

**Zähigkeitsanforderungen bei
geschweißten Stabanschlüssen
mit geschlitzten Knotenblechen**

T 3057

T 3057

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

2004, ISBN 3-8167-6650-1

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

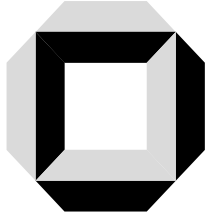
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
(Amtliche Materialprüfungsanstalt)
Universität Karlsruhe (TH)

Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. J. Blaß und Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal

BERICHT

Nr.: 011503

**Zähigkeitsanforderungen bei geschweißten Stabanschlüssen mit
geschlitzten Knotenblechen**

Auftraggeber:

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30L
10829 Berlin

Grundlage der Prüfung:

Vertrag zwischen dem Auftraggeber und der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
(Az.: P 3-5-16.109-985/01)

Dieser Bericht enthält 44 Seiten und 6 Anlagen (107 Seiten).

Karlsruhe, am 29. März 2004

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Saal

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Michael Volz

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbemerkungen.....	3
1.1 <i>Problemstellung.....</i>	3
1.2 <i>Ziel des Forschungsprojektes.....</i>	4
2. Planung des Versuchsprogramms.....	5
3. Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse	9
3.1 <i>Werkstoffkennwerte</i>	9
3.1.1 Allgemeines.....	9
3.1.2 Zugversuche nach DIN EN 10002	9
3.1.3 Kerbschlagbiegeversuche nach DIN EN 10045	9
3.2 <i>Bauteilversuche</i>	16
3.2.1 Versuchsprogramm.....	16
3.3 <i>Versuchsergebnisse</i>	19
3.4 <i>FE – Berechnungen.....</i>	22
3.4.1 Vorbemerkungen	22
3.4.2 FE – Berechnungen mit Schalenelementen	23
3.4.3 FE – Berechnungen mit Volumenelementen.....	28
3.5 <i>Vergleich der Versuche mit den FE – Berechnungen und den Bemessungsformeln.....</i>	31
4. Bemessungsvorschlag.....	40
4.1 <i>Allgemeines</i>	40
4.2 <i>Knotenblechform A.....</i>	40
4.3 <i>Knotenblechform B.....</i>	43
5. Zusammenfassung	44

1. Vorbemerkungen

1.1 Problemstellung

Die zunehmenden Anforderungen an Spannweite und Transparenz von Stahlbaukonstruktionen führen zu Fachwerkstrukturen oder Konstruktionen mit Abspannungen. Die Diagonalen oder Abspannungen haben immer häufiger große Querschnitte (z.B. HEM-Profile oder Rundmaterial $\varnothing 160$). Dabei erweisen sich geschlitzte Knotenbleche hinsichtlich des Ausgleiches von Toleranzen bei geschweißten Stabanschlüssen als sehr vorteilhaft und kommen immer häufiger zum Einsatz. Die Bilder 1 und 2 zeigen beispielhaft solche Anschlüsse.

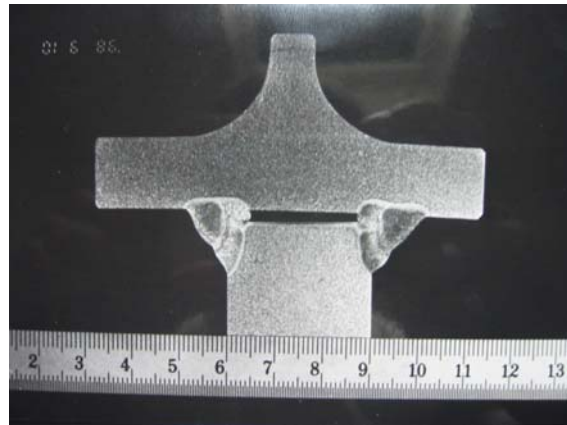


Bild 1 Links: Fachwerkkonstruktion mit HE100B – Profilen, die Diagonalen sind in Knotenbleche eingesteckt.
Rechts: Makroschliff einer solchen Verbindung

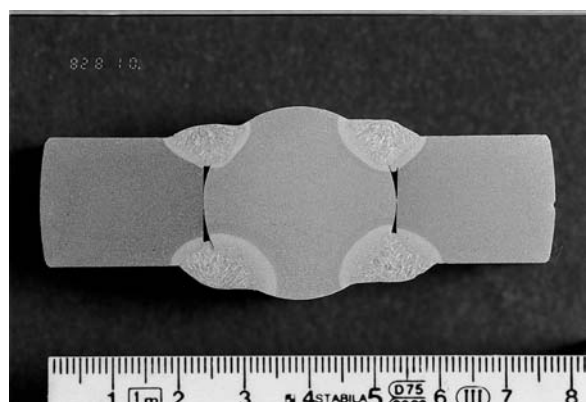


Bild 2 Links: Anschluss eines Rundstabes $d = 30$ mm an ein Knotenblech $t = 15$ mm
Rechts: Makroschliff der Verbindung

Für den statischen Tragfähigkeitsnachweis von Fachwerkknoten mit diesen Anschlüssen wird in [1] ein Berechnungsmodell angegeben, das das Fließvermögen des Werkstoffes voll in Anspruch nimmt. Der statische Tragfähigkeitsnachweis für den Anschluss von Einzelstäben wird in [2] ebenfalls für den plastischen Zustand untersucht. Dieser Ansatz plastischer Tragzustände ist bei der Bemessung von Anschlüssen im Stahlhochbau üblich.

Im vorliegenden Falle (geschlitztes Knotenblech mit eingeschweißtem Stab), der weder durch [3] noch durch [4] abgedeckt ist [5], treten sehr hohe Spannungskonzentrationen aus Last und Eigenspannungen auf. Die endende Flankenkehlnaht stellt für den Werkstoff eine starke geometrische Kerbe dar, die durch den Schlitz am Stabende (Bild 3, links) noch verstärkt wird. Zudem erfährt der Werkstoff durch den Schweißvorgang eine Gefügeänderung in der Wärmeinflusszone, die sich in der dabei möglicherweise entstehenden Härtezone negativ auf seine Zähigkeit auswirkt, und es entstehen Eigenspannungen im Werkstoff, die in ihrer Größe und Art zunächst nicht bekannt sind. Die Höhe der Eigenspannungen sowie deren Mehrachsigkeit hängt dabei auch von dem Spalt in Querrichtung ab (ungenauere Passung, Bild 1, rechts), der aus Montagegründen (Toleranz) immer in unterschiedlicher Größe vorhanden ist. Ein Verschweißen des Schlitzes am Stabende (Bild 3, rechts) vermindert zwar die geometrische Kerbe in einem gewissen Maße, jedoch bringt man im Gegenzug dazu durch die dabei unvermeidlich entstehenden undefinierten Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht andere Kerben und zusätzliche Eigenspannungen in unbekannter Größe ein.

Diese Last- und Eigenspannungen können in Verbindung mit entsprechenden Beanspruchungstemperaturen zu einem spröden Werkstoffversagen führen.

1.2 Ziel des Forschungsprojektes

In Abhängigkeit von der Ausführungsform, Stahlsorte, Temperatur, Blechdicke und des eingesteckten Profils sollen erforderliche Zähigkeiten für das Knotenblech bestimmt werden, die ein vorzeitiges Versagen dieser Anschlüsse durch einen Sprödbbruch verhindern.



Bild 3 Links: Schlitz am Ende des eingesteckten Stabes zum Ausgleich von Montagetoleranzen
Rechts: Zugeschweißter Schlitz am Stabende

2. Planung des Versuchsprogramms

Die Zähigkeit oder plastische Verformbarkeit ist keine reine Werkstoffeigenschaft sondern von mehreren Einflüssen abhängig. Die Haupteinflüsse auf die Zähigkeitseigenschaften, die zum Teil voneinander abhängig sind, sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Ein standardisierter und bekannter Versuch zur Bestimmung der Zähigkeit ist der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Mit [3] ist eine Möglichkeit gegeben, die Ergebnisse von Kerbschlagbiegeversuchen auf reale Bauteilsituationen zu übertragen. Da [3] wie [4] für die in die Knotenbleche eingesteckten Profile nicht angewendet werden kann, soll mit dem Versuchsprogramm festgestellt werden, wie erreichte Zähigkeitswerte aus dem Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy auf die spezielle Anschlussform übertragen werden können.

TABELLE 1

Einflüsse auf die Zähigkeitseigenschaften einer Konstruktion

	Konstruktive Gestaltung	Fertigung (Stahlwerk und Stahlbauunternehmen)	Einwirkungen
mehrachsigem Spannungszustand	kein Schrumpfen möglich, Kerben, dickwandige Bauteile	Eigenspannungen aus Schweißen	Verschiedene Richtungen
große Beanspruchungsgeschwindigkeit	---	---	schlagartig
Zähigkeit des Gefüges	---	Stahlgüte, Martensitbildung infolge Schweißen, Kaltverformung, Ausscheidungen, nichtmetallische Einschlüsse	---
Niedrige Temperaturen	---	---	Außenbauteil
Wasserstoff	kein Schrumpfen möglich	Hochfeste Werkstoffe	---
Zinküberzüge	kein Schrumpfen möglich	Hochfeste Werkstoffe, Oberflächenfehler infolge mechanischer und thermischer Beanspruchung	---

Als Ausgangsbasis für die Untersuchung dienen die folgenden Parameter, mit denen das Ziel, die Angabe der erforderlichen Zähigkeiten – die Temperatur, bei der eine bestimmte Kerbschlagarbeit vorhanden sein muss – erreicht werden soll. Nicht untersucht werden die verspröde wirkenden Einflüsse Beanspruchungsgeschwindigkeit, Wasserstoff und Verzinken.

- 2 Ausführungsformen (Bild 4, S. 18)
 - „Ursprungsform“ (Form A)
 - modifizierte Form mit verbesserter Ausführung der Kerbdetails (Form B)
- 2 Stahlsorten
 - S355
 - S235
- 2 Temperaturen
 - $v = -10\text{ °C}$
 - $v = -30\text{ °C}$
- 3 Blechdicken

- t = 15 mm
- t = 25 mm
- t = 30 mm

- 3 Profilhöhen
 - HE 100 B
 - HE 200 B
 - HE 400 B

Für die Bauteilversuche wurden die Parameter deshalb so variiert, um aus einer möglichst geringen Anzahl an Versuchen eine möglichst große Aussagekraft zu erhalten. Es war dabei wichtig, Werkstoffe mit verschiedenen Übergangstemperaturen $T_{\bar{U}}$ zu verwenden, auch solche bei denen $T_{\bar{U}}$ an der oberen zulässigen Grenze nach den jeweiligen Technischen Lieferbedingungen liegt (z.B. $T_{\bar{U}} = T_{27J} = -20^{\circ}\text{C}$ für S355J2G3). Durch den direkten Vergleich der Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve mit der Versagensart der Probekörper in Abhängigkeit von Temperatur, Kerbsituation (Ausführungsform), Stahlsorte, Blechdicke und Profilhöhe kann dann mit Hilfe von FE – Berechnungen eine Aussage über die zu erwartende Versagensart eines beliebigen Probekörpers innerhalb der oben angegebenen Grenzen gemacht werden.

Mit den Finite – Element – Berechnungen soll der Einfluss des Spannungszustandes erfasst werden. Dazu werden die verschiedenen Versuche zunächst mit linear – elastischem Werkstoffgesetz unter Verwendung von Schalenelementen berechnet, um eine Angabe über die Kerbwirkung sowie über die Mehrachsigkeit der Beanspruchung – das heißt über den Dehnungszustand – zu erhalten. Um Aussagen über das globale Tragverhalten zu erhalten, werden die einzelnen Versuchsreihen mit multilinearem Werkstoffgesetz (miso) sowie mit nicht-linearer Verschiebungs – Verzerrungs – Beziehung (nlgeom) berechnet. Zudem werden Berechnungen mit Volumenelementen durchgeführt, um den Einfluss der Blechdicke auf die Dehnungsbehinderung über die Dicke abzuschätzen.

Mit dem aus den FE – Berechnungen bekannten Dehnungszustand an der maßgebenden Stelle soll zusammen mit den Versuchsergebnissen eine Aussage zur Rissentstehung (= Bruchausgang) gemacht werden. Die Rissentstehung wird gleichgesetzt mit dem Überschreiten der maximal aufnehmbaren Dehnung im Werkstoff. Diese hängt von den Parametern auf der Widerstandsseite der Tabelle 2 ab. Ausgangspunkt für die aufnehmbare Dehnung ist die wahre Dehnung, die im einaxialen Zugversuch nach DIN EN 10002 erreicht wird. Die Einflüsse

mehrachsischer Zugspannungszustand (zunehmende Werkstoffdicke, Spannungsversprödung), Gefügeänderung infolge Schweißen (Härtezone der WEZ) und niedrige Temperatur (Temperaturversprödung) führen zu einer Festigkeitssteigerung im Werkstoff bei gleichzeitiger Verminderung der Bruchdehnung. Die absolute Größe dieser Einflüsse hängt von dem ursprünglichen Gefügezustand des jeweiligen Werkstoffes ab. Als Maß für diesen Gefügezustand wird die Kerbschlagarbeit nach DIN EN 10045 und ihre Verteilung über die Temperatur herangezogen.

TABELLE 2

Rissentstehung durch Überschreiten der maximalen Dehnung

Einwirkungsseite S	Widerstandsseite R
Spannungs- und Dehnungszustand aus Last $\sigma_s^L, \varepsilon_s^L$	Maximale Dehnung im einaxialen Zugversuch $\varepsilon_r^0 = A_{1mm}$
Eigenspannungen aus dem Schweißen $\sigma_s^E, \varepsilon_s^E$	Abminderung von ε_r^0 aufgrund von Spannungszustand Werkstoffdicke Gefügeänderung infolge Schweißen Temperatur $\Rightarrow \varepsilon_r^1$
Spannungs- und Dehnungszustand gesamt $\sigma_s = \sigma^L + \sigma^E, \varepsilon_s = \varepsilon^L + \varepsilon^E$	
Rissentstehung $\varepsilon_s \geq \varepsilon_r$	

3. Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

3.1 Werkstoffkennwerte

3.1.1 Allgemeines

Von den verwendeten Knotenblechen wurden die mechanisch – technologischen Eigenschaften in Zug- und Kerbschlagbiegeversuchen bestimmt. Die in den Zugversuchen ermittelten Festigkeitswerte R_{eH} und R_m dienen als Grundlage für die rechnerische Bestimmung der maximalen Beanspruchbarkeiten nach [2] unter Beachtung von [6] (Tabelle 5) sowie als Datenbasis für die multilinearen Werkstoffgesetze in den FE – Berechnungen der Knotenblechanlüsse. In der Tabelle 3 sind die mechanisch – technologischen Werkstoffkennwerte der Knotenbleche, die in den Kerbschlagbiegeversuchen bei Raumtemperatur und bei -20°C sowie in den Zugversuchen bestimmt wurden, zusammengestellt und im Vergleich dazu auch die in den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1.B angegebenen Werte.

3.1.2 Zugversuche nach DIN EN 10002

Von fünf der sechs verwendeten Knotenbleche wurden Zugproben entnommen und in Zugversuchen nach DIN EN 10002 geprüft. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in der Tabelle 3 zusammengestellt. Vom Werkstoff II stand nicht mehr genügend Probematerial zur Verfügung, um eine Zugprobe ausarbeiten zu können, die Werkstoffe I sowie III bis VI entsprechen in ihren Festigkeitseigenschaften mit Ausnahme der etwas zu hohen Zugfestigkeit von Werkstoff I den Anforderungen, die die DIN EN 10025 an sie stellt.

3.1.3 Kerbschlagbiegeversuche nach DIN EN 10045

Von allen sechs Blechen wurden Kerbschlagproben entnommen und in Kerbschlagbiegeversuchen nach DIN EN 10045 bei verschiedenen Temperaturen geprüft. Die Diagramme 1 bis 6 enthalten die gemessenen Kerbschlagarbeiten in Abhängigkeit von der Temperatur, in der Tabelle 4 sind die gemessenen Kerbschlagarbeiten zusammengestellt. Die Tabelle 3 enthält

zum Vergleich mit den Werten aus den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1.B noch einmal die gemessenen Kerbschlagwerte bei Raumtemperatur (+20°C) und bei -20°C. Die Werkstoffe I und II erfüllen nicht die an einen S355J2G3 gestellten Anforderungen, die Kerbschlagarbeit bei $\vartheta = -20\text{ °C}$ liegt mit 10 J und 12 J deutlich unterhalb der erforderlichen 27 J. Aus den in den Diagrammen 1 und 2 dargestellten Verläufen der Kerbschlagarbeit über die Temperatur ist zu erkennen, dass die Übergangstemperatur T_{27J} – die Temperatur, bei der die Kerbschlagarbeit im Mittel 27 J beträgt – für den Werkstoff 1 bei etwa -5°C, für den Werkstoff 2 sogar bei etwa +5°C liegt. Für die späteren Untersuchungen werden diese Werkstoffe als S355JR eingestuft. Die Werkstoffe III bis VI erfüllen die an sie gestellten Anforderungen, wobei zu beachten ist, dass die einzelnen Verläufe der Kerbschlagarbeit über die Temperatur sich stark voneinander unterscheiden, und auch die Maximalwerte, gegen die die Kerbschlagarbeit strebt, zum Teil sehr unterschiedlich sind.

TABELLE 3
 Werkstoffkennwerte der verwendeten Bleche

Werkstoff Nr.	I S355J2G3, t = 15	II S355J2G3, t = 30	III S355J2G3, t = 30	IV S355J2G3, t = 15	V S235JRG2, t = 15	VI S235JRG2, t = 30
KV (-20°C) [J] (3.1.B)	---	---	136/195/112–MW 114	86/85/84–MW 85	---	---
KV (+20°C) [J] (3.1.B)	---	---	---	---	238/211/207–MW 219	175/185/159–MW 173
R _{eH} [N/mm ²] (3.1.B)	---	---	354	390	259	275
R _m [N/mm ²] (3.1.B)	---	---	516	550	393	434
A [%] (3.1.B)	---	---	26	27	38	31
KV (-20°C) [J] gemessen	8/11/10–MW 10	12	134/138/140–MW 137	30/32/30–MW 31	25/138/23–MW 62	28/34/36–MW 33
KV (+20°C) [J] gemessen	82/52/104–MW 79	51/44/52–MW 52	174/178/170–MW 174	56/58/59–MW 58	238/198/200–MW 212	70/61/77–MW 69
R _{p0,2} [N/mm ²] gemessen	393	---	359	365	248	271
R _m [N/mm ²] gemessen	676	---	542	541	391	448
A _{90mm} [%] gemessen	24	---	26	24	31	32

TABELLE 4
 Kerbschlagarbeit KV in [J] bei verschiedenen Prüftemperaturen

Werkstoff	I S355, t=15	II S355, t=30	III S355, t=30	IV S355, t=15	V S235, t=15	VI S235, t=30
KV (+60°C)	72/132/114 MW 106	---	---	---	---	92/88/88 MW 89
KV (+40°C)	90/136/68 MW 98	72/71 MW 72 ²⁾	---	67/68/71 MW 69	---	90/84/92 MW 89
KV (+20°C)	82/52/104 MW 79	51/44/52 MW 49	174/178/170 MW 174	56/58/59 MW 58	238/198/200 MW 212 (219 ³⁾	70/61/77 MW 69 (173 ³⁾
KV (+10°C)	80/28/38 MW 49	33/37/31 MW 34	---	---	---	---
KV (0°C)	50/20/28 MW 33	19/23/25 MW 22	154/147/174 MW 158	42/42/39 MW 41	230/185/174 MW 196	48/50/44 MW 47
KV (-10°C)	10/12/10 MW 11	17/20/19 MW 19	---	---	31/168/180 MW 126	---
KV (-20°C)	8/11/10 MW 10	12 MW 12 ¹⁾	134/138/140 MW 137 (114 ³⁾	30/32/30 MW 31 (85 ³⁾	25/138/23 MW 62	28/34/36 MW 33
KV (-30°C)	---	5 MW 5 ¹⁾	---	---	14/17/14 MW 15	---
KV (-35°C)	---	---	---	26/23/22 MW 24	---	20/20 MW 20
KV (-40°C)	---	---	---	---	---	---
KV (-50°C)	---	---	70/72/58 MW 67	16/16/12 MW 15	6/10/6 MW 7	12/9/14 MW 12
KV (-60°C)	---	---	22/46/118 MW 62	---	---	---
KV (-75°C)	---	---	54/40/45 MW 46	---	---	---

¹⁾ Einzelversuch, ²⁾ Mittelwert aus zwei Versuchen, ³⁾ Wert in (...) = Angabe aus dem Abnahmeprüfzeugnis 3.1.B

DIAGRAMM 1

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff I

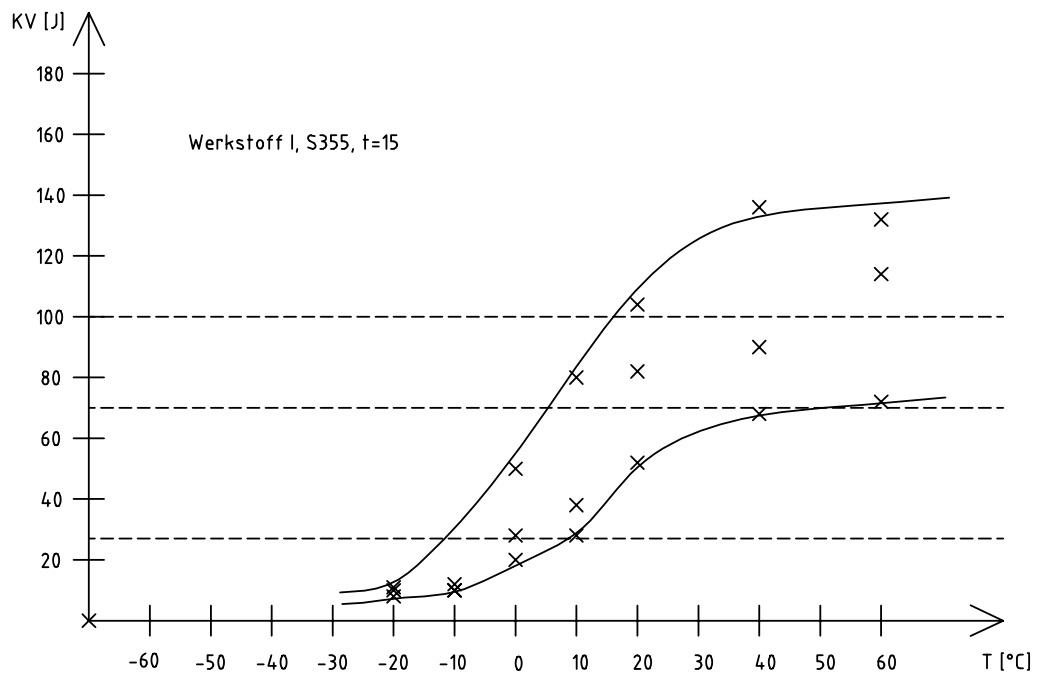


DIAGRAMM 2

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff II

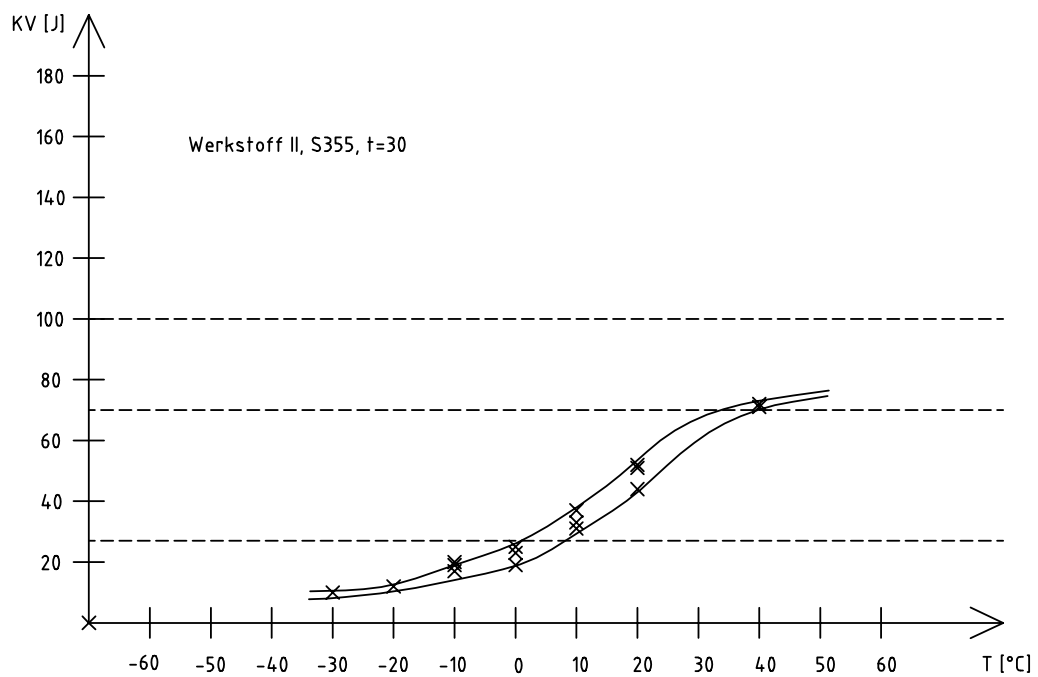


DIAGRAMM 3

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff III

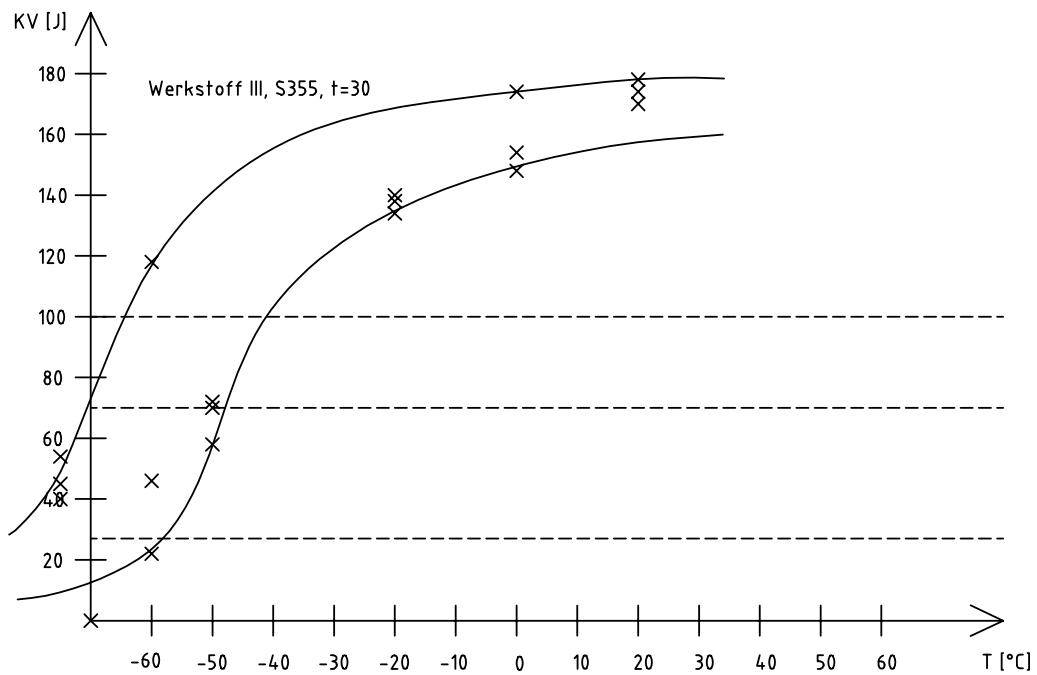


DIAGRAMM 4

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff IV

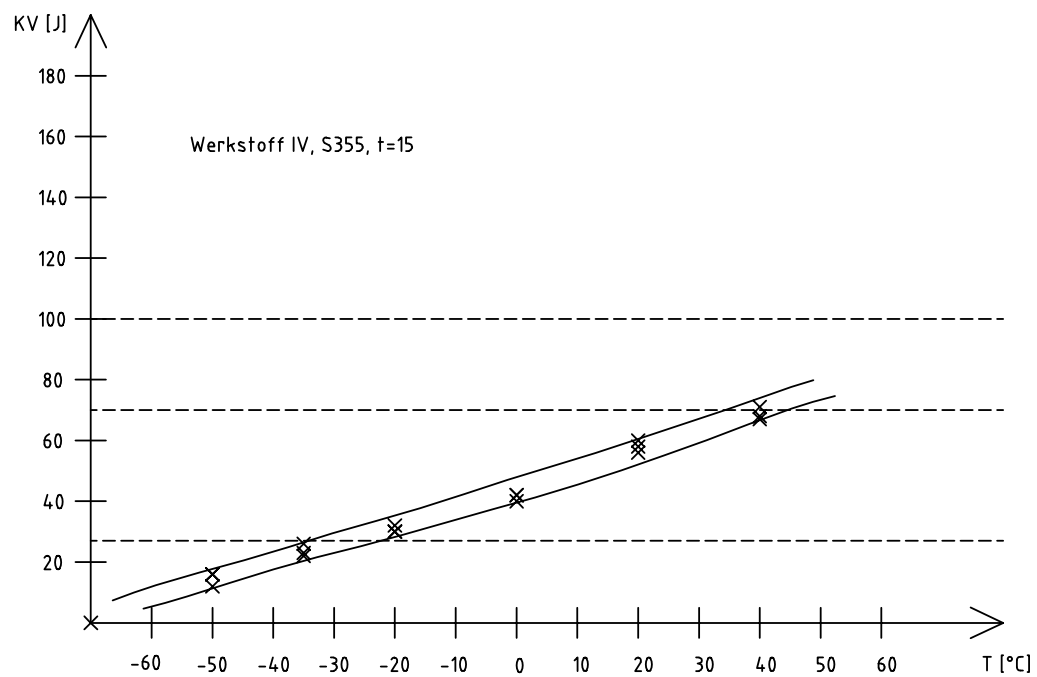


DIAGRAMM 5

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff V

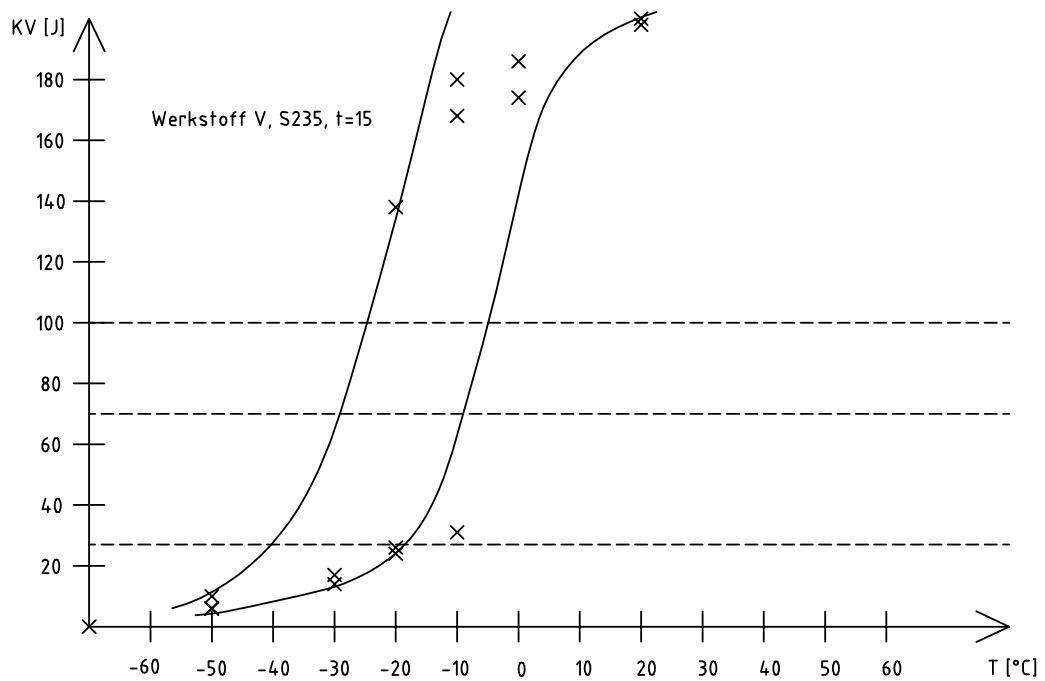
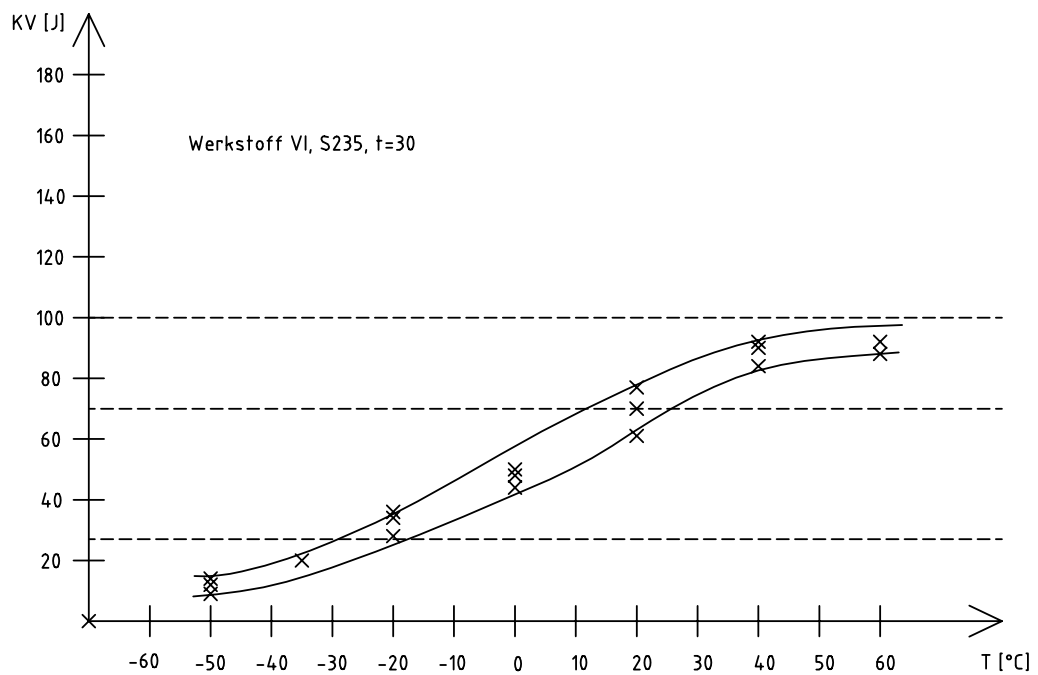


DIAGRAMM 6

Kerbschlagarbeit – Temperatur – Kurve Werkstoff VI



3.2 Bauteilversuche

3.2.1 Versuchsprogramm

Die Bauteilversuche wurden in den 3 Versuchsreihen V100 (V110 bis V160), V200 (V210 bis V260), V300 (V310 bis V340) sowie der Versuchsreihe VK nach der Tabelle 6 durchgeführt. t_{KB} bezeichnet dabei die Dicke des verwendeten Knotenblechs, die Spalte Profilstahl gibt den Querschnitt des eingesteckten Profils an, der Werkstoff des Knotenblechs ist in Tabelle 3 beschrieben. Die Form A des Knotenblechs ist die Ausführung mit Spalt, Form B die verbesserte Ausführung mit einer Ausrundung von 30 mm (Bild 4). Die Temperatur ϑ gibt die Temperatur im Knotenblech während des Versuches an, F_y und F_{cal} sind die nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten charakteristischen Lasten im Zustand der Tragfähigkeit mit $f_{y,k}$ und $R_{p0,2}$ nach Tabelle 3 unter der Voraussetzung der Ausnutzung plastischer Querschnittsreserven. F_{exp} ist die im Versuch bestimmte maximale Kraft im Bruchzustand. Die in den Versuchen aufgetretenen Versagensarten sind in der Tabelle 5 zusammengestellt und in der Tabelle 6 den einzelnen Versuchen zugeordnet (vgl. auch Tabellen 8 und 10). In der Anlage 5 sind Bilder von den Versuchskörpern im Versagenszustand zusammengestellt. Die Versuchskörper wurden mit Ausnahme der Versuchsreihe VK so dimensioniert, dass ein Versagen im Knotenblech durch Fließen zum parallelen oder schrägen Rand bei duktilen Werkstoffen maßgebend wird. Die beiden Versuchskörper VK1 und VK2 wurden für ein Schubversagen im Knotenblech entlang der Schweißnaht im Knotenblech dimensioniert. Das Versagen trat aber auch bei diesen Versuchskörpern durch einen Bruch zum schrägen Rand hin ein.

TABELLE 5

Versagensarten der Versuche (s.a. Tabelle 6)

Versagensart	Plastizierung vor Versagen	Versagensart = Rissfortschritt beim Versagen
1	sehr groß	langsame Rissausbreitung = stabiler Rissfortschritt
1-2	sehr groß	plötzlicher Bruch = instabiler Rissfortschritt
2	groß	langsame Rissausbreitung = stabiler Rissfortschritt
2-3	groß	plötzlicher Bruch = instabiler Rissfortschritt
3	mäßig	langsame Rissausbreitung = stabiler Rissfortschritt
3-4	mäßig	plötzlicher Bruch = instabiler Rissfortschritt
4	gering	langsame Rissausbreitung = stabiler Rissfortschritt
4-5	gering	plötzlicher Bruch = instabiler Rissfortschritt
5	nein	plötzlicher Bruch = instabiler Rissfortschritt

TABELLE 6
 Versuchsprogramm mit Versagenslasten und Versagensarten nach Tabelle 5

Reihe	Versuch Nr.	t_{KB} [mm]	Profilstahl	Werkstoff des Knotenblechs	Form des Knotenblechs	ϑ [°C]	F_y ¹⁾ [kN]	F_{cal} ²⁾ [kN]	F_{exp} [kN]	Versagensart (Tab. 5)
V110	V111	15	HE200B	S355 [I]	A	15	894	976	1054	4
	V112					-10			971	4-5
	V113					0			968	4-5
V120	V121	15	HE200B	S355 [I]	B	-50	894	976	1147	2-3
	V122					-50			1129	2-3
V130	V131	15	HE200B	S355 [IV]	A	-10	894	907	1146	2
	V132					-25			1116	2-3
	V133					-10			1177	2-3
V140	V141	15	HE200B	S355 [IV]	B	-30	894	907	1258	1-2
	V142					-35			1337	1-2
V150	V151	15	HE200B	S235 [V]	A	-10	596	616	826	2
	V152					-20			847	2-3
V160	V161	15	HE200B	S235 [V]	B	-15	596	616	1022	1-2
	V162					-20			1022	1-2
V210	V211	15	HE100B	S355 [I]	A	-45	437	477	501	5
	V212					-10			587	3-4
	V213					20			623	2-3
V220	V222	15	HE100B	S355 [I]	B	-30	437	477	605	2-3
V230	V231	15	HE100B	S355 [IV]	A	-20	437	443	713	1-2
	V232					-15			723	1-2
	V233					-10			752	1-2
V240	V241	15	HE100B	S355 [IV]	B	-15	437	443	669	1-2
	V242					-25			654	1-2
V250	V251	15	HE100B	S235 [V]	A	-35	291	301	571	1-2
	V252					-35			546	1-2
V260	V261	15	HE100B	S235 [V]	B	-25	291	301	485	1
	V262					-40			505	1
V310	V311	30	HE200B	S355 [III]	A	-10	2103	2097	2355	2
	V312					-45			2388	3-4
	V313					+20			2225	2
V320	V321	30	HE200B	S355 [III]	B	-50	2103	2097	2708	2-3
	V322					-15			2808	2-3
	V323					-25			2643	2-3
V330	V331	30	HE200B	S235 [VI]	A	-25	1402	1583	1726	3-4
	V332					-10			2207	2-3
V340	V341	30	HE200B	S235 [VI]	B	-50	1402	1583	2660	1-2
	V342					-25			2654	1-2
VK	VK1	30	HE200B	S355 [II]	A	15	1690 ³⁾	---	2007	3-4
	VK2					-30			2030	4-5

¹⁾ F_y berechnet mit $f_{y,k} = 240 / 360 \text{ N/mm}^2$

²⁾ F_{cal} berechnet mit $R_{p0,2}$ nach Tabelle 2, Zeile 9

³⁾ Schubversagen im Knotenblech entlang der Schweißnaht

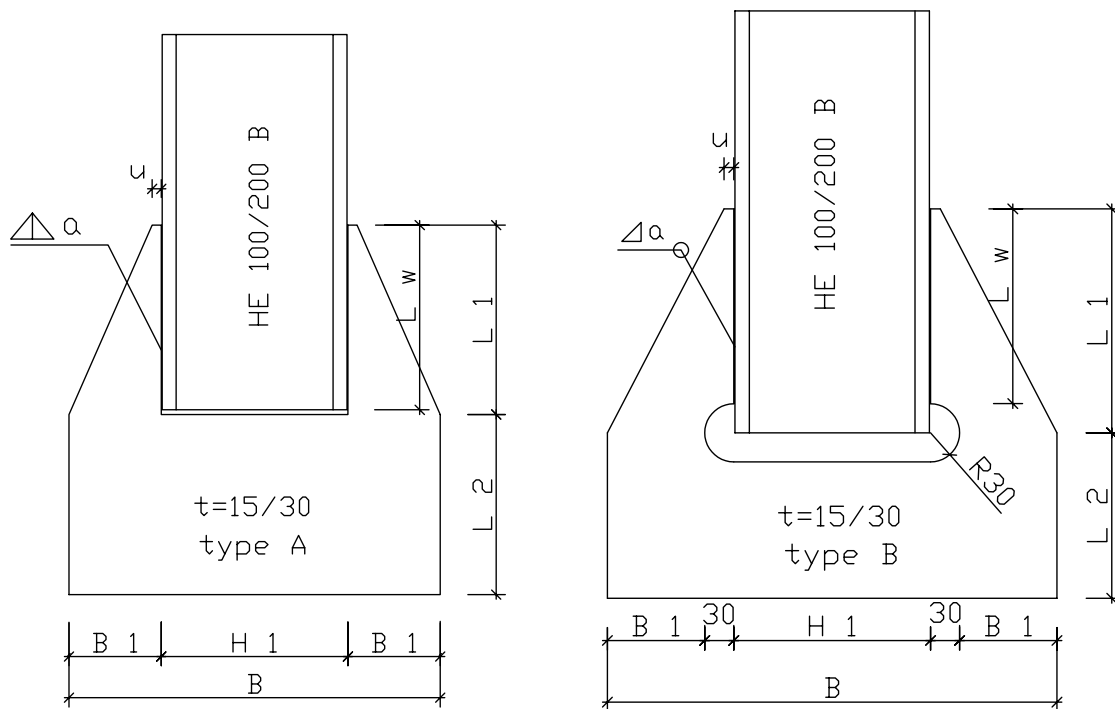


Bild 4 Links: Ursprungsform
 Rechts: Modifizierte Form mit Ausrundung

TABELLE 7
 Abmessungen der Knotenbleche

	a [mm]	u [mm]	L_w [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	B [mm]	B_1 [mm]	H_1 [mm]	t [mm]
V110 V130 V150	6	10	200	205	195	402	100	202	15
V120 V140 V160	6	10	200	230	170	462	100	202	15
V210 V230 V250	6	10	100	105	95	202	50	102	15
V220 V240 V260	6	10	100	130	90	262	50	102	15
V310 V330	10	15	250	255	200	422	110	202	30
V320 V340	10	15	250	280	180	482	110	202	30
VK	10	140	180	190	400	702	250	202	30

3.3 Versuchsergebnisse

Die Versagenslasten und Versagensarten der einzelnen Versuche sind in der Tabelle 6 zusammengestellt. Die Anlage 3 enthält die Last – Verformungskurven aller Versuche (Maschinenschrieb).

V100

Die Versuchreihe V100 umfasst die Versuchsreihen V110, V120, V130, V140, V150 und V160. Die Knotenbleche dieser Versuche haben jeweils eine Dicke von $t = 15$ mm, das eingesteckte Profil ist ein HE200B. Die für die Tragfähigkeit maßgebende Geometrie ist bei allen Versuchskörpern identisch. Da die Versuchsreihen V110 und V120 jedoch mit einer anderen Prüfmaschine durchgeführt wurden, sind die Abmessungen dieser Versuchskörper unterschiedlich zu denen der Versuchsreihen V130 bis V160. Die für die Tragfähigkeitsberechnung wichtigen Geometrieparameter und Werkstoffkennwerte können den Tabellen 3 und 7 sowie Bild 4 entnommen werden. Anlage 2 enthält die Abmessungen aller Versuchskörper. Die Last – Verformungskurven der Versuche sind in der Anlage 3, die Bruchlasten und Versagensarten in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Die Versuchsreihe V110 umfasst die Versuche V111, V112 und V113, das Knotenblech war laut Lieferschein ein S355J2G3, aufgrund der gemessenen Kerbschlagwerte und der Versuchsergebnisse wird das Blech dem Werkstoff S355JR zugeordnet (Diagramm 1). Die Versuchskörper V112 bei -10°C und V113 bei 0°C versagten schlagartig ohne nennenswerte plastische Verformung, das Versagen bei Versuch V111 bei Raumtemperatur trat ebenfalls bei einer sehr geringen Verformung ein, jedoch war der Rissfortschritt bei diesem Versuch nicht schlagartig, sondern der Probekörper konnte noch weiter verformt werden, bis der entstandene Riss durch nahezu den gesamten Probekörper lief. Die Bruchlast der Versuche V112 und V113 erreichte nicht die nach [2] unter Beachtung von [6] berechnete Traglast, das Versagen bei Versuch V111 trat 8% über dieser Last ein. Die durch die Ausrundung verbesserte Versuchsreihe V120 enthält die Versuche V121 und V122. Auch diese beiden Versuchskörper versagten ohne größere plastische Verformung, wurden aber auch bei einer Temperatur von -50°C geprüft. Die Versagenslasten lagen 18% und 16% oberhalb der nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Traglast.

Für die in den maßgebenden Abmessungen zu V110 identische Versuchsreihe V130 wurde ein anderer Werkstoff für das Knotenblech verwendet, auch dieser wurde als S355J2G3 bestellt und geliefert. Obwohl die Kerbschlagwerte des Knotenblechs in Abhängigkeit von der Temperatur nicht auf einen zäheren Werkstoff schließen lassen als bei der Versuchsreihe V110, erfolgt das Versagen selbst bei Versuch V132 bei -25°C erst nach deutlich größeren plastischen Verformungen. Auch die Versagenslasten lagen infolge der größeren plastischen Verformungen deutlich über denen der Versuchsreihe V110. Die Versagenslast von Versuch V132 lag 23% oberhalb der nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Traglast, die Versuche V131 und V133 hatten noch größere Versagenslasten.

Die Versuche V141 und V142 der Versuchsreihe V140 hatten sowohl größere Traglasten als auch deutlich größere plastische Verformungen als die Versuche der Versuchsreihen V110, V120 und V130.

Die Versuchsreihen V150 und V160 wurden mit dem Werkstoff S235JRG2 für das Knotenblech durchgeführt. Der verwendete Werkstoff (Diagramm 5) besitzt bei Raumtemperatur sehr große Werte der Kerbschlagarbeit und eine sehr große Steigung im Steilabfall und damit auch große Streuungen im Übergangsbereich. Die einzelnen Versuchskörper erreichen vor dem Versagen große plastische Verformungen und auch die Bruchlasten liegen deutlich oberhalb der nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Traglasten.

V200

Die Versuchsreihe V200 umfasst die Versuchsreihen V210, V220, V230, V240, V250 und V260. Die Knotenbleche dieser Versuche haben jeweils eine Dicke von $t = 15 \text{ mm}$, das eingesteckte Profil ist ein HE100B. Die für die Tragfähigkeit maßgebende Geometrie ist bei allen Versuchskörpern identisch, die Versuchsreihen V210 und V220 haben jedoch andere Abmessungen der gesamten Versuchskörper als die der Versuchsreihen V230 bis V260. Die Werkstoffe der Knotenbleche der einzelnen Versuchsreihen V210 bis V260 entsprechen jeweils denen der Versuchsreihen V110 bis V160 ($V210 \cong V110$, usw.). Die für die Tragfähigkeits-

berechnung wichtigen Geometrieparameter und Werkstoffkennwerte können den Tabellen 3 und 7 sowie Bild 4 entnommen werden. Anlage 2 enthält die Abmessungen aller Versuchskörper. Die Last – Verformungskurven der Versuche sind in der Anlage 3, die Bruchlasten und Versagensarten in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Die Versuchsergebnisse entsprechen denen der Versuchsreihen V110 bis V160, das heißt in den Versuchsreihen V210 und V220 trat das Versagen mit Ausnahme des Versuches V213 bei Raumtemperatur ohne größere Plastizierungen auf. Der Versuchskörper V211 bei -45°C versagt sogar ohne plastische Verformungen bei einer Last, die nur 5% größer ist als die nach [2] unter Beachtung von [6] berechnete. Das Versagen in den Versuchsreihen V230, V240, V250 und V260 erfolgt in jedem Fall nachdem zuvor große plastische Verformungen auftraten.

V300

Die Versuchsreihe V300 umfasst die Versuchsreihen V310, V320, V330 und V340. Die Knotenbleche dieser Versuche haben jeweils eine Dicke von $t = 30$ mm, das eingesteckte Profil ist ein HE200B. Die Abmessungen der Versuchskörper sind jeweils identisch. Die für die Tragfähigkeitsberechnung wichtigen Geometrieparameter und Werkstoffkennwerte können den Tabellen 3 und 7 sowie Bild 4 entnommen werden. Anlage 2 enthält die Abmessungen aller Versuchskörper. Die Last – Verformungskurven der Versuche sind in der Anlage 3, die Bruchlasten und Versagensarten in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Für die Versuchsreihe V300 wurde eine Knotenblechdicke von $t = 30$ mm gewählt, um den Einfluss des dickeren Bleches auf die Versuchsergebnisse zu untersuchen. Für die Versuchsreihen V310 und V320 wurde ein Blech aus dem Werkstoff S355J2G3 verwendet, für die Versuchsreihen V330 und V340 ein Blech aus dem Werkstoff S235JRG2. Die Versuche der Versuchsreihe V310 versagten bei Lasten, die selbst beim Versuch V313 bei Raumtemperatur nur unwesentlich größer als die nach [2] unter Beachtung von [6] berechnete Traglast waren. Allerdings erfolgte das Versagen bei den Versuchen V311 und V313 nicht schlagartig, sondern der bei der angegebenen Versagenslast entstandene Riss schritt langsam mit zunehmender aufgebrachter Verformung fort. Das Versagen der Versuche V321 bis V323 der Versuchs-

reihe V320 trat erst nach relativ großer plastischer Verformung auf. Das Versagen bei Versuch V331 der Versuchsreihe V330 trat bei -25°C bei einer relativ kleinen plastischen Verformung 9 % oberhalb der nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Traglast auf, V332 versagte nach zuvor erfolgter plastischer Verformung bei einer deutlich größeren Last. Die Versuche V341 und V342 versagten beide bei sehr großen Lasten unter zuvor erfolgter großer plastischer Verformung.

VK

Die Versuchsreihe VK umfasst die Versuche VK1 und VK2. Die Knotenbleche dieser Versuche haben jeweils eine Dicke von $t = 30 \text{ mm}$, das eingesteckte Profil ist ein HE200B. Die Abmessungen der Versuchskörper sind jeweils identisch. Die für die Tragfähigkeitsberechnung wichtigen Geometrieparameter und Werkstoffkennwerte können den Tabellen 3 und 7 sowie Bild 4 entnommen werden. Anlage 2 enthält die Abmessungen der Versuchskörper. Die Last – Verformungskurven der Versuche sind in der Anlage 3, die Bruchlasten und Versagensarten in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Die beiden Versuche der Versuchsreihe VK, VK1 bei -30°C und VK2 bei Raumtemperatur, versagten beide schlagartig zum schrägen Rand ohne nennenswerte Plastizierungen vor dem Bruch. Die Bruchlasten lagen dabei deutlich unter den für die beiden Versagensformen Fließen zum parallelen und schrägen Rand nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Werten. Diese beiden Versuchskörper waren jedoch so dimensioniert, dass ein Versagen durch Schub in der Schweißnaht bei einer Last zu erwarten ist, die etwa 15 % unterhalb der Bruchlast liegt.

3.4 FE – Berechnungen

3.4.1 Vorbemerkungen

Ein entscheidendes Kriterium für den Bruchausgang und zur Bewertung der Sprödbruchsicherheit ist der Spannungs- und Dehnungszustand an der maßgebenden Stelle (Tabelle 2). Dieser setzt sich zusammen aus den Beanspruchungen infolge der äußeren Last sowie den durch das Schweißen eingebrachten Zwängungen. Insbesondere durch das Schweißen ergibt sich ein mehrachsiger Spannungszustand mit hohen Zugspannungskomponenten, der mit zunehmender Dicke des Knotenblechs dreiachsig wird. Mit Hilfe der Finite – Element – Berechnung ist es möglich, die Spannungen σ^L und Dehnungen ε^L zu bestimmen, die sich aus der äußeren Last an der maßgebenden Stelle ergeben. Da die aufnehmbaren Dehnungen an der maßgebenden Stelle ebenfalls vom Spannungszustand abhängen (Tabelle 2), sind die FE – Berechnungen auch eine wichtige Hilfe zur Bestimmung von ε_r .

Die FE – Berechnungen wurden mit dem Programmsystem ANSYS in den Versionen 5.7, 6.1 und 7.1 durchgeführt. Für die Berechnung der Anschlüsse mit Schalenelementen wurde das Element shell181 verwendet. Dieses Element hat vier Knoten mit je 6 Freiheitsgraden (Verschiebungen u_x , u_y , u_z und Verdrehungen rot_x , rot_y , rot_z). Shell181 ist speziell zur Berechnung großer plastischer Verformungen entwickelt. Die Berechnung mit Volumenelementen wurde mit dem Element solid45 durchgeführt. Dieses Element hat acht Knoten mit je 3 Freiheitsgraden (Verschiebungen u_x , u_y , u_z).

3.4.2 FE – Berechnungen mit Schalenelementen

Alle durchgeführten Versuche wurden mit einem Schalenmodell unter Verwendung eines multilineareren Werkstoffgesetzes berechnet (Diagramm 7). Dazu wurden die in den Zugversuchen bestimmten Werte $R_{p0,2}$ und R_m (Tabelle 3) jeweils als Knickpunkte für die Steigungen in der Spannungs – Dehnungskurve verwendet. Für die Versuchsreihe VK wurden die Werkstoffkennwerte der Versuchsreihe V310 übernommen. Die Dehnung ε_e bei $R_{p0,2}$ ergibt sich dabei aus dem E – Modul $E = 2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, die Dehnung bei R_m wurde immer auf $\varepsilon_p = 10 \%$ festgelegt. Danach wurde die Kurve mit einer flachen Steigung bis 100 % Dehnung weitergeführt, um das Konvergenzverhalten der FE – Berechnung zu verbessern. Auf das globale Tragfähigkeitsverhalten hat dieser zusätzliche Anstieg in der Spannungs – Dehnungskurve keine Auswirkung, die Dehnungen im Kerbgrund werden dadurch unwesentlich unterschätzt. Um die großen Dehnungen im Bereich der Kerbe besser zu erfassen, wurden die FE –

Berechnungen unter Berücksichtigung von nichtlinearen Anteilen in der Verschiebungs – Verzerrungs – Beziehung durchgeführt (nlgeom). Die Schweißnaht wurde in den Schalenmodellen nicht abgebildet, sondern es wurden die Elemente des Knotenblechs und des eingeschobenen Profils mit denselben Knoten verbunden. Beansprucht wurden die Modelle am Ende des Profils mit einer Verschiebung der Knoten in Lastrichtung, das untere Ende des Knotenblechs wurde in allen Richtungen festgehalten. Unter Berücksichtigung der Symmetrierandbedingungen wurde nur eine Hälfte des Versuchskörpers im Modell abgebildet. Die Bilder 5 bis 8 zeigen beispielhaft Ausschnitte aus dem Modell V310pl (Form A) und V320pl (Form B).

BILD 5
Schalenmodell V310pl

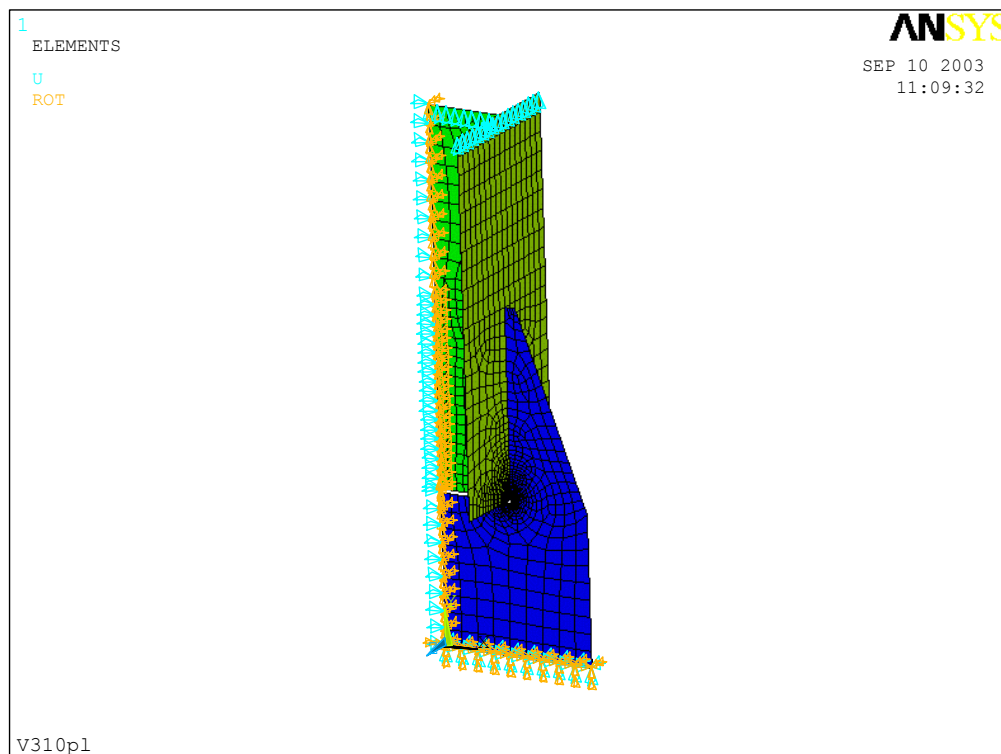


BILD 6
Ausgerundete Ecken im Spalt des Knotenblechs (Schalenmodell V310pl)

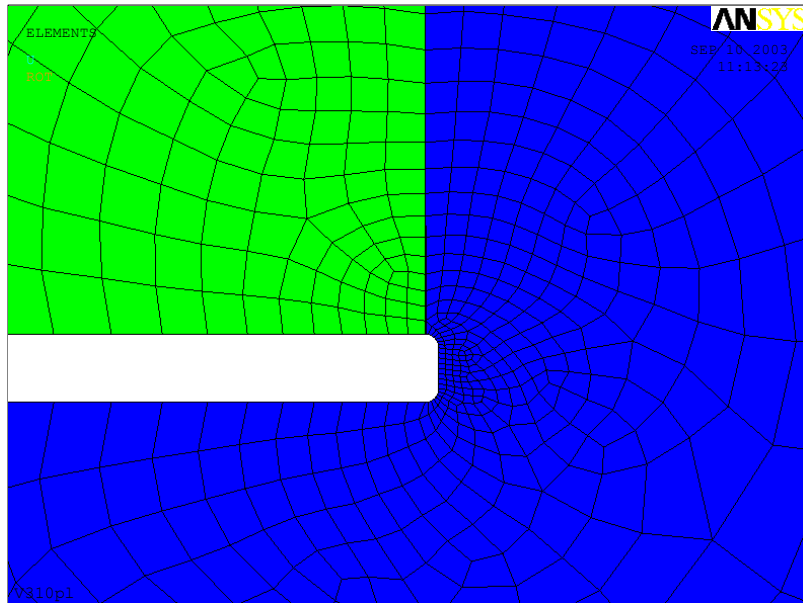


BILD 7

Elemente des Knotenblechs und des Profils haben die gleichen Knoten (V310pl)

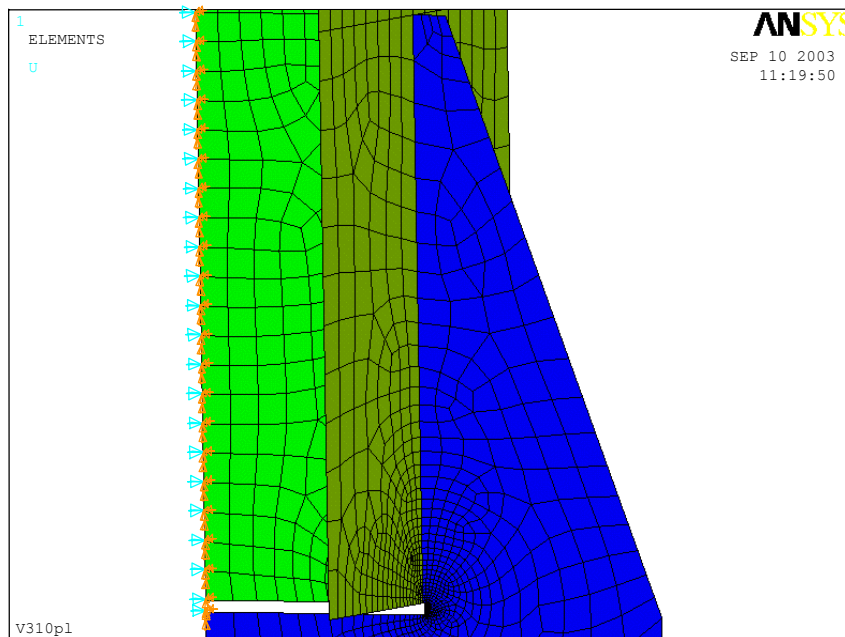


BILD 8

Schalenmodell V320pl

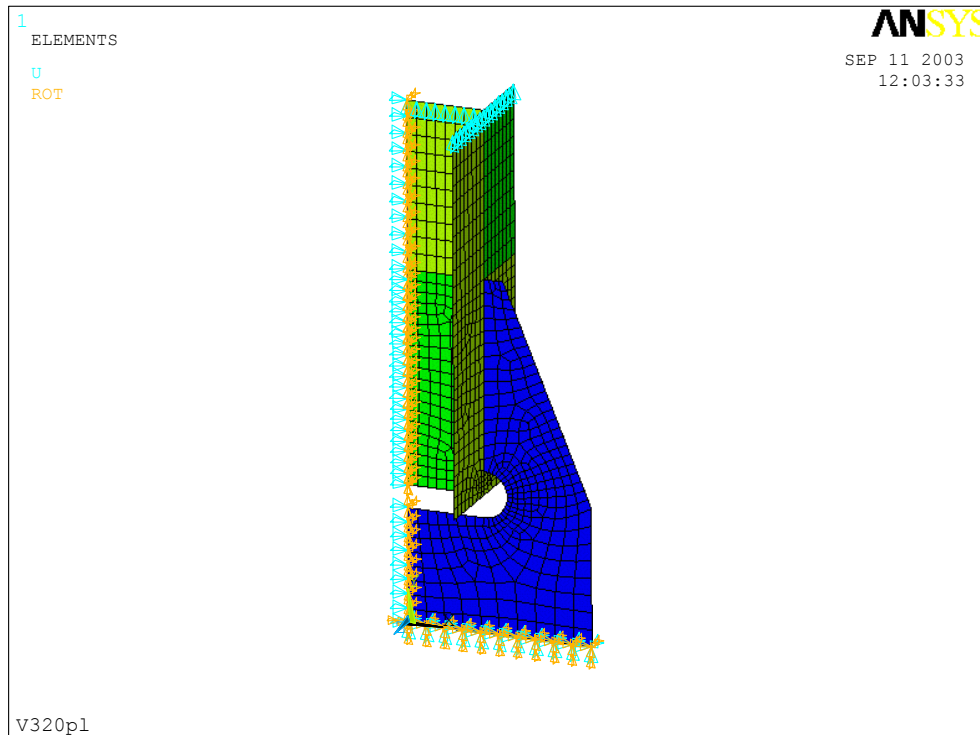
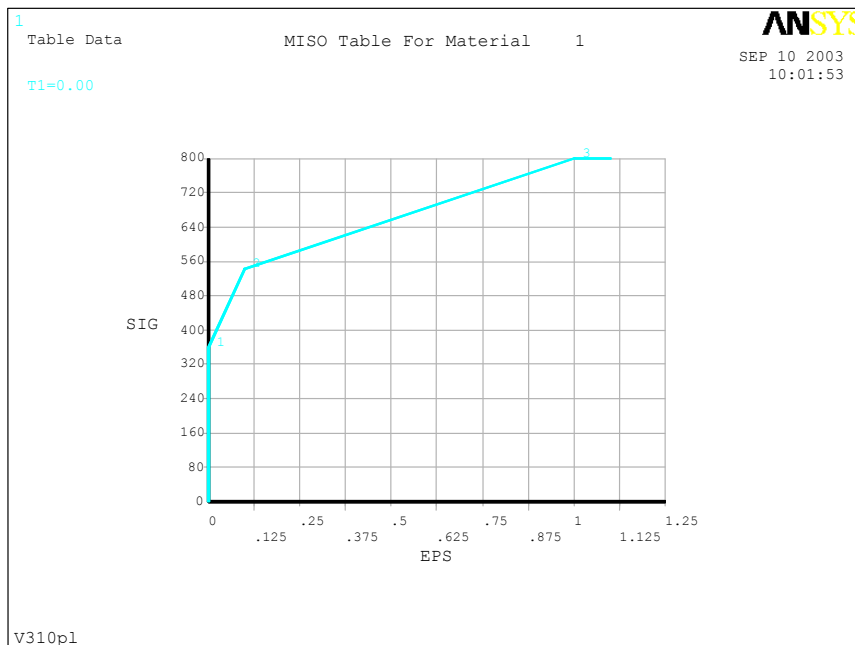


DIAGRAMM 7

Multilineares Werkstoffgesetz der Versuchsreihen V310 und V320



Die maximale Beanspruchung aus der aufgebrachten Last bei **Form A** tritt am Ende des eingeschobenen Profils im Knotenblech auf. Um die dort auftretenden Spannungen und Dehnun-

gen im Rahmen der Theorie exakt zu erfassen, wurden die einspringenden Ecken mit einem Radius von 0,5 mm ausgerundet. Zudem wurde die Vernetzung so eingestellt, dass die Elemente in diesem Bereich der hohen Beanspruchung möglichst wenig von ihrer idealen quadratischen Form abweichen. Die Bilder 9 und 10 zeigen beispielhaft die berechneten Spannungen und Dehnungen für das Modell V310pl bei einer am oberen Modellrand aufgetragenen Verschiebung $v = 9$ mm. Es ist zu erkennen, dass trotz der nahezu rechtwinkligen Anordnung der Elemente eine sehr große Verzerrung in einem Element entsteht, die im Vergleich zu den benachbarten Elementen zu groß erscheint. Diese in einzelnen Elementen sehr große Verzerrung oder besser die sehr große Differenz zu den jeweiligen Nachbarelementen ist der Grund dafür, dass bei manchen Modellen schon bei einer relativ kleinen Verformung die Lösung divergierte. Die Ergebnisse der FE – Berechnungen wurden deshalb in erster Linie dazu verwendet, die globale Last – Verformungsbeziehung der durchgeführten Versuche zu verifizieren. Zur Bestimmung der Mehrachsigkeit wurde der erste Lastschritt der nichtlinearen FE – Berechnungen verwendet, bei dem sich die Modelle zumeist noch im linear – elastischen Bereich befanden.

BILD 9

Schalenmodell V310pl – sehr große Verzerrungen in einem einzelnen Element

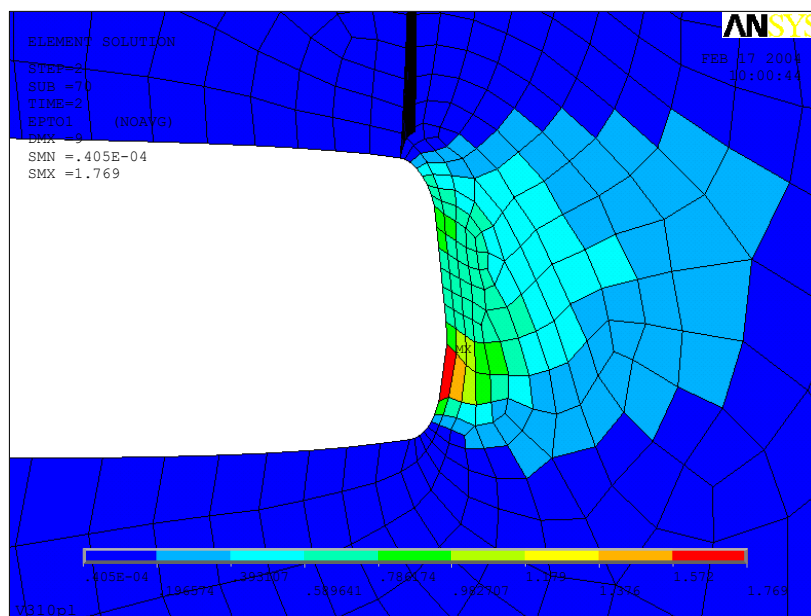
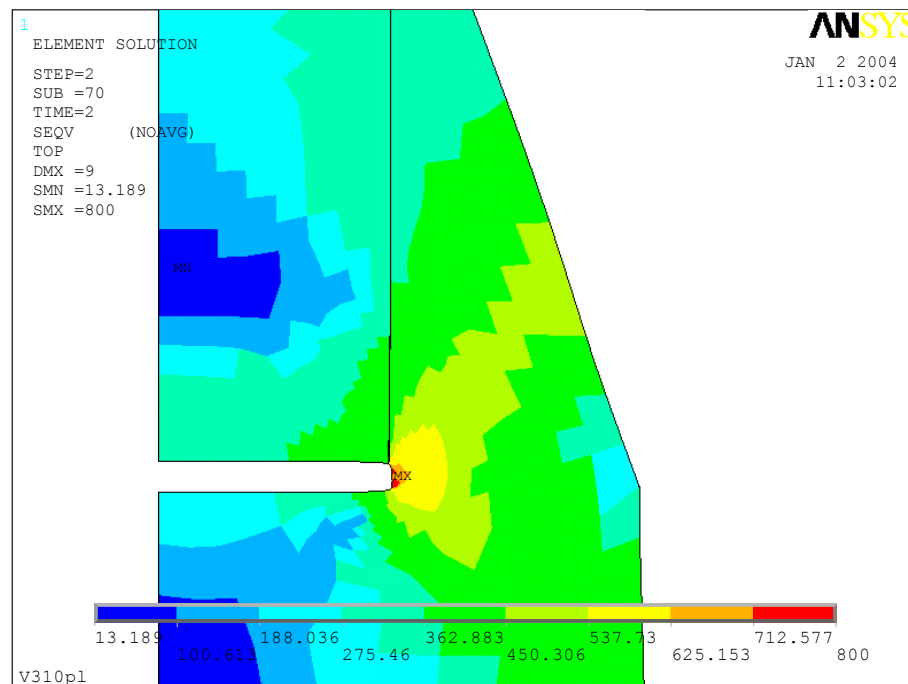


BILD 10

Schalenmodell V310pl – Vergleichsspannungsverteilung



3.4.3 FE – Berechnungen mit Volumenelementen

Das Modell V110 wurde für eine Abschätzung der Spannungen über die Dicke des Knotenblechs mit Volumenelementen vernetzt. Bild 11 zeigt einen Detailausschnitt des Volumenmodells, in dem ein Teil des eingesteckten Stabes, die Schweißnaht sowie ein Teil des Knotenbleches und der Spalt zwischen Profil und Knotenblech zu sehen sind. Die Berechnung wurde unter Verwendung eines linear – elastischen Werkstoffgesetzes durchgeführt. Die unter einer aufgetragenen Last am Stabende entstehenden Hauptspannungen S_1 , S_2 und S_3 an der kritischen Stelle im Knotenblech zeigen die Bilder 12 bis 14. Die dort dargestellten viel zu großen absoluten Werte der Spannungen resultieren aus dem linear – elastischen Werkstoffgesetz. Ziel der Berechnung war jedoch nicht die Bestimmung der absoluten Werte, sondern es war von Interesse, wie groß die Spannung S_3 im Verhältnis zu S_2 und S_1 ist, um eine Aussage über die Mehrachsigkeit machen zu können. Die Ergebnisse sind mit Vorsicht zu betrachten, da die Übergänge der Querschnitte jeweils durch rechtwinklige Ecken erfolgen und somit eine Unstetigkeitsstelle darstellen. Die relative Größe der Spannung S_3 zu der Spannung S_2 dient jedoch als gute Abschätzung für die Beanspruchung in Blechdickenrichtung. Im Weiteren werden aufgrund der hier nicht wiedergegebenen Ergebnisse der Berechnung mit den

Volumenmodellen für alle Abmessungen mit einer Knotenblechdicke $t = 15 \text{ mm}$ $S_3 = 2/3 \cdot S_2$ und für $t = 30 \text{ mm}$ $S_3 = S_2$ angesetzt. Mit dieser Abschätzung ist es nicht mehr notwendig, alle Modelle mit Volumenelementen abzubilden, sondern für die rechnerische Untersuchung mit ANSYS reicht eine Abbildung der Geometrie mit Schalelementen aus.

BILD 11

Detailausschnitt aus dem Volumenmodell V110

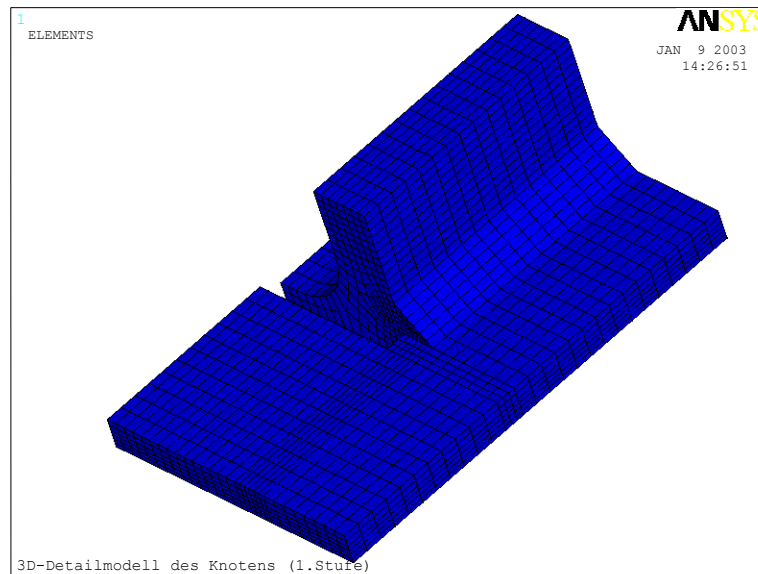


BILD 12

Detailausschnitt der Kerbe - Hauptspannungen S_1

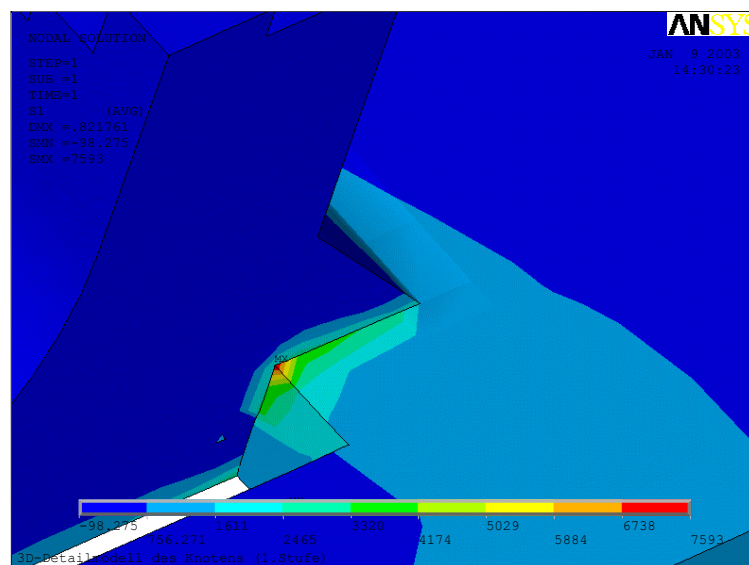


BILD 13

Detailausschnitt der Kerbe - Hauptspannungen S_2

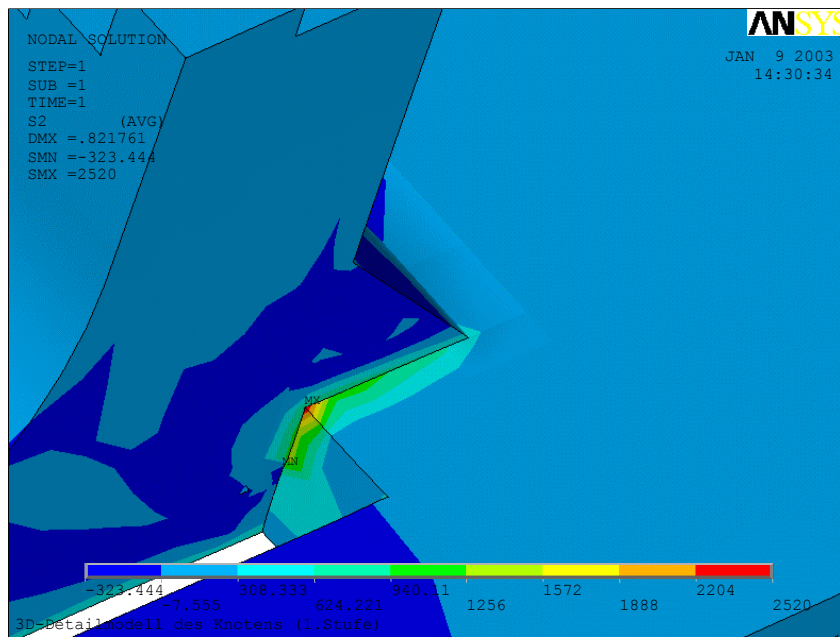
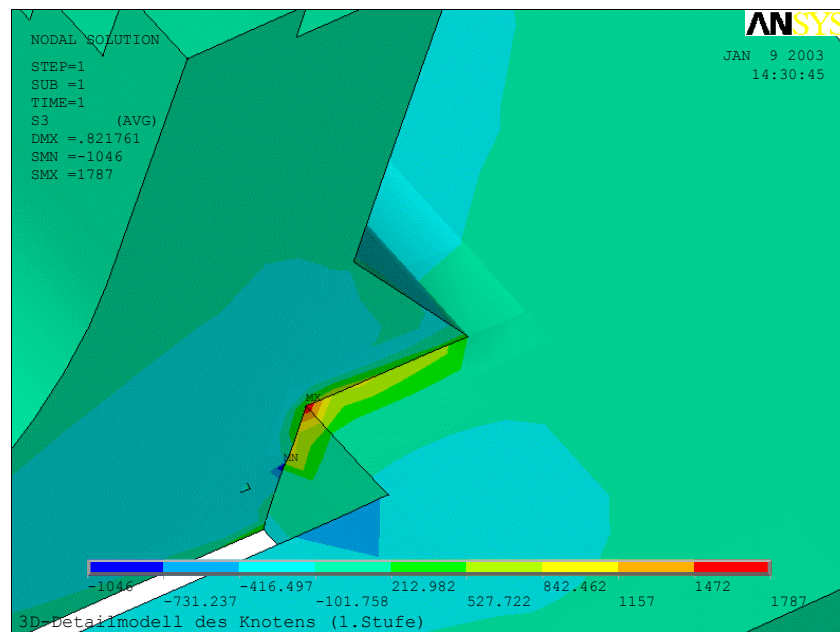


BILD 14

Detailausschnitt der Kerbe - Hauptspannungen S_3



3.5 Vergleich der Versuche mit den FE – Berechnungen und den Bemessungsformeln

Die Ergebnisse der FE – Berechnungen und der Versuche bestätigen in allen Fällen sowohl für die Form A als auch für die Form B der Knotenblechgeometrie, dass die nach den Bemessungsformeln [2] unter Beachtung von [6] gewählten Anschlüsse im Knotenblech versagen. Das Bild 10 enthält beispielhaft für die Versuchsreihe V310 die Verteilung der Vergleichsspannungen. Dabei geht der Bruch bei der Knotenblechform A (Bild 4) immer vom Ende der Schweißnaht aus und verläuft durch das Knotenblech, bei Knotenblechform B (Bild 4) geht der Bruch immer von der Ausrundung aus und verläuft durch das Knotenblech. Bilder von den Versuchskörpern im Bruchzustand und den zugehörigen FE - Berechnungen enthalten die Anlagen 5 und 6.

Ein Vergleich der Bemessungsformeln mit den Versuchen und den einzelnen FE - Berechnungen zeigt, dass die mit den aus den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1.B entnommenen R_{eH} – Werten berechneten Traglasten nach [2] unter Beachtung von [6] den vollplastischen Zustand im Knotenblech sehr genau treffen. Die in den Last – Verformungskurven der FE – Berechnungen anschließend eintretende Laststeigerung resultiert aus der im Werkstoffgesetz berücksichtigten Verfestigung, die in den Bemessungsformeln nach [2] unter Beachtung von [6] mit dem linear – elastischen ideal – plastischen Werkstoffgesetz nicht erfasst ist.

Für die Last – Verformungskurven der einzelnen Versuche wurde der Maschinenweg und die Maschinenkraft aufgezeichnet. Um die Last – Verformungskurven der Versuche mit denen der FE – Berechnungen vergleichen zu können, wurden die aus der Maschineneinspannung resultierenden elastischen Verformungen, die zusätzlich zu denen der Versuchskörper vorhanden sind, von den Maschinenwegen abgezogen. Hierzu wurden die Steigungen der Versuche im elastischen Bereich an die FE – Berechnungen im elastischen Bereich angepasst. Auch im Fließbereich wurde diese elastische Differenz von den Maschinenwegen abgezogen. Außer bei den Versuchsreihen V110, V120, V210, V220 und VK, die einen anderen Versuchsaufbau haben, wurde zudem zunächst der Maschinenweg halbiert, da die Versuchskörper symmetrisch aufgebaut sind (vgl. Anlage 2). Die so erhaltenen Last – Verformungskurven stimmen im elastischen Bereich genau mit den FE – Berechnungen überein. Der Beginn des Plastizierens im Versuch liegt maximal etwa 10 % bis 15 % von dem nach den FE – Berechnungen entfernt. Zumeist tritt die plastische Verformung in den Versuchen bei einer größeren

Last als in den FE – Berechnungen ein. Dies hängt von den Unsicherheiten des Werkstoffgesetzes in Abhängigkeit von der Temperatur und der Dehnrage ab. Mit zunehmender Dehnrage und abnehmender Temperatur verschiebt sich der Beginn des Fließens zu größeren Spannungen. Bei der Knotenblechform A kommt hierzu noch der Einfluss der Gefügeänderung aus dem Schweißen auf das Werkstoffgesetz am Rissausgangspunkt.

In der Tabelle 8 auf Seite 36 sind die nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Lasten F_{cal} , 80 % dieser Lasten $F_{el} = 0,8 \cdot F_{cal}$ und die Versagenslasten F_U aus den einzelnen Versuchen sowie die zu diesen Lasten gehörenden Verformungen w_{cal} , w_{el} und w_u zusammengestellt. Um die einzelnen Versuchsergebnisse hinsichtlich ihrer Sprödbrochbarkeit zu beurteilen, sind in der Tabelle 8 zudem die auf die Lasten und Verformungen im Bruchzustand bezogenen Verhältniswerte $k_{fcal} = F_u / F_{cal}$, $k_{fel} = F_u / F_{el}$, $k_{wcal} = w_u / w_{cal}$ und $k_{wel} = w_u / w_{el}$ aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass für jede Versuchsreihe die plastischen Verformungen der Knotenblechform B (Bild 4) im Bruchzustand bei ähnlichen Größenordnungen in den Bruchlasten um ein Vielfaches größer sind als die der Knotenblechform A. Dies bedeutet, dass bei Knotenblechform A deutlich weniger plastische Verformung möglich ist als bei Knotenblechform B. Die Versuche V112 und V113 versagen sogar bereits im Bereich der rechnerischen Last nach [2] unter Beachtung von [6] schlagartig, das heißt bei diesen Versuchen kann das Fließvermögen des Werkstoffes nicht mehr angesetzt werden.

In Tabelle 9 wird in Abhängigkeit von der Mehrachsbarkeit M aus Last- und Eigenspannungen die Versprödung μ jedes einzelnen Versuchskörpers unter Berücksichtigung von Stahlsorte, Streckgrenze, Bauteiltemperatur ϑ im Versuch, Übergangstemperatur der Kerbschlagarbeit $T_{\dot{U}} = T_{27J}$ sowie der Dicke des Knotenbleches ermittelt. Ausgangspunkt für diesen Vergleich ist die Mehrachsbarkeit des Spannungszustandes [7] in Verbindung mit der daraus resultierenden Versprödung μ ($\equiv \mu_1$) des Werkstoffes (Diagramm 8) in Abhängigkeit dieser Mehrachsbarkeit nach [8]. Im Diagramm 9 ist diese Abhängigkeit der Versprödung μ von der Mehrachsbarkeitszahl $M = S_V / S_1 = \sqrt{\frac{(1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - 1)^2}{2}} = \sqrt{\frac{(1 - \alpha)^2 + (\alpha - \beta)^2 + (\beta - 1)^2}{2}}$

mit der ersten Hauptspannung S_1 und der Vergleichsspannung S_V dargestellt, indem μ linear über M aufgetragen ist. Die Randbedingungen für diese Gerade lauten: $\mu = 0$ für $\alpha = \beta = 0,6$ und $\mu = 1,0$ für $\alpha = \beta = 0$ mit $\alpha = k_1$ und $\beta = k_2$. Damit ergibt sich die in Diagramm 9 be-

schriebene Gerade $\mu = A \cdot (M - 1) + 1$ mit der Steigung $A = 10/6 = 5/3$. Für das Diagramm 9 werden in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften der um 1940 hergestellten Stähle und den in dieser Zeit erfolgten Schäden durch Sprödbrüche folgende Eingangswerte festgelegt:

Stahlsorte S355, $T_U = T_{27J} > 20^\circ\text{C}$, $R_{p0.2} = 360 \text{ N/mm}^2$, $\vartheta = -10^\circ\text{C}$, $t = 30 \text{ mm}$

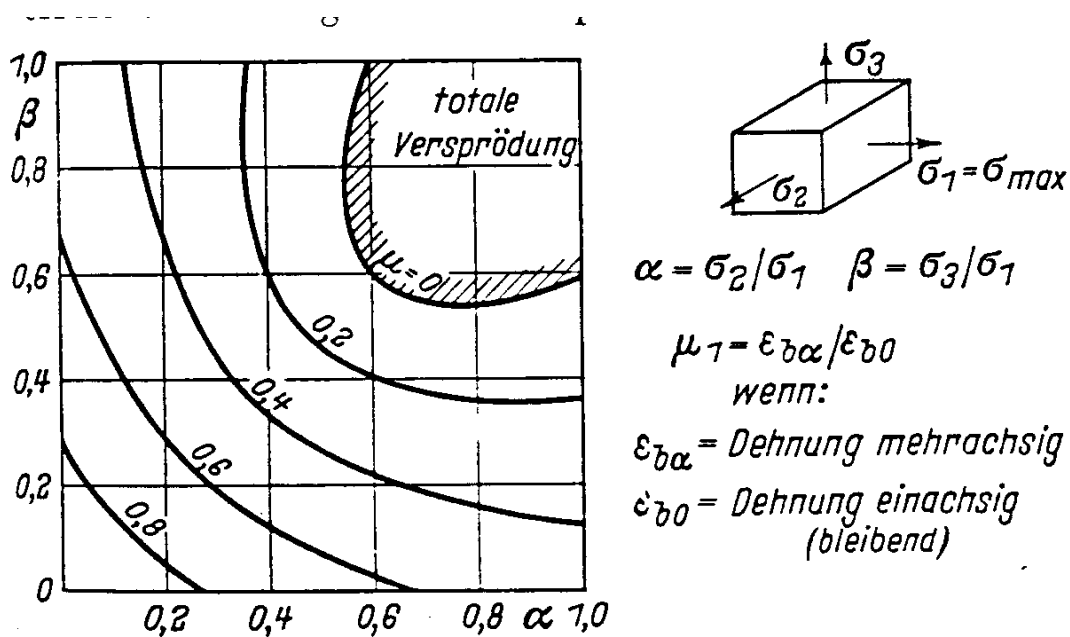


Diagramm 8 Einfluss der Mehrachsigkeit auf die Versprödung nach [8]

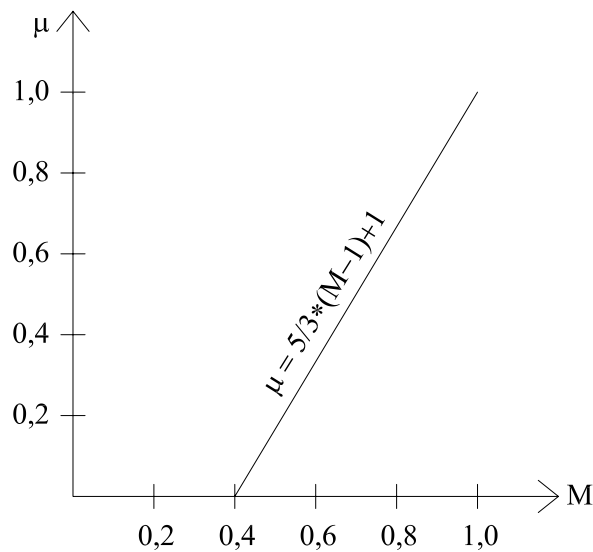


Diagramm 9 Einfluss der Mehrachsigeitszahl M auf die Versprödung μ bei einer Steigung $A = 5/3$

Bei einer Änderung der oben genannten Voraussetzungen für die Stahleigenschaften ändert sich der Einfluss der Mehrachsigeitszahl auf die Versprödung. Die Steigung A der Kurve im Diagramm 9 hängt von der Stahlgüte (A_1), der Streckgrenze (A_2), der Übergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch $T_{\dot{U}} = T_{27J}$ im Vergleich zur Bauteiltemperatur ϑ (A_3) und der Werkstoffdicke (A_4) ab. Die Steigung A ist das Produkt der einzelnen Einflüsse A_1 bis A_4 , die anhand der Versuchsergebnisse bestimmt wurden.

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4$$

mit

$$A_1 = \begin{cases} \frac{10}{7} & \text{für JR} \\ \frac{10}{7,5} & \text{für J0} \\ \frac{10}{8} & \text{für J2} \end{cases} \quad A_2 = \sqrt{\frac{R_{p0,2}}{360}} \quad A_3 = \left[1 - \frac{\vartheta - T_{\dot{U}}}{200} \right] \quad A_4 = \frac{1}{150} \cdot t + 0,8$$

In der Tabelle 9 ist diese Versprödung $\mu = A \cdot (M - 1) + 1$ für jeden Versuchskörper angegeben. Dort sind zudem die zur Berechnung von A und M notwendigen Eingangswerte zusammengestellt. Dies sind die Dicke t, die Bauteiltemperatur während des Versuchs ϑ , die gemessene Streckgrenze des Knotenbleches $R_{p0,2}$, die gemessenen Übergangstemperatur $T_{\dot{U}} = T_{271}$, die Hauptspannungen S_1 , S_2 und S_3 und die Vergleichsspannung

$$S_v = \sqrt{\frac{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2}{2}}$$

unter Berücksichtigung von kleinen Plastizierungen bei der Last F_{cal} sowie die elastisch bestimmte erste Hauptdehnung ε_1 bei der Last F_{cal} .

Die dimensionslosen Parameter zur Bestimmung der Mehrachsigkeit k_2 , k_3 und M ergeben sich aus den nachfolgend angegebenen Gleichungen. k_{2S} und k_{3S} sind die Kennzahlen für die Mehrachsigkeit infolge Schweißen, k_{2L} und k_{3L} die Kennzahlen für die Mehrachsigkeit infolge Last. M_L bezeichnet die Mehrachsigkeit nur durch die äußeren Lasten, in M sind zusätzlich die Eigenspannungen aus dem Schweißen berücksichtigt. Mit den zuvor angegebenen Abhängigkeiten für die Faktoren A_1 bis A_4 kann somit für jeden Versuch die Steigung A und damit die Versprödung μ in Abhängigkeit von der Mehrachsitzzahl M bestimmt werden. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Hauptspannungen infolge Last und die aus Eigenspannungen die gleiche Richtung und ihre jeweiligen Maximalwerte die gleiche Größe haben, so dass die Verhältniswerte addiert werden können.

$$k_{2,S} = \begin{cases} 1,0 & \text{wenn Form A} \\ k_{2,L} & \text{wenn Form B} \end{cases} \quad k_{2,L} = \frac{S_2}{S_1} \quad k_2 = \frac{1}{2} \cdot (k_{2,L} + k_{2,S})$$

$$k_{3,S} = \begin{cases} 1,0 & \text{wenn Form A} \\ k_{3,L} & \text{wenn Form B} \end{cases} \quad k_{3,L} = \frac{S_3}{S_1} \quad k_3 = \frac{1}{2} \cdot (k_{3,L} + k_{3,S})$$

$$M_L = \frac{S_v}{S_1} \quad M = \sqrt{\frac{(1 - k_2)^2 + (k_2 - k_3)^2 + (k_3 - 1)^2}{2}}$$

In der Tabelle 10 ist für jeden Versuchskörper die berechnete Versprödung μ mit den Verformungen und Versagensarten beim Bruch zusammengestellt.

TABELLE 8
 Lasten und Verformungen der einzelnen Versuche

Versuch	Form	ϑ [°C]	F_{cal} [kN]	F_{el} [kN]	F_u [kN]	w_{cal} [mm]	w_{el} [mm]	w_u [mm]	k_{fcal} [---]	k_{fel} [---]	k_{wcal} [---]	k_{wel} [---]
V 111		15	976	781	1054	0,72	0,56	0,87	1,08	1,35	1,21	1,55
V 112	A	-10	976	781	971	---	0,59	1,09	0,99	1,24	---	1,85
V 113		0	976	781	968	---	0,60	1,18	0,99	1,24	---	1,97
V 121	B	-50	976	781	1147	1,61	0,63	3,39	1,18	1,47	2,11	5,38
V 122		-50	976	781	1129	1,79	0,73	3,75	1,16	1,45	2,09	5,14
V 131		-10	907	726	1146	0,75	0,50	4,25	1,26	1,58	5,67	8,50
V 132	A	-25	907	726	1116	0,69	0,50	2,89	1,23	1,54	4,19	5,78
V 133		-10	907	726	1177	0,75	0,53	4,35	1,30	1,62	5,80	8,21
V 141	B	-30	907	726	1258	1,80	0,76	16,21	1,39	1,73	9,03	21,33
V 142		-35	907	726	1337	1,00	0,65	14,80	1,47	1,84	14,80	22,77
V 151	A	-10	616	493	826	0,57	0,35	5,45	1,34	1,68	9,56	15,57
V 152		-20	616	493	847	0,61	0,34	5,40	1,38	1,72	8,85	15,88
V 161	B	-15	616	493	1022	0,81	0,48	36,00	1,66	2,07	44,44	75,00
V 162		-20	616	493	1022	1,299	0,45	37,20	1,66	2,07	28,64	82,67
V 211		-45	477	382	501	0,38	0,31	0,40	1,05	1,31	1,05	1,29
V 212	A	-10	477	382	587	0,38	0,29	0,90	1,23	1,54	2,37	3,10
V 213		20	477	382	623	0,43	0,30	1,75	1,31	1,63	4,07	5,83
V 222	B	-30	477	382	605	1,23	0,48	5,00	1,27	1,58	4,07	10,42
V 231		-20	443	354	713	0,44	0,30	12,52	1,61	2,01	28,45	41,73
V 232	A	-15	443	354	723	0,42	0,30	13,80	1,63	2,04	32,86	46,00
V 233		-10	443	354	752	0,40	0,30	15,22	1,71	2,12	38,05	50,73
V 241	B	-15	443	354	669	1,19	0,43	21,39	1,51	1,89	17,97	49,74
V 242		-25	443	354	654	1,22	0,43	19,20	1,48	1,85	15,74	44,65
V 251	A	-35	301	241	571	0,26	0,19	10,60	1,90	2,37	40,77	55,79
V 252		-35	301	241	546	0,29	0,20	10,40	1,81	2,27	35,86	52,53
V 261	B	-25	301	241	485	0,89	0,29	23,80	1,61	2,01	26,74	82,07
V 262		-40	301	241	505	0,43	0,30	23,50	1,68	2,10	54,65	78,33
V 311		-10	2097	1678	2355	2,20	0,92	5,35	1,12	1,40	2,43	5,82
V 312	A	-45	2097	1678	2388	1,48	0,85	3,85	1,14	1,42	2,60	4,53
V 313		20	2097	1678	2225	2,70	0,90	4,75	1,06	1,33	1,76	5,28
V 321		-50	2097	1678	2708	1,60	1,00	11,60	1,29	1,61	7,25	11,60
V 322	B	-15	2097	1678	2808	2,50	1,01	12,70	1,34	1,67	5,08	12,57
V 323		-25	2097	1678	2643	2,35	1,03	12,00	1,26	1,58	5,11	11,65
V 331	A	-25	1583	1266	1726	0,92	0,59	2,15	1,09	1,36	2,34	3,64
V 332		-10	1583	1266	2207	1,16	0,64	11,40	1,39	1,74	9,83	17,81
V 341	B	-50	1583	1266	2660	1,14	0,72	23,00	1,68	2,10	20,18	31,94
V 342		-25	1583	1266	2654	1,23	0,73	24,00	1,68	2,16	19,51	32,88
VK1	A	15	1690	1352	2007	0,86	0,60	1,90	1,19	1,48	2,21	3,17
VK2		-30	1690	1352	2030	0,75	0,60	1,28	1,20	1,50	1,71	2,13

TABELLE 9

Mehrachsigkeit und daraus resultierende Versprödung μ der einzelnen Versuchsreihen in Abhängigkeit von Stahlsorte, Streckgrenze, Übergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch, Bauteiltemperatur und Blechdicke

Mo- dell	Form	t [mm]	g [°C]	R _{p0,2} [N/mm ²]	T _Ü [°C]	S ₁ [N/mm ²]	S ₂ [N/mm ²]	S ₃ [N/mm ²]	S _v [N/mm ²]	ε ₁ [%]	k _{2S} [---]	k _{2L} [---]	k ₂ [---]	k _{3S} [---]	k _{3L} [---]	k ₃ [---]	ML [---]	M [---]	A1 [---]	A2 [---]	A3 [---]	A4 [---]	A [---]	μ [---]
V111	A	15	15	393	-5	575	120	80	476	1,25	1,00	0,21	0,60	1,00	0,14	0,57	0,83	0,41	1,43	1,04	0,88	0,90	1,18	0,29
V112	A	15	-10	393	-5	575	120	80	476	1,25	1,00	0,21	0,60	1,00	0,14	0,57	0,83	0,41	1,43	1,04	1,03	0,90	1,38	0,19
V113	A	15	0	393	-5	575	120	80	476	1,25	1,00	0,21	0,60	1,00	0,14	0,57	0,83	0,41	1,43	1,04	0,98	0,90	1,31	0,23
V121	B	15	-50	393	-5	452	157	0	397	0,49	0,35	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,43	1,04	1,23	0,90	1,65	0,80
V122	B	15	-50	393	-5	452	157	0	397	0,49	0,35	0,35	0,35	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,43	1,04	1,23	0,90	1,65	0,80
V131	A	15	-10	365	-30	490	112	75	398	1,16	1,00	0,23	0,61	1,00	0,15	0,58	0,81	0,41	1,25	1,01	0,90	0,90	0,91	0,39
V132	A	15	-25	365	-30	490	112	75	398	1,16	1,00	0,23	0,61	1,00	0,15	0,58	0,81	0,41	1,25	1,01	0,98	0,90	0,98	0,34
V133	A	15	-10	365	-30	490	112	75	398	1,16	1,00	0,23	0,61	1,00	0,15	0,58	0,81	0,41	1,25	1,01	0,90	0,90	0,91	0,39
V141	B	15	-30	365	-30	420	151	0		0,50	0,36	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,25	1,01	1,00	0,90	1,01	0,86
V142	B	15	-35	365	-30	420	151	0	368	0,50	0,36	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,25	1,01	1,03	0,90	1,03	0,86
V151	A	15	-10	248	-25	333	109	73	244	1,05	1,00	0,33	0,66	1,00	0,22	0,61	0,73	0,37	1,43	0,83	0,93	0,90	0,99	0,37
V152	A	15	-20	248	-25	333	109	73	244	1,05	1,00	0,33	0,66	1,00	0,22	0,61	0,73	0,37	1,43	0,83	0,98	0,90	1,04	0,34
V161	B	15	-15	248	-25	420	151	0	368	0,49	0,36	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,43	0,83	0,95	0,90	1,01	0,88
V162	B	15	-20	248	-25	420	151	0	368	0,49	0,36	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,88	0,88	1,43	0,83	0,98	0,90	1,04	0,87
V211	A	15	-45	393	-5	300	40	27	267	1,10	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,43	1,04	1,20	0,90	1,61	0,11
V212	A	15	-10	393	-5	300	40	27	267	1,10	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,43	1,04	1,03	0,90	1,38	0,24
V213	A	15	20	393	-5	300	40	27	267	1,10	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,43	1,04	0,88	0,90	1,18	0,35
V222	B	15	-30	393	-5	300	40	0	282	0,67	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,94	0,94	1,43	1,04	1,13	0,90	1,51	0,91
V231	A	15	-20	365	-30	300	40	27	267	1,07	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,25	1,01	0,95	0,90	0,96	0,40
V232	A	15	-15	365	-30	300	40	27	267	1,07	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,25	1,01	0,93	0,90	0,93	0,42
V233	A	15	-10	365	-30	300	40	27	267	1,07	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,25	1,01	0,90	0,90	0,91	0,43
V241	B	15	-15	365	-30	300	40	0	282	0,59	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,94	0,94	1,25	1,01	0,93	0,90	0,93	0,94
V242	B	15	-25	365	-30	300	40	0	282	0,59	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,94	0,94	1,25	1,01	0,98	0,90	0,98	0,93

TABELLE 9 (fortgesetzt)

Mehrachsigkeit und daraus resultierende Versprödung μ der einzelnen Versuchsreihen in Abhängigkeit von Stahlsorte, Streckgrenze, Übergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch, Bauteiltemperatur und Blechdicke

Mo- dell	Form	t [mm]	g [°C]	R _{p0,2} [N/mm ²]	T _Ü [°C]	S ₁ [N/mm ²]	S ₂ [N/mm ²]	S ₃ [N/mm ²]	S _v [N/mm ²]	ε ₁ [%]	k _{2S} [---]	k _{2L} [---]	k ₂ [---]	k _{3S} [---]	k _{3L} [---]	k ₃ [---]	ML [---]	M [---]	A1 [---]	A2 [---]	A3 [---]	A4 [---]	A [---]	μ [---]
V251	A	15	-35	248	-25	300	40	27	267	1,02	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,43	0,83	1,05	0,90	1,12	0,38
V252	A	15	-35	248	-25	300	40	27	267	1,02	1,00	0,13	0,57	1,00	0,09	0,54	0,89	0,44	1,43	0,83	1,05	0,90	1,12	0,38
V261	B	15	-25	248	-25	300	40	0	282	0,24	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,94	0,94	1,43	0,83	1,00	0,90	1,07	0,94
V262	B	15	-40	248	-25	300	40	0	282	0,24	0,13	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,94	0,94	1,43	0,83	1,08	0,90	1,15	0,93
V311	A	30	-10	359	-70	488	145	145	343	1,14	1,00	0,30	0,65	1,00	0,30	0,65	0,70	0,35	1,25	1,00	0,70	1,00	0,78	0,43
V312	A	30	-45	359	-70	488	145	145	343	1,14	1,00	0,30	0,65	1,00	0,30	0,65	0,70	0,35	1,25	1,00	0,85	1,00	0,94	0,29
V313	A	30	20	359	-70	488	145	145	343	1,14	1,00	0,30	0,65	1,00	0,30	0,65	0,70	0,35	1,25	1,00	0,55	1,00	0,61	0,55
V321	B	30	-50	359	-70	420	175	88	299	0,39	0,42	0,42	0,42	0,21	0,21	0,21	0,71	0,71	1,25	1,00	0,90	1,00	1,00	0,68
V322	B	30	-15	359	-70	420	175	88	299	0,39	0,42	0,42	0,42	0,21	0,21	0,21	0,71	0,71	1,25	1,00	0,73	1,00	0,80	0,74
V323	B	30	-25	359	-70	420	175	88	299	0,39	0,42	0,42	0,42	0,21	0,21	0,21	0,71	0,71	1,25	1,00	0,78	1,00	0,86	0,72
V331	A	30	-25	295	-25	370	120	120	250	0,86	1,00	0,32	0,66	1,00	0,32	0,66	0,68	0,34	1,43	0,91	1,00	1,00	1,29	0,14
V332	A	30	-10	295	-25	370	120	120	250	0,86	1,00	0,32	0,66	1,00	0,32	0,66	0,68	0,34	1,43	0,91	0,93	1,00	1,20	0,25
V341	B	30	-50	295	-25	316	110	55	238	0,36	0,35	0,35	0,35	0,17	0,17	0,17	0,75	0,75	1,43	0,91	1,13	1,00	1,45	0,64
V342	B	30	-25	295	-25	316	110	55	238	0,36	0,35	0,35	0,35	0,17	0,17	0,17	0,75	0,75	1,43	0,91	1,00	1,00	1,29	0,68
VKL1	A	30	15	420	5	370	120	120	250	1,11	1,00	0,32	0,66	1,00	0,32	0,66	0,68	0,34	1,43	1,08	0,95	1,00	1,47	0,03
VKL2	A	30	-30	420	5	370	120	120	250	1,11	1,00	0,32	0,66	1,00	0,32	0,66	0,68	0,34	1,43	1,08	1,18	1,00	1,81	-0,20

TABELLE 10

Zusammenhang zwischen Verformung, Versagensart und berechneter Versprödung der einzelnen Versuche

Versuch	Form	ϑ [°C]	k_{fel} [---]	k_{wel} [---]	μ [---]	Versagensart (Tab. 5)
V 111		15	1,35	1,55	0,29	4
V 112	A	-10	1,24	1,85	0,19	4-5
V 113		0	1,24	1,97	0,23	4-5
V 121	B	-50	1,47	5,38	0,80	2-3
V 122		-50	1,45	5,14	0,80	2-3
V 131		-10	1,58	8,50	0,39	2
V 132	A	-25	1,54	5,78	0,34	2-3
V 133		-10	1,62	8,21	0,39	2-3
V 141	B	-30	1,73	21,33	0,86	1-2
V 142		-35	1,84	22,77	0,86	1-2
V 151	A	-10	1,68	15,57	0,37	2
V 152		-20	1,72	15,88	0,34	2-3
V 161	B	-15	2,07	75,00	0,88	1-2
V 162		-20	2,07	82,67	0,87	1-2
V 211		-45	1,31	1,29	0,11	5
V 212	A	-10	1,54	3,10	0,24	3-4
V 213		20	1,63	5,83	0,35	2-3
V 222	B	-30	1,58	10,42	0,91	2-3
V 231		-20	1,87	41,73	0,40	1-2
V 232	A	-15	1,89	46,00	0,42	1-2
V 233		-10	1,97	50,73	0,43	1-2
V 241	B	-15	1,75	49,74	0,94	1-2
V 242		-25	1,71	44,65	0,93	1-2
V 251	A	-35	2,37	55,79	0,38	1-2
V 252		-35	2,27	52,53	0,38	1-2
V 261	B	-25	2,01	82,07	0,94	1
V 262		-40	2,10	78,33	0,93	1
V 311		-10	1,40	5,82	0,43	2
V 312	A	-45	1,42	4,53	0,29	3-4
V 313		20	1,33	5,28	0,55	2
V 321		-50	1,61	11,60	0,68	2-3
V 322	B	-15	1,67	12,57	0,74	2-3
V 323		-25	1,58	11,65	0,72	2-3
V 331	A	-25	1,36	3,64	0,14	3-4
V 332		-10	1,74	17,81	0,25	2-3
V 341	B	-50	2,10	31,94	0,64	1-2
V 342		-25	2,16	32,88	0,68	1-2
VK1	A	15	1,48	3,17	0,03	3-4
VK2		-30	1,50	2,13	-0,20	4-5

4. Bemessungsvorschlag

4.1 Allgemeines

Zur Vermeidung eines spröden Versagens der untersuchten Anschlussgeometrien für die Knotenblechform A wird für jede Stahlsorte mit deren Nennwerten nach DIN EN 10025 in Abhängigkeit von der Werkstoffdicke des Knotenbleches und der Bauteiltemperatur die zu erwartende Versprödung μ berechnet, aus der wiederum die zu erwartende Versagensart bestimmt werden kann. Die zu erwartende Versagensart bestimmt schließlich die erforderliche Bemessungsvorschrift.

Für die Knotenblechform B ist kein Sprödbbruchnachweis erforderlich, der über die im Stahlbau üblichen Nachweise, z.B. [3], hinausgeht.

Die Regelungen in den Abschnitten 4.2 und 4.3 gelten für Profile mit Doppel – T – Querschnitt mit folgenden Bedingungen für die Abmessungen:

$$\begin{array}{ll} \text{Knotenblechdicke:} & t \leq 30 \text{ mm} \\ \text{Fläche des eingesteckten Profils:} & A \leq 150 \text{ cm}^2 \end{array}$$

4.2 Knotenblechform A

Die Knotenblechform A ist sehr anfällig gegen eine Beanspruchung auf Ermüdung. Aus diesem Grund muss genau geprüft werden, ob diese ausgeschlossen werden kann. Regelungen hierzu enthält [9]. In [10] sind Bemessungsregeln für eine statische Beanspruchung unter Berücksichtigung eines durch eine Ermüdungsbeanspruchung entstandenen Risses angegeben.

In der Tabelle 12 ist mit den Eingangswerten nach der Tabelle 11 die Versprödung μ für verschiedene Stahlsorten mit deren Nennwerten nach DIN EN 10025 in Abhängigkeit von der Werkstoffdicke des Knotenbleches und der Bauteiltemperatur angegeben. Für die Streckgrenzen $R_{p0,2}$ werden zur Berücksichtigung möglicher Überfestigkeiten um etwa 17 % erhöhte Werte zu den Mindestanforderungen nach DIN EN 10025 verwendet.

TABELLE 11

Eingangswerte zur Berechnung der Versprödung nach Tabelle 12

Werkstoff nach DIN EN 10025	R _{p0,2} [N/mm ²]	T _Ü [°C]	A ₁ [---]	t [mm]	M [---]
S235JR	280	20	1,43	10	0,42
S235J0	280	0	1,33		
S235J2	280	-20	1,25		
S275JR	325	20	1,43	15	0,42
S275J0	325	0	1,33		
S275J2	325	-20	1,25		
S355JR	420	20	1,43	20	0,41
S355J0	420	0	1,33		
S355J2	420	-20	1,25		
S355JR	420	20	1,43	25	0,41
S355J0	420	0	1,33		
S355J2	420	-20	1,25		
S355K2	420	-25	1,25	30	0,40

TABELLE 12

Versprödung $\mu = A \cdot (M - 1) + 1$ der Stahlsorten nach DIN EN 10025 mit den Eingangswerten nach Tabelle 11

Werkstoff nach DIN EN 10025	t = 10		t = 15		t = 20		t = 25		t = 30	
	Innen -10°C	Außen -30°C	Innen -10°C	Außen -30°C	Innen -10°C	Außen -30°C	Innen -10°C	Außen -30°C	Innen -10°C	Außen -30°C
S235JR	0,28	0,21	0,24	0,17	0,20	0,13	0,16	0,09	0,12	0,05
S235J0	0,38	0,32	0,35	0,29	0,32	0,25	0,29	0,22	0,25	0,18
S235J2	0,48	0,42	0,45	0,39	0,42	0,36	0,40	0,33	0,37	0,31
S275JR	0,20	0,15	0,18	0,11	0,14	0,06	0,10	0,02	0,06	0,00
S275J0	0,33	0,27	0,30	0,23	0,26	0,19	0,23	0,16	0,20	0,12
S275J2	0,44	0,38	0,41	0,35	0,38	0,32	0,35	0,28	0,32	0,25
S355JR	0,11	0,03	0,06	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S355J0	0,24	0,17	0,20	0,13	0,16	0,08	0,13	0,04	0,09	0,00
S355J2	0,36	0,29	0,33	0,26	0,30	0,22	0,26	0,19	0,23	0,15
S355K2	0,38	0,31	0,35	0,27	0,31	0,24	0,28	0,20	0,25	0,17

Die zu erwartende Versagensart (Tabelle 5) ergibt sich aus der berechneten Versprödung μ (Tabelle 12) und bestimmt die erforderliche Bemessungsvorschrift zum Vermeiden eines spröden Versagens (Tabelle 13). Eine abnehmende Verformung vor dem Bruch in Verbindung mit einem schlagartigen Versagen erfordert ein Vermeiden dieser Versagensform durch Vorschalten eines anderen Versagensmechanismus. Um die Bemessungsregeln in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wird nur festgelegt, ob der jeweilige Anschluss zulässig ist oder nicht. Aufgrund der zu geringen Verformungen vor dem Versagen in Verbindung mit

einem möglichen schlagartigen Bruch werden die Versagensarten 3 bis 5 als nicht mehr zulässig eingestuft. Gemäß Tabelle 10 muss unterhalb einer berechneten Versprödung $\mu < 0,30$ mit diesen Versagensformen gerechnet werden. Um auch bei einer berechneten Versprödung $\mu \geq 0,30$ einen Spröbruch auszuschließen, wird für den Anschluss gefordert, dass nur 80 % der nach [2] unter Beachtung von [6] berechneten Werte als Tragfähigkeit der Verbindung angesetzt werden dürfen (damit liegt man noch im elastischen Bereich der Last – Verformungskurve des Bauteils), und dass zusätzlich die plastische Normalkraft des eingesteckten Profils kleiner sein muss als die so berechnete Tragfähigkeit des Anschlusses.

Die Bemessungsvorschrift ist in Tabelle 13 enthalten. Dort ist $F_{i,d}$ die nach [2] unter Berücksichtigung von [6] berechnete Last im vollplastischen Zustand unter Berücksichtigung der verschiedenen Versagensmöglichkeiten, multipliziert mit dem Faktor 0,8, N_d ist die vollplastische Normalkraft des eingesteckten Profils. $N_{pl,d}$ ist der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit für die Kraft, die der Anschluss übertragen kann.

Bei Berücksichtigung dieser Sicherheitsanforderung durch den vorgeschalteten Versagensmechanismus des eingesteckten Profils können für die zulässigen Stahlgüten auch andere anerkannte Bemessungsformeln als die in [2] unter Berücksichtigung von [6] angegebenen verwendet werden.

Die Anschlussform A ist nur für die in Tabelle 14 angegebenen Stahlgüten zulässig. Dabei sind die jeweils höheren Gütestufen einer Festigkeitsklasse miteingeschlossen. Tabelle 14 gilt wegen der vereinfachenden Voraussetzungen nur für die Stahlgütewahl bei der Werkstoffbestellung. Für einen nachträglichen Nachweis der Eignung vorhandenen, eingebauten Materials (fit – for – purpose) kann die Berechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Übergangstemperaturen T_{27J} und / oder Streckgrenzen $R_{p0,2}$ durchgeführt werden, indem die Versprödung μ mit diesen Werten anstelle der Werte in der Tabelle 11 ermittelt wird.

TABELLE 13

Erforderliche Bemessungsvorschrift in Abhängigkeit von der Versprödung und der
 Versagensart

Versprödung μ	Versagensart	Bemessungsvorschrift	Bemerkungen
$\mu < 0,30$	3 – 5	---	nicht zulässig
$\mu \geq 0,30$	1 – 2-3	$N_{pl,d} = N_d < 0,8 \cdot F_{i,d}$	Versagen im eingesteckten Profil vorschalten, Ausnutzung plastischer Querschnittsreserven im Knotenblech nicht zulässig

TABELLE 14

Mindestens erforderliche Stahlgüten für die Anschlussform A in Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse, der Bauteiltemperatur und der Dicke des Bauteils

Bauteiltemperatur	Festigkeitsklasse	Dicke t [mm]				
		10	15	20	25	30
Innen $\vartheta = -10^\circ\text{C}$	S235	J0	J0	J0	J2	J2
	S275	J0	J0	J2	J2	J2
	S355	J2	J2	J2	---*)	---*)
Außen $\vartheta = -30^\circ\text{C}$	S235	J0	J2	J2	J2	J2
	S275	J2	J2	J2	---*)	---*)
	S355	K2	---*)	---*)	---*)	---*)

*) In der Festigkeitsklasse nicht zulässig

4.3 Knotenblechform B

Die Wahl der Stahlgütegruppe der Knotenblechform B erfolgt nach [3]. Zur Bemessung können die Bemessungsformeln in [2] unter Beachtung von [6] verwendet werden. Ein vorschaltetes Versagen des eingesteckten Profils sowie die Beschränkung auf 80 % der berechneten Werte ist nicht erforderlich.

5. Zusammenfassung

Die Versuche mit Knotenblechen unterschiedlicher Dicke und Kerbschlagarbeiten sowie mit verschiedenen eingesteckten Profilen zeigen, dass die ausgerundete Knotenblechform B gegenüber der Knotenblechform A deutlich größere plastische Verformungen zulässt. Die erreichte Verformung im Versuch beschreibt die Möglichkeit der Ausnutzung plastischer Spannungsumlagerungen zur Vermeidung eines spröden Versagens. Die Bewertung der Versprödung μ erfolgt in Abhängigkeit der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes sowie der Stahlgüte, der Streckgrenze, der Übergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch $T_{Ü} = T_{27J}$ im Vergleich zur Bauteiltemperatur ϑ und der Werkstoffdicke. Die Berechnung der Versprödung μ lässt sich auf andere Versuchskörpergeometrien und Werkstoffeigenschaften als die in den Versuchen geprüften übertragen. Um ein sprödes Versagen der gewählten Knotenblechgeometrien auszuschließen, werden im Abschnitt 4 in Abhängigkeit dieser Versprödung Bemessungsregeln für die untersuchten Anschlüsse festgelegt.

Die Regelungen gelten für Profile mit Doppel – T – Querschnitt bis zu folgenden maximal zulässigen Abmessungen:

$$\begin{aligned} \text{Knotenblechdicke:} & \quad t = 30 \text{ mm} \\ \text{Fläche des eingesteckten Profils:} & \quad A = 150 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Die in diesem Bericht festgelegten Bemessungsvorschriften gelten nur für die künftige Werkstoffauswahl, um ein sprödes Versagen der beschriebenen Anschlüsse mit Sicherheit zu vermeiden. Da die Annahmen für die Werkstoffe auf der sicheren Seite liegen, indem für die Stahlsorten jeweils die normativen Grenzanforderungen zugrunde gelegt und nicht tatsächlich vorhandenen Werkstoffkennwerte berücksichtigt wurden, ist die Tabelle 14 nicht zum Bewerten einer bereits bestehenden Konstruktion geeignet. Bei Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Werkstoffkennwerte kann die Auswahl der Stahlgüte viel günstiger ausfallen. Allgemeine Hinweise zum Vermeiden eines spröden Versagens im Stahlbau enthält [12].

Karlsruhe, am 29. März 2004

mv / pc

Die Institutsleitung

Der Sachbearbeiter

Prof. Dr.-Ing. H. Saal

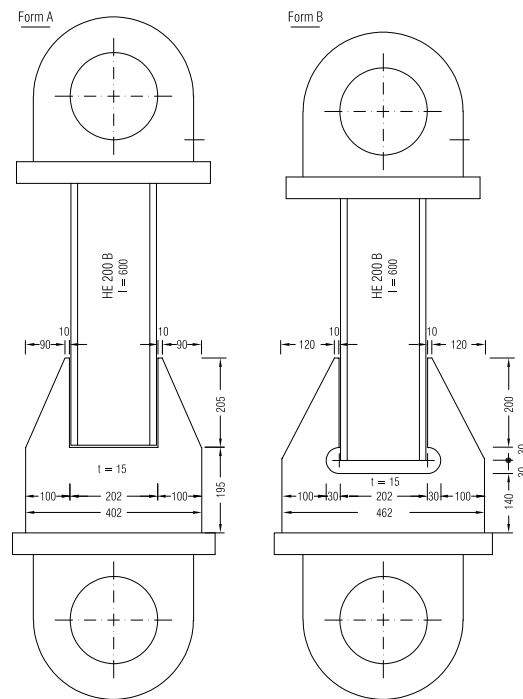
Dipl.-Ing. M. Volz

Anlage 1
Schrifttum

-
- [1] Lange, J. / Friemann, H. / Suppes, A.: Tragverhalten von ausgeschnittenen Knotenblechen, Stahlbau 69 (2000), Heft 2, S. 112 – 123.
 - [2] Klinkenberg, A., Peter, W., Saal, H.: Berechnungsmodelle für geschweißte Anschlüsse in ausgeschnittenen Knotenblechen. Stahlbau 68 (1999), H.2, S. 173-180.
 - [3] DASt – Richtlinie 009: Empfehlungen zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, April 1973, Köln.
 - [4] DASt – Richtlinie 009: Empfehlungen zur Wahl der Stahlsorte für geschweißte Stahlbauten. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Entwurf September 1998.
 - [5] Bericht zu den Untersuchungen zur Erlangung der Zustimmung im Einzelfall für das Detail „Hängeranschluss – Fernbahnhof Düsseldorf Flughafen“, Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 11.März 1999.
 - [6] Saal, H., Volz, M.: Berichtigungen und Ergänzungen zu [2]. Stahlbau 68 (1999), H.8, S. 688-689.
 - [7] Klöppel, K.: Das Verhalten längsbeanspruchter Schweißnähte und die Frage der Zusammenwirkung von Betriebs- und Schrumpfspannungen. Der Stahlbau, 11. Jahrgang, Berlin, 15. Juli 1938, H.14/15, Beilage zu Die Bautechnik.
 - [8] Rühl, K.: Amerikanische Spröbruchversuche und die Folgerungen für die Spröbruchprüfung. Bericht Nr. 912 des Werkstoffausschusses des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Berlin-Dahlem, 25. Jahrgang, H.9/10-Sept./Okt. 1954.
 - [9] Lange, J.: Forschungsbericht P 488: Schieblingsanschlüsse in Fachwerkbindern unter nicht ruhender Beanspruchung, Stahl-Zentrum, Studiengesellschaft Stahlanwendung, Düsseldorf, 2003.
 - [10] Dahl, W.; Bleck, W.; Buchholz, J.: Abschlussbericht zum DFG-Forschungsvorhaben DA 85/78-2: Stahlgütewahl für geschweißte Stahlkonstruktionen in Bezug auf typisierte Konstruktionsdetails entsprechend den Ermüdungsfestigkeitskatalogen (Fortsetzungsprojekt). Kennwort: Stahlgütewahl nach Betriebsfestigkeitskatalogen. Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen, November 2002.
 - [11] Sedlacek, G.; Kühn, B.; Höhler, S.: Abschlussbericht zum DFG Forschungsvorhaben Se 351/28-2: Stahlgütewahl für geschweißte Stahlkonstruktionen in Bezug auf typisierte Konstruktionsdetails entsprechend den Ermüdungsfestigkeitskatalogen (Fortsetzungsprojekt). Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, August 2002.
 - [12] Saal, H.; Steidl, G.; Volz, M.: Spröbruchsicherheit im Stahlbau, Stahlbau 70 (2000), H.9, S. 685-697.

Anlage 2

Zeichnungen und Bilder der Versuchskörper



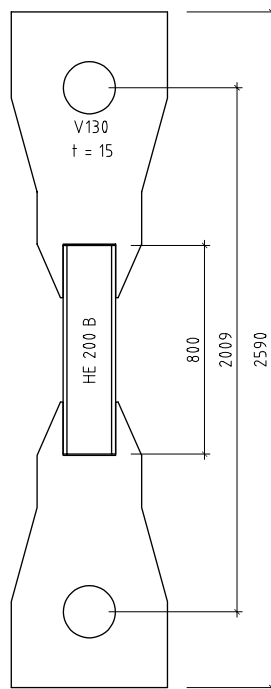
Zeichnung A2.1 Abmessungen der Versuchskörper V110 und V120



Bild A2.1 V111 Versuchsaufbau



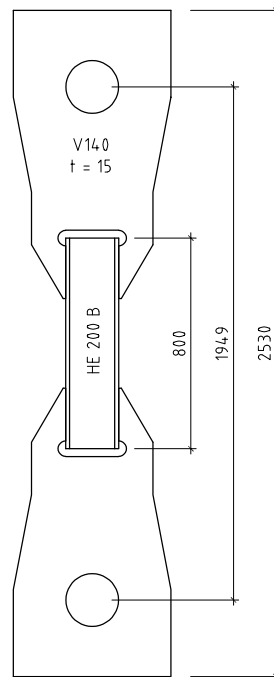
Bild A2.2 V121 Versuchsaufbau



Zeichnung A2.2 Abmessungen der Versuchskörper V130, V150



Bild A2.3 V131 Versuchsaufbau



Zeichnung A2.3 Abmessungen der Versuchskörper V140, V160

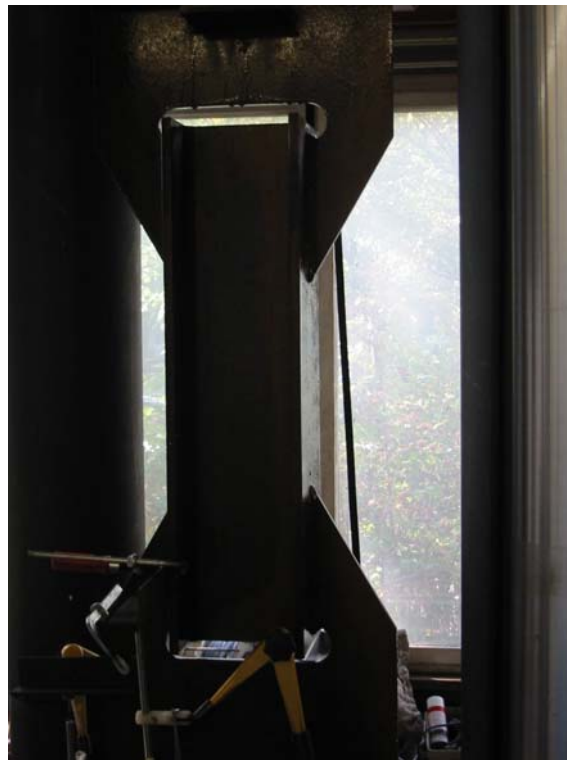
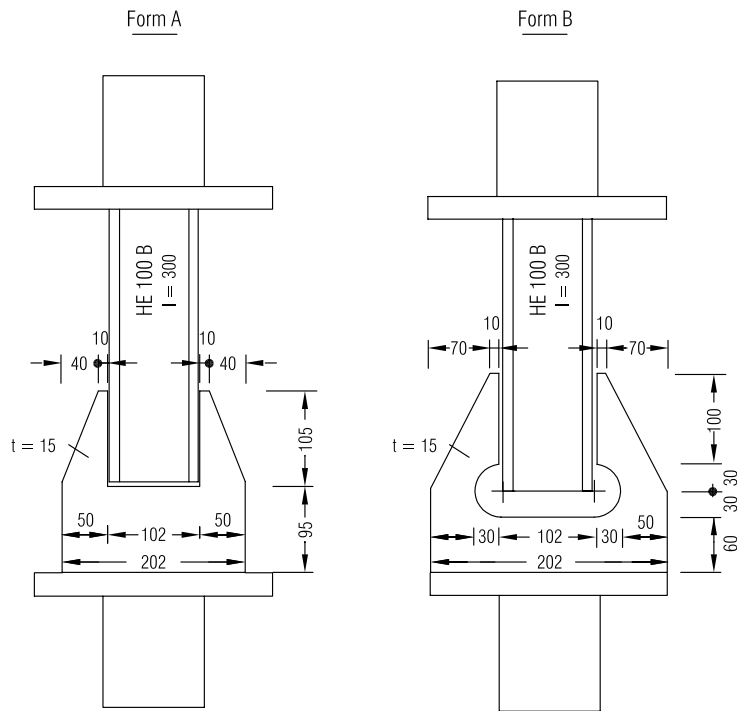
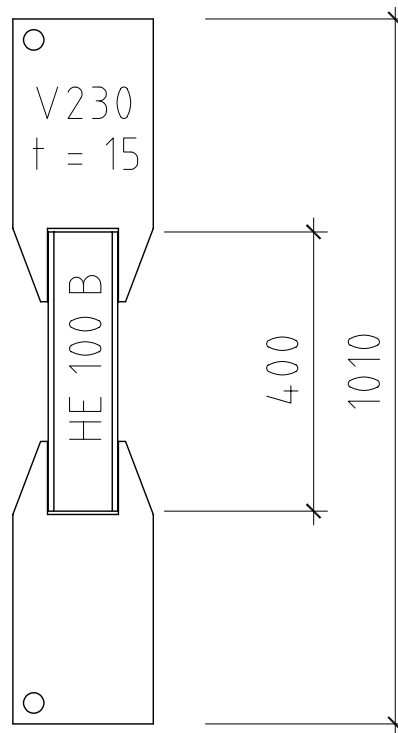


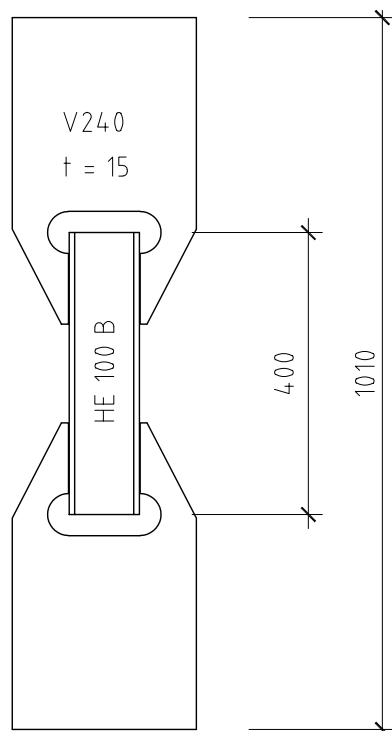
Bild A2.4 V141 Versuchsaufbau



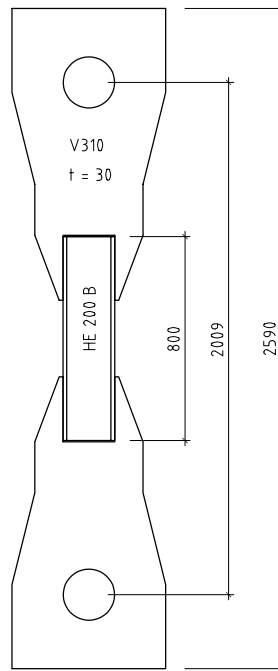
Zeichnung A2.4 Abmessungen der Versuchskörper V210 und V220



Zeichnung A2.5 Abmessungen der Versuchskörper V230, V250



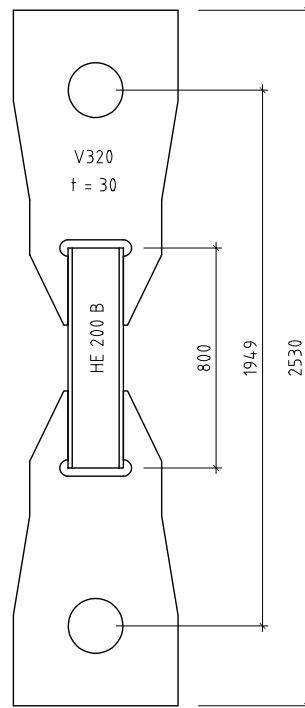
Zeichnung A2.6 Abmessungen der Versuchskörper V240, V260



Zeichnung A2.7 Abmessungen der Versuchskörper V310, V330



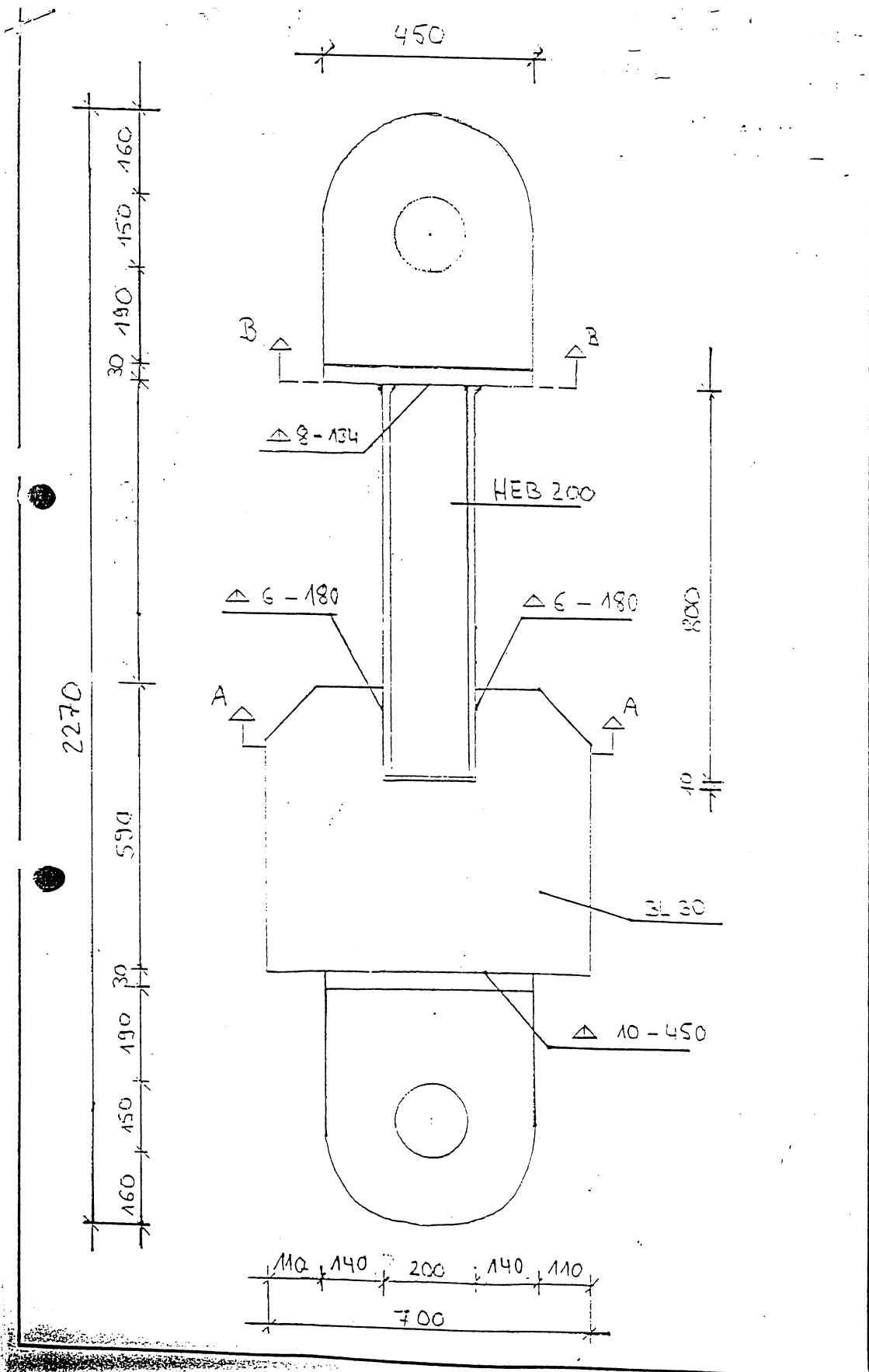
Bild A2.5 V311 Versuchsaufbau



Zeichnung A2.8 Abmessungen der Versuchskörper V320, V340



Bild A2.6 V341 Versuchsaufbau



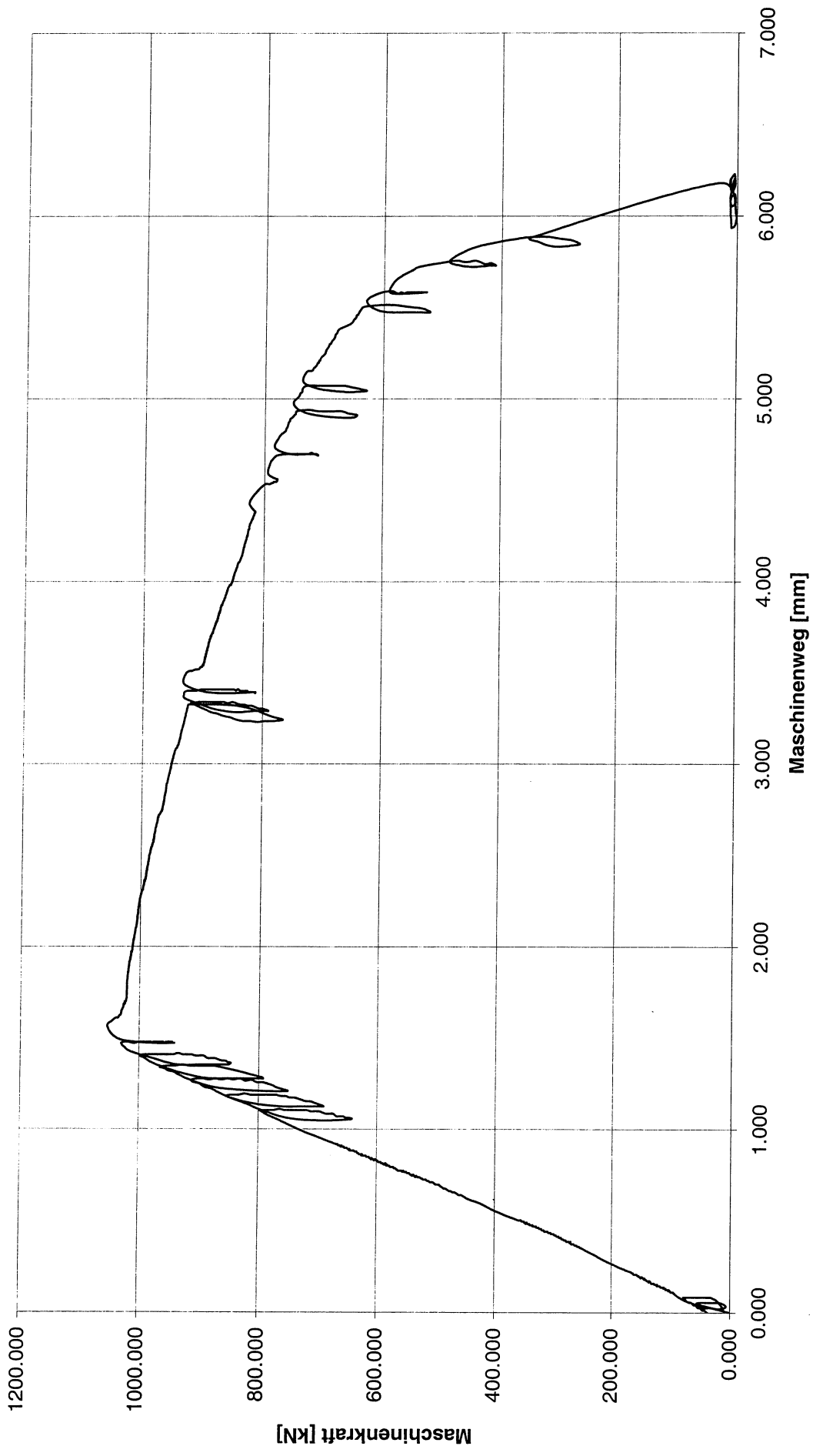
Zeichnung A2.9

Abmessungen der Versuchskörper VKL

Anlage 3

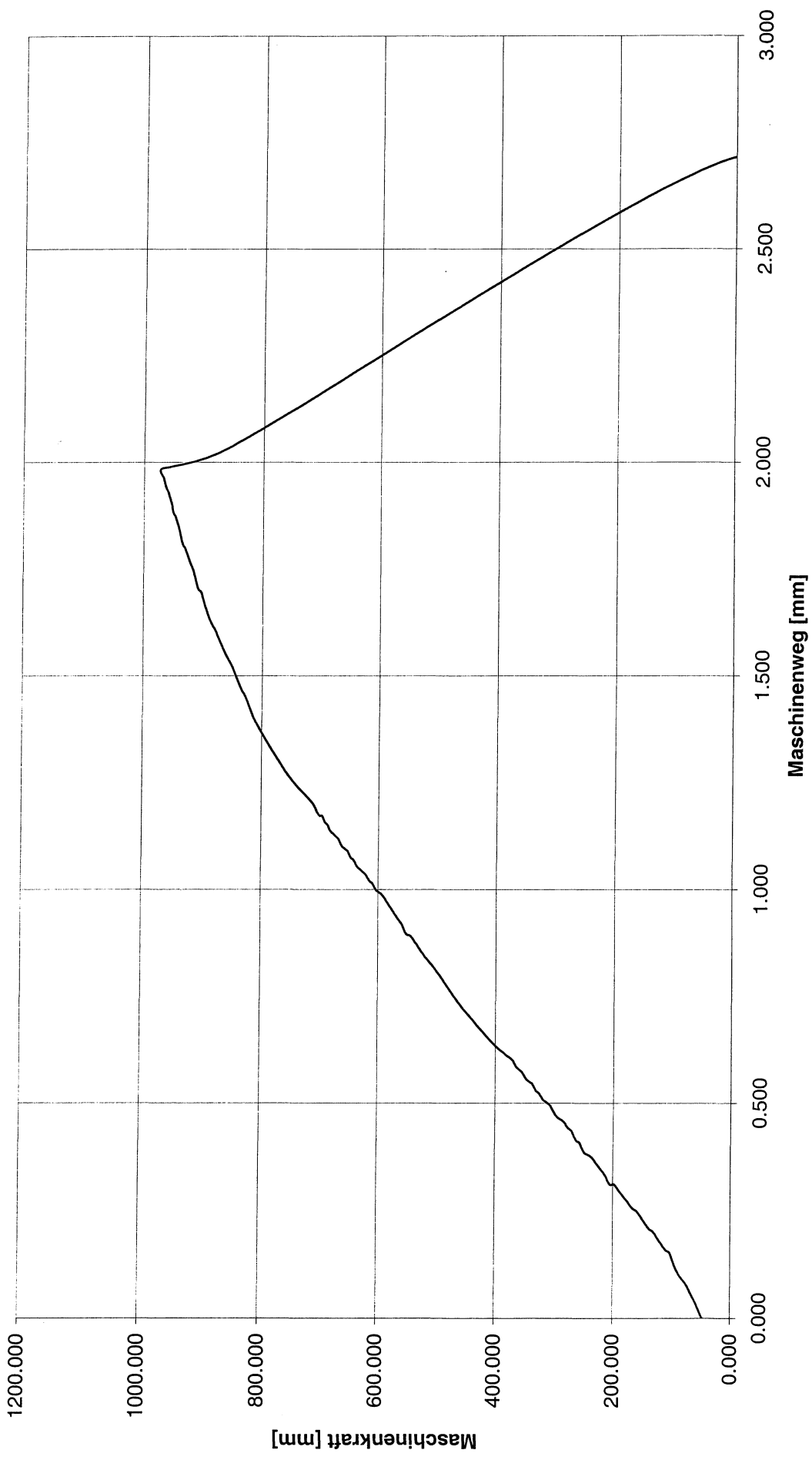
Maschinendiagramme der Versuche

V1111_Versuchsdaten



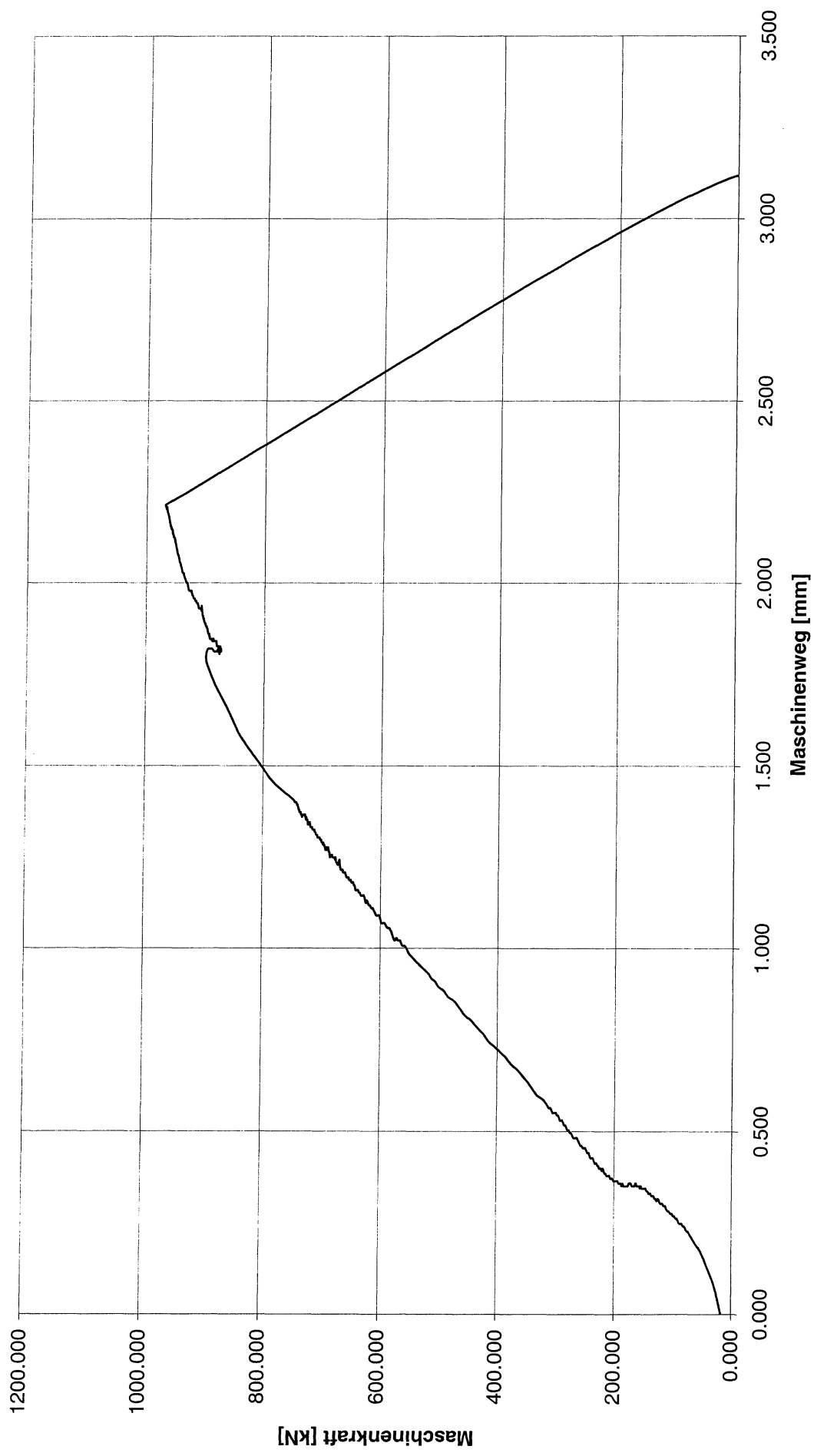
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V112_Versuchsdaten



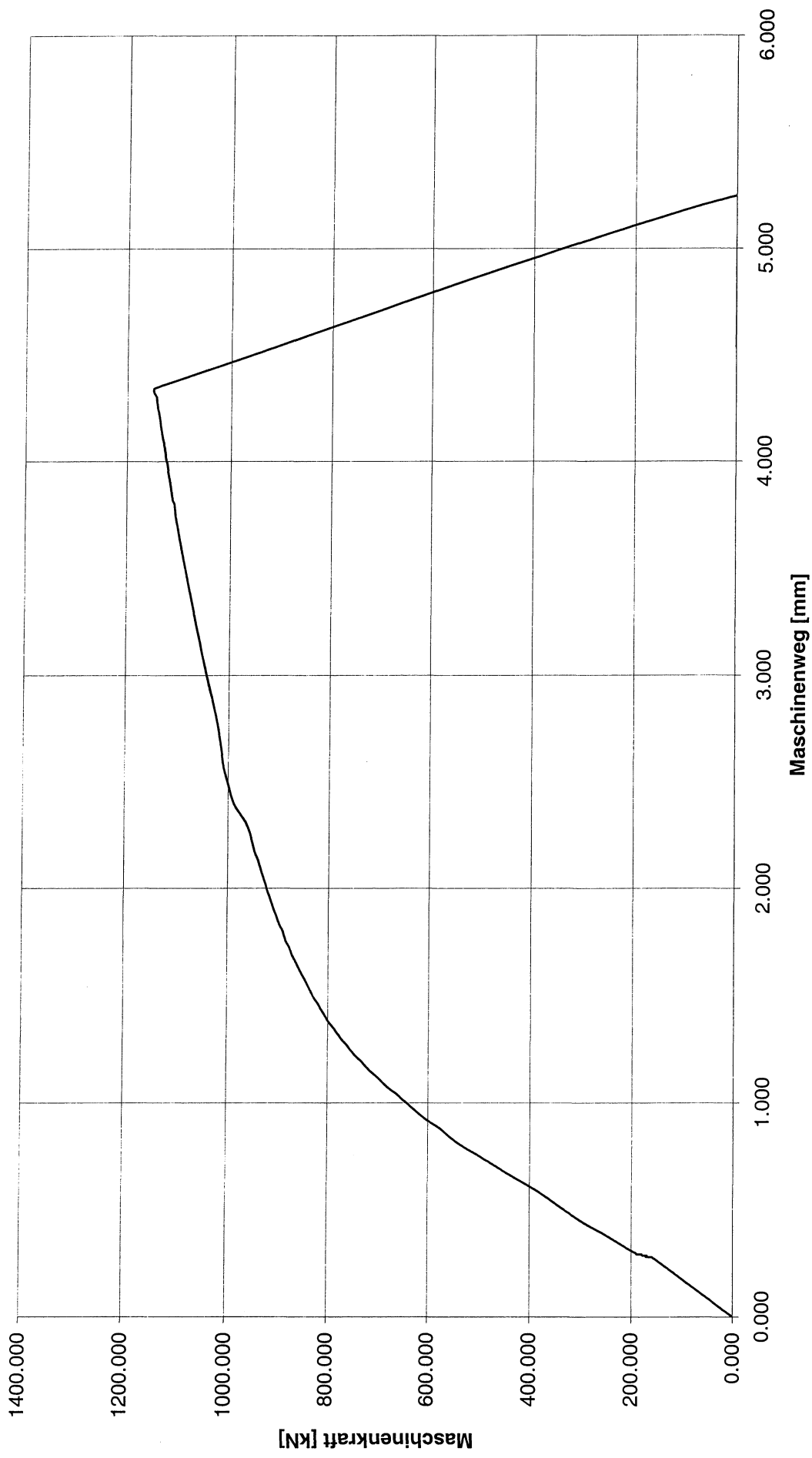
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V1113_Versuchsdaten



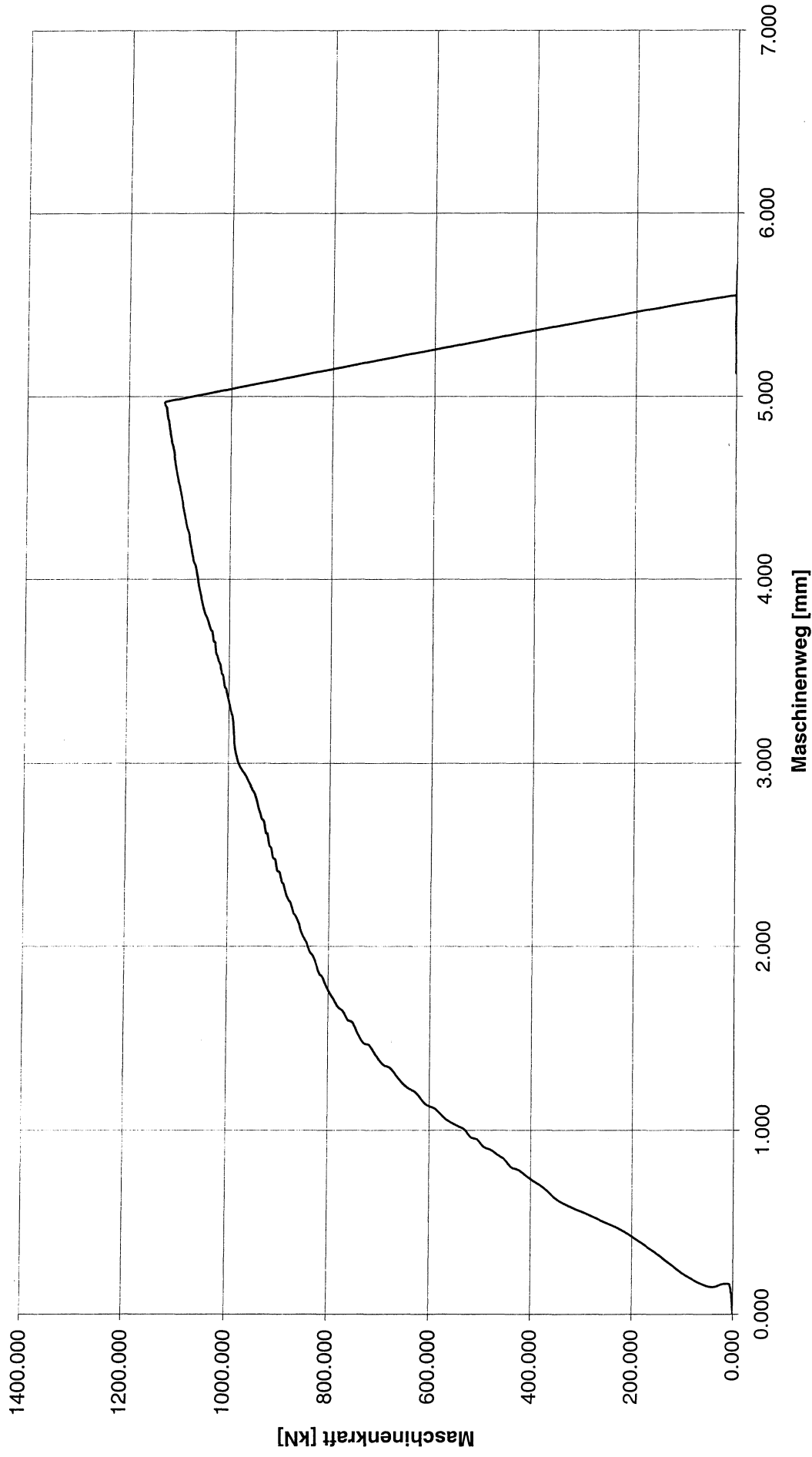
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V121_Versuchsdaten



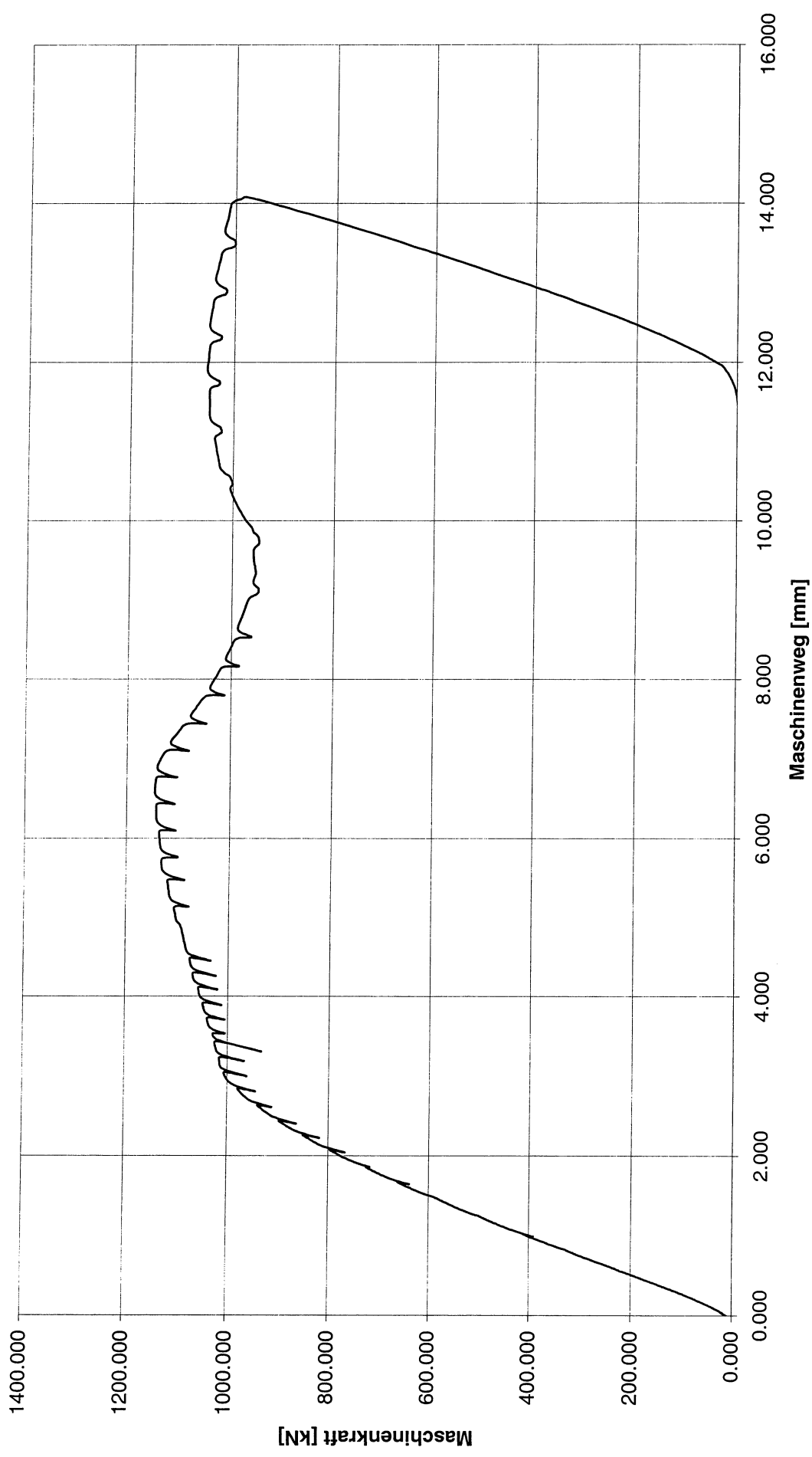
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V122_Versuchsdaten



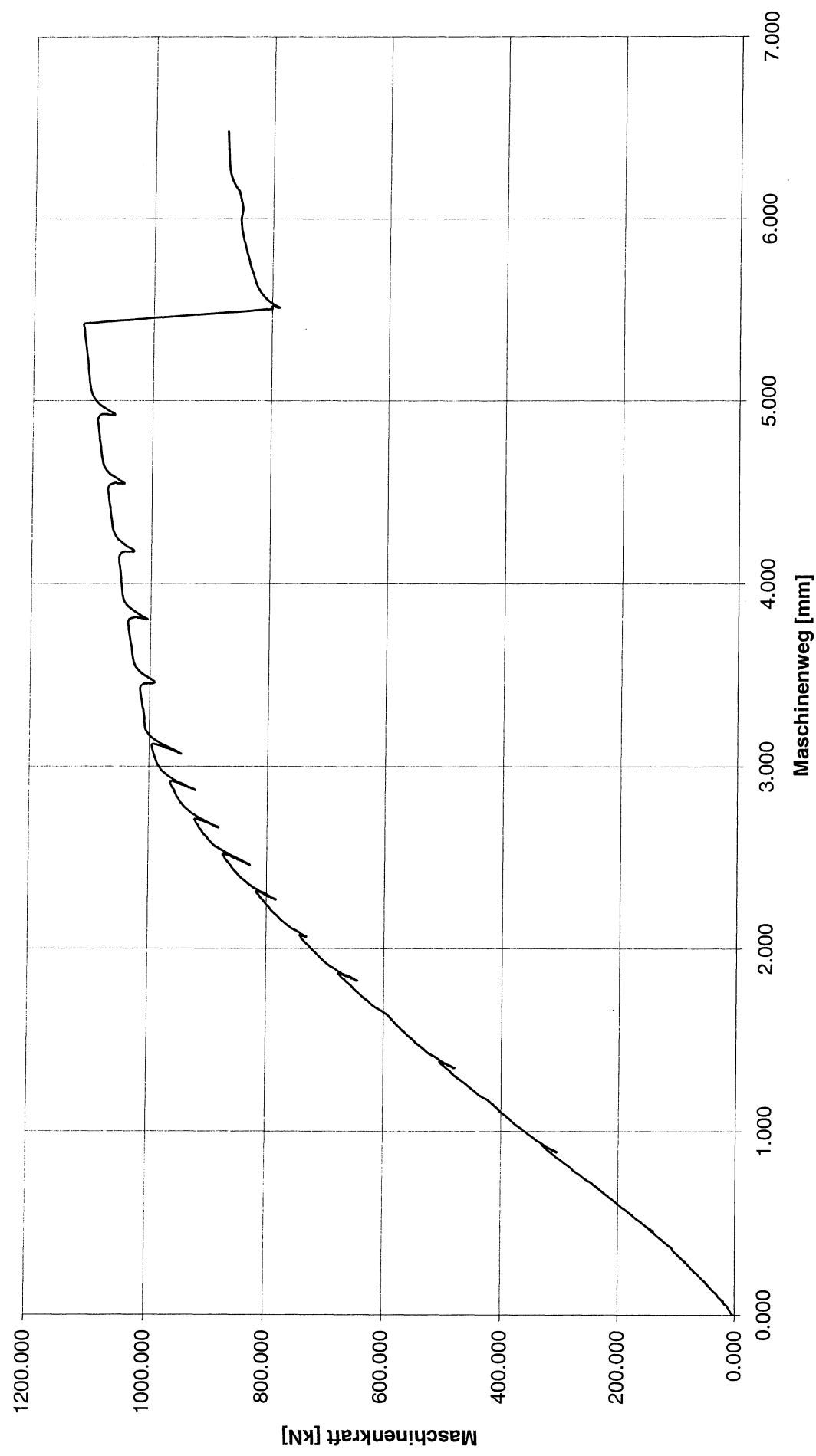
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V131_Versuchsdaten



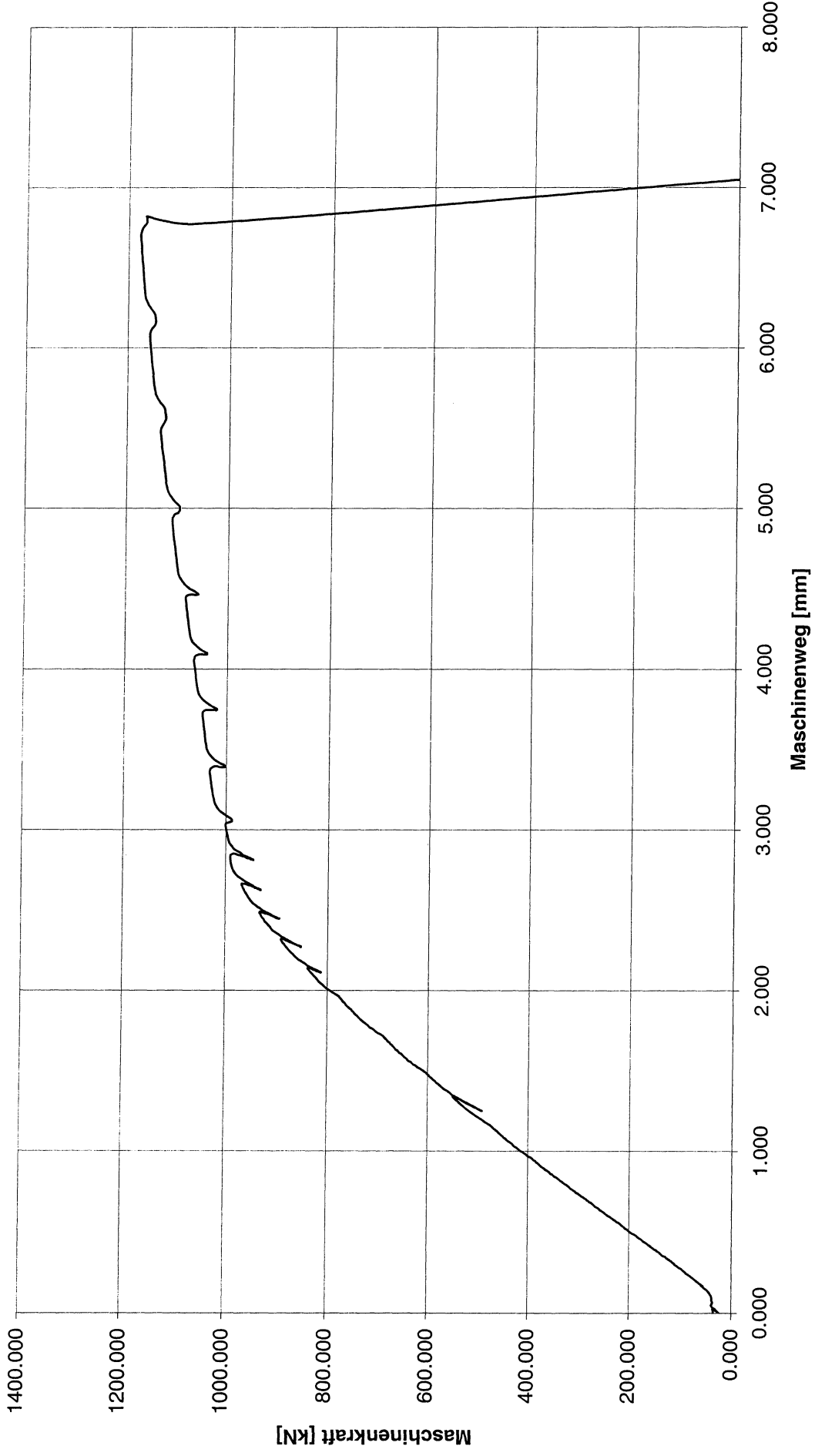
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V132_Versuchsdaten



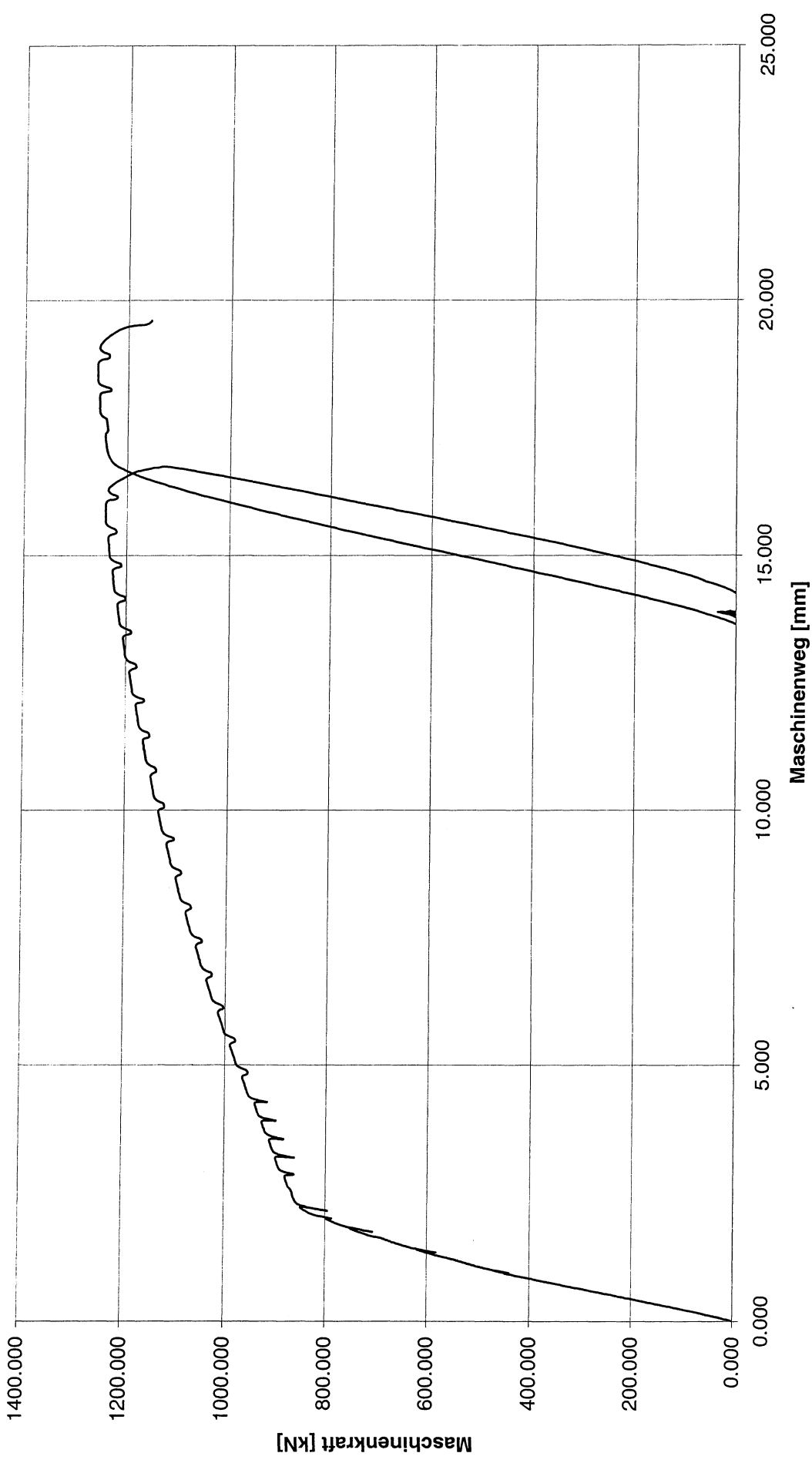
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V133_Versuchsdaten



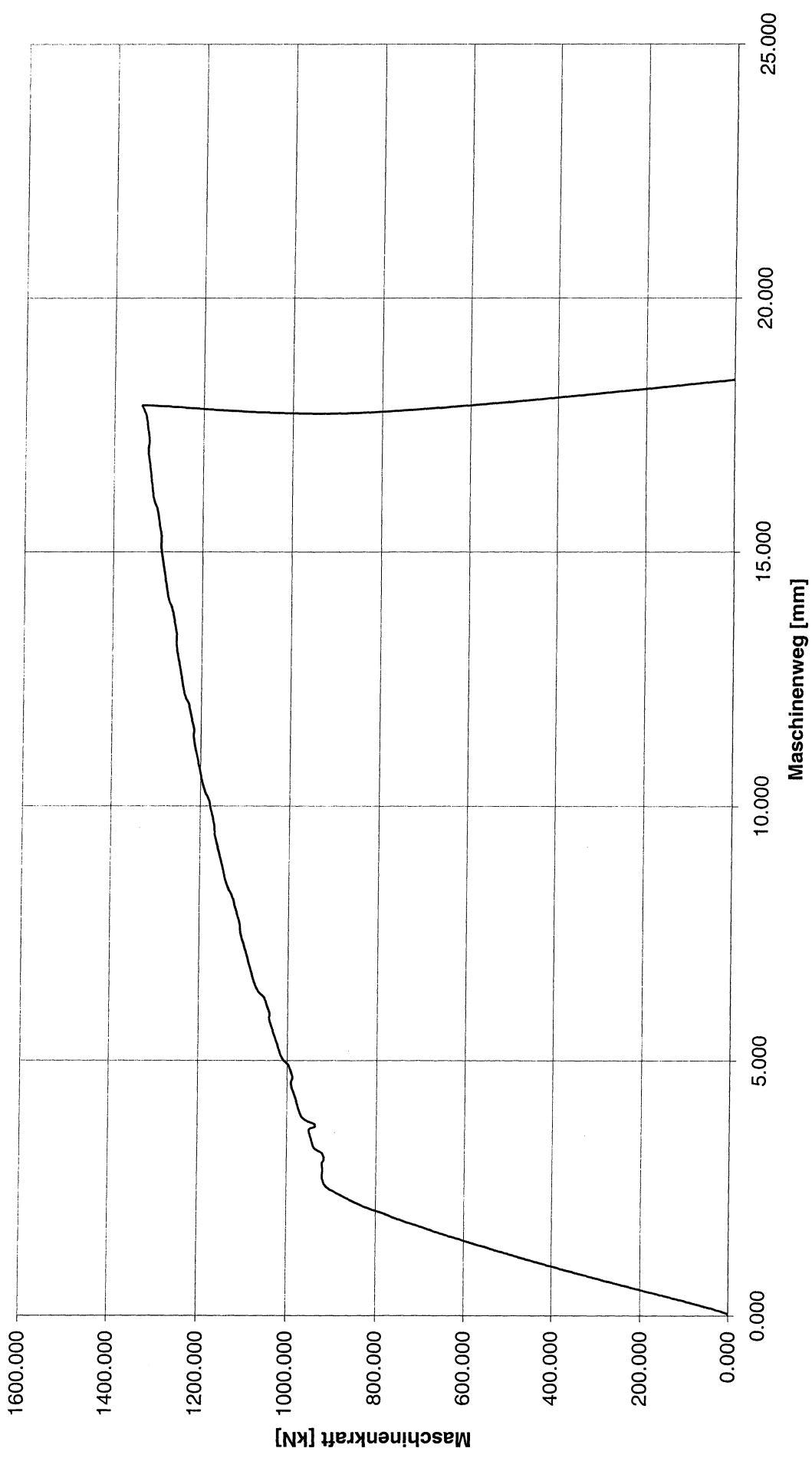
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V141_Versuchsdaten



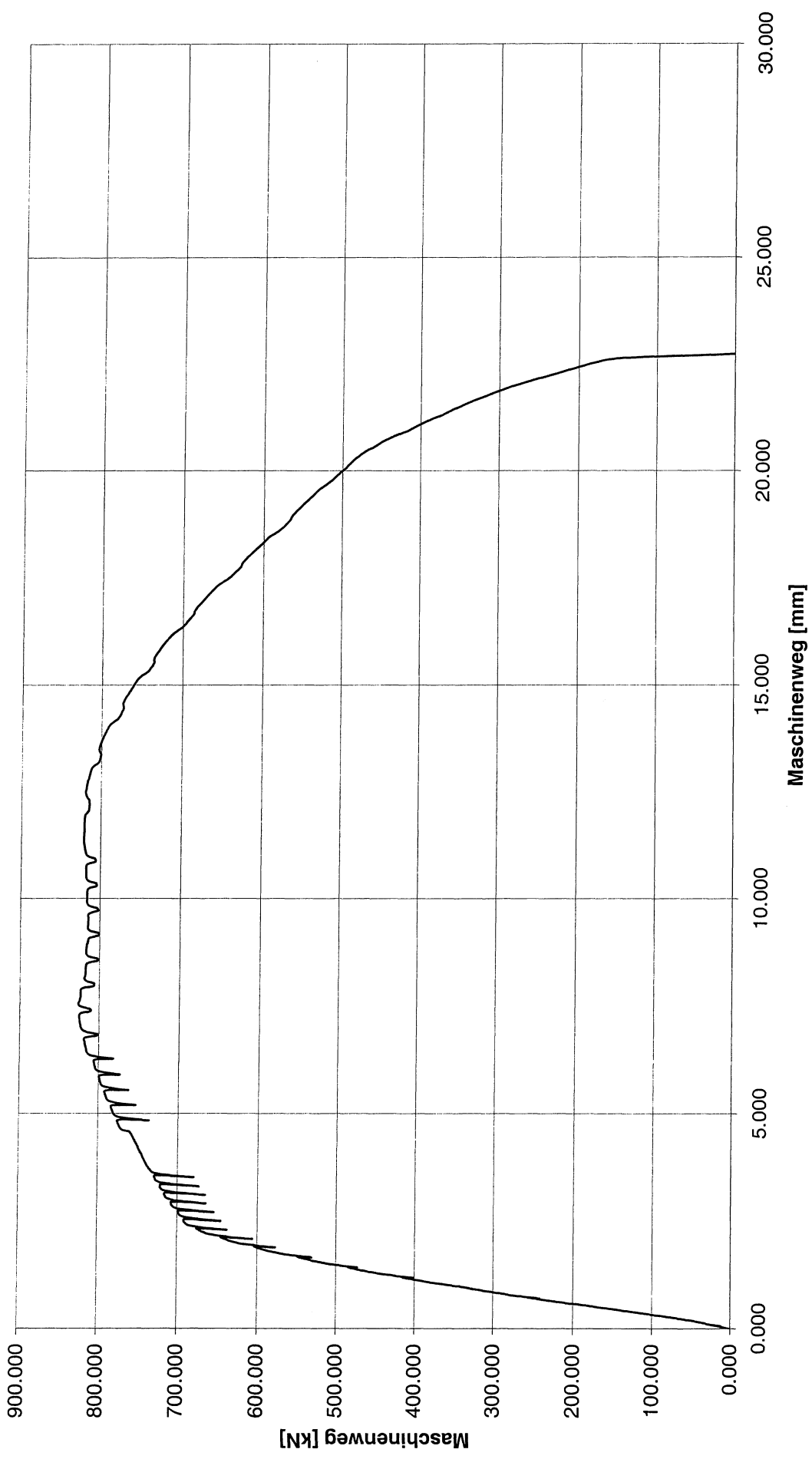
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V142_Versuchsdaten



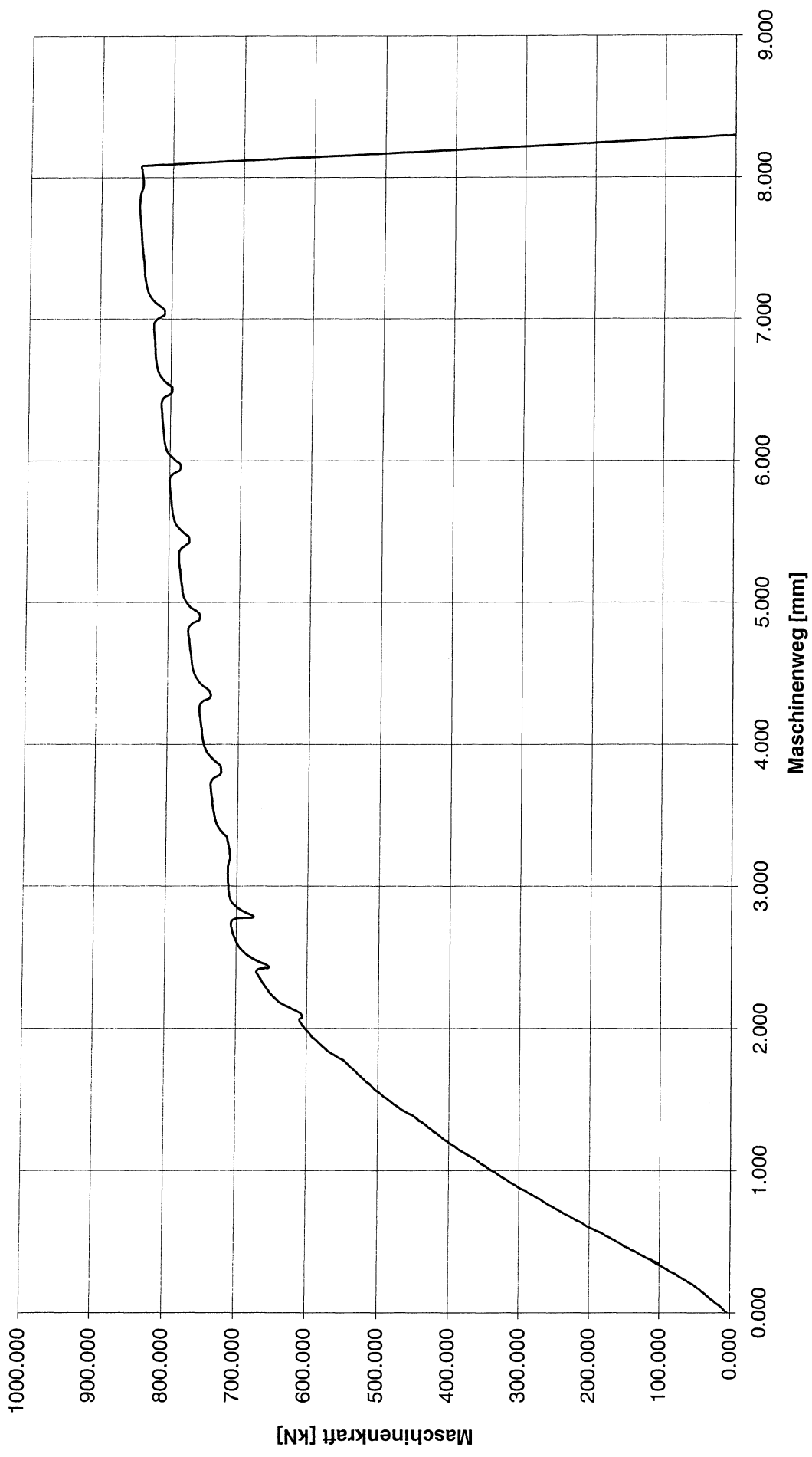
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V151_Versuchsdaten



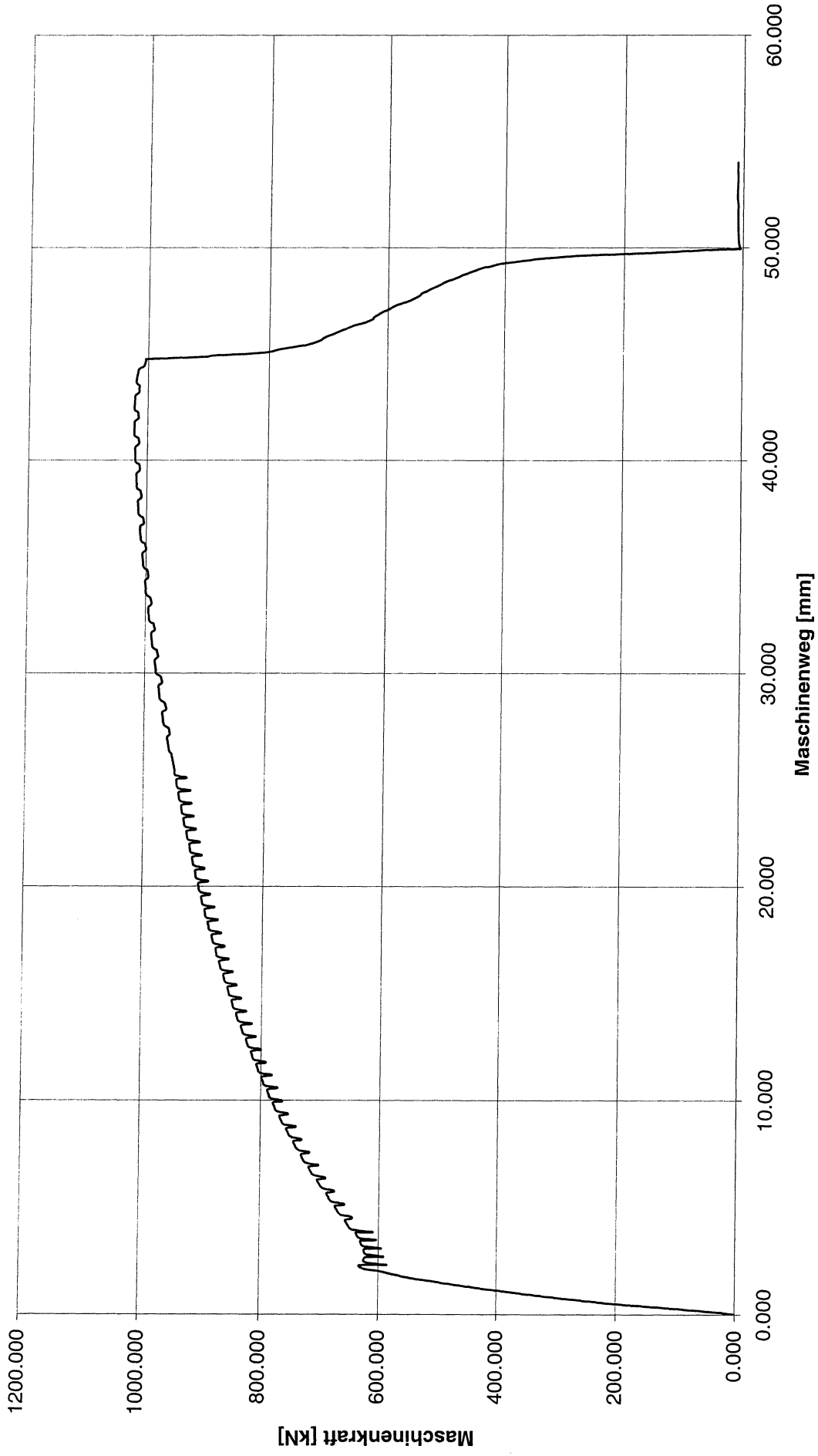
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V152_Versuchsdaten



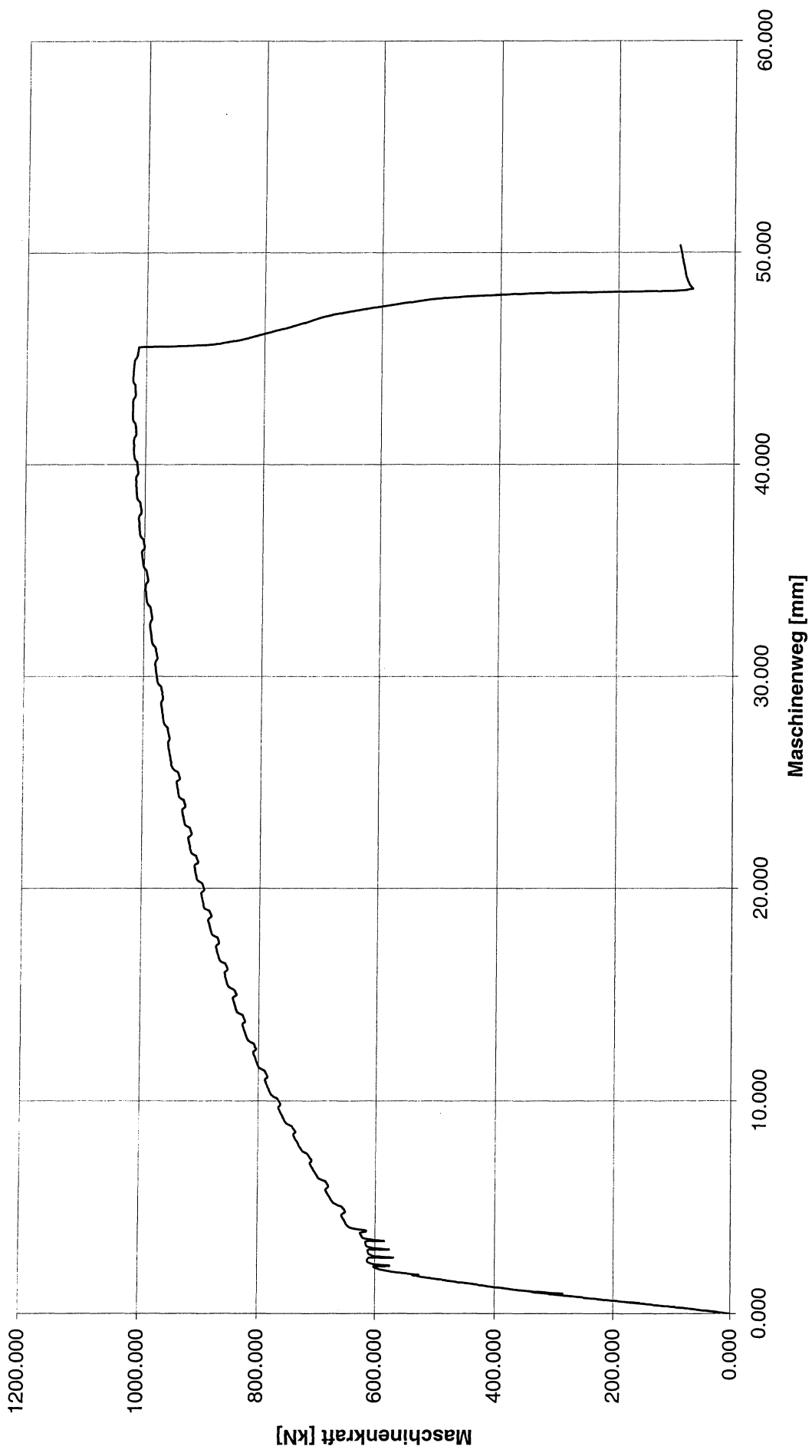
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V161_Versuchsdaten



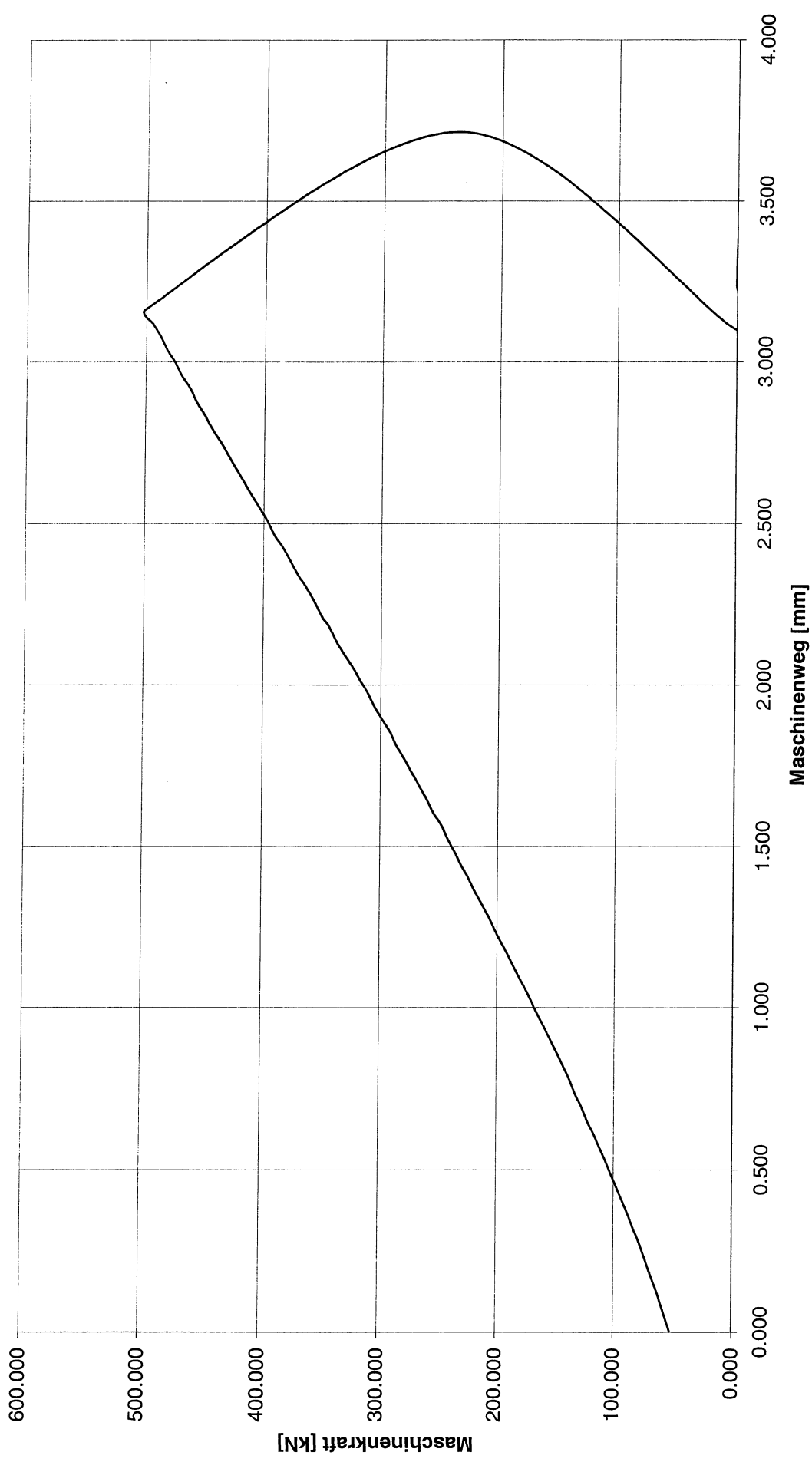
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V162_Versuchsdaten



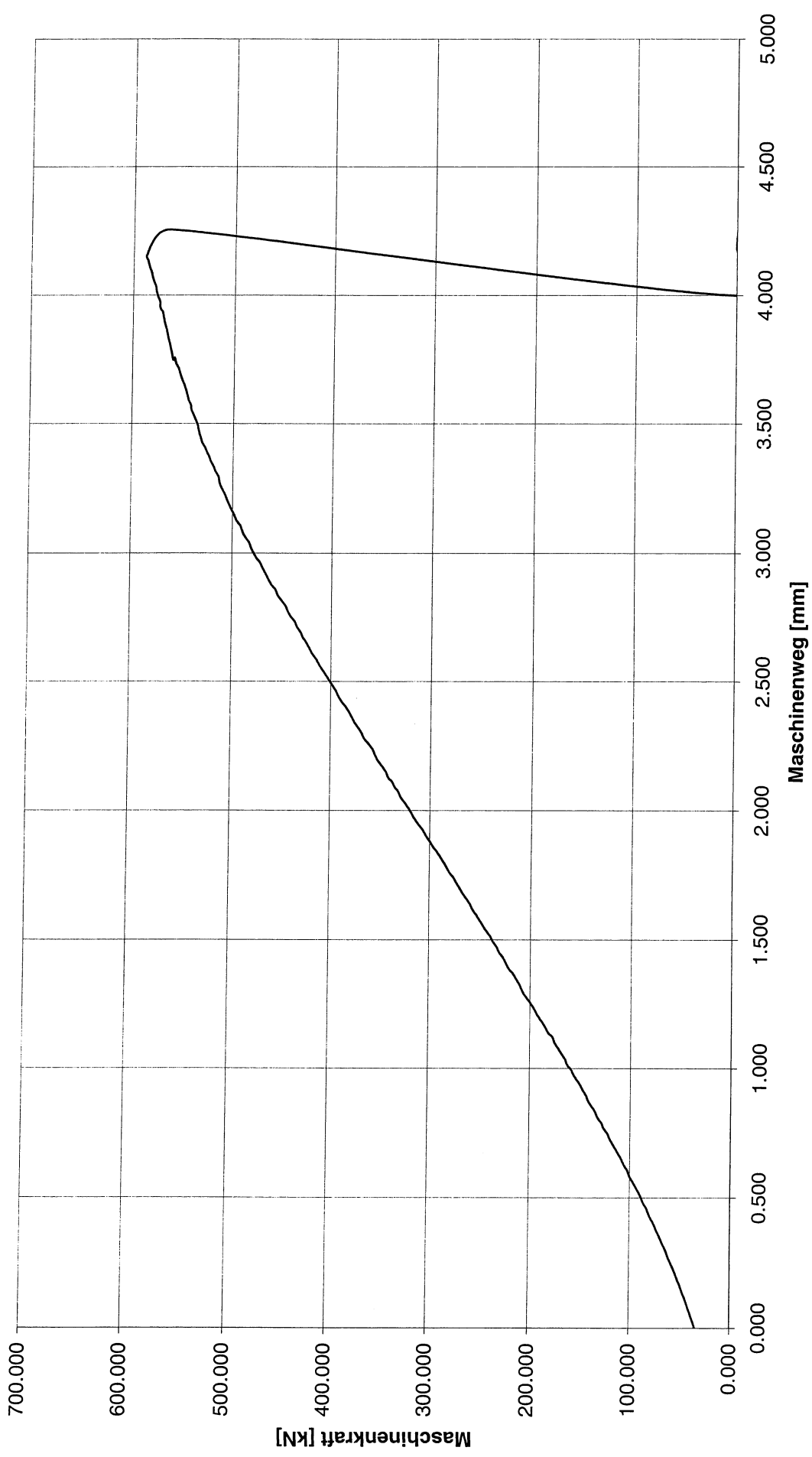
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V211_Versuchsdaten



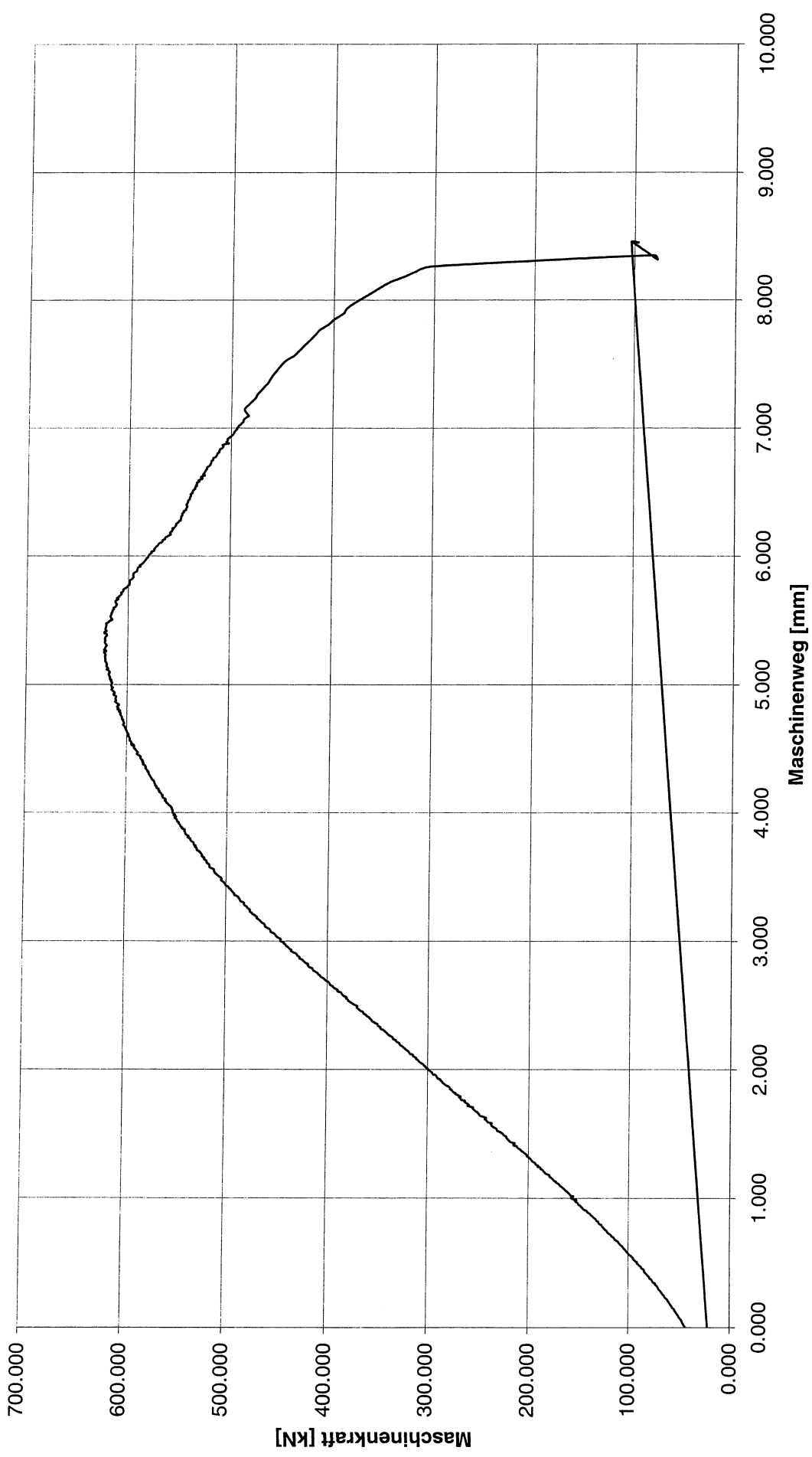
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V212_Versuchsdaten



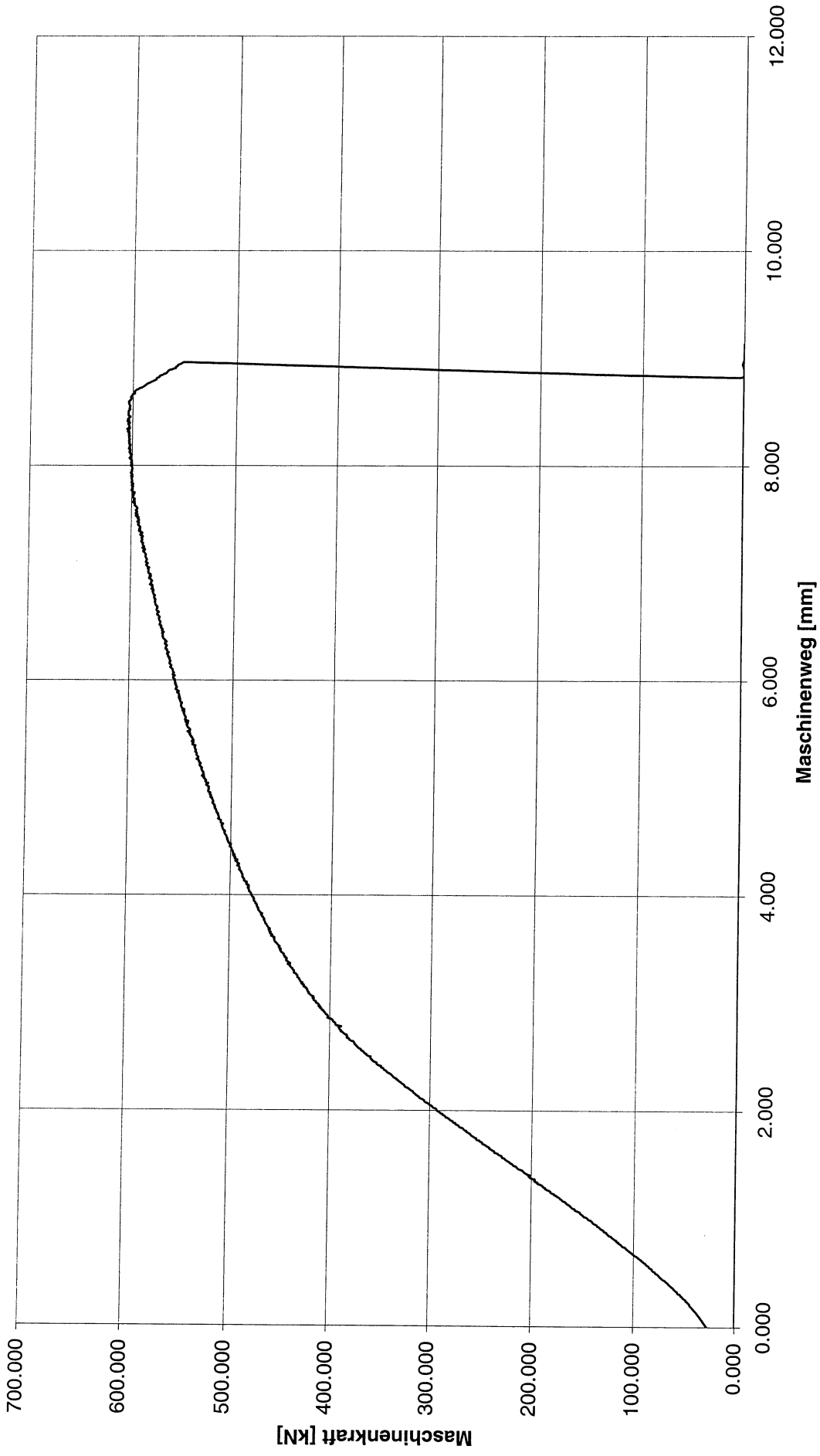
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V213_Versuchsdaten



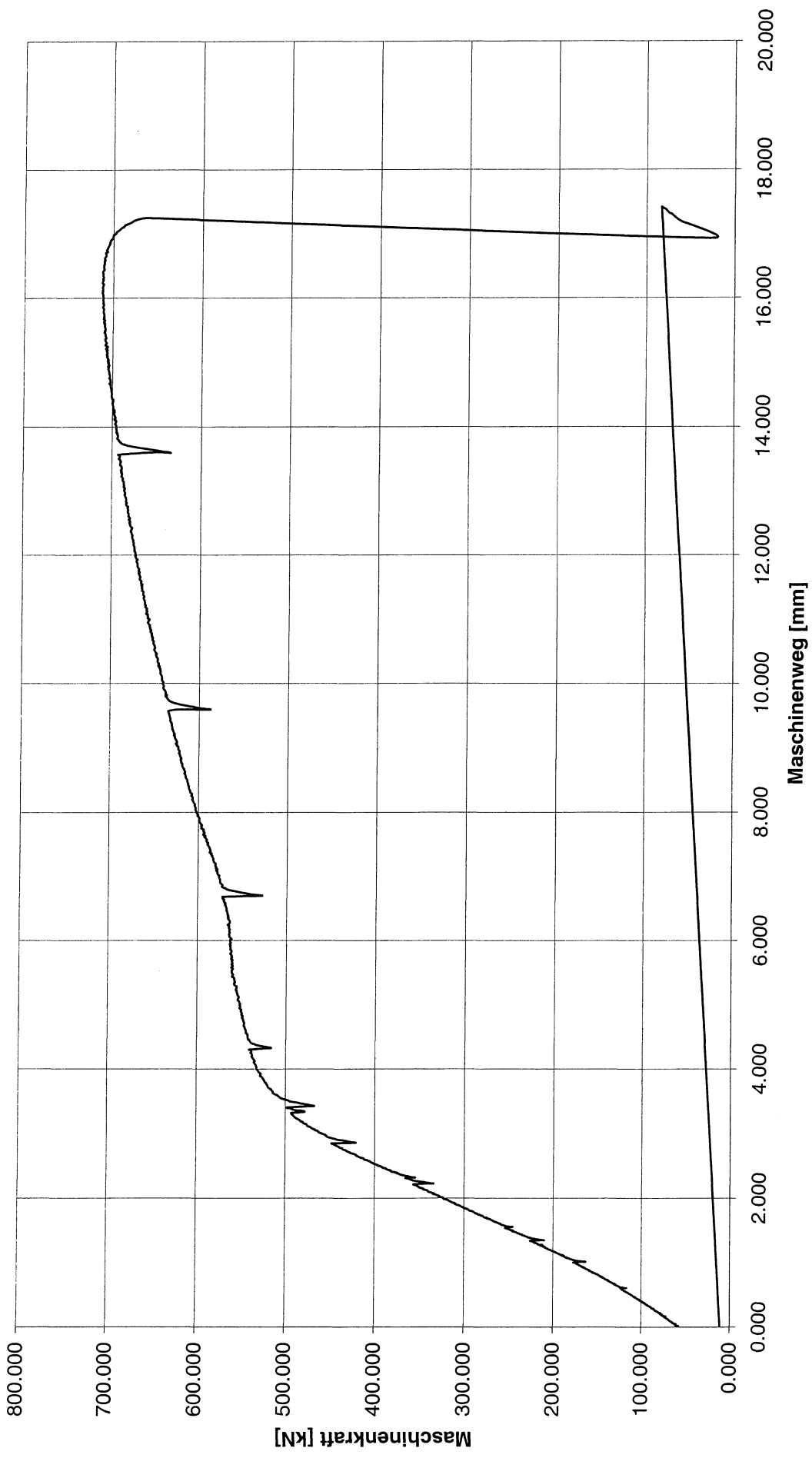
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V222_Versuchsdaten



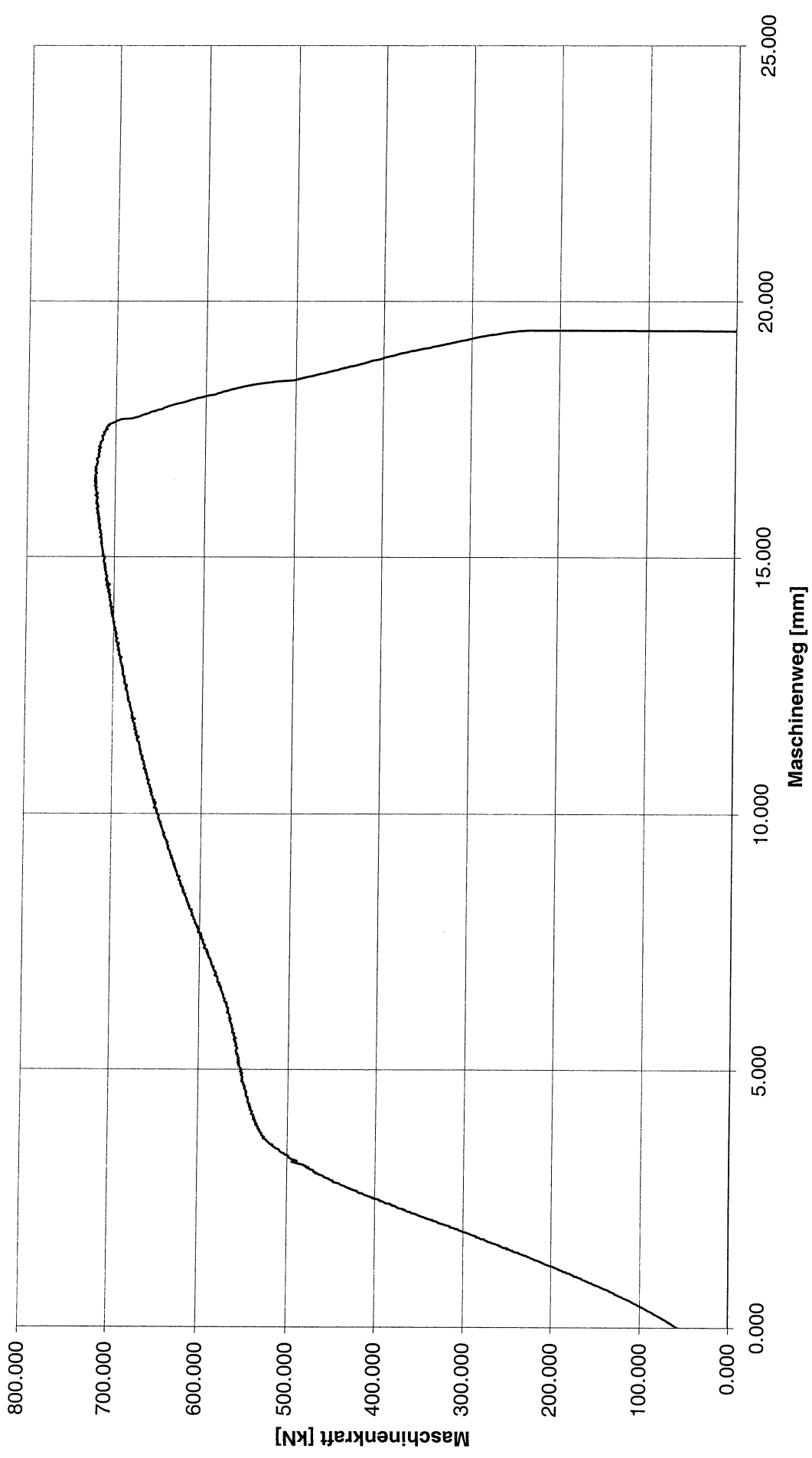
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V231_Versuchsdaten



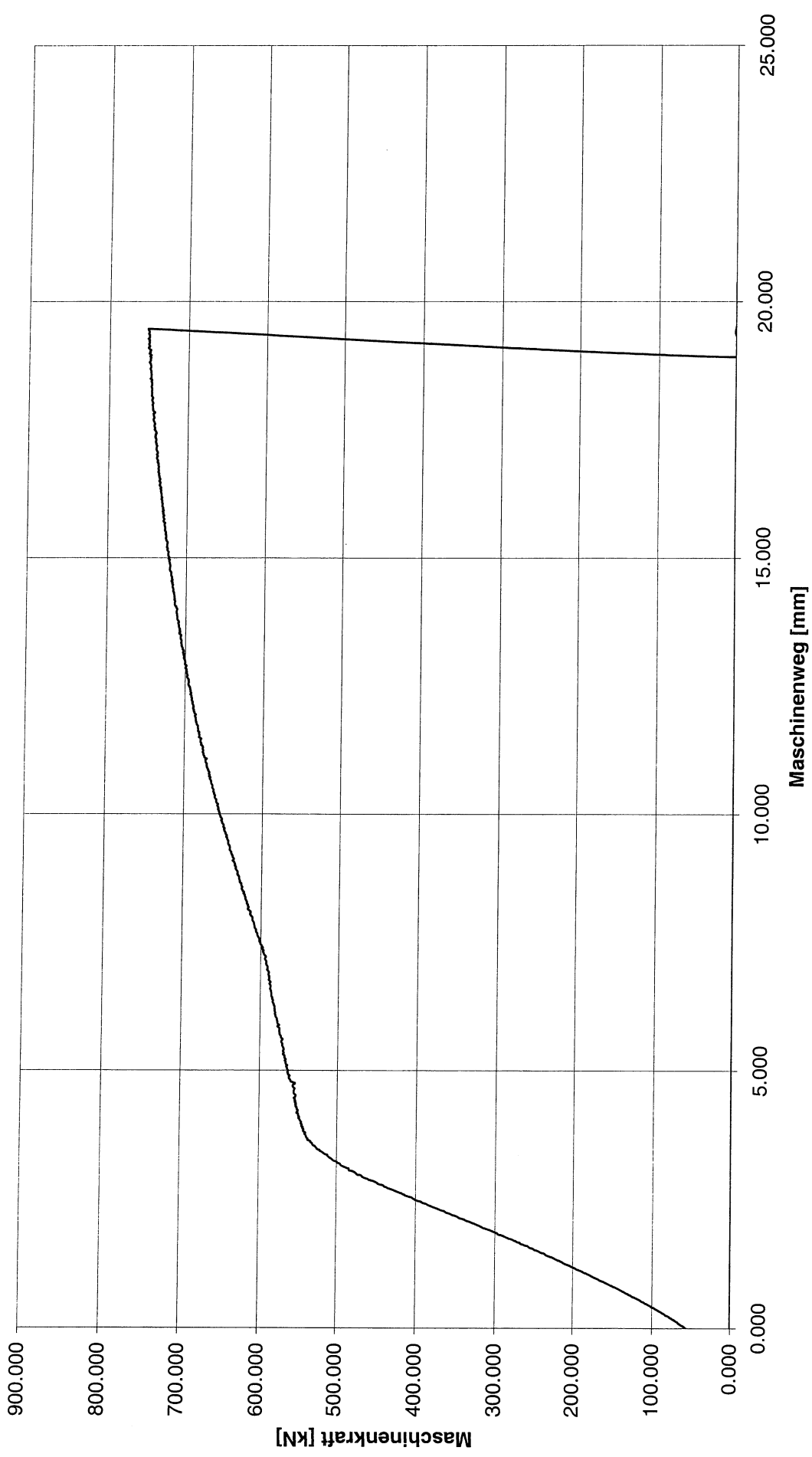
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V232_Versuchsdaten



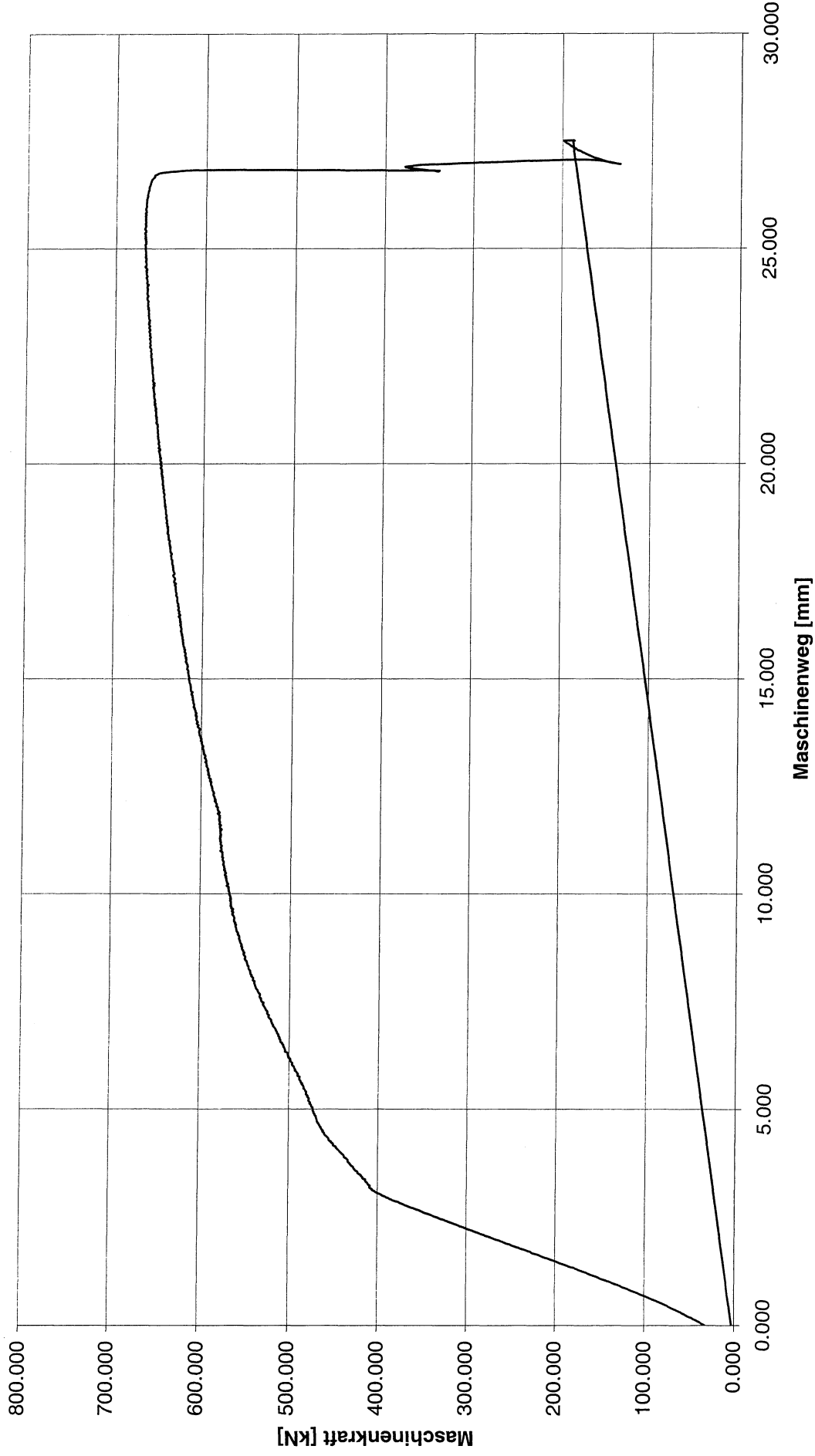
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V233_Versuchsdaten



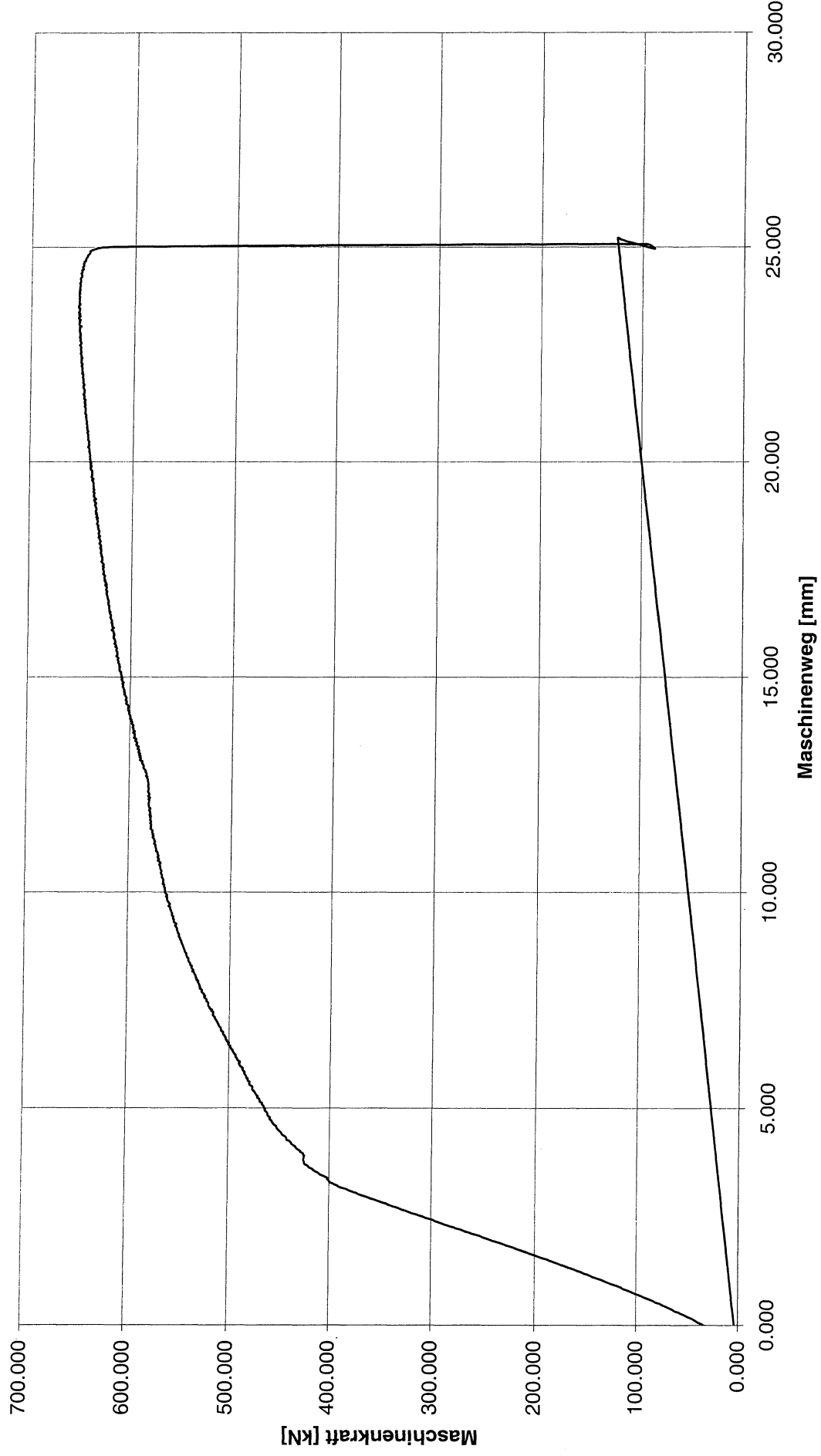
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V241_Versuchsdaten



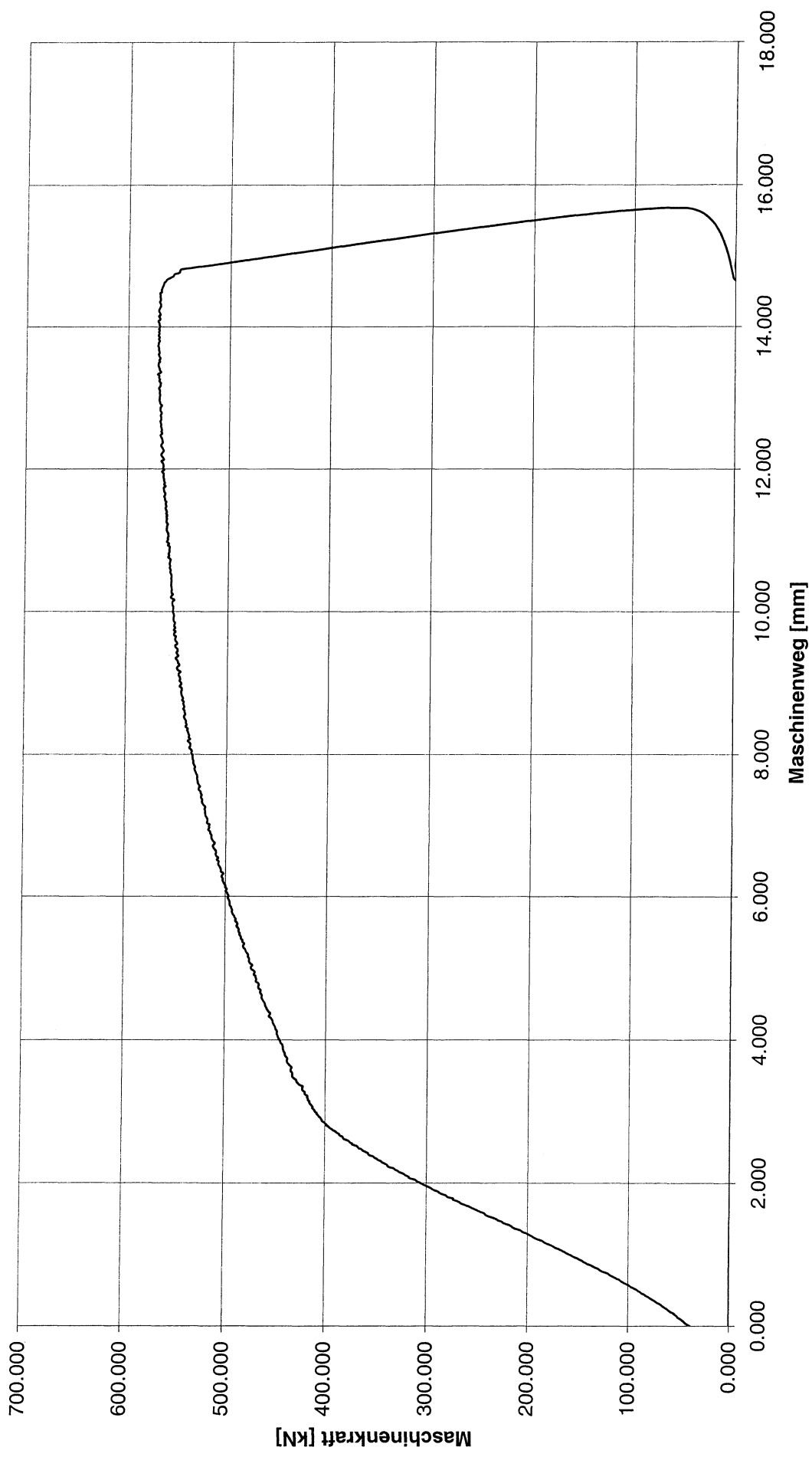
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V242_Versuchsdaten



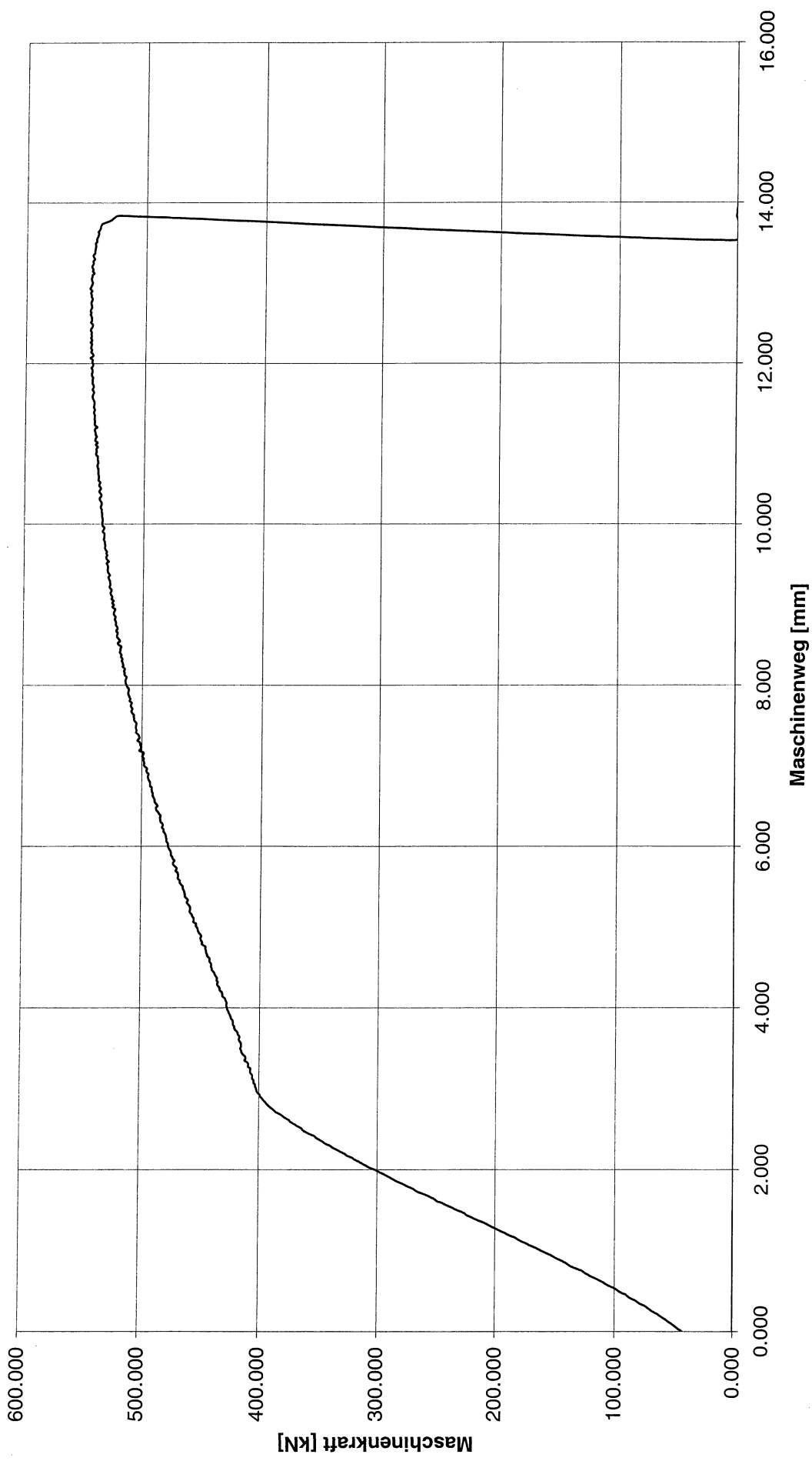
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V251_Versuchsdaten



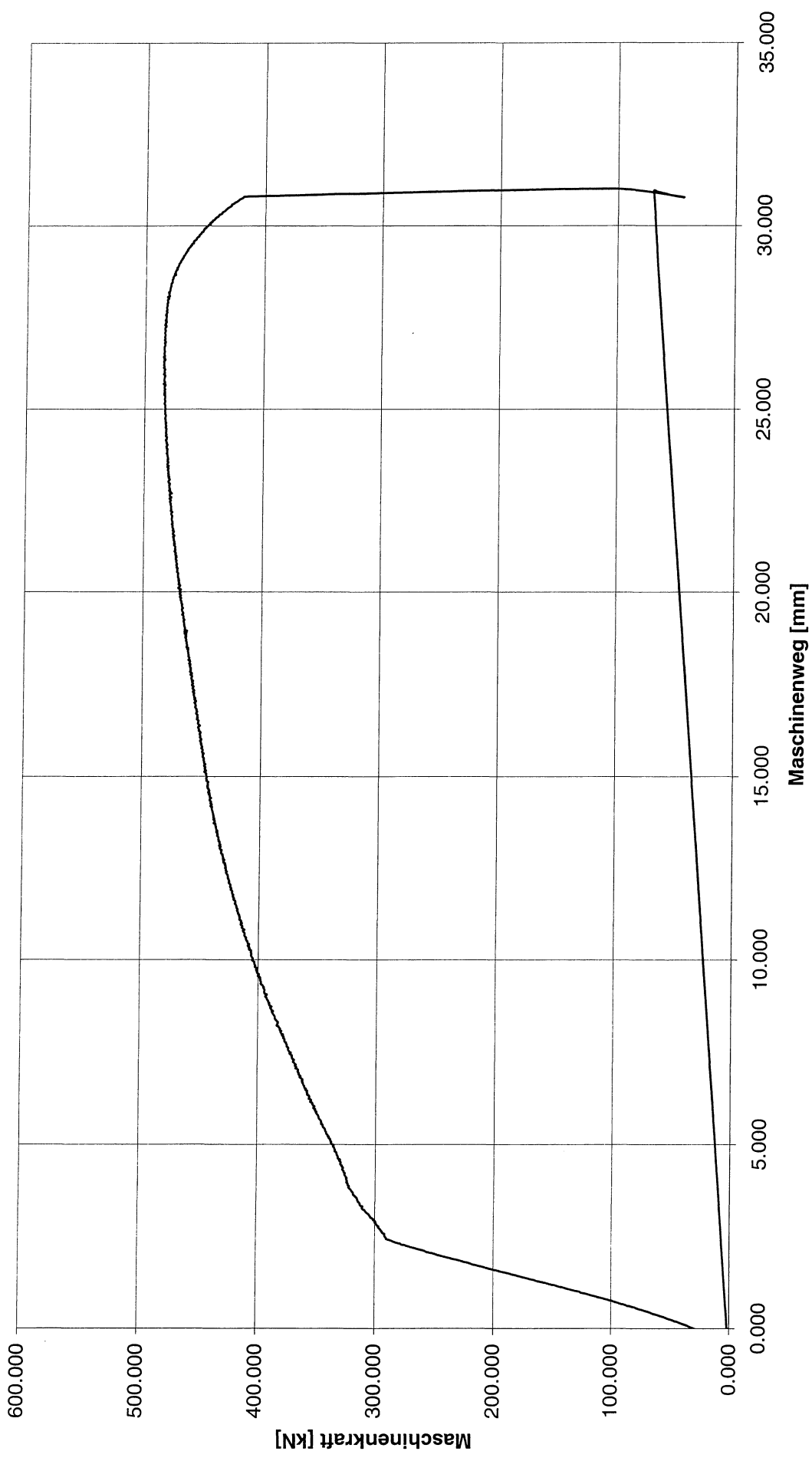
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V252_Versuchsdaten



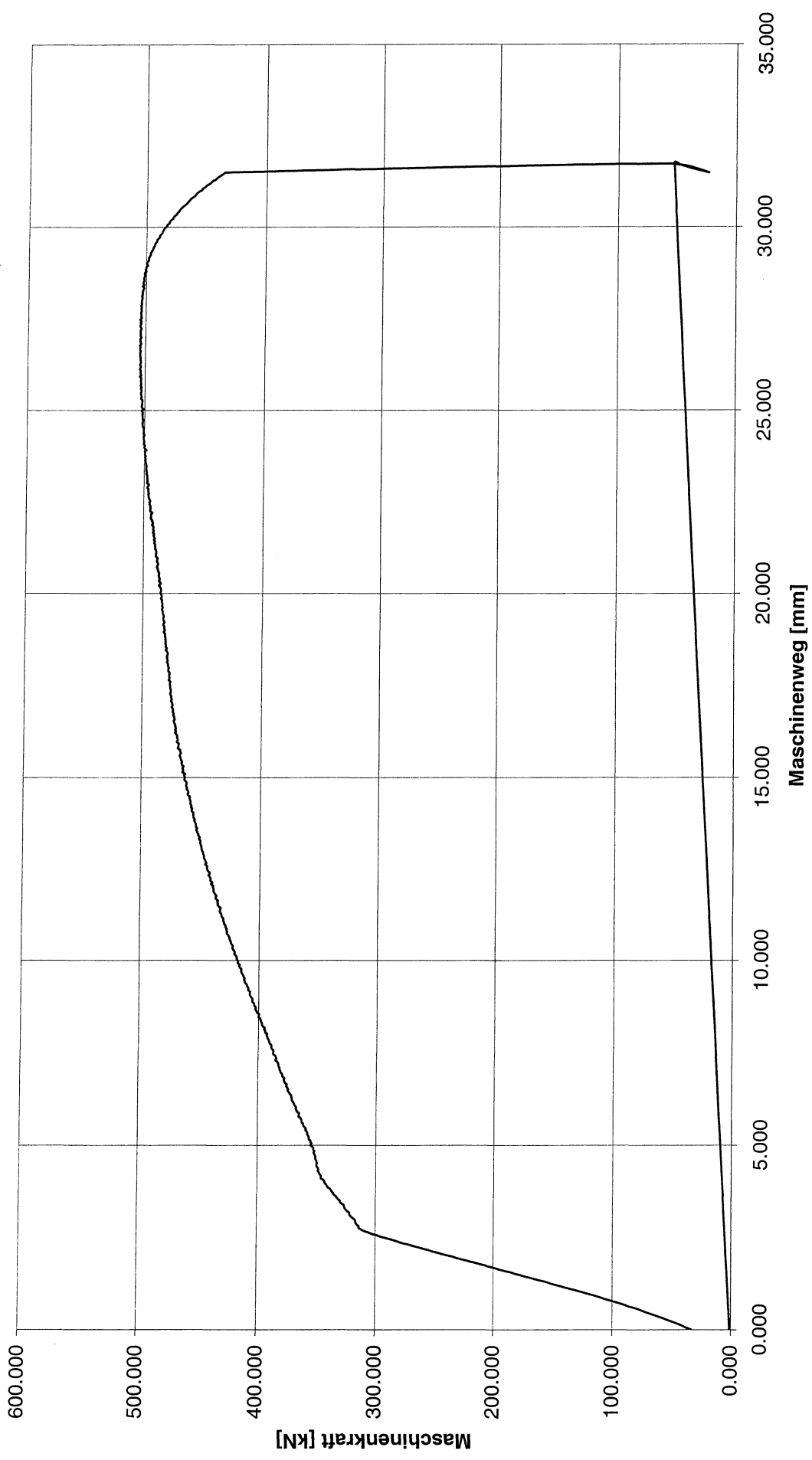
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V261_Versuchsdaten



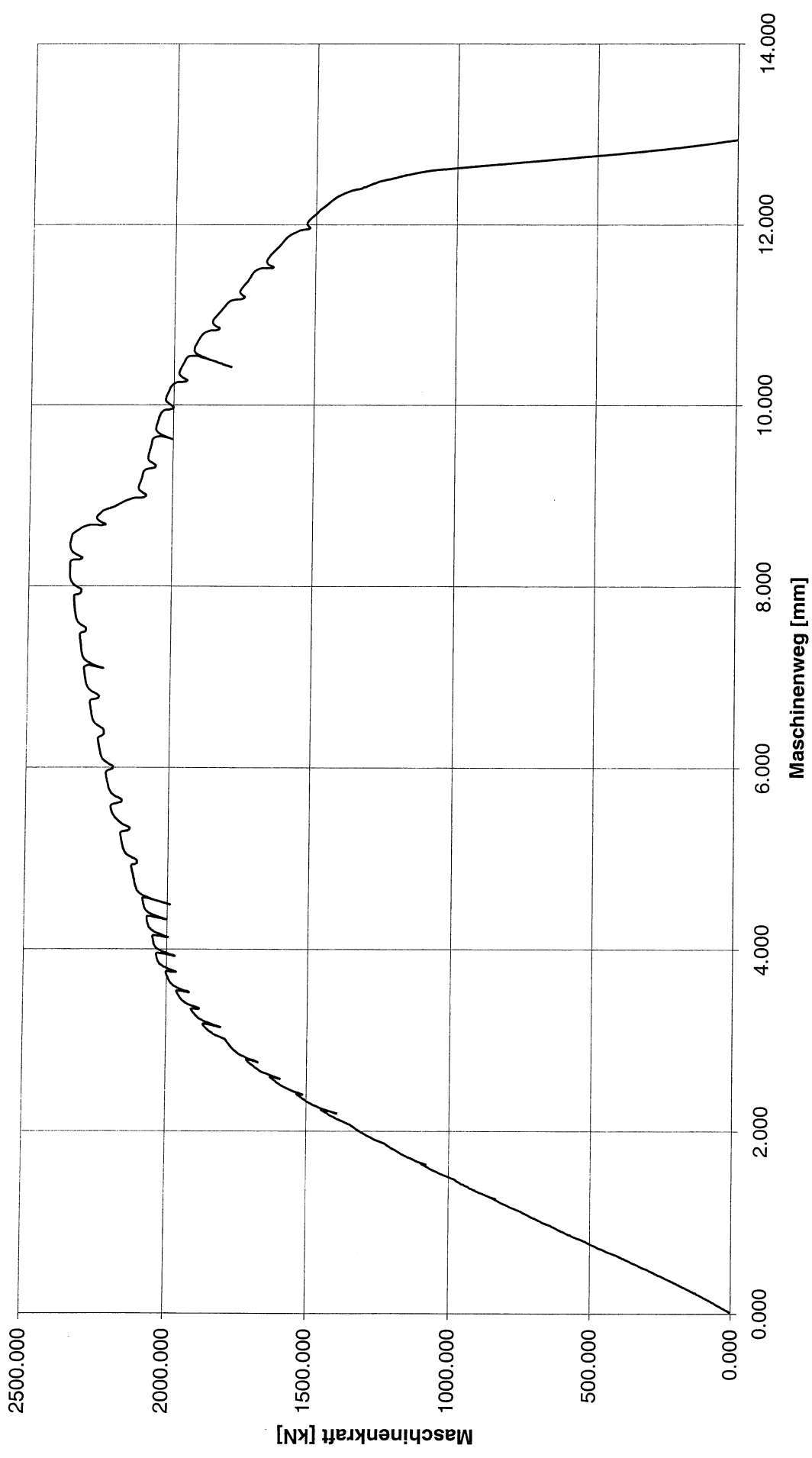
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V262_Versuchsdaten



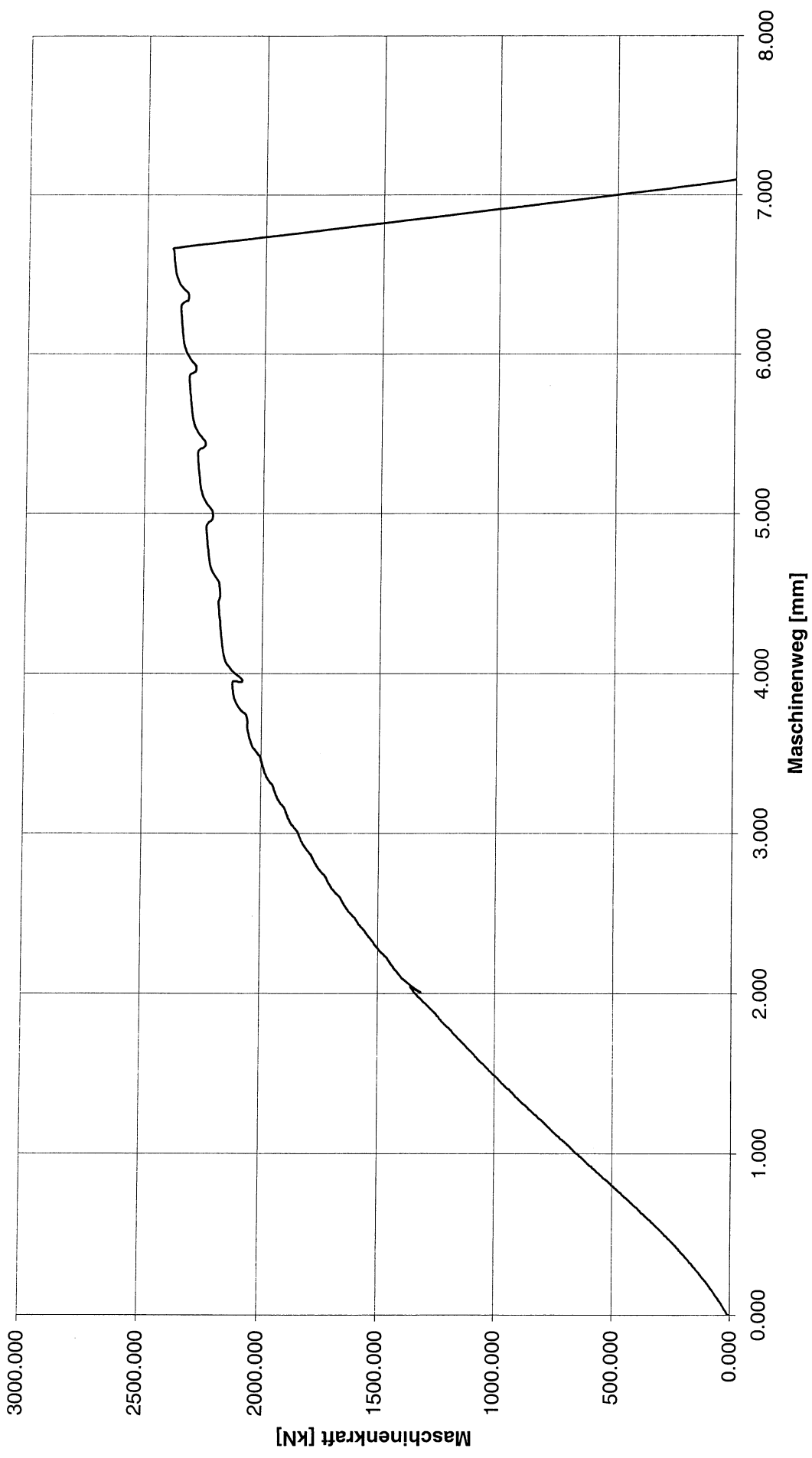
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V311_Versuchsdaten



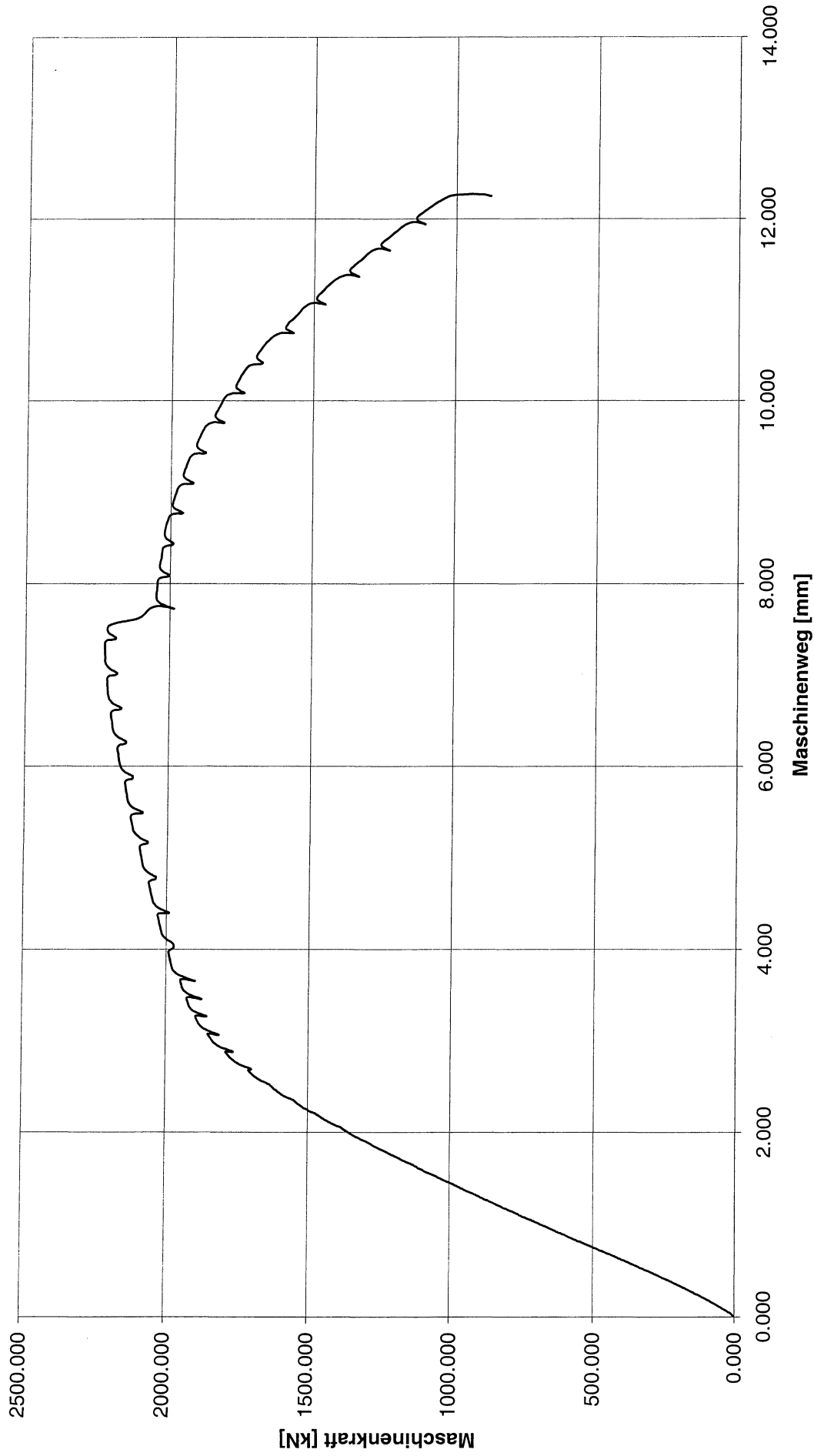
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V312_Versuchsdaten



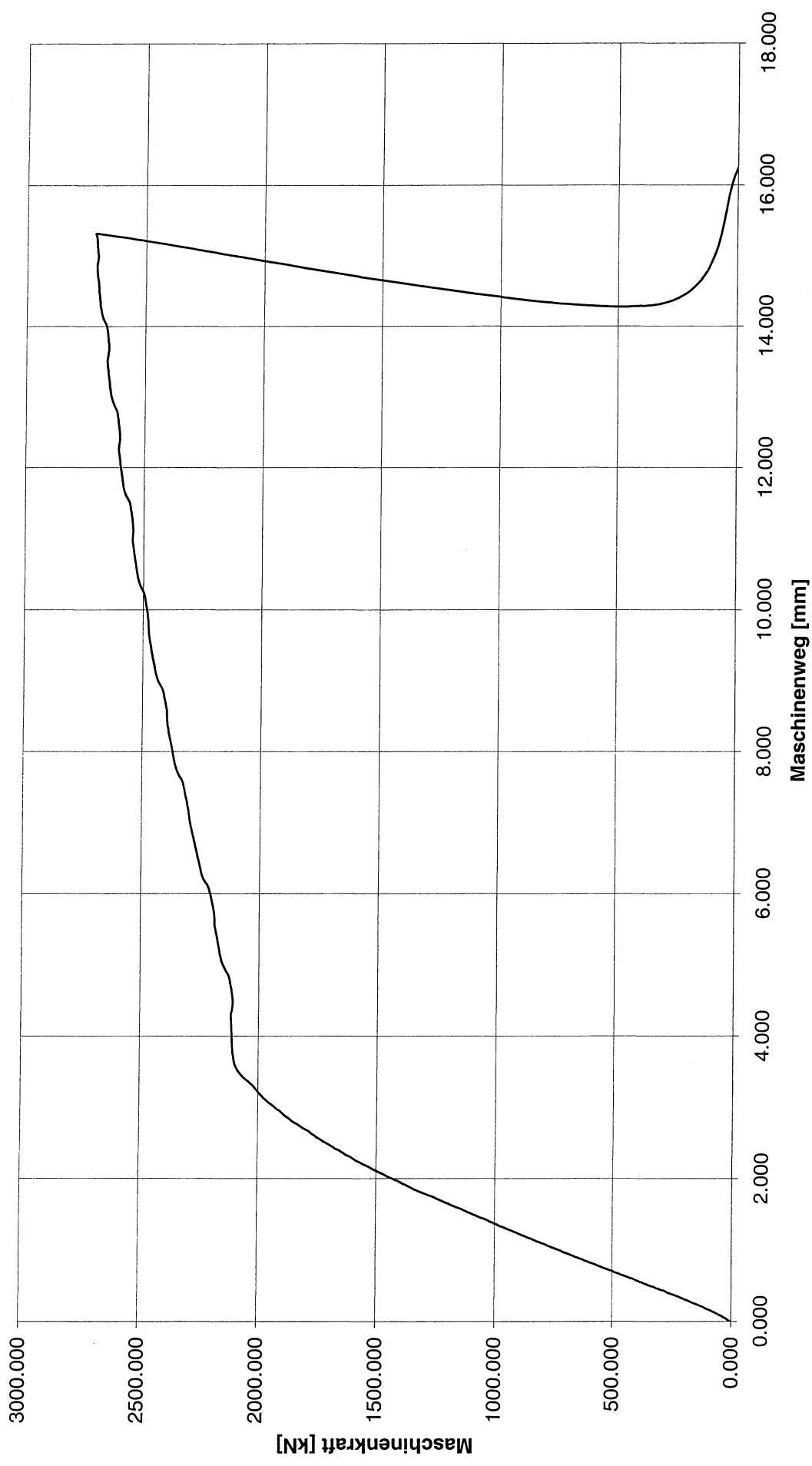
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V313_Versuchsdaten



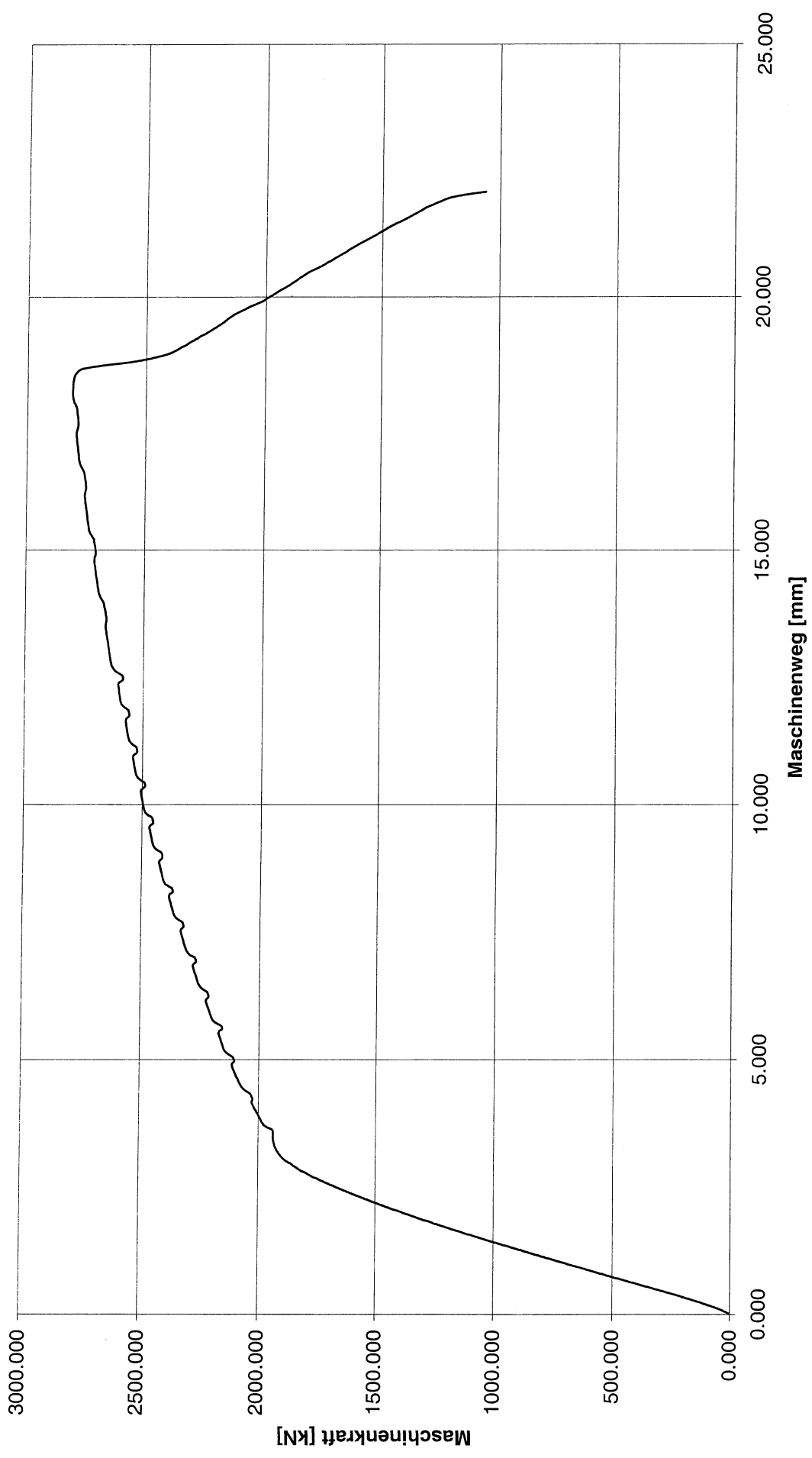
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V321_Versuchsdaten



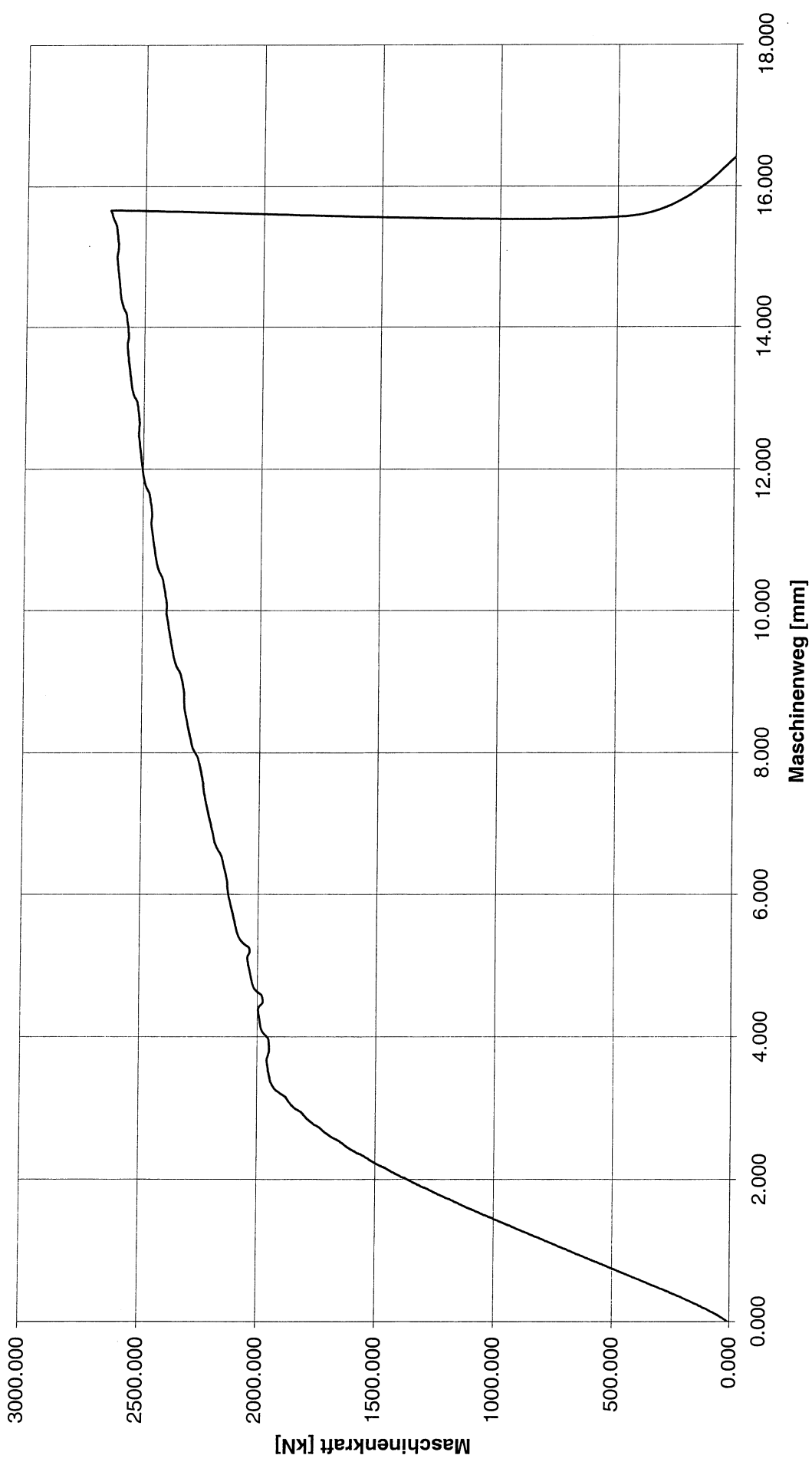
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V322_Versuchsdaten



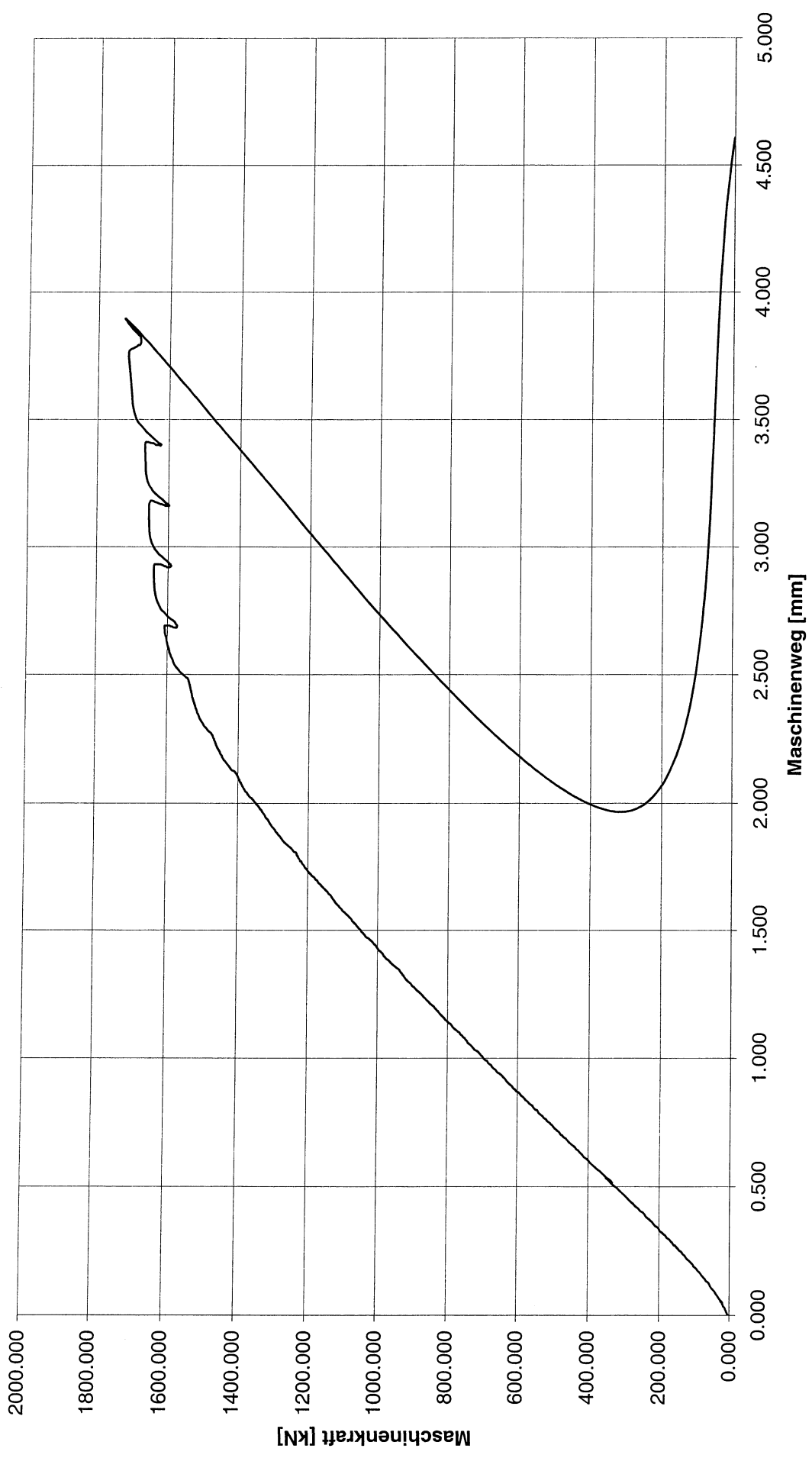
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V323_Versuchsdaten



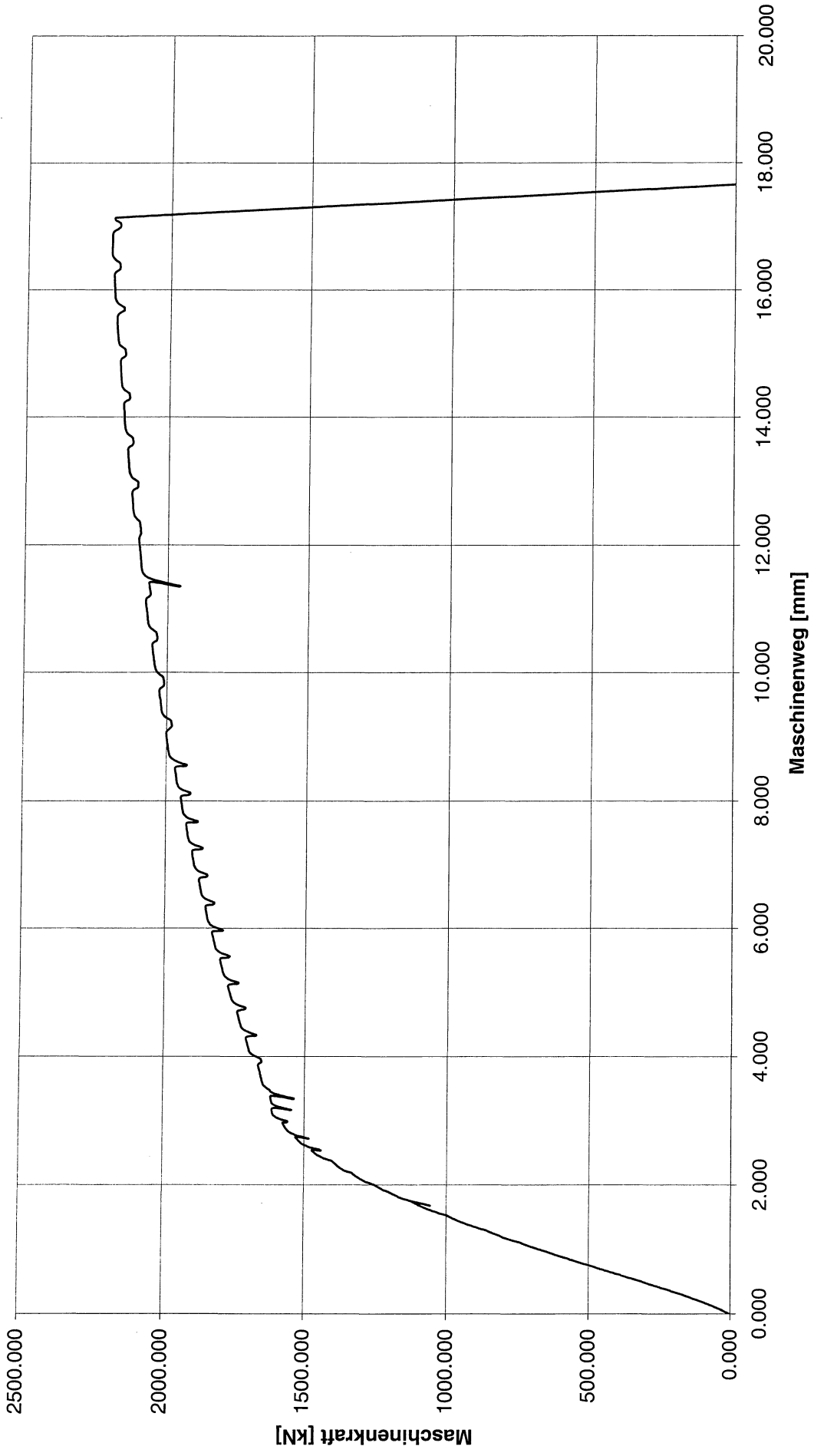
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V331_Versuchsdaten



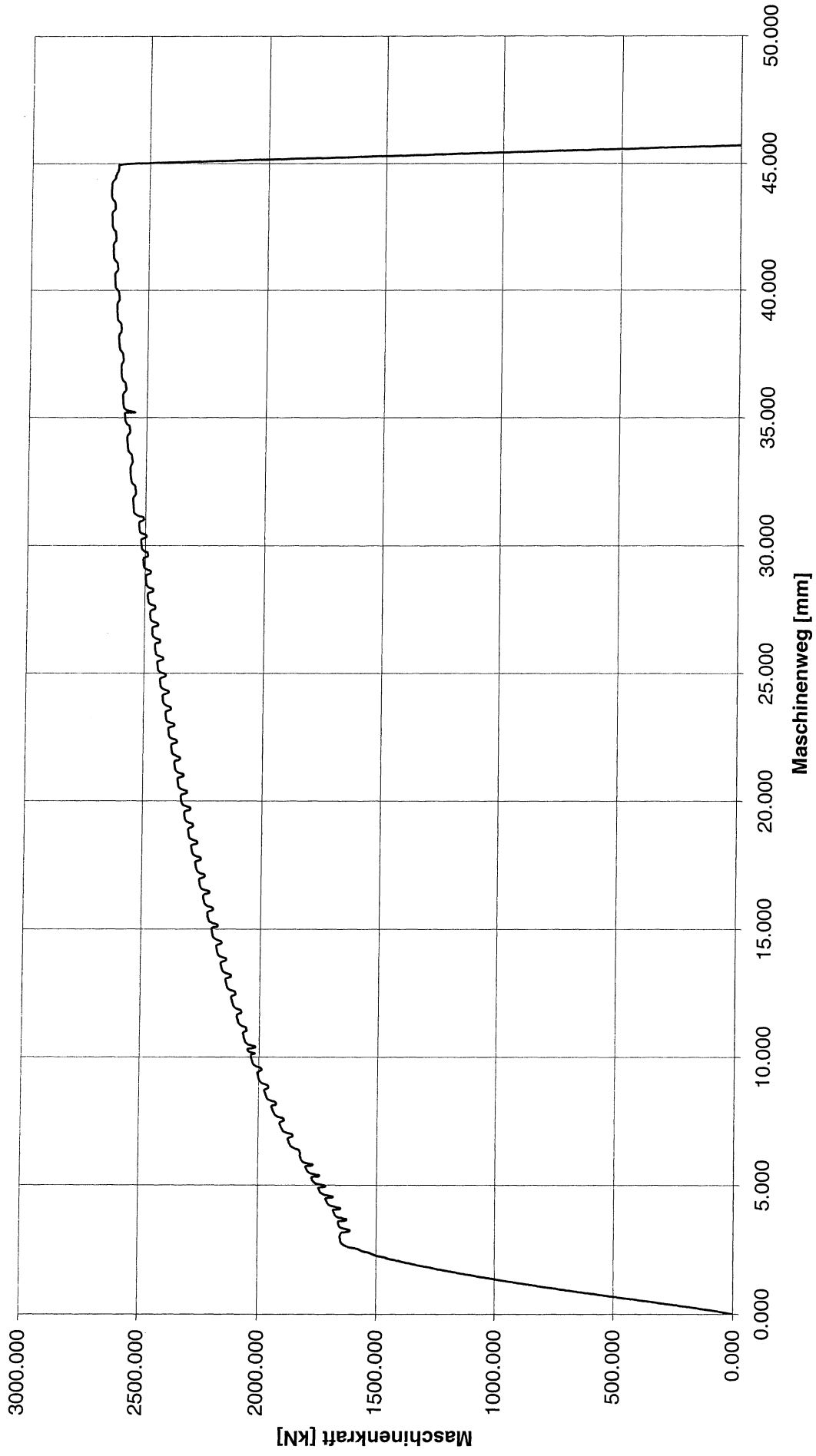
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V332_Versuchsdaten



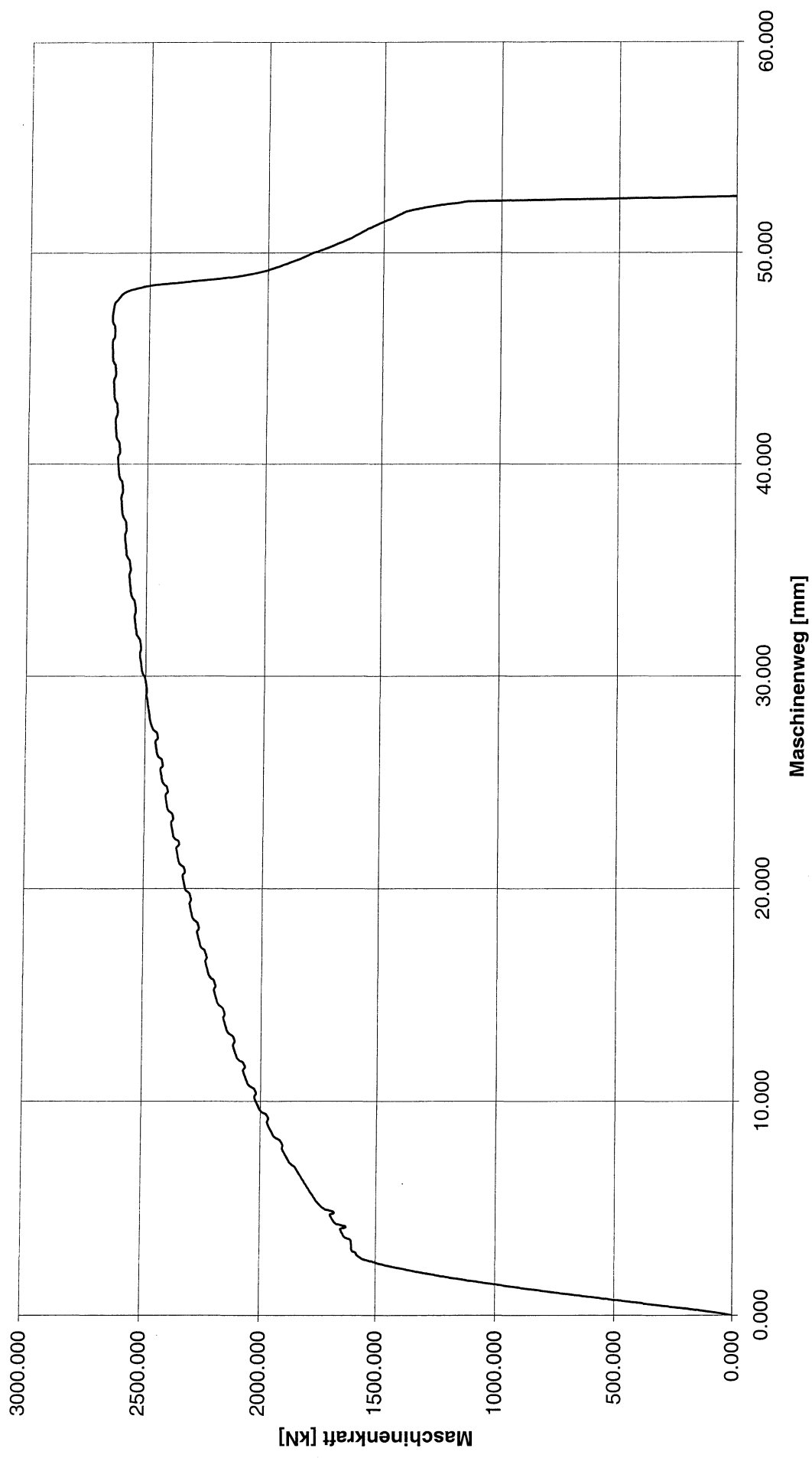
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V341_Versuchsdaten



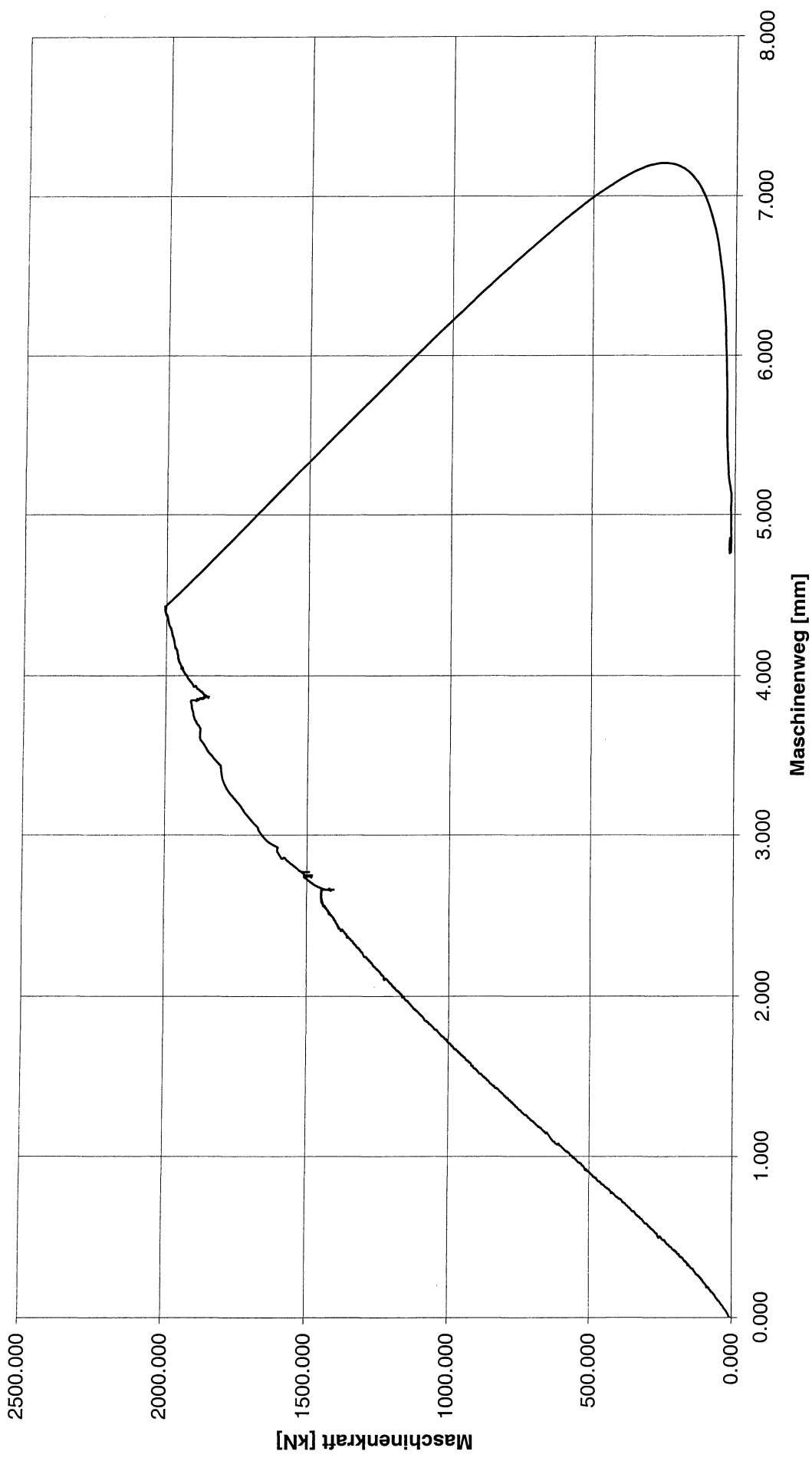
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V342_Versuchsdaten



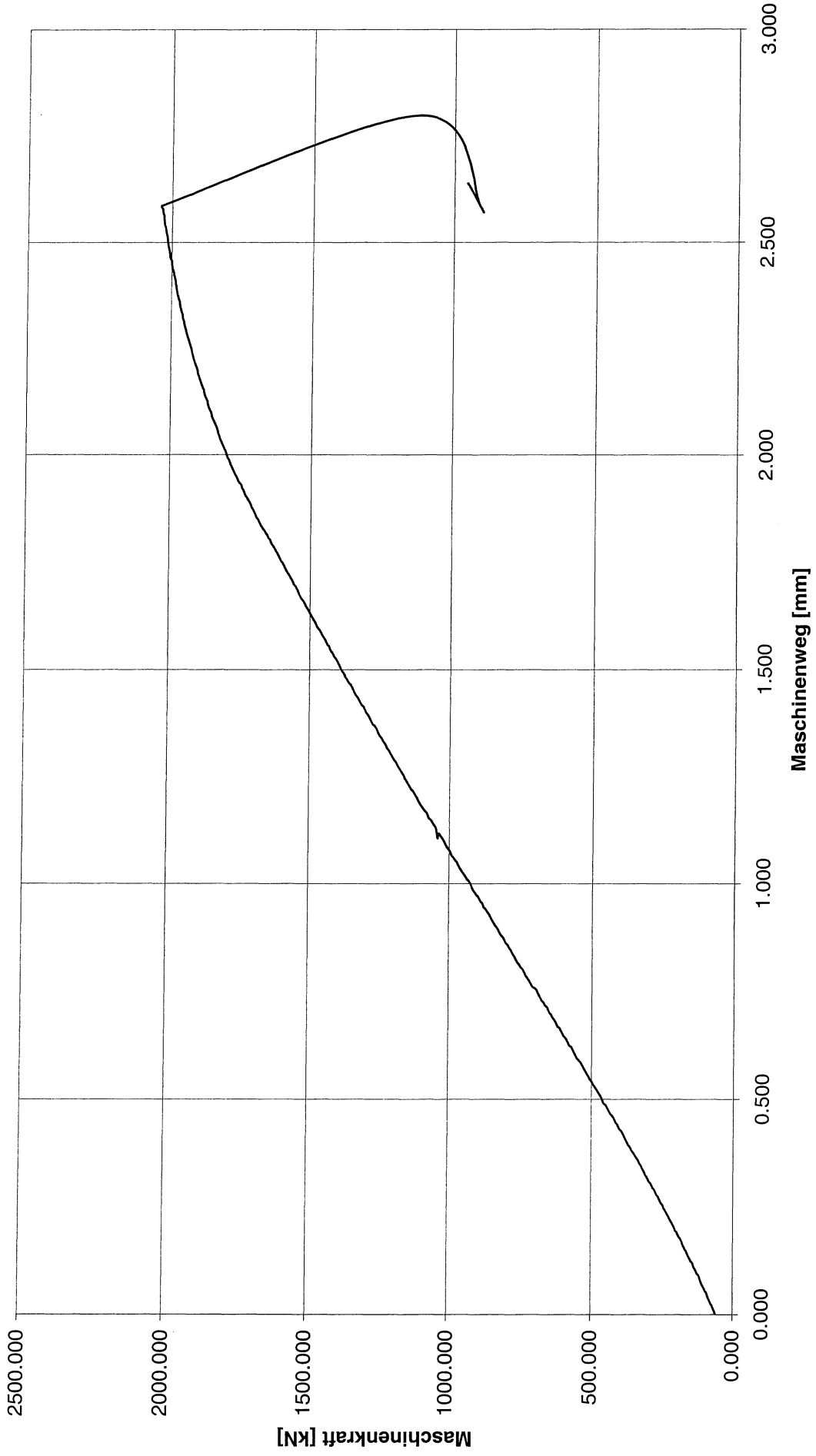
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

VKL1_Versuchsdaten



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

VKL2_Versuchsdaten

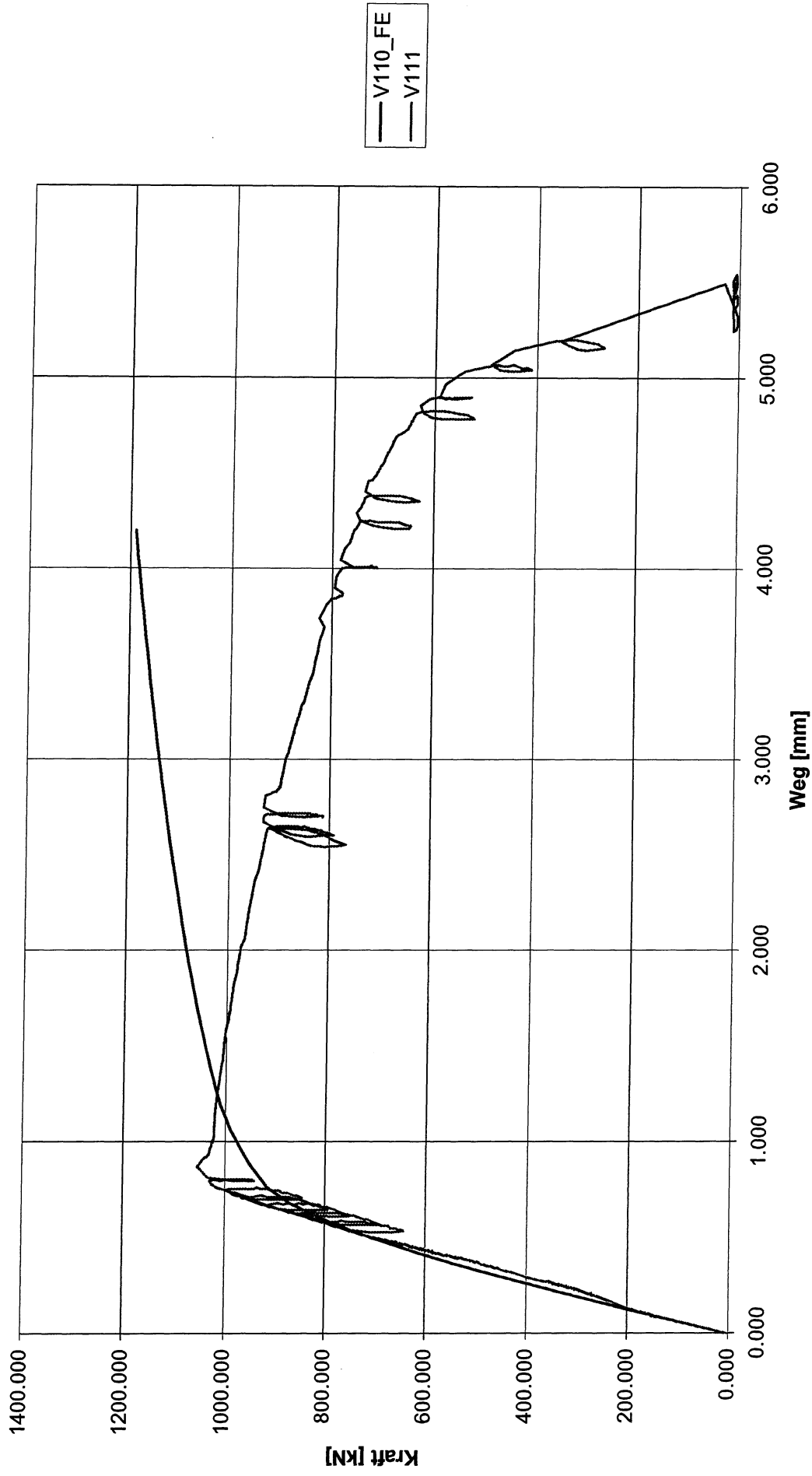


Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

Anlage 4

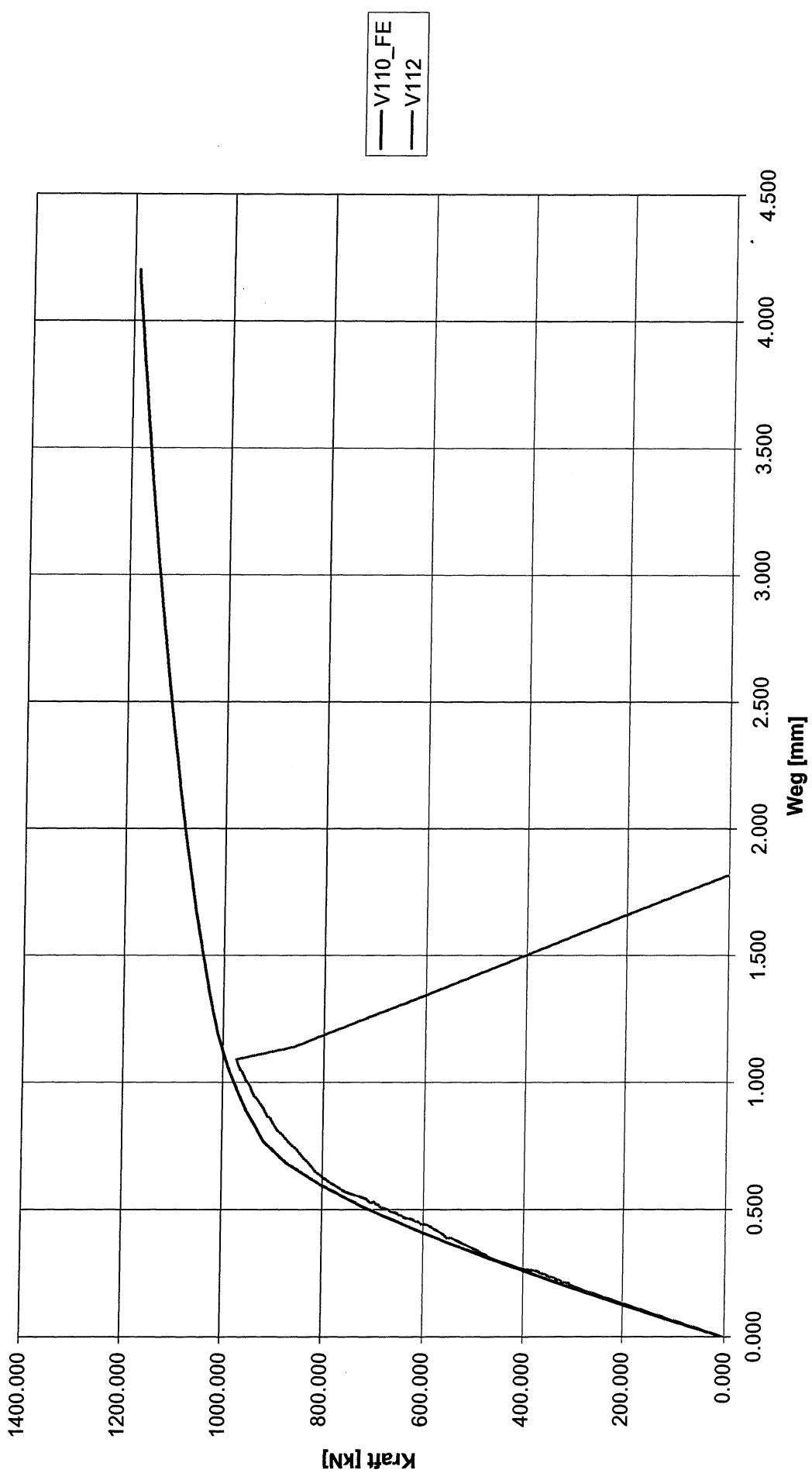
Vergleich der Lastverformungskurven aus den Versuchen mit den FE-Berechnungen

V111



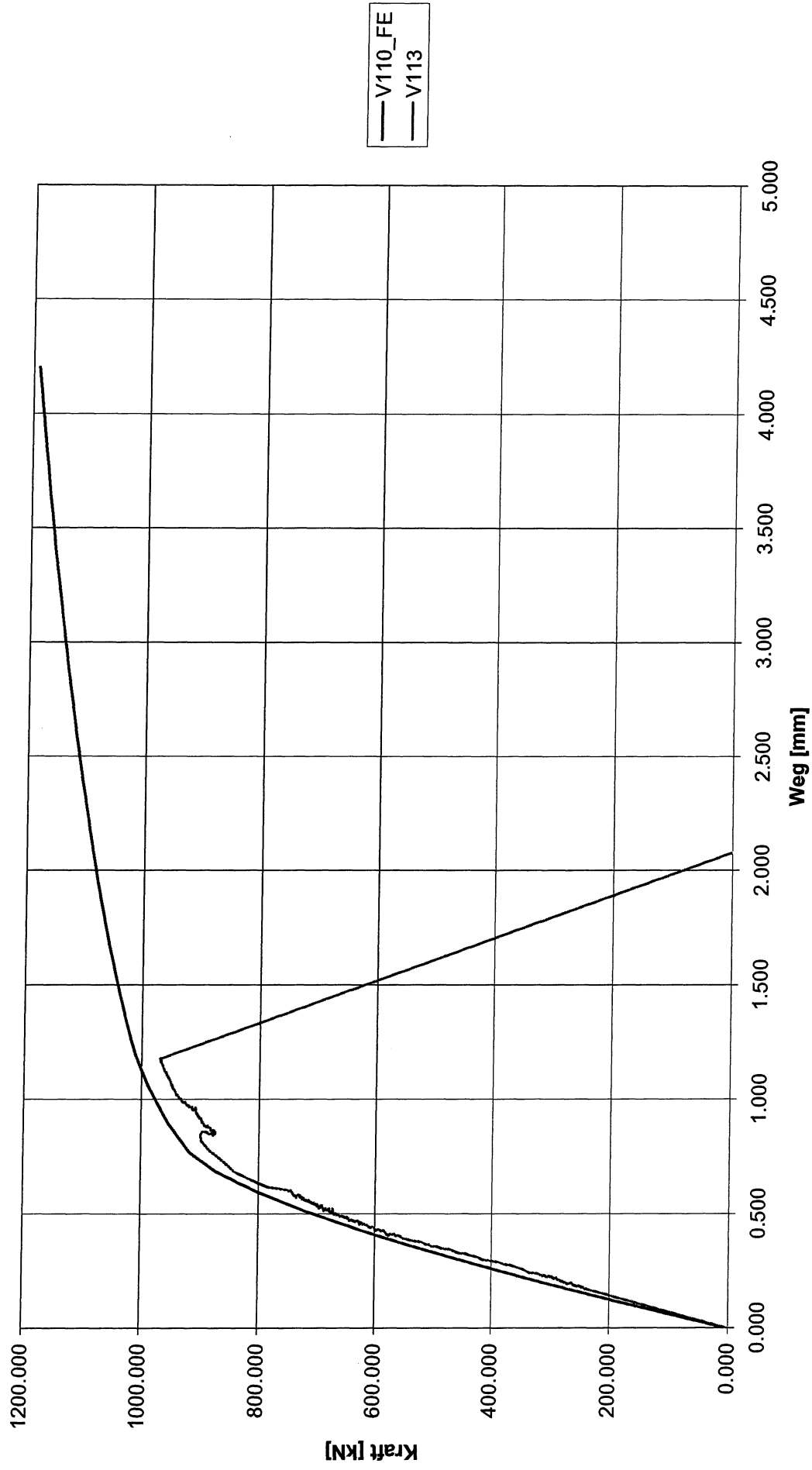
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V112



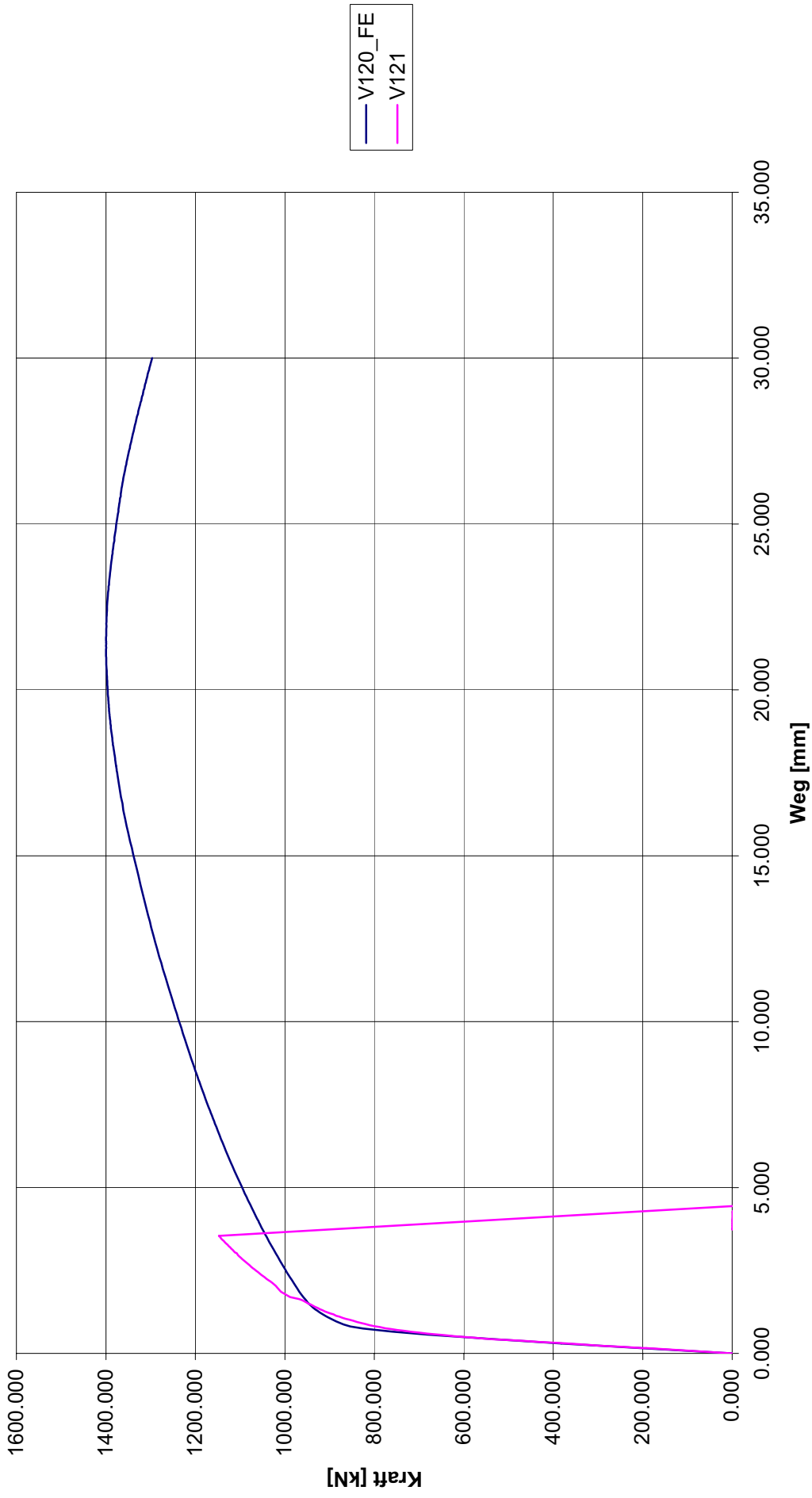
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V113



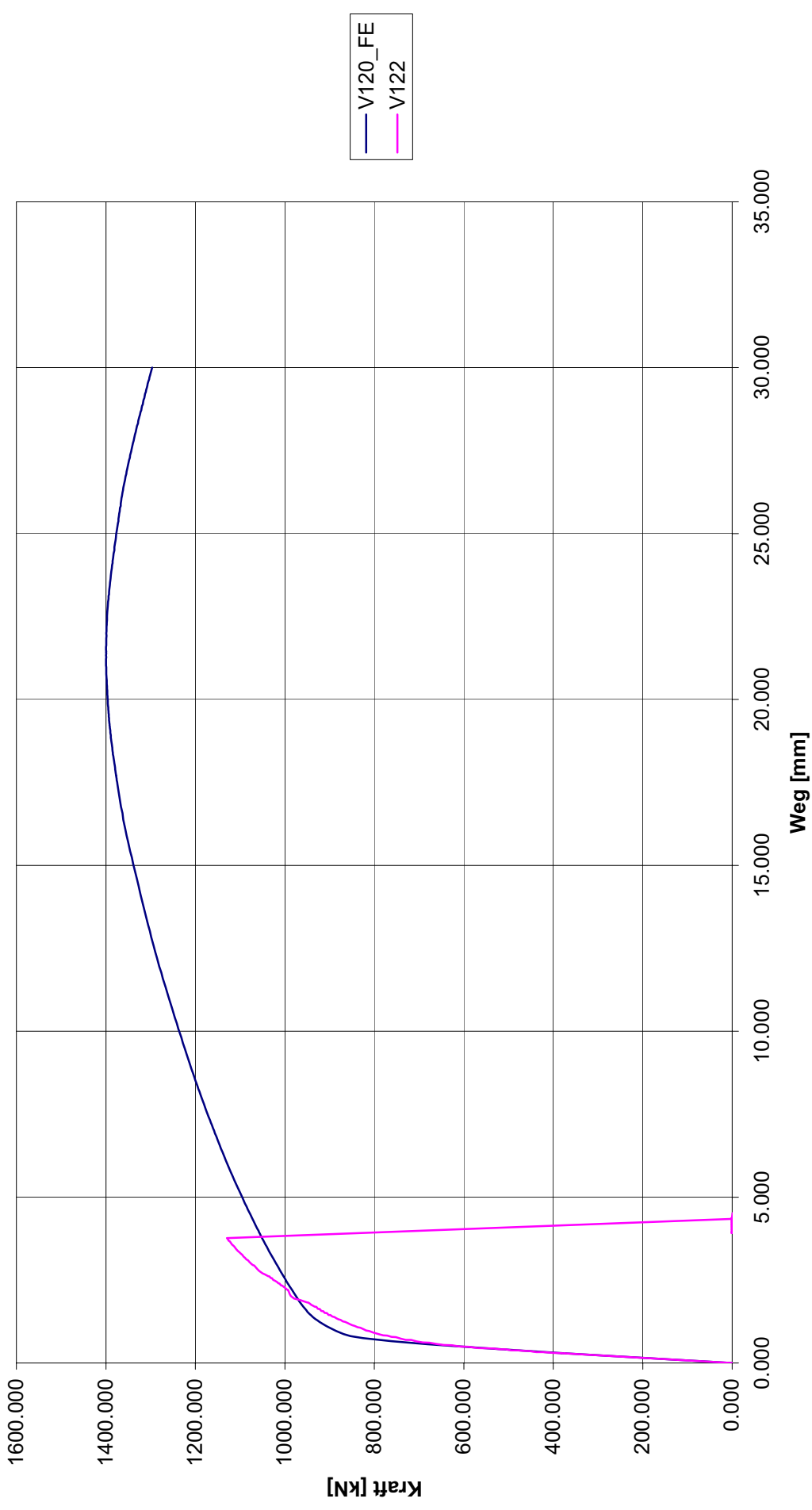
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V121



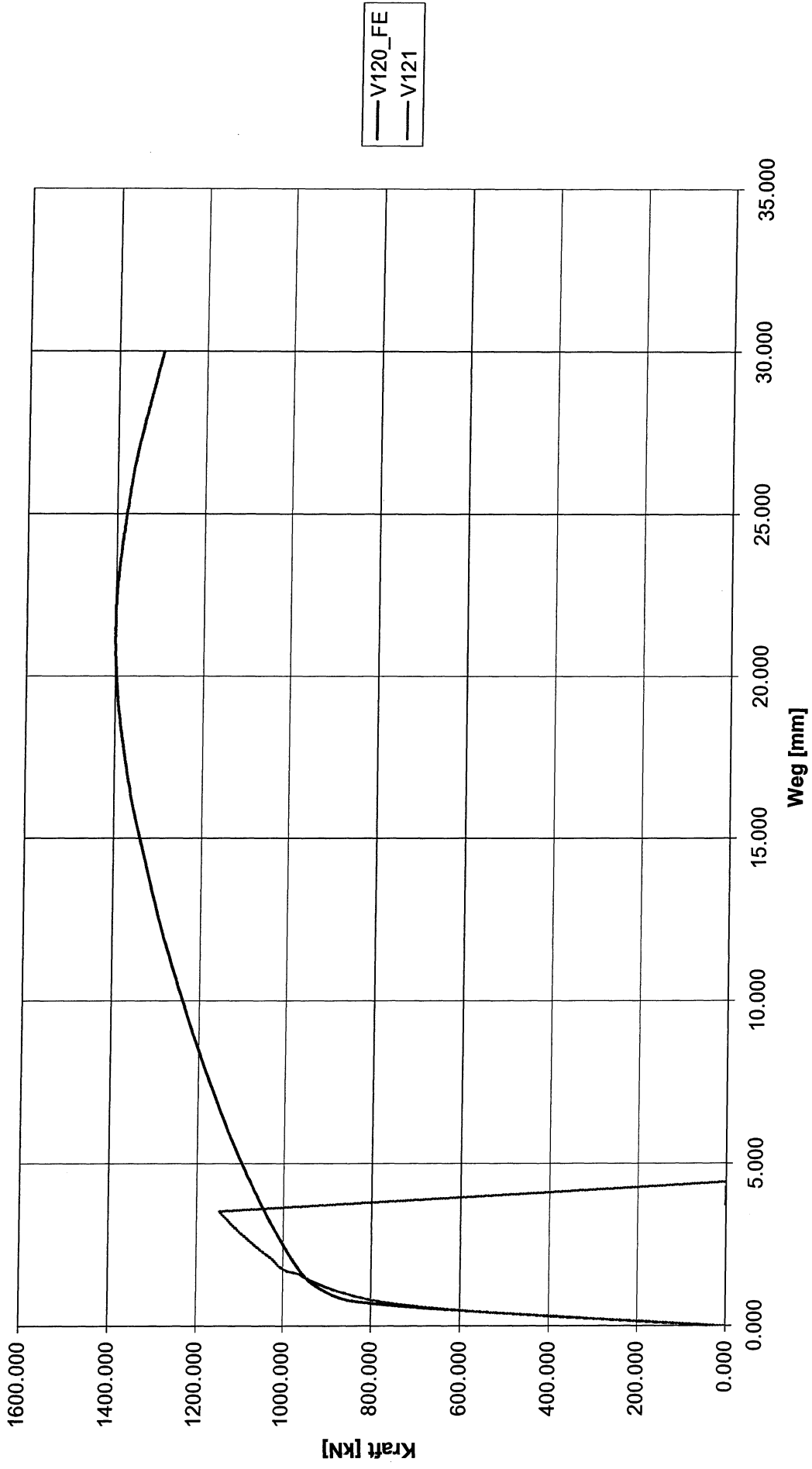
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V122



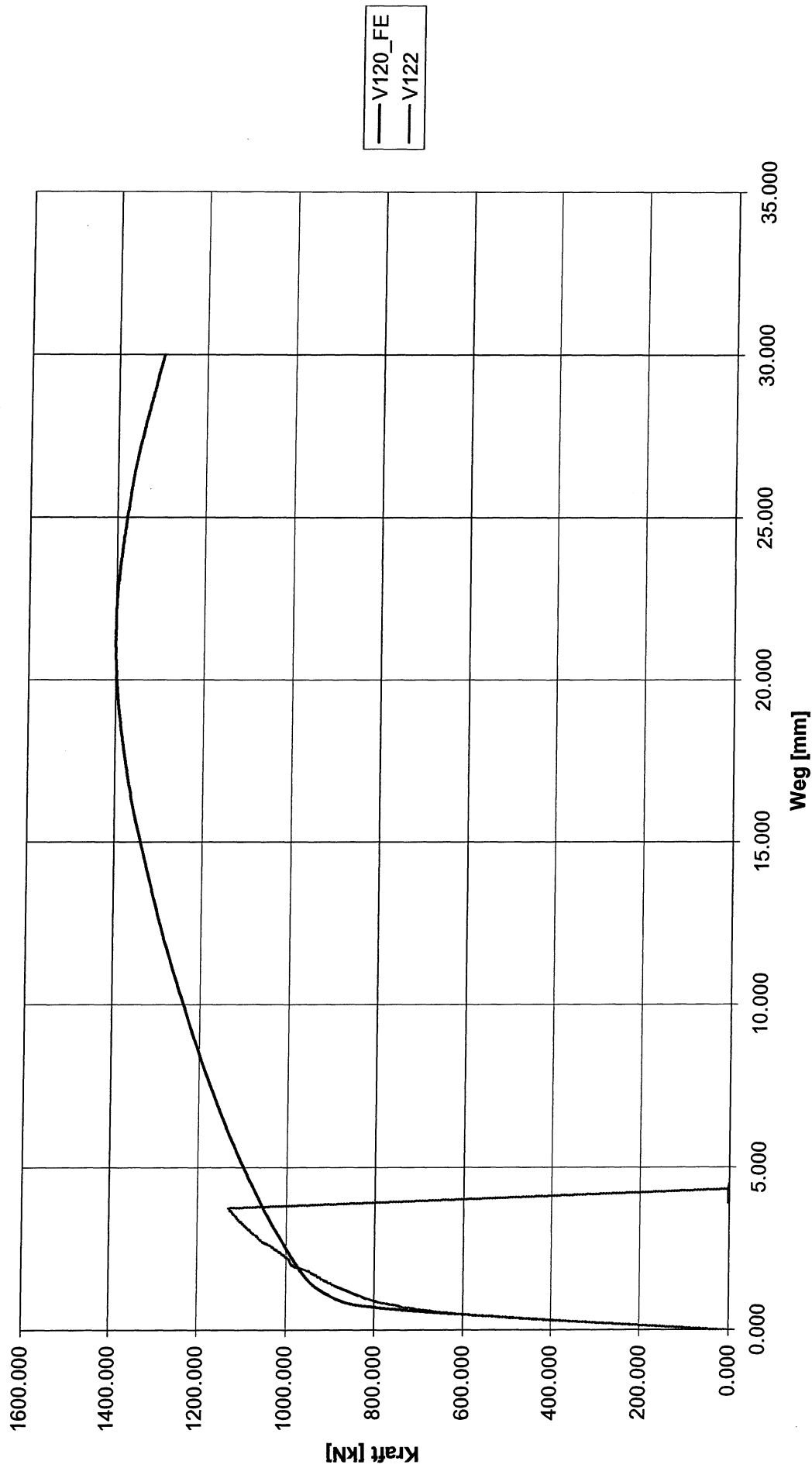
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V121



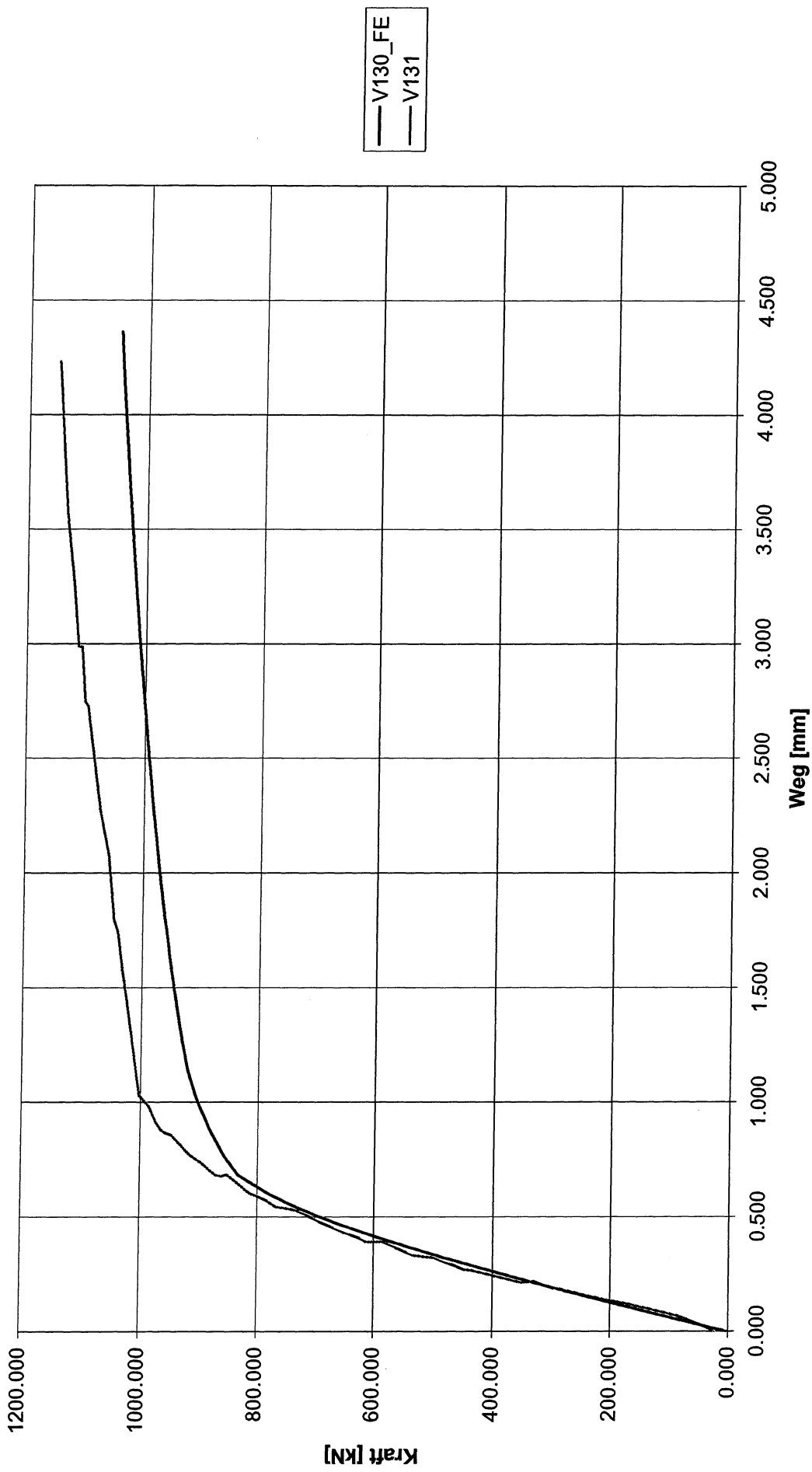
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V122



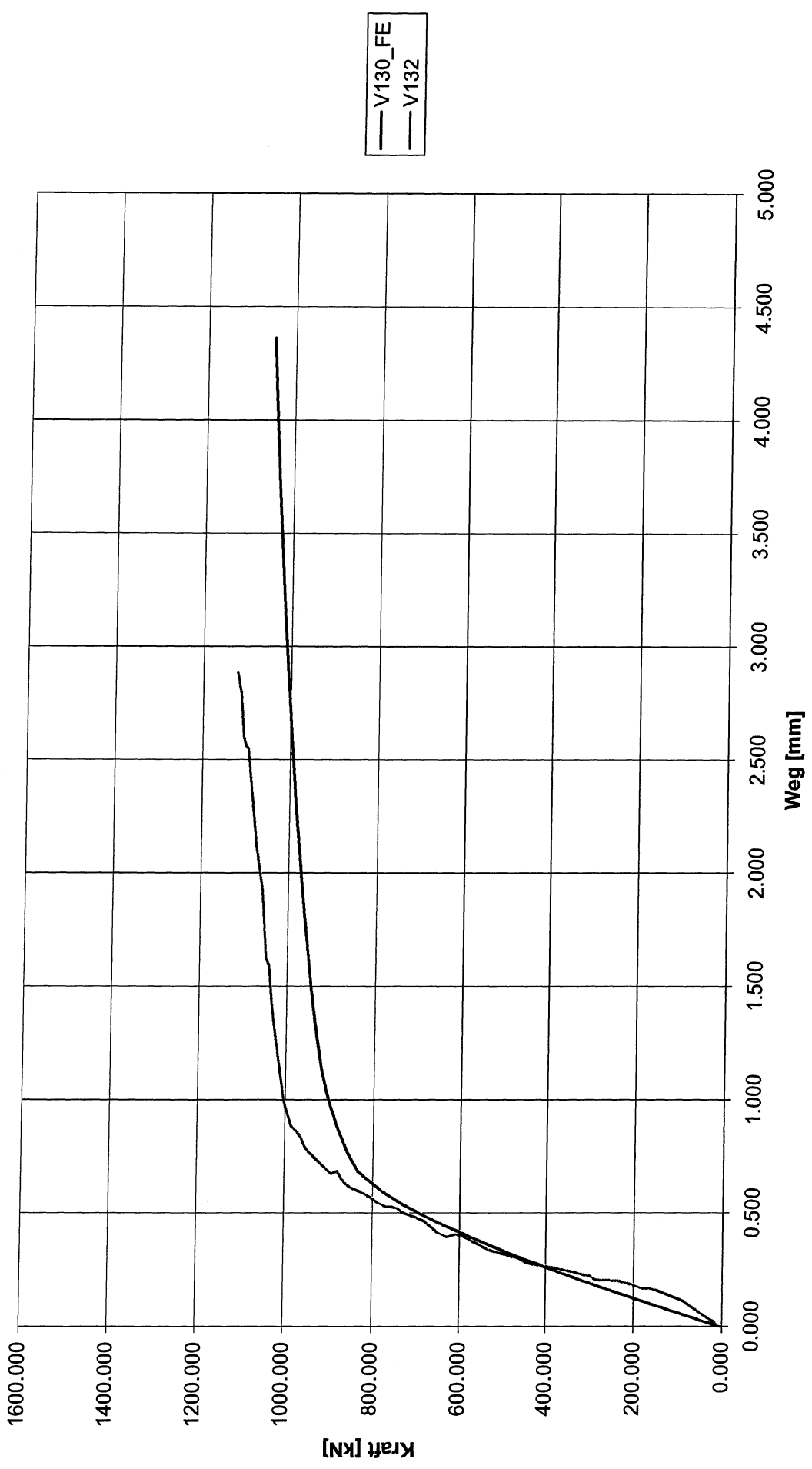
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V131



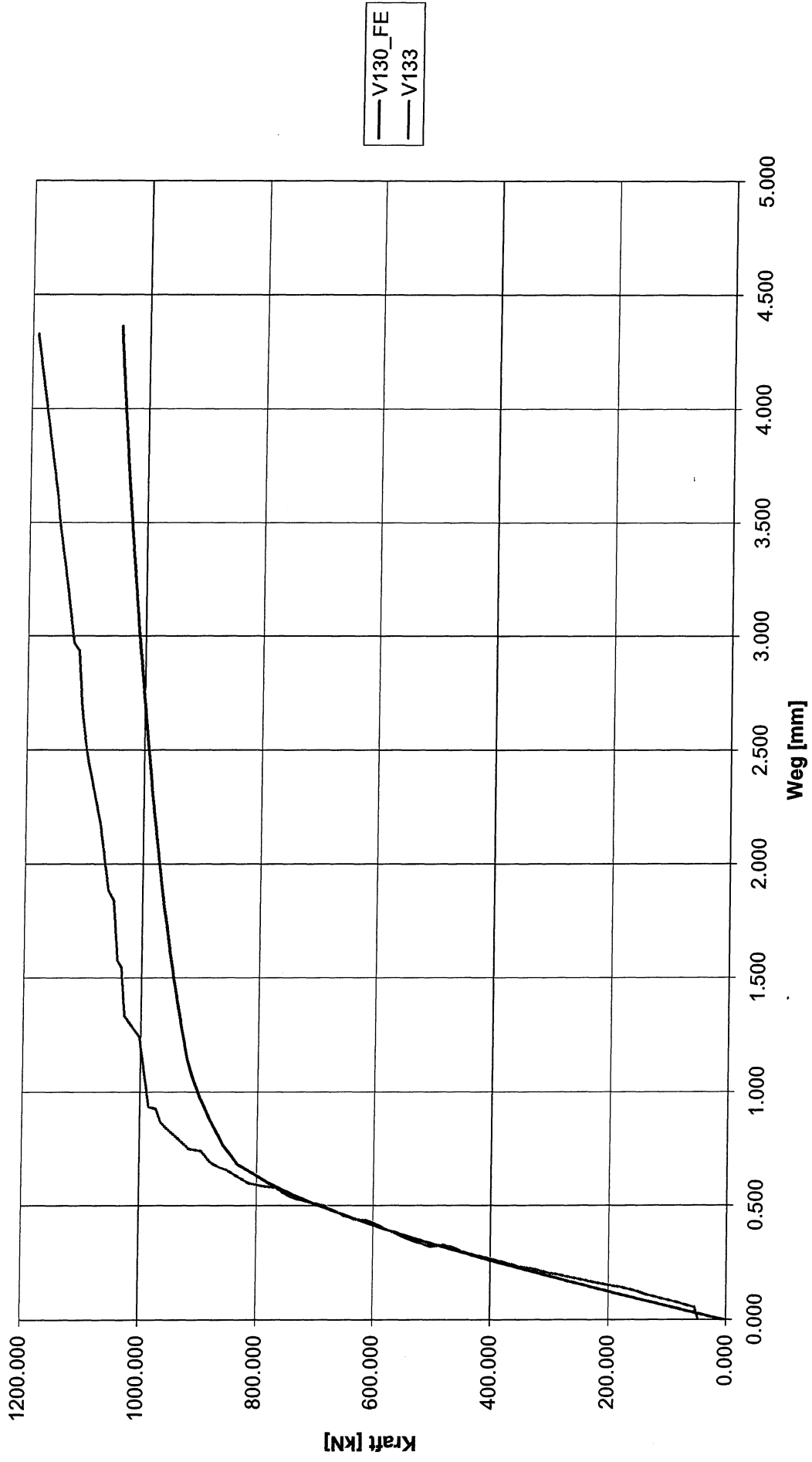
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V132



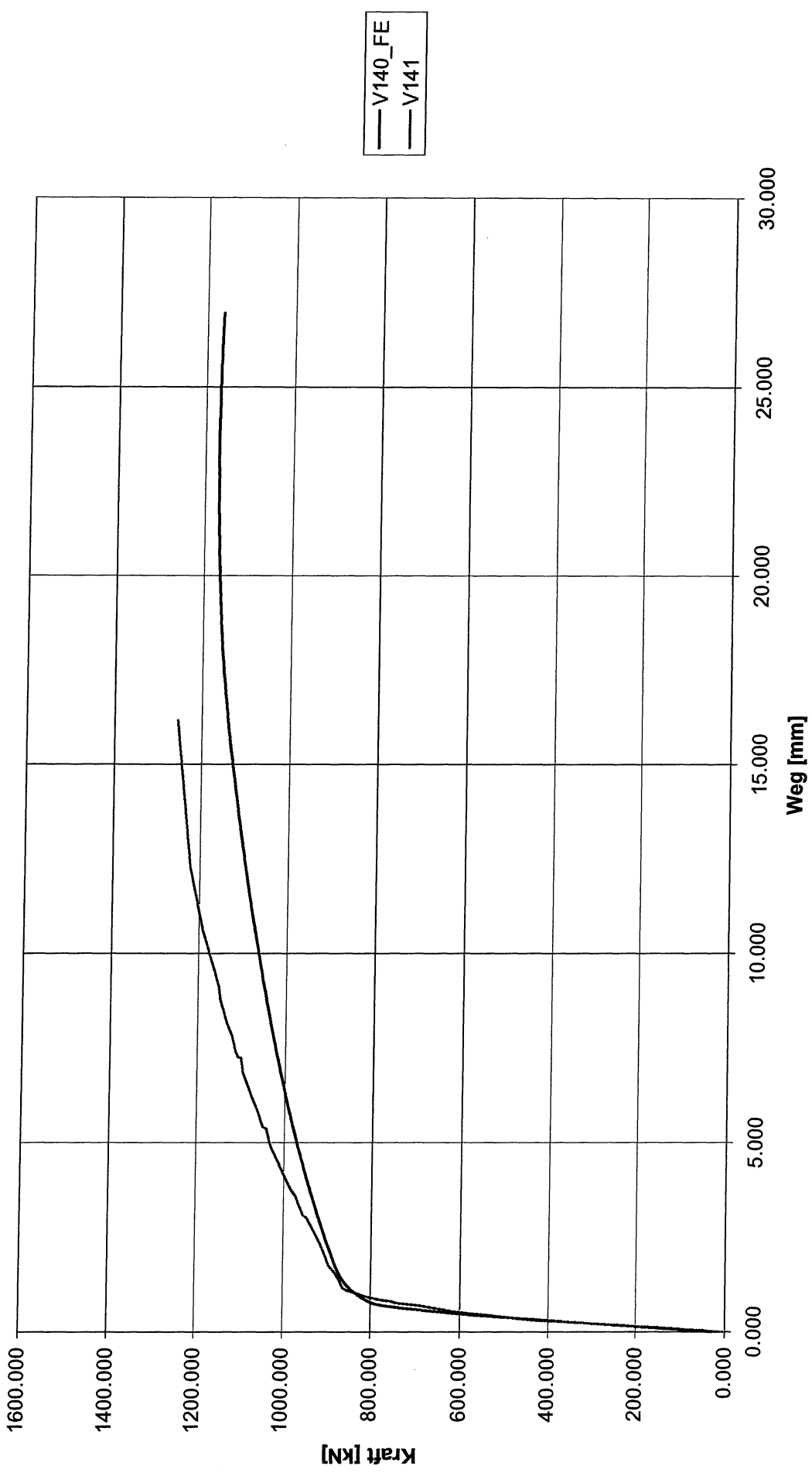
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V133



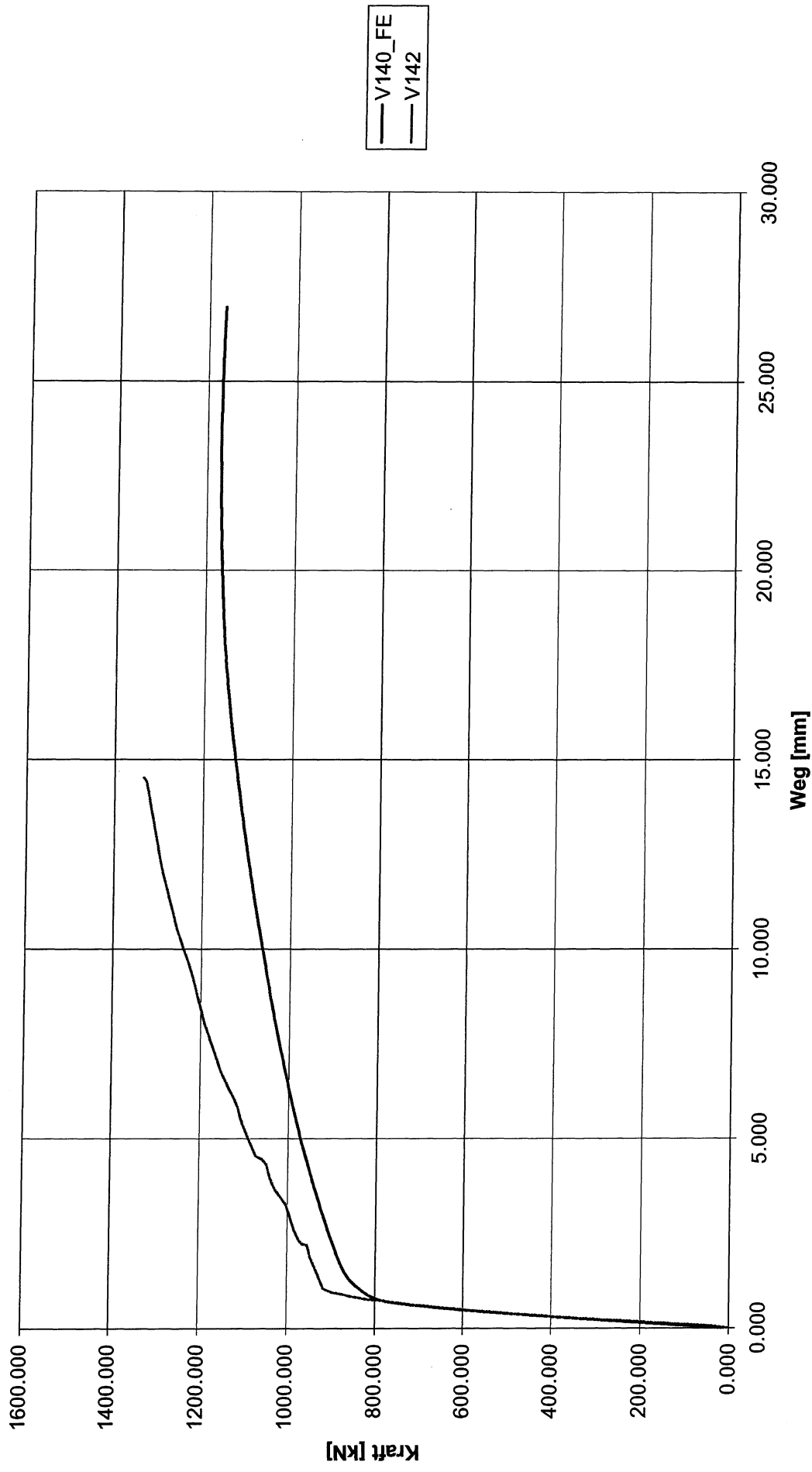
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V141



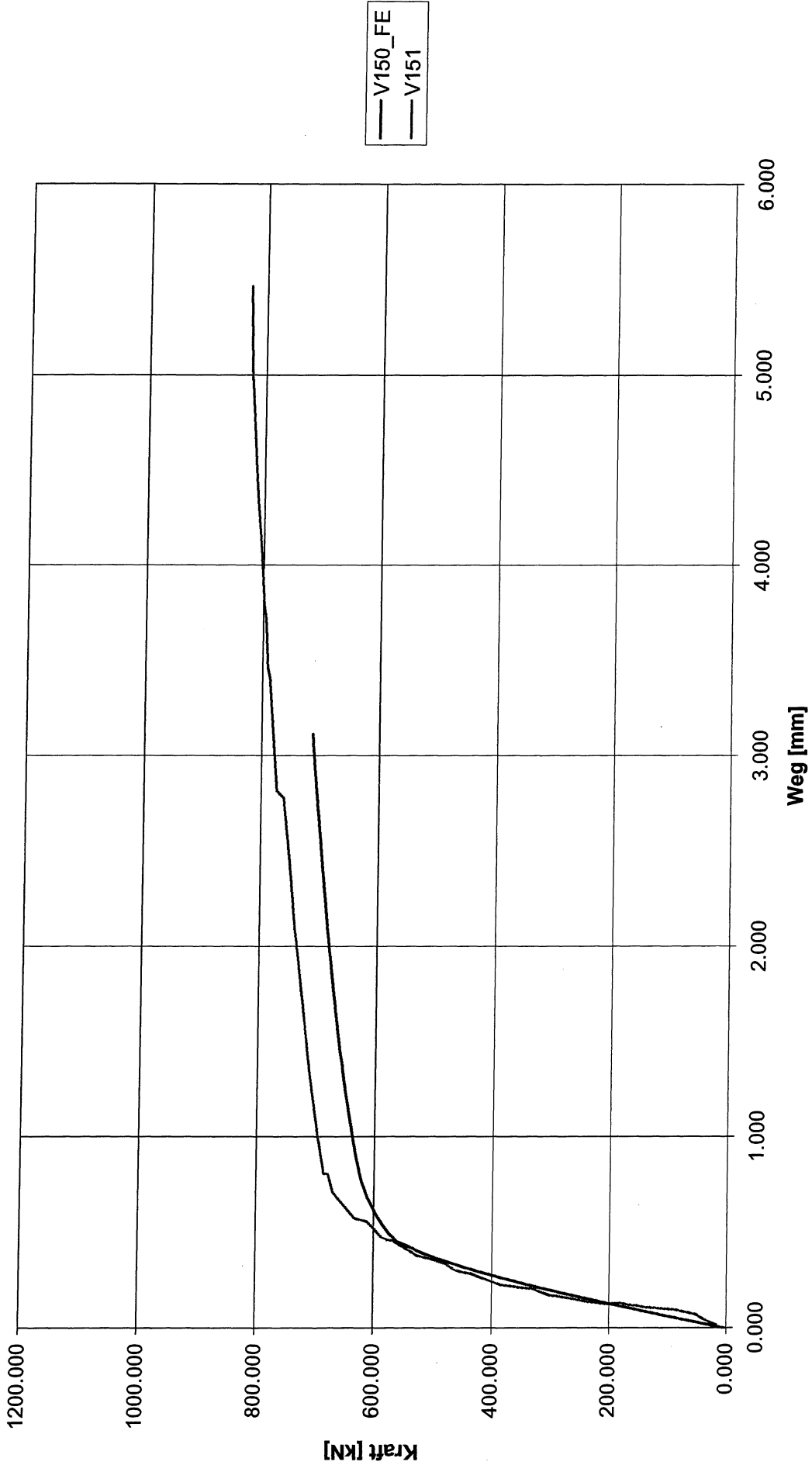
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V142



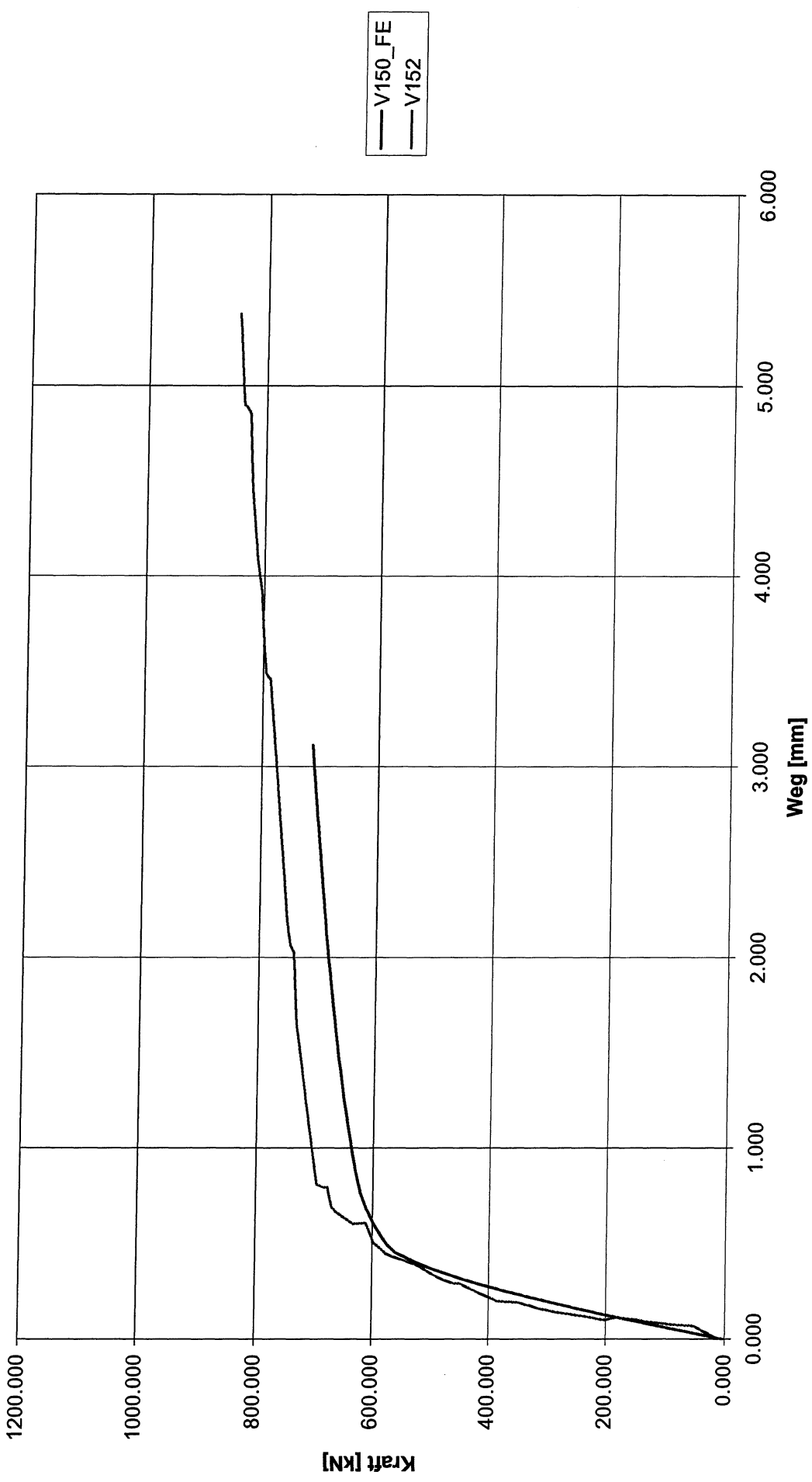
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V151



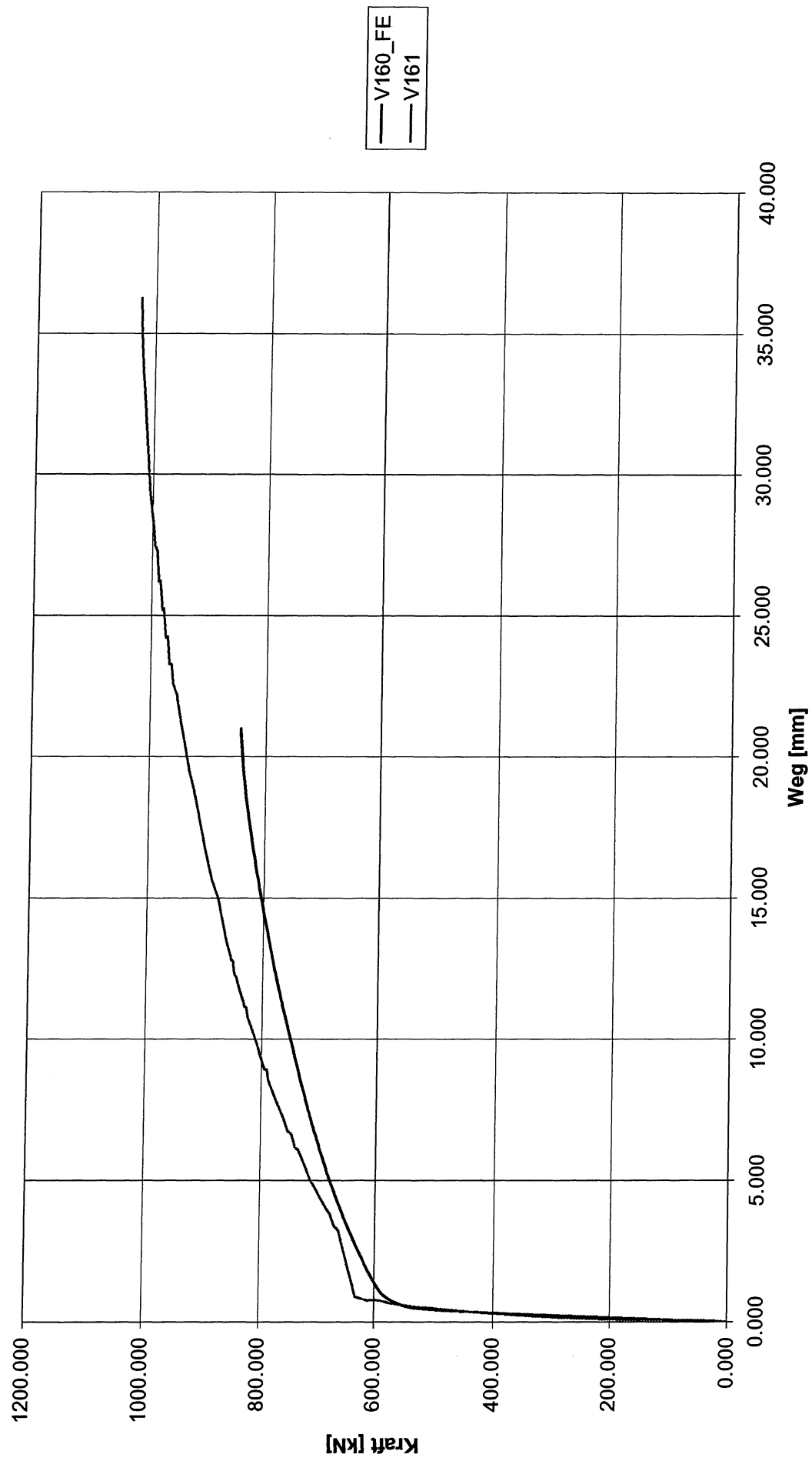
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V152



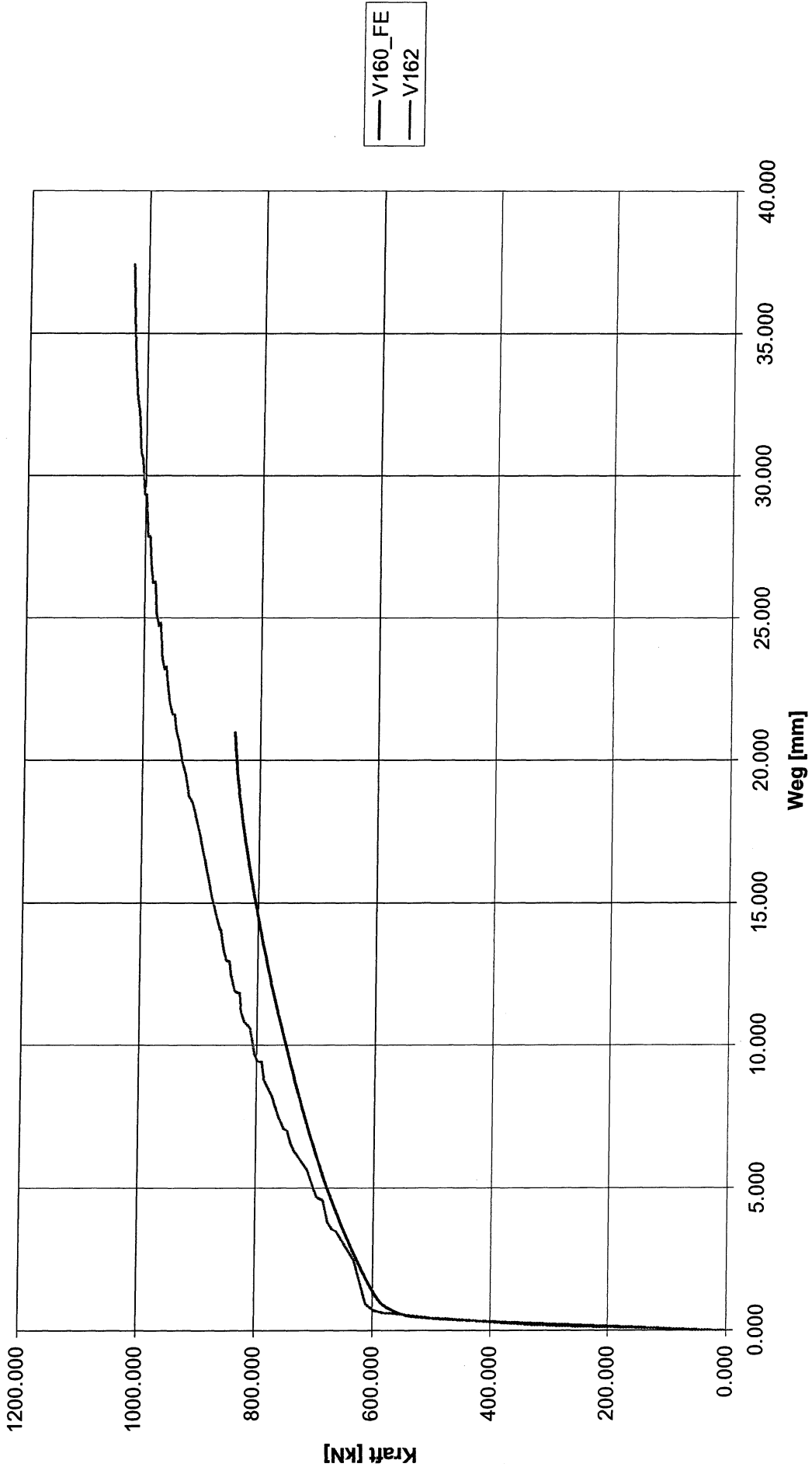
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V161



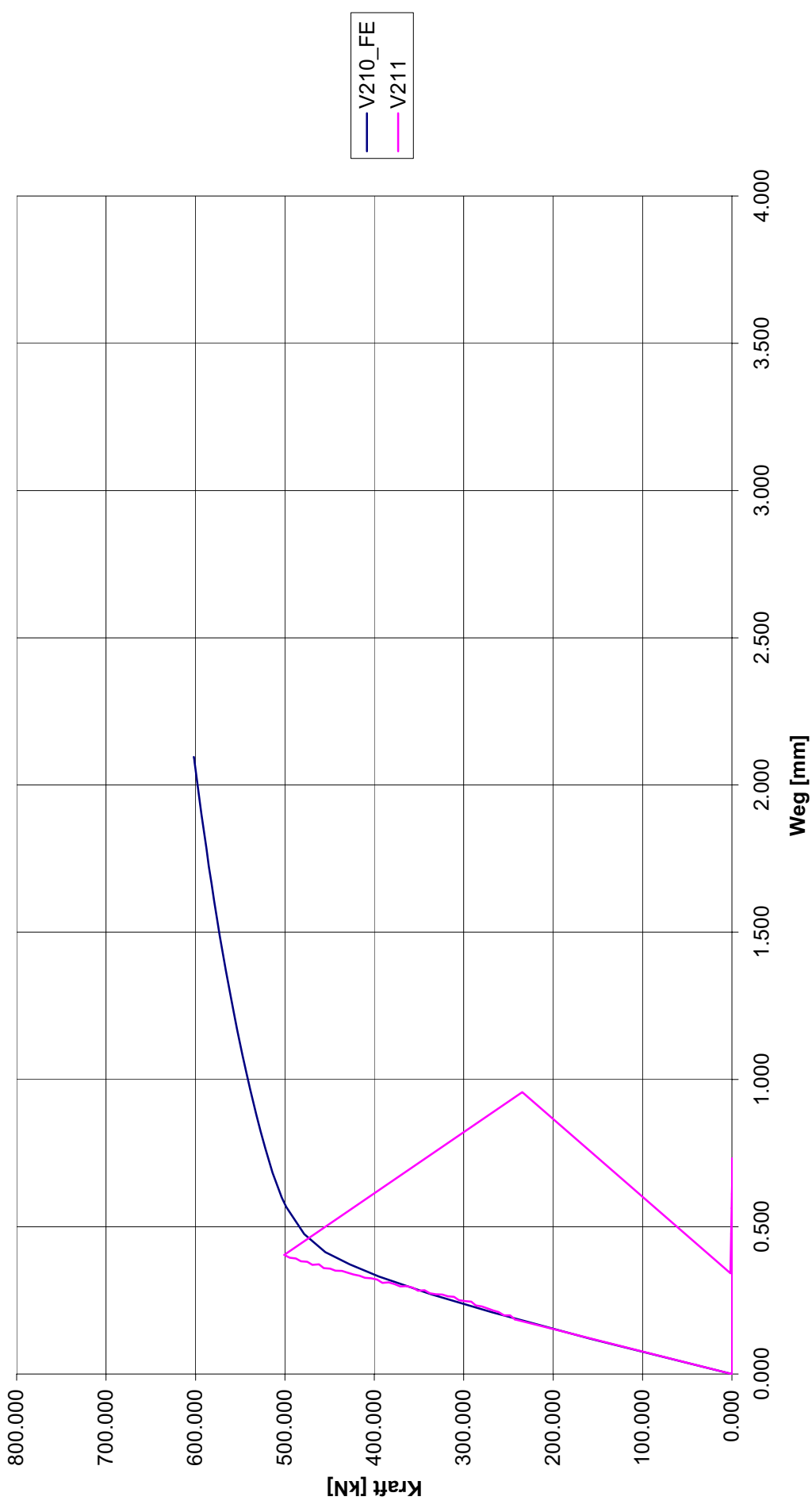
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V162



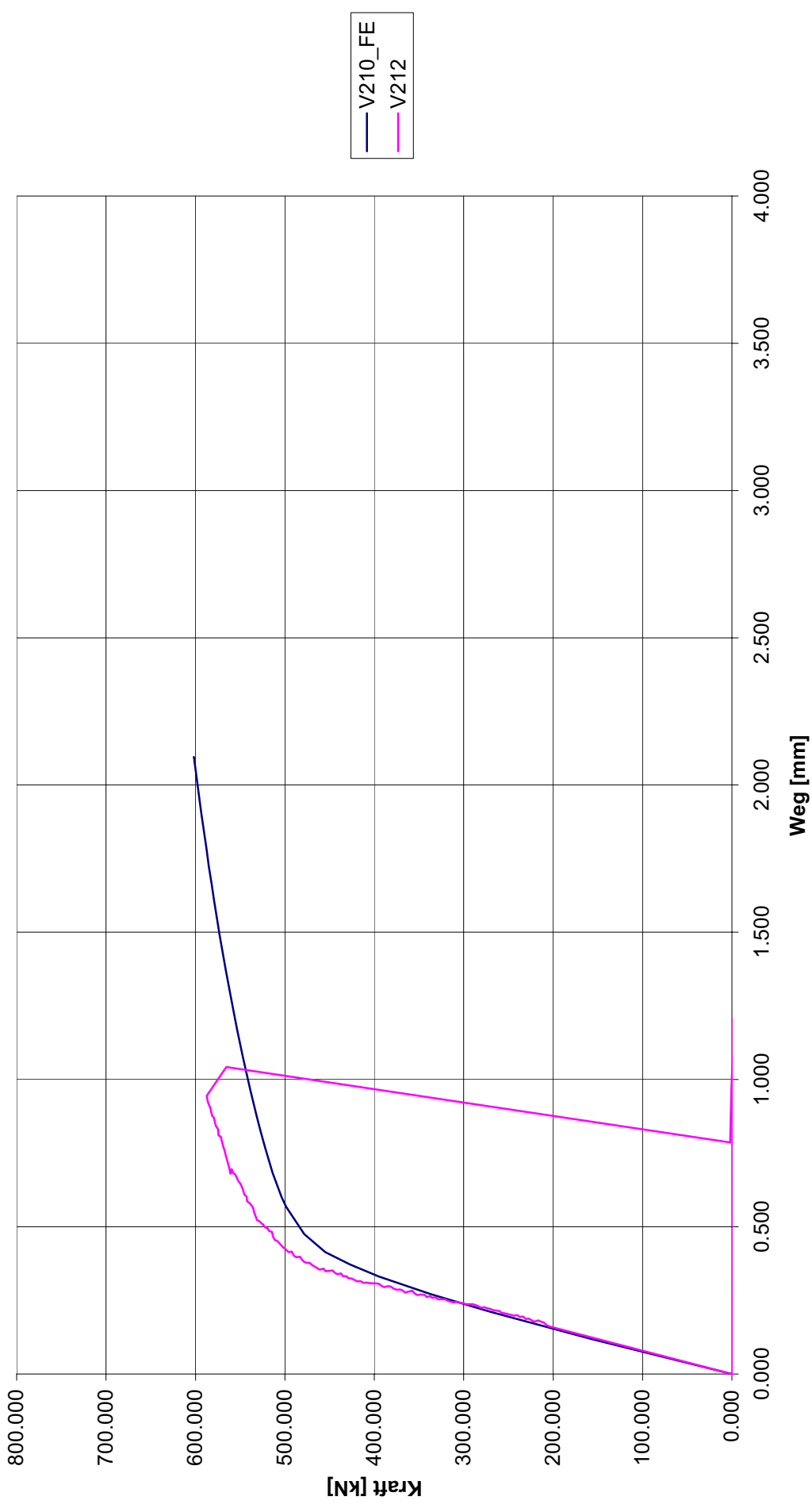
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V211



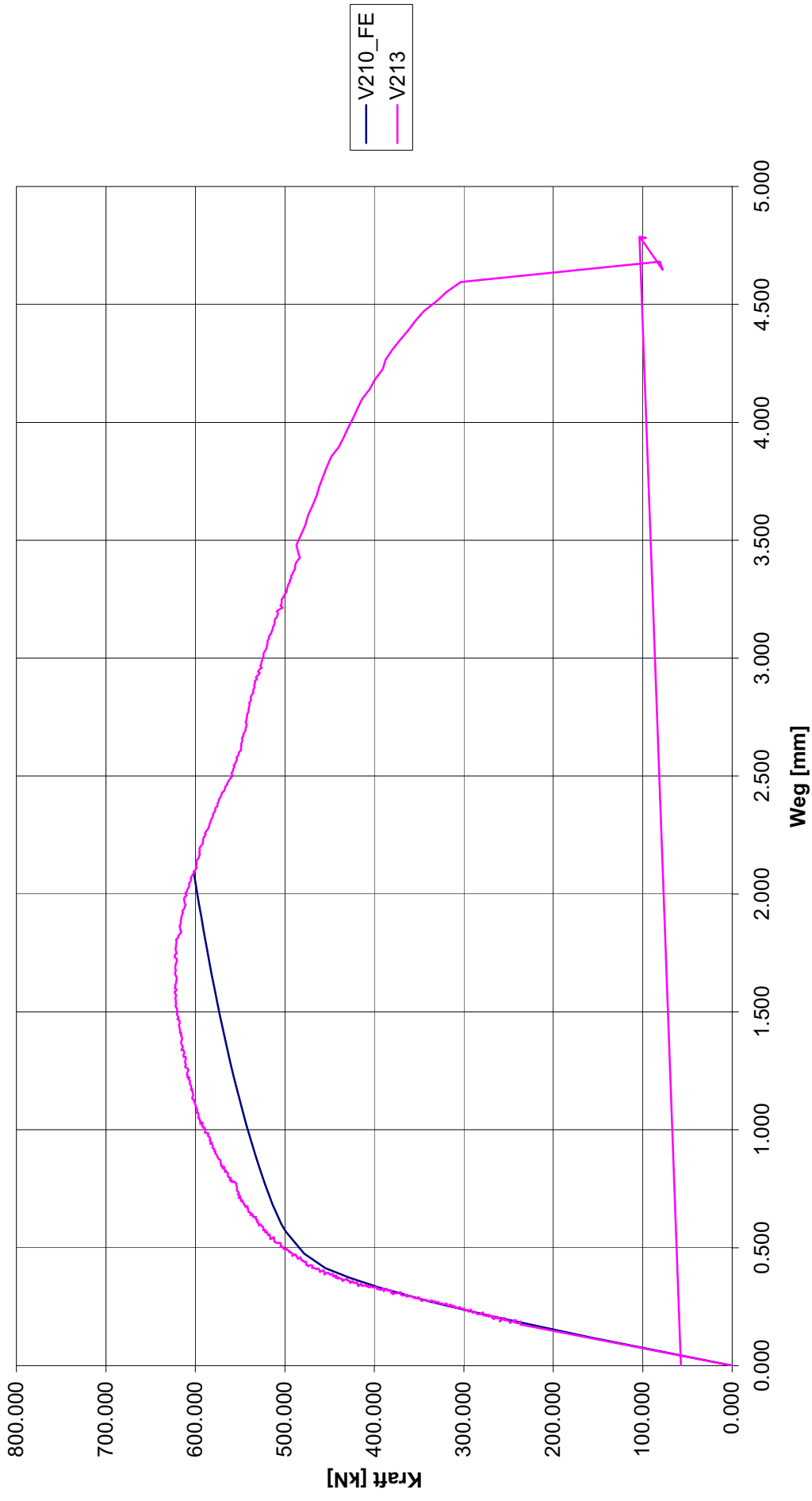
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V212



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V213



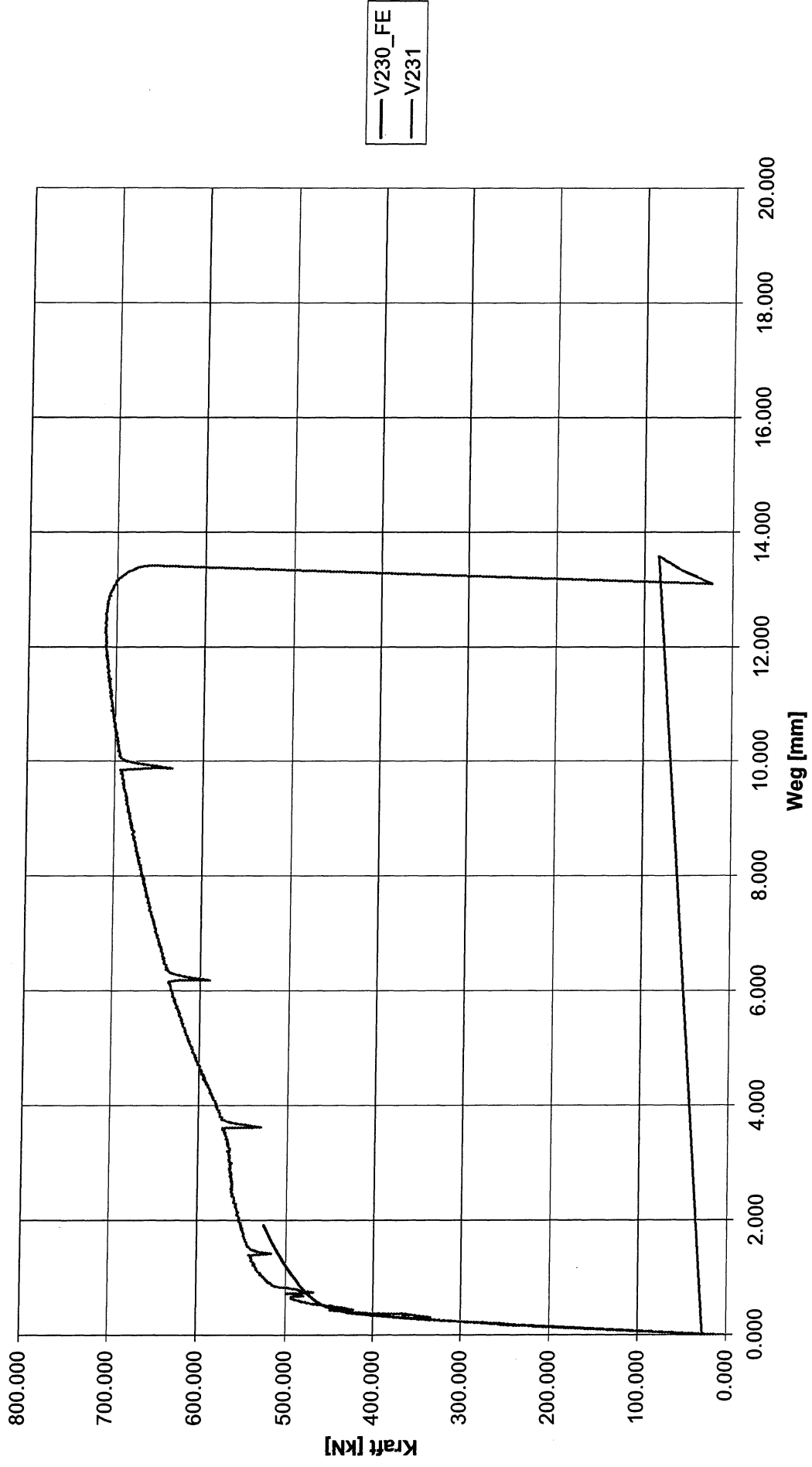
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V222



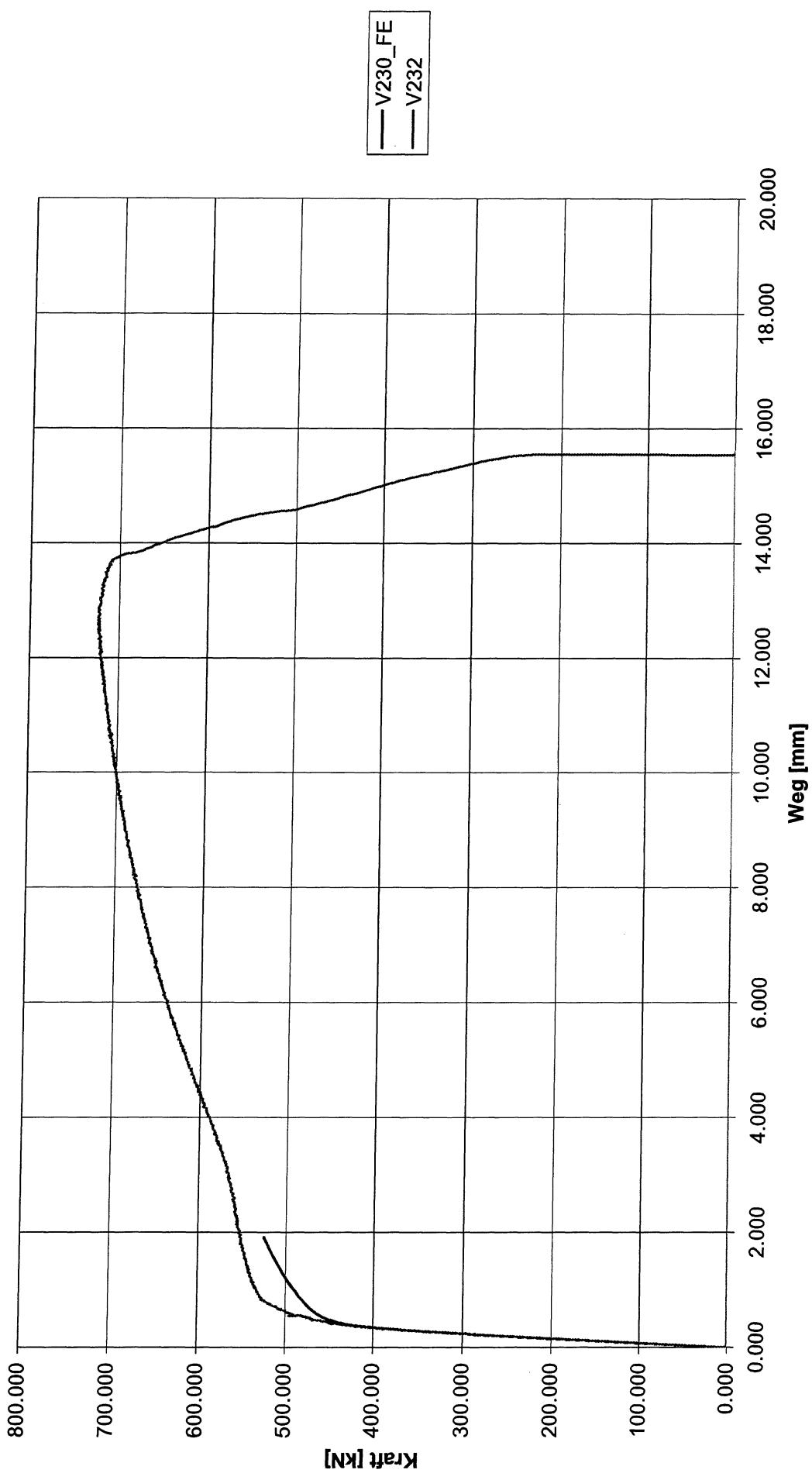
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V231



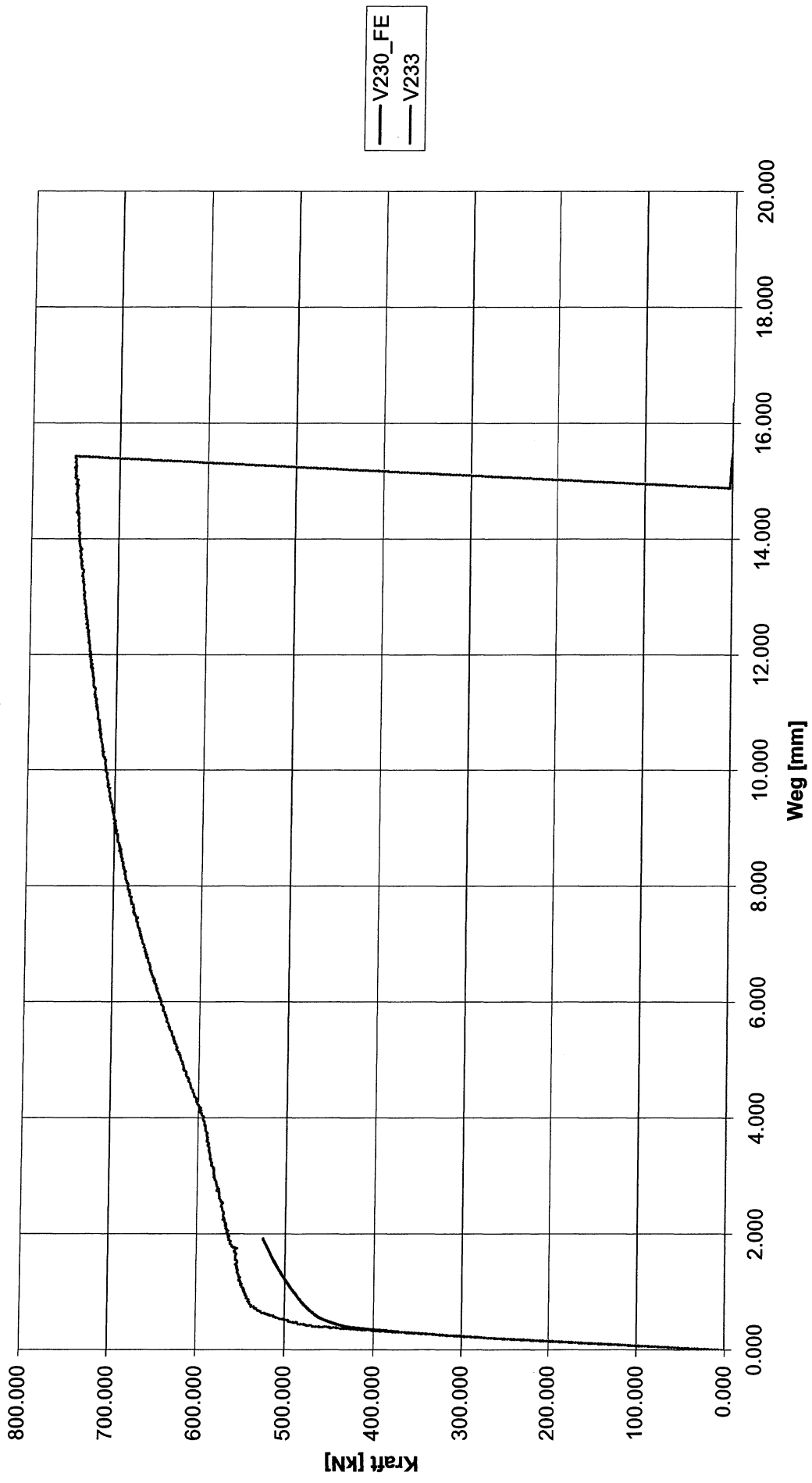
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V232



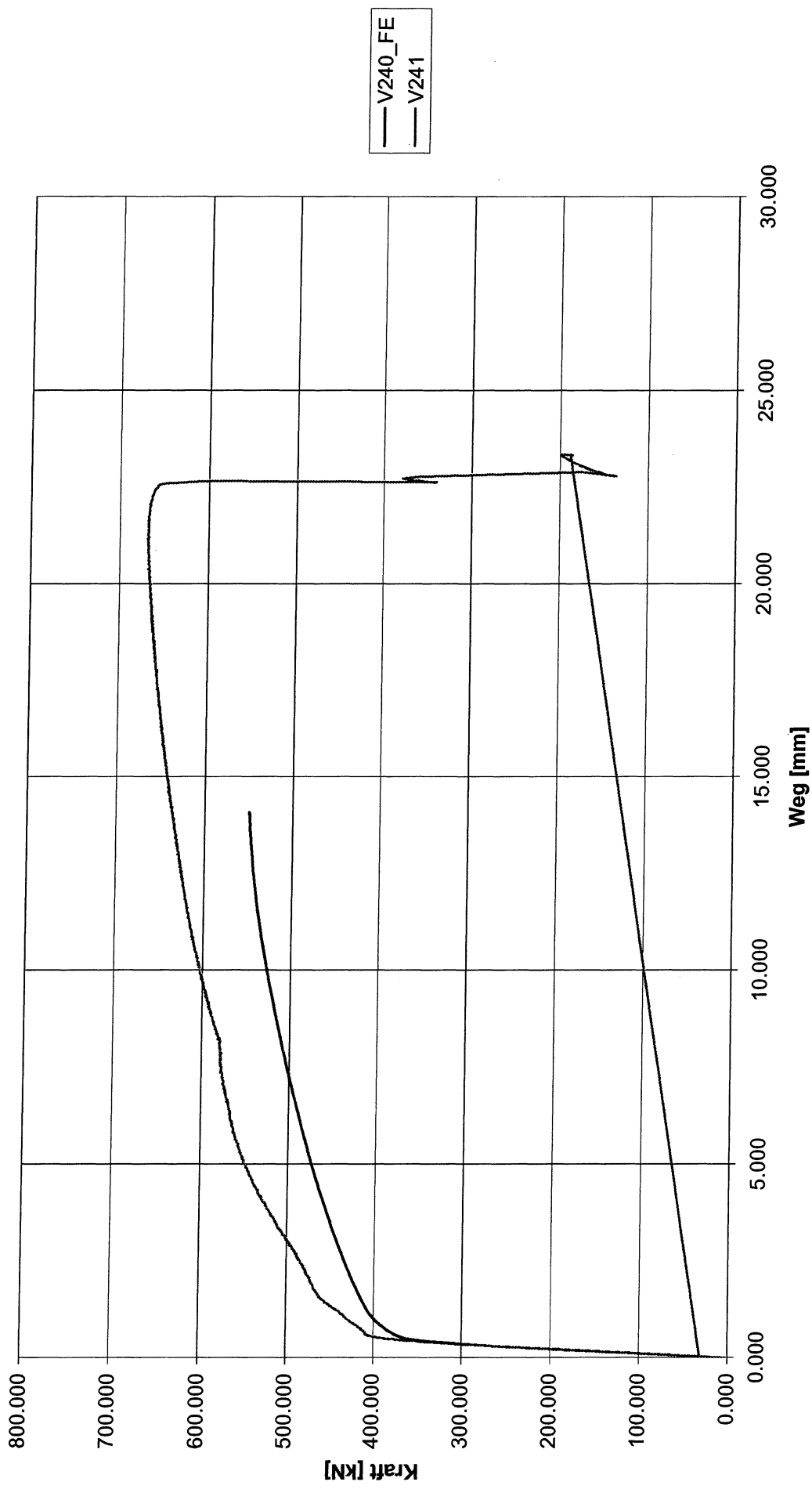
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V233



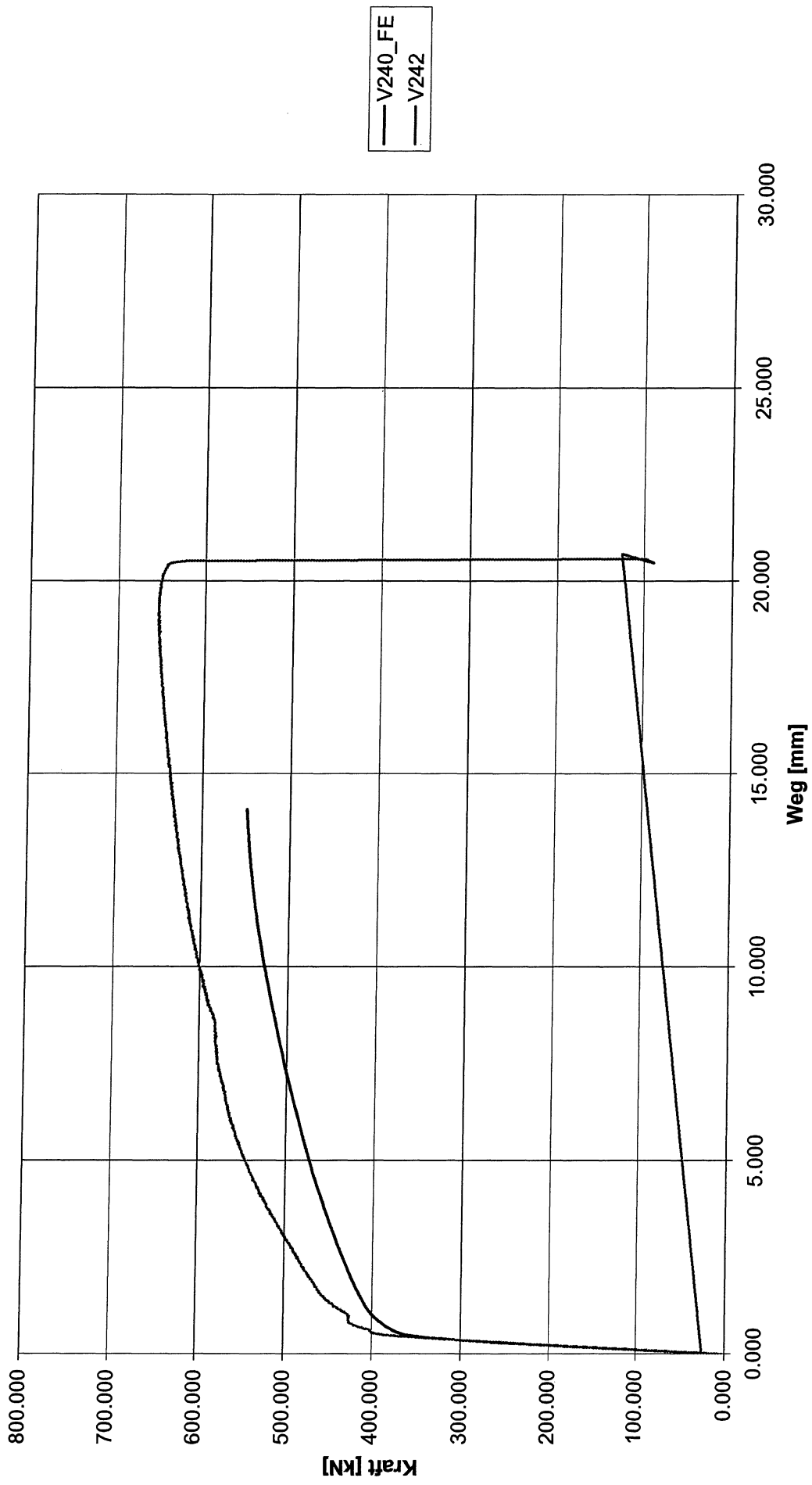
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V241



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V242



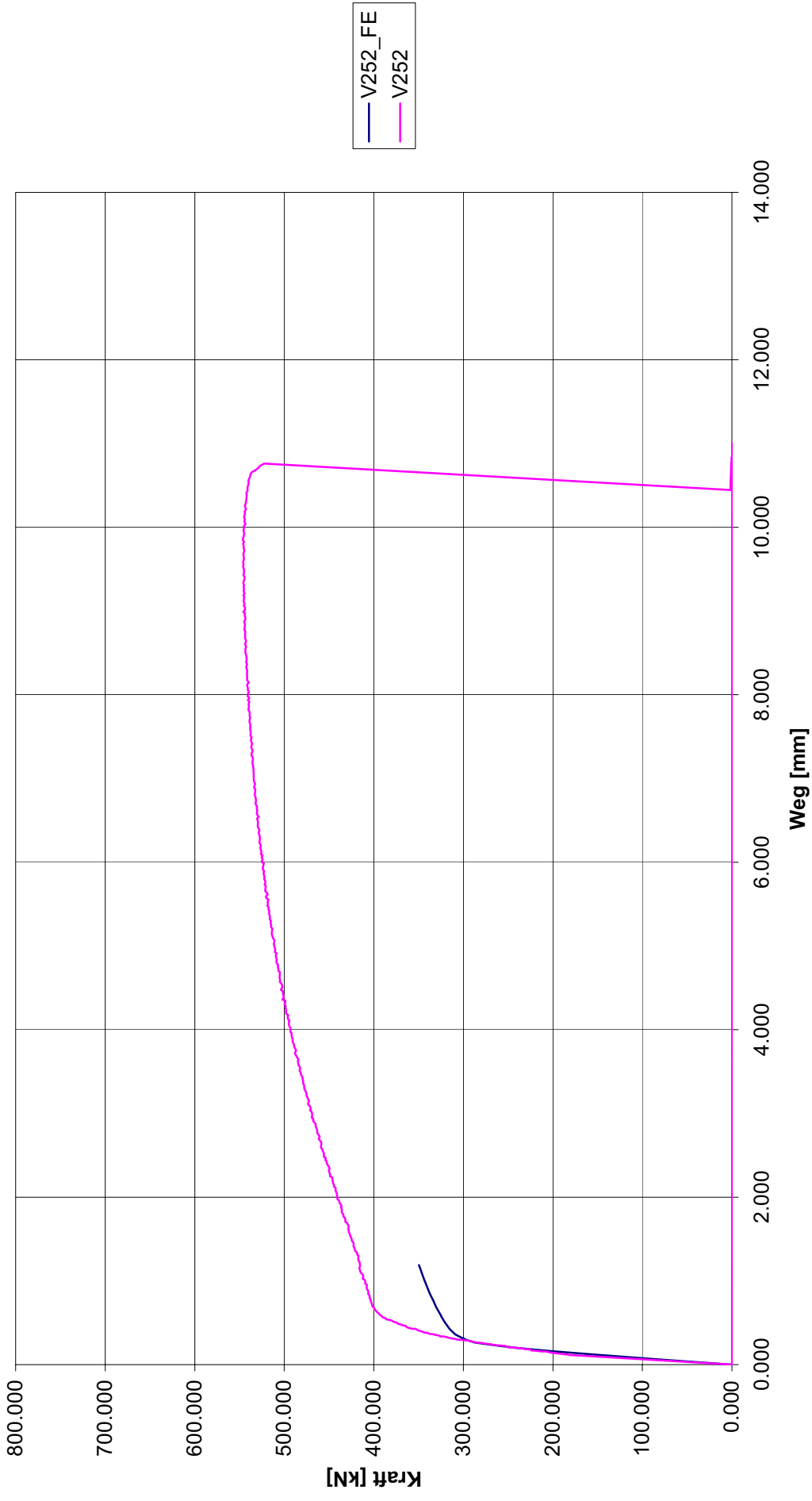
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V251



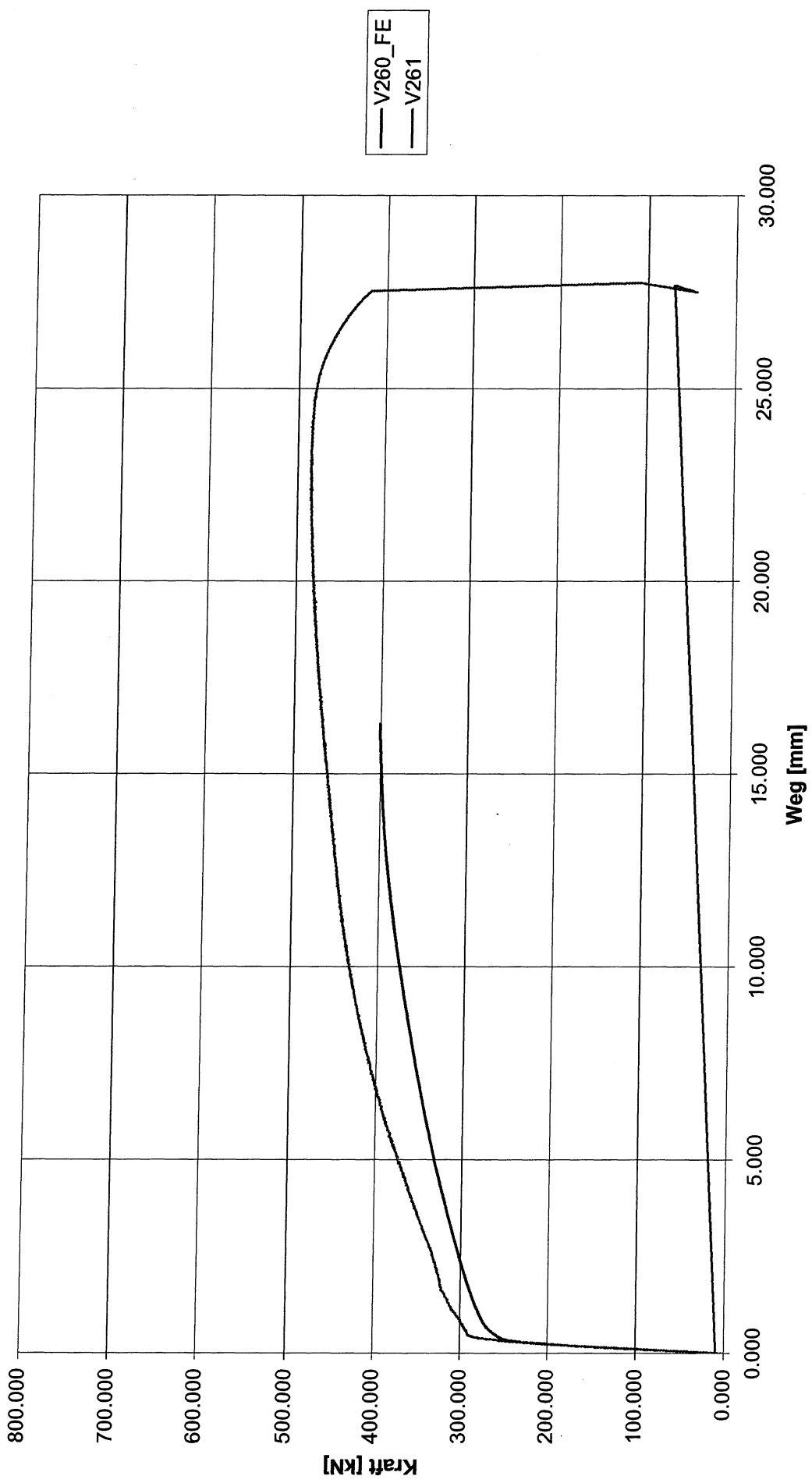
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V252



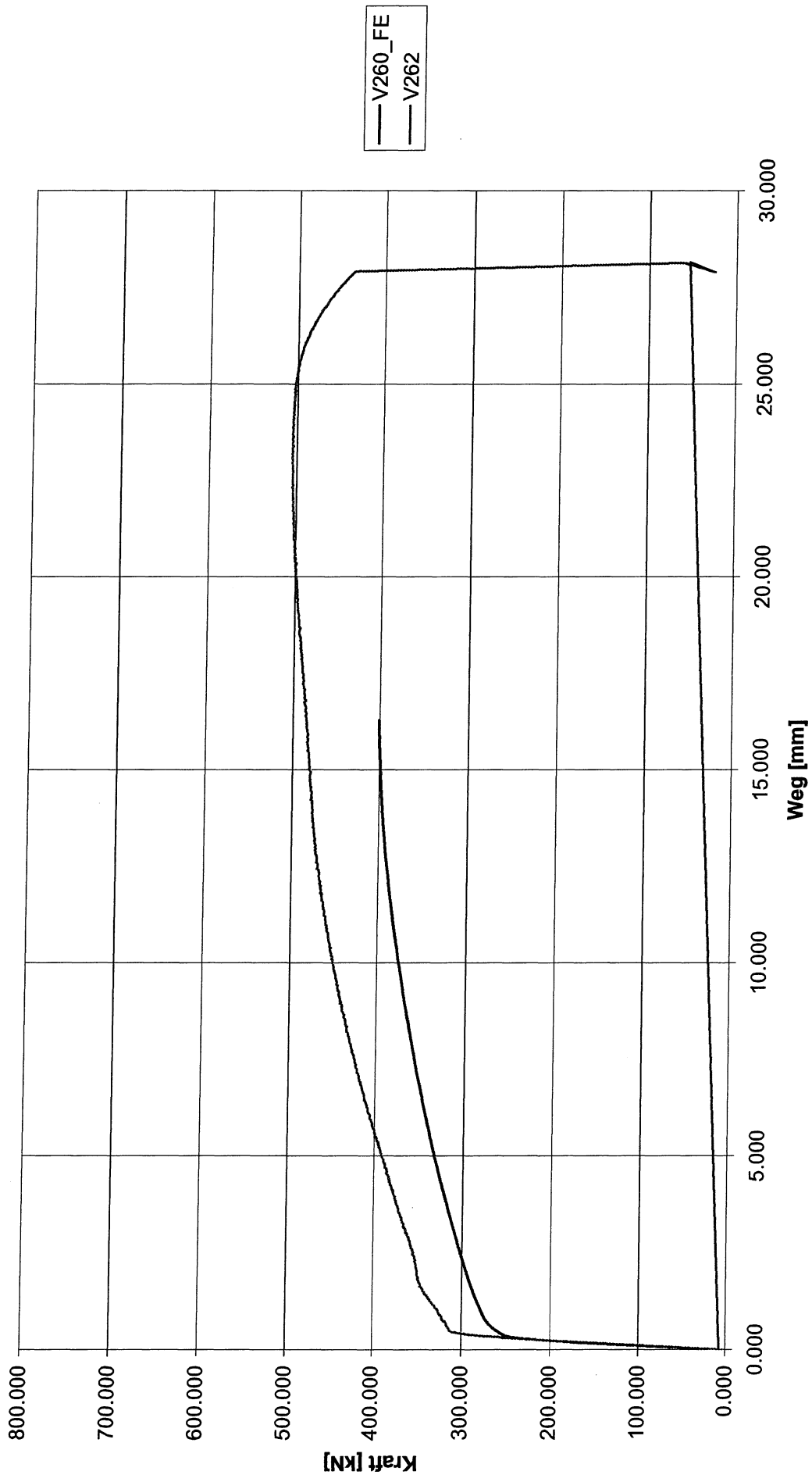
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V261



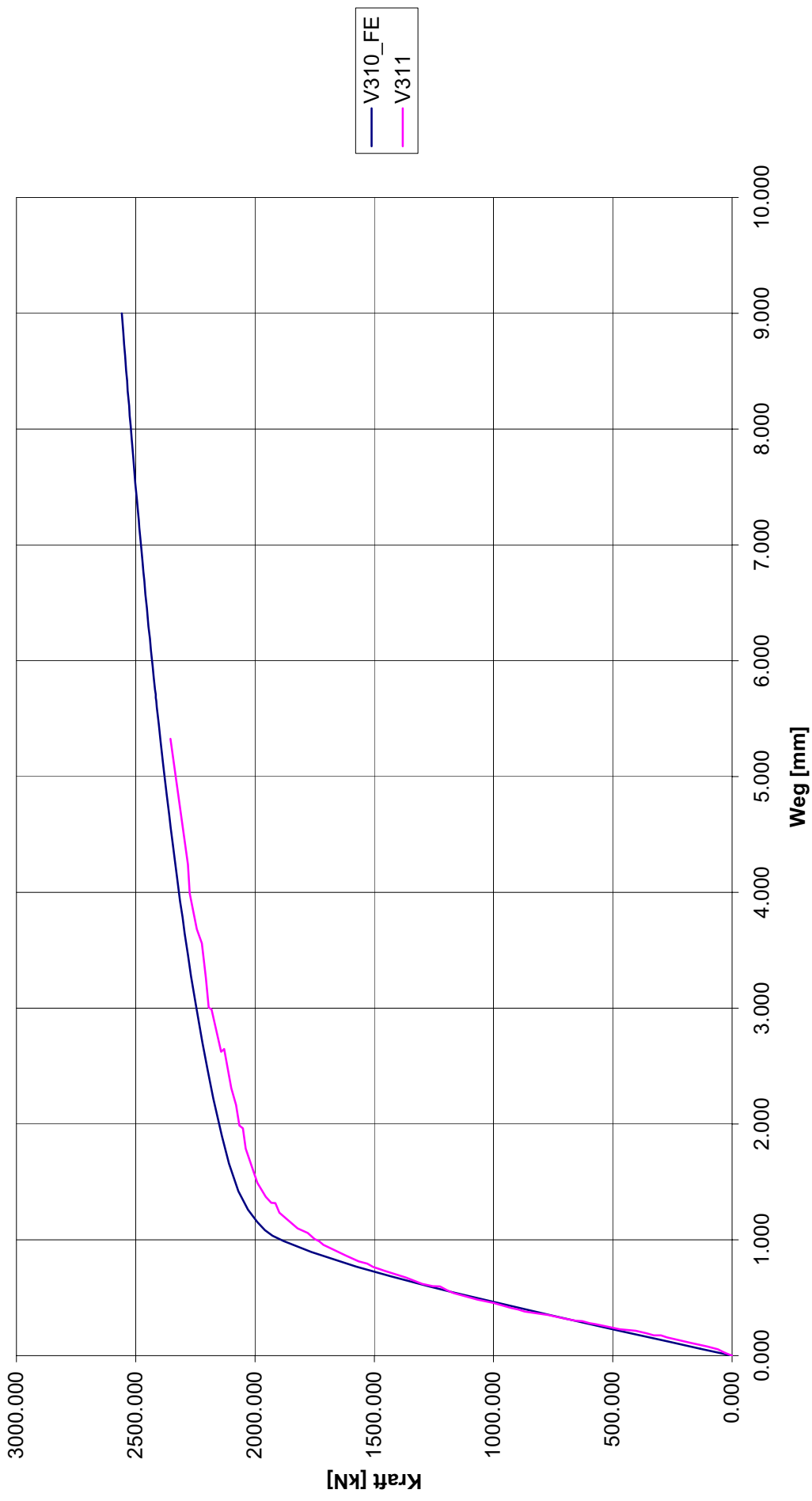
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V262



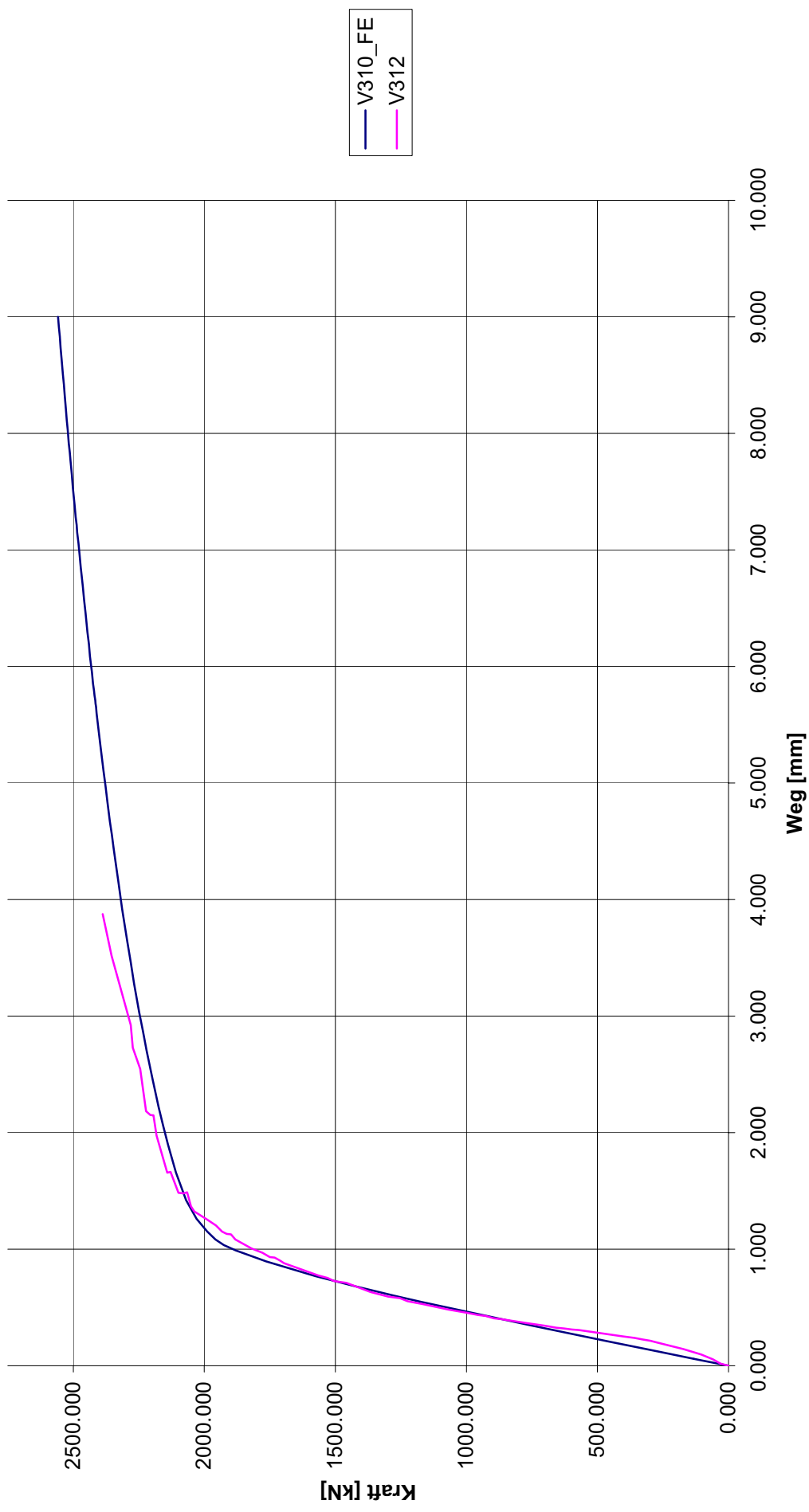
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V311



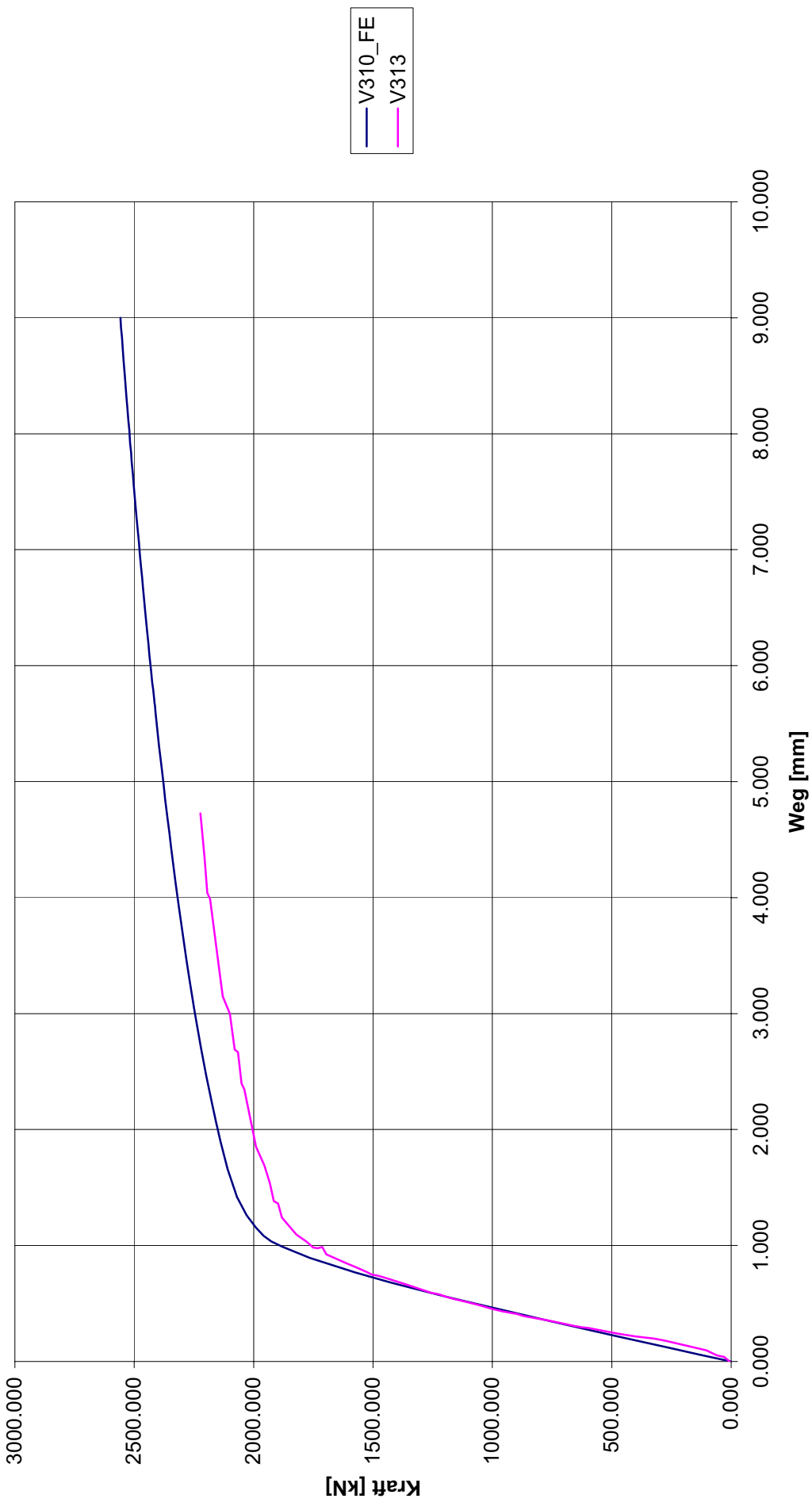
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V312



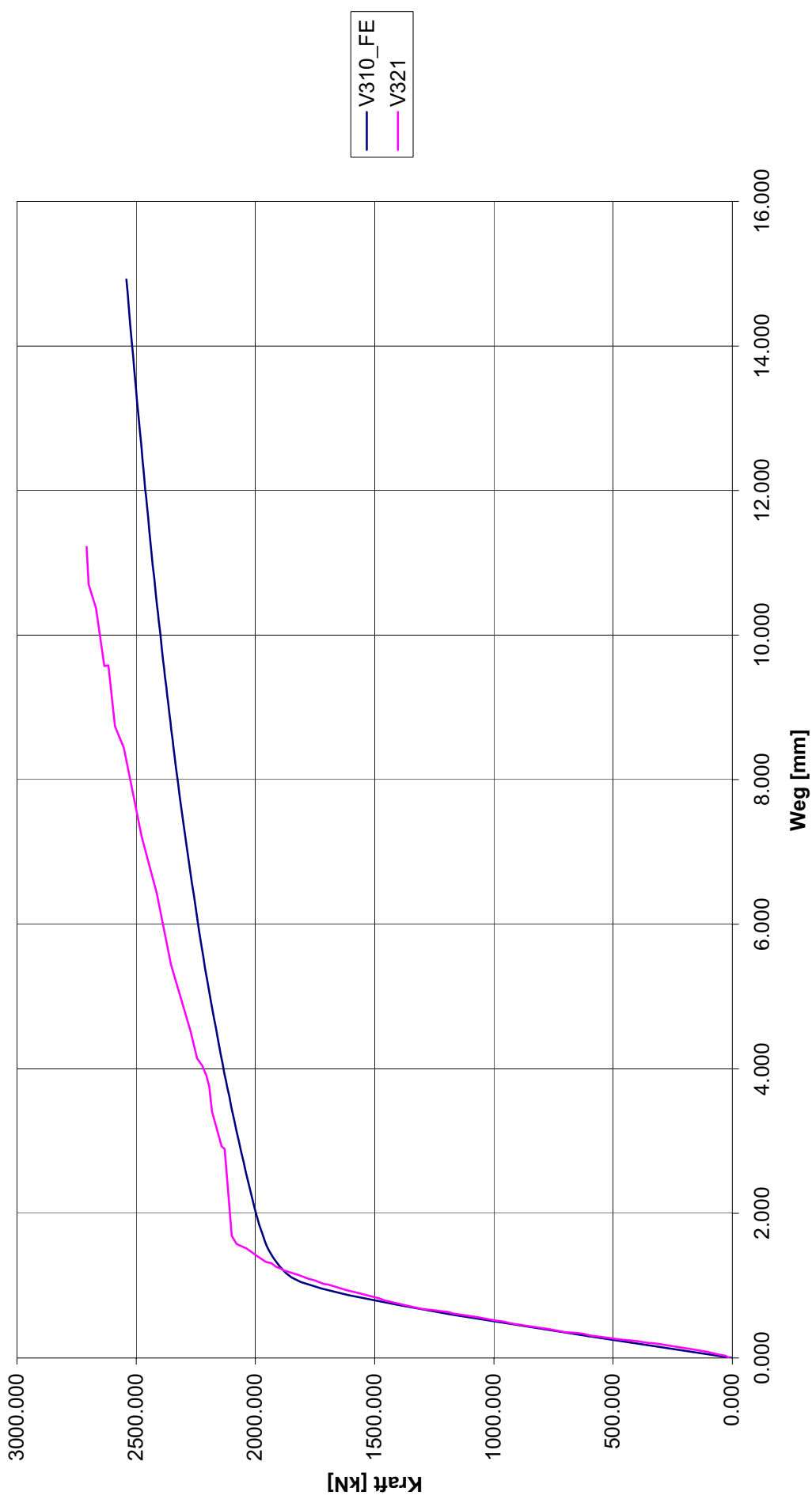
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V313



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V321



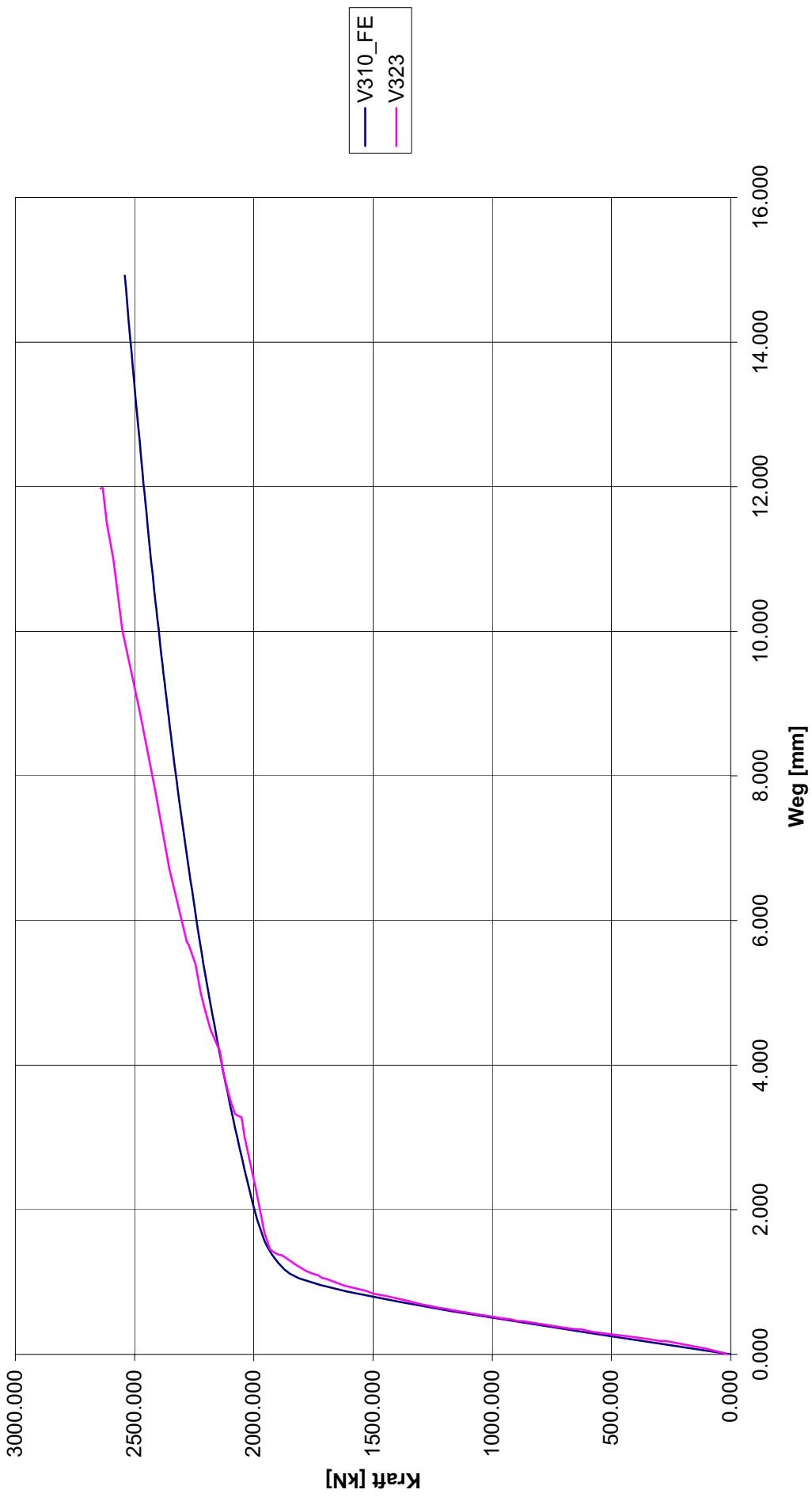
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V322



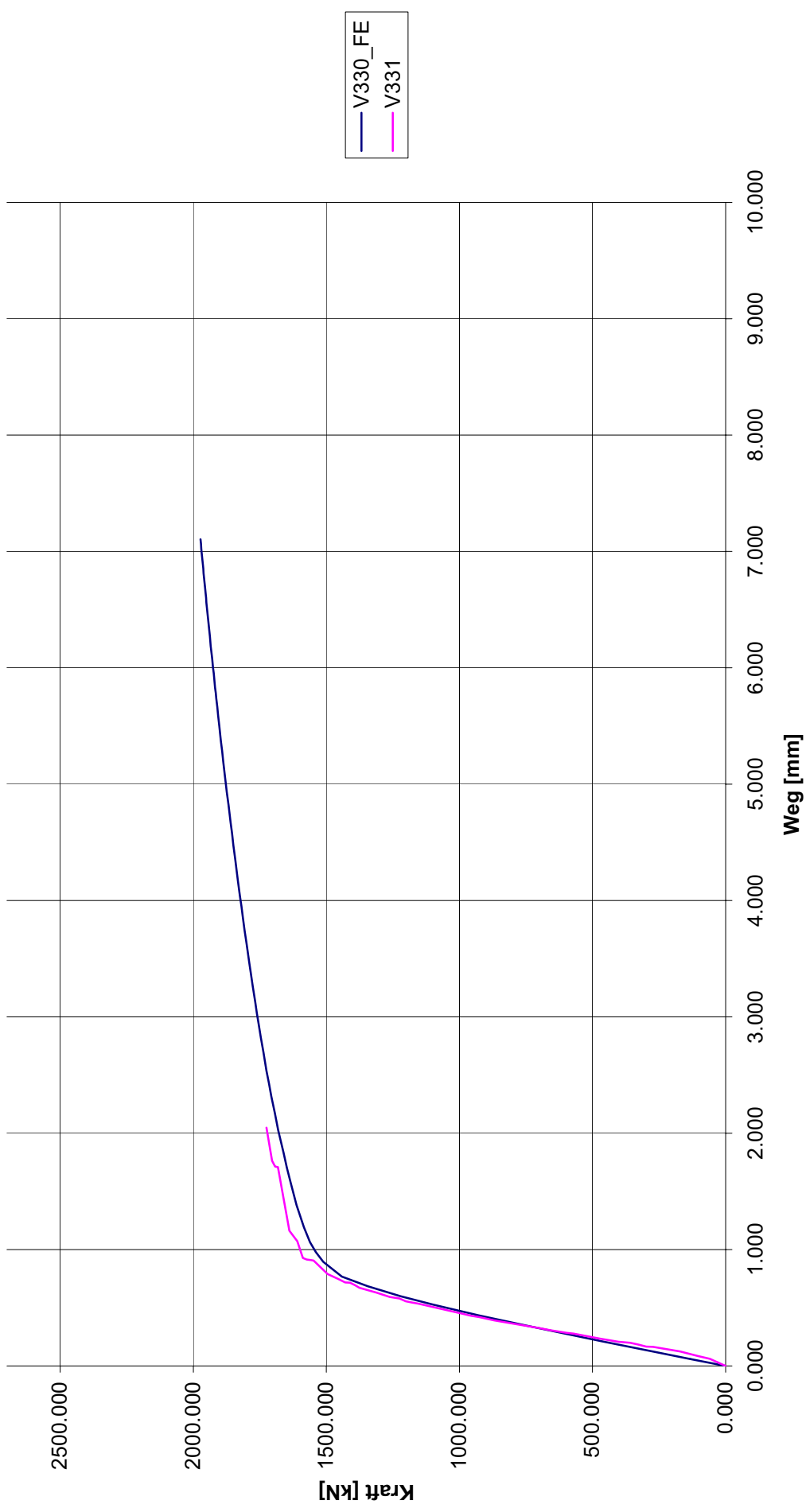
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V323



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V331



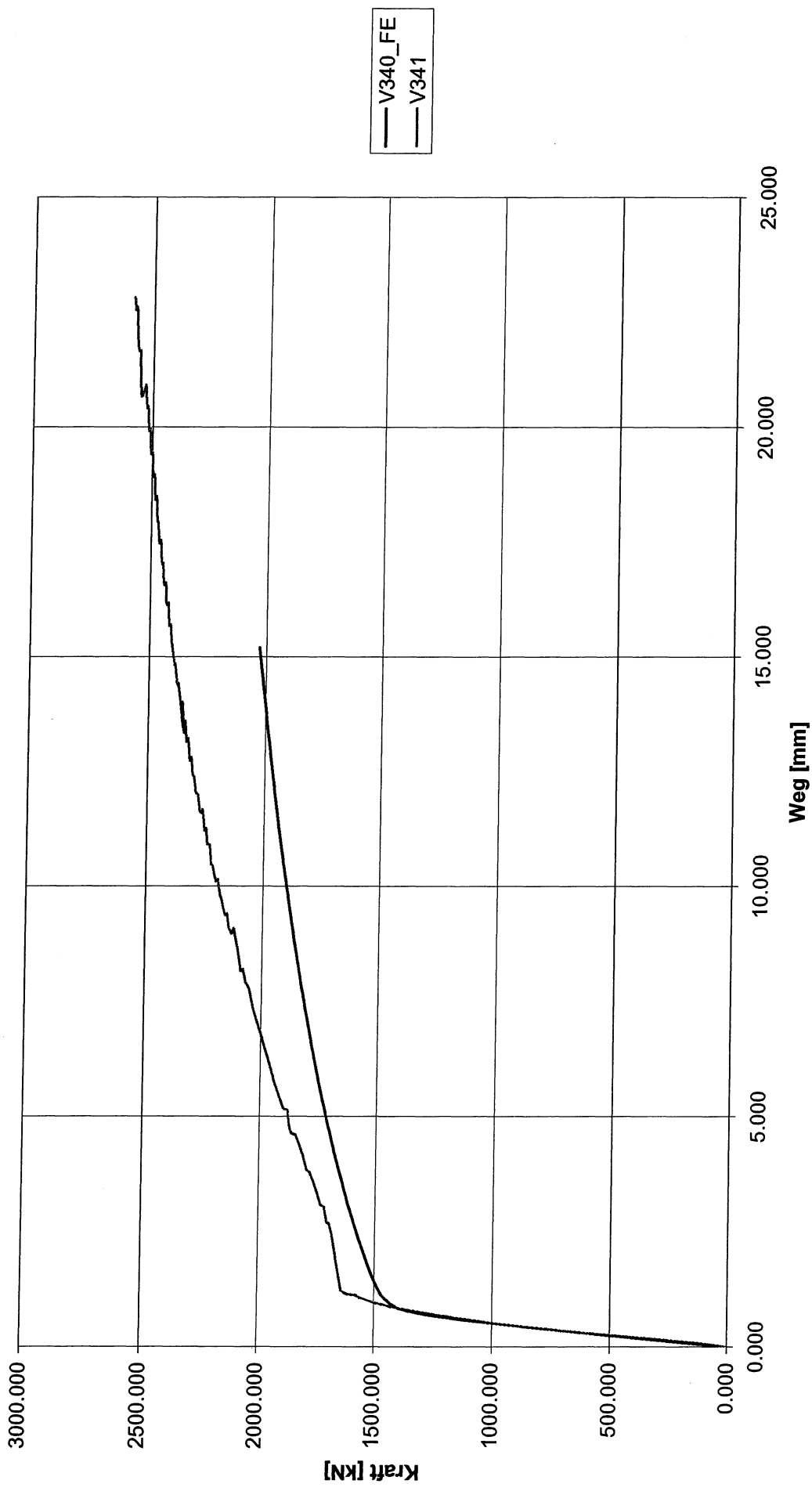
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V332



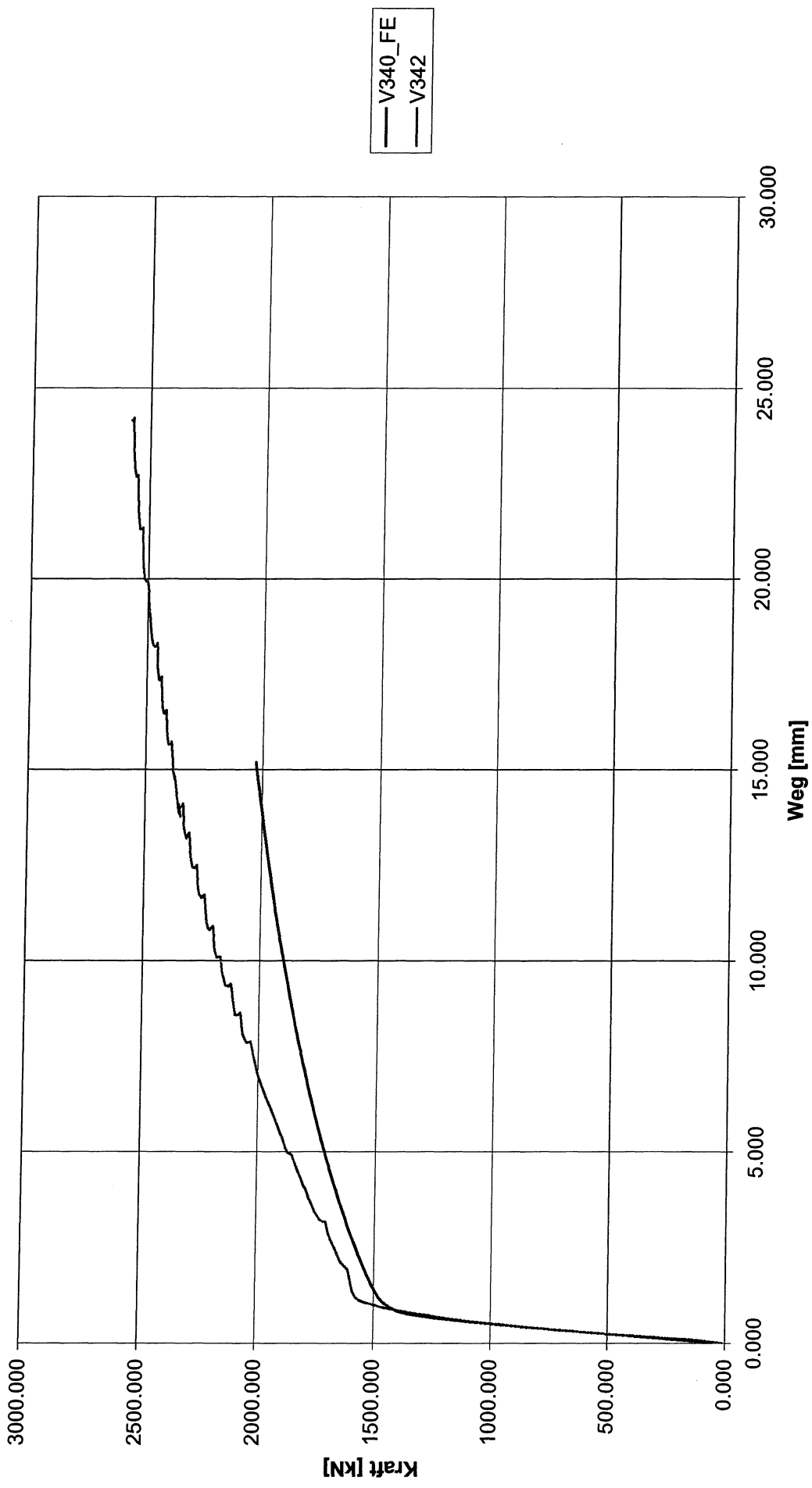
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V341



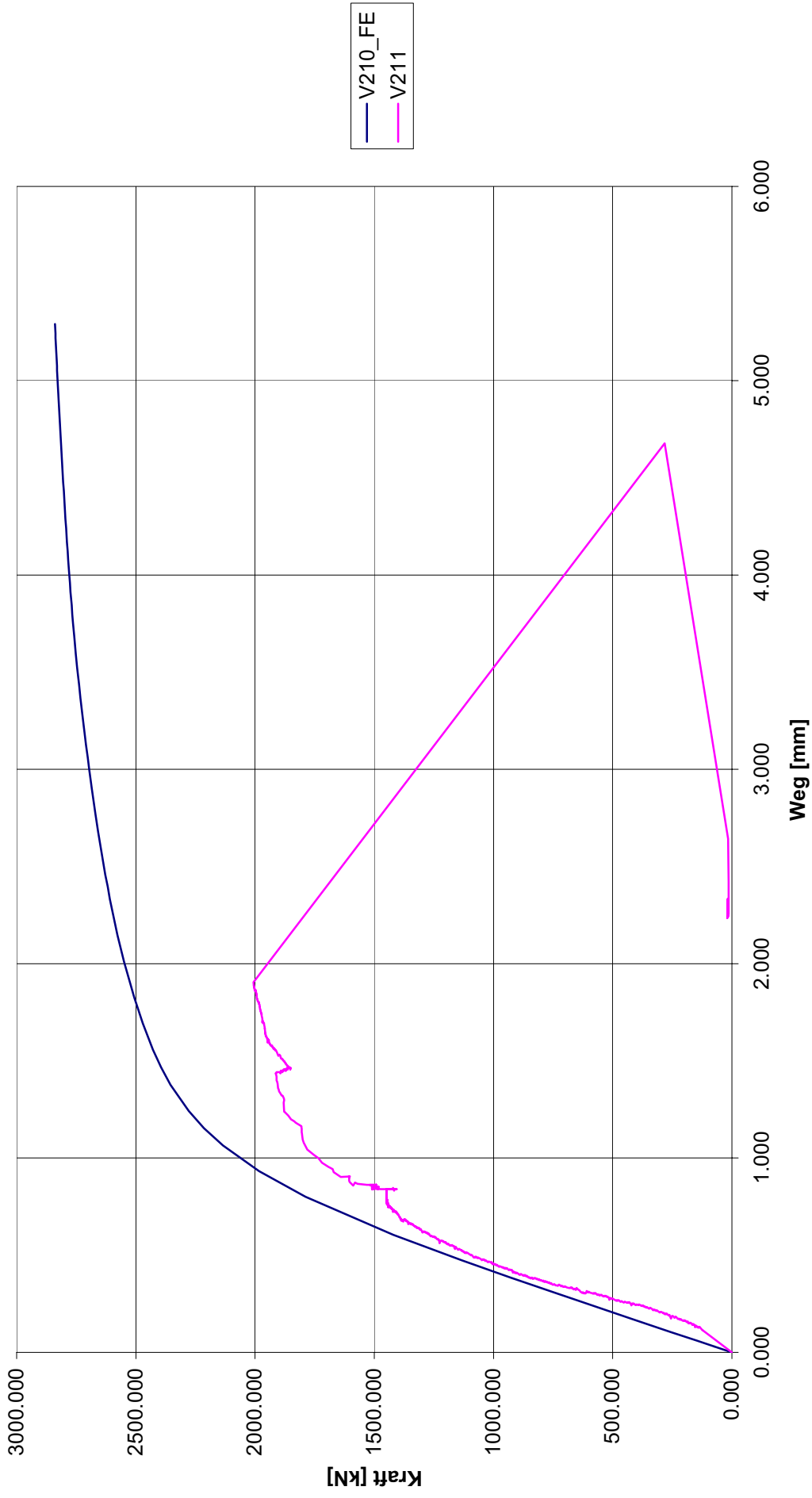
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

V342



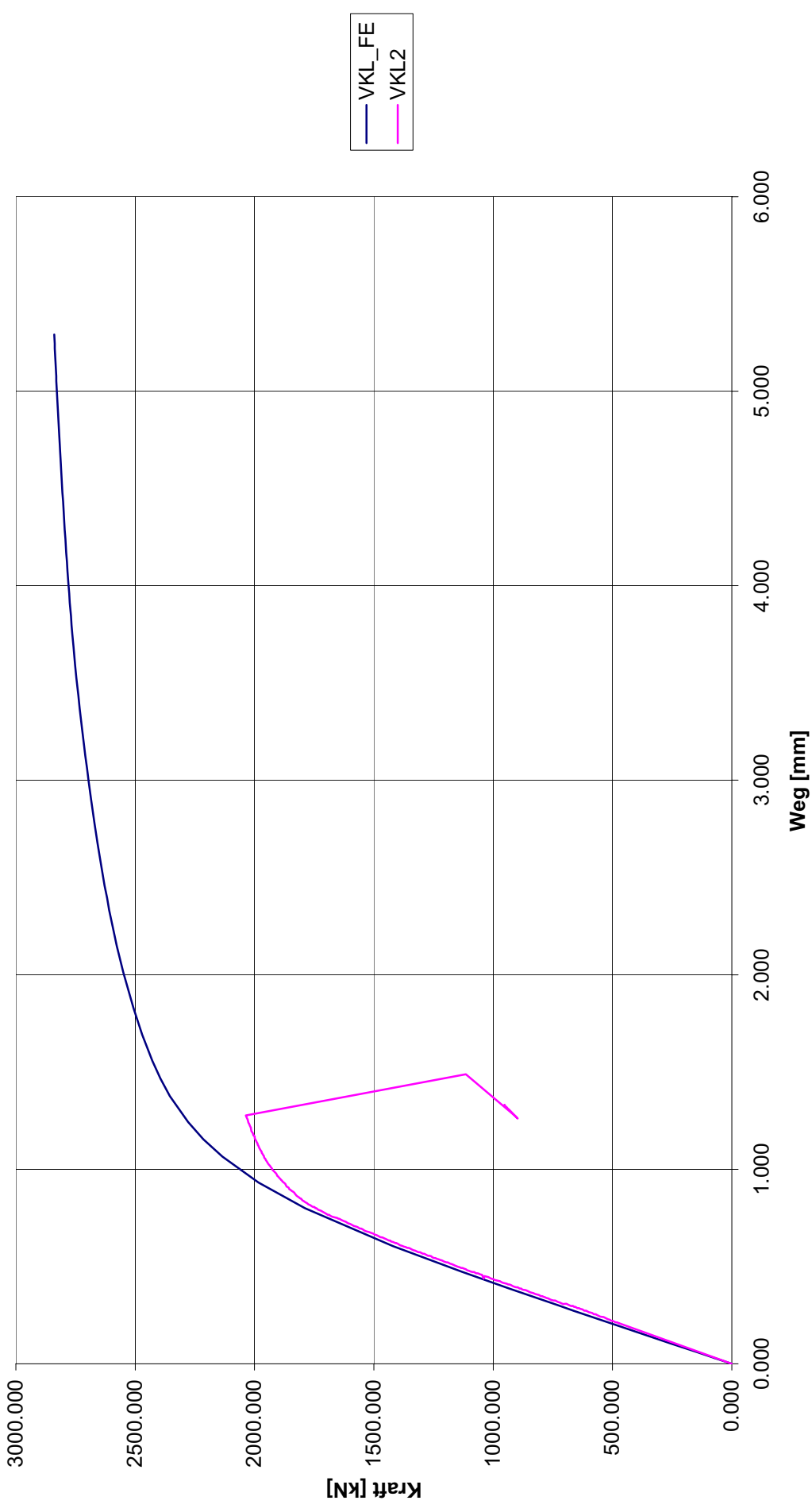
Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

VKL1



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugswise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

VKL2



Dieser Bericht darf nur ungekürzt wiedergegeben werden.
Eine auszugsweise Veröffentlichung bedarf unserer ausdrücklichen Genehmigung.

Anlage 5

Bilder der Versuche im Versagenszustand



Bild 5.1 V111 im Bruchzustand, stabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.2 V112 im Bruchzustand (links), instabiler Rissfortschritt nach geringer Plastizierung vor Rissbeginn (Bruchfläche, rechts)



Bild 5.3 V113 im Bruchzustand (links), instabiler Rissfortschritt nach geringer Plastizierung vor Rissbeginn (Bruchfläche, rechts)



Bild 5.4 V121 im Bruchzustand, instabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.5 V131 im Bruchzustand, stabiler Rissfortschritt nach großer Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.6 V151 im Bruchzustand, stabiler Rissfortschritt nach sehr großer Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.7 V161 im Bruchzustand, instabiler Rissfortschritt nach sehr großer Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.8 V212 im Bruchzustand, instabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.9 V213 im Bruchzustand, stabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn

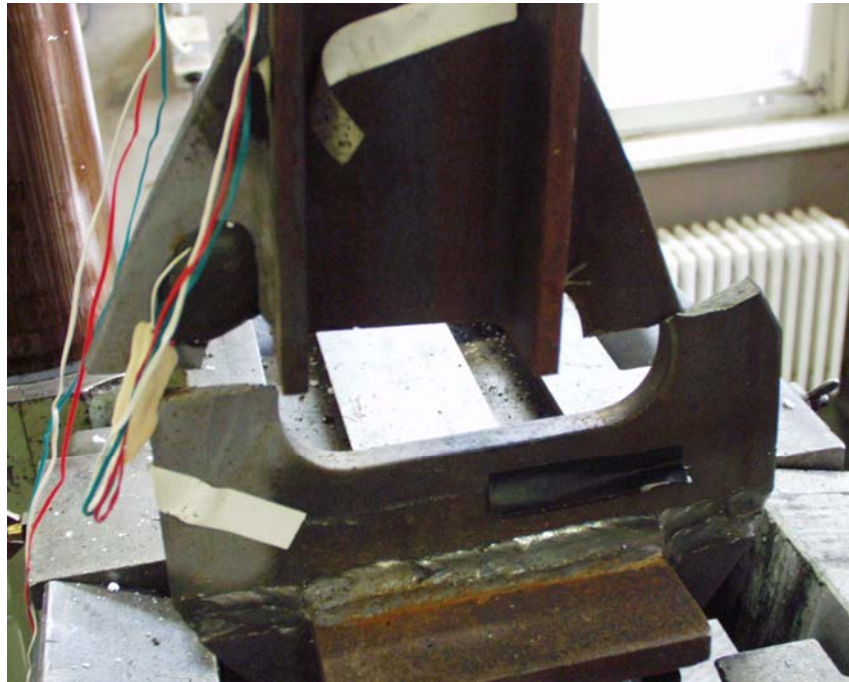


Bild 5.10 V222 im Bruchzustand, instabiler Rissfortschritt nach großer Plastizierung vor Rissbeginn



Bild 5.11 V311 im Bruchzustand, stabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn

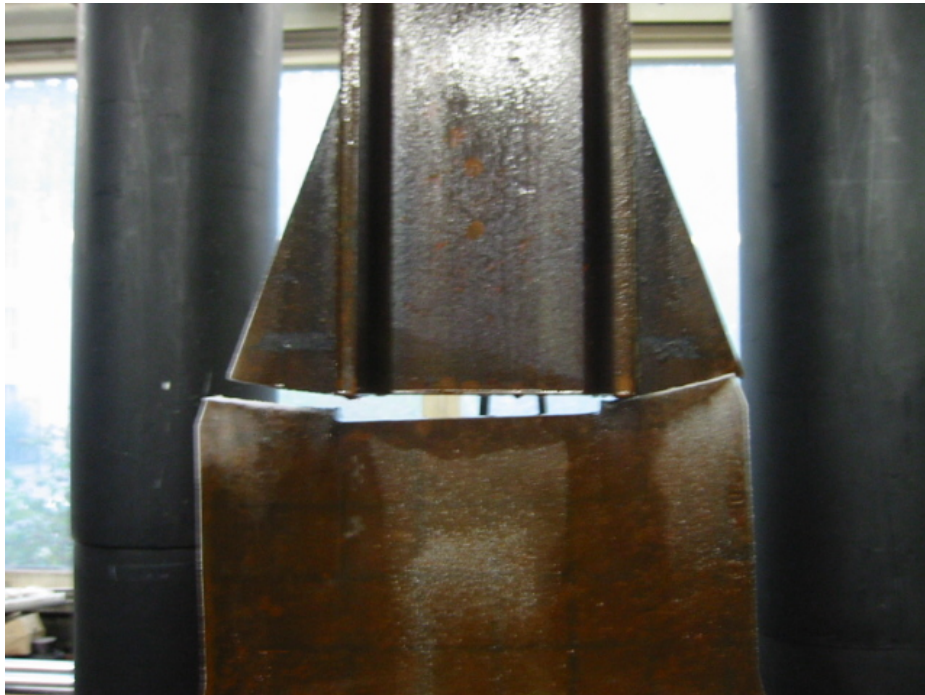


Bild 5.12 V312 im Bruchzustand, instabiler Rissfortschritt nach mäßiger Plastizierung vor Rissbeginn

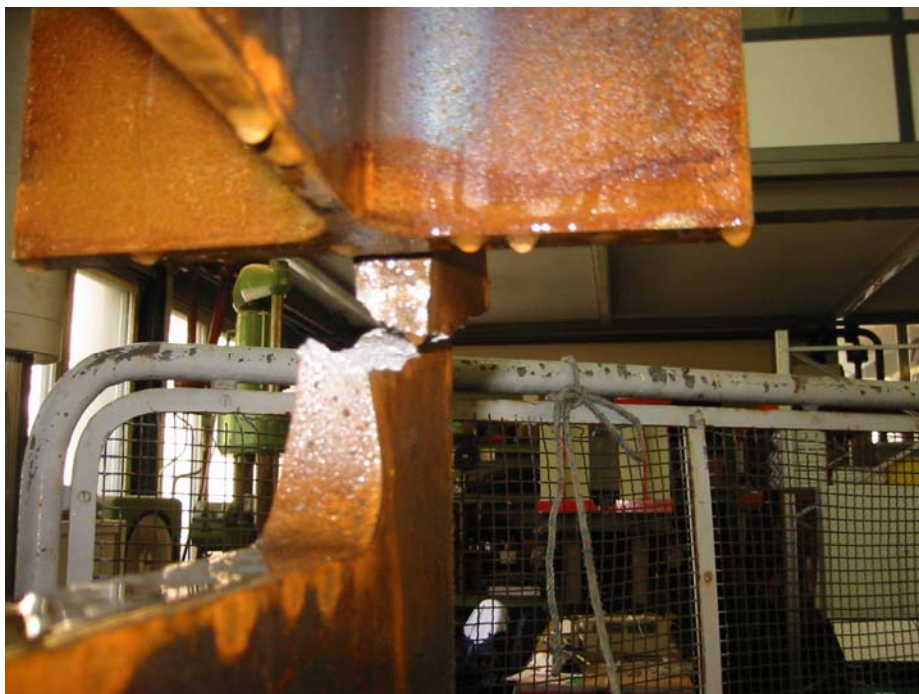


Bild 5.13 V341 im Bruchzustand (Einschnürung vor Bruch), instabiler Rissfortschritt nach sehr großer Plastizierung vor Rissbeginn

Anlage 6

Bilder der FE – Berechnungen

Lastgröße v = Verschiebung am oberen Modellrand

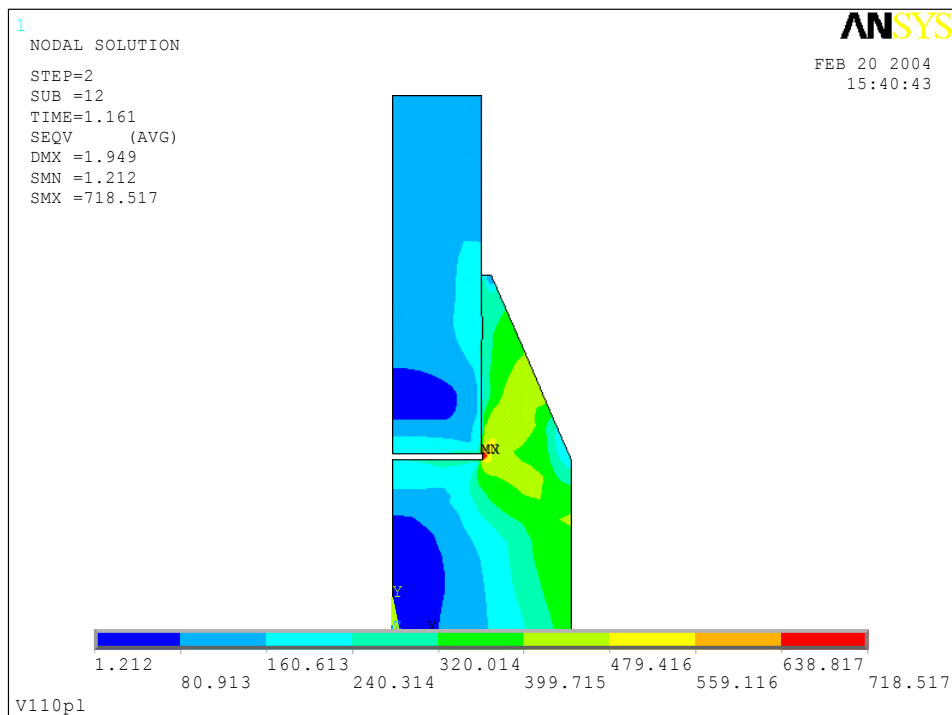


Bild 6.1 V110 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 1,95$ mm

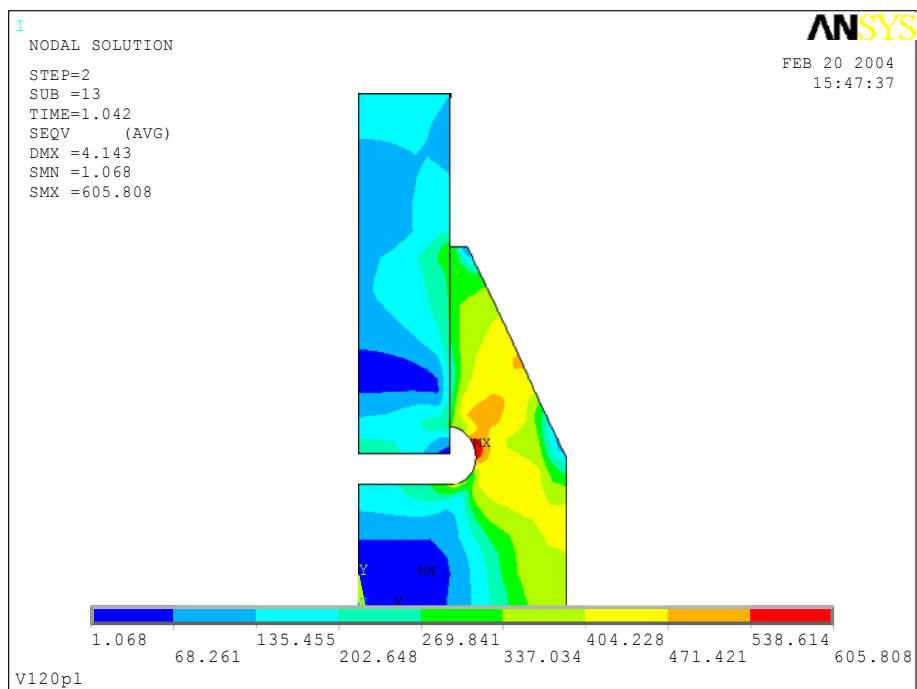


Bild 6.2 V120 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 4,14$ mm

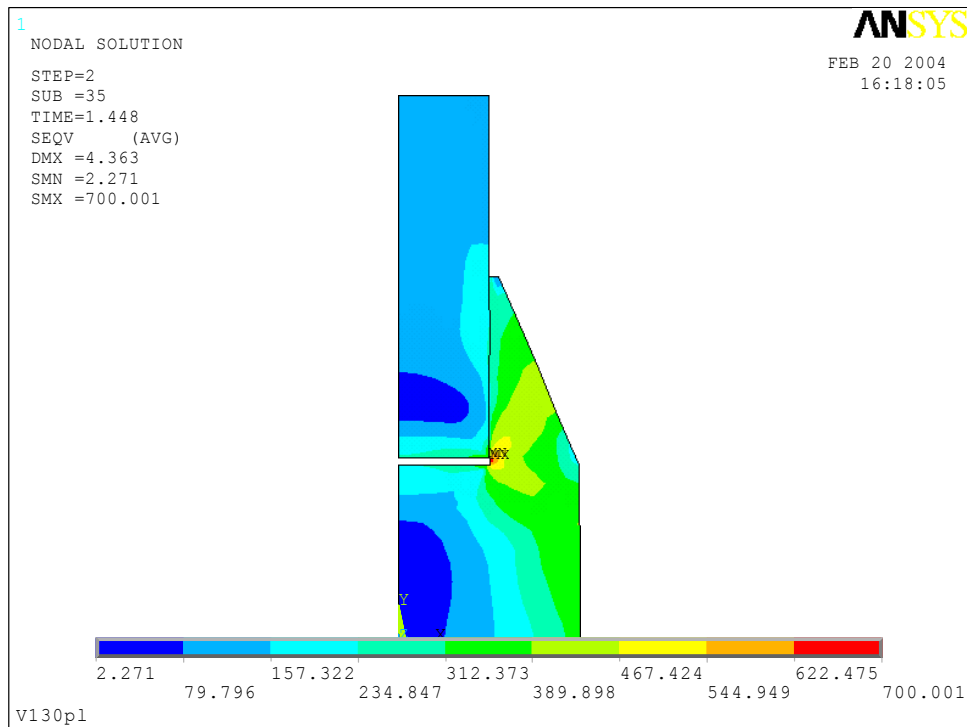


Bild 6.3 V130 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 4,36$ mm

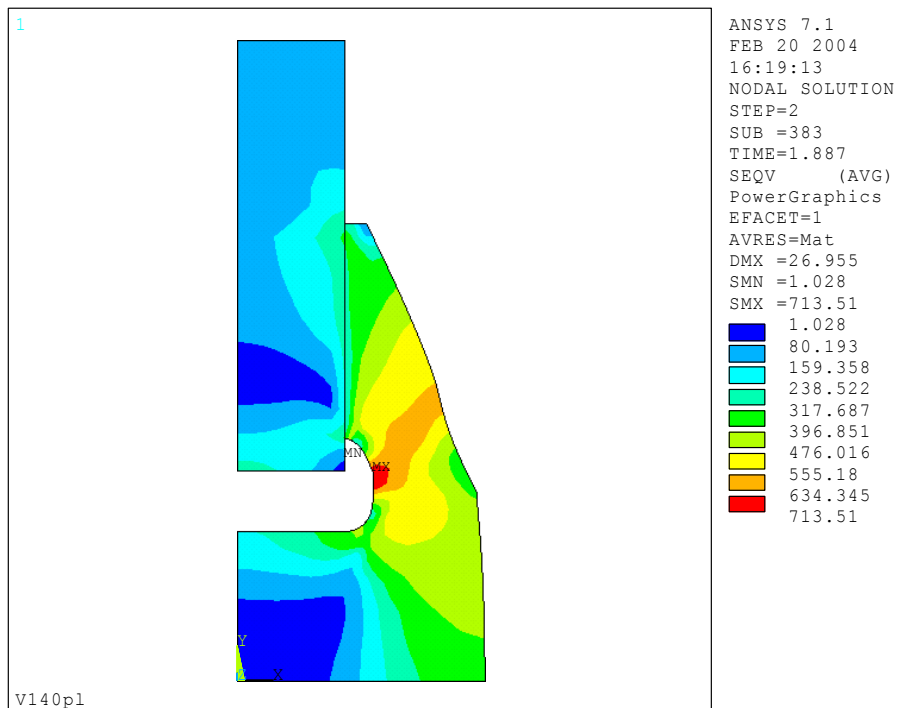


Bild 6.4 V140 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 26,96$ mm

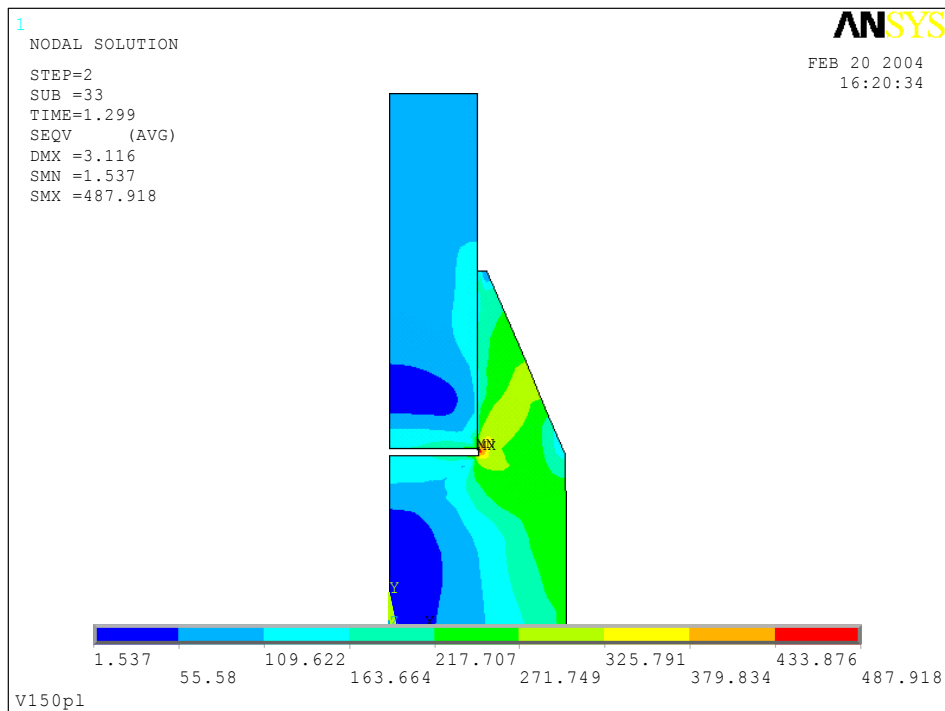


Bild 6.5 V150 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 3,12 \text{ mm}$

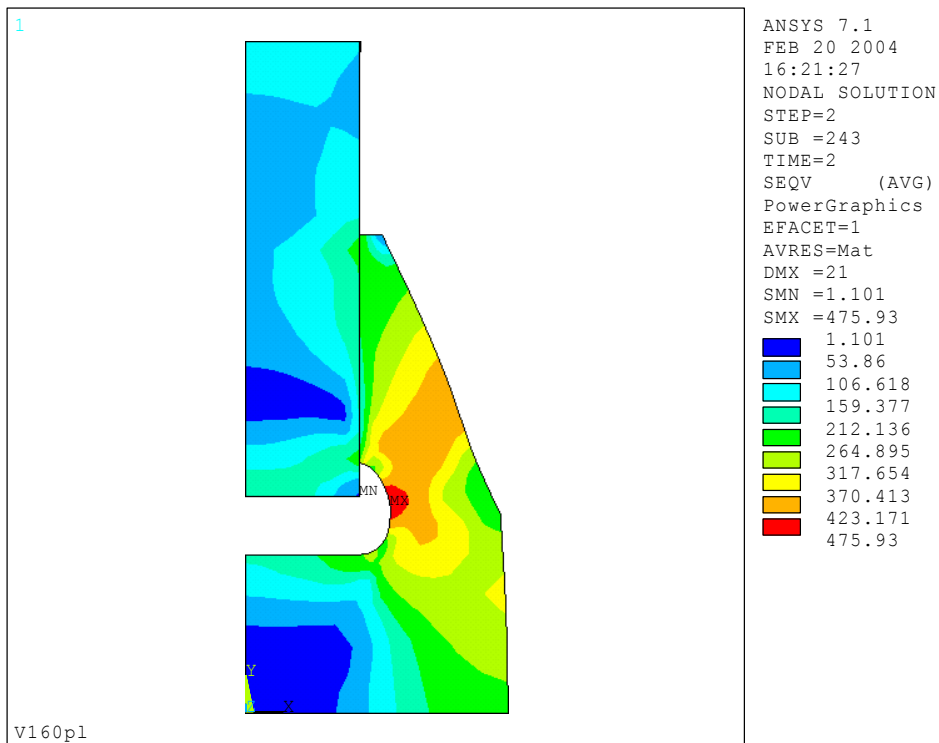


Bild 6.6 V160 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 21 \text{ mm}$

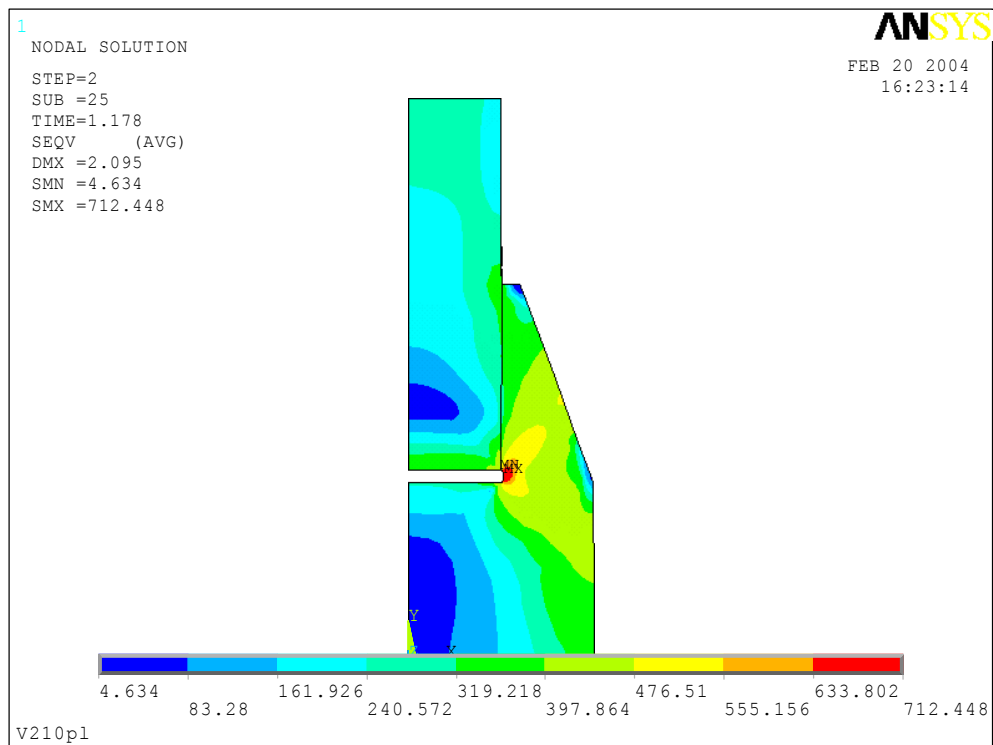


Bild 6.7 V210 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 2,10$ mm

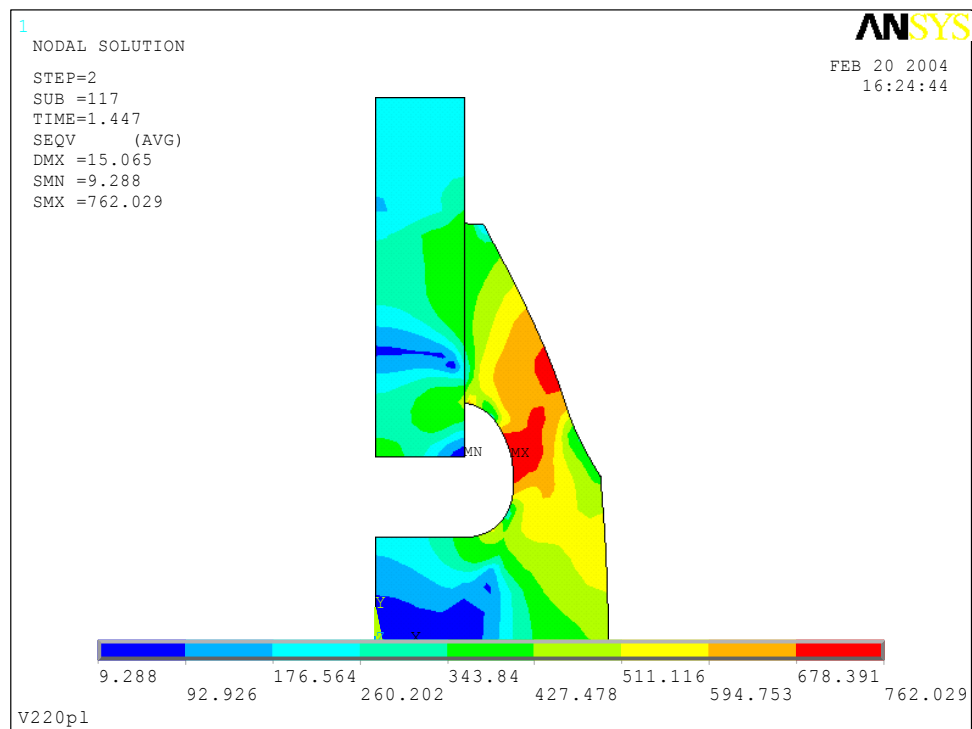


Bild 6.8 V220 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 15,07$ mm

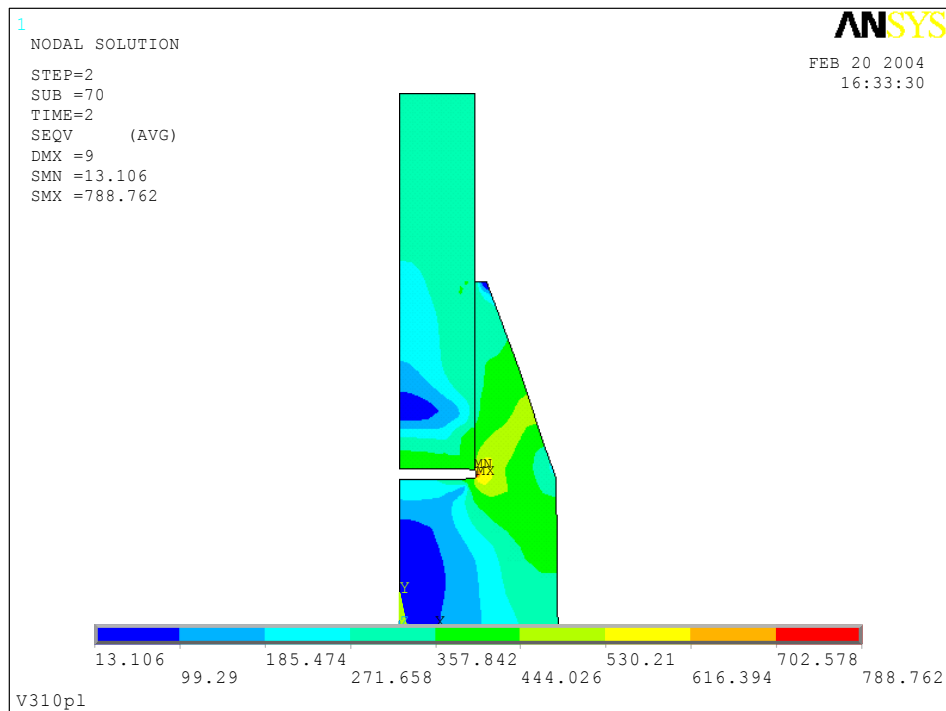


Bild 6.9 V310 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 9$ mm

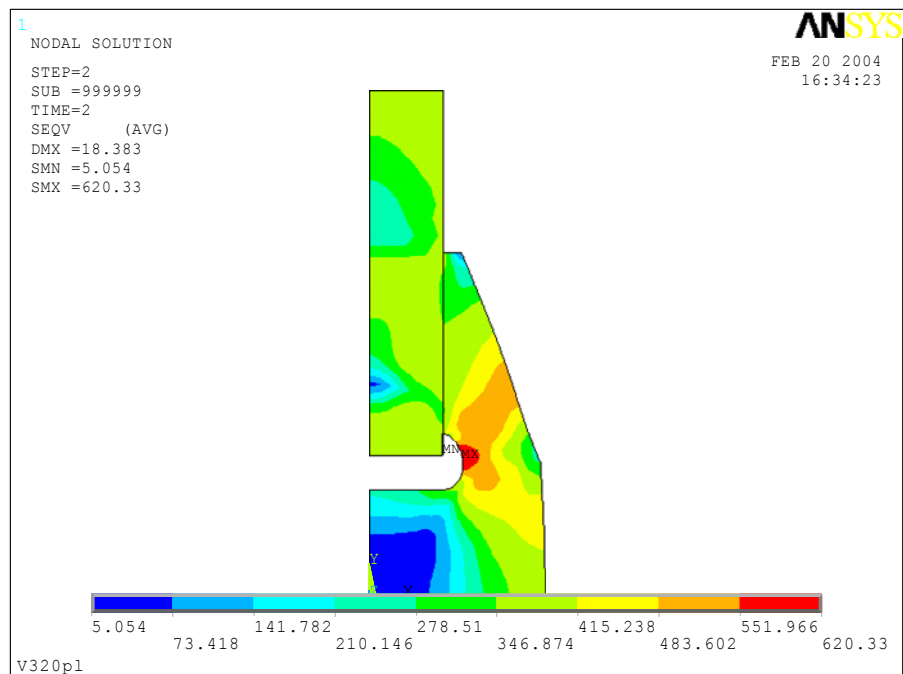


Bild 6.10 V320 Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 18,38$ mm

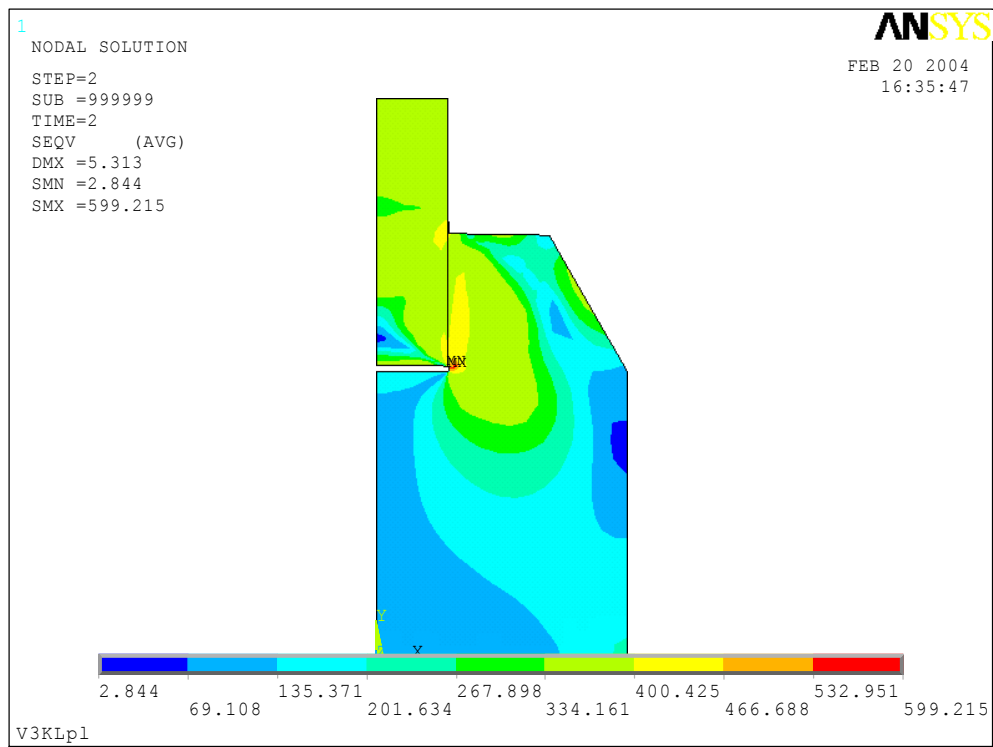


Bild 6.11 VKL Vergleichsspannungsverteilung bei der Verschiebung $v = 5,31$ mm