

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

Februar 1976

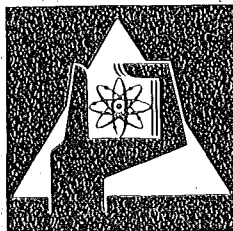
KFK 2249

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit  
Projekt Nukleare Sicherheit

**WALKÜRE**

**Simulation der Wirbelstruktur der Abluftströmung aus  
Kühltürmen mit einem Rechenprogramm**

K. Nester



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit  
Projekt Nukleare Sicherheit

KFK 2249

WALKÖRE

Simulation der Wirbelstruktur der Abluftströmung  
aus Kühltürmen mit einem Rechenprogramm

K. Nester

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Zusammenfassung

Die theoretischen Grundlagen des Computercodes WALKÜRE zur Berechnung des dreidimensionalen Aufstiegs von Kühlturmfahnen werden dargelegt. Die mit diesem Programm berechenbaren Verteilungen der Übertemperatur, der zusätzlichen Feuchte, der Vertikalgeschwindigkeit und des Regentröpfchengehalts in der Fahne werden anhand von Beispielen demonstriert. Ein vorerst nur qualitativ durchführbarer Vergleich mit den Messungen in einer Kühlturmfahne von H. Fortak liefert bereits eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und theoretischen Ergebnissen. Nachteile eindimensionaler Modelle werden diskutiert und die geplante Weiterentwicklung des 3-dimensionalen Modells dargelegt.

## Summary

Simulation of the vortex-pair structure of cooling tower plumes by a Computer Program (WALKÜRE)

The theoretical fundamentals are presented of the WALKÜRE computercode for computation of the three-dimensional rise of cooling tower plumes. Examples demonstrate the distribution of the excess temperature, the additional humidity, the vertical velocity, and the content of rain droplets in the plume, which are calculated by this program. Although, at the time being, only a qualitative comparison is possible with measurements in a cooling tower plume carried out by H. Fortak, it already shows good agreement between experimental and theoretical results. Deficiencies of 1-dimensional models are discussed and the planned further development of the 3-dimensional model is presented.

## 1. Einleitung

Zur Beurteilung der Auswirkungen von Kühlturmmissionen ist es erforderlich, deren Aufstieg in der Atmosphäre zu erfassen, da während dieser Phase die dafür maßgeblichen physikalischen Prozesse stattfinden. Die Erfahrungen haben gezeigt, daß bei der heute erforderlichen Größenordnung der Kühltürme für große Kraftwerke im Mittel kaum Auswirkungen festgestellt werden können, d.h. die Effekte bleiben deutlich unter den natürlichen Schwankungen, /1/, /2/, /3/.

In gewissen seltenen Fällen sind jedoch stärkere Auswirkungen, wie Niederschlag, Nebel, große Abschattung, Feuchte und Temperaturerhöhung in Bodennähe denkbar. Solche Situationen lassen sich rein meteorologisch bereits weitgehend eingrenzen. Es ist deshalb vor allem notwendig, diese begrenzte Zahl von Fällen aufgrund der gegebenen Emissionsbedingungen der zu betrachtenden Kühltürme zu analysieren und die kritischen Bedingungen herauszuarbeiten.

Zur Durchführung der zuvor erwähnten Analyse ist die Simulation des Aufstiegs von Kühlturmfahnen mit einem Rechenprogramm notwendig. Da es sich um die Analyse von Einzelsituationen handelt, sollte das verwendete Simulationsmodell die physikalischen Prozesse weitgehend realistisch erfassen können. Dies ist nur mit einem 3-dimensionalen Modell möglich. Vor allem bei der Untersuchung der Überlagerung mehrerer Kühlturm- und Abgasfahnen benötigt man wegen der Nichtlinearität der physikalischen Prozesse ein dreidimensionales Modell. Außerdem können einfachere Simulationsmodelle, wie sie für statistische Aussagen benötigt werden, aufgrund der Ergebnisse eines ausgetesteten 3-dimensionalen Modells überprüft und verbessert werden.

Aus den obengenannten Gründen wurde am Kernforschungszentrum Karlsruhe im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit ein dreidimensionales Modell zur Simulation des Aufstiegs von Kühlturmfahnen entwickelt, auf das im Folgenden näher eingegangen wird.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1 Grundgleichungen

Basis für die Berechnung des Aufstiegs von Kühlturmfahnen sind:

- die Navier-Stokes-Bewegungsgleichungen
- die Kontinuitätsgleichung
- der 1. Hauptsatz der Wärmelehre
- ein Feuchteansatz

Die Bedeutung der verwendeten Symbole ist am Schluß des Berichtes zusammengestellt.

Um die obigen Gleichungen mit vertretbarem Aufwand lösen zu können, wurden die folgenden Vereinfachungen vorgenommen:

- |   |  |
|---|--|
| a) stationäre Verhältnisse  | } $\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} = 0$  |
| b) turbulente und Wirbelbewegungen in Ausbreitungsrichtung werden gegenüber der horizontalen Windgeschwindigkeit der Umgebung vernachlässigt. | } $u = u_u(z)$   |
| c) Die Windkomponenten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sind in der Umgebung vernachlässigbar klein.  | } $v_u = 0$<br>$w_u = 0$   |
| d) Dichteänderungen werden <u>nur</u> im Auftrieb über die virtuelle Temperaturdifferenz berücksichtigt.                                      | } $\frac{\rho_f}{\rho_u} \approx 1; \frac{\rho_u - \rho_f}{\rho_f} \approx \frac{T_f - T_u}{T_{vu}}$<br>$\rho_u = \text{const.}$ |

Es bedeuten dabei:

u = Umgebung und f = Fahne

Die Näherung b) ist in unmittelbarer Umgebung der Kühlturmmündung nicht realistisch. Man kann aber davon ausgehen, daß die Kühlturmabluft in relativ kurzer Entfernung von der Mündung die Horizontalgeschwindigkeit erreicht. Sinnvollerweise beginnt man mit der Integration der Gleichungen erst ab dieser Entfernung. Die Strömungsverhältnisse in der Anfangsphase sind derart komplex, daß man auf empirische (aus Experimenten abgeleitete) Ansätze angewiesen ist. Wesentlich ist vor allem die "effektive Quellhöhe".

Bei kleinen horizontalen Windgeschwindigkeiten ist die Annahme ebenfalls nicht erfüllt.

Die Vereinfachung  $v_u = 0$  wird hauptsächlich aus rechentechnischen Gründen eingeführt. Die Symmetrieeigenschaft der Anfangsbedingung um  $y = 0$  bleibt in diesem Fall während der gesamten Integration erhalten, was den Rechenaufwand wesentlich reduziert. Windrichtungsänderungen mit der Höhe können in diesem Fall nur im Mittel über die Fahne berücksichtigt werden. Da eine Windrichtungsscherung zu einer Verbreiterung der Fahne führt, werden die Auswirkungen bei der Annahme der Symmetrie größer sein als bei Berücksichtigung der Drehung. Dadurch bleibt man auf der sicheren Seite, was die Folgerungen betrifft. Allerdings ist es kein grundsätzliches Problem, ein  $v_u = v_u(z)$  einzuführen.

Mit den Vereinfachungen a) bis d) ergibt sich dann der folgende Satz von fünf Differentialgleichungen, der in modifizierter Form zur Berechnung der Cumulus - Konvektionsprozesse verwendet wird /4/, /5/, /6/. In /7/ wird ebenfalls von ähnlichen Ansätzen zur Bestimmung des Aufstiegs von Kühlturmfahnen ausgegangen.



$$u_u \frac{\partial}{\partial x} \bar{n}_f + \bar{v}_f \frac{\partial}{\partial y} \bar{n}_f + \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} \bar{n}_f = K_{my} \frac{\partial^2 \bar{n}_f}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} K_{mz} \frac{\partial}{\partial z} \bar{n}_f + \frac{\partial}{\partial x} \bar{v}_f \frac{\partial}{\partial z} u_u + \frac{g}{T_{vu}} (1 + \bar{q}_{cf} + \bar{q}_{rf}) \frac{\partial}{\partial y} \bar{T}_v' - g \frac{\partial}{\partial y} (\bar{q}_{cf} + \bar{q}_{rf}) \quad (1)$$

$$\bar{n}_f = \frac{\partial^2 \bar{\phi}_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\phi}_f}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$u_u \frac{\partial}{\partial x} \bar{T}_s' + \bar{v}_f \frac{\partial}{\partial y} \bar{T}_s' + \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} \bar{T}_s' = K_{hy} \frac{\partial^2 \bar{T}_s'}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} K_{hz} \frac{\partial}{\partial z} \bar{T}_s' - \frac{g}{c_p} \bar{w}_f - \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} T_{vu} + \frac{L}{c_p} \bar{p}_r \quad (3)$$

$$u_u \frac{\partial}{\partial x} \bar{f}' + \bar{v}_f \frac{\partial}{\partial y} \bar{f}' + \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} \bar{f}' = K_{hy} \frac{\partial^2 \bar{f}'}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} K_{hz} \frac{\partial}{\partial z} \bar{f}' - \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} f_u - \bar{p}_r \quad (4)$$

$$u_u \frac{\partial}{\partial x} \bar{q}_{rf} + \bar{v}_f \frac{\partial}{\partial y} \bar{q}_{rf} + \bar{w}_f \frac{\partial}{\partial z} \bar{q}_{rf} = K_{ry} \frac{\partial^2 \bar{q}_{rf}}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} K_{rz} \frac{\partial}{\partial z} \bar{q}_{rf} + \bar{v}_r \frac{\partial}{\partial z} \bar{q}_{rf} + \bar{q}_{rf} \frac{\partial}{\partial z} \bar{v}_r + \bar{p}_r \quad (5)$$

Außerdem gelten die Beziehungen:

$$\overline{w}_f = \frac{\partial \overline{\phi}_f}{\partial y}; \quad \overline{v}_f = - \frac{\partial \overline{\phi}_f}{\partial z}; \quad \overline{u}_f = u_u \quad (6)$$

$$\overline{T}_s' = \overline{T}_v' - \frac{L}{c_p} \overline{q}_{cf} \quad (7)$$

$$\overline{T}_v' = \overline{T}_{vf} - \overline{T}_{vu} \quad (8)$$

$$\overline{f}' = \overline{q}_v' + \overline{q}_{cf} \quad (9)$$

$$\overline{q}_v' = \overline{q}_{vf} - \overline{q}_{vu} \quad (10)$$

Gleichung (1) beschreibt die Änderung der Vorticity  $\overline{\eta}_f$  in Transportrichtung. Durch (2) wird die Beziehung zwischen der Vorticity  $\overline{\eta}_f$  und der Stromfunktion  $\overline{\phi}_f$  hergestellt. Die dritte Gleichung ist aus dem ersten Hauptansatz der Wärmelehre abgeleitet.  $\overline{T}_s'$  ist die Differenz zwischen der Fahne und der Umgebung von einer Temperatur, die sich einstellen würde, falls man die Wolken-tröpfchen verdampft und die dafür notwendige Wärme der Fahne entzieht. Gleichung (3) liefert die Änderung der Differenz des spezifischen Feuchtegehaltes (Wolkentröpfchen + Dampf) zwischen Fahne und Umgebung. Multipliziert man die Gleichung (4) mit  $L/c_p$  und addiert sie zu Gleichung (3) erhält man eine Gleichung für die Änderung der in der Meteorologie bekannten Äquivalenttemperatur. Der spezifische Regentröpfchengehalt wird durch Gleichung (5) beschrieben. Er ist vor allem für die Berechnung des Auftretens von Niederschlägen erforderlich.

Der Term  $\overline{Pr}$  beinhaltet die Prozesse

- Autoconversion von Wolkentröpfchen zu Regentröpfchen
- Zunahme der Regentröpfchen durch Einfangen von Wolkentröpfchen
- Verdunstung von Regentröpfchen

und stammt von Kessler /8/.

$$\overline{Pr} = \alpha(\overline{q_{cf}} - q_{co}) + \beta \overline{q_{cf}} \overline{q_{rf}}^{7/8} + \gamma(\overline{q_{vf}} - q_{vs}) \overline{q_{rf}}^{13/20} \quad (11)$$

$$\beta = \beta^* No^{1/8} \quad (12)$$

$$\gamma = \gamma^* No^{7/8} \quad (13)$$

Wie sich später zeigen wird, kann der für natürliche Niederschlagsprozesse von Kessler angegebene Parameter No, der für das Tröpfchenspektrum maßgebend ist, nicht für Kühlturmfahnen übernommen werden.

## 2.2 Diffusionskoeffizienten

Die Verbreiterung der Fahne aufgrund der turbulenten Diffusion wird über den üblichen Gradientansatz

$$\overline{|V_i|'F'} = -K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{F} \quad (14)$$

parametrisiert, wobei

$$K_{ij} = 0 \quad \text{für} \quad i \neq j \quad (15)$$

Beim Aufstieg von Kühlturmfahnen werden sowohl die durch die Vertikalgeschwindigkeit induzierte Turbulenz als auch die in der Atmosphäre vorhandene Turbulenz wirksam. Die induzierte Turbulenz wird durch den Ansatz

$$K_{ind} = C_0 |W(x)|_{max} \quad (16)$$

berücksichtigt.

Die Wirksamkeit der atmosphärischen Turbulenz hängt von der Ausdehnung der Fahne ab. Wirbel, deren Ausdehnung größer ist als die des Fahnenquerschnitts führen nicht zu einer Verbreiterung der Fahne. Da man davon ausgehen kann, daß in der Anfangsphase des Aufstiegs, während dessen die Fahne noch einen relativ kleinen Querschnitt aufweist, die induzierte Turbulenz maßgebend ist, könnte der oben erwähnte Effekt, d.h. die x-Abhängigkeit, im Ansatz für die atmosphärische Turbulenz unberücksichtigt gelassen werden. Da der Aufstieg vor allem in den höheren Schichten der atmosphärischen Grenzschicht stattfindet, wurde vorerst ein empirischer Ansatz der Form

$$K_{at} = f\left(\frac{\partial T}{\partial z} u\right) = K_{at}(z) \quad (17)$$

vorgesehen. In der Schicht zwischen dem Boden ( $K_{at} = 0$ ) und 50 m Höhe ( $K_{at} = K_{at}(50m)$ ) wurde linear interpoliert

$$K_{at}(z) = K_{at}(50m) \frac{z}{50} ; \quad z \leq 50 \text{ m} \quad (18)$$

In einer erweiterten Version des Programms ist unter anderem eine verbesserte K-Theorie vorgesehen. Zur qualitativen Beurteilung der Auswirkungen höhenveränderlicher Diffusionskoeffizienten genügt der obige Ansatz aber bereits.

Als "wirksamer" Diffusionskoeffizient wird der jeweils größere der beiden Werte  $K_{at}$  und  $K_{ind}$  angesehen.

### 2.3 Randbedingungen

Die Randbedingungen wurden so einfach wie möglich gewählt. Es ist aber ohne wesentlichen Aufwand möglich, auch andere Bedingungen einzuführen.

Am Boden  $z = 0$  gilt

$$\overline{\phi_f} = \overline{n_f} = 0; \quad \text{daraus folgt } \overline{w} = 0, \quad \frac{\partial \overline{v}}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial \overline{T_s}}{\partial z} = \frac{\partial \overline{f'}}{\partial z} = \frac{\partial \overline{q_{rf}}}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

An der Obergrenze der Schicht  $z = H$ , sowie an den seitlichen Begrenzungen  $y = \pm B$  werden alle Parameter gleich null gesetzt.

Sowohl  $H$  als auch  $B$  müssen erheblich größer als die Ausmaße der Kühlturmfahne sein, damit die Randbedingungen an diesen Grenzen keinen merklichen Einfluß auf das Ergebnis haben.

### 2.4 Anfangsbedingungen

Da die numerische Integration in  $x$ -Richtung erfolgen soll, werden die Anfangsbedingungen in der Ebene  $x = 0$  benötigt. Sowohl bei den Messungen als auch bei den Berechnungen der Emissionsbedingungen beschränkt man sich auf Werte an der Kühlturmmündung. Die hier benötigten Anfangsverteilungen sind deshalb nicht bekannt. Man ist somit auf Ansätze angewiesen. Für die Temperatur, die spezifische Feuchte und den spezifischen Regentröpfchengehalt werden Verteilungen der Form:

$$\psi = \psi_A \left\{ \frac{1}{2} \left( \operatorname{erf} \left[ \left( \frac{y-A^*}{SIGY0} \right)^2 \right] - \operatorname{erf} \left[ \left( \frac{y+A^*}{SIGY0} \right)^2 \right] \right) + \frac{1}{2} \left( \operatorname{erf} \left[ \left( \frac{z-H^*-B^*}{SIGZ0} \right)^2 \right] - \operatorname{erf} \left[ \left( \frac{z-H^*+B^*}{SIGZ0} \right)^2 \right] \right) \right\} \quad (21)$$

eingeführt.

$\psi_A$  ist dabei der jeweilige Mittelwert an der Kühlturmmündung. Über die effektive Quellhöhe  $H^*$  kann ein Herabdrücken bzw. ein Aufsteigen der Fahne hinter dem Kühlturm empirisch erfaßt werden. Die Werte für  $A^*$  und  $B^*$  müssen so gewählt werden, daß der gesamte Fluß durch die Fläche  $2A^* \cdot 2B^*$  demjenigen an der Mündung entspricht.  $SIGY0$  und  $SIGZ0$  berücksichtigen eine gewisse Verbreiterung der Fahne bis zum Erreichen von  $u_u$ . Die Anfangsvorticityverteilung in  $y$ -Richtung ist eine ungerade Funktion.

$$\overline{\eta}_f = \overline{\eta}_f(z) \cdot a_0 \cdot W_A \left( \exp \left[ -\left(\frac{y+C^*}{SIGY0}\right)^2 \right] - \exp \left[ -\left(\frac{y-C^*}{SIGY0}\right)^2 \right] \right) \quad (22)$$

mit

$$\overline{\eta}_f(z) = \frac{1}{2} \left( \operatorname{erf} \left[ \left(\frac{z-H-B^*}{SIGZ0}\right)^2 \right] - \operatorname{erf} \left[ \left(\frac{z-H+B^*}{SIGZ0}\right)^2 \right] \right) \quad (23)$$

Setzt man voraus, daß der Vertikalimpulsfluß an der Mündung dem des Doppelwirbels entspricht, erhält man für  $a_0$  die Beziehung

$$a_0 = \frac{A^*}{\sqrt{\pi} \cdot C^* \cdot SIGY0} \quad (24)$$

## 2.5 Rechenverfahren

Zur Berechnung des Aufstiegs werden die fünf partiellen Differentialgleichungen in Differenzgleichungen übergeführt und numerisch mit einem Iterationsverfahren schrittweise in Transportrichtung gelöst. Die Lösung der Poissongleichung (2) nimmt dabei die relativ größte Zeit in Anspruch. Die Differenzgleichung führt in diesem Fall auf ein lineares Gleichungssystem. Die Zahl der Gleichungen entspricht der Zahl der Gitterpunkte. In der jetzigen Version sind dies 558 Punkte. Diese relativ geringe Zahl von Gitterpunkten in einer Ebene  $x = \text{const.}$  genügt aufgrund der angenommenen Symmetrie und der Möglichkeit mit zunehmender Fahnenausdehnung die Gitterabstände zu vergrößern. Durch die Verwendung eines schnelleren Auflösungsverfahrens (zyklische Reduktion / 9/) kann in der erweiterten Version bis zu 15 % Rechenzeit eingespart werden.

### 3. Ergebnisse

Die mit dem Programm erzielbaren Ergebnisse lassen sich am besten an einem Beispiel erläutern. Die verwendeten Emissionsdaten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Abb. 1 enthält die Umgebungsbedingungen. Die Abbildungen 2 bis 21 zeigen Querschnitte durch die Kühlturmfahne senkrecht zur Transportrichtung. Eingezeichnet sind Isolinien der Differenz zwischen der Fahne und der Umgebung für die Temperatur, die spezifische Feuchte, die Vertikalgeschwindigkeit und den spezifischen Regentröpfchengehalt in den Entfernungen 120 m, 280 m, 520 m und 1000 m.

Mündungsfläche des Kühlturms	Temperaturdifferenz Fahne-Umgeb.	spez. Feuchtedifferenz Fahne-Umgeb. (Dampf u. Wolken-tröpfchen)	Vertikalgeschwindigkeit	spez. Regentröpfchengehalt	effektive Quellhöhe
3200 m <sup>2</sup>	20,3 K	15,8 g/kg	4,3 m/s	0,1 g/kg	120 m

Tabelle 1 Emissionsdaten des Kühlturms

#### 3.1 Temperatur

Die Entwicklung der Temperaturverteilung (Abb. 2-5) zeichnet sich durch das Entstehen zweier getrennter Bereiche mit höherer Temperatur aus, hervorgerufen durch das Einströmen von Umgebungsluft an der Unterseite der Fahne. Dieser Prozess führt in 1000 m Entfernung zur Ausbildung zweier getrennter Maxima. Die Temperaturgradienten im oberen Teil der Fahne sind weitaus stärker ausgeprägt als im unteren Teil. Auffällig ist außerdem die starke Temperaturabnahme der Fahne mit der Entfernung von der Quelle.

### 3.2 Spezifische Feuchte

Die Feuchteverteilungen (Abb. 6-9) ähneln stark derjenigen der Temperatur. Der sichtbare Teil der Fahne (in den Abbildungen gestrichelt eingetragen) verlagert sich mit zunehmender Quellentfernung in den oberen Teil der Fahne. Der sichtbare Teil der Fahne kann sich dabei in zwei getrennte Bereiche aufspalten, was auch an bestehenden Kühltürmen beobachtet wurde. In dem hier aufgeführten Beispiel tritt diese Trennung erst in Entfernungen größer als 1000 m auf. Am spezifischen Wolkentröpfchengehalt ist diese Entwicklung bereits in 1000 m erkennbar. Im Gegensatz zur Temperatur nimmt die Feuchte mit der Entfernung weniger stark ab.

### 3.3 Vertikalgeschwindigkeit

Die Vertikalgeschwindigkeit ist in der Fahne anders verteilt als Temperatur und Feuchte (Abb. 10-13). Das Maximum auf der Symmetrieachse befindet sich unterhalb desjenigen der Feuchte. Außerdem ist die Vertikalgeschwindigkeit annähernd symmetrisch um eine horizontale Linie in Höhe des Maximums. Andere Rechnungen zeigen, daß dieser Sachverhalt auch mit geänderten Umgebungsbedingungen im wesentlichen erhalten bleibt. Mit zunehmender Entfernung wird die vertikale Verteilung der Vertikalgeschwindigkeit immer ausgeglichener. Im Gegensatz zu den Temperatur- und Feuchtedifferenzen, die am unteren Rand der Fahne kaum noch feststellbar sind, ist dort noch eine ausgeprägte Vertikalgeschwindigkeit vorhanden. Die Vertikalgeschwindigkeit in Höhe der Kühlturmöffnung nimmt wie die maximale Vertikalgeschwindigkeit in diesem Beispiel nur langsam mit der Entfernung ab. Die Intensität der Vertikalgeschwindigkeit in den unteren Höhen wird allerdings durch die Umgebungsbedingungen wesentlich mitbeeinflusst. Je labiler die thermische Schichtung in Bodennähe ist, desto stärker ist die Vertikalgeschwindigkeit ausgeprägt.

In der Höhe des Maximums der Vertikalgeschwindigkeit treten an den Flanken der Fahne ausgeprägte Abwindzonen auf. Hierin spiegelt sich der Aufstieg der Fahne in Form eines Doppelwirbels wider. Im oberen und unteren Teil der Fahne sind diese Abwindzonen allerdings stark abgeschwächt. Auffällig ist außerdem die große Ausdehnung der Abwindzonen zu beiden Seiten der Fahne. Jede ist annähernd so breit wie die Fahne selbst.



### 3.4 Spezifischer Regentröpfchengehalt

Bei der Beurteilung der Auswirkungen von Kühlturm-fahnen spielt der Niederschlag aus der Fahne eine wesentliche Rolle. Die Verteilung (Abb. 14-17) des spezifischen Regentröpfchengehaltes ist dafür maßgebend. Aufgrund der Sinkgeschwindigkeit der Tröpfchen reicht die Verteilung bis zum Boden. Die Doppelwirbelstruktur der Fahne ist bei dieser Verteilung nur noch durch die schwach angedeutete Pilzform der Verteilung erkennbar. Das Maximum am Boden in Transportrichtung wird bereits in unmittelbarer Nähe des Kühlturms erreicht. Durch das Ausfallen der Tröpfchen nimmt der spezifische Regentröpfchengehalt rasch mit der Entfernung ab.

Der in 120 m Entfernung am Boden erreichte Wert von 0,03 g/kg entspricht einer Niederschlagsintensität von 0,4 mm/h. Dies ist bereits ein merklicher Niederschlag. Das hier angeführte Beispiel liefert keine realistischen Ergebnisse. Die Erfahrungen beweisen nämlich, daß bei den hier angenommenen Emissionen (die bereits einen guten Tröpfchenabscheider voraussetzen) und Umgebungsbedingungen kein Niederschlag zu beobachten ist. Die Parameter der Kessler'schen Theorie, die für die natürlichen Niederschlagsprozesse gelten, können deshalb nicht ohne weiteres auf die Kühlturm-fahne übertragen werden. Das Tröpfchenspektrum im natürlichen Regen weist einen erheblich stärkeren Anteil großer Tröpfchen auf. Sowohl durch die Tröpfchenabscheider als auch durch die kleine Vertikalgeschwindigkeit über den Kühlturmeinbauten wird der Anteil großer Regentröpfchen stark reduziert. In den Fällen, in denen tatsächlich Niederschlag aus der Kühlturm-fahne beobachtet wurde, handelt es sich um ein Nieseln /10/, /11/. In der Kessler'schen Theorie läßt sich diese Verschiebung im Spektrum durch eine Erhöhung des Niederschlagströpfchengrößenparameters  $N_0$  berücksichtigen. Aufgrund der Erfahrung und den Messungen in Neurath/12/ muß dieser Wert von  $10^7 \text{ m}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  auf  $10^{10} \text{ m}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  (entspricht Nieseln) erhöht werden. Mit diesem Wert wurde erneut ein Rechenlauf durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abbn. 18-21 dargestellt. Die Tröpfchen verdunsten in diesem Fall in allen Entfernungen bereits vor Erreichen des Erdbodens. In 200 m Entfernung fallen die Regentröpfchen am weitesten aus der Fahne. In 30 m über dem Boden sind sie jedoch praktisch verdunstet. Die Verteilung des spezifischen Regentröpfchengehaltes spiegelt deutlich die Form des Doppelwirbels wider. Die Abnahme mit der Entfernung geht erheblich langsamer vor sich, da kein Niederschlag

fällt. Ganz entscheidend für das Auftreten von Niederschlägen ist der Anteil der Regentröpfchen an der Kühlturmmündung. Der Beitrag zum Regentröpfchengehalt aufgrund der Umwandlung von Wolken in Regentröpfchen ist im allgemeinen nur sehr klein und kann deshalb nur in Fällen mit sehr hoher relativer Feuchte zu merklichem Niederschlag führen. Bei der Aufsummierung von theoretisch berechneten Niederschlägen aus Kühlturmfahnen sollte ein Schwellwert ( $\sim 0.025$  mm/h) unbedingt Berücksichtigung finden, da sonst unter Umständen eine merkliche Niederschlagsmenge pro Jahr errechnet wird, ohne daß je ein spürbarer Niederschlag aus der Fahne gefallen ist.

#### 4. Durchstoßen einer dünnen Höheninversion

Bei der Diskussion über den Aufstieg von Kühlturmfahnen spielt das Durchstoßen von Inversionen eine große Rolle. Aus diesem Grund wurde auch dieser Fall untersucht. Das Temperaturprofil in der Umgebung wurde entsprechend Abb. 22 modifiziert. Alle anderen Umgebungsbedingungen bleiben unverändert. Die Abbn. 23-25 veranschaulichen die Verteilung der Temperaturdifferenz zwischen Fahne und Umgebung in Form von Isolinien. Bereits in 280 m Entfernung deutet sich die Aufspaltung der Verteilung in zwei Bereiche an. In 520 m Entfernung weist das Zentrum der Fahne bereits negative Temperaturdifferenzen auf. An der Untergrenze der Inversion verbreitert sich die Fahne. Dort befindet sich ein Bereich mit Übertemperaturen. Diese Zweiteilung der Fahne wird in 1000 m Entfernung noch deutlicher. Der Bereich negativer Temperaturdifferenzen weitet sich über der Inversionsschicht und der Übertemperaturbereich an der Untergrenze der Inversion aus. Die gestrichelte Kurve umrahmt den sichtbaren Teil der Fahne. Man erkennt deutlich, daß die sichtbare Fahne die Inversion durchstößt.

Die entsprechenden Vertikalgeschwindigkeitsverteilungen unterscheiden sich in den Entfernungen 280 m und 520 m nur unwesentlich von derjenigen ohne Inversion. Erst in 1000 m Entfernung (Abb. 26) entstehen drei Maxima. Im Zentrum der Fahne bildet sich ein Minimum aus, das aufgrund der starken Bremsung in der Inversion entsteht. Beim Durchstoßen einer Höheninversion kann somit eine Bifurkation in der Vertikalgeschwindigkeitsverteilung erfolgen.

## 5. Vergleich mit Messungen

Da es sich bei den gezeigten Verteilungen nur um zwei willkürlich herausgegriffene Beispiele handelt, kann ein Vergleich mit Messungen vorerst nur qualitativ erfolgen. Die Messungen, die dafür geeignet sind, wurden unter der Leitung von Prof. Fortak von der DFVLR im Rahmen des HHT-Projekts der Kernforschungsanlage Jülich in den Kühlturm-fahnen von Neurath und Meppen durchgeführt /13/. Besonders die Messungen in Meppen (nur ein Kühlturm) sind für einen Vergleich geeignet. Dabei zeigt sich, daß die Verteilungen der relevanten Parameter in der Kühlturm-fahne durch das Modell bereits gut beschrieben werden. Sowohl die Form der Fahne bei Temperatur und Feuchte als auch die Vertikalgeschwindigkeitsverteilung mit den Abwindzonen entsprechen den Meßergebnissen. Es ist somit anzunehmen, daß durch Anpassung der Modellparameter auch eine quantitative Übereinstimmung zu erzielen ist. Hierfür sind jedoch die detaillierten Meßdaten erforderlich, die demnächst zur Verfügung stehen werden.

## 6. Schlußfolgerungen

Das dreidimensionale Modell ist gegenüber eindimensionalen Modellen /1/, /14/, /15/, /16/ eine erhebliche Verbesserung. Vor allem zwei Annahmen der eindimensionalen Modelle erweisen sich aufgrund der Messungen und der dreidimensionalen Rechnungen als unrealistisch.

- 1) Die Verteilungen der Feuchteerhöhung und der Übertemperatur in der Fahne entsprechen nicht einmal annähernd einer Gaußverteilung.
- 2) Die Vertikalgeschwindigkeitsverteilung entspricht nicht der Verteilung der Temperatur- oder Feuchteunterschiede gegenüber der Umgebung. Abwinde bleiben unberücksichtigt.

Aufgrund von 1) ist es zweifelhaft, ob die Effekte in Bodennähe sowie die horizontale Breite der Fahne und somit auch die Abschattung realistisch abgeschätzt werden können. Zur Berechnung des Niederschlags ist die Vertikalgeschwindigkeitsverteilung in der Fahne entscheidend. Eine Simulation der Niederschlagsintensität mit eindimensionalen Modellen führt deshalb kaum zu realistischen Ergebnissen. Außerdem lassen sich sowohl vertikale Strukturen der atmosphärischen Umgebungsbedingungen als auch die Überlagerung mehrerer Kühlturm-fahnen nur unzureichend erfassen.

Mit eindimensionalen Modellen ist bei geeigneter Anpassung lediglich die Länge und die vertikale Ausdehnung der sichtbaren Fahne simulierbar. Für die Untersuchung von kritischen Einzelfällen sind sie nicht geeignet.

Die mit eindimensionalen Modellen gewonnenen statistischen Aussagen können trotzdem als Abschätzung der zu erwartenden Auswirkungen angesehen werden, da man davon ausgehen kann, daß sich die Fehler der Einzelfälle wenigstens teilweise kompensieren.

## 7. Zukünftige Entwicklung

Die im Programm WALKÜRE enthaltenen frei wählbaren Parameter werden anhand der Messungen in den Kühlturmfahnen von Meppen und Neurath weiter der Realität angepaßt. In Arbeit ist die Erweiterung des Programms zur Berücksichtigung mehrerer Quellen. In diesem Zusammenhang wird auch der Ansatz für die induzierte Turbulenz verbessert werden. Anschließend ist die Ankopplung der bereits vorhandenen Programme zur Berechnung der Emissionsbedingungen und der Abschätzung aufgrund der sichtbaren Fahne vorgesehen, so daß die wesentlichen Effekte zur Beurteilung der Auswirkungen von Kühlturmfahnen berechnet werden können.

Symbolliste

$a_0$	:	Konstante in der Anfangsbedingung für die Vorticity in $m^{-1}$
$A^*$	:	Parameter zur Charakterisierung der Vertikalausdehnung der Anfangsfelder in m
$B$	:	Breite des Integrationsfeldes in m
$B^*$	:	Parameter zur Charakterisierung der Horizontalausdehnung der Anfangsfelder in m
$C_0$	:	Proportionalitätsfaktor zur Berechnung von $K_{ind}$ in m
$C^*$	:	Lage des anfänglichen Vorticitymaximums in m
$C_p$	:	spezifische Wärme bei konstantem Druck in $kcal \cdot kg^{-1} \cdot grad^{-1}$
erf	:	Error-function
$F$	:	beliebige einer turbulenten Diffusion unterworfenen Eigenschaft
$\overline{F}$	:	spezifische Feuchtedifferenz (Dampf und Wolkenröpfchen) zwischen Fahne und Umgebung in $g \cdot kg^{-1}$
$f_u$	:	spezifische Feuchte der Umgebung in $g \cdot kg^{-1}$
$g$	:	Erdbeschleunigung in $m \cdot s^{-2}$
$H$	:	Höhe des Integrationsbereiches in m
$H^*$	:	effektive Quellhöhe in m
$K_{at}$	:	atmosphärischer Diffusionskoeffizient in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{ij}$	:	allgemeiner Diffusionskoeffizient in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{ind}$	:	induzierter Diffusionskoeffizient in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{hy}$	:	Diffusionskoeffizient für Wärme in y-Richtung in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{hz}$	:	" " " in z-Richtung in "
$K_{my}$	:	" " Impuls in y-Richtung in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{mz}$	:	" " " in z-Richtung in "
$K_{ry}$	:	" " Regentröpfchen in y-Richtung in $m^2 \cdot s^{-1}$
$K_{rz}$	:	" " " in z-Richtung in "
$L$	:	latente Verdampfungswärme in $kcal \cdot g^{-1}$
$No$	:	Regentröpfchengrößenparameter in $m^{-1} \cdot kg^{-1}$
$\overline{Pr}$	:	Produktionsterm aufgrund wolkenphysikalischer Prozesse in $g \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$
$q_{co}$	:	Schwellwert der Autoconversion in $g \cdot kg^{-1}$
$\overline{q_{cf}}$	:	spez. Wolkenröpfchengehalt der Fahne in $g \cdot kg^{-1}$
$\overline{q_{rf}}$	:	spez. Regentröpfchengehalt " " " "
$\overline{q_v}$	:	spez. Wasserdampfdifferenz zwischen Fahne und Umgebung in $g \cdot kg^{-1}$
$\overline{q_{vf}}$	:	spez. Wasserdampfgehalt der Fahne in $g \cdot kg^{-1}$
$q_{vs}$	:	spez. Wasserdampfgehalt bei Sättigung in $g \cdot kg^{-1}$
$q_{vu}$	:	spez. Wasserdampfgehalt in der Umgebung in $g \cdot kg^{-1}$

SIGY0	:	Streuung in y-Richtung in den Anfangsbedingungen in m
SIGZ0	:	Streuung in z-Richtung in den Anfangsbedingungen in m
t	:	Zeit in s
$\overline{T}_v$	:	virtuelle Temperaturdifferenz zwischen Fahne und Umgebung in K
$\overline{T}_{vf}$	:	virtuelle Temperatur in der Fahne in K
$\overline{T}_{vu}$	:	virtuelle Temperatur in der Umgebung in K
$\overline{T}_s$	:	spez. Temperaturdifferenz zwischen Fahne und Umgebung in K
u	:	horizontale Geschwindigkeit in Transportrichtung in $m \cdot s^{-1}$
$\frac{u_u}{V_f}$	:	Windgeschwindigkeit in der Umgebung in $m \cdot s^{-1}$
$\frac{v_u}{V_r}$	:	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung in der Fahne in $m \cdot s^{-1}$
$\frac{v_u}{V_r}$	:	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung in der Umgebung in $m \cdot s^{-1}$
$\frac{w_f}{w_u}$	:	mittlere Fallgeschwindigkeit der Regentröpfchen in $m \cdot s^{-1}$
$\frac{w_f}{w_u}$	:	Vertikalgeschwindigkeit in der Fahne in $m \cdot s^{-1}$
$ W(x) _{\max}$	:	maximale Vertikalgeschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$
$w_u$	:	Vertikalgeschwindigkeit in der Umgebung in $m \cdot s^{-1}$
x	:	Koordinate in Transportrichtung in m
y	:	horizontale Koordinate senkrecht zur Transportrichtung in m
z	:	vertikale Koordinate senkrecht zur Transportrichtung in m
$\alpha$	:	Proportionalitätskonstante der Autoconversion in $s^{-1}$
$\beta$	:	Proportionalitätskonstante des Regentröpfchenwachstums in $(kg \cdot g^{-1})^{7/8} \cdot s^{-1}$
$\beta^*$	:	Proportionalitätskonstante des Regentröpfchenwachstums in $(kg \cdot g^{-1}) (m \cdot g)^{1/8} \cdot s^{-1}$
$\gamma$	:	Proportionalitätskonstante der Verdunstung in $(kg \cdot g^{-1})^{13/20} \cdot s^{-1}$
$\gamma^*$	:	Proportionalitätskonstante der Verdunstung in $(kg \cdot g^{-1}) (m \cdot g)^{7/20} \cdot s^{-1}$
$\overline{\eta}_f$	:	Vorticity in der Fahne in $s^{-1}$
$\overline{\phi}_f$	:	Stromfunktion in der Fahne in $m^2 \cdot s^{-1}$
$\overline{\rho}_f$	:	Dichte in der Fahne in $g \cdot m^{-3}$
$\overline{\rho}_u$	:	Dichte in der Umgebung in $g \cdot m^{-3}$

## 8. Literatur

- /1/ Bericht zuhanden der Eidgenössischen Kühlturmkommission über den heutigen Stand der Kenntnisse und die entwickelte Arbeitsmethode zur Abschätzung der meteorologischen Auswirkungen von Kühltürmen  
Dienst für die Reinhaltung der Luft, Payerne, 1972
- /2/ A. Martin;  
The influence of a Power Station on Climate - A Study of Local Weather Records  
Atmospheric Environment, Vol 8, S. 419-424, 1974
- /3/ H. Bartels and J.W. Caspar;  
Cooling-Tower Experience and the Meteorological Consequences of Thermal Discharges from Nuclear Power Plants in the Federal Republic of Germany  
IAEA-Symposium on the Physical and Biological Effects on the Environment of Cooling Systems and Thermal Discharges at Nuclear Power Stations, Oslo, 26-30 Aug, 1974, Vienna: IAEA 1975, S. 85-98
- /4/ G. Arnason, R.S. Greenfield and E.A. Newburg;  
A Numerical Experiment in Dry and Moist Convection Including the Rain Stage  
J.of.Atm. Sciences, Volume 25, S. 404, 1968
- /5/ D.K. Lilly;  
Numerical Solutions for the Shape-Preserving Twodimensional Thermal Convection Element  
J.of.Atm. Sciences, Volume 21, S. 83, 1964
- /6/ Y. Ogura;  
The Evolution of a Moist Convective Element in a Shallow, Conditionally Unstable Atmosphere: A Numerical Calculation  
J.of.Atm. Sciences, Volume 20, S. 407, 1963
- /7/ J.Taft;  
A Numerical Model for the Investigation of Moist, Buoyant Cooling-Tower Plumes  
Symposium on Cooling Tower Environment, University of Maryland, College Park, Md., March 4-6, 1974  
ERDA symposium Series, CONF-740302, S. 180-204, 1974

- /8/ E. Kessler;  
The Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric  
Circulations  
Met. Monographs, Nr. 32, Nov. 1969
- /9/ U. Schumann;  
Über die direkte Lösung der diskretisierten Poisson-Gleichung mittels  
zyklischer Reduktion  
Externer Bericht, KFK -Ext.8/75-6, 1975
- /10/ H. Berge, E. King, D. Lorenz;  
Wasserdampfemissionen im Bereich eines konventionellen thermischen  
Kraftwerks  
Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 15, Nr. 6, 1975
- /11/ A. Martin and F.R. Barber;  
Measurements of Precipitation Downwind of Cooling Towers  
Atmospheric Environment, Vol. 8, S. 373-381, 1974
- /12/ E. Baer et al;  
Untersuchungen an einem Naturzug Naßkühlturm  
Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 15, Nr. 5, 1974
- /13/ H. Fortak;  
Meßprogramm an Kühltürmen, III. Teil  
JÜL-1250, 1975
- /14/ S.R. Hanna;  
Fog and Drift Deposition from Evaporative Cooling Towers  
Nuclear Safety, Vol. 15, No. 2, S. 190-196, 1974
- /15/ W. Ott;  
Ein physikalisch-numerisches Modell zur Bestimmung der meteorologischen  
Umweltbeeinflussung durch Kühltürme  
Meteorologische Rundschau, 26, Heft 4, S. 97- 102, 1973



/16/ H.R.A. Wessels, J.A. Wisse;  
A Method for Calculating the size of Cooling Tower Plumes,  
Atmospheric Environment 5, S. 143-150, 1971

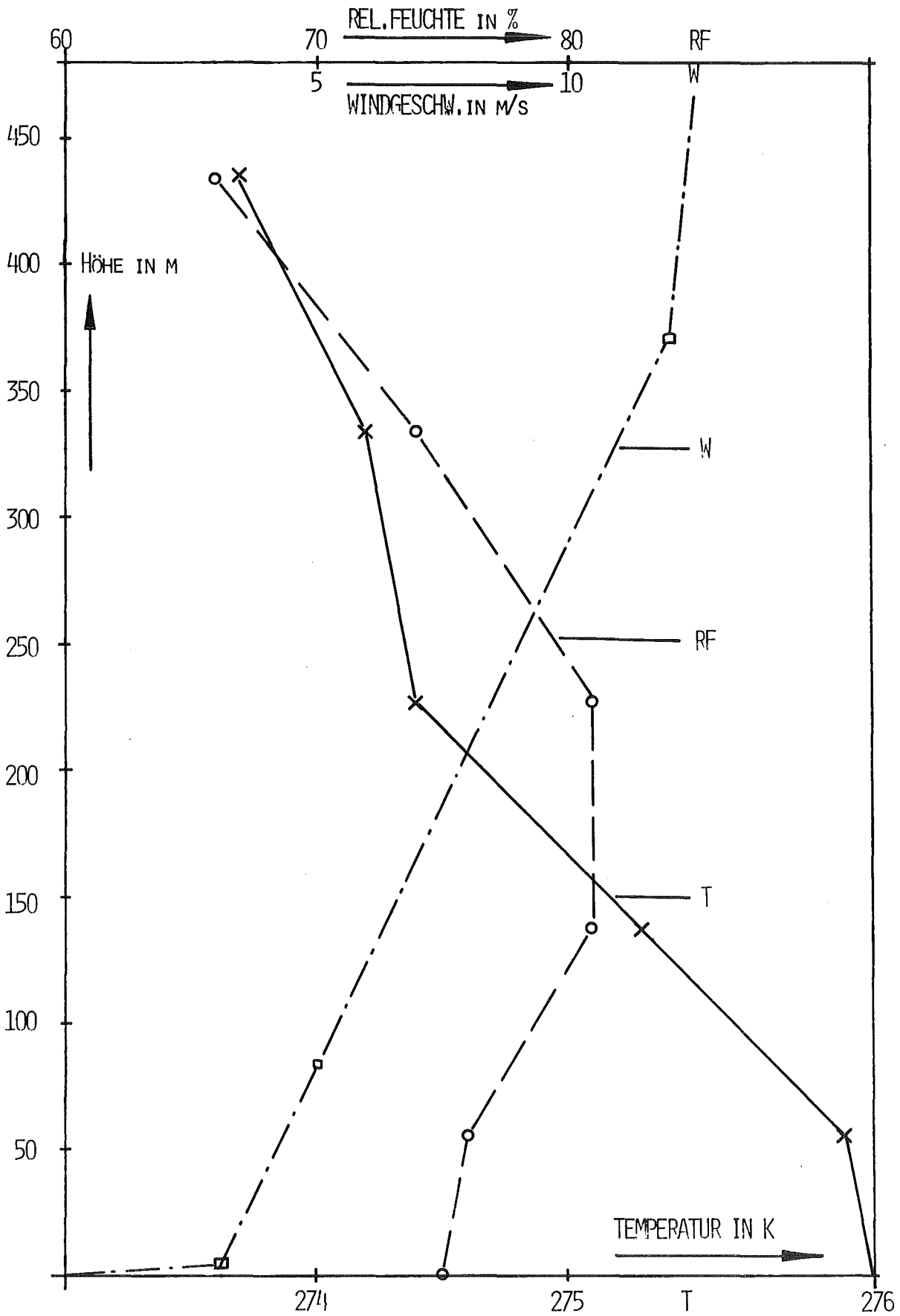


ABB. 1 UMGEBUNGSBEDINGUNGEN

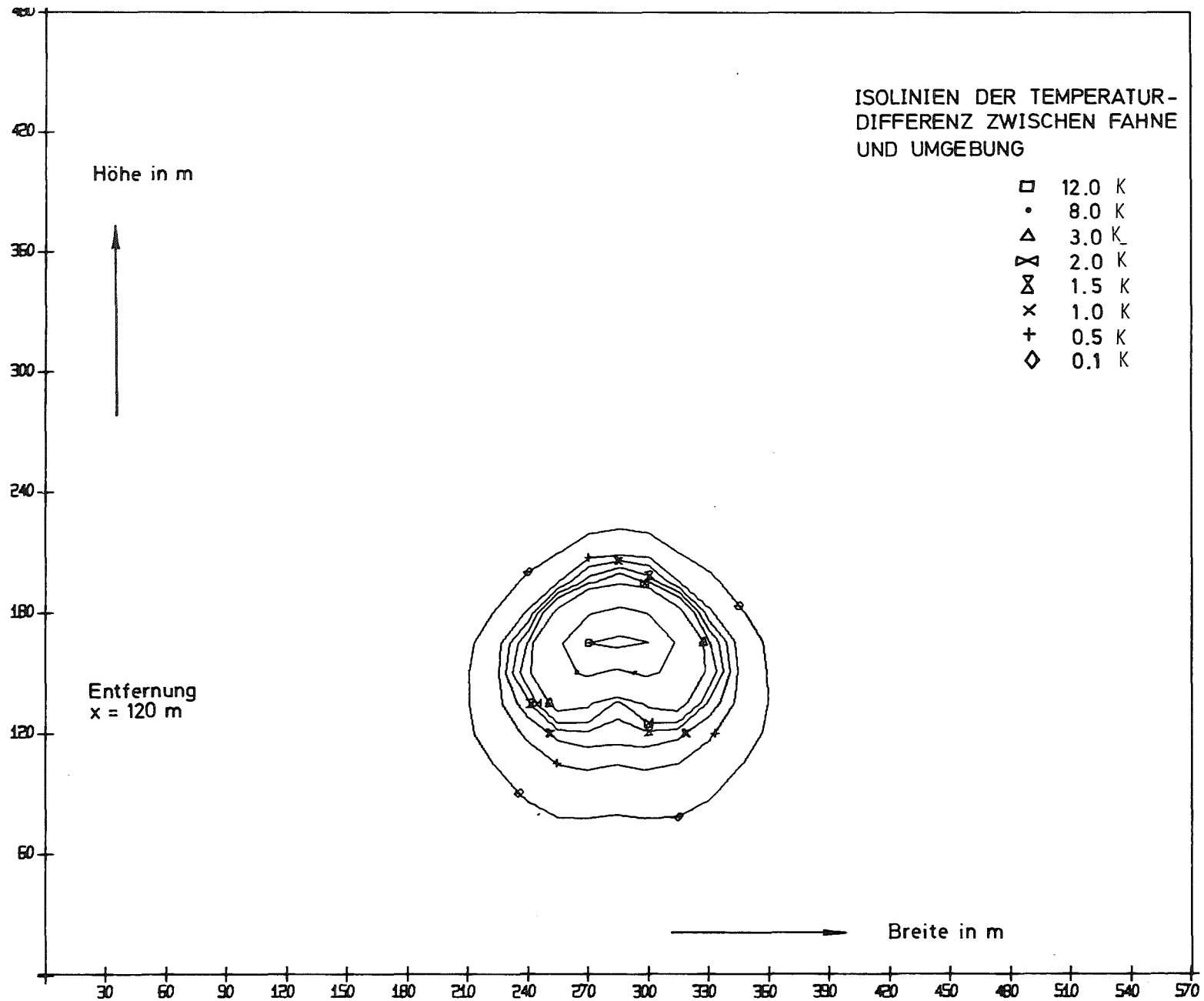


ABB. 2 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 120 m

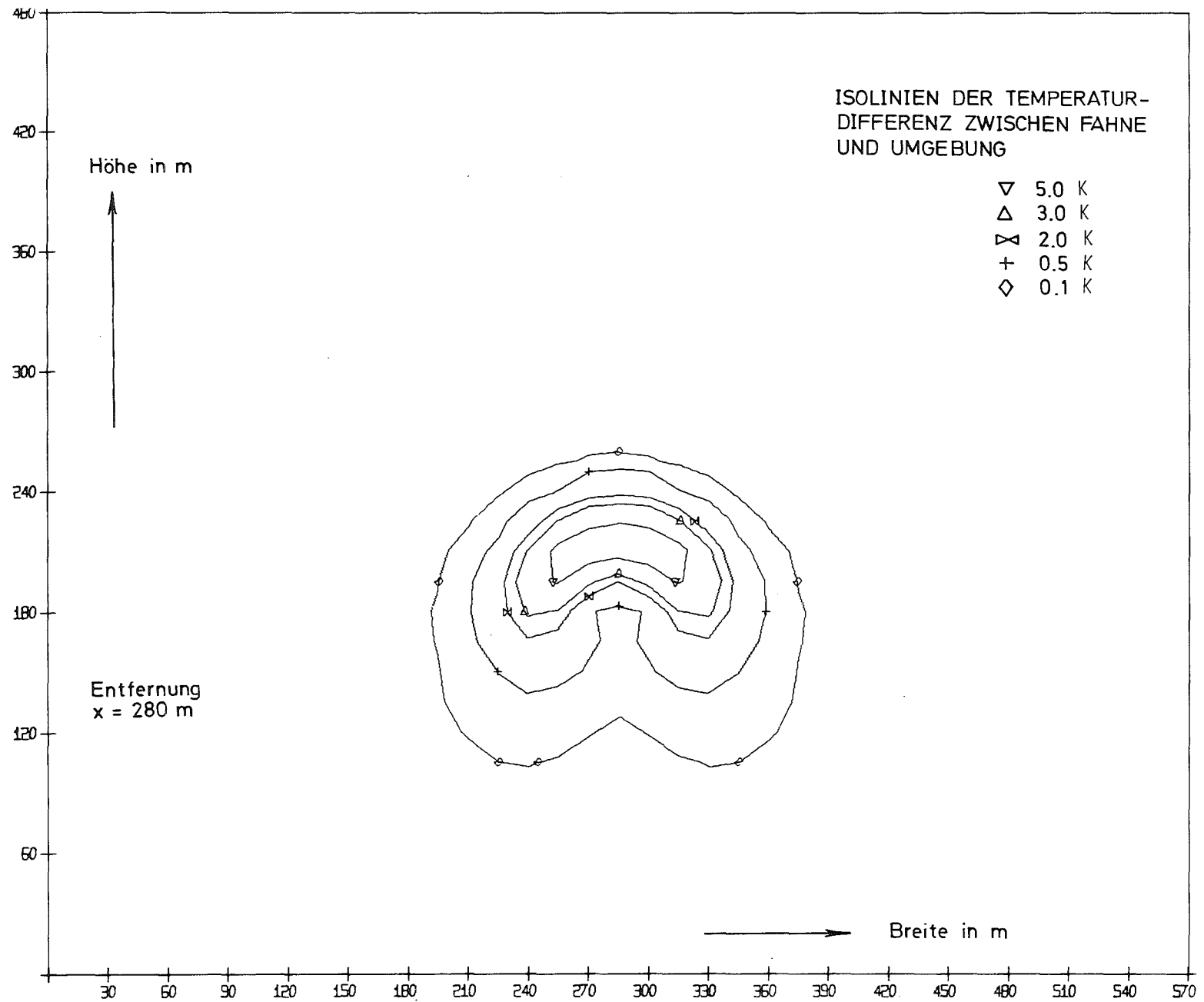


ABB. 3 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 280 m

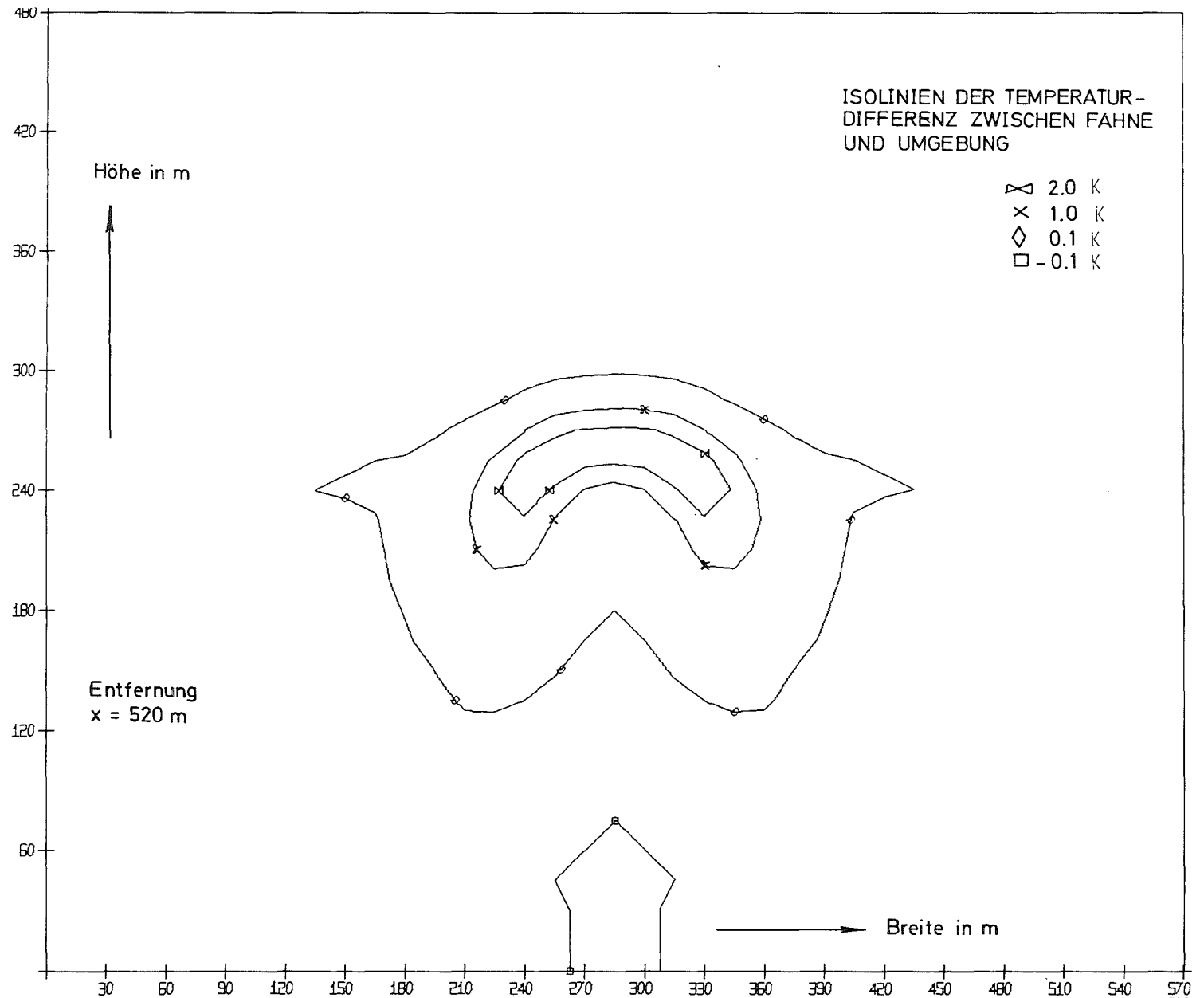


ABB. 4 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 520 M

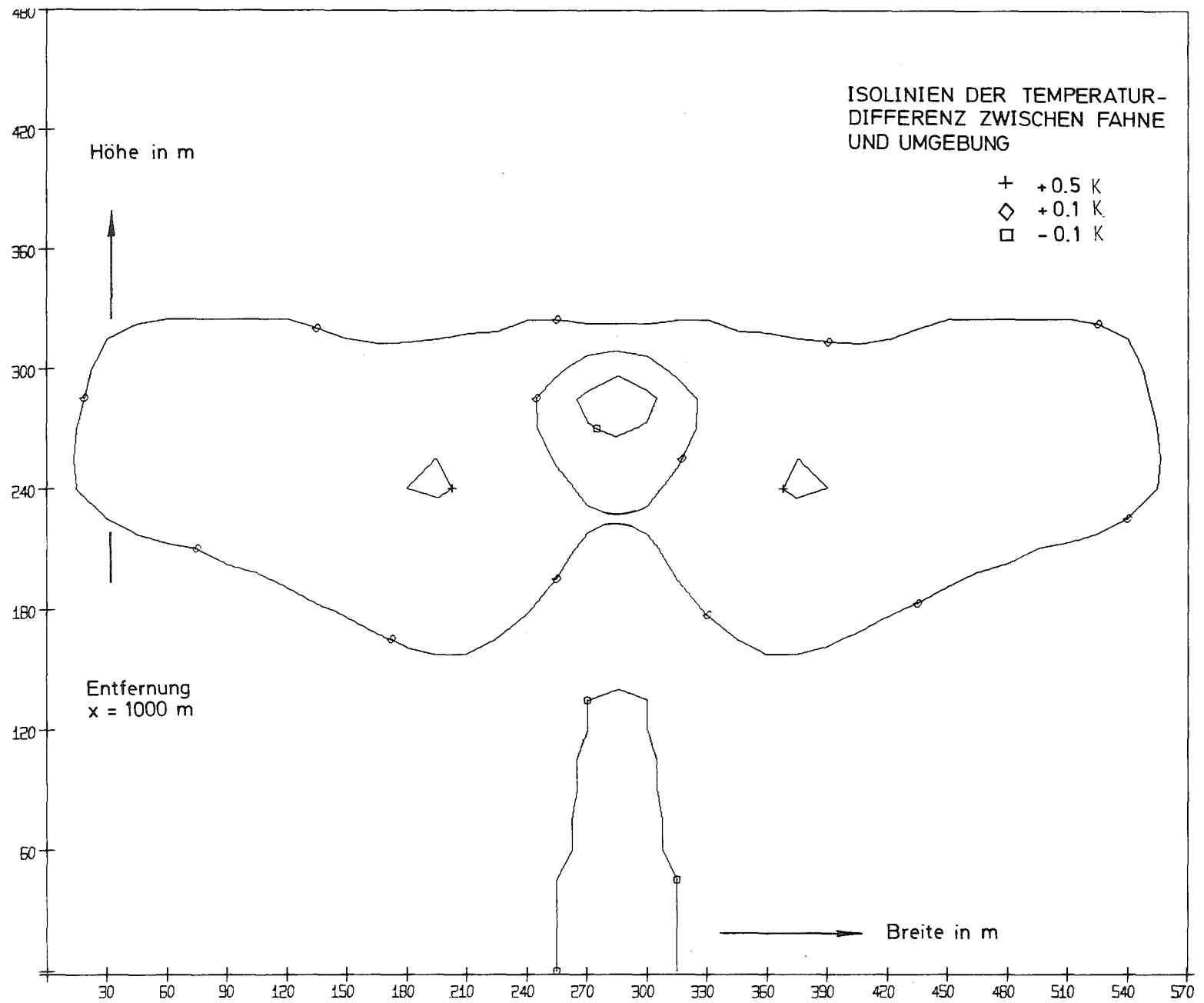


ABB. 5 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 1000 m

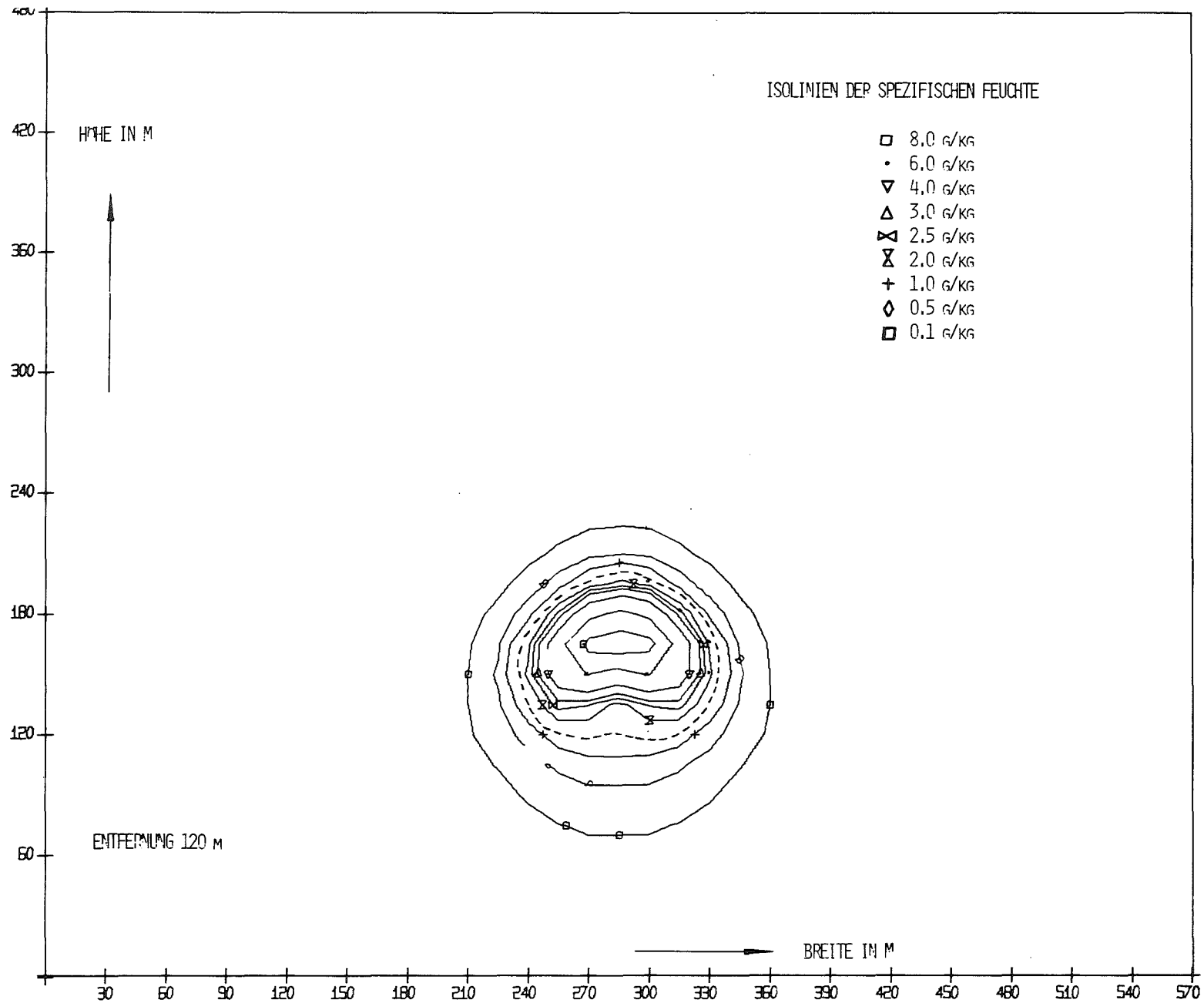


ABB. 6 ISOLINIEN DER SPEZIFISCHEN FEUCHTEDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFÄHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG

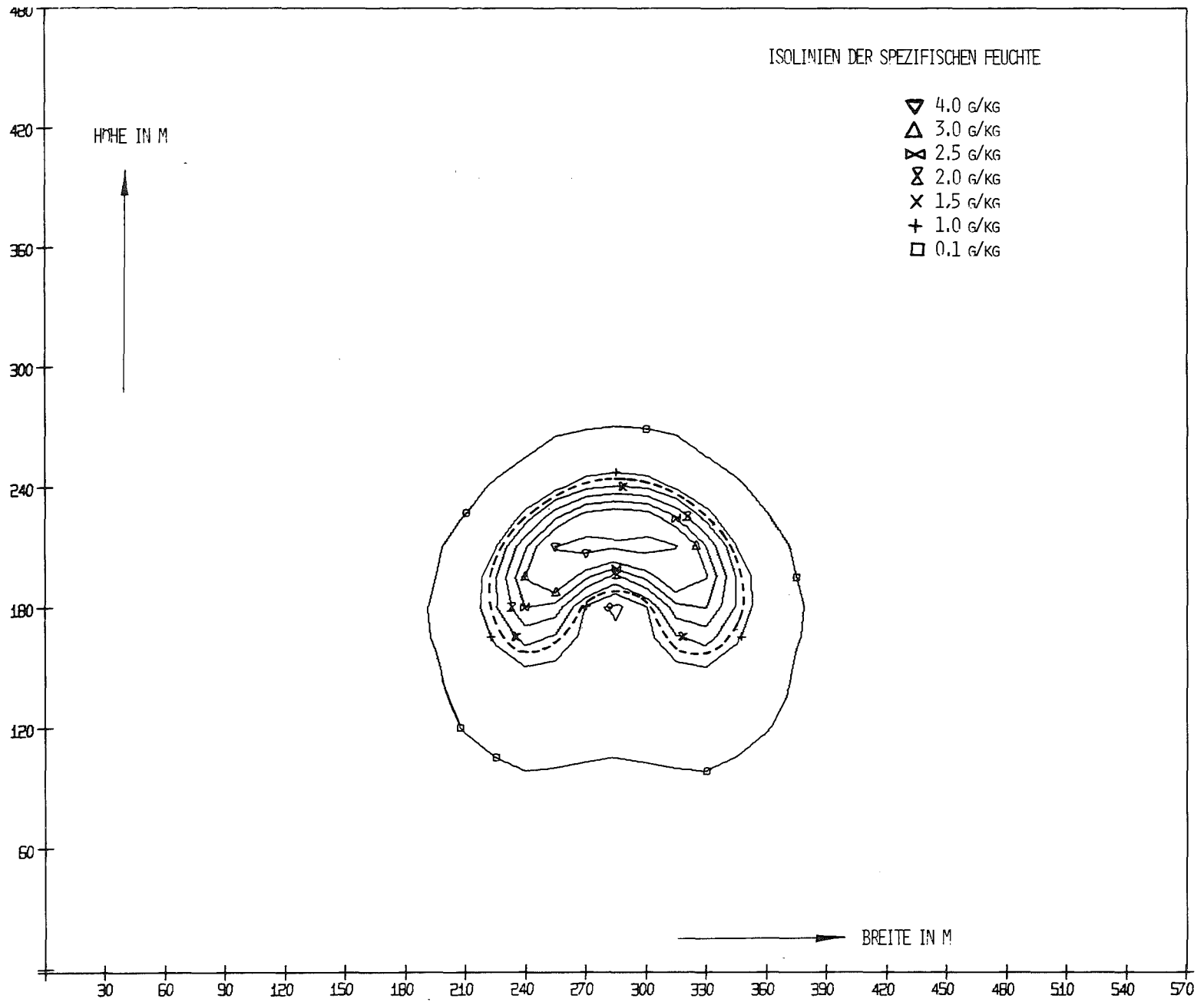


ABB. 7 ISOLINIEN DER SPEZIFISCHEN FEUCHTEDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFÄHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 280 M



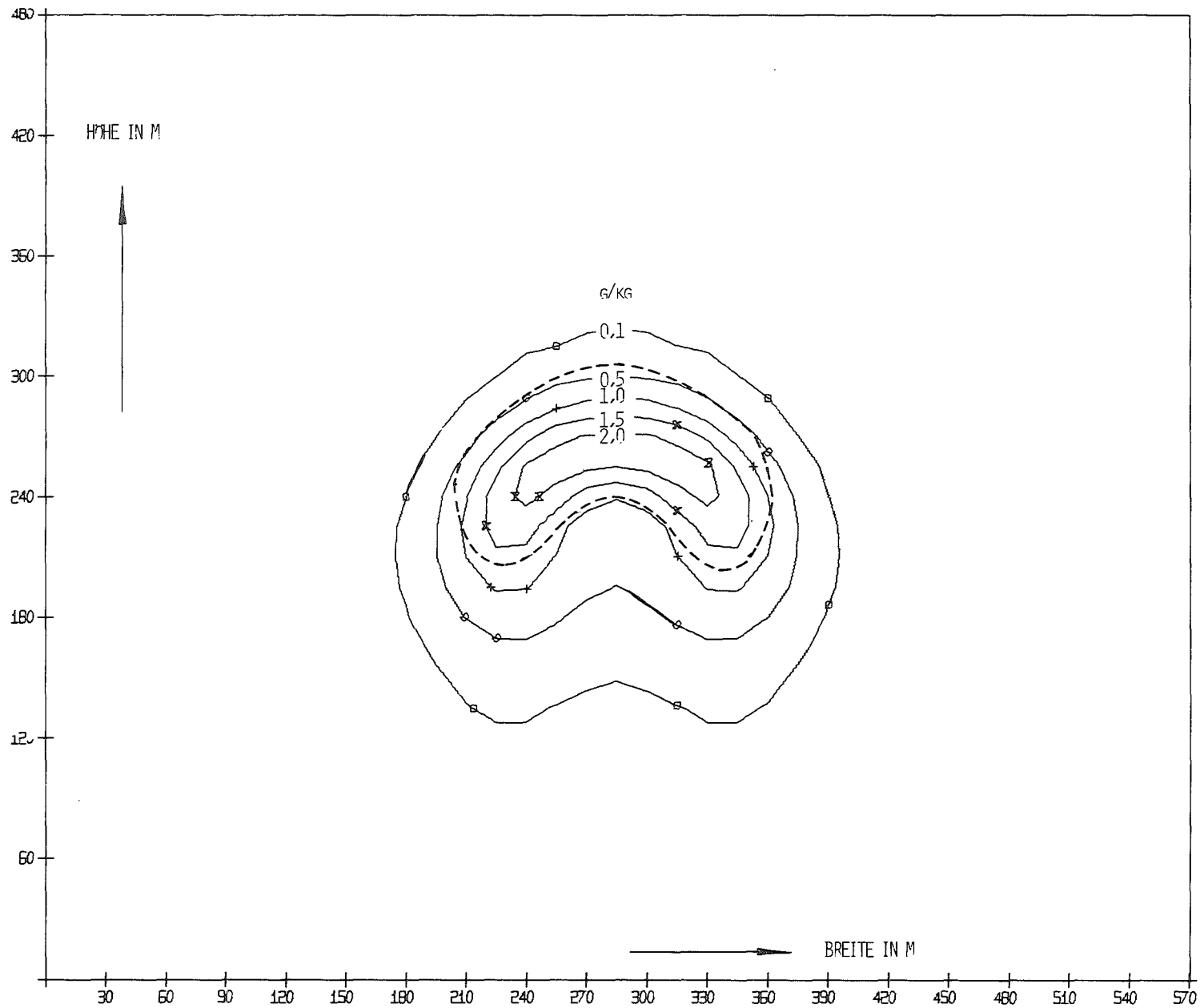


ABB. 8 ISOLINIEN DER SPEZIFISCHEN FEUCHTEDIFFERENZ ZWISCHEN KÜHLTURMFÄHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 520 M

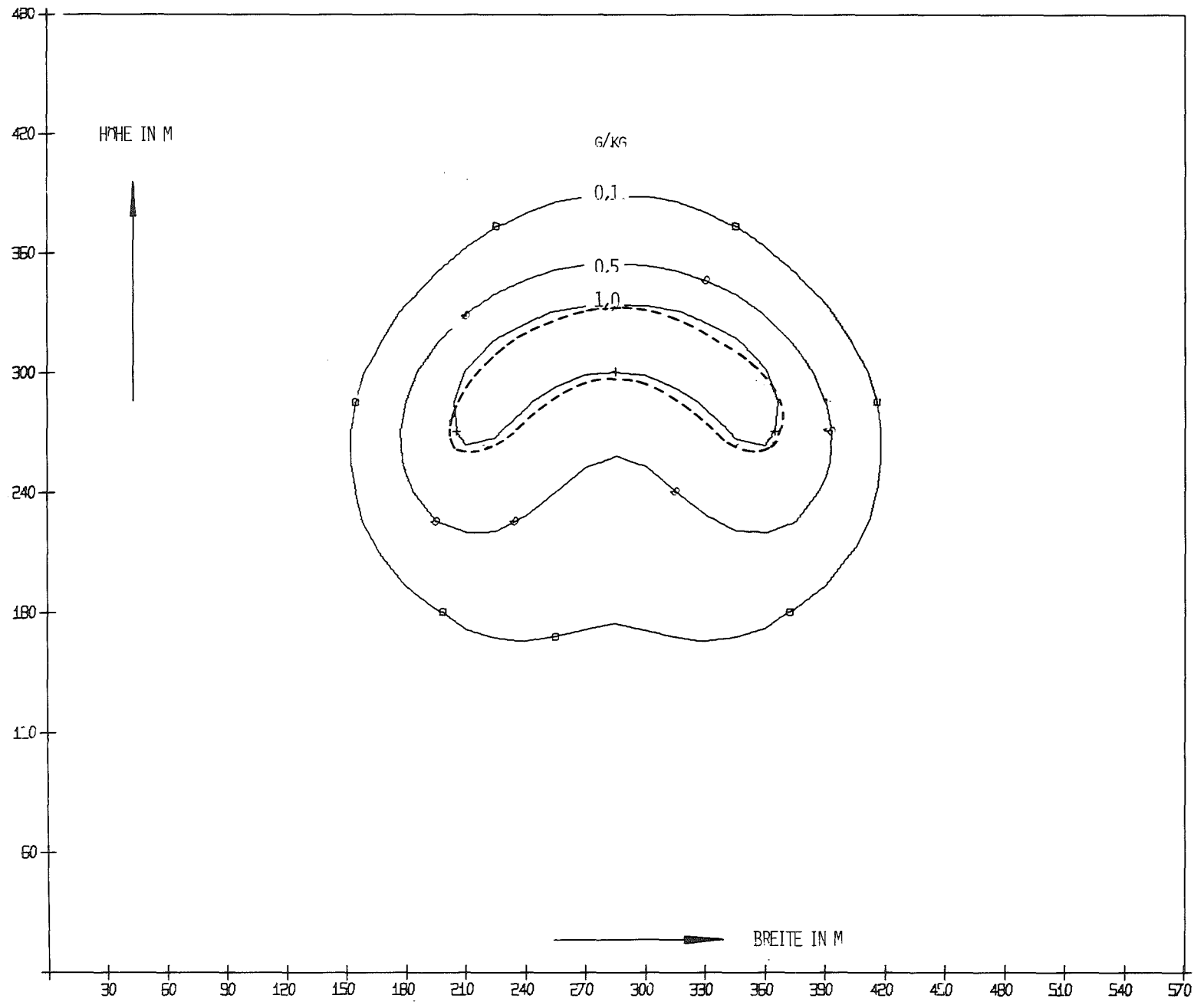


ABB. 9 ISOLINIEN DER SPEZIFISCHEN FEUCHTEDIFFERENZ ZWISCHEN KOHLTURMFÄHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 1000 M

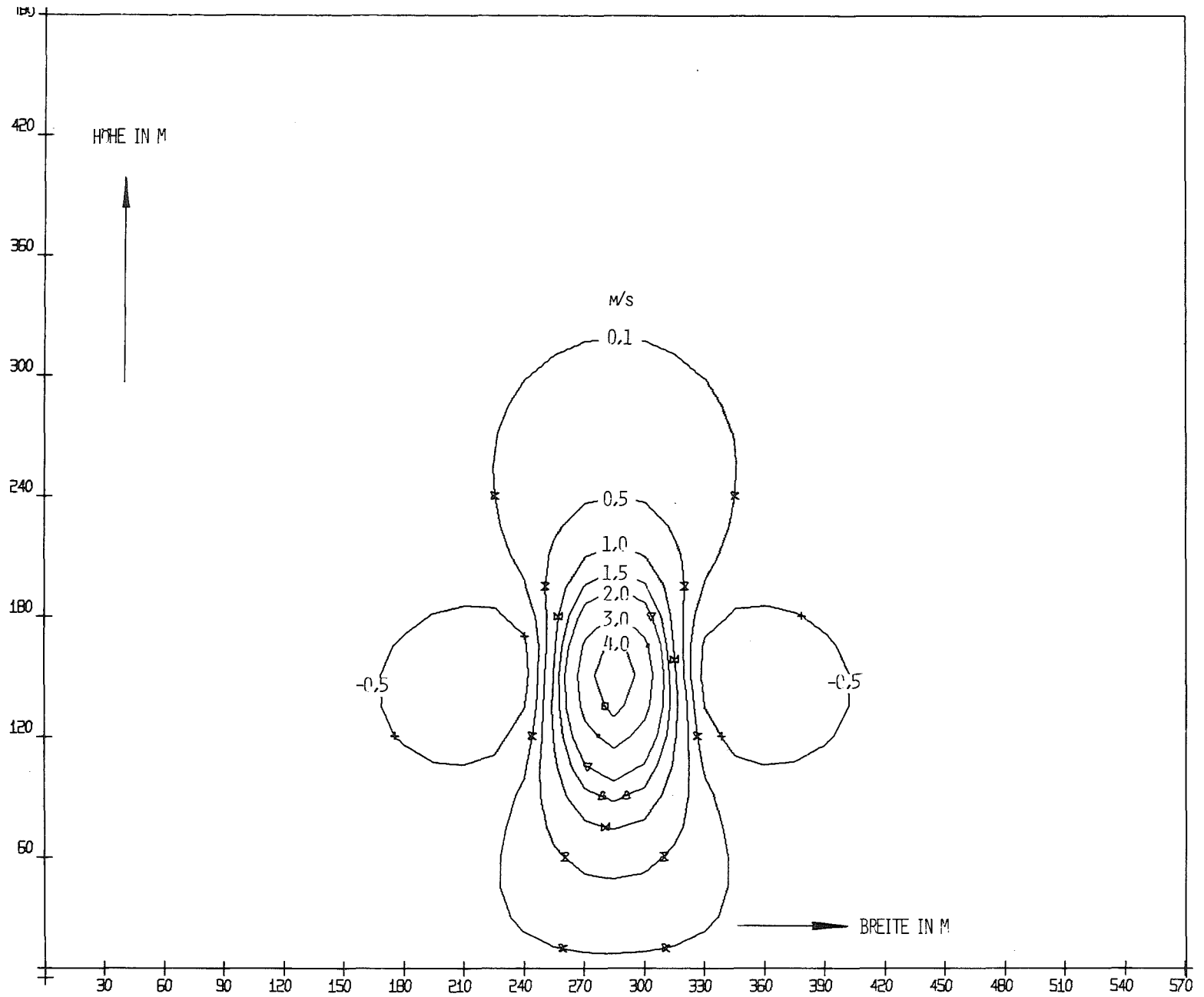


ABB. 10 ISOLINIEN DER VERTIKALGESCHWINDIGKEIT IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 120 M

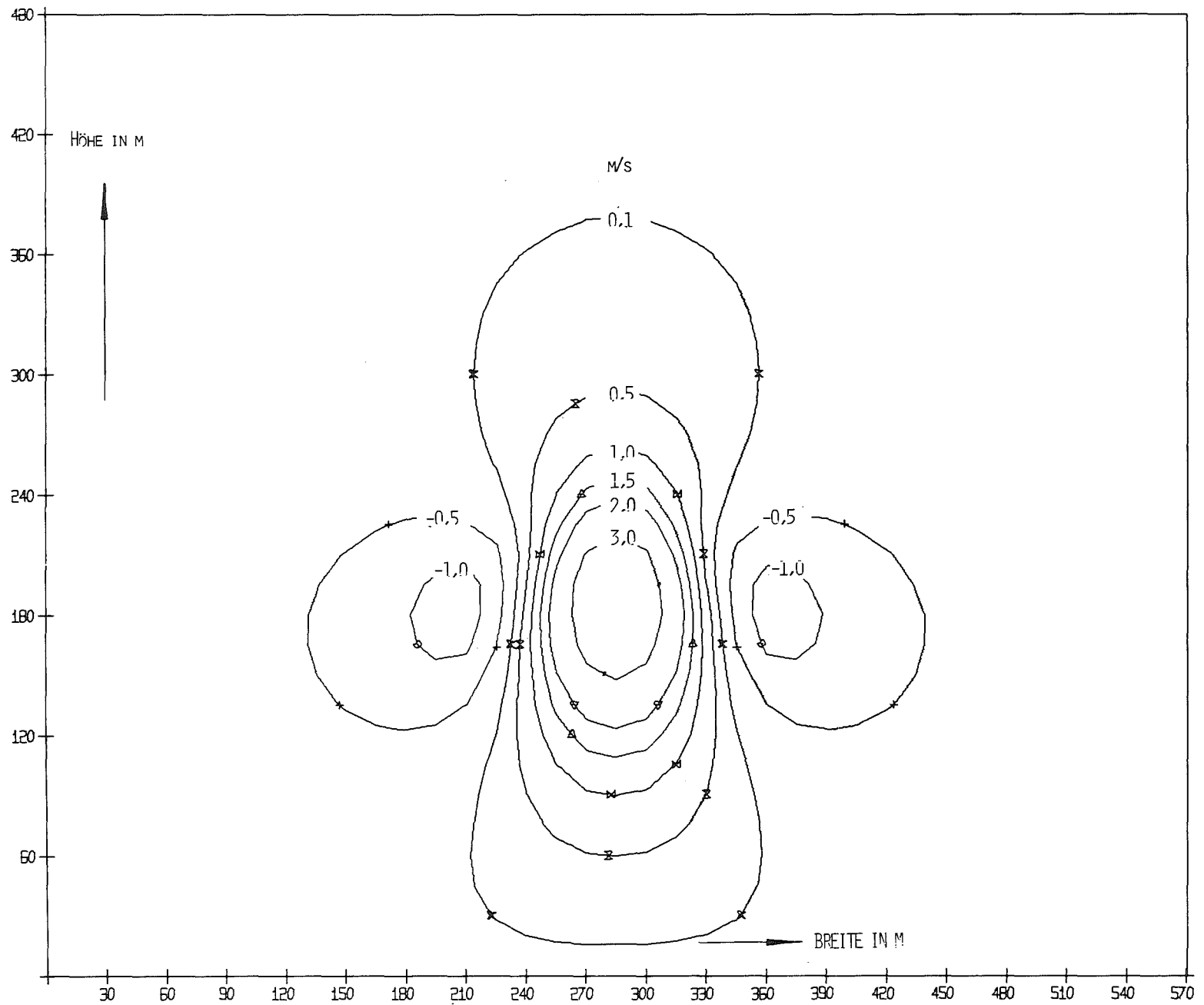


ABB. 11 ISOLINIEN DER VERTIKALGESCHWINDIGKEIT IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 280 M

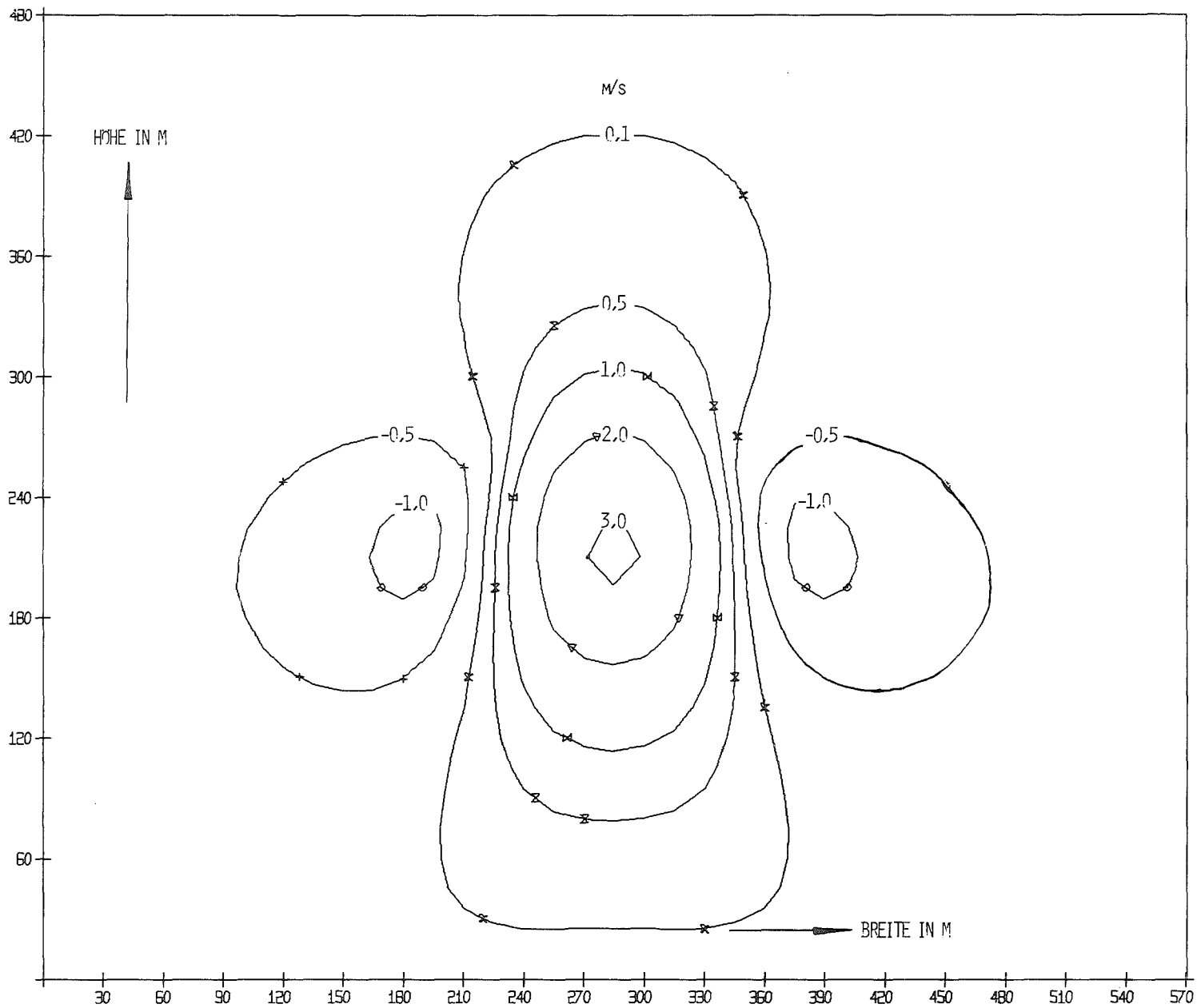


ABB. 12 ISOLINIEN DER VERTIKALGESCHWINDIGKEIT IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 520 M

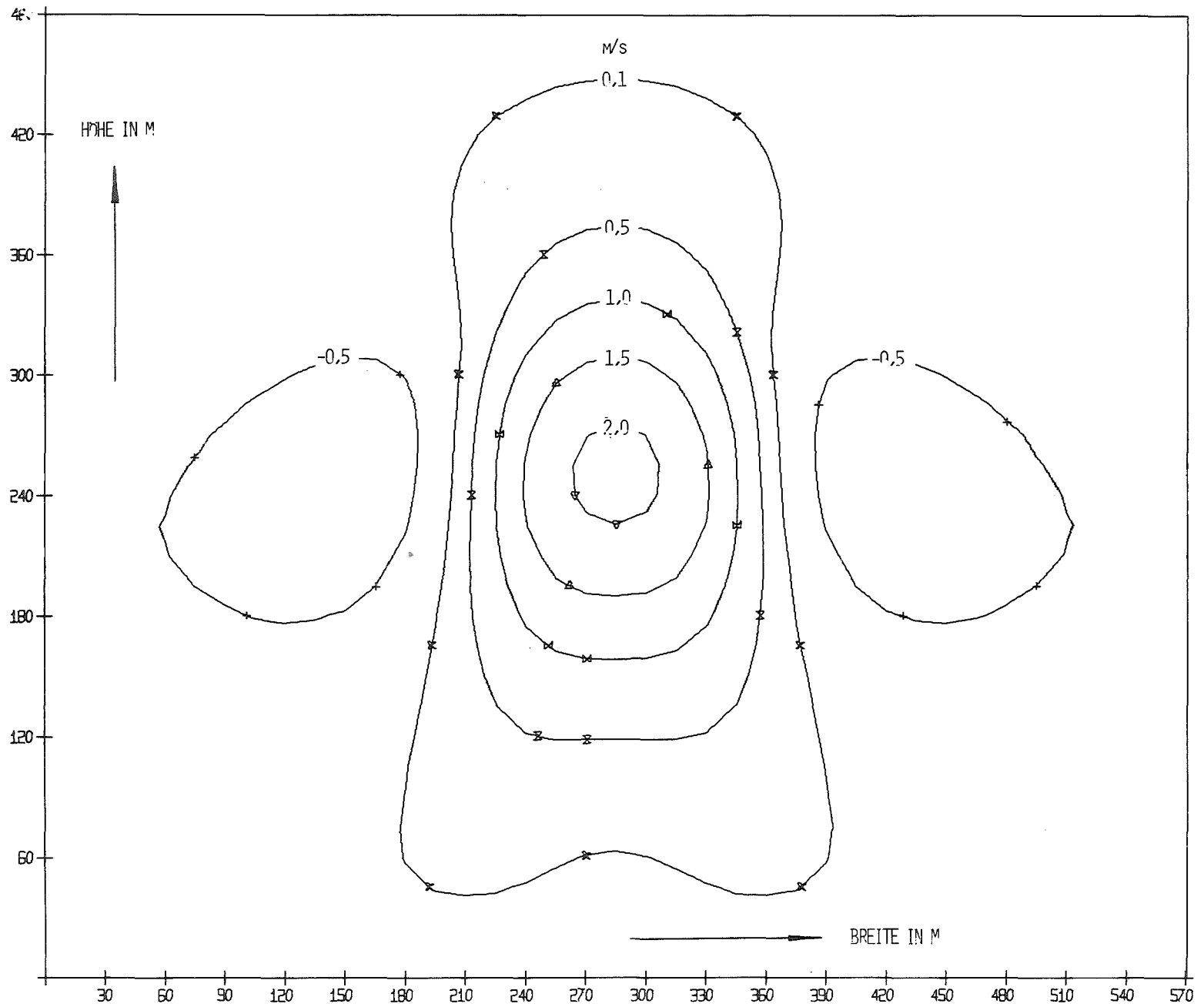


ABB. 13 ISOLIINIEN DER VERTIKALGESCHWINDIGKEIT IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG; ENTFERNUNG 1000 M

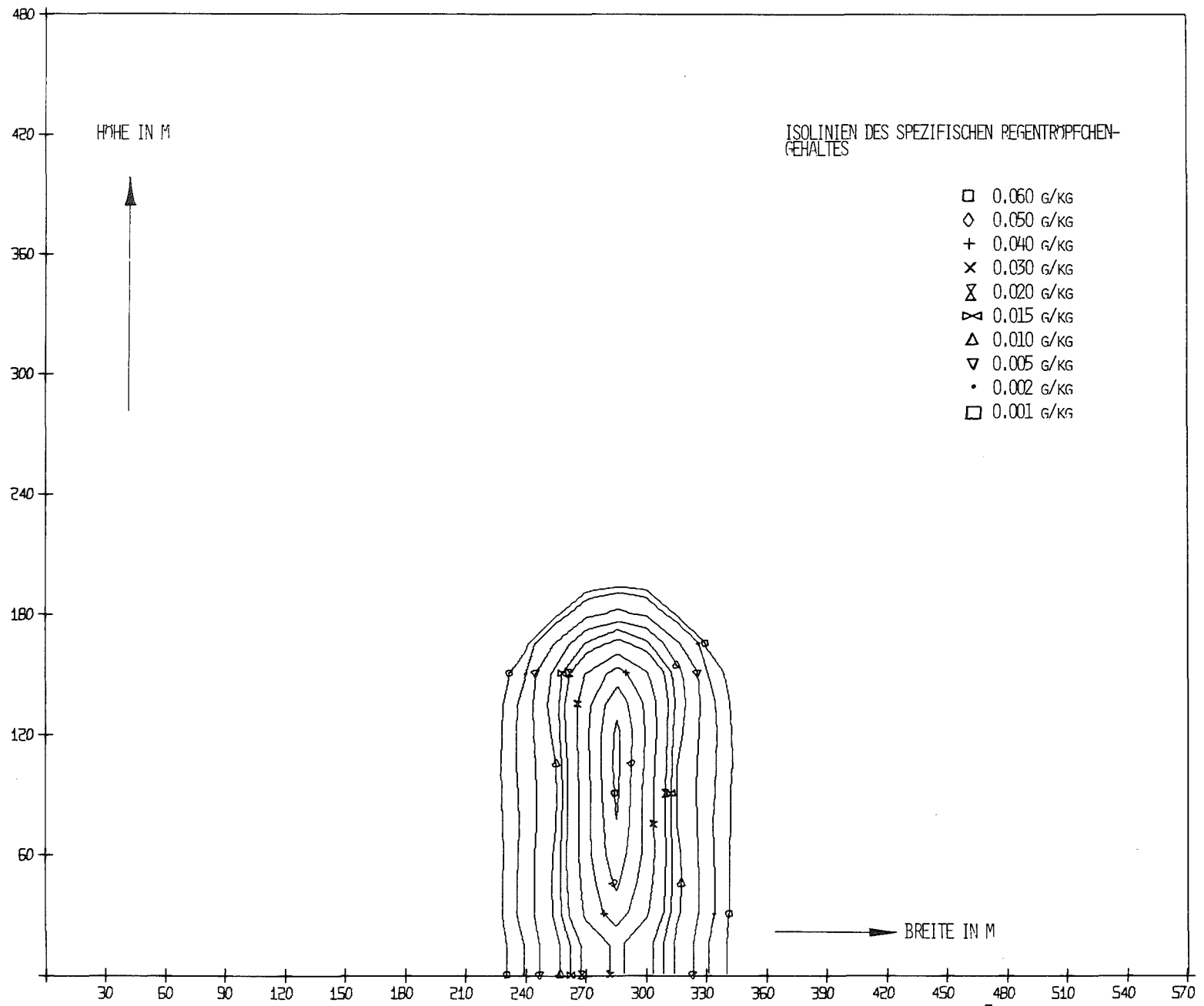


ABB. 14 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^7$  ENTFERNUNG 120 M

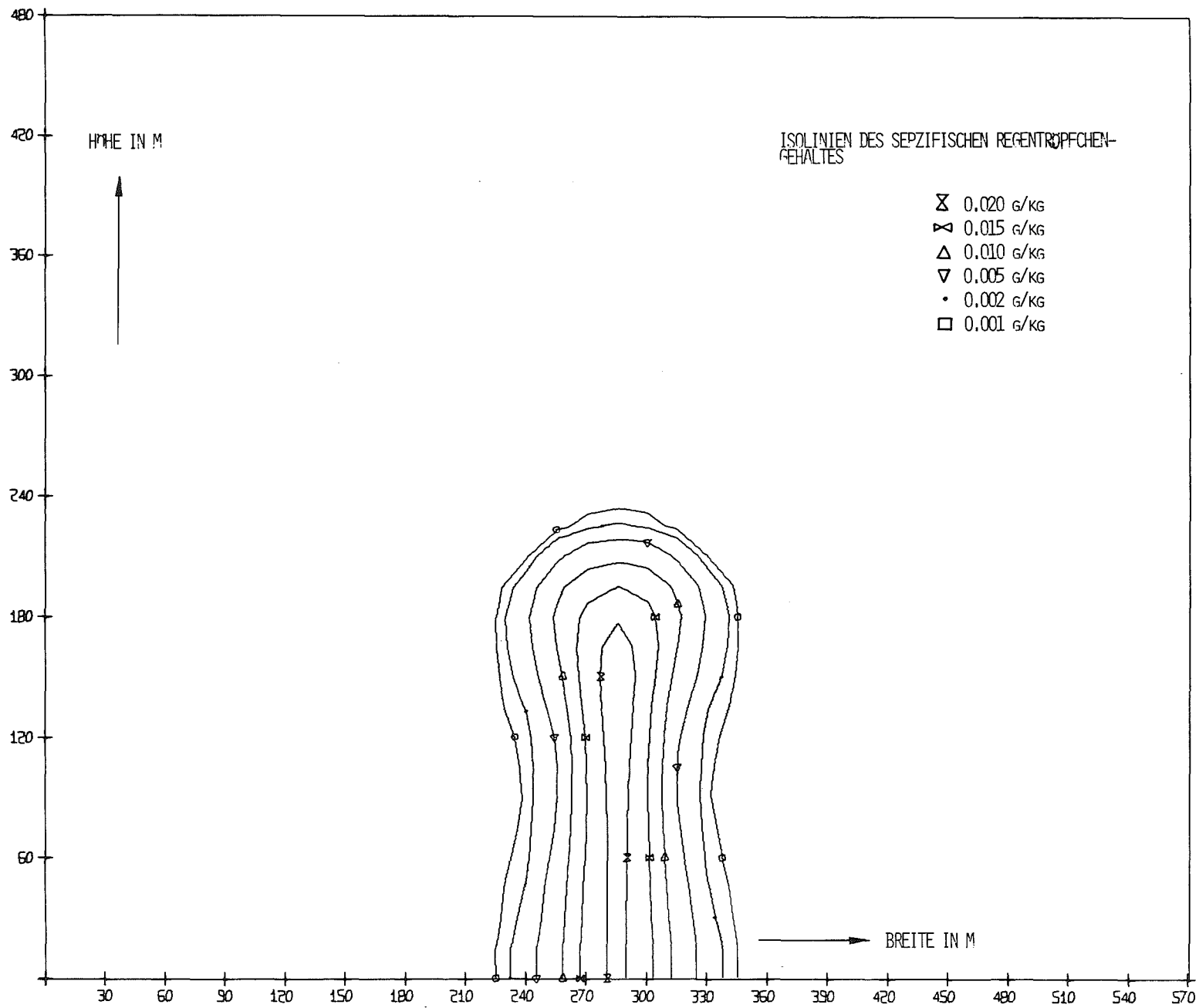


ABB. 15 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $No = 10^7$  ENTFERNUNG 280 M



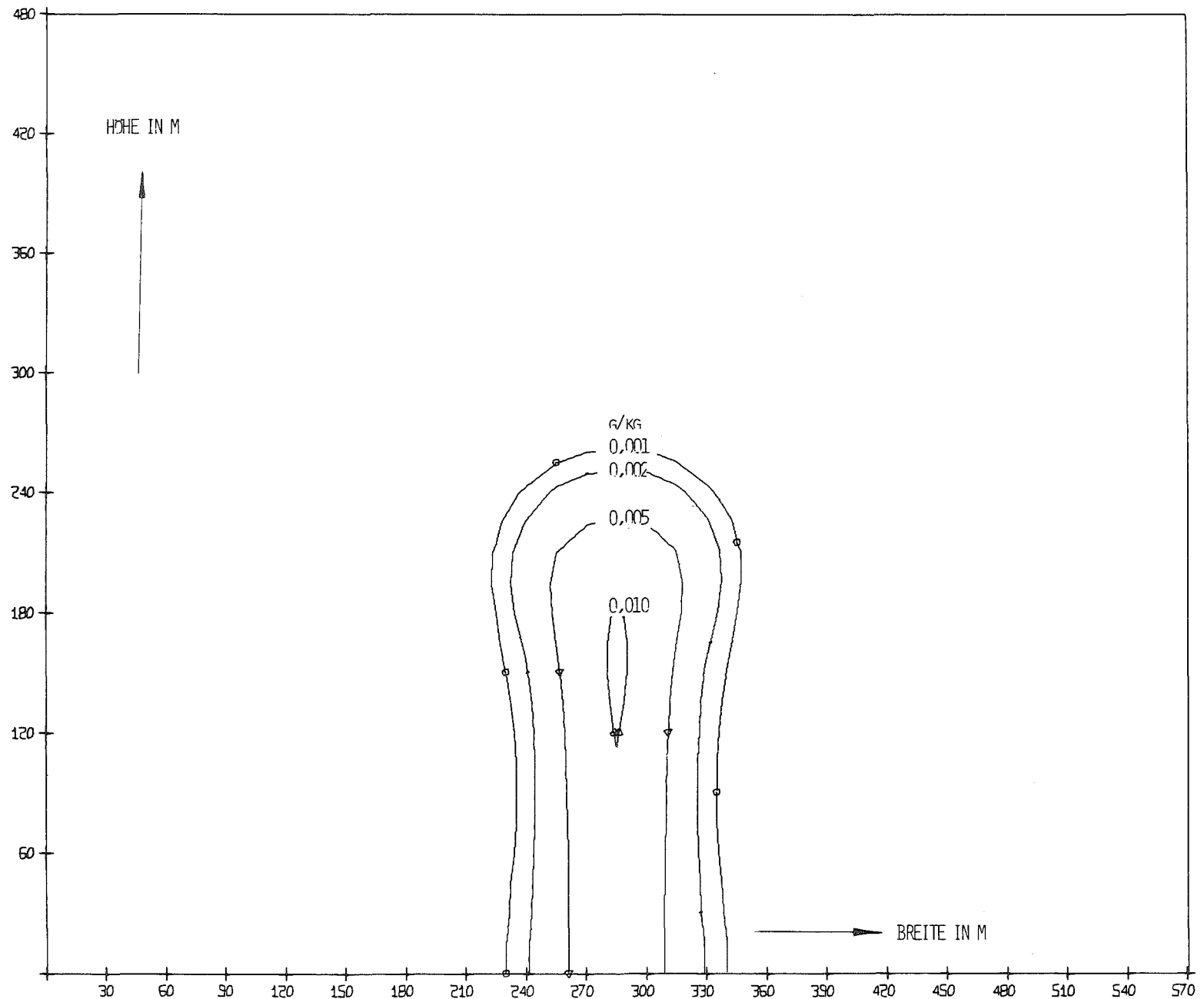


ABB. 16 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^7$  ENTFERNUNG 520 M

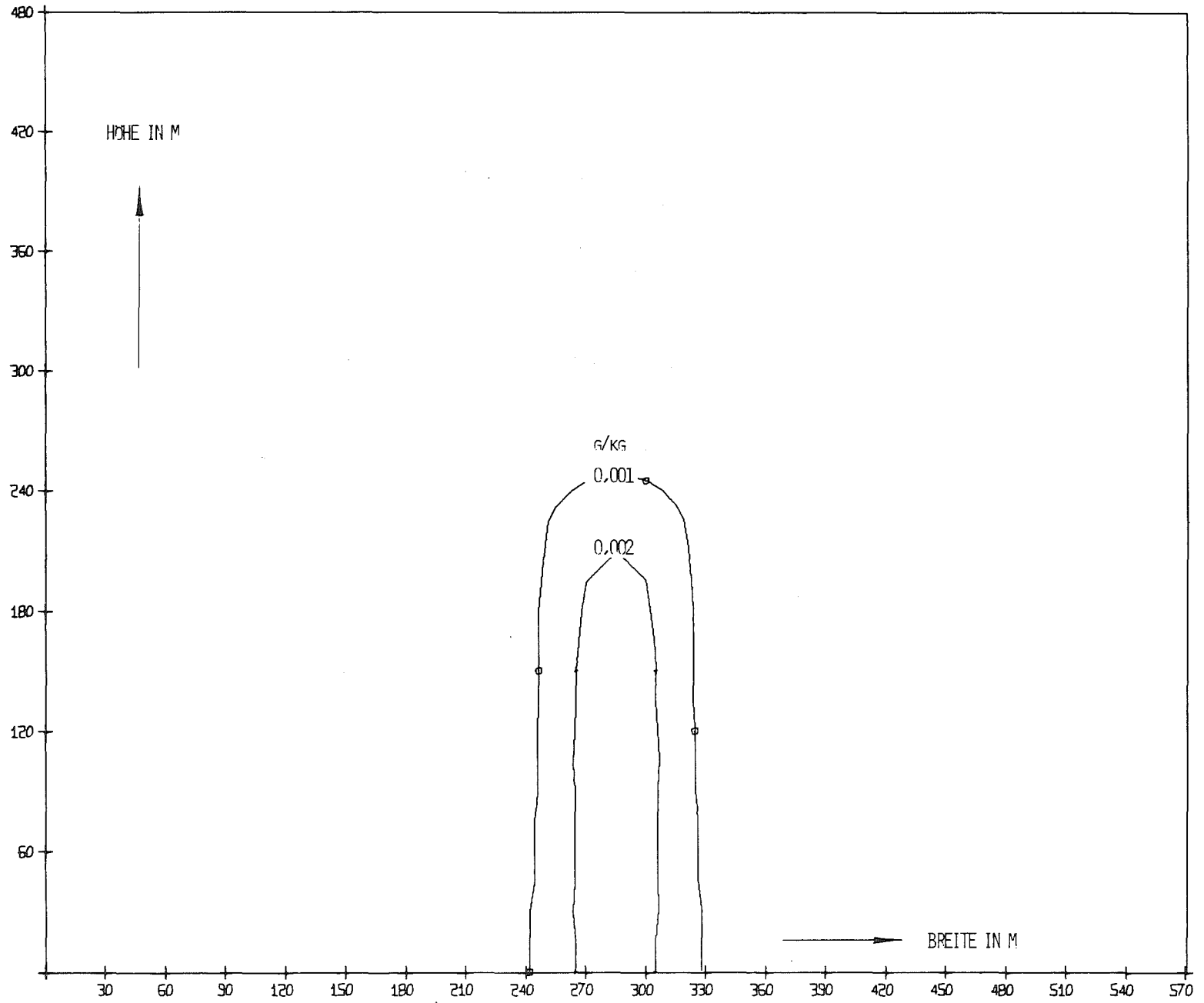


ABB. 17 ISOLIINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^7$  ENTFERNUNG 1000 M

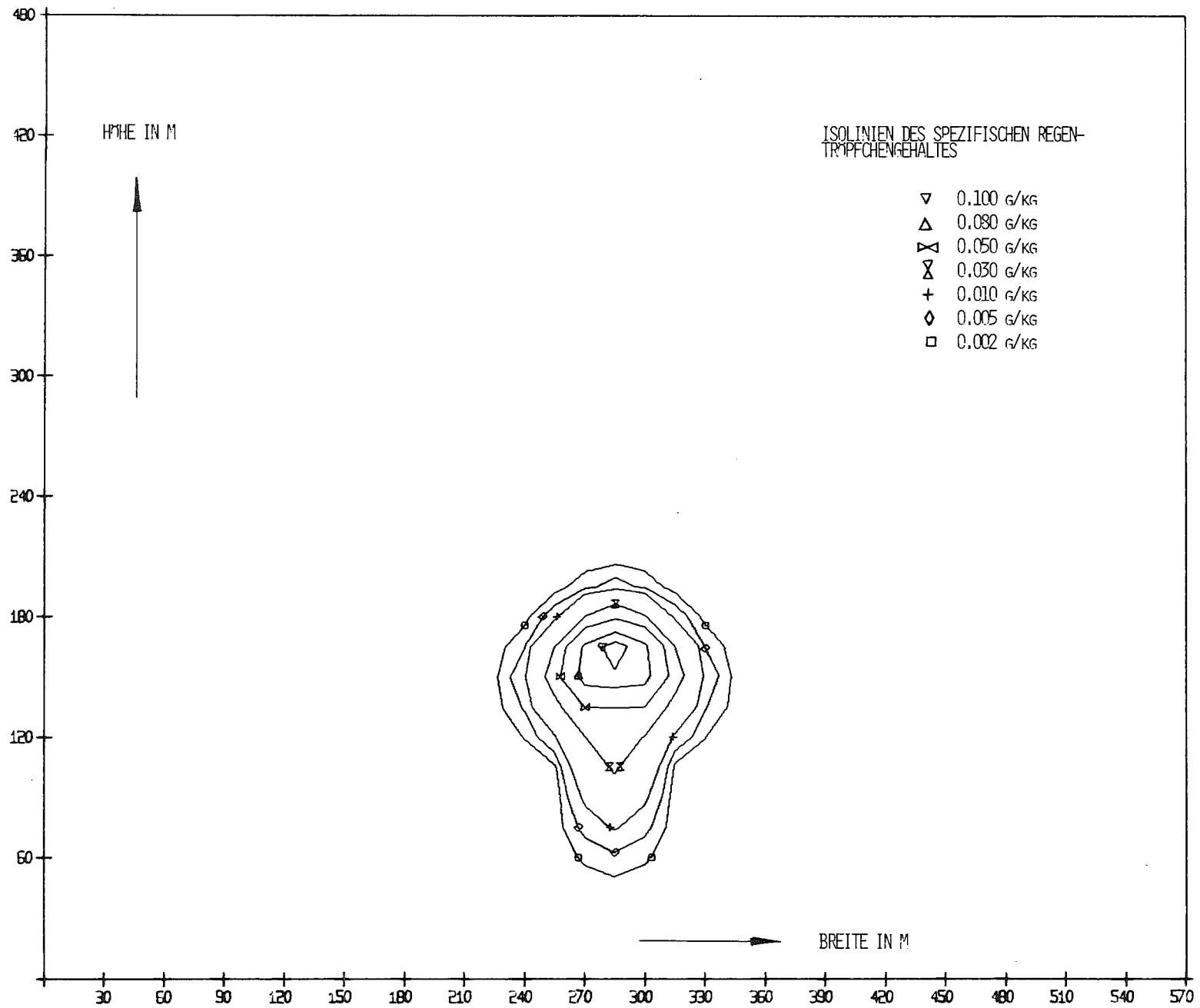


ABB. 18 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^{10}$  ENTFERNUNG 120 M

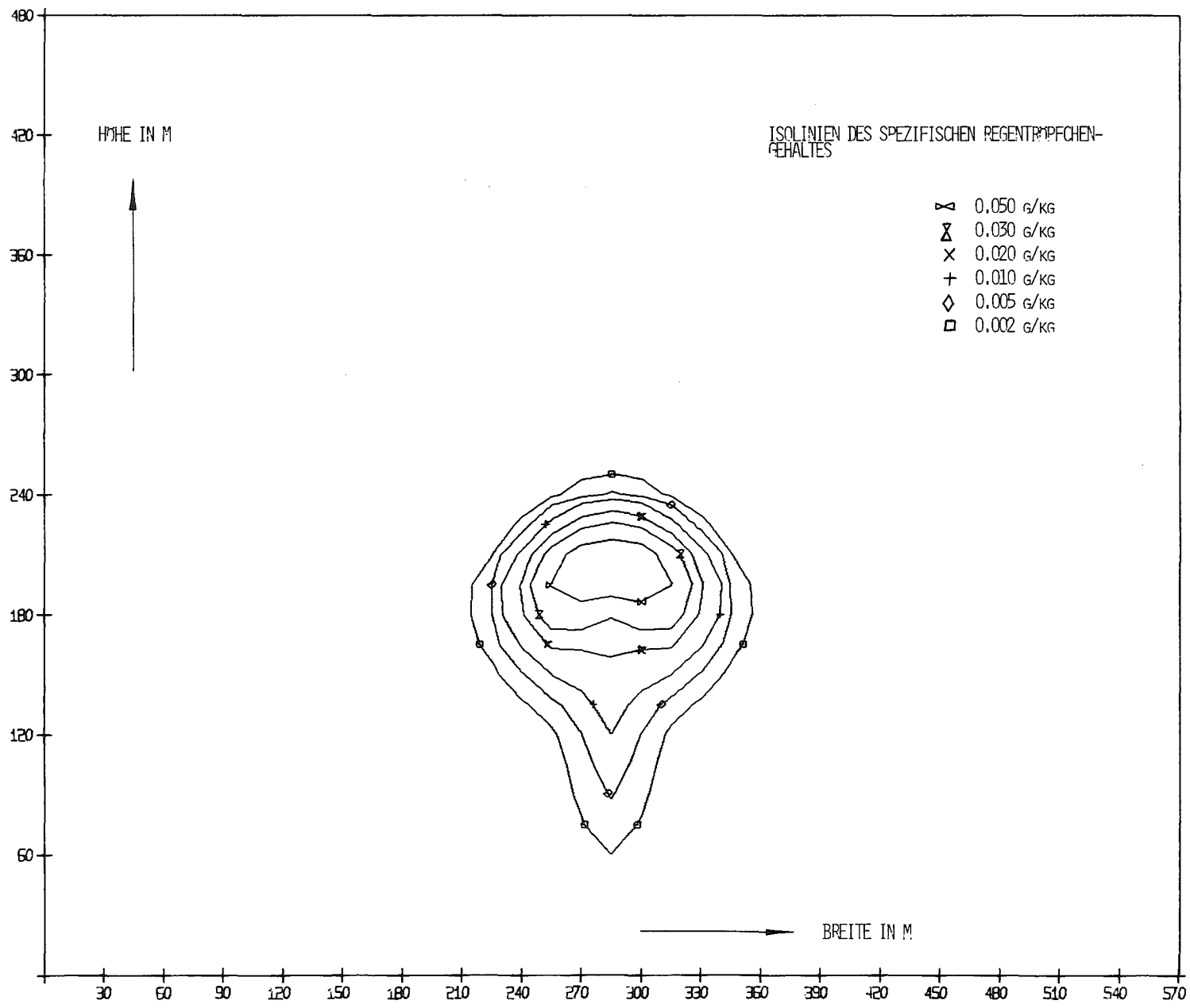


ABB. 19 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^{10}$  ENTFERNUNG 280 M

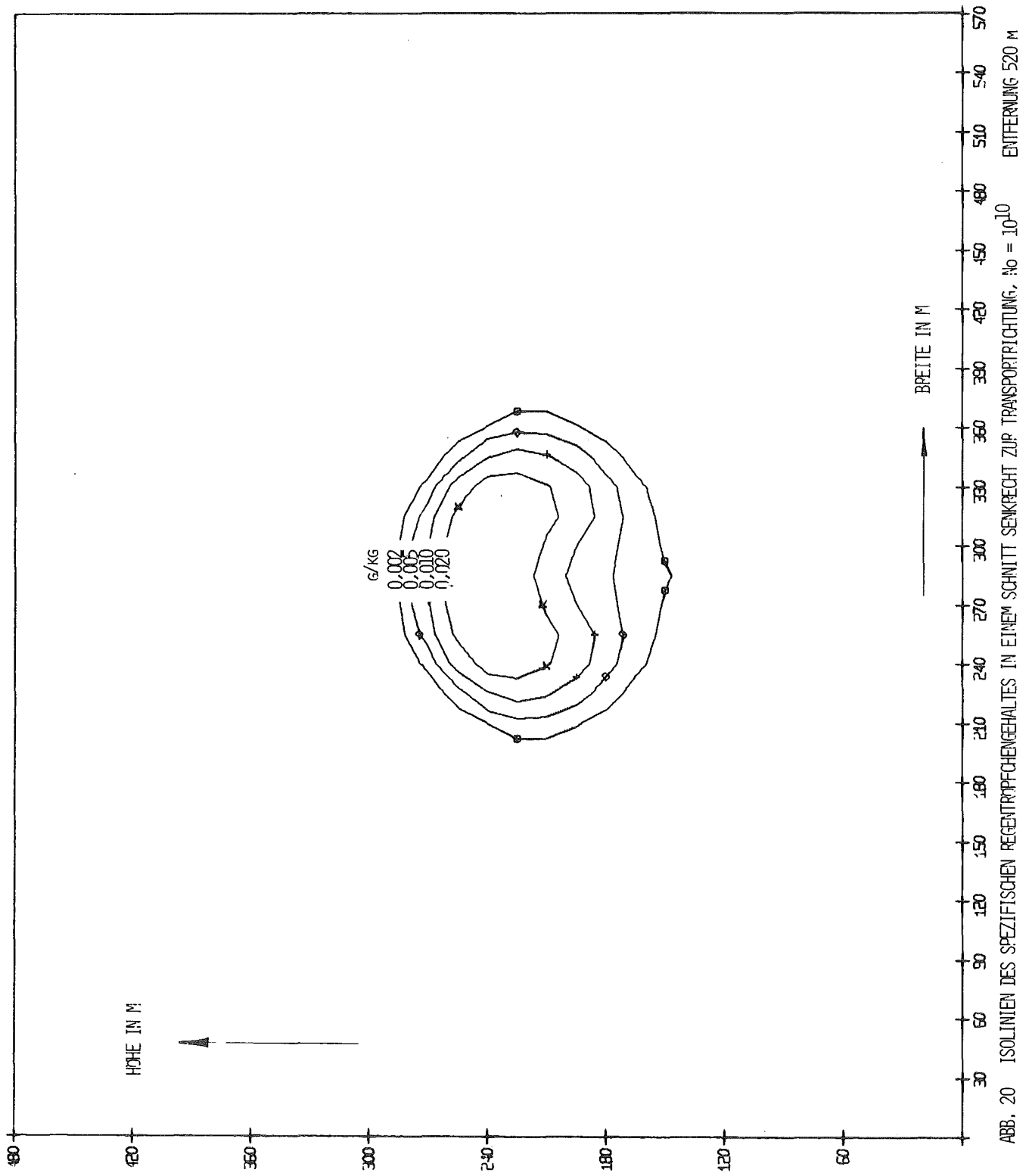


ABB. 20 ISOLIINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTRÖPFCHENGHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG, No = 1010 ENTFERNUNG 520 M

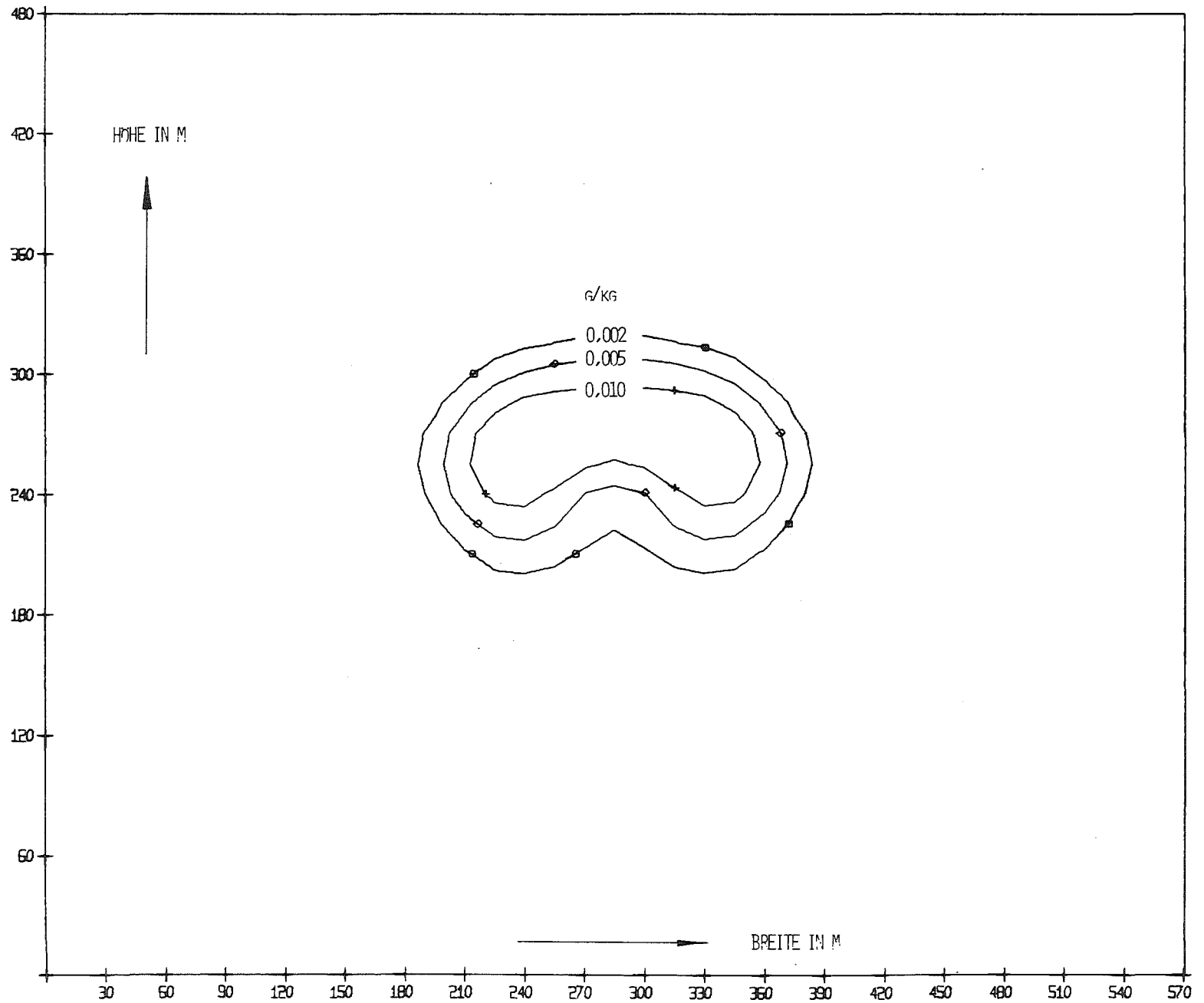


ABB. 21 ISOLINIEN DES SPEZIFISCHEN REGENTROPFCHENGEHALTES IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUP TRANSPORTRICHTUNG,  $N_0 = 10^{10}$

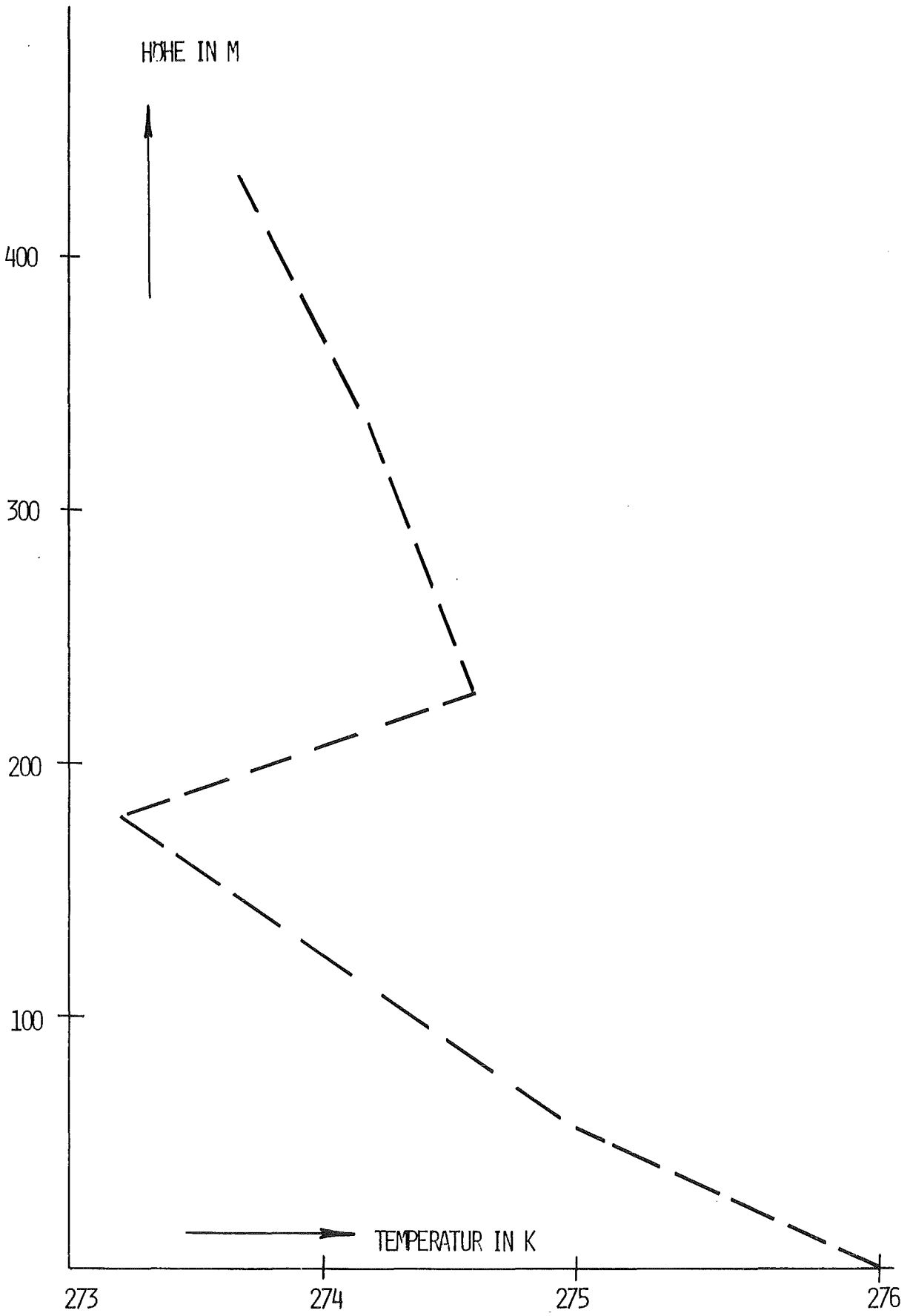


ABB. 22 TEMPERATURPROFIL MIT EINER DONNEN HÖHENINVERSION

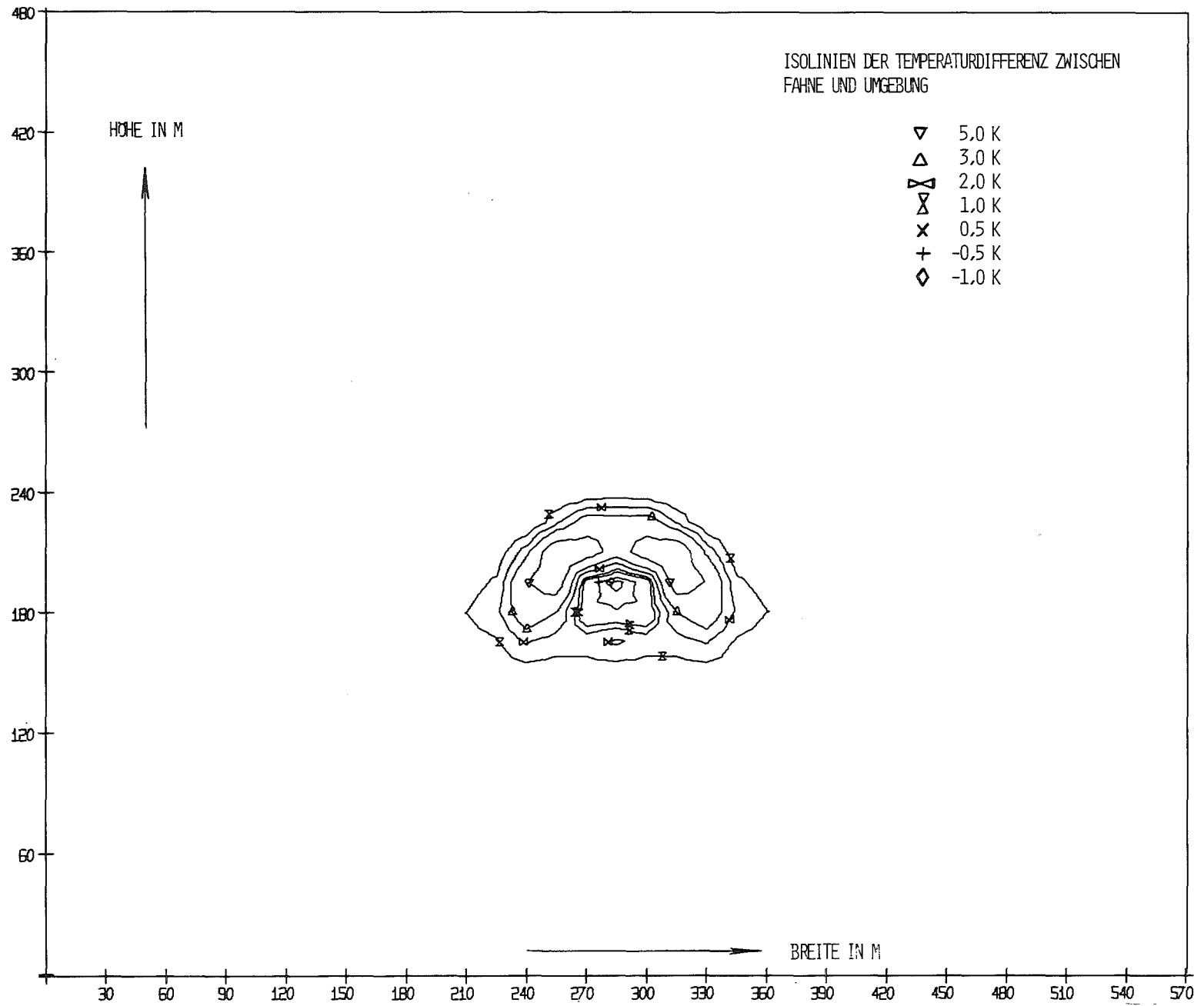


ABB. 23 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN FAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG BEI EINER HÖHENINVERSION, ENTFERNUNG 280 M



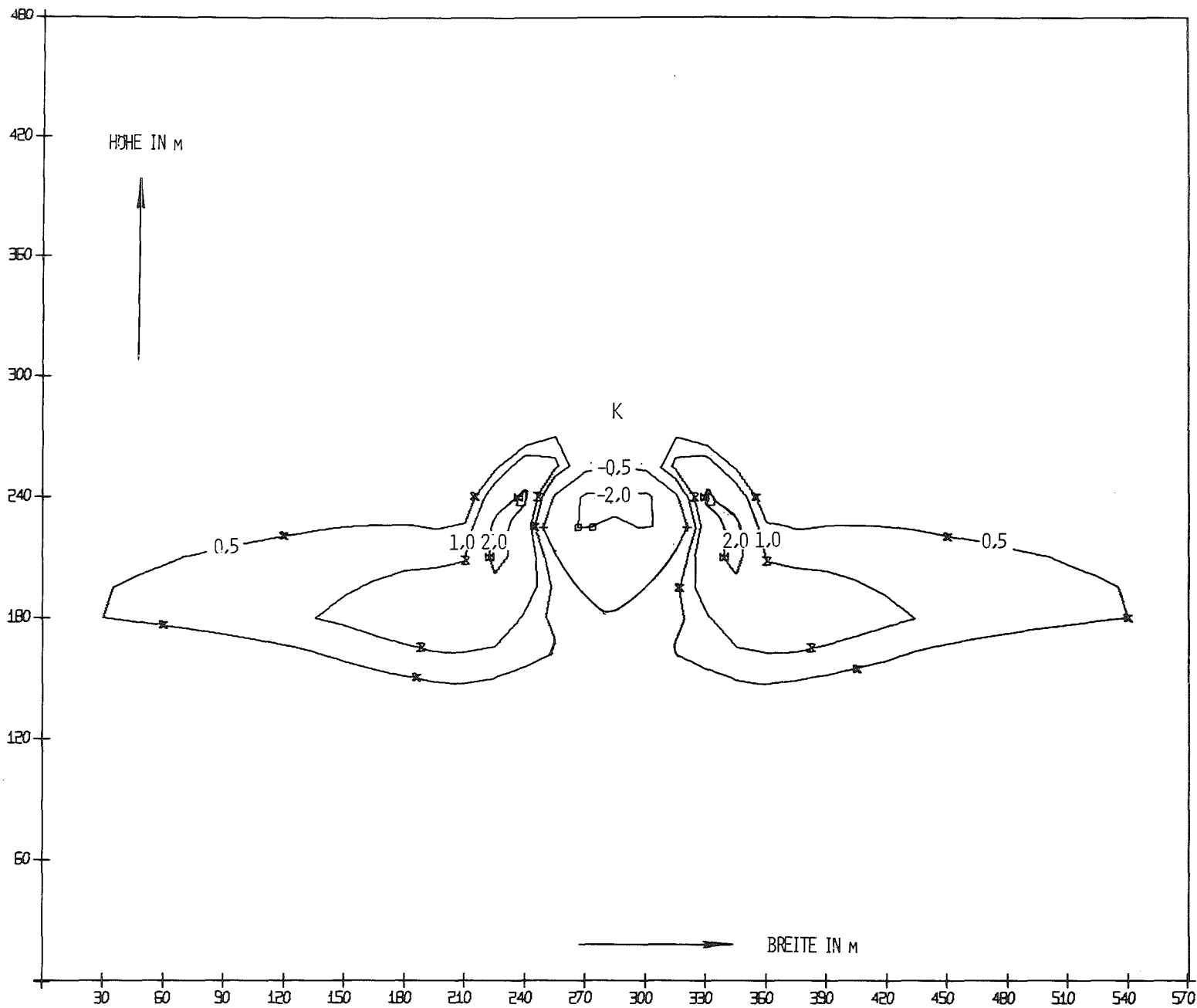


ABB. 24 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN FAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG BEI EINER HÖHENINVERSION ENTFERNUNG 520 M

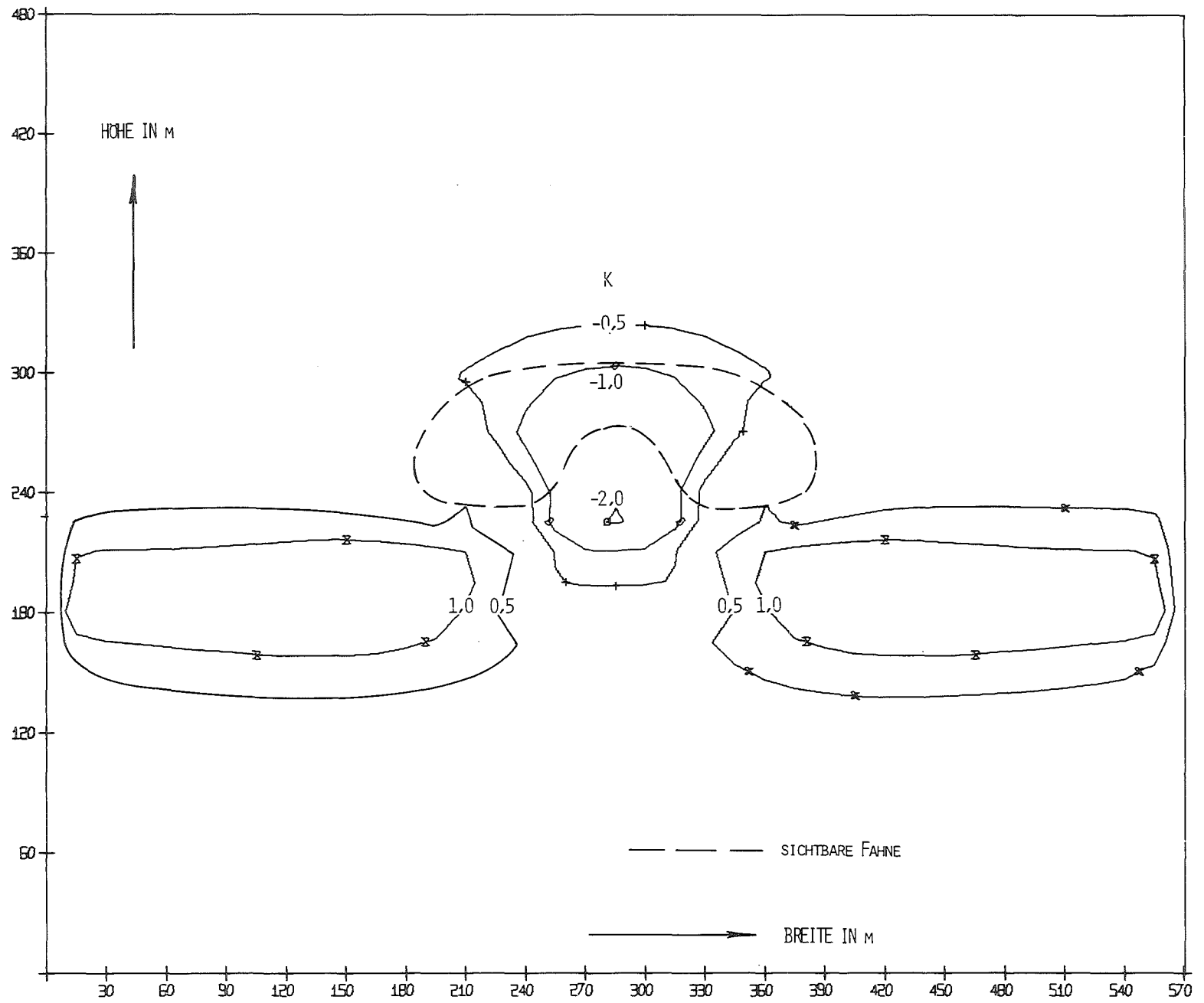


ABB. 25 ISOLINIEN DER TEMPERATURDIFFERENZ ZWISCHEN FAHNE UND UMGEBUNG IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG BEI EINER HOHENINVERSION ENTFERNUNG 1000 M

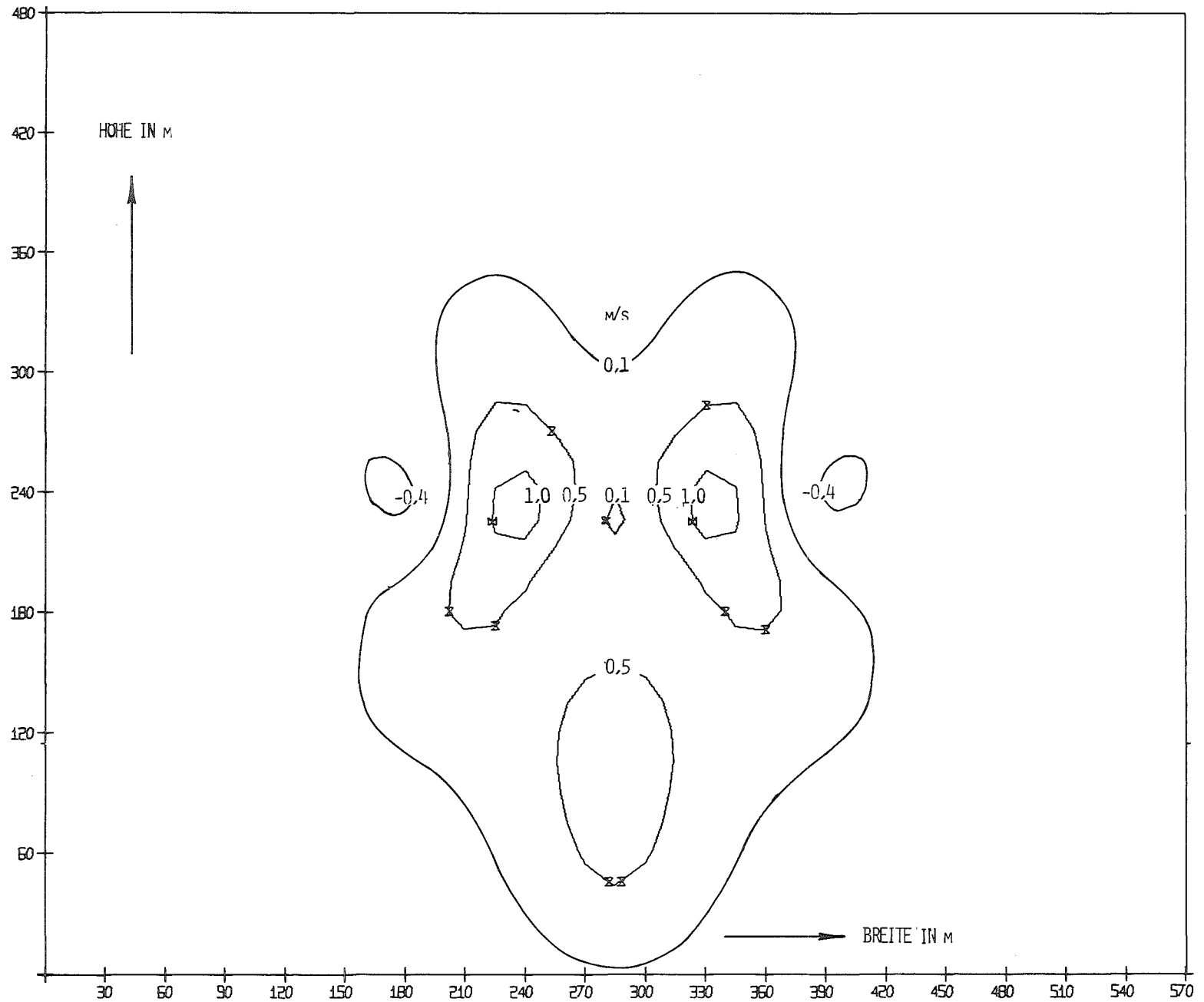


ABB. 26 ISOLINIEN DER VERTIKALGESCHWINDIGKEIT IN EINEM SCHNITT SENKRECHT ZUR TRANSPORTRICHTUNG BEI EINER HÖHENINVERSION, ENTFERNUNG 1000 M