion

In der Abb. 20 ist die Stabilitätsfunktion ϕ_H für das Temperaturprofil dargestellt. Sie gibt die Krümmung der Temperaturprofile in Abhängigkeit von der Dichteschichtung an. Für neutrale Schichtung nimmt ϕ_H den Wert 1 an, das Temperaturprofil ist also nicht gekrümmt. Mit zunehmender Stabilität wird die Krümmung sehr schnell größer, während sie im labilen Bereich etwa gleichmäßig gering bleibt. Die Steigung der Funktion, α_H , ist in Abb. 21 dargestellt. Sie ist bei nahe neutraler Schichtung am größten - zwischen 10 und 11 - , schwankt im stabilen Bereich zwischen 6 und 7 und nimmt im labilen Bereich Werte um 0,5 an. YAGLOM (1976) gibt eine gute Zusammenstellung der Stabilitätsfunktionen verschiedener Autoren, die in Abb. 19 wiedergegeben ist; als Kreise sind einige Werte der Abb. 20 zum Vergleich eingezeichnet, die eine gute Übereinstimmung mit den Kurven der anderen Autoren zeigen.

Für den erwartungsgemäßen Verlauf der Stabilitätsfunktion war das 6. Kriterium ($c > 0$) von entscheidender Bedeutung. Bei 16,3 % aller Temperaturprofile war diese Forderung nicht erfüllt, so daß sie nicht zur Bestimmung von ϕ_H herangezogen wurden. Eine Berücksichtigung dieser 'fehlerhaften' Profile hätte bedeutet, daß die Funktion ϕ_H auch im labilen Bereich Werte annimmt, die größer als 1 sind. Diese Temperaturprofile hätten also im labilen Bereich eine Krümmung gezeigt, wie sie dem stabilen Zu-

stand entspricht. Die Ursache hierfür dürfte zu einem Teil in Ungenauigkeiten bei der Temperaturmessung zu finden sein.

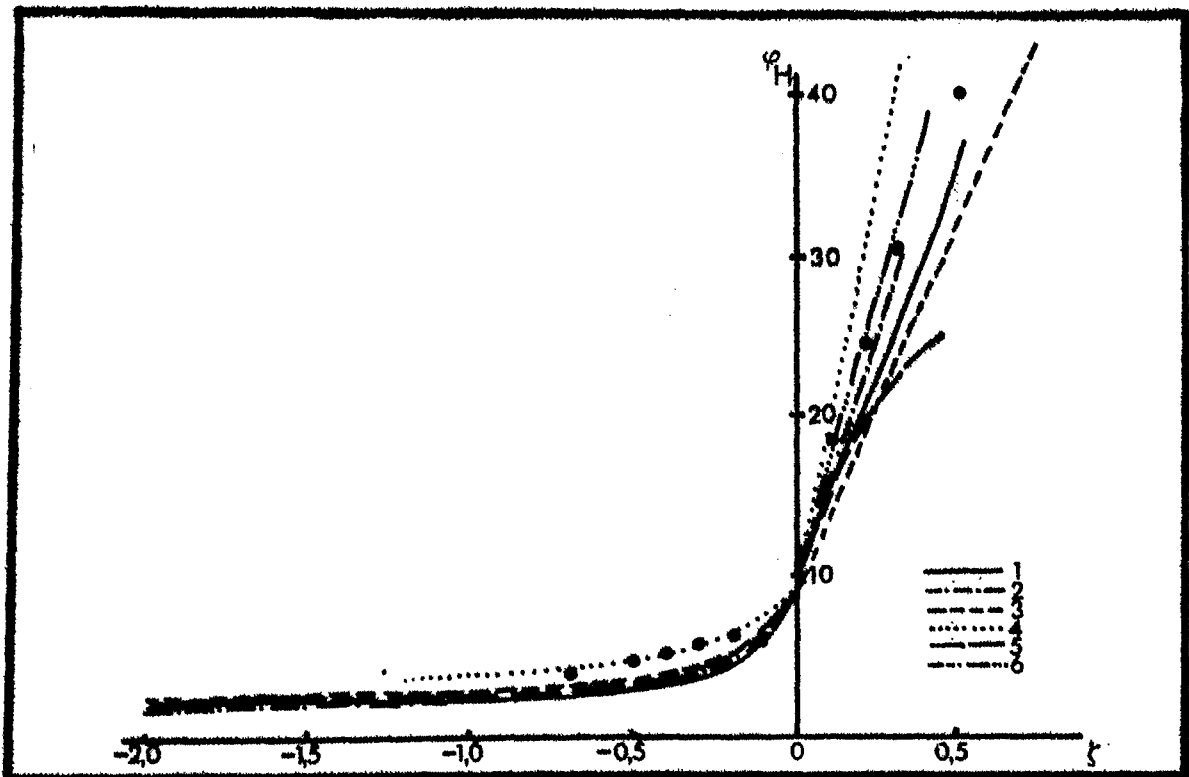


Abb. 19: Stabilitätsfunktionen ϕ_H verschiedener Autoren nach YAGLOM (1976)
Kreise: eigene Messungen

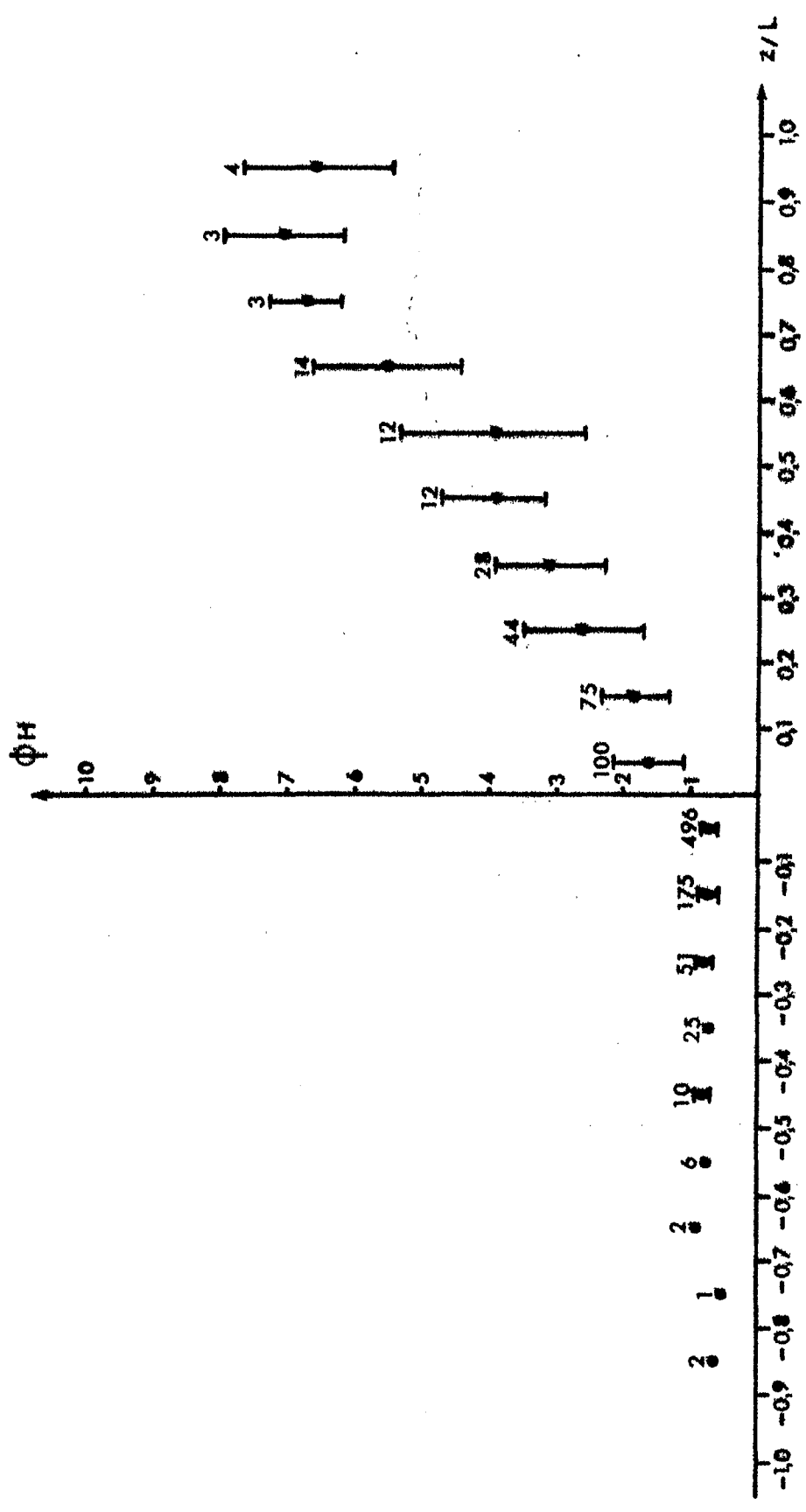


Abb. 20 Stabilitätsfunktion $\phi_H(z/L)$

9. AUSWAHLKRITERIEN FÜR DIE FEUCHTEPROFILE

In der Abb. 22 ist das Profil der spezifischen Feuchte dargestellt, wie es im Idealfall erwartet wird. Die Auswahlkriterien für die Feuchteprofile ergeben sich aus dieser Abbildung sowie aus Abschnitt 5 (eindeutig gestörte Profile werden nicht berechnet) und aus einem Vergleich der berechneten Grenzschichtparameter bei verschiedenen Werten für das 4. Kriterium.

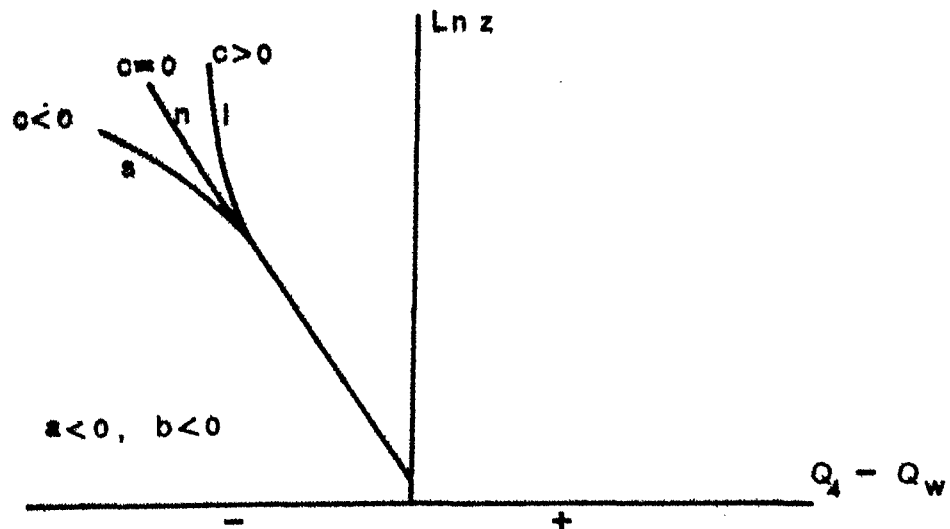


Abb. 22 Profil der spezifischen Feuchte bei labiler (l), neutraler (n) und stabiler (s) Schichtung und Vorzeichen der Konstanten a , b und c der Gl. (36)

Für die Konstanten der Ausgleichsfunktion gelten folgende Bedingungen:

- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| bei stabiler Schichtung: | $a < 0, b < 0, c < 0$ |
| bei neutraler Schichtung: | $a < 0, b < 0, c = 0$ |
| bei labiler Schichtung: | $a < 0, b < 0, c > 0$ |

Die Konstanten haben dem Windprofil entgegengesetzte Vorzeichen, und der Stabilitätszustand wird wieder durch die Konstante c bestimmt. Bei labiler Schichtung zeigt das Profil eine positive Krümmung (im Uhrzeigersinn) ($c > 0$), d.h., der Ausgleich zwischen den Höhen ist größer als bei neutraler Schichtung, während bei stabiler Schichtung die Feuchtedifferenzen zwischen den Höhen größer sind ($c < 0$) als bei neutraler Dichteschichtung.

Bei dieser Betrachtung wurde davon ausgegangen, daß die spezifische Feuchte an der Meeresoberfläche größer ist als in den darüberliegenden Höhen, und daß mit zunehmender Höhe die Feuchte abnimmt. Diese Annahme muß nicht immer den realen Bedingungen entsprechen, man denke z.B. an Nebelbildung etwas oberhalb der Meeresoberfläche. Da tatsächlich die Messungen sehr oft keine kontinuierliche Abnahme mit der Höhe zeigten - besonders oft wurde in der zweiten Höhe eine 'zu kleine' spezifische Feuchte gemessen - mußte die Bedingung einer kontinuierlichen Abnahme gelockert werden und eine um 0.2 g/kg höhere Feuchte in einer tieferliegenden Höhe wurde noch zugelassen (4. Kriterium), da diese Abweichung vom idealen Profil bei der überwiegenden Zahl der Profile auftrat und nicht eindeutig auf Meßfehler zurückgeführt werden konnte. Eine negative Steigung des ganzen Profils ($a < 0$) mußte jedoch gefordert werden, da andernfalls eine Berechnung der Grenzschichtparameter nach der Profilmethode unmöglich wird (falsche Vorzeichen).

Die Auswahlkriterien für die Feuchteprofile sind folgende:

1. Bei Ausfall des Wasserthermometers wird das Feuchteprofil nicht berechnet.
2. Bei Ausfall eines Temperaturmeßfühlers (Feucht- oder Trockentemperatur) wird das Profil nicht berechnet. Diese Ausfälle konnten durch eine Zeitreihenanalyse der Daten festgestellt werden.

3. Für die Berechnung des Transportkoeffizienten c_E und der Stabilitätsfunktion gelten zusätzlich die Kriterien der Windprofile.
4. Für die Differenz der spezifischen Feuchte zwischen den Höhen muß gelten:

$$Q_4 - Q_3 < 0.2 \text{ g/kg}$$

$$Q_3 - Q_2 < 0.2 \text{ g/kg}$$

$$\text{und } Q_2 - Q_1 < 0.2 \text{ g/kg}$$

5. Für die Konstanten a und b der Ausgleichsfunktion Gl. 36 muß gelten:

$$a < -0.1 \text{ g/kg}, b < 0 \text{ g/kg}$$

Die Bedingung $a < -0.1$ ergab sich bei Vergleich der Ergebnisse mit größerer und kleinerer Steigung. Profile, bei denen $a > -0.1$ ist, sind so steil, daß eine Berechnung der Grenzschichtparameter nicht sinnvoll ist.

6. Für die Berechnung der Stabilitätsfunktion muß für die Konstante c gelten:

bei labiler Schichtung: $c > 0 \text{ g/kg m}$

bei stabiler Schichtung: $c < 0 \text{ g/kg m}$

Für die Berechnung der Grenzschichtparameter Q_+ , c_E und z_E wurde diese Bedingung nicht aufgestellt, da die Konstante c bei der Berechnung dieser Parameter keinen Einfluß hat.

In der Tabelle 6 ist eine Aufstellung der Feuchteprofile dargestellt, in der die Ausfälle nach den verschiedenen Kriterien aufgelistet sind. Wenn ein Profil wegen eines Kriteriums nicht berechnet wurde, wurde es nicht mehr nach den anderen Kriterien untersucht. Die Kriterien wurden in der Reihenfolge ihrer Auflistung angewendet. Die Feuchteprofile für die erste Meßserie wurden nicht berechnet, da die Feuchttemperatur in der zweiten Höhe während der gesamten Zeit eindeutig einen zu geringen Wert anzeigte.

Für die Grenzschichtparameter Q_+ und z_E wurden 36 % aller Profile berechnet, da 10,6 % wegen eines defekten Wasserthermometers ausfielen, 27,8 % nicht berechnet werden konnten, da entweder ein Temperaturfühler ausgefallen war oder die Feuchtedifferenz zwischen zwei Höhen größer als 0,2 g/kg war, und da bei 25,6 % aller Profile die Konstante a größer als -0,1 g/kg war, das Profil also zu steil war.

Bei der Berechnung des Transportkoeffizienten c_E und der Stabilitätsfunktion wurde das 3. Kriterium vor den anderen angewendet; die Anzahl der unter diese Kriterien fallenden Profile gilt also nicht bei der Berechnung der Stabilitätsfunktion und des Transportkoeffizienten.

10. ERGEBNISSE DER FEUCHTEPROFILMESSUNGEN

10.1. Bestimmung von Q_+ , c_E und z_E

In den Abb. 23, 24 und 25 sind die Grenzschichtparameter Q_+ , c_E und z_E gegen die Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$ aufgetragen. Es wurde zwischen labiler und stabiler Dichteschichtung unterschieden. Die Anzahl der Profile ist wieder am oberen Rand eingetragen. Vergleichsdarstellungen für Q_+ und z_E sind in der Literatur leider kaum vorhanden.

Die Abb. 23 zeigt ein Anwachsen von Q_+ in Parabelform mit anwachsender Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$, wobei die Werte für stabile Dichteschichtung etwas größer sind als bei den labilen Fällen. Das Feuchteprofil hat erwartungsgemäß bei labiler Schichtung wegen der größeren Vermischung zwischen den Höhen eine geringere Neigung als bei stabiler Dichteschichtung. Mit zunehmender Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$ nimmt der Unterschied zwischen den labilen und stabilen Werten für Q_+ zu. Dies ist auf den Einfluß des Wasserdampfgradienten auf die Dichteschichtung zurückzuführen, der hier je-

doch nicht untersucht werden soll.

Die Abb. 24 zeigt den Transportkoeffizienten c_E in Abhängigkeit von der Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$. Hier bestand kein wesentlicher Unterschied zwischen labiler und stabiler Schichtung, so daß die angegebenen Werte für alle Schichtungsverhältnisse gelten. c_E zeigt eine deutliche Abnahme mit zunehmender Feuchtedifferenz, d.h., der Feuchtetransport ist nicht so sehr von der Feuchtedifferenz abhängig (dieser Einfluß wird durch die Abnahme von c_E gedämpft), sondern wird im wesentlichen von der Windgeschwindigkeit bestimmt (s. Gl. 19). Die zu hohen Werte bei Feuchtedifferenzen bis zu -2 g/kg sind auf eine ungenaue Ausgleichung der Profile zurückzuführen, die bei diesen geringen Feuchtedifferenzen noch zu steil für genaue Berechnungen nach der Profilmethode sind. Der maximale Wert für die Konstante $a_{\max} = -0.1$ scheint doch noch zu groß gewesen zu sein.

KRÜGERMEIER (1975) gibt aus Profilmessungen während APEX für c_E den Wert von $c_E = (1.34 \pm 0.21) \times 10^{-3}$ an und aus direkten Messungen während BOMEX $c_E = (1.22 \pm 0.14) \times 10^{-3}$ wobei er ein Anwachsen des Wertes mit zunehmender Labilität feststellt.

BUSINGER (1975) hält einen Wert von $c_E = 1.5 \times 10^{-3}$ für wahrscheinlich und KITAYGORODSKIY et al. (1973) bestimmt einen Wert von $c_E = (1.0 \pm 0.27) \times 10^{-3}$.

Die Höhe z_E , in der die Luftfeuchte der Sättigungsfeuchte bei der Wassertemperatur entspricht, ist in Abb. 25 dargestellt. Sie nimmt erwartungsgemäß mit zunehmender Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$ ab und liegt im Mittel bei 1 bis 5 mm.

▼ stabile Schichtung
 • labile Schichtung

h	266	741	634	483	316	128	65	14	19	7
17	191	325	184	76	76	37	9			

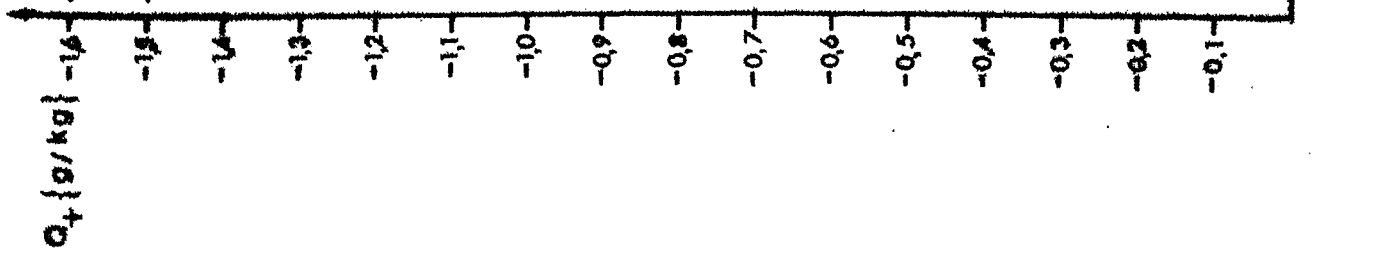


Abb. 23 Feuchtemaß Q_4 als Funktion der Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$ für labile und stabile Schichtung

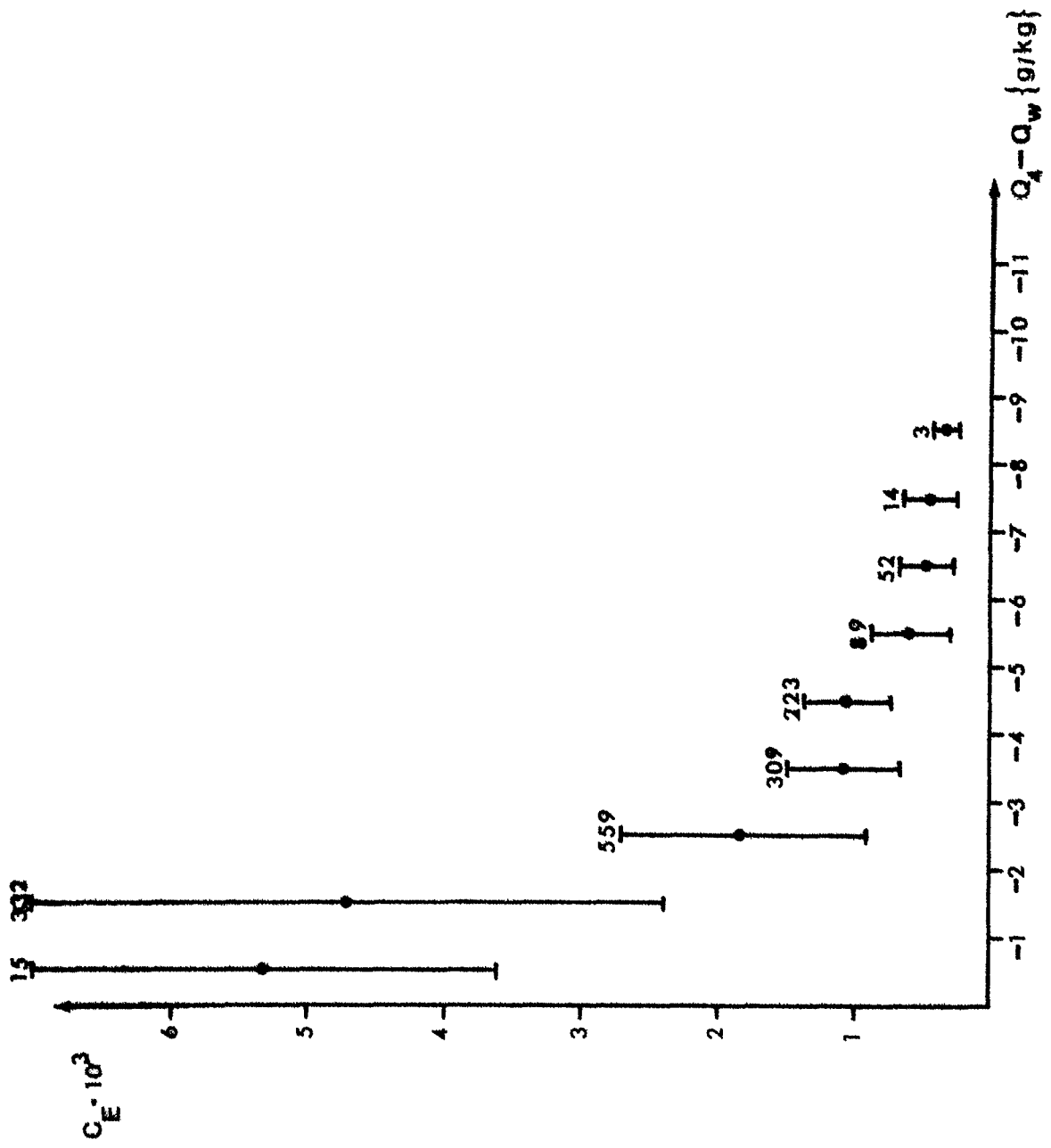


Abb. 24 Transportkoeffizient C_E als Funktion der Differenz $Q_4 - Q_w$

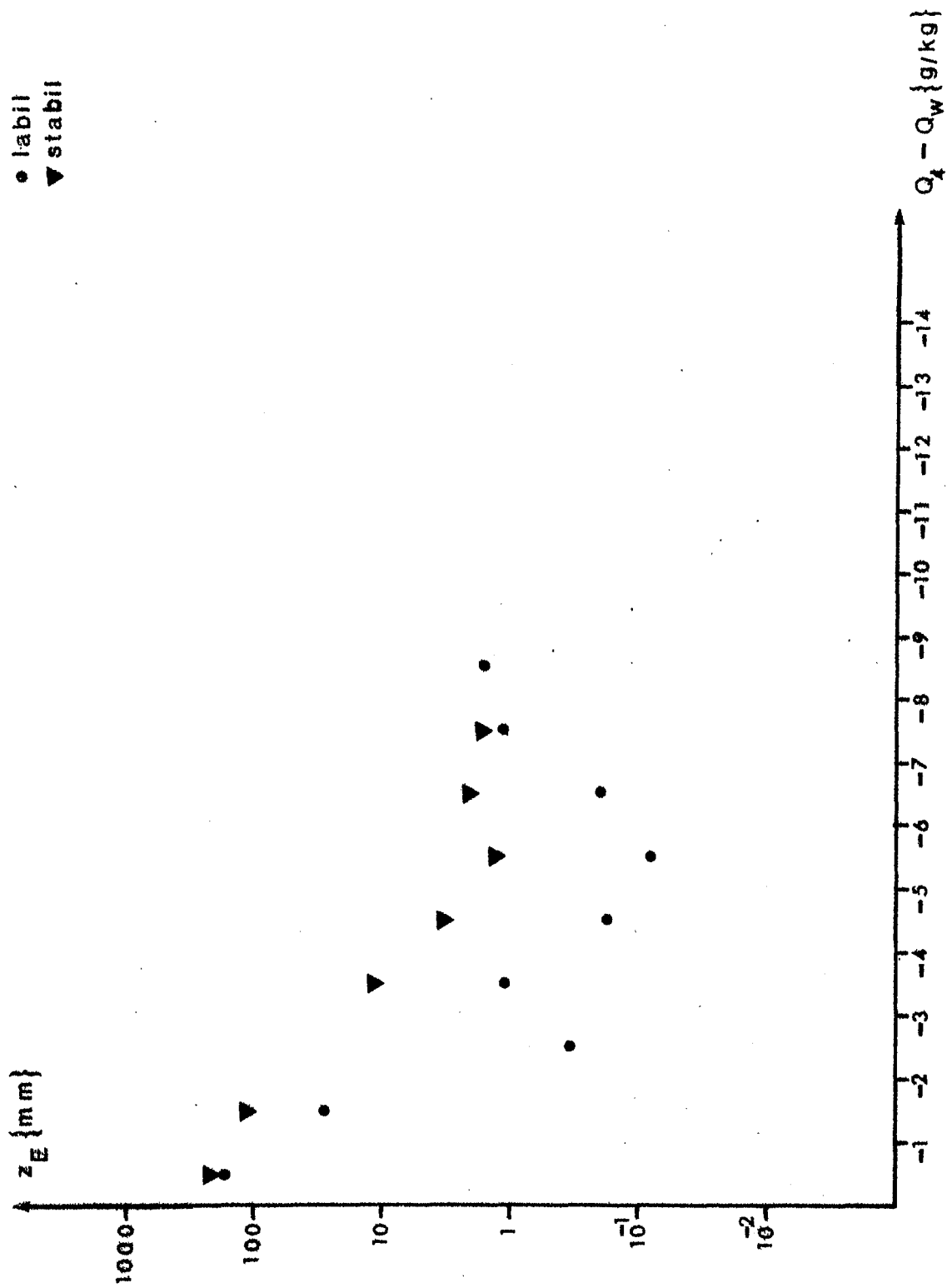


Abb. 25 Z_E als Funktion der Feuchtedifferenz $Q_4 - Q_w$
für stabile und labile Schichtung

10.2. Bestimmung der Stabilitätsfunktion

In der Abb. 27 ist die Stabilitätsfunktion ϕ_E gegen den Stabilitätsparameter z/L aufgetragen. Diese zeigt ebenso wie die Darstellung von α_E in Abb. 28 den gleichen Verlauf wie die Funktionen für die Temperaturprofile. Die in der Literatur oft angenommene Übereinstimmung der Stabilitätsfunktionen für die Temperatur- und Feuchteprofile wird also bestätigt. Allein die sehr große Steigung von ϕ_E im schwach stabilen Bereich ($0 < z/L < 0.1$) ist unerwartet und muß auf die zu steilen Profile in diesem fast neutralen Bereich zurückgeführt werden. Ansonsten schwanken α_H und α_E im stabilen Bereich zwischen 6 und 7. Wie bei den Stabilitätsfunktionen für die Wind- und Temperaturprofile war auch bei den Feuchteprofilen das 6. Kriterium (richtiges Vorzeichen der Konstanten c) entscheidend für den erwarteten Verlauf der Stabilitätsfunktion. Auch ϕ_E wäre bei falschem Vorzeichen der Konstanten c im labilen Bereich größer als 1 geworden.

In der Abb. 26 ist zum Vergleich eine Darstellung der Stabilitätsfunktion ϕ_E von DYER (1974) wiedergegeben, in die Funktionen verschiedener Autoren eingezeichnet sind. Wieder sind einige Werte der Abb. 27 als Kreise eingezeichnet.

Im labilen Bereich liegt die Funktion etwas oberhalb der von DYER eingezeichneten, während im stabilen Bereich beide Funktionen gut übereinstimmen. Für den stabilen Bereich gibt DYER (1974) die Funktion an:

$$\phi_E = 1 + 5 (z/L) ,$$

während die Funktion der Abb. 27 im stabilen Bereich

$$\phi_E = 1 + 6 (z/L)$$

lautet.

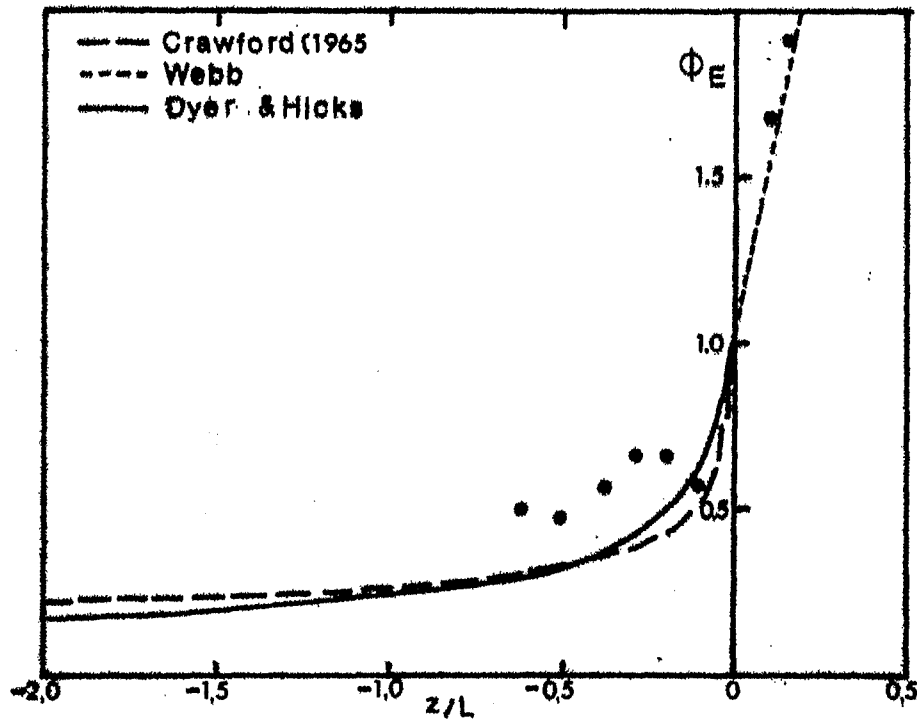


Abb. 26 Darstellung der Stabilitätsfunktion Φ_E verschiedener Autoren nach DYER (1974)

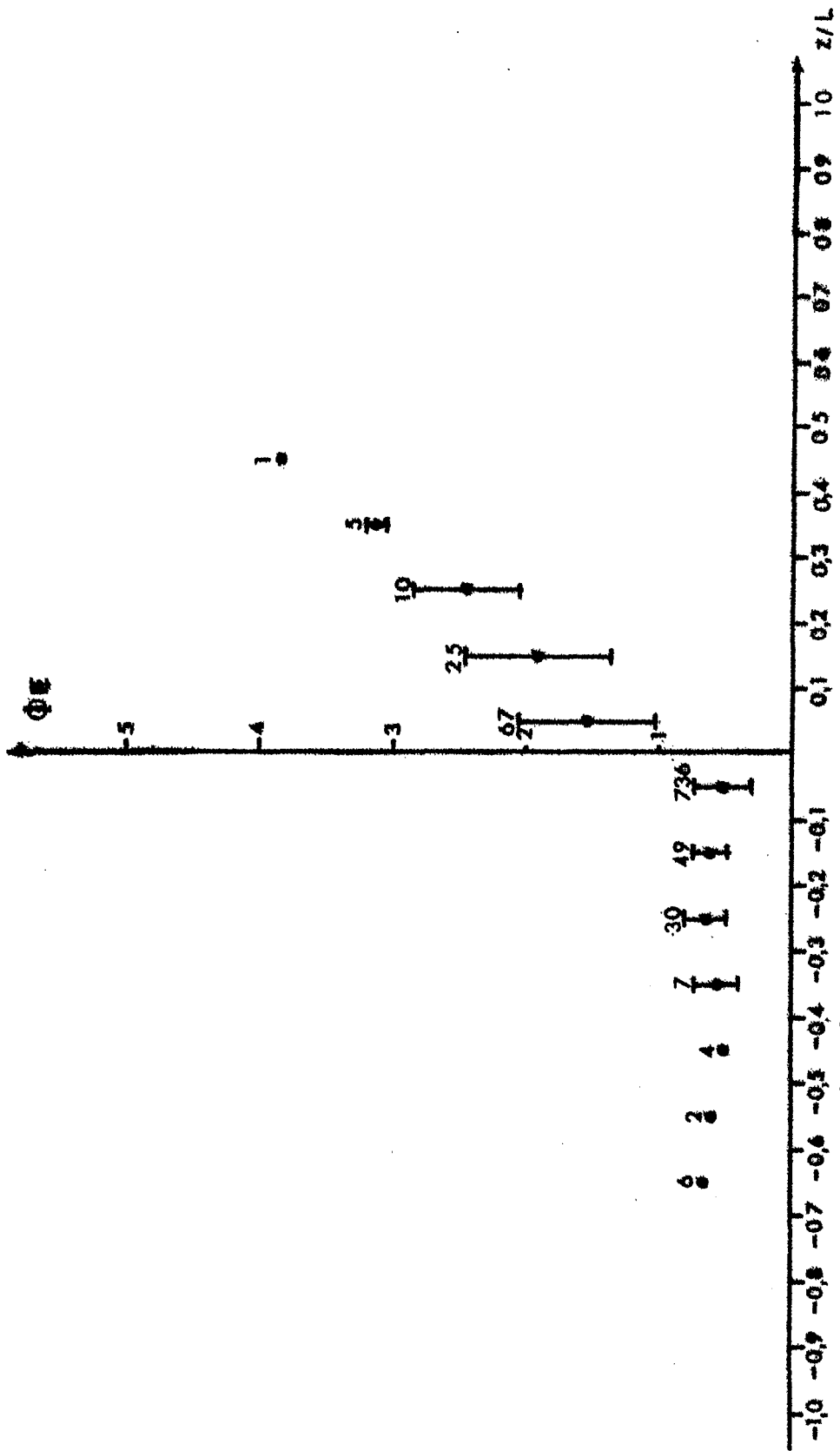


Abb. 27 Stabilitätsfunktion $\Phi_E(z/L)$

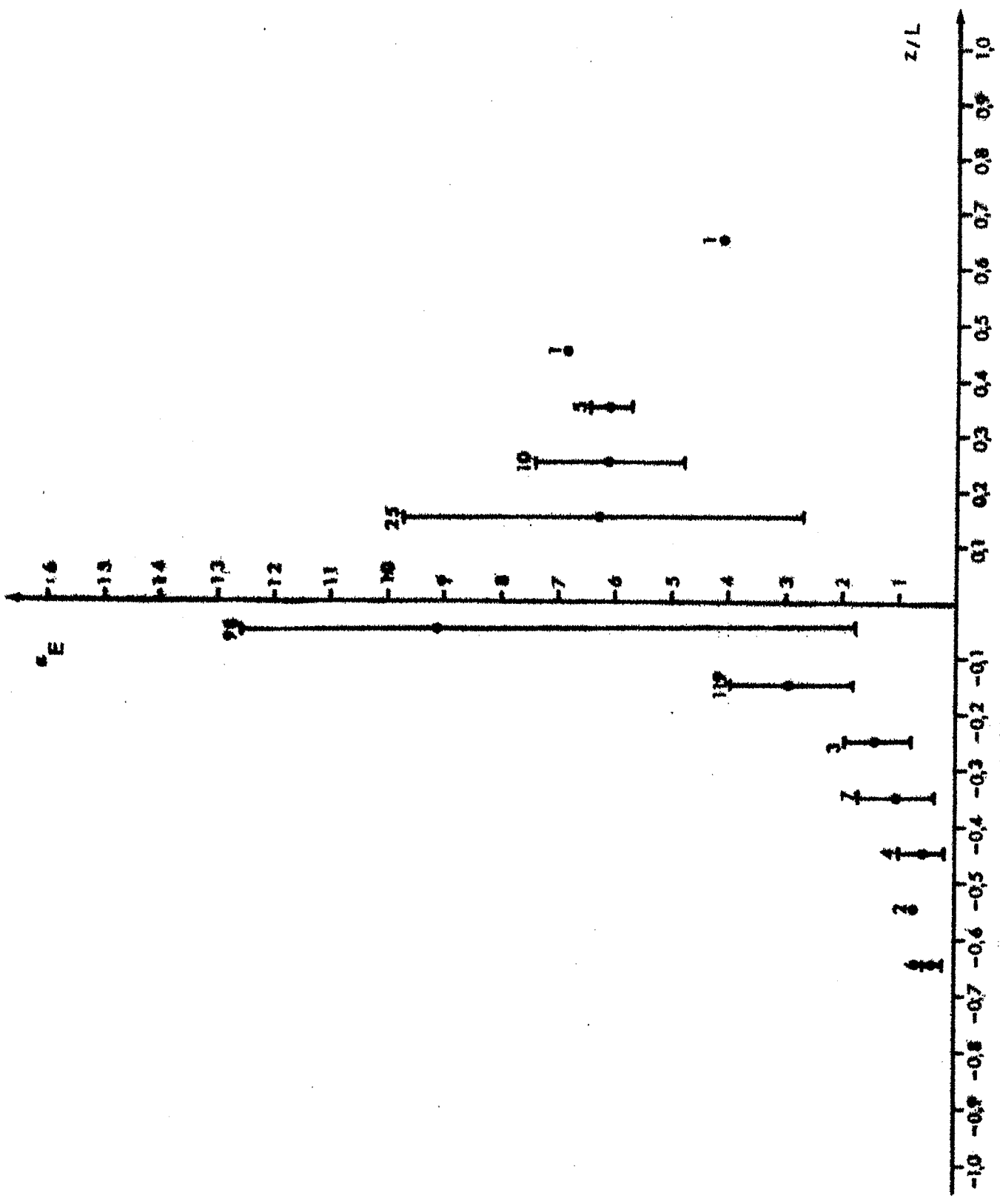


Abb. 28 Steigung $\alpha_E(z/L)$ der Stabilitätsfunktion ϕ_E

SCHLUSSBEMERKUNG

Aufgabenstellung dieser Arbeit war es, einen ersten Überblick über die während 'KIBU 76' gemessenen vertikalen Profile zu geben. Dabei sollten die Ursachen dafür aufgezeigt werden, daß fehlerhafte Profile nicht mit der Profilmethode behandelt werden konnten, und es sollten die zur Berechnung des Austausches notwendigen Parameter berechnet werden,

Die Ursachen, daß nur etwa 50 % aller Profile berechnet werden konnten, sind einmal durch die Meßanlage selbst gegeben (Störung der Profile durch den Mast bei Ostwinden, große Störanfälligkeit der Psychrometer und des Wasserthermometers) und liegen zum anderen in der zur Ausgleichung der Profile angewendeten logarithmisch-linearen Funktion, die bei zu steilen Profilen, also bei zu geringen Höhendifferenzen der Parameter, nicht mehr anwendbar ist. Eine weitere Fehlerursache scheint darin zu liegen, daß die in etwa 10 cm Tiefe gemessene Wassertemperatur nicht mit der Temperatur in der Höhe z_0 übereinstimmt, die eigentlich zur Bestimmung der Temperaturdifferenzen hätte herangezogen werden müssen. Hier scheint eine Untersuchung des Temperaturverlaufs in den oberen Millimetern der Wasseroberfläche und in den untersten Millimetern der Luftschicht erforderlich zu sein.

Die Ergebnisse für die berechneten Grenzschichtparameter bestätigen im wesentlichen die in der Literatur angegebenen Werte verschiedener Autoren. Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, daß die Annahme von konstanten Transportkoeffizienten für die Berechnung des Austausches nach der Bulk-Methode besonders für den sensiblen und latenten Wärmefluß nicht ausreicht. Hier bestimmt im wesentlichen die Windgeschwindigkeit den Austausch, und der Transportkoeffizient sollte als Funktion der Temperatur- bzw. Feuchtedifferenz angegeben werden. Für die Berechnung des Impulstransports

scheint eine Unterscheidung nach Stabilitätsverhältnissen notwendig zu sein, da für c_D doch eine erhebliche Differenz zwischen labiler und stabiler Schichtung besteht.

Bei weiteren Untersuchungen sollte die Meßperiode in Zeitabschnitte mit unterschiedlichem Wettercharakter eingeteilt werden, um die Abhängigkeit der Transporte von der Wettersituation erkennen zu können.

II. LITERATURVERZEICHNIS

- Behrend, J., 1976: Der Zusammenhang zwischen wahren und geostrophischem Wind über der Ostsee während "Baltic 75", Berichte aus dem Inst. f. Meereskunde, Kiel, Nr. 27
- Brocks, K. u. L. Krügermeier, 1970: Die hydrodynamische Rauigkeit der Meeresoberfläche, Berichte d. Inst. f. Radiometeorologie u. Mar. Met., a.d. Univ. Hamburg, Nr. 14
- Businger, J.A., 1975: Interactions of Sea and Atmosphere, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol. 13 Nr. 3, 720-726
- Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi u. E.F. Bradley, 1971: Flux - Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer, Journ. of the Atm. Sc., Vol. 28, 181-189
- Charnock, H., 1967: Flux - Gradient Relations near the ground in unstable conditions, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 93, Nr. 395, 97-100
- Deardorff, J.W., 1968: Dependence of Air-Sea Transfer Coefficients on Bulk Stability, J. Geophys. Res., Vol. 73, Nr. 8, 2549-2557
- Dobesch, H., 1976: Der Rauigkeitsparameter und die Dicke der Verdrängungsschicht für Wind über verschiedenen natürlichen Unterlagen, Arch. Met. Geophys. Biokl., Serie A, 25, 125-130
- Dobesch, H., 1973: Das Wind-, Temperatur- und Feuchteprofil über einer freien Wasseroberfläche, Arch. Met. Geophys. Biokl., Serie A, 22, 47-70
- Dyer, A.J., 1974: A Review of Flux-Profile Relationships, Bound. Lay. Met. 7, 363-372

- Dyer, A.J., 1967: The turbulent transport of heat and water vapor in an unstable atmosphere, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 93, 501-508
- Dyer, A.J., 1965: The flux-gradient relation for turbulent heat transfer in the lower atmosphere, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 91, 151-157
- Fussel, D.B., S. Pond u. M. Miyake, 1977: Computation of Surface Fluxes from climatological and synoptic data, Month. Weather Rev., Vol. 105, 26-36
- Flaagle, R.G., J.W. Deardorff u. F.I. Badgley, 1958: Vertical Distribution of Windspeed, Temperature and Humidity above a Water Surface, J. Marine Res., Vol. 17, 141-157
- Friess, C.A. u. K.F. Schmitt, 1976: Parameterization of Air-Sea Interface Fluxes of Sensible Heat and Moisture by the Bulk Aerodynamic Formulas, J. Phys. Oceanography, Vol. 6, 801-809
- Gurvich, A.S., 1965: Vertical Temperature and Wind Velocity Profiles in the Atmospheric Surface Layer, Atm. and Ocean, Phys., Vol. 1, Nr. 1, 55-65
- Haltiner, G.J. u. F.L. Martin, 1957: Dynamical and Physical Meteorology, McGraw-Hill, New York
- Hasse, L., 1968: Zur Bestimmung der vertikalen Transporte von Impuls und fühlbarer Wärme in der wassernahen Luftschicht über See, Hamburger Geophys. Einzelschr. Nr. 11
- Haugen, D.A. - Editor -, 1973: Workshop on Micrometeorology, American Meteorological Society, Kap. 1,2,3
- Hoerber, H., 1968: Wind-, Temperatur- und Feuchteprofile in der wassernahen Luftschicht über dem äquatorialen Atlantik, 'Meteor' Forsch. Ergeb. Reihe B, Nr. 3

- Högström, U., 1974: A field study of the turbulent fluxes of heat, water vapor and momentum at a 'typical' agricultural site, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 100, 624-639
- Kitaygorodskiy, S.A., O.A. Kuznetsov u. G.N. Panin, 1973: Coefficients of Drag, Sensible Heat and Evaporation in the Atmosphere over the Surface of the Sea, Atm. and Ocean. Phys., Vol. 9, Nr. 11, 1135-1141
- Kraus, E.B., 1972: Atmosphere - Ocean Interaction, Oxford Monographs on Meteorology
- Kreyszig, E., 1975: Statistische Methoden und ihre Anwendungen, Vandenhoeck und Ruprecht
- Krügermeier, L., 1975: Vertikale Transporte von Impuls, Sensibler und Latenter Wärme aus Profilmessungen über dem tropischen Atlantik während APEX, Ber. Inst. f. Radiomet. u. Mar. Met. d. Univ. Hamburg, Nr. 29
- Lumley, J.L. u. H.A. Panofsky, 1964: The structure of atmospheric turbulence, Interscience publishers, New York, Kap. 3
- McIntosh, D.A., R.L. Street u. E.Y. Hsu, 1975: The Influence of Air-Water Interfacial conditions on turbulent Transfer of latent and sensible Heat, Geophys. Res. Letters, Vol. 2, Nr. 1, 12-14
- McVehil, G.E., 1964: Wind and Temperature Profiles near the ground in stable stratification, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 90, 136-146
- Miyake, M., M. Donelan, G. McBean, C. Paulson, F. Badgley u. E. Leavitt, 1970: Comparison of turbulent fluxes over water determined by profile and eddy correlation techniques, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 58

- Monin, A.S. u. A.M. Obukhov, 1954: Fundamentale Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Vermischung in der bodennahen Schicht der Atmosphäre - aus: Statistische Theorie der Turbulenz (Hrsgb. H. Goering)
- Pandolfo, J.P., 1966: Wind and Temperature Profiles for constant-flux Boundary Layers in Lapse Conditions with a variable Eddy Conductivity to Eddy Viscosity Ratio, J. Atm. Sc., Vol. 23, 495-502
- Paulson, C.A., 1970: The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer, J. Appl. Met., Vol. 9, Nr. 6, 857-861
- Pond, Phelps, Paquin, McBean u. Stewart, 1971: Measurements of the Turbulent Fluxes of Momentum, Moisture and sensible Heat over the Ocean, J. Atm. Sc., Vol. 28, 901-917
- Prandtl, L., 1932: Meteorologische Anwendung der Strömungslehre, Beitr. z. Phys. d. Atm., Bd. 19, 188-202
- Sheppard, P.A., 1958: Transfer across the earth's surface and through the air above, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 84, Nr. 361, 205-224
- Sheppard, P.A., D.T. Tribble u. J.R. Garratt, 1972: Studies of turbulence in the surface layer over water (Lough Neagh)/Part 1: Instrumentation, programme, profiles, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 98, 627-641
- Swinbank, W.C., 1964: The exponential Wind-Profile, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 90, Nr. 384, 119-135
- Webb, E.K., 1970: Profile relationships: the log-linear range and extension to strong stability, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 96, 67-90
- Wu, J., 1969: Wind stress and surface roughness at air-sea interface, J. Geophys. Res., Vol. 74, Nr. 2, 444-455

- Yaglom, A.M., 1977: Comments on wind and temperature Flux-Profile Relationships, Bound.-Layer Met., 11, 89-102
- Zilitinkevich, S.S. u. D.V. Chalikov, 1968: The use of profile observations to calculate vertical turbulent fluxes in the atmospheric Boundary Layer, Atm. and Ocean. Phys., Vol. 4, Nr. 9, 915-929

12. ANHANG

In diesem Anhang sind die Ergebnisse, die in den Kapiteln 6.1., 8.1. und 10.1. für den gesamten Meßzeitraum dargestellt sind, für jede einzelne Meßserie wiedergegeben. Auf die Stabilitätsfunktionen wird hier verzichtet, da sie keine systematischen Unterschiede aufweisen, und da - besonders bei den Temperatur- und Feuchteprofilen - wegen der Gültigkeit fast aller Auswahlkriterien diese Darstellungen für die einzelnen Meßserien sehr lückenhaft sind und erst im Gesamtmittel sinnvoll werden. Die Abbildungen sind folgendermaßen gekennzeichnet:

W1	: u_+/u_4	nur neutrale Fälle, Stabilitätsansatz und Neutraler Ansatz	
W2	: u_+/u_4	Stabilitätsansatz, labile, stabile und neutrale Fälle	
W3	: c_D/u_4	"	"
W4	: z_o/u_4	"	"
T1	: $\theta_+/\theta_4 - \theta_w$	Stabilitätsansatz, labile und stabile Fälle	
T2	: $c_H/\theta_4 - \theta_w$	"	"
T3	: $z_\theta/\theta_4 - \theta_w$	"	"
F1	: $Q_+/Q_4 - Q_w$	"	"
F2	: $c_E/Q_4 - Q_w$	"	"
F3	: $z_E/Q_4 - Q_w$	"	"

Bei der ersten Meßserie fehlen die Abb. F1, F2 und F3.

Den Abbildungen ist jeweils eine kurze Beschreibung der Wettersituation während der Meßserie vorangestellt. Es ist eine Tabelle über die Anzahl der Profile und der Ausfälle nach den einzelnen Kriterien aufgestellt, die für die Berechnung der gezeigten Abbildungen angewendet wurden. Es fehlen also die Angaben über die Kriterien, die nur bei der Berechnung der Stabilitätsfunktionen be-

rücksichtigt wurden. Die Ursachen, die für die Ausfälle verantwortlich sind, sind kurz beschrieben, soweit sie aus den Daten ersichtlich waren. Da für die Berechnung der Flüsse die Transportkoeffizienten notwendig sind, für die oft nur ein Mittelwert gewünscht wird, ist eine Tabelle mit den Mittelwerten der Transportkoeffizienten für jede Meßserie aufgeführt.

Eine Interpretation der Abbildungen bei den einzelnen Meßserien wird nicht gegeben, da die Meßserie nicht nach Wetterperioden eingeteilt sind, und das für eine Darstellung der Abhängigkeit der Grenzschichtparameter von der Wettersituation notwendig wäre.

Die Darstellung der Ergebnisse für die einzelnen Meßserien wird hier gegeben, um es Denjenigen, die mit demselben Datensatz arbeiten, zu ermöglichen, einen detaillierteren Überblick über die Meßperiode zu erhalten.

Meßserie 1 (28.5. - 8.6.)

Bis zum 3.6. ziehen mehrere Tiefdruckgebiete über die Station hinweg, die danach am Nordrand eines Hochdruckgebietes über Mitteleuropa liegt. Die Winde wehen vorwiegend aus westlichen Richtungen mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 5 m/s und Extremwerten von 1 m/s bis 10 m/s. Unter dem Einfluß des Hochdruckgebietes steigen die Tagestemperaturen von 11°C auf 17°C, die Nachttemperaturen von 8°C auf 12°C und die Wassertemperatur von 11°C auf 15°C an. Während der Nachtstunden herrschen labile Schichtungsverhältnisse vor.

Tabelle M11; Aufstellung der Profile

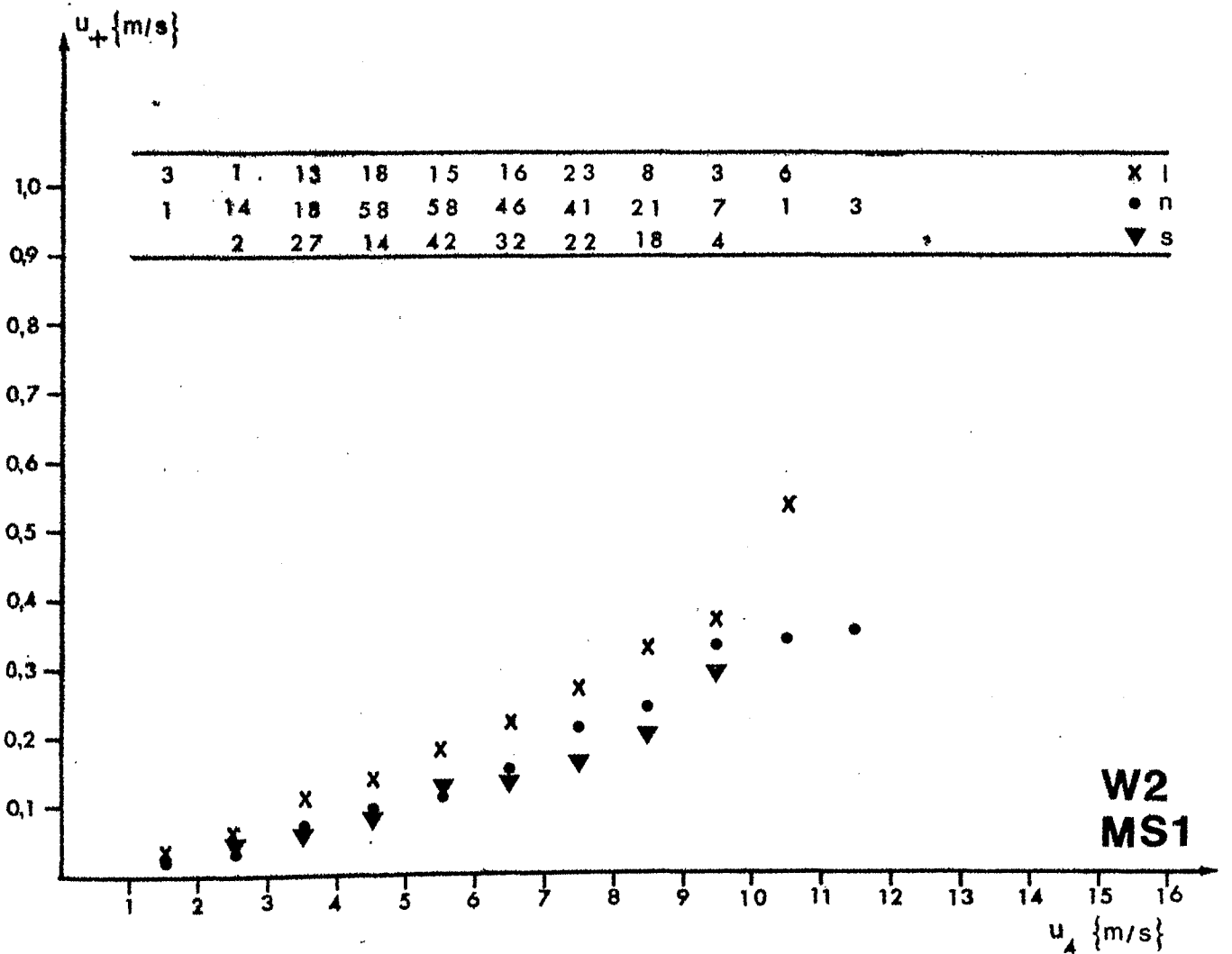
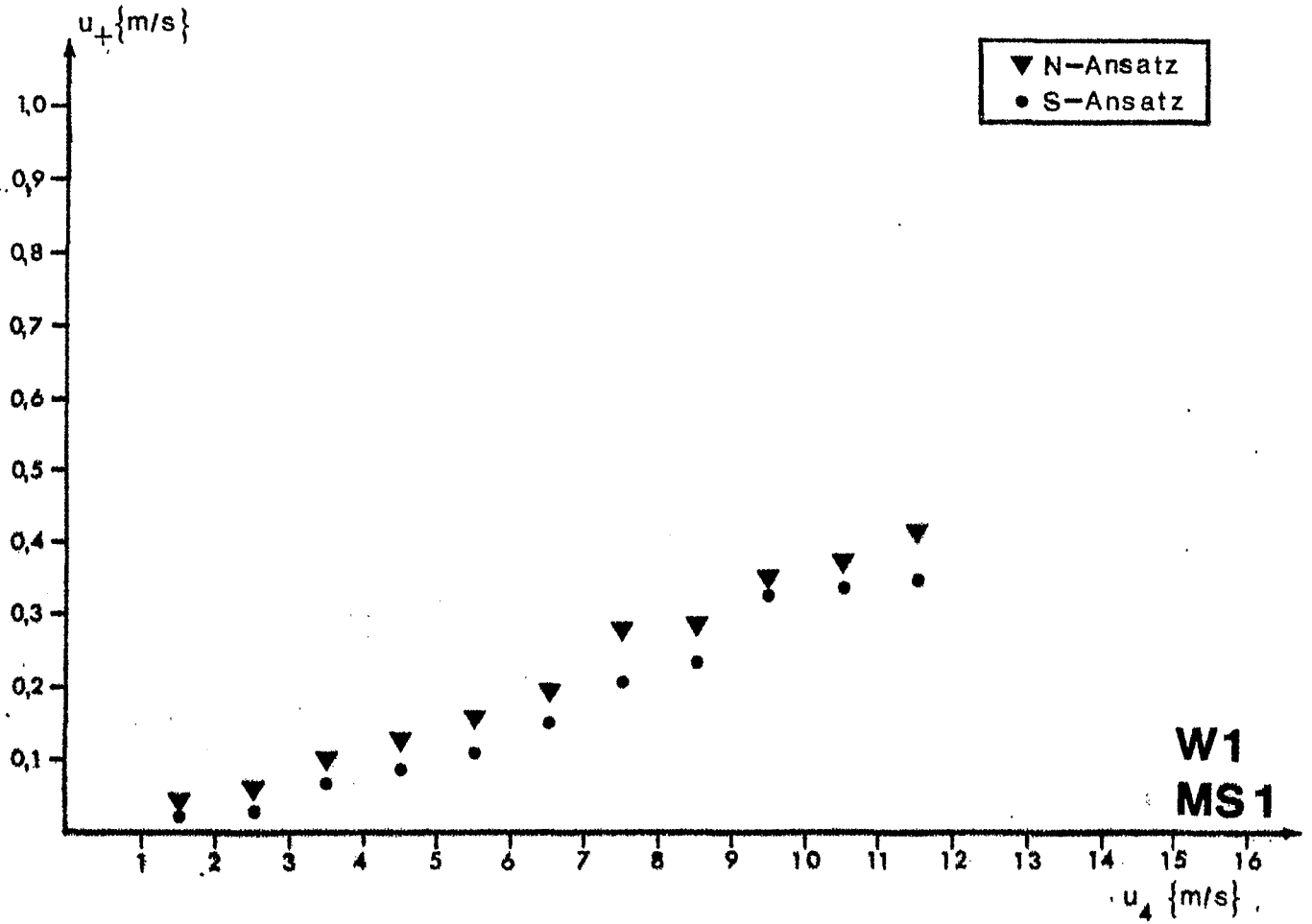
	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1046	1045	--
berechnete Profile	545	631	--
Ausfälle	501	414	--
berechnete Profile für c_H und c_E	--	305	--
Ausfälle für c_H, c_E	--	740	--

hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

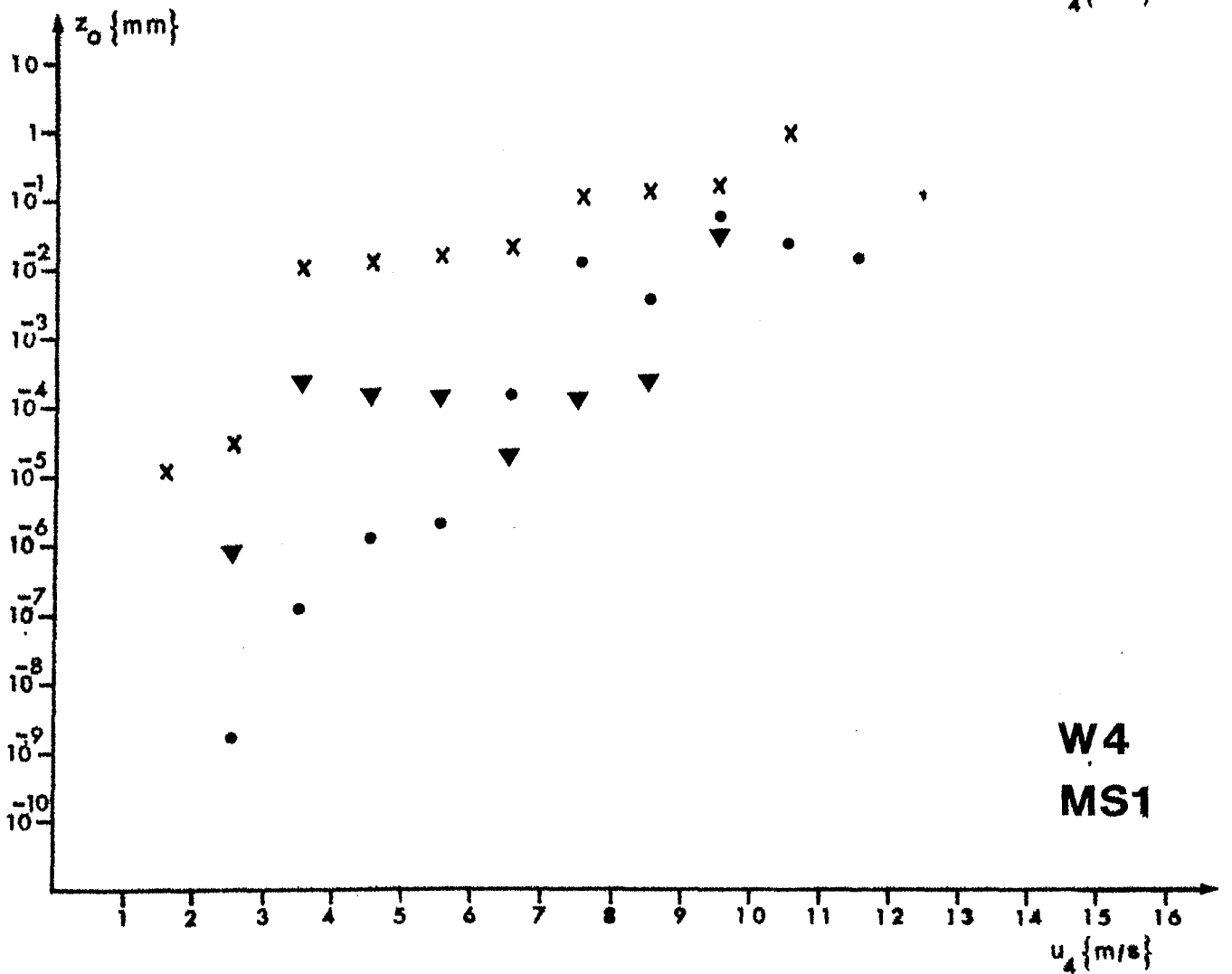
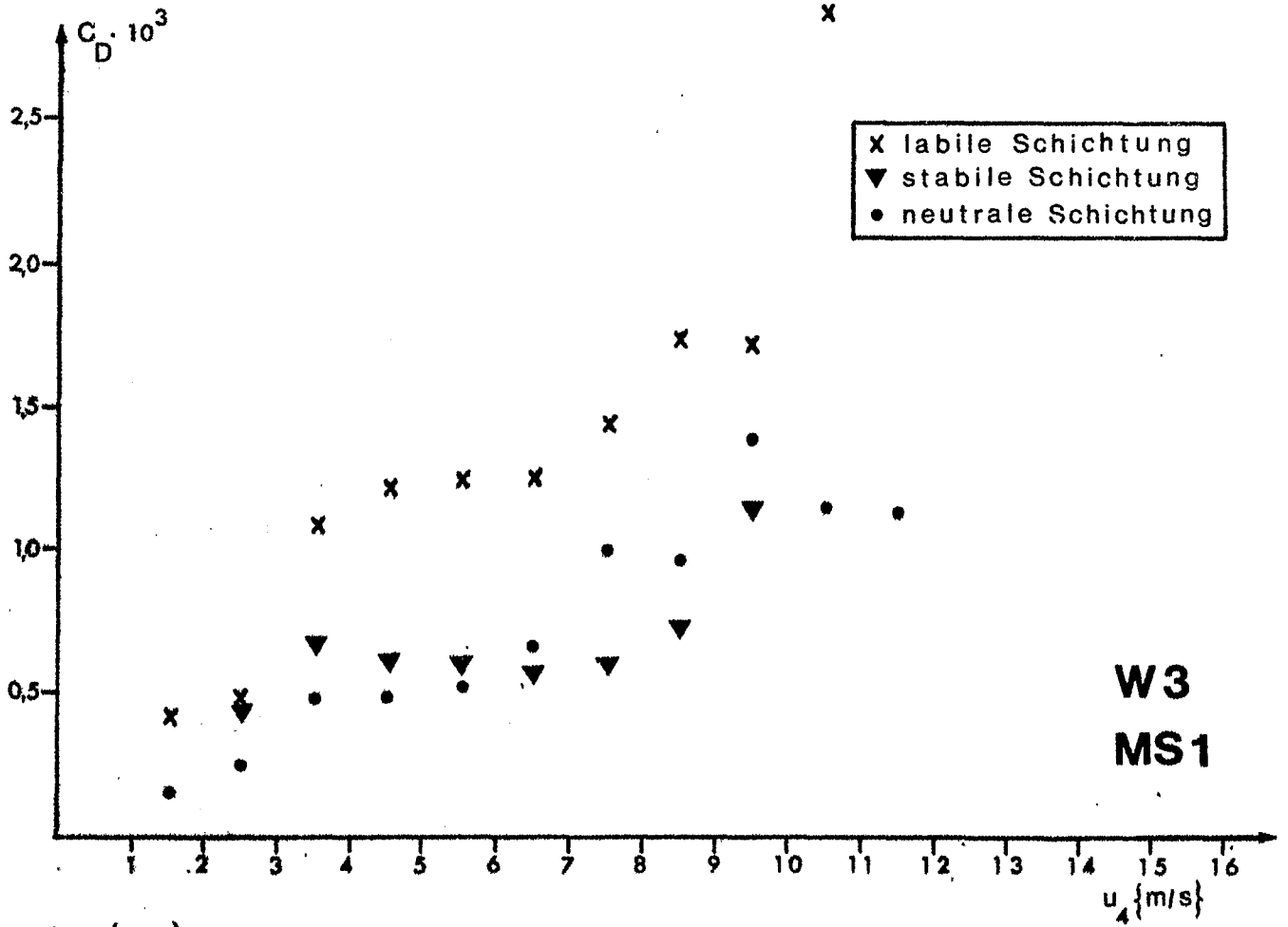
Wind: Ostwinde, zu kleine Windgeschwindigkeit
 Temperatur: keine kontinuierliche Ab- oder Zunahme
 Feuchte: während der gesamten Meßserie falsche Anzeige von TF_2

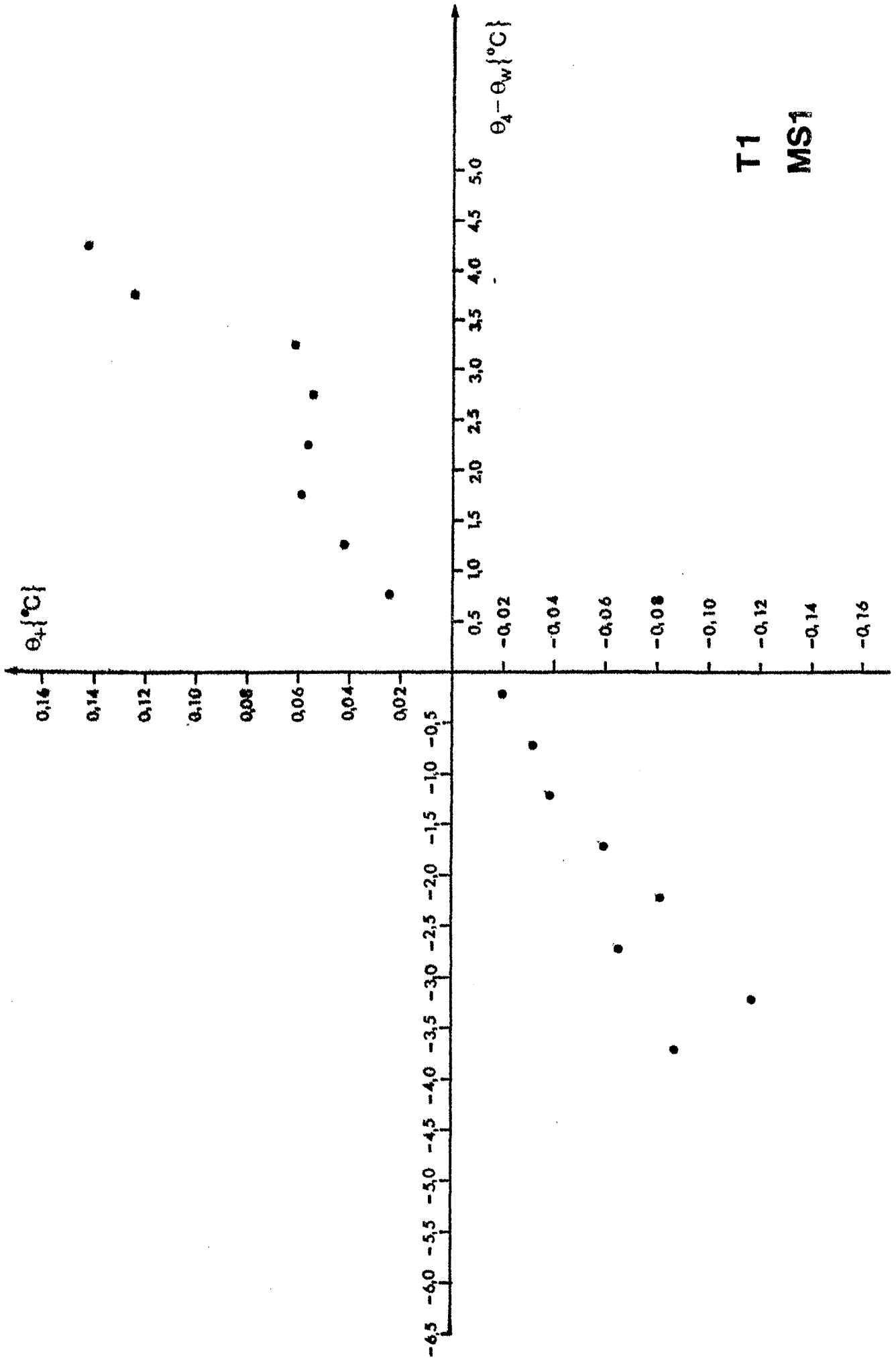
Tabelle M12: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	1.40	1.28	--
neutral	0.67	--	--
stabil	0.64	0.68	--



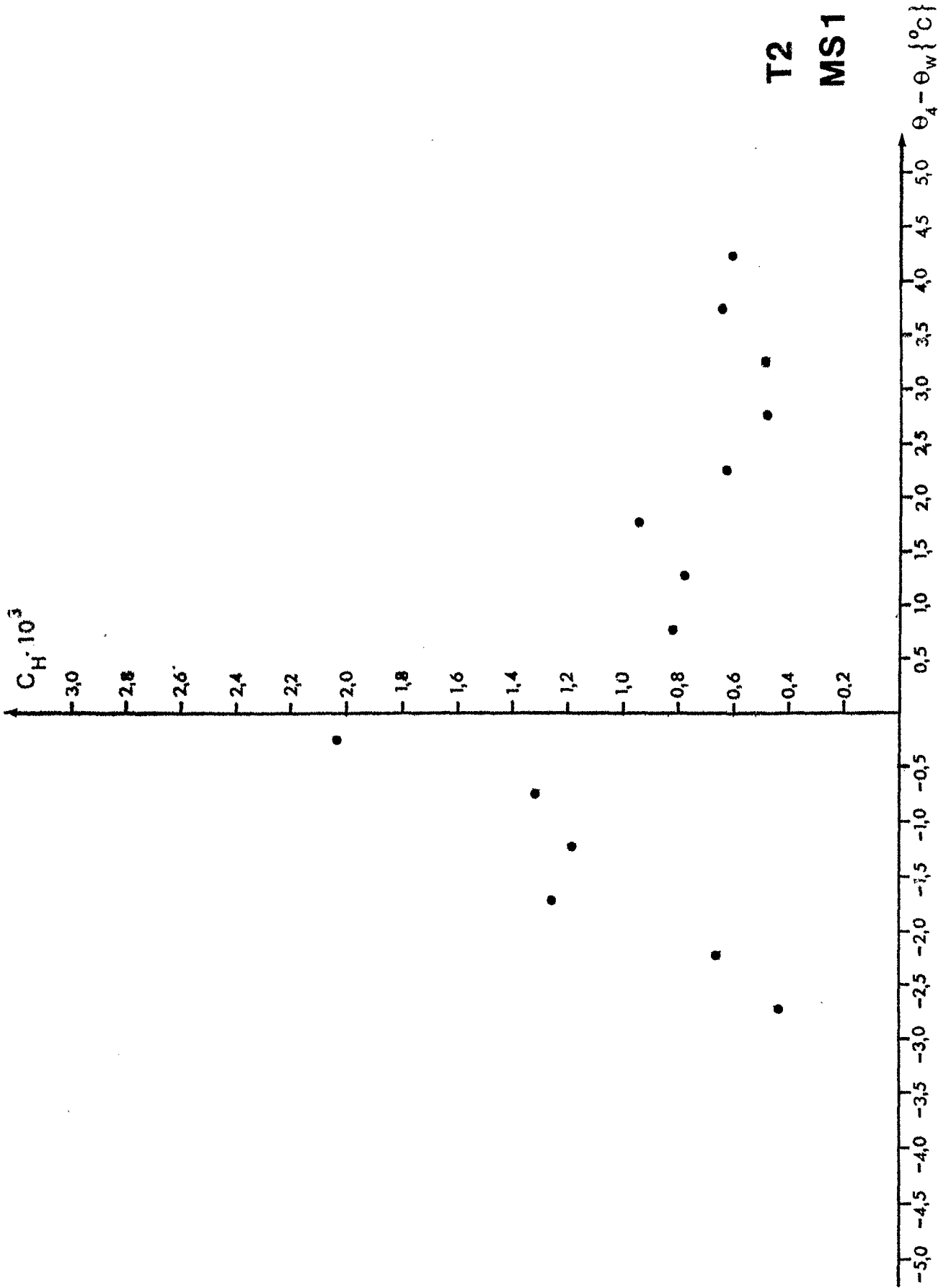
3	1	13	18	15	16	23	8	3	6			X	l	
1	14	18	58	58	46	41	21	7	1	3			•	n
	2	27	14	42	32	22	18	4					▼	s

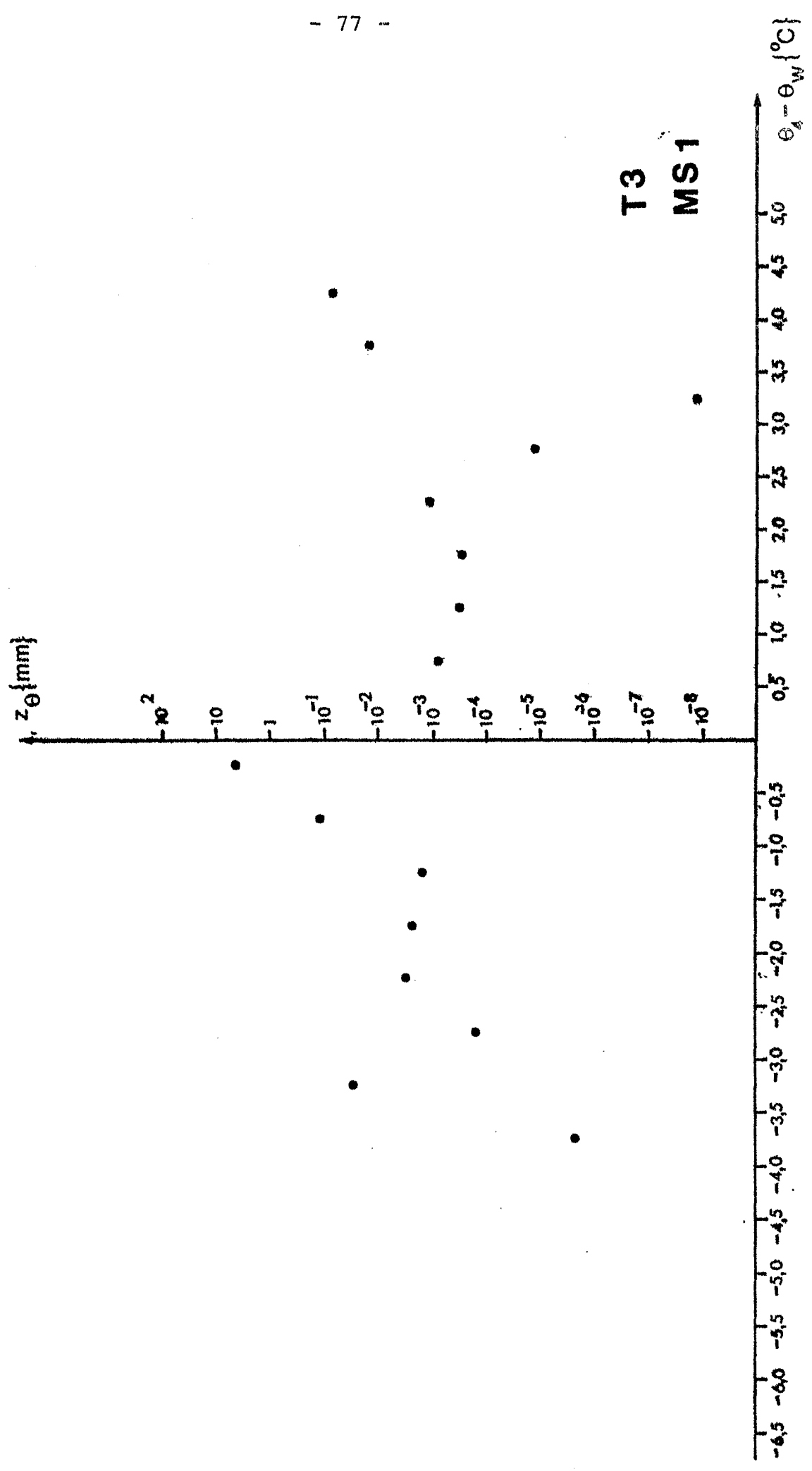




T1

MS1





Meßserie 2 (9.6. - 25.6.)

Ein Hochdruckgebiet zieht in nördlicher Richtung an der Station vorbei, und danach berühren fünf Frontensysteme mit ihren wechselnden Wettererscheinungen die Station. Der Wind kommt überwiegend aus westlichen Richtungen mit maximalen Stärken von 13 m/s. Die maximalen Tagestemperaturen schwanken zwischen 15°C und 18°C, die Nachttemperaturen liegen bei 12°C, die Wassertemperatur bei 14°C. Während der Nacht herrschen überwiegend labile Schichtungsverhältnisse. Gegen Ende der Meßserie kommt die Station erneut unter Hochdruckeinfluß, die Temperaturen steigen an und die Winde drehen auf südliche Richtung, wobei ihre Stärke abnimmt.

Tabelle M21: Aufstellung der Profile

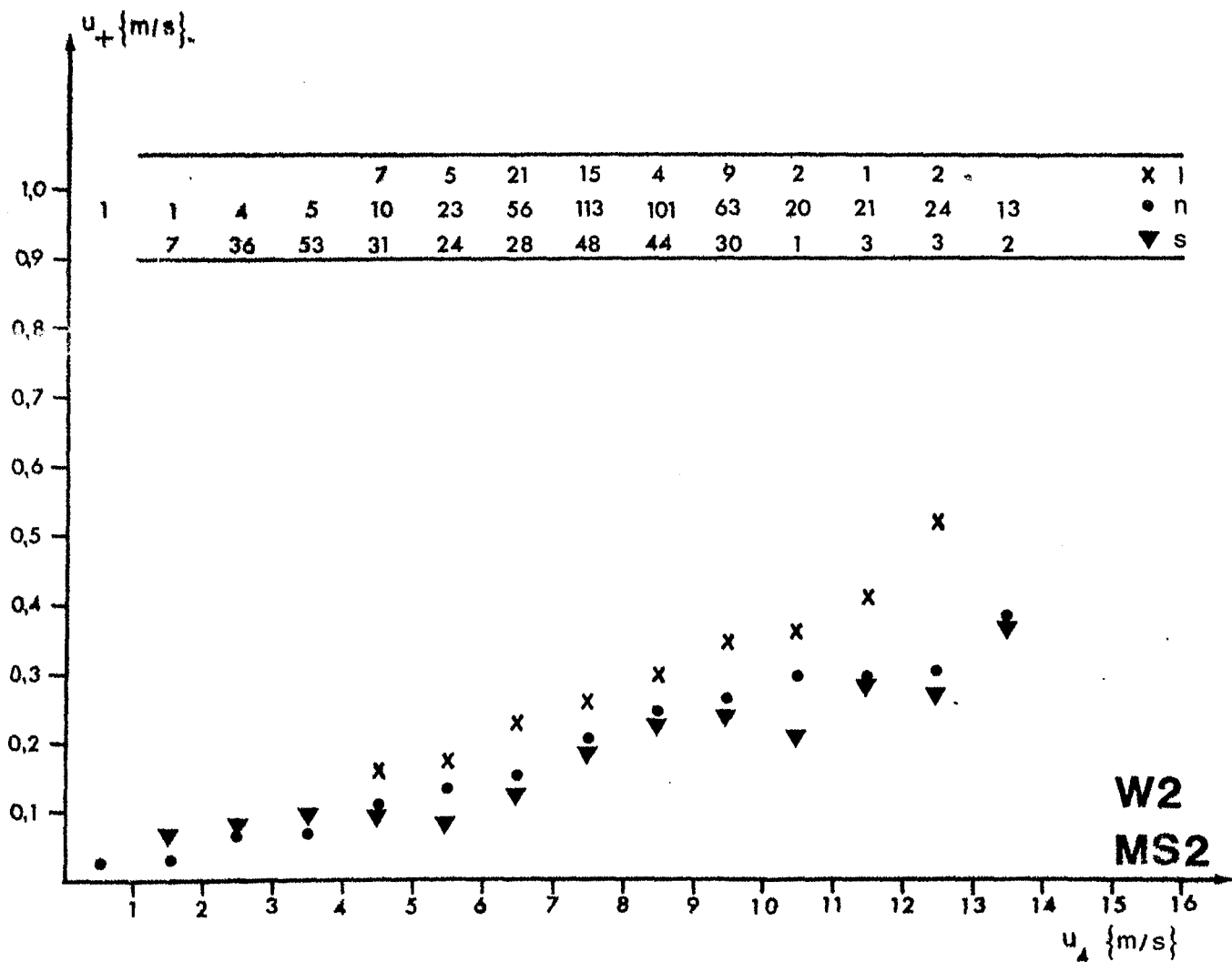
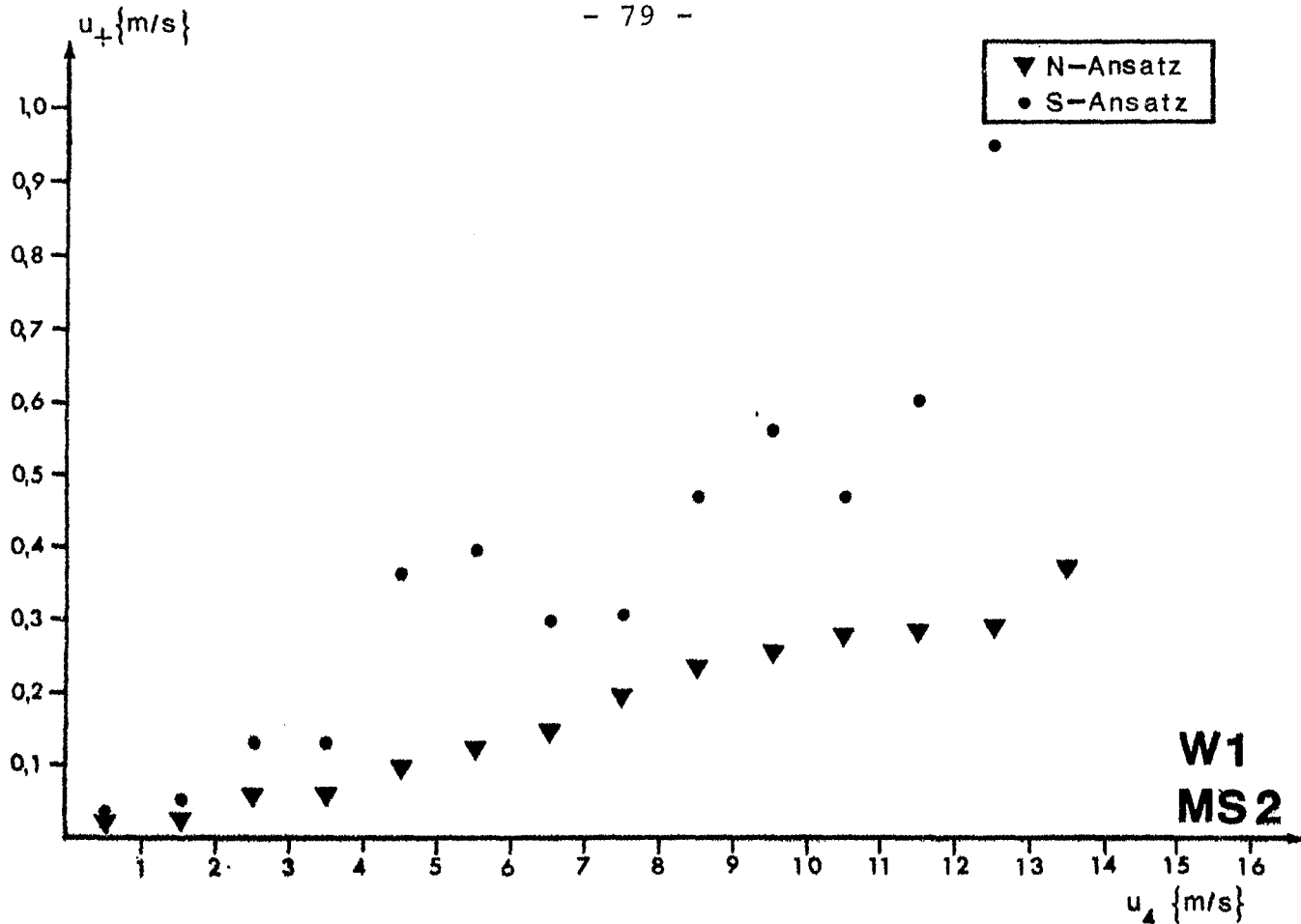
	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1323	1361	1369
berechnete Profile	845	590	511
Ausfälle	478	771	858
berechnete Profile für c_H und c_E	--	453	310
Ausfälle für c_H, c_E	--	908	1059

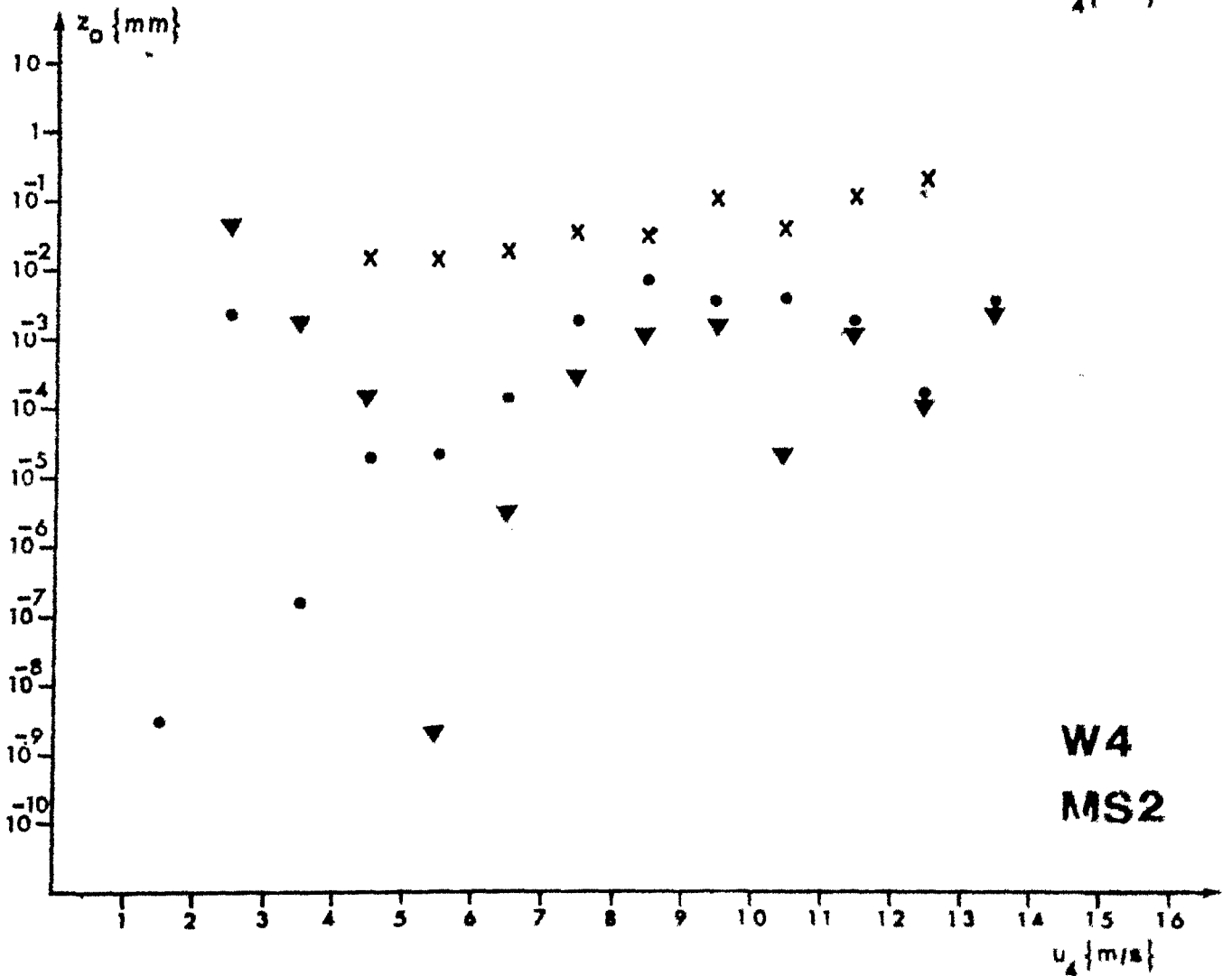
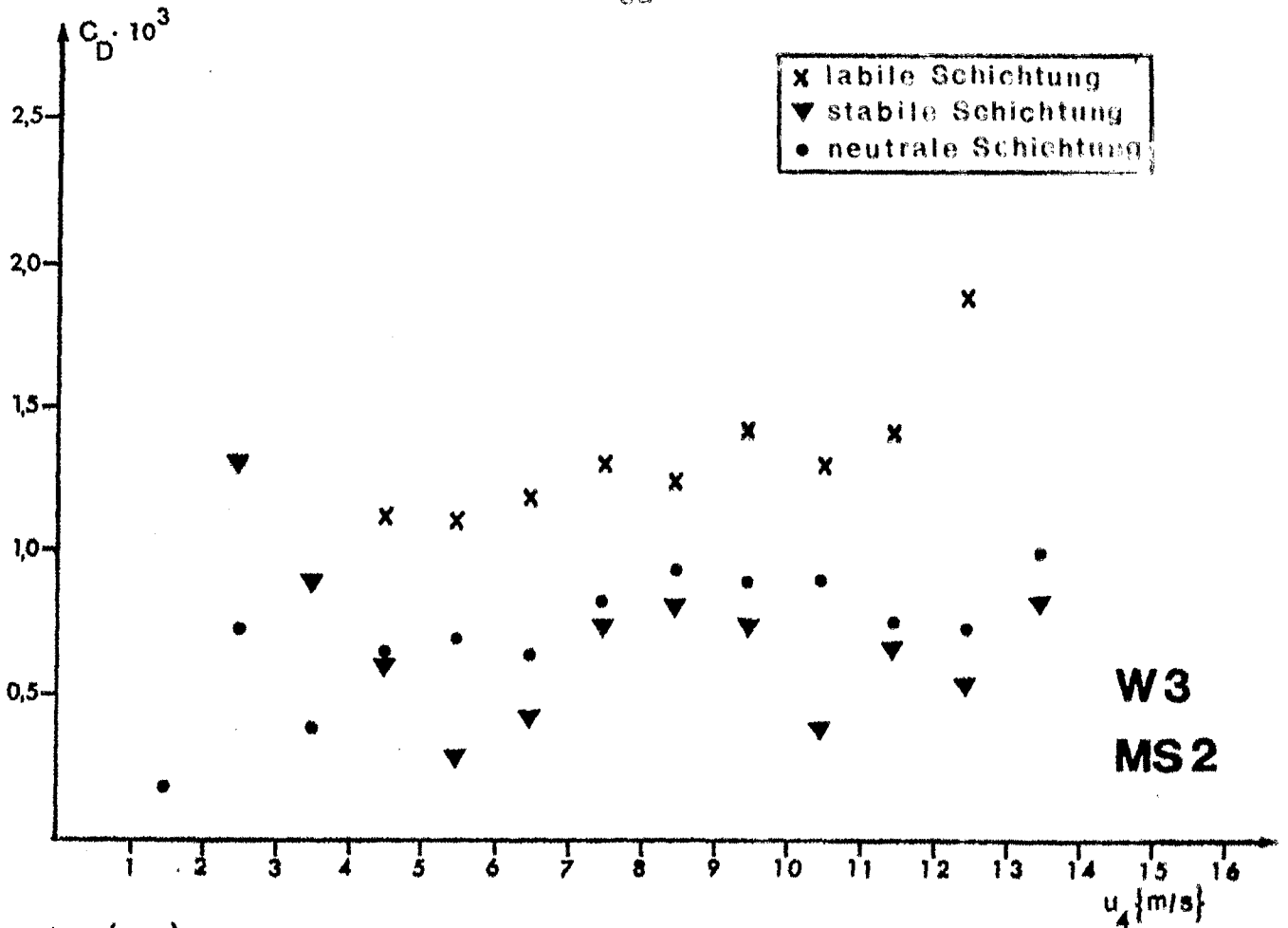
hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

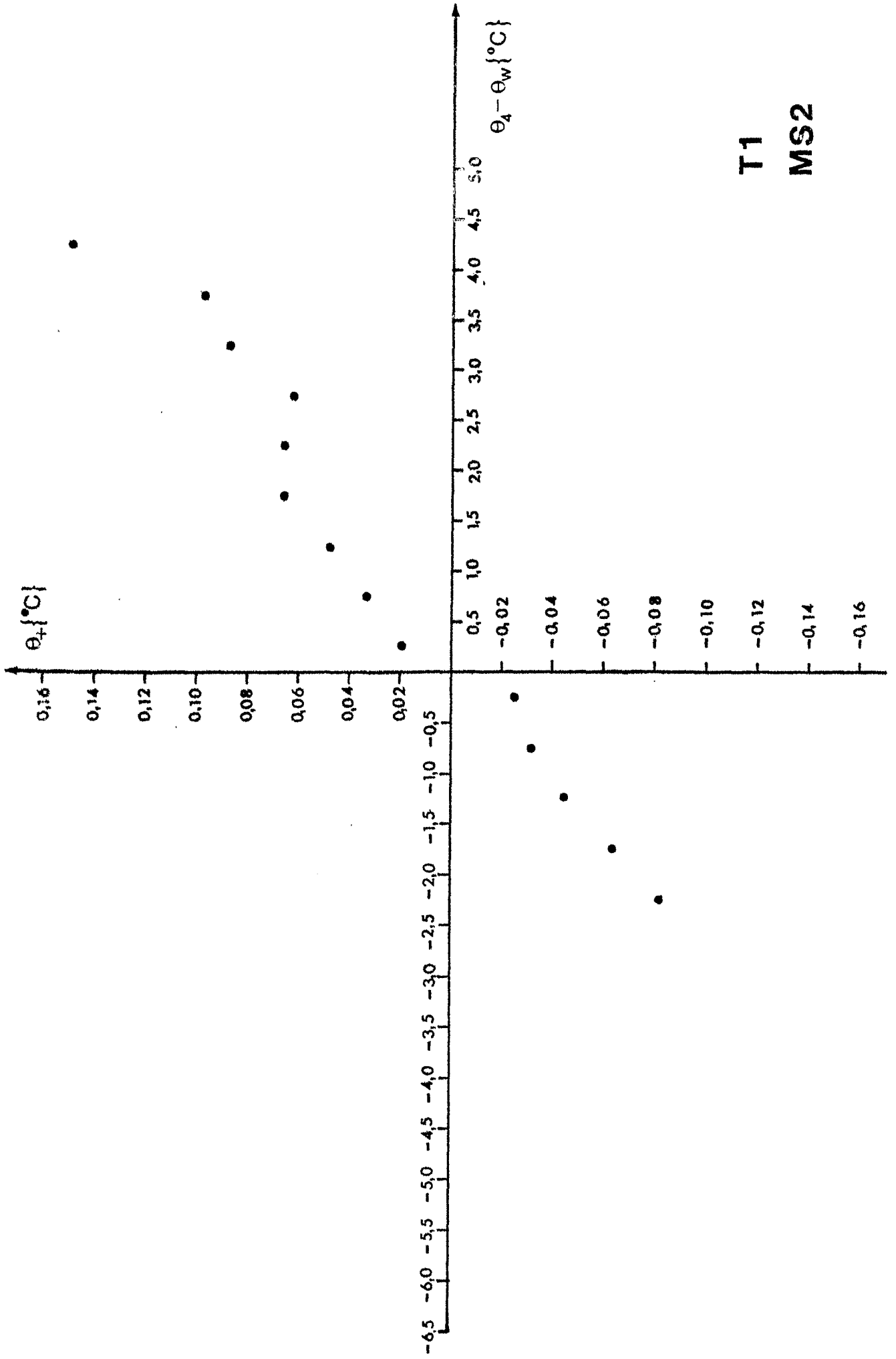
Wind: Ostwinde, zu kleine Windgeschwindigkeit, u_1 defekt
 Temperatur: keine kontinuierliche Ab- oder Zunahme
 Feuchte: Konstante a zu groß, TF_1 ausgetrocknet

Tabelle M22: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

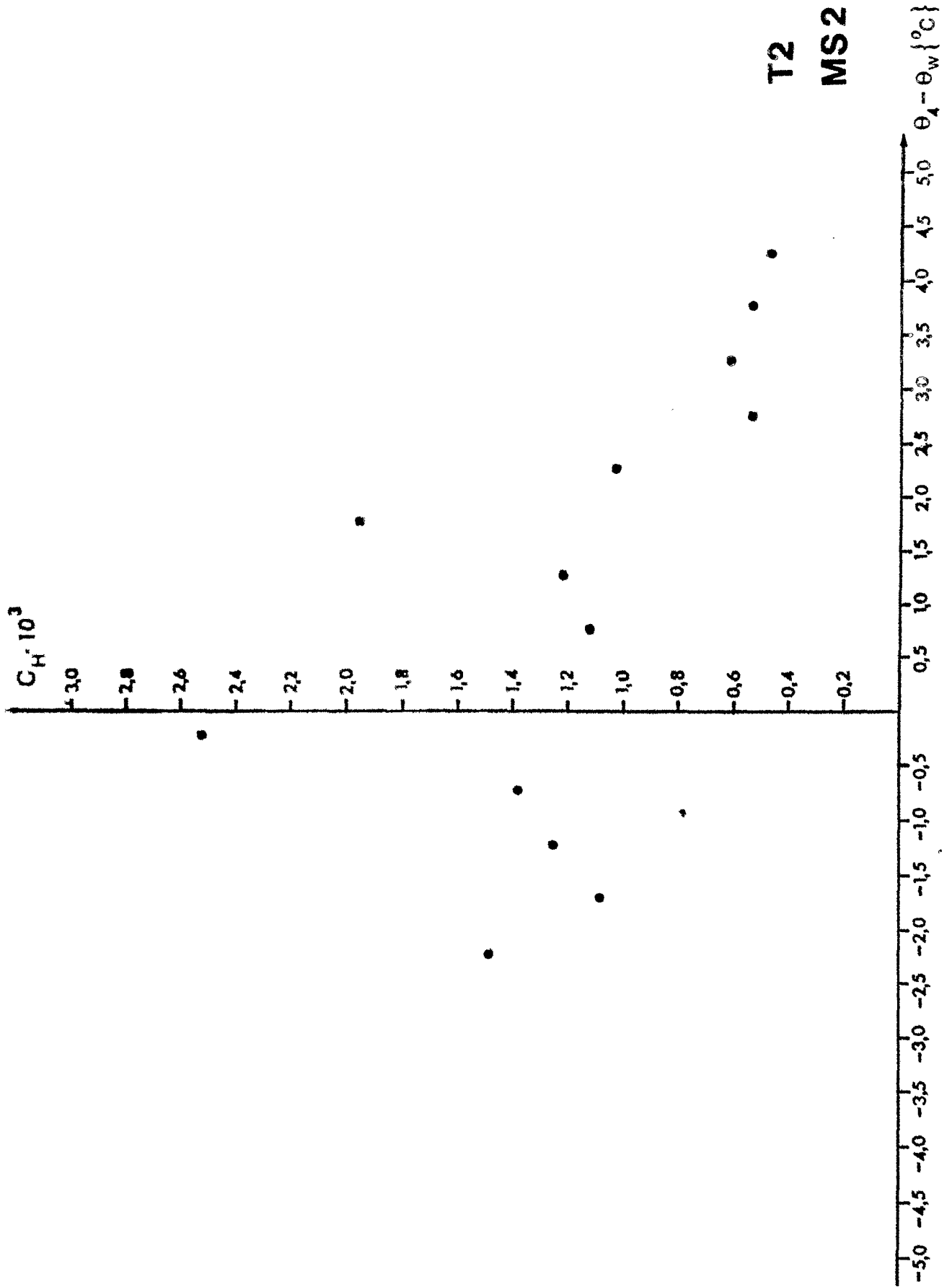
	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	1.30	1.38	1.86
neutral	0.84	--	--
stabil	0.79	1.09	2.21

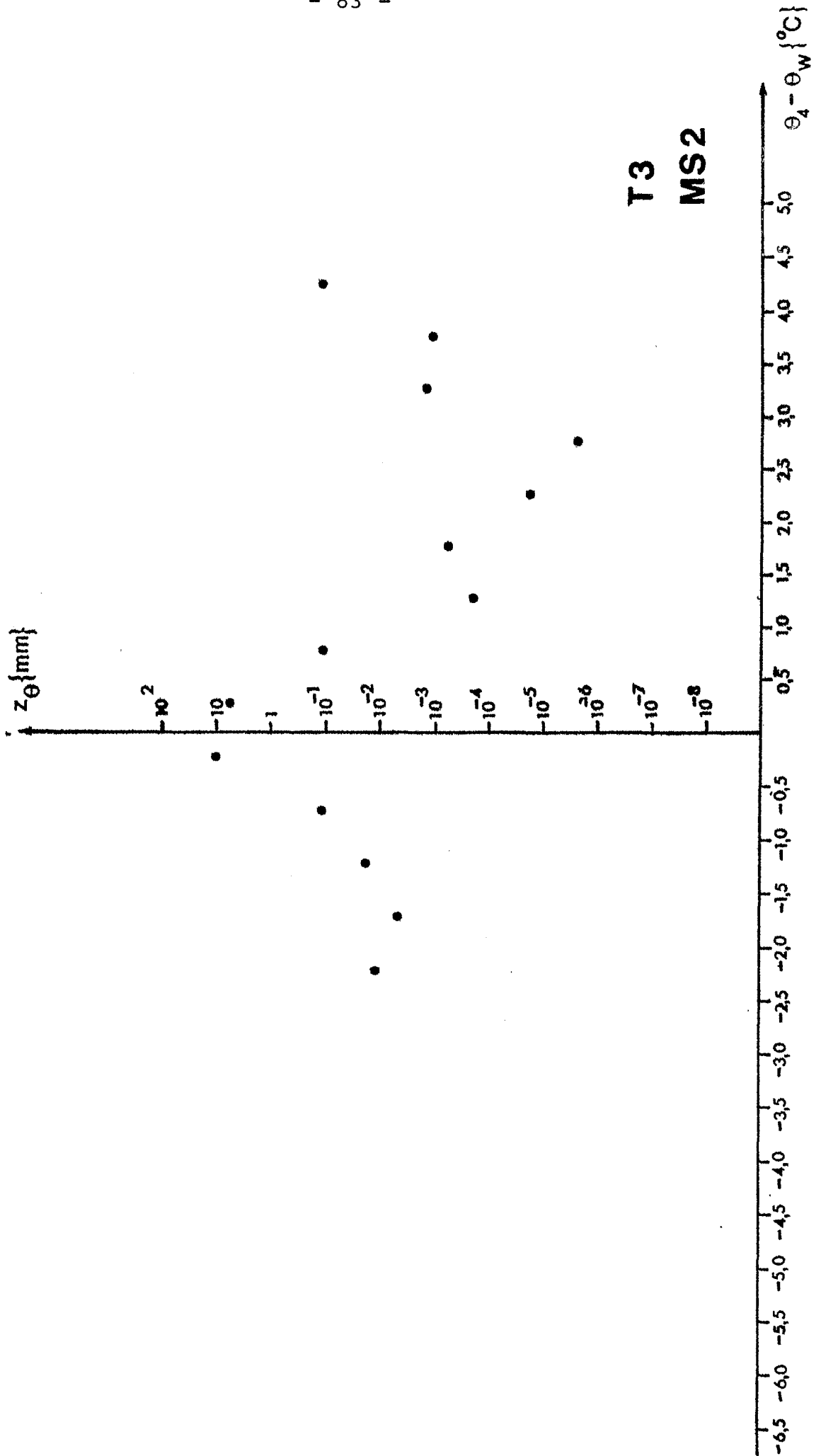






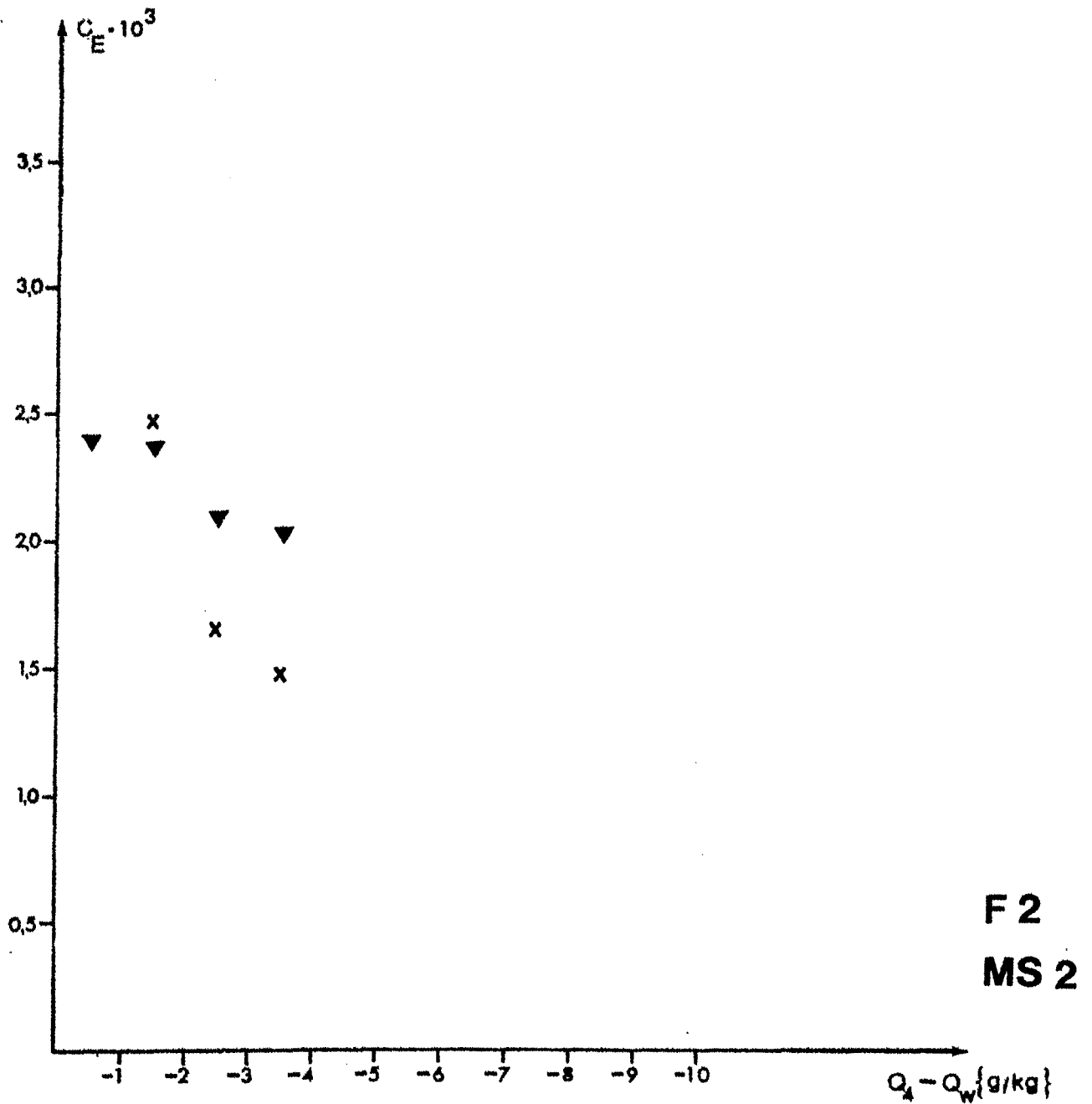
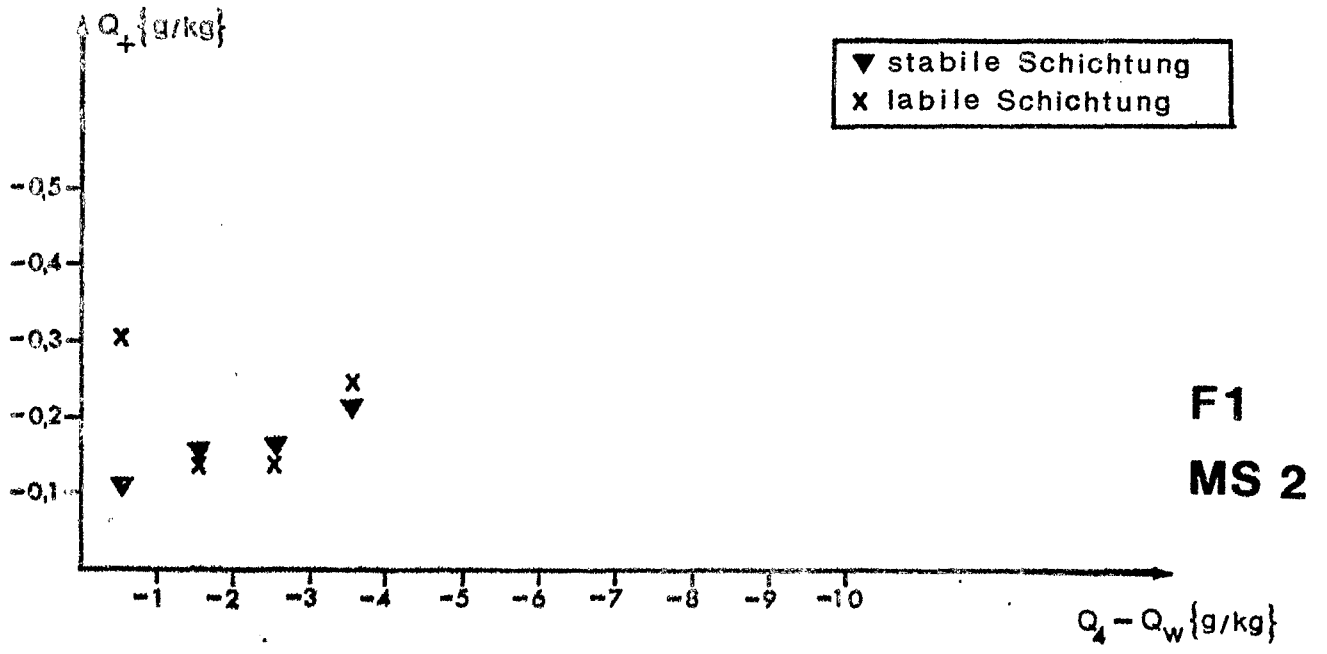
T1
MS2

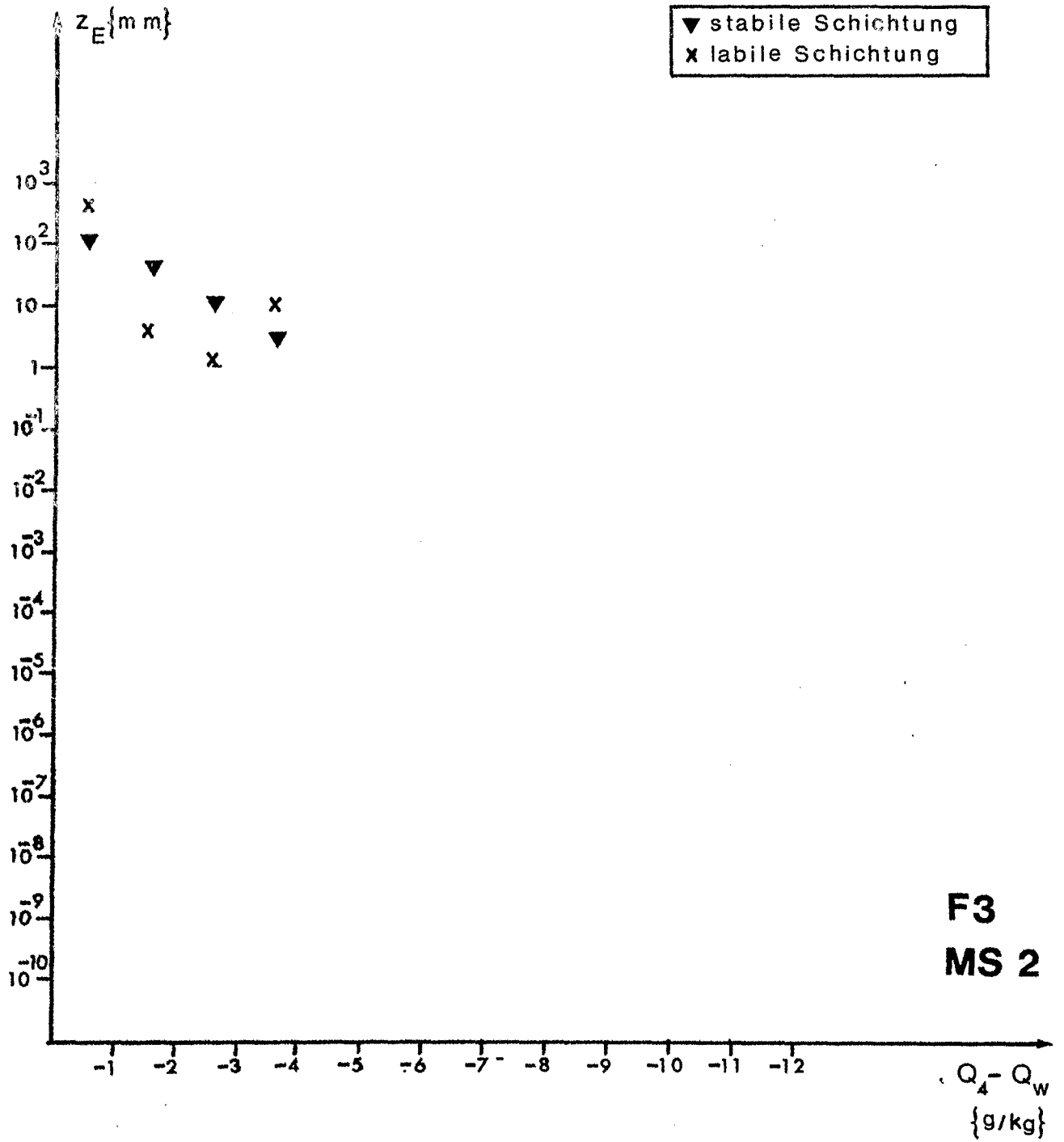




T3

MS2





Meßserie 3 (27.6. - 16.7.)

Zu Beginn der Meßserie liegt die Station am nordwestlichen Rand eines Hochdruckgebietes, und der Wind kommt mit unterschiedlicher Stärke (1-8 m/s) aus westlichen Richtungen. Die Tagesamplitude der Lufttemperatur ist mit 13 Grad sehr hoch (13°C - 26°C), wird jedoch im weiteren Verlauf der Meßserie geringer und liegt bei etwa 5°C. Vom 5.7. greifen Störungsausläufer über die Kieler Bucht, unterbrochen von Zwischenhochdruckgebieten, die wechselnde Winde sehr unterschiedlicher Stärke mit sich bringen. Die Wassertemperatur liegt zwischen 18°C und 20°C. Vorherrschend sind schwach labile und neutrale Schichtungsverhältnisse.

Tabelle M31: Aufstellung der Profile

	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1796	1795	1796
berechnete Profile	463	410	651
Ausfälle	1333	1385	1145
berechnete Profile für c_H und c_E	--	210	37
Ausfälle bei c_H, c_E	--	1585	1759

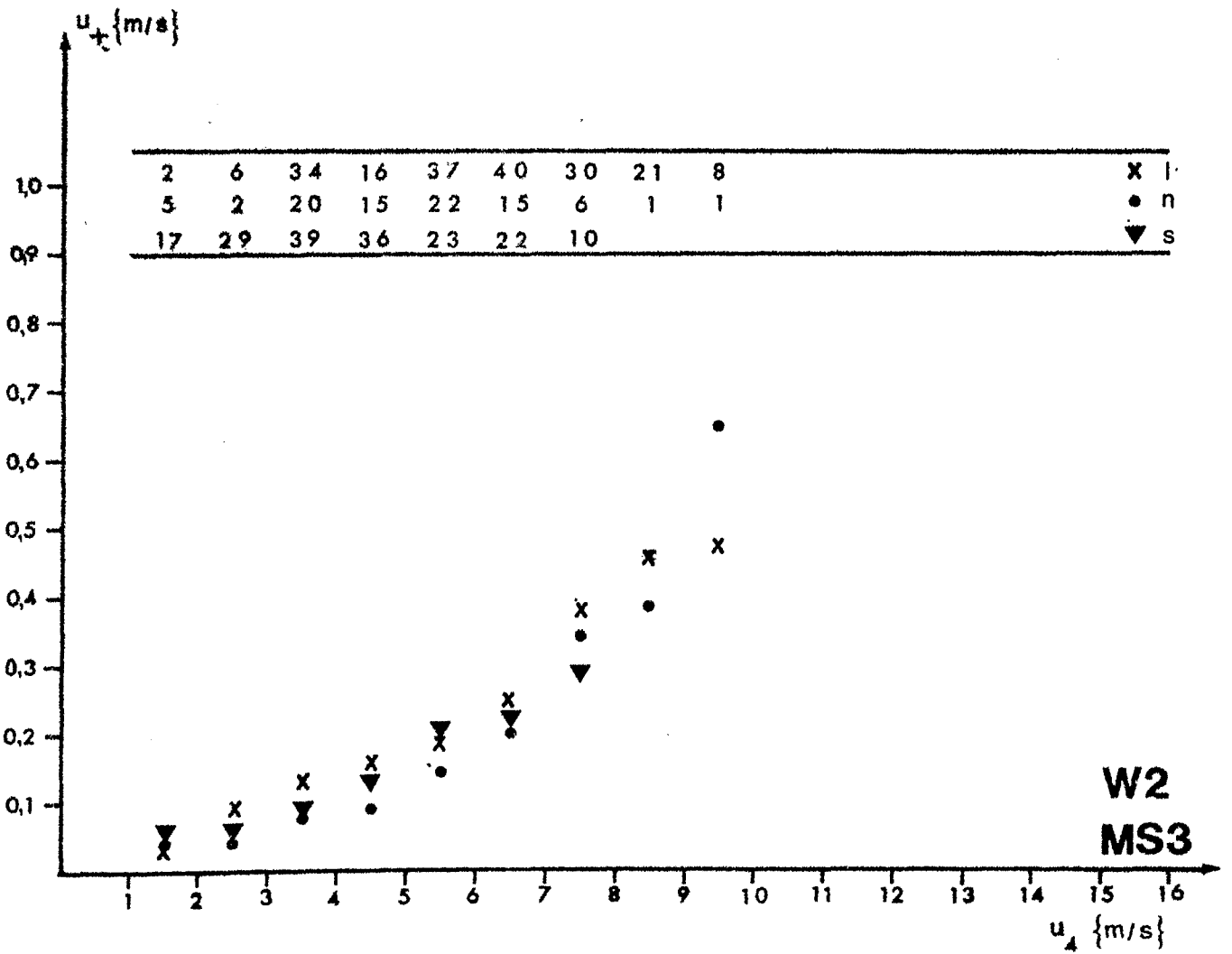
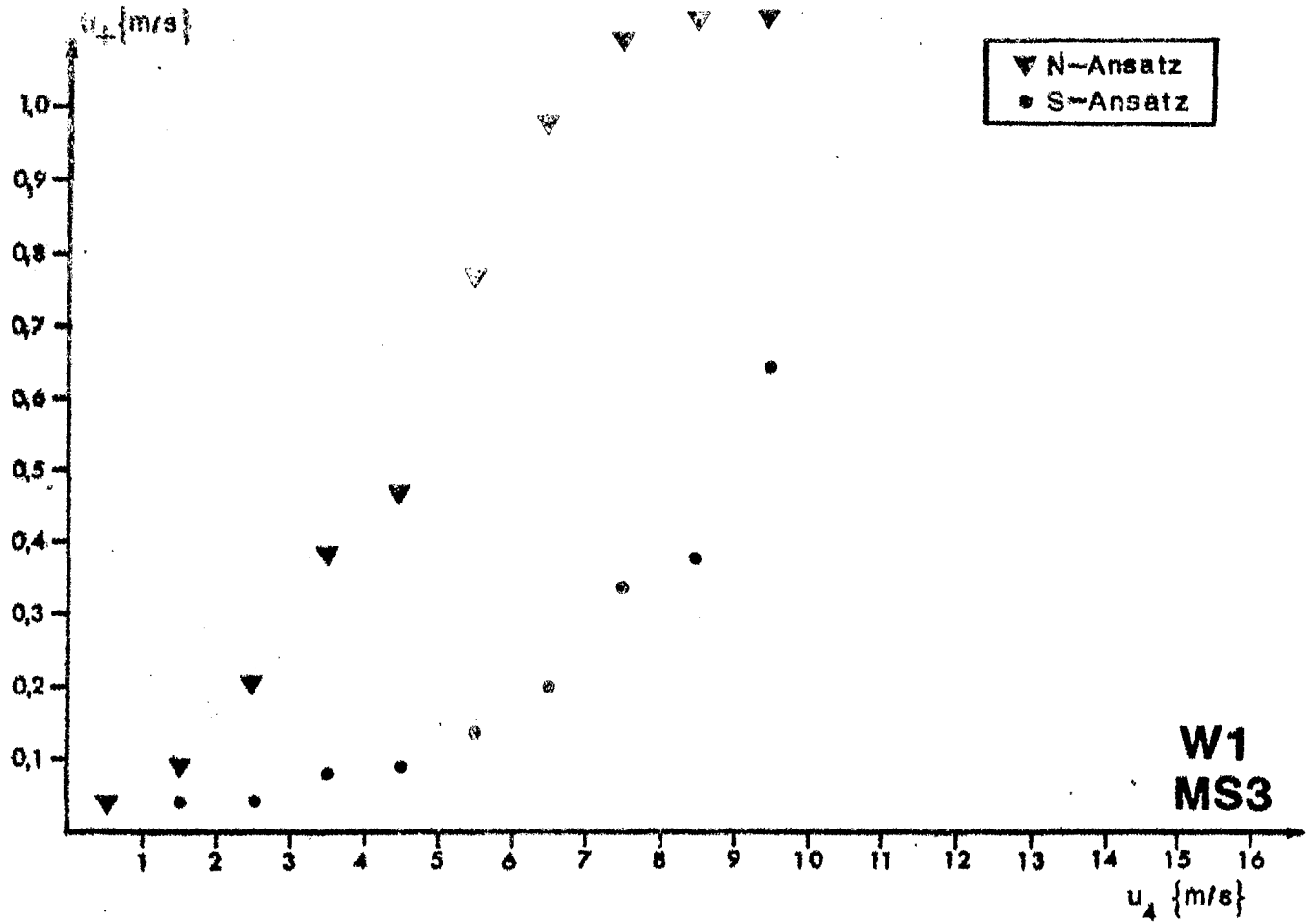
hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

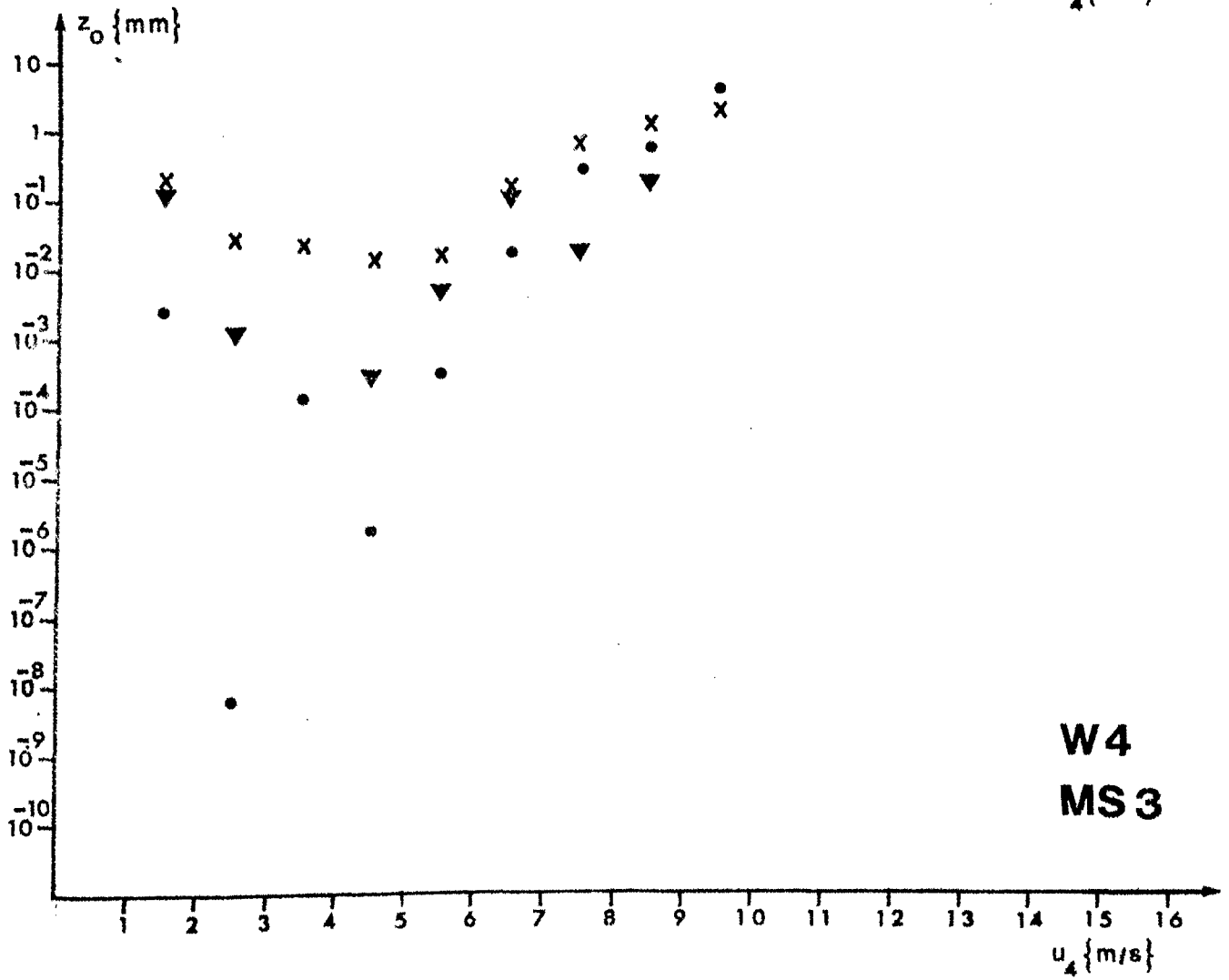
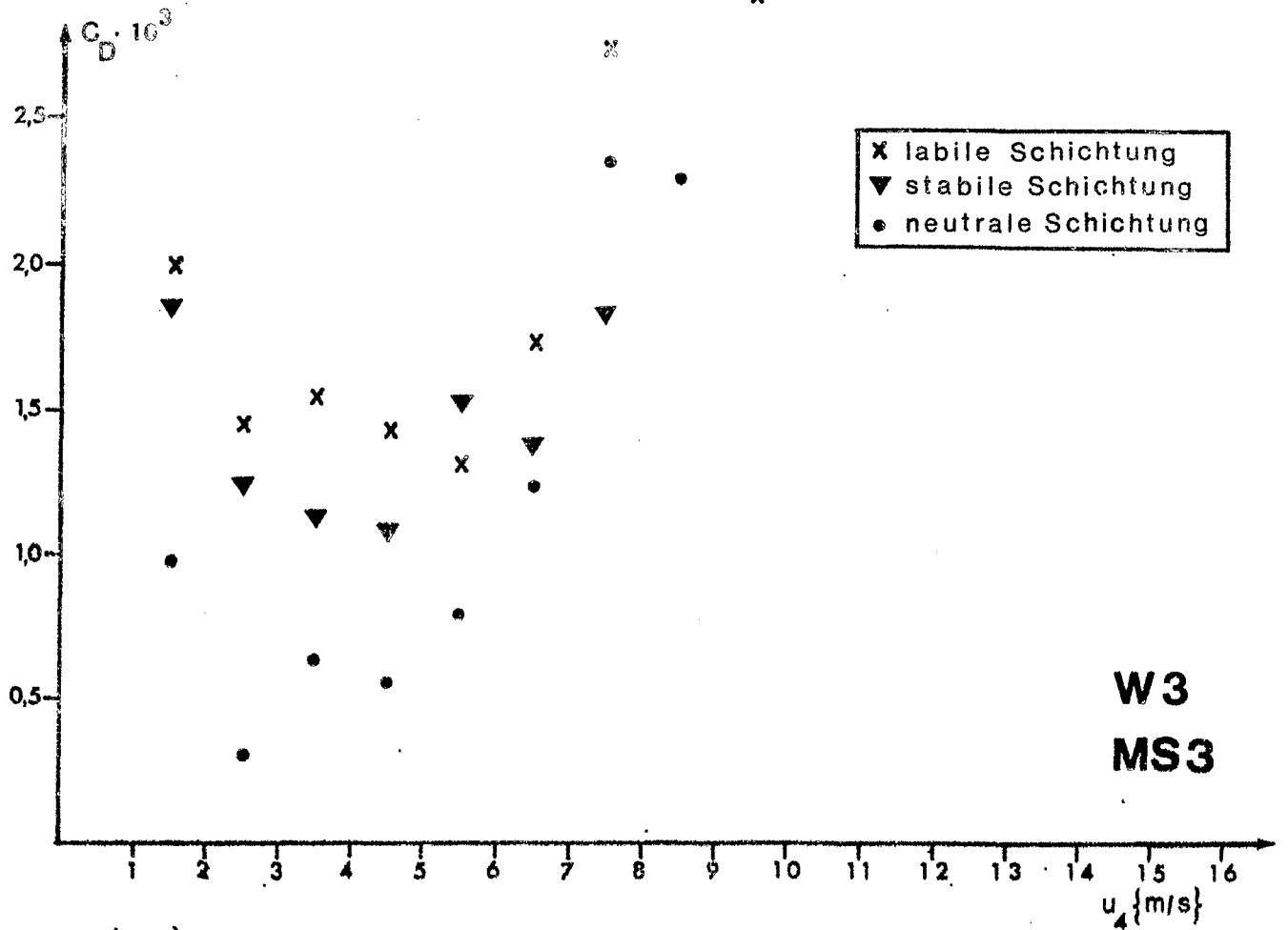
- Wind: u_1 über einen langen Zeitraum defekt, Ostwinde
 Temperatur: Profile zu steil, Konstante a zu groß bzw. zu klein
 Feuchte: Profile zu steil, Konstante a zu groß

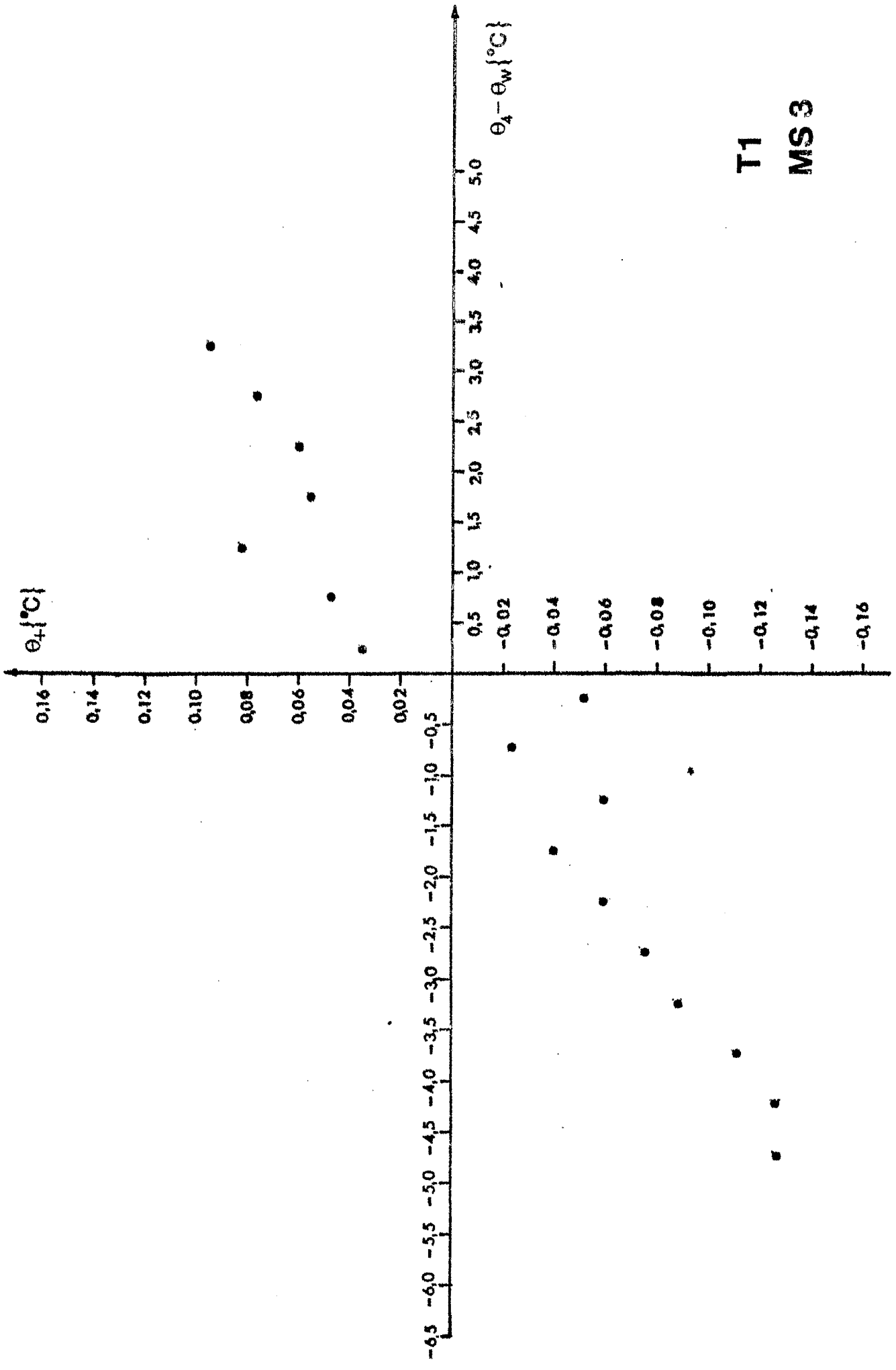
Die Temperatur- und Feuchteprofile sind zu steil wegen der überwiegend vorherrschenden schwach labilen oder neutralen Dichteschichtung.

Tabelle M32: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

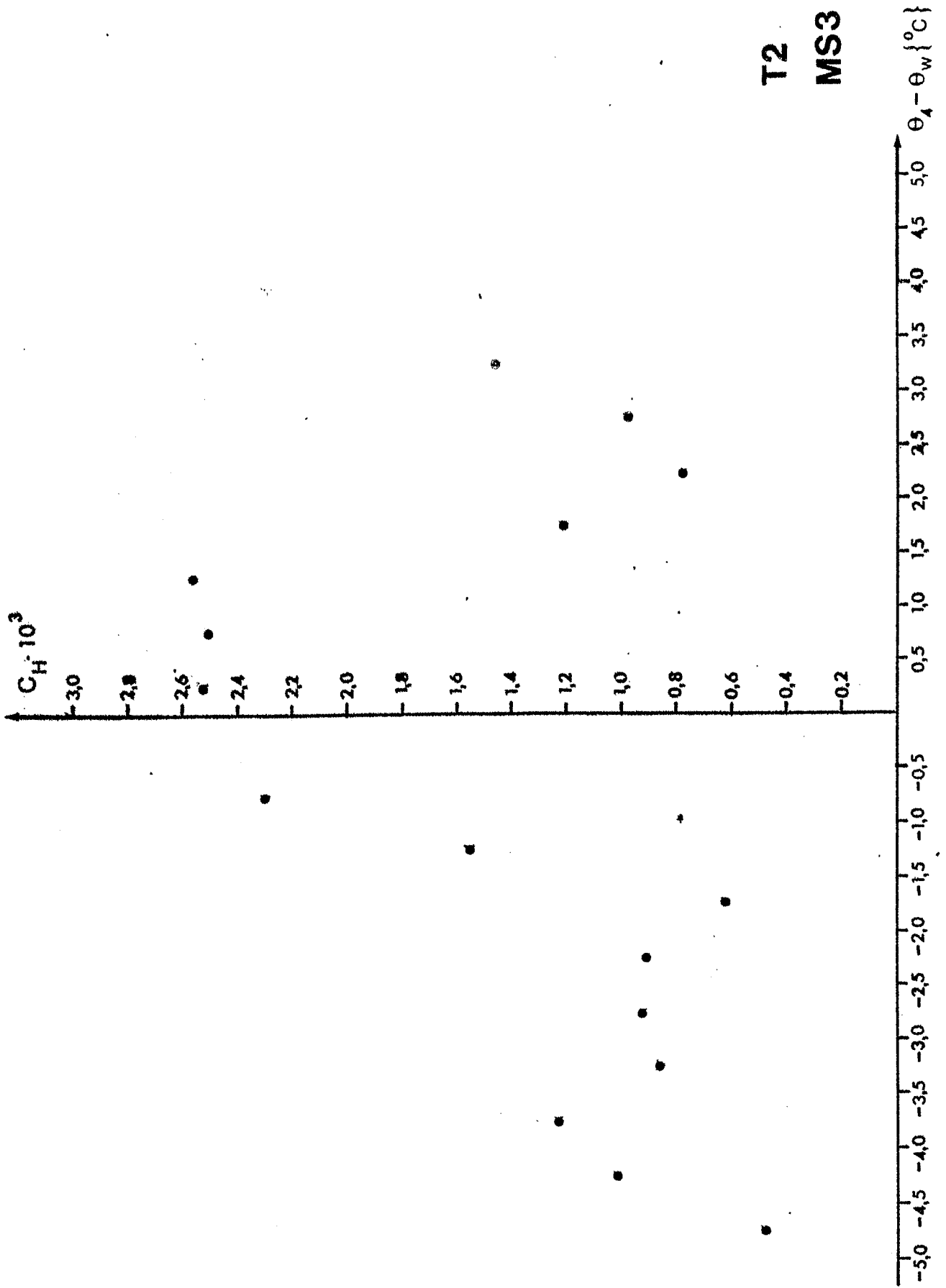
	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	1.98	1.04	1.32
neutral	0.93	--	--
stabil	1.36	2.28	3.08



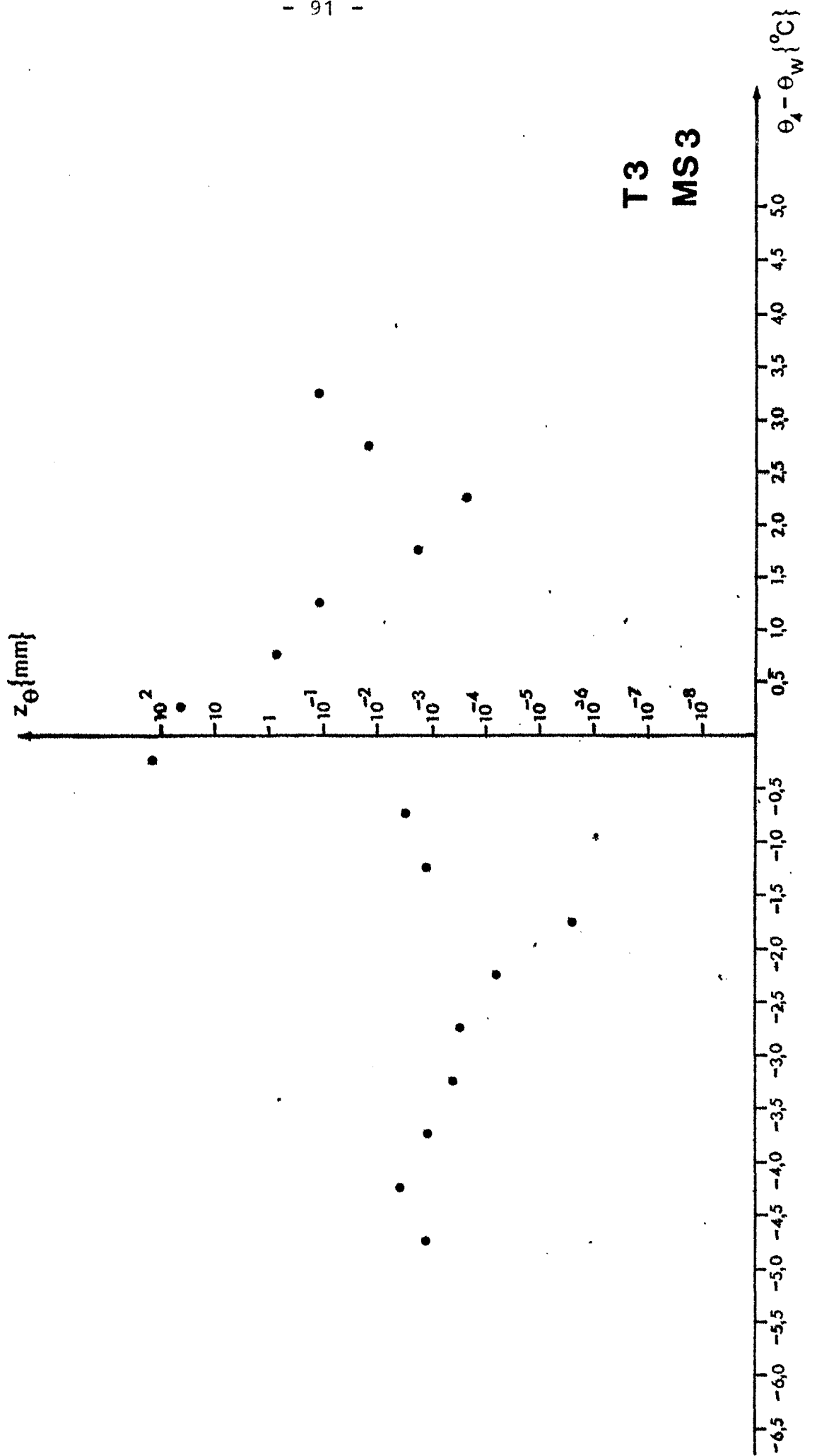


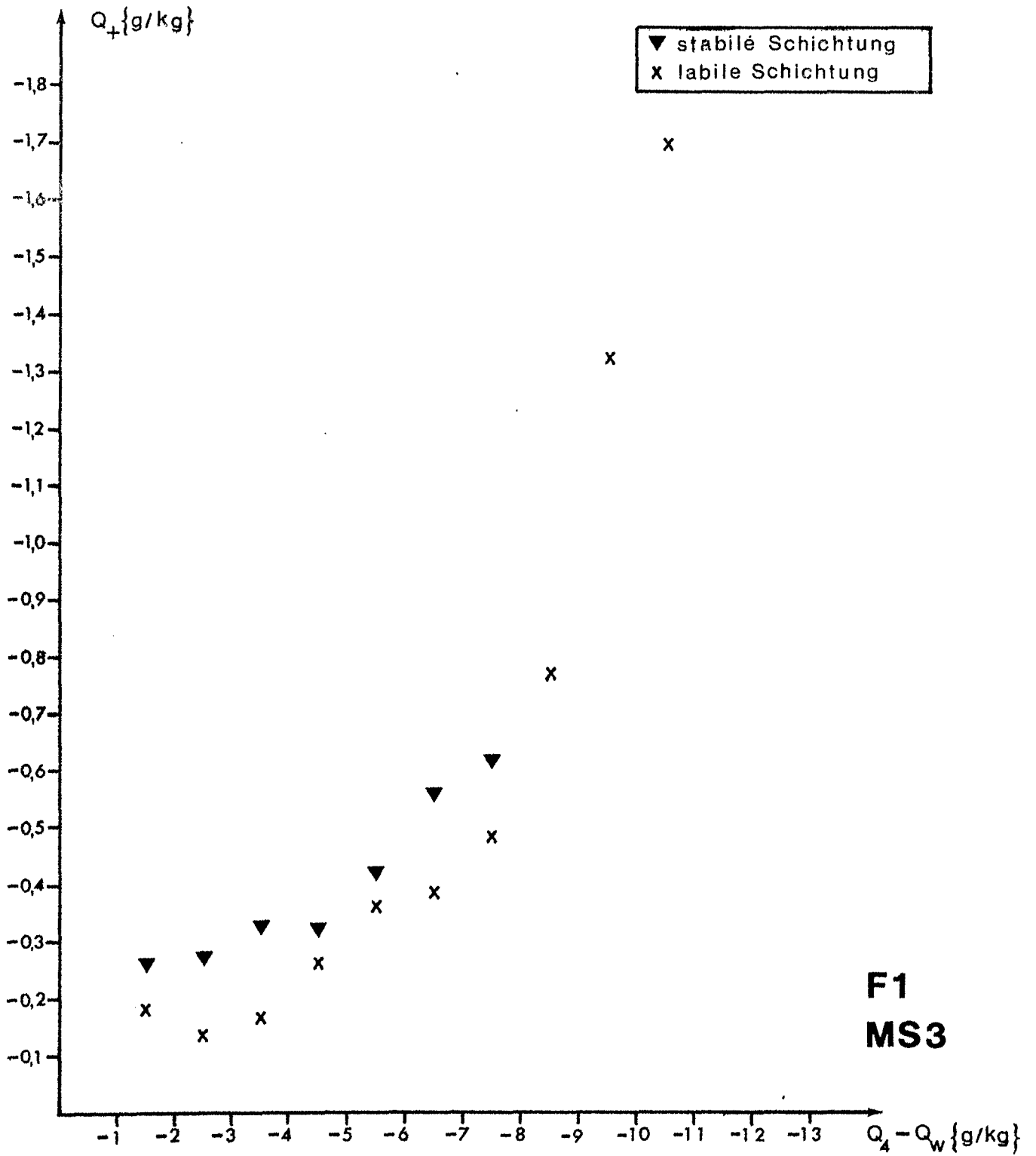


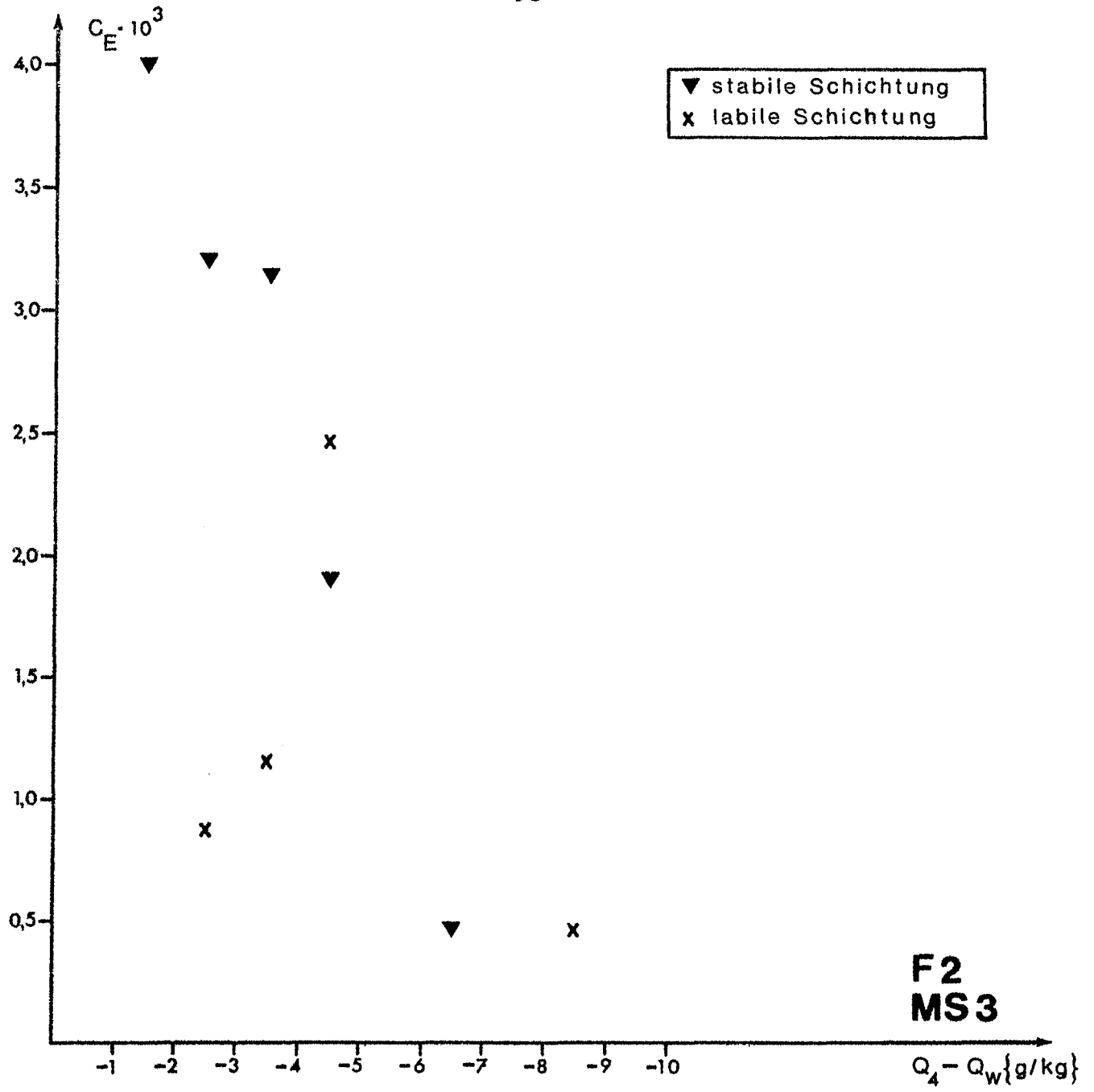
T1
MS 3

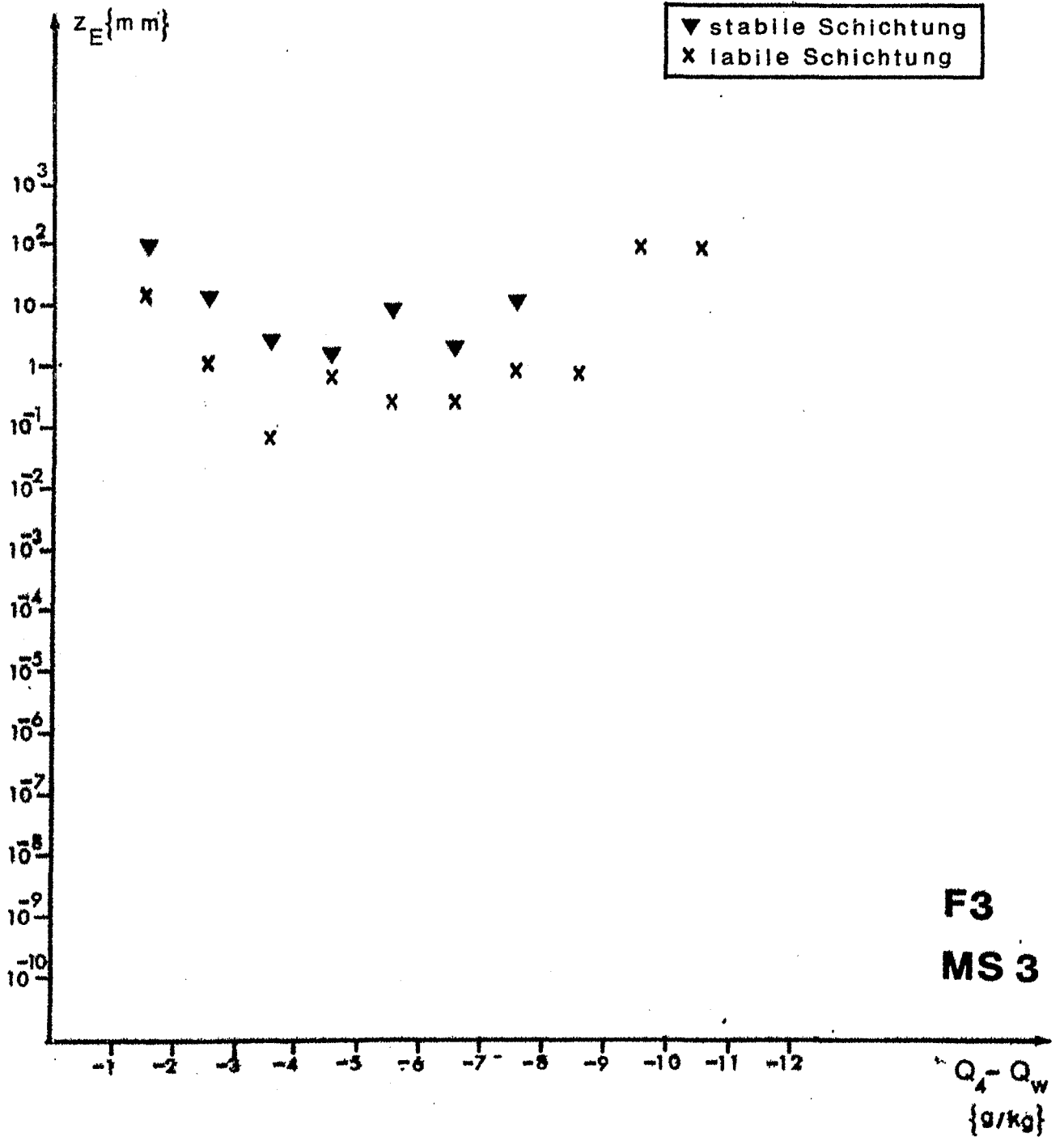


T2
MS3









Meßserie 4 (16.7. - 6.8.)

Der Wechsel zwischen Störungsausläufern und Zwischenhochdruckgebieten dauert mit wechselnden Winden an, bis die Station am 22.7. in den Einflußbereich eines Hochdruckgebietes westlich der Britischen Inseln kommt. Diese Lage mit Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 6 m/s aus N-NW dauert bis zum 27.7. an. Die Wassertemperatur liegt bei 20°C, die Tagestemperaturen betragen knapp über 20°C und die Nachttemperaturen 15-16°C. Am 28.7. überstreicht die Kaltfront eines Tiefdruckwirbels über Norwegen die Station und bringt eine Abkühlung der Luft um etwa 3°C. In dieser Zeit herrscht labile Schichtung vor, da die Wassertemperatur wesentlich langsamer (innerhalb von 6 Tagen) auf 16-17°C zurückgeht. Der Wind kommt aus nördlichen Richtungen und erreicht eine maximale Stärke von 14 m/s. Danach ziehen mehrere Tiefausläufer mit wechselnden Wettererscheinungen über die Station und der Wind dreht auf W-NW.

Tabelle M41; Aufstellung der Profile

	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1876	1874	1876
berechnete Profile	662	438	456
Ausfälle	1214	1436	1420
berechnete Profile für c_H bzw. c_E	--	271	249
Ausfälle bei c_H bzw. c_E	--	1603	1627

hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

Wind: u_1 ist sehr oft defekt

Temperatur: Wasserthermometer defekt, zu steile Profile

Feuchte: Wasserthermometer defekt, zu steile Profile

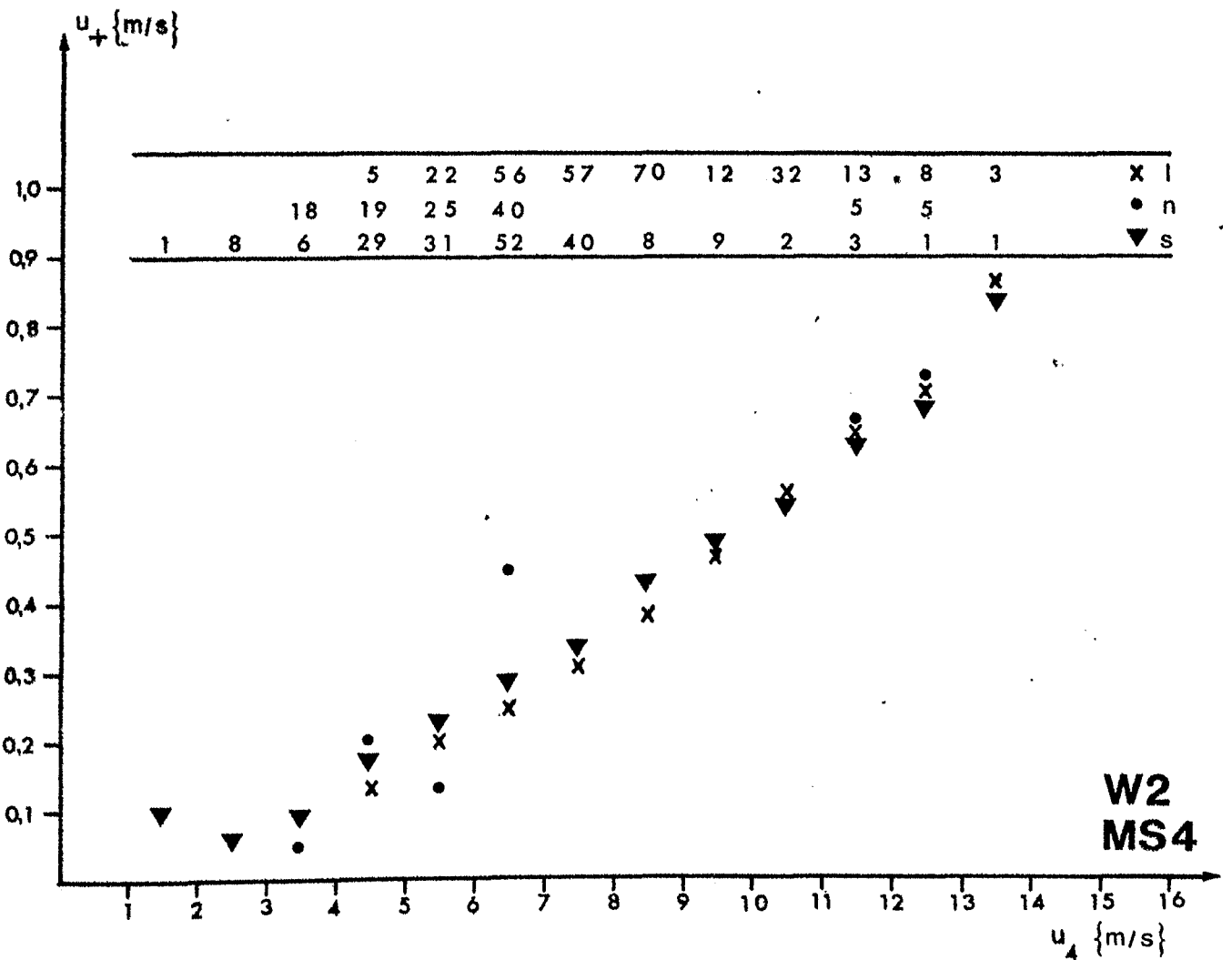
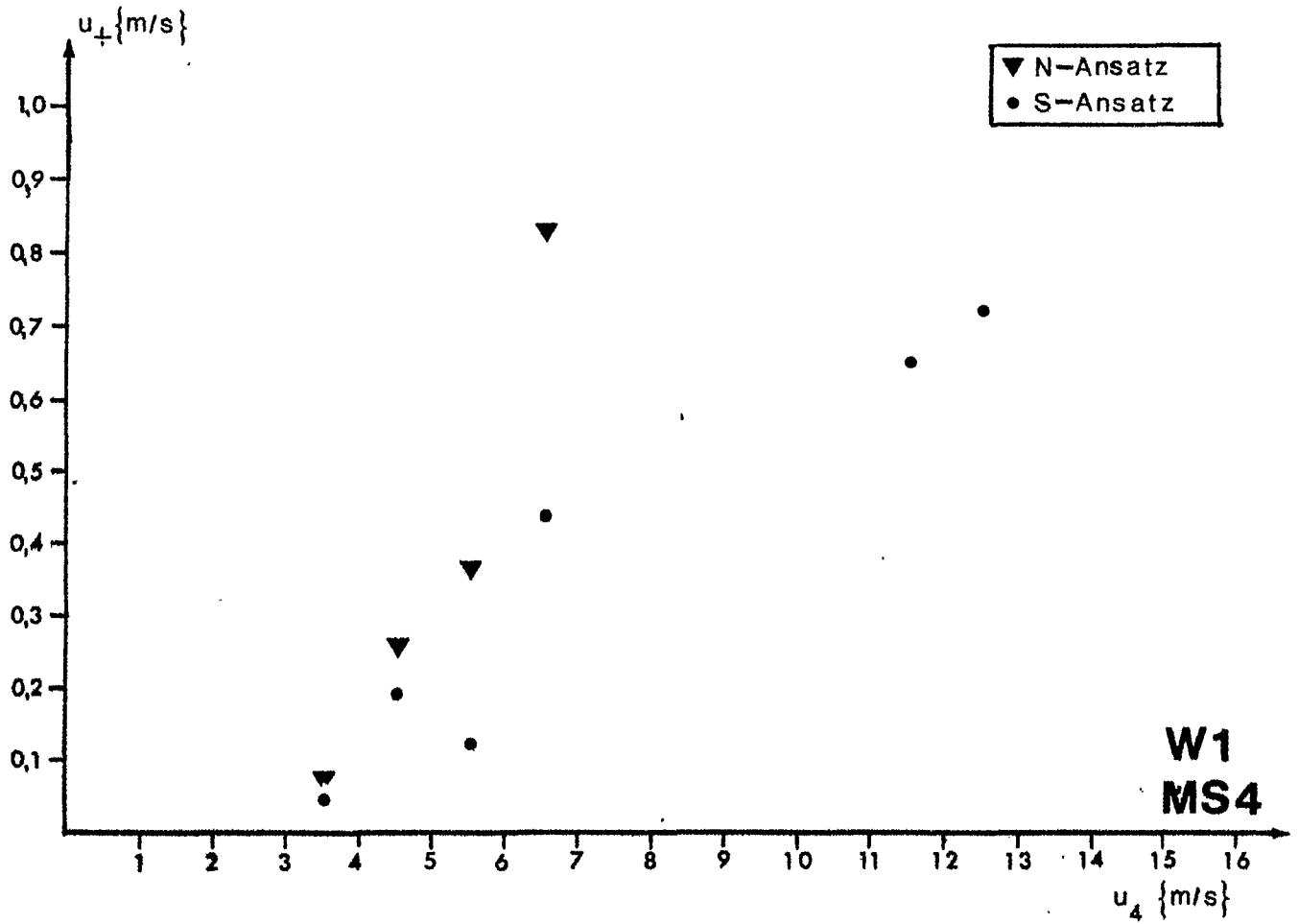
Die sehr große Zahl der Ausfälle der Temperatur- und Feuchteprofile ist auf die überwiegend fast neutrale Schich-

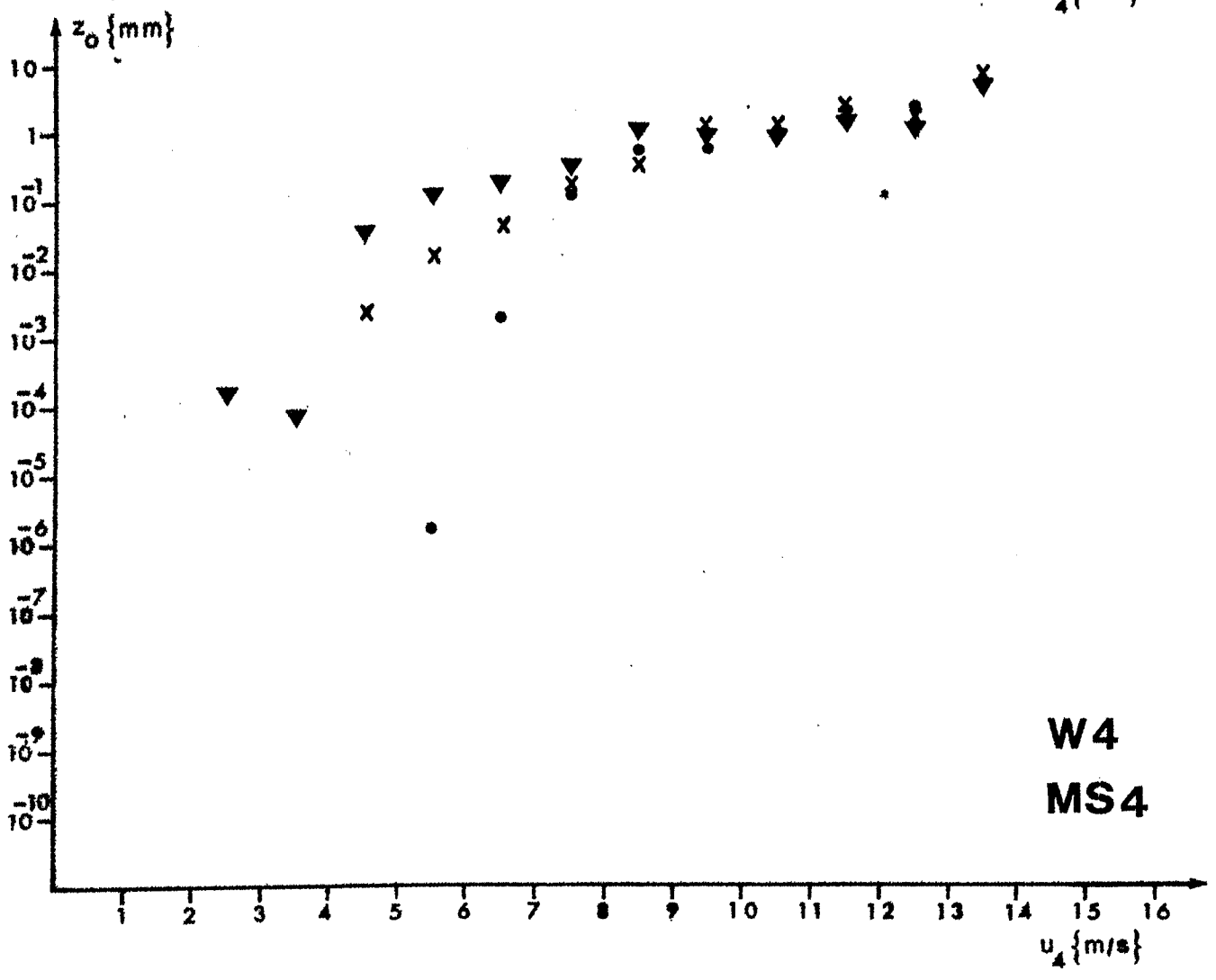
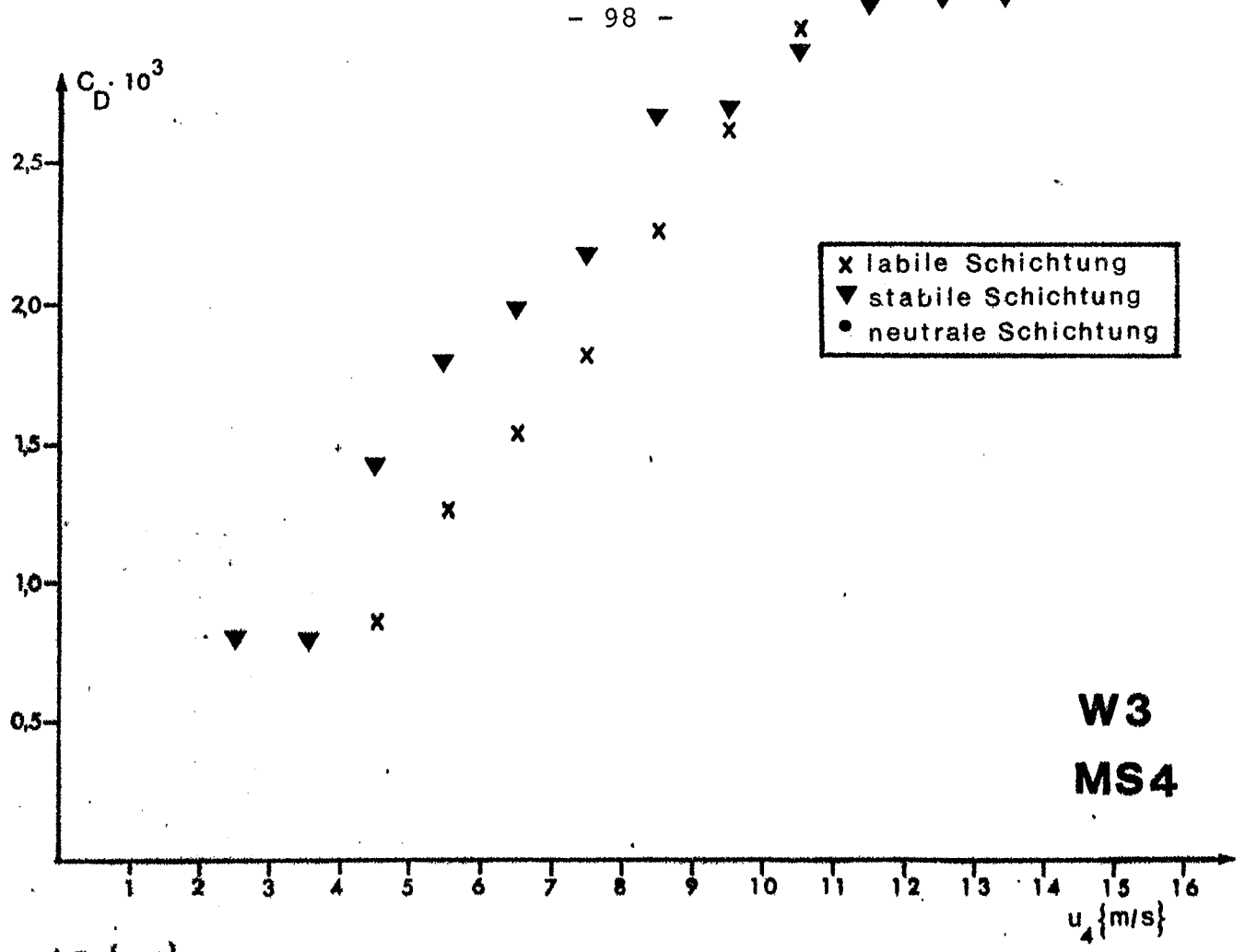
tung zurückzuführen.

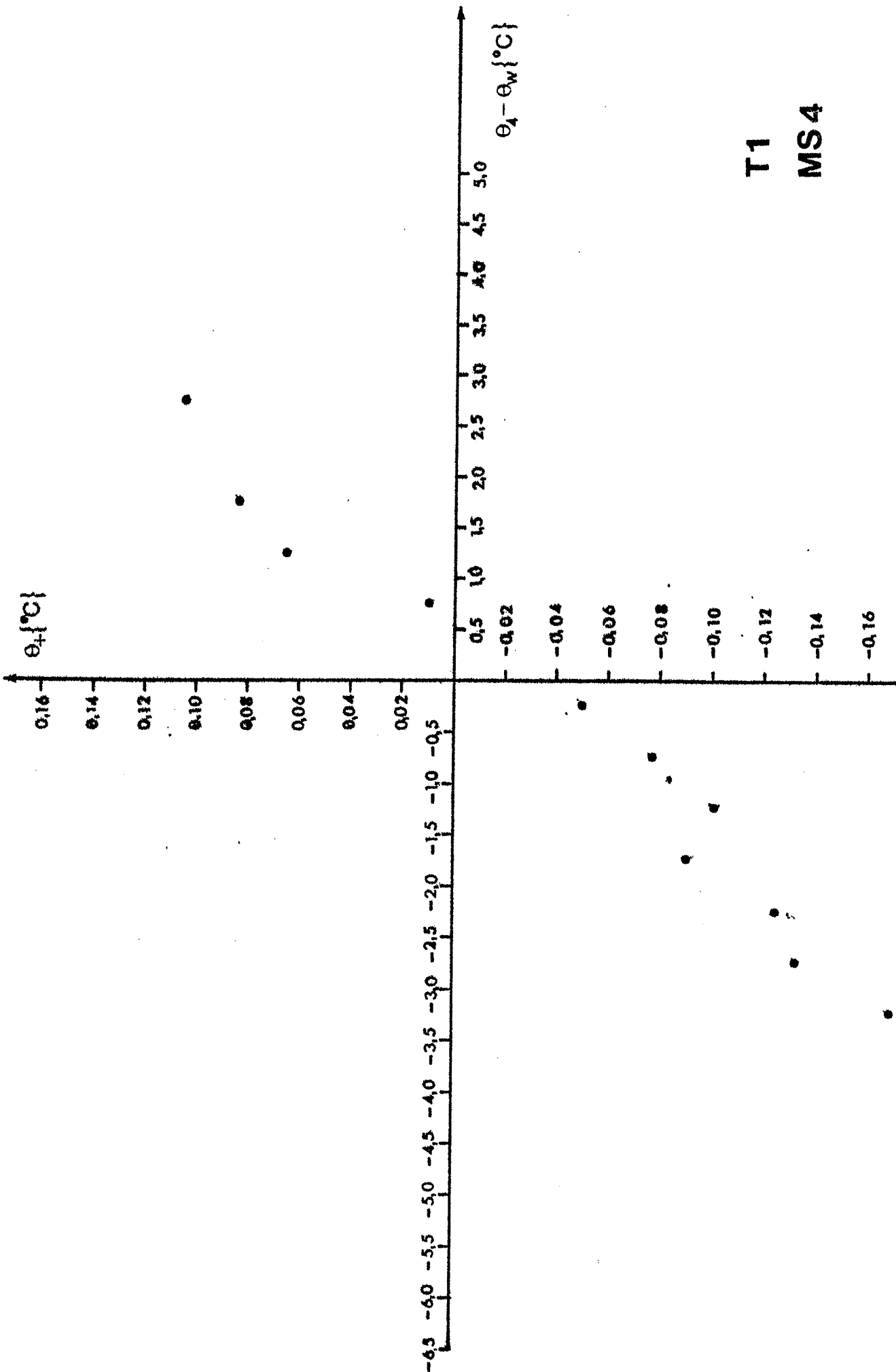
Tabelle M42: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	2.19	1.48	1.10
stabil	1.98	1.33	5.60

c_D nimmt bei neutraler Schichtung Werte an, die teilweise über 100 liegen. Die Werte wurden deswegen nicht berücksichtigt.

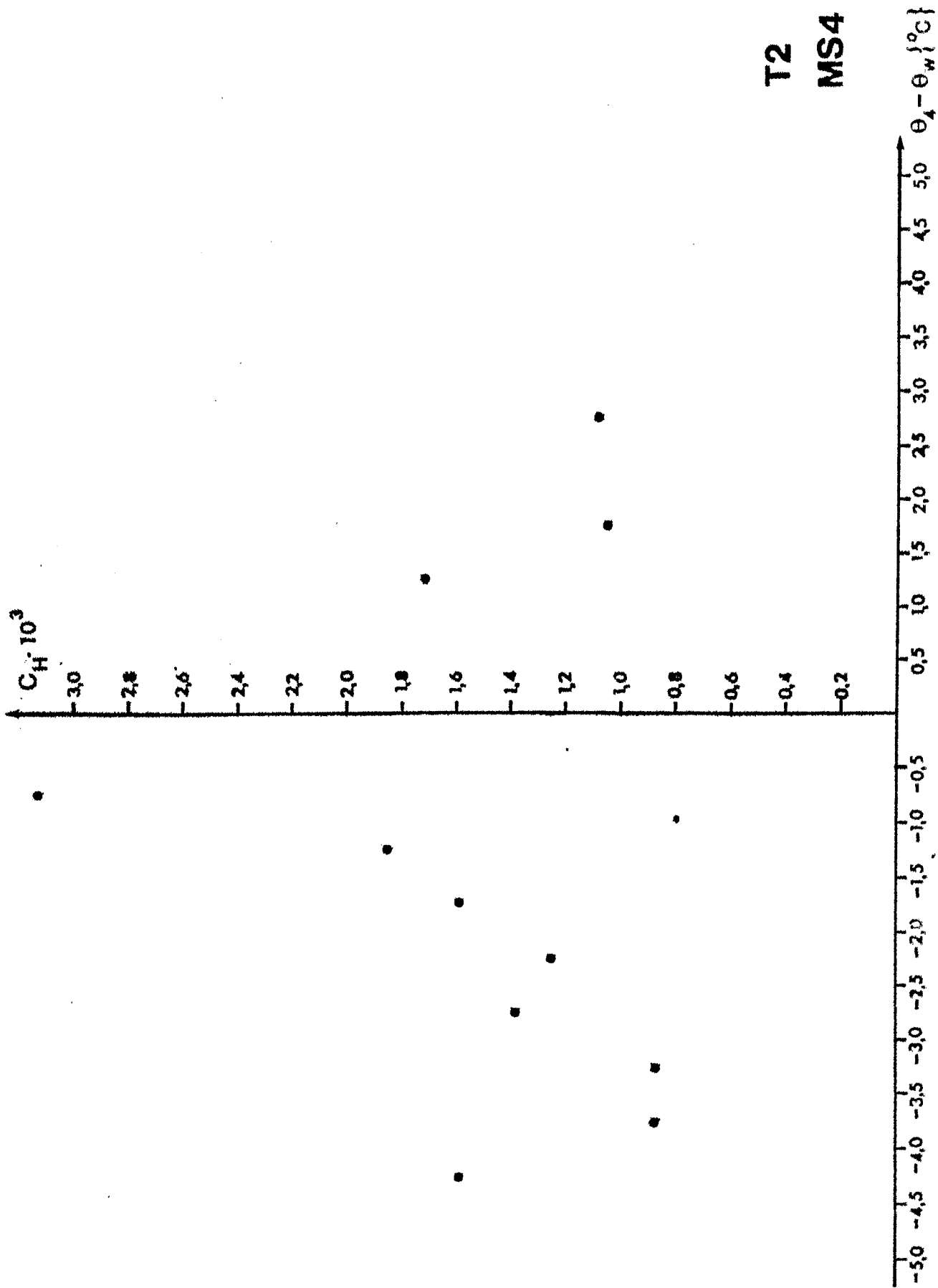




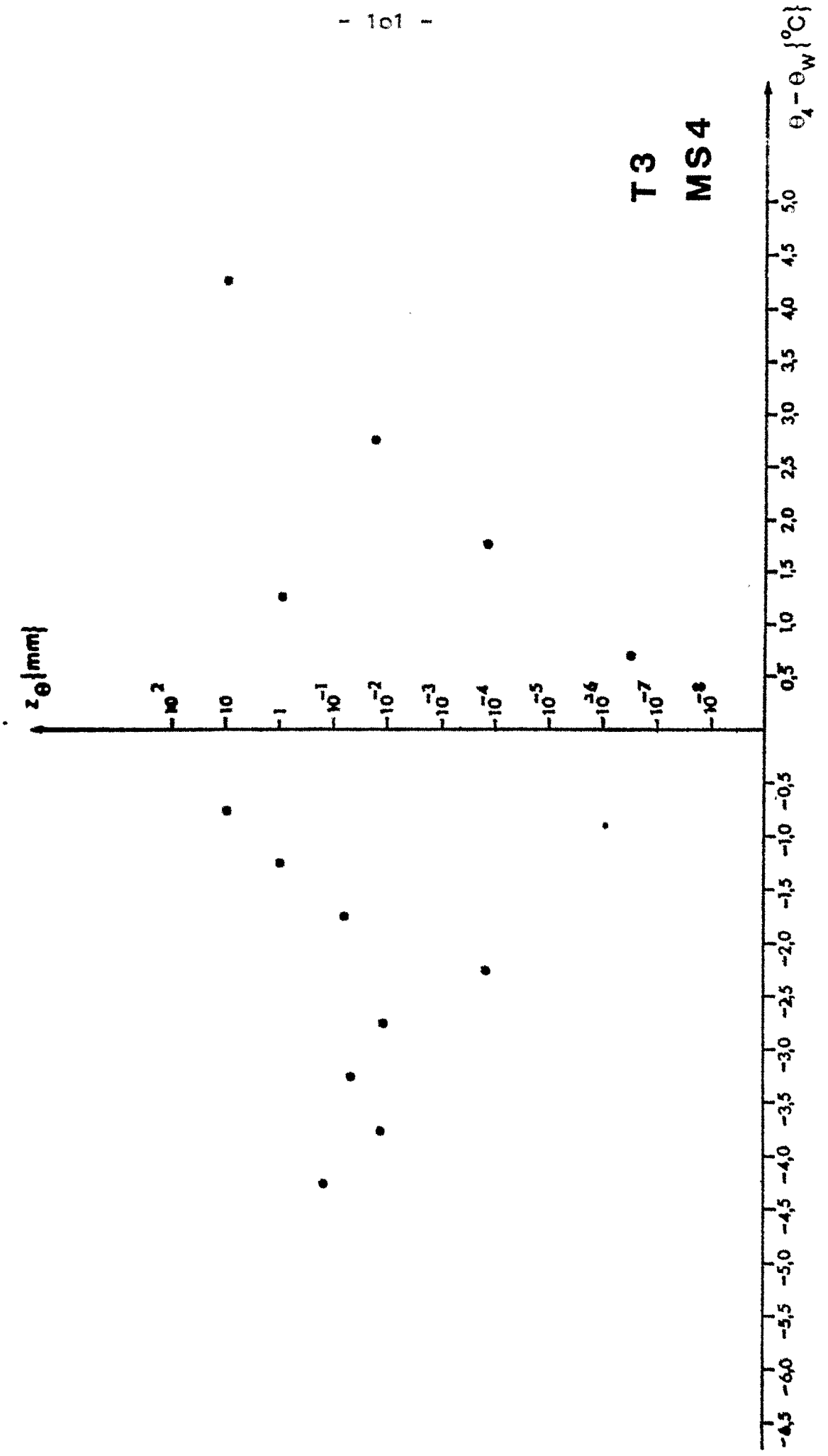


T1

MS4

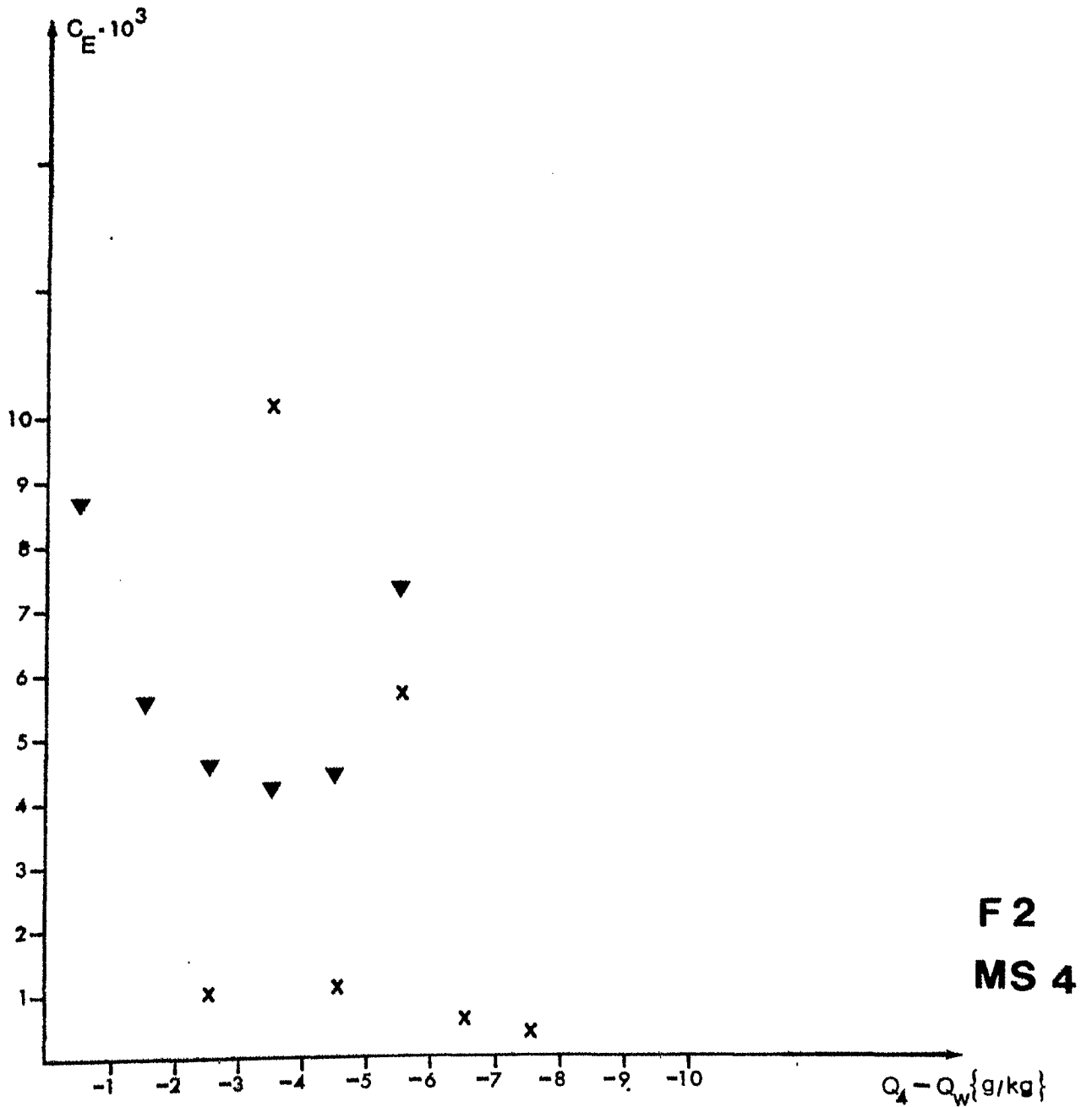
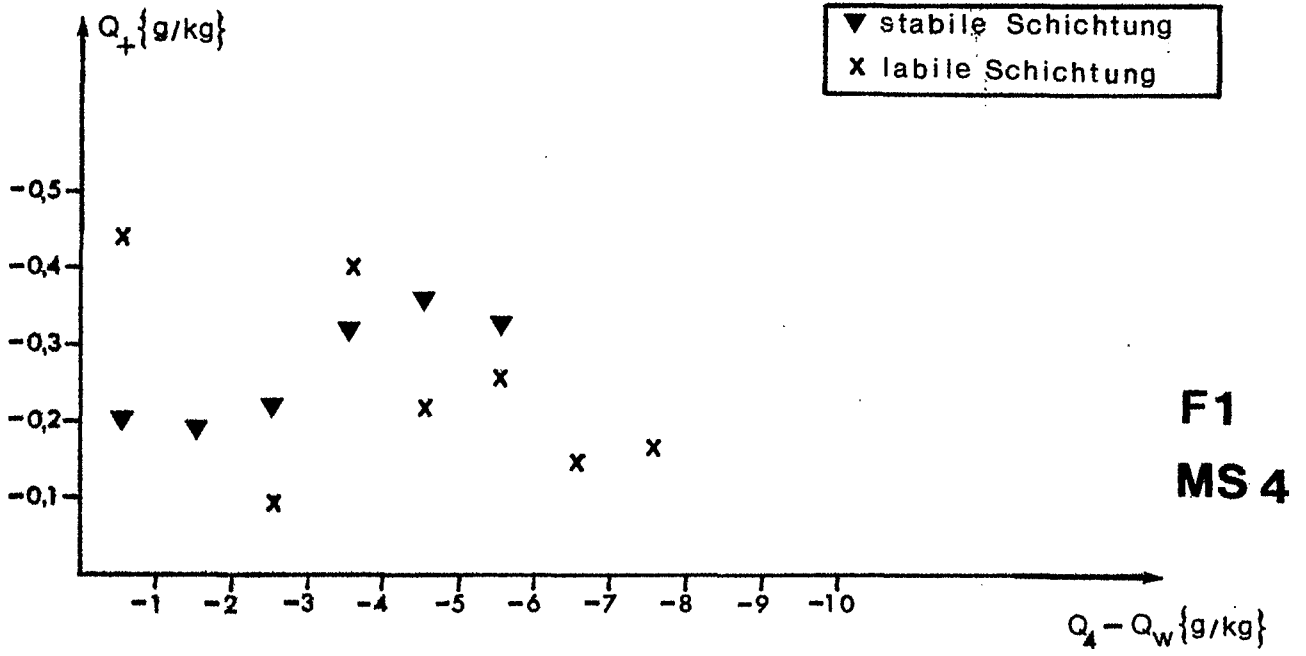


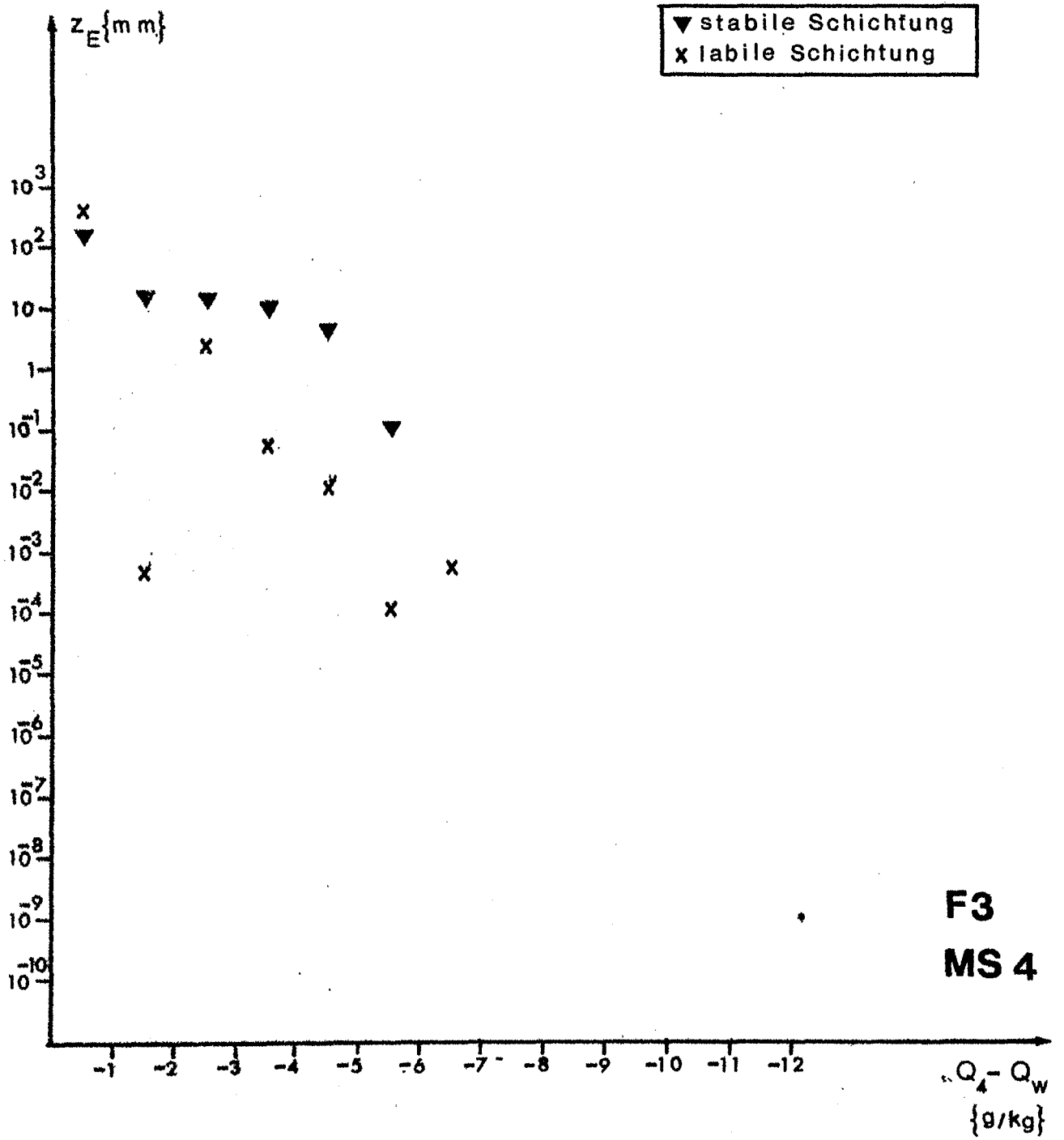
T2
MS4



T3

MS4





Meßserie 5 (6.8. - 27.8.)

Die Serie der durchziehenden Tiefausläufer wird beendet, und am 7.8. kommt die Station unter Hochdruckeinfluß, der bis zum 26.8. bestehen bleibt. Es herrschen vorwiegend schwache Winde (bis 5 m/s), die aus nördlicher Richtung wehen und gegen Ende der Meßserie aus Osten kommen. Die Tagestemperaturen liegen um 20°C (max. 23°C), die Nachttemperaturen zwischen 15°C und 17°C, und die Wassertemperatur nimmt auf 19°C zu. Nachts herrschen labile und tagsüber stabile Schichtungsverhältnisse vor. Am Ende der Meßserie wird die Station von einem Tiefausläufer berührt, wodurch die Windgeschwindigkeit auf 10 m/s ansteigt.

Tabelle M51: Aufstellung der Profile

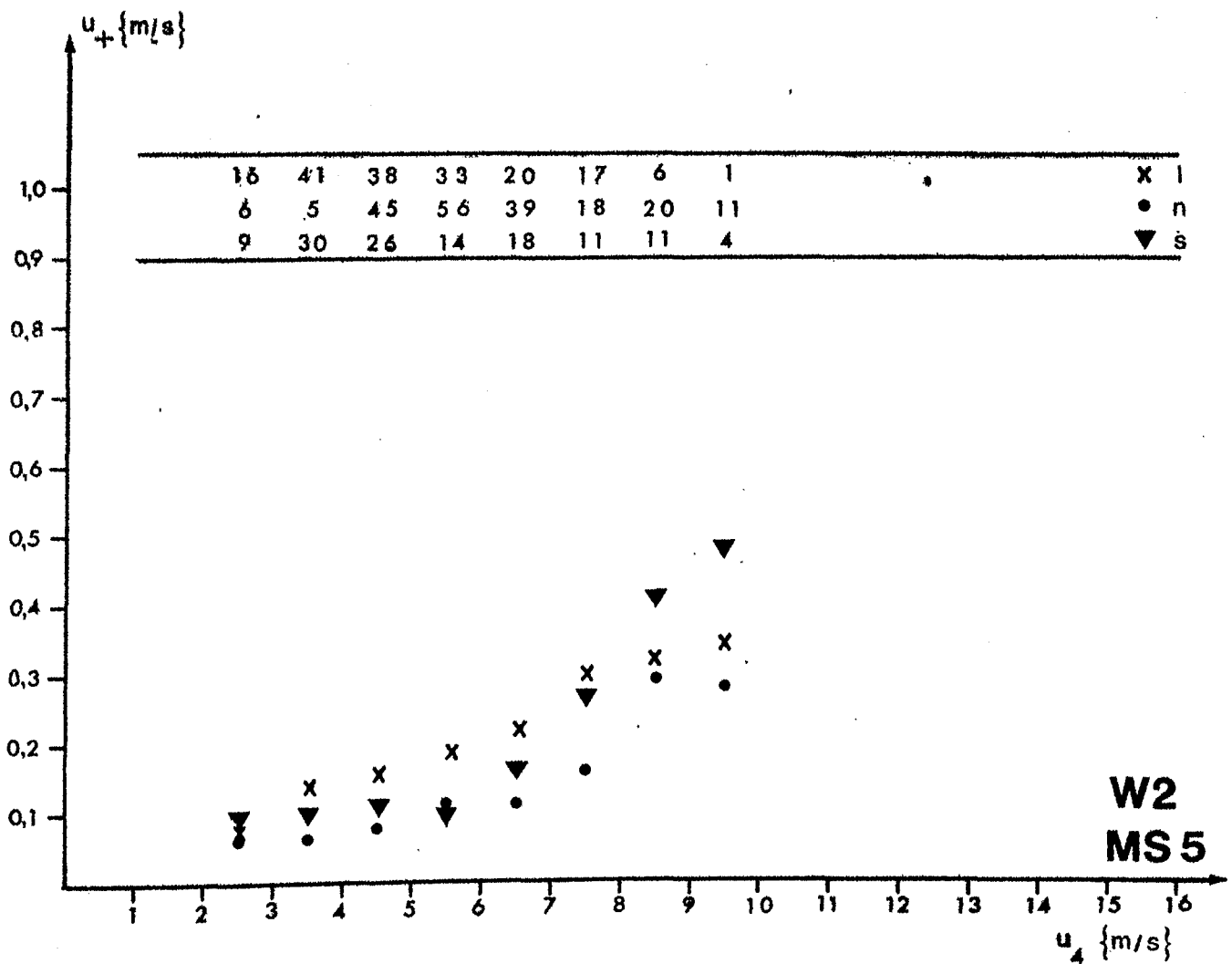
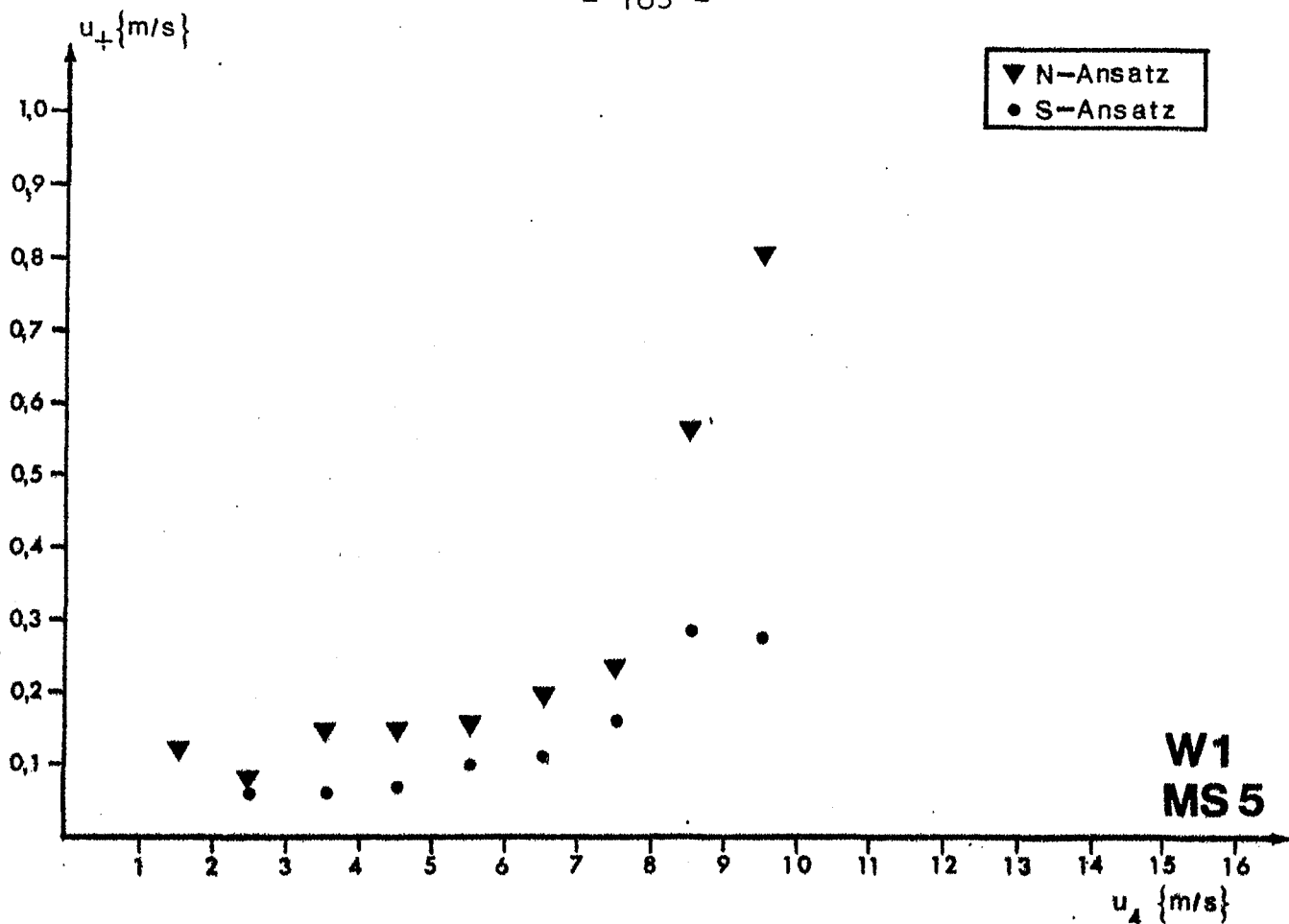
	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1759	1485	1485
berechnete Profile	501	307	725
Ausfälle	1258	1178	760
berechnete Profile für c_H bzw. c_E	--	174	248
Ausfälle bei c_H bzw. c_E	--	1311	1237

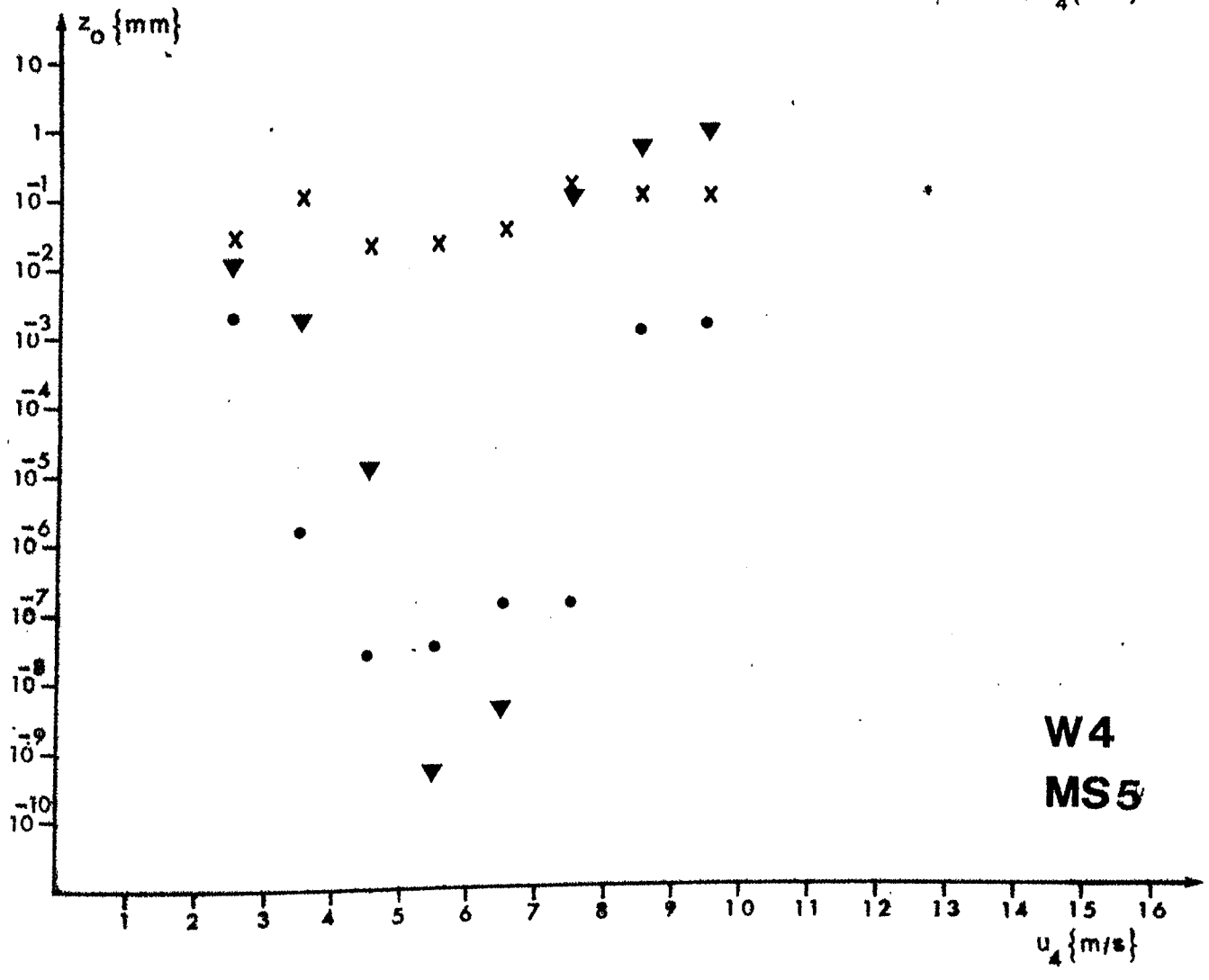
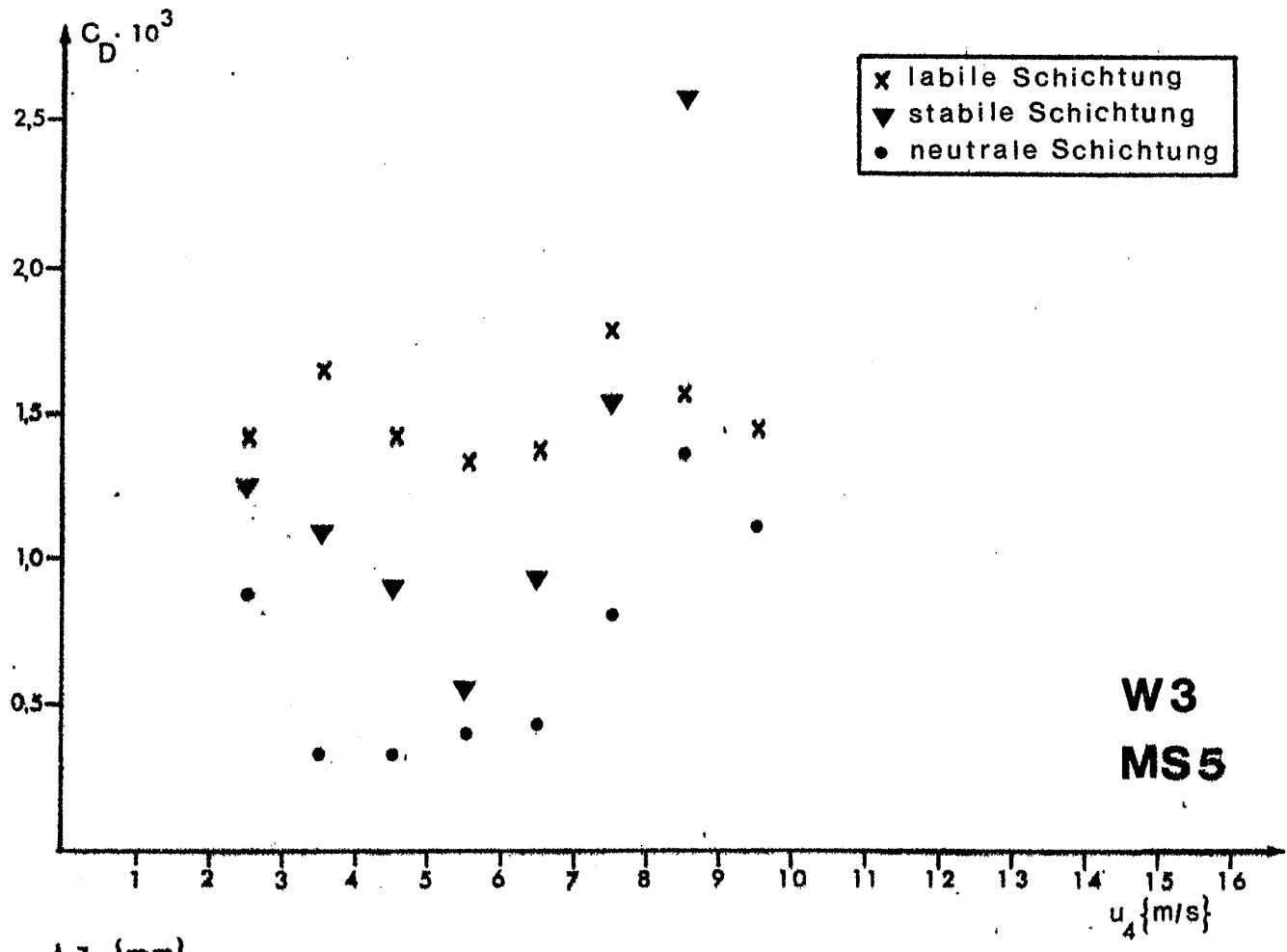
hauptsächliche Ursache für die Ausfälle:

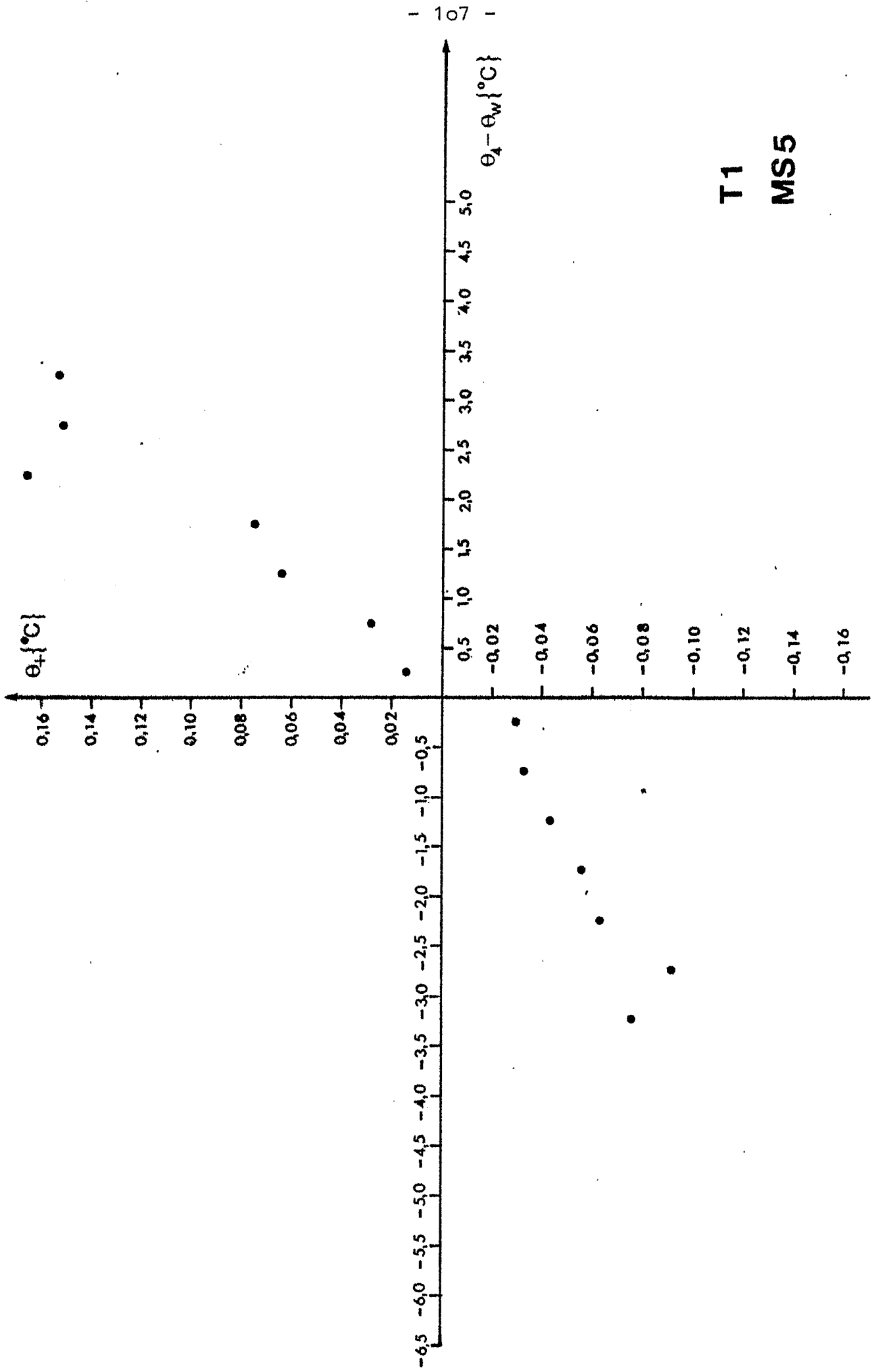
- Wind: Ostwinde, zu kleine Windgeschwindigkeiten
 Temperatur: Wasserthermometer defekt, keine kontinuierliche Zu- oder Abnahme
 Feuchte: Wasserthermometer defekt, Profile zu steil

Tabelle M52: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

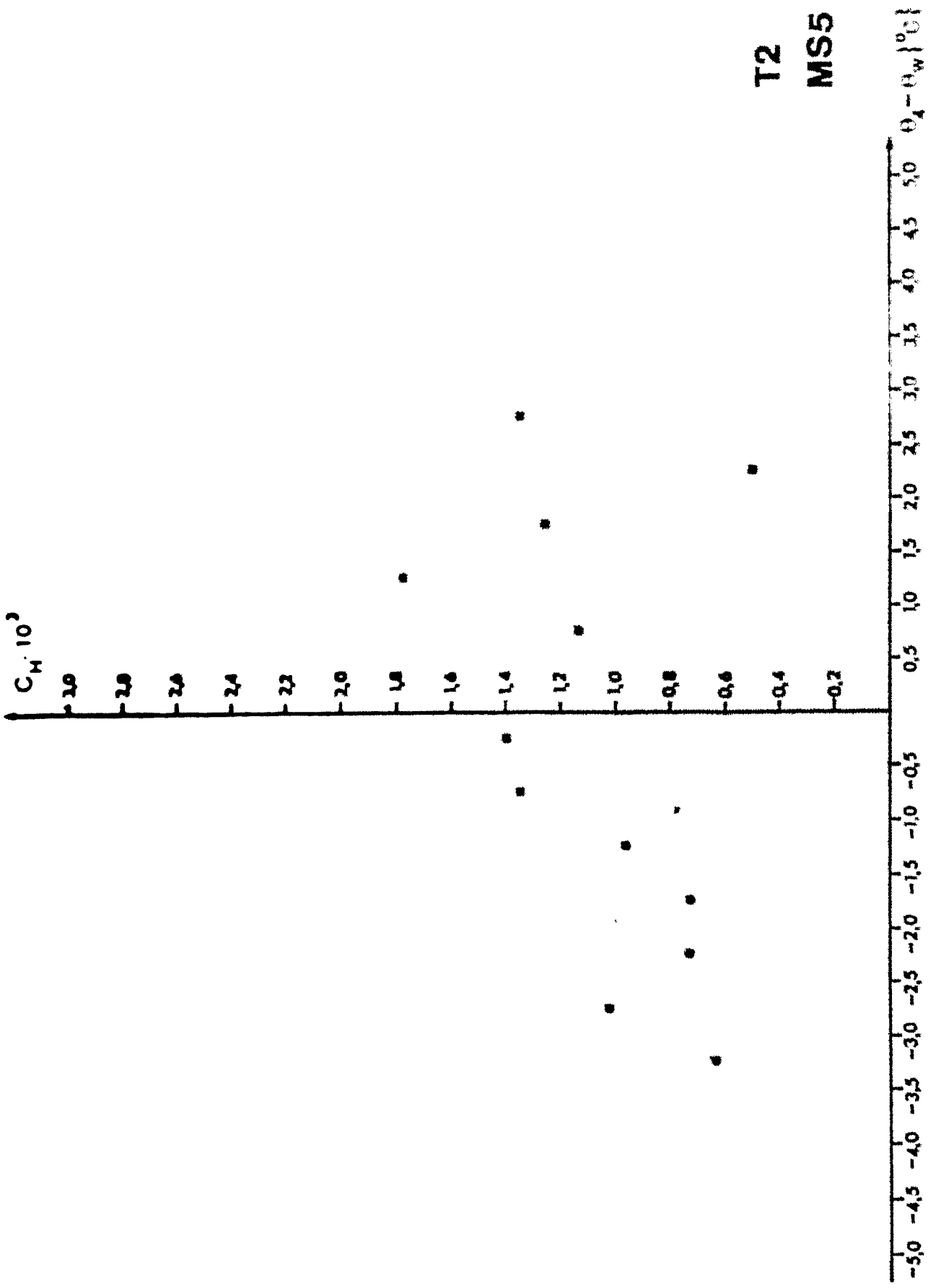
	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	1.52	1.05	0.94
neutral	0.60	--	--
stabil	1.24	1.32	1.29





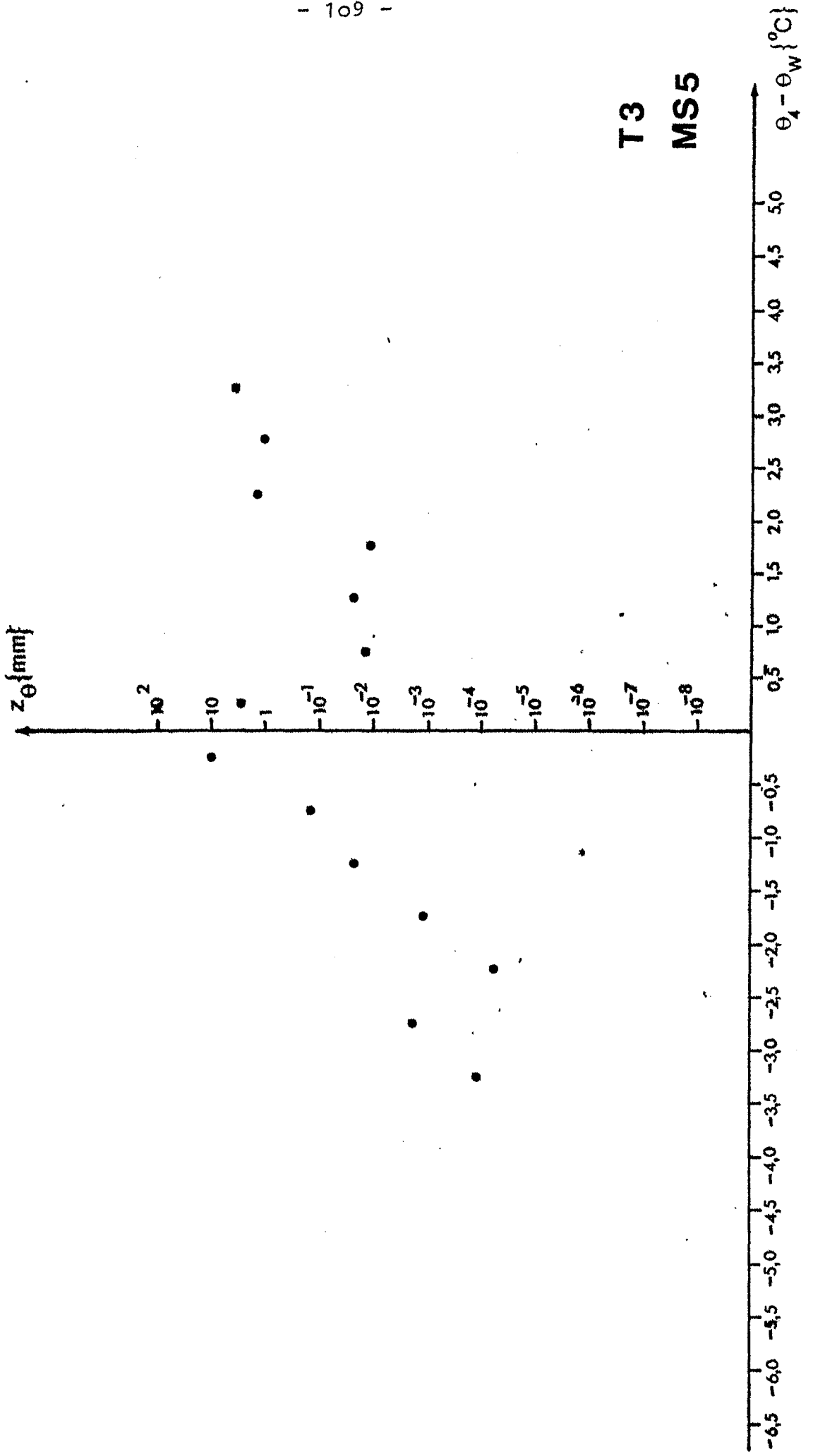


T1
MS5



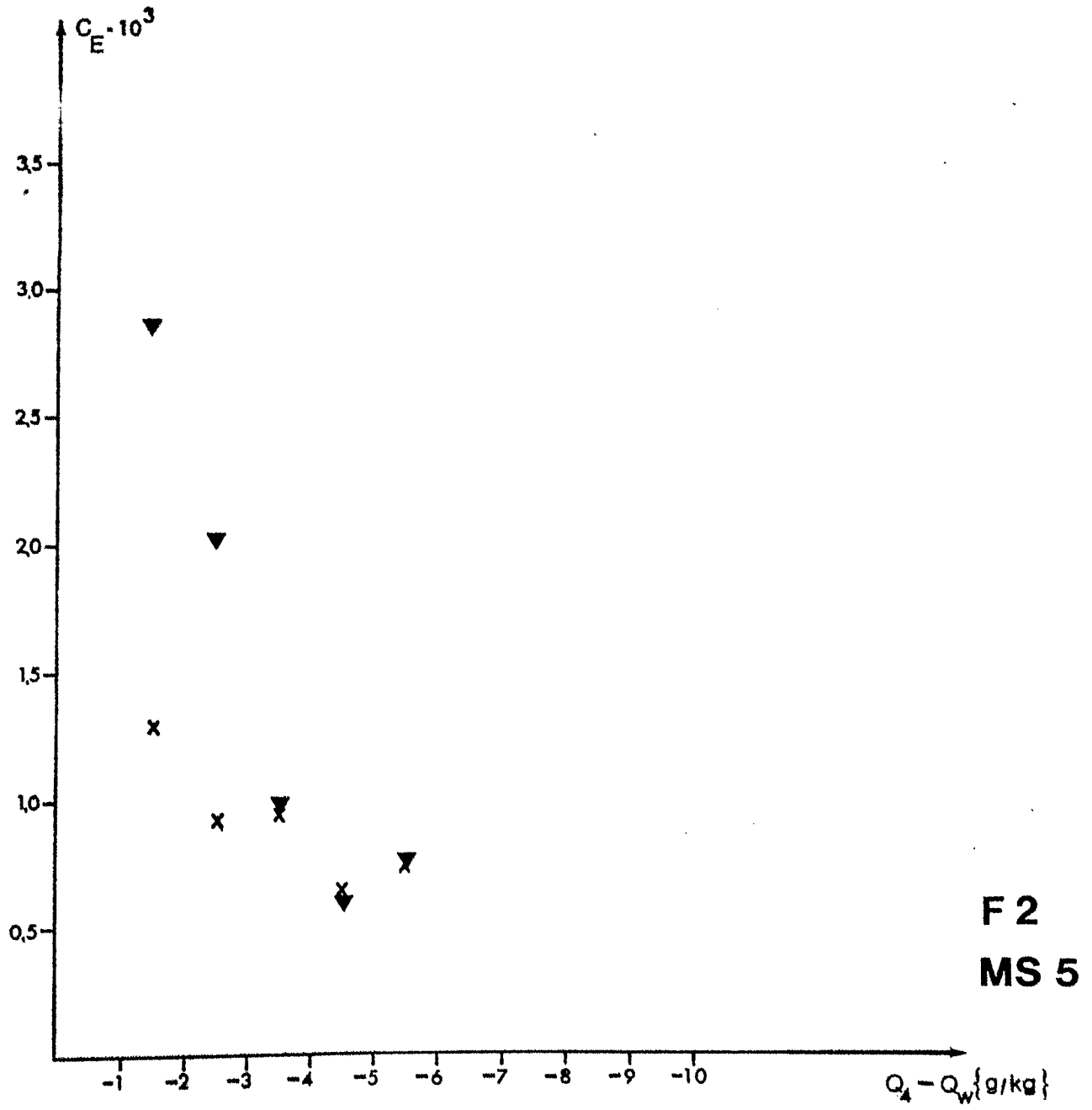
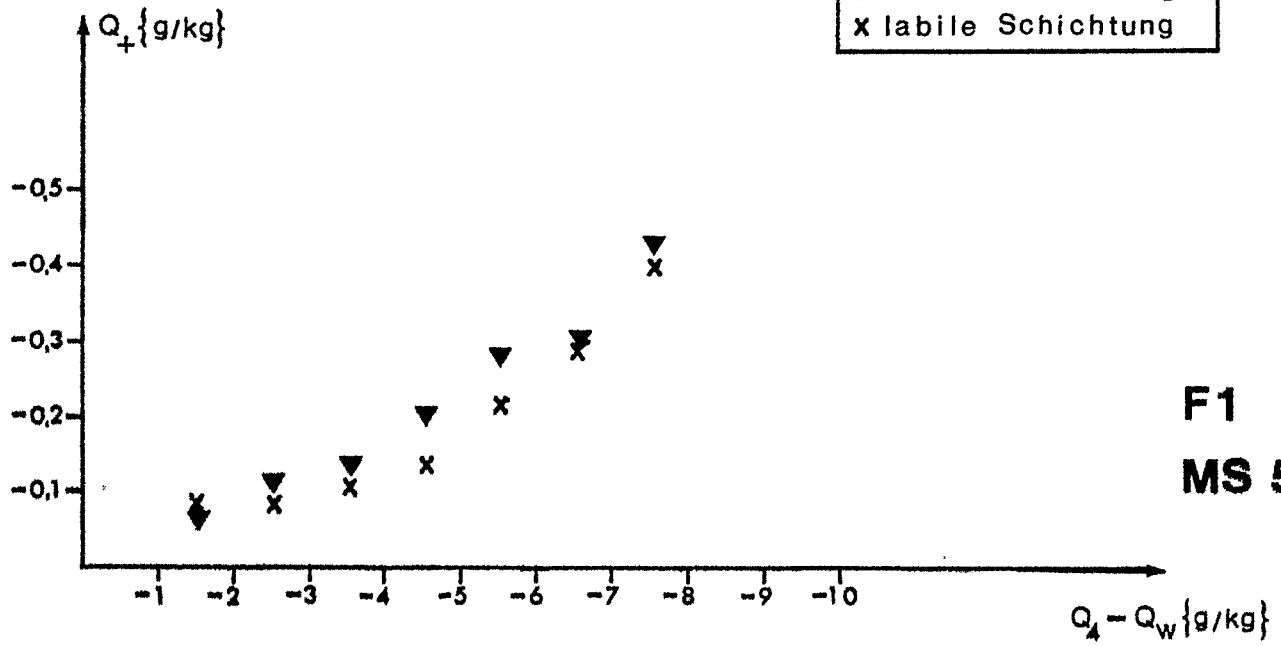
T2

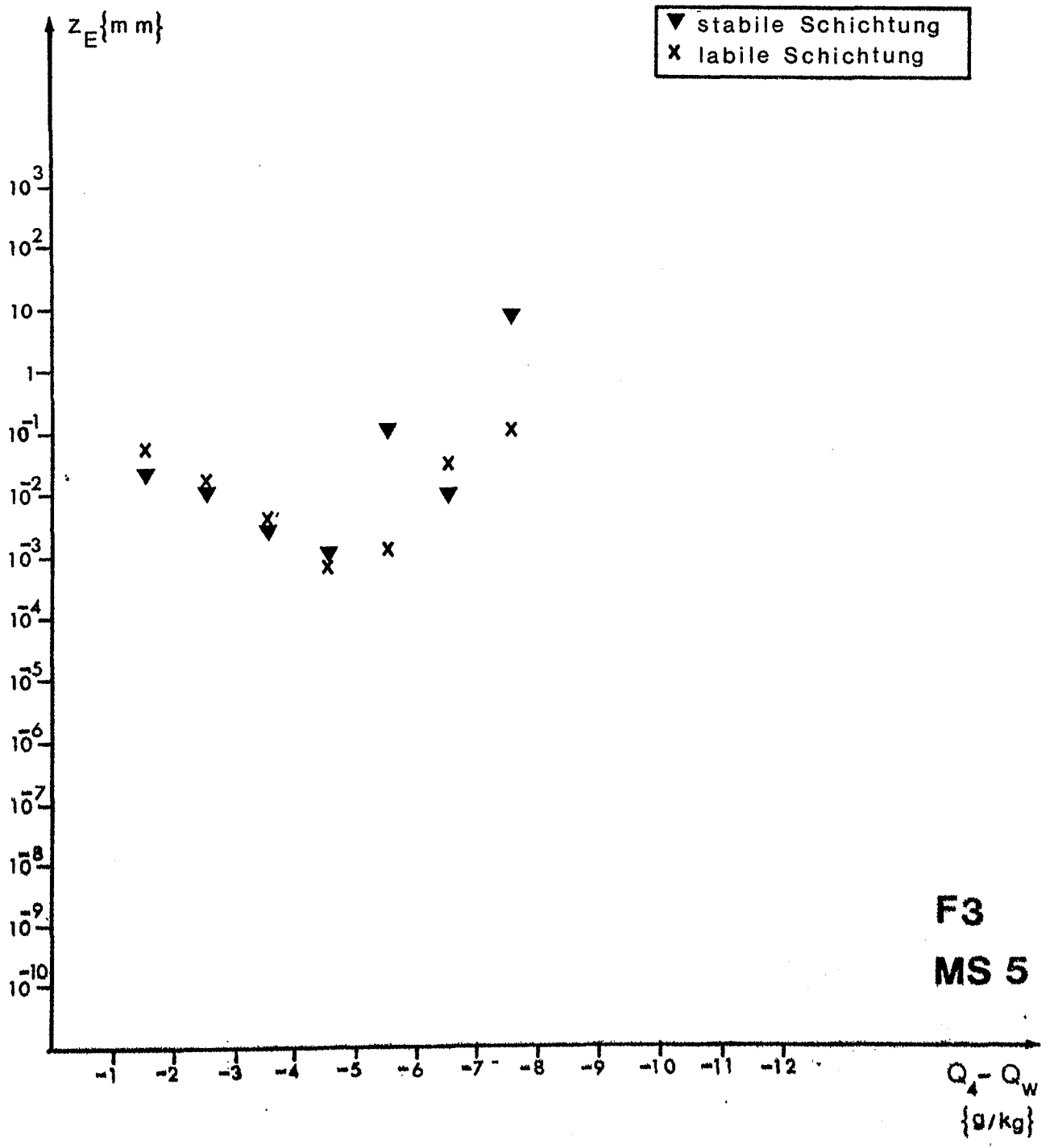
MS5



T3
MS5

▼ stabile Schichtung
x labile Schichtung





F3
MS 5

Meßserie 6 (27.8. - 13.9.)

Während der gesamten Meßserie zieht eine Serie von Tiefdruckgebieten über die Station hinweg. Die Windgeschwindigkeiten betragen 5 m/s bis 13 m/s, nur gelegentlich gehen sie auf niedrigere Werte zurück. Zu Beginn weht der Wind aus N-NO, dreht dann auf westliche Richtungen und kommt zum Ende der Meßserie aus Süden. Die Wassertemperatur nimmt von 19°C zu Beginn auf 15-16°C am Ende der Meßserie ab; die maximale Lufttemperatur geht von 20°C auf 15-16°C zurück und die Nachttemperaturen schwanken zwischen 15-16°C zu Beginn und 10°C am Ende. Überwiegend herrscht neutrale oder schwach labile Dichteschichtung vor.

Tabelle M61: Aufstellung der Profile

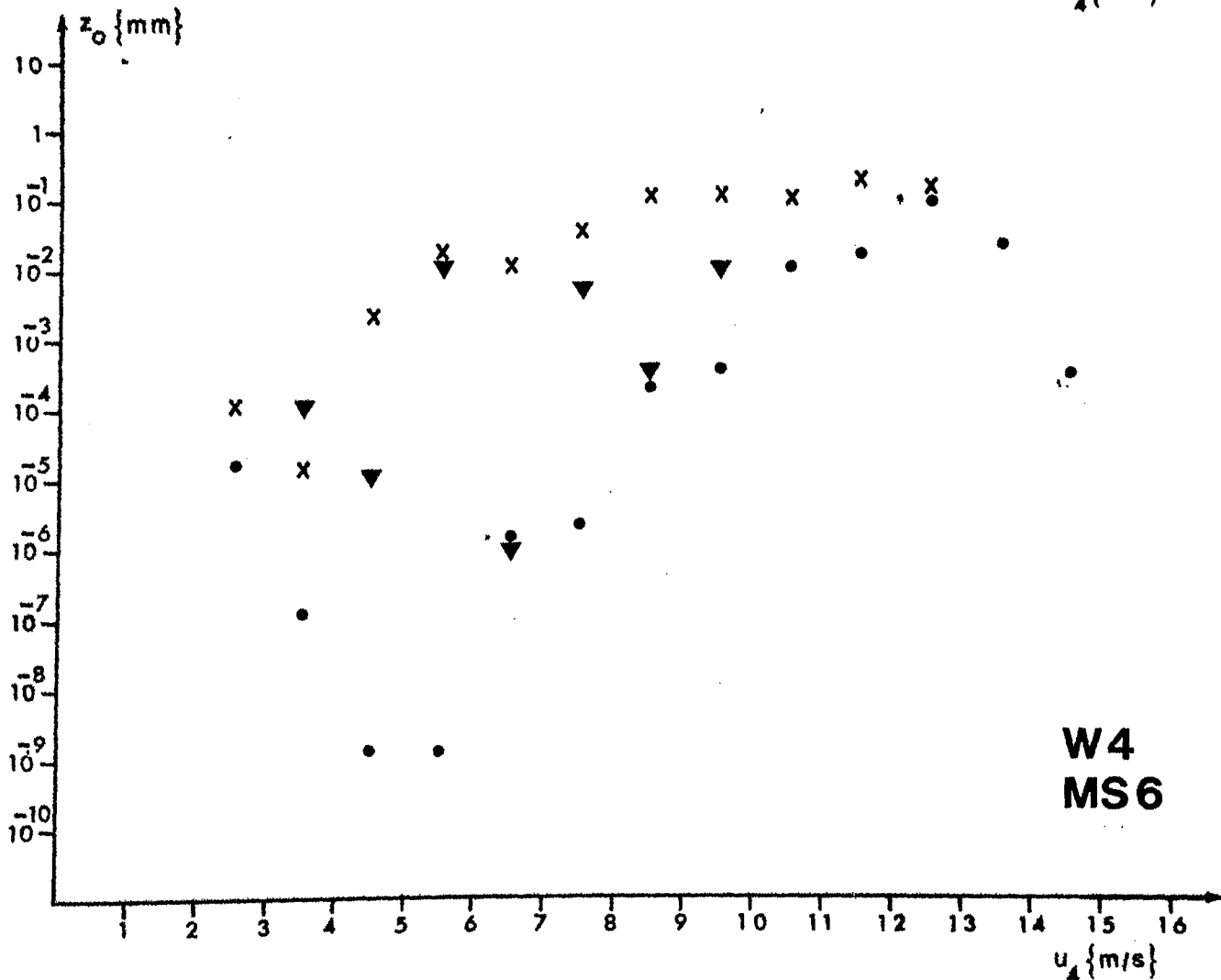
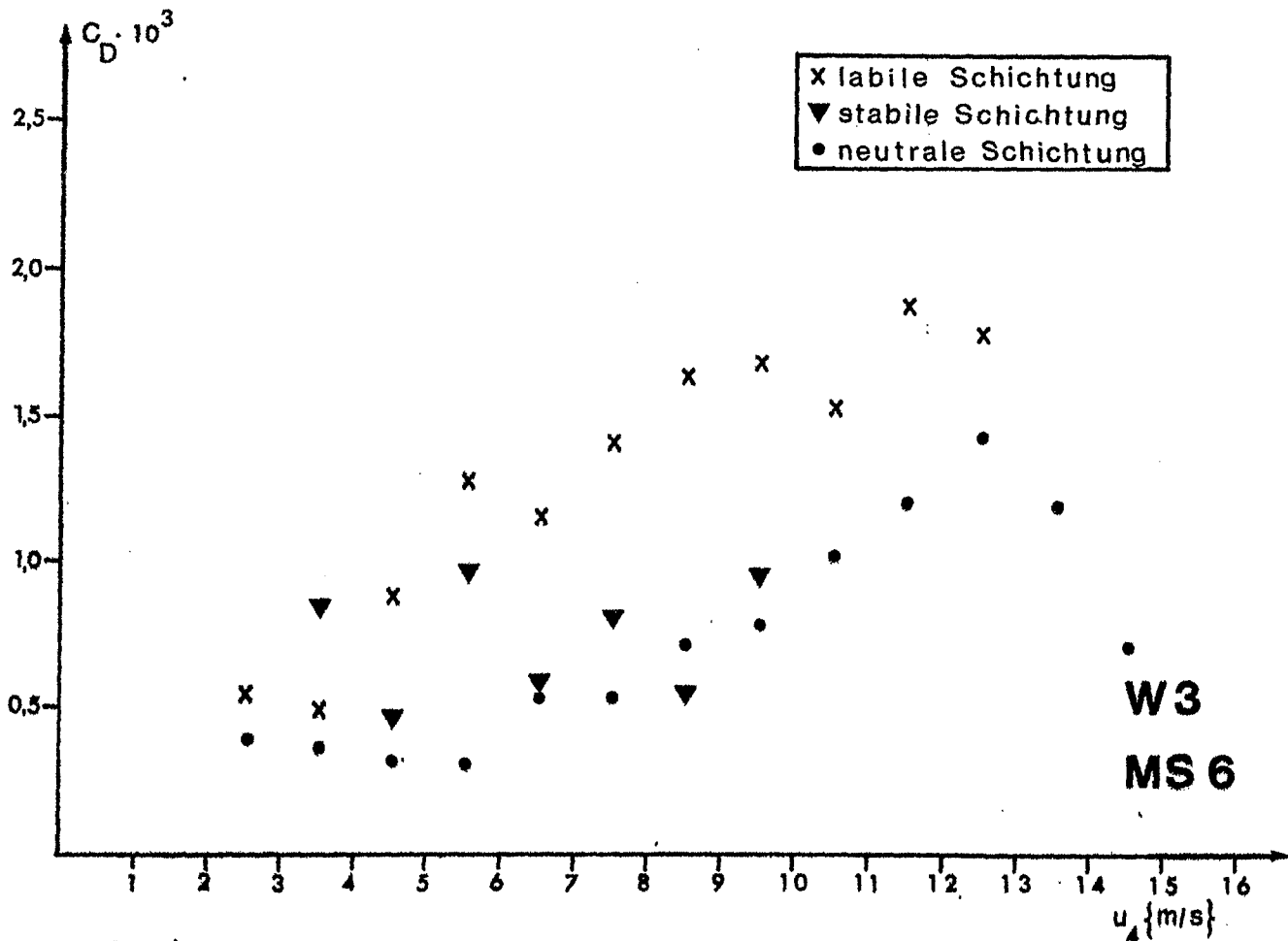
	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1059	1059	1059
berechnete Profile	875	677	455
Ausfälle	184	382	604
berechnete Profile für c_H bzw. c_E	--	581	390
Ausfälle bei c_H bzw. c_E	--	478	669

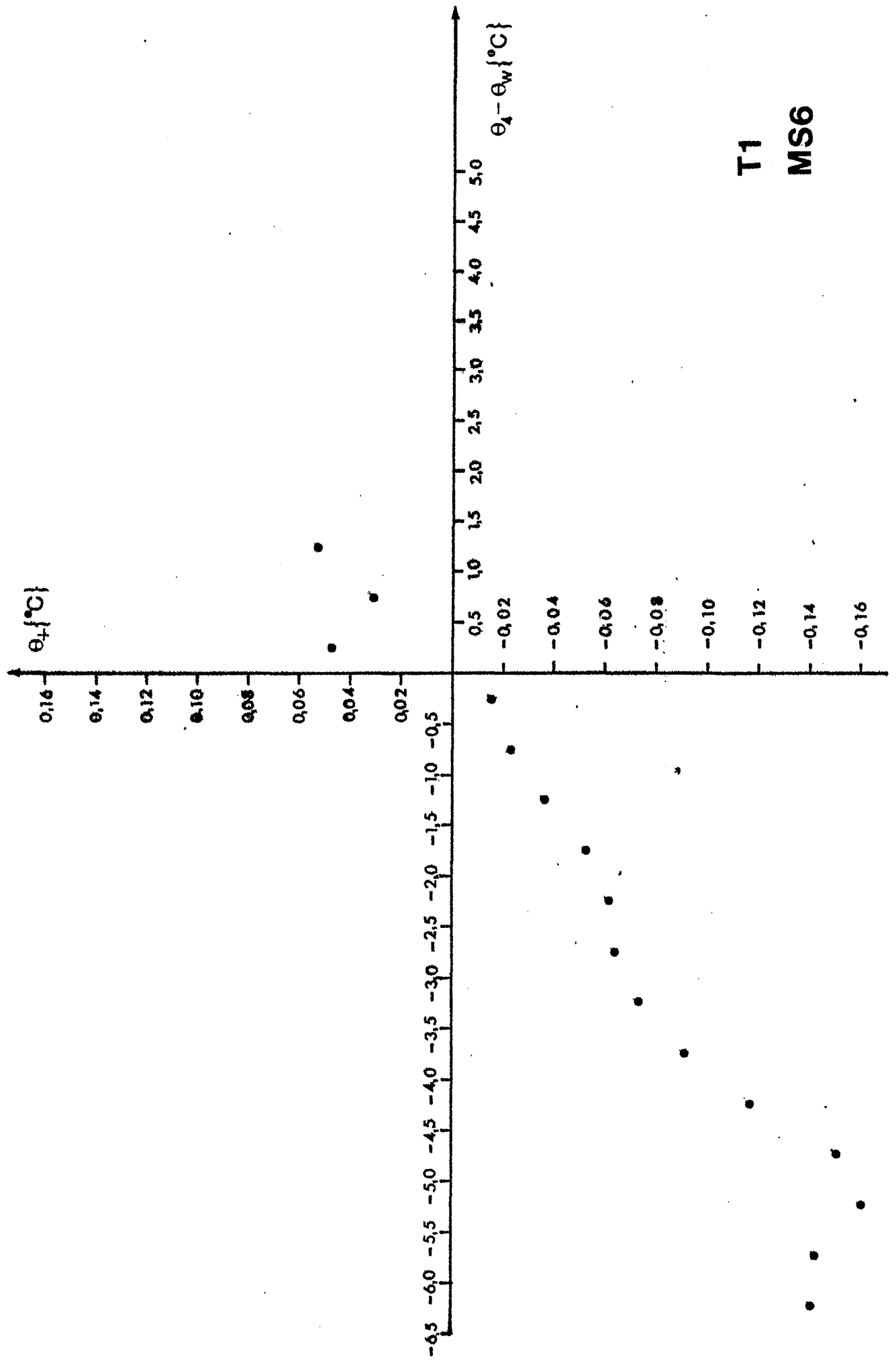
hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

- Wind: Ausfall des Anemometers in der 1. Höhe (sehr hoher Wasserstand)
- Temperatur: zu steile Profile (schwach labile Schichtung)
- Feuchte: Konstante a zu groß, Profile zu steil

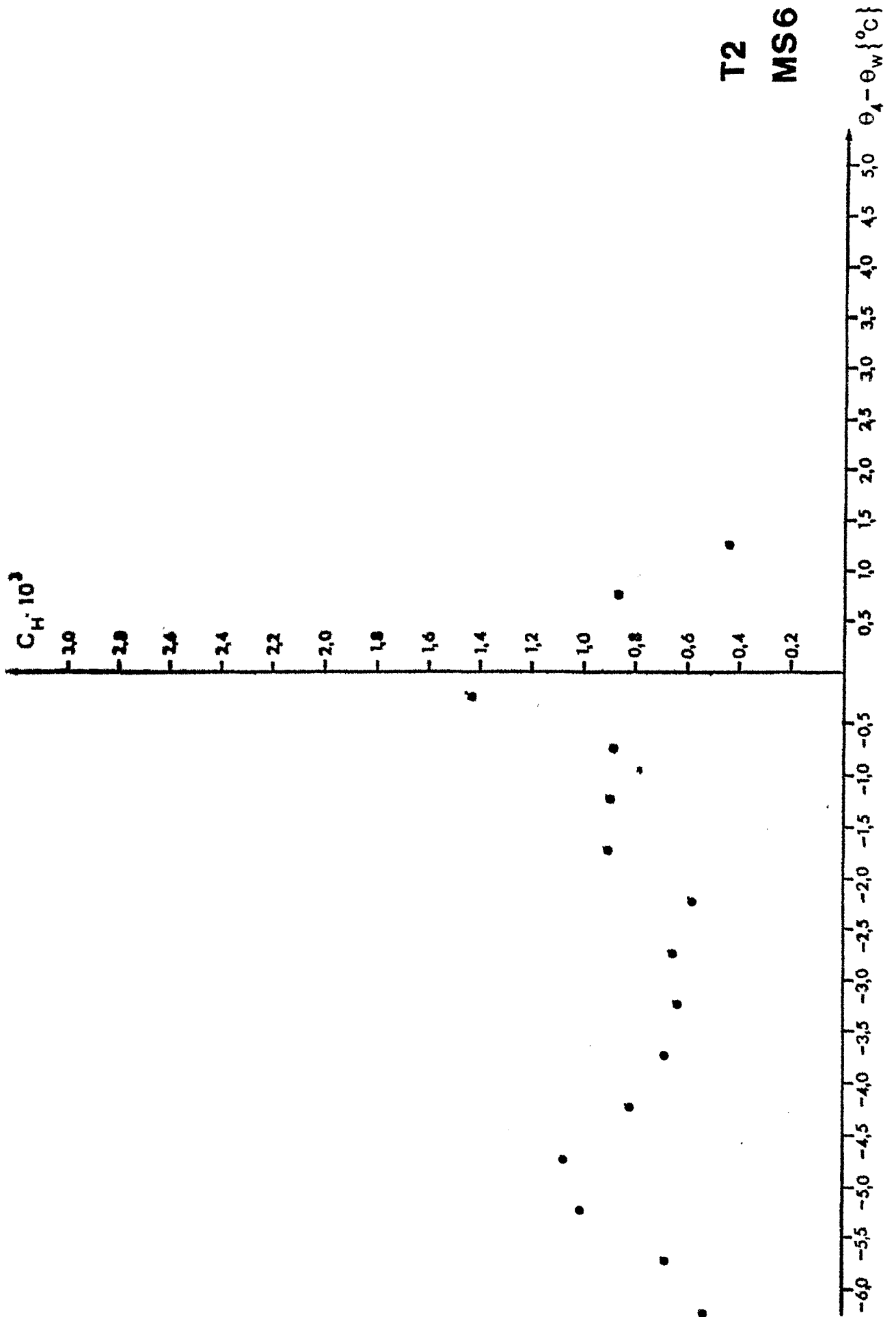
Tabelle M62: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	1.45	0.81	0.76
neutral	0.71	--	--
stabil	0.78	0.77	1.11

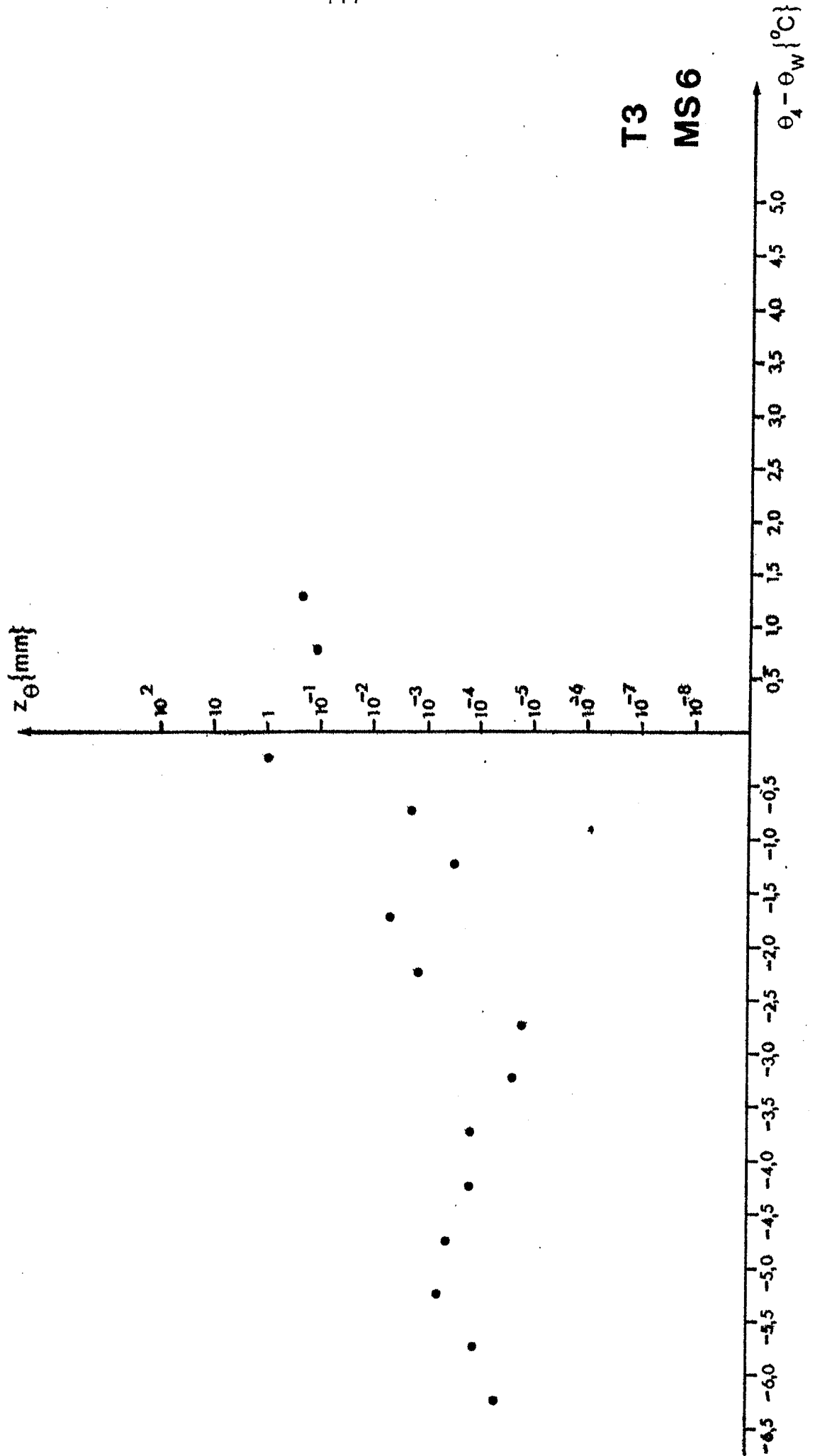




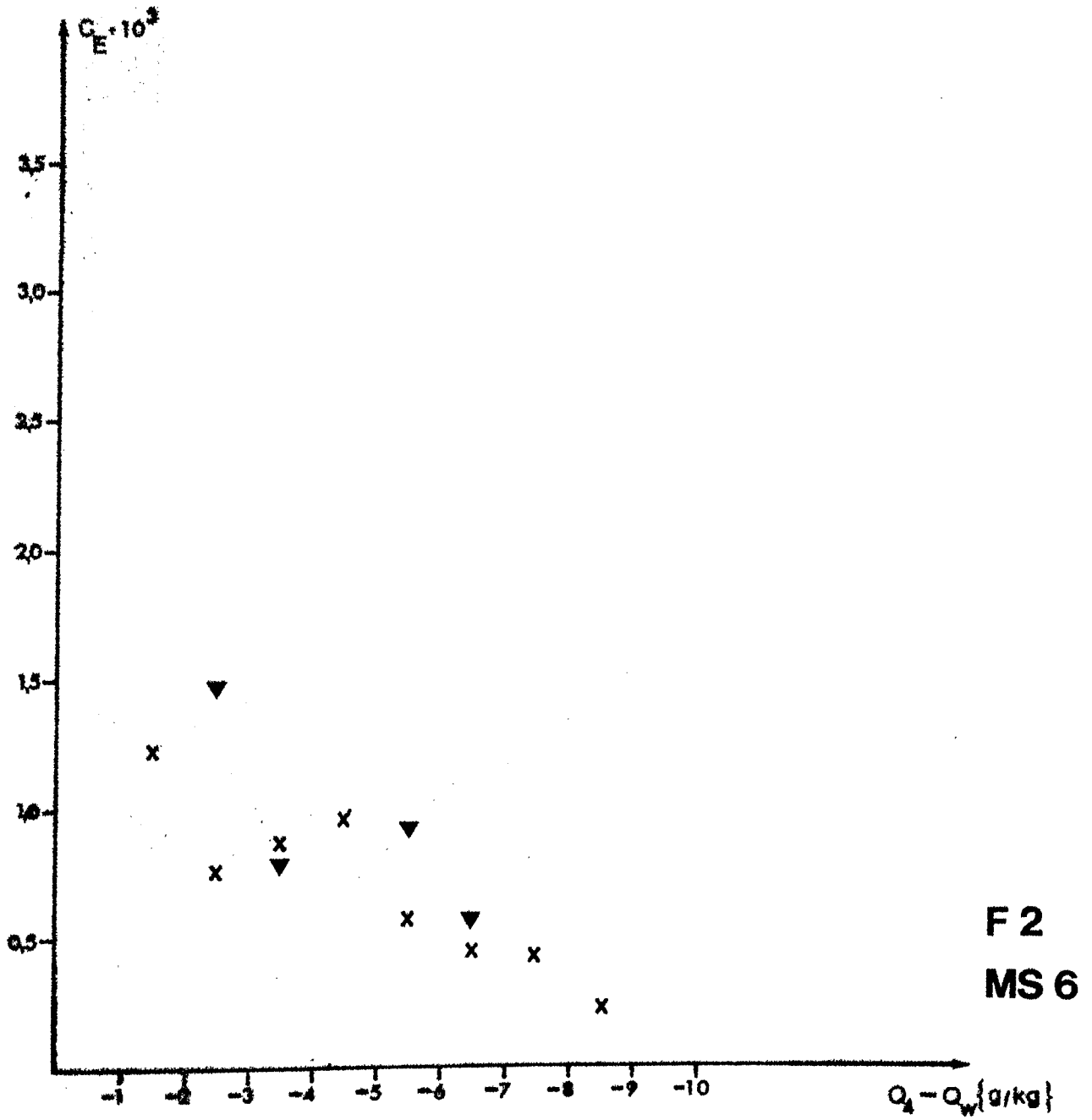
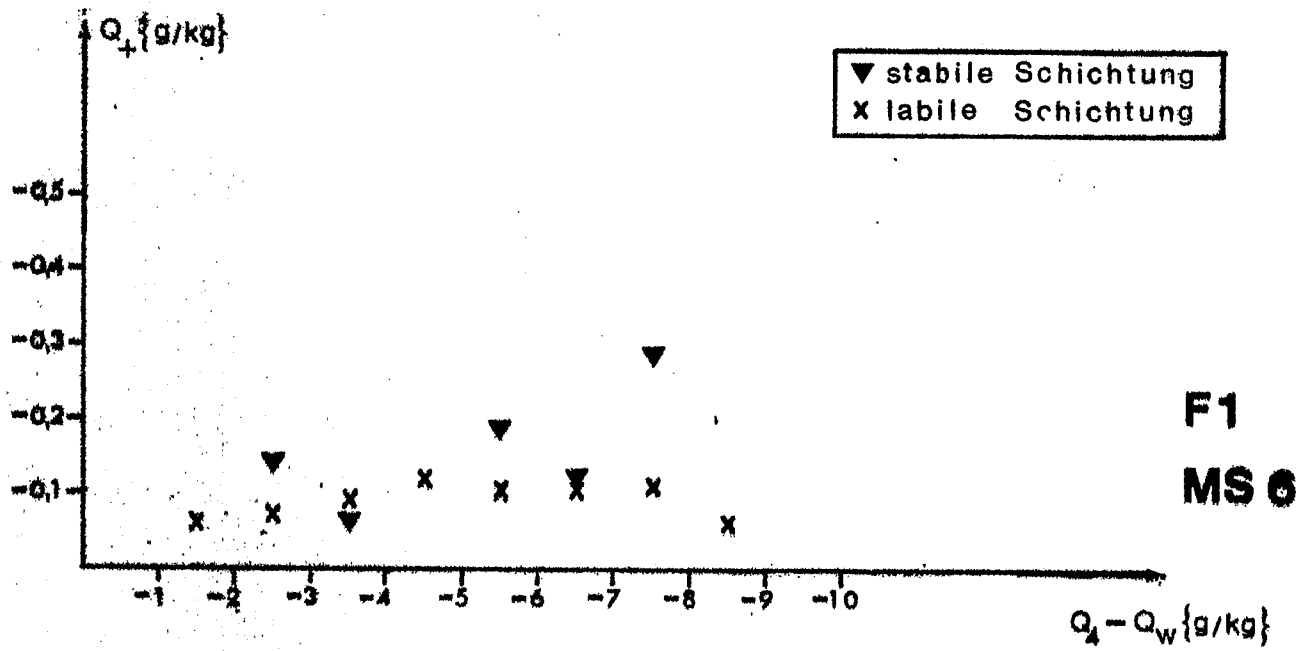
T1
MS6

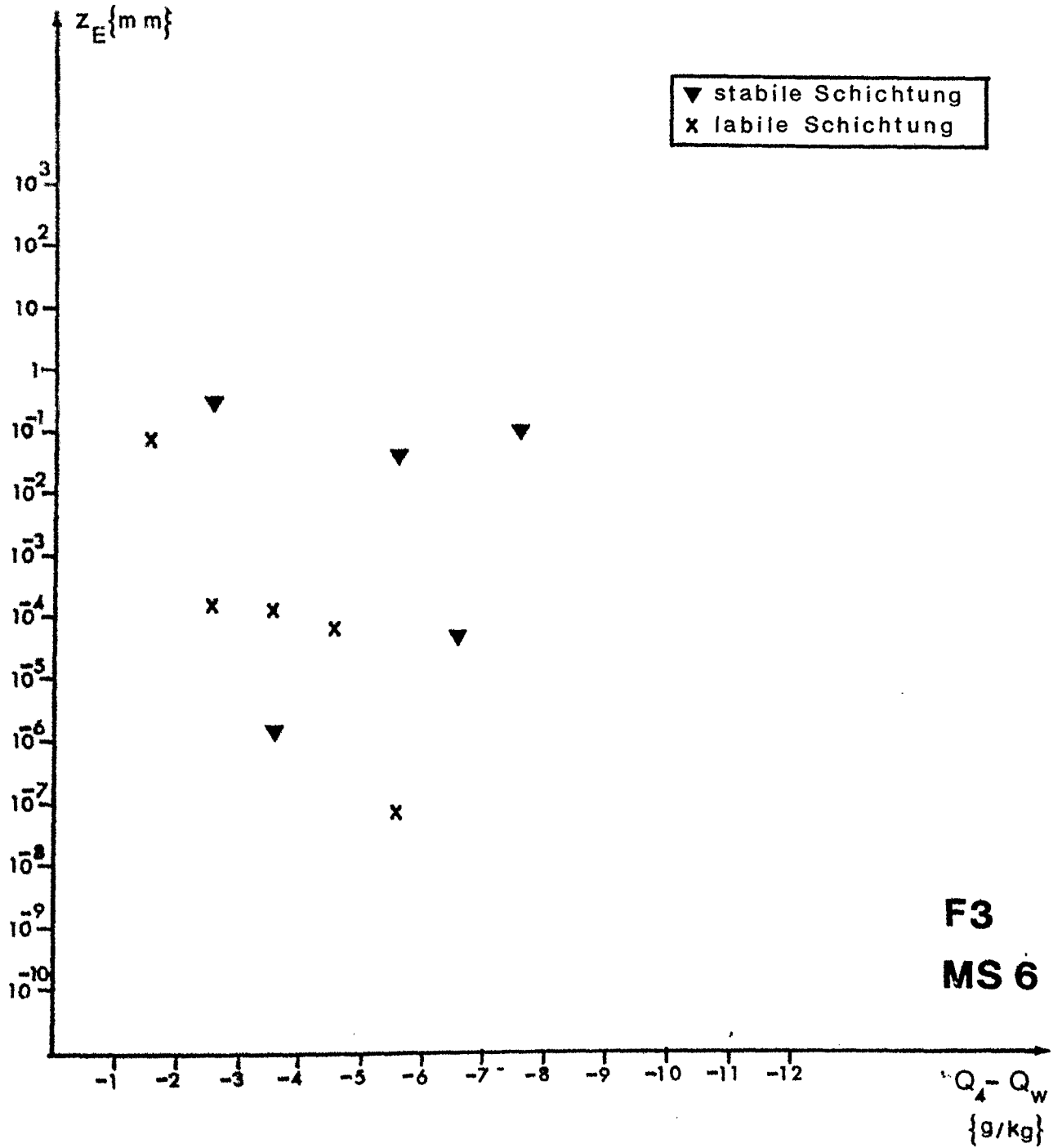


T2
MS6



T3
MS6





Meßserie 7 (13.9. - 2.10.)

Die Station bleibt weiterhin im Einflußbereich von durchziehenden Tiefdruckgebieten mit ihren wechselnden Wettererscheinungen. Die Windrichtung schwankt zwischen Ost und Süd-West bei einer Windstärke von 2-11 m/s. Vom 20.9. an liegt die Station am südlichen Rand eines Hochdruckgebietes über Skandinavien, und die Winde wehen aus östlichen Richtungen mit Stärken von 1-8 m/s. Diese Wetterlage bleibt bis zum 27.9. bestehen. Danach ziehen wieder Ausläufer von Tiefdruckgebieten über die Station. Die Wassertemperatur nimmt während der Meßserie um etwa 1°C von 15.5°C auf 14.5°C ab. Die Tageslufttemperatur schwankt um 15°C und geht gegen Ende auf 11°C zurück. Die Nachttemperaturen schwanken zwischen 12°C und 14°C und nehmen gegen Ende auf 10°C ab. Die Schichtung ist überwiegend labil.

Tabelle M71: Aufstellung der Profile

	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1030	1030	1030
berechnete Profile	219	311	232
Ausfälle	811	619	798
berechnete Profile für c_H bzw. c_E	--	127	38
Ausfälle bei c_H bzw. c_E	--	903	992

hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

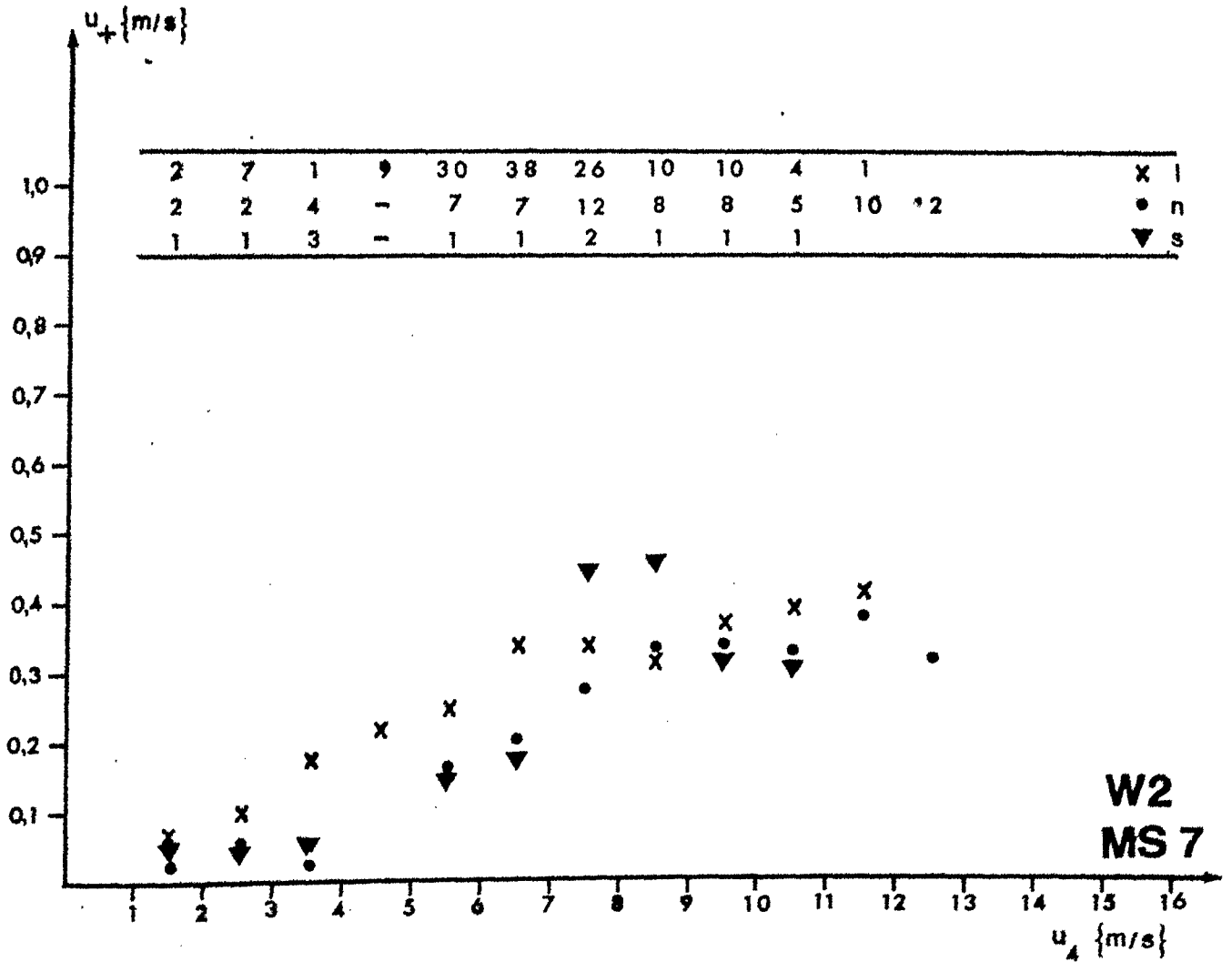
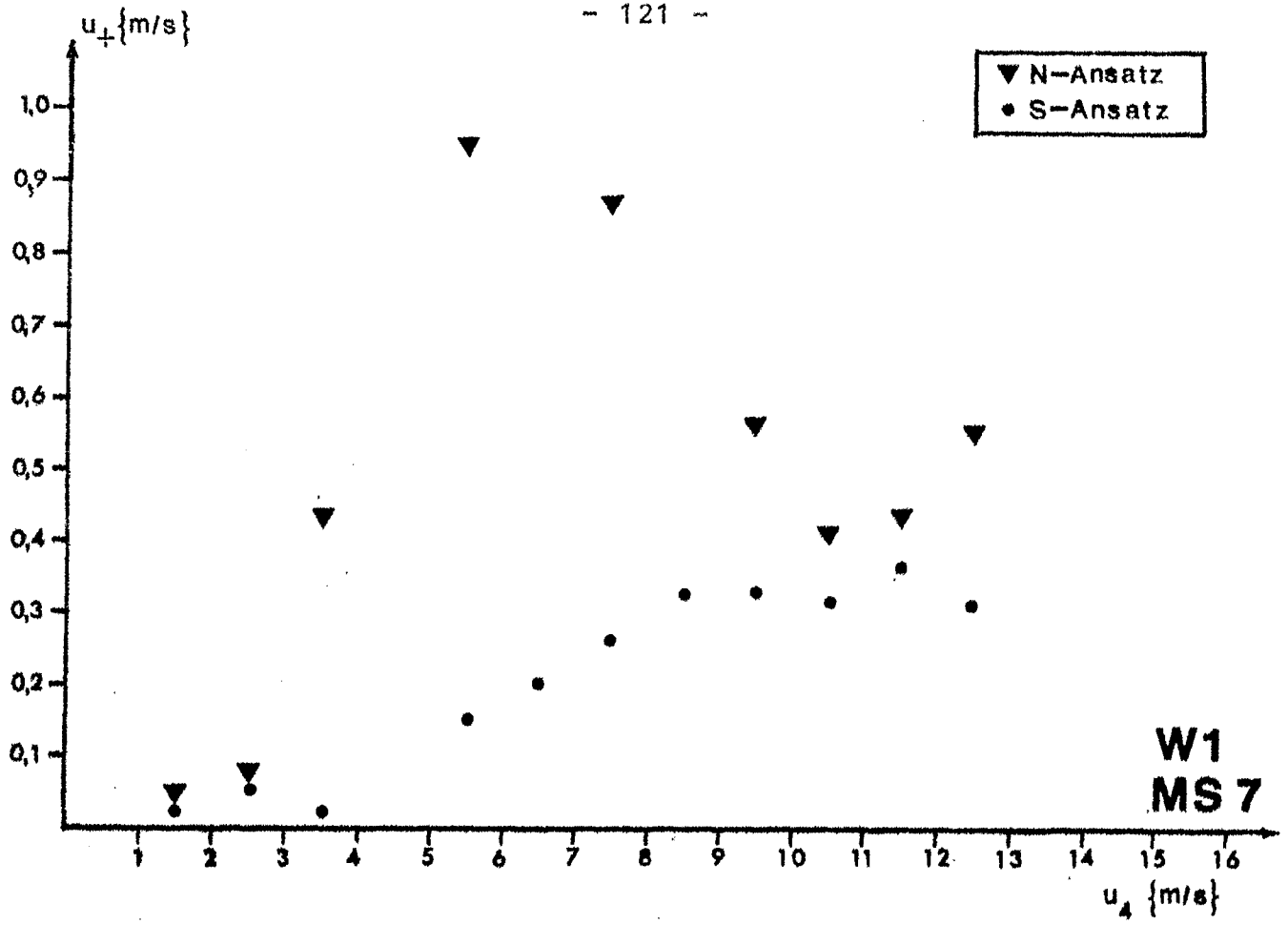
Wind: Ostwinde, u_1 und u_2 defekt

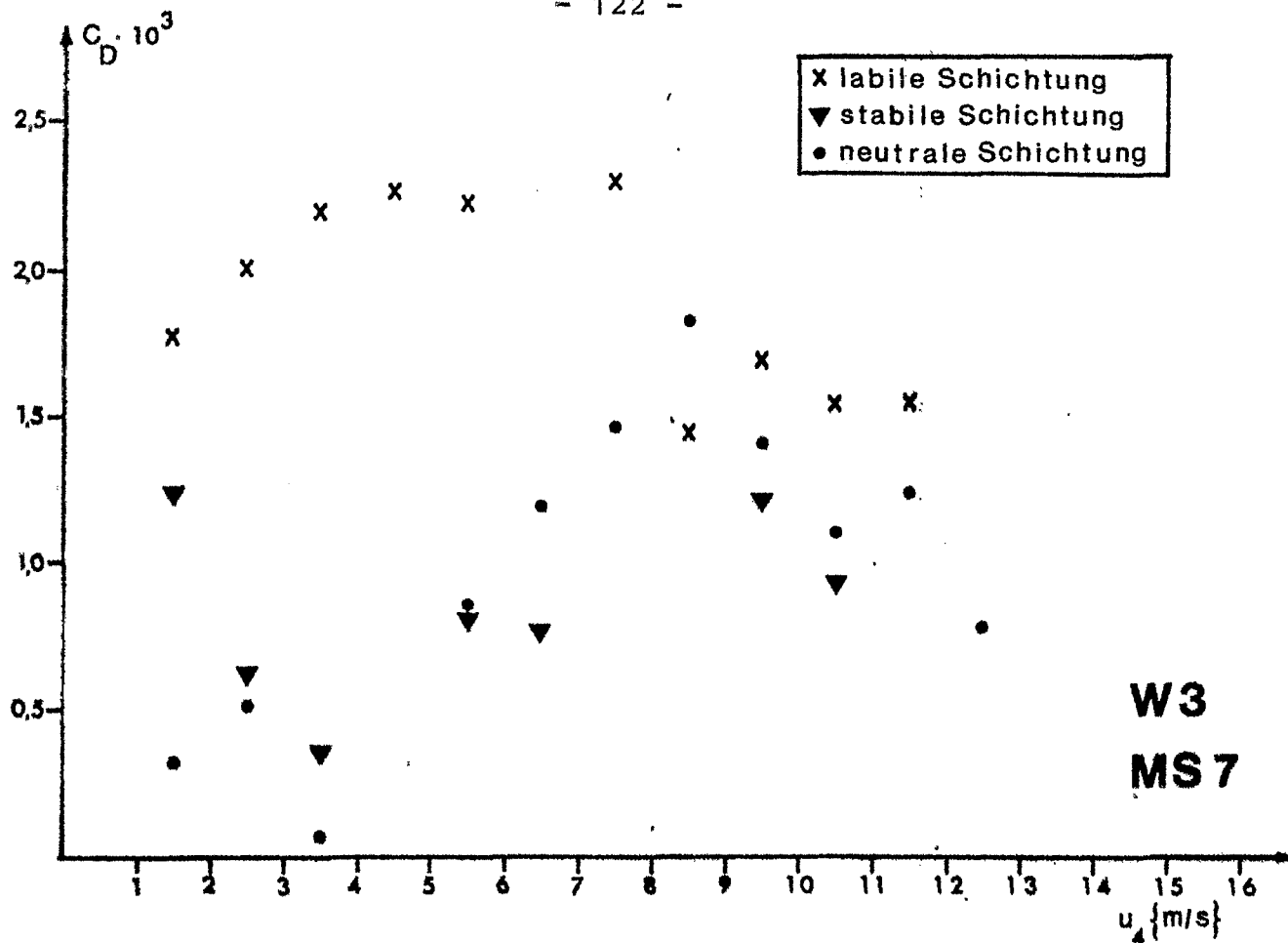
Temperatur: neutrale Schichtung, T_w defekt

Feuchte: Konstante a zu groß wegen zu steiler Profile, T_w defekt, TF_1 defekt

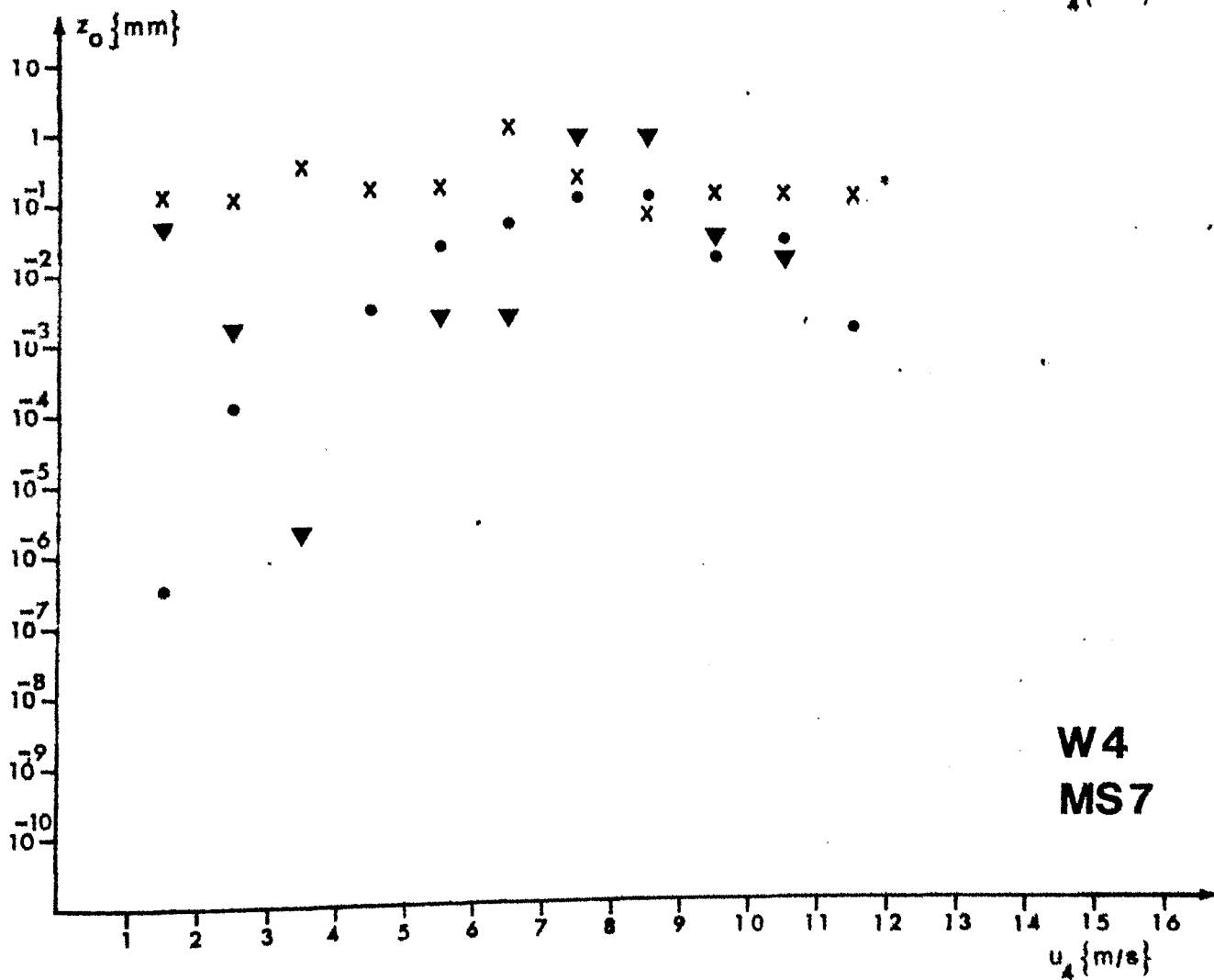
Tabelle M72: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	2.36	1.71	1.31
neutral	1.21	--	--
stabil	0.75	--	3.62

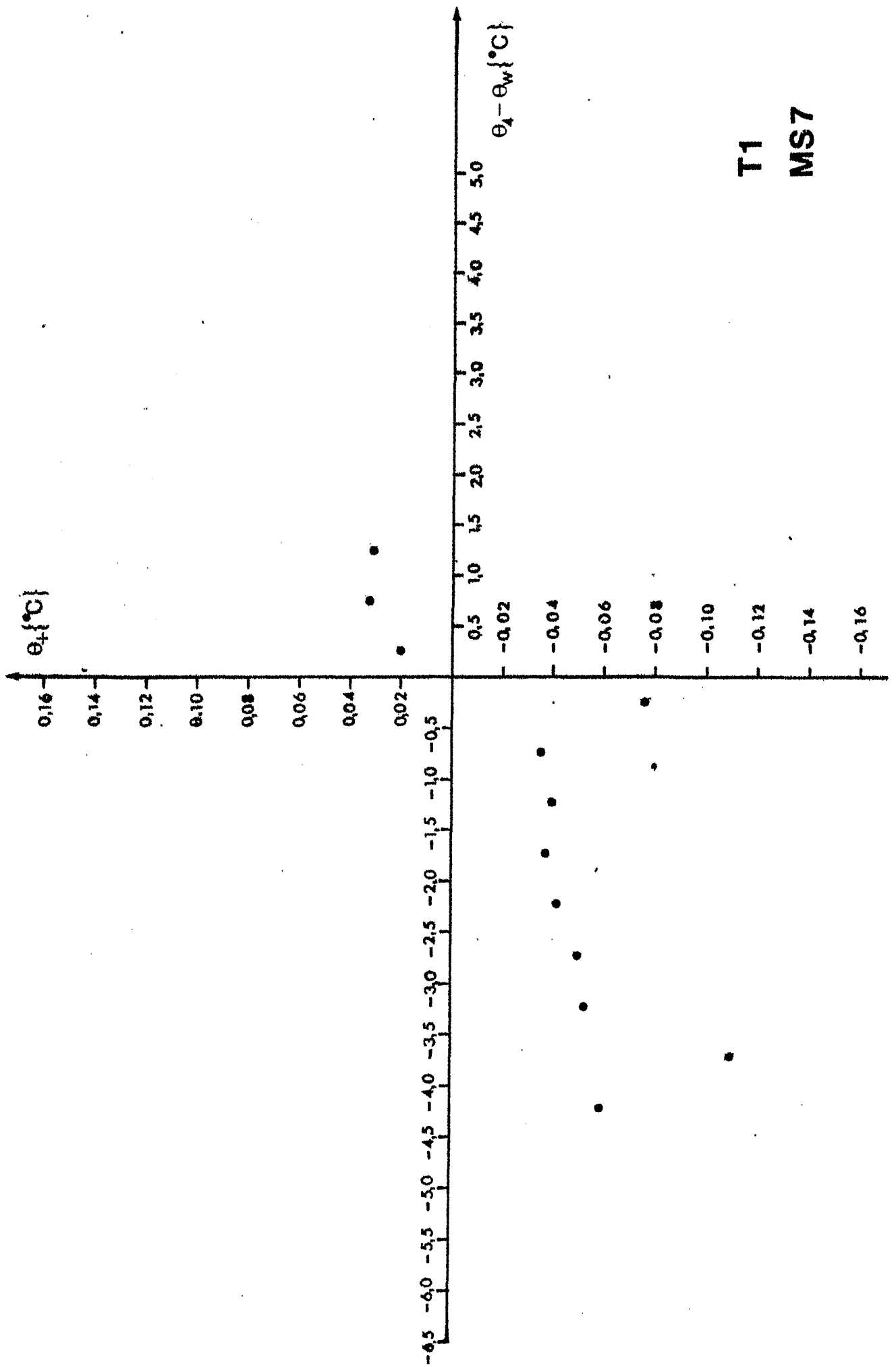




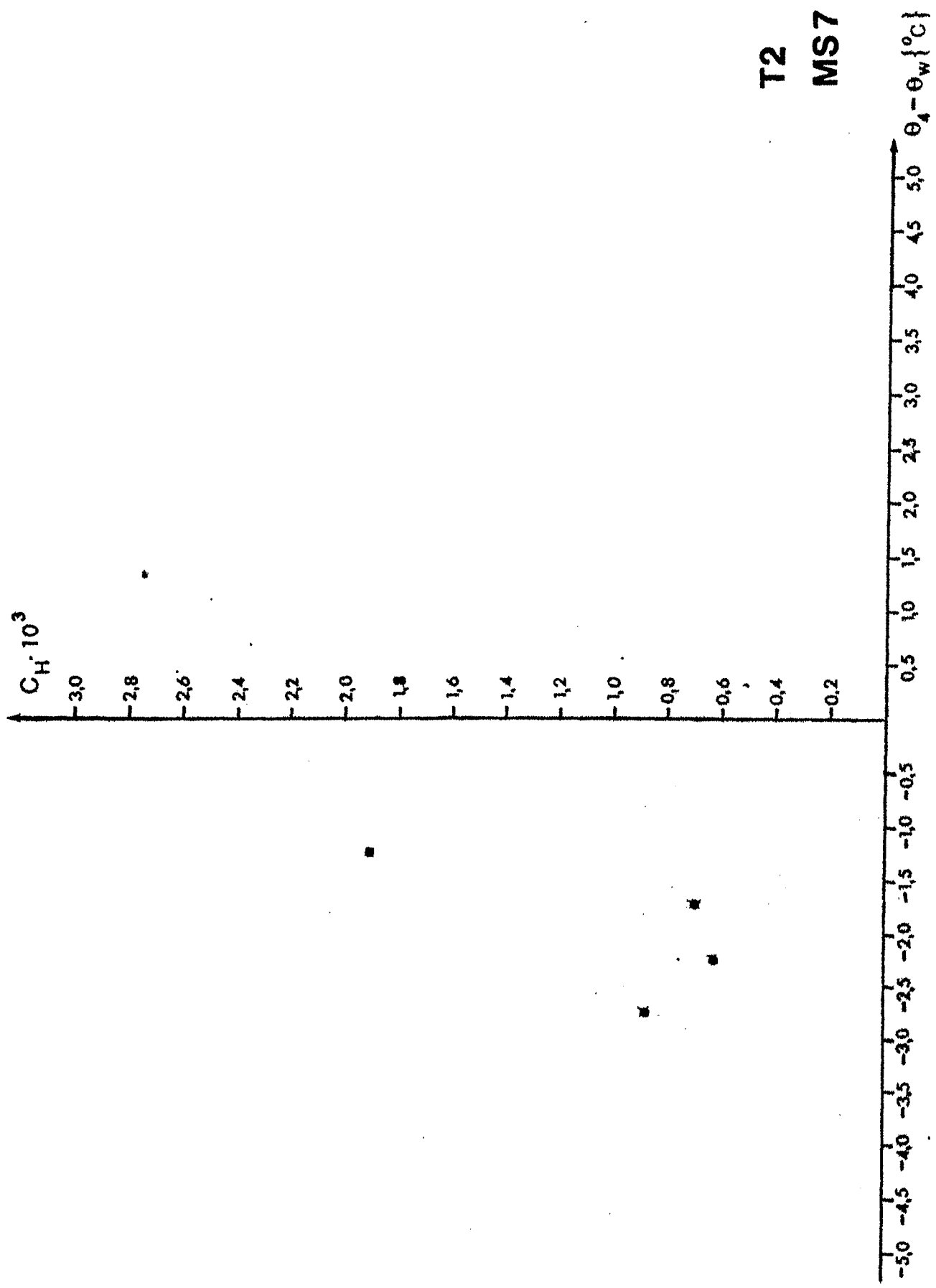
W3
MS7



W4
MS7

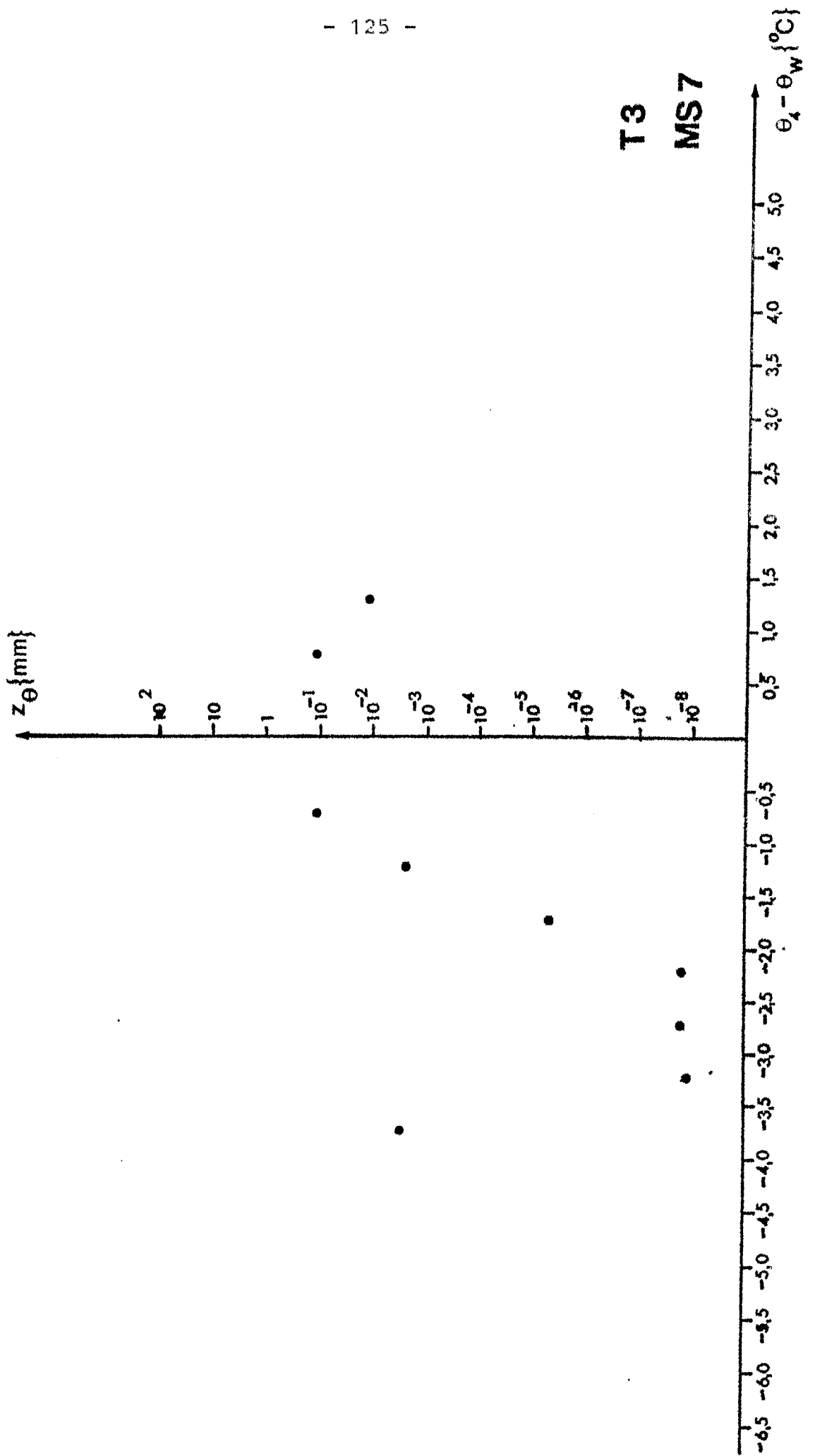


T1
MS7



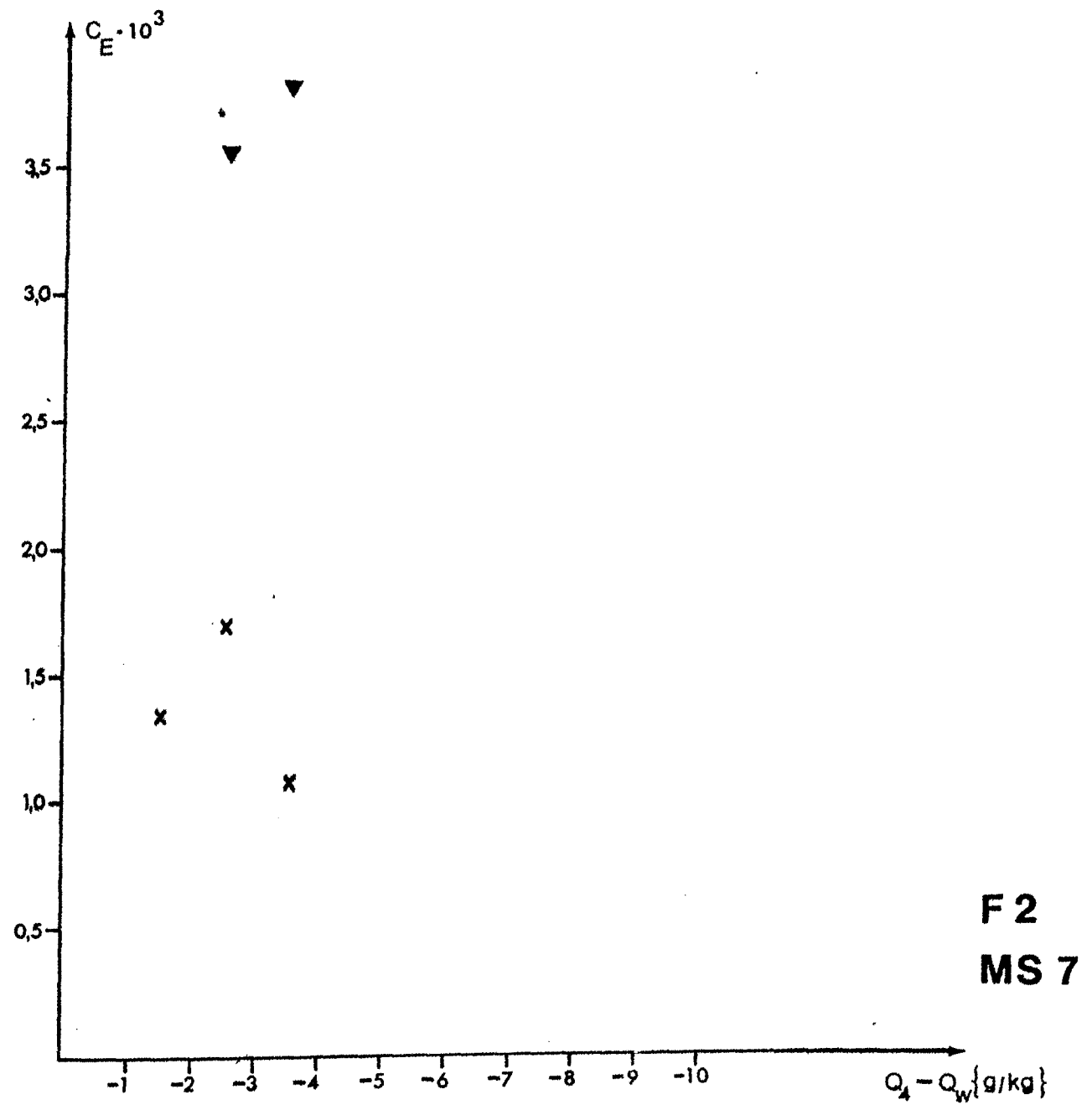
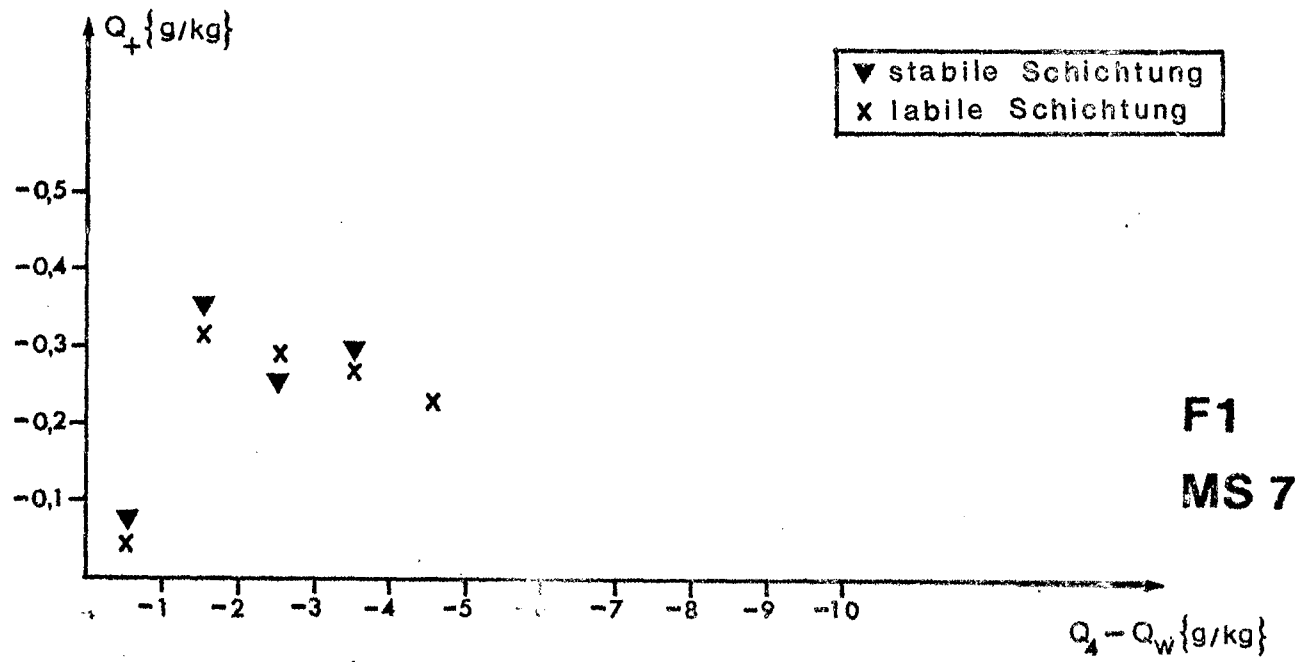
T2

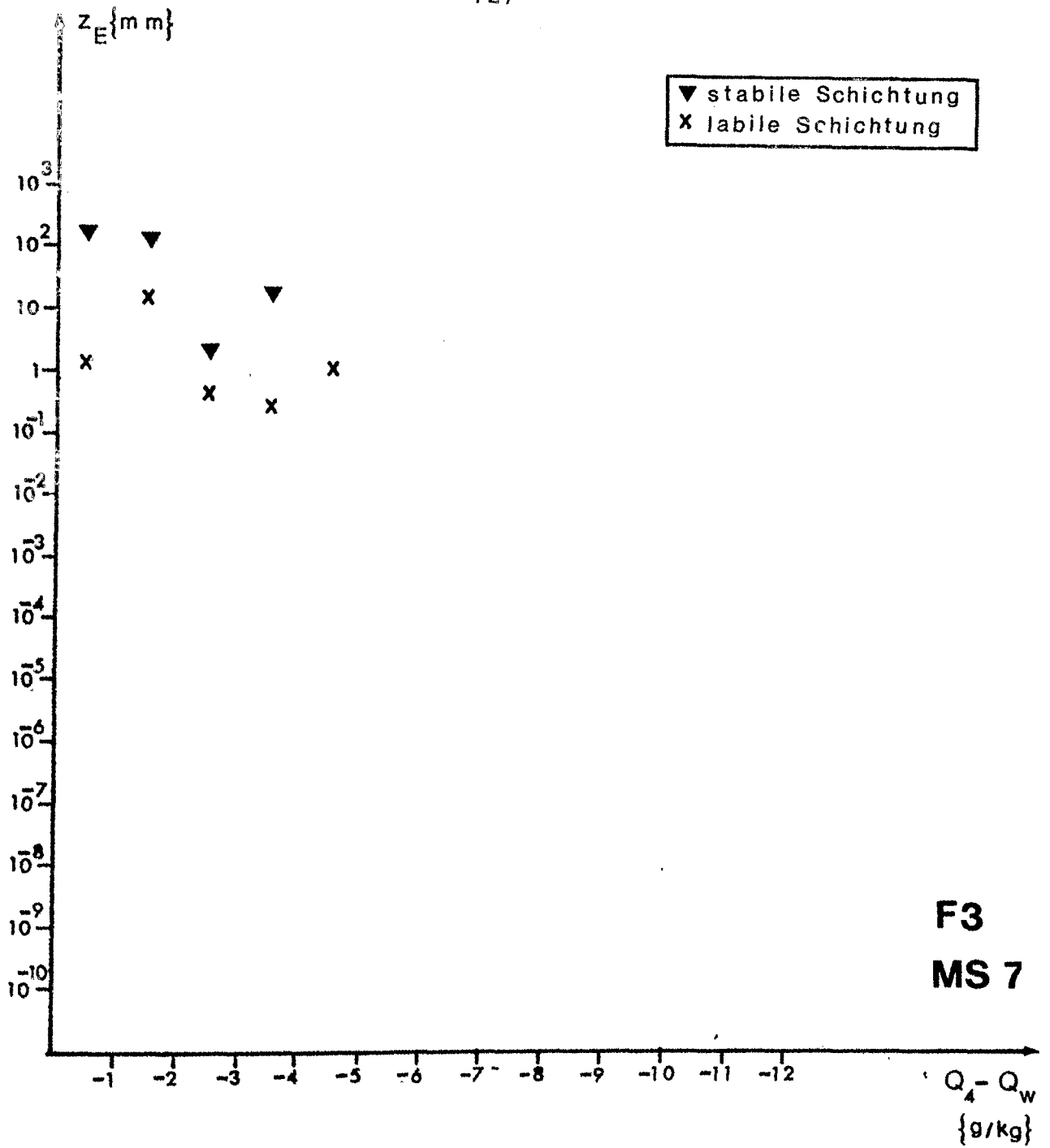
MS7



T3

MS7





Meßserie 8 (3.10. - 25.10.)

Ausläufer von Tiefdruckgebieten bei Island überqueren bis zum 18.10. in rascher Folge die Station. Die Windstärke schwankt zwischen 1 m/s und 16 m/s. Der Wind kommt aus W-SW. Die maximalen Temperaturen schwanken um 13-14°C, die Minimaltemperaturen zwischen 11°C und 13°C. Das Wasser kühlt sich von 14°C auf 13°C ab. Vom 19.10. bis zum Ende der Meßserie liegt die Station an der Westseite eines Hochdruckgebietes über Rußland, von dem die auflaufenden Tiefdruckausläufer abgeblockt werden. Die Station wird wechselartig von der kontinentalen Kaltluft aus SO und von der maritimen Luftmasse aus SW berührt. Die Windstärken liegen zwischen 3 m/s und 12 m/s. Die Wassertemperatur nimmt bis auf 12°C ab, die Maximaltemperaturen schwanken zwischen 8°C und 12°C, die Minimaltemperaturen zwischen 5°C und 10°C. Während der ganzen Meßserie überwiegen labile und fast neutrale Schichtungsverhältnisse.

Tabelle M81: Aufstellung der Profile

	Wind	Temp.	Feuchte
alle Profile	1897	1382	1422
berechnete Profile	793	333	583
Ausfälle	1104	1049	839
berechnete Profile für c_H bzw. c_E	--	250	403
Ausfälle bei c_H bzw. c_E	--	1132	1019

hauptsächliche Ursachen für die Ausfälle:

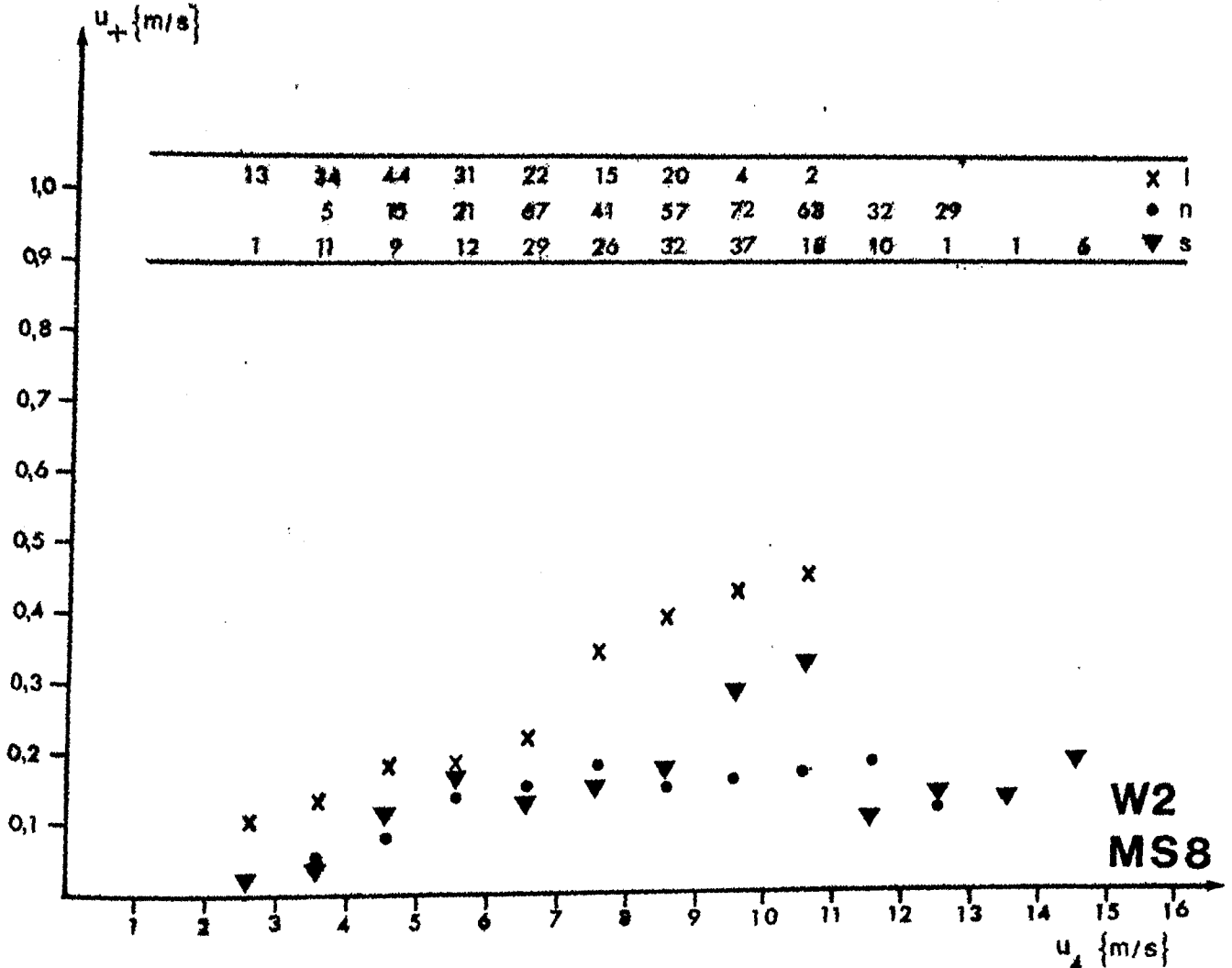
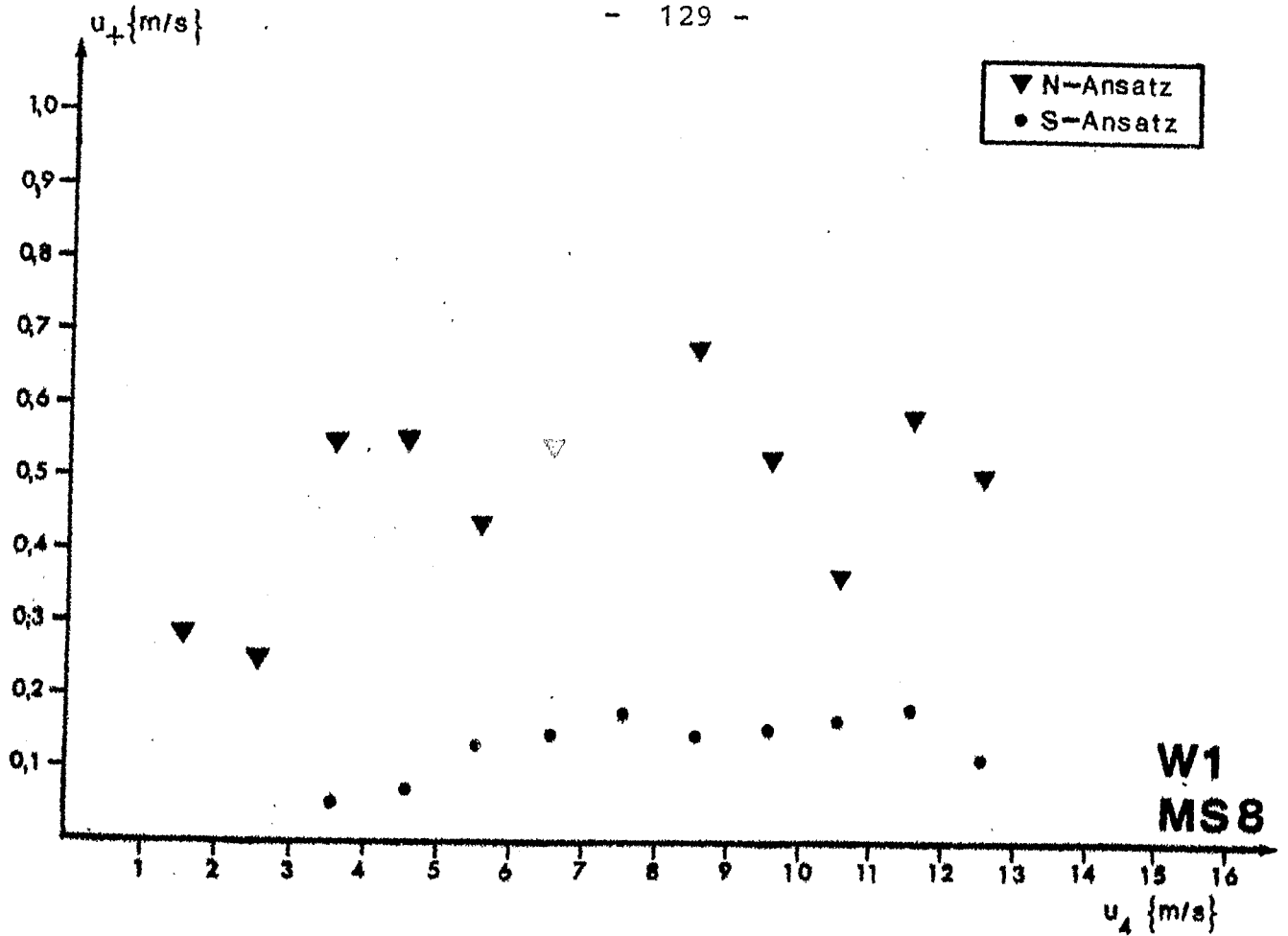
Wind: Ostwinde, u_1 , u_2 , u_3 zeitweilig defekt

Temperatur: neutrale Fälle, T_w defekt, T_1 defekt

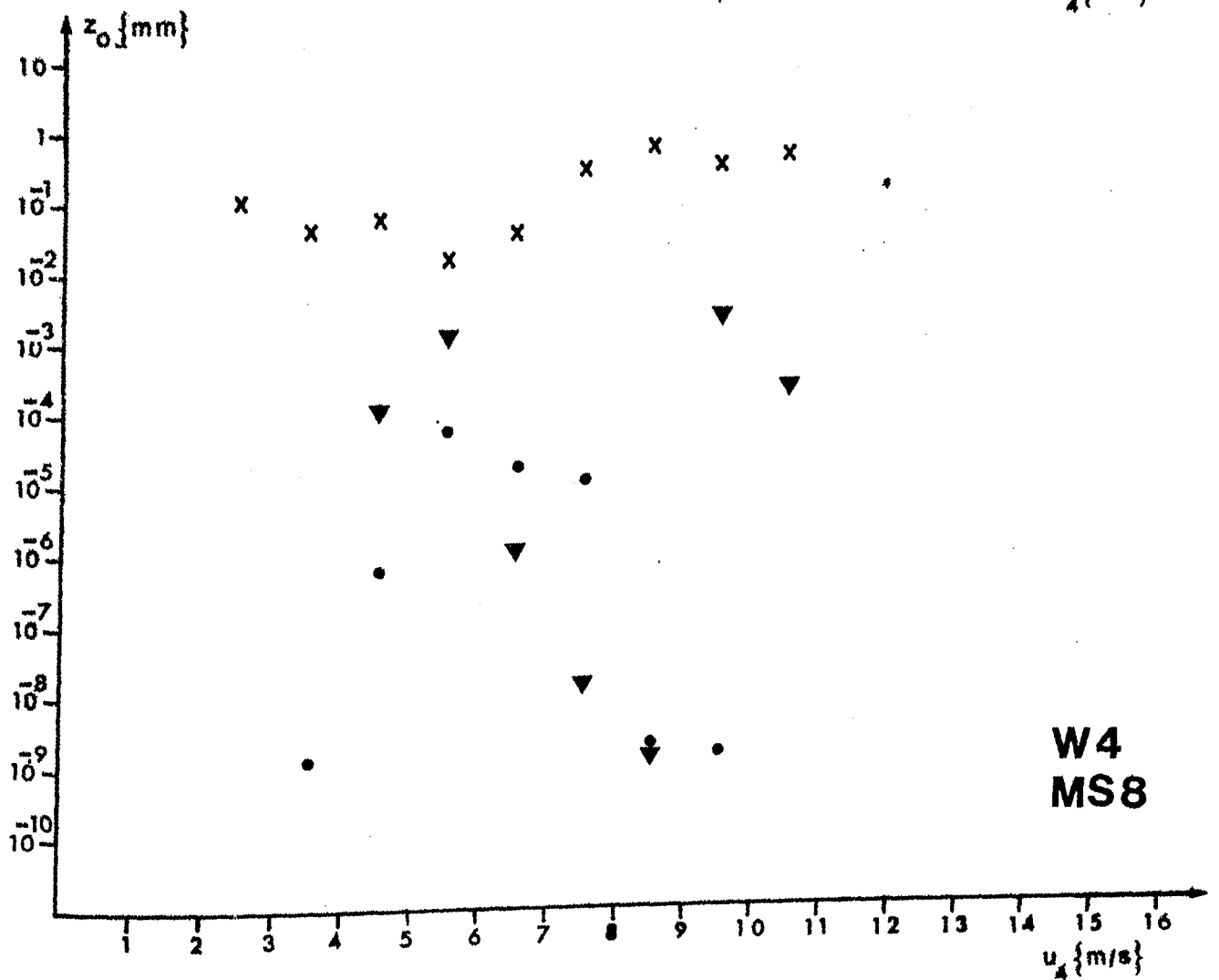
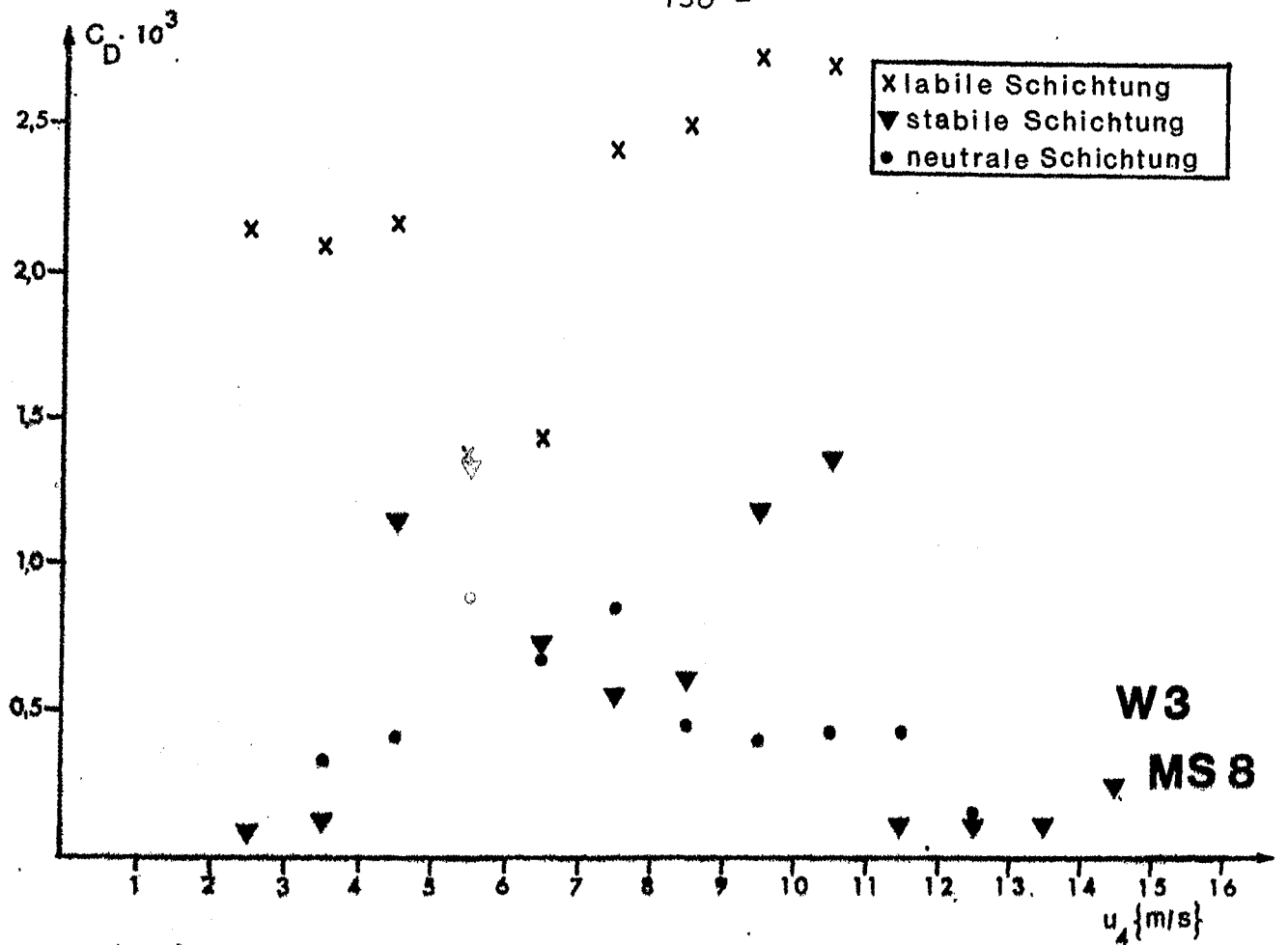
Feuchte: T_w defekt, zu steile Profile, TF_1 und T_1 defekt

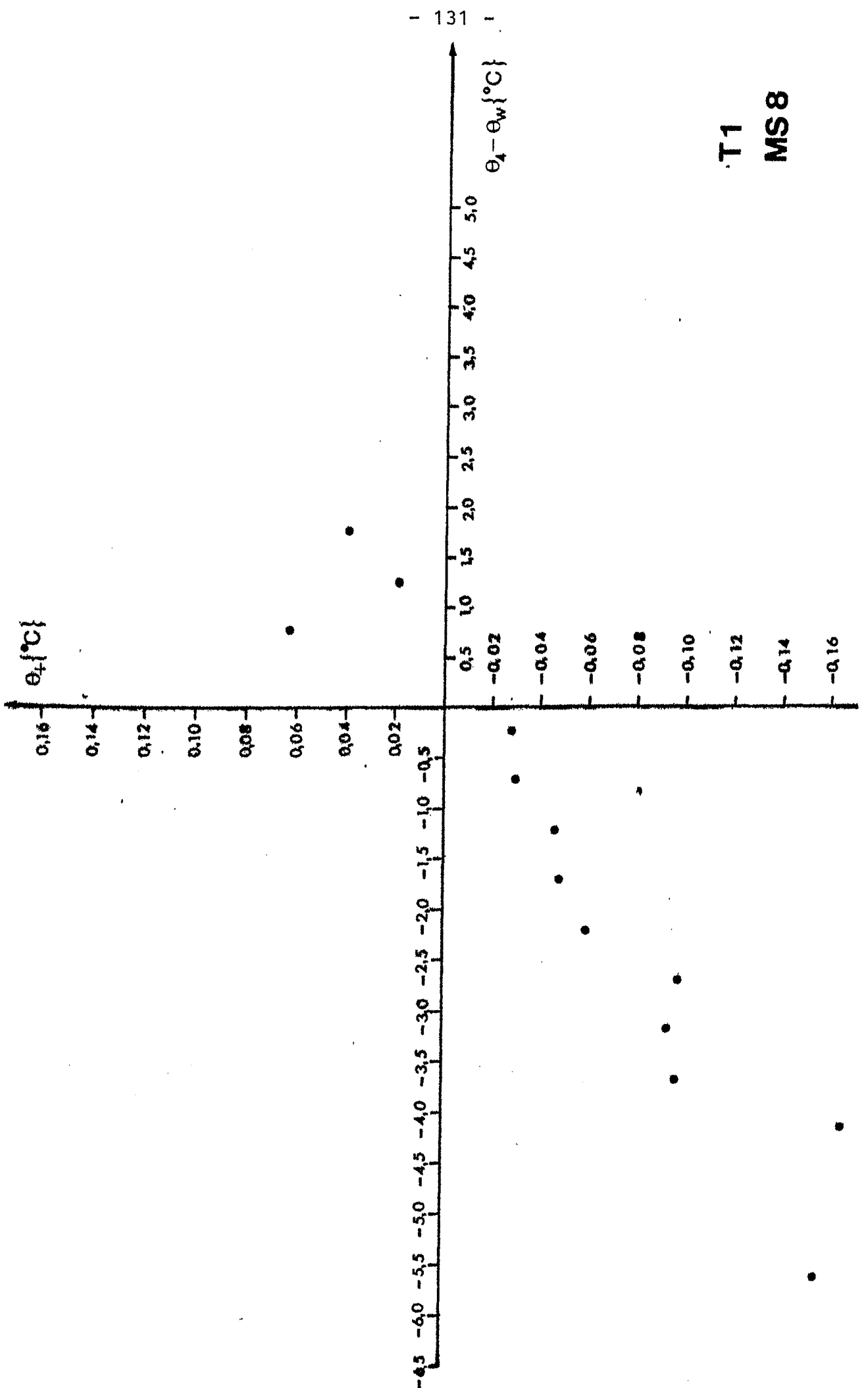
Tabelle M82: Mittelwerte der Transportkoeffizienten

	$c_D \times 10^{-3}$	$c_H \times 10^{-3}$	$c_E \times 10^{-3}$
labil	2.01	1.08	3.92
neutral	0.52	--	--
stabil	0.88	0.75	6.09

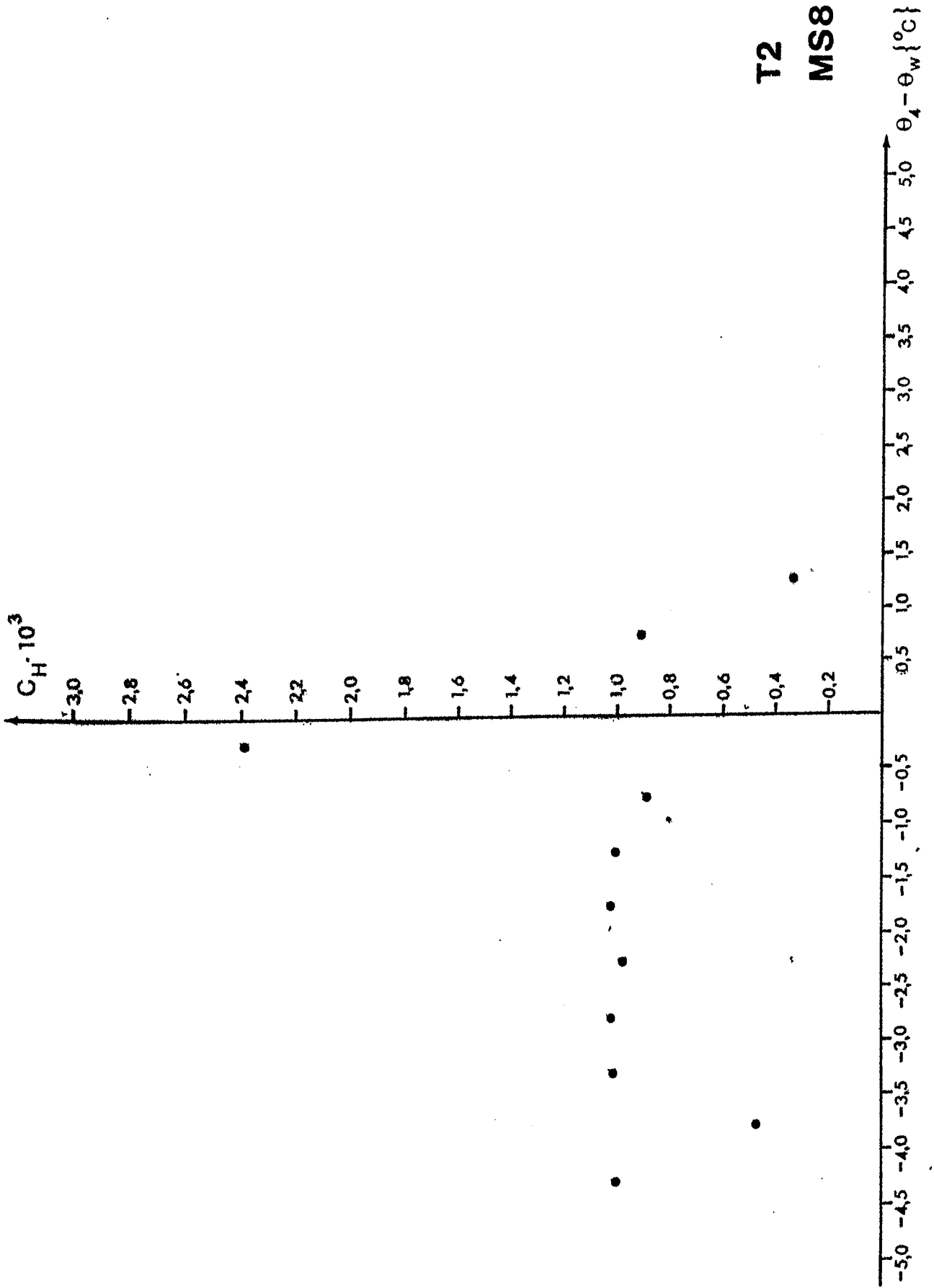


13	34	44	31	22	15	20	4	2										x l
	5	15	21	67	41	57	72	68	32	29								• n
1	11	9	12	29	26	32	37	18	10	1	1	6						▼ s





T1
MS8



T2
MS8

