

Spannungs- und Stabilitätsverhalten von punktförmig gestützten Schalen- tragwerken

T 2947

T 2947

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2001, ISBN 3-8167-5789-8

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.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

Schlußbericht

**Zum Forschungsauftrag Nr. IV 1-5-813/96 des Deutschen Instituts für
Bautechnik: Spannungs- und Stabilitätsverhalten von punktförmig
gestützten Schalenträgwerken**

von

U. Schulz, T. Ummenhofer

1. Allgemeines

Beim Bemühen, einen Weg für den Stabilitätsnachweis von axial durch Blocklasten beanspruchten Zylinderschalen zu finden, steht man vor den gleichen Schwierigkeiten, wie auch bei anderen Schalenformen und Beanspruchungskonfigurationen. Die numerische Behandlung des Stabilitätsproblems scheitert stets an den fehlenden Informationen über den Imperfektionszustand der auszuführenden Schalenstruktur. In den letzten Jahren versucht man nun die bisher übliche empirische Vorgehensweise mit der numerischen Behandlung zu kombinieren [z. B. 1, 2]. An Schalen mit signifikanten Geometrie- bzw. Lastparametern wird dabei das Stabilitätsverhalten numerisch und experimentell untersucht und die eventuell vorliegenden Differenzen als Korrekturfaktoren für die in numerischen Parameterstudien gefundenen Abhängigkeiten eingeführt. Bei dieser Vorgehensweise ist natürlich ein besonderes Augenmerk darauf zu richten, daß bei den experimentellen Untersuchungen realistische Imperfektionen vorgelegen haben. Ist dies nicht der Fall, so sind die korrigierten numerischen Ergebnisse unbrauchbar – da zu unwirtschaftlich oder zu unsicher.

Zu der hier anstehenden Problematik sind in der letzten Zeit die Arbeiten von W. Guggenberger [3], J. Rathé-R. Greiner [4]; G. Rotter-J. Teng [5] und W. Guggenberger- R. Greiner [6] entstanden. Rathé und Greiner berichten über in Gent durchgeführte experimentelle Untersuchungen an 4-punktgestützten stählernen Zylinderschalen unterschiedlicher

Wanddicke und Stahlqualität. In parallel durchgeführten, auf der Arbeit von Guggenberger [3] aufbauenden numerischen Untersuchungen schaffen sie die Voraussetzungen für die Erstellung eines die verschiedenen Parameterbereiche umfassenden Formelausdruckes, den sie für die Aufnahme in die ECCS Recommendations [7] empfehlen. Rotter und Teng führen ähnliche numerische Studien durch und kommen zu etwa den gleichen Empfehlungen wie Rathé und Greiner. Einen zusammenfassenden Überblick über den derzeitigen Wissensstand geben Guggenberger und Greiner [6].

Einige wesentliche Aspekte ließen es zweckmäßig erscheinen, sich erneut mit der Problematik punktgestützter Zylinderschalen auseinanderzusetzen. Zum einen ist bei den Arbeiten von Rathé und Greiner der Empfehlung der DAST-Richtlinie 017, numerische Parameterstudien erst nach experimenteller Verifikation durchzuführen, nicht gefolgt worden. Der bei den einzelnen Versuchen vorgelegene Imperfektionsgrad wurde nicht umfassend bestimmt und daher auch nicht bei der numerischen Berechnung zugrunde gelegt. Zum anderen ist bei den Versuchen eine 4-Punktlagerung gewählt worden, bei der nicht ohne weiteres auf die Belastbarkeit eines Lagerungspunktes geschlossen werden darf. Es ist durchaus möglich, daß infolge vorliegender Imperfektionen, ein Auflagerungspunkt nicht voll an der Lastableitung beteiligt ist und daß daher die Quotientenbildung unzulässig ist. Es ist zudem fraglich, ob die gegenseitige Beeinflussung von starrer Randlagerung und Punktstützung vernachlässigt werden darf.

Als ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Berücksichtigung der in der Praxis zumeist vorhandenen Endringsteife zu nennen. Eine derartige Steife bewirkt stets eine mehr oder weniger starke Lastverteilung und beeinflußt daher ganz wesentlich die Höhe der Beullast und den Ort der einfallenden Beule.

Aus den aufgezeigten Gründen sind im Rahmen eines Forschungsauftrags in Karlsruhe Beulversuche mit einer geänderten Versuchstechnik durchgeführt worden. Die jetzt 3-punktgelagerten Versuchszylinder wiesen dabei stets Endringsteifen und eine flexible Randlagerung auf.

Als weiterer Grund für die neuen Versuche ist die angestrebte Verifikation des von P. Knödel-Th. Ummenhofer [8] vorgeschlagenen Lastausbreitungswinkel-Verfahrens zu nennen. Es galt dabei, Aussagen über den Ort der jeweils einfallenden Beule und den sich einstellenden von der Endringsteifigkeit und der Lasteinleitungsbreite abhängigen fiktiven Lastausbreitungswinkel zu machen.

2. Konzept des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens

Ausgehend von der Erkenntnis, daß bei Punktstützungen das Instabilwerden der Schale stets durch das Einfallen von Einzelbeulen eingeleitet wird, haben P. Knödel und Th. Ummenhofer [8] das Konzept des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens vorgeschlagen. Nach diesem Konzept fällt die Beule dann ein, wenn im maßgebenden Abstand von der Randlast die kritische Beulspannung überschritten wird.

Um den Ort der einfallenden Beule und damit den Ort für den zu führenden Stabilitätsnachweis bestimmen zu können, wird zunächst ein fiktiver Lastausbreitungswinkel definiert. Er stellt die Neigung der Verbindungslinie an die rechteckigen Spannungsblöcke dar, die sich nach einem Flächenausgleich der realen Spannungsverteilungen in den verschiedenen Schalenhorizonten ergeben (Bild 1). Der Winkel wird nicht konstant sein, sondern von der Lasteinleitungsbreite, der Eckringsteifigkeit und der Entfernung von der Lasteinleitungsstelle abhängig sein.

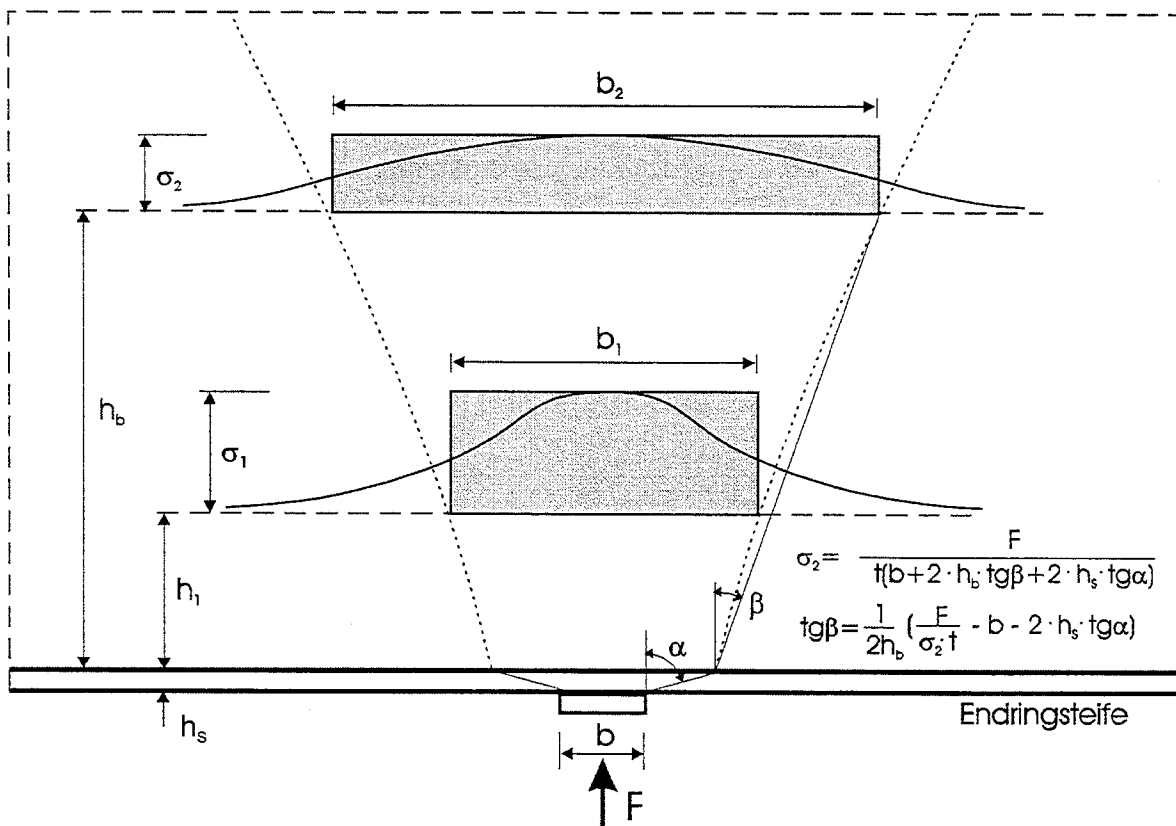


Bild 1: Prinzipielle Darstellung der Spannungsverhältnisse im Lasteinleitungsbereich

Neben dem fiktiven Lastausbreitungswinkel benötigt man nach diesem Konzept noch eine Aussage über den Horizont, in dem die einfallende Einzelbeule auftritt. Dieser Horizont ist natürlich vom Radius-Wanddickenverhältnis, der Steifigkeit des Endrings und in gewissem Maße auch vom Imperfektionsgrad der Schale im Lasteinleitungsbereich abhängig. Geht man davon aus, daß die Endringsteifigkeit ausreichend groß ist und daß keine Imperfektionen vorhanden sind, so könnte man als maßgebend den Horizont definieren, der sich in der halben Höhe der bei ungestörter Randlagerung sich einstellenden Beulen ergibt. Je nach Schlankheitsgrad wird der maßgebende Horizont dann, für den Fall des eingespannten Schalenrandes, in etwa zwischen $h = 2,4 \sqrt{R \cdot t}$ (plastisches Beulen) und $h = 3,4 \sqrt{R \cdot t}$ (elastisches Beulen) liegen.

Dieses außerordentlich einfache, die Gegebenheiten bei Vorliegen ausreichend großer Abstände der einzelnen Punktstützungen im wesentlichen zutreffend beschreibende Nachweiskonzept, bedarf natürlich der experimentellen Verifikation. Dies sowohl im Hinblick auf den Nachweishorizont als auch auf die Höhe der Versagenslast.

3. Experimentelle Untersuchungen

Bei den experimentellen Untersuchungen galt es, besonders die folgenden Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Minimierung der herstellungsbedingten Schweißspannungen.
- Verwendung von Endringsteifen.
- Zwängungsfreie Lagerung am kontinuierlich belasteten Schalenrand.
- Statisch eindeutige Einleitung der Punktlasten.
- Unterschiedliche Schalenschlankheiten, Endringsteifigkeiten und Lasteinleitungsbreiten.

Mit dem besonderen Augenmerk auf diese Versuchsbedingungen sollte es möglich werden, die oben aufgezeigten Lücken bei den Versuchen von Rathé-Greiner [4] zu schließen.

Für die Beulversuche wurden stählerne Zylinderschalen mit dem Nenndurchmesser $D_n = 825$ mm, der Nennhöhe $L_n = 600$ mm und den Nennblechdicken $t_n = 0,6$ und $1,0$ mm verwendet. Sie waren jeweils aus Stahlblech der Güte St 37 (Nennstreckgrenze $R_{eH} = 350$ N/mm²) mittels Laserstrahlschweißung erstellt worden. Das Schweißverfahren, bei dem kein Zusatzwerkstoff eingesetzt wird, wurde gewählt, um die Schweißspannungen und die Gefügeveränderungen auf ein Minimum zu beschränken. Messungen haben gezeigt,

daß die Materialaufhärtung und damit einhergehend eine Streckgrenzenerhöhung auf einen nur wenige Millimeter großen Bereich beiderseits der Schweißnaht beschränkt blieb, und daß keine Änderung des Tragverhaltens einer Schweißnahtprobe gegenüber der ungeschweißten Probe auftrat.

Als Endringsteifen wurden ein leichtes L-Profil (20 x 20 x 2 mm) und ein steiferes □-Profil (20 x 20 mm) gewählt. Die Dimensionierung dieser Steifen erfolgte in Anlehnung an ausgeführte Silokonstruktionen. Hierzu ist der dimensionslose Steifigkeitsparameter

$$\Delta = \frac{J}{R^3 \cdot t}$$

gewählt worden. Er stellt näherungsweise den Quotienten aus Steifenträgheitsmoment und Biege- bzw. Torsionsträgheitsmoment der dünnwandigen Zylinderschale dar. Der Steifigkeitsparameter lag bei den vorliegenden Versuchskörpern mit $\Delta = 0,88 \cdot 10^{-4} - 4,0 \cdot 10^{-4}$ in der gleichen Größenordnung wie bei ausgeführten Silokonstruktionen ($\Delta = 1,3 \cdot 10^{-4} - 18 \cdot 10^{-4}$) – die Praxisrelevanz bezüglich der Endringsteifen war demnach gegeben.

Für die Verbindung der Steife mit dem Zylinder ist zur Vermeidung von Schweißspannungen und Schweißverzügen die Klebtechnik gewählt worden. Dabei ist die jeweils innen- und außenliegende Ringsteife derart fixiert worden, daß ein 2,5 mm großer Spalt zwischen Steife und Zylinderwand entstand und daß der Zylinder etwa 2 mm über die Steifen hinausreichte. Es war so gewährleistet, daß ein Verguß mit einem fließfähigen Kleber (TECHNICOLL 8262/8263 der Fa. Fuller, München) möglich war, und daß die Lasteinleitung unmittelbar in die Schale und nicht über die Steifen erfolgen konnte.

Nach Fertigstellung der Versuchszylinder sind diese in einer Koordinatenmeßmaschine an diskreten Punkten vermessen worden. Die Abstände des annähernd quadratischen Rasters betrug in Umfangs- bzw. Längsrichtung etwa 13 mm. Die Meßgenauigkeit lag deutlich über dem Wert von 0,01 mm. Beispielhaft sind die ermittelten geometrischen Imperfektionen in Bild 2 dargestellt worden. Es zeigt sich, daß die Versuchszylinder einen praxisrelevanten Imperfektionsgrad aufwiesen und daß die maximalen Formabweichungen mit $w_{\sqrt{t}} = 1,5 - 2,0$ in etwa in dem in DIN 18 800 Teil 4 fixierten Rahmen lagen. Die Versuchsergebnisse müssen demnach nicht unter dem Vorbehalt einer zu perfekten Schalengeometrie betrachtet werden.

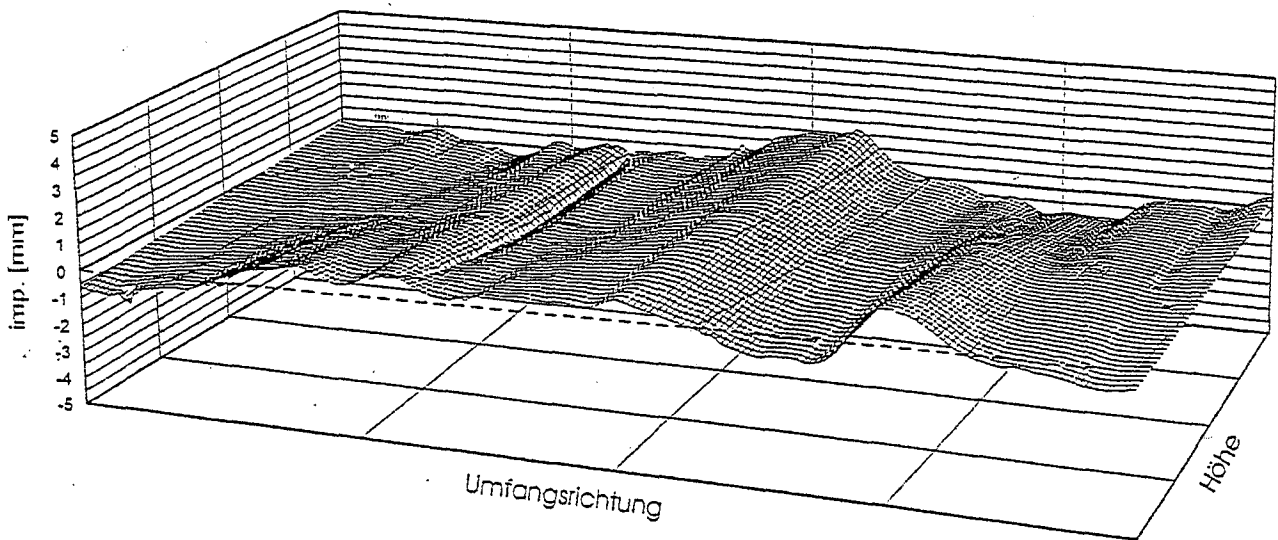


Bild 2: Imperfektionen bei Versuchskörper Nr. 5 (abgewickelt)

Beim Versuchsaufbau wurde darauf geachtet, einen möglichst genau definierten Lasteintrag in die Schale zu erreichen. Hierzu ist in einer neuartigen Vorgehensweise der Zylinder mit dem unten liegenden Flansch auf einen mit Wasser gefüllten Hochdruckschlauch aufgelegt worden. Der Schlauch wurde durch auf eine Bodenplatte angeschweißte, kreisförmig gebogene Stahlbleche zu einem Kreis geformt, wobei der mittlere Durchmesser dem Durchmesser der Versuchszylinder entsprach. Der Wasserdruck im Schlauch wurde so eingestellt, daß beim Einbau des Zylinders überall Kontakt zwischen der Zylinderaufstandsfläche und dem Wasserschlauch herrschte. Durch diese Anordnung konnte eine konstante Pressungsverteilung bzw. ein gleichförmiger Lasteintrag am unteren Zylinderende erreicht und störende Effekte aus ungleichförmiger Auflagerung vermieden werden.

Um die Einzellasten definiert in den Zylinder eintragen zu können, wurde eine Dreipunktstützung realisiert. Bei einem Lasteintrag durch drei über dem Zylinderumfang äquidistant angeordnete Blocklasten mit unterschiedlichen Lasteinleitungsbreiten ist infolge der statischen Bestimmtheit des Systems gewährleistet, daß die eingetragene Kraft in jedem Drittelpunkt vom selben Betrag ist. Um dennoch eine Kontrolle des Lasteintrags zu erreichen, wurden bei

einem Teil der Versuche die Auflagerkräfte mit an jeder Lasteinleitungsstelle angeordneten Kraftmeßdosen kontrolliert.

Die Belastung des in die Prüfeinrichtung eingebauten Versuchszylinders (Bild 3, Anhang D Bilder 1+2) erfolgte über eine zentrisch eingebaute Druckmeßdose (Meßgenauigkeit 0,5 %) durch einen Hydraulikkolben. Um dabei die Übertragung von Biegemomenten zwischen dem Hydraulikkolben und der oberen Lasteinleitungsplatte verhindern zu können, wurde die Belastung über einen kugelförmig gearbeiteten Stahldorn aus gehärtetem Stahl in den Stempel eingebracht. Zur Überprüfung des gleichmäßigen Lasteintrags sind die Versuchskörper jeweils mit einer Last in Höhe von 10 % der zu erwartenden Beullast vorbelastet worden, um bei größeren Ungleichmäßigkeiten in ihrer Lage korrigiert zu werden. In jedem der drei Lasteinleitungsmeridiane sind die Längsverformungen mittels induktiver Wegaufnehmer und die lokal auftretenden radialen Verformungen mittels Meßuhren ermittelt worden.

Bei den Versuchen wurde die Belastung jeweils schrittweise bis zum stets schlagartigen Einfallen der ersten Beule (F_1) gesteigert – teilweise war sie auch noch leicht darüber hinaus steigerbar (F_2). In manchen Fällen ergaben sich auch an zwei bzw. allen drei Lasteinleitungsstellen gleichzeitig Beulenbildungen. Nach Entlastung der Versuchskörper verschwand zumeist die elastisch eingefallene Beule. Die in einigen Fällen vorgenommene Wiederbelastung führte zu einer Vertiefung der Beule und dem Einfallen von weiteren gegeneinander versetzten Beulen (Anhang D Bild 7). In diesem Fall ergab sich eine Last (F_3), die entweder auf dem gleichen Niveau wie bei der Erstbelastung lag oder, wenn Plastizierungen im Beulenbereich aufgetreten waren ($R/t = 450$), ein erheblich niedrigeres Lastniveau. In diesem Fall lagen bei der Zweitbelastung nicht nur große affine Vorbeulen vor, sondern wohl auch Eigenspannungen im Beulenbereich.

Da sich bei den Versuchen stets lokal begrenzte Beulen ergaben und die Versuchsschale sonst stets unbeschädigt blieb, ist der Versuchskörper jeweils um 60° gedreht worden, um einen weiteren Versuch durchführen zu können. Diese Vorgehensweise schien gerechtfertigt zu sein, da kein signifikanter Unterschied zum Erstversuch festzustellen war. Die gleiche Vorgehensweise ist auch im Hinblick auf den zweiten Schalenrand gewählt worden.

Nach Durchführung der Beulversuche sind aus dem jeweiligen Prüfkörper 8 Stahlproben entnommen worden, um die Stahlkerndicke und für die Zylinderlängs- und -querrichtung die Streckgrenze bestimmen zu können.

In Tabelle 1 sind für die einzelnen Versuche die jeweils ermittelten Kernblechdicken, Stahlstreckgrenzen, Beullasten, Beulenlängen und Beulenhoriante zusammengestellt.

Versuch Nr.	Körper	Steifentyp	Radius [mm]	$t_{k,m}$ [mm]	$t_{k,min}$ [mm]	$t_{k,max}$ [mm]	$R/t_{k,m}$	L_N [mm]	A_m [mm ²]	L/R	$R_{p0,2m U^{***}}$ [N/mm ²]	$R_{p0,2m L^{***}}$ [N/mm ²]	b [mm]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	F_3^{**} [kN]	$h_B^{*1)}$ [mm]	l_B [mm]
1/I-1	1	L-Profil	412.5	0.566	0.558	0.575	728.8	600	1467.0	1.45	390.2	405.1	20	21.18	-	-	75	335
2/I-3	2	L-Profil	412.5	0.568	0.565	0.571	725.9	600	1472.8	1.45	391.0	395.3	20	22.16	-	-	60	300
3/I-4	3	L-Profil	412.5	0.566	0.558	0.575	728.3	600	1467.9	1.45	390.2	400.2	20	19.99	-	16.95	65	210
4/I	4	L-Profil	412.5	0.914	0.903	0.926	451.3	600	2369.2	1.45	385.7	384.9	20	51.60	52.80	-	55	280
4/II-8		L-Profil	412.5	0.914								384.9	20	48.44	51.67	-	60	230
5/I-10	5	L-Profil	412.5	0.914	0.902	0.924	451.1	600	2369.9	1.45	380.6	388.5	20	50.85	-	47.22	60	245
6/I-12	6	L-Profil	412.5	0.570								403.4	20	17.91	-	17.74	80	193
6/II-14		L-Profil	412.5	0.570								403.4	20	19.99	21.54	-	95	210
6/III-16		L-Profil	412.5	0.570	0.558	0.590	723.4	600	1478.0	1.45	379.0	403.4	20	22.28	-	-	90	225
6/IV-17		■-Profil	412.5	0.570								403.4	20	30.52	-	30.52	80	225
6/V-19		■-Profil	412.5	0.570								403.4	20	38.21	-	-	95	300
7/I-20	7	L-Profil	412.5	0.566								400.5	40	20.67	20.93	19.93	80	210
7/II-21		L-Profil	412.5	0.566	0.562	0.570	728.5	600	1467.6	1.45	384.3	400.5	40	20.95	21.39	-	97	157
7/III-22		■-Profil	412.5	0.566								400.5	40	32.25	-	26.32	150	210
7/IV-23		■-Profil	412.5	0.566								400.5	40	30.89	-	-	110	190

Tabelle 1a: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Versuch Nr.	Körper	Steifentyp	Radius [mm]	$t_{k,m}$ [mm]	$t_{k,min}$ [mm]	$t_{k,max}$ [mm]	$R/t_{k,m}$	L_N [mm]	A_m [mm ²]	L/R	$R_{p0,2m,U}^{***}$ [N/mm ²]	$R_{p0,2m,L}^{***}$ [N/mm ²]	b [mm]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	F_3^{**} [kN]	h_B^{*1} [mm]	l_B [mm]
8/I-24	8	L-Profil	412.5	0.570								393.6	40	18.42	-	18.42	95	200
8/II-25		L-Profil	412.5	0.570	0.563	0.585	724.3	600	1476.0	1.45	369.1	393.6	40	17.68	-	15.48	70	200
8/III-26		■-Profil	412.5	0.570								393.6	40	33.11	33.74	32.61	150	210
8/IV-27		■-Profil	412.5	0.570								393.6	40	31.28	34.78	-	110	185
9/I-28	9	L-Profil	412.5	0.926								395.2	40	56.10	-	-	70	320
9/II-29		L-Profil	412.5	0.926	0.920	0.933	445.7	600	2398.7	1.45	378.8	395.2	40	54.02	57.14	-	55	320
9/III-30		■-Profil	412.5	0.926								395.2	40	78.65	-	48.40	100	210
9/IV-31		■-Profil	412.5	0.926								395.2	40	78.62	-	-	110	185
10/I-32	10	L-Profil	412.5	0.922								388.1	40	55.71	-	-	60	200
10/II-51		L-Profil	412.5	0.922	0.920	0.924	447.6	600	2388.4	1.45	379.9	388.1	40	53.24	-	-	50	230
10/III-52		■-Profil	412.5	0.922								388.1	40	64.69	-	42.84	-	-
10/IV-53		■-Profil	412.5	0.922								388.1	40	66.82	-	-	70	200
11/I-33	11	L-Profil	412.5	0.568								391.7	40	21.55	-	18.98	100	220
11/II-34		L-Profil	412.5	0.568	0.564	0.572	725.9	600	1472.8	1.45	392.0	391.7	40	21.26	21.43	20.84	110	220
11/IV-45		■-Profil	412.5	0.568								391.7	40	33.14	-	-	83	160
11/VI-46		■-Profil	412.5	0.568								391.7	80	37.57	42.64	-	120	190

Tabelle 1b: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Versuch Nr.	Körper	Steifentyp	Radius [mm]	$t_{k,m}$ [mm]	$t_{k,min}$ [mm]	$t_{k,max}$ [mm]	$R/t_{k,m}$	L_N [mm]	A_m [mm ²]	L/R	$R_{p0,2m,U}^{***}$ [N/mm ²]	$R_{p0,2m,L}^{***}$ [N/mm ²]	b [mm]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	F_3^{**} [kN]	h_B^* [mm]	I_B [mm]
12/I-35	12	L-Profil	412.5	0.932								397.6	40	57.50	-	-	55	300
12/II-36		L-Profil	412.5	0.932	0.926	0.938	442.6	600	2415.6	1.45	384.4	397.6	20	48.04	-	46.56	70	210
12/IV-49		■-Profil	412.5	0.932								397.6	40	78.33	-	-	75	240
12/VI-50		■-Profil	412.5	0.932								397.6	40	74.21	78.57	-	115	250
13/I-37	13	L-Profil	412.5	0.568								391.5	40	21.27	22.79	-	105	210
13/II-38		L-Profil	412.5	0.568	0.564	0.570	726.2	600	1472.2	1.45	387.0	391.5	80	18.56	-	-	110	225
13/III-39		■-Profil	412.5	0.568								391.5	40	35.91	-	-	140	250
13/IV-40		■-Profil	412.5	0.568								391.5	80	39.00	-	-	-	-
14/I-41	14	L-Profil	412.5	0.918								395.8	40	52.88	-	-	50	230
14/II-42		L-Profil	412.5	0.918	0.564	0.570	449.6	600	2378.0	1.45	384.4	395.8	80	67.28	-	-	65	260
14/IV-54		■-Profil	412.5	0.918								395.8	40	82.67	-	-	65	250
14/V-55		■-Profil	412.5	0.918								395.8	80	82.64	-	-	65	240

*) bei mehreren Beulen Mittelwerte

***) nach Wiederbelastung

****) Mittelwerte aus 4 Proben

Tabelle 1c: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Versuch Nr.	Körper	Steifentyp	Radius [mm]	$t_{k,m}$ [mm]	$t_{k,min}$ [mm]	$t_{k,max}$ [mm]	$R/t_{k,m}$	L_N [mm]	A_m [mm ²]	L/R	$R_{p0,2m,U}^{***}$ [N/mm ²]	$R_{p0,2m,L}^{***}$ [N/mm ²]	b [mm]	F_1 [kN]	F_2 [kN]	F_3^{**} [kN]
11/III-43	11	L-Profil	412.5	0.568	0.564	0.572	726.2	600	1472.2	1.45	392.0	391.7	40	26.28	-	-
11/IV-44		L-Profil	412.5									391.7	40	31.07	-	-
12/III-47	12	L-Profil	412.5	0.932	0.926	0.938	442.6	601	2415.6	1.46	384.4	397.6	40	58.63	-	-
12/IV-48		L-Profil	412.5									397.6	40	52.17	-	-

**) nach Wiederbelastung

***) Mittelwerte aus 4 Proben

Tabelle 1d: Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (zusätzliche Mittelringsteife)

4. Bewertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf das Lastausbreitungswinkel-Verfahren

Ein wesentlicher Grund für die Durchführung der hier beschriebenen Beulversuche war die Verifikation des Lastausbreitungswinkel-Verfahrens. Hierbei galt es Aussagen über den fiktiven Lastausbreitungswinkel, den Horizont der einfallenden Beule und die bezogene Beulspannung jeweils in Abhängigkeit von der Schalenschlankheit, der Lasteinleitungsbreite und der Endringsteifigkeit zu machen. Bei Kenntnis dieser Größen wäre dann der Stabilitätsnachweis in Anlehnung an DIN 18 800 Teil 4 möglich.

4.1 Lastausbreitungswinkel

Zur Bestimmung des fiktiven Lastausbreitungswinkels, also der Neigung der Verbindungslinie von Lasteinleitung und Eckpunkt des rechteckigen in Höhe des Beulenhorizontes sich ergebenden Spannungsblocks, benötigt man die Spannungsverteilung in den verschiedenen Schalenhorizonten. Diese läßt sich relativ einfach mittels Finite Elemente - Analysen bestimmen. Für den hier vorliegenden Fall ist die Elementierung derart vorgenommen worden (Elementgröße 3,23 x 3,23 mm), daß ein geschlossener Kurvenzug entstand, der auch den Bereich der Lasteinleitung selbst umfaßte. Eine umfassende Darstellung der Ergebnisse der numerischen Spannungsanalysen ist in Anhang C enthalten.

Die Spannungsanalysen für die Fälle starre und schlaffe Lagerung zeigen (z. B. Bild 4-5), daß in der Zylinderschale oberhalb der Lasteinleitung Spannungmaxima auftreten, die von der Lasteinleitungsbreite, der Steifigkeit der Endringsteife und dem betrachteten Schalenhorizont abhängig sind. Unmittelbar über der Blocklast bzw. bei starrer Lagerung und extremen Lasteinleitungsbreiten an ihrem Rand liegt eine ausgesprochene Spannungsspitze vor, die immer mehr abgebaut wird, je weiter man sich von der Lasteinleitungsstelle entfernt.

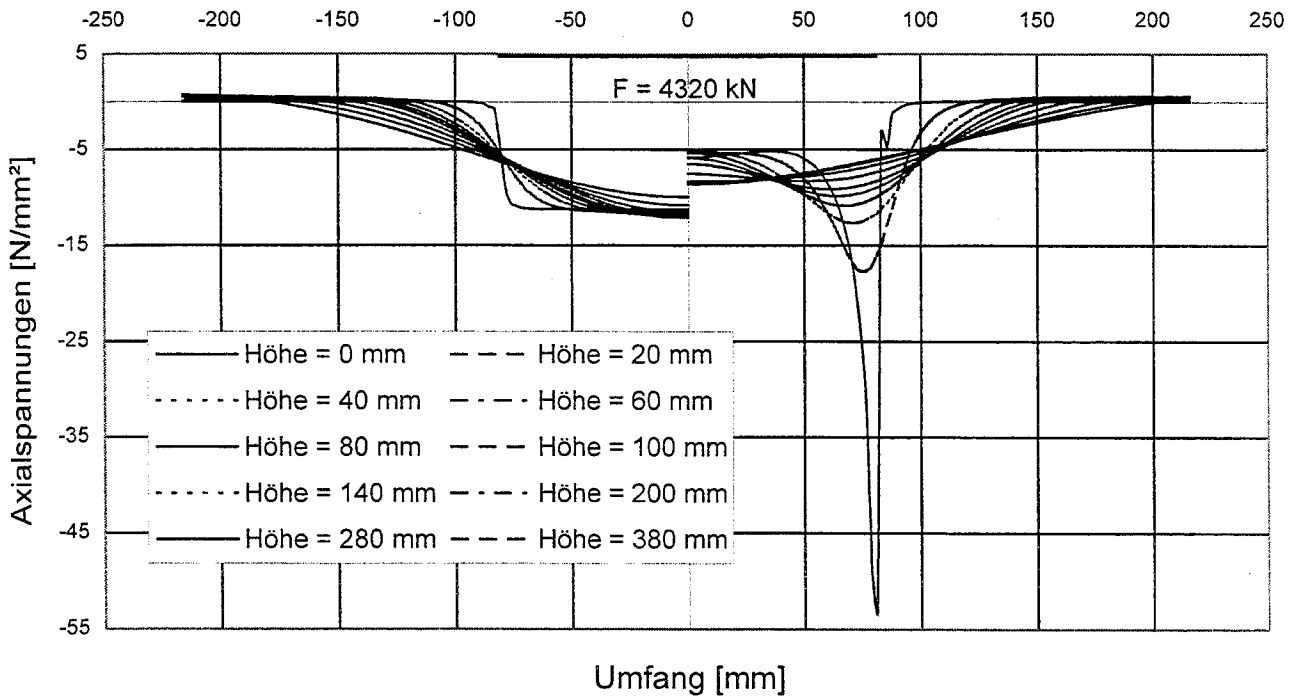


Bild 4: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ohne Steife; $t = 0,6 \text{ mm}$, schlaaffe Lagerung / starre Lagerung)

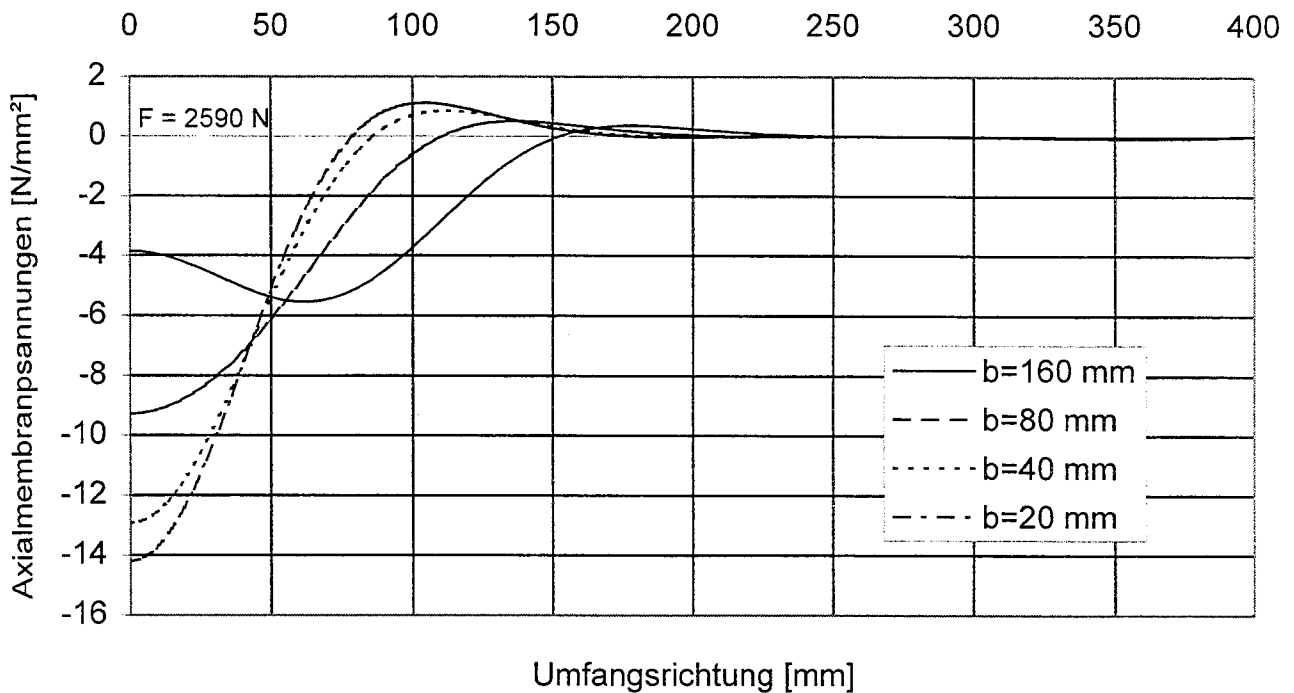


Bild 5: Axialmembrananspannungsverteilung im Lasteinleitungsbereich für verschiedene Lasteinleitungsbreiten (ohne Steife; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung; $h = 100 \text{ mm}$)

Betrachtet man bei Vorhandensein einer Endringsteife die Spannungsverteilungen in der Schale (Bild 6) bzw. in der Steife, so zeigt sich, daß natürlich in der Steife eine ausgeprägtere Lastverteilung auftritt, als in der Schale. Es ist demnach nicht gerechtfertigt, einen einheitlichen Lastausbreitungswinkel für Steife und Schale zu definieren. Die Auswertung der sich numerisch ergebenden Spannungsverteilungen – bei Vorhandensein extremer Spannungsspitzen durch Einführen von Ersatzlasteinleitungsbreiten – zeigt (Bild 7), daß bei den hier untersuchten praxisrelevanten Steifen ein Lastausbreitungswinkel in den Steifen von

$$\alpha = 40 - 80 \text{ }^\circ$$

vorliegt (starre Lagerung). Der Winkel kann demnach je nach Endringsteifigkeit erheblich größer sein, als von Guggenberger-Greiner [6] mit $\alpha = 45 \text{ }^\circ$ vorgeschlagen.

Legt man den sich jeweils ergebenden Lastausbreitungswinkel α und damit eine vergrößerte Lasteinleitungsbreite zugrunde und wertet die numerischen Ergebnisse aus, so ergeben sich für die verschiedenen Schalenhorizonte die in Bild 8 und 9 beispielhaft dargestellten Lastausbreitungswinkel β . Es wird deutlich, daß der Lastausbreitungswinkel β nicht konstant ist, sondern eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Schalenhorizont aufweist – dies insbesondere für die hier interessierenden Schalenhorizonte $h_b = 50 - 120 \text{ mm}$ und die praxisrelevante starre Lagerung.

Im Rahmen des vorliegenden Bemessungskonzeptes ist es ausreichend, die experimentell gefundenen Schalenhorizonte zu betrachten, in denen die Beule einfällt und für die der Stabilitätsnachweis zu führen ist. Zieht man den im Bereich $h_b = 50 - 120 \text{ mm}$ jeweils minimal sich ergebenden Lastausbreitungswinkel heran und trägt sie über der Lasteinleitungsbreite auf, so ergeben sich die in Bild 10 dargestellten Tendenzen. Während bei schlaffer Lagerung (randversteifte Schale) der annähernd konstante Winkel

$$\beta = 32 - 37 \text{ }^\circ$$

existiert, liegt bei starrer Lagerung (randversteifte Schale) die Abhängigkeit

$$\beta = 9 + 0,12 \cdot b$$

vor. Dieser auf der sicheren Seite liegende Ausdruck könnte im Rahmen des vorliegenden Bemessungskonzeptes herangezogen werden.

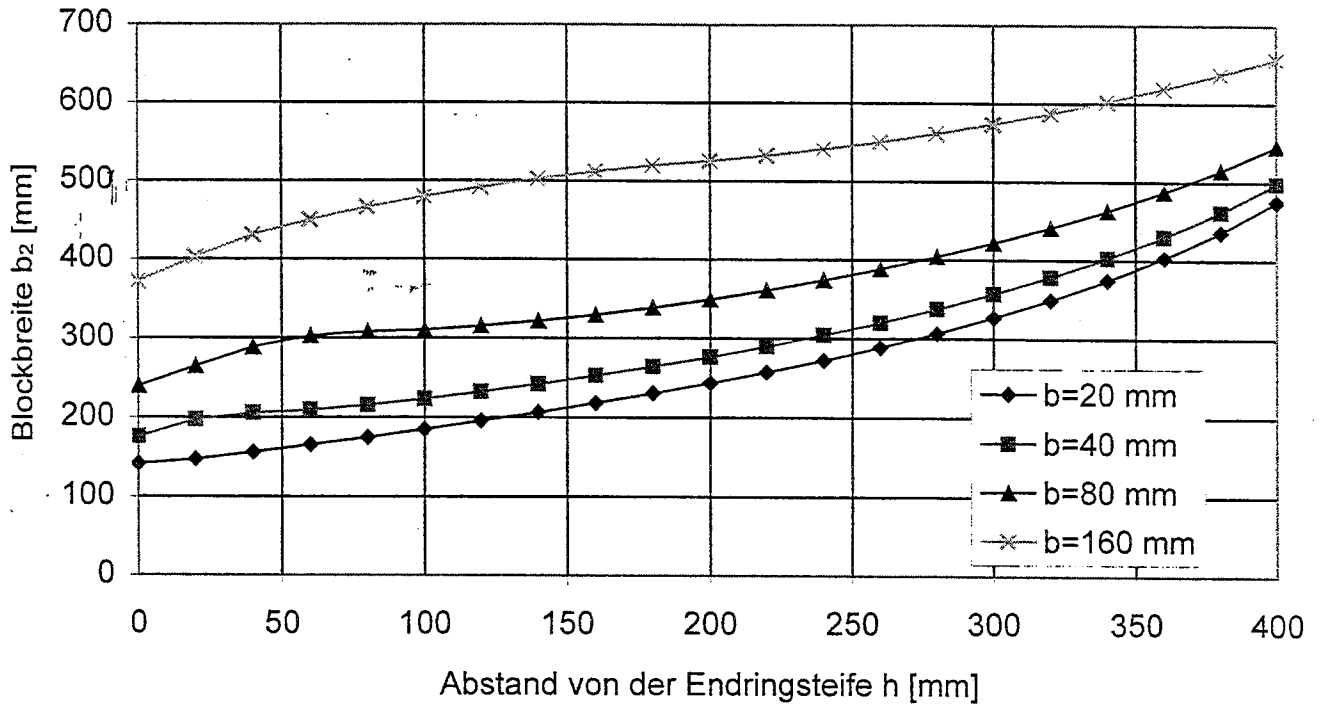


Bild 6: Blockbreite in Abhängigkeit vom Schalenhorizont
(L-Profil; $\Delta = 2,56 \cdot 10^{-4}$; $t = 0,6$ mm ; starre Lagerung)

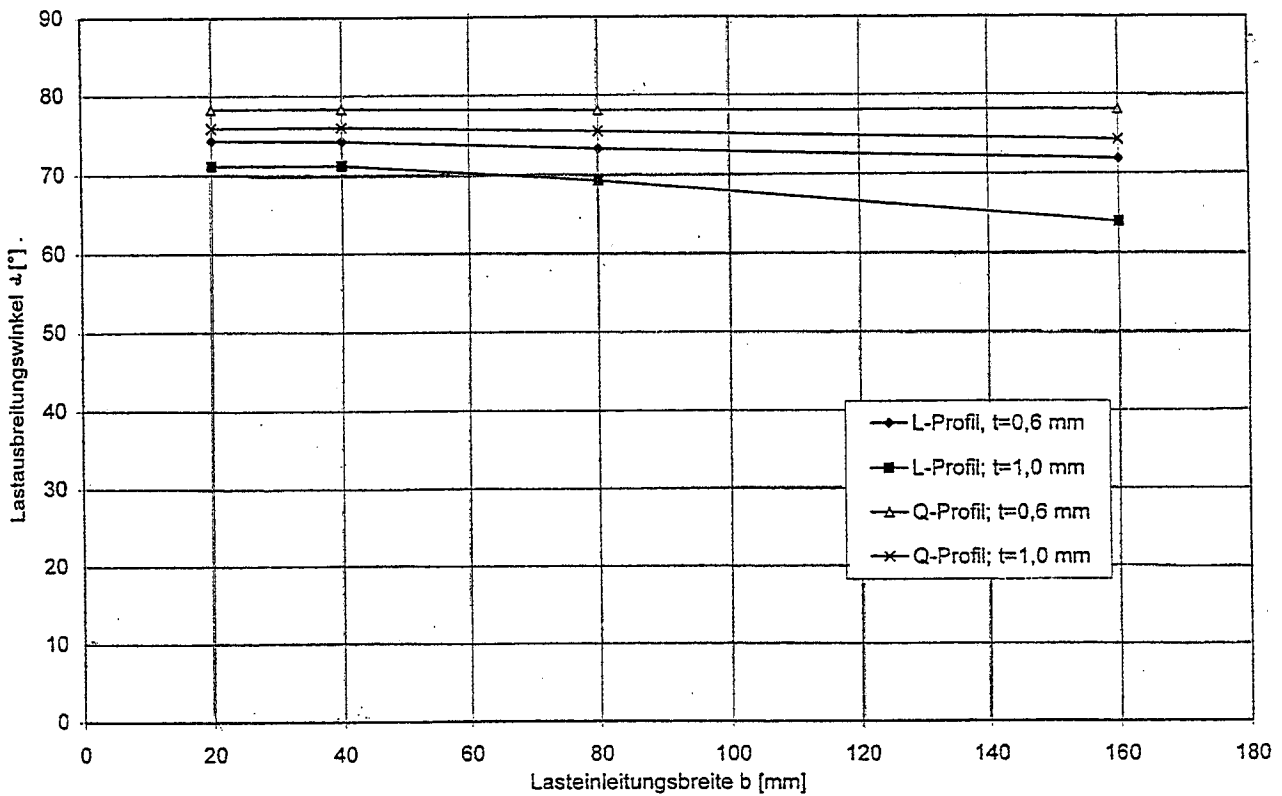


Bild 7: Lastausbreitungswinkel α in der Endringsteife (starre Lagerung)

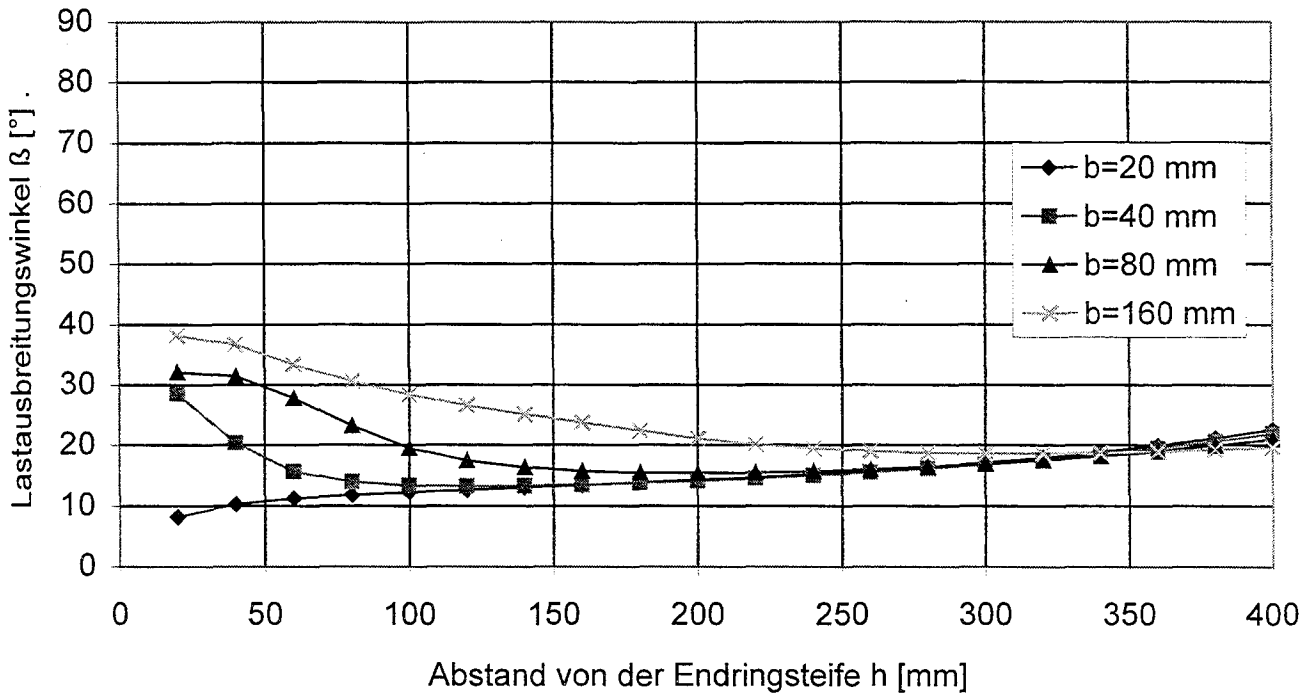


Bild 8: Lastausbreitungswinkel in Abhängigkeit vom Schalenhorizont

(L-Profil; $\Delta = 2,56 \cdot 10^{-4}$ / $t = 0,6$ mm / starre Lagerung)

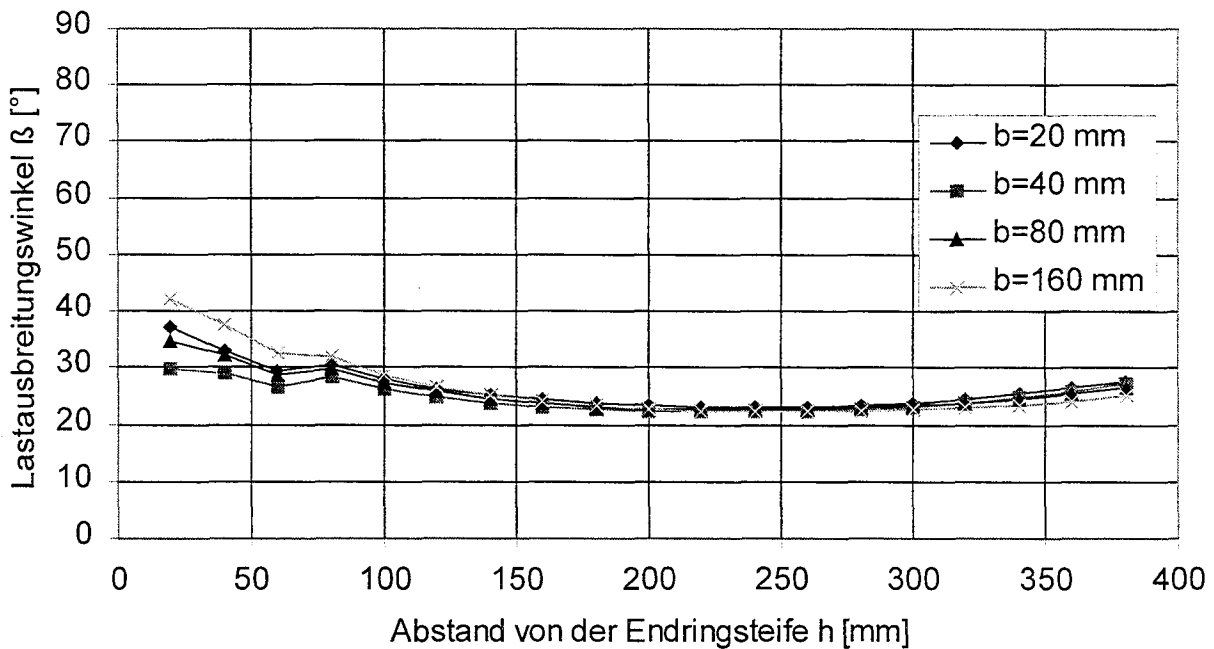


Bild 9: Lastausbreitungswinkel in Abhängigkeit vom Schalenhorizont

(L-Profil; $\Delta = 2,56 \cdot 10^{-4}$ / $t = 0,6$ mm / schlaffe Lagerung)

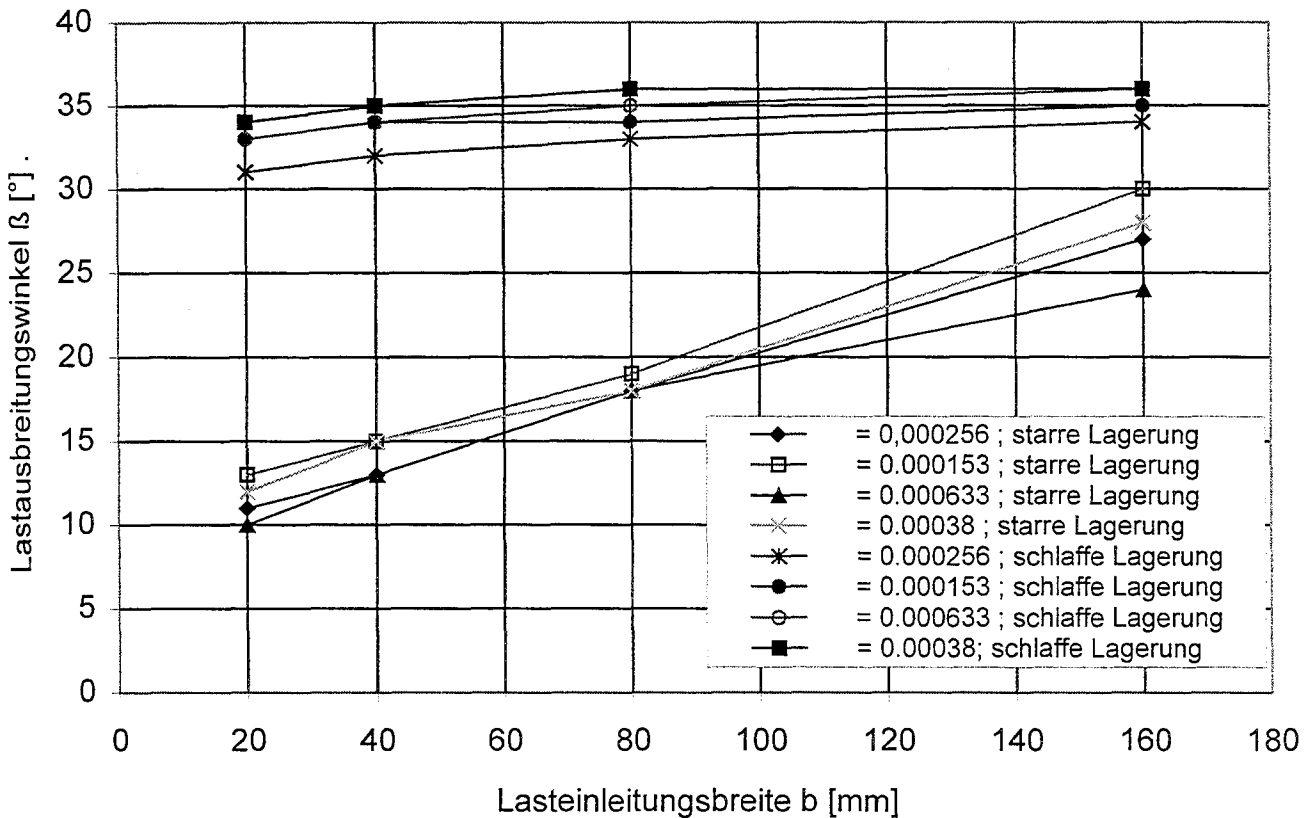


Bild 10: Lastausbreitungswinkel in Abhängigkeit der Lasteinleitungsbreite

4.2 Horizont der einfallenden Beulen

Bei einer Punktstützung bzw. bei einer Blocklast ergibt sich praktisch immer eine lokale Beule im Bereich über der Lasteinleitung. Erst bei nicht mehr praxisrelevanten extrem steifen Endringen versagt die Schale durch Einfallen mehrerer Beulen. Es ist demnach, wie bei der biegebeanspruchten Zylinderschale, nur noch ein kleiner Bereich vorhanden, in dem die Beulung eintreten kann. Entfernt man sich in Umfangsrichtung oder in Längsrichtung vom Ort der maximalen Spannung, so wird es immer unwahrscheinlicher, daß dort die Beule auftritt. Lediglich bei größeren Lasteinleitungsbreiten besteht infolge der Spannungsspitzen an den beiden Rändern der i. d. R. starren Lagerplatten die Möglichkeit des Einfallens von zwei Beulen nebeneinander.

Trägt man die bei den Versuchen gefundenen Abstände des Scheitels der jeweils eingefallenen lokalen Beule von der Endringsteife (h_b) auf, so ergeben sich die in Bild 11 gefundenen Tendenzen. Es zeigt sich, daß eine Abhängigkeit vom R/t -Verhältnis existiert und daß bei größeren Endringsteifigkeiten die Streuung der gefundenen Beulenabstände zunimmt.

Die R/t-Abhängigkeit erklärt sich aus der allgemein bekannten Beeinflussung der Beulengröße durch die Schalengeometrie – schlankere Schalen weisen größere Beulenabmessungen auf, als gedrungene Schalen. Kleinere Beulenabstände als hier gefunden, ergeben sich natürlich im Fall des plastischen bzw. teilplastischen Beulens und vermutlich bei Fehlen einer Endringsteife. In diesem Fall werden die Scheitelabstände der bei Gleichlast sich einstellenden axialsymmetrischen Beulen (Schalenrand eingespannt) maßgebend sein.

Die gefundenen Streuungen resultieren aus den im Lasteinleitungsbereich vorliegenden Mantelimperfectionen. Die Beule wird immer dort einfallen, wo die ungünstigste Kombination aus Schalenbeanspruchung und Mantelimperfection vorliegt. Da diese natürlich bei größeren Endringsteifigkeiten wegen der dort vorliegenden nicht mehr so ausgeprägten Spannungskonzentrationen über einen größeren Bereich gegeben sein kann, streuen die Beulenabstände dort zwangsläufig stärker.

Da über die Lage und Größe der Mantelimperfectionen aus den oben angeführten Gründen nichts gesagt werden kann, bleibt nur die Differenzierung im Hinblick auf das R/t-Verhältnis. Vergleicht man die experimentell gefundenen Beulenabstände, die bei Außerachtlassung der Extremwerte im Bereich von $h_b = 50 - 120$ mm liegen, so kommt man zu dem Ergebnis, daß der übliche Ansatz für die Halbwellenlänge

$$h_b = 3,46 \sqrt{R \cdot t}$$

nicht die Realität wiedergibt. Es muß ein multiplikativer Korrekturfaktor $k = h_{b,ex}/h_{b,th}$ eingeführt werden. Für die hier vorliegenden Endringsteifigkeiten ergibt die Auswertung, daß im Mittel der Faktor

$$k = 0,0035 \cdot R/t - 0,53$$

verwendbar ist. Als Horizont für die einfallenden Beulen ergibt sich dann

$$h_{b,e} = k \cdot 3,46 \cdot \sqrt{R \cdot t}$$

Dieser Ausdruck gilt natürlich nur für den hier untersuchten Schlankheitsbereich ($R/t = 450 - 750$). Bei Schalen mit $R/t < 250$ werden bei Vorliegen der üblichen Stahlqualitäten plastische bzw. teilplastische Versagensformen auftreten. Für diese Fälle sollte man die Biegestörhalbwelle zugrunde legen. Es ergibt sich dann bei Verwendung des gleichen Korrekturfaktors der Ausdruck

$$h_{b,p} = k \cdot 2,4 \cdot \sqrt{R \cdot t}$$

Der plastisch-elastische Übergangsbereich könnte dabei zwischen $R/t = 200$ und 300 mit einer linearen Interpolation zwischen $h_{b,e}$ und $h_{b,p}$ definiert werden.

Bei Schalen mit $R/t > 800$ empfiehlt es sich, bis zum Vorliegen weiterer Versuchsergebnisse, auf eine Extrapolation des Korrekturfaktors über dem Wert $k = 2,3$ hinaus zu verzichten.

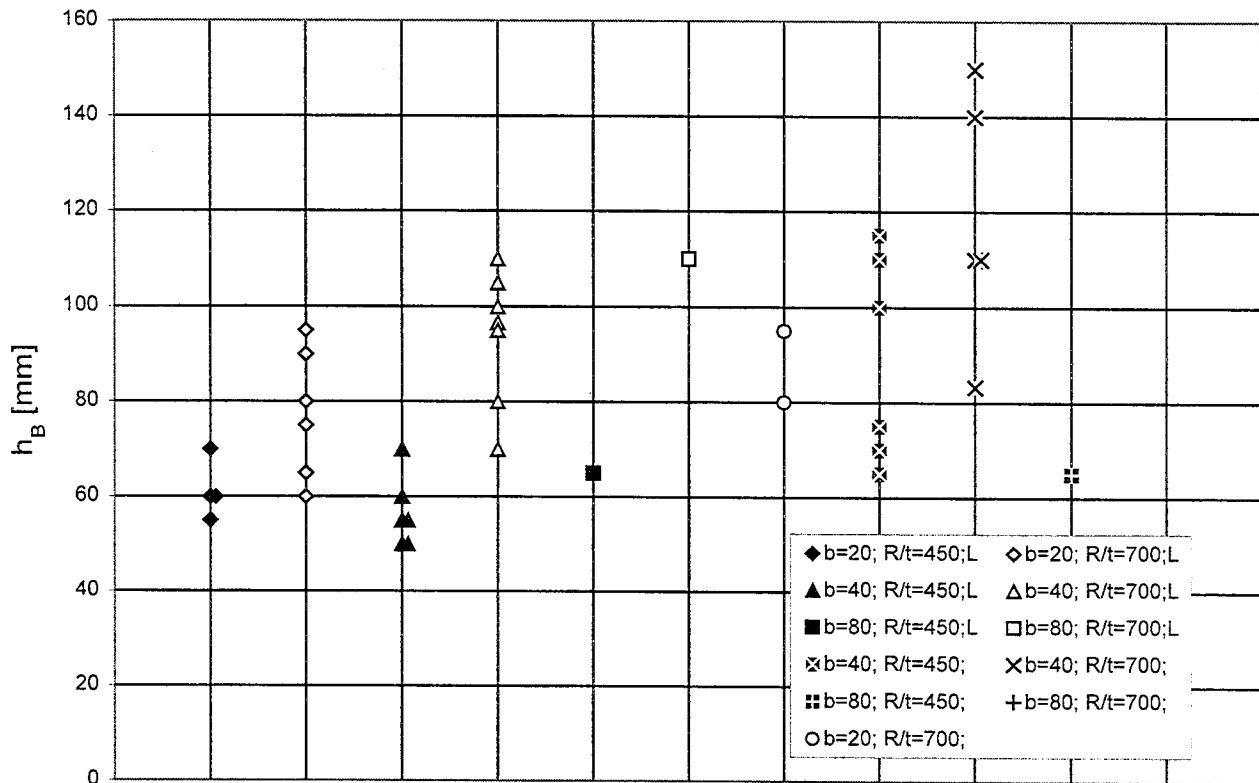


Bild 11: Gemessene Beulenabstände h_b

4.3 Stabilitätsnachweis

Nach dem vorliegenden Modell tritt das Einfallen der Beulen über der Lasteinleitung dann ein, wenn die maximale Längsspannung im Horizont mit der Höhe h_b der ertragbaren Beulspannung entspricht. Es gilt also nach Vorliegen von Informationen über den Ort der auftretenden Beule und den fiktiven Lastausbreitungswinkeln noch eine Aussage über die Beulspannung zu machen – ob diese den in DIN 18 800 Teil 4 angegebenen Werten entspricht oder andere Werte annimmt.

Die in Tabelle 1 aufgeführten experimentell bestimmten Beullasten F_1 zeigen, wie erwartet, eine ausgeprägte Abhängigkeit vom R/t -Verhältnis, der Endringsteifigkeit und der Lasteinleitungsbreite. Stellt man die jeweils gefundenen Lasten den nach DIN 18 800 Teil 4 für Gleichlast sich ergebenden Beullasten gegenüber, so wird deutlich, daß bei einer Punktstützung die Tragkapazität der Schale nur zu einem geringen Maße genutzt werden kann. Beim Versuch Nr. 9/III mit $R/t = 445,7$ und dem relativ steifen \square -Profil als Endringsteife steht z. B. der gefundenen Beullast $F_1 = 78,65$ kN eine Beulkapazität der Schale von $F = 178$ kN gegenüber.

Bezieht man die im Beulhorizont bei der Versagenslast vorliegende maximale Spannung (numerisch ermittelt) auf die sogenannte klassische Beulspannung $\sigma_{KI} = 0,605 \cdot E \cdot t/R$, so wird deutlich, daß auch beim punktgestützten Zylinder die klassische Beulspannung nicht erreicht wird (Bild 12). Bezieht man die maximale Spannung auf die reale für Gleichlast in DIN 18 800 Teil 4 aufgeführte Beulspannung (Bild 13), so zeigt sich, daß offensichtlich ein höheres Beulspannungsniveau vorliegt, als nach Norm vorgeschrieben.

Will man das Nachweiskonzept der DIN 18 800 Teil 4 beibehalten, so bietet es sich an, die reale DIN-Beulspannung ($\sigma_{xs, r, k}$) mit einem Korrekturfaktor zu belegen. Trotz gewisser Einflüsse aus Schalenschlankheit und Endringsteifigkeit scheint es doch gerechtfertigt zu sein, alle Versuchsergebnisse zu einer Population zusammenzufassen und statistisch auszuwerten. Von den sich ergebenden Fraktilwerten (75 %-ige Aussagewahrscheinlichkeit)

$$\sigma_{\max}/\sigma_{xs, r, k} = 2,38 \text{ (Mittelwert)}$$

$$\sigma_{\max}/\sigma_{xs, r, k} = 1,83 \text{ (5 %-Fraktilwert)}$$

könnte dann der 5 %-Fraktilwert als Korrekturfaktor verwendet werden. Für den Stabilitätsnachweis wäre dann als Beulspannung der Wert

$$\sigma_{xs, r, k}^p = 1,83 \cdot \sigma_{xs, r, k}$$

anzusetzen.

Aus den bei den Beulversuchen mitgeschriebenen Last-Stauchungsdiagrammen wird deutlich (siehe Anhang B), daß bei den vorliegenden punktgestützten Zylinderschalen nach dem Einfallen der Beulen nicht der beim gleichmäßig axial gedrückten Zylinder übliche starke Lastabfall auftritt. Die gutartige Versagenscharakteristik wird auch aus den Versuchen deutlich, bei denen nach dem Beulversuch eine Wiederbelastung vorgenommen wurde.

Es ist offensichtlich so, daß die bisher nicht geschädigten Schalenbereiche noch eine erhebliche Tragkapazität aufweisen. Die statistische Auswertung dieser Versuche (Bild 14) zeigt, daß selbst bei relativ großen affinen Vorbeulen ($w_V/t = 3 - 10$) noch bezogene Beulspannungen von

$$\sigma_{\max}/\sigma_{Xs, r, k} = 2,01 \text{ (Mittelwert)}$$

$$\sigma_{\max}/\sigma_{Xs, r, k} = 1,28 \text{ (5 %-Fraktilwert)}$$

vorliegen.

Da also ein ähnliches Tragverhalten wie bei der radial beanspruchten Zylinderschale vorliegt, könnte man möglicherweise auch $\sigma_{\phi S, r, k}$ mit dem Abminderungsfaktor α_1 (nach DIN 18 800 Teil 4) für den Stabilitätsnachweis zugrunde legen.

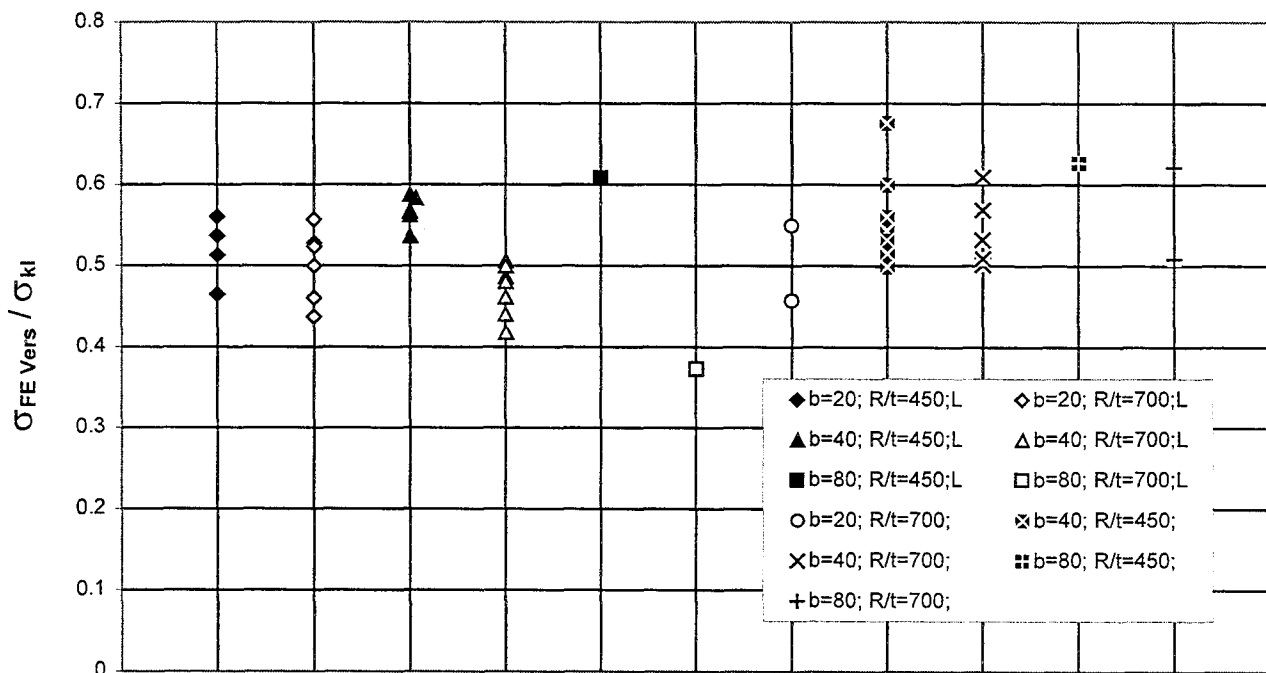


Bild 12: Maximale Beulspannungen, bezogen auf die klassischen Beulspannungen

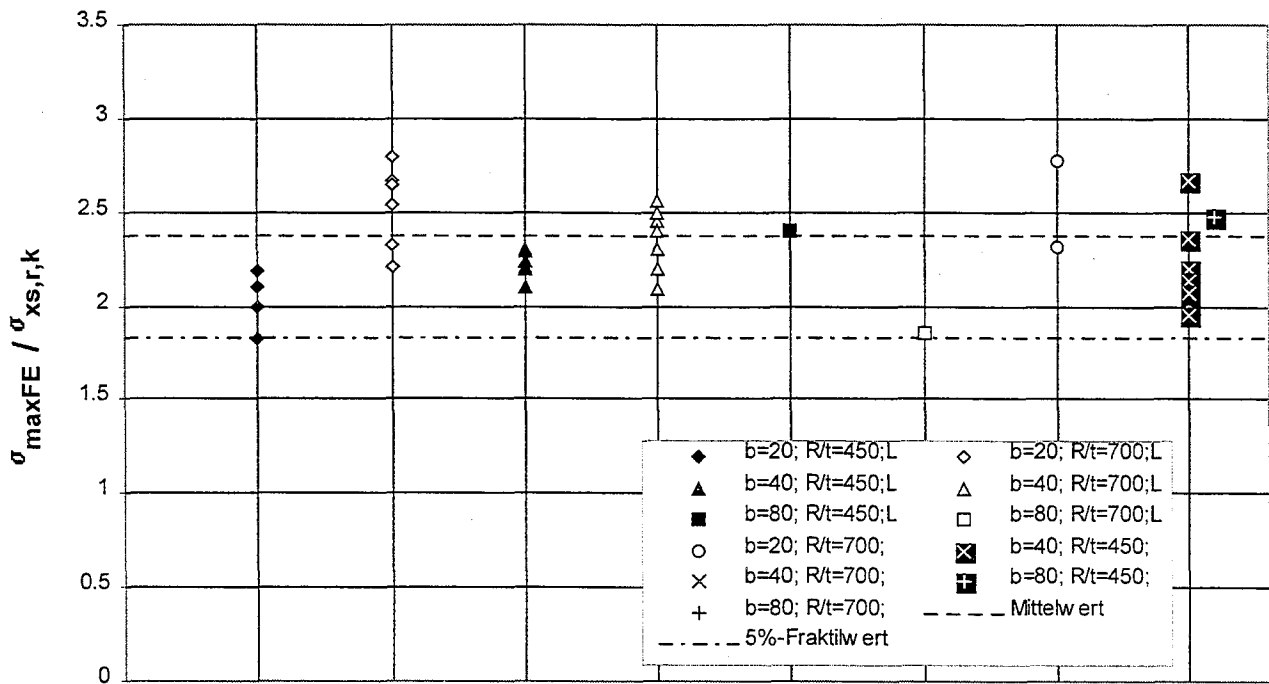


Bild 13: Maximale Beulspannungen, bezogen auf die realen Beulspannungen nach DIN 18800 T.4

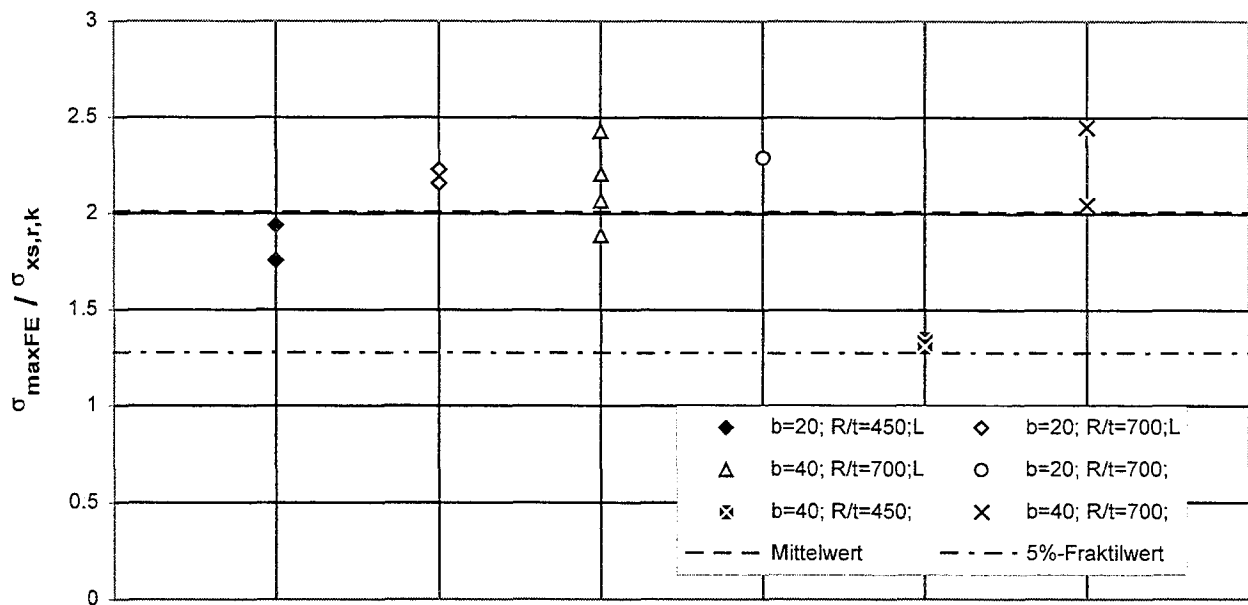


Bild 14: Maximale Beulspannungen, bezogen auf die realen Beulspannungen nach DIN 18800 T.4 (Wiederbelastung)

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht wird auf die komplexe Problematik der Stabilität punktgestützter Zylinderschalen eingegangen. Es wird zunächst über umfangreiche experimentelle Untersuchungen berichtet. Bei der dabei verwendeten neuartigen Versuchstechnik wurden zur Erzielung einer zwängungsfreien Lagerung und zur Vermeidung von Aufstandsimperfectionen die endringversteiften Schalen am kontinuierlich belasteten Rand auf einen wassergefüllten Hochdruckschlauch aufgelegt und zwecks statischer Eindeutigkeit an drei äquidistanten Stellen des freien Randes belastet.

Neben der Ermittlung eindeutiger Versuchsdaten war es weiterhin das Ziel, das in [8] vorgeschlagene Lastausbreitungswinkelverfahren zu verifizieren. Es galt, realistische Angaben über den Ort der einfallenden Beulen, die fiktiven Lastausbreitungswinkel und die Beulspannung in Abhängigkeit von Schalenschlankheit, Endringsteifigkeit und Last-einleitungsbreite zu machen. Mit Kenntnis dieser Daten und einem experimentell gefundenen Korrekturfaktor ist es möglich, den Stabilitätsnachweis der punktgestützten Schale unter Heranziehung des in DIN 18 800 Teil 4 beschriebenen Nachweisverfahrens zu führen.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden vom Deutschen Institut für Bautechnik, Berlin finanziell gefördert – hierfür sei Dank gesagt. Herrn cand. Ing. M. Wolters wird für die Hilfe bei den umfangreichen numerischen Untersuchungen und deren Auswertung gedankt.

6. Literatur

- [1] DAST-Ri 0017: Beulsicherheitsnachweis für Schalen – spezielle Fälle. Deutscher Ausschuß für Stahlbau (1992)
- [2] Ummenhofer, T.: Stabilitätsverhalten imperfekter zylindrischer Stahlsiloschalen – experimentelle und numerische Untersuchungen. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, 5. Folge; Heft 2 (1997)
- [3] Guggenberger, W.: Nichtlineares Beulverhalten von Kreiszyinderschalen unter lokaler Axialbelastung. Dissertation, Technische Universität Graz (1992)
- [4] Rathé, J.; Greiner, R.: Local Loads in Cylindrical Structures, Subproject B, ECSC Contract 7210-SA/208. Enhancement of ECCS Design Recommendations and Development of Eurocode 3 Parts Related to Shell Buckling. Final Report, University of Gent (1996)

- [5] Teng, J.; Rotter, J.M.: Linear Bifurcation of Column-Supported Perfect Cylinders: Support Modelling and Boundary Conditions, *Thin-Walled Structures* 14 (1992)
- [6] Guggenberger, W.; Greiner, R.: Axialbelastete Kreiszylinderschalen auf Einzelstützen – Numerische Tragverhaltensstudie, Versuchsergebnisse und Bemessungsvorschlag. *Der Stahlbau* 67, Heft 6 (1998)
- [7] ECCS Recommendations No. 56, Buckling of Steel Shells, 4. Ausgabe (1988)
- [8] Knödel, P.; Ummenhofer, T.: Ein einfaches Modell zum Stabilitätsnachweis zylindrischer Schalenträgerwerke auf Einzelstützen. *Der Stahlbau* 67, Heft 6 (1998)

Autoren dieses Berichtes

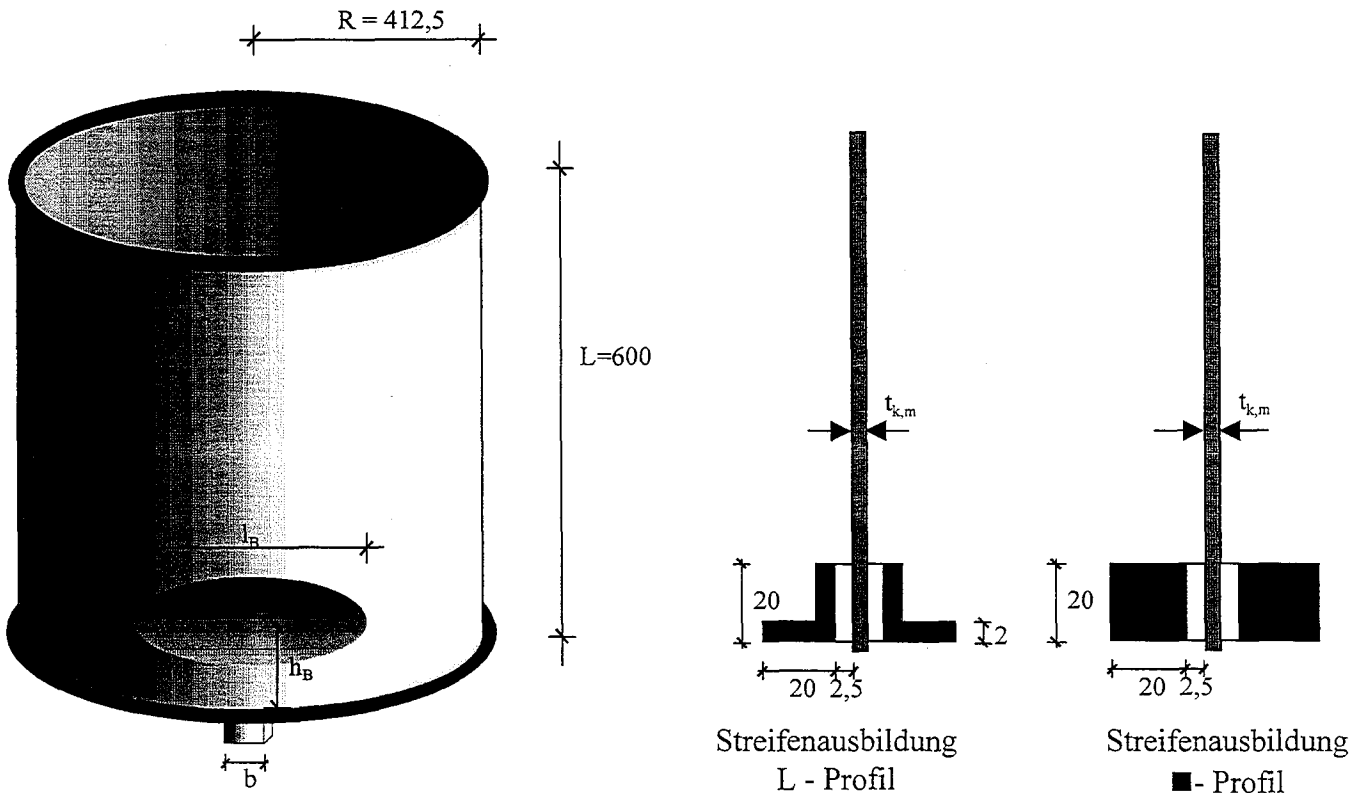
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Schulz,
Universität Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine,
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

Dr.-Ing. Th. Ummenhofer
Herzogin-Elisabethstr. 32
38104 Braunschweig

Anhang A

Dokumentation der Versuche

Geometrie der Versuchskörper



Versuchskörper

Die folgende Auflistung erfolgt chronologisch, d. h. in der Reihenfolge der durchgeführten Versuche. Sämtliche Beullasten und Beulspannungen (bezogen auf den kontinuierlich gelagerten Rand) verstehen sich einschließlich des Gewichts der Versuchseinrichtung von 265 kg. Die Versuchsnummern bestehen aus drei Teilen - der erste Teil stellt die Nummer des Versuchskörpers dar, der zweite die Zahl der an diesem Körper durchgeführten Versuche und der dritte die Dateinummer.

Versuch Nr.	1/I - 1
Abmessungen:	R = 412,5 mm; L = 600 mm; R/t _{k,m} = 728,8
Blehdicken:	t _{k,m} = 0,566 mm; t _{k,min} = 0,558 mm; t _{k,max} = 0,575 mm
Flansch-Geometrie:	L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
Lasteinleitungsbreite:	b = 20 mm
Versagenslast:	F ₁ = 21,18 kN
Beulen-Geometrie:	h _{B2} = 75 mm; l _{B2} = 335 mm
Beulspannung:	σ _B = 12,69 N/mm ²

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager (Stütze) Nr. 2 ein.

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr.1/Ia - 2 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,8$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,575 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 20,42 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,13 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 und Nr. 3 ein.

Nach dem Einfall der Beulen war eine weitere Laststeigerung auf $F_2 = 22,66 \text{ kN}$ möglich.

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr. 2/I - 3

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,565 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,571 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 22,16 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 60 \text{ mm}$; $l_{B2} = 300 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 14,25 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr. 3/I - 4

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,575 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 19,99 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 65 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,86 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern ein.

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr. 3/Ia - 4 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,575 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 16,95 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 10,90 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr. 3/Ib - 4 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,575 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 28,01 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,01 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern ein

Versuch wurde mit je einer Lastmeßdose an jedem Auflager durchgeführt.

Versuch Nr. 4/I

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,903 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,926 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = \text{ca. } 51,60 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 55 \text{ mm}$; $l_{B2} = 280 \text{ mm}$;
 Beulspannung: $\sigma_B = \text{ca. } 19,9 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Die Verformungen wurden bei diesem Versuch nicht erfaßt.

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 4/Ia - 7 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,903 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,926 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 52,80 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,37 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 4/II - 8

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,903 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,926 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 48,44 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 60 \text{ mm}$; $l_{B1} = 230 \text{ mm}$;
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,69 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 4/IIa - 9 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,903 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,926 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 51,67 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 19,94 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 5/I - 10

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,1$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,902 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 50,85 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 60 \text{ mm}$; $l_{B2} = 245 \text{ mm}$;
 Beulspannung: $\sigma_B = 19,62 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 5/Ia - 11 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 451,1$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,902 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 47,22 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,22 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Stütze Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 6/I - 12

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 17,91 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 80 \text{ mm}$; $l_{B1} = 200 \text{ mm}$; $h_{B3} = 80 \text{ mm}$; $l_{B3} = 185 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 11,52 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Beide Beulen bildeten sich nach der Entlastung wieder zurück.

Nach dem Einfallen der ersten Beulen war eine weitere Laststeigerung bis auf $F_2 = 19,68 \text{ kN}$ möglich.

Versuch Nr. 6/Ia - 13 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 17,74 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 11,41 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Es ergaben sich die gleichen Beulen wie beim Versuch 6/I-12.

Versuch Nr. 6/II - 14

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 19,99 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 95 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,86 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 auf.

Nach dem Einfallen der Beule war die Last bis auf $F_2 = 21,06 \text{ kN}$ steigerbar.

Die eingefallene Beule bildete sich nach der Entlastung nicht wieder zurück – sie wurde für den Versuch Nr. 6/II a-15 manuell herausgedrückt.

Versuch Nr. 6/IIa - 15 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 21,54 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,85 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 6/III - 16

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 22,28 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 90 \text{ mm}$; $l_{B1} = 225 \text{ mm}$; $h_{B2} = 100 \text{ mm}$; $l_{B2} = 225 \text{ mm}$;
 $h_{B3} = 95 \text{ mm}$; $l_{B3} = 280 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 14,33 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern gleichzeitig ein.
 Die Verformungen wurden bei diesem Versuch nicht erfaßt.

Versuch Nr. 6/IV - 17

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 30,52 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 160 \text{ mm}$; $l_{B1} = 235 \text{ mm}$; $h_{B2} = 170 \text{ mm}$; $l_{B2} = 220 \text{ mm}$;
 $h_{B3} = 160 \text{ mm}$; $l_{B3} = 220 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 21,30 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern gleichzeitig ein.

Versuch Nr. 6/IVa - 18 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 29,53 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,99 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern gleichzeitig ein.

Versuch Nr. 6/V - 19

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 723,4$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,558 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,590 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 38,21 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 180 \text{ mm}$; $l_{B3} = 300 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 24,57 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern gleichzeitig ein.

Am Auflager Nr. 3 ergab sich bei der Belastung $F = 26 \text{ kN}$ eine kleinere Beule. Der Grund hierfür wird vermutlich in einer Vorschädigung aus den vorangegangenen Versuchen an diesem Prüfkörper zu suchen sein.

Versuch Nr. 7/I - 20

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 20,93 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 80 \text{ mm}$; $l_{B2} = 210 \text{ mm}$; $h_{B3} = 100 \text{ mm}$; $l_{B3} = 210 \text{ mm}$;
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,46 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein, gefolgt von Auflager Nr. 3.

Versuch Nr. 7/1a - 20a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 19,93 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,47 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 2 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 7/II - 21

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 21,39 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 100 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$; $h_{B2} = 90 \text{ mm}$; $l_{B2} = 240 \text{ mm}$;
 $h_{B3} = 100 \text{ mm}$; $l_{B3} = 220 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,75 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen Auflagern kurz nacheinander ein.

Versuch Nr. 7/III - 22

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 32,25 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 140 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$; $h_{B2} = 160 \text{ mm}$; $l_{B2} = 210 \text{ mm}$;
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,74 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 7/IIIa - 22 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 26,32 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 16,93 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 7/IIIb - 22 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 26,32 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 16,93 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 7/IV - 23

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 30,89 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 110 \text{ mm}$; $l_{B2} = 190 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 19,86 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 7/IVa - 23 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 728,5$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,566 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,562 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 40,80 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 26,24 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern ein.

Versuch Nr. 8/I - 24

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 18,42 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 100 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$; $h_{B2} = 90 \text{ mm}$; $l_{B2} = 190 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 11,85 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 8/Ia - 24a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 18,42 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 11,85 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Infolge der Beulen fiel die Last auf 16,07 kN – sie ließ sich bei der erneuten Belastung auf $F_2 = 17,17 \text{ kN}$ steigern.

Versuch Nr. 8/II - 25

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 17,68 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 70 \text{ mm}$; $l_{B2} = 200 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 11,37 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 8/IIa - 25a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 15,48 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 9,95 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Nach dem Einfallen der ersten Beule ließ sich die Belastung noch bis auf $F_2 = 20,23 \text{ kN}$ steigern.

Versagen trat an Auflager Nr. 2 und später an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 8/III - 26

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 33,11 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 150 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 21,29 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein. Nach geringfügigem Abfall war die Last erneut bis auf $F_2 = 33,74 \text{ kN}$ steigerbar. Es ergab sich eine weitere Beule bei Auflager Nr. 3.

Versuch Nr. 8/IIIa - 26a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 32,61 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,97 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 8/IV - 27

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 31,28 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 110 \text{ mm}$; $l_{B1} = 185 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,11 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Nach dem Einfall der Beule war eine weitere Laststeigerung bis auf $F_2 = 34,78 \text{ kN}$ möglich
 Dabei Einfallen einer Beule auch an den Auflagern Nr. 2 und Nr. 3.

Versuch Nr. 8/IVa - 27a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 724,3$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,570 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,563 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,585 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 42,04 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 27,04 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat bei allen drei Auflagern ein.

Versuch Nr. 9/I - 28

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 445,7$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,933 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 56,10 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 70 \text{ mm}$; $l_{B3} = 320 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 21,64 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 9/II - 29

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 445,7$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,933 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 57,14 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 55 \text{ mm}$; $l_{B1} = 320 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 22,04 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 9/III - 30

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 445,7$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,933 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 78,65 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 100 \text{ mm}$; $l_{B3} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 30,35 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 9/IIIa - 30a (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 445,7$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,933 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 48,40 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,67 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 9/IV - 31

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 445,7$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,933 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 78,62 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 110 \text{ mm}$; $l_{B3} = 185 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 30,34 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Bei ca. $F = 62 \text{ kN}$ wurde das Einfallen einer elastischen Beule an Auflager Nr. 3 beobachtet – sie vergrößerte sich bei steigender Belastung.

Versuch Nr. 10/I - 32

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 447,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,921 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 55,71 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 60 \text{ mm}$; $l_{B3} = 200 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 21,49 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuchskörper zeigte nach Abschluß des Versuches Schäden an der Verklebung. Flansch mußte neu geklebt werden.

Versuch Nr. 11/I - 33

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 21,55 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 100 \text{ mm}$; $l_{B1} = 220 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,86 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 11/Ia - 33 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 18,98 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,20 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

An diesem Körper wurde ein weiterer Versuch mit einer Mittelringsteife durchgeführt.

Versuch Nr. 11/Ib - 33 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 19,33 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,43 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 11/II - 34

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 21,43 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 110 \text{ mm}$; $l_{B2} = 220 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,78 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 11/IIa - 34 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 20,84 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,40 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat erneut an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 11/IIb - 34 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 18,72 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 12,04 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

An diesem Körper wurde ein weiterer Versuch mit einer Mittelringsteife durchgeführt.

Versuch Nr. 12/I - 35

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 57,50 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 55 \text{ mm}$; $l_{B2} = 300 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 22,18 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 12/II - 36

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 48,04 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 70 \text{ mm}$; $l_{B3} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,54 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 12/IIa - 36 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 20 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 46,56 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 17,97 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

An diesem Körper wurde ein weiterer Versuch mit einer Mittelringsteife durchgeführt.

Versuch Nr. 13/I - 37

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 726,2$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 22,79 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 105 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 18,54 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 13/Ia - 37 (erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 726,2$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 25,01 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 105 \text{ mm}$; $l_{B1} = 210 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 16,08 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat zunächst an Auflager Nr. 1 ein, gefolgt von Auflager Nr. 3.

Versuch Nr. 13/II - 38

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 726,2$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 80 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 18,56 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 110 \text{ mm}$; $l_{B2} = 225 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 13,61 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Nach dem Einfallen der Beule war eine weitere Laststeigerung auf $F_2 = 21,17 \text{ kN}$ möglich.

Versuch Nr. 13/III - 39

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 726,2$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 35,91 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 140 \text{ mm}$; $l_{B2} = 250 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 23,09 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 13/IV - 40

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 726,2$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,570 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 80 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 39,00 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: Beulen nicht vermessen
 Beulspannung: $\sigma_B = 25,08 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 14/I - 41

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 449,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,918 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,921 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 52,88 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 50 \text{ mm}$; $l_{B2} = 230 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,40 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Nach kurzem Abfallen der Last erneute Steigerung auf $F_2 = 52,62 \text{ kN}$ möglich.

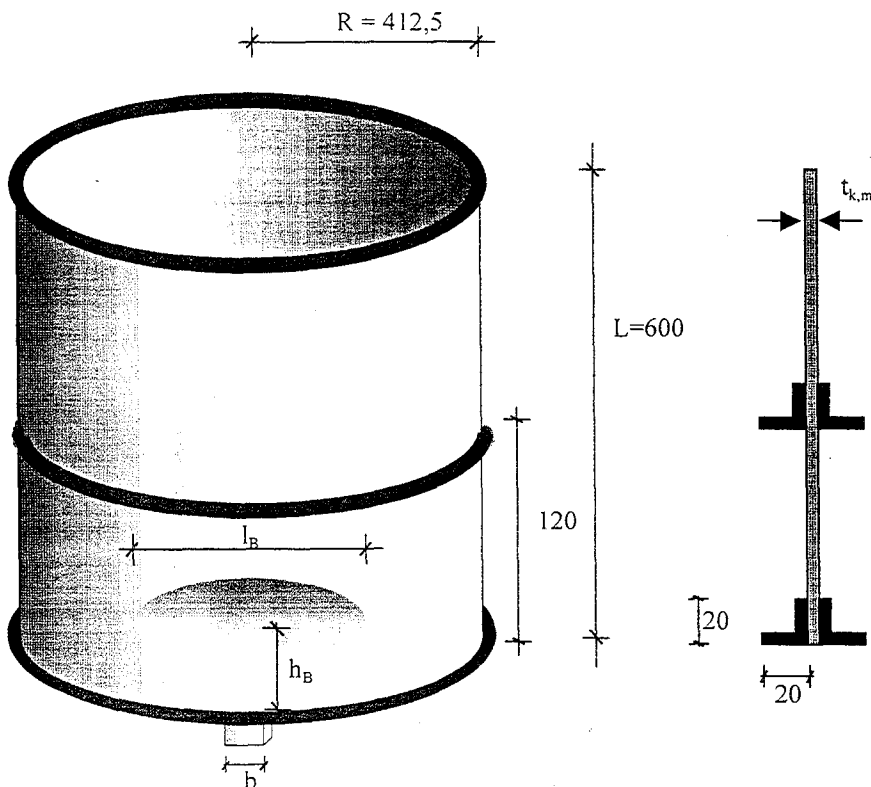
Versuch Nr. 14/II - 42

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 449,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,918 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,921 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: L-Profil - 20 x 20 x 2 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 80 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 67,28 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 65 \text{ mm}$; $l_{B2} = 260 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 25,96 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflagern Nr. 2 und Nr. 3 ein.

Geometrie der Versuchskörper mit Mittelringsteife



Versuch Nr. 11/III - 43 (zusätzliche Mittelringsteife)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$

Blehdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,572 \text{ mm}$

Flansch-Geometrie: 2 x L-Profil - 20 x 20 x 2 mm (Abstand: 120 mm)

Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$

Versagenslast: $F_I = 26,28 \text{ kN}$

Beulspannung: $\sigma_B = 18,90 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 11/IIIa - 43 (zusätzliche Mittelringsteife, erneut belastet)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: 2 x L-Profil - 20 x 20 x 2 mm (Abstand: 120 mm)
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 24,02 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 15,45 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 11/IV - 44 (zusätzliche Mittelringsteife)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: 2 x L-Profil - 20 x 20 x 2 mm (Abstand: 120 mm)
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 31,07 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 19,98 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an den Auflagern Nr. 1 und Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 11/V - 45

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 33,14 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 90 \text{ mm}$; $l_{B1} = 180 \text{ mm}$; $h_{B2} = 80 \text{ mm}$; $l_{B2} = 170 \text{ mm}$;
 $h_{B3} = 80 \text{ mm}$; $l_{B3} = 130 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 21,31 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an allen drei Auflagern ein.

Versuch Nr. 11/VI - 46

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 725,9$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,568 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,564 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,572 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 80 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 31,92 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 120 \text{ mm}$; $l_{B1} = 190 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 25,96 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Nach dem Einfallen der Beule war eine weitere Laststeigerung bis auf $F_2 = 37,52 \text{ kN}$ (Beule bei Auflager Nr. 2) bzw. $F_3 = 42,59 \text{ kN}$ (Beule bei Auflager Nr. 3) möglich.

Versuch Nr. 12/III - 47 (zusätzliche Mittelringsteife)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: $2 \times L$ -Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$ (Abstand: 90 mm)
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 58,63 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 22,62 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 12/IV - 48 (zusätzliche Mittelringsteife)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: $2 \times L$ -Profil - $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}$ (Abstand: 90 mm)
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 52,17 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,13 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Zylinder wies bedingt durch die Vorversuche geringe Vorverformungen im Auflagerbereich auf.

Versuch Nr. 12/V - 49

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 78,33 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B3} = 75 \text{ mm}$; $l_{B3} = 240 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 30,22 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 3 ein.

Versuch Nr. 12/VI - 50

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 442,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,932 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,926 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,938 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 74,21 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 115 \text{ mm}$; $l_{B2} = 250 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 28,63 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Nach dem Einfall der Beule war eine weitere Laststeigerung bis auf $F_2 = 78,57 \text{ kN}$ möglich.

Versuch Nr. 10/II - 51

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 447,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,921 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - $20 \times 20 \text{ mm}$
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 53,24 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 50 \text{ mm}$; $l_{B2} = 230 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 20,54 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 10/III - 52

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 447,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,921 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 64,69 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: Beulen nicht vermessen
 Beulspannung: $\sigma_B = 24,96 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 10/IIIa - 52 (Wiederbelastung)

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 447,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,921 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 42,84 \text{ kN}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 16,53 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 10/IV - 53

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 447,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,921 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,920 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,924 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 66,82 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B1} = 70 \text{ mm}$; $l_{B1} = 200 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 25,78 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 1 ein.

Versuch Nr. 14/IV - 54

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 449,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,918 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,921 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 40 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 82,67 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 65 \text{ mm}$; $l_{B2} = 250 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 31,89 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Versuch Nr. 14/V - 55

Abmessungen: $R = 412,5 \text{ mm}$; $L = 600 \text{ mm}$; $R/t_{k,m} = 449,6$
 Blechdicken: $t_{k,m} = 0,918 \text{ mm}$; $t_{k,\min} = 0,914 \text{ mm}$; $t_{k,\max} = 0,921 \text{ mm}$
 Flansch-Geometrie: ■-Profil - 20 x 20 mm
 Lasteinleitungsbreite: $b = 80 \text{ mm}$
 Versagenslast: $F_1 = 82,64 \text{ kN}$
 Beulen-Geometrie: $h_{B2} = 65 \text{ mm}$; $l_{B2} = 240 \text{ mm}$
 Beulspannung: $\sigma_B = 31,88 \text{ N/mm}^2$

Bemerkungen:

Versagen trat an Auflager Nr. 2 ein.

Anhang B

Lastverformungskurven der Versuche (Bild B1 – B45)

Last-Zeitkurven der Versuche (Bild B1a – B66a)

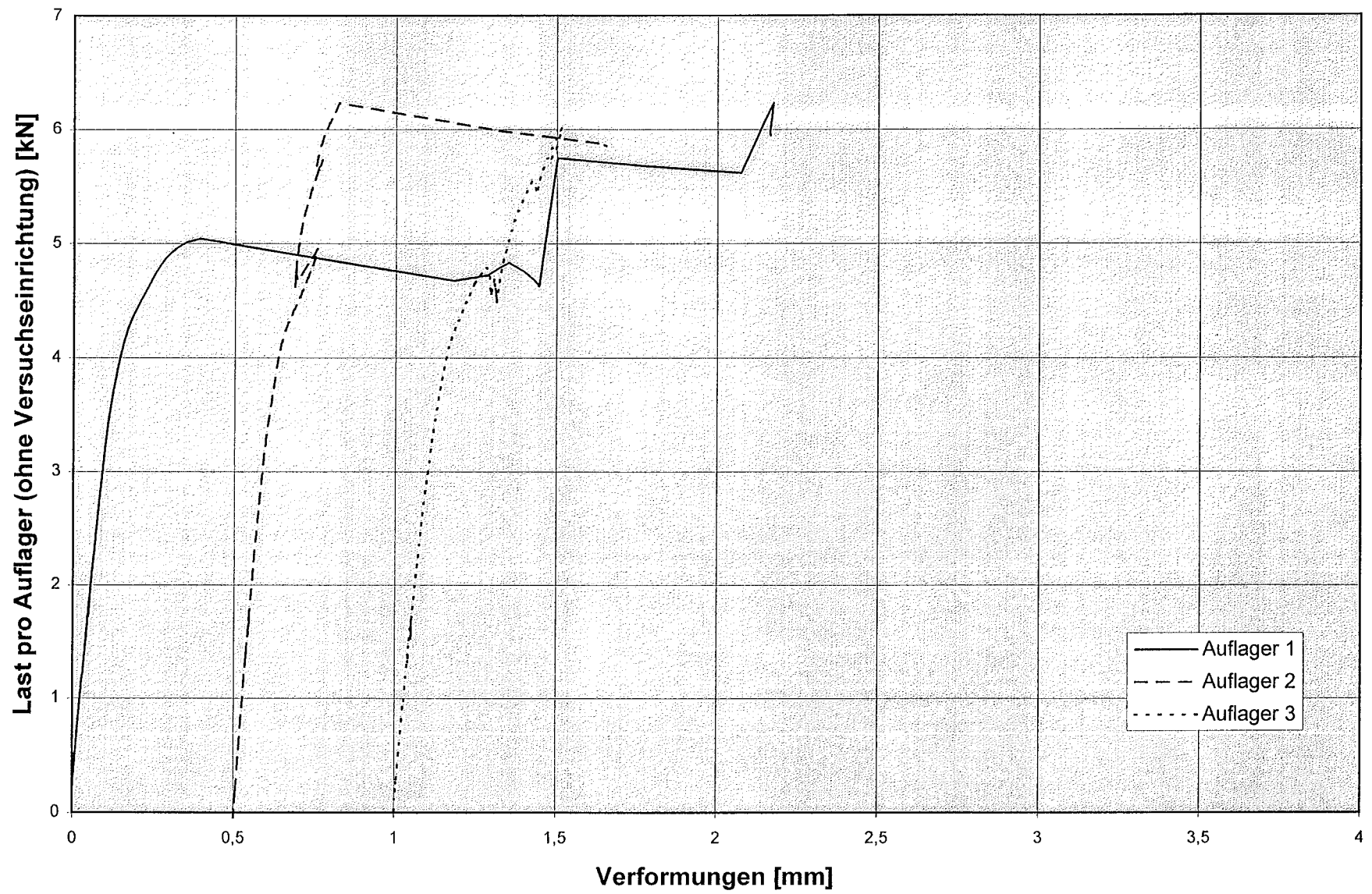


Bild B1: Lastverformungskurven Versuch 1/I ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

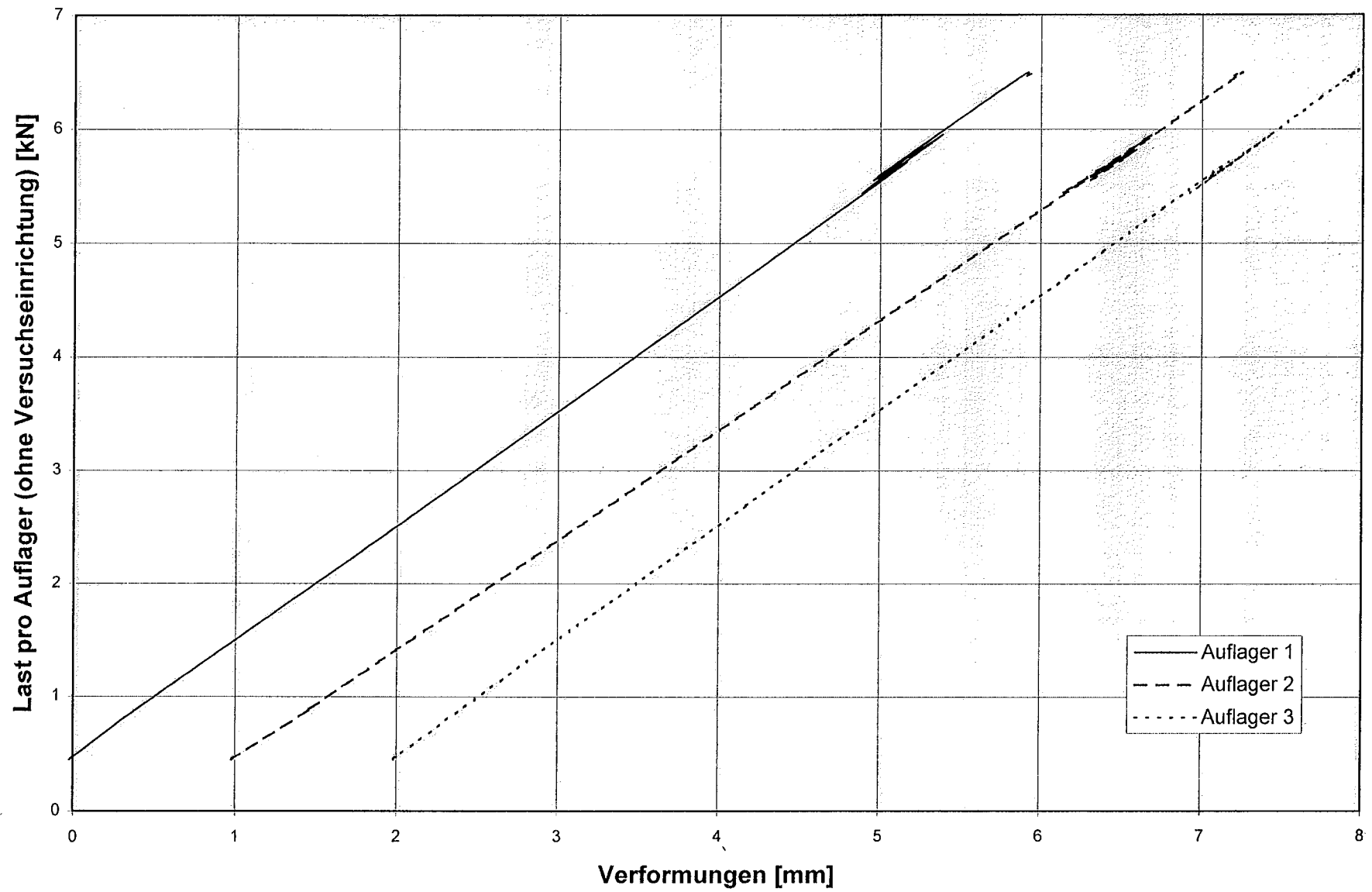


Bild B2: Lastverformungskurven Versuch 2/I ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

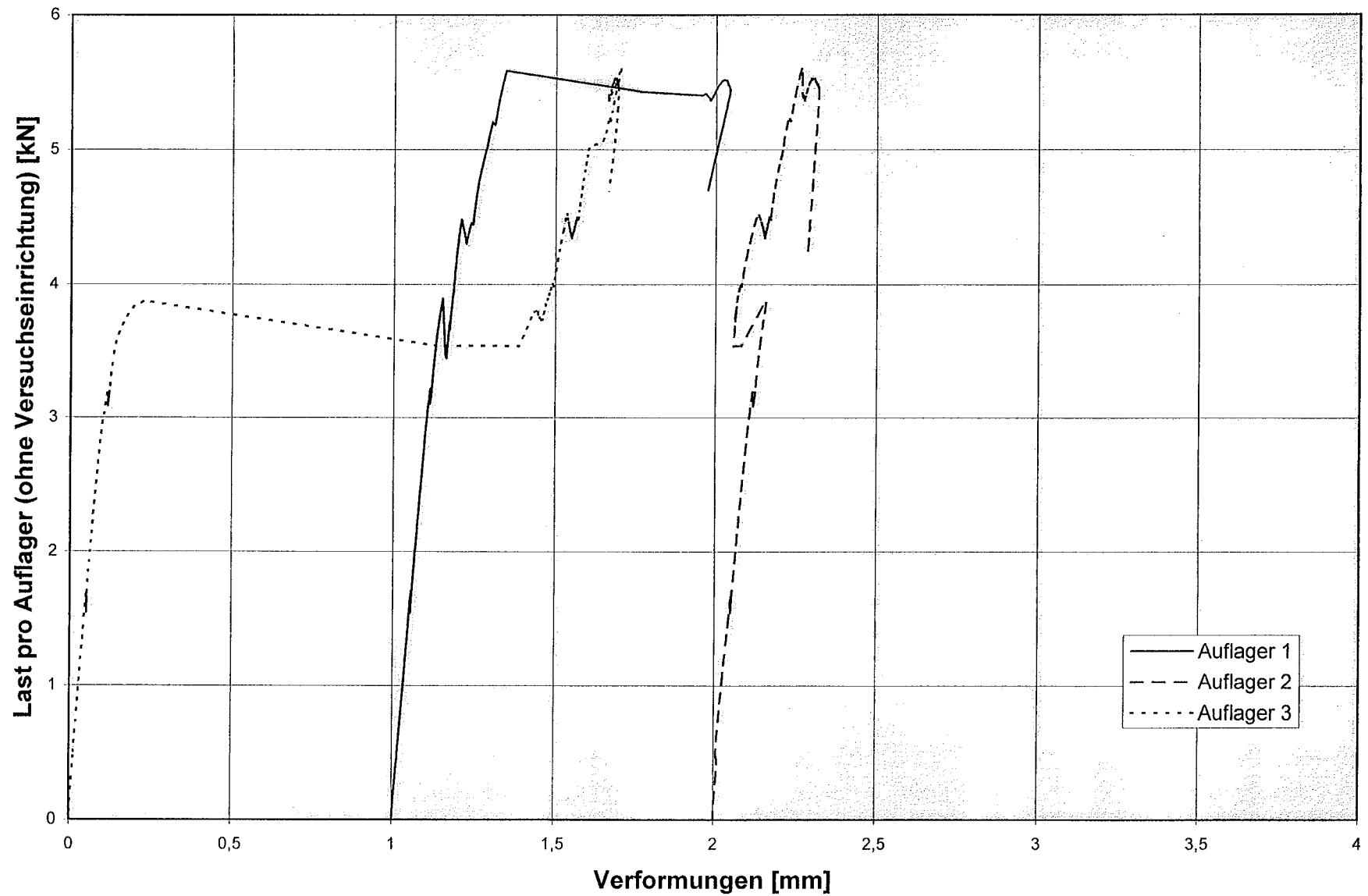


Bild B3: Lastverformungskurven Versuch 3/I ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

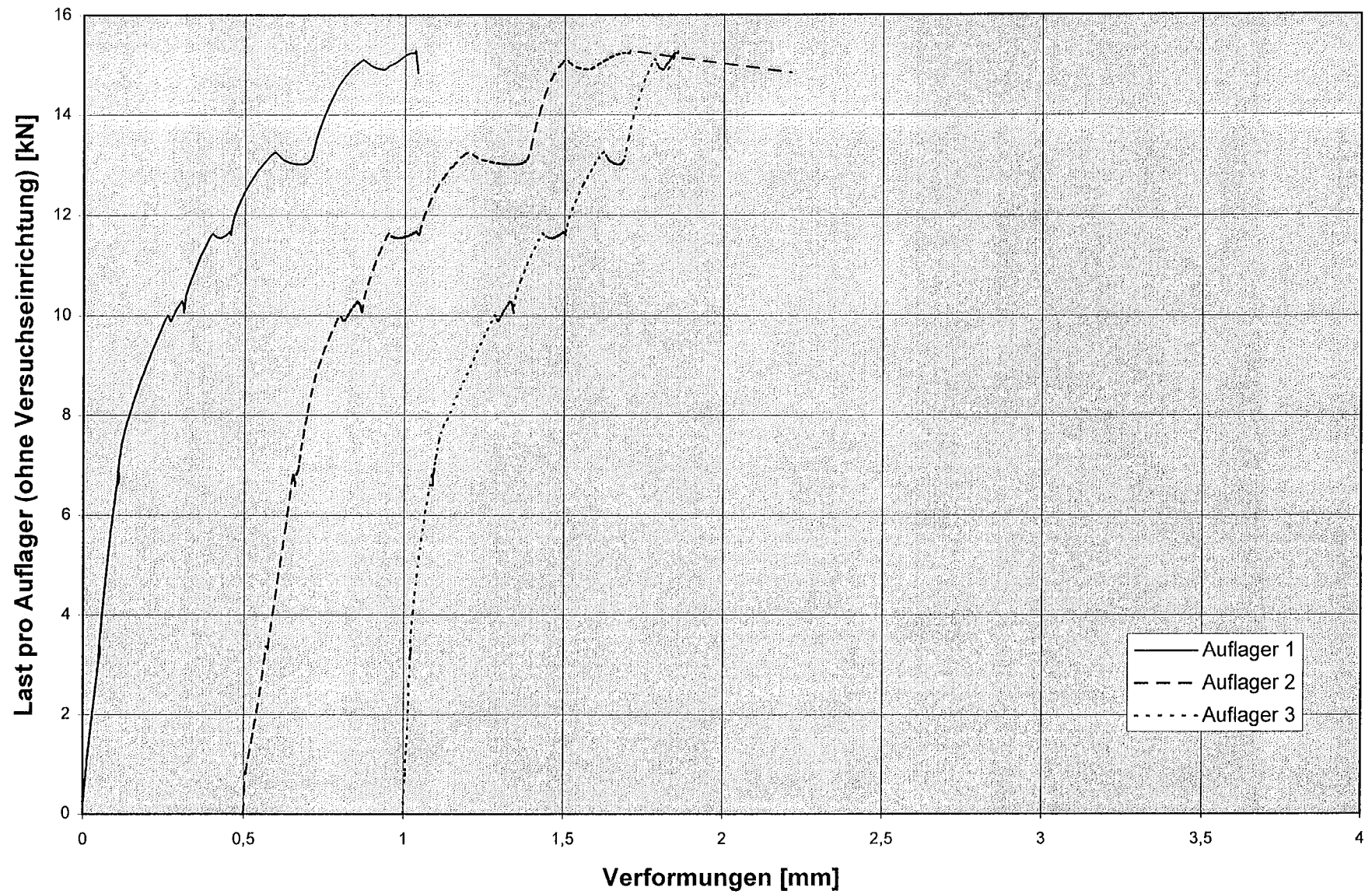


Bild B4: Lastverformungskurven Versuch 4/II ($t_{k,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

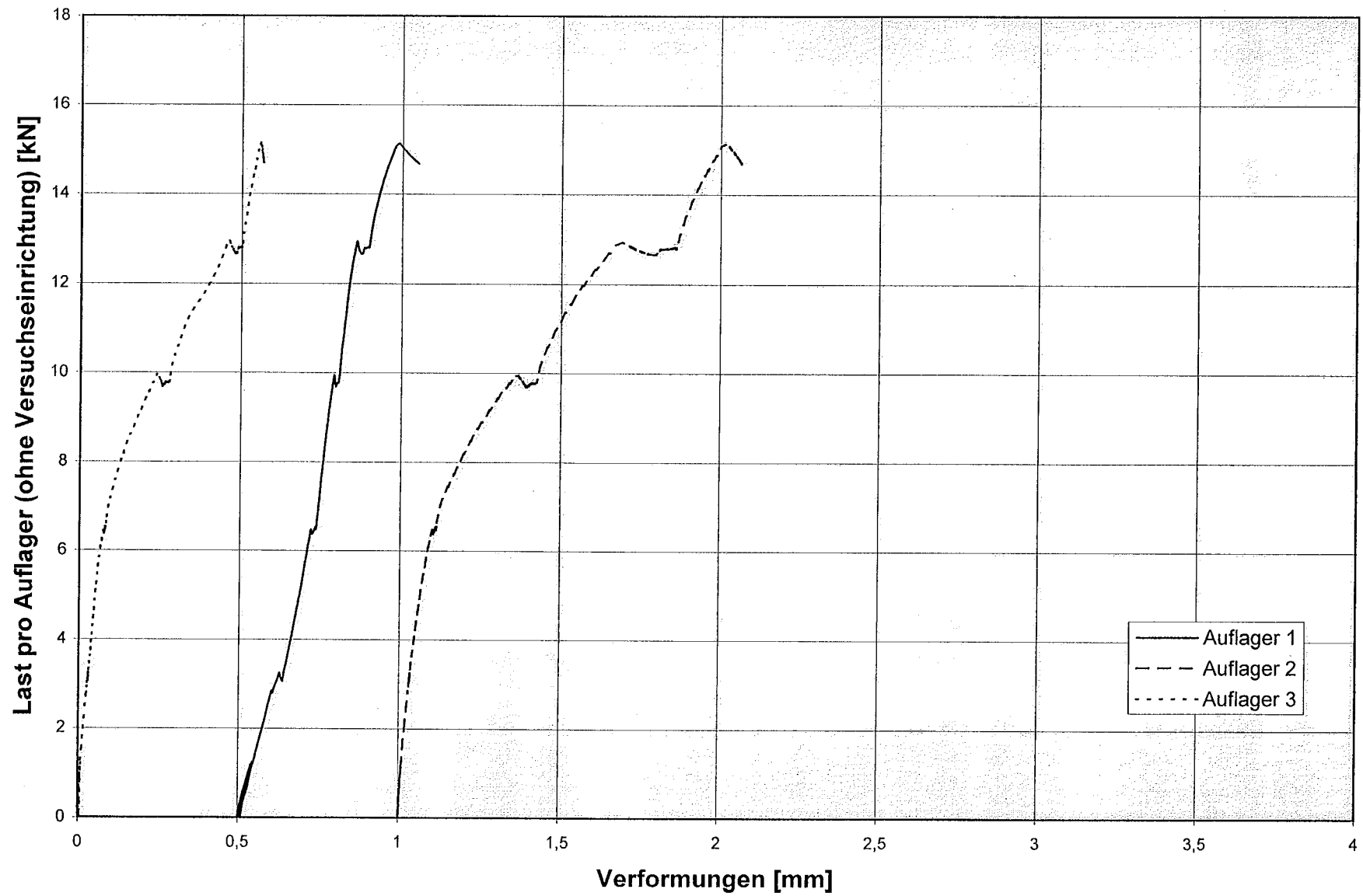


Bild B5: Lastverformungskurven Versuch 5/I ($t_{k,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

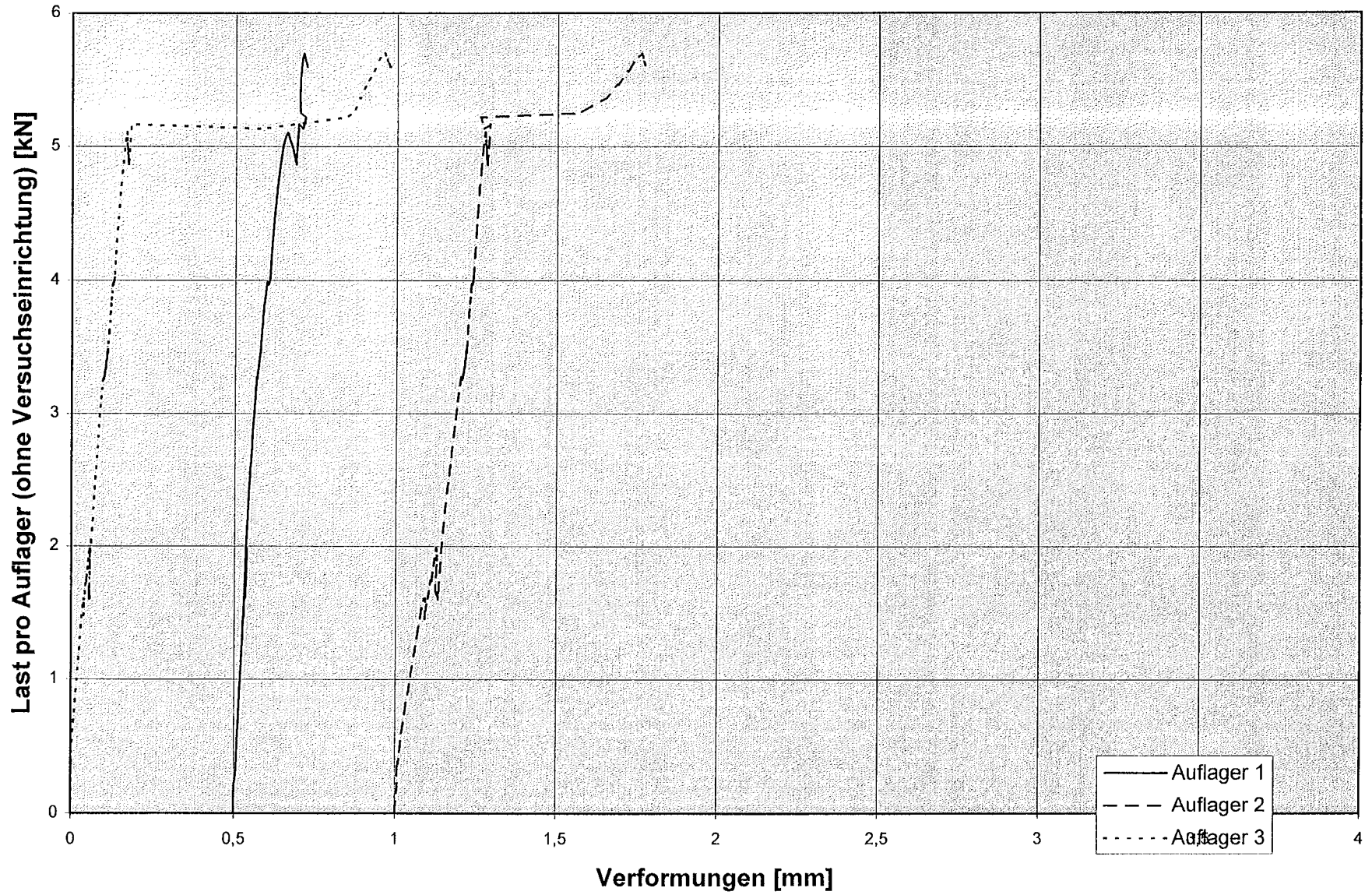


Bild B6: Lastverformungskurven Versuch 6/I ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

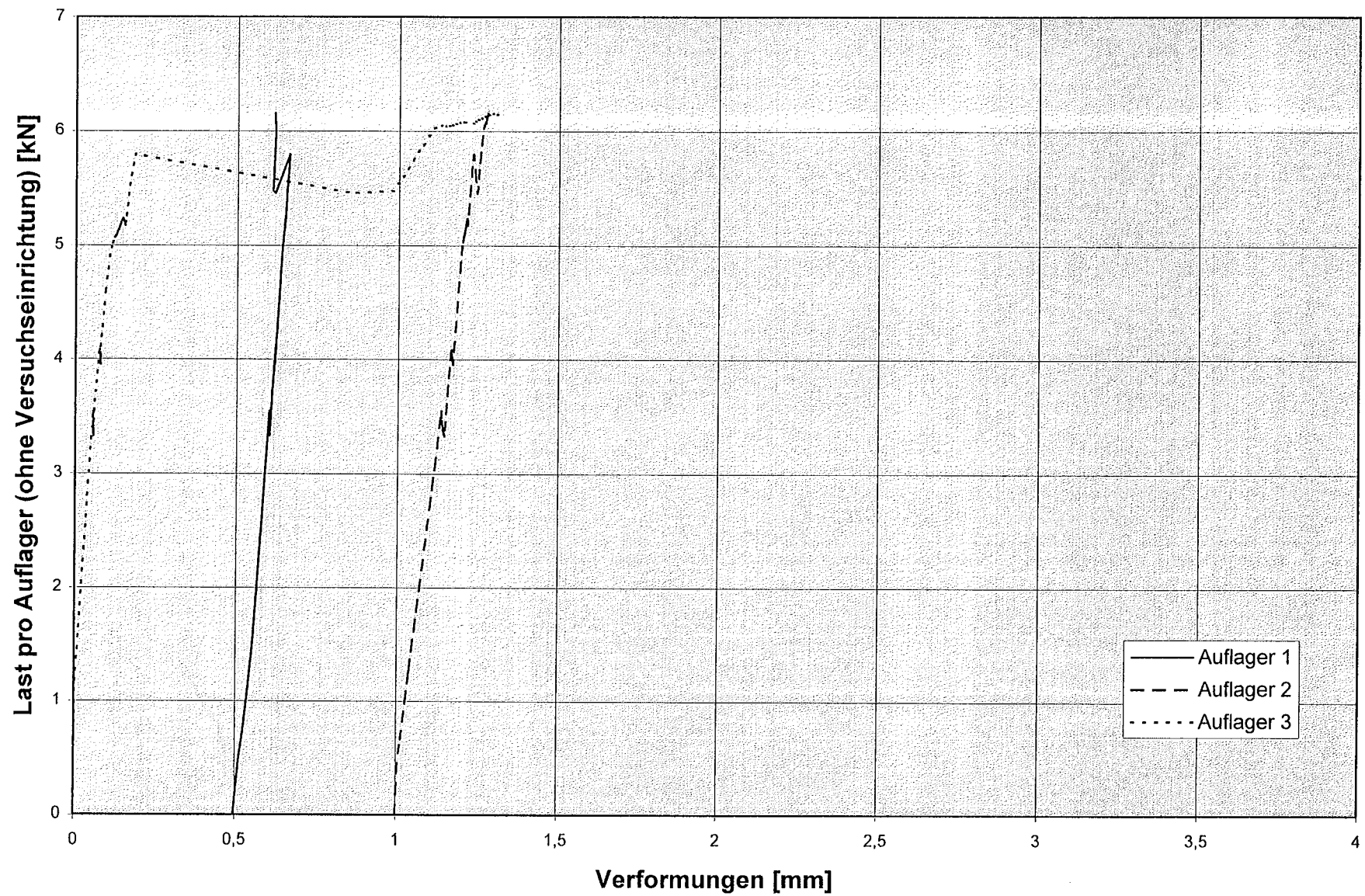


Bild B7: Lastverformungskurven Versuch 6/II ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

6/IV 2

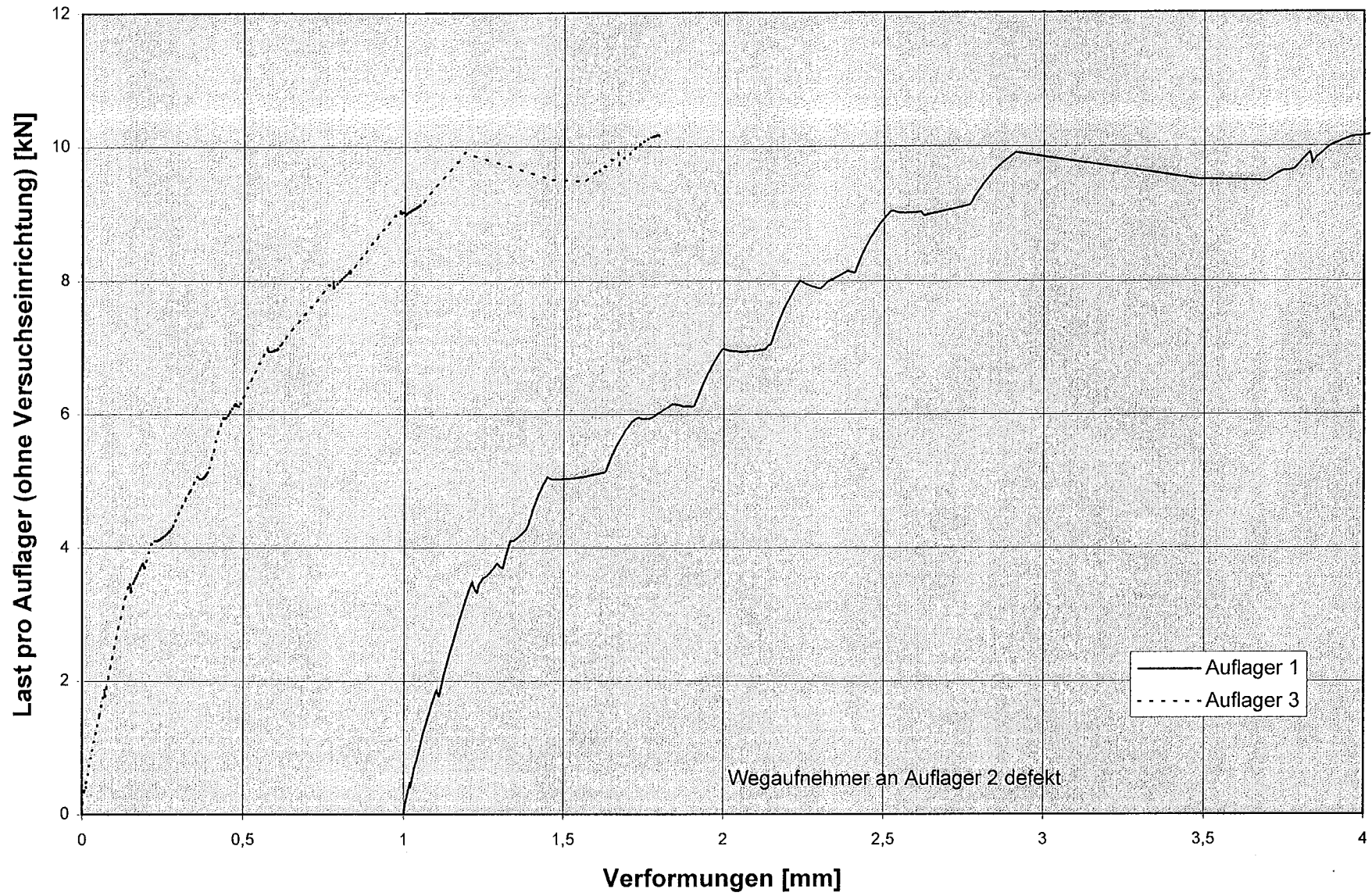


Bild B8: Lastverformungskurven Versuch 6/IV ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; ■-Profil)

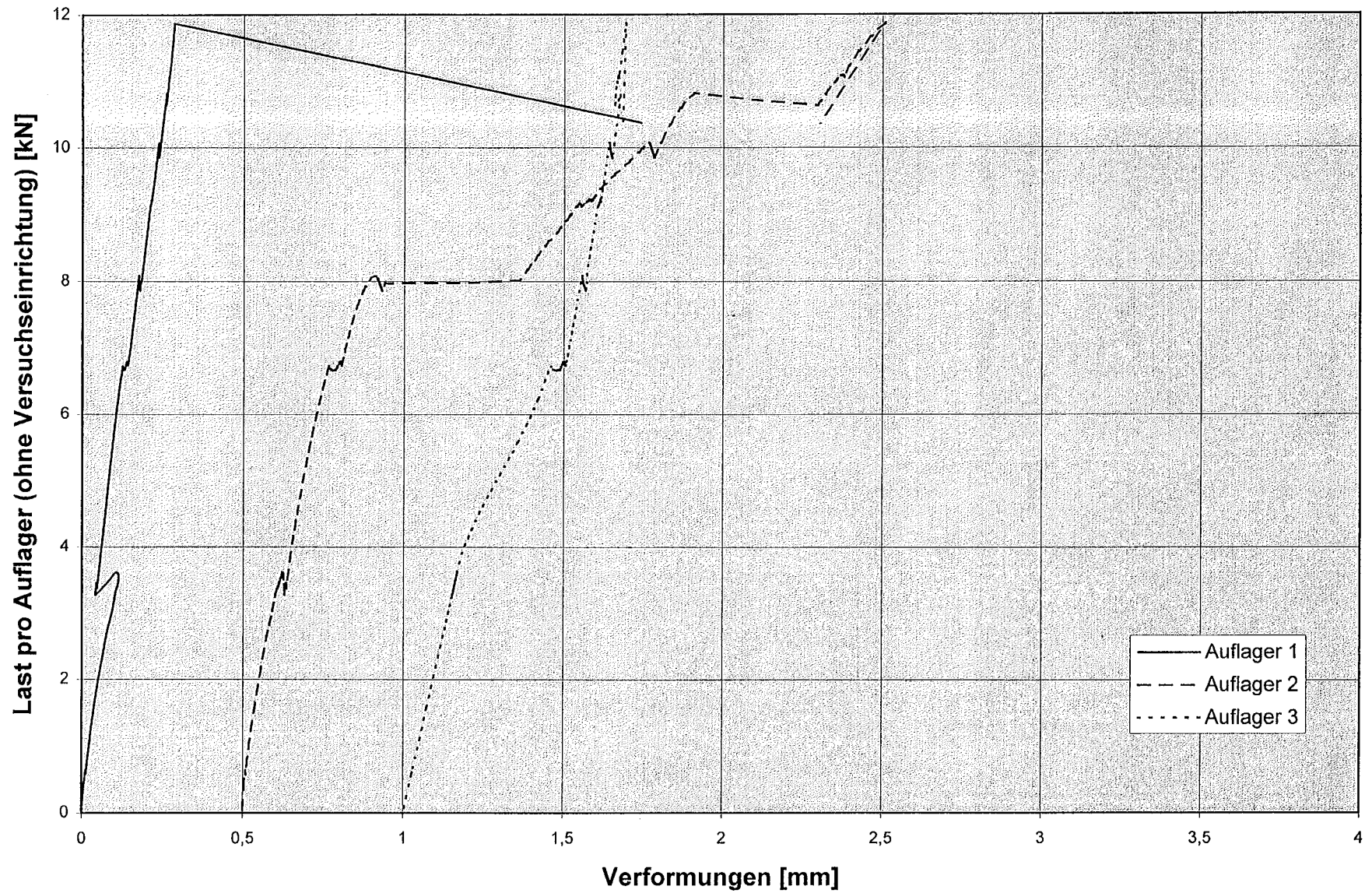


Bild B9: Lastverformungskurven Versuch 6/V ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; ■-Profil)

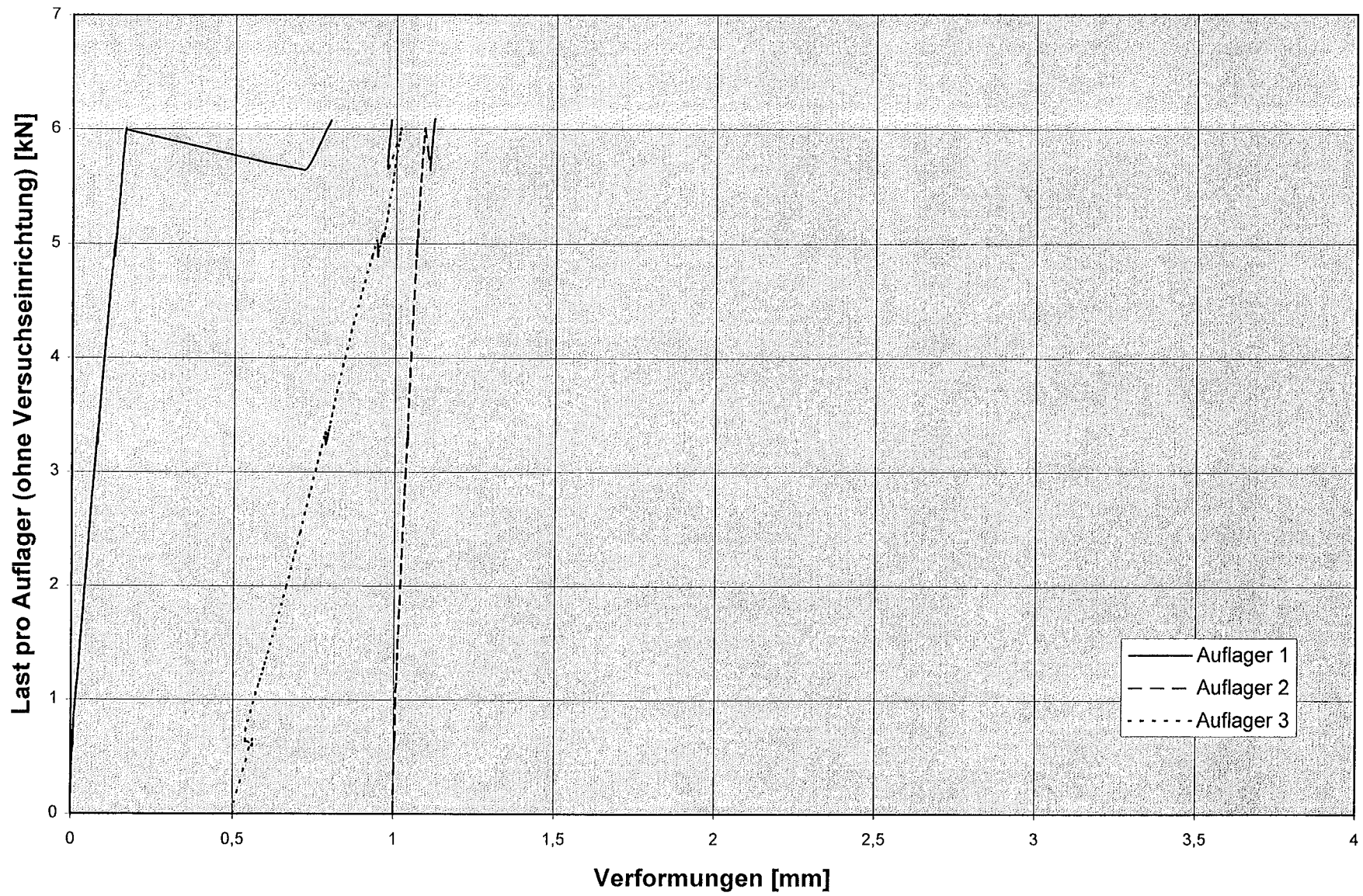


Bild B10: Lastverformungskurven Versuch 7/I ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

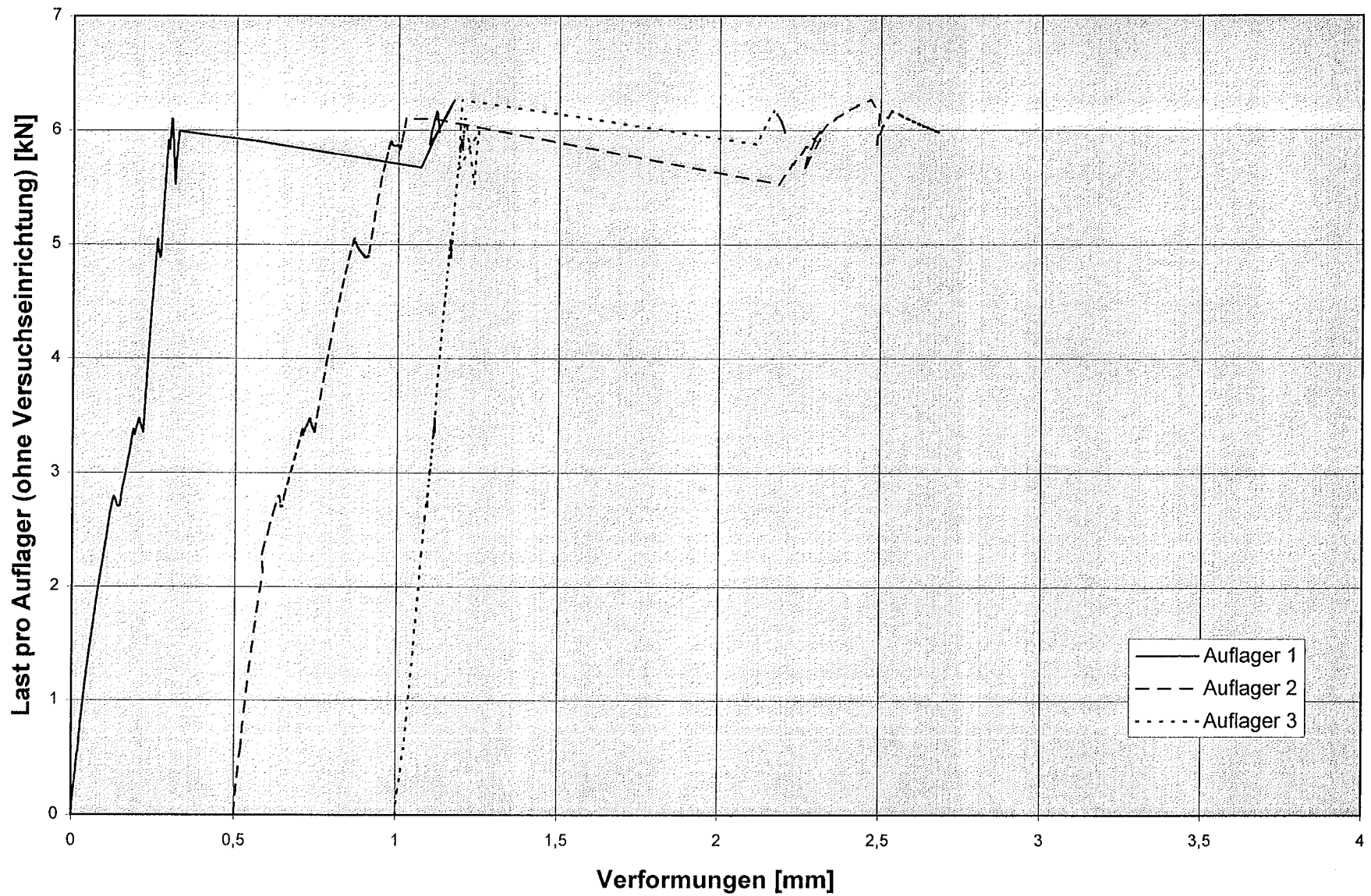


Bild B11: Lastverformungskurven Versuch 7/II ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

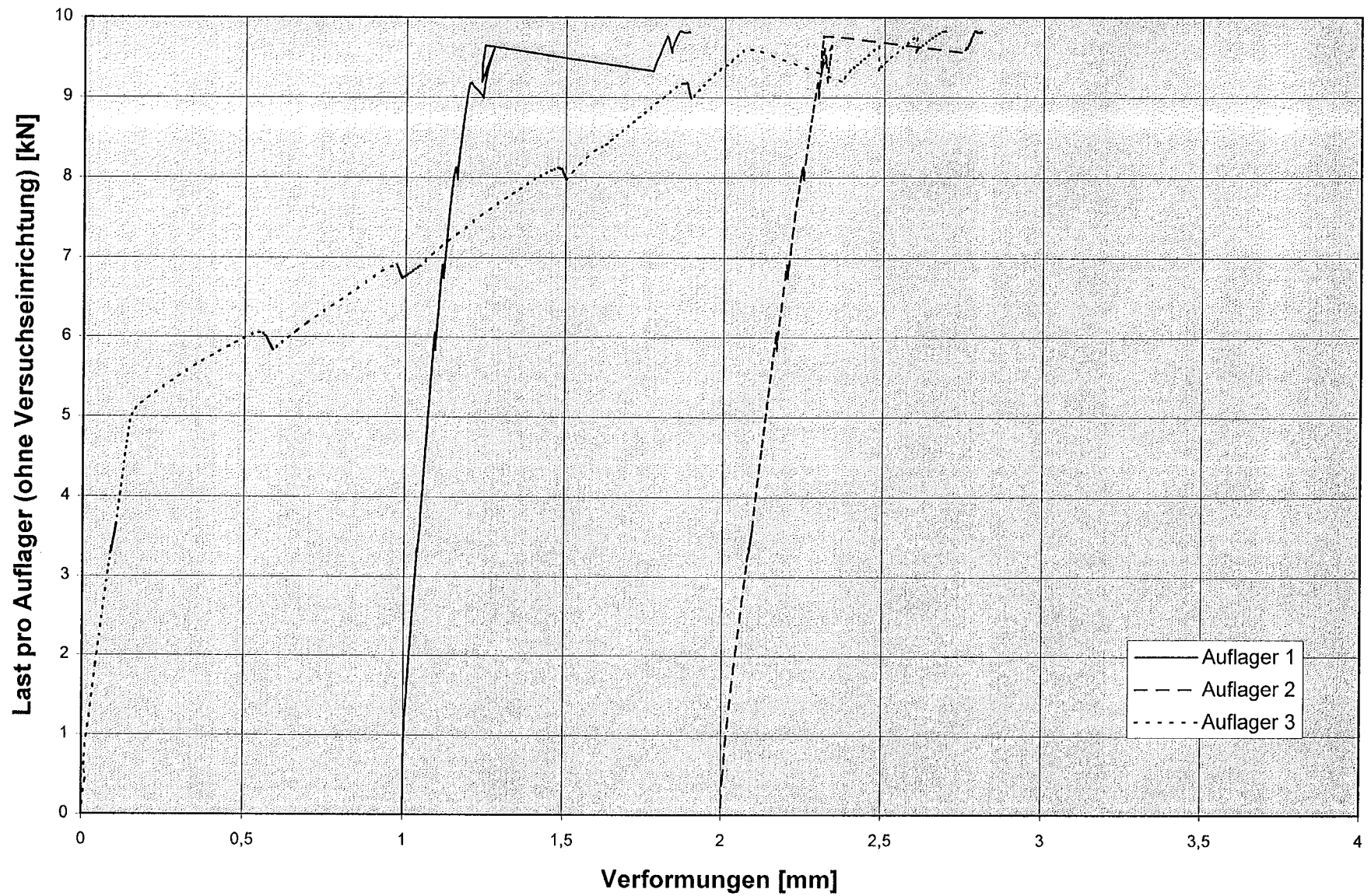


Bild B12: Lastverformungskurven Versuch 7/III ($t_{K,m} = 0,566\text{mm}$; $b = 40\text{ mm}$; ■-Profil)

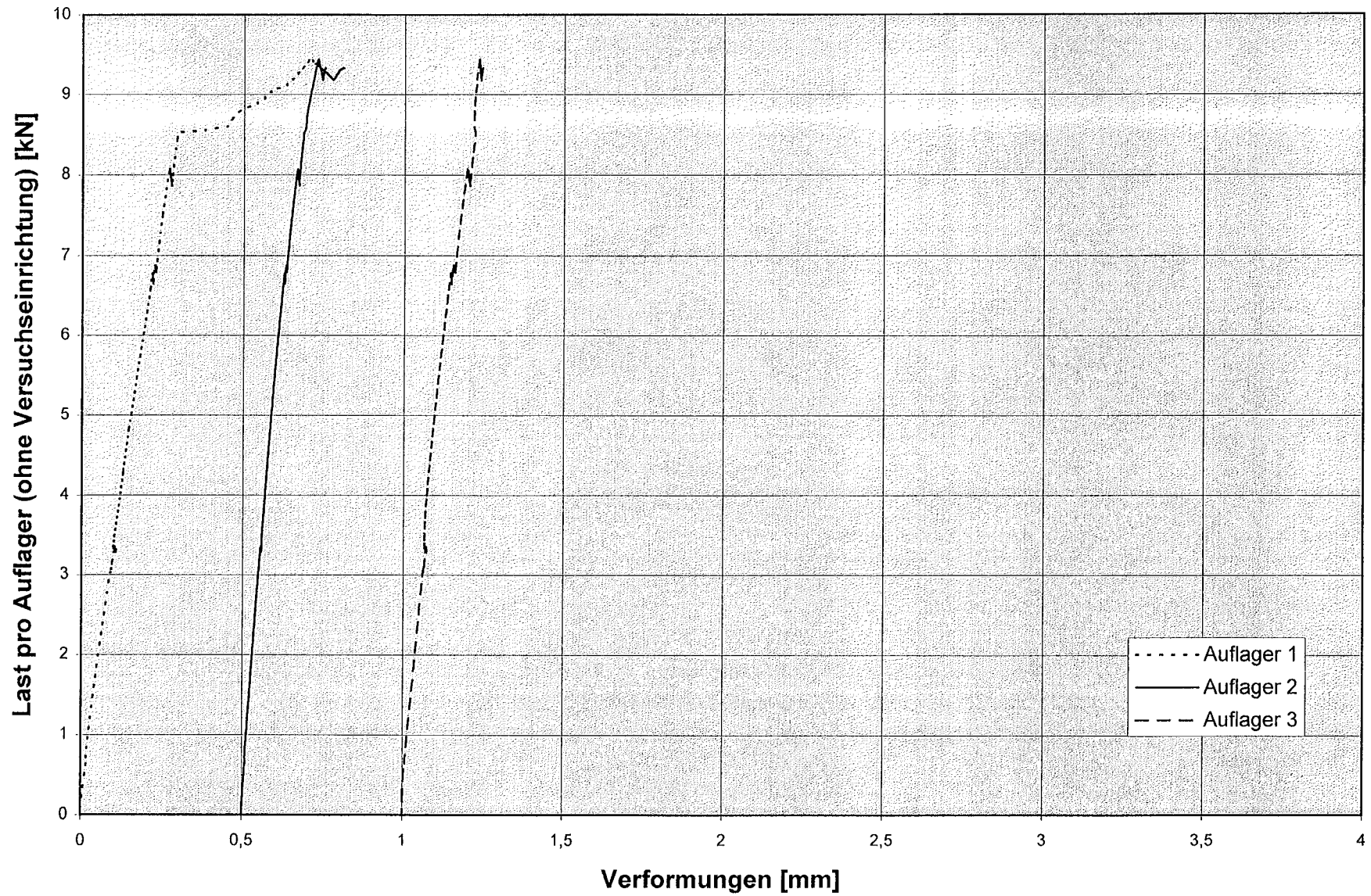


Bild B13: Lastverformungskurven Versuch 7/IV ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

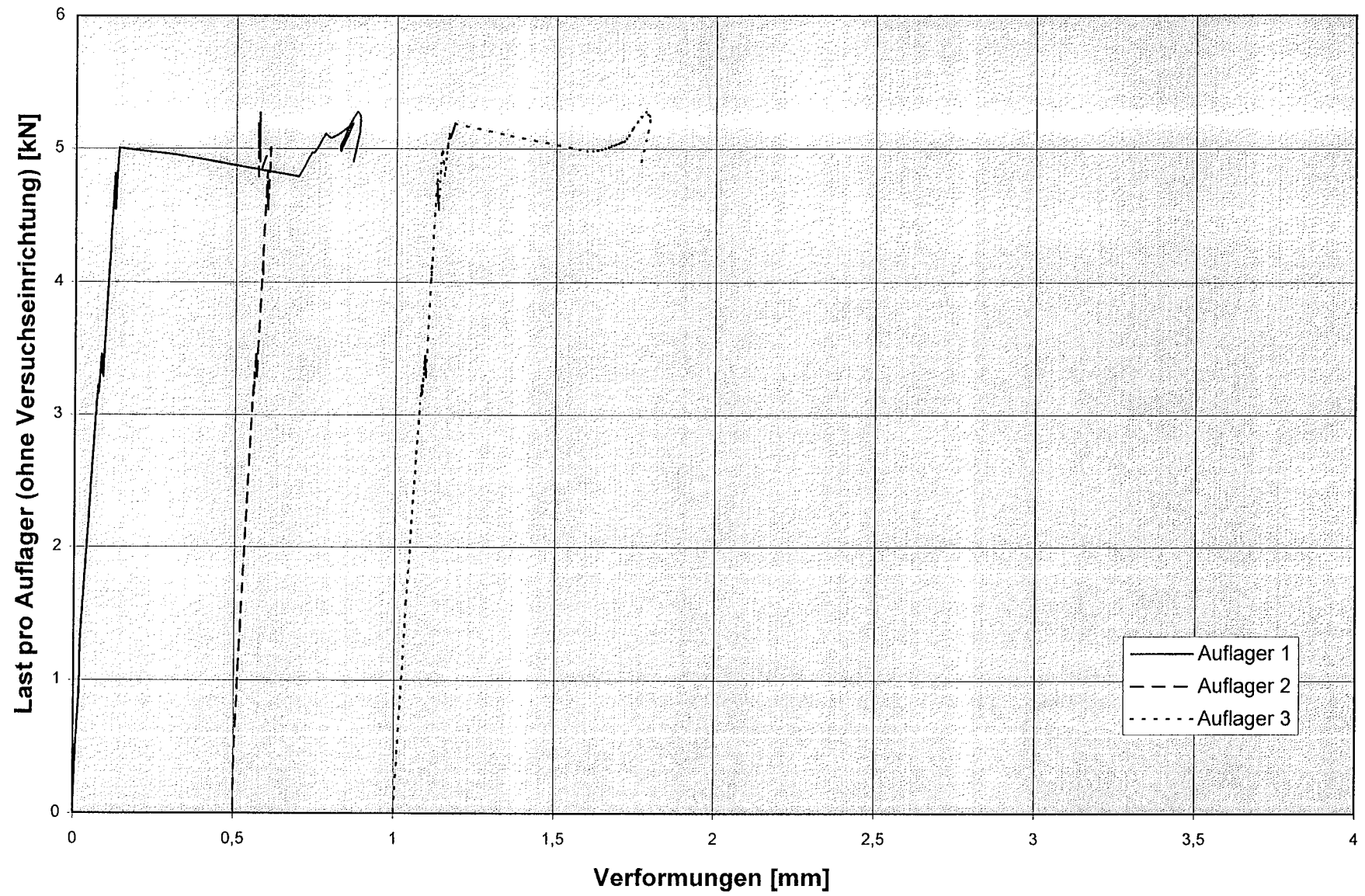


Bild B14: Lastverformungskurven Versuch 8/I ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

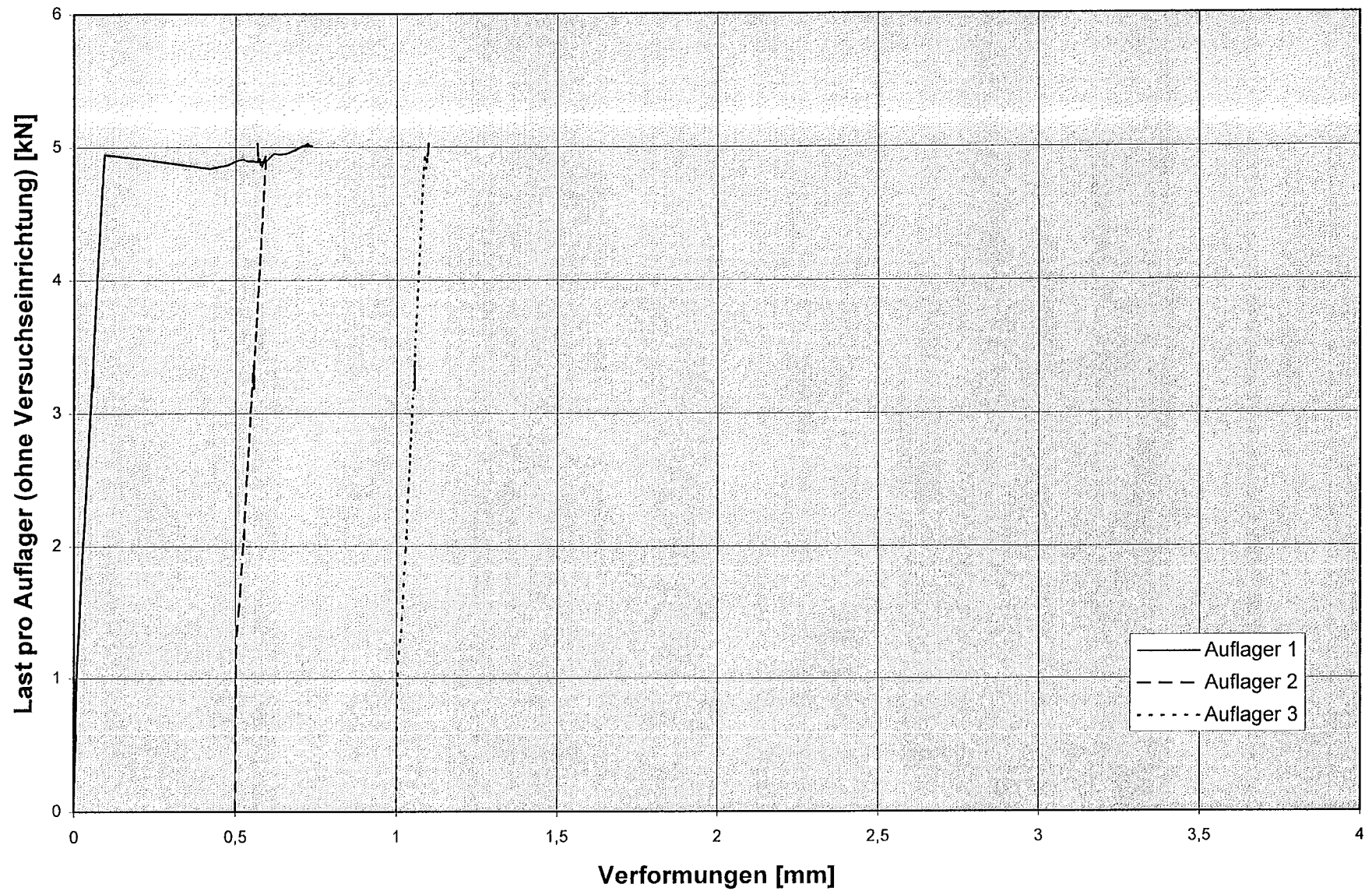


Bild B15: Lastverformungskurven Versuch 8/II ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

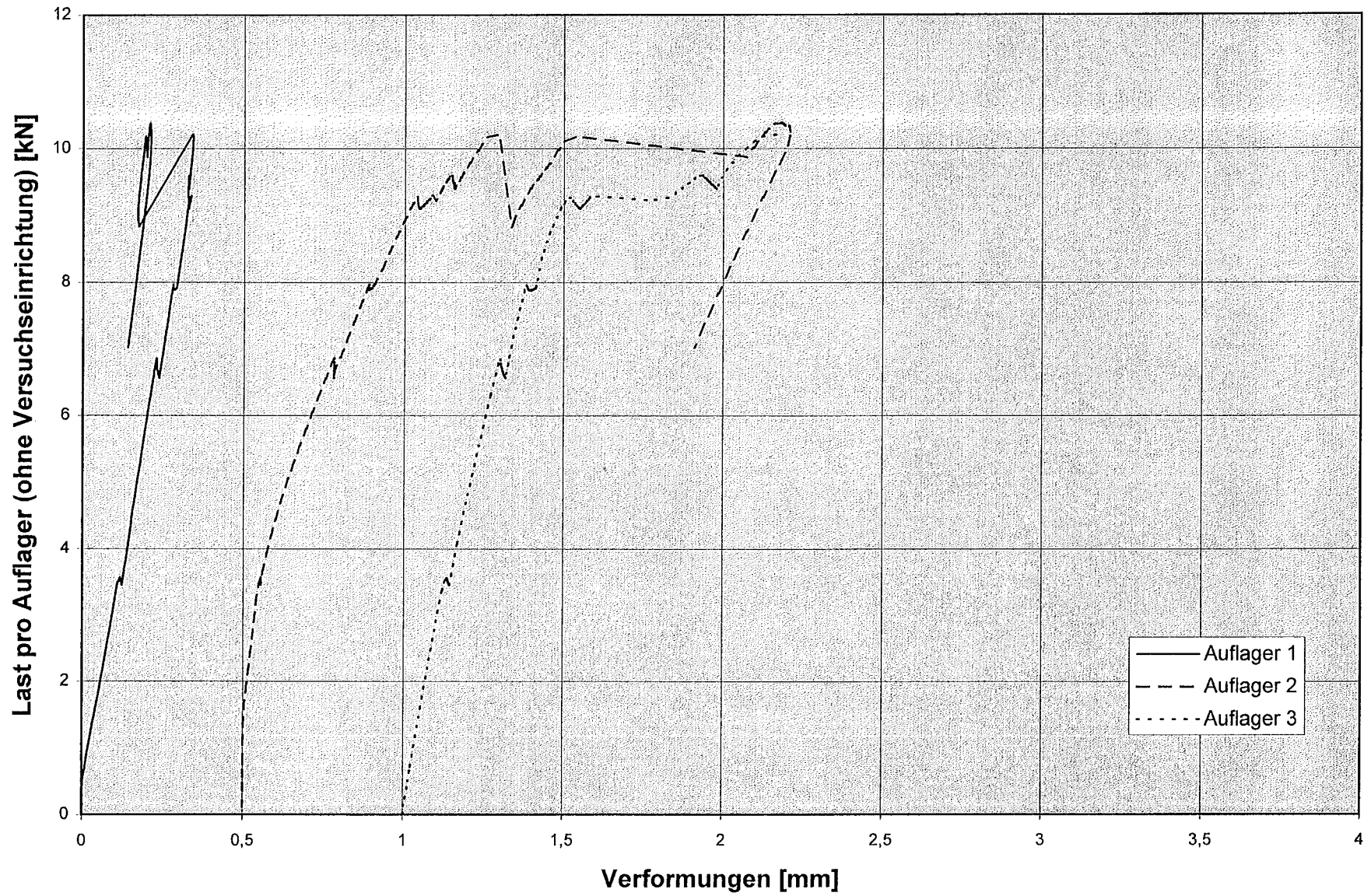


Bild B16: Lastverformungskurven Versuch 8/III ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

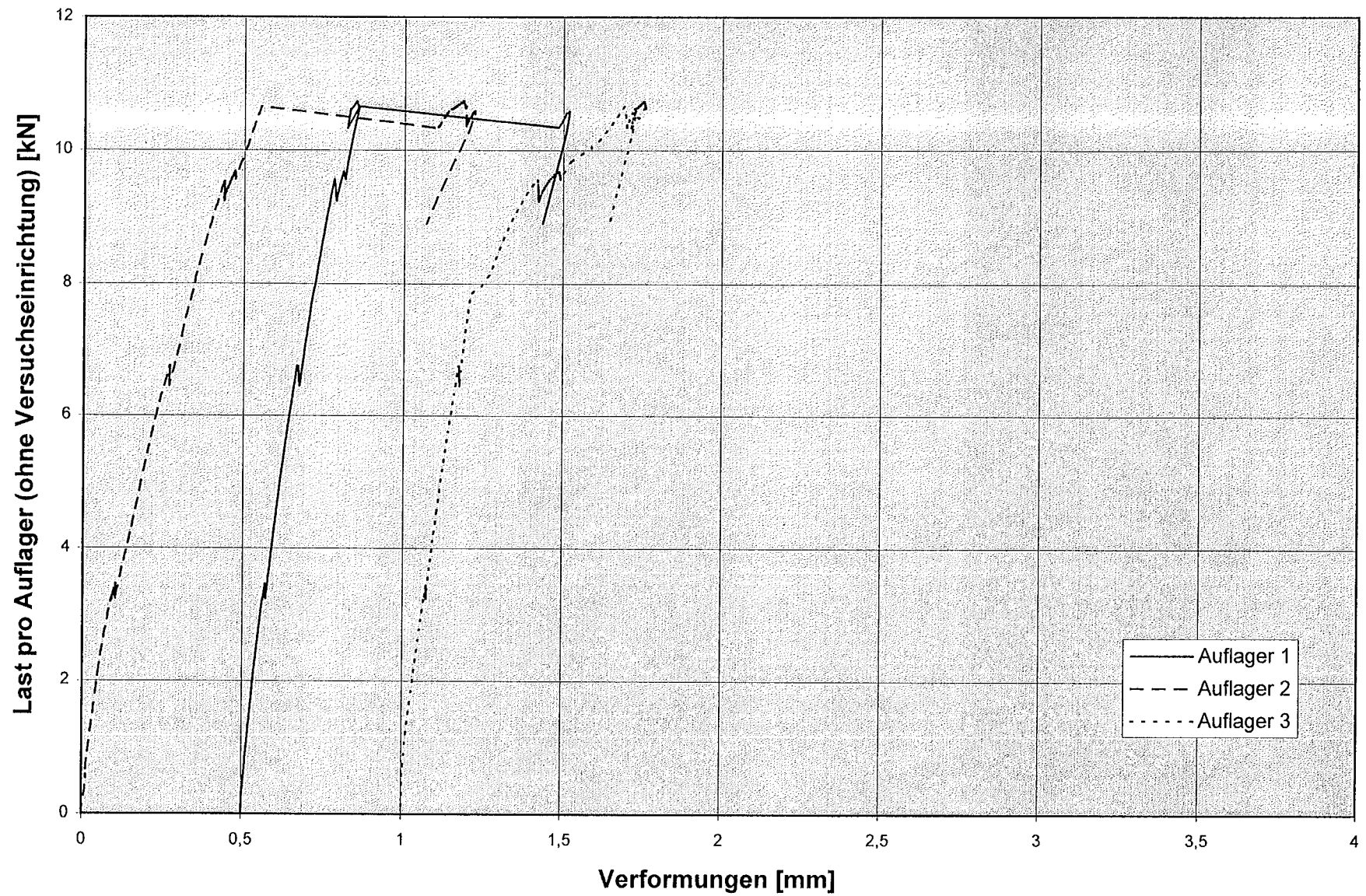


Bild B17: Lastverformungskurven Versuch 8/IV ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

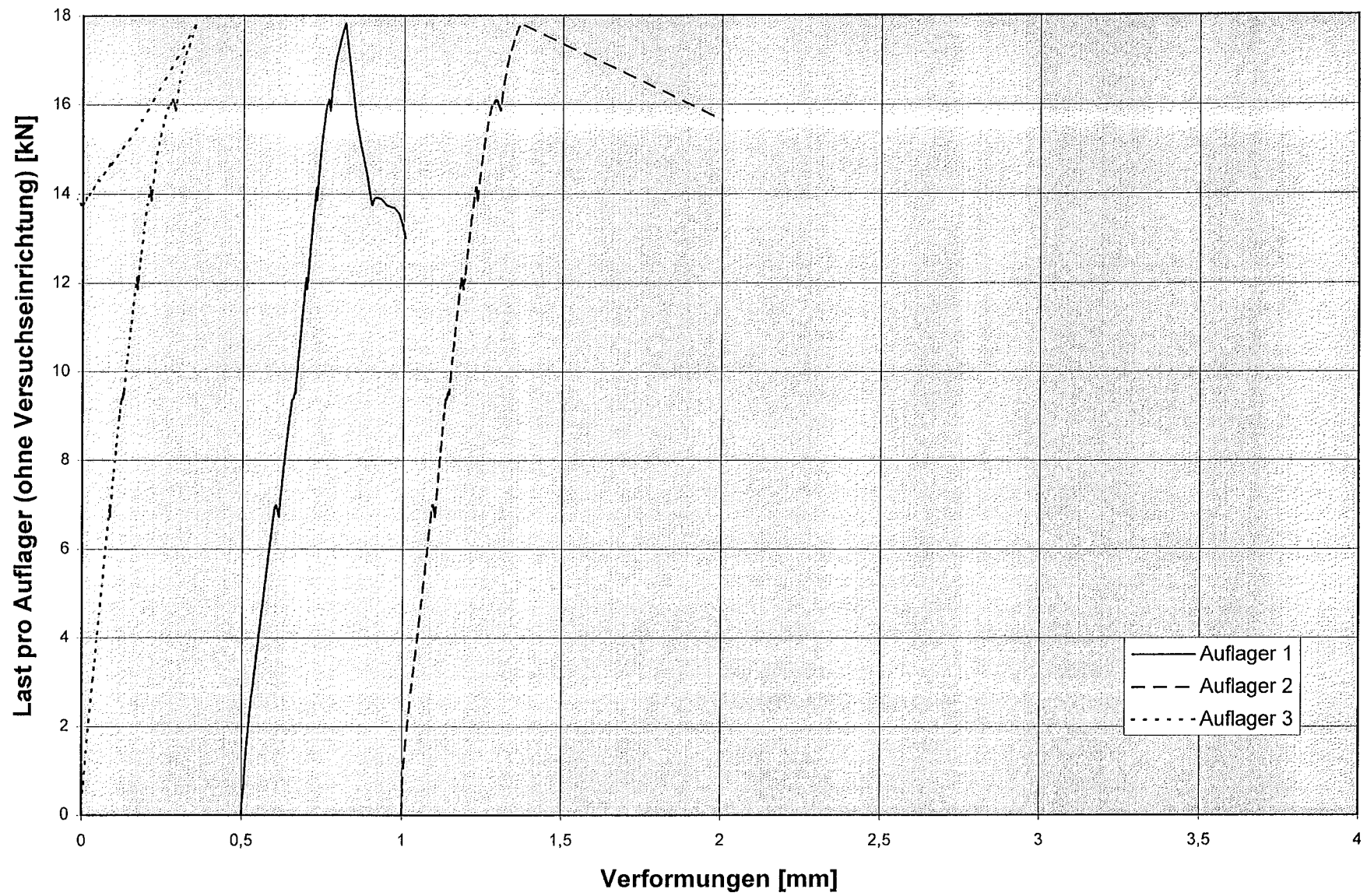


Bild B18: Lastverformungskurven Versuch 9/I ($t_{K,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

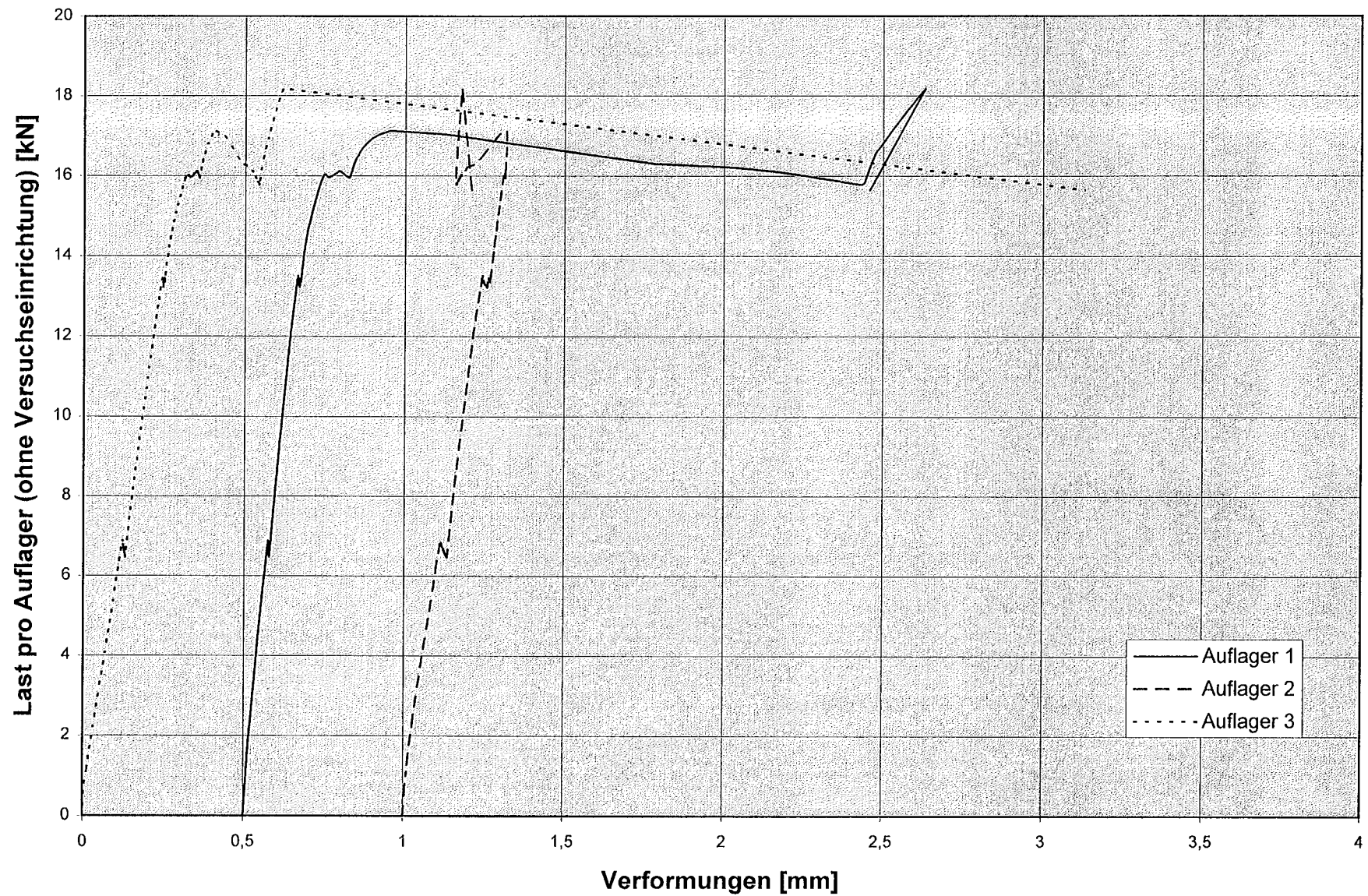


Bild B19: Lastverformungskurven Versuch 9/II ($t_{K,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

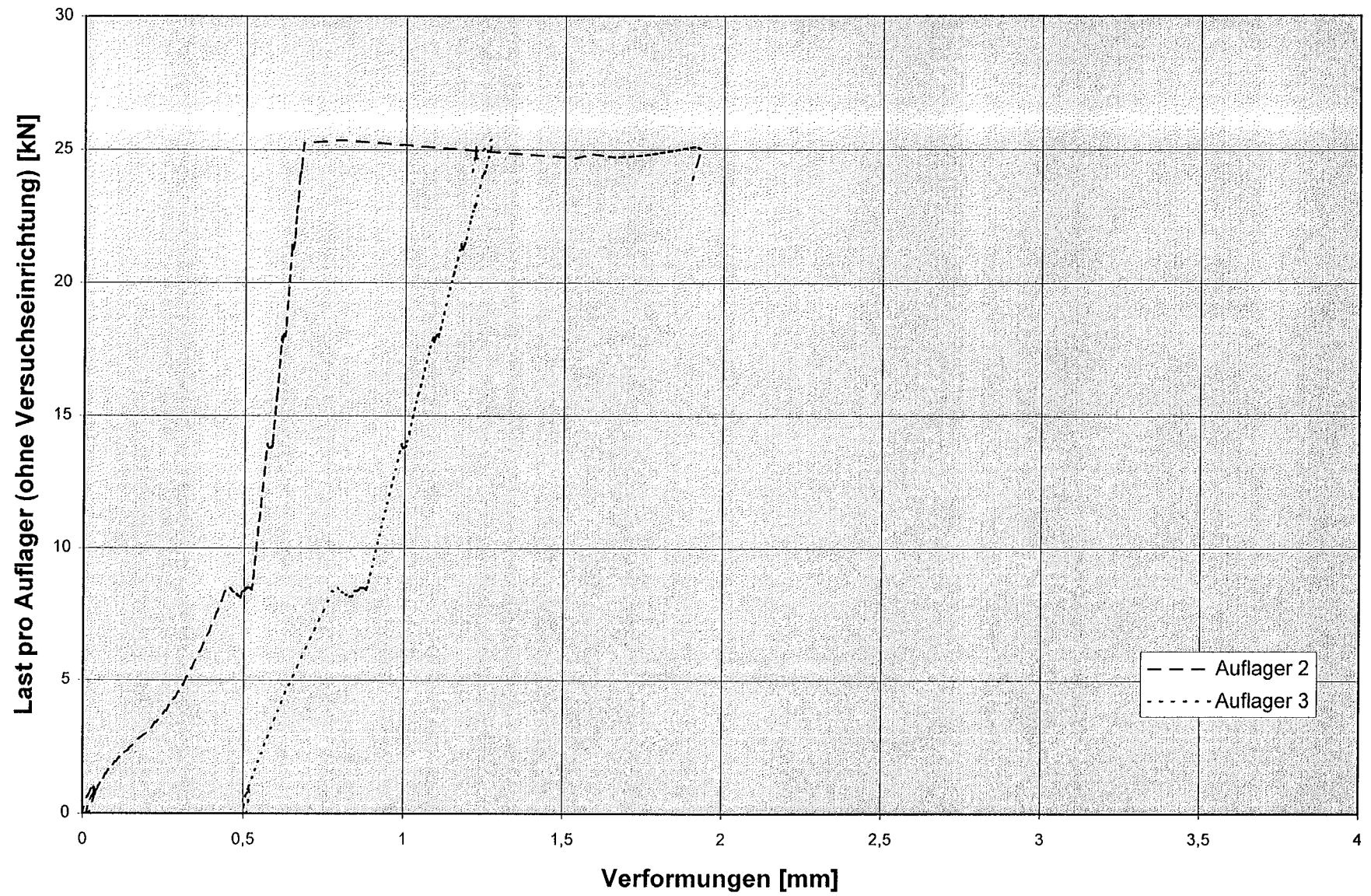


Bild B20: Lastverformungskurven Versuch 9/III ($t_{K,m} = 0,926 \text{ mm}$; $b = 40 \text{ mm}$; ■-Profil)

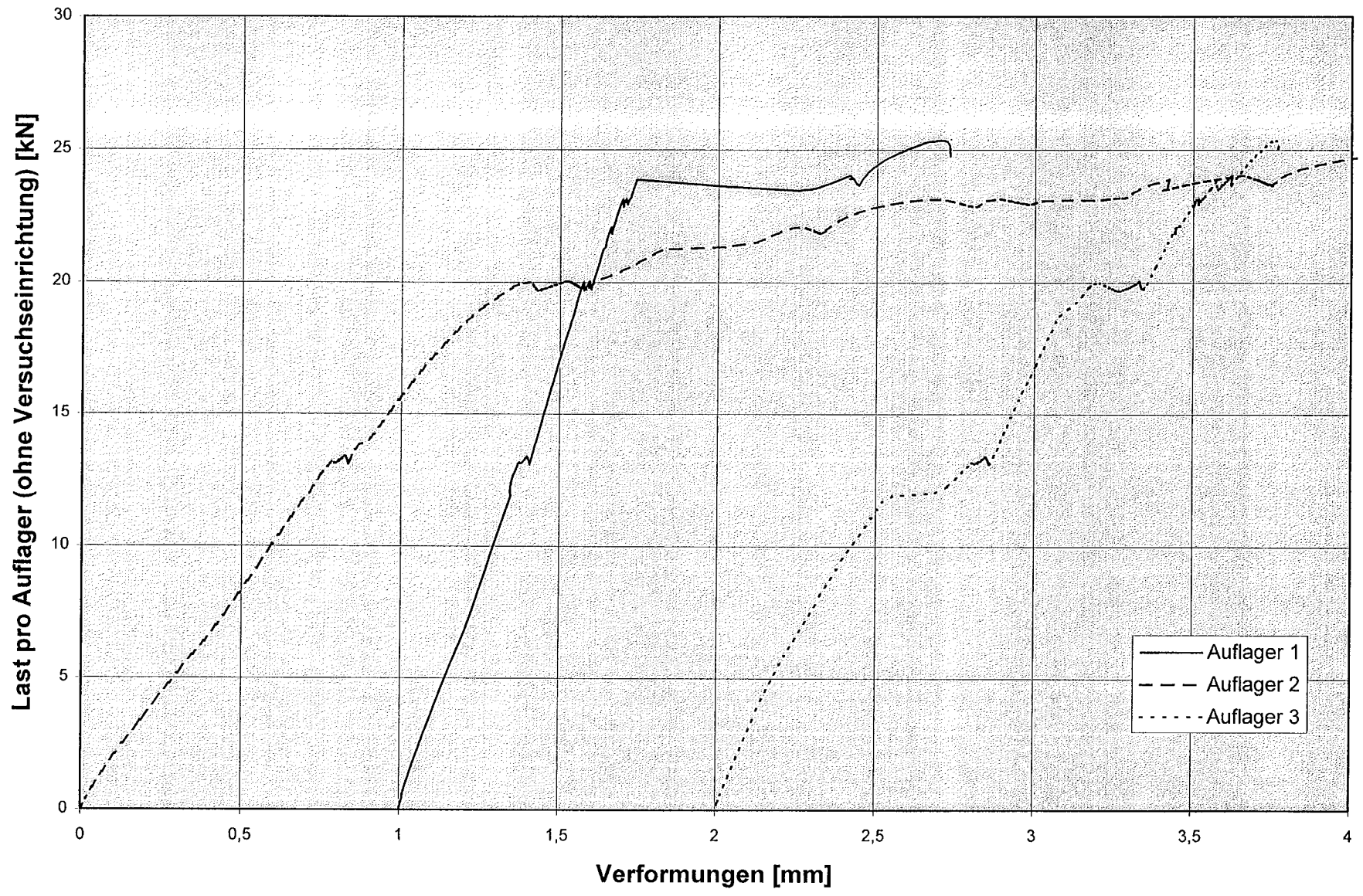


Bild B21: Lastverformungskurven Versuch 9/IV ($t_{K,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

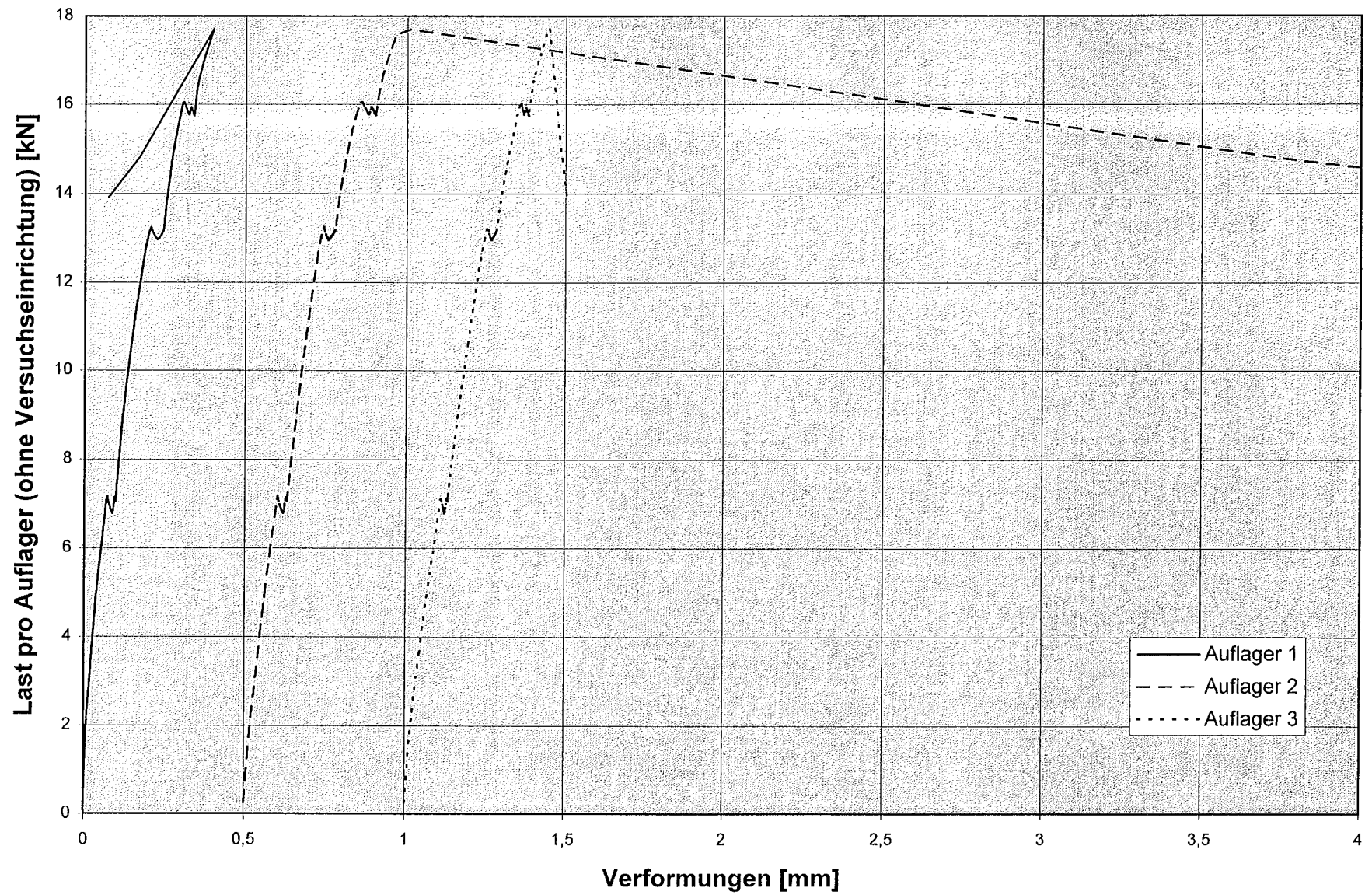


Bild B22: Lastverformungskurven Versuch 10/I ($t_{K,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

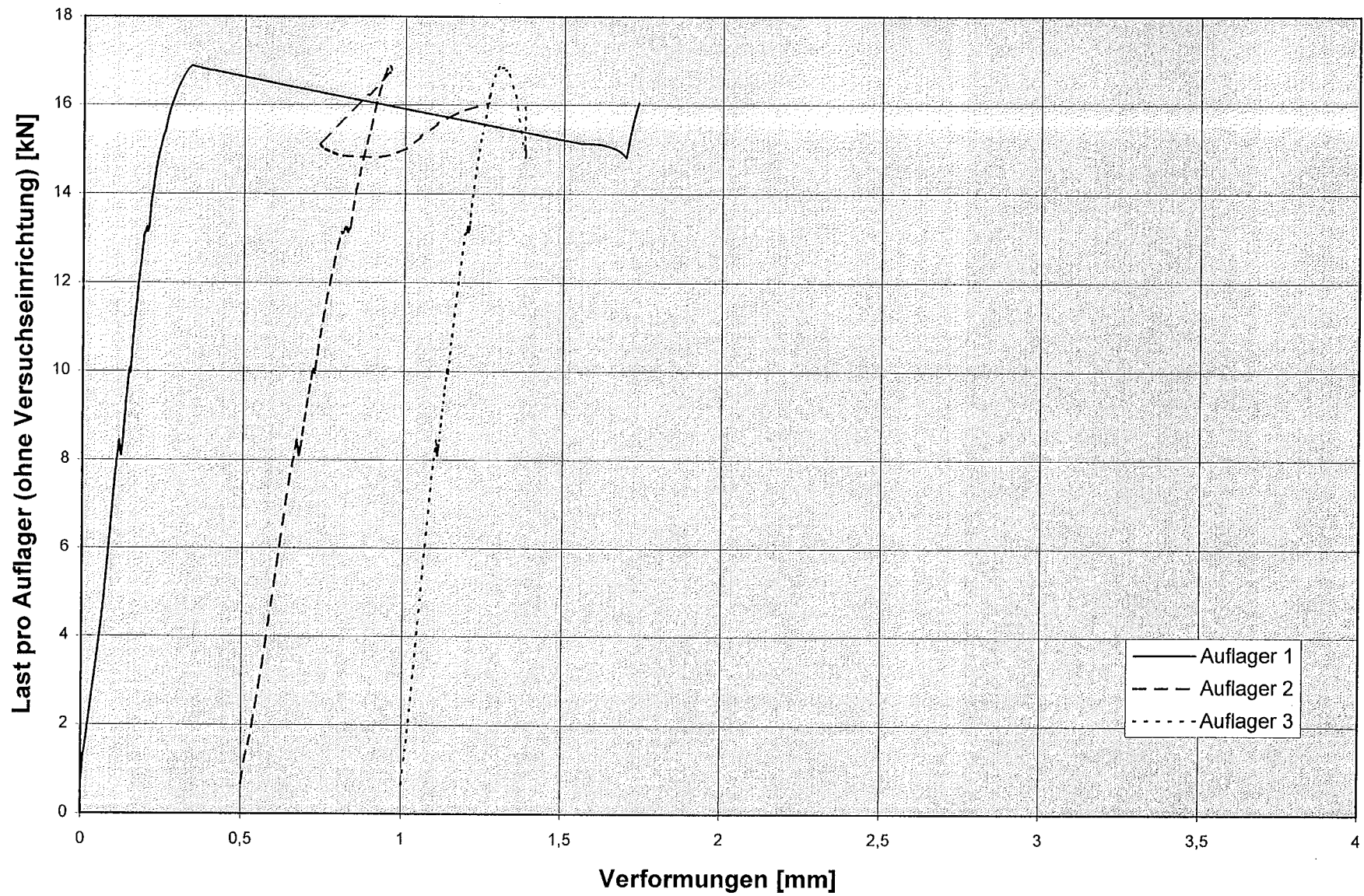


Bild B23: Lastverformungskurven Versuch 10/II ($t_{K,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

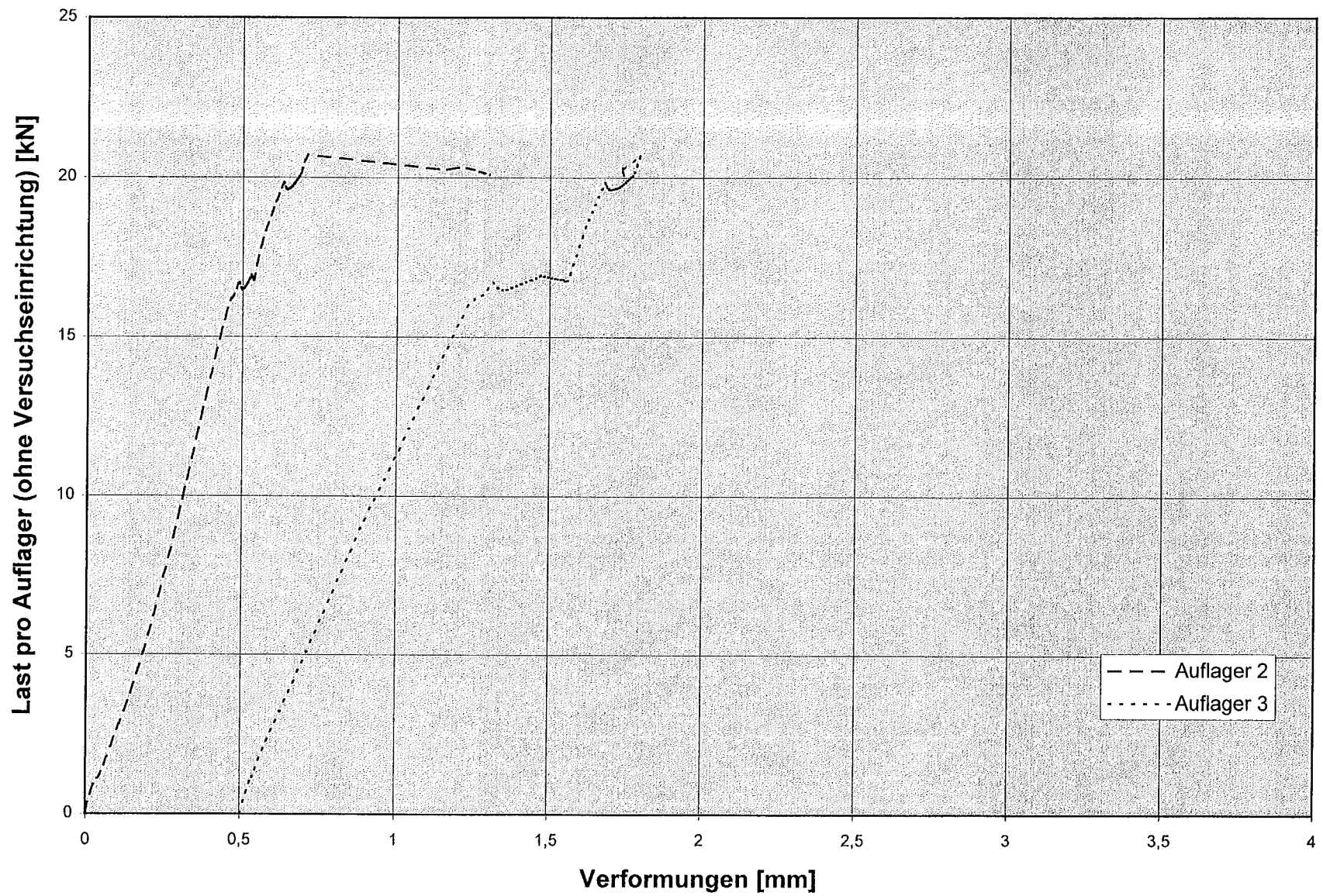


Bild B24: Lastverformungskurven Versuch 10/III ($t_{K,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

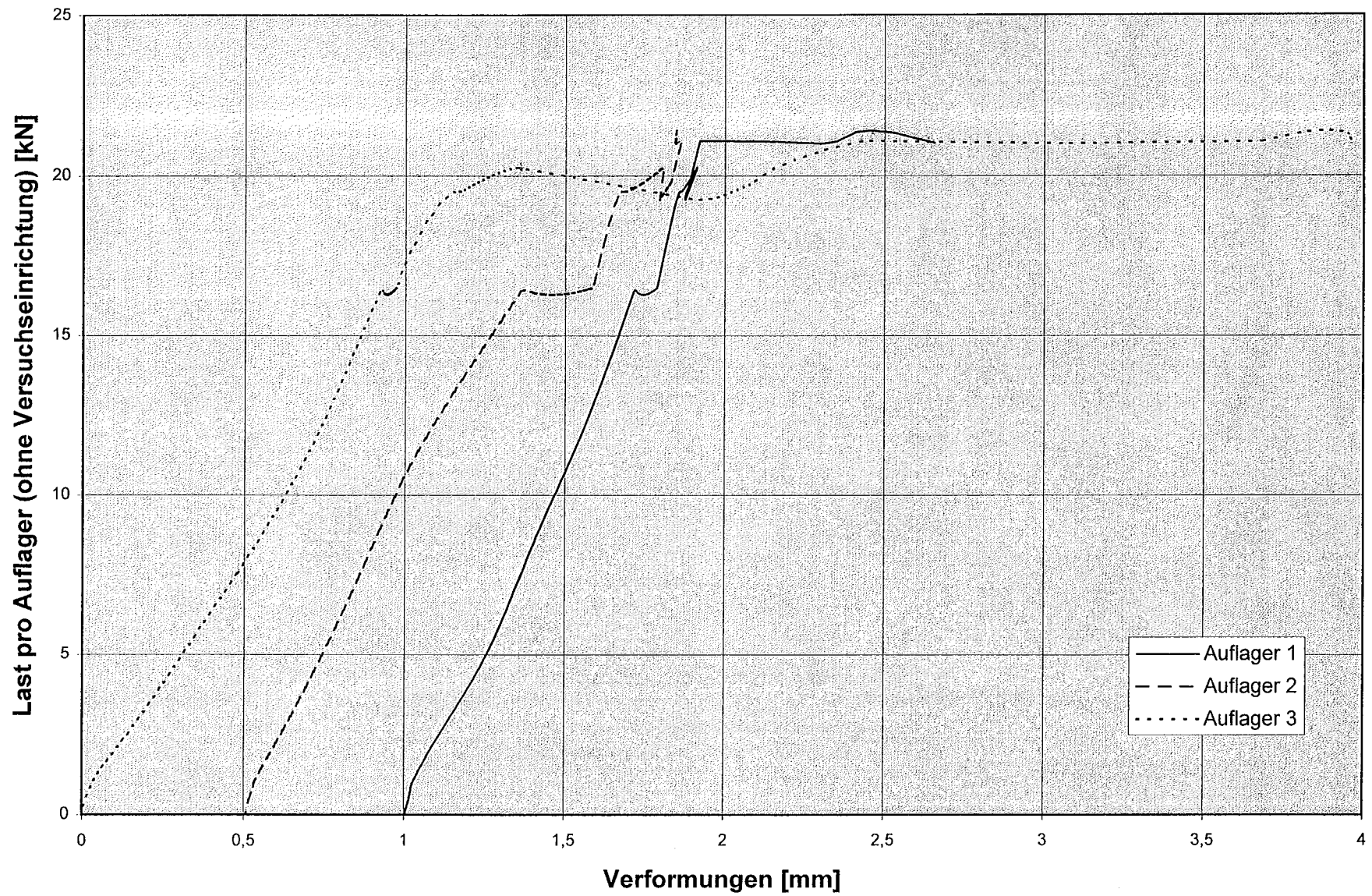


Bild B25: Lastverformungskurven Versuch 10/IV ($t_{K,m} = 0,921 \text{ mm}$; $b = 40 \text{ mm}$; ■-Profil)

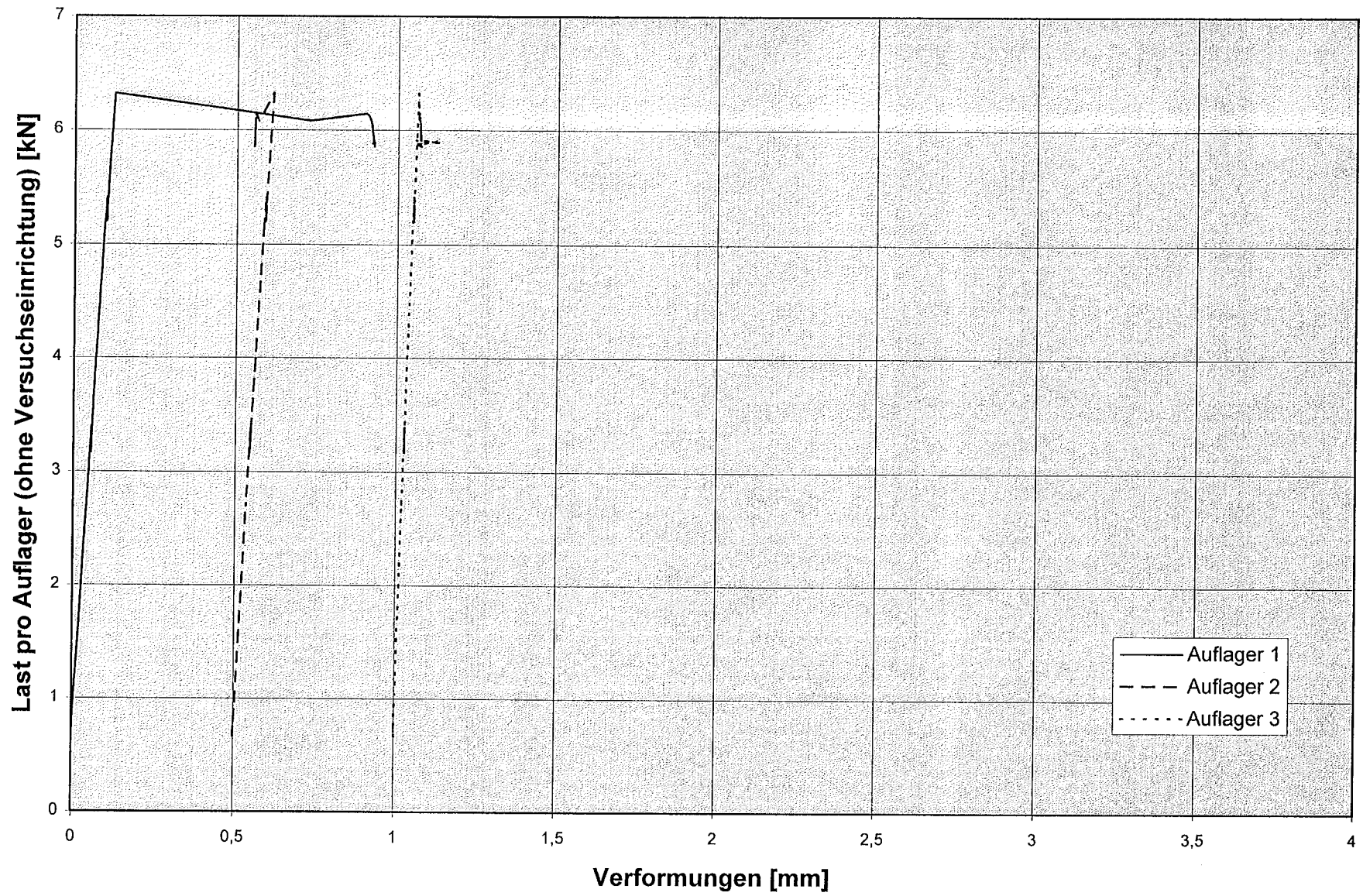


Bild B26: Lastverformungskurven Versuch 11/I ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

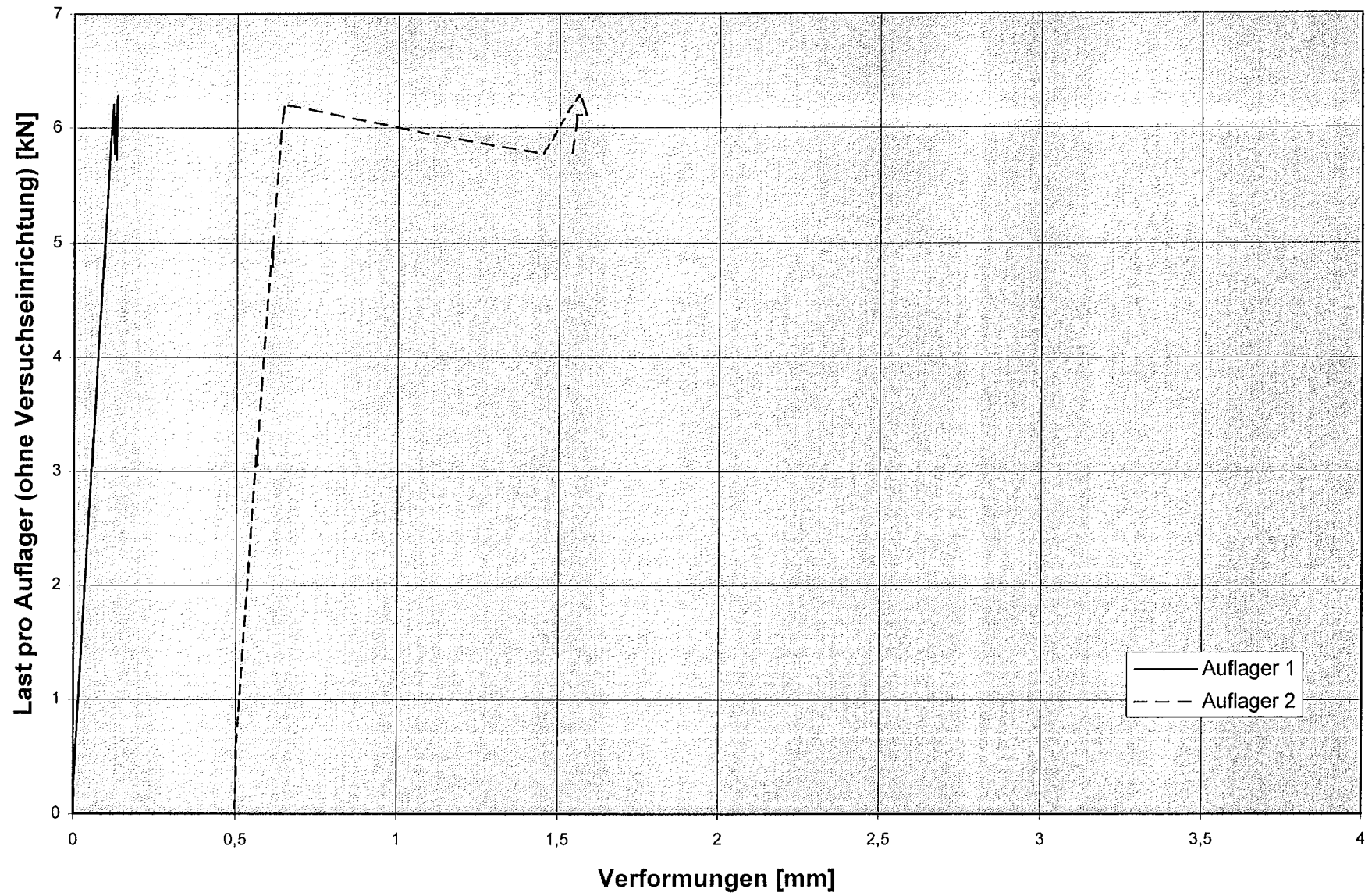


Bild B27: Lastverformungskurven Versuch 11/II ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

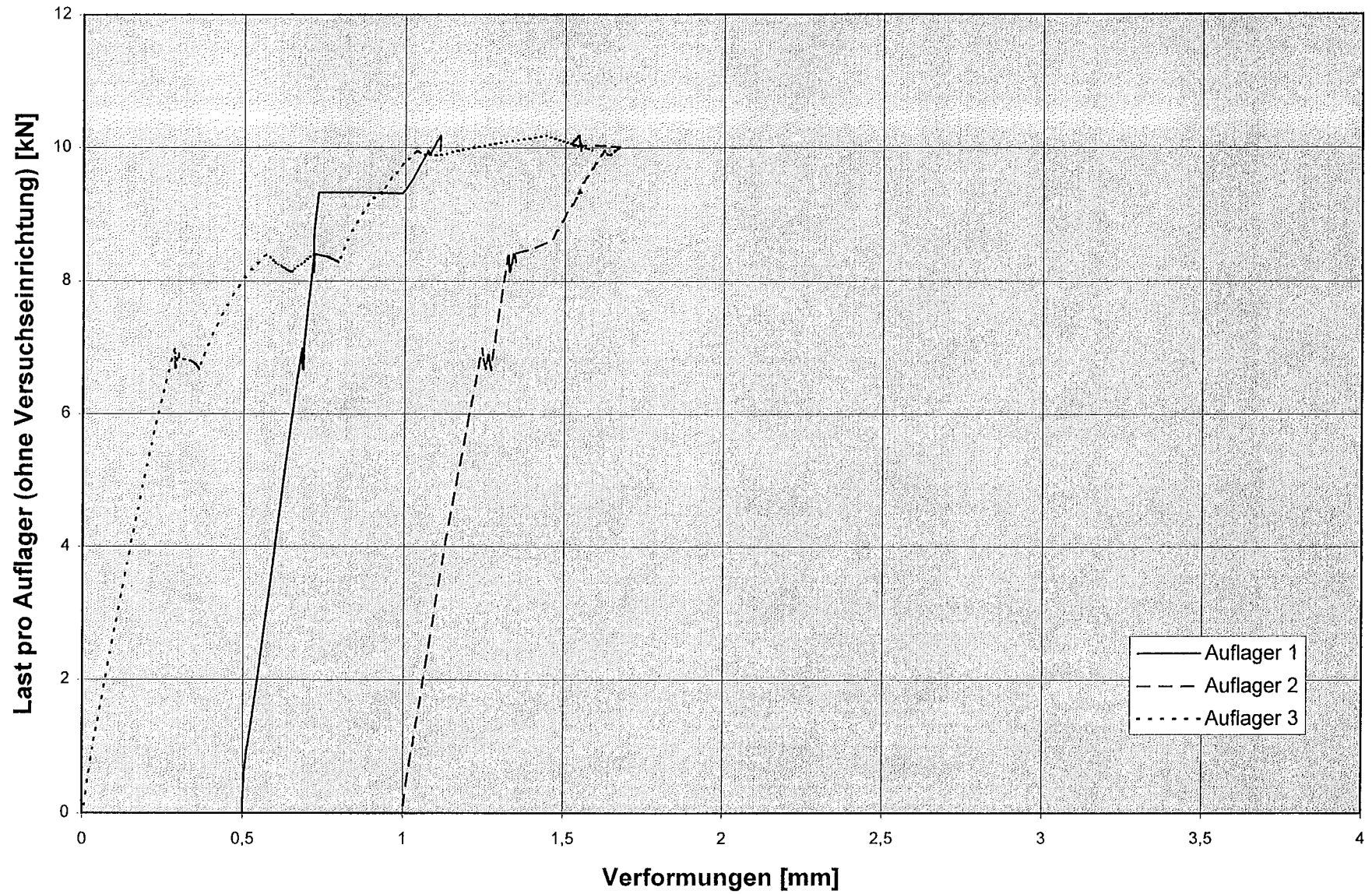


Bild B28: Lastverformungskurven Versuch 11/V ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

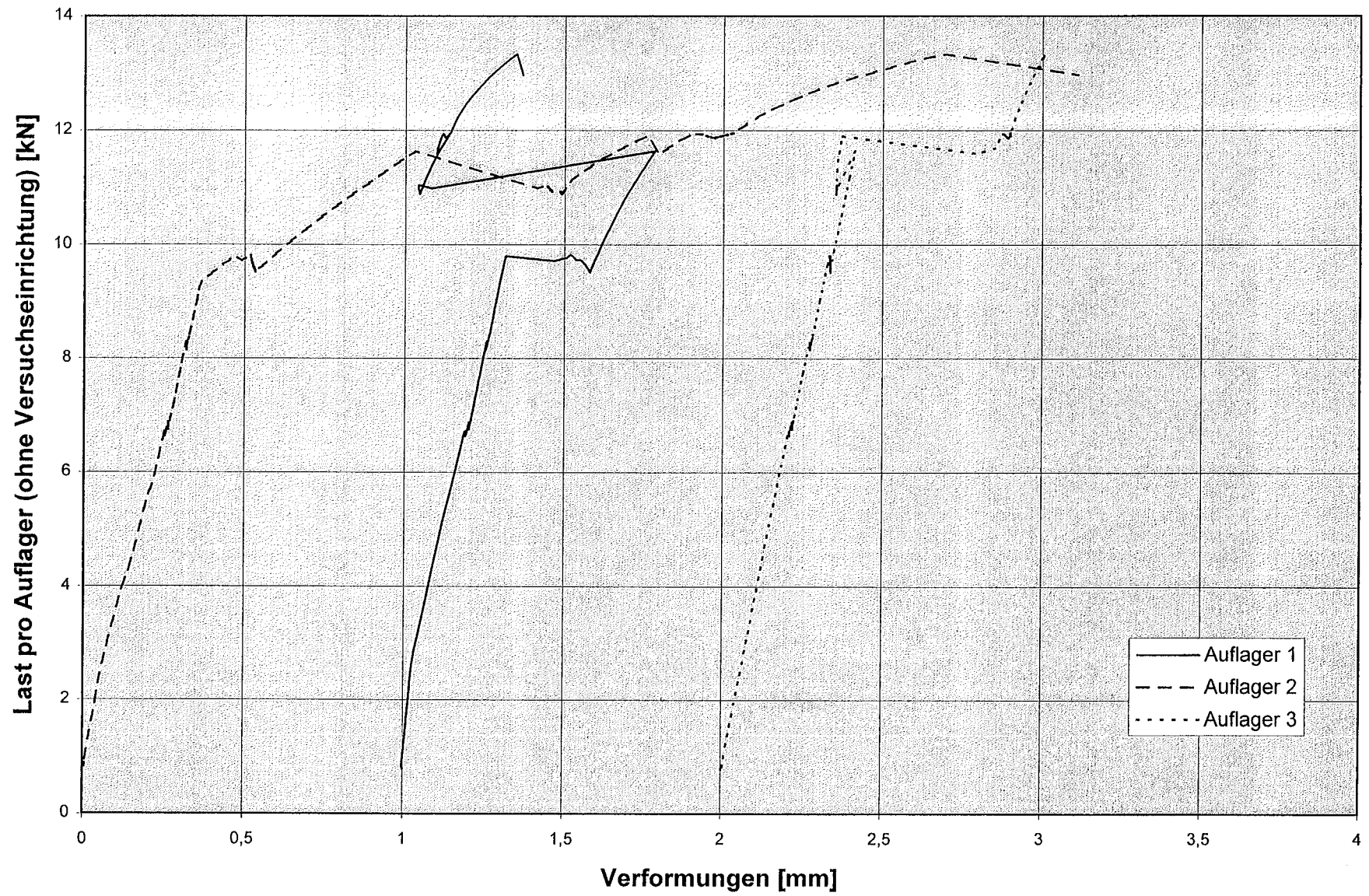


Bild B29: Lastverformungskurven Versuch 11/VI ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 80$ mm; ■-Profil)

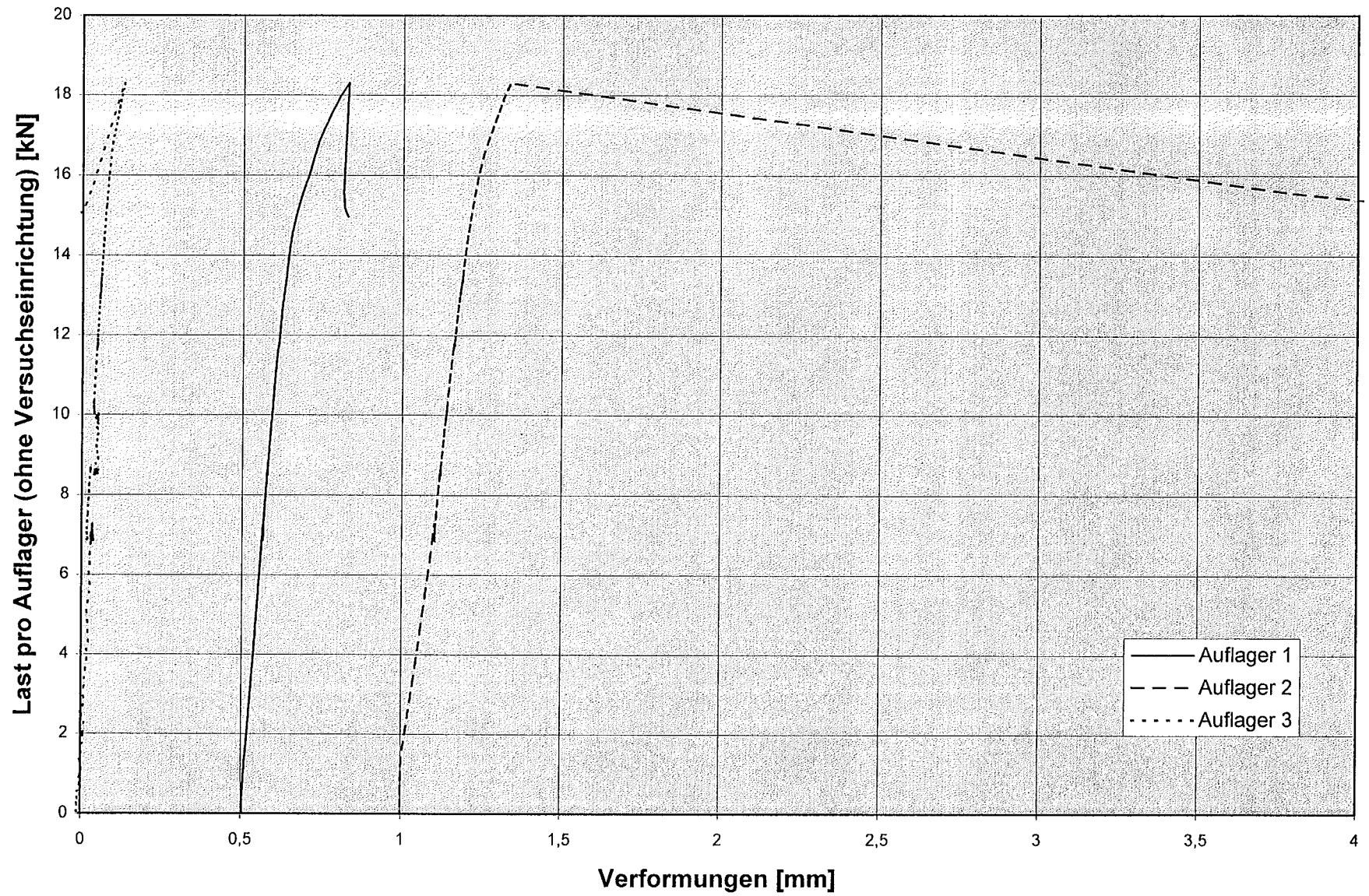


Bild B30: Lastverformungskurven Versuch 12/I ($t_{K,m} = 0,932 \text{ mm}$; $b = 40 \text{ mm}$; L-Profil)

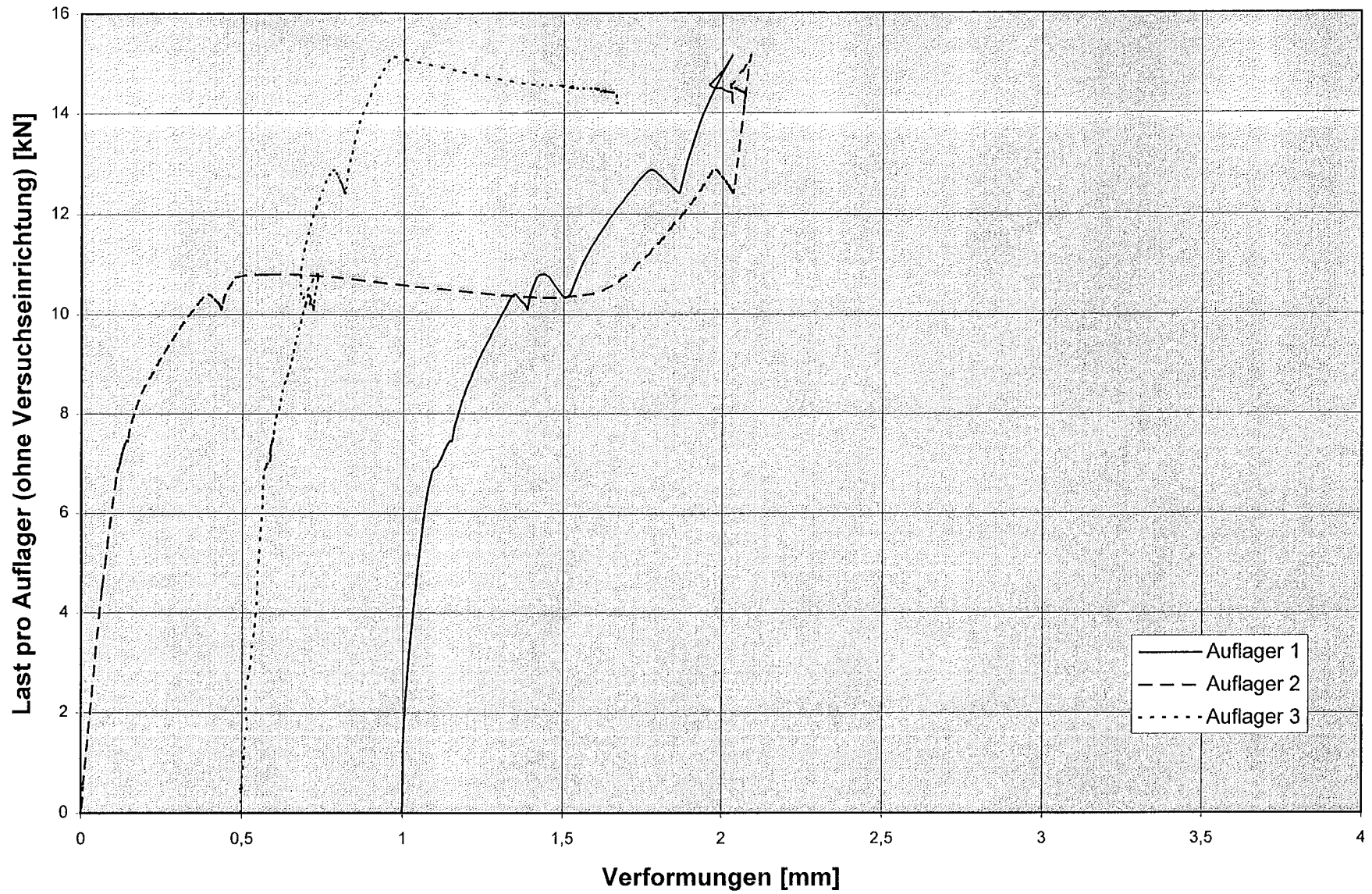


Bild B31: Lastverformungskurven Versuch 12/II ($t_{K,m} = 0,932 \text{ mm}$; $b = 20 \text{ mm}$; L-Profil)

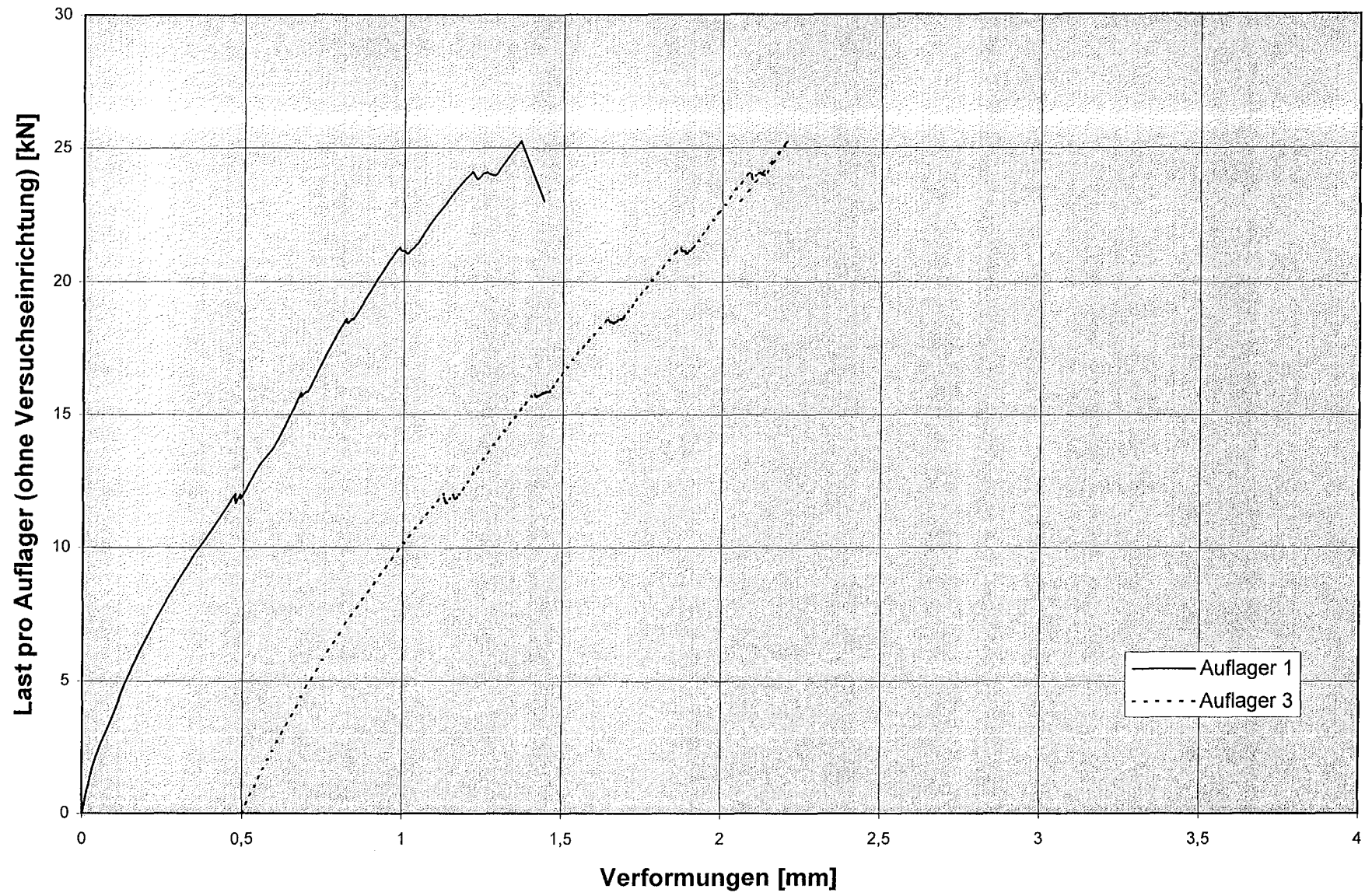


Bild B32: Lastverformungskurven Versuch 12/V ($t_{K,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

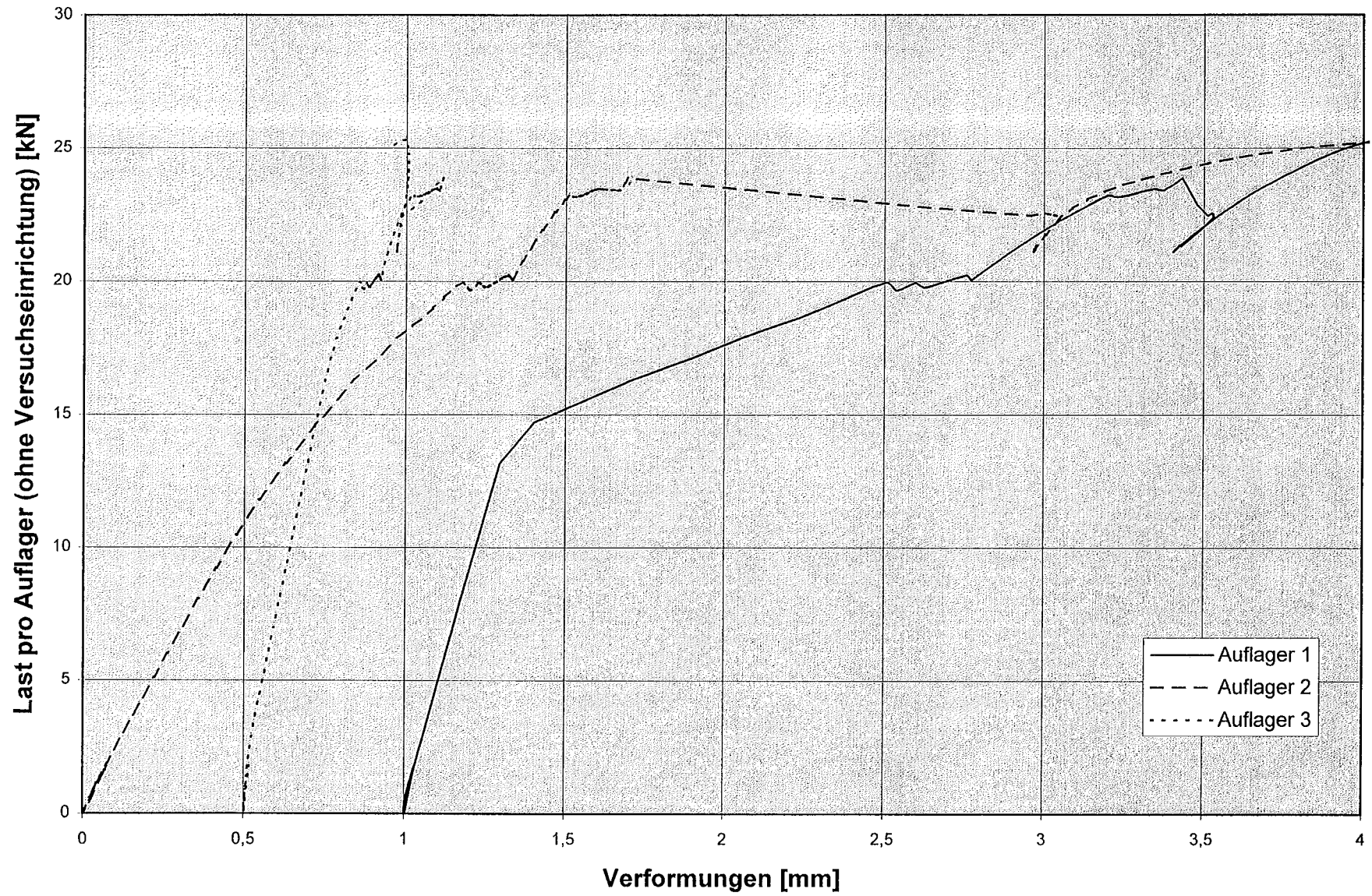


Bild B33: Lastverformungskurven Versuch 12/VI ($t_{k,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

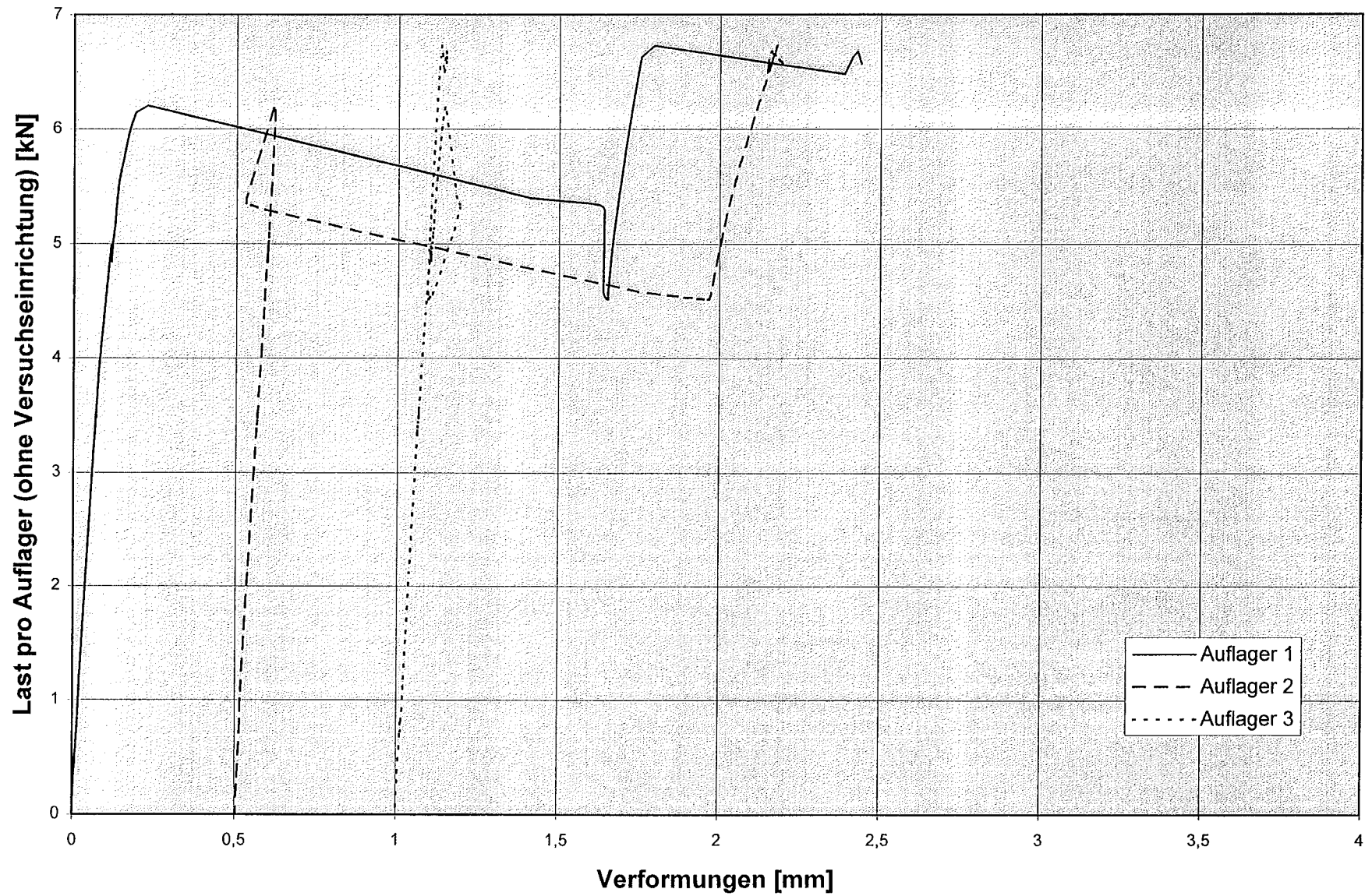


Bild B34: Lastverformungskurven Versuch 13/I ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

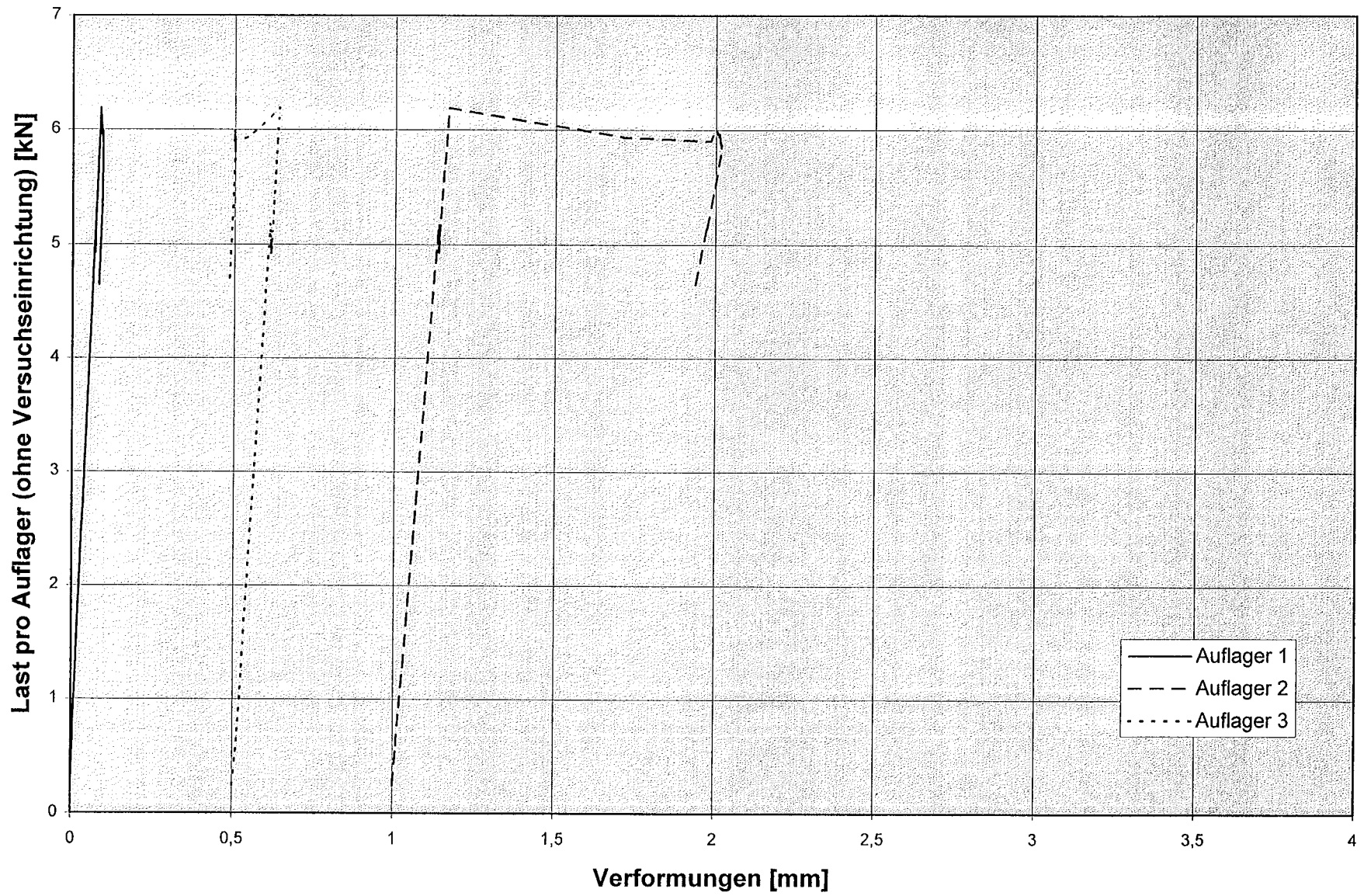


Bild B35: Lastverformungskurven Versuch 13/II ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 80$ mm; L-Profil)

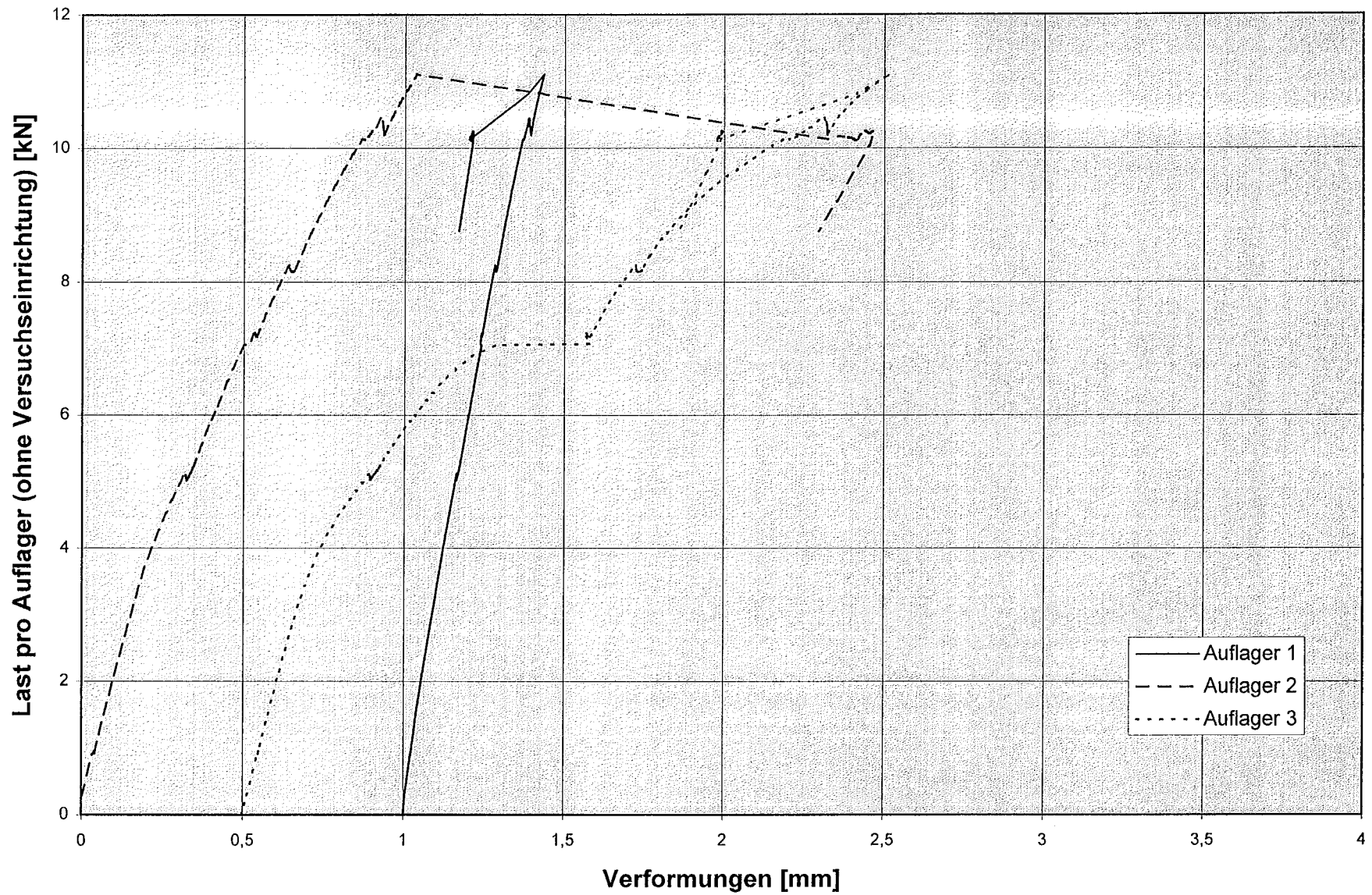


Bild B36: Lastverformungskurven Versuch 13/III ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

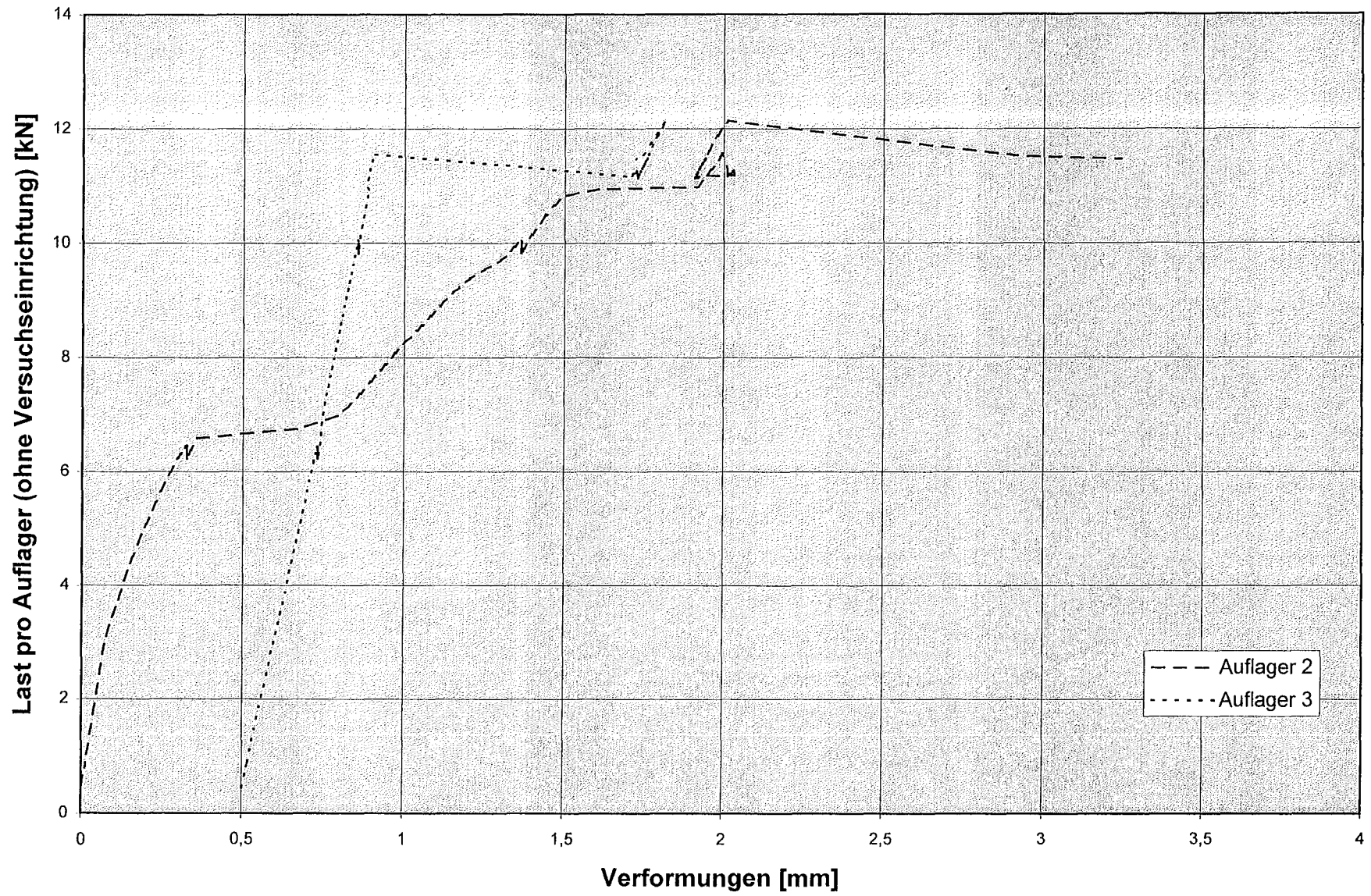


Bild B37: Lastverformungskurven Versuch 13/IV ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 80$ mm; ■-Profil)

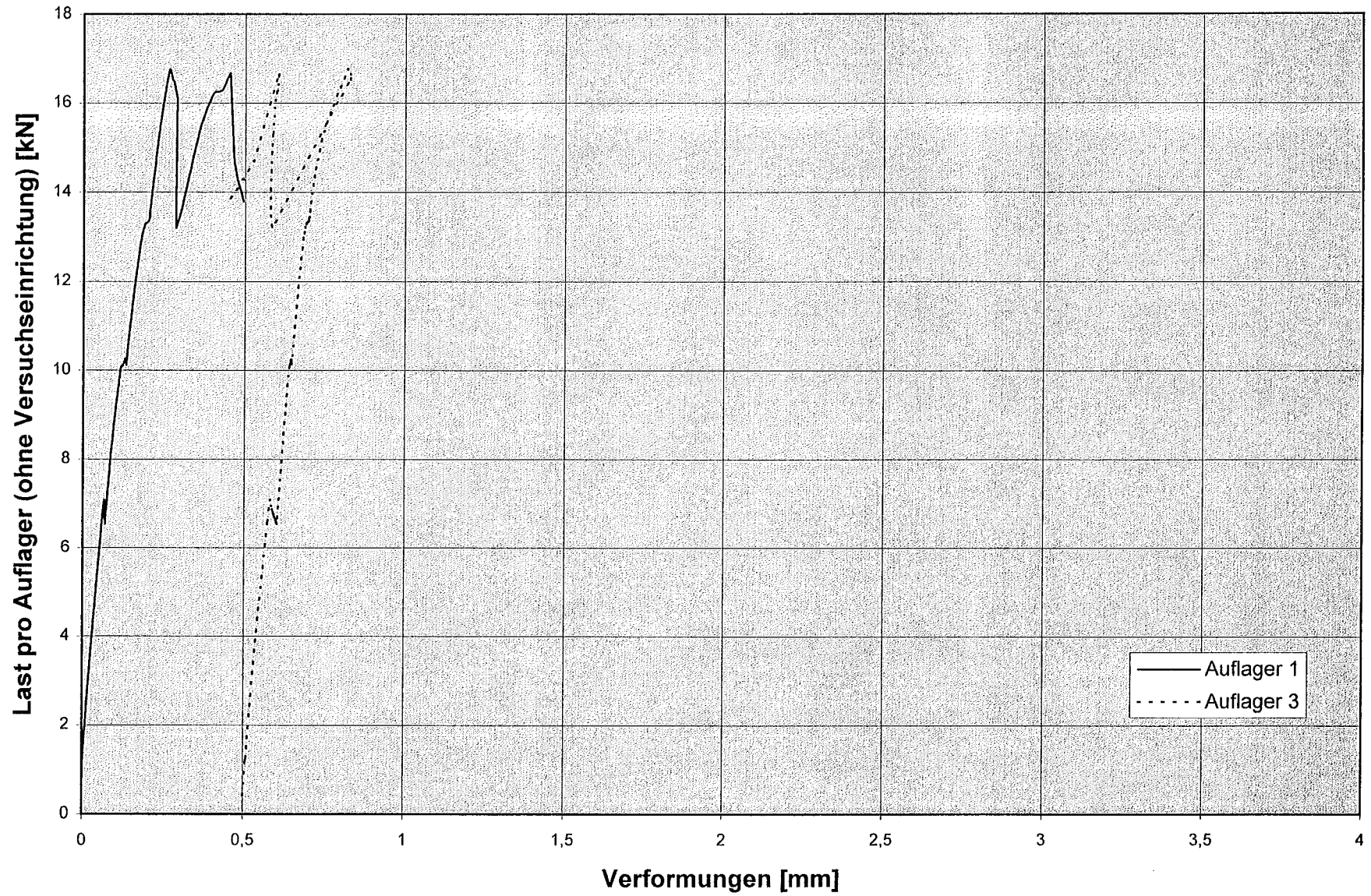


Bild B38: Lastverformungskurven Versuch 14/I ($t_{K,m} = 0,918$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

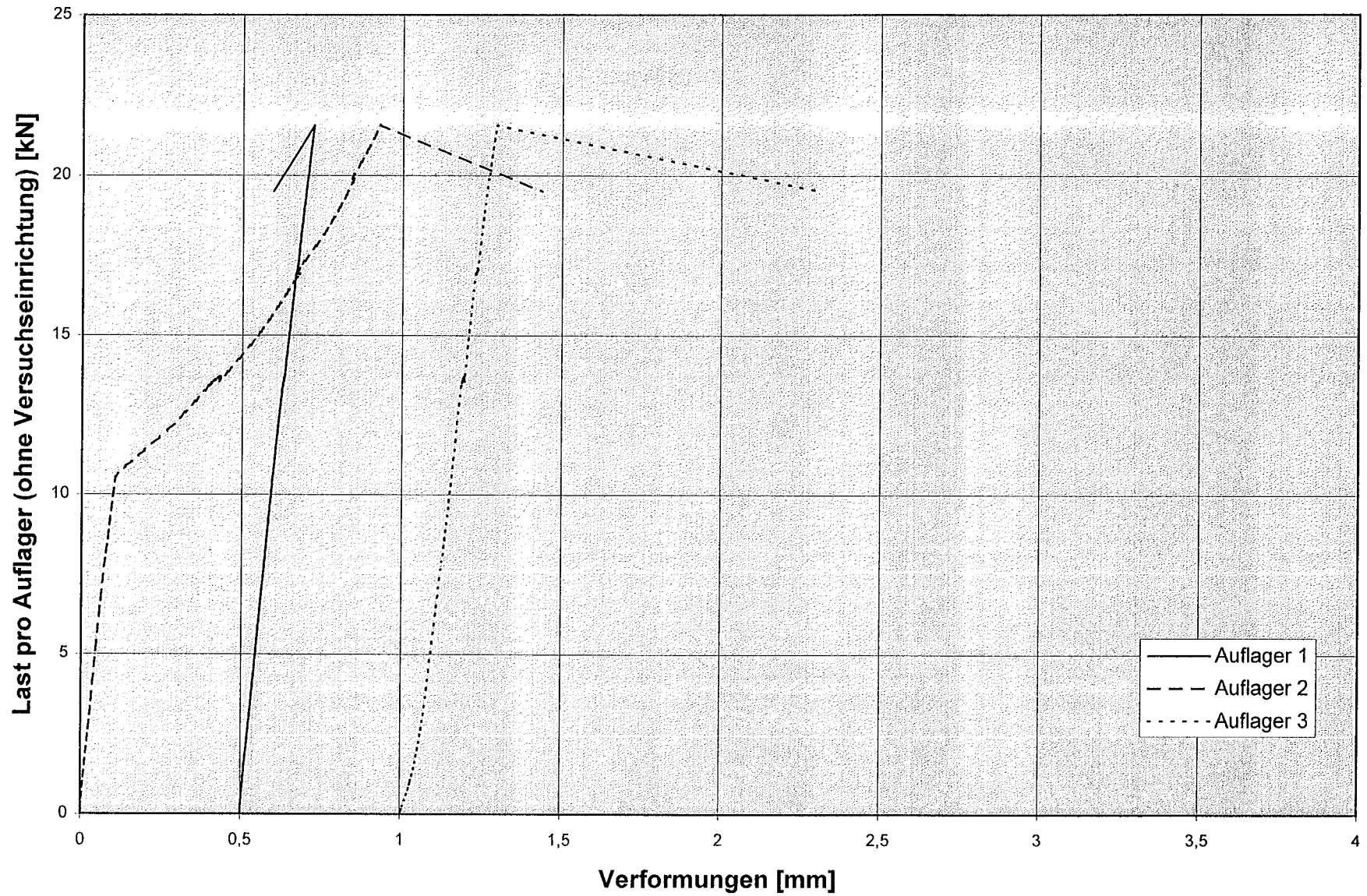


Bild B39: Lastverformungskurven Versuch 14/II ($t_{K,m} = 0,918 \text{ mm}$; $b = 80 \text{ mm}$; L-Profil)

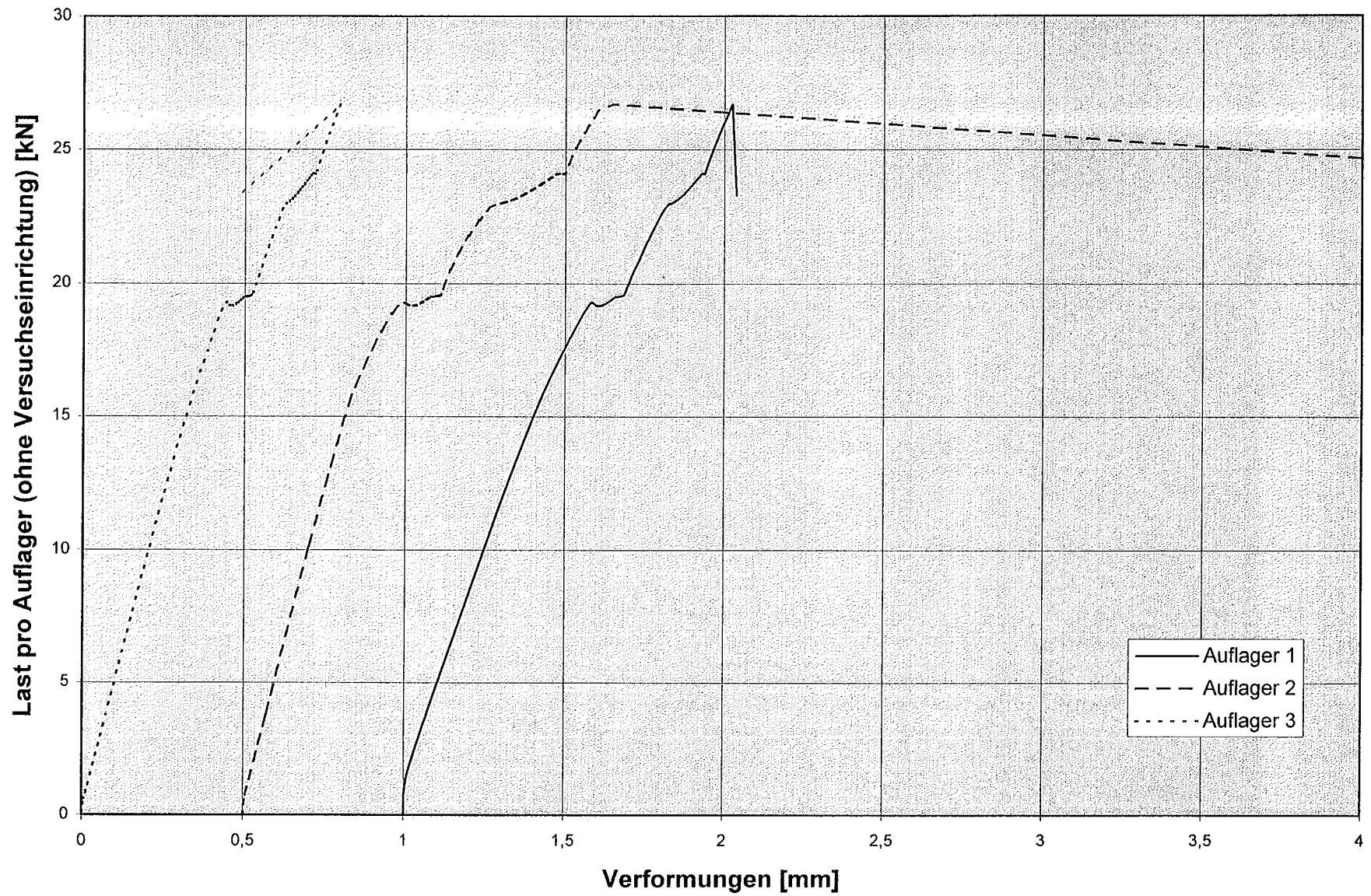


Bild B40: Lastverformungskurven Versuch 14/IV ($t_{k,m} = 0,918 \text{ mm}$; $b = 40 \text{ mm}$; ■-Profil)

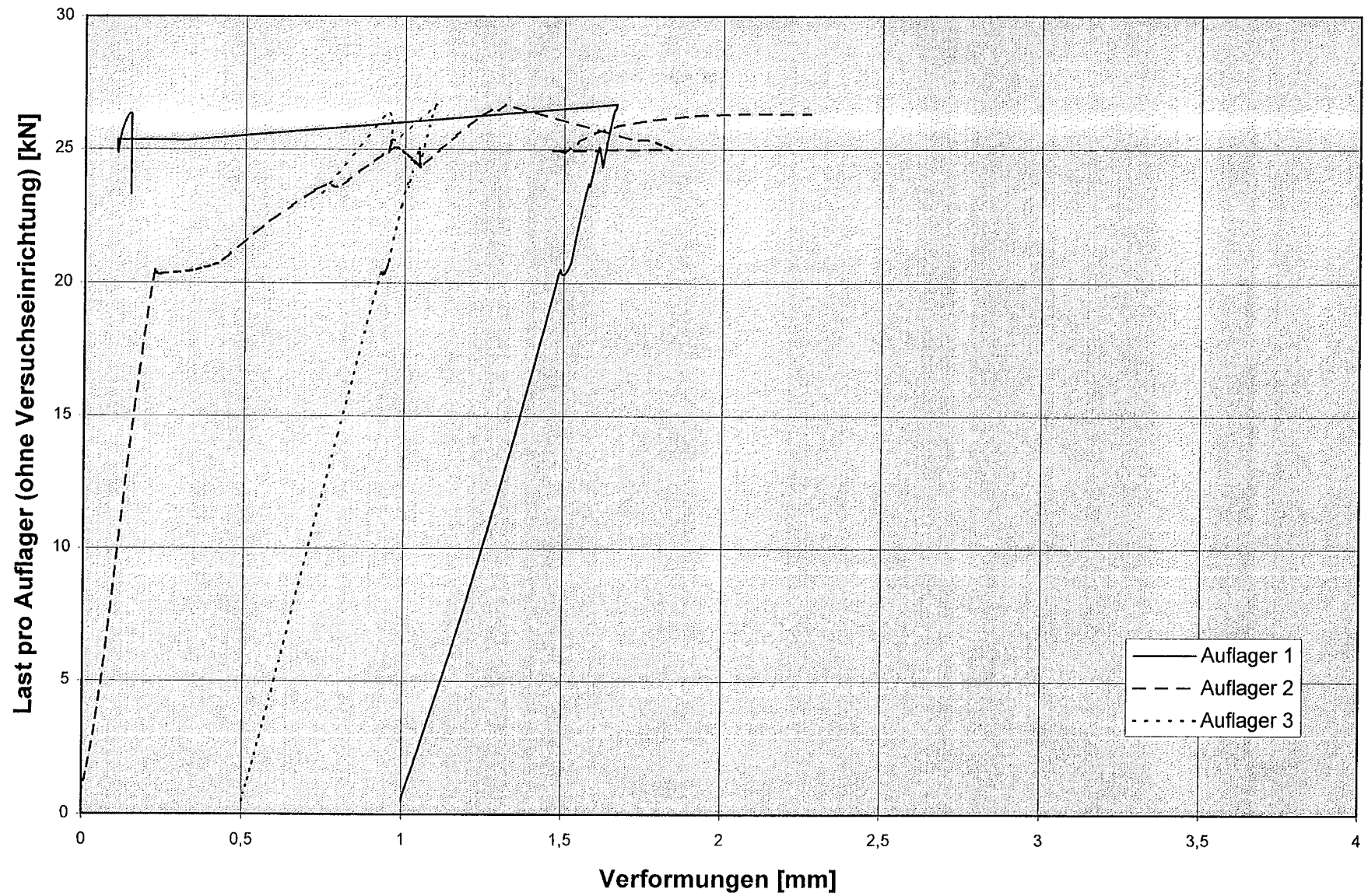


Bild B41: Lastverformungskurven Versuch 14/V ($t_{K,m} = 0,918$ mm; $b = 80$ mm; ■-Profil)

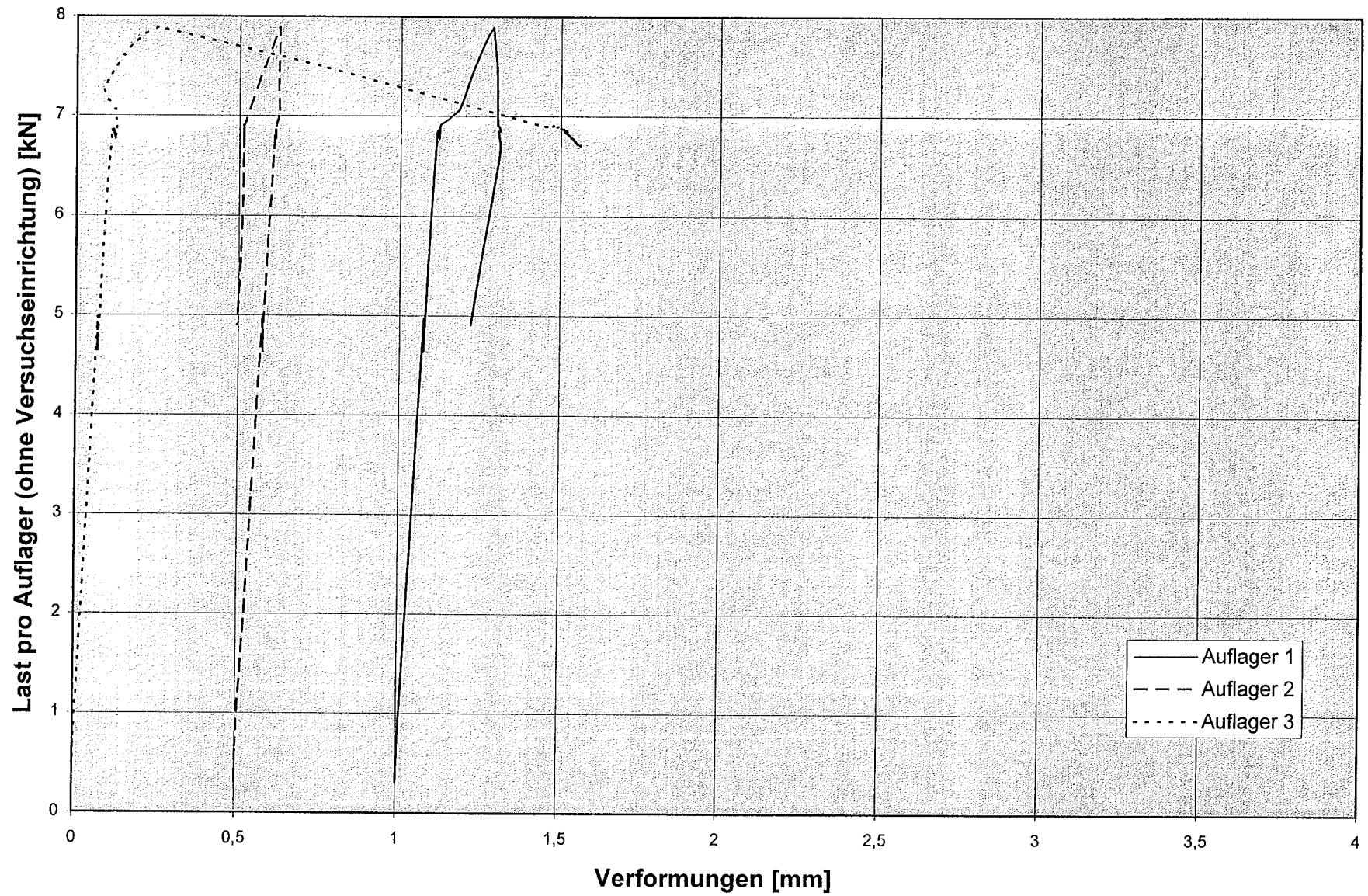


Bild B42: Lastverformungskurven Versuch 11/III ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil; Mittelringsteife)

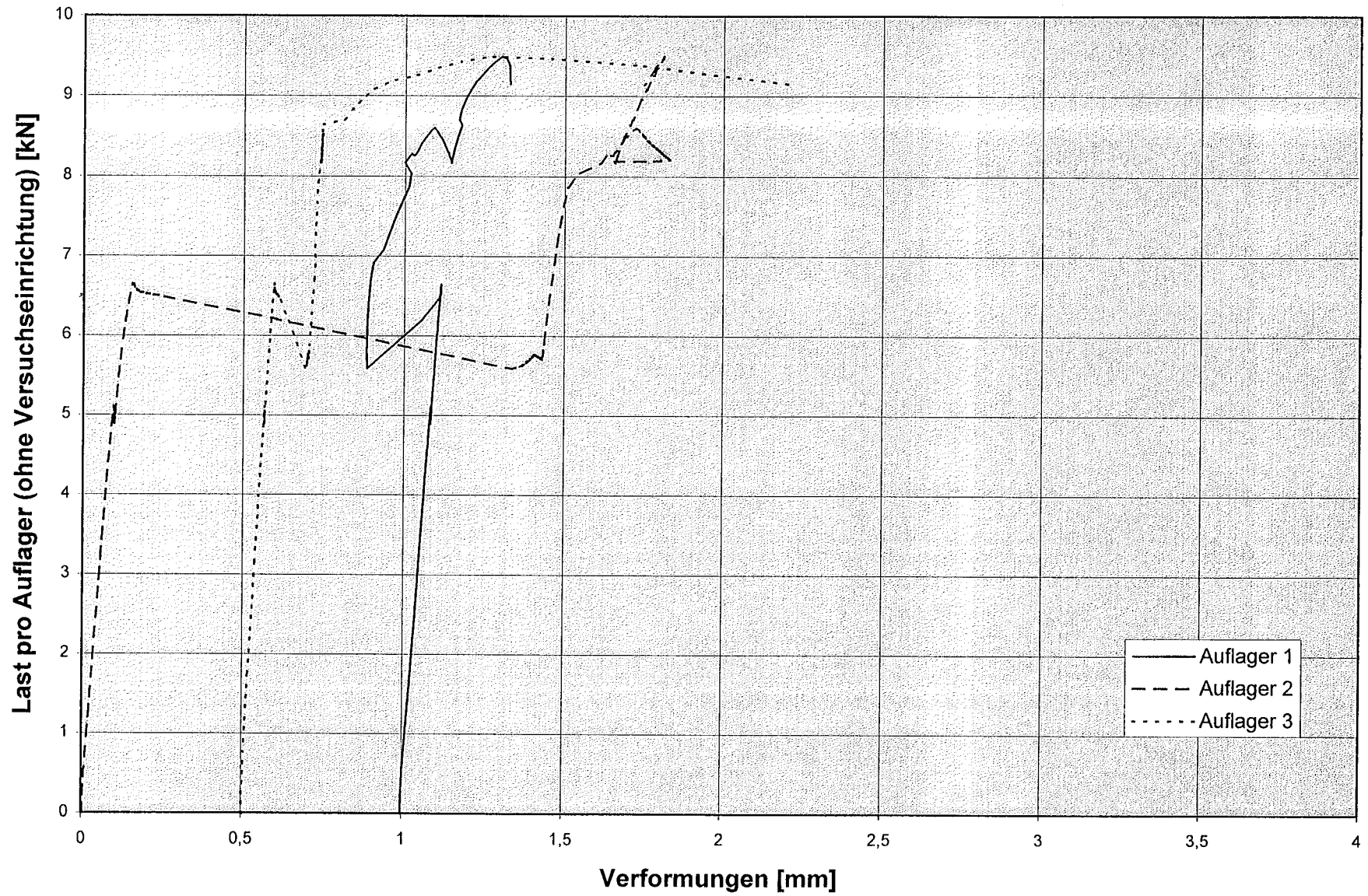


Bild B43: Lastverformungskurven Versuch 11/IV ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil; Mittelringsteife)

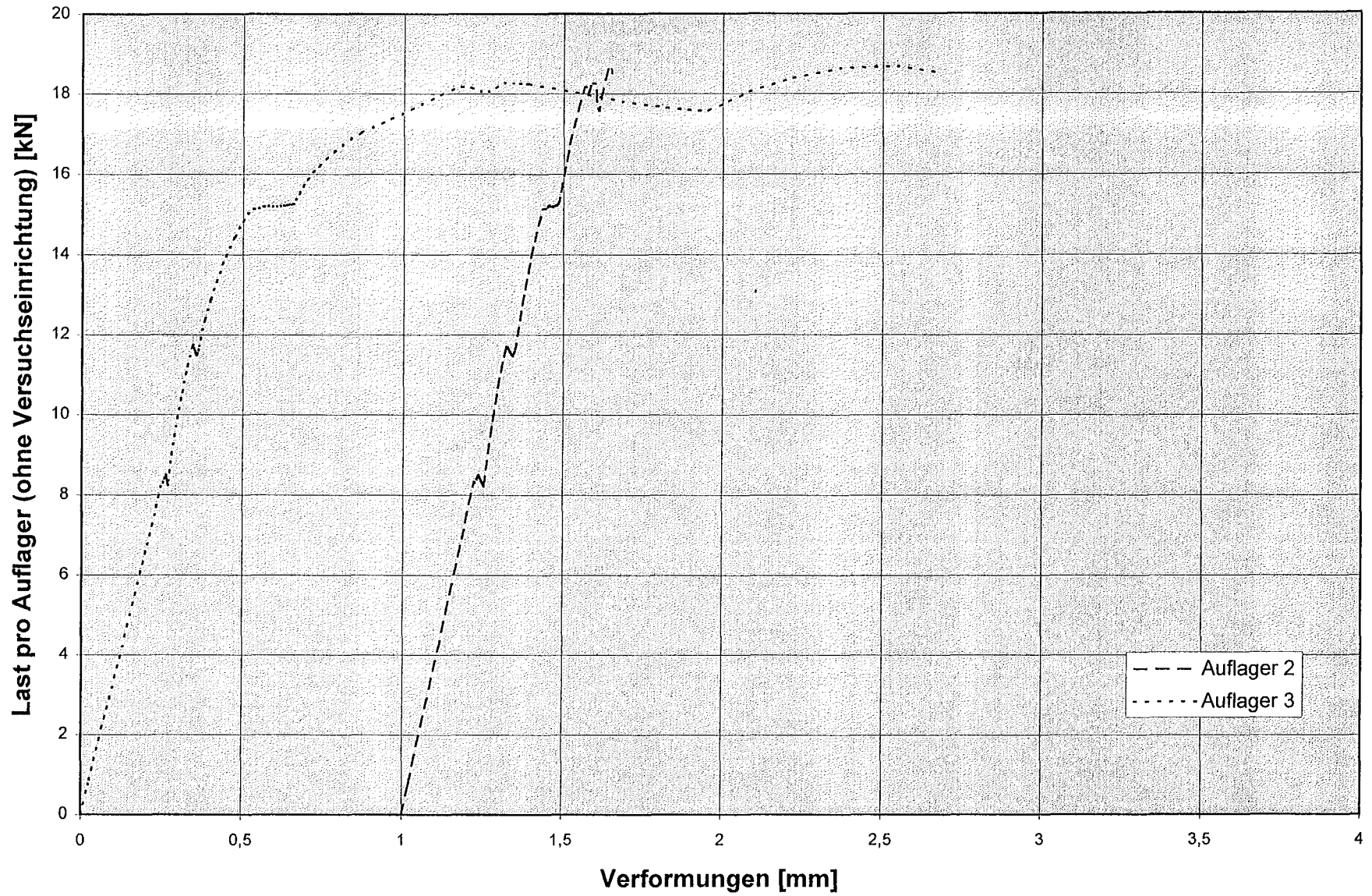


Bild B44: Lastverformungskurven Versuch 12/III ($t_{K,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil; Mittelringsteife)

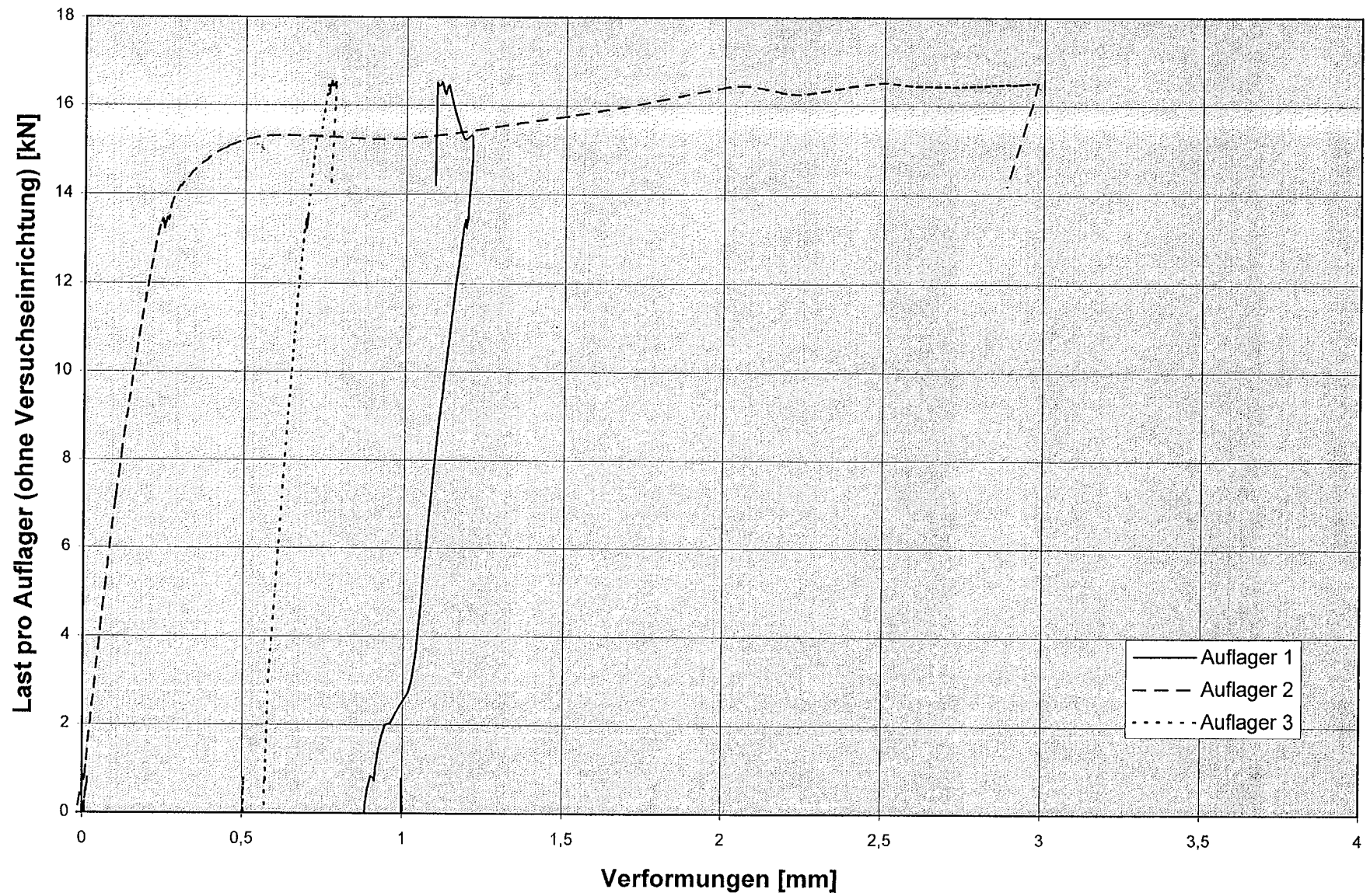


Bild B45: Lastverformungskurven Versuch 12/IV ($t_{K,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil; Mittelringsteife)

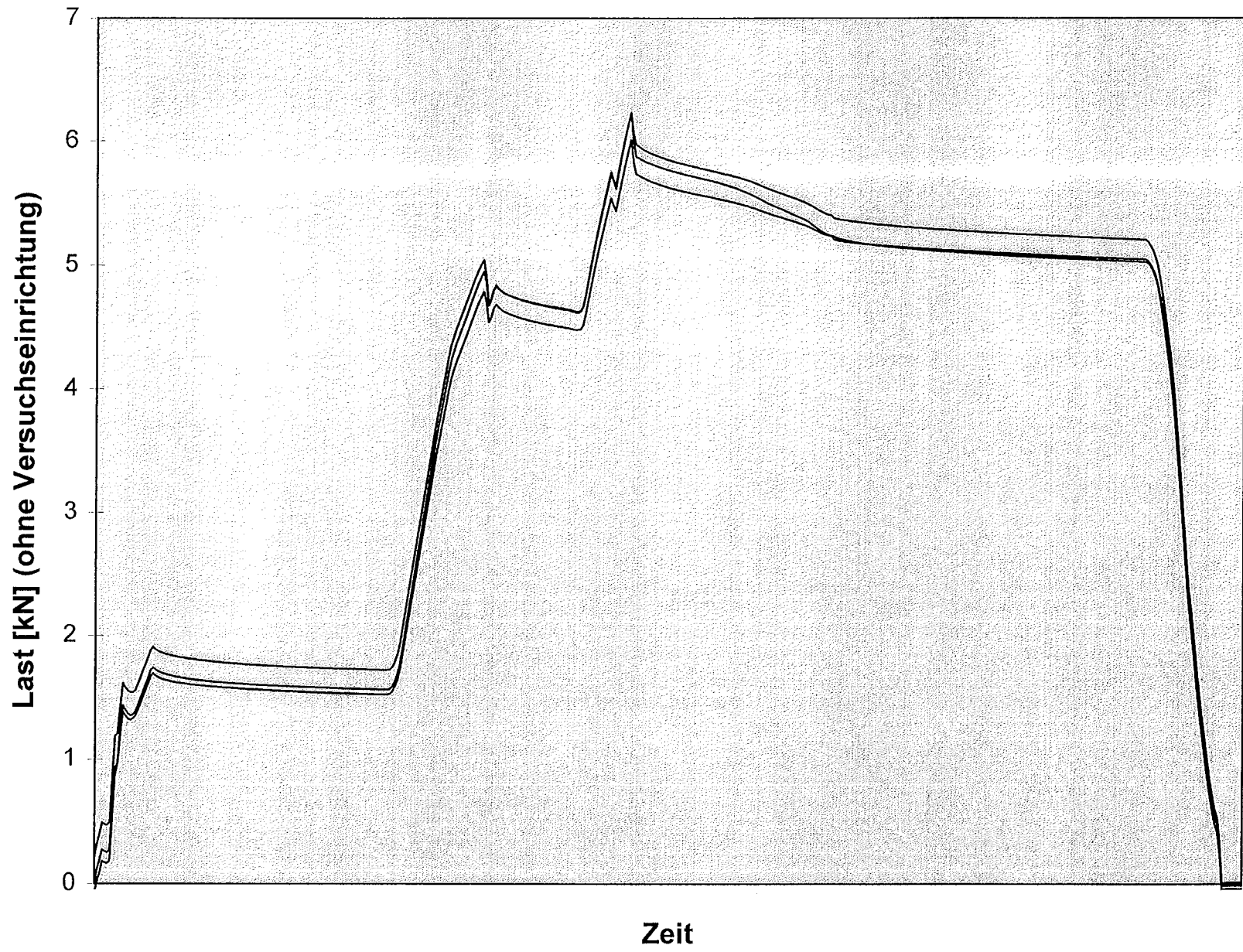


Bild B1a: Last-Zeitkurve Versuch 1/I ($t_{k,m} = 0,566$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

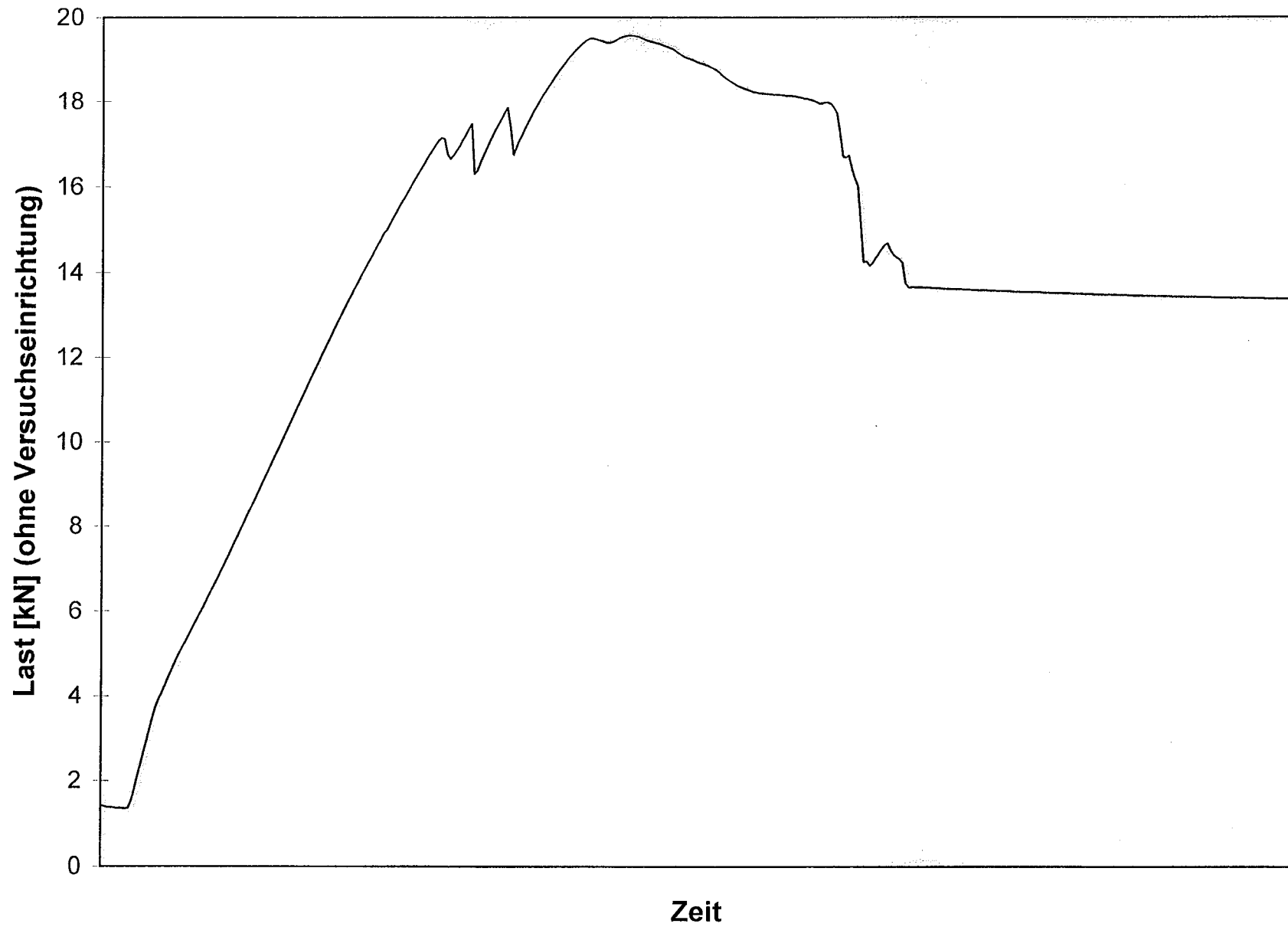
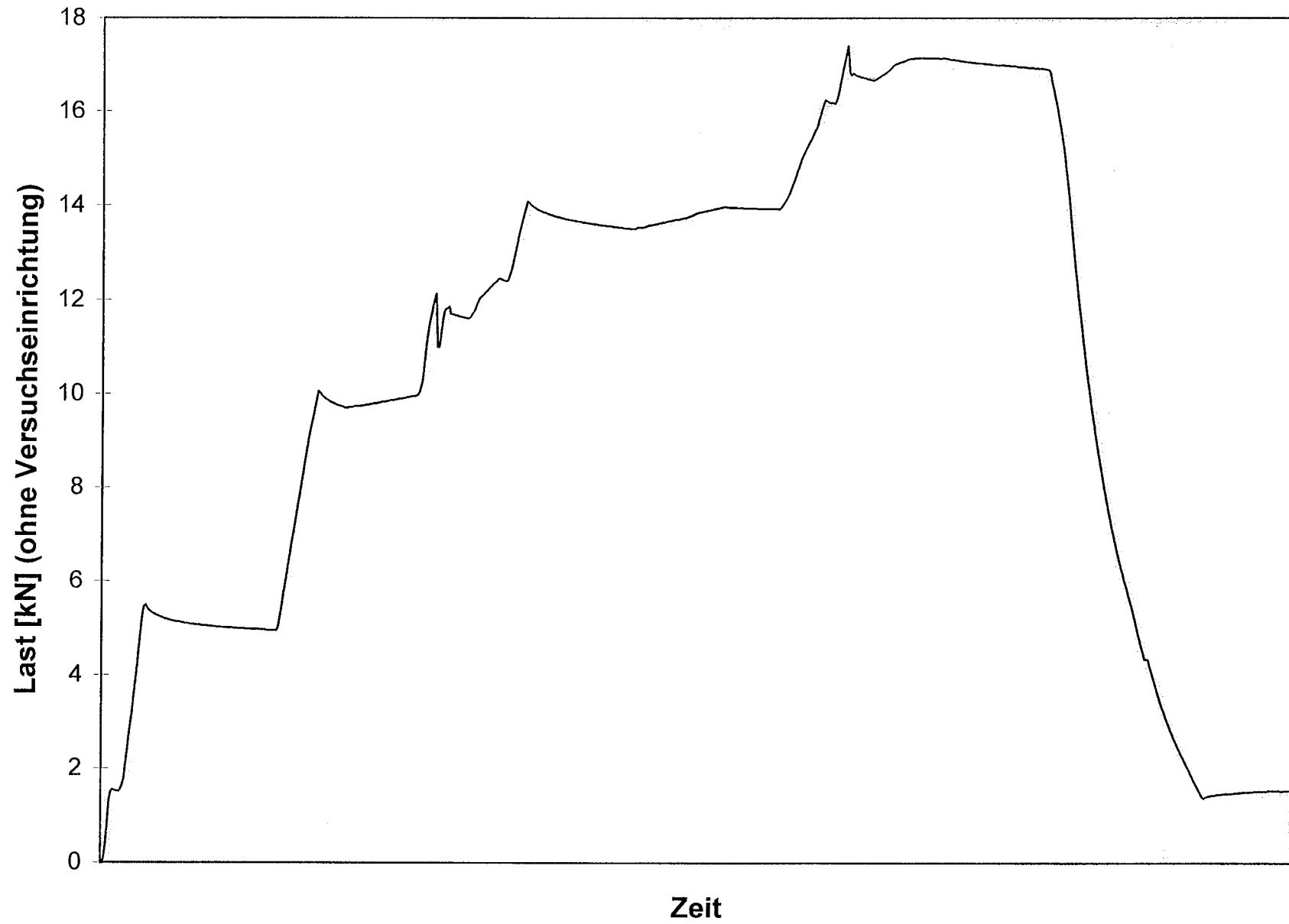


Bild B2a: Last-Zeitkurve Versuch 2/I ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)



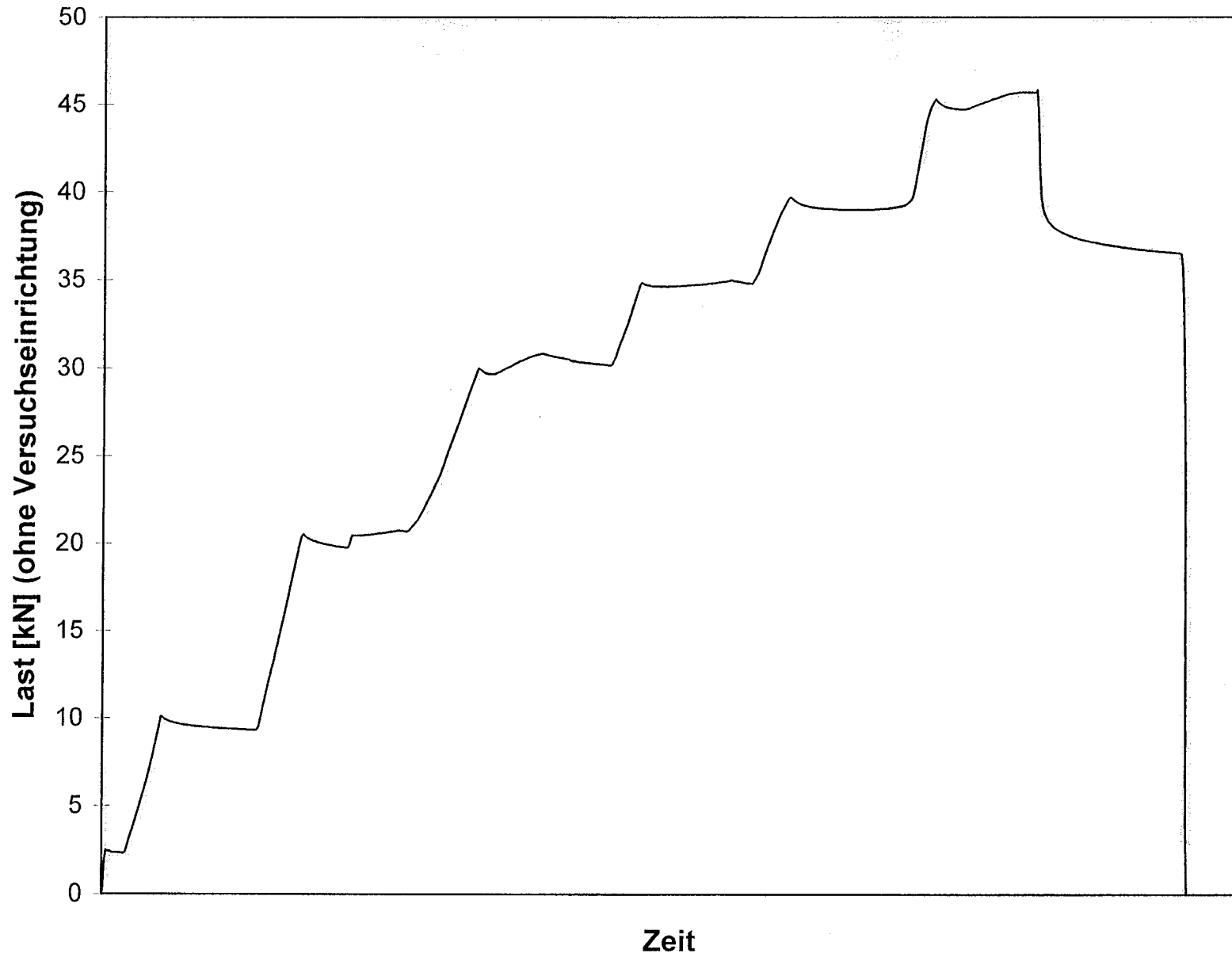


Bild B4a: Last-Zeitkurve Versuch 4/II ($t_{k,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

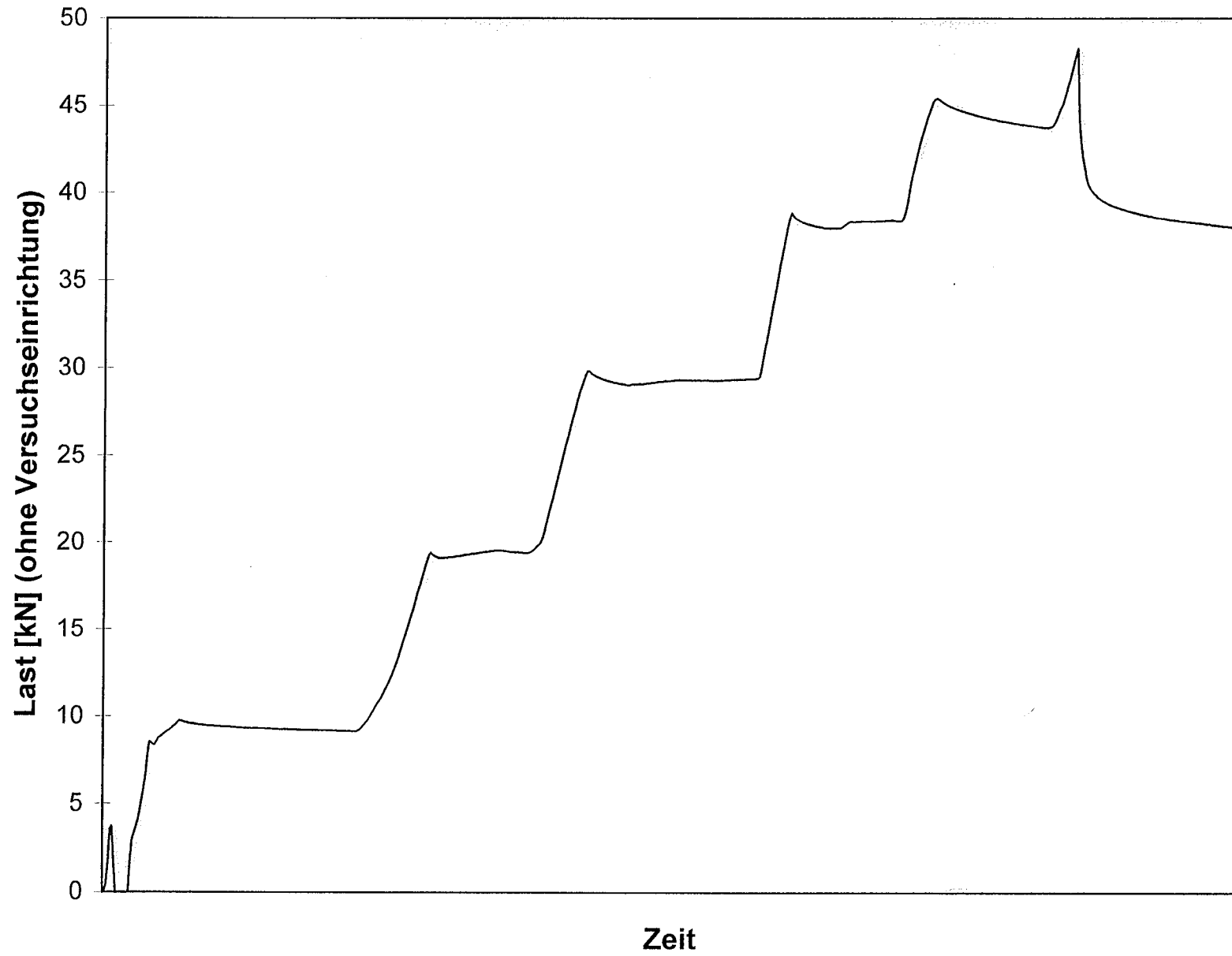


Bild B5a: Last-Zeitkurve Versuch 5/I ($t_{k,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

Gesamtlast

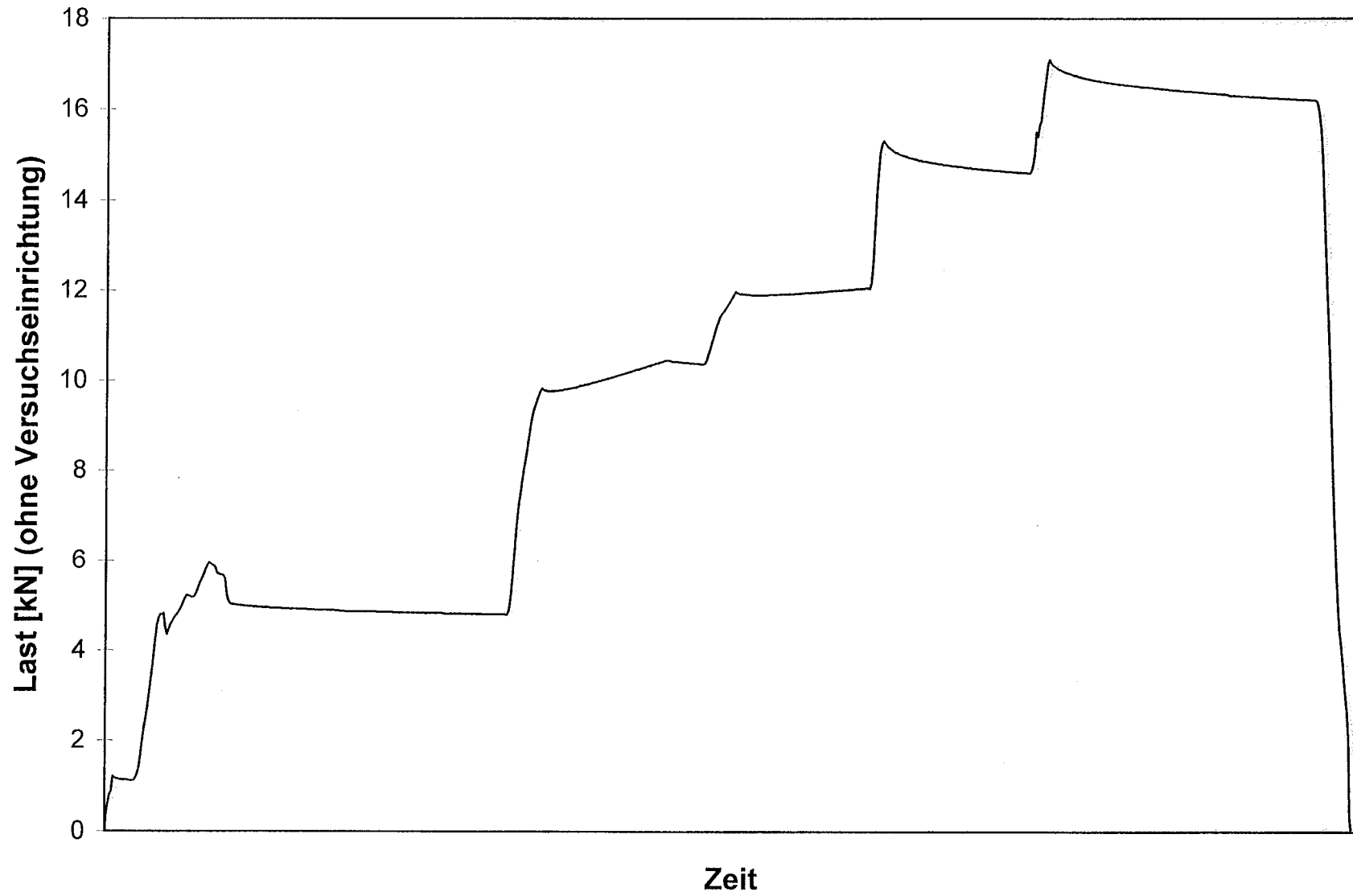


Bild B6a: Last-Zeitkurve Versuch 6/I ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

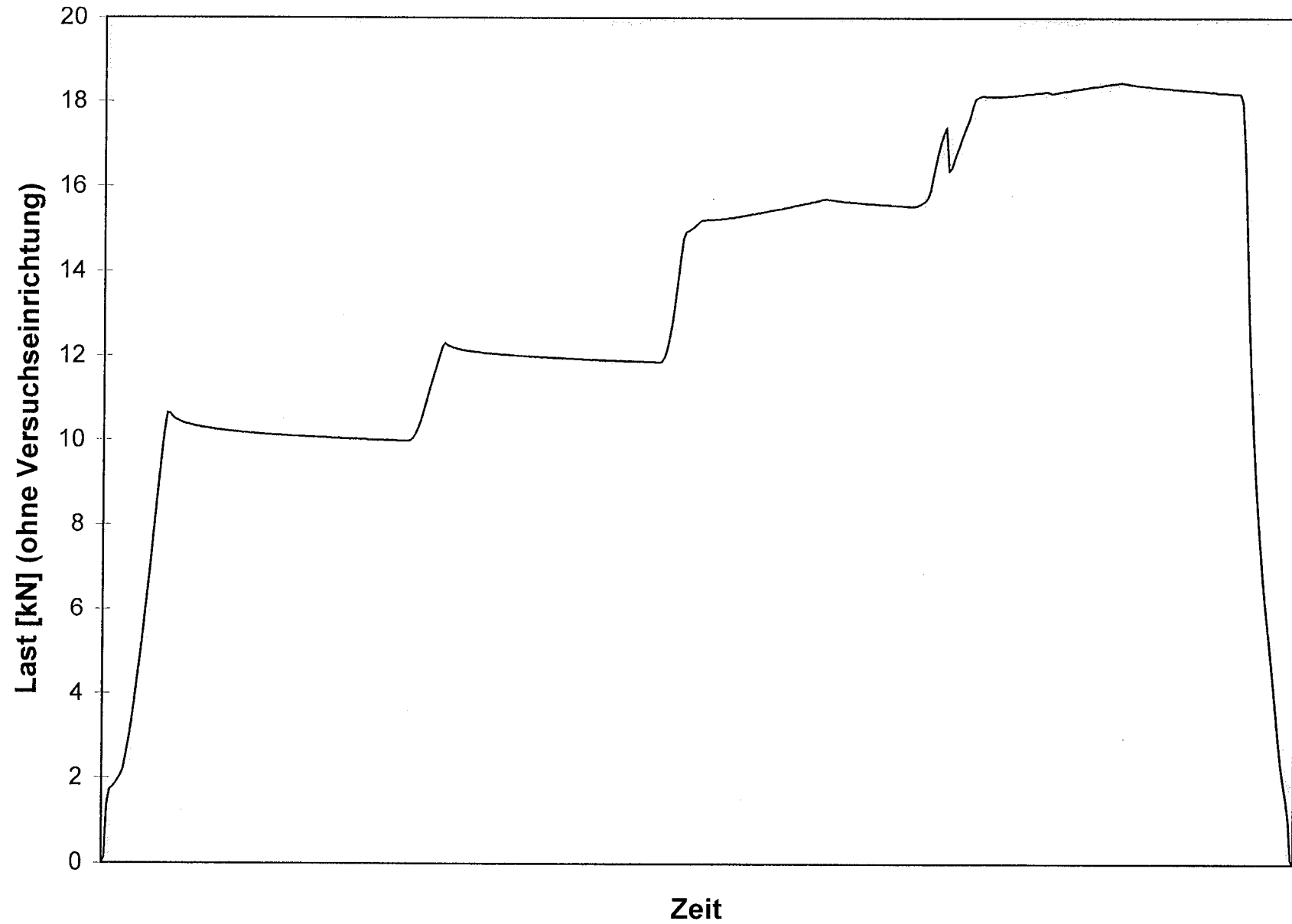


Bild B7a: Last-Zeitkurve Versuch 6/II ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil)

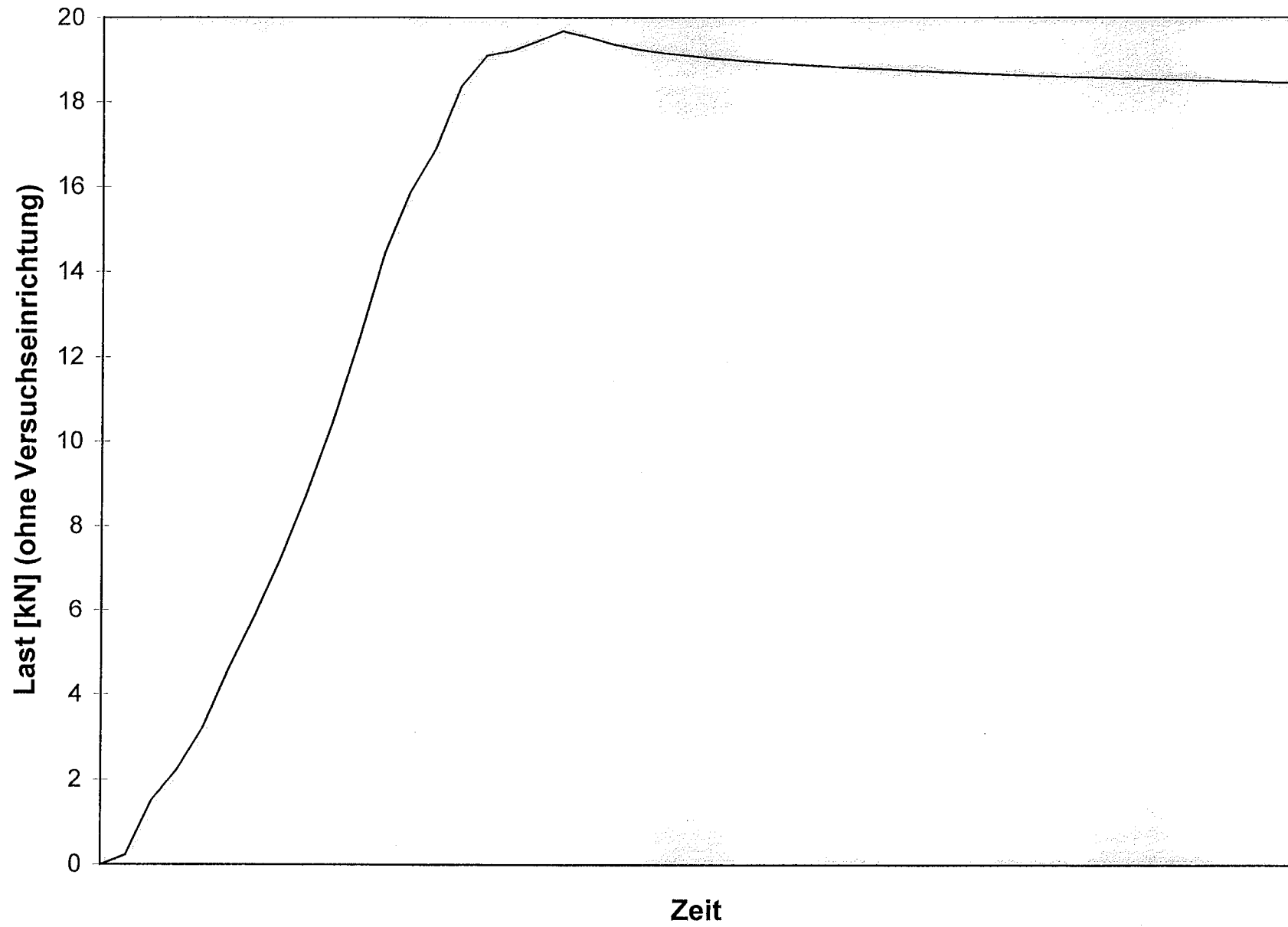


Bild B8a: Last-Zeitkurve Versuch 6/IV ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; ■-Profil)

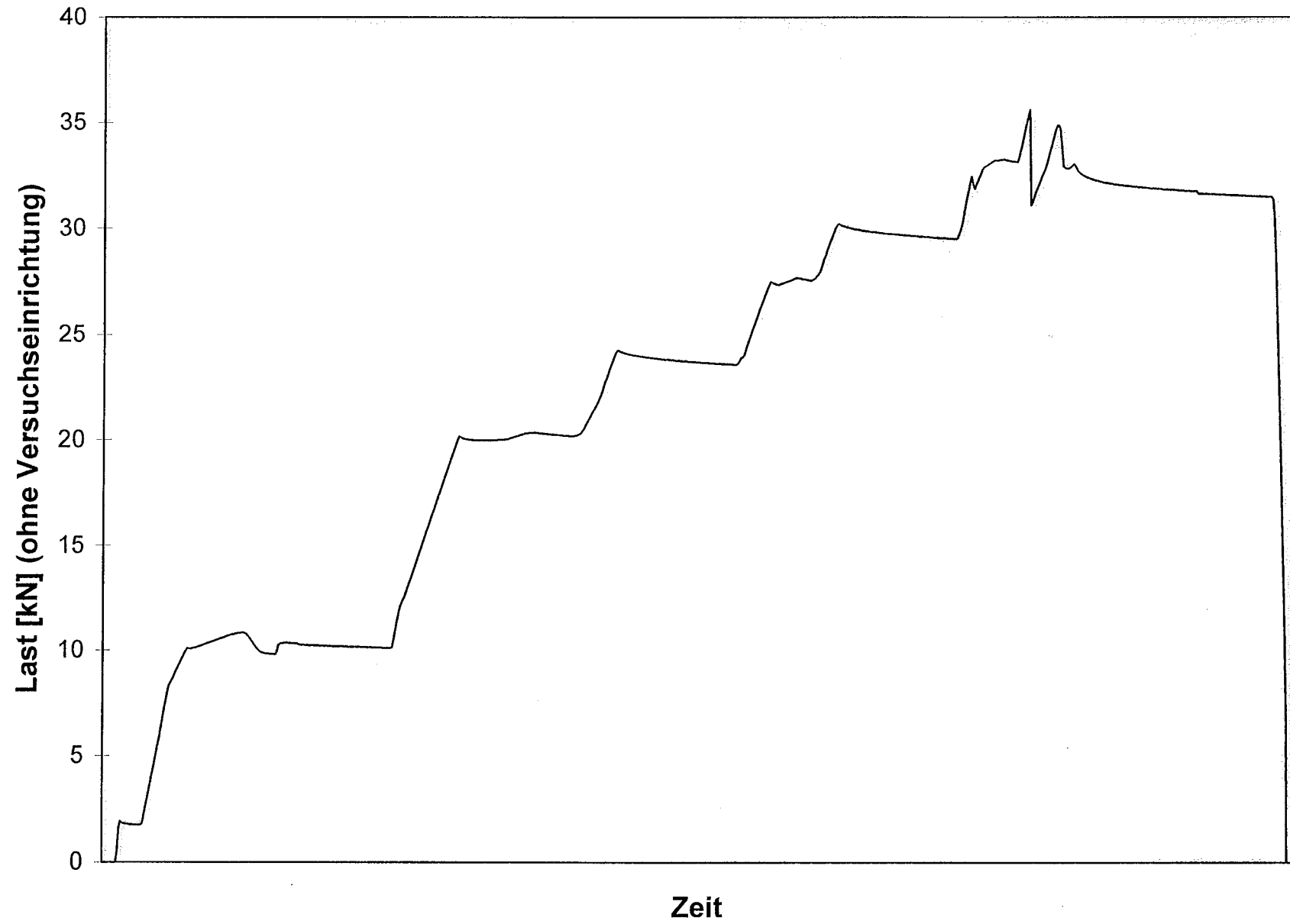


Bild B9a: Last-Zeitkurve Versuch 6/V ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; ■-Profil)

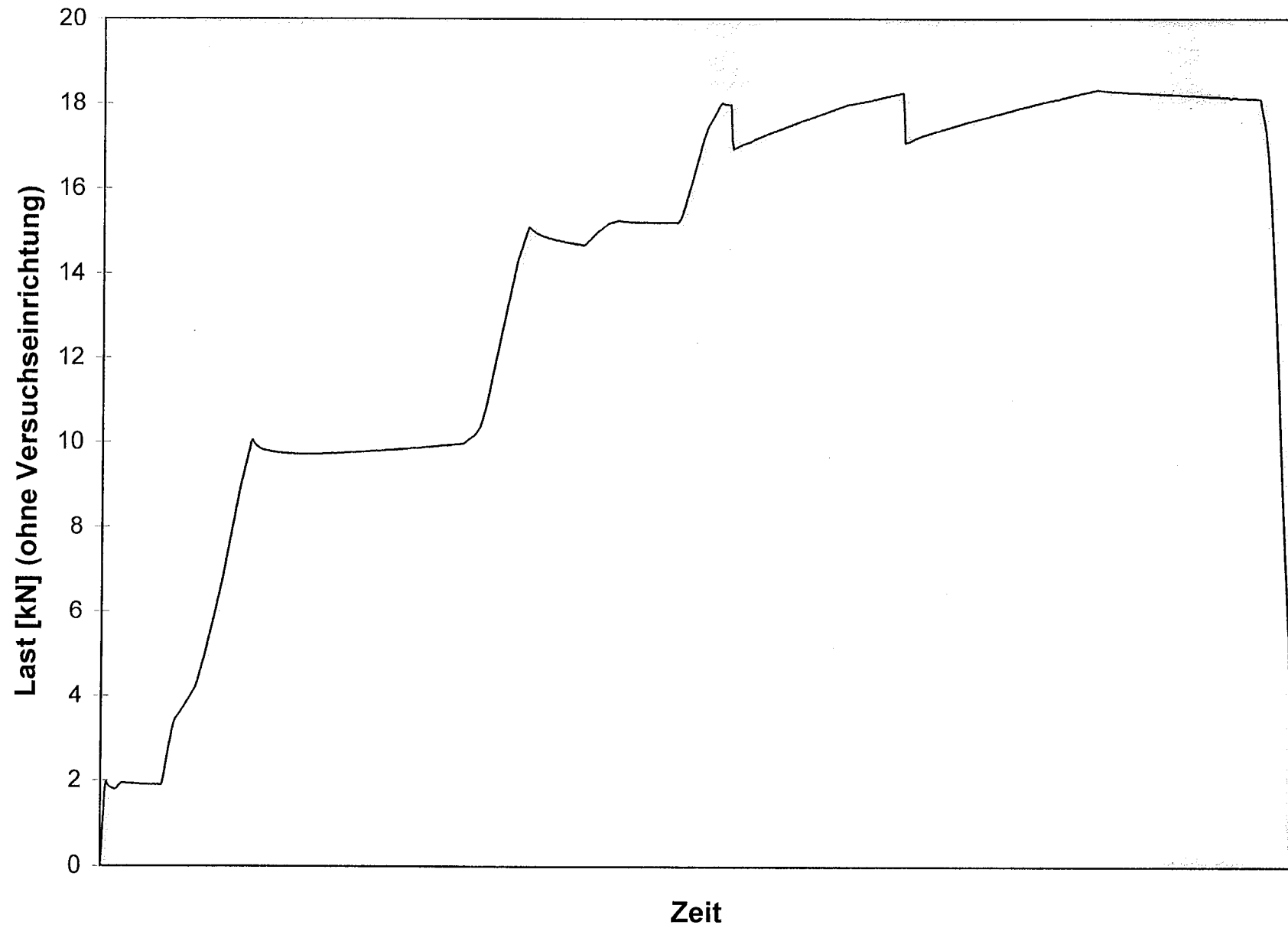


Bild B10a: Last-Zeitkurve Versuch 7/I ($t_{k,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

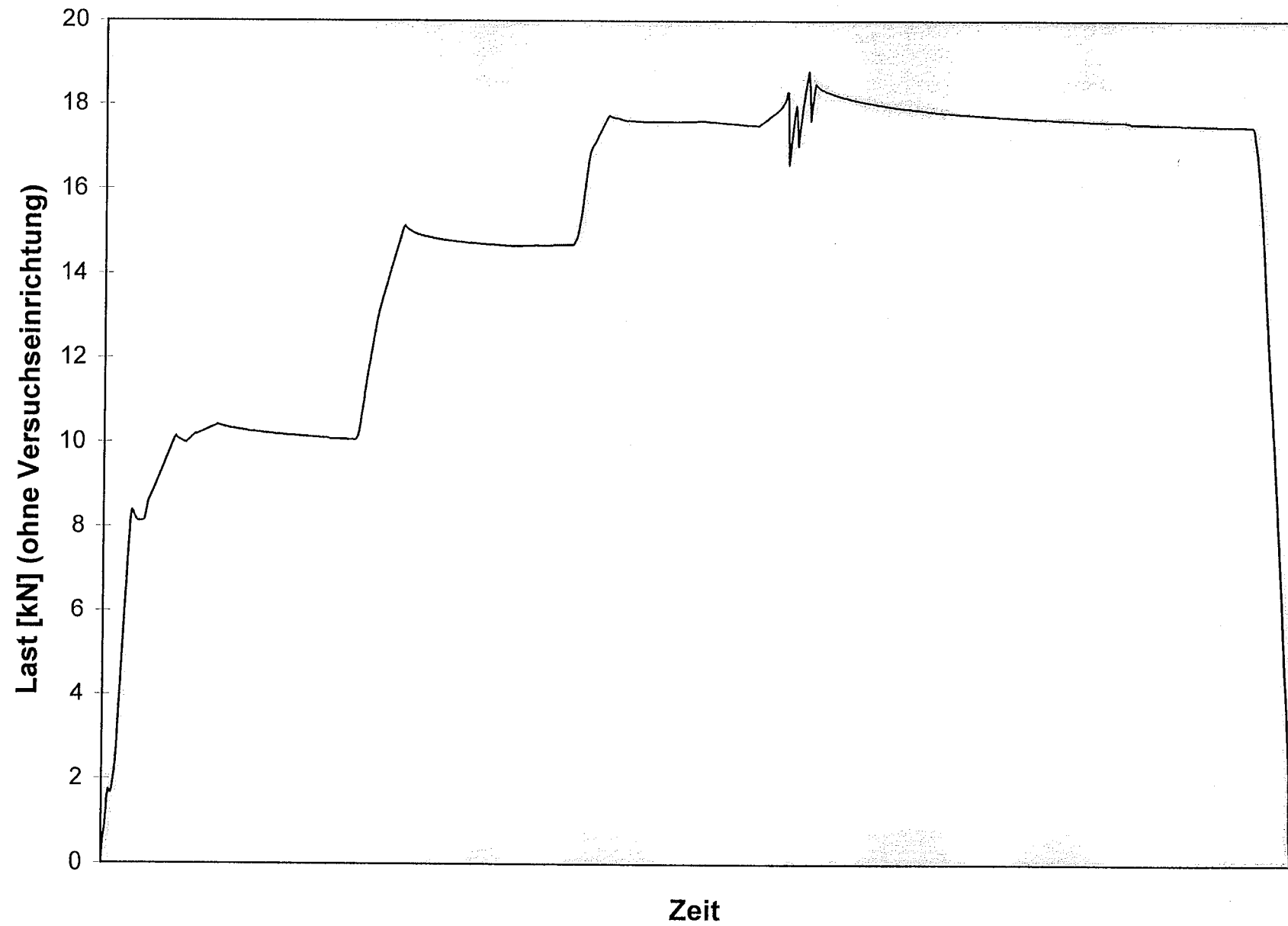


Bild B11a: Last-Zeitkurve Versuch 7/II ($t_{k,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

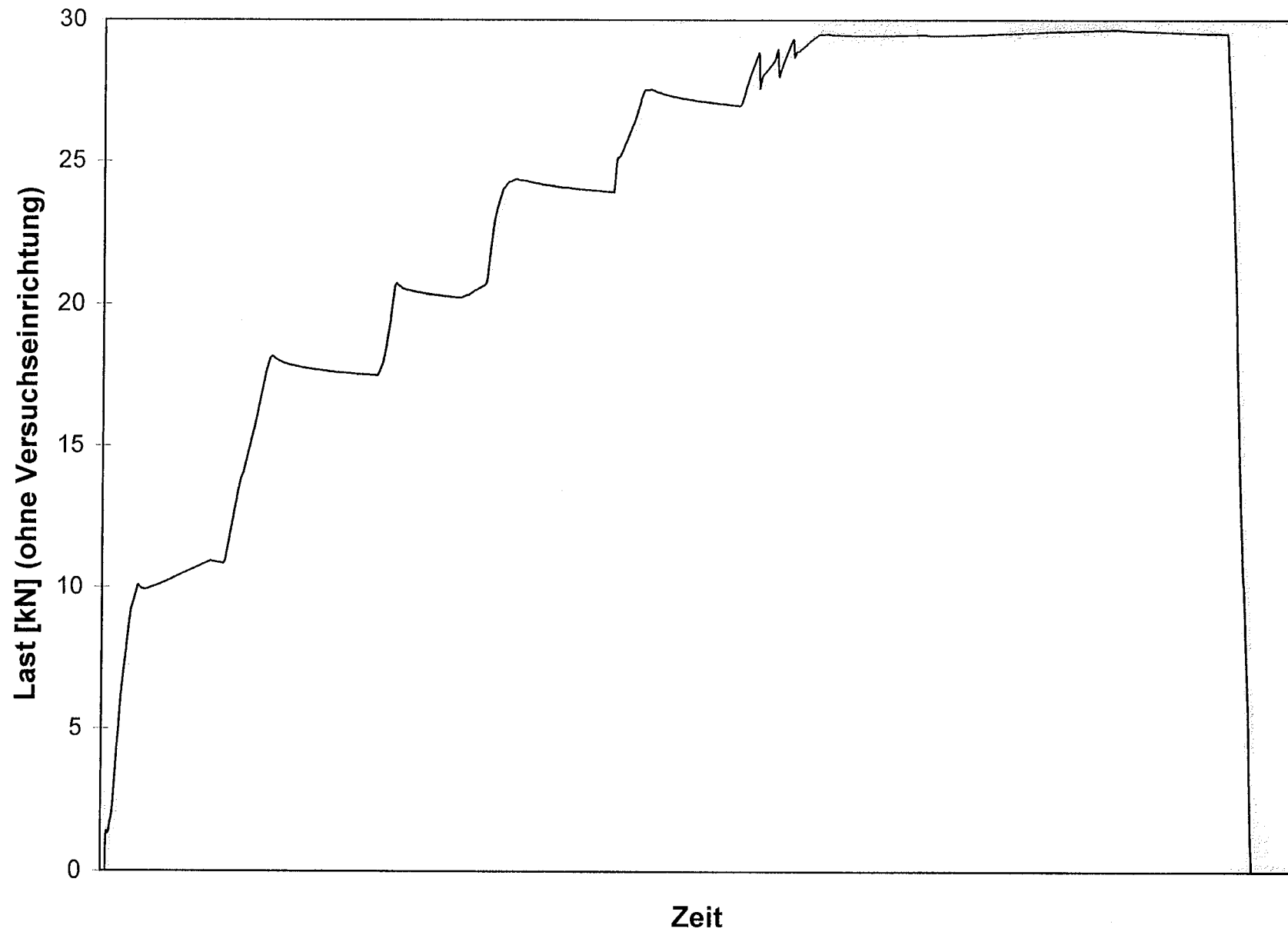


Bild B12a: Last-Zeitkurve Versuch 7/III ($t_{k,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

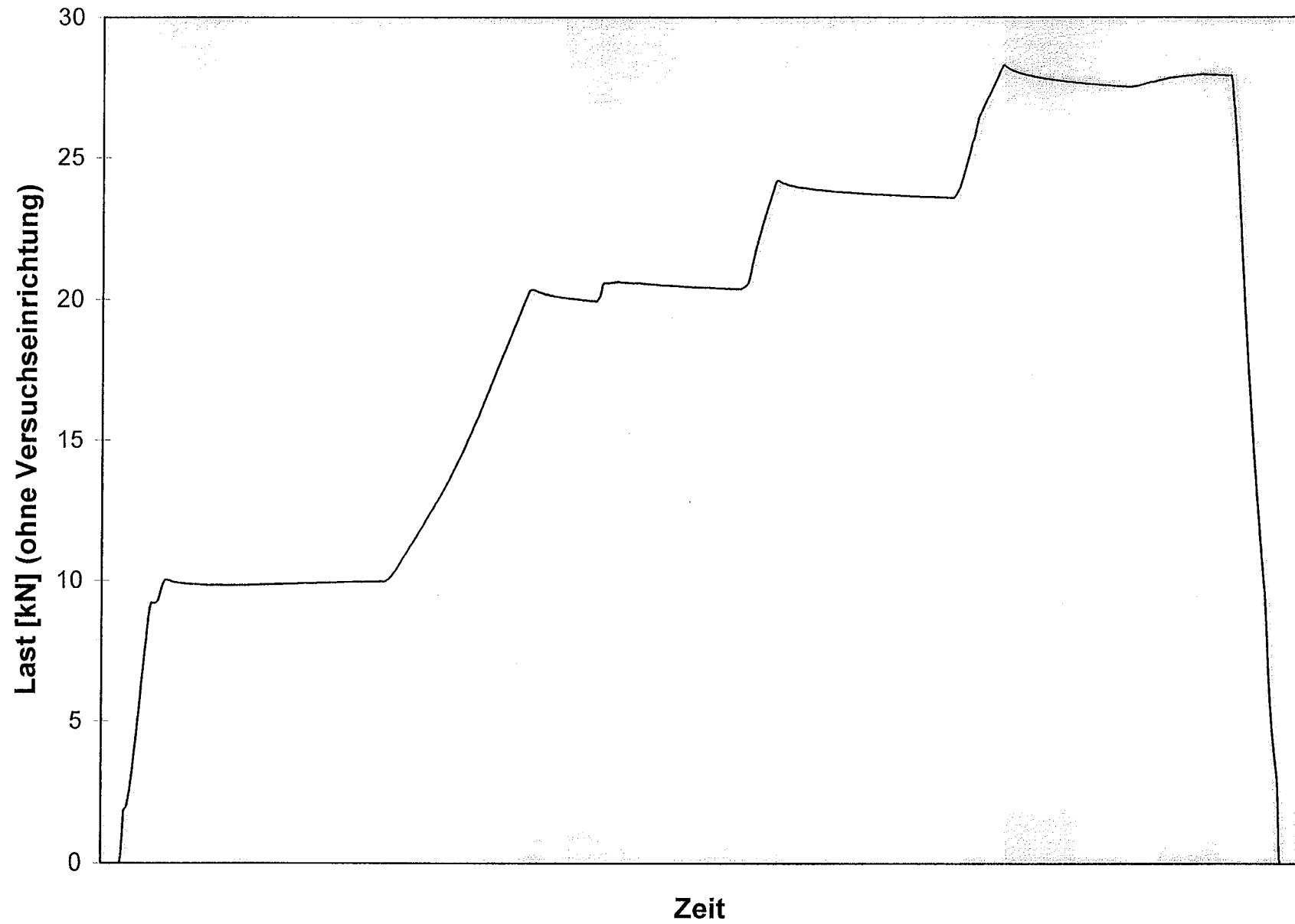
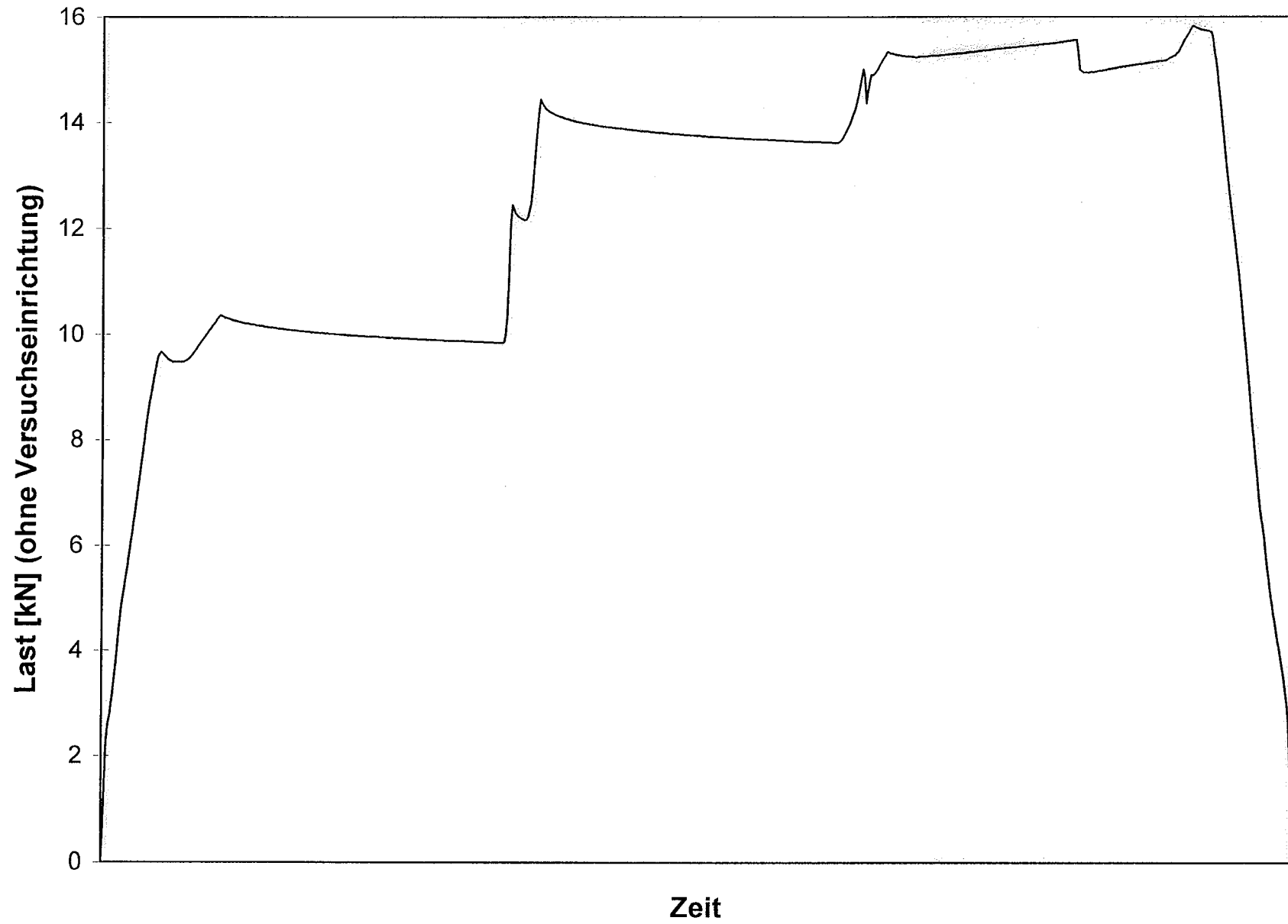
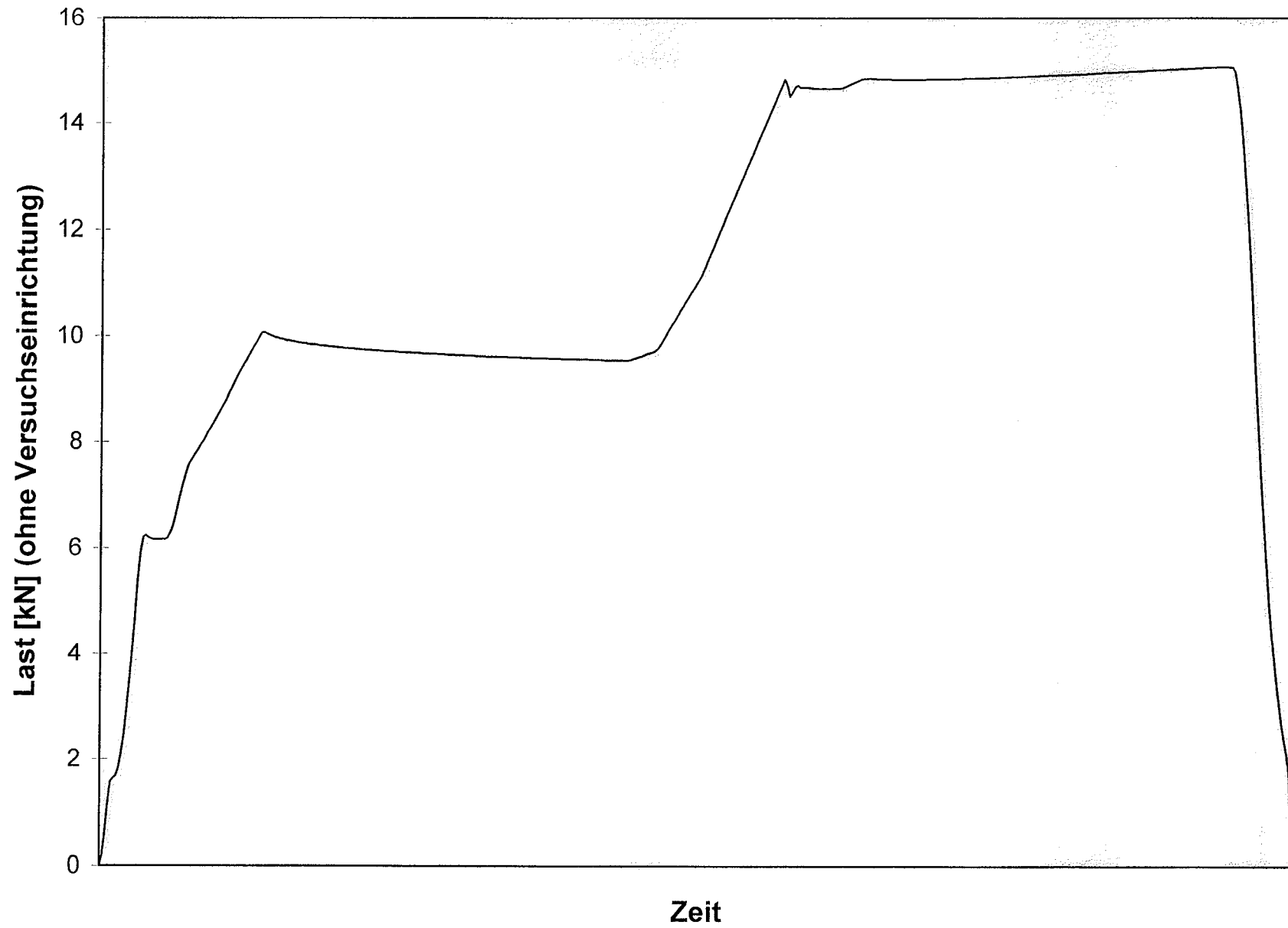


Bild B13a: Last-Zeitkurve Versuch 7/IV ($t_{k,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)





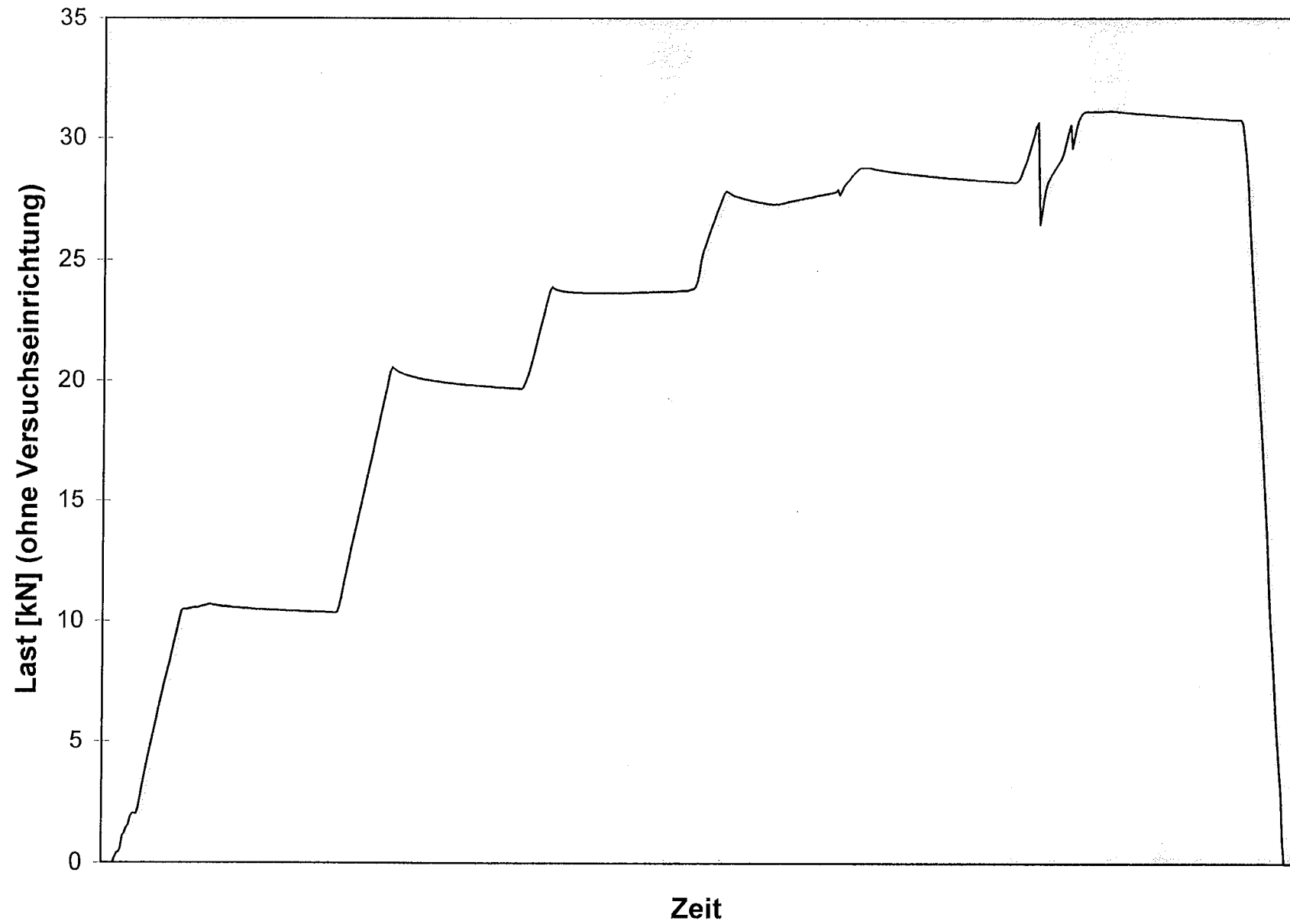


Bild B16a: Last-Zeitkurve Versuch 8/III ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

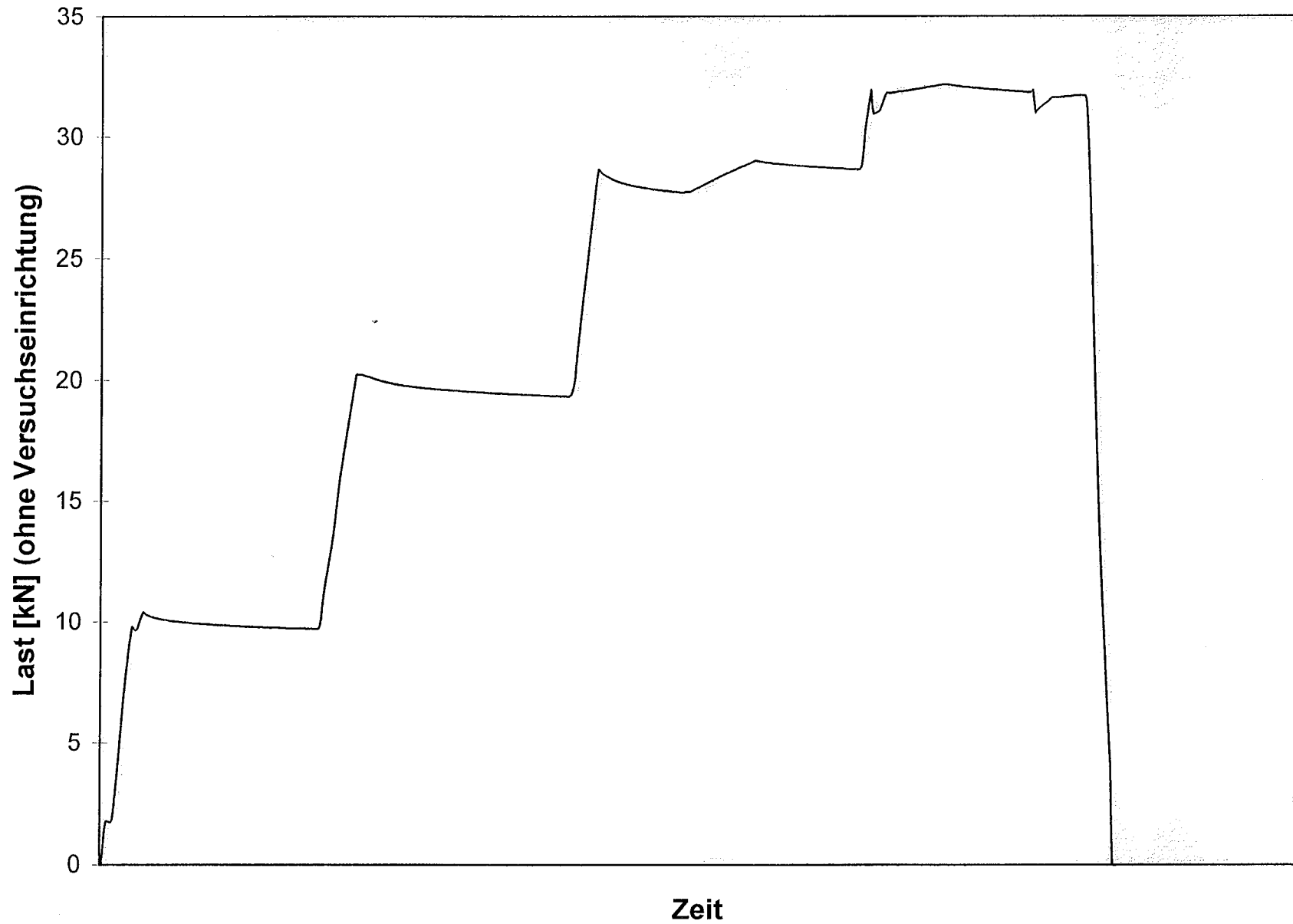


Bild B17a: Last-Zeitkurve Versuch 8/IV ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

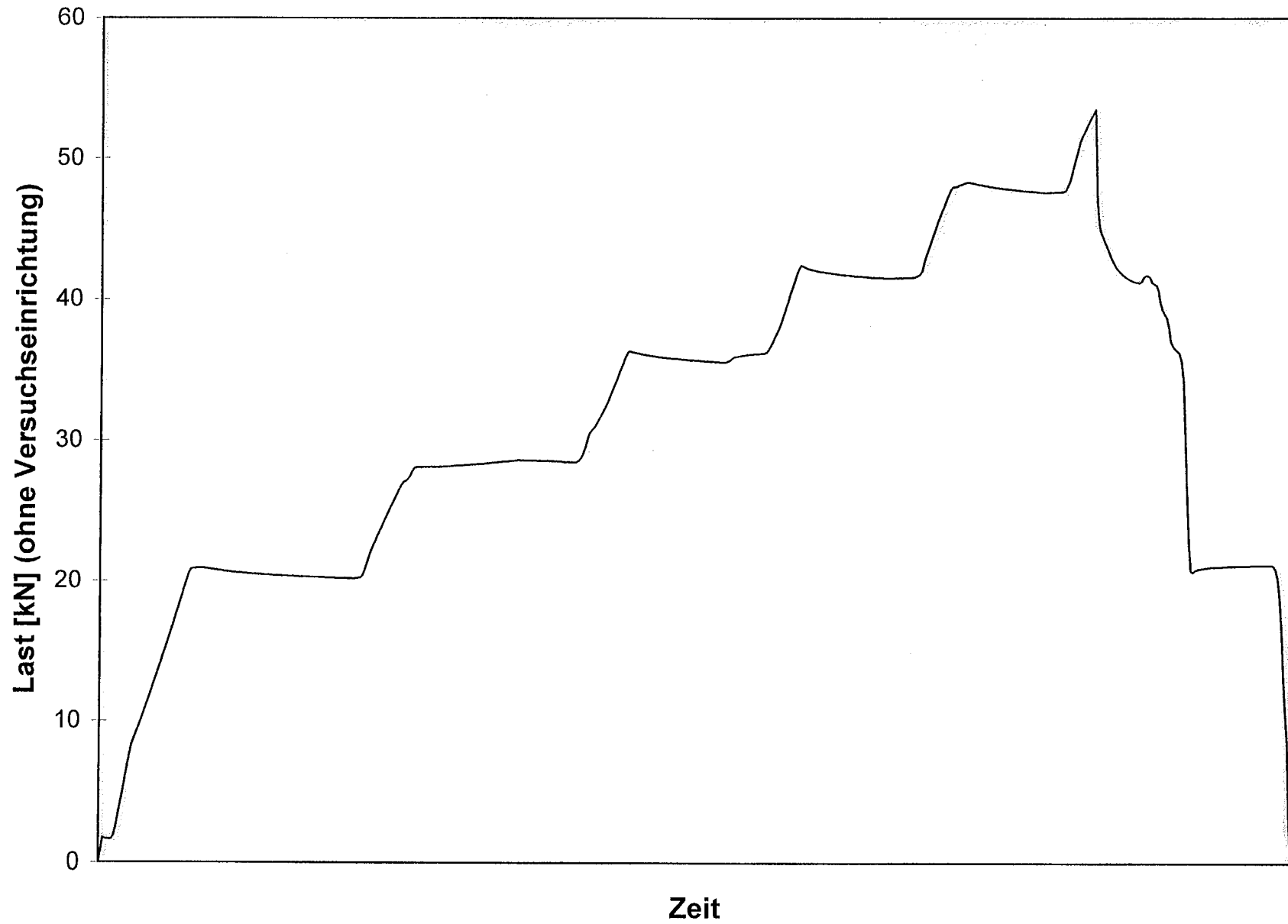


Bild B18a: Last-Zeitkurve Versuch 9/I ($t_{k,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

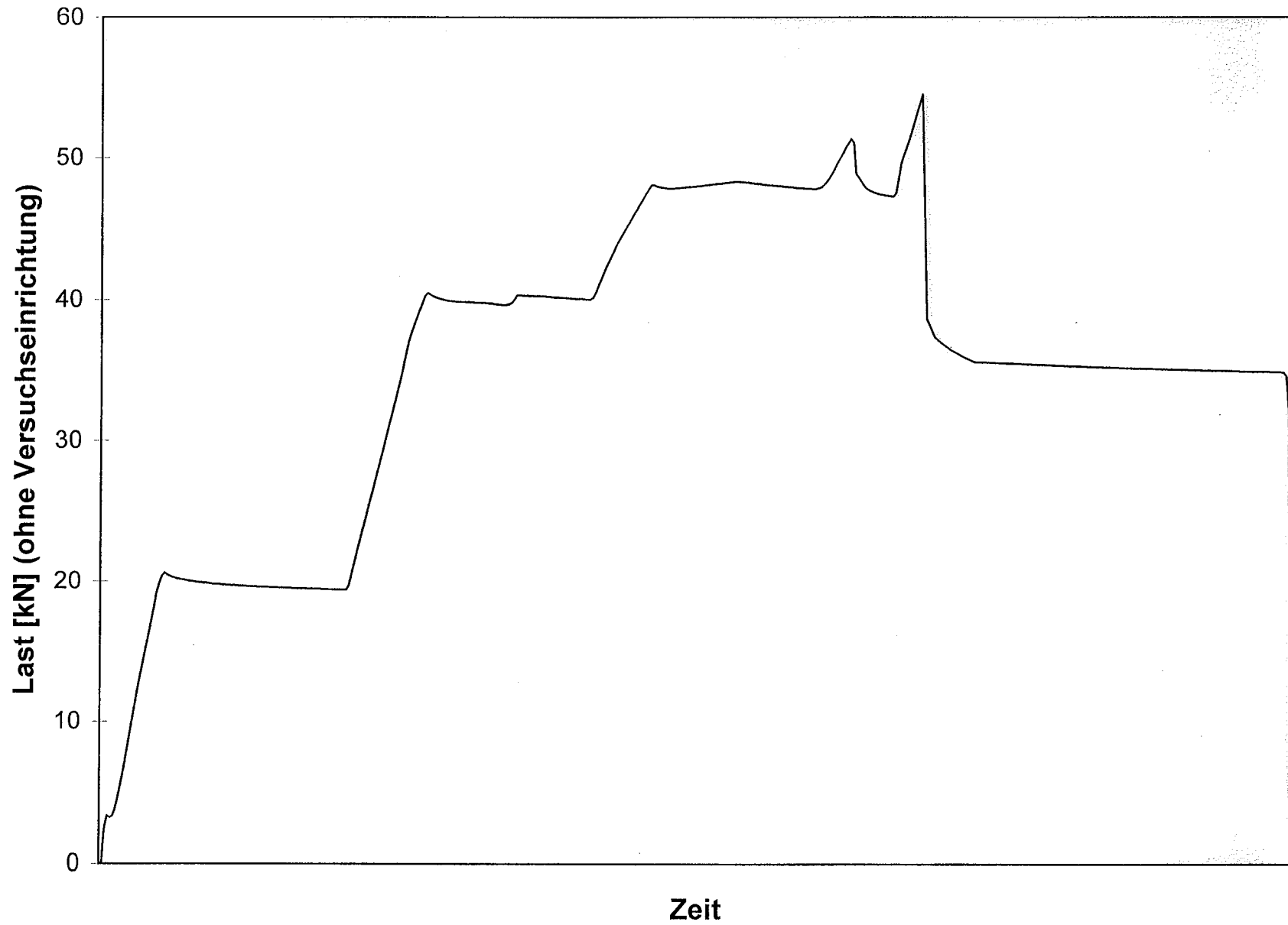


Bild B19a: Last-Zeitkurve Versuch 9/II ($t_{k,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

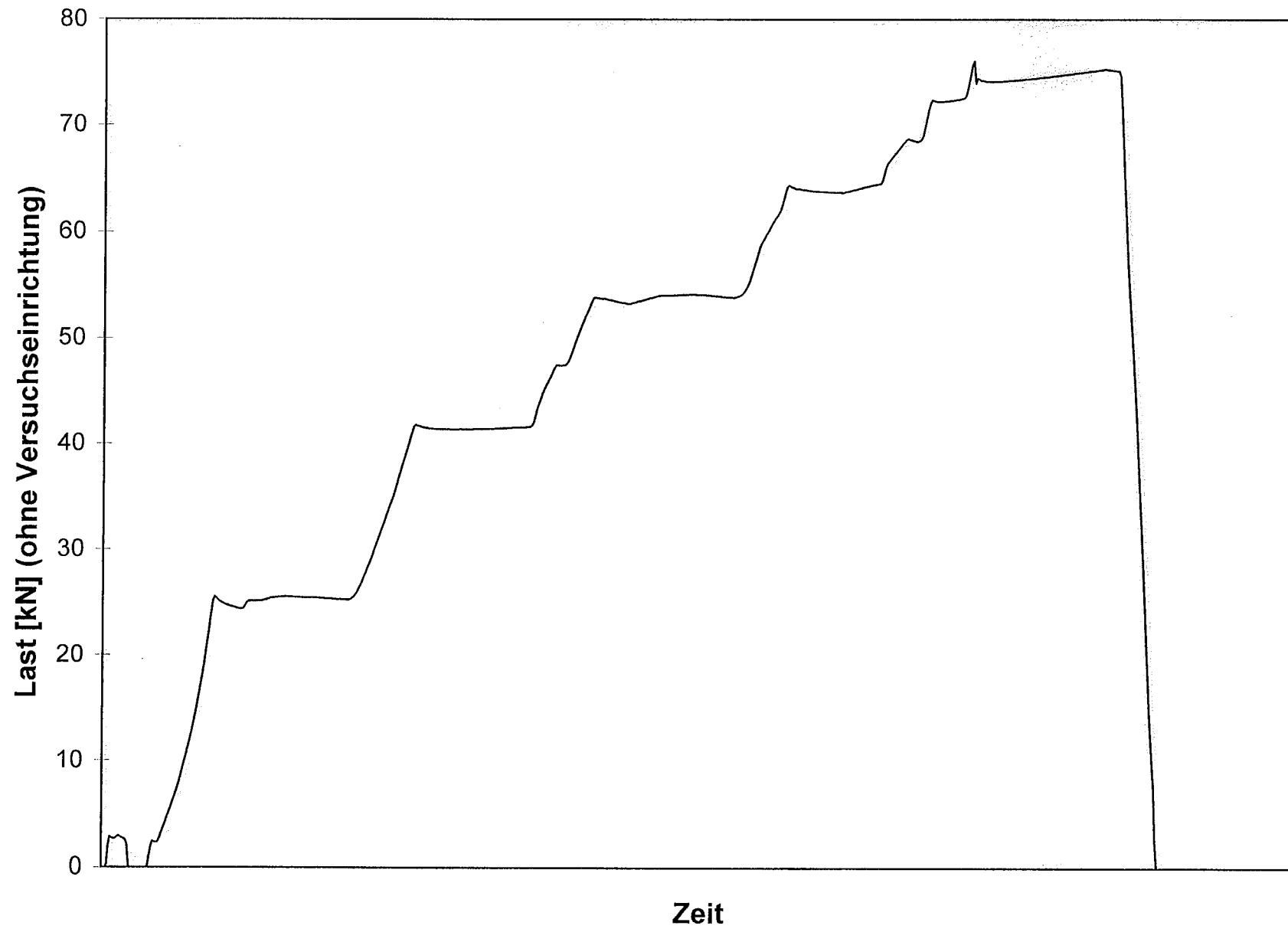


Bild B20a: Last-Zeitkurve Versuch 9/III ($t_{k,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

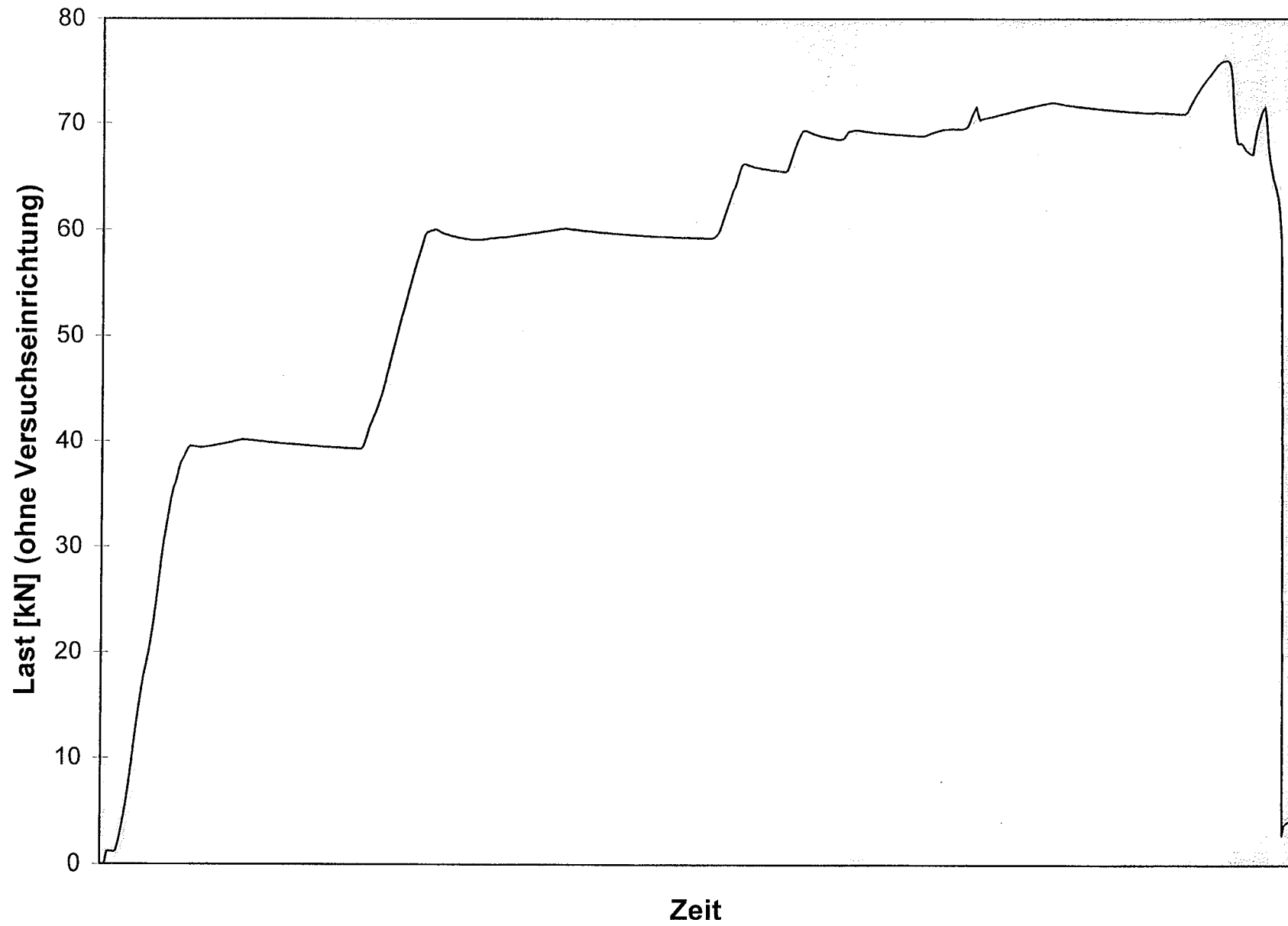


Bild B21a: Last-Zeitkurve Versuch 9/IV ($t_{k,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

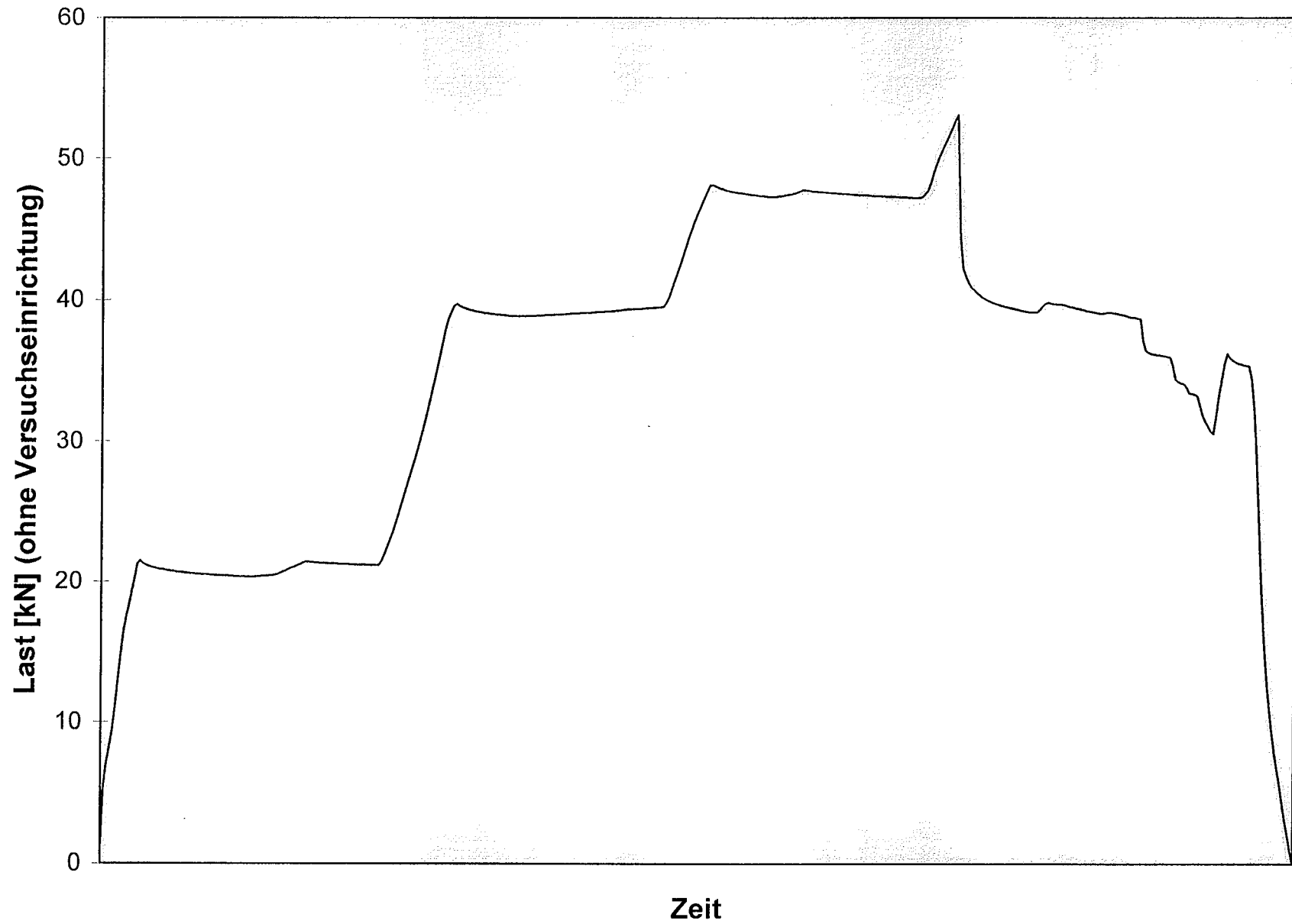


Bild B22a: Last-Zeitkurve Versuch 10/I ($t_{k,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

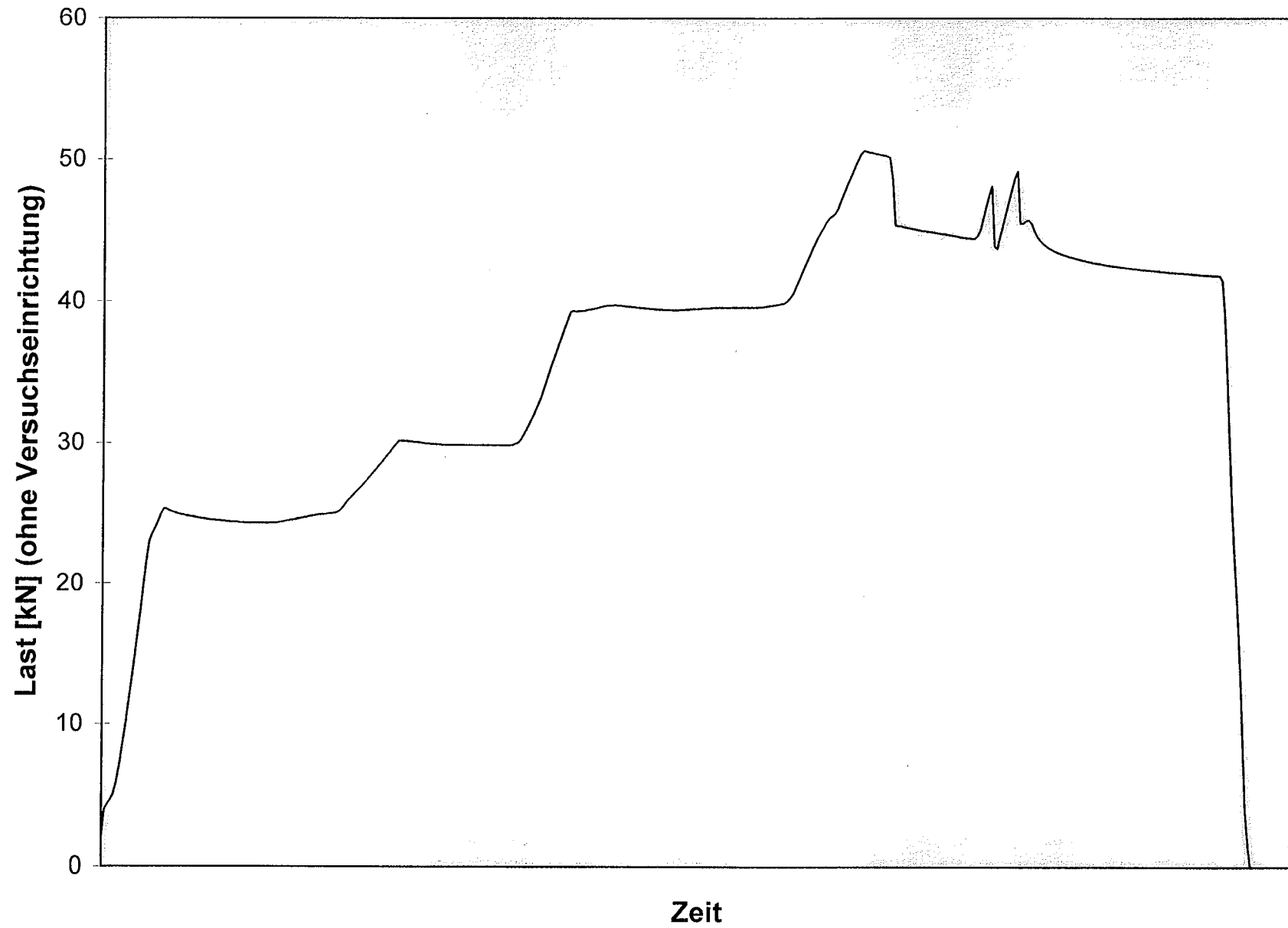


Bild B23a: Last-Zeitkurve Versuch 10/II ($t_{k,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

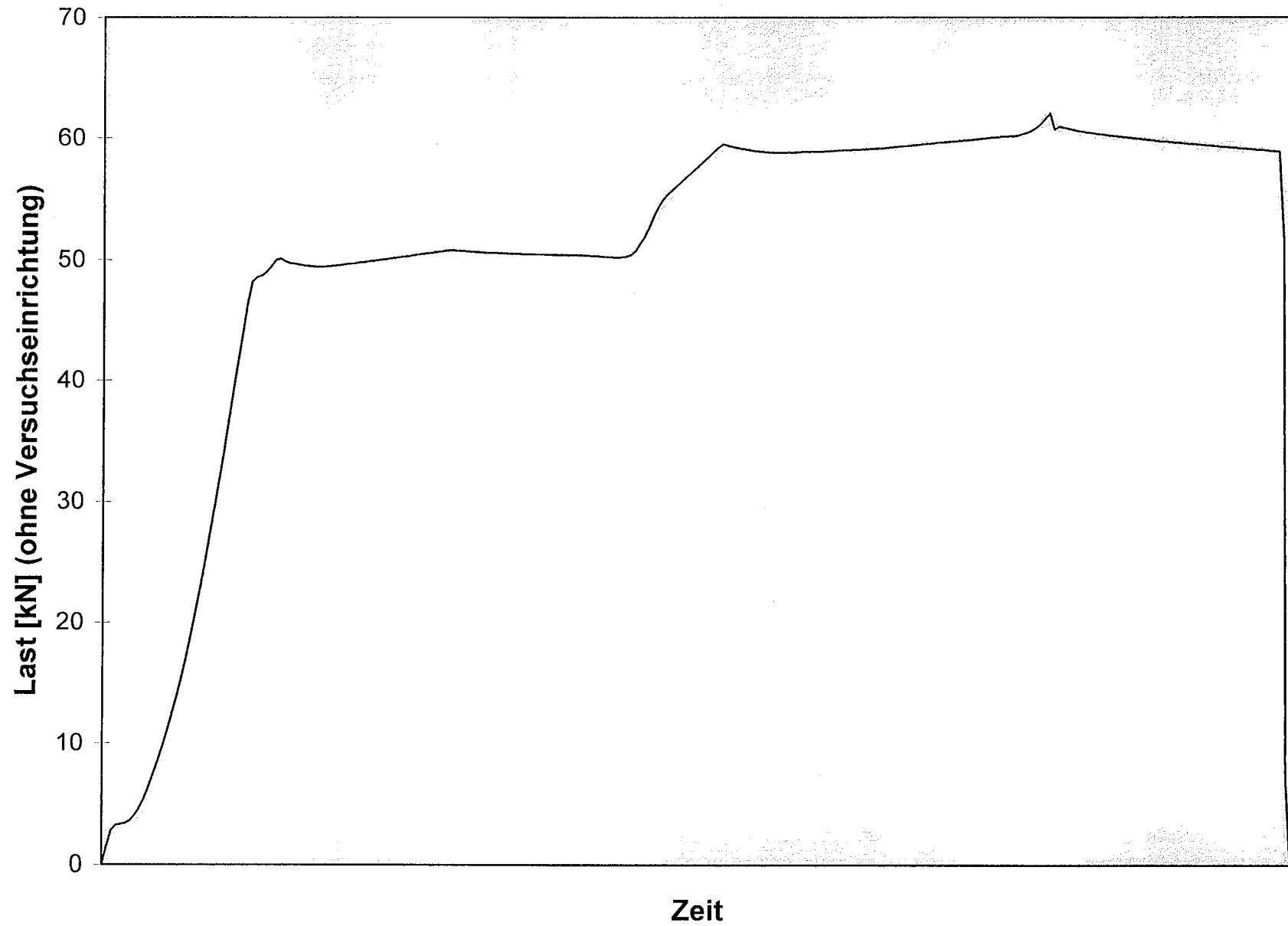
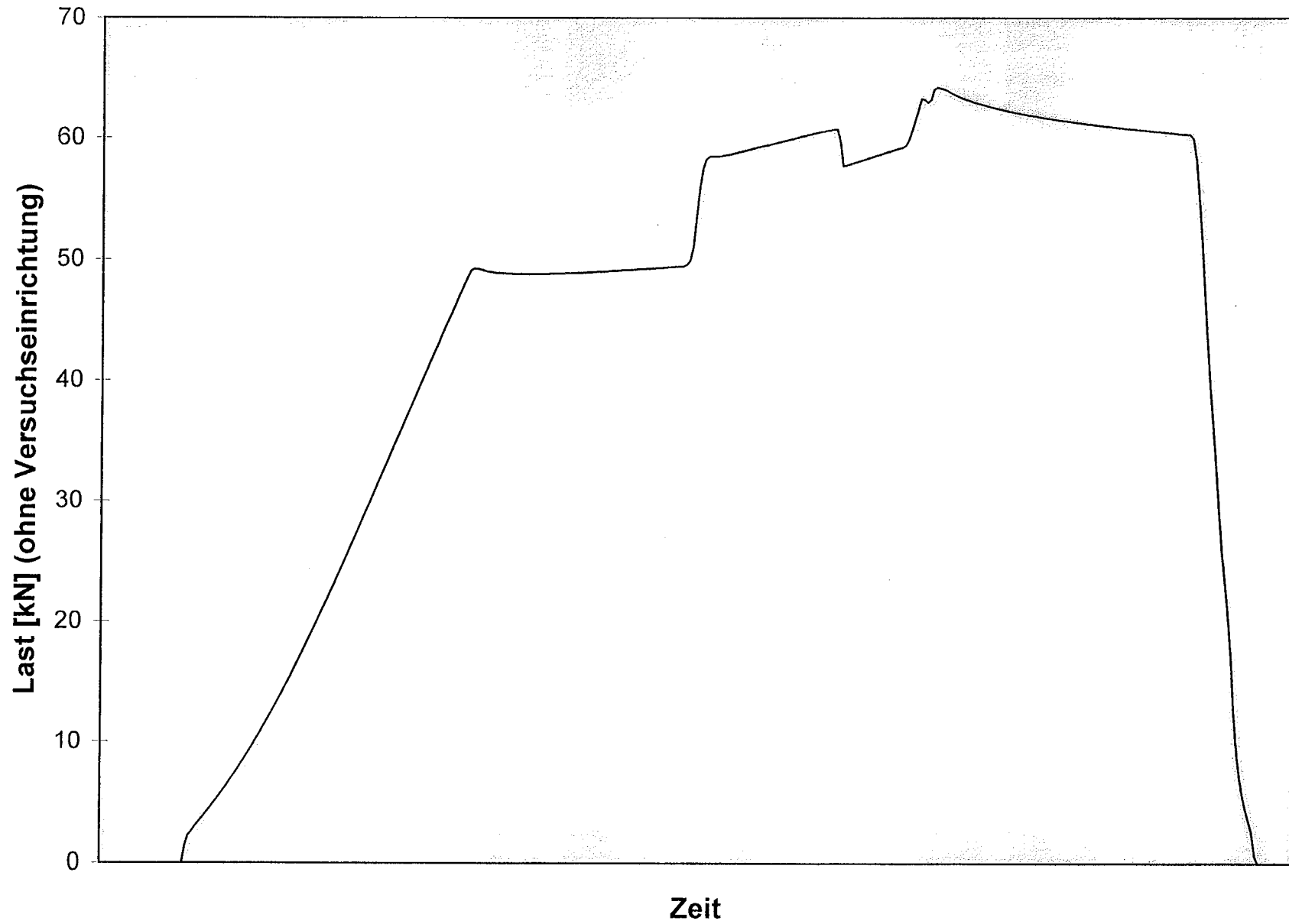


Bild B24a: Last-Zeitkurve Versuch 10/III ($t_{k,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)



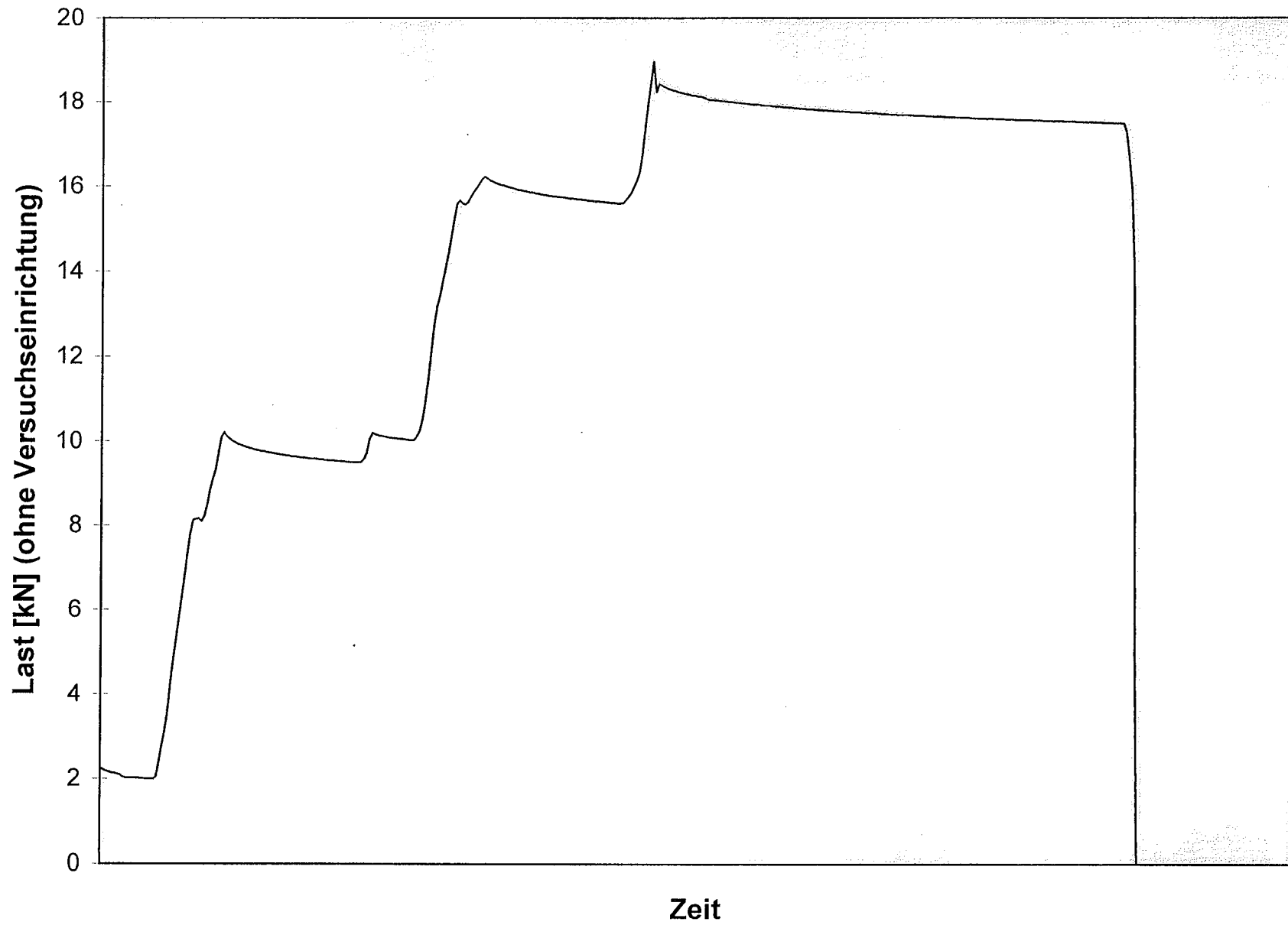


Bild B26a: Last-Zeitkurve Versuch 11/I ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)



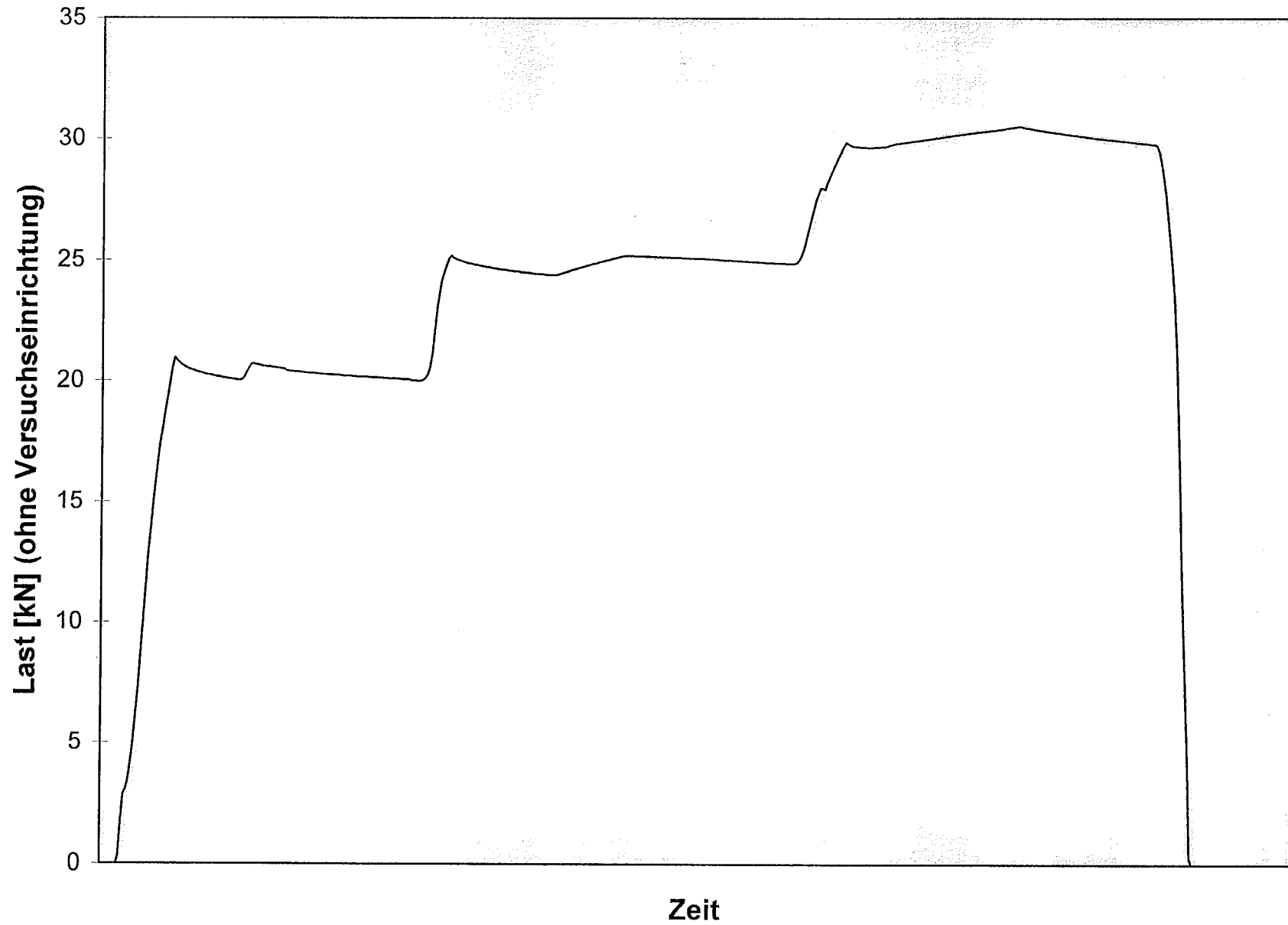
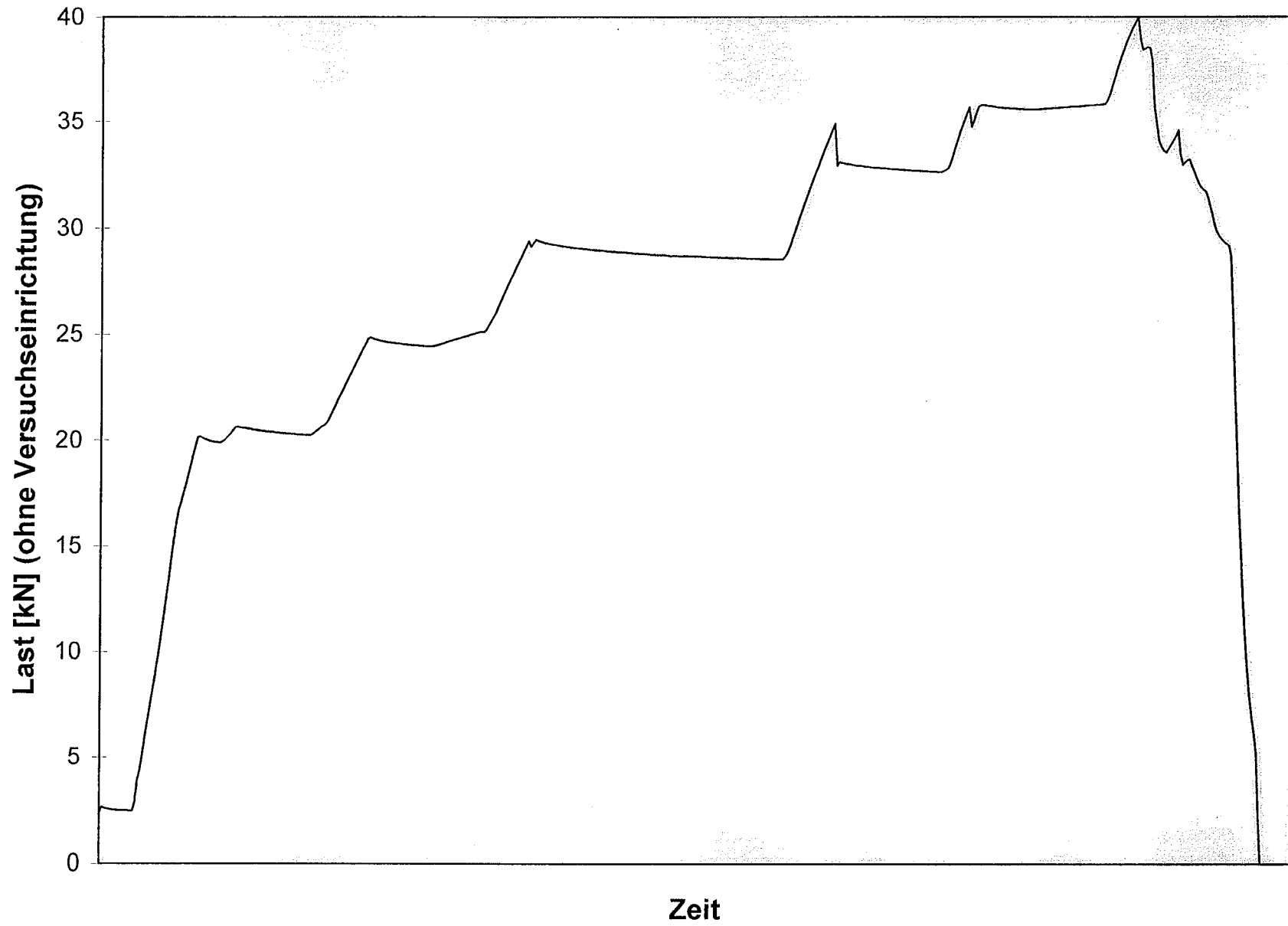


Bild B28a: Last-Zeitkurve Versuch 11/V ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)



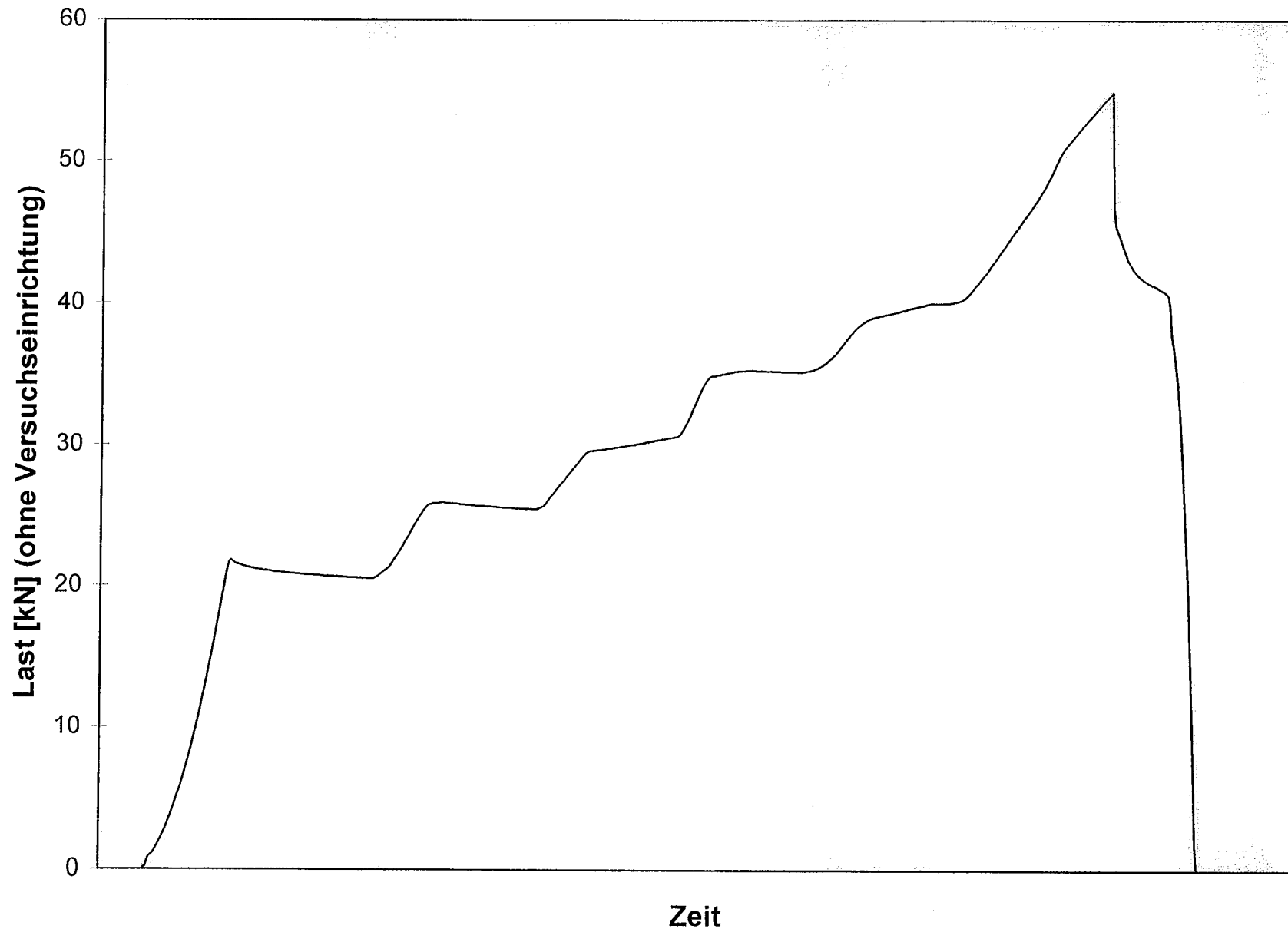
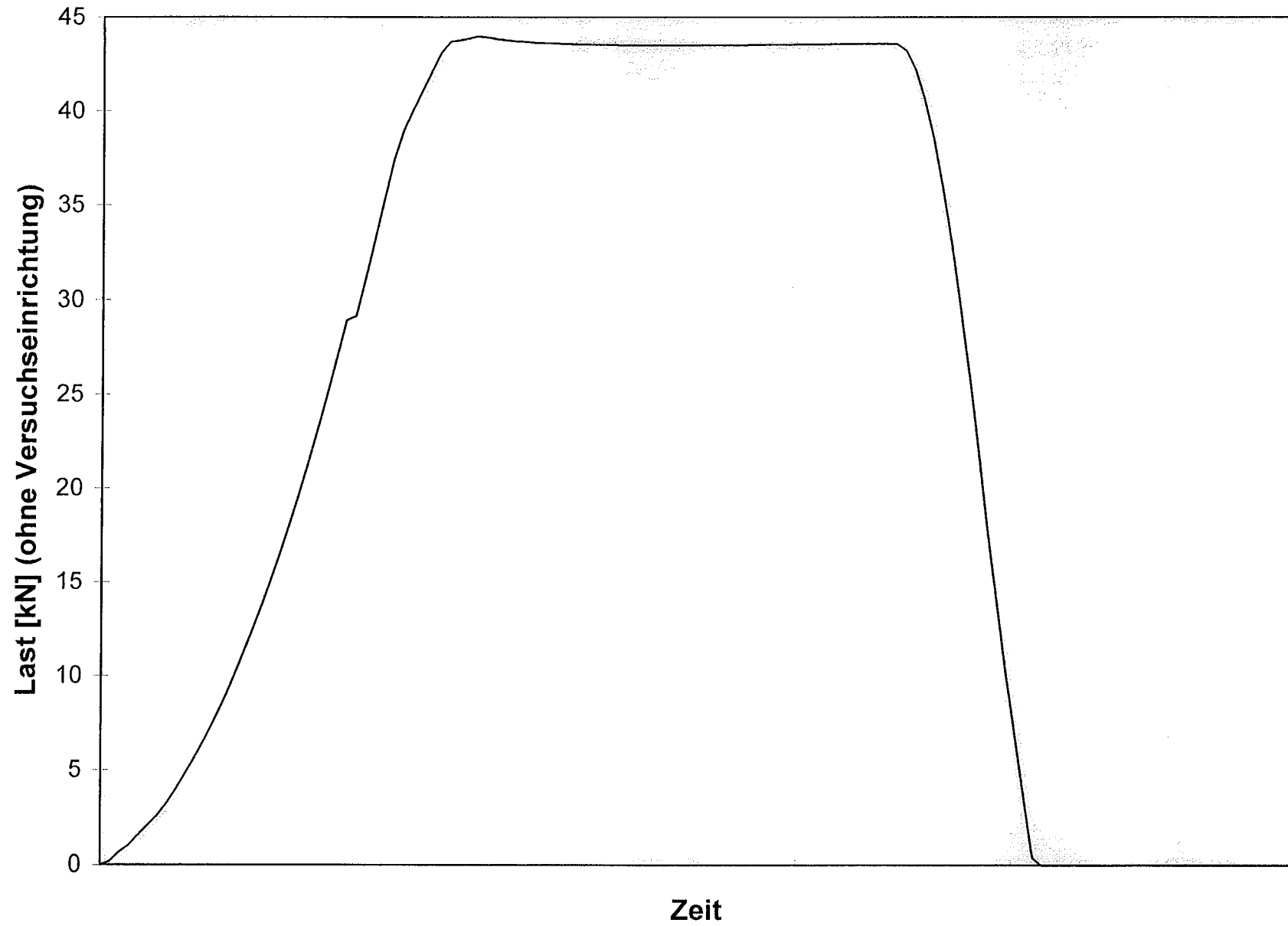


Bild B30a: Last-Zeitkurve Versuch 12/I ($t_{k,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)



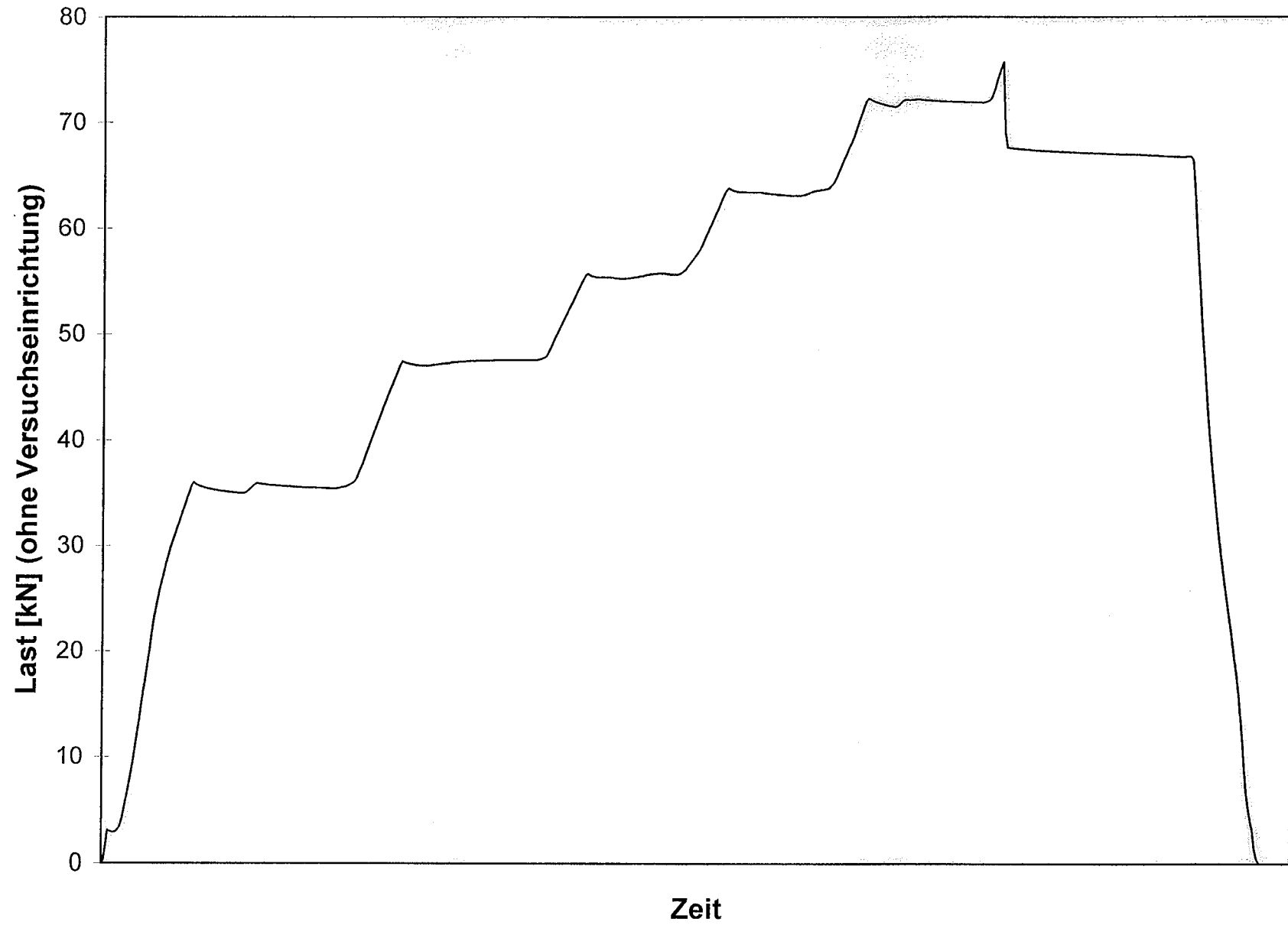
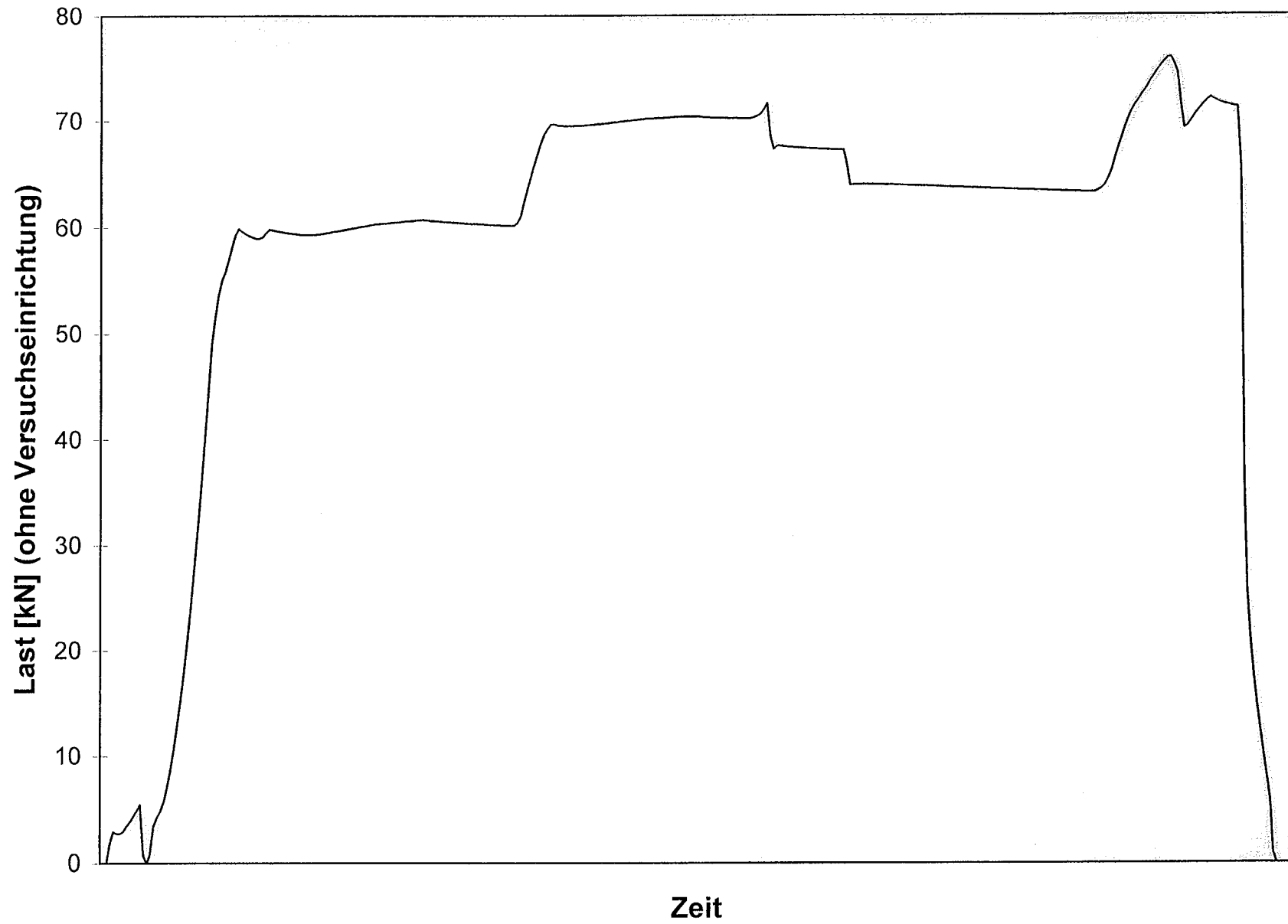


Bild B32a: Last-Zeitkurve Versuch 12/V ($t_{k,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)



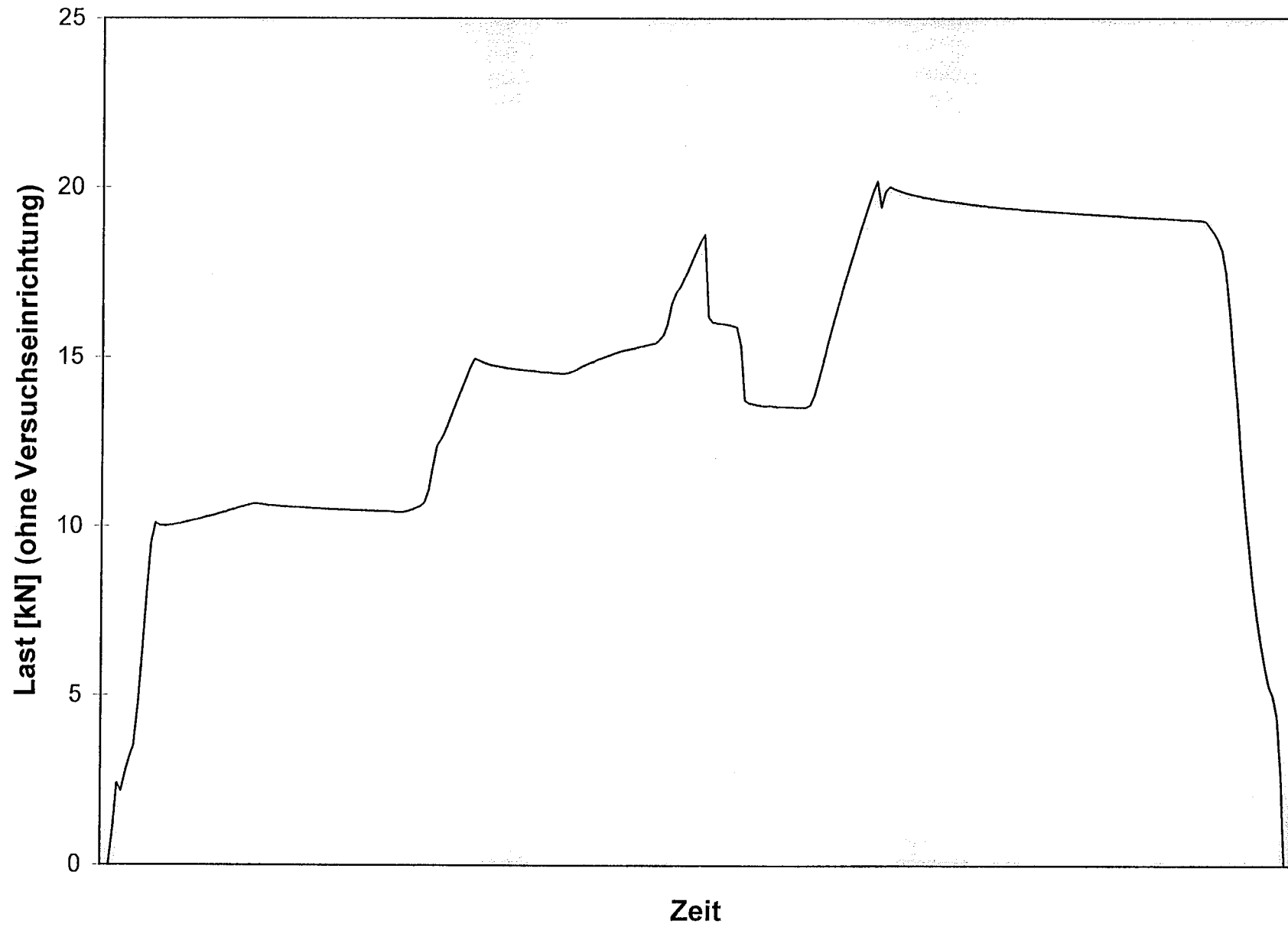
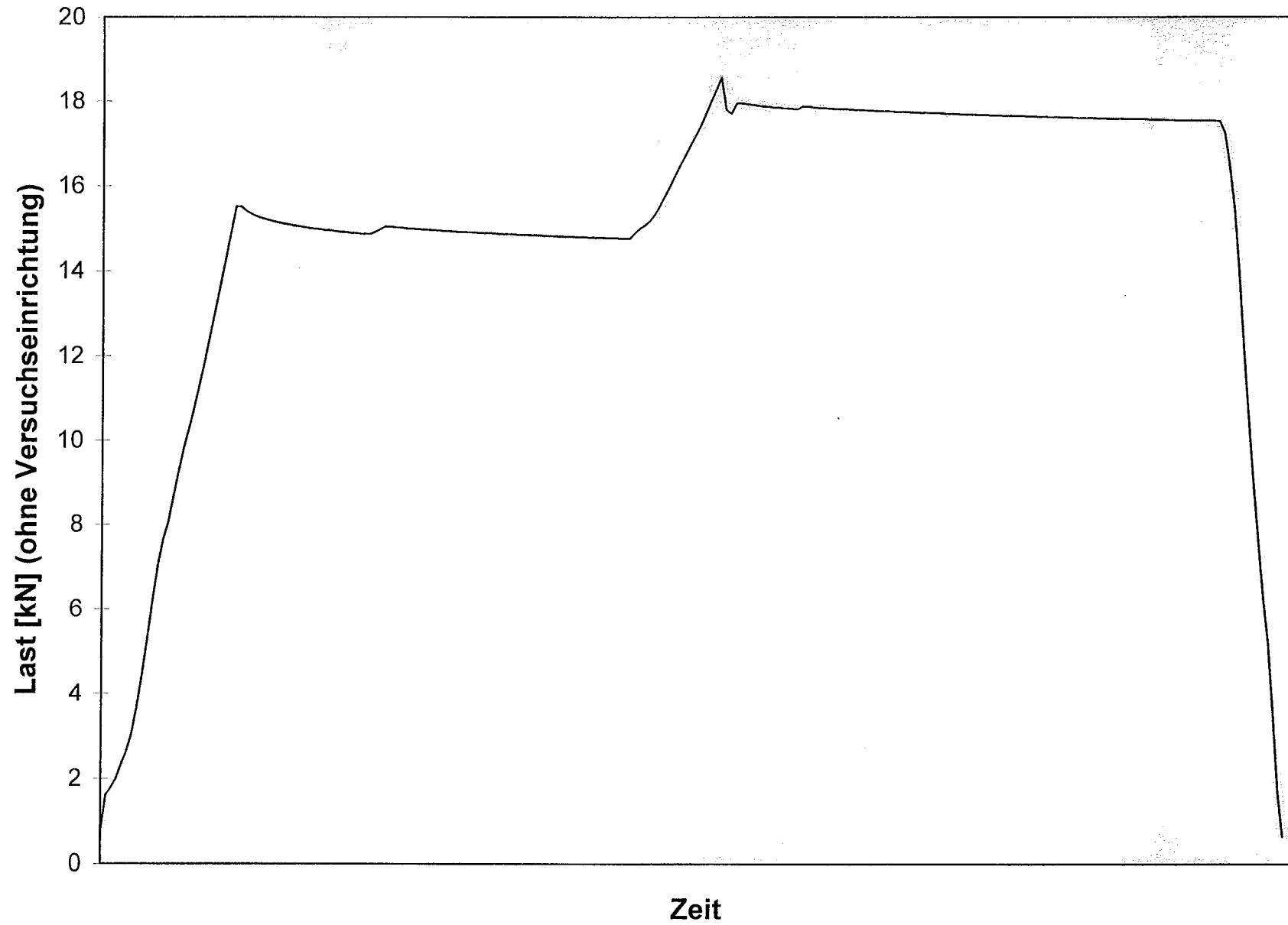
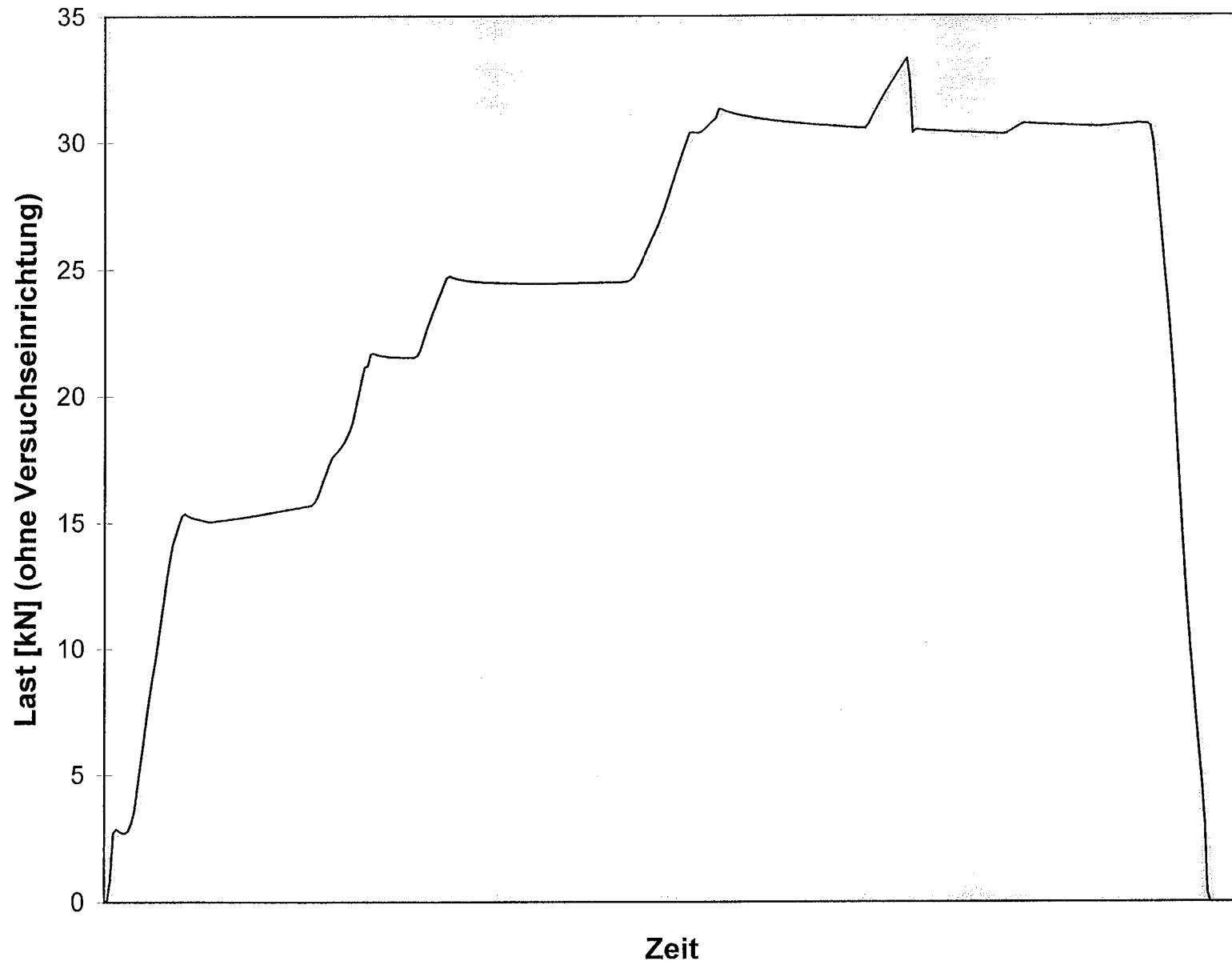


Bild B34a: Last-Zeitkurve Versuch 13/I ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)





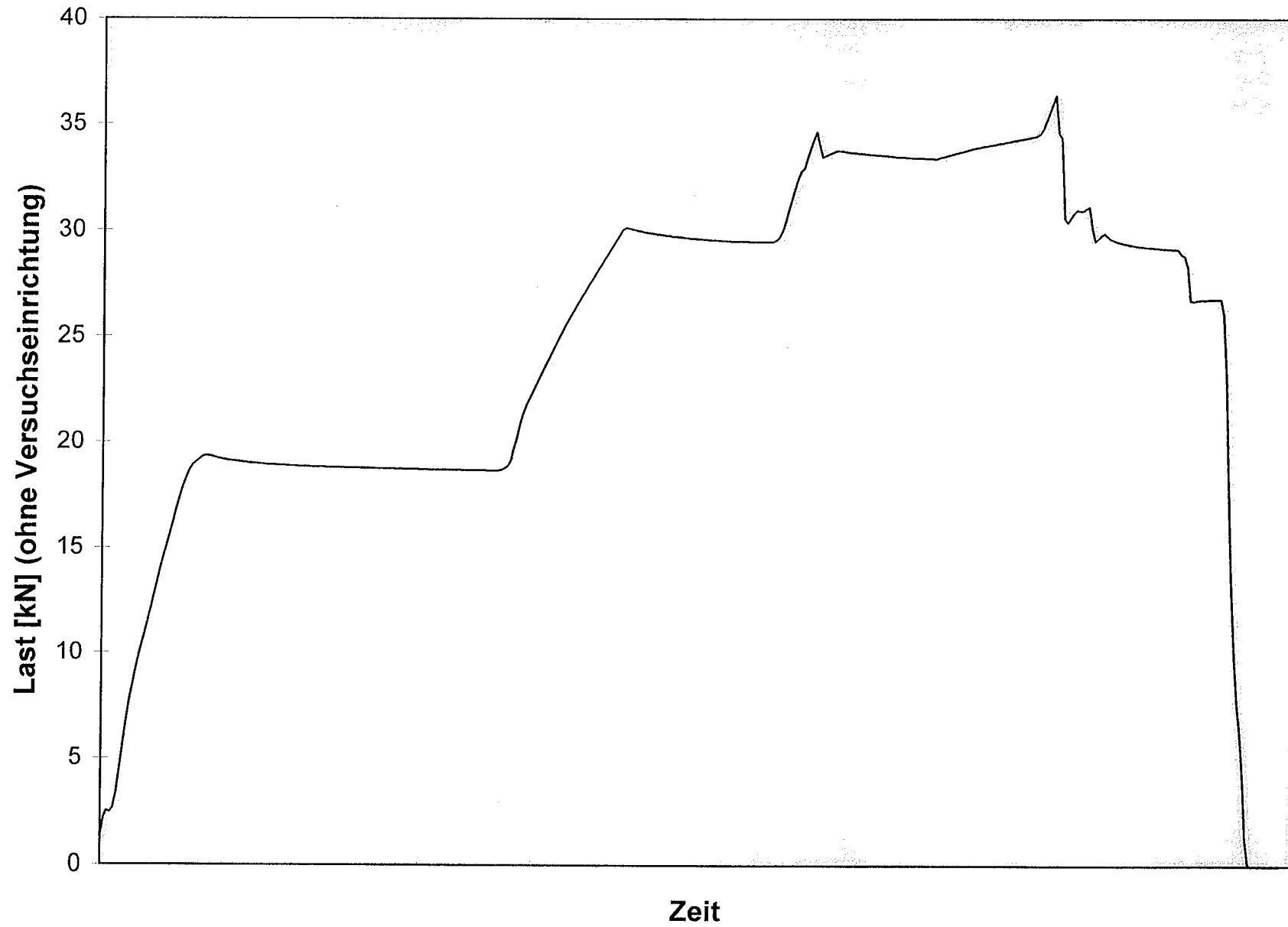


Bild B37a: Last-Zeitkurve Versuch 13/IV ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 80$ mm; ■-Profil)

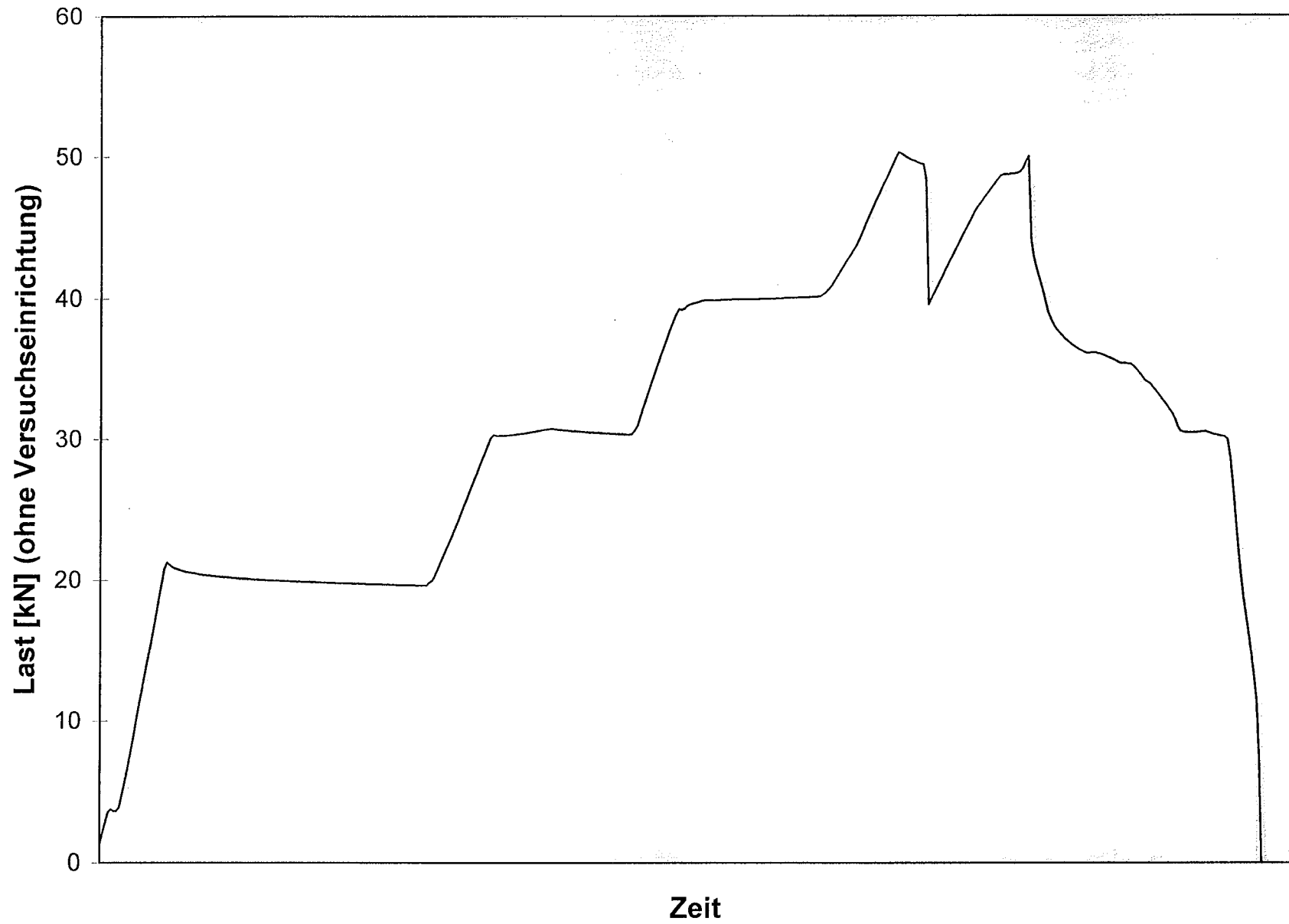


Bild B38a: Last-Zeitkurve Versuch 14/I ($t_{k,m} = 0,918$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil)

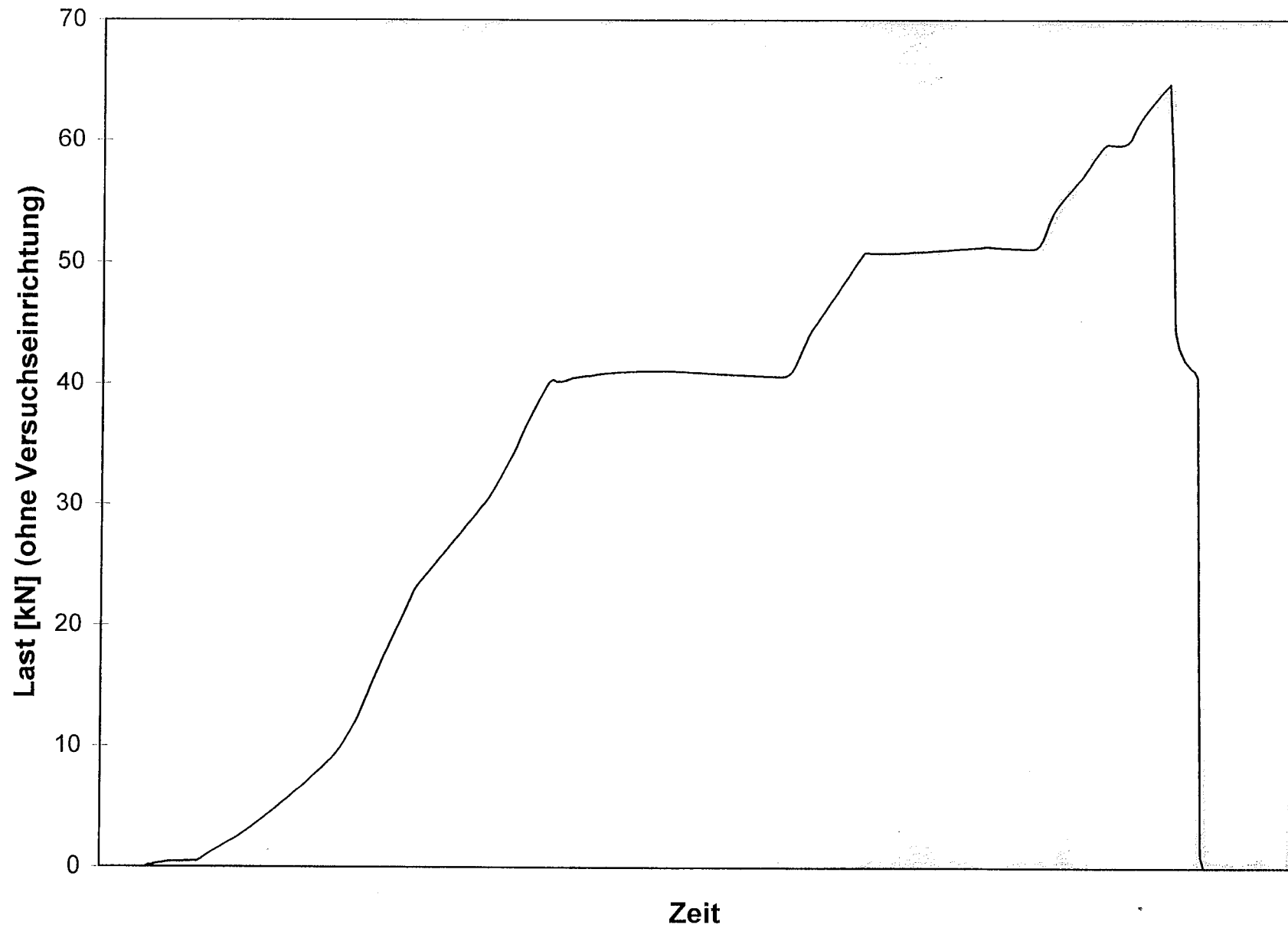


Bild B39a: Last-Zeitkurve Versuch 14/II ($t_{k,m} = 0,918$ mm; $b = 80$ mm; L-Profil)

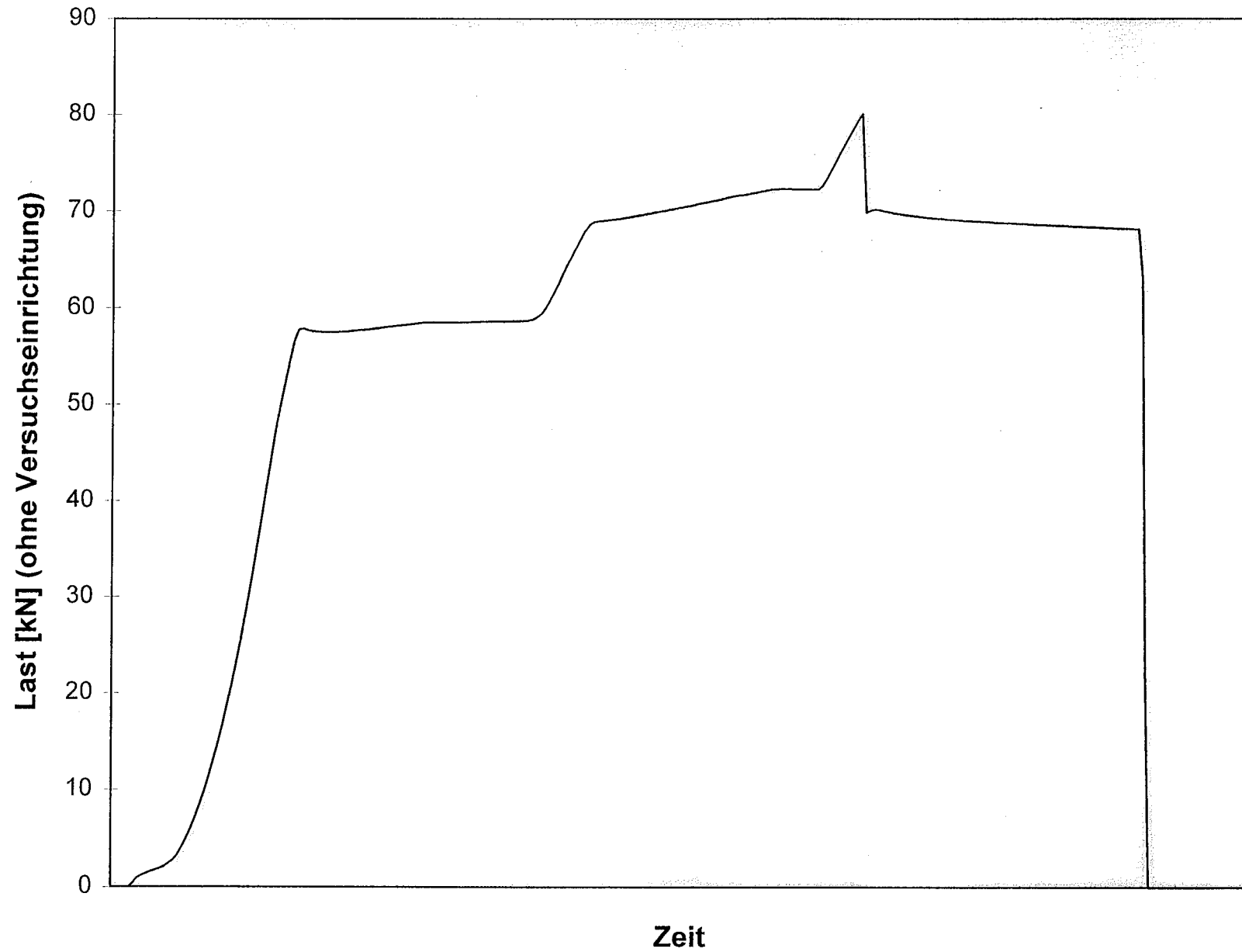


Bild B40a: Last-Zeitkurve Versuch 14/IV ($t_{k,m} = 0,918$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil)

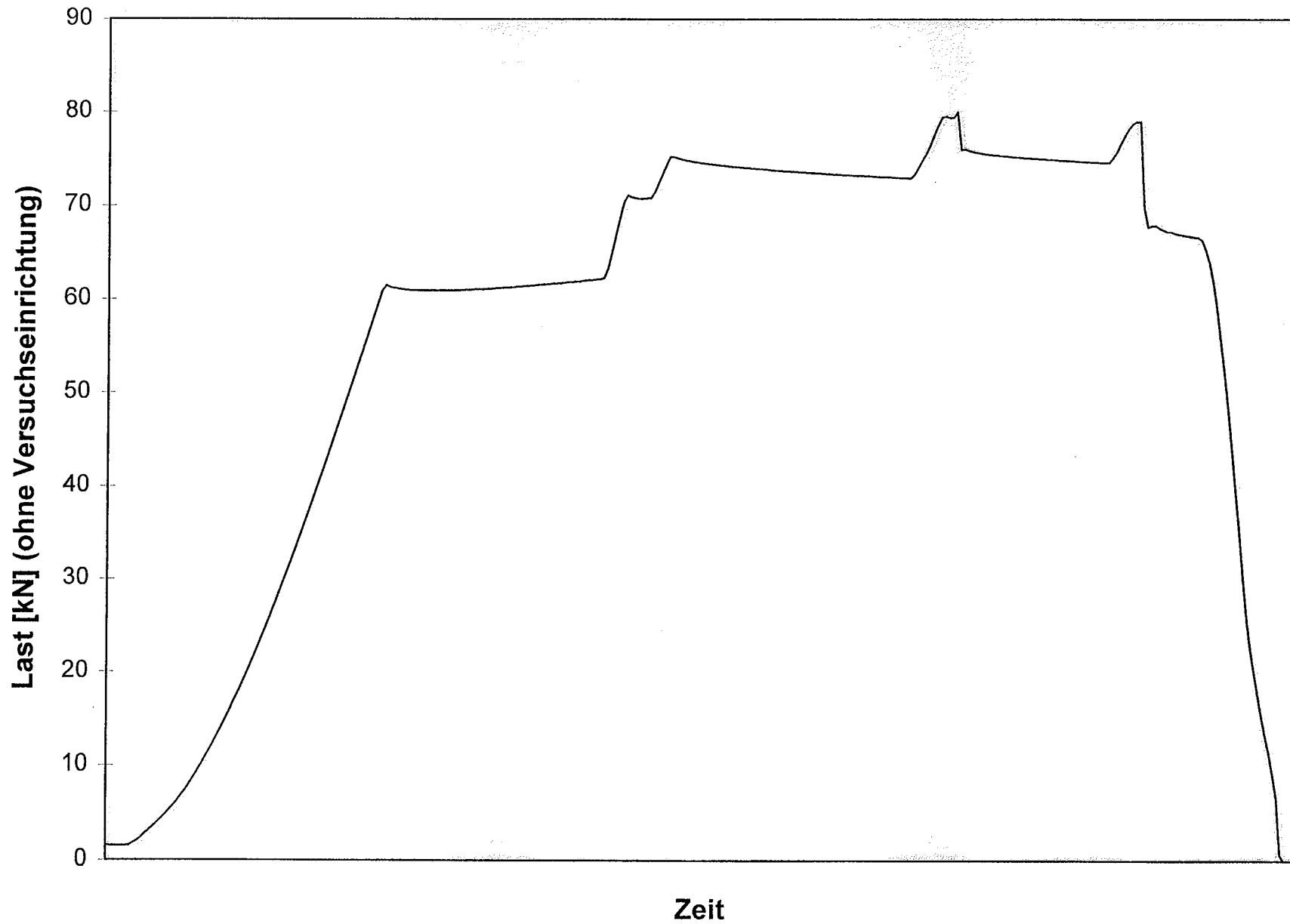


Bild B41a: Last-Zeitkurve Versuch 14/V ($t_{k,m} = 0,918$ mm; $b = 80$ mm; ■-Profil)

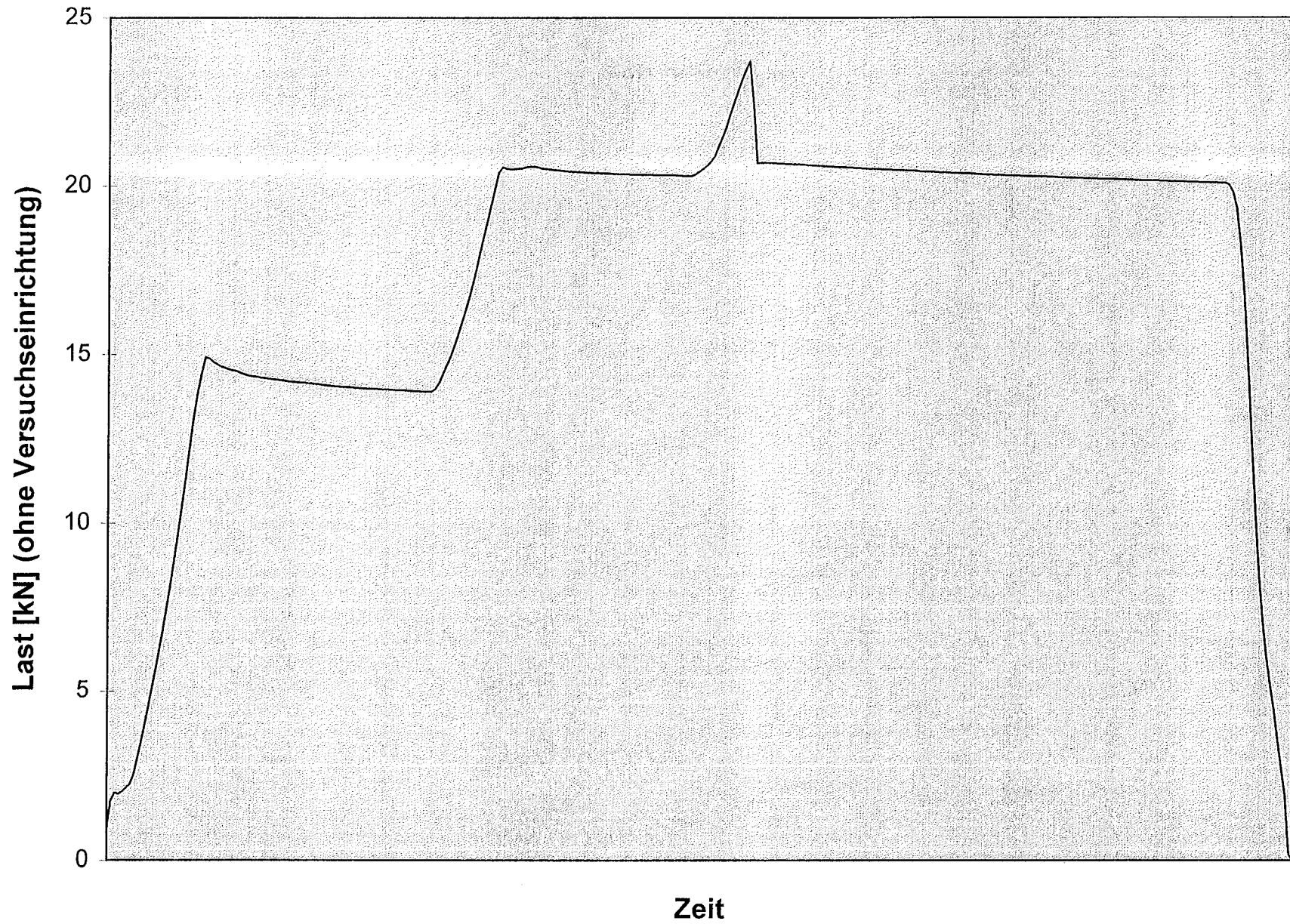


Bild B42a: Last-Zeitkurve Versuch 11/III ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, Mittelringsteife)

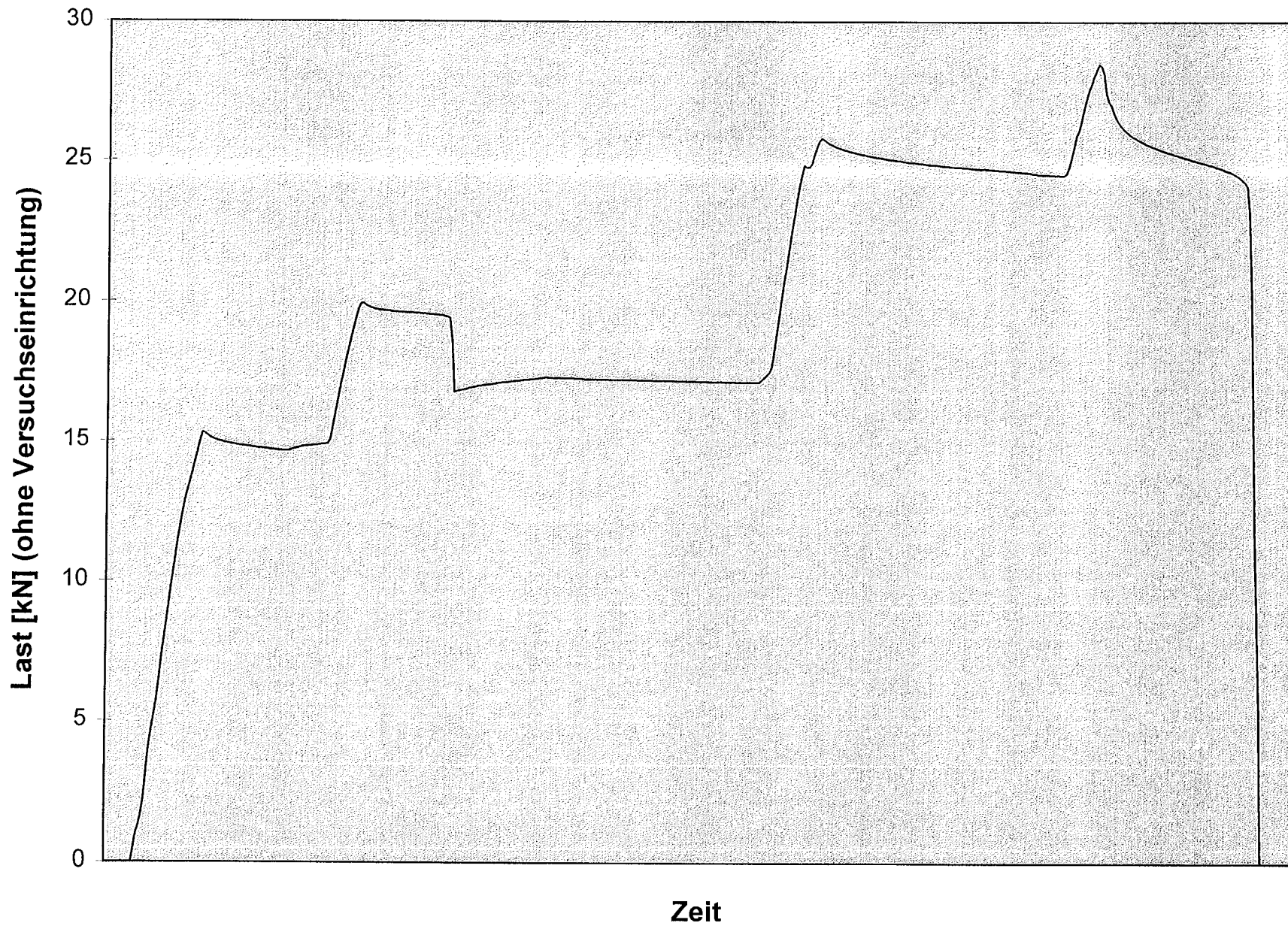


Bild B43a: Last-Zeitkurve Versuch 11/IV ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, Mittelringsteife)

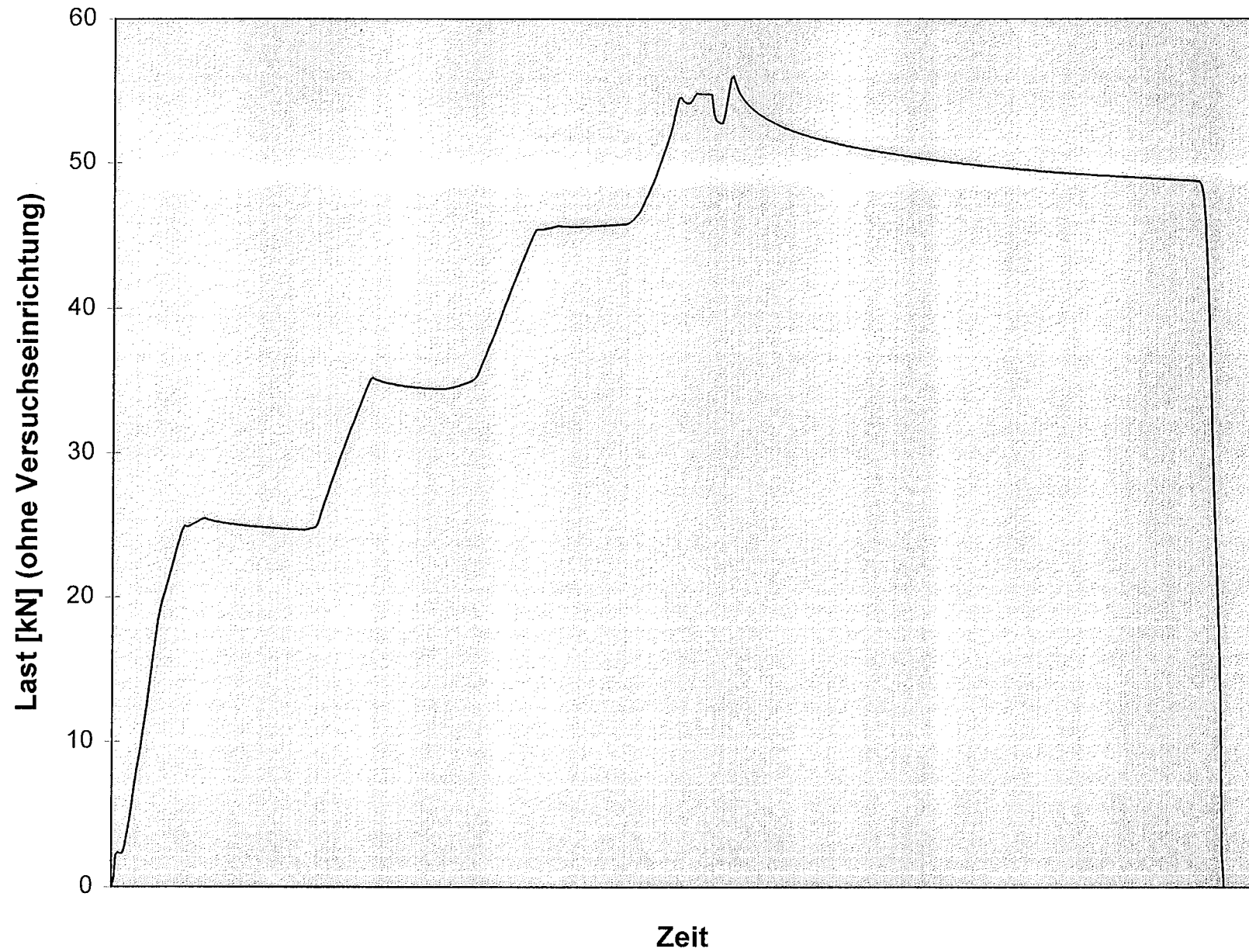
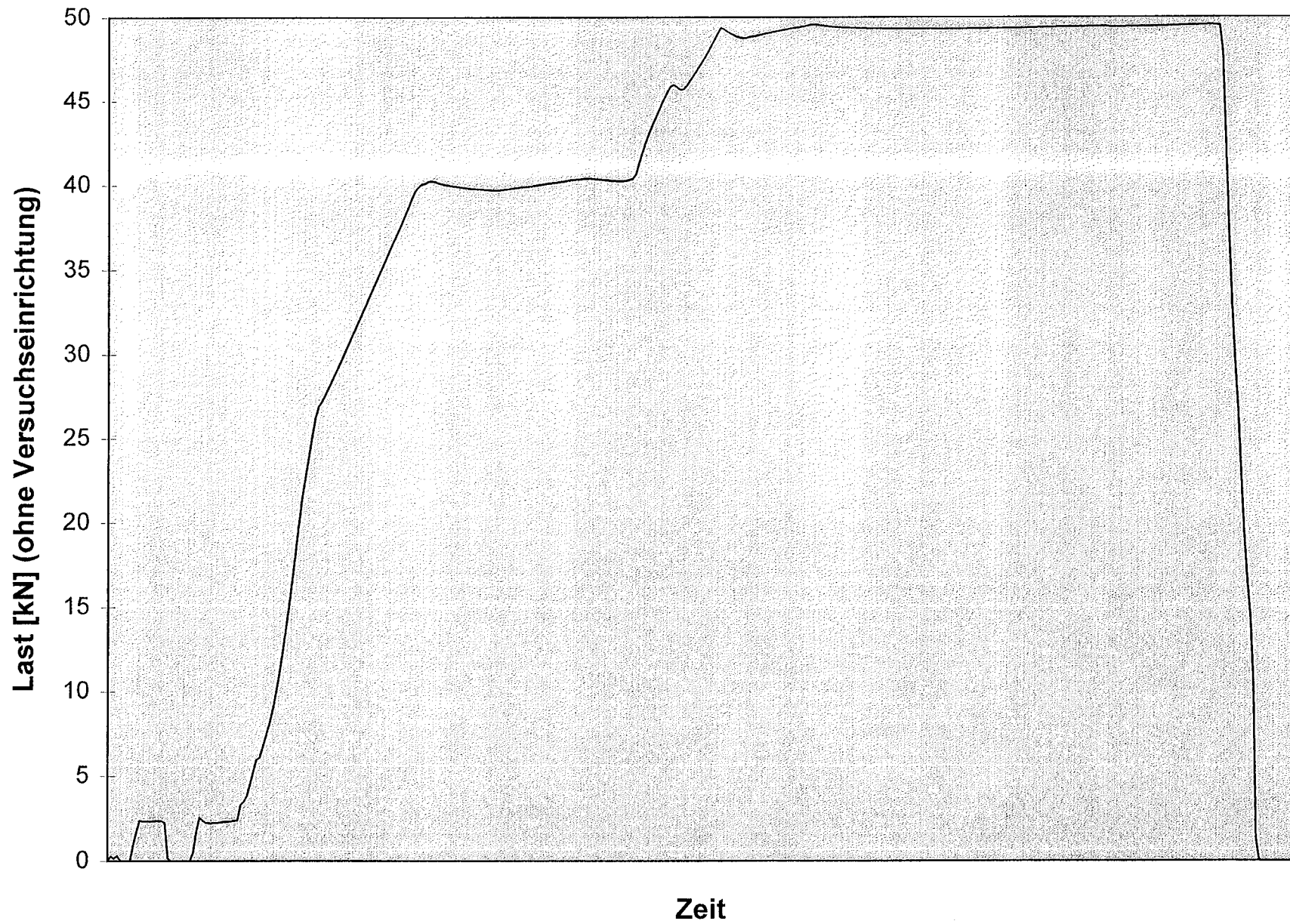


Bild B44a: Last-Zeitkurve Versuch 12/III ($t_{k,m} = 0,932$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, Mittelringsteife)



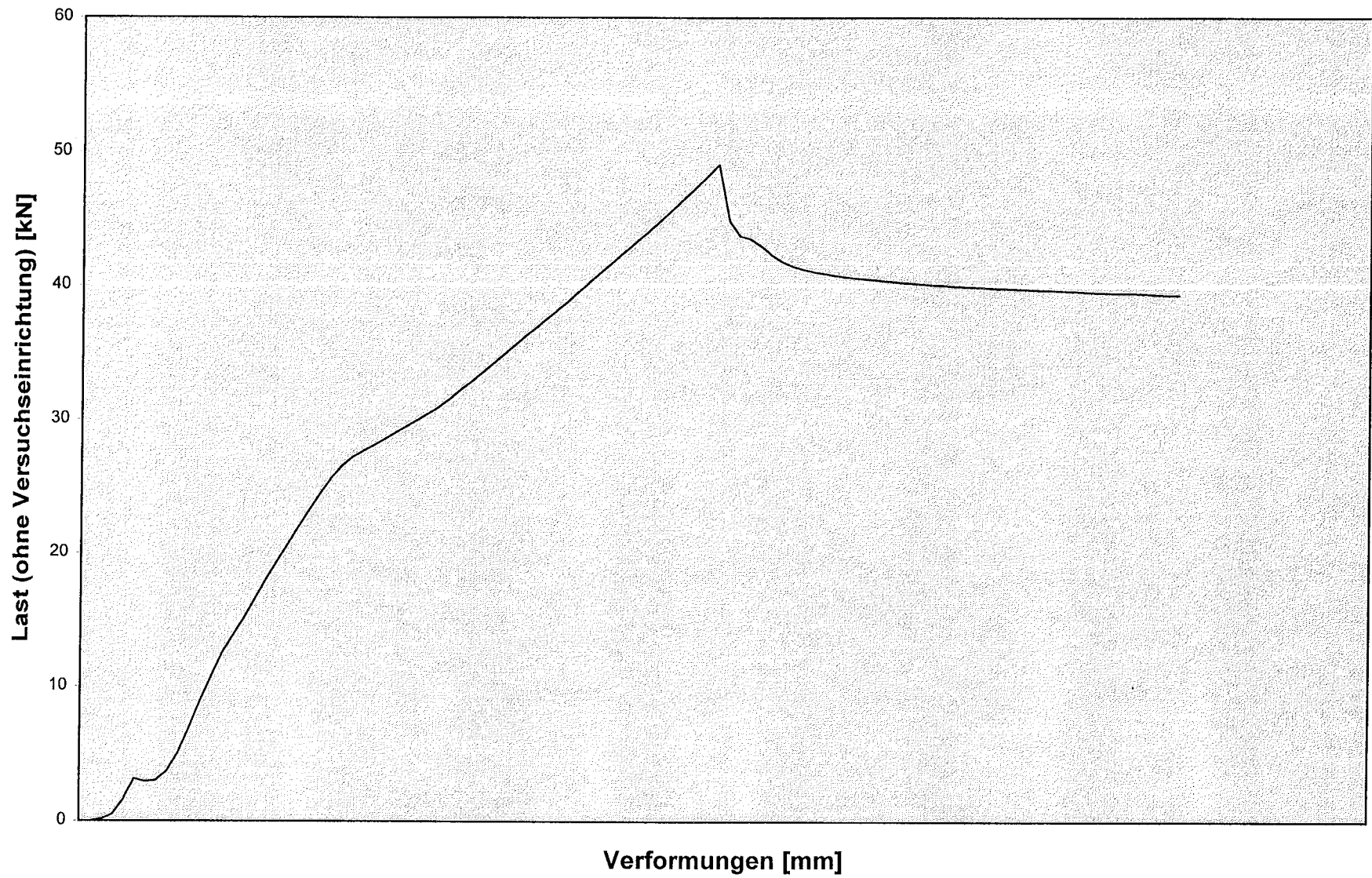


Bild B46a: Last-Zeitkurve Versuch 4/IIa ($t_{K,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

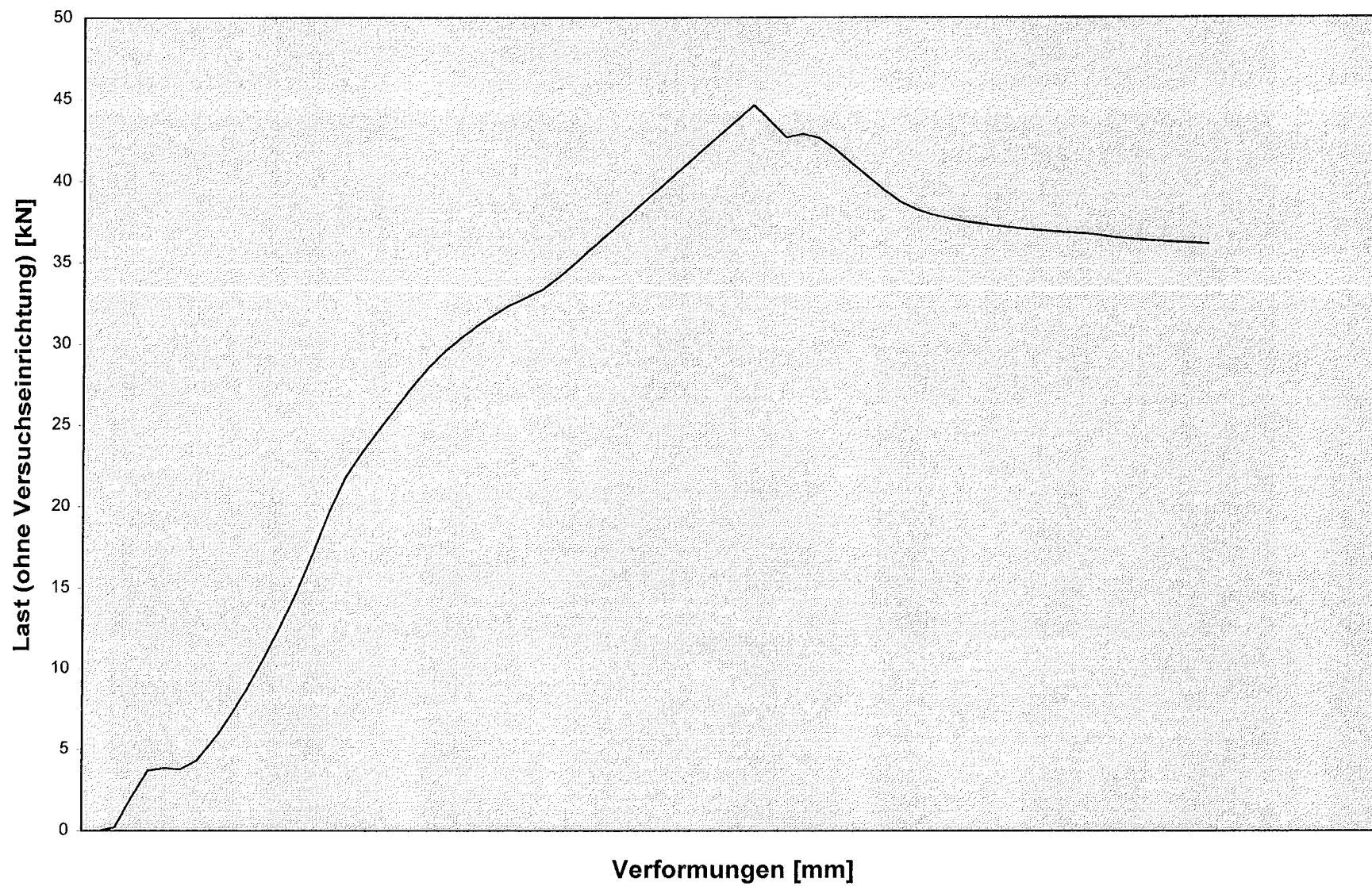


Bild B47a: Last-Zeitkurve Versuch 5/1a ($t_{K,m} = 0,914$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

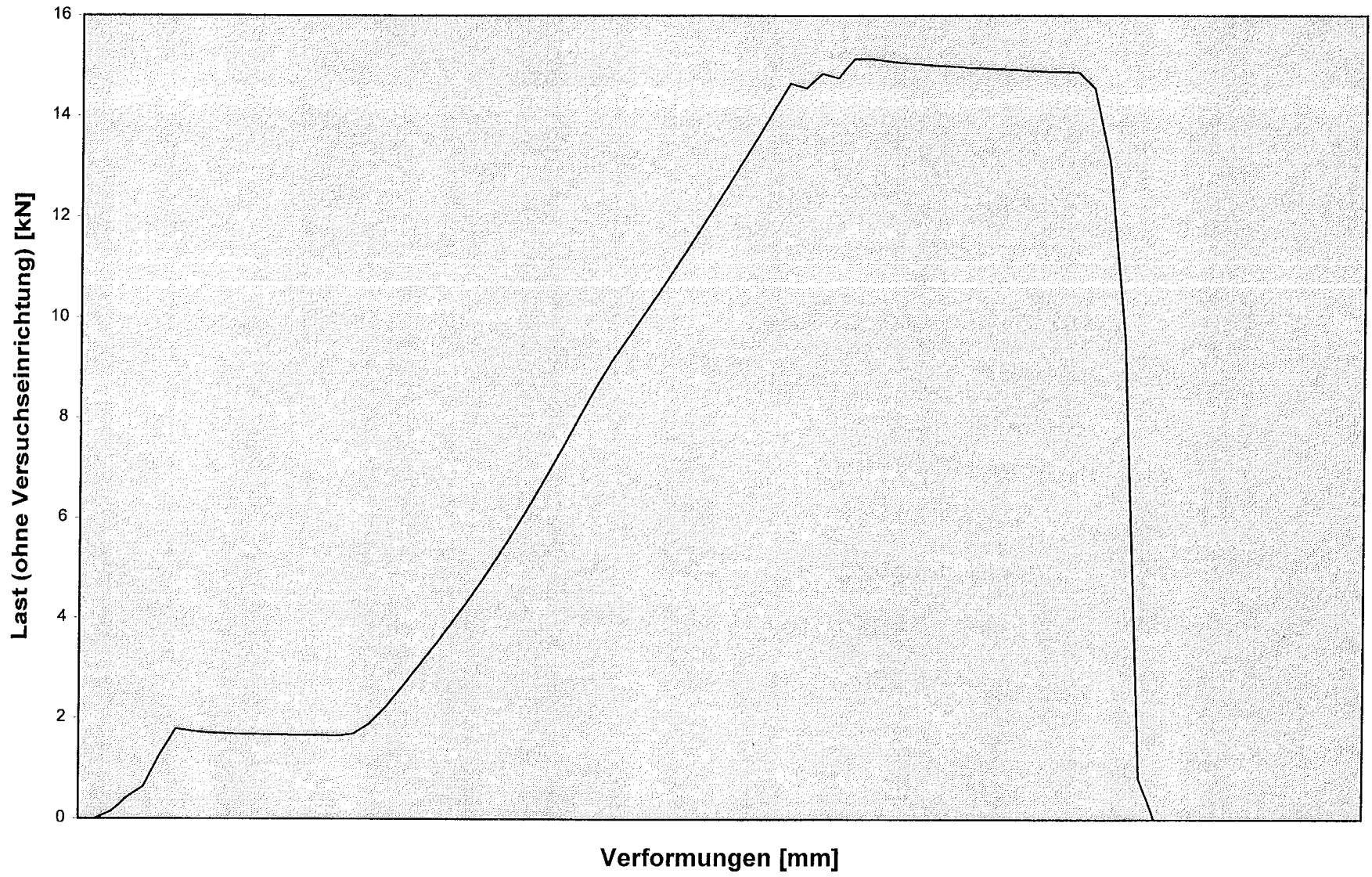


Bild B48a: Last-Zeitkurve Versuch 6/1a ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

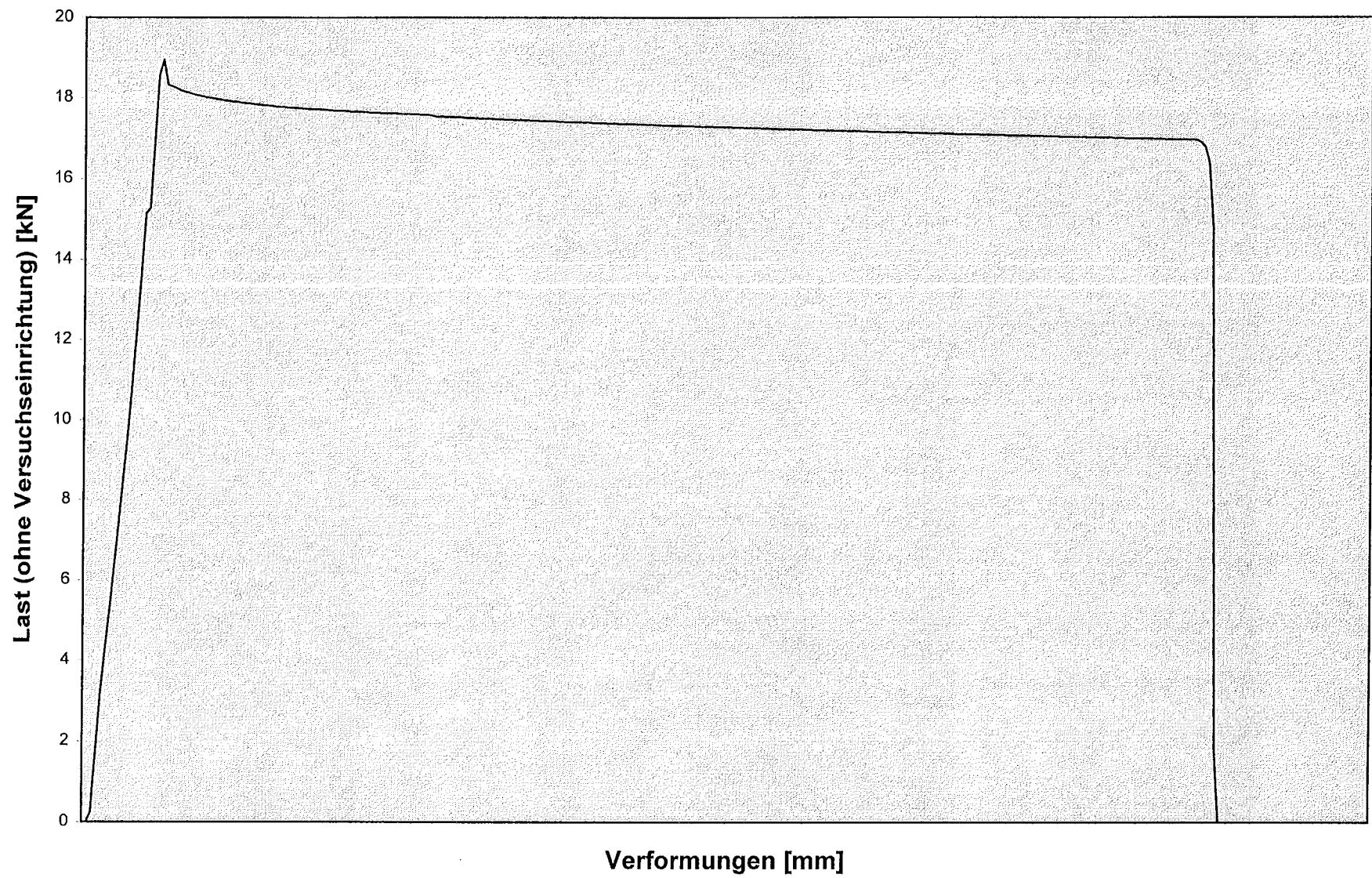


Bild B49a: Last-Zeitkurve Versuch 6/IIa ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

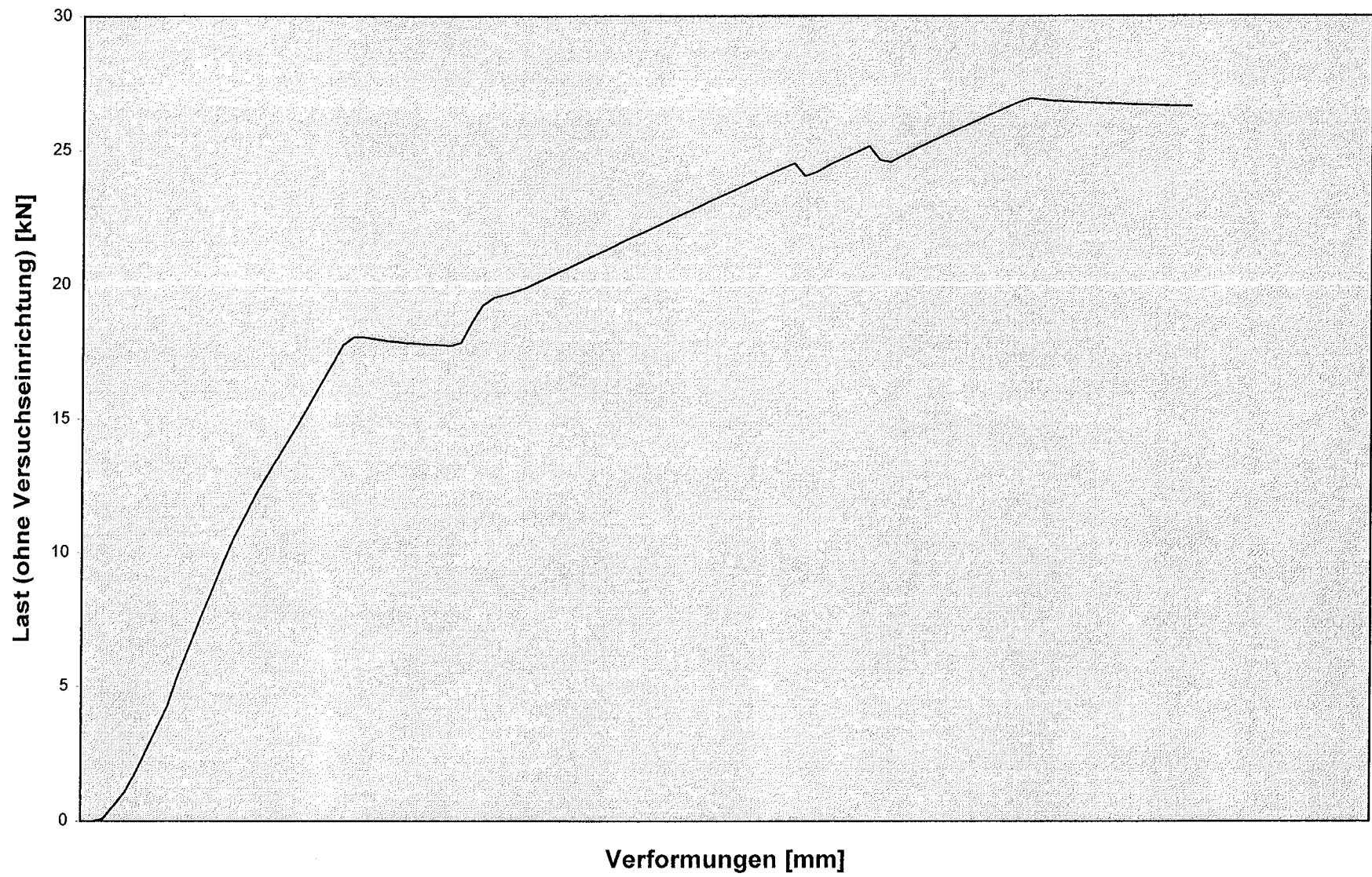
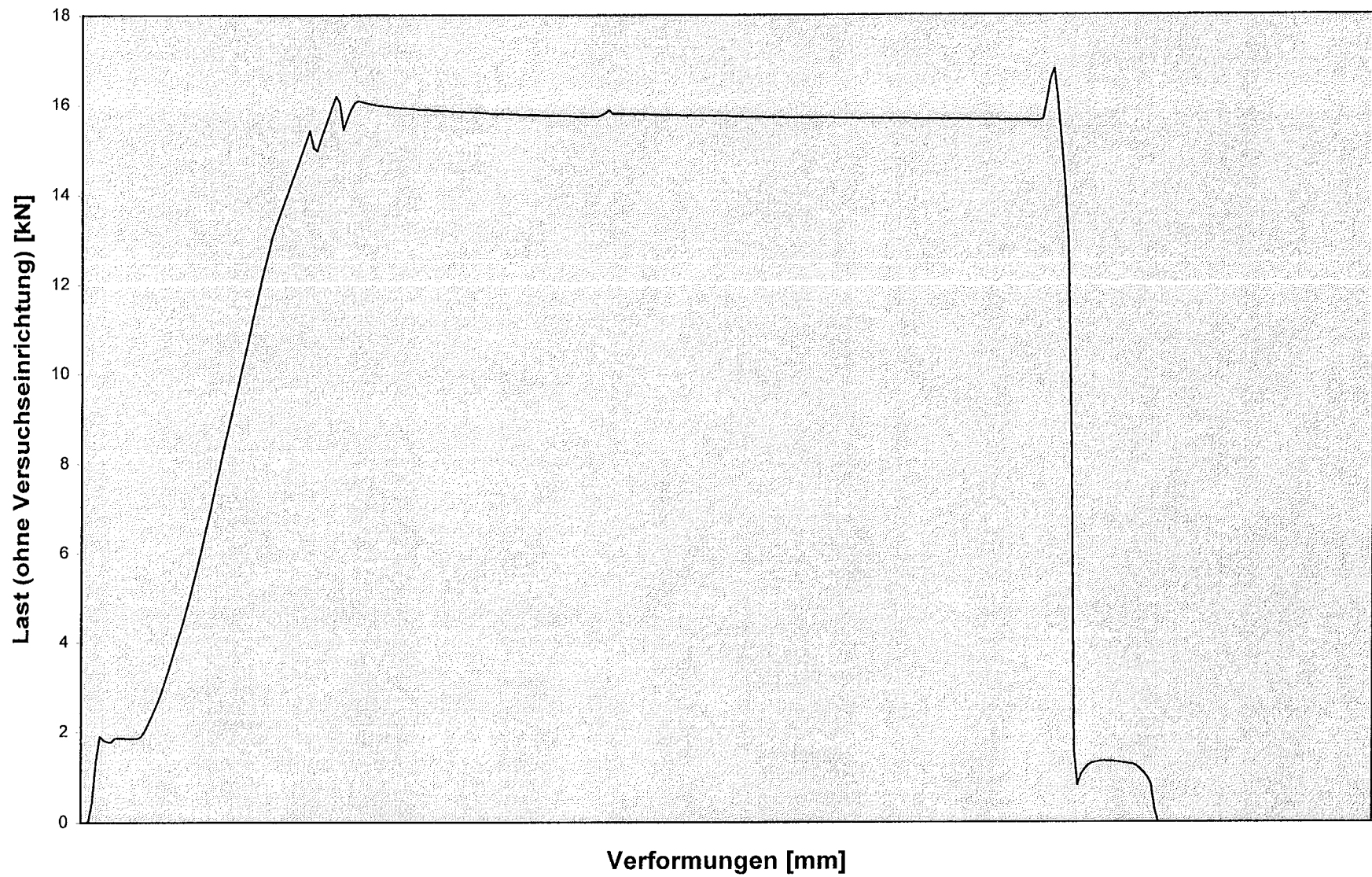


Bild B50a: Last-Zeitkurve Versuch 6/IVa ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 20$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)



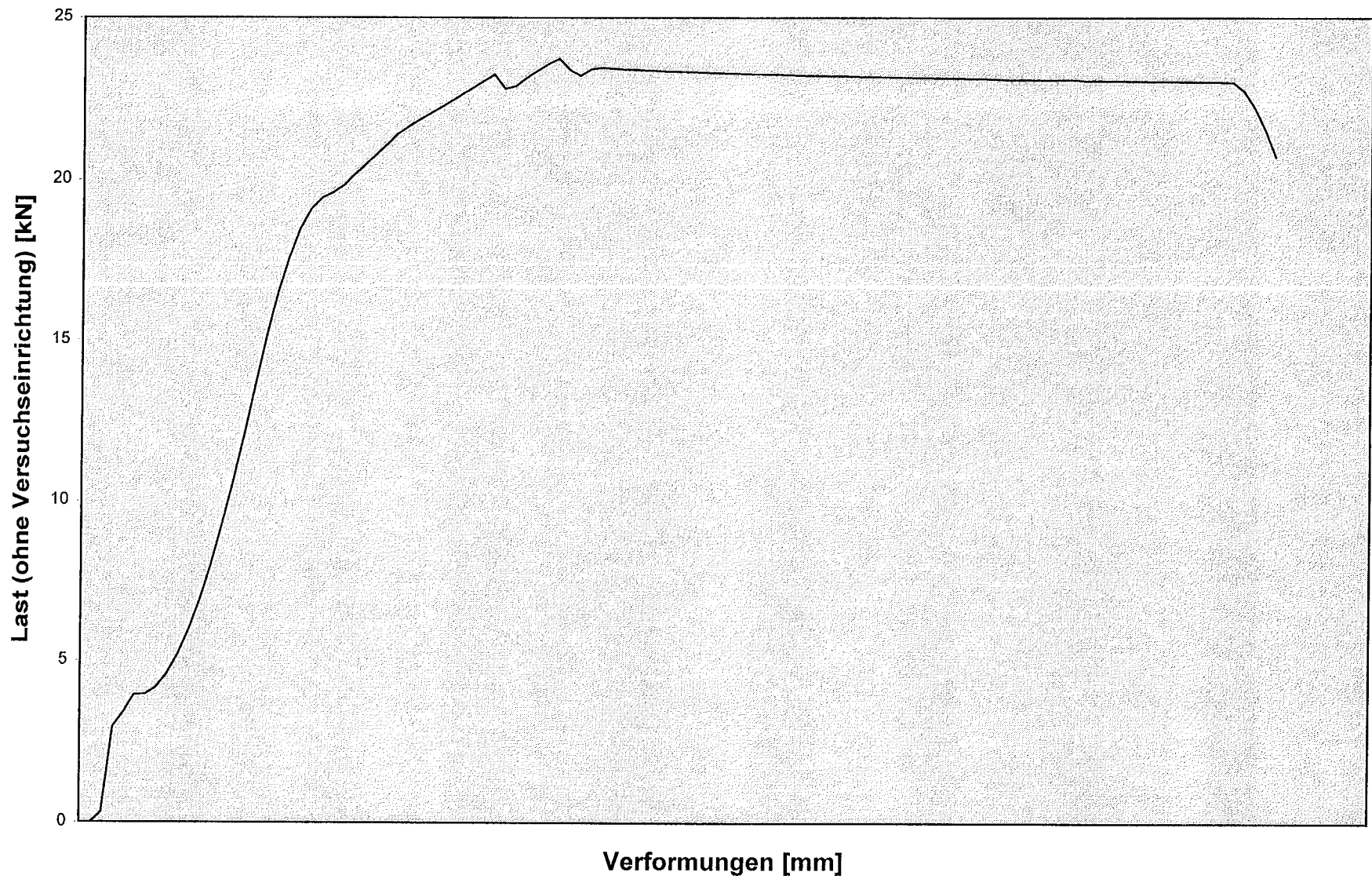


Bild B52a: Last-Zeitkurve Versuch 7/IIIa ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

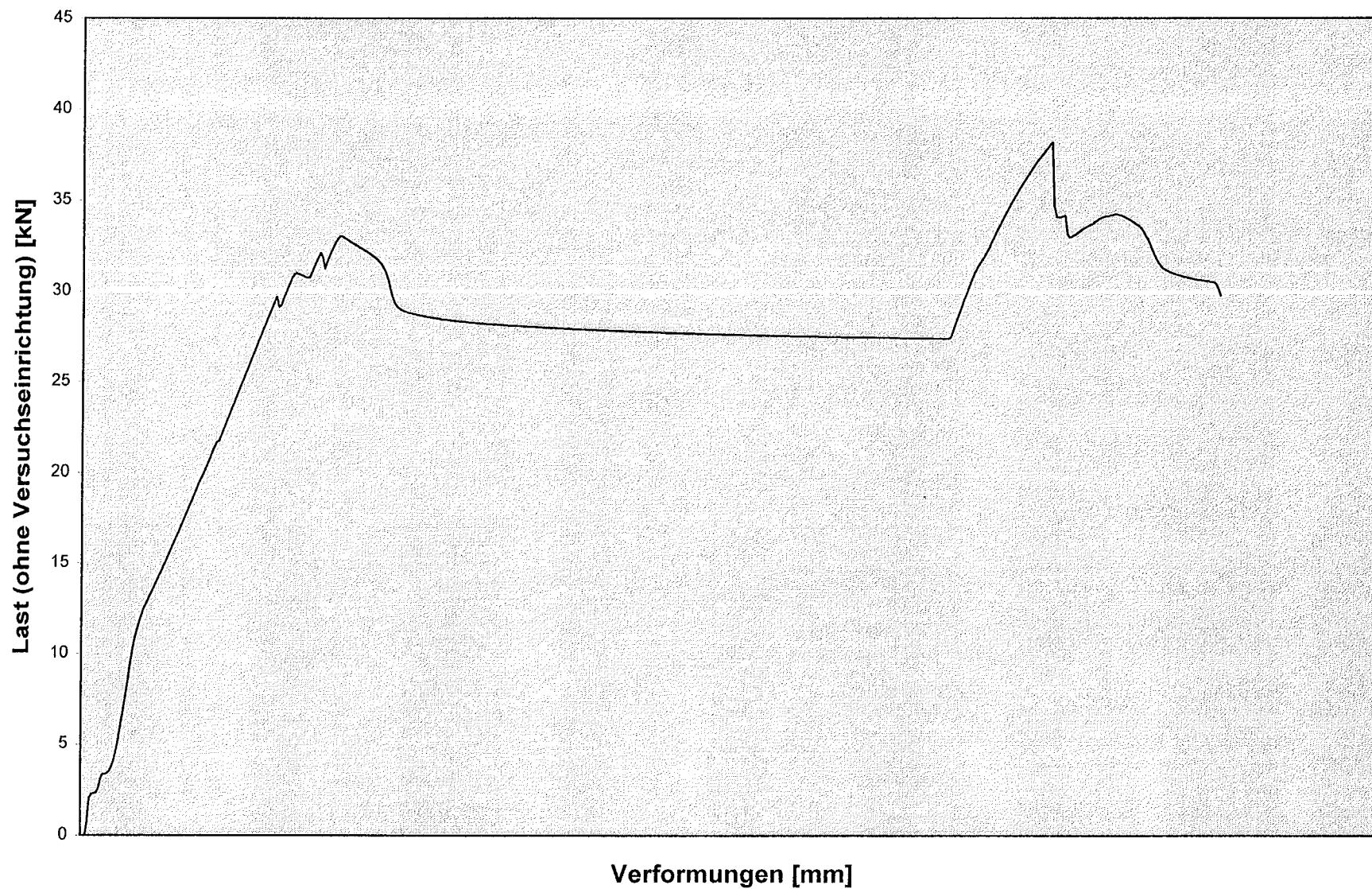


Bild B53a: Last-Zeitkurve Versuch 7/IVa ($t_{K,m} = 0,566$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

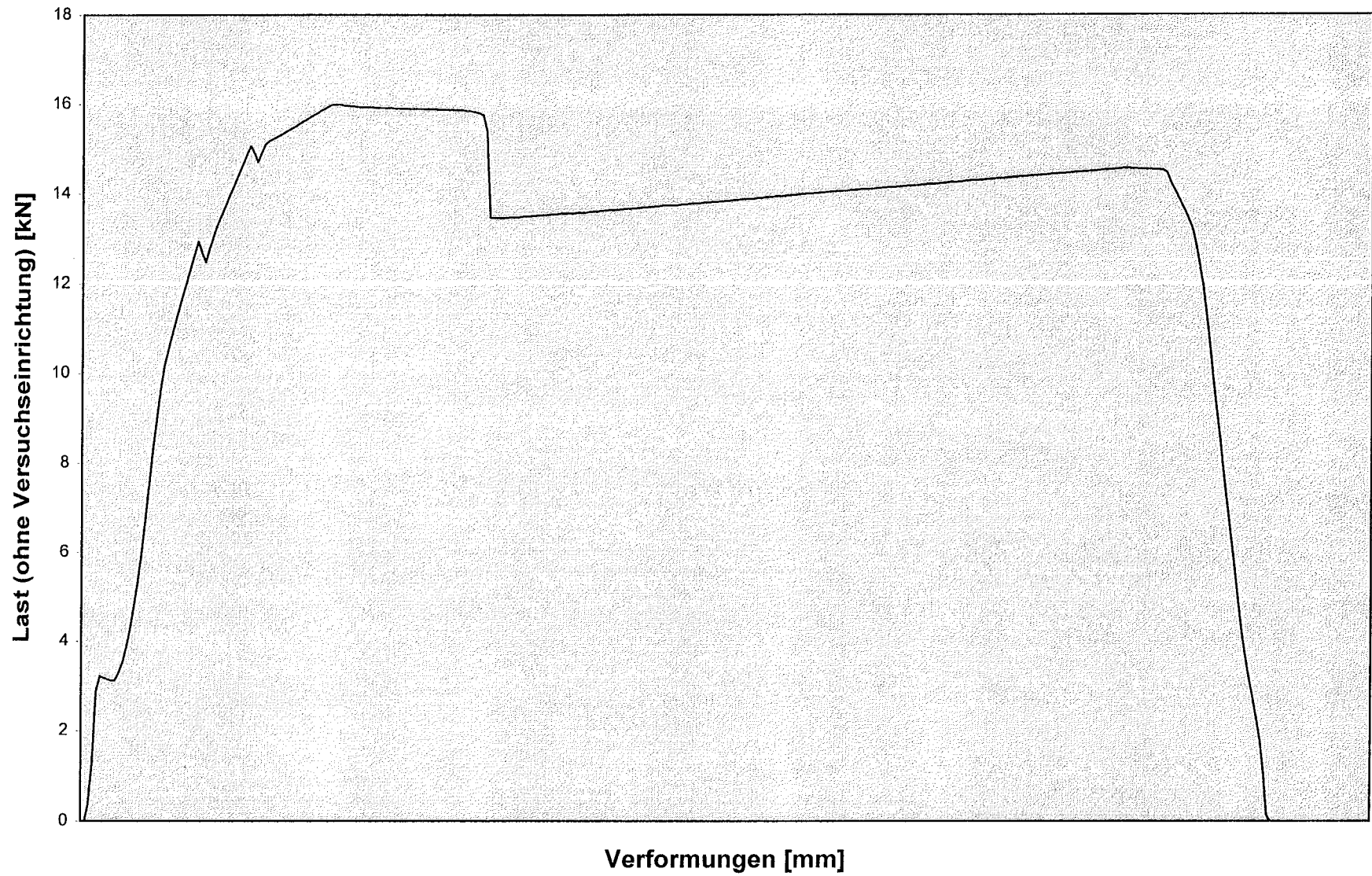


Bild B54a: Last-Zeitkurve Versuch 8/1a ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

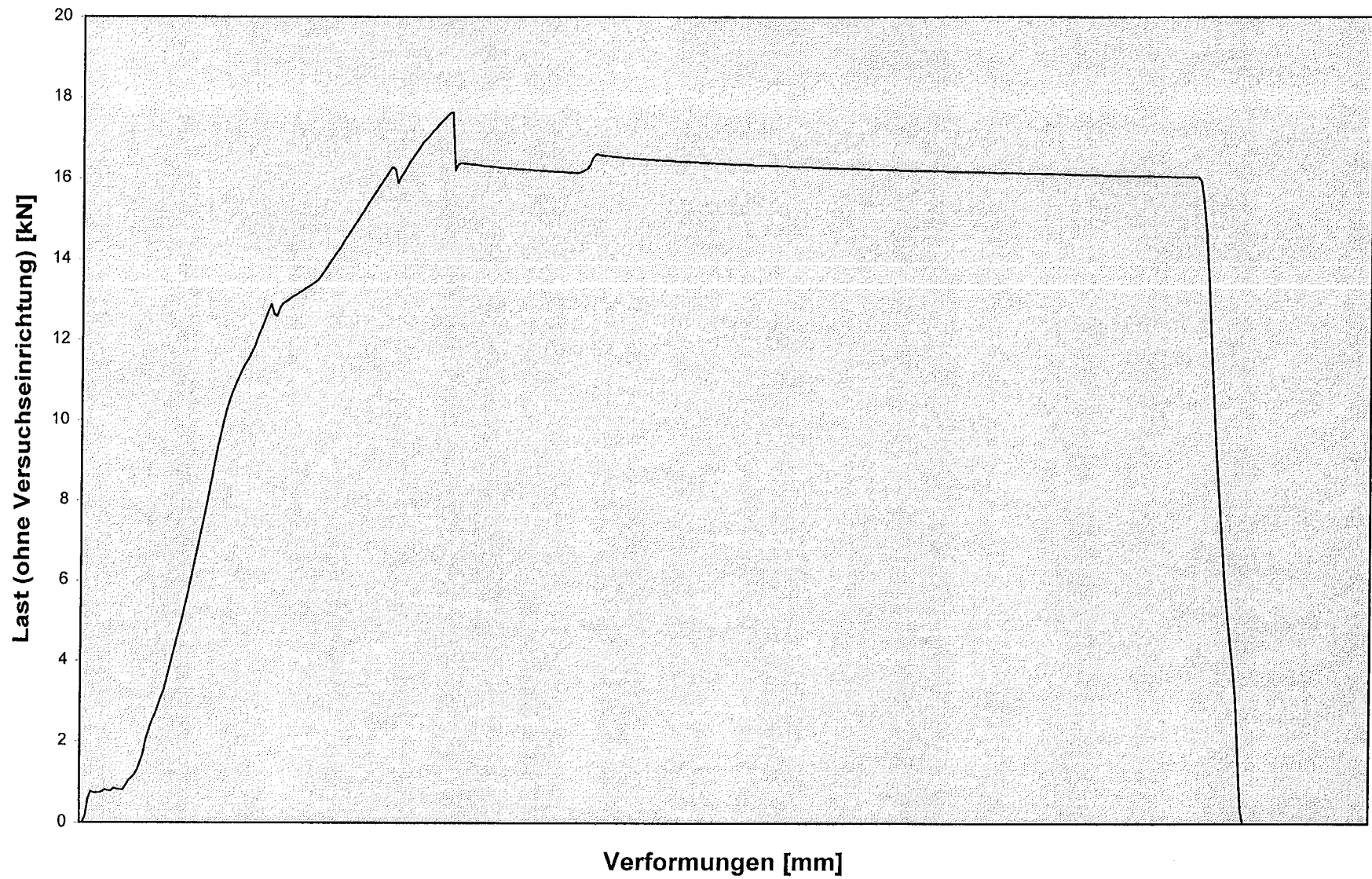


Bild B55a: Last-Zeitkurve Versuch 8/IIa ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

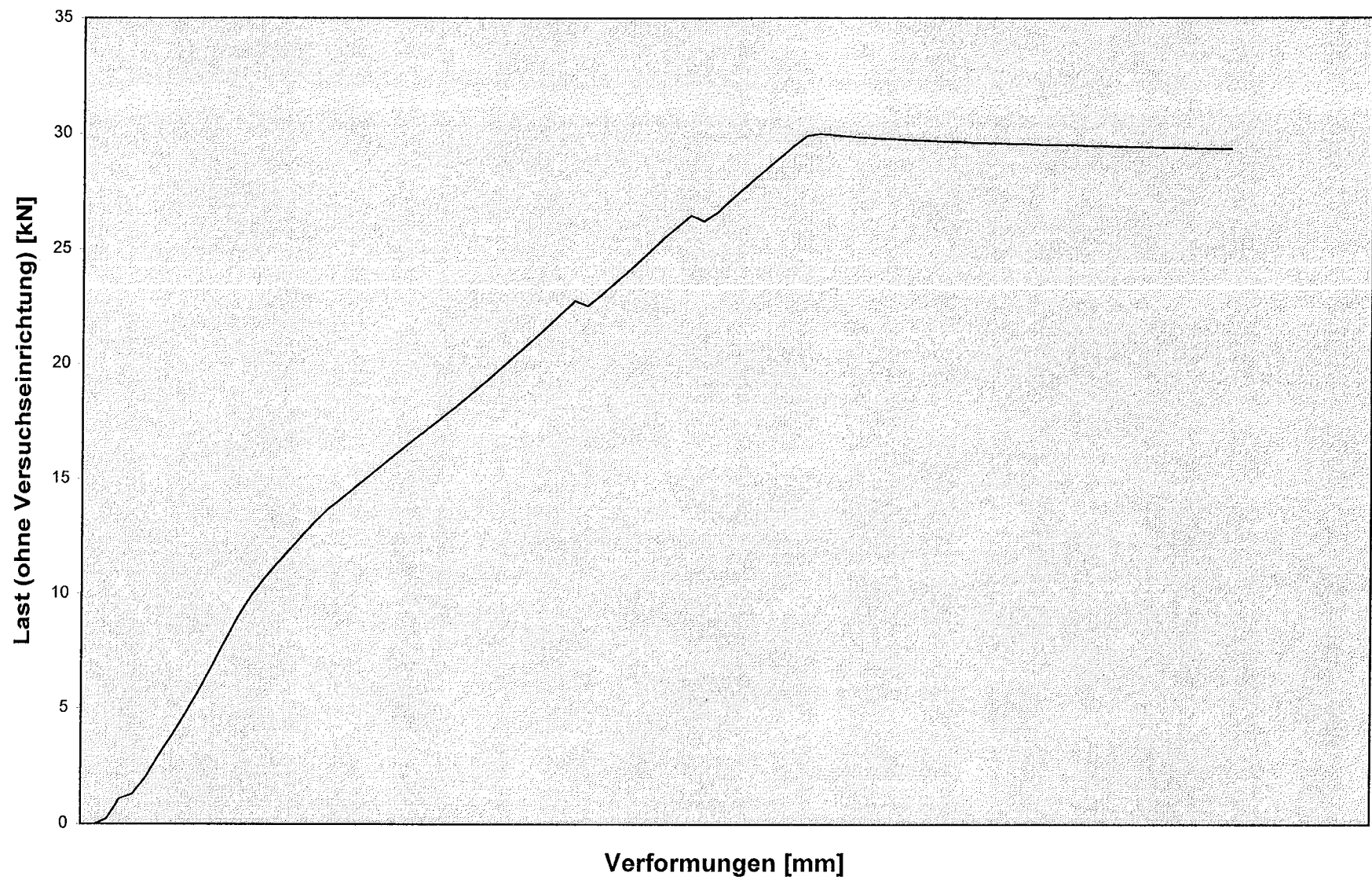


Bild B56a: Last-Zeitkurve Versuch 8/IIIa ($t_{K,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

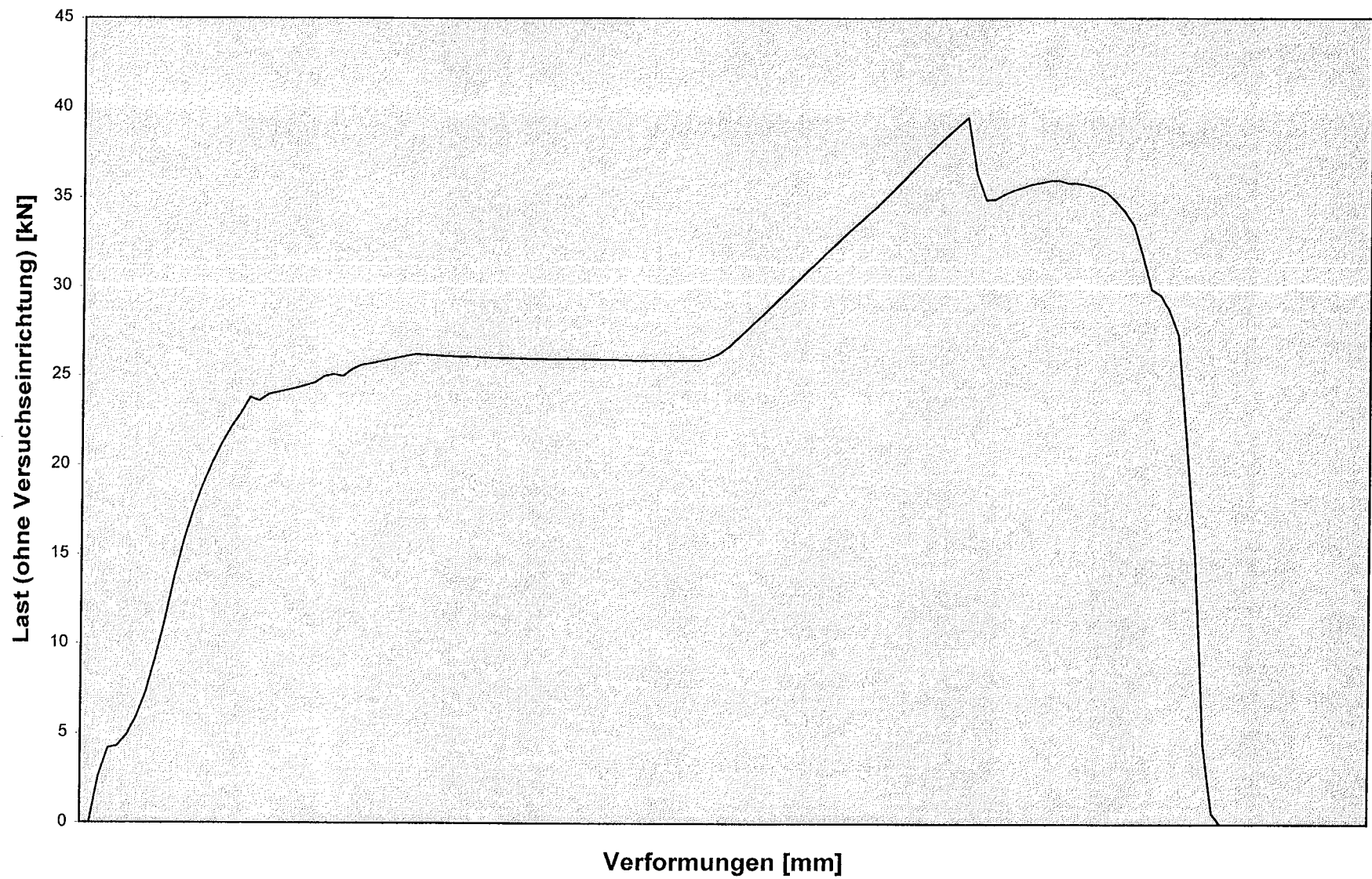


Bild B57a: Last-Zeitkurve Versuch 8/IVa ($t_{k,m} = 0,570$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

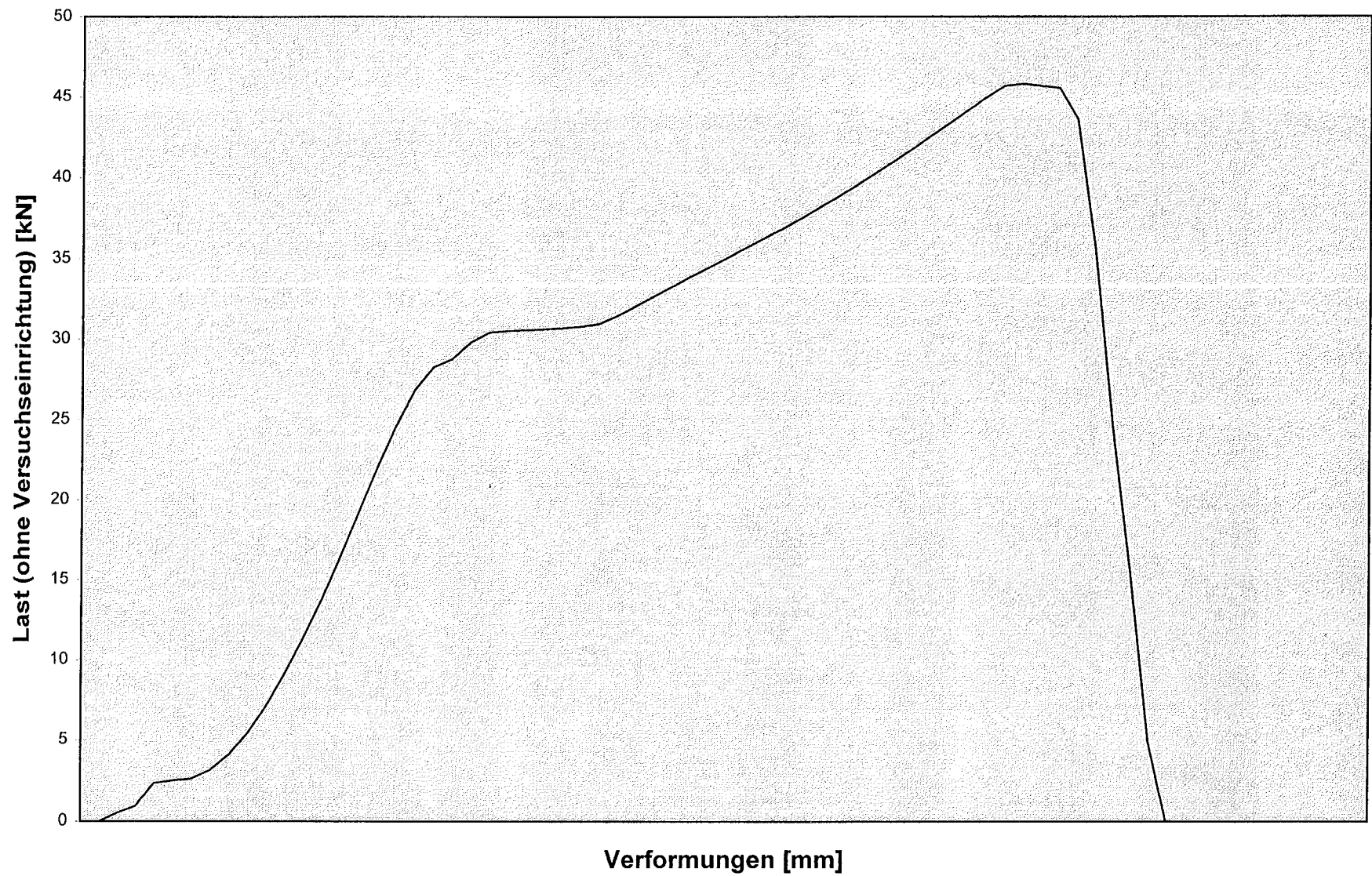


Bild B58a: Last-Zeitkurve Versuch 9/IIIa ($t_{K,m} = 0,926$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

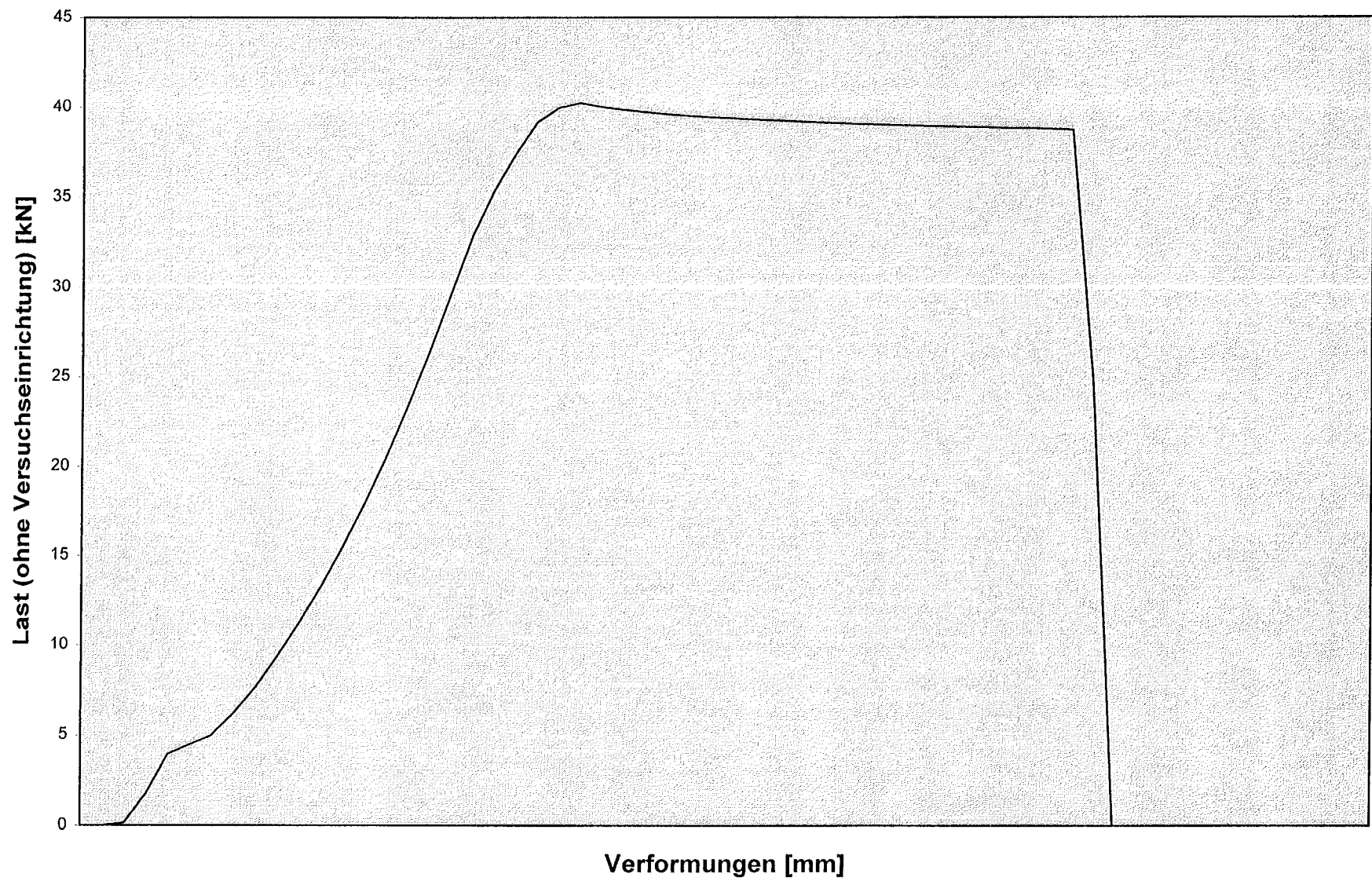


Bild B59a: Last-Zeitkurve Versuch 10/IIIa ($t_{k,m} = 0,921$ mm; $b = 40$ mm; ■-Profil, wiederbelastet)

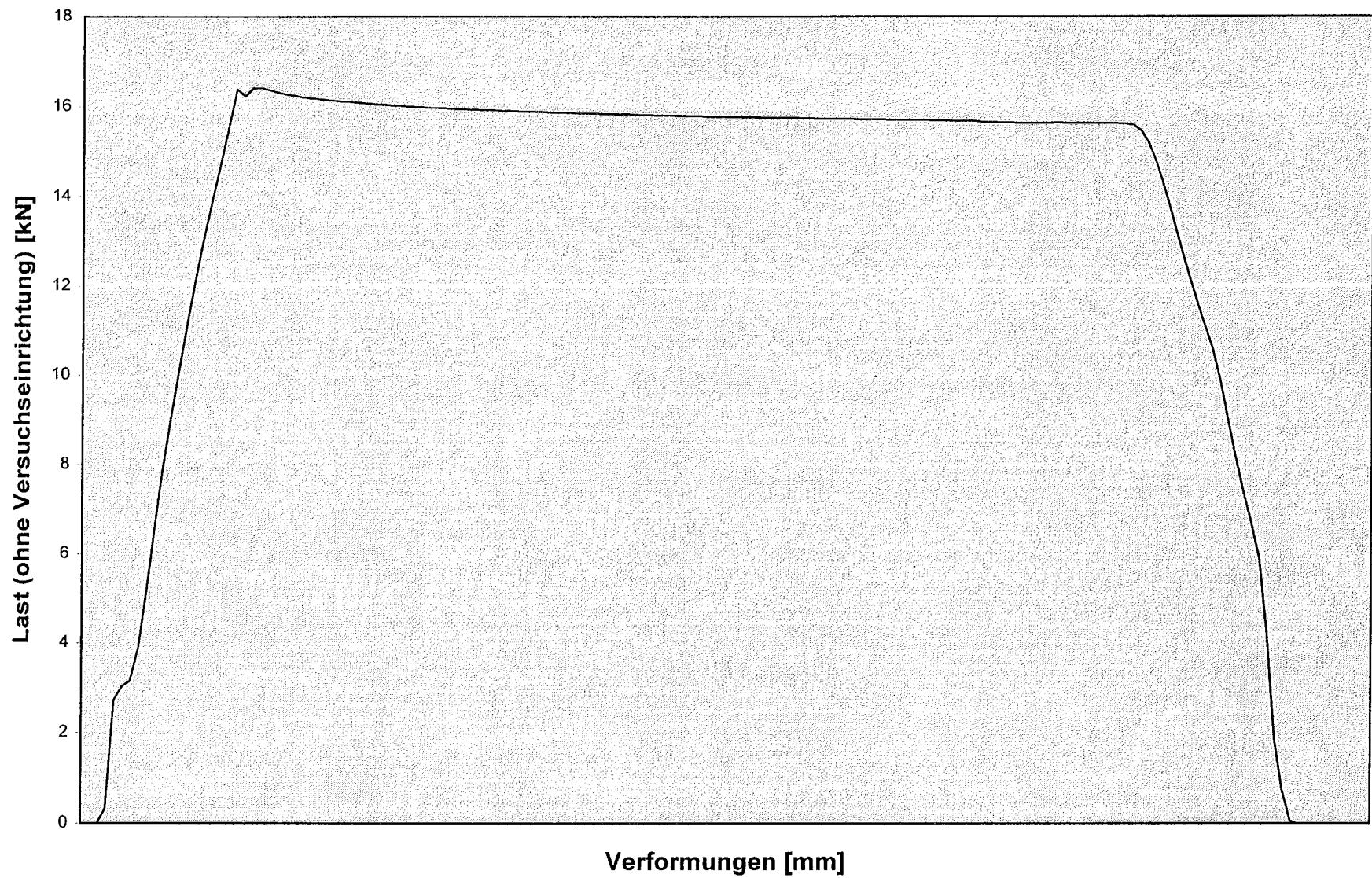


Bild B60a: Last-Zeitkurve Versuch 11/1a ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

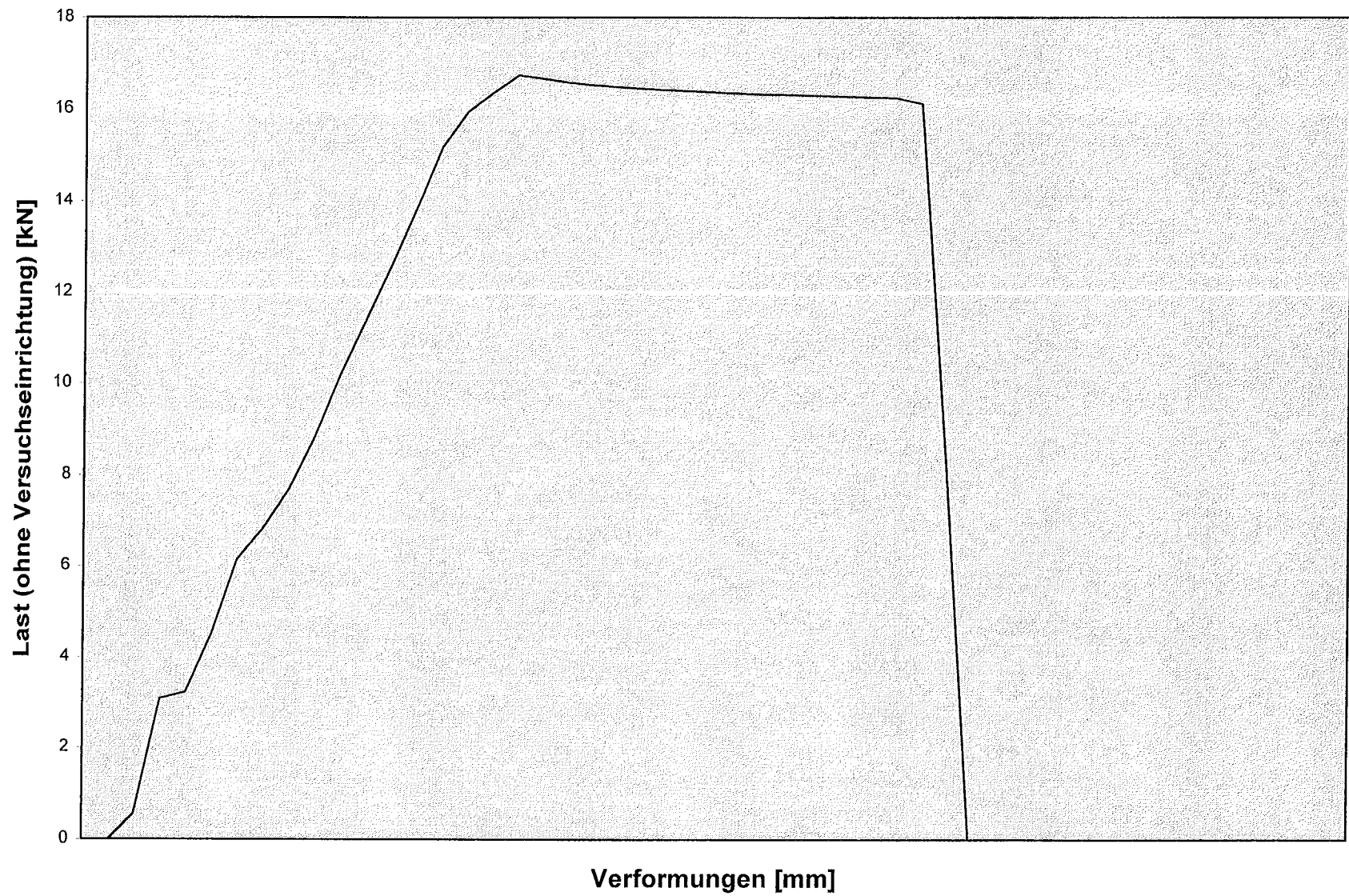


Bild B61a: Last-Zeitkurve Versuch 11/lb ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

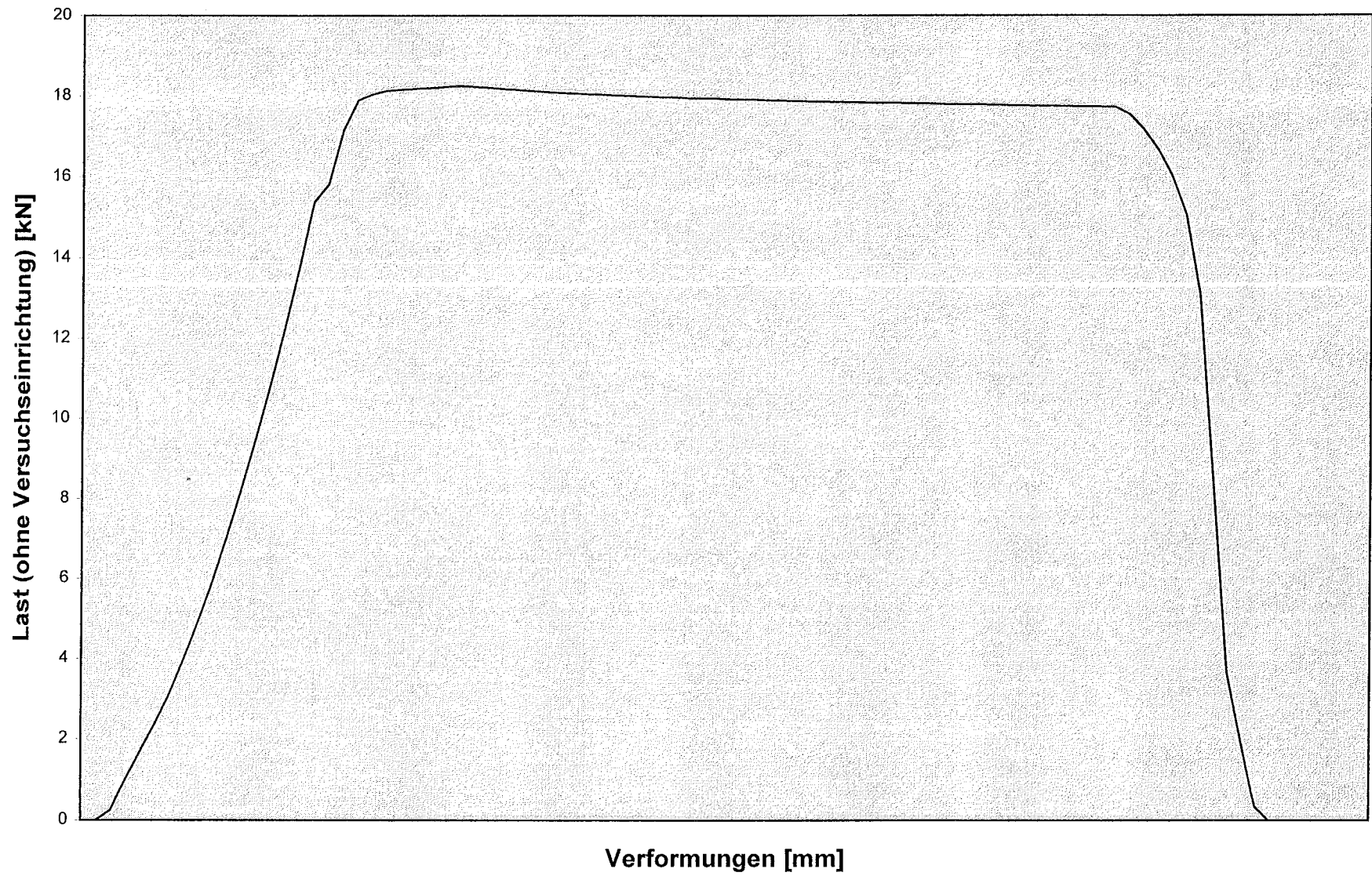


Bild B62a: Last-Zeitkurve Versuch 11/IIa ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

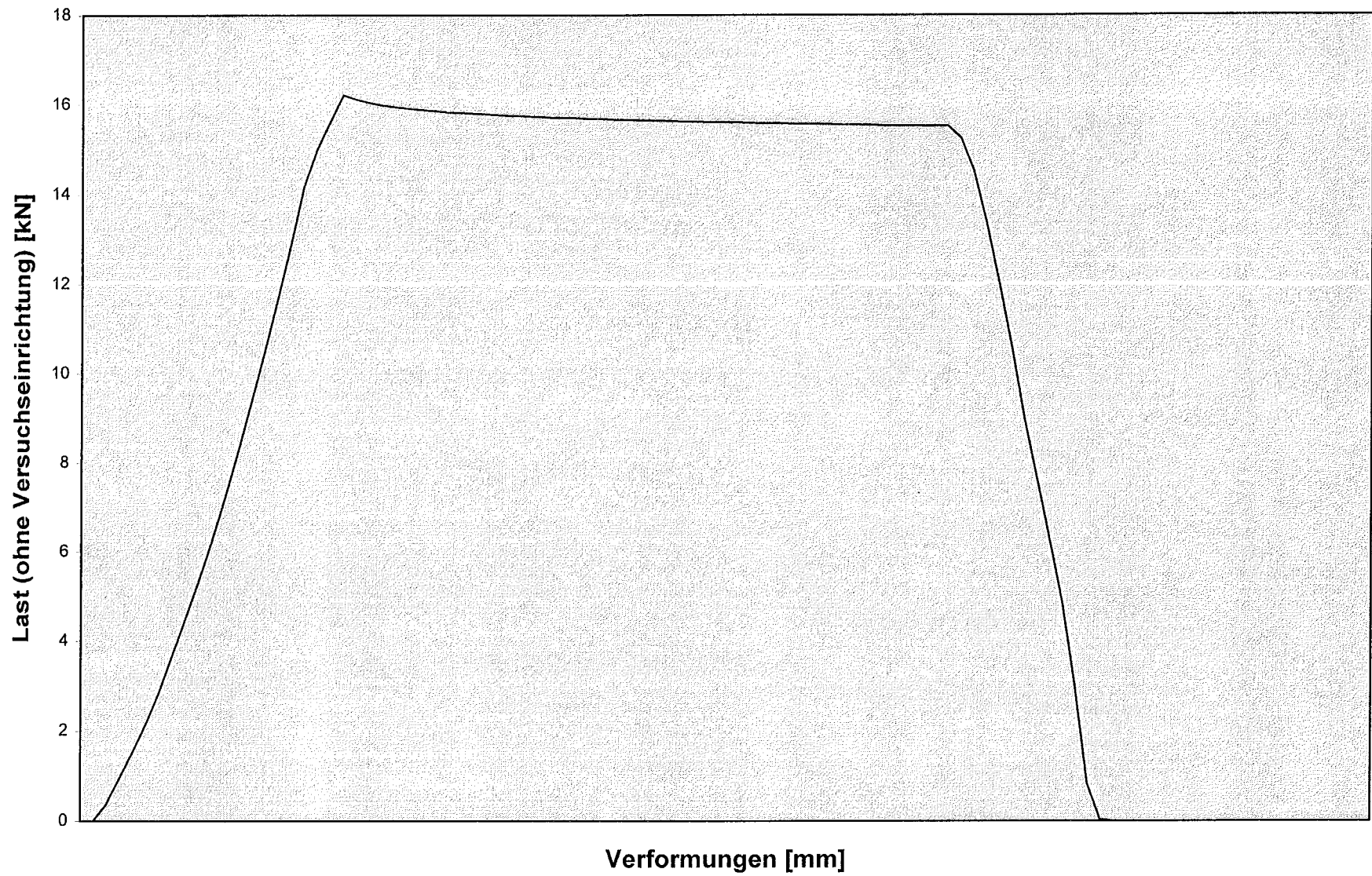


Bild B63a: Last-Zeitkurve Versuch 11/IIb ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

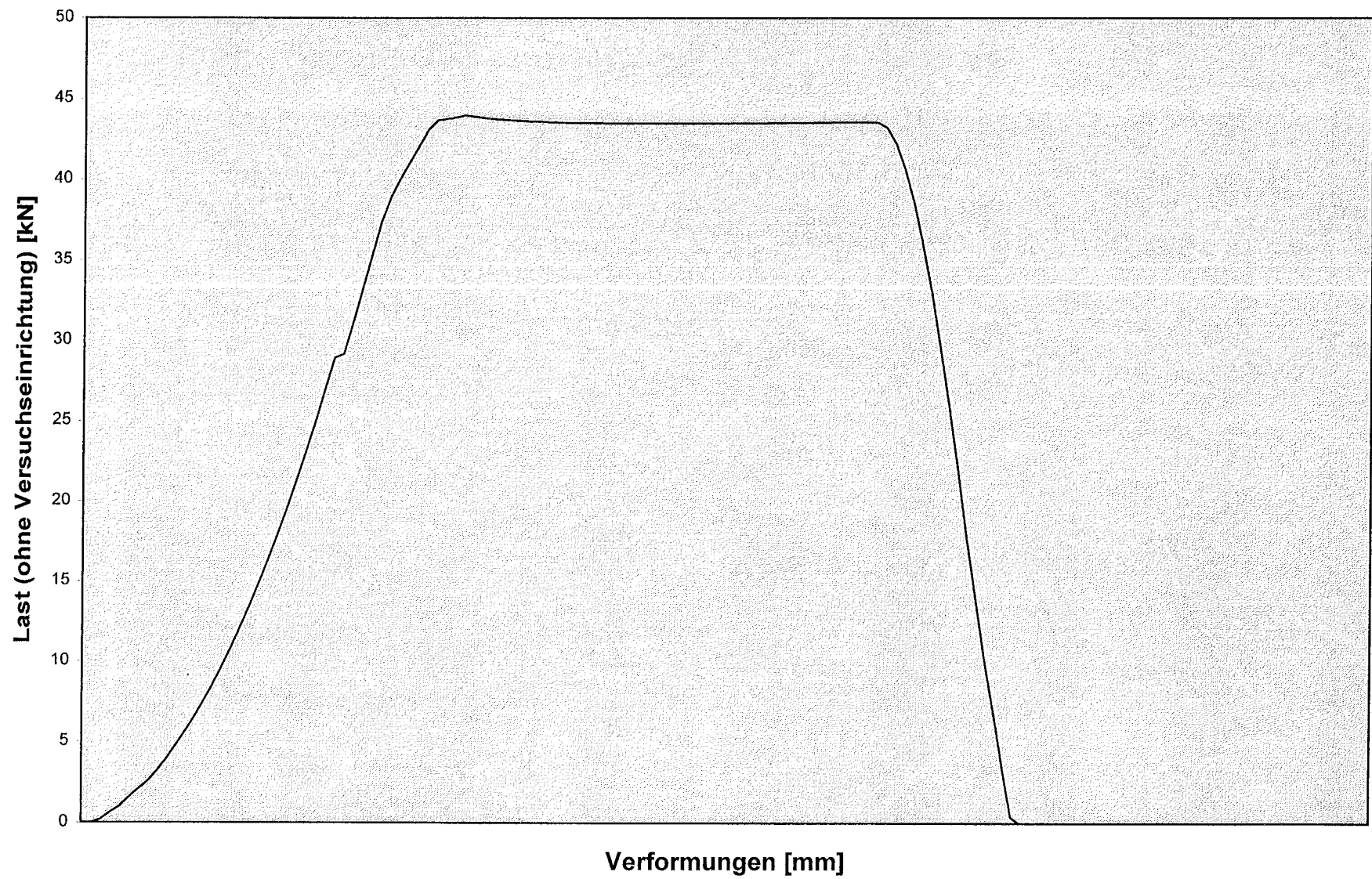


Bild B64a: Last-Zeitkurve Versuch 12/IIa ($t_{K,m} = 0,932$ mm; $b = 20$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

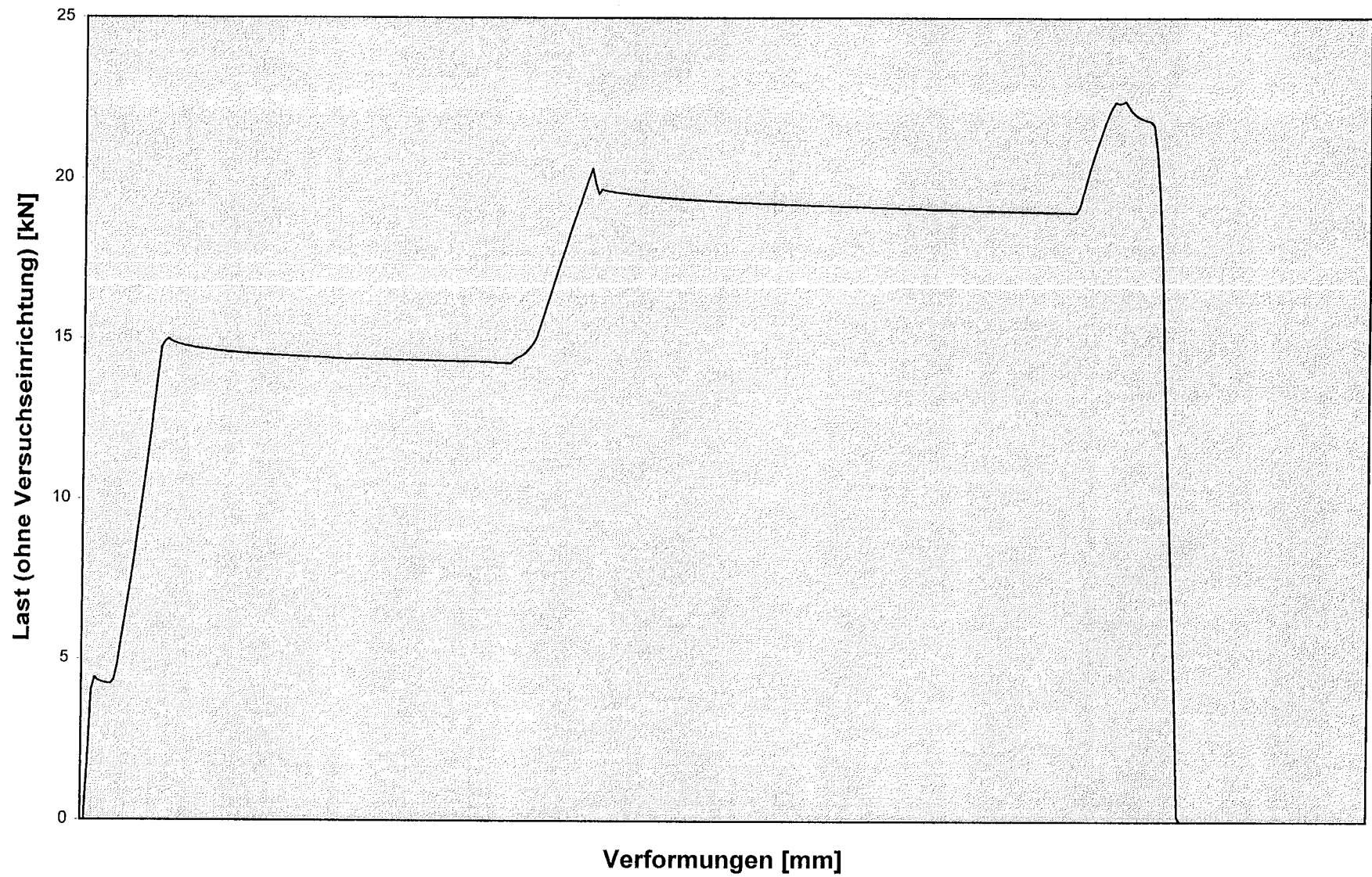


Bild B65a: Last-Zeitkurve Versuch 13/1a ($t_{k,m} = 0,568$ mm; $b = 40$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

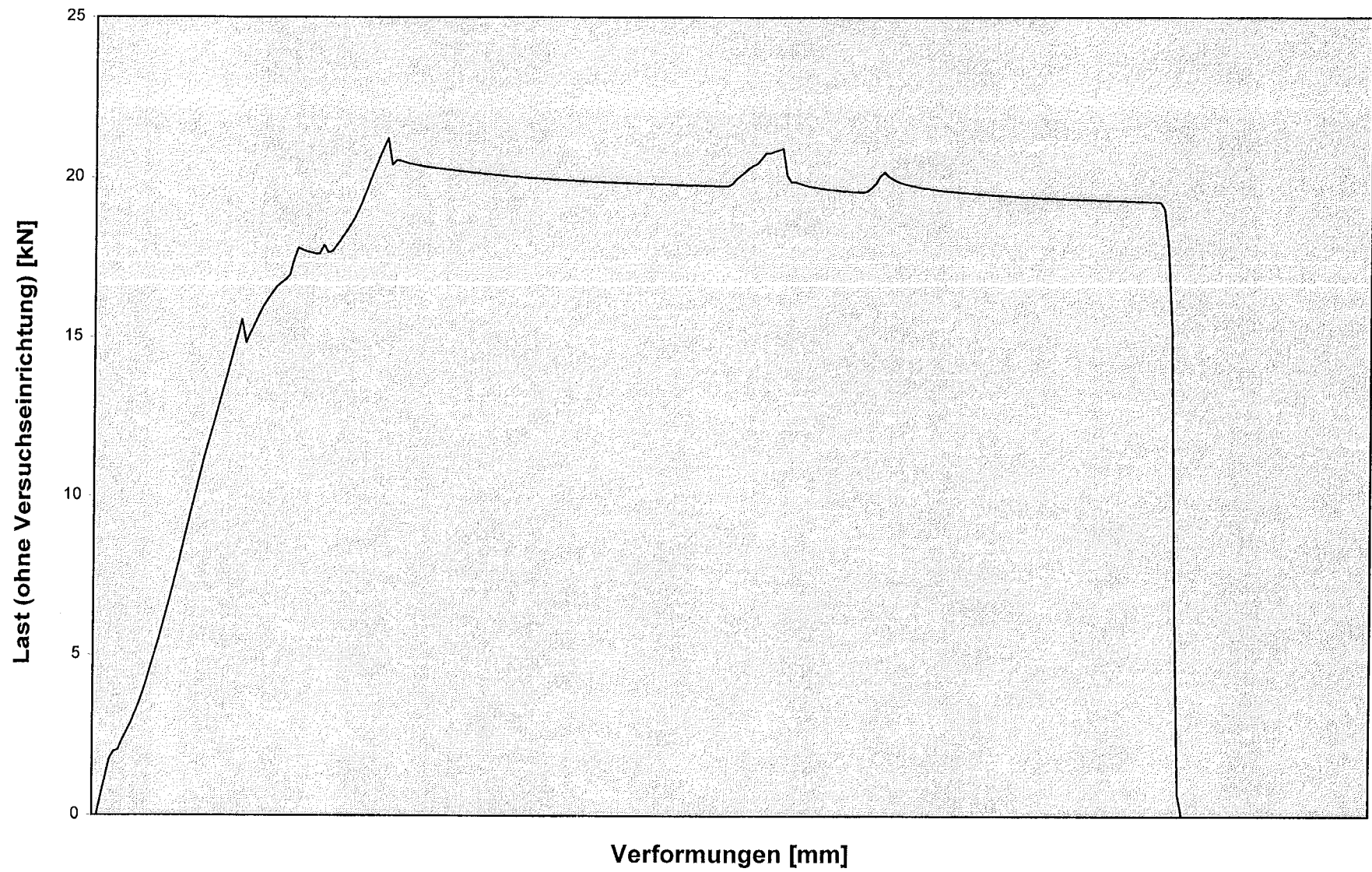


Bild B66a: Last-Zeitkurve Versuch 13/IIa ($t_{K,m} = 0,568$ mm; $b = 80$ mm; L-Profil, wiederbelastet)

Anhang C

Ergebnisse der numerischen Spannungsanalyse

**Bild C1 – C8 Zylinder ohne Endringsteife
(starre Lagerung)**

**Bild C9 – C16 Zylinder mit Endringsteife (L-Profil)
(starre Lagerung)**

**Bild C17 – C24 Zylinder mit Endringsteife (■-Profil)
(starre Lagerung)**

**Bild C25 – C32 Zylinder ohne Endringsteife
(schlaffe Lagerung)**

**Bild C33 – C40 Zylinder mit Endringsteife (L-Profil)
(schlaffe Lagerung)**

**Bild C41 – C48 Zylinder mit Endringsteife (■-Profil)
(schlaffe Lagerung)**

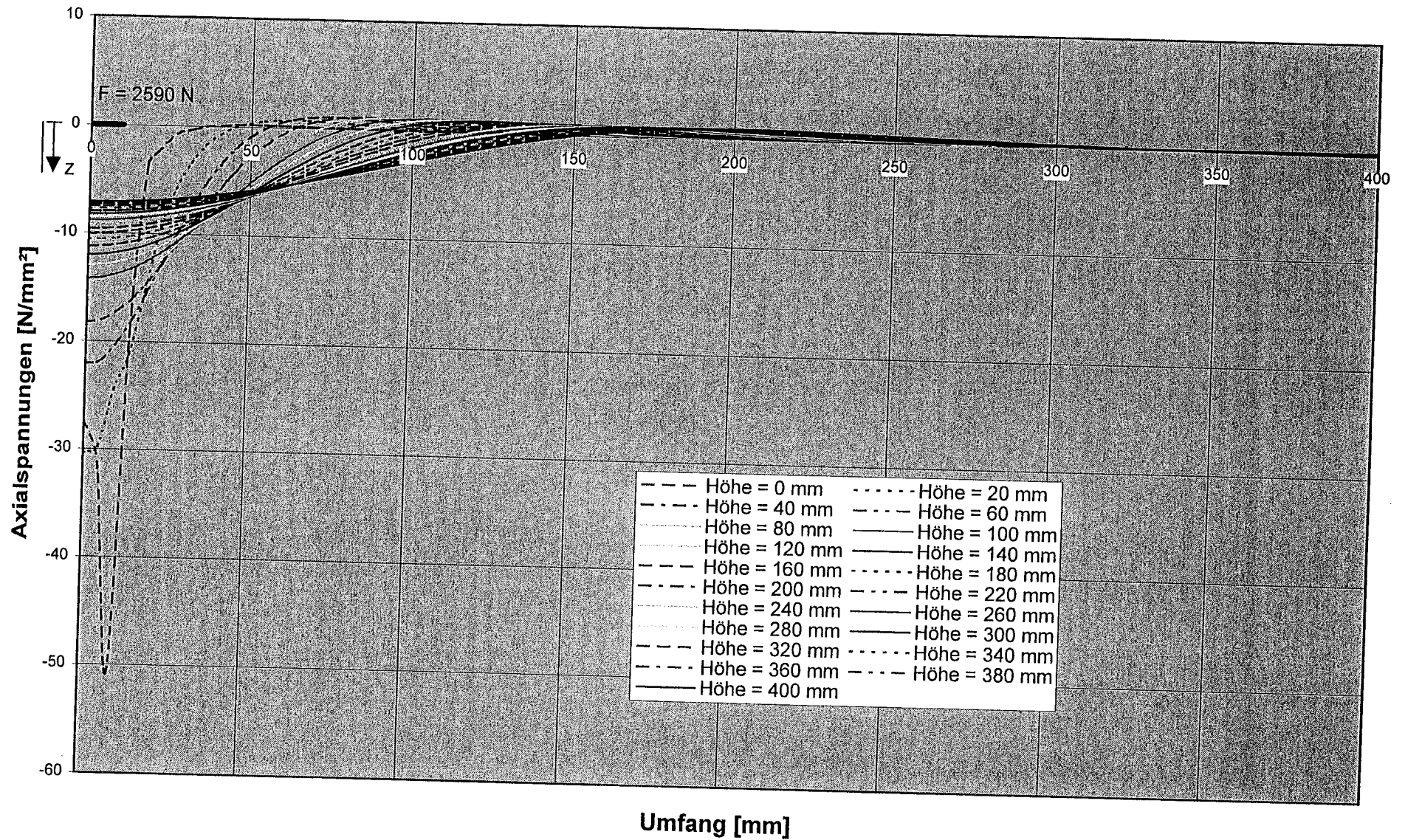


Bild C1: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ohne Endring; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

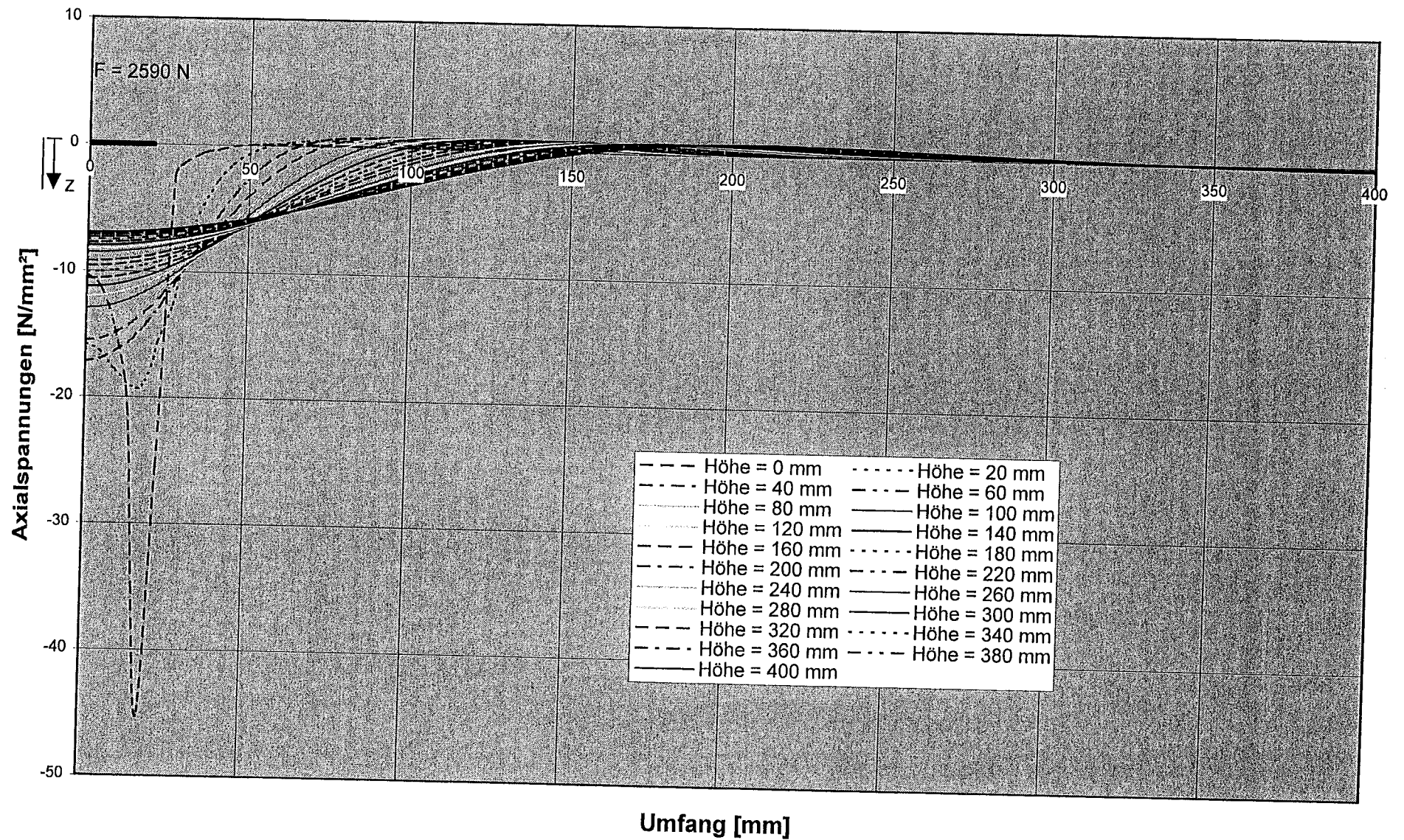


Bild C2: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ohne Endring; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

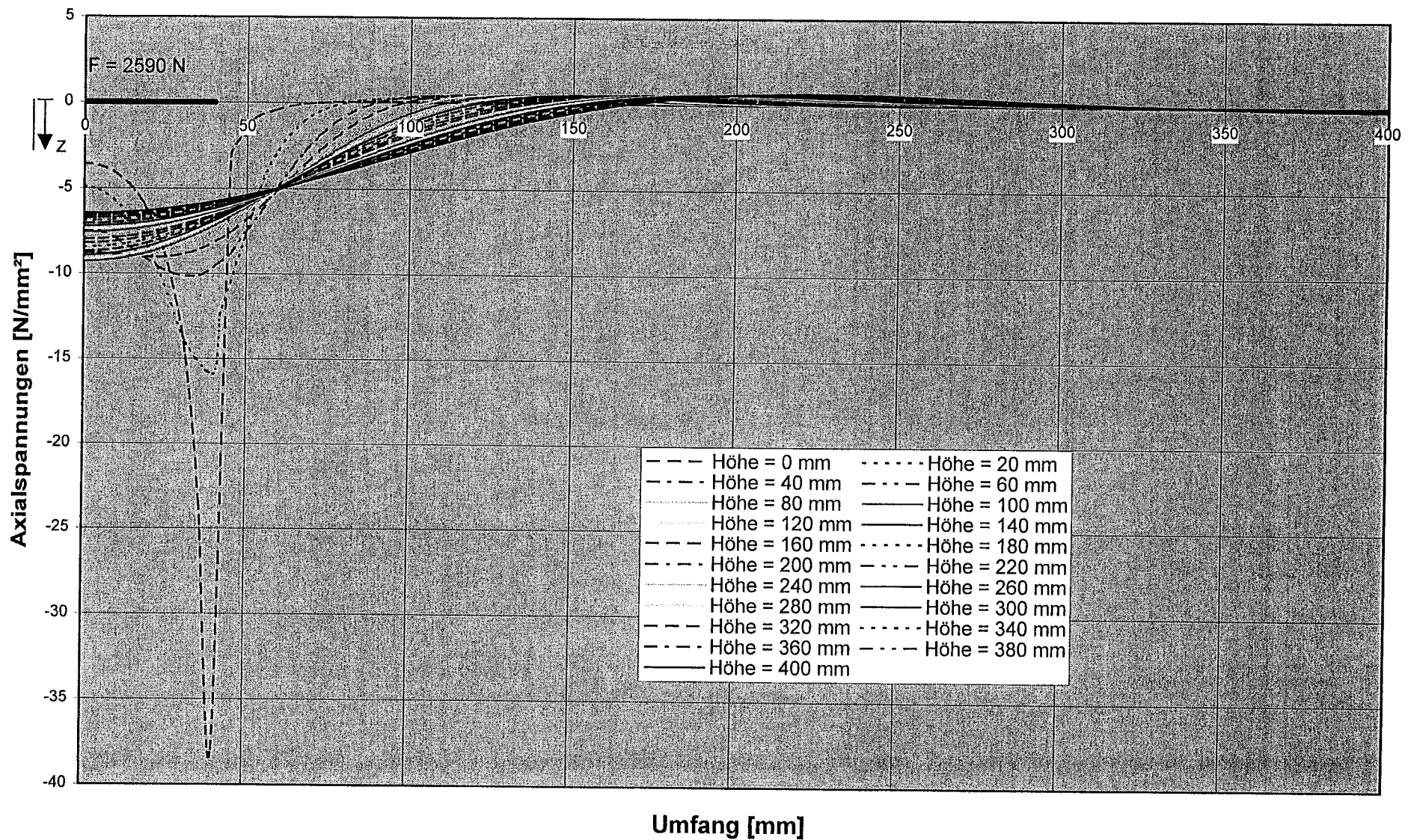


Bild C3: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ohne Endring; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

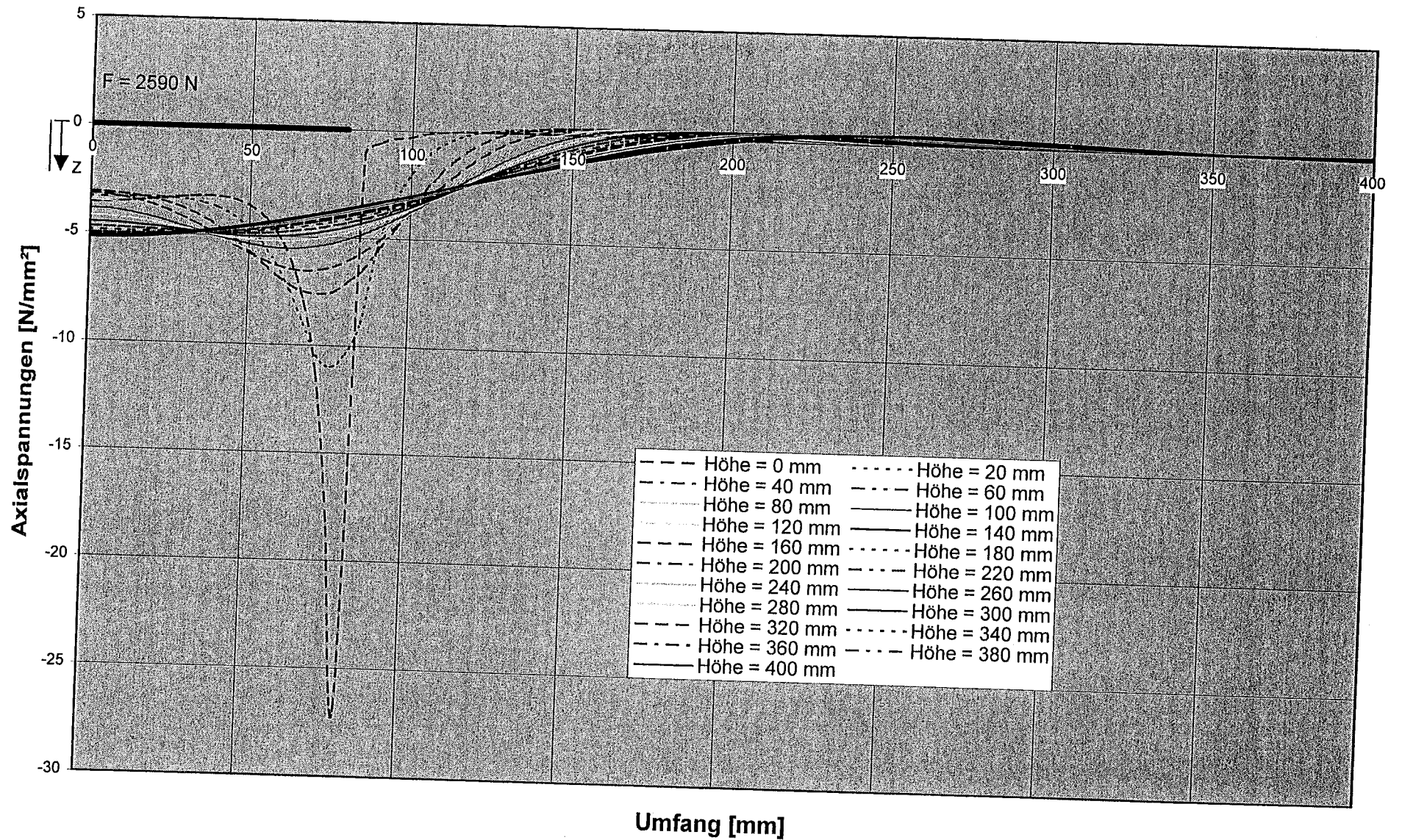


Bild C4: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ohne Endring; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

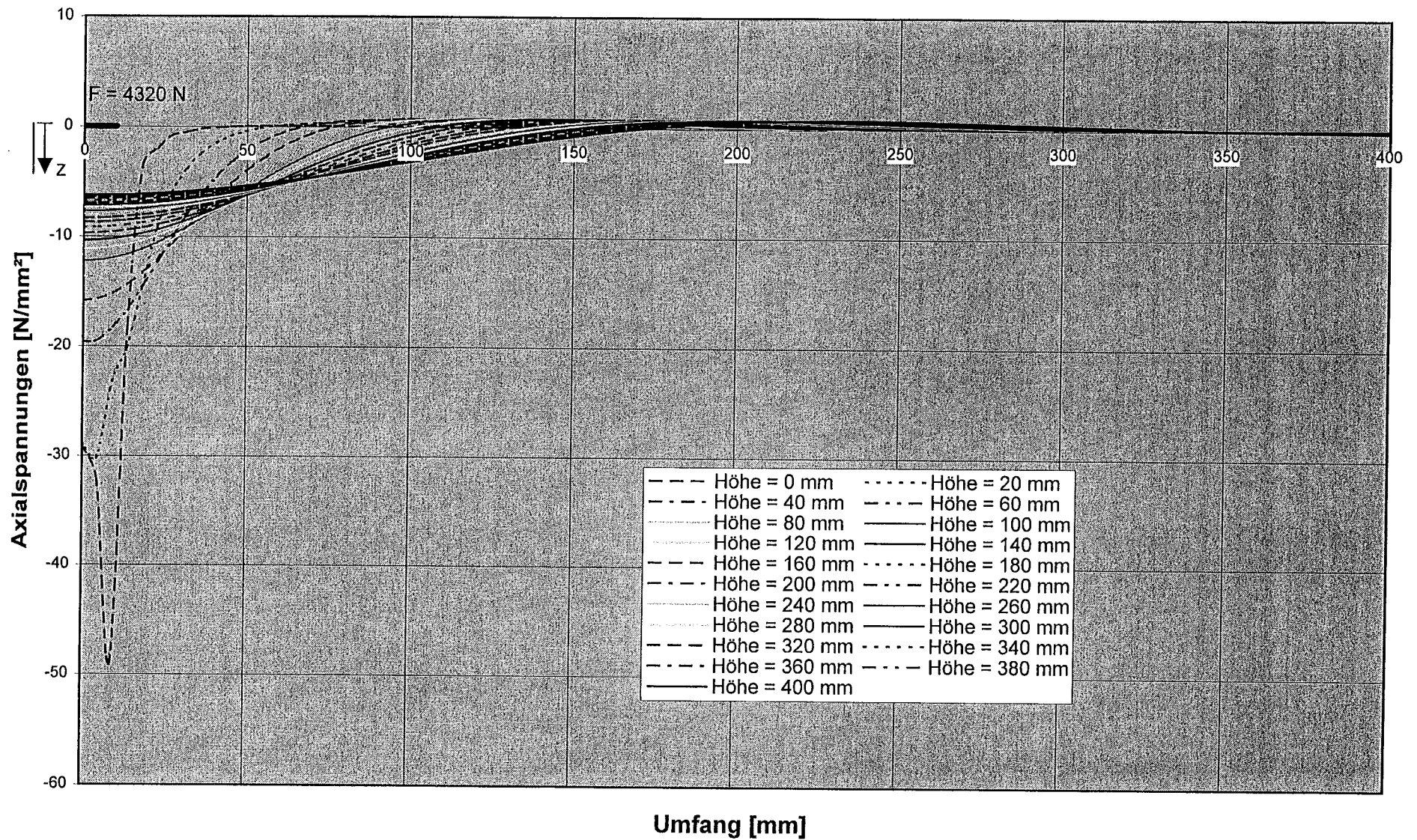


Bild C5: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ohne Endring; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

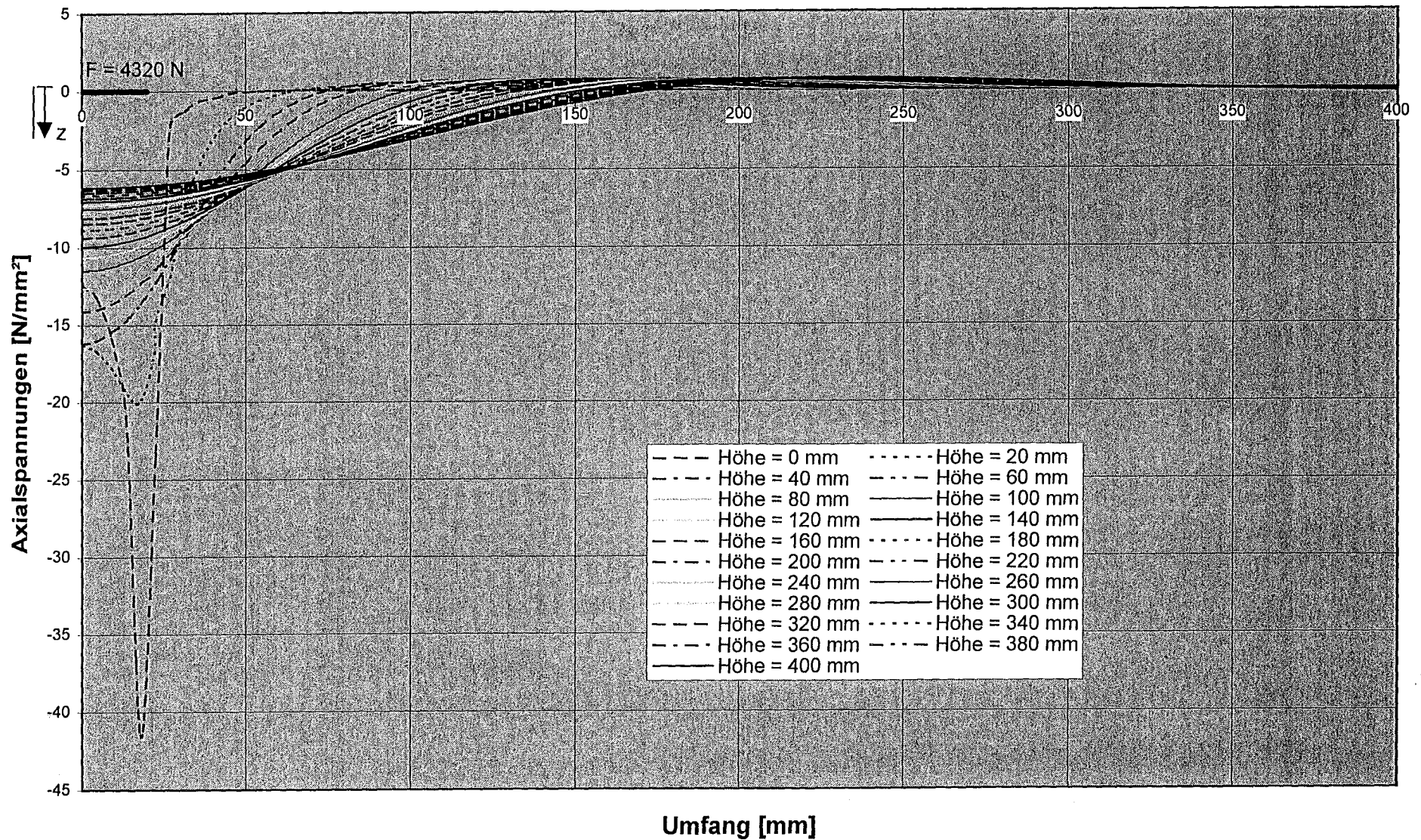


Bild C6: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ohne Endring; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

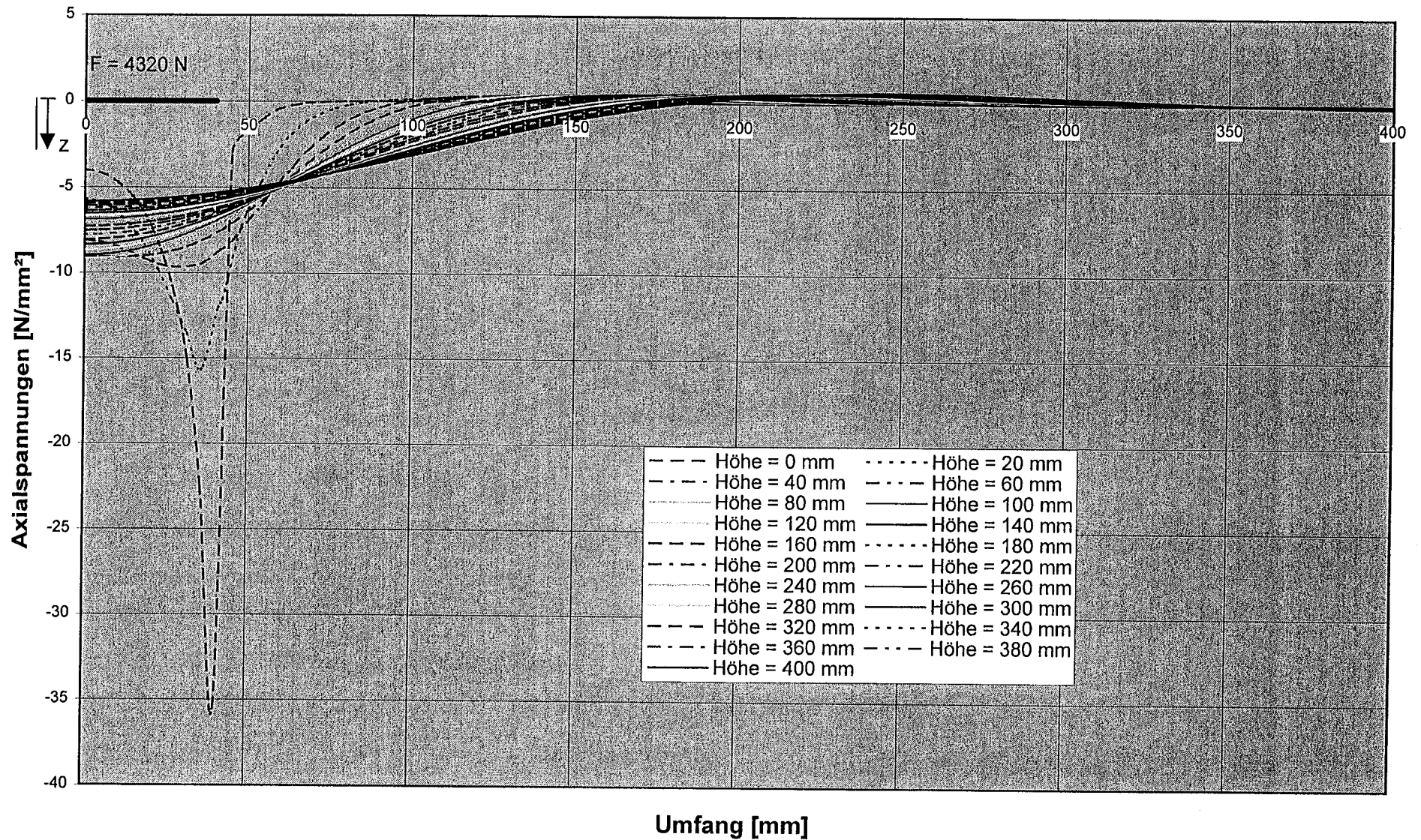


Bild C7: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ohne Endring; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

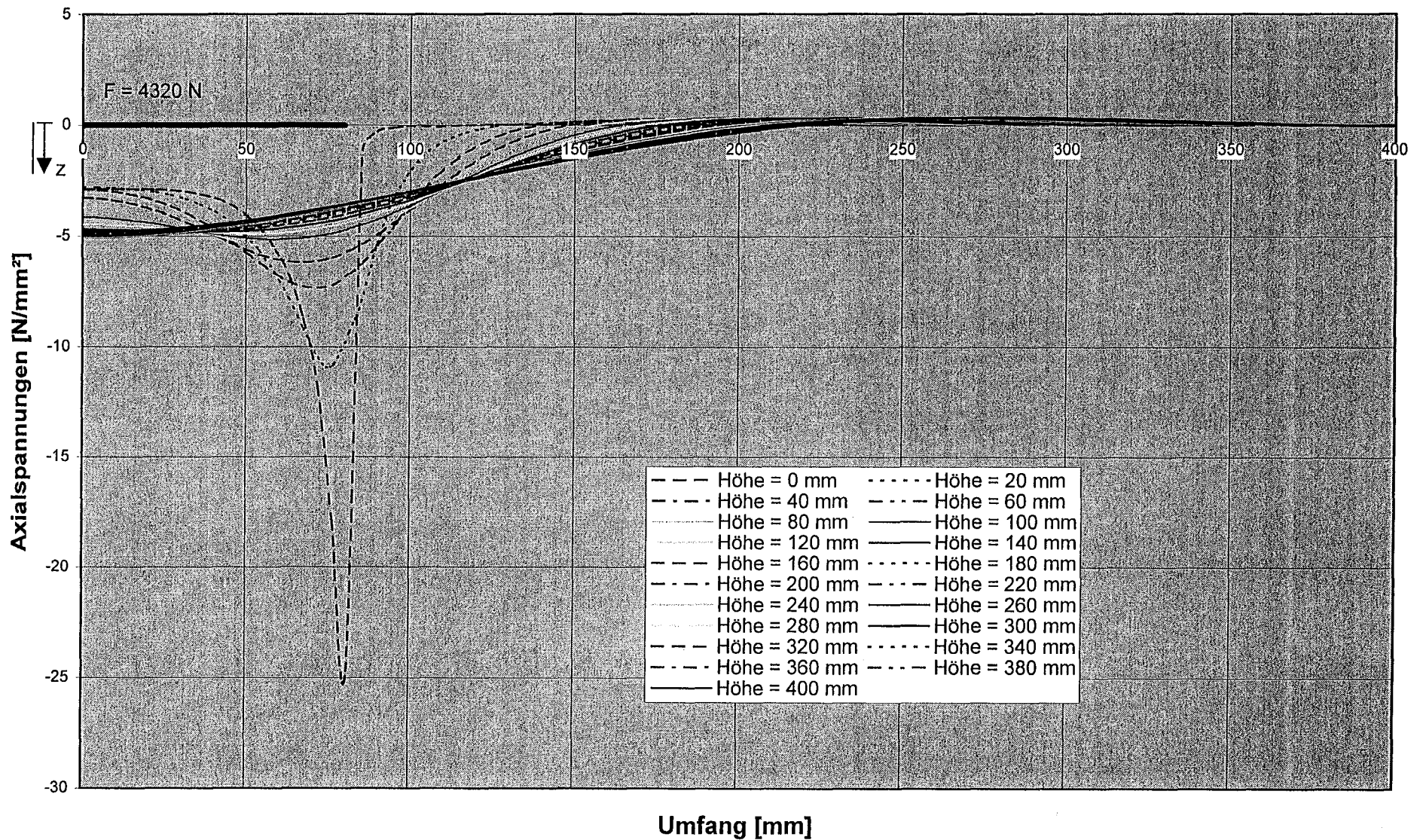


Bild C8: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ohne Endring; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

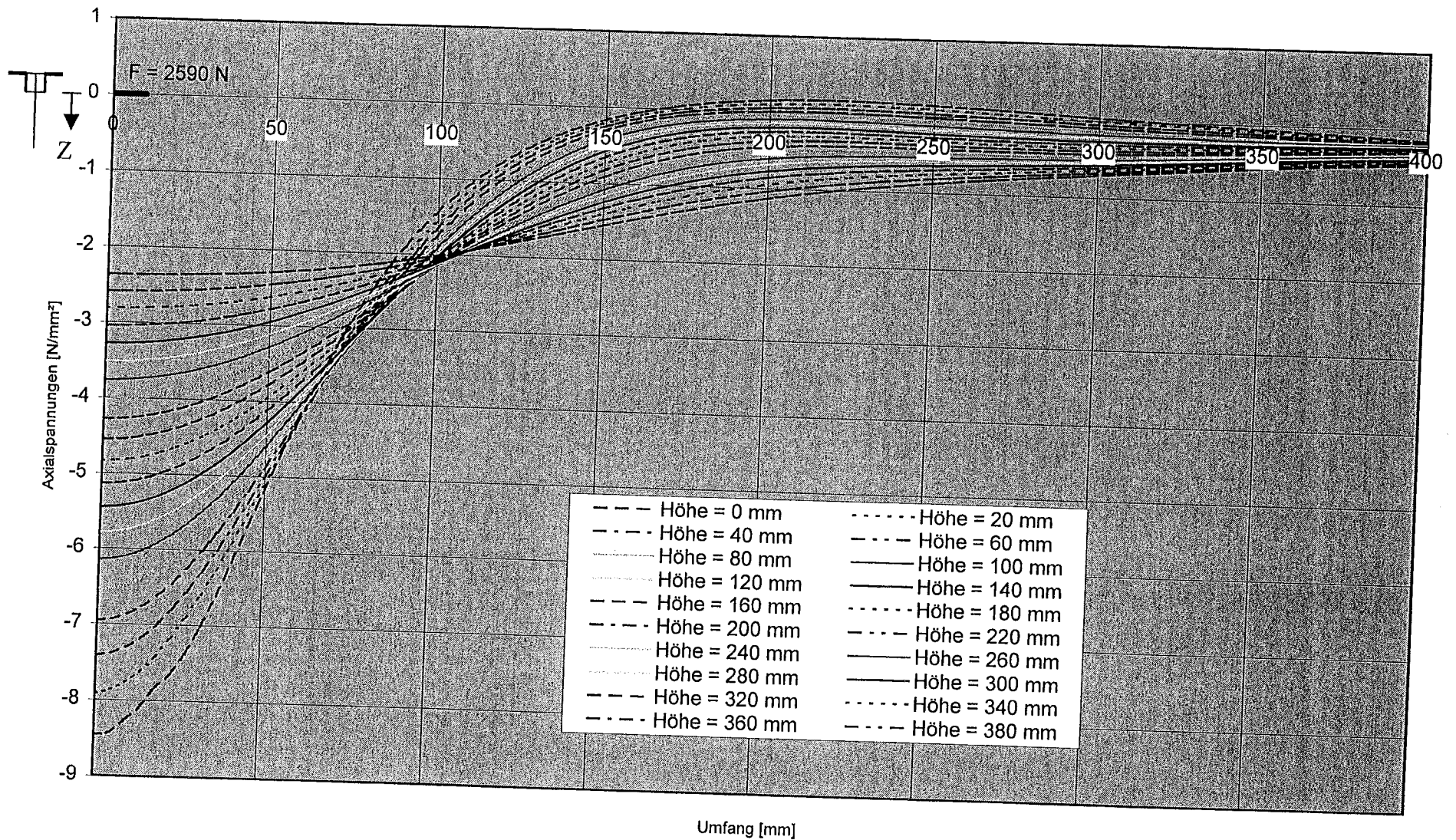


Bild C9 : Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; L-Profil; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

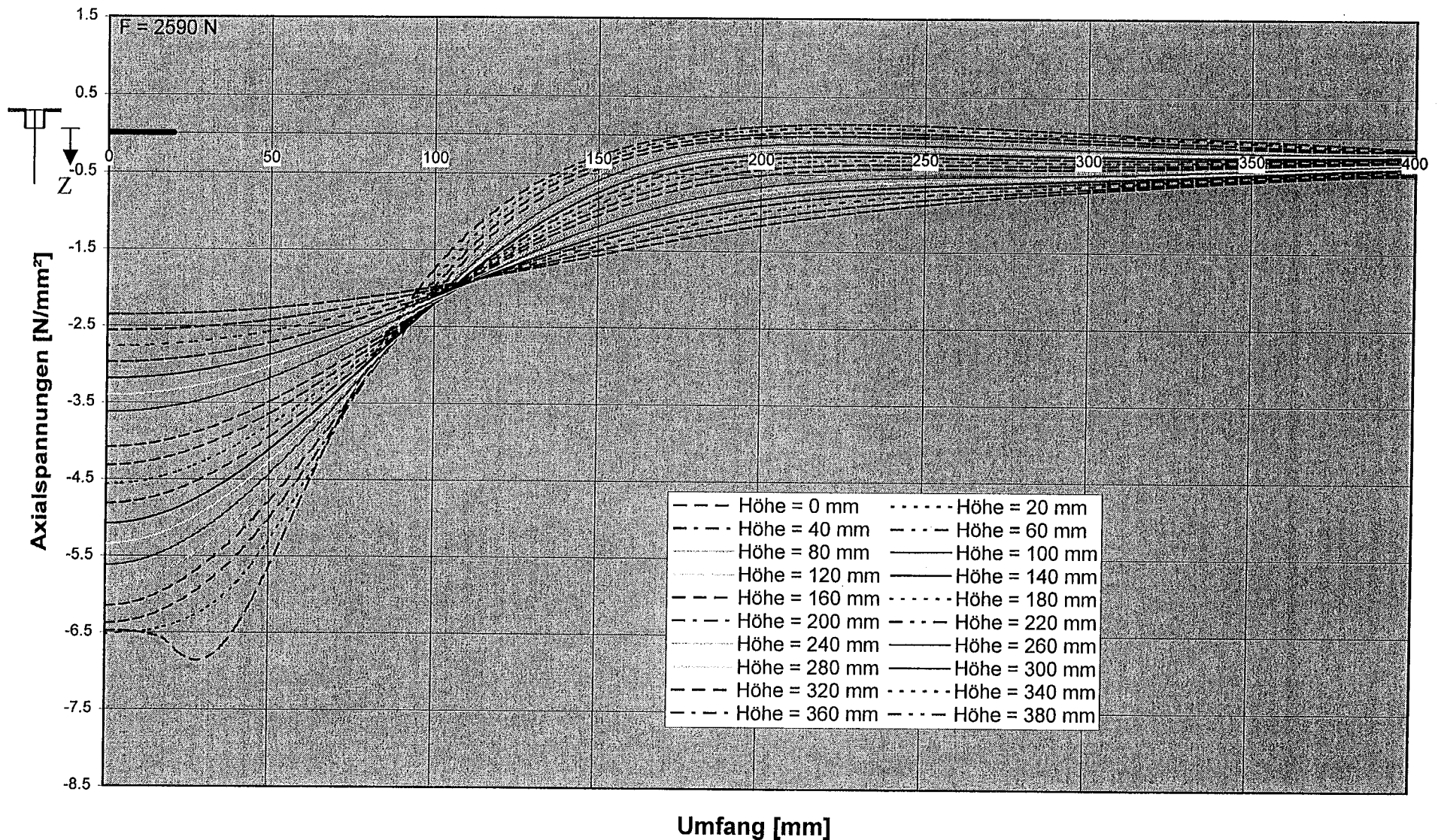


Bild C10 : Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; L-Profil; t = 0,6 mm; starre Lagerung)

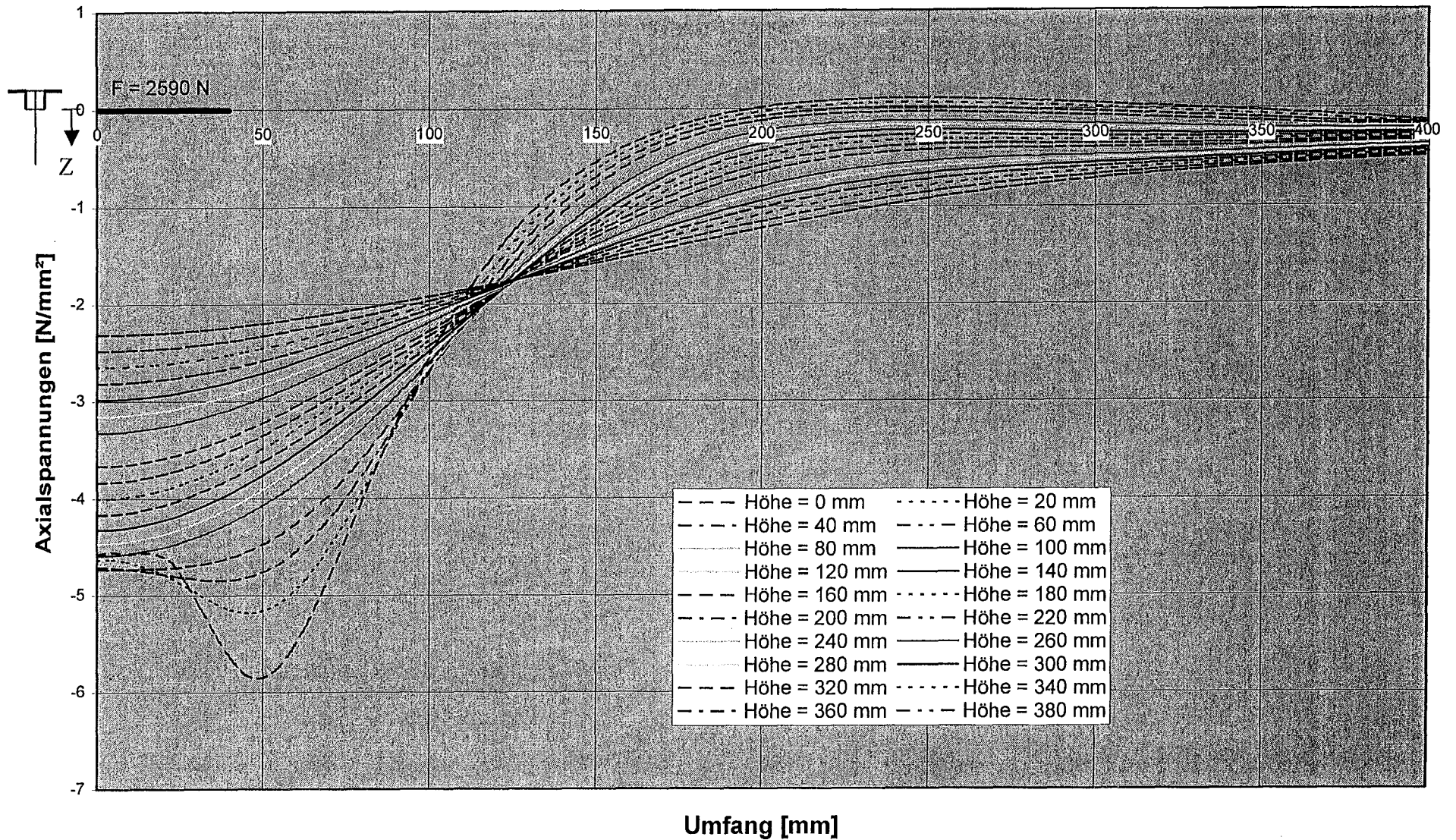


Bild C11 : Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; L-Profil; t = 0,6 mm; starre Lagerung)

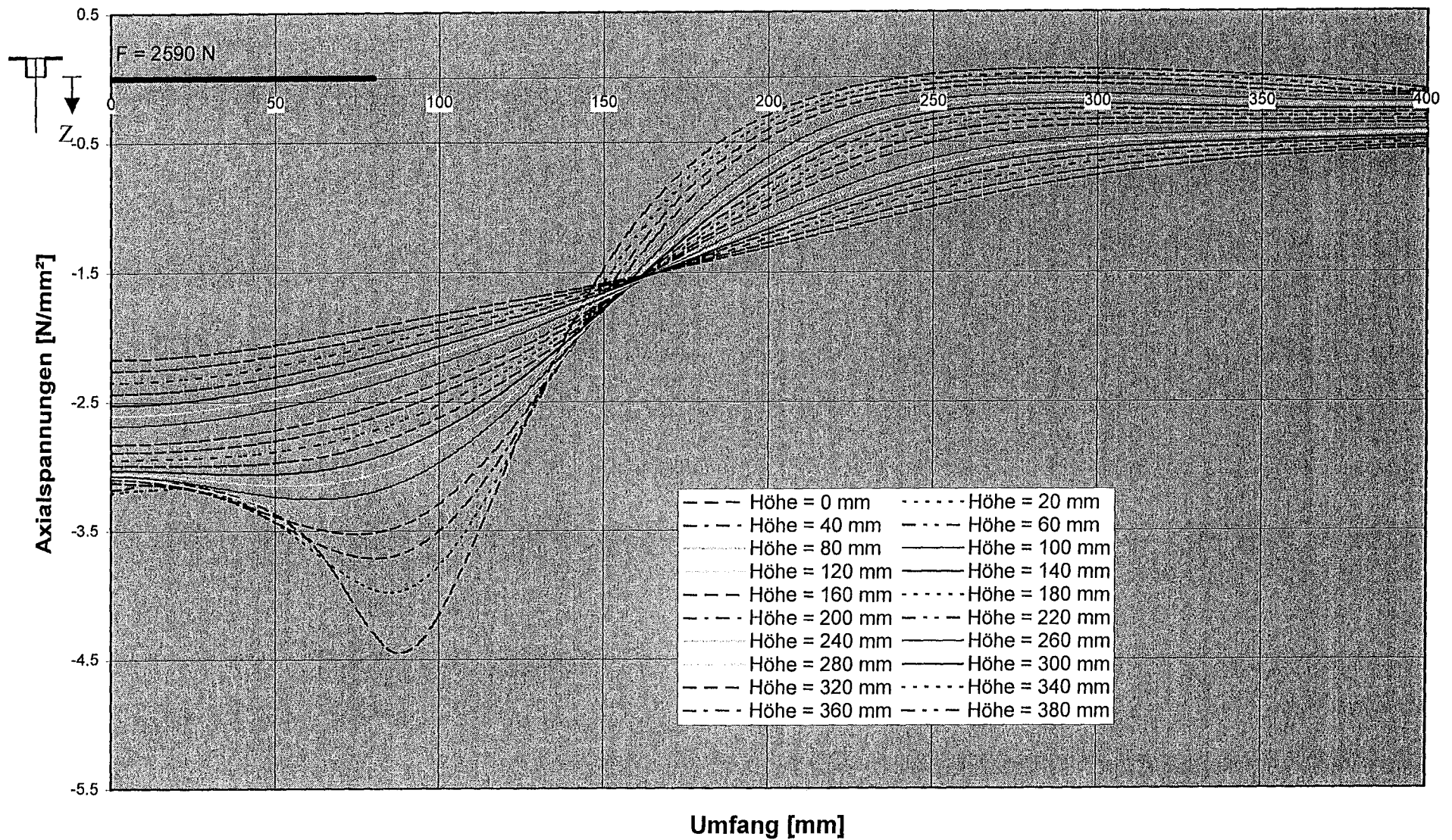


Bild C12: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; L-Profil; t = 0,6 mm; starre Lagerung)

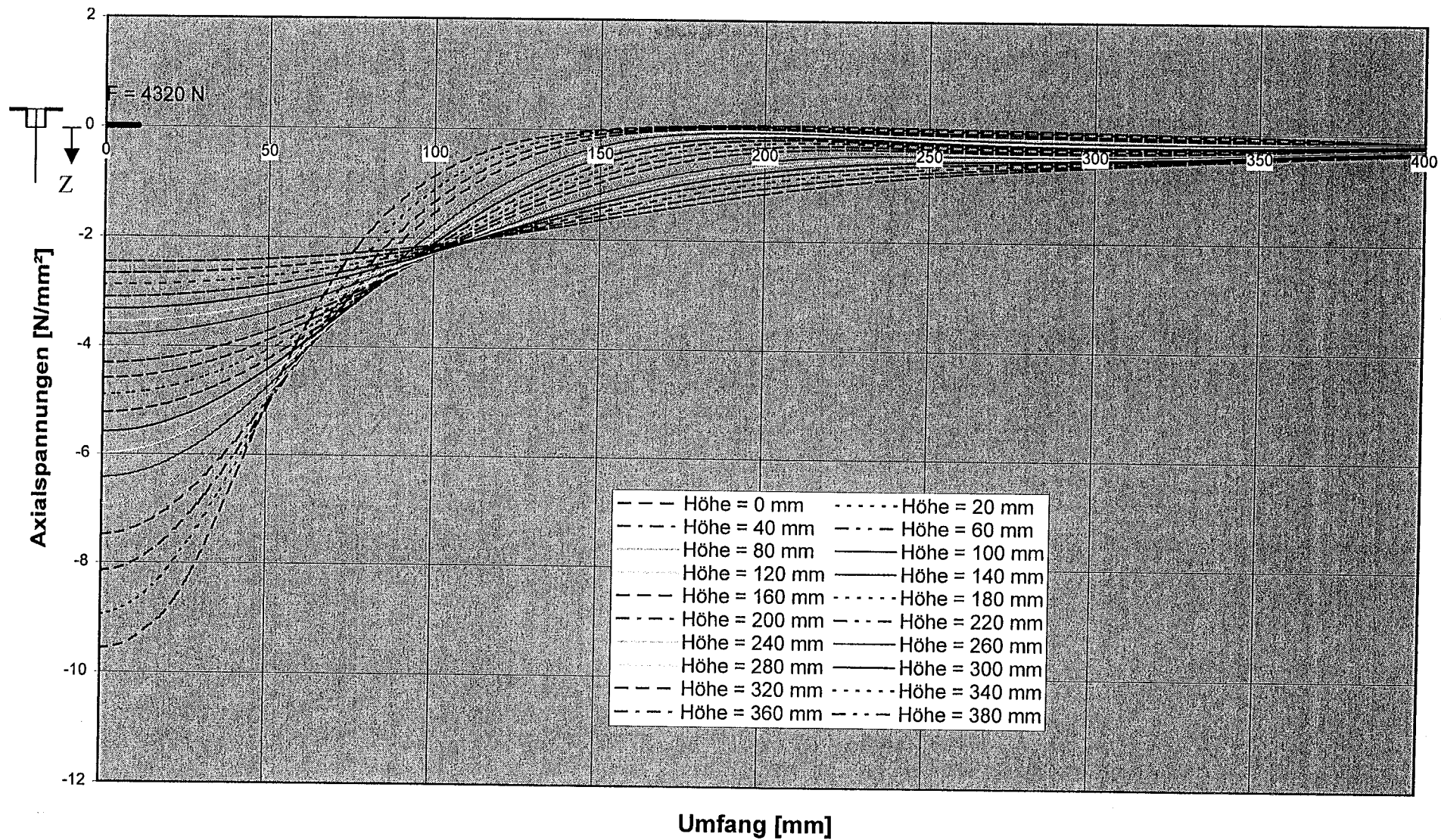


Bild C13: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; L-Profil; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

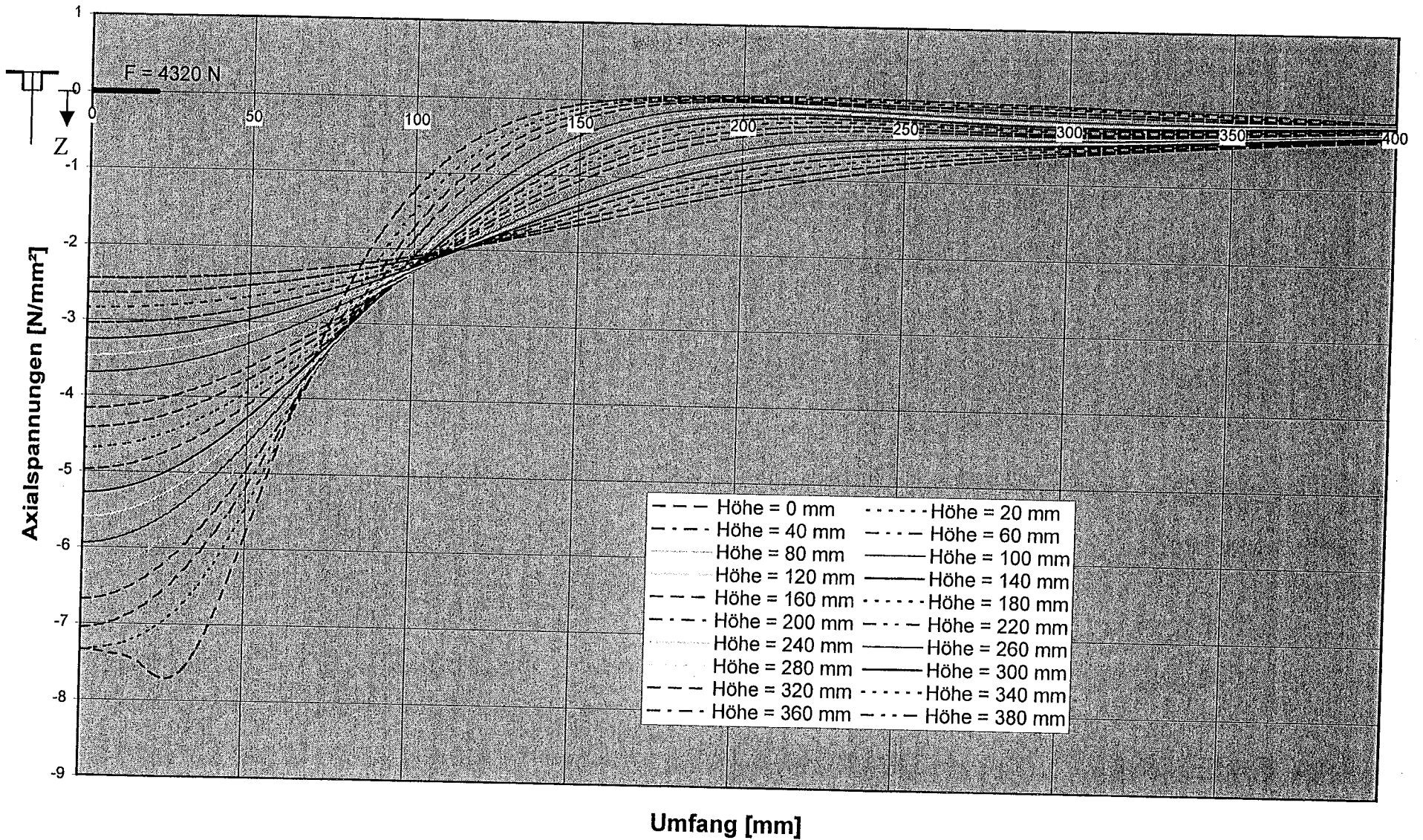


Bild C14 : Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; L-Profil; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

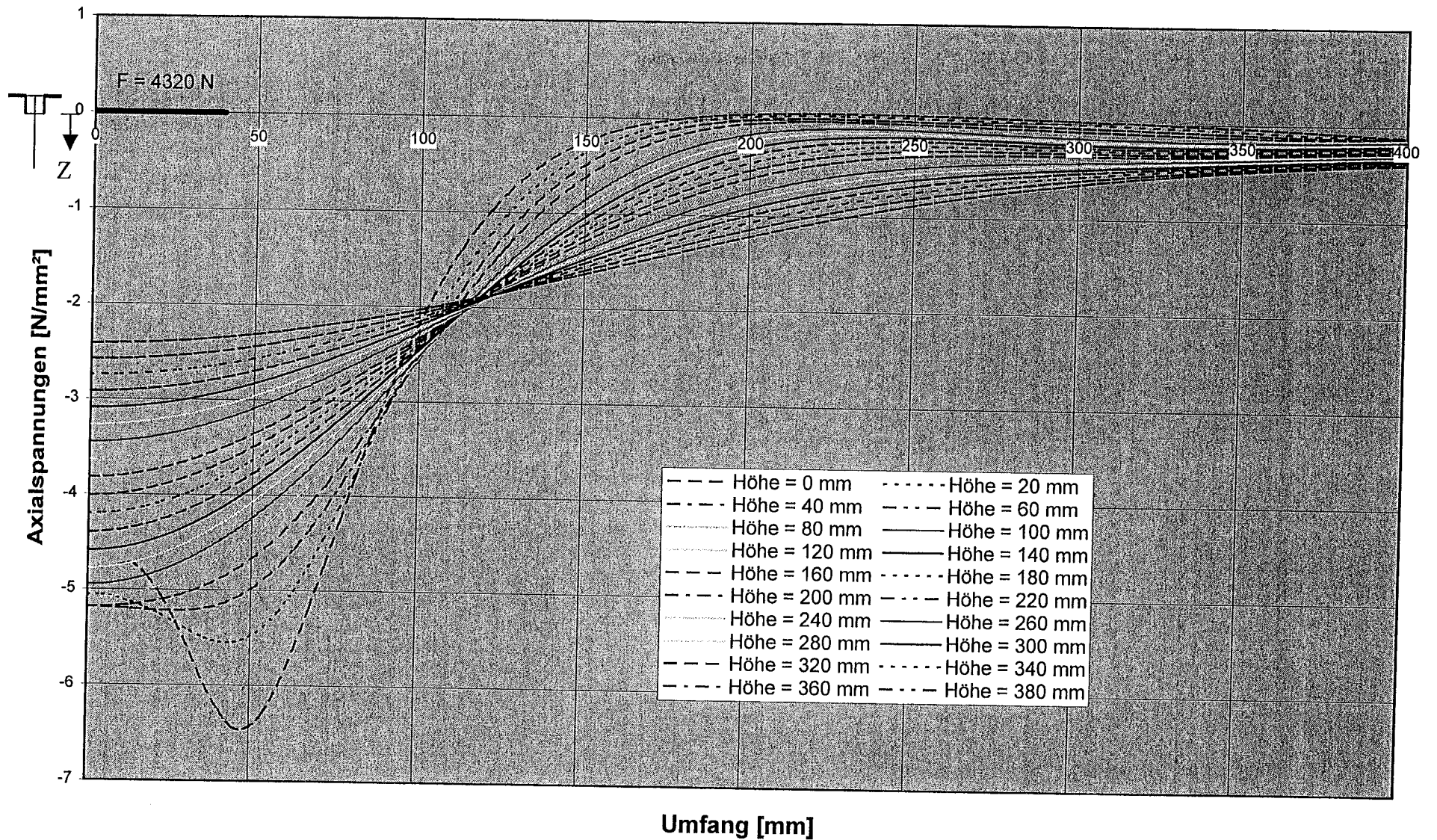


Bild C15: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; L-Profil; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

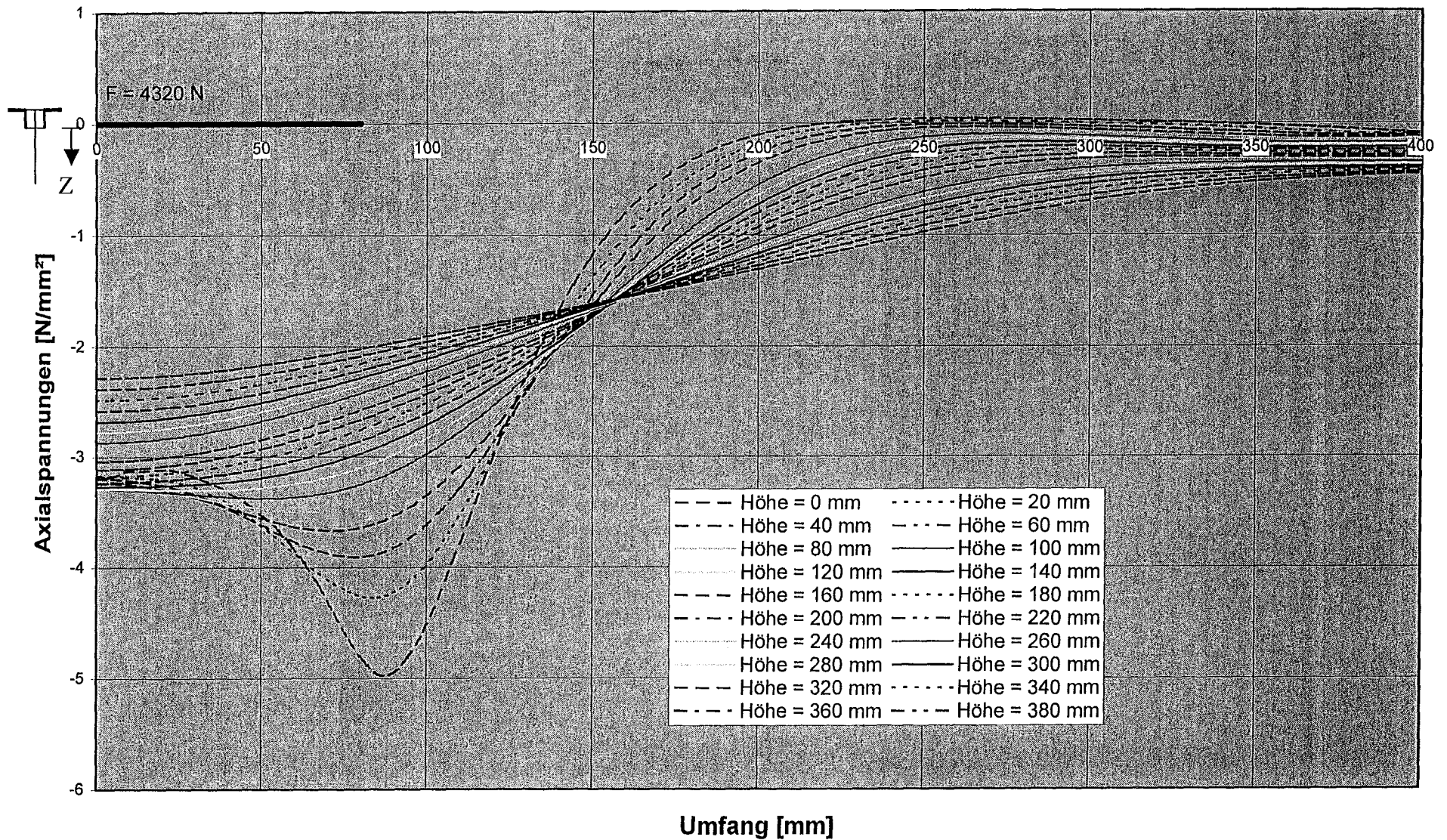


Bild C16 : Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; L-Profil; t = 1,0 mm; starre Lagerung)

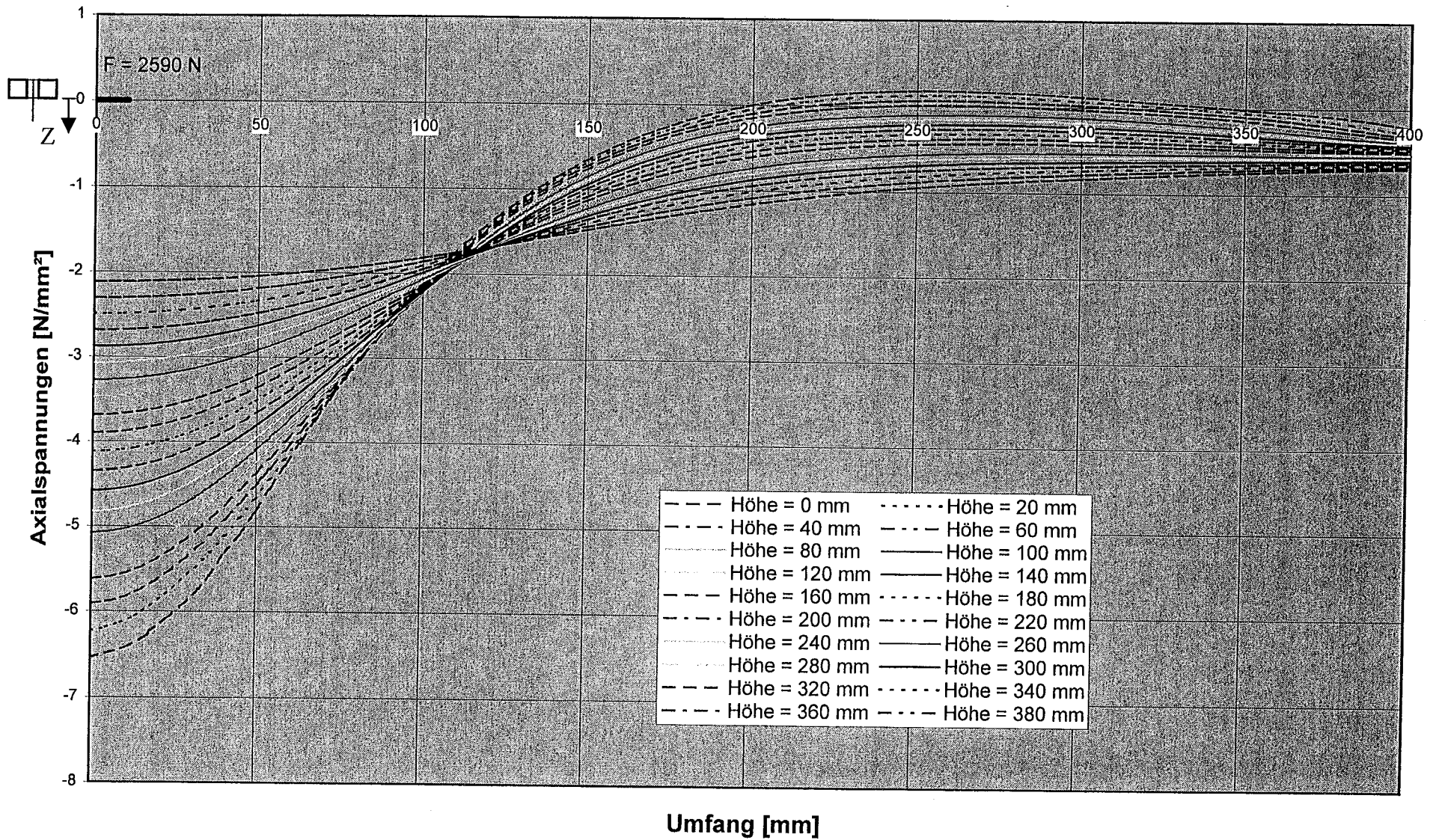


Bild C17: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ■-Profil; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

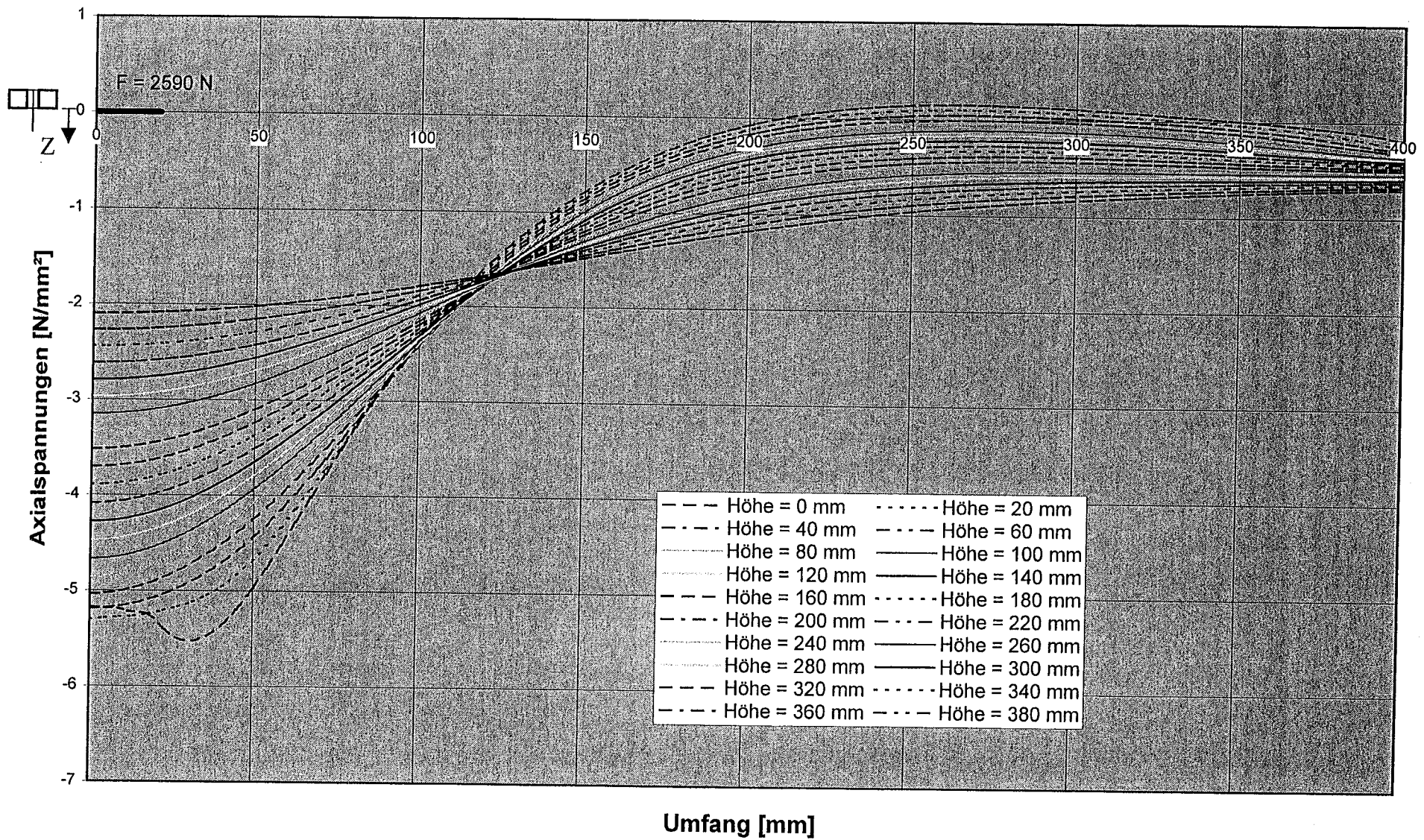


Bild C18: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ■-Profil; t = 0,6 mm; starre Lagerung)

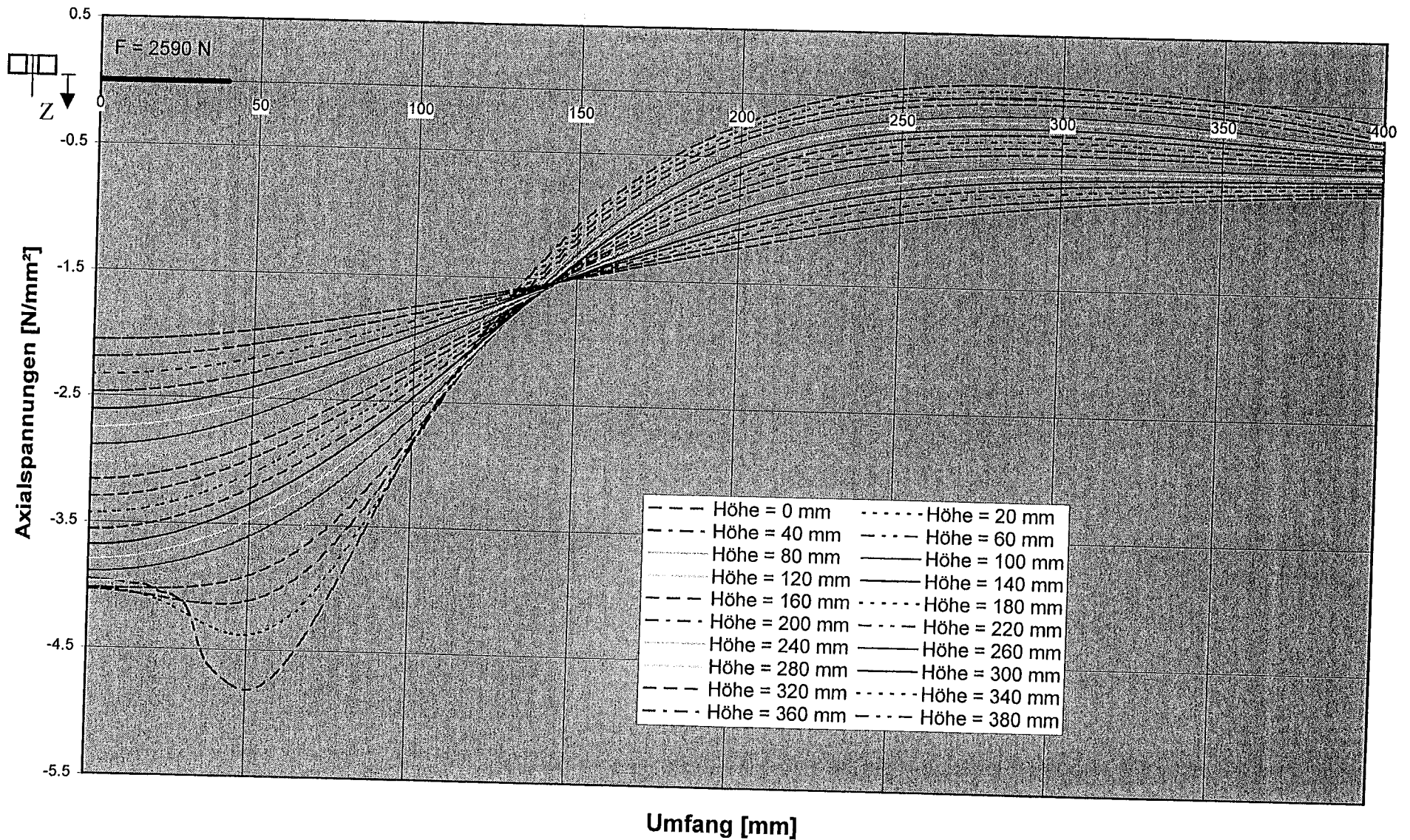


Bild C19: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ■-Profil; t = 0,6 mm; starre Lagerung)

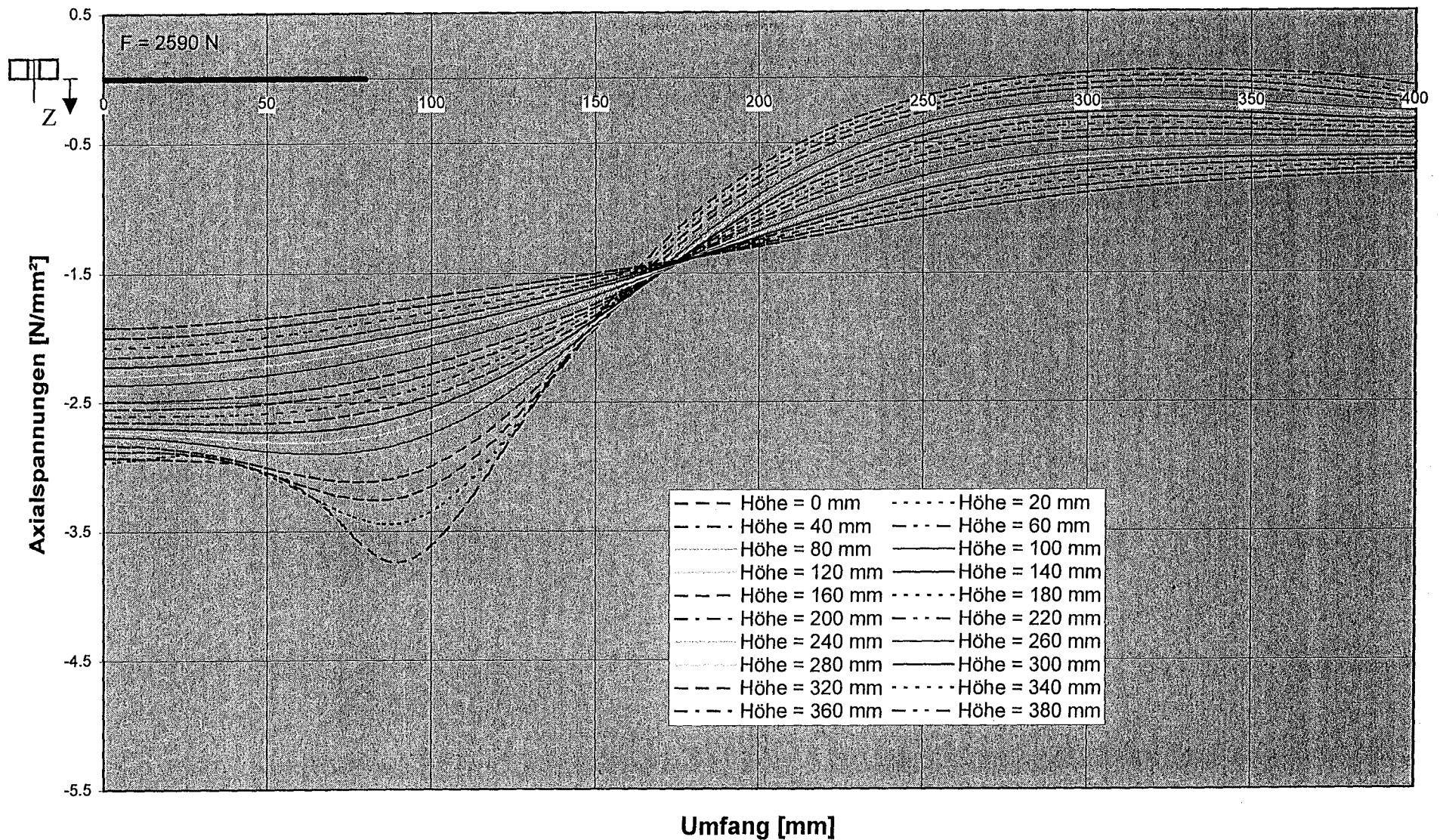


Bild C20: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ■-Profil; $t = 0,6 \text{ mm}$; starre Lagerung)

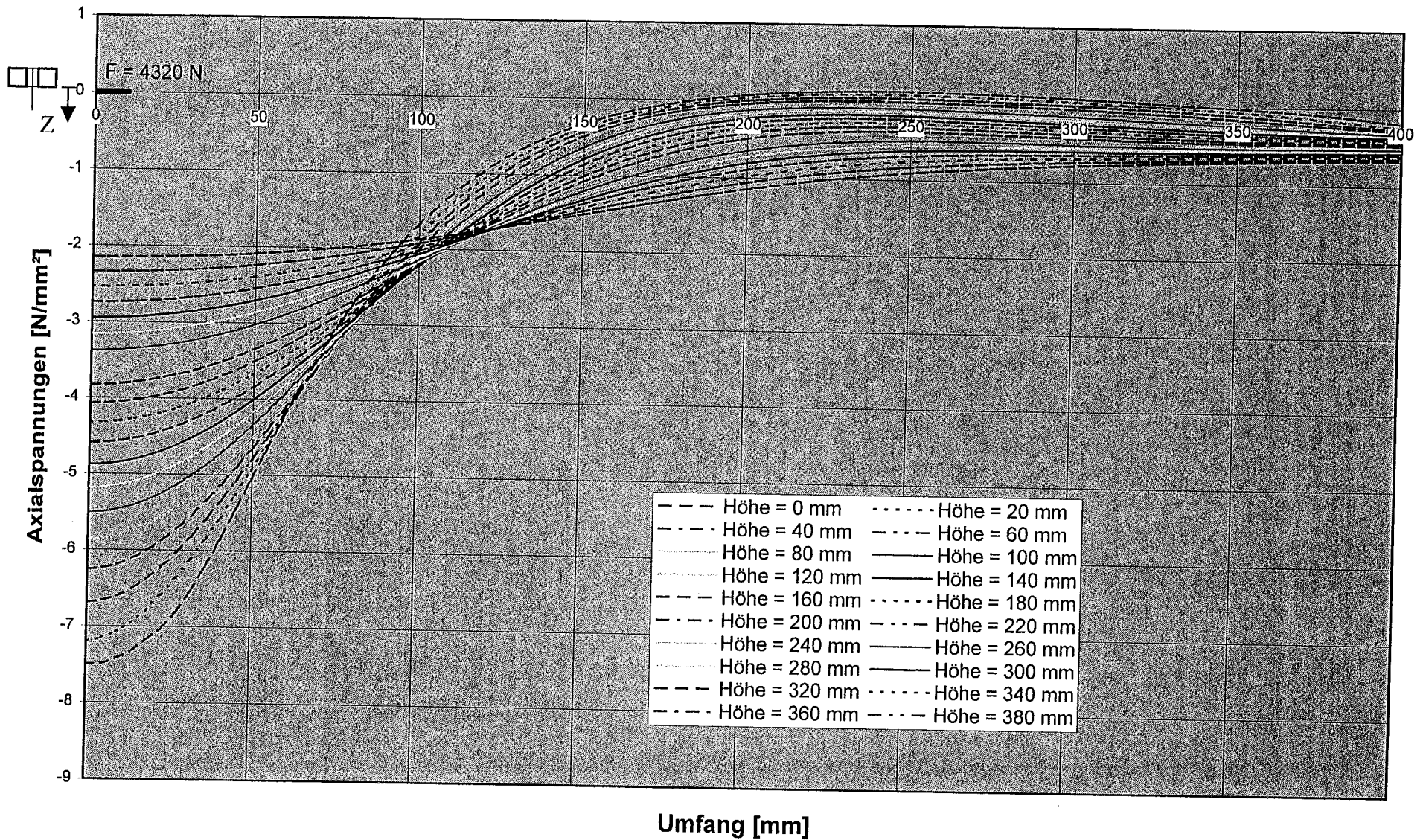


Bild C21: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; starre Lagerung)

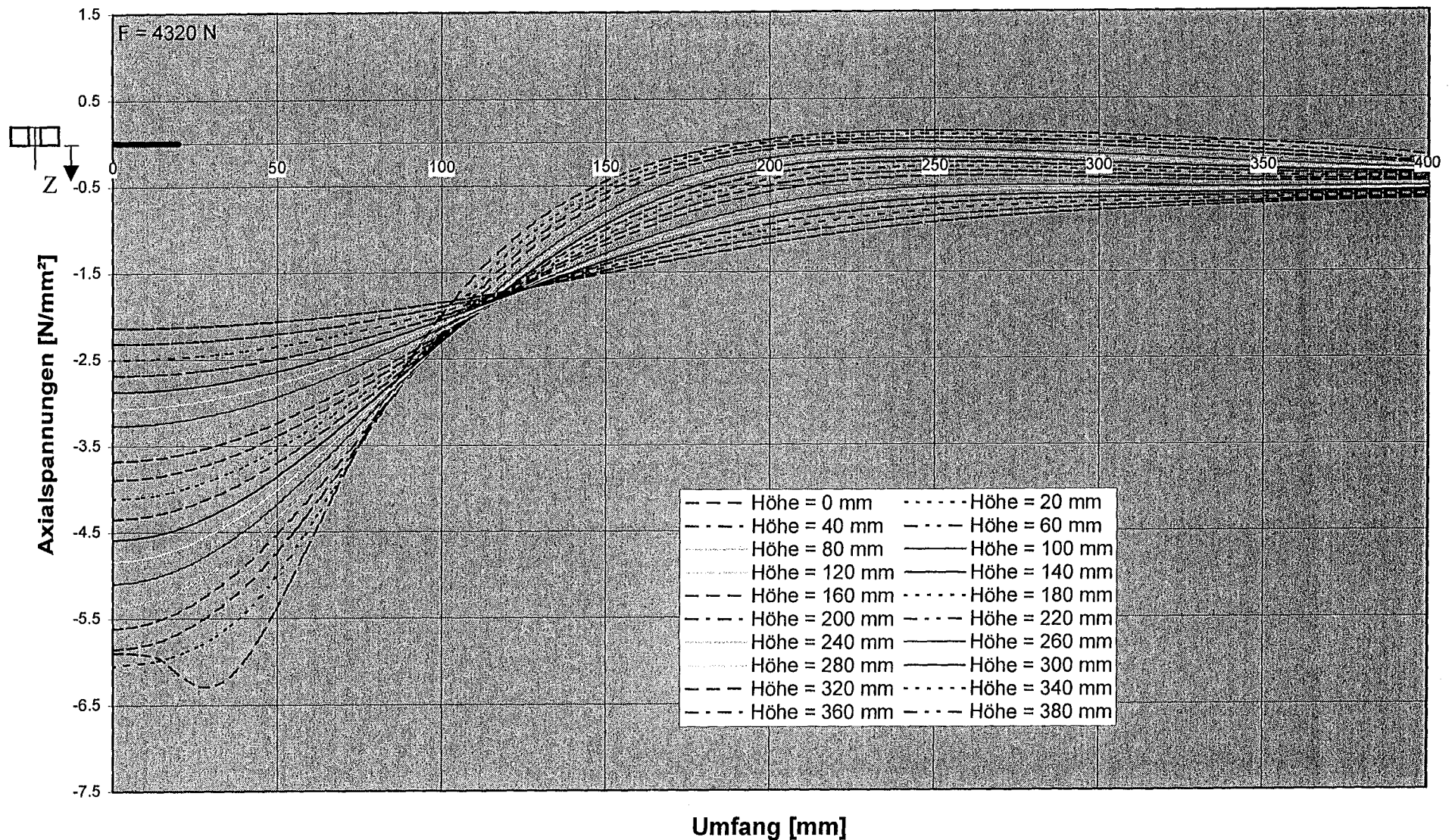


Bild C22: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ■-Profil; $t = 1,0 \text{ mm}$; starre Lagerung)

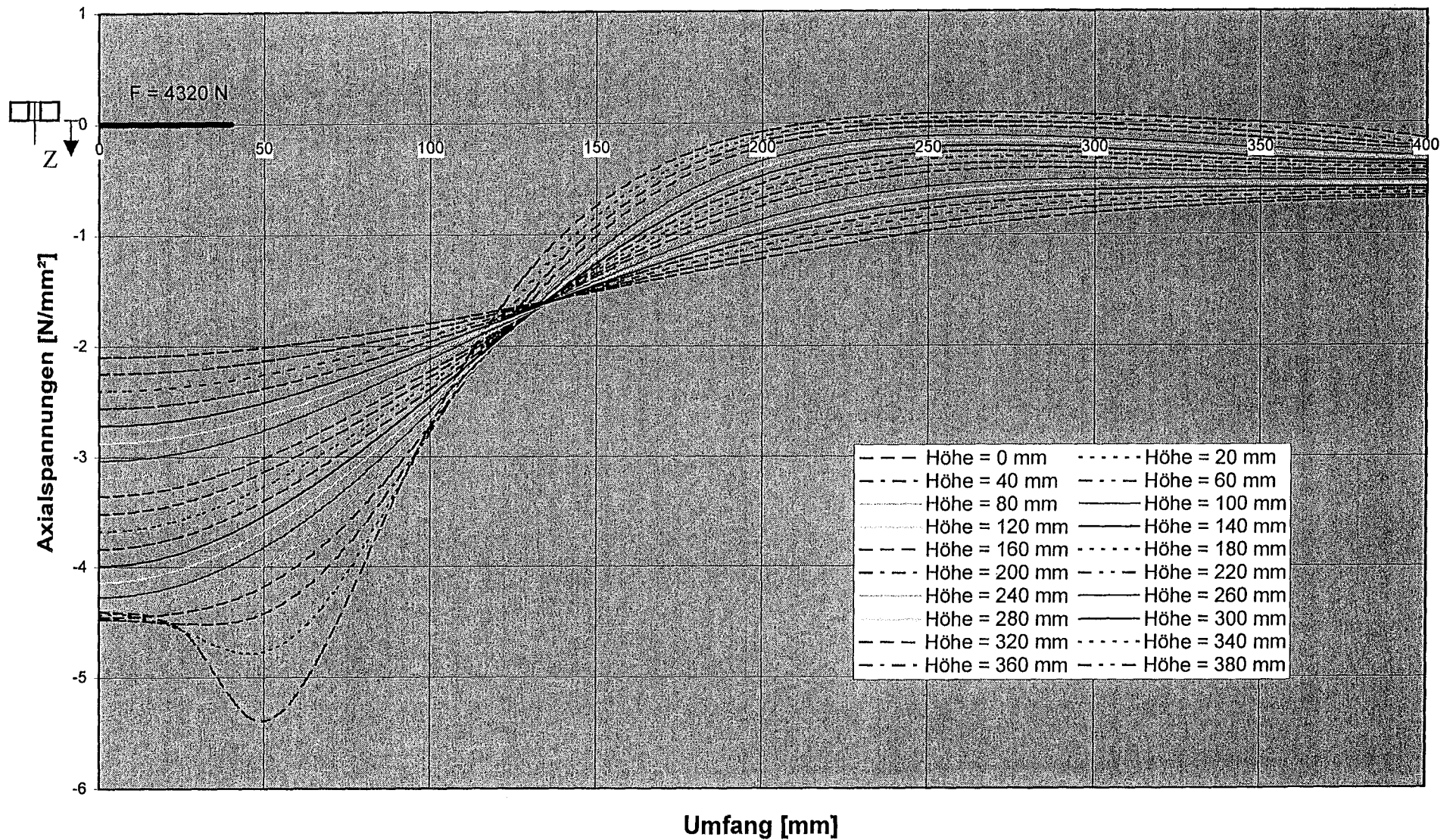


Bild C23: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; starre Lagerung)

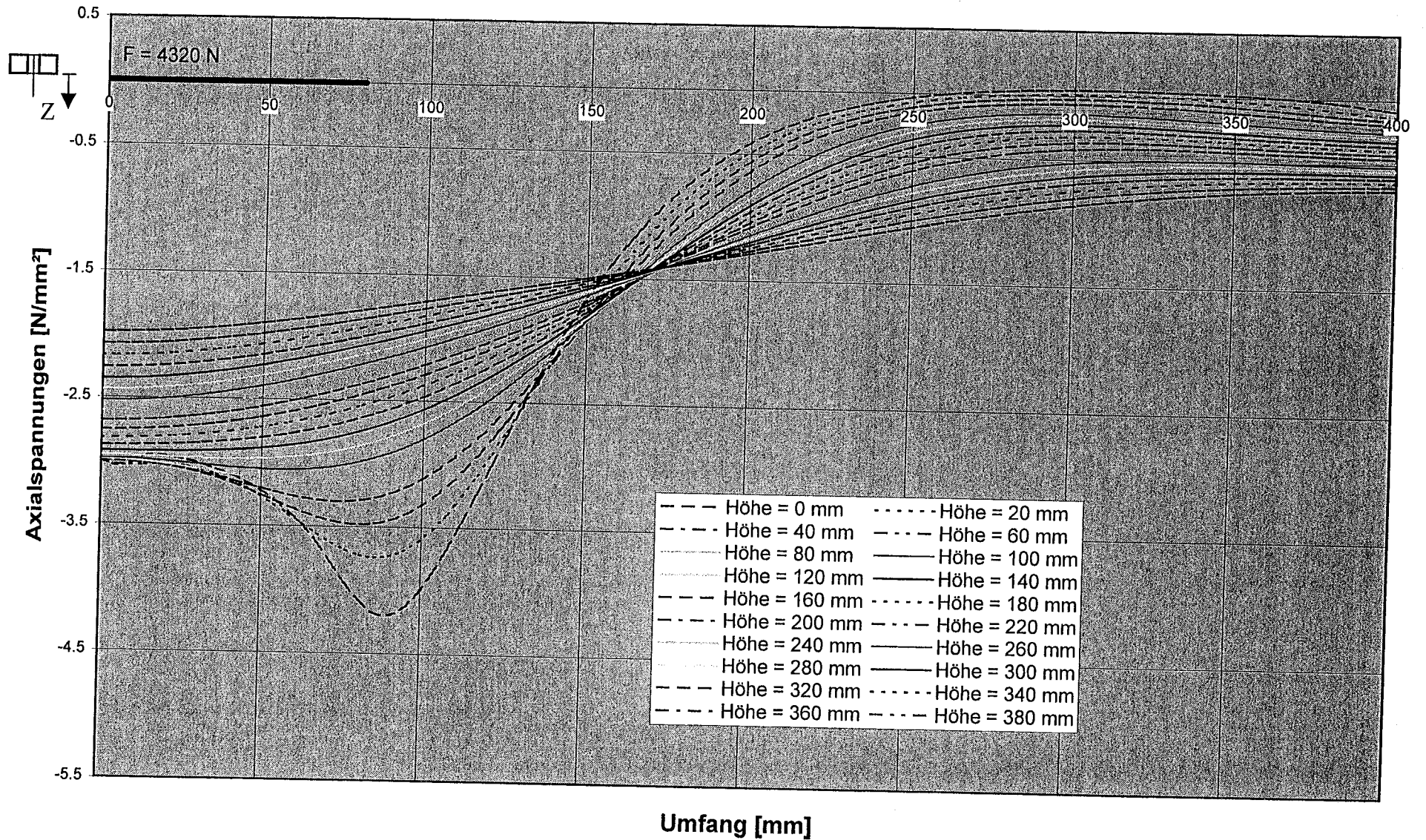


Bild C24: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; starre Lagerung)

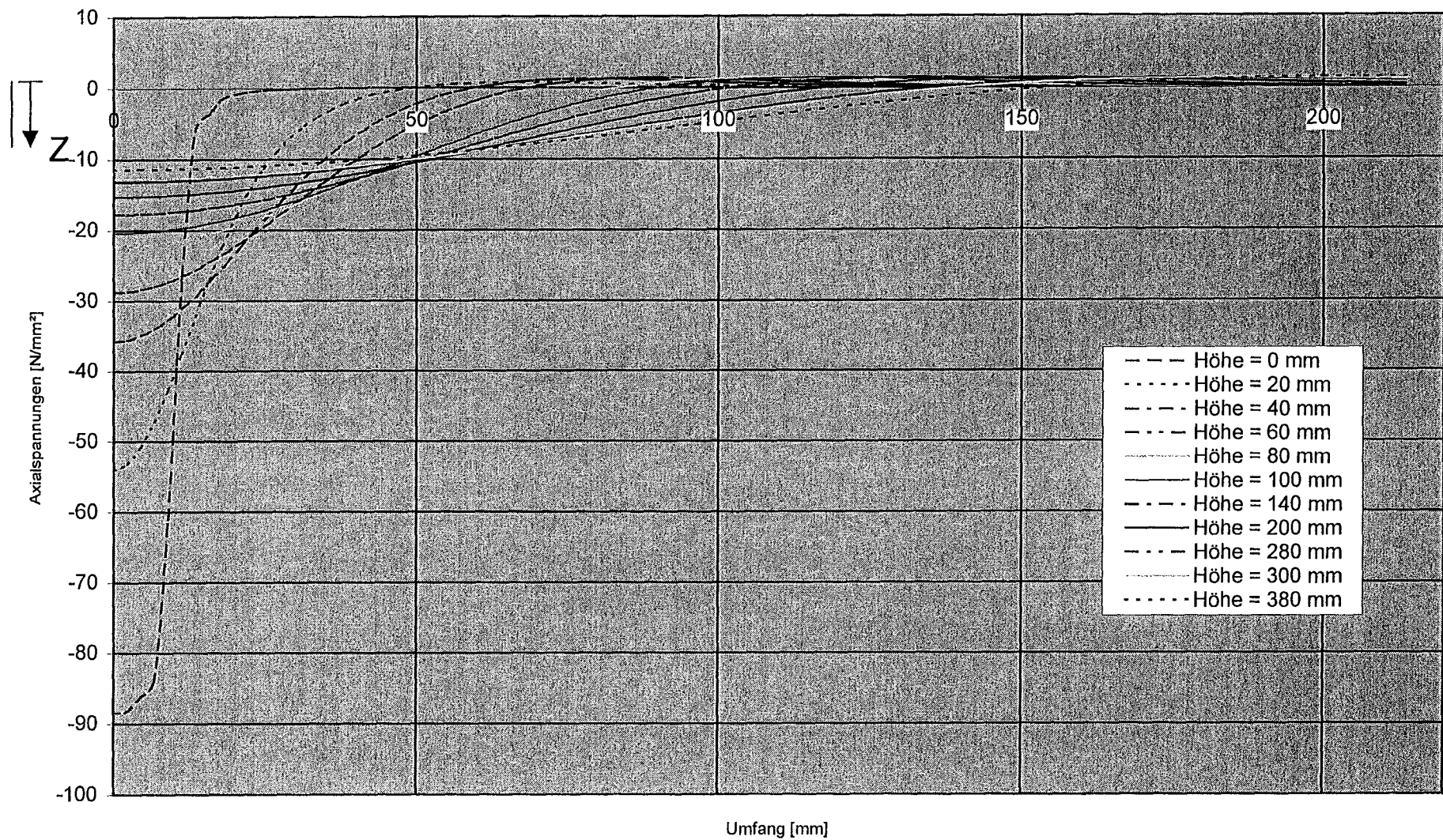


Bild C25: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ohne Endring; $t = 0,6$ mm; schlaife Lagerung)

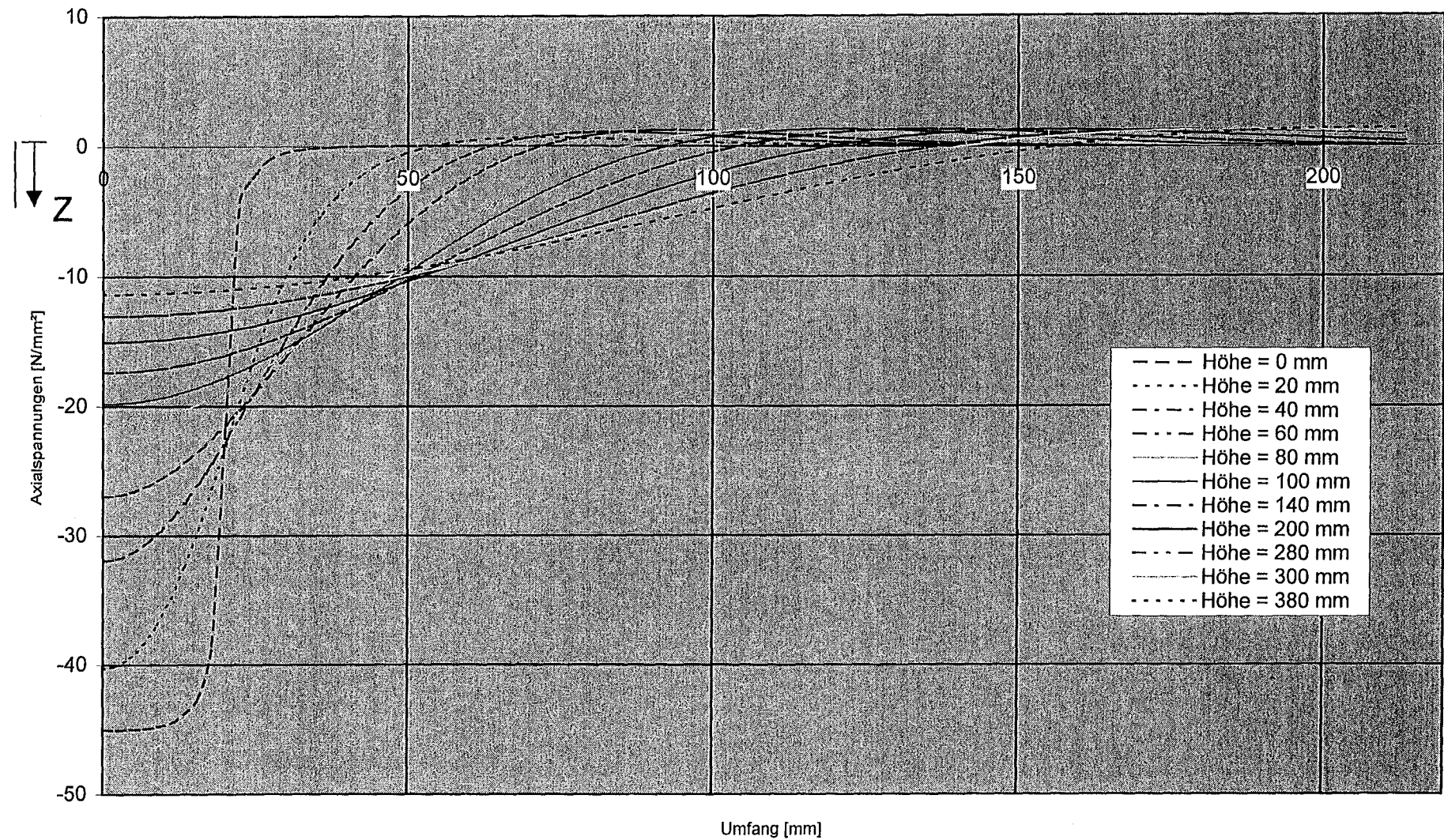


Bild C26: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ohne Endring; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

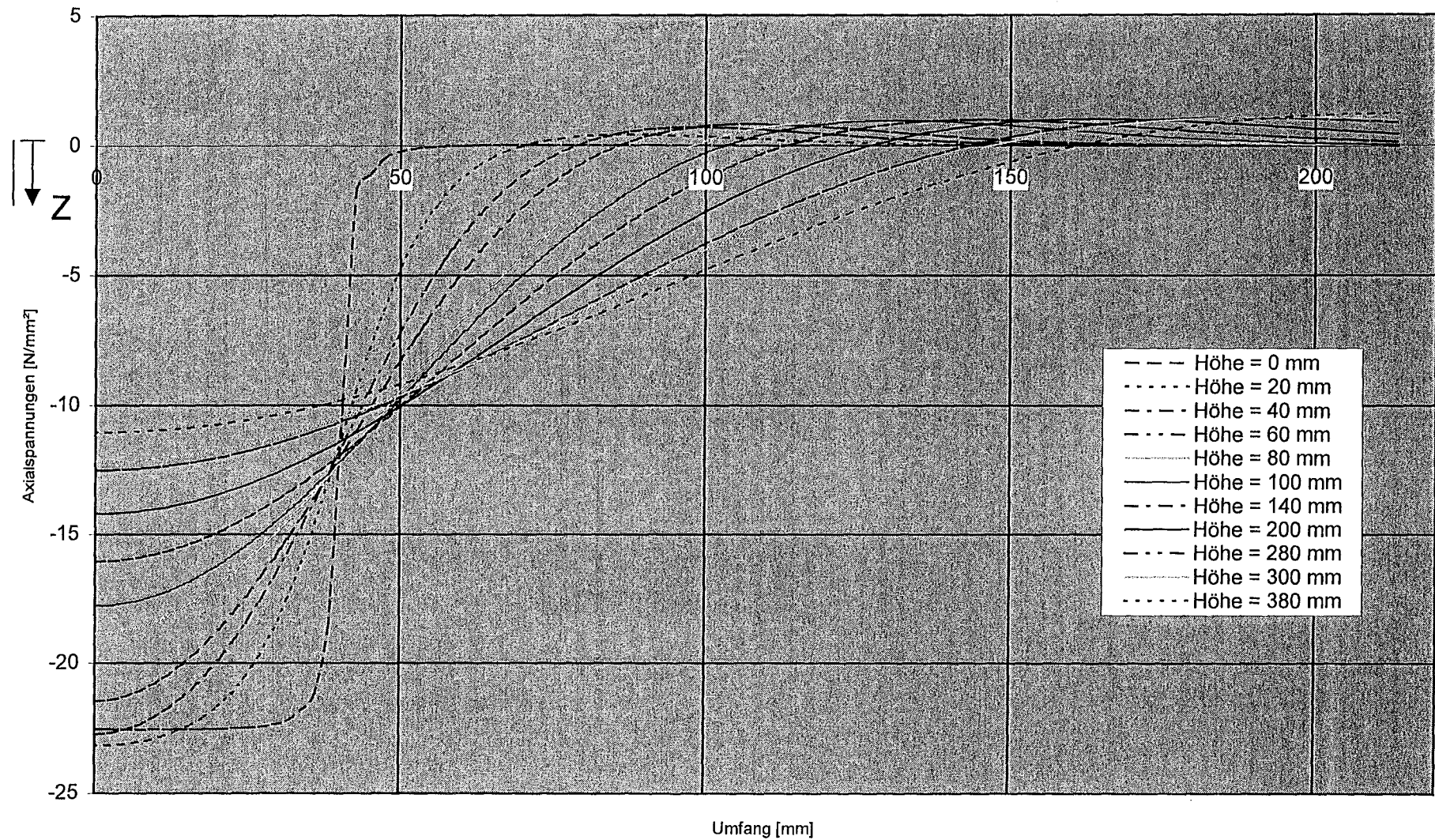


Bild C27: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ohne Endring; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

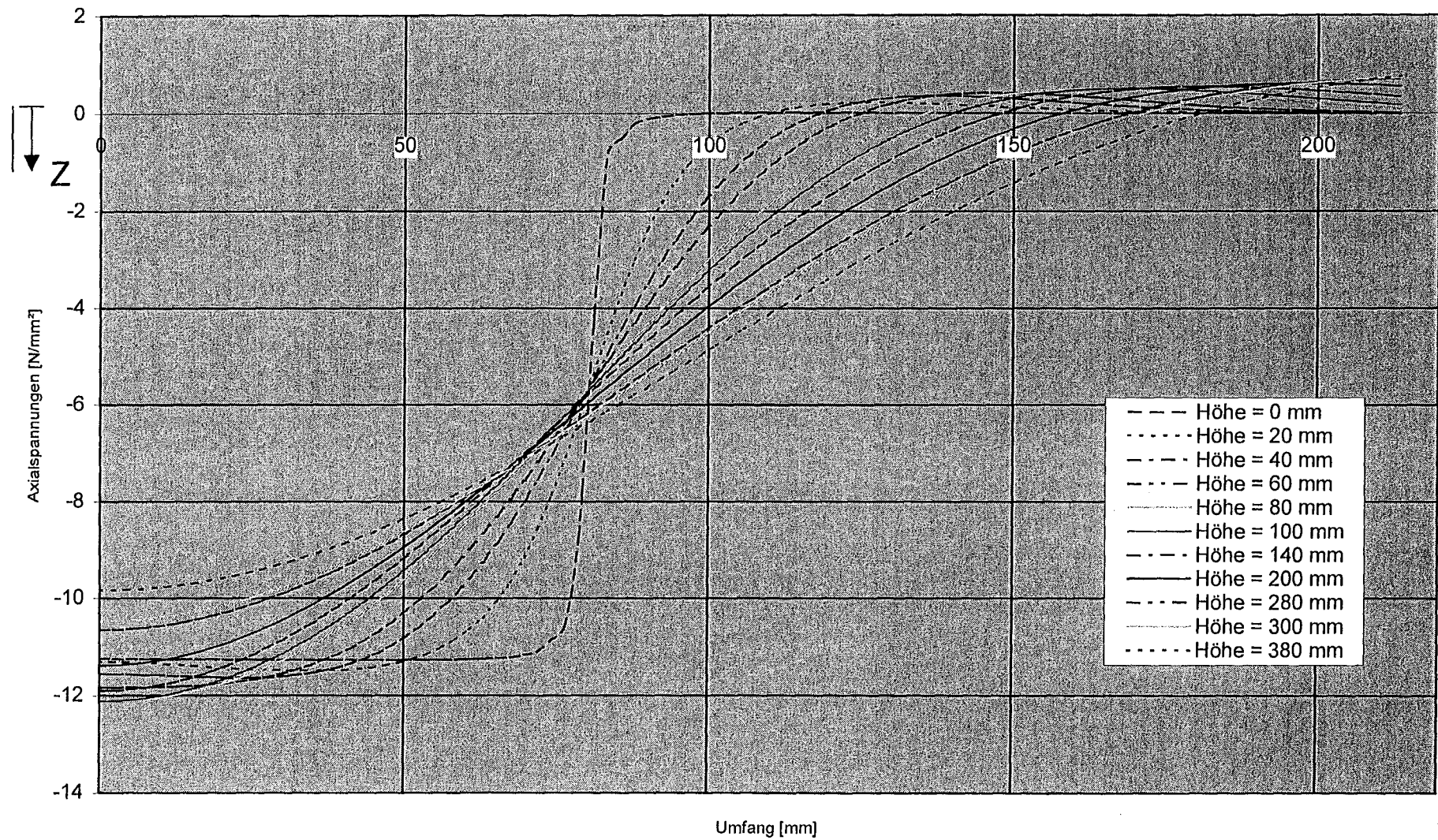


Bild C28: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ohne Endring; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

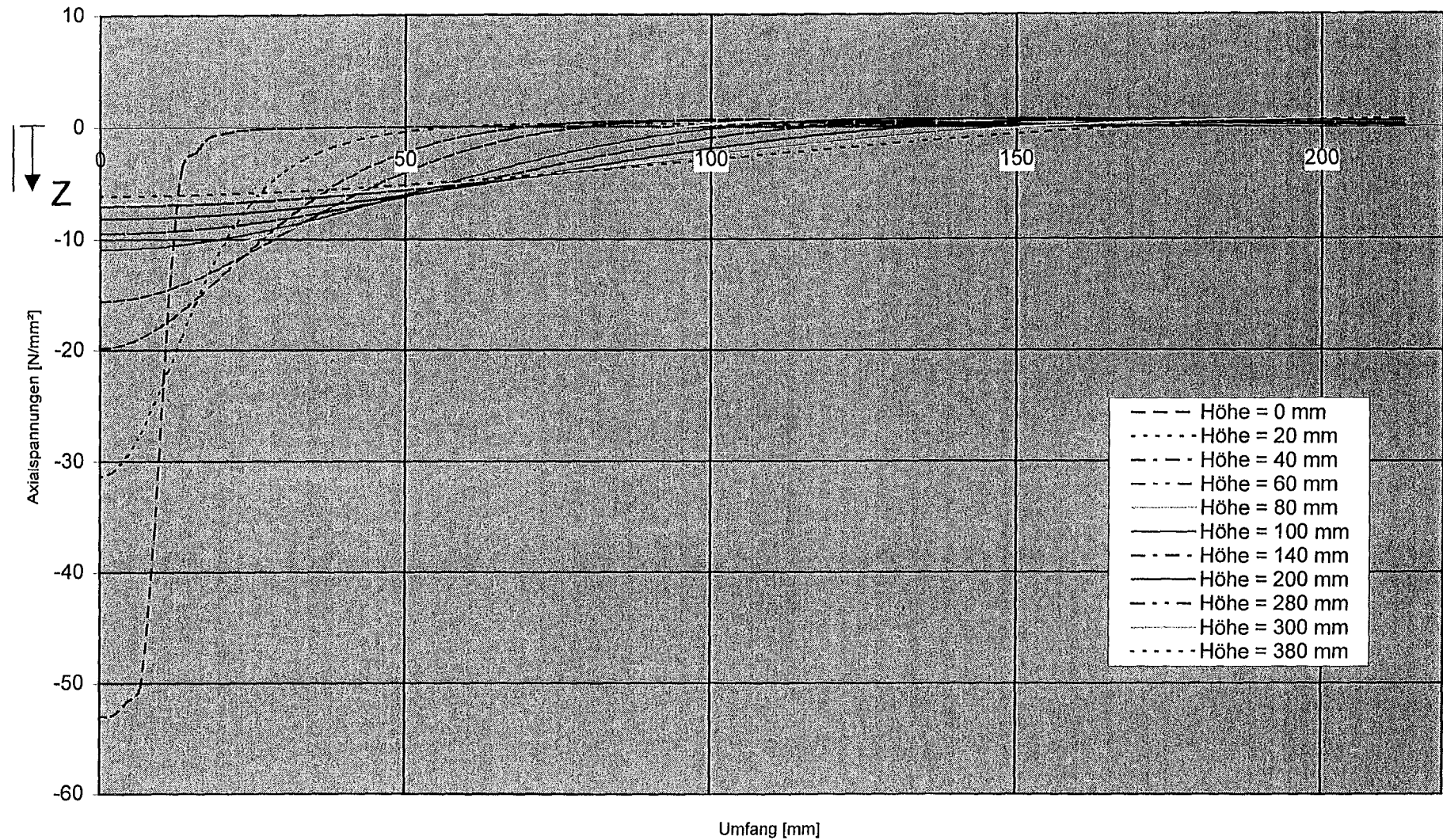


Bild C29: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ohne Endring; $t = 1,0$ mm; schlaaffe Lagerung)

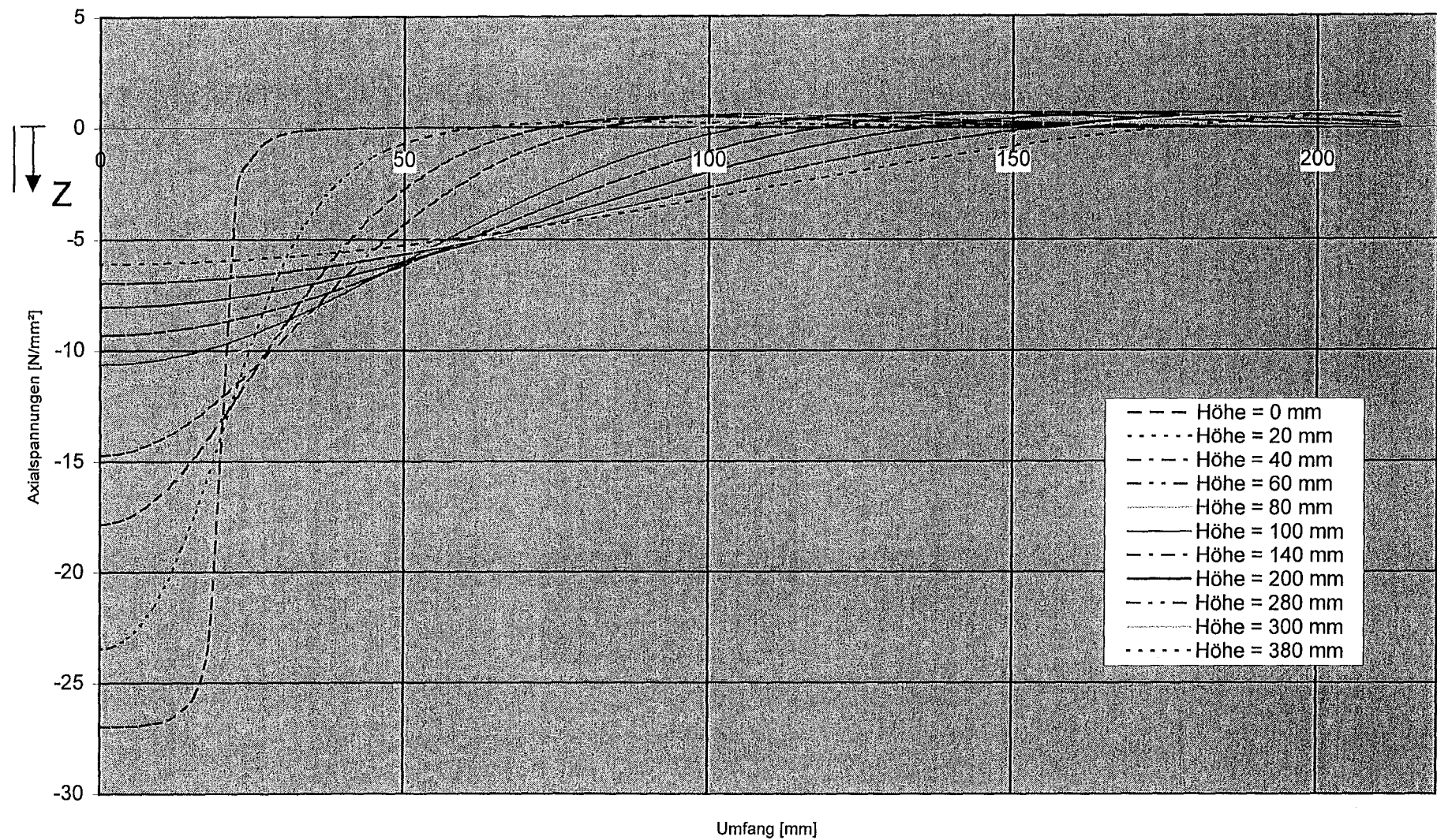


Bild C30: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ohne Endring; $t = 1,0$ mm; schlaaffe Lagerung)

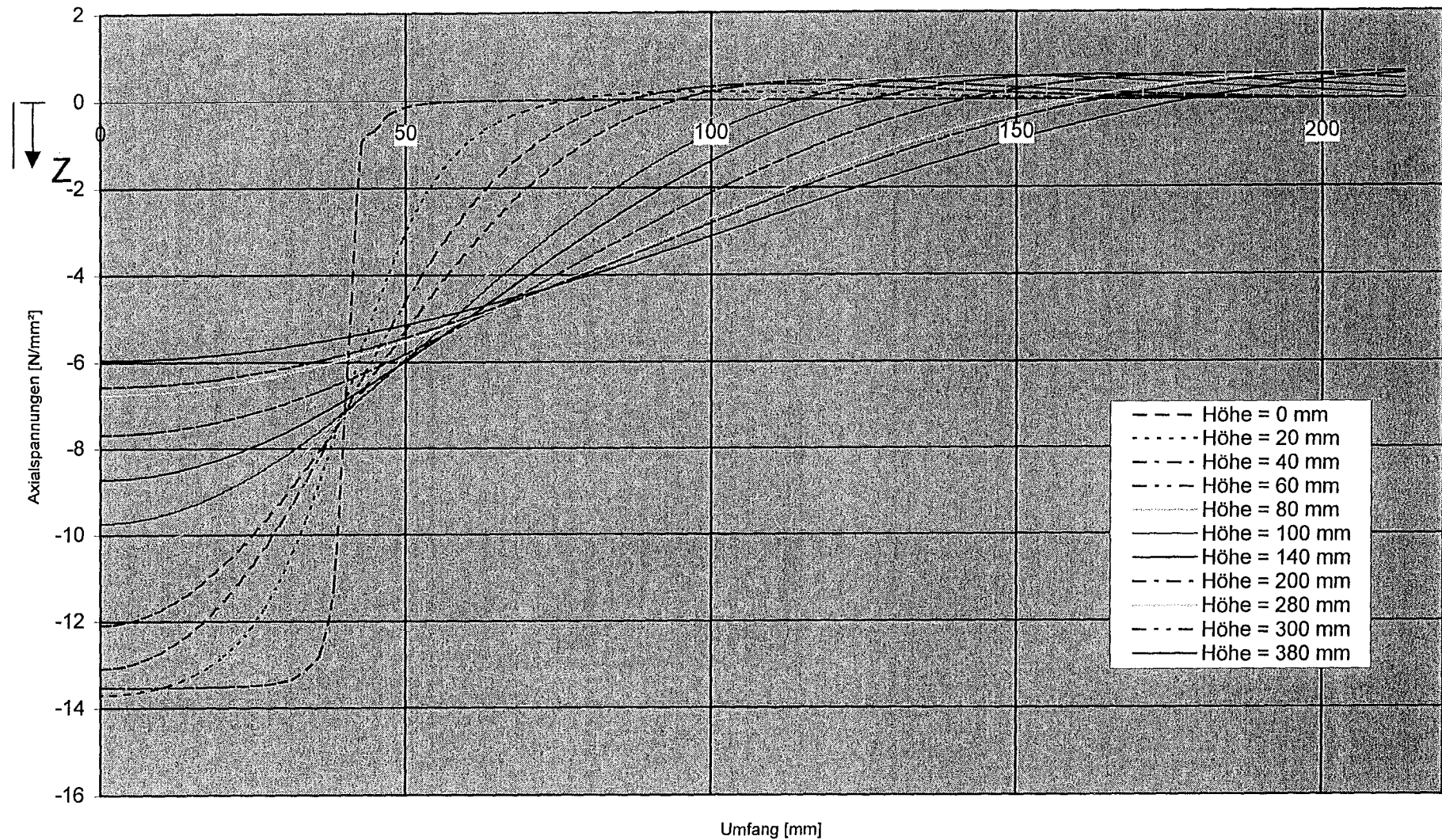


Bild C31: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ohne Endring; $t = 1,0$ mm; schlaaffe Lagerung)

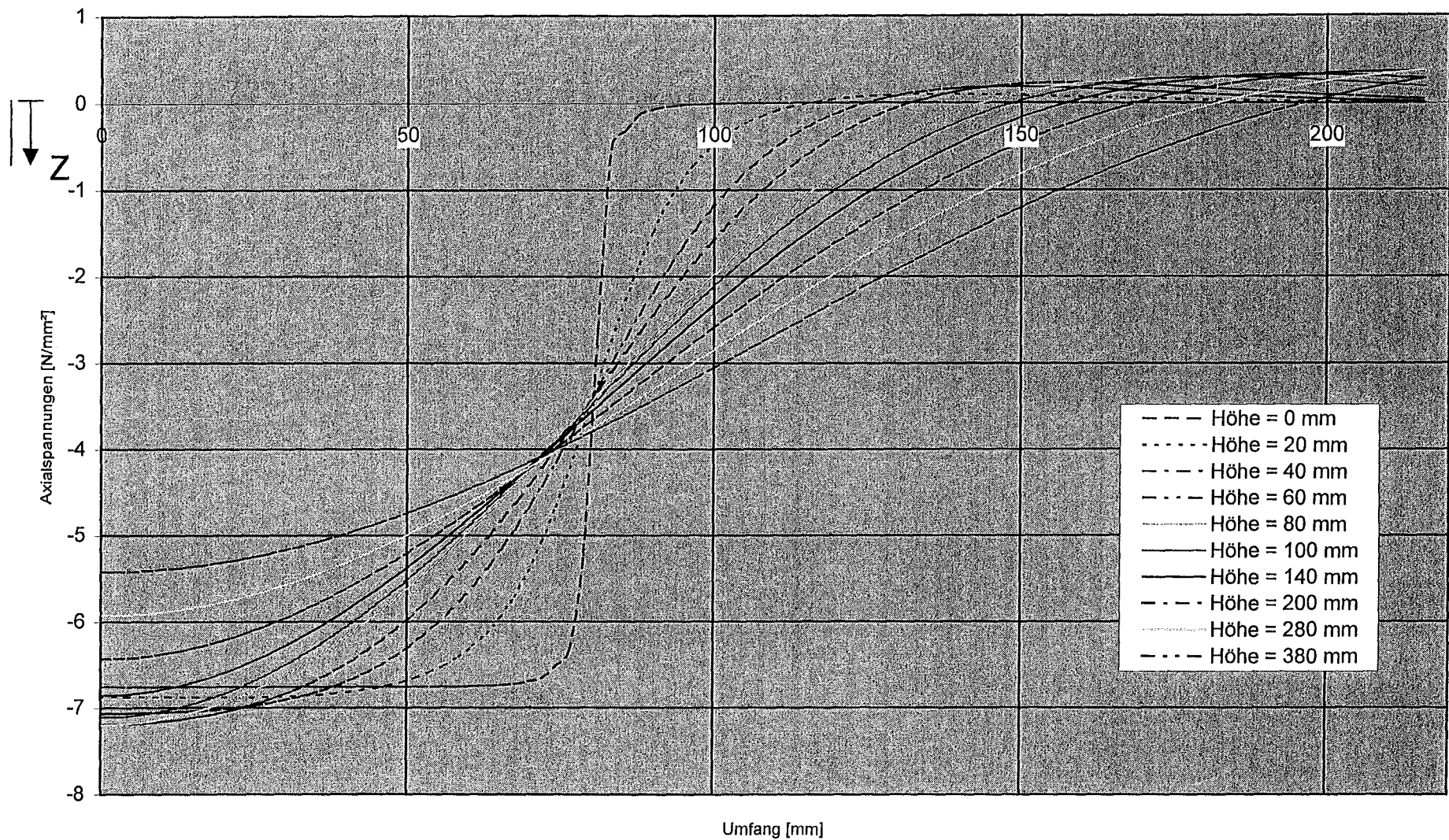


Bild C32: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ohne Endring; $t = 1,0 \text{ mm}$; schlaife Lagerung)

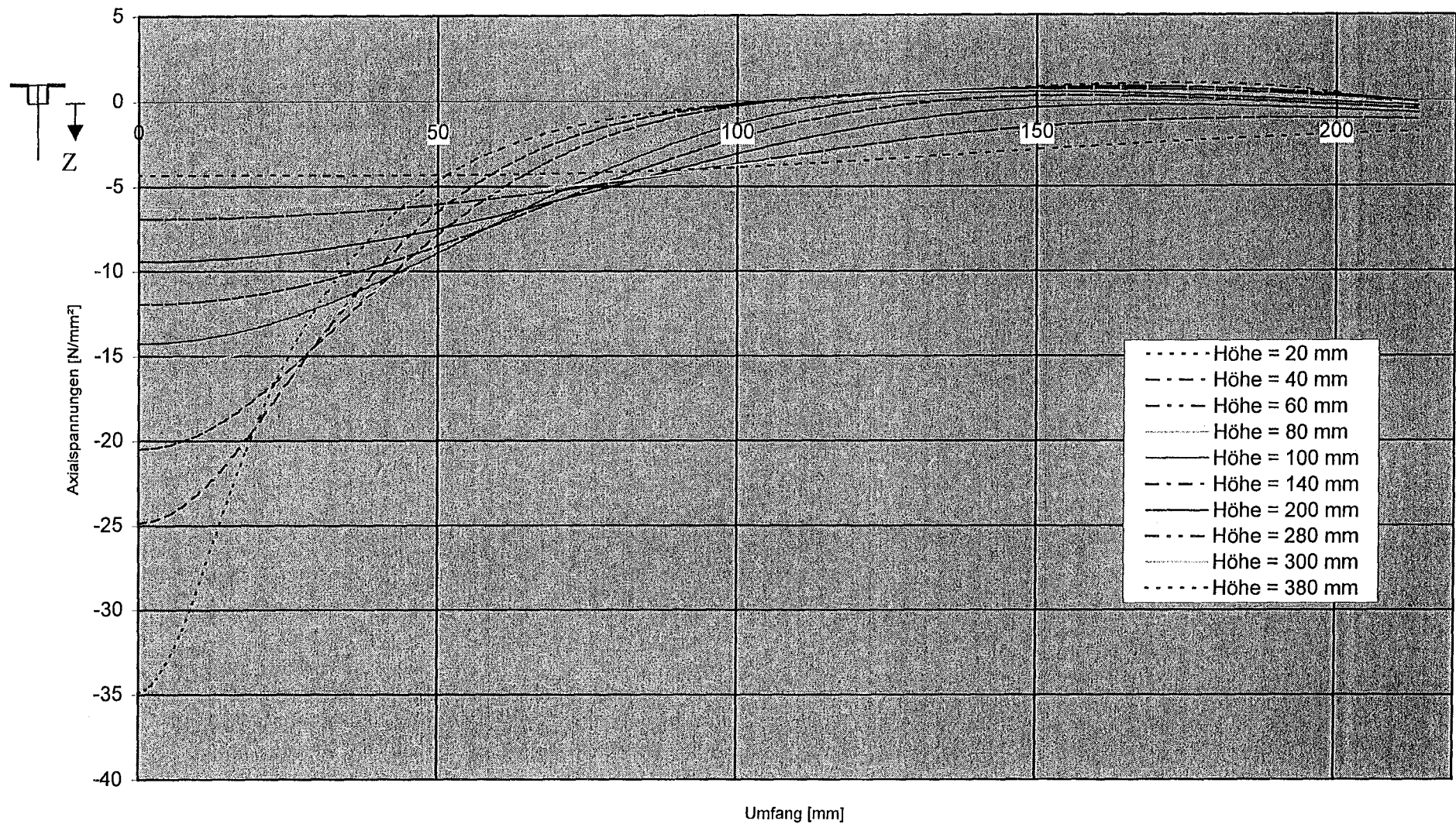


Bild C33: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; L-Profil; t = 0,6 mm; schlaaffe Lagerung)

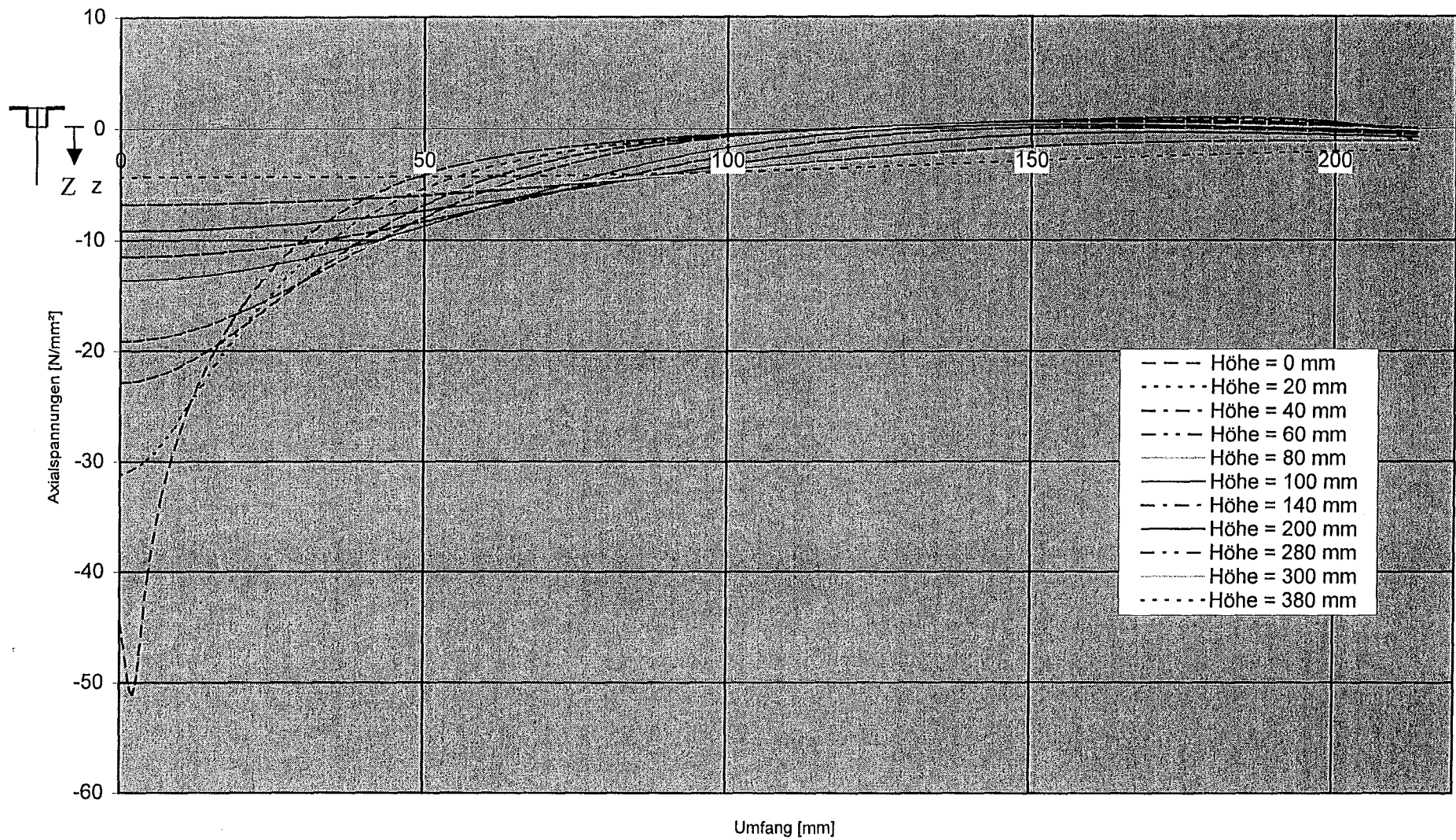


Bild C34: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; L-Profil; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

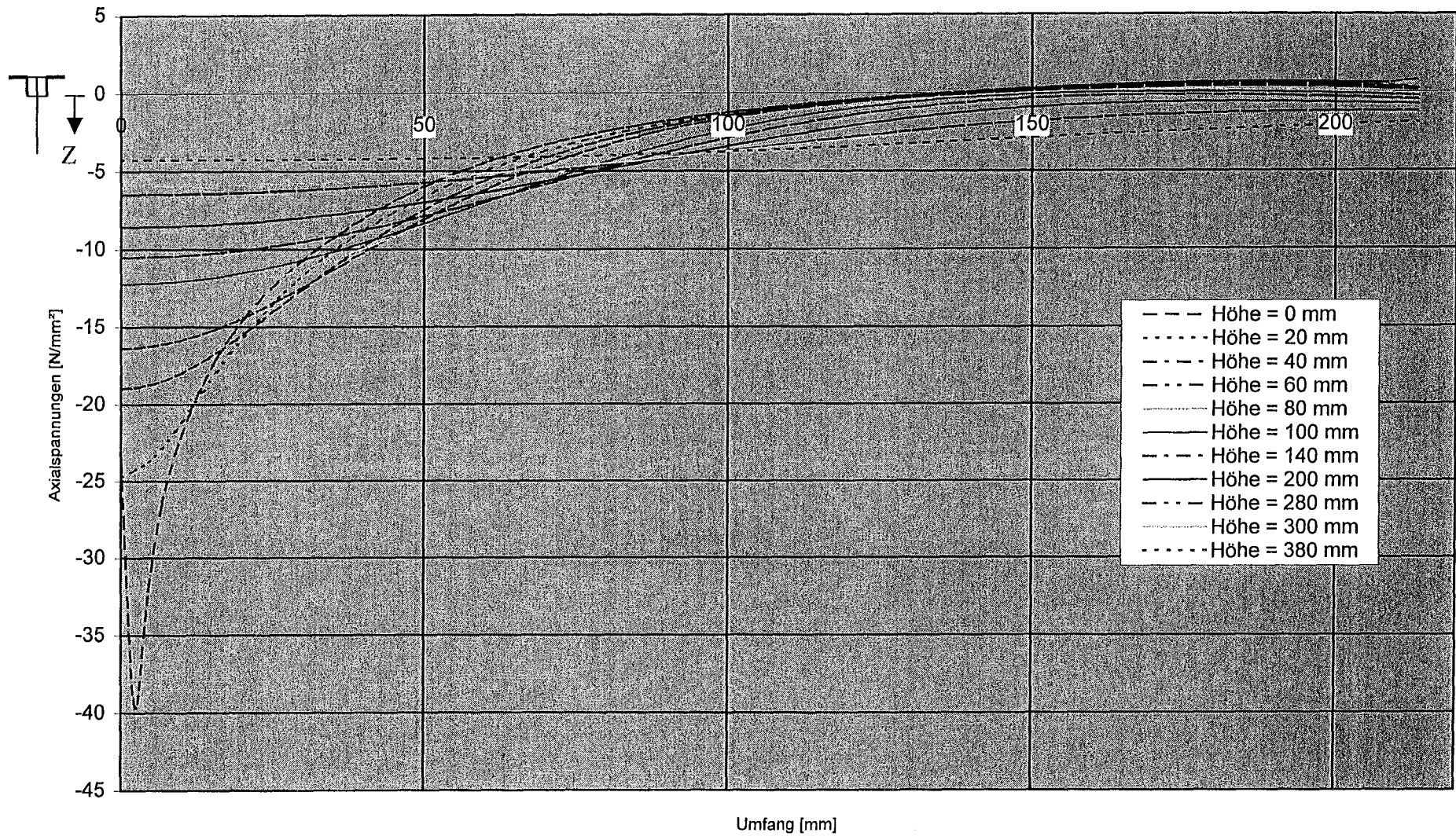


Bild C35: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; L-Profil; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

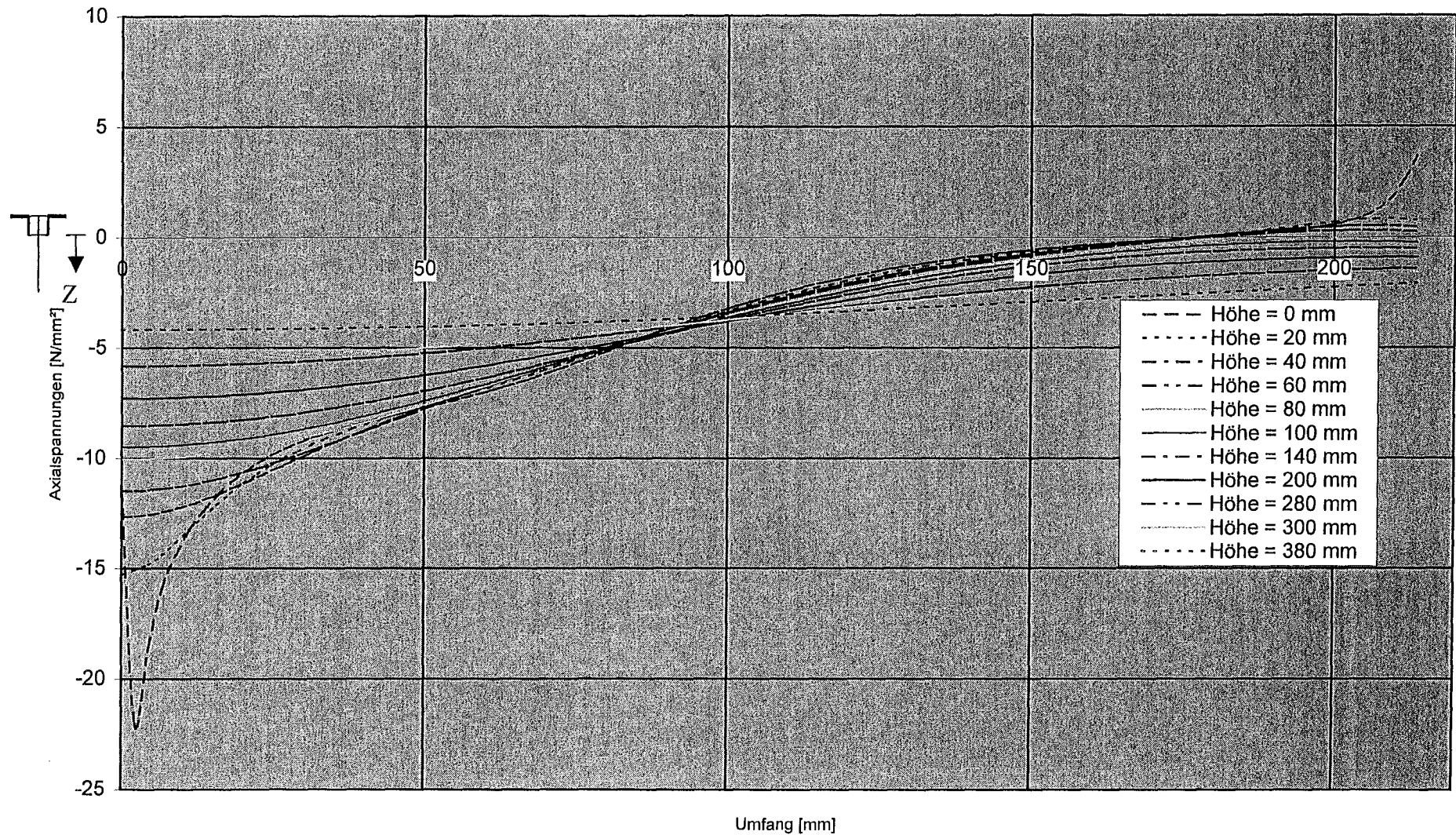


Bild C36: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; L-Profil; t = 0,6 mm; schlaaffe Lagerung)

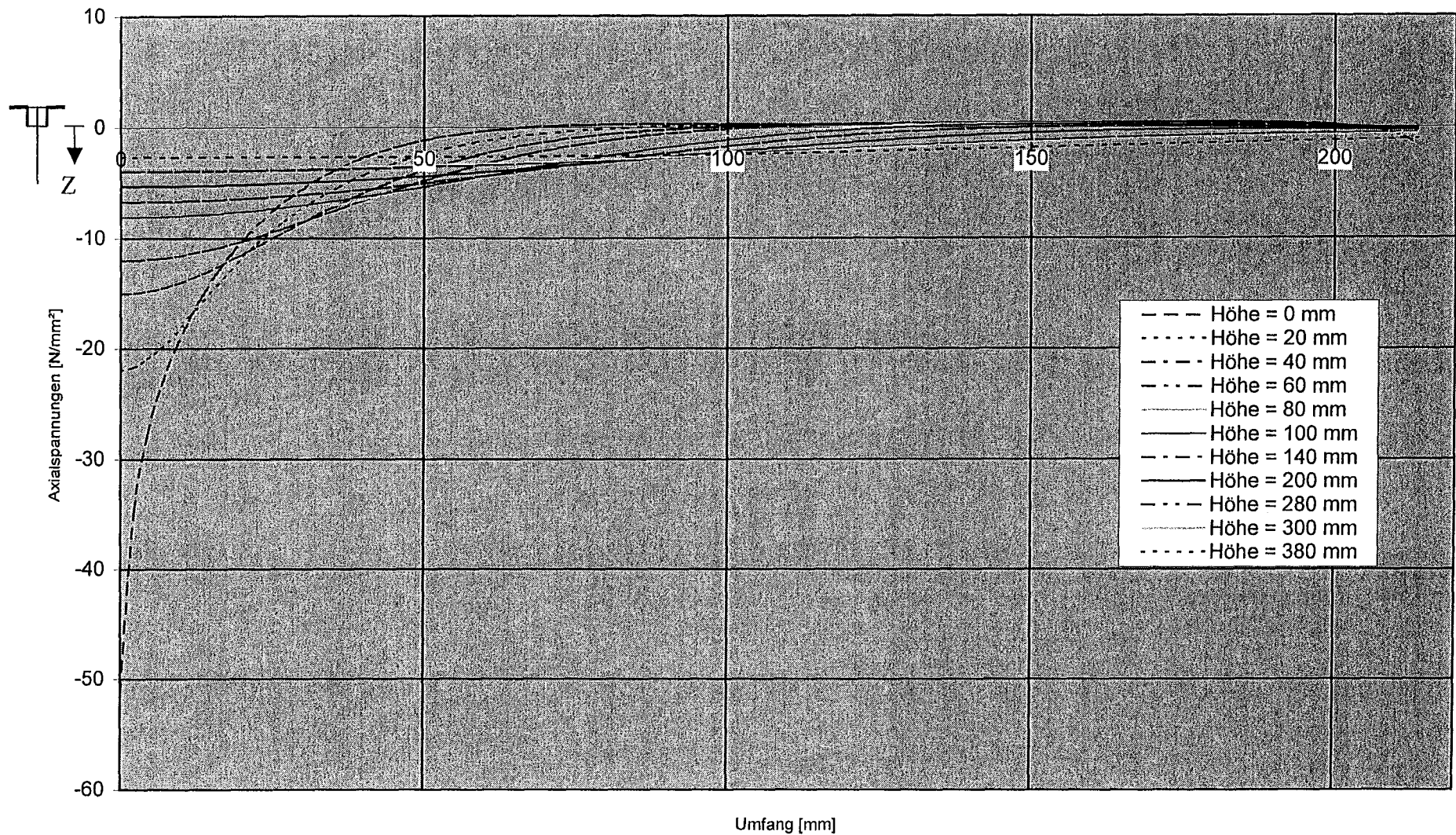


Bild C37: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; L-Profil; $t = 1,0$ mm; schlaaffe Lagerung)

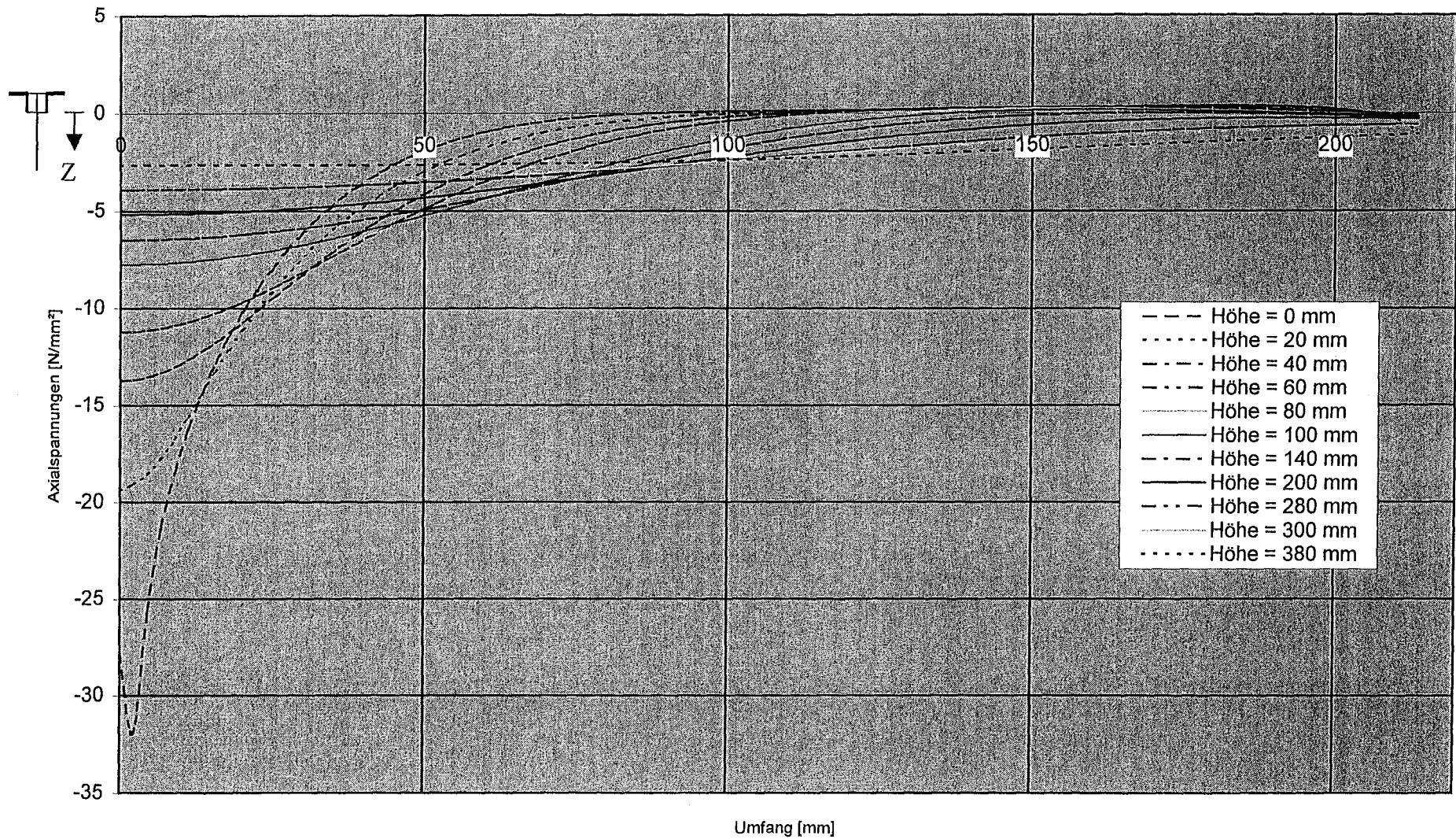


Bild C38: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; L-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

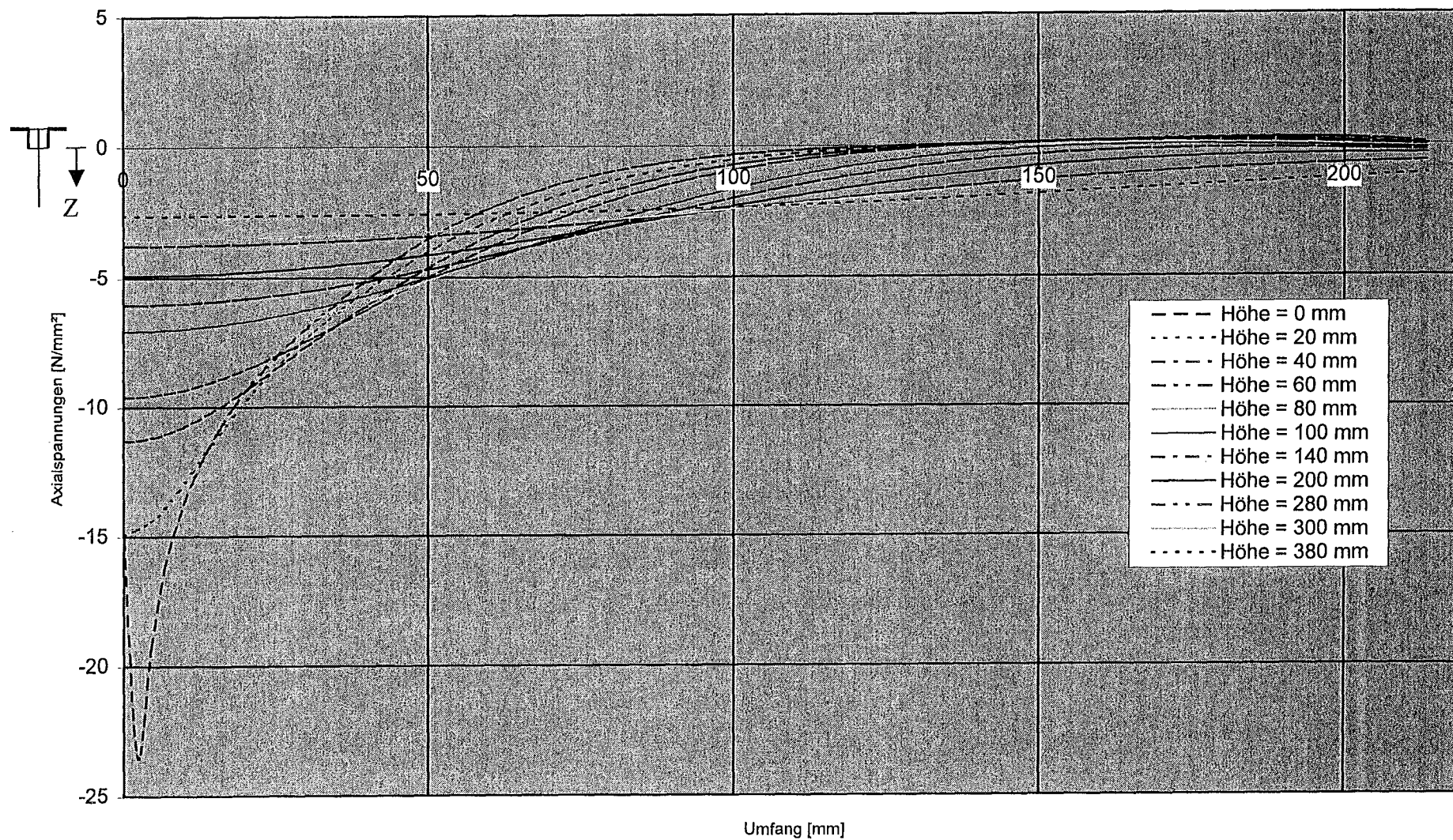


Bild C39: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; L-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

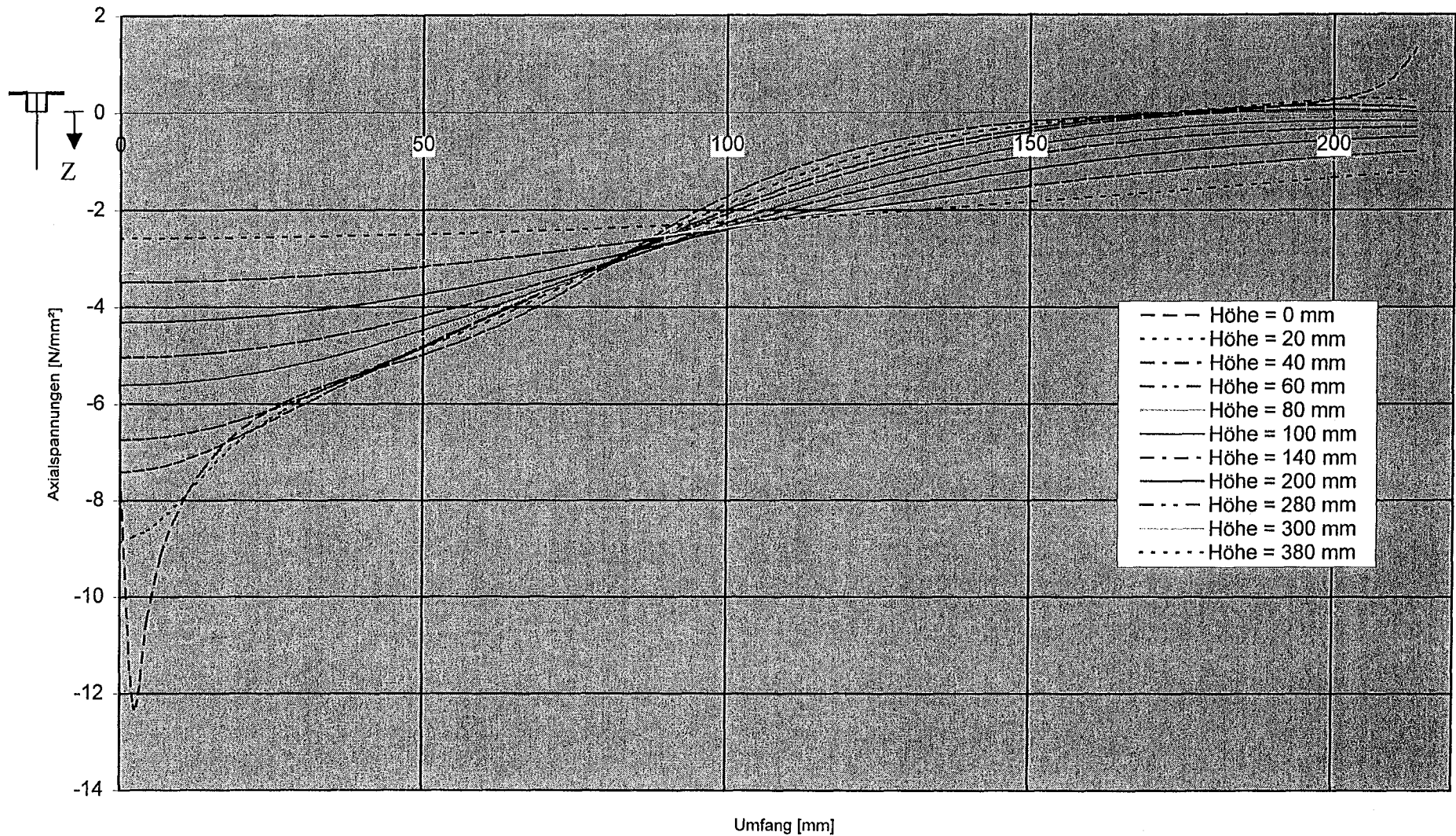


Bild C40: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; L-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

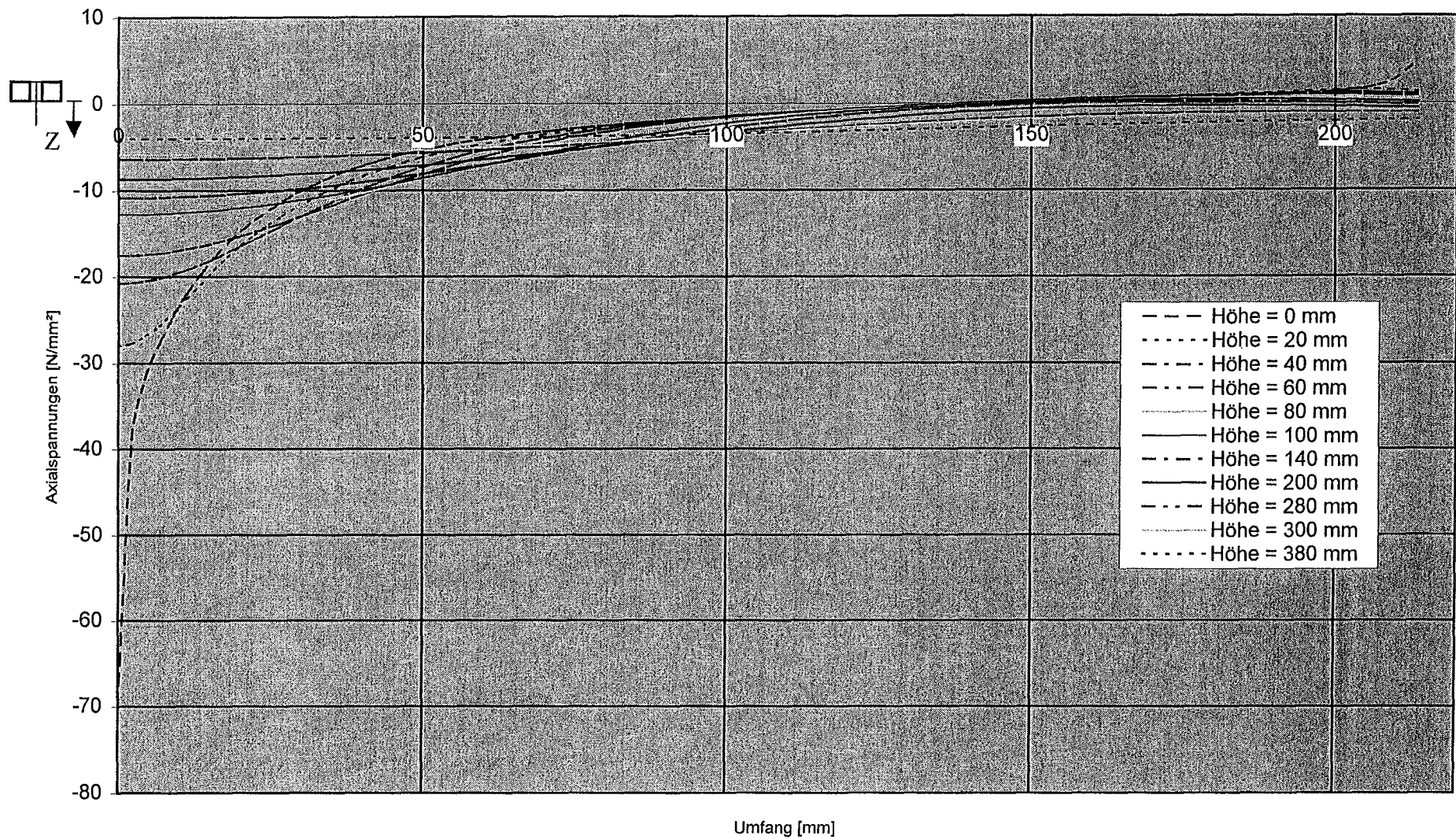


Bild C41: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ■-Profil; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

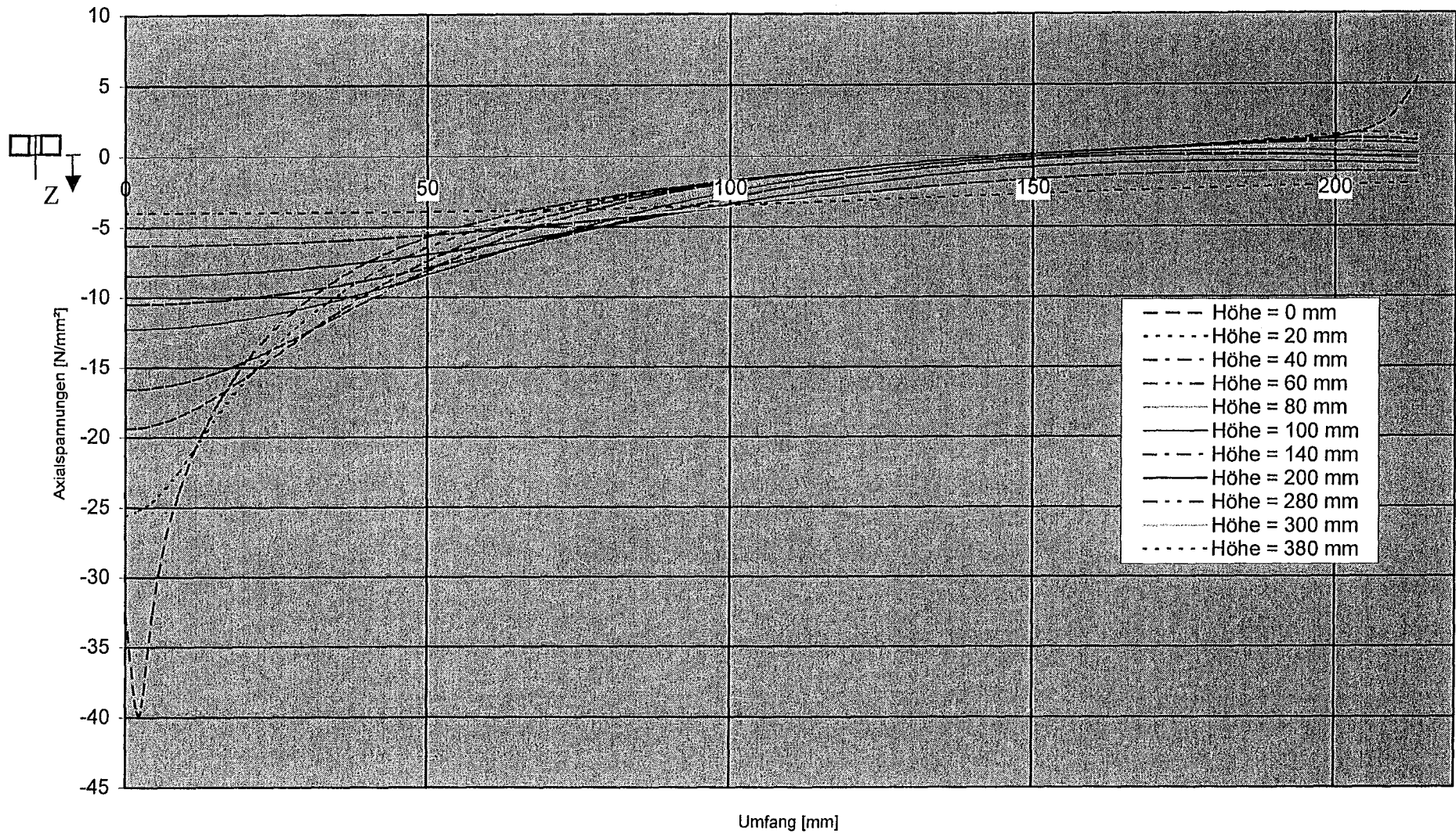


Bild C42: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ■-Profil; t = 0,6 mm; schlaaffe Lagerung)

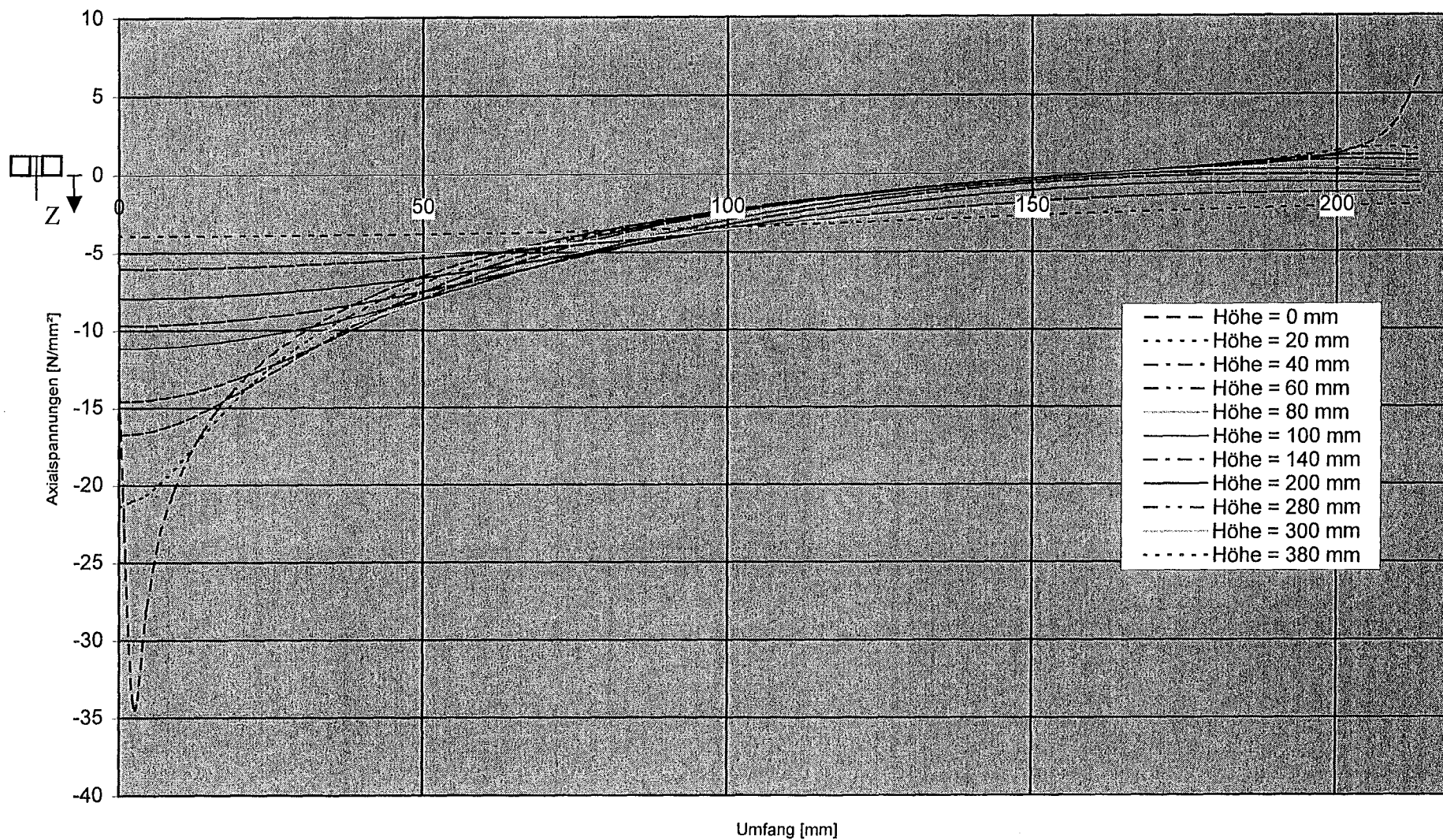


Bild C43: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ■-Profil; t = 0,6 mm; schlaaffe Lagerung)

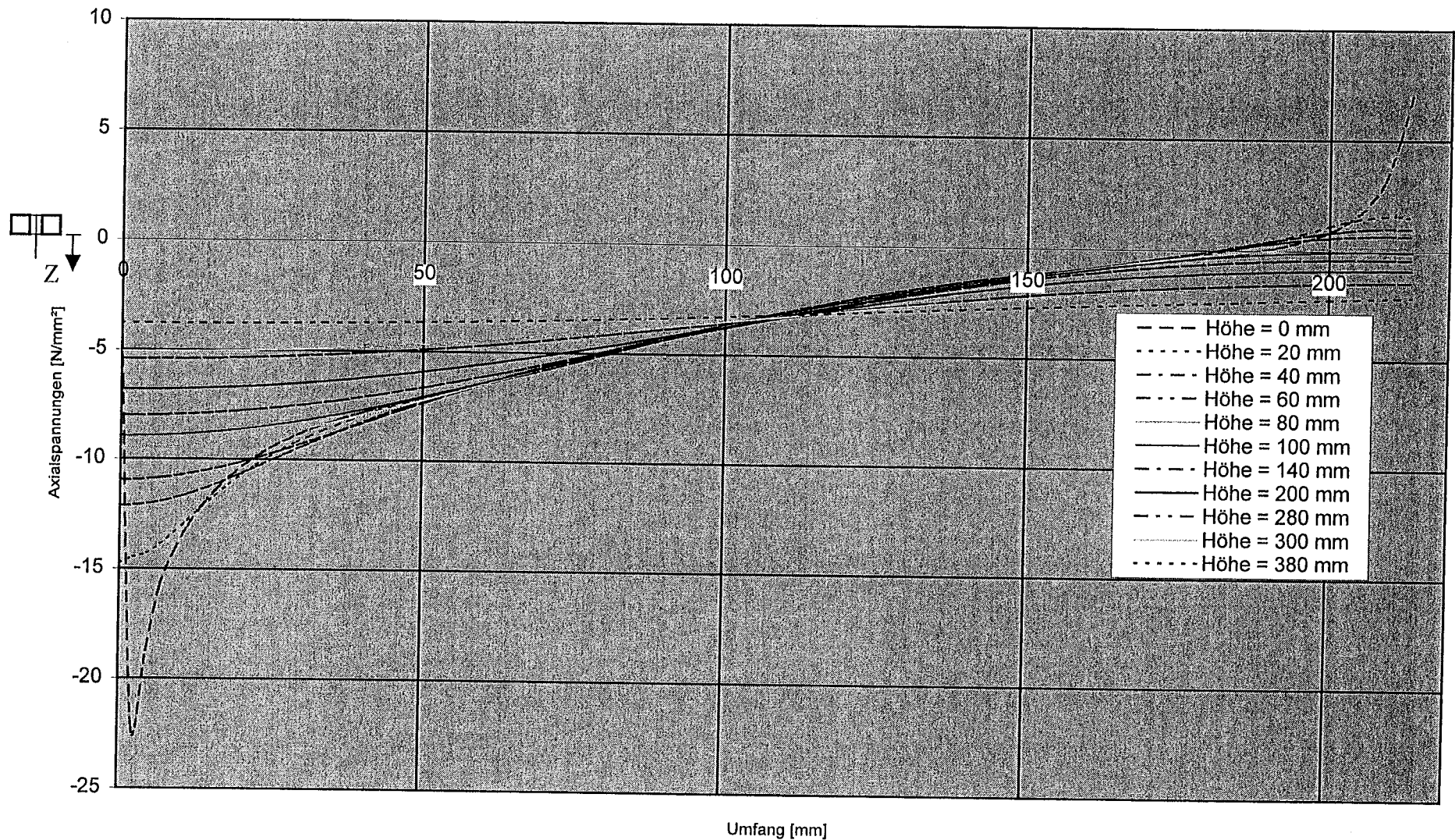


Bild C44: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ■-Profil; $t = 0,6$ mm; schlaaffe Lagerung)

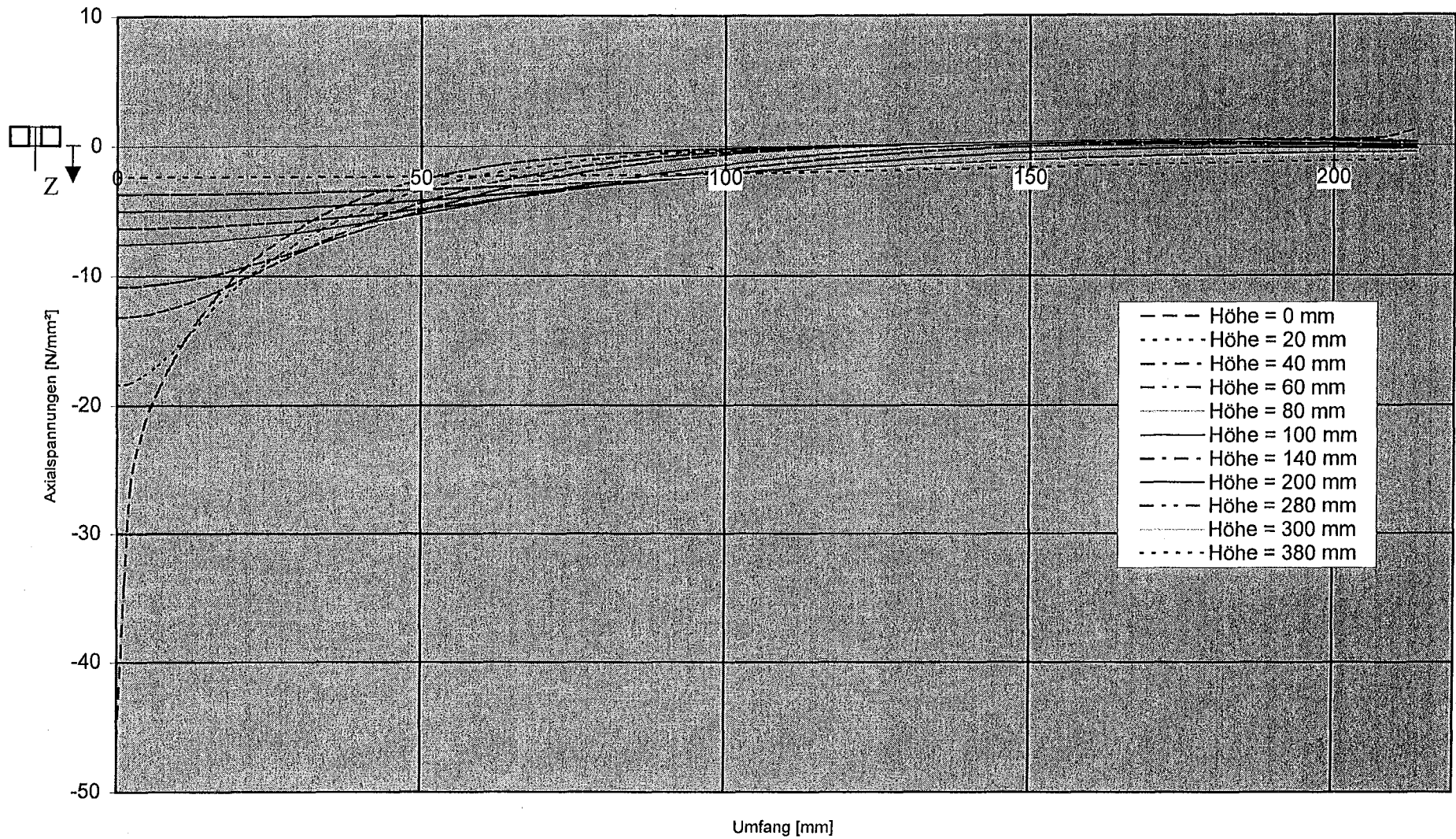


Bild C45: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 20 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

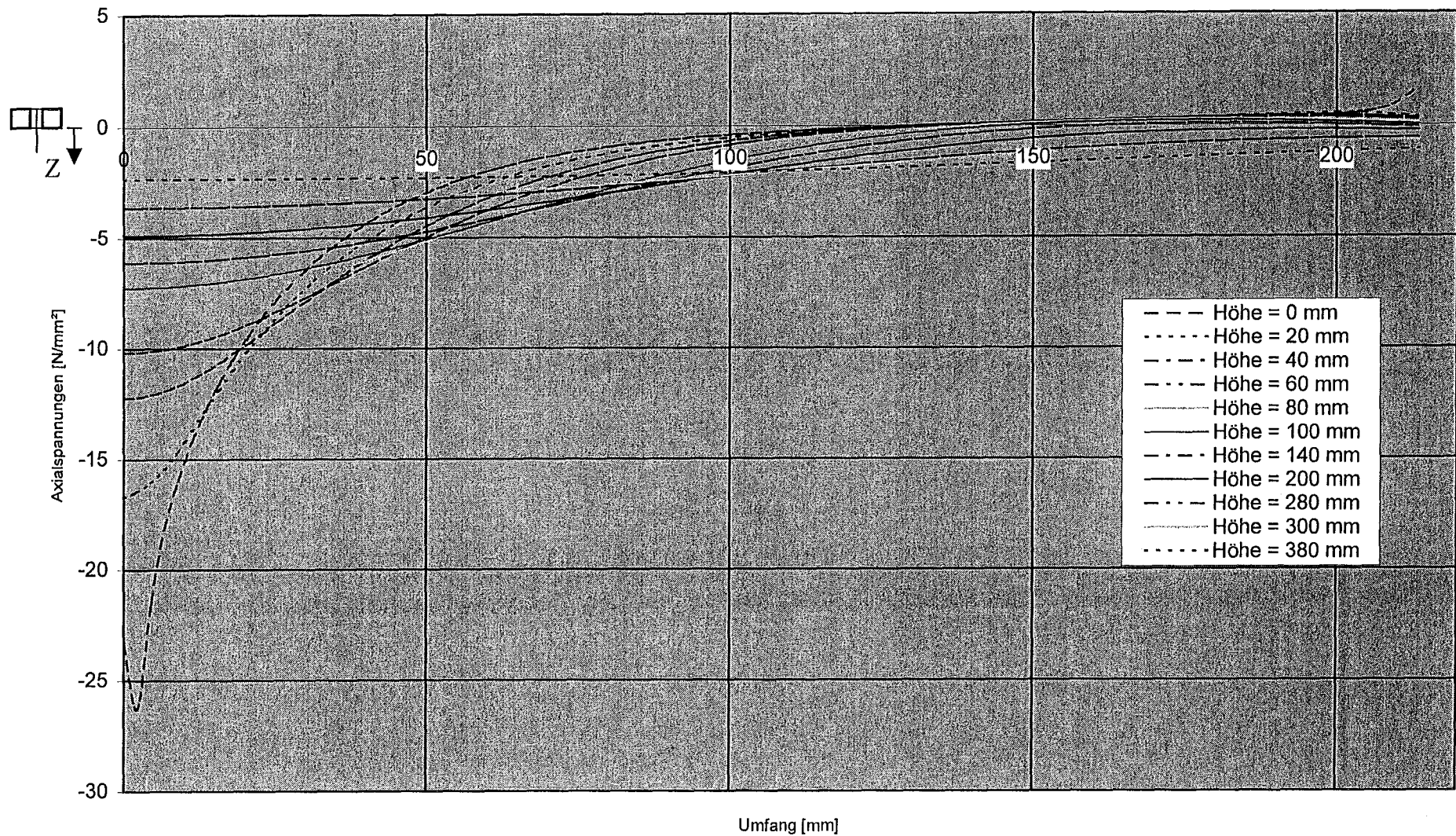


Bild C46: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 40 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

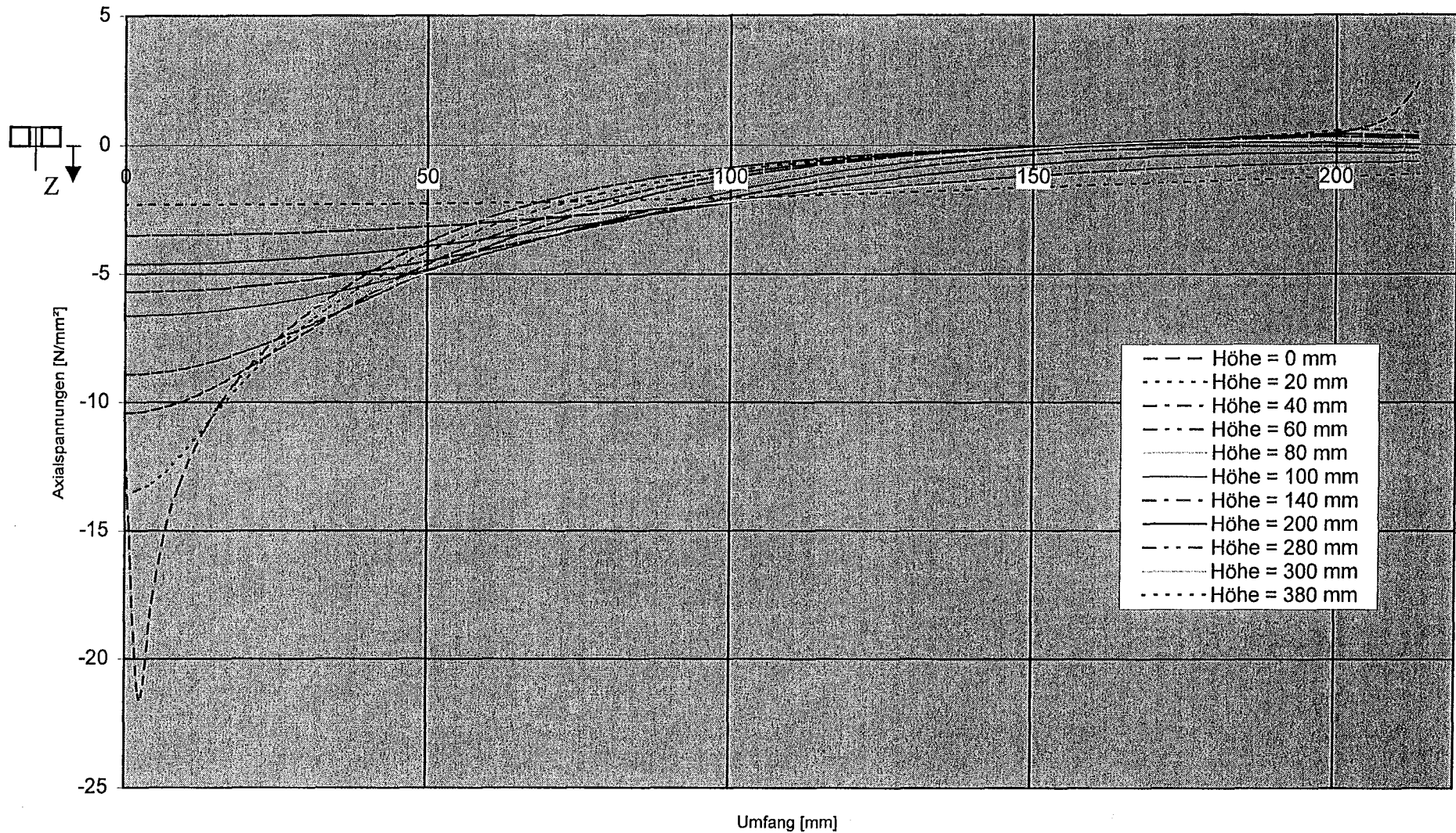


Bild C47: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 80 mm; ■-Profil; $t = 1,0$ mm; schlaife Lagerung)

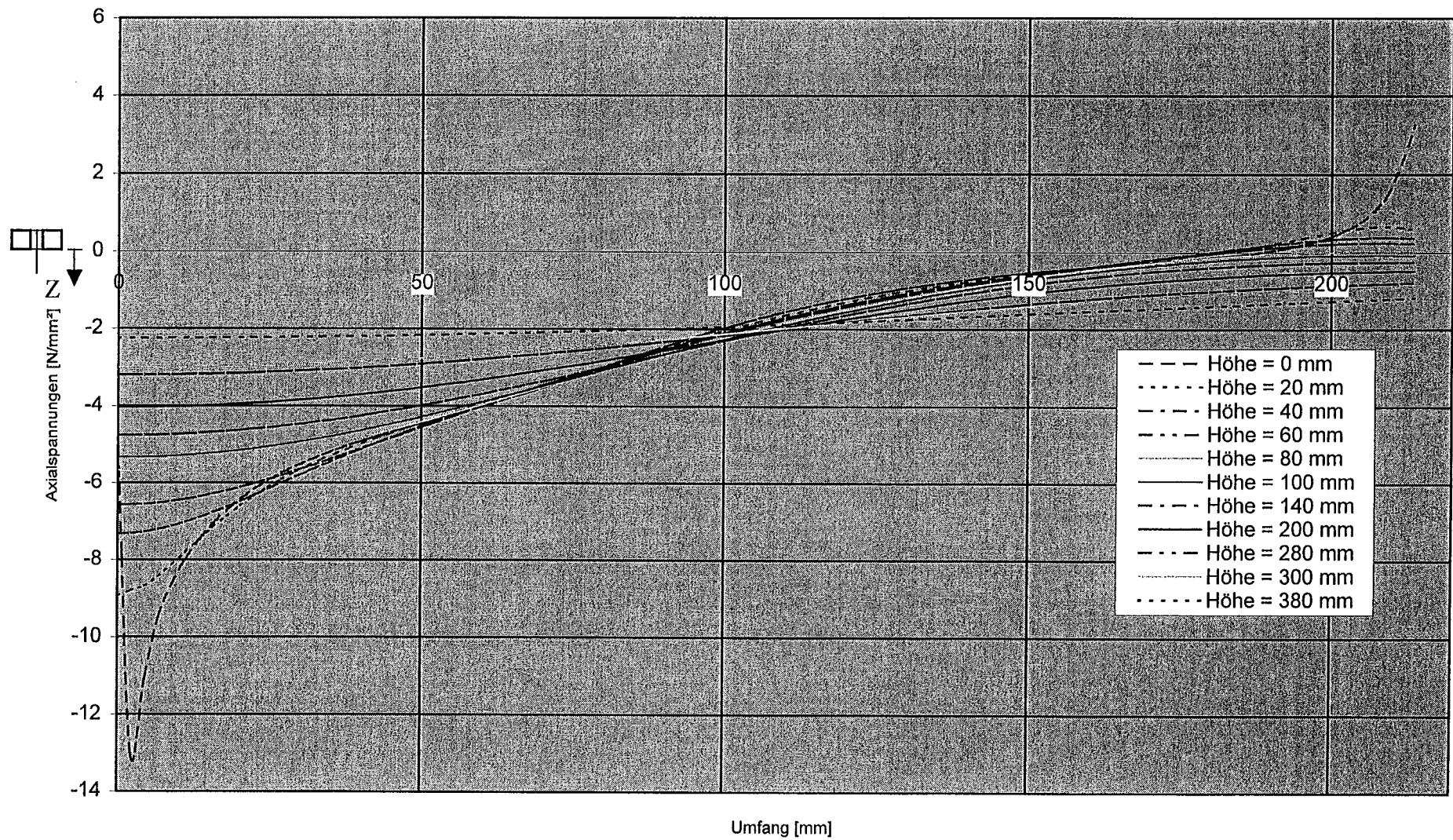


Bild C48: Axialspannungsverteilung am unteren Schalenrand (Lasteinleitungsbreite 160 mm; ■-Profil; t = 1,0 mm; schlaaffe Lagerung)

Anhang D

Foto-Dokumentation zu den Versuchen

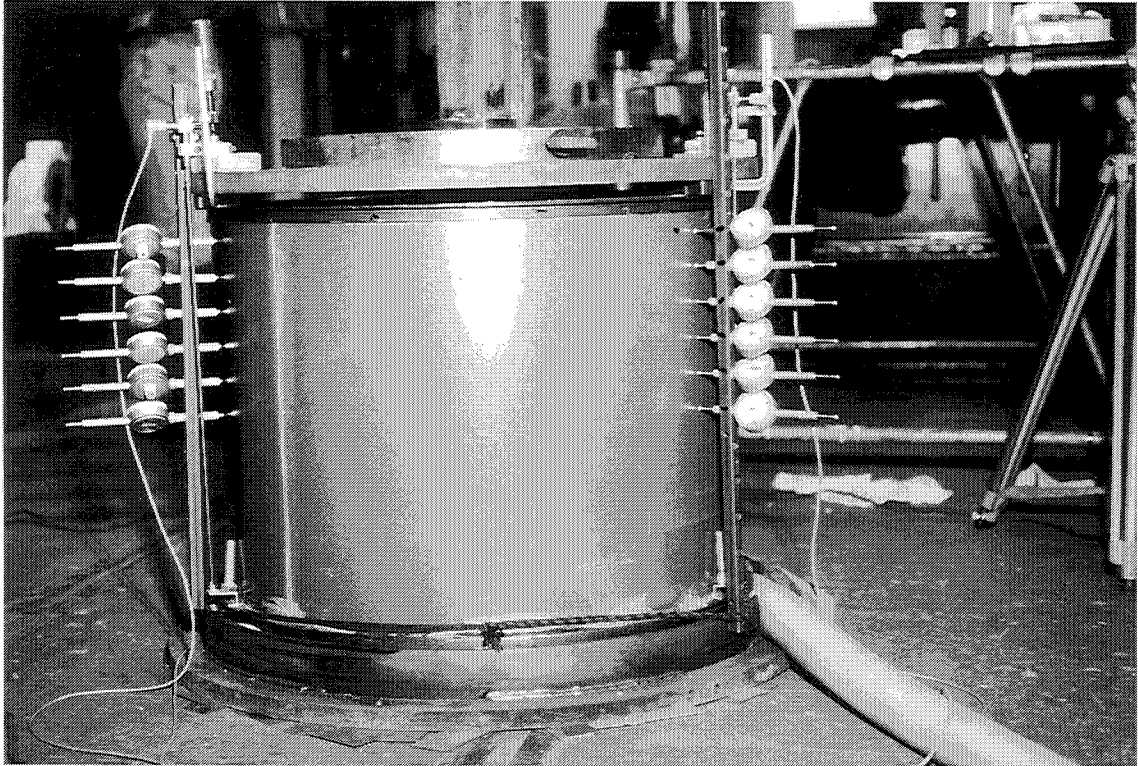


Bild 1: Prüfkörper in der Versuchsanlage

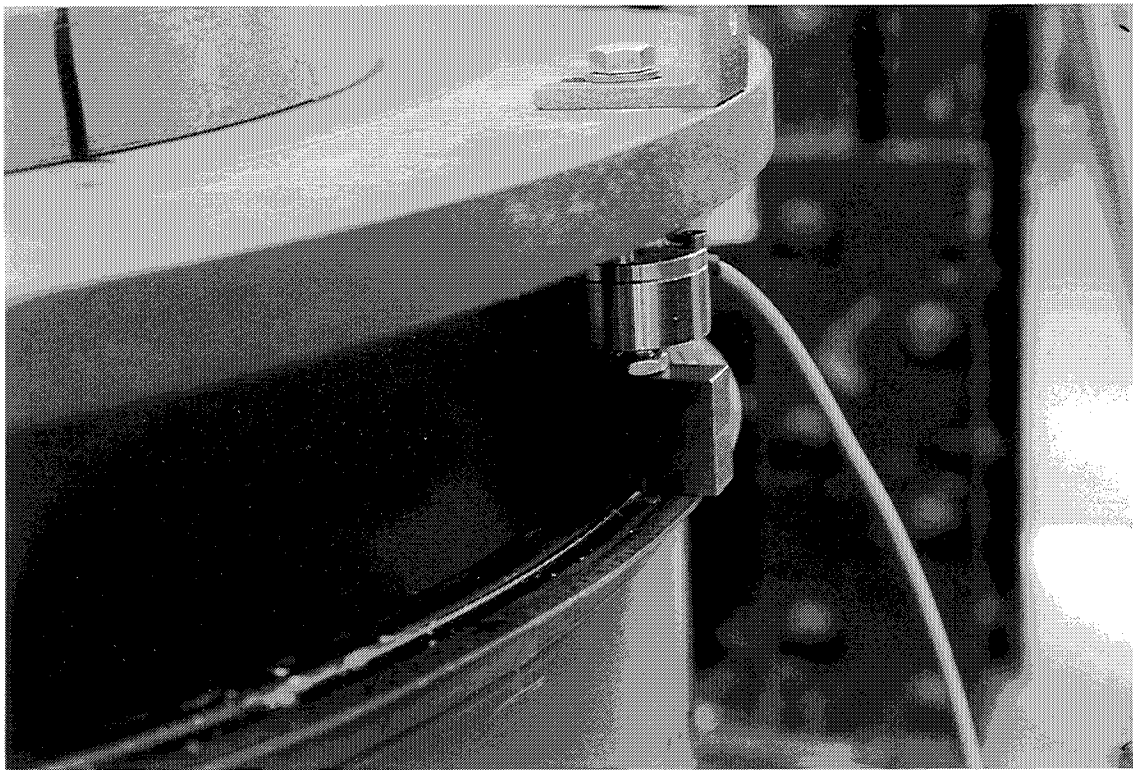


Bild 2: Lasteinleitungsstelle mit Druckmeßdose
(Prüfkörper Nr. 1)

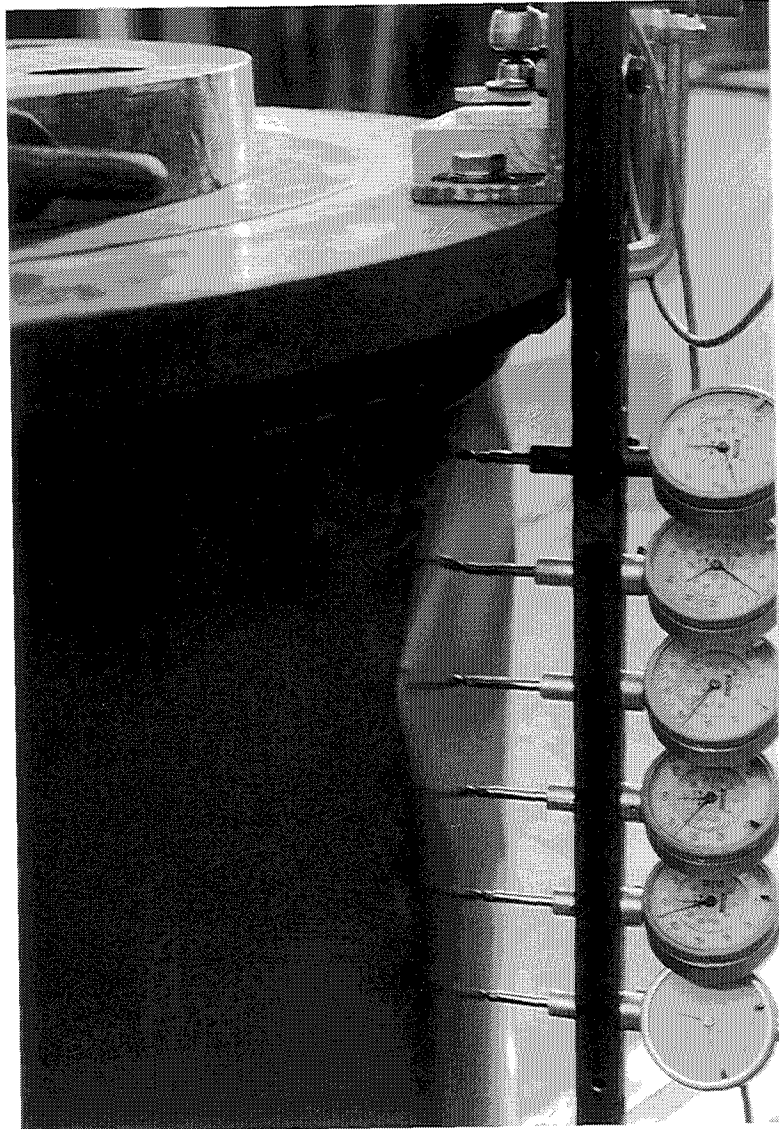


Bild 3: Beulenbildung unter der
Lasteinleitungsstelle

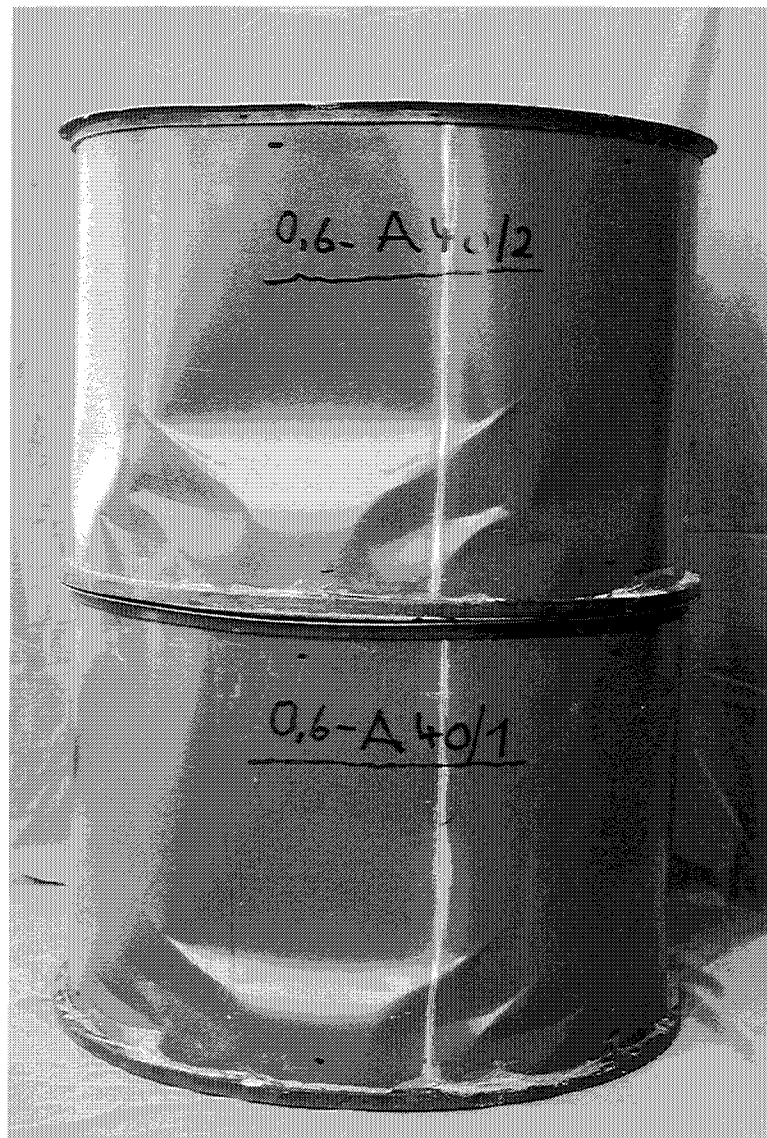


Bild 4: Beulenbildung bei Prüfkörper Nr. 7 und Nr. 8

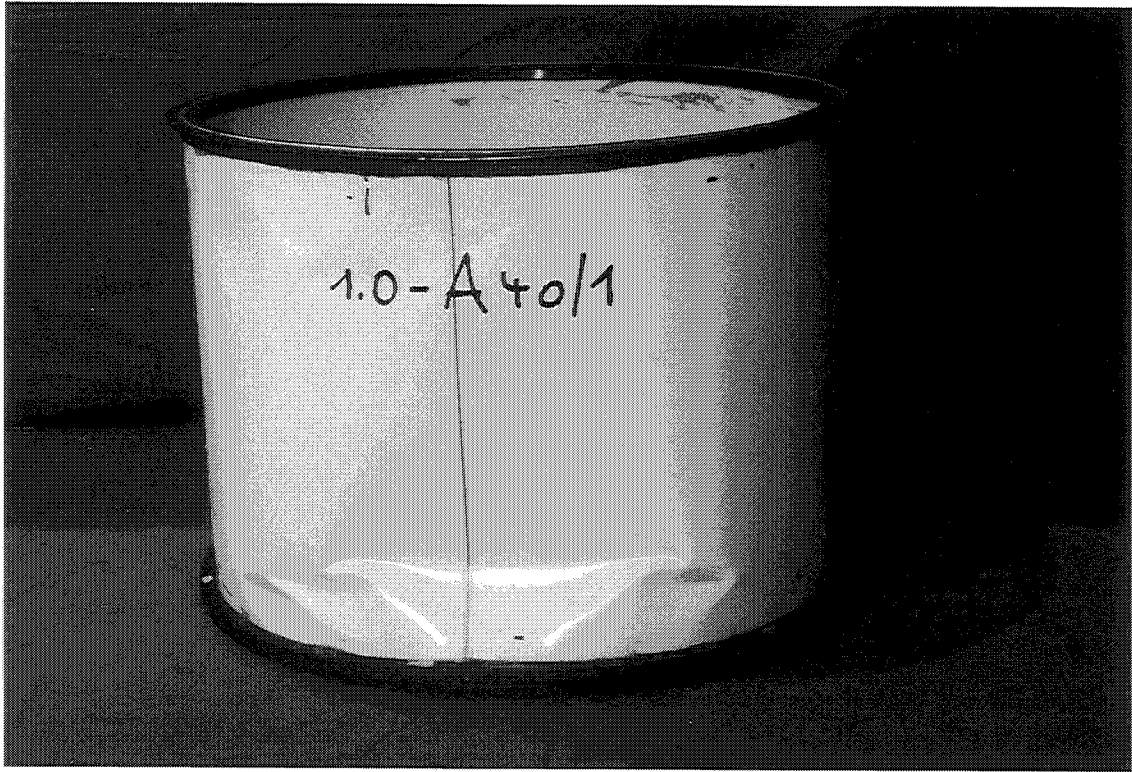


Bild 5: Beulenbildung bei Prüfkörper Nr. 9



Bild 6: Beulenbildung bei Prüfkörper Nr. 11 (Außenansicht)

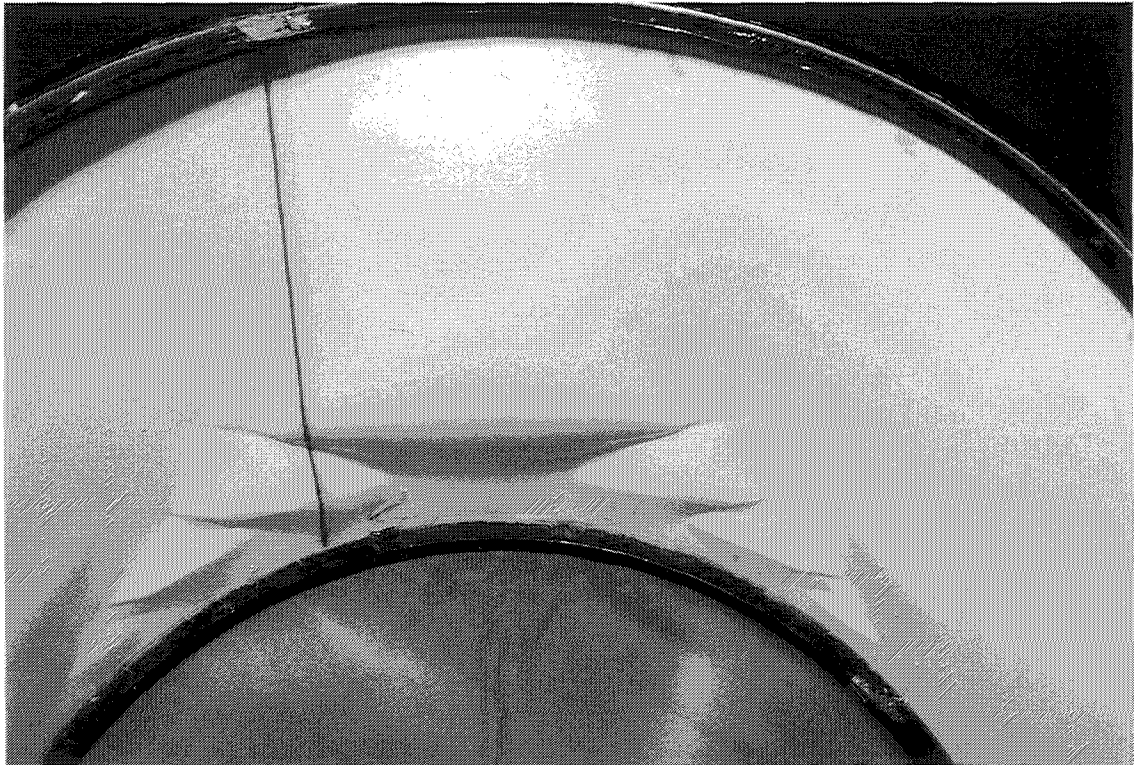


Bild 7: Beulenbildung bei Prüfkörper Nr. 10/III (Innenansicht)

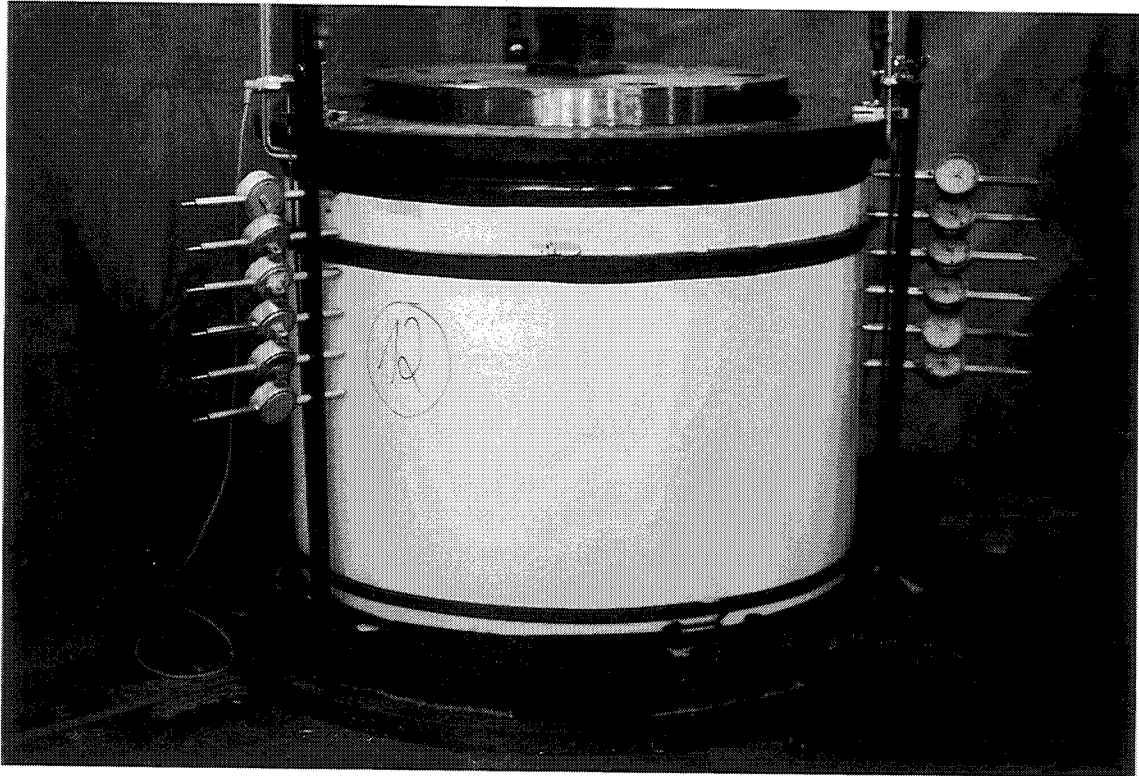


Bild 8: Prüfkörper Nr. 12 mit Mittelringsteife in der Versuchsanlage

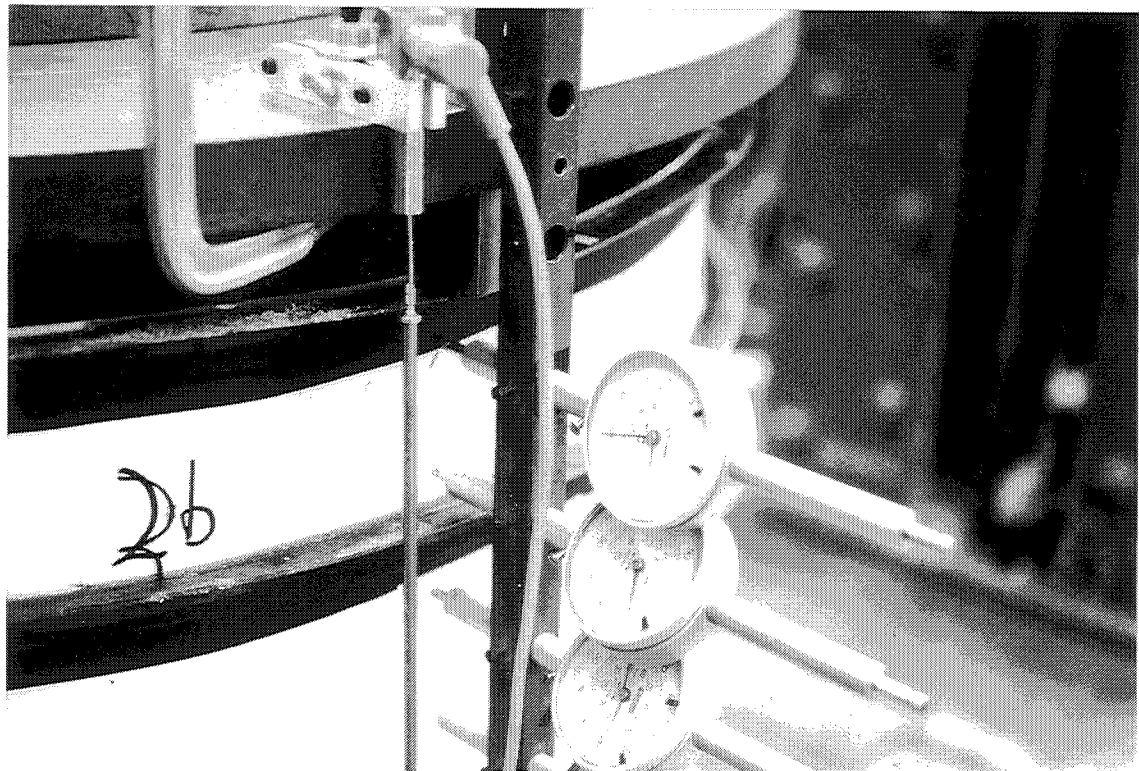


Bild 9: Beulenbildung zwischen den Ringsteifen bei Prüfkörper Nr. 12