

382 | April 1979

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

F.U. Häusler

Festigkeit von schwimmenden Eisdecken

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Festigkeit von schwimmenden Eisdecken

F. U. Häusler, 1. Auflage, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1979

© Technische Universität Hamburg-Harburg

Schriftenreihe Schiffbau

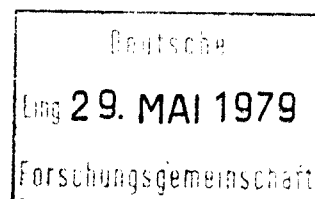
Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

BERICHT NR. 382



FESTIGKEIT VON SCHWIMMENDEN EISDECKEN

VON

FRANZ ULRICH HÄUSLER

APRIL 1979

FESTIGKEIT VON SCHWIMMENDEN EISDECKEN

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft
gefördert. Vorhaben Gr 62/17

Bearbeiter:

Leiter:

Franz Ulrich Häusler

(Dipl.-Ing. F. U. Häusler)

Otto Grim

(Prof. Dr.-Ing. O. Grim)

Inhaltsverzeichnis

	<u>S e i t e</u>	
1.	Einleitung	1
2.	Rechenprogramm zur Festigkeitsanalyse elastisch gebetteter Platten	2
2.1.	Verbesserung und Aufgabe	2
2.2.	Theoretische Grundlage des Rechenprogramms	2
2.3.	Steifigkeitsmatrizen	5
2.4.	Aufbau des Rechenprogramms	13
2.5.	Anwendungsbeispiel	14
2.6.	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	19
3.	Versuch mit punktförmig belasteten Eisdecken	20
3.1.	Veranlassung und Aufgabe der Untersuchung	20
3.2.	Versuchseinrichtung	20
3.2.1.	Versuchsanlage	20
3.2.2.	Meßeinrichtung und Datenerfassung	21
3.3.	Versuchsdurchführung	24
3.4.	Versuchsauswertung	25
3.5.	Ergebnisse	28
3.6.	Zusammenfassung	37
4.	Feldversuche zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Eises um Spitzbergen	38
4.1.	Vorbemerkungen	38
4.2.	Veranlassung und Aufgabe der Untersuchungen	38
4.3.	Theoretische Grundlage der Untersuchungen	39
4.3.1.	Kragbalkenversuche	39
4.3.2.	Bestimmung der Biegefestigkeit des Eises über den Salzlaugengehalt	40

	<u>S e i t e</u>	
4.4.	Meßeinrichtung	44
4.5.	Durchführung der Messungen	45
4.5.1.	Kragbalkenversuche	45
4.5.2.	Temperatur-Salzgehalt-Messungen	46
4.6.	Auswertung der Meßergebnisse	46
4.6.1.	Kragbalkenversuche	46
4.6.2.	Temperatur-Salzgehalt-Messungen	47
4.7.	Versuchsergebnisse	49
4.7.1.	Biegefestigkeiten	49
4.7.1.1.	Biegefestigkeiten aus Kragbalkenversuchen	49
4.7.1.2.	Biegefestigkeiten aus Salzlaugengehalt	50
4.7.1.3.	Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit	52
4.7.1.4.	Temperaturabhängigkeit der Biegefestigkeit	53
4.7.2.	Elastizitätseigenschaften	54
4.8.	Zusammenfassung und Schlußfolgerung	56
5.	Schlußfolgerungen	57
	Schrifttum	58
	Anhang	

1. Einleitung

In der Eistechnik stehen eine Reihe von Problemen zur Lösung an. Wie die steigende Anzahl von Veröffentlichungen auf diesem Gebiet zeigt, wird weltweit an solchen Problemen gearbeitet. Eins dieser Probleme ist die Erstellung einer genügend sicheren Prognose des Leistungsbedarfs von Eisbrechern. Im DFG-Forschungsvorhaben Gr 62-17, über das hier berichtet wird, sollten Grundlagen erarbeitet werden, die geeignet sind, einer solchen Prognose zu dienen. Im einzelnen wurden folgende Teilgebiete bearbeitet:

- Erstellung eines Rechenprogramms auf der Basis der Finite-Elemente-Methode zur Spannungs- und Verformungsanalyse an elastisch gebetteten Platten als Rechenmodell für schwimmende, homogene Eisdecken.
- Messung von Verformungen und Dehnungen an punktförmig belasteten Eisdecken aus niedrigsalinem Salzwasser-Eis.
- Feldversuche zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften natürlichen Meer-Eises.
- Druckfestigkeitsversuche mit natürlichem Meer-Eis und mit niedrigsalinem Modelleis.

Über die Druckfestigkeitsversuche, die auf einer von der DFG beschafften Materialprüfmaschine im Eistank der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) durchgeführt wurden, wurde bereits berichtet (Häusler, 1977).

Die Feldversuche fanden im Rahmen der "Arktischen Meßfahrt" mit dem eisbrechenden Bohrinsel-Versorger M/S "Werdertor" statt. Die "Arktische Meßfahrt" wurde gemeinsam von den Firmen Vereinigte Tanklager Gesellschaft (VTG), Jastram-Werke, Germanischer Lloyd (GL) und der HSVA mit Unterstützung durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (MTK 55) in den eisbedeckten Gewässern um Spitzbergen durchgeführt (Schwarz ed., 1978). Herr Dr. Frederking vom National Research Council of Canada leitete die Feldmessungen.

Die Messungen an punktförmig belasteten Eisdecken wurden im Eistank der HSVA durchgeführt.

Stellvertretend für alle Mitarbeiter an diesem Forschungsvorhaben sei an dieser Stelle Herrn Dr. Schwarz und Herrn Jochmann (beide HSVA) für ihren Beitrag gedankt.

2. Rechenprogramm zur Festigkeitsanalyse elastisch gebetteter Platten

2.1. Veranlassung und Aufgabe

Ein naheliegendes Modell für eine homogene, geschlossene, auf Wasser schwimmende Eisdecke ist die "elastisch gebettete Platte". In der Literatur wird verschiedentlich über derartige Ansätze berichtet (z.B. Nevel, 1965 und Enkvist, 1972). Die Belastung wird dort aber ausschließlich senkrecht zur Eisoberfläche angenommen. Je nach Steilheit des eisbrechenden Schiffes werden aber beim Eisbrechen nicht unerhebliche Horizontalkräfte in die Eisdecke eingeleitet. Bei größeren Durchbiegungen können diese Horizontalkräfte die Spannungsverteilung in der Eisdecke wesentlich beeinflussen. Deshalb sollte ein Rechenprogramm erstellt werden, das auf der Basis des geometrischen Steifigkeitskonzepts und des HOOKE'schen Gesetzes, die Berechnung von Spannungen und Verformungen von elastisch gebetteten Platten unter beliebiger Belastung und unter Berücksichtigung großer Verformungen ermöglicht. Das Programm sollte so aufgebaut sein, daß auch Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt werden können, denn unter rein horizontaler Belastung, wie z.B. bei vertikalen Strukturen, kann eine homogene Eisdecke auch durch Plattenbeulung versagen. Die Bildung von Eiswällen (ridges) in homogenen, durch Wind oder Strömung horizontal belasteten Eisdecken ist auch mit Sicherheit eine Beulerscheinung.

2.2. Theoretische Grundlage des Rechenprogramms

Das Rechenprogramm arbeitet nach der Finite-Elemente-Methode. Das hier benutzte geometrische Steifigkeitskonzept ermöglicht, im Gegensatz zu iterativen Verfahren zur Berechnung von Platten unter Berücksichtigung großer Verformungen und tangentialer Kräfte, eine geschlossene Lösung. Die Steifigkeitsmatrix der Platte wird aufgeteilt in einen 2elastischen Teil $[K_E]$, der außer von den

Materialkenngrößen, nur von der Geometrie des unverformten Systems abhängt, und einen sogenannten "geometrischen" Teil $[K_G]$ der, außer von der Geometrie, auch von den Verformungen abhängt, die aus den tangential angreifenden Kräften resultieren (Scheibenanteil).

In Matrixschreibweise lautet die allgemeine Grundgleichung

$$\{F_k\} = ([K_E] + [K_G]) \{U_k\} . \quad (2.1)$$

$\{F_k\}$ ist hierin der Knotenlastvektor und $\{U_k\}$ der Knotenverschiebungsvektor. Die Platten- und Scheibenanteile von $[K_E]$ sind entkoppelt. $[K_G]$ hängt nur von den Scheibenanteilen von $\{U_k\}$ ab.

$$\begin{Bmatrix} F_{KS} \\ F_{KP} \end{Bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} [K_{ES}] & \sigma \\ \sigma & [K_{EP}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma & \\ \sigma & [K_{GP}(\{u_{KS}\})] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} u_{KS} \\ u_{KP} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Gleichung (2.2) läßt sich in zwei Matrixgleichungen aufspalten

$$\{F_{KS}\} = [K_{ES}] \{u_{KS}\} \quad (2.3)$$

$$\{F_{KP}\} = ([K_{EP}] + [K_{GP}(\{u_{KS}\})]) \{u_{KP}\} . \quad (2.4)$$

Damit ist die Vorgehensweise festgelegt:

Zunächst wird das reine Scheibenproblem Gl. (2.3) gelöst. Danach wird die geometrische Steifigkeitsmatrix der Platte aufgebaut und zur elastischen Steifigkeitsmatrix addiert.

Zuletzt wird das Plattenproblem Gl. (2.4) gelöst.

Das Stabilitätsproblem läßt sich wie folgt behandeln:

Wegen der linearen Abhängigkeit läßt sich Gl. (2.3) umschreiben in

$$\lambda \{F_{KS0}\} = \lambda [K_{ES}] \{u_{KS0}\} . \quad (2.5)$$

Hierin ist $\{F_{KSO}\}$ ein Grundlast-Vektor und $\{U_{KSO}\}$ der Vektor der daraus resultierenden Knotenpunktverschiebungen. Weiterhin gilt

$$[K_{GP}(\lambda \{u_{KSO}\})] = \lambda [K_{GP} \{u_{KSO}\}] = \lambda [K_{GPO}]. \quad (2.6)$$

Das Kriterium für Instabilität, also Plattenbeulung, ist

$$\{0\} = ([K_{EP}] + [K_{GP}]) \{u_{KP}\}. \quad (2.7)$$

Gl. (2.7) wird außer von der trivialen Lösung $\{u_{KP}\} = 0$ erfüllt, wenn gilt

$$|[K_{EP}] + [K_{GP}]| = 0. \quad (2.8)$$

Dies führt mit Gl. (2.6) auf das Eigenwertproblem *)

$$|[K_{EP}] + \lambda [K_{GPO}]| = 0. \quad (2.9)$$

*) Auf die Behandlung dieses Eigenwertproblems wurde im vorliegenden Programm aus Rechenzeitgründen verzichtet. Der Programmaufbau ist aber auf den Anschluß einer Eigenwertroutine ausgelegt.

2.3. Steifigkeitsmatrizen

Die Steifigkeitsmatrizen werden über die innere Formänderungsenergie der Platte entwickelt, die sich allgemein in Matrixschreibweise durch die Beziehung

$$U_i = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon\} dV \quad (2.10)$$

beschreiben läßt.

Die Elemente des Dehnungsvektors

$$\{\epsilon\}^T = \{\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}\} \quad (2.11)$$

werden unter Berücksichtigung der Terme 2. Ordnung durch folgende Gleichungen beschrieben (vgl. Girkmann, 1954)

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right). \quad (2.14)$$

Das HOOKE'sche Gesetz für den ebenen Spannungszustand lautet in Matrizenform (vgl. Lehmann, 1974)

$$[E] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Mit den Gln. (2.11) und (2.15) eingesetzt in Gl. (2.10) wird die innere Formänderungsenergie unter Vernachlässigung der Quadrate bzw. Produkte der partiellen Ableitungen von u und v nach x und y beschrieben durch

$$U_i = \frac{1}{2} \frac{E}{1-\nu^2} \int_V (\epsilon_x^2 + 2\nu \epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_y^2 + \frac{1-\nu}{2} \gamma_{xy}^2) dV. \quad (2.16)$$

Nach einigen Umformungen unter Vernachlässigung der Glieder 4. Ordnung und nach Integration über die Dicke ergibt sich die innere Formänderungsenergie einer Platte mit Scheibenwirkung zu

$$\begin{aligned} U_i = & \frac{E t}{2(1-\nu^2)} \int_A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1-\nu}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dA \\ & + \frac{E t^3}{24(1-\nu^2)} \int_A \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2\nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dA \\ & + \frac{E t}{2(1-\nu^2)} \int_A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + (1-\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dA. \quad (2.17) \end{aligned}$$

Darin beinhaltet das 1. Integral die Formänderungsarbeit der Scheibe, das 2. Integral die der Platte nach der linearen Theorie und das 3. Integral die Anteile, die sich aus der Berücksichtigung großer Verformungen ergeben.

Aus der Formänderungsenergie der Scheibe läßt sich die Steifigkeitsmatrix der Scheibe herleiten

$$U_{i,s} = \frac{1}{2} \int_V \{ \epsilon_s \}^T [E] \{ \epsilon_s \} dV, \quad (2.18)$$

mit dem Scheibendehnungsvektor

$$\{ \epsilon_s \}^T = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (2.19)$$

oder mit dem Operator $[\Delta_s]$

$$\{\epsilon_s\} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & \sigma \\ \sigma & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [\Delta_s] \{\bar{u}\}. \quad (2.20)$$

Die Verformungen in $\{\bar{u}\}$ werden durch Polynome beschrieben

$$u(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + \dots \quad (2.21)$$

$$v(x, y) = b_1 + b_2 x + b_3 y + \dots \quad (2.22)$$

bzw. in Matrizenform

$$\{\bar{u}\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & \dots & | & \sigma \\ \sigma & & & & | & 1 & x & y & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \end{Bmatrix} \\ = [xy]^T \{A_s\}. \quad (2.23)$$

Der Dehnungsvektor wird damit zu

$$\{\epsilon_s\} = [\Delta_s][xy]^T \{A_s\} \quad (2.24)$$

und die Formänderungsenergie zu

$$U_{is} = \frac{1}{2} \int_V \{A_s\}^T [xy] [\Delta_s]^T [E] [\Delta_s] [xy]^T \{A_s\} dV. \quad (2.25)$$

Bei der Entwicklung der Elementsteifigkeitsmatrix für ein finites Scheibenelement ist U_{is} die Formänderungsenergie eines Scheibenelements. Zusammen mit einer Koordinatenmatrix $[C_s]$, die die Knotenkoordinaten des finiten Scheibenelements enthält, ergibt der Vektor der Polynomkoeffizienten $\{A_s\}$ den Vektor der Knotenpunktverschiebungen $\{U_K\}$

$$\begin{Bmatrix} \vdots \\ u_i \\ v_i \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & & & & & \\ 1 & X_i & Y_i & \dots & & \\ & & \sigma & & & \\ & & & & 1 & X_i & Y_i & \dots \\ & & & & & & & \sigma \\ \vdots & & & & & & & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

$$\{u_k\} = [C_s] \cdot \{A_s\}. \quad (2.26)$$

X_i und Y_i sind die in die Polynome in den Gln. (2.21) und (2.22) eingesetzten Koordinaten des i -ten Knotenpunktes. Linksmultiplikation von Gl. 2.23 mit $[C_s]^{-1}$ ergibt

$$[C_s]^{-1} \{u_k\} = \{A_s\}. \quad (2.27)$$

Damit und nach Integration über die Scheibendicke wird die innere Formänderungsenergie zu

$$U_{is} = \frac{t}{2} \{u_k\}^T [C_s]^{-1T} \int_A ([\Delta_s][xy]^T)^T [E] ([\Delta_s][xy]^T) dA [C_s]^{-1} \{u_k\}. \quad (2.28)$$

Gleichgesetzt mit der äußeren Formänderungsarbeit der Knotenkräfte F_{ki}

$$U_{as} = \frac{1}{2} \{u_k\}^T \{F_k\} \quad (2.29)$$

führt die zur Beziehung

$$\begin{aligned}
 \{F_k\} &= t [C_s]^{-1T} \int_A ([\Delta_s][xy]^T)^T [E] ([\Delta_s][xy]^T) dA [C_s]^{-1} \{u_k\} \\
 &= [K_s] \cdot \{u_k\}. \quad (2.30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [K_s] &= [C_s]^{-1T} t \int_A ([\Delta_s][xy]^T)^T [E] ([\Delta_s][xy]^T) dA [C_s]^{-1} \\
 &= [C_s]^{-1T} [K_s^*] [C_s]^{-1} \quad (2.31)
 \end{aligned}$$

ist die Elementssteifigkeitsmatrix eines finiten Scheibenelements.

Hauptproblem ist darin der Aufbau der Matrix

$$[K_S^*] = t \int_A ([\Delta_S][xy]^T)^T [E] ([\Delta_S][xy]^T) dA, \quad (2.32)$$

für deren Elemente man nach einigen Umformungen und nach Integration über die Elementfläche das folgende Bildungsgesetz erhält

$$\begin{aligned} k_{S_{ik}}^* = t \{ & e_{11} m_i m_k F(MM-2, NN) + e_{22} s_i s_k F(RR, SS-2) \\ & + [e_{12} m_k s_i + e_{33} n_k r_i] F(MRK-1, NSK-1) \\ & + [e_{13} m_k n_i + e_{31} m_i n_k] F(MM-1, NN-1) \\ & + e_{13} m_k r_i F(MRK-2, NSK) + e_{31} m_i r_k F(MRI-2, NSI) \\ & + [e_{21} m_i s_k + e_{33} n_i r_k] F(MRI-1, NSI-1) \\ & + e_{23} n_i s_k F(MRI, NSI-2) + e_{32} n_k s_i F(MRK, NSK-2) \\ & + [e_{23} r_i s_k + e_{32} r_k s_i] F(RR-1, SS-1) \\ & + e_{33} n_i n_k F(MM, NN-2) + e_{33} r_i r_k F(RR-2, SS) \}. \quad (2.33) \end{aligned}$$

Hierin ist $F(p, q)$ das Integral

$$F(p, q) = \int_A x^p y^q dA \quad (2.34)$$

über die Elementfläche und

$$\begin{aligned} MM &= m_i + m_k & NN &= n_i + n_k \\ RR &= r_i + r_k & SS &= s_i + s_k \\ MRI &= m_i + r_k & NSI &= n_i + s_k \\ MRK &= m_k + r_i & NSK &= n_k + s_i \end{aligned} \quad (2.35 \text{ a-h})$$

sind Werte, die aus den Vektoren der Polynomkoeffizienten für die Verschiebungsverlaufsmatrix gebildet werden.

Für das 12-Parameter Dreieckelement gilt

$$\{m\}^T = \{0, 1, 0, 2, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\} \quad (2.36)$$

$$\{n\}^T = \{0, 0, 1, 0, 1, 2, 0, 0, 0, 0, 0, 0\} \quad (2.37)$$

$$\{r\}^T = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 2, 1, 0\} \quad (2.38)$$

$$\{s\}^T = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 2\} \quad (2.39)$$

In ähnlicher Weise werden die elastische und die geometrische Steifigkeitsmatrix der Platte hergeleitet. Unter Annahme eines 21-parametrischen Verschiebungsansatzes

$$w(x, y) = \sum_{i=1}^{21} a_i x^{m_i} y^{n_i} \quad (2.40)$$

mit

$$\{m\}^T = \{0, 1, 0, 2, 1, 0, 3, 2, 1, 0, 4, 3, 2, 1, 0, 5, 4, 3, 2, 1, 0\} \quad (2.41)$$

$$\{n\}^T = \{0, 0, 1, 0, 1, 2, 0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 3, 4, 0, 1, 2, 3, 4, 5\} \quad (2.42)$$

führt dies auf das folgende Bildungsgesetz für die Matrix $[K_E^*]$

$$\begin{aligned} k_{e_{ij}}^* = t^3/12 [& e_{11} m_i (m_i - 1) m_j (m_j - 1) F(MM-4, NN) \\ & + (e_{13} 2 m_i (m_i - 1) m_j n_j + e_{31} 2 m_i m_j (m_j - 1) n_i) F(MM-3, NN-1) \\ & + (e_{12} m_i (m_i - 1) n_j (n_j - 1) + e_{21} m_j (m_j - 1) n_i (n_i - 1) \\ & \quad + e_{33} 4 m_i m_j n_i n_j) F(MM-2, NN-2) \\ & + (e_{23} 2 m_j n_i (n_i - 1) n_j + e_{32} 2 m_i n_i n_j (n_j - 1)) F(MM-1, NN-3) \\ & + e_{22} n_i (n_i - 1) n_j (n_j - 1) F(MM, NN-4)] \quad (2.43) \end{aligned}$$

mit

$$MM = m_i + m_j \quad NN = n_i + n_j \quad (2.44 \text{ a,b})$$

Für die Bildung der geometrischen Steifigkeitsmatrix ist aus der Scheibenrechnung die Scheibenspannungsverteilung bekannt:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \sum_k \alpha_k x^r_k y^s_k \quad (2.45)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \sum_k \beta_k x^r_k y^s_k \quad (2.46)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{1-\nu^2} \frac{1-\nu}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \sum_k \gamma_k x^r_k y^s_k \quad (2.47)$$

Der "geometrische" Anteil der inneren Formänderungsenergie

$$U_{ig} = \frac{Et}{2(1-\nu^2)} \int_A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \nu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + (1-\nu) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dA \quad (2.48)$$

läßt sich umformen in (vgl. Tinawi, 1972)

$$U_{ig} = \frac{t}{2} \int_A \left[\sigma_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2\tau_{xy} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] dA$$

$$= \frac{t}{2} \int_A \{w_{xy}\}^T [\sigma] \{w_{xy}\} dA \quad (2.49)$$

mit dem Vektor der Richtungsableitungen der Durchsenkung w

$$\{w_{xy}\}^T = \left\{ \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y} \right\} \quad (2.50)$$

$$\{w_{xy}\} = \begin{Bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \end{Bmatrix} \left\{ \dots, x^{m_i} y^{n_i}, \dots \right\} \begin{Bmatrix} \vdots \\ a_i \\ \vdots \end{Bmatrix}$$

$$= \{ \Delta_g \} \quad \{x-y\}^T \quad \{A_g\} \quad (2.51)$$

und dem Spannungstensor

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} x^{r_1} y^{s_1}, \dots & \sigma \\ \hline \sigma & x^{r_1} y^{s_1}, \dots \end{array} \right] \begin{bmatrix} \alpha_1 & \delta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \delta_1 & \beta_1 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \\ = [xy\sigma]^T [B] \quad (2.52)$$

Die Verlaufsmatrix $[xy\sigma]$ läßt sich darstellen durch

$$[xy\sigma]^T = \begin{bmatrix} \dots & g_{1k} x^{r_k} y^{s_k} & \dots \\ \dots & g_{2k} x^{r_k} y^{s_k} & \dots \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

mit $g_{jk} = 0$ oder 1 entsprechend Gl.(2.52.) Das Bildungsgesetz für $[K_g^*]$ lautet dann

$$k_{g_{ij}}^* = t \sum_k [m_i m_j b_{k1} g_{1k} F(\text{MMR}-2, \text{NNS}) \\ + (m_i n_j b_{k2} g_{1k} + m_j n_i b_{k1} g_{2k}) F(\text{MMR}-1, \text{NNS}-1) \\ + n_i n_j b_{k2} g_{2k} F(\text{MMR}, \text{NNS}-2)] \quad (2.54)$$

mit

$$\text{MMR} = m_i + m_j + r_k \quad \text{NNS} = n_i + n_j + s_k \quad (2.55 \text{ a,b})$$

und

$$\{r\}^T = \{0, 1, 0, 0, 1, 0\} \quad (2.56)$$

$$\{s\}^T = \{0, 0, 1, 0, 0, 1\} \quad (2.57)$$

und $k = 6$ für das 21-Parameter-Dreieck-Element mit dreigliedrigem Spannungspolynom.

Für die Elementssteifigkeitsmatrix der elastischen Bettung lautet das Bildungsgesetz für $[K_B^*]$

$$k_{B_{ij}}^* = k F(\text{MM}, \text{NN}) \quad (2.58)$$

$$\text{mit} \quad \text{MM} = m_i + m_j \quad \text{NN} = n_i + n_j \quad (2.59 \text{ a,b})$$

und der Bettungsziffer $k = \gamma_{\text{Wasser}}$.

2.4. Aufbau des Rechenprogramms

Das Rechenprogramm ist in zwei Hauptteile geteilt: ein Scheibenprogramm und ein Plattenprogramm, das auf die Eingabedaten und Ergebnisse des Scheibenprogramms zurückgreift. Die Daten werden über langfristige Dateien übertragen. Das hat den Vorteil, daß auf einen Scheiben-Lauf mehrere Platten-Läufe folgen können, in denen die einmal erstellten, konstanten Scheiben-Daten benutzt werden. Das ermöglicht Rechenzeitersparnisse und wegen des kleineren Jobs auch kürzere Bearbeitungszeiten. Beide Programme werden segmentiert geladen, um möglichst viel Platz für die großen Systemsteifigkeitsmatrizen zu haben, die in der vorliegenden Version voll im Kernspeicher gespeichert sind. Eine Programmversion, in der die Systemsteifigkeitsmatrizen in einen Hintergrundspeicher ausgelagert und nur blockweise in den Kernspeicher geholt und dort bearbeitet werden, ist grundsätzlich möglich. Dem Vorteil der nahezu unbegrenzten Systemgröße steht bei einer solchen Version aber eine deutlich längere Rechenzeit gegenüber, die durch die Vielzahl von Lese- und Schreibzugriffen auf den recht langsamen Hintergrundspeicher bedingt ist. Im vorliegenden Fall wurde auf eine solche sogenannte "out-of-core"-Version verzichtet. Um trotzdem möglichst große Systeme bearbeiten zu können, wurde Wert auf das Sparen von Kernspeicherplatz gelegt, z.B. durch das oben erwähnte segmentierte Laden von Programmanteilen oder durch Belegung eines COMMON-Bereiches mit verschiedenen Feldern im Verlauf des Programms. Bevor die elastische und geometrische Systemsteifigkeitsmatrix addiert und durch die Lösung des Gleichungssystems zerstört werden, werden sie auf Dateien kopiert und stehen so bei Bedarf für eine Stabilitätsanalyse entsprechend dem Eigenwertproblem in Gl. 2.9 zur Verfügung. (Für die Lösung des Eigenwertproblems könnte z.B. die von Gupta beschriebene "Sturm Sequence Method" für bandförmige Steifigkeitsmatrizen (Gupta, 1972) benutzt werden.)

Die Listen der beiden Programme sind im Anhang A abgedruckt.

2.5. Anwendungsbeispiel

Als Beispiel für die Anwendung des Rechenprogramms wurde eine punktförmig belastete Platte auf elastischer Bettung gewählt, die an drei Rändern

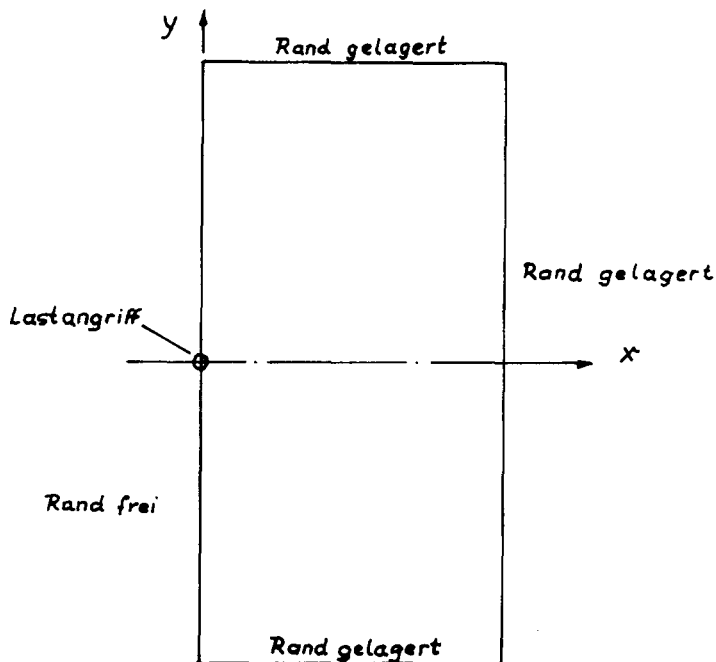


Abb. 2.1 Rechenmodell

gelagert und an einem Rand frei ist (Abb. 2.1). Die Abmessungen der Platte und die Materialkenngrößen wurden in Anlehnung an die Gegebenheiten im Eistank der HSVA gewählt: die Länge des freien Randes entspricht der Breite des Eistanks ($B = 6 \text{ m}$); die Bettungsziffer $k = 9807 \text{ N/m}^3$ entspricht der von Frischwasser (Eistank $k = 9855 \text{ N/m}^3$); Plattendicke $h = 4 \text{ cm}$; Elastizitätsmodul $E = 1.3 \text{ GPa}$ ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$); Poisson-Zahl $\nu = 0.30$.

In x -Richtung (=Tanklängsrichtung) wurde die Plattenlänge auf 3 m begrenzt, um die Generierung des Finite Elemente-Netzes zu vereinfachen. Grundsätzlich wäre es nötig, die anschließende Eisdecke in die Berechnung mit einzubeziehen oder sie zumindest in der Formulierung der Randbedingungen zu berücksichtigen. Die Einbeziehung der anschließenden Eisdecke in das Finite Elemente-Netz war kaum möglich, da die Kernspeicherkapazität der TR440-Anlage der Universität Hamburg, auf der die Rechnungen durchgeführt wurden, schon sehr weitgehend ausgenutzt wurde. Auch auf die detaillierte Berücksichtigung der anschließenden

Eisdecke in der Formulierung der Randbedingungen wurde verzichtet, da einerseits schon die übrigen Randbedingungen stark vereinfacht werden mußten (der **Einspannungsgrad** der Modelleisdecke an den Tankwänden ist nicht genau bekannt) und andererseits der Abstand von der Lastangriffsstelle zum Rand groß genug ist, um Feinheiten in den Randbedingungen vernachlässigen zu können. Als Randbedingungen wurde gewählt: im Scheiben-Fall ein starres Auflager, im Platten-Fall ein gelenkiges, in Richtung senkrecht zur Platte starres Auflager, beides jeweils auf $y = \pm 3,00$ m (Tankwand) und $x = - 3,00$ m (anschließende Eisdecke).

Durch die Beschränkung auf systematische Lastfälle konnte die Rechnung zugunsten einer feineren Elemententeilung auf eine quadratische Plattenhälfte begrenzt werden. Diese quadratische Plattenhälfte wurde in ein Netz von 98 Dreieckelementen eingeteilt (Abb. 2.2), die Elemente teilen die Platte in sechs Sektoren auf, die strahlenförmig vom Lastangriffspunkt ausgehen. Dadurch wird erreicht, daß eine punktförmige angreifende Last gleichmäßig in die Platte eingeleitet wird.

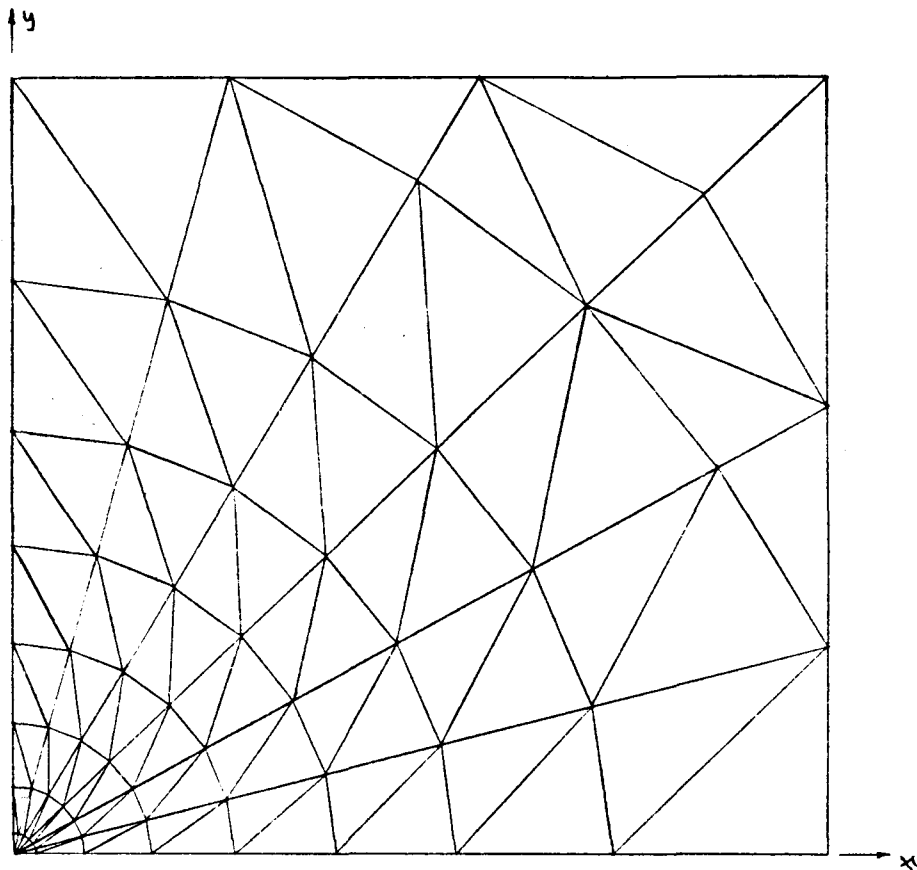


Abb. 2.2 Finite-Elemente-Netz mit 98 Dreieckelementen

Als Kriterium für die Bewertung der berechneten Spannungszustände wurde die Vergleichsspannung nach Gestaltänderungsenergiehypothese von Huber gewählt. Danach ist für ebene Spannungsprobleme für Versagen des Materials die Vergleichsspannung

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2} \quad (2.60)$$

maßgeblich, d.h. wenn σ_v die einachsige (Zug-) Festigkeit erreicht, versagt das Material. Die Abbildungen im Anhang B zeigen für die verschiedenen Lastzustände Linien gleicher Vergleichsspannung σ_v in der oberen Randfaser. Im einzelnen wurden die folgenden Lastzustände behandelt:

- Platte ohne Riß mit punktförmiger Einzellast auf der Mitte der freien Kante senkrecht zur Plattenoberfläche
- dto. aber zusätzlich mit Last parallel zur Plattenoberfläche; die resultierende ist 30° gegen die Senkrechte geneigt und soll stark idealisiert die Last darstellen, die von einem Eisbrechersteven mit 24° Stevenneigung (bei $c_f \approx 0,1$) auf eine Eisdecke aufgebracht wird.
- Platten mit Riß auf der x-Achse, ausgehend vom Lastangriff. Die Last greift weiterhin auf der Mitte der freien Kante an, ist nun aber aufgespalten in zwei gleichgroße Einzellasten, die rechts und links vom Riß angreifen. (Dieser Rißverlauf wurde gewählt, weil der Spannungsgradient in dieser Richtung bei der unverletzten Platte am größten ist, sich also, wie durch Versuche bestätigt, zunächst ein radialer Riß ausbildet, dem später ein zirkumferentialer Riß folgt, der ausgehend vom Radialriß, sich nach rechts und links in die Platte fortpflanzt und dann im weiten Bogen zur freien Kante läuft.) Von Fall zu Fall wurde der Riß um jeweils eine Elementlänge verlängert, so daß die Rißspitze immer in einen Element-Eckknotenpunkt fiel.

Bei der Auswertung der berechneten Spannungen wurden jeweils die Mittelpunktsvergleichsspannungen zweier benachbarter Elemente eines Sektors zu einer mittleren Vergleichsspannung zusammengefaßt. Auf diese Weise wurden Ungleichmäßigkeiten ausgeglichen, die sich aus der Wahl eines Dreieckselements mit vollständigem Verschiebungsansatz ergeben, denn zwangsläufig sind derartige Elemente nicht drehinvariant, d.h. eine Festkörperdrehung eines solchen

Elements beeinflusst die Elementssteifigkeitsmatrix über die reine Drehung hinaus.

Die Analyse der graphisch dargestellten Vergleichsspannungszustände (s. Anhang) ergibt, daß sich schon bei einem relativ kurzen RiB von 0,262 m eine ausgeprägte Spannungsspitze senkrecht zum RiB ausbildet, die den Anfang eines Zirkumferentialrisses bei $x_z = 0,18$ m bilden könnte. Normiert mit der charakteristischen Länge der Eisdecke

$$e_{cp} = \left(\frac{E h^3}{12(1-\nu^2)k} \right)^{1/4} \quad (2.61)$$

mit

$$h = 0,04 \text{ m} \quad E = 1,3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\nu = 0,30 \quad k = 9807 \text{ N/m}^3$$

$$e_{cp} = \left(\frac{1,3 \cdot 10^9 \cdot 0,04^3}{12(1-0,30^2) 9807} \frac{\text{N m}^3 \text{m}^3}{\text{m}^2 \text{N}} \right)^{1/4} = 0,939 \text{ m}$$
$$= 0,939 \text{ m}$$

ergibt sich für den Abstand des zirkumferentialen Risses vom Lastangriff (Zirkumferentialrißradius)

$$e^* = x_z / e_{cp} = 0,18 \text{ m} / 0,939 \text{ m} = 0,192.$$

Beim Fall mit 0.508 m langem RiB liegt die Querspannungsspitze bei $x_z = 0,38$ m entsprechend einem normierten Zirkumferentialrißradius von $l^* = 0,405$, während im Fall mit 0,819 m langem RiB das Quermaximum bei $x_z = 0,66$ m entsprechend $l^* = 0,703$ liegt.

Mit zunehmender RiBlänge wird das Quermaximum immer schwächer, gleichzeitig sinkt aber auch das Spannungsniveau in Radialrißrichtung.

Aus den durchgeführten Berechnungen ist noch nicht eindeutig zu erkennen, wo sich im idealen Fall der Zirkumferentialriß ausbilden wird. Es wird aber deutlich, daß schon bei geringer Radialrißlänge ein ausgeprägtes Spannungsmaximum in zirkumferentialer Richtung vorhanden ist, das bei geringfügiger Behinderung des Radialrisses zur Ausbildung eines Zirkumferentialrisses führen kann. Diese These wird gestützt durch die weite Bandbreite von relativen Zirkumferentialrißradien, die in Versuchen ermittelt wurden. (Vgl. Enkvist, 1972). Enkvist (1972) berichtet außerdem über Finite Elemente Berechnungen an einem 90° - Keil, entsprechend einer Platte auf elastischer Bettung mit unbegrenzt tiefem Radialriß. Der hierfür berechnete Zirkumferentialrißradius von $l^* = 1,0$ entspricht der oberen Grenze der in Versuchen ermittelten Werte. Die untere Grenze liegt bei $l^* = 0,3$.

Der Vergleich der Spannungszustände mit und ohne Horizontalkraftkomponente läßt erkennen, daß die durch die Horizontalkraft erzeugten Druckspannungen erwartungsgemäß zu einer Entlastung der oberen Randfaser führen.

Mit zunehmender Rißlänge wird die Federsteifigkeit an der Lastangriffsstelle immer geringer, das heißt bei konstanter Last steigt das elastische Potential U . In Tafel 2.1 sind für die hier behandelten Lastfälle die Last, die Durchsenkung und das elastische Potential zusammengestellt.

F_x	[N]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
F_z	[N]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
U_x	[mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
U_z	[mm]	4.171	4.219	4.409	4.667	4.911	4.178
U	[Nm]	0.2085	0.2109	0.2204	0.2334	0.2455	0.2090
$l_{riß}$	[mm]	0.0	82.0	262.0	508.0	819.0	0.0

Tafel 2.1 Last, Verschiebung am Lastangriffspunkt und elastisches Potential für rechteckige Platte auf elastischer Bettung.

Zum Vergleich sei hier das elastische Potential gegeben, das sich nach Nevel (1965) für eine halbunendliche Platte mit den gleichen Kennwerten wie im behandelten Beispiel ergibt:

$$U_{\infty} = 0.2376 \text{ Nm.}$$

2.6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Es wurde ein Finite Elemente Programm erstellt, das auf der Basis des geometrischen Steifigkeitskonzepts mit 12-parametrischen Dreieckscheibenelementen und 21-parametrischen Dreieckplattenelementen, beide mit 6 Knotenpunkten und einem vollständigen Verschiebungsansatz, arbeitet. Eine elastische Bettung wird durch spezielle Bettungssteifigkeitsmatrizen berücksichtigt. Das Programm ist ausgelegt für den Anschluß von EigenwertROUTINEN zur Beullastberechnung.

Das Programm ist, lineare Elastizität vorausgesetzt, geeignet zur Spannungsanalyse an schwimmenden homogenen Eisdecken, insbesondere, wenn diese, wie in Eistanks, räumlich begrenzt sind.

Das Programm wurde angewandt auf eine rechteckige Modelleisdecke, deren Abmessungen und Materialeigenschaften an die Gegebenheiten im Eistank der HSVA angelehnt wurden. Dabei wurde eine mögliche Erklärung für die große Bandbreite der in der Literatur angegebenen, in Versuchen gemessenen Zirkumferentialrißradien gefunden. Auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß sich das Eis nicht linear-elastisch verhält, bietet das vorgestellte Finite-Elemente-Programm die Möglichkeit, die spannungsmäßigen Auswirkungen von Variationen in der Lasteinleitung in eine Eisdecke zu analysieren.

3. Versuche mit punktförmig belasteten Eisdecken

3.1. Veranlassung und Aufgabe der Untersuchung

Das im vorigen Kapitel beschriebene Rechenmodell basiert auf der Annahme, daß das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Eis dem HOOKE'schen Gesetz gehorcht. Da die Materialeigenschaften von Eis noch nicht in ausreichendem Maße beschrieben sind, bedarf es der Überprüfung durch Versuche, ob und in welchem Rahmen diese Annahmen eines linearen Verformungsgesetzes zulässig ist. Festigkeitsversuche mit Dehnungsmessungen auf einer Materialprüfmaschine, wie sie im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden (Häusler, 1977) und über die auch andere Autoren berichten (z.B. Frederking, 1977 und Jones, 1978) sind der direkteste Weg zur Beantwortung dieser Frage. Sie sind klar aufgebaut und relativ einfach rechnerisch zu erfassen, tragen aber den Nachteil in sich, daß das Eis aus seiner natürlichen Lage (auf Wasser schwimmend) entfernt werden muß, wobei beim säulenförmigen Salzwasser-Eis zwangsläufig Salzlake aus dem porigen Eis herausläuft. Das kann vermieden werden, wenn das Eis "in-situ" untersucht wird. Im Feld werden derartige Untersuchungen häufig als Kragbalkenversuche durchgeführt, wobei das Eis quasi einachsig belastet wird (vgl. folgendes Kapitel). Da bei Eis das Verformungs- und Bruchverhalten auch vom Spannungszustand abhängt, ist es sinnvoll, den komplizierten Spannungszustand beim Eisbrechen im Versuch durch punktförmige Belastung von geschlossenen und halbgeschlossenen Eisdecken zu simulieren. Bei den im folgenden beschriebenen Belastungsversuchen mit niedrigrinalinen Salzwasser-Eisdecken sollte die Messung von Kraft und Verformung während der Belastung die oben gestellte Frage, inwieweit die Anwendung des HOOKE'schen Gesetzes bei Eis zulässig ist, aufhellen. Dehnungsmessungen an der Eisoberfläche sollten einen direkten Einblick in die Vorgänge im Eis gewähren.

3.2. Versuchseinrichtung

3.2.1 Versuchsanlage

Die Versuche wurden im Eistank der Hamburgischen Schiffbau-Versuchsanstalt durchgeführt. Der Eistank ist im Jahre 1971 mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie gebaut worden. Er besteht aus einem dreiteiligen Becken: Trimm-tank, Gefrierbecken und Eis-Abtaubecken.

Das Gefrierbecken, das eigentliche Versuchsbecken, ist 30 m lang, 6 m breit und 1,2 m tief. Eisbrechvorgänge können durch Fenster im Boden und in der Seitenwand beobachtet werden. Das Kühlsystem liefert eine Kühlleistung von 42 kW, die über gleichmäßig an der Decke des Tanks angebrachte Radiatoren in den Raum übertragen wird. Während des Gefriervorgangs kann jede Temperatur zwischen 0° und -20° C eingestellt und innerhalb 1° C konstant gehalten werden. Aufgrund der geringen Luftbewegung ist die sich bildende Eisdecke über die Länge des Tanks recht gleichmäßig (± 1 mm in der Eisdicke). Um die Größe der Eiskristalle zu verkleinern und um eine gleichmäßige Kristallstruktur zu erzeugen, wird die Eisbildung durch die sogenannte "Wasser-Sprüh-Methode" initiiert. Hierbei wird Wasser von einigen Grad über dem Gefrierpunkt als Nebel in die -10° C kalte Luft gesprüht. Die Eiskristalle, die sich sogleich aus den feinen Wasserteilchen bilden, sinken auf die eisbereite aber eisfrei Wasseroberfläche und bewirken dort die Bildung eines feinkörnigen, säulenförmigen Eises, das in seiner Struktur dem Meer-Eis in der Natur ähnlich ist.

Der Eistank ist mit einem motorgetriebenen Schleppwagen ausgerüstet, an dem auch Belastungseinrichtungen befestigt werden können.

3.2.2 Meßeinrichtung und Datenerfassung

Für die Versuche waren grundsätzlich zwei verschiedene Belastungseinrichtungen nötig:

- für Belastung senkrecht zur Eisoberfläche
- für Belastung parallel zur Eisoberfläche.

Für die Belastung senkrecht zur Eisoberfläche wurde am vorderen Querträger des Schleppwagens eine stabile Aufhängung befestigt, die zur Vermeidung von Kippbewegungen noch zusätzlich am Mittellängsträger des Schleppwagens abgestützt war. Mit der Aufhängung fest verschraubt war ein Spindelgetriebe, das von einer starken Bohrmaschine angetrieben wurde und über das die Kraft auf die Eisdecke aufgebracht wurde. Am unteren, verschieblichen Teil des Spindelgetriebes war eine Kraftmeßdose befestigt, über die die Kraft in die eigentliche Krafteinleitung geleitet wurde. Die eigentliche Krafteinleitung geschah beim Zug-Fall über einen drehbar an der Kraftmeßdose angelenkten Haken, dessen Auflagefläche an der Eisunterseite auf 25 cm^2 vergrößert war und zur Vermeidung

von Lastspitzen eine Balsaholzschicht trug. Bei den ersten beiden Drucklastfällen bestand die Krafteinleitung aus einer drehbar angelenkten Stahlscheibe, die mit Balsaholz abgepolstert war. In den folgenden Drucklastfällen wurde die Kraft über zwei Rollen auf die Eisdecke übertragen. Zur Lastverteilung diente eine Kunststoffscheibe mit untergelegtem Balsaholz. Durch die Rollen sollte vermieden werden, daß bei größeren Durchbiegungen insbesondere der Halbplatte Tangentialkräfte in die Eisdecke eingeleitet wurden. In Abb. 3.1 ist die Belastungseinrichtung für die Versuche mit Belastung senkrecht zur Eisdecke skizziert. Für die Belastung parallel zur Eisoberfläche wurde eine schlanke zylindrische Säule von 0,20 m Durchmesser, die durch eine Parallelogrammführung senkrecht gehalten wurde, vom Schleppwagen gegen die freie Eiskante gedrückt (Abb. 3.2).

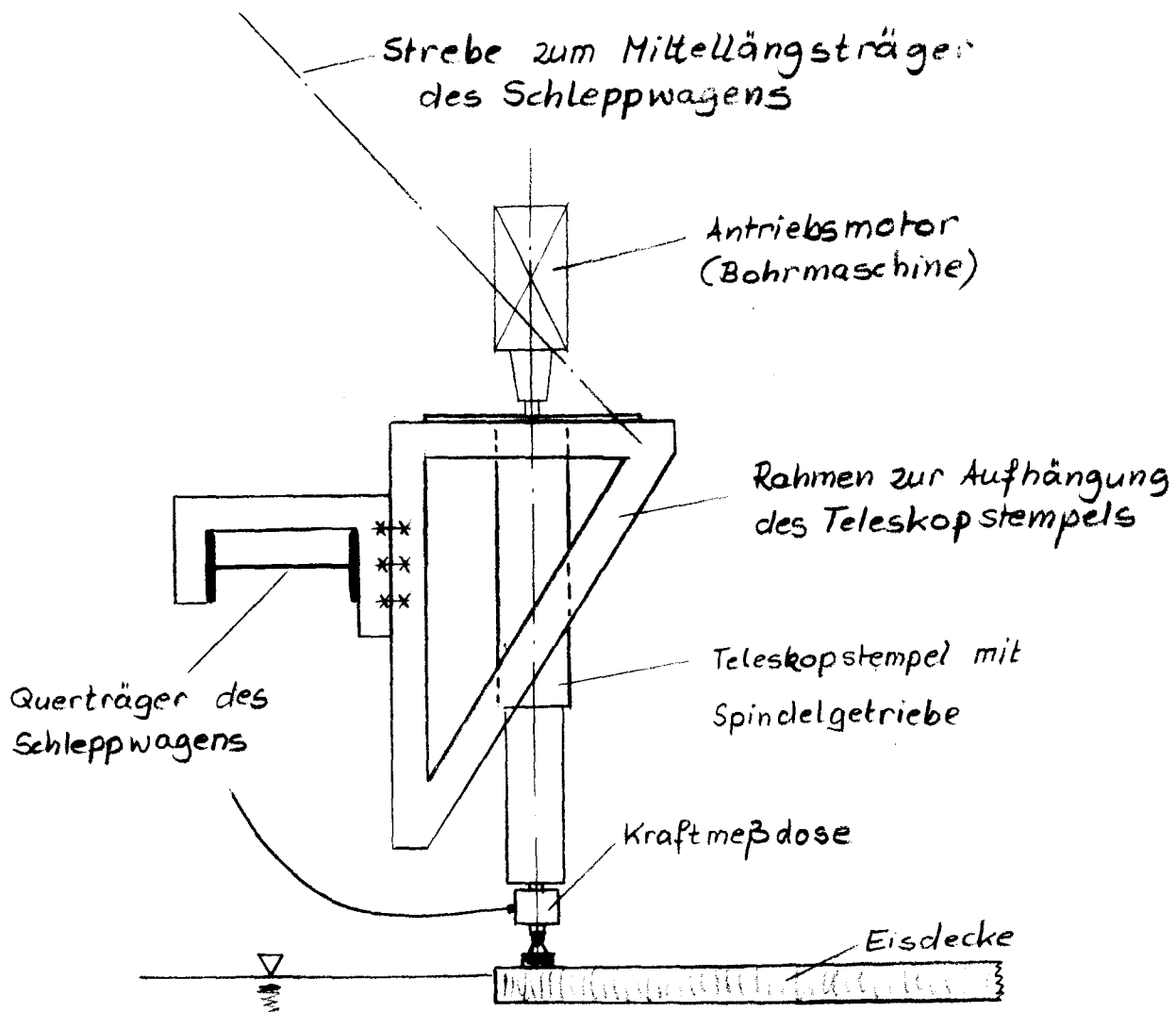


Abb. 3.1 Belastungseinrichtung für Belastung senkrecht zur Eisoberfläche

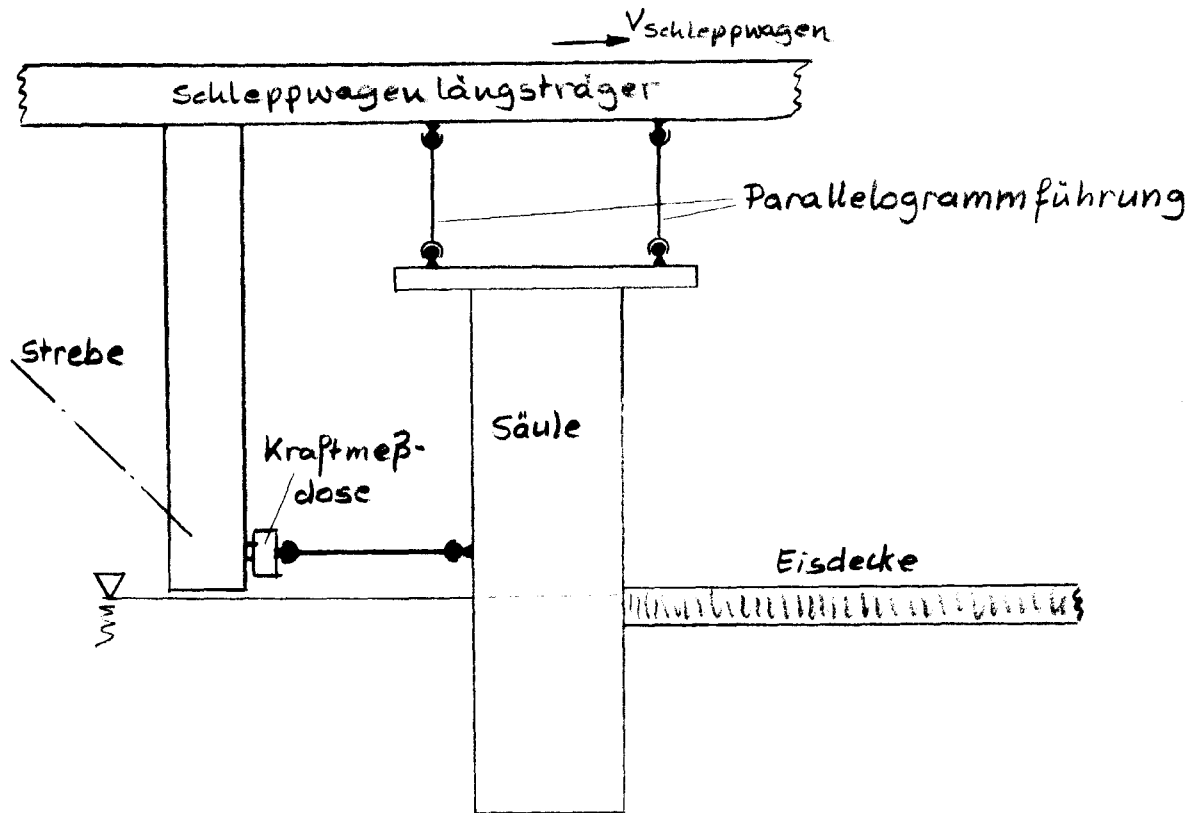


Abb. 3.2 Belastungseinrichtung für Belastung parallel zur Eisoberfläche

Um während der Belastung synchron alle Meßwerte erfassen zu können, wurden sämtliche zeitlich veränderlichen Größen elektrisch gemessen. Dabei wurden soweit als möglich aktive Meßwertaufnehmersysteme eingesetzt. Im einzelnen wurden folgende Geräte eingesetzt:

- 2 aktive Kraftmeßdosen mit 5 bzw. 10 kN Nennbelastung
- 2 passive Kraftmeßdosen mit 2 kN und 100 N Nennbelastung, (die kleinere Dose für die begleitenden Kragbalkenversuche)
- 3 aktive Wegaufnehmer mit ± 75 mm Nennweg
- 2 passive Wegaufnehmer mit ± 10 mm Nennweg (für die begleitenden Kragbalkenversuche)
- 15 DMS-Rosetten, 120 Ω - System, deren Trägerfolie mit feinem Sand beklebt wurde um einen besseren Schluß zwischen DMS und Eis zu erzeugen.

Die Meßsignale wurden soweit nötig verstärkt und von zwei UV-Lichtstrahl-oszillographen synchron aufgezeichnet. Die Synchronisierung der beiden UV-Schriebe wurde dadurch gewährleistet, daß ein Rechtecksignal erzeugt und auf beiden Oszillographen registriert wurde.

3.3. Versuchsdurchführung

Der Versuchsablauf war bei sämtlichen 4 Eisdecken, die untersucht wurden, ähnlich. Zunächst wurde nach der bei der HSVA üblichen Wasser-Sprüh-Methode eine Eisdecke gefroren. War die gewünschte Eisdicke erreicht, wurden an drei Stellen in Tanklängsrichtung jeweils 5 DMS-Rosetten in die Eisdecke gefroren. Die Lage der DMS relativ zum gewählten Lastangriffspunkt war in allen Fällen gleich: drei Rosetten in Tanklängsrichtung 0,20, 0,40 m und 0,60 m vom Lastangriff entfernt, dazu zwei weitere Rosetten in 0,40 m Abstand vom Lastangriff unter 30° und 60° zur Tanklängsachse (vgl. Meßstellenanordnungen in Anhang C). Der Soll-Lastangriffspunkt lag in allen Fällen auf der Mittellängsachse des Tanks. Zum Einfrieren der DMS-Rosetten wurden flache Vertiefungen in die Eisoberfläche geschabt. Die DMS wurden in die Vertiefungen eingelegt und mit 0° C kaltem Frischwasser eingefroren. Die DMS wurden in die Eisdecke eingefroren, um zu verhindern, daß, wie beim Auffrieren unvermeidlich, verlaufendes Frischwasser zu einer lokalen Vergrößerung der Eisdicke führt. Die Verletzung der oberen Faser durch das Ausschaben der Vertiefungen mußte dabei in Kauf genommen werden. Die DMS wurden so früh wie möglich an eine Spannungsquelle angeschlossen, um während der eigentlichen Messung die temperaturbedingte Nullpunktdrift klein zu halten.

Bei den Versuchen mit freier Eiskante wurde an der Versuchsstelle ein schmaler Kanal quer über die Tankbreite freigesägt. Anschließend wurden die Wegaufnehmer möglichst nahe der Lastangriffsstelle installiert. Sie steckten in einem Balsaholzträger, der seinerseits an einem Sperrholzkastenträger befestigt war, der stegartig quer über den Tank gelegt worden war. Danach wurde der Schleppwagen mit der Belastungseinrichtung in Position gefahren.

Vor jedem Versuch wurden die DMS-Signale elektrisch kalibriert. Die Signale der Kraftmeßdosen und Wegaufnehmer wurden demgegenüber zum Teil unabhängig vom jeweiligen Versuch mechanisch kalibriert. Nachdem die Meßstelle mit den Positionen aller Aufnehmer aufgemessen worden war, wurde die Eisdecke bis zum Bruch belastet. Das Bruchbild wurde aufgezeichnet.

Parallel zu den Hauptversuchen wurden Kragbalkenversuche durchgeführt, bei denen Kraft und Durchbiegung als Zeitfunktion registriert wurden.

Zur Überprüfung der mit den DMS gemessenen Dehnungen wurde eine Rosette in eine Eisdecke eingefroren, aus der dann ein rechteckiges Stück mit der Rosette in der Mitte ausgesägt wurde. Dieses Eisdeckenstück wurde auf einer Materialprüfmaschine parallel zur ursprünglichen Eisoberfläche gedrückt (Scheibenbelastung) und gleichzeitig der Weg des Prüfmaschinenjochs und die Dehnungen an der DMS-Rosette gemessen.

3.4. Versuchsauswertung

Die UV-Oszillogramme wurden digitalisiert. Aus den digitalen, kalibrierten Meßwerten wurden Zeitfunktionsdiagramme der gemessenen Größen Kraft, Wege und Dehnungen entwickelt.

Für die Plattenlastfälle mit Einzellast auf Mitte der freien Kante wurde unter Bezug auf die Theorie der halbunendlichen, elastisch gebetteten, linear elastischen Platte (Nevel, 1965) ein Elastizitätsmodul berechnet. Für den Fall einer Last, die auf eine rechteckige Fläche unmittelbar an der freien Kante einer halbunendlichen, elastisch gebetteten Platte wirkt gibt Nevel (1965) die Durchsenkung an der freien Kante mit

$$w = c \frac{F}{k l_{cp}^2} \quad (3.1)$$

an.

Der Koeffizient c hängt von der Länge und Breite der Belastungsfläche relativiert mit der charakteristischen Länge der Eisdecke

$$l_{cp} = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (3.2)$$

ab. Für die reine Punktlast gilt $C_p = 0.4702$. Mit diesem Ansatz wird der Elastizitätsmodul

$$E = \left(\frac{cF}{w}\right)^2 \frac{12(1-\nu^2)}{k h^3} \quad (3.3)$$

Da c von den Abmessungen der Belastungsfläche und von l_{cp} abhängt, kann, von der reinen Punktlast abgesehen, Gl. 3.3 nicht geschlossen gelöst werden, sondern es ist eine Iteration nötig. Die Werte für c sind von Nevel (1965) berechnet und tabelliert worden.

Für die Lastfälle mit geschlossener Eisdecke wurde die bekannte Lösung für die unendliche, punktförmig belastete Eisdecke auf elastischer Bettung benutzt (Grim, 19)

$$w = \frac{F}{8kh^2} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{E}} \quad (3.4)$$

und nach E aufgelöst

$$E = \left(\frac{F}{8w}\right)^2 \frac{12(1-\nu^2)}{kh^3} \quad (3.5)$$

Die Wertepaare Kraft-Weg wurden zu Beginn der Belastung genommen, wo der Kraftanstieg noch weitgehend proportional dem Weganstieg war, also lineares Materialverhalten noch in guter Näherung angenommen werden konnte. Da die Plattendurchsenkung am Lastangriffspunkt nicht gemessen werden konnte, wurde für den Weg der Meßwert von dem Wegaufnehmer gewählt, der der Belastungsstelle am nächsten war. Die Folge ist, daß eine zu kleine Durchsenkung in die Berechnung eingeht, der berechnete scheinbare Elastizitätsmodul also zu groß ist.

Mit der gleichen Wertepaarung (Kraft und nächstgelegener Weg) wurden Kraft-Weg-Diagramme entwickelt und durch Integration die Brucharbeiten für sämtliche Belastungsfälle ermittelt

$$U = \int_0^{w_{bruch}} F(w) dw \quad (3.6)$$

Der Bewertung der ermittelten Brucharbeiten wird die Theorie der elastisch gebetteten, halbunendlichen Platte (Nevel, 1965) zugrundegelegt. Danach ist die äußere Formänderungsarbeit

$$U_a = \frac{1}{2} w F = \frac{1}{2} c \frac{F^2}{k \sqrt{\frac{E h^3}{12(1-\nu^2)k}}} \quad (3.7)$$

Die Bettungsziffer k ist gleich dem spezifischen Gewicht des Wassers, auf dem die Eisdecke schwimmt. k ist daher für alle Versuche konstant. Unter der Annahme, daß der Elastizitätsmodul proportional der Eisbiegefestigkeit aus Kragbalkenversuchen σ_f und die Bruchlast F proportional $\sigma_f h^2$ ist, wird

$$U_a \sim \frac{\sigma_f h^4}{\sqrt{\sigma_f h^3 k}} = \sqrt{\sigma_f^3 h^5 / k}. \quad (3.8)$$

Die Proportionalität zwischen Eisbiegefestigkeit und Elastizitätsmodul ist grundsätzlich nicht unbedingt gegeben. Im Feld sind annähernd konstante Verhältnisse beobachtet worden. Im Modelltank sind dagegen erhebliche Anstrengungen nötig um E/σ -Verhältnisse zu verwirklichen, die, wie nach dem Cauchy'schen Ähnlichkeitsgesetz nötig, annähernd den in der Natur gemessenen Verhältnissen entsprechen.

Die Brucharbeiten der Lastfälle mit Last senkrecht zur Eisoberfläche wurden dementsprechend mit $\sqrt{\sigma_f^3 h^5 / k}$ normiert. Weiterhin wurden die Bruchlasten für diese "Plattenbiegungs-Fälle" mit $\sigma_f h^2$ normiert.

Auf die Scheibenlastfälle mit horizontaler Druckkraft auf die freie gerade Scheibenkante wurde die empirische Eisdruckformel nach IIHR (Iowa Institute of Hydraulic Research, 1974) angewandt. Danach ist die Eisdruckkraft F (in N) für einen quasistatisch in eine Eisdecke eindringenden runden Pfahl mit dem Durchmesser d (in m)

$$F = 0,566 \sigma_c h^{1,1} d^{0,5} \quad (3.9)$$

Hierin ist σ_c (in N/m^2) die einachsige Druckfestigkeit des Eises und h (in m) die Eisdicke. Zu beachten ist, daß die Konstante dimensionsbehaftet ist. Aus der daraus ermittelten einachsigen Druckfestigkeit, bei gegebener Kraft $F =$ Bruchkraft, und dem Ergebnis der parallel durchgeführten Kragbalkenversuche wurde das Verhältnis σ_c / σ_f ermittelt.

Der Auswertung der Kragbalkenversuche liegt die einfache Balkentheorie zugrunde. Der Einfluß der elastischen Bettung konnte ebenso vernachlässigt werden wie der Einfluß der Schubdurchsenkung. Unter Berücksichtigung des Abstandes der Wegaufnehmer konnte so der scheinbare Elastizitätsmodul des Eises aus Kraft-Weg-

Wertpaaren einfach ermittelt werden:

$$E = \frac{4 F e^3}{w_i b h^3} \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{x_i}{e} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{x_i}{e} \right)^3 \right) \quad (3.10)$$

mit

b = Balkenbreite

l = Balkenlänge von der Einspannstelle bis zum Lastangriffspunkt

x = Koordinate in Balkenlängsrichtung mit Nullpunkt am Lastangriffspunkt.

w_i = Durchsenkung an der Stelle x_i.

Die Kraft, ein oder zwei Wege und dementsprechend ein oder zwei scheinbare Elastizitätsmoduln wurden als Zeitfunktionen über der Belastungszeit bis zum Bruch in Diagrammform dargestellt.

Die beim DMS-Überprüfungsversuch auf einer Materialprüfmaschine gemessenen Dehnungen wurden zusammen mit der Kraft und dem Weg des Prüfmaschinenjochs als Zeitfunktionen dargestellt.

3.5. Ergebnisse

Die Meßergebnisse, Zeitfunktionen, Bruchbilder und dazugehörige Meßstellenanordnungen sind im Anhang zusammengestellt. Die Verläufe der Dehnungen geben einen guten Einblick in die Vorgänge in der oberen Eisdeckenrandfaser während der Belastung. Oberflächenrisse, die sich, wie beobachtet werden konnte, einer nach dem anderen ausbilden, finden sich als sprungartige Dehnungsänderungen in den Dehnungsverläufen wieder (vgl. z.B. 1. Messung, 10.1.1978, Position 7.8 m). Diese Dehnungssprünge sind häufig an mehreren DMS-Meßstellen gleichzeitig zu beobachten. Die Dehnungen wechseln im Verlauf der Belastung häufig ein oder mehrere Male zum Teil sprungartig die Dehnungsrichtung, was mit Lastumlagerungen in der Eisdecke erklärt werden kann, die sich aus der lokalen Entspannung durch Risse ergibt. Die größten gemessenen Dehnungen liegen im Bereich von 300 µm/m. In Abb. 3.1 sind zum Vergleich Dehnungsverläufe aufgezeichnet die während der "Arktischen Meßfahrt 1977" im Eisfjord, Spitzbergen gemessen worden waren (Häusler, 1978). Dabei waren 4 Dehnungsmeßrahmen wie in Abb. 3.2 skizziert in die ca. 0.4 m dicke Eisdecke eingefroren worden. Das Schiff passierte die Meßstelle in ca. 95 m Abstand.

Die mit den DMS gemessenen Dehnungen sind aber insofern fragwürdig, was die Größe der Dehnung (nicht die Charakteristik) angeht, als der Überprüfungsversuch mit einer Eisscheibe auf einer Materialprüfmaschine eine sehr schlechte Übereinstimmung zwischen theoretischer Scheibendehnung und den an der DMS-Rosette gemessenen Dehnung ergab (s. Anhang D). Klärung könnte hier die Überprüfung der DMS-Werte mit z.B. einem induktiven Dehnungsmeßsystem geben, daß unmittelbar an der DMS-Rosette mißt und nicht, wie hier, integral über die Probenlänge.

Beachtenswert ist, daß die rißbedingten Sprünge in den Kurven, von Ausnahmen abgesehen (Messung 1, 29.12.1977), nur bei den Dehnungen, nicht aber bei Kraft und Wegen zu erkennen sind. Offensichtlich bleibt die Eisdecke auch trotz Rißbildung noch lange tragfähig, denn die Last steigt auch nach mehreren, deutlich erkennbaren Rissen nicht an. Dies läßt den Schluß zu, daß die Eisdecke nur an der spröden Oberfläche reißt, im übrigen aber noch trägt und zum Teil plastifiziert. Für die Plastifizierung spricht auch, daß der Kraftverlauf nach steilem Anstieg ein flaches Maximum erreicht und erst nach zum Teil deutlichem Lastabfall der Bruch der Eisdecke eintritt. Bei der Bewertung dieses Kraftverlaufs ist zu beachten, daß die Belastung relativ langsam aufgebracht werden mußte (10 - 20 s Belastungsdauer). Im Gegensatz dazu liegt bei Eisbrechern die Belastungsdauer in der Größenordnung von 1 s. Da die Versuche mit annähernd konstanter Vorschubgeschwindigkeit gefahren wurden, ist die Charakteristik der Kraftverläufe über Weg und über Zeit ähnlich (siehe Anhang C). Die Kraft-Weg-Kurve entspricht gut den Spannungs-Dehnungs-Kurven, die bei geringen Verformungsgeschwindigkeiten in einachsigen Druckversuchen beobachtet wurden.

In Tafel 3.1 sind die Bruchlasten und Brucharbeiten für die punktförmig auf Biegung belasteten Eisdecken zusammengestellt. Bei den Versuchen mit geschlossener Eisdecke fällt die relativ niedrige Bruchlast und Brucharbeit auf. Hauptgrund dafür ist, daß hier, im Gegensatz zu den Versuchen mit halbgeschlossenen Eisdecken, das Eis relativ weich und plastisch war. Die oben angenommene Konstanz des E/σ -Verhältnisses ist mit Sicherheit hier nicht mehr gegeben. Weiterhin ist aber auch zu beachten, daß hier, im Gegensatz zu den Versuchen mit Halbplatten, die entgültige Versagensform kein Biegebruch war, sondern von der Lastplatte ein kreisförmiges Stück aus der Eisdecke herausgestanzt wurde, das geringfügig größer war als die Lastplatte selbst. Dieses Versagen kann nicht

allein durch Scherversagen erklärt werden, (die scheinbare Scherfestigkeit $\sigma_s^* = F_{\text{Bruch}} / (h \pi d)$ ergibt zum Beispiel im Versuch 9.1 nur $\sigma_s^* = 9,8$ kPa bei $\sigma_f = 79$ kPa; (Durchmesser des herausgestanzten Eisstückes $d = 0,22$ m), sondern durch die Überlagerung der lokalen Plattenbiegung an der Lasteinleitung (Zugspannungen in der Eisunterseite) mit den Schubspannungen um die Lasteinleitung herum.

Die in den Plattenbiegungsversuchen ermittelten Elastizitätsmoduln sind in Tafel 3.2 zusammengestellt und zwar auf der Basis der Theorie der elastisch gebetteten Platte. Allem Anschein nach ist das Ergebnis E_1 nach der Theorie der Platte auf elastischer Bettung unzuverlässig. In den begleitenden Kragbalkenversuchen (Tafel 3.3) wurden Elastizitätsmoduln im Bereich von $E_{\text{KB}} = 200$ MPa ermittelt, ein Wert, der größenordnungsmäßig vom Ergebnis der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Druckfestigkeitsversuche (Häusler, 1977) gestützt wird (dort $E = 48$ bzw. 107 MPa).

Das Versagen des benutzten Verfahrens zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls kann damit erklärt werden, daß das benutzte Rechenmodell "Platte auf elastischer Bettung" bei den gegebenen Tankabmessungen und Eisdicken nicht mehr zulässig ist.

Der Vergleich der in Tafel 3.2 aufgeführten maximalen Zirkumferentialrißradien (vgl. Rißbilder im Anhang) mit den charakteristischen Längen der jeweiligen Eisdecke (berechnet auf der Basis von gemittelten Elastizitätsmoduln aus Kragbalkenversuchen) ergibt zum Teil recht gute Übereinstimmung der Werte. Bemerkenswert ist das Auftreten von zwei Zirkumferentialrissen im Versuch 2.1 (s. Anhang C) mit 1.0 m und 1.7 m Zirkumferentialrißradius. Dies kann als Stützung der in Abschnitt 2.5 behandelten Rißbildungshypothese dienen.

Die Versuchsergebnisse aus der horizontalen Belastung halbgeschlossener Eisdecken sind in Tafel 3.4 zusammengefaßt. Zeitfunktionsdiagramme von Kraft, Wegen und Dehnungen finden sich im Anhang C. Der Vergleich zwischen der aus Kragbalkenversuchen ermittelten Biegefestigkeit und der nach Gl.(3.9) berechneten Eisdruckfestigkeit ergibt ein Verhältnis $\sigma_c / \sigma_f = 4.0$. Dies stimmt recht gut mit den einachsigen Druckfestigkeitsversuchen überein, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurde (Häusler, 1977); für Proben, die senkrecht zur Wachstumsrichtung auf Druck belastet wurden ergab sich dort $\sigma_c / \sigma_f = 4,6$.

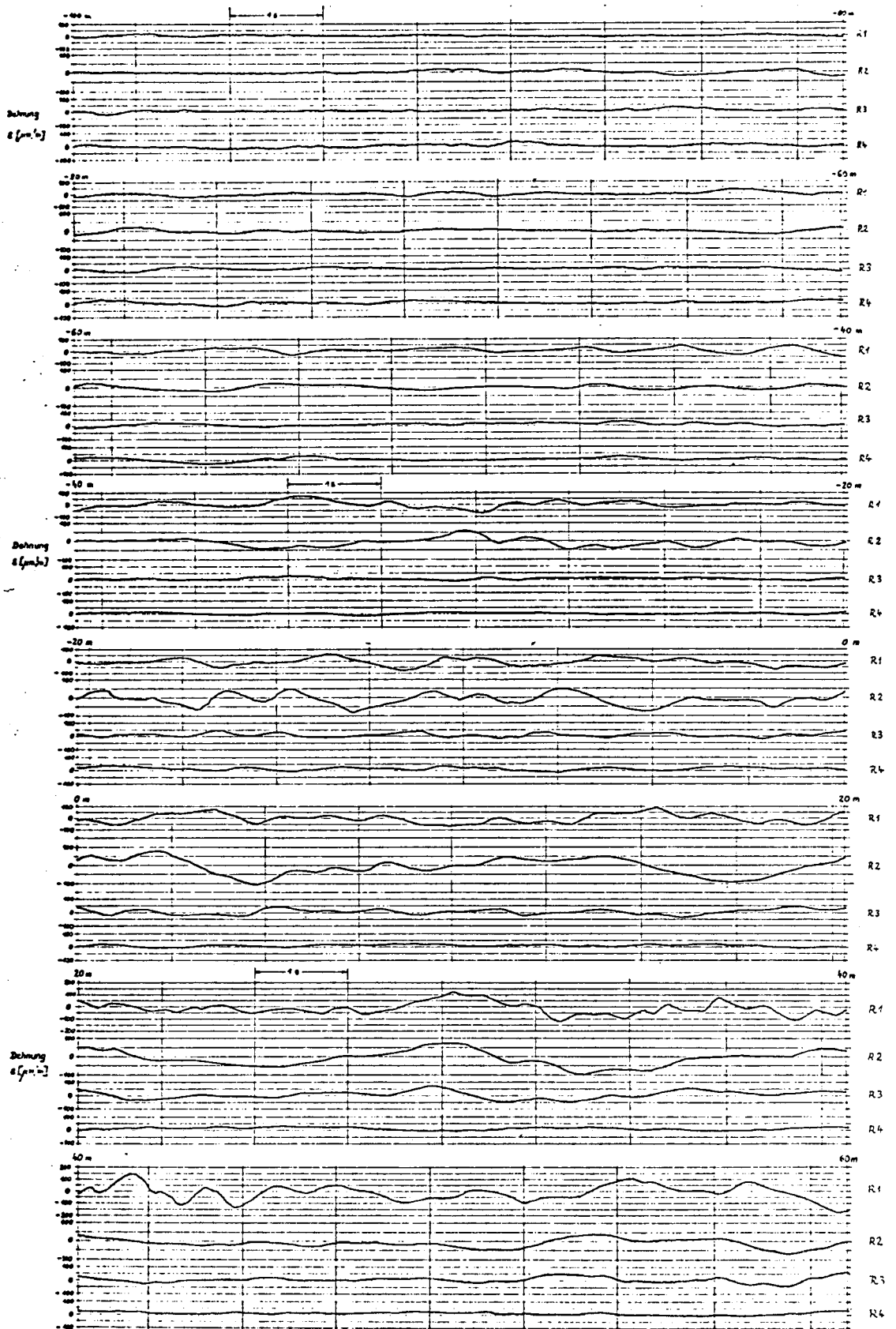


Abb. 3.1 Dehnungsverläufe während des Vorbeifahrt-Versuchs (Positionsangabe: Bug - Passierpunkt).

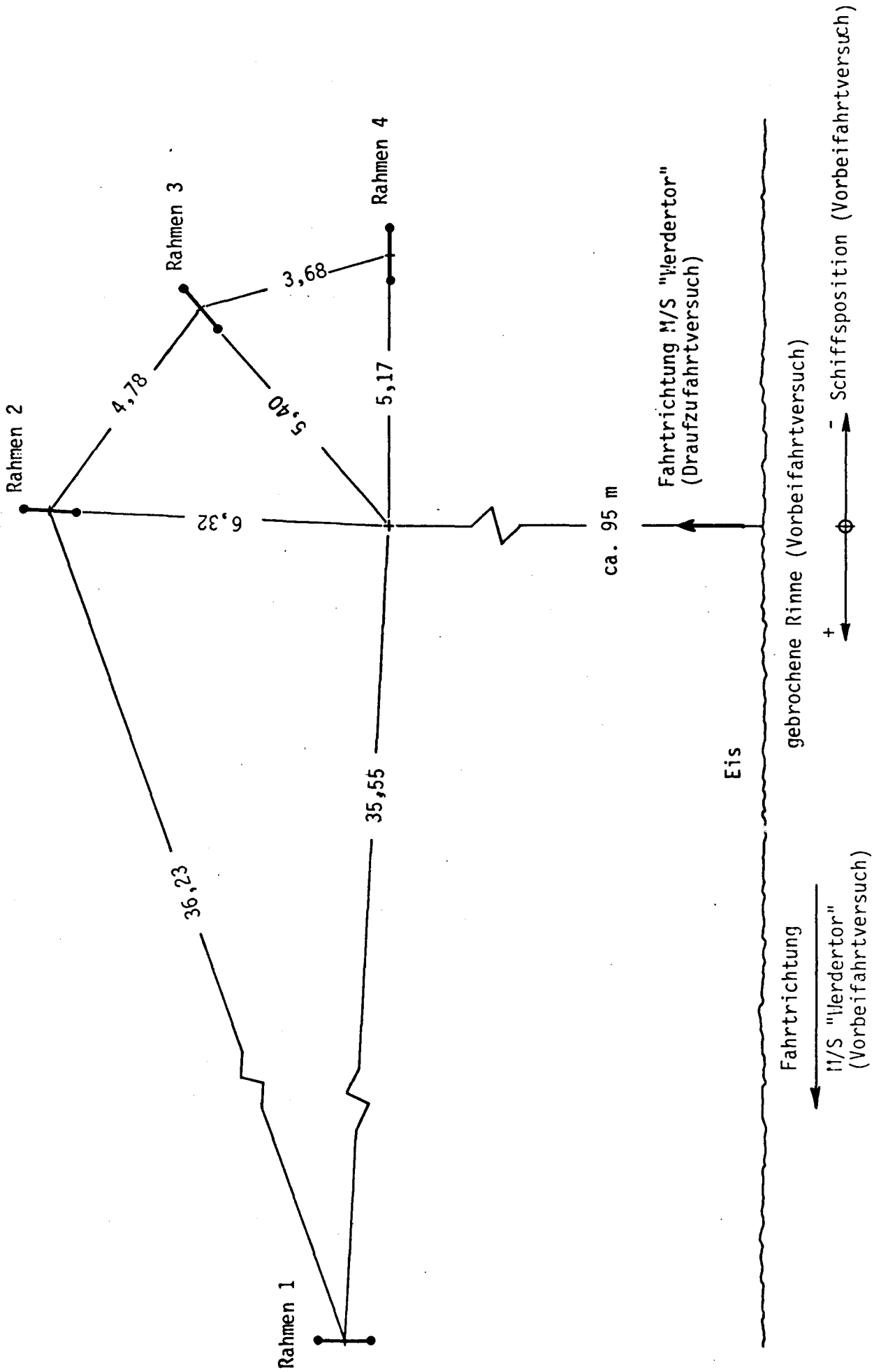


Abb. 3.2 : Meßstellenanordnung für Dehnungsmessungen mit eingefrorenen Rahmen Arktische Meißfahrt, Spitzbergen, Eisfjord, 15. April 1977

Vers. Nr.	Datum	F_{\max} [N]	U [Nm]	h [mm]	σ_f [kPa]	$U/\sqrt{\sigma_f^3 h^5/k}$ [10 ⁻³]	$F_{\max}/(\sigma_f h^2)$ [-]
Halbplatte, Belastung nach unten							
1.4	22.12.77	435	2.6	69			
2.1	22.12.77	1094	19.8	72			2.43
3.2	22.12.77	1716	36.4	77	87	85.6	3.33
Halbplatte, Belastung nach oben							
4.1	29.12.77	2218	76.0	78	113	117	3.23
5.1	29.12.77	2098	41.0	80	99	72.2	3.31
6.1	29.12.77	1869	51.3	81	95	93.1	3.00
Geschlossene Platte, Belastung nach unten							
7.1	10.01.78	689	26.3	52.5	118	102	2.12
8.1	10.01.78	392	20.1	56	126	60.1	0.99
9.1	11.01.78	534	41.0	78.5	79	106	1.11

Tafel 3.1 Bruchlasten und Brucharbeiten von punktförmig biegebelasteten Eisdecken

Vers. Nr.	t_{el} [s]	$w_1(t_{el})$ [mm]	$F(t_{el})$ [N]	E_1 [MPa]	E_{KB} [MPa]	h [mm]	r_{max} [m]	l_p [m]
2.1	10.0	15.3	656	1142	--	72	1.7	---
3.1	1.1	2.1	200	4665	315	77	---	1.08
3.2	1.4	3.3	313	4626	315	77	---	1.08
4.1	2.4	9.3	1271	9455	320	78	1.1	1.09
5.1	0.9	3.3	429	7926	180	80	0.4	0.96
6.1	2.9	10.9	1626	10070	175	81	0.6	0.96
7.1	2.3	8.6	300	146	120	52.5	0.6	0.63
8.1	3.7	16.4	208	16	165	56	---	0.72
9.1	2.3	8.6	291	41	135	78.5	1.2	0.88

Tafel 3.2 Elastizitätsmoduln aus punktförmig belasteten, elastisch gebetteten Eisdecken für den linearen Verformungsbereich; Elastizitätsmoduln aus Kragbalkenversuchen; maximale Zirkumferentialrissradien und charakteristische Längen

Nr.	Datum	l [cm]	b [cm]	h [cm]	F [N]	σ_f [kPa]	E_{KB} [Mk]
1	22.12.77	49.0	11.50	7.70	35.7	153	315
2*	22.12.77	45.0	11.70	7.55	20.9	85	220
3	22.12.77	67.0	12.6	7.70	17.6	95	315
4*	22.12.77	34.0	12.3	7.70	29.0	81	60
5	29.12.77	59.0	9.40	7.80	23.6	146	395
6	29.12.77	60.0	13.40	7.80	24.6	103	390
7	29.12.77	60.0	12.70	7.80	19.3	90	165
8	29.12.77	66.0	10.50	8.00	15.1	90	195
9	29.12.77	68.0	11,35	8.00	17.8	100	180
10	29.12.77	69.0	10.75	8.00	17.7	107	165
11	29.12.77	66.0	9.55	8.05	15.5	99	180
12	29.12.77	67.0	10.25	8.05	15.8	98	245
13	29.12.77	67.0	10.60	8.05	17.3	101	150
14	29.12.77	67.0	11.30	8.05	17.0	93	160
15	29.12.77	66.5	11.70	8.05	16.0	84	140
16	10.01.78	49.0	11.50	5.25	14.1	131	120
17	10.01.78	49.8	10.70	5.25	10.4	105	115
18	10.01.78	47.0	11.00	5.60	14.6	120	160
19	10.01.78	47.0	9.00	5.60	13.1	131	295
20	10.01.78	47.0	9.20	5.60	13.8	135	170
21	10.01.78	46.0	10.60	5.60	14.6	121	170
22	11.01.78	63.0	10.00	7.85	15.5	95	120
23	11.01.78	62.2	12.30	7.85	14.3	71	160
24	11.01.78	61.3	11.60	7.85	14.1	72	125
25	13.01.78	49.5	10.50	5.35	13.7	135	190
26	13.01.78	50.0	10.40	5.35	10.0	101	160
27	13.01.78	50.2	9.70	5.35	12.7	138	180
28	13.01.78	51.0	11.70	5.35	12.9	118	230
29	13.01.78	48.0	12.40	5.50	20.7	159	220
30	13.01.78	47.0	11.90	5.50	20.1	157	220
31	13.01.78	45.5	11.00	5.50	16.7	137	225
32	13.01.78	53.5	9.60	5.80	13.7	136	315
33	13.01.78	55.5	10.40	5.80	12.2	116	250
34	13.01.78	55.5	9.60	5.80	13.8	142	240
35	13.01.78	56.5	10.60	5.80	15.3	145	240

*) Werte fragwürdig

Tafel 3.3 Kragbalkenversuche

Vers. Nr.	Datum	F_{\max} [N]	W [Nm]	h [mm]	σ_f [kPa]	σ_c [kPa]
10.1	13.01.79	4959	47.0	53.3	123	491
11.1	13.01.78	5631	52.9	55	151	541
12.1	13.01.78	6769	54.9	58	134	613
Vers. Nr.	σ_c/σ_f [-]	$W/\sqrt{\sigma_f^3 h^5/k}$ [10^{-3}]	E_{KB} [MPa]			
10.1	3.99	163	190			
11.1	3.58	126	220			
12.1	4.57	137	260			

Tafel 3.4 Bruchlasten und Brucharbeiten von Eisdecken unter punktförmiger Belastung parallel zur Eisoberfläche

Da die Eisdecken nicht nur durch einen reinen Quetschbruch versagten, sondern auch ausbogen, wie aus den Wegmessungen senkrecht zur Eisoberfläche deutlich zu erkennen ist (siehe Anhang C), wurde auch hier die Brucharbeit mit $\sqrt{\sigma_f^3 h^5/k}$ normiert. Die so gewonnenen Werte liegen eindeutig höher als die aus den reinen Plattenbiegungsversuchen, bleiben aber in der gleichen Größenordnung.

3.6. Zusammenfassung

An vier Eisdecken, die im Eistank der HSVA gefroren worden waren, wurden insgesamt 12 Belastungsversuche durchgeführt. Während der Belastung wurden Kräfte, Wege und Dehnungen in der Eisoberfläche gemessen. Die Analyse der Ergebnisse ergab folgendes:

- das Rechenmodell halbbunendliche Platte auf elastischer Bettung ist bei den gegebenen Tankabmessungen und den hier üblichen Eisdecken ungeeignet zur Beschreibung von punktförmig belasteten Halbplatten,
- die Anwendung von elastischen Rechenmodellen auf die Prognose von Brucharbeiten, Bruchkräften und Verformungen erscheint bei höherem Belastungsgeschwindigkeiten im Bereich von einer Sekunde bis zum Bruch zulässig, solange die Randbedingungen der Eisdecken sorgfältig genug beschrieben werden. Der Variationsmöglichkeiten wegen wird dies praktisch nur mit Finite Elemente Methoden oder ähnlichem möglich sein,
- genauere Analysen der Bruchvorgänge wie Prognosen von Bruchbildern, Spannungen und Rechnungen werden nur mit nichtlinearen Rechenmethoden möglich sein, die wiederum ziemlich genau Kenntnis der Materialeigenschaften voraussetzen. Bisher ist diese Voraussetzung noch nicht ausreichend erfüllt. Dies wird sich aber in den nächsten Jahren ändern.
- Kragbalkenversuche erwiesen sich als zuverlässige Methode zur Bestimmung von Referenzwerten bezüglich der Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften des Eises.

4. Feldversuche zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Eises um Spitzbergen

4.1. Vorbemerkungen

Im April 1977 wurde von den Firmen Germanischer Lloyd, Hamburg, Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Hamburg, Jastram-Werke, Bergedorf und Vereinigte Tanklager- und Transportmittel GmbH., Bremen gemeinsam eine Meßreise mit dem eisbrechenden Bohrinser-Versorger M/S "Werdertor" in die eisbedeckten Gewässer um Spitzbergen durchgeführt. Die sogenannte "Arktische Meßfahrt 1977" wurde vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft stellte den Sachbearbeiter des vorliegenden Forschungsvorhabens zur Teilnahme an der Meßfahrt frei. Im folgenden wird über Feldmessungen berichtet, die im Rahmen der "Arktischen Meßfahrt 1977" unter der Leitung von Dr. R. Frederking (HSVA, Gast vom National Research Council of Canada, Ottawa) zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Eises um Spitzbergen während der Meßfahrt durchgeführt wurden. Neben dem Sachbearbeiter des vorliegenden Forschungsvorhabens waren Herr D. Lemke (HSVA) und Herr R. Reymer (VTG) an den Messungen beteiligt. Meßgeräte und Ausrüstung wurden, abgesehen von Leihgaben des U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. (Eis-Kernbohrer), Behörde für Strom- und Hafenbau, Hamburg (2 Hand-Eissägen) und der Deutschen Bundeswehr (2 Zelte), von der HSVA bereitgestellt.

4.2. Veranlassung und Aufgabe der Untersuchungen

Zur Auswertung von Eisbrechversuchen genügt es nicht, nur die Dicke des Eises und der darauf liegenden Schneedecke zu kennen. Nicht minder wichtig ist die Kenntnis von den physikalischen Eigenschaften des gebrochenen Eises wie z.B. Kristallstruktur, Salzgehalt, Temperatur, Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften.

Im Rahmen dieser Untersuchung sollte die Biegefestigkeit des Eises ermittelt werden. Zwei verschiedene Verfahren sollten dazu angewandt und die Ergebnisse verglichen werden: in-situ Kragbalkenversuche und Berechnung der Biegefestigkeit aus Temperatur- und Salzgehaltmessungen (Frankenstein, 1970). Dem aus den Kragbalkenversuchen ermittelten scheinbaren Elastizitätsmodul sollte der

Elastizitätsmodul gegenübergestellt werden, der nach der Meßreihe an mitgebrachten Eisproben durch einachsige Druckfestigkeitsversuche ermittelt wurde (Häusler, 1977).

4.3. Theoretische Grundlage der Untersuchungen

4.3.1 Kragbalkenversuche

Eis schwimmt auf der Wasseroberfläche. Bei Durchsenkung infolge einer äußeren Last wird zusätzlich Wasser verdrängt und somit ein Auftrieb erzeugt. Dieser Auftrieb ist solange der Durchsenkung Proportional, wie weder die Eisoberseite untertaucht, noch die Eisunterseite austaucht. In diesem Rahmen kann das Eis als elastisch gebettet betrachtet werden. Vernachlässigt man die Nachgiebigkeit der Eisdecke an der Einspannstelle, kann man somit das Verhalten der in-situ Kragbalken mit dem Rechenmodell "einseitig fest eingespannter Balken auf elastischer Bettung" beschreiben.

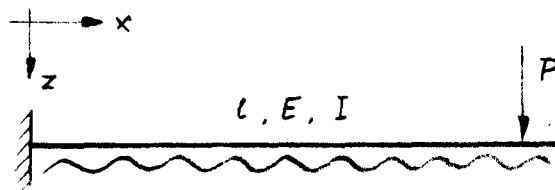


Abb. 4.1 Rechenmodell

Der Bettungskoeffizient ergibt sich zu

$$k = \rho g b \quad (4.1)$$

mit

ρ = Wasserdichte

g = Erdbeschleunigung

b = mittlere Balkenbreite

Der Anteil der Lastaufnahme durch die Bettung hängt von der Balkendurchsenkung und somit vom Elastizitätsmodul des Eises ab. Die Materialkenngröße "Elastizitätsmodul" ist aber zunächst unbekannt und soll durch Wegmessungen während der Belastung der Kragbalken erst bestimmt werden. Dies erfordert eine iterative Vorgehensweise: ausgehend von der einfachen Balkentheorie

$$E_* = \frac{F x_p}{3 w(x_p, F) I} \quad (4.2)$$

mit F = Last
 x_p = Lastangriffsstelle
 w = Durchsenkung
 I = mittleres Balkenträgheitsmoment

wird iterativ derjenige Elastizitätsmodul bestimmt, bei dem die Biegelinie des idealen Kragbalkens auf elastischer Bettung weitgehend den gemessenen Durchbiegungen entspricht. Für den so bestimmten, im folgenden als "äquivalent" bezeichneten Kragbalken können neben der Biegelinie nun auch Querkraft- und Biegemomentverlauf, sowie Spannung und Dehnung in der äußeren Faser über die Balkenlänge bestimmt werden. Wird die Iterationsrechnung für verschiedene Lastzustände im Verlauf eines Versuchs durchgeführt, läßt sich ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm entwickeln und außerdem die Biegefestigkeit des Eises σ_f und die Bruchdehnung ϵ in der äußeren Faser angeben. Dynamische Effekte bleiben unberücksichtigt (vgl. Määttänen, 1976).

4.3.2 Bestimmung der Biegefestigkeit des Eises über dem Salzlaugengehalt

Nach Weeks und Assur (1967) hängt der Elastizitätsmodul von Meer-Eis vom Salzlaugengehalt ab. Die folgende Fassung dieses Zusammenhanges wurde von Schwarz und Weeks (1977) veröffentlicht

$$E = E_0 (1 - \nu_b)^4 \quad (4.3)$$

E_0 ist hierin der Elastizitätsmodul eines fiktiven Salzwassereises mit Salzgehalt $S_I = 0$ und Salzlaugengehalt $v_b = 0$. Der Salzlaugengehalt kann über die Beziehung

$$v_b = \frac{S_I}{1000 \text{ ‰}} \left(0,532 - \frac{49,185 \text{ °C}}{T_I} \right) \quad (4.4)$$

bestimmt werden mit

S_I = Salzgehalt des Eises

T_I = Temperatur des Eises.

Mit Temperatur und Salzgehalt sind somit auch Salzlaugengehalt und Elastizitätsmodul über die Eisdicke veränderlich.

Unter Annahme eines linearen Dehnungsverlaufes über die Balkendicke gilt für einen Balken

$$\sigma(z) = E(z) \frac{z}{r} \quad (4.5)$$

mit

r = Krümmungsradius

z = Abstand zur Neutralen Faser.

Da der Elastizitätsmodul über die Eisdicke h_I veränderlich, die Lage der neutralen Faser somit unbekannt ist, ist es sinnvoll, mit einer Koordinate z' zu arbeiten, die ihren Ursprung in der oberen Randfaser hat.

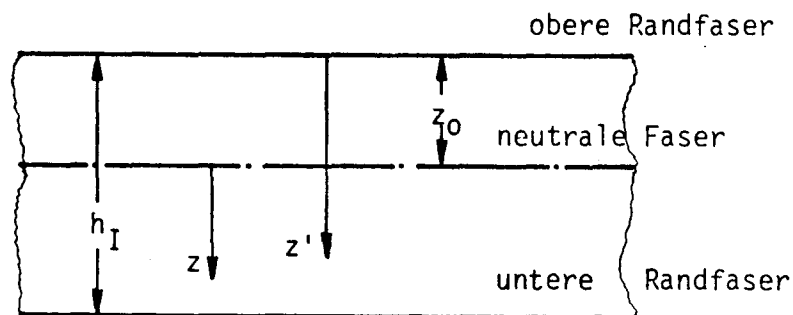


Abb. 4.2 Koordinaten

Zunächst wird der Abstand der neutralen Faser von der oberen Randfaser z_0 bestimmt. Aus den bekannten Beziehungen

$$\int_{h_r} \sigma_x b dz \quad (4.6)$$

und

$$z = z' - z_0 \quad (4.7)$$

ergibt sich mit den Gln. (4.3) und (4.5)

$$z_0 = \frac{\int_0^{h_r} (1 - \nu_b(z'))^4 z' dz'}{\int_0^{h_r} (1 - \nu_b(z'))^4 dz'} \quad (4.8)$$

Der Verlauf des Salzlaugengehaltes kann in guter Näherung durch eine kubische Parabel dargestellt werden:

$$\nu_b = \sum_{j=0}^3 a_j z'^j \quad (4.9)$$

Das Biegemoment im Balkenquerschnitt ergibt sich zu

$$M = \int_{h_r} \sigma_x b z dz \quad (4.10)$$

Mit den Gln. (4.3), (4.5) und (4.7) wird

$$E_0 / r = M / \int_0^{h_r} b (1 - \nu_b(z'))^4 (z' - z_0)^2 dz' \quad (4.11)$$

Damit ist der Spannungsverlauf über die Eisdicke bestimmbar:

$$\sigma_x(z') = \frac{E_0}{r} (1 - \nu_b(z'))^4 (z' - z_0) \quad (4.12)$$

In Abb. 4.3 sind typische, während der "Arktischen Meßfahrt 1977" ermittelte Verläufe der Temperatur, des Salzgehaltes, des Salzlaugengehaltes des Spannungs- und des Elastizitätsverhältnisses über die Eisdicke aufgetragen.

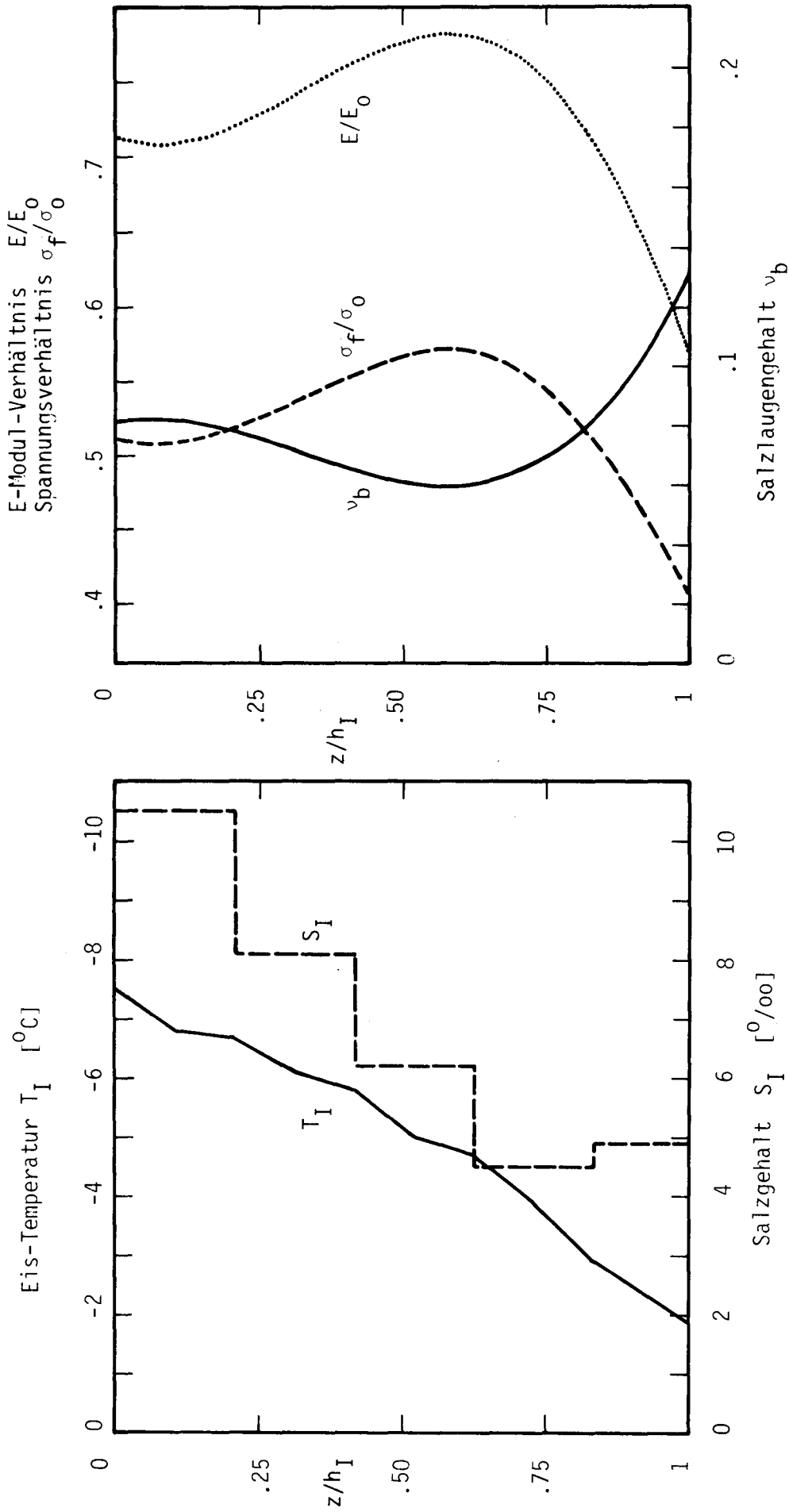


Abb. 4.3. Typischer Verlauf von Temperatur T_I und Salzgehalt S_I (gemessen), Salzlaugengehalt ν_b , Spannungsverhältnis σ_f/σ_0 und E-Modul-Verhältnis E/E_0 (abgeleitet) über die Eisdicke (Spitzbergen, Eisfjord, Eisprobe 4, 9. April 1977, Arktische Meßfahrt).

Nach Assur und Weeks (1967) läßt sich die Biegefestigkeit des Eises wie folgt aus dem Salzlaugengehalt berechnen:

$$\sigma_f = \sigma_o (1 - \sqrt{\nu_b})^2 \quad (4.13)$$

σ_o ist hierin, ähnlich E_o , die Biegefestigkeit eines fiktiven Meer-Eises mit $\nu_b = 0$. Mit den Gln. (4.11) und (4.12) können für das Bruchmoment M_B die Versagensspannungen in der oberen und der unteren Radnfaser berechnet werden und daraus über Gl. (4.13) der Wert für σ_o .

Gemäß Definition ist σ_o konstant. Ist σ_o bekannt, kann über Gl. (4.13) die Eisbiegefestigkeit auch ohne Kenntnis eines Bruchmomentes berechnet werden (Frankenstein, 1970).

4.4. Meßeinrichtung

Bei den Kragbalkenversuchen mußten Kräfte und Wege gemessen werden. Um die einzelnen Meßgrößen synchronisieren und ihren zeitlichen Verlauf festhalten zu können, war es sinnvoll elektrisch zu messen und die Signale mit einem UV-Schreiber aufzuzeichnen. Durch Benutzung aktiver Geber konnte auf Meßverstärker verzichtet und so der Meßaufbau wesentlich vereinfacht werden. Für die Kraftmessungen standen zwei Hottinger-Baldwin UIV-Kraftmeßdosen mit 5 bzw. 10 kN Nennlast zur Verfügung. Die Kragbalkendurchbiegungen wurden mit 3 induktiven Wegaufnehmern TRANS-TEK 246-000 mit ± 75 mm Nennweg gemessen. Weiterhin waren für die Kragbalkenversuche noch einige Hilfsgeräte nötig:

- ein Stahlrohrschlitten, der in der Eisdecke verankert wurde, um über einen Hebel die Kraft zum Abbrechen der Kragbalken aufbringen zu können,
- zwei Motor-Kettensägen,
- zwei Hand-Eissägen (Leihgabe Strom- und Hafengebäude, Hamburg),
- ein Stahlmaßband,
- ein Eisdickenmaßband.

Zur Bestimmung der Temperatur- und Salzgehaltverläufe über die Eisdicke wurden Bohrkerne aus der Eisdecke gezogen. Ein spezieller Eis-Kernbohrer wurde dazu vom U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. zur Verfügung gestellt. Die Eistemperaturen wurden mit einem Widerstands-Digitalthermometer (technotherm 7600 mit Meßfühler Pt 100-02), der Salzgehalt der Schmelzen von Eisproben mit einer Beckmann Solu-bridge RB3-349 gemessen. Weiterhin standen zur Verfügung

- zwei Zelte (Leihgabe der Bundeswehr),
- zwei beheizbare, isolierte Holzkisten zum Schutz des UV-Schreibers vor Witterungseinflüssen und Sonnenlicht,
- div. Plastikschaalen,
- ein 3kW-Dieselmotor zur Stromversorgung.

4.5. Durchführung der Messungen

4.5.1 Kragbalkenversuche

Zuerst wurden mit einer Motor-Kettensäge rechteckige Balken aus der Eisdecke ausgeschnitten, die am Kopfende in der Eisdecke eingespannt blieben (Kragbalken). Die Breite der Kragbalken betrug dabei ca. 1,5 x Eisdicke und die Länge i.a. ca. 9 x Eisdicke. In Verlängerung des Kragbalkens wurde am freien Ende der Stahlrohrschlitten aufgestellt und in der Eisdecke verankert. Der Stahlrohrschlitten war mit einem langen Hebel ausgerüstet, der es ermöglichte, die zum Abbrechen der Kragbalken erforderliche Last mit Körperkraft aufzubringen. Der Hebel drückte über eine Kraftmeßdose auf einen Stempel, der seinerseits auf den Kragbalken drückte. An der Kraftangriffsstelle und an zwei weiteren Stellen entlang des Kragbalkens wurde mit den induktiven Wegaufnehmern die Balkendurchbiegung relativ zur festen Eisdecke gemessen. Während der Belastung eines Kragbalkens bis zum Bruch wurden Kraft und Durchsenkung von einem UV-Schreiber (Visicorder) über der Zeit aufgezeichnet. Nach dem Bruch wurden die Abmessungen des abgebrochenen Balkens und die Positionen der Wegaufnehmer und des Kraftangriffs aufgemessen. Der Nullpunkt wurde dabei in die Reißebene gelegt.

4.5.2 Temperatur-Salzgehalt-Messungen

Parallel zu den oben beschriebenen Kragbalkenversuchen und außerdem unabhängig davon wurden mit einem Eis-Kernbohrer vertikale Kerne aus der Eisdecke gezogen. Sofort nach der Entnahme wurde an den Kernen ein Temperaturprofil über die Eisdicke aufgenommen. Außerdem wurden Luft- und Wassertemperatur, sowie Schnee- und Eisdicke (=Kernlänge) gemessen. Die Lufttemperatur wurde ca. 2 m über der Eisoberfläche gemessen. Ein Teil der Kerne wurde in ca. 10 cm lange Stücke zersägt, die in luftdicht geschlossenen Plastikbechern aufbewahrt und später an Bord der "Werdertor" aufgetaut wurden. Der Salzgehalt der Schmelzen wurde gemessen und so ein Salzgehaltprofil über die Eisdicke bestimmt.

4.6. Auswertung der Meßergebnisse

4.6.1 Kragbalkenversuche

Die Meßschriebe wurden digitalisiert und über ein Rechnerprogramm auf der TR 440-Anlage der Universität Hamburg ausgewertet. Neben den allgemeinen Balkendaten wie Länge, Breite, Dicke, Salzgehalt wurden für jeden Meßpunkt (i.a. 8 - 10 je Balkenbelastung) folgende Größen ermittelt:

- Kraft
- E-Modul nach einfacher Balkentheorie
- E-Modul unter Berücksichtigung einer elastischen Bettung
- gemessene und theoretische Durchsenkungen an der Wegmeßstelle
- Biegemomentenverlauf
- Querkraftverlauf
- Spannung in der Randfaser
- Dehnung in der Randfaser.

4.6.2 Temperatur-Salzgehalt-Messungen

Aus den Einzelmessungen von Temperatur und Salzgehalt an den aus der Eisdecke gezogenen vertikalen Bohrkernen, im folgenden kurz "Eisproben" genannt, wurden Temperatur- und Salzgehaltprofile über die Eisdicke entwickelt und daraus wieder Profile des Salzlaugengehalte. Die Salzlaugengehaltsprofile wurden manuell geglättet. Für diejenigen Eisproben, für die ein Salzgehaltprofil nicht gemessen werden konnte wurde ein Profil angenommen, das aus benachbarten Proben entwickelt worden war. Die Meßdaten wurden entsprechen der oben beschriebenen Theorie in einem Rechnerprogramm weiterverarbeitet.

Meßwertverarbeitung von Kragbalkenversuchen und Eisproben

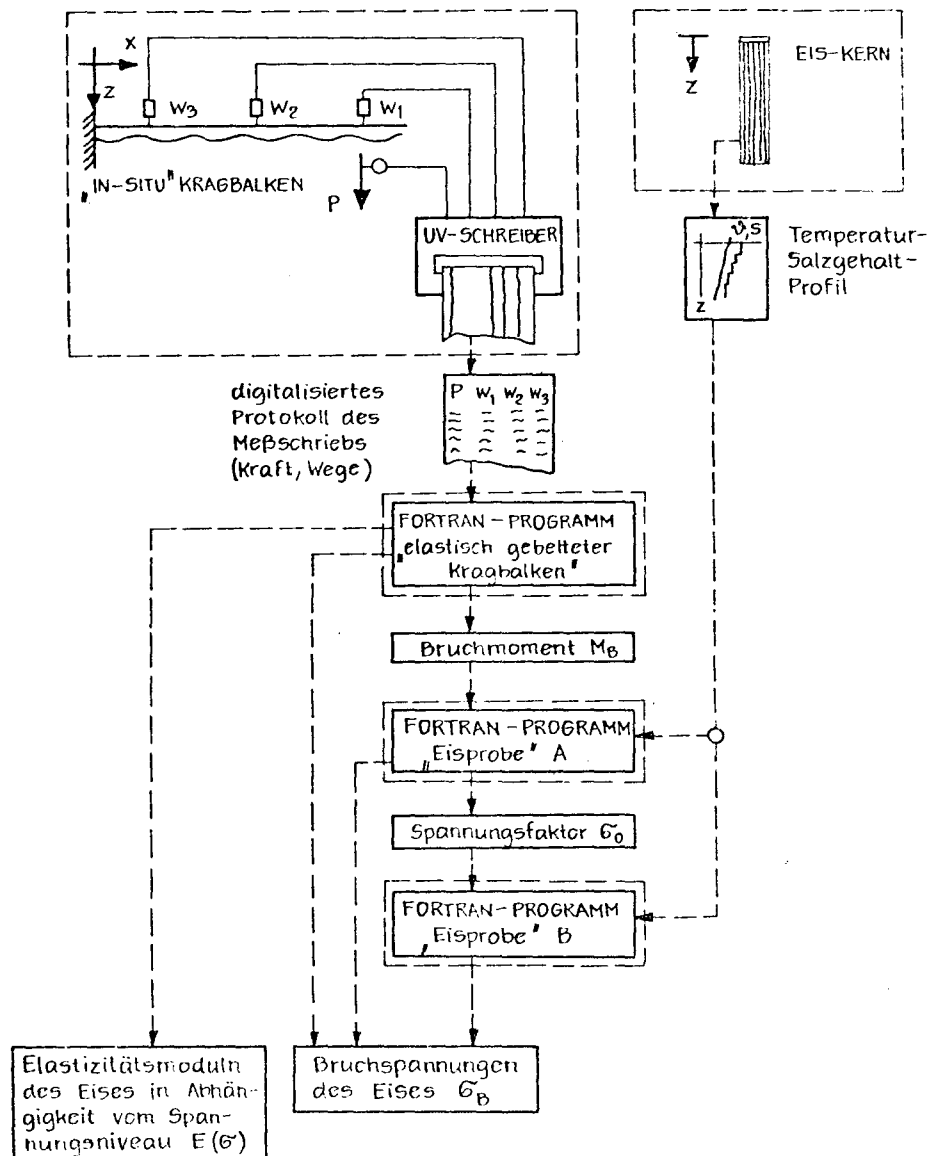


Abb. 4.4 Flußdiagramm

Zunächst wurden diejenigen Eisproben untersucht, die parallel zu Kragbalkenversuchen nahe der Einspannstelle der Kragbalken entnommen worden waren. Aus den Kragbalkenversuchen war das Biegemoment an der Bruchstelle unter Berücksichtigung der elastischen Bettung bestimmbar und somit auch die Vergleichsspannung σ_0 . Da σ_0 definitionsgemäß konstant sein muß, konnte aus sämtlichen "Eisproben mit Kragbalkenversuch" ein mittleres $\bar{\sigma}_0$ berechnet werden. Mit diesem mittleren $\bar{\sigma}_0$ wurde für alle Eisproben, auch die mit Kragbalkenversuch, eine mittlere Biegefestigkeit σ_f berechnet und als Bezugsgröße für andere Messungen der "Arktischen Meßfahrt 1977" angegeben. Außerdem wurden ermittelt:

- Verläufe von Temperatur, Salzgehalt, Salzlaugengehalt, E/E_0 und σ_f/σ_0 über die Eisdicke
- Lage der neutralen Faser
- Bruchspannung σ_f und Vergleichsspannung σ_0^* für den mittleren Salzlaugengehalt (Bezugsspannung) und für die Salzlaugengehalte in der oberen und der unteren Randfaser.

Im Zusammenhang mit der Vergleichsspannung σ_0 werden im Text drei Symbole benutzt:

- σ_0 Vergleichsspannung (Konstante)
- σ_0^* im jeweiligen Versuch bestimmter Wert der Konstanten
- $\bar{\sigma}_0$ aus mehreren Versuchen gemittelter Wert der Konstanten

4.7. Versuchsergebnisse

4.7.1 Biegefestigkeiten

4.7.1.1 Biegefestigkeiten aus Kragbalkenversuchen

Die nach dem oben beschriebenen Verfahren ermittelten Biegefestigkeiten σ_{f1} und σ_{f2} aus den Kragbalkenversuchen sind in Tafel 4.1 zusammengefaßt (konventionelle Theorie). Daneben sind noch die Biegefestigkeiten nach der einfachen Balkentheorie, die Unterschiede zwischen σ_{f1} und σ_{f2} bezogen auf σ_{f2} , die Balkenabmessungen und die Bruchlast angegeben.

Balken-Nr.	5	6	7	8	9	12
b [m]	0,67	0,64	0,60	0,78	0,72	0,61
h [m]	0,44	0,42	0,43	0,435	0,45	0,38
l [m]	4,04	4,12	4,15	4,18	4,21	3,79
l_p [m]	3,80	3,96	3,98	4,01	3,95	3,57
F [N]	1936	1560	2106	1914	2212	1116
σ_{f1} [kN/m ²] mit el.Bettg.	331	318	444	302	349	254
σ_{f2} [kN/m ²] ohne el.Bettg.	340	328	453	312	360	271
$\Delta\sigma_{f1,2}$ [%]	-2,6	-3,0	-2,0	-3,2	-3,1	-6,3

Tafel 4.1 Biegefestigkeiten aus Kragbalkenversuchen nach einfacher Balkentheorie und nach der Theorie des elastisch gebetteten Kragbalkens (idealer Balken, konventionelle Theorie); Balkenabmessungen

4.7.1.2 Biegefestigkeiten aus Salzlaugengehalt

Unter Berücksichtigung des Salzlaugengehaltes und des daraus resultierenden nichtlinearen Verlaufs der Biegespannungen erhält man die folgenden Ergebnisse:

Eisprobe Nr.	9	10	11	12	13	16
Balken-Nr.	5	6	7	8	9	12
M_B [Nm]	7160	5987	8200	7422	8468	3723
h [m]	0,44	0,42	0,43	0,435	0,45	0,38
ob. Randfaser						
z_o [m]	0,213	0,203	0,207	0,209	0,217	0,187
v_{bo} [%]	8,9	9,6	9,4	9,1	10,8	12,5
σ_{Bo} [kN/m ²]	349	329	460	319	346	245
σ_{o0}^* [kN/m ²]	711	693	956	654	767	586
unt. Randfaser						
z_u [m]	0,227	0,217	0,223	0,226	0,233	0,193
v_{bu} [%]	14,6	14,4	14,4	15,8	14,8	14,5
σ_{Bu} [kN/m ²]	288	284	393	255	309	230
σ_{u0}^* [kN/m ²]	757	738	1023	702	816	598
mittlerer Gesamtquerschn.						
v_{bm} [%]	10,5	10,8	10,5	10,8	10,6	11,2
σ_{f3} [kN/m ²]	346	332	466	316	371	265
σ_o^* [kN/m ²]	757	738	1023	702	816	598

- M_B = Bruchmoment des Kragbalkens h = Eisdicke
 z_{ou} = Abstand der oberen/unteren Randfaser von der neutralen Faser v_b = Salzlaugengehalt
 σ_{Bou} = Versagensspannungen in der oberen/unteren Randfaser σ_{f3} = Biegefestigkeit
 σ_o^* = Vergleichsspannungen

Tafel 4.2 Biegefestigkeit σ_{f3} und Vergleichsspannung σ_o^* aus Eisproben mit Kragbalken

Als Vergleichsspannung wurde $\sigma_0 = \bar{\sigma}_0 \pm s = 738 \pm 159 \text{ kN/m}^2$ errechnet (vgl. Frankenstein (1970): $\sigma_0 = 760 \text{ kN/m}^2$). Auf der Basis dieser Vergleichsspannung wurden über den Salzlaugengehalt die Biegefestigkeiten aus sämtlichen Eisproben errechnet und tageweise gemittelt. Diese Tagesmittelwerte sind in Tafel 4.3 zusammengestellt

Datum	07.04	08.04	09.04	10.04	13.04	14.04
σ_f [kN/m ²]	404	434	387	279	324	335
Datum	15.04	16.04	17.04	18.04	19.04	20.04
σ_f [kN/m ²]	336	335	344	371	378	399

Tafel 4,3: Mittlere Biegefestigkeiten des Eises im Verlauf der Arktischen Meßfahrt 1977 (Spitzbergen)

In Tafel 4.4 sind die über $\sigma_0 = 738 \text{ kN/m}^2$ berechneten Biegefestigkeiten für die Eisproben aufgeführt, für die auch Kragbalkenergebnisse zum Vergleich vorhanden waren

Eisprobe Nr.	9	10	11	12	13	16
Balken Nr.	5	6	7	8	9	12
σ_{f4} [kN/m ²]	338	332	337	332	336	336

Tafel 4.4: Biegefestigkeiten aus Temperatur- und Salzgehaltsmessungen nach Frankenstein (1970)

4.7.1.3 Vergleich der Verfahren zur Bestimmung der Biegefestigkeit

Die vier Verfahren zur Bestimmung der Eisbiegefestigkeit zeigen deutliche Tendenzen, so daß ein Vergleich möglich ist. In Tafel 4.5 sind die Mittelwerte und die Standardabweichung der Stichprobe der Biegefestigkeiten aus den unter annähernd konstanten Bedingungen durchgeführten Kragbalkenversuchen 5 bis 9 und Eisproben 9 bis 13 nach den vier benutzten Verfahren gegenübergestellt.

Verfahren	Biegefestigkeit σ_f [kN/m ²]
Kragbalken (ideal, elastisch gebettet)	$\sigma_{f1} = \bar{\sigma}_{f1} \pm s = 349 \pm 25$
Kragbalken (einf. Balkentheorie)	$\sigma_{f2} = \bar{\sigma}_{f2} \pm s = 359 \pm 25$
Salzlaugengehaltprofil + Bruchmoment von Kragbalken (ideal, elast. gebettet)	$\sigma_{f3} = \bar{\sigma}_{f3} \pm s = 366 \pm 27$
Salzlaugengehaltprofil mit vorgegebenen $\sigma_0 = 738$ kN/m ²	$\sigma_{f4} = \bar{\sigma}_{f4} \pm s = 335 \pm 1$

Tafel 4.5: Eis-Biegefestigkeiten nach verschiedenen Berechnungsverfahren.

Die gegenüber den Kragbalkenmethoden weitaus geringeren Schwankungen bei der Salzlaugengehaltmethode können so erklärt werden, daß die Kragbalkenmethoden empfindlich auf Ungleichmäßigkeiten im Eis und bei der Lastaufbringung reagieren, während die Salzlaugengehaltmethode zum einen unabhängig von einer Lastaufbringung ist und zum anderen verfahrensbedingt Ungleichmäßigkeiten im Eis verschmiert. Solange es nicht auf den genauen Ablauf des Bruchvorganges ankommt, kann also, sobald die Vergleichsspannung σ_0 ausreichend genau bekannt ist, mit der Salzlaugengehaltmethode eine (Referenz-) Eisbiegefestigkeit zuverlässig bestimmt werden.

4.7.1.4 Temperaturabhängigkeit der Biegefestigkeit

Erwartungsgemäß hängt die Biegefestigkeit des Eises von der Lufttemperatur ab, wie aus Abb. 4.5 zu entnehmen ist.

Den Messungen ging eine längere Kälteperiode voraus. Die dementsprechend hohe Eisbiegefestigkeit sank schnell, als am 9. April Tauwetter mit Regen einsetzte. In den folgenden Tagen stieg sie bei langanhaltendem Frost mit Lufttemperaturen unter -10°C langsam wieder an. Noch deutlicher ist der Zusammenhang zwischen Eisbiegefestigkeit und der Eis Temperatur T_{I05} 5 cm unter der Eisoberfläche. An der Eisunterseite herrscht gleichmäßig eine Temperatur von $-1,9$ bis $2,1^{\circ}\text{C}$. Dies entspricht der Gefriertemperatur des Meerwassers unter dem Eis ($S_w = 34 \text{ ‰}$).

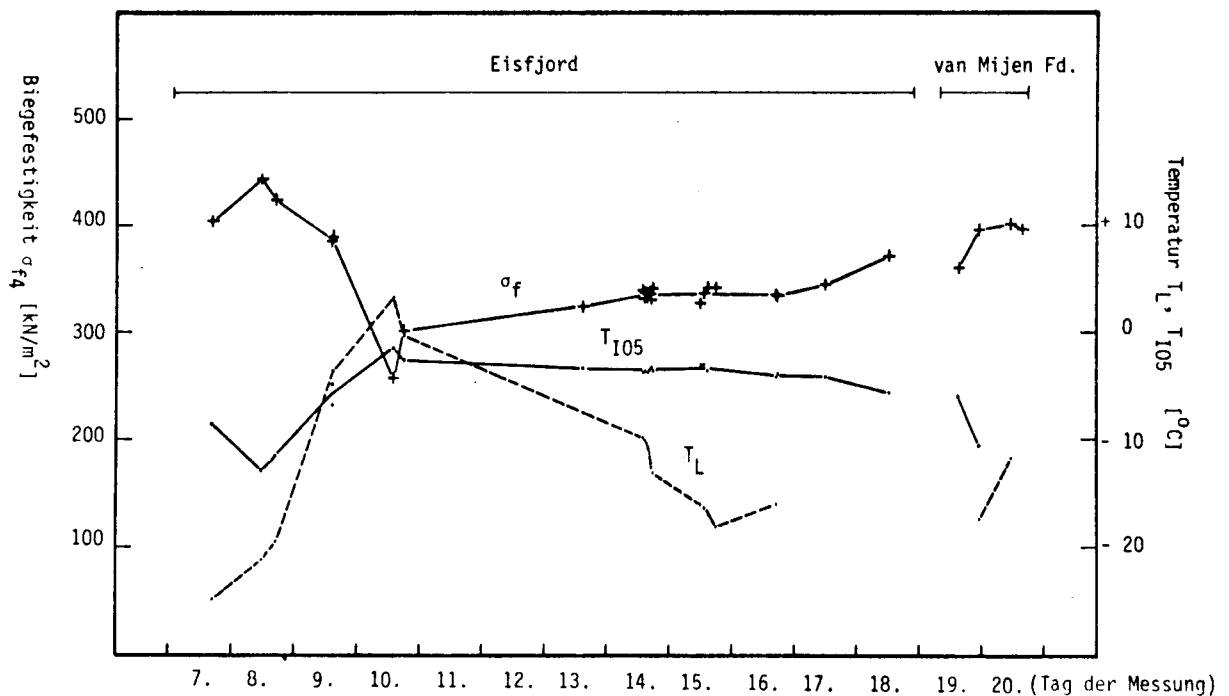


Abb. 4.5 Verlauf der Eis-Biegefestigkeit σ_{f4} , der Eis-Temperatur 5 cm unter der Oberfläche T_{I05} und der Lufttemperatur T_L während der Arktischen Meßfahrt (Spitzbergen, April 1977).

4.7.2 Elastizitätseigenschaften

In Abb. 4.6 sind die Spannungs-Dehnungs-Verläufe aufgetragen, die aus den gemessenen Durchbiegungen für die Randfaser der Einspannstelle der äquivalenten, ideal-elastischen, elastisch gebetteten Kragbalken errechnet wurden.

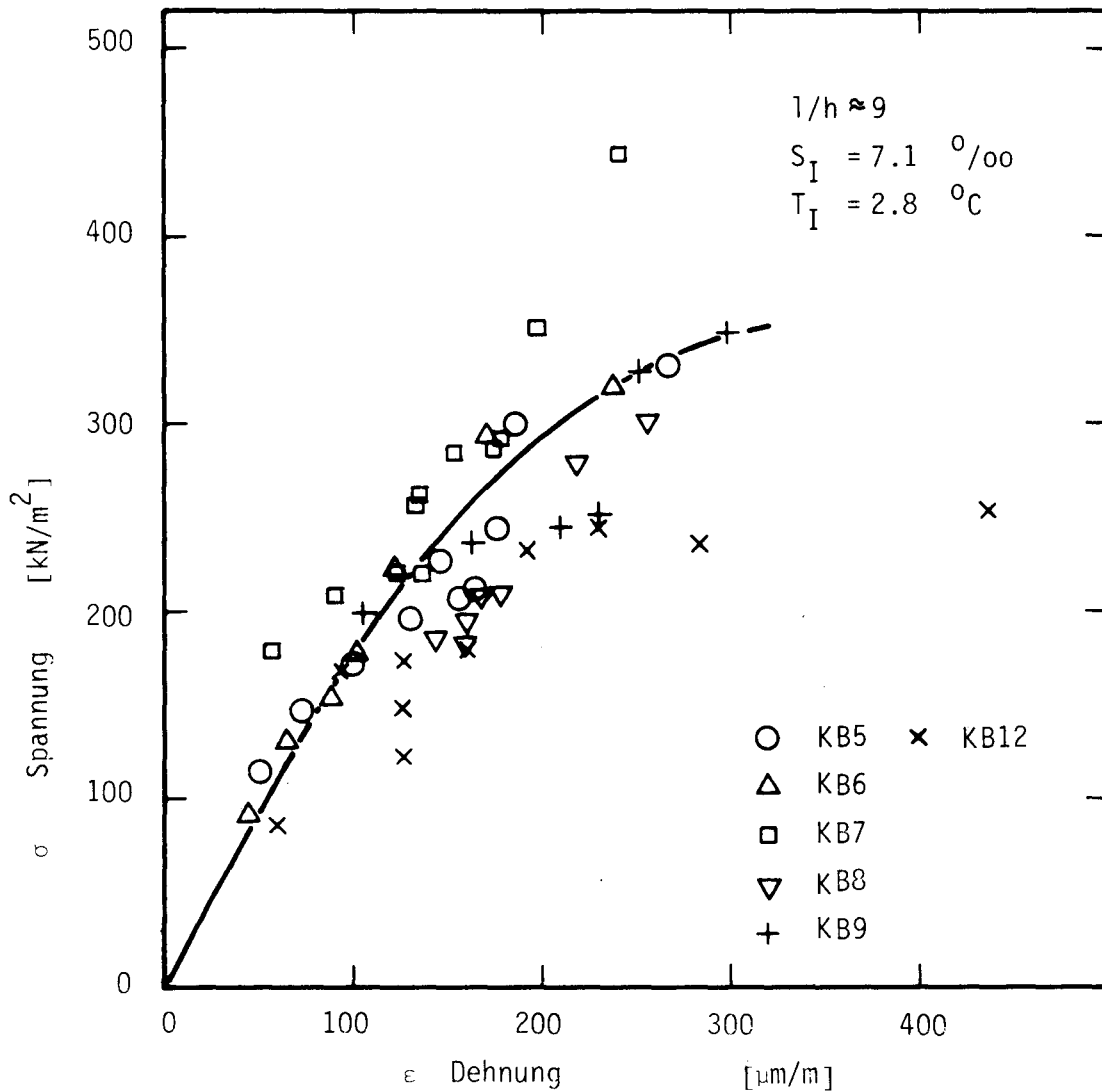


Abb. 4.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Kragbalkenversuchen vom 14./15. April 1977 (Spitzbergen-Eisfjord) Werte berechnet für die äußerste Faser an der Einspannstelle der äquivalenten idealen Kragbalken auf elastischer Bettung

Das häufig angegebene Verhältnis Elastizitätsmodul zu Biegefestigkeit kann mit $E/\sigma_f = 3750$ angegeben werden. Die Abnahme des Elastizitätsmoduls mit zunehmender Spannung läßt die Hypothese zu, daß sich im Einspannbereich eine Plastifizierungszone bildet. Diese Hypothese wird gestützt durch den Vergleich der theoretisch ermittelten und der gemessenen Balkendurchbiegungen, dies insbesondere, da der Anteil der Schubdurchsenkung vernachlässigbar klein ist.

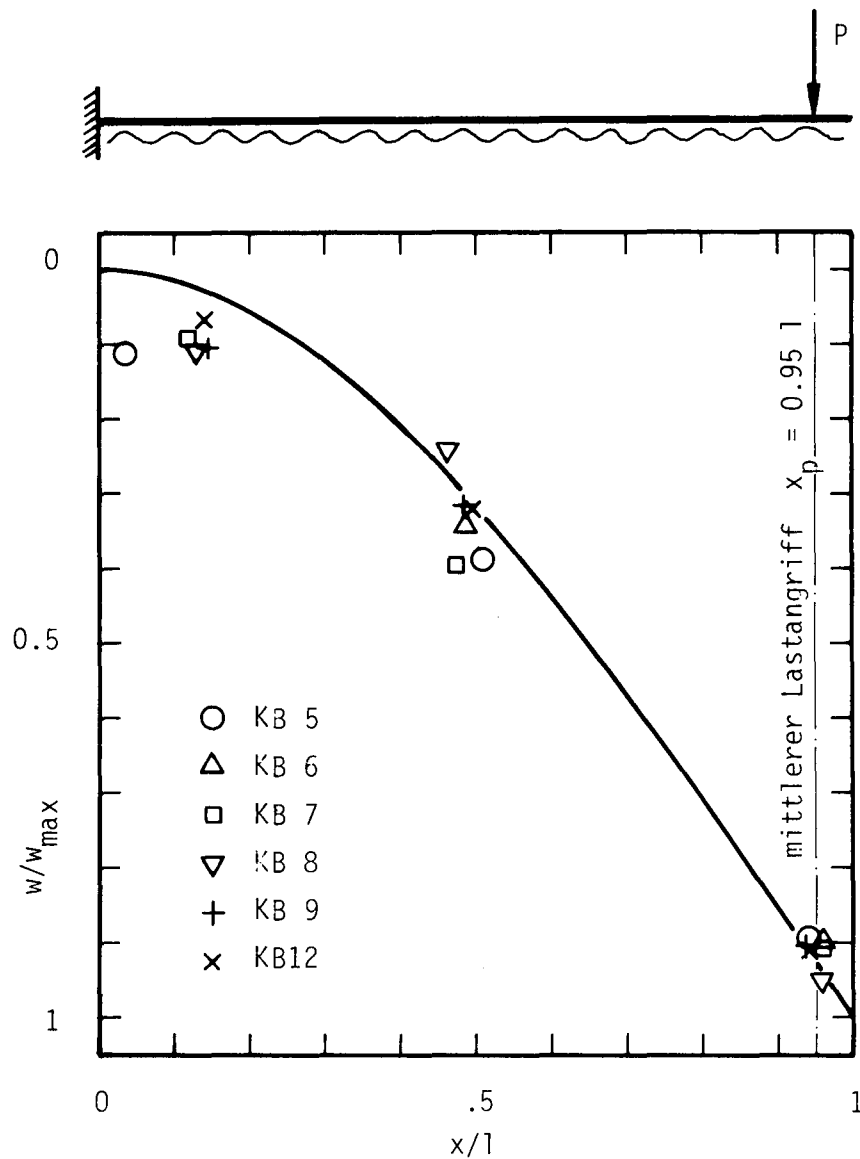


Abb. 4.7 Theoretische und gemessene Durchbiegung (normiert) über der normierten Länge der Kragbalken

4.8. Zusammenfassung und Schlußfolgerung

Während der "Arktischen Meßfahrt 1977" wurden physikalische Eigenschaften des Eises um Spitzbergen, wie Biegefestigkeit, Elastizität, Salzgehalt und Temperatur über die gesamte Dauer der Fahrt im ungebrochenen Eis ermittelt. Die gewonnenen Daten konnten als Bezugsgrößen für nahezu alle anderen Messungen mit dem eisbrechenden Bohrrinselvesorger M/S "Werdertor" benutzt werden.

Die Biegefestigkeiten wurden nach mehreren verschiedenen Verfahren bestimmt. Dabei lieferte das Salzlaugengehalt-Verfahren nach Frankenstein (1970) gut reproduzierbare und relativ einfach zu gewinnende Ergebnisse. Solange man nur an mittleren Eis-Biegefestigkeiten interessiert ist, z.B. als Bezugsgrößen für Eisbrechversuche mit Schiffen, erscheint die Beschränkung auf dieses Verfahren (Ziehen von Bohrkernen und Aufmessen von Salzgehalt- und Temperaturprofilen über die Eisdicke) als zulässig. Der Mangel dieses Verfahrens liegt z.Zt. noch in der Unsicherheit, mit dem der Wert der Vergleichsspannung σ_0 behaftet ist.

Die in-situ Kragbalkenversuche, zur Zeit notwendig zur Bestimmung der Biegefestigkeit σ_f und der Vergleichsspannung σ_0 , erwiesen sich als so aufwendig, daß sie für die routinemäßige Bestimmung der Eisbiegefestigkeit z.B. bei Probefahrten mit eisgängigen Schiffen kaum in Frage kommen dürften. Grundlagenversuche mit Kragbalken sind dagegen in größerem Umfang, unabhängig von Versuchen mit Schiffen und über einen längeren Zeitraum dringend nötig.

Das Eis zeigte in den Kragbalkenversuchen ein nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten (vgl. Häusler, 1977). Gemessene und theoretisch ermittelte Durchsenkungen weisen auf eine Teilplastifizierung im Einspannbereich. Um diesen Effekt zu erfassen ist es nötig, bei zukünftigen in-situ Kragbalkenversuchen durch Wegmessung an möglichst vielen Stellen entlang des Balkens die Biegelinie während des Versuchs zu bestimmen.

Neben der Lieferung von Bezugsdaten für die übrigen Messungen während der "Arktischen Meßfahrt 1977" dienen die beschriebenen Feldmessungen als Beitrag zur Beschreibung der bisher noch unzureichend bekannten Eigenschaften von Meer-Eis.

5. Schlußbemerkungen

Im DFG-Forschungsvorhaben "Grundlagen für Eisbrechen" (Gr 62-17), über das hier berichtet wird, wurden theoretische und experimentelle Arbeiten durchgeführt, die dem Ziel einer sicheren Prognose des Leistungsbedarfs von eisbrechenden Schiffen dienen. Die Arbeiten beschränkten sich auf die experimentelle Untersuchung und rechenmodellmäßige Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von natürlichem Meer-Eis und niedrigsalinem Modell-Eis. Das Schwergewicht lag hierbei auf Biegefestigkeitsversuchen im Feld und im Labor auf einachsigen Druckfestigkeitsversuchen sowie auf der Beschreibung des Verhaltens von punktförmig belasteten Eisdecken.

Das Hauptergebnis dieses Forschungsvorhabens ist die Erkenntnis, daß für die relativ schnellen Belastungsvorgänge beim Eisbrechen das HOOKE'sche Gesetz eine ausreichende Grundlage für die rohe Abschätzung wesentlicher Größen wie Bruchlast, Durchbiegung und Brucharbeit darstellt.

Für die detaillierte Erfassung der Verformungs- und Bruchvorgänge im Eis sind nichtlineare Berechnungsmethoden nötig.

Somit ist auch der Anwendungsbereich des beschriebenen Rechenprogramms beschränkt auf das Gebiet, in dem das HOOKE'sche Gesetz in ausreichender Näherung gilt. In diesem Rahmen aber stellt es ein nützliches Werkzeug dar.

Schrifttum

Enkvist, E.:

On the ice resistance encountered by ships operating in the continuous mode of icebreaking.

Swedische Academy of Engineering Sciences in Finland, Technical Report No. 24, Helsinki, 1972

Frankenstein, G.E.:

The flexural strength of sea ice as determined from salinity and temperature profiles.

U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H., 1970

Frederking, R.M.W.:

Plane strain compressive strength of columnar-grained and granular snow ice.

Journal of Glaciology, Vol. 18, No. 80, 1977, p. 505-516

Girkmann, K.:

Flächentragwerke

3. Auflage, Springer Verl., Wien 1954

Grim, O.:

Über das Eisbrechen

Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Bericht Nr. 1089, Hamburg 1955

Gupta, K.K.:

Solution of eigenvalue problems by Sturm Sequence Method

Inst. J. f. Numerical Methods in Engineering 4 (1972), p. 379-404

Häusler, F.U.:

Beitrag zur Bestimmung der Beulspannungen von rechteckigen Plattenfelder mit Eigenspannungen

Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Diplomarbeit, November 1976

Häusler, F.U.

Druckfestigkeitsversuche mit Salzwasser-Eis
Institut für Schiffbau der Universität Hamburg,
Bericht Nr. 358, November 1977

Häusler, F.U.

Physikalische Eigenschaften des Eises um Spitzbergen
(in Schwarz, J. ed. Arktische Meßfahrt 1977 mit M.S. Werdertor,
Gemeinsamer Forschungsbericht der Firmen Germanischer Lloyd, Hamburg,
Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Jastram-Werke, Bergedorf,
Vereinigte Tanklager- und Transportmittel GmbH., Bremen) Hamburg, Mai 1978.

Hütte I, 1955 - Das Ingenieurwesen

Taschenbuch-Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1955.

Jones, S.J.:

Triaxial testing of polycrystalline ice.

Third International Conference on Permafrost, Edmonton, Alberta,
10 - 13 July, 1978

Lehmann, E.

Beitrag zur praktischen Berechnung schiffbaulicher Scheibentragwerke mit
der Deformationsmethode,
Handbuch der Werften XII, Hamburg 1974.

Määttänen, M.:

On the flexural strength of brackish water ice by in-situ tests.

In: Proceedings of the Third International Conference on Port and Ocean
Engineering under Arctic Conditions, 11 - 15 August 1976. University
Alaska, Fairbanks, Alaska, Vol. 1, p. 349-359

Murat, J.R. and Tinawi, R.:

Sea-ice testing in flexure

Proceedings, Fourth International Conference on Port and Ocean Engineering
under Arctic Conditions (POAC), September 26-30, 1977, Memorial University
of Newfoundland, St. Johns.

Nevel, D.E.:

A semi-infinite plate on an elastic foundation

U.S. Army, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Research Report 136, Hanover, N.H., März, 1965.

Schwarz, J. and W.F. Weeks:

Engineering properties of sea ice

Journal of Glaciology, Vol. 19, No. 81, 1977, p. 499-531

Schwarz, J.(ed.):

Arktische Meßfahrt mit M.S. Werdertor.

Gemeinsamer Forschungsbericht der Firmen Germanischer Lloyd, Hamburg

Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt, Hamburg

Jastram-Werke, Bergedorf, Vereinigte Tanklager und Transportmittel GmbH.

Bremen. Hamburg, Mai 1978.

Tinawi, R.A.:

Anisotropic tapered elements using displacement models

Inst. J. f. Numerical Methods in Engineering, 4 (1972), p. 475-489

ANHANG A

LHFUHI J=00003 IS ON CR08888 USING 00024 BLKS R=0000

```
0001 C   VERSION VOM 28.07.77
0002 C   *****
0003 C   DATENEINGABE
0004 C   *****
0005 C
0006 C   1 KARTE FORMAT(3A4)
0007 C   1.-12. SPALTE, TEXT ZUR LAUFKENNZEICHNUNG
0008 C   TEXT RECHTSBUENDIG EINTRAGEN
0009 C
0010 C   1 KARTE FORMAT(5I5)
0011 C   SYSTEMDATEN
0012 C   1.-5. SPALTE,      ELANZ = ANZAHL DER ELEMENTE
0013 C   6.-10. SPALTE,   KNAZ  = ANZAHL DER KNOTENPUNKTE
0014 C   11.-15. SPALTE,  FRANZ = ANZAHL DER FREIHEITSGRADE
0015 C   16.-20. SPALTE,  IB   = HALBE BANDBREITE DER SYSTEMSTEIFIGKEITS-
0016 C                   MATRIX
0017 C   21.-25. SPALTE,  IRB  = ANZAHL DER RANDBEDINGUNGEN
0018 C
0019 C   1 KARTE FORMAT(3B)
0020 C   POISSON-ZAHL
0021 C   ELASTIZITAETSMODUL
0022 C   KENNZIFFER FUER STOFFGESETZ - 1 = EBENER SPANNUNGSZUSTAND
0023 C                                   2 = EBENER DEHNUNGSZUSTAND
0024 C   EKNAZ KARTEN FORMAT(15,2F10.3,2I5)
0025 C   (EKNAZ = ANZAHL DER ECKKNOTENPUNKTE)
0026 C   1.-5. SPALTE, KNOTENNUMMER
0027 C   6.-15. SPALTE, X-KOORDINATE
0028 C   16.-25. SPALTE, Y-KOORDINATE
0029 C   26.-30. SPALTE, FREIHEITSGRADNUMMER U-VERSCHIEBUNG
0030 C   31.-35. SPALTE, FREIHEITSGRADNUMMER V-VERSCHIEBUNG
0031 C
0032 C   1 KARTE FORMAT(15)
0033 C   99999 - (BLOCKENDE)
0034 C
0035 C   (KNAZ - EKNAZ) KARTEN FORMAT(5I5)
0036 C   1.-5. SPALTE, KNOTENNUMMER DES ZWISCHENKNOTENS
0037 C   6.-10. SPALTE, NUMMER DES 1. ZUGEOERIGEN ECKKNOTENS
0038 C   11.-15. SPALTE, NUMMER DES 2. ZUGEOERIGEN ECKKNOTENS
0039 C   16.-20. SPALTE, FREIHEITSGRADNUMMER U-VERSCHIEBUNG
0040 C   21.-25. SPALTE, FREIHEITSGRADNUMMER V-VERSCHIEBUNG
0041 C
0042 C   1KARTE FORMAT(15)
0043 C   99999 - (BLOCKENDE)
0044 C
0045 C   ELANZ KARTEN FORMAT(15,F5.4,6I5)
0046 C   1.-5. SPALTE, ELEMENTNUMMER
0047 C   6.-10. SPALTE, ELEMENTDICKE IN M BZW. IN 1/10 MM
0048 C   11.-15. SPALTE, KNOTENNUMMER DES 1. KNOTENS
0049 C   ...
0050 C   36.-40. SPALTE, KNOTENNUMMER DES 6. KNOTENS
0051 C   NUMERIERUNG IM MATHEMATISCH POSITIVEN DREHSINN
0052 C
0053 C   1 KARTE FORMAT(15)
0054 C   99999 - (BLOCKENDE)
0055 C
0056 C   N KARTEN FORMAT(2I5,2F10.0,6I5)
0057 C   5. SPALTE, LASTTYP-KENNZIFFER - 1 = EINZELLAST
0058 C                                   2 = LIN. VERAENDERL. STRECKENLAST
0059 C   FALLS TYP = 1 (EINZELLAST)
```

0060 C 6.-10. SPALTE, ZUR LAST GEHOERENDER FREIHEITSGRAD
0061 C 11.-20. SPALTE, LAST IN N
0062 C FALLS TYP = 2 (STRECKENLAST LAENGS EINES ELEMENTRANDES)
0063 C 10. SPALTE KENNZIFFER IXY FUER LASTRICHTUNG - 1 = X-RICHTUNG
0064 C 2 = Y-RICHTUNG
0065 C 11.-20. SPALTE, STRECKENLASTAMPLITUDE IN N/M AM KNOTEN K1
0066 C 21.-30. SPALTE, STRECKENLASTAMPLITUDE IN N/M AM KNOTEN K3
0067 C 31.-35. SPALTE, KNOTENNUMMER K1 DES 1. ECKKNOTENS
0068 C 36.-40. SPALTE, KNOTENNUMMER K2 DES ZWISCHENKNOTENS
0069 C 41.-45. SPALTE, KNOTENNUMMER K3 DES 2. ECKKNOTENS
0070 C 46.-50. SPALTE, ZUR LAST GEHOERENDER FREIHEITSGRAD AM KNOTEN K1
0071 C 51.-55. SPALTE, DTO. AM KNOTEN K2
0072 C 56.-60. SPALTE, DTO. AM KNOTEN K3
0073 C
0074 C 1 KARTE FORMAT(I5)
0075 C 99999 - (BLOCKENDE)
0076 C
0077 C IRB KARTEN FORMAT(4I5,E10.5,I5) BZW. FORMAT(2I5,2E10.5,I5)
0078 C 5. SPALTE, RANDBEDINGUNGSTYP-KENNZIFFER
0079 C 1 = EINZELFEDER
0080 C 2 = ELASTISCHE RANDBETTUNG
0081 C 3 = UNTERDRUECKUNG EINES FREIHEITSGRADES
0082 C FALLS ITYP = 1 (EINZELFEDER)
0083 C 6.-10. SPALTE, KNOTENNUMMER DER RANDBEDINGUNG
0084 C 11.-20. SPALTE, WINKEL ZWISCHEN X-ACHSE UND FEDERACHSE
0085 C 21.-30. SPALTE, FEDERSTEIFIGKEIT IN N/M (BEI STARRER LAGERUNG
0086 C UM CA. 1.E10 HOEHER ALS UEBRIGE STEIFIGKEITEN)
0087 C 35. SPALTE, KENNZIFFER FUER ART DER WINKELANGABE
0088 C IRAD = 0 - WINKEL IN GRAD
0089 C IRAD = 1 - WINKEL IN RAD
0090 C FALLS ITYP = 2 (ELASTISCHE RANDBETTUNG)
0091 C 6.-10. SPALTE, KNOTENNUMMER DES 1. ECKKNOTENS
0092 C 11.-15. SPALTE, KNOTENNUMMER DES ZWISCHENKNOTENS
0093 C 16.-20. SPALTE, KNOTENNUMMER DES 2. ECKKNOTENS
0094 C 21.-30. SPALTE, BETTUNGSZIFFER IN N/M**2
0095 C 35. SPALTE, BETTUNGSRICHTUNG - KENNZIFFER
0096 C IXY = 1 - BETTUNG PARALLEL ZUM RAND K1 - K3 (SCHUB)
0097 C IXY = 2 - BETTUNG SENKR. ZUM RAND K1 - K3 (ZUG/DRUCK)
0098 C FALLS ITYP = 3 (FREIHEITSGRADUNTERDRUECKUNG
0099 C 6.-10. SPALTE, NUMMER DES ZU UNTERDRUECKENDEN FREIHEITSGRADES
0100 C
0101 C 1 KARTE FORMAT(I5)
0102 C 99999 - (BLOCKENDE)
0103 C
0104 C
0105 C DATEIEN
0106 C
0107 C NAME = L1SP
0108 C TYP = RAN-P
0109 C SATZZAHL = M(ELANZ)
0110 C SATZBAU = M12W
0111 C TRAEGER = LFD
0112 C
0113 C NAME = L2S
0114 C TYP = RAN-P
0115 C SATZZAHL = M(ELANZ)
0116 C SATZBAU = M12W
0117 C TRAEGER = P
0118 C
0119 C NAME = L3SPE
0120 C TYP = RAN-P

```
0121 C SATZZAHL = G2
0122 C SATZBAU = M(FRANZ*IB)W
0123 C TRAEGER = LFD
0124 C
0125 C NAME = L4S
0126 C TYP = RAN-P
0127 C SATZZAHL = M(2*ELANZ)
0128 C SATZBAU = G144W
0129 C TRAEGER = P
0130 C
0131 C NAME = L5SP
0132 C TYP = RAN-P
0133 C SATZZAHL = M(KNANZ)
0134 C SATZBAU = M8W
0135 C TRAEGER = LFD
0136 C
0137 C NAME = L6SP
0138 C TYP = RAN-P
0139 C SATZZAHL = M(ELANZ+1)
0140 C SATZBAU = G9W
0141 C TRAEGER = LFD
0142 C
0143 C NAME = DATEN
0144 C TYP = RAN-P
0145 C SATZZAHL = M(KNANZ+ELANZ+LASTANZ+IRB+8)
0146 C SATZBAU = M800
0147 C TRAEGER = P
0148 C
0149 C *****
0150 C BLOCKDATA
0151 C *****
0152 C
0153 C BLOCKDATA SUBROUTINE - PLANE STRESS PROGRAM
0154 C
0155 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6
0156 C DATA L1/11/,L2/12/,L3/13/,L4/14/,L5/15/,L6/16/
0157 C INTEGER R,S
0158 C COMMON /ARBSP/ E(3,3),M(12),N(12),R(12),S(12)
0159 C DATA M/0,1,0,2,1,0,0,0,0,0,0,0/
0160 C DATA N/0,0,1,0,1,2,0,0,0,0,0,0/
0161 C DATA R/0,0,0,0,0,0,0,1,0,2,1,0/
0162 C DATA S/0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,2/
0163 C END
```

```

DNRPRDTOKOLI
  1 ZUSTAND      = ETN
  2 GERAFT      = DR(1,2)-DC1
  3 ANZAHL      = 1
DTPKOPFIERE
  1 NAME        = HAFSCHEIB
  2 ZFILE       = 1-999999
  4 PRDTOKOLI   = -STD-
  5 NUMFIERUNG  = 1-(6)
  6 INFORMATION = /FREMOSTRING
000010 C *****
000020 C PROGRAM PLANE STRESS
000030 C *****
000040 C
000050 C COMPUTATION OF STRESS VARIATION IN 12 PARAMETER TRIANGULAR PLANE
000060 C STRESS ELEMENTS
000070 C DEGREES OF FREEDOM AT EVERY NODE - U V
000080 C
000090 C INTEGER FRANZ,ELANZ,KVANZ
000100 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6
000110 C COMMON /ARBSP/ B( 989)
000120 C COMMON / WERT/ RNUE,EM
000130 C DIMENSION A(26950)
000140 C DATA IA,JB/26950, 989/,A/26950*0.0/
000150 C DIMENSION TJOB(3)
000160 C
000170 C READ(5,1003) TJOB
000180 C READ(5,1001) ELANZ,KVANZ,FRANZ,IB,IRB
000190 C WRITE(6,2000)
000200 C WRITE(6,2001) TJOB,ELANZ,KVANZ,FRANZ,IB,IRB
000210 C I1=FRANZ+1
000220 C I2=I1+FRANZ*IB-1
000230 C I3=9+2*FRANZ
000240 C IF(I3.LT.633) I3=633
000250 C WRITE(6,2007) IA,I2
000260 C WRITE(6,2008) JB,I3
000270 C IF(IA-I2) 10,20,20
000280 C 10 WRITE(6,2002) IA,I2
000290 C STOP
000300 C 20 IF(JB-I3) 30,40,40
000310 C 30 WRITE(6,2003) JB,I3
000320 C STOP
000330 C 40 READ(5,1002) RNUE,EM,ITYPE
000340 C WRITE(6,2004) RNUE,EM
000350 C IF(ITYPE.EQ.2) GOTO 50
000360 C F=EM/(1-RNUE**2)
000370 C B(1)=F
000380 C B(2)=RNUE*F
000390 C B(3)=0.
000400 C B(4)=B(2)
000410 C B(5)=F
000420 C B(6)=0.
000430 C B(7)=0.
000440 C B(8)=0.
000450 C B(9)=F*0.5*(1-RNUE)
000460 C WRITE(6,2005)
000470 C GOTO 60
000480 C 50 F=EM/(1+RNUE)/(1-2*RNUE)
000490 C S(1)=F*(1-RNUE)
000500 C B(2)=F*RNUE
000510 C B(3)=0.
000520 C B(4)=B(2)

```

```

000530      B(5)=R(1)
000540      B(6)=0.
000550      B(7)=0.
000560      B(8)=0.
000570      B(9)=F*(0.5-RNUF)
000580      WRITE(6,2006)
000590      60 CALL PRPGA(A(1),A(11),ELANZ,KNA NZ,FRANZ,IB,IRB)
000600      1001 FORMAT(16I5)
000610      1002 FORMAT(20B)
000620      1003 FORMAT(3A4)
000630      2000 FORMAT(1H1)
000640      2001 FORMAT(1H,69(1H*)),39H PLANE STRESS PROGRAM (VERSION 280777),
000650      118X,3A4/,1H,69(1H*)/,
000660      245H NUMBER OF ELEMENTS = ,I4/,
000670      345H NUMBER OF NODES = ,I4/,
000680      445H NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM = ,I4/,
000690      545H HALF BANDWIDTH OF SYSTEM STIFFNESS MATRIX = ,I4/,
000700      645H NUMBER OF BOUNDARY CONDITIONS = ,I4/,
000710      71H,69(1H-)
000720      2002 FORMAT(18H ****DIMENSION A(,I5,15H) TOO SMALL, A(,I5,11H) NECESSA
000730      1RY)
000740      2003 FORMAT(18H ****DIMENSION B(,I5,15H) TOO SMALL, B(,I5,11H) NECESSA
000750      1RY)
000760      2004 FORMAT(25H POISSON NUMBER = ,F4.2/,
000770      125H MODULUS OF ELASTICITY = ,E10.4,5H N/M2/,1H,69(1H-)
000780      2005 FORMAT(19H PLANE STRESS STATE)
000790      2006 FORMAT(19H PLANE STRAIN STATE)
000800      2008 FORMAT(13H DIMENSION B(,I5,14H) NECESSARY B(,I5,1H))
000810      2007 FORMAT(13H DIMENSION A(,I5,14H) NECESSARY A(,I5,1H))
000820      STOP
000830      END
000840      C *****
000850      SUBROUTINE PRPGA(P,SK,ELANZ,KNA NZ,FRANZ,IB,IRB)
000860      C *****
000870      C
000880      C PLANE STRESS MAIN DRIVER ROUTINE
000890      C
000900      INTEGER ELANZ,FRANZ
000910      DIMENSION P(FRANZ),SK(FRANZ,IB)
000920      COMMON /ARBSP/ ZERO(9),B(1)
000930      C
000940      CALL P1(SK(1,1),SK(1,2),SK(1,3),KNA NZ,ELANZ)
000950      CALL P2(ELANZ,FRANZ,IB,P,12)
000960      CALL P3(SK,FRANZ,IB,ELANZ)
000970      CALL P4(P,FRANZ)
000980      CALL P5(P,SK,FRANZ,IB,KNA NZ,IRB)
000990      CALL P6(SK,P,FRANZ,IB)
001000      CALL P7(P,FRANZ,ELANZ)
001010      IF2=2*FRANZ
001020      CALL P8(SK,P,FRANZ,IB,B,IF2)
001030      RETURN
001040      END
001050      C *****
001060      SUBROUTINE P1(X,Y,BOLK,KNA NZ,ELANZ)
001070      C *****
001080      C
001090      C NODE COORDINATES INPUT
001100      C BOOLEAN VECTORS INPUT
001110      C COMPUTATION OF GEOMETRICAL AND BOOLEAN ELEMENT DATA
001120      C
001130      INTEGER ELANZ,BOLF,BOLK,FLNR
001140      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5

```

```

001150      COMMON /ARBSP/ ZFRZ(57),BOLF(12)
001160      DIMENSION X(KMANZ),Y(KMANZ),BOLK(KMANZ,2)
001170 C
001180 C      INPUT CORNER NODES
001190 C
001200      ISTOP=0
001210      10 READ(5,1001) KNNR
001220      IF(KNNR.GT.99998) GOTO 30
001230      IF((KNNR.GT.0).AND.(KNNR.LE.KMANZ)) GOTO 20
001240      WRITE(6,2001) KNNR
001250      ISTOP=1
001260      20 BACKSPACE 5
001270      READ(5,1001) KNNR,X(KNNR),Y(KNNR),BOLK(KNNR,1),BOLK(KNNR,2)
001280      GOTO 10
001290      30 IF(ISTOP.EQ.1) STOP
001300 C
001310 C      INPUT INTERMEDIATE NODES
001320 C
001330      40 READ(5,1002) KNNR
001340      IF(KNNR.GT.99998) GOTO 60
001350      IF((KNNR.GT.0).AND.(KNNR.LE.KMANZ)) GOTO 50
001360      WRITE(6,2001) KNNR
001370      ISTOP=1
001380      50 BACKSPACE 5
001390      READ(5,1002) KNNR,K1,K2,BOLK(KNNR,1),BOLK(KNNR,2)
001400      X(KNNR)=0.5*(X(K1)+X(K2))
001410      Y(KNNR)=0.5*(Y(K1)+Y(K2))
001420      GOTO 40
001430      60 IF(ISTOP.EQ.1) STOP
001440      WRITE(6,2002)
001450      DO 70 I=1,KMANZ
001460      WRITE(L5'I) X(I),Y(I),BOLK(I,1),BOLK(I,2)
001470      70 WRITE(6,2003) I,X(I),Y(I),BOLK(I,1),BOLK(I,2)
001480 C
001490 C      INPUT ELEMENT DATA
001500 C      OUTPUT ELEMENT DATA TO FILE L1, RECORD NR. ELNR
001510 C
001520      WRITE(6,2004)
001530      80 READ(5,1003) ELNR
001540      IF(ELNR.GT.99998) GOTO 110
001550      BACKSPACE 5
001560      READ(5,1003) ELNR,T,(BOLF(I),I=1,6)
001570      WRITE(6,2005) ELNR,T,(BOLF(I),I=1,6)
001580      IF((ELNR.GT.0).AND.(ELNR.LE.ELANZ)) GOTO 90
001590      ISTOP=1
001600      WRITE(6,2006)
001610      90 CALL XFOR(X(BOLF(1)),X(BOLF(3)),X(BOLF(5)),Y(BOLF(1)),Y(BOLF(3)),
001620      Y(BOLF(5)),COSALF,COSBET,A,B,C,ELNR)
001630      WRITE(L1'ELNR) T,A,B,C,COSALF,COSBET,(BOLF(I),I=1,6)
001640 C
001650 C      DETERMINATION OF BOOLEAN VECTORS OF DEGREES OF FREEDOM
001660 C      OUTPUT OF ELEMENT BOOLEAN VECTOR TO FILE L2, RECORD NO. ELNR
001670 C
001680      DO 100 I=1,6
001690      J=7-I
001700      J2=14-2*I
001710      J1=J2-1
001720      BOLF(J2)=BOLK(BOLF(J),2)
001730      100 BOLF(J1)=BOLK(BOLF(J),1)
001740      WRITE(L2'ELNR)(BOLF(I),I=1,12)
001750      GOTO 80
001760      110 IF(ISTOP.EQ.1) STOP

```

2

```

001770 1001 FORMAT(I5,2F10.3,2I5)
001780 1002 FORMAT(5I5)
001790 1003 FORMAT(I5,F5.4,6I5)
001800 2001 FORMAT(18H *****NODE NUMBER ,I4,6H WRONG)
001810 2002 FORMAT(10H NODE DATA/10H -----/33H KNNR X (M) Y (M) BOLK1
001820 137IK2)
001830 2003 FORMAT(1H ,I4,2(2X,F5.3),2(2X,I4))
001840 2004 FORMAT(1H ,60(1I-)/13H ELEMENT DATA/13H -----/49H ELNR T
001850 1(M) K1 K2 K3 K4 K5 K6)
001860 2005 FORMAT(1H ,I4,2X,F6.4,6(2X,I4))
001870 2006 FORMAT(26H *****ELEMENT NUMBER WRONG)
001880 RETURN
001890 END
001900 C *****
001910 SUBROUTINE KORR(X1,X2,X3,Y1,Y2,Y3,COSALF,COSBET,A,B,C,I)
001920 C *****
001930 C
001940 C DETERMINATION OF LOCAL KOORDINATES OF TRIANGLE IN XY-PLANE
001950 C ELEMENT NUMBER I
001960 C
001970 C RFAL#4 KSI1,KSI2,KSI3
001980 C
001990 C C1=X2-X1
002000 C C2=Y2-Y1
002010 C C3=C1**2+C2**2
002020 C C3=SQRT(C3)
002030 C COSALF=C1/C3
002040 C COSBET=C2/C3
002050 C
002060 C ROTATION
002070 C
002080 C KSI1=X1*COSALF+Y1*COSBET
002090 C KSI2=X2*COSALF+Y2*COSBET
002100 C KSI3=X3*COSALF+Y3*COSBET
002110 C ETA1=-X1*COSBET+Y1*COSALF
002120 C ETA2=-X2*COSBET+Y2*COSALF
002130 C ETA3=-X3*COSBET+Y3*COSALF
002140 C
002150 C TRANSLATION
002160 C
002170 C A=KSI2-KSI3
002180 C B=KSI3-KSI1
002190 C C=ETA3-ETA1
002200 C CNT=ETA3-ETA2
002210 C CNT=ABS(CNT-C)
002220 C IF(CNT.GT.1.E-8) CNT=CNT/0.
002230 C CNT=ABS(C)
002240 C IF(CNT.GT.1.E-8) GOTD 10
002250 C WRITE(6,2000) I
002260 C STOP
002270 10 RETURN
002280 2000 FORMAT(14H *****ELEMENT ,I4,34H CORNER NODE KOORDINATES DEFECTIVE)
002290 C END
002300 C *****
002310 C SUBROUTINE P3(SX,FRANZ,IB,ELANZ)
002320 C *****
002330 C
002340 C INTEGER BOL,ELANZ,FRANZ
002350 COMMON /DATNR/ I1,I2,I3
002360 COMMON /ARSP/ 7FRJ(57),EKS(12,12),BOL(12)
002370 C
002380 C

```

```

002390 C ASSEMBLY OF LOCAL AND GLOBAL ELEMENT STIFFNESS MATRICES
002400 C ASSEMBLY OF SYSTEM STIFFNESS MATRIX
002410 C
002420 D0 5 I=1,FRANZ
002430 D0 5 J=1,IR
002440 5 SK(I,J)=0.0
002450 D0 10 I=1,ELANZ
002460 READ(1,1) T,A,B,C,COSALF,COSRET
002470 CALL STIFFM(T,A,B,C,I)
002480 CALL TRANSF(COSALF,COSRET,I)
002490 READ(1,2) B0L
002500 CALL B0DLB(SK,EKS,B0L,FRANZ,IR,12)
002510 10 CONTINUE
002520 WRITE(1,3) SK
002530 RETURN
002540 END
002550 C *****
002560 SUBROUTINE STIFFM(T,A,B,C,I)
002570 C *****
002580 C
002590 C ASSEMBLY OF LOCAL STIFFNESS MATRIX
002600 C
002610 COMMON /DATNR/ L1,L2,L3
002620 COMMON /ARBSP/ 7FERD(57),EKS(12,12),CC(12,12),CCT(12,12),ZWI(12,12)
002630 C
002640 CALL MEM12(A,B,C,T)
002650 CALL CCS12(A,B,C,I)
002660 CALL MAMU(EKS,CC,ZWI,12,12,12)
002670 D0 10 K=1,12
002680 D0 10 J=1,12
002690 10 EKS(K,J)=0.
002700 CALL MAMU(CCT,7WT,EKS,12,12,12)
002710 RETURN
002720 END
002730 C *****
002740 SUBROUTINE MEM12(A,B,C,T)
002750 C *****
002760 C
002770 C K*-MATRIX - 12-PARAMETER TRIANGULAR PLANE STRESS ELEMENT
002780 C LITERATURE - TINAWI,R.A. - INT.J.F.NUM.METH.IN ENGINEERING, VOL.4
002790 C
002800 C INTEGER R,S,RR,SS
002810 COMMON /ARBSP/ F(3,3),M(12),N(12),R(12),S(12),EKS(12,12),F(8,8),
002820 FAC(12)
002830 C
002840 D0 10 I=1,12
002850 D0 10 J=1,12
002860 10 EKS(I,J)=0.0
002870 D0 20 I=1,8
002880 D0 20 J=1,8
002890 20 F(I,J)=0.0
002900 FAC(1)=1.0
002910 D0 30 I=2,12
002920 30 FAC(I)=I*FAC(I-1)
002930 F(3,3)=0.5*C*(A+B)
002940 D0 40 I=4,8
002950 40 F(I,3)=(A**((I-2)-(-B)**(I-2))*C*FAC(I-3)/FAC(I-1)
002960 D0 50 J=4,8
002970 50 F(3,J)=(A+B)*C**((J-2)*FAC(J-3)/FAC(J-1)
002980 D0 60 I=4,8
002990 D0 60 J=4,8
003000 K=I+J-4

```

```

003010      60 F(I,J)=(A**(I-2)-(-B)**(I-2))*C**(J-2)*FAC(I-3)*FAC(J-3)/FAC(K)
003020      00 70 I=1,12
003030      00 70 K=I,12
003040      MM=H(I)+M(K)
003050      NN=N(I)+N(K)
003060      RR=R(I)+R(K)
003070      SS=S(I)+S(K)
003080      MRT=M(I)+R(K)
003090      MRK=M(K)+R(I)
003100      NST=N(I)+S(K)
003110      NSK=N(K)+S(I)
003120      70 FKS(I,K)=T*(
003130      1E(1,1)*M(I)*M(K)*F(MM+1,NN+3)+E(2,2)*S(I)*S(K)*F(RR+3,SS+1)+(
003140      2E(1,2)*M(K)*S(I)+E(3,3)*N(K)*R(I))*F(MRK+2,NSK+2)+(
003150      3E(1,3)*M(K)*N(I)+E(3,1)*M(I)*N(K))*F(MM+2,NN+2)+
003160      4E(1,3)*M(K)*R(I)*F(MRK+1,NSK+3)+E(3,1)*M(I)*R(K)*F(MRI+1,NSI+3)+(
003170      5E(2,1)*M(I)*S(K)+E(3,3)*N(I)*R(K))*F(MRI+2,NSI+2)+
003180      6E(2,3)*N(I)*S(K)*F(MRT+3,NSI+1)+E(3,2)*N(K)*S(I)*F(MRK+3,NSK+1)+(
003190      7E(2,3)*R(I)*S(K)+E(3,2)*R(K)*S(I))*F(RR+2,SS+2)+
003200      8E(3,3)*N(I)*N(K)*F(MM+3,NN+1)+R(I)*R(K)*F(RR+1,SS+3)))
003210      00 80 I=1,12
003220      00 80 K=I,12
003230      80 FKS(K,I)=FKS(I,K)
003240      RETURN
003250      END
003260 C *****
003270 SUBROUTINE CCS12(A,B,C,I)
003280 C *****
003290 C
003300 C COMPUTATION OF INVERSE COORDINATE MATRIX OF 12 PARAMETER
003310 C TRIANGULAR PLANE STRESS ELEMENT AND ITS TRANSPOSED MATRIX
003320 C OUTPUT OF INVERSE COORDINATE MATRIX TO FILE L4, RECORD I*2-1
003330 C
003340 C INTEGER R,S
003350 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4
003360 C COMMON /ARRSP/ E(3,3),M(12),N(12),R(12),S(12),EKS(12,12),CC(12,12)
003370 C I,CC(12,12),HH(12),VV(12),X(6),Y(6)
003380 C
003390      X(1)=-B
003400      Y(1)=0.
003410      X(2)=(A-B)*0.5
003420      Y(2)=0.
003430      X(3)=A
003440      Y(3)=0.
003450      X(4)=A*0.5
003460      Y(4)=C*0.5
003470      X(5)=0.
003480      Y(5)=C
003490      X(6)=-B*0.5
003500      Y(6)=Y(4)
003510      00 10 K=1,12
003520      00 10 J=1,12
003530      10 CC(K,J)=0.0
003540      00 20 K=1,6
003550      I2=K*2
003560      I1=I2-1
003570      00 20 I1=1,6
003580      J2=J1+6
003590      CC(I1,J1)=EXP0(X(K),M(J1))*EXP0(Y(K),N(J1))
003600      20 CC(I2,J2)=EXP0(X(K),R(J2))*EXP0(Y(K),S(J2))
003610      CALL MINV(CC,12,DET,MM,NN,144)
003620      I21=I*2-1

```

```

003630      WRITE(L4,'I21) CC
003640      CALL GMTRA(CC,CCT,12,12)
003650      RETURN
003660      END
003670 C      *****
003680      SUBROUTINE TRANSF(COSALF,COSBET,K)
003690 C      *****
003700 C
003710 C      COORDINATE TRANSFORMATION OF ELEMENT STIFFNESS MATRIX
003720 C      UI=T*UG
003730 C
003740      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4
003750      COMMON /ARBS/ 7ERR(57),EKS(12,12),T(12,12),TT(12,12),ZWI(12,12)
003760 C
003770      DO 10 I=1,12
003780      DO 10 J=1,12
003790 10 T(I,J)=0.
003800      DO 20 I=1,6
003810      I2=I*2
003820      I1=I2-1
003830      T(I1,I1)=COSALF
003840      T(I2,I2)=COSALF
003850      T(I1,I2)=COSBET
003860 20 T(I2,I1)=-COSBET
003870      CALL GMTRA(T,TT,12,12)
003880 C
003890 C      OUTPUT OF TRANSFORMATION MATRIX T TO FILE L4, RECORD NO. K*2
003900 C
003910      K2=K*2
003920      WRITE(L4,K2) T
003930      CALL MAMU(EKS,T,ZWI,12,12,12)
003940      DO 40 I=1,12
003950      DO 40 J=1,12
003960 40 EKS(I,J)=0.
003970      CALL MAMU(TT,ZWI,EKS,12,12,12)
003980      RETURN
003990      END
004000 C      *****
004010      SUBROUTINE P4(P,FRANZ)
004020 C      *****
004030 C
004040 C      ASSEMBLY OF LOAD VECTOR
004050 C
004060      INTEGER FRANZ,BOL,BOL1,BOL2,BOL3,TYP
004070      DIMENSION P(FRANZ)
004080      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5
004090      COMMON /ARBS/ 7ERR(57),BOL(2),X(2),Y(2)
004100 C
004110      ISTOP=0
004120      WRITE(6,2001)
004130      IP=0
004140 10 READ(5,1001) TYP
004150      IF(TYP.GT.9999) GOTO 50
004160      IP=IP+1
004170      BACKSPACE 5
004180      IF(TYP.EQ.1) GOTO 40
004190      READ(5,1001) TYP,IXY,P1,P3,K1,K2,K3,BOL1,BOL2,BOL3
004200      WRITE(6,2002) TYP,IXY,P1,P3,K1,K2,K3,BOL1,BOL2,BOL3
004210      READ(5,K3) X(2),Y(2),BOL(1),BOL(2)
004220      IF(BOL3.EQ.BOL(IXY)) GOTO 20
004230      WRITE(6,2007) K3,BOL3,BOL(IXY)
004240      ISTOP=0

```

```

004250      20 READ(L5,K2) X(1),Y(1),BOL(1),BOL(2)
004260      IF(BOL2.EQ.BOL(IXY)) GOTO 25
004270      WRITE(6,2005) K2,BOL2,BOL(IXY)
004280      ISTOP=1
004290      25 READ(L5,K1) X(1),Y(1),BOL(1),BOL(2)
004300      IF(BOL1.EQ.BOL(IXY)) GOTO 30
004310      WRITE(6,2004) K1,BOL1,BOL(IXY)
004320      ISTOP=1
004330      30 DELTA=(X(1)-X(2))**2+(Y(1)-Y(2))**2
004340      DELTA=SQRT(DELTA)
004350      SAVE=P1
004360      P1=DELTA*SAVE/6.
004370      P2=DELTA*(SAVE+P3)/3.
004380      P3=DELTA*P3/6.
004390      IF(BOL1.GT.0) P(BOL1)=P(BOL1)+P1
004400      IF(BOL2.GT.0) P(BOL2)=P(BOL2)+P2
004410      IF(BOL3.GT.0) P(BOL3)=P(BOL3)+P3
004420      GOTO 10
004430      40 READ(5,1001) TYP,B7L1,P1
004440      WRITE(6,2003) TYP,P1,B7L1
004450      P(BOL1)=P(BOL1)+P1
004460      GOTO 10
004470      50 IF(ISTOP.EQ.1) STOP
004480      WRITE(6,2006) IP
004490      CALL POUT(P,FRANZ)
004500      1001 FORMAT(2I5,2F10.0,6I5)
004510      2001 FORMAT(10H LOAD DATA/10H -----/64H TYP IXY          P1
004520      1      P3      K1      K2      K3 BOL1 BOL2 BOL3)
004530      2002 FORMAT(1H ,I3,I4,2F13.5,6I5)
004540      2003 FORMAT(1H ,I3,4X,E13.5,23X,I5)
004550      2004 FORMAT(11H *****NODE ,I4,24H DEGREE OF FREEDOM BOL1=,I4,4H.NE.,I4)
004560      2005 FORMAT(11H *****NODE ,I4,24H DEGREE OF FREEDOM BOL2=,I4,4H.NE.,I4)
004570      2006 FORMAT(25H LOAD VECTOR COMPOSED OF ,I4,6H LOADS/1H ,35(1H-)/1H ,3(
004580      12H B7L      P(B7L) ))
004590      2007 FORMAT(11H *****NODE ,I4,24H DEGREE OF FREEDOM BOL3=,I4,4H.NE.,I4)
004600      RETURN
004610      END
004620 C *****
004630 C SUBROUTINE P5(P,SK,FRANZ,IB,KNANZ,IRB)
004640 C *****
004650 C
004660 C FITTING IN BOUNDARY CONDITIONS TO SYSTEM STIFFNESS MATRIX
004670 C BY TENSION/COMPRESSION SPRINGS OR AN ELASTIC LINE BEARING
004680 C
004690 C INTEGER FRANZ,B7L,BOLX,BOLY
004700 C DIMENSION P(FRANZ),SK(FRANZ,IR)
004710 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5
004720 C COMMON /ARBS/ 7ERR(57),BOLX(3),BOLY(3),XK(3),YK(3),KNNR(3),BOL(6)
004730 C ,CK(6,6),T(6,6),TT(6,6),ZWI(6,6)
004740 C
004750 C ISTOP=0
004760 C WRITE(6,2000) IRA
004770 C I=0
004780 C 10 READ(5,1000) ITYP
004790 C IF(ITYP.GT.9999) GOTO 100
004800 C BACKSPACE 5
004810 C IF(ITYP.EQ.2) GOTO 40
004820 C IF(ITYP.EQ.3) GOTO 95
004830 C READ(5,1000) ITYP,KNNR(1),ALFA,C,IRAD
004840 C IF(IRAD.EQ.0) ALFA=3.1415926536*ALFA/180.
004850 C I=I+1
004860 C IF(KNNR(1).GT.0.AND.KNNR(1).LE.KNANZ) GOTO 20

```

```

004870      WRITE (6,2001) KNNR(1)
004880      ISTOP=1
004890      GOTO 10
004900      20 READ(15,KNNR(1), XK(1), YK(1), BDLX(1), BDLY(1)
004910      WRITE(6,2002) ITYP,KNNR(1),BDLX(1),BDLY(1),ALFA,C,IRAD
004920      SINALF=SIN(ALFA)
004930      COSALF=COS(ALFA)
004940      IF(BDLX(1).EQ.0) GOTO 30
004950      SK(BDLX(1),1)=SK(BDLX(1),1)+C*COSALF**2
004960      30 IF(BDLY(1).EQ.0) GOTO 10
004970      SK(BDLY(1),1)=SK(BDLY(1),1)+C*SINALF**2
004980      IF(BDLX(1).EQ.0) GOTO 10
004990      JBDL=BDLY(1)-BDLX(1)
005000      JBDL=ABS(JBDL)+1
005010      IBDL=BDLX(1)
005020      IF(BDLY(1).LT.BDLX(1)) IBDL=BDLY(1)
005030      SK(IBDL,JBDL)=SK(IBDL,JBDL)+C*SINALF*COSALF
005040      GOTO 10
005050      40 READ(5,1001) ITYP,KNNR,C,IXY
005060      I=I+1
005070      DO 50 J=1,3
005080      50 READ(15,KNNR(J), XK(J), YK(J), BDLX(J), BDLY(J)
005090      DELTA=(XK(3)-XK(1))**2+(YK(3)-YK(1))**2
005100      DELTA=SQRT(DELTA)
005110      DO 60 J=1,6
005120      DO 60 K=1,6
005130      CK(J,K)=0.0
005140      T(J,K)=0.0
005150      TT(J,K)=0.0
005160      60 ZWI(J,K)=0.0
005170      CC=C*DELTA/30.
005180      CK(IXY,IXY)=4.*CC
005190      CK(2+IXY,IXY)=2.*CC
005200      CK(4+IXY,IXY)=-1.*CC
005210      CK(IXY,2+IXY)=CK(2+IXY,IXY)
005220      CK(2+IXY,2+IXY)=16.*CC
005230      CK(4+IXY,2+IXY)=CK(2+IXY,IXY)
005240      CK(IXY,4+IXY)=CK(4+IXY,IXY)
005250      CK(2+IXY,4+IXY)=CK(4+IXY,2+IXY)
005260      CK(4+IXY,4+IXY)=CK(IXY,IXY)
005270      COSALF=(XK(3)-XK(1))/DELTA
005280      SINALF=(YK(3)-YK(1))/DELTA
005290      DO 80 J=2,6,2
005300      T(J-1,J-1)=COSALF
005310      T(J,J)=COSALF
005320      T(J-1,J)=SINALF
005330      80 T(J,J-1)=-SINALF
005340      CALL GHTRA(T,TT,6,6)
005350      CALL MANU(CK,T,ZWI,6,6,6)
005360      CALL MANU(TT,ZWI,CK,6,6,6)
005370      DO 90 J=1,3
005380      J2=2*J
005390      J1=J2-1
005400      BDL(J1)=BDLX(J)
005410      90 BDL(J2)=BDLY(J)
005420      CALL BBDLB(SK,CK,BDL,FRANZ,IB,6)
005430      WRITE(6,2003) ITYP,KNNR,BDL,C,IXY
005440      GOTO 10
005450      05 READ(5,1000) ITYP,BDL(1)
005460      CALL PRUNT(P,SK,BDL(1),FRANZ,IB)
005470      WRITE(6,2005) ITYP,BDL(1)
005480      I=I+1

```

```

005490      GOTO 10
005500      100 IF(I.EQ.IRB) GOTO 110
005510          ISTOP=1
005520          WRITE(6,2004) I,IRB
005530      110 IF(ISTOP.EQ.1) STOP
005540      1000 FORMAT(2I5,2E10.5,I5)
005550      1001 FORMAT(4I5,F10.5,I5)
005560      2000 FORMAT(22H BOUNDARY CONDITIONS (,I4,1H)/1H ,25(1H-)/68H TYP KNNR
005570          1      BDLX BDLY      ALFA      C IRAD/68H TYP
005580          2 K1 K2 K3 BDL1 BDL2 BDL3 BDL4 BDL5 BDL6      C IXY)
005590      2001 FORMAT(11H *****NODE I5,22H NODE NUMBER DEFECTIVE)
005600      2002 FORMAT(1H I3,I5,10X,2I5,8X,F12.6,E14.5,I5)
005610      2003 FORMAT(1H I3,9I5,E14.5,I5)
005620      2004 FORMAT(40H *****NUMBER OF READ BOUNDARY CONDITIONS ,I4,30H NOT EQU
005630      1AL TO PROVIDED NUMBER ,I4)
005640      2005 FORMAT(1H I3,15X,I5)
005650          RETURN
005660          END
005670      C *****
005680      C SUBROUTINE QUTM(A,M,N)
005690      C *****
005700      C
005710      C OUTPUT OF MATRIX A(M,N)
005720      C
005730      C DIMENSION A(M,N)
005740      C
005750          WRITE(6,2000)
005760          WRITE(6,2001)((I,J,A(I,J)),I=1,M),J=1,N)
005770      2000 FORMAT(1H ,4(29H I J A(I,J)),/)
005780      2001 FORMAT(1H 4(2I5,E19.11))
005790          RETURN
005800          END
005810      C *****
005820      C SUBROUTINE p6(SK,P,FRANZ,IB)
005830      C *****
005840      C
005850      C SOLUTION OF LINEAR EQUATION SYSTEM
005860      C OUTPUT OF DISPLACEMENT VECTOR
005870      C
005880      C INTEGER FRANZ
005890      C DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ)
005900      C COMMON /ARBSP/ ZER0(57),B(1)
005910      C
005920          WRITE(6,2000)
005930          CALL SSOL(SK,P,B,FRANZ,IB)
005940          CALL PRUT(P,FRANZ)
005950      2000 FORMAT(20H DISPLACEMENT VECTOR/20H -----/1H ,3(20H B
005960      10L P(BDL) ))
005970          RETURN
005980          END
005990      C *****
006000      C SUBROUTINE p7(P,FRANZ,ELANZ)
006010      C *****
006020      C
006030      C COMPUTATION OF ELEMENT STRESS STATE (LOCAL COORDINATE SYSTEM)
006040      C OUTPUT TO FILE 16, RECORO NO. ELNR
006050      C
006060          INTEGER FRANZ,ELANZ,BDL
006070          DIMENSION P(FRANZ)
006080          COMMON /DATIR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6
006090          COMMON /ARBSP/ E(3,3),A(12),BDL(12),U(12),ALFA(3,3),BETA(3,3),
006100          ITR(12,12),CC(12,12)

```

```

006110 C
006120 WRITE(6,2000)
006130 DO 20 I=1,ELANZ
006140 READ(L2,I) BDL
006150 DO 10 J=1,12
006160 A(J)=0.0
006170 IF(BDL(J).GT.0) A(J)=P(BDL(J))
006180 10 CONTINUE
006190 I2=2*I
006200 I1=I2-1
006210 READ(L4,I1) CC
006220 READ(L4,I2) TR
006230 CALL MAMU(TR,A,I,12,12,1)
006240 CALL MAMU(CC,U,A,12,12,1)
006250 ALFA(1,1)=A(2)
006260 ALFA(1,2)=A(4)*2
006270 ALFA(1,3)=A(5)
006280 ALFA(2,1)=A(9)
006290 ALFA(2,2)=A(11)
006300 ALFA(2,3)=A(12)*2
006310 ALFA(3,1)=A(3)+A(8)
006320 ALFA(3,2)=A(5)+A(10)*2
006330 ALFA(3,3)=A(6)*2+A(11)
006340 CALL MAMU(E,ALFA,BETA,3,3,3)
006350 WRITE(6,2001) I
006360 WRITE(6,2002) (BETA(1,II),II=1,3)
006370 WRITE(6,2003) (BETA(2,II),II=1,3)
006380 WRITE(6,2004) (BETA(3,II),II=1,3)
006390 CALL GMTRA(BETA,ALFA,3,3)
006400 WRITE(L6,I) ALFA
006410 READ(L1,I) T,AX,BX,CY
006420 XM=(AX-BX)/3.
006430 YM=CY/3.
006440 SX=BETA(1,1)+BETA(1,2)*XM+BETA(1,3)*YM
006450 SY=BETA(2,1)+BETA(2,2)*XM+BETA(2,3)*YM
006460 TXY=BETA(3,1)+BETA(3,2)*XM+BETA(3,3)*YM
006470 SX=SX/1.E6
006480 SY=SY/1.E6
006490 TXY=TXY/1.E6
006500 WRITE(6,2005) SX,SY,TTY
006510 20 CONTINUE
006520 C
006530 C OUTPUT OF ELASTICITY MATRIX TO FILE L6, RECORD NO. ELANZ+1
006540 C
006550 I=ELANZ+1
006560 WRITE(L6,I) E
006570 2000 FORMAT(47H ELEMENT STRESS STATE (LOCAL COORDINATE SYSTEM)/1H ,47(1
006580 1H-1/)
006590 2001 FORMAT(13H ELEMENT NO. I4)
006600 2002 FORMAT(8H SIGMAX=E18.10,X,E18.10,4H *X E18.10,3H *Y)
006610 2003 FORMAT(8H SIGMAY=E18.10,X,E18.10,4H *X E18.10,3H *Y)
006620 2004 FORMAT(8H TAUXY =E18.10,X,E18.10,4H *X E18.10,3H *Y)
006630 2005 FORMAT(41H STRESS STATE AT CENTRAL POINT OF ELEMENT/
006640 18H SIGMAX=F9.3,15H MN/M2 SIGMAY=F9.3,14H MN/M2 TAUXY=F9.3,6H MN/
006650 242)
006660 RETURN
006670 END
006680 C
006690 SUBROUTINE P8(S,K,P,FRANZ,IB,F,IF2)
006700 C
006710 C
006720 C COMPUTATION OF BEARING FORCES AND OF ELASTIC POTENTIAL OF SYSTEM

```

```

006730 C
006740 INTEGER FRANZ
006750 COMMON /DATNR/ I1,L2,L3
006760 DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ),F(IF2)
006770 C
006780 READ(L3,1) SK
006790 I1=FRANZ+1
006800 I2=FRANZ*IB
006810 CALL HANBURV(SK,FRANZ,IB,P,F(1),F(I1),I2)
006820 WRITE(6,2001)
006830 CALL POUT(F,FRANZ)
006840 PEL=0.
006850 DO 10 I=1,FRANZ
006860 10 PEL=PEL+P(I)*F(I)
006870 PEL=-0.5*PEL
006880 WRITE(6,2002) PEL
006890 2001 FORMAT(15H BEARING FORCES/15H -----/1H ,3(20H BDL
006900 1F(BDL) ))
006910 2002 FORMAT(1H ,60(14-)/27H ELASTIC POTENTIAL .. PEL= E12.5)
006920 RETURN
006930 END
006940 C
006950 SUBROUTINE HANBURV(A,N,M,B,C,D,MM)
006960 C
006970 C *****
006980 C MULTIPLIKATION EINER BANDBEFORMIGEN SYMMETRISCHEN QUADRATISCHEN
006990 C MATRIX A MIT EINEM VEKTOR B UNTER ERHALTUNG VON MATRIX UND VEKTOR.
007000 C A IST ALS HALBES BAND VERFINBART, BANDLAENGE N, HALBE BANDBREITE
007010 C EINSCHLIESSLICH HAUPTDIAGONALELEMENT M, FELDLAENGE MM=N*M
007020 C B HAT DIE LAENGE N
007030 C D IST DER ERGEBNISVEKTOR MIT DER LAENGE N
007040 C D IST EIN HILFSVEKTOR MIT DER LAENGE N
007050 C
007060 DIMENSION A(MM),B(N),C(N),D(N)
007070 C
007080 DO 50 I=1,N
007090 R=0.
007100 DO 10 J=1,N
007110 10 D(I)=0.
007120 IJ=I-1
007130 IF(M.GT.I) III=I-1
007140 DO 20 J=1,III
007150 IJ=I-J
007160 20 D(IJ)=A(IJ)
007170 III=M
007180 IN=I+M-1
007190 IF(IN.GT.N) III=M-IN+N
007200 DO 30 J=1,III
007210 JJ=J-1
007220 II=I+JJ
007230 IJ=I+M*JJ
007240 30 D(II)=A(II)
007250 DO 40 J=1,N
007260 40 R=R+D(I)*B(J)
007270 50 C(I)=R
007280 RETURN
007290 END
007300 C
007310 SUBROUTINE P2(FRANZ,FRANZ,IB,C,IBDL)
007320 C
007330 C *****
007340 C CONTROL OF NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM

```

```

007350 C CONTROL OF BANDWIDTH OF SYSTEM STIFFNESS MATRIX
007360 C
007370 C INTEGER ELANZ,FRANZ,B7L
007380 C COMMON /DATNR/ L1,L2
007390 C COMMON /ARBSP/ 7ER7(57),B0L(21)
007400 C DIMENSION C(FRANZ)
007410 C
007420 C I STOP=0
007430 C DO 10 I=1,FRANZ
007440 10 C(I)=0.
007450 C DO 30 I=1,ELANZ
007460 C MAX=0
007470 C MIN=FRANZ
007480 C READ(L2,I)(B0L(J),J=1,IB0L)
007490 C DO 20 J=1,IB0L
007500 C IF(B0L(J).EQ.0) GOTD 20
007510 C C(B0L(J))=C(B0L(J))+1
007520 C IF(B0L(J).GT.MAX) MAX=B0L(J)
007530 C IF(B0L(J).LT.MIN) MIN=B0L(J)
007540 20 CONTINUE
007550 C MAX=MAX-MIN+1
007560 C IF(IB.GE.MAX) GOTD 30
007570 C WRITE(6,2001) I,MAX,IB
007580 C I STOP=1
007590 30 CONTINUE
007600 C DO 40 I=1,FRANZ
007610 C IF(C(I).GT.0.) GOTD 40
007620 C WRITE(6,2002) I
007630 C I STOP=1
007640 40 C(I)=0.
007650 C IF(I STOP.EQ.1) STOP
007660 2001 FORMAT(18H *****ELEMENT NO. ,I4,10H BANDWIDTH ,I4,18H IS WIDER THA
007670 1H IB=,I4)
007680 2002 FORMAT(28H *****DEGREE OF FREEDOM NO. ,I4,7H MISSES)
007690 C RETURN
007700 C END
007710 C *****
007720 C SUBROUTINE B0DLB(SK,EK,B7L,FRANZ,IB,N)
007730 C *****
007740 C
007750 C INTEGER FRANZ,B7L(N)
007760 C DIMENSION SK(FRANZ,IB),EK(N,N)
007770 C
007780 C DO 2 I=1,N
007790 C J1=B0L(I)
007800 C IF(J1.EQ.0) GOTD 2
007810 C DO 1 K=1,N
007820 C J2=B0L(K)
007830 C IF(J2.EQ.0) GOTD 1
007840 C IF(J1.GT.J2) GOTD 1
007850 C J2=J2-J1+1
007860 C SK(J1,J2)=SK(J1,J2)+EK(I,K)
007870 C 1 CONTINUE
007880 C 2 CONTINUE
007890 C RETURN
007900 C END
007910 C *****
007920 C SUBROUTINE FRUNT(P,SK,IFU,FRANZ,IB)
007930 C *****
007940 C
007950 C INTERDRUECKEN EINES FREIHEITSGRADES
007960 C

```

```

007970      INTEGER FRANZ
007980      DIMENSION P (FRANZ), SK (FRANZ,IB)
007990      C
008000      SK (IFU,1)=1.0
008010      P (IFU)=0.0
008020      J1=IFU
008030      DO 10 J=2,IB
008040      J1=J1-1
008050      SK (IFU,J)=0.0
008060      IF (J1.GT.0) SK (J1,J)=0.0
008070      10 CONTINUE
008080      RETURN
008090      END
008100      C *****
008110      SUBROUTINE POUT (P,FRANZ)
008120      C *****
008130      C
008140      C      OUTPUT OF LOAD/DEFLECTION VECTOR
008150      C
008160      INTEGER FRANZ
008170      DIMENSION P (FRANZ)
008180      C
008190      I7=FRANZ/3
008200      J3=I7*3
008210      IF (FRANZ.GT.J3) IZ=I7+1
008220      DO 10 I=1,IZ
008230      I2=I*3
008240      I1=I2-2
008250      IF (I2.GT.FRANZ) I2=FRANZ
008260      10 WRITE (6,2000) ((I,I,P (I)),I=I1,I2)
008270      2000 FORMAT (1H 3(I4,2X,E12.5,2X))
008280      RETURN
008290      END
008300      C *****
008310      SUBROUTINE MAMU (A,B,C,N,M,L)
008320      C *****
008330      C
008340      C      MATRIZENMULTIPLIKATION
008350      C
008360      DIMENSION A (N,M), B (M,L), C (N,L)
008370      DO 5 I=1,N
008380      DO 4 J=1,L
008390      R=0.0
008400      DO 3 K=1,M
008410      R=R+A (I,K)*B (K,J)
008420      3 CONTINUE
008430      C (I,J)=R
008440      4 CONTINUE
008450      5 CONTINUE
008460      RETURN
008470      END
008480      C *****
008490      FUNCTION EXPD (X,M)
008500      C *****
008510      C
008520      C      COMPUTATION OF X**M WITH X**M=0. IF M.LT.0
008530      C
008540      IF (M) 10,20,30
008550      10 EXPD=0.
008560      RETURN
008570      20 EXPD=1.
008580      RETURN

```

0118*SR6260 HAEUSLER

HH1 HAMBURG

26.01.78 182608 SEITE

15

008590 30 EXPD=X**M
008600 RETURN
008610 END

ENDE TKOPFERE (7.01) 1.91

LHFUH T=00003 IS ON CR08888 USING 00024 BLKS R=0000

```
0001 C   VERSION VOM 14.09.1977
0002 C   *****
0003 C   DATENEINGABE
0004 C   *****
0005 C
0006 C   DATEIEN
0007 C   1 KARTE FORMAT (3A4)
0008 C   1.-12. SPALTE, TEXT ZUR LAUFKENNZEICHNUNG
0009 C   TEXT RECHTSBUENDIG EINTRAGEN
0010 C
0011 C   1 KARTE FORMAT (5I5)
0012 C   SYSTEMDATEN
0013 C   1.-5. SPALTE,      ELANZ = ANZAHL DER ELEMENTE
0014 C   6.-10. SPALTE,   KMANZ = ANZAHL DER KNOTENPUNKTE
0015 C   11.-15. SPALTE,  FRANZ = ANZAHL DER FREIHEITSGRADE
0016 C   16.-20. SPALTE,  IB = HALBE BANDBREITE DER SYSTEMSTEIFIGKEITS-
0017 C                   MATRIX
0018 C   21.-25. SPALTE,  IRB = ANZAHL DER RANDBEDINGUNGEN
0019 C
0020 C   1 KARTE FORMAT (F5.0)
0021 C   1.-5. SPALTE, RHO= DICHTe DES WASSERS
0022 C
0023 C   1 KARTE FORMAT (1B)
0024 C   FAKTOR ZUR REDUKTION DES SCHEIBENSPANNUNGSZUSTANDES
0025 C   FAKTOR = 1. - SCHEIBENSPANNUNGSZUSTAND GEHT VOLL IN DIE
0026 C                   BERECHNUNG DER GEOMETRISCHEN STEIFIGKEITSMATRIX
0027 C                   EIN
0028 C   FAKTOR = 0. - KEINE SCHEIBENSPANNUNGEN VORHANDEN
0029 C   BELIEBIGE ZWISCHENWERTE ODER VIELFACHE SIND ZULAESSIG
0030 C
0031 C   KMANZ KARTEN FORMAT (8I5) BZW. (3I5)
0032 C   KNOTENDATEN
0033 C   1.-5. SPALTE,      KNOTENTYP  KTYP = 6 - ECKKNOTEN
0034 C                   KTYP = 1 - ZWISCHENKNOTEN
0035 C   6.-10. SPALTE,    KNNR = KNOTENNUMMER
0036 C   11.-15. SPALTE,   BOL1 = FREIHEITSGRADNUMMER VON U BZW. UN
0037 C   16.-20. SPALTE,   BOL2 = FREIHEITSGRADNUMMER VON UX
0038 C   21.-25. SPALTE,   BOL3 = FREIHEITSGRADNUMMER VON UY
0039 C   26.-30. SPALTE,   BOL4 = FREIHEITSGRADNUMMER VON UXX
0040 C   31.-35. SPALTE,   BOL5 = FREIHEITSGRADNUMMER VON UXY
0041 C   36.-40. SPALTE,   BOL6 = FREIHEITSGRADNUMMER VON UYY
0042 C
0043 C   1 KARTE FORMAT (15)
0044 C   99999 - (BLOCKENDE)
0045 C
0046 C   IRB KARTEN - RANDBEDINGUNGEN - 5 TYPEN
0047 C   EINFACHE FEDER IN FREIHEITSGRADRICHTUNG
0048 C   FORMAT (2I5, E10.4)
0049 C   1.-5. SPALTE,      ITYP = 1
0050 C   6.-10. SPALTE,    BOL = FREIHEITSGRADNUMMER
0051 C   11.-20. SPALTE,   C = FEDERSTEIFIGKEIT
0052 C   TORSIONSFEDER AN ECKKNOTEN
0053 C   FORMAT (2I5, E10.4, F5.2, I5)
0054 C   1.-5. SPALTE,      ITYP = 2
0055 C   6.-10. SPALTE,    KNNR = KNOTENNUMMER
0056 C   11.-20. SPALTE,   C = FEDERSTEIFIGKEIT
0057 C   21.-25. SPALTE,   ALFA = WINKEL ZWISCHEN X-ACHSE UND FEDERACHSE
0058 C   26.-30. SPALTE,   IRAD = 0 - ALFA IN GRAD, IRAD = 1 - ALFA IN RAD
0059 C   ELASTISCHE LAGERUNG LAENGS EINER ELEMENTSEITE
```

```
0060 C.   FORMAT (3I5,E10.4)
0061 C     1.-5. SPALTE,      ITYP = 3
0062 C     6.-10. SPALTE,    KN1 = 1. ECKKNOTENNUMMER
0063 C     11.-15 SPALTE,   KN2 = 2. ECKKNOTENNUMMER
0064 C     16.-25. SPALTE,  K = BETTUNGSZIFFER
0065 C     ELASTISCHE TEILEINSPANNUNG LAENGS EINER ELEMENTSEITE
0066 C     FORMAT (4I5,E10.4)
0067 C     1.-5. SPALTE,      ITYP = 4
0068 C     6.-10. SPALTE,    KN1 = 1. ECKKNOTENNUMMER
0069 C     11.-15. SPALTE,  KN2 = ZWISCHENKNOTENNUMMER
0070 C     16.-20. SPALTE,  KN3 = 2. ECKKNOTENNUMMER
0071 C     21.-30. SPALTE,  K = EINSPANNUNGSZIFFER
0072 C     UNTERDRUECKUNG EINES FREIHEITSGRADES
0073 C     FORMAT (2I5)
0074 C     1.-5. SPALTE,      ITYP = 5
0075 C     6.-10. SPALTE,    BOL = FREIHEITSGRADNUMMER
0076 C
0077 C     1 KARTE FORMAT (I5)
0078 C     99999 - (BLOCKENDE)
0079 C
0080 C     NN KARTEN LASTDATEN
0081 C     PUNKTLAST IN RICHTUNG EINES FREIHEITSGRADES
0082 C     FORMAT (I5,F10.0,I5)
0083 C     1.-5. SPALTE,      ITYP = 1
0084 C     6.-15. SPALTE,    P = LAST
0085 C     16.-20. SPALTE,   BOL = FREIHEITSGRADNUMMER
0086 C     STRECKENLAST LAENGS EINES ELEMENTRANDES
0087 C     FORMAT (I5,2F10.0,2I5)
0088 C     1.-5. SPALTE,      ITYP = 2
0089 C     6.-15. SPALTE,    Q1 = STRECKENLAST AM 1. ECKKNOTEN
0090 C     16.-25. SPALTE,   Q2 = STRECKENLAST AM 2. ECKKNOTEN
0091 C     26.-30. SPALTE,  K1 = 1. ECKKNOTENNUMMER
0092 C     31.-35. SPALTE,  K2 = 2. ECKKNOTENNUMMER
0093 C
0094 C     1 KARTE FORMAT (I5)
0095 C     99999 - (BLOCKENDE)
0096 C
0097 C
0098 C     NAME      = L1SP
0099 C     TYP       = RAN-P
0100 C     SATZZAHL = M(ELANZ)
0101 C     SATZBAU  = M12W
0102 C     TRAEGER  = LFD
0103 C
0104 C     NAME      = L2P
0105 C     TYP       = RAN-P
0106 C     SATZZAHL = M(ELANZ)
0107 C     SATZBAU  = M21W
0108 C     TRAEGER  = P
0109 C
0110 C     NAME      = L3SPE
0111 C     TYP       = RAN-P
0112 C     SATZZAHL = M3
0113 C     SATZBAU  = M(FRANZ*IB)W
0114 C     TRAEGER  = LFD
0115 C
0116 C     NAME      = L4P
0117 C     TYP       = RAN-P
0118 C     SATZZAHL = M(5*ELANZ)
0119 C     SATZBAU  = G441W
0120 C     TRAEGER  = P
```

```
0121 C
0122 C   NAME      = L5SP
0123 C   TYP       = RAN-P
0124 C   SATZZAHL = M(KNANZ)
0125 C   SATZBAU  = M8W
0126 C   TRAEGER  = LFD
0127 C
0128 C   NAME      = L6SP
0129 C   TYP       = RAN-P
0130 C   SATZZAHL = M(ELANZ+1)
0131 C   SATZBAU  = G9W
0132 C   TRAEGER  = LFD
0133 C
0134 C   NAME      = L7P
0135 C   TYP       = RAN-P
0136 C   SATZZAHL = M(2*FRANZ)
0137 C   SATZBAU  = M(1B)W
0138 C   TRAEGER  = P
0139 C
0140 C   NAME      = L8P
0141 C   TYP       = SEQ-P
0142 C   SATZZAHL = M(IRB+1)
0143 C   SATZBAU  = G1W
0144 C   TRAEGER  = LFD
0145 C
0146 C   NAME      = DATEN
0147 C   TYP       = RAN-P
0148 C   SATZZAHL =
0149 C   SATZBAU  = M800
0150 C   TRAEGER  = P
0151 C
0152 C *****
0153 C BLOCKDATA
0154 C *****
0155 C
0156 C BLOCKDATA SUBROUTINE - PLATE STIFFNESS MATRICES PROGRAM
0157 C
0158 C INTEGER R,S
0159 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
0160 C DATA L1/11/,L2/12/,L3/13/,L4/14/,L5/15/,L6/16/,L7/17/,L8/18/
0161 C COMMON /KOEFF/ M(21),N(21),R(6),S(6)
0162 C DATA M/0,1,0,2,1,0,3,2,1,0,4,3,2,1,0,5,4,3,2,1,0/
0163 C DATA N/0,0,1,0,1,2,0,1,2,3,0,1,2,3,4,0,1,2,3,4,5/
0164 C DATA R/0,1,0,0,1,0/
0165 C DATA S/0,0,1,0,0,1/
0166 C END
```

```

01)RPRPTOKPLL
  1 ZUSTAND      = ETN
  2 GERADT      = DR(1,2)-DC1
  3 ANZAHL      = 1
02)TKOPTFRE
  1 NAME        = HAFPLATT
  2 ZEIFE       = 1-999999
  4 PRPTOKPLL   = -STD-
  5 NUMMERIERUNG = H-(6)
  6 INFORMATION = /FREMDSTRING
000010 C *****
000020 C PLATE STIFFNESS MATRICES PROGRAM
000030 C *****
000040 C
000050 C ASSEMBLY OF ELASTIC AND GEOMETRIC PLATE STIFFNESS MATRICES
000060 C WITH L-NODAL-POINT 21-PARAMETER TRIANGULAR PLATE ELEMENTS IN
000070 C AN XY-PLANE WITH AN ELASTIC BEARING IN Z-DIRECTION
000080 C
000090 C INTEGER R,S,ELANZ,FRANZ
000100 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
000110 C COMMON /ARBSP/ ARR(3534),TJOB(3)
000120 C COMMON /KOFFF/ M(21),N(21),R(6),S(6)
000130 C COMMON /ELAST/ E(3,3),BETT,FAKTOR
000140 C DIMENSION SK(39796)
000150 C DATA ISK,SK/39796,39796*0.0/
000160 C
000170 C READ(5,1001) TJOB
000180 C READ(5,1002) ELANZ,KNANZ,FRANZ,IB,IRB
000190 C WRITE(6,2000)
000200 C WRITE(6,2001) TJOB,ELANZ,KNANZ,FRANZ,IB,IRB
000210 C I0=FRANZ*IB+1
000220 C I1=I0+FRANZ-1
000230 C WRITE(6,2003) ISK,I1
000240 C IF(ISK-I1) 10,20,20
000250 10 WRITE(6,2002) ISK,I1
000260 C STOP
000270 20 I2=ELANZ+1
000280 C READ(L6,I2) E
000281 C CALL MIJOUT(E,3,3,E1)
000290 C CALL PROGB(SK(1),SK(I0),ELANZ,KNANZ,FRANZ,IB,IRB)
000300 1001 FORMAT(3A4)
000310 1002 FORMAT(16I5)
000320 2000 FORMAT(1H1)
000330 2001 FORMAT(1H ,69(1H*))//,42H PLATE STIFFNESS MATRICES ASSEMBLY PROGRAM,
000340 115X,3A4/1H ,69(1H*)//,
000350 245H NUMBER OF ELEMENTS = ,I4/,
000360 345H NUMBER OF NODAL POINTS = ,I4/,
000370 445H NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM = ,I4/,
000380 545H HALF BANDWIDTH OF SYSTEM STIFFNESS MATRIX = ,I4/,
000390 645H NUMBER OF BOUNDARY CONDITIONS = ,I4/,
000400 71H ,69(1H-))
000410 2002 FORMAT(19H *****DIMENSION SK(,I5,16H) TOO SMALL, SK(,I5,11H) NECES
000420 1SARY)
000430 2003 FORMAT(14H DIMENSION SK(,I5,15H) NECESSARY SK(,I5,1H))
000440 C STOP
000450 C END
000460 C *****
000470 C SUBROUTINE PROGB(SK,P,ELANZ,KNANZ,FRANZ,IB,IRB)
000480 C *****
000490 C
000500 C INTEGER ELANZ,FRANZ
000510 C DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ)

```

0121*SR6260 HAEUSLER

HH1 HAMBURG

26.01.78 182608 SEITE

2

```
000520      DIMENSION IT(10),T(9)
000530 C
000540      CALL TIME(IT(1))
000550      CALL LOAD(5)
000560      CALL P11(ELANZ,KNANZ,FRANZ,IB)
000570      CALL UNLOAD(5)
000580      CALL TIME(IT(2))
000590      CALL LOAD(6)
000600      CALL P2 (ELANZ,FRANZ,IB,SK(1,1),21)
000610      CALL UNLOAD(6)
000620      CALL TIME(IT(3))
000630      CALL LOAD(1)
000640      CALL LOAD(2)
000650      CALL LOAD(7)
000660      CALL P12(SK,FRANZ,IB,ELANZ)
000670      CALL UNLOAD(7)
000680      CALL TIME(IT(4))
000690      CALL LOAD(3)
000700      CALL P13(SK,FRANZ,IB,IRB,KNANZ)
000710      CALL UNLOAD(8)
000720      CALL UNLOAD(2)
000730      CALL TIME(IT(5))
000740      CALL LOAD(3)
000750      CALL LOAD(9)
000760      CALL P14(P,FRANZ)
000770      CALL UNLOAD(9)
000780      CALL UNLOAD(3)
000790      CALL UNLOAD(1)
000800      CALL TIME(IT(6))
000810      CALL LOAD(10)
000820      CALL P15(SK,P,FRANZ,IB)
000830      CALL UNLOAD(10)
000840      CALL TIME(IT(7))
000850      CALL LOAD(4)
000860      CALL LOAD(11)
000870      CALL P16(SK,FRANZ,IB)
000880      CALL UNLOAD(11)
000890      CALL TIME(IT(8))
000900      CALL LOAD(3)
000910      CALL LOAD(12)
000920      CALL P18(SK,P,FRANZ,IB)
000930      CALL UNLOAD(12)
000940      CALL UNLOAD(3)
000950      CALL UNLOAD(4)
000960      CALL TIME(IT(9))
000970      CALL LOAD(1)
000980      CALL LOAD(13)
000990      CALL P19(P,FRANZ,ELANZ)
001000      CALL UNLOAD(13)
001010      CALL UNLOAD(1)
001020      CALL TIME(IT(10))
001030      DO 10 I=1,9
001040      J=11-I
001050      IT(J)=IT(J)-IT(J-1)
001060      10 T(J-1)=IT(J)*0.0001
001070      WRITE(6,2000) T
001080      2000 FORMAT(13HIRECHENZEITEN/6H P11: F9.5/6H P2: F9.5/
001090      16H P12: F9.5/6H P13: F9.5/6H P14: F9.5/6H P15: F9.5/
001100      26H P16: F9.5/6H P18: F9.5/6H P19: F9.5/)
001110      RETURN
001120      END
001130 C      *****
```

```

001140      SUBROUTINE P11(ELANZ,KNAN7,FRANZ,IB)
001150 C      *****
001160 C
001170 C      DATA INPUT
001180 C
001190      INTEGER BNL,ELAN7,FRANZ
001200      COMMON /DATNR/ I1,L2,L3,L4,L5
001210      COMMON /ELAST/ E(3,3),BETT,FAKTOR
001220      COMMON /ARBSP/ RNL(21),KN(6)
001230 C
001240 C      INPUT ELASTIC BEARING RHD (WATER) IN KG/M**3
001250 C
001260      READ(5,1000) RHD
001270      BETT=9.80665*RHD
001280 C
001290 C      INPUT FACTOR IN-PLANE STRESSES COMPUTED BY PROGRAM SCHEIB ARE TO
001300 C      BE MULTIPLICATED WITH
001310 C
001320      READ(5,1002) FAKTOR
001330 C
001340 C      INPUT BOOLEAN VECTOR OF NODAL POINTS
001350 C      KTOP = 6 - CORNER NODE
001360 C              = 1 - INTERMEDIATE NODE
001370 C
001380      WRITE(6,2000)
001390      ISTOP=0
001400 10 READ(5,1001) KTOP
001410      IF(KTOP.GT.99998) GOTO 40
001420      BACKSPACE 5
001430      READ(5,1001) KTOP,KNNR,(BNL(K),K=1,KTOP)
001440      IF((KNNR.GT.0).AND.(KNNR.LE.KNANZ)) GOTO 20
001450      ISTOP=1
001460      WRITE(6,2001) KNNR
001470      GOTO 10
001480 20 READ(L5,KNNR) X,Y
001490      WRITE(15,KNNR) X,Y,(BNL(K),K=1,KTOP)
001500      WRITE(6,2002) KNNR,(BNL(K),K=1,KTOP)
001510      DO 30 I=1,KTOP
001520      IF((BNL(I).GE.0).AND.(BNL(I).LE.FRANZ)) GOTO 30
001530      ISTOP=1
001540      WRITE(6,2003) KNNR,I,BNL(I)
001550 30 CONTINUE
001560      GOTO 10
001570 40 IF(ISTOP.EQ.1) STOP
001580 C
001590 C      ASSEMBLY OF ELEMENT BOOLEAN VECTOR
001600 C
001610      WRITE(6,2004)
001620      DO 60 IE=1,ELANZ
001630      READ(L1,IE) T,A,B,C,COSALF,COSBET,(KN(I),I=1,6)
001640      DO 50 I=1,3
001650      KI=2*I
001660      KC=KI-1
001670      J3=7*I
001680      J2=J3-1
001690      J1=J3-6
001700      READ(L5,KN(KC)) X,Y,(BNL(J),J=J1,J2)
001710 50 READ(L5,KN(KI)) X,Y,BNL(J3)
001720      WRITE(12,IE) (BNL(I),I=1,21)
001730 60 WRITE(6,2005) IE,BNL
001740      WRITE(6,2006) RHD,BETT
001750 1000 FORMAT(F5.0)

```

```

001760 1001 FORMAT(8I5)
001770 1002 FORMAT(1B)
001780 2000 FORMAT(10H NODE DATA/10H -----/35H KNNR B0L1 B0L2 B0L3 B0L4 B0
001790 1L5 B0L6)
001800 2001 FORMAT(18H *****NODAL POINT ,I4,22H NODE NUMBER DEFECTIVE)
001810 2002 FORMAT(1H ,I4,6I5)
001820 2003 FORMAT(18H *****NODAL POINT ,I4,6H, B0L(I,2H)=,I5,10H DEFECTIVE)
001830 2004 FORMAT(24H ELEMENT B7CLEAN VECTORS/24H -----/,
001840 170H ELNR B01 B02 B03 B04 B05 B06 B07 B08 B09 B10 B11 B
001850 212 B13/45H B14 B15 B16 B17 B18 B19 B20 B21/)
001860 2005 FORMAT(1H I4,13I5/14 ,4X,8I5)
001870 2006 FORMAT(13HORHN WATER = ,F6.1, 8H KG/M**3/,47H ELASTIC BEARING COEF
001880 LFCIENT K = GAMMA WATER = ,F7.1,7H N/M**3/)
001890 RETURN
001900 END
001910 C *****
001920 C SUBROUTINE PL2(SK,FRANZ,IB,ELANZ)
001930 C *****
001940 C
001950 C ASSEMBLY OF ELASTIC AND GEOMETRIC SYSTEM STIFFNESS MATRIX
001960 C
001970 C INTEGER B0L,FRANZ,ELANZ
001980 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5
001990 C COMMON /ARBSP/ EK(21,21),B0L(21)
002000 C DIMENSION SK(FRANZ,IB)
002010 C AIGOL EXTERNAL LOESCH
002020 C
002030 C D0 10 IE=1,ELANZ
002040 C CALL STIFFP(IE,ELANZ)
002050 C WRITE(6,3000) IE
002060 C3000 FORMAT(1H I5)
002070 C 10 CONTINUE
002080 C D0 30 IREC=1,2
002090 C D0 15 I=1,FRANZ
002100 C D0 15 J=1,IB
002110 C 15 SK(I,J)=0.
002120 C CALL LOESCH(SK,0.)
002130 C D0 20 I=1,ELANZ
002140 C READ(L2'I) B0L
002150 C I2=5*(I-1)+IREC
002160 C CALL BUFFT(L4,I2,EK(1,1),EK(21,21))
002170 C CALL B0LB(SK,EK,B0L,FRANZ,IB,21)
002180 C 2) CONTINUE
002190 C CALL MIJOUT(SK,FRANZ,IB,'SK')
002200 C WRITE(L3'IREC) SK
002210 C IF(IREC.EQ.2) WRITE(L3'5) SK
002220 C 3) CONTINUE
002230 C READ(L3'1) SK
002240 C D0 40 J=1,ELANZ
002250 C READ(L2'I) B0L
002260 C I2=5*(J-1)+3
002270 C CALL BUFFT(L4,I2,EK(1,1),EK(21,21))
002280 C CALL B0LB(SK,EK,B0L,FRANZ,IB,21)
002290 C 4) CONTINUE
002300 C WRITE(L3'1) SK
002310 C WRITE(L3'4) SK
002320 C RETURN
002330 C END
002340 C *****
002350 C SUBROUTINE STIFFP(IE,ELANZ)
002360 C *****
002370 C

```

```

002380      INTEGER ELANZ
002390      REAL LAMDA,LAMDAT
002400      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5
002410      COMMON /ARBSP/ KN(6),EKE(21,21),EKG(21,21),EKB(21,21),CC(21,21),
002420      CCT(21,21),LAMDA(21,21),LAMDAT(21,21),ZWI(21,21)
002430 C
002440      READ(L1,'IE) T,A,B,C,COSALF,SINALF,KN
002450      I5=5*IE
002460      I4=I5-1
002470      I3=I5-2
002480      I2=I5-3
002490      I1=I5-4
002500      CALL PLATEG(A,B,C,T,IE,ELANZ)
002510 C      CALL MIJOUT(EKE,21,21,'K*E')
002520 C      CALL MIJOUT(EKG,21,21,'K*G')
002530 C      CALL MIJOUT(EKB,21,21,'K*B')
002540      CALL COP21(A,B,C)
002550      CALL TRPL2(COSALF,SINALF)
002560      CALL MAMU(CCT,EKE,ZWI,21,21,21)
002570      CALL MAMU(ZWI,CC,EKE,21,21,21)
002580 C      CALL MIJOUT(EKE,21,21,'EKEL')
002590      CALL MAMU(CCT,EKG,ZWI,21,21,21)
002600      CALL MAMU(ZWI,CC,EKG,21,21,21)
002610 C      CALL MIJOUT(EKG,21,21,'EKGL')
002620      CALL MAMU(LAMDAT,EKE,ZWI,21,21,21)
002630      CALL MAMU(ZWI,LAMDA,EKE,21,21,21)
002640      CALL MAMU(LAMDAT,EKG,ZWI,21,21,21)
002650      CALL MAMU(ZWI,LAMDA,EKG,21,21,21)
002660      CALL MAMU(CCT,EKB,ZWI,21,21,21)
002670      CALL MAMU(ZWI,CC,EKB,21,21,21)
002680 C      CALL MIJOUT(EKB,21,21,'EKBL')
002690      CALL MAMU(LAMDAT,EKB,ZWI,21,21,21)
002700      CALL MAMU(ZWI,LAMDA,EKB,21,21,21)
002710 C      WRITE TO FILE L4,
002720 C      RECORD 5*IE-4 - ELASTIC ELEMENT STIFFNESS MATRIX
002730 C      RECORD 5*IE-3 - GEOMETRIC ELEMENT STIFFNESS MATRIX
002740 C      RECORD 5*IE-2 - ELASTIC BEARING ELEMENT STIFFNESS MATRIX
002750 C      RECORD 5*IE-1 - COORDINATE MATRIX
002760 C      RECORD 5*IE - TRANSFORMATION MATRIX
002770      CALL BUFF7(L4,I1,EKE(1,1),EKE(21,21))
002780      CALL BUFF7(L4,I2,EKG(1,1),EKG(21,21))
002790      CALL BUFF7(L4,I3,EKB(1,1),EKB(21,21))
002800      CALL BUFF7(L4,I4,CC(1,1),CC(21,21))
002810      CALL BUFF7(L4,I5,LAMDA(1,1),LAMDA(21,21))
002820 C      CALL MIJOUT(EKE,21,21,'EKEG')
002830 C      CALL MIJOUT(EKG,21,21,'EKGG')
002840 C      CALL MIJOUT(EKB,21,21,'EKBG')
002850 C      CALL MIJOUT(CC,21,21,'CC')
002860 C      CALL MIJOUT(LAMDA,21,21,'LAMDA')
002870      RETURN
002880      END
002890 C      *****
002900      SUBROUTINE PLATEG(A,B,C,T,IE,ELANZ)
002910 C      *****
002920 C
002930      INTEGER R,S,ELANZ
002940      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6
002950      COMMON /ARBSP/ KN(6),EKE(21,21),EKG(21,21),EKB(21,21),D(6,2),
002960      LG(2,6),F(18,18),FAC(28)
002970      COMMON /ELAST/ F(3,3),BETT,FAKTOR
002980      COMMON /KTEFF/ M(21),N(21),R(6),S(6)
002990 C

```

```

003000 C READ ELEMENT IN-PLANE STRESSES FROM FILE L6, RECORD IE
003010 C
003020 READ(L6,IF) (D(I,1),I=1,3), (D(I,2),I=4,6), (D(I,1),I=4,6)
003030 D(1,2)=D(4,1)
003040 D(2,2)=D(5,1)
003050 D(3,2)=D(6,1)
003060 DO 10 I=1,6
003070 DO 10 J=1,2
003080 10 D(I,J)=D(I,J)*FAKTOR
003090 C
003100 DO 20 I=1,21
003110 DO 20 J=1,21
003120 EKF(I,J)=0.0
003130 EKG(I,J)=0.0
003140 20 EKB(I,J)=0.0
003150 DO 30 I=1,18
003160 DO 30 J=1,18
003170 30 F(I,J)=0.0
003180 FAC(1)=1.
003190 DO 40 I=2,28
003200 40 FAC(I)=I*FAC(I-1)
003210 F(5,5)=.5*C*(A+B)
003220 DO 50 I=6,18
003230 50 F(I,5)=(A**I-4)-(-B)**I-4)*C*FAC(I-5)/FAC(I-3)
003240 DO 60 J=6,18
003250 60 F(5,J)=(A+B)*C**J-4)*FAC(J-5)/FAC(J-3)
003260 DO 70 I=6,18
003270 DO 70 J=6,18
003280 K=I+J-8
003290 70 F(I,J)=C**J-4)*(A**I-4)-(-B)**I-4)*FAC(I-5)*FAC(J-5)/FAC(K)
003300 C CALL MTJOUT(FAC,1,28,'FAC')
003310 C CALL MTJOUT(F,18,18,'F')
003320 C WRITE(6,3000) A,B,C
003330 C3000 FORMAT(3H A=,E20.7,3H B=,E20.7,3H C=,E20.7)
003340 DO 80 K=1,3
003350 KK=K+3
003360 G(1,K)=1.
003370 G(1,KK)=0.
003380 G(2,K)=0.
003390 80 G(2,KK)=1.
003400 DO 90 I=1,21
003410 DO 90 J=I,21
003420 MM=M(I)+M(J)
003430 NN=N(I)+N(J)
003440 EKB(I,J)=BETT*F(MM+5,NN+5)
003450 EKF(I,J)=T**3/12.*(E(1,1)*M(I)*M(I-1)*M(J)*M(J-1)*F(MM+1,NN+5)
003460 1+(E(1,3)*2.*M(I)*M(I-1)*M(J)*N(J)+E(3,1)*2.*M(I)*M(J)*M(J-1)
003470 2*N(I))*F(MM+2,NN+4)
003480 3+(E(1,2)*M(I)*M(I-1)*N(J)*N(J-1)+E(2,1)*M(J)*M(J-1)*N(I)
003490 4*N(I-1)+E(3,3)*4.*M(I)*M(J)*N(I)*N(J))*F(MM+3,NN+3)
003500 5+(E(2,3)*2.*M(J)*N(I)*N(I-1)*N(J)+E(3,2)*2.*M(I)*N(I)*N(J)
003510 6*N(J-1))*F(MM+4,NN+2)
003520 7+F(2,2)*N(I)*N(I-1)*N(J)*N(J-1)*F(MM+5,NN+1))
003530 DO 90 K=1,6
003540 MMR=MM+R(K)
003550 NNS=NN+S(K)
003560 EKG(I,J)=EKG(I,J)+T*(M(I)*M(J)*D(K,1)*G(1,K)*F(MMR+3,NNS+5)
003570 1+(M(I)*N(J)*D(K,2)*G(1,K)+M(J)*N(I)*D(K,1)*G(2,K))*F(MMR+4,NNS+4)
003580 2*N(I)*M(J)*D(K,2)*G(2,K)*F(MMR+5,NNS+3))
003590 90 CONTINUE
003600 DO 100 I=1,21
003610 DO 100 J=I,21

```

```

003620      EKF(J,I)=EKE(I,J)
003630      EKG(J,I)=EKG(I,J)
003640      100  FKB(J,I)=EKB(I,J)
003650      RETURN
003660      END
003670  C      *****
003680      SUBROUTINE CCP21(A,B,C)
003690  C      *****
003700  C
003710  C      DIMENSION EINHAT(21,21)
003720      COMMON /ARRSP/ KN(6),EKE(21,21),EKG(21,21),EKB(21,21),CC(21,21),
003730      ICCT(21,21),MM(21),NN(21),X(6),Y(6)
003740      COMMON /KOEFF/ M(21),N(21)
003750  C      DIMENSION COO(21,21)
003760  C      EQUIVALENCE (COO,ICCT)
003770  C
003780      IWN2=1
003790      IWN4=1
003800      IWN6=1
003810      IF(KN(1).GT.KN(3)) IWN2=-1
003820      IF(KN(3).GT.KN(5)) IWN4=-1
003830      IF(KN(5).GT.KN(1)) IWN6=-1
003840  C      WRITE(6,3000) IWN2,IWN4,IWN6,KN
003850  C3000  FORMAT(6H IWN2=I5,6H IWN4=I5,6H IWN6=I5,4H KN:6I5)
003860      X(1)=-B
003870      Y(1)=0.
003880      X(2)=(A-B)/2.
003890      Y(2)=0.
003900      X(3)=A
003910      Y(3)=0.
003920      X(4)=A/2.
003930      Y(4)=C/2.
003940      X(5)=0.
003950      Y(5)=C
003960      X(6)=-B/2.
003970      Y(6)=C/2.
003980      DO 10 J=1,3
003990      DO 10 I=1,21
004000      JJ=2*I-1
004010      J7=7*I
004020      CC(J7-6,I)=EXPD(X(JJ),M(I))*EXPD(Y(JJ),N(I))
004030      CC(J7-5,I)=M(I)*EXPD(X(JJ),(M(I)-1))*EXPD(Y(JJ),N(I))
004040      CC(J7-4,I)=N(I)*EXPD(X(JJ),M(I))*EXPD(Y(JJ),(N(I)-1))
004050      CC(J7-3,I)=M(I)*(M(I)-1)*EXPD(X(JJ),(M(I)-2))*EXPD(Y(JJ),N(I))
004060      CC(J7-2,I)=M(I)*N(I)*EXPD(X(JJ),(M(I)-1))*EXPD(Y(JJ),(N(I)-1))
004070  10  CC(J7-1,I)=N(I)*(N(I)-1)*EXPD(X(JJ),M(I))*EXPD(Y(JJ),(N(I)-2))
004080      D4=X(3)**2+Y(5)**2
004090      D4=SQRT(D4)
004100      CPHI4=-X(3)/D4
004110      SPHI4= Y(5)/D4
004120      D6=X(1)**2+Y(5)**2
004130      D6=SQRT(D6)
004140      CPHI6= X(1)/D6
004150      SPHI6=-Y(5)/D6
004160      DO 20 I=1,21
004170      CC( 7,I)=N(I)*EXPD(X(2),M(I))*EXPD(Y(2),(N(I)-1))
004180      CC( 7,I)=CC( 7,I)*IWN2
004190      CC(14,I)=M(I)*(-SPHI4)*EXPD(X(4),(M(I)-1))*EXPD(Y(4),N(I))
004200  1  +N(I)*CPHI4*EXPD(X(4),M(I))*EXPD(Y(4),(N(I)-1))
004210      CC(14,I)=CC(14,I)*IWN4
004220      CC(21,I)=M(I)*(-SPHI6)*EXPD(X(6),(M(I)-1))*EXPD(Y(6),N(I))
004230  1  +N(I)*CPHI6*EXPD(X(6),M(I))*EXPD(Y(6),(N(I)-1))

```

```

004240      20 CC(21,I)=CC(21,I)*IWN6
004250 C      DN 21 I=1,21
004260 C      DN 21 J=1,21
004270 C      21 C00(I,J)=CC(I,J)
004280 C      CALL MTJOUT(CC,21,21,'C00I')
004290 C      CALL MINV(CC,21,DET,MM,NN,441)
004300 C      CALL MTJOUT(CC,21,21,'C0-1')
004310 C      CALL HMMU(C00,CC,EINMAT,21,21,21)
004320 C      CALL MTJOUT(EINMAT,21,21,'I')
004330 C      CALL GMTRA(CC,CCT,21,21)
004340 C      RETURN
004350 C      END
004360 C      *****
004370 C      SUBROUTINE TRPL21(COSALF,SINALF)
004380 C      *****
004390 C
004400 C      COORDINATE TRANSFORMATION OF 21-PRAMETER PLATE ELEMENT STIFFNESS
004410 C      MATRIX          IIL=LAMDA*UG
004420 C
004430 C      REAL LAMDA,LAMDAT
004440 C      COMMON /ARBSP/ KN(6),EKF(21,21),EKG(21,21),EKB(21,21),CC(21,21),
004450 C      ICCT(21,21),LAMDA(21,21),LAMDAT(21,21)
004460 C
004470 C      DN 10 I=1,21
004480 C      DN 10 J=1,21
004490 C      10 LAMDA(I,J)=0.
004500 C      ALFA=ARCOS(COSALF)
004510 C      C=ALFA-ARCSIN(SINALF)
004520 C      C=ABS(C)
004530 C      IF(C.GT.0.1E-8) ALFA=-ALFA
004540 C      CCA=COSALF**2
004550 C      SSA=SINALF**2
004560 C      A2=2.*ALFA
004570 C      C2A=COS(A2)
004580 C      S2A=SIN(A2)
004590 C      C2A2=C2A*0.5
004600 C      S2A2=S2A*0.5
004610 C      DN 20 J=1,3
004620 C      II=(I-1)*7
004630 C      LAMDA(II+1,II+1)=1.
004640 C      LAMDA(II+2,II+2)=COSALF
004650 C      LAMDA(II+2,II+3)=SINALF
004660 C      LAMDA(II+3,II+2)=-SINALF
004670 C      LAMDA(II+3,II+3)=COSALF
004680 C      LAMDA(II+4,II+4)=CCA
004690 C      LAMDA(II+4,II+5)=S2A
004700 C      LAMDA(II+4,II+6)=SSA
004710 C      LAMDA(II+5,II+4)=-S2A2
004720 C      LAMDA(II+5,II+5)=C2A
004730 C      LAMDA(II+5,II+6)=S2A2
004740 C      LAMDA(II+6,II+4)=SSA
004750 C      LAMDA(II+6,II+5)=-S2A
004760 C      LAMDA(II+6,II+6)=CCA
004770 C      20 LAMDA(II+7,II+7)=1.
004780 C      CALL GMTRA(LAMDA,LAMDAT,21,21)
004790 C      RETURN
004800 C      END
004810 C      *****
004820 C      SUBROUTINE p13(SK,FRAN7,IR,IRB,KNANZ)
004830 C      *****
004840 C
004850 C      FITTING IN BOUNDARY CONDITIONS TO ELASTIC SYSTEM STIFFNESS MATRIX

```

```

004860 C BY SINGLE TENSION/COMPRESSION SPRING OR TORSION SPRING
004870 C (INTERMEDIATE NODE) - ITYP=1
004880 C SINGLE TORSION SPRING (CORNER NODE) - ITYP=2
004890 C ELASTIC TENSION/COMPRESSION BEARING - ITYP=3
004900 C ELASTIC TORSION BEARING - ITYP=4
004910 C SUPPRESSION OF DEGREE OF FREEDOM - ITYP=5
004920 C BOOLEAN NUMBERS OF DEGREES OF FREEDOM TO BE SUPPRESSED ARE
004930 C STORED AT RECORD L8
004940 C
004950 REAL LAMDA,LAMDAT
004960 INTEGER BDL,FRANZ,BDLK
004970 COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
004980 COMMON /ARBSP/ B7L(12),X(3),Y(3),CC(36),CCT(36),LAMDA(72),
004990 LAMDAT(72),M(6),N(6),B7LK(6),EK(36),ZWI(72),F(11),BCEK(144)
005000 DIMENSION SK(FRANZ,18)
005010 C
005020 REWIND L8
005030 ISTOP=0
005040 READ(L8,1) SK
005050 WRITE(6,2000) IRB
005060 DO 110 I=1,IRB
005070 READ(5,1000) ITYP
005080 IF(ITYP.GT.99998) GOTO 120
005090 BACKSPACE 5
005100 GOTO (10,20,40,70,100),ITYP
005110 10 READ(5,1001) ITYP,BDL(1),C
005120 WRITE(6,2001) ITYP,B7L(1),C
005130 SK(BDL(1),1)=SK(BDL(1),1)+C
005140 GOTO 110
005150 20 READ(5,1002) ITYP,KNNR,C,ALFA,IRAD
005160 IF(IRAD.EQ.0) ALFA=ALFA*3.1415926536/180.
005170 READ(L5,'KNNR') X(1),Y(1),BDLK
005180 BDL(1)=BDLK(2)
005190 BDL(2)=BDLK(3)
005200 SINALF=SIN(ALFA)
005210 COSALF=COS(ALFA)
005220 IF(BDL(1).EQ.0) GOTO 30
005230 SK(BDL(1),1)=SK(BDL(1),1)+C*COSALF**2
005240 30 IF(BDL(2).EQ.0) GOTO 110
005250 SK(BDL(2),1)=SK(BDL(1),1)+C*SINALF**2
005260 IF(BDL(1).EQ.0) GOTO 110
005270 JBOL=BDL(2)-BDL(1)
005280 JBOL=ABS(JBOL)+1
005290 IBOL=BDL(1)
005300 IF(BDL(2).LT.BDL(1)) IBOL=BDL(2)
005310 SK(IBOL,JBOL)=SK(IBOL,JBOL)+C*SINALF*COSALF
005320 WRITE(6,2002) ITYP,KNNR,ALFA,C
005330 GOTO 110
005340 40 READ(5,1003) ITYP,K1,X3,C
005350 READ(L5,'K1') X(1),Y(1),BDLK
005360 DO 50 K=1,6
005370 BDL(K)=BDLK(K)
005380 READ(L5,'K3') X(3),Y(3),BDLK
005390 DO 60 K=1,6
005400 60 BDL(K+6)=BDLK(K)
005410 DX=X(3)-X(1)
005420 DY=Y(3)-Y(1)
005430 DELTA=DX**2+DY**2
005440 DELTA=SQRT(DELTA)
005450 CALL RCINT(DELTA,C,6,EK,F)
005460 CALL CCTCS(DELTA,CC,CCT,M,N)
005470 COSALF=DX/DELTA

```

```

005480      SINALF=DY/DELTA
005490      CALL TRTCS(LAMDA,LAMDAT,COSALF,SINALF)
005500      CALL BCKL(6,EK,CC,CCT,ZWI)
005510      CALL BCTR(EK,6,LAMDA,LAMDAT,ZWI,BCEK,12)
005520      CALL BDLB(SK,BCEK,B7L,FRANZ,IR,12)
005530      WRITE(6,2003) ITYP,K1,K3,C
005540      GOTO 110
005550      70 READ(5,1004) ITYP,K1,K2,K3,C
005560      READ(15,K1) X(1),Y(1),BOLK
005570      DO 80 K=1,5
005580      80 BOL(K)=BOL(K+1)
005590      READ(15,K2) X(2),Y(2),BOL(6)
005600      READ(15,K3) X(3),Y(3),BOLK
005610      DO 90 K=7,11
005620      90 BOL(K)=BOL(K-5)
005630      DX=X(3)-X(1)
005640      DY=Y(3)-Y(1)
005650      DELTA=DX**2+DY**2
005660      DELTA=SQRT(DELTA)
005670      CALL RCINT(DELTA,C,5,EK,F)
005680      CALL CCTOS(DELTA,CC,CCT,M,N)
005690      COSALF=DX/DELTA
005700      SINALF=DY/DELTA
005710      CALL TRTCS(LAMDA,LAMDAT,COSALF,SINALF)
005720      CALL BCKL(5,EK,CC,CCT,ZWI)
005730      CALL BCTR(EK,5,LAMDA,LAMDAT,ZWI,BCEK,11)
005740      CALL BDLB(SK,BCEK,B7L,FRANZ,IR,11)
005750      WRITE(6,2004) ITYP,K1,K2,K3,C
005760      GOTO 110
005770      100 READ(5,1001) ITYP,B7L(1)
005780      WRITE(L8) BOL(1)
005790      WRITE(6,2001) ITYP,BOL(1)
005800      110 CONTINUE
005810      READ(5,1000) ITYP
005820      GOTO 130
005830      120 WRITE(6,2005)
005840      130 WRITE(13,1) SK
005850      BOL(1)=99999
005860      WRITE(L8) BOL(1)
005870      1000 FORMAT(I5)
005880      1001 FORMAT(2I5,E10.4)
005890      1002 FORMAT(2I5,E10.4,F5.2,I5)
005900      1003 FORMAT(3I5,E10.4)
005910      1004 FORMAT(4I5,E10.4)
005920      2000 FORMAT(23HBOUNDARY CONDITIONS (,I4,I4),,28H -----
005930      1-----/,
005940      236H TYP 1 BOL1 C/,
005950      336H 2 K1 ALFA C/,
005960      436H 3 K1 K3 C/,
005970      536H 4 K1 K2 K3 C/,
005980      612H 5 BOL1)
005990      2001 FORMAT(14 I5,I6,12X,E12.4)
006000      2002 FORMAT(14 I5,I6,F12.6,E12.4)
006010      2003 FORMAT(14 I5,I6,6X,I6,E12.4)
006020      2004 FORMAT(14 I5,3I5,E12.4)
006030      2005 FORMAT(58H *****WARNING: NUMBER OF BOUNDARY CONDITIONS LESS THAN I
006040      IRB)
006050      RETURN
006060      END
006070 C *****
006080 SUBROUTINE RCINT(DELTA,C,NT,EK,F)
006090 C *****

```

```

006100 C
006110 C   MATRIX KSTERN FOR BOUNDARY CONDITION
006120 C
006130 C   DIMENSION EK(NT,NT),F(11)
006140 C
006150 C   ISUM=2*NT-1
006160 C   XEXP=1.
006170 C   DO 10 I=1,ISUM
006180 C   XEXP=XEXP*DELTA
006190 C 10 F(I)=XEXP/I
006200 C   DO 20 I=1,NT
006210 C   DO 20 J=1,NT
006220 C 20 EK(I,J)=0.
006230 C   DO 30 I=1,NT
006240 C   DO 30 J=I,NT
006250 C   IM=I+J-1
006260 C   EK(I,J)=F(IM)*C
006270 C 30 EK(J,I)=EK(I,J)
006280 C   RETURN
006290 C   END
006300 C   *****
006310 C   SUBROUTINE ECKL(NT,EK,CC,CCT,ZWI)
006320 C   *****
006330 C
006340 C   ASSEMBLY OF LOCAL BOUNDARY CONDITION STIFFNESS MATRIX
006350 C
006360 C   DIMENSION EK(NT,NT),CC(NT,NT),CCT(NT,NT),ZWI(NT,NT)
006370 C
006380 C   CALL MAMU(CCT,EK,ZWI,NT,NT,NT)
006390 C   CALL MAMU(ZWI,CC,EK,NT,NT,NT)
006400 C   RETURN
006410 C   END
006420 C   *****
006430 C   SUBROUTINE BC TR (FK, NT, LAMDA, LAMDA T, ZWI, BCEK, MT)
006440 C   *****
006450 C
006460 C   TRANSFORMATION OF BOUNDARY CONDITION STIFFNESS MATRIX
006470 C   FROM LOCAL TO GLOBAL COORDINATE SYSTEM
006480 C
006490 C   REAL LAMDA, LAMDA T
006500 C   DIMENSION EK(NT,NT), LAMDA(NT,MT), LAMDA T(MT,NT), ZWI(MT,NT),
006510 C   LBCEK(MT,MT)
006520 C
006530 C   CALL MAMU(LAMDA T, EK, ZWI, MT, NT, NT)
006540 C   CALL MAMU(ZWI, LAMDA, BCEK, MT, NT, MT)
006550 C   RETURN
006560 C   END
006570 C   *****
006580 C   SUBROUTINE CCTCS(DELTA, CC, CCT, I, N)
006590 C   *****
006600 C
006610 C   COORDINATE MATRIX FOR BOUNDARY CONDITION
006620 C   ELASTIC TENSION/COMPRESSION BEARING
006630 C
006640 C   DIMENSION CC(6,6), CCT(6,6), M(6), N(6)
006650 C
006660 C   DO 10 I=1,6
006670 C   DO 10 J=1,6
006680 C   CC(I,J)=0.
006690 C 10 CCT(I,J)=0.
006700 C   CCT(1,1)=1.
006710 C   CCT(2,2)=1.

```

```

006720      CC(3,3)=2.
006730      CC(4,1)=1.
006740      CC(5,2)=1.
006750      CC(6,3)=2.
006760      DELTEX=DELTA
006770      CC(4,2)=DELTEX
006780      CC(5,3)=2.*DELTEX
006790      CC(6,4)=6.*DELTEX
006800      DELTEX=DELTEX*DELTA
006810      CC(4,3)=DELTEX
006820      CC(5,4)=3.*DELTEX
006830      CC(6,5)=12.*DELTEX
006840      DELTEX=DELTEX*DELTA
006850      CC(4,4)=DELTEX
006860      CC(5,5)=4.*DELTEX
006870      CC(6,6)=20.*DELTEX
006880      DELTEX=DELTEX*DELTA
006890      CC(4,5)=DELTEX
006900      CC(5,6)=5.*DELTEX
006910      CC(4,6)=DELTEX*DELTA
006920      CALL HINV(CC,6,DELTA,N,36)
006930      CALL CONTRA(CC,CCT,6,6)
006940      RETURN
006950      END
006960 C      *****
006970 C      SUBROUTINE TRTCS(LAMDA,LAMDAT,CCSALF,SINALF)
006980 C      *****
006990 C
007000 C      COORDINATE TRANSFORMATION OF BOUNDARY CONDITION MATRIX
007010 C      TENSION/COMPRESSION ELASTIC BEARING
007020 C      IJ=LAMDA*IJG
007030 C
007040 C      REAL LAMDA,LAMDAT
007050 C      DIMENSION LAMDA(6,12),LAMDAT(12,6)
007060 C
007070      DO 10 I=1,6
007080      DO 10 J=1,12
007090      LAMDA(I,J)=0.
007100 10  LAMDAT(J,I)=0.
007110      ALFA=ARCCOS(CCSALF)
007120      C=ALFA-ARSTN(SINALF)
007130      C=ABS(C)
007140      IF(C.GT.0.1E-8) ALFA=-ALFA
007150      CCA=CCSALF**2
007160      SSA=SINALF**2
007170      S2A=SIN(2.*ALFA)
007180      DO 20 I=1,2
007190      II=3*(I-1)
007200      JJ=6*(I-1)
007210      LAMDA(II+1, JJ+1)=1.
007220      LAMDA(II+2, JJ+2)=CCSALF
007230      LAMDA(II+2, JJ+3)=SINALF
007240      LAMDA(II+3, JJ+4)=CCA
007250      LAMDA(II+3, JJ+5)=S2A
007260 20  LAMDA(II+3, JJ+6)=SSA
007270      CALL CONTRA(LAMDA,LAMDAT,6,12)
007280      RETURN
007290      END
007300 C      *****
007310 C      SUBROUTINE CCTPS(DELTA,CC,CCT,N,N)
007320 C      *****
007330 C

```

```

007340 C      COORDINATE MATRIX FOR BOUNDARY CONDITION ELASTIC TORSION BEARING
007350 C
007360      DIMENSION CC(5,5),CCT(5,5),M(5),N(5)
007370 C
007380      DN 10 I=1,5
007390      DN 10 J=1,5
007400      CC(I,J)=0.
007410 10    CCT(I,J)=0.
007420      CC(1,1)=1.
007430      CC(2,2)=1.
007440      CC(3,1)=1.
007450      CC(4,1)=1.
007460      CC(5,2)=1.
007470      DELTEX=DELTA
007480      CC(3,2)=DELTEX*0.5
007490      CC(4,2)=DELTEX
007500      CC(5,3)=DELTEX*2.
007510      DELTEX=DELTEX*DELTA
007520      CC(3,3)=DELTEX*0.25
007530      CC(4,3)=DELTEX
007540      CC(5,4)=DELTEX*3.
007550      DELTEX=DELTEX*DELTA
007560      CC(3,4)=DELTEX*0.125
007570      CC(4,4)=DELTEX
007580      CC(5,5)=DELTEX*4.
007590      DELTEX=DELTEX*DELTA
007600      CC(3,5)=DELTEX*0.0625
007610      CC(4,5)=DELTEX
007620      CALL MINV(CC,5,DET,M,N,25)
007630      CALL GMTRA(CC,CCT,5,5)
007640      RETURN
007650      END
007660 C      *****
007670      SUBROUTINE TRTOS(LAMDA,LAMDAT,COSALF,SINALF)
007680 C      *****
007690 C
007700      COORDINATE TRANSFORMATION OF BOUNDARY CONDITION MATRIX
007710 C      TORSION ELASTIC BEARING
007720 C      UL=LAMDA*UG
007730 C
007740      REAL LAMDA,LAMDAT
007750      DIMENSION LAMDA(5,11),LAMDAT(11,5)
007760 C
007770      DN 10 I=1,5
007780      DN 10 J=1,11
007790      LAMDA(I,J)=0.
007800 10    LAMDAT(J,I)=0.
007810      ALFA=ARCCOS(COSALF)
007820      C=ALFA-ARSIN(SINALF)
007830      IF(C.GT.0.1E-8) ALFA=-ALFA
007840      SSA=SINALF**2
007850      A2=2.*ALFA
007860      C2A=COS(A2)
007870      S2A2=SIN(A2)*0.5
007880      DN 20 I=1,2
007890      II=3*(I-1)
007900      JJ=6*(I-1)
007910      LAMDA(II+1,JJ+1)=-SINALF
007920      LAMDA(II+1,JJ+2)=COSALF
007930      LAMDA(II+2,JJ+3)=SSA
007940      LAMDA(II+2,JJ+4)=C2A
007950 20    LAMDA(II+2,JJ+5)=S2A2

```

```

007960      LAMDA(3,6)=1.
007970      CALL GHTRA(LAMDA,LAMDAT,5,11)
007980      RETURN
007990      END
008000 C *****
008010 C SUBROUTINE P14(P,FRANZ)
008020 C *****
008030 C
008040 C ASSEMBLY OF LOAD VECTOR FOR PLATE BENDING PROGRAMM
008050 C
008060 C INTEGER FRANZ,B7L
008070 C REAL LAMDAT
008080 C DIMENSION P(FRANZ)
008090 C COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
008100 C COMMON /ARBS/ KN(2),X(2),Y(2),BOL(12),LAMDAT(12,6),PK(6),V(6,2),
008110 C 1 Q(2),PG(2)
008120 C
008130 C IP=0
008140 C READ(5,1001) ITYP
008150 C IF(ITYP.GT.99998) GOTO 500
008160 C BACKSPACE 5
008170 C DO 10 I=1,FRANZ
008180 C 10 P(I)=0.
008190 C WRITE(6,2001)
008200 C 20 READ(5,1001) ITYP
008210 C IF(ITYP.GT.99998) GOTO 400
008220 C BACKSPACE 5
008230 C IP=IP+1
008240 C GOTO(30,40),ITYP
008250 C 30 READ(5,1001) ITYP,PX(1),BOL(1)
008260 C P(BOL(1))=PK(1)
008270 C WRITE(6,2002) ITYP,PK(1),BOL(1)
008280 C GOTO 20
008290 C 40 READ(5,1002) ITYP,Q(1),Q(2),KN(1),KN(2)
008300 C WRITE(6,2003) ITYP,Q,KN
008310 C READ(L5,KN(1)) X(1),Y(1),(BOL(I),I=1,6)
008320 C READ(L5,KN(2)) X(2),Y(2),(BOL(I),I=7,12)
008330 C DX=X(2)-X(1)
008340 C DY=Y(2)-Y(1)
008350 C DELTA=DX**2+DY**2
008360 C DELTA=SQRT(DELTA)
008370 C COSALF=DX/DELTA
008380 C SINLAF=DY/DELTA
008390 C ALFA=ARCOS(COSALF)
008400 C C=ALFA-ARSIN(SINLAF)
008410 C C=ABS(C)
008420 C IF(C.GT.0.1E-8) ALFA=-ALFA
008430 C CCA=COSALF**2
008440 C SSA=SINLAF**2
008450 C S2A=SIN(2*ALFA)
008460 C DO 50 I=1,12
008470 C DO 50 J=1,6
008480 C 50 LAMDAT(I,J)=0.
008490 C DO 60 I=1,2
008500 C J3=(I-1)*3
008510 C I6=J3*2
008520 C LAMDAT(I6+1,J3+1)=1.
008530 C LAMDAT(I6+2,J3+2)=COSALF
008540 C LAMDAT(I6+3,J3+2)=SINLAF
008550 C LAMDAT(I6+4,J3+3)=CCA
008560 C LAMDAT(I6+5,J3+3)=S2A
008570 C 60 LAMDAT(I6+6,J3+3)=SSA

```

```

008580      C=DELTA/840.
008590      V(1,1)=300.*C
008600      V(1,2)=120.*C
008610      V(4,1)=V(1,2)
008620      V(4,2)=V(1,1)
008630      C=C*DELTA
008640      V(2,1)=52.*C
008650      V(2,2)=32.*C
008660      V(5,1)=-V(2,2)
008670      V(5,2)=-V(2,1)
008680      C=C*DELTA
008690      V(3,1)=4.*C
008700      V(3,2)=3.*C
008710      V(6,1)=V(3,2)
008720      V(6,2)=V(3,1)
008730      CALL MAMU(V,Q,PK,6,2,1)
008740      CALL MAMU(LANDAT,PK,PG,12,6,1)
008750      DT 70 I=1,12
008760      70 P(BOL(I))=PG(I)
008770      GOTO 20
008780      400 WRITE(6,2004) IP
008790      CALL POUT(P,FRANZ)
008800      500 RETURN
008810      1001 FORMAT(I5,F10.0,I5)
008820      1002 FORMAT(I5,2F10.0,2I5)
008830      2001 FORMAT(10H LOAD DATA/10H -----/35H TYP          P
008840      1      BOL/40H TYP          01          Q2      K1      K2)
008850      2002 FORMAT(1H ,I3,F13.5,I3X,I5)
008860      2003 FORMAT(1H ,I3,2E13.5,2I5)
008870      2004 FORMAT(25H LOAD VECTOR COMPOSED OF ,I4,8H LOAD(S)/1H ,37(1H-)/1H ,
008880      13(20H BOL          P(BOL) ))
008890      END
008900      C      *****
008910      SUBROUTINE P15(SK,P,FRANZ,IB)
008920      C      *****
008930      C
008940      C      FITTING IN SUPPRESSION OF DEGREES OF FREEDOM TO SYSTEM STIFFNESS
008950      C      MATRICES AND LOAD VECTOR
008960      C
008970      INTEGER FRANZ,BOL
008980      DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ)
008990      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
009000      C
009010      DT 30 IREC=1,2
009020      REWIND L8
009030      READ(L8,IREC) SK
009040      10 READ(L8) BOL
009050      IF(BOL.GT.99998) GOTO 20
009060      CALL FRUNT(P,SK,BOL,FRANZ,IB)
009070      GOTO 10
009080      20 WRITE(L8,IREC) SK
009090      30 CONTINUE
009100      RETURN
009110      END
009120      C      *****
009130      SUBROUTINE P16(SK,FRANZ,IB)
009140      C      *****
009150      C
009160      C      ADDITION OF ELASTIC AND GEOMETRIC SYSTEM STIFFNESS MATRICES
009170      C
009180      INTEGER FRANZ
009190      COMMON /ARASP/ C(2000)

```

```

009200      DIMENSION SK(FRANZ,IB)
009210      C
009220      CALL SKADD(SK,C,FRANZ,IB,1)
009230      RETURN
009240      END
009250      C
009260      SUBROUTINE SKADD(SK,C,FRANZ,IB,I1)
009270      C
009280      C
009290      INTEGER FRANZ
009300      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7
009310      DIMENSION SK(FRANZ,IB),C(IB)
009320      C
009330      C STORAGE OF ELASTIC AND GEOMETRIC SYSTEM STIFFNESS MATRICES
009340      C LINEWISE (LINE I) TO FILE L7, RECORD NO. I (ELASTIC) AND
009350      C I+FRANZ (GEOMETRIC)
009360      C
009370      DO 10 I=1,2
009380      IRFC=I1-1+I
009390      READ(L3,IREC) SK
009400      IRFC=(I-1)*FRANZ
009410      DO 10 II=1,FRANZ
009420      III=II+IRFC
009430      WRITE(L7,III) (SK(II,II),II=1,IB)
009440      10 CONTINUE
009450      C
009460      C SET SK TO ZERO
009470      C
009480      DO 20 I=1,FRANZ
009490      DO 20 J=1,IB
009500      20 SK(I,J)=0.0
009510      C
009520      C ADDITION OF ELASTIC AND GEOMETRIC SYSTEM STIFFNESS MATRICES
009530      C OUTPUT OF SUM TO FILE L3, RECORD NO. 3
009540      C
009550      DO 30 IE=1,FRANZ
009560      IG=IE+FRANZ
009570      READ(L7,IE) (SK(IE,J),J=1,IB)
009580      READ(L7,IG) (C(J),J=1,IB)
009590      DO 30 J=1,IB
009600      SK(IE,J)=SK(IE,J)+C(J)
009610      30 CONTINUE
009620      WRITE(L3,3) SK
009630      RETURN
009640      END
009650      C
009660      C SUBROUTINE P19(P,FRANZ,ELANZ)
009670      C
009680      C
009690      REAL LAMDA
009700      INTEGER FRANZ,ELANZ,BOL
009710      DIMENSION P(FRANZ),KN(6),XY(10),WXY(3),ALPHA(21),CC(21,21),
009720      BETA(3,10),SIGS(3,3)
009730      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7,L8
009740      COMMON /ELAST/ E(3,3),BETT,FAKTOR
009750      COMMON /KOEFF/ M(21),N(21)
009760      COMMON /ARBSP/ LAMDA(21,21),BOL(21),UKG(21),UKL(21),SIG(3)
009770      EQUIVALENCE (UKG,ALPHA,XY),(LAMDA,CC,BETA,SIGS),(BOL,KN),(UKL,WXY)
009780      C
009790      WRITE(6,2000)
009800      DO 50 IE=1,ELANZ
009810      I5=5*IE

```

```
009820      CALL RUFFI(L4,I5,LAMDA(1,1),LAMDA(21,21))
009830      READ(L2,IE) BNL
009840      DT 30 I=1,21
009850      IF(BNL(I)) 10,10,20
009860 10  UKG(I)=0.
009870      GOTO 30
009880 20  UKG(I)=P(BNL(I))
009890 30  CONTINUE
009900      CALL MAMU(LAMDA,UKG,JKL,21,21,1)
009910      I4=I5-1
009920      CALL RUFFI(L4,I4,CC(1,1),CC(21,21))
009930      CALL MAMU(CC,UKI,ALPHA,21,21,1)
009940      BETA(1,1)=2*ALPHA(4)
009950      BETA(1,2)=6*ALPHA(7)
009960      BETA(1,3)=2*ALPHA(8)
009970      BETA(1,4)=12*ALPHA(11)
009980      BETA(1,5)=6*ALPHA(12)
009990      BETA(1,6)=2*ALPHA(13)
010000      BETA(1,7)=20*ALPHA(16)
010010      BETA(1,8)=12*ALPHA(17)
010020      BETA(1,9)=6*ALPHA(18)
010030      BETA(1,10)=2*ALPHA(19)
010040      BETA(2,1)=2*ALPHA(6)
010050      BETA(2,2)=2*ALPHA(9)
010060      BETA(2,3)=6*ALPHA(10)
010070      BETA(2,4)=2*ALPHA(13)
010080      BETA(2,5)=6*ALPHA(14)
010090      BETA(2,6)=12*ALPHA(15)
010100      BETA(2,7)=2*ALPHA(18)
010110      BETA(2,8)=6*ALPHA(19)
010120      BETA(2,9)=12*ALPHA(20)
010130      BETA(2,10)=20*ALPHA(21)
010140      BETA(3,1)=2*ALPHA(5)
010150      BETA(3,2)=4*ALPHA(8)
010160      BETA(3,3)=4*ALPHA(9)
010170      BETA(3,4)=6*ALPHA(12)
010180      BETA(3,5)=8*ALPHA(13)
010190      BETA(3,6)=6*ALPHA(14)
010200      BETA(3,7)=8*ALPHA(17)
010210      BETA(3,8)=12*ALPHA(18)
010220      BETA(3,9)=12*ALPHA(19)
010230      BETA(3,10)=8*ALPHA(20)
010240      READ(L1,IF) T,A,B,C,COSALF,COSBET,KN
010250      XC=(A-B)/3
010260      YC=C/3
010270      DT 40 I=1,10
010280 40  XY(I)=EXP7(XC,M(I))*EXP8(YC,N(I))
010290      CALL MAMU(BETA,XY,WXY,3,10,1)
010300      CALL MAMU(E,WXY,SIG,3,3,1)
010310      READ(L6,IE) SIGS
010320      DT 45 I=1,3
010330      DT 45 J=1,3
010340 45  SIGS(I,J)=SIGS(I,J)*FAKTOR
010350      SXN= SIGS(1,1)+SIGS(2,1)*XC+SIGS(3,1)*YC
010360      SYN= SIGS(1,2)+SIGS(2,2)*XC+SIGS(3,2)*YC
010370      TXYN=SIGS(1,3)+SIGS(2,3)*XC+SIGS(3,3)*YC
010380      SX7= SXN +.5*T*SIG(1)
010390      SYN7= SYN +.5*T*SIG(2)
010400      TXYN7=TXYN+.5*T*SIG(3)
010410      SX11= SXN -.5*T*SIG(1)
010420      SY11= SYN -.5*T*SIG(2)
010430      TXYN11=TXYN-.5*T*SIG(3)
```

```

010440      SVN= SXI**2+SYN**2-SXN*SYN+3*TXYD**2
010450      SVN= SXI**2+SYN**2-SXN*SYN+3*TXYN**2
010460      SVU= SXI**2+SYU**2-SXU*SYU+3*TXYU**2
010470      SVN= SQRT(SVN)
010480      SVN= SQRT(SVN)
010490      SVU= SQRT(SVU)
010500      READ(15,KN(1)) X1,Y1
010510      READ(15,KN(3)) X3,Y3
010520      READ(15,KN(5)) X5,Y5
010530      XCG=(X1+X3+X5)/3
010540      YCG=(Y1+Y3+Y5)/3
010550      CALL HPTSPA(SXN,SYN,TXYN,S1D,S2D,PHID)
010560      CALL HPTSPA(SXN,SYN,TXYN,S1N,S2N,PHIN)
010570      CALL HPTSPA(SXU,SYU,TXYU,S1U,S2U,PHIU)
010580      WRITE(6,2001) IE,XC,YC,XCG,YCG,SXD,SXN,SXU,SYD,SYN,SYU,TXYD,TXYN,
010590      TXYU,SVN,SVN,SVU,S1D,S1N,S1U,S2D,S2N,S2U,PHID,PHIN,PHIU
010600      50 CONTINUE
010610      2000 FORMAT(47H ELEMENT STRESS STATE (LOCAL COORDINATE SYSTEM)/
010620      11H ,46(1H-))
010630      2001 FORMAT(13H ELEMENT NO. 15/
010640      147H STRESS STATE AT CENTRAL POINT OF ELEMENT IN PA/
010650      227H COORDINATES (X,Y): LOCAL (,F7.3,1H, ,F7.3,11H), GLOBAL (,F7.3,
010660      31H, ,F7.3,1H)/
010670      41H ,18X,9HTOP LAYER,8X,13HNEUTRAL LAYER,9X,12HBOTTOM LAYER/
010680      57H SIGMAX,3E21.5/7H SIGMAY,3E21.5/7H TAIXY ,3E21.5/
010690      67H SIGHAY,3E21.5/7H S1 ,3E21.5/7H S2 ,3E21.5/
010700      77H PHIGRD,3(F17.5,4X)/1H ,69(1H-))
010710      RETURN
010720      END
010730      C *****
010740      SUBROUTINE P18(SK,P,FRANZ,IB)
010750      C *****
010760      C
010770      C SOLUTION OF EQUATIONS SYSTEM
010780      C OUTPUT OF DISPLACEMENT VECTOR
010790      C OUTPUT OF BEARING FORCES
010800      C OUTPUT OF ELASTIC POTENTIAL
010810      C
010820      INTEGER FRANZ
010830      DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ)
010840      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3
010850      COMMON /ARBSP/ B(1)
010860      C
010870      WRITE(6,2000)
010880      READ(L3,3) SK
010890      CALL SSOL(SK,P,B,FRANZ,IB)
010900      CALL POUT(P,FRANZ)
010910      CALL SKADD(SK,B,FRANZ,IB,4)
010920      IF2=2*FRANZ
010930      CALL P8(SK,P,FRANZ,IB,B,IF2,3)
010940      2000 FORMAT(20HDISPLACEMENT VECTOR/20H -----/1H ,3(20H B
010950      17L P(ENL) ))
010960      RETURN
010970      END
010980      C *****
010990      SUBROUTINE MINV(A,N,D,L,M,NN)
011000      C *****
011010      DIMENSION A(NN),L(N),M(N)
011020      C SUCHE NACH GROSSTEM ELEMENT
011030      D=1.0
011040      IK=-1
011050      DO 80 K=1,N

```

```
011060      NK=NK+N
011070      L(K)=K
011080      M(K)=K
011090      KK=NK+K
011100      BIGA=A(KK)
011110      DN 20 I=K,N
011120      I7=N*(I-1)
011130      DN 20 J=K,N
011140      IJ=IZ+I
011150      10 IF(ABS(BIGA)-ABS(A(IJ))) 15,20,20
011160      15 BIGA=A(IJ)
011170      L(K)=I
011180      M(K)=J
011190      20 CONTINUE
011200  C      VERTAUSCHEN DER ZEILEN
011210      J=I(K)
011220      IF(J-K) 35,35,25
011230      25 KI=K-N
011240      DN 30 J=1,N
011250      KJ=KI+N
011260      HOLD=-A(KI)
011270      JI=KI-K+J
011280      A(KI)=A(JI)
011290      30 A(JI)=HOLD
011300  C      VERTAUSCHEN DER SPALTEN
011310      35 I=M(K)
011320      IF(I-K) 45,45,38
011330      38 JP=N*(I-1)
011340      DN 40 J=1,N
011350      JK=NK+J
011360      JI=JP+J
011370      HOLD=-A(JK)
011380      A(JK)=A(JI)
011390      40 A(JI)=HOLD
011400  C      DIVISION DER SPALTE DURCH DAS NEGATIVE PIVOT-ELEMENT (DER WERT
011410  C      DES PIVOT-ELEMENTES STEHT IN BIGA)
011420      45 IF(BIGA) 49,46,48
011430      46 D=1.0
011440      RETURN
011450      48 DN 55 I=1,N
011460      IF(I-K) 50,55,50
011470      50 IK=NK+I
011480      A(IK)=A(IK)/(-BIGA)
011490      55 CONTINUE
011500  C      REDUKTION DER MATRIX
011510      DN 65 I=1,N
011520      IK=NK+I
011530      IJ=I-N
011540      DN 65 J=1,N
011550      IJ=IJ+M
011560      IF(I-K) 60,65,60
011570      60 IF(J-K) 62,65,62
011580      62 KJ=IJ-I+K
011590      A(IJ)=A(IK)*A(KJ) + A(IJ)
011600      65 CONTINUE
011610  C      DIVISION DER ZEILE DURCH DAS PIVOT-ELEMENT
011620      KJ=K-N
011630      DN 75 J=1,N
011640      KJ=KJ+M
011650      IF(J-K) 70,75,70
011660      70 A(KJ)=A(KJ)/BIGA
011670      75 CONTINUE
```

```

011680 C      PRODUKT DER PIVOT-ELEMENTE
011690      D=D*B/IGA
011700 C      ERSATZEN DES PIVOT-ELEMENTES DURCH SEINEN KEHRWERT
011710      A(KK)=1.0/B/IGA
011720      80 CONTINUE
011730 C      ABSCHLIESSENDES VERTAUSCHEN VON ZEILEN UND SPALTEN
011740      K=N
011750      100 K=K-1
011760      IF(K) 150,150,105
011770      105 I=L(K)
011780      IF(I-K) 120,120,108
011790      108 JO=N*(K-1)
011800      JR=N*(I-1)
011810      DO 110 J=1,N
011820      JK=JQ+J
011830      HOLD=A(JK)
011840      JT=JR+I
011850      A(JK)=-A(JI)
011860      110 A(JI)=HOLD
011870      120 J=M(K)
011880      IF(J-K) 100,100,125
011890      125 KI=K-N
011900      DO 130 I=1,N
011910      KI=KI+N
011920      HOLD=A(KI)
011930      JT=KI-K+J
011940      A(KI)=-A(JI)
011950      130 A(JI)=HOLD
011960      GO TO 100
011970      150 RETURN
011980      END
011990 C      *****
012000 C      SUBROUTINE PR(SK,P,FRANZ,IB,F,IF2,IREC)
012010 C      *****
012020 C
012030 C      COMPUTATION OF BEARING FORCES AND OF ELASTIC POTENTIAL OF SYSTEM
012040 C
012050 C      INTEGER FRANZ
012060 C      COMMON /DATNR/ L1,L2,L3
012070 C      DIMENSION SK(FRANZ,IB),P(FRANZ),F(IF2)
012080 C
012090 C      READ(L3,IREC) SK
012100 C      I1=FRANZ+1
012110 C      I2=FRANZ*IB
012120 C      CALL NAMUBV(SK,FRANZ,IB,P,F(I1),F(I2))
012130 C      WRITE(6,2001)
012140 C      CALL POUT(F,FRANZ)
012150 C      PEL=0.
012160 C      DO 10 I=1,FRANZ
012170 C      10 PEL=PEL+P(I)*F(I)
012180 C      PEL=-0.5*PEL
012190 C      WRITE(6,2002) PEL
012200 C      2001 FORMAT(15H BEARING FORCES/15H -----/1H ,3(20H BUL
012210 C      IF(BUL) )
012220 C      2002 FORMAT(1H ,60(14-)/27H ELASTIC POTENTIAL .. PEL= E12.5)
012230 C      RETURN
012240 C      END
012250 C      *****
012260 C      SUBROUTINE NAMUBV(A,N,M,R,C,D,NM)
012270 C      *****
012280 C      MULTIPLIKATION EINER BANDELFERHIGEN SYMMETRISCHEN QUADRATISCHEN
012290 C      MATRIX A MIT EINEM VEKTOR B UNTER ERHALTUNG VON MATRIX UND VEKTOR.

```

```

012300 C      A IST ALS HALBES BAND VERFEINBART, BANDLAENGE N, HALBE BANDBREITE
012310 C      EINSCHLIESSLICH HAUPTDIAGONALELEMENT M, FELDLAENGE MM=N*M
012320 C      B HAT DIE LAENGE N
012330 C      C IST DER ERGEBNISVEKTOR MIT DER LAENGE N
012340 C      D IST EIN HILFSVEKTOR MIT DER LAENGE N
012350 C
012360      DIMENSION A(NM),B(N),C(N),D(N)
012370 C
012380      DO 50 I=1,M
012390      R=0.
012400      DO 10 J=1,N
012410 10  D(I)=0.
012420      III=M-I
012430      IF(M.GT.I) III=I-1
012440      DO 20 J=1,III
012450      IJ=I+J*(N-1)
012460      II=I-J
012470 20  D(II)=A(IJ)
012480      III=M
012490      IN=I+M-1
012500      IF(IN.GT.N) III=M-IN+N
012510      DO 30 J=1,III
012520      IJ=J-1
012530      II=I+JJ
012540      IJ=I+M*JJ
012550 30  D(II)=A(IJ)
012560      DO 40 J=1,N
012570 40  R=R+D(J)*B(J)
012580 50  C(I)=R
012590      RETURN
012600      END
012610 C      *****
012620      SUBROUTINE P2(ELANZ,FRANZ,IB,C,IBOL)
012630 C      *****
012640 C
012650 C      CONTROL OF NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM
012660 C      CONTROL OF BANDWIDTH OF SYSTEM STIFFNESS MATRIX
012670 C
012680      INTEGER ELANZ,FRANZ,BOL
012690      COMMON /DATNR/ L1,L2
012700      COMMON /ARBSP/ ZERO(57),BOL(21)
012710      DIMENSION C(FRANZ)
012720 C
012730      ISTOP=0
012740      DO 10 I=1,FRANZ
012750 10  C(I)=0.
012760      DO 30 I=1,ELANZ
012770      MAX=0
012780      MIN=FRANZ
012790      READ(L2,I)(BOL(J),J=1,IBOL)
012800      DO 20 J=1,IBOL
012810      IF(BOL(J).EQ.0) GOTD 20
012820      C(BOL(J))=C(BOL(J))+1
012830      IF(BOL(J).GT.MAX) MAX=BOL(J)
012840      IF(BOL(J).LT.MIN) MIN=BOL(J)
012850 20  CONTINUE
012860      MAX=MAX-MIN+1
012870      IF(18.GE.MAX) GOTD 30
012880      WRITE(6,2001) I,MAX,IB
012890      ISTOP=1
012900 30  CONTINUE
012910      DO 40 I=1,FRANZ

```

```

012920      IF(C(I).GT.0.) GOTD 40
012930      WRITE(6,2002) I
012940      ISTOP=1
012950      40 C(I)=0.
012960      IF(ISTOP.EQ.1) STOP
012970      2001 FORMAT(18H *****ELEMENT NO. ,I4,10H BANDWIDTH ,I4,18H IS WIDER THA
012980      1H IB=,I4)
012990      2002 FORMAT(28H *****DEGREE OF FREEDOM NO. ,I4,7H MISSES)
013000      RETURN
013010      END
013020      C *****
013030      SUBROUTINE B0DL(B(SK,EK,B0L,FRANZ,IB,N)
013040      C *****
013050      C
013060      INTEGER FRANZ,B0L(N)
013070      DIMENSION SK(FRANZ,IB),EK(N,N)
013080      C
013090      DO 2 I=1,N
013100      J1=B0L(I)
013110      IF(J1.EQ.0) GOTD 2
013120      DO 1 K=1,N
013130      J2=B0L(K)
013140      IF(J2.EQ.0) GOTD 1
013150      IF(J1.GT.J2) GOTD 1
013160      J2=J2-J1+1
013170      SK(J1,J2)=SK(J1,J2)+EK(I,K)
013180      1 CONTINUE
013190      2 CONTINUE
013200      RETURN
013210      END
013220      C *****
013230      SUBROUTINE FRUIT(P,SK,IFU,FRANZ,IB)
013240      C *****
013250      C
013260      C INTERDRUECKEN EINES FREIHEITSGRADES
013270      C
013280      INTEGER FRANZ
013290      DIMENSION P(FRANZ),SK(FRANZ,IB)
013300      C
013310      SK(IFU,1)=1.0
013320      P(IFU)=0.0
013330      J1=IFU
013340      DO 10 J=2,IB
013350      J1=J1-1
013360      SK(IFU,J)=0.0
013370      IF(J1.GT.0) SK(J1,J)=0.0
013380      10 CONTINUE
013390      RETURN
013400      END
013410      C *****
013420      SUBROUTINE POUT(P,FRANZ)
013430      C *****
013440      C
013450      C OUTPUT OF LOAD/DEFLECTION VECTOR
013460      C
013470      INTEGER FRANZ
013480      DIMENSION P(FRANZ)
013490      C
013500      I7=FRANZ/3
013510      J3=IZ*3
013520      IF(FRANZ.GT.J3) IZ=IZ+1
013530      DO 10 I=1,IZ

```

```

013540      I2=I*3
013550      I1=I2-2
013560      IF(J2.GT.FRANZ) I2=FRANZ
013570      10 WRITE(6,2000) ((I1,P(I1)),I1=I1,I2)
013580      2000 FORMAT(1H 3(I4,2X,E12.5,2X))
013590      RETURN
013600      END
013610 C      *****
013620      SUBROUTINE MAMU(A,B,C,N,M,L)
013630 C      *****
013640 C
013650 C      MATRIZENMULTIPLIKATION
013660 C
013670      DIMENSION A(N,N),B(M,L),C(N,L)
013680      DO 5 I=1,N
013690      DO 4 J=1,L
013700      R=0.0
013710      DO 3 K=1,M
013720      R=R+A(I,K)*B(K,J)
013730      3 CONTINUE
013740      C(I,J)=R
013750      4 CONTINUE
013760      5 CONTINUE
013770      RETURN
013780      END
013790 C      *****
013800      FUNCTION EXPD(X,M)
013810 C      *****
013820 C
013830 C      COMPUTATION OF X**M WITH X**M=0. IF M.LT.0
013840 C
013850      IF(M) 10,20,30
013860      10 EXPD=0.
013870      RETURN
013880      20 EXPD=1.
013890      RETURN
013900      30 EXPD=X**M
013910      RETURN
013920      END
013930 C      *****
013940      SUBROUTINE HIJOUT(A,IMAX,JMAX,NAME)
013950 C      *****
013960 C
013970      INTEGER*2 NAME
013980      DIMENSION A(IMAX,JMAX),NAME(3)
013990 C
014000      J1=-6
014010      J2=0
014020      10 J1=J1+7
014030      J2=J2+7
014040      IF(J2.GT.JMAX) J2=JMAX
014050      WRITE(6,2000) NAME,(J,J=J1,J2)
014060      DO 20 I=1,IMAX
014070      20 WRITE(6,2001) I,(A(I,J),J=J1,J2)
014080      IF(J2.LT.JMAX) GOTD 10
014090      2000 FORMAT(1H0,3A2,7(16/1H ,118(1H-)))
014100      2001 FORMAT(1H ,16,7E16.8)
014110      RETURN
014120      END
014130 C      *****
014140      SUBROUTINE HPTS PA(SX,SY,TSY,S1,S2,PHICRO)
014150 C      *****

```

0121*SR6260 HAEUSI FR.

HHI HAMBURG

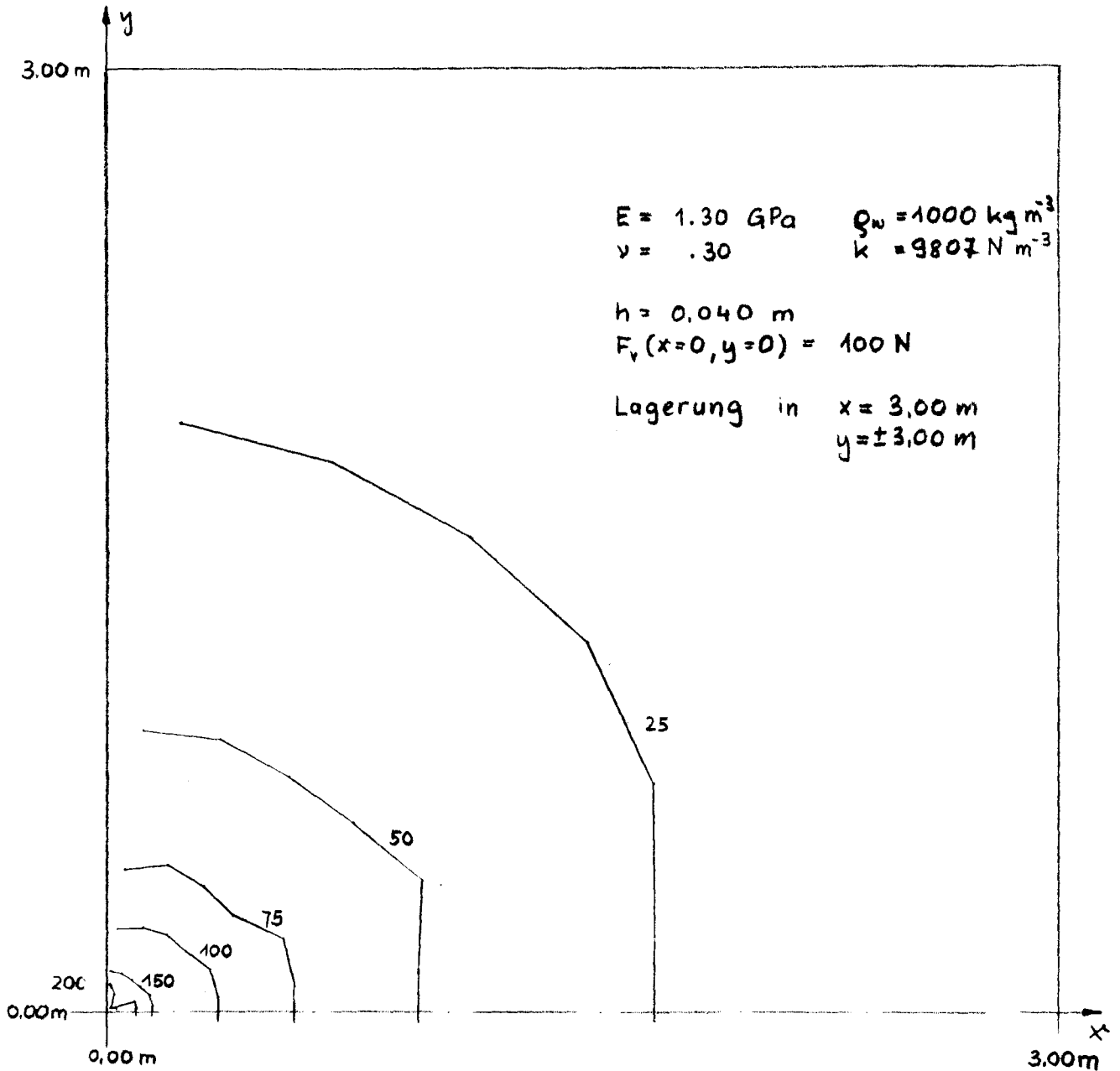
26.01.78 182608 SEITE

24

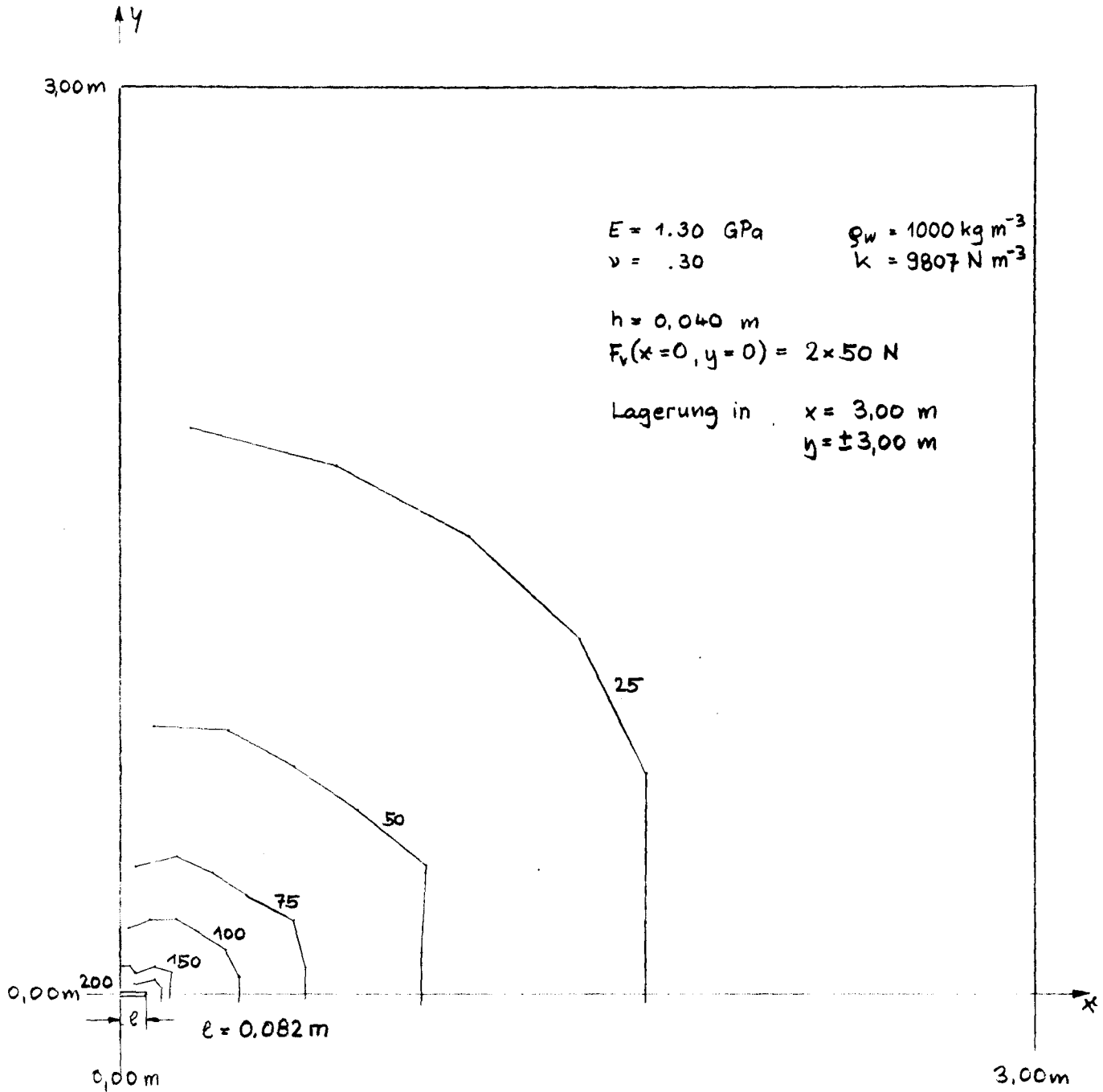
```
014160 C
014170 F1=.5*(SX+SY)
014180 F2=SX-SY
014190 IF(ABS(F2).GT.ABS(1.E-10*SX)) GOTO 5
014200 S1=SX
014210 S2=SY
014220 PHI GRD=0.
014230 RETURN
014240 5 F3=.25*F2**2+TX**2
014250 F3=SQRT(F3)
014260 S1=F1+F3
014270 S2=F1-F3
014280 IF(ABS(S1).GE.ABS(S2)) GOTO 10
014290 SAVE=S1
014300 S1=S2
014310 S2=SAVE
014320 10 F4=2*TX/F2
014330 PHI=.5*ATAN(F4)
014340 PHI GRD=180.*PHI/3.1415926536
014350 RETURN
014360 END
```

ENDE TKOPIERE (7.01) 3.22

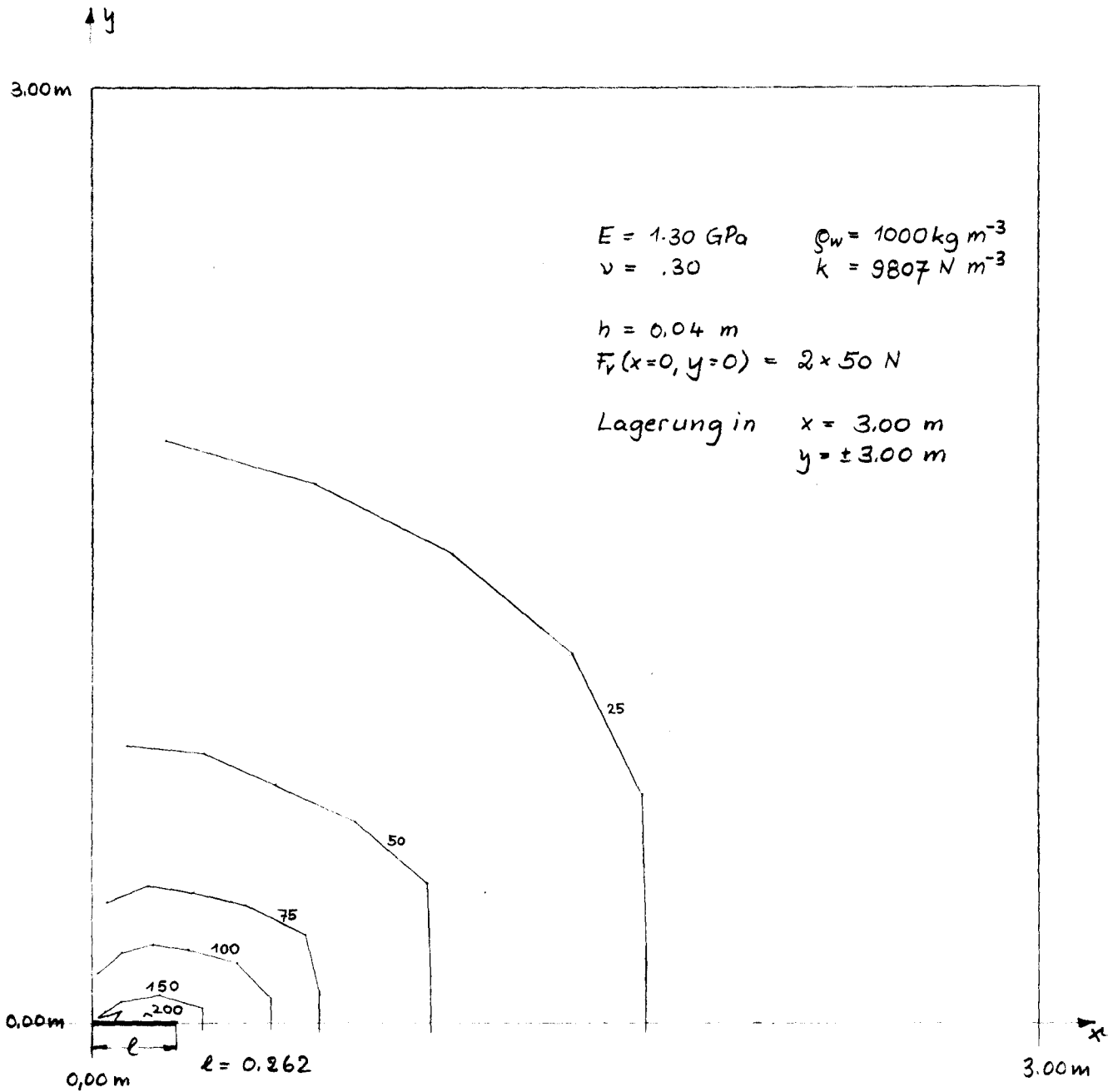
A N H A N G B



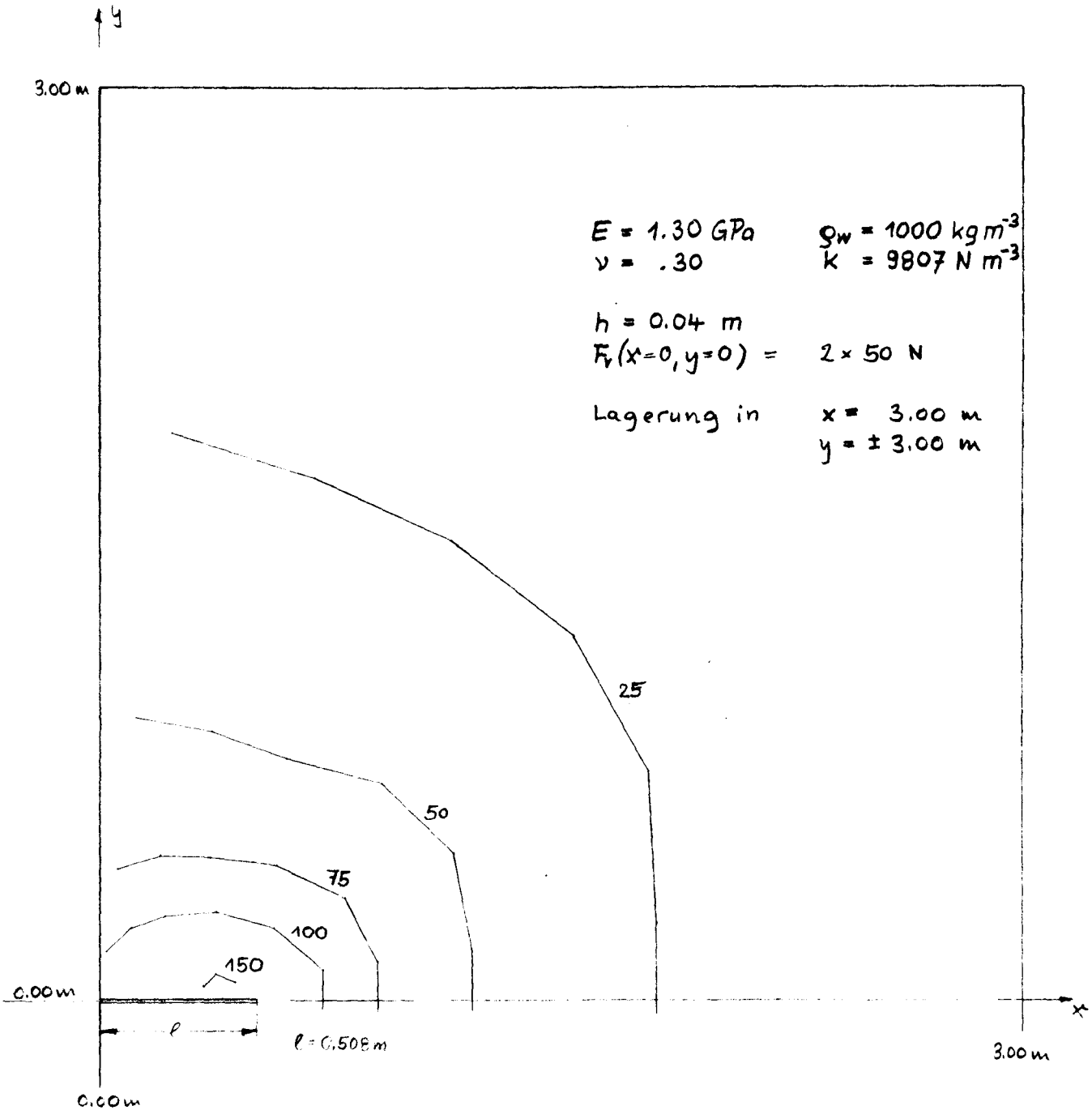
Linien gleicher Vergleichsspannung σ_v [kPa] in der oberen Randfaser für frei drehbar gelagerte Platte auf elastischer Bettung, ohne Riß



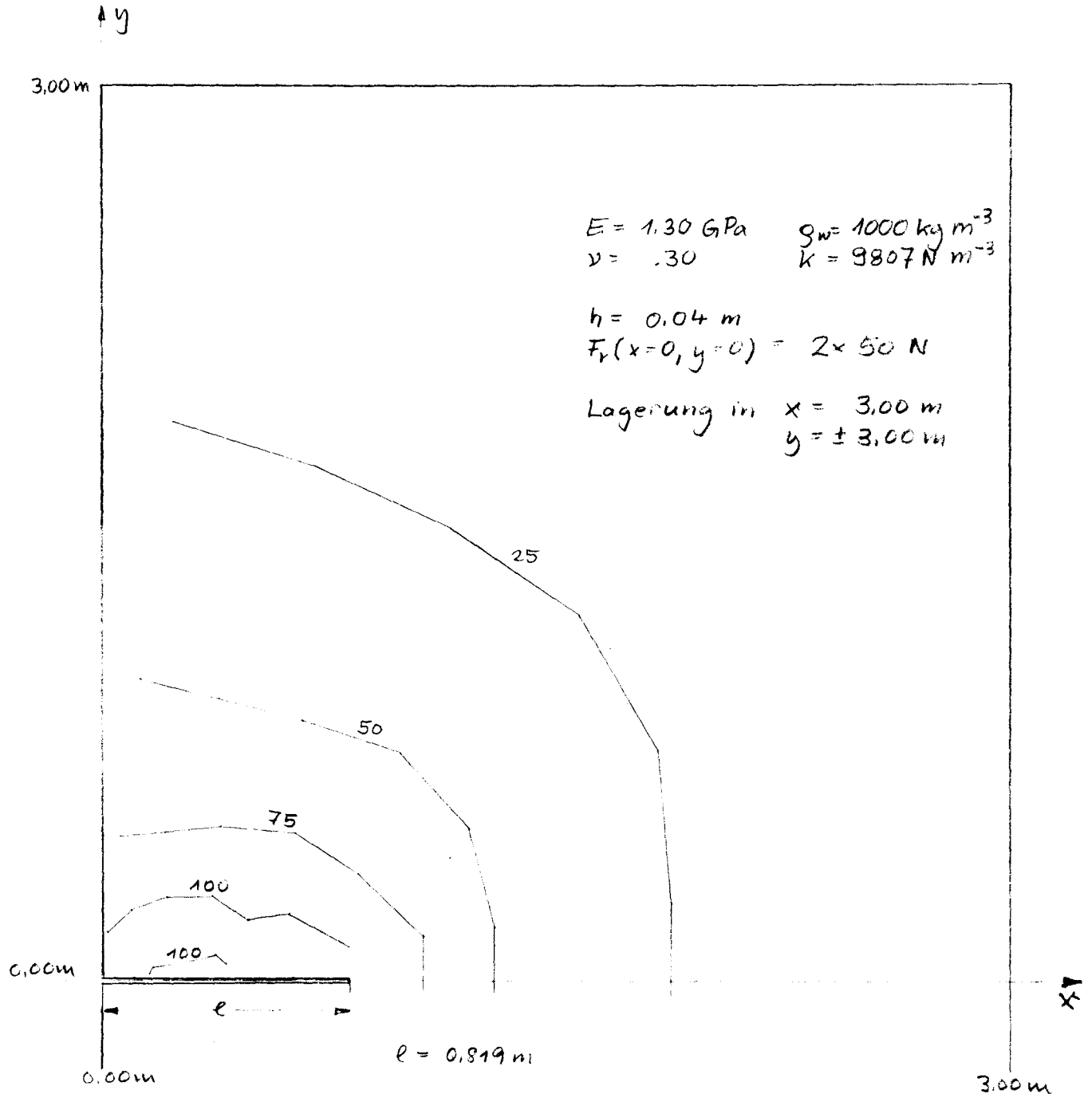
Linien gleicher Vergleichsspannung σ_v [kPa] in der oberen Randfaser für frei drehbar gelagerte Platte auf elastischer Bettung, mit Riß auf $y = 0$ vom Kraftangriff bis $x = 0.082 \text{ m}$



Linien gleicher Vergleichsspannung σ_v [kPa] in der oberen Randfaser für frei drehbar gelagerte Platte auf elastischer Bettung, mit Riß auf $y = 0$ vom Kraftangriff bis $x = 0.262 \text{ m}$



Linien gleicher Vergleichsspannung σ_v [kPa] in der oberen Randfaser für frei drehbar gelagerte Platte auf elastischer Bettung, mit Riß auf $y=0$ vom Kraftangriff bis $x = 0.508 \text{ m}$



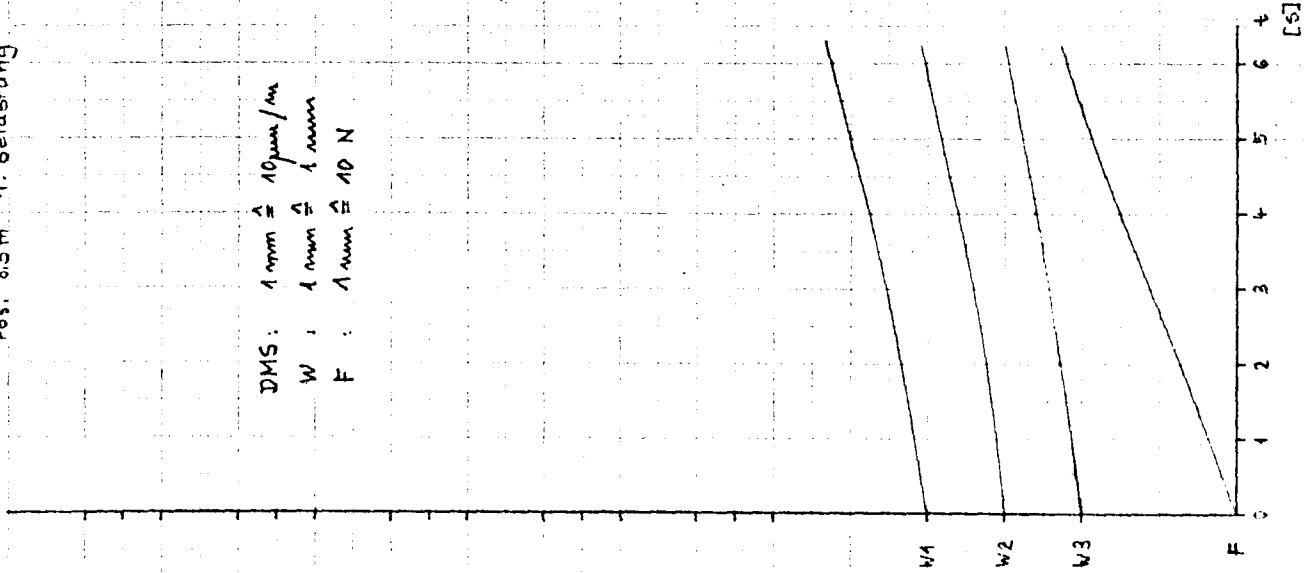
Linien gleicher Vergleichsspannungen σ_v [kPa] in der oberen Randfaser für frei drehbar gelagerte Platte auf elastischer Bettung, mit Riß auf $y = 0$ vom Kraftangriff bis $x = 0.819 \text{ m}$

ANHANG C

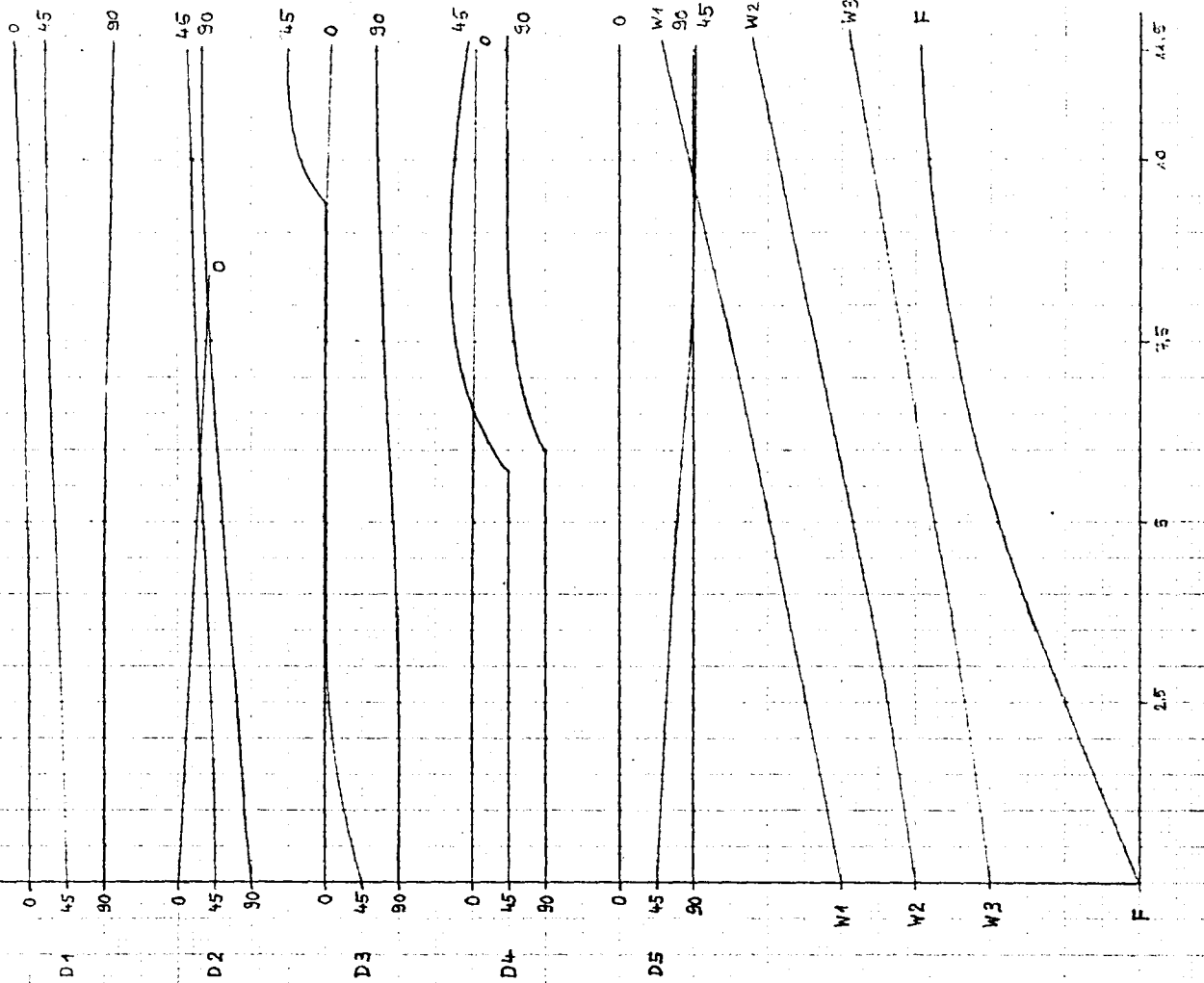
17.6.13 KONT

21.12.77 Messung 1 $h_1 = 52 \text{ mm}$ HUU
 Pos. 8.5 m 1. Belastung

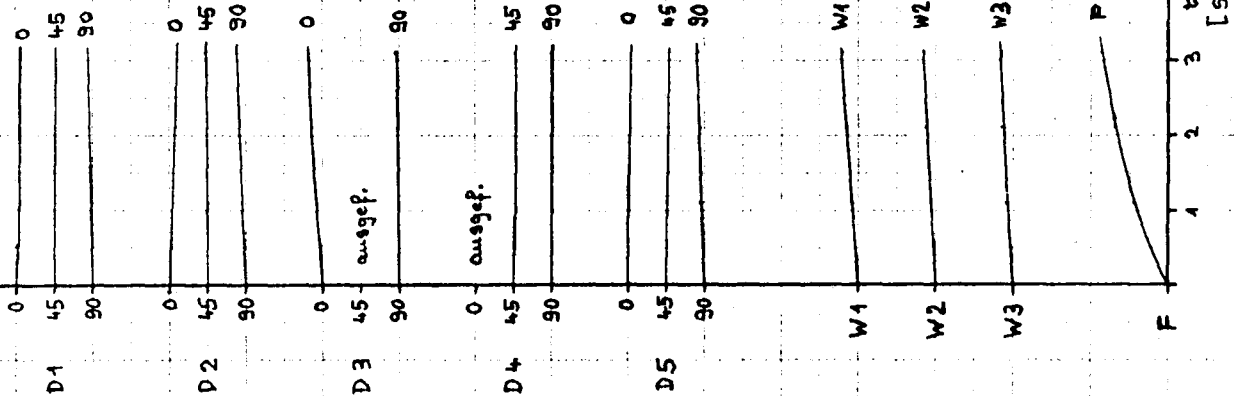
DMS: $1 \text{ mm} \hat{=} 10 \mu\text{m/m}$
 W : $1 \text{ mm} \hat{=} 1 \text{ mm}$
 F : $1 \text{ mm} \hat{=} 10 \text{ N}$



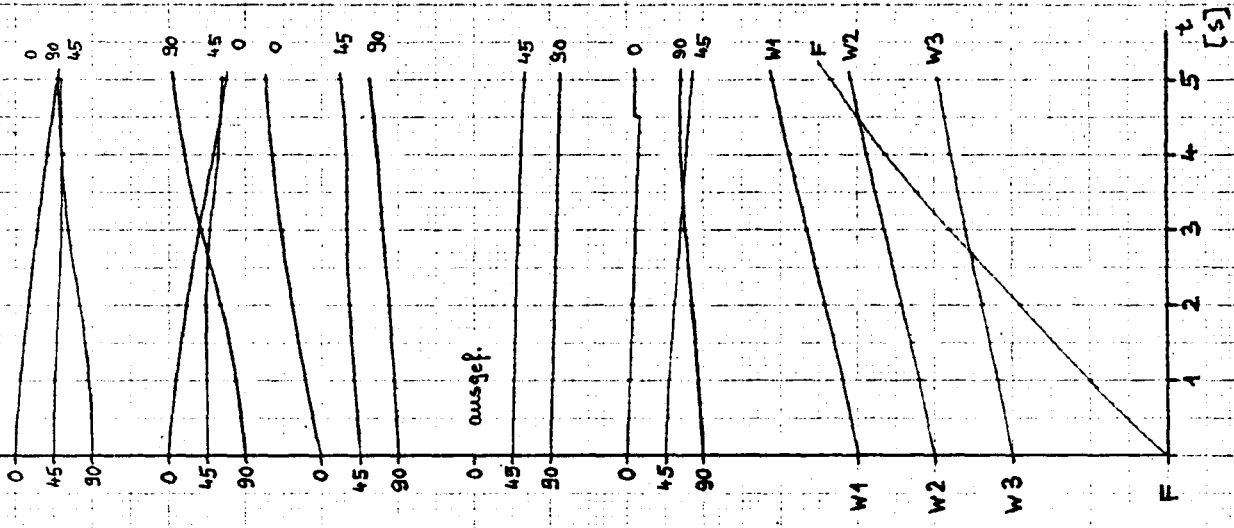
21.12.77 Messung 2 $h_1 = 52 \text{ mm}$ HUU
 Pos. 8.5 m 2. Belastung



22.12.77 1. Messung $h_1 = 69 \text{ mm}$ HUU
Pos. 8.5m 3. Belastung



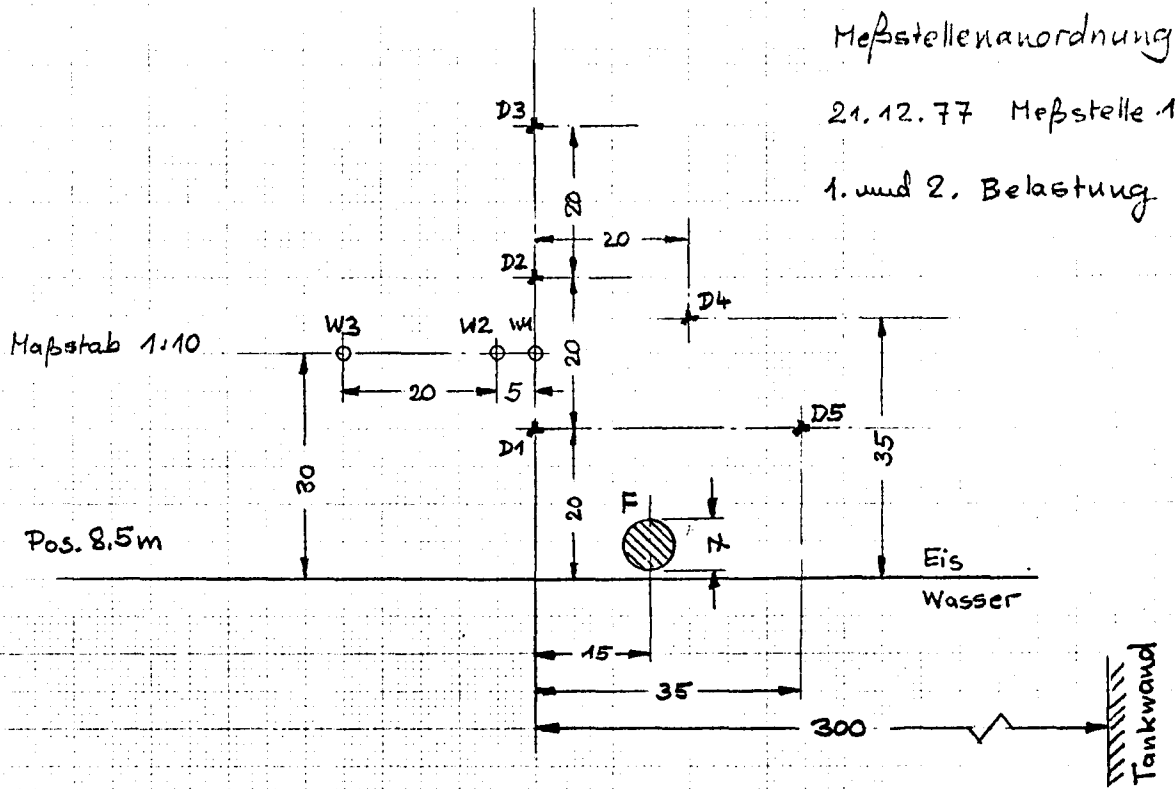
22.12.77 2. Messung $h_1 = 69 \text{ mm}$ HUU
Pos. 8.5m 4. Belastung



Meßstellenanordnung

21.12.77 Meßstelle 1

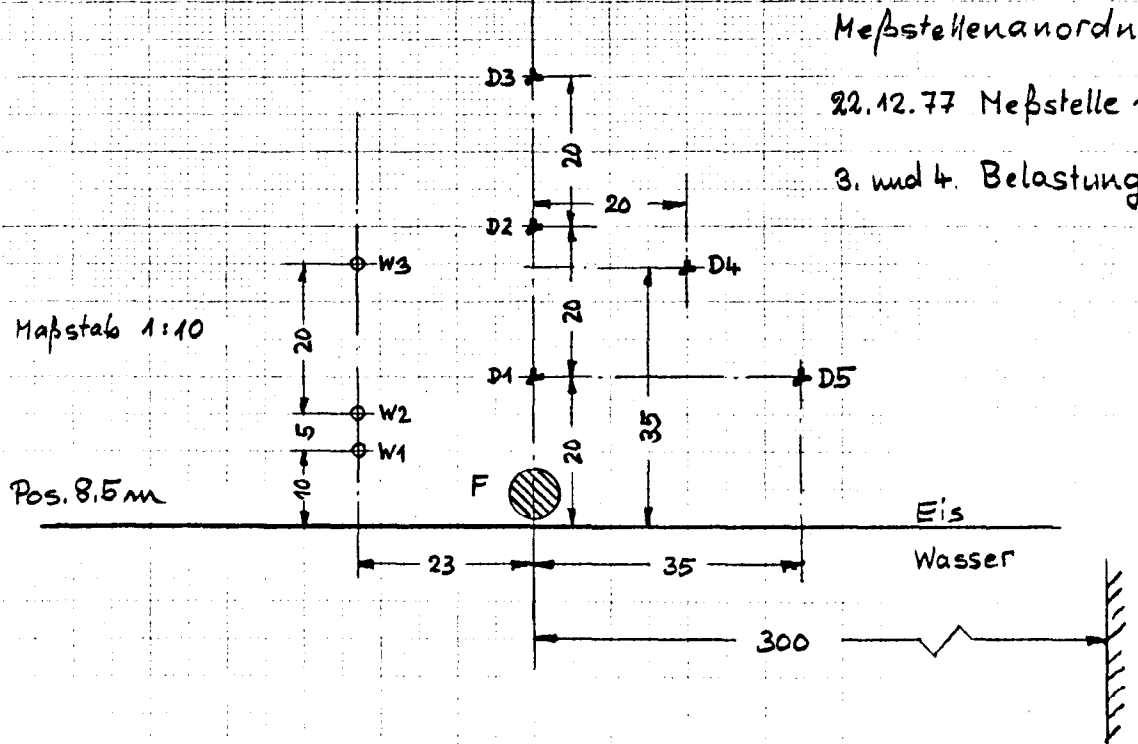
1. und 2. Belastung



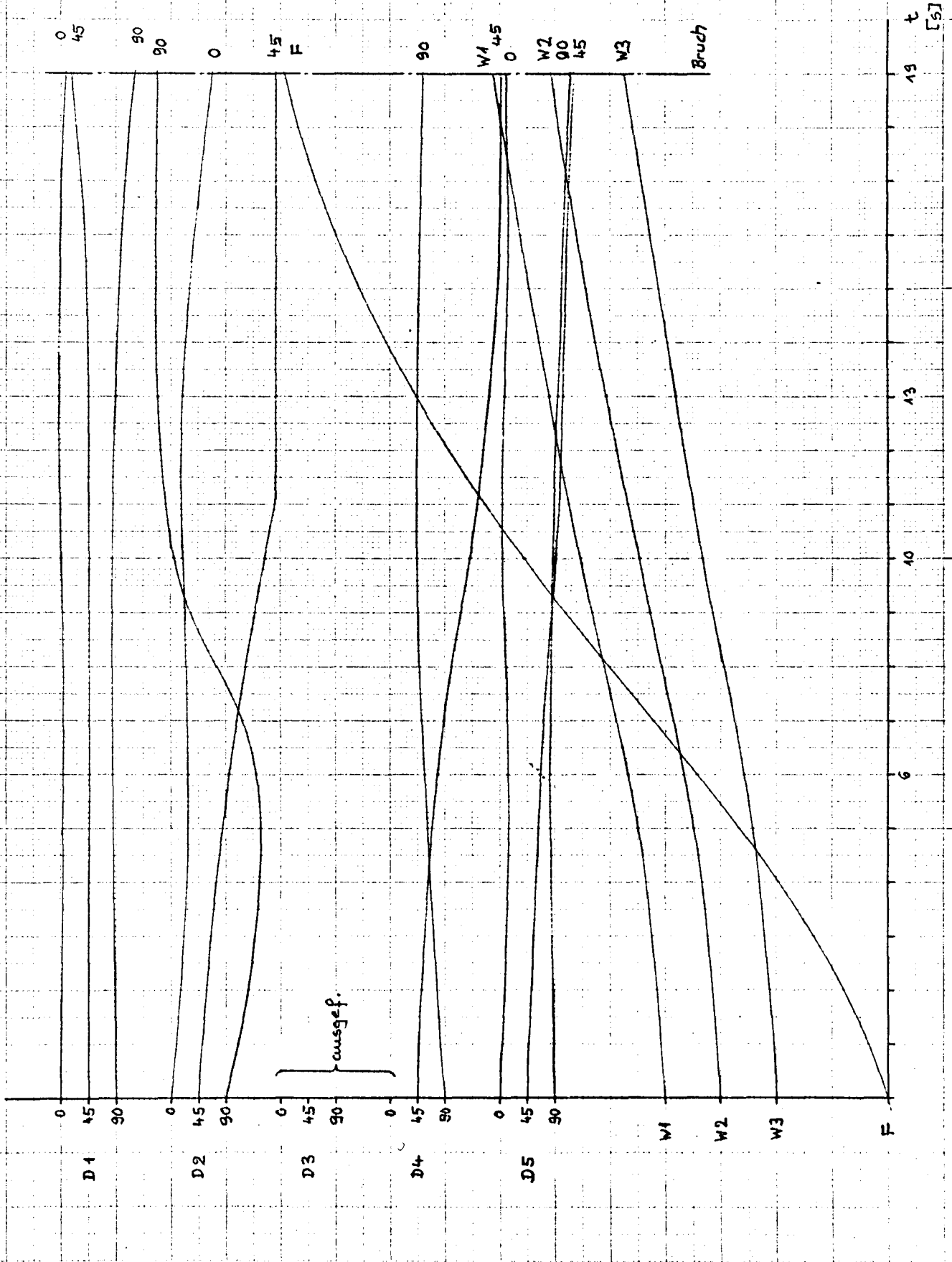
Meßstellenanordnung

22.12.77 Meßstelle 1

3. und 4. Belastung



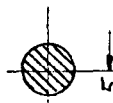
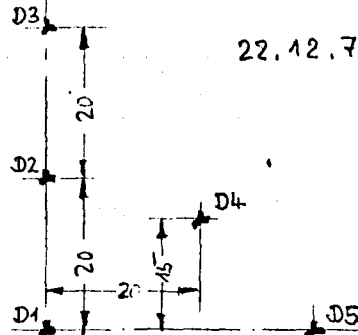
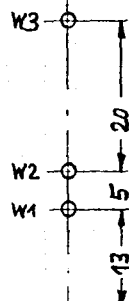
22.12.77 3. Messung $h_c = 72 \text{ mm}$ HUU Pos. 15 m Belastung bis Bruch



Meßstellenanordnung
22.12.77 Meßstelle 2

Maßstab 1:10

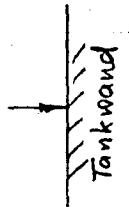
Pos 15 m



Eis
Wasser

37

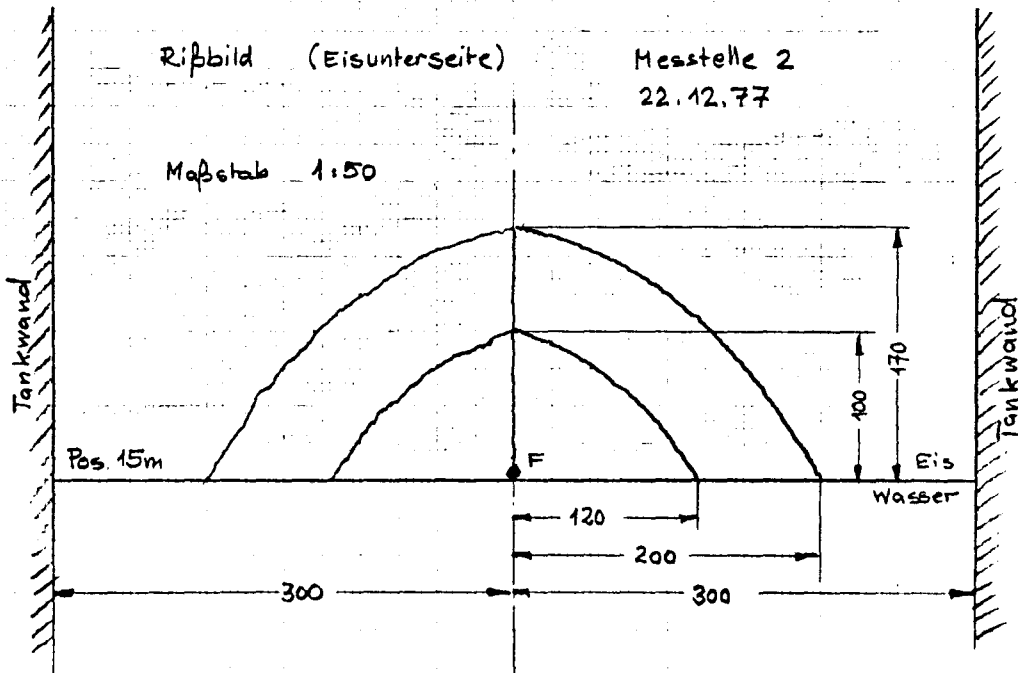
284



Rißbild (Eisunterseite)

Meßstelle 2
22.12.77

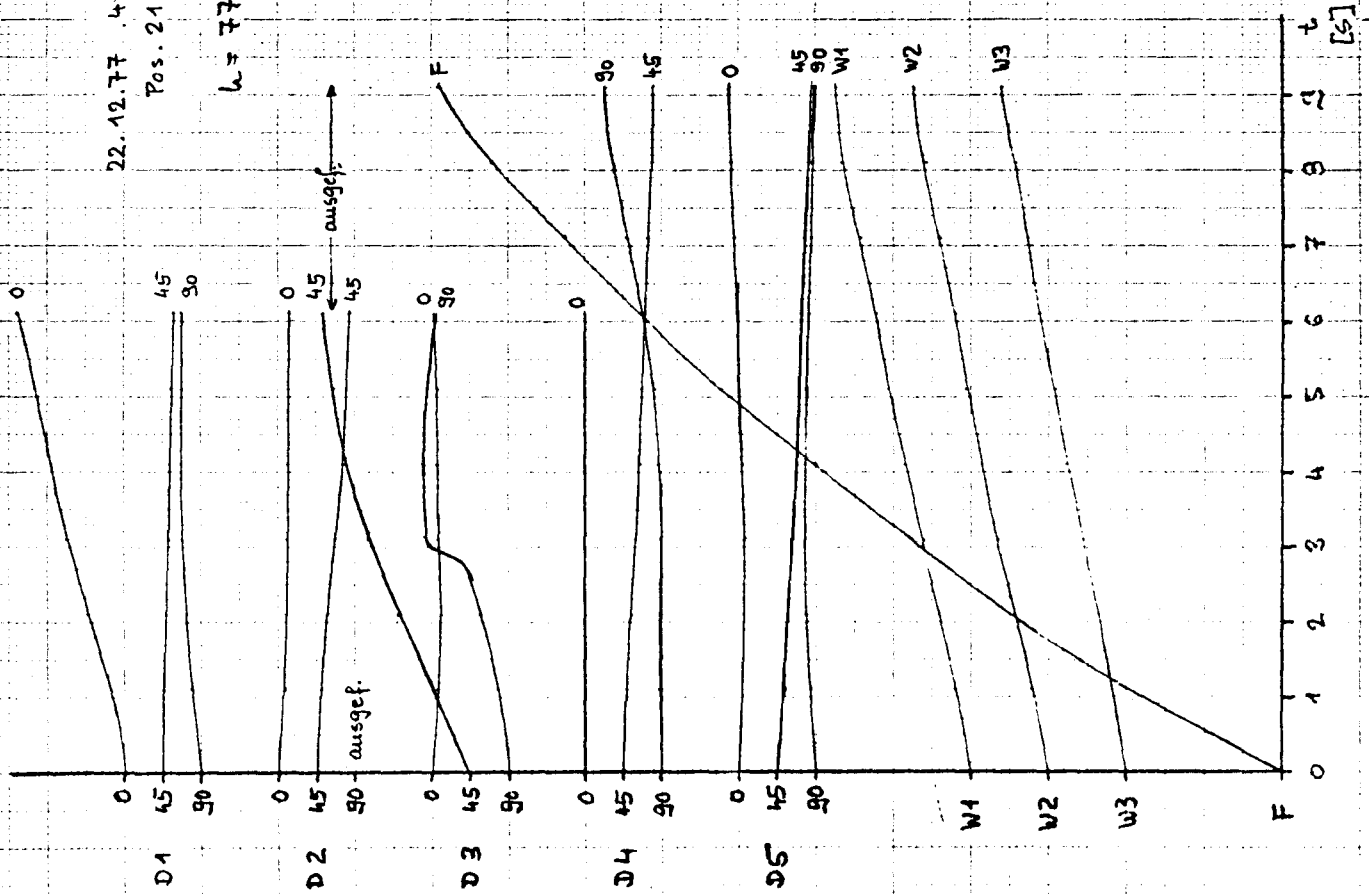
Maßstab 1:50



22.12.77 4. Messung HUU
 Pos. 21 am 1. Belastung

h = 77 mm

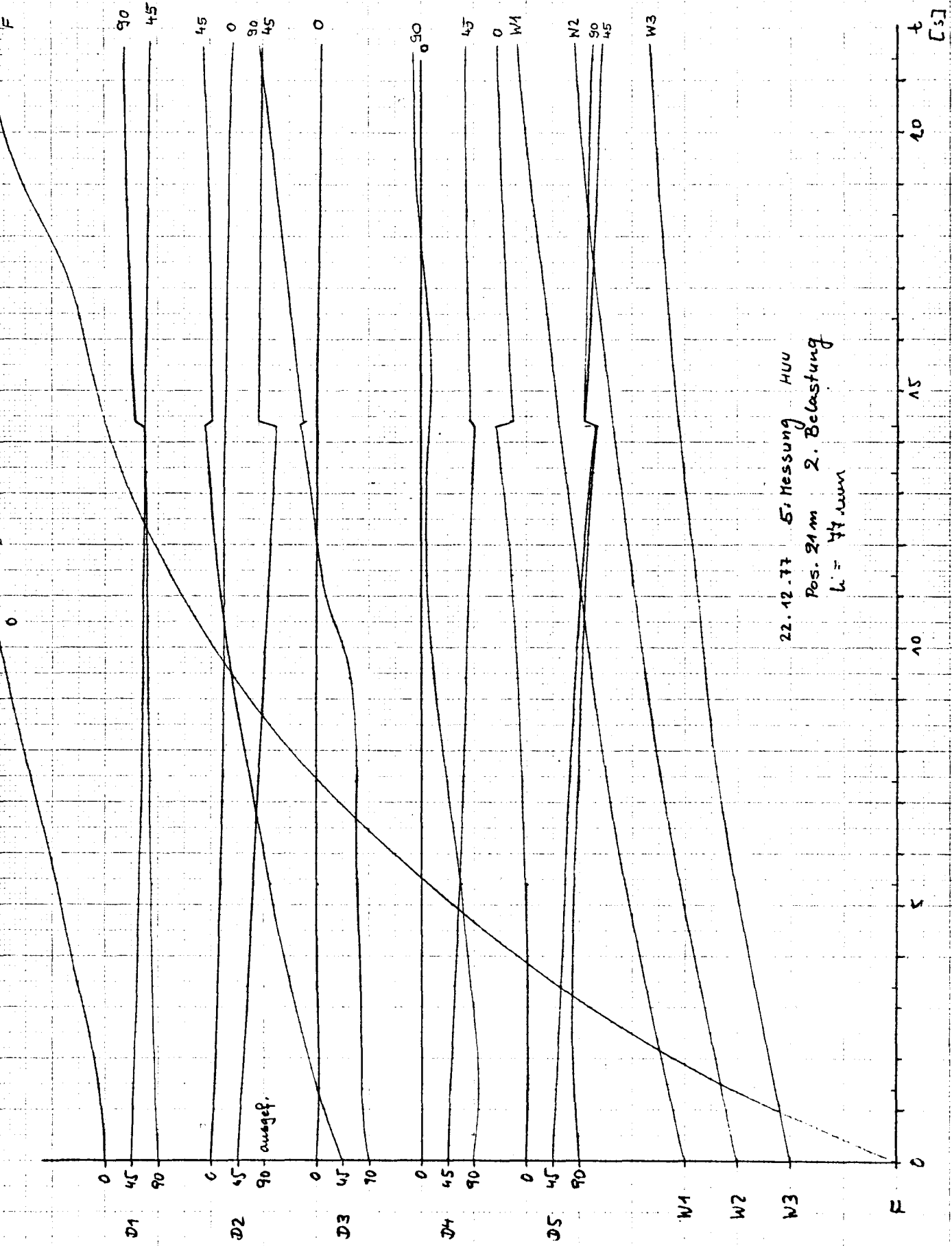
$$E(t=7.9s) = 2.27 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$



10.6.77 K22

F

übersteuert



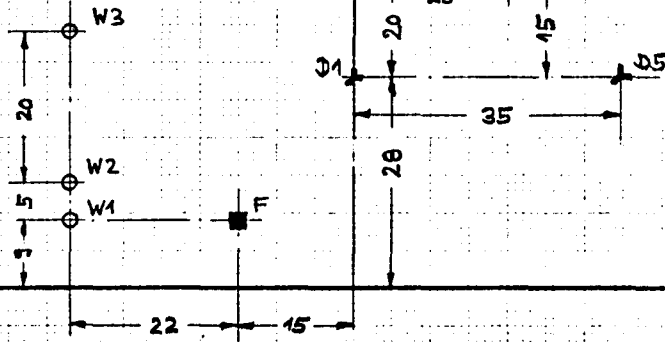
22.12.77 5. Messung HUU
 Pos. 21m 2. Belastung
 h = 47 mm

Messstellenanordnung

22.12.77 Messstelle 3

Maßstab 1:10

Pos. 21 m

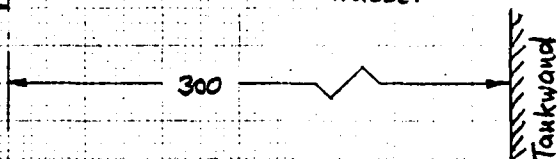


Eis

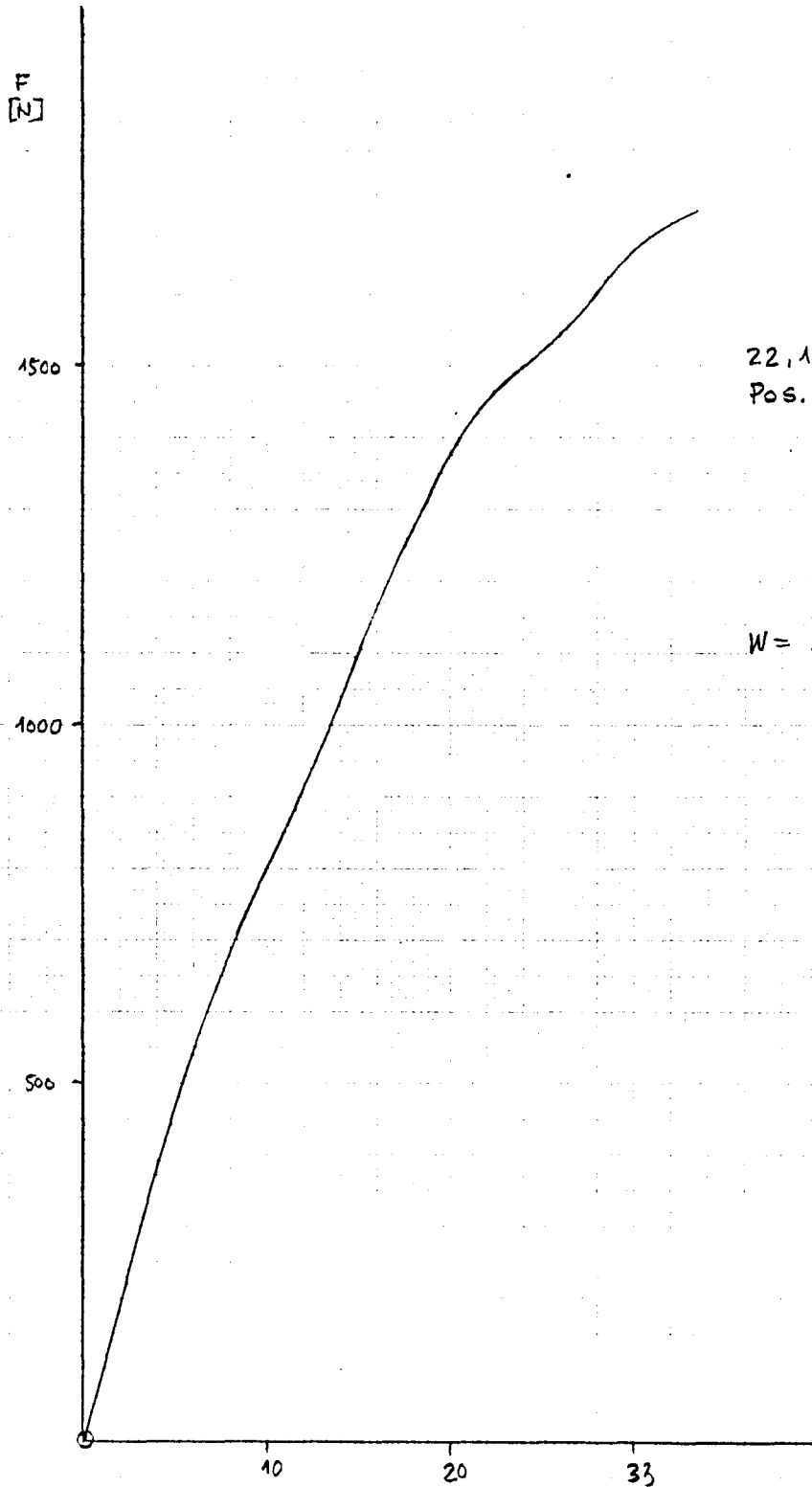
Wasser

300

Tankwand



Halle in unvollständiger Eisdecke
nach unten gedrückt



22.12.77 Messing 4b
Pos. 21 m

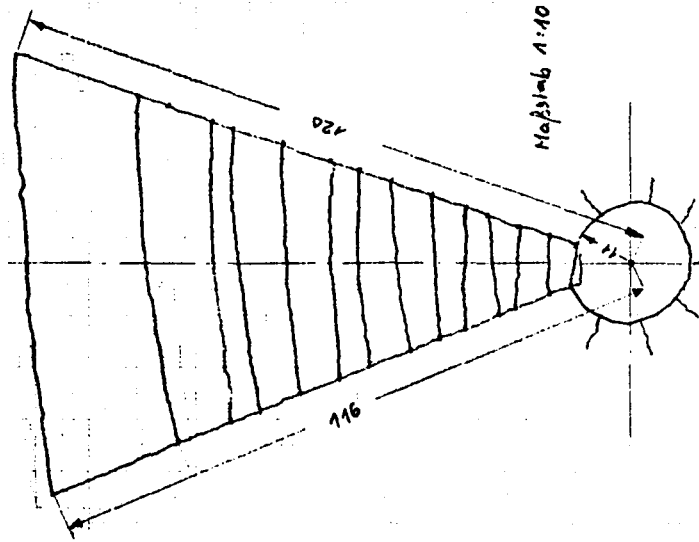
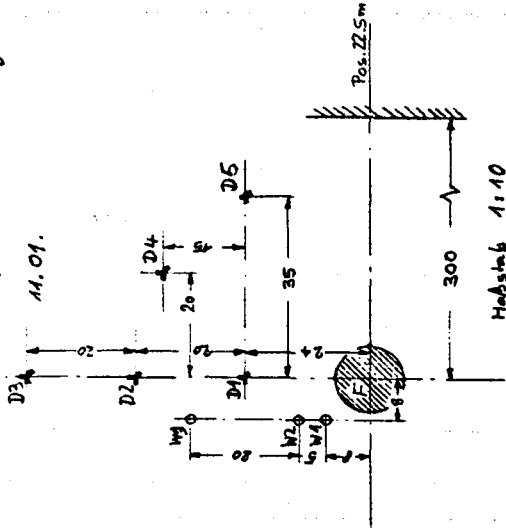
$$W = 36,4 \text{ Nm}$$

11.01.78 Messung 3 $k_I = 78.5 \text{ mm}$

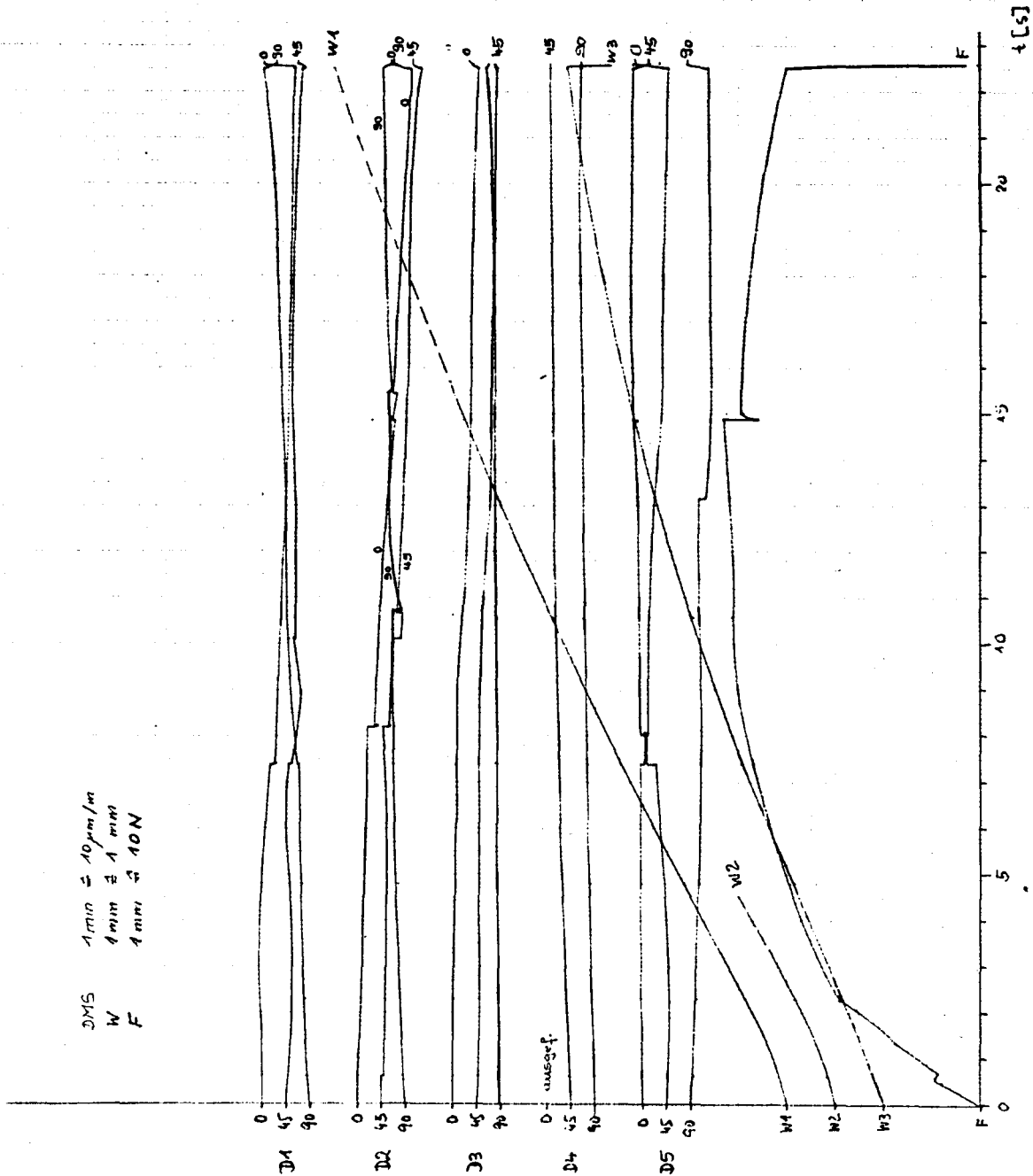
Pos. 22.5m

DMS $1 \text{ mm} \pm 10 \mu\text{m/m}$
 W $1 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$
 F $1 \text{ mm} \pm 10 \text{ N}$

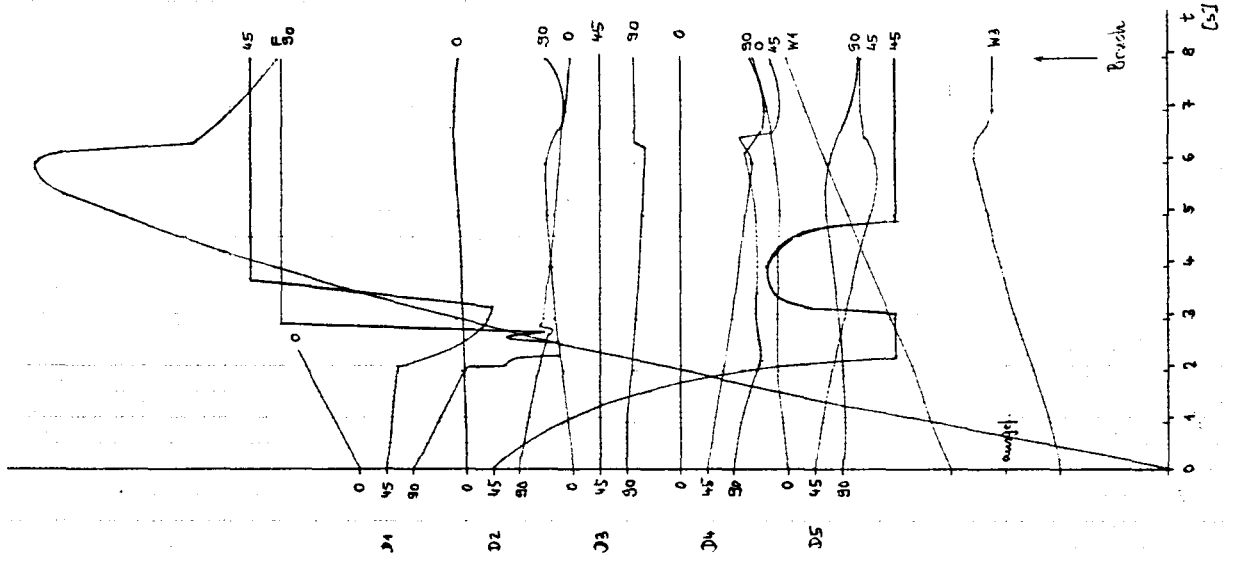
Meßstellenanordnung
 1:1



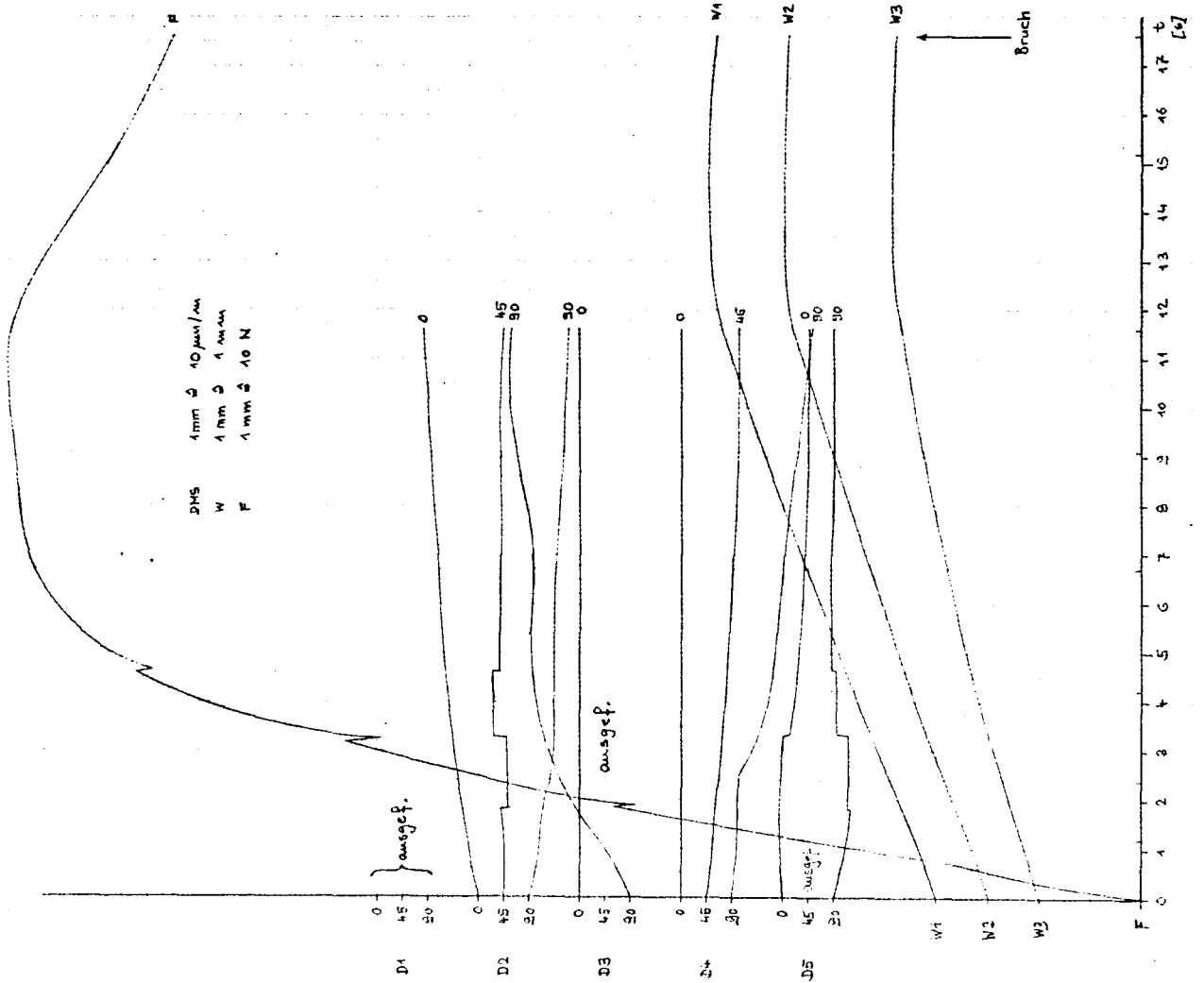
Oberflächenrißbild eines von 9 Segmenten



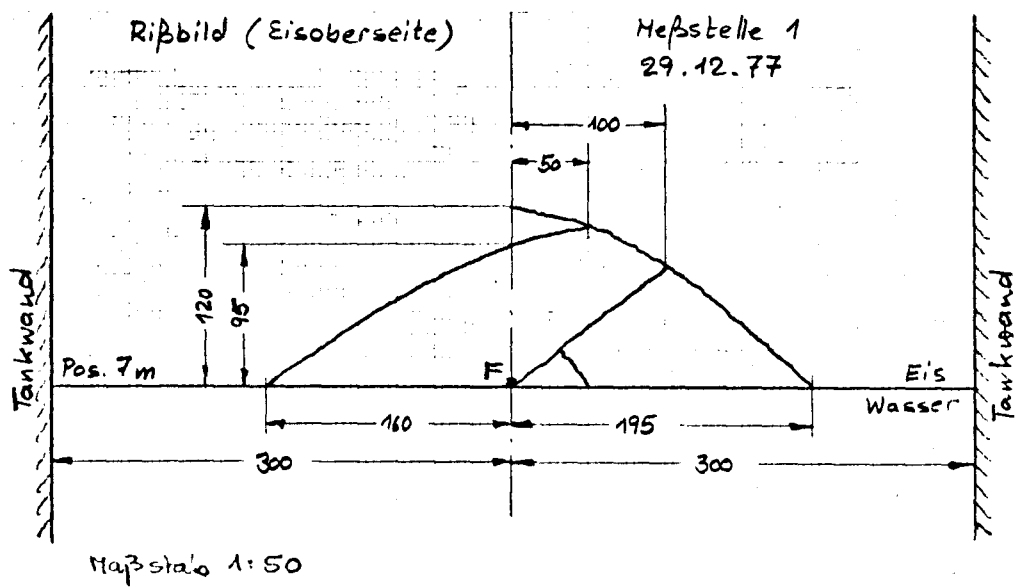
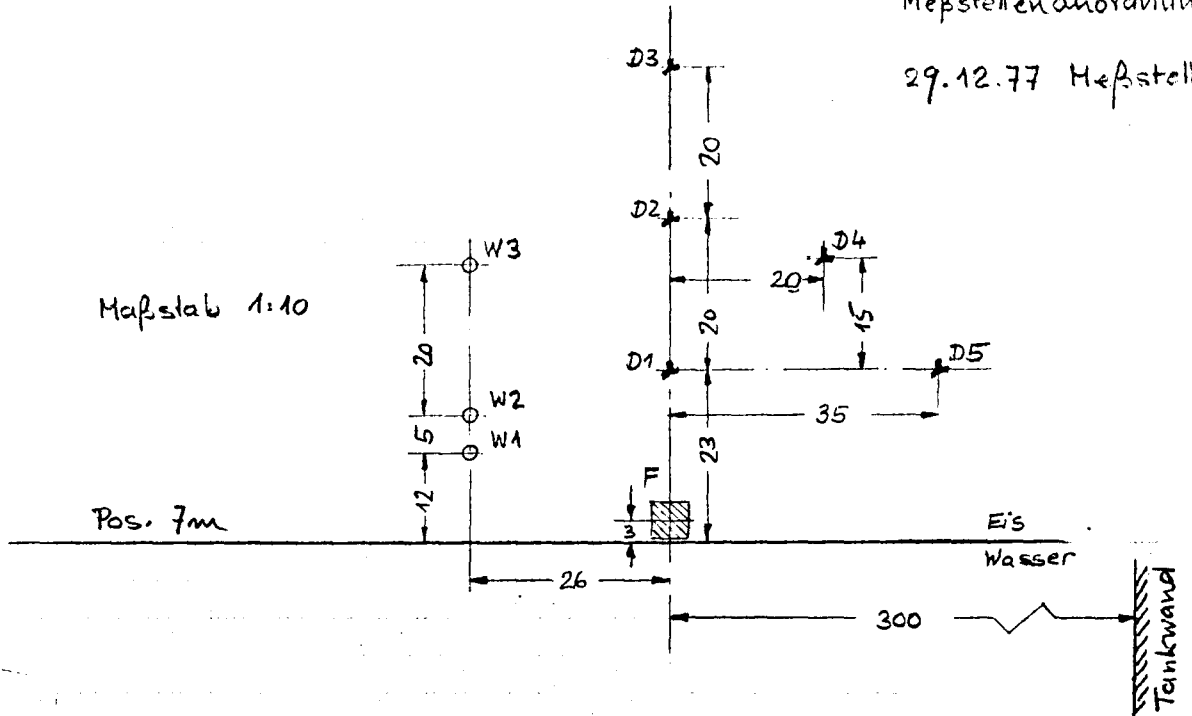
29.12.77 Messung 2 $h_T = 90 \text{ mm}$ HUO
Pos. 115 mm



24.12.77 Messung 1 $h_T = 77 \text{ mm}$ HUO
Pos. 7 mm



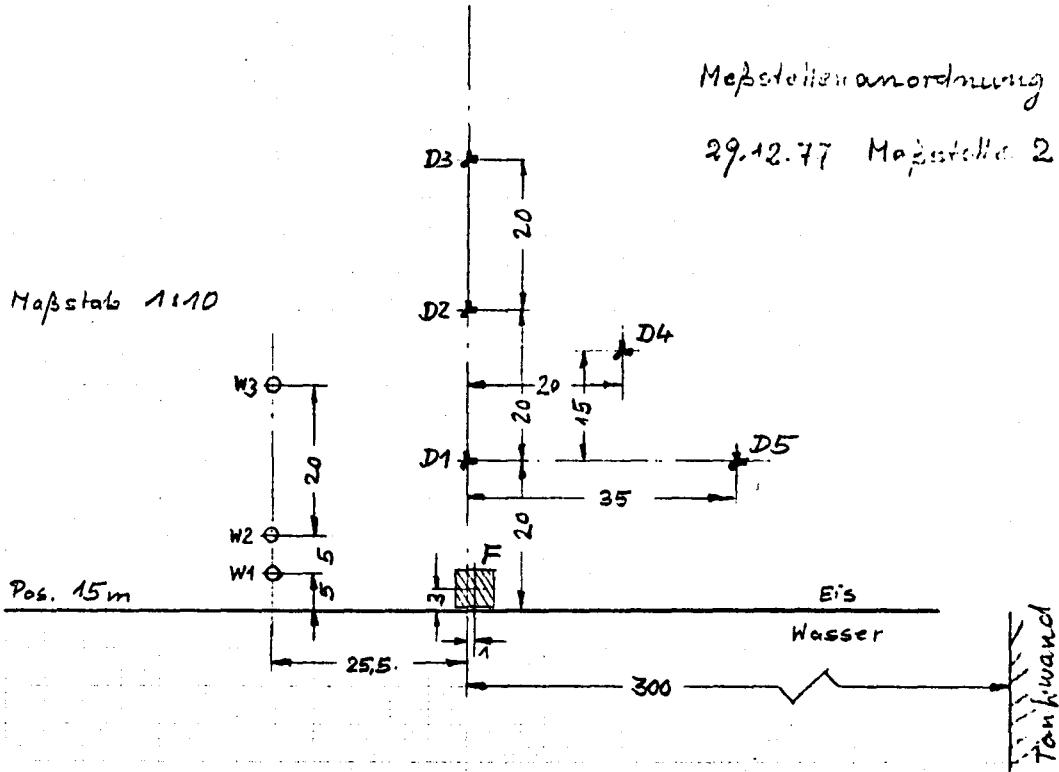
Messstellenanordnung
29.12.77 Messstelle 1



Meßstellenanordnung

29.12.77 Meßstelle 2

Maßstab 1:10

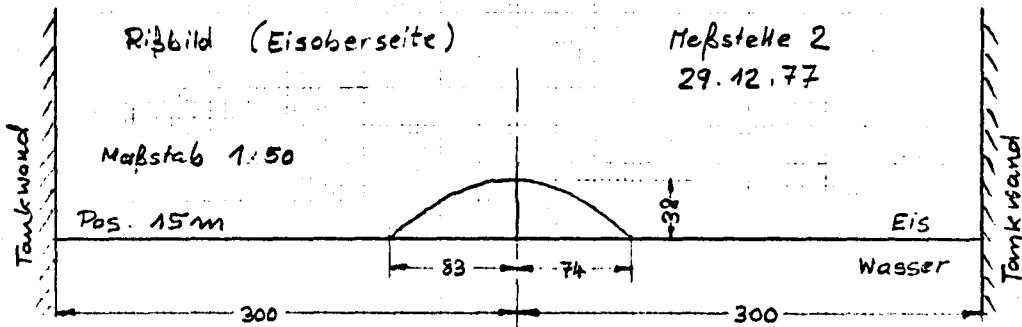


Rißbild (Eisoberseite)

Meßstelle 2

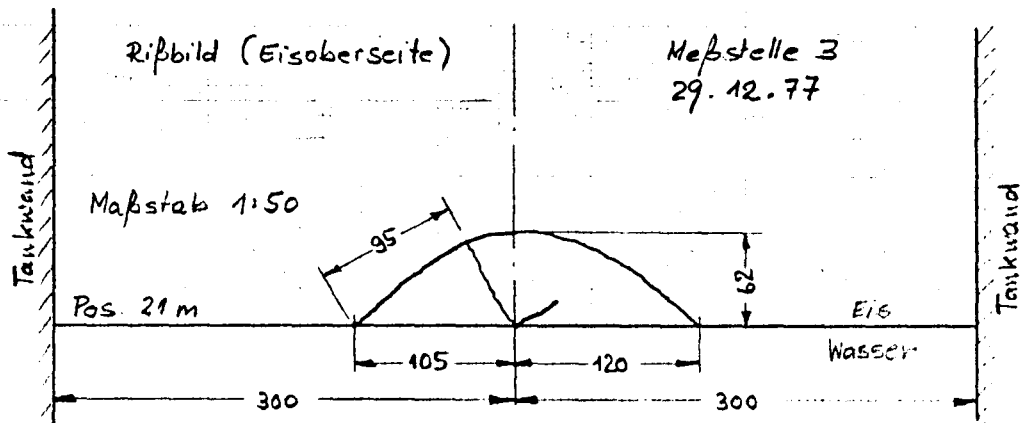
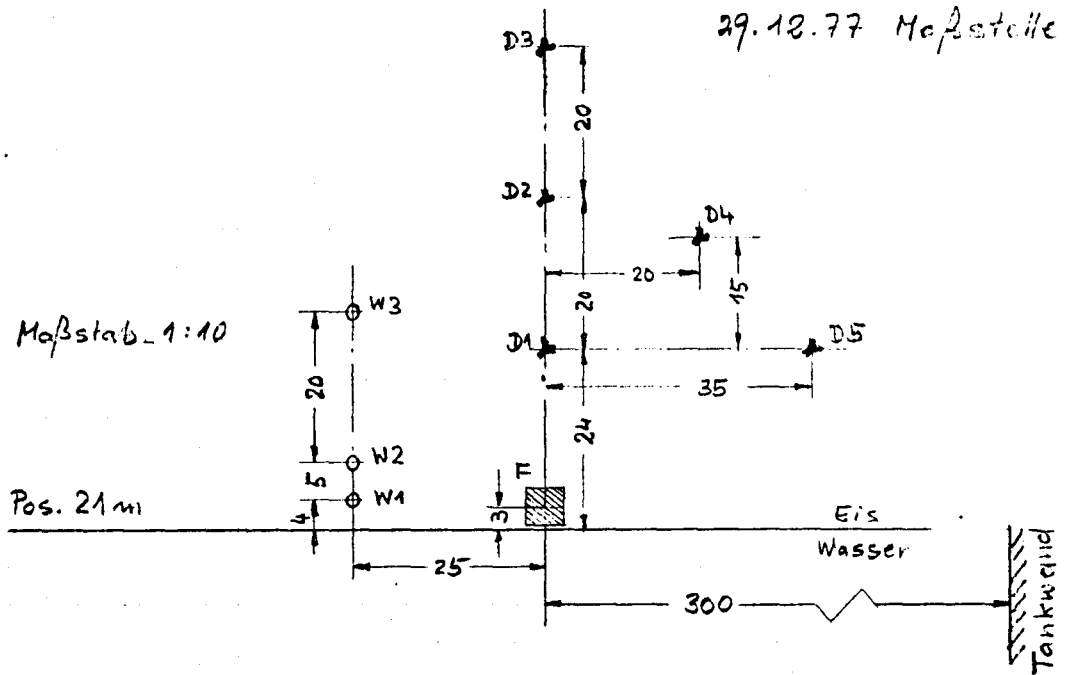
29.12.77

Maßstab 1:50



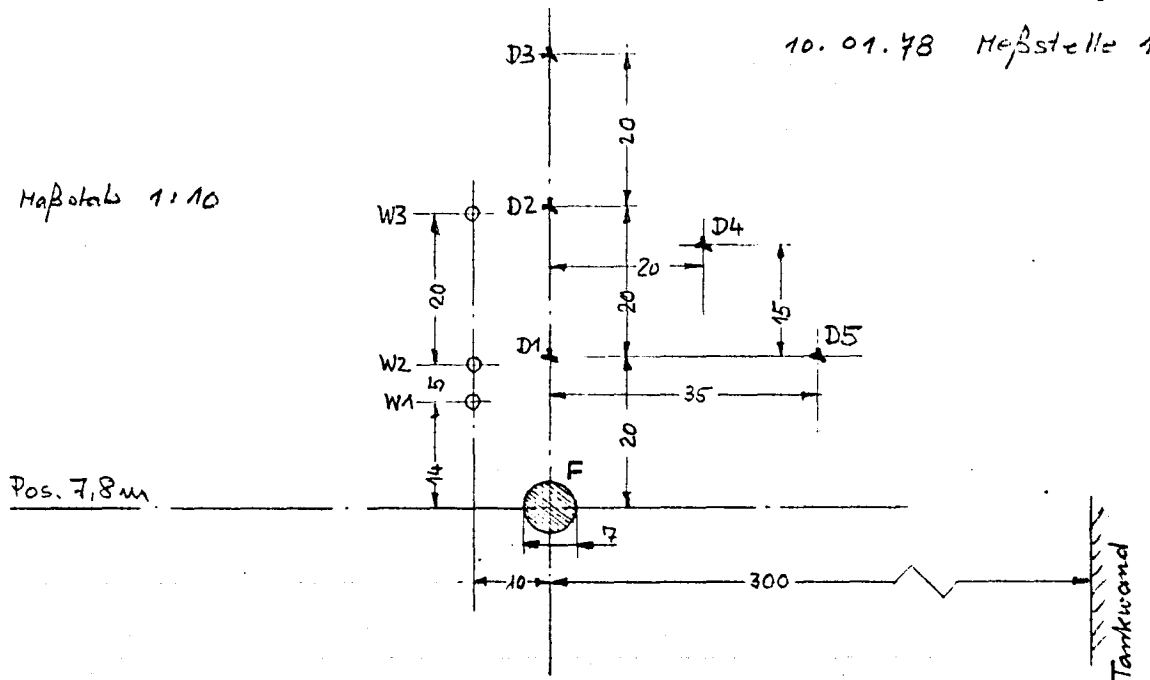
Mefstellenanordnung

29.12.77 Meßstelle 3

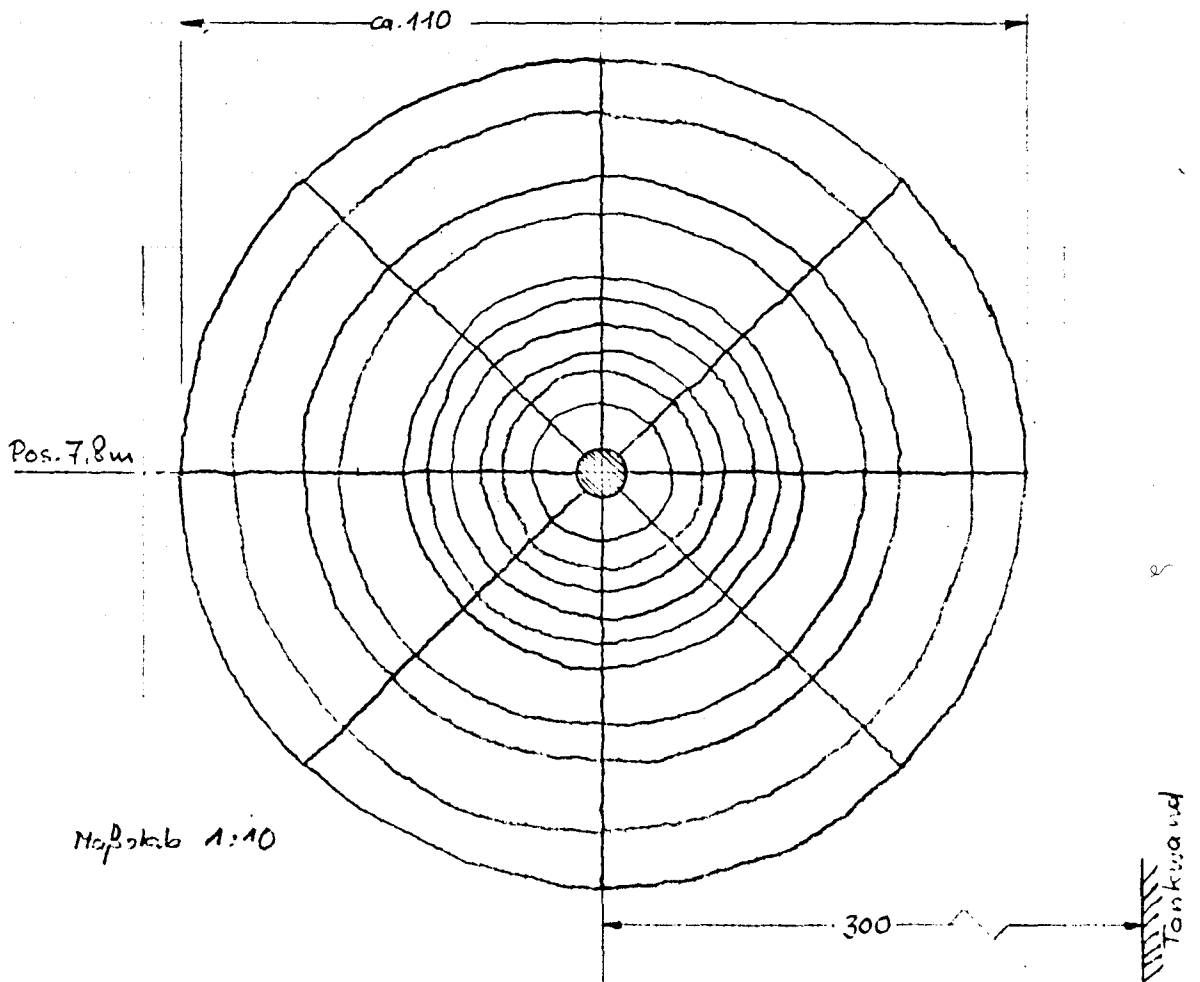


Messstellenanordnung
10.01.78 Messstelle 1

Maßstab 1:10

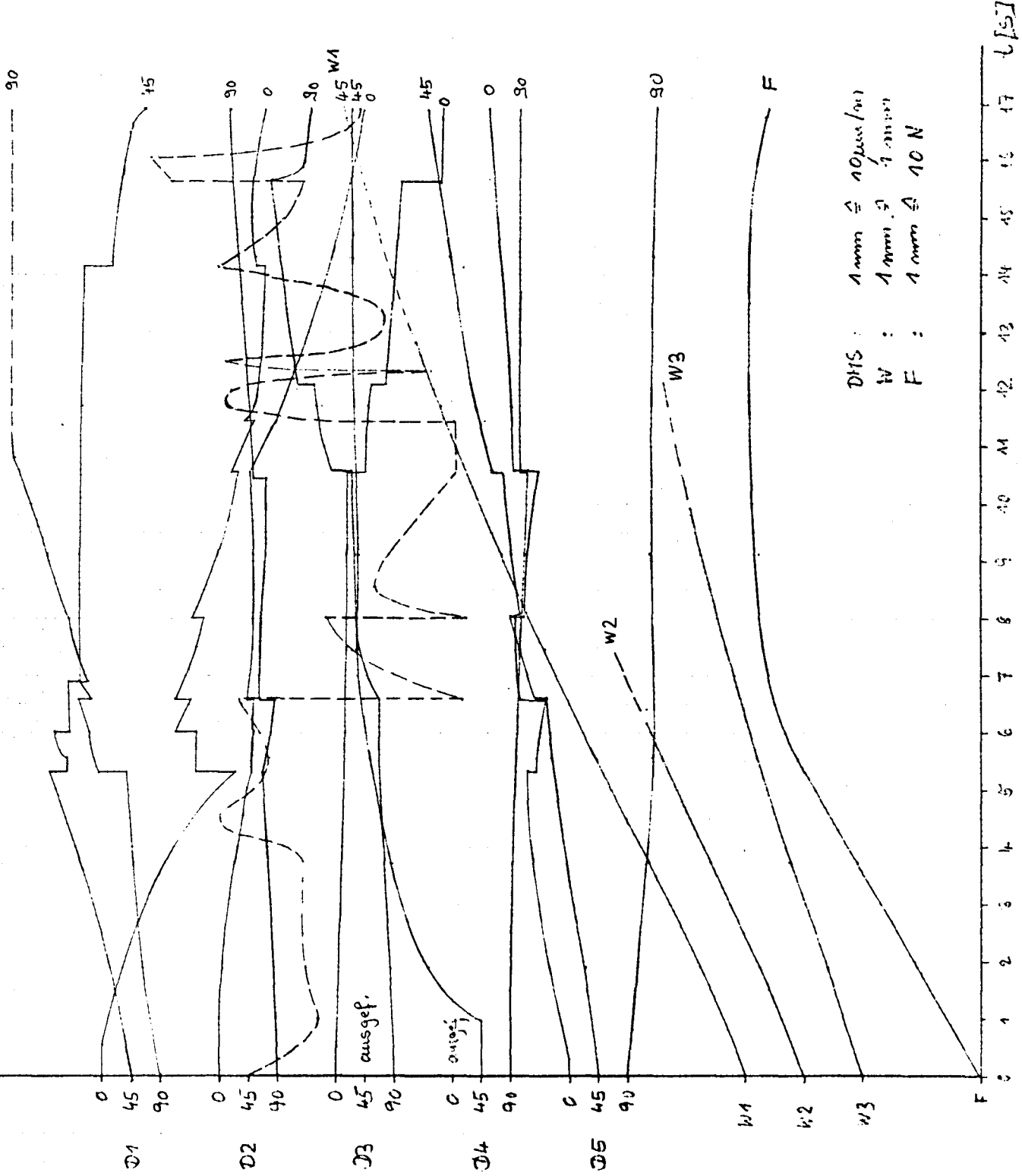


Rißbild (Eisunterseite) Maße nur ungefähr



D2-45 schwankt stark um
den gestrichelten Mittelverlauf

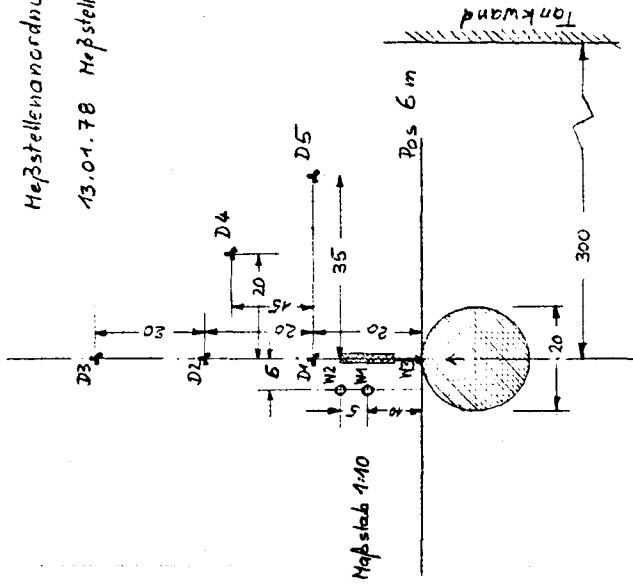
10.01.78 16:00
Messung 2 $h_f = 56 \text{ mm}$
Pos. 16,6 m C 18 I



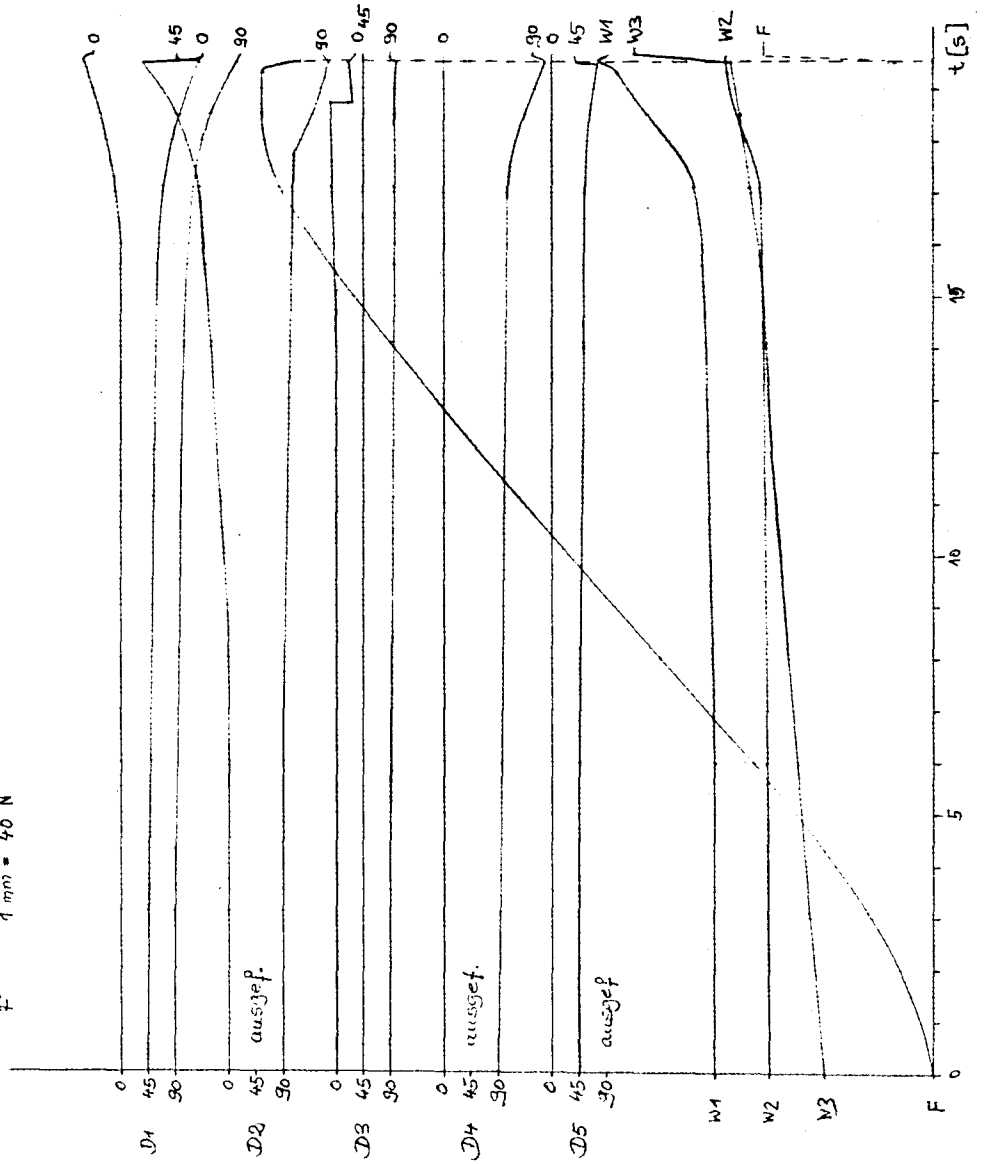
DHS : 1 mm $\hat{=}$ 10 mm/sec
W : 1 mm $\hat{=}$ 1 mm/sec
F : 1 mm $\hat{=}$ 10 N

[s]

Meßstellenanordnung
13.01.78 Meßstelle 1

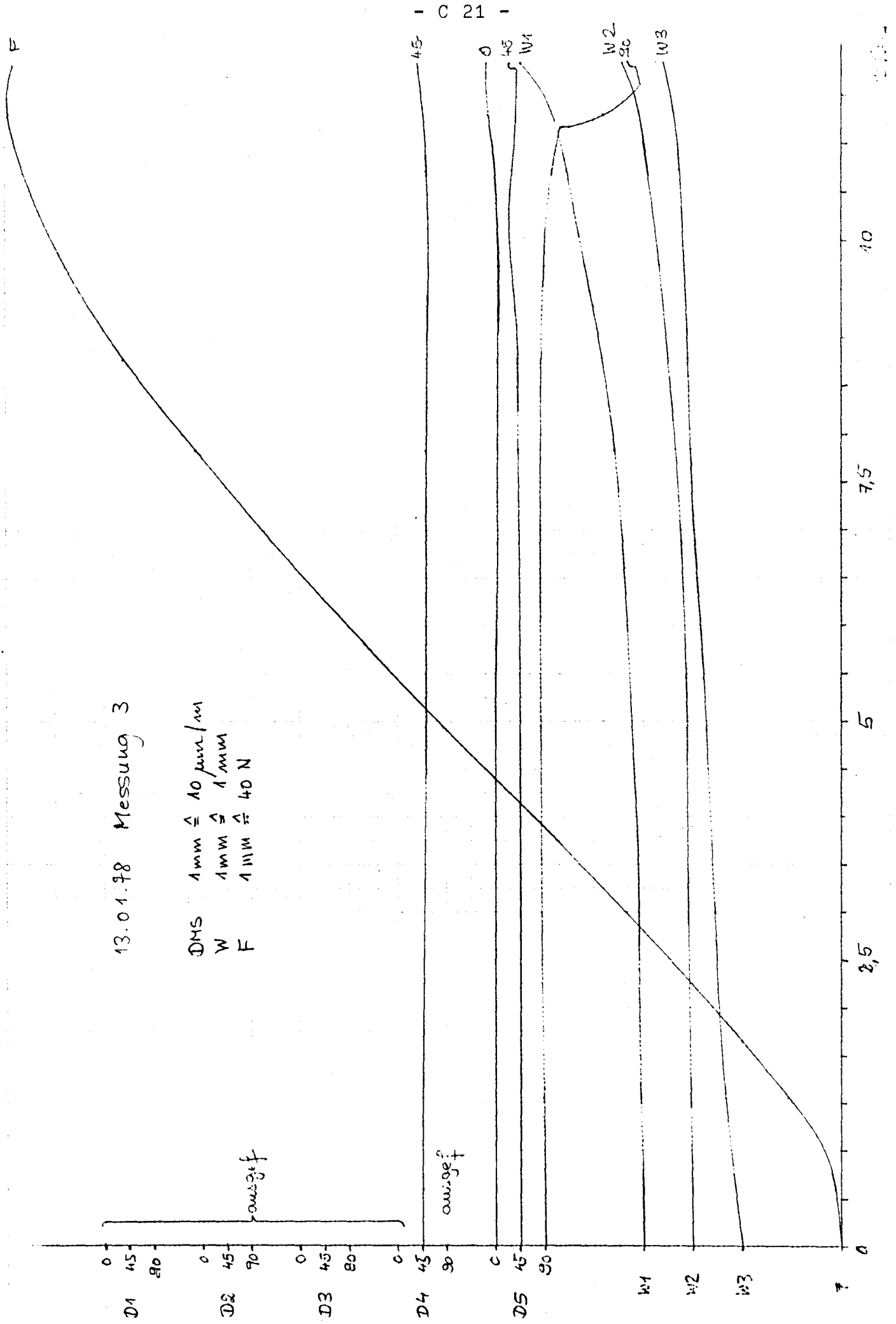


DN5 1 mm ± 10 µm/min
Ri 1 mm ± 1 µm/min
F 1 mm ± 40 N



13.01.78 Messung 3

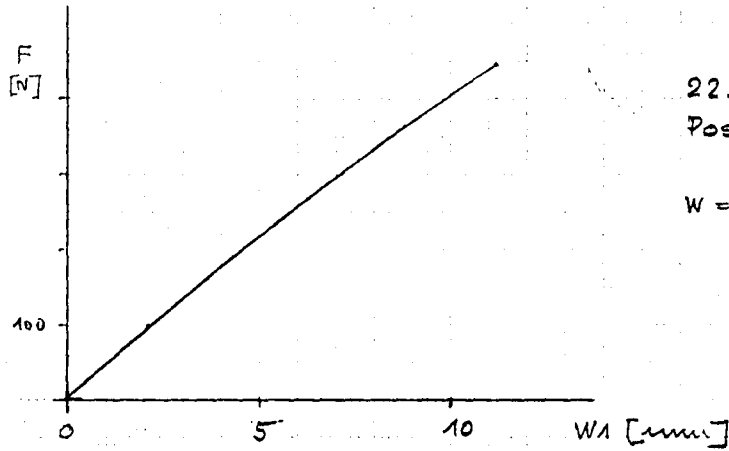
DMS 1mm $\hat{=}$ 10 μ m/mm
W 1mm $\hat{=}$ 1mm
F 1mm $\hat{=}$ 40 N



- C 21 -

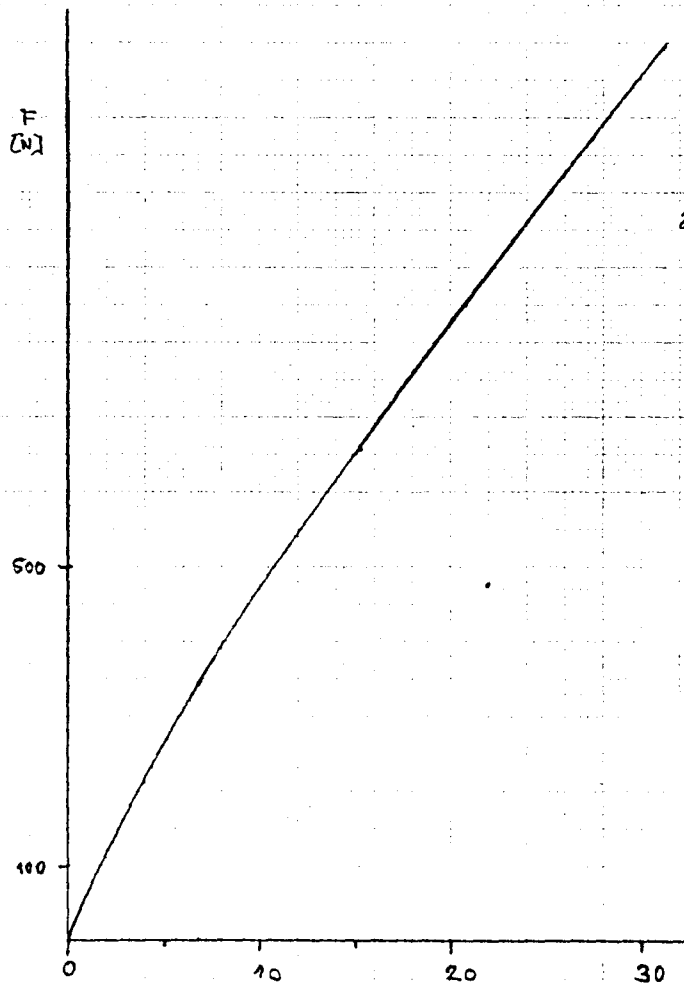
A N H A N G D

Halbbrennblöcke Eisdecke nach unten gedrückt



22.12.77 Messung 2 $h_i = 69 \text{ mm}$
Pos. 8,5 m 4. Belastung

$$W = \int F(w_1) dw_1 \approx 2,64 \text{ Nm}$$

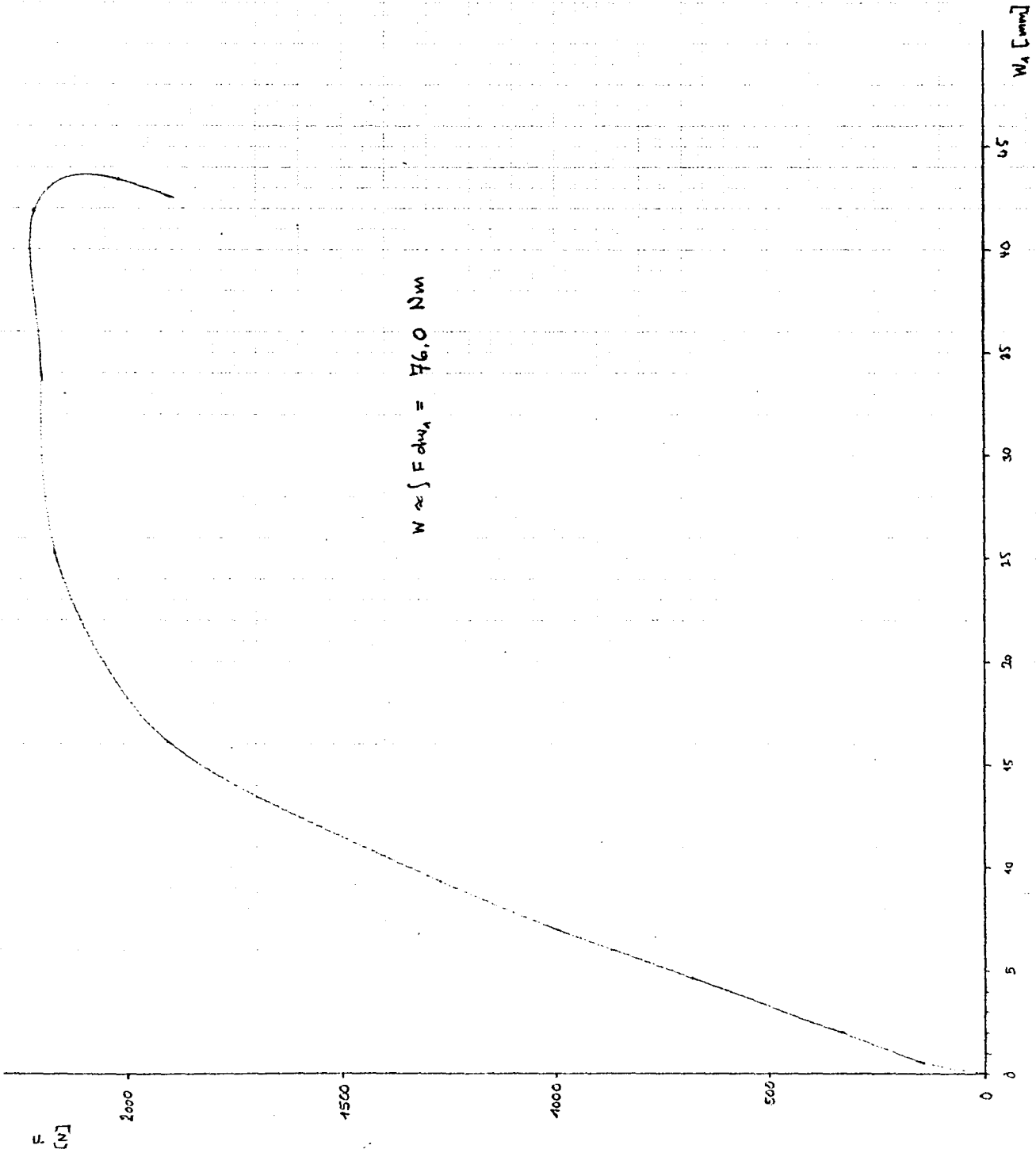


22.12.77 Messung 3 $h_i = 72 \text{ mm}$
Pos. 15 m

Belastung bis Bruch

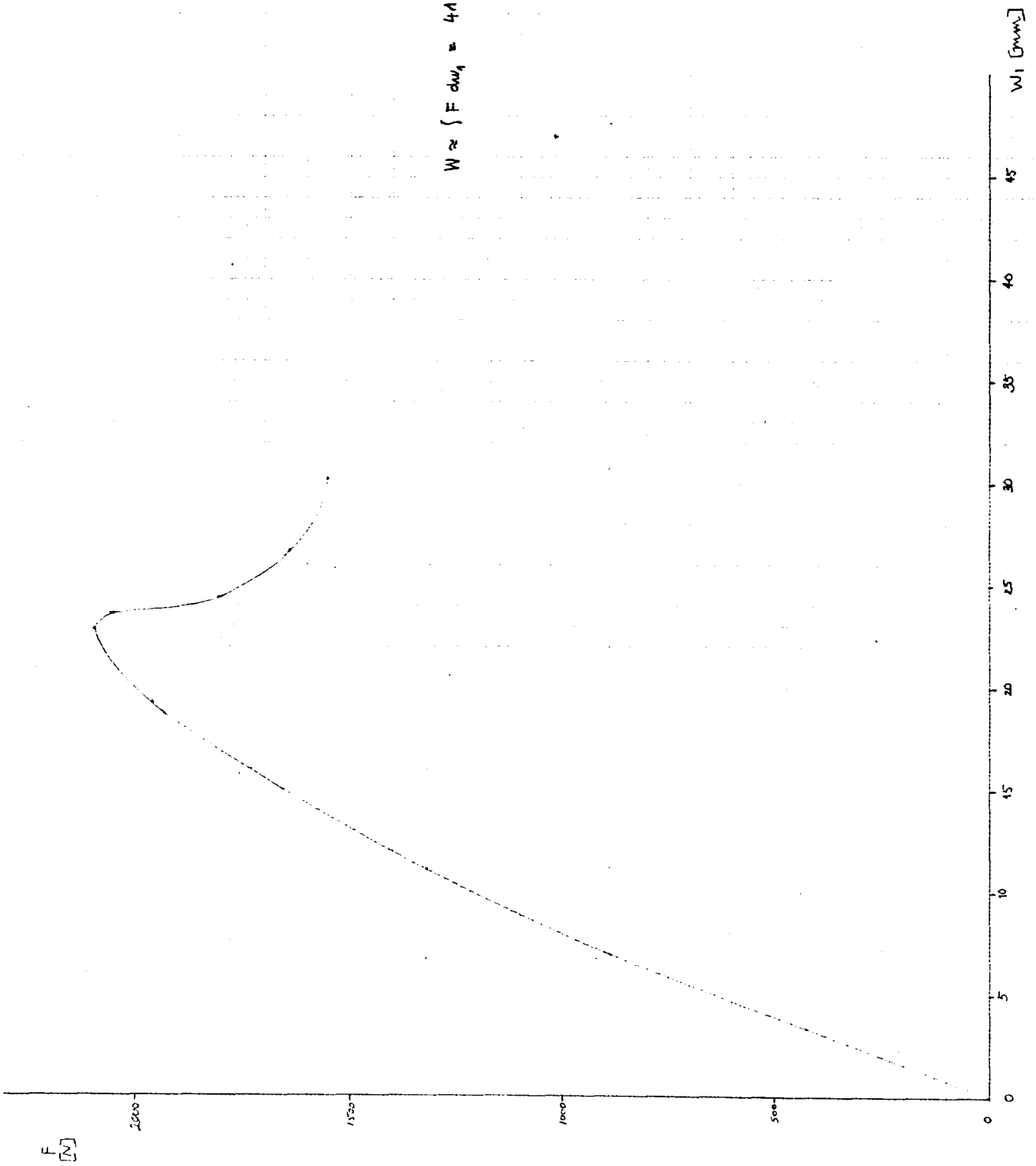
$$W \approx 19,8 \text{ Nm}$$

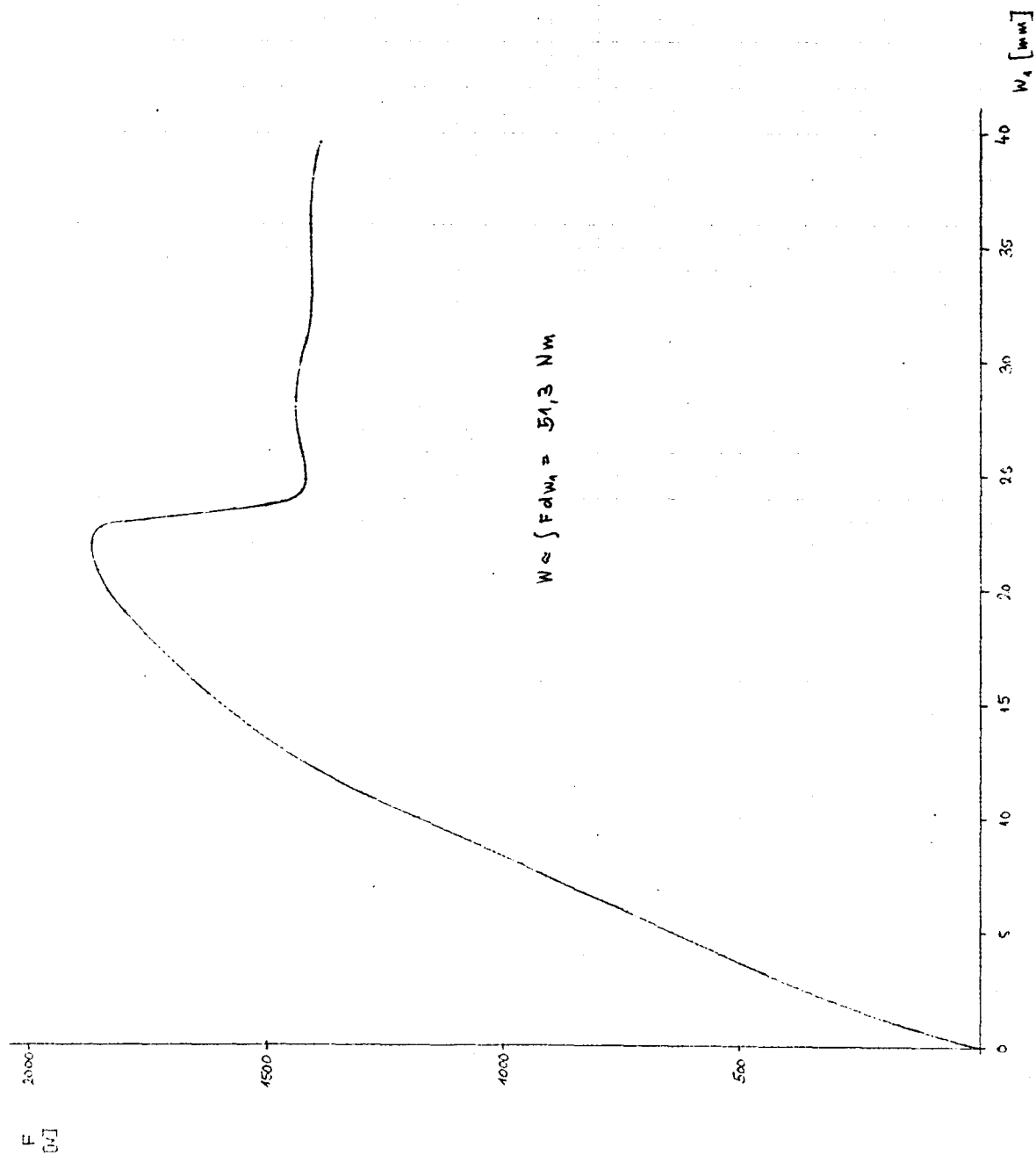
Kraft - Weg - Diagramm
29.12.77 Messung 1



Kraft-Weg-Diagramm
29.12.77 Messung 2

$$W \approx \int F \, dw_1 = 44,0 \text{ Nm}$$





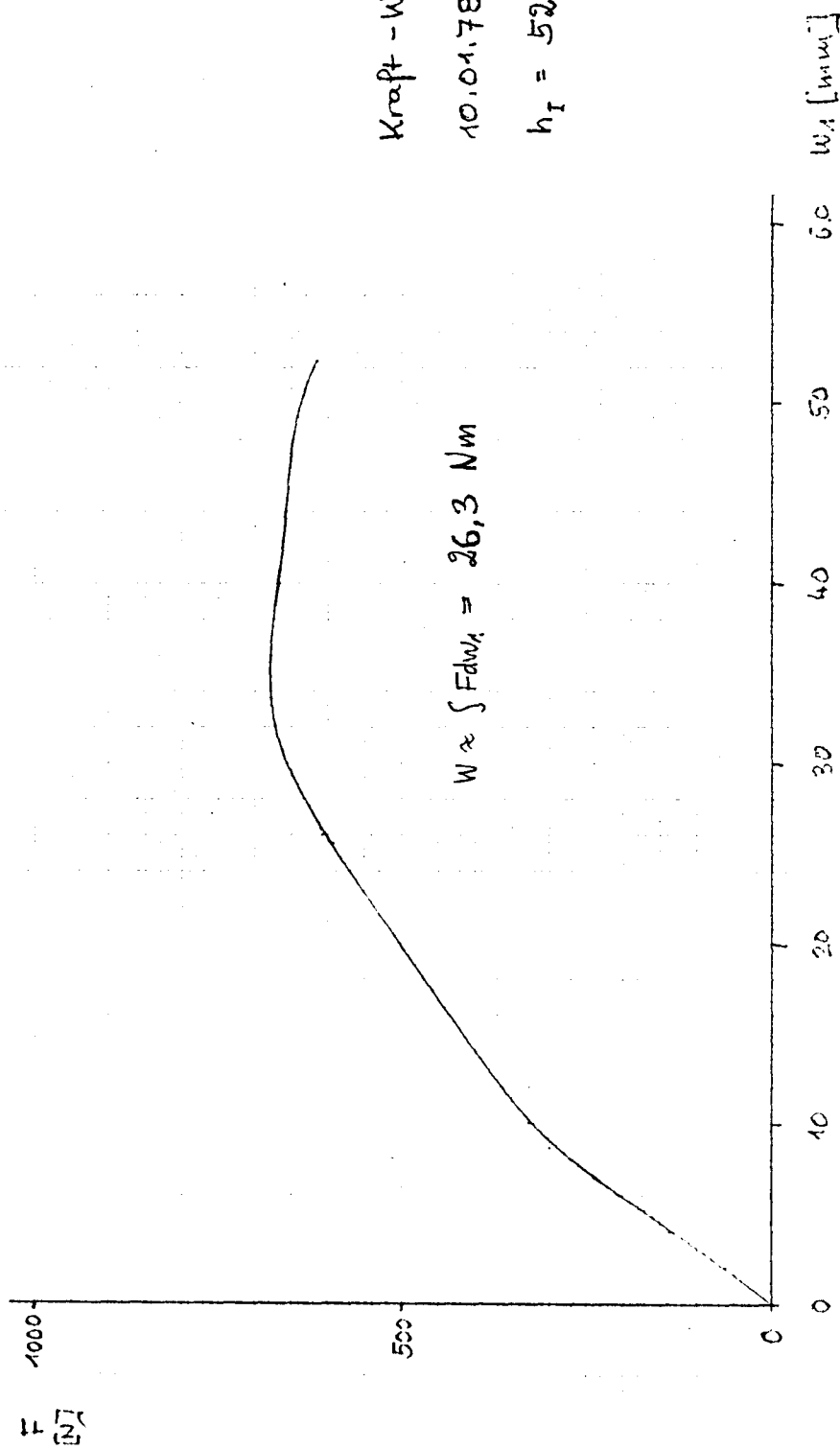
$W \approx \int F dW_1 = 51,3 \text{ Nm}$

Kraft-Weg-Diagramm
29.12.77 Messung 3

Kraft - Weg Diagramm:

10.01.78 Messung 1

$h_I = 52.5 \text{ mm}$ Pos. 78 m



F

[N]

1000

500

0

C

10

20

30

40

50

60

70

80

w_1 [mm]

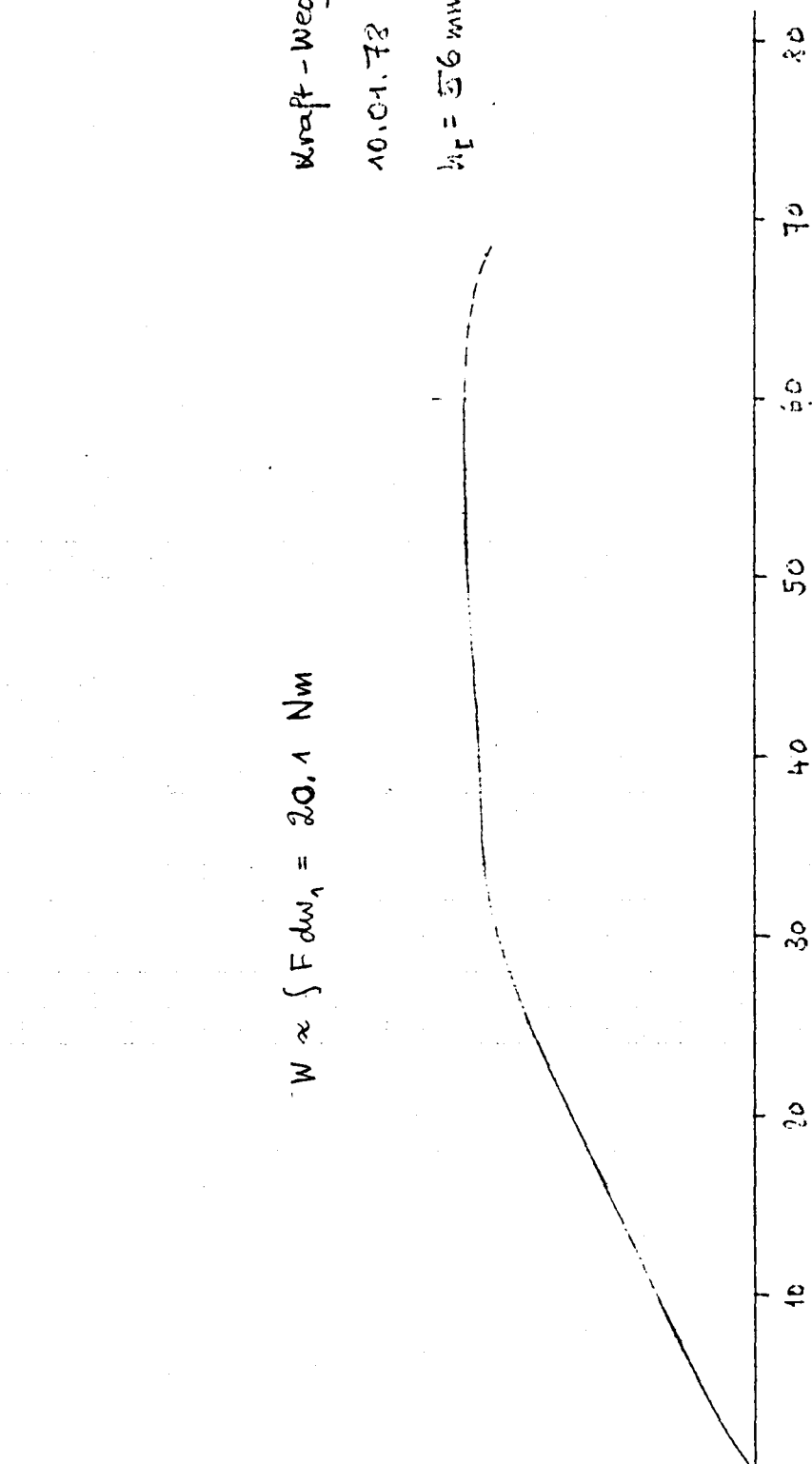
$$W \propto \int F dw_1 = 20,1 \text{ Nm}$$

Kraft - Weg - Diagramm

E6

10.01.78 Messung 2

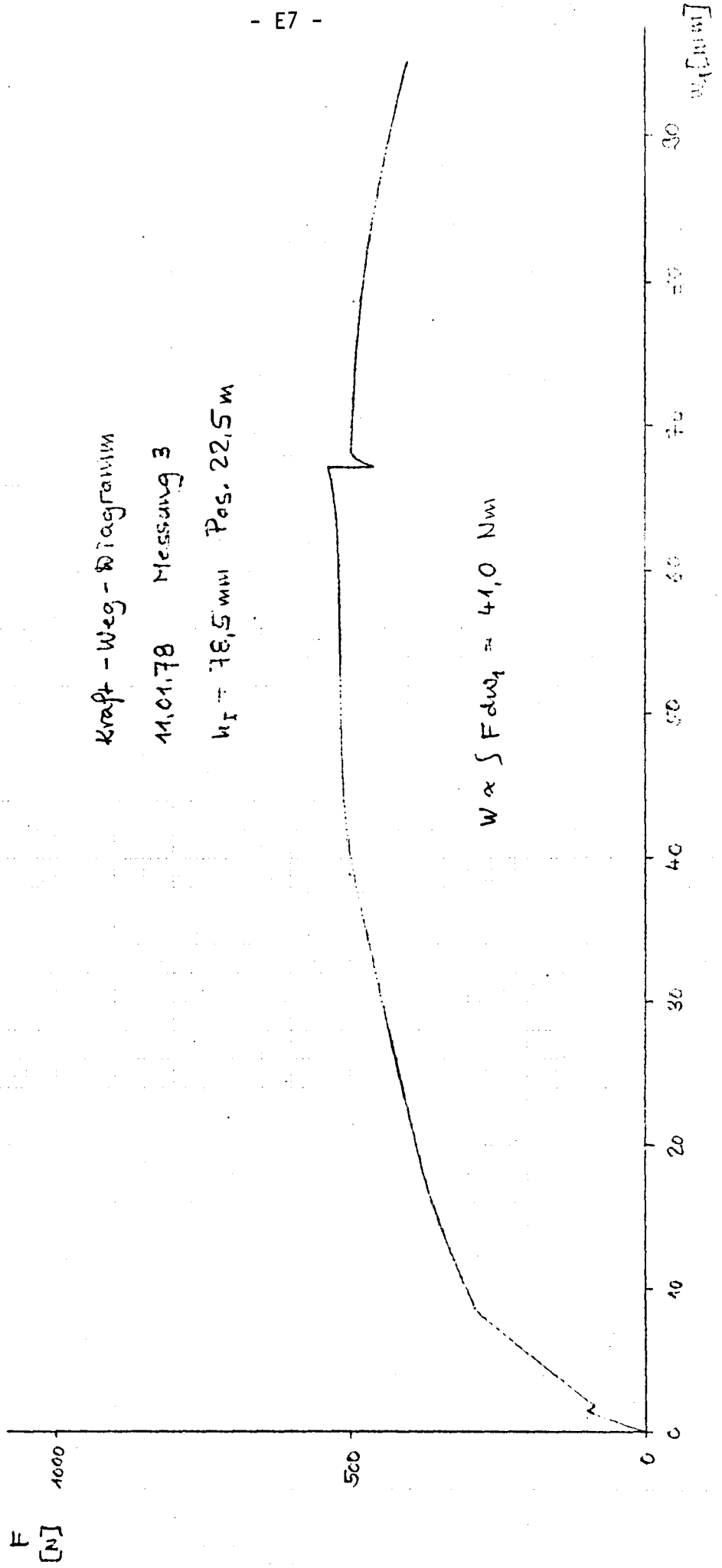
$w_F = 56 \text{ mm}$ Pos. 16.6 m



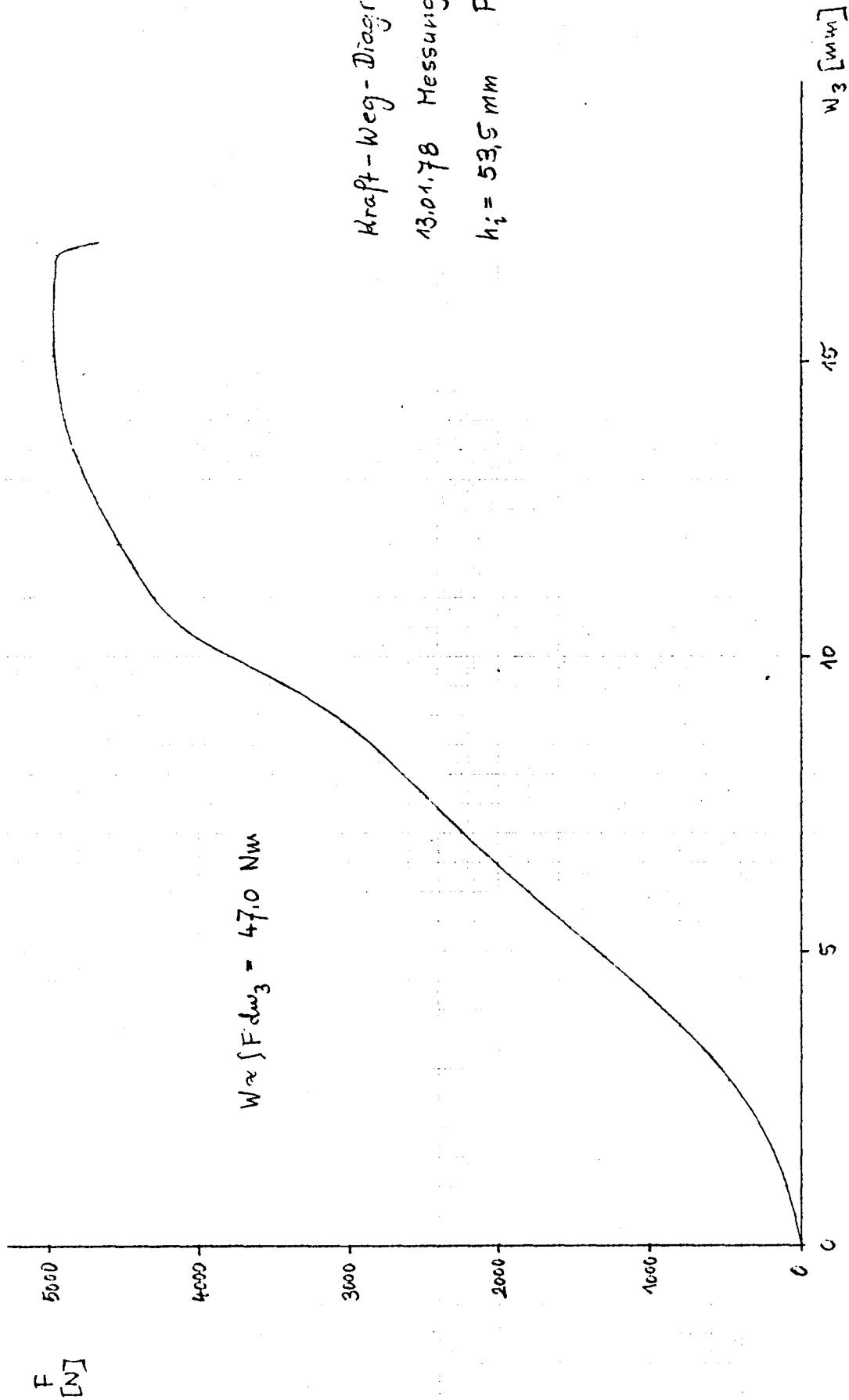
Kraft - Weg - Diagramm

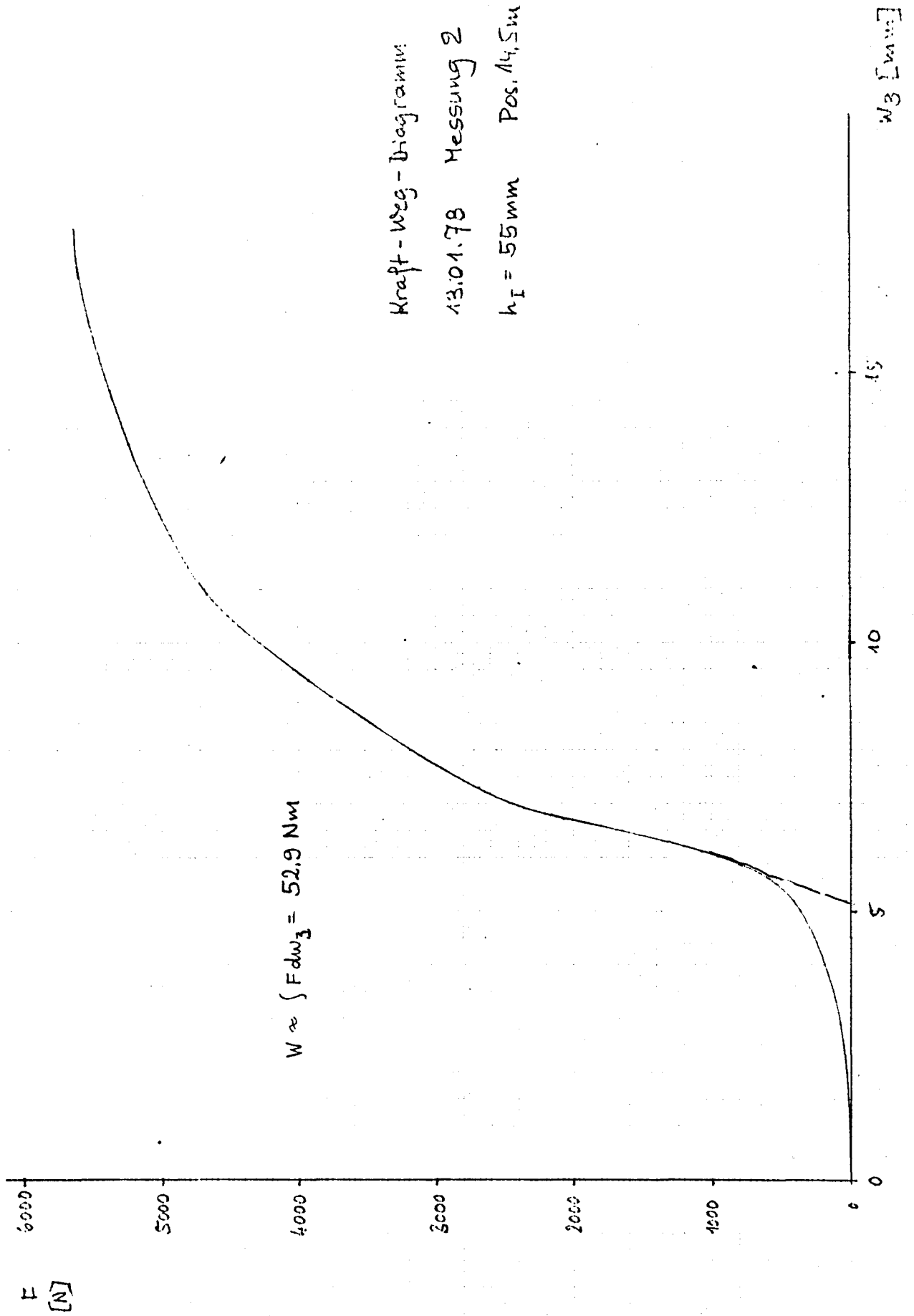
11.01.78 Messung 3

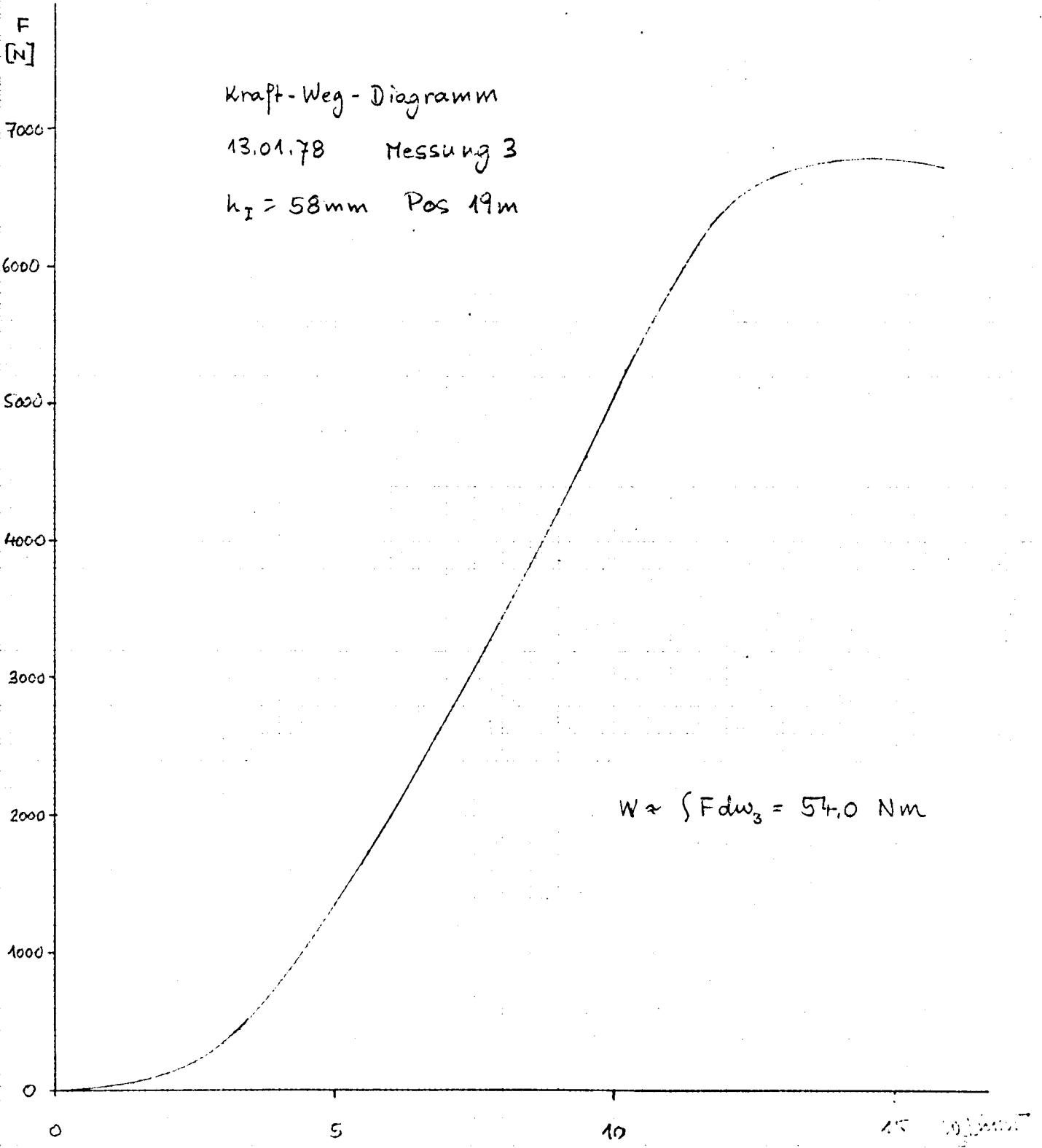
$h_T = 78,5 \text{ mm}$ Pos. 22,5 m



$W \propto \int F dw_T = 41,0 \text{ Nm}$

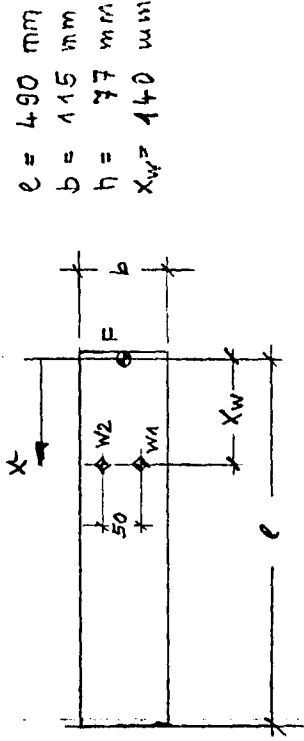




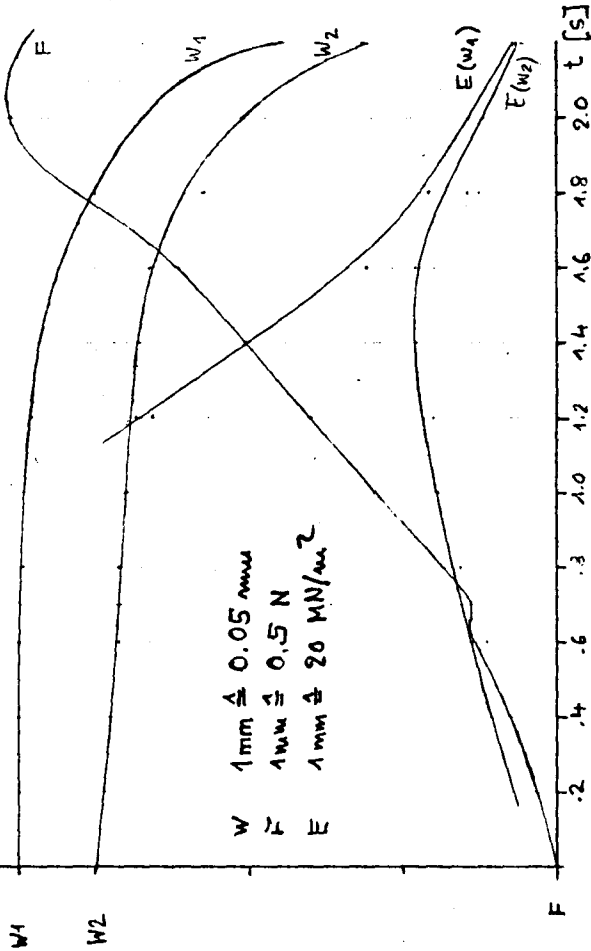


ANHANG F

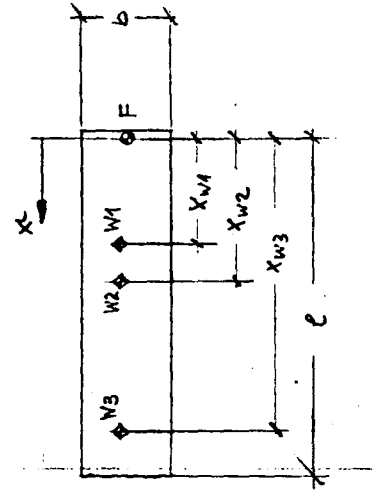
22.12.77
Kragbalken 1 Position 21m



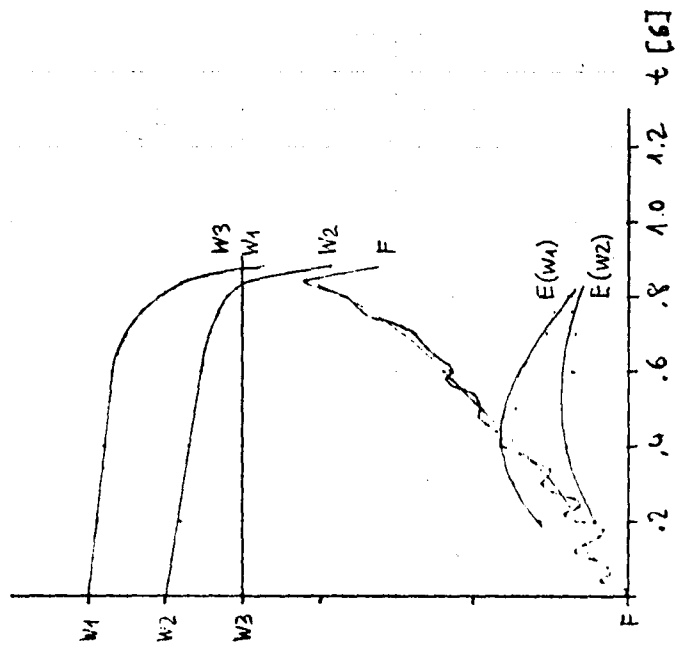
$l = 490 \text{ mm}$
 $b = 115 \text{ mm}$
 $h = 77 \text{ mm}$
 $X_{W1} = 140 \text{ mm}$



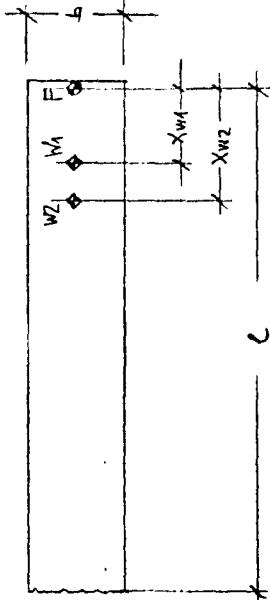
22.12.77
Kragbalken 2 Position 21m



$l = 450 \text{ mm}$
 $b = 117 \text{ mm}$
 $h = 75.5 \text{ mm}$
 $X_{W1} = 140 \text{ mm}$
 $X_{W2} = 190 \text{ mm}$
 $X_{W3} = 350 \text{ mm}$

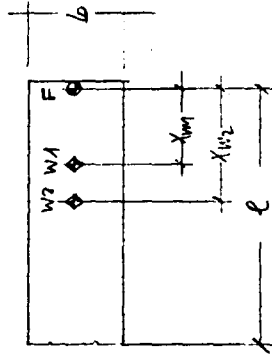


22.12.77
Kragbalken 3
Position 21 mm



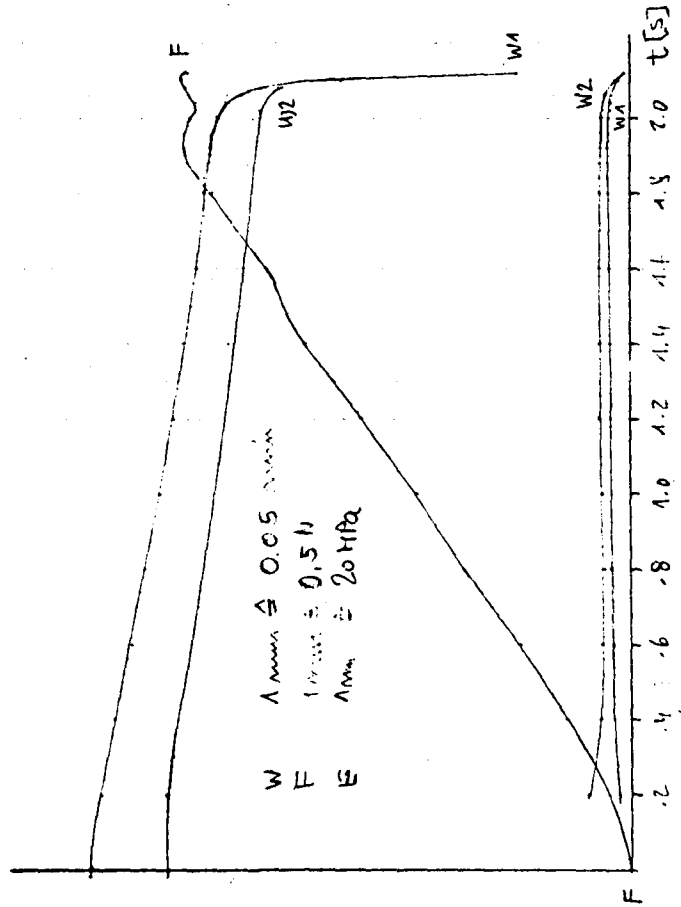
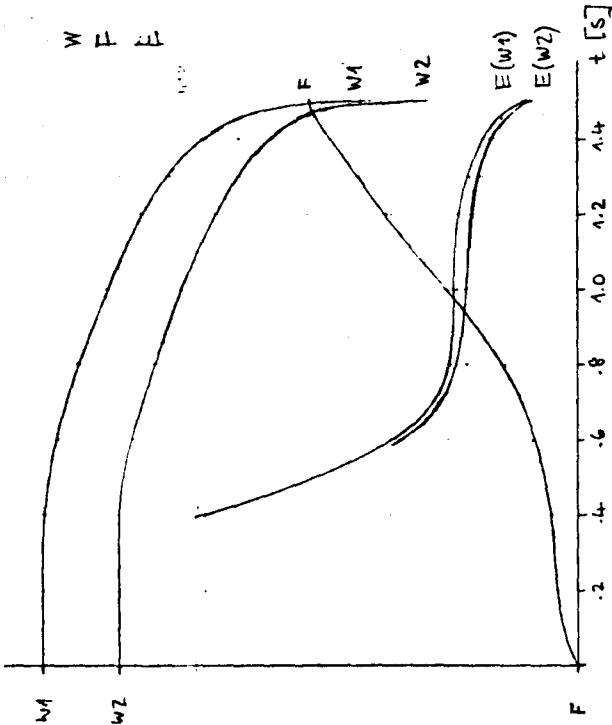
$b = 670 \text{ mm}$
 $b = 126 \text{ mm}$
 $h = 77 \text{ mm}$
 $x_{W1} = 100 \text{ mm}$
 $x_{W2} = 150 \text{ mm}$

22.12.77
Kragbalken 4
Position 21 mm



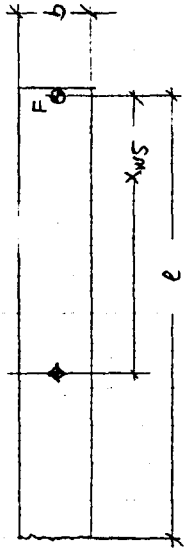
$b = 340 \text{ mm}$
 $b = 123 \text{ mm}$
 $h = 77 \text{ mm}$
 $x_{W1} = 100 \text{ mm}$
 $x_{W2} = 150 \text{ mm}$

$W = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.05 \text{ mm/s}$
 $F = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.5 \text{ N}$
 $E = 1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$



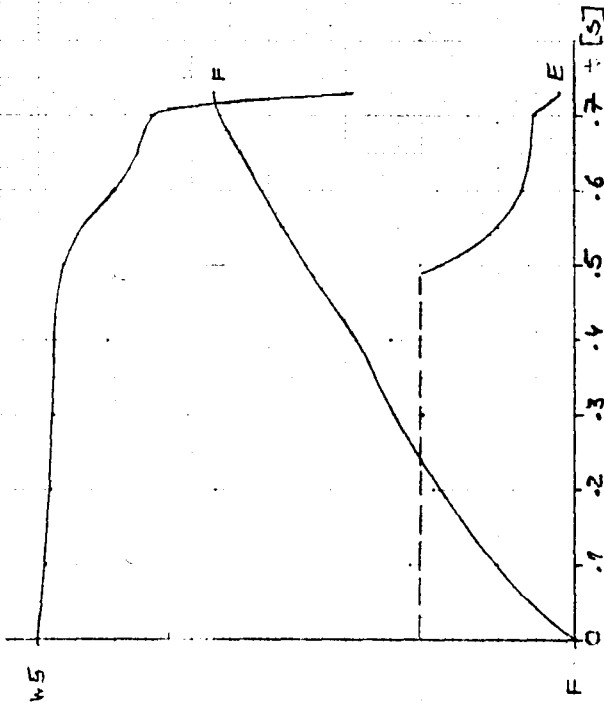
$W = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.05 \text{ mm/s}$
 $F = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.5 \text{ N}$
 $E = 1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$

29.12.77
Kragbalken 1 Position 8m

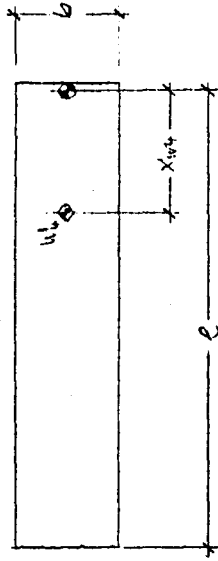


- $l = 590 \text{ mm}$
- $b = 94 \text{ mm}$
- $h = 78 \text{ mm}$
- $x_{MS} = 70 \text{ mm}$

- W $1 \text{ mm} \hat{=} 0,05 \text{ mm}$
- F $1 \text{ mm} \hat{=} 0,5 \text{ N}$
- E $1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$

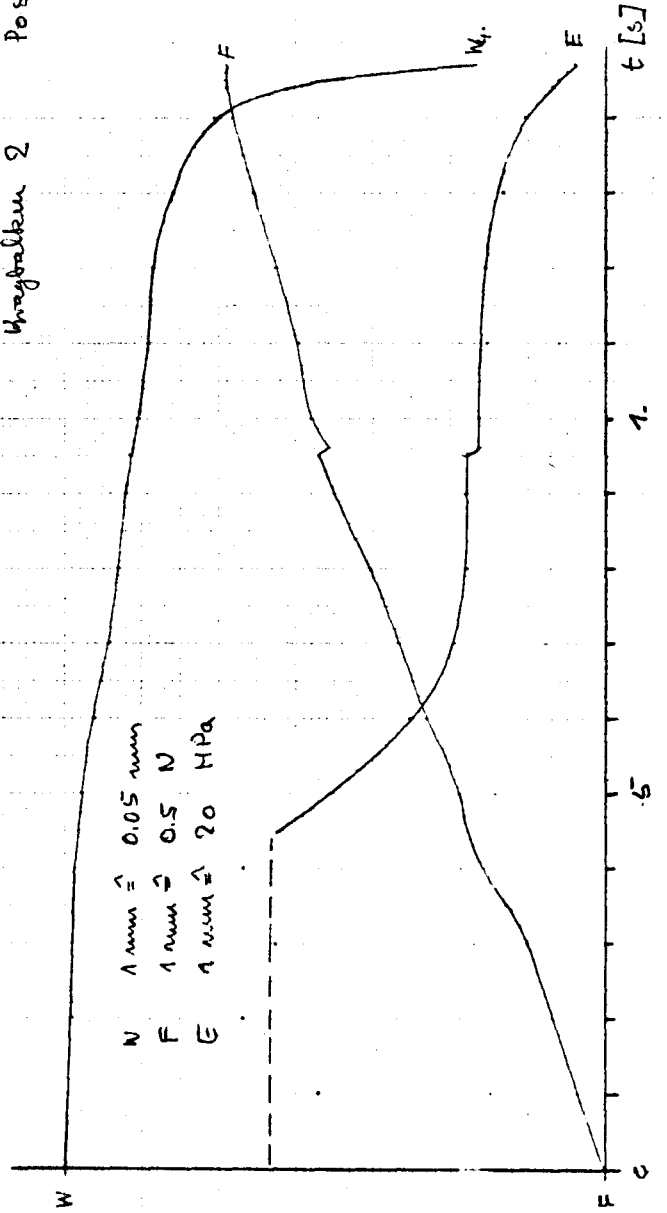


29.12.77
Kragbalken 2 Position 9m

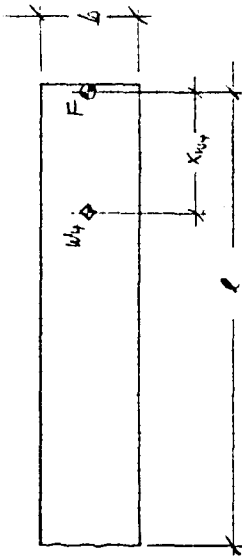


- $l = 600 \text{ mm}$
- $b = 134 \text{ mm}$
- $h = 78 \text{ mm}$
- $x_{MS} = 170 \text{ mm}$

- N $1 \text{ mm} \hat{=} 0,05 \text{ mm}$
- F $1 \text{ mm} \hat{=} 0,5 \text{ N}$
- E $1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$



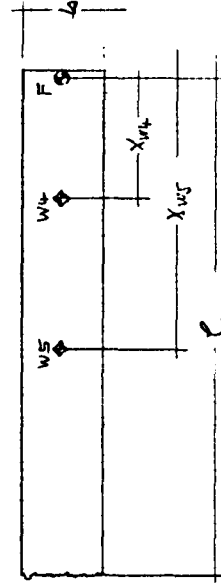
29.12.77
Magjaluken 3 Position 3m



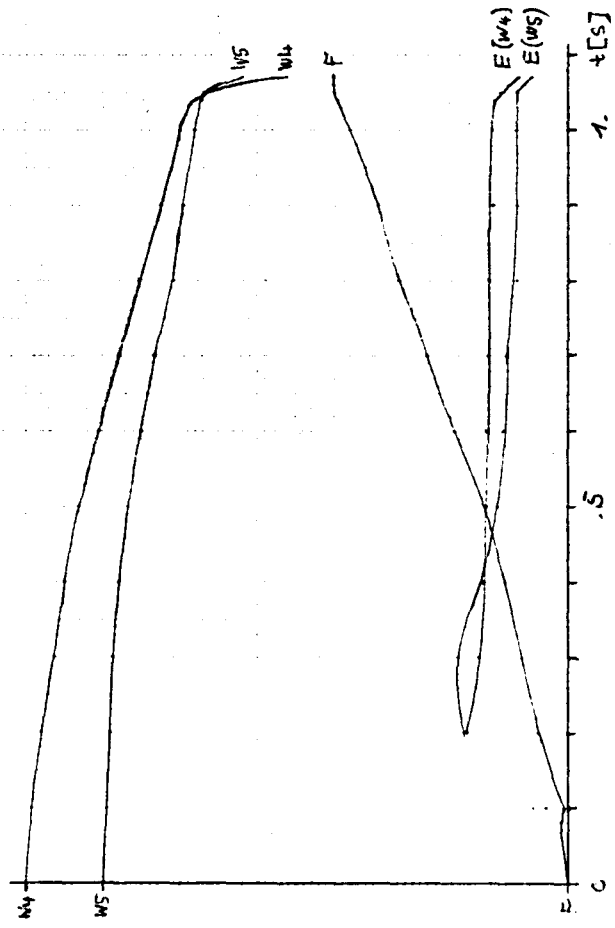
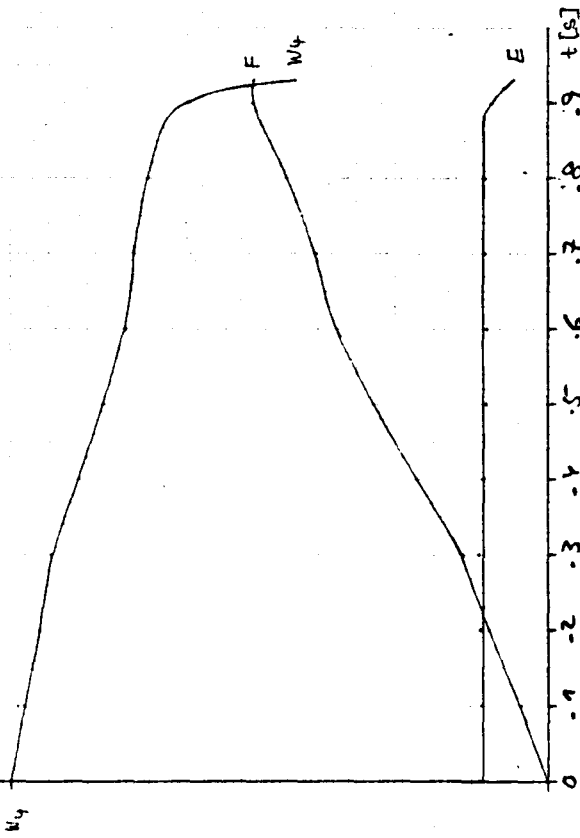
- $l = 600 \text{ mm}$
- $b = 127 \text{ mm}$
- $h = 78 \text{ mm}$
- $X_{W4} = 160 \text{ mm}$

- 74 -

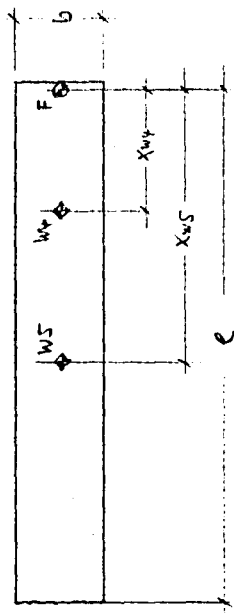
29.12.77
Magjaluken 4 Position 3m



- $l = 660 \text{ mm}$
- $b = 105 \text{ mm}$
- $h = 50 \text{ mm}$
- $X_{W4} = 160 \text{ mm}$
- $X_{W5} = 360 \text{ mm}$

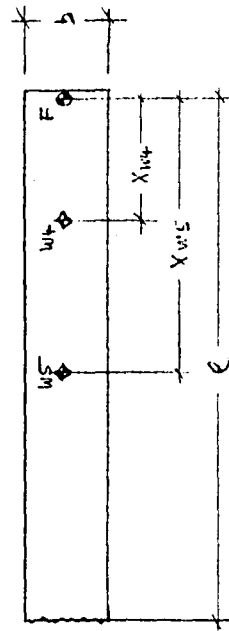


29.12.77
Kreuzbrücken 5 Position 8 m

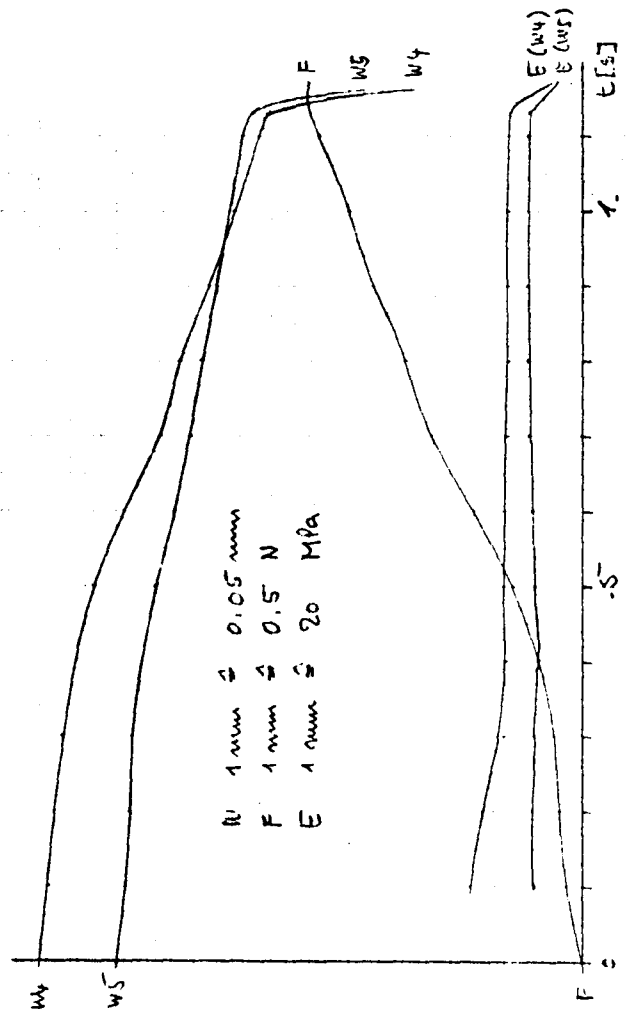
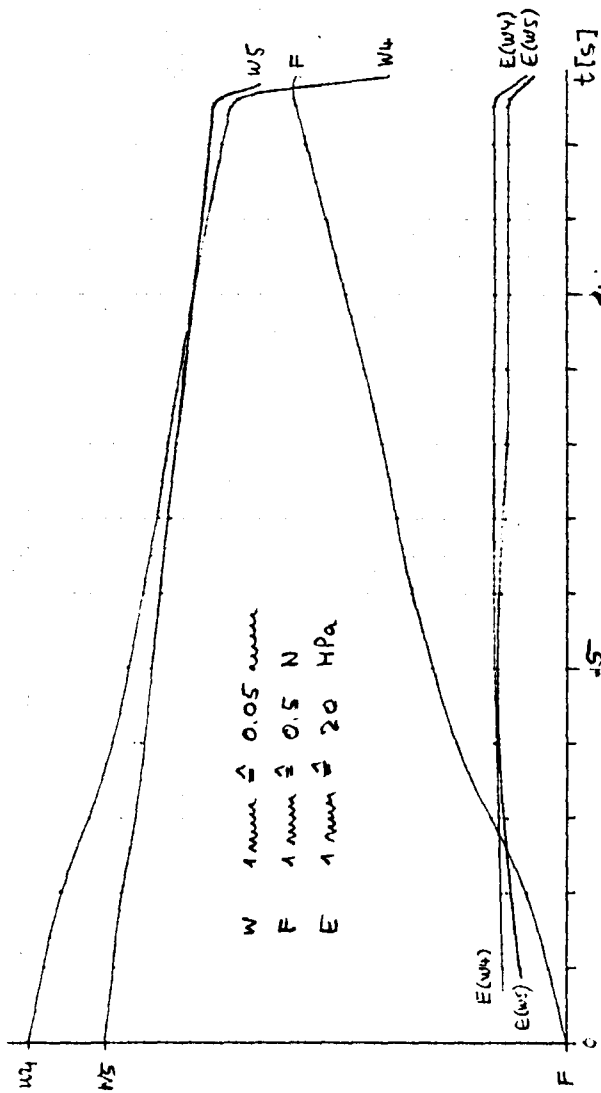


$l = 680 \text{ mm}$ $X_{W4} = 160 \text{ mm}$
 $b = 113,5 \text{ mm}$ $X_{WS} = 360 \text{ mm}$
 $h = 80 \text{ mm}$

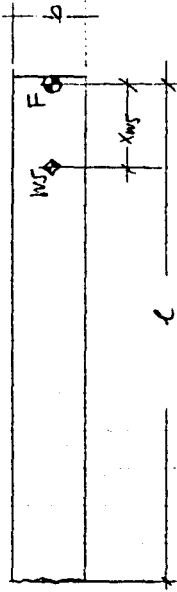
29.12.77
Kreuzbrücken 6 Position 9 m



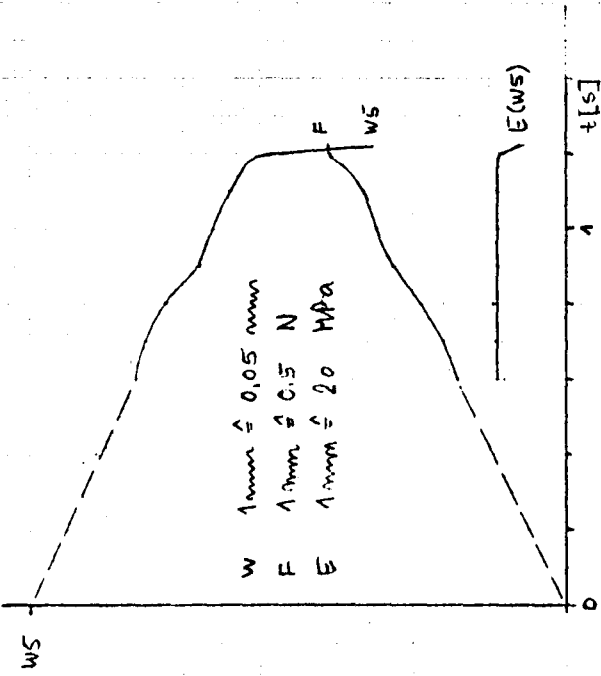
$l = 690 \text{ mm}$ $X_{W4} = 160 \text{ mm}$
 $b = 107,5 \text{ mm}$ $X_{WS} = 360 \text{ mm}$
 $h = 80 \text{ mm}$



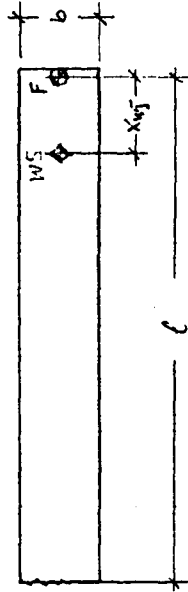
29.12.77 16:00
Kragbalken 7 Position 17m



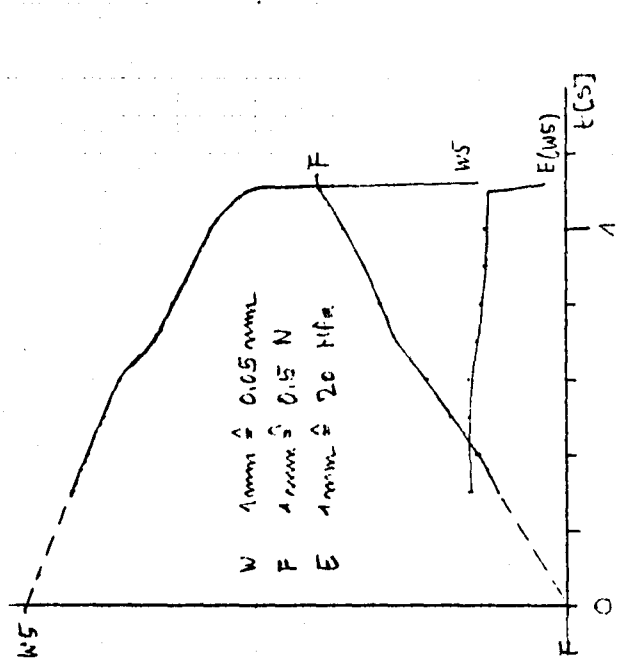
$l = 660 \text{ mm}$
 $b = 99,5 \text{ mm}$
 $h = 80,5 \text{ mm}$
 $x_{WS} = 110 \text{ mm}$



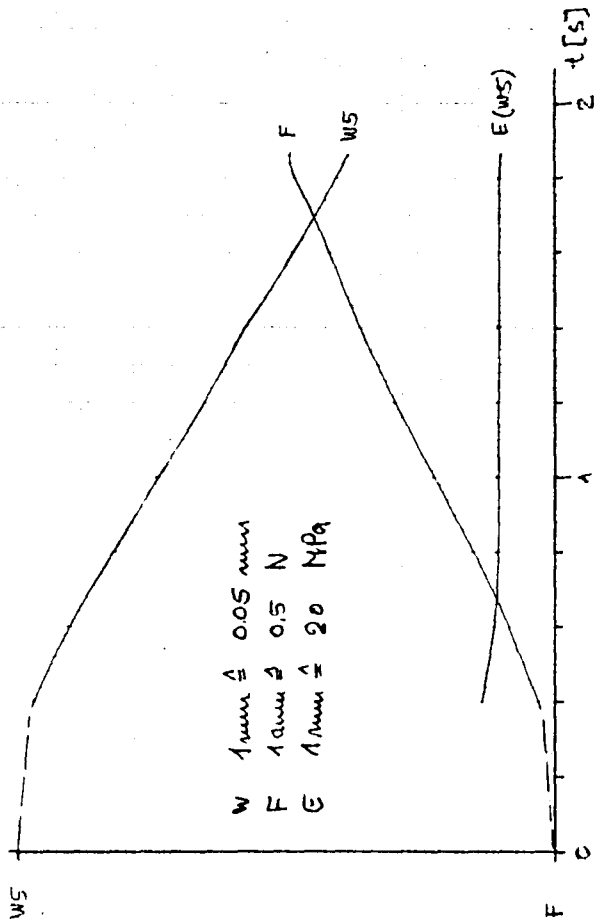
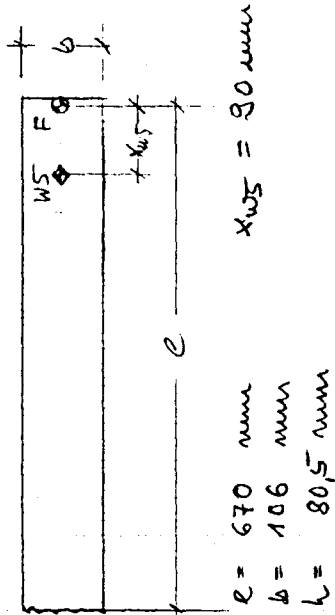
29.12.77 16:05
Kragbalken 8 Position 17m



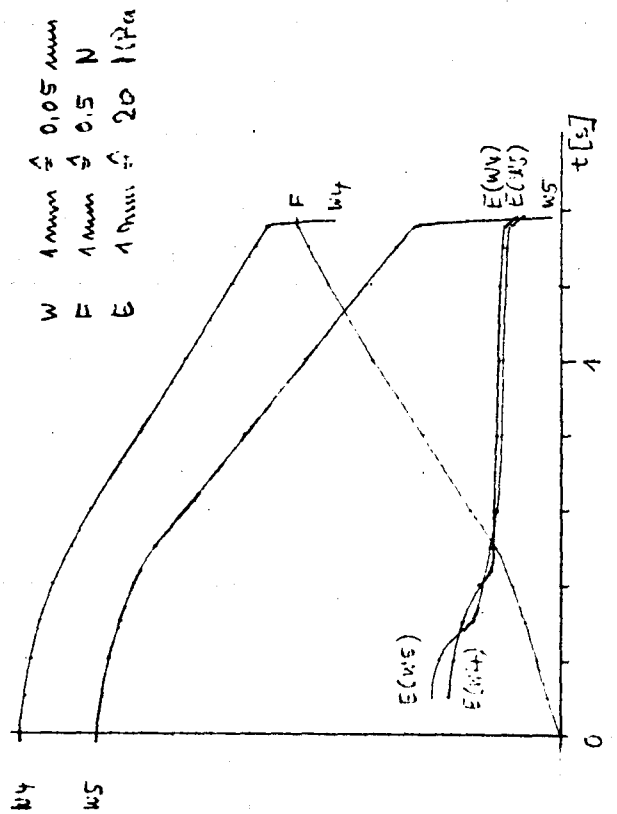
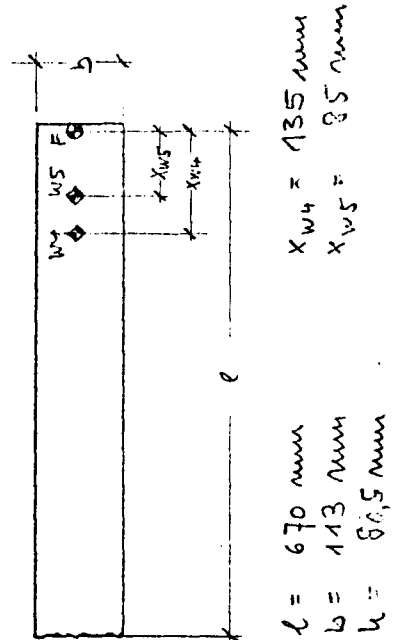
$l = 670 \text{ mm}$
 $b = 102,5 \text{ mm}$
 $h = 80,5 \text{ mm}$
 $x_{WS} = 160 \text{ mm}$



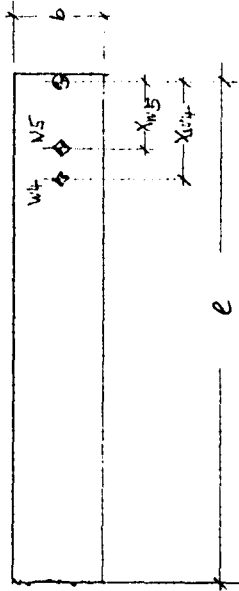
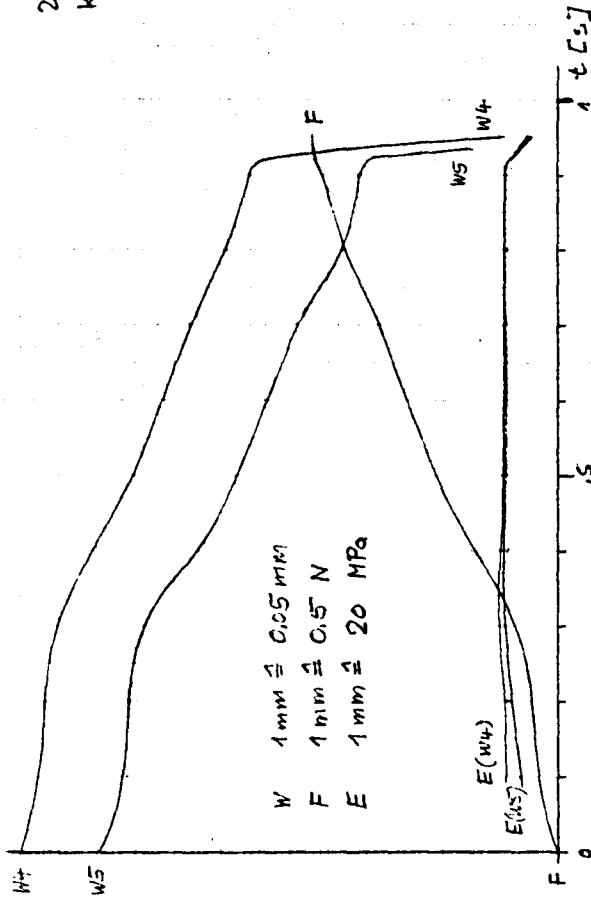
28.12.77 16:10
Kragbalken 9 Position 17m



29.12.77 16:15
Kragbalken 10 Position 17m



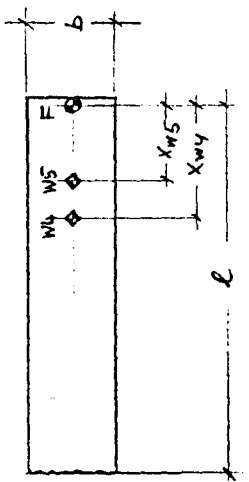
23.12.77 16:20
 Kragbalken 11 Position 17M



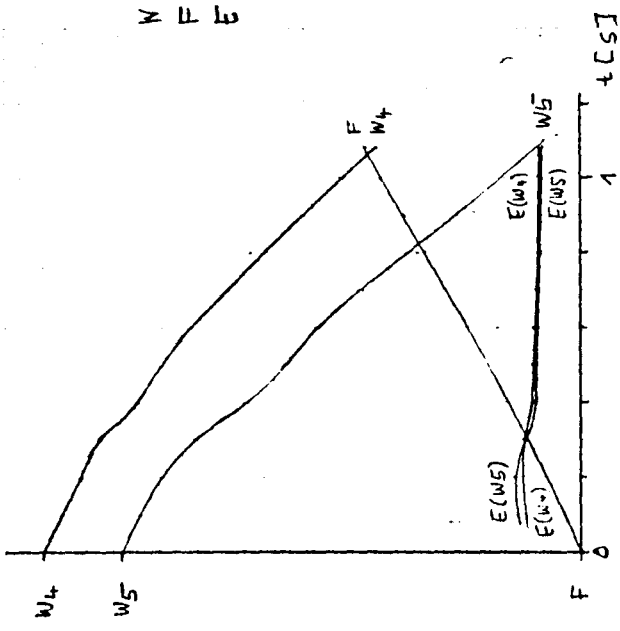
$l = 665 \text{ mm}$
 $b = 117 \text{ mm}$
 $h = 80,5 \text{ mm}$
 $X_{W4} = 140 \text{ mm}$
 $X_{W5} = 99 \text{ mm}$

10.01.78 14:21
Kragbalken 1 Pos. 4.2 m

$l = 490 \text{ mm}$
 $b = 115 \text{ mm}$
 $h = 52,5 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 100 \text{ mm}$

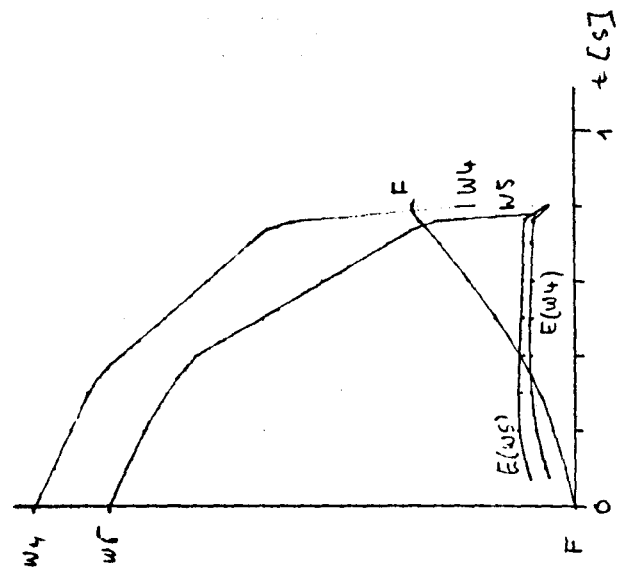
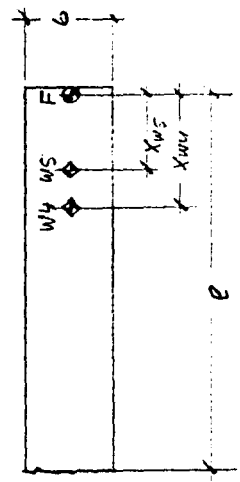


N $1 \text{ mm} \hat{=} 0,05 \text{ mm}$
 F $1 \text{ mm} \hat{=} 0,5 \text{ N}$
 E $1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$

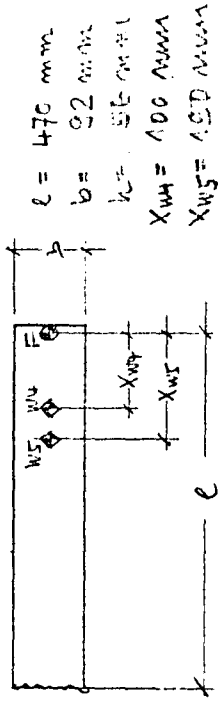


10.01.78 14:23
Kragbalken 3 Pos. 4.2 m

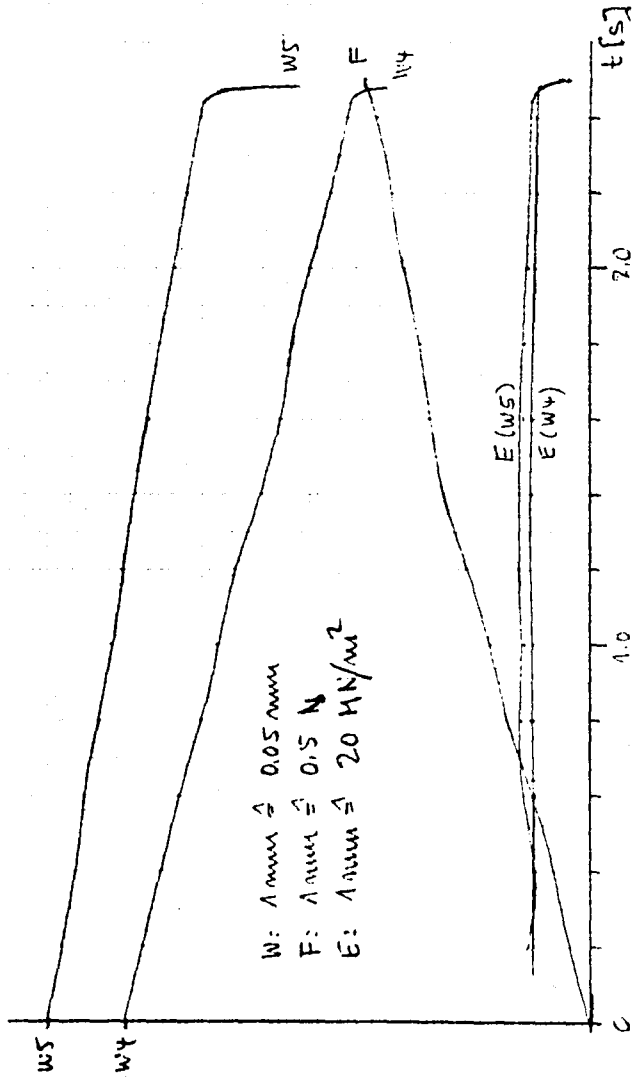
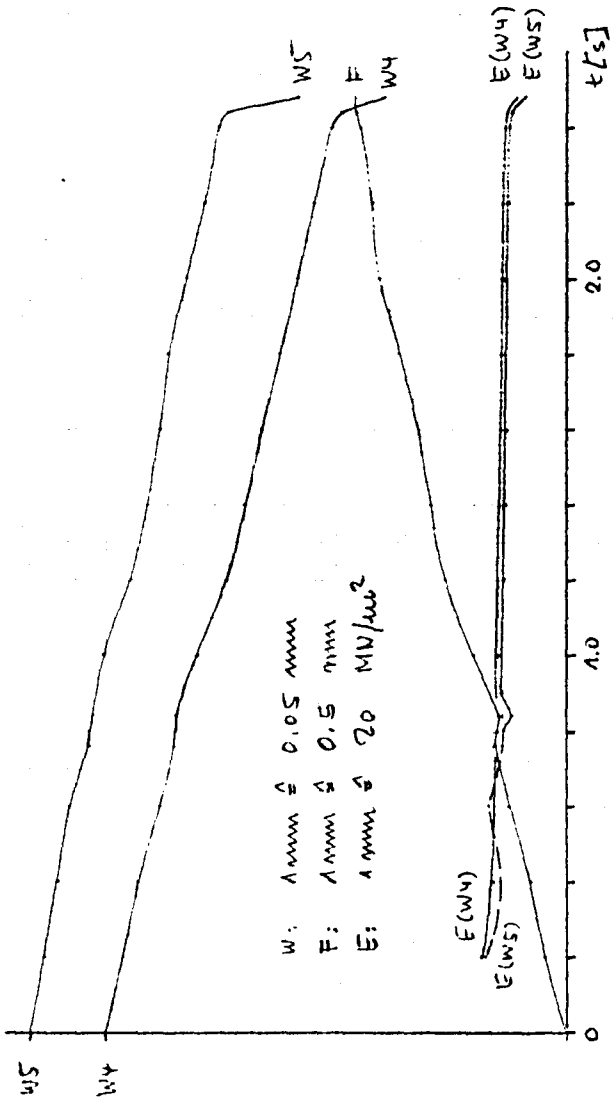
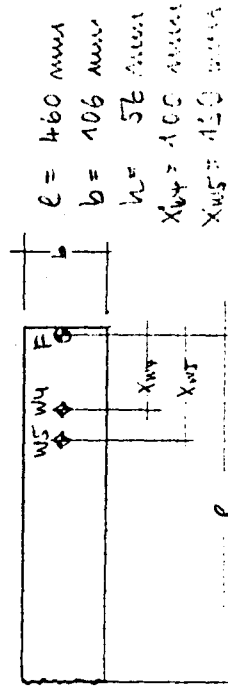
$l = 498 \text{ mm}$
 $b = 113 \text{ mm}$
 $h = 52,5 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 100 \text{ mm}$



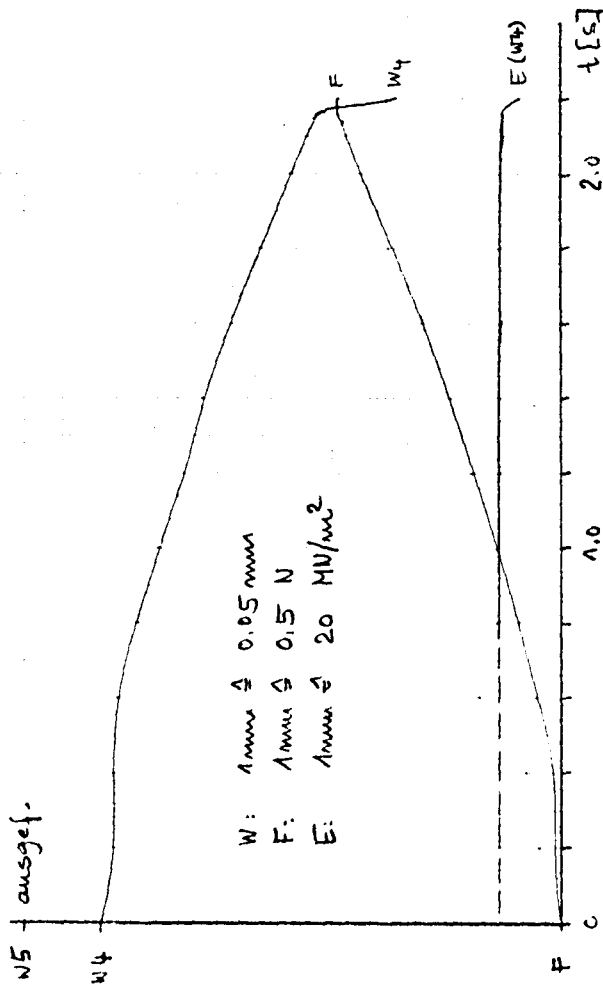
10.01.78 16:21
Kragbalken 7 Pos. 13 m



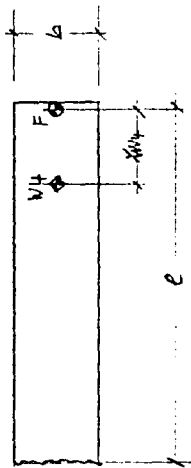
10.01.78 16:24
Kragbalken 8 Pos. 13 m



N5 ausgef.

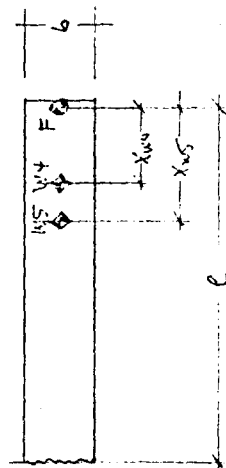


10.01.78 16:15
Kragbolzen 5 Pos. 13 m



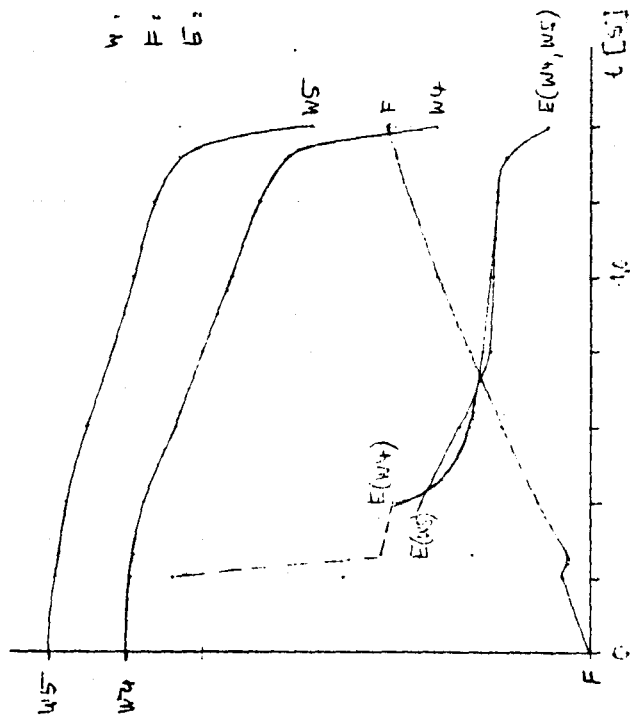
$l = 470\text{ mm}$
 $b = 110\text{ mm}$
 $h = 56\text{ mm}$
 $x_{42} = 180\text{ mm}$

10.01.78 16:18
Kragbolzen 6 Pos. 13 m

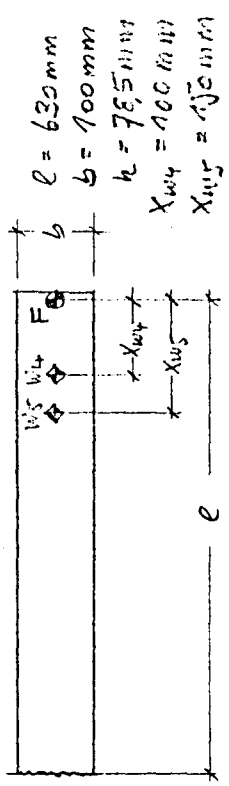


$l = 470\text{ mm}$
 $b = 90\text{ mm}$
 $h = 56\text{ mm}$
 $x_{44} = 160\text{ mm}$
 $x_{45} = 150\text{ mm}$

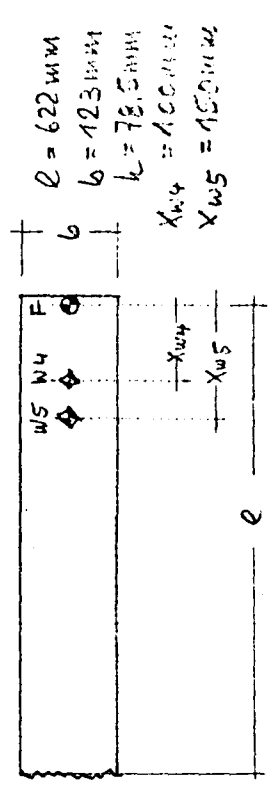
$W: 1\text{mm} \pm 0.05\text{ mm}$
 $F: 1\text{mm} \pm 0.5\text{ N}$
 $E: 1\text{mm} \pm 20\text{ MJ/m}^2$



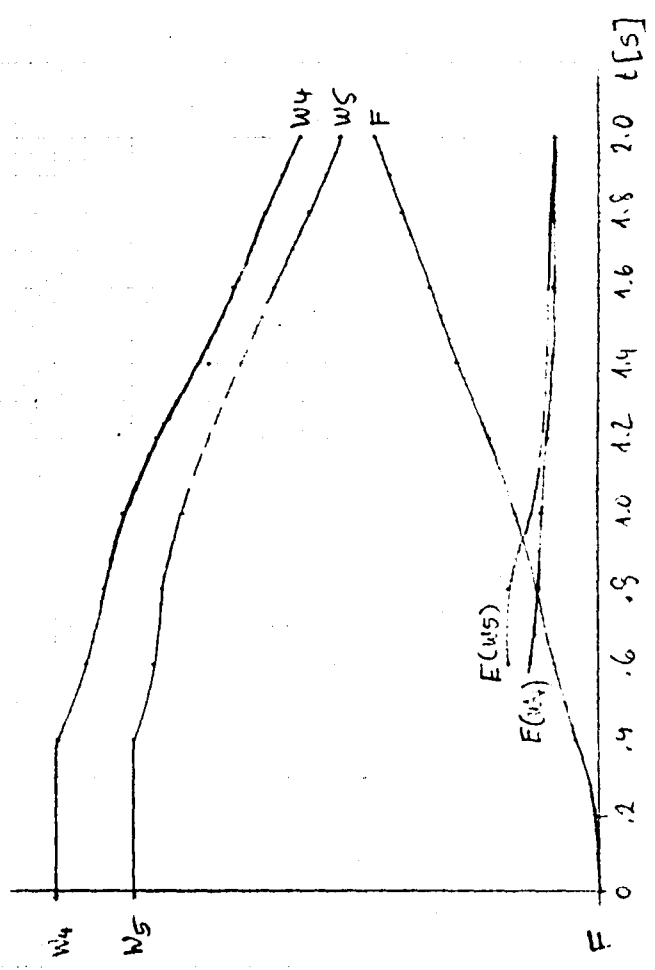
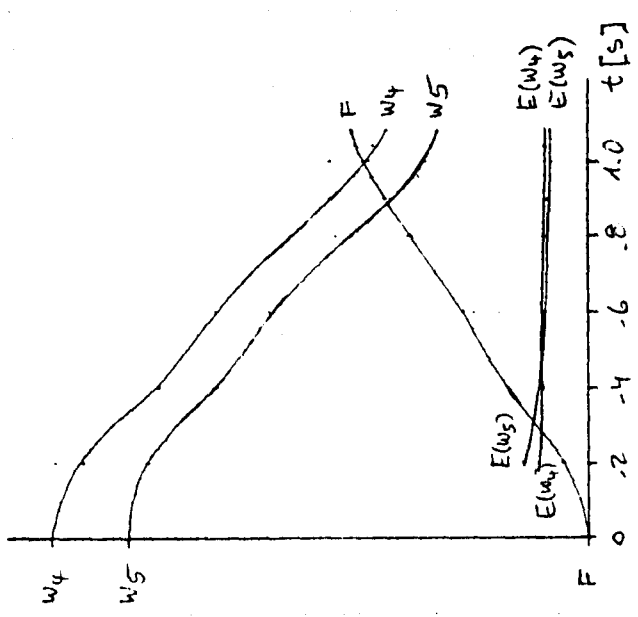
11.01.78 18:00
Kragbalken 1 Pos. 19m



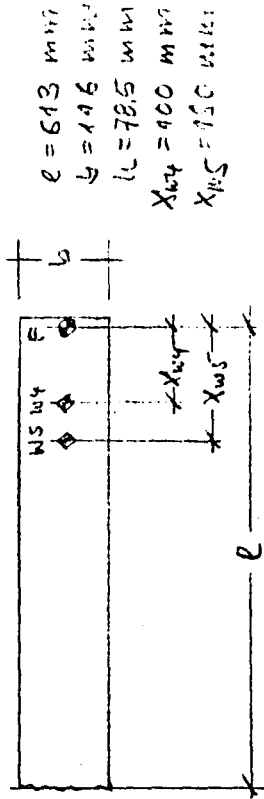
11.01.78 18:02
Kragbalken 2 Pos. 19m



W 1 mm Δ 0.05 mm
F 1 mm Δ 0.5 N
E 1 mm Δ 20 MPa

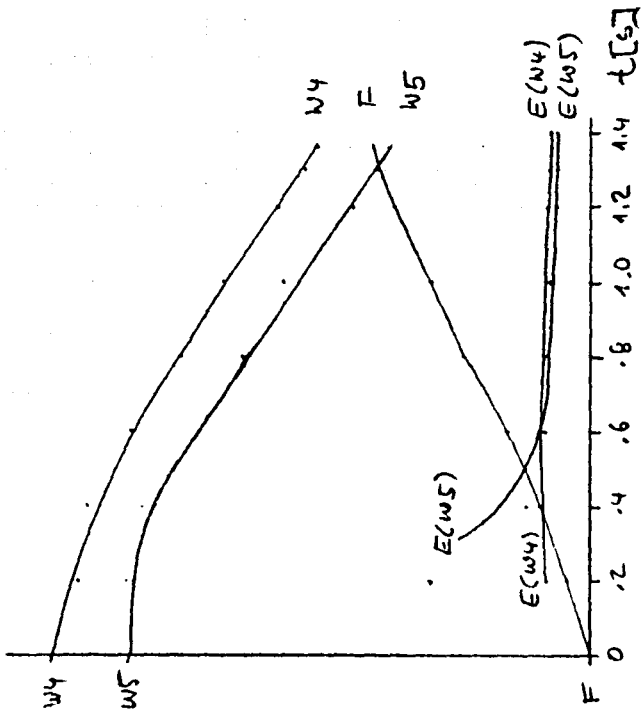


11.01.78 18.04 Pos. 19m
Kragbalken 3



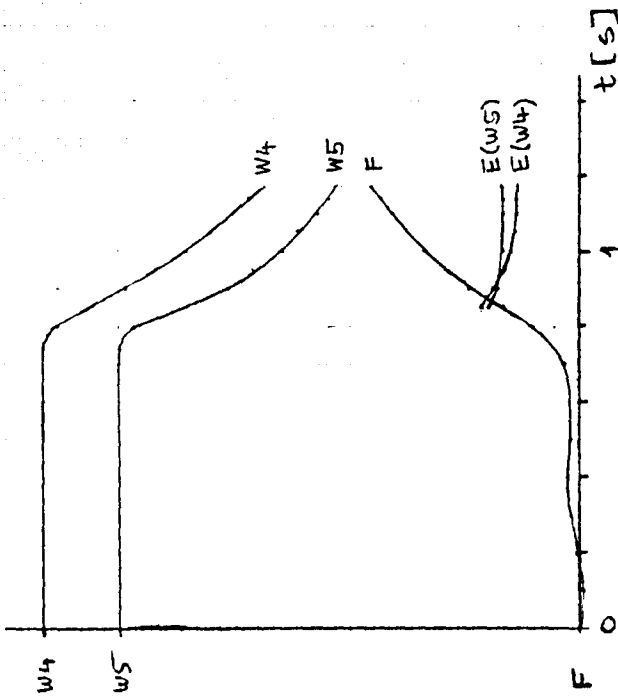
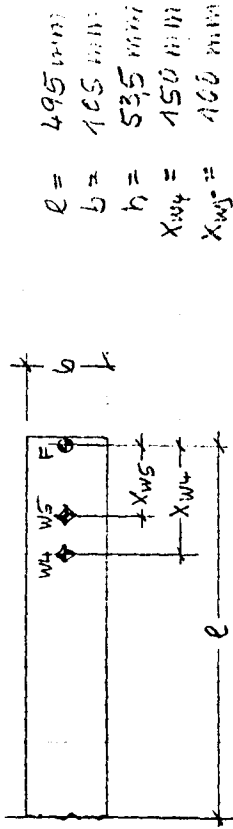
$e = 613 \text{ mm}$
 $b = 196 \text{ mm}$
 $l = 78.5 \text{ m}$
 $x_{w4} = 400 \text{ mm}$
 $x_{w5} = 150 \text{ mm}$

$w = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.05 \text{ mm}$
 $F = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.5 \text{ N}$
 $E = 1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$

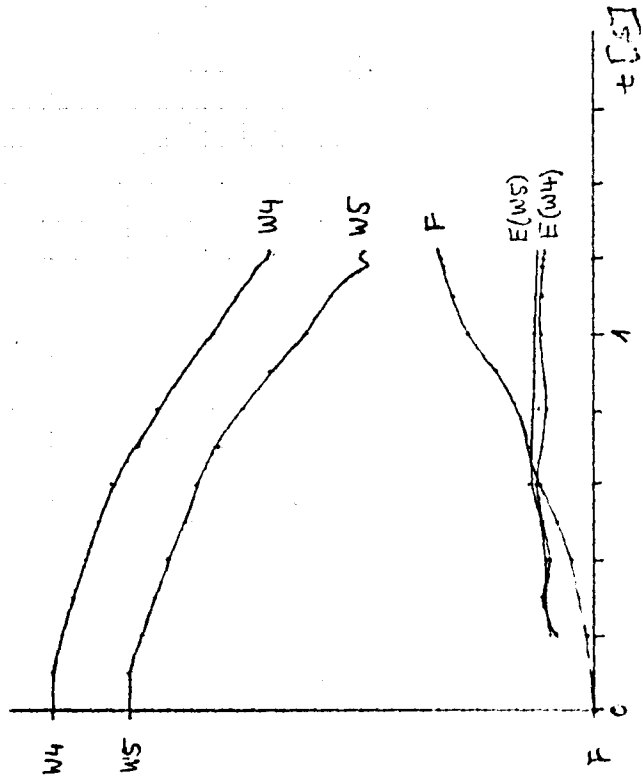
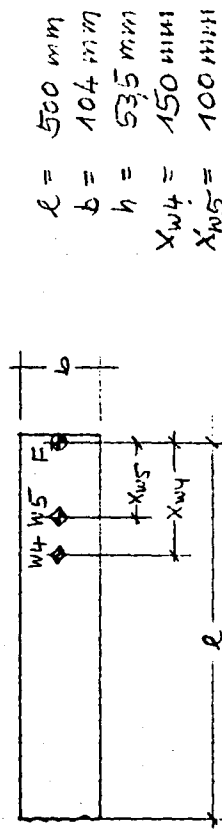


W 1 mm ± 0.05 mm
 F 1 mm ± 0.5 N
 E 1 mm ± 20 MPa

13.01.78 17:25
 Kragbalken 1 Pos. 6 m

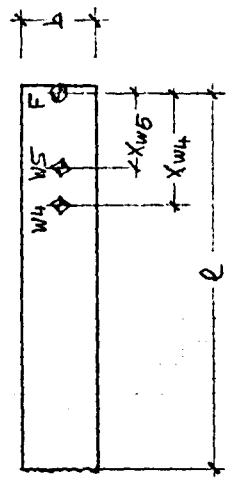


13.01.78 17:27
 Kragbalken 2 Pos. 6 m

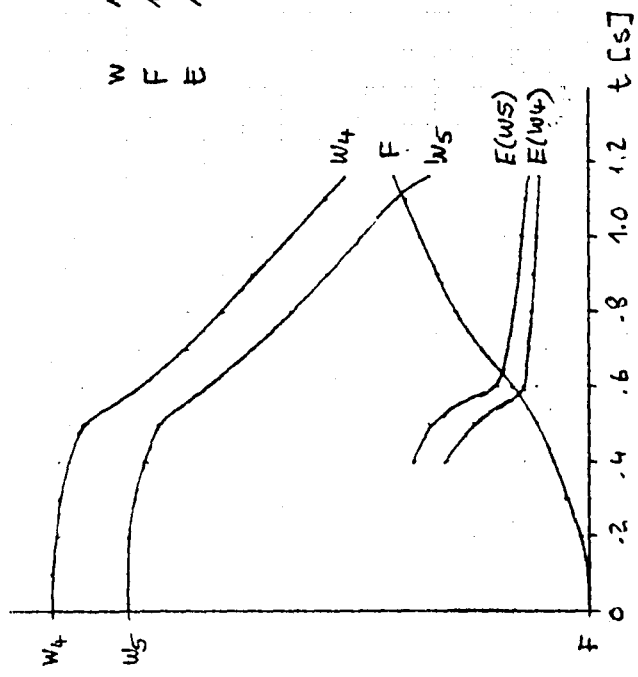


W 1mm ± 0,05 mm
 F 1mm ± 0,5 N
 E 1mm ± 20 MPa

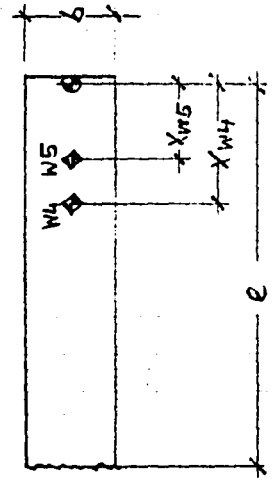
13.01.78 17:28
 Kragbalken 3 Pos. 6m



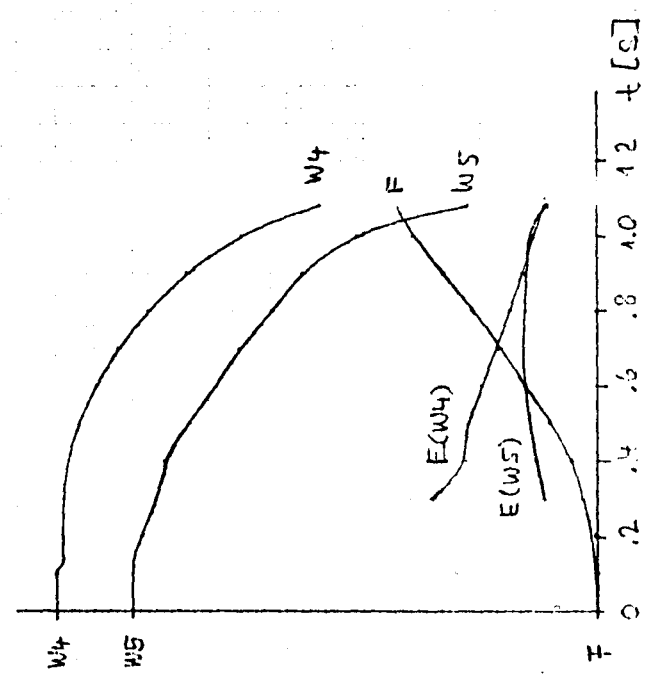
$l = 502 \text{ mm}$
 $b = 97 \text{ mm}$
 $h = 53,5 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 100 \text{ mm}$



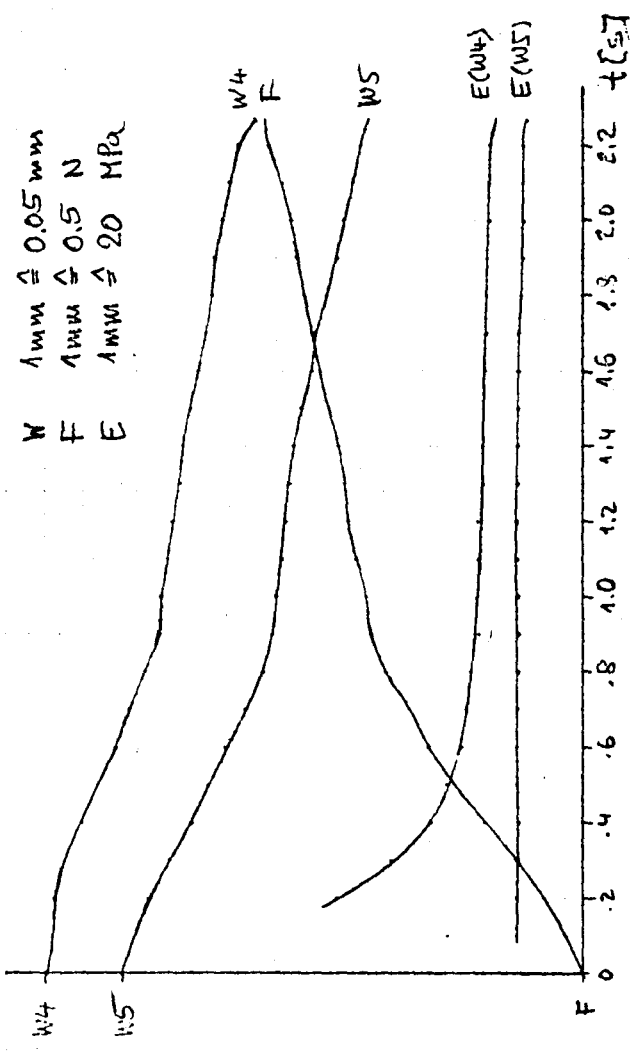
13.01.78 17:31 h
 Kragbalken 4 Pos. 6m



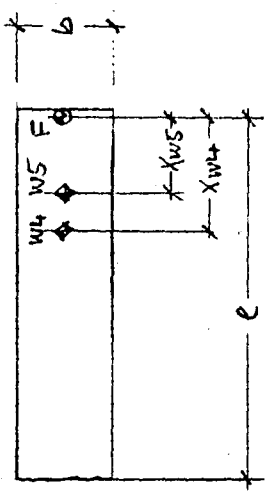
$l = 510 \text{ mm}$
 $b = 117 \text{ mm}$
 $h = 53,5 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 150 \text{ mm}$



$N = 1\text{mm} \hat{=} 0.05\text{mm}$
 $F = 1\text{mm} \hat{=} 0.5\text{N}$
 $E = 1\text{mm} \hat{=} 20\text{MPa}$



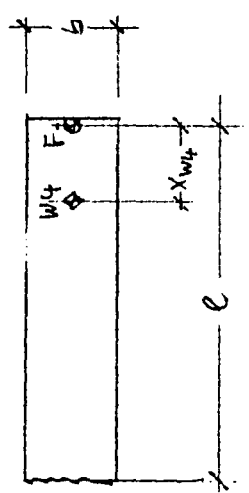
13.01.78 18:30
 Kragbalken 5 Pos. 14.5m



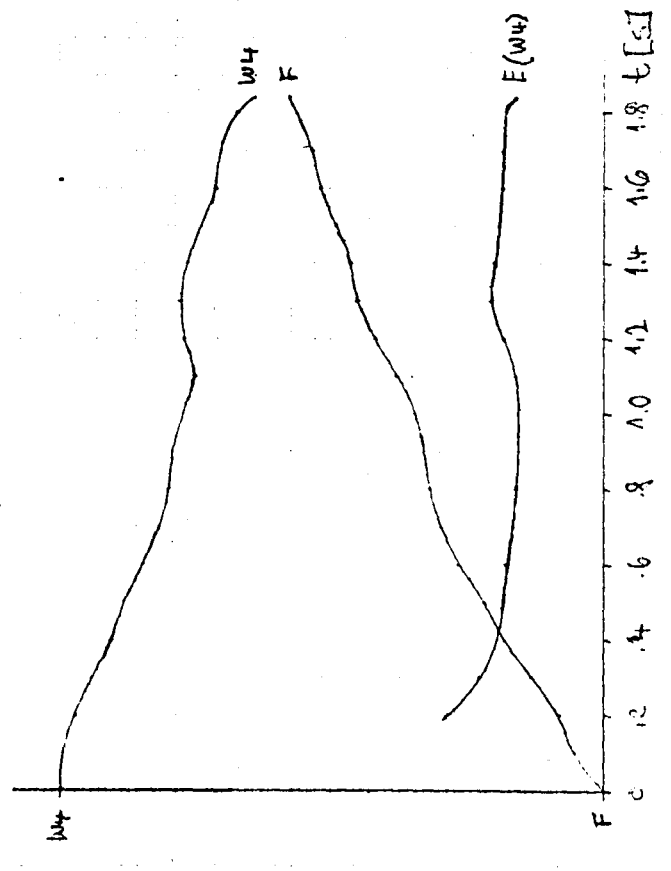
$c = 480\text{mm}$
 $b = 124\text{mm}$
 $h = 55\text{mm}$
 $X_{W4} = 150\text{mm}$
 $X_{W5} = 100\text{mm}$

13.01.78 18:33
 Kragbalken 7

18:33
 Pos. 14.5m



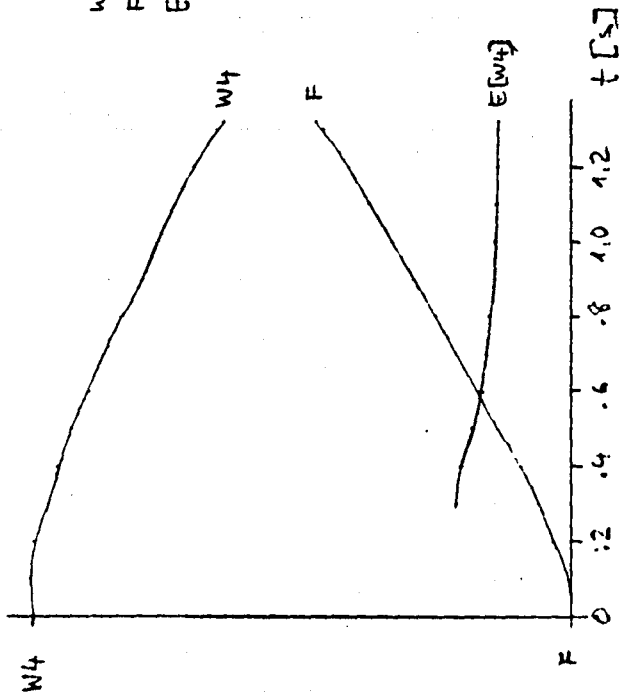
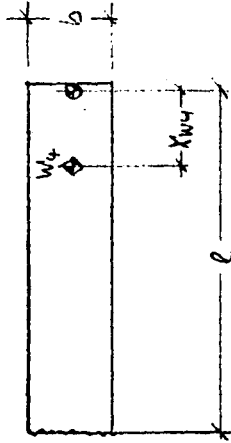
$c = 470\text{mm}$
 $b = 119\text{mm}$
 $h = 55\text{mm}$
 $X_{W4} = 100\text{mm}$



13.01.78 18:36
Kragbalken: 8 Pos. 14.5 m

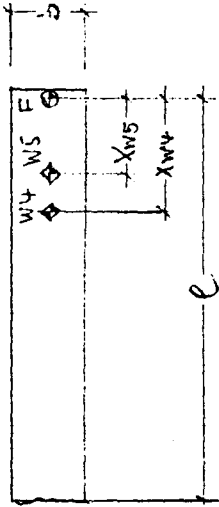
W 1 mm ± 0,05 mm
F 1 mm ± 0,5 mm
E 1 mm ± 20 N/a

$l = 455 \text{ mm}$
 $b = 110 \text{ mm}$
 $h = 55 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 100 \text{ mm}$



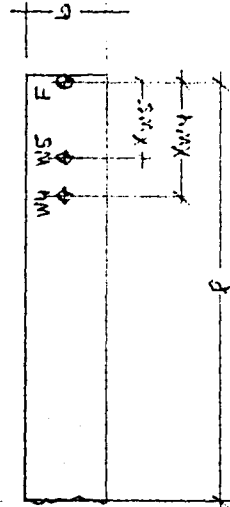
13.01.78 20:52
Kragbalken 9 Pos. 19m

$l = 535 \text{ mm}$
 $b = 96 \text{ mm}$
 $h = 58 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 160 \text{ mm}$

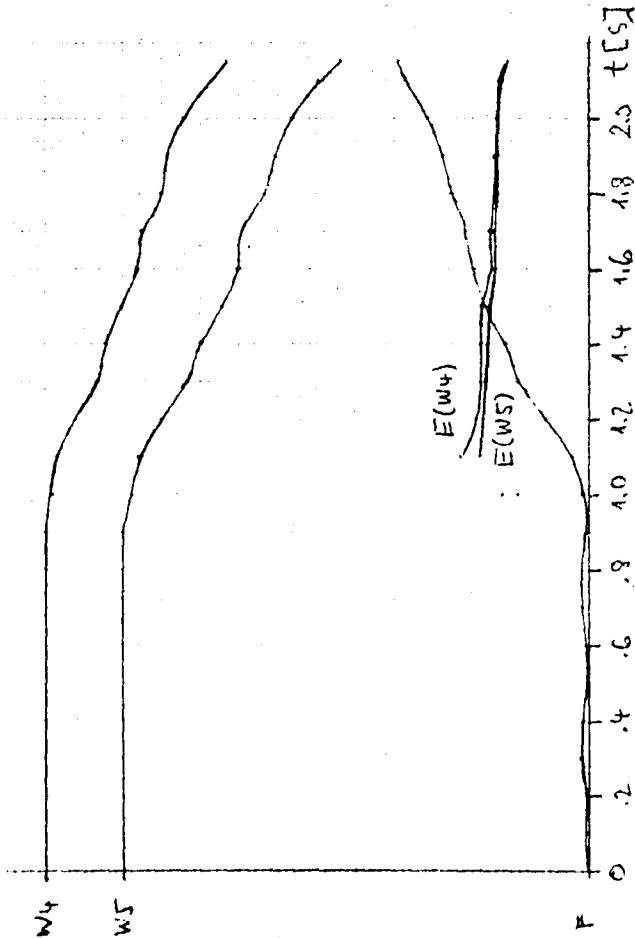
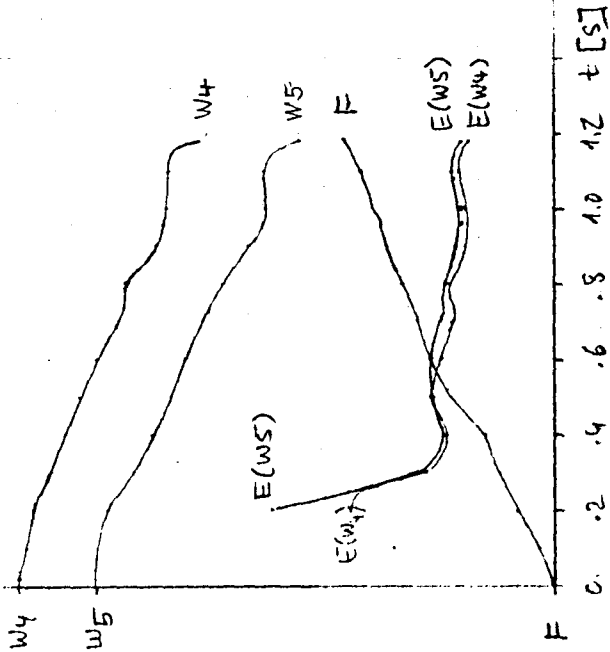


13.01.78 20:53
Kragbalken 10 Pos. 19m

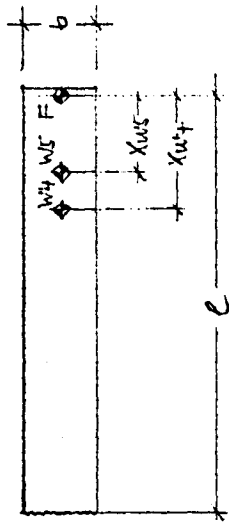
$l = 555 \text{ mm}$
 $b = 104 \text{ mm}$
 $h = 58 \text{ mm}$
 $x_{W4} = 150 \text{ mm}$
 $x_{W5} = 160 \text{ mm}$



W $1 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$
F $1 \text{ mN} \pm 0.5 \text{ N}$
E $1 \text{ mN} \pm 20 \text{ kPa}$

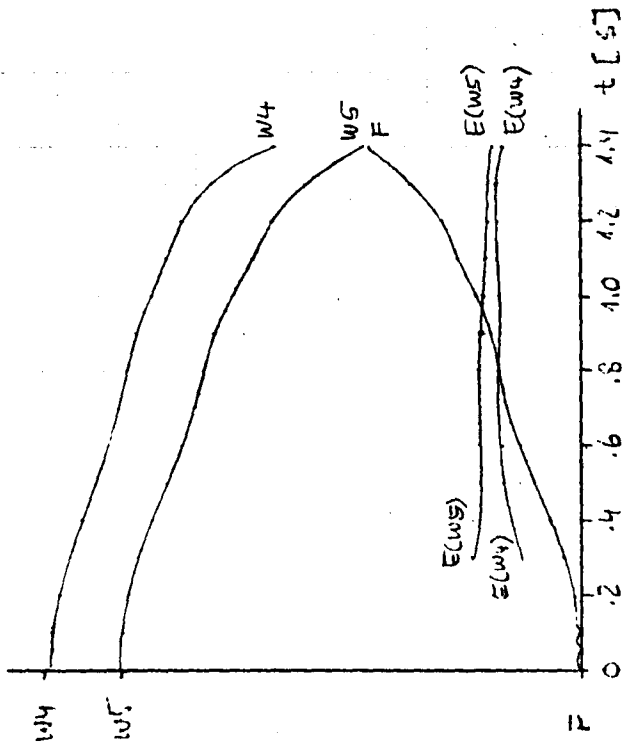


13.01.78 20:54
Kragbalken 11 Pos. 19 m

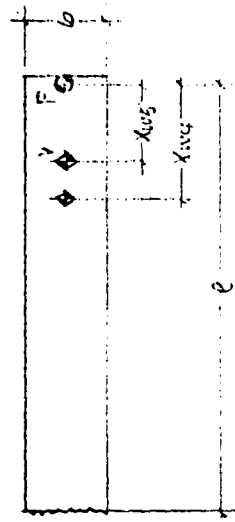


$l = 555 \text{ mm}$
 $b = 96 \text{ mm}$
 $h = 58 \text{ mm}$
 $X_{w4} = 150 \text{ mm}$
 $X_{w5} = 100 \text{ mm}$

$W = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.05 \text{ mm}$
 $F = 1 \text{ mm} \hat{=} 0.5 \text{ N}$
 $E = 1 \text{ mm} \hat{=} 20 \text{ MPa}$



13.01.78 20:55
Kragbalken 12 Pos. 17 m



$l = 505 \text{ mm}$
 $b = 106 \text{ mm}$
 $h = 58 \text{ mm}$
 $X_{w4} = 150 \text{ mm}$
 $X_{w5} = 100 \text{ mm}$

