

LIS-Berichte

Nr. 89

**Analyse der räumlichen
Repräsentativität automatischer
Meßnetze der Luftqualität**

Herausgeber



ISSN 0720-8499

1989

Analyse der räumlichen Repräsentativität
automatischer Meßnetze der Luftqualität

Dr. Reinhold Beier und Alfred Doppelfeld

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	7
SUMMARY	8
1. EINLEITUNG -----	9
2. METHODE -----	10
2.1 Die modifizierte Strukturfunktion (MSF)	10
2.2 Die MSF als Maß für die räumliche Repräsentativität	13
2.3 Konstruktion von Isolinien der MSF	15
3. ANWENDUNGEN -----	19
3.1 Halbstundenwerte	19
3.2 Tagesmittelwerte	19
3.3 Jahresmittelwert	20
3.4 98-%-Wert der Halbstundenwerte	20
3.5 Median der Tagesmittelwerte	21
3.6 98-%-Wert der Tagesmittelwerte	23
4. ZUVERLÄSSIGKEIT -----	26
4.1 Standardabweichung der MSF aller Tagesmittelwerte	26
4.2 Standardabweichung der MSF erhöhter Tagesmittelwerte	29
4.3 Standardabweichung der Isolinien der MSF	32
4.4 Einfluß unterschiedlicher Bezugsjahre	32
5. SCHLUßFOLGERUNGEN -----	33
Literaturhinweise	36
Abbildungen	39-77

ANALYSE DER RÄUMLICHEN REPRÄSENTATIVITÄT AUTOMATISCHER
MESSNETZE DER LUFTQUALITÄT

Dr. Reinhold Beier und Alfred Doppelfeld

ZUSAMMENFASSUNG:

Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist eine Analyse der Zuverlässigkeit der Erfassung räumlicher Strukturen von Immissionen durch das im Rhein-Ruhr-Gebiet vorhandene automatische Meßnetz TEMES. Zu diesem Zweck wird eine einfache Methode zur Ermittlung und Darstellung von Linien gleicher Schätzfehler für die Übertragung von Meßdaten oder Kenngrößen von Meßstationen auf benachbarte Orte ohne Meßeinrichtungen beschrieben und am Beispiel von Schwefeldioxid diskutiert.

Zentrales Element ist eine modifizierte Strukturfunktion, welche aus den relativen Differenzen zeitgleicher Meßwerte benachbarter Meßstationen berechnet wird. Es wird gezeigt, daß Isolinien der modifizierten Strukturfunktion als Linien gleicher relativer Abweichung (Schätzfehler) von den Vergleichsgrößen einer betrachteten Meßstation interpretiert werden können. Zwei einfache Wege zur Konstruktion solcher Linien gleicher Schätzfehler als Ausdruck der räumlichen Repräsentativität der betrachteten Vergleichsgrößen werden vorgestellt.

Als Vergleichsgrößen betrachtet werden Halbstunden- und Tagesmittelwerte, sowie die zugehörigen Kenngrößen Mittelwert, Median und 98-%-Wert eines Jahres. Die Methode erweist sich als sehr robust gegen das Fehlen von Meßwerten. Dies wird durch Simulation von Ausfallwerten demonstriert.

Die Methode erlaubt im Rahmen ihrer Grenzen, d.h. nicht in der Nähe stark befahrener Straßen, die räumliche Aussagekraft von Immissionskenngrößen durch Linien gleicher Schätzfehler flächendeckend abzuschätzen. Damit wird ein objektiver Vergleich der Leistungsfähigkeit von Meßnetzen der Luftqualität hinsichtlich der Erfassung räumlicher Belastungsstrukturen möglich, auch wenn diese nach unterschiedlichen Kriterien konzipiert wurden. Hierdurch werden beispielsweise Meßnetze aus verschiedenen Mitgliedsländern der Europäischen Gemeinschaften vergleichbar.

Die Anwendung dieser Methode ist nicht auf Schwefeldioxid beschränkt, sie kann ausgedehnt werden auf alle Schadstoffe, von denen zeitgleiche Meßwerte aus einem Meßnetz vorliegen, beispielsweise Stickstoffdioxid, Ozon, Schwebstaub und Staubinhaltsstoffe.

ANALYSIS OF THE SPATIAL REPRESENTATIVITY OF AUTOMATIC AIR QUALITY MONITORING NETWORKS

Dr. Reinhold Beier and Alfred Doppelfeld

SUMMARY:

The objective of the present study is an analysis of the reliability of the detection of spatial structures of pollutants by the automatic monitoring network TEMES operated in the Rhine-Ruhr district. For this purpose, a simple method for calculation and construction of lines of equal estimation error of the application of air quality data or parameters of monitoring sites to neighbored locations without monitoring equipment is presented and discussed using examples of sulfur dioxide.

Central element is a modified structure function, which is calculated from relative differences of simultaneous values of neighbored monitoring sites. It is shown that isolines of the modified structure function can be interpreted as lines of equal relative deviation (estimation error) from the respective parameter of the considered monitoring site. Two simple ways for the construction of such isolines of equal estimation error as a measure of the spatial representativity of the parameters considered are described.

The parameters can be: half hourly and daily mean values and corresponding yearly averages, medians and 98-percentiles. The method turns out to be very insensitive to missing values. This is shown by simulation of missing values.

The method allows, apart from the direct neighborhood of heavy traffic carrying roads, to assess the spatial reliability of air quality parameters determined from monitoring networks and to characterise them by line of equal estimation errors. In this way, an objective comparison of the performance of air quality monitoring networks with respect to the detection of spatial structures becomes possible, even when the design criteria of these networks were different. In this way, for instance, monitoring networks from different member states of the European Communities become comparable.

The application of this method is not limited to sulfur dioxide, it can be extended to all pollutants monitored simultaneously in networks, for instance, nitrogen dioxide (apart from roads), suspended particulate matter, lead and ozone.

1. EINLEITUNG

In der Europäischen Gemeinschaft gibt es gemeinsame Grenz- und Leitwerte für die Konzentrationen von Schwefeldioxid und Schwebstaub, Stickstoffdioxid und Blei in der Außenluft, festgelegt in drei Richtlinien <1,2,3>. Neben Grenz- und Leitwerten enthalten diese Richtlinien auch Anforderungen an die Meßtechnik und die Meßplanung, insbesondere an die Meßnetzgestaltung. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften dringt auf eine harmonisierte Anwendung der Richtlinien in den Mitgliedsstaaten. Zu diesem Zweck wurden Programme zur Qualitätssicherung für meßtechnische Ausrüstungen ins Leben gerufen. Bislang gibt es jedoch kein vergleichbares Programm zur Untersuchung der Vergleichbarkeit der Meßnetze in den Mitgliedsstaaten hinsichtlich der Erfassung räumlicher Strukturen der Immissionsbelastungen. Ein Grund mag das Fehlen geeigneter, leicht anwendbarer Verfahren für diesen Zweck sein. Ein zweiter Grund ist in den Forderungen der EG-Richtlinien selbst zu suchen. Die Richtlinie 80/779/EWG, betreffend Schwefeldioxid und Schwebstaub, fordert beispielsweise, daß in Zonen, wo Grenzwerte der Richtlinie wahrscheinlich überschritten oder nur knapp unterschritten werden, "die (Meß)-Stationen an Orten lokalisiert sein müssen, wo die höchsten Belastungen zu erwarten sind und die repräsentativ für die lokalen Verhältnisse sind". Auf die Schwierigkeiten der Umsetzung dieser Forderungen wurde an anderem Orte hingewiesen <4>.

In den Niederlanden <5> und in Frankreich <6> wurden komplexe statistische Methoden angewandt, um vorhandene Meßnetze vor dem Hintergrund dieser Richtlinie zu optimieren. Mit diesen Ansätzen wurden die Meßstationen jedoch nicht an den Orten der vermutlich höchsten Belastung errichtet, sondern flächendeckend dort, wo der Mangel an Informationen über die Immissionsbelastung am größten war. Auf diese Weise wurden die Forderungen der EG-Richtlinie 80/779/EWG zumindest indirekt erfüllt, insofern als diese Meßnetze anstelle von Meßwerten zumindest Abschätzungen der Konzentrationen für die höchstbelasteten Orte bereitstellen.

In NRW konnte durch Vergleich mit Stichprobenmessungen im 1x1-km²-Raster die statistische Repräsentativität des vorhandenen automatischen Meßnetzes TEMES für Schwefeldioxid gezeigt werden <7>.

Die statistischen Grundlagen für Analysen der räumlichen Repräsentativität von Meßnetzen stammen aus dem Bereich der Geostatistik <8,9,10>, wo sie zur Erkundung von Lagerstätten dienen. Einen interessanten Beitrag zur Frage der Planung von Meßnetzen haben in jüngster Zeit LANGSTAFF et al. <11> geliefert. Sie berücksichtigen neben Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen zur Abschätzung der räumlichen Struktur des Immissionsfeldes auch raum aufgelöste Daten über die Bevölkerungsdichte, um eine Rangfolge möglicher Meßorte anzugeben.

In der vorliegenden Arbeit werden diese Methoden auf mögliche Anwendungen im Bereich der Überwachung von Luftverunreinigungen hin überprüft und soweit erforderlich modifiziert. Das Resultat ist eine einfache Methode zur Charakterisierung der räumlichen Repräsentativität von Meßdaten und Kenngrößen der Luftqualität durch Linien gleicher Schätzfehler. Mit diesem Schätzfehler ist zu rechnen, wenn die Vergleichsgröße der betreffenden Meßstation auf einen Ort innerhalb der zugehörigen Linie gleichen Schätzfehlers übertragen wird. Die beschriebene Methode wird anhand von Halbstunden- und Tagesmittelwerten von Schwefeldioxid getestet, welche in den Jahren 1985 bis 1987 im Meßnetz TEMES <12> in Nordrhein-Westfalen registriert wurden.

2. METHODE

2.1 Die modifizierte Strukturfunktion (MSF)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die räumliche Repräsentativität von Meßwerten und Kenngrößen, welche an einer Meßstation gewonnen wurden, durch Linien gleicher Schätzfehler zu charakterisieren. Die zugehörige Schätzung besteht darin, die betrachtete Kenngröße einer Meßstation auf einen nahegelegenen Ort ohne Meßstation zu übertragen. Die Ausgangsfrage ist daher, welche Fläche innerhalb vorgegebener Fehlergrenzen durch einen Meßwert bzw. eine Kenngröße repräsentiert werden kann. Das mathematische Werkzeug, welches in der vorliegenden Arbeit benutzt wird, ist eine modifizierte Form der bekannten "Strukturfunktion".

Betrachtet werde ein Meßnetz bestehend aus m Stationen an den Orten $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$. In einem vorgegebenen Meßzeitraum sei an der Station i ($i=1,2,\dots,m$) eine Zeitreihe von Konzentrationswerten $C_i(t) > 0$ ($t=1,2,\dots,N$) eines bestimmten Schadstoffes registriert worden. Ein fehlender Wert (Ausfallwert) zum Zeitpunkt t' werde durch $C_i(t')=0$ markiert.

Die Strukturfunktion $g(i,j)$, auch als Variogramm bekannt aus dem Bereich der Geostatistik <8,9,10>, verknüpft die Zeitreihen $C_i(t)$ und $C_j(t)$, welche an benachbarten Stationen eines Meßnetzes registriert wurden, nach folgender Vorschrift:

$$g(i,j) = \frac{1}{M} * \sum_{\substack{t=1 \\ C_i(t) > 0 \\ C_j(t) > 0}}^N (C_j(t) - C_i(t))^{**2} \quad (1)$$

(M = Anzahl der vollständigen Wertepaare $C_i(t), C_j(t)$,
 $x^{**2} = x*x$.)

Es läßt sich leicht zeigen, daß zwischen der Strukturfunktion $g(i,j)$ und der räumlichen Kovarianz $cov(C_i, C_j)$ folgender direkter Zusammenhang besteht:

$$g(i,j) = \frac{1}{M} * \sum_{t=1}^N (C_j(t)**2 + C_i(t)**2) - 2*cov(i,j) \quad (1a)$$

Gemäß (1) ist die Strukturfunktion die mittlere quadratische Differenz der zeitgleichen Konzentrationswerte an den Stationen i und j .

Um die Bedeutung der Strukturfunktion zu erläutern, ist folgendes Gedankenexperiment hilfreich: Die Konzentration $C_i(t)$ werde benutzt zur Abschätzung der Konzentration $C_j(t)$ an der Station j . In diesem Fall gibt die Strukturfunktion $g(i,j)$ die Schätzvarianz an, also die mittlere quadratische Abweichung der tatsächlichen Konzentration $C_j(t)$ von der für die Station j geschätzten Konzentration $C_i(t)$.

In Abb.1 (siehe Anhang) ist die typische Verteilung quadratischer Differenzen zwischen Tagesmittelwerten von Schwefeldioxid an benachbarten Meßstationen wiedergegeben. Diese Abbildung zeigt, daß die Spannbreite der Werte mit der Konzentration $C_i(t)$ an der Bezugsstation i ansteigt. Folglich liefern die hohen Werte von $C_i(t)$ und die zugehörigen Differenzen bedeutende Beiträge zu $g(i,j)$. Aus diesem Grunde ist die Strukturfunktion wie sie in Gl.(1) angegeben ist, kein sehr robustes Mittel zur Untersuchung räumlicher Zusammenhänge in zeitveränderlichen Konzentrationsfeldern. Die Erzfelder, welche in geostatistischen Anwendungen untersucht werden, zeigen keine zeitliche Veränderlichkeit.

Aus den genannten Gründen findet in der vorliegenden Arbeit folgende "modifizierte Strukturfunktion" (MSF) Anwendung:

$$g_m(i,j) = \frac{1}{M} * \sum_{\substack{t=1 \\ C_i(t)>0 \\ C_j(t)>0}}^N (C_j(t)/C_i(t)-1)**2 \quad (2)$$

(M: Anzahl der vollständigen Wertepaare $C_i(t), C_j(t)$.)

Gl.(2) kann aus Gl.(1) gewonnen werden, indem die absolute Differenz $C_j(t)-C_i(t)$ durch die relative Differenz $(C_j(t)-C_i(t))/C_i(t)$ ersetzt wird. Dementsprechend gibt die MSF $g_m(i,j)$ das mittlere Quadrat der relativen Abweichung des Konzentrationswertes $C_j(t)$ von dem zeitgleichen Konzentrationswert $C_i(t)$ der Bezugsstation i an.

Das Ziel dieser Modifikation ist es, die Beiträge hoher Werte von $C_i(t)$ und $C_j(t)$ zu reduzieren und so eine robustere Funktion zu erhalten. Die Auswirkungen werden in Abb.2 (siehe Anhang) verdeutlicht, wo die Verteilung der quadrierten relativen Differenzen dargestellt ist, die in der MSF $g_m(i,j)$ aufsummiert werden.

Man erkennt deutlich, daß die Spannweite der Verteilung hier mit zunehmender Konzentration $C_i(t)$ abfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Abweichungen des Verhältnisses $C_j(t)/C_i(t)$ von 1 mit wachsender Konzentration $C_i(t)$ geringer werden. Dies zeigt, daß die MSF gegenüber Beiträgen hoher Werte nicht empfindlich ist. Wegen dieser Robustheit wird die MSF $g_m(i,j)$ in der vorliegenden Arbeit vorgezogen.

Im Folgenden wird die MSF $g_m(i,j)$ als mittlere quadratische Abweichung benutzt, wenn die Konzentration an der Station j durch die an der Station i , nämlich $C_i(t)$, geschätzt wird.

$$\left\langle \left(\frac{DC_j}{C_i} \right)^2 \right\rangle = g_m(i,j) \quad (3)$$

mit der abkürzenden Schreibweise

$$\frac{DC_j}{C_i} = \frac{C_j(t) - C_i(t)}{C_i(t)} \quad \text{und}$$

$\langle \rangle$ = arithmetischer Mittelwert.

Es ist wichtig, diese mittlere quadratische Abweichung von der größeren Varianz zu unterscheiden. Es gilt die Relation

$$\text{var} \left(\frac{DC_j}{C_i} \right) = \left\langle \left(\frac{DC_j}{C_i} \right)^2 \right\rangle - \left(\left\langle \frac{DC_j}{C_i} \right\rangle \right)^2 \quad (4)$$

Um näheres über die Interpretation der MSF zu erfahren, ist ein Blick auf die kumulative Häufigkeitsverteilung der Variablen $(DC_j/C_i)^2$ nützlich. In Tabelle 1 sind einige Parameter der beobachteten Verteilungen zusammengestellt für Stationen, welche im folgenden beispielhaft betrachtet werden.

Man erkennt, daß $g_m(i,j)$ nicht einem konstanten Perzentilwert entspricht. Deshalb bleibt die Bedeutung der MSF auf die einer mittleren quadratischen Abweichung des Verhältnisses DC_j/C_i vom Wert 1 beschränkt.

Tabelle 1: Parameter der kumulativen Häufigkeitsverteilung von $(DC_j/C_i)**2$ für Tagesmittelwertes von Schwefeldioxid. Meßjahr: 1987

j / i	gm(i, j)	Perzentile von $(DC_j/C_i)**2$				
		50-	60-	70-	80-	95-
ALTE / BOTT	.174	.106	.163	.213	.274	.512
OSTE / BOTT	.114	.034	.056	.079	.151	.402
STYR / BOTT	.190	.091	.136	.198	.270	.507
GLAD / BOTT	.120	.078	.104	.143	.196	.373
HERT / BOTT	.133	.081	.111	.153	.227	.444
GELS / BOTT	.132	.051	.073	.111	.181	.444
LEIT / BOTT	.203	.123	.186	.235	.306	.501
ICKE / DORT	.593	.090	.164	.320	.649	2.75
BRAM / DORT	.506	.131	.213	.316	.582	2.39
NIED / DORT	.306	.079	.121	.181	.270	1.52
ASSE / DORT	.166	.111	.160	.213	.261	.426
SCHW / DORT	.145	.074	.111	.160	.221	.467
HERD / DORT	.145	.093	.133	.174	.242	.429
WITT / DORT	.117	.066	.111	.149	.198	.369
FROH / DORT	.094	.041	.060	.095	.138	.272
BOCH / HERN	.149	.080	.111	.163	.204	.391
FROH / HERN	.125	.059	.085	.118	.181	.327
GELS / HERN	.247	.037	.060	.101	.204	.722
HERT / HERN	.285	.083	.130	.229	.351	.840
ICKE / HERN	.497	.081	.128	.225	.385	1.742
LEIT / HERN	.136	.062	.087	.134	.180	.379
RECK / HERN	.229	.111	.166	.268	.354	.617
WITT / HERN	.187	.119	.164	.213	.268	.490
BUCH / MEID	.358	.069	.111	.160	.309	1.16
BUDB / MEID	.501	.250	.340	.429	.517	.942
KALD / MEID	.500	.153	.216	.305	.437	1.09
MEER / MEID	.511	.144	.241	.340	.457	2.32
OSTE / MEID	.477	.119	.217	.373	.570	1.87
STYR / MEID	.114	.047	.076	.111	.174	.498
WALS / MEID	.307	.160	.237	.327	.444	1.15

2.2 Die MSF als Maß für die räumliche Repräsentativität

Wegen ihrer Bedeutung als mittlere quadratische Abweichung einer Schätzung ist die modifizierte Strukturfunktion (MSF) geeignet, die räumliche Verteilung des Schätzfehlers bei der Übertragung des an einem Meßort i festgestellten Konzentrationswertes $C_i(t)$ auf die benachbarte Umgebung abzuschätzen. Benötigt werden dazu

- die Werte der MSF $gm(i,j)$ für die Bezugsstation i und die Nachbarstationen j ,
- ein Algorithmus zur Abschätzung der MSF an Orten x zwischen den Meßstationen.

Zur Charakterisierung des beschriebenen Schätzfehlers verwendet man üblicherweise die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung des Verhältnisses DCx/Ci von 1, abgekürzt rms (root mean square). Außerdem werden folgende Abkürzungen benötigt:

$Cx(t)$ für die (unbekannte) Konzentration am Ort x ,

$DCx = Cx(t) - Ci(t)$ und

$gm(i,x)$ für die MSF zwischen der Bezugsstation am Ort i und dem Ort x .

Mit diesen Schreibweisen ist eine Linie gleichen Schätzfehlers rms bestimmt durch die Gleichung

$$\text{rms}(DCx/Ci) = \sqrt{gm(i,x)} \quad (5)$$

mit $\text{rms}(DCx/Ci)**2 = \langle (DCx/Ci)**2 \rangle$.

Dies bedeutet, daß Isolinien der MSF $gm(i,j)$ zugleich Linien gleichen Schätzfehlers $\text{rms}(DCx/Ci)$ sind.

Dieser Schätzfehler (rms-Abweichung) ist mit der bekannten Standardabweichung identisch, wenn der Mittelwert des Verhältnisses Cj/Ci den Wert 1 annimmt, wenn also gilt $\langle Cj/Ci \rangle = 1$. Um den gesuchten Schätzfehler gemäß Gl.(5) am Ort x angeben zu können, wird folglich nur ein (Interpolations-) Algorithmus zur Abschätzung der MST $gm(i,x)$ an Orten x zwischen den vorhandenen Meßstationen benötigt.

Ein solcher Algorithmus erlaubt es, ein Bild von der räumlichen Struktur der MSF der Bezugsstation i zu gewinnen.

Gibt man einen zulässigen Schätzfehler (rms-Abweichung) für eine bestimmte statistische Kenngröße (Tagesmittelwert, 98%-Jahreswert) eines Schadstoffes vor (z.B. 20 Prozent für Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid), so kann man die zugehörigen Isolinien gleichen Schätzfehlers für die Stationen eines gegebenen Meßnetzes ermitteln und grafisch darstellen. Die von diesen Isolinien eingeschlossenen Flächen werden im folgenden "Bezugsflächen der betrachteten Kenngröße zum Schätzfehler rms" genannt.

Diese "Bezugsflächen" charakterisieren die räumliche Repräsentativität der Meßstationen des betrachteten Meßnetzes innerhalb des vorgegebenen zulässigen Schätzfehlers rms.

Einige Werte der MSF und des entsprechenden Schätzfehlers (rms-Abweichung) sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Entsprechende Werte der modifizierten Strukturfunktion und des Schätzfehlers (rms-Abweichung) rms(DCx/Ci).

rms(DCx/Ci)	gm(i,x)
0,10	0,01
0,14	0,02
0,20	0,04
0,30	0,09
0,32	0,10

Tabelle 2 zeigt, daß die Konzentration $C_x(t)$ an einem Punkt x auf der Isolinie $gm(i,x)=0,04$ durch die Konzentration $C_i(t)$ an der Bezugsstation i mit einem Schätzfehler (rms-Abweichung) von 20 Prozent abgeschätzt werden kann. Die eingeschlossene Fläche wird im folgenden deshalb "20-Prozent-Bezugsfläche" der betrachteten Kenngröße von Schwefeldioxid der Station i genannt. Es ist wichtig, die Angaben soweit zu präzisieren, denn eine bestimmte Station kann für unterschiedliche Schadstoffe und auch für unterschiedliche statistische Kenngrößen unterschiedliche Bezugsflächen aufweisen.

2.3 Konstruktion von Isolinien der MSF

Die Werte der MSF $gm(i,j)$ zwischen der Bezugsstation i und den benachbarten Stationen j des betrachteten Meßnetzes seien bekannt. Zur Abschätzung der MSF an einem Aufpunkt x zwischen dem Meßort i und den benachbarten Meßstationen werden möglichst zuverlässige Informationen über die zu erwartende funktionale Abhängigkeit der MSF $gm(i,x)$ von Richtung und Abstand (vom Meßort i) benötigt. Zur Gewinnung derartiger Informationen wird die grafische Darstellung der MSF $gm(i,j)$ zwischen der Bezugsstation i und den Nachbarstationen j in einer Umgebung, deren radiale Ausdehnung mindestens dem doppelten mittleren Abstand der Meßstationen entspricht, empfohlen. Anhand derartiger Darstellungen lassen sich folgende Fragen prüfen:

- Liegen unterschiedliche Richtungsabhängigkeiten vor?
- Hängt $gm(i,j)$ linear vom Abstand der Meßorte i und j ab?
- Wächst $gm(i,j)$ monoton mit dem Abstand der Meßorte i und j an?

Wird die erste Frage mit Nein beantwortet, so liegt Isotropie vor. In diesem Fall wären folglich kreisförmige Isolinien zu erwarten. Anderenfalls sind unterschiedliche Richtungsklassen getrennt zu betrachten. Letzteres wird der

Regelfall sein. Die beiden übrigen Fragen können klassenweise durch Inspektion oder durch lineare Regression beantwortet werden. Der monotone Anstieg der MSF zwischen benachbarten Meßstationen ist ebenfalls eine wichtige Voraussetzung für die Zulässigkeit der Interpolation .

In den Abb.3-6 (siehe Anhang) sind Beispiele für derartige Darstellungen wiedergegeben. Die zugrundeliegenden Daten sind Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid, welche 1987 im TEMES-Netz registriert worden sind.

Die Konstruktion der interessierenden Isolinien kann mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden. Die Anwendung eines sog. "fortgeschrittene" Isolinien-Algorithmus, wie beispielsweise in <13> beschrieben, ist im vorliegenden Fall nicht zweckmäßig, da er vorhandene Richtungsabhängigkeiten der Strukturfunktion nicht zu berücksichtigen vermag.

Die einfachste Möglichkeit zur Gewinnung von Isolinien besteht darin, auf den Verbindungslinien zwischen der Bezugsstation i und den benachbarten Meßstationen j Stützstellen durch lineare Interpolation zu bestimmen. Die Nachbarstationen j werden im Uhrzeigersinn fortlaufend numeriert beginnend mit 1 bei der nördlichsten Station im Sektor Nord-Ost. Betrachtet werde ein Punkt $\underline{x}=(x,y)$ auf der Verbindungslinie zwischen dem Bezugsort i mit den kartesischen Koordinaten (x_i, y_i) und einem benachbarten Meßort j mit den Koordinaten (x_j, y_j) .

Zunächst wird eine Transformation in Polarkoordinaten durchgeführt, wobei der Ursprung an den Ort der Bezugsstation i gelegt wird und der Winkel im Uhrzeigersinn gegen die Nordrichtung bestimmt wird. Die Winkelkoordinate $w(j)$ der Nachbarstation j ist dann durch folgende Vorschrift bestimmt:

$$w(j) = \arctan\left(\frac{x_j - x_i}{y_j - y_i}\right) \quad (6)$$

Die radiale Koordinate der Nachbarstation j ist dann gegeben durch

$$r(j) = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (7)$$

Durch diese Vorschriften wird erreicht, daß für die Winkel gilt

$$w(1) < w(2) < \dots < w(K),$$

wobei K die Anzahl der zu berücksichtigenden Nachbarstationen ist.

Gesucht werden K Stützstellen für die Isolinie zum Schätzfehler rms. Da auf den Verbindungslinien zu den Nachbarstationen interpoliert wird, ist die Anzahl der gesuchten Stützstellen gegeben durch die Anzahl der Nachbarstationen.

Die Polarkoordinaten $wiso(j)$ und $riso(j)$ der gesuchten Stützstelle auf der Verbindungslinie zur Nachbarstation j sind dann gegeben durch die Vorschriften

$$wiso(j) = w(j) \quad \text{und} \quad (8a)$$

$$riso(j) = \frac{rms}{gm(i,j)} * r(j). \quad (8b)$$

Die kartesischen Koordinaten dieser Stützstelle sind folglich gegeben durch die Relationen

$$xiso(j) = xi + riso(j) * \sin(w(j)), \quad (9a)$$

$$yiso(j) = yi + riso(j) * \cos(w(j)). \quad (9b)$$

Ausgehend von der durch Beobachtungen (Abb.3-6) unterstützten Annahme einer linearen Abhängigkeit der MSF vom Abstand für Entfernungen bis zu 16 km wurde im vorliegenden Fall ein Umkreisradius von 13 km festgelegt. In einem rasterförmigen Meßnetz mit 8 km Maschenweite (TEMES) erhält man in einem Umkreis von 13 Kilometer Radius maximal 8 Stützstellen für eine Isolinie. Verbindet man diese Punkte durch Streckenzüge, so erhält man auf einfache Weise die zugehörige Isolinie.

An dieser Stelle ist eine weitere Vereinbarung zu treffen, u.z. über die Zahl der Nachbarstationen innerhalb des Umkreises von 13 km, welche zur Darstellung einer geschlossenen Isolinie gefordert werden. Im vorliegenden Fall wurde diese Mindestzahl auf 4 festgelegt. Dies geschah durch die Forderung, daß die nicht durch Nachbarstationen abgedeckten Sektoren nicht größer als 100 Grad sein sollen, formal

$$w(i+1) - w(i) \leq 100 \text{ Grad} \quad \text{für } i = 1, \dots, K-1.$$

Anderenfalls wird auf eine Darstellung von Isolinien in dem entsprechenden Sektor verzichtet. Für Meßstationen am Rand des Überwachungsgebietes ergeben sich auf diese Weise halb-offene Isolinien. Ein Beispiel für die Anwendung dieses einfachen Algorithmus ist in Abb.7a (siehe Anhang) gegeben.

In einem weiteren Schritt können die so gewonnenen Isolinien geglättet werden. Dazu werden zusätzliche Stützstellen durch einen weiteren Interpolationsschritt gewonnen für die 36 Winkel

$$\text{wiso}'(k) = k * 10 \text{ Grad}, k = 1, 2, \dots, 36. \quad (10)$$

Zunächst wird geprüft, zwischen welchen Nachbarstationen j_1 und $j_2 = j_1 + 1$ der betrachtete Winkel $\text{wiso}'(k)$ liegt, und zwar durch die Bedingung

$$\text{wiso}(j_1) < \text{wiso}'(k) < \text{wiso}(j_2). \quad (11)$$

Sollte gelten $\text{wiso}'(k) = \text{wiso}(j_1)$ oder $\text{wiso}'(k) = \text{wiso}(j_2)$, so entfällt dieser Interpolationsschritt.

Anderenfalls wird die radiale Koordinate der gesuchten zusätzlichen Stützstelle abgeschätzt durch

$$\text{riso}'(k) = \text{riso}(j_1) + \frac{\text{riso}(j_2) - \text{riso}(j_1)}{\text{wiso}(j_2) - \text{wiso}(j_1)} * \text{Dw} \quad (12)$$

mit $\text{Dw} = \text{wiso}'(k) - \text{wiso}(j_1)$.

Die kartesischen Koordinaten der zusätzlichen Stützstelle sind gegeben durch die Relationen

$$\text{xiso}'(k) = \text{x}_i + \text{riso}'(k) * \sin(\text{wiso}'(k)), \quad (13a)$$

$$\text{yiso}'(k) = \text{y}_i + \text{riso}'(k) * \cos(\text{wiso}'(k)). \quad (13b)$$

Auf diese Weise erhält man mindestens 36 Stützstellen für eine geschlossene Isolinie. Die glättende Wirkung kann anhand von Abb.7b (siehe Anhang) beurteilt werden.

Zur Berechnung und Darstellung der Isolinien wurde ein Rechenprogramm in FORTRAN77 erstellt, welches sowohl die Beschränkung auf den ersten Interpolationsschritt als auch die Anwendung des erweiterten Interpolationsalgorithmus gestattet. Zumindest der erste Interpolationsschritt kann gegebenenfalls auch von Hand nachvollzogen werden. Anwendungsbeispiele werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

3. ANWENDUNGEN

Die MSF, wie sie in Abschnitt 2.1 definiert wurde, unterliegt bezüglich der verwendbaren Datenbasis keinerlei Einschränkungen. Auf der Basis von Halbstundenwerten beschreibt sie die räumliche Repräsentativität von Halbstundenwerten, auf der Basis von Tagesmittelwerten diejenige von Tagesmittelwerten. Beispiele für diese beiden Integrationszeiten werden im folgenden vorgestellt ausgehend von den Meßstationen, welche im vorangehenden Abschnitt betrachtet worden sind.

Darüber hinaus erhebt sich die Frage, ob die vorgestellte Methode auch Aussagen über die räumliche Repräsentativität von Kenngrößen ermöglicht. Dabei interessieren neben dem Mittelwert und dem 98-%-Wert der Halbstundenwerte eines Jahres auch die in der EG-Richtlinie 80/779/EWG betrachteten Anteilwerte, Median und 98-%-Wert der Tagesmittelwerte. Berechnungen auf der Basis von Tagesmittelwerten haben den nicht zu unterschätzenden Vorteil eines erheblich geringeren Rechenaufwandes.

3.1 Halbstundenwerte

In den Abbn. 7-10 (siehe Anhang) sind ausgehend von allen gemessenen Halbstundenwerten der Komponente Schwefeldioxid aus dem Jahr 1987 für die betrachteten Stationen die Isolinien zu den rms-Abweichungen 50 und 75 Prozent dargestellt. Die eingeschlossenen Flächen sind also die 50-Prozent- und die 75-Prozent-Bezugsflächen der Halbstundenwerte für die betrachteten Meßstationen. Die maximale Abweichung innerhalb dieser Bezugsflächen kann durch $2 \cdot \text{rms}$ -Abweichung abgeschätzt werden.

Das offene Quadrat markiert jeweils die Lage der Bezugsstation i. An den Orten der benachbarten Meßstationen sind, soweit sie im dargestellten Kartenausschnitt liegen, die Werte der entsprechenden MSF zur betrachteten Bezugsstation i angegeben.

In diesen Darstellungen erkennt man, wie unterschiedlich die räumliche Repräsentativität der Meßstationen sein kann. So hat die 50-Prozent-Bezugsfläche der Halbstundenwerte der Meßstation Bottrop-Welheim (BOTT) eine radiale Ausdehnung zwischen 1 und 3 km (Abb.7b). Die entsprechenden Bezugsflächen der Meßstationen Dortmund (DORT), Herne (HERN) und Duisburg-Meiderich (MEID) weisen radiale Ausdehnungen zwischen 0,5 und 5 km (DORT), zwischen 0,4 und 4 km (HERN) sowie zwischen 0,4 und 1,5 km (MEID) auf.

3.2 Tagesmittelwerte

In den Abbn.11-14 (siehe Anhang) sind auf der Basis aller gemessenen Tagesmittelwerte der Komponente Schwefeldioxid des Jahres 1987 für die betrachteten Stationen die Isolinien

zu den rms-Abweichungen 14 und 20 Prozent dargestellt. Die eingeschlossenen Flächen sind also die 14- und die 20-Prozent- Bezugsflächen der Tagesmittelwerte an den betrachteten Stationen. Die maximalen Abweichungen können wiederum durch 2*rms-Abweichung abgeschätzt werden.

Auch hier sind die Werte der entsprechenden MSF zu den benachbarten Meßstationen an den zugehörigen Orten eingetragen. An der bereits erwähnten Meßstation Essen-Altendorf (ALTE) erreicht die MSF der Tagesmittel von Schwefeldioxid zur Bezugsstation Bottrop-Welheim (BOTT) den Wert 0,17.

Unterschiede in der räumlichen Repräsentativität der gemessenen Tagesmittelwerte sind auch hier an Unterschieden in der Gestalt und Größe der Bezugsflächen erkennbar. So weisen die 20-Prozent-Bezugsflächen der Tagesmittel der betrachteten Meßstationen folgende radiale Ausdehnungen auf: BOTT: 1,5-3 km, DORT: 0,5-4 km, HERN: 0,9-3,9 km und MEID: 0,5-2,5 km.

3.3 Jahresmittelwert

Eine direkte Anwendung der beschriebenen Methode auf die Kenngröße Jahresmittelwert auf der Basis eines Meßjahres ist nicht bekannt. Nichtsdestoweniger ist jedoch die folgende indirekte Verfahrensweise möglich. Der Jahresmittelwert der Halbstundenwerte kann in sehr guter Näherung durch den Jahresmittelwert der Tagesmittel abgeschätzt werden. Deshalb kann man sich auf die Betrachtung des letzteren beschränken. Die räumliche Repräsentativität des Jahresmittelwertes ist daher sicherlich mindestens so groß wie diejenige eines durchschnittlichen Tagesmittelwertes (siehe Abschnitt 3.2).

3.4 98%-Wert der Halbstundenwerte

Die räumliche Repräsentativität des 98%-Wertes der Halbstundenwerte kann auf der Basis der in Abschnitt 2 beschriebenen Methode folgendermaßen abgeschätzt werden: Erfahrungsgemäß wird der 98%-Wert der Halbstundenwerte, die im Laufe eines Jahres an einer Meßstation registriert wurden, durch einen Meßwert $> 100 \text{ ug/m}^3$ abgeschätzt. Für Halbstundenwerte aus diesem Intervall kann die MSF folgendermaßen eingeschränkt werden:

$$\text{gmr}(i, j) = \frac{1}{M} * \sum_{\substack{t=1 \\ C_i(t) > h \\ C_j(t) > 0}}^N (C_j(t)/C_i(t) - 1)**2. \quad (14)$$

(M: Anzahl der berücksichtigten Wertepaare mit $C_i(t) > h$.)

Bei dieser eingeschränkten MSF werden also nur die Zeiten t berücksichtigt, zu denen an der Meßstation i erhöhte Meßwerte ($> h$) aufgetreten sind. Ein Test dieser Verfahrensweise wurde aus Gründen des Rechenaufwandes für Tagesmittelwerte durchgeführt (vergl. Abschnitt 3.6).

In den Abbn.15-18 (siehe Anhang) sind die Isolinien zu den rms-Abweichungen 14 und 20 Prozent der Halbstundenwerte $> 100 \text{ ug/m}^3$ dargestellt. Die eingeschlossenen Flächen sind folglich die 14- und die 20-Prozent-Bezugsflächen der erhöhten Halbstundenwerte, welche 100 ug/m^3 übertreffen. Zugleich sind diese Flächen als 14- und 20-Prozent-Bezugsflächen der 98-%-Werte der gemessenen Halbstundenwerte von Schwefeldioxid aufzufassen.

Im Vergleich zu den dargestellten Bezugsflächen aller Halbstundenwerte (Abb.11-14) erkennt man, daß die 14-Prozent-Bezugsflächen der erhöhten Halbstundenwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$), bzw. der 98-%-Werte der Halbstundenwerte ihrer Größe nach am ehesten den 50-Prozent-Bezugsflächen aller Halbstundenwerte entsprechen. Die radialen Ausdehnungen der 14-Prozent-Bezugsflächen der erhöhten Halbstundenwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$) liegen in folgenden Bereichen: BOTT: 1-3 km, DORT: 0,7-5 km, HERN: 1-4 km, MEID: 0,6-2,6 km.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, daß die räumliche Repräsentativität der betrachteten Meßstationen für die 98-%-Werte der Halbstundenwerte von Schwefeldioxid wesentlich größer ist als für Halbstundenwerte von Schwefeldioxid.

3.5 Median der Tagesmittelwerte

Ausgehend von den Isolinien der MSF $gm(i,j)$ von Tagesmittelwerten ist es direkt möglich, obere Grenzen für die relativen Abweichungen (Fehler) der Mediane der Tagesmittelwerte abzuschätzen. Dies wird möglich durch Vergleich der mittels $gm(i,j)$ abgeschätzten Abweichungen mit beobachteten Relationen von Perzentilen an benachbarten Meßstationen, wie sie in Tabelle 3 dargestellt sind.

Anhand von Tabelle 3 wird deutlich, daß die Isolinien der MSF direkt benutzt werden können, um obere Grenzen für die Abweichung des lokalen Median $Cx50$ am Ort x von dem Median $Ci50$ am Bezugsort i abzuschätzen.

Tabelle 3: Vergleich der modifizierten Strukturfunktion mit Relationen beobachteter Mediane.
 Daten: Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid
 Jahr: 1987

j / i	N	gm(i, j)	$\frac{C_{j50}}{C_{i50}} - 1$	$\frac{(C_{j50}/C_{i50}-1)**2}{gm(i, j)}$
ALTE / BOTT	323	0.174	-0.31	0.54
GELS / BOTT	318	0.132	-0.12	0.11
GLAD / BOTT	330	0.120	-0.16	0.22
HERT / BOTT	294	0.133	-0.16	0.20
LEIT / BOTT	316	0.203	-0.24	0.30
OSTE / BOTT	328	0.114	+0.04	0.02
STYR / BOTT	304	0.190	-0.22	0.26
ASSE / DORT	323	0.166	-0.31	0.57
BRAM / DORT	314	0.506	+0.23	0.10
FROH / DORT	319	0.094	-0.18	0.34
HERD / DORT	345	0.145	-0.26	0.45
ICKE / DORT	325	0.593	+0.33	0.19
NIED / DORT	313	0.306	+0.10	0.04
SCHW / DORT	339	0.145	-0.23	0.17
WITT / DORT	323	0.117	-0.23	0.45
BOCH / HERN	326	0.149	-0.22	0.33
FROH / HERN	321	0.125	-0.29	0.66
GELS / HERN	323	0.247	-0.04	0.008
HERT / HERN	299	0.285	-0.09	0.03
ICKE / HERN	331	0.497	+0.16	0.05
LEIT / HERN	322	0.136	-0.18	0.24
RECK / HERN	334	0.229	-0.22	0.21
WITT / HERN	325	0.187	-0.33	0.59
BUCH / MEID	314	0.358	+0.05	0.006
BUDB / MEID	308	0.501	-0.37	0.27
KALD / MEID	303	0.500	-0.05	0.004
MEER / MEID	299	0.511	+0.10	0.02
OSTE / MEID	326	0.477	+0.24	0.12
STYR / MEID	300	0.114	-0.07	0.04
WALS / MEID	294	0.307	-0.12	0.05
Median				0.17
68%-Wert				0.26
95%-Wert				0.59
Maximum				0.66

Auf der Basis von 31 repräsentativen Fällen aus dem Rhein-Ruhr-Gebiet wurde folgende Relation festgestellt:

$$\left| \frac{DCx50}{Ci50} \right| \leq 0.80 * \sqrt{gm(i,x)} \quad (15)$$

mit $DCx50 = Cx50 - Ci50$.

Die Relation (15) ergibt sich als grobe Schätzung aus der Quadratwurzel des in Tabelle 3 angegebenen 95-%-Wertes der in der letzten Spalte angegebenen Verhältniszahlen.

Dementsprechend gewinnen Isolinien der MSF der Tagesmittelwerte direkt eine Bedeutung zur Bewertung der räumlichen Repräsentativität des Medians der betrachteten Tagesmittelwerte. Beispielsweise ist zu erwarten, daß innerhalb der 20-Prozent-Bezugsfläche der Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid die relative Abweichung der lokalen Mediane von den beobachteten 16 Prozent nicht überschreitet.

3.6 98-%-Wert der Tagesmittelwerte

Zur Untersuchung der räumlichen Repräsentativität des 98-%-Wertes der Tagesmittelwerte wird derselbe Ansatz benutzt wie in Abschnitt 3.4 für 98-%-Werte der Halbstundenwerte. Wie man aus Abb.2 entnehmen kann, ist zu erwarten, daß die MSF die relative Abweichung des Verhältnisses $C_j(t)/C_i(t)$ von 1 bei höheren Konzentrationen überschätzt. Da mit Blick auf den 98-%-Wert von Jahreskollektiven nur die höheren Konzentrationswerte von Interesse sind, kann eine zutreffendere Beschreibung durch folgende Beschränkung der MSF erreicht werden:

$$gmr(i,j) = \frac{1}{M} * \sum_{\substack{t=1 \\ C_i(t) > h \\ C_j(t) > 0}}^N (C_j(t)/C_i(t) - 1)^2 \quad (16)$$

In dieser "eingeschränkten" MSF $gmr(i,j)$ werden die zeitgleich gemessenen Wertepaare $C_i(t)$, $C_j(t)$ nur dann berücksichtigt, wenn der Konzentrationswert $C_i(t)$ an der Bezugsstation i die Schwelle h übersteigt. Für Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid, die im folgenden betrachtet werden, wird gesetzt $h=100 \text{ ug/m}^3$.

Isolinien der eingeschränkten MSF $gmr(i,j)$ können auf dieselbe Weise konstruiert werden, wie solche der nicht-eingeschränkten MSF $gm(i,j)$. Auch die Zuordnung von rms-Abweichungen erfolgt nach denselben Regeln.

In Abb.19-22 (siehe Anhang) sind die Isolinien zu den rms-Abweichungen von 14 und 20 Prozent für erhöhte Tagesmittelwerte ($h=100 \text{ ug/m}^3$) von Schwefeldioxid für die betrachteten Stationen dargestellt. Die Bedeutung für den 98%-Wert C_{i98} der Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid ergibt daraus, daß dieser gegeben ist durch einen Tagesmittelwert $> 100 \text{ ug/m}^3$. Folglich schließen die in den Abbn.23-26 (siehe Anhang) dargestellten Isolinien 14- bzw. 20-Prozent-Bezugsflächen der 98%-Werte der Tagesmittel von Schwefeldioxid ein. Für Abschätzungen kann man daher sagen, daß die relative Abweichung der lokalen 98%-Werte von den stationsbezogenen 98%-Werten innerhalb der Isolinien zur rms-Abweichung von 14 Prozent den Wert 30 Prozent ($= 2 * \text{rms-Abweichung}$) nicht überschreitet. Dies wird durch den nachfolgenden Test bestätigt.

Dieser Test besteht in einem Vergleich des gewählten Ansatzes mit beobachteten 98%-Werten an benachbarten Meßstationen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Neben dem berechneten Wert der eingeschränkten MSF ist in Spalte 4 der Tabelle 4 die Abweichung des Verhältnisses der beobachteten 98%-Werte von 1 angegeben. In der letzten Spalte ist wie in Tabelle 3 das Quadrat von Spalte 4 ins Verhältnis gesetzt zum angegebenen Wert der eingeschränkten MSF. Ausgehend von dem angegebenen 95%-Wert bzw. Maximalwert dieser Verhältniszahl findet man die Relation

$$\left| \frac{DC_{j98}}{C_{i98}} \right| < 2 * \sqrt{\text{gmr}(i,j)} \quad (17)$$

mit $DC_{j98} = C_{j98} - C_{i98}$.

Dies entspricht der Erwartung aufgrund des gewählten Ansatzes und bestätigt ihn somit.

Vergleicht man die in den Abbn. 23-26 (siehe Anhang) dargestellten Bezugsflächen der 98%-Werte der Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid mit den entsprechenden Bezugsflächen der 98%-Werte der Halbstundenwerte aus Abb. 15-18 (siehe Anhang), so erkennt man zwar einige Unterschiede im Detail, bezüglich der Flächengröße jedoch ziemliche Ähnlichkeiten für gleiche rms-Abweichungen. Dies ist ein recht interessantes Ergebnis, insofern als es Vereinfachungen ermöglicht. Es reicht demzufolge nämlich, die interessierenden Bezugsflächen für den 98%-Wert der Tagesmittelwerte zu kennen, was wesentlich weniger rechenintensiv ist als auf der Basis von Halbstundenwerten zu rechnen. Die Ergebnisse gelten näherungsweise auch für die 98%-Werte der Halbstundenwerte.

Wie im Fall der Halbstundenwerte, so gilt auch für Tagesmittelwerte, daß die räumliche Repräsentativität der 98%-Werte größer ist als diejenige der durchschnittlichen Tagesmittelwerte.

Tabelle 4: Vergleich der eingeschränkten MSF ($h=100 \text{ ug/m}^3$) mit Verhältnissen beobachteter 98-%-Werte von Tagesmittelwerten von Schwefeldioxid (1987).

j / i	M	gmr(i,j)	$\frac{C_{j98}}{C_{i98}} - 1$	$\frac{(C_{j98}/C_{i98}-1)**2}{\text{gmr}(i,j)}$
ALTE / BOTT		0.04	-0.01	0.002
GELS / BOTT		0.04	-0.14	0.52
GLAD / BOTT		0.09	-0.12	0.16
HERT / BOTT		0.05	-0.10	0.20
LEIT / BOTT		0.10	-0.20	0.41
OSTE / BOTT		0.04	+0.16	0.66
STYR / BOTT		0.04	-0.02	0.007
ASSE / DORT		0.08	-0.28	0.97
BRAM / DORT		0.08	+0.06	0.04
FROH / DORT		0.02	-0.25	3.15
HERD / DORT		0.03	-0.16	0.80
ICKE / DORT		0.07	-0.04	0.02
NIED / DORT		0.03	-0.16	0.85
SCHW / DORT		0.04	-0.40	4.04
WITT / DORT		0.03	-0.18	1.02
BOCH / HERN		0.06	-0.19	0.62
FROH / HERN		0.04	-0.31	2.46
GELS / HERN		0.02	-0.08	0.30
HERT / HERN		0.06	-0.03	0.01
ICKE / HERN		0.04	-0.12	0.34
LEIT / HERN		0.04	-0.14	0.48
RECK / HERN		0.05	-0.18	0.61
WITT / HERN		0.07	-0.24	0.85
BUCH / MEID		0.04	+0.24	1.49
BUDB / MEID		0.04	-0.32	0.02
KALD / MEID		0.03	+0.07	0.15
MEER / MEID		0.13	+0.22	0.37
OSTE / MEID		0.13	+0.38	1.09
STYR / MEID		0.03	+0.16	0.90
WALS / MEID		0.04	+0.05	0.07
Median				0.61
68-%-Wert				0,85
95-%-Wert				3,15
Maximum				4,04

Beispielhaft betrachtet werden im folgenden die 14-Prozent-Bezugsflächen der erhöhten Tagesmittelwerte bzw. der 98%-Werte der Tagesmittelwerte. Innerhalb dieser Bezugsflächen ist zu erwarten, daß die (unbekannten) lokalen 98%-Werte der Tagesmittel eine Abweichung von maximal 30 Prozent von den 98%-Werten der zugehörigen Meßstationen aufweisen. Im einzelnen sind die Konturen dieser Bezugsflächen recht unterschiedlich. Dies ist als Ausdruck der hinsichtlich der Emissionen unterschiedlichen Gegebenheiten in den Umgebungen der betrachteten Meßstationen anzusehen. Die radialen Ausdehnungen der betrachteten Bezugsflächen der erhöhten ($>100 \text{ ug/m}^3$) Tagesmittelwerte liegen in folgenden Bereichen: BOTT: 1,3-5,8 km, DORT: 1,8-8,8 km, HERN: 2,2-10 km, MEID: 1,1-8,8 km.

4. ZUVERLÄSSIGKEIT

Die Zuverlässigkeit der beschriebenen Methode und ihrer Resultate hängt von verschiedenen Faktoren ab. Entscheidend ist sicherlich der Einfluß der in den betrachteten Zeitreihen vorhandenen Ausfälle. Von Bedeutung ist auch der Einfluß unterschiedlicher Bezugsjahre auf die Ergebnisse. Diese Fragen werden im folgenden untersucht. Aus Gründen des geringeren Rechenaufwandes sowie ihrer allgemein großen Bedeutung geschieht dies anhand von Tagesmittelwerten.

4.1 Standardabweichung der MSF aller Tagesmittelwerte

Bedingt durch vorhandene Ausfallwerte in den betrachteten Jahres-Zeitreihen werden die resultierenden MSF Unsicherheiten aufweisen. Diese können nicht direkt erkannt werden, da die vollständigen Zeitreihen nicht vorliegen. Durch die künstliche Erzeugung (Simulation) zusätzlicher Ausfallwerte in den vorhandenen Zeitreihen können die interessierenden Unsicherheiten jedoch näherungsweise analysiert und durch Standardabweichungen charakterisiert werden. Dieses Verfahren trägt in der Statistik den Namen Bootstrap-Technik <12>.

Unvermeidbar vorhandene Ausfallwerte in den Jahres-Zeitreihen $C_i(t)$ und $C_j(t)$ von Tagesmittelwerten führen dazu, daß die Anzahl der für die Berechnung der MSF gemäß Gl.(2) bzw. Gl.(15) zur Verfügung stehenden Wertepaare $C_i(t)$, $C_j(t)$ kleiner ist als 365 ($M < 365$).

In der Bootstrap-Technik werden die vorhandenen M Wertepaare einer Stationspaarung als Referenzdatensatz herangezogen, um den Einfluß von m ($=1,2,\dots$) zusätzlichen, künstlich erzeugten Ausfallwerten zu untersuchen. Dazu werden m gleichverteilte Zufallszahlen aus dem Intervalle 1 bis 365 (ohne Zurücklegen) gezogen. Dies seien die Zahlen

$t_1, t_2, \dots, t_M.$

Die zugehörigen Tagesmittelwerte werden, sofern sie nicht bereits Ausfallwerte sind, künstlich zu Ausfallwerten erklärt, indem gesetzt wird

$$C_i(t) = C_j(t) = 0 \text{ für } t=t_i \text{ mit } i=1,2,\dots,m.$$

Fällt ein künstlich erzeugter Ausfallwert mit einem realen Ausfall zusammen, so wird ein weiterer künstlicher Ausfallwert erzeugt.

Die entsprechende MSF wird dann für die verbleibenden $M-m$ Wertepaare nach folgender Vorschrift ermittelt ($N=365$):

$$gm'(m) = \frac{1}{M-m} * \sum_{\substack{t=1 \\ C_i(t)>0 \\ C_j(t)>0}}^N (C_j(t)/C_i(t)-1)**2. \quad (18)$$

Die Zufallsauswahl von m ($=1,2,\dots$) zusätzlichen Ausfallwerten wurde jeweils 100-mal für jede betrachtete Stationspaarung unabhängig voneinander wiederholt. Dadurch ergeben sich für eine betrachtete Stationspaarung 100 Werte $gm'(m)$ für eine bestimmte Anzahl m an künstlich erzeugten Ausfällen. Die Häufigkeitsverteilung dieser Werte $gm'(m)$ wird Bootstrap-Verteilung genannt. Mittelwert und Standardabweichung dieser Verteilung charakterisieren den Einfluß von m zusätzlichen Ausfallwerten auf die MSF der betrachteten Stationspaarung. In Tabelle 5 sind einige Resultate zusammengestellt.

Die Resultate in Tabelle 5 zeigen deutlich, daß die MSF aller Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid sehr unempfindlich ist gegen zusätzliche Ausfallwerte für Schwefeldioxid. Der Einfluß einzelner oder weniger Ausfallwerte ist vernachlässigbar gering. Für 40 zusätzliche Ausfallwerte liegen die Standardabweichungen der resultierenden MSF im Bereich 2-14 Prozent. Ferner erkennt man, daß näherungsweise die folgende Relation erfüllt ist:

$$gm'(10) = 0,5 * gm'(40) \quad (19)$$

Geht man näherungsweise davon aus, daß gleiche Anteile an Ausfallwerten in den vorhandenen und in den entsprechenden vollständigen Zeitreihen gleiche Standardabweichungen zur Folge haben, so erhält man folgende Abschätzung für die Standardabweichung der MSF der Tagesmittelwerte bei M vorhandenen Wertepaaren.

$$\text{std}(gm) = \sqrt{(365-M)} * \text{std}(gm'(1)) \quad (20)$$

Auf diese Weise kann die Standardabweichung der MSF $gm(i,j)$ abgeschätzt werden. Einige Resultate für die MSF $gm(i,j)$ sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 5: Einfluß zusätzlicher Ausfallwerte auf die MSF für Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid (1987)

----- $\langle gm'(k) \rangle$ ($std(gm'(k))$) -----				
j / i	M	Anzahl k zusätzlicher Ausfalltage		
		1	10	40
ALTE / BOTT	323	.174 (.001)	.173 (.002)	.173 (.004)
GELS / BOTT	318	.132 (.001)	.133 (.002)	.132 (.006)
GLAD / BOTT	330	.120 (.001)	.120 (.001)	.120 (.003)
HERT / BOTT	294	.133 (.001)	.133 (.002)	.133 (.003)
LEIT / BOTT	316	.203 (.002)	.202 (.005)	.203 (.007)
OSTE / BOTT	328	.114 (.001)	.114 (.003)	.114 (.006)
STYR / BOTT	304	.190 (.001)	.189 (.006)	.189 (.010)
ASSE / DORT	323	.166 (.000)	.166 (.002)	.167 (.003)
BRAM / DORT	314	.506 (.004)	.505 (.011)	.506 (.021)
FROH / DORT	319	.094 (.000)	.094 (.002)	.094 (.004)
HERD / DORT	345	.145 (.000)	.145 (.001)	.145 (.003)
ICKE / DORT	325	.593 (.004)	.590 (.013)	.592 (.026)
NIED / DORT	313	.306 (.001)	.307 (.007)	.306 (.015)
SCHW / DORT	339	.145 (.000)	.145 (.003)	.145 (.005)
WITT / DORT	323	.117 (.001)	.117 (.002)	.118 (.003)
BOCH / HERN	326	.149 (.000)	.149 (.003)	.150 (.006)
FROH / HERN	321	.125 (.000)	.125 (.004)	.126 (.007)
GELS / HERN	323	.247 (.001)	.246 (.013)	.251 (.018)
HERT / HERN	299	.285 (.001)	.283 (.010)	.286 (.017)
ICKE / HERN	331	.497 (.003)	.496 (.016)	.497 (.036)
LEIT / HERN	322	.136 (.001)	.135 (.004)	.137 (.005)
RECK / HERN	334	.228 (.003)	.230 (.003)	.229 (.008)
WITT / HERN	325	.186 (.002)	.187 (.003)	.186 (.009)
BUCH / MEID	314	.358 (.004)	.359 (.012)	.359 (.027)
BUDB / MEID	308	.501 (.008)	.503 (.014)	.506 (.044)
KALD / MEID	303	.500 (.010)	.496 (.036)	.490 (.069)
MEER / MEID	299	.511 (.005)	.510 (.014)	.510 (.031)
OSTE / MEID	326	.477 (.003)	.475 (.012)	.474 (.023)
STYR / MEID	300	.114 (.001)	.114 (.002)	.114 (.004)
WALS / MEID	294	.307 (.002)	.308 (.004)	.307 (.010)

(): Standardabweichung

Tabelle 6: Geschätzte Standardabweichungen der MSF $gm(i, j)$ für Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid (1987).

j / i	M (Ausfälle)	$gm(i, j)$	$std(gm(i, j))$ (Prozent)
ALTE / BOTT	323	.173	2.3
GELS / BOTT	318	.133	4.5
GLAD / BOTT	330	.120	2.5
HERT / BOTT	294	.133	2.2
LEIT / BOTT	316	.202	3.5
OSTE / BOTT	328	.114	5.3
STYR / BOTT	304	.189	5.3
ASSE / DORT	323	.166	1.8
BRAM / DORT	314	.505	4.2
FROH / DORT	319	.094	4.2
HERD / DORT	345	.145	2.1
ICKE / DORT	325	.590	4.4
NIED / DORT	313	.307	4.9
SCHW / DORT	339	.145	3.4
WITT / DORT	323	.117	2.6
BOCH / HERN	326	.149	4.0
FROH / HERN	321	.125	5.6
GELS / HERN	323	.247	7.3
HERT / HERN	299	.285	6.0
ICKE / HERN	331	.497	7.2
LEIT / HERN	322	.136	3.7
RECK / HERN	334	.228	3.5
WITT / HERN	325	.186	4.8
BUCH / MEID	314	.358	7.5
BUDB / MEID	308	.501	8.8
KALD / MEID	303	.500	13.8
MEER / MEID	299	.511	6.1
OSTE / MEID	326	.477	4.8
STYR / MEID	300	.114	3.5
WALS / MEID	294	.307	3.2
Mittelwert:			4,8
Standardabweichung:			2,4

4.2 Standardabweichung der MSF erhöhter Tagesmittelwerte

Eine Abschätzung der Standardabweichung der MSF erhöhter Tagesmittelwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$) kann ebenfalls nicht direkt erfolgen. Auch hier wird der Einfluß von Ausfallwerten auf das Ergebnis durch Simulation zusätzlicher Ausfallwerte, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7: Einfluß zusätzlicher Ausfallwerte auf die MSF für erhöhte Tagesmittelwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$) von Schwefeldioxid (1987).

		----- <gmr'(k)> (std(gmr'(k))) -----		
j / i	m	Anzahl k zusätzl. Ausfalltage in Folge		
		1	5	10
ALTE / BOTT	59	.105 (.0023)	.106 (.0084)	.107 (.0126)
GELS / BOTT	58	.069 (.0013)	.069 (.0055)	.069 (.0069)
GLAD / BOTT	57	.107 (.0014)	.107 (.0051)	.109 (.0101)
HERT / BOTT	49	.104 (.0025)	.105 (.0095)	.109 (.0138)
LEIT / BOTT	56	.178 (.0028)	.179 (.0100)	.180 (.0212)
OSTE / BOTT	59	.049 (.0012)	.049 (.0033)	.048 (.0051)
STYR / BOTT	56	.116 (.0027)	.117 (.0102)	.118 (.0235)
ASSE / DORT	36	.127 (.0025)	.128 (.0097)	.134 (.0181)
BRAM / DORT	32	.087 (.0039)	.088 (.0103)	.090 (.0229)
FROH / DORT	32	.021 (.0006)	.021 (.0014)	.021 (.0013)
HERD / DORT	38	.068 (.0022)	.069 (.0069)	.074 (.0126)
ICKE / DORT	37	.085 (.0032)	.086 (.0071)	.090 (.0104)
NIED / DORT	34	.033 (.0018)	.033 (.0066)	.032 (.0121)
SCHW / DORT	35	.094 (.0030)	.094 (.0109)	.103 (.0094)
WITT / DORT	37	.054 (.0016)	.055 (.0040)	.056 (.0094)
BOCH / HERN	47	.115 (.0023)	.115 (.0086)	.115 (.0183)
FROH / HERN	39	.074 (.0027)	.074 (.0112)	.074 (.0216)
GELS / HERN	47	.030 (.0019)	.030 (.0048)	.030 (.0088)
HERT / HERN	40	.089 (.0037)	.089 (.0111)	.089 (.0271)
ICKE / HERN	46	.050 (.0015)	.049 (.0041)	.050 (.0098)
LEIT / HERN	46	.096 (.0023)	.096 (.0075)	.094 (.0187)
RECK / HERN	47	.121 (.0033)	.121 (.0117)	.126 (.0210)
WITT / HERN	45	.141 (.0030)	.141 (.0086)	.139 (.0212)
BUCH / MEID	34	.053 (.0023)	.052 (.0041)	.051 (.0077)
BUDB / MEID	34	.115 (.0045)	.112 (.0084)	.131 (.0151)
KALD / MEID	35	.048 (.0025)	.048 (.0070)	.053 (.0081)
MEER / MEID	26	.126 (.0070)	.126 (.0152)	.127 (.0351)
OSTE / MEID	35	.124 (.0042)	.124 (.0150)	.125 (.0352)
STYR / MEID	35	.027 (.0014)	.027 (.0030)	.027 (.0038)
WALS / MEID	30	.060 (.0034)	.060 (.0085)	.060 (.0194)

Diese Ergebnisse sind folgendermaßen zu interpretieren. Geht man davon aus, daß die Vollständigkeiten (Verfügbarkeit) der Zeitreihen nicht vom betrachteten Konzentrationsbereich abhängt, so sollte bei einer typischen Verfügbarkeit der Wertepaare $C_i(t)$, $C_j(t)$ von 90 Prozent ($M=330$) der Bereich $C_i(t) > 100 \text{ ug/m}^3$ ebenfalls mit einer Vollständigkeit von ca. 90 Prozent erfaßt sein. In diesem Fall ist bei 5 vorhandenen Wertepaaren $C_i(t)$, $C_j(t)$ mit $C_i(t) > 100 \text{ ug/m}^3$ mit 5 nicht erfaßten Wertepaaren zu rechnen. Der Einfluß dieser 5 fehlenden Wertepaare kann näherungsweise durch den Einfluß von 5 zusätzlichen Ausfalltagen abgeschätzt werden.

Verallgemeinert man diese Überlegungen, so erhält man folgende Abschätzung für die Standardabweichung der MSF für erhöhte ($>100 \text{ ug/m}^3$) Tagesmittelwerte:

$$\text{std}(\text{gmr}) = \text{std}(\text{gmr}'(1)) * \sqrt{m * (1 - M/365)}, \quad (21)$$

wobei M wie in Abschnitt 4.1 die Anzahl aller vorhandenen Wertepaare $C_i(t)$, $C_j(t)$ angibt.

Tabelle 8: Geschätzte Standardabweichungen der MSF $\text{gmr}(i, j)$ für erhöhte ($>100 \text{ ug/m}^3$) Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid (1987).

j / i	m	M	$\text{gmr}(i, j)$	$\text{std}(\text{gmr}(i, j))$ (Prozent)
ALTE / BOTT	59	323	.105	5,7
GELS / BOTT	58	318	.069	5,1
GLAD / BOTT	57	330	.107	3,0
HERT / BOTT	49	294	.104	7,4
LEIT / BOTT	59	316	.178	4,4
OSTE / BOTT	59	328	.049	6,0
STYR / BOTT	56	304	.116	7,1
ASSE / DORT	36	323	.127	4,0
BRAM / DORT	32	314	.087	9,5
FROH / DORT	32	319	.021	7,3
HERD / DORT	38	345	.068	4,7
ICKE / DORT	37	325	.085	7,6
NIED / DORT	34	313	.033	12,0
SCHW / DORT	35	339	.094	5,0
WITT / DORT	37	323	.054	6,1
BOCH / HERN	47	326	.115	4,5
FROH / HERN	39	321	.074	7,9
GELS / HERN	47	323	.030	14,7
HERT / HERN	40	299	.089	11,7
ICKE / HERN	46	331	.050	6,7
LEIT / HERN	46	322	.096	5,5
RECK / HERN	47	334	.121	5,4
WITT / HERN	45	325	.141	4,8
BUCH / MEID	34	314	.053	9,5
BUDB / MEID	34	308	.115	9,0
KALD / MEID	35	303	.048	12,7
MEER / MEID	26	299	.126	12,0
OSTE / MEID	35	326	.124	6,6
STYR / MEID	35	300	.027	12,9
WALS / MEID	30	294	.060	13,7
Mittelwert:				7,7
Standardabweichung:				3,2

Man erkennt, daß die Standardabweichungen der MSF für die erhöhten Tagesmittelwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$) um ca. 60 Prozent größer sind als diejenigen der MSF für alle Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid. Sie liegen im Bereich zwischen 3 und 15 Prozent. Der arithmetische Mittelwert liegt bei ca. 8 Prozent.

Die geringsten Standardabweichungen unter den betrachteten Stationen weisen mit 5,5 Prozent im Mittel die MSF der erhöhten Werte ($>100 \text{ ug/m}^3$) der Bezugsstation Bottrop-Welheim (BOTT) auf, die größten mit durchschnittlich 11 Prozent diejenigen der Bezugsstation Duisburg-Meiderich (MEID).

4.3 Standardabweichung der Isolinien

Die vorhandenen statistischen Unsicherheiten der MSF schlagen sich natürlich auch bei den resultierenden Isolinien nieder. Eine Abschätzung für die Standardabweichung der interpolierten Werte $gm(i,x)$ erhält man durch folgende konservative Relation:

$$\frac{\text{std}(gm(i,x))}{gm(i,x)} = \frac{\text{std}(gm(i,j))}{gm(i,j)} \quad (21)$$

Diese Unsicherheit beeinflusst letztlich die radiale Lage der interessierenden Isolinie. Die daraus resultierende Standardabweichung des Abstandes $riso$ von der Bezugsstation kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$\frac{\text{std}(h)}{riso} = \frac{\text{std}(gm(i,j))}{gm(i,j)} \quad (22)$$

Entsprechend dieser Abschätzung weist die radiale Lage der Eckpunkte der in den Abb.11-14 (siehe Anhang) dargestellten Isolinien für Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid im Mittel eine Standardabweichung von ca. 5 Prozent auf.

Die in den Abb.19-22 (siehe Anhang) wiedergegebenen Isolinien für erhöhte Tagesmittelwerte ($>100 \text{ ug/m}^3$) weisen im Mittel eine Standardabweichung von ca. 8 Prozent auf.

4.4 Einfluß unterschiedlicher Bezugsjahre

Neben dem Einfluß von Ausfallwerten ist insbesondere von Interesse, inwieweit sich die Bezugsflächen einer Meßstation aus aufeinander folgenden Meßjahren unterscheiden. Es wäre für Anwendungen wünschenswert, wenn diese Unterschiede nicht allzu groß wären. Für die Untersuchung dieser Frage werden hier für die in den vorangehenden Abschnitten betrachteten Stationen die entsprechenden Bezugsflächen für die Jahre 1985 und 1986 ermittelt.

Die Ergebnisse für alle Tagesmittelwerte ($>0 \text{ ug/m}^3$) von Schwefeldioxid sind in den Abb. 23-30 (siehe Anhang) zusammengestellt. Bei den Meßstationen Bottrop-Welheim (BOTT) und Dortmund (DORT) sind Ähnlichkeiten der Bezugsflächen zwischen den Jahren 1985 und 1986 erkennbar und Abweichungen von den Konturen im Jahr 1987 (Abb. 11, 12). Diese Abweichungen sind darauf zurückzuführen, daß in den Jahren 1985 und 1986 noch einige Meßstationen nicht ganzjährig vorhanden waren, die im Jahr 1987 berücksichtigt werden konnten. Am Beispiel der Meßstationen Herne (HERN) und Duisburg-Meiderich (MEID) sind die jahresbedingten Einflüsse gut erkennbar.

In den Abb. 31-38 (siehe Anhang) sind die jahresbedingten Einflüsse auf die MSF der erhöhten ($>100 \text{ ug/m}^3$) der Tagesmittelwerte von Schwefeldioxid dargestellt. Bei den Meßstationen Bottrop-Welheim (BOTT) und Dortmund (DORT) ist wiederum der Einfluß der fehlenden Stationen in den Jahren 1985 und 1986 erkennbar. Die Unterschiede zwischen den Jahren 1985, 1986 und 1987 sind für die erhöhten Tagesmittelwerte größer als im Mittel über alle Tagesmittelwerte. Zu bedenken ist dabei jedoch, daß die Jahre 1985 und 1987 jeweils durch eine Smogepisode im Januar gekennzeichnet waren. Es ist zu erwarten, daß dieser Einfluß sich bei den erhöhten Tagesmittelwerten in der Weise bemerkbar macht, daß die Größe der Bezugsflächen wächst.

5. SCHLUßFOLGERUNGEN

Die vorgestellte Methode zeigt einen vergleichsweise einfachen Weg auf, die räumliche Repräsentativität kontinuierlicher Immissionsmessungen und daraus abgeleiteter Kenngrößen zu beschreiben. Dies wird möglich durch Zuordnung von Bezugsflächen zu den Meßstationen in Meßnetzen. Diese werden von Linien gleicher Schätzfehler eingeschlossen, welche auf sehr einfachem Weg bestimmt werden. Diese Isolinien kennzeichnen die zu erwartende prozentuale Abweichung der Vergleichsgrößen innerhalb dieser Bezugsflächen von den entsprechenden, an der eingeschlossenen Meßstation festgestellten Werten. Als Vergleichsgrößen werden neben Halbstunden-, Tagesmittelwerte auch Perzentile (Median, 98%-Wert) dieser Werte betrachtet.

Zur Ermittlung einer derartigen Bezugsfläche werden neben den Meßwerten der Bezugsstation auch die zeitgleichen Meßwerte aller benachbarten Stationen aus einem Umkreis von 13 km Radius herangezogen. Diese Einschränkung des Umfeldes wurde vorgenommen, um die Annahme eines linearen Verlaufes der modifizierten Strukturfunktion in der Umgebung der Bezugsstation möglichst weitgehend zu erfüllen. Wegen dieser Annahme gelten die Resultate uneingeschränkt nur soweit man sich nicht im Nahbereich bedeutender bodennaher Quellen befindet. Zur Abschätzung von Immissionsbelastungen in der Nachbarschaft stark befahrener Straßen ist diese Methode daher nicht geeignet.

Im übrigen gestattet die beschriebene Methode, die Unsicherheiten bei einer flächendeckenden Anwendung vorhandener Immissionskenngrößen durch Angabe von Schätzfehlern abzuschätzen. Damit wird ein objektiver Vergleich der Leistungsfähigkeit von Meßnetzen der Luftqualität hinsichtlich der Erfassung räumlicher Immissionsstrukturen möglich, auch wenn diese nach unterschiedlichen Kriterien konzipiert wurden.

Auf dieser Basis ist es möglich, die Unsicherheit über vorhandene Immissionskenngrößen als Kriterium für die Konzeption und Optimierung von Meßnetzen heranzuziehen. Eine entsprechende Forderung könnte folgendermaßen lauten:

Ein Luftqualitätsmeßnetz soll es ermöglichen, die gewünschten Luftqualitätsparameter der interessierenden Luftbeimengungen in einer vorgegebenen Fläche mit einer vorgegebenen maximalen Unsicherheit (= 2x Standardabweichung) zu bestimmen.

Im Fall der Optimierung wären danach zusätzliche Meßstationen dort einzurichten, wo die Unsicherheit über vorhandenen Immissionskenngrößen den vorgegebenen Maximalwert übertreffen. Eine hinreichende Überwachung der Luftqualität wäre gewährleistet, wenn die Unsicherheiten der interessierenden Luftqualitätsparameter in dem vorgegebenen Überwachungsgebiet eine zu vereinbarende Schwelle nicht überschreiten.

Werden die vorhandenen Unsicherheiten auf diese Weise begrenzt, so sind auch Abschätzungen über die höchsten zu erwartenden Werte von Kenngrößen der Luftqualität in der Umgebung der vorhandenen Meßstationen möglich. Dadurch können auch die Forderungen der EG-Richtlinie 80/779/EWG sinngemäß erfüllt werden.

Die EG-Richtlinie 80/779/EWG fordert formal die Bewertung der von Immissionsbelastungen an den vermutlich am höchsten belasteten Orten durch Messungen. Dabei bleibt jedoch offen,

1. nach welcher Kenngröße sich die Auswahl der Meßorte richten soll und
2. wie zuverlässig die Vermutungen über den Ort der höchsten Belastung sein sollen.

Demzufolge bleibt auch die Zuverlässigkeit von Kenngrößen, die nach diesen Kriterien ermittelt werden, fraglich. Um zu einer harmonisierten Anwendung der EG-Richtlinie 80/779/EWG zu gelangen, sind deshalb in punkto räumliche Zuverlässigkeit der zu ermittelnden Immissionskenngrößen konkrete Anforderungen zu stellen.

Die Anwendung der Methode setzt ein Meßnetz voraus, wobei für die Erzeugung geschlossener Isolinien zu einer Bezugsstation mindestens 4 Nachbarstationen in dem betrachteten Umkreis von 13 km Radius benötigt werden. Die Methode kann jedoch auch auf kleinere Meßnetze bestehend beispielsweise aus 4 benachbarten Meßstationen in einem Stadtgebiet angewandt werden. Man erhält dann zwar keine geschlossenen Iso-

linien, im Gebiet zwischen den Meßstationen jedoch Isoli-niensegmente, welche Aussagen über die räumliche Repräsen-tativität der betrachteten Meßstationen für das eingeschlos-sene Gebiet ermöglichen.

Von Bedeutung sind die Ergebnisse der beschriebenen Methode auch für Fragestellungen der Interpolation von Kenngrößen der Luftqualität zwischen existierenden Meßstationen. Notwendige Voraussetzung für die Zulässigkeit einer derartigen Interpolation ist ein monotoner Anstieg der modifizierten Strukturfunktion zwischen den betrachteten Stationen. Die Frage der Monotonie kann jedoch nur beantwortet werden, wenn in der betrachteten Richtung mindestens 3 Meßstationen in Reihe liegen, also nur in ausgedehnten Meßnetzen.

Außerdem kann mit Hilfe der modifizierten Strukturfunktion der Interpolationsfehler bei der Interpolation von Kenngrößen der Luftqualität abgeschätzt werden. Geeignete Methoden hierfür können angegeben werden, sind jedoch nur für mathematisch versierte Anwender zu empfehlen <7,8>.

Hinsichtlich der Abschätzung von Extremwerten in der Nachbarschaft von Meßstationen ist die beschriebene Methode als konservativ einzustufen. Liegt beispielsweise eine Meßstation in einem Belastungsschwerpunkt, so treten in der Umgebung große Konzentrationsgradienten auf. Diese führen zu größeren Werten der MSF als in homogeneren Umgebungen. Eine direkte Folge sind kleinere Bezugsflächen der hochbelasteten Stationen. Je kleiner die Bezugsfläche, desto extremer ist die Lage der betreffenden Meßstation mit Blick auf die Immissions-situation. Ob es sich bei einer derartigen Station um ein Immissionsmaximum oder -minimum handelt, kann durch Vergleich mit den vorhandenen Nachbarstationen leicht geklärt werden.

Die Anwendung dieser Methode ist nicht auf Schwefeldioxid beschränkt, sie kann mit den bereits erwähnten Einschränkungen ausgedehnt werden auf alle Schadstoffe, von denen zeitgleiche Meßwerte aus einem Meßnetz vorliegen, beispielsweise Stickstoffdioxid, Ozon, Schwebstaub und Staubinhaltsstoffe.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß die Ergebnisse der vorgestellten Methode jederzeit durch ergänzende stichprobenartige Messungen, beispielsweise von Tagesmittelwerten, nachgeprüft werden können. Diese experimentelle Überprüfung sollte regelmäßig durchgeführt werden.

SCHRIFTTUM:

- <1> Richtlinie des Rates vom 15 Juli 1980 (80/779/EEC) über Grenzwerte und Leitwerte für Schwefeldioxid und Schwebestaub, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (1980) L229/30.
- <2> Richtlinie des Rates vom 7. März 1985 (85/203/EEC) über Öuftqualitätsnormen für Stickstoffdioxid, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (1985) L87/1.
- <3> Richtlinie des Rates vom 3. Dezember 1982 (82/884/EWG) betreffend einen Grenzwert für den Bleigehalt in der Luft, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften (1982) L378/15
- <4> Beier, R., P.-L. Gonzalez, G. McInnes, E. Muylle and D. Onderdelinden: EEC Directive 80/779/EEC: A study of network design for monitoring suspended particulates and sulphur dioxide in the Member States, Report EUR 10647, Office for Official Puplications of the European Communities, Luxembourg, (1986)
- <5> Van Egmond, N.D., Onderdelinden, D., Kessebohm, H.. An Objective Procedure for Air Pollution Monitoring Network Design. EC-Workshop on Monitoring Sulfur Dioxide, Black Smoke and Suspended Particulates, RIVM, Bilthoven, (1984)
- <6> Gonzalez, P-L., Chami, H.: Amelioration d'un Reseau de Surveillance de la Pollution Atmospherique. Rairo Automatique/Systems Analysis and Control, vol.18, 369 (1984)
- <7> Beier, R. und A. Doppelfeld: Räumliche Repräsentativität kontinuierlicher Immissionsmessungen in Nordrhein-Westfalen, Staub-Reinhaltung der Luft, Bd.47 (1987), 16-21.
- <8> G. Matheron, "The Theory of Regionalized Variables", Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau, No 5 (1971).
- <9> Clark, J, "Practical Geostatistics", Applied Science Publishers Ltd, London (1979)
- <10> Munn, R.E., "The Design of Air Quality Monitoring Networks", MacMillan Publishers Ltd., London (1981))
- <11> Langstaff, J., Seigneur, C., Liu, M.-K., Behar, J., McElroy, J.L.: Design of an Optimum Air poluttion Monitoring Network for Exposure Assessment, Atmos. Envir. vol 21, pp1393-1410 (1987)

- <12> Buck, M., Pfeffer, H-U.: Air Quality Surveillance in the State North-Rhine-Westphalia (F.R.Germany), LIS-Report No.70, Landesanstalt für Immissionsschutz, Essen (1987).
- <13> Watson D.F.: ACORD: Automatic Contouring of Raw Data, Computers & Geosciences, vol 8, p97-101 (1982)
- <14> Miller, R.G: The Jackknife - a review, Biometrika, vol.61, p1-15 (1974)

ABBILDUNGEN:

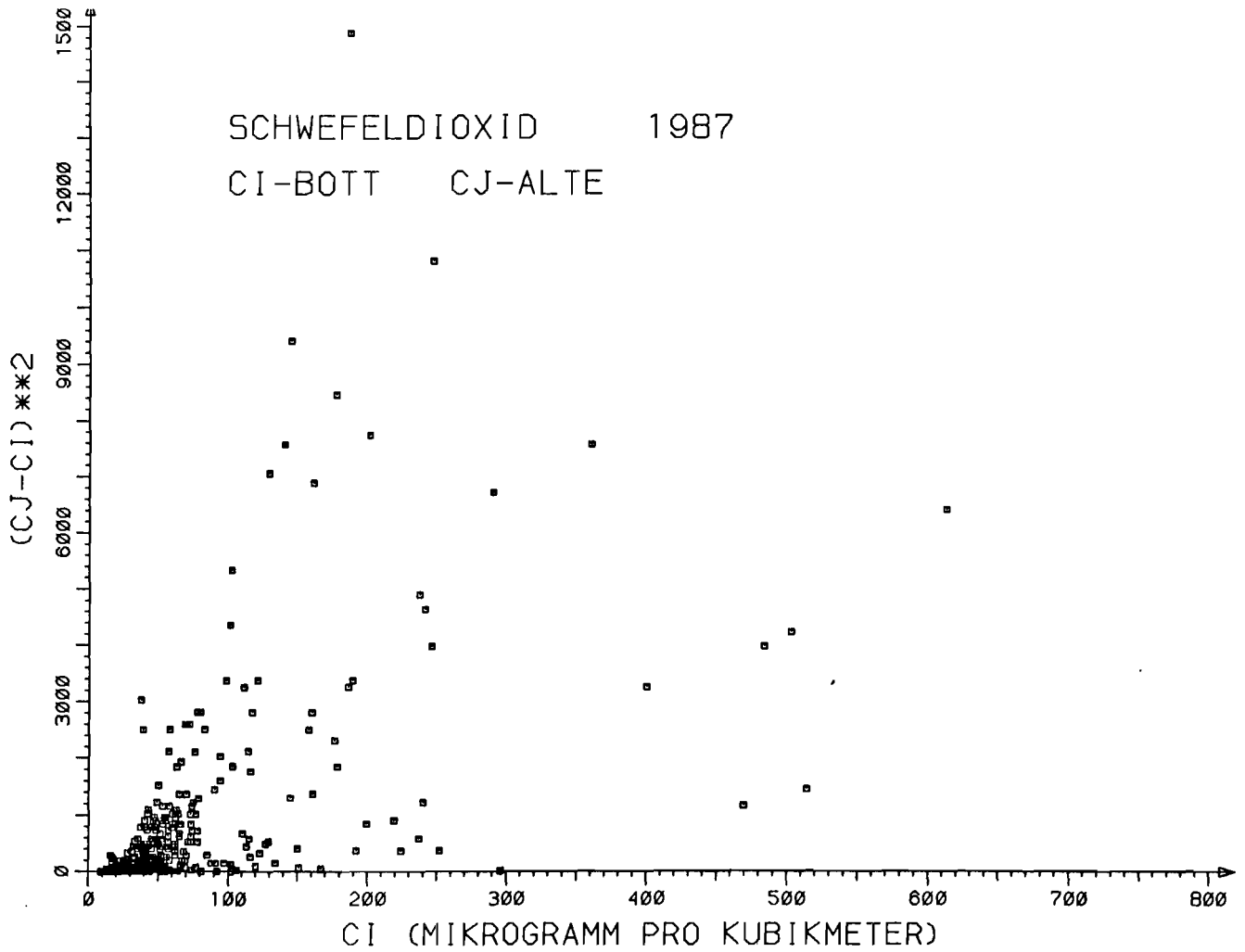


Abb. 1 : Verteilung der Abweichungsquadrate als Funktion der Konzentration.

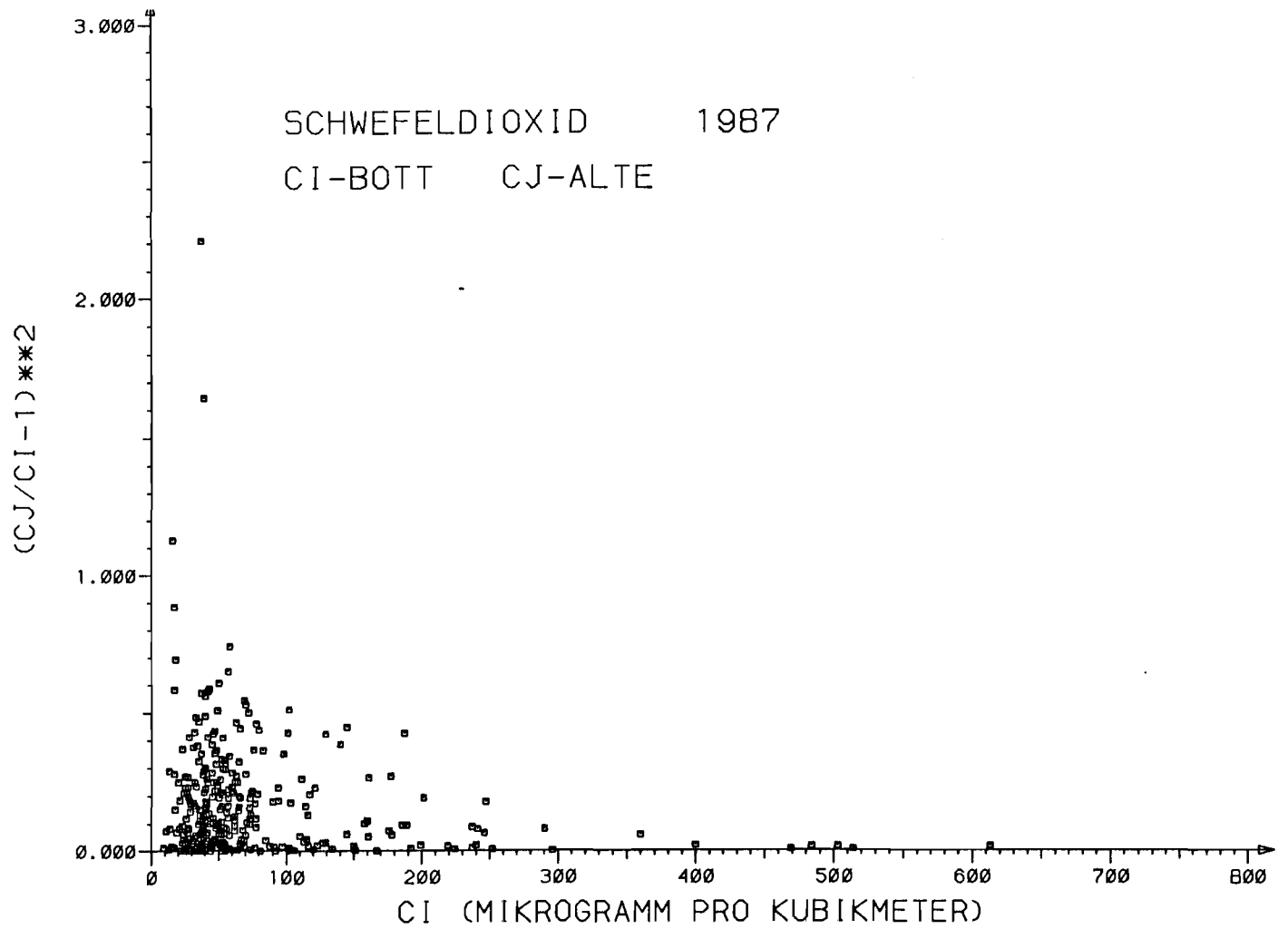


Abb. 2 : Verteilung der Quadrate der relativen Abweichungen als Funktion der Konzentration.

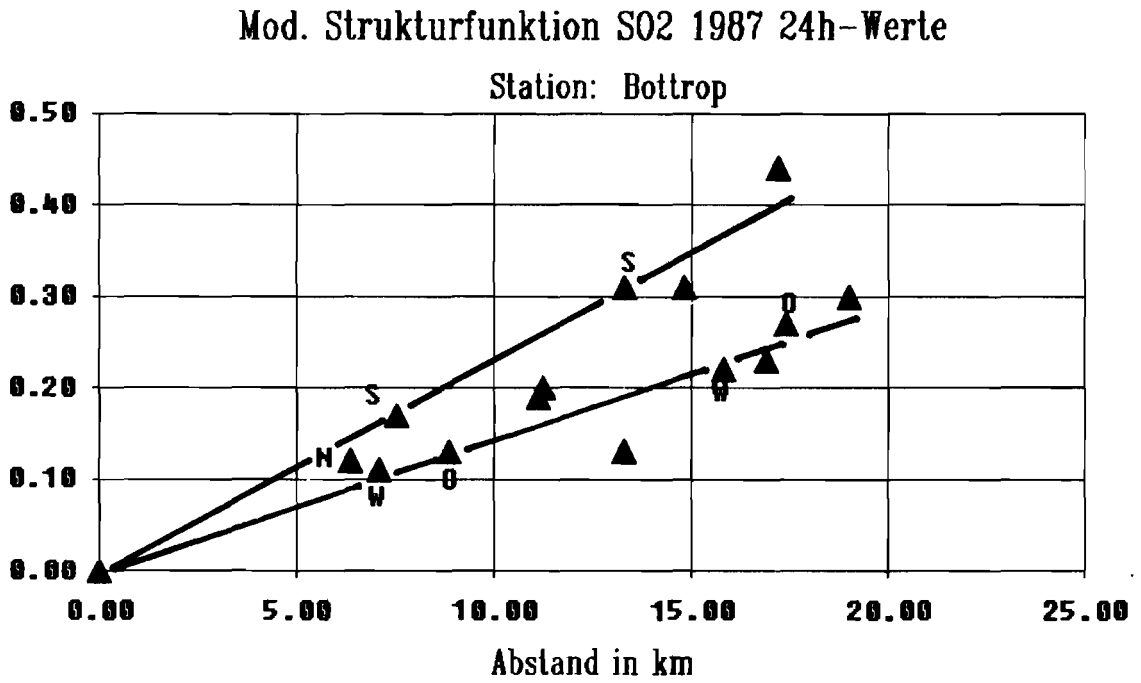


Abb. 3 : Verlauf der MSF in der Umgebung der Station BOTT.
Daten: Tagesmittelwerte Schwefeldioxid 1987

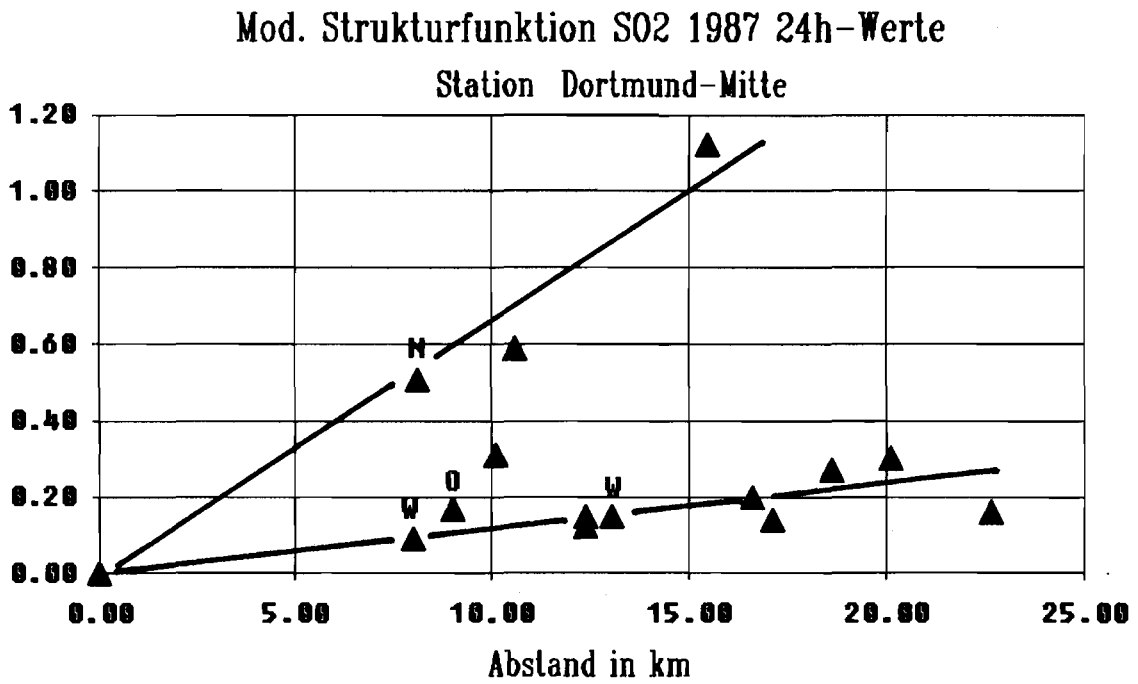


Abb. 4 : Verlauf der MSF in der Umgebung der Station DORT.
Daten: Tagesmittelwerte Schwefeldioxid 1987

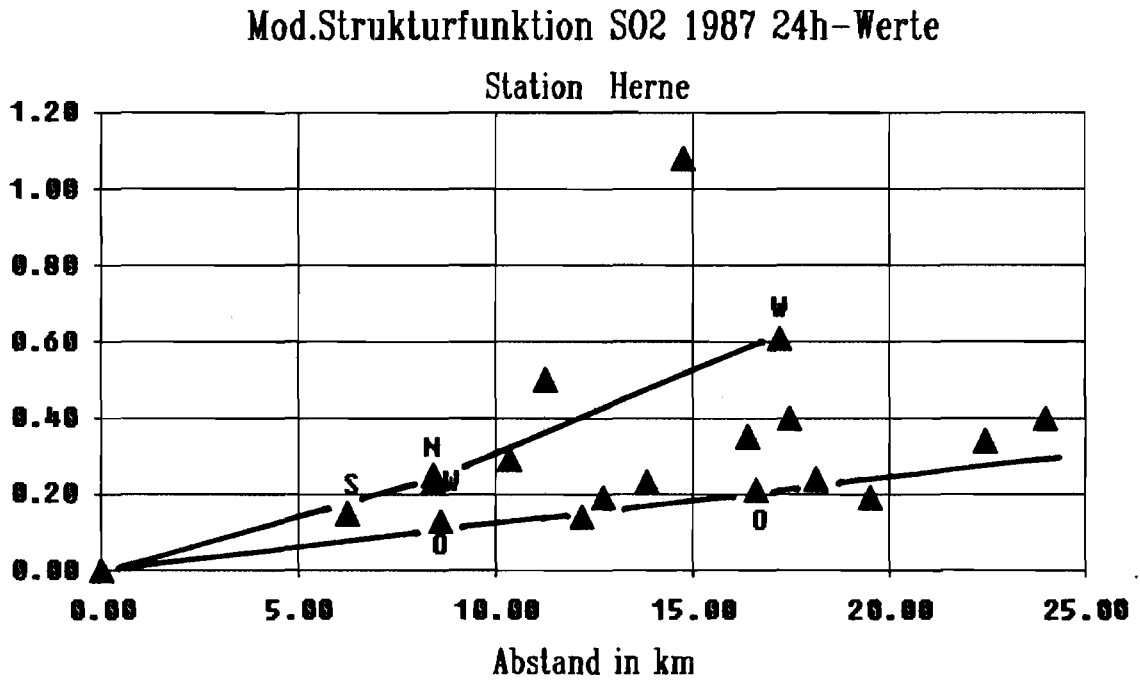


Abb. 5 : Verlauf der MSF in der Umgebung der Station HERN.
Daten: Tagesmittelwerte Schwefeldioxid 1987

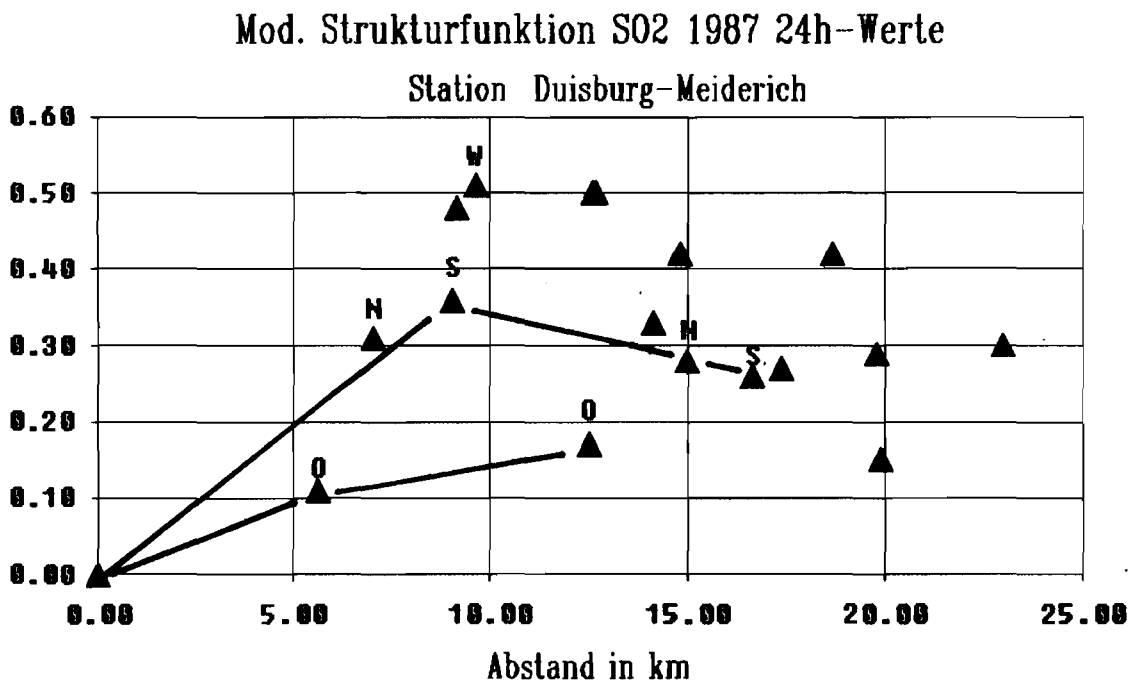
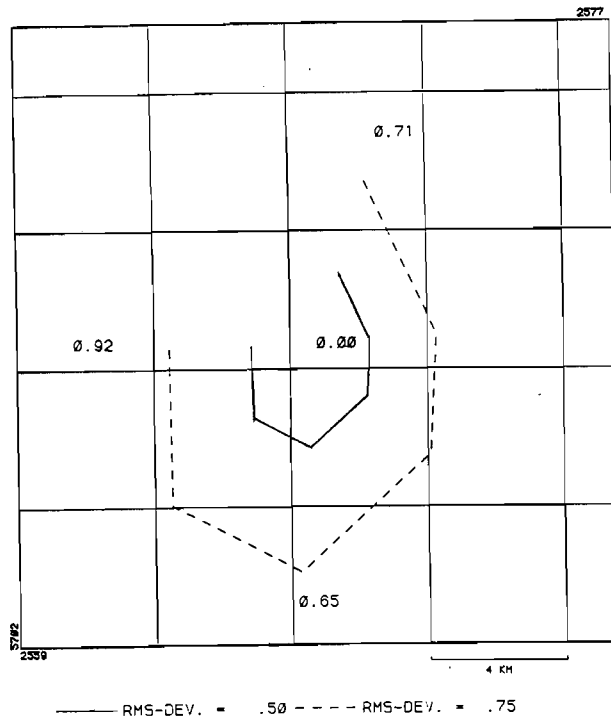


Abb. 6 : Verlauf der MSF in der Umgebung der Station MEID.
Daten: Tagesmittelwerte Schwefeldioxid 1987

a)



b)

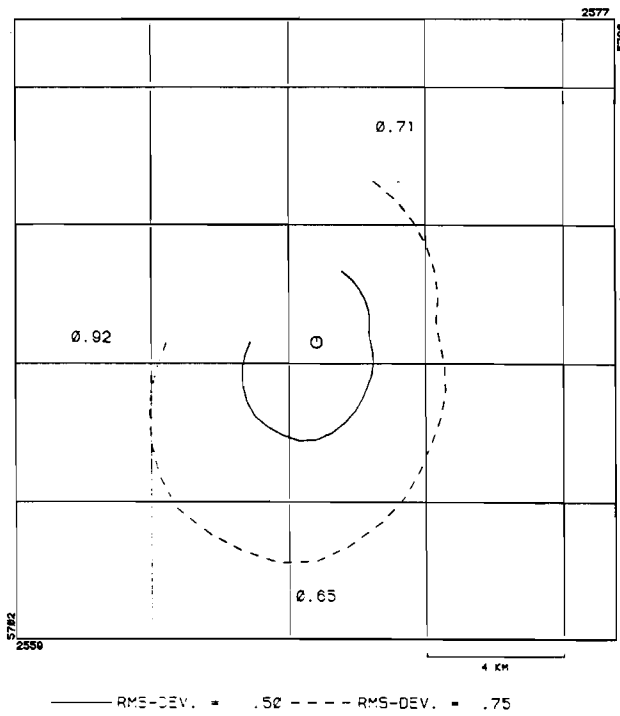


Abb. 7 : Isolinien der MSF von Halbstundenwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987.
 Station: Bottrop-Welheim

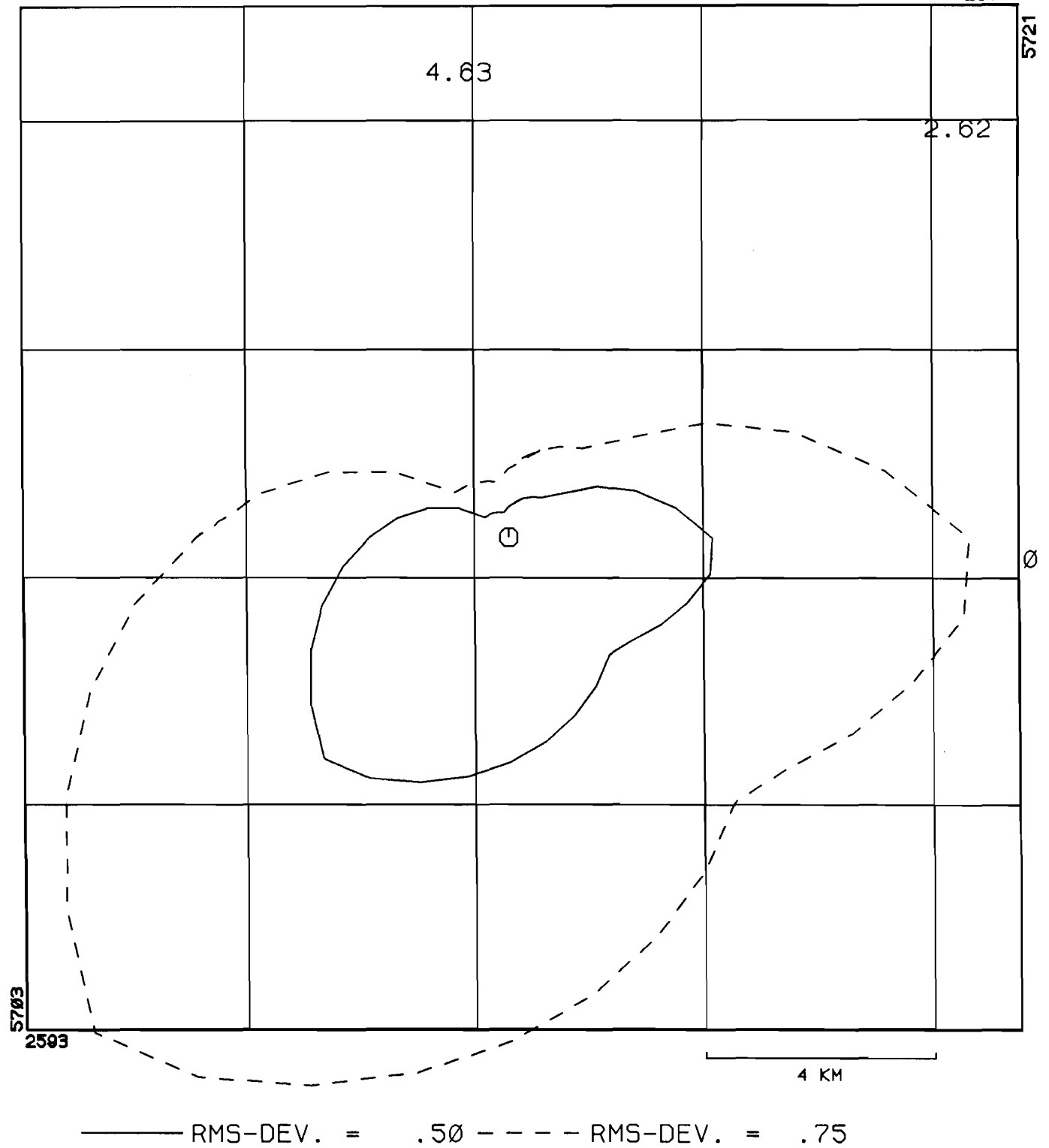
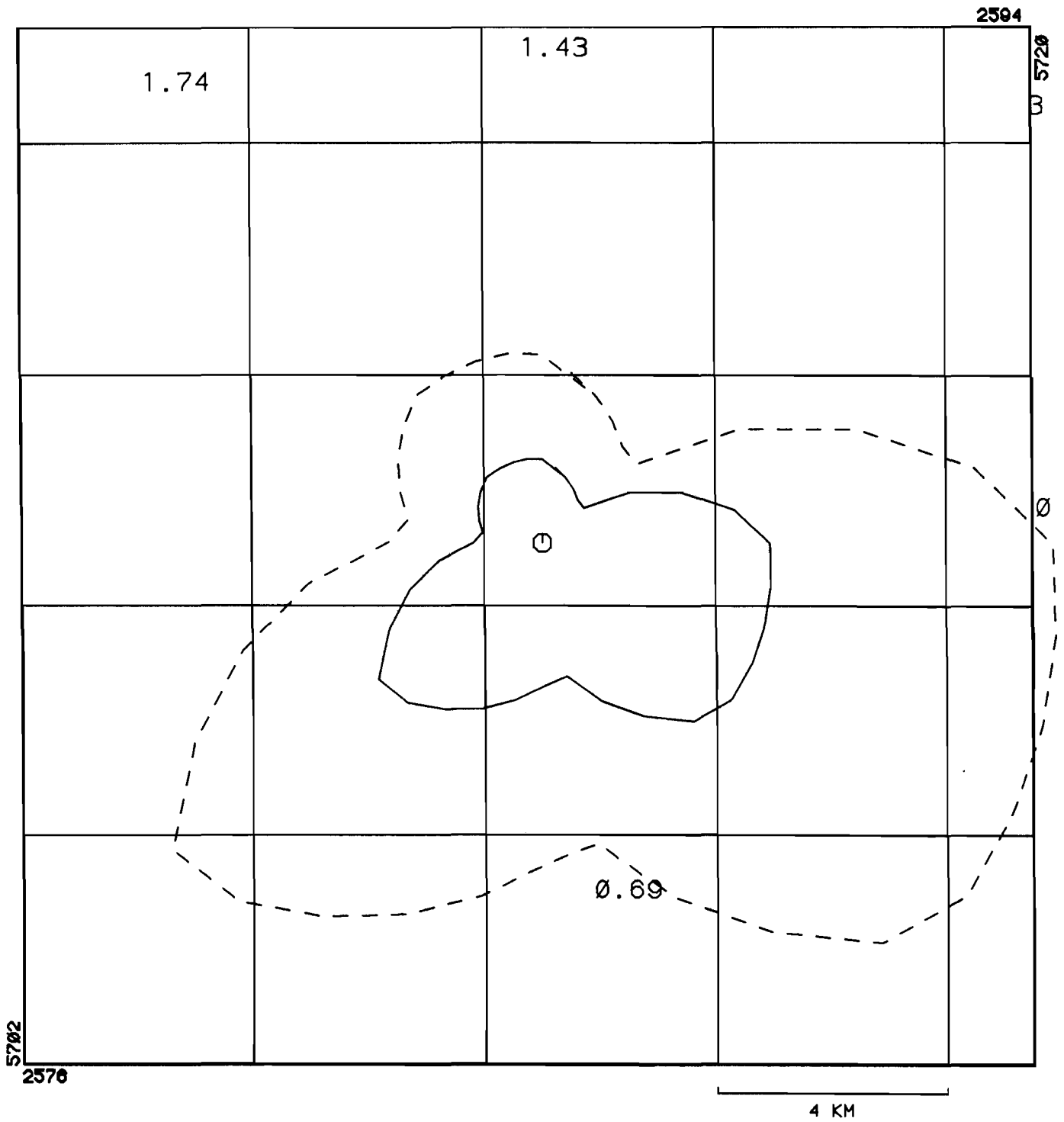
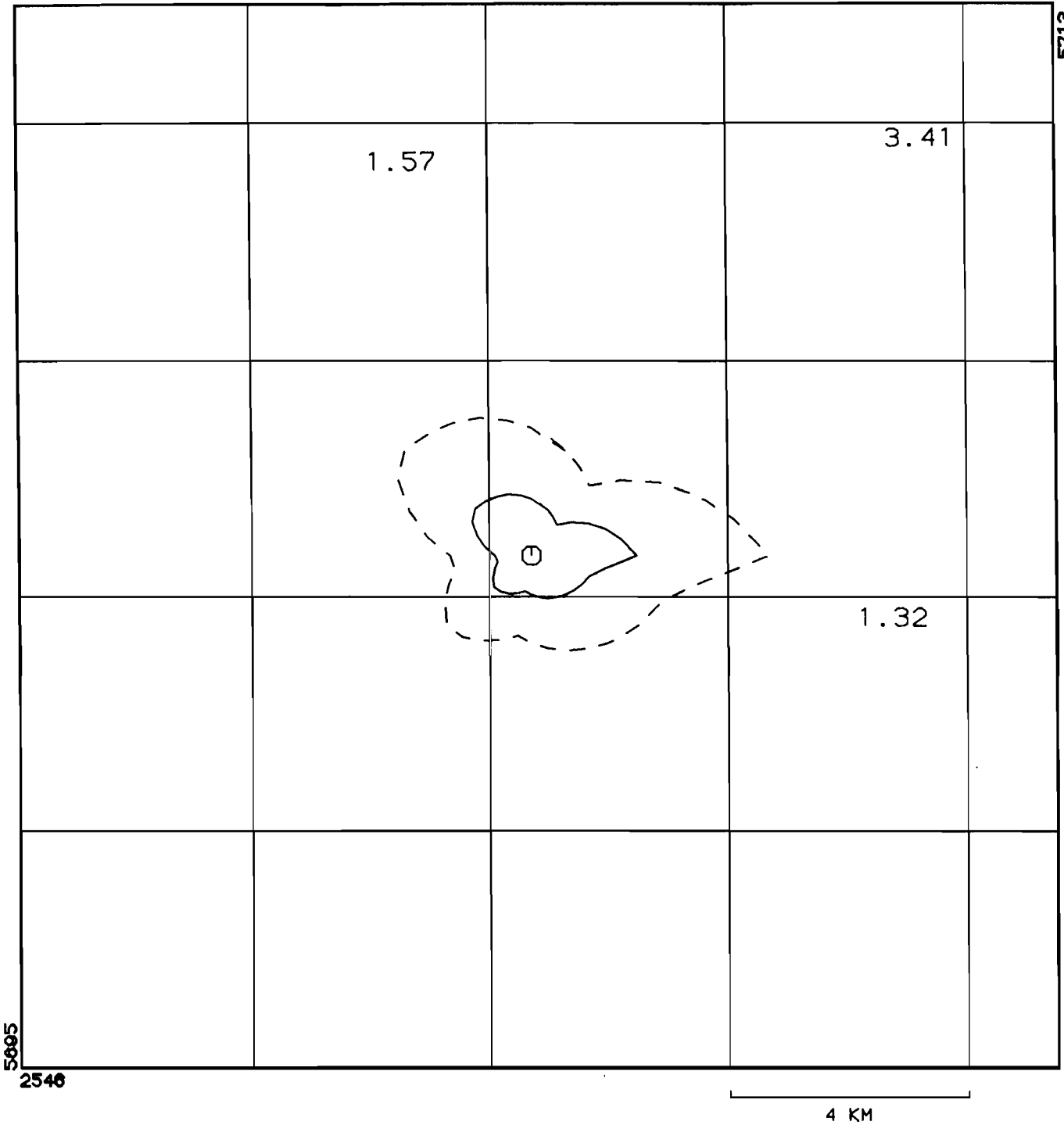


Abb. 8 : Isolinien der MSF von Halbstundenwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987.
 Station: Dortmund-Mitte



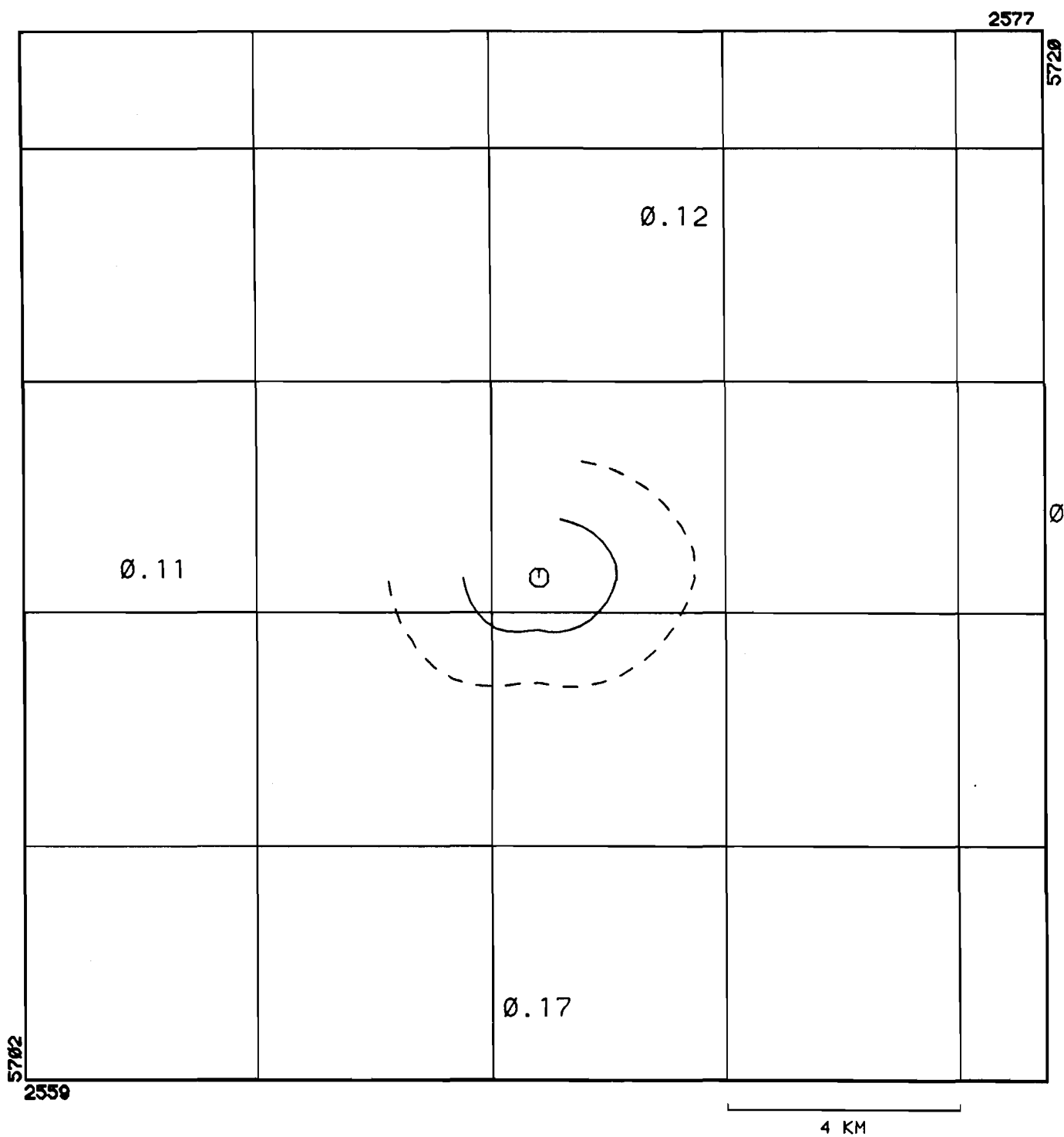
———— RMS-DEV. = .50 - - - - RMS-DEV. = .75

Abb. 9 : Isolinien der MSF von Halbstundenwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987.
 Station: Herne



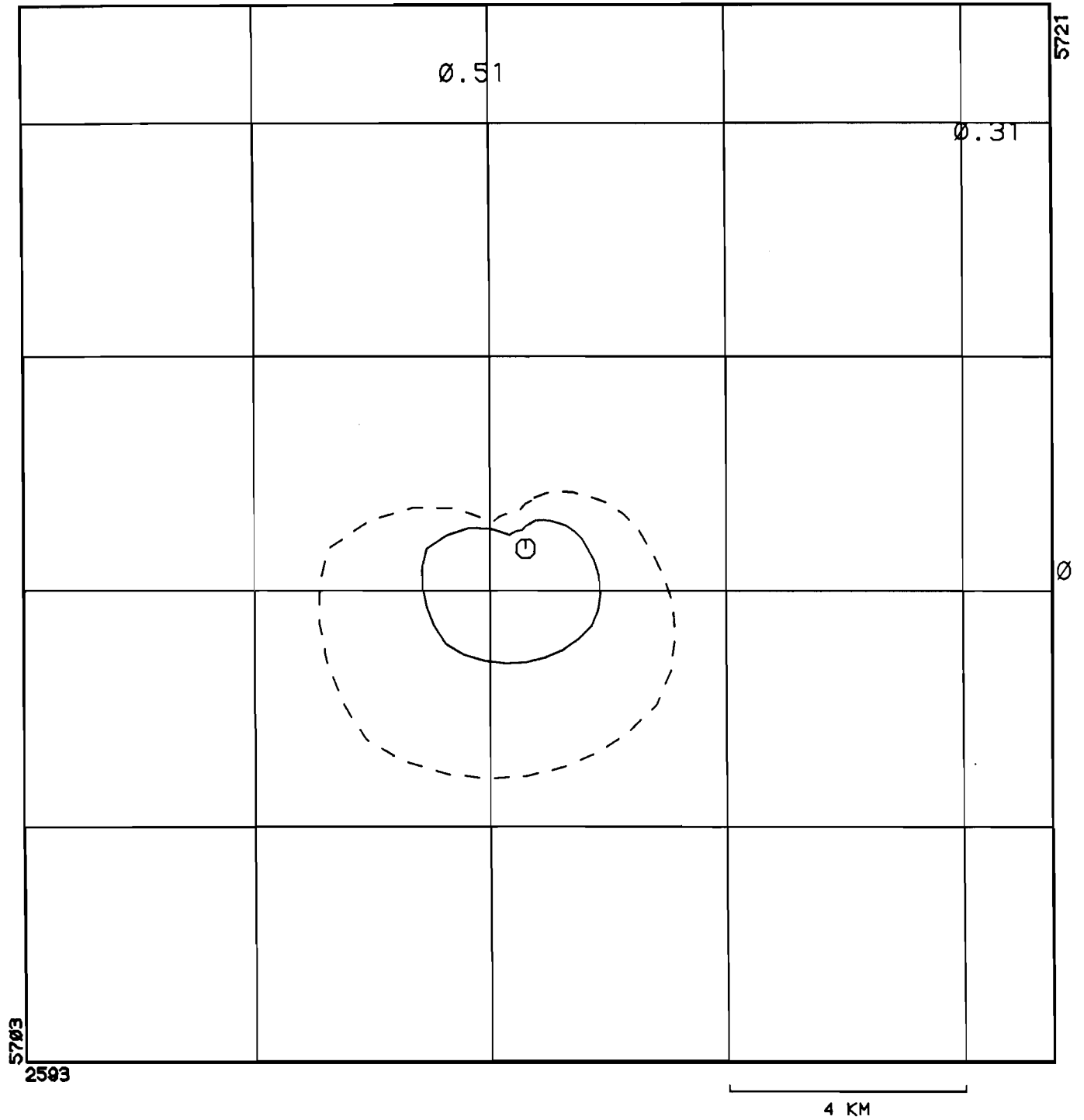
—— RMS-DEV. = .50 - - - - RMS-DEV. = .75

Abb.10 : Isolinien der MSF von Halbstundenwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987.
 Station: Duisburg-Meiderich



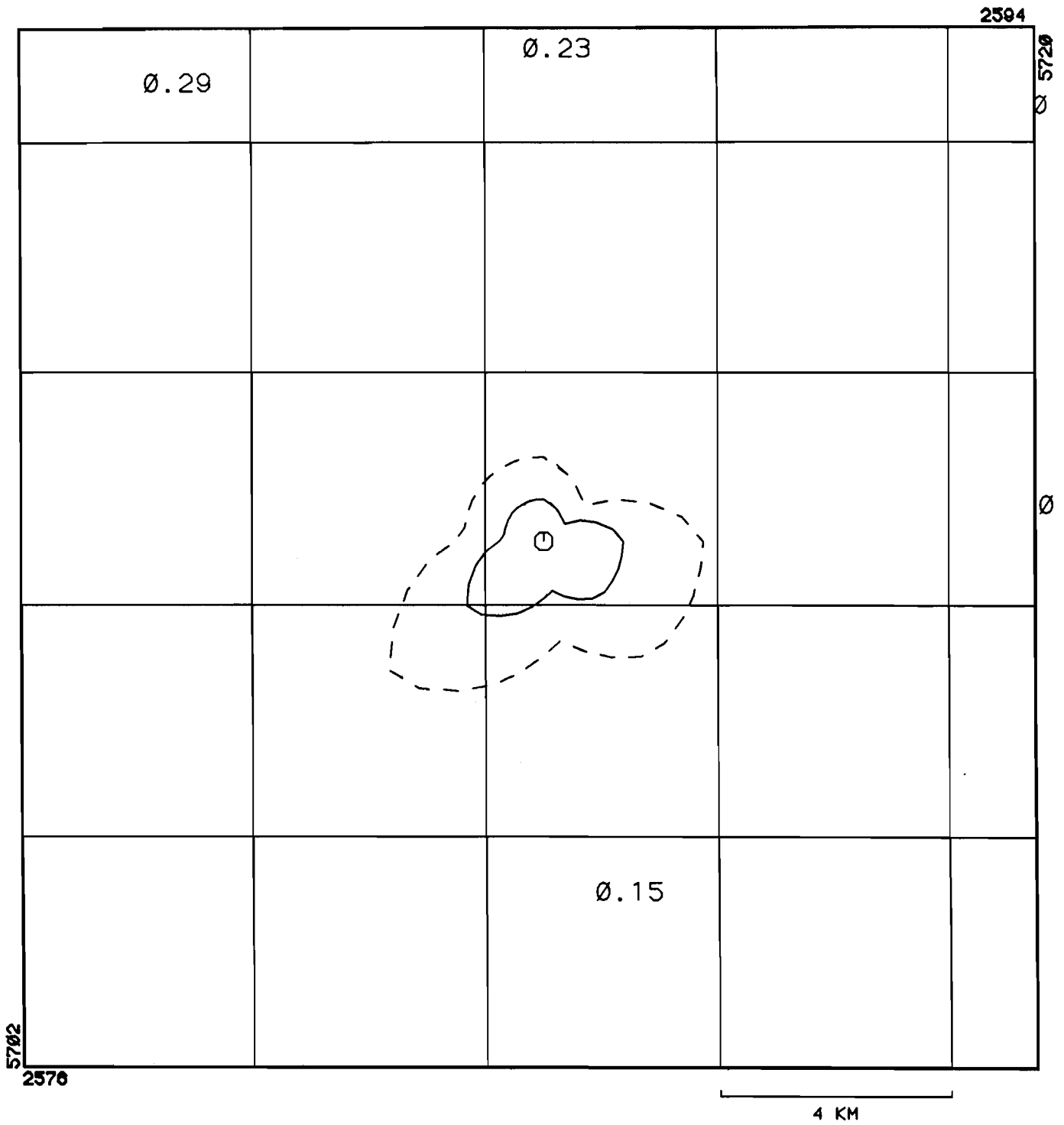
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.11 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Bottrop-Welheim



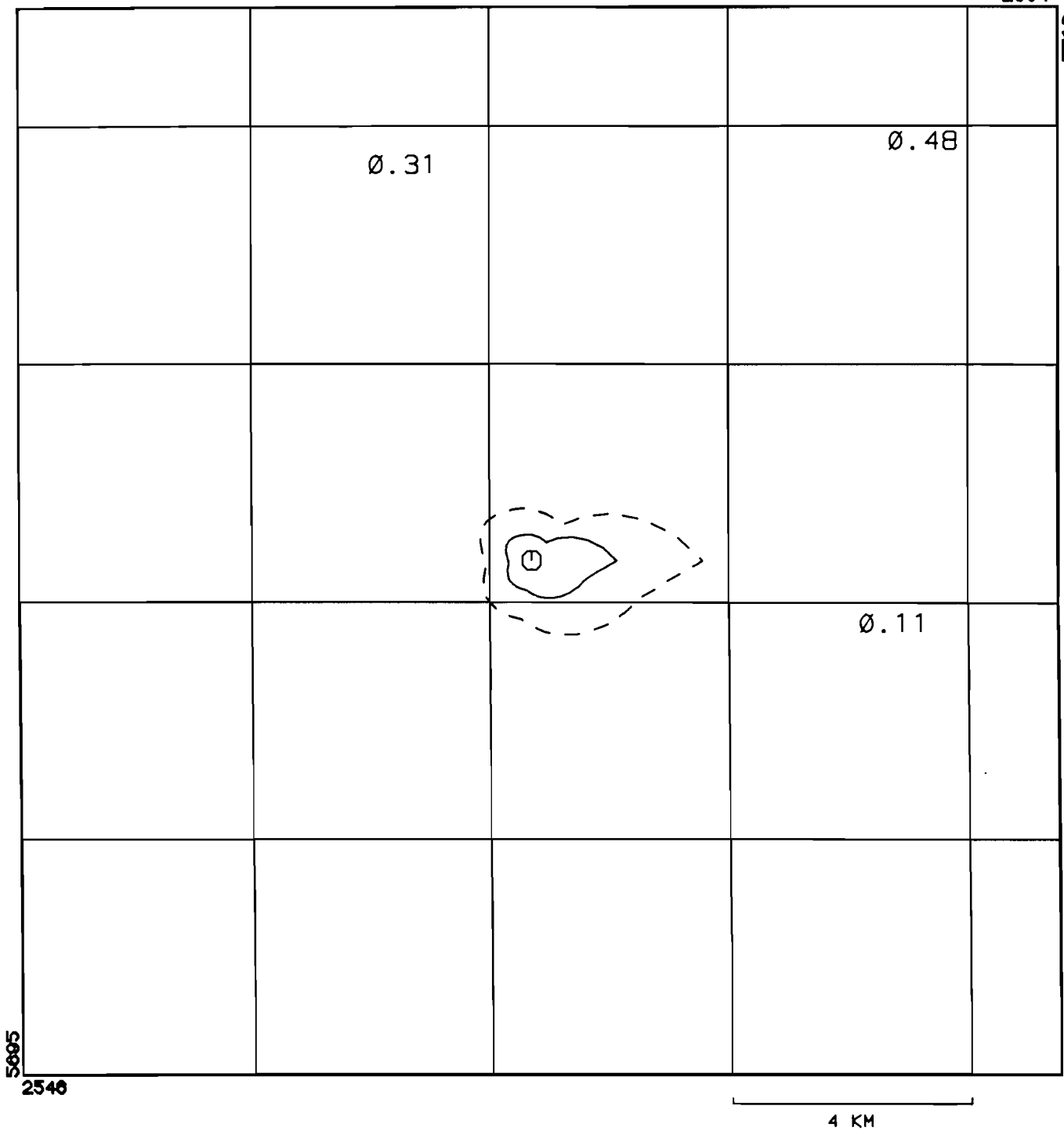
——— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.12 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Dortmund-Mitte



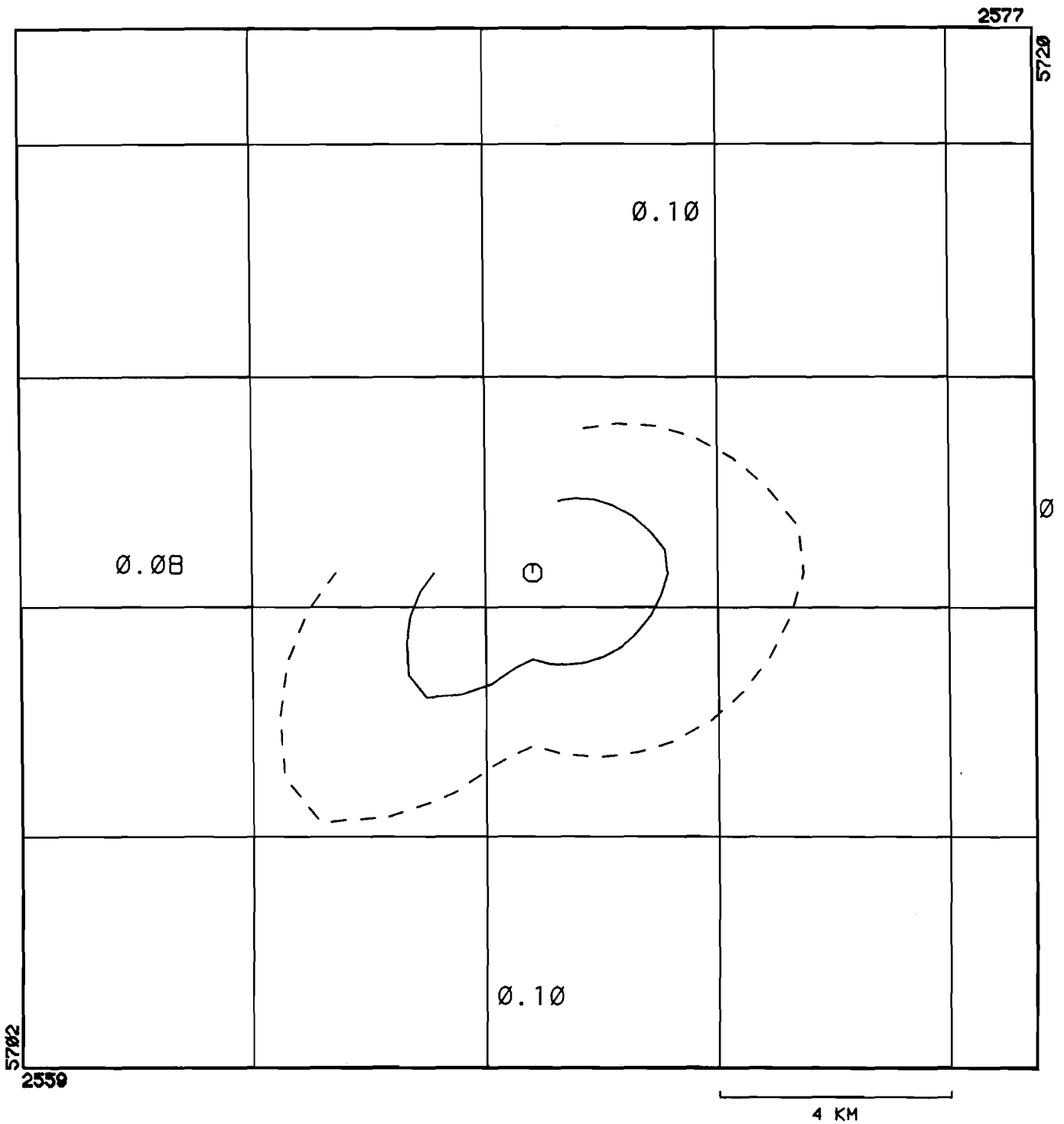
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.13 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Herne



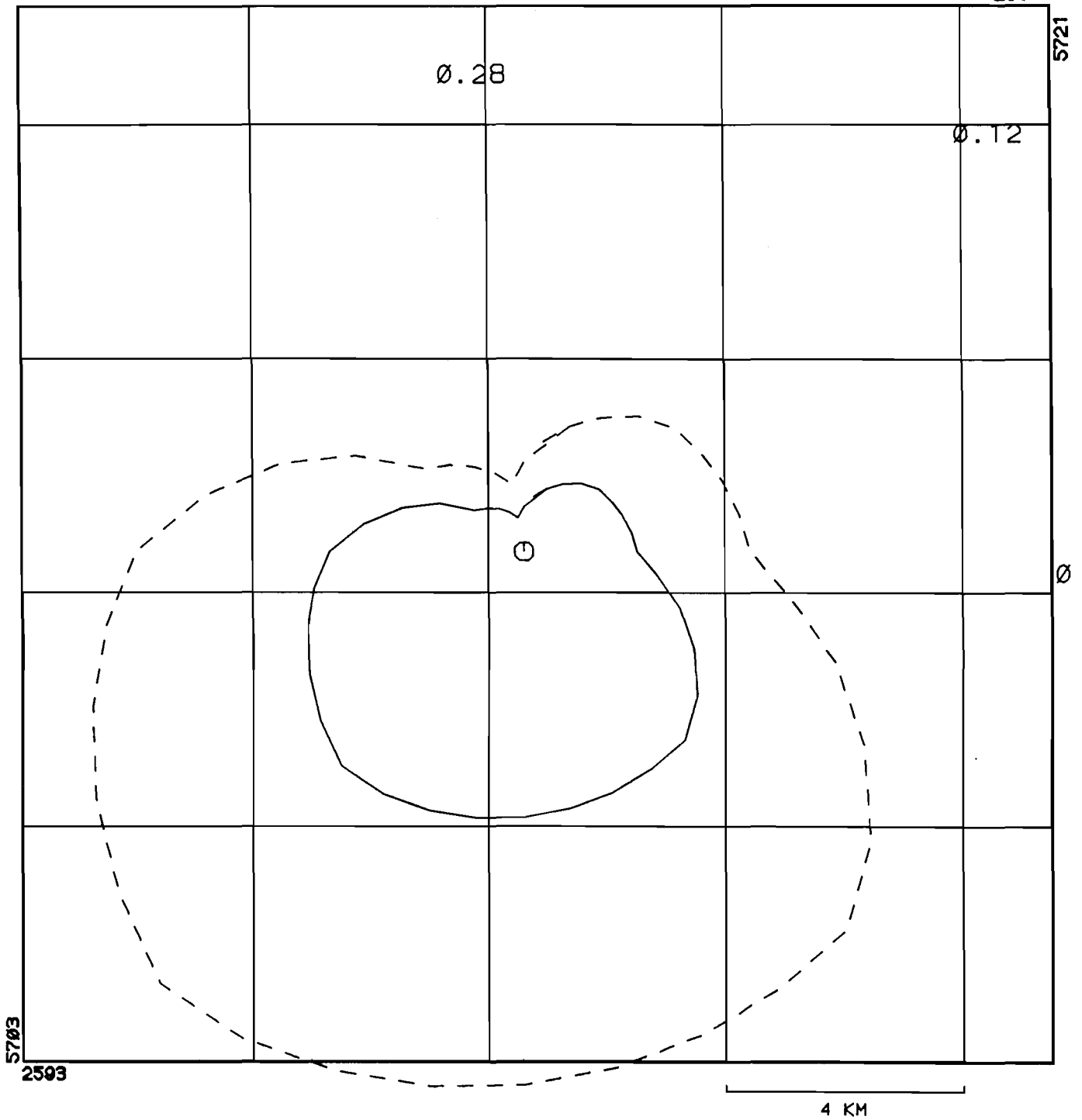
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.14 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Duisburg-Meiderich



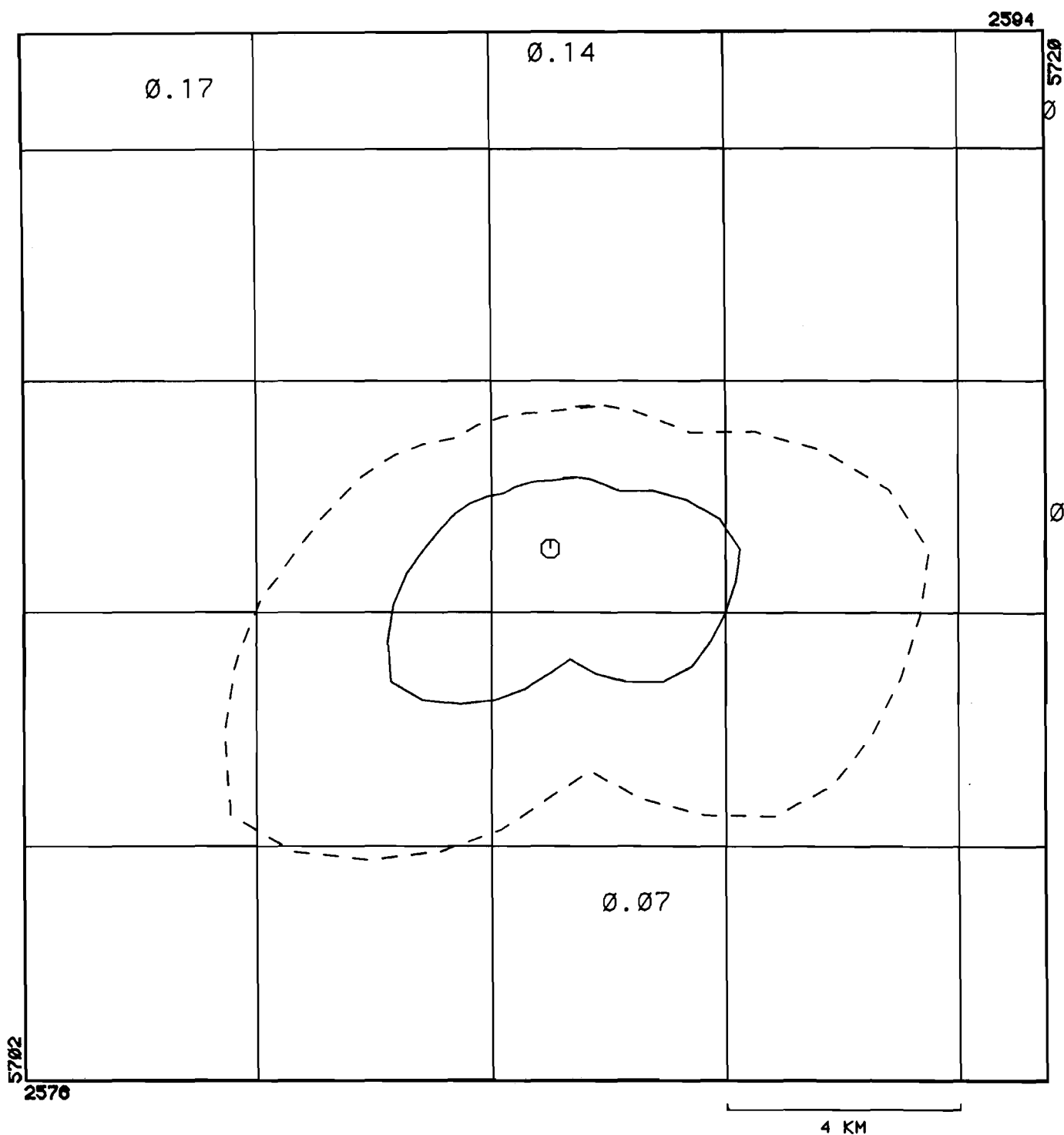
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.15 : Isolinien der MSF von erhöhten ($>100 \text{ ug/m}^3$)
Halbstundenwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Bottrop-Welheim



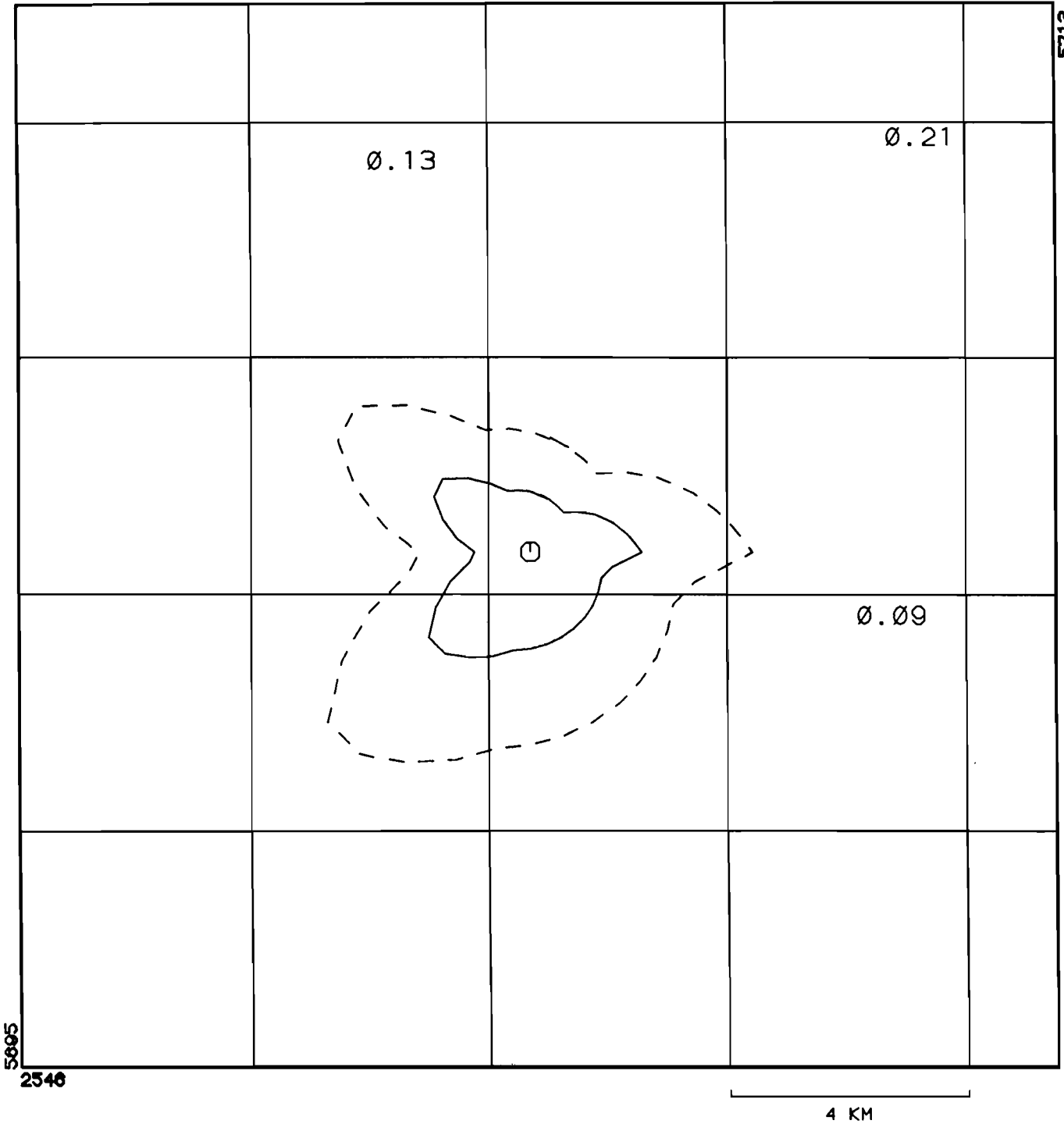
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.16 : Isolinien der MSF von erhöhten ($>100\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Halbstundenwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Dortmund-Mitte



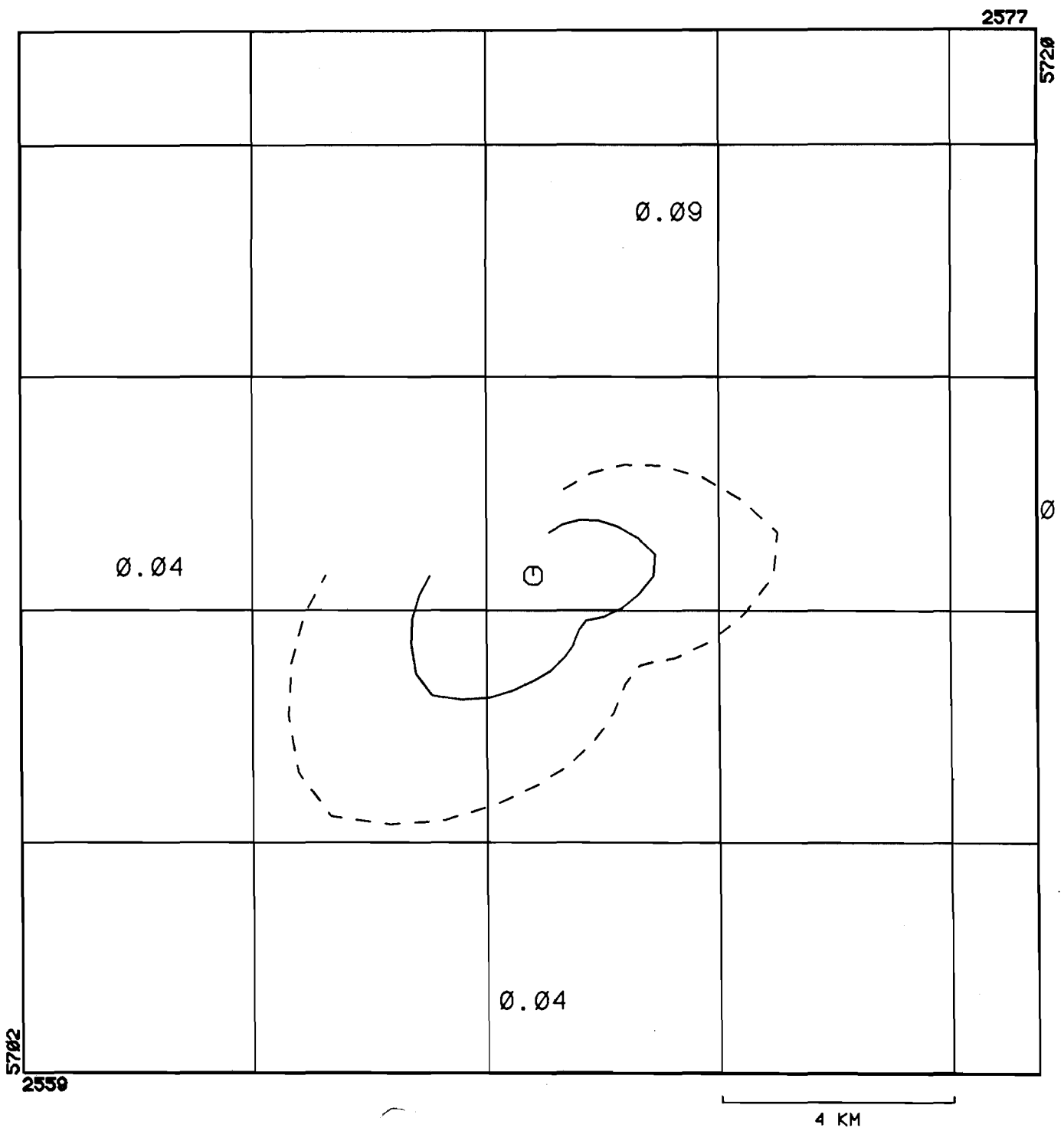
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.17 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100ug/m³)
Halbstundenwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Herne



—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.18 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100ug/m³)
Halbstundenwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Duisburg-Meiderich



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.19 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100 ug/m³) Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Bottrop-Welheim

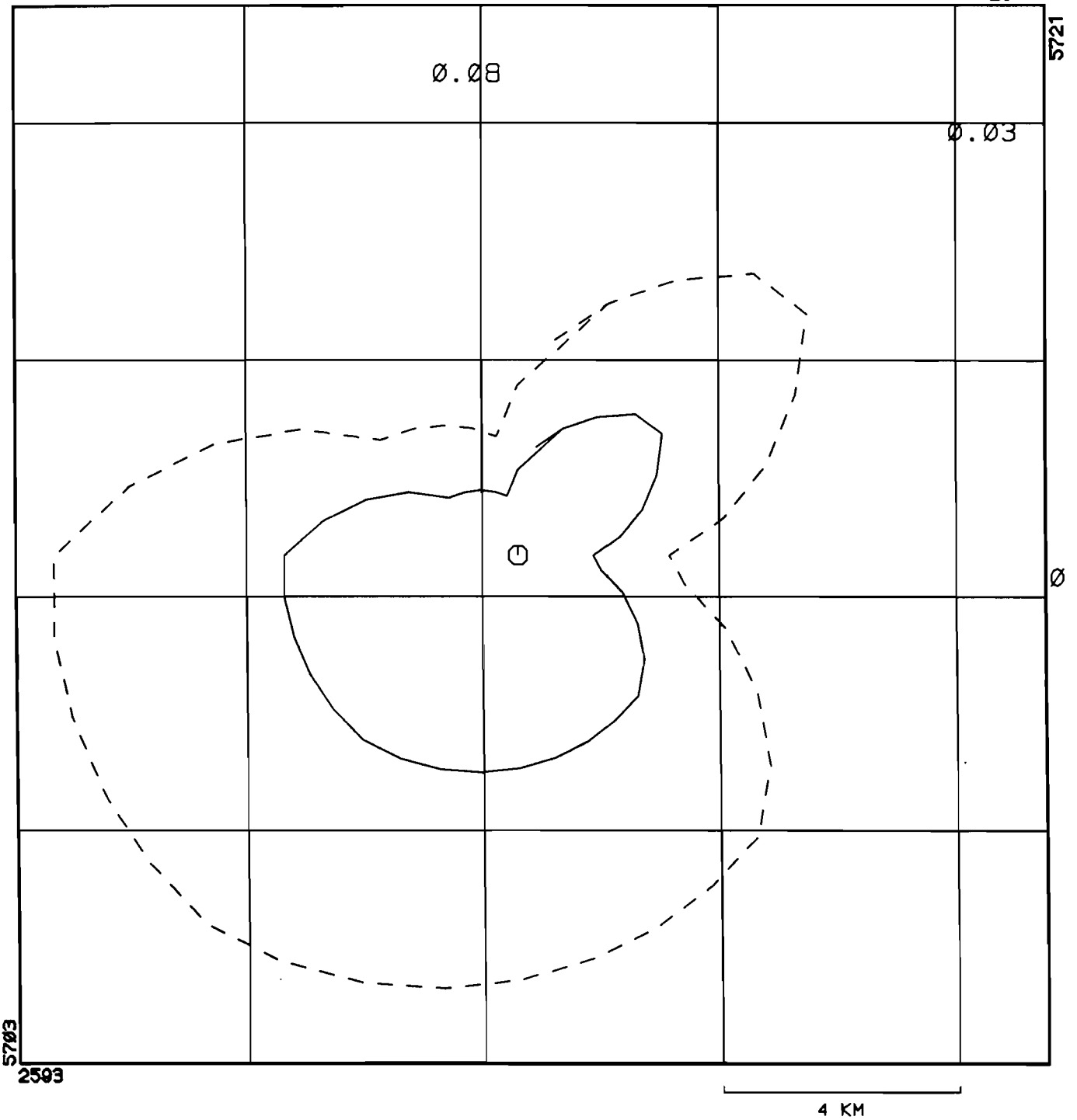
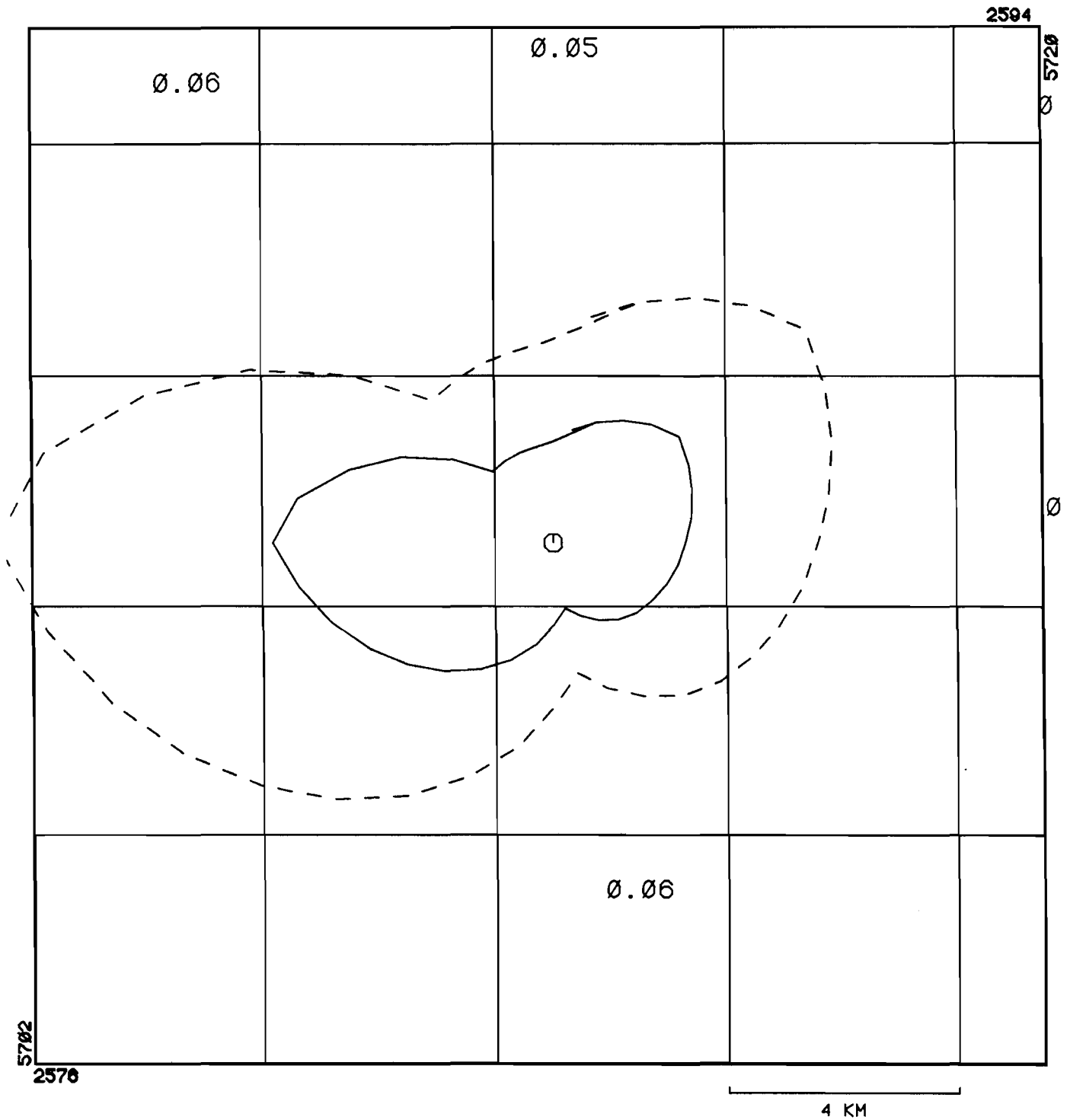
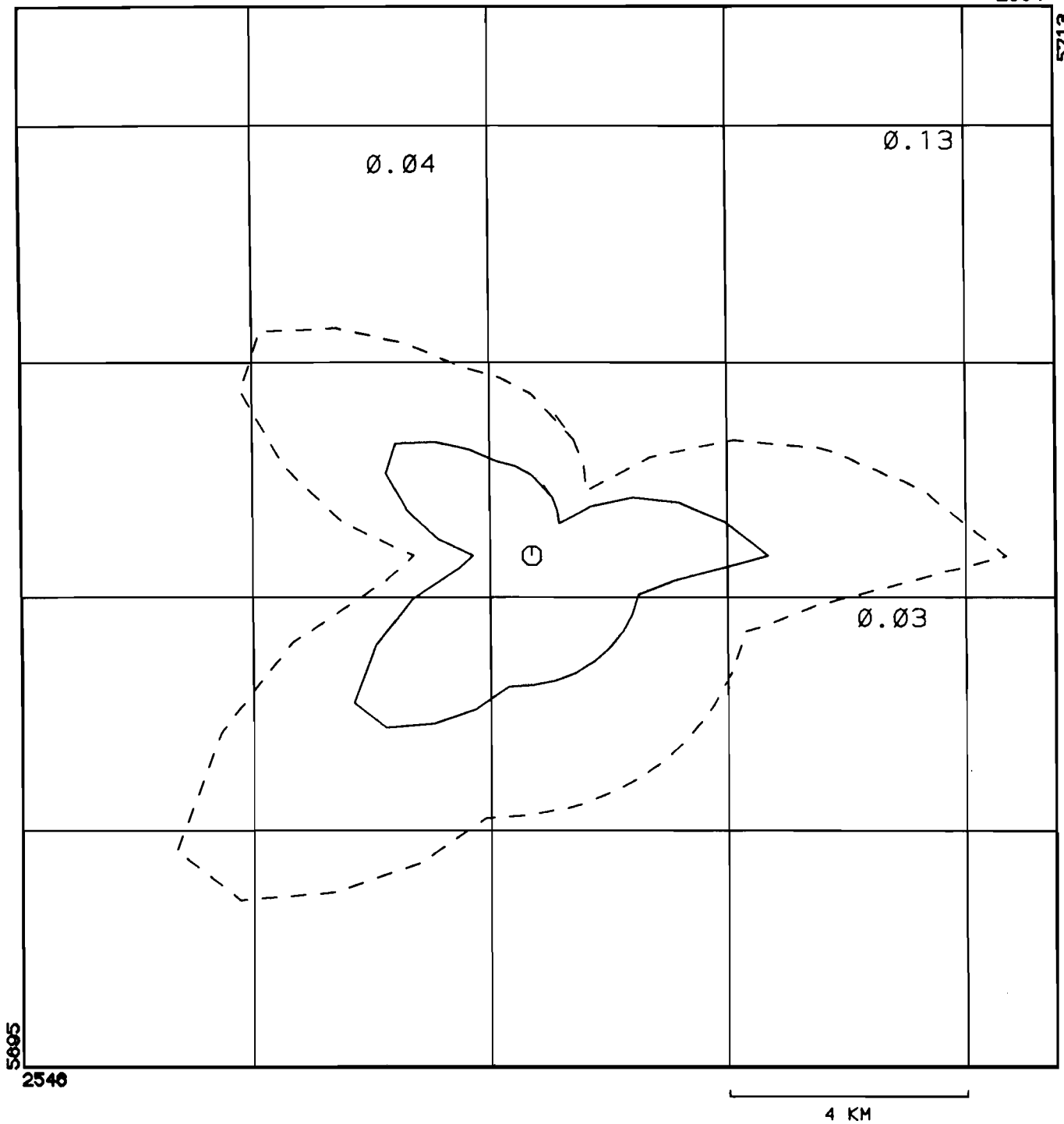


Abb.20 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1987
 Station: Dortmund-Mitte



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.21 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100 ug/m³)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Herne



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.22 : Isolinien der MSF von erhöhten (>100 ug/m³)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1987
Station: Duisburg-Meiderich

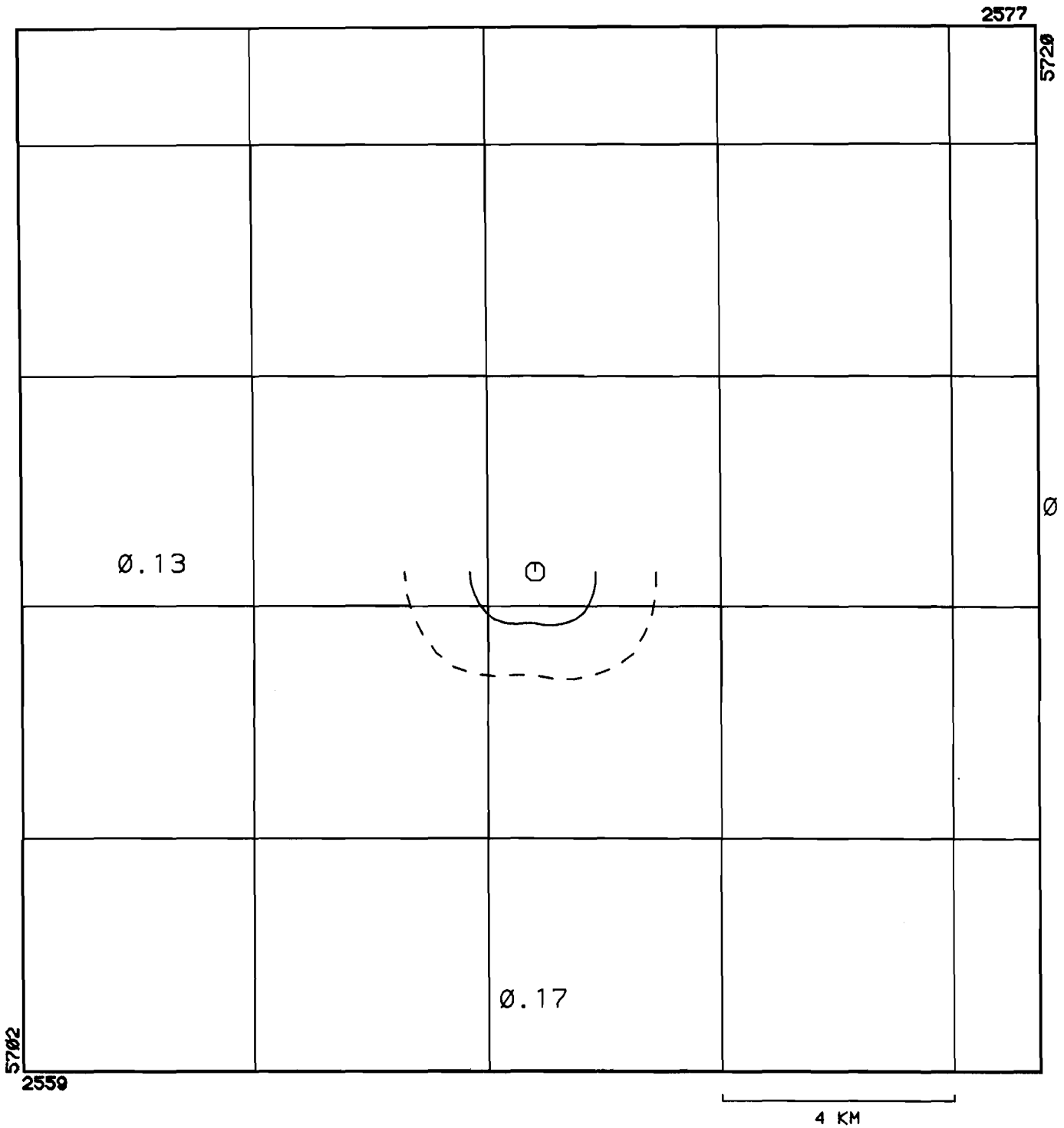


Abb.23 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Bottrop-Welheim

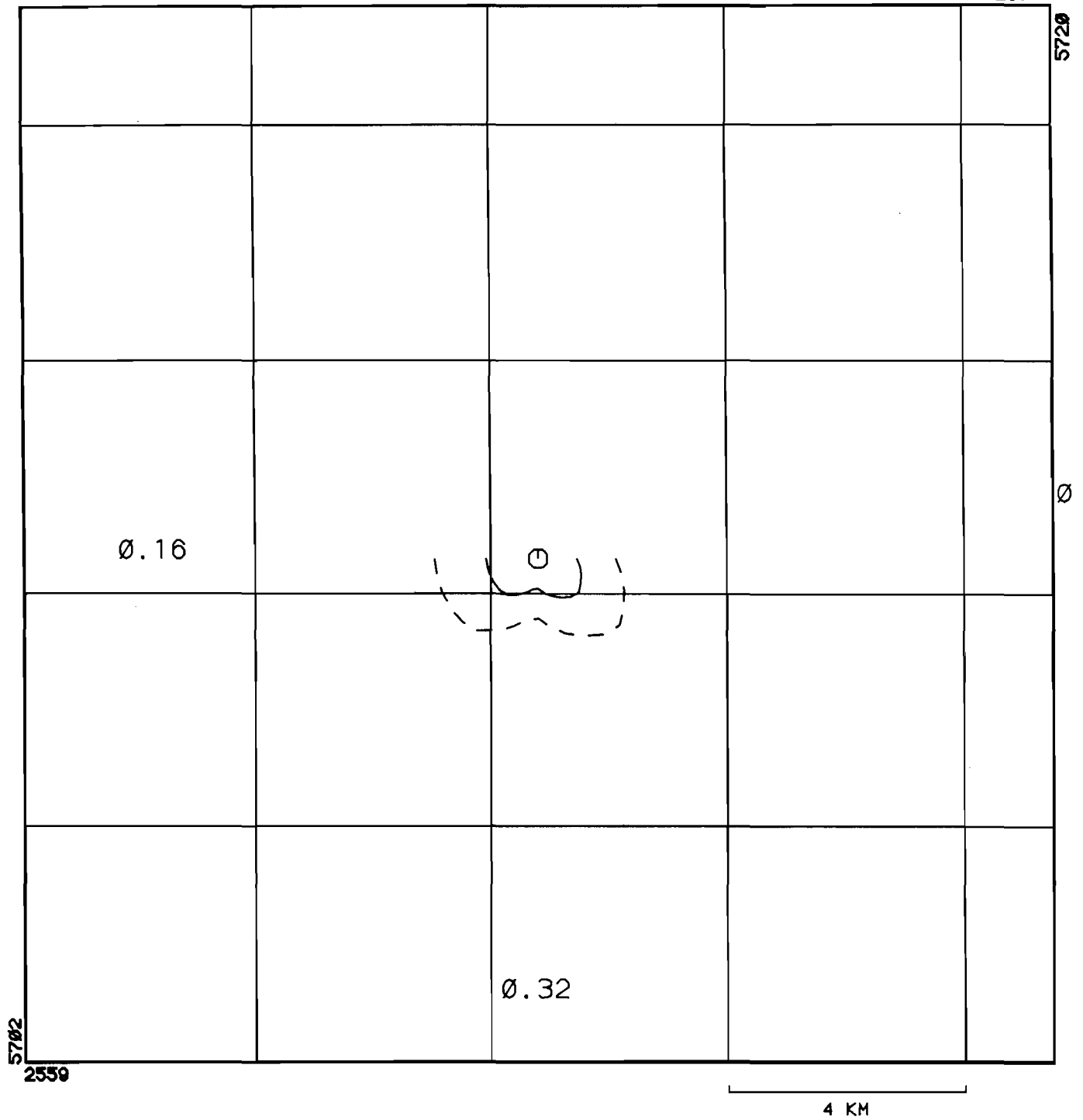
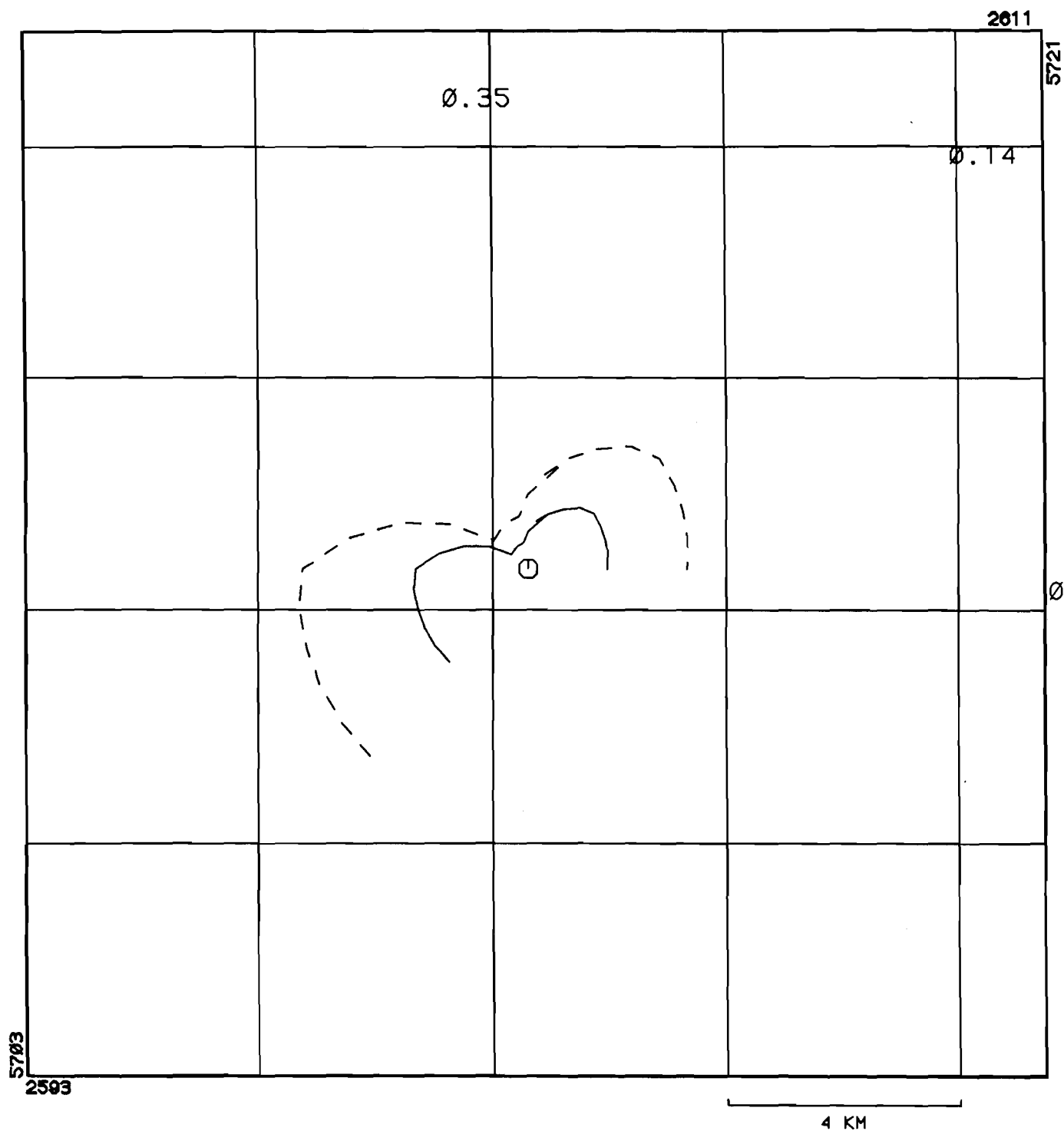
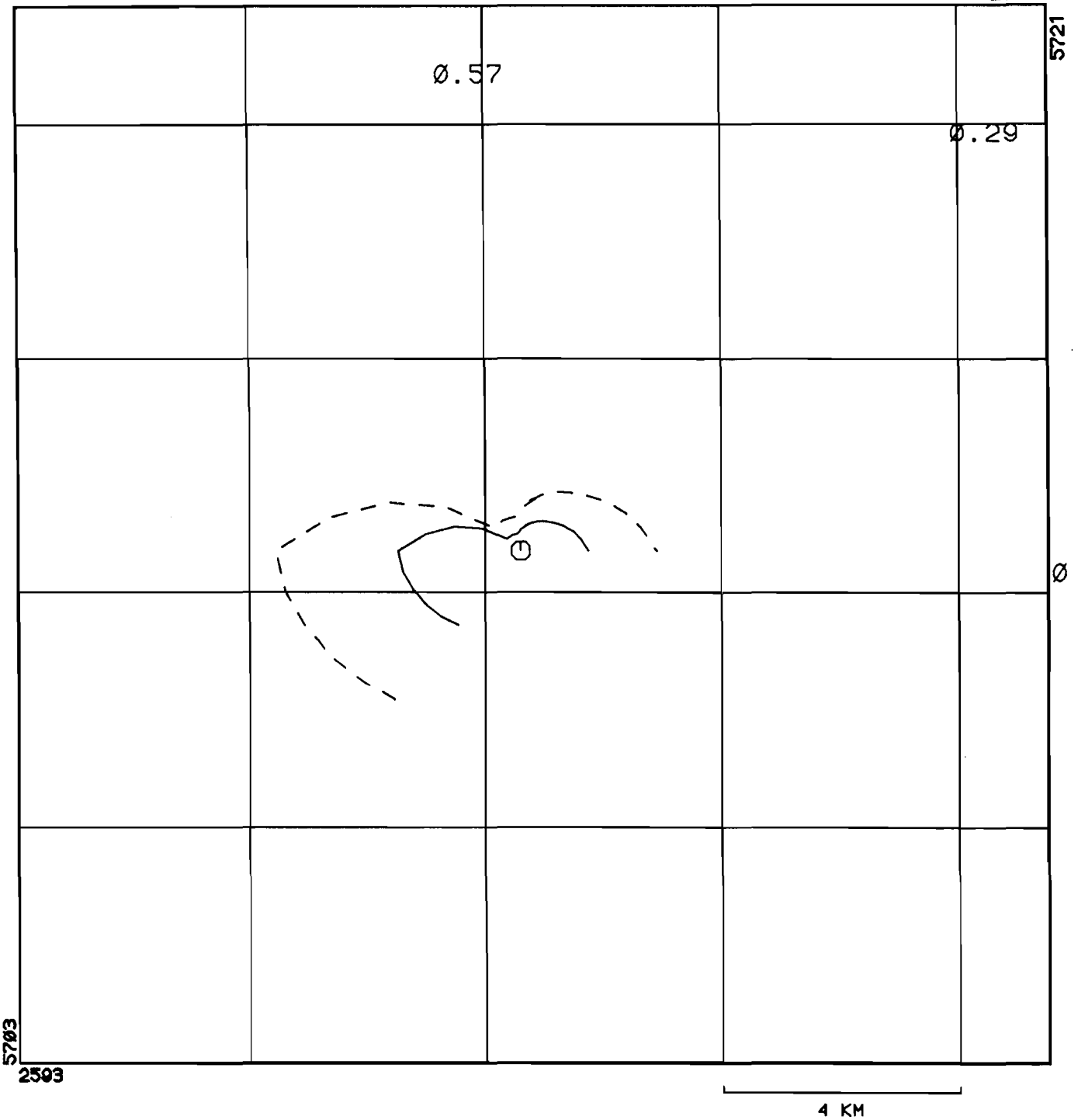


Abb.24 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Bottrop-Welheim



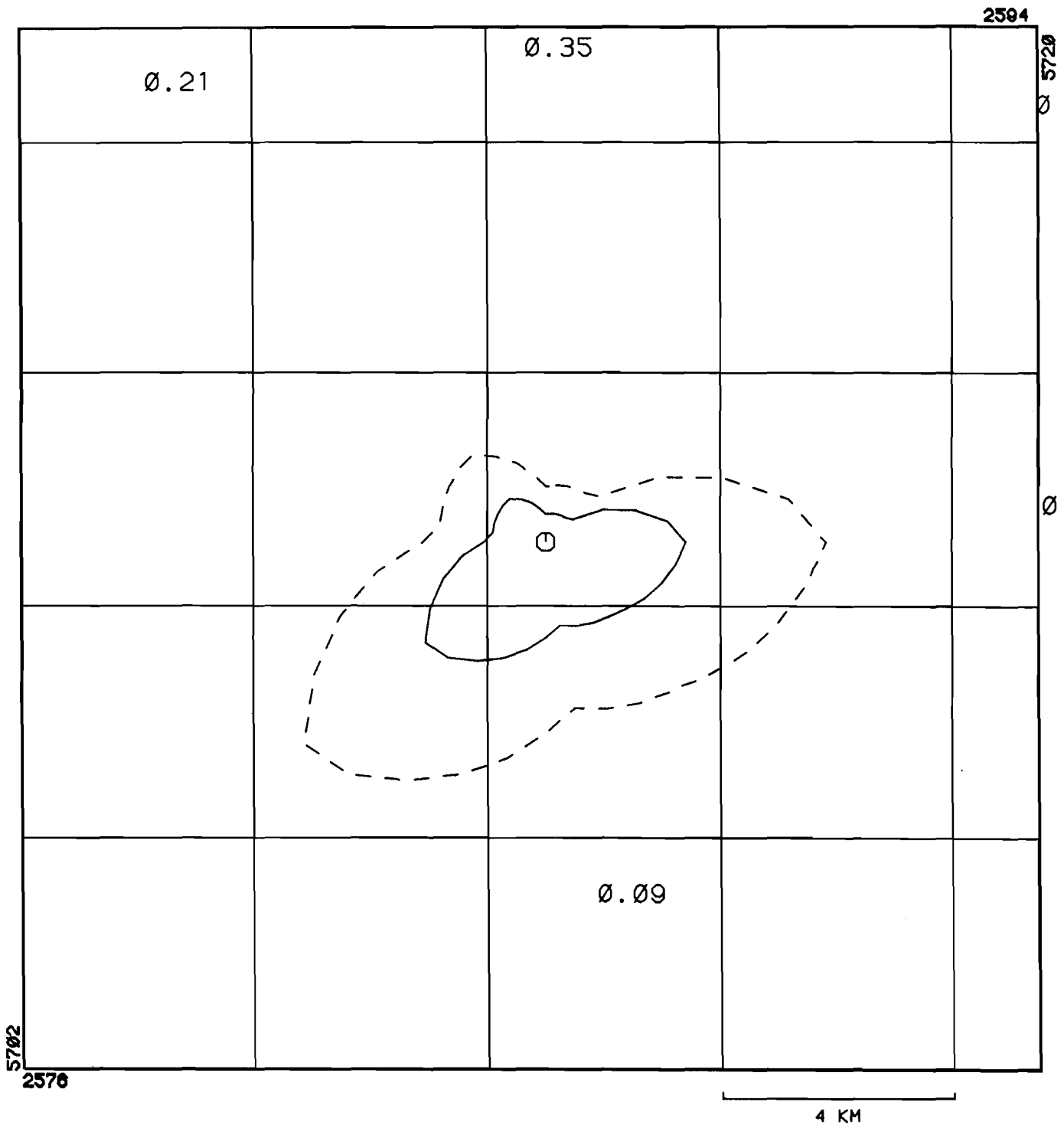
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.25 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Dortmund-Mitte



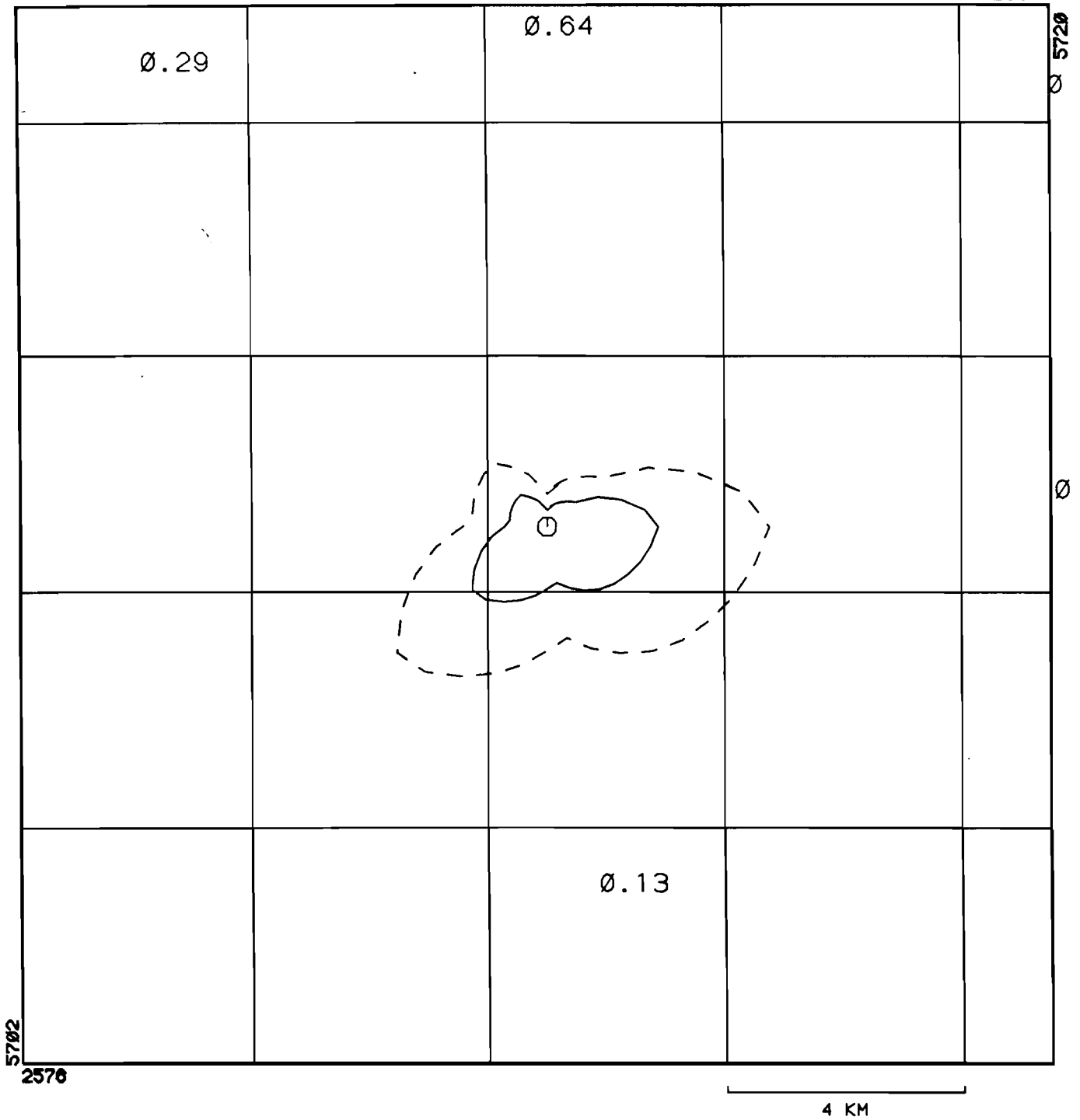
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.26 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Dortmund-Mitte



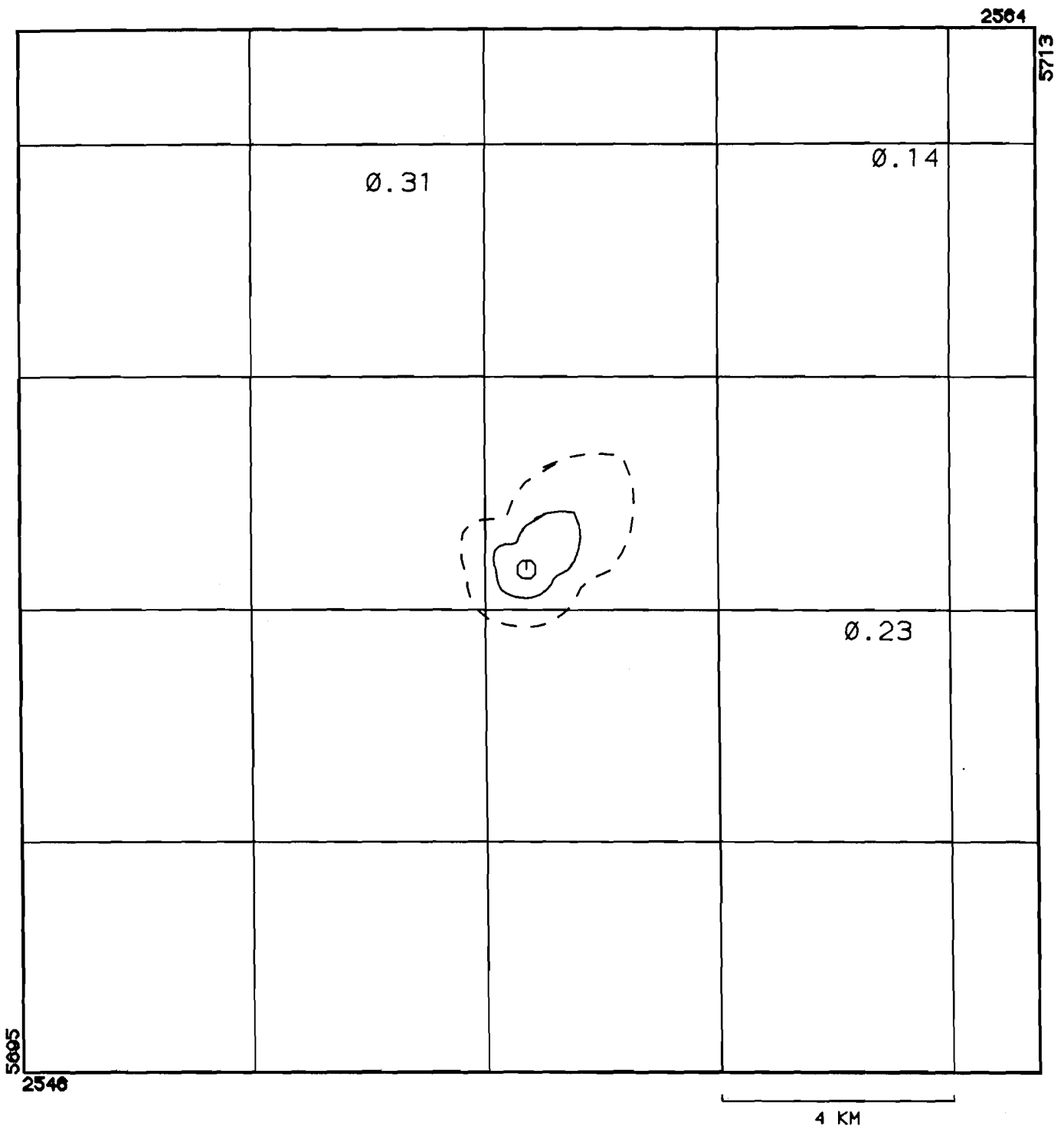
—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.27 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Herne



—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.28 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Herne



—— RMS-DEV. = .14 - - - - RMS-DEV. = .20

Abb.29 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Duisburg-Meiderich

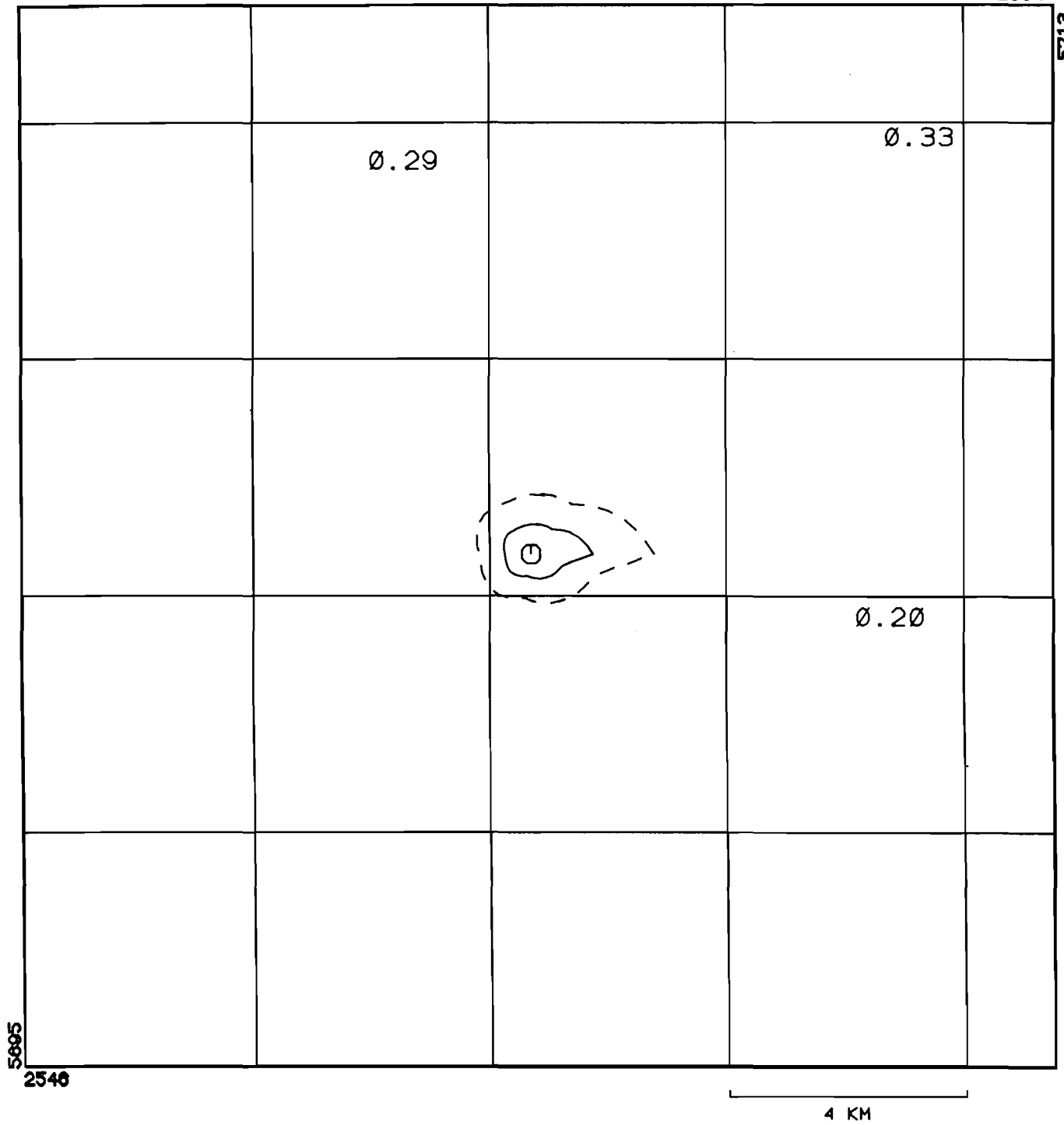
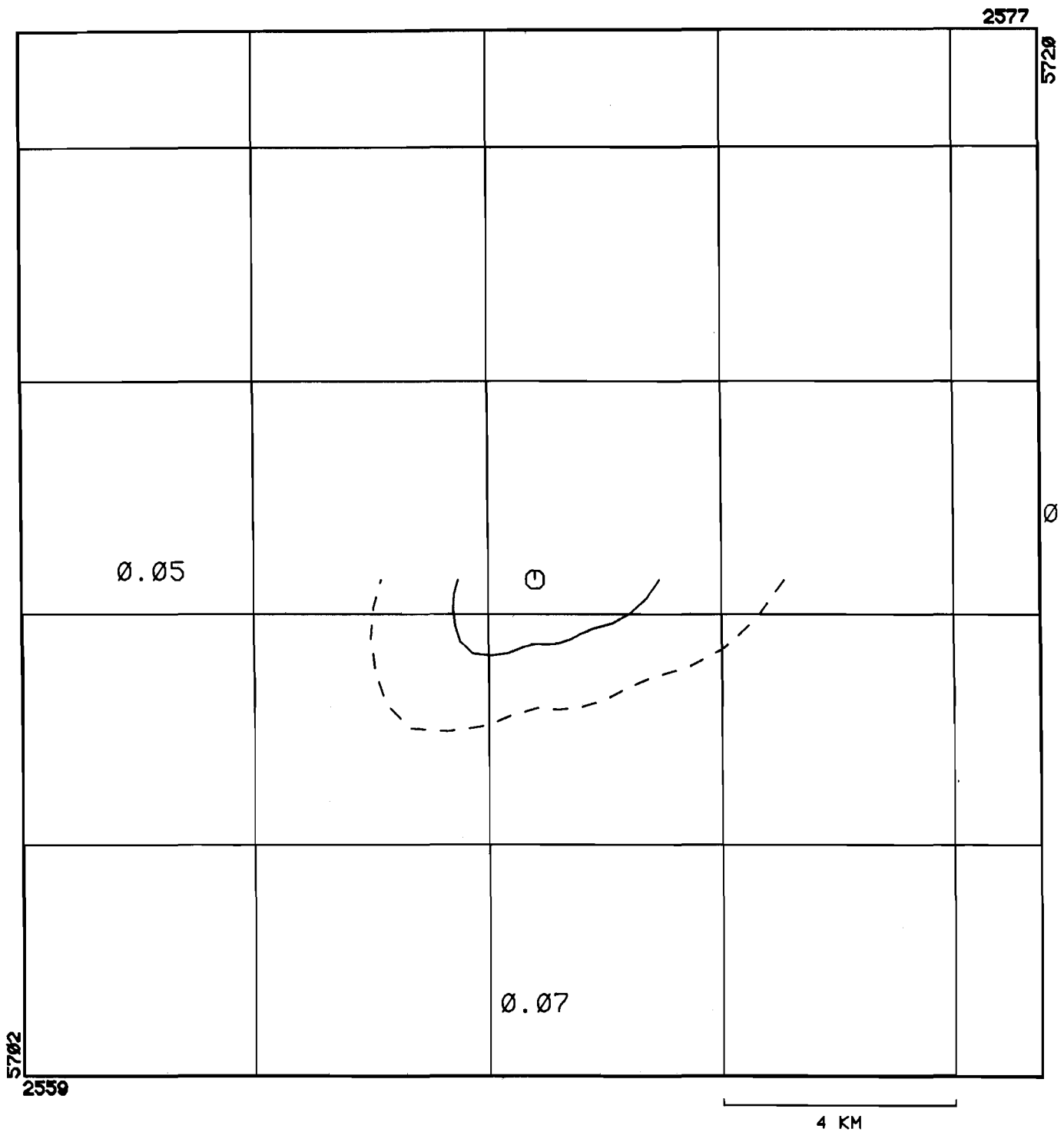
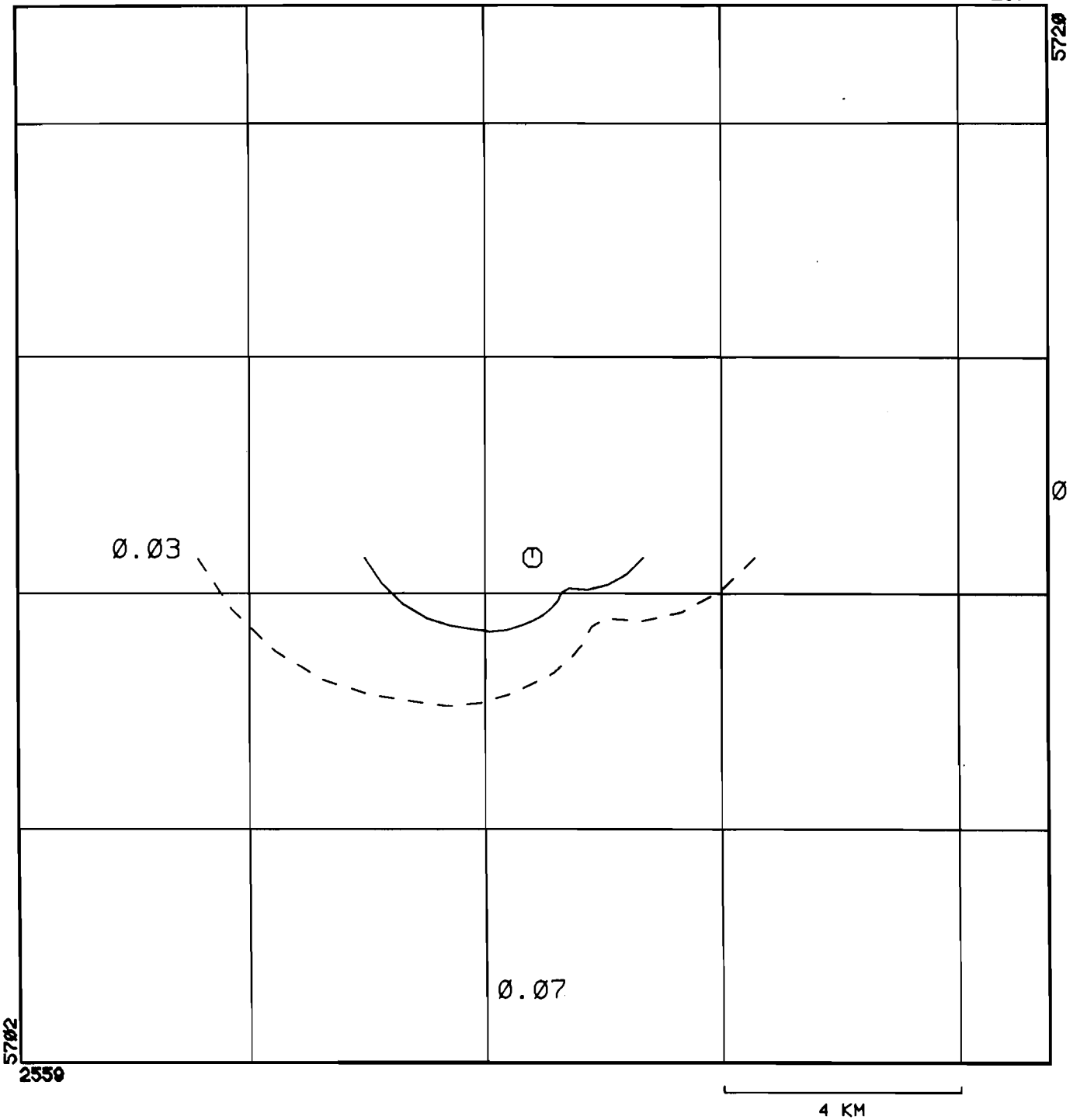


Abb.30 : Isolinien der MSF von Tagesmittelwerten
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Duisburg-Meiderich



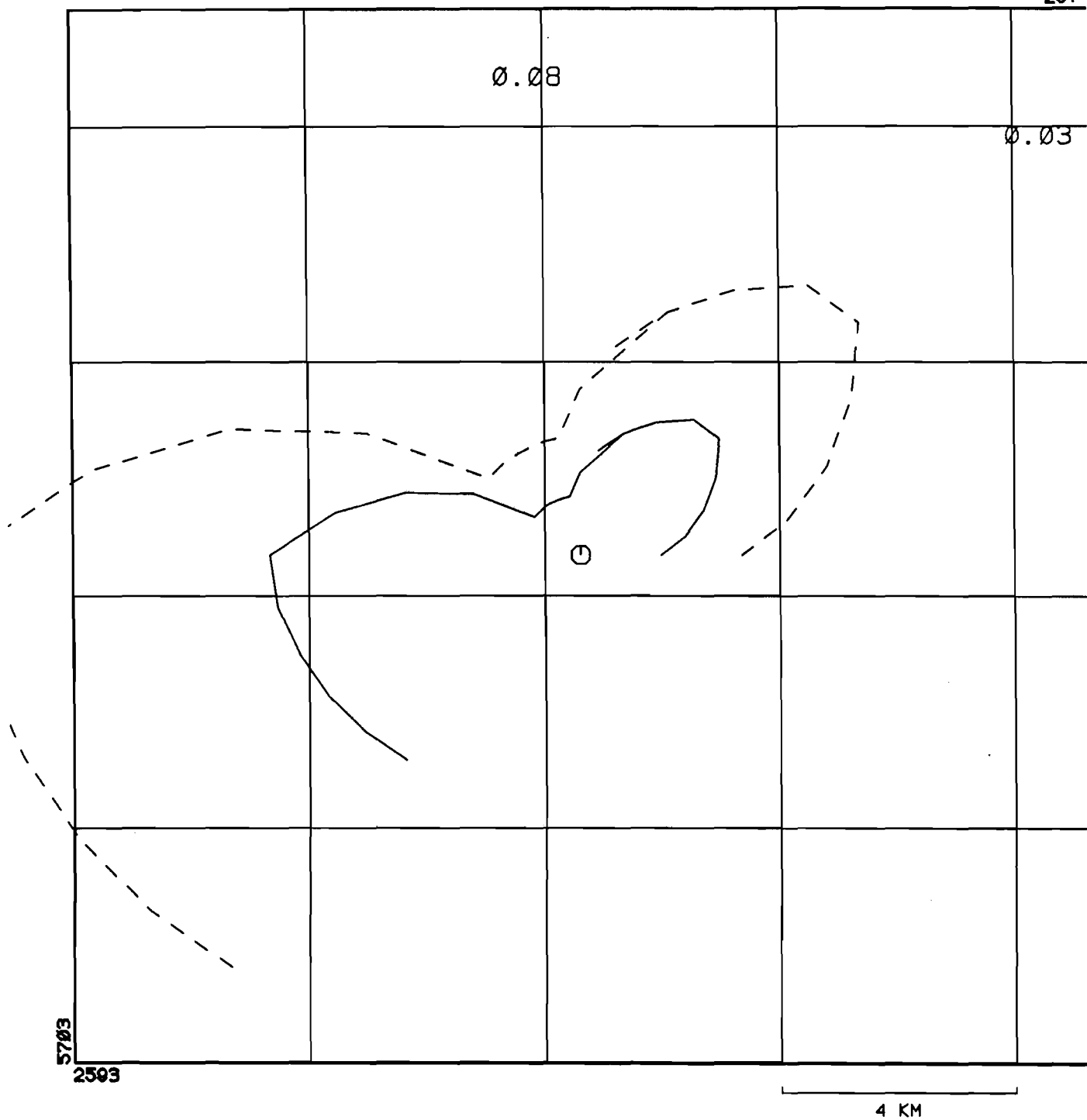
—— RMS-DEV. = 0.10 - - - - RMS-DEV. = 0.14

Abb.31 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Bottrop-Welheim



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.32 : Isolinien der MSF von erhöhten ($> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1986
Station: Bottrop-Welheim



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.33 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 ug/m³)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1985
Station: Dortmund-Mitte

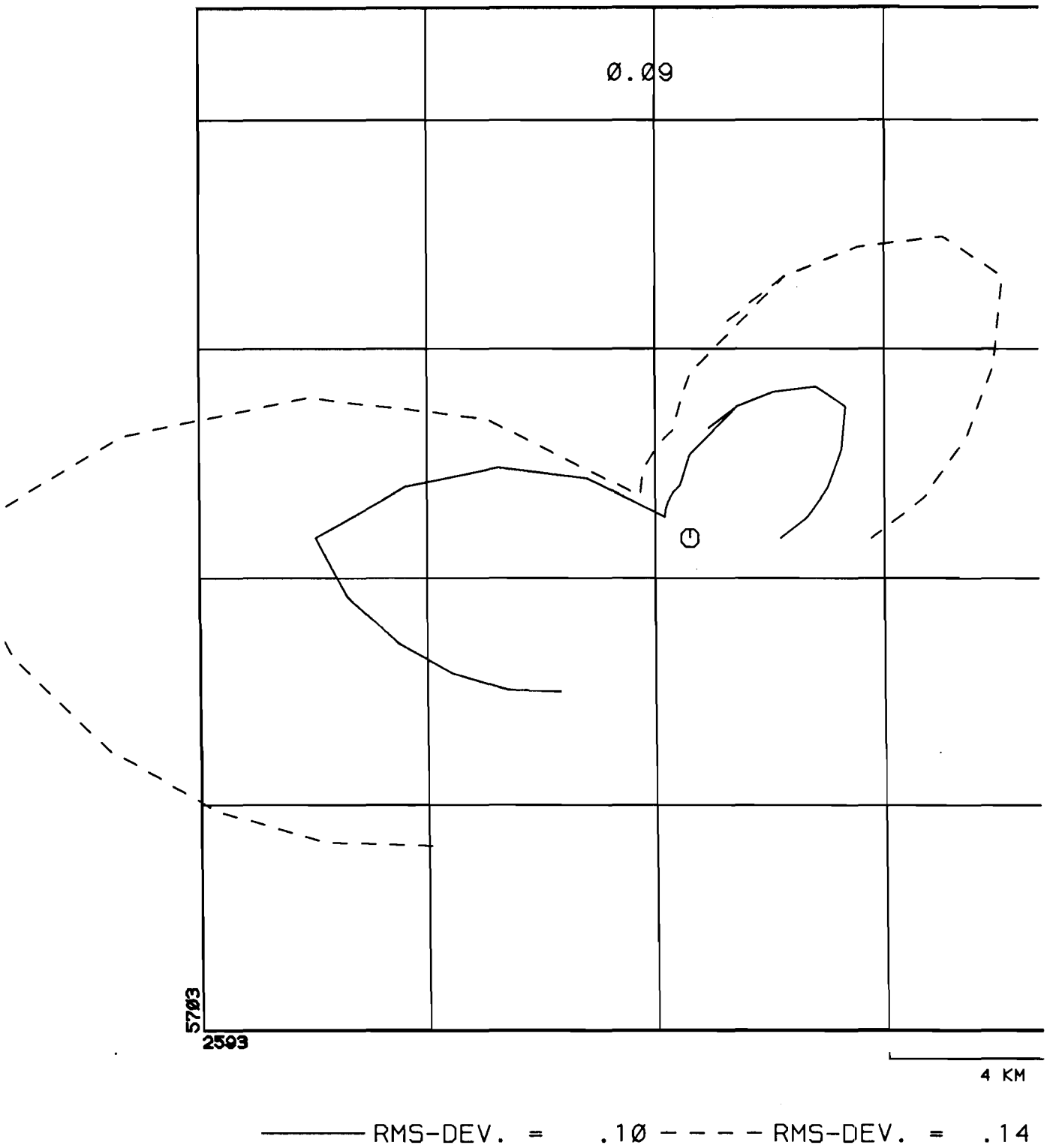
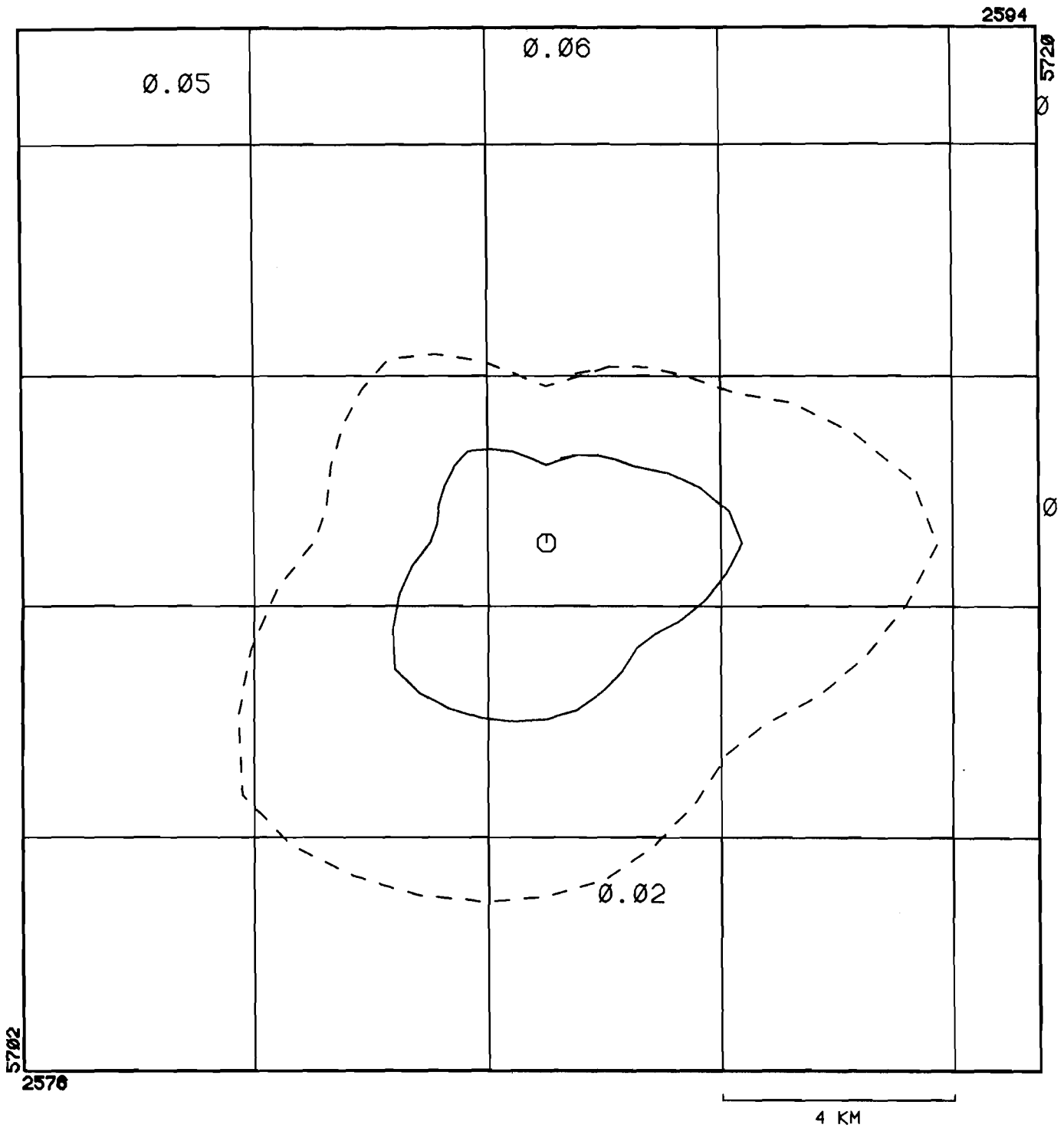
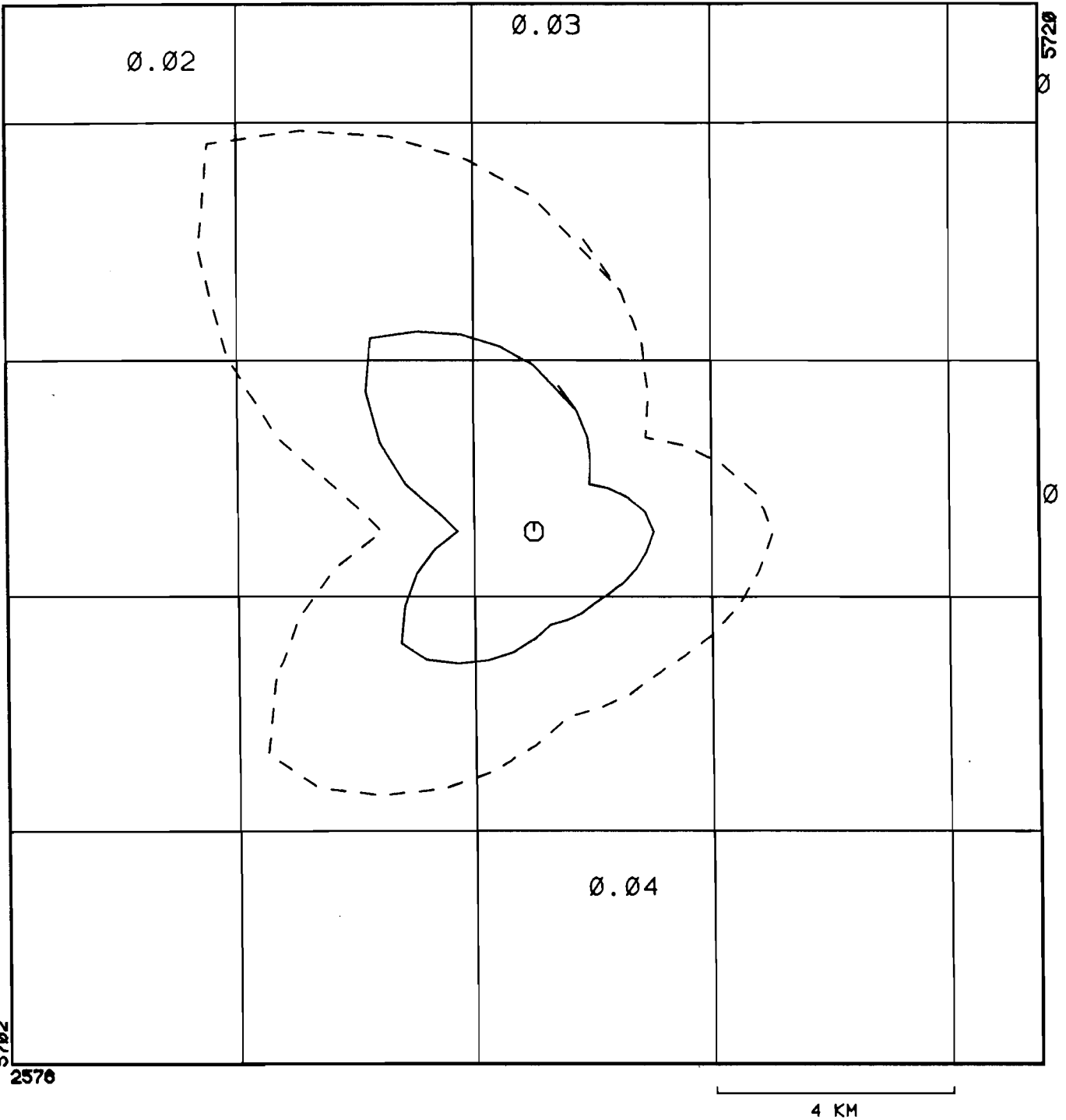


Abb.34 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 ug/m³)
 Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Dortmund-Mitte



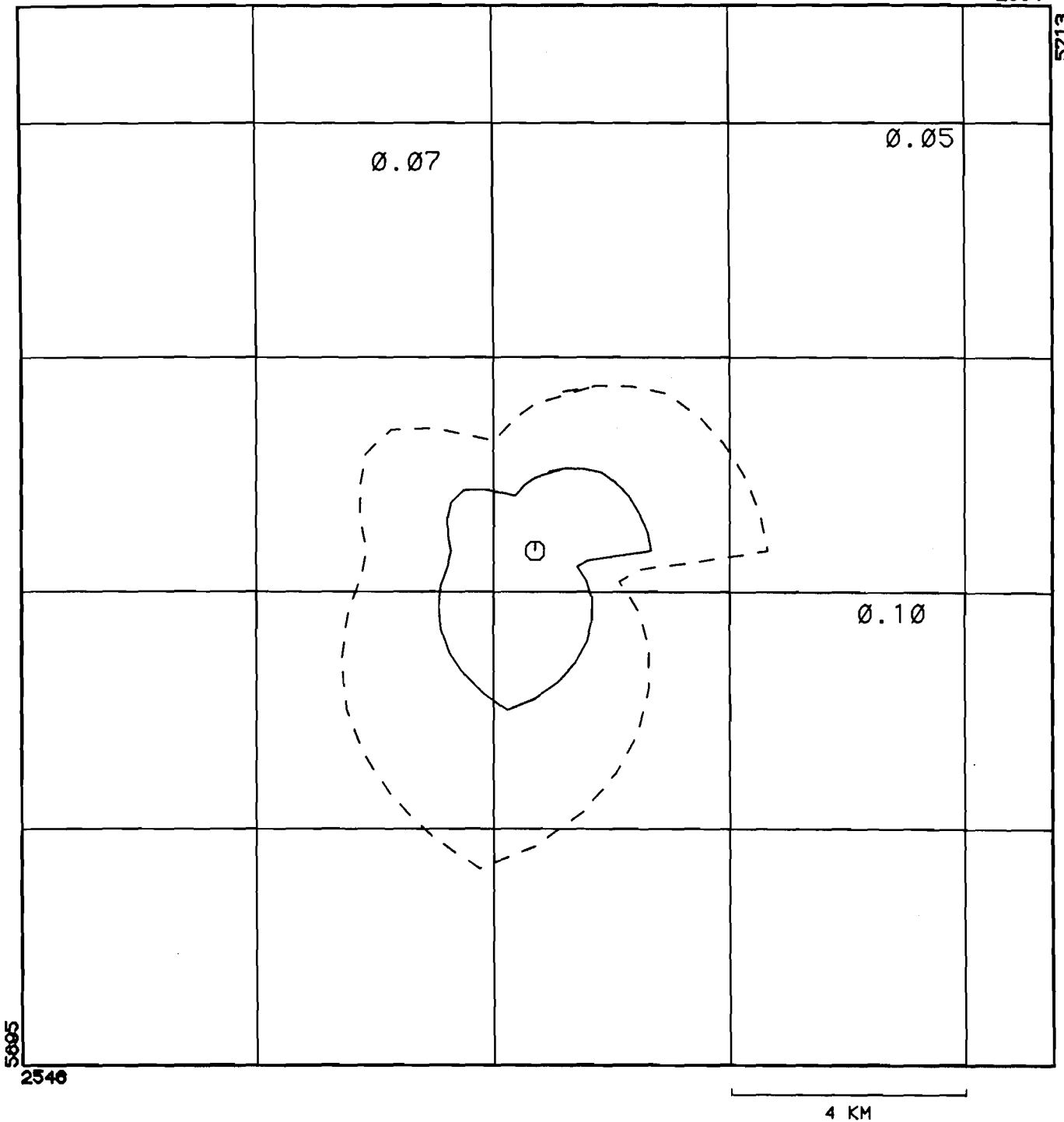
——— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.35 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 ug/m³)
 Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1985
 Station: Herne



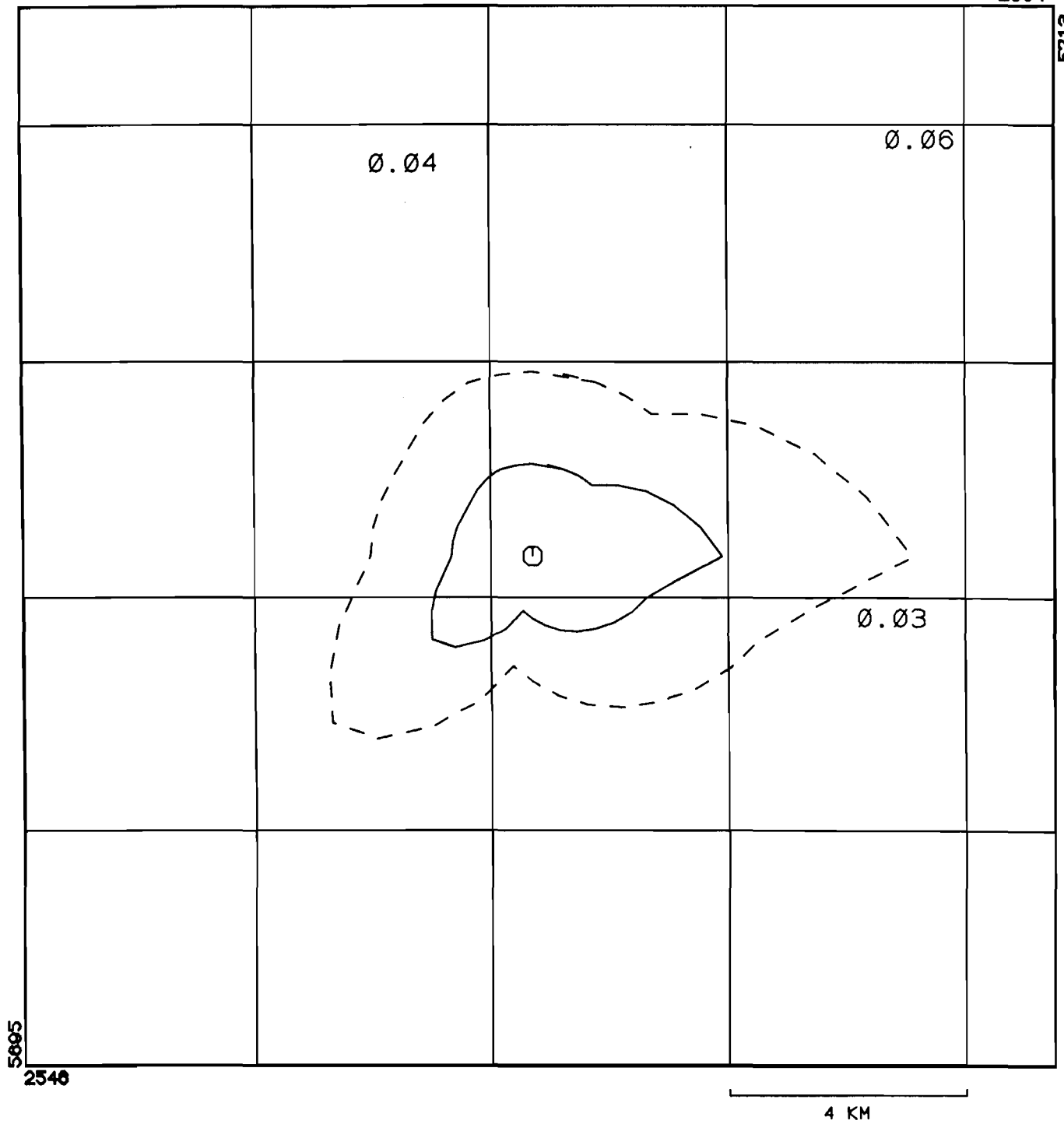
——— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.36 : Isolinien der MSF von erhöhten ($> 100 \text{ ug/m}^3$)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1986
Station: Herne



———— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.37 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 ug/m³)
Tagesmittelwerten.
Daten: Schwefeldioxid 1985
Station: Duisburg-Meiderich



—— RMS-DEV. = .10 - - - - RMS-DEV. = .14

Abb.38 : Isolinien der MSF von erhöhten (> 100 ug/m³) Tagesmittelwerten.
 Daten: Schwefeldioxid 1986
 Station: Duisburg-Meiderich