

**Durchknöpftragfähigkeit
der Befestigungsmittel
von Sandwichelementen
bei direkter Befestigung**

T 3160

T 3160

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7551-5

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

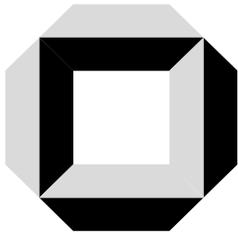
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



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.: 061505

**Durchknöpffragfähigkeit der Befestigungsmittel von
Sandwichelementen bei direkter Befestigung**

Auftraggeber: DIBt
Kolonnenstraße 30L
10829 Berlin

Grundlage: Vertrag vom 02.08.2006

Dieser Bericht umfasst 68 Seiten und 4 Anlagen (69 Seiten).

Ausgabedatum: 19.12.2007

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkung	3
2	Gegenstand und Umfang der Versuche	3
2.1	Sandwichelemente	3
2.2	Schrauben	5
2.3	Versuchstypen	5
2.4	Zusammenfassung	8
3	Versuchsergebnisse	9
3.1	Versuche mit PUR-Wandelementen	9
3.2	Versuche an PUR-Wandelementen mit variablem Randabstand	25
3.3	Versuche an PUR-Dachelementen	35
3.4	Versuche an Mineralwolle-Wandelementen	39
3.5	Werkstoffkennwerte und Abmessungen	42
3.6	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	46
4	Auswertung	49
4.1	Versuche mit Bügelproben	49
4.2	Einfluss des Scheibendurchmessers	50
4.3	Vergleich der Prüfverfahren	53
4.4	Druckfestigkeit des PUR-Schaumkerns	55
4.5	Wiederholte Belastung	59
4.6	Dachelemente	62
4.7	Randabstand der Befestigung	63
5	Zusammenfassung und Empfehlung	65
6	Schrifttum	67
Anlage 1:	Kraft-Maschinenweg-Diagramme der Versuche mit PUR-Sandwichwandelementen (39 Seiten)	
Anlage 2:	Kraft-Maschinenweg-Diagramme der Versuche mit PUR-Sandwichdachelementen (6 Seiten)	
Anlage 3:	Kraft-Maschinenweg-Diagramme der Versuche mit Mineralwolle-Sandwichwandelementen (4 Seiten)	
Anlage 4:	Auswertungs-Diagramme (20 Seiten)	

1 Vorbemerkung

Die Ermittlung der Durchknöpffragfähigkeit von Verbindungselementen bei direkter Befestigung zur Aufnahme in die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-407 [1] erfolgt analog zur Vorgehensweise zur Aufnahme in die Zulassung Z-14.1-4 [2] durch Versuche an Bügelproben nach [5]. Während bei einer Bemessung nach [2] jedoch in Abhängigkeit vom Abstand des Verbindungselementes zu den die zu befestigenden Bauteile aussteifenden Stegen eine Abminderung der Zugtragfähigkeit erfolgt, erfolgt diese bei einer Bemessung nach [1] nicht, obgleich in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass aussteifende Stege (z.B. bei quasiebenen Wandelementen) überhaupt nicht vorhanden sind. Dementsprechend zeigen die Ergebnisse aus Durchknöpffversuchen an ganzen Sandwichelementen geringere Durchknöpffragfähigkeiten als Versuche an Bügelproben nach [2], siehe [9]. Bisher wurde davon ausgegangen, dass die fehlenden Stege durch die stützende Wirkung des Schaumkerns kompensiert werden. Eine einfache Übertragung der Abminderungsfaktoren nach [2] ist jedoch nicht möglich, da sich für ebene Elemente ein Abminderungsfaktor von „0“ ergeben würde, d.h. es ist rechnerisch keine Durchknöpffragfähigkeit vorhanden.

Ziel ist es daher, entsprechende Abminderungsfaktoren für Sandwichelemente zu ermitteln, um eine sichere Bemessung mit den bisherigen, an Bügelproben ermittelten Tragfähigkeitswerten zu ermöglichen, ohne dass für diese Verbindungselemente erneute Versuche erforderlich sind. Die Abminderungsfaktoren sollen insbesondere unter Vernachlässigung des Einflusses des Kernwerkstoffes ermittelt werden, um diese Werte sowohl für Sandwichelemente mit Polyurethan- oder Polystyrolschaumkern als auch mit Mineralwollekern anwenden zu können. Gleiches gilt für den Einfluss der Elementdicke. Hierbei soll auch der Einfluss des Abstandes zu unversteiften Rändern, wie sie z.B. am Querrand oder am Längsrand geteilter Elemente auftreten können, untersucht werden.

2 Gegenstand und Umfang der Versuche

2.1 Sandwichelemente

Die Untersuchungen wurden vorwiegend an Wandelementen mit PUR-Schaumkern der Nennstärke (durchgehende Schaumkerndicke) $d = 80\text{mm}$ durchgeführt. Die Deckschichten bestanden aus Stahl. Die Nennstärke des Deckblechs der Außenseite (Produktionsunterseite, Positivlage) betrug $0,63\text{mm}$, die Nennstärke des Deckblechs der Innenseite (Produktionsoberseite, Negativlage) betrug $0,50\text{mm}$. Die Geometrie der Deckschichtlinierung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

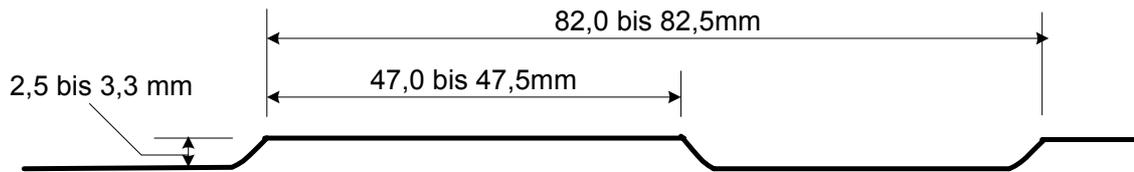


Abbildung 2.1: Geometrie der Linierung der Wandelemente mit PUR-Schaumkern

In den Ergebnistabellen des Abschnitts 3 sind die an den jeweiligen Probekörpern gemessenen Elementdicken nach Abbildung 2.2 mit aufgenommen worden. Ebenfalls mit aufgenommen wurden die in den Zugversuchen an Proben aus den Deckschichten ermittelten Kernblechdicken $t_{k,oben}$ (Außenseite) und $t_{k,unten}$ (Innenseite).

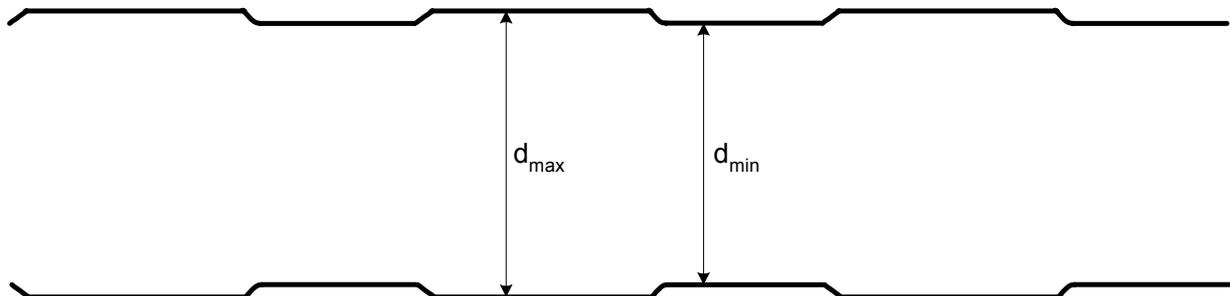


Abbildung 2.2: Definition der Elementdicken der Wandelemente

Ergänzende Versuche wurden an Dachelementen mit PUR-Schaumkern sowie Wandelementen mit Mineralwollekern durchgeführt. Die durchgehende Schaumkerndicke der Dachelemente betrug $d = 60\text{mm}$. Die Deckschichten bestanden aus Stahl. Die Nenndicke des Deckblechs der Außenseite (Produktionsunterseite, Positivlage) betrug $0,75\text{mm}$, die Nenndicke des Deckblechs der Innenseite (Produktionsoberseite, Negativlage) betrug $0,55\text{mm}$. Die Geometrie der Trapezprofilierung ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

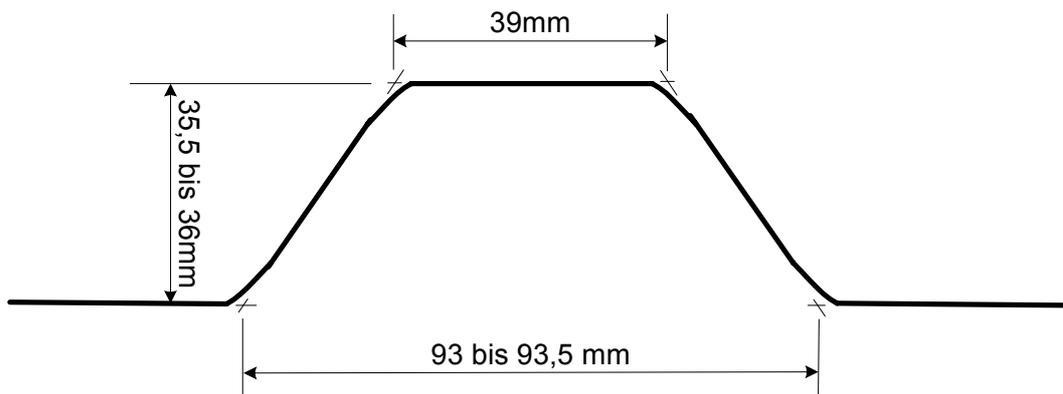


Abbildung 2.3: Geometrie der Trapezprofilierung der Dachelemente mit PUR-Schaumkern

In den Ergebnistabellen des Abschnitts 3 sind die an den jeweiligen Probekörpern gemessenen Elementdicken nach Abbildung 2.4 mit aufgenommen worden. Ebenfalls mit aufgenommen wurden wiederum die in den Zugversuchen an Proben aus den Deckschichten ermittelten Kernblechdicken $t_{k,oben}$ (Außenseite) und $t_{k,unten}$ (Innenseite).

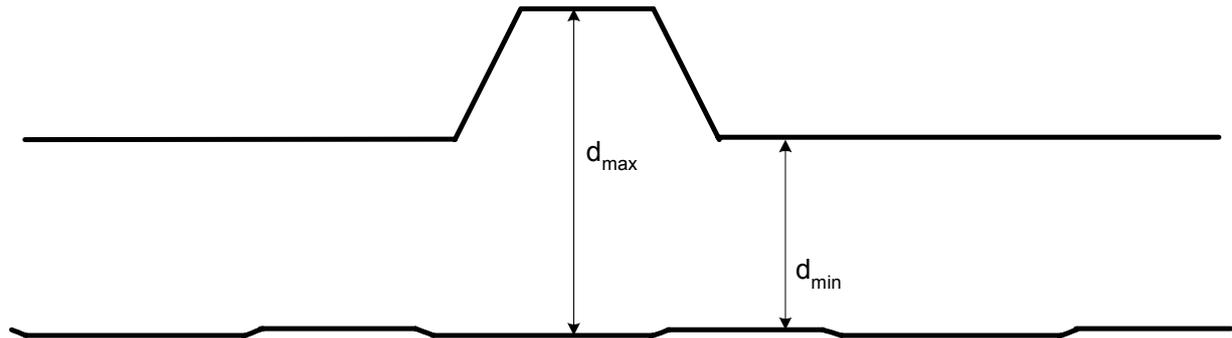


Abbildung 2.4: Definition der Elementdicken der Dachelemente

Die Deckschichten bestanden aus Stahl. Die Nenndicke des Deckblechs der Außenseite (Produktionsunterseite, Positivlage) und der Innenseite (Produktionsoberseite, Negativlage) betrug 0,50mm. Die Geometrie der Deckschichtlinierung ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

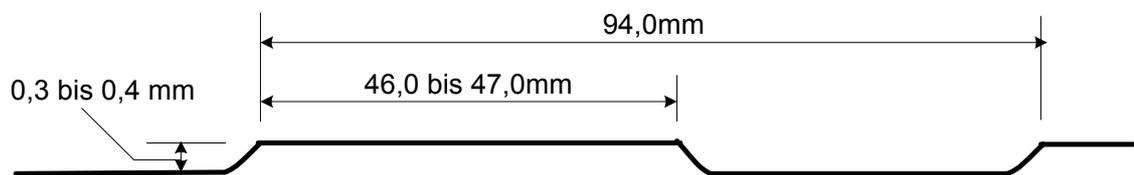


Abbildung 2.5: Geometrie der Linierung der Wandelemente mit Mineralwollekern

Die Angaben in den Ergebnistabellen des Abschnitts 3 entsprechen denen für Wandelemente mit PUR-Schaumkern.

2.2 Schrauben

Für die Untersuchungen wurden durchgehend Bohrschrauben JT3-D-6H-5,5xL verwendet. Die Schrauben besitzen ein Stützgewinde sowie einen 6-Kant-Kopf (Schlüsselweite 8mm) mit Bund (Durchmesser 10,5mm). Der Scheibendurchmesser \varnothing_s wurde zwischen 11mm und 29mm variiert. Die Scheiben bestanden aus nichtrostendem Stahl mit anvulkanisierter EPDM-Dichtung.

2.3 Versuchstypen

In den Versuchen vom Typ Einfeldträger wurden die Elemente auf zwei Auflager frei drehbar aufgelagert. Die Stützweite betrug 200mm (Ausnahme Versuchsserie A mit Scheibendurchmesser 19mm, 22mm und 29mm: 160mm). In die Elemente wurde mittig eine Schraube mit Dichtscheibe eingeschraubt. Der Schraubenkopf kam dabei infolge der Geometrie der Elemente auf einer „Hochsicke“ der Linierung zu liegen. Die Belastung erfolgte weggesteuert (Belastungsgeschwindigkeit 5mm/min), wobei die Lasteinleitung in Feldmitte als Zugkraft in den Schraubenschaft erfolgte. Die Wegmessung erfolgte ebenfalls über den Schraubenschaft (Maschinenweg).

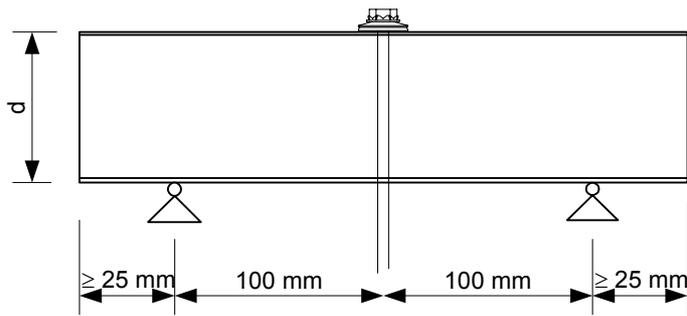


Abbildung 2.6: Versuchsaufbau Einfeldträger

Die Länge der Probekörper Linierungsrichtung betrug 250mm, rechtwinklig dazu 330mm. Die Versuche wurden vorwiegend so durchgeführt, dass die Linierungsrichtung der Spannrichtung entsprach. In den Versuchen mit Scheibendurchmesser 16mm wurde die Spannrichtung variiert: In den Versuchen mit Orientierung 1 spannten die Elemente quer zur Linierungsrichtung (geringe Biegesteifigkeit) in den Versuchen mit Orientierung 2 spannten die Elemente in Linierungsrichtung (größere Biegesteifigkeit, Anwendungsfall).

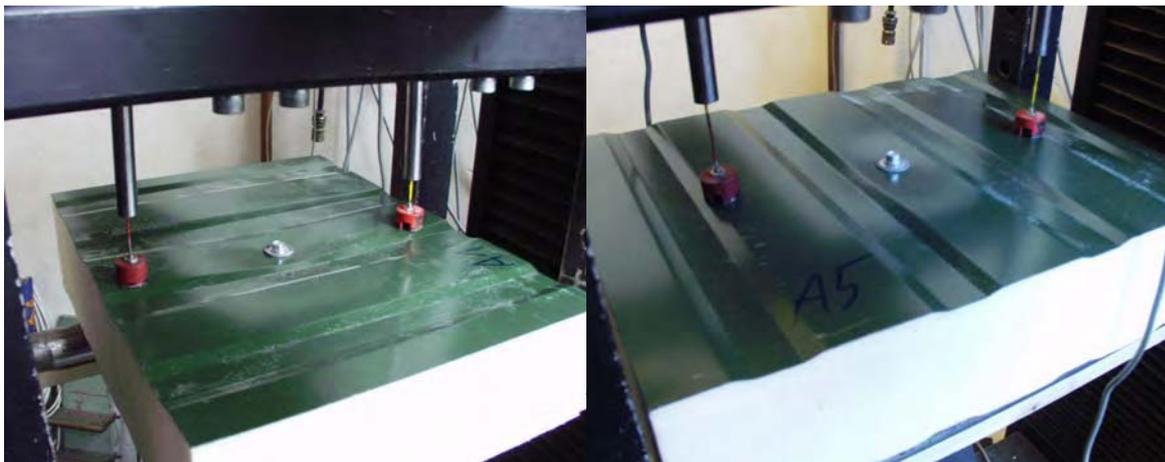


Abbildung 2.7: Versuchsaufbau mit Orientierung 1 (links) und 2 (rechts)

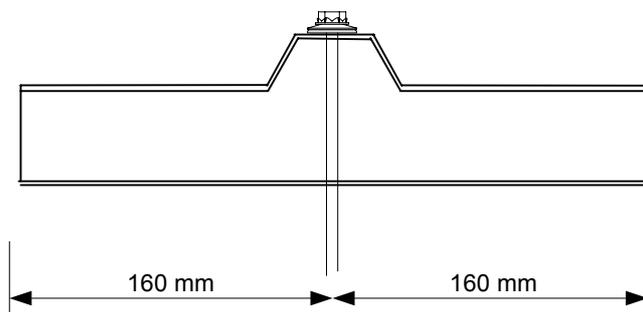


Abbildung 2.8: Querschnitt Versuchsaufbau Einfeldträger bei Dachelementen

In den Versuchen zur Untersuchung des Einflusses des Randabstandes wurden Proben aus Sandwichelementen als Kragträger verwendet. In die Proben wurde im Abstand e_1 vom Rand eine Schraube mit Dichtscheibe eingeschraubt. Der Schraubenkopf kam dabei infolge der Geometrie der Elemente auf einer „Hochsicke“ der Linierung zu liegen. Das Element wurde als

Einfeldträger mit Kragarm l_k (Abbildung 2.9) weggesteuert belastet (Belastungsgeschwindigkeit 5mm/min), wobei die Lasteinleitung als Zugkraft in den Schraubenschaft erfolgte. Alle Versuche wurden mit Orientierung 2 durchgeführt. Die Probekörper hatten die gleiche Breite wie bei den Versuchen vom Typ Einfeldträger. Lediglich die Länge wurde aufgrund des Randabstandes e_1 und der Kraglänge l_k sowie der für die Einspannung erforderlichen Mindestlänge zum Teil vergrößert.

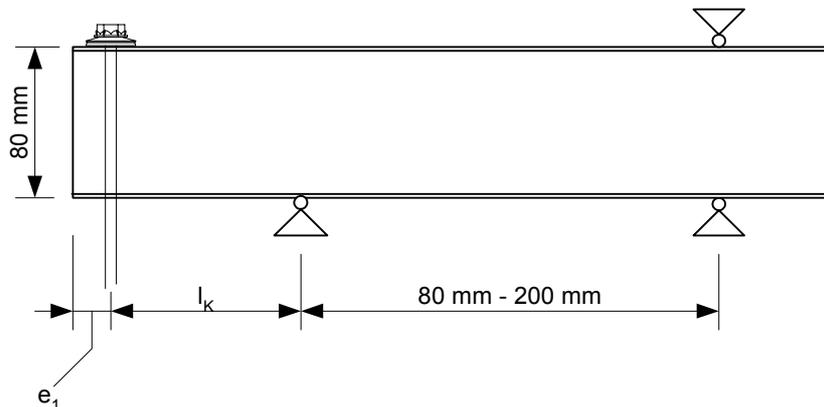


Abbildung 2.9: Versuchsaufbau Kragträger

Bei allen Serien mit Ausnahme der Serie A, Scheibendurchmesser 11mm, war eine seitliche Auflagerung des Kragarms auf Blechstreifen erforderlich, da es ansonsten zu einem Schubbruch der Kernschicht gekommen wäre.



Abbildung 2.10: Versuchsaufbau

Um ein Abheben der Deckbleche an den seitlichen Rändern zu verhindern, wurden diese mit Holzklötzen verspannt (Abbildung 2.10). Der mittlere Holzklötz dient zur Aufnahme der abhebenden Belastung am hinteren Elementrand.

An außenseitigen Deckblechabschnitten der Dachelemente wurden Versuche nach DIN 18807-7, Bild 9 durchgeführt. Die Versuche wurden ohne Schaumkern durchgeführt. In den Obergurt wurde mittig eine Schraube mit Unterlegscheibe ohne Kalotte eingeschraubt. Das Element wurde weggesteuert belastet (Belastungsgeschwindigkeit 5mm/min), wobei die Lasteinleitung in Feldmitte als Zugkraft in den Schraubenschaft erfolgte.

Ergänzend wurden Versuche an Bügelproben nach Klee/Seeger [5] durchgeführt, wobei die Bleche jeweils aus den in den Versuchen mit Sandwichelementen oberliegenden Deckschichten gefertigt wurden.

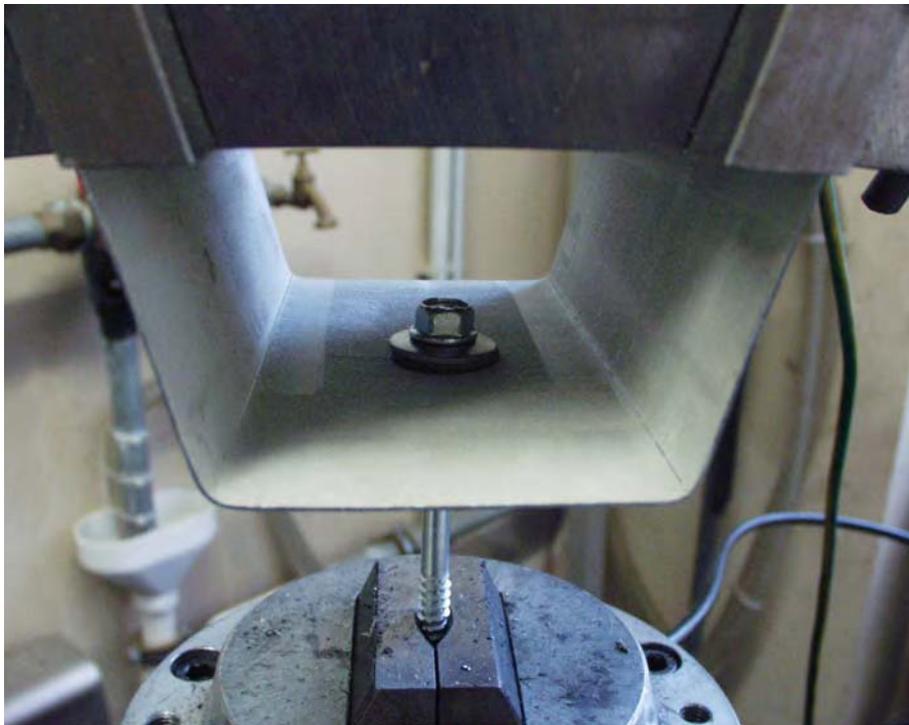


Abbildung 2.11: Versuchsaufbau

Die Belastungsgeschwindigkeit betrug auch hier 5mm/min.

2.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschnitt werden die Versuche und die Versuchsergebnisse dokumentiert. Dabei erfolgt die Reihenfolge der Darstellung entsprechend der Bezeichnung der Serie. Eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuchsserien kann Tabelle 2.1 entnommen werden.

Serie	Elementtyp	\varnothing_s	Aufbau	Bemerkung
		[mm]		
A	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Einfeldträger	-
B	PUR-Wand 80mm	16	Einfeldträger	Bohrung untere Deckschicht
P	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Einfeldträger	wiederholte Belastung
D	PUR-Wand 80mm	16	Einfeldträger	Bohrung im Schaumkern
E	PUR-Wand 80mm	16	Einfeldträger	Bohrung im Schaumkern
F	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Bügelproben	Blech aus PUR-Wand 80mm
G	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Kragträger	Randabstand $e_1 = 20\text{mm}$
H	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Kragträger	Randabstand $e_1 = 30\text{mm}$
I	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Kragträger	Randabstand $e_1 = 50\text{mm}$
J	PUR-Wand 80mm	11 bis 29	Kragträger	Randabstand $e_1 = 100\text{mm}$
K	PUR-Dach 60mm	14 / 19	Einfeldträger	-
L	PUR-Dach 60mm	14 / 19	DIN 18807-7, Bild 9	ohne Schaumkern
M	PUR-Dach 60mm	14 / 19	Bügelproben	Blech aus PUR-Dach 60mm
N	MiWo-Wand 60mm	14 / 19	Einfeldträger	-
O	MiWo-Wand 60mm	14 / 19	Bügelproben	Blech aus MiWo-Wand 60mm

Tabelle 2.1: Zusammenstellung der Versuchsserien

In den Ergebnistabellen des folgenden Abschnitts sind die wesentlichen Abmessungen der Probekörper sowie die in den Versuchen ermittelten Maximallasten F_{\max} ausgewiesen. Für jede Versuchsserie wurde der Mittelwert F_{mean} sowie die Standardabweichung ermittelt, wobei bei Serien mit unterschiedlicher Orientierung der Probekörper zusammengefasst wurden. Ergänzend wurde der 5%-Fraktilwert $F_{5\%}$ und der 95%-Fraktilwert $F_{95\%}$ mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75% ermittelt.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Versuche mit PUR-Wandelementen

3.1.1 Serie A

In den Versuchen der Serie A wurde ein PUR-Wandelement der Nenndicke 80mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. In den Versuchen wurde die Spannrichtung variiert. Der Scheibendurchmesser wurde variiert. Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch die obenliegende Deckschicht. Die Risse in der Deckschicht gingen dabei sternförmig in drei Richtungen. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es zu einem Durchknöpfen durch die Scheibe.



Abbildung 3.1: Scheibe \varnothing_s 29mm nach dem Versagen durch Durchknöpfen

Ausgehend von den rechtwinklig zur Richtung der Linierung liegenden Schnittkanten der Elemente kam es z.T. zu einem Ablösen der oberliegenden Deckschicht (Abbildung 3.2), die sich zeltartig auffaltete.



Abbildung 3.2: Abreißen der Deckschichten

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A111	2	11	0,59	0,47	74,7	80,6	3,45	
A112	2				74,7	80,5	3,45	
A113	2				74,6	80,5	3,35	
A114	2				74,3	80,4	2,99	
A115	2				74,7	80,4	3,37	
					F_{mean}	[kN]	3,34	
					s		0,21	
					k	-	2,46	
					$F_{5\%}$	[kN]	2,82	
					$F_{95\%}$		3,86	

Tabelle 3.1: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 11mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A141	2	14	0,59	0,47	73,4	80,3	3,68	
A142	2				74,6	80,4	3,63	
A143	2				74,5	80,6	3,59	
A144	2				74,8	80,4	3,55	
A145	2				73,3	80,4	4,00	
					F_{mean}	[kN]	3,69	
					s		0,18	
					k	-	2,46	
					$F_{5\%}$	[kN]	3,25	
					$F_{95\%}$		4,13	

Tabelle 3.2: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 14mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A1	1	16	0,59	0,47	74,9	80,7	3,59	
A2	1				75,1	80,4	3,67	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
A3	2				75,2	80,5	4,23	
A4	2				74,3	80,3	3,79	
A5	2				75,2	80,3	4,28	
A6	2				74,4	80,4	3,75	
A7	1				75,0	80,6	3,63	
A8	1				74,1	80,9	3,60	
A9	1				74,6	80,1	3,53	
A10	2				75,2	81,0	4,03	
A11	2				74,9	80,4	3,70	
					F_{mean}	[kN]	3,80	
					s		0,26	
					k	-	2,07	
					$F_{5\%}$	[kN]	3,26	
					$F_{95\%}$		4,34	

Tabelle 3.3: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A191	2	19	0,59	0,47	74,5	80,7	5,14	
A192	2				74,6	80,6	4,16	Bruch Schaumkern
A193	2				74,5	80,3	4,51	Bruch Schaumkern
A194	2				75,1	80,4	4,70	
A195	2				74,9	80,4	4,84	
A196	2				75,2	80,5	5,40	
A197	2				74,9	80,8	5,27	
					F_{mean}	[kN]	4,86	
					s		0,44	
					k	-	2,25	
					$F_{5\%}$	[kN]	3,87	
					$F_{95\%}$		5,85	

Tabelle 3.4: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A221	2	22	0,59	0,47	75,2	80,6	6,17	
A222	2				74,7	80,6	6,17	Bruch Schaumkern
A223	2				75,1	80,8	6,17	Rutschen in der Lasteinleitung Bruch Schaumkern
							6,27	
A224	2				75,1	80,6	7,85	Bruch Schaumkern
A225	2				75,2	80,6	5,81	
A226	2				75,1	80,6	6,94	
A227	2				75,2	80,5	6,26	
A228	2				75,3	80,5	6,70	
A229	2	75,2	80,5	5,92	Rutschen in der Lasteinleitung			
				7,47				
					F_{mean}	[kN]	6,66	
					s		0,66	
					k	-	2,14	
					$F_{5\%}$	[kN]	5,24	
					$F_{95\%}$		8,08	

Tabelle 3.5: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
A291	2	29	0,59	0,47	75,2	80,2	5,96	Rutschen in der Lasteinleitung
A292	2				74,6	80,5	5,62	
							6,40	
A293	2				75,2	80,5	6,44	
A294	2				75,3	80,6	5,94	
A295	2				75,2	80,6	6,20	
					F_{mean}	[kN]	6,19	
					s		0,24	
					k	-	2,46	
					$F_{5\%}$	[kN]	5,61	
					$F_{95\%}$		6,77	

Tabelle 3.6: Ergebnisse Versuchsserie A, \varnothing_s 29mm

3.1.2 Serie B

In den Versuchen der Serie B wurde ein PUR-Wandelement der Nenndicke 80mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. In den Versuchen wurde die Spannrichtung variiert. Es wurden nur Dichtscheiben mit \varnothing_s 16mm verwendet. In das untere Deckblech wurde ein Loch mit Durchmesser 10mm gebohrt, wodurch ein Mittragen dieses auf Herausziehen des Gewindes aus dem Deckblech belasteten Bereichs verhindert werden sollte.

Das Verhalten der Elemente entsprach dem in Serie A beobachteten Verhalten. Die weit geringeren Schwankungen der gemessenen Kraft sind darauf zurückzuführen, dass im unteren Deckblech keine Verbindung zum Schraubengewinde bestand, so dass es nicht zu einem Herausziehen des Schraubengewindes aus dem Blech kam. Aus diesem Grunde wurden in den nachfolgenden Versuchen zum Randabstand vorwiegend Schrauben verwendet, deren Gewinde nicht im Bereich des unteren Deckblechs lag.



Abbildung 3.3: Versagen durch Durchknöpfen

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
B1	1	16	0,59	0,47	74,9	80,1	3,44	
B2	1				74,7	80,5	3,59	
B3	2				74,4	80,2	3,44	
B4	2				74,4	80,3	3,75	
B5	2				75,1	80,3	3,96	
B6	1				74,7	80,6	3,38	
B7	1				74,6	80,5	3,28	
B8	1				74,6	80,7	3,59	
B9	2				74,7	80,8	3,75	
B10	2				74,6	80,6	3,41	
B11	1				75,0	80,5	3,66	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
B12	1				74,8	80,5	3,75	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
B13	1				75,1	80,5	3,91	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
					F_{mean}	[kN]	3,61	
					s	-	0,21	
					k	-	2,03	
					$F_{5\%}$	[kN]	3,18	
					$F_{95\%}$	[kN]	4,04	

Tabelle 3.7: Ergebnisse Versuchsserie B

3.1.3 Serie C

In den Versuchen der Serie C wurde ein PUR-Wandelement der Nenndicke 80mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. Die Versuche wurden mit einer wiederholten Belastung von 5000 Lastwechseln mit einer Frequenz von 2,5 Hz bis 3,0 Hz durchgeführt.

Die Oberlast wurde entsprechend den in den Versuchen der Serie A ermittelten mittleren Durchknöpfungkraft F_{mean} angepasst. Das jeweils angesetzte Verhältnis $f_o = F_o/F_{mean,A}$ ist in den Ergebnistabellen mit aufgenommen worden. Das Verhältnis Unterlast zu Oberlast betrug einheitlich 0,1.

In den Versuchen, in denen die 5000 Lastwechsel nicht erreicht wurden, kam es bei allen Scheibendurchmessern zu einem Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch die obliegende Deckschicht.

Wurden 5000 Lastwechsel erreicht, wurden die Versuche abgebrochen und ein quasi-statischer Durchknöpfversuch durchgeführt. Die ermittelte Resttragfähigkeit wird in den nachfolgenden Tabellen als F_{max} angegeben. Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch die obliegende Deckschicht. Die Risse in der Deckschicht gingen dabei sternförmig in drei Richtungen. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es zu einem Durchknöpfen durch die Scheibe.

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	f_o	F_{max}	Bemerkung
		[mm]					-	[kN]	
C141	2	14	0,59	0,47	74,4	80,6	0,67	3,73	
C142	2				74,4	80,6	0,67	2,98	
C143	2				74,5	80,4	0,67	3,08	
C144	2				74,0	80,4	0,67	3,08	
							F_{mean}	[kN]	3,22
							s		0,34
							k	-	2,68
							$F_{5\%}$	[kN]	2,29
							$F_{95\%}$		4,14

Tabelle 3.8: Ergebnisse Versuchsserie C, \varnothing_s 14mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	f_O	F_{max}	Bemerkung	
										[mm]
C161	2	16	0,59	0,47	74,2	80,2	0,67	4,42		
C162	2				75,0	80,4	0,67	3,31		
C163	2				75,0	80,2	0,67	4,34		
							F_{mean}	[kN]	4,02	
							s	-	0,62	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,07	
							$F_{95\%}$	[kN]	5,97	

Tabelle 3.9: Ergebnisse Versuchsserie C, \varnothing_s 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	f_O	F_{max}	Bemerkung	
										[mm]
C191	2	19	0,59	0,47	74,8	80,1	0,67	4,27		
C192	2				74,6	80,3	0,67	4,13		
C193	2				74,9	80,4	0,67	5,36		
							F_{mean}	[kN]	4,59	
							s	-	0,67	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,47	
							$F_{95\%}$	[kN]	6,71	

Tabelle 3.10: Ergebnisse Versuchsserie C, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	f_O	F_{max}	Bemerkung	
										[mm]
C221	2	22	0,59	0,47	75,1	80,3	0,50	-	Versagen nach 1164 LW	
C222	2				74,9	80,3	0,67	7,34	Abbruch wg. Ende Wegaufnahme, Wiederbelastung	
								6,38		
C223	2				73,3	80,2	0,50	-	Versagen nach 1116 LW	
C224	2				74,4	80,4	0,67	-	Versagen nach 4971 LW	
C225	2				74,4	81,0	0,67	5,46		
C226	2				75,1	80,3	0,67	7,32	Abbruch wg. Ende Wegaufnahme, Wiederbelastung	
								5,51		
C227	2				74,3	80,5	0,67	4,64		
							F_{mean}	[kN]	6,19	
							s		1,36	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,55	
							$F_{95\%}$		9,83	

Tabelle 3.11: Ergebnisse Versuchsserie C, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	f_O	F_{max}	Bemerkung	
										[mm]
C291	2	29	0,59	0,47	74,6	80,4	0,66	-	Versagen nach 2873 LW	
C292	2				74,8	80,1	0,50	5,42		
C293	2				74,7	80,2	0,50	5,84		
							F_{mean}	[kN]	5,63	
							s		0,30	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	-	
							$F_{95\%}$		-	

Tabelle 3.12: Ergebnisse Versuchsserie C, \varnothing_s 29mm

3.1.4 Serie D

In den Versuchen der Serie B wurde ein PUR-Wandelement der Nenndicke 80mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. In den Versuchen wurde die Spannrichtung variiert. Es wurden nur Dichtscheiben mit \varnothing_s 16mm verwendet. In das untere Deckblech wurde ein Loch mit Durchmesser 20mm gebohrt, und der Schaumkern im darunter liegenden Bohrkanal wurde entfernt, um eine Aussage über den mittragenden Bereich des Kerns und auch über die Anforderungen an den Kernwerkstoff machen zu können.

Das Verhalten der Elemente entsprach dem in Serie A beobachteten Verhalten.

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
D1	1	16	0,59	0,47	74,7	80,0	3,39	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
D2	1				74,9	80,2	3,45	
D3	2				74,2	80,2	3,71	
D4	2				74,4	80,4	3,50	
D5	2				74,1	80,1	3,75	
D6	1				74,5	80,4	3,42	
D7	1				74,6	80,5	3,47	
D8	1				74,8	80,4	3,50	
D9	2				74,9	81,0	3,70	
D10	2				74,8	80,4	3,60	
D11	1				75,0	80,6	4,03	
D12	1				74,7	80,8	3,36	
D13	2				75,1	80,5	4,12	
					F_{mean}	[kN]	3,62	
					s		0,24	
					k	-	3,03	
					$F_{5\%}$	[kN]	2,89	
					$F_{95\%}$		4,34	

Tabelle 3.13: Ergebnisse Versuchsserie D

3.1.5 Serie E

In den Versuchen der Serie B wurde ein PUR-Wandelement der Nenndicke 80mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. In den Versuchen wurde die Spannrichtung variiert. Es wurden nur Dichtscheiben mit \varnothing_s 16mm verwendet. In das untere Deckblech wurde ein Loch mit Durchmesser 50mm gebohrt und der Schaumkern im darunter liegenden Bohrkanal wurde entfernt, um eine Aussage über den mittragenden Bereich des Kerns und auch über die Anforderungen an den Kernwerkstoff machen zu können (Abbildung 3.4).



Abbildung 3.4: Entfernter Schaumkern

Das Verhalten der Elemente entsprach dem in Serie A beobachteten Verhalten.

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
E1	1	16	0,59	0,47	74,06	79,97	3,32	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
E2	1				73,80	79,94	3,24	Abbruch wg. Ende Wegaufnehmer
E3	2				74,48	80,00	3,84	
E4	2				75,02	80,45	4,49	
E5	2				75,68	80,23	4,71	
E6	1				74,48	80,36	3,31	
E7	1				74,52	80,38	3,29	
E8	1				74,46	80,39	3,22	
E9	2				74,56	80,65	3,48	
E10	2				74,50	80,34	3,91	
E11	1				74,94	80,41	3,88	
E12	1				74,78	80,44	3,93	
E13	1				74,97	80,51	3,84	
					F_{mean}	[kN]	3,73	
					s		0,48	
					k	-	4,03	
					$F_{5\%}$	[kN]	1,80	
					$F_{95\%}$		5,66	

Tabelle 3.14: Ergebnisse Versuchsserie E

3.1.6 Serie F

An Proben aus den im Versuch oberliegenden Deckschichten der PUR-Wandelemente mit Nenndicke 80mm wurden Durchknöpfversuche mit Bügelproben nach Klee/Seeger [5] durchgeführt. Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch das Blech. Die beiden Risse im Blech gingen vom Bohrloch aus entlang des Knicks der sich einstellenden V-Geometrie der Probe. In den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es zum Durchknöpfen des Schraubenkopfs durch die Scheibe.



Abbildung 3.5: Versagen durch Rissbildung und Durchknöpfen

		F _{max}					
		[kN]					
∅ _S	[mm]	11	14	16	19	22	29
t _{k,oben}		0,59					
Nr.							
F1		3,86	4,23	5,24	6,79	6,66	6,82
F2		4,10	4,15	4,69	5,86	6,33	6,75
F3		3,97	4,78	4,86	6,12	5,96	6,67
F4		4,27	5,13	4,86	5,57	7,09	6,19
F5		3,70	4,25	4,17	5,98	6,32	6,47
F _{mean}	[kN]	3,98	4,51	4,76	6,07	6,47	6,58
s		0,22	0,43	0,39	0,45	0,43	0,26
k	-	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
F _{5%}	[kN]	3,44	3,46	3,81	4,95	5,43	5,95
F _{95%}		4,52	5,56	5,72	7,18	7,52	7,21

Tabelle 3.15: Ergebnisse Versuchsserie F

3.2 Versuche an PUR-Wandelementen mit variablem Randabstand

3.2.1 Serie G

In den Versuchen der Serie G wurde ein Sandwichelement mit PUR-Schaumkern der Nenndicke 80mm als Kragträger verwendet. In die Probe wurde im Abstand $e_1 = 20\text{mm}$ vom Rand eine Schraube mit Unterlegscheibe eingeschraubt und auf Zug belastet.

Das Versagen erfolgte durch Durchknöpfen in Verbindung mit einem vom Bohrloch zum freien Rand durchgehenden Riß. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 11mm kam es zu einem Durchknöpfen ohne Riß in Richtung des freien Randes. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es nicht zur Rissbildung. Das Versagen erfolgte in diesem Fall durch Durchknöpfen durch die Scheibe mit einem Loch in der Deckschicht, von dem keine signifikanten Risse ausgingen.

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
G111	2	11	0,59	0,47	74,6	80,1	80	4,35		
G112	2				74,1	80,2		3,48		
G113	2				74,2	80,5		3,50		
G114	2				65	74,3	80,1	3,52		
G115	2					74,2	80,2	3,47		
G116	2					74,3	80,3	3,36		
							F_{mean}	[kN]	3,61	
							s		0,37	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,76	
							$F_{95\%}$		4,47	

Tabelle 3.16: Ergebnisse Versuchsserie G, \varnothing_s 11mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
G161	2	16	0,59	0,47	74,2	80,2	65	3,70		
G162	2				74,3	80,1		3,77		
G163	2				74,3	80,3		3,37		
G164	2				80	74,6	80,7	3,89		
G165	2					74,7	80,5	3,65		
G166	2					74,5	80,4	3,59		
							F_{mean}	[kN]	3,66	
							s	-	0,18	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,25	
							$F_{95\%}$	[kN]	4,08	

Tabelle 3.17: Ergebnisse Versuchsserie G, \varnothing_s 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
G191	2	19	0,59	0,47	74,2	80,2	65	4,24		
G192	2				74,4	80,7		4,12		
G193	2				74,6	80,7		4,07		
G194	2				80	74,5	80,8	4,22		
G195	2					74,2	80,7	4,10		
G196	2					74,3	80,7	4,19		
							F_{mean}	[kN]	4,16	
							s	-	0,07	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,00	
							$F_{95\%}$	[kN]	4,32	

Tabelle 3.18: Ergebnisse Versuchsserie G, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
G221	2	22	0,59	0,47	74,1	80,5	65	4,53		
G222	2				74,3	80,2		4,66		
G223	2				74,4	80,4		4,78		
G224	2				74,2	80,1	80	4,81		
G225	2				74,1	80,2		5,02	Abbruch wg. Ende Weg- aufnehmer	
G226	2				74,2	80,3		4,87		
							F_{mean}	[kN]	4,78	
							s		0,17	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,38	
							$F_{95\%}$		5,17	

Tabelle 3.19: Ergebnisse Versuchsserie G, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
G291	2	29	0,59	0,47	74,3	80,4	65	4,51		
G292	2				74,1	80,1		4,57		
G293	2				74,3	80,3		4,47		
G294	2				74,3	80,2	80	5,15		
G295	2				74,5	80,4		4,64		
G296	2				74,6	80,2		4,87		
							F_{mean}	[kN]	4,70	
							s		0,26	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,09	
							$F_{95\%}$		5,31	

Tabelle 3.20: Ergebnisse Versuchsserie G, \varnothing_s 29mm

3.2.2 Serie H

In den Versuchen der Serie H wurde ein Sandwichelement mit PUR-Schaumkern der Nenndicke 80mm als Kragträger verwendet. In die Probe wurde im Abstand $e_1 = 30\text{mm}$ vom Rand eine Schraube mit Unterlegscheibe eingeschraubt und auf Zug belastet.

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen in Verbindung mit einem vom Bohrloch zum freien Rand zeigenden Anriß. Vereinzelt erreichte dieser Riß fast den freien Rand, in einem Fall kam es zum Durchreißen. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es nicht zur Rissbildung. Das Versagen erfolgte in diesem Fall durch Durchknöpfen durch die Scheibe mit einem Loch in der Deckschicht, von dem keine signifikanten Risse ausgingen.

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
H111	2	11	0,59	0,47	74,4	80,1	65	3,50		
H112	2				74,1	80,1		3,29		
H113	2				74,4	80,5		3,52		
H114	2				80	75,1	80,7	3,35		
H115	2					74,9	80,5	3,52		
H116	2					74,5	80,7	3,00		
							F_{mean}	[kN]	3,36	
							s		0,20	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,89	
							$F_{95\%}$		3,84	

Tabelle 3.21: Ergebnisse Versuchsserie H, \varnothing_s 11mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
H161	2	16	0,59	0,47	74,2	80,2	65	3,86		
H162	2				74,2	80,2		3,53		
H163	2				74,3	80,3		4,19		
H164	2				74,7	80,5	80	4,10		
H165	2				74,3	80,8		4,05		
H166	2				74,4	80,3		3,70		
							F_{mean}	[kN]	3,91	
							s		0,25	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,31	
							$F_{95\%}$		4,50	

Tabelle 3.22: Ergebnisse Versuchsserie H, \varnothing_s 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
H191	2	19	0,59	0,47	74,2	80,2	65	4,32		
H192	2				74,2	80,2		3,59		
H193	2				74,3	80,3		4,03		
H194	2				74,6	80,7	80	4,28		
H195	2				74,5	80,7		4,46		
H196	2				75,0	80,8		4,62		
							F_{mean}	[kN]	4,22	
							s		0,36	
							k	-	2,34	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,37	
							$F_{95\%}$		5,07	

Tabelle 3.23: Ergebnisse Versuchsserie H, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
H221	2	22	0,59	0,47	74,8	80,8	80	4,61	Rutschen in der Lasteinleitung, Erstbelastung ohne Diagramm	
	2							4,78		
H222	2				74,8	80,5		5,44		
H223	2				74,5	80,6		4,46		
H224	2				74,7	80,7		5,29		
H225	2				74,5	80,5		4,49		
							F_{mean}	[kN]	4,89	
							s		0,45	
							k	-	2,46	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,77	
							$F_{95\%}$		6,01	

Tabelle 3.24: Ergebnisse Versuchsserie H, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
H291	2	29	0,59	0,47	74,2	80,4	80	4,81		
H292	2				74,5	80,7		4,94		
H293	2				74,5	80,6		4,67		
							F_{mean}	[kN]	4,81	
							s		0,14	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,38	
							$F_{95\%}$		5,24	

Tabelle 3.25: Ergebnisse Versuchsserie H, \varnothing_s 29mm

3.2.3 Serie I

In den Versuchen der Serie G wurde ein Sandwichelement mit PUR-Schaumkern der Nenndicke 80mm als Kragträger verwendet. In die Probe wurde im Abstand $e_1 = 50\text{mm}$ vom Rand eine Schraube mit Unterlegscheibe eingeschraubt und auf Zug belastet.

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen in Verbindung mit einem vom Bohrloch zum freien Rand zeigenden Anriß. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es nicht zur Rissbildung. Das Versagen erfolgte in diesem Fall durch Durchknöpfen durch die Scheibe mit einem Loch in der Deckschicht, von dem keine signifikanten Risse ausgingen.

Nr.	Orientierung	\varnothing_S	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
I111	2	11	0,59	0,47	73,6	78,8	80	3,47		
I112	2				73,2	79,0		3,35		
I113	2				73,5	78,5		3,45		
							F_{mean}	[kN]	3,42	
							s		0,06	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,22	
							$F_{95\%}$		3,62	

Tabelle 3.26: Ergebnisse Versuchsserie I, \varnothing_S 11mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_S	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
I161	2	16	0,59	0,47	72,9	78,6	80	4,45	3,93	
I162	2				73,0	78,5		3,93	4,35	
I163	2				72,4	78,3		4,35		
							F_{mean}	[kN]	4,24	
							s		0,28	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,36	
							$F_{95\%}$		5,12	

Tabelle 3.27: Ergebnisse Versuchsserie I, \varnothing_S 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
I191	2	19	0,59	0,47	73,0	78,9	80	4,70		
I192	2				72,7	78,6		4,92		
I193	2				72,6	78,6		4,82		
							F_{mean}	[kN]	4,82	
							s		0,11	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,47	
							$F_{95\%}$		5,16	

Tabelle 3.28: Ergebnisse Versuchsserie I, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
I221	2	22	0,59	0,47	73,1	78,9	80	5,80		
I222	2				73,1	78,6		5,08		
I223	2				72,2	77,4		5,58		
							F_{mean}	[kN]	5,48	
							s		0,37	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,33	
							$F_{95\%}$		6,64	

Tabelle 3.29: Ergebnisse Versuchsserie I, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
I291	2	29	0,59	0,47	72,9	78,4	80	5,37		
I292	2				72,6	78,2		5,38		
I293	2				72,8	78,5		5,51		
							F_{mean}	[kN]	5,42	
							s		0,08	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	5,17	
							$F_{95\%}$		5,67	

Tabelle 3.30: Ergebnisse Versuchsserie I, \varnothing_s 29mm

3.2.4 Serie J

In den Versuchen der Serie G wurde ein Sandwichelement mit PUR-Schaumkern der Nenndicke 80mm als Kragträger verwendet. In die Probe wurde im Abstand $e_1 = 100\text{mm}$ vom Rand eine Schraube mit Unterlegscheibe eingeschraubt und auf Zug belastet.

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen in Verbindung mit einem vom Bohrloch zum freien Rand zeigenden Anriß. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es nicht zur Rissbildung. Das Versagen erfolgte in diesem Fall durch Durchknöpfen durch die Scheibe mit einem Loch in der Deckschicht, von dem keine signifikanten Risse ausgingen.

Nr.	Orientierung	\varnothing_S	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
J111	2	11	0,59	0,47	73,0	78,7	80	3,12		
J112	2				72,6	78,3		3,34		
J113	2				72,9	78,3		3,22		
							F_{mean}	[kN]	3,23	
							s		0,11	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	2,87	
							$F_{95\%}$		3,58	

Tabelle 3.31: Ergebnisse Versuchsserie J, \varnothing_S 11mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_S	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
J161	2	16	0,59	0,47	73,1	78,7	80	4,00		
J162	2				72,9	79,0		3,93		
J163	2				72,9	79,1		3,91		
							F_{mean}	[kN]	3,95	
							s		0,05	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,80	
							$F_{95\%}$		4,10	

Tabelle 3.32: Ergebnisse Versuchsserie J, \varnothing_S 16mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
J191	2	19	0,59	0,47	73,2	78,5	80	4,86		
J192	2				72,9	79,1		4,14		
J193	2				72,9	78,9		4,82		
							F_{mean}	[kN]	4,60	
							s		0,40	
							k	-	3,15	
							$F_{5\%}$	[kN]	3,33	
							$F_{95\%}$		5,88	

Tabelle 3.33: Ergebnisse Versuchsserie J, \varnothing_s 19mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
J221	2	22	0,59	0,47	73,0	78,5	80	5,74		
J222	2				72,4	78,2		5,04		
J223	2				72,3	77,7		5,14		
J224	2				73,1	78,7		5,07		
							F_{mean}	[kN]	5,25	
							s		0,33	
							k	-	2,68	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,36	
							$F_{95\%}$		6,13	

Tabelle 3.34: Ergebnisse Versuchsserie J, \varnothing_s 22mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	l_k	F_{max}	Bemerkung	
								[mm]		[kN]
J291	2	29	0,59	0,47	73,2	78,6	80	5,16		
J292	2				73,0	79,0		5,76		
J293	2				73,1	78,4		5,65		
J294	2				73,0	78,4		5,58		
							F_{mean}	[kN]	5,54	
							s		0,26	
							k	-	2,68	
							$F_{5\%}$	[kN]	4,83	
							$F_{95\%}$		6,24	

Tabelle 3.35: Ergebnisse Versuchsserie J, \varnothing_s 29mm

3.3 Versuche an PUR-Dachelementen

3.3.1 Serie K

In den Versuchen der Serie K wurde ein PUR-Dachelement der Nenndicke 60mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. Es wurden nur Dichtscheiben mit \varnothing_s 14mm und 19mm verwendet. Das Versagen erfolgte durch Beulen der Stege und Durchknöpfen durch den Obergurt (Abbildung 3.6).

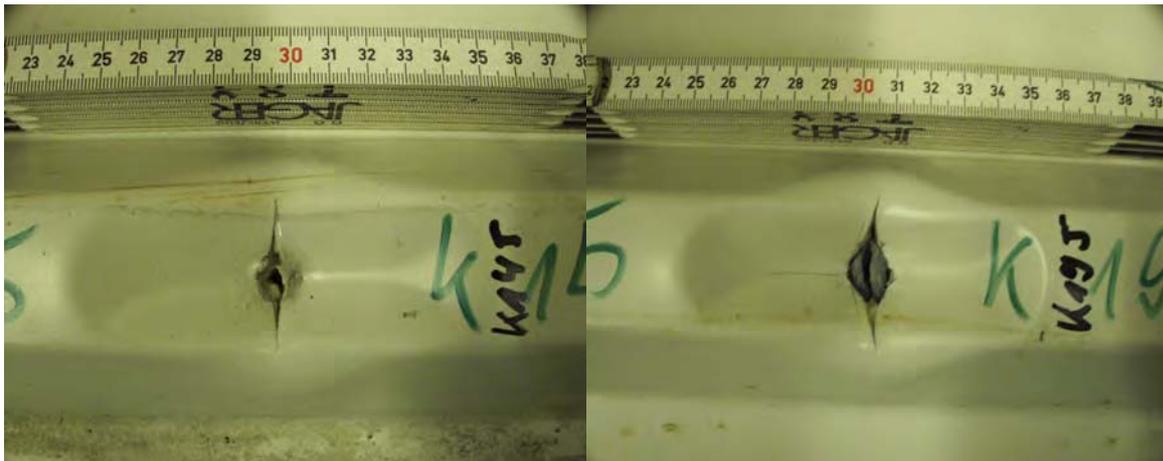


Abbildung 3.6: Versagensbild bei Scheibendurchmesser 14mm (links) und 19mm (rechts)

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
K141	2	14	0,68	0,53	59,4	94,6	4,01	
K142	2				59,5	94,1	3,80	
K143	2				59,6	95,0	3,64	
K144	2				59,6	93,1	3,90	
K145	2				59,7	93,5	3,94	
					F_{mean}	[kN]	3,86	
					s		0,14	
					k		-	2,68
					$F_{5\%}$	[kN]	3,47	
					$F_{95\%}$		4,24	

Tabelle 3.36: Ergebnisse Versuchsserie K, \varnothing_s 14mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
K191	2	19	0,68	0,53	59,9	94,8	4,23	
K192	2				59,5	94,8	4,30	
K193	2				59,1	93,7	4,12	
K194	2				59,1	94,6	4,16	
K195	2				59,2	93,6	4,20	
					F_{mean}	[kN]	4,20	
					s		0,07	
					k	-	2,68	
					$F_{5\%}$	[kN]	4,01	
					$F_{95\%}$		4,39	

Tabelle 3.37: Ergebnisse Versuchsserie K, \varnothing_s 19mm

3.3.2 Serie L

An Deckblechabschnitten ohne Schaumkern wurden Versuche nach DIN 18807-7, Bild 9 durchgeführt Abbildung 3.7.

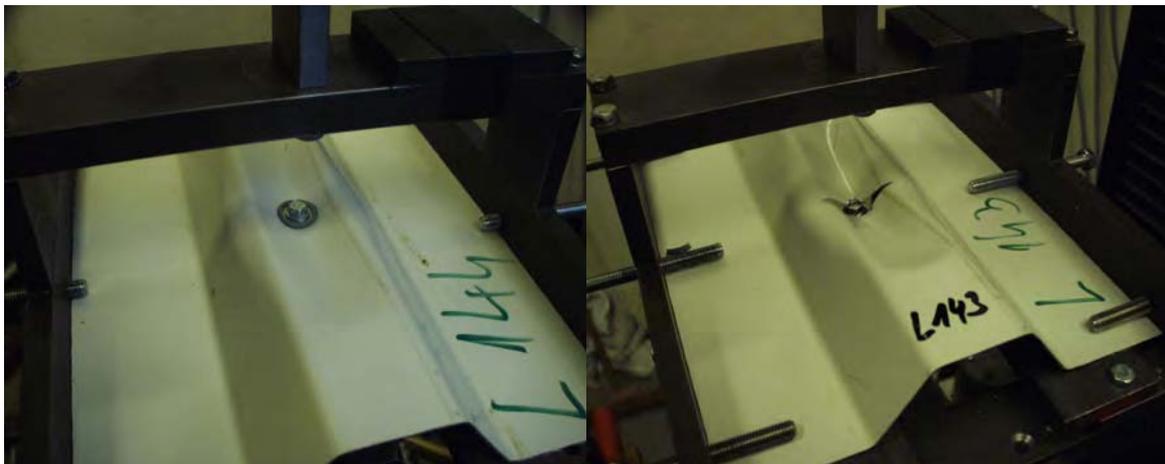


Abbildung 3.7: Versuchsaufbau und Versagensbild

Das Versagen erfolgte durch Beulen der Stege und Durchknöpfen durch den Obergurt (Abbildung 3.8).

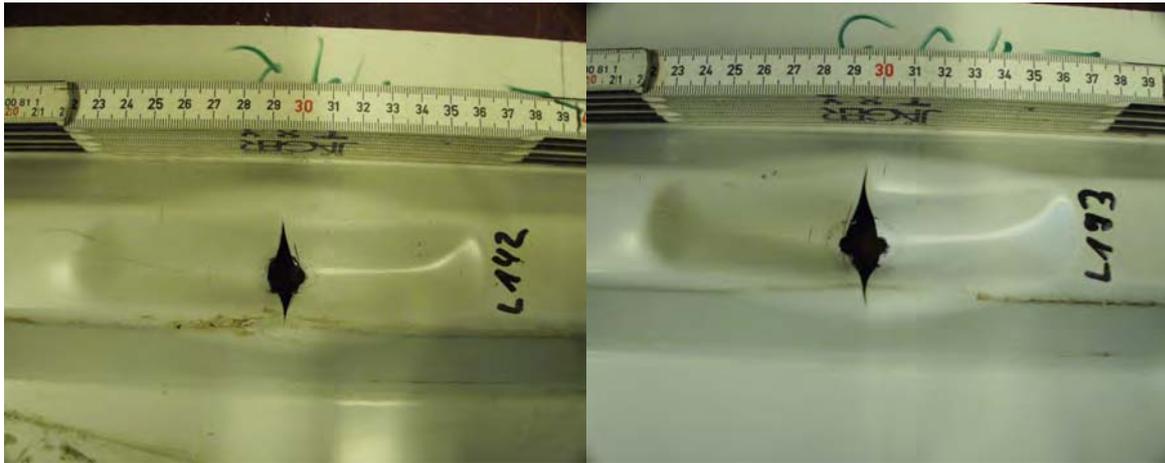


Abbildung 3.8: Versagensbild bei Scheibendurchmesser 14mm (links) und 19mm (rechts)

		F_{max}			F_{max}
		[kN]			[kN]
\varnothing_s	[mm]	14	\varnothing_s	[mm]	19
$t_{k,oben}$		0,68	$t_{k,oben}$		0,68
Nr.			Nr.		
L141		3,18	L191		3,85
L142		3,44	L192		3,86
L143		3,62	L193		3,71
L144		3,22	-		-
L145		3,32	-		-
F_{mean}	[kN]	3,35	F_{mean}	[kN]	3,81
s		0,18	s		0,08
k	-	2,46	k	-	3,15
$F_{5\%}$	[kN]	2,91	$F_{5\%}$	[kN]	3,55
$F_{95\%}$		3,80	$F_{95\%}$		4,07

Tabelle 3.38: Ergebnisse Versuchsserie L

3.3.3 Serie M

An Proben aus den im Versuch oberliegenden Deckschichten der PUR-Dachelemente mit Nenndicke 60mm wurden Durchknöpfversuche mit Bügelproben nach Klee/Seeger [5] durchgeführt.

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch das Blech. Die beiden Risse im Blech gingen vom Bohrloch aus entlang des Knicks der sich einstellenden V-Geometrie der Probe.

		F_{max}			F_{max}
		[kN]			[kN]
\varnothing_s	[mm]	14	\varnothing_s	[mm]	19
$t_{k,oben}$		0,68	$t_{k,oben}$		0,68
Nr.			Nr.		
M141		7,12	M191		7,58
M142		6,55	M192		7,46
M143		6,49	M193		8,17
M144		5,99	M194		8,96
M145		4,84	M195		7,61
F_{mean}	[kN]	6,20	F_{mean}	[kN]	7,96
s		0,86	s		0,62
k	-	2,46	k	-	2,46
$F_{5\%}$	[kN]	4,09	$F_{5\%}$	[kN]	6,42
$F_{95\%}$		8,31	$F_{95\%}$		9,49

Tabelle 3.39: Ergebnisse Versuchsserie M

3.4 Versuche an Mineralwolle-Wandelementen

3.4.1 Serie N

In den Versuchen der Serie N wurde ein Wandelement mit Mineralwollekern der Nenndicke 60mm als Einfeldträger mit Schraube in Feldmitte geprüft. Es wurden nur Dichtscheiben mit \varnothing_s 14mm und 19mm verwendet. Das Versagen erfolgte durch Beulen der Stege und Durchknöpfen durch den Obergurt (Abbildung 3.6).

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen durch die oberliegende Deckschicht. Die Risse in der Deckschicht gingen dabei sternförmig in drei Richtungen. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 29mm kam es zu einem Durchknöpfen durch die Scheibe.



Abbildung 3.9: Versagensbild bei Scheibendurchmesser 14mm (links) und 19mm (rechts)

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
		[mm]						
N141	2	14	0,48	0,47	59,2	59,4	2,88	
N142	2				59,2	59,5	2,78	
N143	2				59,3	59,7	2,97	
					F_{mean}	[kN]	2,88	
					s		0,99	
					k	-	3,15	
					$F_{5\%}$	[kN]	2,58	
					$F_{95\%}$		3,17	

Tabelle 3.40: Ergebnisse Versuchsserie K, \varnothing_s 14mm

Nr.	Orientierung	\varnothing_s	$t_{k,oben}$	$t_{k,unten}$	d_{min}	d_{max}	F_{max}	Bemerkung
							[mm]	
N191	2	19	0,48	0,47	59,0	59,5	3,28	
N192	2				59,3	59,6	2,83	
N193	2				59,3	59,6	3,55	
					F_{mean}	[kN]	3,22	
					s		0,36	
					k	-	3,15	
					$F_{5\%}$	[kN]	2,07	
					$F_{95\%}$		4,37	

Tabelle 3.41: Ergebnisse Versuchsserie N, \varnothing_s 19mm

3.4.2 Serie O

An Proben aus den im Versuch oberliegenden Deckschichten der Mineralwolle-Wandelemente mit Nenndicke 60mm wurden Durchknöpfversuche mit Bügelproben nach Klee/Seeger [5] durchgeführt.

Das Versagen erfolgte als Durchknöpfen von Schraube und Scheibe durch das Blech. Die beiden Risse im Blech gingen vom Bohrloch aus entlang des Knicks der sich einstellenden V-Geometrie der Probe.

		F_{max}			F_{max}
		[kN]			[kN]
\varnothing_s	[mm]	14	\varnothing_s	[mm]	19
$t_{k,oben}$		0,48	$t_{k,oben}$		0,48
Nr.			Nr.		
O141		4,49	O191		4,59
O142		4,14	O192		4,52
O143		4,75	O193		4,52
O144		4,17	O194		5,60
F_{mean}	[kN]	4,39	F_{mean}	[kN]	4,81
s		0,29	s		0,53
k	-	2,68	k	-	2,68
$F_{5\%}$	[kN]	3,62	$F_{5\%}$	[kN]	3,38
$F_{95\%}$		5,16	$F_{95\%}$		6,23

Tabelle 3.42: Ergebnisse Versuchsserie O

3.5 Werkstoffkennwerte und Abmessungen

An Proben aus den Sandwichelementen wurden Versuche zur Ermittlung der Schaumkennwerte durchgeführt. Die Ermittlung der Schaumkennwerte erfolgte entsprechend Anlage B der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen. Die Prüfverfahren sind nachfolgend beschrieben:

- Die Bestimmung der Dichte ρ_K des Hartschaums erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen $100 \times 100 \times d$ mm.
- Die Bestimmung der Zugfestigkeit $\sigma_{z,K}$ mit Deckschicht erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen $100 \times 100 \times d$ mm. Zum Zweck der Kraffteinleitung in die Probekörper wurden die Deckschichten mit Holz- und Stahlplatten verklebt.
- Die Bestimmung der Druckfestigkeit $\sigma_{D,K}$ bei 10% Stauchung erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen $100 \times 100 \times d$ mm.
- Die Bestimmung der Scherfestigkeit τ_K erfolgte an Probekörpern mit den Abmessungen $1200 \times 150 \times d$ mm. Die Stützweite betrug 1000mm.
- Die Modulwerte $E_{z,K}$, $E_{D,K}$ und G_K wurden jeweils aus dem linearen Anstieg der Last-Verformungslinie ermittelt. Bei der Bestimmung des Schubmoduls wurden die gemessenen Blechdicken berücksichtigt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.43 aufgeführt.

Nennstärke [mm]	Rohdichte [kg/m ³]	Zugversuch [N/mm ²]		Druckversuch [N/mm ²]		Schubversuch [N/mm ²]	
		$\sigma_{z,K}$	$E_{z,K}$	$\sigma_{D,K}$	$E_{D,K}$	τ_K	G_K
80 Wand	40,0	0,13	6,3	0,14	3,8	0,15	3,1
60 Dach	38,5	0,09	4,2	0,13	3,5	-	-
60 Wand MiWo	110	0,08	5,7	0,07	3,3	0,11	9,8

Tabelle 3.43: Werkstoffkennwerte der Kernschichten (Mittelwerte)

Aus den Deckschichten wurden Proben zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften und der Kernblechdicke gefertigt. Die Versuche wurden nach DIN 10002-1:2001-12 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.44 aufgeführt.

Element-nenn-dicke	Deckschicht	Nenn-dicke [mm]	Kernblech-dicke [mm]	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm]	Bruch-dehnung [%]
		t	t _k	R _{eH} /R _{p0,2}	R _m	A _{80mm}
80 Wand	Außen	0,63	0,59	404	431	23,0
	Innen	0,50	0,47	451	452	20,5
60 Dach	Außen	0,75	0,68	401	496	23
	Innen	0,55	0,53	411	489	24
60 Wand MiWo	Außen	0,50	0,48	453	460	22
	Innen	0,50	0,47	405	436	24

Tabelle 3.44: Werkstoffkennwerte der Deckschichten

Die Vermessung der Scheiben erfolgte mit einem Schraubenmessgerät. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

Messung Nr.	Außendurch-messer	Innendurch-messer	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	11,8	6,2	3,3	0,96	1,8
2	11,8	6,2	3,3	0,97	1,9
3	11,8	6,1	3,2	0,98	1,8
4	11,8	6,2	3,3	0,99	2,00
5	11,8	6,2	3,2	1,06	1,7
6	11,8	6,1	3,2	1,00	1,8
7	11,8	6,1	3,2	0,94	1,9
8	11,8	6,1	3,3	0,96	1,8
9	11,8	6,2	3,3	1,14	1,8
10	11,8	6,1	3,3	1,07	1,7

Tabelle 3.45: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 11mm

Messung Nr.	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	13,9	5,7	5,2	1,04	3,0
2	13,9	5,7	4,3	1,02	2,6
3	13,9	5,7	4,5	0,98	2,6
4	13,9	5,7	4,4	1,03	2,5
5	13,9	5,7	4,5	1,00	2,6
6	13,9	5,7	4,9	1,08	2,6
7	13,9	5,7	4,4	1,05	2,6
8	13,9	5,7	4,7	1,04	2,6
9	13,9	5,7	4,6	1,04	2,5
10	13,9	5,7	4,5	1,06	2,3

Tabelle 3.46: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 14mm

Messung Nr.	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	16,0	6,8	3,6	1,05	1,8
2	16,0	6,8	3,7	1,09	1,9
3	16,0	6,8	3,6	1,04	2,0
4	16,0	6,8	3,6	1,09	2,0
5	15,9	6,9	3,5	1,05	1,8
6	15,9	6,7	3,7	1,09	2,0
7	15,9	6,8	3,5	1,04	1,9
8	16,0	6,7	3,4	1,03	1,9
9	16,0	6,7	3,4	1,01	1,8
10	16,0	6,7	3,6	1,12	1,9

Tabelle 3.47: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 16mm

Messung Nr.	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	19,0	6,9	5,1	1,04	2,5
2	19,0	6,9	5,1	0,98	2,8
3	19,0	6,9	4,7	1,00	2,3
4	19,0	6,9	4,8	1,06	2,4
5	19,0	6,9	5,0	0,99	2,5
6	18,9	6,8	4,8	1,03	2,5
7	19,0	6,9	4,8	1,01	2,7
8	19,0	6,8	5,1	0,97	2,3
9	19,0	6,9	4,8	1,03	2,4
10	18,9	6,9	4,9	1,04	2,7

Tabelle 3.48: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 19mm

Messung Nr.	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	22,0	7,1	5,7	1,05	2,8
2	22,0	6,9	5,7	1,05	2,5
3	22,0	7,0	5,9	1,11	2,8
4	22,0	6,8	5,1	1,06	2,6
5	22,0	6,9	5,2	1,10	2,5
6	22,0	6,8	5,2	1,07	2,5
7	22,0	7,0	5,7	1,16	2,7
8	22,0	6,9	5,2	1,05	2,6
9	22,1	6,9	5,8	1,11	2,7
10	22,0	7,1	5,7	1,03	2,4

Tabelle 3.49: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 22mm

Messung Nr.	Außendurchmesser	Innendurchmesser	Gesamthöhe	Dicke Stahl	Dicke EPDM
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	29,0	6,8	-	1,04	2,7
2	29,0	6,8	-	1,00	2,9
3	29,0	6,9	-	1,01	2,8
4	29,0	6,8	-	1,04	2,7
5	29,0	6,8	-	1,02	2,9
6	29,0	6,8	-	0,95	2,8
7	29,0	6,8	-	0,99	2,8
8	29,0	6,8	-	1,02	2,7
9	29,0	6,9	-	1,01	2,9
10	29,0	6,8	-	1,01	2,6

Tabelle 3.50: Geometrie der Scheiben \varnothing_s 29mm

3.6 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind die Versuchsergebnisse zusammengefasst. Tabelle 3.51 fasst die Ergebnisse der Versuche an Sandwichelementen bei mittiger Befestigung zusammen. Bei den Ergebnissen der Serie C handelt es sich nur um die nach 5000 Lastwechseln ermittelten Resttragfähigkeiten.

Serie	Elementtyp	\varnothing_s	F_{mean}	s	$F_{5\%}$	$F_{95\%}$	Bemerkung
		[mm]	[kN]				
A	PUR-Wand 80mm	11	3,34	0,21	2,82	3,86	-
		14	3,69	0,18	3,25	4,13	
		16	3,80	0,26	3,26	4,34	
		19	4,86	0,44	3,87	5,85	
		22	6,66	0,66	5,24	8,08	
		29	6,19	0,24	5,61	6,77	
B	PUR-Wand 80mm	16	3,61	0,21	3,18	4,04	Bohrung unteres Deckblech
C	PUR-Wand 80mm	14	3,22	0,34	2,29	4,14	wiederholte Belastung
		16	4,02	0,62	2,07	5,97	
		19	4,59	0,67	2,47	6,71	
		22	6,19	1,36	2,55	9,83	
		29	5,63	0,30	-	-	
D	PUR-Wand 80mm	16	3,62	0,24	2,89	4,34	Bohrung Schaumkern
E	PUR-Wand 80mm	16	3,73	0,48	1,80	5,66	Bohrung Schaumkern
F	PUR-Wand 80mm	11	3,98	0,22	3,44	4,52	Bügelprobe
		14	4,51	0,43	3,46	5,56	
		16	4,76	0,39	3,81	5,72	
		19	6,07	0,45	4,95	7,18	
		22	6,47	0,43	5,43	7,52	
		29	6,58	0,26	5,95	7,21	

Tabelle 3.51: Versuche an PUR-Wandelementen

Die Versuche mit variablem Randabstand, an Dachelementen sowie an Elementen mit Mineralwollekern, sind in Tabelle 3.52 bis Tabelle 3.54 zusammengefasst.

Serie	Elementtyp	\varnothing_s	F_{mean}	s	$F_{5\%}$	$F_{95\%}$	Bemerkung
		[mm]	[kN]				
G	PUR-Wand 80mm	11	3,61	0,37	2,76	4,47	Randabstand 20mm
		16	3,66	0,18	3,25	4,08	
		19	4,16	0,07	4,00	4,32	
		22	4,78	0,17	4,38	5,17	
		29	4,70	0,26	4,09	5,31	
H	PUR-Wand 80mm	11	3,26	0,20	2,89	3,84	Randabstand 30mm
		16	3,91	0,25	3,31	4,50	
		19	4,22	0,36	3,37	5,07	
		22	4,89	0,45	3,77	6,01	
		29	4,81	0,14	4,38	5,24	
I	PUR-Wand 80mm	11	3,42	0,06	3,22	3,62	Randabstand 50mm
		16	4,24	0,28	3,36	5,12	
		19	4,82	0,11	4,47	5,16	
		22	5,48	0,37	4,33	6,64	
		29	5,42	0,08	5,17	5,67	
J	PUR-Wand 80mm	11	3,23	0,11	2,87	3,58	Randabstand 100mm
		16	3,95	0,05	3,80	4,10	
		19	4,60	0,40	3,33	5,88	
		22	5,25	0,33	4,36	6,13	
		29	5,54	0,26	4,83	6,24	

Tabelle 3.52: Versuche an PUR-Wandelementen – Randabstand

Serie	Elementtyp	\varnothing_s	F_{mean}	s	$F_{5\%}$	$F_{95\%}$	Bemerkung
		[mm]	[kN]				
K	PUR-Dach 60mm	14	3,86	0,14	3,47	4,24	-
		19	4,20	0,07	4,01	4,39	
L	PUR-Dach 60mm	14	3,35	0,18	2,91	3,80	ohne Schaumkern
		19	3,81	0,08	3,55	4,07	
M	PUR-Dach 60mm	14	6,20	0,86	4,09	8,31	Bügelprobe
		19	7,96	0,62	6,42	9,49	

Tabelle 3.53: Versuche an PUR-Dachelementen

Serie	Elementtyp	\varnothing_s	F_{mean}	s	$F_{5\%}$	$F_{95\%}$	Bemerkung
		[mm]	[kN]				
N	MiWo-Wand 60mm	14	2,88	0,09	2,58	3,17	-
		19	3,22	0,36	2,07	4,37	
O	MiWo-Wand 60mm	14	4,39	0,29	3,62	5,16	Bügelprobe
		19	4,81	0,53	3,38	6,23	

Tabelle 3.54: Versuche an Mineralwollewandelementen

4 Auswertung

4.1 Versuche mit Bügelproben

Die Ergebnisse der Versuche mit Bügelproben und Scheibendurchmesser 14mm und 19mm, die an drei unterschiedlichen Blechdicken durchgeführt wurden, wurden entsprechend den Regelungen der Zulassungsverfahren normiert. Hierbei wurde die auf die im Stahlzugversuch an Proben aus den Deckschichten ermittelte Zugfestigkeiten und Kernblechdicken den Mindestwerten der technischen Regel gegenübergestellt.

Die über der Nennblechdicke aufgetragenen Ergebnisse sind in den Anlagen 4.1 und 4.2 dargestellt. Für den Scheibendurchmesser 14mm erhält man eine lineare Abhängigkeit von der Nennblechdicke. Die Auftragung für den Scheibendurchmesser 19mm zeigt hingegen einen Knick. Hierbei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

In vergleichbaren Untersuchungen mit Durchknöpfversuchen an Bügelproben zeigte sich wiederholt ein bilinearer Zusammenhang zwischen Nennblechdicke und Tragfähigkeit. Der Knick stellt sich dabei wie auch im vorliegenden Fall bei etwa 0,60mm ein, d.h. die Durchknöpftragfähigkeit liegt bei einer Nennblechdicke von 0,50mm über dem durch Extrapolation der Ergebnisse für Blechdicken über 0,63mm in den Bereich geringerer Blechdicken hinein ermittelten Wert. Für größere Blechdicken kann daher davon ausgegangen werden, dass die Tragfähigkeit aus den Ergebnissen der Nennblechdicken 0,63mm und 0,75mm extrapoliert werden kann.

Im Bereich kleiner Blechdicken ergibt sich häufig ein Wechsel der Versagensmechanismen infolge eines sich mit abnehmender Blechdicke ändernden Tragverhaltens. Dies ist auf die sehr geringe Steifigkeit des Deckblechs im Vergleich zur Steifigkeit der Scheibe zurückzuführen. Das Deckblech wird im Durchknöpfversuch um die Scheibenränder herumgezogen. Der Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Scheibendurchmesser und kann dazu führen, dass nicht der vom Bohrloch ausgehende Riss für das Versagen maßgebend wird, sondern die örtliche Eindrückung des Scheibenrandes in das Deckblech.

In den Formulierungen der Fließgelenklinientheorie für Platten lässt sich das beschriebene Tragverhalten wie folgt erklären: Im Kontaktbereich Scheibenrand zum Deckblech stellt sich kein Biegemomente übertragendes Fließgelenk ein. Stattdessen steht das Blech rein unter Zugbelastung. Bei großem Scheibendurchmesser liegt das biegeeweiche Blech infolge des Membranzugs an. Dies wirkt sich negativ auf das Wachstum des vom Bohrloch ausgehende Risses aus. Bei größeren Blechdicken und kleineren Durchmessern der Scheibe ergibt sich im Blech ein größerer Anteil der Lastabtragung über Biegung, der bezüglich des Risswachstums weniger kritisch ist.

4.2 Einfluss des Scheibendurchmessers

Ein Auftrag der mittleren Durchknöpffragfähigkeiten über dem Scheibendurchmesser zeigt sowohl für die Versuche der Serie A (Sandwichenelemente als Einfeldträger) als auch für die Versuche der Serie F (Bügelproben) einen Anstieg der Durchknöpffragfähigkeit mit dem Durchmesser (Anlage 4.3 bis 4.9). Dies gilt bis zu einem Scheibendurchmesser von 22mm: Für den Durchmesser 29mm ist kein weiterer Anstieg der Durchknöpffragfähigkeit zu erkennen, in der Serie A fällt der Wert sogar wieder geringfügig ab.

Näherungsweise lassen sich die Ergebnisse der Serien F (Anlage 4.4) für Scheibendurchmesser $\leq 22\text{mm}$ jedoch durch eine Abhängigkeit der Durchknöpffragfähigkeit F_I vom Scheibendurchmesser \varnothing_S in der Form

$$F_I \propto \sqrt{\varnothing_S}$$

oder

$$F_I \propto \varnothing_S$$

approximieren. DIN 18807-6:1995-09 unterstellt für die Durchknöpffragfähigkeit F_I (dort: Z_I) einen Zusammenhang mit dem Dichtscheibendurchmesser in der Form

$$F_I \propto \sqrt{\frac{\varnothing_S}{22}}$$

Durch den Bezug auf den Durchmesser 22mm ergäben sich auf dieser Grundlage rechnerisch beim hier beobachteten Verlauf der Durchknöpffragfähigkeit für kleinere Durchmesser Werte auf der unsicheren Seite, wobei allerdings die nach DIN 18807-6 ermittelten Werte weit unter den in den Versuchen ermittelten Werten liegen.

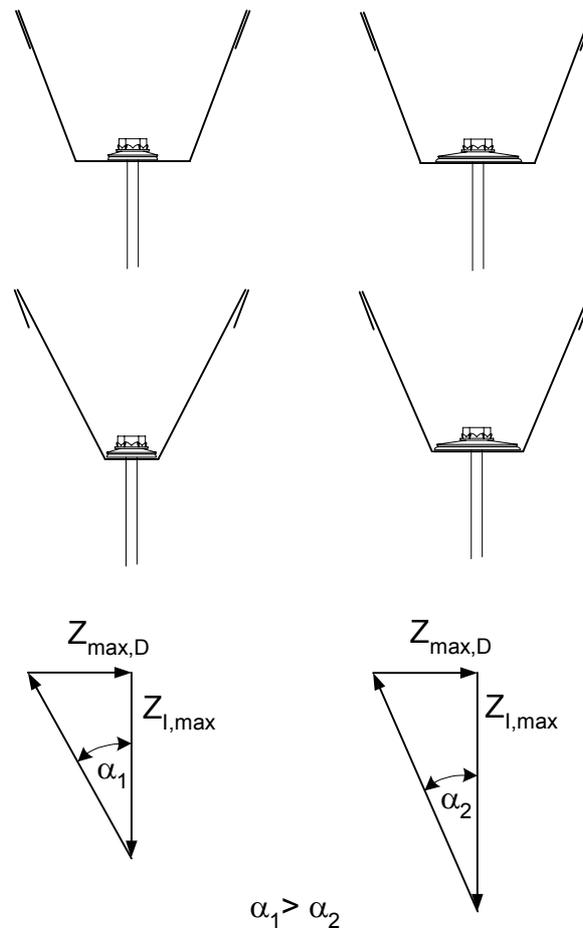


Abbildung 4.1: Tragfähigkeit $Z_{l,\max}$ der Verbindung in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser

Als Erklärung kann das in Abbildung 4.1 skizzierte Tragmodell herangezogen werden: Mit zunehmendem Scheibendurchmesser nimmt die durch die Verbindung aufnehmbare Kraft $Z_{l,\max}$ zu, da sich im Blech aufgrund der festen Aufhängepunkte des Versuchsaufbaus unterschiedliche Winkel in der Bügelprobe einstellen. Die Horizontalkomponente $Z_{\max,D}$ bleibt gleich und ist durch die Zugfestigkeit R_m der Bügelprobe beschränkt. Beschränkend wirkt auf die Durchknöpfrtragfähigkeit die sich aus der Rückverankerung der horizontalen Zugkraft im Blech durch die Scheibe (Druckkraft) ergebende lokale Beanspruchung an der Berührfläche von Scheibenaußendurchmesser und Blech sowie durch die Durchknöpfrtragfähigkeit der Scheibe selbst. Entsprechende Änderungen im Versagensmechanismus zeigen sich hier bei dem Scheibendurchmesser von 29mm. Es lässt sich daher auch nicht ausschließen, dass im Bereich zwischen 22mm und 29mm höhere Tragfähigkeiten erzielt werden können.

Die Versuche der Serie A (Anlage 4.3) zeigen hingegen eine progressive Zunahme der Tragfähigkeit mit dem Scheibendurchmesser, wobei auch hier über einem Durchmesser von 22mm keine Zunahme der Durchknöpfrtragfähigkeit mehr festgestellt werden kann. Ein Tragverhalten entsprechend Abbildung 4.1 kann sich in den Versuchen an Sandwichelementen nicht einstellen, da nur eine unzureichende Rückverankerung der Zugkräfte im Blech vorhanden ist. Das

Versagensbild (drei um 120° gegeneinander gedrehte, vom Loch ausgehende Risse) deutet auf einen achsensymmetrischen Beanspruchungszustand hin.

Die Kraft-Maschinenweg-Diagramme zeigen für alle Versuche der Serie A den in Abbildung 4.2 dargestellten charakteristischen Verlauf: Unabhängig vom Scheibendurchmesser ergibt sich bis zu einer Kraft von etwa 3,5 bis 4,0kN eine in etwa lineare Zunahme der Kraft mit dem Maschinenweg. Auch oberhalb dieses Wertes nimmt die Kraft in etwa linear zu, jedoch aufgrund einer geringeren Steifigkeit mit einer weit geringeren Steigung. Der Einfluss des Scheibendurchmessers zeigt sich in der Länge dieses Abschnittes und damit in der erzielbaren Maximalkraft.

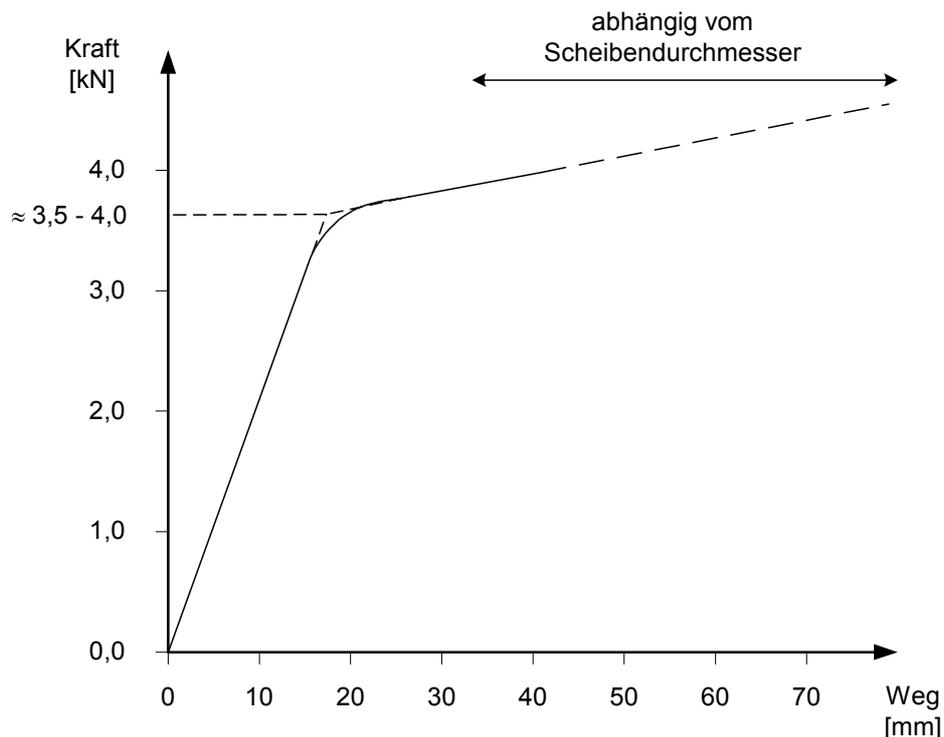


Abbildung 4.2: Verlauf der Kraft-Maschinenweg-Diagramme bei Sandwichelementen

Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass im Anfangsbereich das Deckblech voll mitträgt, nach einer Rissbildung im Blech die Kraft aber zum Teil durch den Schaumkern abgetragen werden muß. Dieser Anteil wiederum hängt stark mit dem Durchmesser der Scheibe zusammen. Bei den Versuchen der Serien D und E (mit ausgebohrtem Kernmaterial) trat der Wechsel der Steifigkeit bei geringeren Kräften ein, die erzielten Maximalkräfte lagen aber in der gleichen Größe. Demnach ist die maximale Durchknöpffragfähigkeit für den Durchmesser 16mm unabhängig von den Eigenschaften der Kernschicht. Diese hat jedoch einen Einfluss auf die Lastabtragung im Deckblech.

Die Versuche mit variablem Randabstand zeigten keine ausgeprägte Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser (Anlage 4.17 bis 4.20), sieht man von der Versuchsserie mit Scheibendurchmesser 11mm und Randabstand 20mm ab: Die Werte in der Serie mit Scheibendurchmesser 11mm und Randabstand 20mm liegen über dem erwarteten Wert, d.h. über den Wer-

ten der Serie mit Scheibendurchmesser 11mm und größeren Randabständen. Dies kann auf die abweichende Versuchsdurchführung zurückzuführen sein: In dieser Versuchsserie war aufgrund der geringen Kräfte noch keine randseitige Abstützung der auskragenden Proben erforderlich. Demnach ergäben sich infolge der Abstützung geringere Durchknöpffragfähigkeiten, was sich z.B. durch die Klemmung des Schafts im sich unter Belastung schrägstellenden Element erklären ließe.

Die durchgeführten Untersuchungen lassen somit den Schluß zu, dass die Tragfähigkeit der Verbindung mit zunehmendem Scheibendurchmesser grundsätzlich – d.h. unabhängig vom gewählten Probenotyp und vom Randabstand - zunimmt. Dies gilt so lange, wie sich kein anderer Trag- oder Versagensmechanismus einstellen kann. Bei den hier dokumentierten Versuchen gilt dies für den Scheibendurchmesser 29mm, bei dem Durchknöpfen durch die Scheibe maßgebend wurde.

4.3 Vergleich der Prüfverfahren

Als Grundlage für einen Vergleich der Prüfverfahren wurden in den Anlagen 4.3 und 4.4 die Mittelwerte der in den quasi-statischen Versuchen ermittelten Durchknöpffräfte über dem Scheibendurchmesser aufgetragen. Die Streuung der Versuchsergebnisse ist an den dargestellten vertikalen Linien erkennbar, deren obere und untere Grenze jeweils dem mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75% ermittelten 5%- und 95%-Fraktilwert entsprechen.

Die in Anlage 4.3 dargestellten Ergebnisse an Einfeldträgern aus PUR-Wandelementen zeigen einen charakteristischen Verlauf der Durchknöpffkraft in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser, der auch in den in Anlage 4.4 dokumentierten Ergebnissen der Versuche mit Bügelproben aus den Deckschichten festgestellt werden kann: Die Durchknöpffkraft steigt bis zu einem Scheibendurchmesser von 16mm nur wenig an. Im Bereich von 16mm bis 19mm erhält man einen starken Anstieg der Durchknöpffkräfte, wobei eine weitere Steigerung des Scheibendurchmessers über 22mm hinaus keine Verbesserung der Durchknöpffragfähigkeit mehr bringt. Bei den Versuchen der Serie A kam es sogar zu einem Abfall der maximalen Durchknöpffkraft. Obwohl Dicke und Innendurchmesser der Scheiben mit Durchmesser 29mm der Ausführung der Scheiben mit 22mm entsprachen, erfolgte hier das Versagen in Form eines Durchknöpfens durch die Scheibe.

In Anlage 4.10 wurden die Durchknöpffragfähigkeit der Versuche der Serie A mit PUR-Wandelementen in einer auf die Ergebnisse der Serie F an Bügelproben bezogenen Form aufgetragen. Bis zu einem Scheibendurchmesser von 19mm liegen die Werte unter 1,0, bei größeren Scheibendurchmessern werden die Werte der Bügelproben erreicht.

Der Einfluss des Kernmaterials auf die Durchknöpffragfähigkeit setzt sich im wesentlichen aus zwei Anteilen zusammen: Zum einen bildet der Schaumkern eine elastische Bettung für das durch eine Einzellast belastete Deckblech. Je steifer die Bettung, desto geringer die Eindrückung unter der Einzellast. Hier erfolgt die Lastabtragung über Biegemomente und Membran-

zugspannungen im Deckblech. Ein weiterer Einfluss auf die Durchknöpffragfähigkeit bildet die Lastabtragung über den Schaumkern. Kräfte, die durch den Schaumkern abgetragen werden können, entlasten die unter der Einzellast auf Zug belasteten Deckbleche und erhöhen so (indirekt) die Durchknöpffragfähigkeit der Deckschicht. Ausgehend von der Annahme, dass der Einfluss des Schaumkerns auf die Durchknöpffragfähigkeit mit zunehmendem Scheibendurchmesser zunimmt, da die Kräfte vorwiegend über die Scheiben in den Kern eingeleitet werden, lässt sich auch das beobachtete Verhalten erklären. Ab einem Grenzwert des Scheibendurchmessers reicht die Lastabtragung über den Schaumkern aus, die infolge der fehlenden Umkantungen etc. reduzierte Durchknöpffragfähigkeit des Bleches zu kompensieren. Selbst bei Berücksichtigung des verhältnismäßig niedrigen Mittelwerts der Durchknöpffragfähigkeit der Serie A19 kann dieser Durchmesser für die geprüften Elemente auf etwa 20mm abgeschätzt werden. Bei kleineren Scheibendurchmessern fällt die Durchknöpffragfähigkeit des Elementes jedoch in keinem Fall unter 80% der in den Versuchen mit Bügelproben ermittelten Werte ab. Unterhalb dieses Grenzwertdurchmessers spielt damit die Druckfestigkeit eine untergeordnete Rolle, da der Schaumkern nicht aktiviert wird. Dies zeigt sich auch bei den Versuchen mit ausgebohrtem Kernmaterial (Serie D mit Durchmesser 20mm, Serie E mit Durchmesser 50mm), bei denen die Tragfähigkeit der Verbindung nur wenig oder gar nicht abfällt.

Dass sich für den Scheibendurchmesser 29mm ein Verhältnis der Tragfähigkeitswerte aus Serie A und F von 1,0 ergibt hängt in erster Linie damit zusammen, dass die Scheibe maßgebend wird. Würde diese nicht maßgebend werden, so wäre auf Grundlage des im vorherigen beschriebenen davon auszugehen, dass der Verhältniswert ebenfalls bei 1,0 oder sogar über 1,0 liegt. Verlängert man die sich für die Scheibendurchmesser bis einschließlich 22mm ergebenden Kurven der Anlagen 4.3 und 4.4 in charakteristischer Weise (d.h. für Bügelproben der Serie F in etwa linear, für die Versuche mit Sandwichelementen der Serie A progressiv zunehmend, so ergibt sich aus der stärker zunehmenden Tragfähigkeit der Versuche der Serie A ein Verhältnis größer 1,0.

Um die in [9] dokumentierten Ergebnisse auf kleinere Scheibendurchmesser zu erweitern wurden Durchknöpffversuche an Wandelementen mit Mineralwollekern durchgeführt. Anlage 4.8 und 4.9 zeigen die Ergebnisse der Durchknöpffversuche an Elementabschnitten sowie an Bügelproben aus den Deckschichten, wiederum über dem Scheibendurchmesser aufgetragen. Die auf die Ergebnisse an Bügelproben bezogenen Werte wurden zusammen mit den Ergebnissen aus [9] in Anlage 4.10 mit aufgenommen. Die Ergebnisse der in beiden Fällen mit Scheibendurchmesser 19mm durchgeführten Untersuchungen weichen signifikant voneinander ab: Während in den im vorliegenden Bericht dokumentierten Versuchen bezogene Durchknöpffragfähigkeiten von 67% ermittelt wurden lagen die Ergebnisse aus [9] mit etwa 82% im Bereich der an Elementen mit PUR-Schaumkern ermittelten Werte. Für alle anderen Dicken lagen die Ergebnisse unter den an PUR-Elementen ermittelten Werten. Leider liegen zu den in

[9] dokumentierten Ergebnissen keine Angaben zu den mechanischen Eigenschaften der Elemente, des Kerns und der Deckschicht vor. Dennoch zeigt sich ein Verlauf des Verhältnisses der Ergebnisse der beiden Prüfverfahren in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser, der dem an PUR-Elementen beobachteten Verlauf entspricht: Für kleine Scheibendurchmesser ergibt sich ein kleinerer Verhältniswert, für große Scheibendurchmesser ein größerer Verhältniswert. Die Werte sind jeweils über einen Durchmesserbereich näherungsweise konstant.

Geht man davon aus, dass der Grenzwert des Scheibendurchmessers, ab dem die Lastabtragung über den Schaumkern ausreicht, die infolge der fehlenden Umkantungen etc. reduzierte Durchknöpffragfähigkeit des Bleches zu kompensieren, von den mechanischen Eigenschaften des Kern abhängt, kann daraus geschlossen werden, dass die mechanischen Eigenschaften der Elemente aus [9] über denen der Elemente lagen, die für die im vorliegenden Bericht dokumentierten Versuche verwendet wurden.

Hieraus folgt aber auch, dass die quasi-statische Durchknöpffragfähigkeit von Sandwichelementen mit Mineralwollekern nur bei etwa 80% der quasi-statischen Durchknöpffragfähigkeit von Sandwichelementen mit PUR-Schaumkern liegt. Während es sich beim PUR-Schaumkern mechanisch um einen festen Körper handelt, besteht die Mineralwolle aus Einzelfasern, die rechtwinklig zur Faserrichtung keine Kräfte weiterleiten können und als Einzelfasern ausknicken.

4.4 Druckfestigkeit des PUR-Schaumkerns

Üblicherweise wird davon ausgegangen, dass die fehlende stützende Wirkung von Umkantungen etc. auf die schraubenkopfseitige Deckschicht durch die Druckfestigkeit des Kernmaterials der Sandwichelemente ausgeglichen wird. Diese Annahme basiert auf einem Modell einer elastisch gebetteten Deckschicht, wobei anstelle der mechanisch korrekten Verwendung des Druck- oder des Schaummoduls die Druckfestigkeit bei 10% Stauchung angesetzt wird. In [4] wird von einem Zusammenhang der Durchknöpffragfähigkeit von der Druckfestigkeit $f_{K,c}$ der Form

$$F_I \sim \sqrt{f_{K,c}}$$

ausgegangen, die mit der mehrachsigen Lastabtragung im Schaumkern begründet wird. Dieser Ansatz lässt sich jedoch mechanisch nicht begründen, vermutlich handelt es sich um einen phänomenologisch begründete Beziehung.

Obwohl die verwendeten Elemente mit PUR-Schaumkern eine Druckfestigkeit im üblichen Anwendungsbereich besitzen, betragen die für die kleineren Scheibendurchmesser bis einschließlich Durchmesser 19mm ermittelten Durchknöpffragfähigkeiten nur etwa 83% der an Bügelproben ermittelten Werte. Dieser Abfall der Durchknöpffragfähigkeit ist mit nahezu konstantem Betrag über einen Bereich der Scheibendurchmesser von 10mm bis 20mm zu erkennen, der sich aus den fehlenden Versteifungen der Deckbleche durch Stege o.ä. ergibt. Inso-

fern ist zu untersuchen, ob der Einfluss des Scheibendurchmessers auf die Tragfähigkeit mit dem Kernwerkstoff oder mit der Deckschicht verknüpft ist.

Die Lastabtragung über das Kernmaterial lässt sich nun mit dem Modell einer elastisch gebetteten Platte darstellen, die Lastabtragung über die Deckschicht über das Modell einer Kreis- oder Kreisringplatte.

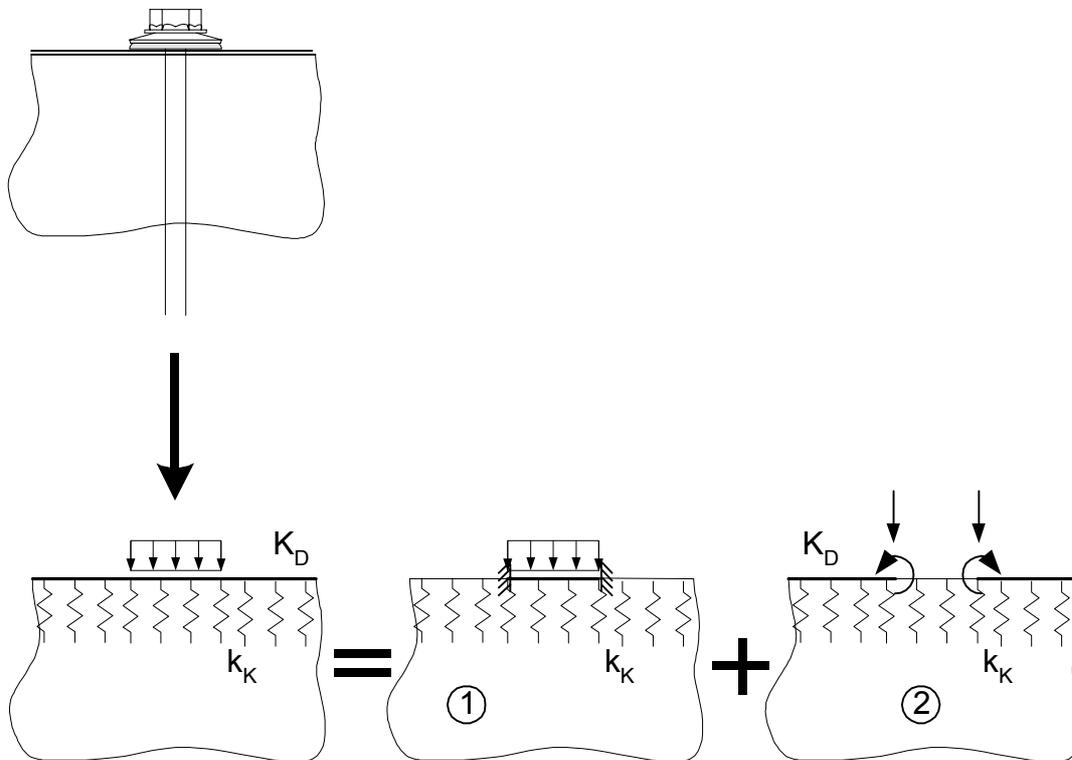


Abbildung 4.3: Trennung der Tragmechanismen

Die Federsteifigkeit der Bettung ergibt sich im wesentlichen zu

$$k_K = f(E_K, \nu_K, f_{c,K}, \rho_K)$$

mit

E_K, ν_K elastische Eigenschaften des Kernwerkstoffs

$f_{c,K}$ Druckfestigkeit des Kernwerkstoffs

ρ_K Dichte des Kernwerkstoffs

Die Biegesteifigkeit der Kreis- oder Kreisringplatte ergibt sich zu

$$K_D = f(E_D, \nu_D, t, \text{Linierungsgeometrie})$$

mit

E_D, ν_D elastische Eigenschaften der Deckschicht

t Blechdicke der Deckschicht

Aus dem Teilmodell 1 ergibt sich die Auflagerkraft nach [8] zu

$$B_1 = -\frac{q}{k_K} \cdot \frac{K_K}{l^3} \cdot f_1(x)$$

mit

$$l = \sqrt[4]{\frac{K_D}{k_K}}$$

und

$$x = \frac{\varnothing_S}{2 \cdot l}$$

Die Anteile der Thompson-Funktion werden in der Funktion $f_1(x)$ zusammengefasst, da diese als konstanter Anteil für die folgenden rein qualitativen Betrachtungen unerheblich sind. Diese Anteile lassen sich auch für das Gesamtmodell (d.h. nach Addition der Anteile aus den Systemen 1 und 2) analog in einer Funktion $f(x)$ zusammenfassen.

Die Schraubenkraft F ergibt sich zu

$$F = q \cdot \frac{\pi \cdot \varnothing_S^2}{4}$$

Der Anteil der Schraubenkraft F , der nicht direkt über den unter der Scheibe liegenden Anteil des Kernmaterials, sondern über die Biegesteifigkeit des Deckblechs abgetragen wird, lässt sich durch Summation über den Umfang der Scheibe wie folgt ermitteln

$$\frac{F_D}{F} = \frac{B_1 \cdot \pi \cdot \varnothing_S}{F}$$

Zusammengefasst erhält man

$$\frac{F_D}{F} = \frac{4}{\varnothing_S} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_D}{k_K}} \cdot f(x)$$

Der Anteil, der direkt über die unter der Scheibe liegende Kernschicht abgetragen wird, beträgt

$$\frac{F_K}{F} = 1 - \frac{F_D}{F} = 1 - \frac{4}{\varnothing_S} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_D}{k_K}} \cdot f(x)$$

Hieraus ergibt sich folgendes Tragverhalten:

- Mit zunehmendem Scheibendurchmesser steigt der Anteil der Lastabtragung über den Schaumkern. Die Abhängigkeit vom Durchmesser ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

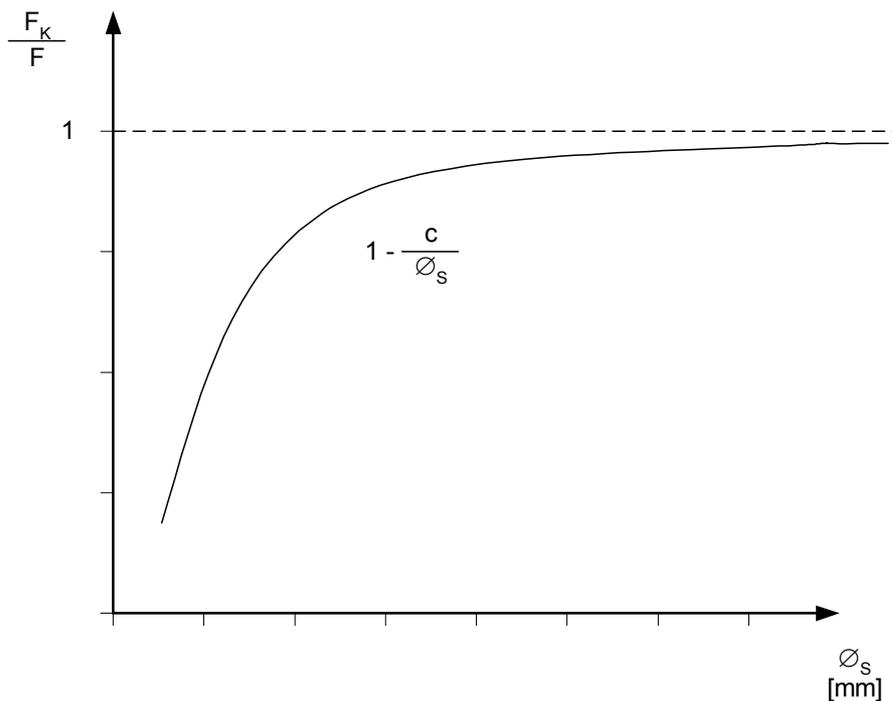


Abbildung 4.4: Abhängigkeit der Lastabtragung über die Kernschicht vom Scheibendurchmesser

Es gilt

$$\frac{F_D}{F} \sim c \cdot \frac{1}{\varnothing_s}$$

- Eine Zunahme der Steifigkeit der Deckschicht (zunehmende Blechdicke, ausgeprägtere Linierung) vergrößert den Anteil der Deckbleche an der Lastabtragung. Analog dazu nimmt der Anteil des Kernmaterials an der Lastabtragung mit zunehmender Steifigkeit des Kernmaterials zu. Mit

$$K_D \sim t^3$$

und

$$k_K \sim E_K$$

zeigt sich in

$$\frac{F_D}{F} \sim c \cdot \frac{\sqrt[4]{t^3}}{\sqrt[4]{E_K}}$$

d.h. der Anteil der Blechdicke dominiert gegenüber dem Anteil aus den Eigenschaften der Kernschicht.

- Bei Elementen, bei denen die Lastabtragung über das Deckblech dominiert, spielt der Scheibendurchmesser keine Rolle bei der Verteilung der Last zwischen Kern und Deckschicht. Der Einfluss zeigt sich jedoch bei den Versagenslasten der Deckschicht.

Abschließend lässt sich sagen, dass bei geringen Scheibendurchmessern kein Einfluß der Eigenschaften des Kernwerkstoffes vorhanden ist, bei größeren Durchmessern hingegen

schon. Dieser Einfluß reicht aus, das infolge der ebenen Deckschichtgeometrie gegenüber Bügelproben oder profilierten Deckschichten schlechtere Tragverhalten zu kompensieren. Um die Tragfähigkeit des Schaumkerns zu aktivieren, ist ein Mindestdurchmesser sowie eine Mindeststeifigkeit erforderlich. Der Einfluß des Durchmessers dominiert dabei. Der erforderliche Durchmesser lässt sich im vorliegenden Fall zu 20mm abschätzen. Wird diese Forderung nicht erfüllt, reduzieren sich die quasi-statischen Tragfähigkeitswerte auf etwa 80%. Dies gilt jedoch nicht bei randnaher Befestigung, da infolge der Auflagerverdrehung die Scheibe nicht über die gesamte Fläche wirken kann, vgl. die Versuche zum Randabstand. Hier ist unabhängig vom Scheibendurchmesser die Reduktion auf 80% erforderlich.

Mineralwolleelemente verhalten sich diesbezüglich schlechter, wobei aufgrund der Ergebnisse in [9] vermutet werden muß, dass sich die selbe ausgleichende Wirkung wie bei Schaumkernen einstellt. Dieser Effekt ist aber mangels parametrischer Untersuchungen hierzu nicht quantifizierbar.

4.5 Wiederholte Belastung

Der Übergang von den Ergebnissen aus quasi-statischen Versuchen zu den charakteristischen Werten erfolgt in der Regel unter Berücksichtigung des Einflusses wiederholter Belastung. Als Grundlage für eine Bewertung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen werden daher zuerst die gängigen, in Normen oder Prüfvorschriften geregelten Auswertungsverfahren betrachtet und verglichen.

4.5.1 DIN 18807-7:1995-09

Die Durchknöpfversuche DIN 18807-7:1995-09 werden mit den entsprechenden Aluminiumtrapezprofilen durchgeführt. Zur Berücksichtigung wiederholter Belastung wird der 5%-Fraktilwert aus den quasi-statischen Versuchen mit dem Faktor $f_{wB} = 2/3$ multipliziert:

$$F_k = f_{wB} \cdot F_{5\%,stat}$$

Alternativ können Versuche mit wiederholter Belastung durchgeführt werden, um f_{wB} zu ermitteln, wobei 5000 Lastwechsel durch das Trapezprofil zu ertragen sind. Anforderungen an die Resttragfähigkeit gibt es nicht, jedoch werden bei „die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigenden Veränderungen in der Verbindung“ zusätzliche Nachweise durch Versuche gefordert.

Es gilt dann

$$F_k = \min \left\{ \begin{array}{l} F_{5\%,stat} \\ 1,54 \cdot F_O \end{array} \right.$$

Für den maximal erreichbaren Wert $f_{wB} = 1,0$ sind daher Versuche mit

$$F_O = 0,65 \cdot F_{5\%,stat}$$

durchzuführen.

4.5.2 DIBt-Prüfprogramm Sandwichkonstruktionen

Die Durchknöpfversuche nach dem DIBt-Prüfprogramm Sandwichkonstruktionen [3] und [4] werden mit den entsprechenden Sandwichelementen durchgeführt. Es sind sowohl quasistatische Versuche als auch Versuche mit wiederholter Belastung vorgesehen. Der sich aus den statischen Versuchen ergebende 5%-Fraktilwert darf dann als charakteristischer Wert übernommen werden ($f_{WB} = 1,0$), wenn in den Versuchen mit wiederholter Belastung die Oberlast

$$F_O = 0,5 \cdot F_{mean,stat}$$

über 5000 Lastwechsel ertragen wurde und eine Resttragfähigkeit von

$$F = 1,3 \cdot F_O = 0,65 \cdot F_{mean,stat}$$

nachgewiesen wird. Ausgehend von der Annahme, dass die Varianz in den quasi-statischen Versuchen zwischen 5% und 10% liegt, lässt sich der 5%-Fraktilwert für den Vergleich der Prüfverfahren wie folgt abschätzen:

$$F_{5\%,stat} \approx (0,8 \div 0,9) \cdot F_{mean,stat}$$

Damit ergibt sich als Oberlast, die zum Nachweis von $f_{WB} = 1,0$ im Versuch aufgebracht werden muß

$$F_O = \frac{0,5}{(0,8 \div 0,9)} \cdot F_{mean,stat} = (0,56 \div 0,63) \cdot F_{mean,stat}$$

4.5.3 Klee/Seeger

Die Durchknöpfversuche nach Klee/Seeger [5] werden an Bügelproben durchgeführt, deren Geometrie den bei Stahltrapezprofilen gängigen Abmessungen, insbesondere hinsichtlich der Gurtbreite entspricht. Für größere Gurtbreiten legt z.B. die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.1-4 Abminderungsfaktoren fest. Ausgehend von einer globalen Sicherheit gegen Versagen unter statischer Belastung von $\gamma = 2,0$ und gegen Versagen unter wiederholter Belastung von $\gamma = 1,3$ wird eine Abminderung der in den quasi-statischen Versuchen ermittelten 5%-Fraktilwerte in der Form

$$F_k = 0,62 \cdot F_{5\%,stat}$$

erforderlich, die infolge von Vereinfachungen zu

$$F_k = 0,67 \cdot F_{5\%,stat}$$

wird. Diese Faktoren basieren auf der Erkenntnis, dass die Tragfähigkeit unter wiederholter Belastung zwischen 30% und 70% der quasi-statischen Tragfähigkeit beträgt, wobei ein Wert von 40% angesetzt wurde.

4.5.4 Vergleich und Bewertung der Verfahren

Für den Nachweis, dass $F_{5\%,stat}$ als charakteristischer Wert übernommen werden darf, d.h. $f_{wB} = 1,0$ angesetzt werden darf, sind Versuch mit einer Oberlast F_O von $0,56$ bis $0,66 \cdot F_{5\%,stat}$ erforderlich, je nachdem ob zusätzliche Forderungen an die Resttragfähigkeit gestellt werden.

In Ergänzung lässt sich zu den Prüfverfahren folgende Anmerkung machen:

Versuche mit wiederholter Belastung sind nur für Anwendungen sinnvoll und daher vorgesehen, bei denen die zu befestigenden Bauteile auch in den Versuchen verwendet werden. Dies gilt für die Fälle Aluminiumtrapezprofile bei Prüfung nach DIN 18807-7 und für Sandwichelemente bei Prüfung nach dem Prüfprogramm des DIBt, kann aber auch für den Fall Stahltrapezprofile bei Prüfung mit Bügelproben angenommen werden. [5] behandelt explizit nur Stahltrapezprofile, nicht aber Sandwichelemente.

4.5.5 Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

In den Versuchen der Serie C konnte für die Scheibendurchmesser bis einschließlich 19mm gezeigt werden, dass 5000 Lastwechsel mit einer Oberlast $F_O = 0,67 F_{mean,stat}$ aufgenommen werden. Eine ausreichende Resttragfähigkeit wurde ebenfalls nachgewiesen. Daher können die Ergebnisse der statischen Versuche der Serie A direkt zur Ermittlung charakteristischer Werte herangezogen werden, d.h. es gilt $f_{wB} = 1,0$.

Anders verhält es sich mit den Versuchen mit Scheibendurchmessern 22mm und 29mm. In diesen Versuchen wurde nur eine Oberlast von $F_O = 0,50 F_{mean,stat}$ aufgenommen. Demnach gilt für die Ermittlung der charakteristischen Werte

$$F_k = \frac{0,50}{0,67} \cdot F_{5\%,stat} = 0,75 \cdot F_{5\%,stat}$$

mit $F_{5\%,stat}$ aus den Versuchen der Serie A.

Setzt man diese Ergebnisse zu den Ergebnissen an Bügelproben ins Verhältnis, ergibt sich folgendes Bild:

Die Versuche der Serie F mit Scheibendurchmessern bis einschließlich 19mm überschätzen die quasi-statische Tragfähigkeit: Die Ergebnisse der Serie A ergaben jeweils nur 80% der Versuche der Serie F:

$$F_{5\%,stat,A} = 0,8 \cdot F_{5\%,stat,F}$$

Für diese Scheibendurchmesser darf jedoch $f_{wB,A} = 1,0$ in Verbindung mit den Versuchsergebnissen der Serie A angenommen werden. Für die Bügelproben der Serie F wird jedoch nach [5] $f_{wB,F} = 0,67$ pauschal angesetzt. Insgesamt ergibt sich daraus eine Unterschätzung der Tragfähigkeit bei Versuchen mit Bügelproben:

$$\frac{F_{k,F}}{F_{k,A}} = \frac{f_{wb,F} \cdot F_{5\%,stat,F}}{f_{wb,A} \cdot F_{5\%,stat,A}} = \frac{0,67 \cdot F_{5\%,stat,F}}{1,00 \cdot F_{5\%,stat,A}} = \frac{0,67 \cdot F_{5\%,stat,F}}{1,0 \cdot 0,8 \cdot F_{5\%,stat,F}} = 0,84$$

Bei den Scheibendurchmessern 22mm und 29mm ergibt sich ein vergleichbares Bild: Die Versuche der Serie F mit den Scheibendurchmessern 22mm und 29mm ergaben die gleichen Ergebnisse wie die Versuche der Serie A:

$$F_{5\%,A} = F_{5\%,F}$$

Jedoch müssen die Ergebnisse der Serie A auf etwa 75% reduziert werden, da $f_{wB,A} = 0,75$ für diese Durchmesser gilt. Man erhält

$$\frac{F_{k,F}}{F_{k,A}} = \frac{f_{wB,F} \cdot F_{5\%,stat,F}}{f_{wB,A} \cdot F_{5\%,stat,A}} = \frac{0,67 \cdot F_{5\%,stat,F}}{0,75 \cdot F_{5\%,stat,A}} = \frac{0,67 \cdot F_{5\%,stat,F}}{0,75 \cdot F_{5\%,stat,F}} = 0,89$$

d.h. auch hier führen die Versuche mit Bügelproben zu einer Unterschätzung der Tragfähigkeit.

4.5.6 Zusammenfassung

In Verbindung mit den Betrachtungen zum Einfluß des Schaumkerns und dessen Eigenschaften sowie zum Scheibendurchmesser auf die Tragfähigkeit erhält man folgendes Ergebnis:

Um die Tragfähigkeit des Schaumkerns zu aktivieren, ist ein Mindestdurchmesser sowie eine Mindeststeifigkeit erforderlich. Der Einfluß des Durchmessers dominiert aber, vgl. das Ende des vorangehenden Abschnitts. Sind diese Anforderungen an den Scheibendurchmesser und die Steifigkeit erfüllt, reduziert sich das Verhältnis zwischen der unter wiederholter Belastung und unter quasi-statischer Belastung aufnehmbaren Kraft. Der Faktor

$$f_{wB} = \frac{F_k}{F_{5\%,stat}}$$

wird kleiner.

Generell lässt sich sagen, dass die Ergebnisse aus Versuchen mit Bügelproben konservativer sind, die bisherige Zulassungspraxis damit gerechtfertigt ist. Dies gilt nur, solange $f_{wB} = 0,67$ oder kleiner angesetzt wird.

4.6 Dachelemente

Zur Überprüfung des Einflusses des Kernmaterials im Bereich der Trapezprofilierung auf die Durchknöpfragfähigkeit der Verbindungen von Dachelementen mit Befestigung im Obergurt der außenliegenden Deckschicht wurden Versuche an Einfeldträgern aus Sandwichelementen sowie an Obergurtbefestigungen nach DIN 18807-7 durchgeführt. Die Versuche wurden mit Deckschichten aus den gleichen Elementen, jeweils ohne Kalotten durchgeführt. Ergänzend wurden Versuche an Bügelproben durchgeführt. Die Anlagen 4.5 bis 4.7 zeigen jeweils die Ergebnisse aufgetragen über den Scheibendurchmesser. Anlage 4.11 zeigt diese in einer auf die Ergebnisse aus den Versuchen mit Bügelproben bezogenen Form. Die Werte liegen um 40% bis 50% unter den Ergebnisse aus den Versuchen mit Bügelproben. Demgegenüber ist der Einfluss des Kernmaterials vernachlässigbar.

Die Ergebnisse dieser Versuche wurden durch andere, vergleichbare Untersuchungen an Trapezprofilen bestätigt.

4.7 Randabstand der Befestigung

In den Versuchen zeigte sich, dass die durch die Schraubenkräfte (= Auflagerkräfte) hervorgerufenen Schubspannungen im Kernmaterial bei einem Aufbau als Kragträger zu einem Schubbruch führten. Dies ist auch plausibel, wenn man aus den in Tabelle 3.43 dokumentierten Scherfestigkeit die aufnehmbare Kraft abschätzt: Für die Dicke 80mm erhält man bei Annahme einer voll mittragenden Breite der Probe von 250mm eine aufnehmbare Kraft von 3,0kN, die über den erzielten Durchknöpfräften liegt.

Die in Abhängigkeit vom Randabstand erzielten Durchknöpfräfte sind in den Anlagen 4.12 bis 4.16 aufgeführt. Ebenfalls aufgenommen wurden die im Einfeldträger in Bauteilmitte erzielten Werte sowie die in den Bügelproben erzielten Werte. Anlage 4.17 bis 4.20 zeigt die auf die Ergebnisse an Bügelproben bezogenen Werte in Abhängigkeit vom Scheibendurchmesser.

Aus der erstgenannten Auftragung über dem Randabstand lässt sich folgendes Ergebnis ableiten:

Während die Ergebnisse für sehr geringe Scheibendurchmesser (11mm) über den im Einfeldträger ermittelten Werten liegen, ergaben sich für die gebräuchlichsten Scheibendurchmesser 16mm und 19mm bei sehr kleinen Randabständen Durchknöpfräfte, die unter den an den Einfeldträgern ermittelten Kräften lagen. Bei den Versuchen mit Scheibendurchmesser 22mm und 29mm ergaben sich auch bei größeren Randabständen Durchknöpfräfte, die unter den an Einfeldträgern ermittelten Kräften lagen.

Die Reduzierung der Durchknöpfragfähigkeit bei großen Scheibendurchmessern steht zuerst im Widerspruch zu den am Einfeldträger beobachteten Ergebnissen. Ursache hierfür ist aber, dass infolge des Endtangentialwinkels des Sandwichelementes am Endauflager der Traganteil F_K des Schaumkerns auch bei größeren Scheibendurchmessern nicht voll aktiviert werden kann. Am Endauflager beträgt daher die Tragfähigkeit auch bei größeren Scheibendurchmessern nur 80% der am Zwischenaflager ermittelten Tragfähigkeit. Berücksichtigt man das in Abschnitt 4.3 erläuterte Verhältnis der Tragfähigkeitswerte aus Versuchen mit Bügelproben und an Einfeldträgern und setzt dabei voraus, dass für den Einfluss wiederholter Belastung die in Abschnitt 4.5 gemachten Ausführungen analog gelten, so ist diese Reduzierung der Tragfähigkeit durch die bisherige Zulassungspraxis gerade noch abgedeckt. Eine abschließende Aussage ist hierzu aufgrund der fehlenden Versuche an Endauflagern mit wiederholter Belastung nicht möglich.

Nahezu unabhängig vom Scheibendurchmesser zeigt sich bei kleinen Randabständen eine verstärkte Reduzierung der Tragfähigkeit. Diese Ergebnisse korrelieren mit den in allen Versuchen außer beim Scheibendurchmesser 29mm beobachteten Rissen in der Deckschicht mit Richtung zum freien Rand, die die Tragfähigkeit weiter reduzieren. Insofern lässt sich für diese

Anwendungsfälle eine entsprechende Abminderung der Tragfähigkeit begründen. Hinsichtlich des Einflusses der Blechdicke kann jedoch mangels Versuchsergebnissen keine Aussage getroffen werden. Es ist jedoch zu erwarten, dass der Effekt der Reduzierung der Durchknöpftragfähigkeit aufgrund der zunehmenden Deckblechsteifigkeit mit zunehmender Blechdicke abnimmt und mit abnehmender Blechdicke auch für andere Scheibendurchmesser vorhanden ist. Der Einfluss des Randabstandes lässt sich mit dem Scheibendurchmesser \varnothing_s in mm durch einen Faktor f_{e1} mit

$$f_{e1} = 1,4 - 0,03 \cdot \varnothing_s \begin{cases} \leq 1,0 \\ \geq 0,9 \end{cases}$$

für $20 \text{ mm} \leq e_1 \leq 45 \text{ mm}$ erfassen, der stark vereinfachend eine untere Grenzkurve der Versuchsergebnisse beschreibt und das Ausreißen zum freien Rand hin berücksichtigt. Dieser setzt voraus, dass für den Einfluss wiederholter Belastung die oben gemachten Ausführungen analog gelten. Der bei allen Scheibendurchmessern festgestellte Abfall der Durchknöpftragfähigkeit auf etwa 80% der Ergebnisse der Versuche vom Typ Einfeldträger wird in diesem Faktor nicht berücksichtigt. Eine signifikante Abhängigkeit des Faktors vom Randabstand besteht in dem oben angegebenen Gültigkeitsbereich nicht. Für kleinere Randabstände ist keine Aussage möglich.

Verbindungen mit dem Scheibendurchmesser 29 mm verhalten sich in den Versuchen besser, vermutlich infolge des abweichenden Versagensmechanismus des Durchknöpfens durch die Scheibe. Dieser hat in allen Versuchen - also auch in den als Referenz herangezogenen Versuchen - einen dominierenden Einfluss auf das Tragverhalten.

Auf weitergehende Untersuchungen zum Einfluß des Randabstandes bei Elementen mit Mineralwollekern wurde aufgrund der in [9] dokumentierten Ergebnisse verzichtet. In den Versuchen wurden Randabstände von 30mm und 60 mm untersucht. Auch hier zeigt sich, dass sich die Elemente aus Mineralwolle diesbezüglich schlechter verhalten.

Durchknöpf- tragfähigkeit bezogen auf ...	Randabstand			
	30mm		60mm	
	Scheibendurchmesser			
	19mm	29mm	19mm	29mm
... Einfeldträger	0,44	0,49	0,78	0,70

Tabelle 4.1: Bezogene Durchknöpftragfähigkeit am Elementrand

Eine Abschätzung des tragfähigkeitsmindernden Einflusses des Randabstandes ist aufgrund der unzureichenden Datenlage jedoch nicht möglich.

5 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Ermittlung der Durchknöpftragfähigkeit von Verbindungselementen bei direkter Befestigung zur Aufnahme in die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-407 [1] erfolgt analog zur Vorgehensweise zur Aufnahme in die Zulassung Z-14.1-4 [2] durch Versuche an Bügelproben nach [5]. Während bei einer Bemessung nach [2] jedoch in Abhängigkeit vom Abstand des Verbindungselementes zu den die zu befestigenden Bauteile aussteifenden Stegen eine Abminderung der Zugtragfähigkeit erfolgt, erfolgt diese bei einer Bemessung nach [1] nicht, obgleich in diesem Fall davon ausgegangen werden kann, dass aussteifende Stege (z.B. bei quasiebenen Wandelementen) nicht vorhanden sind.

Im vorliegenden Bericht wurden daher Abminderungsfaktoren ermittelt, die eine sichere Bemessung mit an Bügelproben ermittelten Tragfähigkeitswerten ermöglichen.

Hierbei wurde auch der Einfluss des Abstandes zu unversteiften Rändern, wie sie z.B. am Querrand oder am Längsrand geteilter Elemente auftreten können, untersucht.

Für Sandwichelemente mit PUR- oder PIR-Schaumkern lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Die Ergebnisse aus Versuchen mit Bügelproben sind konservativ und die bisherige Zulassungspraxis damit gerechtfertigt. Dies gilt nur, solange im Rahmen der Auswertung für die Zulassung Z-14.4-407 $f_{wB} = 0,67$ oder kleiner angesetzt wird.
- Die Durchknöpftragfähigkeit am Endauflager beträgt generell nur 80% der Durchknöpftragfähigkeit am Zwischenaufleger. Dies ist darauf zurückzuführen, dass infolge der Endtangentialverdrehung der Sandwichelemente auch bei größeren Scheibendurchmessern nur ein Teil des Traganteils der Kernschicht aktiviert werden kann. Dieser Effekt ist unabhängig vom Randabstand e_1 . Diese Reduzierung der Tragfähigkeit ist durch die bisherige Zulassungspraxis gerade noch abgedeckt. Eine abschließende Aussage ist hierzu aufgrund der fehlenden Versuche an Endauflagern mit wiederholter Belastung nicht möglich.

- Für Randabstände $20\text{mm} \leq e_1 \leq 45\text{mm}$ ist die Durchknöpfftragfähigkeit mit dem Faktor

$$f_{el} = 1,4 - 0,03 \cdot \varnothing_s \begin{cases} \leq 1,0 \\ \geq 0,9 \end{cases}$$

abzumindern, wobei der Scheibendurchmesser \varnothing_s in mm einzusetzen ist. Dieser Faktor berücksichtigt das Ausreißen zum freien Rand. Für kleinere Randabstände ist keine Aussage möglich.

- Bei Dachelementen mit Obergurtbefestigung ohne Kalotte darf nur 50% der in Versuchen mit Bügelproben ermittelten Durchknöpfftragfähigkeit angesetzt werden.
- Die vergleichend an Dachelementen mit Obergurtbefestigung ohne Schaumkern durchgeführten Versuche zeigen, dass auch bei Trapezprofilen nur 50% der in Versuchen mit Bügelproben ermittelten Durchknöpfftragfähigkeit angesetzt werden darf.

Für Sandwichelemente mit Mineralwollekern lässt sich nur verallgemeinernd sagen, dass sich diese hinsichtlich der Durchknöpfftragfähigkeit schlechter als Sandwichelemente mit PUR- oder PIR-Kernschicht verhalten.

Karlsruhe, am 19.12.2007

mi/pc

Der Sachbearbeiter

Die Institutsleitung

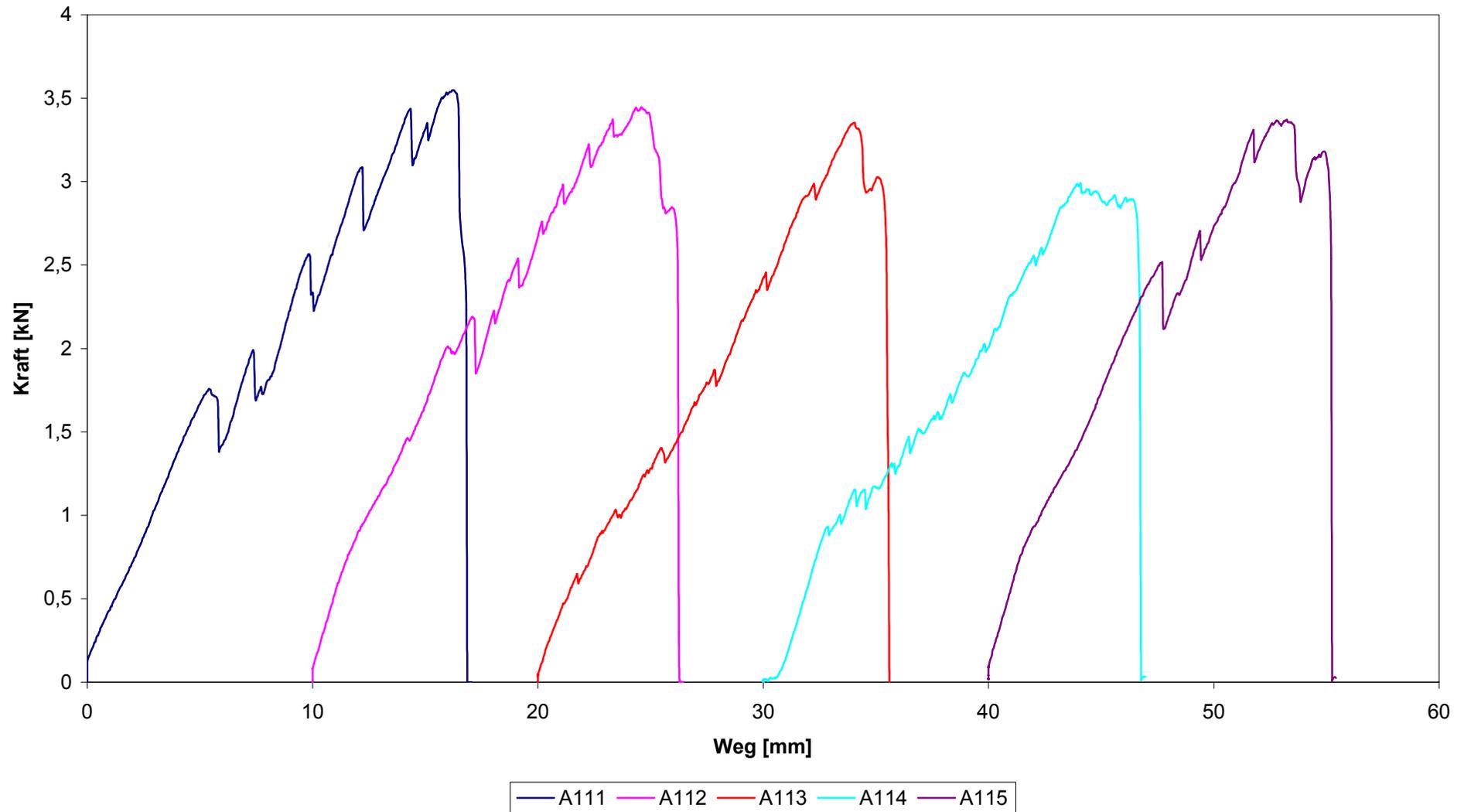
Dipl.-Ing. Th. Misiak

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Saal

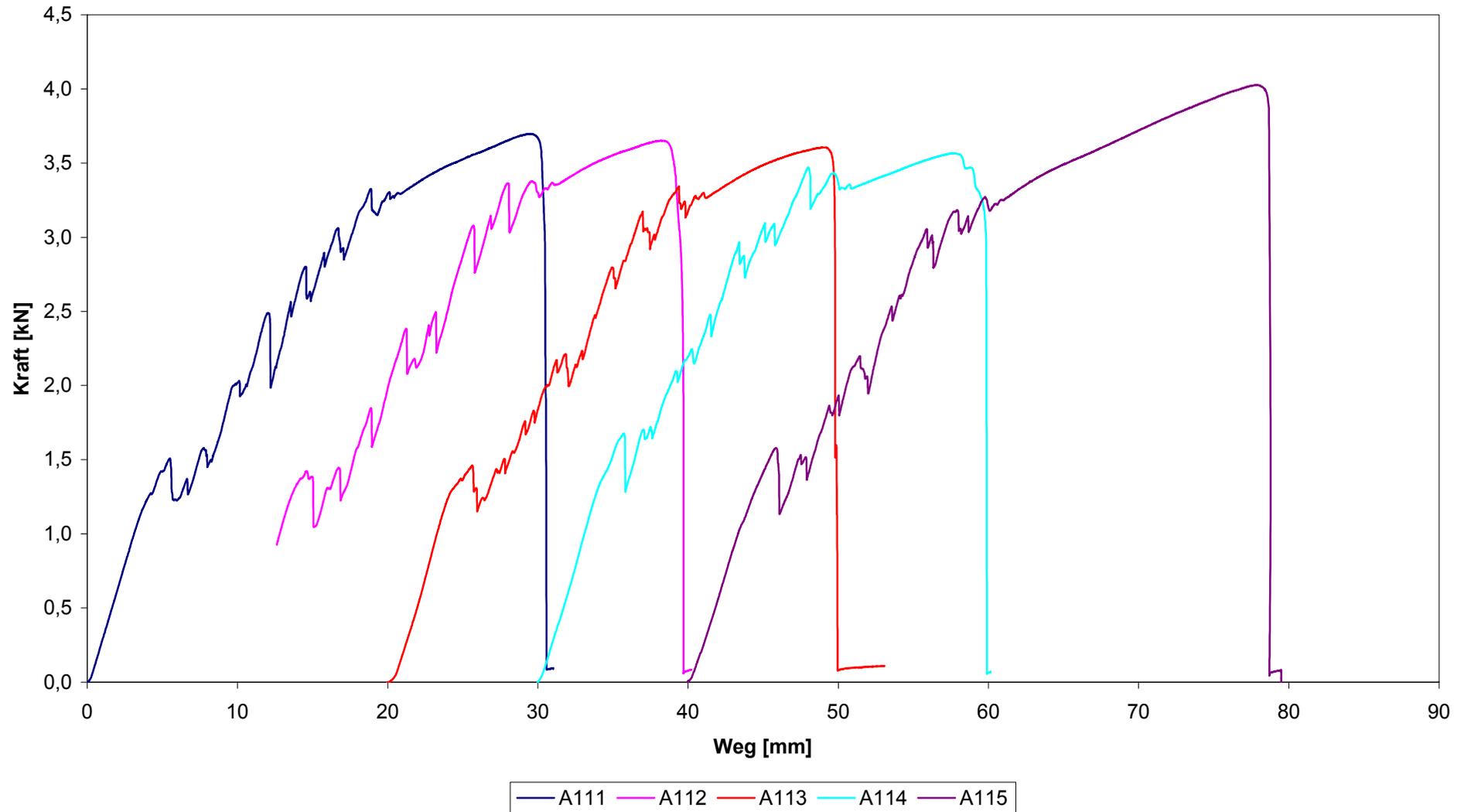
6 Schrifttum

- [1] Z-14.4-407: Gewindeformende Schrauben zur Verbindung von Sandwichelementen mit Unterkonstruktionen aus Stahl oder Holz, 18.12.2006, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [2] Z-14.1-4: Verbindungselemente zur Verbindung von Bauteilen im Metallleichtbau, 06.09.2005, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [3] Prüfprogramm für Sandwichkonstruktionen mit einem Stützkern aus Polyurethan (PUR)-Hartschaum frei von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen zwischen Metalldeckschichten im Zulassungsverfahren, Fassung 3.93, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [4] Prüfprogramm für Sandwichkonstruktionen mit einem schubweichen Kern zwischen Metalldeckschichten im Zulassungsverfahren, 4. Entwurf, 04.06.2002, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin (unveröffentlicht)
- [5] S. Klee, T. Seeger: Vorschlag zur vereinfachten Ermittlung von zulässigen Kräften für Befestigungen von Stahltrapezprofilen, Darmstadt 1979
- [6] Versuchsbericht Nr. 10/78: Tragfähigkeit von Schraubenbefestigungen für Hoeschisowand Sandwichelemente unter statischer und wiederholter Belastung, Institut für Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt 1978 (unveröffentlicht)
- [7] Baehre, R.: Bericht über den Vergleich von Auszugsversuchen von Schrauben aus Stahltrapezprofilen und Sandwichelementen, Karlsruhe 1990 (Anlage zum Schreiben vom 12.11.1990 an das Deutsche Institut für Bautechnik, unveröffentlicht)
- [8] Márkus, G.: Theorie und Berechnung rotationssymmetrischer Bauwerke, Düsseldorf 1978
- [9] P. Hassinen: Tensile resistance of screw fastenings of sandwich panels, comparison of the test results given by two tes arrangements: ECCS TWG 7.9 / CIB W56 Joint Committee on Sandwich Constructions, Minutes from 7th meeting held in Düsseldorf 5.-6.10.2006

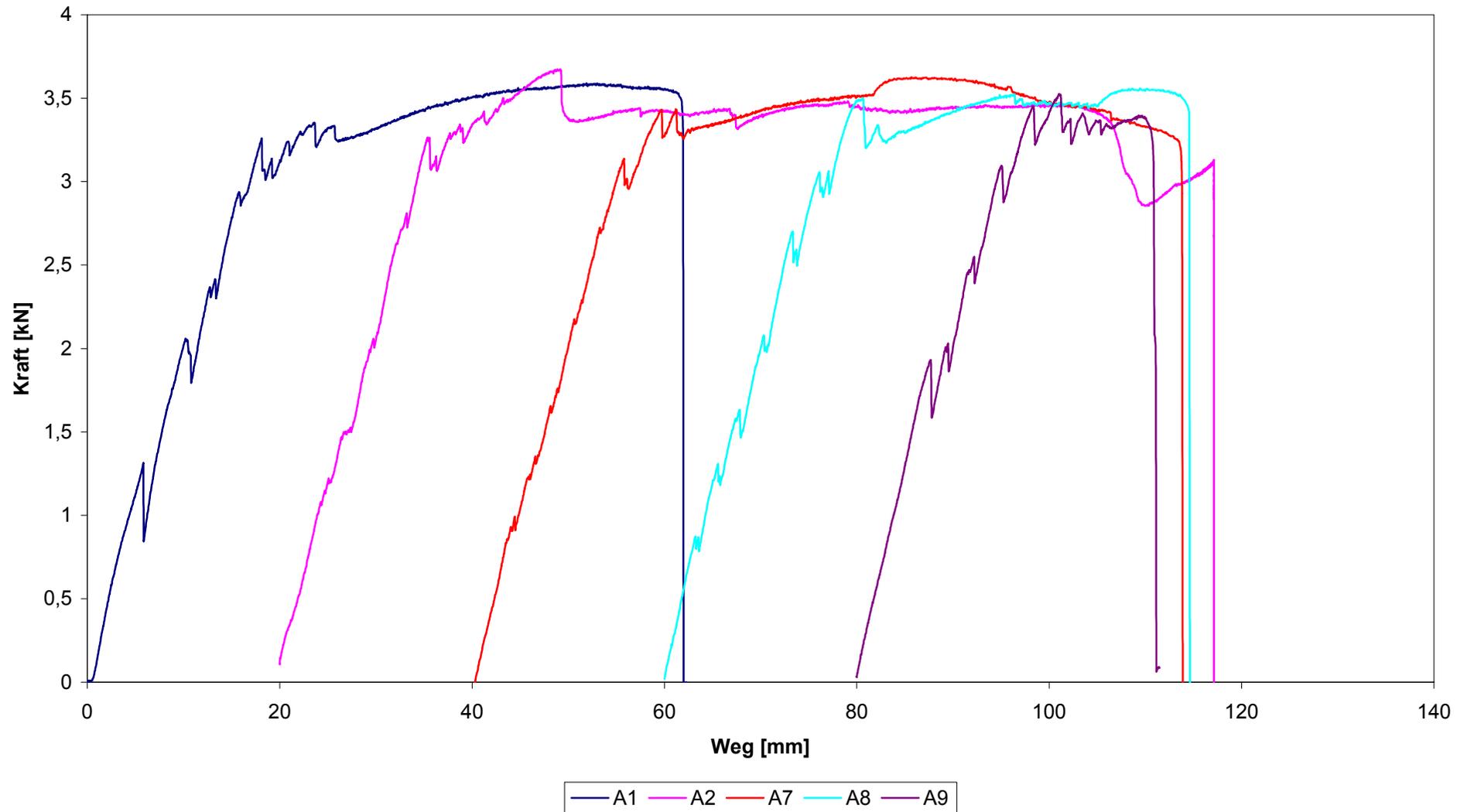
Versuchsserie A, \varnothing_s 11mm



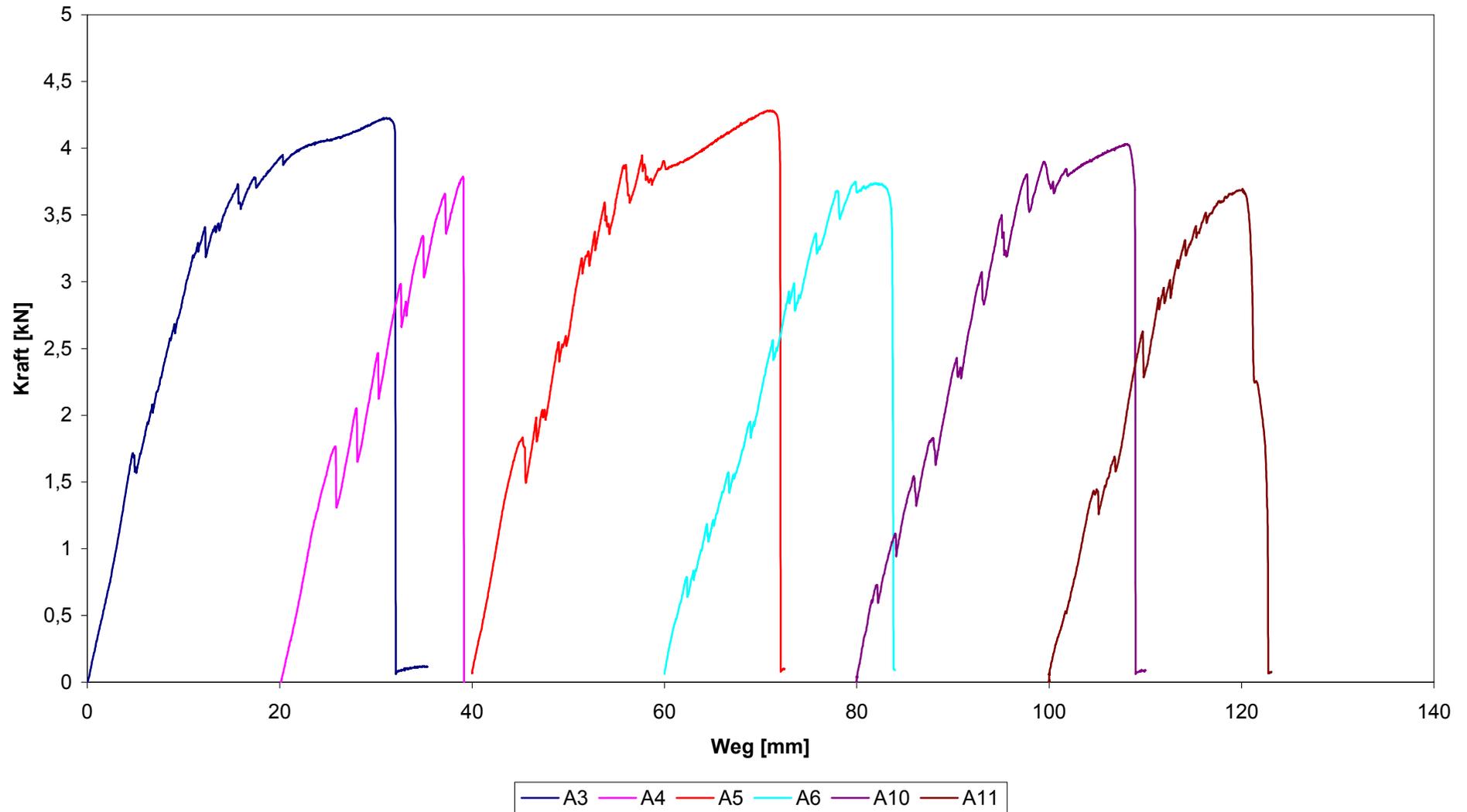
Versuchsserie A, \varnothing_s 14mm



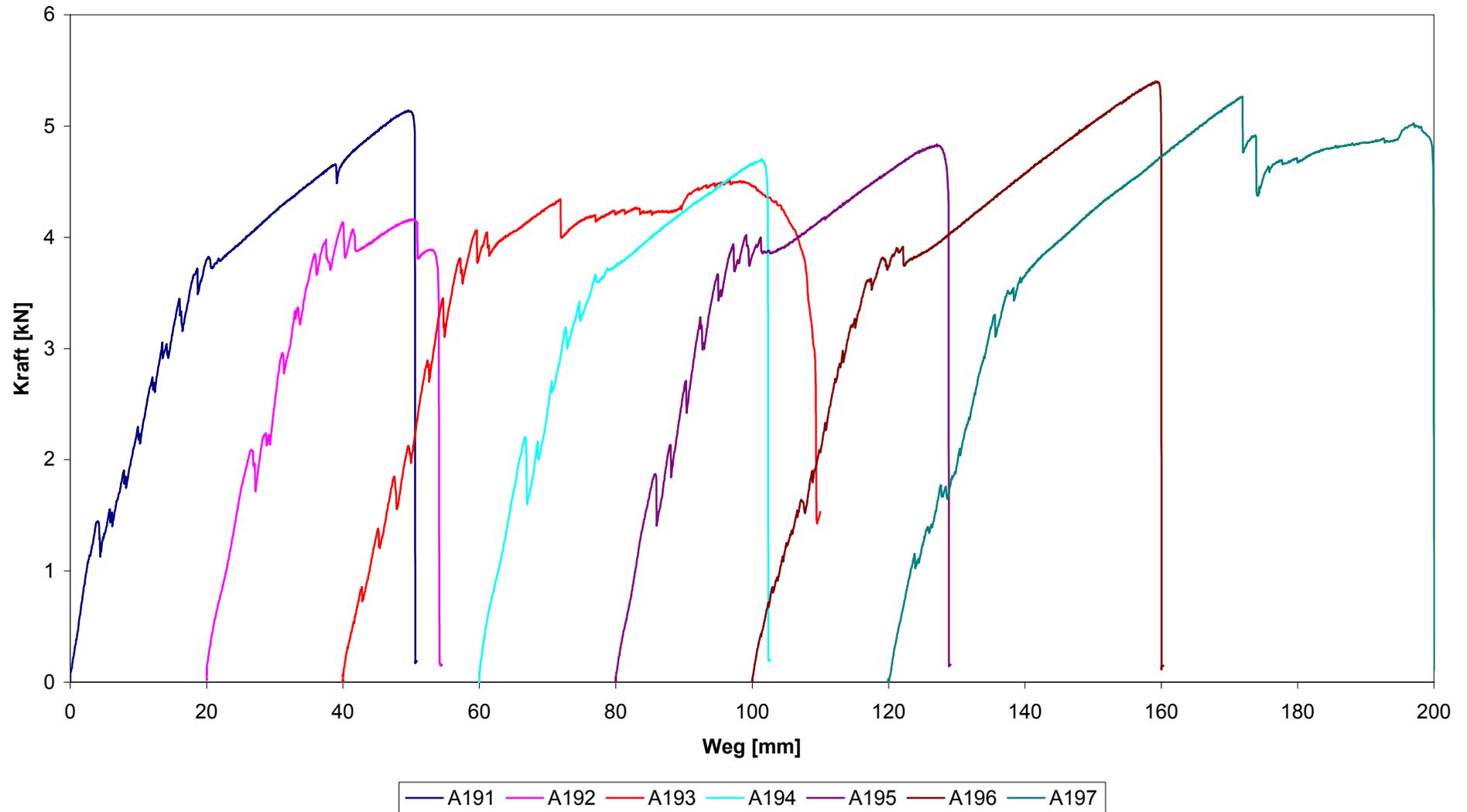
Versuchsserie A, \varnothing_s 16mm, Orientierung 1



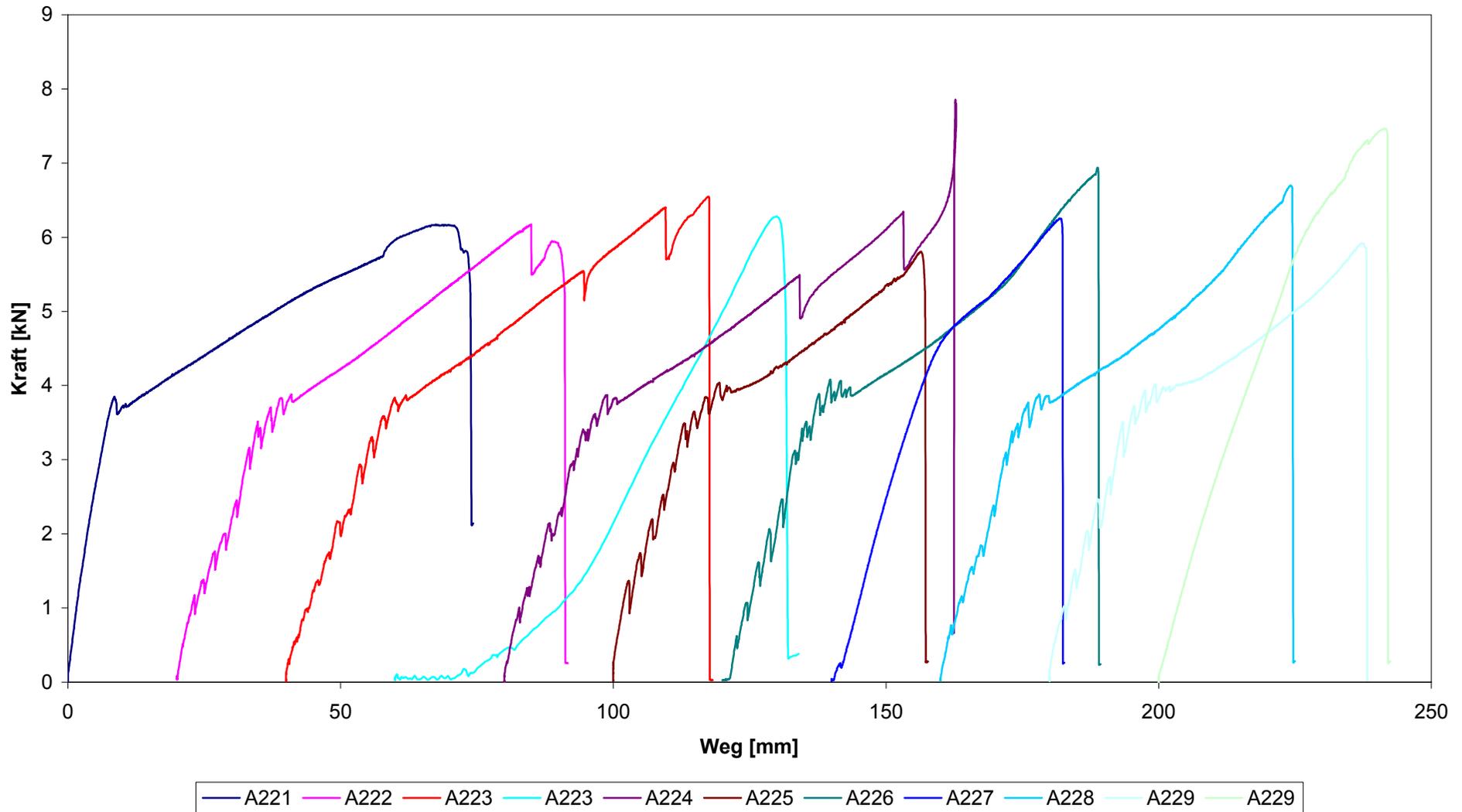
Versuchsserie A, \varnothing_s 16mm, Orientierung 2



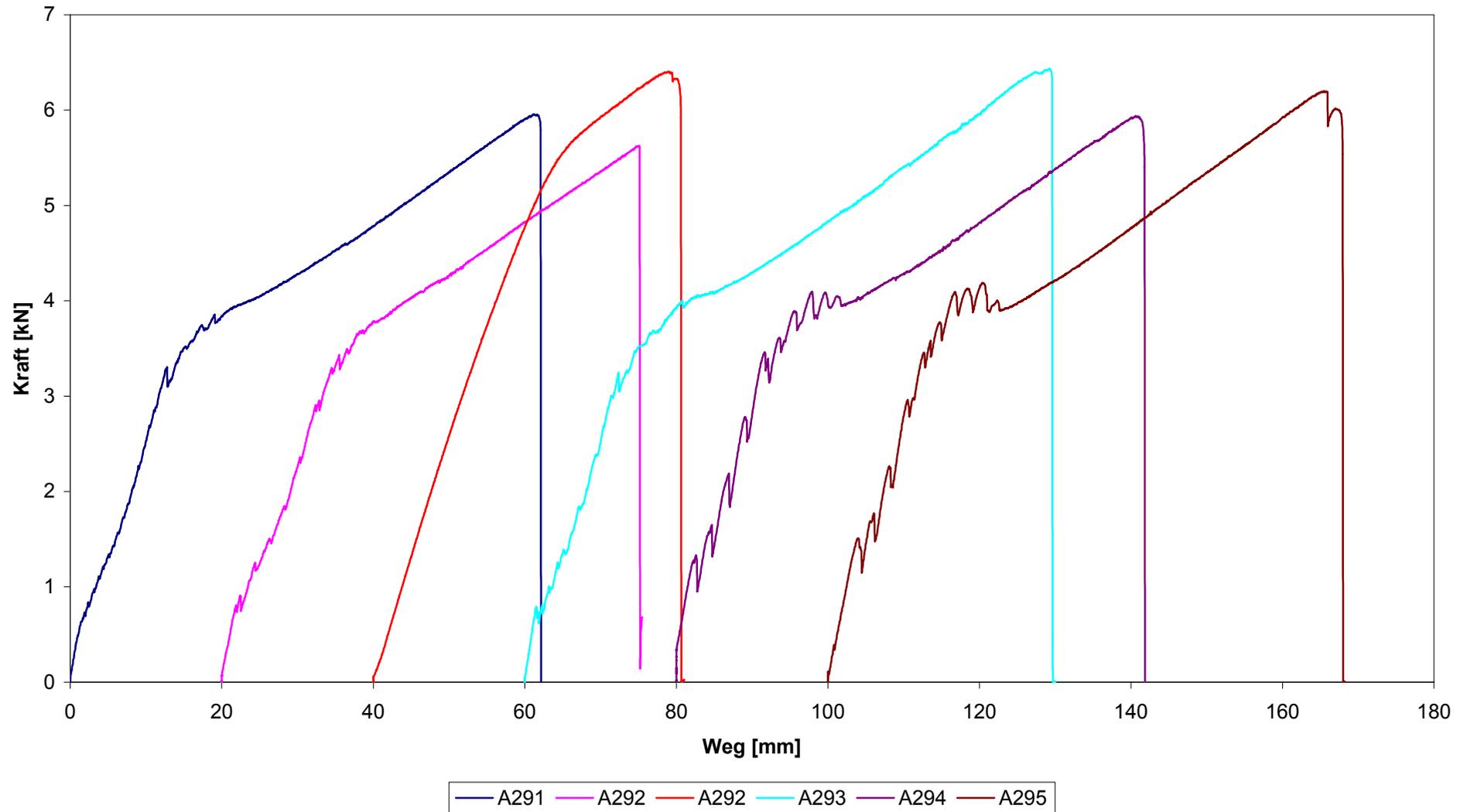
Versuchsserie A, \varnothing_s 19mm



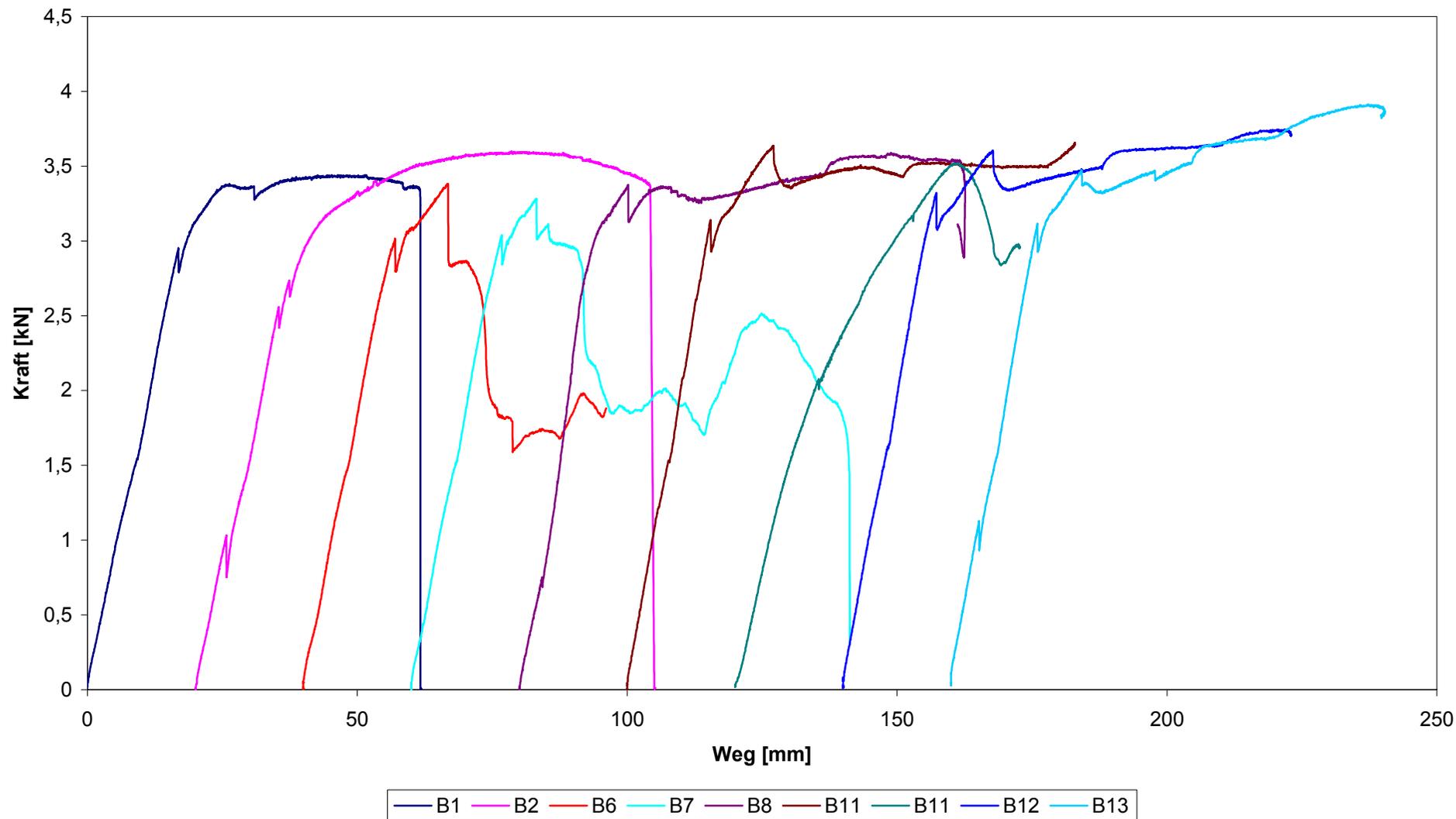
Versuchsserie A, \varnothing_s 22mm



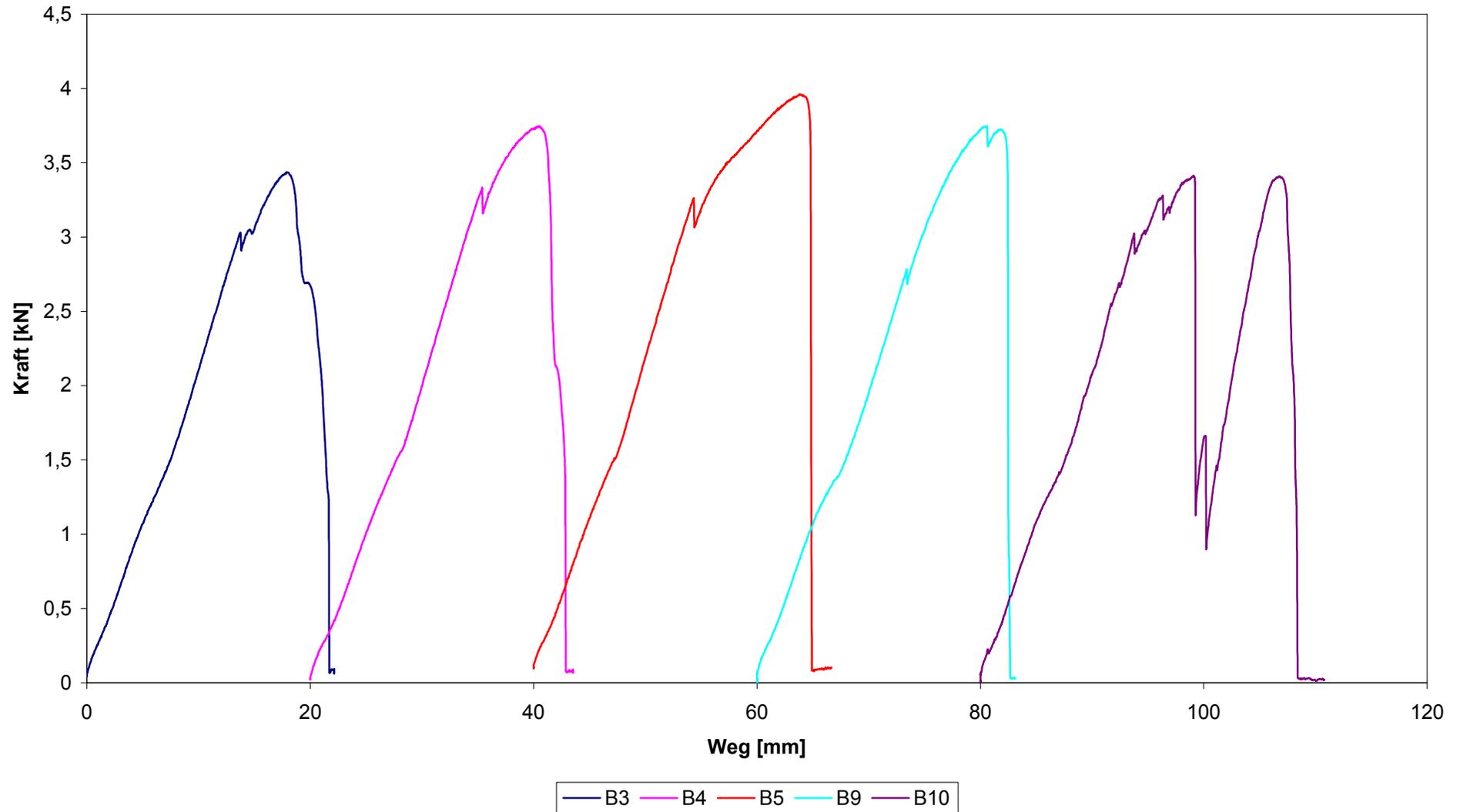
Versuchsserie A, \varnothing_s 29mm



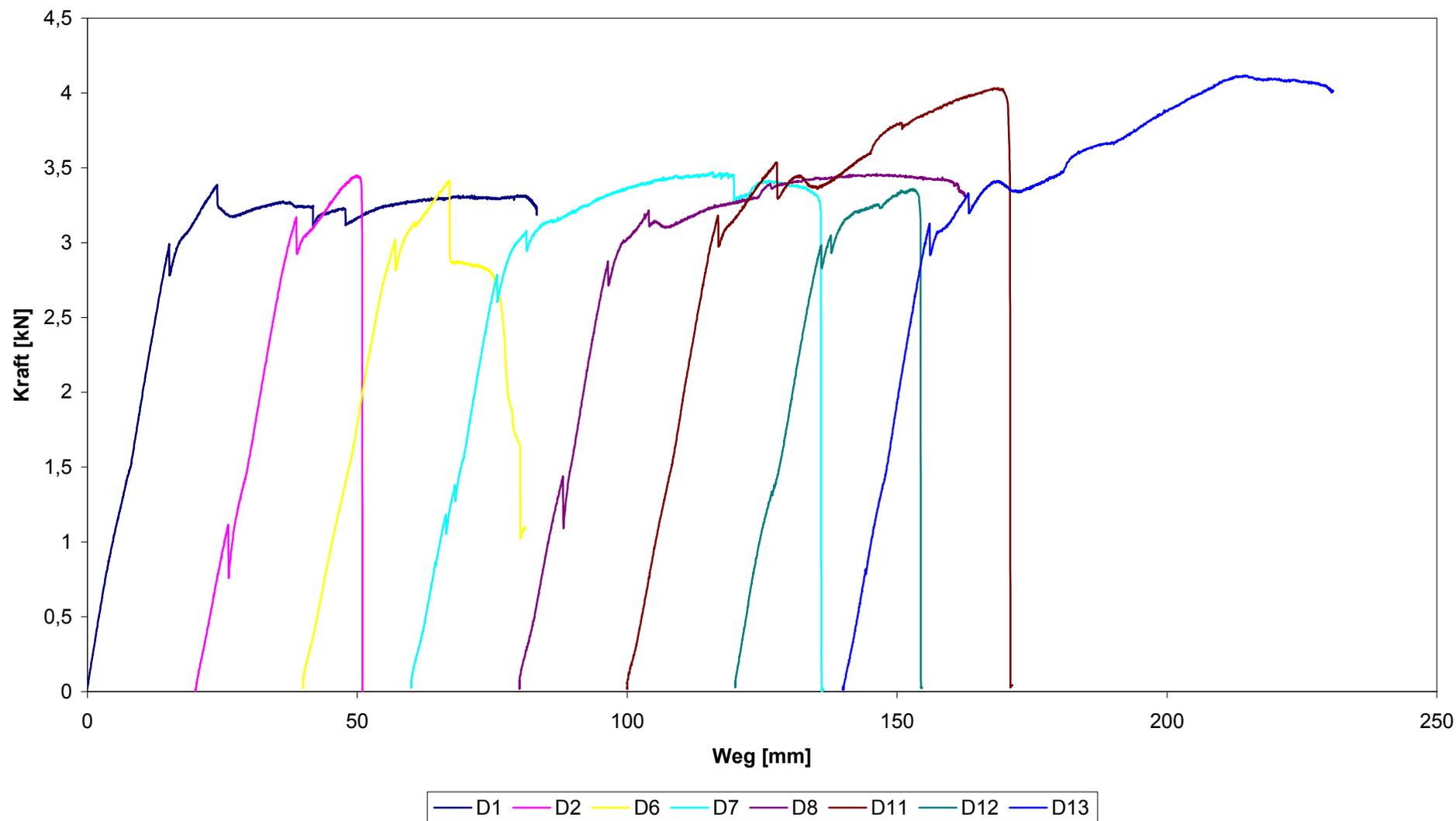
Versuchsserie B mit Orientierung 1



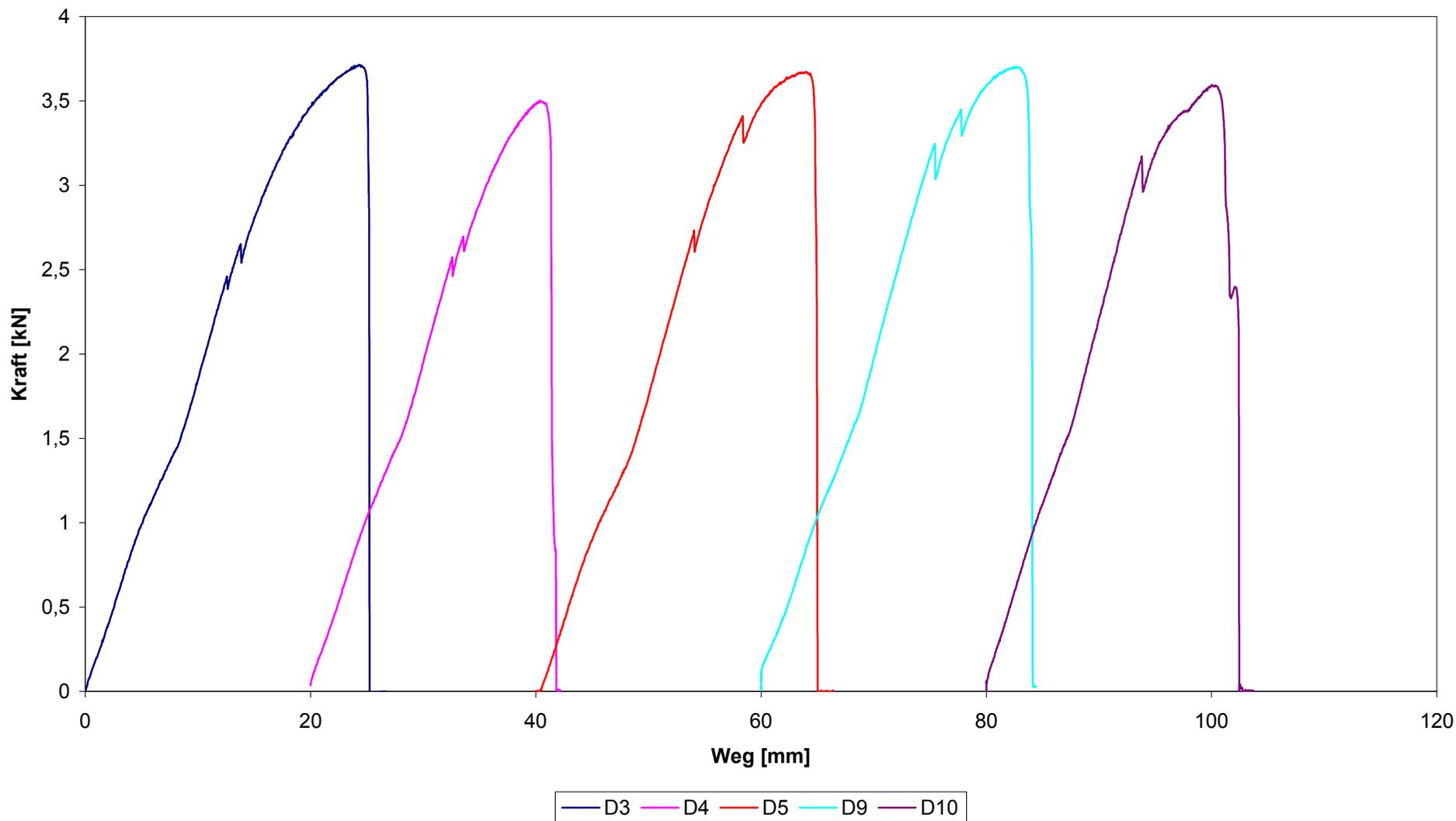
Versuchsserie B mit Orientierung 2



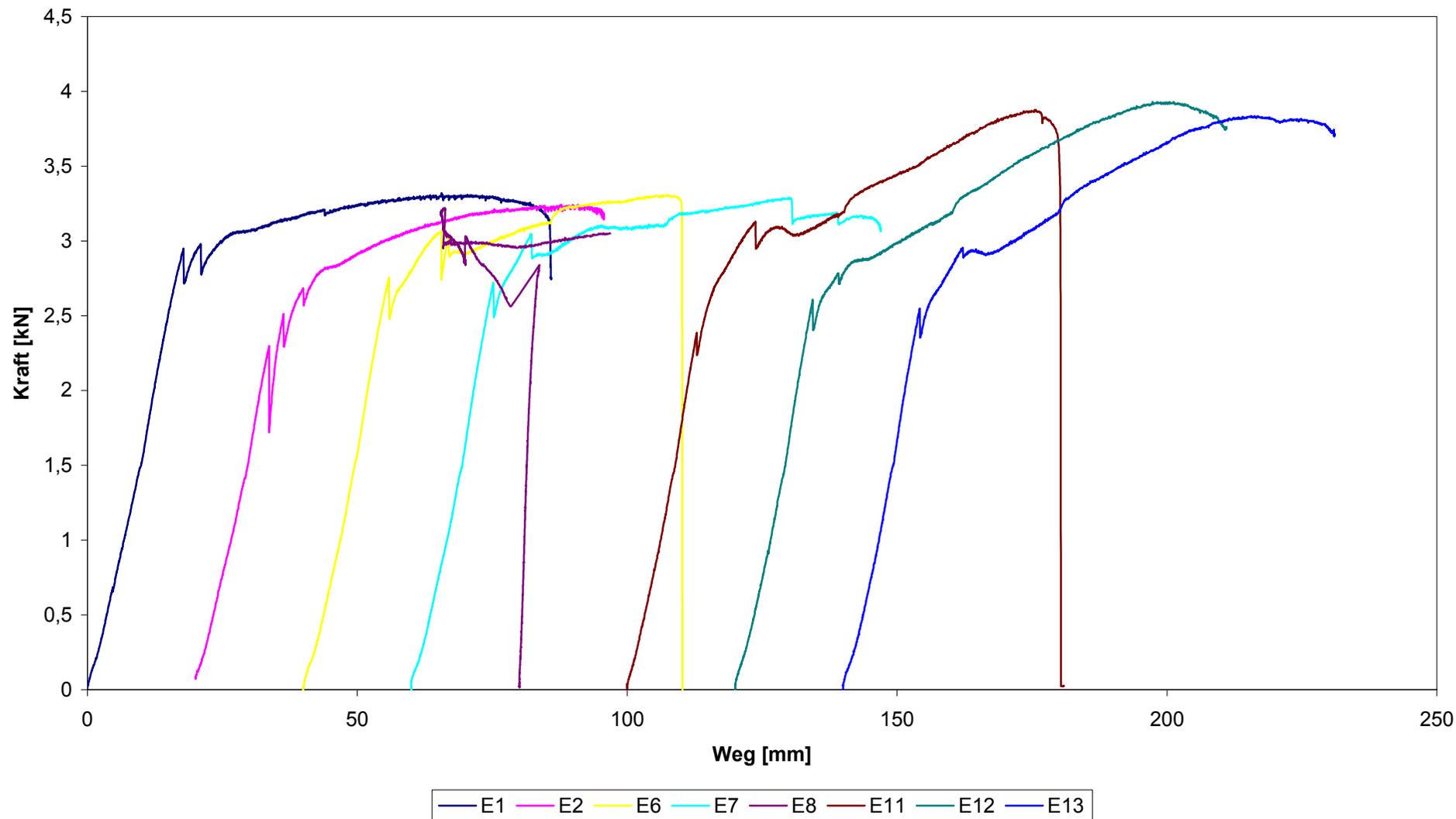
Versuchsserie D mit Orientierung 1



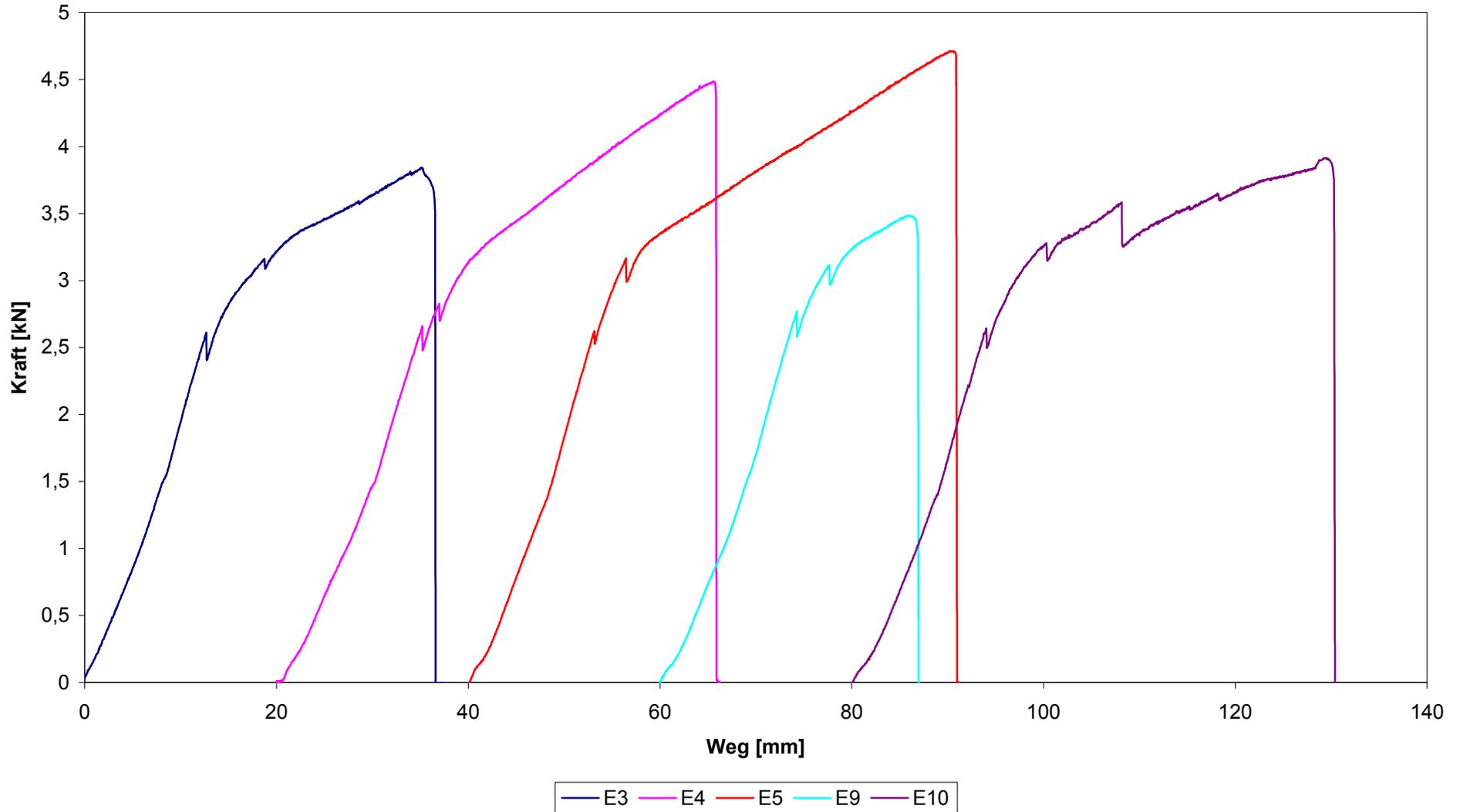
Versuchsserie D mit Orientierung 2



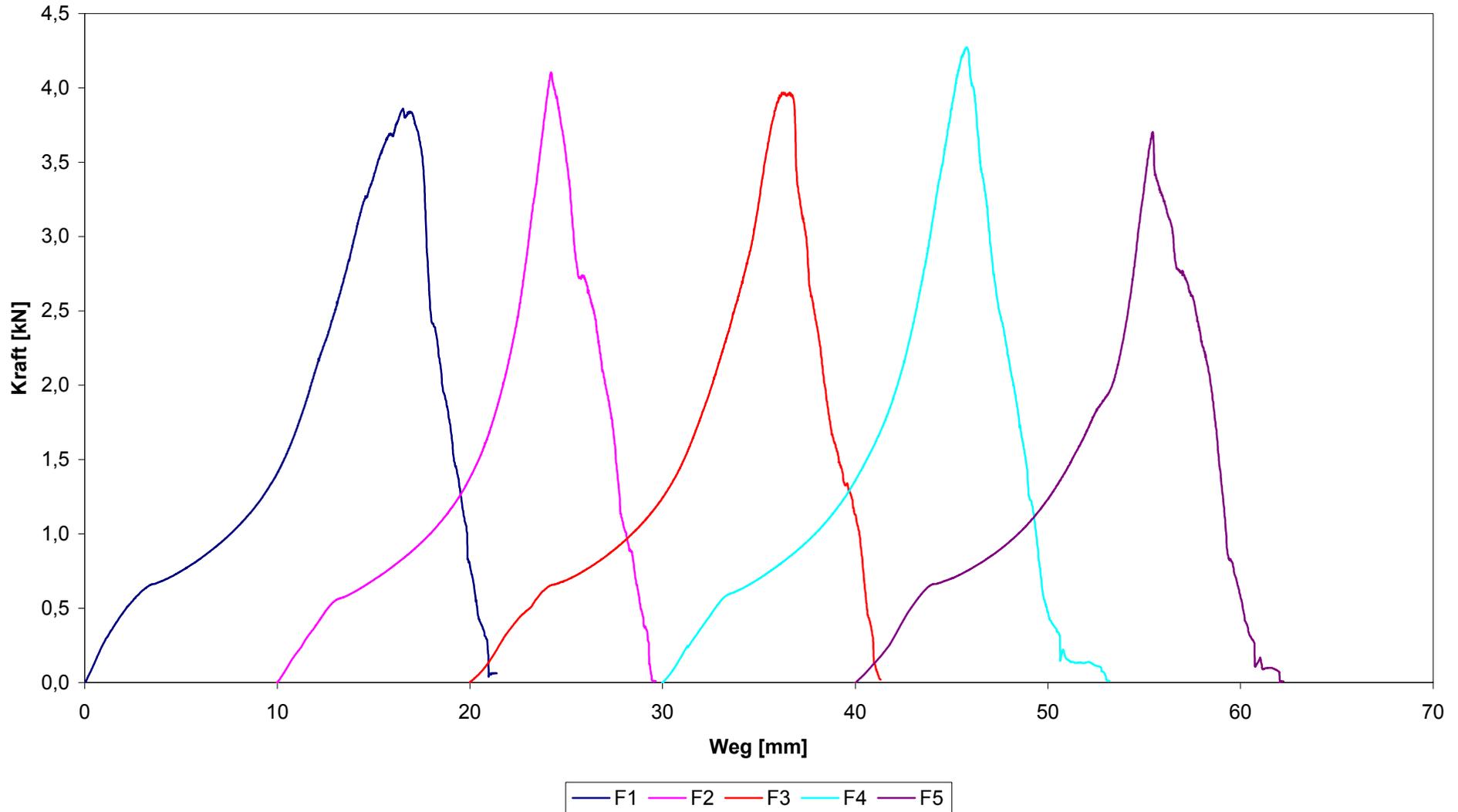
Versuchsserie E mit Orientierung 1



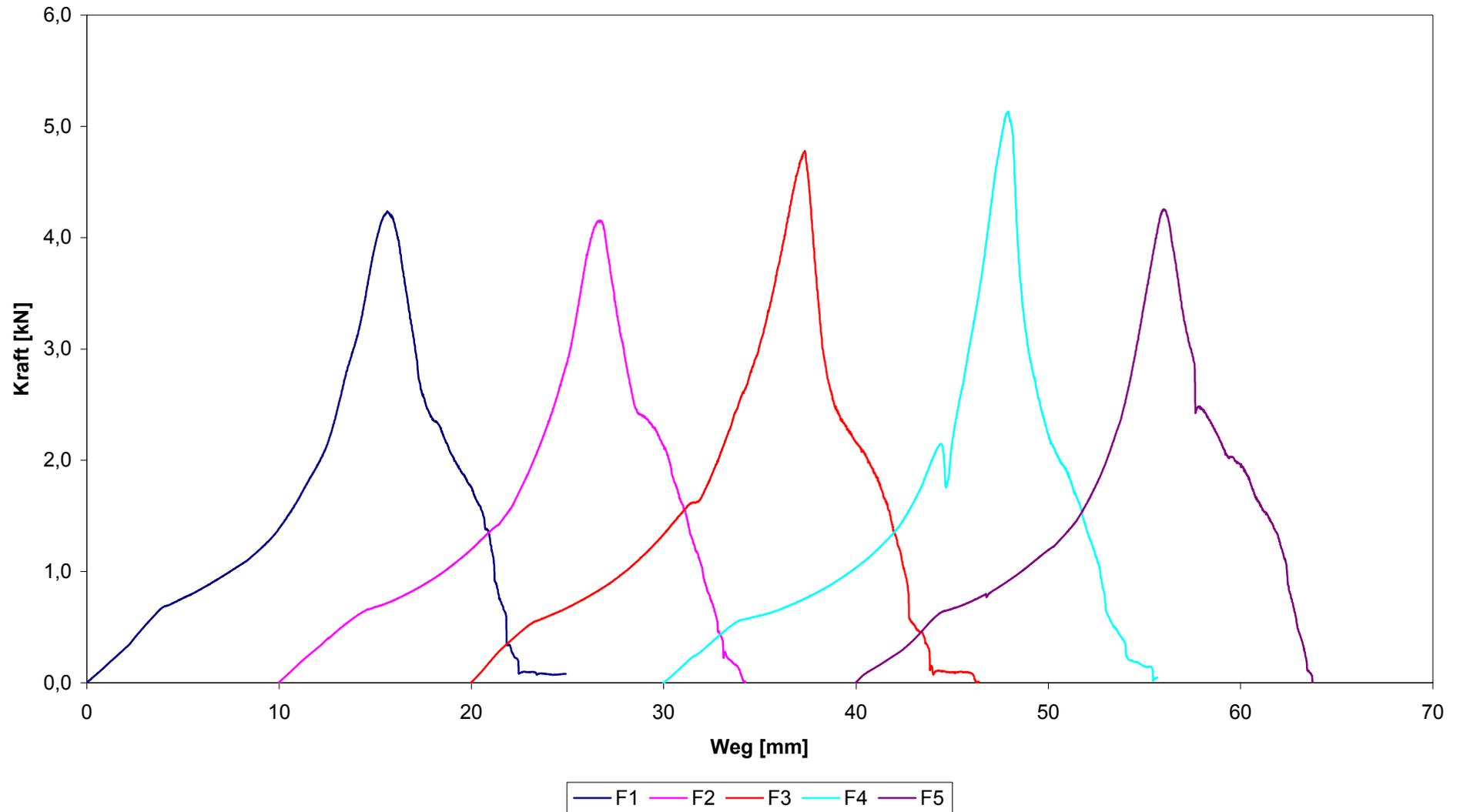
Versuchsserie E mit Orientierung 2



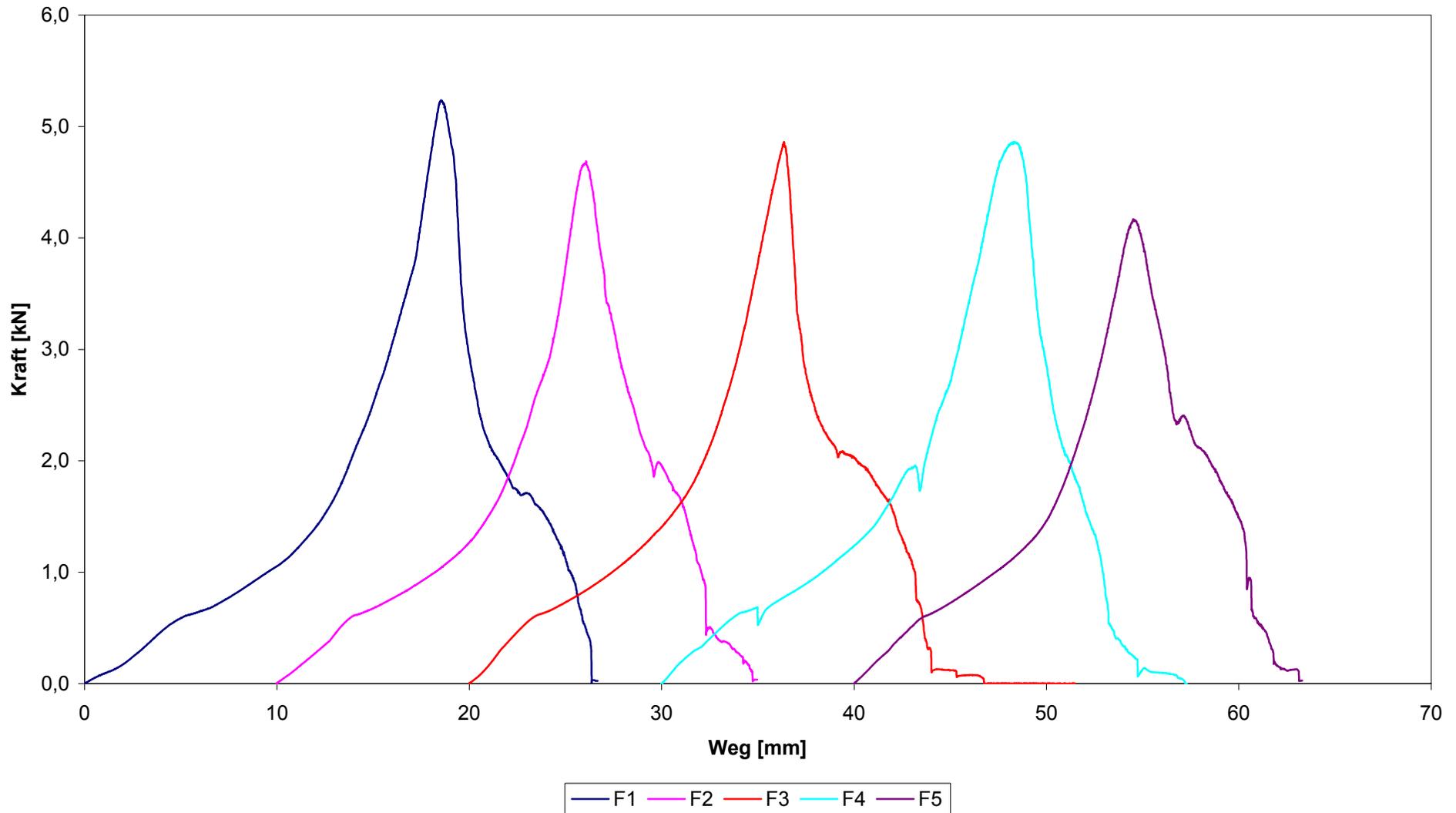
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 11mm



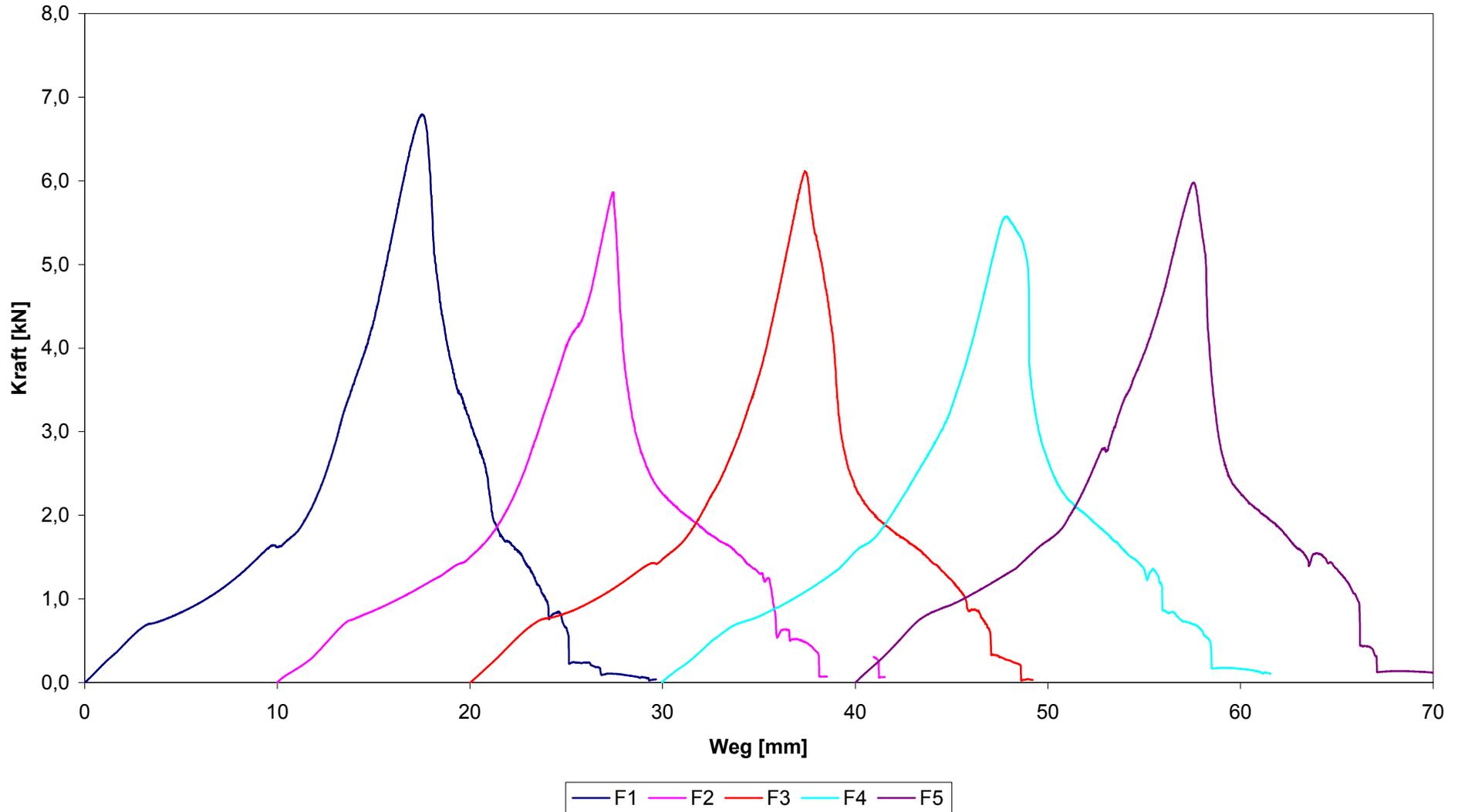
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 14mm



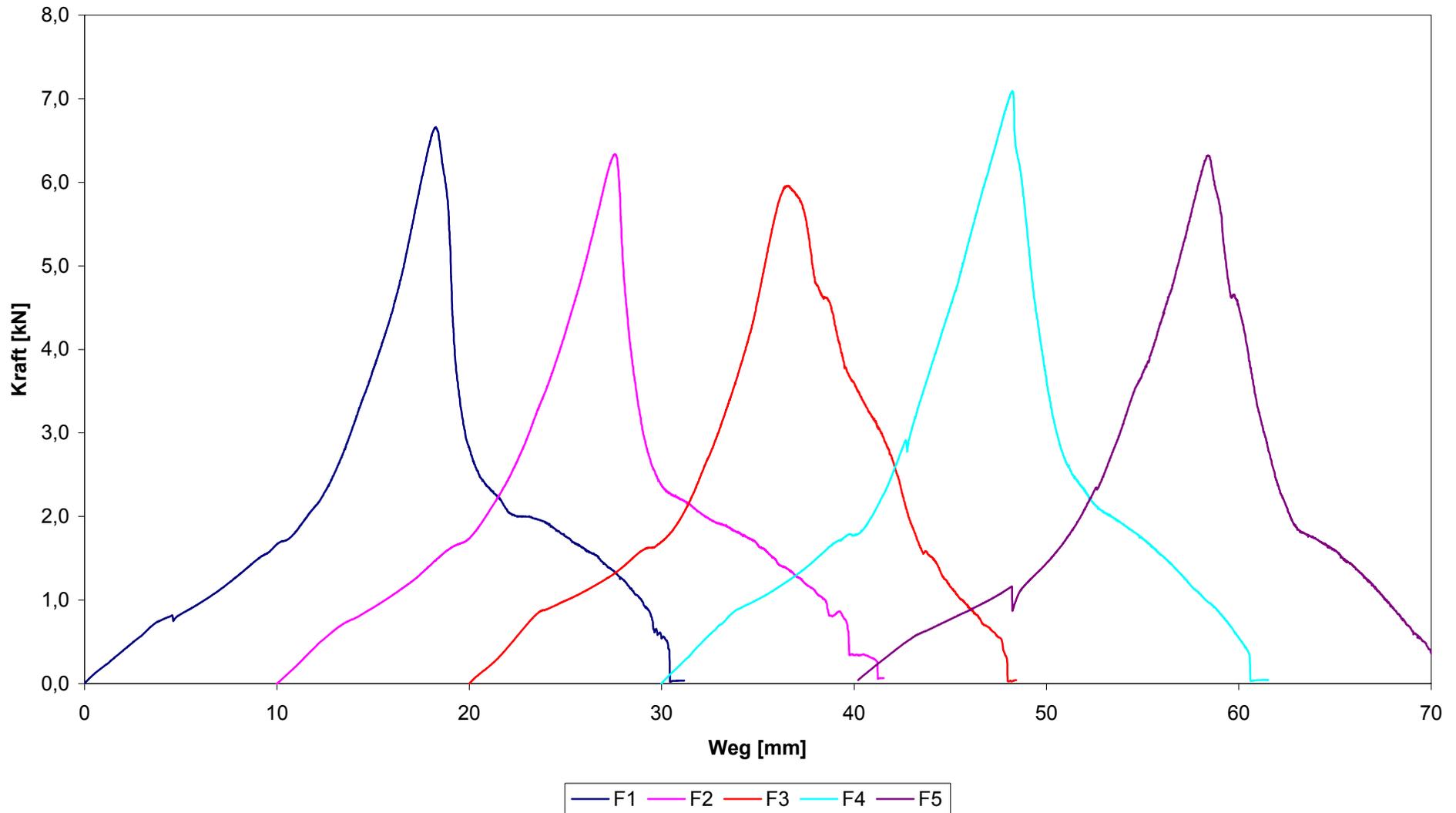
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 16mm



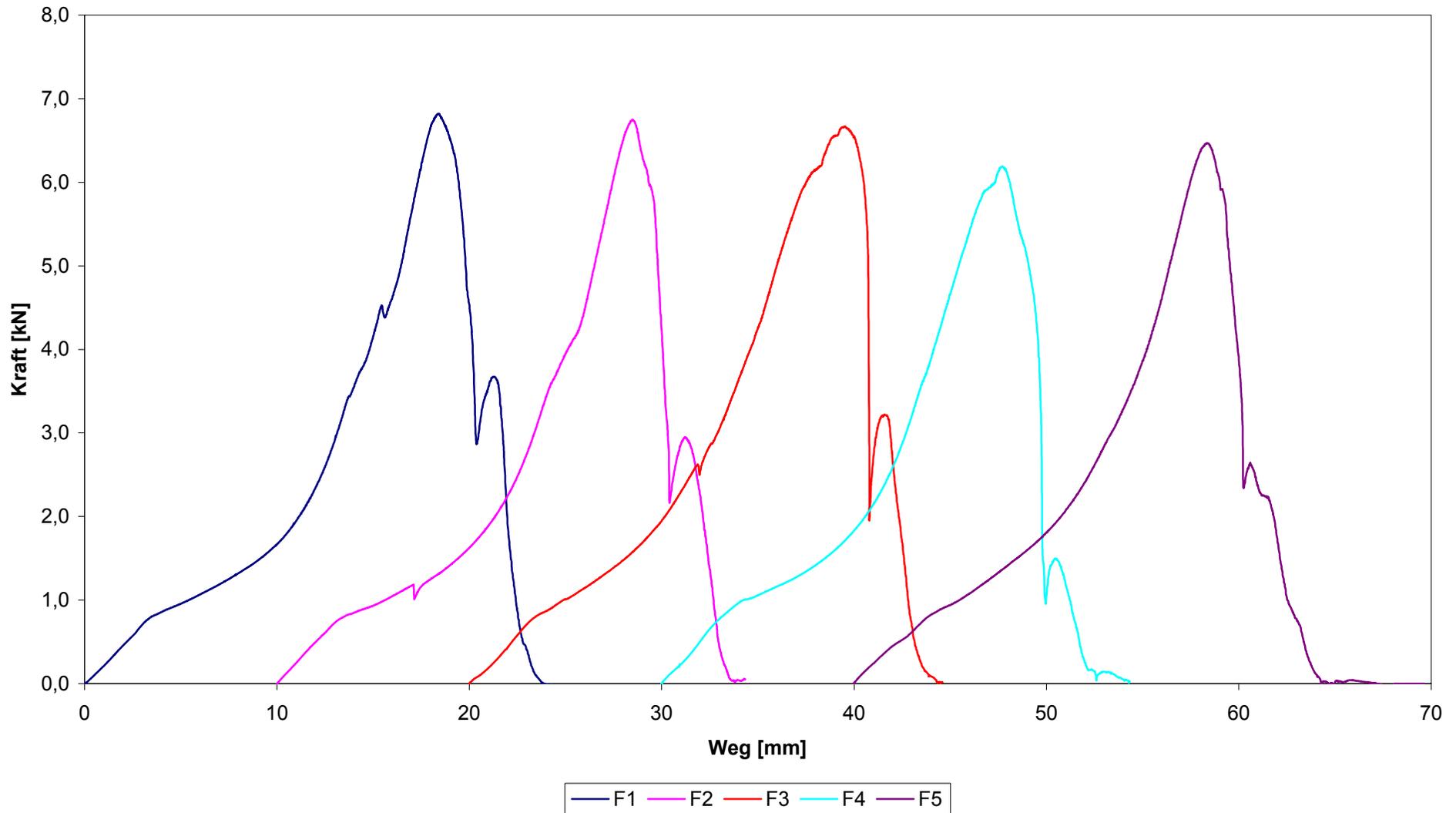
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 19mm



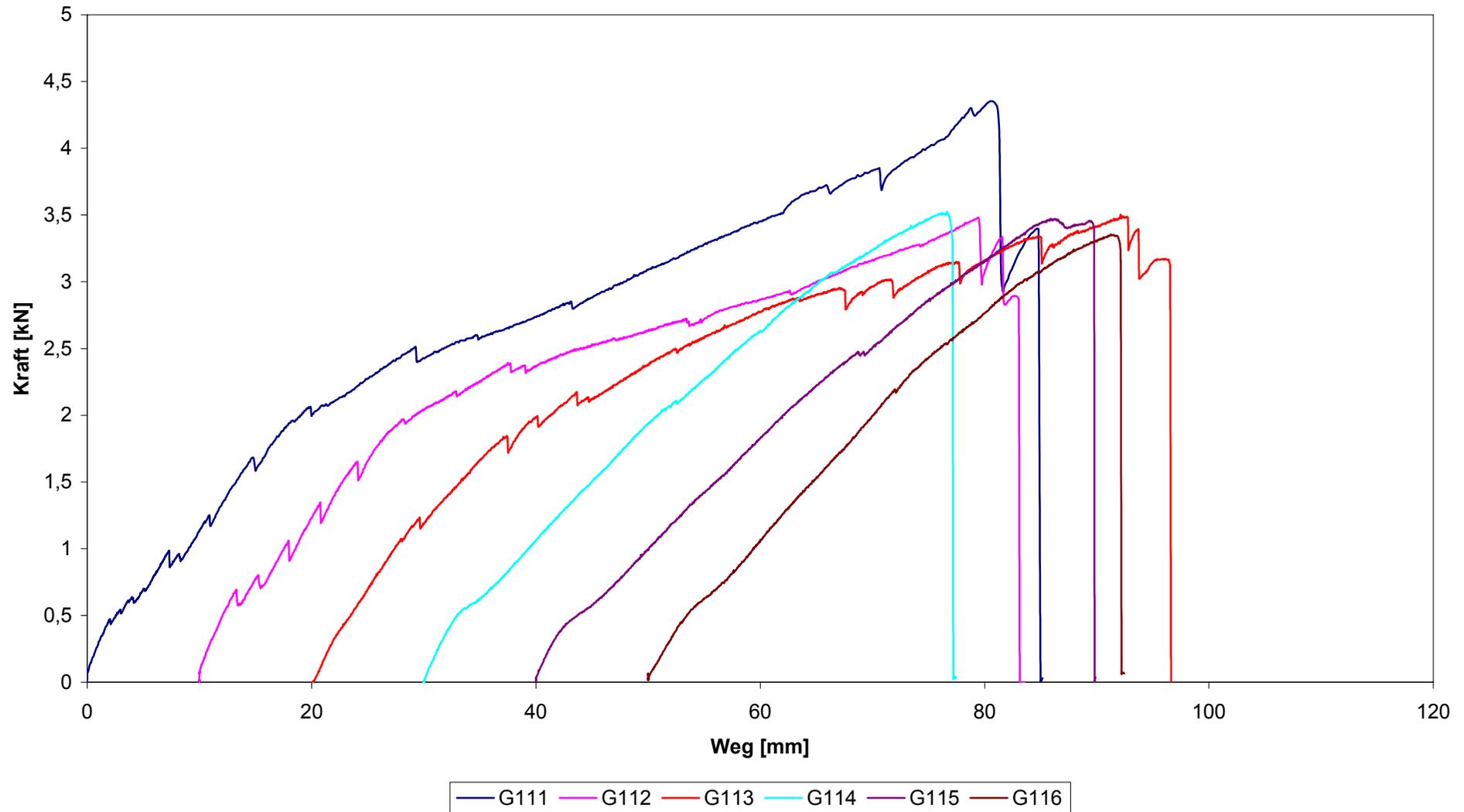
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 22mm



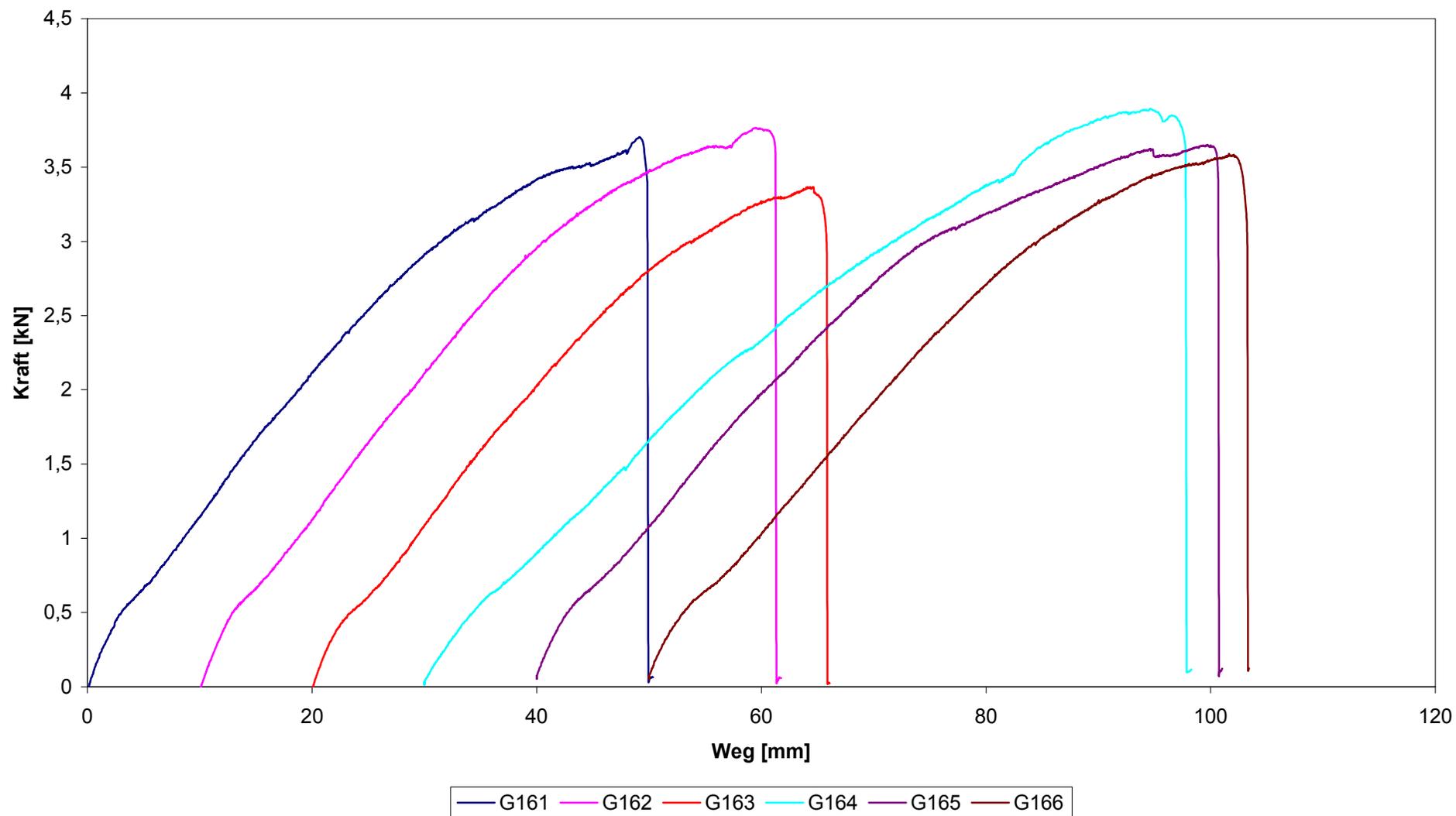
Versuchsserie F mit Scheiben \varnothing 29mm



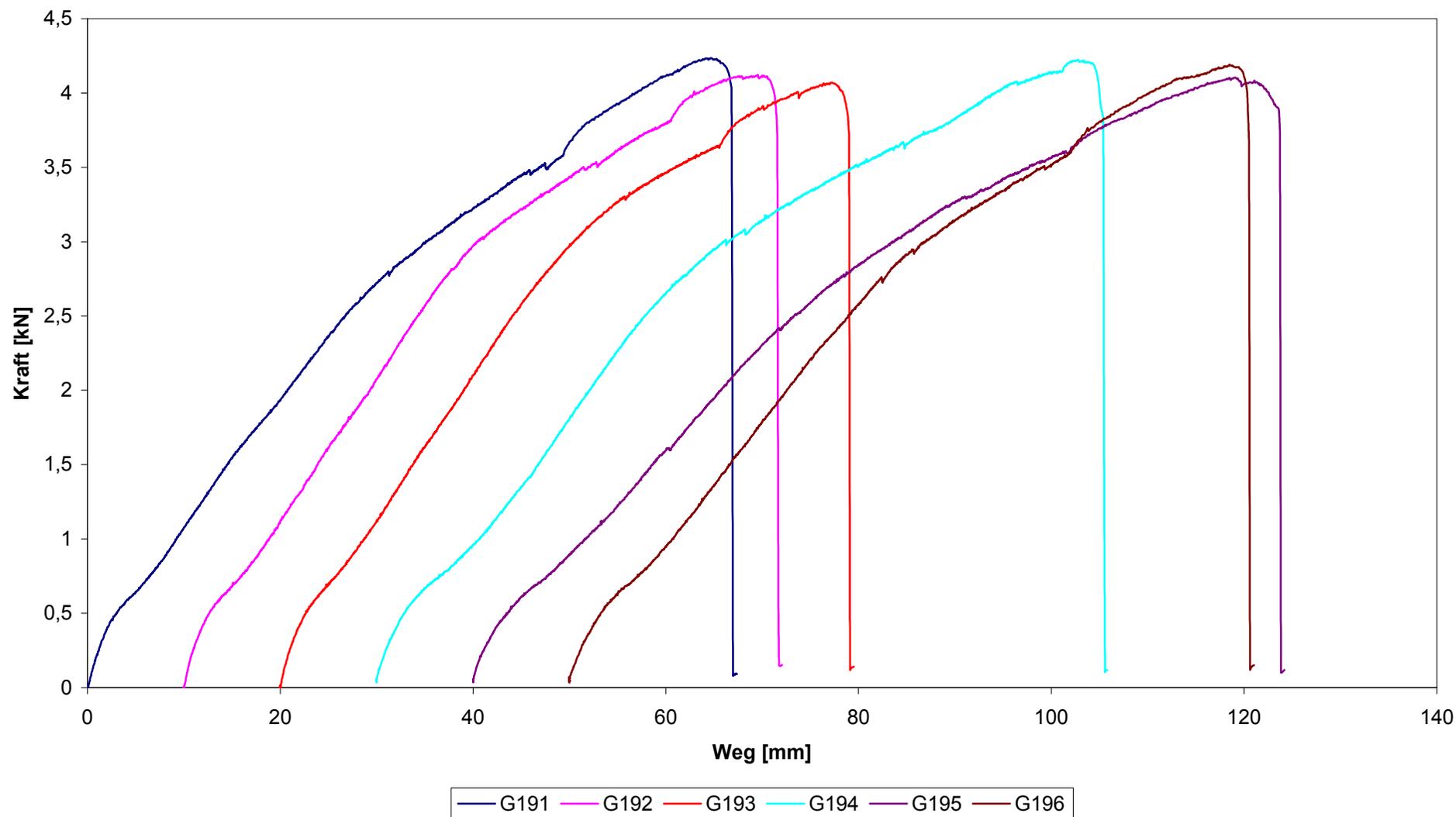
Versuchsserie G, \varnothing_S 11mm, $e_1 = 20$ mm



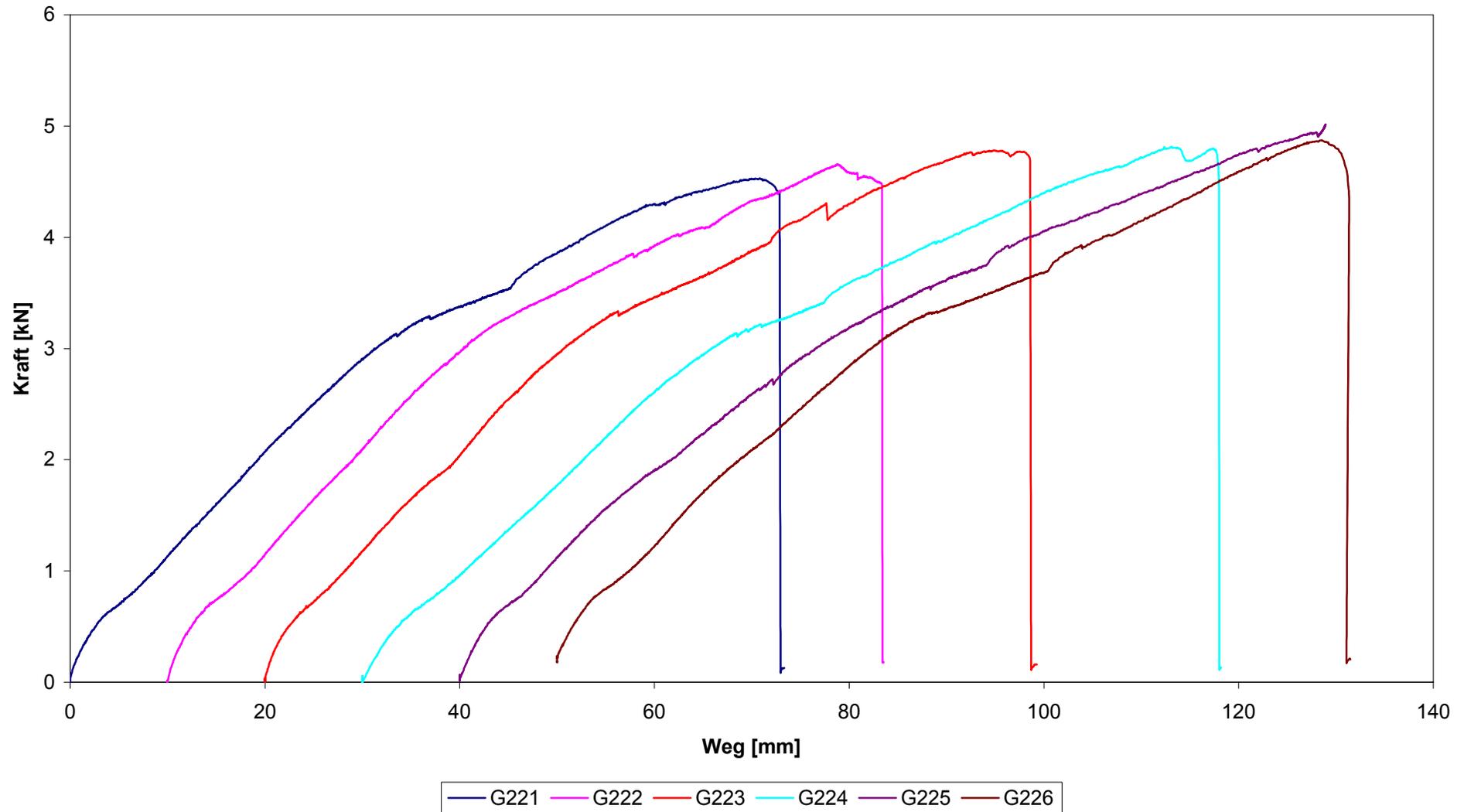
Versuchsserie G, \varnothing_S 16mm, $e_1 = 20$ mm



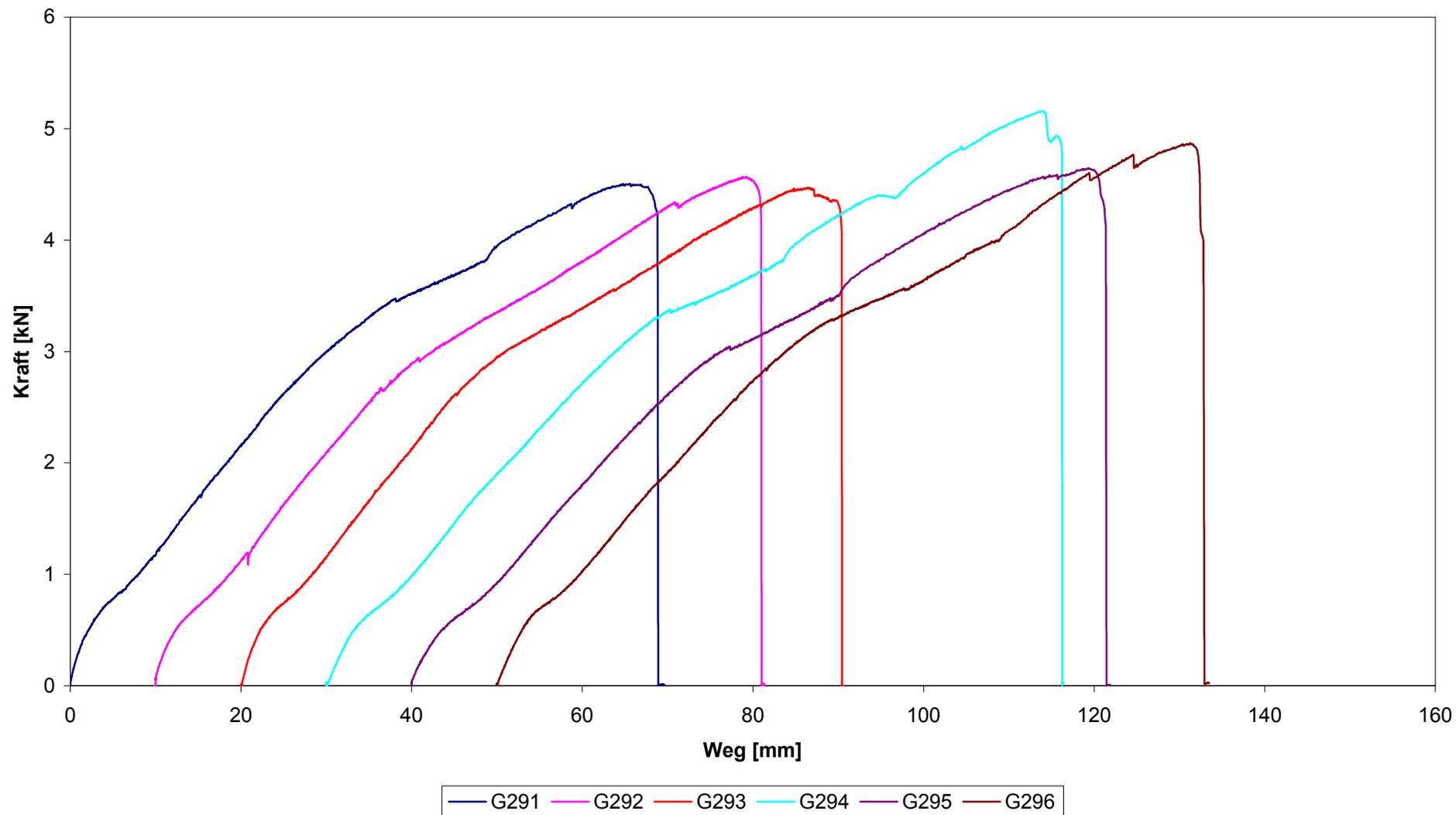
Versuchsserie G, \varnothing_S 19mm, $e_1 = 20$ mm



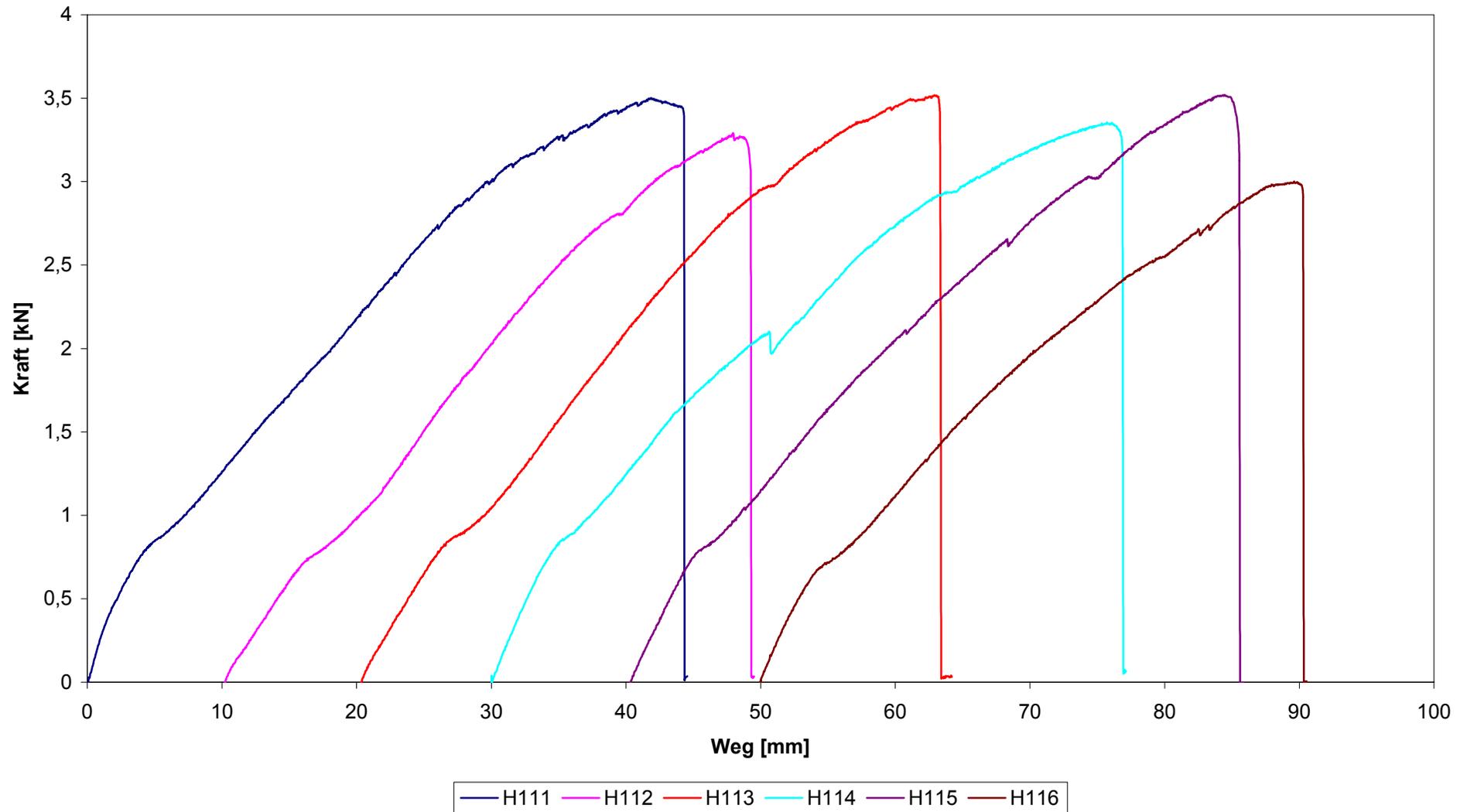
Versuchsserie G, \varnothing_S 22mm, $e_1 = 20$ mm



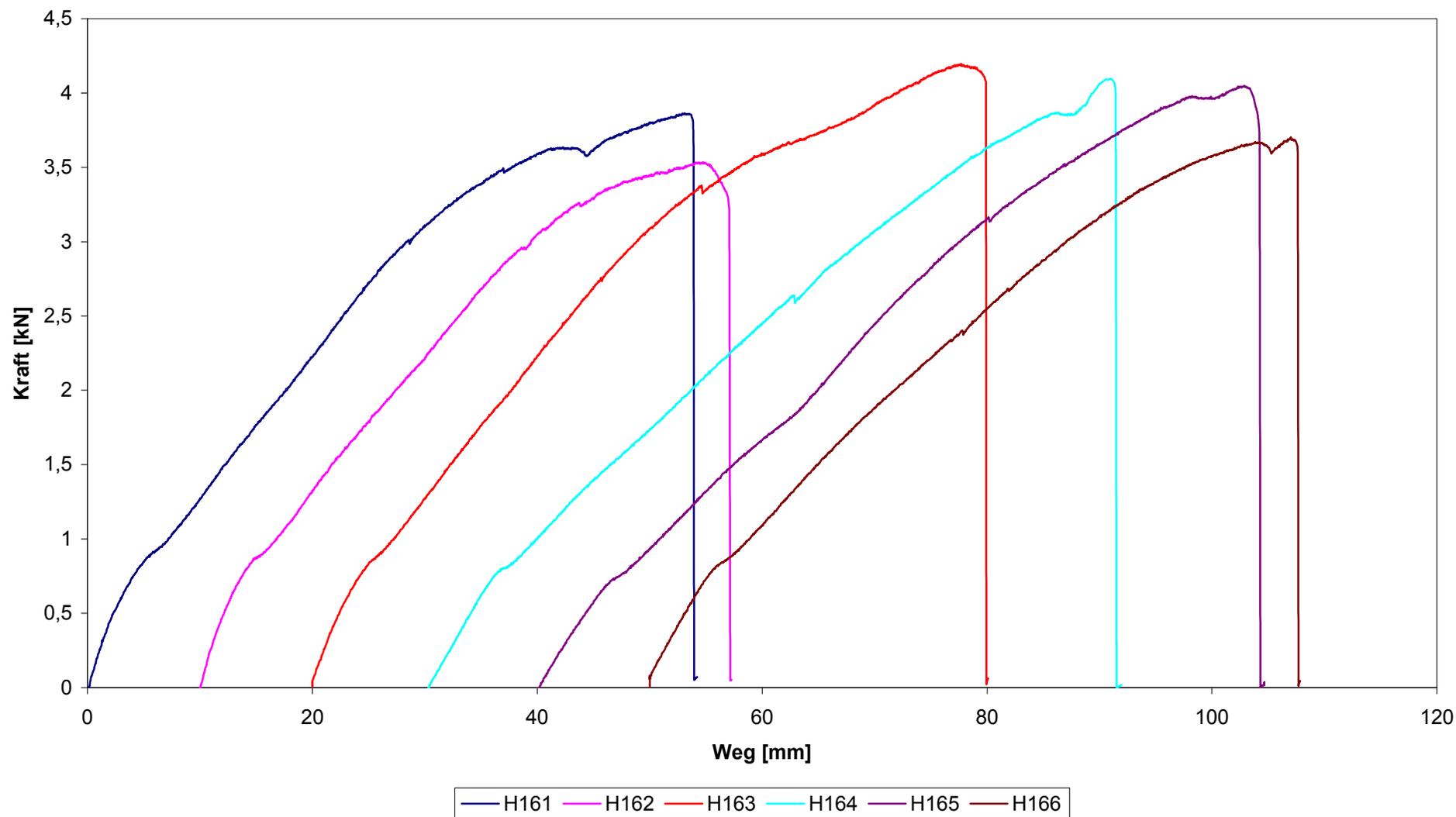
Versuchsserie G, \varnothing_S 29mm, $e_1 = 20$ mm



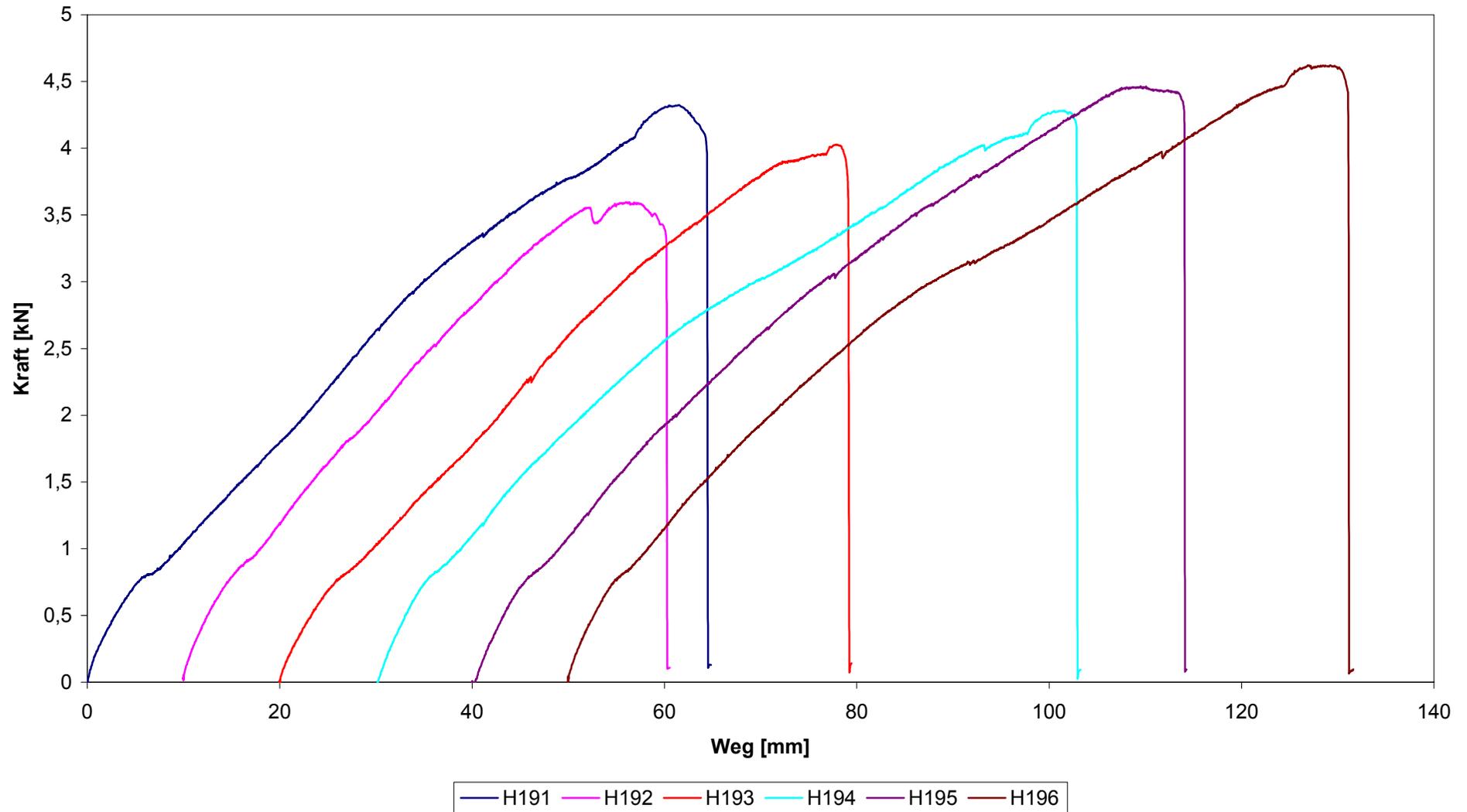
Versuchsserie H, \varnothing_s 11mm, $e_1 = 30$ mm



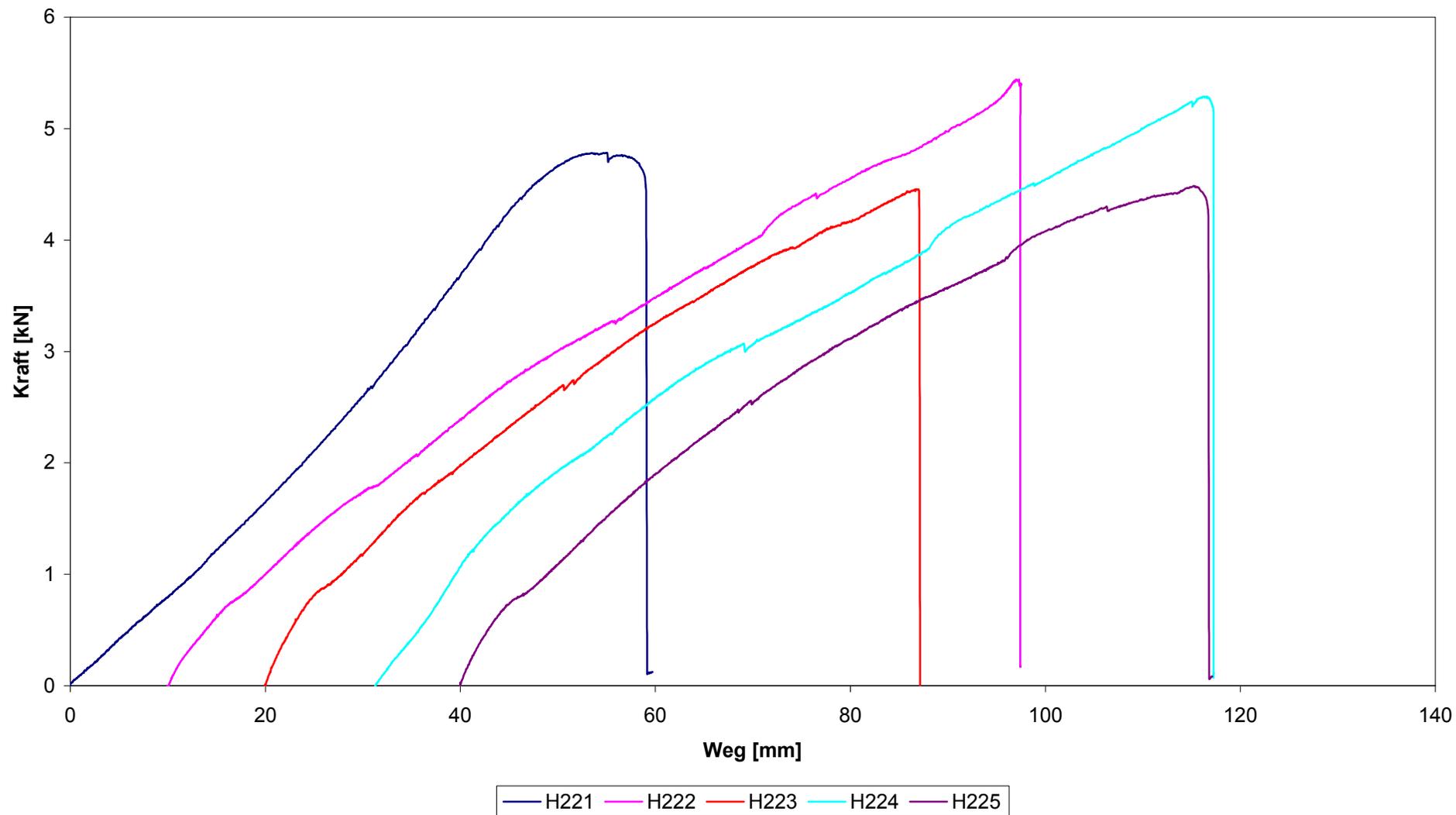
Versuchsserie H, \varnothing_s 16mm, $e_1 = 30$ mm



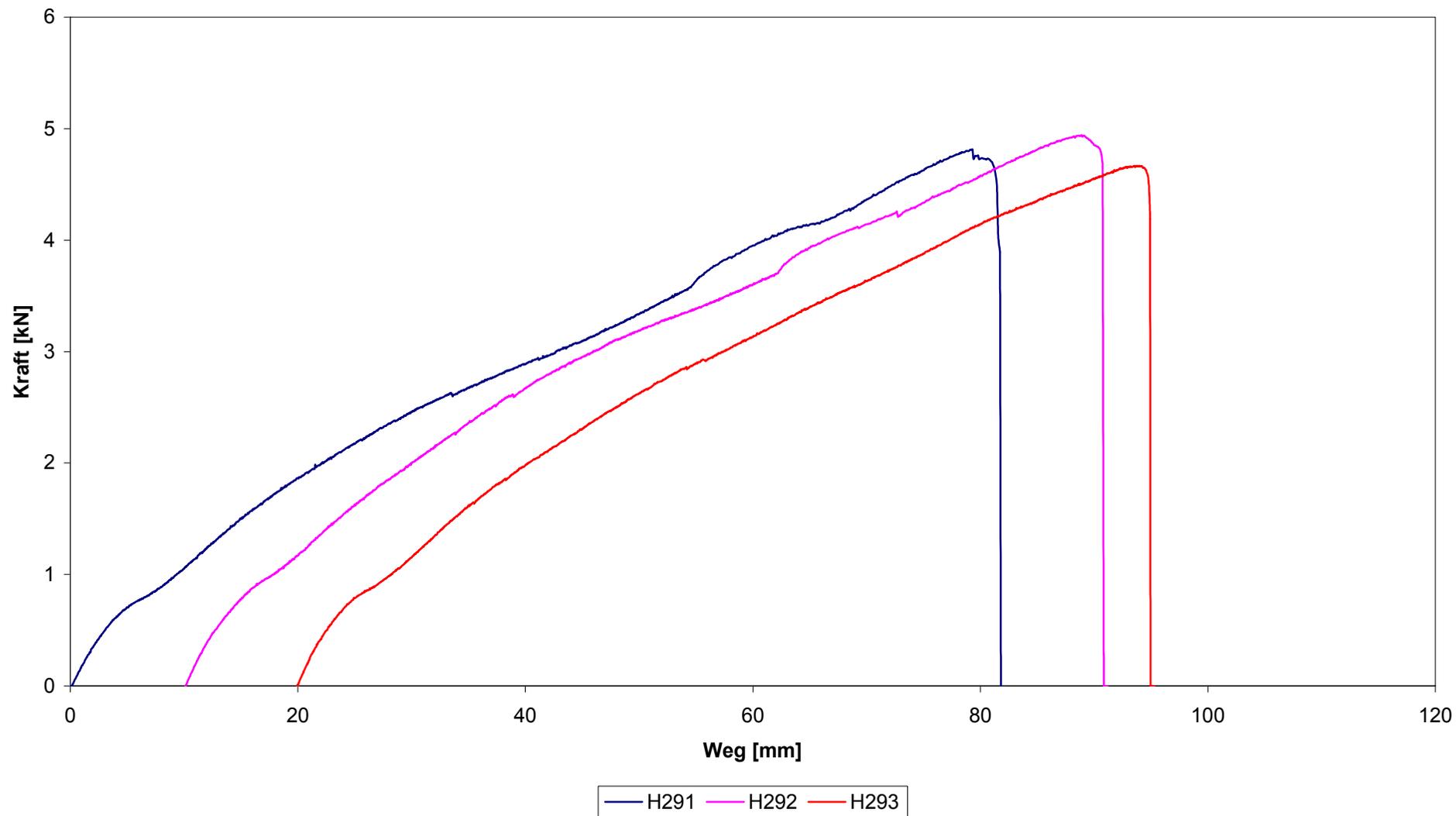
Versuchsserie H, \varnothing_s 19mm, $e_1 = 30$ mm



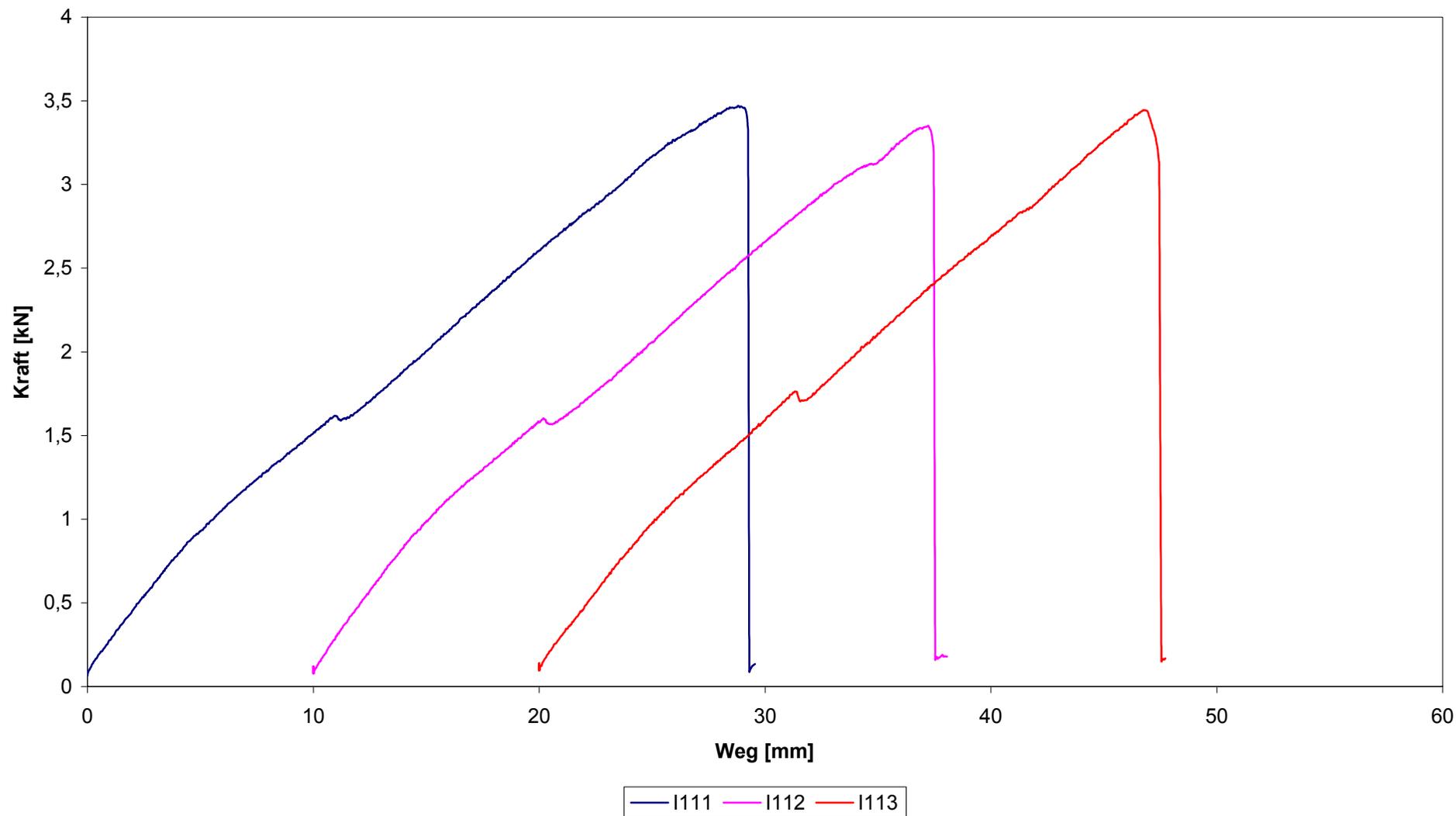
Versuchsserie H, \varnothing_s 22mm, $e_1 = 30$ mm



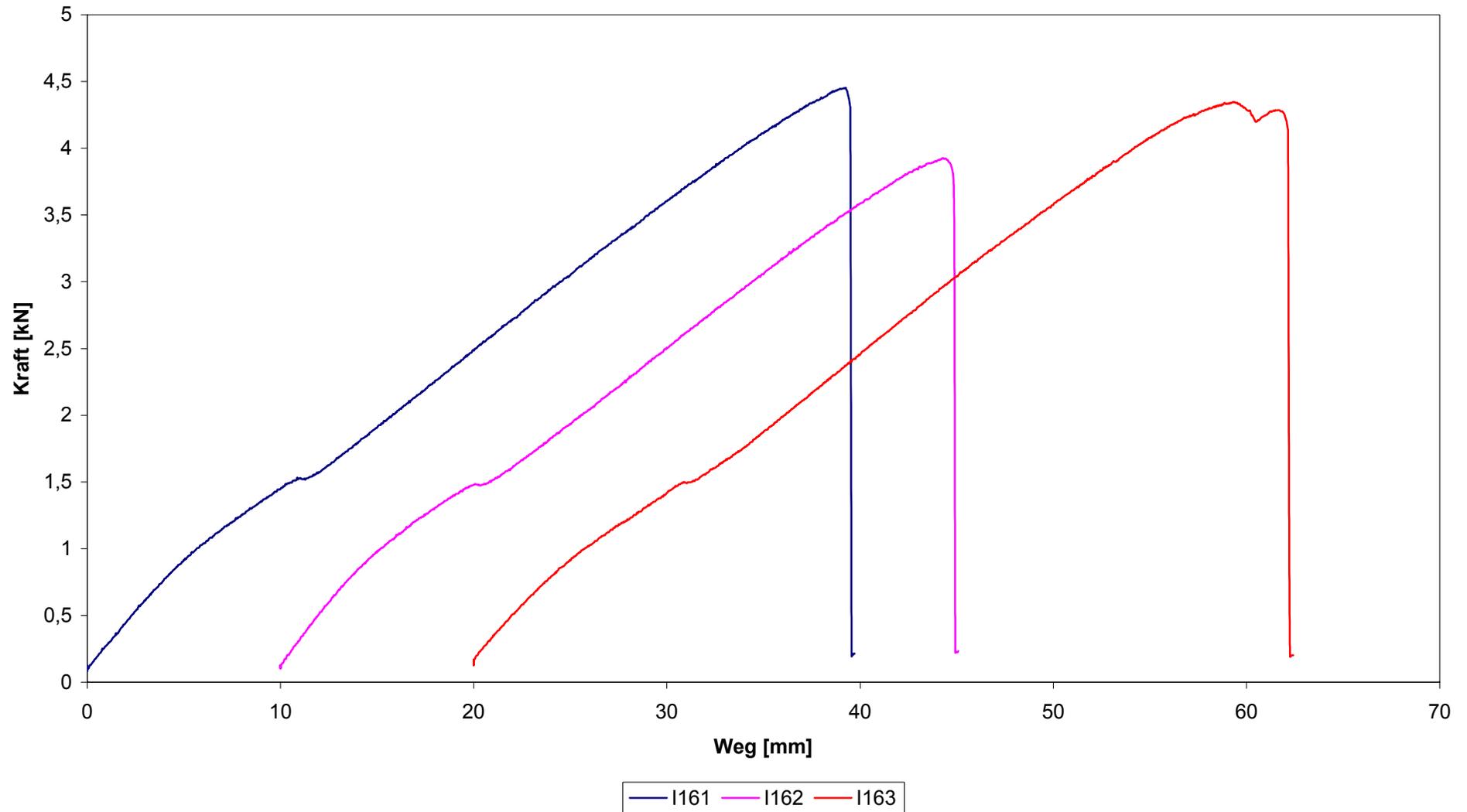
Versuchsserie H, \varnothing_S 29mm, $e_1 = 30$ mm



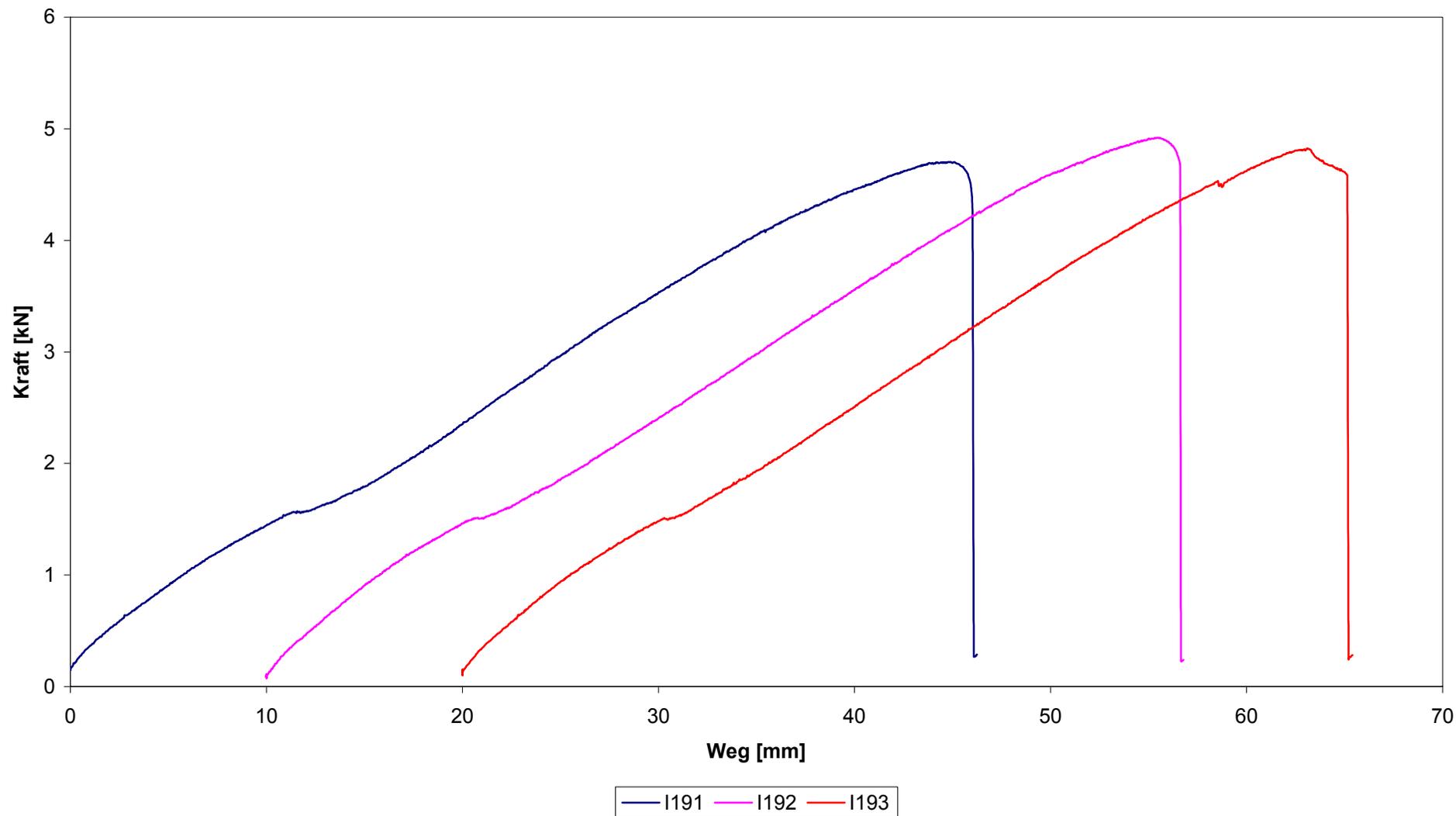
Versuchsserie I, \varnothing_s 11mm, $e_1 = 50$ mm



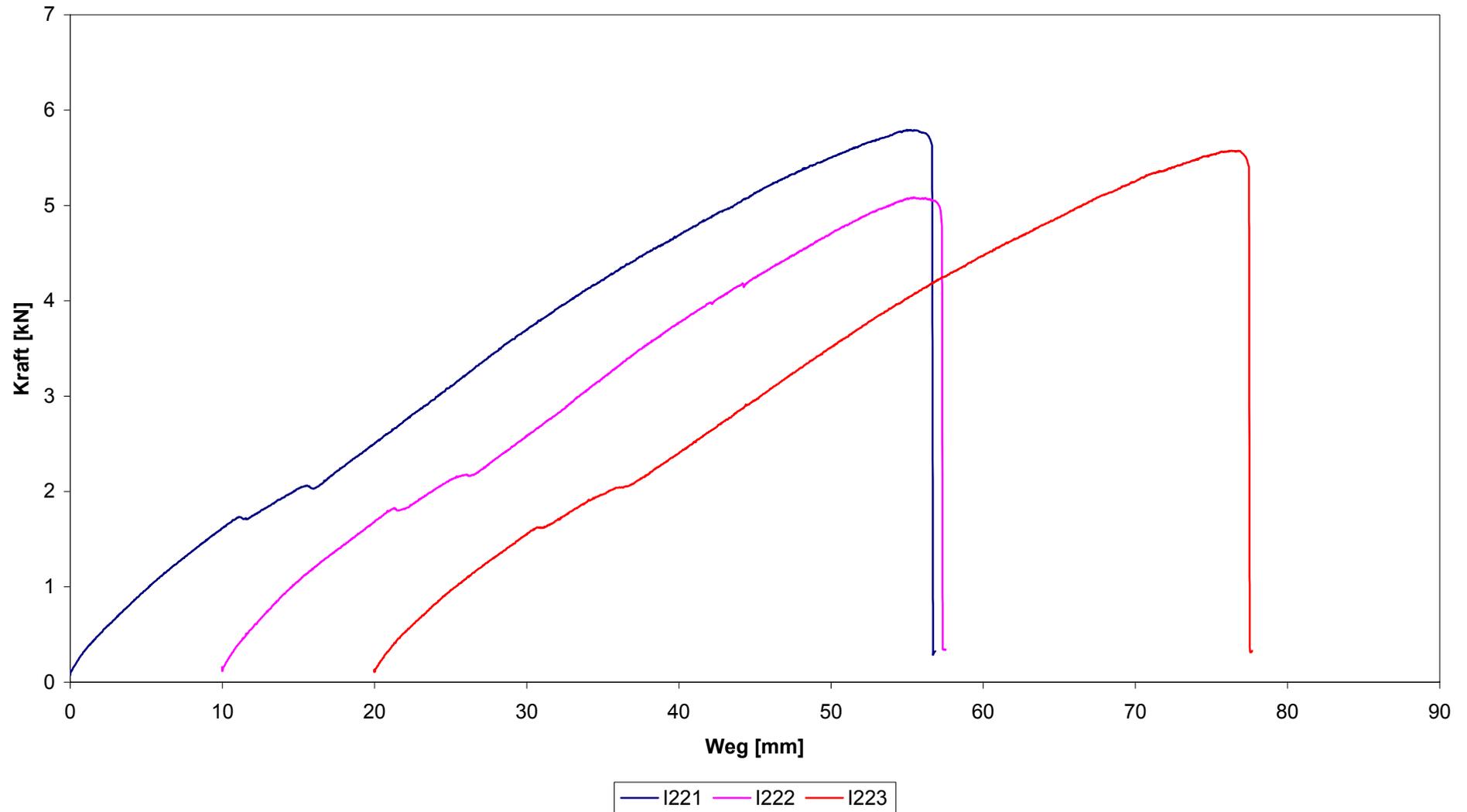
Versuchsserie I, \varnothing_s 16mm, $e_1 = 50$ mm



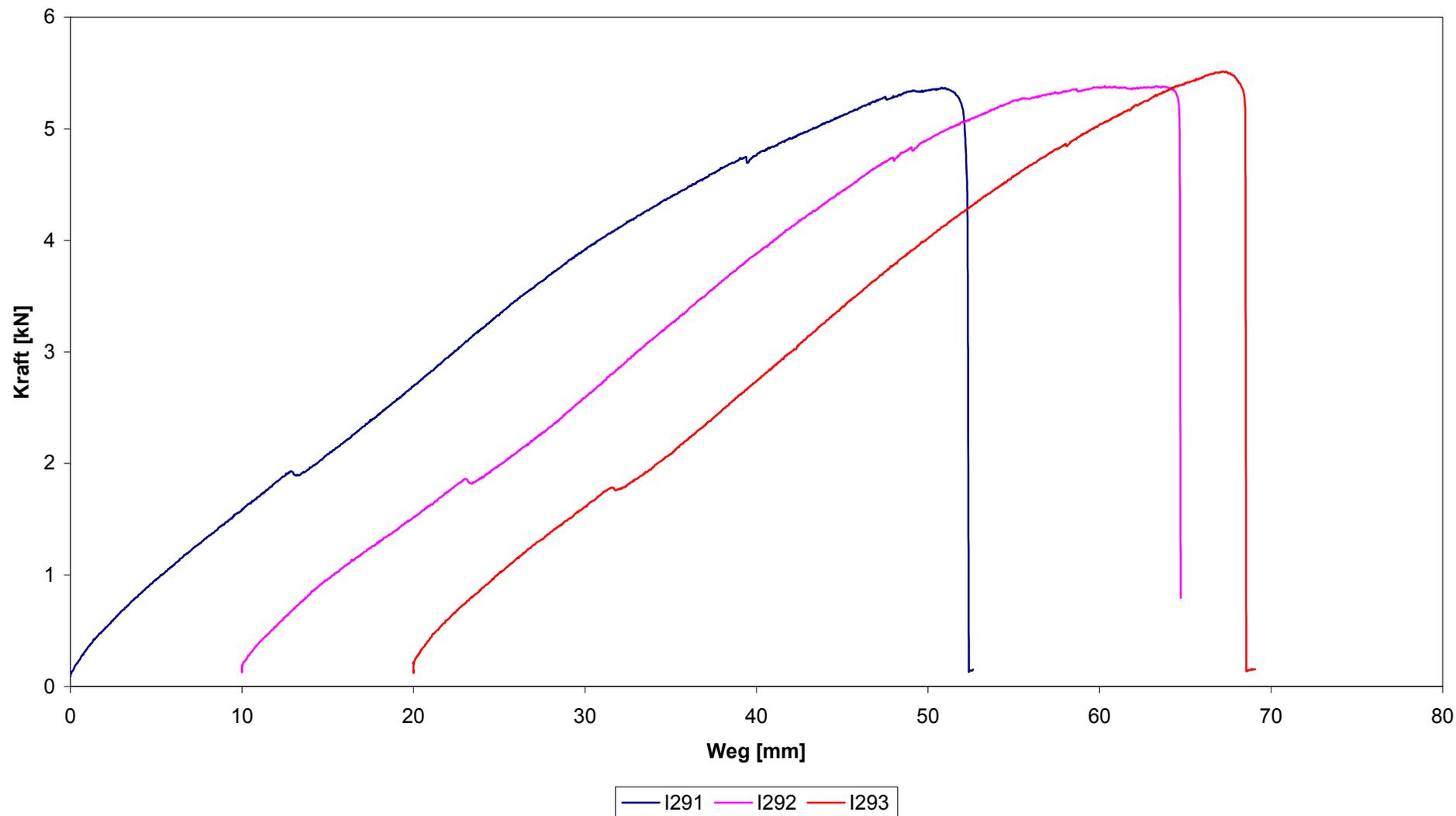
Versuchsserie I, \varnothing_s 19mm, $e_1 = 50$ mm



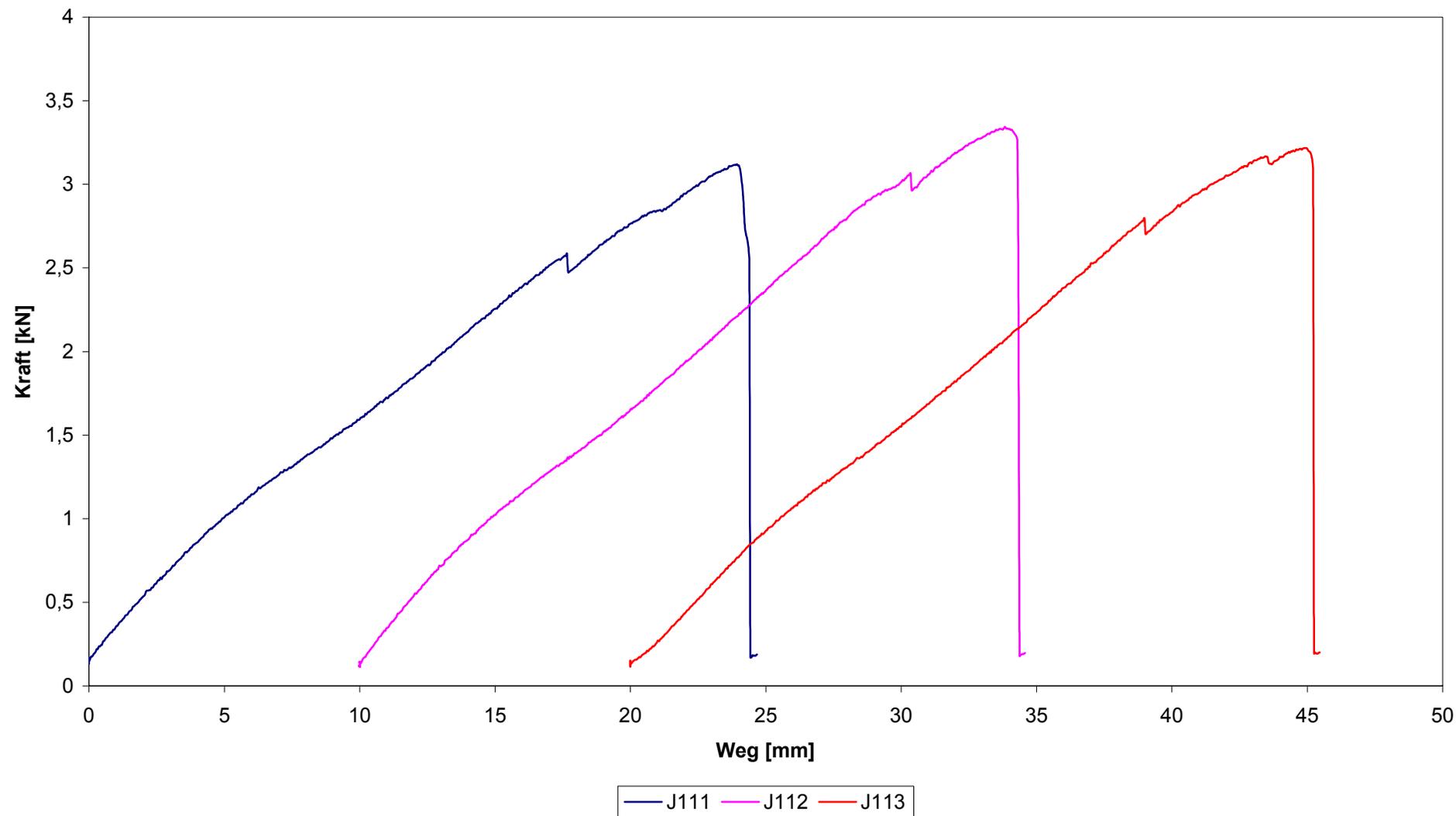
Versuchsserie I, \varnothing_s 22mm, $e_1 = 50$ mm



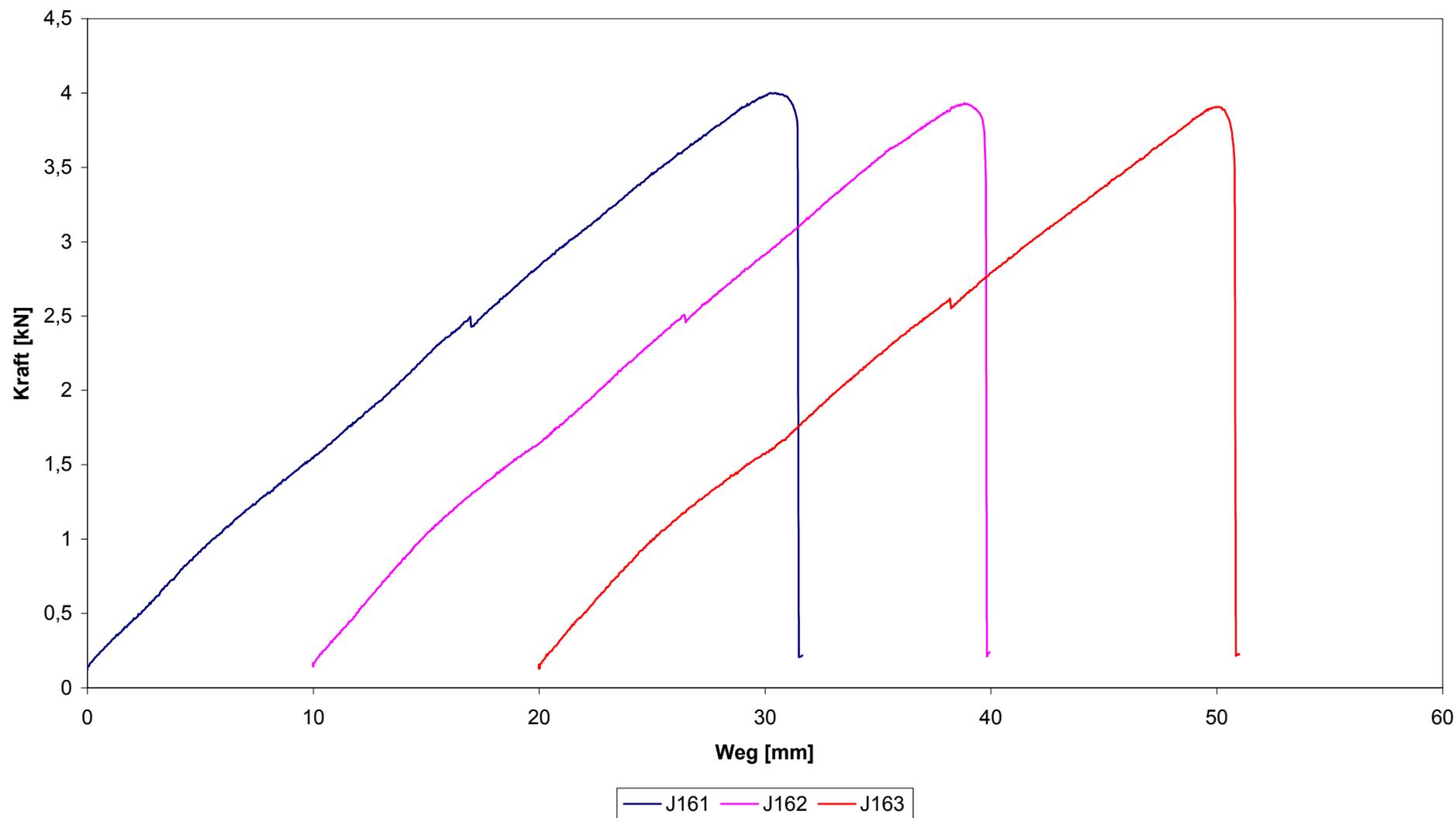
Versuchsserie I, \varnothing_s 29mm, $e_1 = 50$ mm



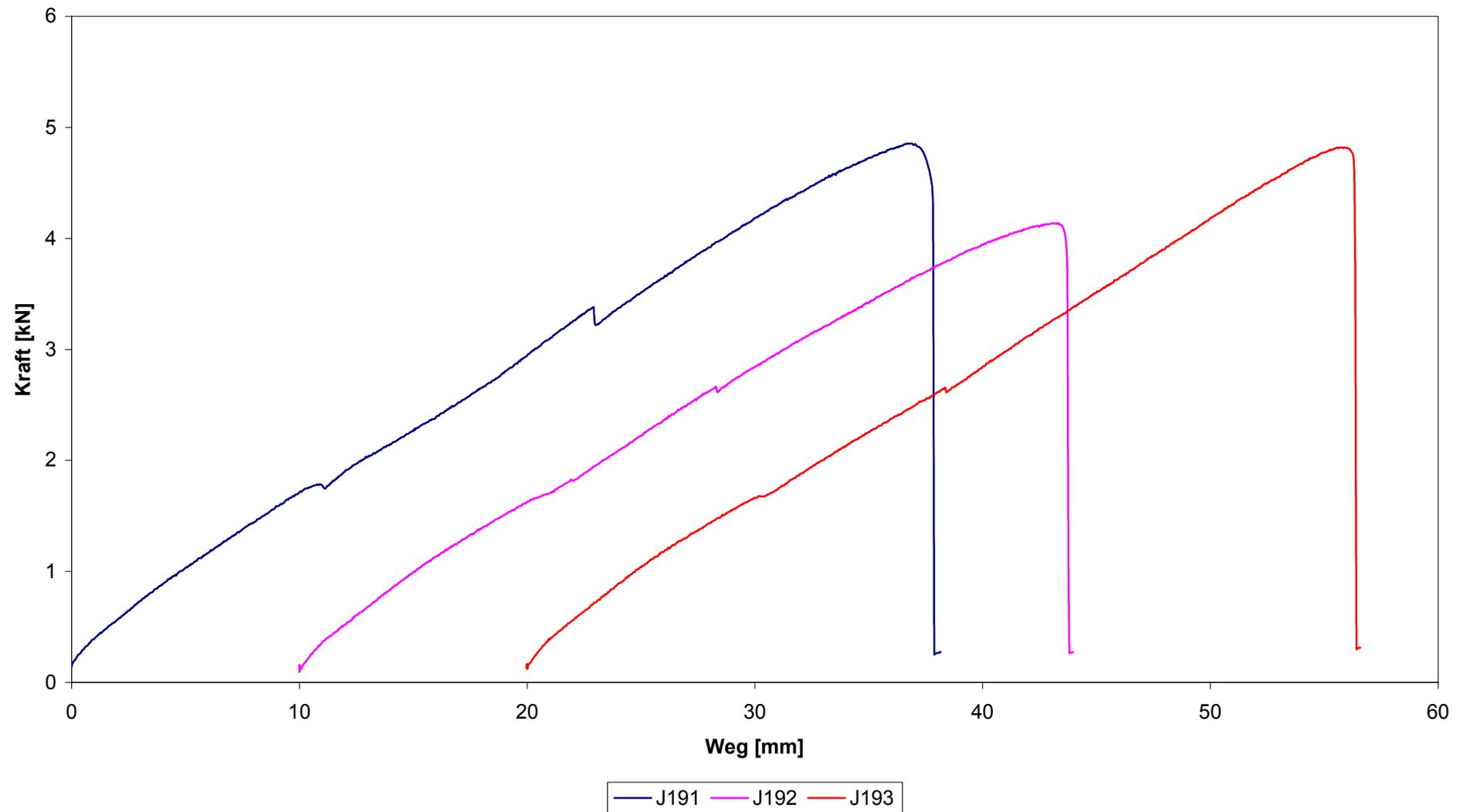
Versuchsserie J, \varnothing_s 11mm, $e_1 = 100$ mm



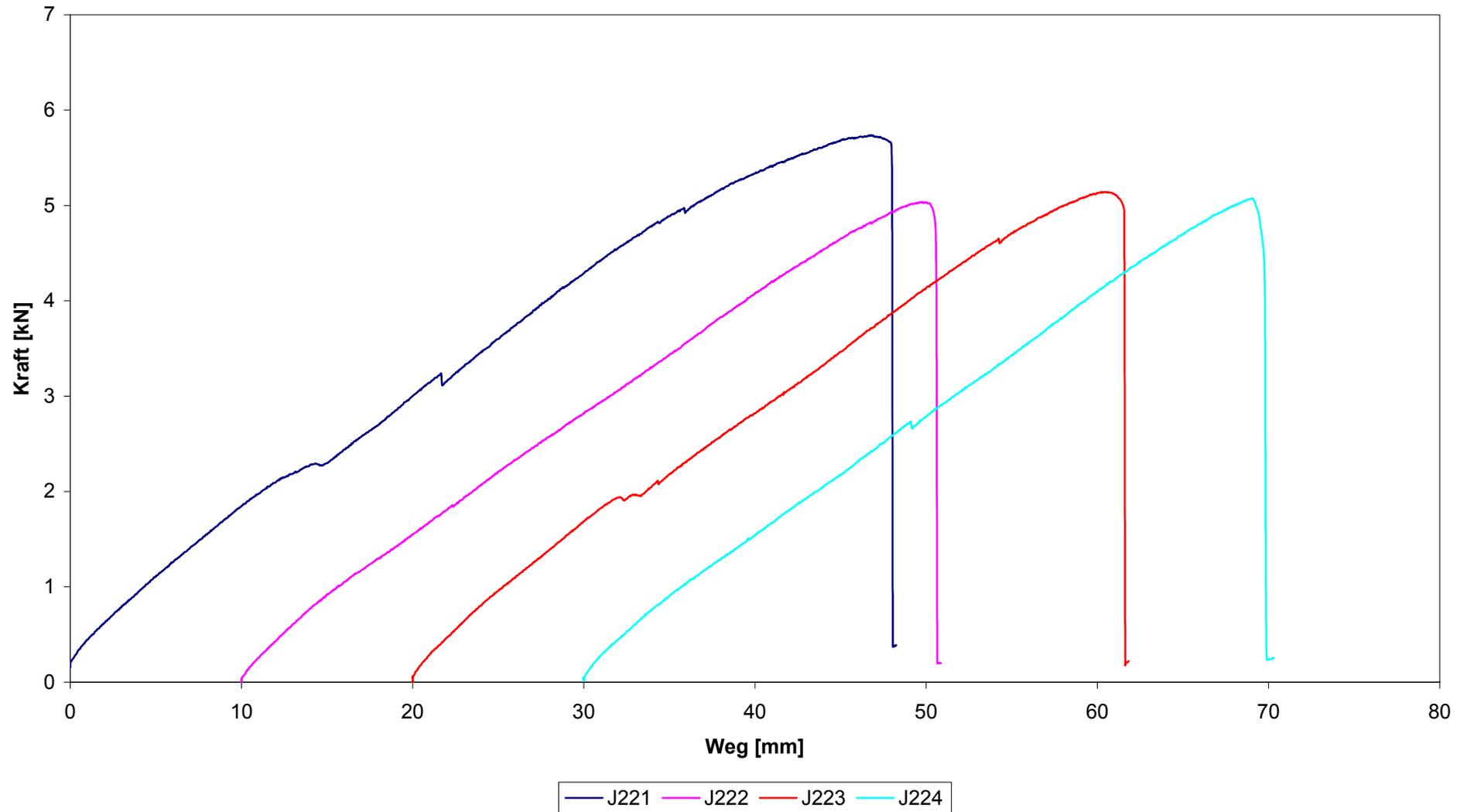
Versuchsserie J, \varnothing_s 16mm, $e_1 = 100$ mm



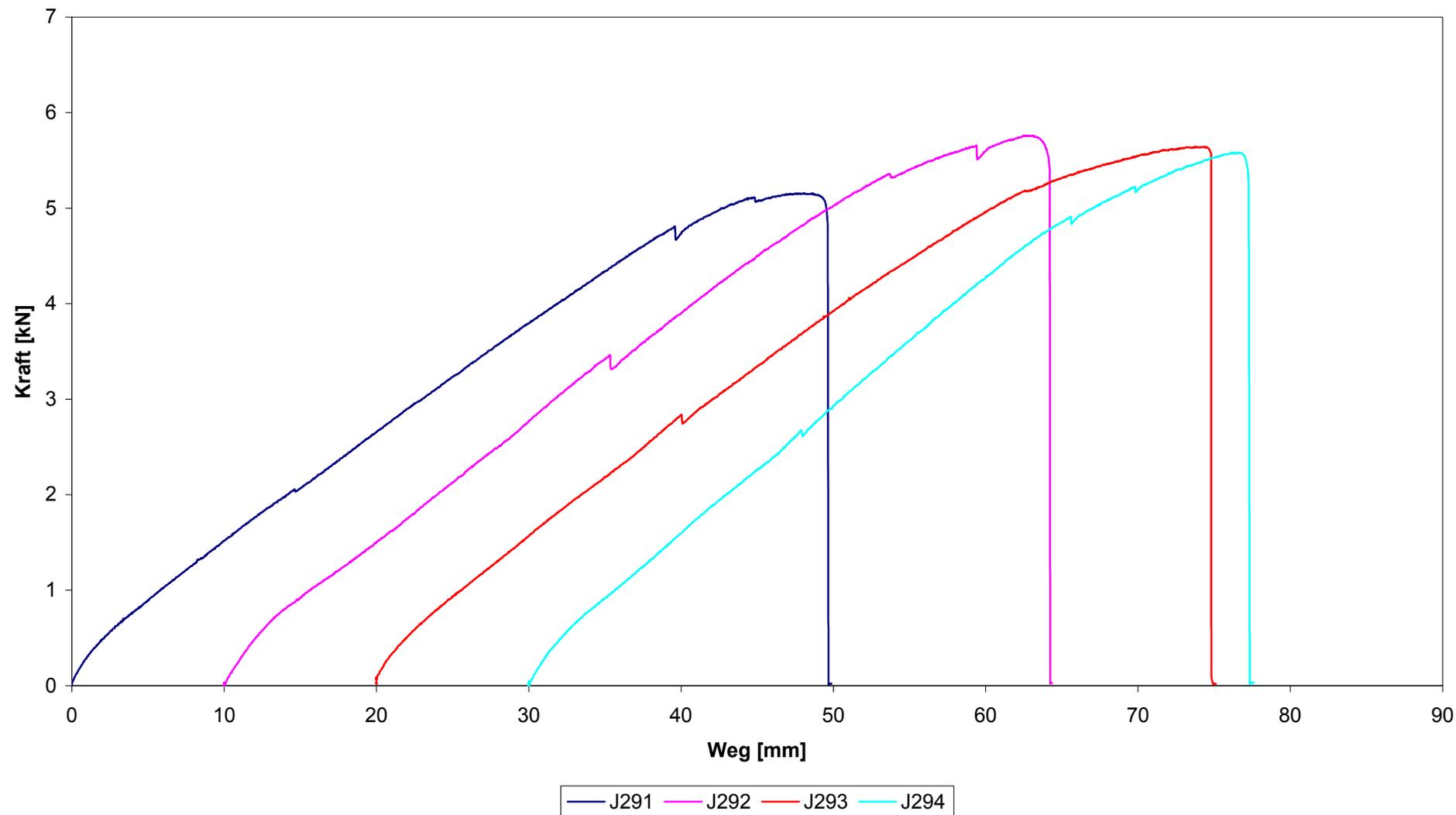
Versuchsserie J, \varnothing_s 19mm, $e_1 = 100$ mm



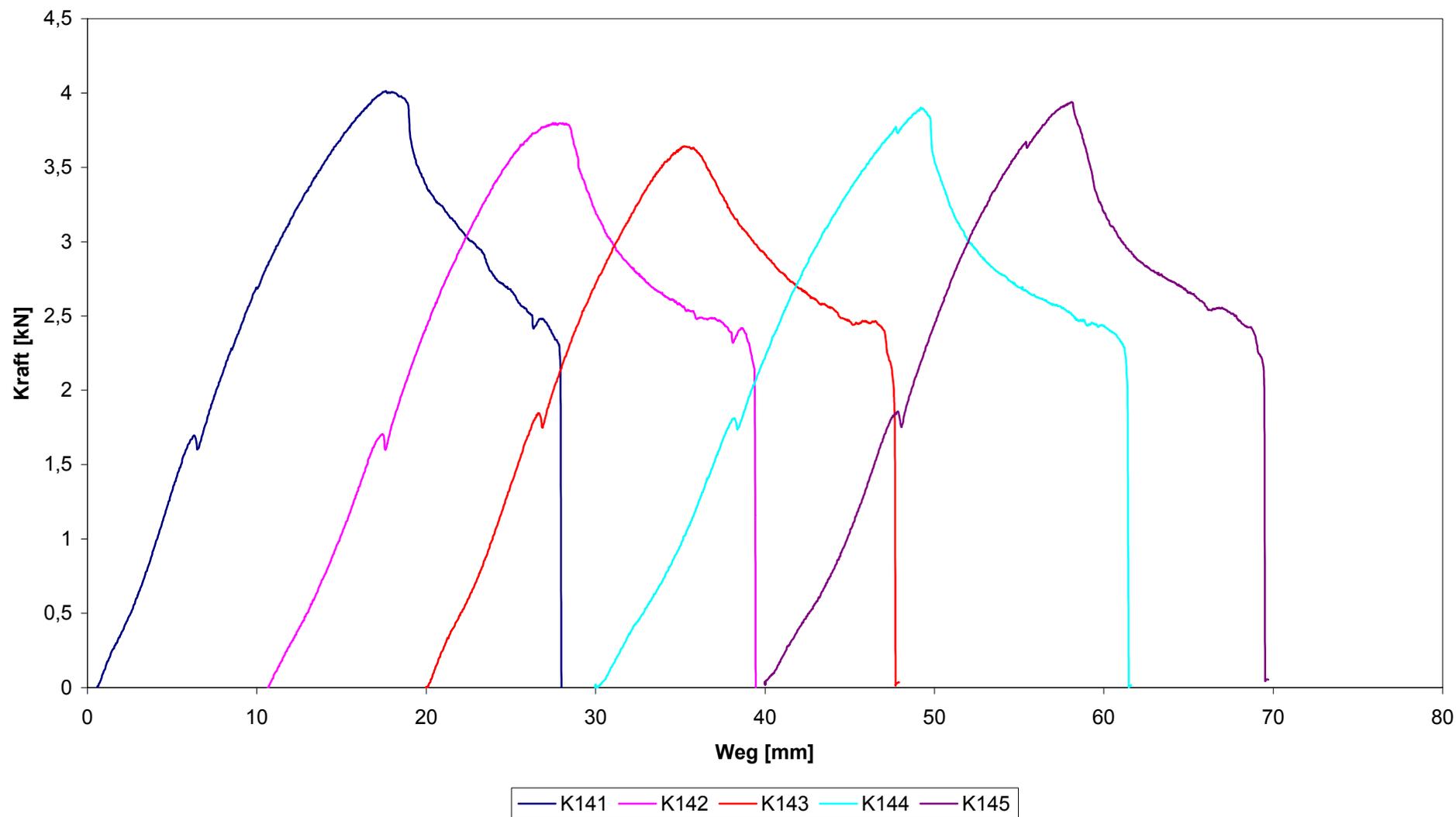
Versuchsserie J, \varnothing_s 22mm, $e_1 = 100$ mm



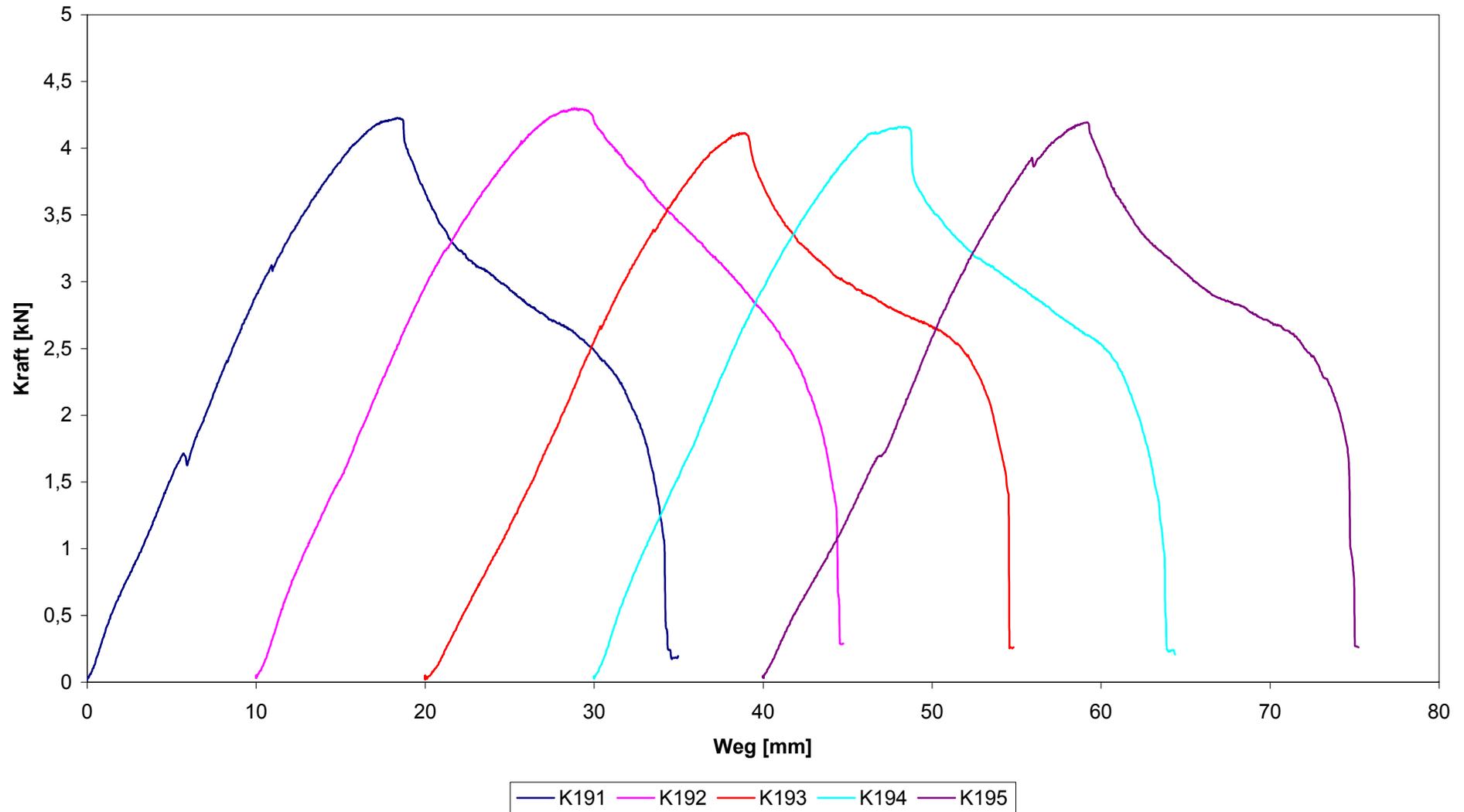
Versuchsserie J, \varnothing_s 29mm, $e_1 = 100$ mm



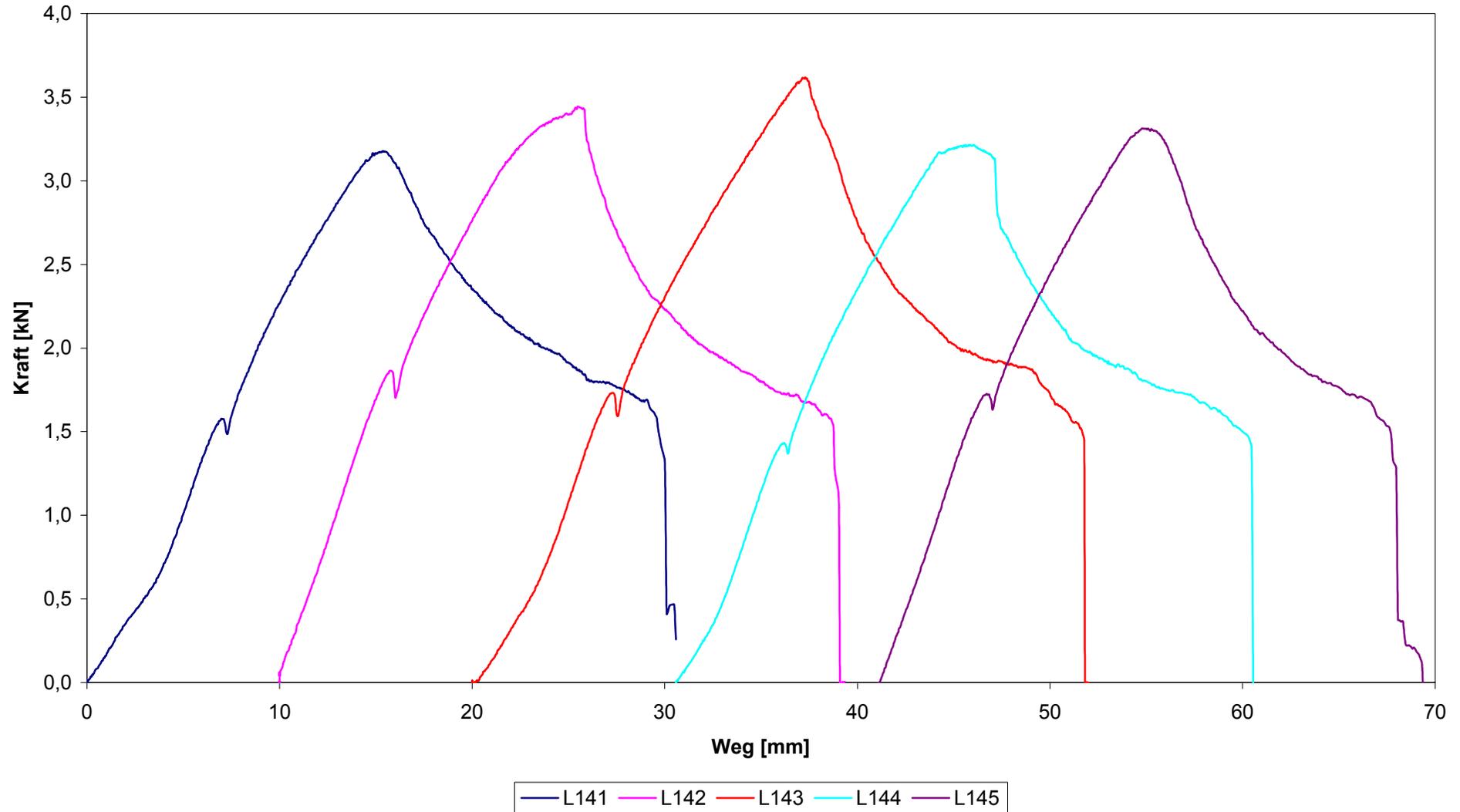
Versuchsserie K, \varnothing_s 14mm



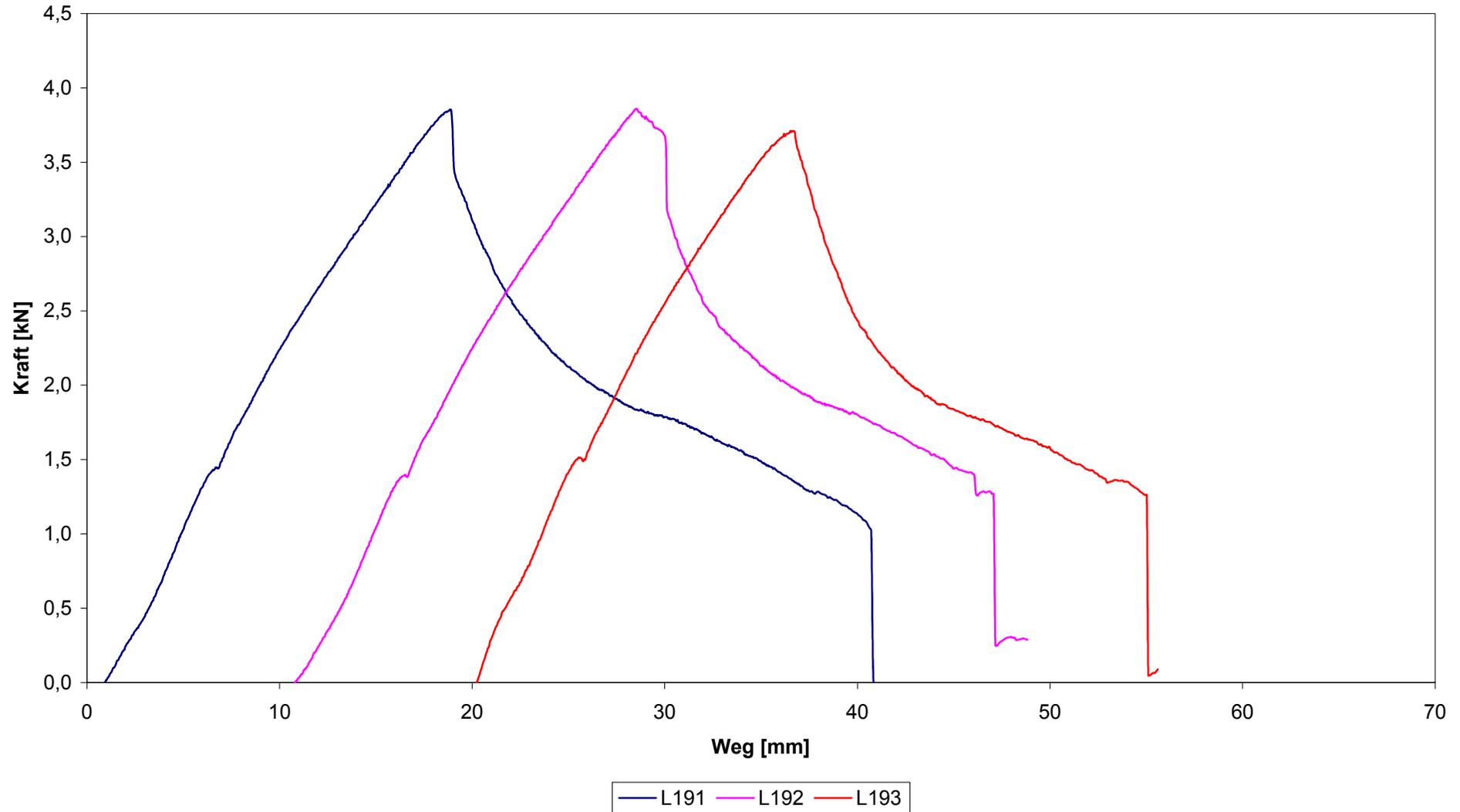
Versuchsserie K, \varnothing_s 19mm



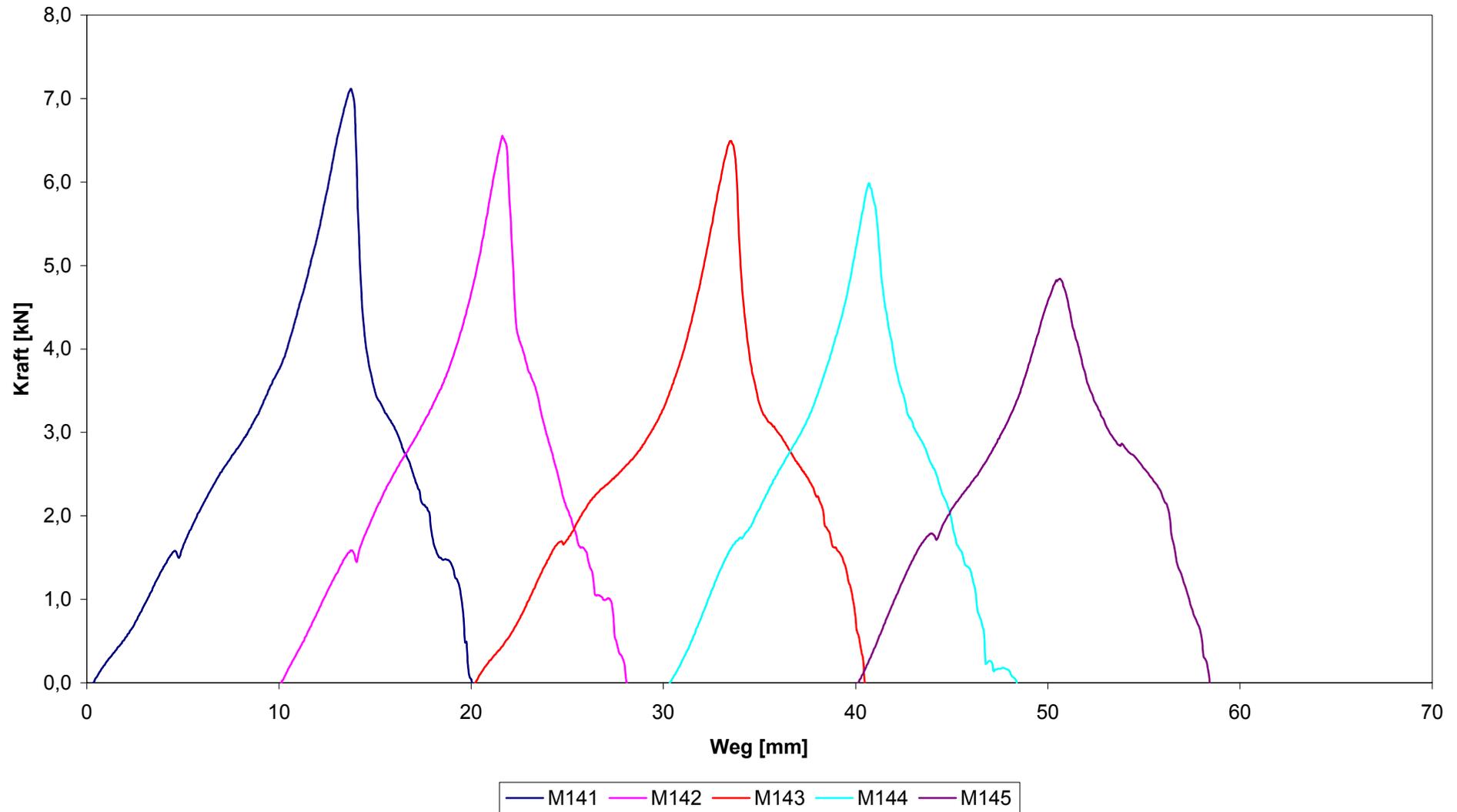
Versuchsserie L mit Scheiben \varnothing 14mm



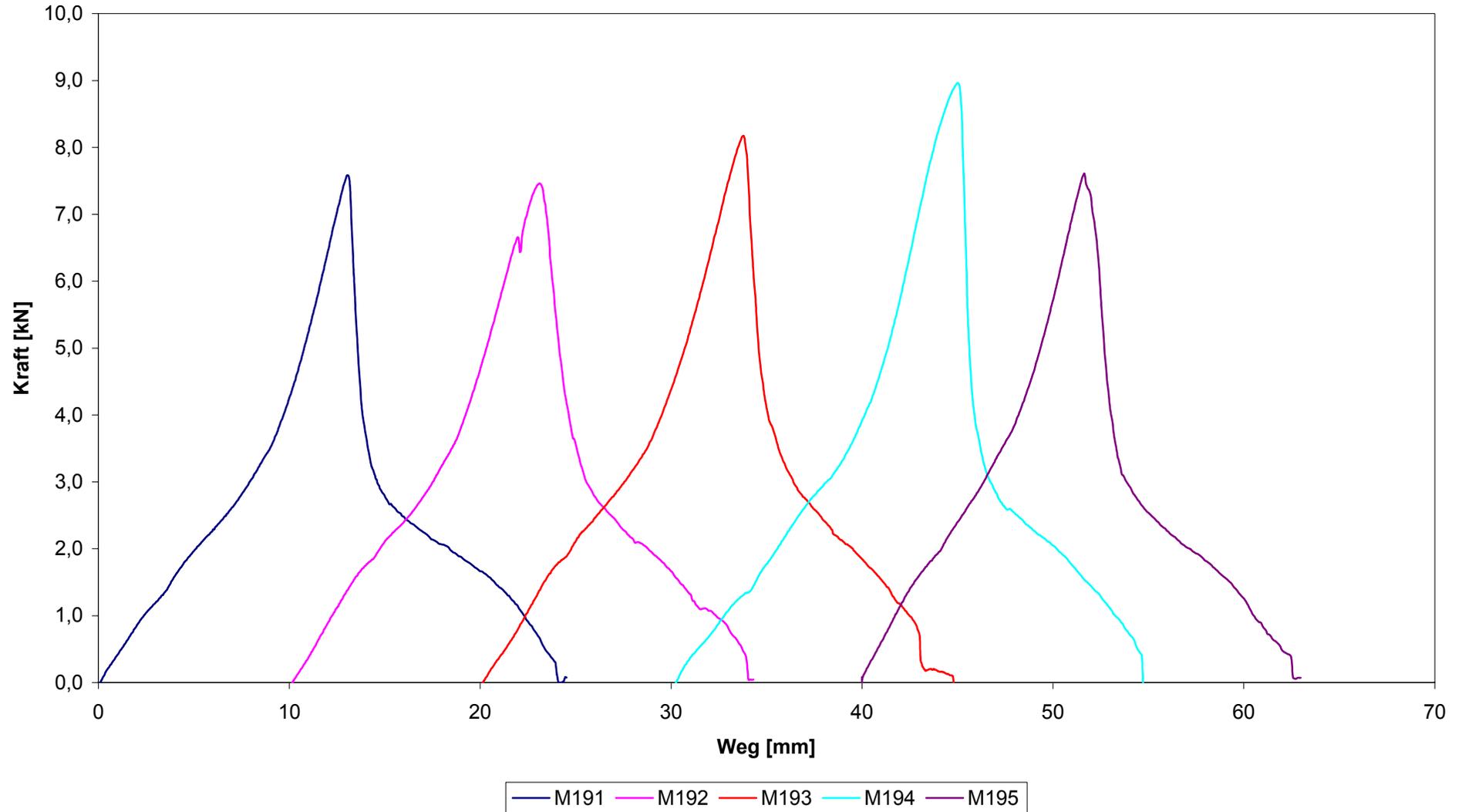
Versuchsserie L mit Scheiben \varnothing 19mm



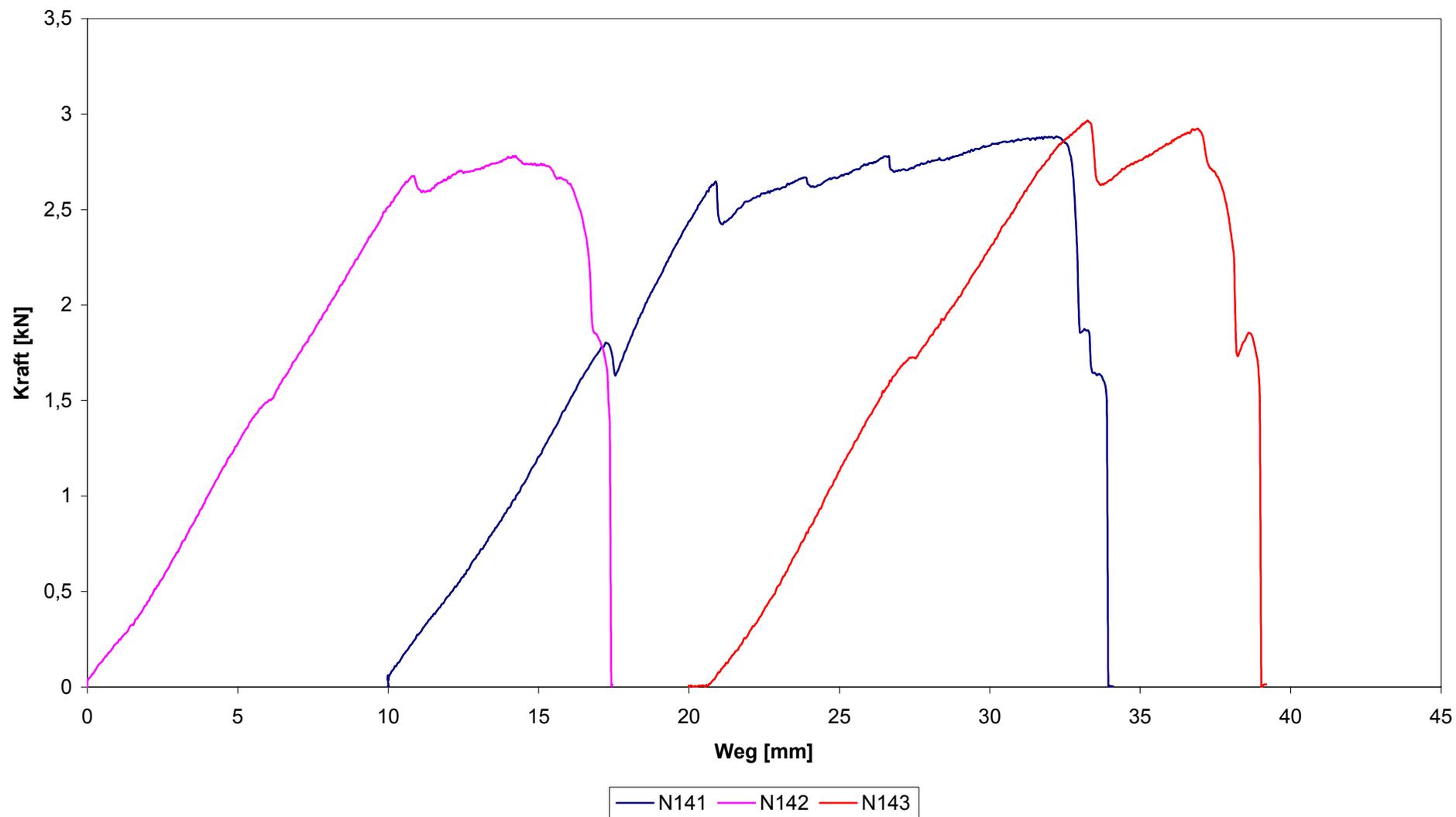
Versuchsserie M mit Scheiben \varnothing 14mm



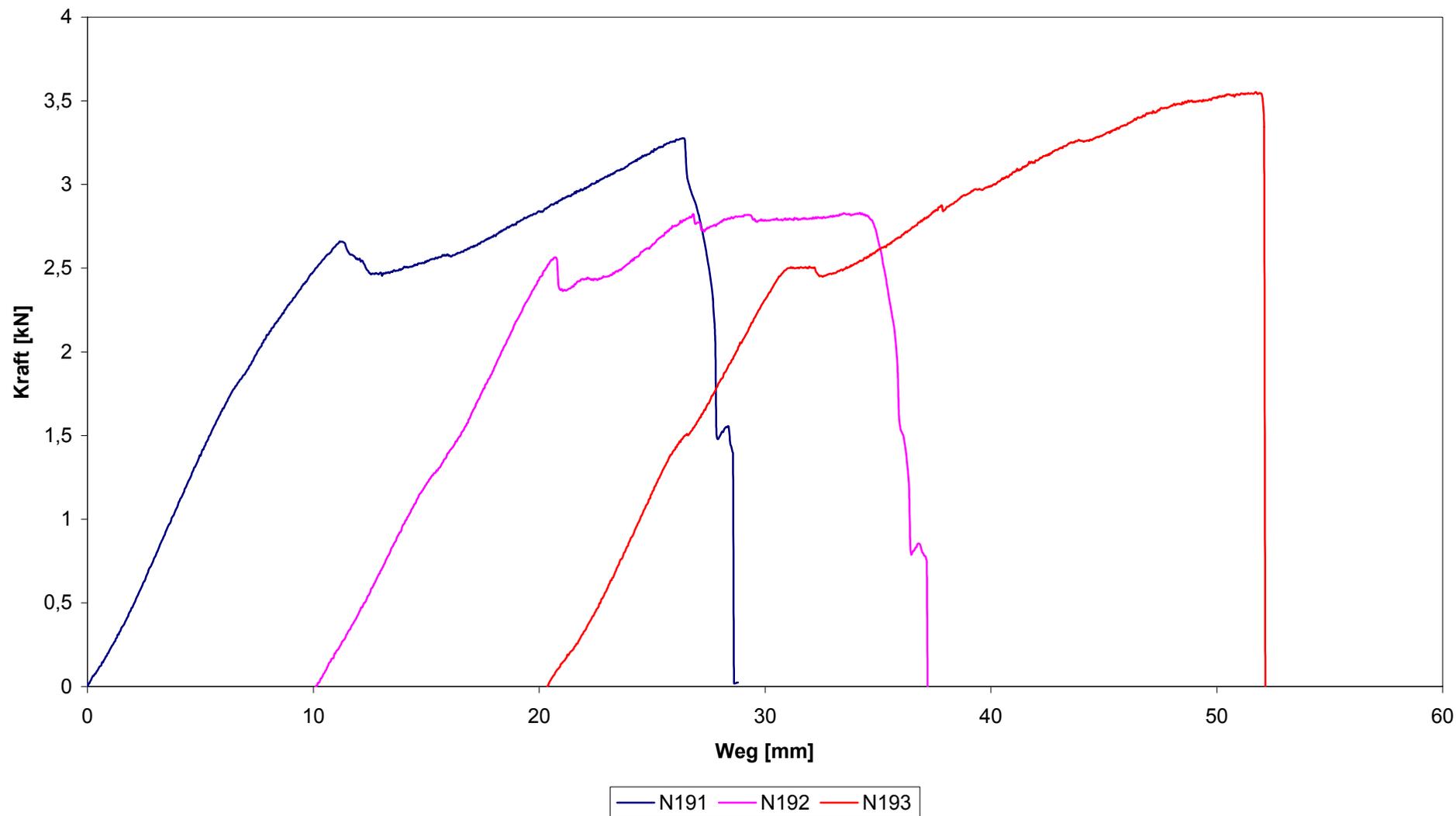
Versuchsserie M mit Scheiben \varnothing 19mm



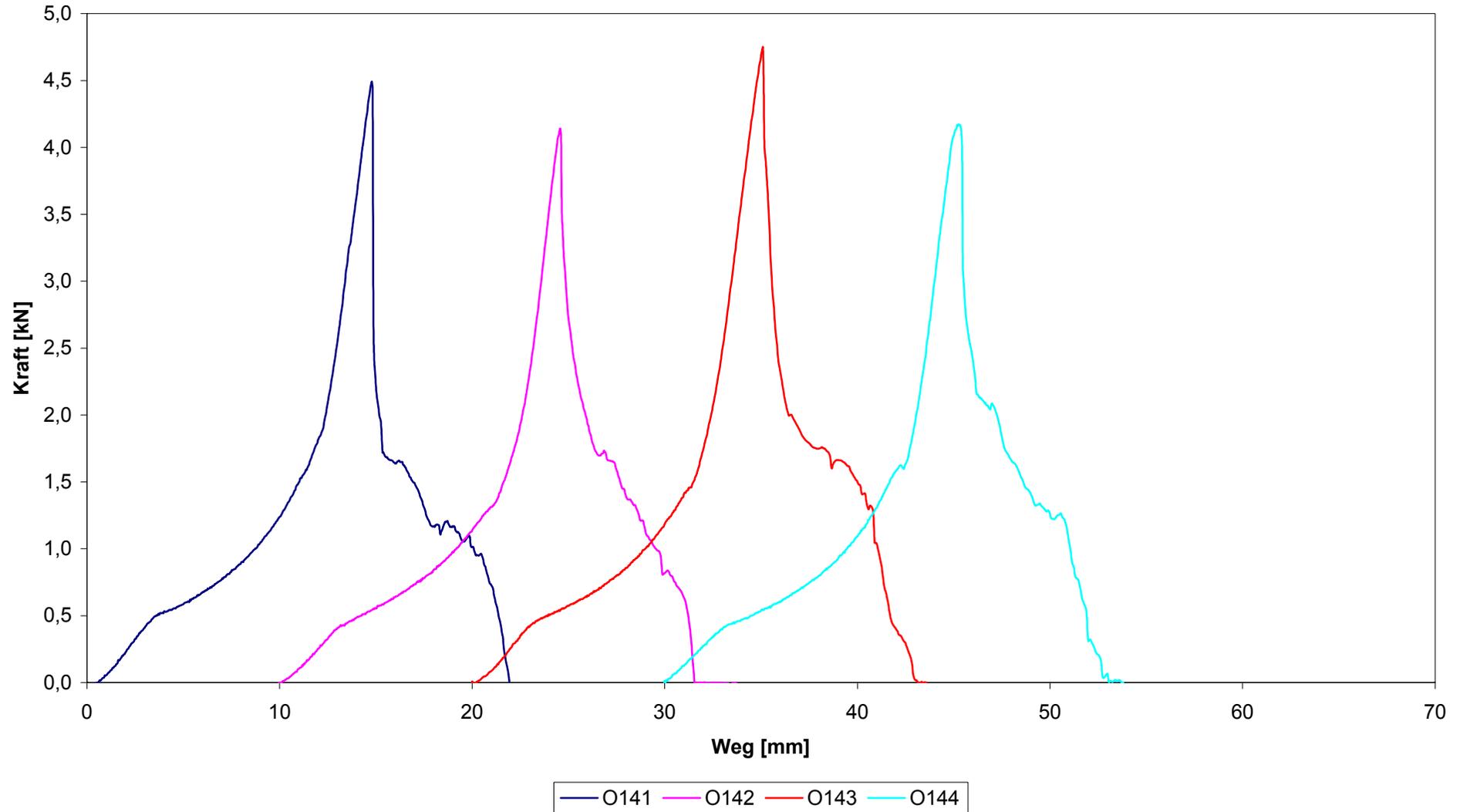
Versuchsserie N, \varnothing_s 14mm



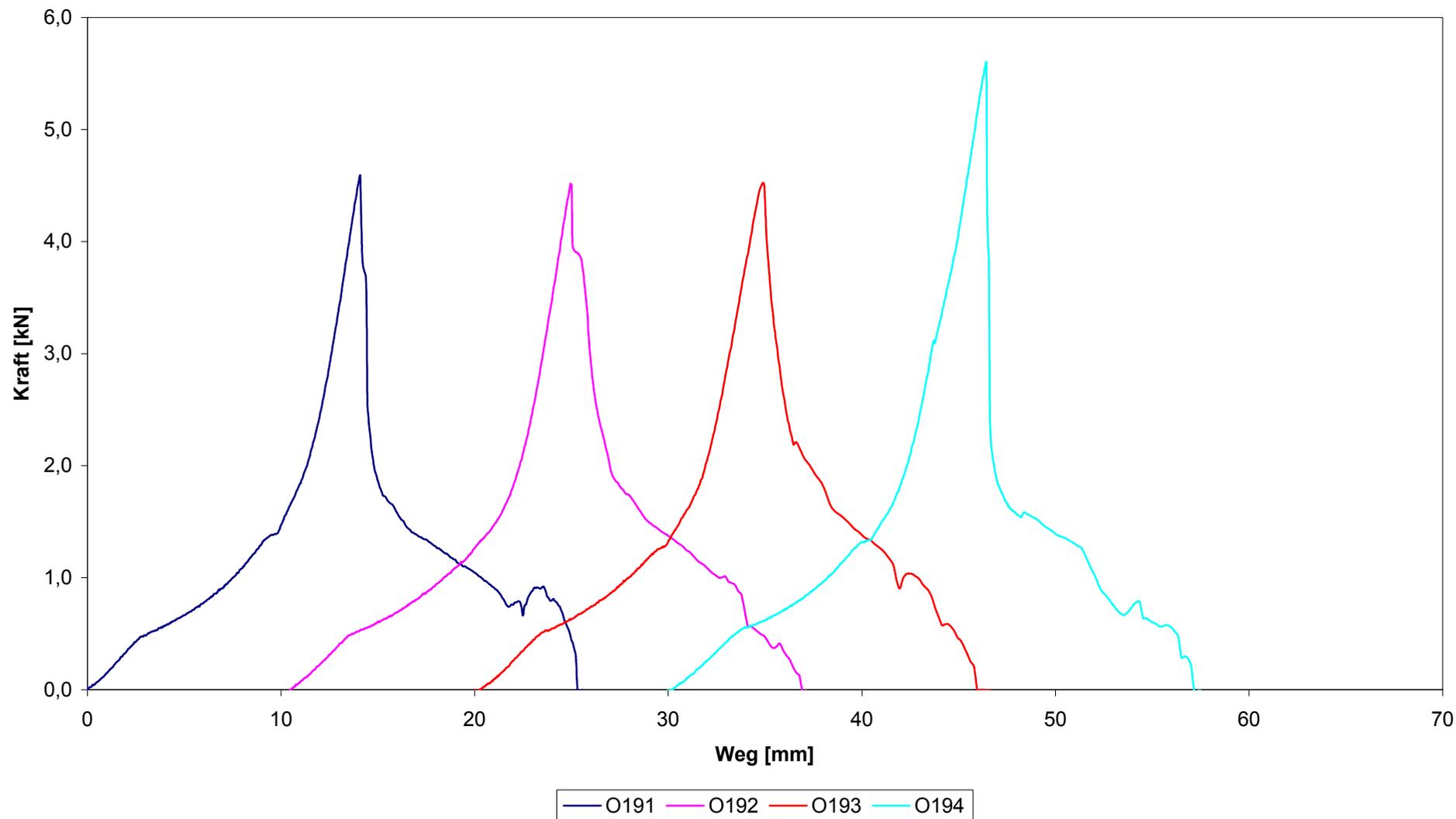
Versuchsserie N, \varnothing_s 19mm



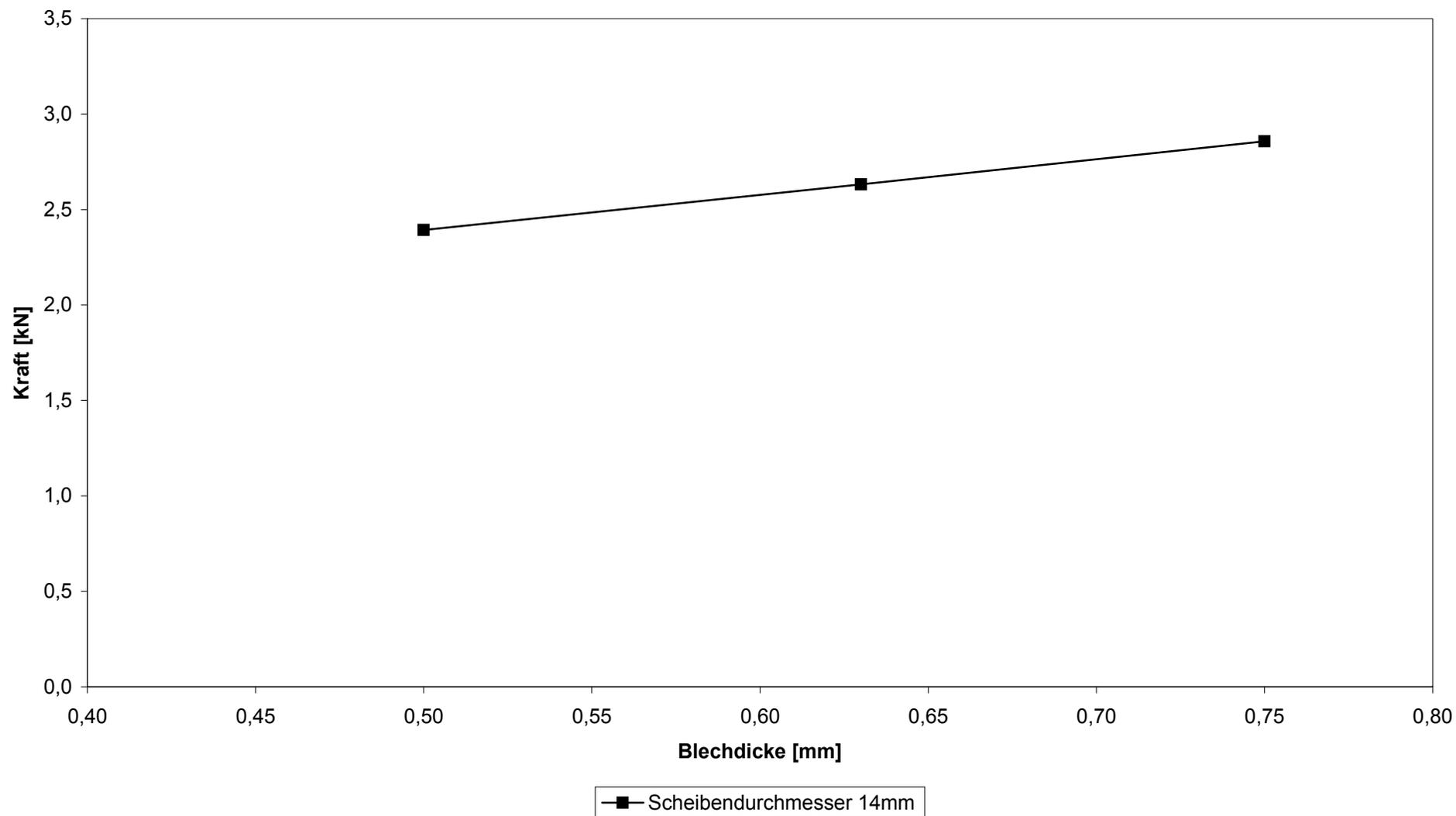
Versuchsserie O mit Scheiben Ø 14mm



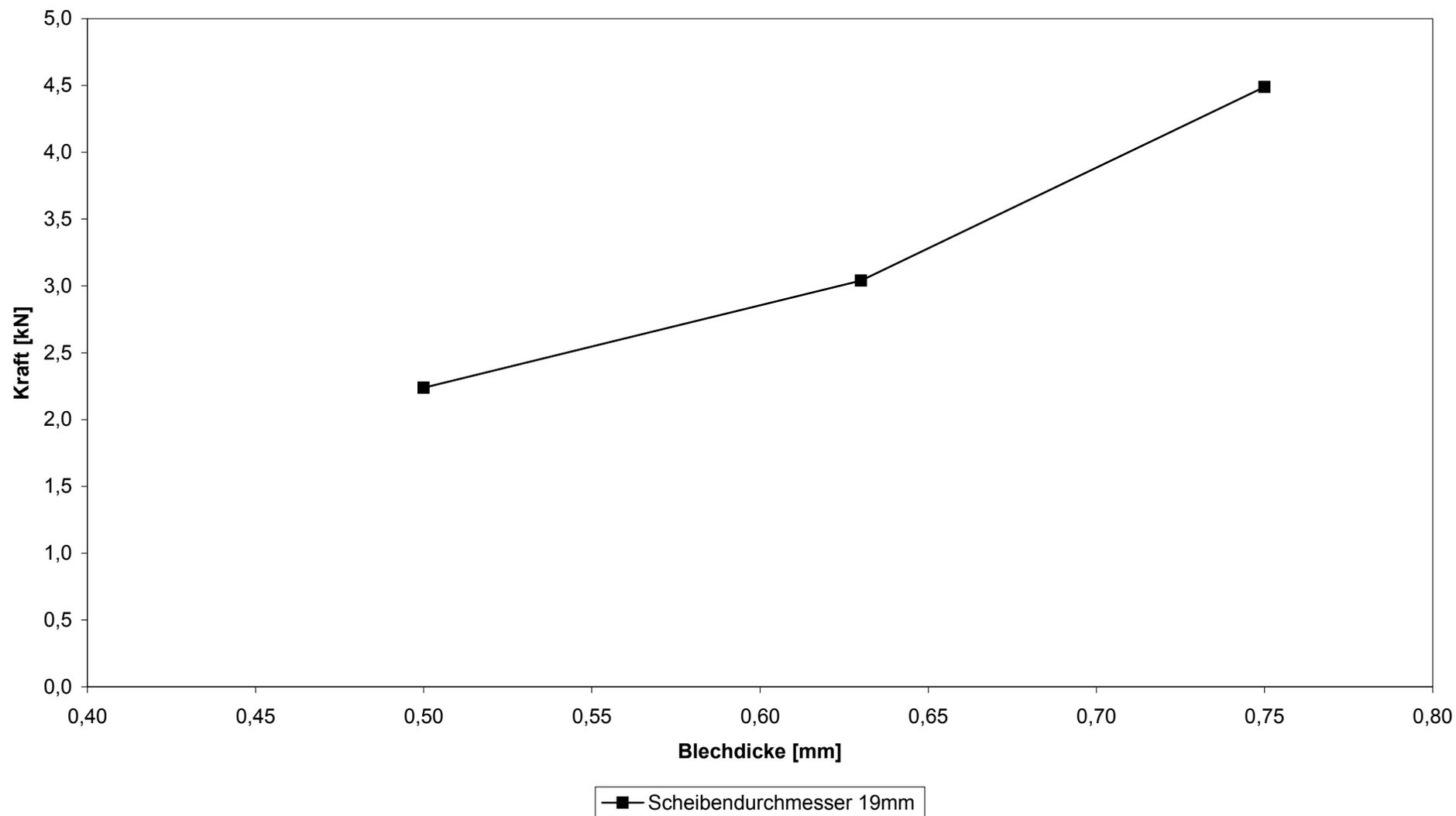
Versuchsserie O mit Scheiben \varnothing 19mm



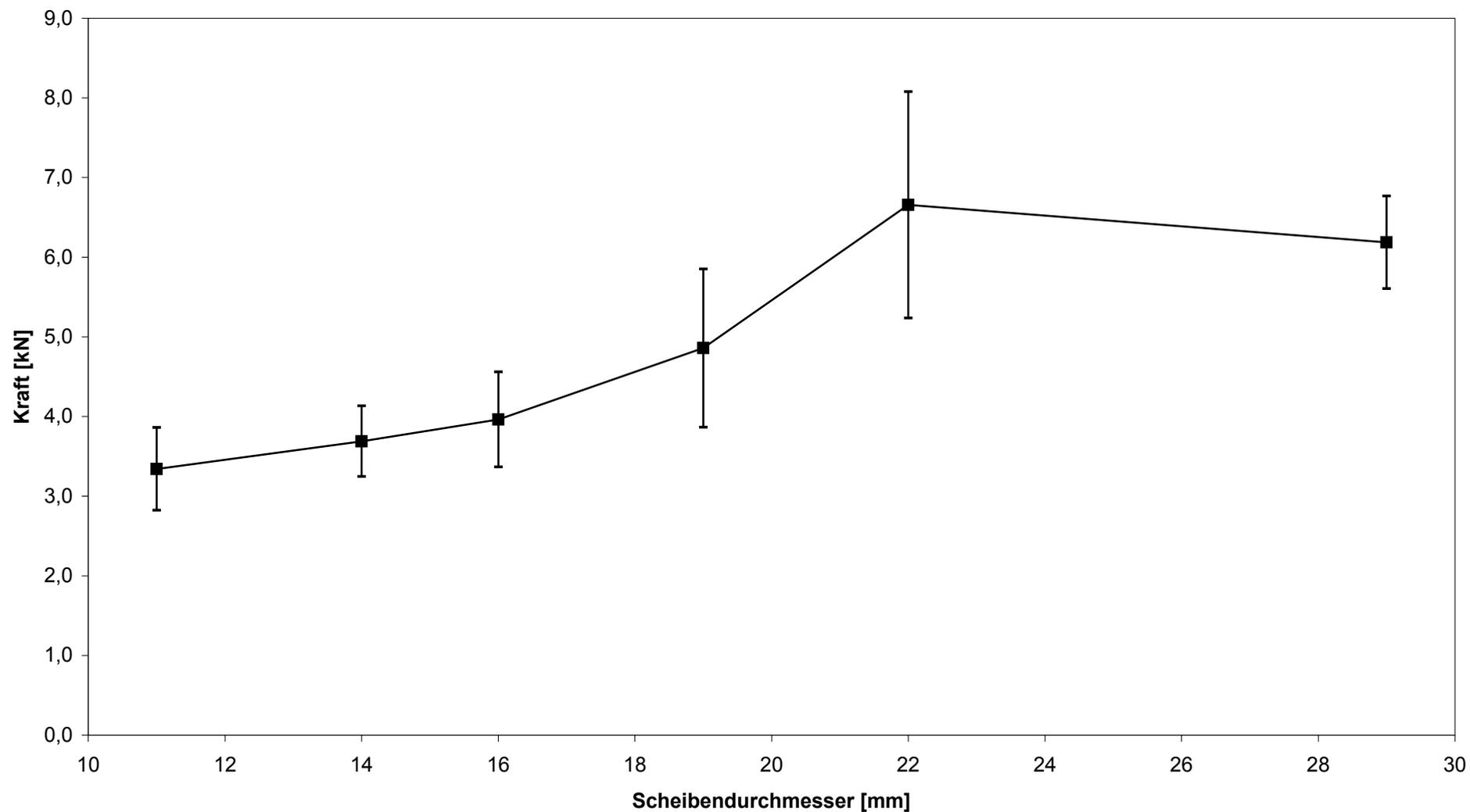
Bügelproben: Versuchsserien mit Scheiben \varnothing_s 14mm



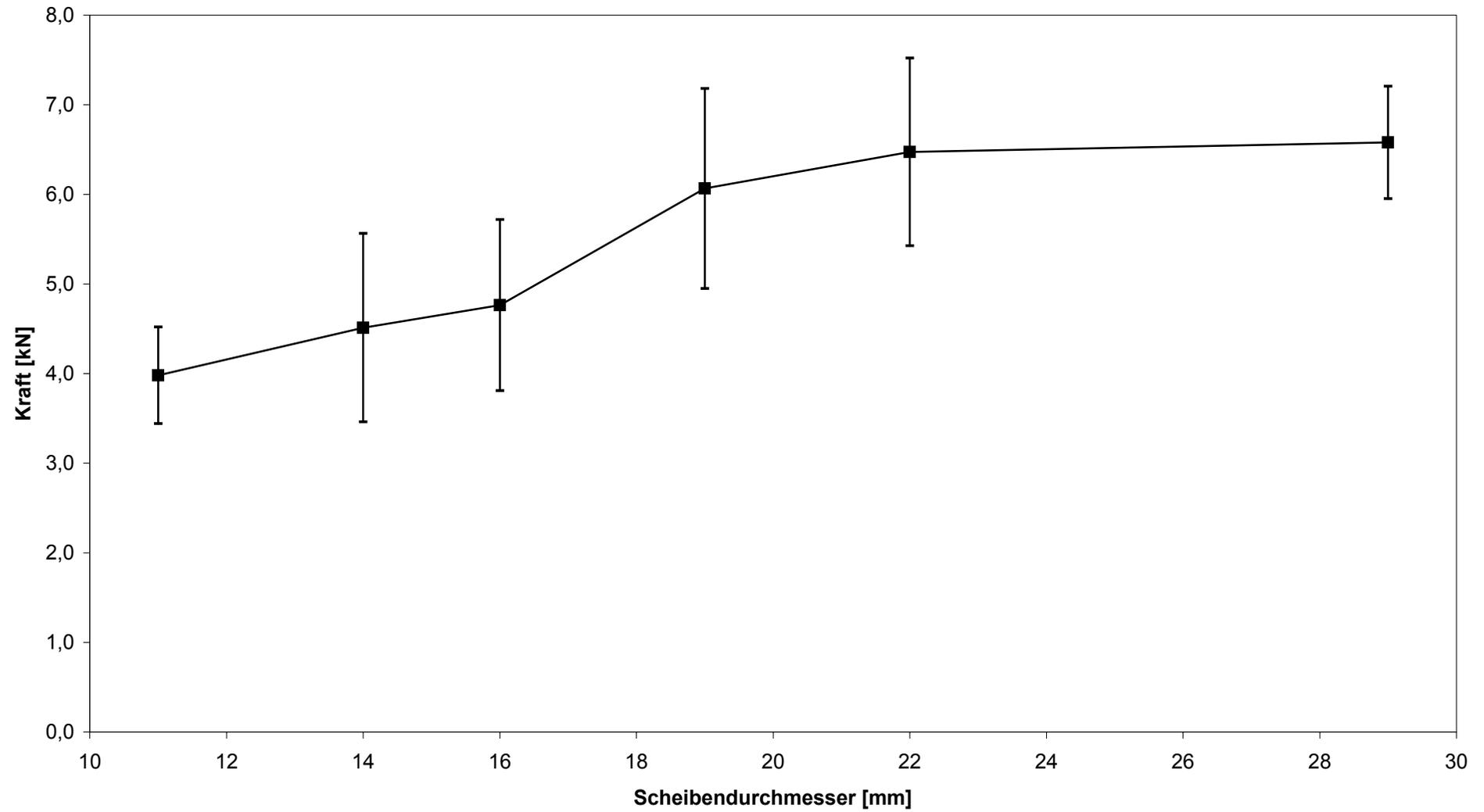
Bügelproben: Versuchsserien mit Scheiben \varnothing_s 19mm



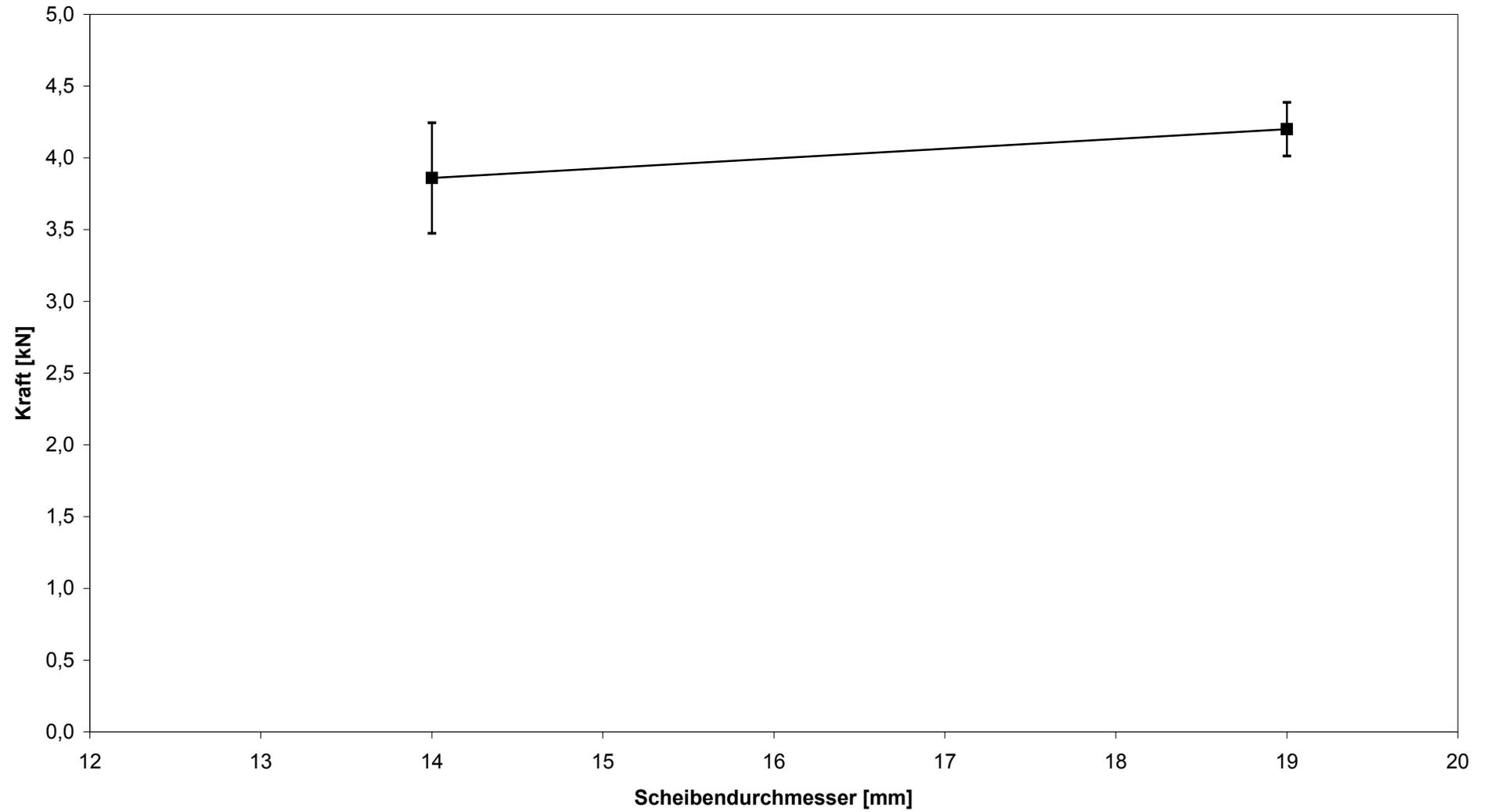
Versuchsserie A



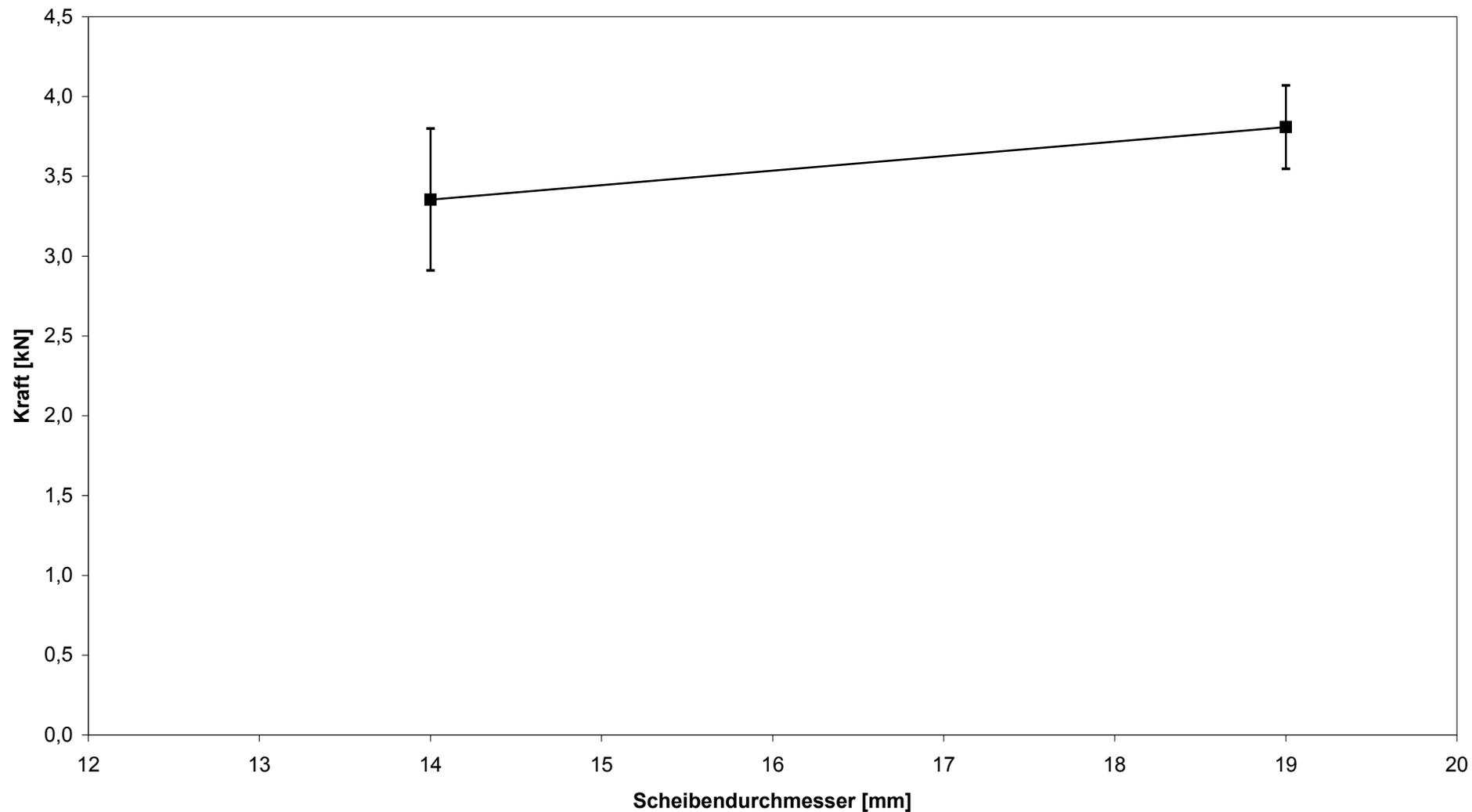
Versuchsserie F



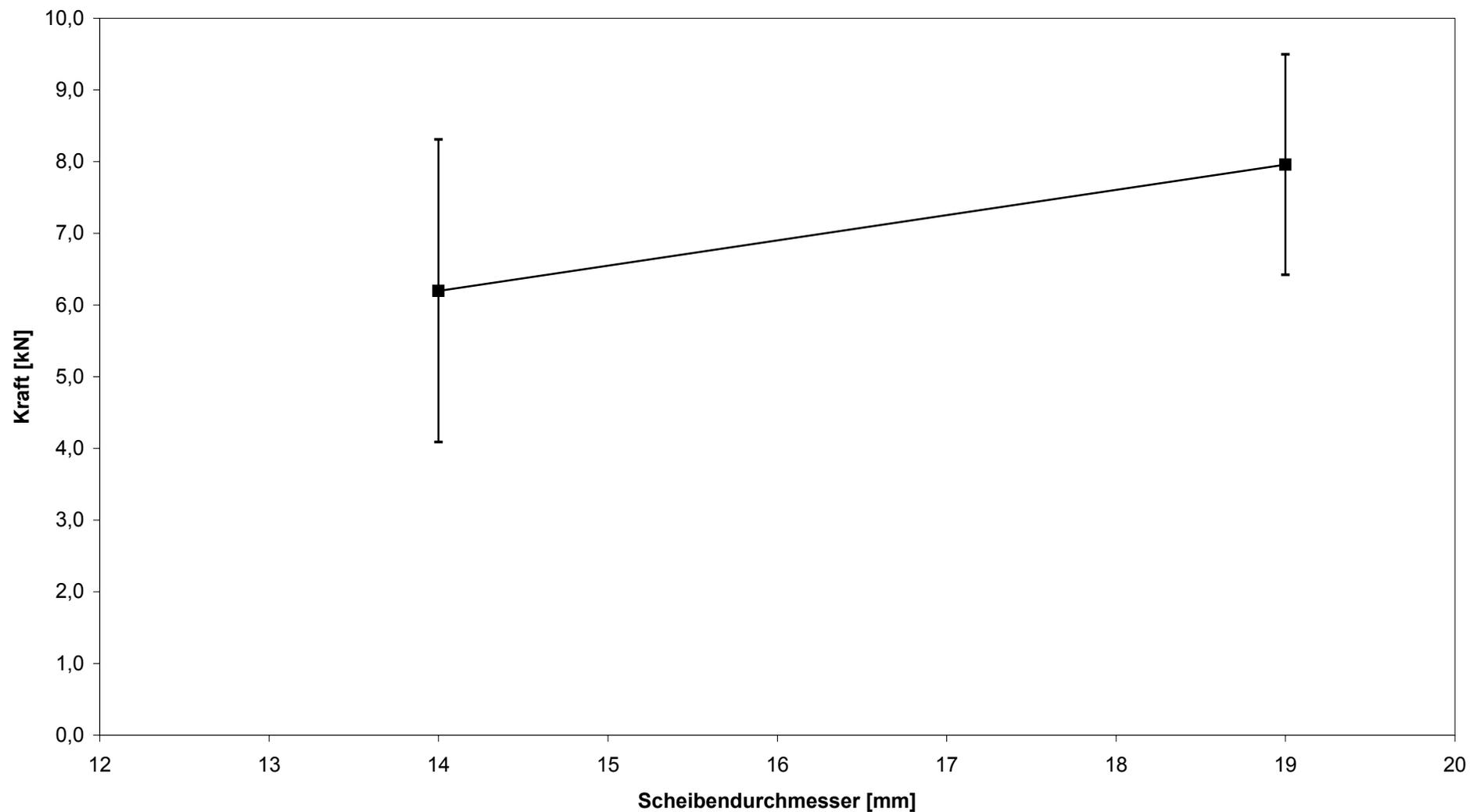
Versuchsserie K



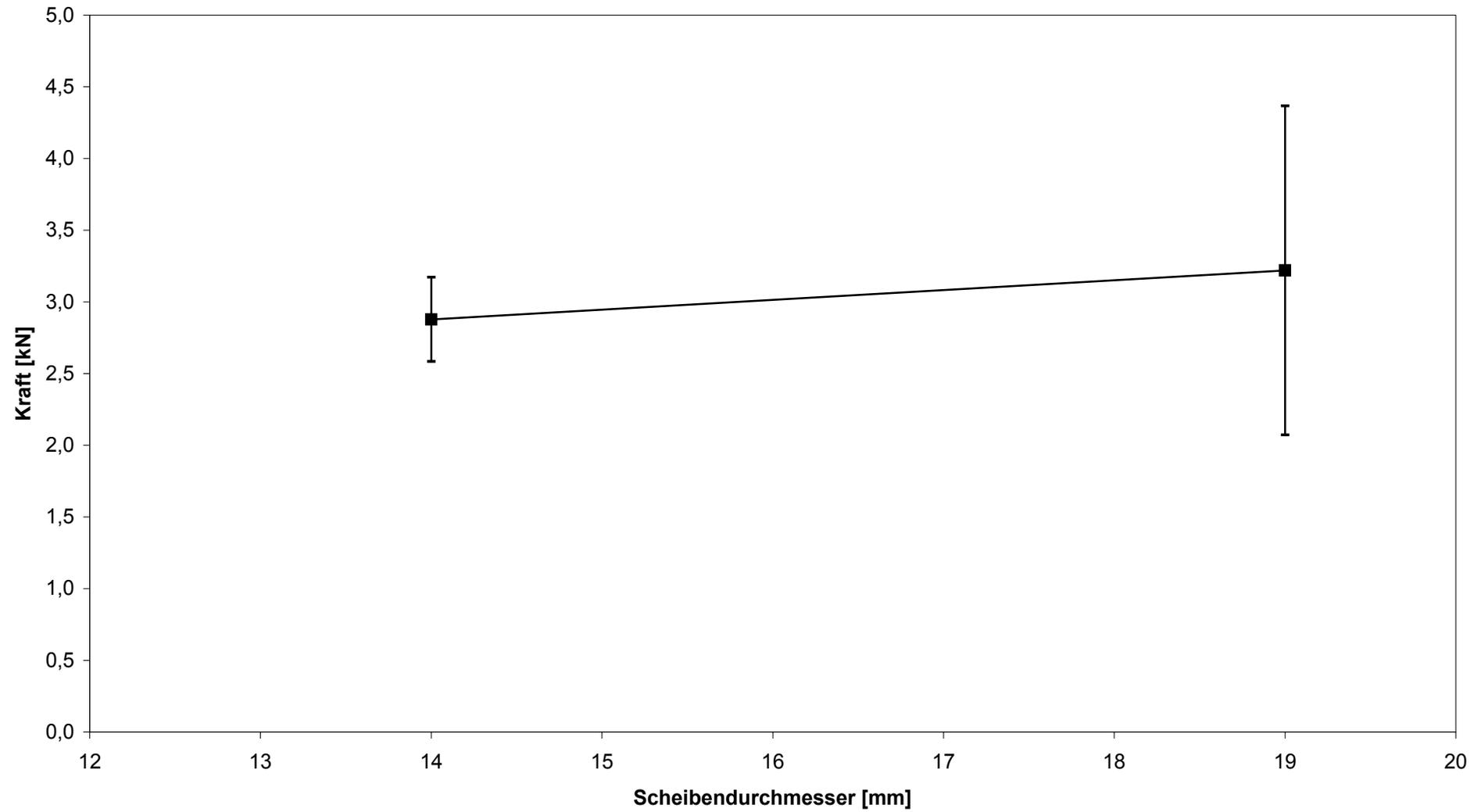
Versuchsserie L



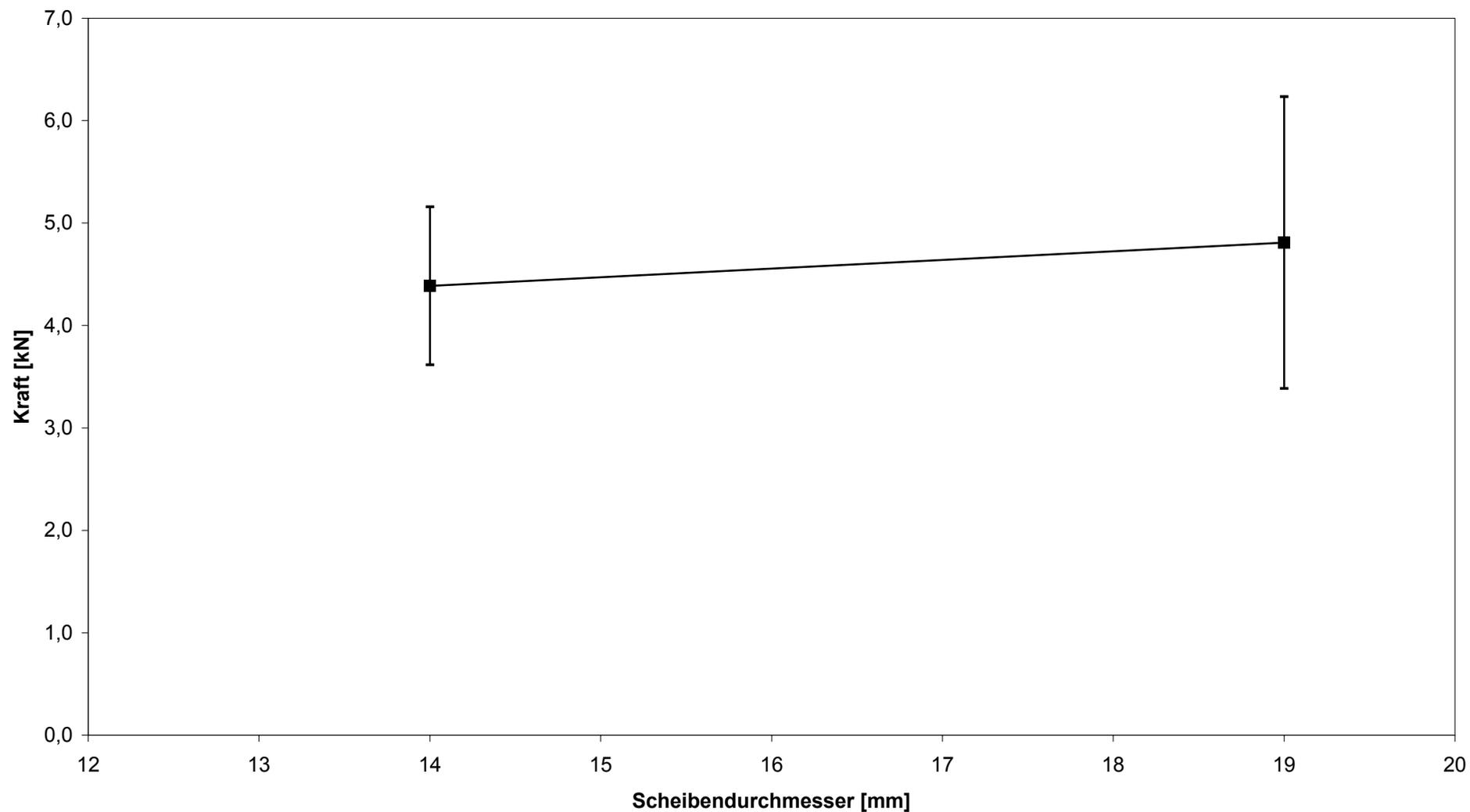
Versuchsserie M



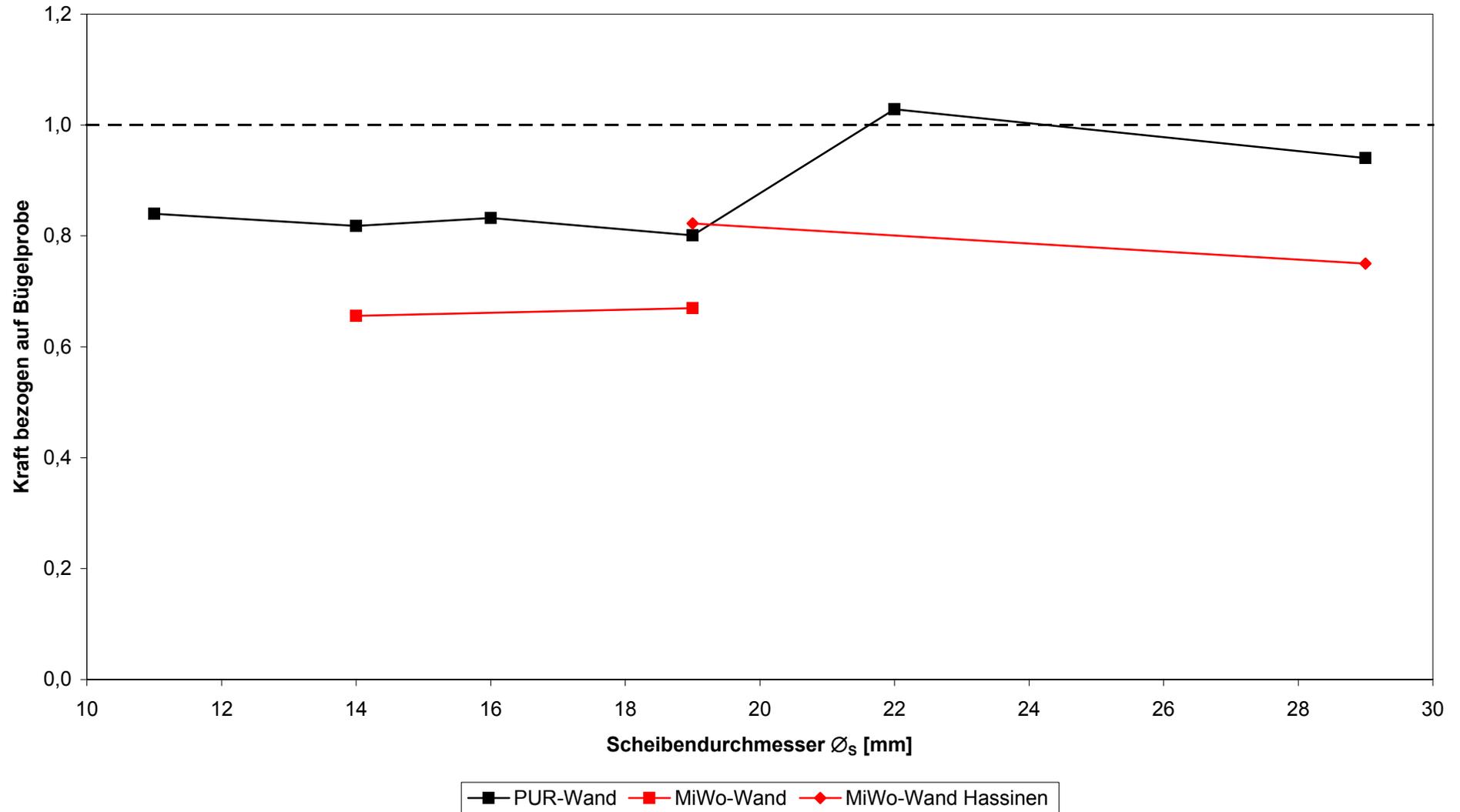
Versuchsserie N



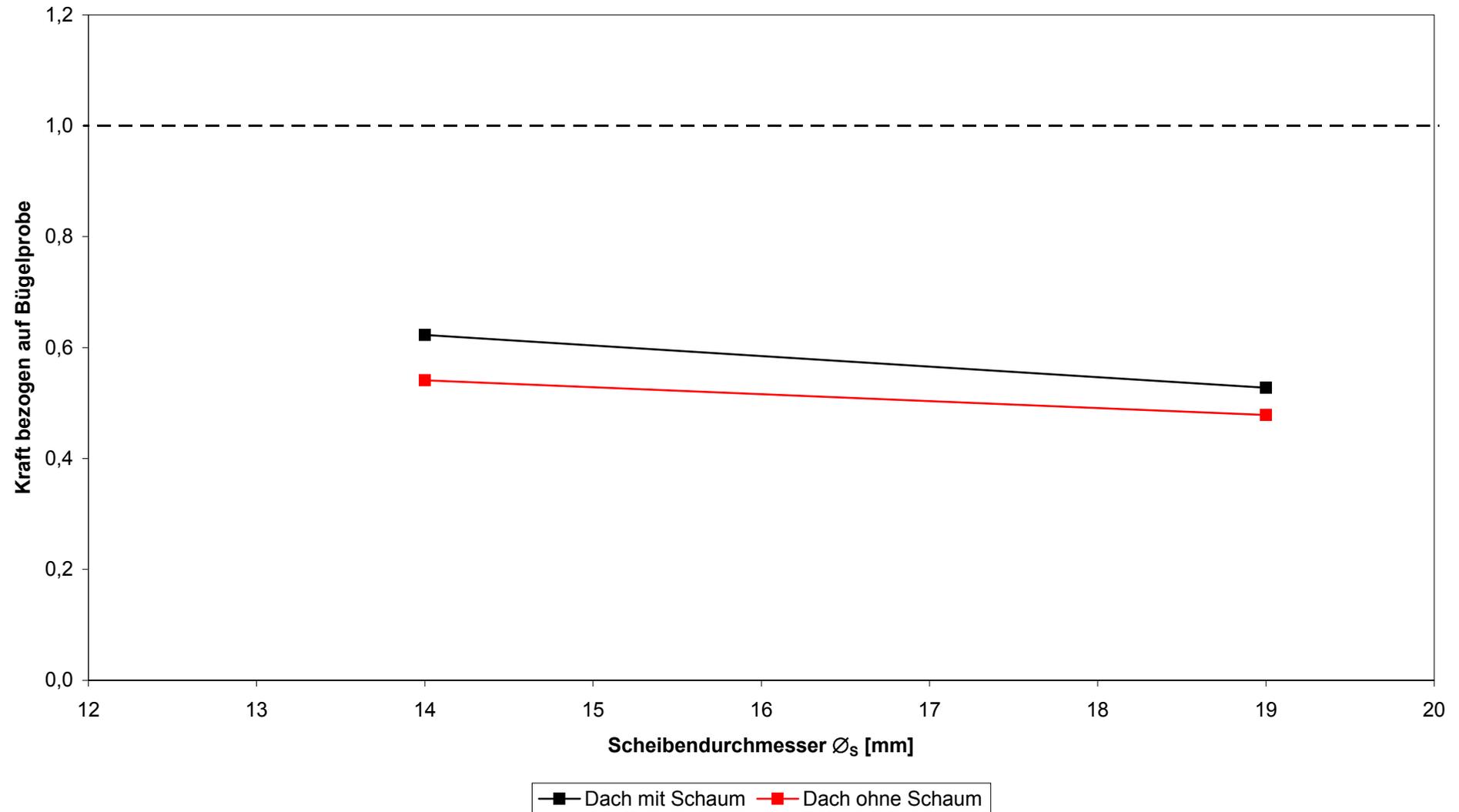
Versuchsserie O



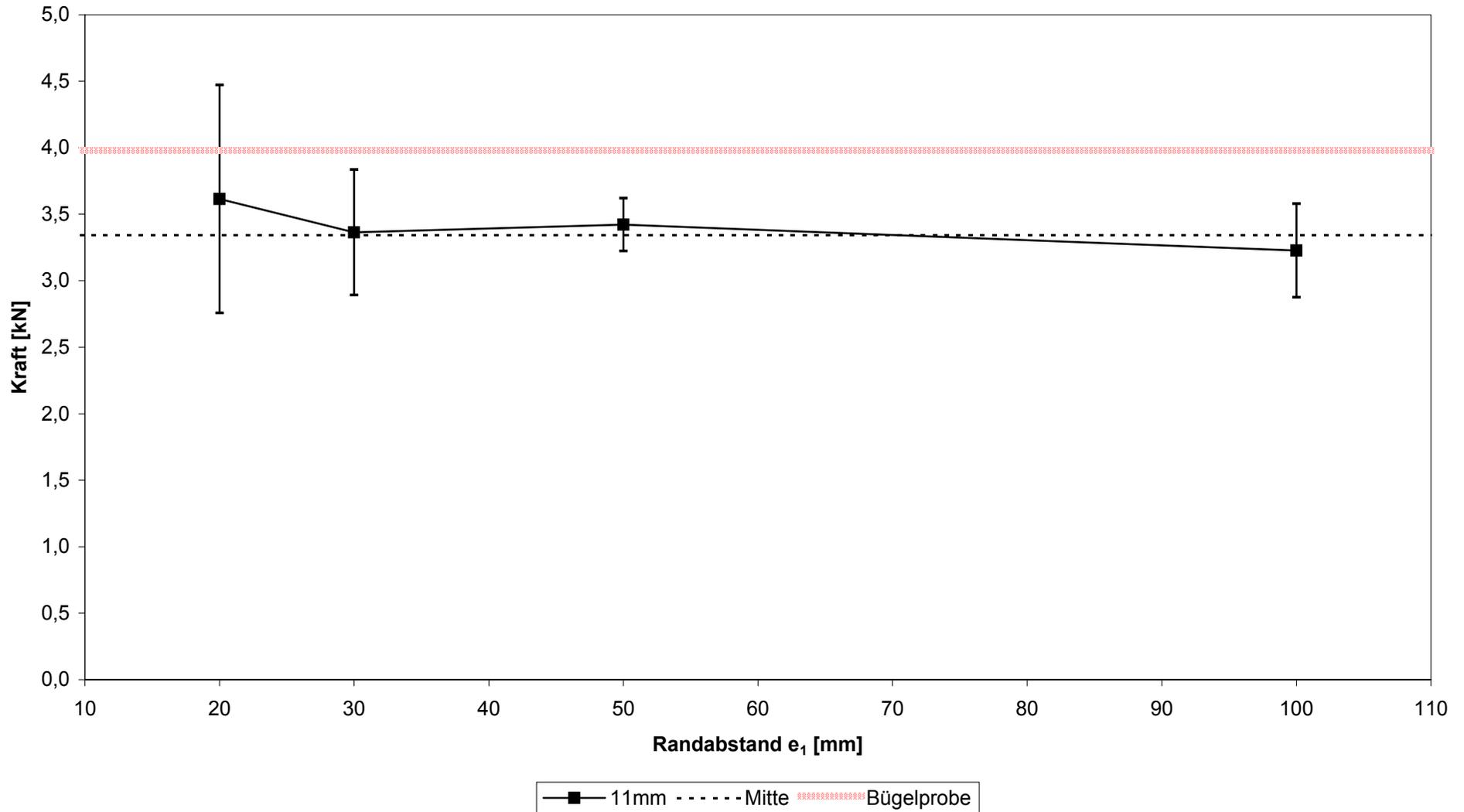
Versuchsserien Wand



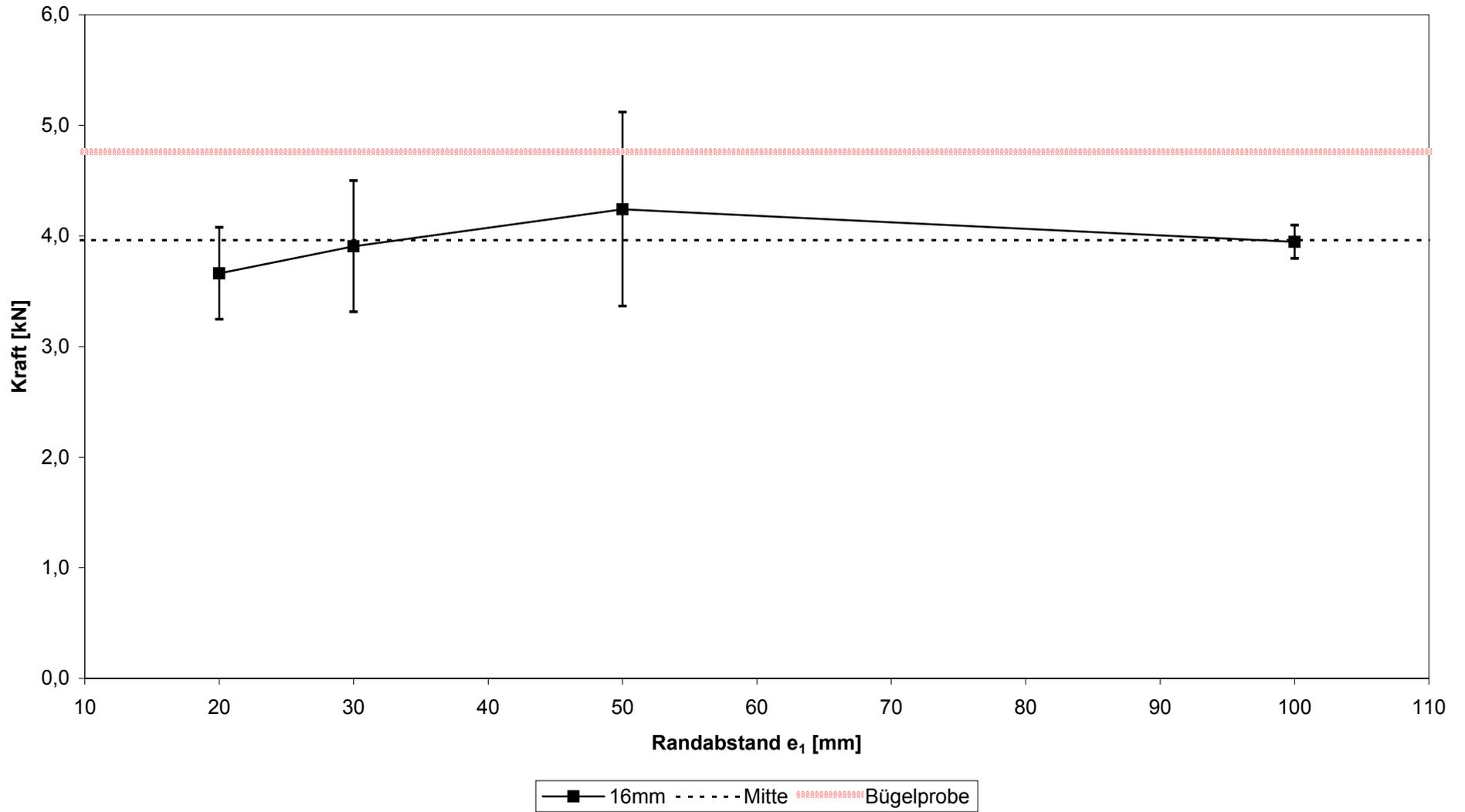
Versuchsserien Dach



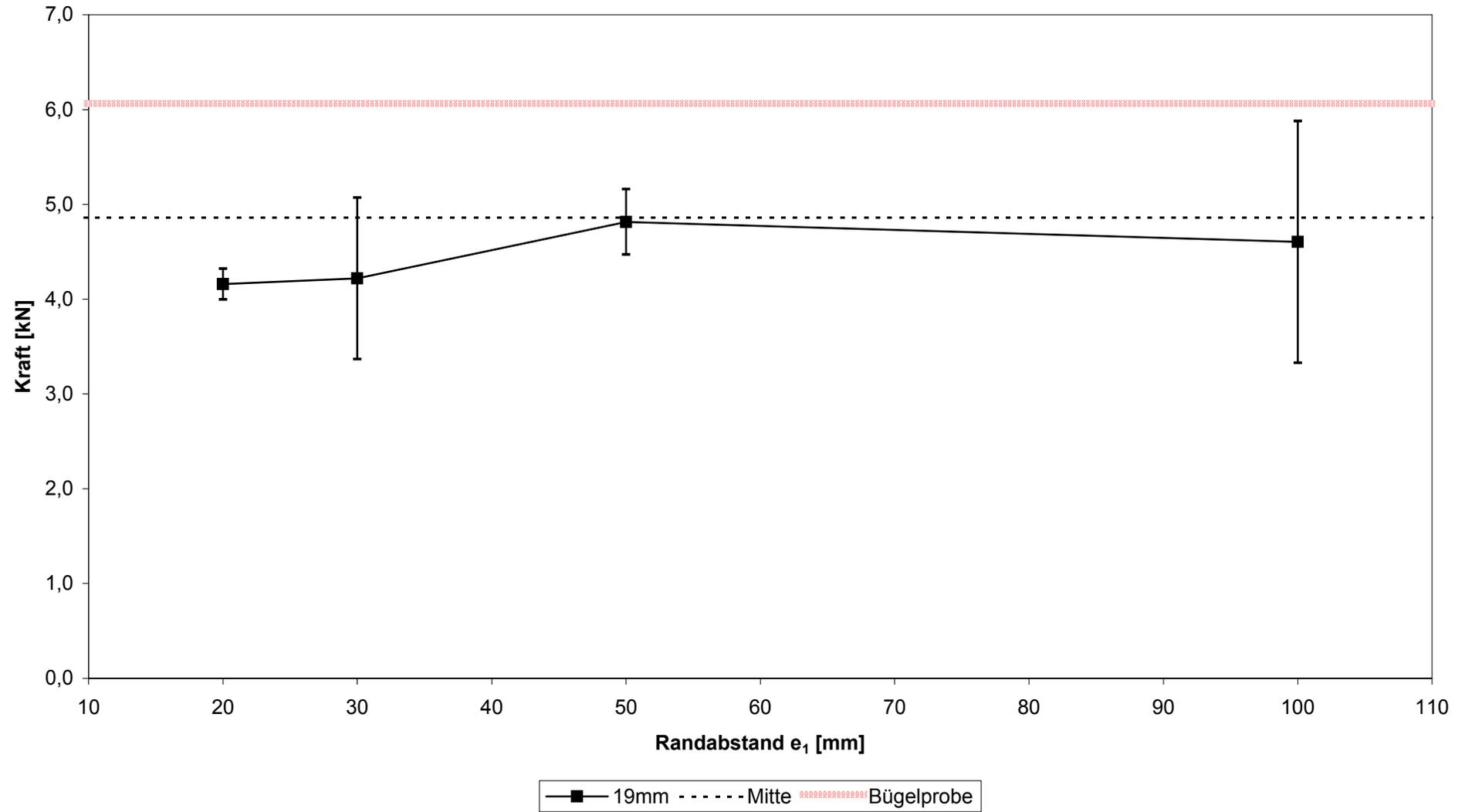
Versuchsserien \varnothing_s 11mm



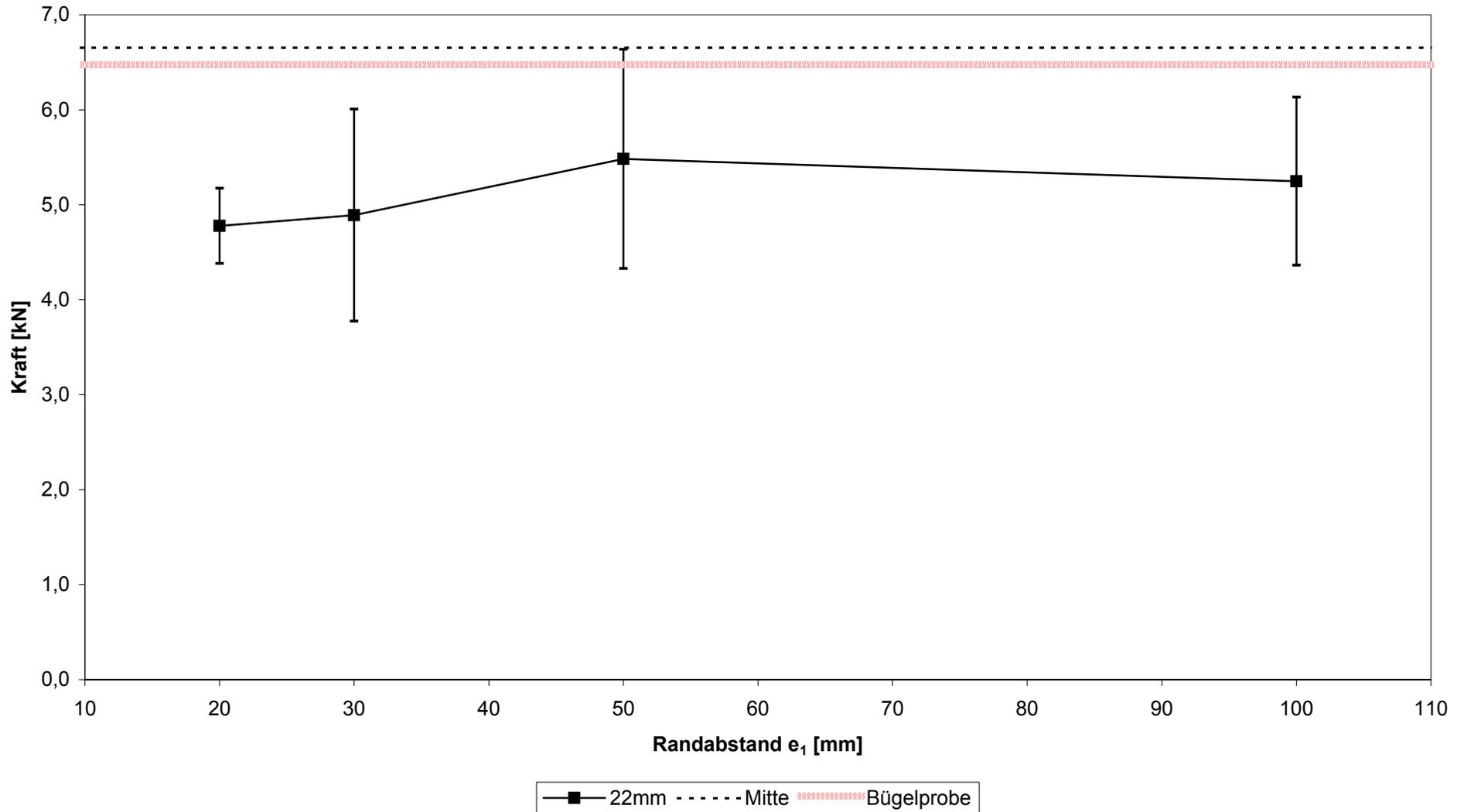
Versuchsserien \varnothing_s 16mm



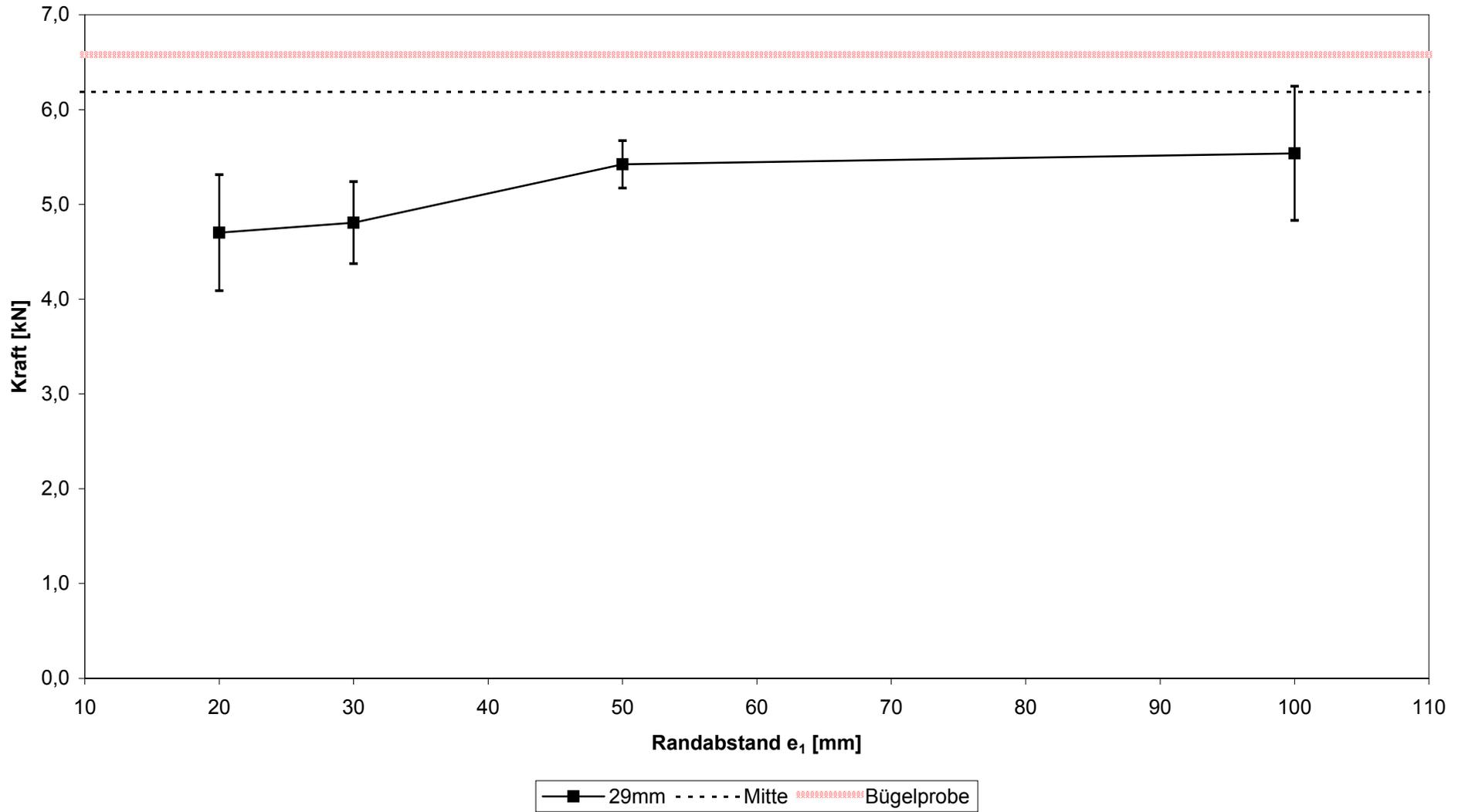
Versuchsserien \varnothing_s 19mm



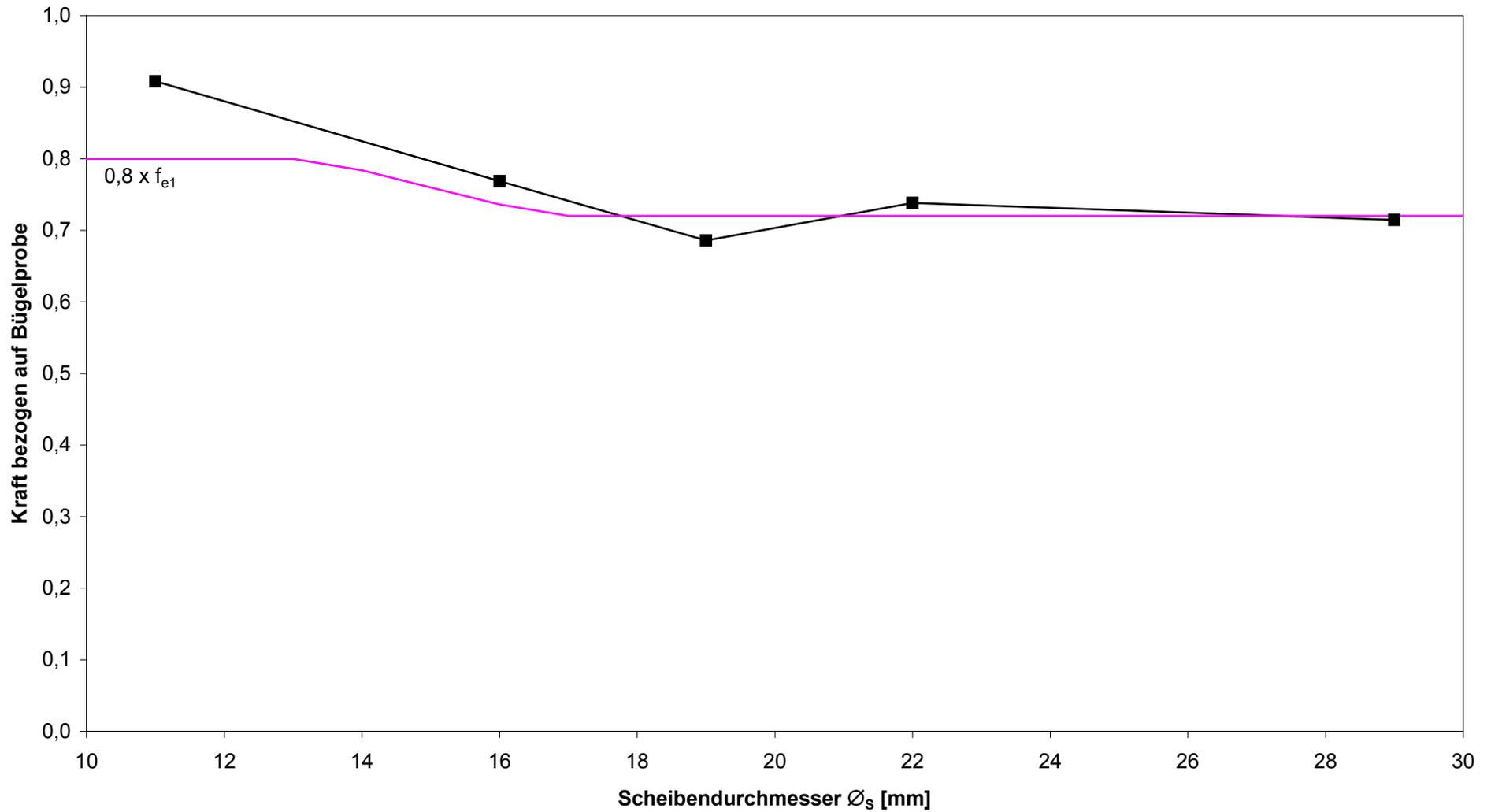
Versuchsserien \varnothing_s 22mm



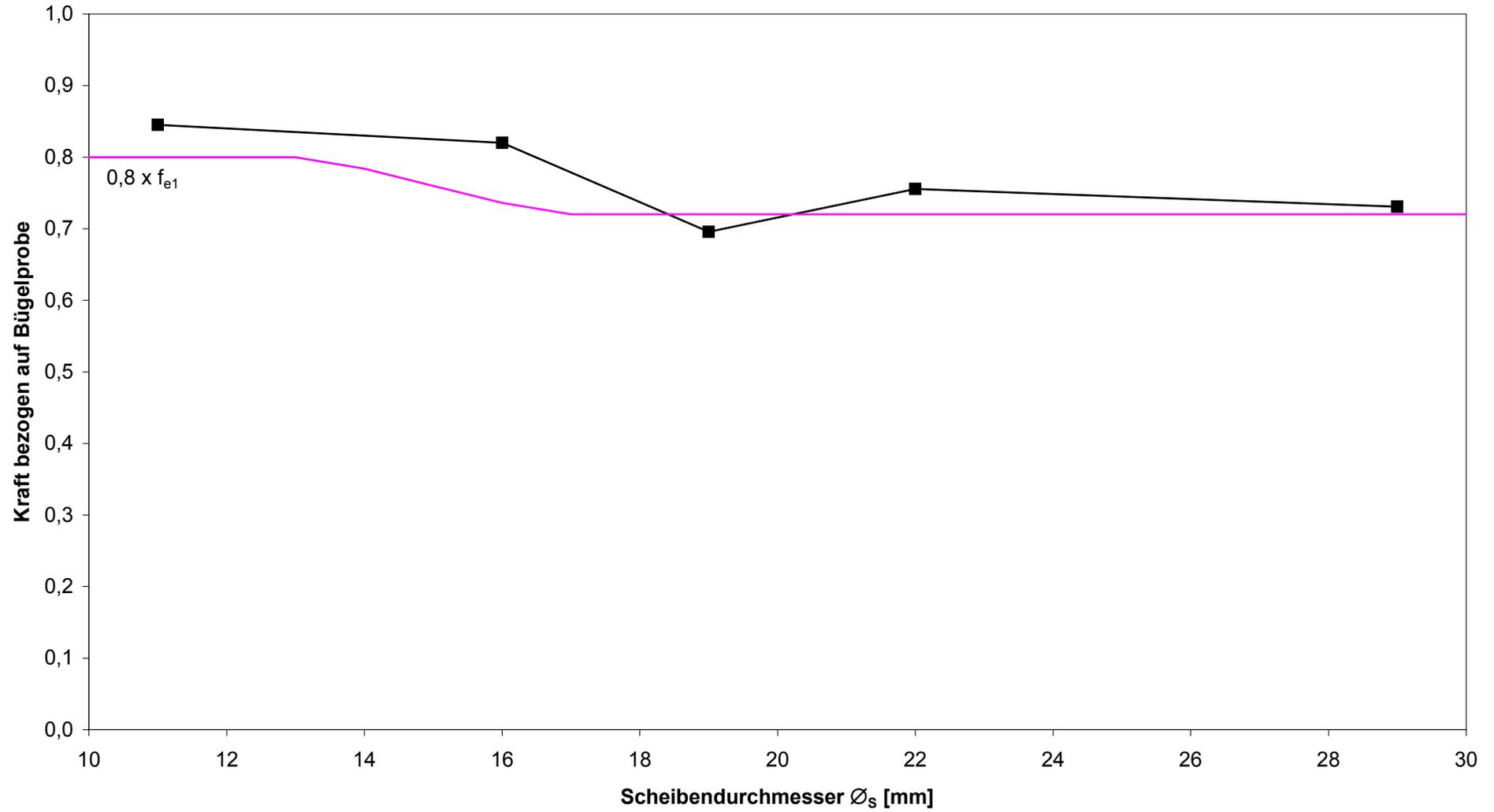
Versuchsserien \varnothing_s 29mm



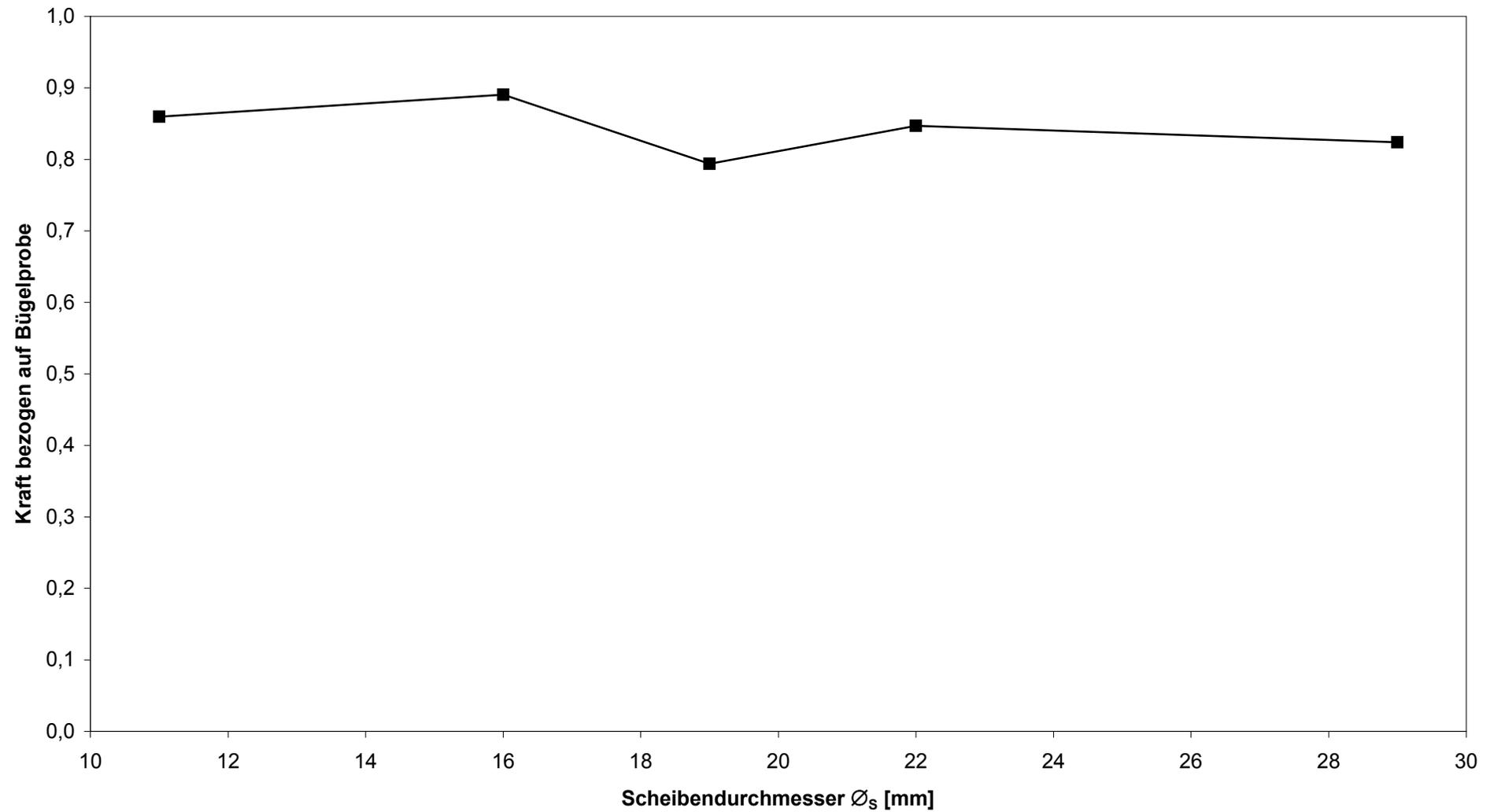
$e_1 = 20\text{mm}$



$e_1 = 30\text{mm}$



$e_1 = 50\text{mm}$



$e_1 = 100\text{mm}$

