

Eingeleimte Gewindestangen unter
Axialbelastung bei Übertragung von
großen Kräften und bei Aufnahme
von Querkraften in Biegeträgern
Teil 2: Einfluß von Klimaeinwirkung und
Langzeitbelastung

T 2561

T 2561

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

**Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung
bei Übertragung von großen Kräften und bei
Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern**

Teil 2: Einfluß von Klimaeinwirkung und Langzeitbelastung

von

Jürgen Ehlbeck, Paulo Belchior-Gaspard und Matthias Gerold

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Abt. Ingenieurholzbau
Universität Fridericiana Karlsruhe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck

1992

VORWORT

Die Verwendung von eingeleimten Gewindestangen zur Verhinderung von Querschlüssen in Brettschichtholzbauteilen oder zur Einleitung hoher Einzellasten hat in der Praxis des Ingenieurholzbaues eine beachtliche Anwendungshäufigkeit erreicht. Die Anordnung von Gewindestangen erfolgt bisher nach konstruktiven Gesichtspunkten, da Berechnungsgrundlagen nur für Sonderfälle vorliegen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit Hilfe systematischer Versuche den zeitabhängigen Haftspannungsverlauf entlang der eingeleimten Gewindestangen unter baupraktischen Bedingungen zu bestimmen. Hierbei sollten die Verbindungen klimatischen und Langzeitbeanspruchungen ausgesetzt werden. Damit verbundene Verformungsmessungen sollten Auskunft über das Tragverhalten ergeben. Die Arbeit entstand in den Jahren 1987 bis 1990 im Auftrage der Entwicklungsgemeinschaft Holzbau in der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. und wurde durch Forschungsmittel vom Institut für Bautechnik, Berlin, Gesch.Z. IV 1-5-472/86, gefördert.

Die Forschungsarbeit wurde begonnen von Herrn Dipl.-Ing. P. Belchior-Gaspard und durch Herrn Dipl.-Ing. M. Gerold zu Ende geführt. Der Bau der Meßeinrichtungen und die Durchführung der Messungen erfolgte im wesentlichen durch Herrn G. Rüd. Auch den wissenschaftlichen Hilfskräften, insbesondere Herrn cand.ing. J. Bartel, ist für die gewissenhafte Mithilfe bei den Auswertungen der Meßdaten in ihrer graphischen Darstellung zu danken.

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1	Allgemeines	1
2	Symbole	2
3	Beanspruchung der Prüfkörper	3
	Reihe I: Versuche unter reiner Klimabeanspruchung	
	Reihe II: Langzeitbeanspruchung unter Last	6
4	Herstellung der Prüfkörper	7
4.1	Verwendete Materialien	
4.2	Applikation der Dehnungsmeßstreifen	11
4.3	Eindreihen der Stangen in die Holzkörper	12
5	Versuchsdurchführung	14
5.1	reine Klimabeanspruchung	
5.1.1	Wechselnde Luftfeuchte	
5.1.2	Temperaturbeanspruchung	15
5.1.3	Konstantes Klima 20/65	
5.2	Ausziehversuche	
5.3	Langzeitbeanspruchung unter Last	16
6	Versuchsauswertung	19
6.1	Erläuterungen	
6.2	Reine Klimabeanspruchung	21
6.2.1	Wechselnde Luftfeuchte	
6.2.2	Temperaturbeanspruchung	28
6.2.3	Normalklima 20/65	30
6.3	Ausziehversuche	31
6.3.1	Bruchverhalten	
6.3.2	Haftspannungen	32
6.4	Langzeitbeanspruchung	40

7	Folgerungen	45
7.1	Alterung der Klebfuge infolge Feuchtigkeit	
7.2	Einleitung äußerer Kräfte - Vorschlag eines Bemessungsverfahrens	45
7.2.1	Allgemeines	
7.2.2	Beanspruchung der Verbindung	
7.2.3	Beanspruchbarkeit	47
8	Zusammenfassung	51
9	Schrifttum	55

62 Blatt Anlagen

Tabellen :

Tabelle 1:	Versuchsübersicht Reihe I	4
Tabelle 2:	Versuchsübersicht Reihe II	6
Tabelle 3:	Beanspruchung in Holz eingebundener Gewindestangen unter wechselnder Temperaturbeanspruchung ohne äußere Lasteinwirkung	29
Tabelle 4:	Binefestigkeiten $\tau_{u,m}$	33
Tabelle 5:	Klima in der offenen Halle	41
Tabelle 6:	Maximale Haftspannungen infolge einer Änderung der Holzfeuchte	47
Tabelle 7:	Mittelwerte der Binefestigkeiten in Abhängigkeit von der Haftlänge	48

1 ALLGEMEINES

Der Schwerpunkt des ersten Teiles dieses Forschungsvorhabens (EHLBECK, SIEBERT 1987) lag auf der Überprüfung und Beschreibung geeigneter Einleimmethoden für Gewindestangen sowie auf der Entwicklung eines Meßverfahrens zur Ermittlung der Haftspannungsverteilung entlang zug- und druckbeanspruchter Stahlstäbe. Es wurden Stangen unterschiedlicher Stahlsorten, Durchmesser und Gewindeausbildungen in die Untersuchungen einbezogen; die Stangen wurden sowohl parallel als auch rechtwinklig zur Holzfasern eingebracht. Sämtliche Versuche wurden als Kurzzeitversuche unter Normalklima DIN 50 014 - 20/65-1 durchgeführt.

Im 2. Teil des Forschungsvorhabens wurde die Verbindung Stahl - (Kleber) - Holz klimatischen und Langzeit-Beanspruchungen bei verschiedenen Lasthöhen ausgesetzt. Unter Anwendung und Erweiterung der bisherigen Erfahrungen sollten damit verbundene Verformungsmessungen Auskunft über das Tragverhalten geben, d.h. etwaige Last- bzw. Spannungsumlagerungen oder Verformungsänderungen sind von Interesse. Der 2. Teil des Forschungsvorhabens gliedert sich daher in zwei Versuchsreihen:

- Reihe I** Kurzzeitversuche unter reiner Klimabeanspruchung
 ohne äußere Lasteinwirkung
- Reihe II** Langzeitversuche in einer offenen, überdachten Halle
 unter konstanter, äußerer Last
 (Kombination der Einflußfaktoren Luftfeuchte und
 Temperatur mit Langzeitbeanspruchung)

Variiert wurden jeweils die Gewindeform, der Kleber sowie der Winkel zwischen Stangen- und Holzfaserrichtung.

Die Versuche der **Reihe I** wurden mit der Ermittlung der verbleibenden Ausziehungskraft abgeschlossen. An den Langzeitprüfkörpern (**Reihe II**) sollen weiterhin über die in die Stangen eingeklebten Dehnungsmeßstreifen die Haftspannungen kontrolliert werden.

2 SYMBOLLE

β	Winkel zwischen der Stangenlängsachse und der Holzfaserrichtung
d	Außen- bzw. Nenndurchmesser der Stange
d_B	Bohrlochdurchmesser
d_M	arithmetischer Mittelwert aus minimalem und maximalem Durchmesser der Bruchfläche (oval) bei Spannstählen
l_E	Einschraublänge der Gewindestange ins Holz
s_W	Haftlänge der Gewindestange im Holz
x	Stangenkoordinate
$\delta(x)$	Verschiebung der Stahlstange bei der Koordinate x
$\epsilon(x)$	Dehnung der Stahlstange bei der Koordinate x
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
U	Umfang der Stahlstange = $\pi \cdot d$
A	Querschnittsfläche der Stahlstange
$Z(x)$	Zugkraft in der Stange an der Koordinate x
Z_u	Tragfähigkeit der Gewindestange auf Herausziehen
$\tau(x)$	Haftspannung an der Koordinate x
$\tau_{u,m}$	Bindefestigkeit*) des Verbindung = $Z_u / (\pi \cdot d \cdot s_W)$
$\tau_{\Delta u}$	Haftspannung infolge Holzfeuchteänderung Δu
$\tau_{m,a}$	mittlere Haftspannung infolge äußerer Last
max	maximal, Größtwert
n	Spannungsspitzenfaktor = $\max \tau / \tau_{u,m}$
λ [$10^{-3}/\text{mm}$]	Periode der Differentialgleichung für $\tau(x)$
k [N/mm^3]	Steifigkeitsziffer der Verbindung Stahl - (Kleber -) Holz

Fußzeiger:

a	äußere Last
Δu	Änderung der Holzfeuchte um Δu [%]
m	mittlere(r), Mittelwert
n	Netto - Wert
u	höchste(r), Bruchwert

*) Unter der Bindefestigkeit $\tau_{u,m}$ der Verbindung soll hier die über die gesamte Haftlänge gemittelte, auf den Umfang der Bruchfläche bezogene Haftfestigkeit verstanden werden. Sie wird sowohl in der Literatur als auch bei Prüfungen nach DIN 53 281

(Zugscherversuch) und DIN 68 141 (Holzverbindungen) mit τ_B bezeichnet.

3 BEANSPRUCHUNG DER PRÜFKÖRPER

Einen Überblick über die durchgeführten Versuche geben die folgenden Tabellen 1 und 2. In beiden Versuchsreihen besaßen die Prüfkörper je zur Hälfte Stangen mit metrischem Gewinde und Stangen mit Holzschraubengewinde (sog. Schlüsselschrauben). Folgende Beanspruchungsarten wurden untersucht:

Reihe I: Versuche unter reiner Klimabeanspruchung (ohne äußere Last)

- Klimabeanspruchung mit wechselnder relativer Luftfeuchte bei einer konstanten Temperatur von 30°C (Gruppen I.1 und I.2)
In der ersten Gruppe sind die Stangen mit metrischem Gewinde; in der zweiten die Schlüsselschrauben. Die ausgewählten Prüfkörper wurden in eine Klimakammer gestellt; nach einer bestimmten Anzahl von Tagen (eine Periode) wurde das konstant gehaltene Klima neu eingestellt (hier: Änderung der relativen Luftfeuchte).
- Klimabeanspruchung mit wechselnder Temperatur bei nahezu konstanter relativer Luftfeuchte von 65 bis 70 % (Gruppe I.3)
Die Temperatur wurde hier im Zweitagesrhythmus geändert.
- Konstantes Normalklima 20/65 (Gruppe I.4)
Vier Prüfkörper standen als Vergleichskörper über eineinhalb Jahre in einem klimatisierten Raum mit Normalklima.

Eine Hälfte der Stangen wurde parallel zur Holzfaserrichtung; die andere rechtwinklig dazu eingedreht.

Tabelle 1: Versuchsübersicht Reihe I (reine Klimabeanspruchung)

Versuche Reihe I		Gewindestange			Beanspruchung					
Gruppe	Bezeichnung	Richtung zur Faser		Typ ¹⁾	Querschnitt ^{*)}	Kleber ²⁾	Klima ^{**)}	Z _u ^{***)} [kN]		
I.1	P M20 R1	⊥		M20	D	KPRF	wechselnde Luftfeuchte	121		
	S M20 R1			M20	A	KPRF		20/30	90	
	P M20 P1	⊥		M20	B	PUR		20/52	122	
	S M20 P1			M20	E	PUR		30/90	128	
	P M20 W1	⊥		M20	Z	KEP		30/40	103	
	S M20 W1			M20	Y	KEP		30/90	146 +	
	P M20 R2	⊥		M20	ohne DMS	KPRF		Wechsel nach ca. 6 Wochen	81	
	S M20 R2			M20		KPRF			119	
	I.2	P S20 O1	⊥		S20	I			-	Wechsel nach ca. 6 Wochen
S S20 O1		S20			K	-	64			
P S20 R1		⊥		S20	L	KPRF	20/30		76	
S S20 R1				S20	Q	KPRF	30/90		119	
P S20 O2		⊥		S20	ohne DMS	-	30/40		60	
S S20 O2				S20		-	30/90		73	
P S20 R2		⊥		S20	KPRF	KPRF	104			
S S20 R2				S20	KPRF		103			
I.3		P M20 R3	⊥		M20	Z	KPRF	wechselnde Temperatur	140	
	S M20 R3	M20			A	KPRF	10/70		151	
	P S20 O3	⊥		S20	L	-	10/70		43	
	S S20 O3			S20	N	-	60/65		65	
Wechsel alle zwei Tage										
I.4	P M20 R4	⊥		M20	Y	KPRF	Normalklima	89		
	S M20 R4			M20	F	KPRF		20/65	115 +	
	P S20 O4	⊥		S20	N	-		43		
	S S20 O4			S20	O	-		67		
konstant										
<p>1) M.. = metrisches Gewinde Stahl 8.8 Bohrlochdurchmesser d_B = 20 mm S.. = Schlüsselschraube mit Außen- bzw. Nenndurchmesser d = 20 mm Einbindelänge l_E = 40 cm</p> <p>2) KPRF = Resorcinharz kalthärtende PUR = Polyurethanleim Mehrkomponenten-Systeme KEP = Wevo-Kleber (Epoxidharz) mit Füllmittel Plastorit - = ohne Leim eingedrehte Gewindestangen</p> <p>*) vgl. Anlagen 1 - 3</p> <p>***) jeder der vier bzw. fünf Zyklen wurde einmal durchfahren; Klima 20/30 soll heißen : 20°C Lufttemperatur und 30% relative Luftfeuchte</p> <p>****) verbleibende Ausziehungskraft nach Abschluß der Versuche; + Versagen infolge Querkzug</p>										

Versuchsbezeichnung für die Reihe I :

Informationen über die Stangen, den Kleber und die Art der Beanspruchung sind aus der Versuchsbezeichnung ersichtlich. Es bedeuten:

Anordnung der Gewindestangen

P parallel ($\beta = 0^\circ$) bzw.

S senkrecht (rechtwinklig) zur Holzfaserrichtung ($\beta = 90^\circ$)

Gewindetyp

M20 Schraube mit Nenn- bzw. Außendurchmesser $d = 20$ mm
und metrischem Gewinde

S20 Holz-Schlüsselschraube mit Außendurchmesser $d = 20$ mm

für Reihe II:

G26 warmgewalzter, gereckter und angelassener Spannstahl St
1080/1230 mit Gewinderippen ("Gewindestab") und
Nenndurchmesser 26,5 mm nach Zulassung Z-12.1-V

G32 Gewindestab mit Nenndurchmesser 32 mm nach o.g.
Zulassung

Bezeichnungen für die verwendeten Kleber

R Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Kondensationsprodukt
(im Holzleimbau wird dieser kalthärtende Kleber kurz
Resorcinharzleim genannt; Abkürzung nach DIN 4076: KPRF)

P Polyurethan-System
(in der internationalen Literatur oft mit PUR abgekürzt)

W Wevo - Kleber
(Epoxidharz-System; Abkürzung nach DIN 4076: KEP)

Die letzte Ziffer deutet auch auf die Art der Beanspruchung hin:

1, 2 wechselnde Luftfeuchte;

Gruppe I.1: Stangen mit metrischem Gewinde

Gruppe I.2: Holzschlüsselschrauben

3 Gruppe I.3: wechselnde Temperaturbeanspruchung

4 Gruppe I.4: Lagerung in Normalklima

Reihe II: Langzeitbeanspruchung unter Last

Die Einleimung der Stangen erfolgte ausschließlich rechtwinklig zur Holzfaserrichtung (Belastung im Seitenholz); die Ausziehbelastung wurde konstant gehalten.

Tabelle 2: Versuchsübersicht Reihe II (Langzeitbeanspruchung)

Versuche Reihe II		Gewindestange			Kleber	Beanspruchung	
Gruppe	Bezeichnung	Einbinde-/ Haftlänge l_E/s_w [cm]	1)	Quer- schnitt*)	2)	Klima	$\tau_{a,m}$ **) [N/mm ²]
II.1	M20 / 8R M20 / 8P	80/80	M20	C A	KPRF PUR	in Karlsruhe;	1.46
							1.49
II.2	M20 / 4R M20 / 4P	40/40	M20	C C	KPRF PUR	seit 11/87	1.62
						gegen	1.62
II.3	S20 / 8O S20 / 8R	80/77	S20	V T	- KPRF	direkten	1.40
							1.40
II.4	S20 / 4O S20 / 4R	40/37	S20	U X	- KPRF	Niederschlag	1.48
						geschützt	1.48
II.5	G26 / 10R G32 / 10P	100/100	G26 G32	G H	KPRF PUR		1.26
							1.49
<p>1) M.. = metrisches Gewinde Stahl 8.8; Bohrlochdurchmesser d_B = 20 mm S.. = Schlüsselschraube Bohrlochdurchmesser d_B = 18 mm G.. = Spannstahl St 1080/1230 Bohrlochdurchmesser d_B = 30 mm bzw. 36 mm mit Gewinderippen (Gewindestab)</p> <p>2) KPRF = Resorcinharz kalthärtende PUR = Polyurethanleim Zweikomponentensysteme - = ohne Leim eingedrehte Gewindestangen</p> <p>*) vgl. Anlagen 1, 4 und 5</p> <p>**) Über die wirksame Haftlänge s_w gemittelte Haftbeanspruchung infolge konstanter, äußerer Belastung Z; $\tau_{a,m} = Z / (\pi \cdot d \cdot s_w)$</p>							

Bei den Stangen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) wurden i.d.R. jeweils zwei Nuten eingefräst. Dadurch sollten eventuell vorhandene Exzentrizitäten erkannt und bei der Auswertung berücksichtigt werden können. Die einzige Ausnahme bilden die beiden Schlüsselschrauben des Versuchs II.3. Hier wurde jeweils nur eine Nut eingefräst, um ein Fließen der sehr langen Schlüsselschrauben zu verhindern.

4 HERSTELLUNG DER PRÜFKÖRPER

Alle Versuchskörper wurden im Prüflabor hergestellt und gelagert. Die relative Luftfeuchte in dieser Halle beträgt $60\% \pm 5\%$; die Lufttemperatur schwankt jahreszeitlich bedingt zwischen 15°C und 25°C .

4.1 VERWENDETE MATERIALIEN

Es standen 30 nicht verzinkte Gewindestangen zur Verfügung; die für die Reihe I.3 benötigten Stangen wurden aus den vorhergehenden Versuchsreihen I.1, I.2 und I.4 entnommen.

Im einzelnen handelte es sich um

- 14 Stangen der Stahlgüte 8.8 mit metrischem Gewinde M 20 nach DIN 976. In 12 dieser Stangen wurden seitlich je zwei Nuten eingefräst und darin je 8 bzw. je 12 Dehnungsmeßstreifen (DMS) geklebt. Zwei Stangen blieben ohne DMS.
- 14 rohe Stahlstangen der Güte 8.8 mit Nenndurchmesser $d = 20$ mm und Gewinde in Anlehnung an DIN 571 (Sechskant-Holzschrauben). Die Gewindetiefe betrug $d/10$; eine Spitze wurde auf einer Länge von 35 mm ausgebildet (Angaben zur Ausbildung der Spitze sowie zur Tiefe der Gewindegänge sind in DIN 7998 enthalten). In 10 Stangen wurden seitlich zwei bzw. eine Nut eingefräst und darin je 8 bzw. je 12 DMS geklebt. Vier Stangen blieben ohne DMS.
- 2 warmgewalzte, gereckte und angelassene Spannstähle St 1080/1230 mit Gewinderippen ("Gewindestab") nach Zulassung Z-12.1-V.2. Die Stangen besaßen die Nenndurchmesser 26,5 mm und 32,0 mm. Beide Stangen wurden vom ersten Teil des Forschungsvorhabens übernommen und wiesen je zwei Nuten mit jeweils 11 DMS auf.

Die Stahlgüte 8.8 der Stangen wurde benötigt, da die seitlich eingefrästen Nuten eine erhebliche Schwächung der Kernquerschnitte darstellen und ein Fließen des verbleibenden Querschnittes bei den Ausziehversuchen vermieden werden sollte. Die Stangen besaßen keine Überfestigkeiten.

Die Stangen mit metrischem Gewinde M20 wurden vom Handel bezogen; die Stangen mit Holzschrauben-Gewinde dagegen waren eine

Sonderanfertigung: Zunächst wurde an einem Ende der Stahlstäbe das Holzschraubengewinde auf einer Länge $l_E = 40$ cm eingefräst; anschließend an beiden Enden ein Gewinde M8 bzw. M20 mit 3 cm bzw. 50 cm Länge aufgebracht (vgl. Anlagen 3.4 sowie Bild 1).

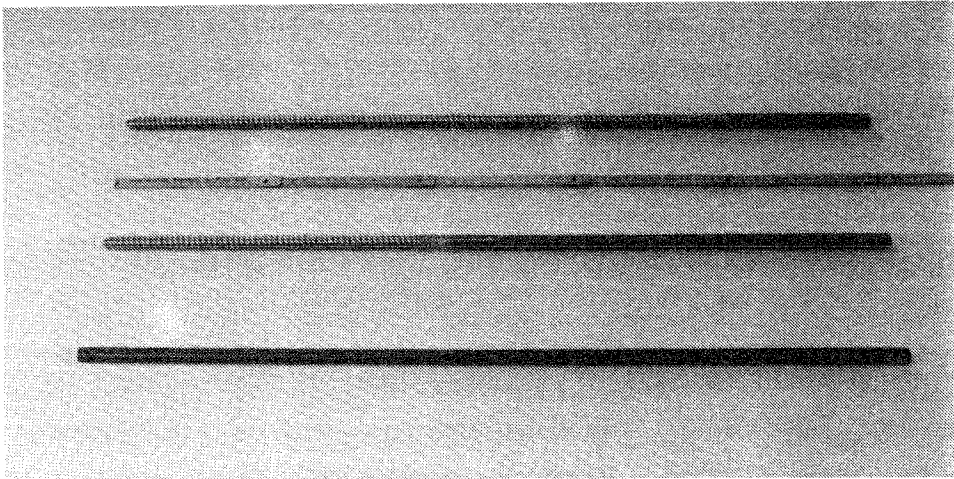


Bild 1: Darstellung verwendeter Stangentypen

Bedingt durch die Vorkrümmung des Rohmaterials sowie durch das Herstellungsverfahren hatten die Gewinde der Schlüsselschrauben keine konstante Höhe (s. Bild 2). Infolgedessen war die Tiefe der eingefrästen Nuten nicht konstant über die Länge der Schlüsselschraube. Auch wiesen unterschiedliche Stangen unterschiedliche Nuttiefen auf.

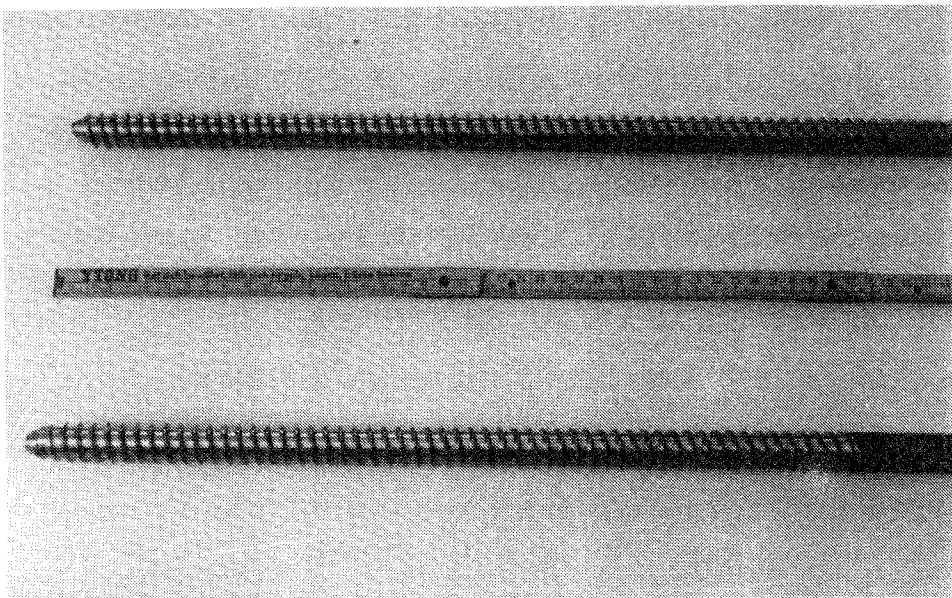


Bild 2: Unregelmäßigkeiten in der Gewindetiefe bei Stangen mit Holzschrauben - Gewinde

Entsprechend der vorgesehenen Einschraublänge wurden für die Prüfkörper unterschiedliche Abmessungen gewählt:

- 28 Holzkörper der Abmessungen 65 x 16 x 65 [cm] (vgl. Anlage 6) für die Versuchsreihe I sowie für die Versuche II.2 und II.4. Die Einbindelänge betrug einheitlich 20 d; die Randabstände zu den Seitenflächen und zur Hirnholzfläche wurden entsprechend bisherigen Veröffentlichungen mit 8 cm (= 4 d) festgelegt. Die Holzkörper wurden aus vier Brettschichtholzträgern aus Fichte/Tanne der Güteklasse II herausgesägt.
- 6 Holzkörper der Abmessungen 110 x 20 x 150 [cm]. Diese größeren Körper für die Versuche II.1, II.3 und II.5 wurden aus zwei Brettschichtholzträgern, Fi/Ta, Güteklasse II, herausgesägt. Die Stangen wurden in der Symmetrieachse der Prüfkörper eingebracht. Die Einleimlänge betrug 80 bzw. 100 cm; der Randabstand zu den Seitenflächen 10 cm.

Die Hirnholzflächen wurden nicht versiegelt. Alle Träger wiesen eine Feuchte von ca. 11 % auf und lagerten bis zum Beginn des Versuchs in einer Halle mit dem Klima 20/65. Die Holzeigenschaften wurden nach Abschluß der Versuchsreihe I an 10 Proben nach den einschlägigen Prüfnormen ermittelt. Nachfolgend sind Kleinst-, Mittel- und Größtwerte zusammengestellt:

Mittlere Jahrringbreite	[mm]	2.0	-	3.4	-	4.9
Rohdichte	[g/cm ³]	0.39	-	0.43	-	0.47
Holzfeuchte u	[%]	10.3	-	12.3	-	13.8
Druckfestigkeit $\beta_D \parallel$	[N/mm ²]	37.1	-	43.8	-	48.4
Druckfestigkeit $\beta_{D15}^*)$	[N/mm ²]	32.1	-	37.9	-	41.8
*) $\beta_{D15} = \frac{17}{32 - u} \cdot \beta_D \parallel$		die auf u = 15% umgerechnete Längsdruckfestigkeit				

Als Kleber (kalthärtende Mehrkomponenten-Kleber) kamen zum Einsatz:

1. Resorcinharzleim

Kauresin 440 / Härter 444

(Phenol - Resorcin - Formaldehyd - Kondensationsprodukt)

Hersteller: BASF AG

Anwendungstechnische Abteilung (Holzleime)

6700 Ludwigshafen

Die Herstellung der Flotte erfolgt im Mischungsverhältnis

Kauresin 440 100 Gewichtsteile

Härter 444 20 Gewichtsteile

2. Polyurethan-System

Kleiberit Plastic-Mastic 573.8 / 573.9

Hersteller: Klebchemie M.G. Becker GmbH & Co. KG,

7504 Weingarten

Die Herstellung erfolgt im Mischungsverhältnis

Plastic-Mastic 573.8 3 Gewichtsteile

Plastic-Mastic 573.9 1 Gewichtsteil

3. Epoxidharz-System

WEVO-Spezialharz EP 20 / Härter B 20 / Füllmaterial Plastorit

Hersteller: Wevo-Chemie GmbH + Co.,

7302 Ostfildern 4 (Kemnat)

Das WEVO-Spezialharz EP 20, ein modifiziertes Epoxidharz,

wurde mit 7,3 Gewichtsprozent Plastorit gemischt. Plastorit ist ein

Pulver in Plättchenstruktur aus Magnesium-Aluminium-

Hydrosilikat mit Spuren von Glimmer und Quarz; die Herstellung

des Harz-Härter-Gemisches erfolgt im Mischungsverhältnis

WEVO-Spezialharz EP 20 100 Gewichtsteile

WEVO-Härter B 20 45 Gewichtsteile

Das fertige Gemisch ist dünnflüssiger als das verwendete

Polyurethan-System und läßt sich sehr leicht verarbeiten.

Alle Kleber wurden bei Raumtemperatur verarbeitet, die Aushärtezeit betrug mindestens 5 Tage.

4.2 APPLIKATION DER DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Zur Anwendung kamen temperaturkompensierte Dehnungsmeßstreifen (DMS), um die durch Temperaturänderungen hervorgerufenen Differenzdehnungen aus DMS und Stahlteil auf ein Minimum zu reduzieren. Die DMS wurden zunächst mit dem kalthärtenden Zweikomponenten-Schnellklebstoff X60 in der Nut fixiert. Nach dem Anlöten beider Drahtenden an Kupferkabel (ϕ 0,7 mm) und dem Abdecken der DMS mit dauerelastischem Kitt wurden die Nuten mit handelsüblichem Gießharz vergossen.

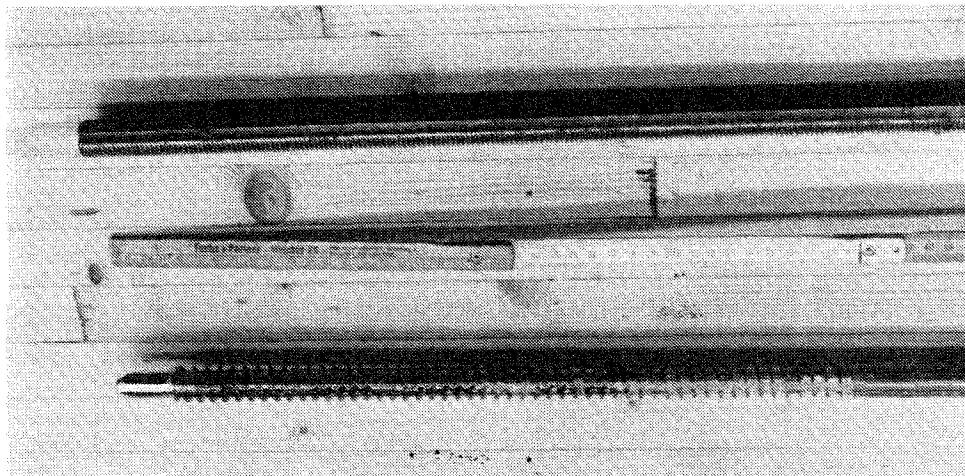


Bild 3: Nut nach dem Einkleben der Dehnungsmeßstreifen und Versiegelung mit Gießharz

In den Anlagen 1 bis 5 sind die Abmessungen der Nuten sowie die Anordnung der DMS für die einzelnen Versuche dargestellt. Die am "oberen" Ende der Gewindestange angebrachten Meßstellen lagen außerhalb des Holzes und sollten aufgrund der in diesem Teil des Stabes bekannten Beanspruchung zur Kontrolle der Meßwerte dienen.

Vor dem Eindrehen der Stangen in die Holzkörper wurden die DMS in einem ersten Zugversuch (der 2. Zugversuch fand nach Abschluß der Versuche statt) auf ihre Wirksamkeit hin untersucht. Hierzu wurde bei den Schrauben mit Holzschraubengewinde auf den ersten 30 mm ein metrisches Gewinde aufgebracht (vgl. Anlagen 3, 4). Von den 404 DMS waren etwa 2 % beschädigt oder ungenau.

4.3 EINDREHEN DER STANGEN IN DIE HOLZKÖRPER

Hinsichtlich des Einleimvorganges wurden die von EHLBECK, SIEBERT 1987 empfohlenen Methoden angewandt. Die Bohrlöcher wurden mit einem Handbohrgerät vorgebohrt (siehe Bild 4) und anschließend mit Preßluft ausgeblasen. Der Bohrlochdurchmesser entsprach bei den Stangen mit metrischem Gewinde dem Außen- bzw. Nenndurchmesser; bei den Stangen mit Holzschraubengewinde dem arithmetischen Mittel aus Kern- und Außendurchmesser und bei den Spannstählen dem Nenndurchmesser zuzüglich der Dicke der aufgewalzten Profilierung.

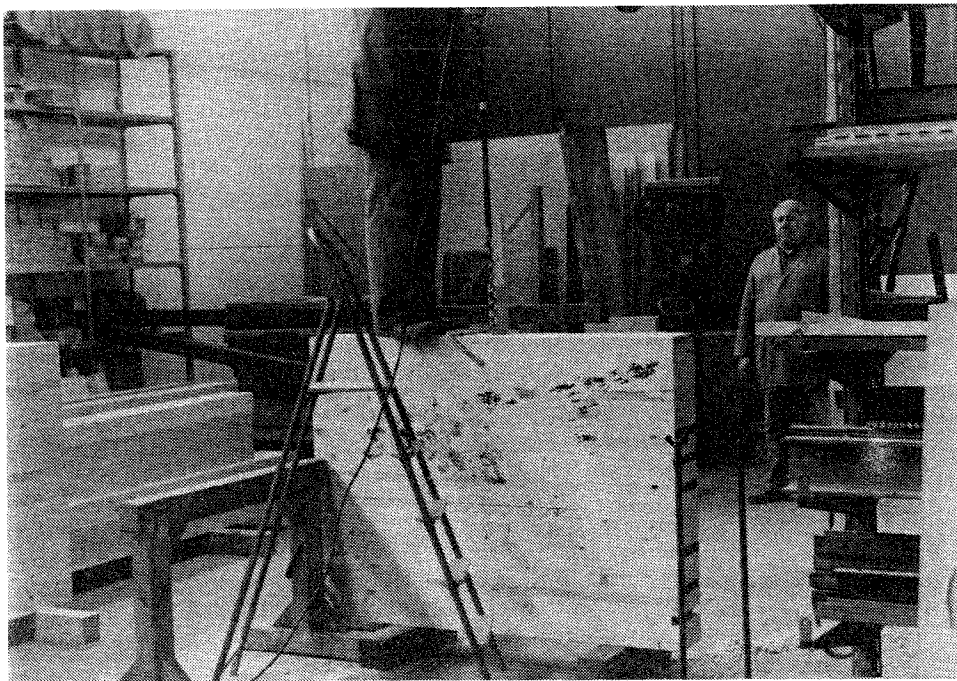


Bild 4: Vorbohren eines Bohrloches

Alle Stangen wurden von Hand in die **stehenden Träger** eingedreht. Dabei wurden folgende Beobachtungen gemacht:

- Die Stangen ließen sich ausnahmslos leicht einbringen, sofern man dem Kleber ausreichend Zeit läßt, sich zu verteilen.
- Bei den Stangen mit zwei Nuten quoll der Kleber wie erwartet aus dem Bohrloch heraus. Die Wirkung der Entlastungsnut kam zum Tragen. Es entstanden keine Risse im Holz.

- Bei den beiden Stangen mit Holzschrauben-Gewinde ohne Nut (Körper SS20R2 und PS20R2) wurde das Loch bis zur Hälfte mit Resorcinharz gefüllt und dann die Stange eingedreht. Der Kleber quoll in beiden Fällen nicht aus dem Bohrloch, sondern aus dem Holz heraus; siehe Bild 5:

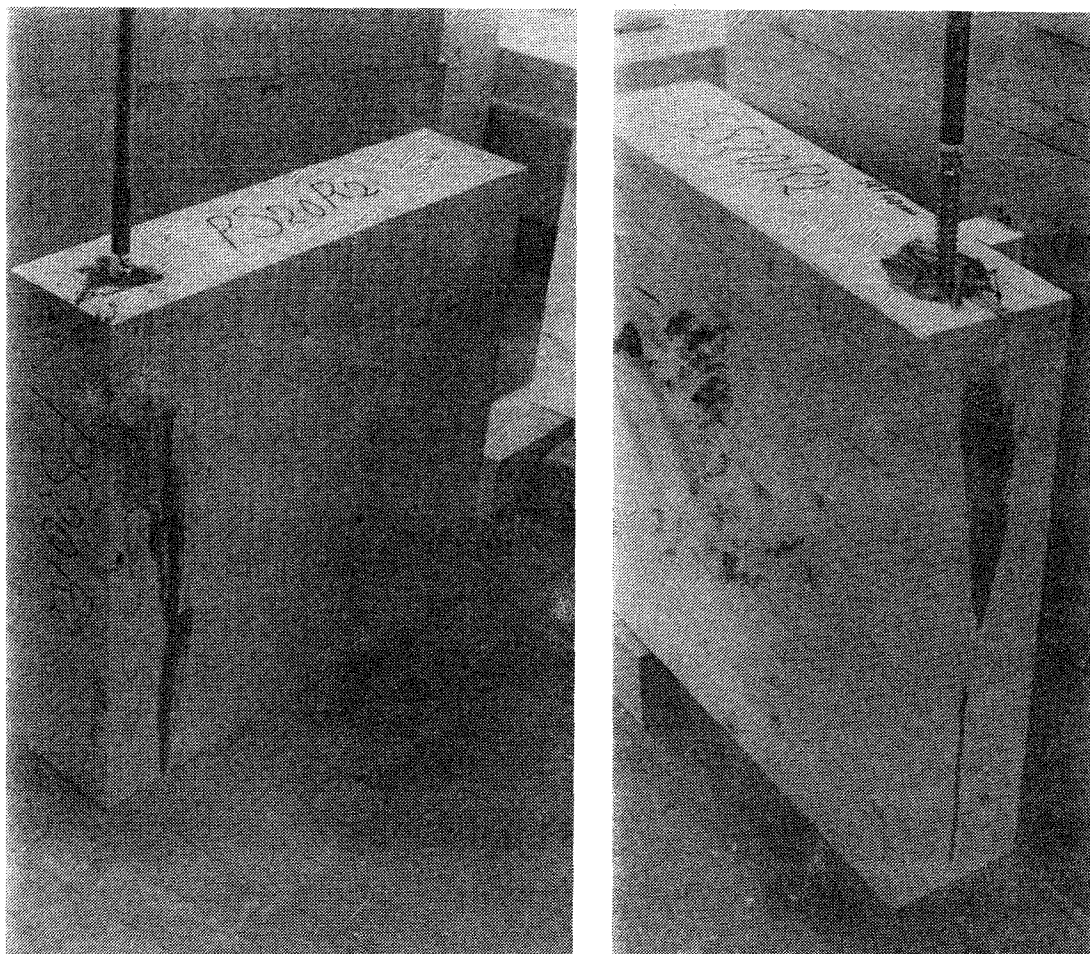


Bild 5: Ausgetretener Kleber nach dem Eindrehen bei Versuchskörpern mit Stangen ohne Nut

- Bei Körpern ohne Nut und Stangen mit metrischem Gewinde wurden nur die ersten 2 bis 3 cm des Loches mit dem Klebstoff gefüllt und die Stange zusätzlich während des Eindrehvorganges von außen mit dem Klebstoff bestrichen. Es stellte sich heraus, daß der Kleber mit eingedreht wurde; auch hier quoll er aus dem Bohrloch heraus.

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 REINE KLIMABEANSPRUCHUNG

5.1.1 Wechselnde Luftfeuchte

Für die Untersuchung der Klimabeanspruchung bei wechselnder Luftfeuchte wurden zwei Gruppen von Körpern verwendet: Die Gruppe I.1 bestand aus 8 Körpern mit metrischem Gewinde M 20; die Gruppe I.2 aus 8 Körpern mit Holzschrauben-Gewinde. Einige der Versuchskörper besaßen Stangen ohne Dehnungsmeßstreifen. Sie konnten jederzeit aus der Kammer entnommen werden, um durch Feuchtemessungen in verschiedenen Tiefen die Feuchteverteilung in den Körpern zu ermitteln. Es wurde ein Erreichen der Ausgleichsfeuchte in 3,5 cm Tiefe angestrebt. Dadurch mußte die Periode konstanten Klimas von ursprünglich geplanten vier auf sechs bis sieben Wochen erhöht werden. Im einzelnen ergab sich folgender Ablauf mit den angegebenen Versuchsphasen:

Versuche I.1:

Beginn der Phasen

	Ausgangsklima 18/57	(u = 10 %)	
6	Wochen Klima 20/30	(u = 6 %)	15.01.1988
7	Wochen Klima 20/52	wegen Defekt in der Klimakammer (u = 10 %)	25.02.1988
7,5	Wochen Klima 30/90	(u = 20 %)	14.04.1988
6	Wochen Klima 30/40	(u = 7 %)	07.06.1988
6,5	Wochen Klima 30/90	(u = 20%)	21.07.1988
36	Wochen Klima 20/65	(u = 12 %)	05.09.1988
		Ausziehversuche:	Mai 1989

Versuche I.2:

	Ausgangsklima 22/65	(u = 12 %)	
6	Wochen Klima 20/30	(u = 6 %)	07.09.1988
8	Wochen Klima 30/90	(u = 20 %)	19.10.1988
5,5	Wochen Klima 30/40	(u = 7 %)	14.12.1988
1	Woche Klima 30/30	(u = 6 %)	23.01.1989
6	Wochen Klima 30/90	(u = 20 %)	30.01.1989
9	Wochen Klima 20/65	(u = 12 %)	14.03.1989
		Ausziehversuche:	Mai 1989

Die zugehörigen Ausgleichsfeuchten u nach KOLLMANN 1951, Bild 283, sind in Klammern angegeben. Die Temperatur von 20° beim Klima 20/30 erwies sich als schlecht haltbar.

5.1.2 Temperaturbeanspruchung

Bei den Versuchen der Gruppe I.3 sollte der Einfluß einer plötzlichen Temperaturänderung bei Anschlüssen untersucht werden. Da die freien Enden der Stangen sofort auf die neue Umgebungstemperatur reagieren, waren die kurzzeitigen Spannungsspitzen von Interesse. Hier ergab sich der zeitliche Ablauf der Versuche wie folgt:

<u>Versuche I.3:</u>				<u>Beginn der Phasen</u>
	Ausgangsklima	25/62	($u = 11 \%$)	
2	Tage	Klima 10/70	($u = 13 \%$)	12.07.1989
2,5	Tage	Klima 60/65	($u = 10 \%$)	14.07.1989
2	Tage	Klima 10/70	($u = 13 \%$)	17.07.1989
2	Tage	Klima 60/65	($u = 10 \%$)	19.07.1989
4	Wochen	Klima 20/65	($u = 12 \%$)	21.07.1989
			Ausziehversuche:	Aug. 1989

5.1.3 Konstantes Klima 20/65

Um später eine Aussage über den Einfluß klimatischer Einwirkungen machen zu können, standen vier Körper mit DMS bestückten Stangen ohne äußere Lasteinwirkung in einem Klimaraum mit dem Normalklima DIN 50 014 - 20/65 - 1 (Versuche I.4). Die Dehnungen wurden spätestens nach 4 Wochen abgelesen.

5.2 AUSZIEHVERSUCHE

Bei den unter reiner Klimabeanspruchung untersuchten Prüfkörpern wurde nach dem Abschluß der Klimaversuche die verbleibende Ausziehungskraft ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Anlage 25, die Ausziehungskräfte Z_u in Tabelle 1 (s. S. 4) dargestellt.

Nachdem zwei Körper mit rechtwinklig zur Holzfaserrichtung eingeleimten Stangen während dem Versuch aufrissen, wurden alle Holzkörper mit rechtwinklig zur Faser eingeleimten Stangen beidseitig durch eine 5-lagige Baufurnierplatte 200 x 10 x 650 [mm] verstärkt mit einem Weißleim nach DIN 68 602. Die bereits infolge Querkraft voll

durchgerissenen Versuchskörper SM20W1 (Gruppe I.1) und SM20R4 (Gruppe I.4) wurden wieder zusammengeleimt und ebenfalls wie beschrieben verstärkt. Der zweite Ausziehversuch ergab jedoch keine höheren Traglasten; wahrscheinlich aufgrund des bereits gestörten Gefüges.

Nach Abschluß dieser Versuche wurden in einem zweiten Zugversuch die DMS nochmals auf weitere Beschädigungen hin überprüft.

5.3 LANGZEITBEANSPRUCHUNG UNTER LAST

Für die Untersuchung der Langzeitbeanspruchung infolge Dauerstands-
last (**Reihe II**) wurden die in Bild 6 dargestellten Prüfkörper hergestellt. Nach dem Eindrehen der Stangen wurden die 10 Körper in einer Halle aufgestellt und die Kabel der Dehnungsmeßstreifen an drei Mehrstellenmess-umschalter angeschlossen. Bis zum Versuchsanfang, der Aufbringung der äußeren Lasten, waren die Körper zwei Wochen dem Außenklima ausgesetzt.

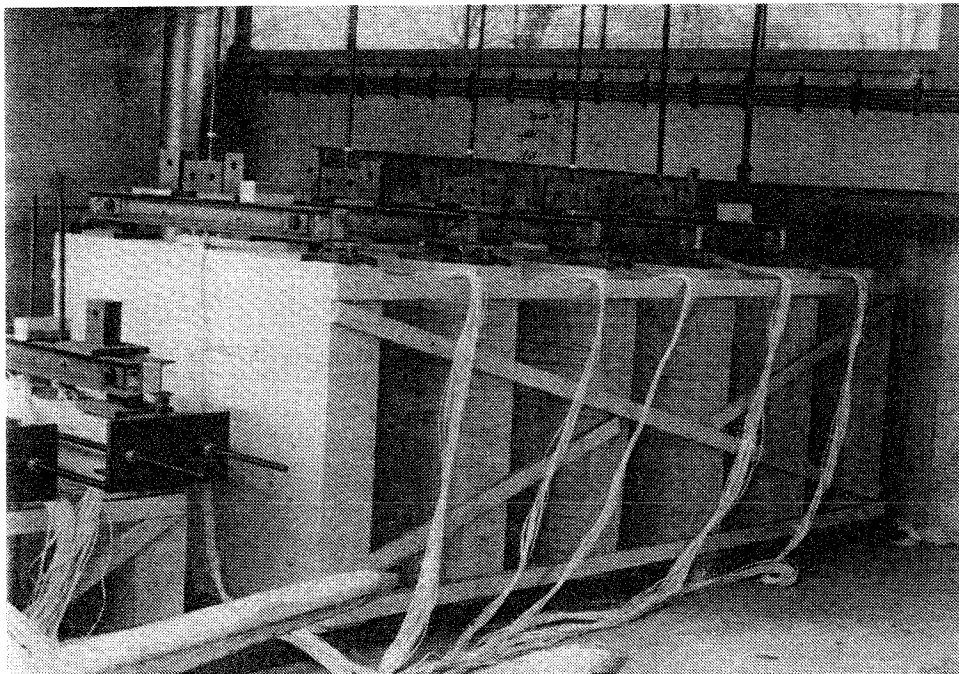


Bild 6: Prüfkörper für Untersuchung der Langzeitbeanspruchung

Die Erzeugung konstanter Dauerlasten erfolgt über Hebelarme, an deren Ende Gewichte aufgebracht wurden. Die Vorrichtungen zur Auflagerung der Hebelarme sind aus Bild 7 bzw. 8 ersichtlich; Bild 9 zeigt die Anordnung der Hebelarme an den kleineren, paarweise angeordneten Versuchskörpern. Weitere Einzelheiten zur Versuchsanordnung für die Langzeitbeanspruchung sind in den Anlagen 44 und 45 dargestellt.

Temperatur und relative Luftfeuchte werden mittels eines Klimaschreibgeräts laufend aufgezeichnet; in Anlage 46 sind die in der offenen Halle gemessenen Größt- und Kleinstwerte dargestellt. Die Höhe der äußeren Lasten wurde nicht verändert.

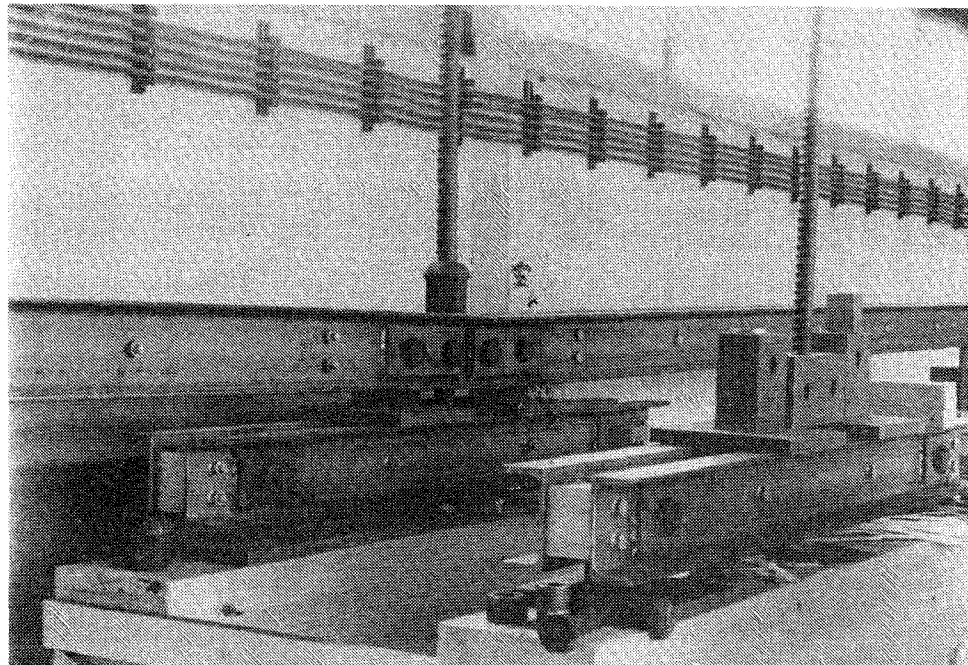


Bild 7: Anordnung der Hebelarme für die Spannstäbe

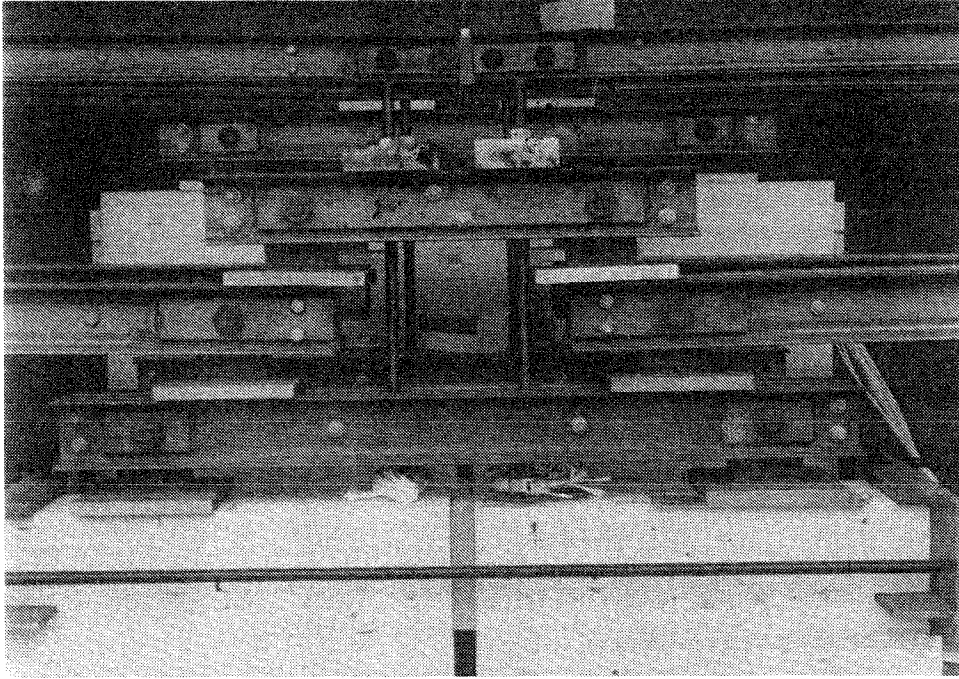


Bild 8: Vorrichtung zur Auflagerung der Hebelarme bei den paarweise angeordneten kleinen Prüfkörpern

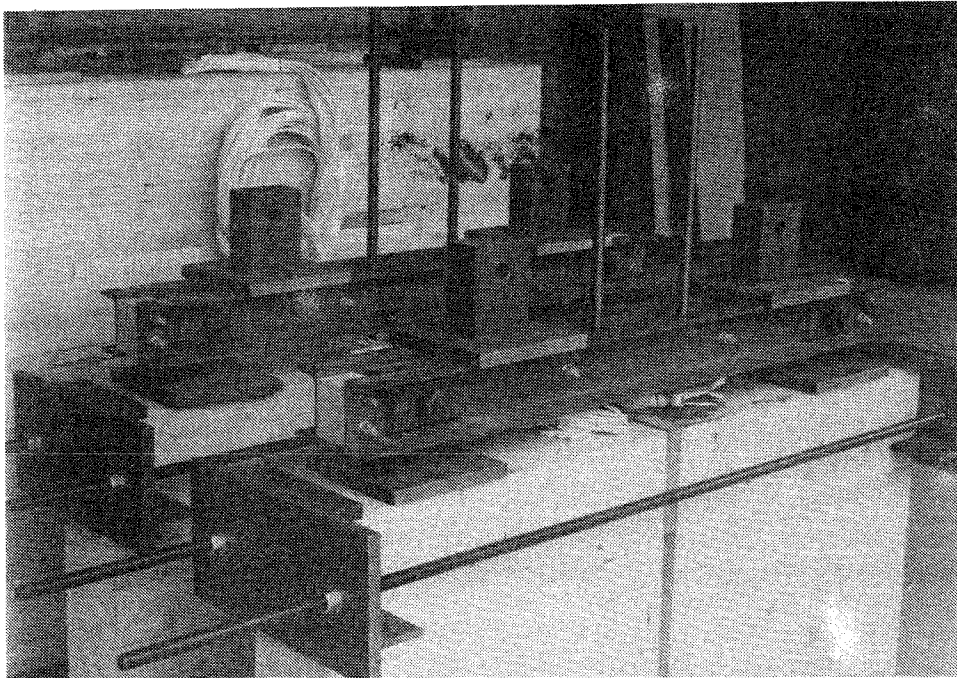


Bild 9: Lasteintragung in die paarweise angeordneten Körper

6 VERSUCHSAUSWERTUNG

6.1 ERLÄUTERUNGEN

Bei der Auswertung der Meßdaten wurde wie folgt verfahren:

- Vor der Beanspruchung wurde jeder einzelne DMS angesteuert und abgelesen. Dieser Wert wird von jedem später abgelesenen Wert subtrahiert. Aus der Differenz ergibt sich die Dehnung des DMS innerhalb des Ablesezeitraumes (Nullabgleich).
- Die Dehnungen der sich jeweils gegenüberliegenden DMS wurden gemittelt. Dadurch konnte die Lasteinleitung auf etwaige Exzentrizitäten hin untersucht werden und notwendige Korrekturen sofort erfolgen.

Der Mittelwert wird im folgenden mit Meßwert bezeichnet.

- Wenn im Laufe der Zeit ein DMS ausfällt, kann keine Mittelwertbildung mehr erfolgen. Der Meßwert errechnet sich dann aus der Dehnungsdifferenz des gegenüberliegenden DMS. Stellt sich jedoch heraus, daß dieser mit den gemittelten Dehnungen der benachbarten DMS nicht in Einklang zu bringen ist, so wird auch er aus der Auswertung genommen. An jener Stelle besitzt die Stange bei der weiteren Auswertung dann keinen Meßwert mehr.
- Meßtechnisch bedingte fehlerhafte Meßwerte wurden aus der Auswertung herausgenommen; die laufende Nummer der Ablesung ist dann in Klammern angegeben.

Bei den folgenden Auswertungen ist zu beachten, daß es sich bei den ermittelten Dehnungen ausschließlich um die Dehnungen der Stahlstangen handelt.

Auf der jeweils linken Seite der Anlagen 7 bis 24 und 47 bis 56 sind für die einzelnen Dehnungsmeßstreifen die Meßwerte geradlinig verbunden über der Zeit dargestellt. Einzelne Meßwerte sind dabei auf der Abszisse mit ihrer laufenden Ordnungsnummer versehen. Diese ausgewählten Ablesungen kennzeichnen i.d.R. Extremwerte oder aber Unregelmäßigkeiten der Dehnungen während der einzelnen Beanspruchungsperioden (=Zyklen).

Auf der jeweils rechten Seite wurden in einem zweiten Schritt für maximal sieben dieser Ablesungen die Dehnungen über der

Schraubenlänge aufgetragen (Symbol: \oplus) einschließlich ihrer Ordnungsnummer. Die Koordinate $x = 0$ mm kennzeichnet das Stangenende im Holzkörper ("unteres Ende"). An dieser Stelle sind die Dehnungen mit Ausnahme der Temperaturversuche gleich Null.

Die einzelnen Meßwerte jeder Ablesung wurden dann mittels Regressionsrechnung durch Polynome entsprechend der Auswertung von Ehlbeck, Siebert 1987 angenähert. Am besten geeignet erwies sich ein Polynom vierter Ordnung der Form

$$\epsilon(x) = A + B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3 + E \cdot x^4, \quad (1)$$

wobei

A, B, C, D, E dimensionslose Parameter.

Zur möglichst genauen Beschreibung des Kurvenverlaufs wurde bei den Stangen mit metrischem Gewinde an der Stelle $x = 0$ mm und für die Holzschlüsselschrauben an der Stelle $x = 30$ mm ein zusätzlicher Wert festgelegt; und zwar

$\epsilon = 0$ für die Gruppen I.1, I.2 und I.4 sowie

$\epsilon = \epsilon(50 \text{ mm})$ für die Gruppe I.3.

Ferner wurden die Meßwerte der außerhalb des Holzkörpers gemessenen Stahldehnungen auf die Stelle $x = l_E$ gelegt.

Durch Differenzieren lassen sich dann näherungsweise die Haftspannungen berechnen. Unmittelbar an der Eintrittsstelle der Stangen in das Holz besitzen die Haftspannungen den Wert 0. Dies wird aber durch den gewählten Ansatz nicht erfaßt.

Die Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen sind auf den rechten Seiten der Anlagen 7 bis 24 und 47 bis 56 dargestellt.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, daß infolge der Nuten in den Stangen sowohl die verbleibenden Sektionen des eingeleimten Gewindeumfanges als auch der Kernquerschnitt gegenüber einer Stange ohne Nut verkleinert wurden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist jedoch gewährleistet, da sich das Verhältnis von Gewindeumfang zu Kernquerschnitt kaum ändert und zudem das Gießharz mit den Stahlstangen einen festen Verbund eingeht. Ein möglicher Einfluß des Gießharzes wurde nicht untersucht.

6.2 REINE KLIMABEANSPRUCHUNG

Bei der Versuchsreihe I sind Dehnungen an den beiden, unbelasteten Enden der Stangen gleich Null. Da keine äußere Kraft an ihnen angreift, ist das Integral über die Haftspannungen gleich Null. Der gewählte Polynom-Ansatz erreicht dies nur näherungsweise.

6.2.1 Wechselnde Luftfeuchte

a) **Schrauben mit metrischem Gewinde** (Gruppe I.1; vgl. Seiten 4 und 14)

Die Auswertung der Gruppe I.1 stützt sich auf die Darstellung der Meßwerte über der Zeit in den Anlagen 7 bis 12. Die Wechsel der Beanspruchungen sind sehr deutlich erkennbar:

1. Periode	Klima 20/30 (Trocknung)	1.-19. Meßwert	6 Wochen
2. Periode	Klima 20/52 (Befeuchtung)	20.-29. Meßwert	7 Wochen
3. Periode	Klima 30/90 (Befeuchtung)	30.-40. Meßwert	7,5 Wochen
4. Periode	Klima 30/40 (Trocknung)	41.-49. Meßwert	6 Wochen
5. Periode	Klima 30/90 (Befeuchtung)	50.-57. Meßwert	6,5 Wochen

In der ersten Beanspruchungsperiode schwindet das Holz; die Stangen werden gestaucht. Bei den faserparallel eingebrachten Stangen erreichen die Stauchungen nach einem halben Monat einen konstanten Wert; bei den rechtwinklig zur Faser eingeleimten Stangen steigen die negativen Dehnungen noch weiter an; am Ende der ersten Periode erreichen auch hier die Stauchungen allmählich einen konstanten Wert. Zu diesem Zeitpunkt ist die Feuchte im Prüfkörper noch nicht gleichmäßig verteilt.

In der zweiten Beanspruchungsperiode (Normalklima 20/52) nimmt das Holz Feuchtigkeit auf; die Stangen werden entlastet. Am Ende dieser Periode sind die Stauchungen der faserparallel eingebrachten Stangen annähernd auf Null zurückgegangen.

Unter dem sich daran anschließenden Klima 30/90 und der damit verbundenen weiteren Befeuchtung fängt das Holz nochmals an zu Quellen. Die Stangen werden auf Zug belastet und gedehnt. Wie bei der ersten Beanspruchungsperiode (Trocknung) reagieren alle Stangen sofort auf die Feuchteänderung. Allerdings stellt sich bei den

faserparallel eingeleimten Stangen zunächst kurzfristig eine Stauchung ein (vgl. 29., 30. und 31. Messung), bevor sie gedehnt werden. Ferner erreichen die Dehnungen dieser Stangen - wie bei der ersten Periode - bereits nach einem halben Monat einen konstanten Wert. Dadurch sind die bis zum Ende dieser dritten Periode erreichten maximalen Dehnungsdifferenzen gegenüber denen der Körper SM20R1 und SM20W1 im Mittel um den Faktor 3 kleiner.

Es bleibt anzumerken, daß die Stangen der Körper PM20P1 und SM20W1 ca. einen Monat nach Beginn der Befeuchtung sogar wieder gestaucht werden; vgl. Anlagen 9 und 12. Ein möglicher Grund hierfür könnte ihre Lage in der Klimakammer zwischen Körpern, die zur Ermittlung der Feuchteverteilung herausgenommen und wieder eingeordnet wurden, gewesen sein.

In der vierten Beanspruchungsperiode (Trocknung) schwindet wiederum das Holz; die Vorgänge ähneln denen der ersten Periode. Die über die vierte Periode gemessenen Stauchungen sind jedoch größer - wie auch die Holzfeuchteänderung (vgl. Kapitel 5.1.1). In der nachfolgenden Tabelle sind die Verhältniszahlen dargestellt:

<u>Verhältniszahlen 4.Periode/1.Periode:</u> Größe der gemessenen Stauchungen bei einem Verhältnis der Holzfeuchteänderungen von 2,0		
Gruppe I.1	Verhältniszahlen der gemessenen Stauchungen	
	Richtung zur Faser	
Kleber		⊥
Resorcinharzleim	1,8	3,0
Polyurethan-System	2,6	2,4
Wevo - Kleber (Epoxidharz)	2,4	2,6

Der Vergleich zeigt, daß sich die mit dem Epoxidharz- und dem Polyurethan-System eingebrachten Stangen mit metrischem Gewinde ähnlich verhalten. Auch ist im Unterschied zum Resorcinharzleim kein Einfluß des Faserwinkels erkennbar.

Unter der Annahme, daß am Ende einer Periode eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Holzfeuchte im Körper vorliegt, bewirkte eine Änderung der Holzfeuchte um 1% im Mittel Dehnungen von

ca. $43 \mu\text{m}/\text{m}$ bei Verwendung von Resorcinharzleim und dem Epoxydharz-System;

ca. $50 \mu\text{m}/\text{m}$ bei Verwendung von Polyurethan-System und, wie später gezeigt wird,

ca. $25 \mu\text{m}/\text{m}$ beim Einschrauben ohne Kleber.

In Bild 10 sind die in den Versuchskörpern PM20R1 und SM20P1 aufgetretenen Schwindrisse abgebildet.

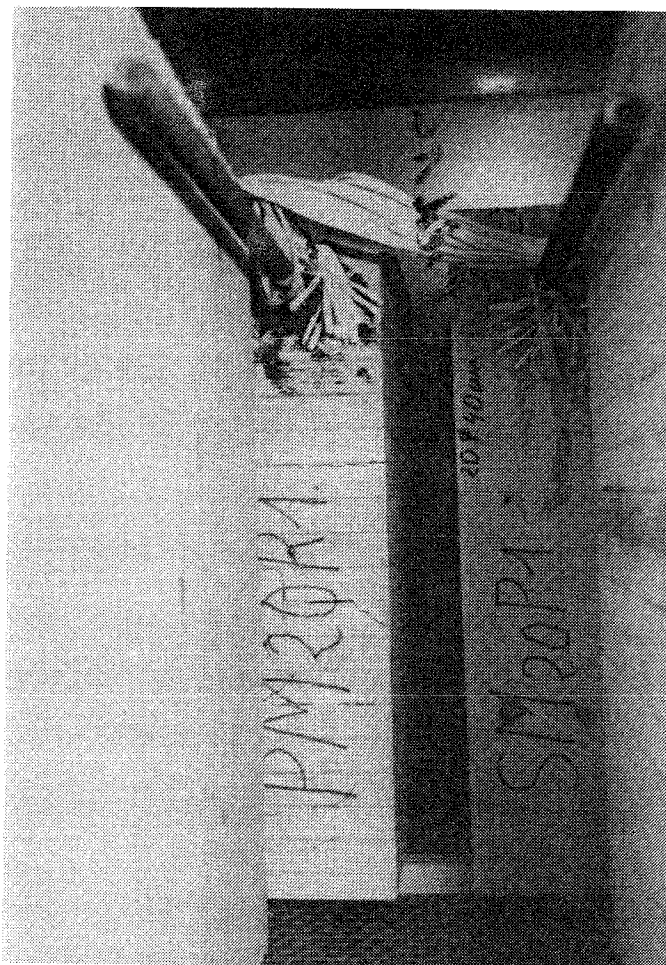


Bild 10: Schwindrisse infolge Änderung der relativen Luftfeuchte

Für die fünfte und letzte Beanspruchungsperiode (Befeuchtung) können die Vorgänge infolge eines Fehlers in der Klimakammer nicht eindeutig nachvollzogen werden.

Auf der rechten Seite der Anlagen 7 bis 12 sind jeweils die Dehnungen sowie darunter die zugehörigen Haftspannungen über der Einschraubtiefe für die Extremwerte einzelner Beanspruchungsperioden dargestellt (19., 29., 36., 40., 49., 53. und 57. Meßwert).

Die Regressionspolynome zeigen, daß die Dehnung - wie erwartet - an den beiden unbelasteten Enden der Stangen ungefähr Null ist.

Die Verteilung der Dehnungen und der zugehörigen Haftspannungen entlang der Stangen scheint unabhängig vom Winkel β zwischen Holzfaser- und Stangenlängsrichtung zu sein. Bei den Versuchskörpern mit rechtwinklig zur Faserrichtung eingeleimten Stangen sind die Werte der Dehnungen und Haftspannungen jedoch größer (insbesondere während der Befeuchtungsperioden) als die vergleichbaren Werte bei den Körpern mit faserparallel eingeleimten Gewindestangen. Dies ist in erster Linie auf die unterschiedlichen Schwind- und Quellmaße zurückzuführen. Gleichzeitig ist bei Anordnung der Stangen rechtwinklig zur Faserrichtung ein zeitlich längeres Anwachsen der Dehnungen zu beobachten. Ein je nach dem Einschraubwinkel β unterschiedlich steiler Anstieg der Dehnungen durch die Feuchtigkeitsänderungen ist nicht erkennbar.

Die gleichmäßigsten Dehnungsverteilungen können bei den Körpern PM20W1 und PM20R1 sowie SM20R1 beobachtet werden. Für die beiden letzt genannten Körpern ließe sich der Verlauf der Haftspannungen für die Meßwerte sogar als Gerade darstellen. Lastumlagerungen und somit gegenüber den mit Resorcinharzleim eingebrachten Stangen gleichmäßigere Haftspannungsverteilungen konnten beim angeblich "zäheren" Polyurethan-System nicht festgestellt werden.

Nach Auswertung der maximalen Haftspannungen $\max \tau_{\Delta U}$ in Abhängigkeit von der nach KOLLMANN 1951 zu erwartenden Holzfeuchteänderung läßt sich die nachfolgende Tabelle angeben:

Maximale Haftspannungen $\max \tau_{\Delta U}$ [N/mm ²] infolge Änderung der Holzfeuchte um 12% (bzw. 4%)		
Gruppe I.1 Kleber	Winkel β zwischen Stangen- und Holzfaserrichtung	
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 90^\circ$
Resorcinharzleim	1,6 (0,9)	4,3 (1,5)
Wevo - Kleber	1,6 (0,8)	4,5 (1,9)
Polyurethan-System	1,9 (1,2)	5,2 (2,3)

Die Tatsache, daß keine lineare Abhängigkeit zwischen den Haftspannungen und der Holzfeuchteänderung besteht, deutet auf Sorptionseffekte ("Mechano-sorptive effects"; vgl. auch Martensson 1990) hin.

Die rechnerische Verteilung der Haftspannungen kann entsprechend Bild 11 angenommen werden. Mögliche Plastifizierungen der Kleber sind durch die beiden Spannungsblöcke abgedeckt.

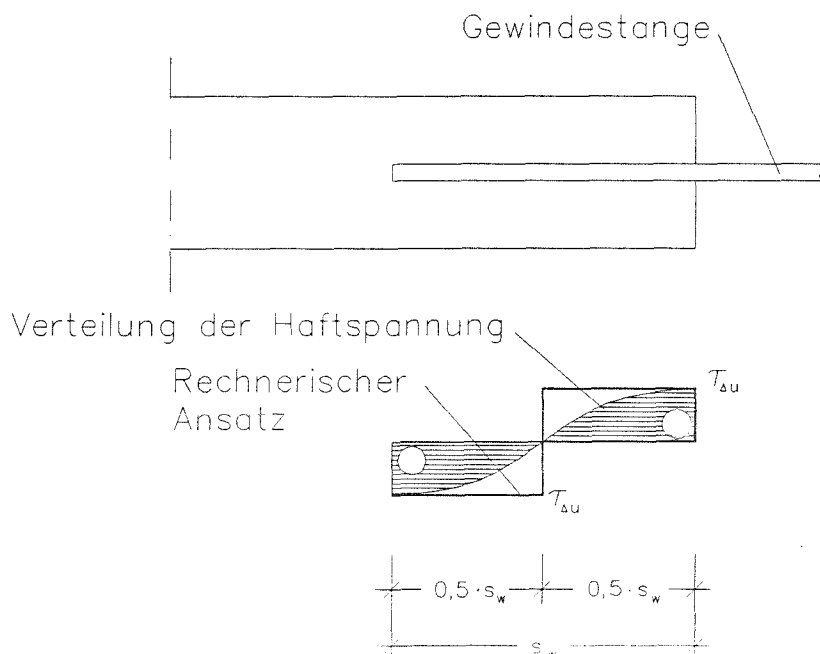


Bild 11: Vereinfachte rechnerische Verteilung der Haftspannungen infolge wechselnder Luftfeuchte

b) Holzschlüsselschrauben

(Gruppe I.2; vgl. Seiten 4 und 14)

Wie aus den Meßwerten in den Anlagen 13 bis 16 teilweise ersichtlich, sind einige DMS während der Versuche ausgefallen. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die aus der Wertung herausgenommenen Meßwerte:

Gruppe I.2	Aus der Wertung herausgenommene Dehnungswerte		
Körper	DMS Nr.	ab Meßwert	Bestätigung
PS20O1	3	0	1. Zugversuch
	15,16	18. bzw. 16.	2. Zugversuch
SS20O1	4	0	1. Zugversuch
	15,16	19.	2. Zugversuch
PS20R1	7	17.	2. Zugversuch
	8	0	1. Zugversuch

Den Einfluß der Exzentrizitäten bei den Holzschlüsselschrauben auf die Dehnungen zeigen besonders deutlich die DMS Nr. 4/12 des Körpers SS20O1: Bereits beim 1. Zugversuch wurde festgestellt, daß der DMS Nr. 4 beschädigt ist (siehe Tabelle). Die Dehnungen des gegenüberliegenden, in der Wertung noch verbleibenden DMS Nr. 12 passen ab dem 15. Meßwert größenordnungsmäßig nicht zu den Meßwerten der benachbarten Dehnungsmeßgruppen (vgl. Anlage 14).

Trotz dieser vielen Ausfälle bei der Gruppe mit den Holzschlüsselschrauben sind auch hier - wie bei der Gruppe I.1 - die einzelnen Phasen sehr deutlich erkennbar:

Während der Trocknungsperioden sind die Dehnungen negativ (Ablesungen 3 - 12, 22 - 29); während der Befeuchtungsperioden positiv (Ablesungen 13 - 21, 30 - 34). Beim Körper PS20R1 erreichten die Dehnungen bereits bei der 16. bzw. 32. Ablesung ihr Maximum; die Stange wird für den Rest der 2. Periode sogar gestaucht.

Im Vergleich zur Gruppe I.1 ergibt sich bezüglich der Dehnungen zwischen den Stangen mit metrischem und denen mit Holzschrauben-

Gewinde kein erkennbarer Größenunterschied; vgl. Körper SM20R1 und SS20R1 (Anlagen 8 und 16).

Die Regressionspolynome in den Anlagen 13 bis 16 zeigen, daß die Dehnungen an den unbelasteten Enden der Stangen ungefähr gleich Null sind. Die gleichmäßigsten Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen konnten in dieser Gruppe bei den Körpern ohne Kleber beobachtet werden. Um den Einfluß ungenauer Meßwerte durch den Ausfall einzelner DMS zu untersuchen, wurden an einigen Stellen die Meßwerte ganz herausgenommen, z.B.:

Körper	DMS Nr.	Schrauben- koordinate [mm]	Bemerkung
SS20O1	4/12	225	vgl. Anlage 14 A
PS20R1	5/13	275	vgl. Anlage 15 A
	7/15	375	

Beim Körper SS20O1 werden dadurch im wesentlichen die Größe der Haftspannungen beeinflusst; beim Körper PS20R1 ändern sich Anzahl und Lage der Nulldurchgänge und somit teilweise das Vorzeichen der Haftspannung für $x = 425$ mm. Die Integrale über die Haftspannungen nähern sich dem Wert Null.

Eine Auswertung der maximalen Haftspannungen $\max \tau_{\Delta U}$ in Abhängigkeit von der zu erwartenden Holzfeuchteänderung bestätigt die im Kapitel 6.2.1 a) angegebene Tendenz; bei Eindrehen der Stange ohne Kleber können etwa die halben Werte der Haftspannungen erwartet werden.

6.2.2 Temperaturbeanspruchung

Der Auswertung für die Gruppe I.3 liegen die Anlagen 17 bis 20 zugrunde. Auch hier sind die Wechsel der Beanspruchungen sehr deutlich erkennbar:

1. Periode	Klima 10/70	1.-12.Meßwert	2 Tage
2. Periode	Klima 60/65	13.-29.Meßwert	2,5 Tage
3. Periode	Klima 10/70	30.-41.Meßwert	2 Tage
4. Periode	Klima 60/65	42.-52.Meßwert	2 Tage
anschließend	Klima 20/65		

Die Dehnungsänderungen stellten sich zum größten Teil innerhalb weniger Stunden ein. Während der ersten, dritten und abschließenden Periode findet sowohl eine Abkühlung von Stahlstange, DMS und Gießharz als auch eine Erhöhung der Holzfeuchte im Prüfkörper statt; in der zweiten und vierten Periode überlagern sich analog die Dehnungen der Metalle und Kleber infolge der Temperaturerhöhung mit Stauchungen durch eine Abnahme der Holzfeuchte. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Dehnungen der Stahlstange im Bereich außerhalb mit denen im Holzkörper vergleicht. Allerdings zeigten die außerhalb des Holzkörpers in die Stahlstange eingeklebten DMS spätestens ab der zweiten Periode ausschließlich negative Dehnungen an. Ein möglicher Grund könnte in einer Nachhärtung des in die Nuten der Stahlstangen eingebrachten Gießharzes liegen. Aus den gemessenen Dehnungen konnten daher kaum Schlußfolgerungen gezogen werden. Es wurden daher ergänzende Versuche vorgenommen (Tabelle 3) bei veränderter Meßtechnik; u.a.

- Aushärtung des Gießharzes in den Nuten der Stahlstangen im Ofen unter einer Temperatur von etwa 80°C über 24 Stunden
- Einbau von Thermoelementen in den Nuten (vgl. Anlage 57)
- Aufkleben und Einbau von Thermoelementen im Holzkörper (vgl. Anlage 58)
- Bereitstellung eines Vergleichskörpers zur Messung der Holzfeuchte.

Da wiederum temperaturkompensierte DMS zur Anwendung kamen, wurden die Dehnungen der Stahlstange ($\alpha_T \approx 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) den gemessenen Dehnungen überlagert. Die resultierenden Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen sind in den Anlagen 59 bis 62 angegeben.

Tabelle 3: Beanspruchung in Holz eingebundener Gewindestangen unter wechselnder Temperaturbeanspruchung ohne äußere Lasteinwirkung

Ergänzende Versuche zum Teil 2 des Forschungsvorhabens (Gruppe I.3)		Gewindestange		Kleber ²⁾	Beanspruchung	
		Richtung zur Faser	Typ ¹⁾		Klima [*]	Z _u ^{**)} [kN]
Gruppe	Bezeichnung				(20/65)	
I.3/E	P M20 R3/E		M20	KPRF	10/70	111
	S M20 R3/E	⊥	M20	KPRF	60/65	135
	P S20 O3/E		S20	-	10/70	75
	S S20 O3/E	⊥	S20	-	60/65	107
					20/65	
<p>1) M.. = metrisches Gewinde Stahl 8.8 Bohrlochdurchmesser d_B = 20 mm S.. = Schlüsselschraube mit Außen- bzw. Nenndurchmesser d = 18 mm Haftlänge s_w = 40 cm</p> <p>2) KPRF = Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Leim (kalthärtendes Zweikomponenten-System) - = ohne Leim eingedrehte Schlüsselschrauben</p> <p>[*]) jeder der fünf Zyklen wurde ein mal durchfahren ; Dauer ca. 2 Tage ; Klima 10/70 soll heißen : 10⁰ C Lufttemperatur und 70% relative Luftfeuchte</p> <p>^{**)} verbleibende Ausziehungskraft nach Abschluß der Versuche</p>						

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- * Die im Klimaschrank eingestellte Temperatur stellt sich an der Holzoberfläche binnen drei Stunden ein; im Inneren des Holzkörpers sowie am freien Ende der Stangen demgegenüber etwas verzögert. Der Stangenteil im Inneren des Holzkörpers erreichte nach ca. sechs bis sieben Stunden die eingestellte Temperatur. Dieser Ablauf traf für eine Erwärmung wie für eine Abkühlung gleichermaßen zu.
- * Die Temperatur entlang der Gewindestangen im Inneren der Versuchskörper war weitgehend konstant; ein nennenswerter Einfluß auf Größe und Verteilung der Haftspannungen war daher nicht vorhanden.
- * Die Holzfeuchte in 3,5 cm Tiefe veränderte sich im Verlauf einer Periode um maximal 1% .
- * Da sich bei allen vier Versuchen bei den außerhalb des Körpers liegenden DMS nach wie vor geringfügige negative Dehnungen einstellten, bleibt zu vermuten, daß das Gießharz noch weiter nachgehärtet hat ($\alpha_T \approx 200 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Diese Stauchungen sind jedoch wesentlich geringer als diejenigen bei der vorangegangenen Versuchsserie.
- * Wie schon bei der Gruppe I.2 konnten die gleichmäßigsten Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen bei den Körpern mit den nicht eingeleimten Holzschlüsselschrauben beobachtet werden.

Fazit:

Die Haftspannungen in der Klebfuge lassen sich aus der sich im Holz einstellenden Ausgleichsfeuchte ermitteln. Aus den sich infolge einer Temperaturänderung errechenbaren, über die Gewindelänge nahezu konstanten Dehnungen ergeben sich keine zusätzlichen Haftspannungen.

6.2.3 Normalklima 20/65

Die Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen der Vergleichskörper (Gruppe I.4) sind in den Anlagen 21 bis 24 dargestellt.

6.3 AUSZIEHVERSUCHE

Die Prüfkörper wurden nach der Klimabeanspruchung im Ausgangsklima 20/65 gelagert; die Gewindestangen später herausgezogen (vgl. Anlage 25). Diese Ausziehversuche wurden mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit des Querhauptes von 1mm/min durchgeführt. Gleichzeitig wurden über die noch intakten DMS die Dehnungen der Stahlstange gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

6.3.1 Bruchverhalten

Nach Abschluß der Versuche unter reiner Klimabeanspruchung wurden an den unter 6.2 genannten Prüfkörpern die Ausziehkräfte Z_u (vgl. Tabellen 1,3) ermittelt.

Im Vergleich zu den Kurzzeitversuchen von EHLBECK, SIEBERT - 1987 konnten bezüglich der Bruchbilder keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden:

- bei Verwendung des Polyurethan- bzw. Epoxidharz-Systems blieb der Kleber über die volle Länge an den Stangen haften; bei Einleimung parallel zur Faser wurden diese zum Teil mit herausgezogen; vgl. Bild 12.

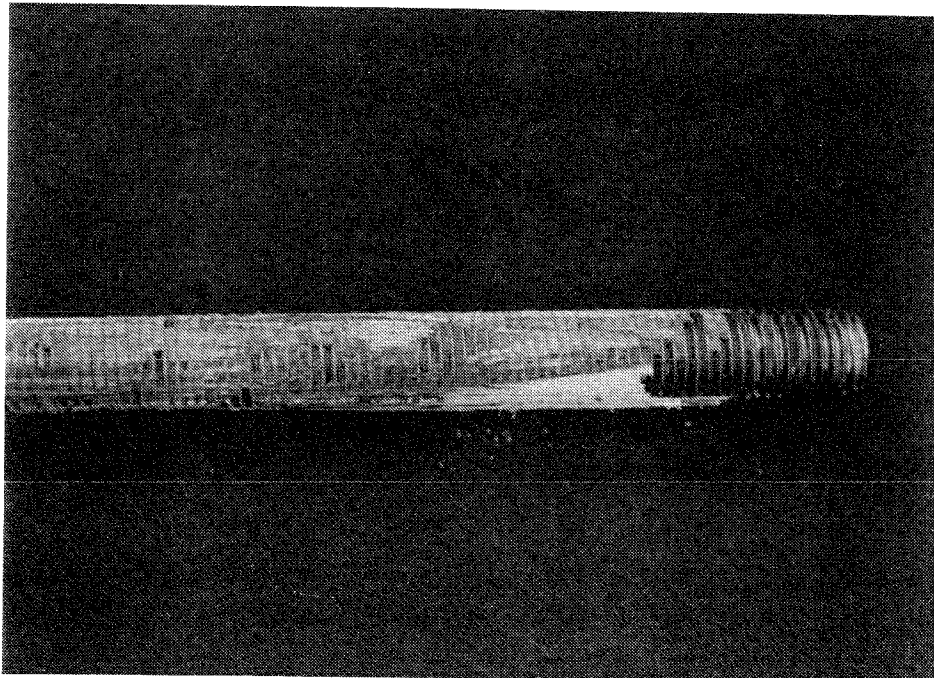


Bild 12: Ausgezogene Stange des Körpers PM20W1

- bei Verwendung von Resorcinharzleim fielen während des Ausziehvorganges schalenförmige, aus Holzfasern und Kleber bestehende Teile aus den Gewindegängen heraus. Dies ist darauf zurückzuführen, daß zum einen Stahl und die Kondensationsharzgruppen keine chemische Verbindung eingehen können; zum anderen benötigt der Resorcinharzleim zur Erzielung höherer Festigkeiten einen gewissen Preßdruck. Wenn aber bei den Stangen mit metrischem Gewinde mit dem Außendurchmesser vorgebohrt und so beim Eindrehen der Stangen kein nennenswerter Preßdruck aufgebracht wird, ist für das Versagen der Verbindung der Kleber und nicht das Holz verantwortlich. Bei diesem Spröbruch tritt das Versagen schlagartig und ohne Vorankündigung ein.

6.3.2 Haftspannungen

Zur Bestimmung der Tragfähigkeiten wurden aus den Ausziehkräften Z_u die Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$ in Tabelle 4 zusammengestellt. Als Bindefestigkeit werden die über die Haftlänge s_w gemittelten Haftfestigkeiten bezeichnet. Entsprechend der Vorgehensweise in EHLBECK, SIEBERT 1987 wurde dabei immer der Außendurchmesser zugrunde gelegt. Bei den Holzschlüsselschrauben wurde eine wirksame Einschraublänge von 370 mm in Ansatz gebracht, da die Schrauben am unteren Ende auf einer Länge von 30 mm abgeklebt in einem Leimpropfen saßen. Vernachlässigt wurde hingegen der fehlende mechanische Verbund der Holzschlüsselschrauben im Bereich der Nute.

Tabelle 4: Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$

Versuche Reihe I		Gewindestange				Beanspruchung		
Gruppe	Bezeichnung	Richtung zur Holzfaser	Typ ¹⁾	Haftlänge s_w [mm]	Kleber ²⁾	Z_u ³⁾ [kN]	$\tau_{u,m}$ ⁴⁾ [N/mm ²]	
I.1	P M20 R1 P M20 R2		M20	400	KPRF	121 81	4,8 3,2	
	S M20 R1 S M20 R2	⊥	M20	400	KPRF	91 119	3,6 4,7	
	P M20 P1 S M20 P1	 ⊥	M20 M20	400 400	PUR PUR	122 128	4,9 5,1	
	P M20 W1 S M20 W1	 ⊥	M20 M20	400 400	KEP KEP	103 146 ^{*)}	4,1 ≥ 5,8	
	I.2	P S20 R1 P S20 R2		S20	370	KPRF	76 104	3,3 4,5
		S S20 R1 S S20 R2	⊥	S20	370	KPRF	119 103	5,1(6,1) 4,4
P S20 O1 P S20 O2			S20	370	-	27 60	1,2 2,6	
S S20 O1 S S20 O2		⊥	S20	370	-	64 73	2,8 3,1	
I.3 I.3/E	P M20 R3 P M20 R3/E		M20	400	KPRF	140 111	5,6 4,4	
	S M20 R3 S M20 R3/E	⊥	M20	400	KPRF	151 135	6,0 5,4	
	P S20 O3 P S20 O3/E		S20	370 400	-	43 75	1,8 3,0	
	S S20 O3 S S20 O3/E	⊥	S20	370 400	-	65 107	2,8 4,3	
I.4	P M20 R4 S M20 R4	 ⊥	M20 M20	400 400	KPRF KPRF	89 115 ^{*)}	3,5(5,0) ≥ 4,6(5,6)	
	P S20 O4 S S20 O4	 ⊥	S20 S20	370 370	- -	43 67	1,8 2,9(4,0) (5,1) ⁺	
	1) siehe Tabelle 1							
	2) siehe Tabelle 1							
3) verbleibende Ausziehungskraft Z_u nach Abschluß der Versuche;								
*) Unterer Grenzwert der Ausziehungsfestigkeit infolge vorzeitigem Quersugversagen								
4) Bindefestigkeiten $\tau_{u,m} = Z_u / (\pi \cdot d \cdot s_w)$; in Klammern sind zum Vergleich die unter Normalklima aus jeweils zwei Versuchen ermittelten Bindefestigkeiten nach EHLBECK, SIEBERT 1987 angegeben;								
+ hier: Bohrlochdurchmesser \approx Kerndurchmesser								

Die Tabelle 4 läßt folgendes erkennen:

1. Im Ausziehversuch kann bei den Körpern, die zuvor der in den Tabellen 1,3 angegebenen Klimabeanspruchung ausgesetzt waren, keine Reduzierung der Bindefestigkeiten gegenüber den unter Normalklima gelagerten Körpern festgestellt werden. Diese Aussage deckt sich mit den in RIBERHOLT 1986 mitgeteilten Ergebnissen. Hierzu noch zwei Bemerkungen:
 - ° Im ersten Teil dieses Forschungsvorhabens wurden um 20% bis 30% höhere Bindefestigkeiten unter Normalklima erzielt (vgl. Klammerwerte in Tabelle 4); was auf dort teilweise deutlich geringeren Haftlängen s_W zurückzuführen ist.
 - ° Literaturangaben zufolge (KOLLEK 1989) geben Alterungsversuche über kurze Zeiträume nur sehr grobe Hinweise auf die Beständigkeit von Klebungen.
2. Die Tragfähigkeit bei Anordnung der Stangen rechtwinklig zur Faser ist i.d.R. größer als bei faserparalleler Anordnung. Für die ohne Kleber eingebrachten Holzschlüsselschrauben ist der Unterschied am größten.
3. Bei Einleimung der Stangen werden höhere Tragfähigkeiten erzielt als bei Eindrehen ohne Leim; bei Verwendung von Resorcinharzleim beträgt die Laststeigerung mindestens 50 %.
4. Wie im ersten Teil dieses Forschungsvorhabens liegen die Bindefestigkeiten von mit dem Polyurethan-System eingebrachten Stangen über denen bei Verwendung von Resorcinharzleim.

Anschließend wurden aus den während der Ausziehversuche gemessenen Dehnungen die Haftspannungen entlang der Stange ermittelt

- zum einen wiederum mittels Regressionsrechnung durch Polynome n. Grades;
- zum zweiten mittels einer trigonometrischen Ansatzfunktion in Anlehnung an die strenge Lösung der Differentialgleichung (VOLKERSEN 1953) für linear elastische Werkstoff

$$\epsilon(x) = a \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + b \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + b \quad (2)$$

wobei

a,b dimensionslose Parameter

λ [$10^{-3}/\text{mm}$] Periode der Differentialgleichung (DGL)
für $\tau(x)$
 k [N/mm^3] Steifigkeitsziffer der Verbindung ;

- zum dritten mittels einer analogen trigonometrischen Ansatzfunktion der Form

$$\epsilon(x) = d \cdot \sin(\lambda \cdot x) + e \cdot \cos(\lambda \cdot x) + e \quad (2a)$$

Mit allen drei Ansätzen lassen sich die Meßwerte gut erfassen. Der hyperbolische und der trigonometrische Ansatz wurden gewählt, da - wie auch schon bei EHLBECK, SIEBERT 1987 - zum einen die errechneten Konstanten aus den Polynomansätzen keine Gesetzmäßigkeiten erkennen ließen und zum anderen die Haftspannungen, insbesondere für $x = l_E$ ("oberes" Ende), sehr großen Schwankungen unterworfen waren.

Der Herleitung von Gl.(2) liegt die Annahme einer rein elastischen Verformung der Schicht zwischen Stahlstange und Holzkörper zugrunde. Die Schubspannung entlang der Stange ergibt sich dann zu

$$\tau(x) = k \cdot \delta(x) \quad (3)$$

wobei

$\delta(x)$ Verschiebung der Stahlstange an der Stelle x .

$$\text{Mit} \quad \delta(x) = \int_0^x \epsilon(x) dx \quad (4)$$

$$\epsilon(x) = Z(x) / (E \cdot A_n) \quad (5)$$

$$\text{und} \quad Z(x) = U \cdot \int_0^x \tau(x) dx \quad (6)$$

folgt

$$\tau(x) = \frac{U \cdot k}{E \cdot A_n} \cdot \int_0^x \int_0^x \tau(x) dx dx \quad (7)$$

Nach zweimaligem Differenzieren ergibt sich die lineare, homogene Differentialgleichung (DGL) 2. Ordnung

$$\tau''(x) = \frac{U \cdot k}{E A_n} \cdot \tau(x) \quad (8)$$

mit der allgemeinen Lösung

$$\tau(x) = k/\lambda \cdot [a \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + b \cdot \cosh(\lambda \cdot x)]$$

und der Periode

$$\lambda = \sqrt{\frac{U \cdot k}{E \cdot A_n}} \quad (9)$$

Durch Einsetzen von Gl.(6) in Gl.(5) lassen sich die Dehnungen der Stahlstange errechnen zu

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= \frac{U}{E \cdot A_n} \cdot \int_0^x \tau(x) dx \\ &= b \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + a \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + c \end{aligned} \quad (10)$$

Mit der Randbedingung $\epsilon(0) = 0$ läßt sich Gl.(10) vereinfachen zu

$$\epsilon(x) = b \cdot \sinh(\lambda \cdot x) + a \cdot \cosh(\lambda \cdot x) + a \quad ; \quad (2)$$

die zugehörige Haftspannungsverteilung läßt sich daraus nach EHLBECK, SIEBERT 1987 errechnen zu

$$\tau(x) = \epsilon'(x) \cdot E \cdot A_n / U \quad (11)$$

Die Steifigkeitsziffern k wurden aus den Versuchswerten wie folgt ermittelt:

$$k = \frac{\tau(x)}{\delta(x)} \approx \frac{\tau_m}{\delta_m} = \frac{\tau_m}{\epsilon_m \cdot s_w}$$

$$\text{bzw.} \quad k \approx \frac{Z}{U \cdot s_w \cdot \epsilon_m \cdot s_w} = \frac{Z}{\pi \cdot d \cdot s_w \cdot \epsilon_m} \quad (12)$$

wobei

$\tau_m, \delta_m, \epsilon_m$

über die Haftlänge s_w gemittelte Werte der Haftspannung, Verformung bzw. Dehnung.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, daß bei der Auswertung der Ausziehversuche insbesondere der Wert für λ nur in geringen Grenzen streut.

Steifigkeitsziffer k [N/mm^3] der Verbindung bei Auswertung der Ausziehversuche mit Nenndurchmesser $d = 20$ mm					
Verbindung ¹⁾		Winkel zwischen Stangenlängs- und Holzfaserrichtung			
		0°		90°	
Typ	Kleber	$Z = 0,5 \cdot Z_u$	$Z = 1,0 \cdot Z_u$	$Z = 0,5 \cdot Z_u$	$Z = 1,0 \cdot Z_u$
S20	ohne K., KPRF	5,6 - 6,2	5,7 - 6,2	5,1 - 6,6	5,7 - 6,3
M20	KPRF	8,0 - 8,9	4,3 - 7,0	7,0 - 7,2	6,2 - 6,6
	PUR, KEP	9,7	5,7	7,4 ; 8,0	5,0 ; 5,1
zugehörige Periode λ [$10^{-3}/mm$] der Differentialgleichung					
Verbindung ¹⁾		0°		90°	
Typ	Kleber	$Z = 0,5 \cdot Z_u$	$Z = 1,0 \cdot Z_u$	$Z = 0,5 \cdot Z_u$	$Z = 1,0 \cdot Z_u$
S20	ohne K., KPRF	3,4 - 3,6	3,5 - 3,6	3,1 - 3,6	3,3 - 3,5
M20	KRRF	3,7 - 3,9	2,7 - 3,4	3,5	3,3
M20	PUR, KEP	4,1 ; 4,2	3,1 ; 3,7	3,6 ; 3,7	2,9 ; 3,0
1) Bezeichnungen siehe Tabelle 1					

Die mit Gl.(11) erzielten Ergebnisse sind in den Anlagen 26 bis 43 dargestellt. Dabei ist allerdings zu beachten, daß bei den am "oberen" Ende der Gewindestangen angebrachten Meßstellen bei Laststufen über etwa 100 kN die gemessenen Dehnungen weit über den sich aus der angreifenden Kraft, dem Elastizitätsmodul des Stahles und dem Nettoquerschnitt errechneten Sollwerten lagen. Dies ist auf den Beginn eines Fließens der Stahlstangen zurückzuführen. Da Zugversuche an den Stahlstangen der Güte 8.8 keinerlei Überfestigkeiten zeigten, wurden im Bereich der Plastizierung als Dehnung der sich unter der Streckgrenze ergebend Wert angesetzt, um eine sinnvollere Auswertung zu ermöglichen. Möchte man mit einem einzigen Ansatz auch die höheren Laststufen beschreiben können, sind die hyperbolischen Funktionen in Gl.(2) durch die entsprechenden trigonometrischen Funktionen (vgl. Gl.(2a)) zu ersetzen. Ein Vergleich der größten Haftspannungen $\max \tau$ mit den zugehörigen Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$ nach Tabelle 4 ergab mit Ausnahme der Versuche PM20W1 und PM20R3 für den Spannungsspitzenfaktor n Werte von

$$n = \max \tau / \tau_{u,m} \leq 1,6 .$$

Die Auswertungen einschließlich weiterer Vergleichs- und Kontrollrechnungen von KAISER, REIDELSHÖFER 1989 zeigen, daß die verwendeten hyperbolischen und trigonometrischen Funktionen durchaus geeignet sind, den Dehnungs- und Haftspannungsverlauf entlang der Gewindestangen zu beschreiben; eine besonders gute Übereinstimmung mit den Meßwerten ergab sich bei den Versuchen mit Schlüsselschrauben und bei rechtwinklig zur Faser eingeschraubten Gewindestangen. Die Auswertungen zeigten aber auch, daß die Form der Haftspannungsverteilung und die Größe der Spannungsspitzen bei $x = s_w$ ("oberes" Ende) entscheidend von der gewählten Funktion abhängen und daher nicht überbewertet werden sollten.

Das näherungsweise Erfassen des Haftspannungsverlaufes unter Gebrauchslast ($Z \approx 0,4 \cdot Z_u$ bzw. $D \approx 0,4 \cdot D_u$) kann, unter Berücksichtigung der von EHLBECK, SIEBERT 1987 mitgeteilten Ausziehversuche, mit dem in Bild 13 dargestellten, auf der sicheren Seite liegenden Zusammenhang erfolgen. Dem liegt die Annahme

zugrunde, daß infolge der geringen Klebfugendicken der Haftspannungsverlauf an der Grenzschicht Stahlstange/Kleber in etwa dem in der Grenzschicht Kleber/Holz entspricht.

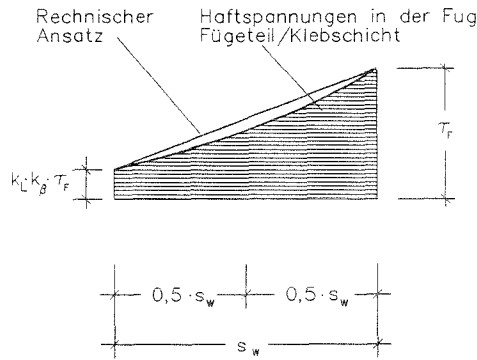
VERTEILUNG DER HAFTSPANNUNGEN	
GRÖSSTWERT	$\tau_F = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot s_w} \cdot \frac{3}{(k_L \cdot k_\beta + 1,0)}$ <p>mit</p> <p>F = äußere Axialbelastung d = Außen- bzw. Nenndurchmesser s_w = Haftlänge der Stahlstange in den Holzkörper k_L = Beiwert für den verwendeten Leim k_β = Beiwert für den Winkel β zwischen Holzfasern- und Stangenlängsrichtung</p>
BEIWERTE	$k_L = \begin{cases} 0,24 & \text{für Polyurethan- und Epoxidharzsysteme} \\ 0,13 & \text{für Resorzinharzleim} \\ 0,83 & \text{bei Einbringung ohne Leim} \end{cases}$ $k_\beta = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \beta = 0^\circ \\ 1,2 & \text{für } \beta = 90^\circ \end{cases}$

Bild 13: Haftspannungsverteilung entlang der Gewindestangen infolge äußerer Zug- bzw. Druckbeanspruchung

Die Formeln für die maximale Haftspannung $\max \tau_{Z,D}$ beinhalten Erhöhungsfaktoren zur Berücksichtigung der ungleichförmigen Spannungsverteilungen entlang der Gewindestangen sowie des Winkels β zwischen Stangen- und Holzfaserrichtung. Ein Winkel $\beta = 90^\circ$ führt entsprechend dem kleineren Elastizitätsmodul rechtwinklig zur Faser zu einem "weicheren" Verhalten und somit zu einer gleichmäßigeren Kraftübertragung.

Im Übrigen wird auf die in EHLBECK, SIEBERT 1987 mitgeteilten Ergebnisse bei der Auswertung der Ausziehversuche verwiesen.

6.4 LANGZEITBEANSPRUCHUNG

Die Auswertung der Reihe II stützt sich auf die Darstellungen in den Anlagen 47 bis 56 sowie auf das in Anlage 46 für die entsprechende Zeit dargestellte Klima in Karlsruhe. Im Januar und Februar herrschten jeweils große Tagesschwankungen von bis zu 35% relativer Luftfeuchte. Der Temperaturverlauf $T(t)$ sowie der Verlauf der gemittelten Tageswerte der relativen Luftfeuchte $\varphi(t)$ lassen sich vereinfachend wie folgt angeben (vgl. Anlage 46 A,B):

$$T(t) = 12,5 \left\{ 1 + \sin \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{(t-105)}{365} \right] \right\} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (12)$$

$$\varphi(t) = 75 + 15 \left\{ \sin \left[2 \cdot \pi \cdot \frac{(t+130)}{365} \right] \right\} \quad [\%] \quad (13)$$

wobei

t x. Tag im Jahr (1. Januar : t = 1)

Ferner sind zum Vergleich in der nachfolgenden Tabelle 5 für einzelne Tage die aus den gemittelten Tageswerten errechneten Ausgleichsfeuchten nach KOLLMANN 1951 zusammengestellt.

Für die 40 cm tief eingedrehten Gewindestangen wurden erhebliche Abweichungen zwischen den gemessenen Dehnungen und den aus der angreifenden Kraft, dem Elastizitätsmodul des Stahles und dem Nettoquerschnitt berechneten Werten festgestellt. Mögliche Ursachen hierfür sind Ungenauigkeiten bei der Ausführung der Stangen und der Anbringung der Meßstreifen sowie Exzentrizitäten bei der Krafteinleitung.

Tabelle 5: Klima in der offenen Halle

Periode	Beginn	Meßwert	mittleres Klima	zugehörige Holzfeuchte [%]
-	Sept. 1987	-	20/65	12
1	01.12.87	3.	2/77	15
	08.12.87	18.	-8/68	13
	31.12.87	36.	5/75	15
	15.01.88	42.	0/83	18
	15.02.88	47.	3/70	13
	26.02.88	48./49.	0/90	21
	21.03.88	52.	8/83	18
2	25.04.88	55.	9/45	9
	22.07.88	62.	27/64	11
	22.08.88	64.	18/65	12
3	15.10.88	68.	13/95	24
	04.11.88	69.	3/56	11
	26.11.88	71.	1/94	24
	09.01.89	74.	6/92	22
	23.01.89	75.	0/95	25
	21.02.89	77.	6/88	20
4	06.03.89	78.	7/80	17
	23.03.89	79.	8/50	9
	4.04.89	80.	6/83	18
	28.08.89	90.	17/78	16
5	30.10.89	94.	13/93	23
	11.12.89	97.	-2/92	22
	8.01.90	98.	0/95	25
6	11.06.90	109.	16/75	14
	24.07.90	112.	22/47	9
	15.10.90	118.	16/82	17

Die Darstellungen der Dehnungen über der Zeit zeigen, daß

- Klimaänderungen - wie bei den Versuchen in der Klimakammer - sofort Dehnungen in den Stangen verursachen;
- Dehnungszunahmen entweder infolge eines kurzfristigen Anstiegs der Temperatur, da die Stahlstange z.T. nicht dagegen isoliert ist, oder infolge einer Zunahme der Holzfeuchte zustande kommen;
- die mit Resorcinharzleim eingebrachten Stangen die auffälligsten Dehnungssprünge zeigen (insbesondere die mit 80 cm Einleimlänge); die geringsten Dehnungsdifferenzen hingegen weisen entsprechend allen bisherigen Versuchen die ohne Kleber eingebrachten Holzschlüsselschrauben auf;
- insbesondere bei den 40 cm tief eingebrachten Stangen die Dehnungen im Sommer 1988 bzw. 1989 geringer waren als zu Beginn der Versuche im Winter 1987;
- bei den Stangen mit Holzschraubengewinde die Dehnungen der beiden äußersten DMS kleiner sind als die der beiden nachfolgenden DMS, da für $x > l_E$ ein größerer Stahlquerschnitt vorhanden ist (vgl. Anlage 3).
- beim Körper G26/10R (Anlage 55) infolge einer Beschädigung beim Einbau die Meßwerte des DMS Nr.20 zu hoch liegen. Bei der Auswertung der Dehnungen über der Schraubenkoordinate wurde daher der Meßwert für $x = 950$ mm ganz herausgenommen.

Kriecheinflüsse sind bisher - auch an den Versuchskörpern - nicht zu beobachten.

Auf der rechten Seite der Anlagen 47 bis 56 ist in der Kopfzeile neben der Versuchsbezeichnung die äußere, an den Stangen angreifende Zugkraft Z sowie die zugehörige, über die Haftlänge s_w gemittelte Haftspannung $\tau_{m,a}$ angegeben. In der Darstellung der Haftspannung über der Schraubenkoordinate ist die Größe von $\tau_{m,a}$ strichliert eingezeichnet. Die vorläufige Auswertung ergab folgendes Bild:

- Am unbelasteten Ende der Stangen sind die Dehnungen ungefähr Null.
- Das Integral über die Haftspannungen entlang der Stange entspricht ungefähr der äußeren Last.
- Bei den Körpern mit den kürzeren Einleimlängen und bei denen mit Spannstählen sind die Dehnungen sowohl aus klimatischen als

auch aus den äußeren Beanspruchungen am gleichmäßigsten über die Einschraublänge verteilt.

- Die Meßwerte am "oberen" Ende der Stangen sind auf der rechten Ordinate der jeweils oberen Abbildung dargestellt. Die geringsten Unterschiede zeigen sich bei den Körpern mit 80 cm bzw. 100 cm tief eingebrachten Stangen; die maximalen Dehnungsdifferenzen liegen hier bei $160 \mu\text{m/m}$.
- Während des Aufbringens der äußeren Lasten wurden verschiedene Ablesungen durchgeführt. Die Auswertung des 3. Meßwertes zeigt, daß die kurz zuvor aufgebrachten Lasten im wesentlichen über die ersten $40 \text{ cm} = 20 \cdot d$ abgetragen werden:
 - bei Einbindelängen l_E von 40 cm sind die Dehnungen über die Haftlänge s_w gleichmäßig verteilt;
 - bei den Stangen mit $l_E = 80 \text{ cm}$ nähern sich die Haftspannungen nach 40 cm Einbindelänge einem konstanten Wert. Eine bisher nicht erklärbare Ausnahme bildet der Körper S20/8R.
- Im Verlauf einer kalten Periode nimmt die Größe der Haftspannungen am Stangenende zu; bei einer heißen oder sehr feuchten Periode ist diese Spannungsumlagerung gegenläufig. Die Kurven der Haftspannung in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe unmittelbar nach Aufbringung der statischen Last haben das gleiche Aussehen wie die entsprechenden Kurven aus dem Teil 1 dieses Forschungsvorhabens. Ergänzend kann festgestellt werden, daß zwischen den mit Resorcinharzleim und den mit dem Polyurethan-System eingebrachten Stangen keine großen Unterschiede bestehen.
- Im Laufe der Zeit stellt sich insbesondere bei den Körpern S20/40 und S20/4R eine Umlagerung der Haftspannungen zur Stangenmitte hin ein bei gleichzeitig gleichmäßigerer Verteilung derselben. Die Last wird allerdings weiterhin hauptsächlich von beiden Stangenenden aufgenommen.

Die bisherige Auswertung der Reihe II läßt sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die gleichmäßigsten Dehnungen über die Haftlänge s_w und somit einen linearen Haftspannungsverlauf ergeben sich bei den ohne Kleber eingebrachten Holzschlüsselschrauben; im Unterschied zu den bisherigen Ergebnissen besitzen die mit Resorcinharzleim gegenüber den mit dem Polyurethan-System eingeklebten Stangen die ungleichförmigeren Dehnungsverteilungen.
2. Änderungen der Holzfeuchte der Körper tritt in der offenen Halle im wesentlichen durch die wechselnden Luftfeuchten ein.
3. Die Übertragbarkeit der unter reiner Klimabeanspruchung erzielten Ergebnisse auf Körper mit Gewindestangen unter Langzeitbeanspruchung scheint nach den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen gegeben zu sein.
4. Bei Anordnung der Stangen rechtwinklig zur Faserrichtung ($\beta=90^\circ$) liegt die "Grenzlänge", d.h. die an der Lastabtragung beteiligten Bereiche bei etwa dem 20-fachen des Durchmessers d ; für $\beta=0^\circ$ liegt sie entsprechend den Untersuchungen von EHLBECK, SIEBERT 1987 bei ca. $40 \cdot d$.

7 FOLGERUNGEN

7.1 ALTERUNG DER KLEBFUGE INFOLGE FEUCHTIGKEIT

Bei eingeleimten Gewindestangen ist insbesondere in Dach- und Außenbereichen trotz Beachtung des baulichen Holzschutzes manchmal mit Tauwasserbildung, Undichtigkeiten, Spritzwasser u.ä. zu rechnen. Bei den im Bauesen gebräuchlichen kalthärtenden Systemen zieht der Kleber Feuchtigkeit an. Der Wassereintritt in die Klebfuge kann 1 bis 2 mm/Monat betragen. Mit dem Eindringen der Feuchtigkeit in die Klebfuge ist eine Zerstörung in der Grenzschicht der Klebfuge infolge eintretender Korrosion sowie eine Verminderung der Haftfestigkeiten grundsätzlich nicht auszuschließen. Abhilfe kann hier eine entsprechende Feuchtigkeitssperre oder die Verwendung von beschichtetem bzw. nicht rostendem Stahl schaffen (vgl. auch RIBERHOLT 1986). Wirtschaftlicher wäre es, einen geeigneten Kleber zu verwenden. In diesem Fall könnte man ferner den aus dem Bohrloch beim Einschraubvorgang ausgetretenen Klebstoff rund um die Stange belassen mit dem zusätzlichen Vorteil, daß durch diesen Klebstoffkehlrand Haftspannungsspitzen abgebaut und so die Tragfähigkeit der Verbindung erhöht wird (vgl. HAHN et al. 1982).)

7.2 EINLEITUNG ÄUßERER KRÄFTE - VORSCHLAG EINES BEMESSUNGSVERFAHRENS

7.2.1 Allgemeines

Die nachfolgenden Ausführungen betreffen die Einleitung hoher Einzellasten, z.B. bei Stützenfüßen, Trägerstößen und -auflagern, unter planmäßiger äußerer Zug- oder Druckbeanspruchung sowie unter Klimabeanspruchung. Im einzelnen ist nachzuweisen, daß

- die Axialkraft in die Gewindestange eingeleitet werden kann
- die Gewindestange diese Kraft aufnimmt
- die zu erwartenden Dehnungen der Gewindestange den Dehnungen des Brettschichtholzträgers entspricht.

7.2.2 Beanspruchung der Verbindung

Für den Gebrauchszustand kann bis zum Vorliegen genauerer Erkenntnisse der Verlauf der Haftspannungen vereinfachend nach den

in Bild 14 dargestellten Ansätzen erfolgen.

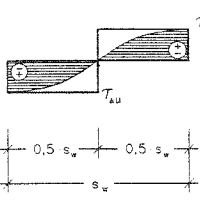
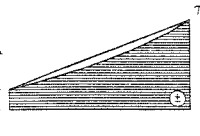
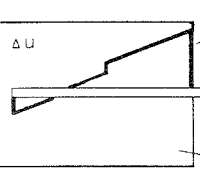
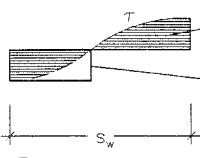
BEANSPRUCHUNG									
ART	VERTEILUNG DER HAFTSPANNUNGEN	VORZEICHEN-DEFINITION	RECHENWERTE						
WECHSELNDE RELATIVE LUFTFEUCHTE φ BZW. TEMPERATUR T		<table border="1"> <tr> <td>PROBUNG</td> <td>BETRIEBUNG</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>-</td> <td>+</td> </tr> </table>	PROBUNG	BETRIEBUNG	+	-	-	+	Bestimmung der Ausgleichsfeuchten u nach Kollmann $\tau_{s,u}$ vgl. Tabelle 6
PROBUNG	BETRIEBUNG								
+	-								
-	+								
AXIAL- BELASTUNG F	 <p>k_L = Beiwert für den verwendeten Leim k_β = Beiwert für den Winkel β zwischen Holzfaser- und Stangenlängsrichtung</p>	<table border="1"> <tr> <td>ZUG</td> <td>DRUCK</td> </tr> <tr> <td>+</td> <td>-</td> </tr> </table>	ZUG	DRUCK	+	-	$\tau_F = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot s_w} \cdot \frac{3}{(k_L k_\beta + 1,0)}$ <p>$k_L = \begin{cases} 0,24 & \text{für Polyurethan- und Epoxidharzsysteme} \\ 0,13 & \text{für Resorzinharzleim bei Einbringung ohne Leim} \\ 0,83 & \end{cases}$</p> <p>$k_\beta = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \beta = 0^\circ \\ 1,2 & \text{für } \beta = 90^\circ \end{cases}$</p>		
ZUG	DRUCK								
+	-								
ÜBERLAGERUNG	 <p>Holzkörper</p>		$\tau_{u,m}$ vgl. Tabelle 7 $\gamma = 2,5$						
ERLAUTERUNGEN	 <p>Verteilung der Haftspannung Rechnerischer Ansatz</p> <p>F = Äußere Axialkraft im Gebrauchszustand d = Außen- bzw. Nenn Durchmesser s_w = Haftlänge der Stahlstange in den Holzkörper; Haftlängen von mehr als $20 d (\beta=0^\circ)$ bzw. $40 d (\beta=90^\circ)$ dürfen nicht in Rechnung gestellt werden β = Winkel zwischen Holzfaser- und Stangenlängsrichtung</p>								

Bild 14: Verlauf der Haftspannungen von Gewindestangen aus wechselnder Holzfeuchte Δu und äußerer Normalkraftbeanspruchung F unter Gebrauchslast

Bei ohne Kleber eingebrachten Holzschlüsselschrauben sollten Haftlängen s_w von mehr als $20 \cdot d$ nicht in Rechnung gestellt werden.

Die für die Bemessung benötigte Größe der maximalen Haftspannungen $\max \tau_{\Delta U}$ infolge einer Änderung der Holzfeuchte geht aus der nachfolgenden Tabelle 6 hervor.

Tabelle 6: Maximale Haftspannungen $\max \tau_{\Delta U}$ [N/mm²] infolge einer Änderung der Holzfeuchte um 12% (bzw. 4%)

Kleber	Winkel β zwischen Stangen- und Holzfaserrichtung	
	$\beta = 0^\circ$	$\beta = 90^\circ$
ohne Kleber	0,8 (0,4)	2,0 (0,8)
Resorcinharzleim, Wevo - Harz	1,6 (0,8)	4,5 (1,9)
Polyurethan-System	1,9 (1,2)	5,2 (2,3)

Zwischenwerte können näherungsweise geradlinig interpoliert werden.

7.2.3 Beanspruchbarkeit

Der Maximalwerte der nach Bild 14 errechneten Haftspannungen ist unter Zugrundelegung einer mindestens 2,5-fachen Sicherheit den Mittelwerten der Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$ gegenüberzustellen. Die Tabelle 7 gibt für mögliche Kombinationen aus Stangentyp und Kleber einen Überblick über die Mittelwerte der Bindefestigkeiten in Abhängigkeit von der Haftlänge s_w . Hierzu wurden alle verfügbaren Versuchswerte (EHLBECK, SIEBERT 1987; GÖRLACHER 1990; GUPTA et al. 1983, JASIENKO 1989; KAVAJA, PENTTALA 1983; KJUCUKOV, ENCEV 1977, MÖHLER et al. 1982/83, 1981, 1979, 1978, 1972 und 1963; RIBERHOLT 1988, 1986 und 1977; MOERS 1980; RUG 1983 sowie Scherberger, Wiedmann 1984, WERNER 1988) in die Untersuchung einbezogen. Die Rohdichten der untersuchten Hölzer lagen zwischen 390 und 407 kg/m³.

Tabelle 7: Mittelwerte der Bindefestigkeiten in Abhängigkeit von der Haftlänge

Ausziehversuche				Mittelwerte der Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$ ³⁾ (Anzahl der Einzelwerte in Klammern)			
Stangentyp	vgl. Bild	Kleber ¹⁾	β ²⁾ [°]	Haftlänge s_w			
				$\approx 5 \cdot d$	$\approx 10 \cdot d$	$\approx 15 \cdot d$	$\approx 20 \cdot d$
Schrauben mit metrischem Gewinde	15	KPRF	0	-	5,2 (47)	3,9 (20)	4,1 (36)
			90	5,7 (28)	5,5 (53)	4,4 (2)	4,7 (22)
		PUR	0	-	6,3 (12)	5,3 (71)	4,6 (31)
			90	-	-	-	5,1 (1)
		KEP	0	8,9 (18)	6,2 (23)	5,5 (38)	5,4 (6)
			90	7,9 (75)	7,7 (13)	6,7 (4)	5,8 (1)
Stahlteile mit einem Gewinde nach DIN 571 (Holzschlüsselschrauben, Schraubmuffen)		-	0	4,1 (42)	3,5 (13)	3,5 (3)	2,1 (5)
			90	6,7 (717)	5,6 (45)	4,5 (7)	3,2 (5)
		KPRF	0	-	-	-	3,8 (2)
			90	5,3 (63)	4,2 (5)	-	4,8 (2)
				$\leq 22 \cdot d_M$	$\approx 25 \cdot d_M$	$\approx 28 \cdot d_M$	$\approx 33 \cdot d_M$
Spannstähle		KPRF	90	4,4 (12)	1,7 (2)	2,3 (3)	2,5 (1)
		PUR	90	-	4,3 (1)	4,2 (1)	4,0 (1)
		KEP	90	7,1 (99)	-	-	-

1) KPRF = Phenol-Resorcin-Formaldehyd-Leime
 PUR = Polyurethan-Systeme
 KEP = Epoxidharz-Systeme
 - = ohne Leim eingedrehte Stangen

2) Winkel zwischen Holzfaser- und Stangenlängsrichtung

3) Als Bindefestigkeit wird die sich aus der Ausziehkraft ergebende, über die gesamte Haftlänge als konstant angenommene Haftfestigkeit bezeichnet

$$\text{Bindefestigkeit } \tau_{u,m} = \begin{matrix} Z_u / (\pi \cdot d_M \cdot s_w) & \text{für Spannstähle} \\ Z_u / (\pi \cdot d \cdot s_w) & \text{für Schrauben mit metrischem Gewinde bzw. Holzschlüsselschrauben} \end{matrix}$$

mit

Z_u Ausziehkraft

d_M mittlerer Bruchflächendurchmesser bei Spannstählen

d Außen- bzw. Nenndurchmesser bei Schrauben mit metrischem Gewinde bzw. Gewinde entsprechend DIN 571

s_w Haftlänge

Für die mit dem Polyurethan-System eingebrachten Stangen mit metrischem Gewinde wurde von RIBERHOLT 1986 eine Abhängigkeit der Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$ vom Verhältnis s_w/d festgestellt. Wie die Tabelle 7 zeigt, sinkt die Bindefestigkeit ganz generell mit zunehmendem Verhältnis Haftlänge zu Nenn- bzw. Bruchflächendurchmesser. Für die mit Resorcinharz eingeklebten Stangen mit metrischem Gewinde kann eine Abhängigkeit vom Winkel zwischen Holzfaser- und Stangenlängsrichtung nicht festgestellt werden (vgl. auch MÖHLER, HEMMER 1981). Bild 15 zeigt exemplarisch auch, daß ein pauschaler Sicherheitsfaktor von 2,5 gerechtfertigt erscheint.

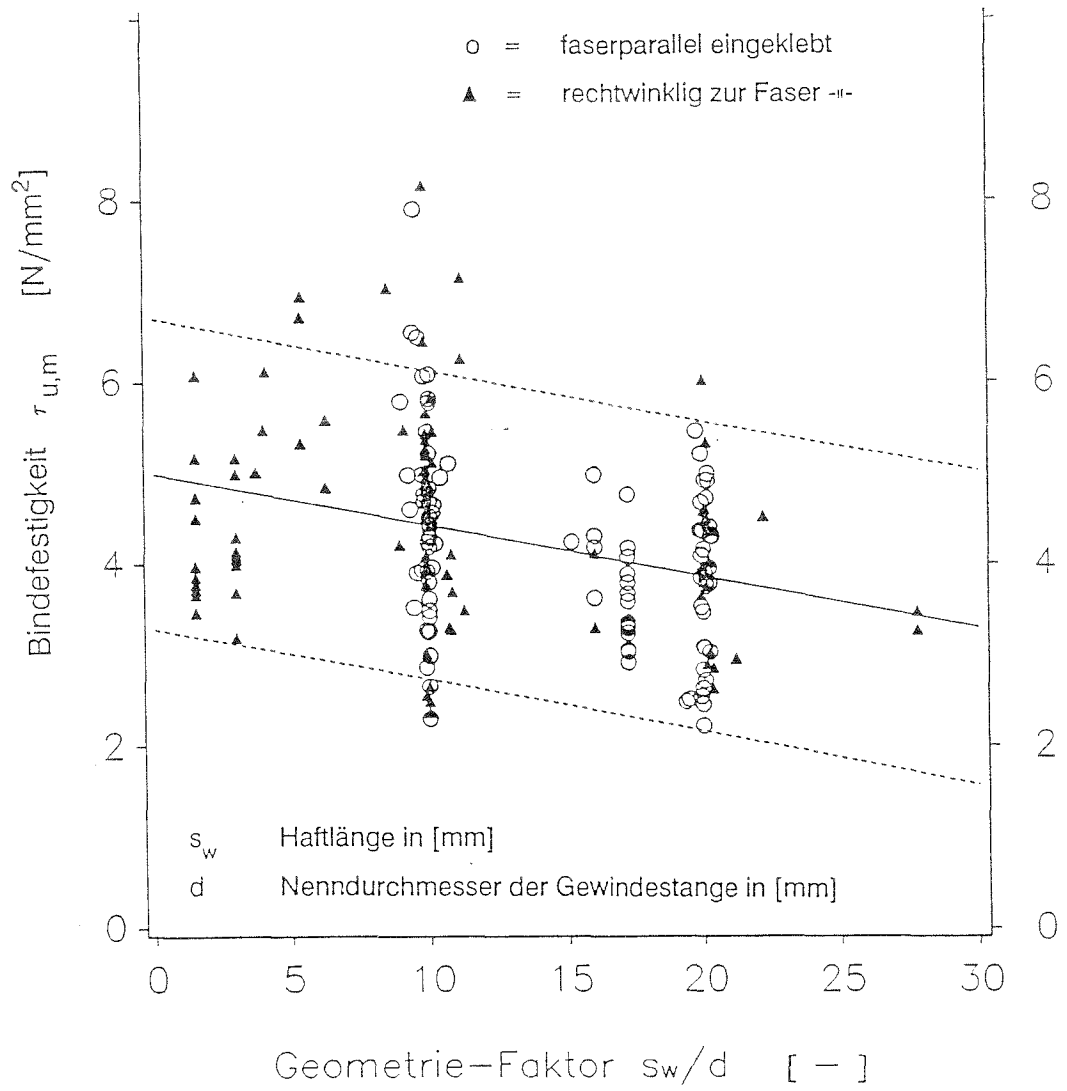


Bild 15: Versuchswerte, lineare Regression und 5%-Fraktile für die Parameter Stange mit metrischem Gewinde, resorcinharz verleimt

8 ZUSAMMENFASSUNG

Im 2. Teil des Forschungsvorhabens "Eingeleimte Gewindestangen unter Axialbelastung" wurden die Beanspruchungen der Verbindung Stahl - (Kleber -) Holz durch Klimawechsel - mit und ohne Last - untersucht unter Anwendung und Erweiterung der bisherigen Erfahrungen. Variiert wurden dabei die Parameter Gewindeform, Kleber sowie der Winkel zwischen Stangen- und Holzfaserrichtung.

Die Versuche unter reiner Klimabeanspruchung ohne äußere Last- einwirkung (**Reihe I**) konnten mit der Ermittlung der verbleibenden Ausziehungskraft abgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind im folgenden zusammengefaßt.

Einleimvorgang, Materialien:

- Hinsichtlich des Einleimvorganges wird auf die in Teil 1 dieses Forschungsvorhabens empfohlenen Methoden hingewiesen. Darüberhinaus konnte für die untersuchte Einbindelänge von 40 cm festgestellt werden, daß sich alle Stangentypen manuell leicht einbringen lassen, sofern man dabei dem Kleber ausreichend Zeit läßt, sich zu verteilen. Bei Stangen mit metrischem Gewinde genügt es, nur die ersten 2 bis 3 cm des Loches mit dem Kleber zu füllen und die Stange zusätzlich während des Eindrehvorganges von außen mit Kleber zu bestreichen; bei Stangen mit Holzschraubengewinde ohne Nut ist der Kleber bis zur Hälfte ins Loch einzufüllen.
- Der ins Versuchsprogramm des Teiles 2 aufgenommene Epoxidharzkleber hat sich unter wechselnder Luftfeuchte bewährt. Im Versagensfall findet der Bruch wie beim Polyurethanharz im Holz statt. Allerdings ist der verwendete Härter einschließlich Füll-material zwischenzeitlich nicht mehr im Handel. Sie wurden ersetzt durch das lösungsmittelfreie, modifizierte Epoxidharz EP 20/VP 1, das mit dem Härter B 20/1 verarbeitet wird. Die an der FMPA Stuttgart durchgeführten Untersuchungen nach DIN 68141 als auch hinsichtlich der Temperaturbeständigkeit bis 70°C sowie des Alterungsverhaltens zeigen bisher keinerlei Beeinträchtigungen durch den neuen Füllstoff.

- Schrauben mit metrischem Gewinde nach DIN 976 sowie Spann-
stähle sind grundsätzlich einzuleimen.
- Die sogenannten Holzschlüsselschrauben sind in Anlehnung an
DIN 571 herzustellen; eine Spitze ist ratsam.
- Der Bohrlochdurchmesser entspricht bei den Stangen mit
metrischem Gewinde dem Außen- bzw. Nenndurchmesser; bei
den Stangen mit Holzschraubengewinde dem arithmetischen
Mittel aus Kern- und Außendurchmesser und bei den Spann-
stählen dem Nenndurchmesser zuzüglich der Dicke der
aufgewalzten Profilierung.

Versuchsauswertung:

- Für die Untersuchung der Klimabeanspruchung mit wechselnder
Luftfeuchte wurden vier Beanspruchungsperioden gewählt. Die
Beanspruchung wechselte ungefähr alle 6 bis 7 Wochen von
Trockenklima 30°/40% auf Feuchtklima 30°/90%.
Die Verbindung Holz - (Kleber -) Stahl reagiert sofort auf jeden
Klimawechsel: In der Trocknungsperiode schwindet das Holz; die
Stangen werden zusammengestaucht. Diese negativen Dehnungen
erreichten nach spätestens einem Monat einen konstanten Wert.
Entsprechendes gilt für eine Befeuchtungsperiode.
Die Aufzeichnung der Haftspannungen über der Einschraubtiefe
führte zu der allgemeinen Feststellung, daß die beiden
Beanspruchungsarten Quellen und Schwinden eine gleichartige
Verteilung der Haftspannungen verursachen. Ein Unterschied
besteht im „Wechsel des Vorzeichens“. Die qualitative Verteilung
der Dehnungen und der zugehörigen Haftspannungen entlang der
Stangen scheint unabhängig vom Winkel zwischen Stangen- und
Faserrichtung zu sein. Bei Versuchskörpern mit rechtwinklig zur
Faserrichtung eingeleimten Stangen waren die Werte der
Dehnungen und Haftspannungen jedoch größer (insbesondere
während der Befeuchtungsperioden) als die vergleichbaren Werte
bei faserparalleler Einleimung. Dies dürfte im wesentlichen auf
die unterschiedlichen Schwind- und Quellmaße zurückzuführen
sein.
- Infolge wechselnder Temperaturbeanspruchung ergeben sich
keine nennenswerten Beanspruchungen für die Klebfuge, da z.B.
infolge einer Temperaturerhöhung einer Dehnung der

Stahlstange eine Stauchung derselben infolge des Schwindvorganges im Bauteil überlagert wird.

- Die ohne Kleber eingedrehten Holzschlüsselschrauben ergaben die gleichmäßigsten, die mit dem Polyurethan-System eingebrachten Stangen mit metrischem Gewinde die ungleichmäßigsten Dehnungs- und Haftspannungsverteilungen.
- Die Stangen der Prüfkörper der Reihe I wurden nach der Klimabeanspruchung herausgezogen. Aus den Ausziehkräften Z_u wurden die mittleren Bindefestigkeiten $\tau_{u,m}$, d.h. die über die Haftlänge s_w gemittelten Haftfestigkeiten, errechnet. Dabei wurde immer der Außen- bzw. Nenndurchmesser zugrunde gelegt. Eine Reduzierung der Bindefestigkeiten infolge der wechselnden Klimabeanspruchungen konnte nicht festgestellt werden. Die geringsten Tragfähigkeiten besaßen die ohne Kleber eingedrehten Holzschlüsselschrauben.

Konstruktive Hinweise:

- Resorcinharzleime sollten bei Verwendung von Stangen mit metrischem Gewinde zur Einleitung von großen äußeren Zugkräften in Brettschichtholz-Binder nicht verwendet werden.
- Es wird empfohlen, unter den Schraubenköpfen von Gewindestangen, bei denen in größerem Maße mit Tauwasserbildung oder Feuchtigkeit zu rechnen ist, eine Abdichtung (z.B. ein Gummi) anzuordnen. Dies betrifft insbesondere den Außenbereich.
Um die Haftspannungsspitzen abzubauen, kann man ferner den aus dem Bohrloch beim Einschraubvorgang ausgetretenen Kleber rund um die Stange belassen, da so die Tragfähigkeit der Verbindung weiter erhöht wird (vgl. HAHN et al. 1982).
- Aus den bisherigen Ergebnissen wurde ein erster Vorschlag zur Abschätzung von Größe und Verteilung der Haftspannungen entwickelt.

Für die Untersuchung der Langzeitbeanspruchung infolge Dauerstandslast (**Reihe II**) wurden die Prüfkörper in einer offenen Halle aufgestellt. Hier werden weiterhin über die in den Stangen eingeklebten Dehnungsmeßstreifen die Haftspannungen kontrolliert.

Die bisherige Auswertung läßt folgende Schlußfolgerungen zu:

- Die gleichmäßigsten Dehnungen über die Haftlänge s_W und somit einen linearen Haftspannungsverlauf ergeben sich bei den ohne Kleber eingebrachten Holzschlüsselschrauben; im Unterschied zu den bisherigen Ergebnissen besitzen die mit Resorcinharzleim gegenüber den mit dem Polyurethan-System eingeklebten Stangen die ungleichförmigeren Dehnungsverteilungen.
- Die äußeren Lasten werden im wesentlichen über eine Einschraubtiefe, die ungefähr dem 20-fachen Außendurchmesser entspricht, abgetragen. Das Quellen und Schwinden des Holzes infolge der wechselnden Klimabeanspruchungen erzeugt hingegen Haftspannungen über die gesamte Haftlänge.
- Die Übertragbarkeit der unter reiner Klimabeanspruchung erzielten Ergebnisse auf Körper mit Gewindestangen unter Langzeitbeanspruchung ist weiter zu überprüfen.

In einem dritten Teil werden abschließend auch unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus der Untersuchung der Langzeitbeanspruchung praxisnahe Trägerformen wie gekrümmte Träger, Satteldachträger oder Auflagerausklinkungen in die Untersuchungen einbezogen, da sich die Krafteinleitungen in solchen Fällen von denen in den bisherigen Untersuchungen wesentlich unterscheiden.

9 **SCHRIFTTUM**

- BULLEIT, W.M.; SANDBERG, L.B. ; WOODS, G.J. 1989
Steel-Reinforced Glued Laminated Timber.
In: Journal of Structural Engineering, Nr. 2, S. 433-444
- EHLBECK, J.; SIEBERT, W. 1987
Praktikable Einleimmethoden und Wirkungsweise von eingeleimten Gewindestangen unter Axialbelastung bei Übertragung von großen Kräften und bei Aufnahme von Querkraften in Biegeträgern. Teil 1: Einleimmethoden / Meßverfahren / Haftspannungsverlauf
Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe
- GÖRLACHER, R. 1990
Die Ausziehwidstandsmessung.
In: Bauen mit Holz, H.12, S. 904 - 908
- GUPTA, V.K.; SHUKLA, N.K.; RAJPUT, S.S. 1983
Some Studies on Nail and Screw Holding Power of Timber.
In: Holzforschung und Holzverwertung, H.1, S. 6 - 8
- HAHN, O.; OTTO, G.; LANGE, F.J. 1982
Spannungsanalyse von Metallklebverbindungen mit der Finite-Element-Methode.
In: Schweißen und Schneiden, H.4, S. 189 - 192
- JASIENKO, J. 1989
Force Transmission between epoxy bonded steel bars and wood. Technische Universiteit Eindhoven, Faculty of Architecture, Building and Planning.

- KAISER, A.; REIDELSHÖFER, M. 1989/1990
Ermittlung der Haftspannungsverteilung entlang auf
Herausziehen beanspruchter Gewindestangen.
Vertieferarbeiten am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und
Baukonstruktionen, Universität (TH) Karlsruhe
- KAVAJA, J.; PENTALLA, V. 1983
Reinforcement of glue-laminated wooden beams.
Helsinki University of Technology, Division of Structural
Engineering, Publication 55
- KOLLMANN, F. 1951
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe.
Erster Band, 2. Auflage; Springer-Verlag, Berlin
- KOLLEK, H. 1989
Probleme der Langzeitfestigkeit.
Referat zum Lehrgang "Klebstoffe, Klebverfahren und
Konstruktionshinweise für das Verbinden von Werkstoffen.
Technische Akademie Esslingen
- KJUCUKOV, G.; ENCEV, E. 1977
Der Einfluß der Schraubenabmessungen auf den
Auszieh Widerstand in Tannenholz.
In: Holztechnologie, H.1, S. 26 - 29
- MARTENSSON, A. 1990
Effect of moisture and mechanical loading on wood and
wooden materials.
UIFRO/5.02 Timber Engineering Meeting
St. John, New Brunswick, Canada
- MÖHLER, K. 1963
Versuche über die Tragfähigkeit von Holzschrauben bei
Holzkonstruktionen.
In: Berichte aus der Bauforschung, H.33, S. 1 - 12

MÖHLER, K.; FREISEIS, R. 1982/83

Erhöhung der Querdruckfestigkeit der Auflagerungen von Vollholz- und Brettschichtholzbauteilen durch zusätzliche Konstruktionsmaßnahmen.

Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe

MÖHLER, K.; HEMMER, K. 1981

Versuche mit eingeleimten Gewindestangen.

Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe

MÖHLER, K.; HERRÖDER, W. 1979

Ersatz von Bolzen durch Holzschrauben und Schraubnägeln bei Dübelverbindungen.

Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe

MÖHLER, K.; LAUTENSCHLÄGER, R. 1978

Großflächige Queranschlüsse bei Brettschichtholz.

Forschungsbericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe

MÖHLER, K.; WENZ, J. 1972

Bericht über die Belastungsversuche mit brett-schicht-verleimten Trägern, bei denen die Auflagerkraft über eine Stange $\varnothing 36$ in die Unterkonstruktion eingeleitet wurde.

Gutachten der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, Universität (TH) Karlsruhe

RIBERHOLT, H. 1988

Glued Bolts in Glulam, Part 2.

Dept. of. Struc. Eng., Techn. University of Denmark;
Report 228 Lyngby/Denmark

RIBERHOLT, H. 1986

Glued Bolts in Glulam.

Dept. of Struc. Eng., Techn. University of Denmark;

Report 210 Lyngby/Denmark

RIBERHOLT, H. 1977

Bolte indlimet i limtr.

Dept. of Struc. Eng., Techn. University of Denmark;

Report 83 Lyngby/Denmark

SCHERBERGER, M.; WIEDMANN, L. 1984

Sanierung von Ausklinkungen.

In: Bauen mit Holz, H. 11, S. 784 - 786

TOWNSEND, P. K. 1990

Steel Dowels Epoxy Bonded in Glue Laminated Timber.

Department of Civil Engineering, University of Canterbury,

Christchurch New Zealand, Report 90-11

VOLKERSEN, O. 1953

Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen.

In: Energie und Technik, S. 68-71, 103-108, 150-154

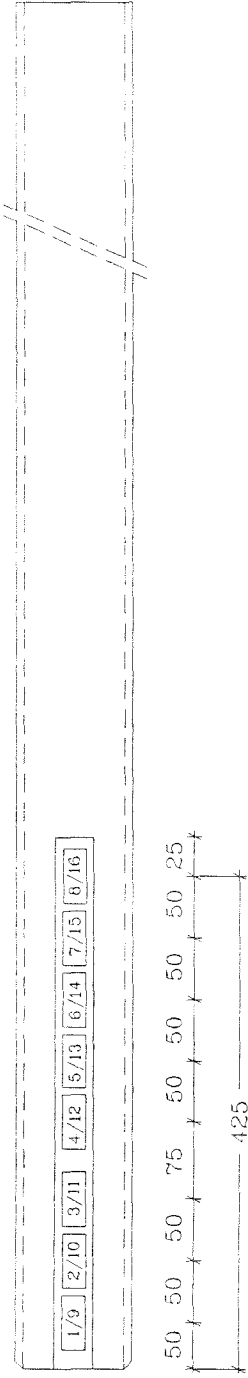
DIN 571 SECHSKANT - HOLZSCHRAUBEN (12/86)

DIN 4076 Benennungen und Kurzzeichen auf dem Holzgebiet.

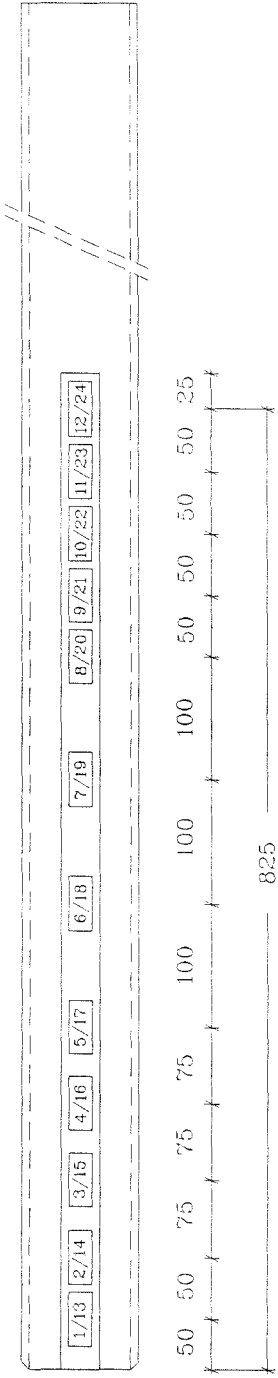
Blatt 3: Beanspruchungsgruppen für Holz-Leimverbindungen

(1/74)

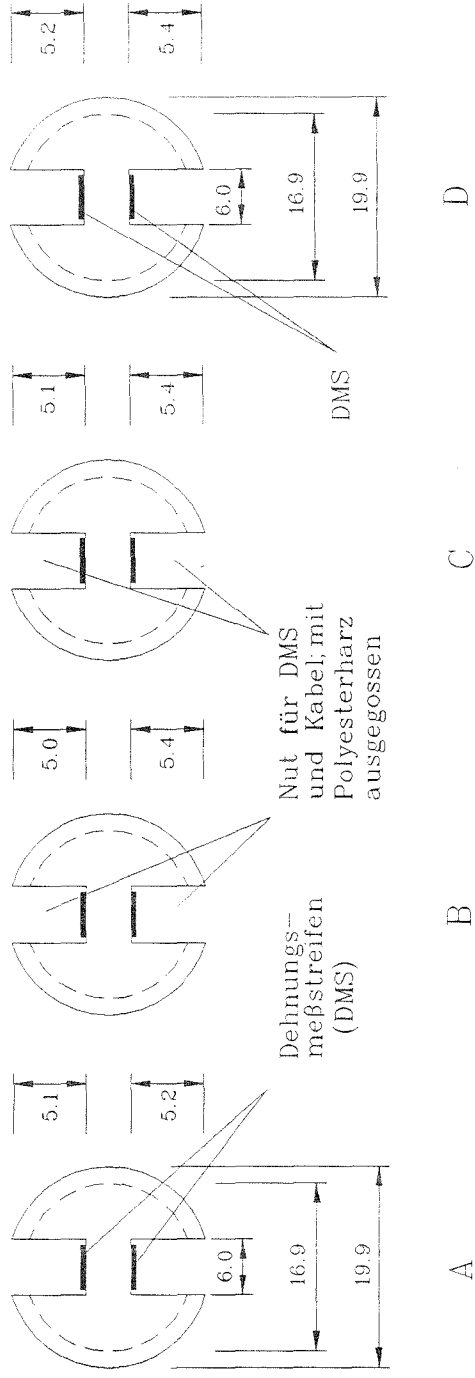
SM20R1, PM20R1,
SM20R3, PM20P1,
M20/4R, M20/4P



M20/8R, M20/8P



Querschnitte:

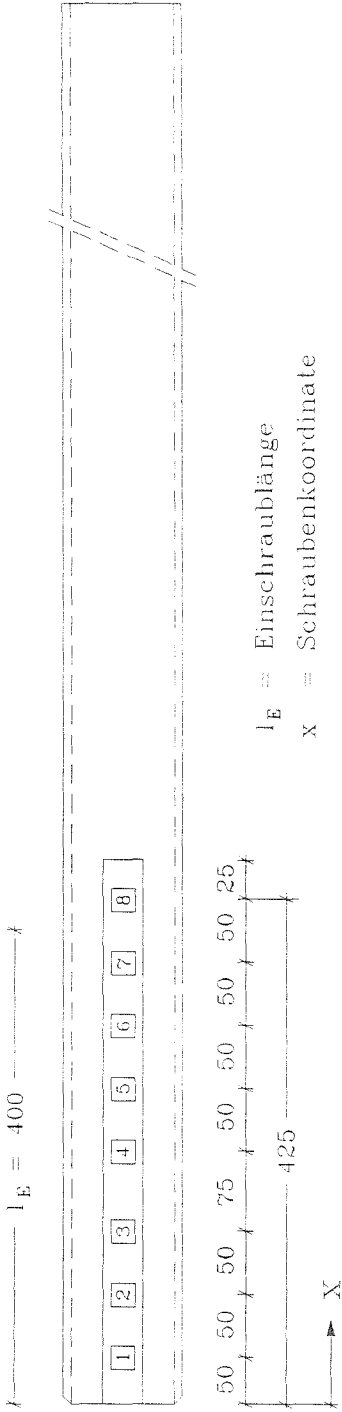


Netto-Kernquerschnittsfläche $A_n \approx 175 \text{ mm}^2$

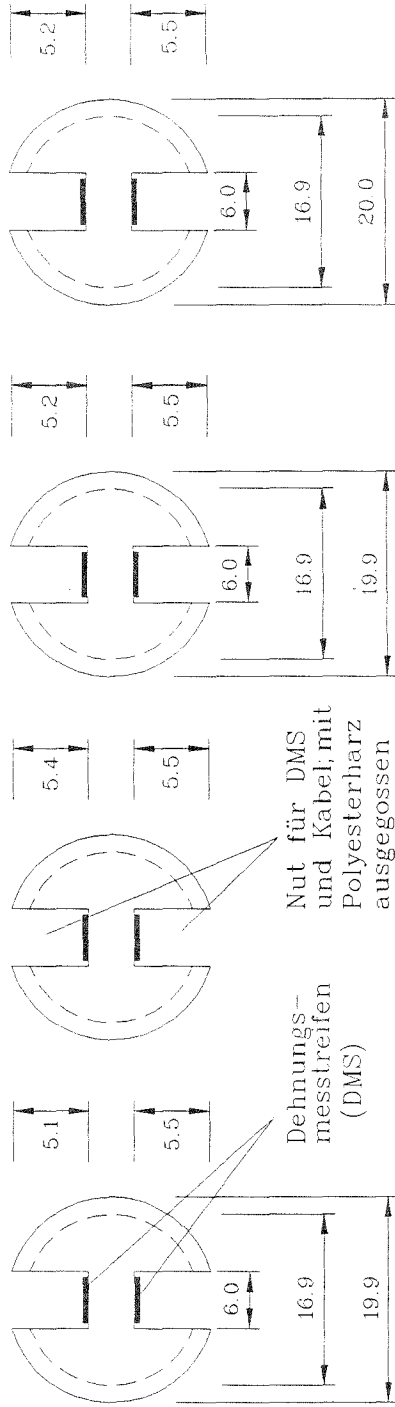
Metrisches Gewinde M 20 Güte 8.8

Maße in [mm]

SM20P1, PM20W1,
SM20W1, PM20R3,
PM20R4, SM20R4



l_E = Einschraublänge
x = Schraubenkoordinate



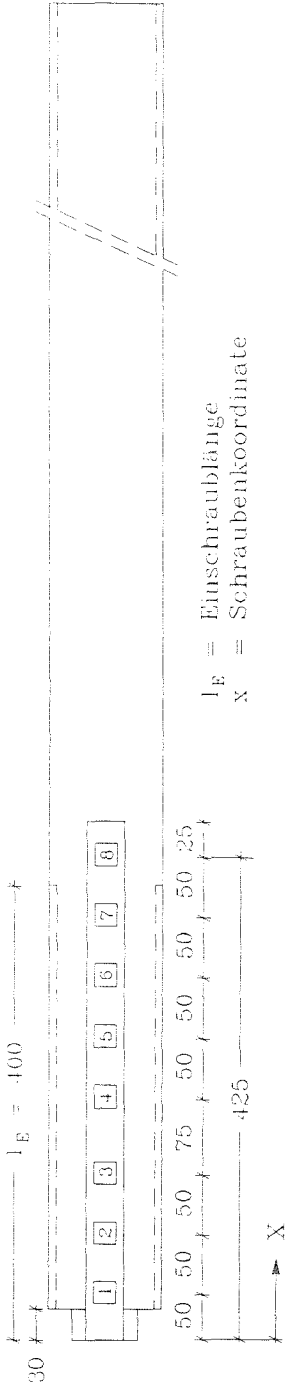
Querschnitt: E F Y Z

Netto-Kernquer-
schnittsfläche $A_n \approx 175 \text{ mm}^2$

Metrisches Gewinde M 20

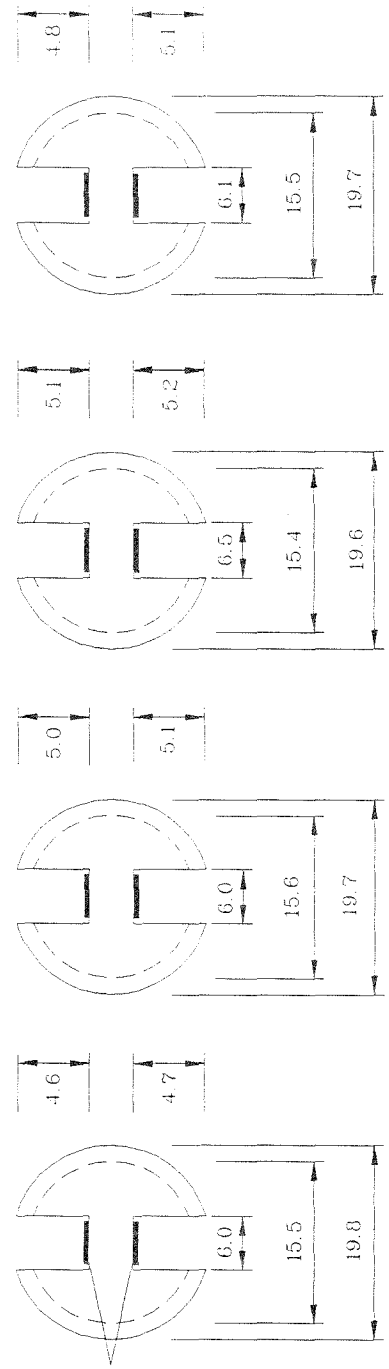
Stahl 8.8

Maße in [mm]



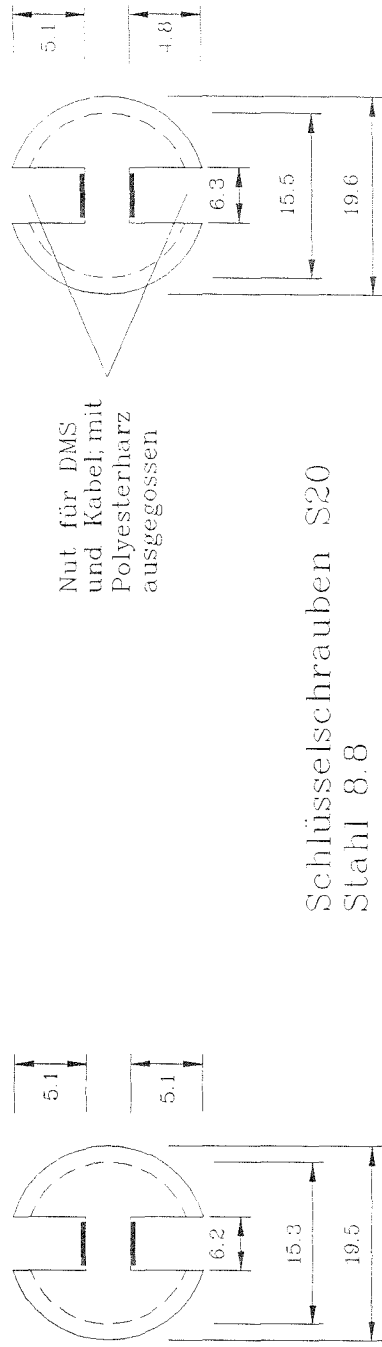
l_E = Einschraublänge
 x = Schraubenkoordinate

PS2001, SS2001,
 SS2004, SS2001,
 PS2004, PS2001,
 SS2003, PS2003



Dehnungs-
 messtreifen
 (DMS)

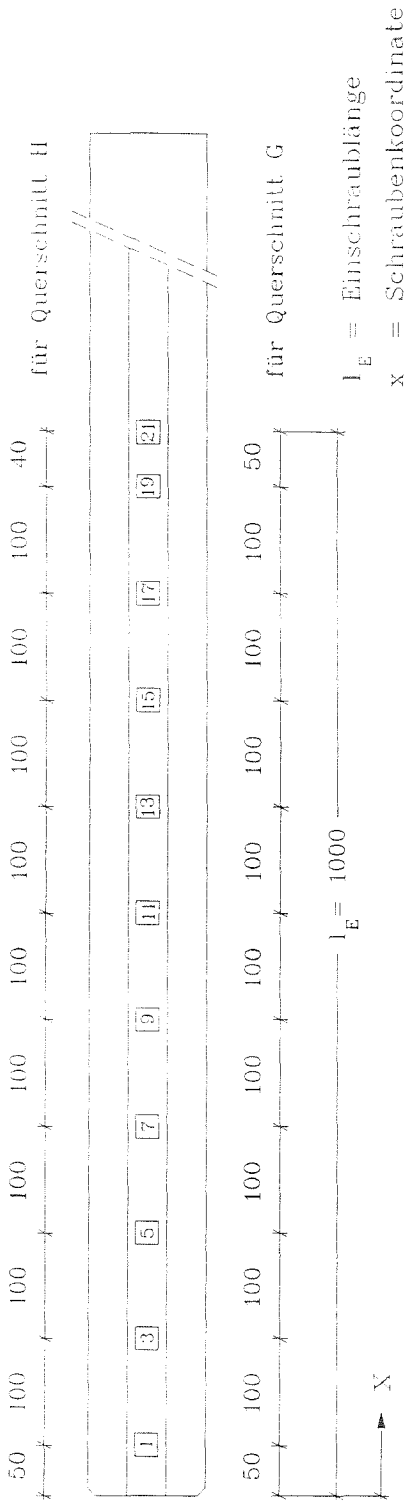
Querschnitt: I 156 K 151 L 142 Q 149
 Netto-Kernquer-
 schnittsfläche
 A_n [mm²]



Nut für DMS
 und Kabel mit
 Polyesterharz
 ausgegossen

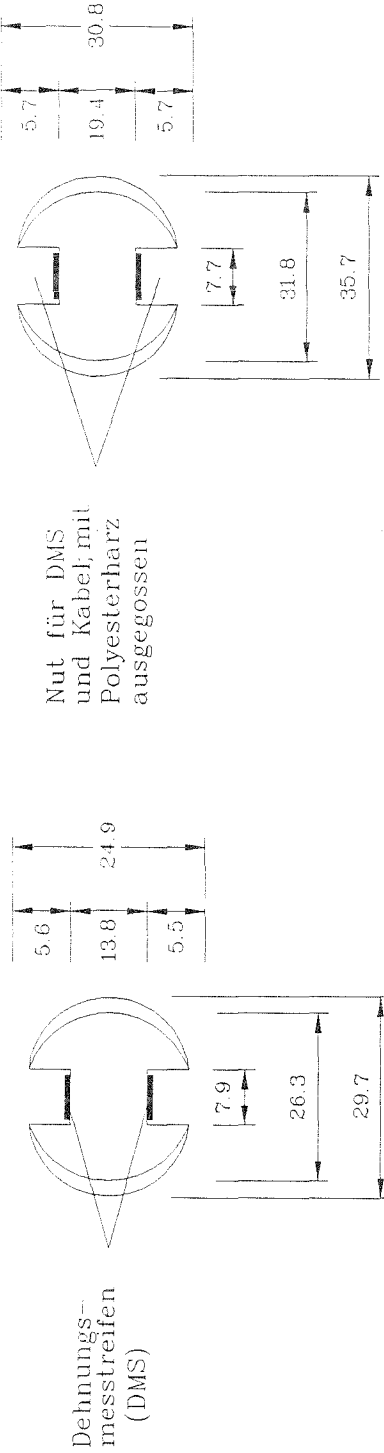
Schlüsselschrauben S20
 Stahl 8.8

Querschnitt: N 147 O 152
 Netto-Kernquer-
 schnittsfläche
 A_n [mm²]
 Maße in [mm]



l_E = Einschraublänge

x = Schraubenkoordinate



Querschnitt:

Nettoquerschnitts-
fläche A_n [mm²]

Nenn Durchmesser [mm]

Vickershärte HV10:

GEWI-Stahl 1080/1230

H

700

32.0

347

G

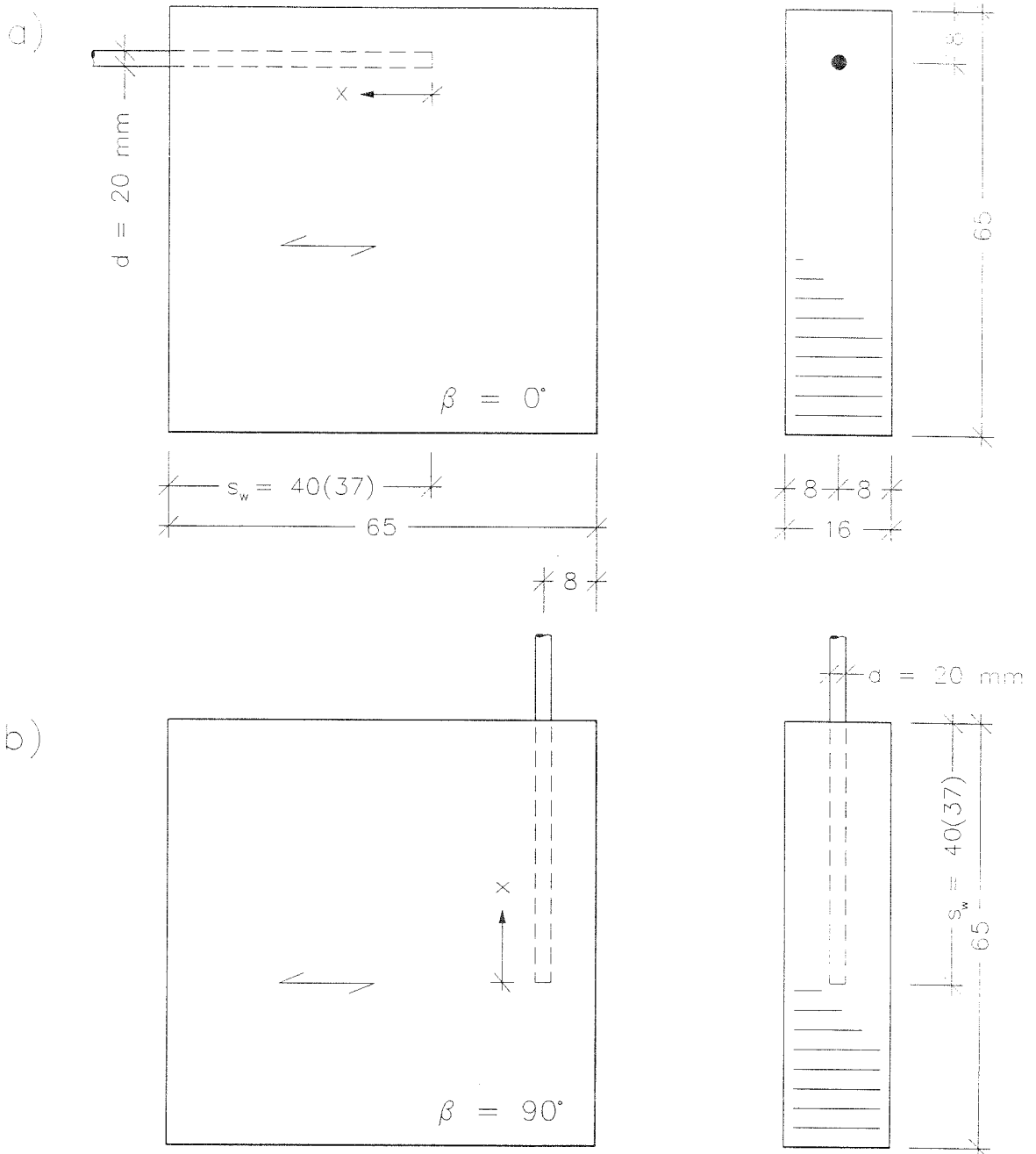
450

26.5

353

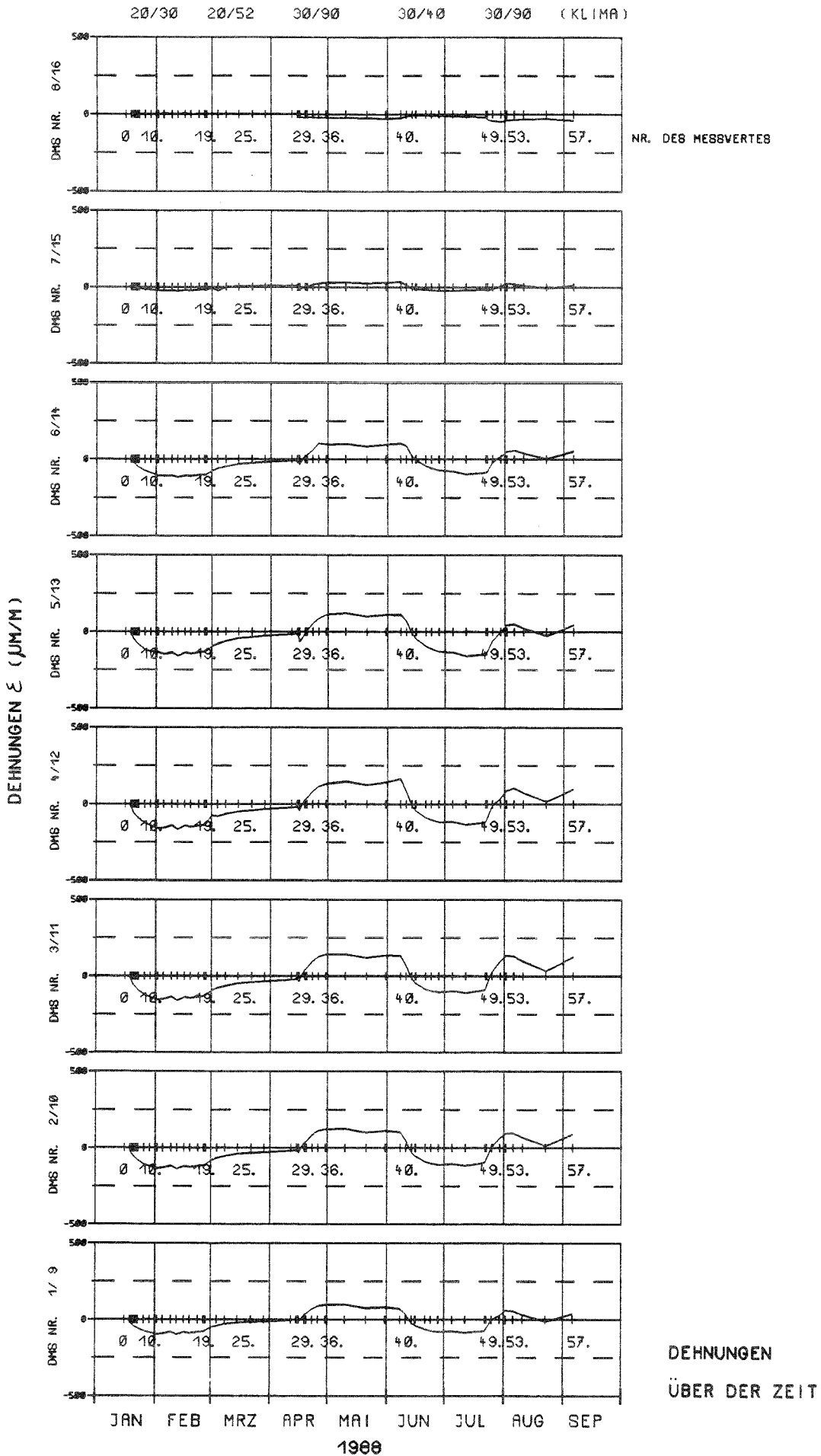
Maße in [mm]

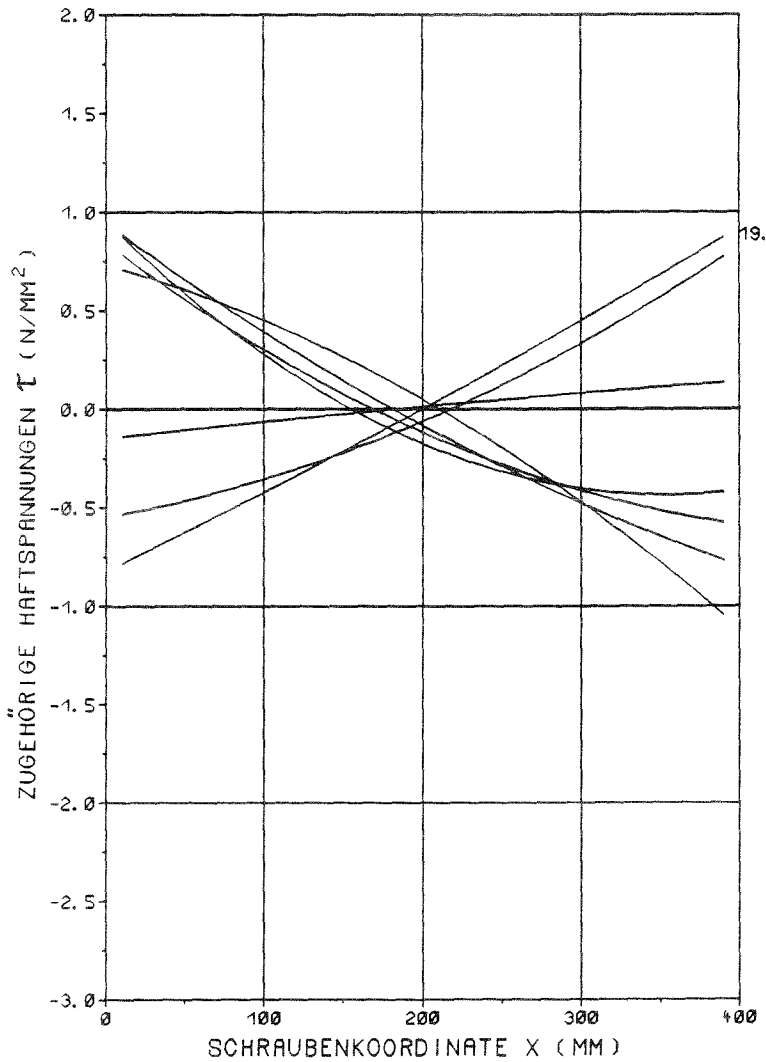
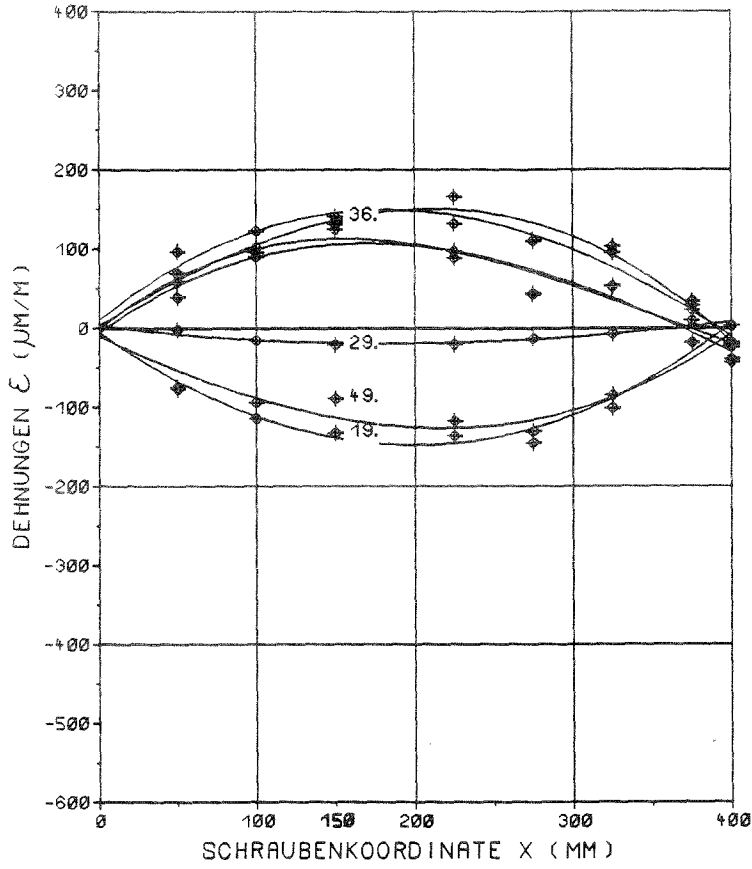
Anlage 6

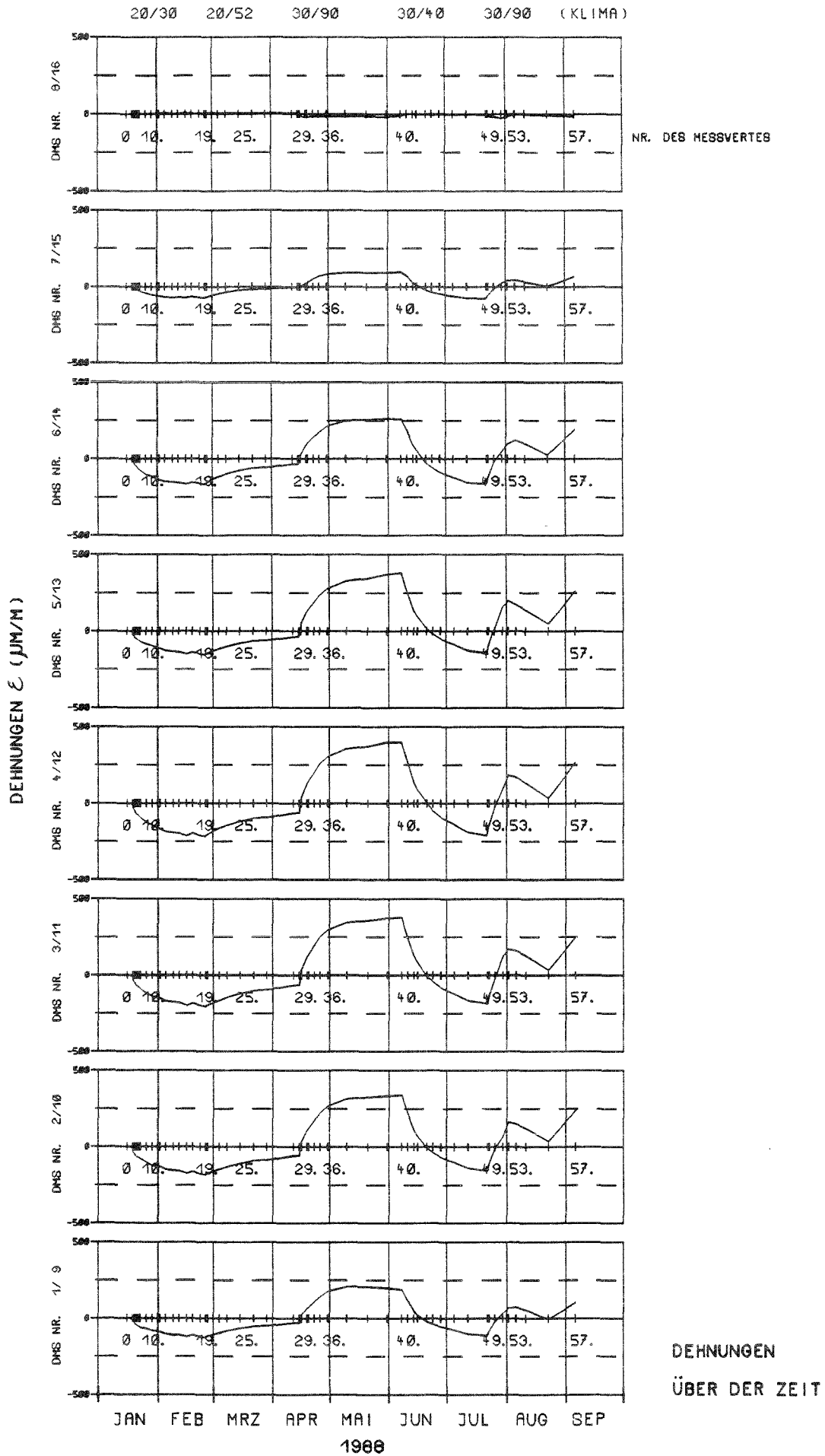


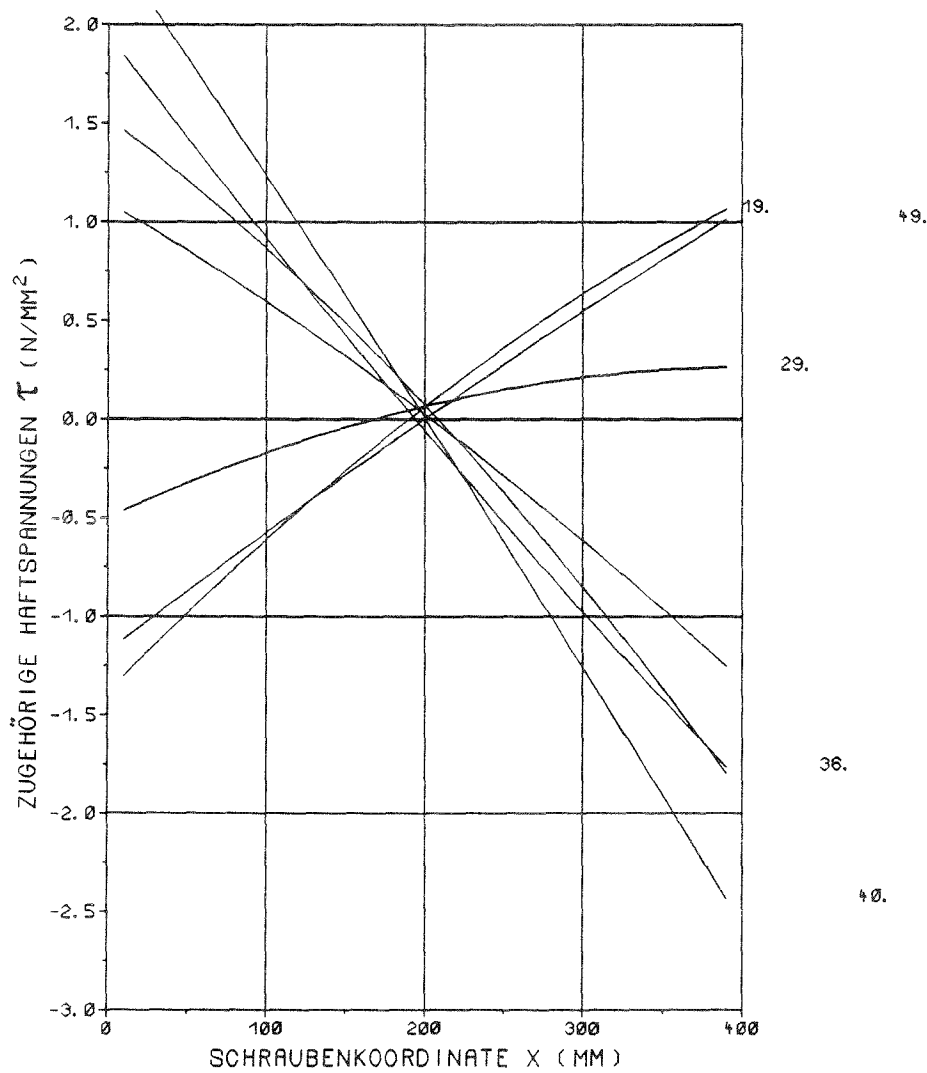
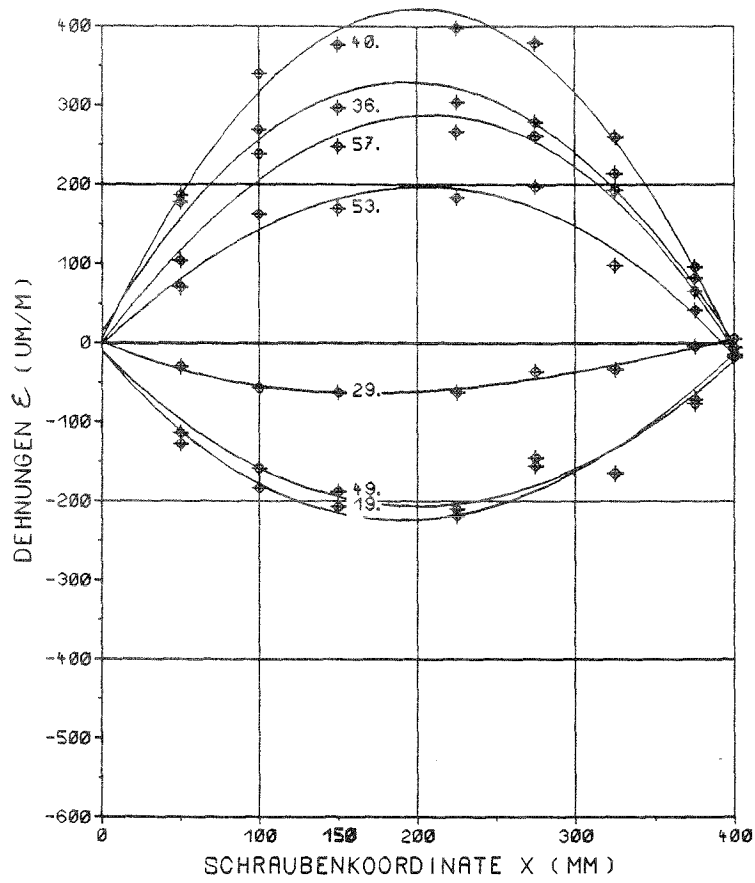
- s_w = Haftlänge
 - x = Schraubenkoordinate
 - β = Winkel zwischen Stangenlängs- und Holzfaserrichtung
 - d = Nenndurchmesser der Gewindestangen
 - \longleftrightarrow Holzfaserrichtung
- Maße in [cm]

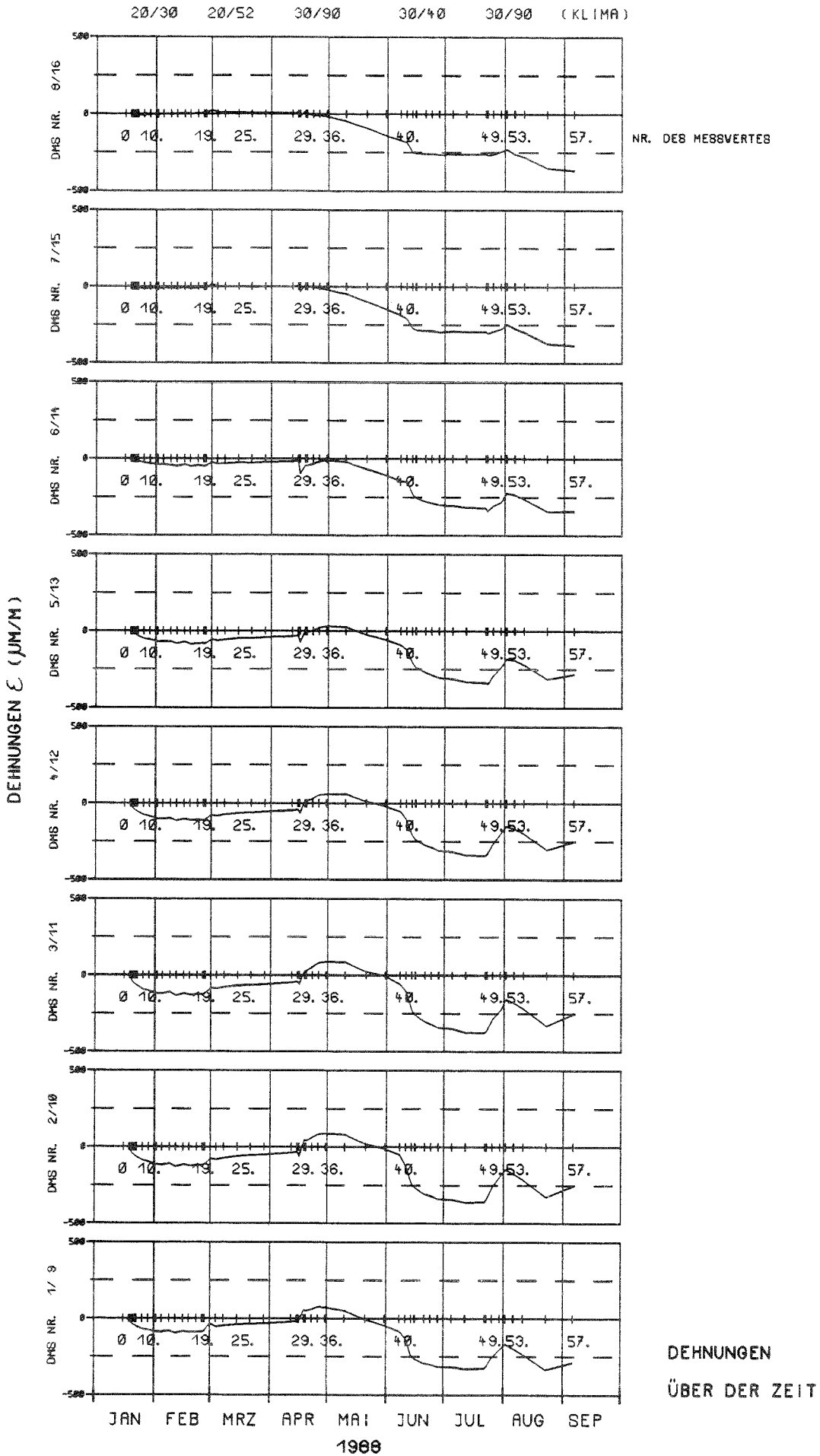
Schematische Darstellung der Prüfkörper für die Versuche Reihe I sowie Gruppen II.2 und II.4

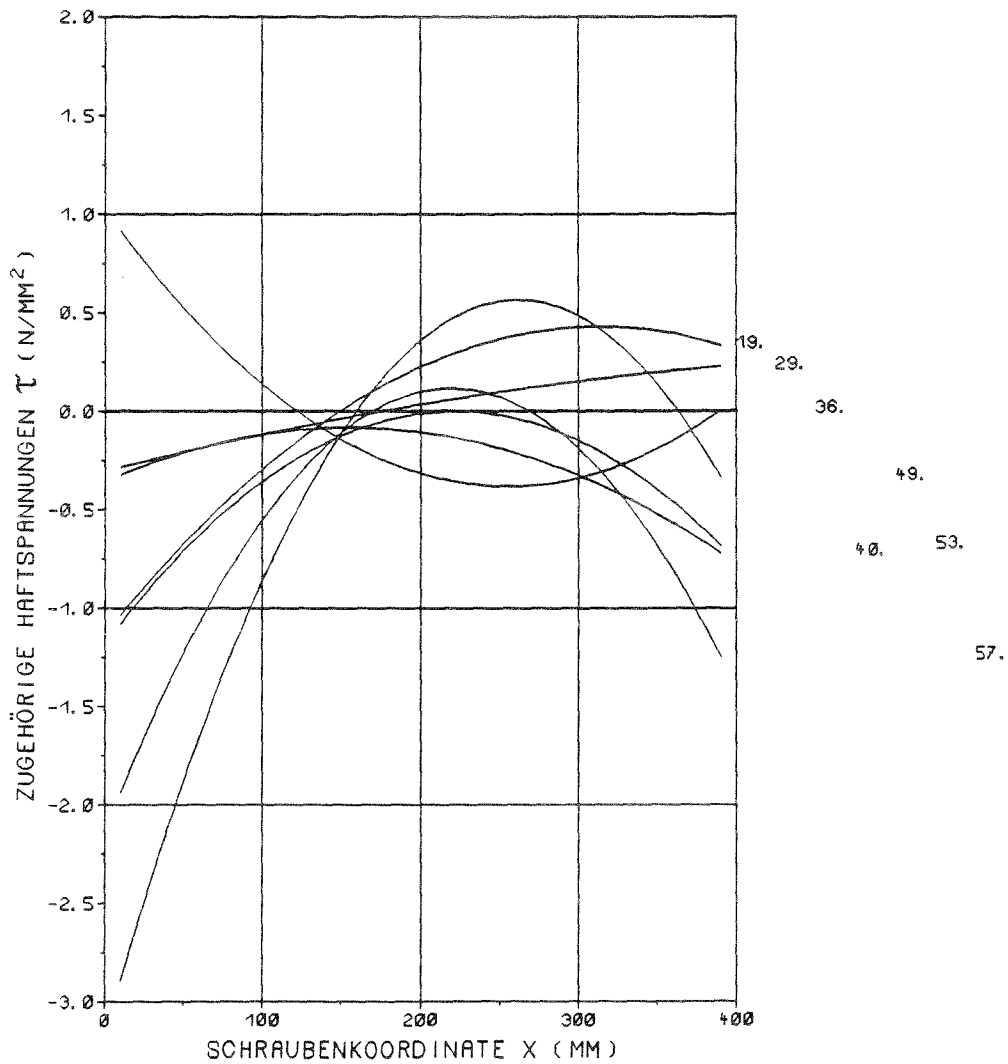
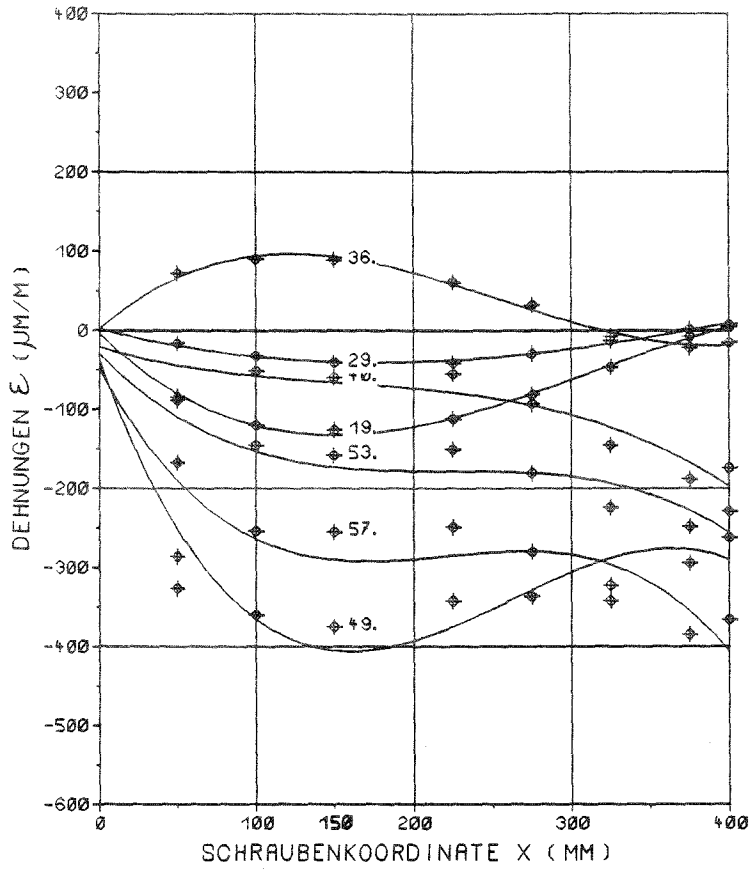


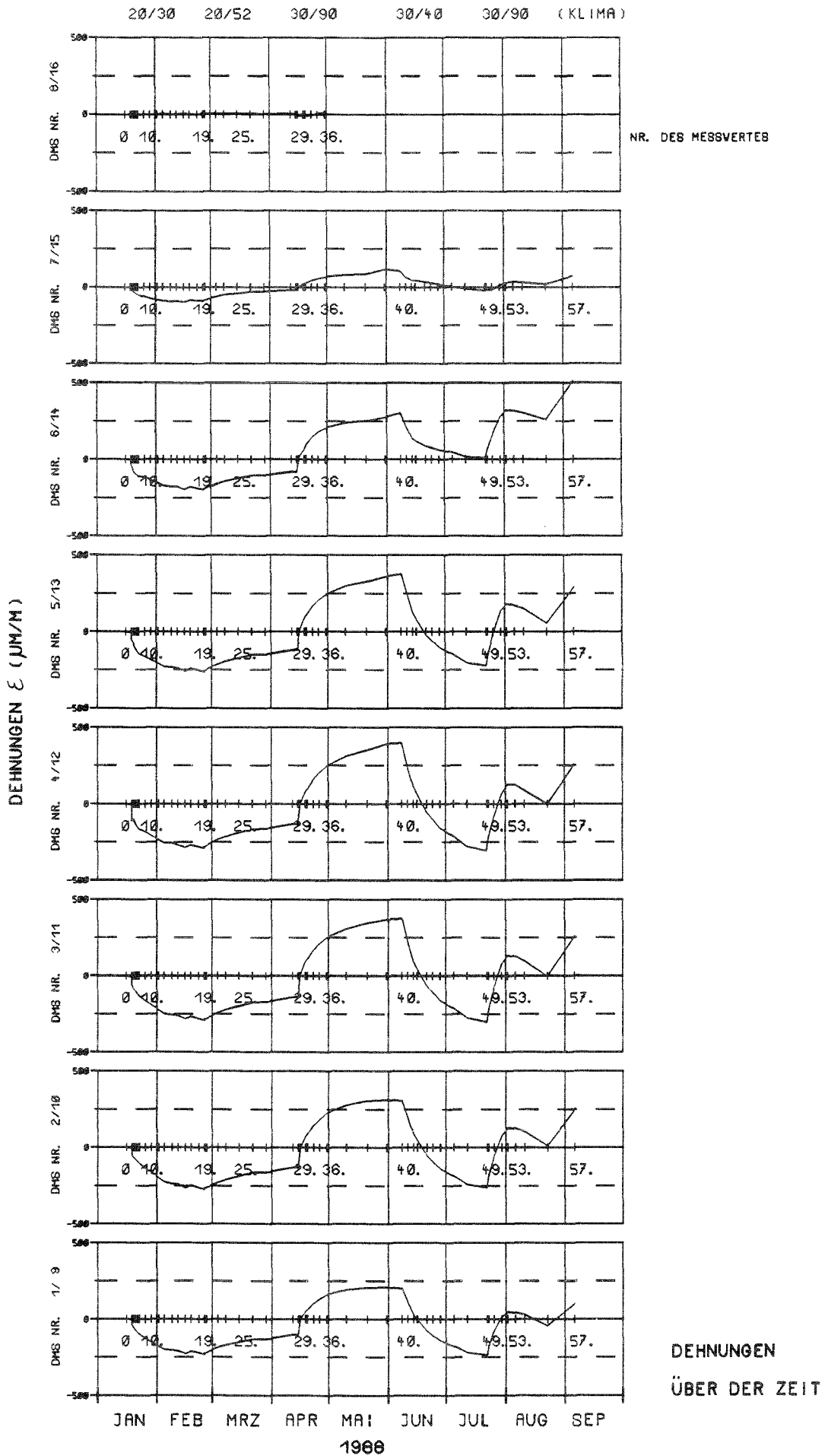


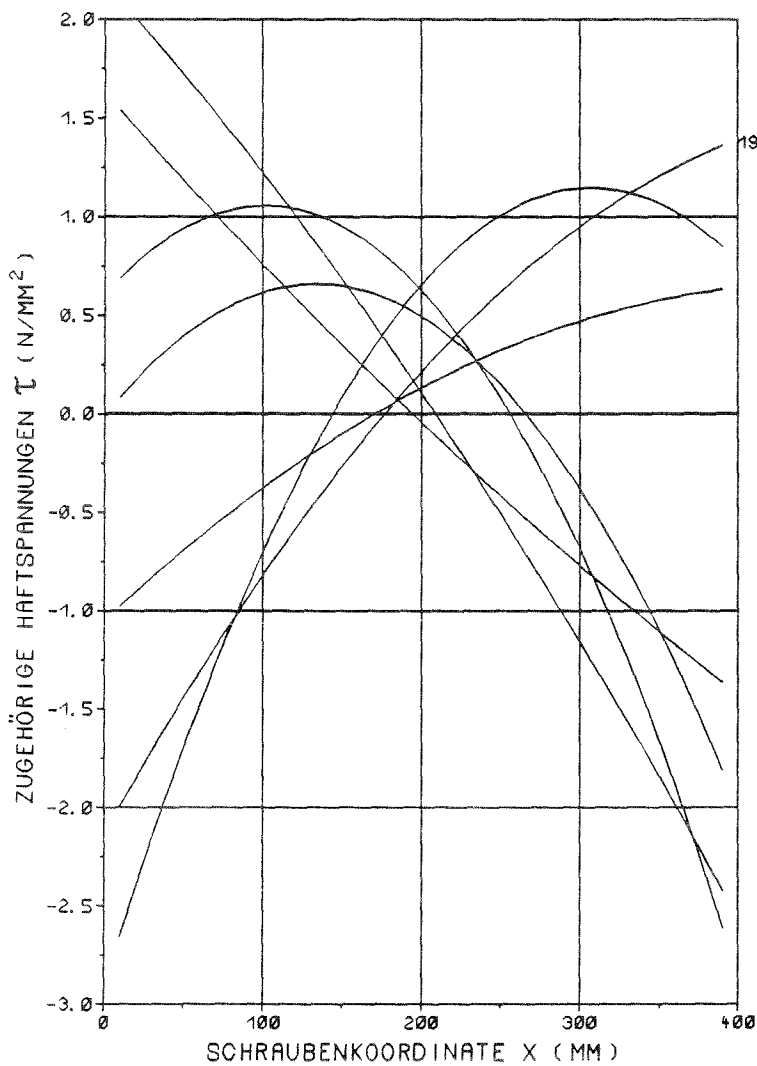
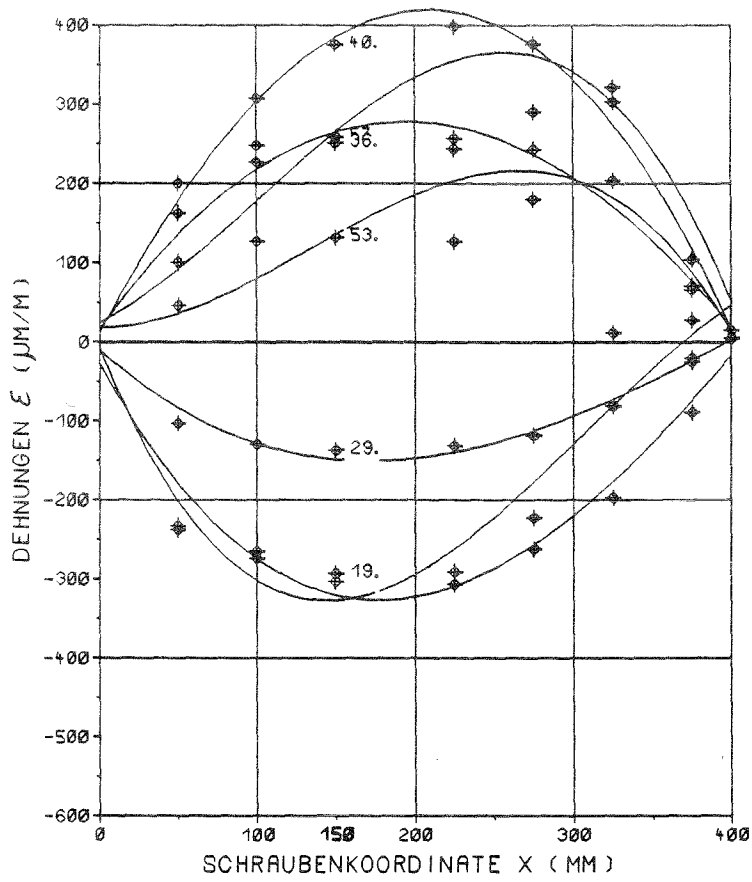


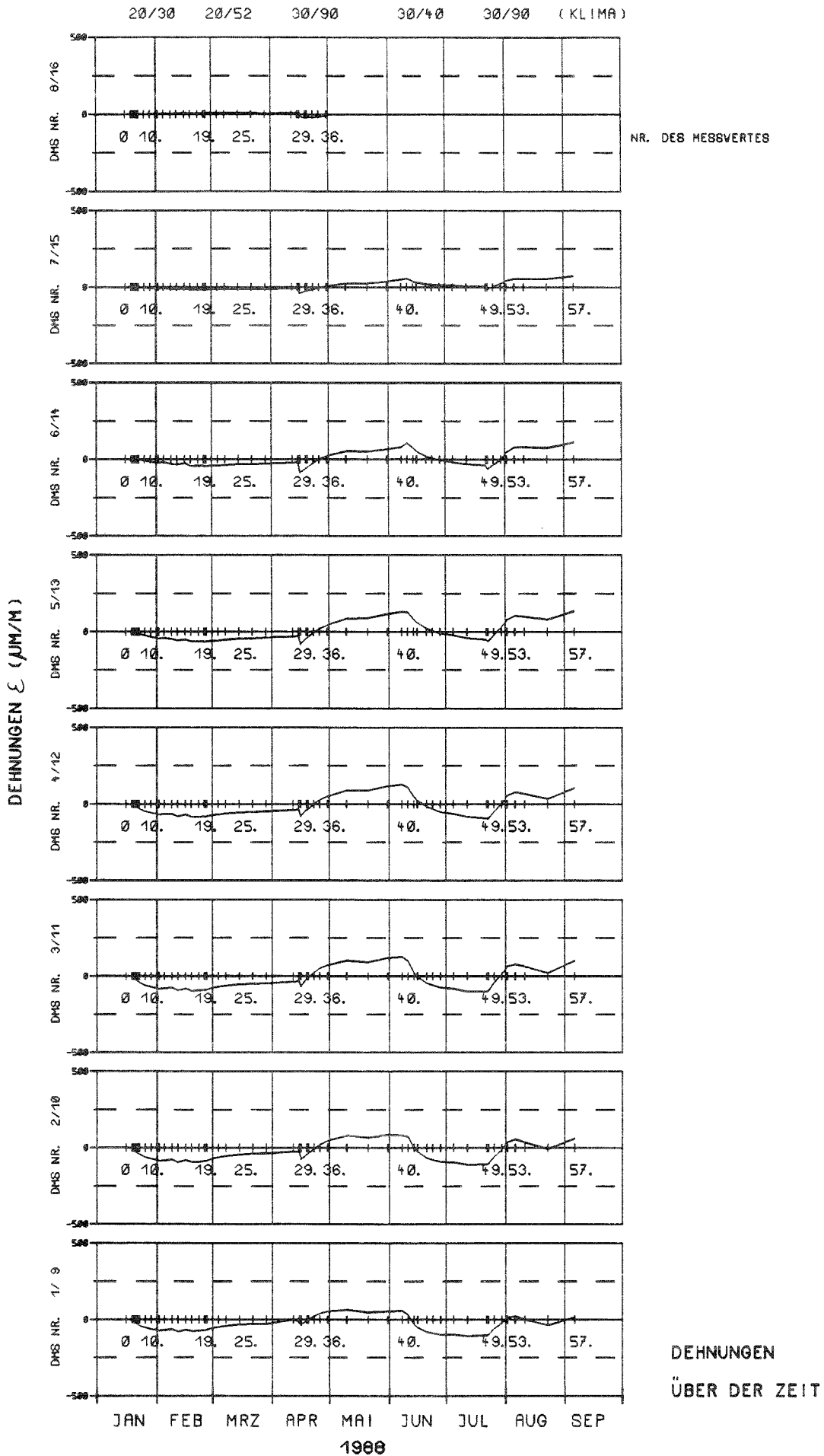


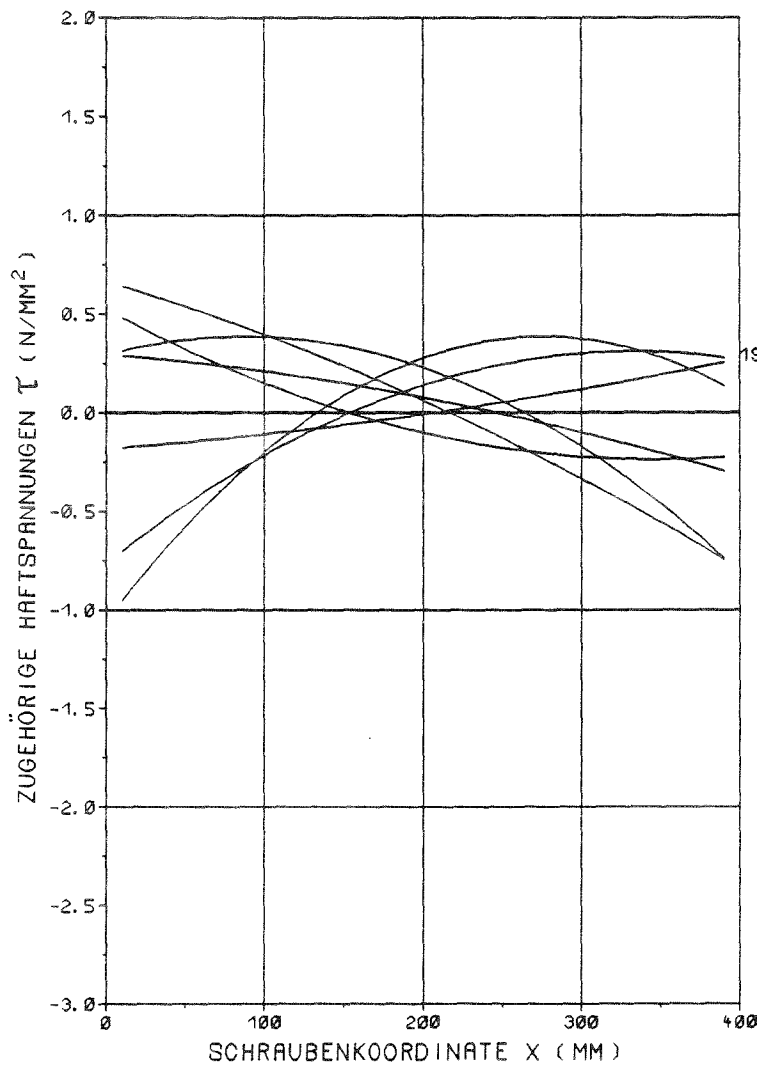
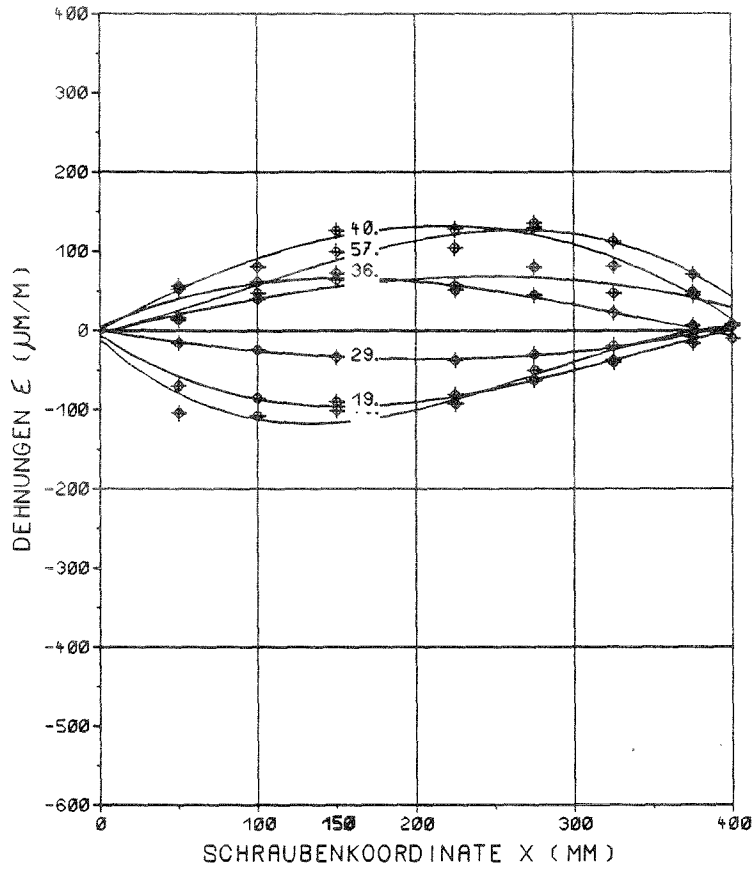


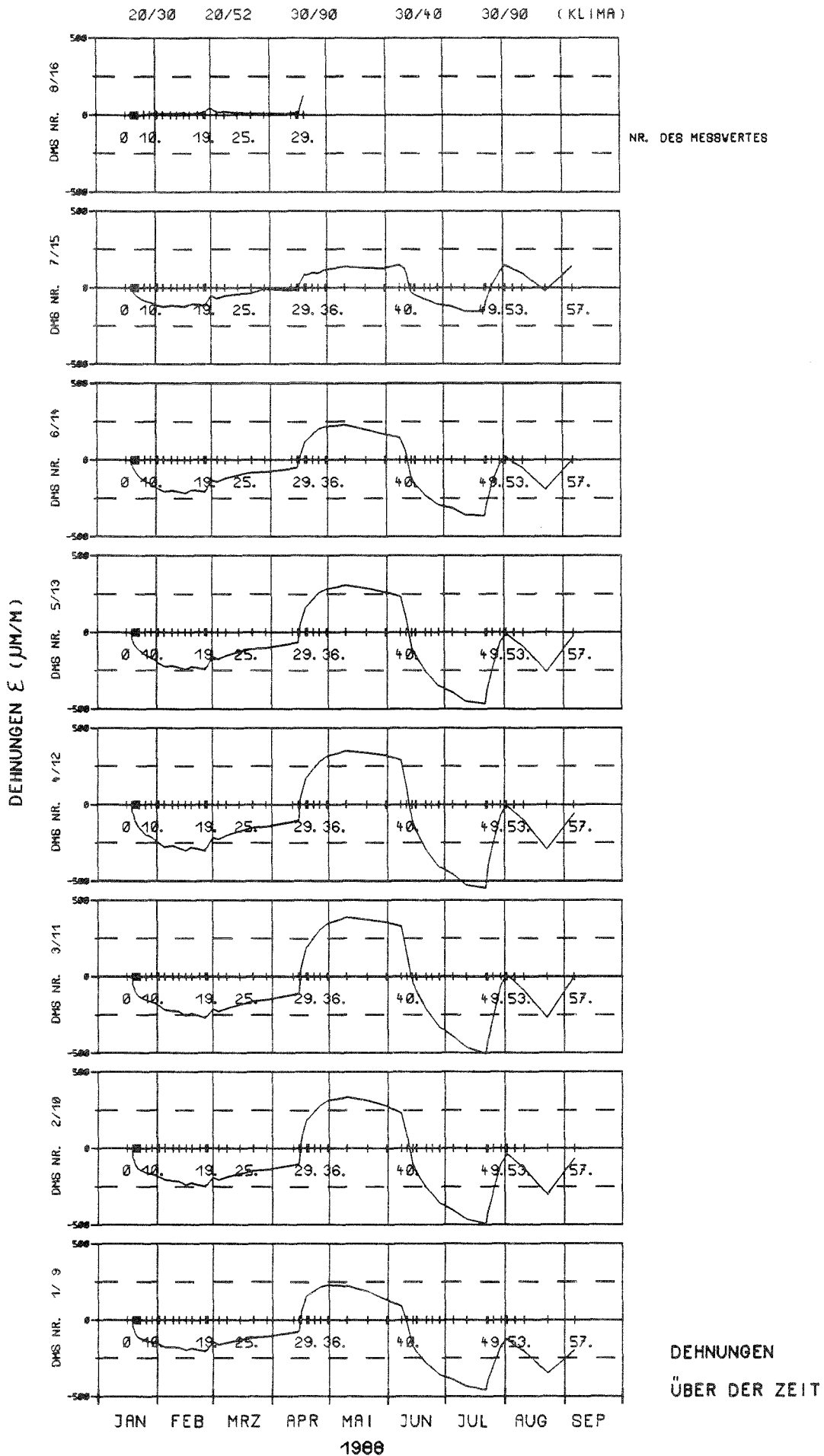


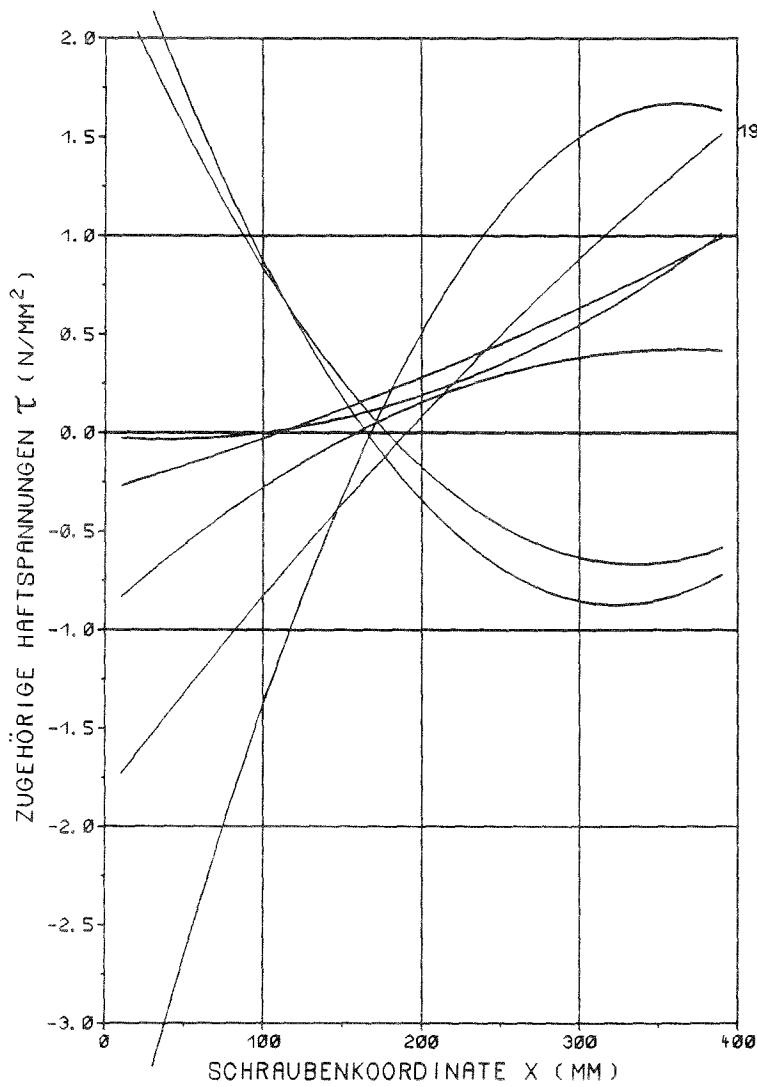
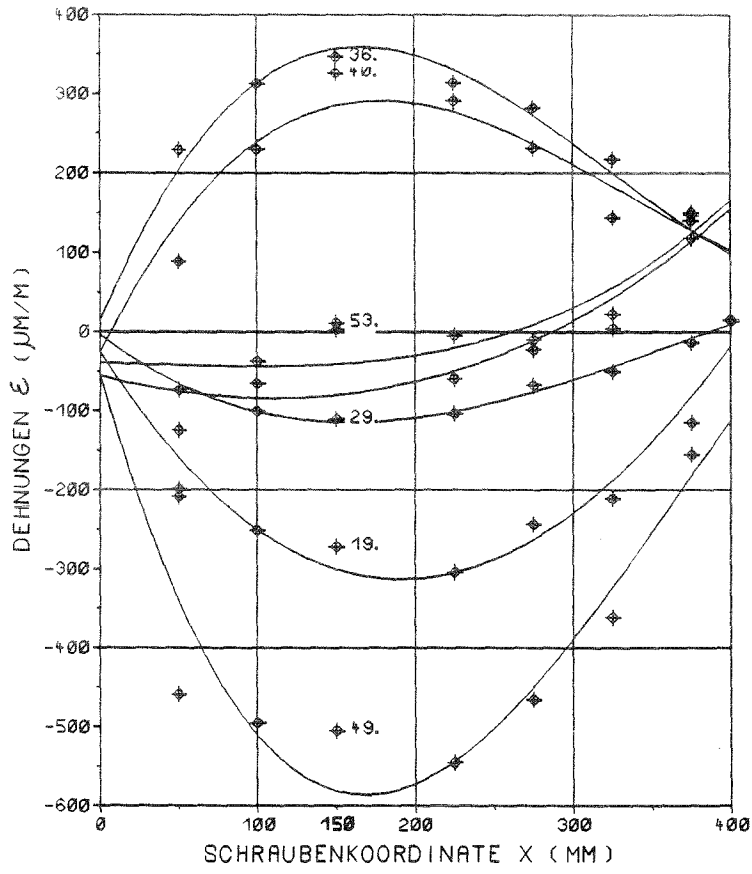












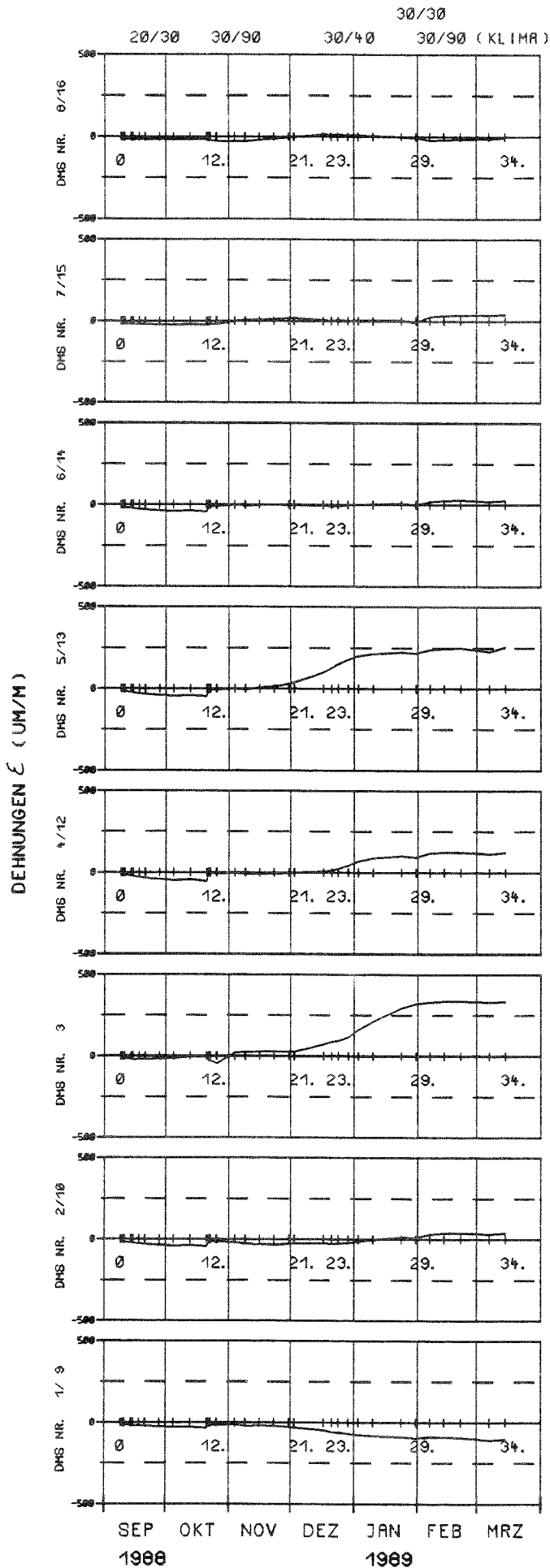
49.

53. 57.

29.

40.

36.

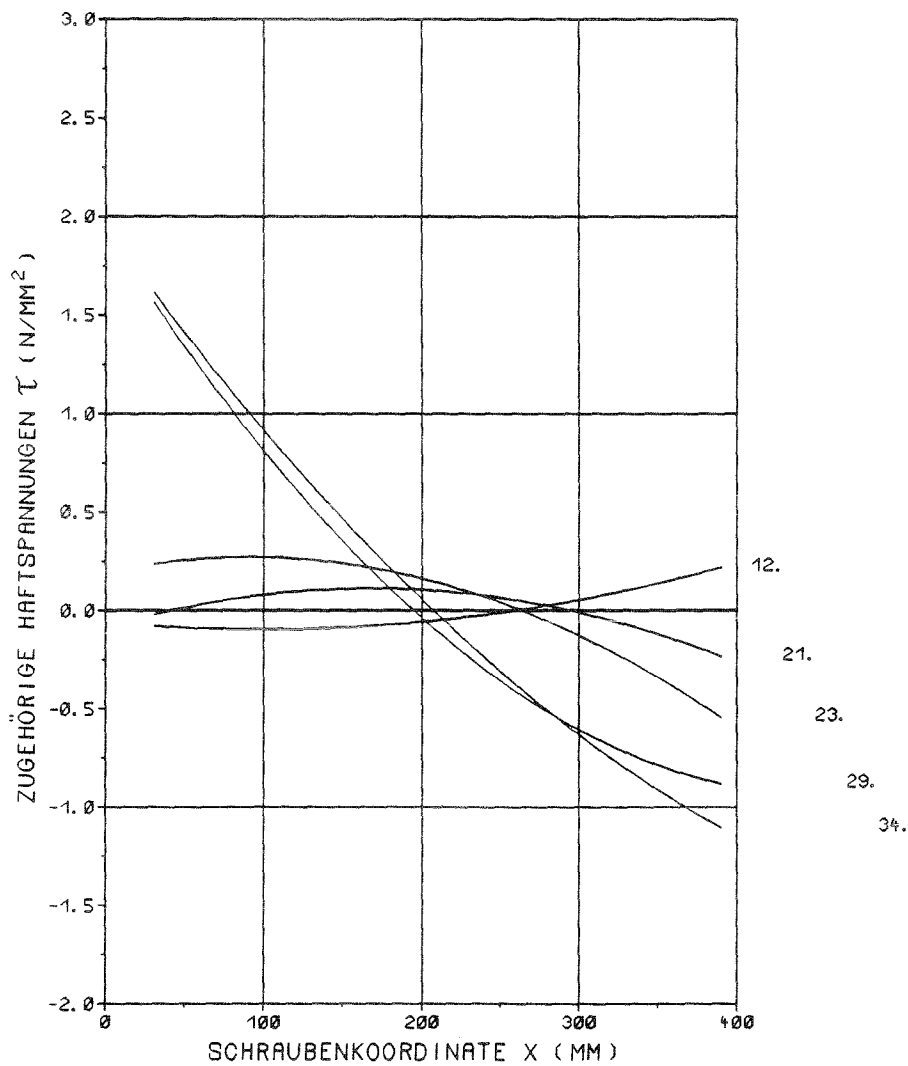
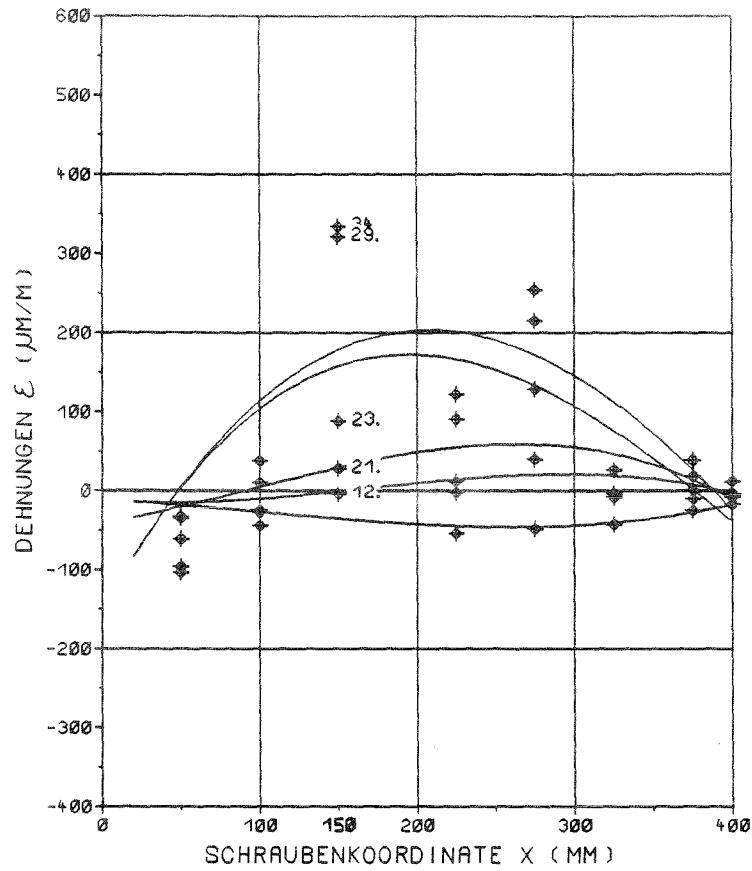


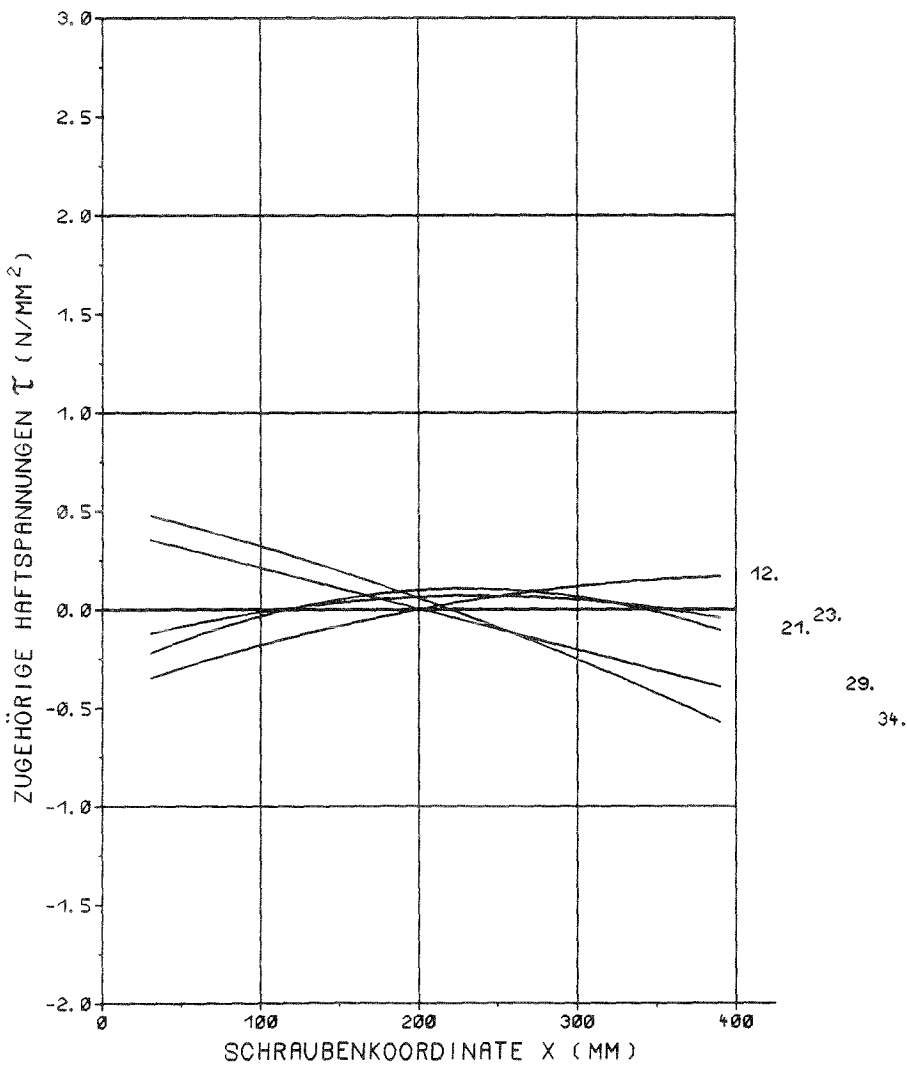
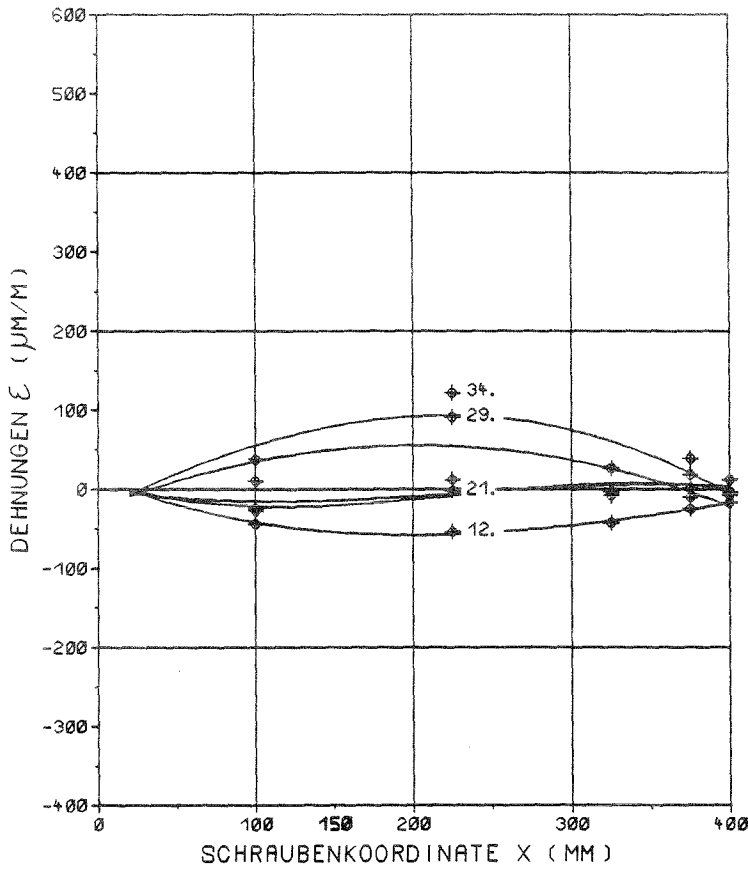
NR. DES MESSVERTES

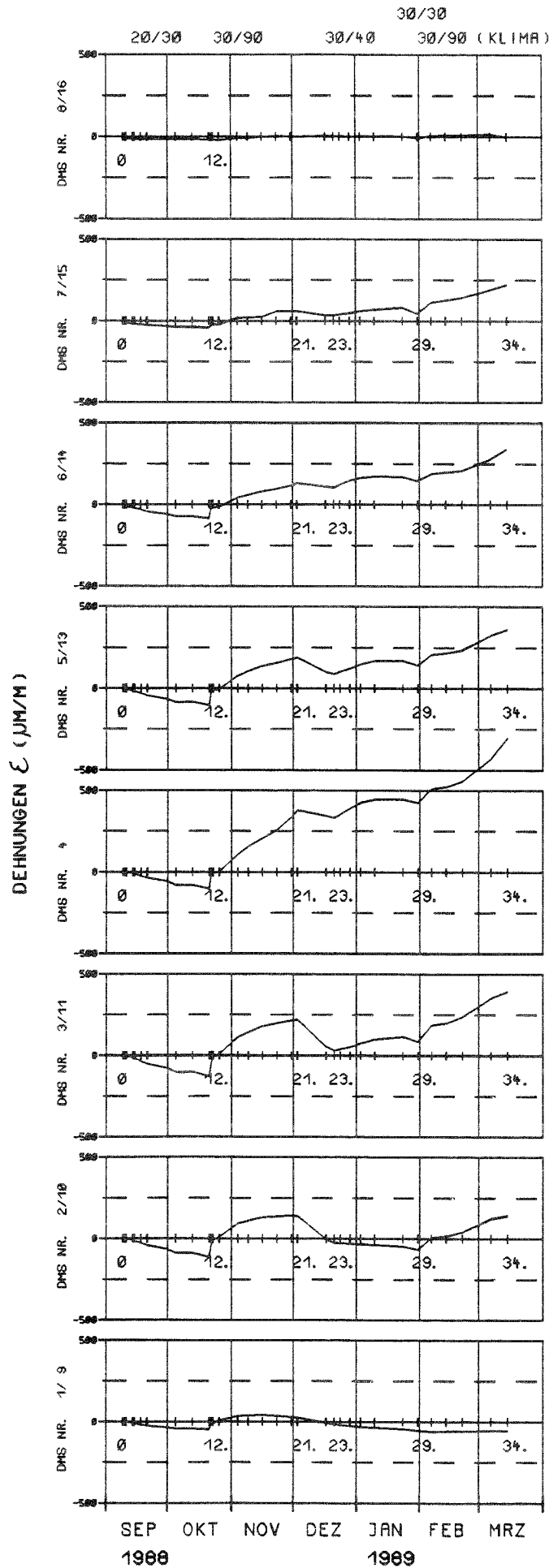
ab 16. Messwert
nur DMS Nr.16

ab 18. Messwert
nur DMS Nr.15

DEHNUNGEN
ÜBER DER ZEIT







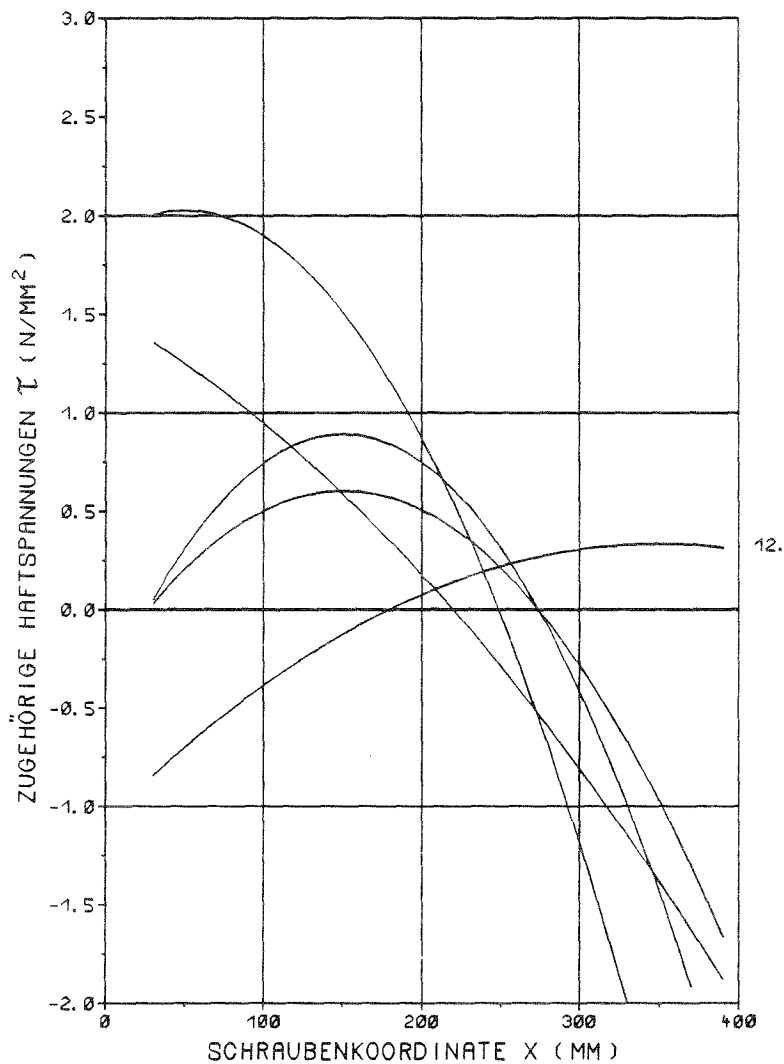
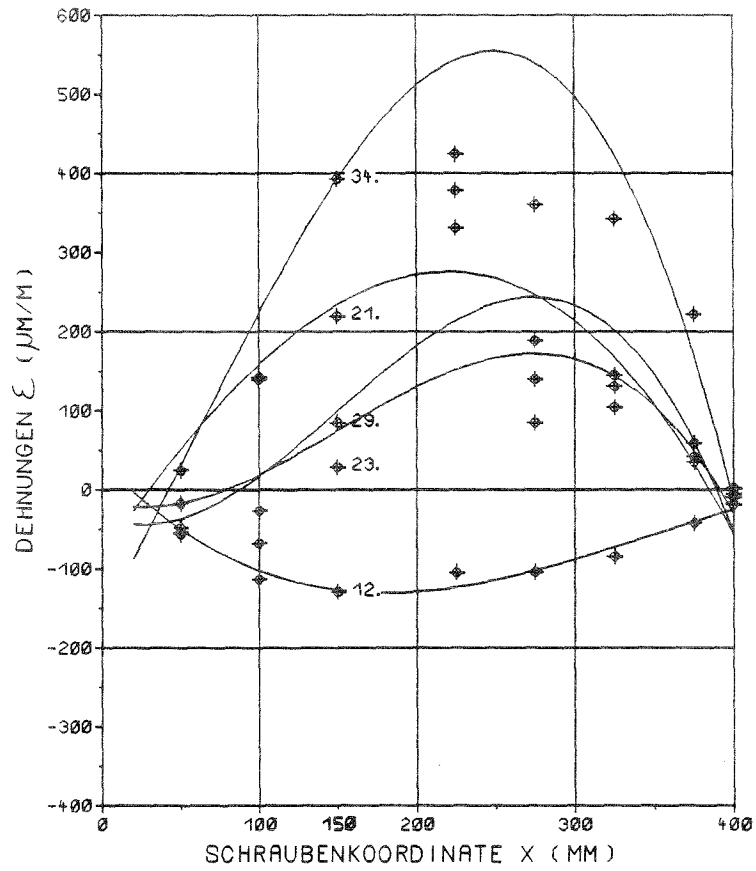
NR. DES MESSVERTES

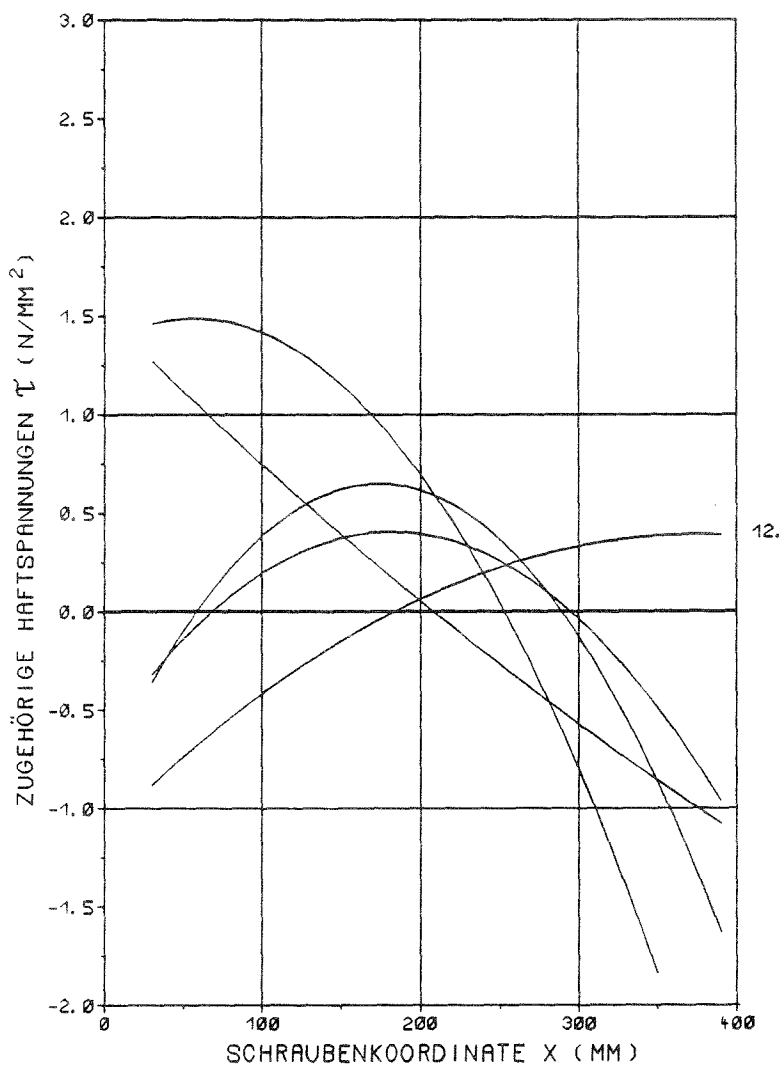
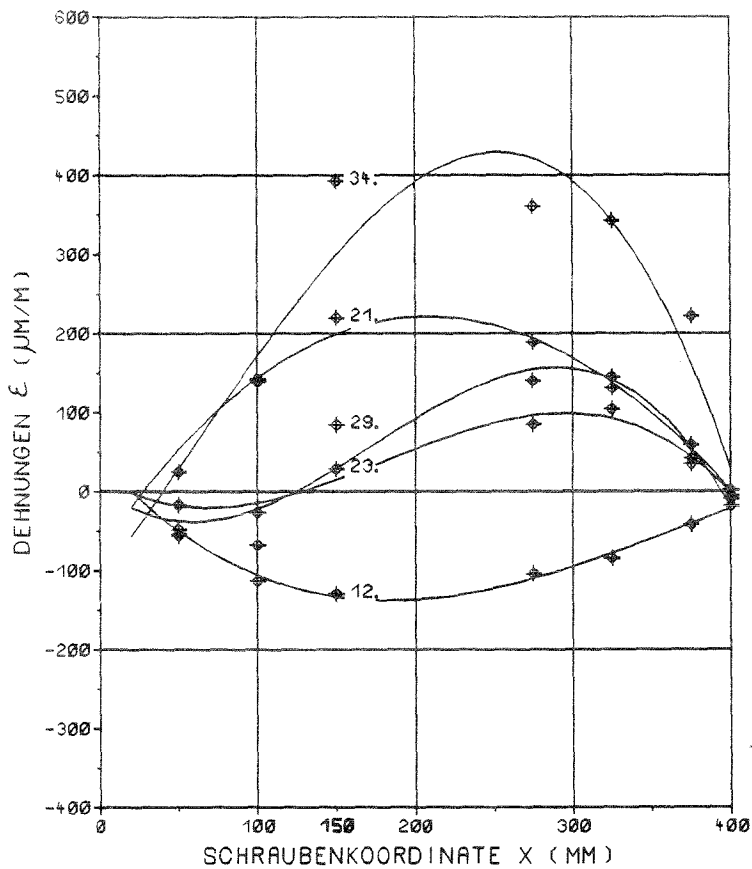
ab 19. Messwert
nur DMS Nr.16

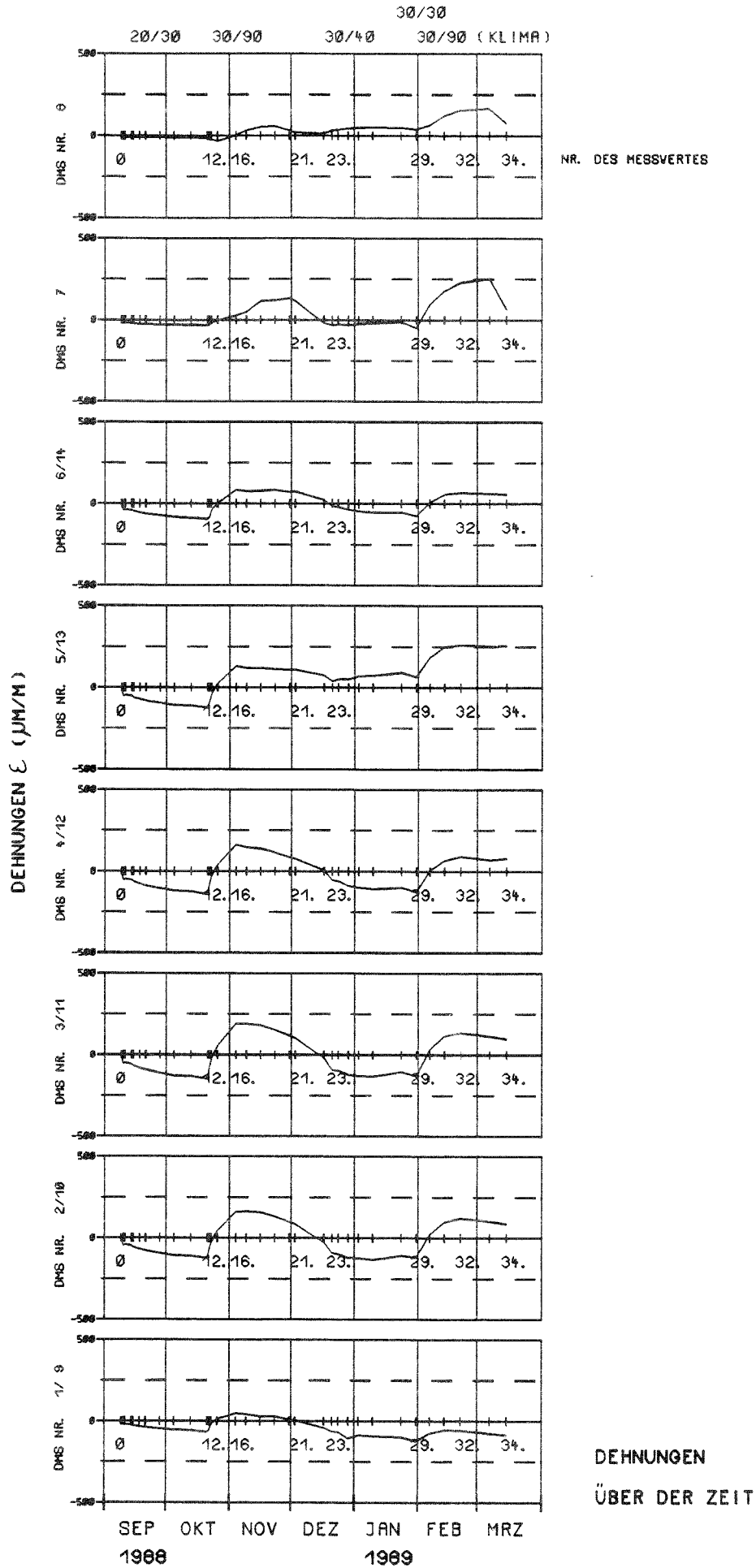
ab 19. Messwert
nur DMS Nr.15

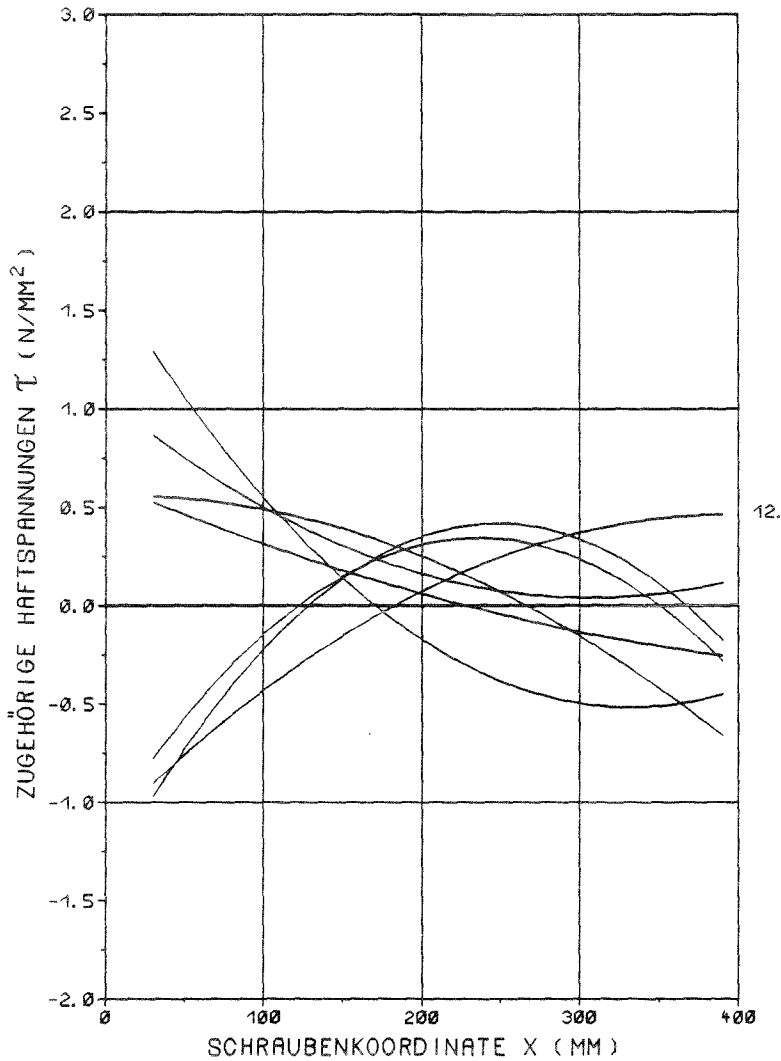
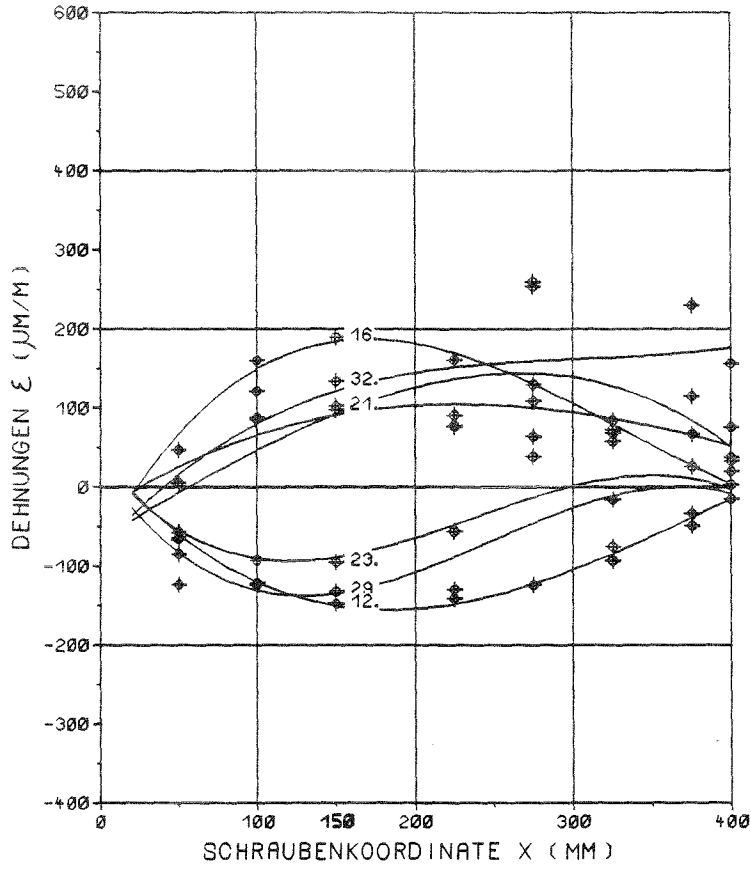
bis 21. Messwert
nur DMS Nr.9

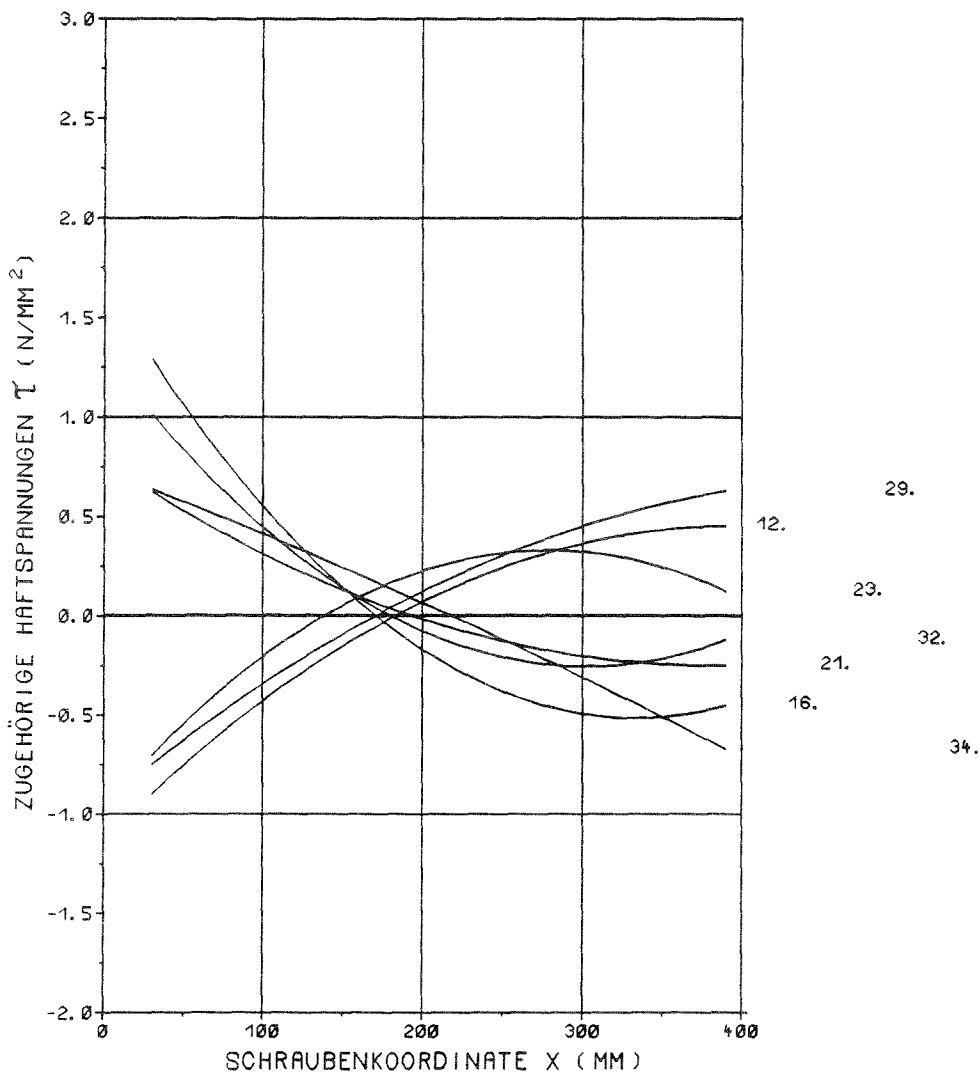
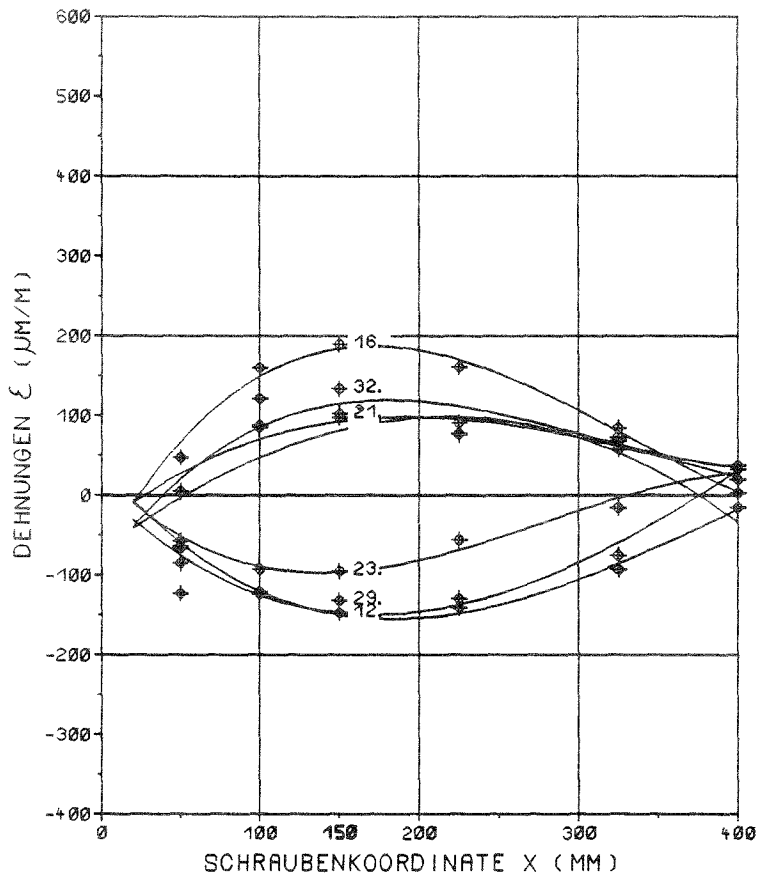
DEHNUNGEN
ÜBER DER ZEIT

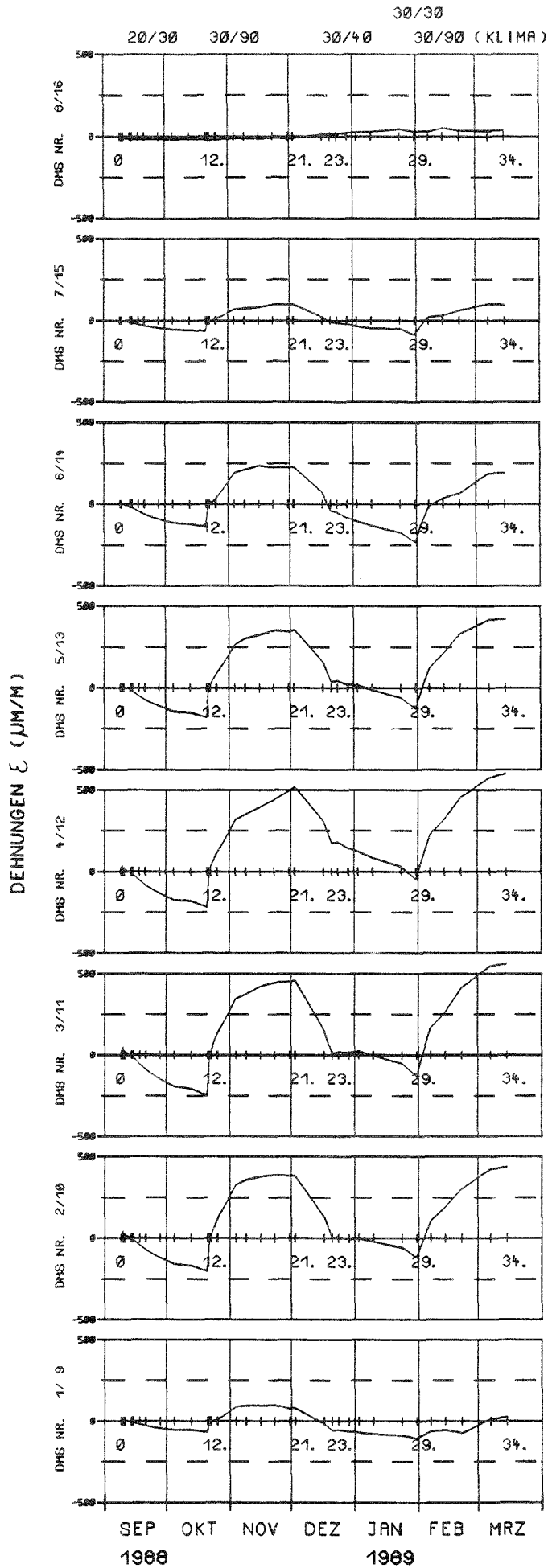








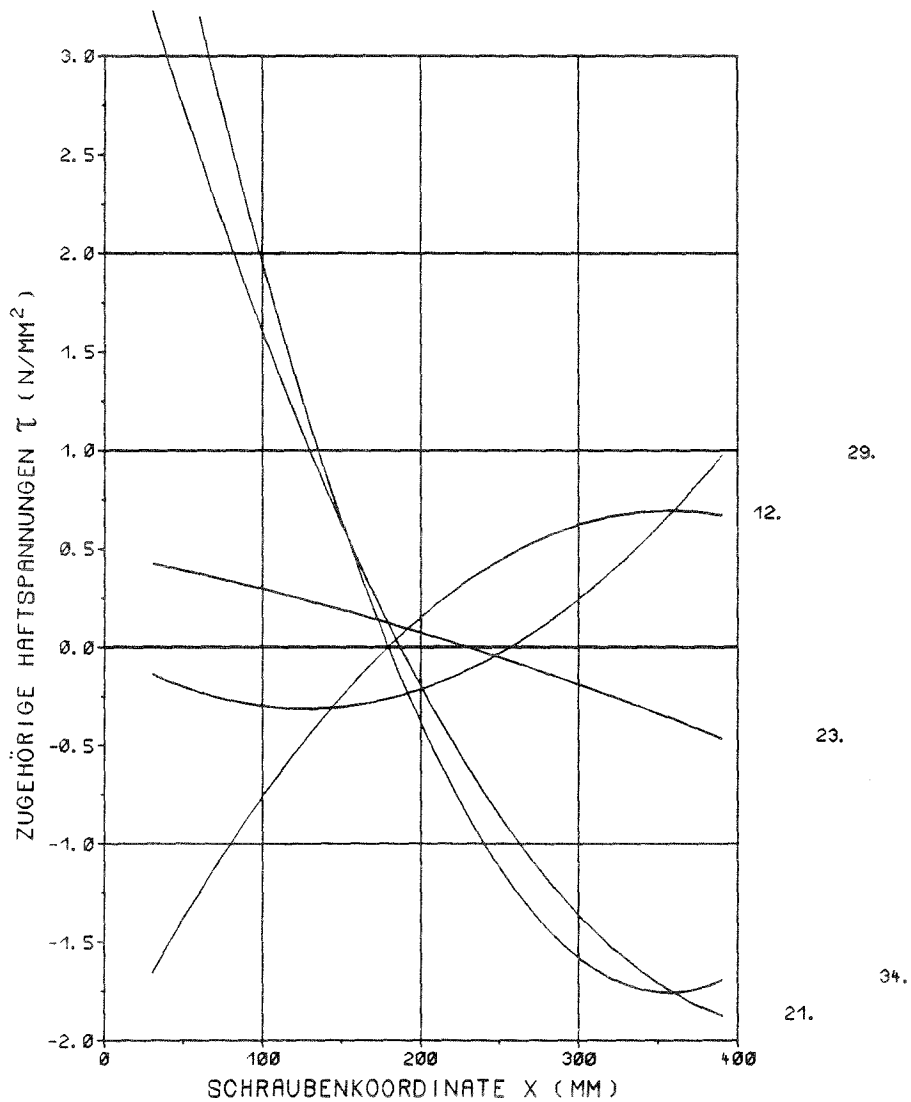
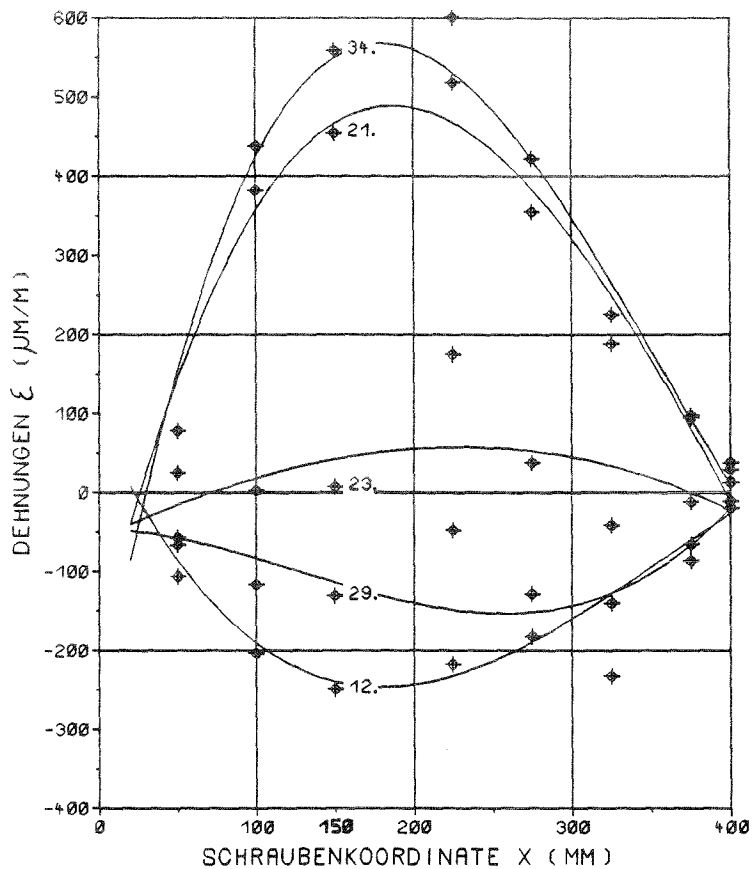


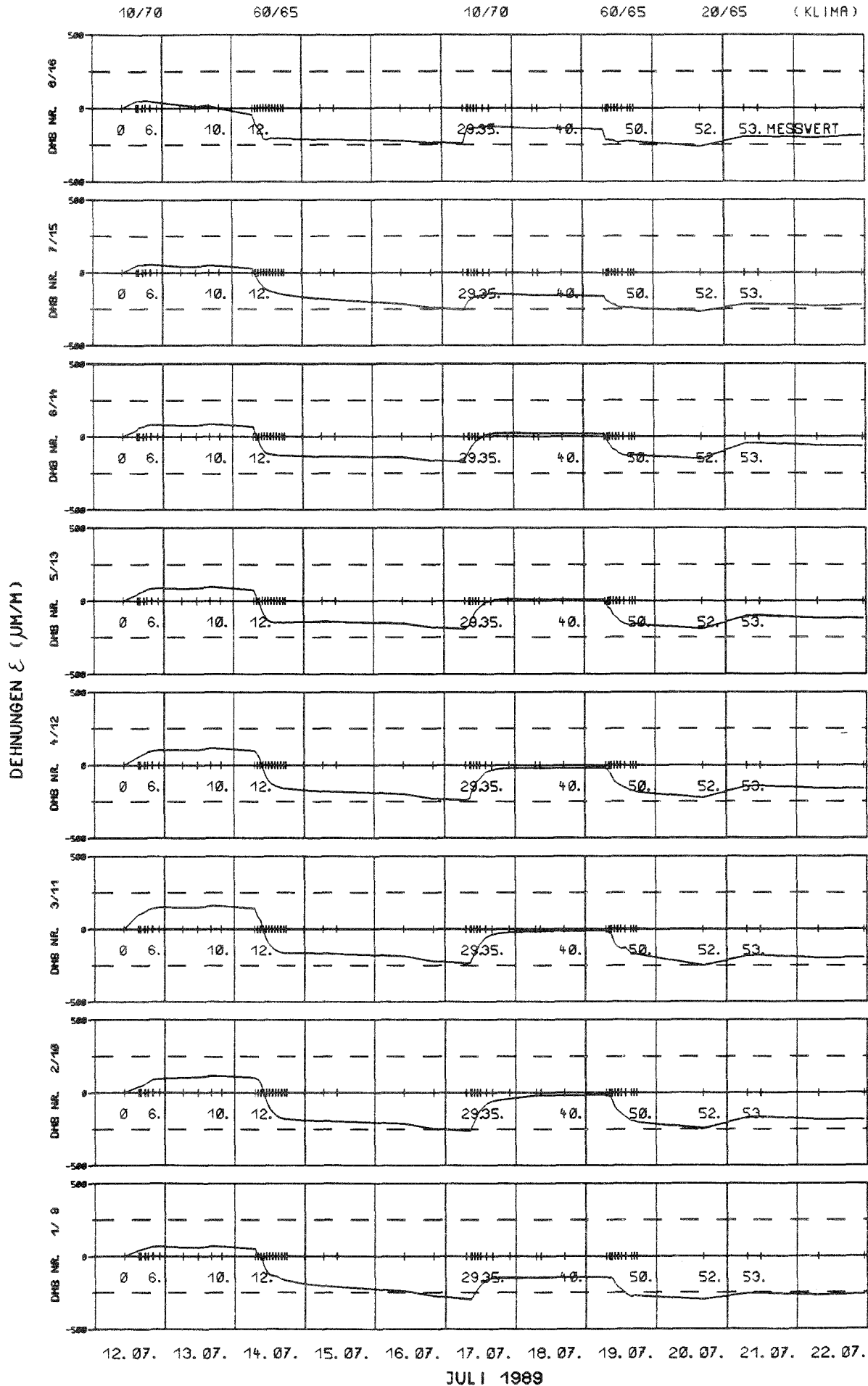


NR. DES MESSVERTES

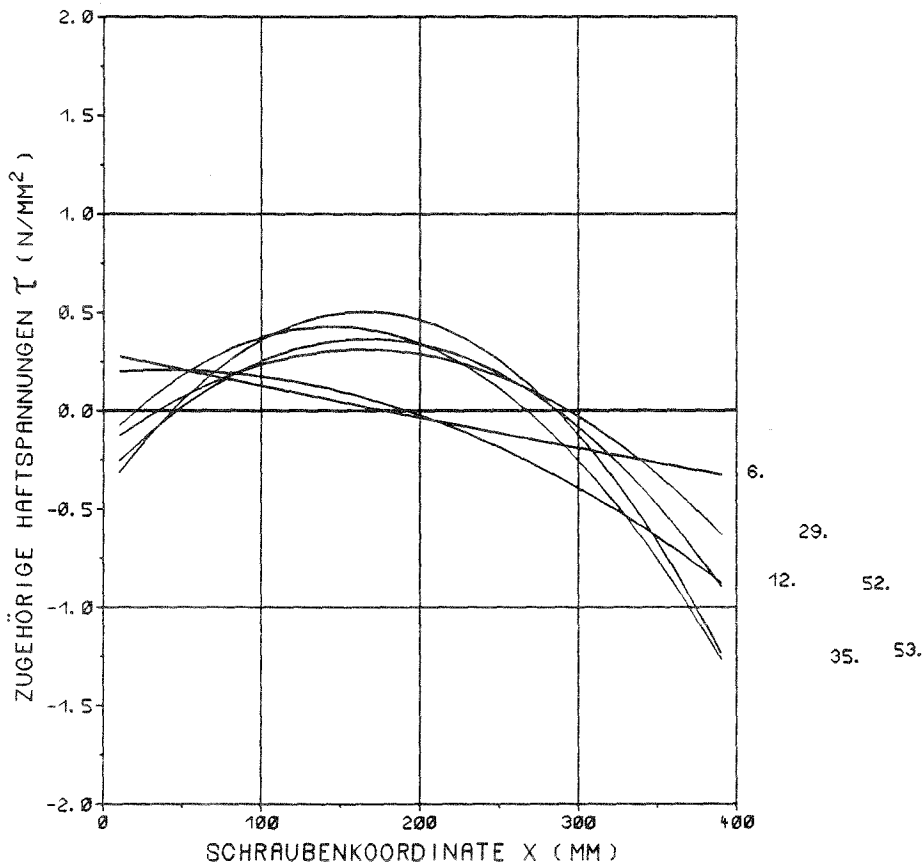
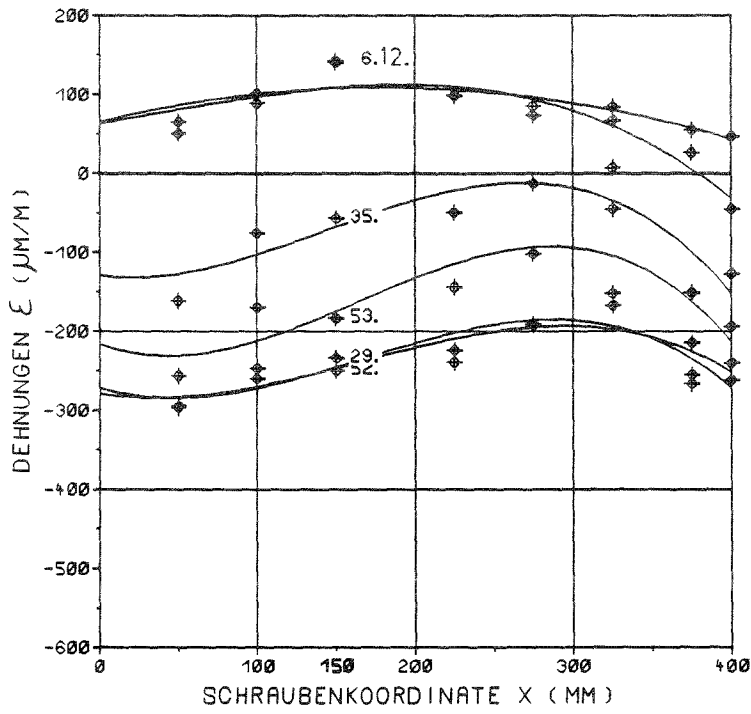
ab 15. Messwert
nur DMS Nr.8

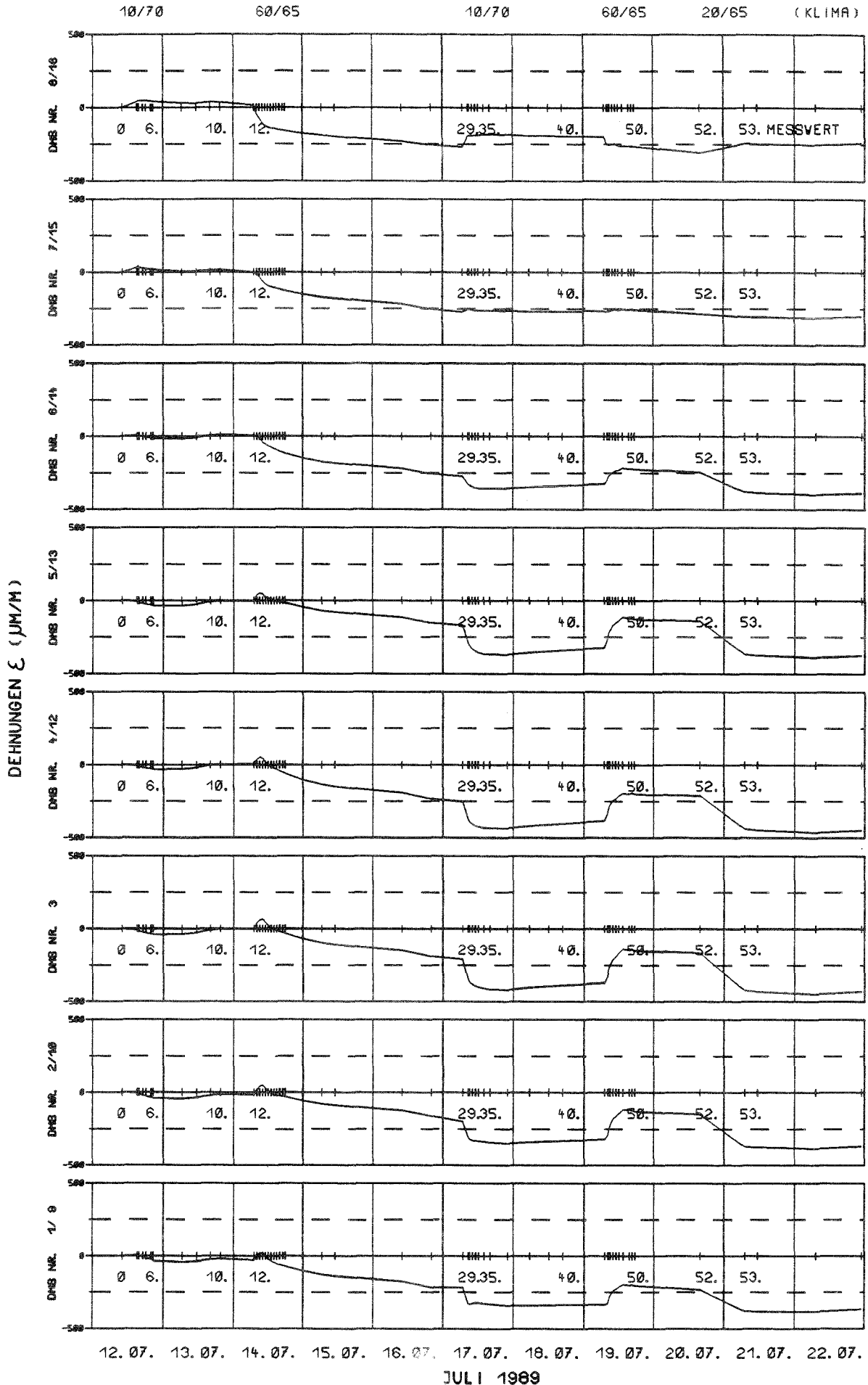
DEHNUNGEN
ÜBER DER ZEIT



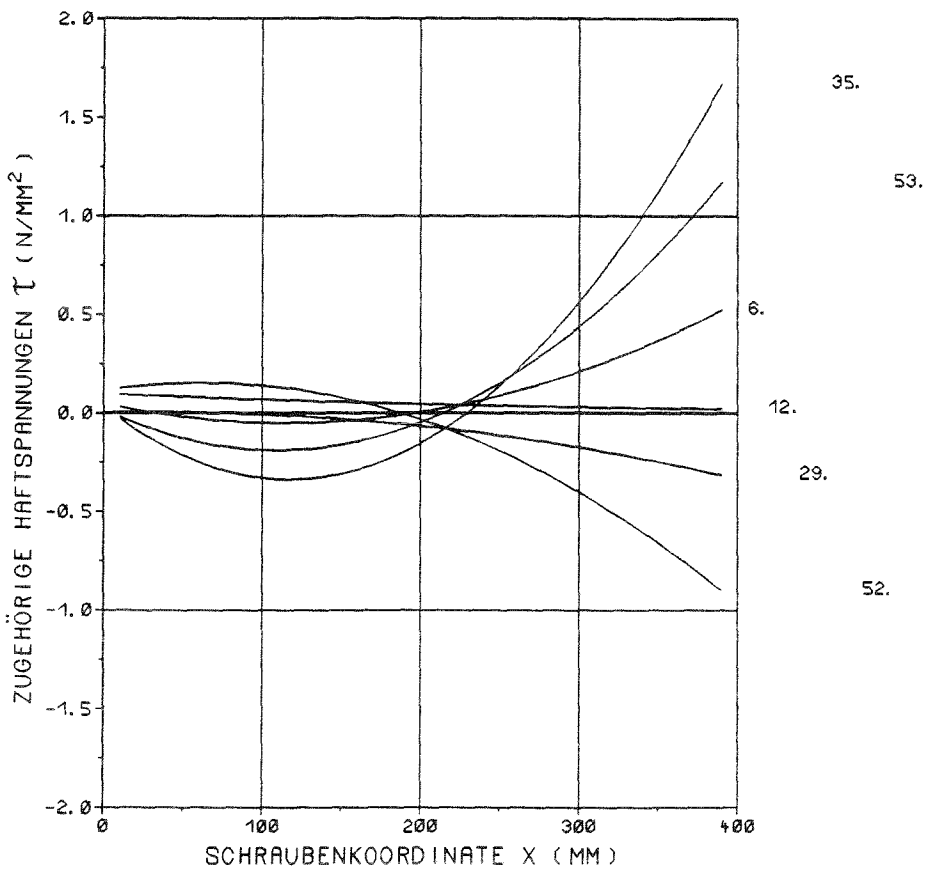
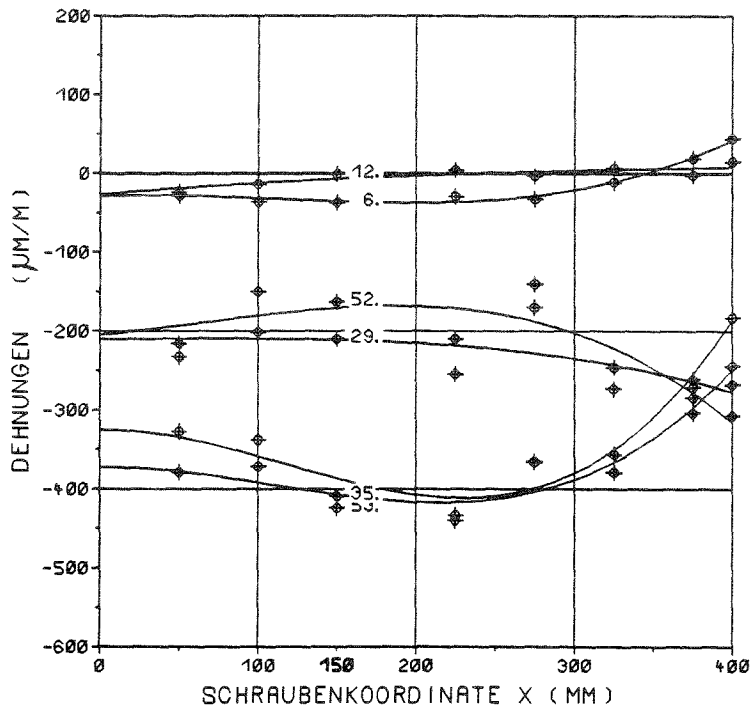


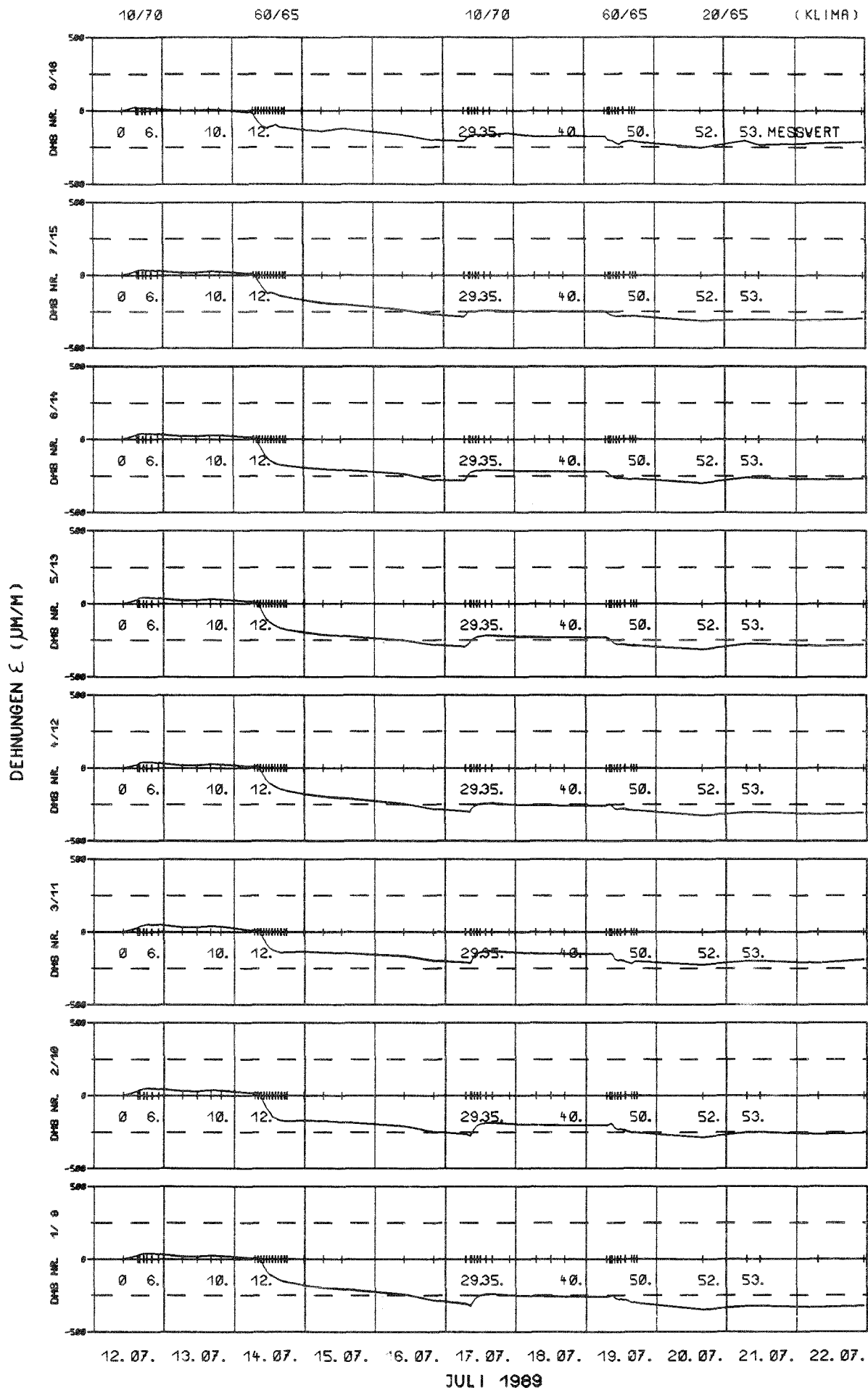
Körper PM2ØR3 unter Temperaturbeanspruchung



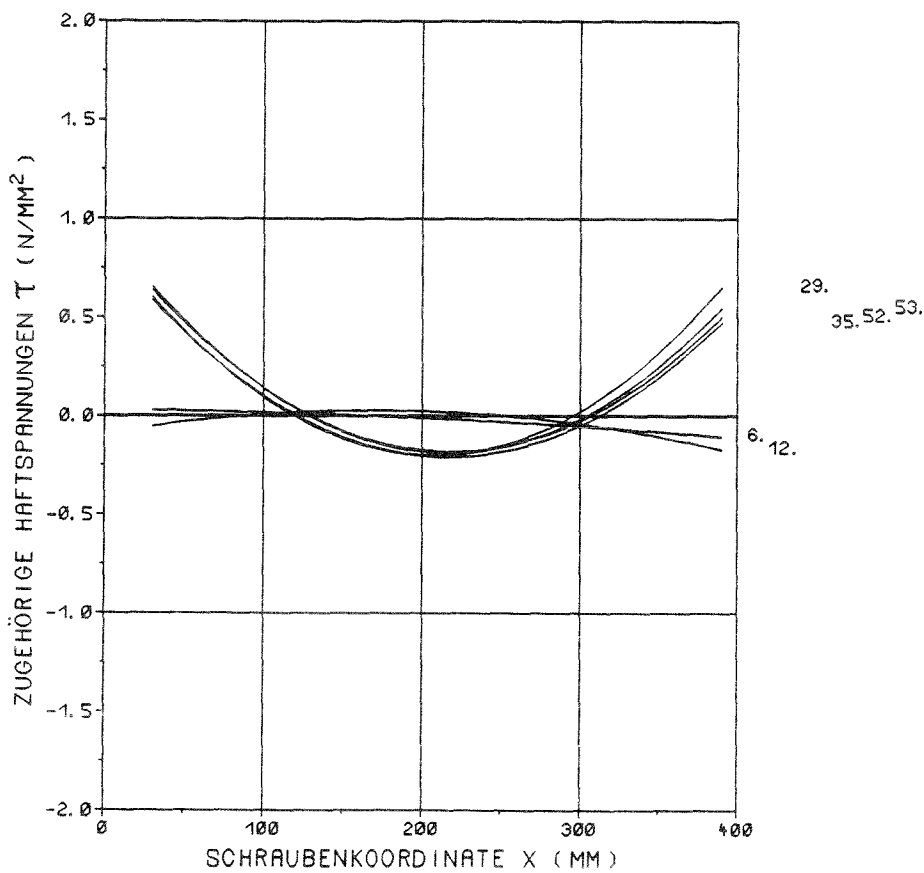
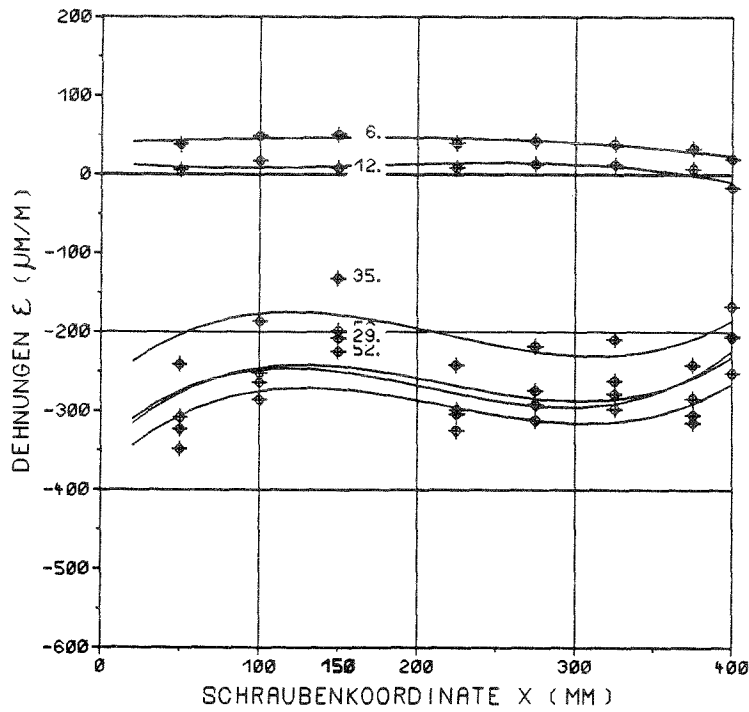


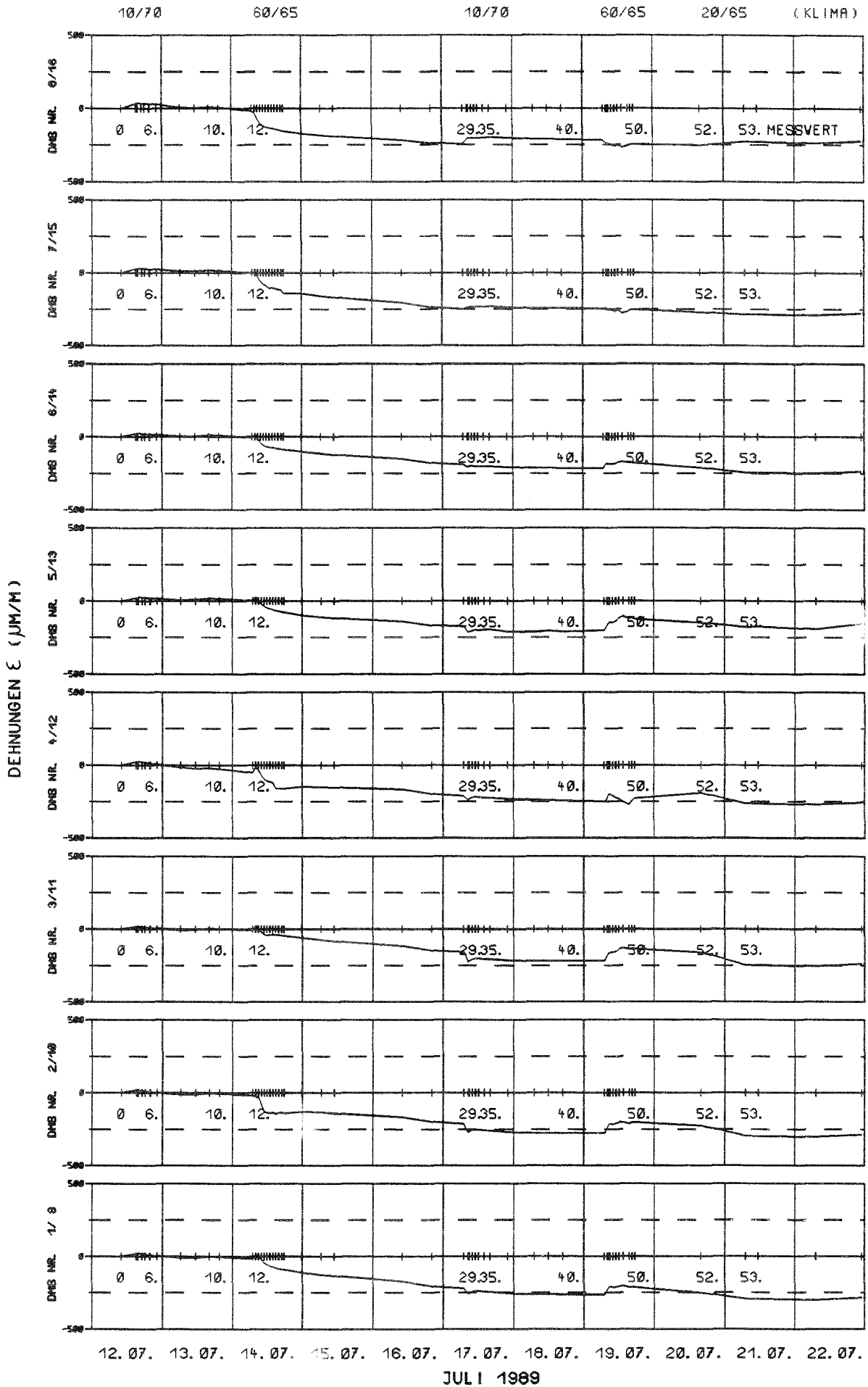
Körper SM2ØR3 unter Temperaturbeanspruchung



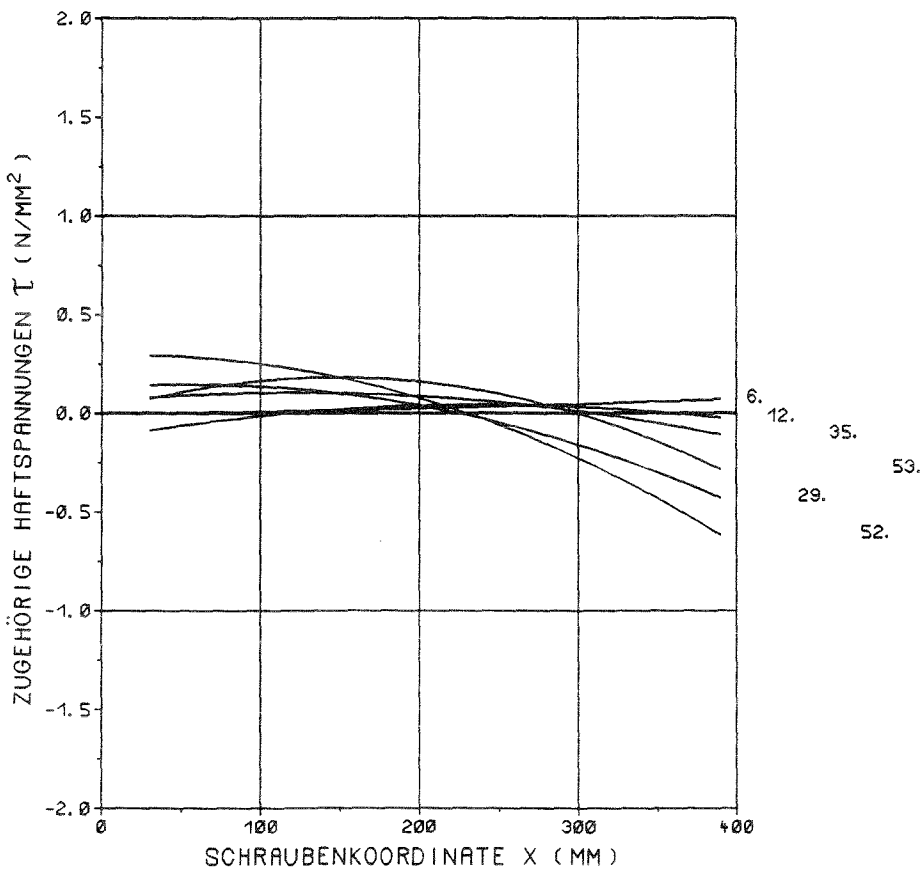
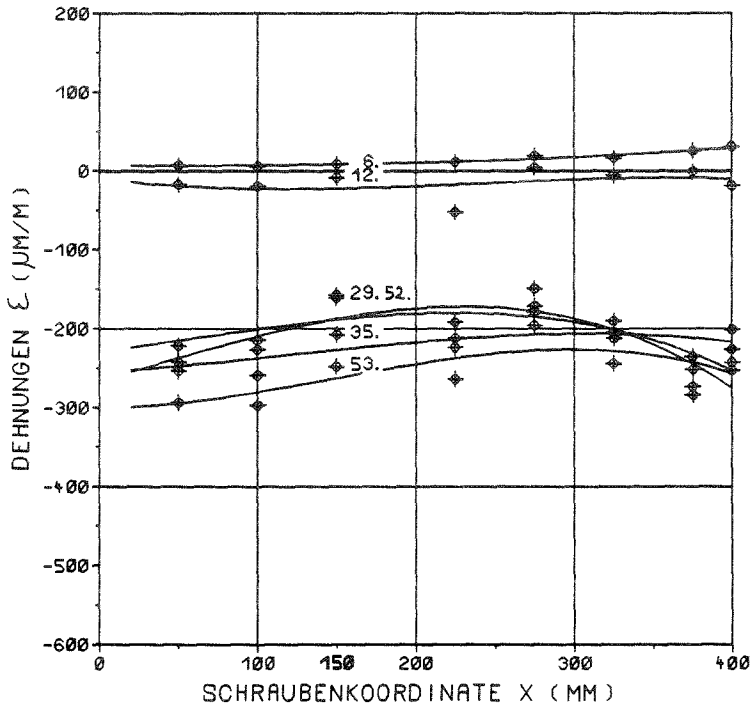


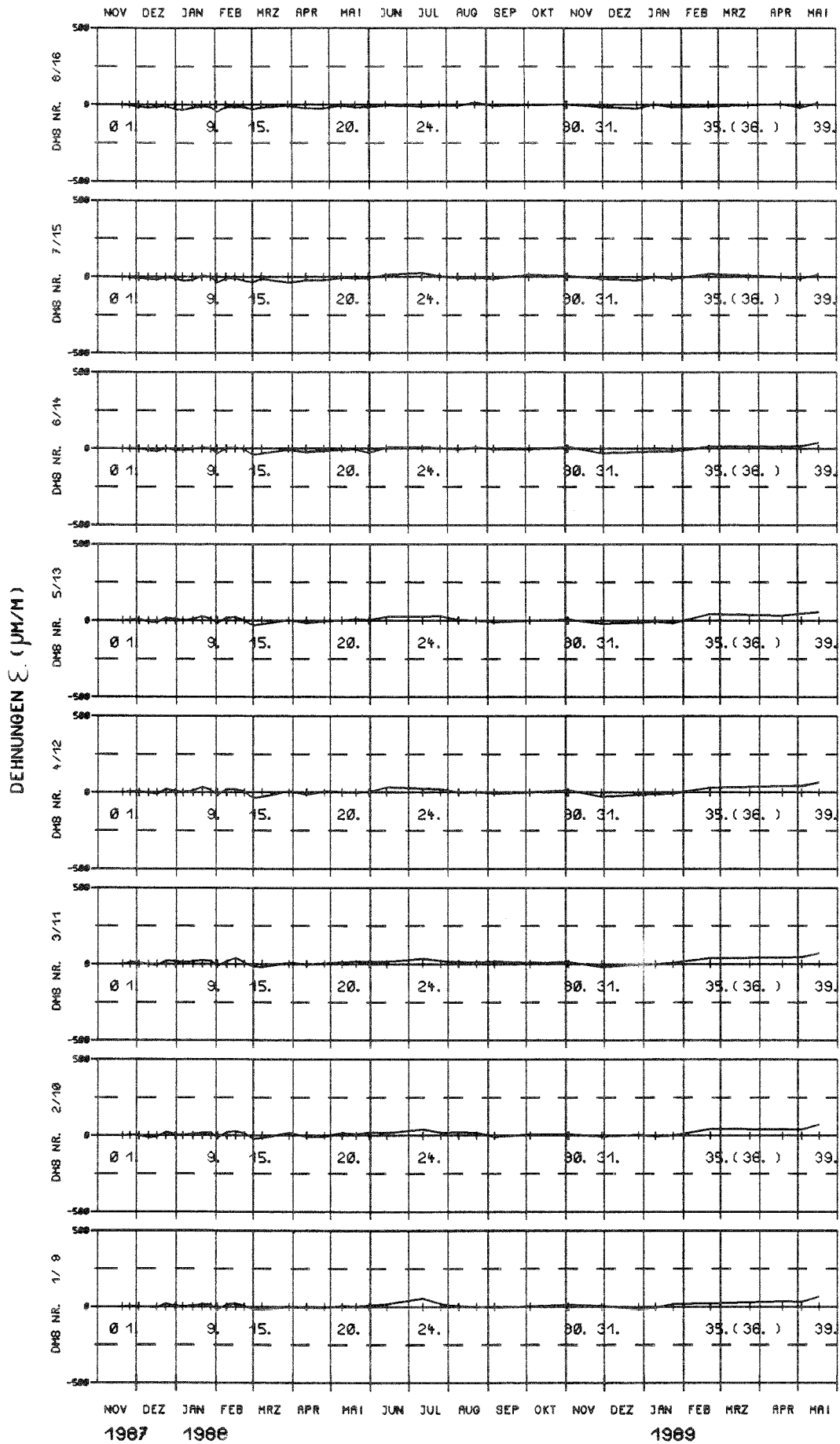
Körper PS2003 unter Temperaturbeanspruchung



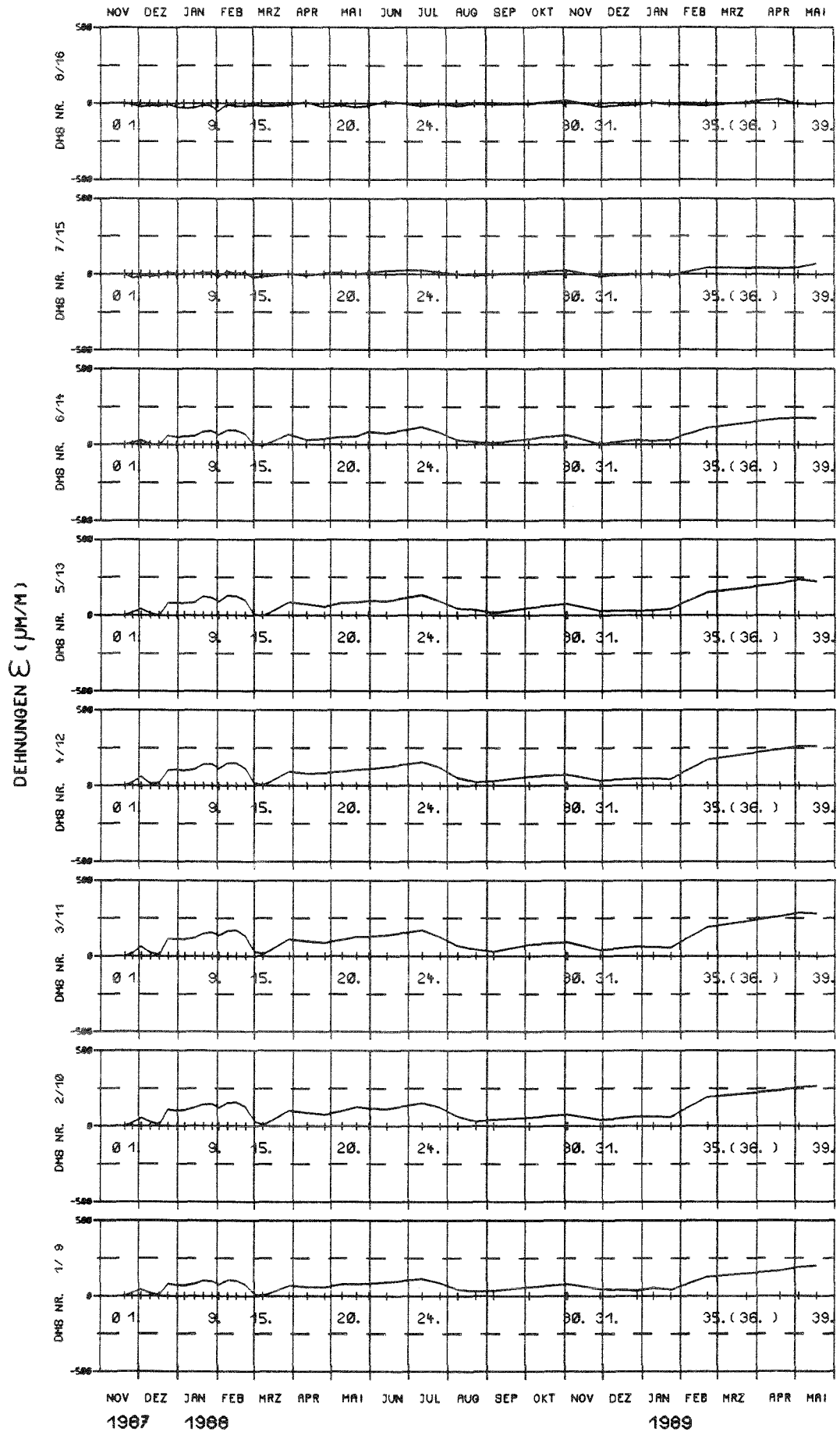


Körper SS2003 unter Temperaturbeanspruchung



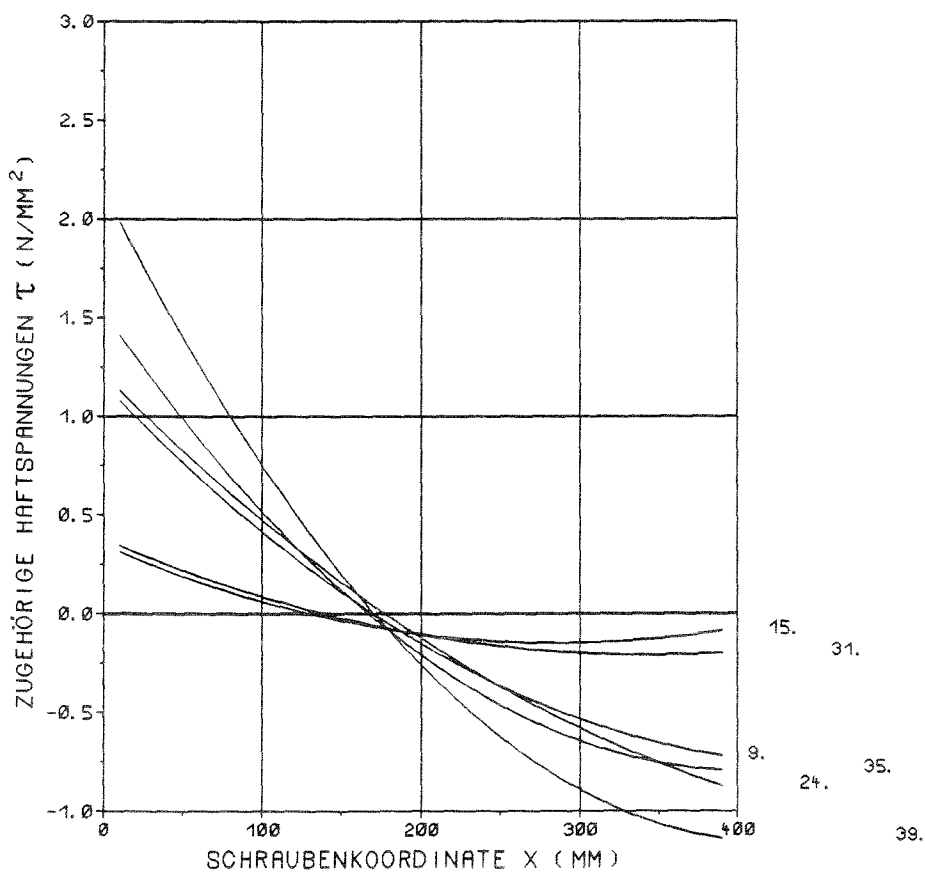
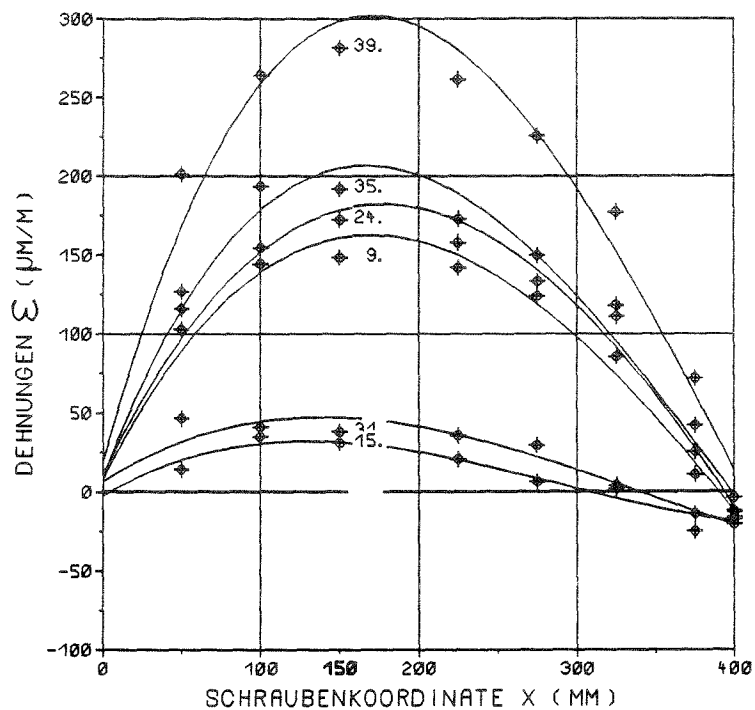


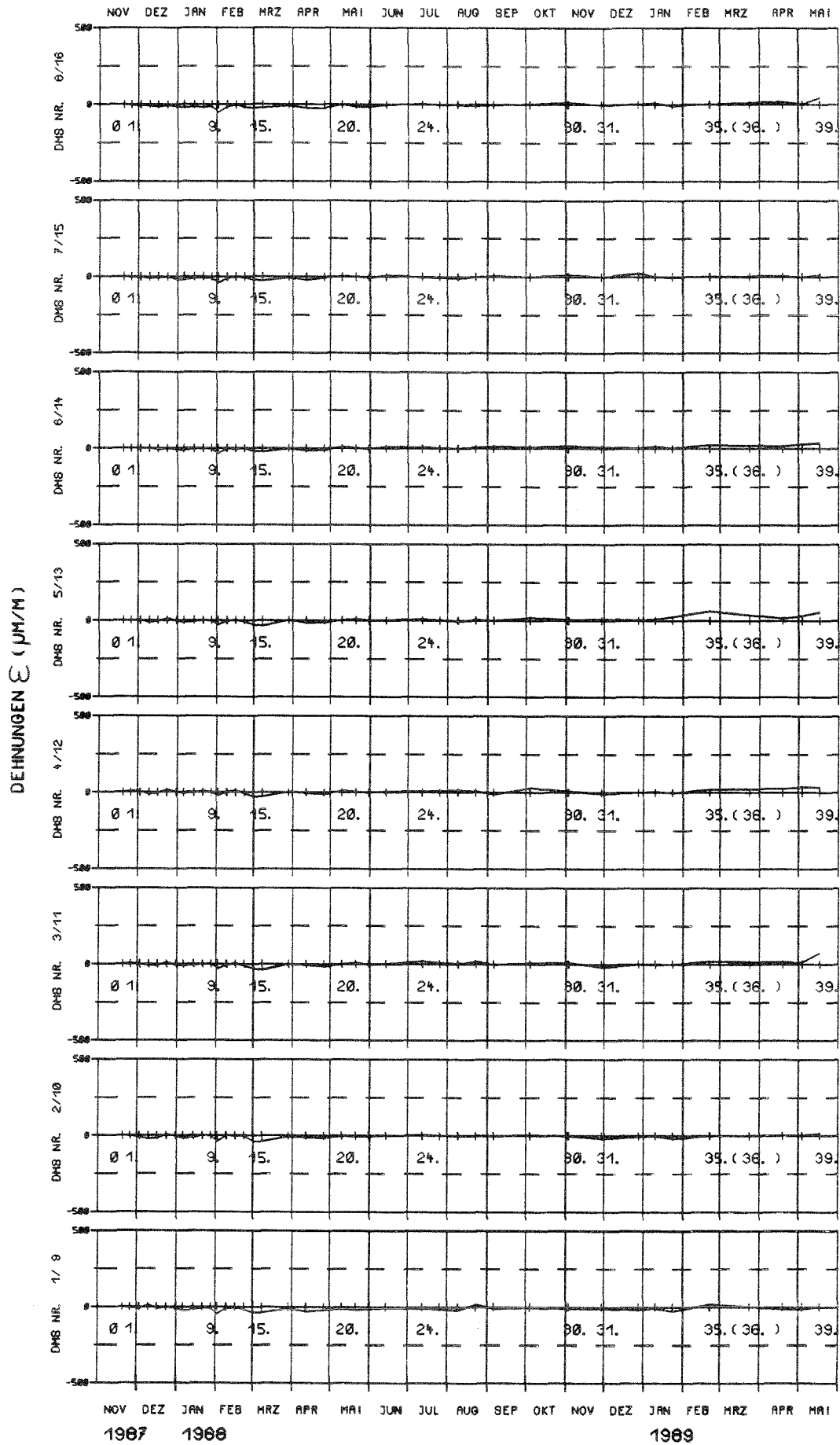
NR. DES
MESSWERTES



NR. DES
MESSVERTES

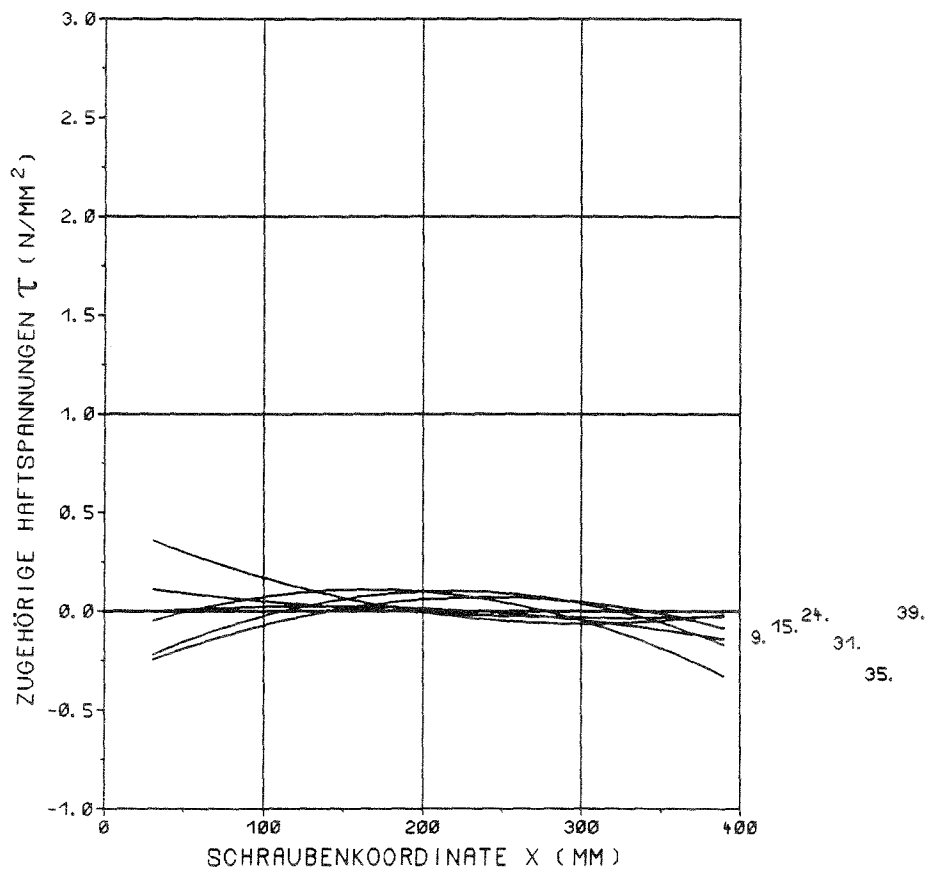
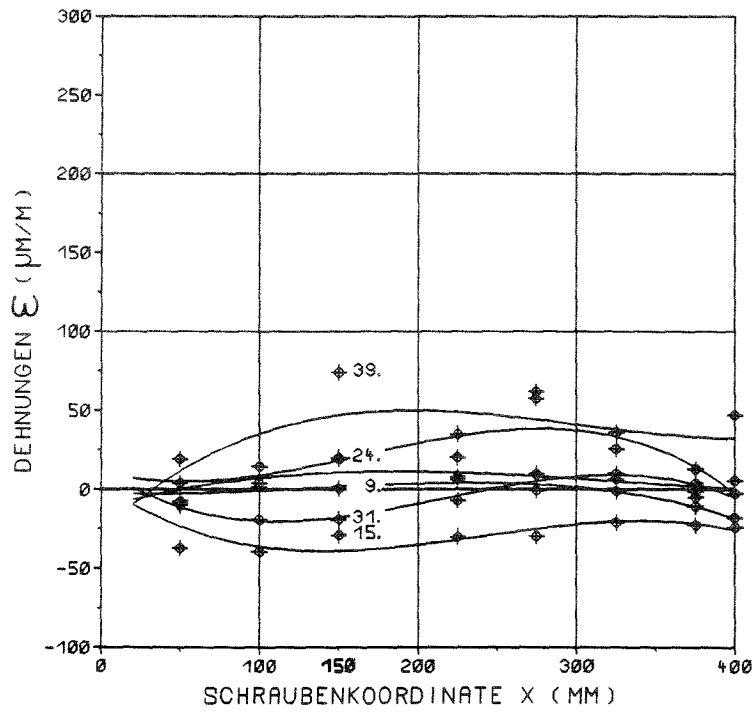
Körper SM2ØR4 unter Normalklima DIN 50 014 -- 20/65-1

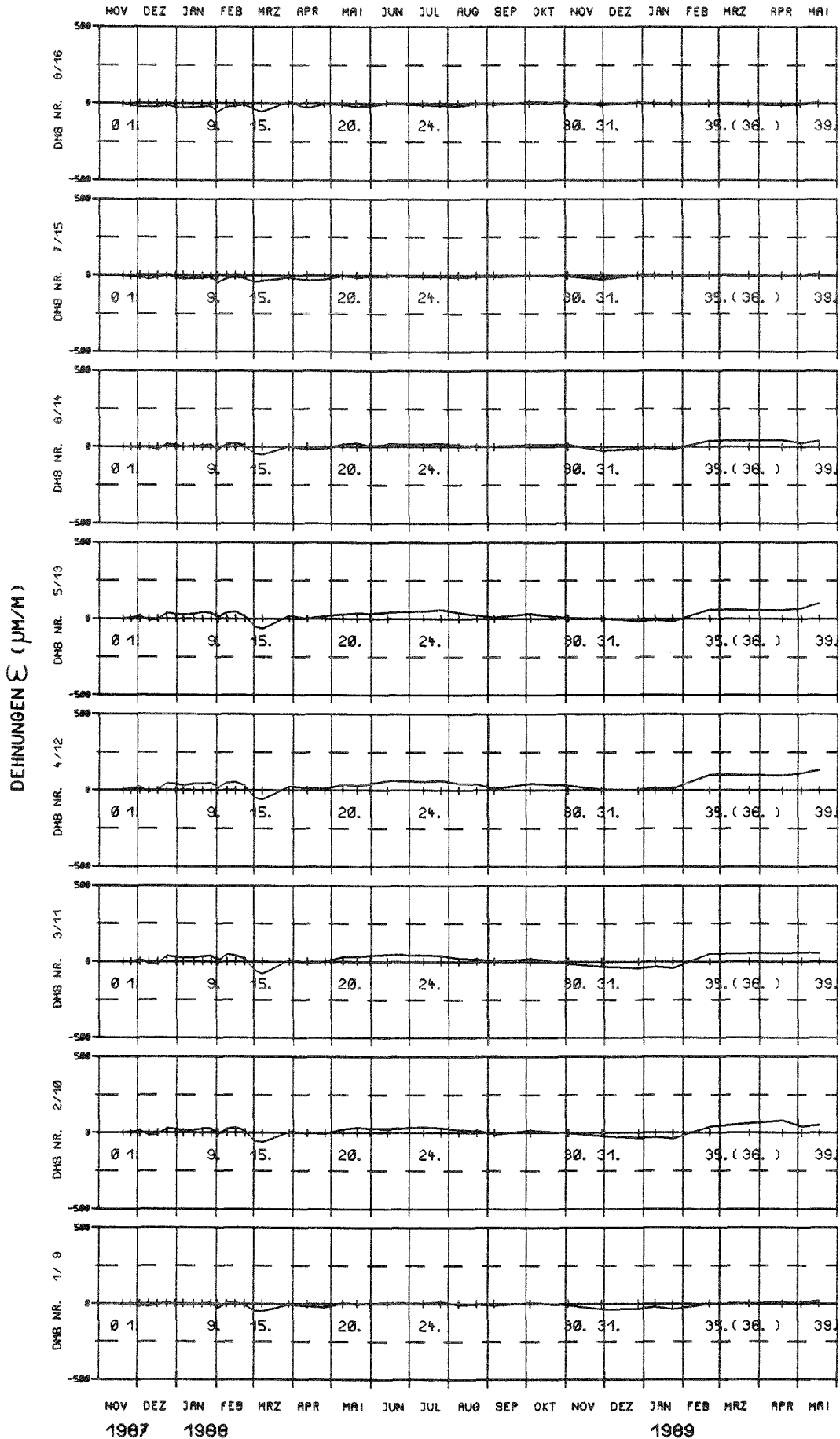




NR. DES
MESSVERTES

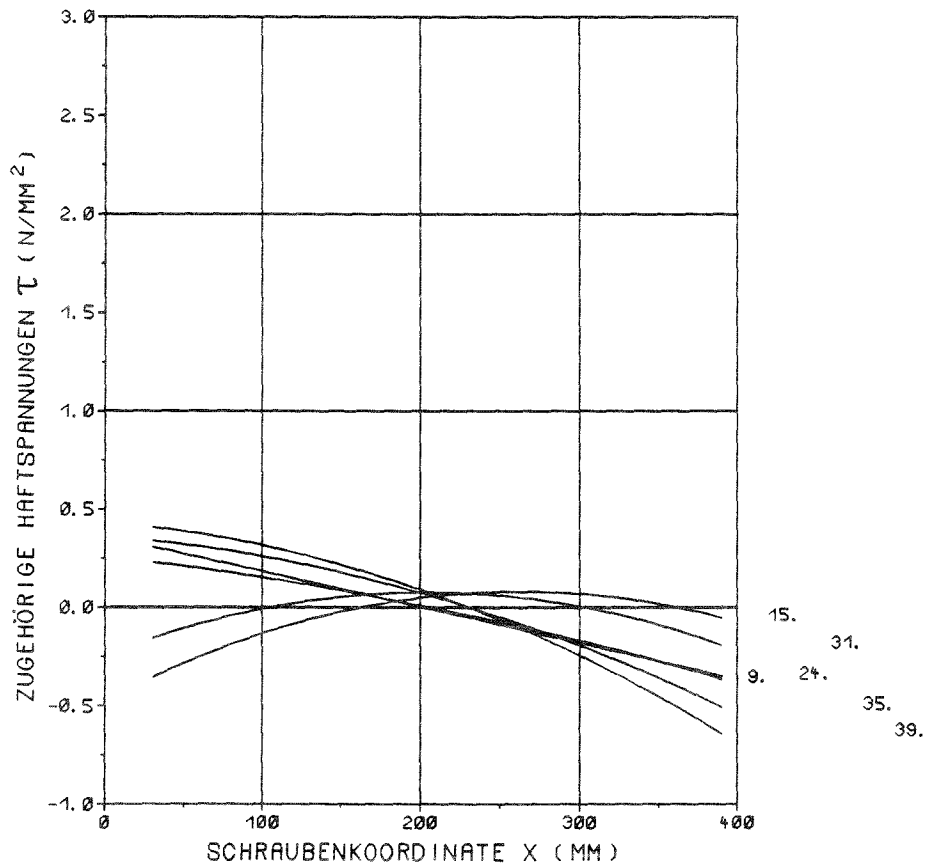
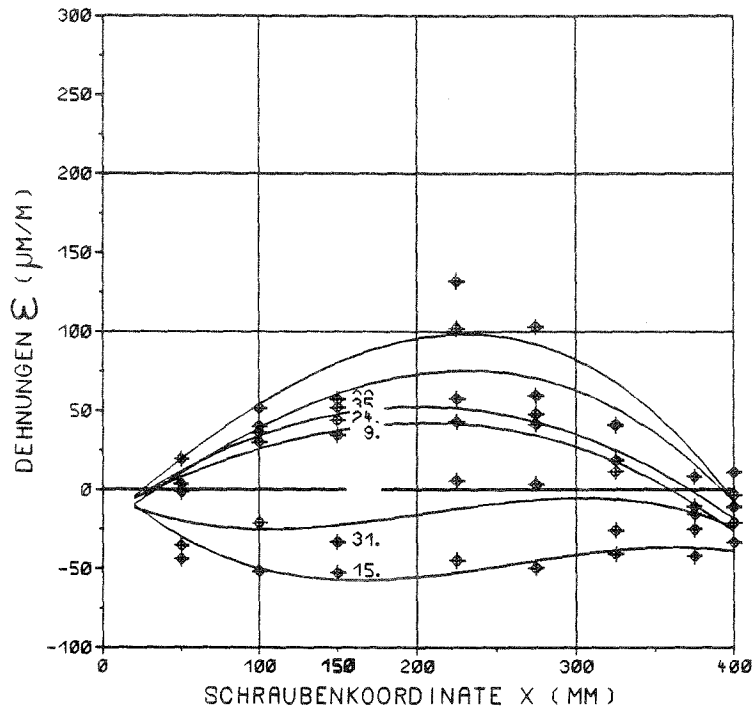
Körper PS2004 unter Normalklima DIN 50 014 -- 20/65-1

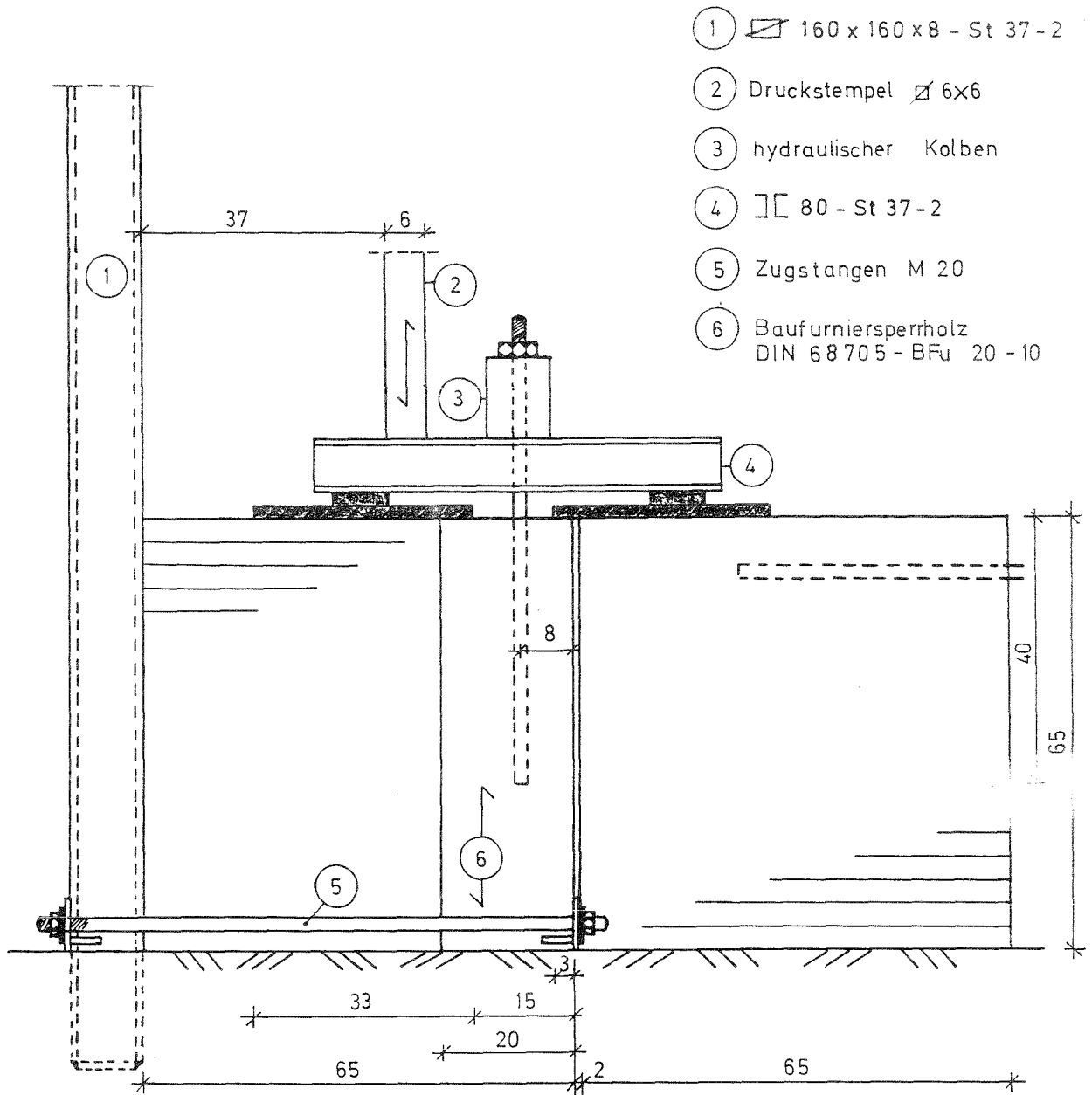




NR. DES
MESSVERTES

Körper SS2004 unter Normalklima DIN 50 014 -- 20/65-1





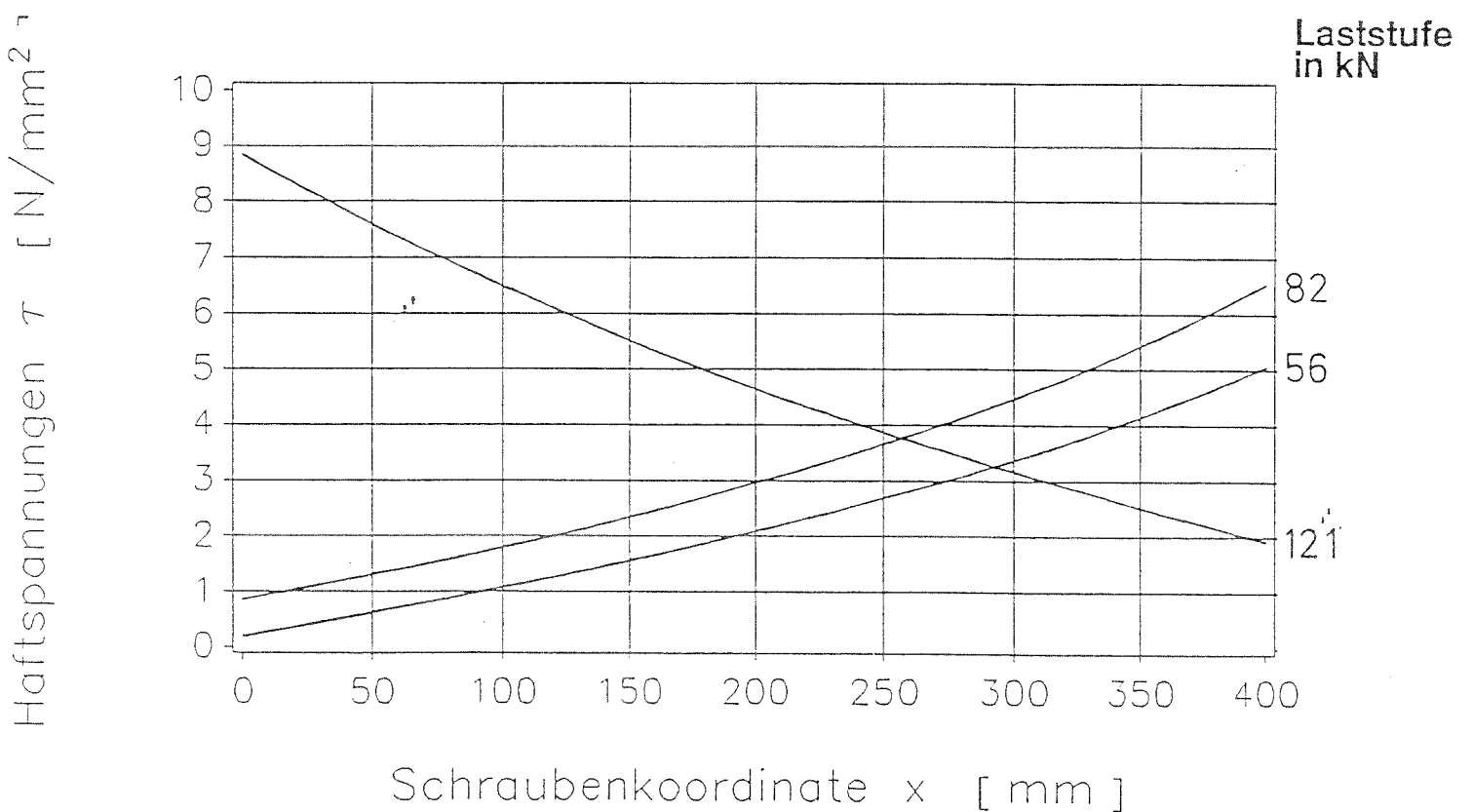
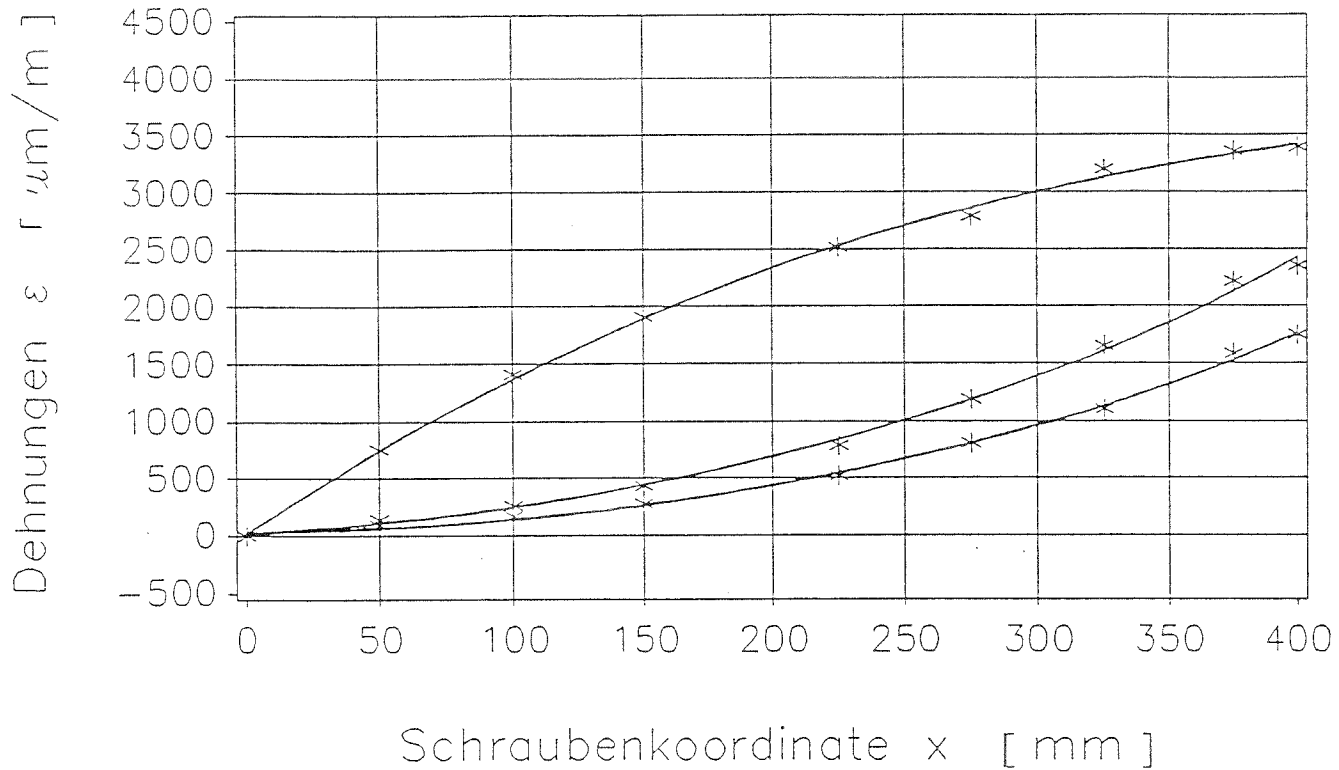
- ① \square 160 x 160 x 8 - St 37-2
- ② Druckstempel \varnothing 6x6
- ③ hydraulischer Kolben
- ④ \square 80 - St 37-2
- ⑤ Zugstangen M 20
- ⑥ Baufurniersperrholz
DIN 68705 - BFu 20 - 10

Maße in [cm]

Ausziehvorrichtung für die Versuche Reihe I

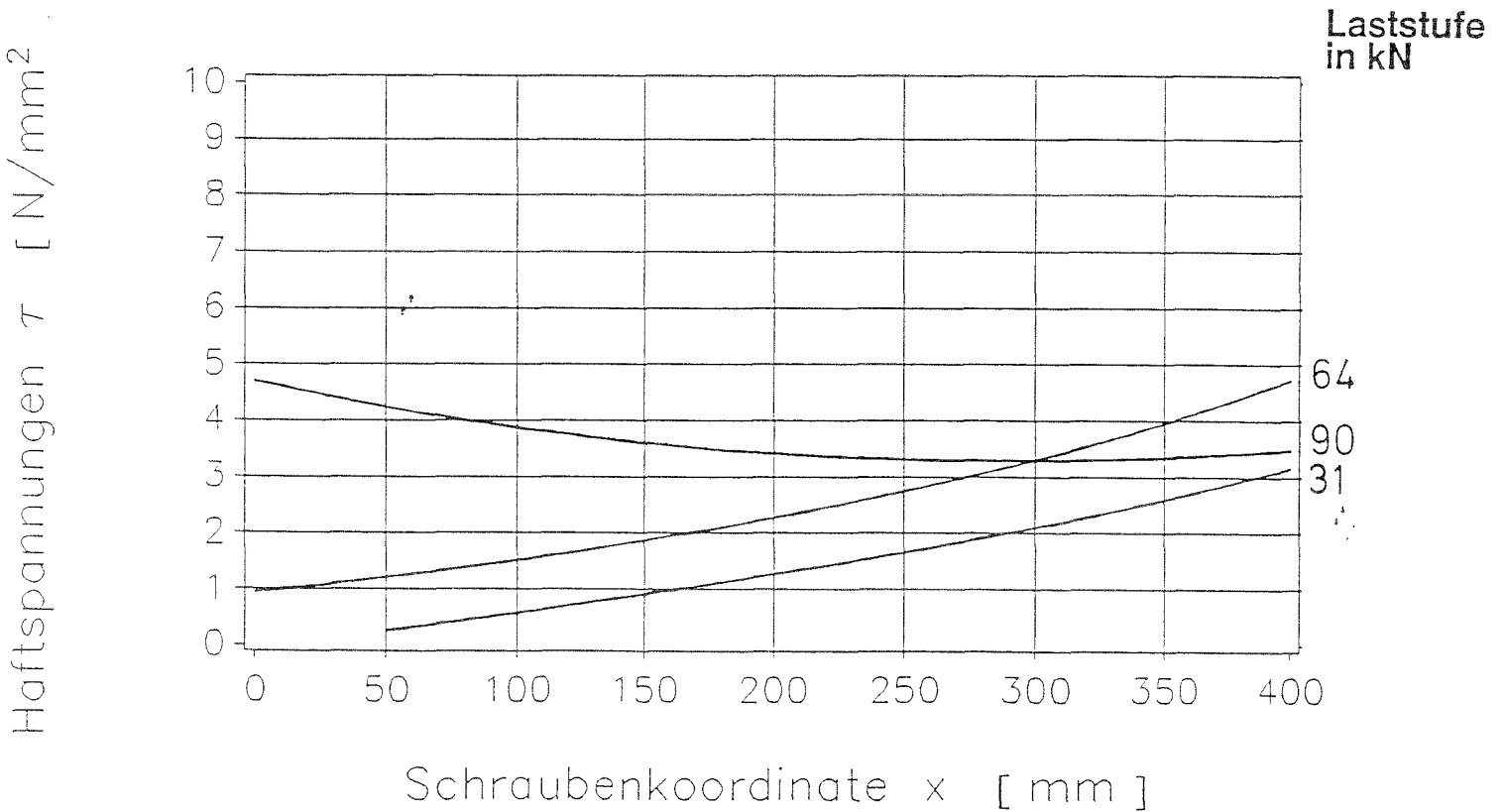
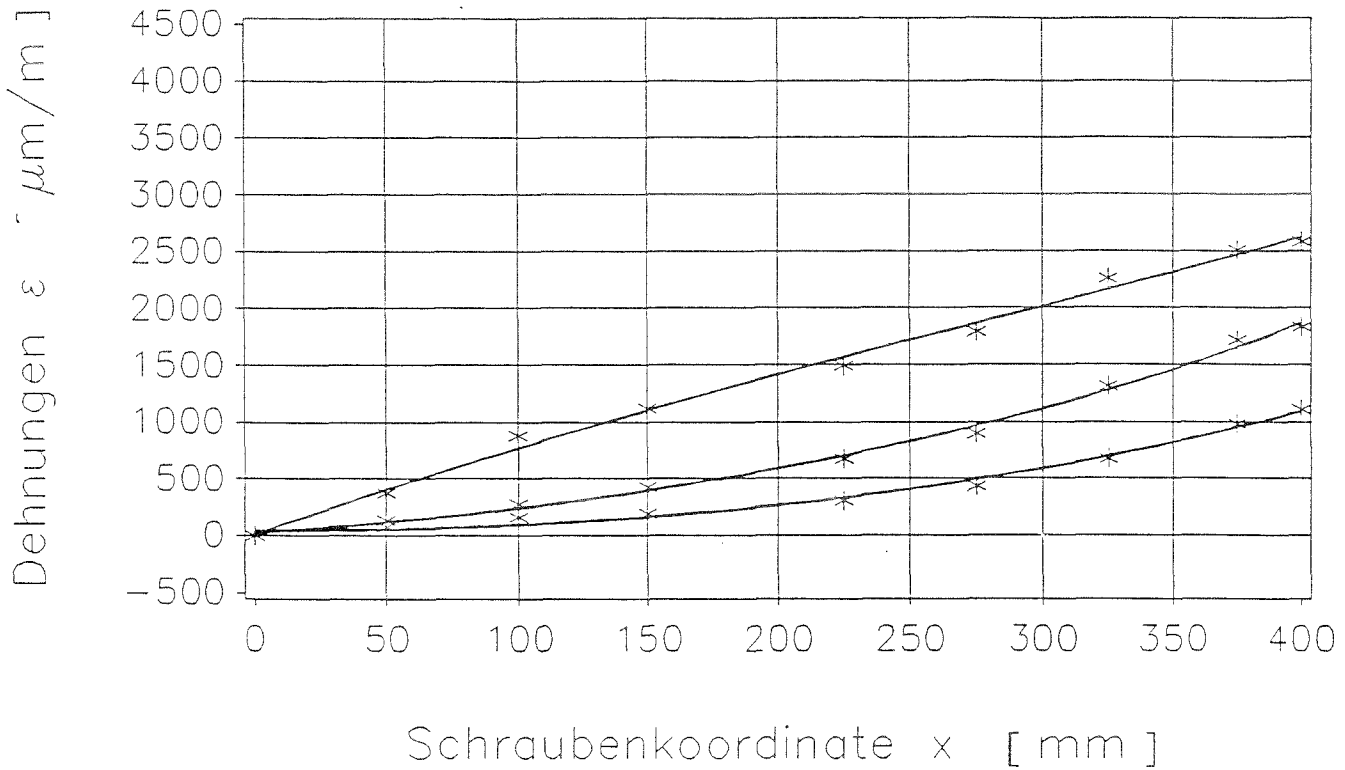
Ausziehversuch Körper PM20R1

Annäherung der Versuchswerte
durch eine hyperbolische Funktion



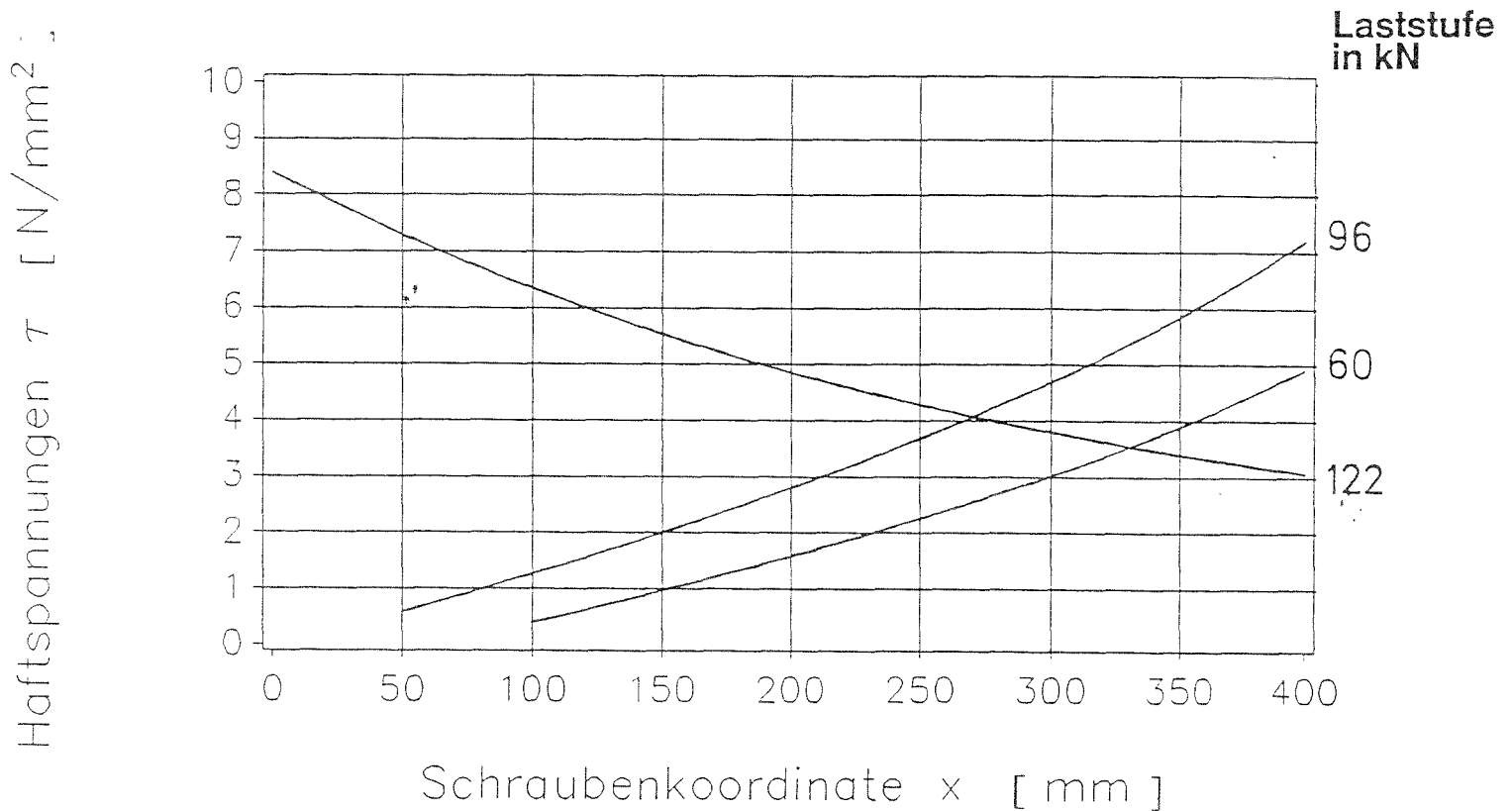
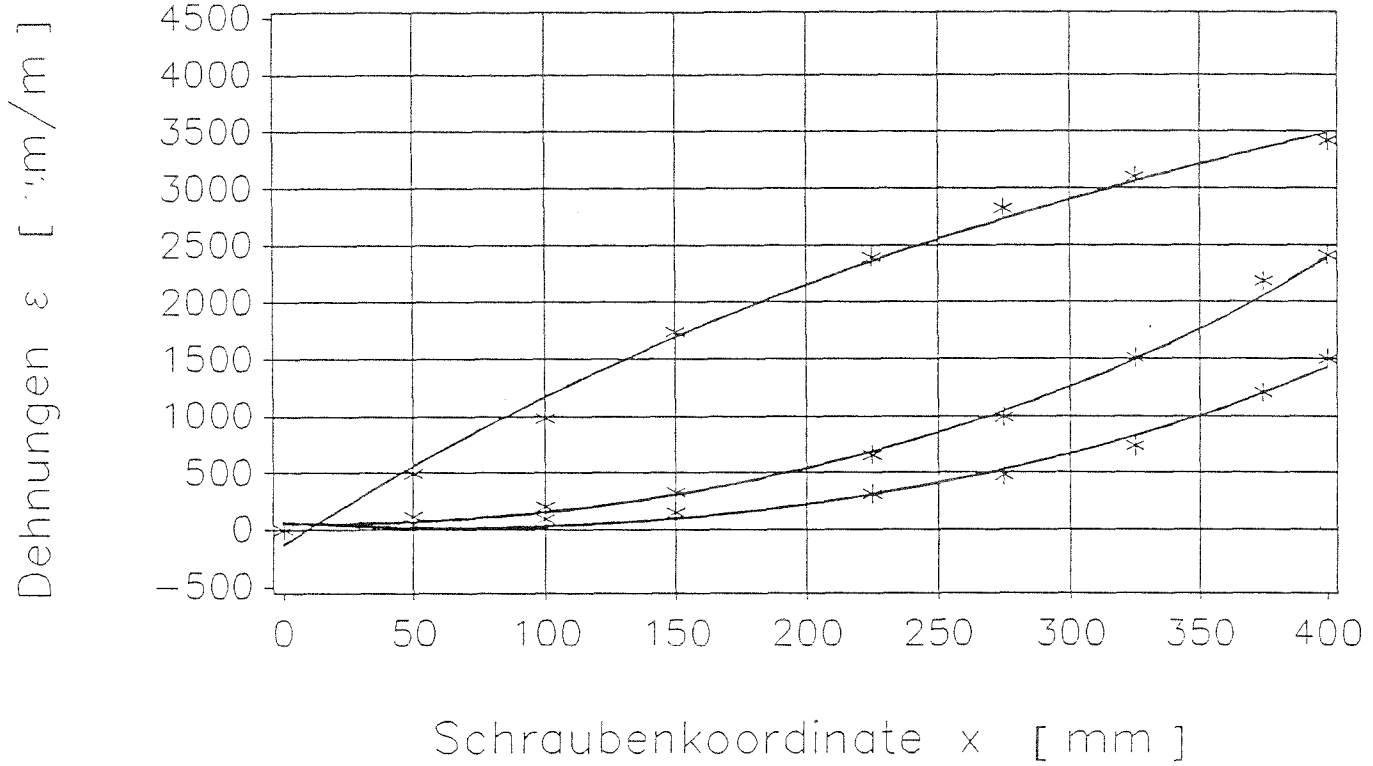
Ausziehversuch Körper SM20R1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



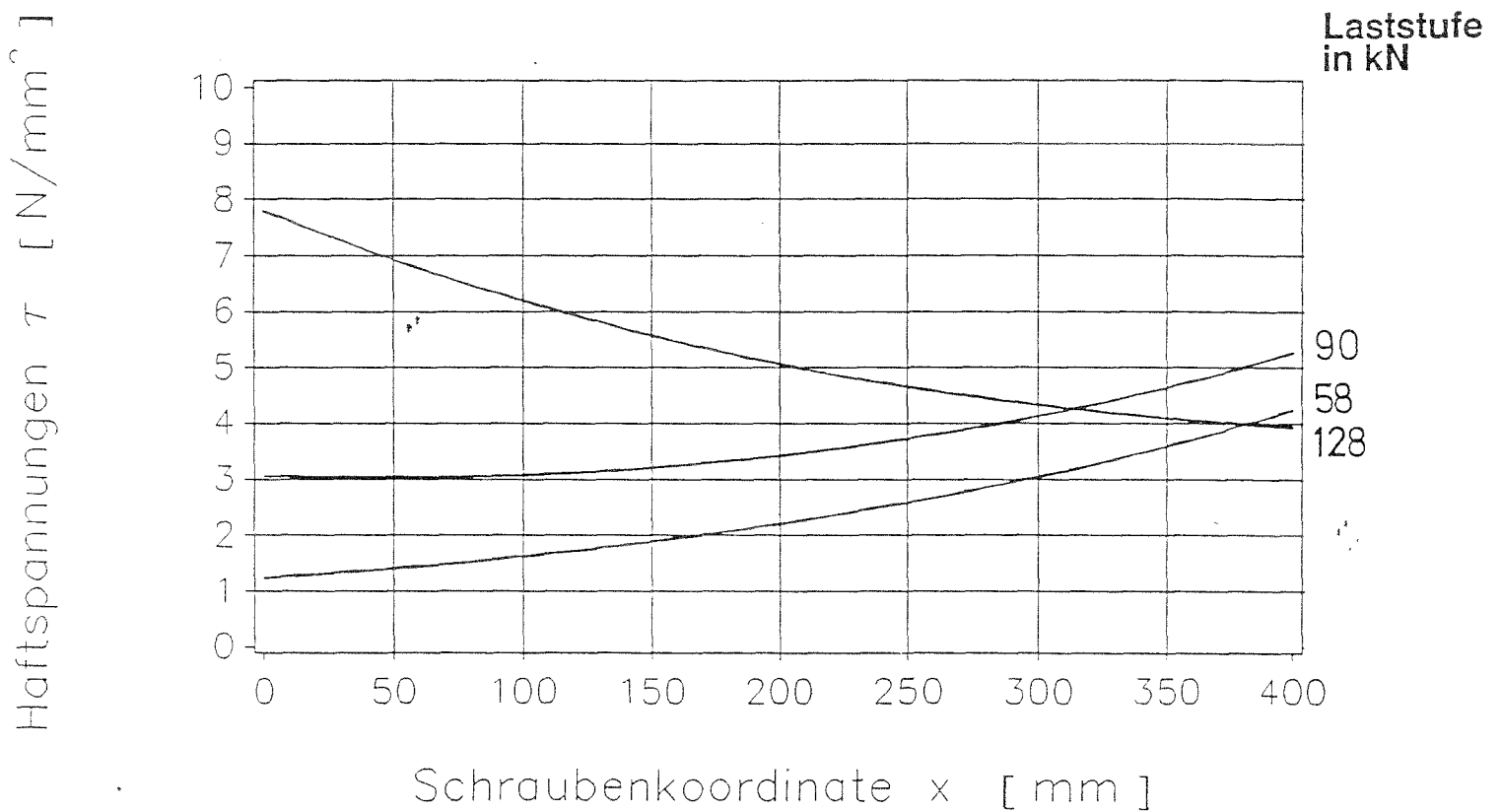
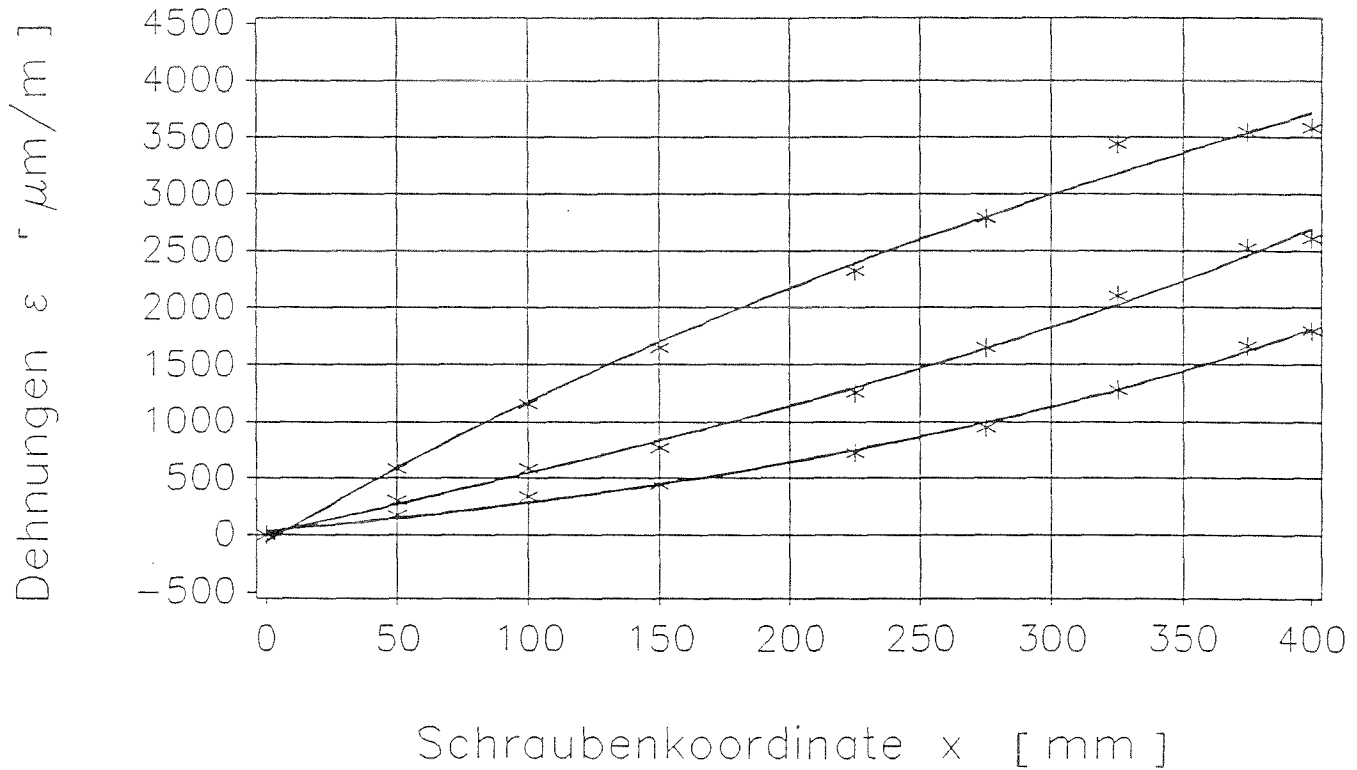
Ausziehversuch Körper PM20P1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



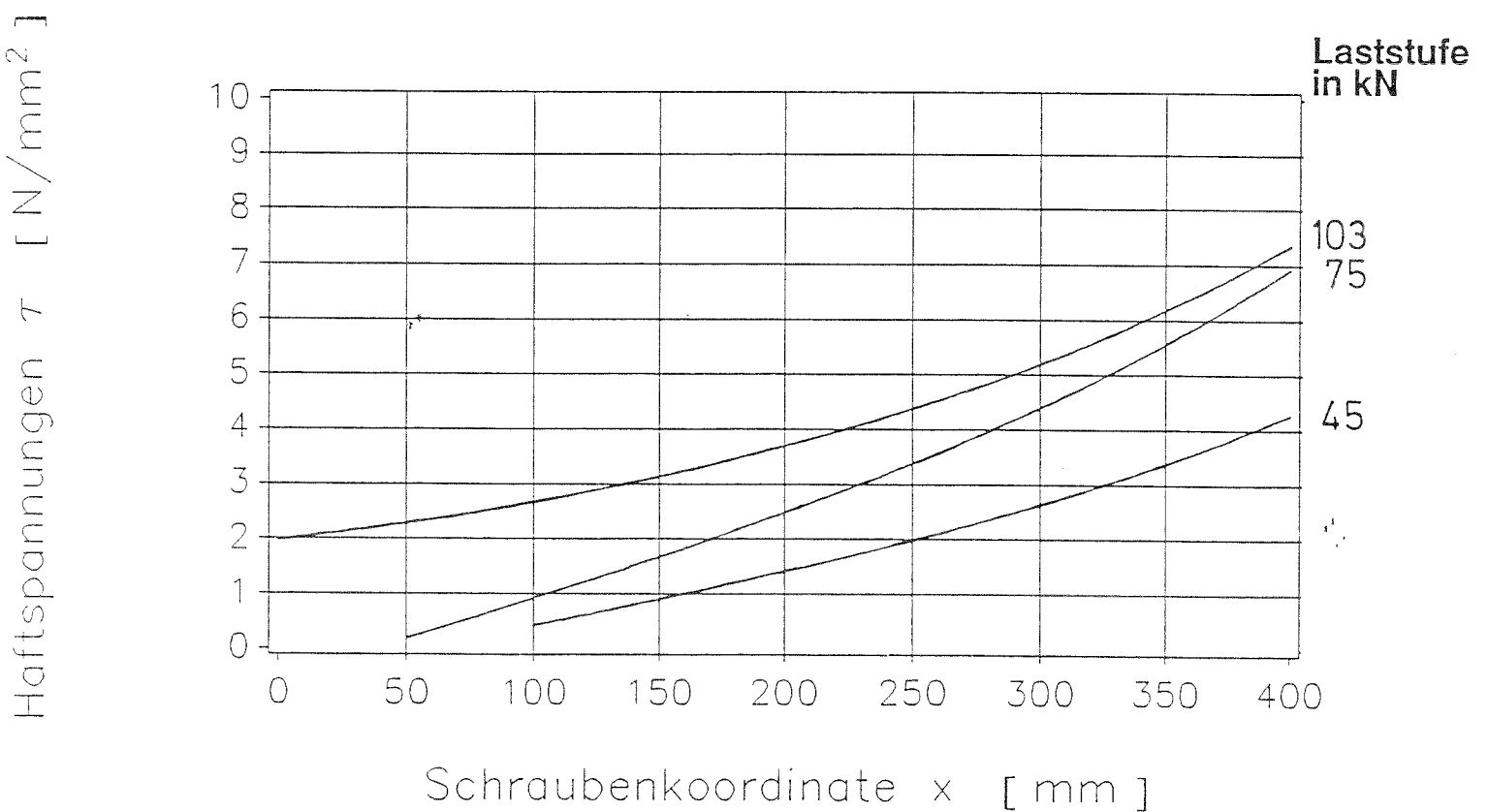
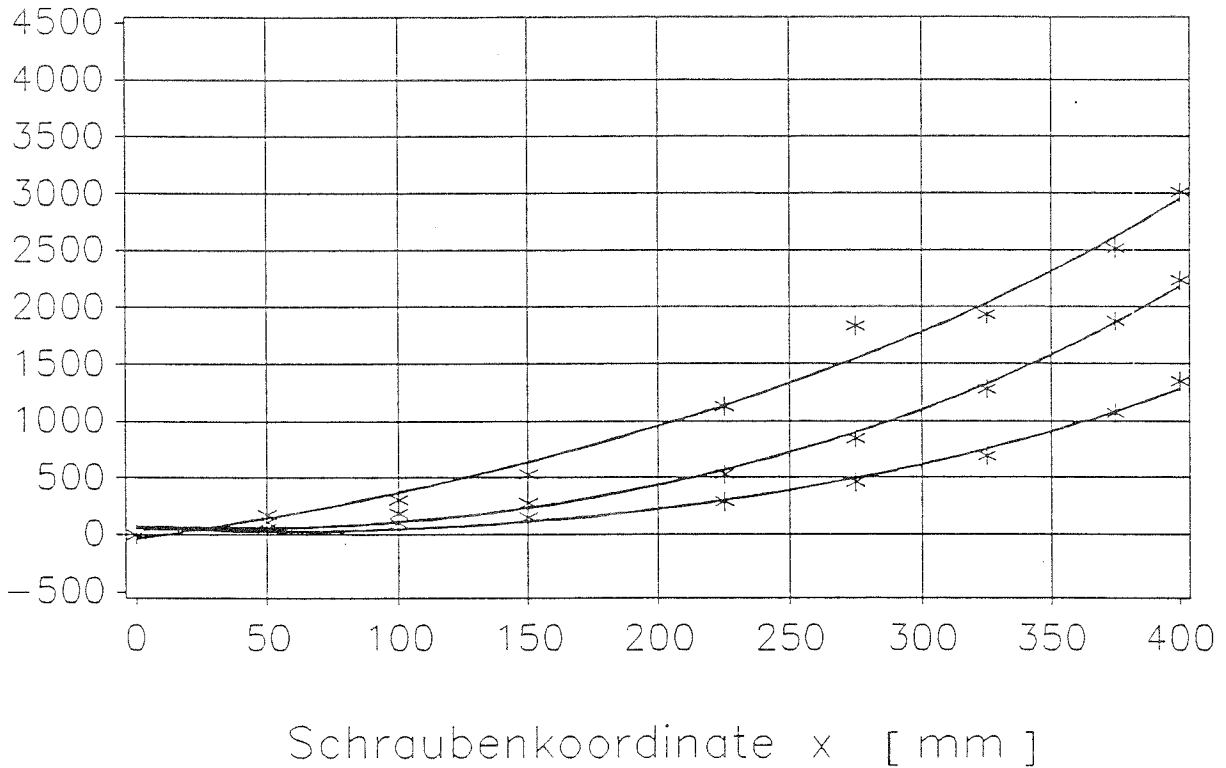
Ausziehversuch Körper SM20P1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



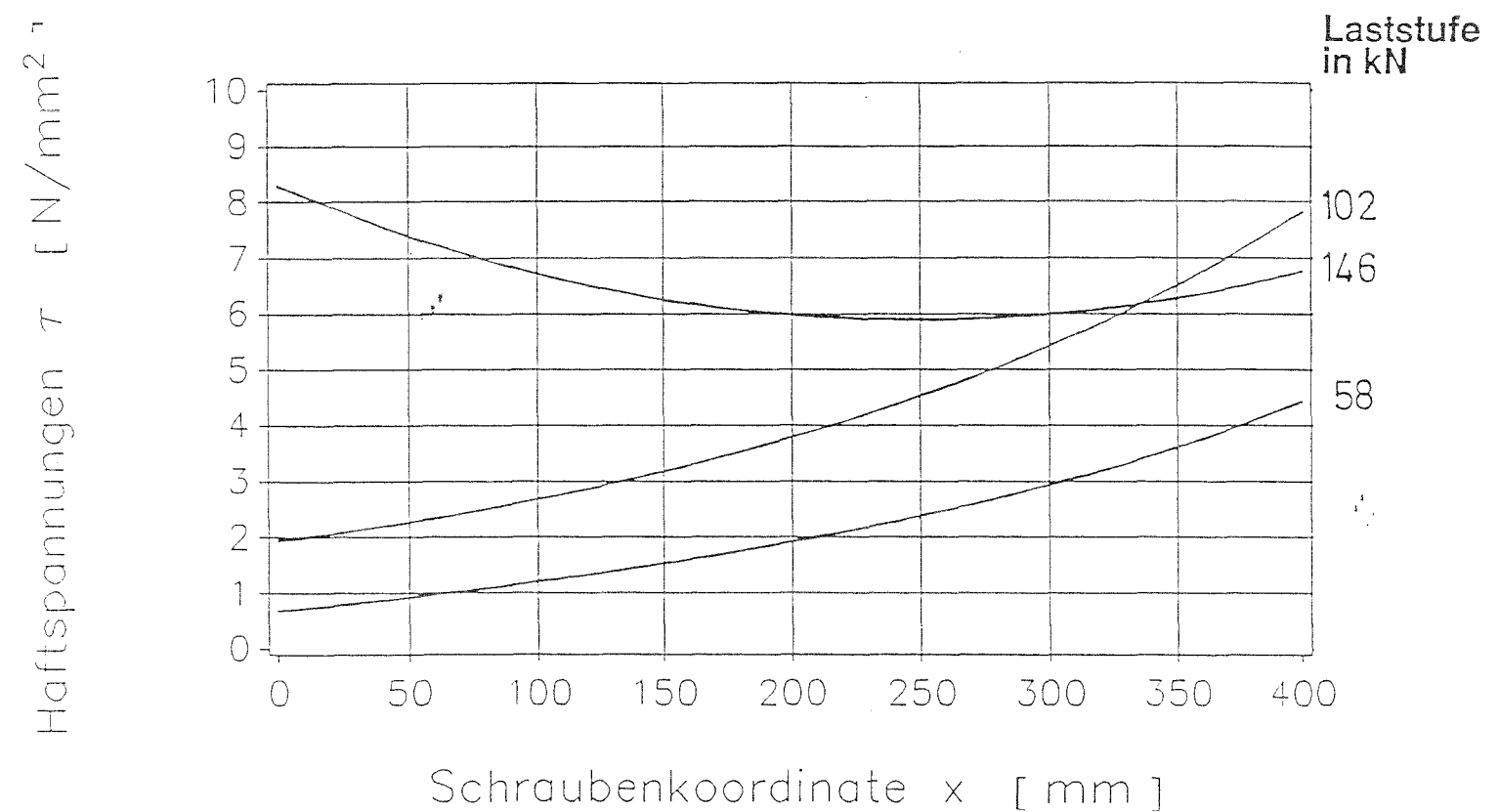
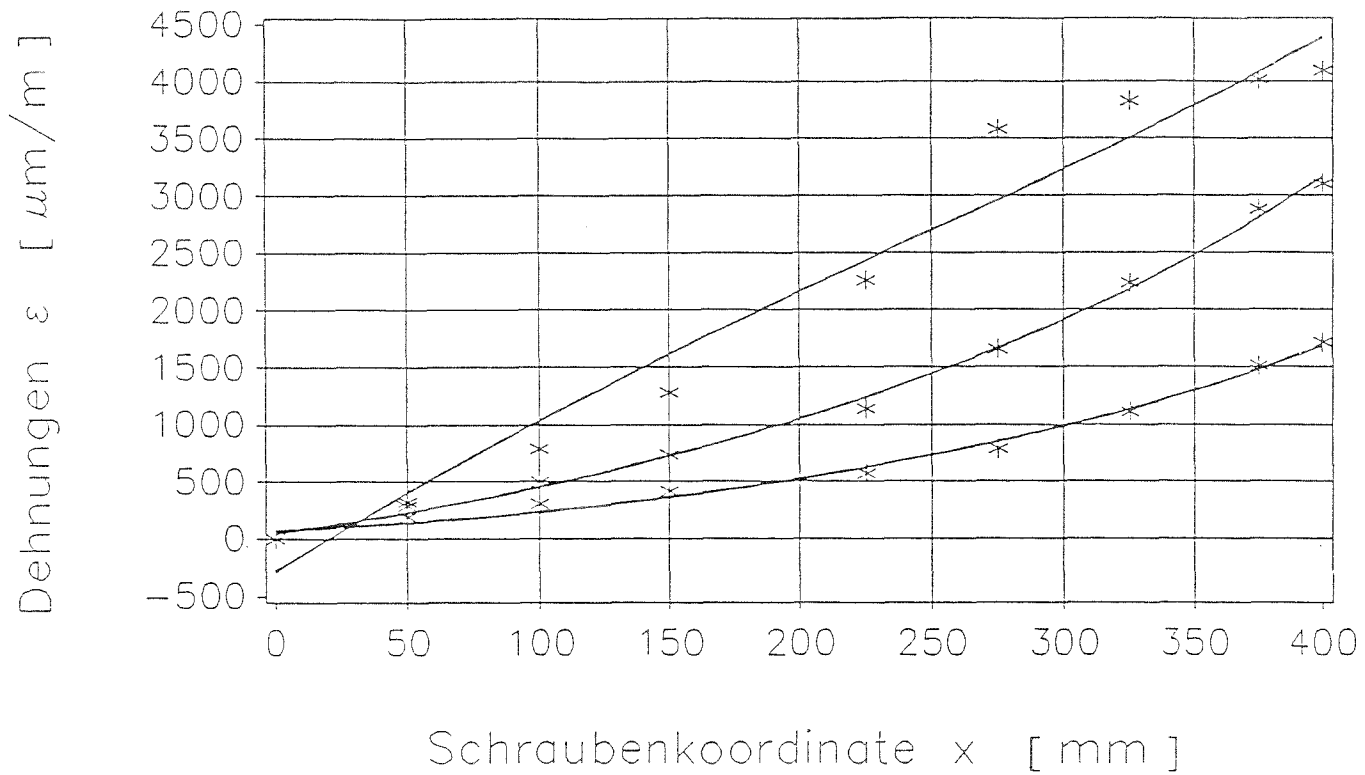
Ausziehversuch Körper PM20W1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



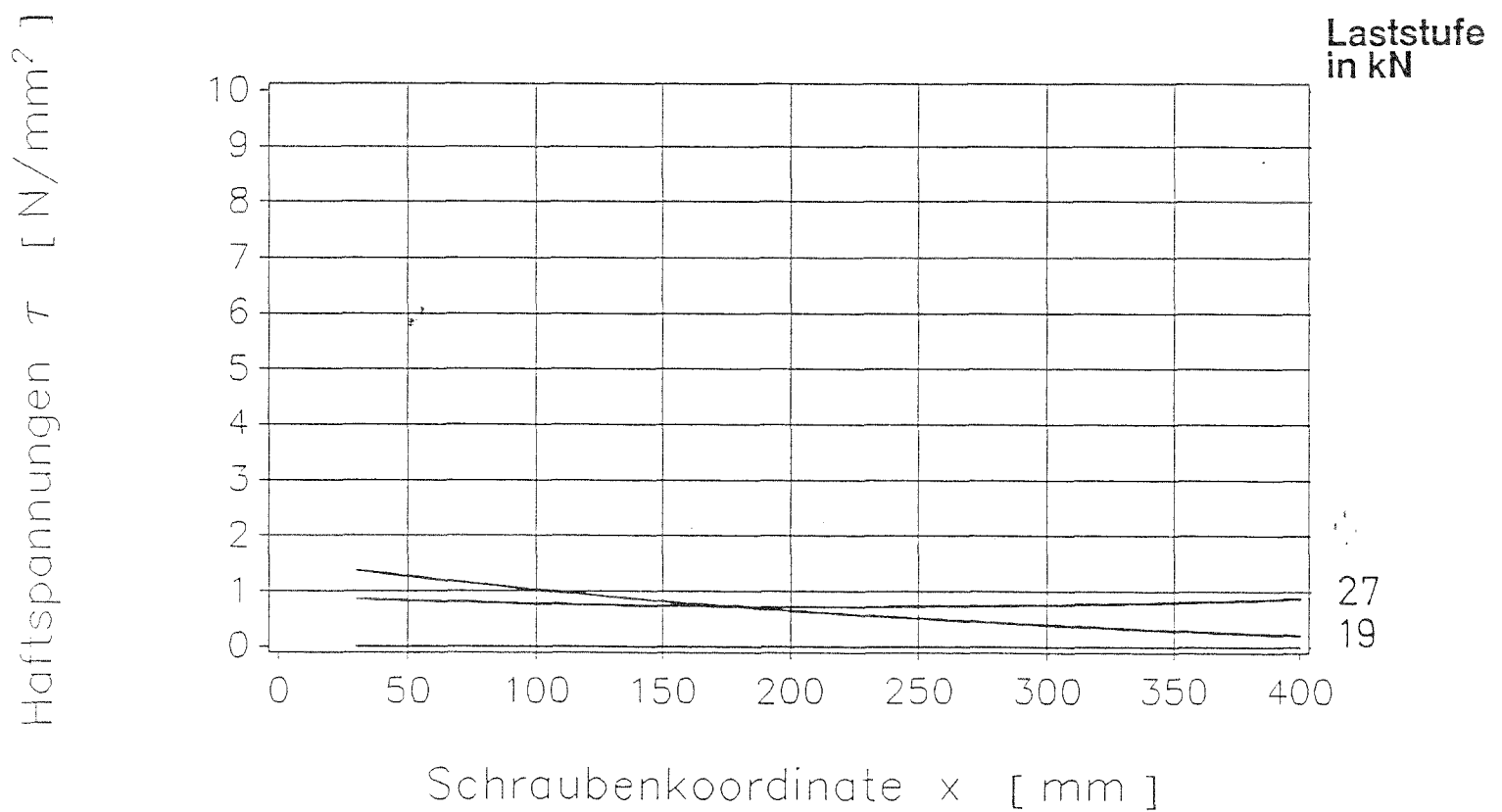
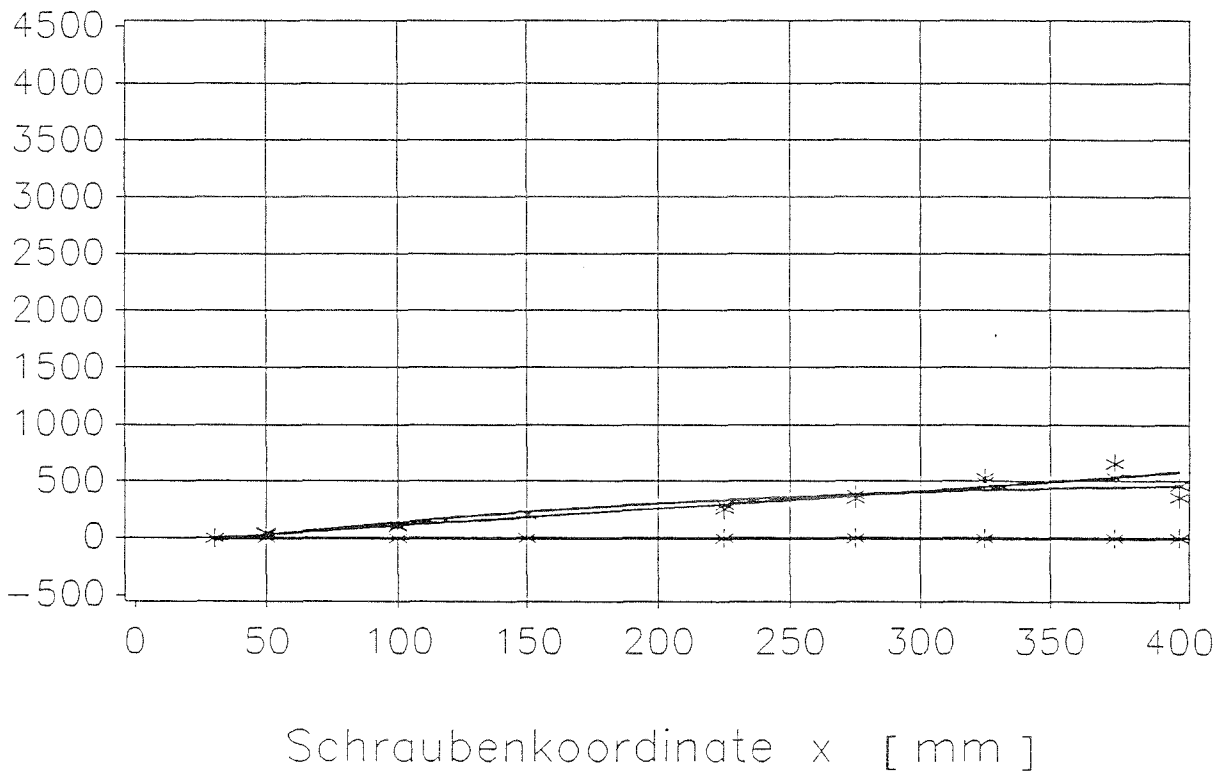
Ausziehversuch Körper SM20W1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



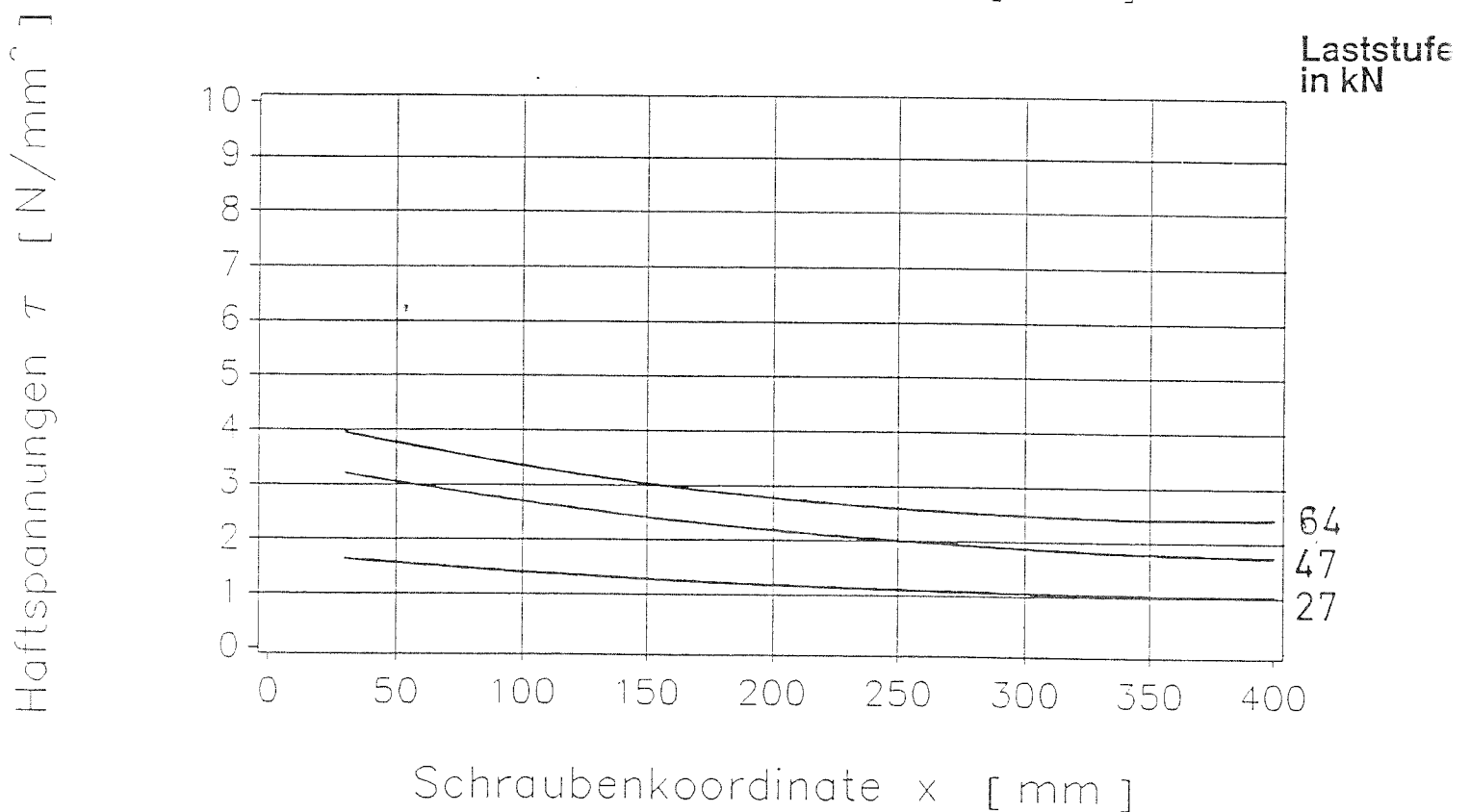
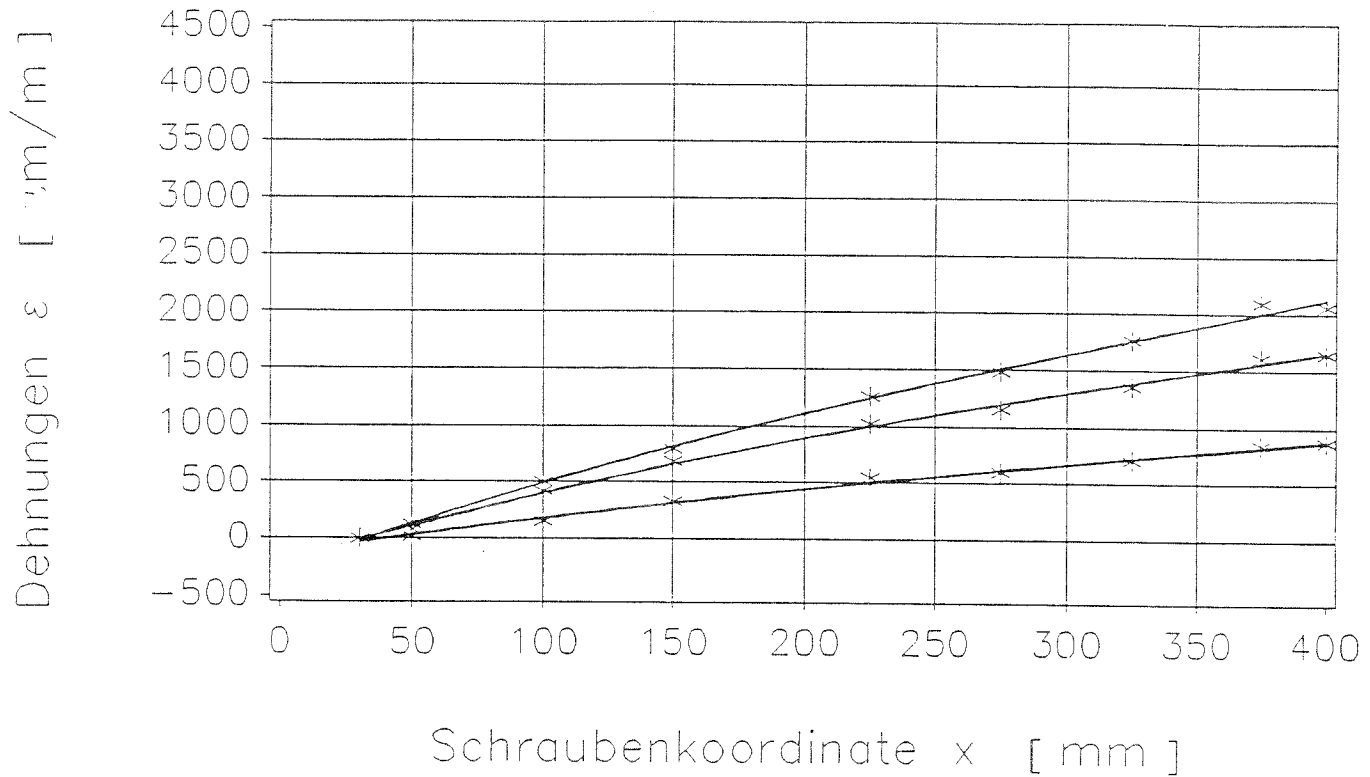
Ausziehversuch Körper PS2001

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



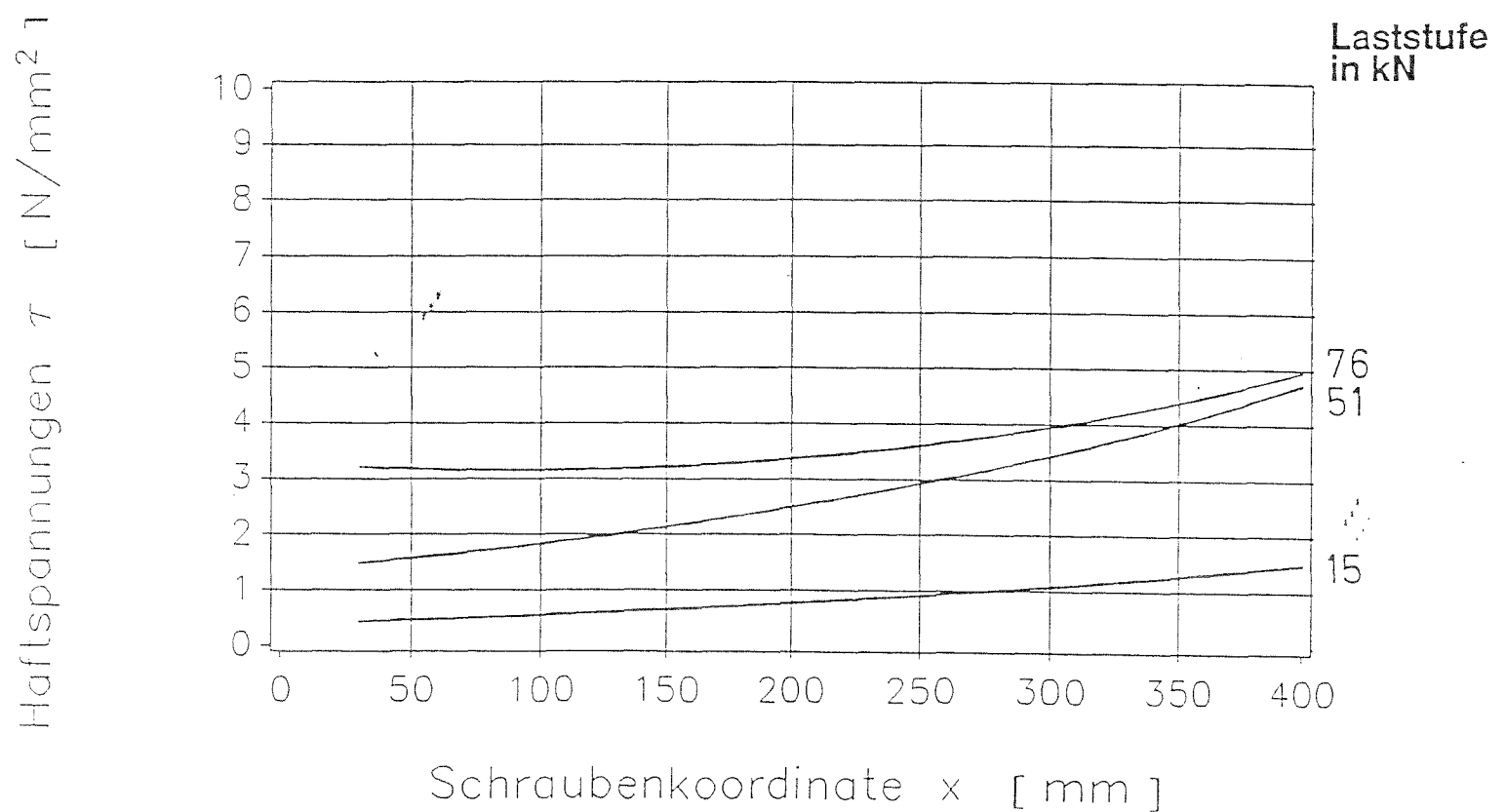
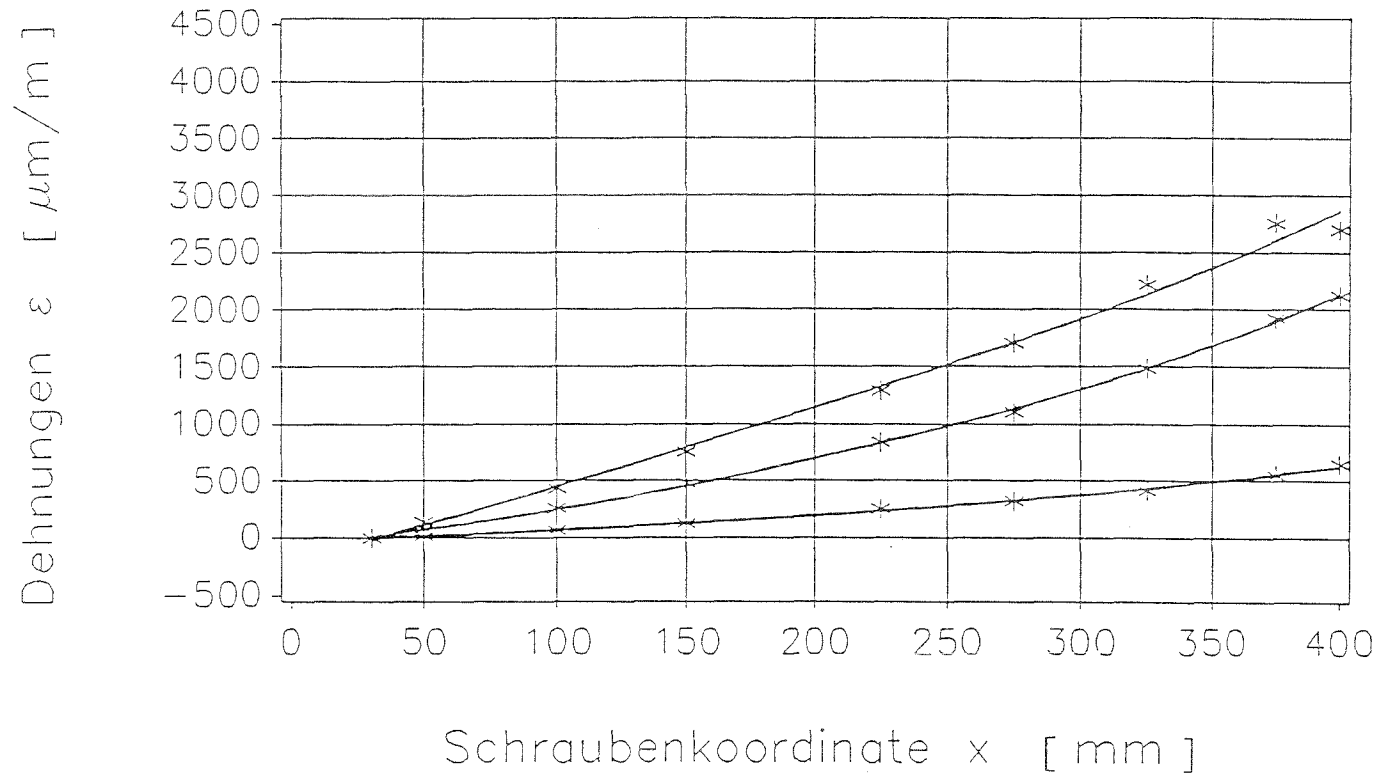
Ausziehversuch Körper SS2001

Annäherung der Versuchswerte
durch eine hyperbolische Funktion



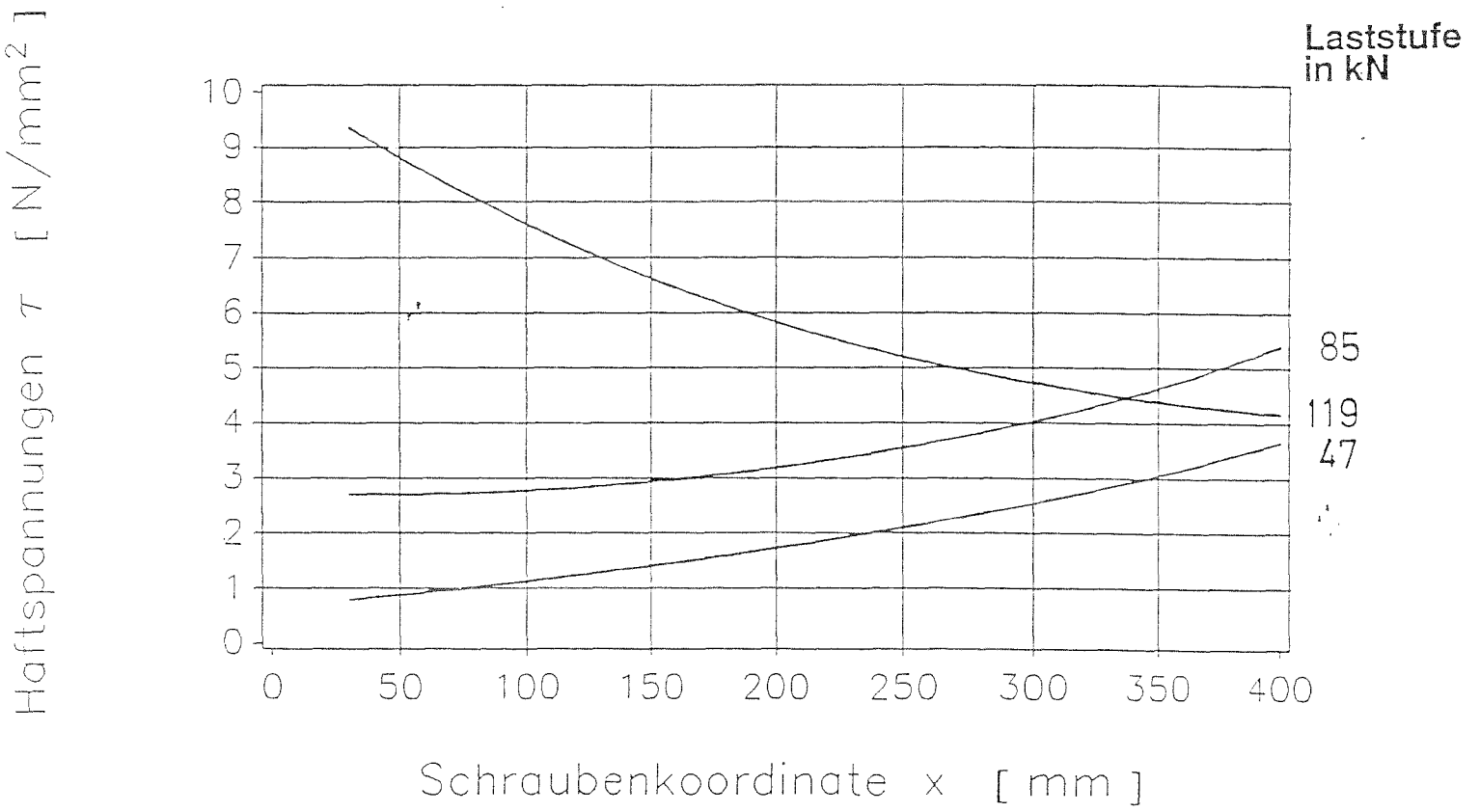
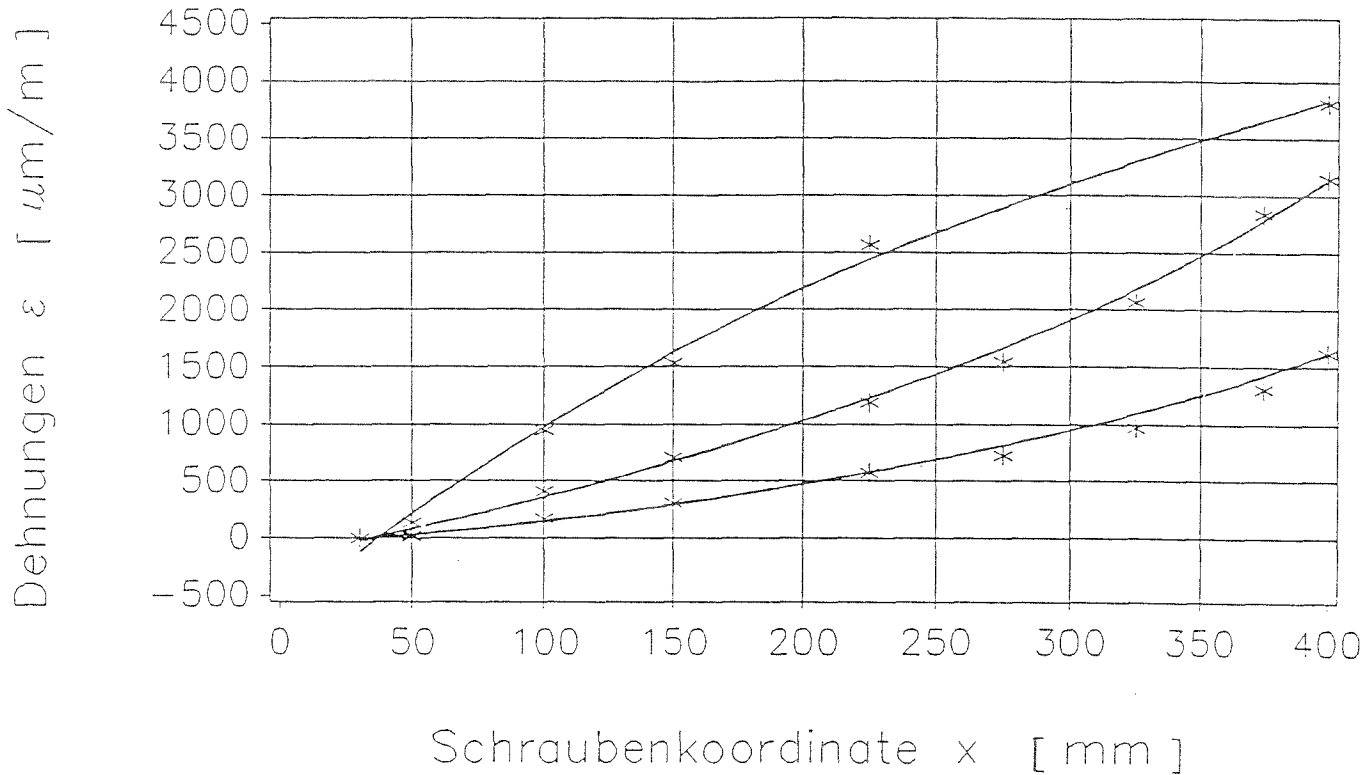
Ausziehversuch Körper PS20R1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



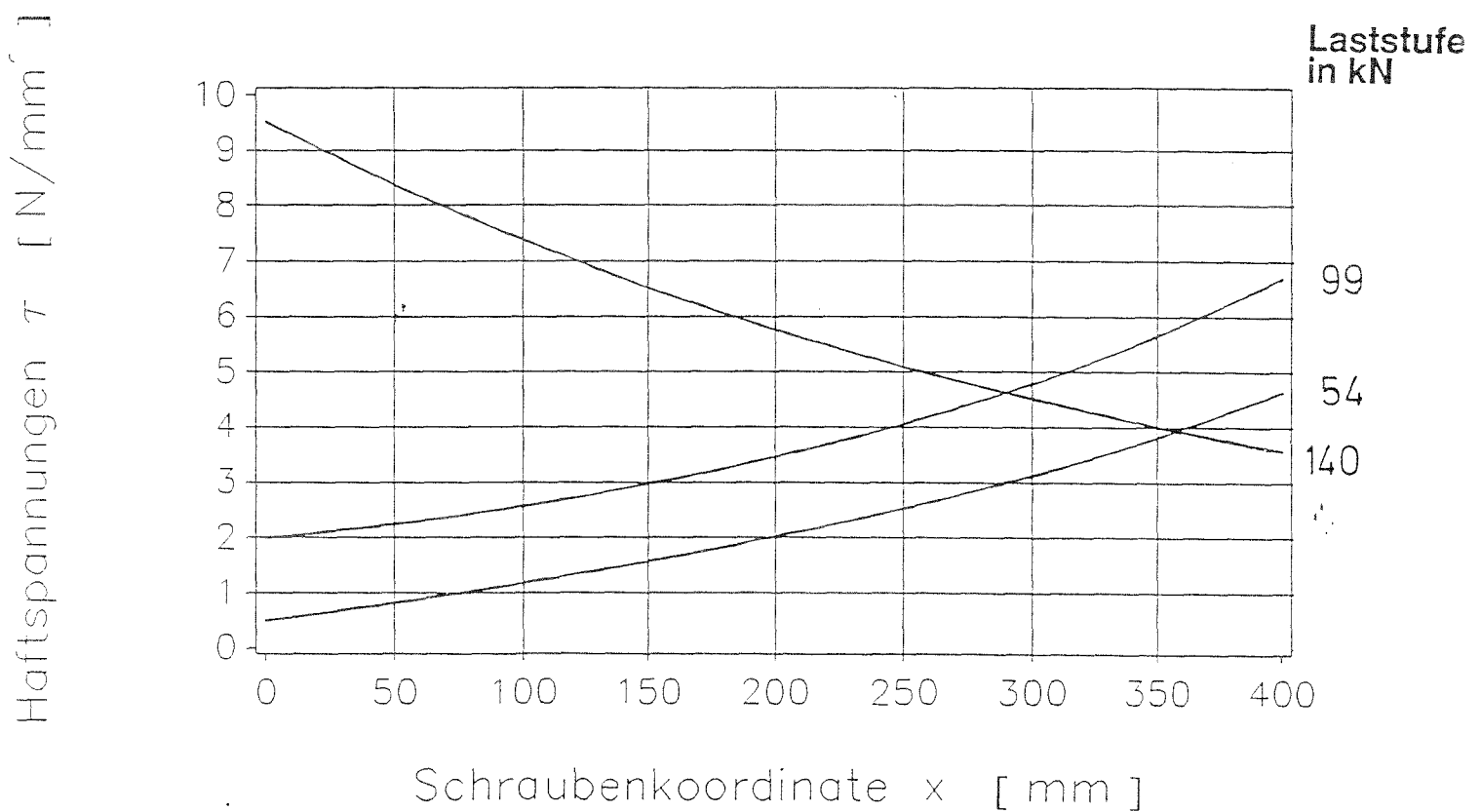
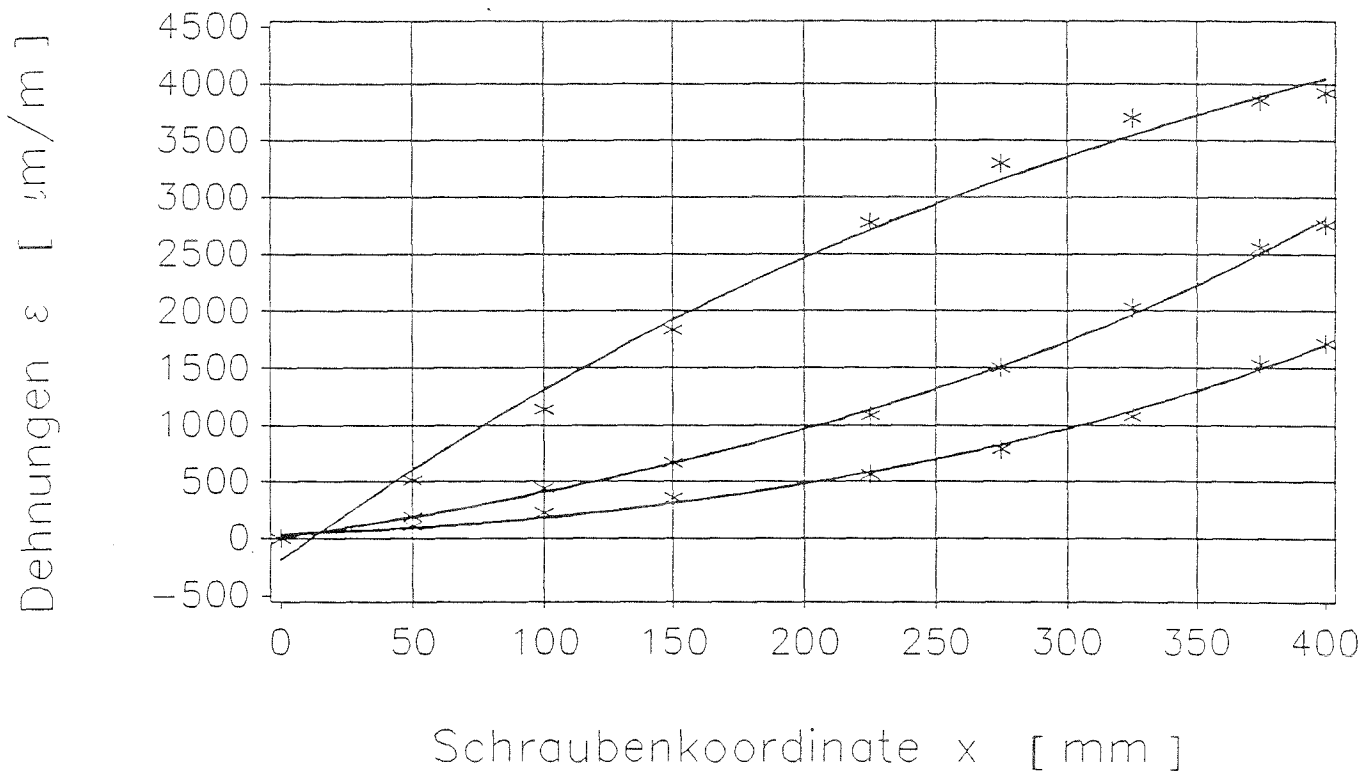
Ausziehversuch Körper SS20R1

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



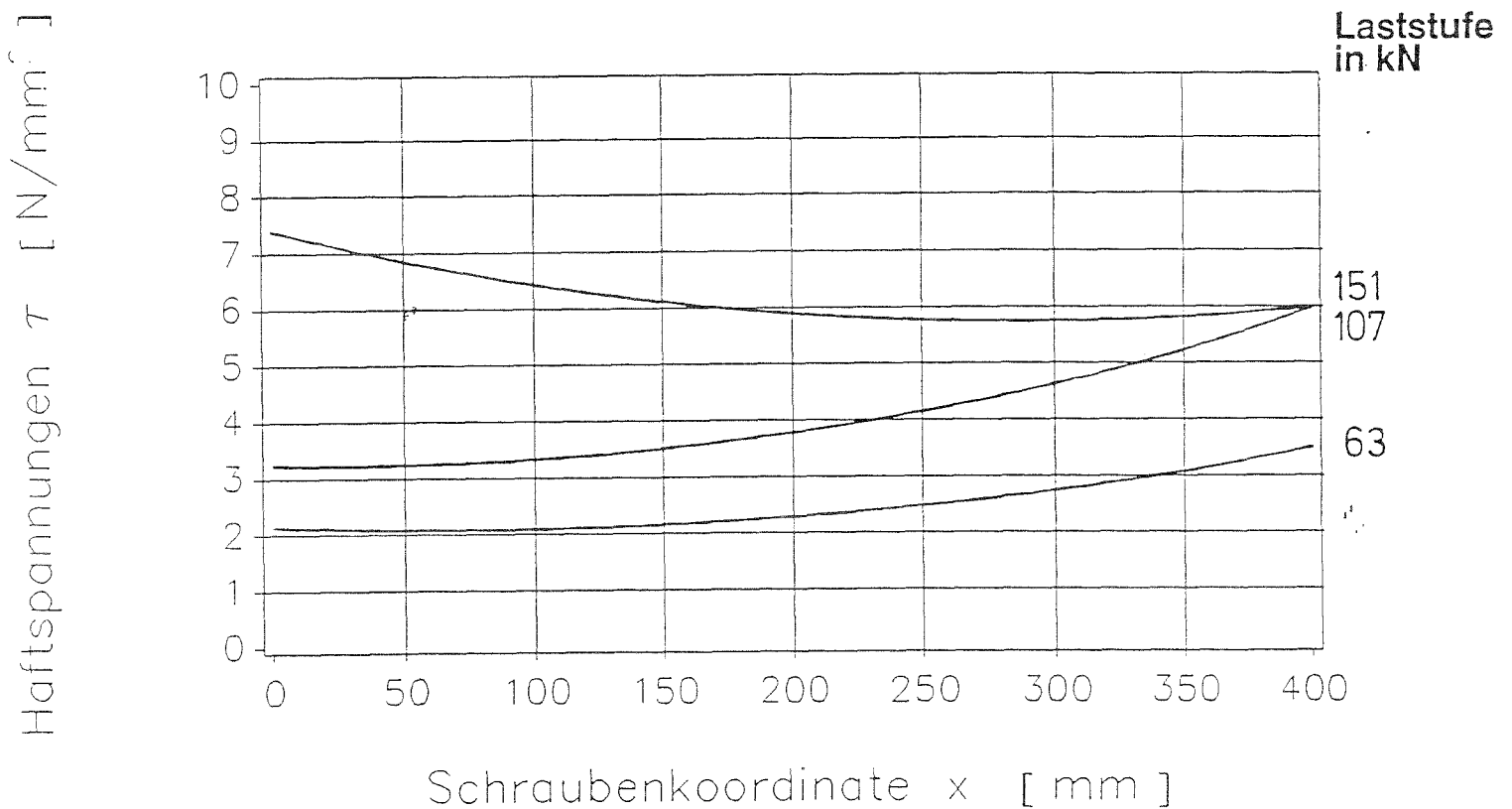
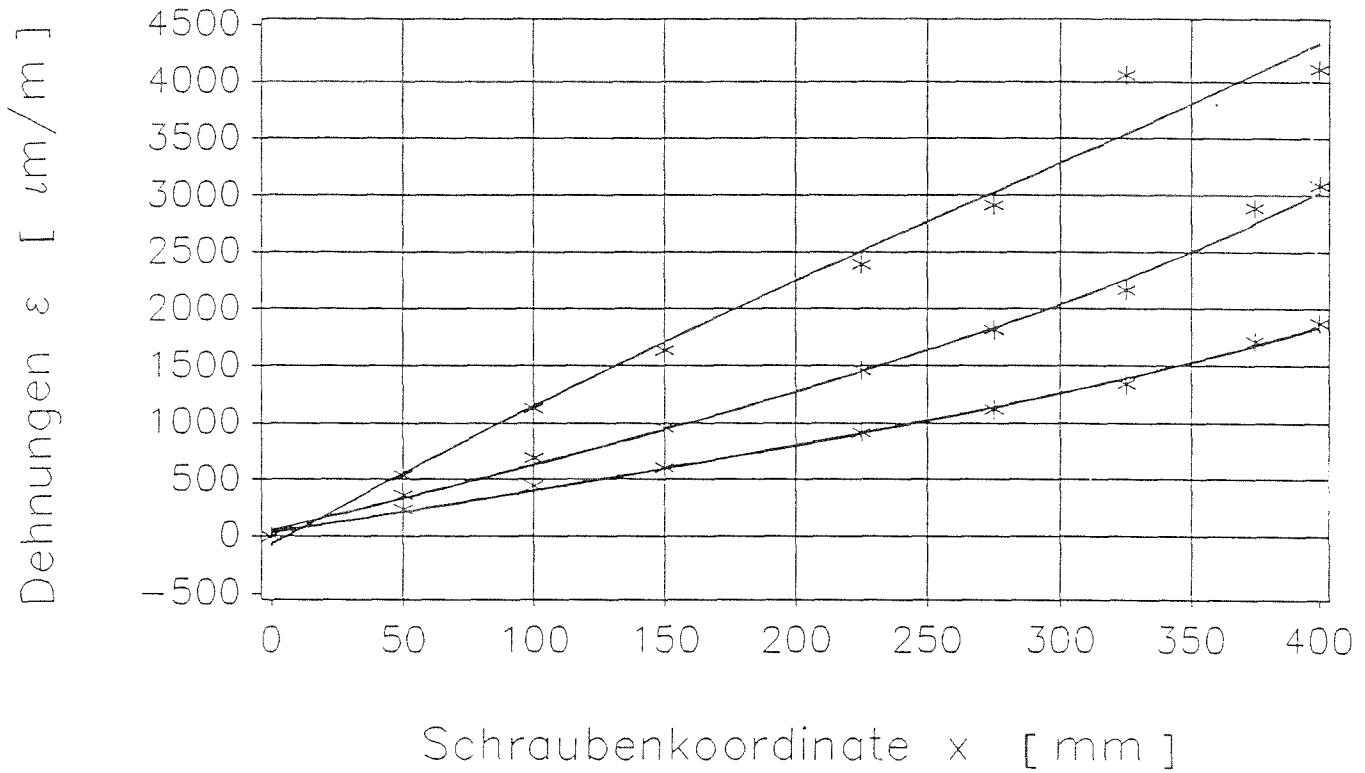
Ausziehversuch Körper PM20R3

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



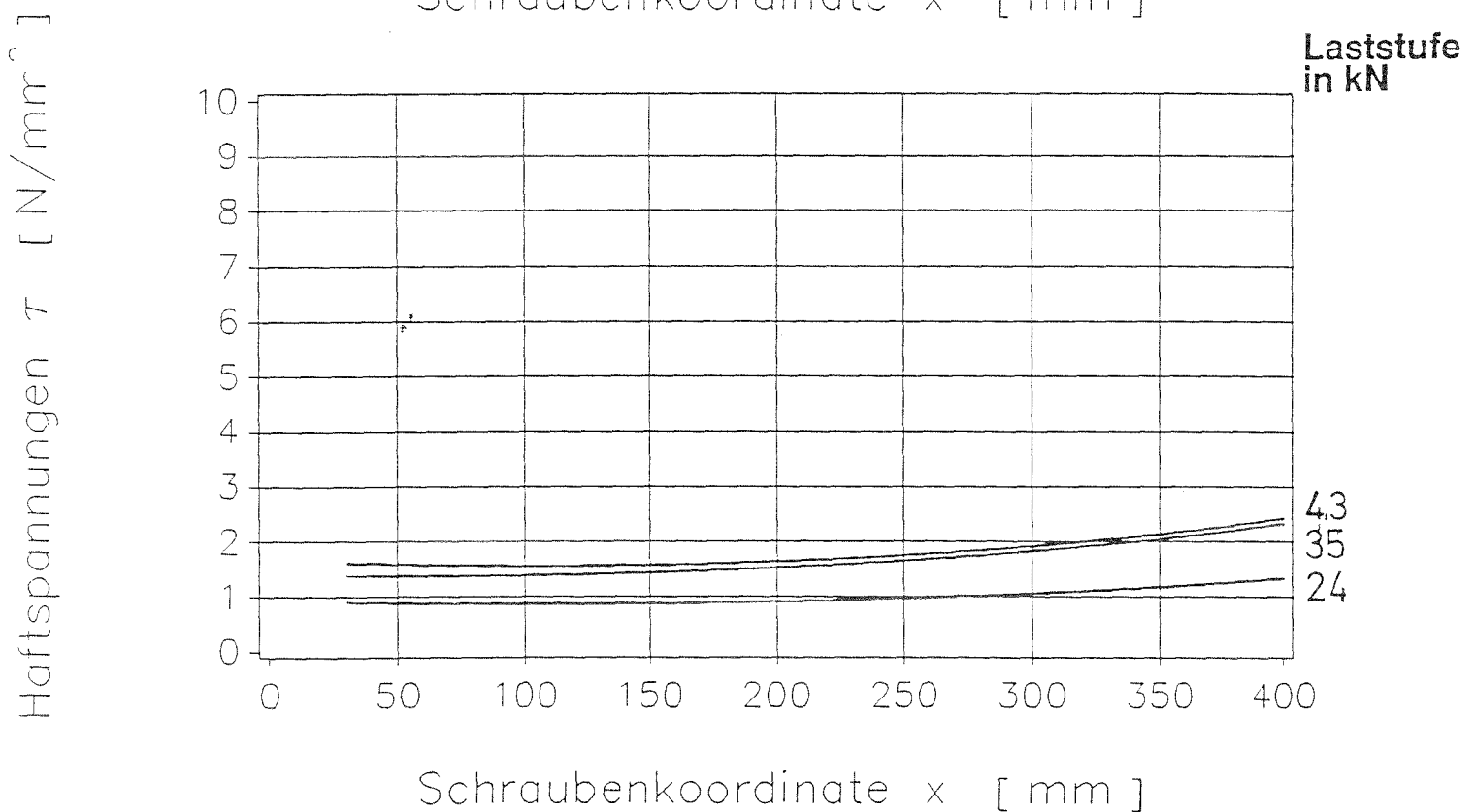
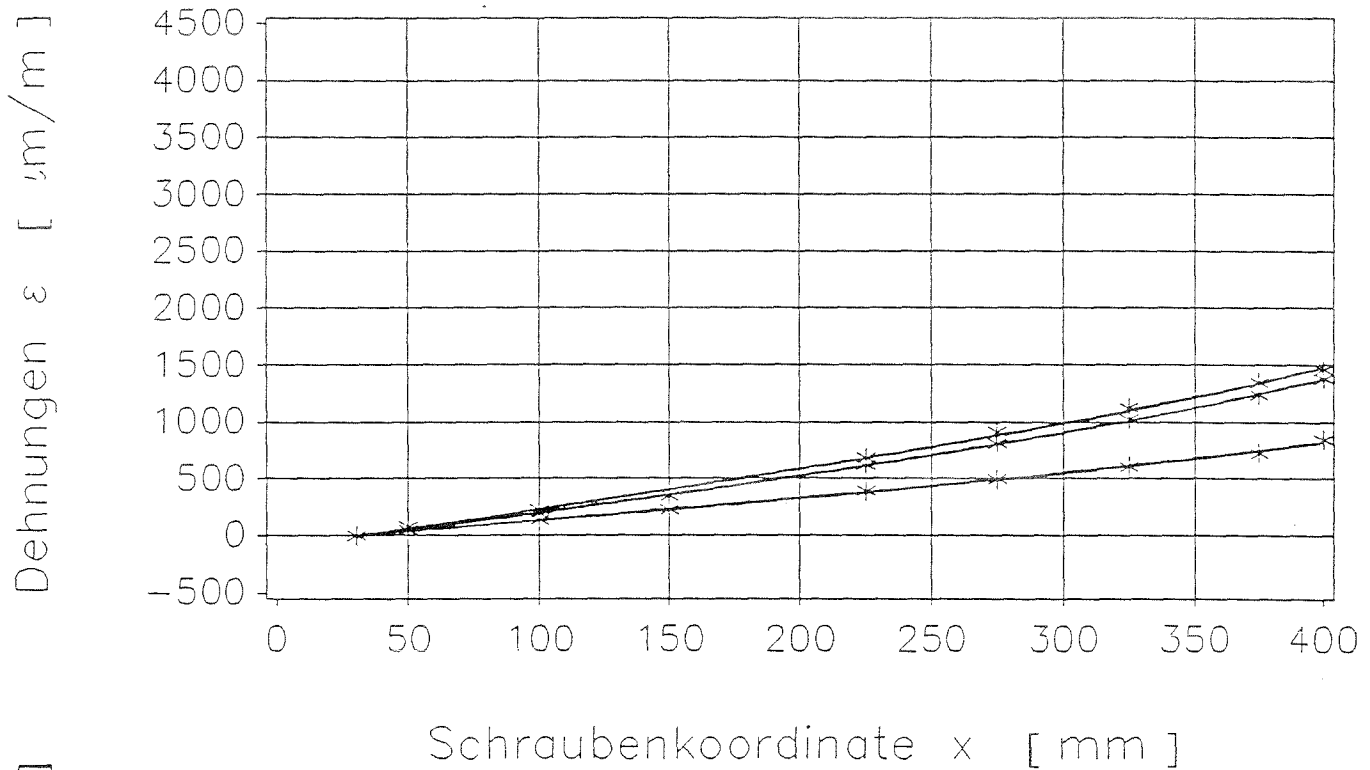
Ausziehversuch Körper SM20R3

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



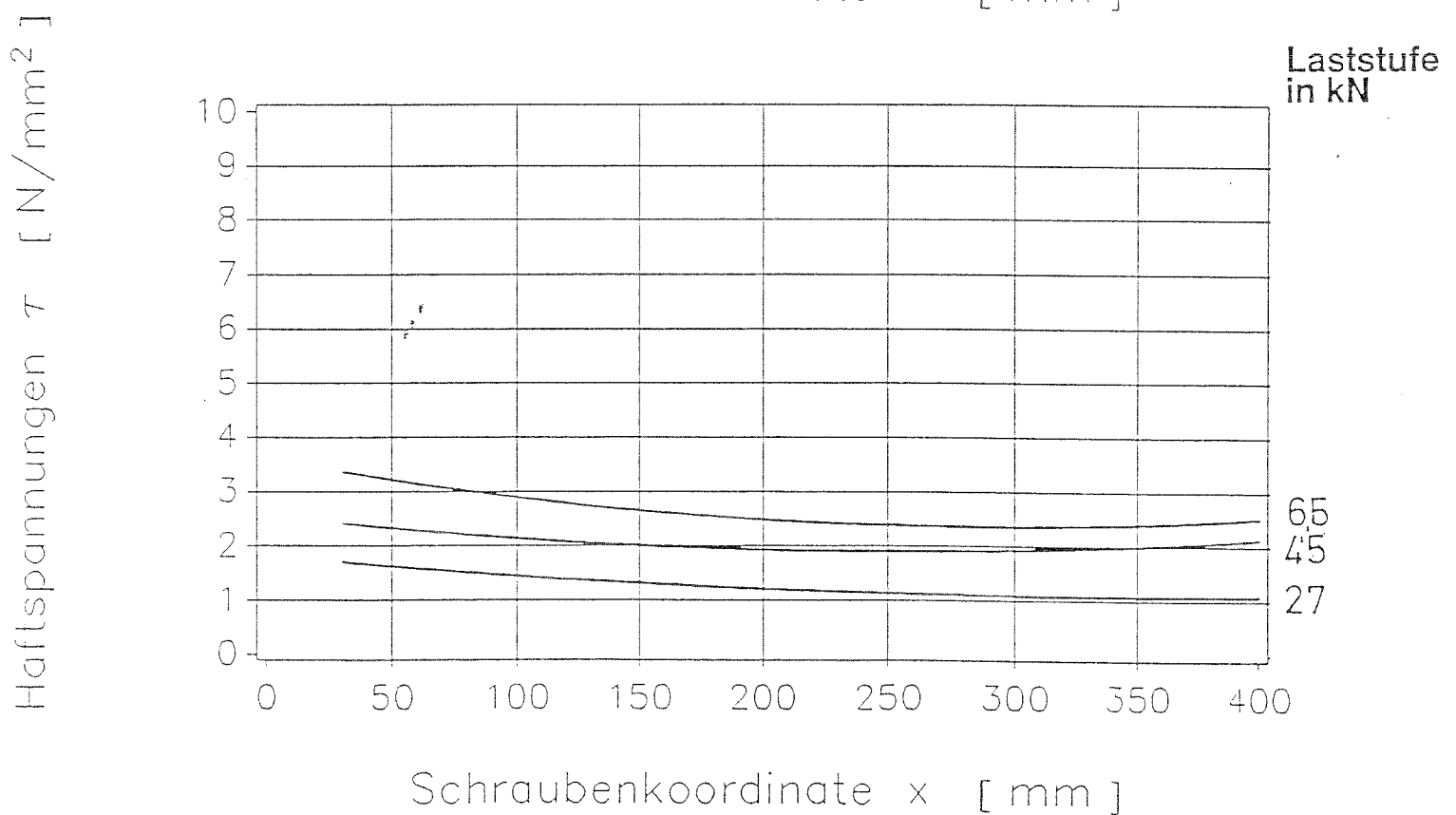
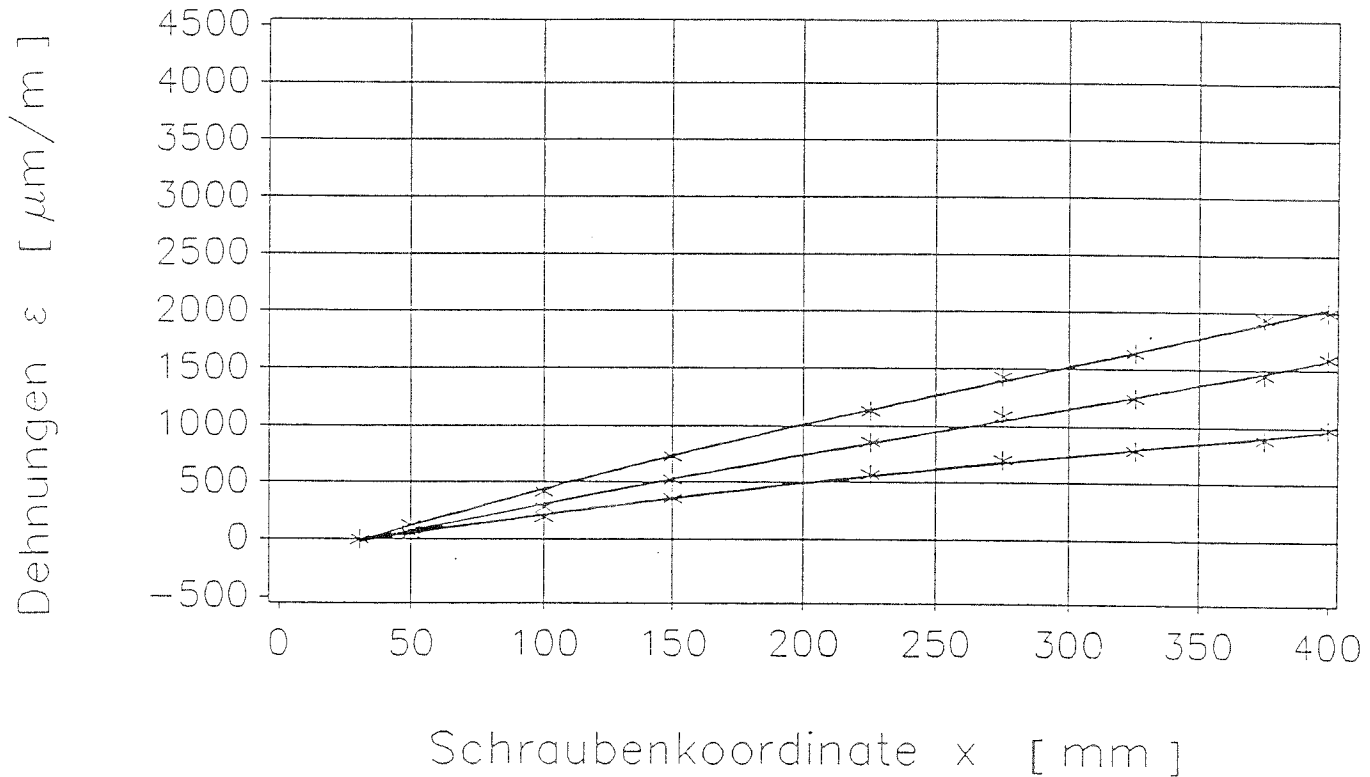
Ausziehversuch Körper PS2003

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



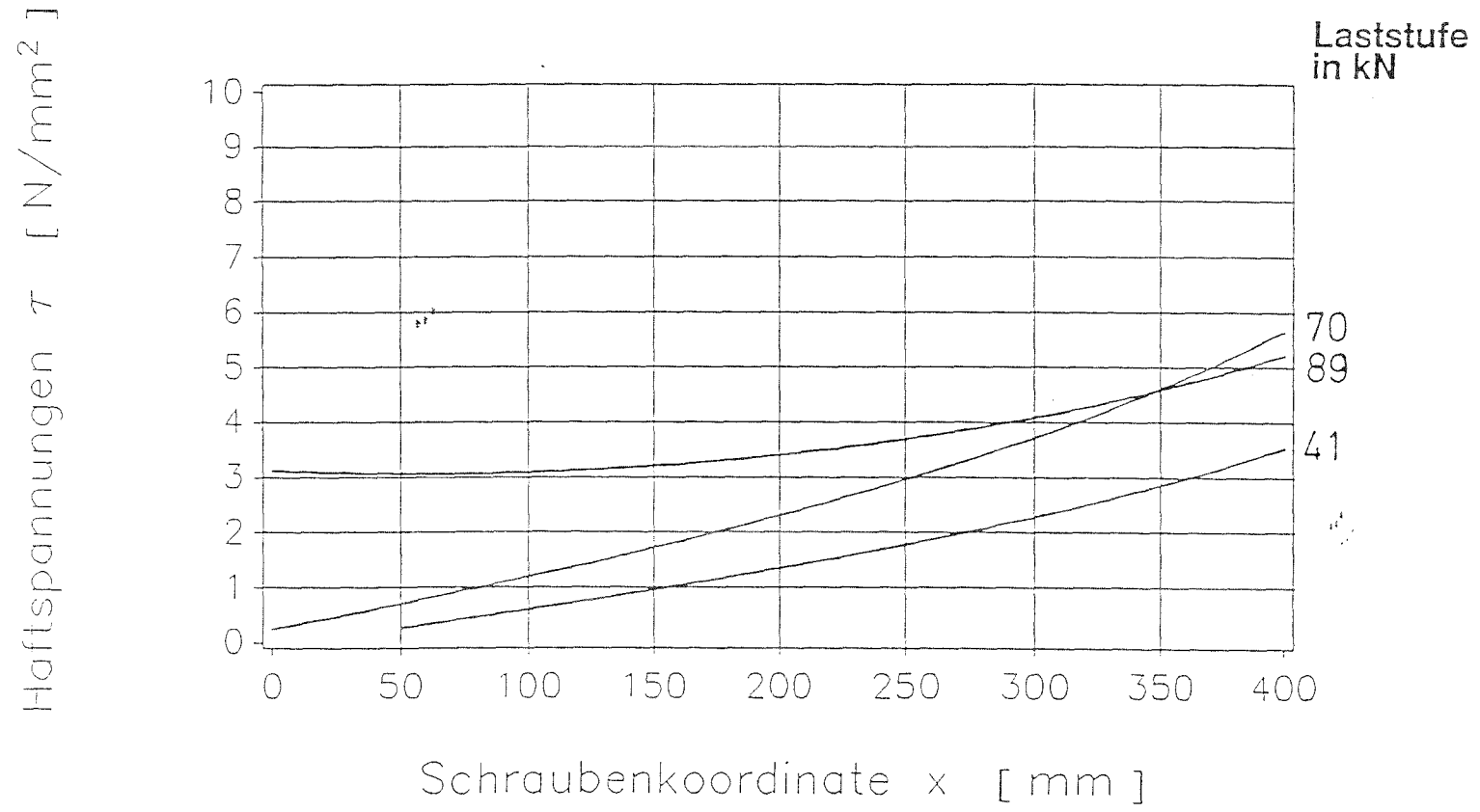
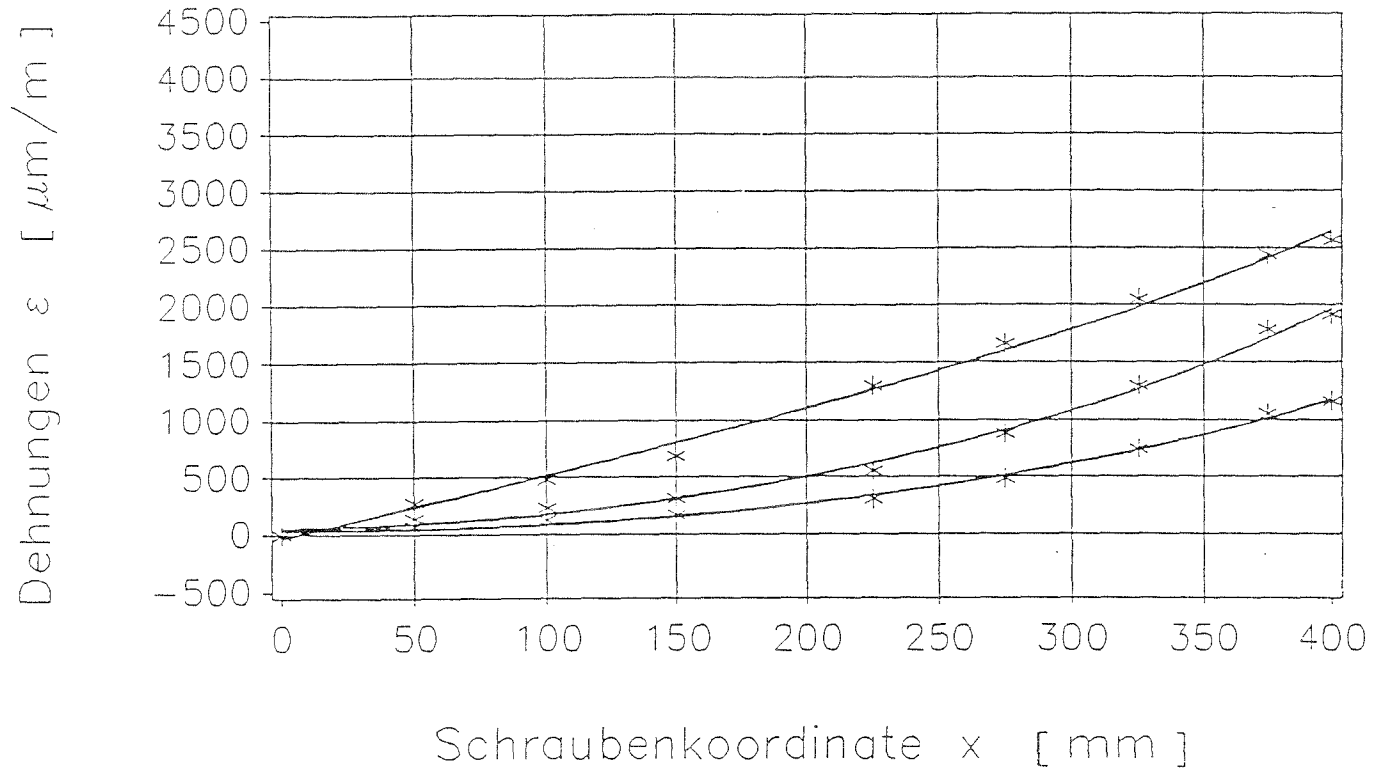
Ausziehversuch Körper SS2003

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



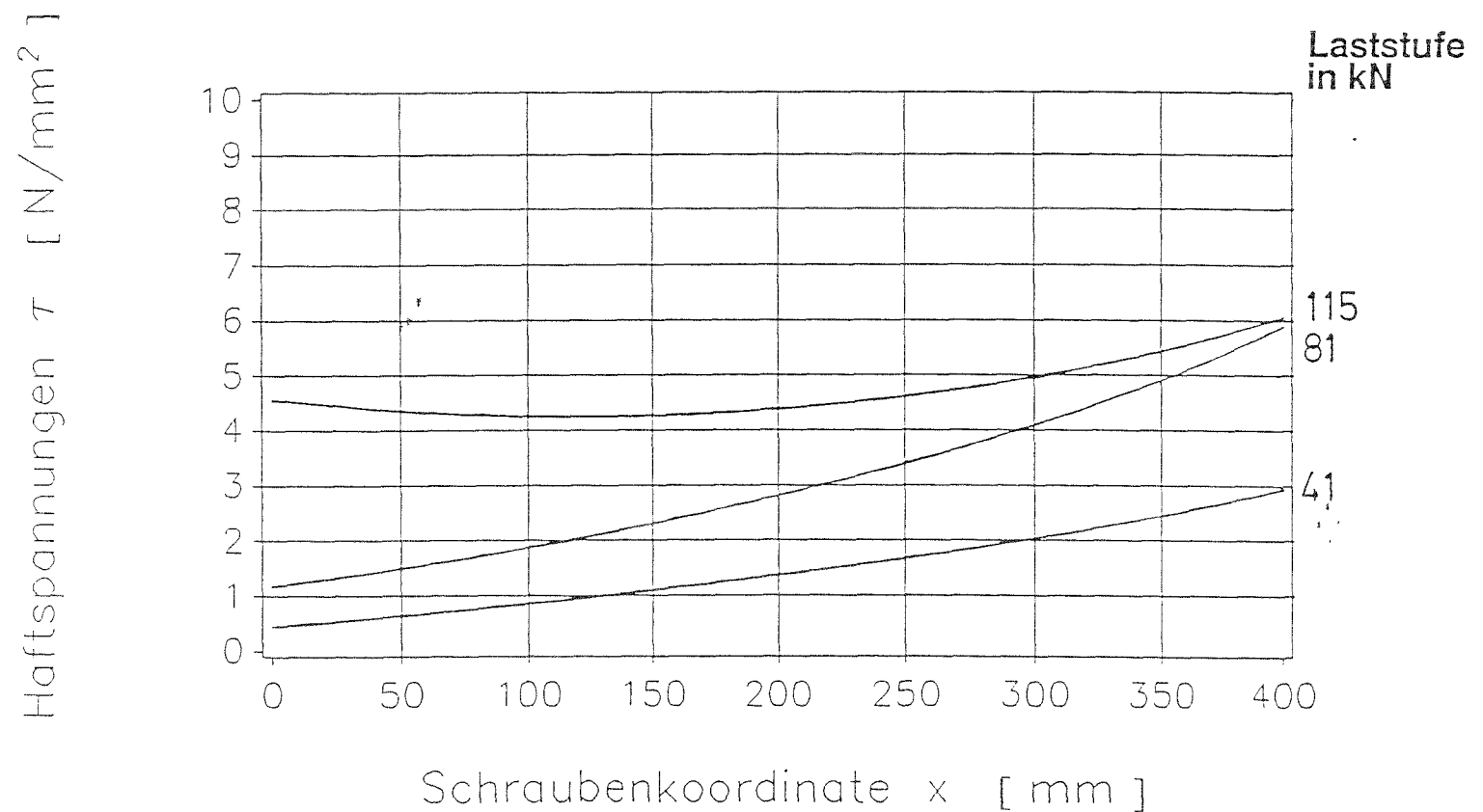
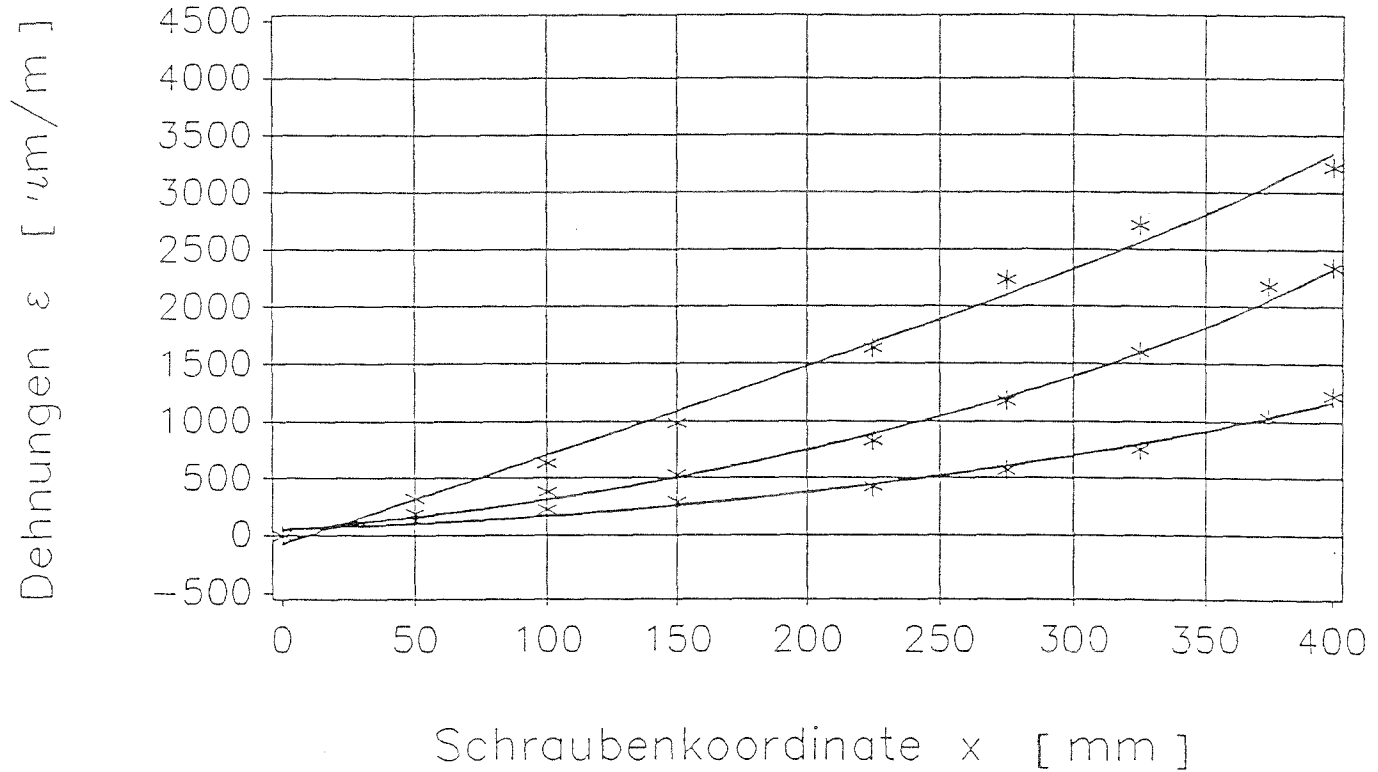
Ausziehversuch Körper PM20R4

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



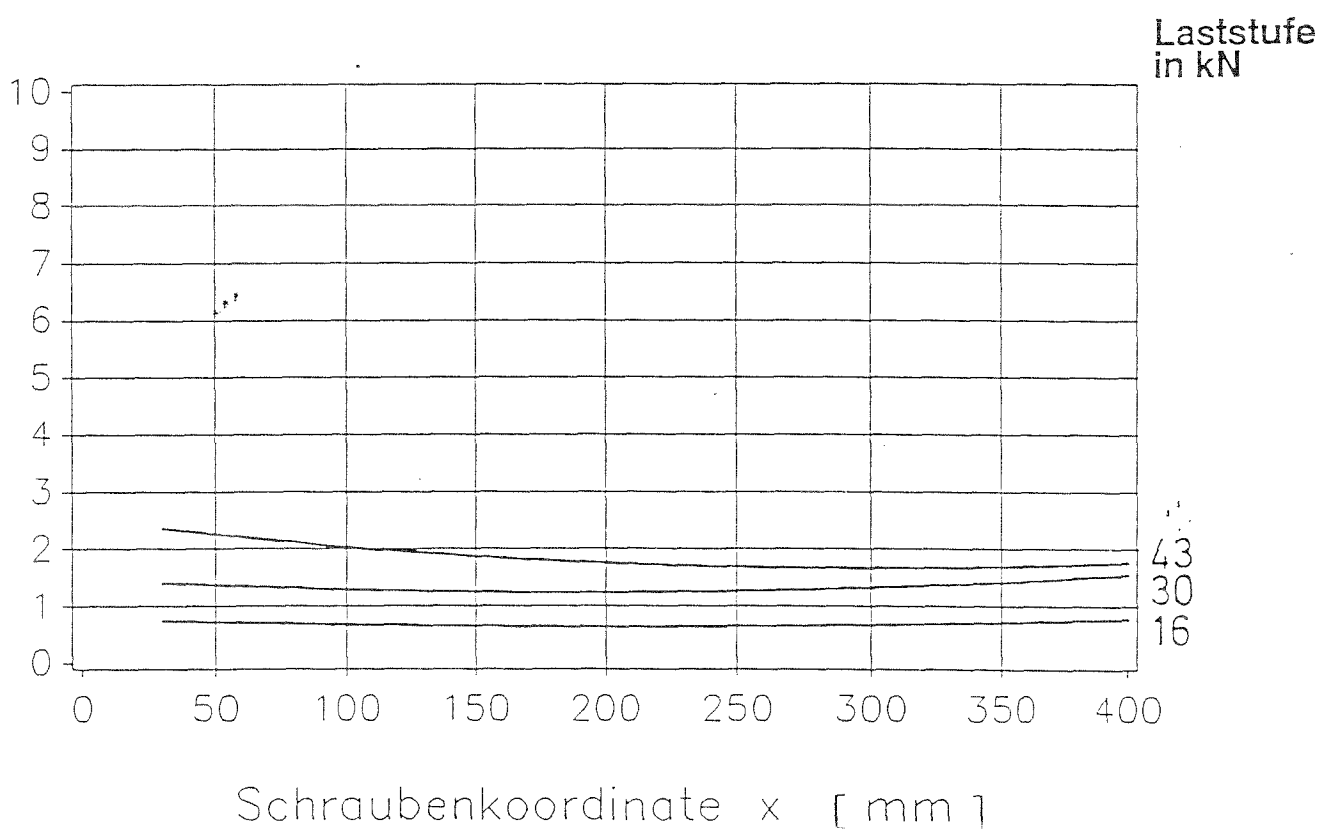
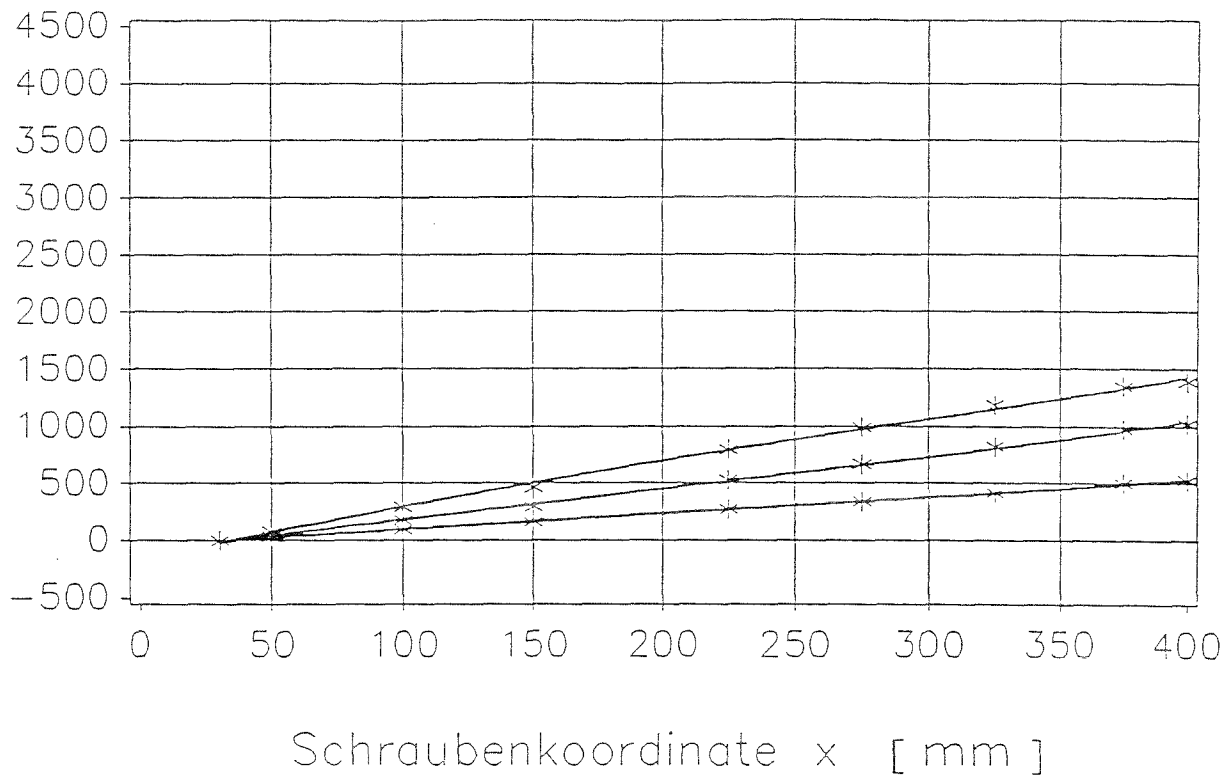
Ausziehversuch Körper SM20R4

Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



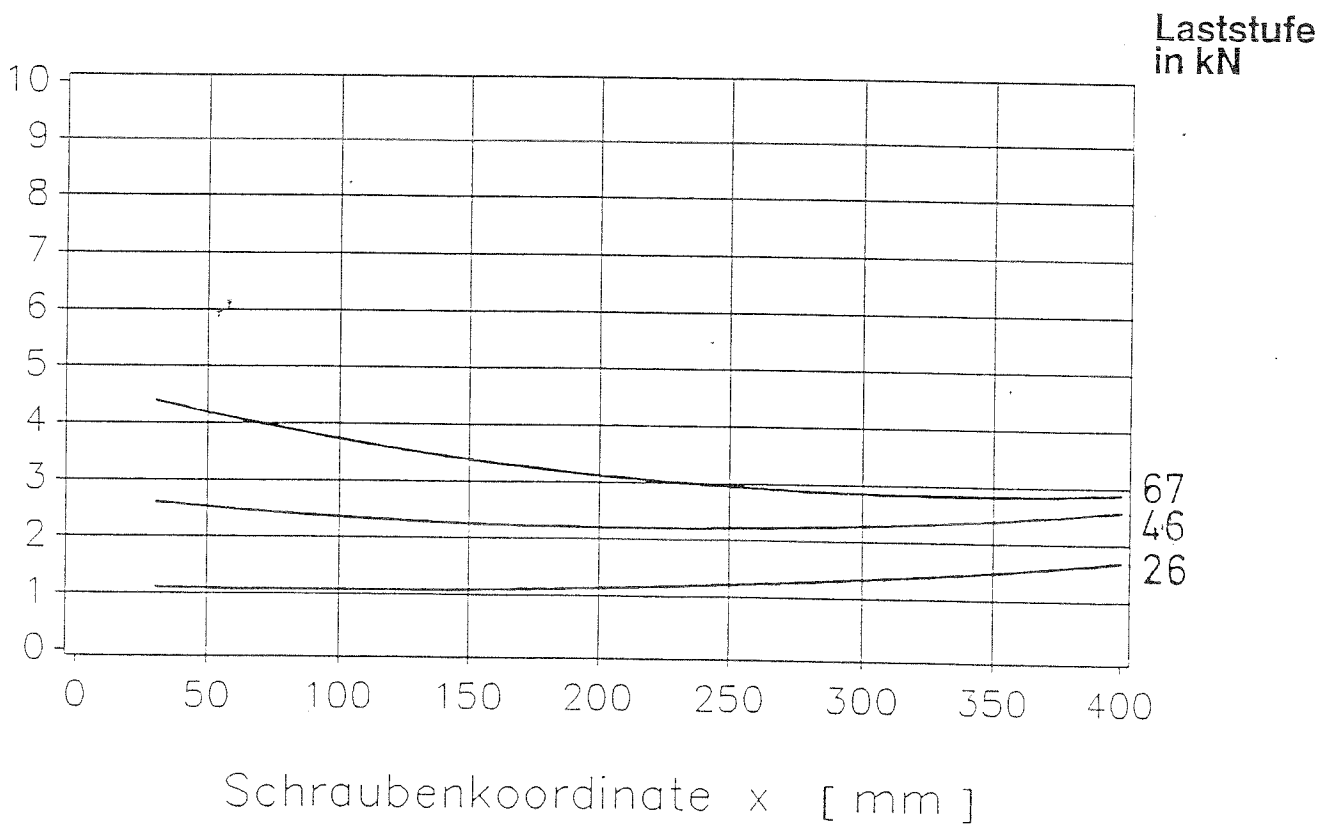
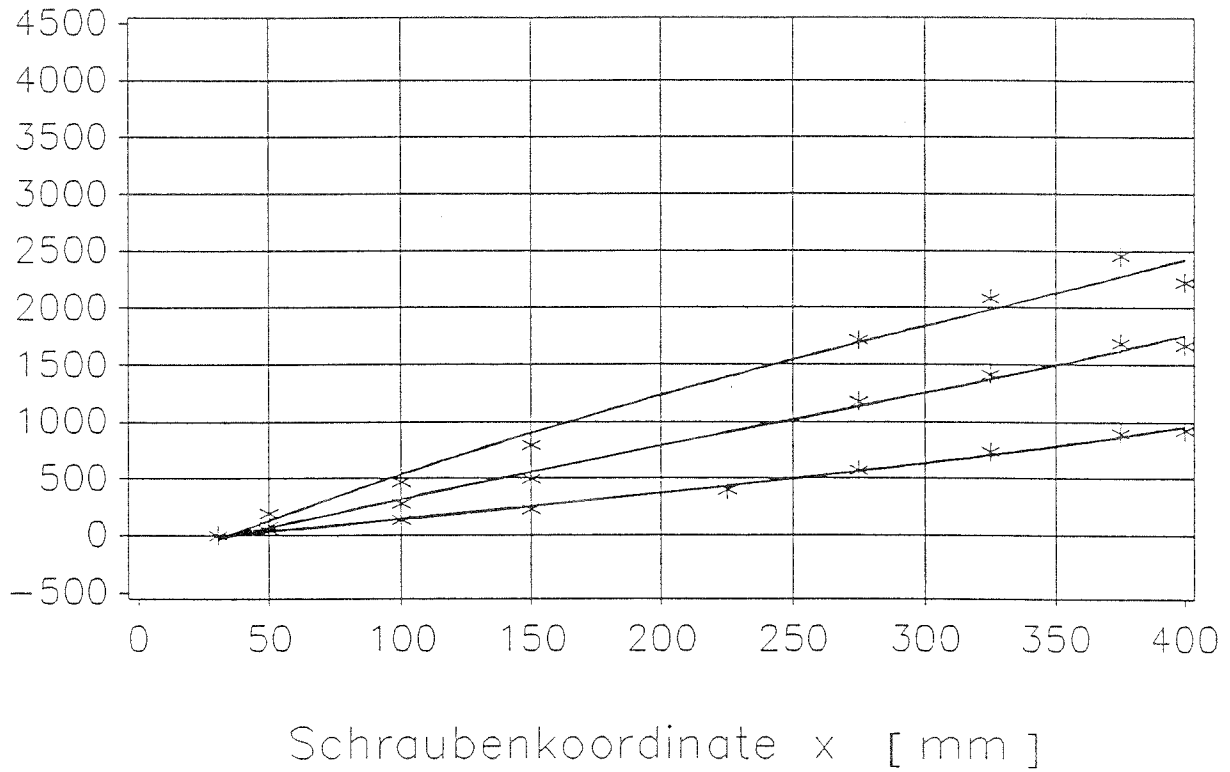
Ausziehversuch Körper PS2004

Annäherung der Versuchswerte
durch eine hyperbolische Funktion

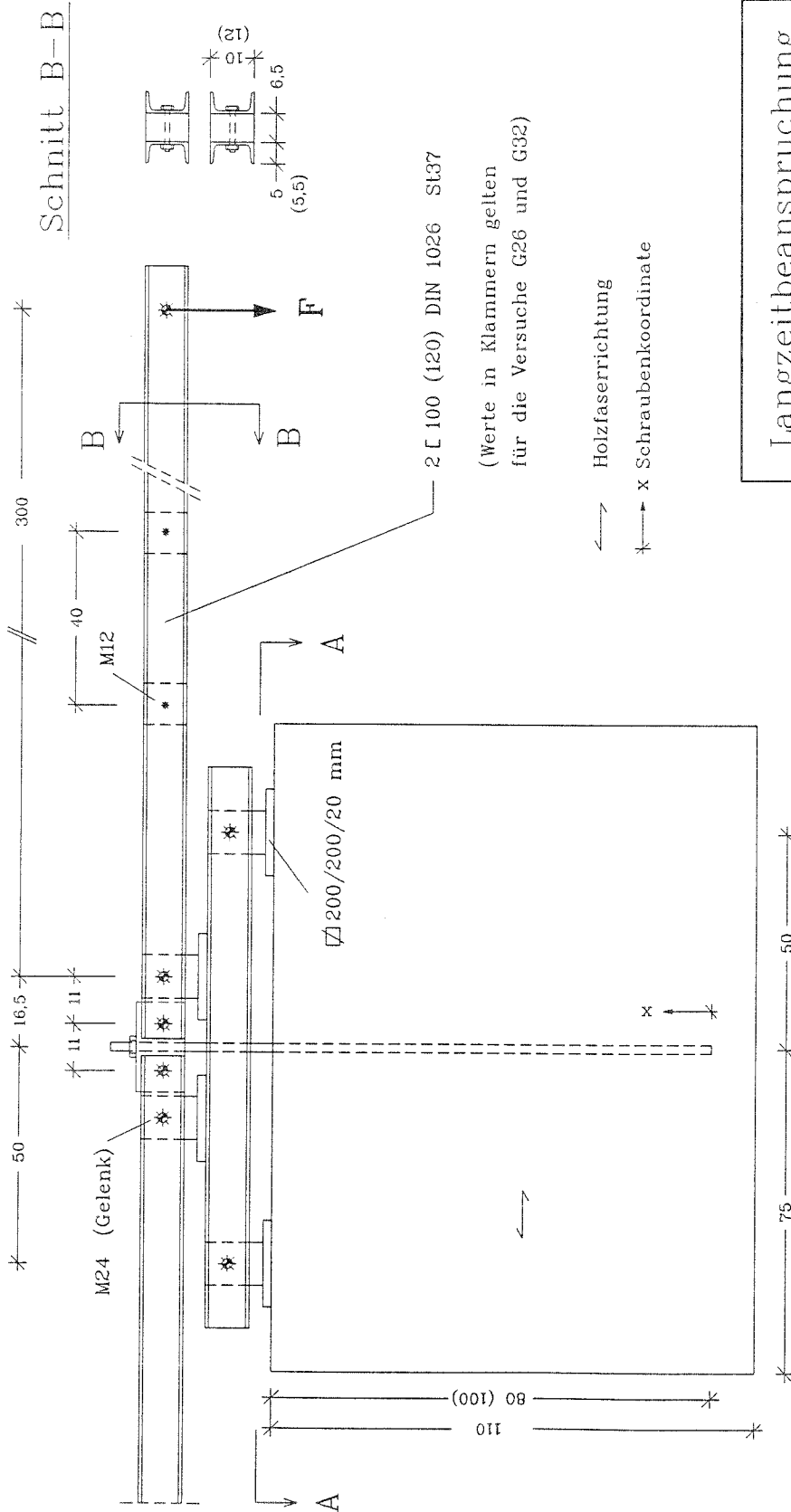


Ausziehversuch Körper SS2004

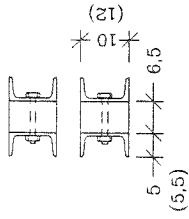
Annäherung der Versuchswerte durch eine hyperbolische Funktion



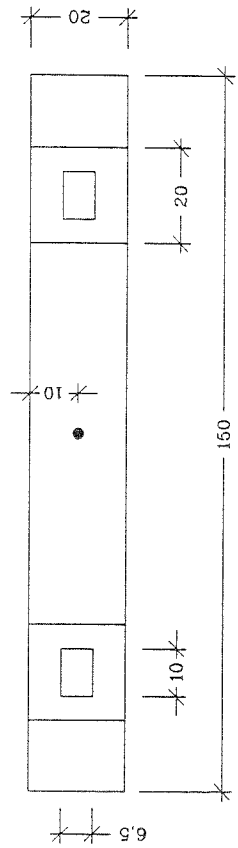
Ansicht



Schnitt B-B



Schnitt A-A (Draufsicht)

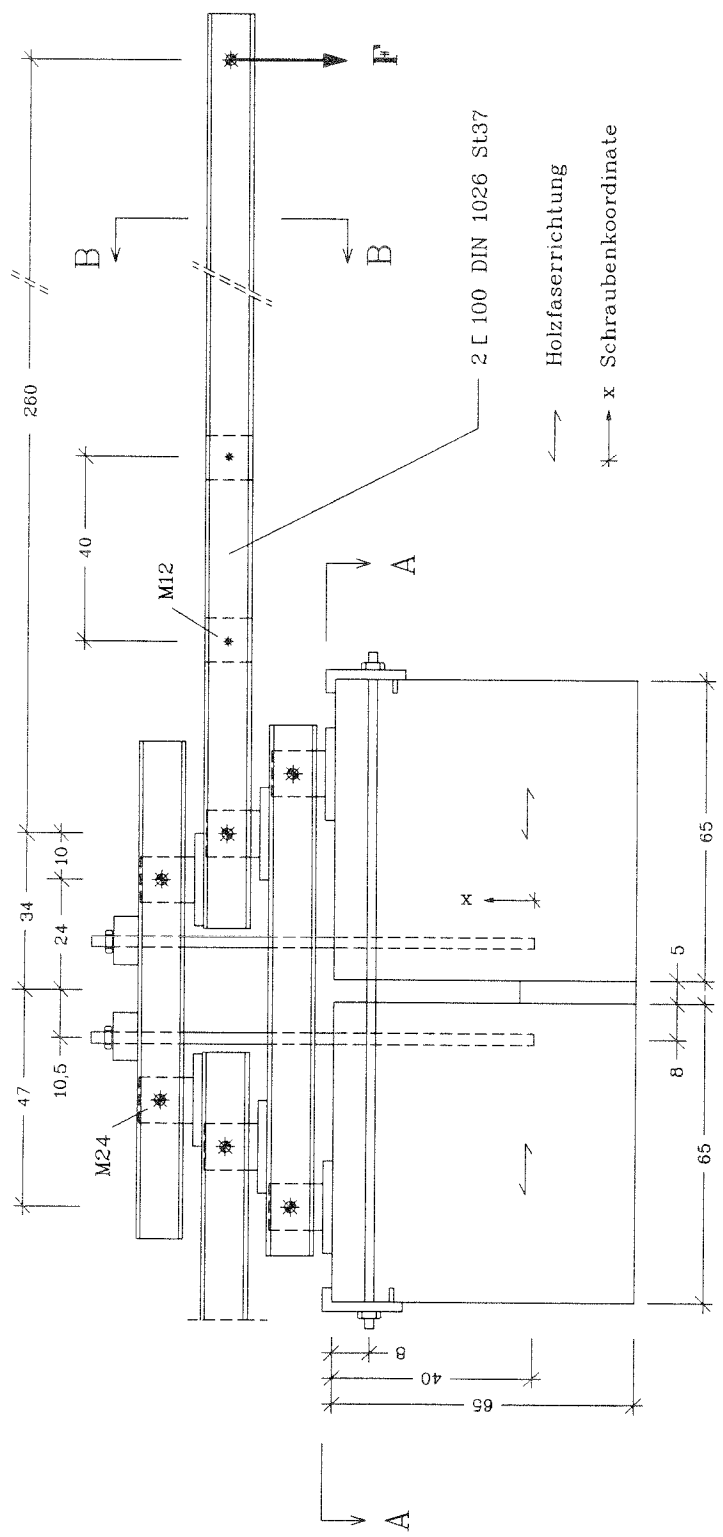


Langzeitbeanspruchung
unter äußerer Last F

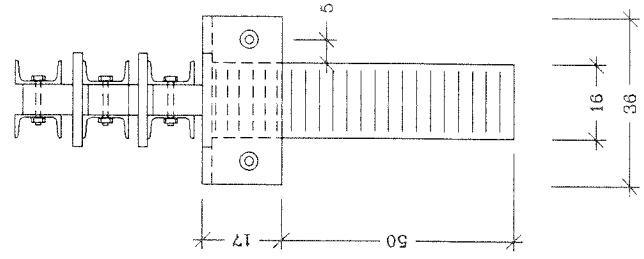
Versuchsordnung
großer Prüfkörper

Maße in [cm]

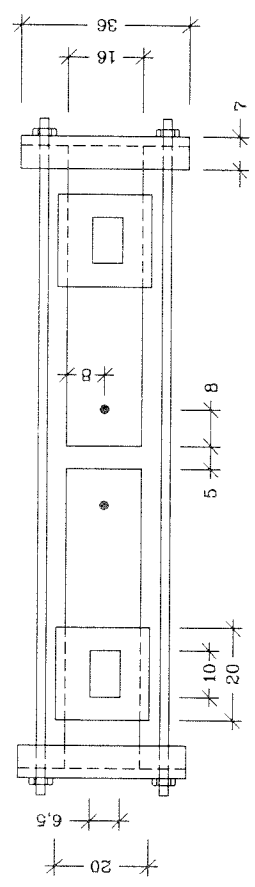
Ansicht



Schnitt B-B

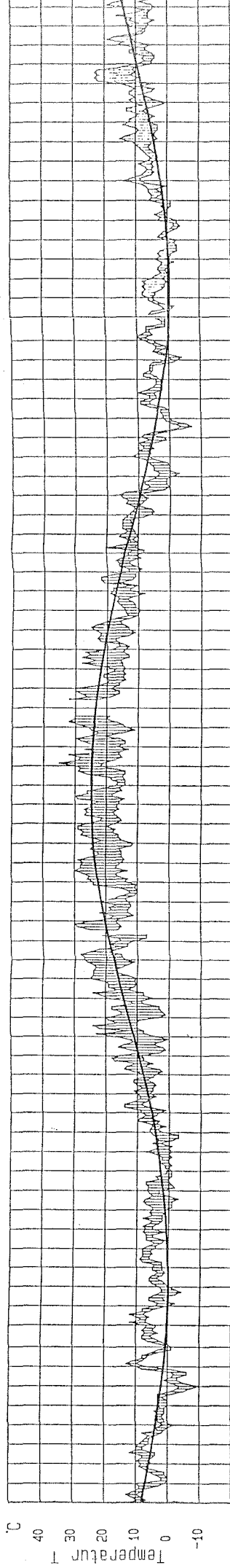


Schnitt A-A (Draufsicht)

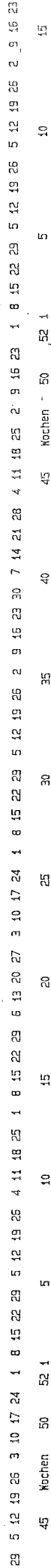


Langzeitbeanspruchung unter äußerer Last F
Versuchsanordnung kleine Prüfkörper
Maße in [cm]

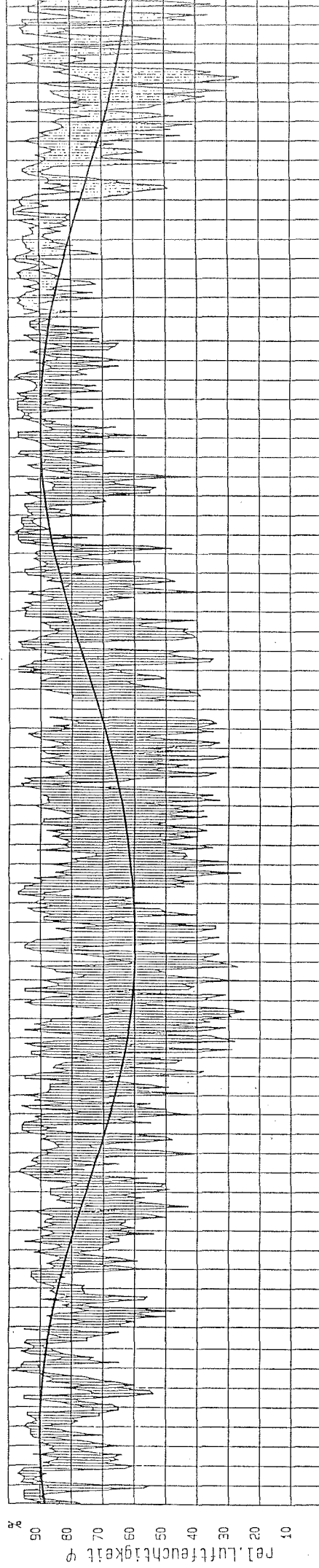
TAGESHÖCHSTWERTE



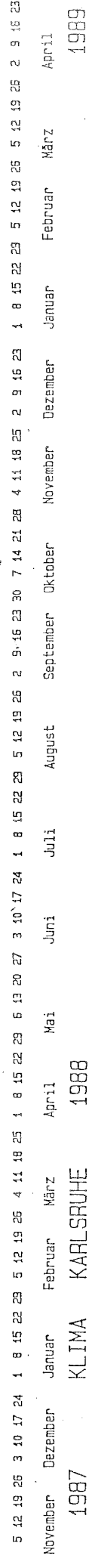
TAGESTIEFSTWERTE



TAGESHÖCHSTWERTE



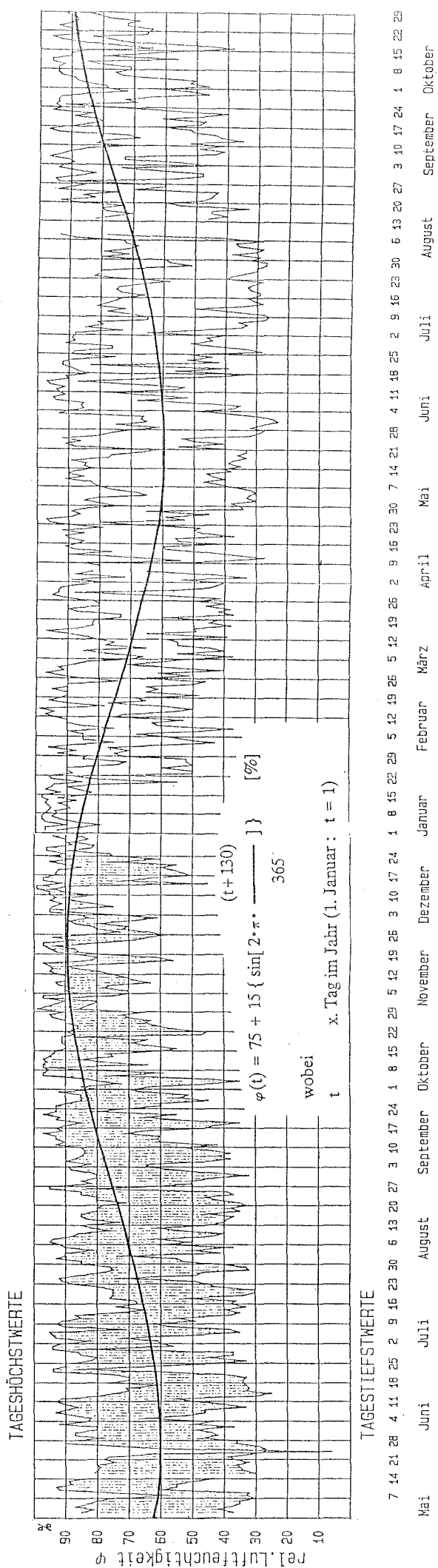
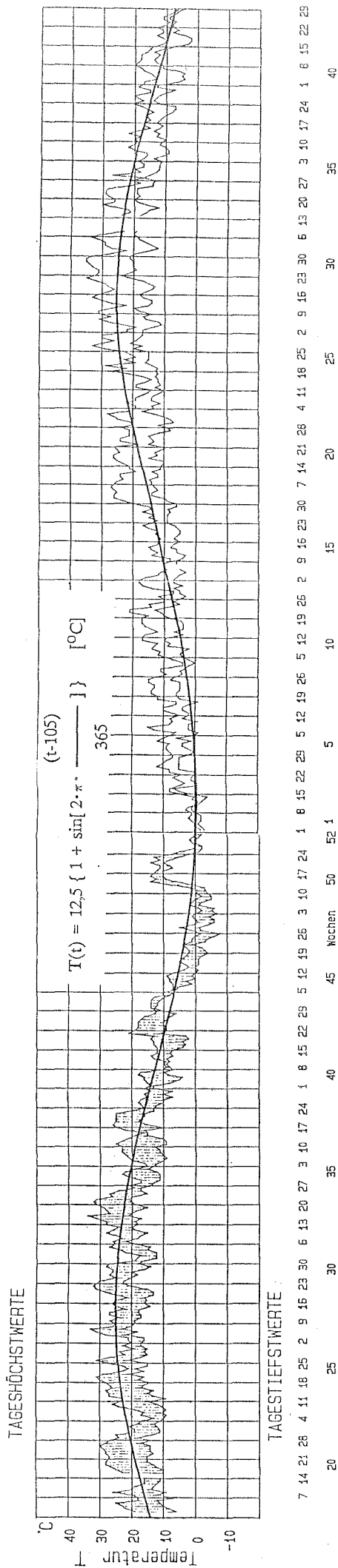
TAGESTIEFSTWERTE



KLIMA KARLSRUHE 1988

1987

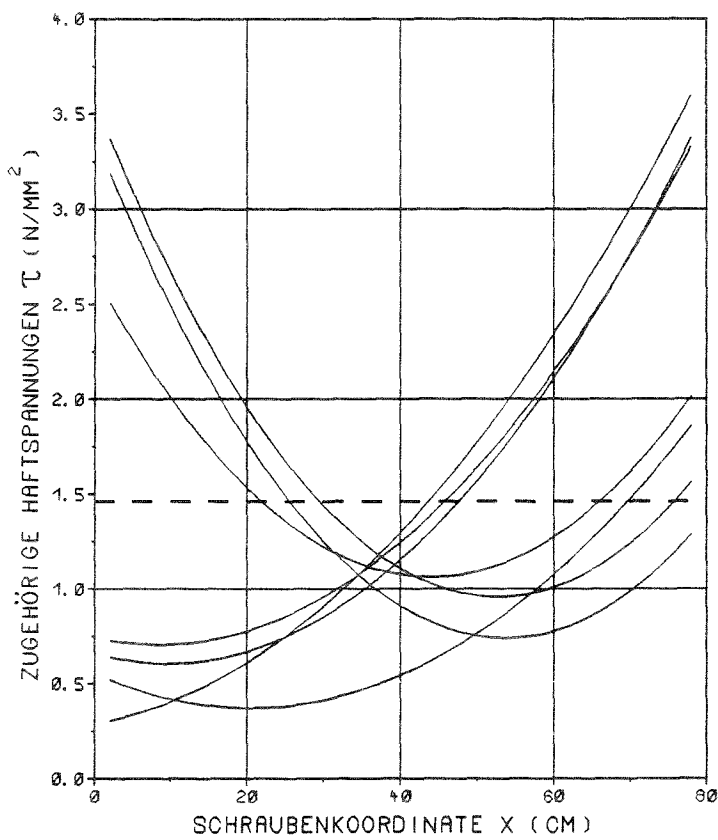
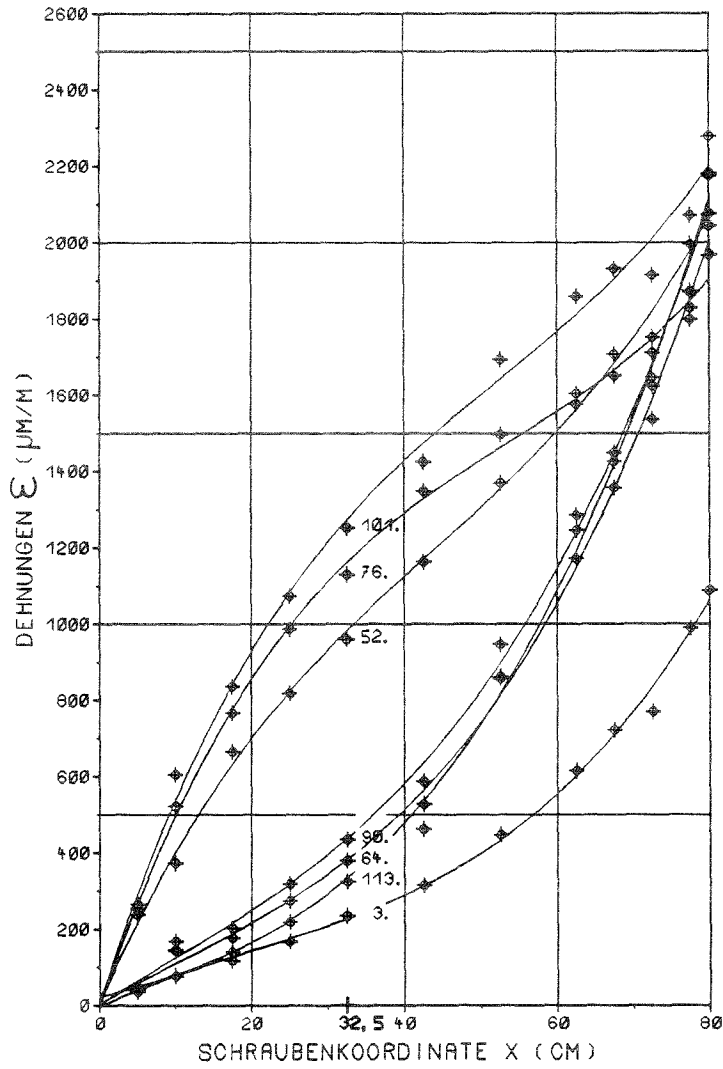
1989



Körper M20/ØR Dauerstandsbelastung

Z=73, 3kN

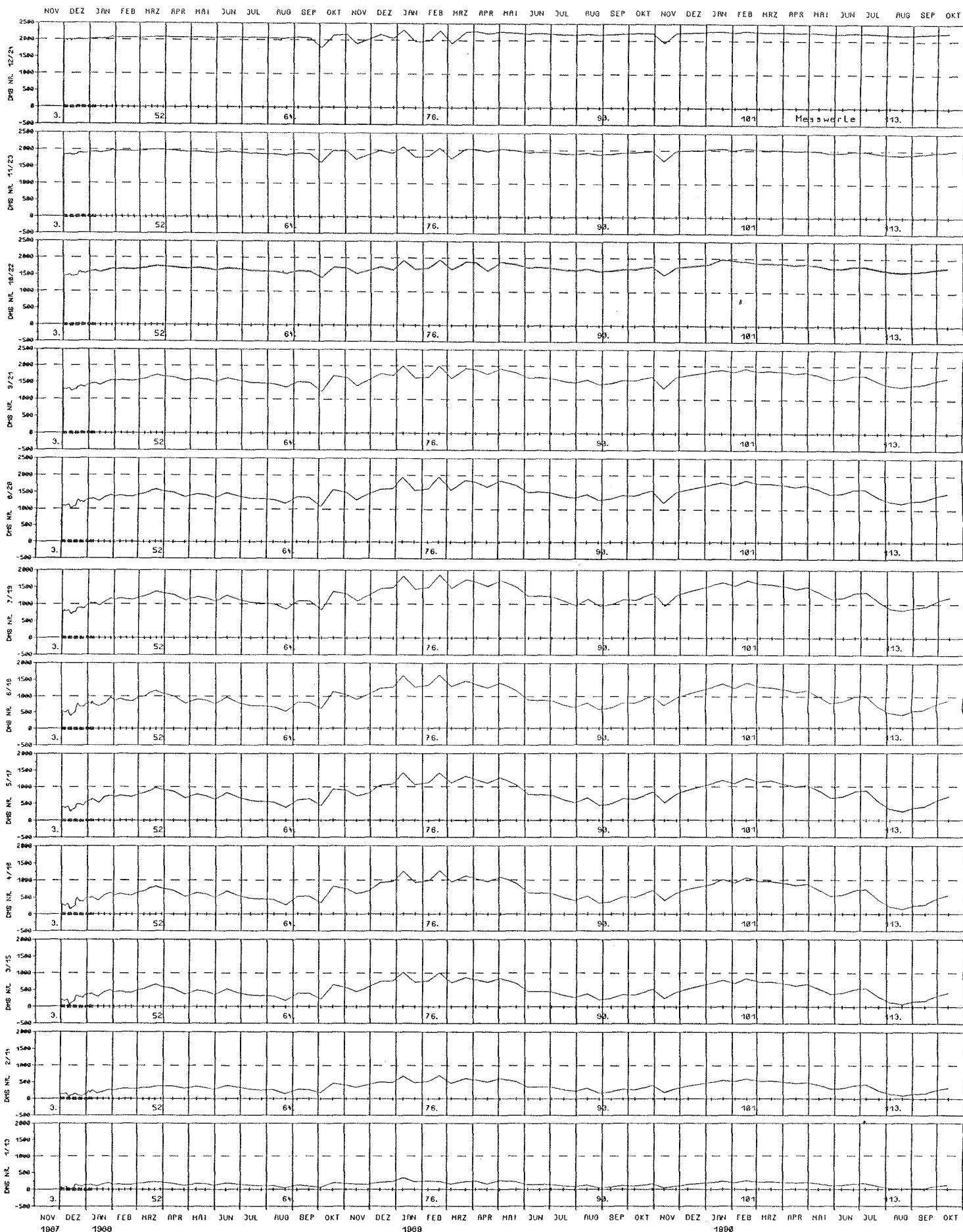
$\tau_{m, \sigma} = 1, 5 \text{ N/mm}^2$



113.
64. 90.
52.
3.
101.
 m, σ 76.

Körper M20/8R

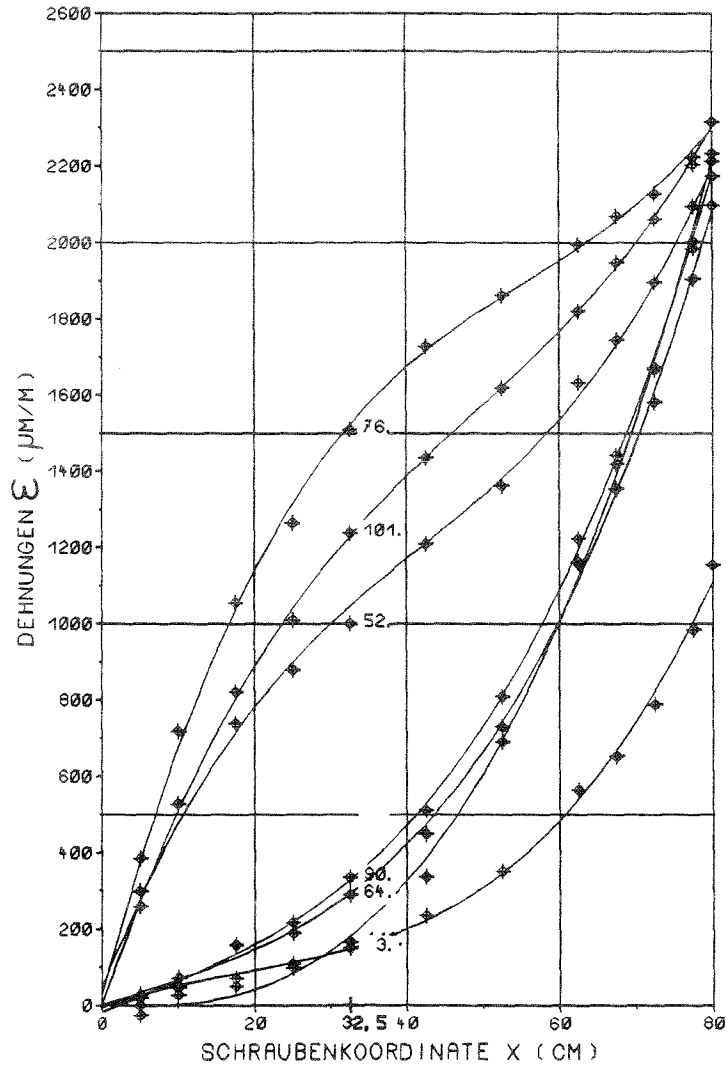
DEHNUNGEN ϵ ($\mu\text{m/m}$)



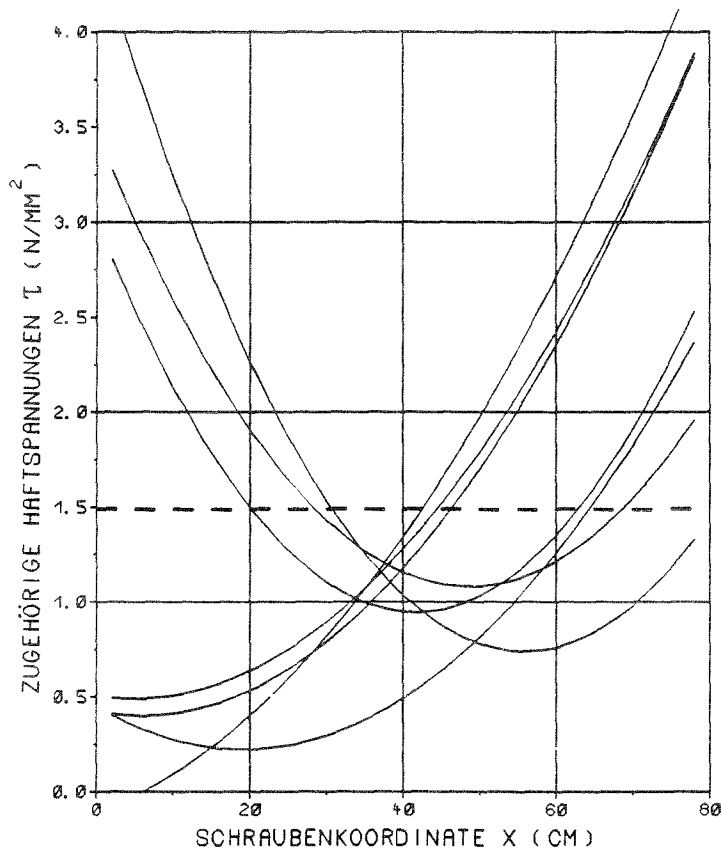
Körper M20/ØP Dauerstandsbelastung

Z=74, ØkN

$\tau_{m, \alpha} = 1,5 \text{ N/mm}^2$



113.



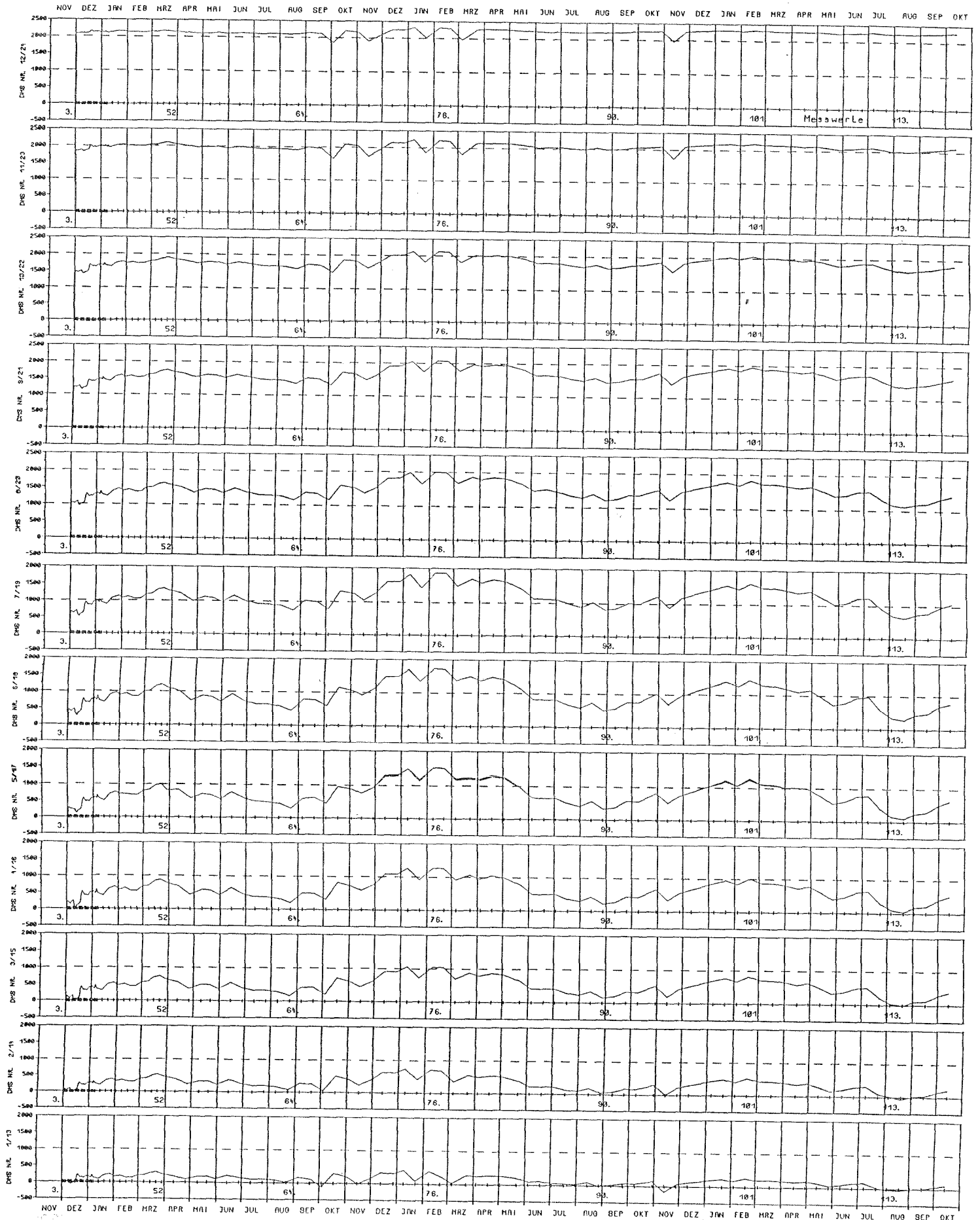
64. 90.

52.
3.

101.

m, α 76.

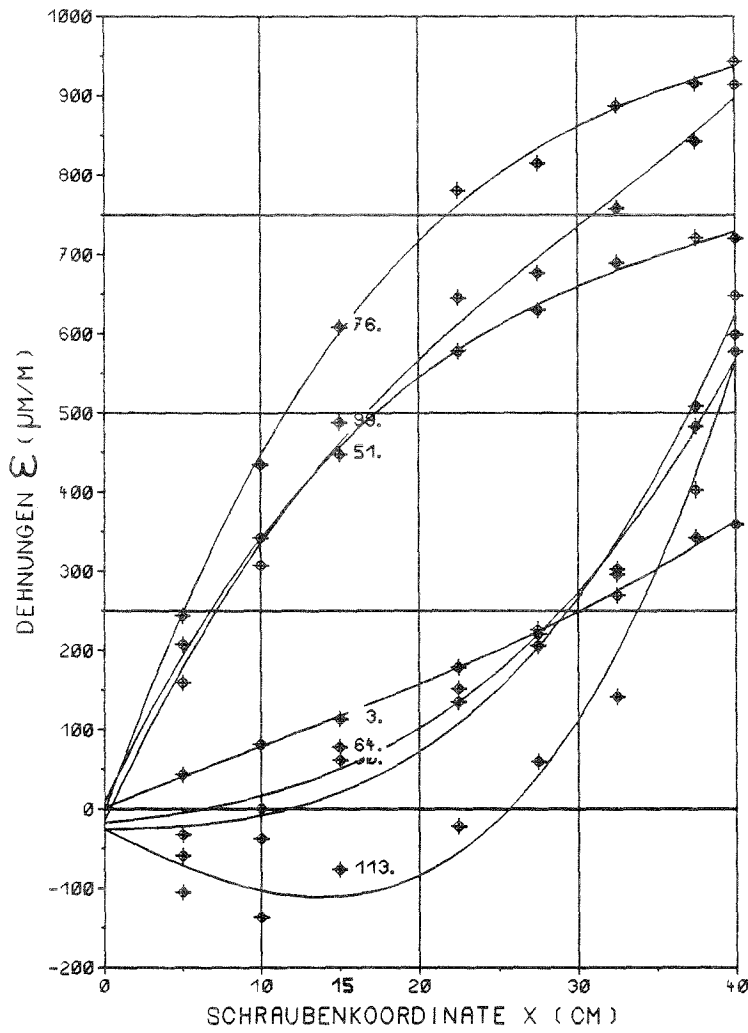
Körper M20/8P



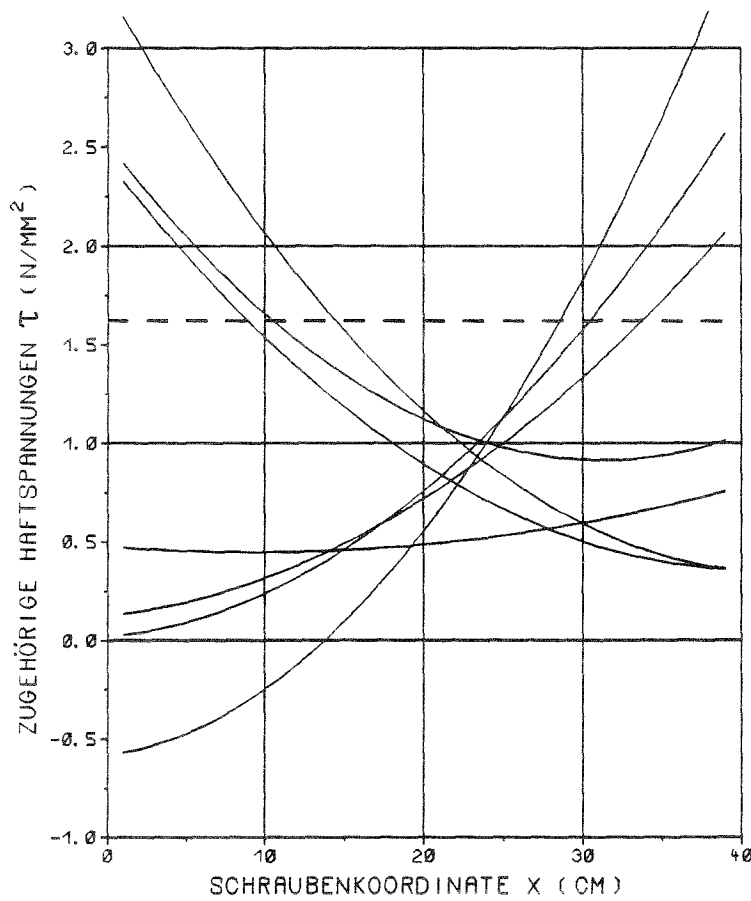
Körper M20/4R Dauerstandsbelastung

Z=40, 0kN

$\tau_{m, a} = -1,6 \text{ N/mm}^2$



113.



98.

6+.

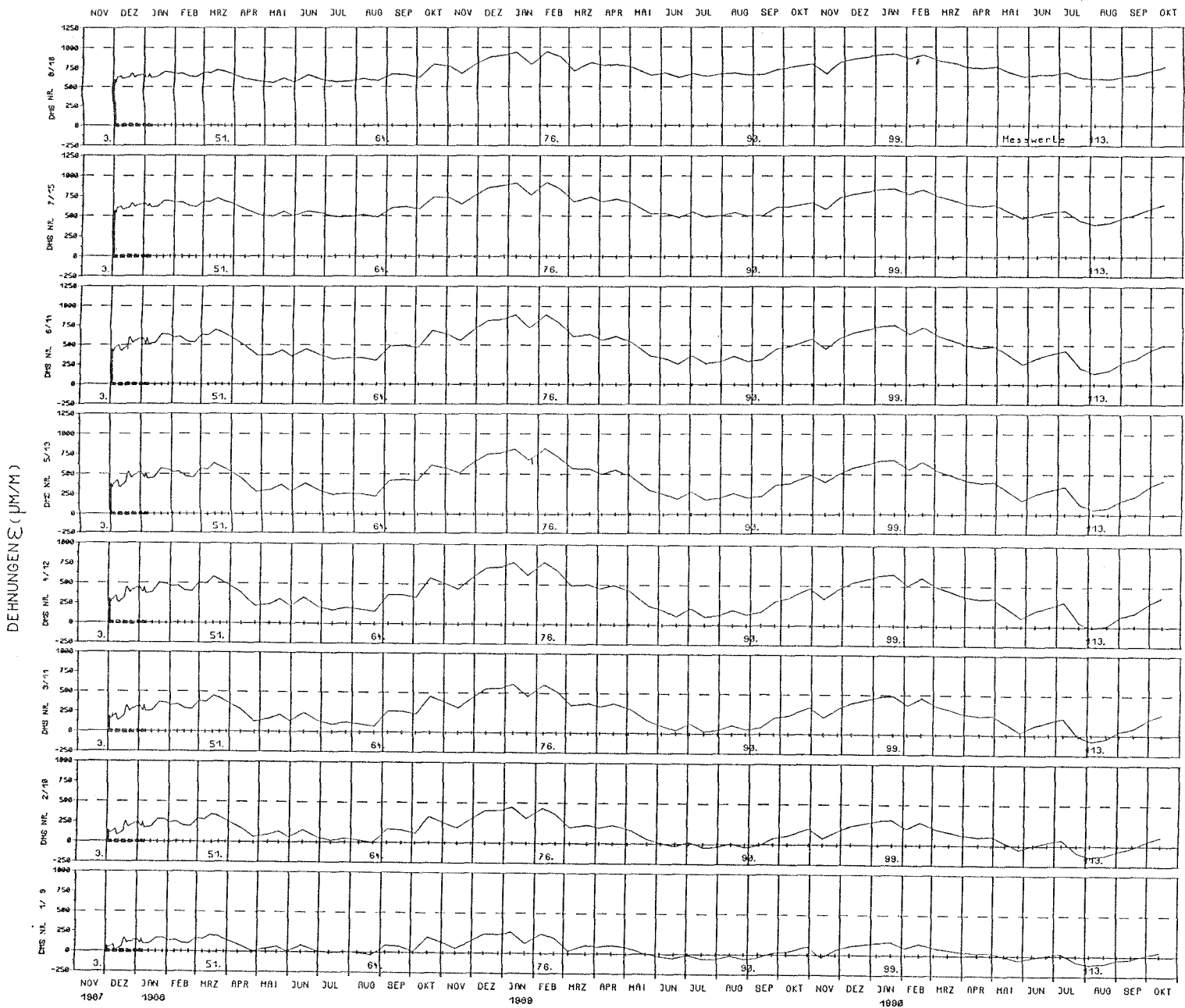
m, a

99.

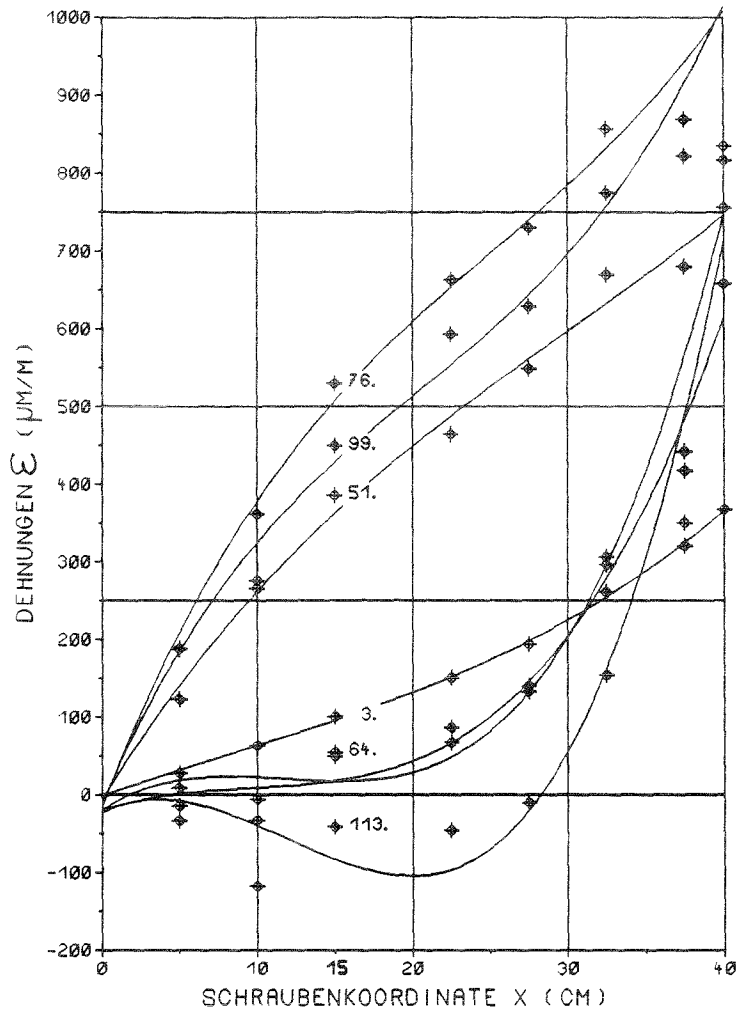
3.

51. 76.

Körper M20/4R



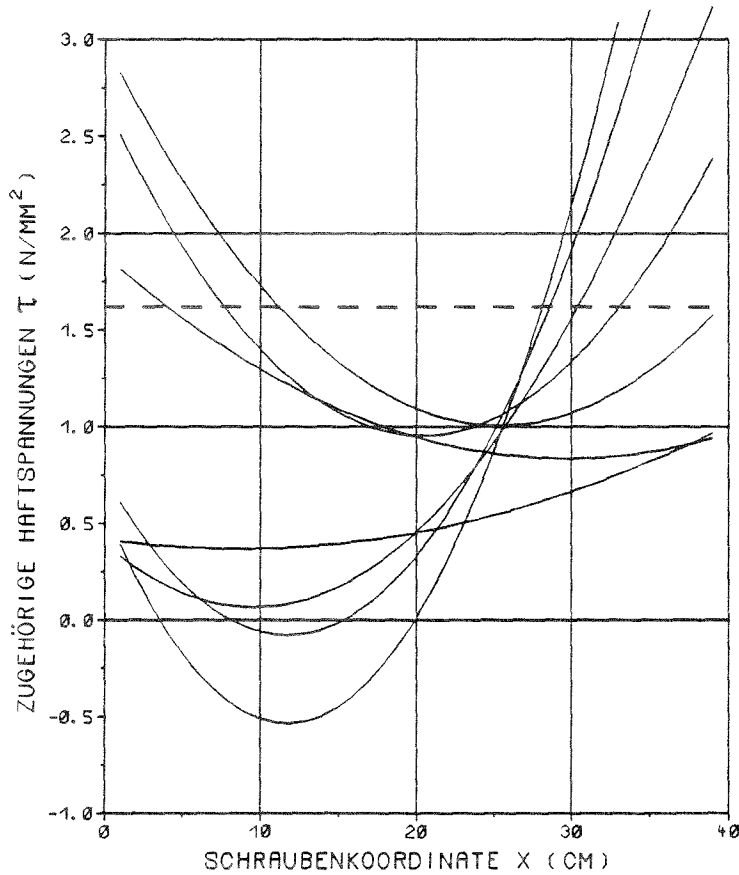
Körper M20/4P Dauerstandsbelastung $Z=40, 8kN$ $\tau_{m, \sigma} = 1,6 N/mm^2$



113.

90.

64.



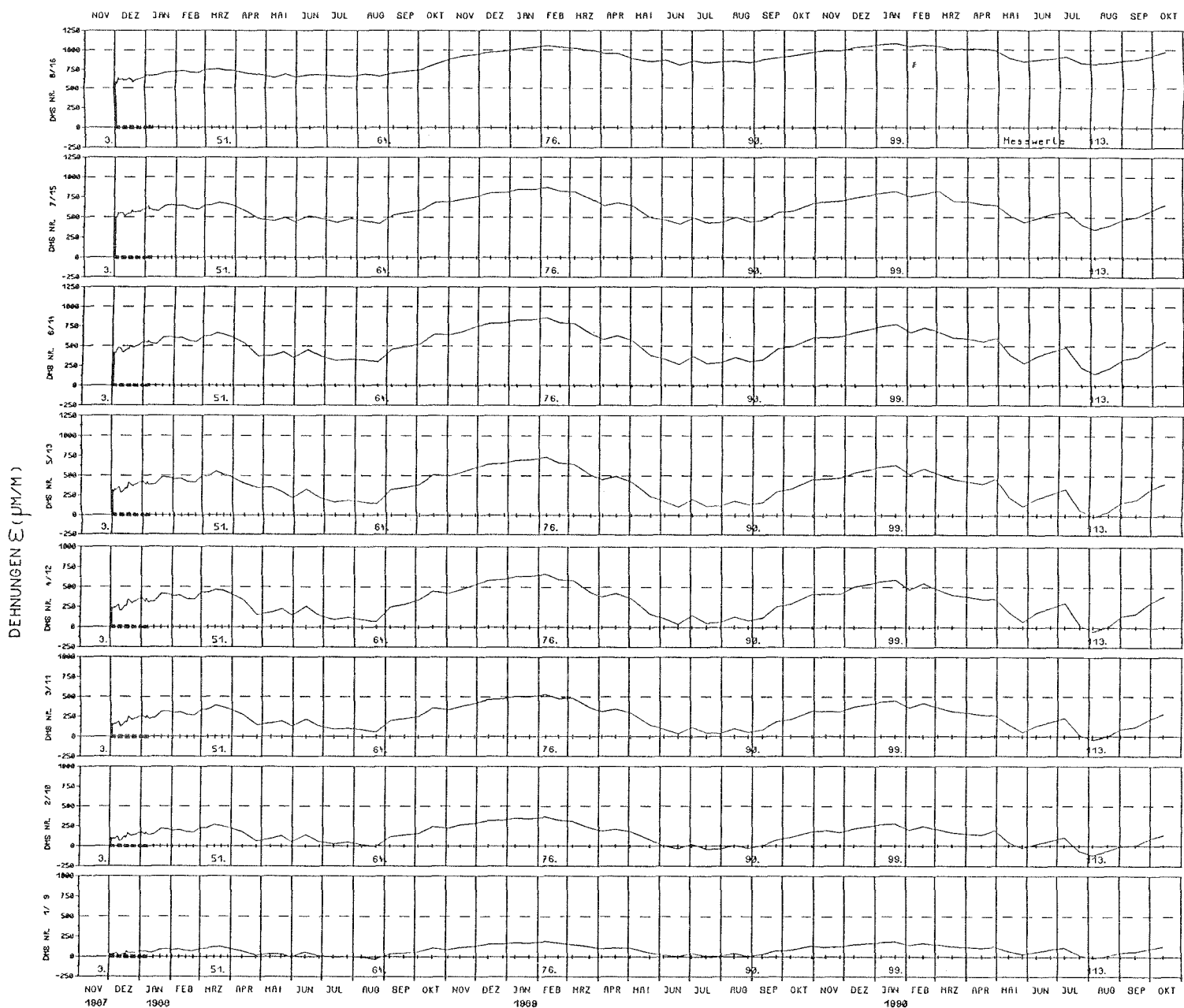
99.

76.

m, σ

3.51.

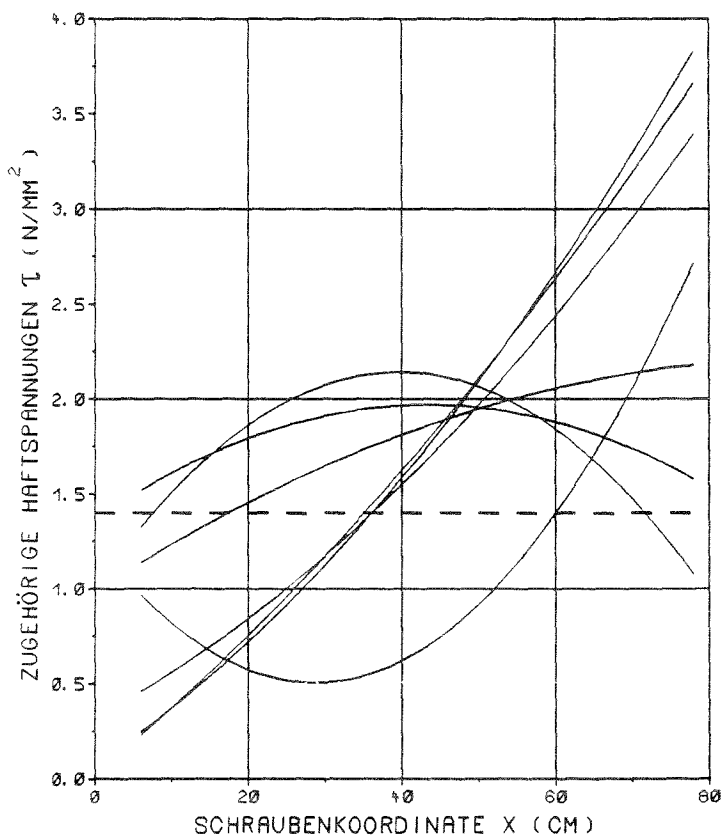
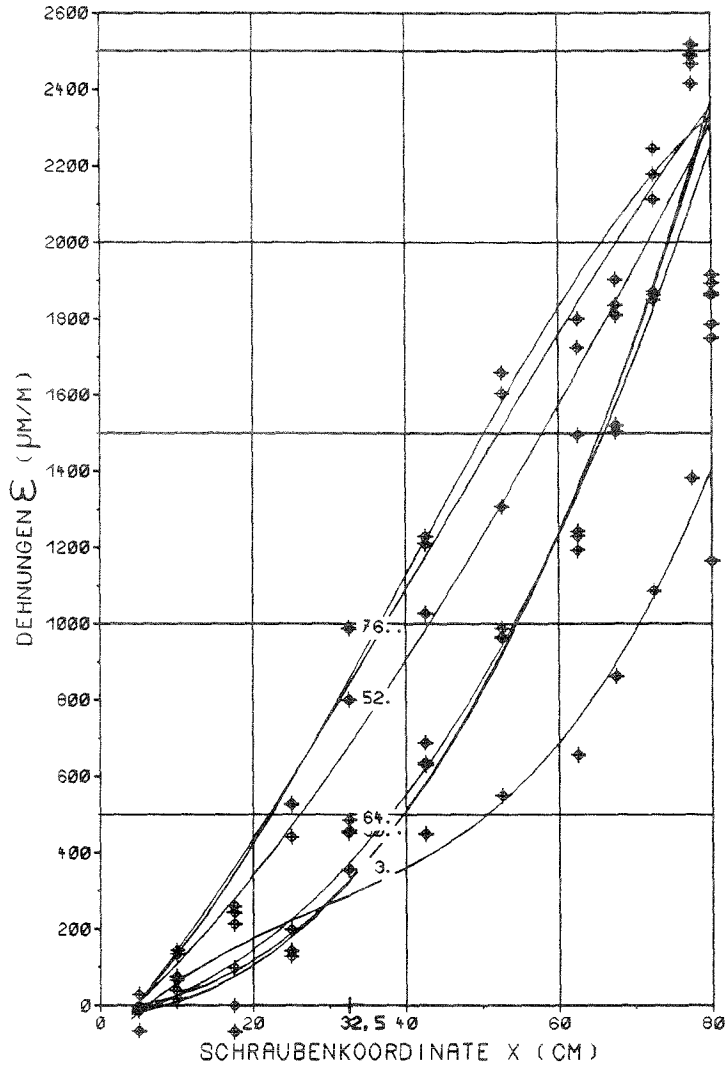
Körper M20/4P



Körper S20/80 Dauerstandsbelastung

Z=67,7kN

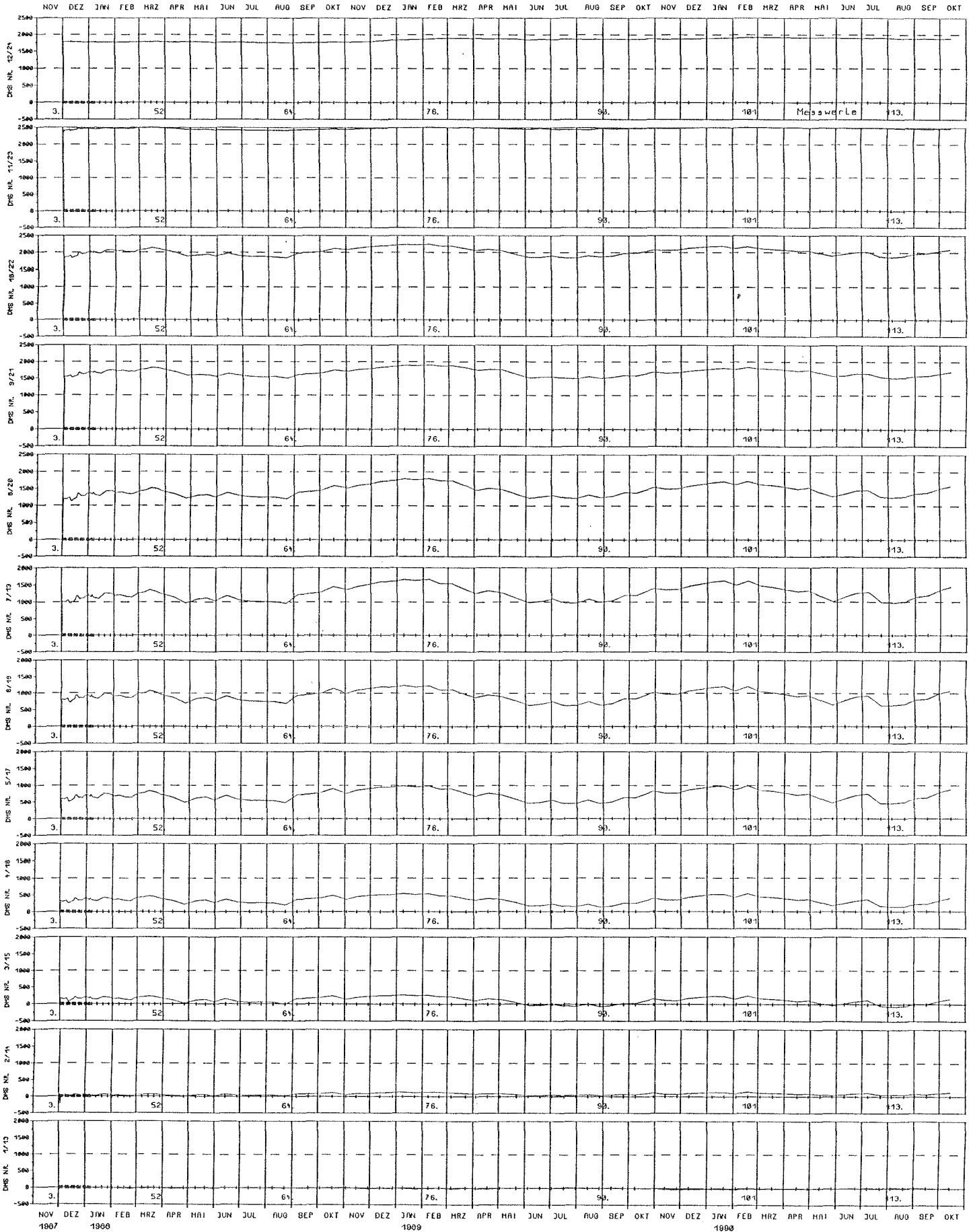
$\tau_{m, \sigma} = 1,4 \text{ N/mm}^2$



113.
90.
64.
3.
52.
101.
 m, σ
76.

Körper S20/00

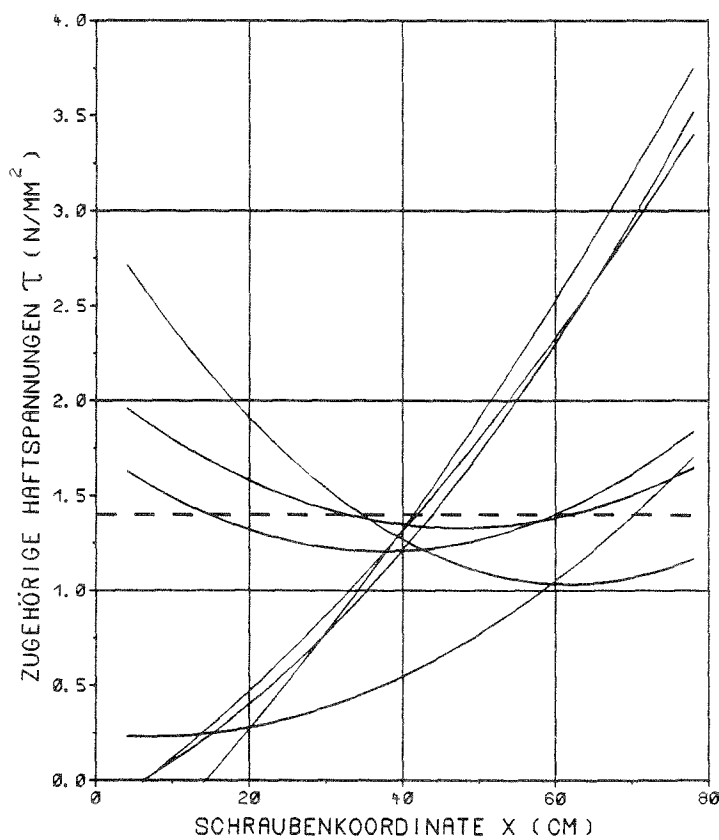
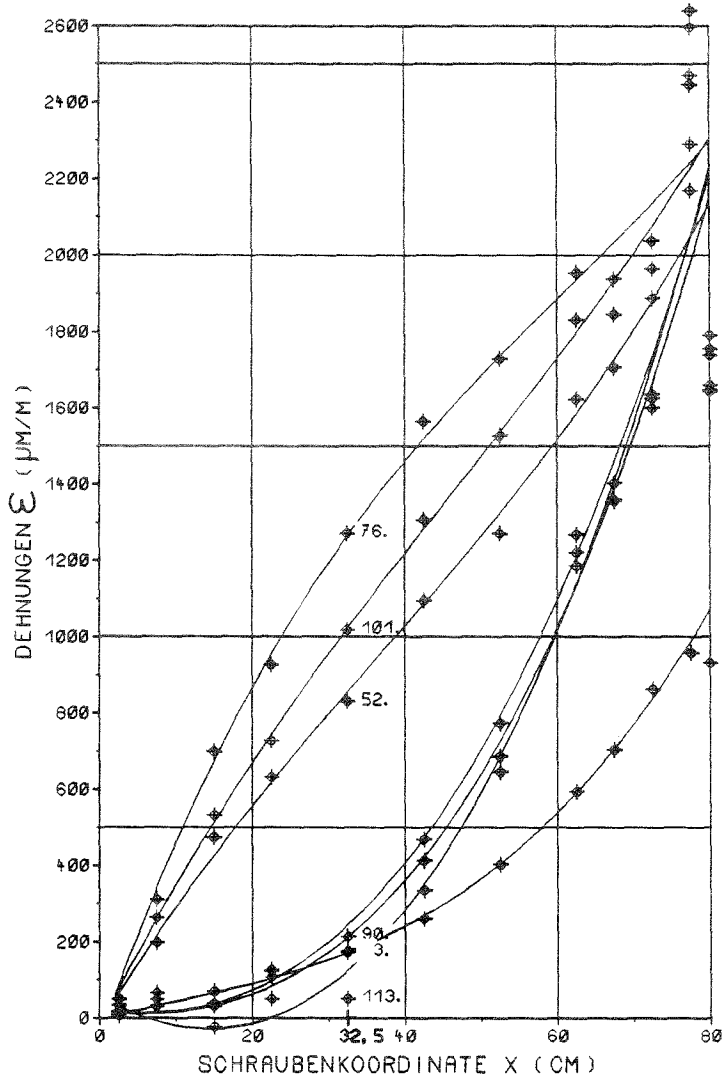
DEHNUNGEN ϵ ($\mu\text{m/m}$)



Körper S20/0R Dauerstandsbelastung

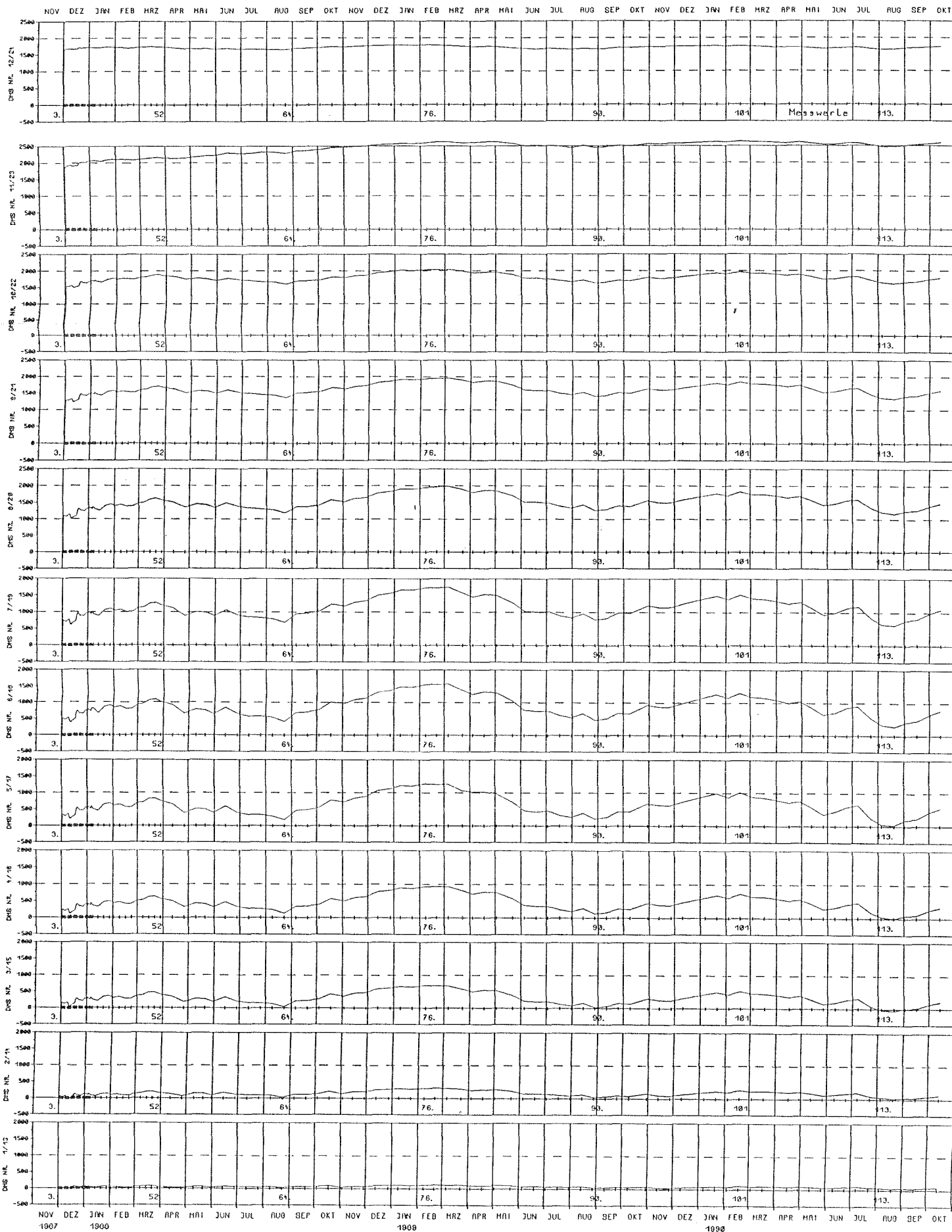
Z=67,7kN

$\tau_{m, a} = 1,4 \text{ N/mm}^2$



Körper S20/8R

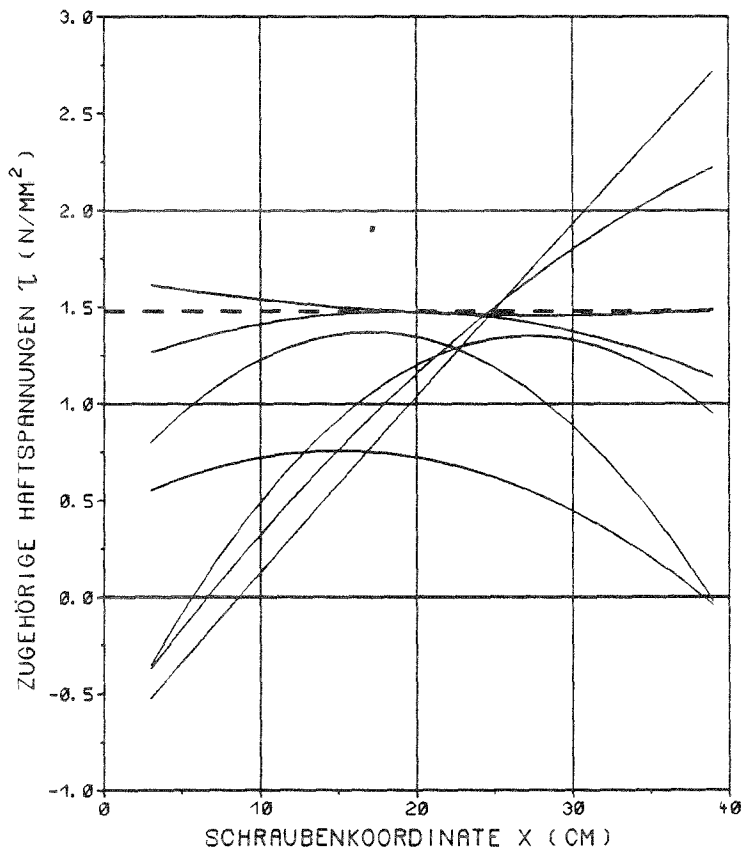
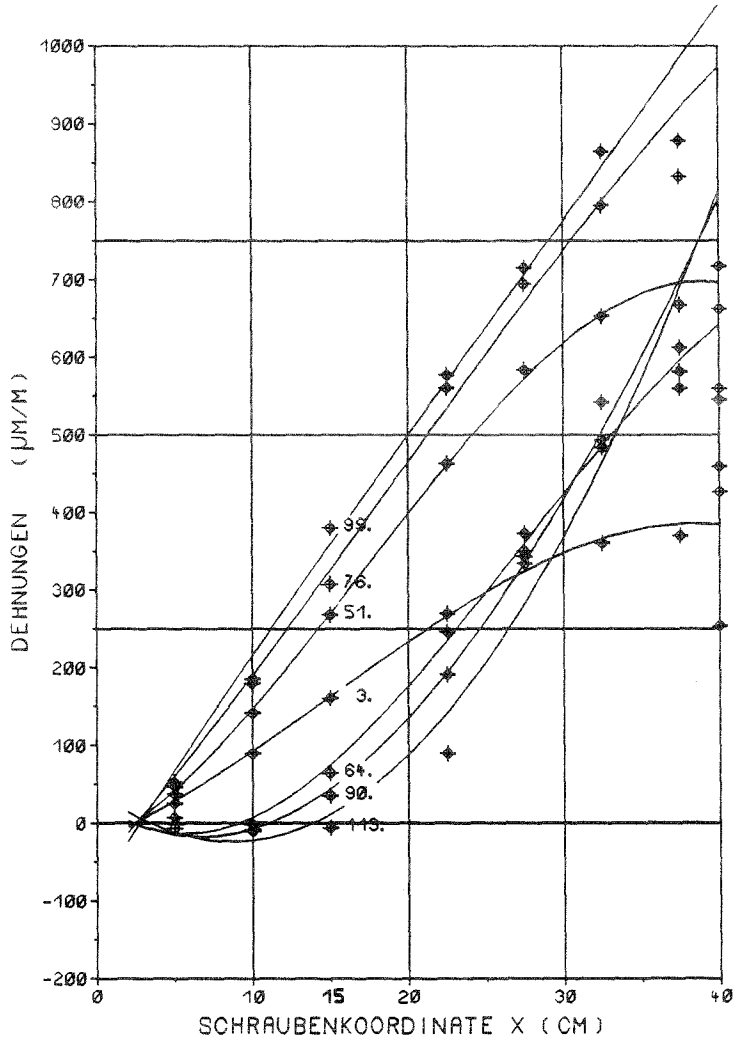
DEHNUNGEN ϵ ($\mu\text{m/m}$)



Körper S20/40 Dauerstandsbelastung

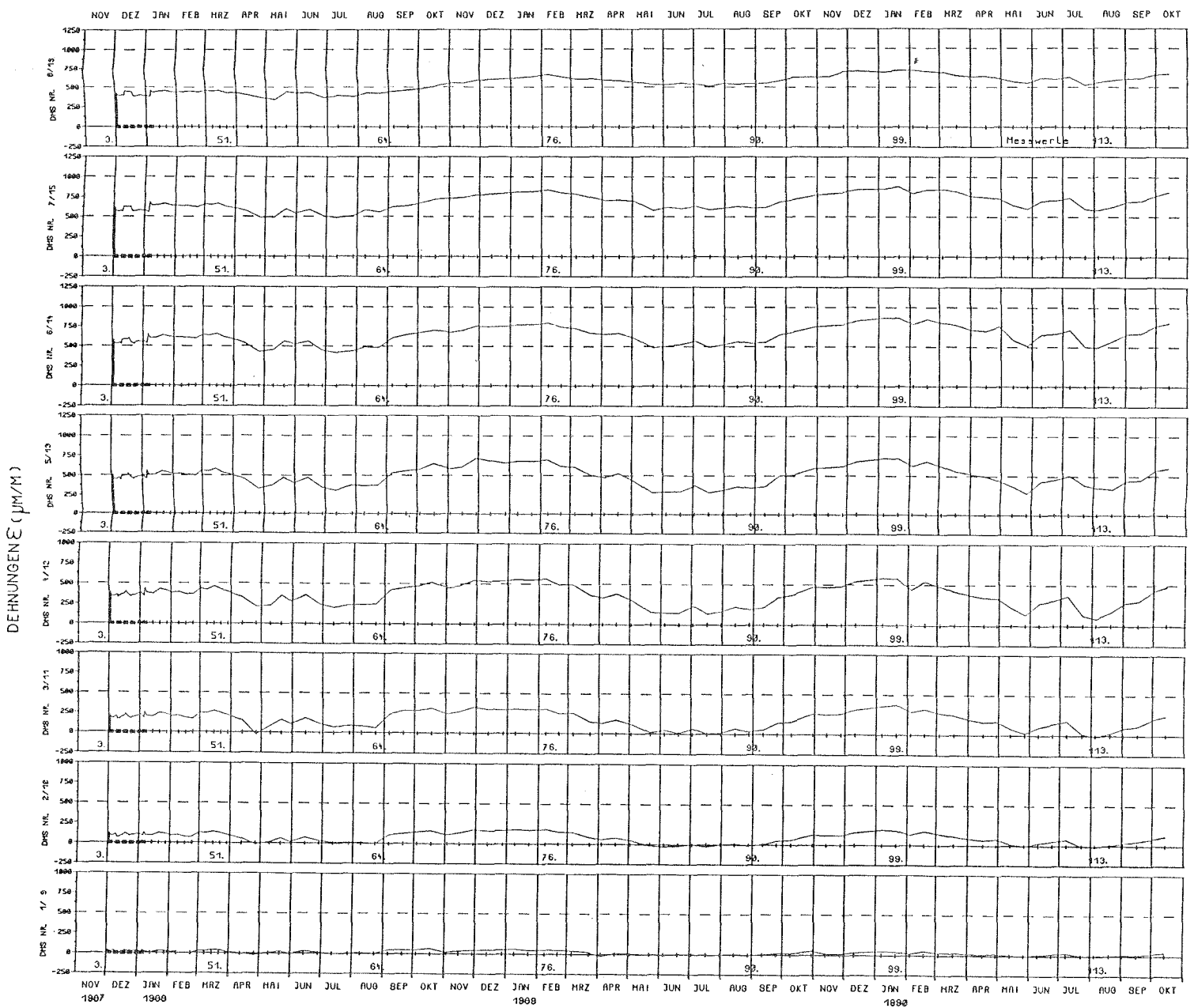
Z=34, 3kN

$\tau_{m, \sigma} = 1, 5N/mm^2$



113.
90.
99.
76.
64.
3, 51.

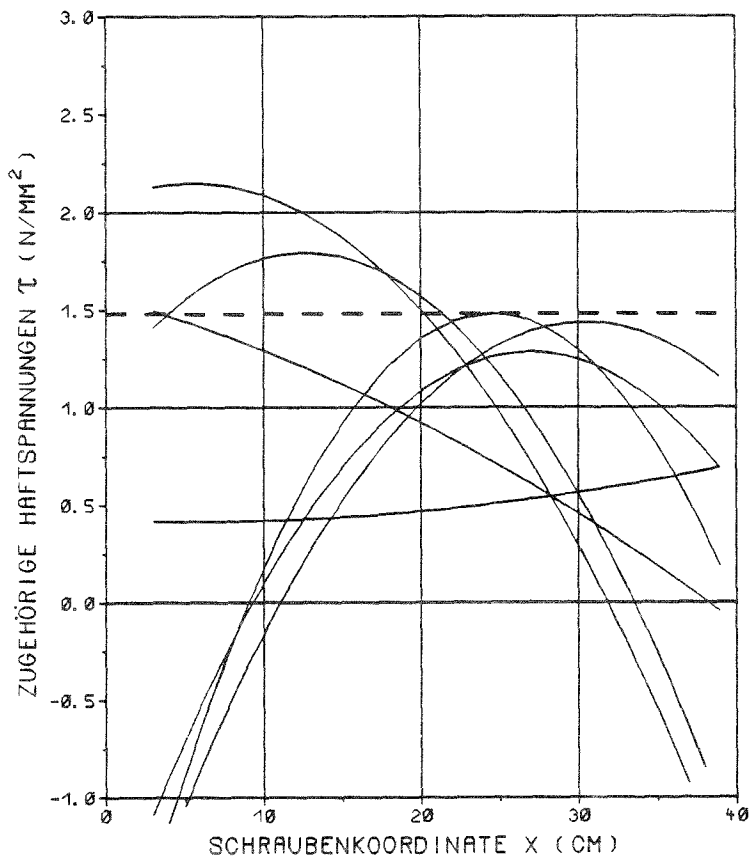
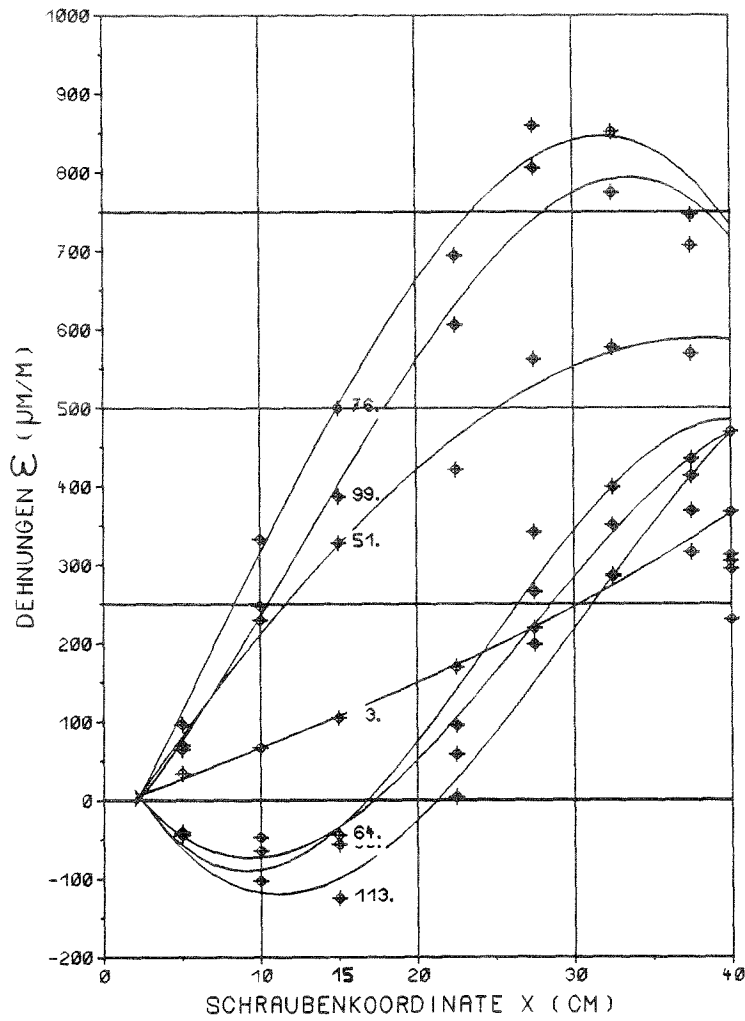
Körper S20/40



Körper S20/4R Dauerstandsbelastung

Z=34, 3kN

$\tau_{m, \sigma} = 1,5 \text{ N/mm}^2$



m, σ

113.

3. 64.

99.

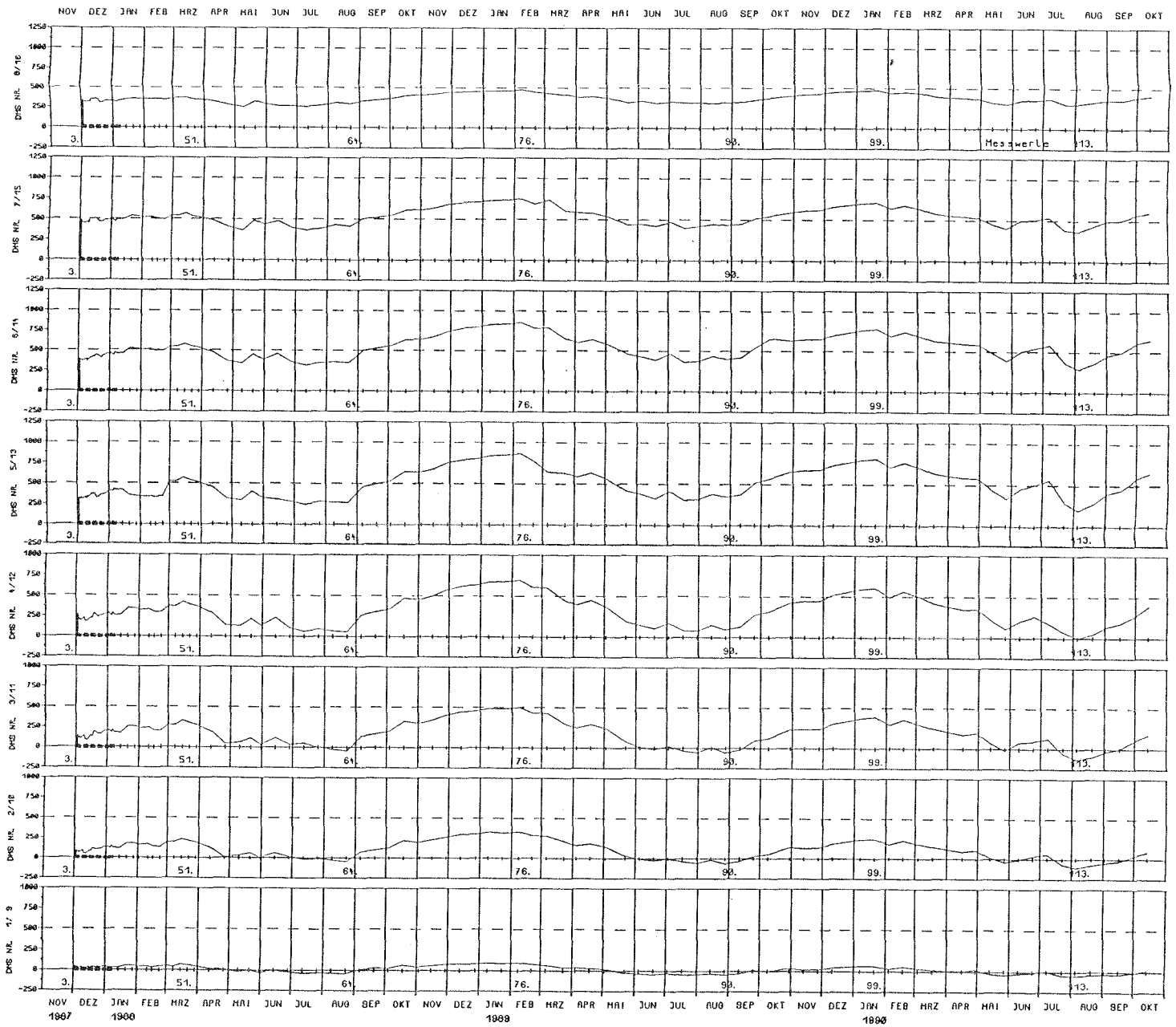
51.

99.

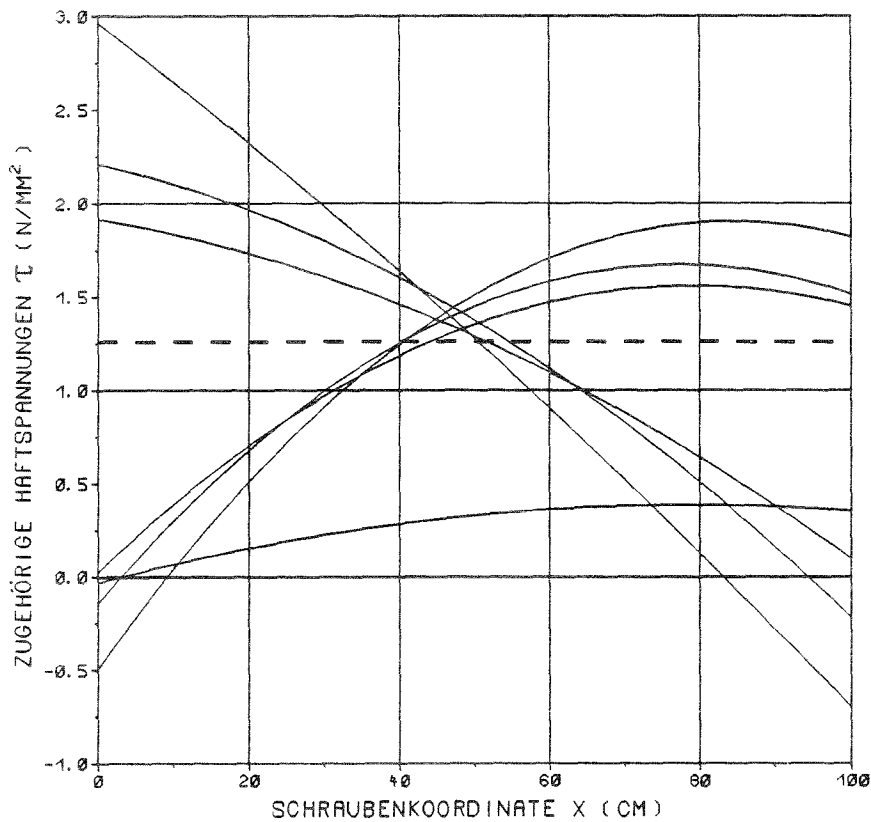
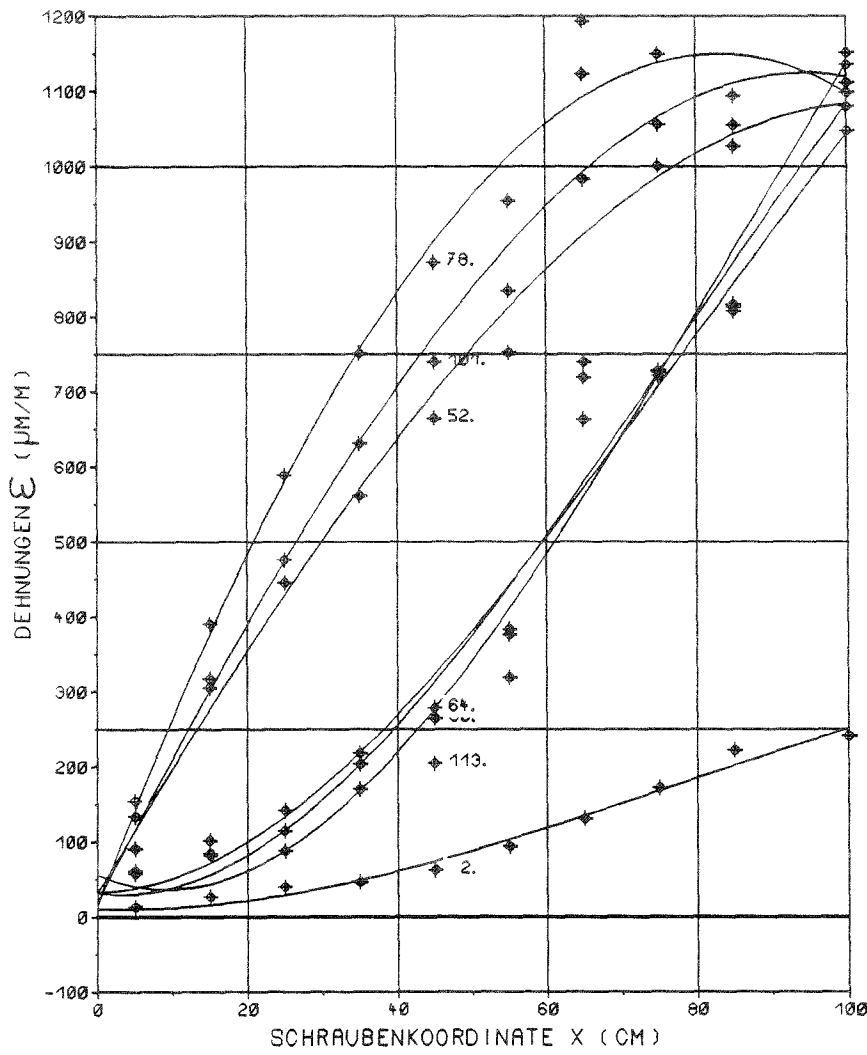
76.

Körper S20/4R

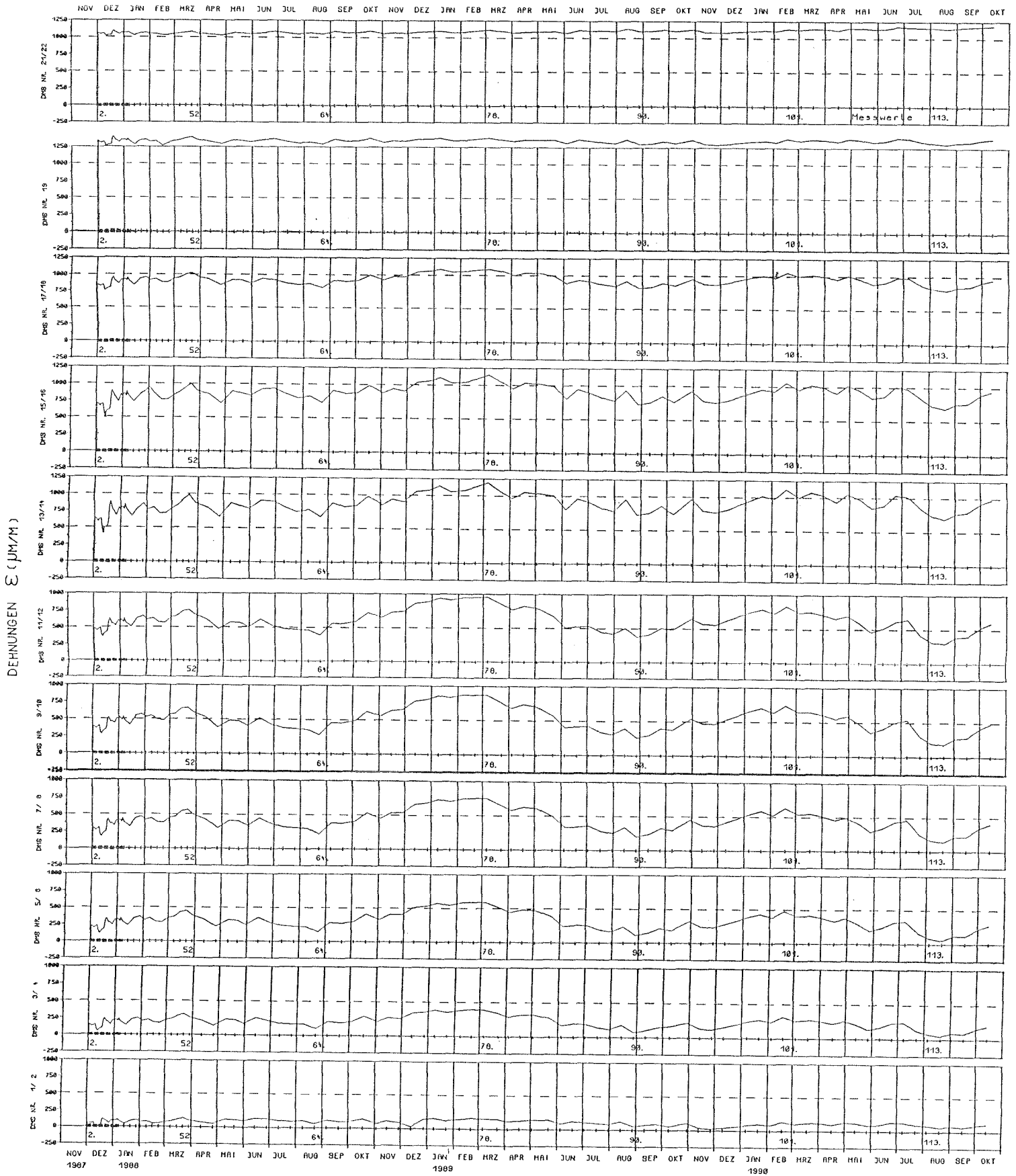
DEHNUNGEN ϵ ($\mu\text{m/m}$)



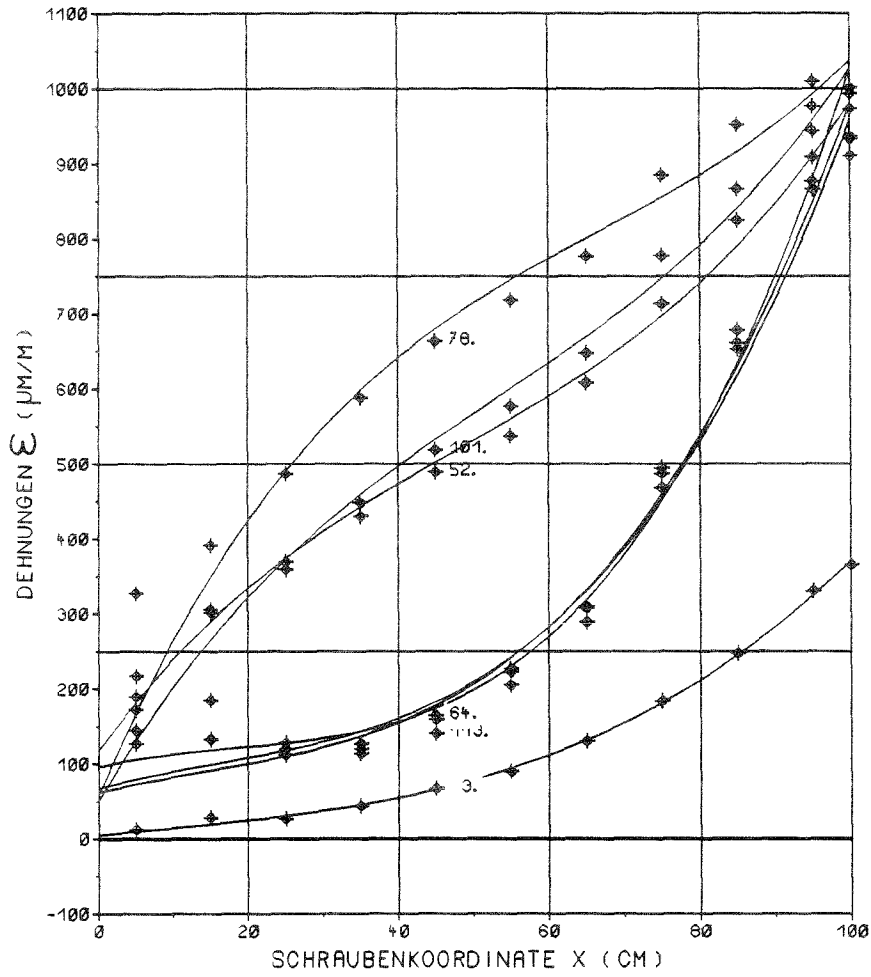
Körper G26/10R Dauerstandbelastung $Z=104,7\text{kN}$ $\tau_{m, \sigma}=1,3\text{N/mm}^2$



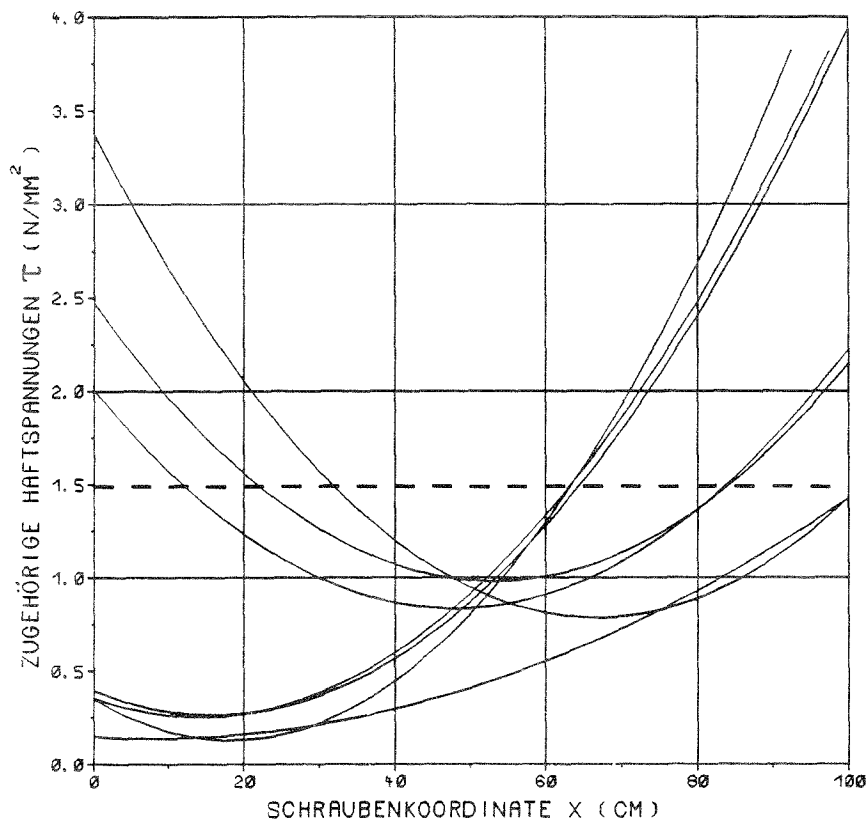
Körper G26/10R



Körper G32/10P Dauerstandbelastung $Z=149,7\text{kN}$ $\tau_{m,a} = 1,5\text{N/mm}^2$



113.



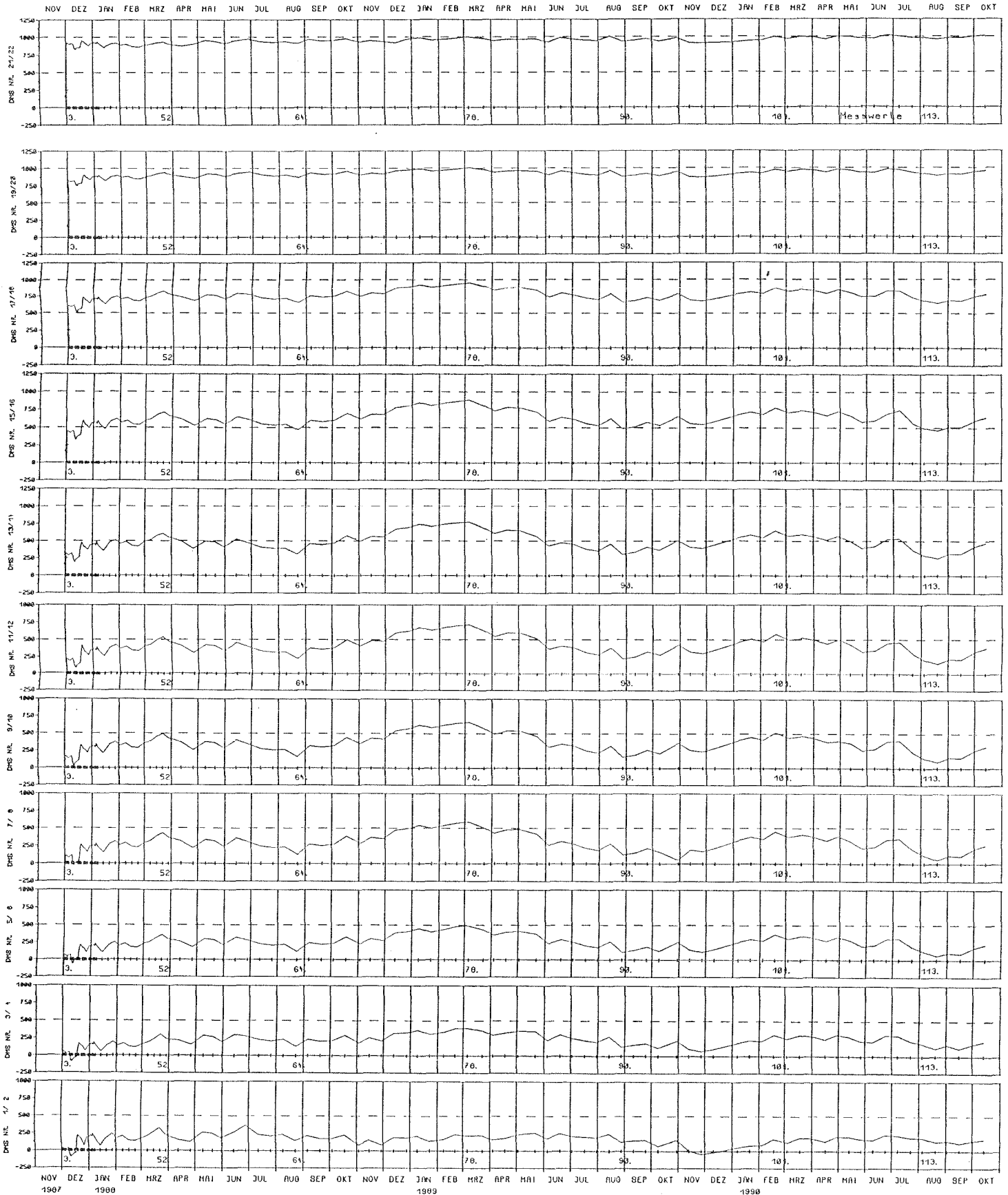
64. 90.

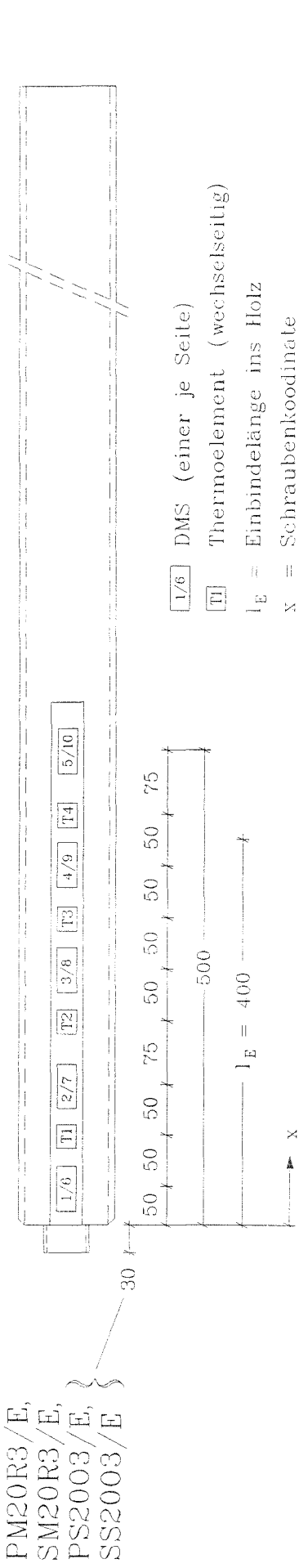
52. 101.

$\tau_{m,a}$ 76.

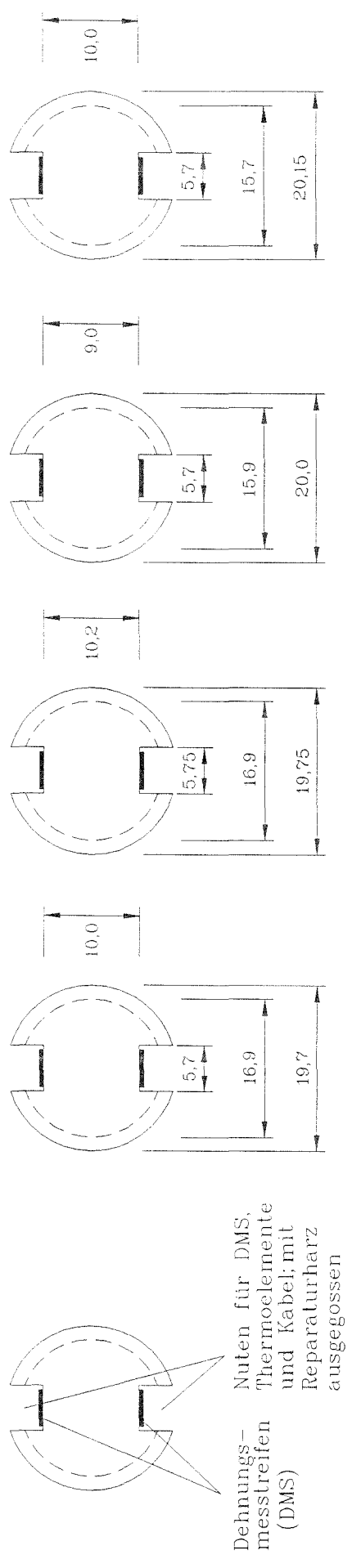
Körper G32/10P

DEHNUNGEN ϵ ($\mu\text{m}/\text{m}$)





Querschnitte:



Nuten für DMS, Thermoelemente und Kabel mit Reparaturharz ausgegossen

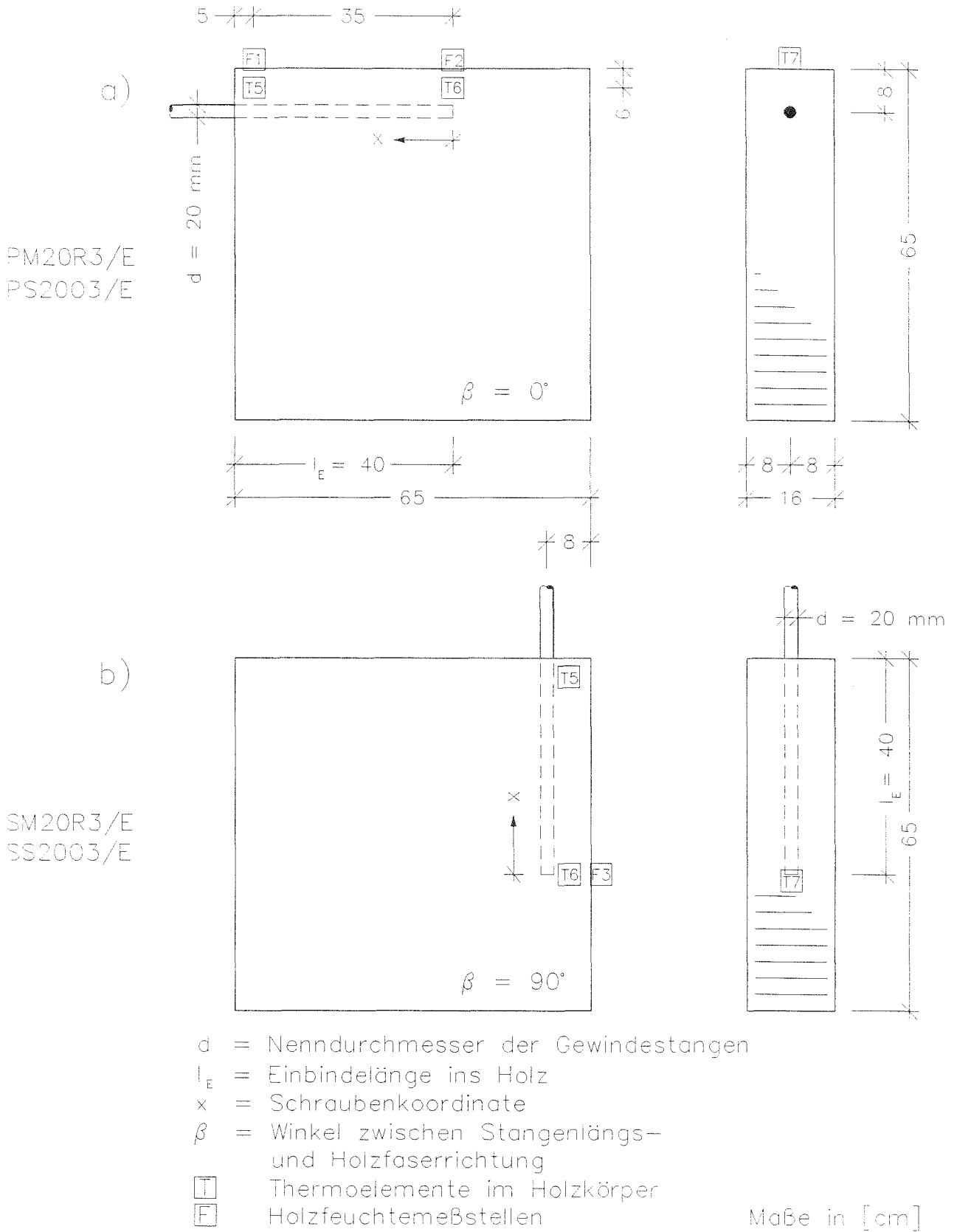
Netto-Kernquerschnittsfläche
 A_n [mm²]

Güte 8.8

SM20R3/E	PM20R3/E	PS2003/E	SS2003/E
187	188	161	163

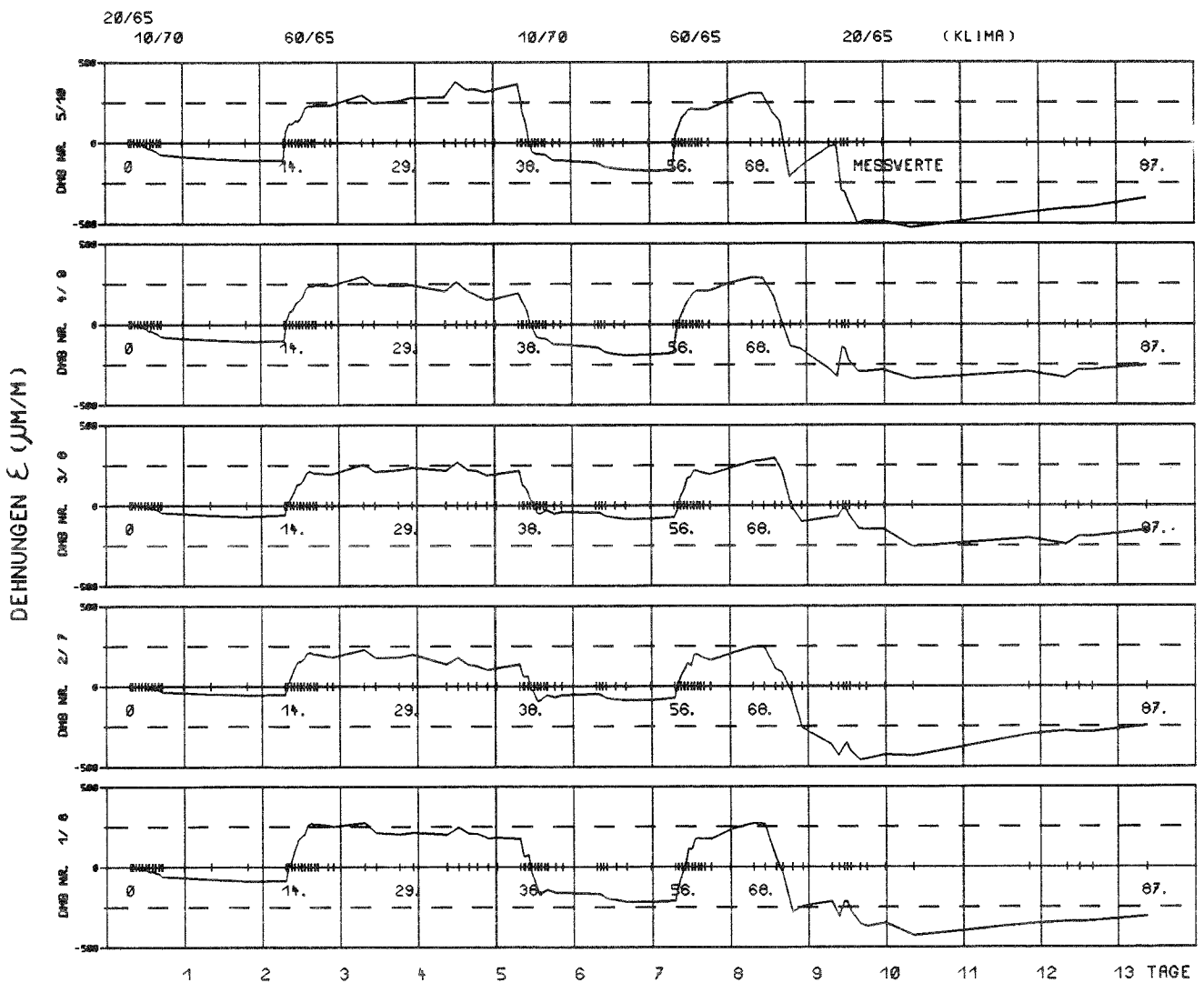
Metrisches Gewinde M20 Schlüsselschrauben S20

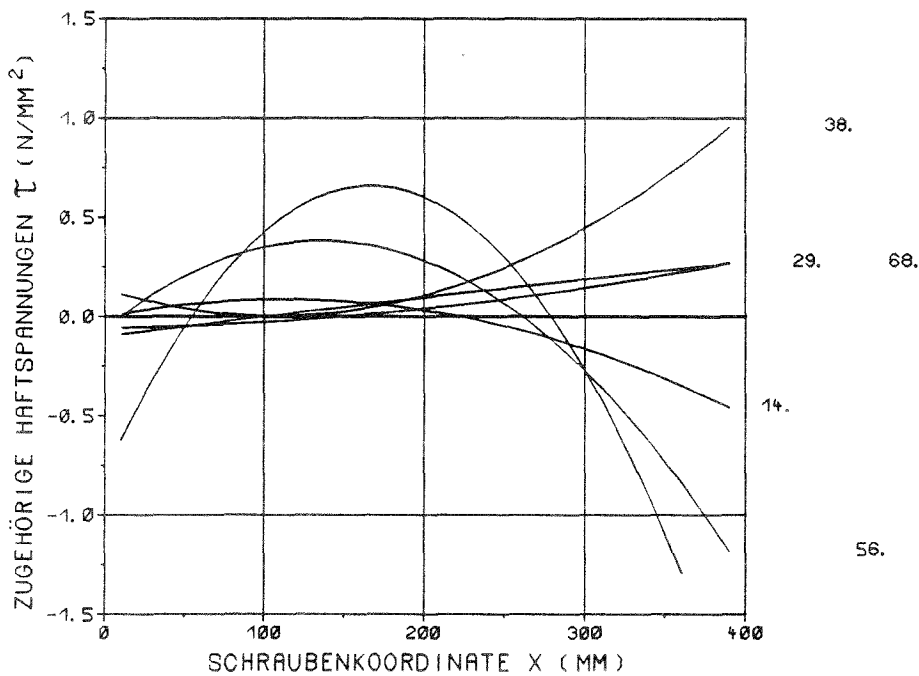
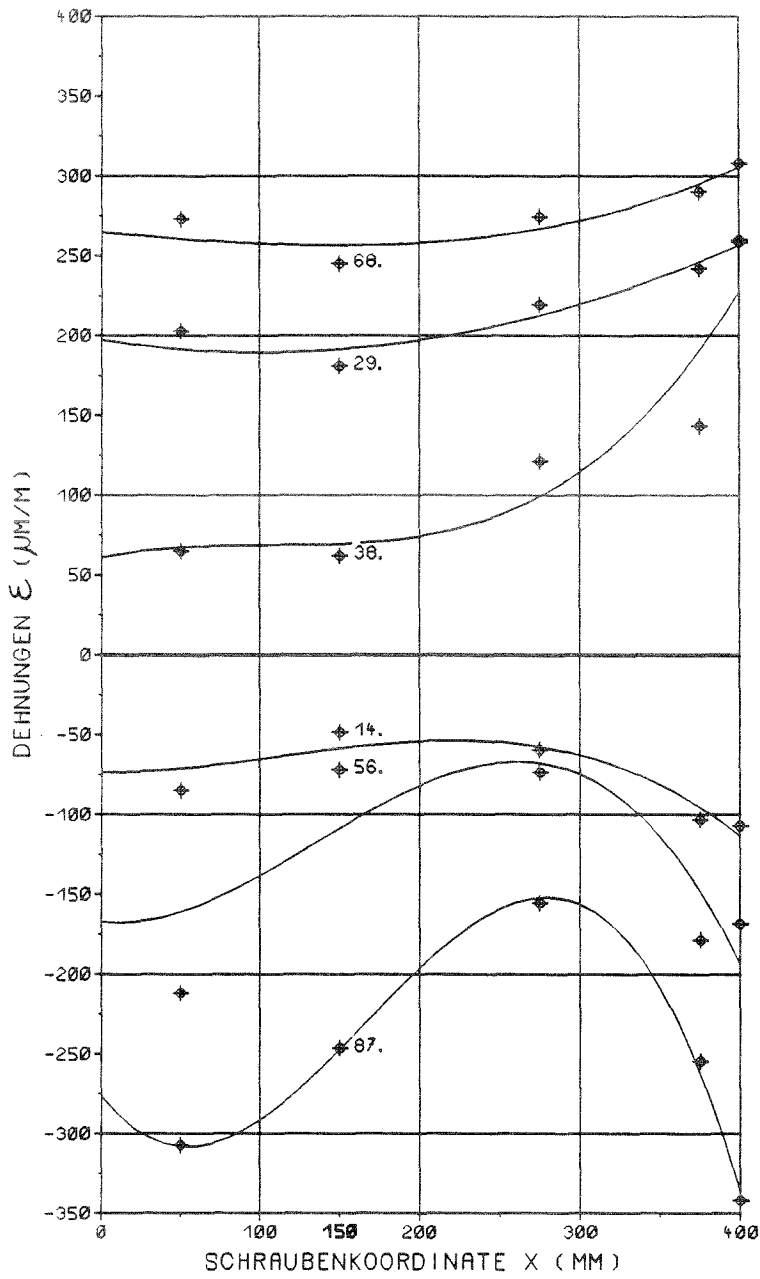
Maße in [mm]



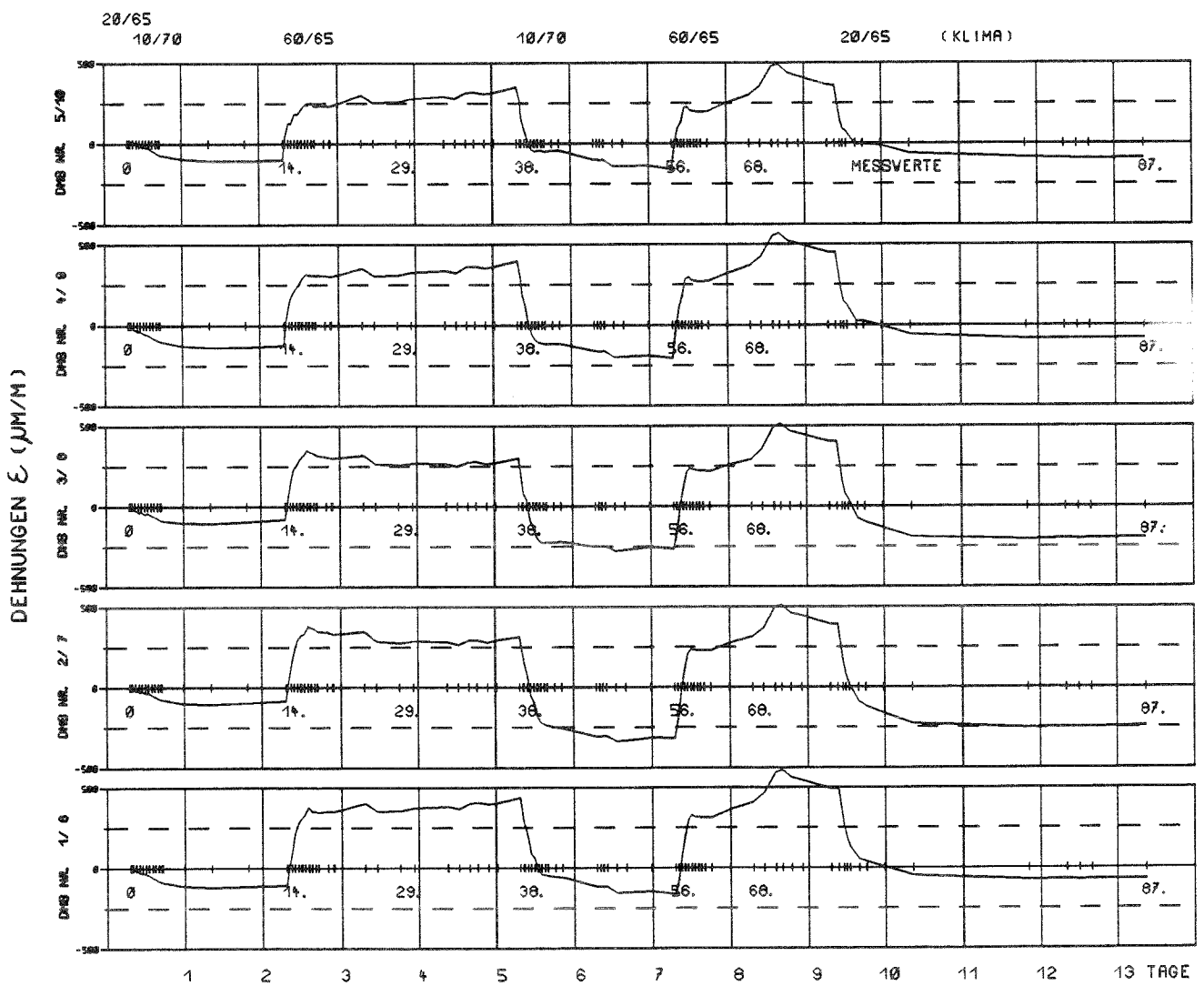
Schematische Darstellung der Prüfkörper für die ergänzenden Temperatur-Versuche (Reihe 1.3 vom Teil 2 des Forschungsvorhabens)

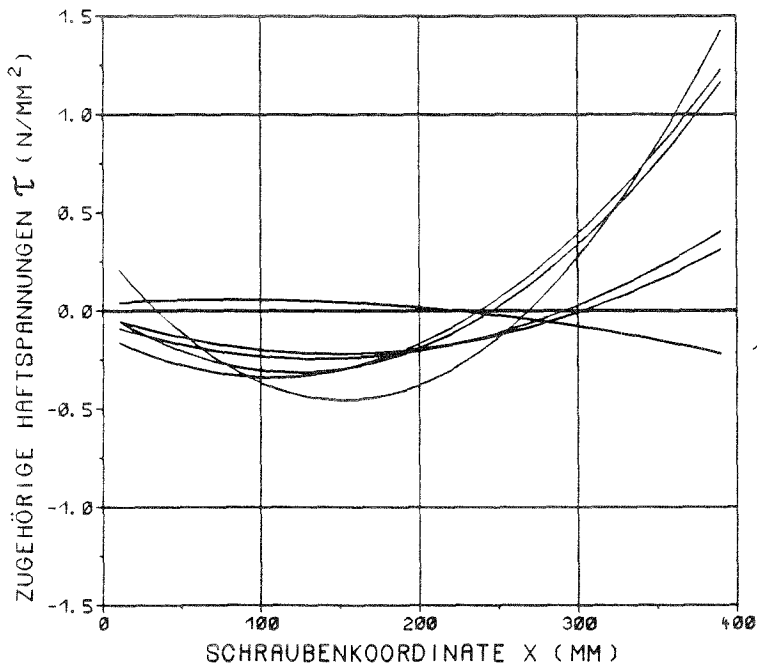
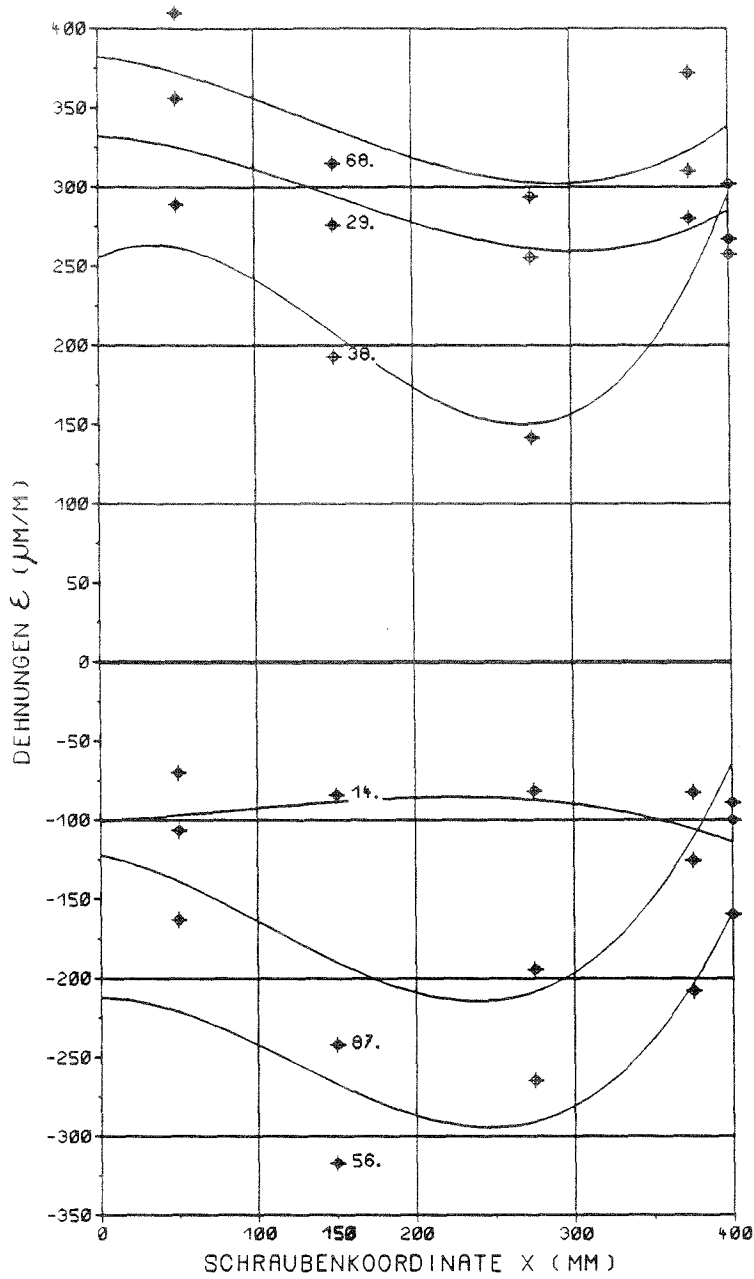
Körper PM20R3/E





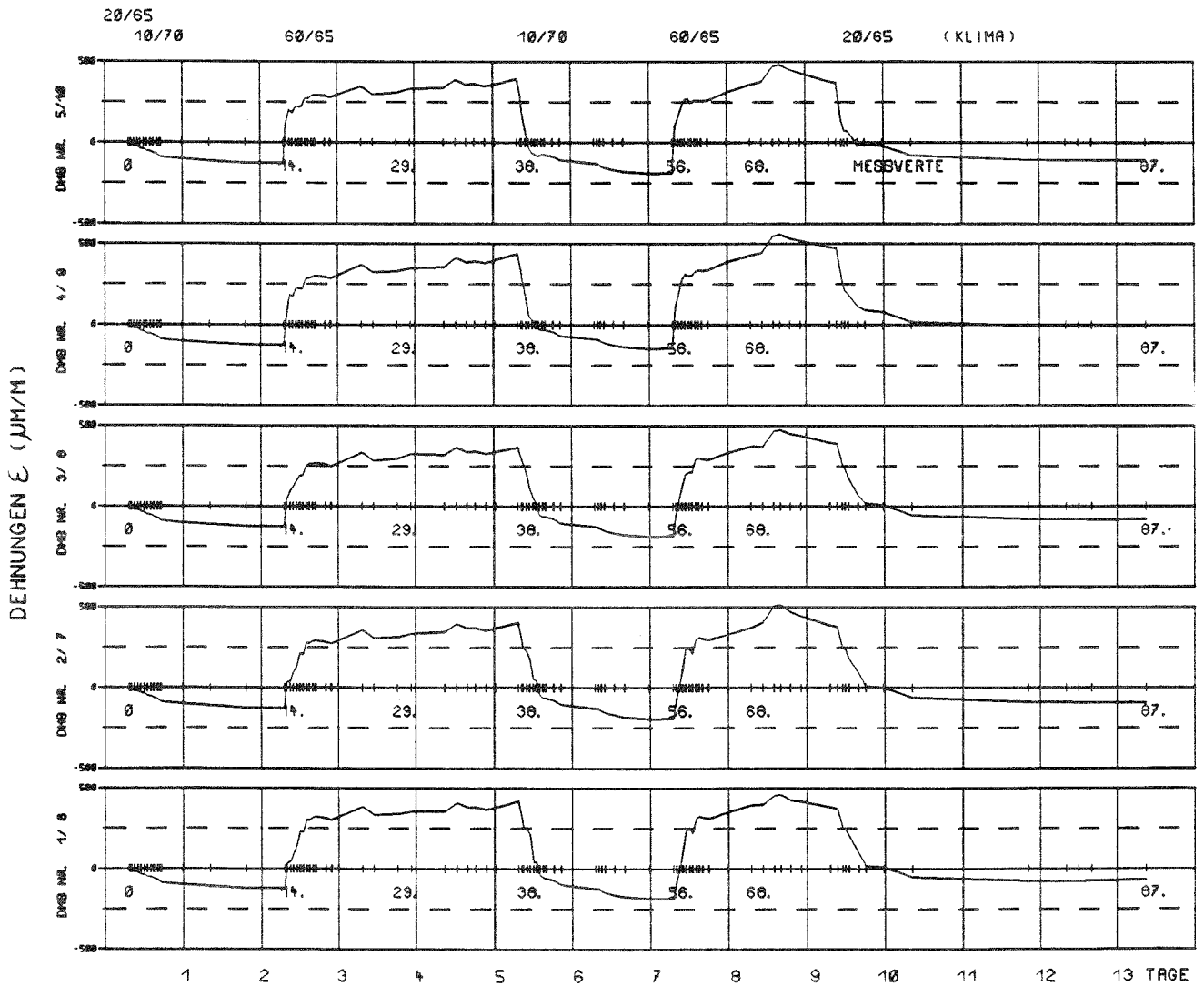
Körper SM20R3/E

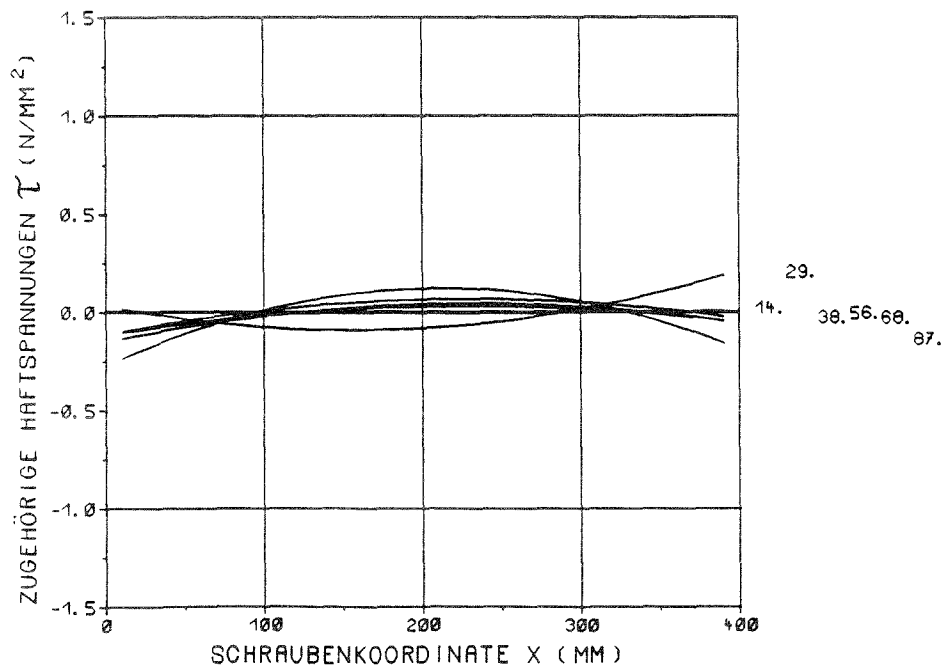
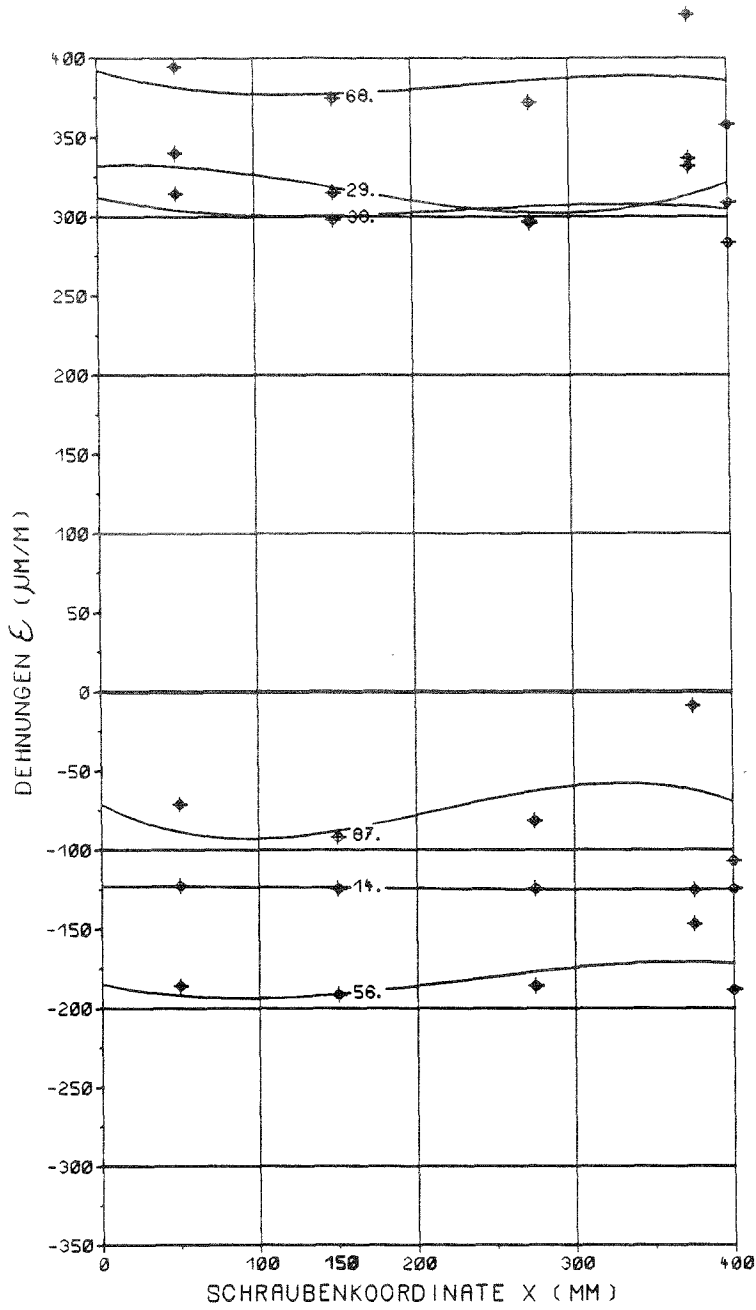




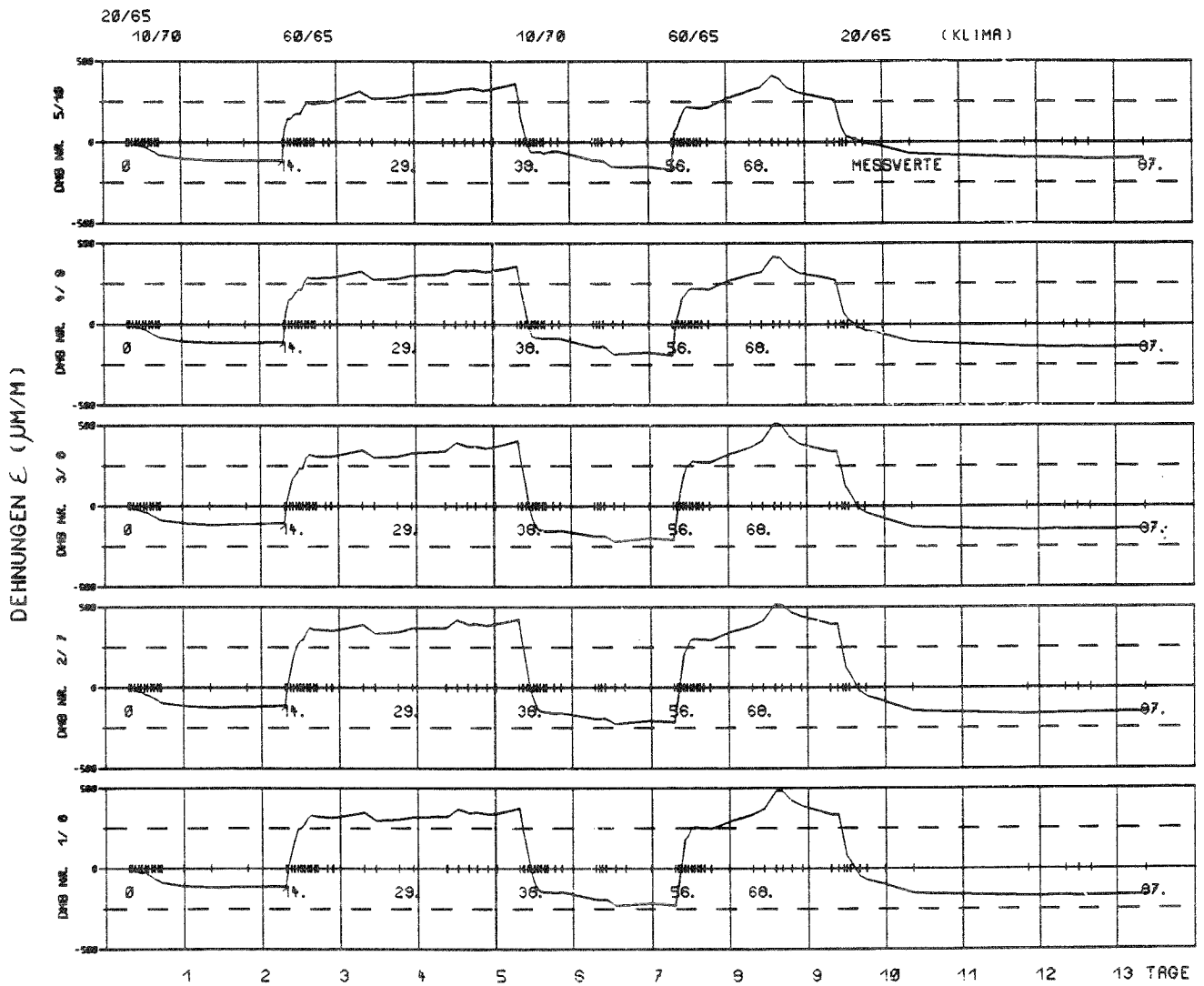
36.
56. 67.
29. 68.
14.

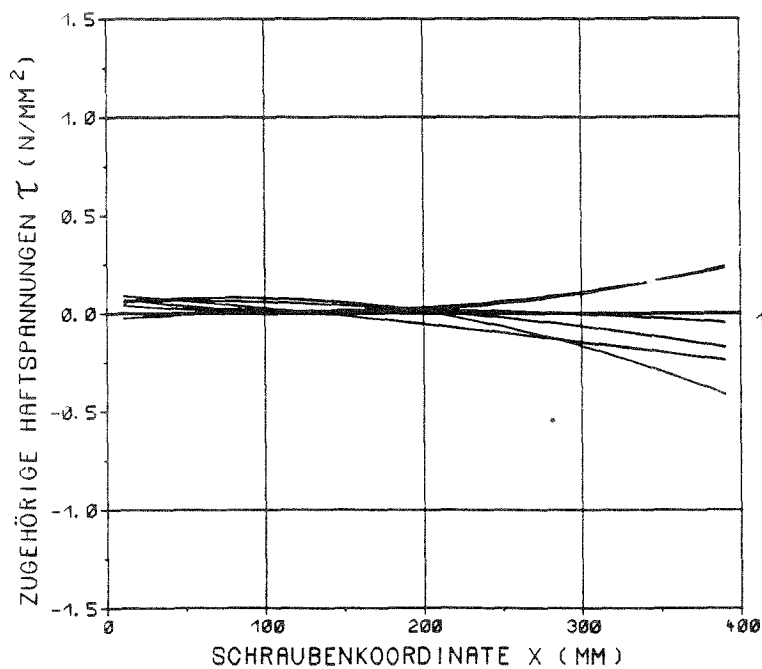
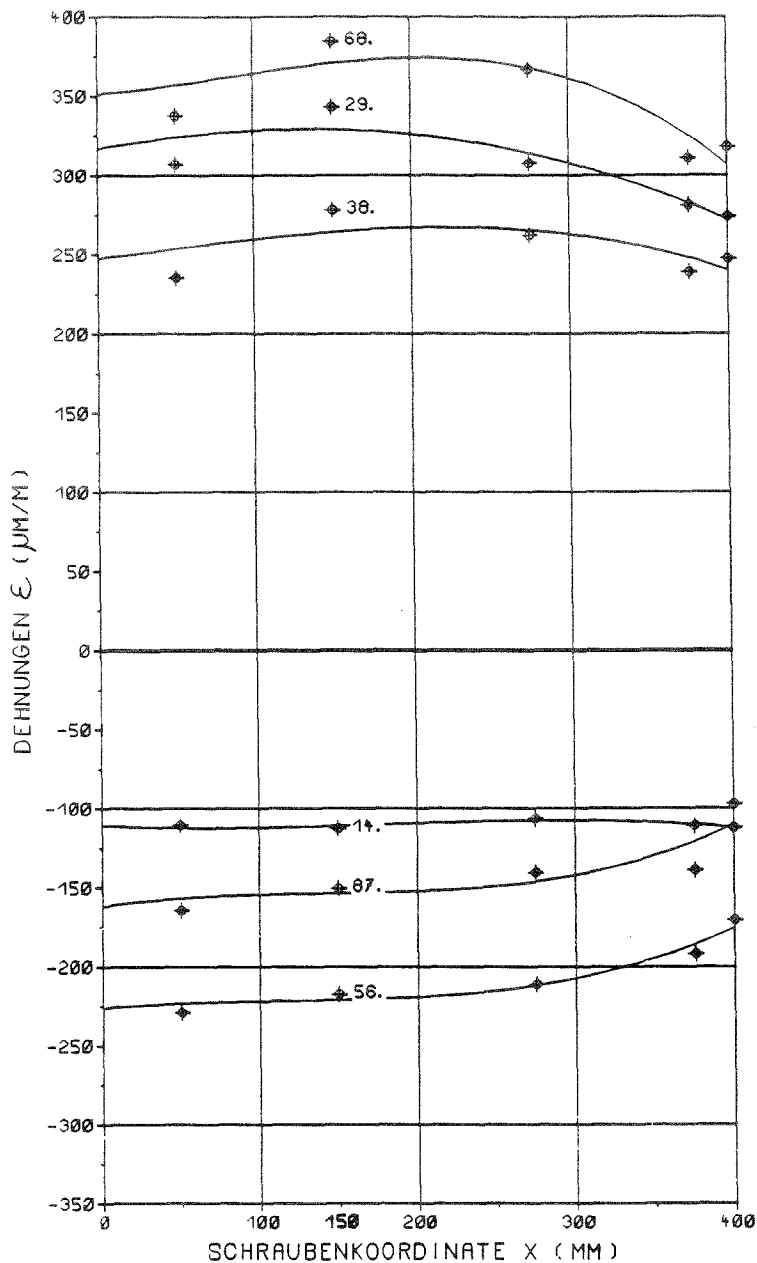
Körper PS2003/E





Körper SS2003/E





Boulons sous traction axiale pour la transmission de grandes forces et de forces perpendiculaires au fil dans des poutres

2ème partie: influence des conditions climatiques et d'une charge de longue durée

Au cours de ce projet, les contraintes de la connection fer - (colle) - bois sous des changements climatiques furent examinées (avec et sans charge externe supplémentaire) en variant les paramètres suivants: forme du filetage, sorte de colle et angle entre la direction du boulon et la direction du fil (du bois).

Quatre périodes climatiques furent effectuées pour examiner l'influence d'un changement d'humidité. Le climat changeait approximativement tous les six semaines, en partant d'un climat sec (30°C / 40% humidité relative) jusqu'à un climat humide (30°C / 90% hum. rel.).

La connection bois - (colle) - fer réagit immédiatement à tout changement climatique: au cours du séchage le bois se rétracte et les boulons sont comprimés. Après un mois au plus tard, cette dilatation négative atteint une valeur constante. Un comportement similaire (avec signe inverse) fût constaté durant la période d'humidité.

Les contraintes au long de la surface d'adhérence furent trouvées d'être les mêmes (en valeur absolue) au cours des périodes de séchage et d'humidité. La distribution des dilatations d'adhésion (et ainsi aussi des contraintes correspondantes) semble d'être indépendante de l'angle entre la direction du boulon et la direction du fil du bois. Les boulons collés perpendiculairement au fil montraient cependant des valeurs plus élevées que les boulons parallèles au fil. Cet effet peut être expliqué avec le comportement de retrait et de gonflage, divergeant avec la direction du fil.

Après les périodes climatiques, les boulons furent tirés hors du bois. Aucune réduction de résistance comme suite des charges climatiques fût constatée.

Pour examiner le comportement des boulons sous une force externe supplémentaire à la charge climatique, quelques spécimens d'essai furent placés en dehors sous un toit. Les contraintes d'adhésion sont mesurées au cours du temps à l'aide d'extensiomètres collés sur/dans les boulons. Les mesurages seront continués au delà de la fin du projet pour obtenir des résultats encore plus éprouvés en ce qui concerne le comportement de boulons collés sous une charge de longue durée.

Axially loaded glued-in steel rods for transmitting heavy loads and perpendicular-to-grain forces in beams.

Part 2: Influence of environmental conditions and long-term loading.

A { The objective of this research project was to determine the stresses in the joint between steel and timber under climatic changes (with or without external loading). The influencing parameters, such as shape of the rods, adhesive and angle between bolt and grain direction were varied.

In order to determine the influence of changing relative humidity four periods of different climates were chosen. The climate changes approximately every six weeks from dry conditions (30°C/40%r.h.) to wet conditons (30°C/90%r.h.).

The joints showed an immediate reaction to every climate change: Under dry conditions the rods are compressed due to wood shrinkage. The strains obtain a constant value within one months time. A similar behaviour was observed during wet conditions. The measured stresses along the penetration depth of the rods showed the same distribution under shrinking and swelling with alternating stress direction. The distribution of the strains and the corresponding stresses proved to be independent of the angle between the rod and the grain direction; rods glued-in perpendicular to the grain showed, however, somewhat higher values than those rods glued-in parallel to the grain. This can be attributed to the different swelling and shrinking factors.

A { After several climatic alternations the rods were pulled out of the timber. No reduction of the withdrawal resistance due to climatic changes was observed.

For determining the load-carrying behaviour under long-term loading under changing environmental conditions some test specimens were placed in an open shed. Strains versus time are measured with strain gauges bonded to the rods. These tests are continued in order to obtain better and more realistic results on the long-time behaviour of glued-in rods.