

**Trag- und Verformungsverhalten  
querkraftbeanspruchter dübelartiger  
Verbindungen im Stahlbau**

**T 3163**

T 3163

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 978-3-8167-7572-0

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

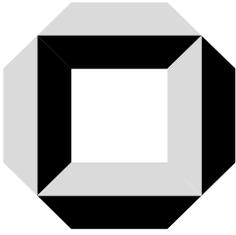
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://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.: 071501**

**Trag- und Verformungsverhalten querkraftbeanspruchter  
dübelartiger Verbindungen im Stahlbau**

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30L  
10829 Berlin

Grundlage: Vertrag vom 03.01.2007

Dieser Bericht umfasst 37 Seiten und 6 Anlagen (214 Seiten).

Ausgabedatum: 30.01.2008

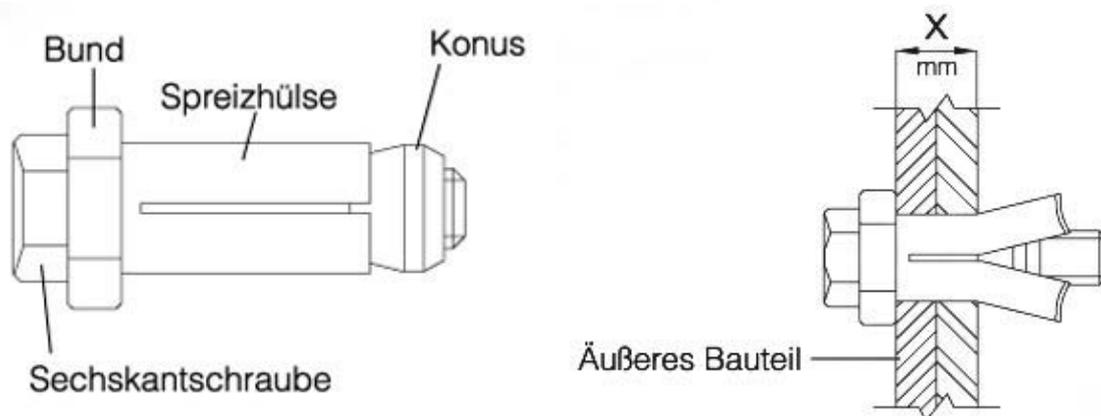
## **Inhaltsverzeichnis**

1	Vorbemerkung	3
2	Gegenstand und Umfang der Versuche	4
2.1	Vorbemerkungen	4
2.2	Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Lochdurchmessers auf die Abscher- und Lochleibungstragfähigkeit	5
2.3	Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Klemmdicke auf die Lochleibungstragfähigkeit bei einschnittig ungestützten Verbindungen	5
2.4	Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Hülsenausbildung	6
2.5	Vergleichsversuche	6
2.6	Zugversuche an Werkstoffproben	6
2.7	Abmessungen	6
3	Versuchsdurchführung	7
4	Versuchsergebnisse	9
4.1	Variation des Lochdurchmessers	9
4.2	Variation der Klemmdicke	12
4.3	Variation der Hülsenausbildung	14
4.4	Versuche mit Schrauben	15
4.5	Zugversuche an Werkstoffproben	17
5	Auswertung	18
5.1	Allgemeines	18
5.2	Lochdurchmesser	19
5.2.1	Tragfähigkeit und Grenzdurchmesser	19
5.2.2	Verformungsverhalten	19
5.3	Klemmdicke und Lochleibung	21
5.4	Hülsenausbildung	27
5.4.1	Vorbemerkungen	27
5.4.2	Tragfähigkeit	27
5.4.3	Verformungsverhalten	29
5.4.4	Zusammenfassung	30

5.5	Vergleich mit Schraubenverbindungen	31
5.5.1	Vorbemerkungen	31
5.5.2	Lochleibung	31
5.5.3	Abscheren	32
5.5.4	Zusammenfassung	34
6	Zusammenfassung und Empfehlung	35
7	Schrifttum	37
Anlage 1:	Abmessungen der Stahlbaudübel (4 Seiten)	
Anlage 2:	Kraft-Maschinenweg-Diagramme (44 Seiten)	
Anlage 3:	Kraft-Weg-Diagramme (44 Seiten)	
Anlage 4:	Verdrehungs-Kraft-Diagramme (88 Seiten)	
Anlage 5:	Bilder der Versuche und Probekörper (12 Seiten)	
Anlage 6:	Diagramme Auswertung (22 Seiten)	

## 1 Vorbemerkung

Der Verwendbarkeitsnachweis dübelartiger Verbindungselemente für Verbindungen an Hohlprofilen und anderen rückseitig schwer zugänglichen Konstruktionen ist durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu erbringen. Bei den genannten Verbindungselementen erfolgt die Fixierung durch Spreizung einer Hülse mittels eines im unzugänglichen Bereich der Verbindung liegenden Konus.



**Abbildung 1.1: Aufbau und Anwendung dübelartiger Verbindungselemente im Stahlbau (aus [2])**

Die auf der unzugänglichen Seite fehlende Auflage ermöglicht bei querkraftbeanspruchten dübelartigen Verbindungen unter Gebrauchslastniveau größere Verformungen als bei Verbindungen mit rohen Schrauben oder gar Passschrauben. Andererseits führt die sich spreizende Hülse zu einer Verklebung im Bohrloch, die die Verformungen behindert.

Erneute Fragestellungen zum Trag- und Verformungsverhalten der oben genannten Verbindungselemente haben sich insbesondere im Zusammenhang mit der Verwendung dieser Verbindungselemente bei der Kattwykbrücke in Hamburg ergeben. Bei den dort ausgeführten Anschlüssen traten von den Ausführenden nicht erwartete und als groß angesehene Verformungen auf, deren Einfluss auf die tatsächliche Tragfähigkeit der Anschlüsse unklar blieb.

Durch das Forschungsvorhaben sollen detaillierte Aussagen zum Trag- und Verformungsverhalten und somit auch zur Gebrauchstauglichkeit dübelartiger Verbindungen im Stahlbau im Vergleich zu üblichen Schraubenverbindungen gewonnen werden.

Hierzu sollen folgende Einflüsse untersucht werden:

- Einfluss des Lochdurchmessers auf die Abscher- und Lochleibungstragfähigkeit
- Einfluss der Klemmdicke auf die Lochleibungstragfähigkeit bei ungestützten Verbindungen
- Einfluss der Hülsenausbildung

## **2 Gegenstand und Umfang der Versuche**

### **2.1 Vorbemerkungen**

Die Stahlbaudübel setzen sich zusammen aus einer Sechskantschraube mit Gewinde bis Kopf DIN EN ISO 4017 der Festigkeitsklasse 8.8, einer konischen Mutter und einer Hülse mit Bund. Es werden Verbindungselemente für die Schraubengrößen M8, M10, M12, M16 und M20 hergestellt. Bei den Verbindungselementen für die Schraubengrößen M16 und M20 ist bei Stahlbaudübeln nach [1] der Bund von der Hülse getrennt, und zwischen Bund und Hülse ist zusätzlich ein Gummiring angeordnet.

Die Versuche an M12 dienen alle repräsentative Versuche für die Ausführung ohne Gummizwischenlage zwischen Hülse und Bund, die Versuche mit Größe M20 als repräsentative Versuche für die Ausführung mit Gummizwischenlage zwischen Hülse und Bund. Ergänzend werden Versuche an der Größe M20 in der Ausführung ohne Gummizwischenlage durchgeführt. Der Umfang dieser letztgenannten Versuche ergibt sich aus der Anzahl der noch erhältlichen Stahlbaudübel M20 ohne Gummizwischenlage mit gleichem Außendurchmesser, deren Produktion vor mehreren Jahren eingestellt wurde.

Die Versuche wurden mit Hollo-Bolts nach [1] durchgeführt, die von der Firma Lindapter GmbH, Essen, zur Verfügung gestellt wurden.

In den Versuchen mit Schraubenverbindungen wurden Sechskantschrauben mit Schaft DIN EN ISO 4014-M20x60-8.8 in Verbindung mit Muttern DIN EN ISO 4032-M20-8 und Scheiben DIN EN ISO 7089-20 sowie Sechskantschrauben mit Gewinde bis Kopf DIN EN ISO 4017-M24x60-8.8 in Verbindung mit Muttern DIN EN ISO 4032-M24-8 und Scheiben DIN EN ISO 7089-24 verwendet.

2.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Lochdurchmessers auf die Abscher- und Lochleibungstragfähigkeit

Variation des Lochdurchmessers innerhalb des zulässigen Bereiches:

Stahlbaudübel	Blechkicken [mm]	Hülsendurchmesser [mm]	Lochdurchmesser [mm]
M12	2x15mm	19,75mm	20
			21
			22
M20	2x15mm	32,75mm	33
			35
			37
			40

**Tabelle 2.1: Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Lochdurchmessers auf die Abscher- und Lochleibungstragfähigkeit**

2.3 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Klemmdicke auf die Lochleibungstragfähigkeit bei einschnittig ungestützten Verbindungen

Stahlbaudübel	Blechkicken [mm]	Hülsendurchmesser [mm]	Lochdurchmesser [mm]
M12	2x3mm	19,75mm	21
	2x8mm		
	2x15mm		
Versuche an Stahlbaudübeln M12 mit Klemmdicke 2x15mm sind durch die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Versuche bereits abgedeckt.			
M20	2x3mm	32,75mm	35
	2x8mm		
	2x15mm		
Versuche an Stahlbaudübeln M20 mit Klemmdicke 2x15mm sind durch die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Versuche bereits abgedeckt.			

**Tabelle 2.2: Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Klemmdicke auf die Lochleibungstragfähigkeit bei einschnittig ungestützten Verbindungen**

## 2.4 Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Hülseausbildung

Einfluss der Gummiringzwischenlage:

Stahlbaudübel	Blechkicken [mm]	Hülsendurchmesser [mm]	Lochdurchmesser [mm]
M20 ohne Gummiring	2x3mm	19,75mm	21
	2x8mm		
	2x15mm		
M20 mit Gummiring	2x3mm	32,75mm	35
	2x8mm		
	2x15mm		

Versuche an Stahlbaudübeln M20 mit Gummiring sind durch die in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3 aufgeführten Versuche bereits abgedeckt.

**Tabelle 2.3: Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Hülseausbildung**

## 2.5 Vergleichsversuche

Versuche an ungestützten Verbindungen mit rohen Schrauben und Passschrauben mit etwa gleichem Durchmesser zum Vergleich der Verformungen:

- Schraubendurchmesser M20 im Vergleich zu Stahlbaudübeln M12 (Außendurchmesser der Hülse 20mm) mit einer Blechdicke für eine vergleichbare Lochleibungstragfähigkeit.
- Schraubendurchmesser M24 entsprechend der charakteristischen Abschertragfähigkeit des Stahlbaudübels M20 (Schraube 8.8), Blechdicke 2x15mm

## 2.6 Zugversuche an Werkstoffproben

An Proben aus den für die Laschen verwendeten Blechen wurden Zugversuche durchgeführt.

## 2.7 Abmessungen

Die in den Versuchen verwendeten Laschen wurden vermessen. Die Ergebnisse der Vermessung sind in den Ergebnistabellen des Abschnitts 4 mit aufgenommen worden und dienen als Grundlage für die jeweils berechneten Lochleibungstragfähigkeit und Zugtragfähigkeit im Nettoquerschnitt.

Von jedem Typ verwendeter Stahlbaudübel wurden stichprobenartig drei Exemplare vermessen. Die Ergebnisse sind in Anlage 1 aufgenommen worden.

### **3 Versuchsdurchführung**

Die Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten der Stahlbaudübel wurden an einschnittig ungestützten Verbindungen durchgeführt. Die dabei verwendeten Laschen bestanden aus einem Flachblech der Länge 500mm, das im Bereich der Einspannung zur Vermeidung eines Versatzes durch ein Blech gleicher Dicke verstärkt wurde. Die Laschen wurden aus Blechen gebrannt, die Löcher gebohrt.

Alle Verbindungsmittel wurden mittels Drehmomentenschlüssel angezogen. Die Anzugsmomente für die Stahlbaudübel wurden gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung angesetzt:

- Stahlbaudübel M12: 80Nm
- Stahlbaudübel M20: 300Nm

Für die Schrauben (galvanisch verzinkt) wurden die Anzugsmomente wie folgt festgelegt:

- Schrauben M20: 300Nm
- Schrauben M24: 500Nm

Zur Messung der Verformungen und lokalen Verdrehungen der Probekörper wurden Messbrücken an den Laschen befestigt, deren Messpunkte mittels Videoextensiometer aufgezeichnet wurden.

Die Versuche wurden mit kalibrierten Prüfeinrichtungen der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine durchgeführt. Die Probekörper wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 5mm/min (Versuch 10: 3mm/min) bis zum Bruch belastet.

Die Verschiebung in der Verbindung wurde zum einen als Maschinenweg gemessen (Anlage 2), zum anderen aus den Koordinaten der obersten und untersten Messbrücke berechnet (Anlage 3).

Ergänzend wird jeweils die Verdrehung des Schaftes der Sechskantschraube sowie – soweit geometrisch möglich – die Verdrehung des schraubenkopfseitigen Blechs neben dem Schraubenkopf und am freien Ende aus den Verschiebungen berechnet. Die Verdrehungen der obersten und untersten Messbrücke wurden ebenfalls berechnet (Anlage 4).

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abschnitt 4 aufgeführt. Aus den gemessenen Abmessungen der Laschen sowie den Ergebnissen der Zugversuche wurden die charakteristischen Werte der Tragfähigkeit auf Abscheren, Lochleibung und Fließen im Nettoquerschnitt errechnet und in den Ergebnistabellen des Abschnitts 4 den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Die sich aus [5] und [6] für einschnittig ungestützte Verbindungen ergebenden reduzierten Bemessungswerte der Tragfähigkeit infolge der Begrenzung der zulässigen Ausnutzung auf 83% der rechnerischen Lochleibungstragfähigkeit nach Element (807) sowie des für einschnittig ungestützte Verbindungen anzusetzenden größeren Teilsicherheitsbeiwertes von  $\gamma_M = 1,25$  für die Ermittlung des Bemessungswertes der Tragfähigkeit gegen Abscheren nach

Element (804) wurden dabei nicht berücksichtigt. Ebenfalls wurden die Einschränkungen des Elements (807) hinsichtlich der Randabstände vernachlässigt.

Die Lochleibungstragfähigkeit der Verbindungen mit Stahlbaudübeln ergibt sich gemäß [1] bis [4] zu

$$V_{l,calc} = R_{eH} \cdot \alpha_l \cdot t \cdot d_{Hü}$$

mit

$$\alpha_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot \varepsilon - 0,3 \\ 2,0 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_L} - 0,3 \\ 2,0 \end{array} \right.$$

und dem mittleren Hüsendurchmesser  $d_{Hü}$  gemäß Anlage 1. Diese Regelung entspricht der in DIN 18800-1:1990-11, Element (805) für Schraubenverbindungen angegebene Regelung, wobei diese gemäß [1] bis [4] für Verbindungen mit Stahlbaudübeln für Randabstände bis  $e_2 = 1,2 d_L$  angewendet werden darf. DIN 18800-1 sieht einen Mindestwert von  $e_2 = 1,5 d_L$  vor. Für Randabstände  $e_2 = 1,2 d_L$  sind die Werte auf 2/3 zu reduzieren.

Die Abschertragfähigkeit der Stahlbaudübel  $V_{a,calc}$  wurde aus [1] übernommen. Die Abschertragfähigkeit und die Lochleibungstragfähigkeit der Verbindungen mit Schrauben wurde nach DIN 18800-1 ermittelt.

Die Tragfähigkeit im Nettoquerschnitt wurde mit

$$N_{y,calc} = R_{eH} \cdot (e_{2,1} + e_{2,2} - d_L) \cdot t$$

berechnet.

Die Zugversuche an Werkstoffproben wurden nach DIN EN 10002-1 durchgeführt.

## 4 Versuchsergebnisse

### 4.1 Variation des Lochdurchmessers

In der ersten Versuchsserie wurde der Lochdurchmesser in den Laschen variiert. Die Blechdicke betrug einheitlich bei 15mm.

In den Versuchen 1 bis 19 trat das Versagen durch Abscheren ein. Während das Abscheren bei den Versuchen mit Stahlbaudübeln M12 (Versuche 1 bis 9) rechtwinklig zur Schraubenchse durch Schraube und Hülse erfolgte, kam es bei den Versuchen mit Stahlbaudübeln M20 zu einer geneigten Scherfläche infolge einer Kombination aus Zug und Querkraftbeanspruchung nach Verdrehung (Abbildung 7 rechts der Anlage 5). In den Versuchen 20 bis 22mm (Stahlbaudübel M20, Lochdurchmesser 40mm) kam es zu einem Herausziehen der Stahlbaudübel aus der Unterkonstruktion (Abbildung 8 der Anlage 5).

<b>Stahlbaudübel M12, <math>d_{L,nom} = 20\text{mm}</math>, <math>t = 15\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
1	A	25,0	25,3	24,6	20,0	15,1	266	71,0	84,2	112,1	94,6
	B	25,1	25,3	24,9	20,0	15,2			85,2	114,0	
2	A	45,1	25,3	24,7	20,1	15,0	266	71,0	155,6	111,0	98,3
	B	45,1	25,3	24,2	20,0	14,9			154,6	109,1	
3	A	45,1	25,4	25,4	20,1	15,1	266	71,0	156,6	114,7	95,6
	B	45,1	25,1	25,3	20,0	15,1			156,6	113,8	

**Tabelle 4.1: Versuche M12**

<b>Stahlbaudübel M12, <math>d_{L,nom} = 21\text{mm}</math>, <math>t = 15\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
4	A	25,1	25,3	24,8	21,2	15,1	266	71,0	78,5	108,5	96,2
	B	24,8	25,1	25,5	21,2	15,1			77,3	110,4	
5	A	45,2	25,0	25,5	21,2	15,2	266	71,0	157,7	110,6	98,4
	B	44,9	25,1	25,0	21,1	15,1			156,6	108,7	
6	A	45,0	25,2	25,1	21,2	15,0	266	71,0	155,6	108,4	98,1
	B	45,1	25,0	25,8	21,3	15,2			157,7	111,1	

**Tabelle 4.2: Versuche M12**

Stahlbaudübel M12, $d_{L,nom} = 22\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
7	A	25,6	25,5	24,8	22,1	14,9	266	71,0	75,1	104,0	94,9
	B	25,4	25,4	24,9	22,0	15,1			76,0	106,1	
8	A	44,3	25,2	24,7	22,1	15,2	266	71,0	150,4	105,1	93,2
	B	45,3	24,7	26,8	22,1	15,1			152,9	109,9	
9	A	45,1	25,2	25,0	22,0	15,1	266	71,0	153,1	105,7	93,8
	B	45,3	25,3	25,1	22,1	15,1			152,9	105,7	

Tabelle 4.3: Versuche M12

Stahlbaudübel M20, $d_{L,nom} = 33\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
10	A	60,1	50,2	50,0	32,7	15,1	266	210,8	222,5	252,7	259,4
	B	60,2	50,4	49,8	32,6	15,0			222,4	251,8	
11	A	75,2	50,1	50,0	32,5	15,1	266	210,8	258,7	253,6	256,0
	B	75,0	50,2	50,2	32,4	15,1			258,7	254,6	
12	A	75,4	50,6	49,7	33,6	15,1	266	210,8	258,7	250,3	259,9
	B	75,2	50,1	49,9	32,9	15,2			260,4	253,1	

Tabelle 4.4: Versuche M20

Stahlbaudübel M20, $d_{L,nom} = 35\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
13	A	60,1	50,6	50,5	35,1	15,2	266	210,8	206,0	248,7	251,6
	B	60,1	50,2	50,3	35,0	15,1			205,5	245,6	
14	A	59,8	50,2	50,2	35,1	15,2	266	210,8	205,1	246,6	253,6
	B	60,1	50,1	50,8	35,1	15,1			204,9	246,9	
15	A	75,2	50,3	50,0	35,0	15,1	266	210,8	258,7	244,8	252,9
	B	75,4	50,1	50,1	35,4	15,1			258,7	243,0	
16	A	74,9	49,9	50,5	35,0	15,2	266	210,8	260,4	247,0	260,4
	B	74,9	50,3	50,7	35,1	15,0			257,0	245,3	

Tabelle 4.5: Versuche M20

Stahlbaudübel M20, $d_{L,nom} = 37\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
17	A	60,3	50,3	50,2	37,1	15,0	266	210,8	191,0	235,8	249,4
	B	59,8	50,1	50,1	37,0	15,1			191,1	237,0	
18	A	75,0	50,2	49,9	37,1	15,1	266	210,8	249,2	236,0	251,7
	B	75,8	50,3	49,8	37,0	15,0			251,0	235,0	
19	A	75,9	50,2	50,0	37,3	15,1	266	210,8	250,9	236,0	248,8
	B	75,1	50,3	49,7	37,1	15,0			247,3	233,9	

Tabelle 4.6: Versuche M20

Stahlbaudübel M20, $d_{L,nom} = 40\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
20	A	60,1	50,3	50,3	40,4	15,1	266	210,8	172,8	225,7	202,5
	B	60,4	50,5	50,6	40,0	15,0			175,1	227,4	
21	A	75,1	49,9	49,9	40,4	15,1	266	210,8	226,0	222,5	204,1
	B	75,3	50,2	50,4	40,4	15,0			225,2	224,0	
22	A	75,2	50,5	50,8	40,5	15,2	266	210,8	226,7	229,1	193,3
	B	74,8	50,0	50,3	40,4	15,1			224,9	224,4	

Tabelle 4.7: Versuche M20

#### 4.2 Variation der Klemmdicke

In der zweiten Versuchsserie wurden Stahlbaudübel in Verbindungen mit Klemmdicken 2x3mm und 2x8mm untersucht. In den Versuchen kam es zu einem Herausziehen der Stahlbaudübel aus der Unterkonstruktion (Lochleibungsversagen), wobei dies bei den Versuchen mit Klemmdicke 2x8mm mit einer Zerstörung der Hülse (Versuche 25 und 26: und der Schraube) verbunden war.

<b>Stahlbaudübel M12, <math>d_{L,nom} = 21\text{mm}</math>, <math>t = 3\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
23	A	25,0	25,8	23,4	20,9	3,1	344	71,0	21,1	28,4	24,2
	B	25,3	25,4	23,9	21,0	3,1			21,3	28,5	
24	A	25,4	25,5	23,6	21,0	3,0	344	71,0	20,6	27,4	24,8
	B	25,2	25,7	24,4	21,0	3,1			21,2	29,2	

**Tabelle 4.8: Versuche M12**

<b>Stahlbaudübel M12, <math>d_{L,nom} = 21\text{mm}</math>, <math>t = 8\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
25	A	25,0	25,4	24,3	21,0	8,0	332	71,0	52,3	69,3	80,6
	B	25,0	25,1	24,5	21,0	8,0			52,3	69,0	
26	A	25,6	24,8	25,5	21,3	8,0	332	71,0	53,1	69,9	82,1
	B	25,1	25,2	24,8	21,0	8,0			52,6	70,1	

**Tabelle 4.9: Versuche M12**

<b>Stahlbaudübel M20, <math>d_{L,nom} = 35\text{mm}</math>, <math>t = 3\text{mm}</math> mit Futterblech <math>t = 3\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
27	A	60,1	50,6	49,4	35,0	3,1	344	210,8	54,6	65,5	43,4
	B	60,0	50,5	50,1	34,9	3,1			54,6	66,3	
28	A	60,1	50,4	49,3	35,1	3,1	344	210,8	54,5	65,1	42,9
	B	60,2	50,4	49,9	35,0	3,2			56,4	67,9	

**Tabelle 4.10: Versuche M20**

<b>Stahlbaudübel M20, <math>d_{L,nom} = 35\text{mm}</math>, <math>t = 8\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
29	A	59,9	50,2	49,7	35,0	8,0	332	210,8	135,6	156,5	144,1
	B	59,8	50,2	49,8	35,0	8,0			135,1	156,9	
30	A	60,1	50,2	49,6	35,1	8,0	332	210,8	135,5	156,3	145,3
	B	60,0	50,1	49,6	35,0	8,0			135,6	156,2	

**Tabelle 4.11: Versuche M20**

#### 4.3 Variation der Hülseausbildung

An Stahlbaudübeln M20 ohne Gummiring wurden Versuche mit unterschiedlichen Klemmdicken durchgeführt.

In den Versuchen kam es zu einem Versagen durch Lochleibung und einem Herausziehen der Stahlbaudübel aus der Unterkonstruktion. Mit Ausnahme des Versuchs 32 kam es bei allen Versuchen zu einer Beschädigung der Hülse durch Abbrechen einer oder mehrerer Finnen. Ein Abscheren der Schraube wurde nicht beobachtet.

<b>Stahlbaudübel M20 ohne Gummiring, <math>d_{L,nom} = 35\text{mm}</math>, <math>t = 3\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
31	A	60,1	50,4	49,7	35,1	3,1	344	210,8	55,3	65,5	39,0
	B	60,2	50,4	50,1	35,1	3,1			55,4	65,9	
32	A	59,9	50,3	49,8	35,1	3,1	344	210,8	55,1	65,5	44,8
	B	60,0	50,5	49,5	35,0	3,1			55,3	65,5	

Tabelle 4.12: Versuche M20

<b>Stahlbaudübel M20 ohne Gummiring, <math>d_{L,nom} = 35\text{mm}</math>, <math>t = 8\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
33	A	60,2	50,0	49,9	34,9	8,1	332	210,8	140,5	158,8	132,1
	B	60,0	50,2	50,0	35,0	8,1			139,3	159,1	
34	A	59,6	50,3	49,9	35,0	8,0	332	210,8	136,6	157,4	130,3
	B	59,7	50,3	49,8	35,1	8,0			136,7	156,8	

Tabelle 4.13: Versuche M20

<b>Stahlbaudübel M20 ohne Gummiring, <math>d_{L,nom} = 35\text{mm}</math>, <math>t = 15\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
35	A	60,3	50,2	50,0	35,1	15,1	266	210,8	208,9	244,3	248,8
	B	60,1	50,2	50,3	35,1	15,1			207,8	244,8	
36	A	59,8	53,1	53,2	35,1	15,1	266	210,8	206,5	266,6	247,6
	B	60,4	55,4	51,0	35,1	15,1			209,0	267,0	

Tabelle 4.14: Versuche M20

#### 4.4 Versuche mit Schrauben

Als Grundlage für einen Vergleich des Verformungsverhaltens der Stahlbaudübel mit konventionellen geschraubten Verbindungen wurden ergänzende Querkraftversuche an Schraubenverbindungen durchgeführt. Das Versagen erfolgte bei diesen Versuchen in jedem Fall durch ein Abscheren der Schraube. Bei den Versuchen mit Schrauben M20 kam es dabei infolge des geringen Randabstandes  $e_1$  zu ausgeprägten Lochleibungsdeformationen. Dieser Effekt wurde bei den Versuchen 39 und 40 durch den großen Lochdurchmesser  $d_L$  verstärkt.

Schrauben M20, $d_{L,nom} = 20\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
37	A	24,6	35,2	35,4	20,1	15,2	266	117,6	84,4	190,2	139,5
	B	25,9	35,4	35,1	20,1	15,1			90,0	188,8	
38	A	25,0	35,3	35,4	20,1	15,1	266	117,6	85,9	189,9	147,9
	B	25,1	35,5	35,0	20,0	15,1			86,8	189,3	

Tabelle 4.15: Versuche M20

Schrauben M20, $d_{L,nom} = 23\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
39	A	25,3	35,6	35,4	22,9	15,2	266	117,6	73,8	181,2	149,0
	B	25,3	35,3	35,4	22,9	15,1			73,3	178,8	
40	A	25,0	35,4	35,5	23,0	15,1	266	117,6	72,2	179,4	159,8
	B	25,5	35,5	35,5	22,9	15,2			74,6	181,2	

Tabelle 4.16: Versuche M20

Schrauben M24, $d_{L,nom} = 24\text{mm}$ , $t = 15\text{mm}$											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
41	A	90,1	50,1	50,1	24,1	15,1	266	169,4	289,2	284,9	202,2
	B	90,1	50,1	51,8	24,2	15,1			289,2	291,5	
42	A	90,1	50,1	50,0	24,1	15,1	266	169,4	289,2	284,6	202,1
	B	89,9	50,4	50,6	24,1	15,0			287,3	286,0	

Tabelle 4.17: Versuche M20

<b>Schrauben M24, <math>d_{L,nom} = 27\text{mm}</math>, <math>t = 15\text{mm}</math></b>											
Versuch Nr.	Lasche	Abmessungen					$R_{eH}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Kräfte			
		$e_1$	$e_{2,1}$	$e_{2,2}$	$d_L$	$t$		$V_{a,calc}$	$V_{l,calc}$	$N_{y,calc}$	$F_{max}$
		[mm]					[kN]				
43	A	90,4	49,9	50,8	27,2	15,1	266	169,4	289,2	275,6	230,7
	B	90,3	50,2	50,2	27,5	15,0			287,3	271,1	
44	A	90,1	49,9	50,5	27,5	15,0	266	169,4	287,3	271,5	211,7
	B	90,7	49,7	50,6	27,5	15,0			287,3	270,8	

**Tabelle 4.18: Versuche M20**

#### 4.5 Zugversuche an Werkstoffproben

An Werkstoffproben aus den für die Herstellung der Laschen verwendeten Blechen wurden Zugversuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt.

Nenndicke	Blechdicke t [mm]	Streckgrenze R <sub>eH</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung A <sub>5</sub> [%]
3,0	2,99	332	427	30,6
	3,02	330	425	29,4
	2,99	333	427	30,5
Mittelwert:	3,00	332	426	30,2
8,0	7,92	344	417	-
	7,88	341	417	42,3
	7,92	348	417	38,6
Mittelwert:	7,91	344	417	40,5
15,0	15,01	268	375	38,7
	15,07	255	371	39,2
	15,02	274	371	38,7
Mittelwert:	15,03	266	372	38,9

**Tabelle 4.19: Werkstoffkennwerte**

## 5 Auswertung

### 5.1 Allgemeines

Für alle Versuche wurde als Grundlage für eine Einschätzung der Versuchsergebnisse und für eine Überprüfung der Bemessungswerte nach den technischen Regeln der rechnerische charakteristische Wert der Tragfähigkeit ermittelt, vgl. Abschnitt 3 sowie die Ergebnistabellen des Abschnitts 4. Trägt man die Versuchsergebnisse über den sich rechnerisch ergebenden charakteristischen Werten auf, so zeigt sich, dass die Versuche mit Stahlbaudübeln M20 mit und ohne Gummiring und Blechdicke 2x3mm (Versuche 27 bis 28 und 31 bis 32), mit Blechdicke 2x8mm (Versuche 33 bis 34) sowie die Versuche mit Stahlbaudübeln M20 und Lochdurchmesser  $d_L = 40\text{mm}$  bei einem Randabstand  $e_1 = 75\text{mm}$  (Versuche 21 bis 22) unter dem charakteristischen Wert der Tragfähigkeit liegen (Anlage 6.1).

Berücksichtigt man, dass nach [5] der Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit einschnittig ungestützter Verbindungen in der Form

$$\frac{V_d}{V_{1,Rd}} \leq \frac{1}{1,2}$$

zu führen ist und nach [6] für den Nachweis gegen Abscheren bei einschnittig ungestützten Verbindungen  $\gamma_M = 1,25$  statt  $\gamma_M = 1,1$  zu setzen ist, so liegen die Versuchsergebnisse mit großem Lochspiel sowie mit Blechdicke 2x8mm oberhalb der damit korrigierten charakteristischen Werte. Anders verhält es sich mit den Ergebnissen mit Stahlbaudübeln M20 und Blechdicke 2x3mm, die immer noch unter den charakteristischen Werten liegen.

Offensichtlich liefern die Ansätze zur Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit für einschnittig ungestützte Verbindungen mit Stahlbaudübeln generell Ergebnisse, die zumindest bei kleineren Blechdicken nicht auf der sicheren Seite liegen. Tritt hingegen das Versagen durch Abscheren ein, liegen die Versuchsergebnisse bei Bohrlochdurchmessern innerhalb des zulässigen Bereichs immer deutlich über den rechnerisch ermittelten charakteristischen Werten.

## 5.2 Lochdurchmesser

### 5.2.1 Tragfähigkeit und Grenzdurchmesser

Wie die Ergebnisse und Versagensmodi der Versuche 20 bis 22 zeigen, kann es bei zu großem Lochdurchmesser zu einem Versagen der Verbindung durch zu große Verdrehungen und einem sich daraus ergebenden Herausziehen des Stahlbaudübels kommen. Diese mit dem Versagen durch Lochleibung verwandte Versagensform tritt dann sogar bei Blechdicken auf, bei denen aufgrund der relative großen Dicke von einem Versagen durch Abscheren auszugehen wäre. Um dies auszuschließen, empfiehlt es sich, den Bohrlochdurchmesser in Abhängigkeit vom Hüsendurchmesser zu begrenzen

Versuche Nr.	Verbindung	Abmessungen			$d_{H\ddot{u}}/d_L$
		$d_{H\ddot{u}}$	$d_L$	$t$	
[mm]					
<b>1 bis 3</b>	Stahlbaudübel M12	19,5	20,0	15,1	1,03
<b>4 bis 6</b>			21,2		1,09
<b>7 bis 9</b>			22,1		1,13
<b>10 bis 12</b>	Stahlbaudübel M20	32,1	32,6	15,1	1,02
<b>13 bis 16</b>			35,1		1,09
<b>17 bis 19</b>			37,1		1,16
<b>20 bis 22</b>			40,4		1,26

**Tabelle 5.1: Variation des Lochdurchmessers - Grenzdurchmesser**

Aus den Versuchen ergibt sich eine auf den Hüsendurchmesser  $d_{H\ddot{u}} = d_2$  bezogene Begrenzung des Bohrlochdurchmessers  $d_L$  auf

$$d_L \leq 1,15 \cdot d_2$$

für Stahlbaudübel mit gleicher oder ähnlicher Geometrie wie die des in den Untersuchungen verwendeten Systems. Diese Begrenzung dient nur der Verhinderung des Versagensmodus Durchziehen unter Querkraft bei rechnerisch durch Abscheren versagenden Systemen und wird von allen bisher bauaufsichtlich zugelassenen Stahlbaudübeln eingehalten. Die größten der auf den Hüsendurchmesser bezogenen maximal zulässigen Bohrlochdurchmesser betragen 1,11.

In Richtung der Schraubenachse durch Längszug beanspruchte Verbindungen können zusätzliche Anforderungen an den maximalen Bohrlochdurchmesser erforderlich machen.

### 5.2.2 Verformungsverhalten

Eine Vergrößerung des Lochdurchmessers lässt größere Verdrehungen des Verbindungsmittels und damit größere Verschiebungen der Verbindung erwarten. Die Auftragung in Anlage 6.2 und 6.3 für Stahlbaudübel M12 zeigt, dass sich die Verbindungen bei einem Lochdurch-

messer  $d_L = 20\text{mm}$  (aufgrund  $d_{Hü} = 19,4$  näherungsweise eine Passverbindung) weit steifer als Verbindungen mit  $d_L \geq 21\text{mm}$  verhalten. Ein Unterschied zwischen Verbindungen mit 21mm und 22mm ist ebenfalls feststellbar, jedoch insbesondere bei den Verschiebungen und deren Charakteristik weit weniger ausgeprägt. Die einzelnen Stufen der Verformungen (Verschiebungen und Verdrehungen) lassen sich wie folgt unterteilen:

- Bei einer Kraft von etwa 5kN bis 8kN kommt es bei den Verbindungen  $d_L \geq 21\text{mm}$  zu einem Rutschen. Dieses ist vermutlich auf Verschiebungen im Langloch durch Rutschen nach Erreichen der durch das „Vorspannen“ erzielten Grenzgleitkraft zurückzuführen. Eine entsprechende Zunahme der Verdrehung kann bei diesem Lastniveau nicht festgestellt werden. Ein entsprechendes Rutschen ist bei den Verbindungen mit  $d_L = 20\text{mm}$  kaum zu erkennen.
- Die Verbindung versteift sich nun wieder. Nun treten signifikante Verdrehungen auf. Die Diagramme der Anlage 4 für die Einzelversuche zeigen, dass die Verdrehungen der Lasche noch gering sind und nicht in gleichem Maße zunehmen.
- Liegt der Stahlbaudübel am Lochrand an, kommt es zu einer erneuten Versteifung der Verbindung. Nun verdrehen sich auch die Laschen.

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei den Stahlbaudübeln M20 (Anlage 6.4 und 6.5). Aufgrund der größeren Lochleibungsbeanspruchung zeigen die Verläufe aber eine geringere Stufenform, d.h. die Verdrehungen nehmen aufgrund der damit verbundenen Laschenverformungen stetig zu. Diese Verdrehungen liegen für die Lochdurchmesser  $33\text{mm} \geq d_L \geq 37\text{mm}$  alle innerhalb eines Streubandes, nur für den Lochdurchmesser  $d_L = 40\text{mm}$  liegen die Verdrehungen weit oberhalb des genannten Streubandes.

- Bei einer Kraft von etwa 20kN bis 40kN kommt es bei den Verbindungen zu einem Rutschen. Dieses ist vermutlich auf Verschiebungen im Langloch durch Rutschen nach Erreichen der durch das „Vorspannen“ erzielten Grenzgleitkraft zurückzuführen. Eine entsprechende Zunahme der Verdrehung kann bei diesem Lastniveau nicht festgestellt werden. Dies gilt für alle Vorbohrdurchmesser.
- Die Verbindung versteift sich nun wieder. Nun treten signifikante Verdrehungen auf. Die Verdrehungen der Versuche mit  $d_L = 40\text{mm}$  nehmen sogar stark zu. Die Diagramme der Anlage 4 für die Einzelversuche zeigen, dass die Verdrehungen der Lasche noch gering sind und nicht in diesem Maße zunehmen. Aufgrund des Einflusses der Lochleibung und der gegenüber den Laschen für Stahlbaudübel M12 schwächer dimensionierten Laschen ist jedoch kein weiterer Wechsel im Last-Verformungsverhalten erkennbar, d.h. die Verformungen der Lasche und die globalen Verdrehungen des Stahlbaudübels nehmen weiter stetig zu.

Die Beurteilung der Verformungen erfolgt auf einem Gebrauslastniveau. Die Gebrauchslasten der Verbindung lassen sich wie folgt abschätzen:

$$V_{serv} \approx \frac{V_k}{\gamma_F} = \frac{V_k}{(1,35 \div 1,5)} \approx \frac{2}{3} \cdot V_k$$

Für die Verbindungen mit Stahlbaudübeln M12, bei denen sowohl rechnerisch als auch im Versuch Abscheren maßgebend wurde, ergibt sich daraus eine Gebrauchslast von etwa 47kN. In diesem Bereich haben die Verdrehungen der Stahlbaudübel in den Verbindung mit geringem Lochspiel schon fast den Wert der Verbindungen mit größerem Lochspiel erreicht. Diese Verdrehungen liegen für alle Lochdurchmesser bei etwa 3° bis 5°. Ein ähnliches Verhalten ist bei den Verschiebungen erkennbar. Auch hier sind die Verschiebungen der Verbindungen mit kleinem Lochspiel schon signifikant angewachsen. Jedoch sind die Verschiebungen beim größten untersuchten Lochspiel etwa doppelt so groß wie beim kleinsten untersuchten Lochspiel.

Für die Verbindungen mit Stahlbaudübeln M20, bei denen Lochleibung im Versuch immer eine Rolle spielte, ergibt sich in Abhängigkeit von den genauen Abmessungen der Laschen eine Gebrauchslast von 116 bis 140kN, berechnet auf Grundlage der tatsächlich vorhandenen Abmessungen und Werkstoffeigenschaften der Laschen. Die Verdrehungen bei den Versuchen mit  $33\text{mm} \geq d_L \geq 37\text{mm}$  liegen für diese Kräfte bei 2,5° bis 6,5°, also in einem ähnlichen Bereich wie bei den Versuchen mit Stahlbaudübeln M12. Für die Verschiebungen ergeben sich im betrachteten Lastbereich beim größten untersuchten Lochspiel Werte, die um das 3,1 bis 3,5-fache der Verschiebung beim kleinsten untersuchten Lochspiel betragen. Vernachlässigt man die Versuche mit  $d_L = 40\text{mm}$ , d.h. beschränkt man sich auf den nach Abschnitt 5.2.1 zulässigen Lochdurchmesserbereich, so ergeben sich im betrachteten Lastbereich beim größten zulässigen Lochspiel Werte, die um das 2,5 bis 2,6-fache der Verschiebung beim kleinsten untersuchten Lochspiel betragen.

Diese Betrachtungen zum Verformungsverhalten lassen sich wie folgt zusammenfassen: Das Lochspiel hat – bleibt man unterhalb des in Abschnitt 5.2.1 definierten zulässigen Lochspiels – in erster Linie einen Einfluss auf die Verschiebungen in der Verbindung, weniger auf die Verdrehung. Während die Verschiebungen unter Gebrauchslasten beim größten zulässigen Lochspiel ( $d_L = 1,15 d_{Hü}$ ) bis zu etwa dem 2,5-fachen der Verschiebung der Verbindung mit dem kleinsten geprüften Lochspiel betragen, liegen die Verdrehungen einheitlich zwischen 3° und 6°. Unterhalb des Gebrauchslastniveaus können sich jedoch Unterschiede in den Verdrehungen ergeben, je nachdem ob das Tragverhalten durch Abscheren oder Lochleibung dominiert wird.

### 5.3 Klemmdicke und Lochleibung

Die sich bei einschnittig ungestützten Verbindungen mit geringen Blechdicken einstellenden großen Verdrehungen führen in Verbindung mit einer Vergrößerung des Loches infolge Lochleibung zu einem Versagen durch Herausziehen des Verbindungselementes. Diese Gefahr ist bei Stahlbaudübel ausgeprägter als bei Verbindungen mit Schrauben, Muttern und Scheiben,

da die sich beim Anziehen spreizenden Finnen eine trichterförmige Geometrie bilden. Daher kommt der Lochleibungstragfähigkeit insbesondere bei einschnittig ungestützten Verbindungen eine große Bedeutung zu.

Nach [1] bis [4] gilt für den Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit der untersuchten Verbindungen

$$\alpha_l = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_L} - 0,30 \\ 2,0 \end{array} \right.$$

für  $e_2 \geq 1,2 d_L$ . Dies entspricht Gleichung (50 a) in DIN 18800-1:1990-11, jedoch mit geänderter Anwendungsbereich. Anlage 6.6 kann entnommen werden, dass die aus den Versuchsergebnissen über

$$\alpha_l = \frac{F_{\max}}{R_{eH} \cdot t_{\text{mean}} \cdot d_{H\ddot{u}}}$$

berechneten Lochleibungsparameter zu etwa 50% unterhalb der Werte nach [1] bis [4] liegen. Berücksichtigt man, dass die Verhältnisse  $e_1/d_L$  der Versuchskörper in der Regel zwischen 1,2 und 1,5 lagen, muß die Frage gestellt werden, ob nicht gemäß DIN 18800-1:1990-11 zwischen

$$\alpha_{l,50c} = 0,73 \cdot \frac{e_1}{d_L} - 0,20$$

für  $e_2 = 1,2 d_L$  und

$$\alpha_{l,50a} = 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_L} - 0,30$$

für  $e_2 \geq 1,5 d_L$  unterschieden werden muß. In diesem Zusammenhang muß auch untersucht werden, in wie weit die Regelungen des Elements (807) der DIN 18800-1:1990-11 die - aufgrund der fehlenden Stützung durch die auf der Seite der Unterkonstruktion fehlende Scheibe und Mutter - möglicherweise reduzierte Lochleibungstragfähigkeit einschnittig ungestützter Verbindungen mit Stahlbaudübeln ausreichend erfassen. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengetragen worden, bei denen Lochleibung einen Einfluss auf das Versagen hatte: Praktisch bedeutet dies, dass nur die Versuchsergebnisse mit Stahlbaudübeln M12 und Blechdicke  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$ , bei denen es zu einem reinen Scherversagen kam, nicht berücksichtigt wurden. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden die Schraubenverbindungen.

Die sich aus den Versuchen ergebenden Lochleibungsparameter  $\alpha_{l,v}$  wurden den Lochleibungsparametern  $\alpha_l$  der DIN 18800-1:1990-11 gegenübergestellt. Der sich ergebende Quotient wurde statistisch ausgewertet. Für die vorliegenden Versuchsergebnisse ergaben sich im Mittel Lochleibungsparameter, die über den Werten der DIN 18800-1:1990-11 lagen ( $\alpha_{l,v}/\alpha_l > 1,0$ ). Diese Regelungen können also übernommen werden. Jedoch wurden auch Lochleibungsparameter  $\alpha_{l,v}/\alpha_l < 1,0$  ermittelt, die über die Regelungen des Elements (807) abgedeckt werden müssen. Wertet man die Ergebnisse nach DIN EN 1990:2002-10 statistisch aus, was

aufgrund der großen Streuung der Verhältniswerte  $\alpha_{i,v}/\alpha_i$  unter Ansatz einer log-Normalverteilung erfolgen sollte, so erhält man einen 5%-Fraktilwert von 0,89, d.h. Reduzierung auf 89%. Element (807) sieht eine Reduzierung auf 83% ( $= 1 / 1,2 \cdot 100\%$ ) vor, so dass die Regelungen der DIN 18800-1:1990-11 für den Lochleibungsnachweis einschnittig ungestützter Schraubenverbindungen auf entsprechende Verbindungen mit Stahlbaudübeln übertragen werden können. Die Beschränkung auf  $\alpha_i \leq 2,0$  sollte jedoch aufgrund mangelnder entsprechender Ergebnisse beibehalten werden, auch da die in Anlage 6.7 eingezeichnete Obergrenze von  $\alpha_i = 2,0$  durch die Versuchsergebnisse zumindest näherungsweise gestützt wird.

Versuch Nr.	Kraft $F_{max}$ [kN]	Abmessungen			Parameter		Lochleibungsparameter				$\alpha_{1,v}/\alpha_1$
		$e_{1,mean}$	$e_{2,mean}$	$d_{L,mean}$	$e_1/d_L$	$e_2/d_L$	$\alpha_{1,v}$	$\alpha_{1,(50a)}$	$\alpha_{1,(50c)}$	$\alpha_1$	
		[mm]									
10	259,4	60,1	50,1	33,0	1,82	1,52	2,01	1,70	1,13	1,70	1,18
11	256,0	75,1	50,2	33,0	2,28	1,52	1,99	2,20	1,46	2,20	0,90
12	259,9	75,2	50,2	33,0	2,28	1,52	2,02	2,21	1,46	2,21	0,91
13	251,6	60,0	50,4	35,1	1,71	1,44	1,95	1,58	1,05	1,47	1,33
14	253,6	60,0	50,3	35,1	1,71	1,43	1,97	1,58	1,05	1,46	1,35
15	252,9	75,3	50,1	35,2	2,14	1,42	1,96	2,05	1,36	1,88	1,05
16	260,4	74,9	50,4	35,0	2,14	1,44	2,02	2,05	1,36	1,92	1,05
17	249,4	60,0	50,2	37,0	1,62	1,36	1,93	1,48	0,98	1,25	1,55
18	251,7	75,4	50,1	37,0	2,04	1,35	1,95	1,94	1,29	1,62	1,20
19	248,8	75,5	50,0	37,2	2,03	1,34	1,93	1,93	1,28	1,59	1,21
20	202,5	60,2	50,4	40,2	1,50	1,25	1,57	1,35	0,89	0,97	1,61
21	204,1	75,2	50,1	40,4	1,86	1,24	1,58	1,75	1,16	1,24	1,28
22	193,3	75,6	50,4	40,5	1,87	1,24	1,50	1,75	1,16	1,25	1,20
23	24,2	25,1	24,6	20,4	1,23	1,21	1,16	1,05	0,70	0,71	1,65
24	24,8	25,3	24,8	21,0	1,20	1,18	1,19	1,03	0,68	0,66	1,81
25	80,6	25,0	24,9	21,0	1,19	1,19	1,54	1,01	0,67	0,65	2,35
26	82,1	25,3	58,0	21,1	1,20	2,75	1,57	1,02	0,68	1,02	1,54
27	43,4	60,0	50,1	35,0	1,71	1,43	1,27	1,59	1,05	1,46	0,87
28	42,9	60,1	50,0	35,1	1,71	1,42	1,25	1,58	1,05	1,45	0,86
29	144,1	59,9	50,0	35,0	1,71	1,43	1,67	1,58	1,05	1,46	1,15
30	145,3	60,0	49,9	35,1	1,71	1,42	1,68	1,58	1,05	1,44	1,17
31	39,0	60,1	50,1	35,1	1,71	1,43	1,12	1,58	1,05	1,45	0,77
32	44,8	60,0	50,0	35,1	1,71	1,42	1,28	1,58	1,05	1,45	0,89
33	132,1	60,1	50,0	35,0	1,72	1,43	1,50	1,59	1,05	1,46	1,03
34	130,3	59,7	50,1	35,0	1,71	1,43	1,48	1,58	1,05	1,45	1,02
35	248,8	60,2	50,2	35,1	1,72	1,43	2,23	1,59	1,05	1,46	1,52
36	247,6	60,1	53,2	35,1	1,71	1,52	2,22	1,58	1,05	1,58	1,40
							Mittelwert $\alpha_{1,v}/\alpha_1$				1,25
							Standardabweichung				0,35
							Kleinstwert $\alpha_{1,v}/\alpha_1$				0,77
							Anzahl Versuche n				27
							k				1,74
							5%-Fraktilwert (Normalverteilung)				0,64
							5%-Fraktilwert (log-Normalverteilung)				0,89

Tabelle 5.2: Lochleibung – Lochleibungsparameter  $\alpha_1$

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der Vergleich mit DIN EN 1993-1-8:2005-07, die ein abweichendes Nachweiskonzept für die Ermittlung des charakteristischen Wertes der Lochleibungstragfähigkeit hat. Der charakteristische Wert der Lochleibungstragfähigkeit beträgt

$$F_{b,k} = \alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t \leq 1,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t$$

mit

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_1}{3 \cdot d_L} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,0 \end{array} \right.$$

und

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_L} - 1,7 \\ 2,5 \end{array} \right.$$

wobei mit  $\gamma_{M2} = 1,25$  zu rechnen ist, da die Zugfestigkeit  $f_u$  angesetzt wird. Definiert man auch hier einen Lochleibungsparameter

$$\beta_l = \alpha_b \cdot k_1$$

für den

$$\beta_l \leq 1,5$$

gilt und berechnet diesen aus den Versuchsergebnissen ( $\beta_{l,v}$ ) und nach DIN EN 1993:2005-07 ( $\beta_l$ ), so lässt sich wiederum ein Vergleich anstellen. Die Einzelwerte sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Mit  $\beta_{l,v}/\beta_l = 1,04$  ergibt sich im Mittel eine bessere Anpassung an die Versuchsergebnisse. Damit der Ansatz nach DIN EN 1993-1-8:2005-07 den 5%-Fraktilwert abbildet, müsste der Wert  $\beta_l$  mit 0,86 multipliziert werden. Dies entspricht der Abminderung mit  $1/1,2 = 0,83$  nach DIN 18800-1:1990-11, Element (807). Bei Verwendung des Nachweisformats der DIN EN 1993-1-8:2007-05 müsste eine äquivalente Regelung ergänzt werden. Die Begrenzung auf  $\beta_l \leq 1,5$  erfasst die reduzierte Lochleibungstragfähigkeit einschnittig ungestützter Verbindungen mit Stahlbaudübeln nicht (Anlage 6.8).

Versuch Nr.	Kraft $F_{max}$ [kN]	Abmessungen			$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Parameter			Lochleibungsp.		$\beta_{i,v}/\beta_i$
		$e_{1,mean}$	$e_{2,mean}$	$d_{L,mean}$		$\alpha_d$	$\alpha_b$	$k_1$	$\beta_{i,v}$	$\beta_i$	
		[mm]									
10	259,4	60,1	50,1	33,0	372	0,61	0,61	2,50	1,44	1,50	0,96
11	256,0	75,1	50,2	33,0	372	0,76	0,76	2,50	1,42	1,50	0,95
12	259,9	75,2	50,2	33,0	372	0,76	0,76	2,50	1,44	1,50	0,96
13	251,6	60,0	50,4	35,1	372	0,57	0,57	2,32	1,40	1,32	1,06
14	253,6	60,0	50,3	35,1	372	0,57	0,57	2,31	1,41	1,32	1,07
15	252,9	75,3	50,1	35,2	372	0,71	0,71	2,29	1,40	1,50	0,94
16	260,4	74,9	50,4	35,0	372	0,71	0,71	2,33	1,44	1,50	0,96
17	249,4	60,0	50,2	37,0	372	0,54	0,54	2,10	1,38	1,13	1,22
18	251,7	75,4	50,1	37,0	372	0,68	0,68	2,09	1,40	1,42	0,98
19	248,8	75,5	50,0	37,2	372	0,68	0,68	2,06	1,38	1,40	0,99
20	202,5	60,2	50,4	40,2	372	0,50	0,50	1,81	1,12	0,90	1,24
21	204,1	75,2	50,1	40,4	372	0,62	0,62	1,77	1,13	1,10	1,03
22	193,3	75,6	50,4	40,5	372	0,62	0,62	1,78	1,07	1,11	0,97
23	24,2	25,1	24,6	20,4	417	0,41	0,41	1,68	0,96	0,69	1,40
24	24,8	25,3	24,8	21,0	417	0,40	0,40	1,61	0,98	0,65	1,52
25	80,6	25,0	24,9	21,0	426	0,40	0,40	1,62	1,20	0,64	1,86
26	82,1	25,3	58,0	21,1	426	0,40	0,40	2,50	1,22	1,00	1,22
27	43,4	60,0	50,1	35,0	417	0,57	0,57	2,31	1,05	1,32	0,79
28	42,9	60,1	50,0	35,1	417	0,57	0,57	2,29	1,03	1,31	0,79
29	144,1	59,9	50,0	35,0	426	0,57	0,57	2,30	1,30	1,31	0,99
30	145,3	60,0	49,9	35,1	426	0,57	0,57	2,28	1,31	1,30	1,01
31	39,0	60,1	50,1	35,1	417	0,57	0,57	2,30	0,92	1,31	0,70
32	44,8	60,0	50,0	35,1	417	0,57	0,57	2,29	1,06	1,30	0,81
33	132,1	60,1	50,0	35,0	426	0,57	0,57	2,30	1,17	1,32	0,89
34	130,3	59,7	50,1	35,0	426	0,57	0,57	2,31	1,15	1,31	0,88
35	248,8	60,2	50,2	35,1	372	0,57	0,57	2,30	1,35	1,32	1,03
36	247,6	60,1	53,2	35,1	372	0,57	0,57	2,50	1,35	1,43	0,94
						Mittelwert $\beta_{i,v}/\beta_i$					1,04
						Standardabweichung					0,24
						Kleinstwert $\beta_{i,v}/\beta_i$					0,70
						Anzahl Versuche n					27
						k					1,74
						5%-Fraktilewert (Normalverteilung)					0,62
						5%-Fraktilewert (log-Normalverteilung)					0,86

Tabelle 5.3: Lochleibung – Lochleibungsparameter  $\beta_i$  nach DIN EN 1993-1-8

## 5.4 Hülsenausbildung

### 5.4.1 Vorbemerkungen

Bei Stahlbaudübel gibt es zwei Varianten der Hülsenausbildung: In einem Fall bestehen Bund und geschlitztes Rundrohr aus einem Stück, im anderen aus zwei Einzelbauteilen, die durch einen Gummiring voneinander getrennt sind. Die letztgenannte Ausbildung soll das Anziehverhalten bei dicken Blechen verbessern, die bei nicht planmäßiger Lage gegeneinander gezogen werden müssen. Diese Variante wird daher auch nur bei größeren Nenndurchmessern der Stahlbaudübel vorgesehen, bei denen unterstellt wird, dass die damit zu verbindenden Bauteile entsprechend größere Dicken haben.

Ist das Versagen der Verbindung mit großen Verdrehungen verbunden, können bei einer zweiteiligen Hülse anteilige Zugkräfte nur über die Schraube, nicht aber über die Hülse übertragen werden. Im folgenden soll geprüft werden, inwieweit die unterschiedlichen Ausführungen einen Einfluss auf das Trag- und insbesondere Verformungsverhalten haben, ob also die zweiteilige Hülse eine größere Nachgiebigkeit hat.

Als Grundlage für eine Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Ausbildungen der Hülse wird der Durchmesser M20 herangezogen, der in einer zweiteiligen Hülsenausführung mit trennendem Gummiring hergestellt wird, von dem aber noch ältere Vorserienbauteile ohne Gummiring vom gleichen Hersteller – d.h. mit gleicher Geometrie – vorlagen. Es handelt sich dabei um die folgenden Versuchsserien:

Versuche Nr.	Verbindung	Nennabmessungen				Ausführung
		$e_1$	$e_2$	$d_L$	$t$	
		[mm]				
27, 28	Stahlbaudübel M20	60	50	35	3	mit Gummiring
31, 32						ohne Gummiring
29, 30					8	mit Gummiring
33, 34						ohne Gummiring
13 – 16					15	mit Gummiring
35, 36						ohne Gummiring

**Tabelle 5.4: Variation der Hülsenausbildung - Versuche**

### 5.4.2 Tragfähigkeit

Während es bei den Versuchen mit Blechdicke 2x15mm abhängig von der Hülsenausbildung zu einem Versagen durch Abscheren nach großen Verdrehungen (zweiteilige Hülse mit Gummi) oder Lochleibung und Herausziehen nach großen Verdrehungen (einteilige Hülse) kam, versagten die Verbindungen mit Blechdicke 2x8mm und 2x3mm einheitlich durch Loch-

leibung und Herausziehen nach großen Verdrehungen. Die Ergebnisse der Versuche mit Blechdicke 2x15mm stellen also keineswegs eine obere Schranke für die Tragfähigkeit im Sinne einer Abschertragfähigkeit der Stahlbaudübel dar. Es handelt sich praktisch um ein Lochleibungsversagen entsprechend den Versuchen mit Blechdicke 2x8mm, bei dem jedoch aufgrund der größeren Kräfte bei den Versuchen mit einer zweiteiligen Hülsenausbildung, bei denen die Hülse keine Zugkräfte übertragen kann, ein Abscheren der Schraube eintrat. Im folgenden wird daher der Einfluss der Hülsenausbildung auf die Lochleibungstragfähigkeit, nicht auf die Tragfähigkeit gegen Abscheren untersucht. Dennoch werden die charakteristischen Werte der rechnerischen Tragfähigkeit gegen Abscheren überschritten.

In Tabelle 5.5 sind die im folgenden betrachteten Ergebnisse zusammengefasst.

Verbindung	Nennabmessungen				Ausführung	Kraft
	$e_1$	$e_2$	$d_L$	$t$		$F_{\text{mean}}$
	[mm]					[kN]
Stahlbaudübel M20	60	50	35	3	mit Gummiring	<b>43,2</b>
					ohne Gummiring	<b>41,9</b>
				8	mit Gummiring	<b>144,7</b>
					ohne Gummiring	<b>131,2</b>
				15	mit Gummiring	<b>254,6</b>
					ohne Gummiring	<b>248,2</b>

**Tabelle 5.5: Variation der Hülsenausbildung - Tragfähigkeit**

Die in der Tabelle angegebenen Mittelwerte legen den Schluss nahe, dass die Tragfähigkeit der Verbindung mit einteiligem Stahlbaudübel – selbst bei Versuchen mit Blechdicke 2x3mm oder 2x8mm, in denen das Versagen durch Lochleibung eintrat und unterschiedliche Ist-Werte der mechanischen Eigenschaften von Schraube und Hülse keine Rolle spielen dürften - unter der Tragfähigkeit der Verbindung mit zweiteiliger Hülse liegt. Dem ist jedoch nicht so: Bei den Versuchen mit Blechdicke 2x3mm lag ein einzelner Wert so niedrig, dass sich ein kleinerer Wert  $F_{\text{mean}}$  für die Variante ohne Gummiring ergab. Bei den Versuchen mit Blechdicke 2x8mm kam es zu einer teilweisen Zerstörung der Hülse, so dass auch bei diesen Versuchen die Ist-Werte der mechanischen Eigenschaften der Hülse einen Einfluss auf das Versuchsergebnis hatten – jedoch nur auf das Bruchverhalten nach Überschreiten der Maximallast.

Bei den Blechdicken, bei denen es aufgrund der geringen Blechdicke zu einer Übertragung der Lochleibungskräfte über den Gummiring kommen kann, ist aufgrund der vorauszusetzenden geringen Blechdicke in der Regel von einem Versagen durch Lochleibung auszugehen. Die reduzierte Tragfähigkeit gegen Abscheren spielt daher keine Rolle.

Die Tragfähigkeit der Verbindungen von Stahlbaudübeln wird also durch die unterschiedlichen Hülsenausbildungen nicht beeinflusst. Dies gilt sowohl für Verbindungen, die rechnerisch durch Lochleibung als auch für Verbindungen, die rechnerische auf Abscheren versagen.

### 5.4.3 Verformungsverhalten

Als Grundlage für einen Vergleich des Verformungsverhaltens der beiden Ausführungen wurden für alle geprüften Blechdickenkombinationen sowohl die Verschiebungen in der Verbindung (Anlage 3) als auch die Verdrehungen des Verbindungselements selbst (Anlage 4) herangezogen. Die Auswertung erfolgte qualitativ über den Vergleich der Kraft-Verschiebungsverläufe und Verdrehungs-Kraft-Verläufe der Verbindungen.

Die Ergebnisse der Versuche mit Blechdicke  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  sind hinsichtlich der Unterschiede in den Verdrehungen und Verschiebungen aufgrund der nur geringen Absolutwerte schwierig zu beurteilen. Dennoch lässt sich hinsichtlich der Verschiebungen (Anlage 6.9) die Aussage vertreten, dass die Hülsenausbildung keine Unterschiede in den Verschiebungen verursacht. Durch das Anziehen wird der Gummiring so weit komprimiert, dass – unterstützt durch das Unterlegblech - die Lasteinleitung immer in die Hülse erfolgt. Hinsichtlich der Verdrehungen (Anlage 6.10) ist keine Aussage möglich. In diesem Blechdickenbereich spielt vermutlich die Blechverformung auch einen weit stärkeren Einfluss: Die Verformungen des Bleches infolge Lochleibung und Laschenbiegung sind aufgrund der geringen Steifigkeit weit größer als die Verformungen der Stahlbaudübel.

Die Ergebnisse der Versuche mit Blechdicke  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  zeigen bei einer Hülsenausbildung ohne (!) Gummiring ab einer Belastung von etwa 100kN größere Verschiebungen als bei einer Hülsenausbildung mit Gummiring (Anlage 6.11). Dies scheint zuerst auf den geringeren Wert der Maximalkraft zurückzuführen zu sein. Jedoch zeigen sich auch größere Verdrehungen (Anlage 6.12), diese sogar bei einer etwas geringeren Kraft, wobei die Verdrehungen bei  $F_{\max}$  in gleicher Größenordnung liegen. Es erscheint widersinnig, dass die steifere einteilige Hülsenausbildung ohne Gummiring zu größeren Verschiebungen und insbesondere Verdrehungen führen soll.

Untersuchungen der Probekörper und Aufnahmen der Proben während der Belastung ergaben folgende mögliche Ursache: Der Spreizwinkel der Finnen lag bei allen im vorliegenden Abschnitt betrachteten Versuchen unabhängig von der Blechdicke und Hülsenausbildung in der Größe von etwa  $18^\circ$  bis  $21^\circ$ . Bei den Versuchen mit Blechdicke  $2 \times 8 \text{ mm}$  und einer einteiligen Hülsenausbildung ohne Gummiring lag dieser Winkel jedoch bei  $12^\circ$  bis  $14^\circ$ . Dieser geringere Spreizwinkel korreliert mit der Nachgiebigkeit der Verbindung, insbesondere der Verdrehung der Stahlbaudübel. Die genauen Ursachen für den geringeren Spreizwinkel lassen sich aber nicht finden.

Die Ergebnisse der Versuche mit Blechdicke  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  zeigen keine Unterschiede in den Verschiebungen (Anlage 6.13) oder Verdrehungen (Anlage 6.14). Bei Verbindungen mit Blechdicke  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  ist unabhängig von der Hülsenausbildung von einer so starken Einspannung in die zu verbindenden Bauteile auszugehen, dass die Hülsenausbildung keine Rolle spielt.

#### 5.4.4 Zusammenfassung

Die Hülsenausbildung beeinflusst weder die Tragfähigkeit noch das Verformungsverhalten der Verbindung, d.h. ein Gummiring beeinflusst die Tragfähigkeit oder das Verformungsverhalten nicht negativ.

## 5.5 Vergleich mit Schraubenverbindungen

### 5.5.1 Vorbemerkungen

Die Geometrie der eingebauten Stahlbaudübel weicht auf der unzugänglichen Unterseite (Unterkonstruktion) signifikant von der Geometrie üblicher Stahlbauverbindungen mit Schrauben, Muttern und Scheiben ab. Anstelle der flächig am Bauteil anliegenden Scheibe und Mutter bildet sich nach Anziehen der Verbindung ein Spreiztrichter aus in der Regel vier Finnen aus. Diese Unterschiede haben Folgen bezüglich der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit. Zum einen gelten die Regelungen zur Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit in [5] [6] nur für Verbindungen, bei denen die verbindenden Bauteile (Bleche) beidseitig durch Muttern und Scheiben gestützt werden. Zum anderen ergibt sich aus der fehlenden Scheiben- oder Mutterauflage eine geringere Einspannwirkung in die Unterkonstruktion, so dass es unter Belastung zu größeren Verdrehungen der Stahlbaudübel und damit zu größeren Verschiebungen in der Verbindung kommt.

Die nachfolgenden Vergleiche von Verbindungen mit in etwa gleicher rechnerischer Lochleibungstragfähigkeit und in etwa gleicher Tragfähigkeit gegen Abscheren sollen der Beurteilung der Verformungen, d.h. Verschiebungen und Verdrehungen dienen.

### 5.5.2 Lochleibung

Zum Vergleich des Verformungsverhaltens wurden Versuche mit Stahlbaudübeln M12 mit Versuchen an Schrauben M20 herangezogen. Um eine in etwa gleiche Tragfähigkeit gegen Lochleibung zu erreichen, wurden die Randabstände  $e_1$  und  $e_2$  angepasst. Die betrachteten Versuche sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Versuche Nr.	Verbindung	Nennabmessungen					Kraft	
		$d_{Hü}$	$d_L$	$t$	$e_1$	$e_2$	$V_{l,calc}^{1)}$	$F_{max}^{2)}$
		[mm]					[kN]	
<b>1</b>	Stahlbaudübel M12	19,5	20	15	25	25	83,6	<b>94,6</b>
<b>2 bis 3</b>					45		155,6	<b>96,7</b>
<b>37 bis 38</b>	Schrauben M20	20,0	20	15	25	35	85,8	<b>143,7</b>
<b>4</b>	Stahlbaudübel M12	19,5	23	15	25	25	69,7	<b>96,2</b>
<b>5 bis 6</b>					45		144,1	<b>98,3</b>
<b>39 bis 40</b>	Schrauben M20	20,0	23	15	25	35	71,5	<b>154,4</b>

<sup>1)</sup> berechnet mit  $R_{eH} = 266\text{N/mm}^2$   
<sup>2)</sup> Mittelwert

**Tabelle 5.6: Schraubenverbindungen – Lochleibung**

Die im Versuch erzielten Versagenslasten lagen bei den Stahlbaudübeln (Versuche 1 und 4) über den rechnerischen Werten. Da es sich um ein kombiniertes Versagen aus Abscheren und Lochleibung handelte, lagen die Ergebnisse dieser beiden Versuche in der gleichen Größenordnung, d.h. die sich rechnerisch ergebenden Unterschiede in der Lochleibungstragfähigkeit spiegeln sich nicht in den Versuchsergebnissen wieder. Da die ermittelten Versagenslasten bei den Versuchen mit Stahlbaudübeln bei Vergrößerung des Randabstands  $e_1$  (und damit theoretisch vergrößerter Lochleibungstragfähigkeit  $V_{l,calc}$ ) in gleicher Größenordnung lag, wurden die Versuche 2 bis 3 und 5 bis 6) für den Vergleich mit herangezogen.

Die Tragfähigkeiten der Schraubenverbindungen lagen weit über den sich rechnerisch ergebenden Tragfähigkeiten. Hier kann nur spekuliert werden, dass die Ansätze zur Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit für Schraubenverbindungen z.T. recht konservativ sind. Zumindest führte die große Blechdicke dazu, dass sich die Schrauben kaum verdrehten und Abscheren maßgebend wurde.

Dennoch lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen Aussagen zum Verschiebungs- und Verdrehungsverhalten der Verbindungen ableiten, so lange man sich auf den Bereich der Gebrauslasten beschränkt, bei denen bezüglich der Eigenschaften der Verbindungselemente nur die Abmessungen (Durchmesser der Hülse), nicht jedoch die mechanischen Eigenschaften maßgebend auf das Lochleibungstragverhalten sind.

Hier zeigt sich, dass trotz der ausgeprägten Lochleibungsdeformationen bei den Schraubenverbindungen die Verdrehungen und Verschiebungen der Verbindungen mit Stahlbaudübeln weit über den Werten für Schraubenverbindungen liegen (Anlage 6.15 bis 6.18). Selbst bei einer Ausführung mit  $\Delta d_L \approx 0$  (Versuche 1 bis 3) stellen sich nach Überschreiten einer Grenzkraft von etwa 40kN die gleichen großen Verdrehungen und Verschiebungen wie bei einer Ausführung mit  $\Delta d_L \approx 3$  (Versuche 4 bis 6) ein.

Grundsätzlich gilt bei den hier untersuchten Blechdicken, dass bei gleichem  $\Delta d_L$  die Verdrehungen der Verbindungen mit Stahlbaudübeln um etwa das dreifache größer sind als bei den entsprechenden Schraubenverbindungen. Die Verschiebungen dieser Verbindungen mit Stahlbaudübeln betragen etwa das zweifache der Werte der untersuchten Schraubenverbindungen. Diese größeren Verschiebungen sind jedoch nur eine Folge der gegenüber Schraubenverbindungen größeren Verdrehungen.

### 5.5.3 Abscheren

Zum Vergleich des Verformungsverhaltens wurden Versuche mit Stahlbaudübeln M20 mit Versuchen an Schrauben M24 herangezogen. Es wurden Versuche mit gleichem Lochspiel betrachtet. Die betrachteten Versuche sind in Tabelle 5.7 aufgeführt.

Versuche Nr.	Verbindung	Nennabmessungen					Kraft	
		$d_{H\ddot{u}}$	$d_L$	$t$	$e_1$	$e_2$	$V_{a,calc}$	$F_{max}^{1)}$
		[mm]					[kN]	
<b>10</b>	Stahlbaudübel M20	32,1	33	15	60	50	210,8	<b>259,4</b>
<b>11 bis 12</b>					75			<b>256,5</b>
<b>41 bis 42</b>	Schrauben M24	20,0	24	15	90	50	169,4	<b>202,2</b>
<b>13 bis 14</b>	Stahlbaudübel M20	32,1	35	15	60	50	210,8	<b>252,6</b>
<b>15 bis 16</b>					75			<b>256,7</b>
<b>35 bis 36</b>	Stahlbaudübel M20	32,7	35	15	60	50	210,8	<b>248,2</b>
<b>43 bis 44</b>	Schrauben M24	20,0	27	15	90	50	169,4	<b>221,2</b>
<sup>1)</sup> Mittelwert <sup>2)</sup> ohne Gummiring								

**Tabelle 5.7: Schraubenverbindungen – Abscheren**

In den Versuchen wurden Maximalkräfte erreicht, die 20% (bei den Versuchen 43 und 44 sogar im Mittel 30%) über den sich rechnerisch ergebenden Werten  $V_{a,calc}$  lagen. Dies ist – obwohl bei den Verbindungen mit Stahlbaudübeln Lochleibung beim Versagen eine Rolle spielte – auf die gegenüber den rechnerischen Werten höheren Ist-Werten der mechanischen Eigenschaften zurückzuführen. Für den folgenden Vergleich ergibt sich folgende Einschränkung:

- Die rechnerischen und tatsächlichen Tragfähigkeiten der Stahlbaudübel und Schrauben weichen um 20% voneinander ab. Dies macht die eindeutige Definition eines für den Vergleich heranzuziehenden Lastniveaus unmöglich.
- Der Einfluss der bei den Stahlbaudübeln beobachteten Lochleibung führt bei diesen zu größeren Verformungen und Verdrehungen.

Für eine rein qualitative Aussage können die Ergebnisse dennoch herangezogen werden, zumal es bei den Betrachtungen dieses Abschnitts an Verbindungen, bei denen Abscheren rechnerisch maßgebend wird, auch vordringlich um die Tragfähigkeit, weniger um die Verformungen geht.

Gegenüber den Versuchen, bei denen Lochleibung rechnerisch maßgebend wird, sind die Unterschiede in den Verschiebungen geringer (Anlage 6.19 und 6.21): Die Verbindungen mit Stahlbaudübeln zeigten Verschiebungen, die bei 169kN (=  $V_{a,calc}$  der Schrauben) im Mittel um 2mm über den Verbindungen mit Schrauben lagen. Bei den Verbindungen mit Lochspiel  $\Delta d_L \approx 0$ mm entspricht dies etwa 30% größeren Verschiebungen. Für die Verbindungen mit Lochspiel  $\Delta d_L \approx 3$ mm ist eine relative Aussage hierzu nicht möglich, da der Schlupf in der Verbindung nach Überschreiten der infolge der Vorspannung über Reibung übertragbaren Kraft einen zu großen Einfluss hat.

Bei einer Belastung mit 169kN lagen die Verdrehung der Stahlbaudübel M20 bei den Versuchen mit  $\Delta d_L \approx 0$  und  $\Delta d_L \approx 3\text{mm}$  um  $3^\circ$  bis  $6^\circ$  über den Verdrehungen der Schrauben (Anlage 6.20). Dieser Wert erscheint gering, vernachlässigt aber, dass die Hülsendurchmesser der Stahlbaudübel mit 32,2mm bis 32,7mm weit größer als die Gewindenenddurchmesser der Schrauben M24 waren. Dies relativiert den geringen Abstand. Auch ergaben sich bei den Versuchen mit  $\Delta d_L \approx 3\text{mm}$  schon bei einer Belastung mit 50kN signifikant zunehmende Verdrehungen (Anlage 6.22). Ab hier liegen die Verdrehungen bei nahezu dem Doppelten der Verdrehungen der Schrauben. Demnach zeigt sich auch hier, dass die Verdrehungen bei Stahlbaudübeln weit größer sind als bei Schraubenverbindungen, selbst wenn man bei einer rechnerisch auf Abscheren versagenden Verbindung von größeren Durchmessern der Stahlbaudübel als der Schraube ausgehen kann.

#### 5.5.4 Zusammenfassung

Bei den im Stahlbau üblichen, rechnerisch auf Lochleibung versagenden Verbindungen, muß bei der Verwendung von Stahlbaudübeln davon ausgegangen werden, dass sich Verdrehungen und Verschiebungen in signifikanter Größenordnung einstellen. Diese liegen bei den hier untersuchten Blechdicken schon unter Gebrauchslasten um das zweifache (Verschiebungen) bis dreifache (Verdrehungen) über den Werten einer Schraubenverbindung mit rohen Schrauben mit vergleichbarer Lochleibungstragfähigkeit. Die größeren Verschiebungen sind jedoch nur eine Folge der gegenüber Schraubenverbindungen größeren Verdrehungen.

Bei einer rechnerisch durch Abscheren versagenden Verbindung ergeben sich nur verhältnismäßig geringe Unterschiede in den Verschiebungen. Jedoch sind auch hier – bei größeren Durchmessern der Stahlbaudübel gegenüber den Schrauben – sehr große Verdrehungen zu erwarten. Diese haben aber keinen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit, insbesondere, da bei diesen Verbindungen nicht mit einer so großen Verdrehung (z.B. im Zusammenhang mit Lochleibung) zu rechnen ist, dass sich bei Stahlbaudübeln mit einer Hülsenausbildung mit Gummiring der negative Einfluss derselben hinsichtlich der Zugtragfähigkeit bemerkbar macht.

## 6 Zusammenfassung und Empfehlung

Der Verwendbarkeitsnachweis dübelartiger Verbindungselemente für Verbindungen an Hohlprofilen und anderen rückseitig schwer zugänglichen Konstruktionen ist durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu erbringen. Bei den genannten Verbindungselementen erfolgt die Fixierung durch Spreizung einer Hülse mittels eines im unzugänglichen Bereich der Verbindung liegenden Konus.

Große Verformungen bei ausgeführten Anschlüssen, deren Einfluss auf die tatsächliche Tragfähigkeit unklar blieb, bildeten den Ausgangspunkt für die im vorliegenden Bericht dokumentierten Untersuchungen. Die Ergebnisse lassen sich mit den Zahlenangaben für den untersuchten Parameterbereich wie folgt zusammenfassen:

- Um den Versagensmodus Durchziehen unter Querkraft bei rechnerisch durch Abscheren versagenden Systemen zu verhindern, ist der Bohrlochdurchmesser bezüglich des Hüsendurchmessers  $d_{H\ddot{u}} = d_2$  zu beschränken auf

$$d_L \leq 1,15 \cdot d_2$$

Dies gilt für Stahlbaudübel mit einer Geometrie, die der des in den Untersuchungen verwendeten Systems gleich oder ähnlich ist.

- Das Lochspiel hat in erster Linie einen Einfluss auf die Verschiebungen in der Verbindung, weniger auf die Verdrehung. Während die Verschiebungen unter Gebrauchslasten beim größten zulässigen Lochspiel ( $d_L = 1,15 d_{H\ddot{u}}$ ) bis zu etwa dem 2,5-fachen der Verschiebung der Verbindung mit dem kleinsten geprüften Lochspiel betragen, liegen die Verdrehungen einheitlich zwischen  $3^\circ$  und  $6^\circ$ . Unterhalb des Gebrauchslastniveaus können sich jedoch Unterschiede in den Verdrehungen ergeben, je nachdem ob das Tragverhalten durch Abscheren oder Lochleibung dominiert wird.
- Die Lochleibungstragfähigkeit entspricht der Lochleibungstragfähigkeit der Schraubverbindungen. Die Regelungen in [1] bis [4] zur Lochleibungstragfähigkeit sollten jedoch durch die Regelungen der DIN 18800-1:1990-11 ersetzt werden, wobei die Obergrenzen  $\alpha_1 \leq 2,0$  für außenliegende Bauteile und  $\alpha_1 \leq 3,0$  für innenliegende Bauteile beibehalten werden sollten.
- Sollen alternativ die Regelungen der DIN EN 1993-1-8:2007-05 zur Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit herangezogen werden, sollte der Nachweis in Anlehnung an DIN 18800-1:1990-11, Element (807) in der Form

$$\frac{V_L}{V_{L,R,d}} \leq \frac{1}{1,2}$$

geführt werden.

- Die Hülsenausbildung hat keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit oder auf das Verformungsverhalten der Verbindung. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein Gummiring die Tragfähigkeit oder das Verformungsverhalten negativ beeinflusst.
- Verbindungen mit Stahlbaudübeln führen gegenüber Verbindungen mit Schrauben zu größeren Verschiebungen in der Anschlussebene. Dies ist in erster Linie auf die vergleichsweise größeren Verdrehungen zurückzuführen. Ein negativer Einfluss auf die Tragfähigkeit existiert aber nicht.

Karlsruhe, am 30.01.2008

mi/pc

Der Sachbearbeiter

Die Institutsleitung

Dipl.-Ing. Th. Misiek

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

## **7 Schrifttum**

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-420: Hollo-Bolt, 17.10.2002, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-482: BoxBolt, 30.05.2005, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-14.4-482: BoxBolt, 07.07.2006, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [4] Änderung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-14.4-482: BoxBolt, 09.10.2006, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin
- [5] DIN 18800-1: 1990-11: Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [6] Entwurf DIN 18800-1/A2:2007-06: Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion; Änderung A2
- [7] DIN EN 1993-1-8:2005-07: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen

HB M12 ohne Gummi, Länge 1
----------------------------

Schraube	1	2	3	Nennwert
Eckmaß e	21,3	21,4	21,4	-
Schlüsselweite sw	18,7	18,7	18,7	18/19
Kopfhöhe k	7,4	7,4	7,4	7,5

Hülse	1	2	3	Nennwert
Schlüsselweite sw	29,7	29,7	29,7	30
Durchmesser $d_1$	31,7	31,7	31,7	-
Innendurchmesser $d_{11}$	13,9	14,0	14,0	-
Kopfhöhe k	7,1	7,0	7,0	7
Durchmesser $d_2 = d_{Hü}$	19,4	19,4	19,5	19,75
Innendurchmesser $d_{12}$	13,9	13,9	13,9	-
Wanddicke t	2,9	2,9	2,9	-
Hülsenlänge $l_1$	34,9	34,8	35,1	35
Schlitzlänge $l_2$	31,2	32,1	32,2	-

Konus	1	2	3	Nennwert
Durchmesser $d_k$	18,9	18,9	18,9	-
Länge $l_k$	14,9	15,1	15,0	-
Teillänge $l_{k1}$	7,7	4,5	7,9	-
Teillänge $l_{k2}$	4,4	4,3	4,5	-
Teillänge $l_{k3}$	3,7	3,8	3,8	-
Winkel $\alpha_1$	18°	17°	15°	-
Winkel $\alpha_2$	33°	32°	31°	-

Alle Maße in mm

HB M12 ohne Gummi, Länge 2
----------------------------

Schraube	1	2	3	Nennwert
Eckmaß e	21,4	21,4	21,6	-
Schlüsselweite sw	18,7	18,8	18,8	18/19
Kopfhöhe k	7,5	7,4	7,4	7,5

Hülse	1	2	3	Nennwert
Schlüsselweite sw	29,7	29,7	29,7	30
Durchmesser $d_1$	31,4	31,3	31,3	-
Innendurchmesser $d_{i1}$	14,0	14,2	14,0	-
Kopfhöhe k	7,0	7,1	7,0	7
Durchmesser $d_2 = d_{Hü}$	19,6	19,4	19,5	19,75
Innendurchmesser $d_{i2}$	14,0	14,2	14,0	-
Wanddicke t	2,9	2,9	2,9	-
Hülsenlänge $l_1$	56,7	56,8	56,7	57
Schlitzlänge $l_2$	34,6	35,5	34,9	-

Konus	1	2	3	Nennwert
Durchmesser $d_k$	18,9	18,9	18,9	-
Länge $l_k$	15,0	14,9	15,0	-
Teillänge $l_{k1}$	7,2	7,6	7,3	-
Teillänge $l_{k2}$	4,4	4,3	4,4	-
Teillänge $l_{k3}$	3,6	3,5	3,5	-
Winkel $\alpha_1$	14°	14°	16°	-
Winkel $\alpha_2$	30°	30°	31°	-

Alle Maße in mm

HB M20 mit Gummi, Länge 1
---------------------------

Schraube	1	2	3	Nennwert
Eckmaß e	34,2	34,3	34,2	-
Schlüsselweite sw	29,8	29,8	29,7	30
Kopfhöhe k	12,3	12,4	12,4	12,5

Hülse	1	2	3	Nennwert
Schlüsselweite sw	45,7	45,7	45,7	46
Durchmesser $d_1$	50,2	50,2	50,2	-
Innendurchmesser $d_{i1}$	20,9	20,9	21,0	-
Kopfhöhe k	9,6	9,8	9,5	10
Durchmesser $d_2 = d_{Hü}$	32,1	32,2	32,1	32,75
Innendurchmesser $d_{i2}$	20,9	20,9	21,0	-
Wanddicke t	5,8	5,8	5,8	-
Hüslenlänge $l_1$	49,9	50,0	49,9	50
Schlitzlänge $l_2$	44,6	44,5	44,8	-

Konus	1	2	3	Nennwert
Durchmesser $d_k$	31,4	31,4	31,3	-
Länge $l_k$	26,8	26,7	26,7	-
Teillänge $l_{k1}$	15,0	14,9	14,8	-
Teillänge $l_{k2}$	4,7	4,8	4,8	-
Teillänge $l_{k3}$	7,1	6,8	6,8	-
Winkel $\alpha_1$	14°	14°	14°	-
Winkel $\alpha_2$	28°	30°	29°	-

Alle Maße in mm

HB M20 ohne Gummi, Länge 1
----------------------------

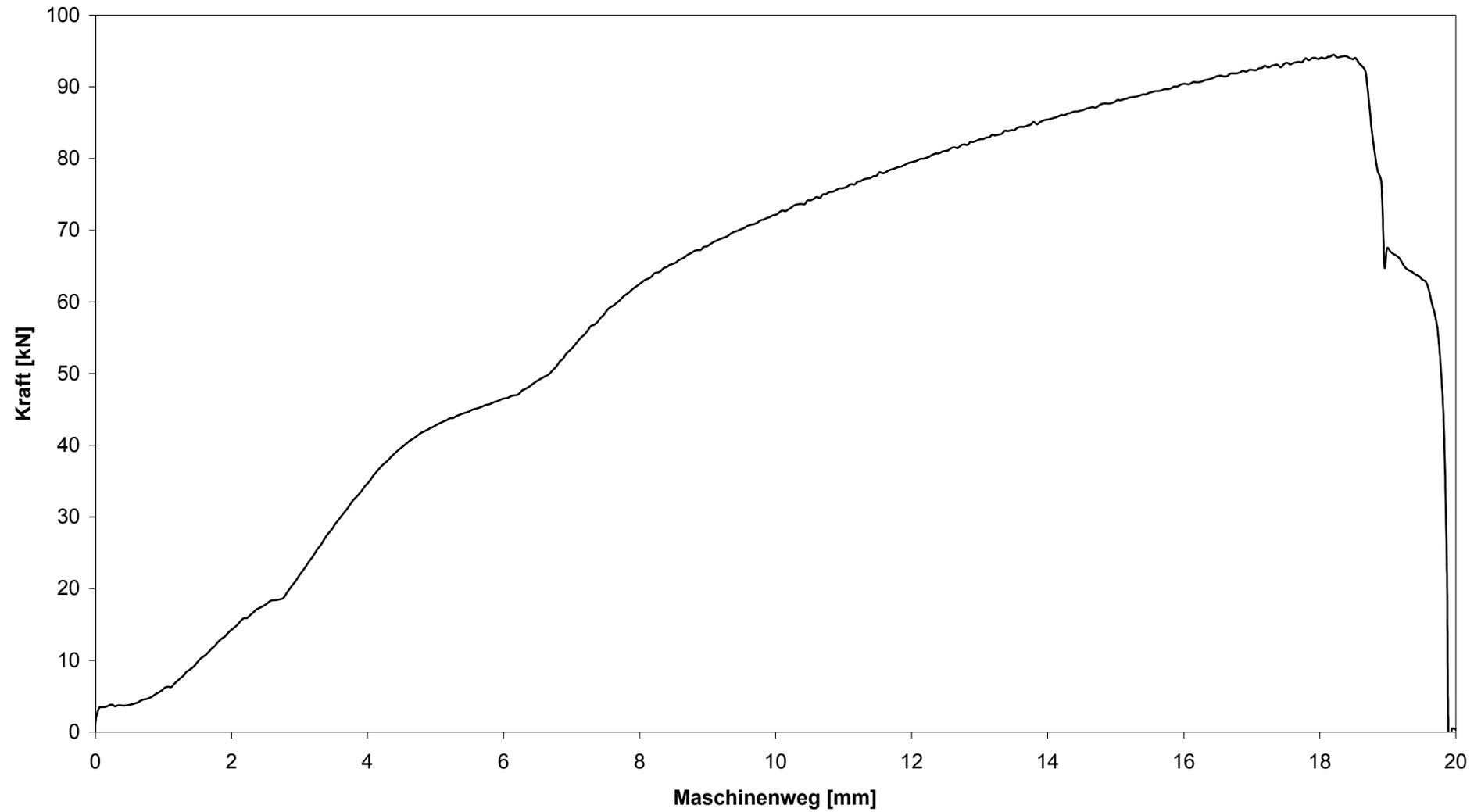
Schraube	1	2	3	Nennwert
Eckmaß e	34,2	34,2	34,2	-
Schlüsselweite sw	29,8	29,8	29,8	30
Kopfhöhe k	12,5	12,4	12,4	12,5

Hülse	1	2	3	Nennwert
Schlüsselweite sw	45,7	45,6	45,7	46
Durchmesser $d_1$	50,8	50,7	50,8	-
Innendurchmesser $d_{i1}$	21,0	20,9	21,0	-
Kopfhöhe k	9,9	10,3	10,0	10
Durchmesser $d_2 = d_{Hü}$	32,8	32,5	32,7	32,75
Innendurchmesser $d_{i2}$	21,0	21,0	20,9	-
Wanddicke t	5,9	5,8	6,0	-
Hülsenlänge $l_1$	45,2	44,9	45,0	45
Schlitzlänge $l_2$	42,4	41,4	42,5	-

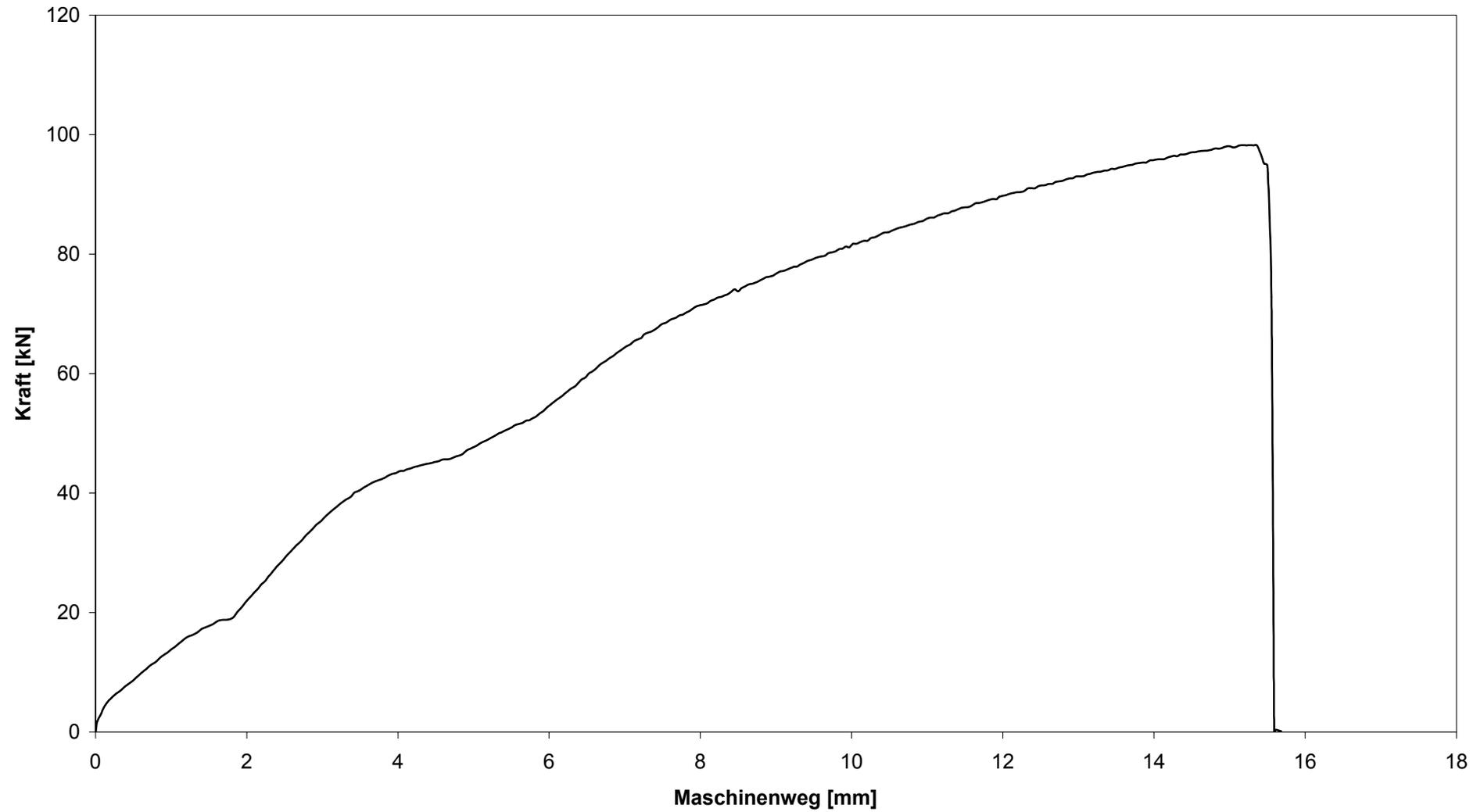
Konus	1	2	3	Nennwert
Durchmesser $d_k$	31,7	31,6	31,7	-
Länge $l_k$	26,7	27,0	26,9	-
Teillänge $l_{k1}$	15,6	14,7	15,2	-
Teillänge $l_{k2}$	11,1	12,7	11,8	-
Teillänge $l_{k3}$	0,0	0,0	0,0	-
Winkel $\alpha_1$	14°	15°	14°	-
Winkel $\alpha_2$	90°	90°	90°	-

Alle Maße in mm

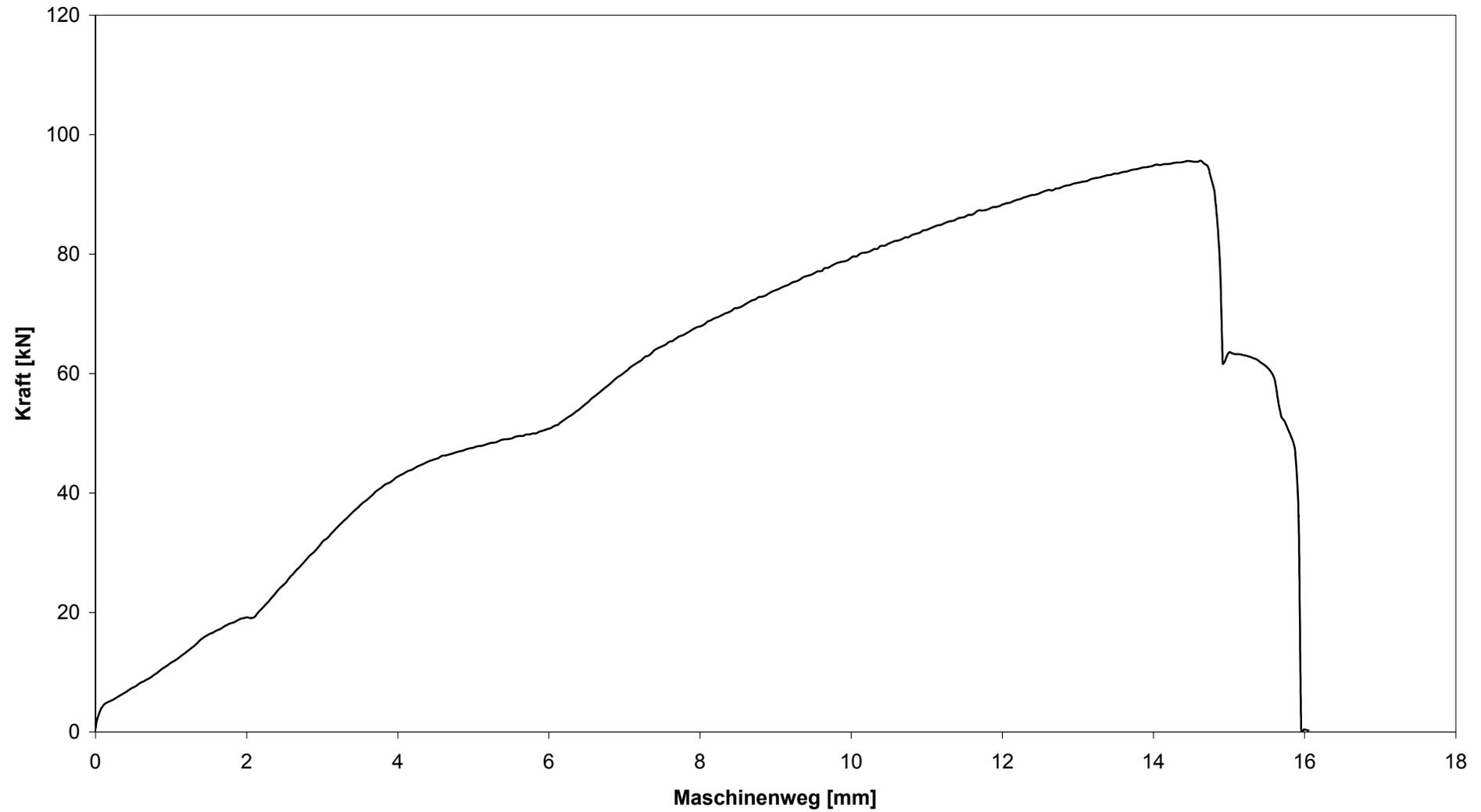
### Versuch 1



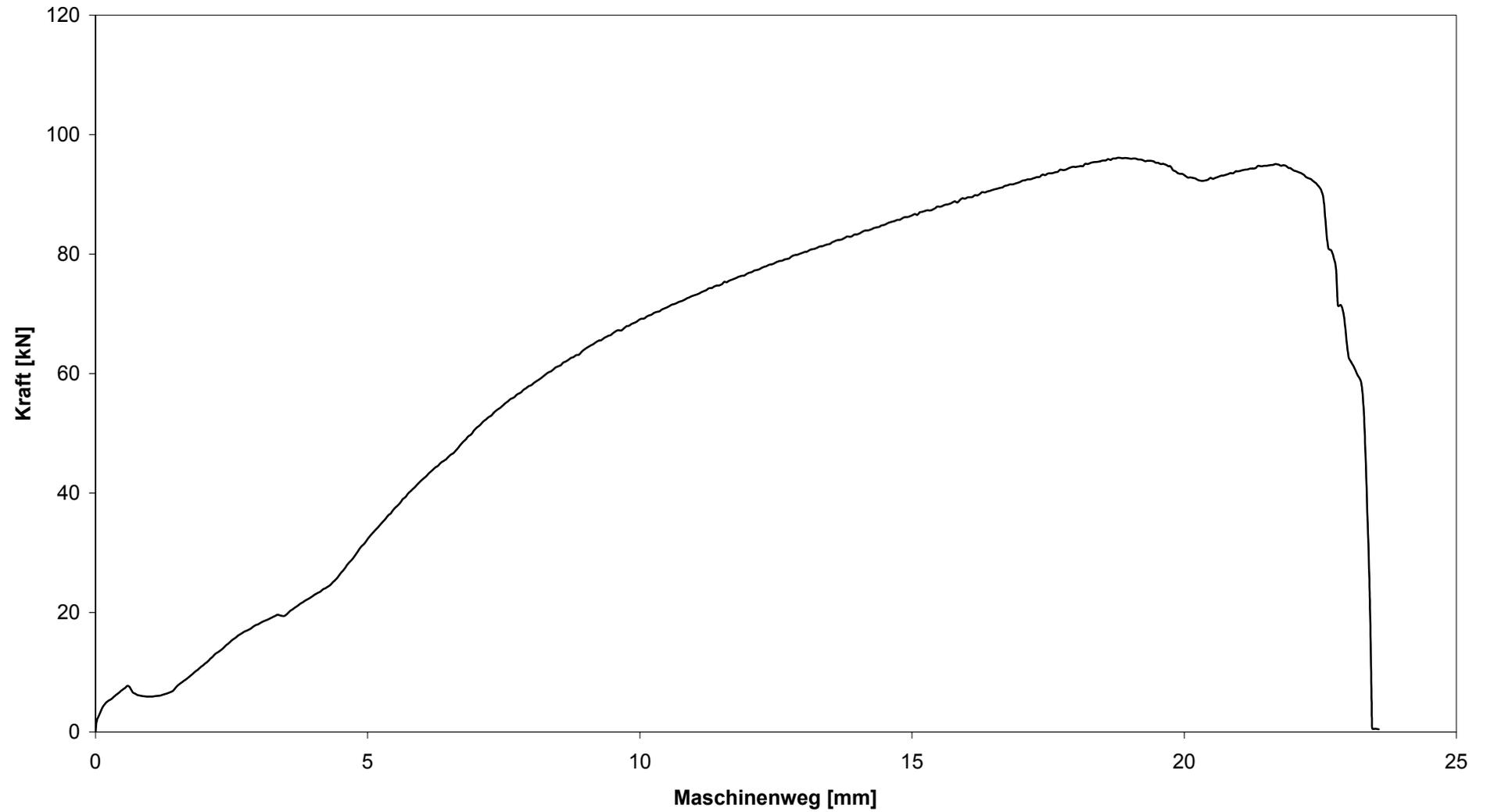
### Versuch 2



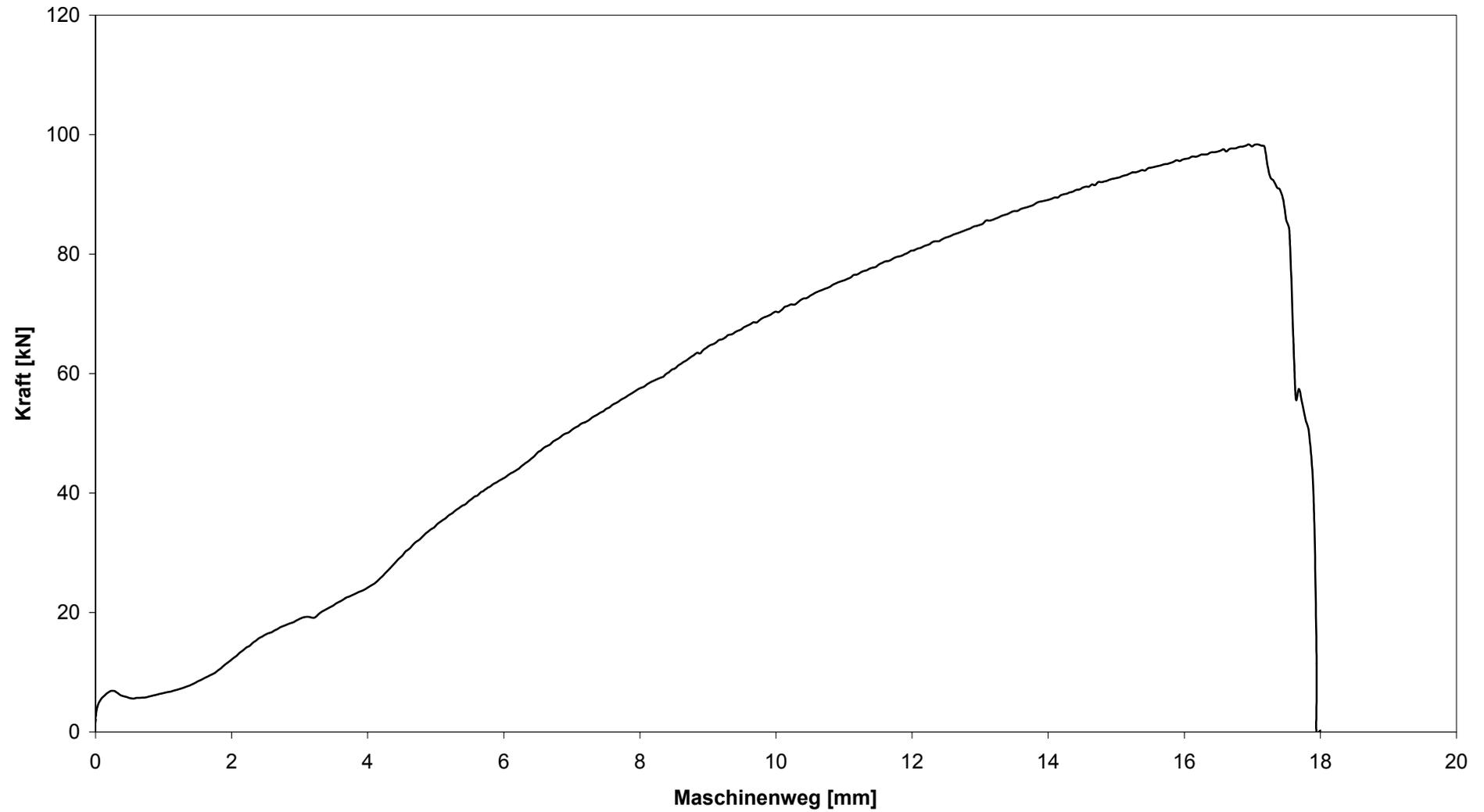
### Versuch 3



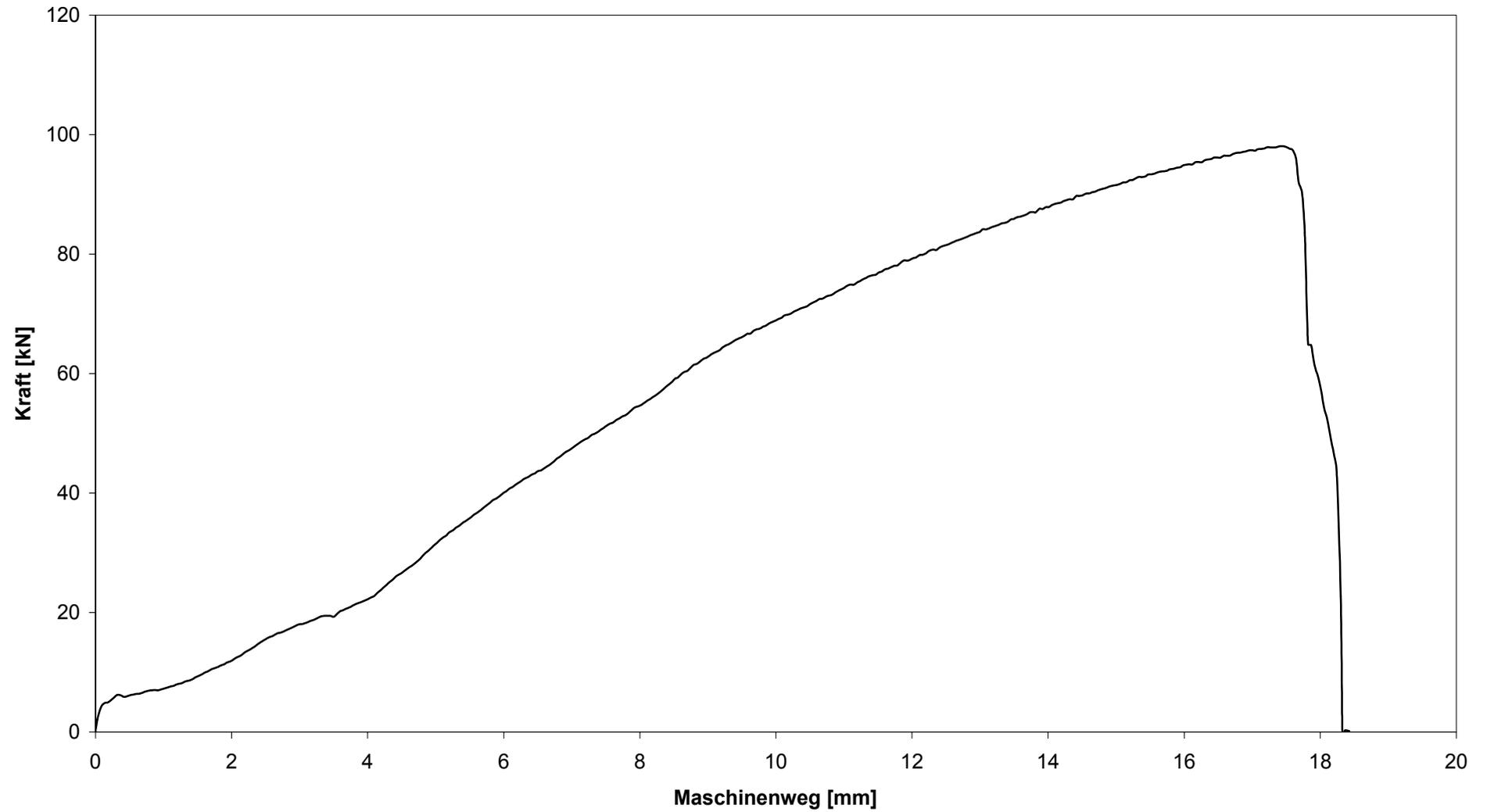
### Versuch 4



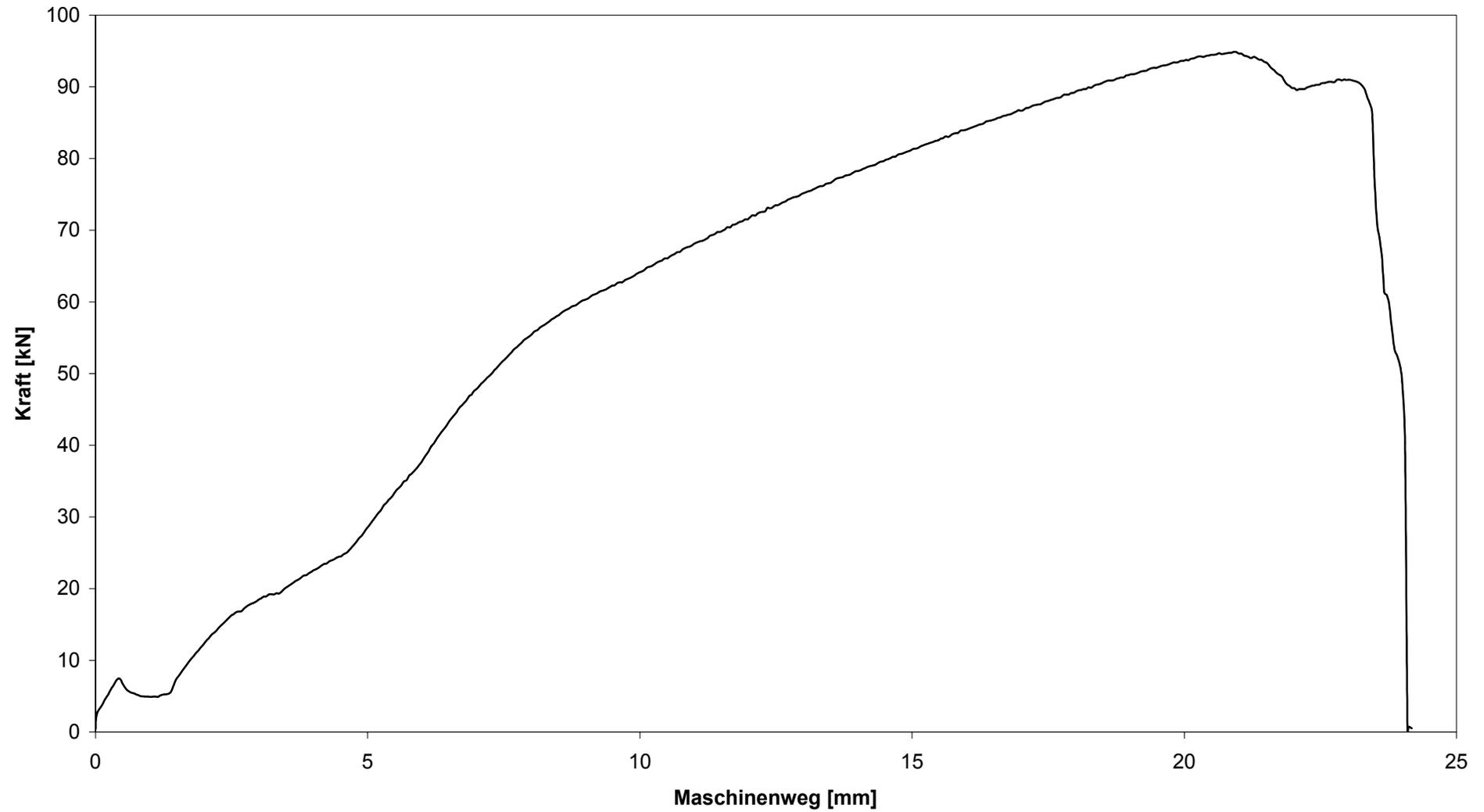
**Versuch 5**



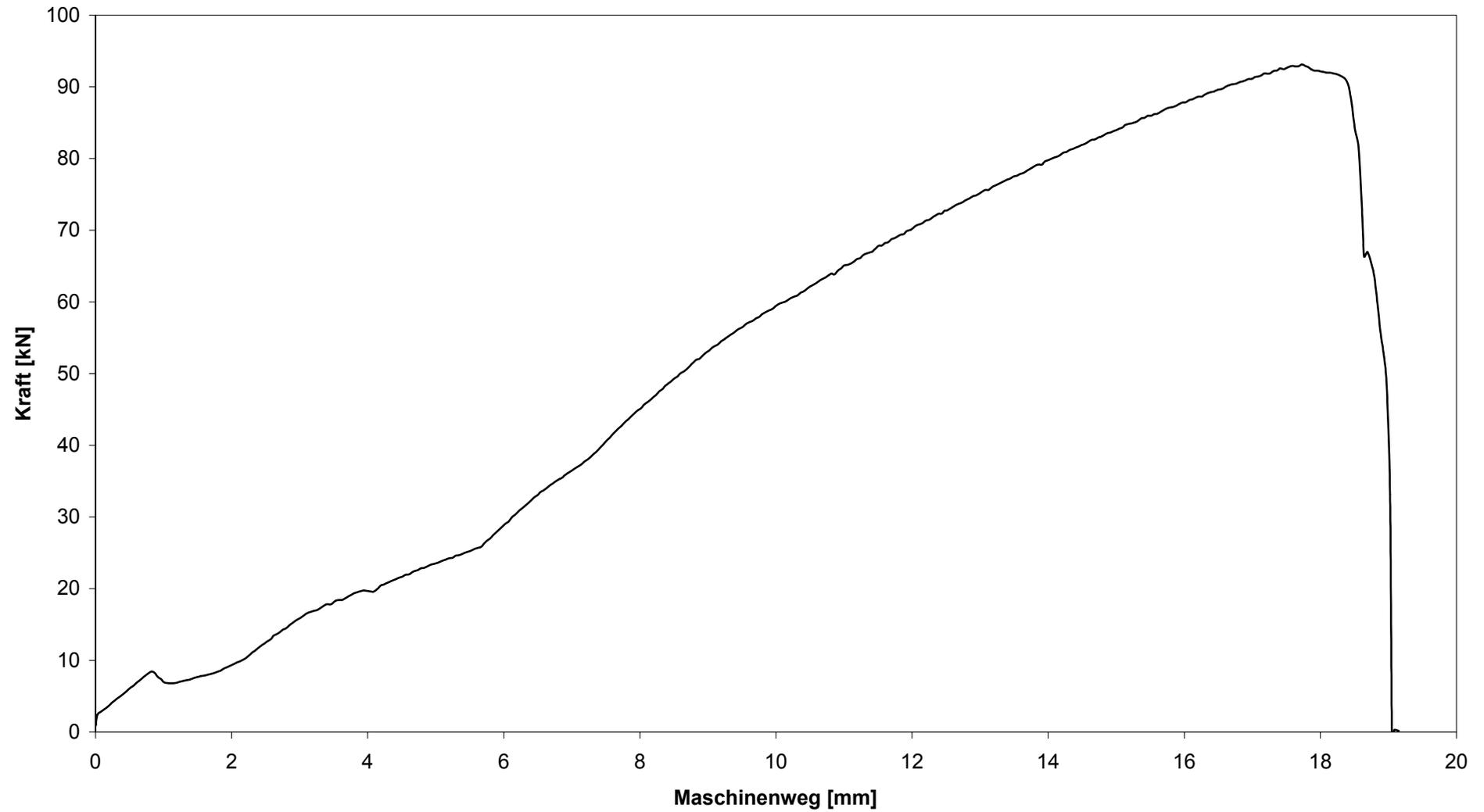
### Versuch 6



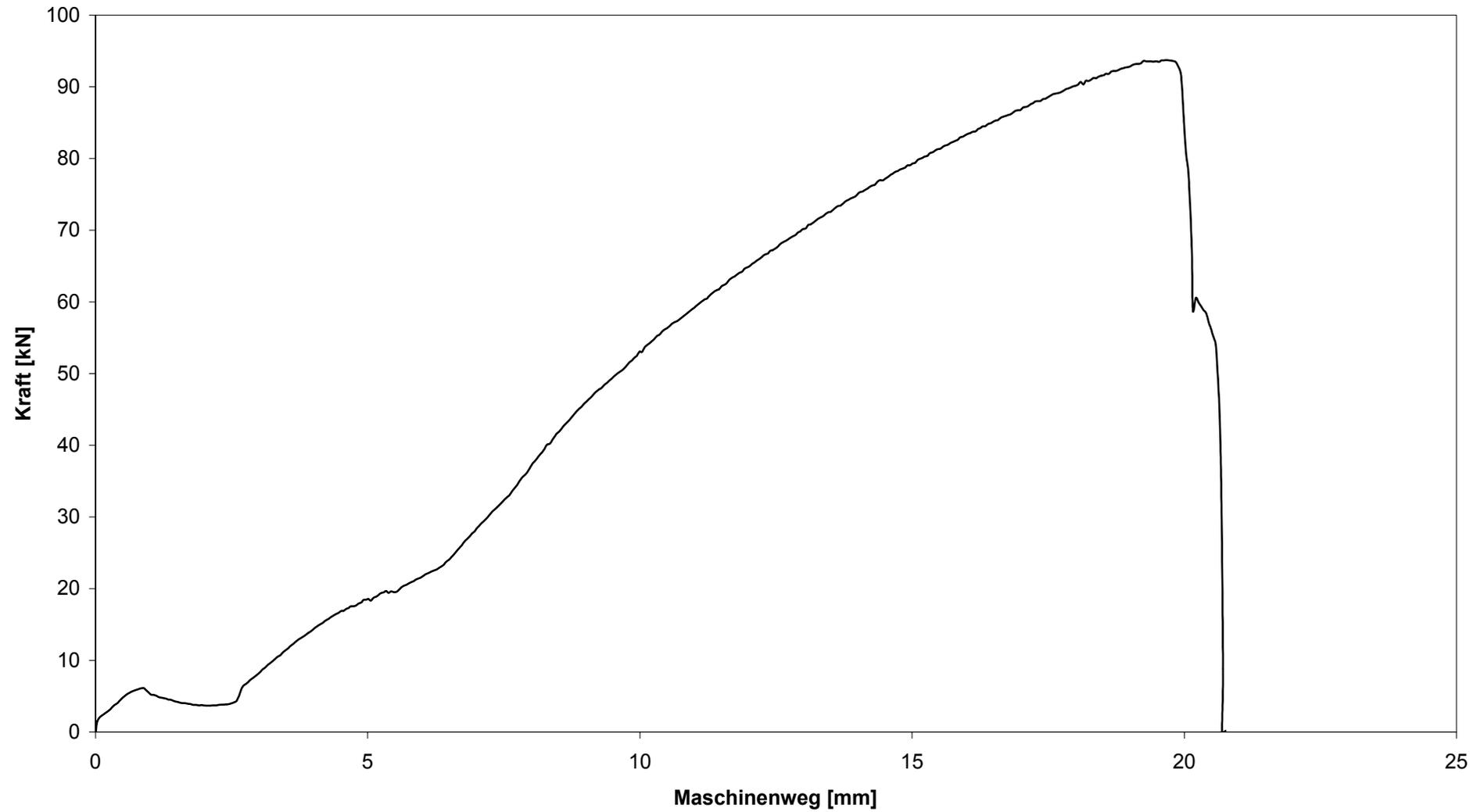
**Versuch 7**



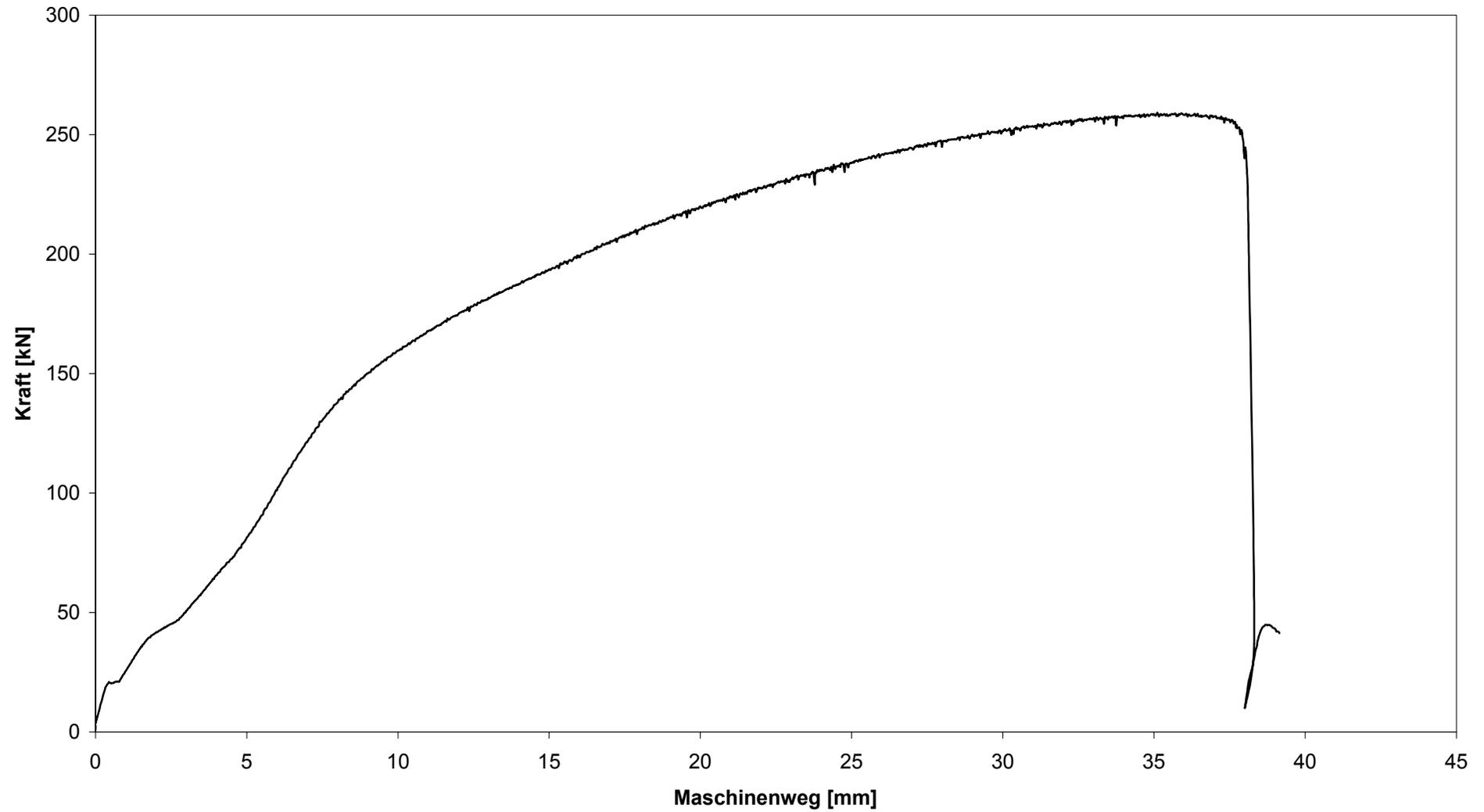
**Versuch 8**



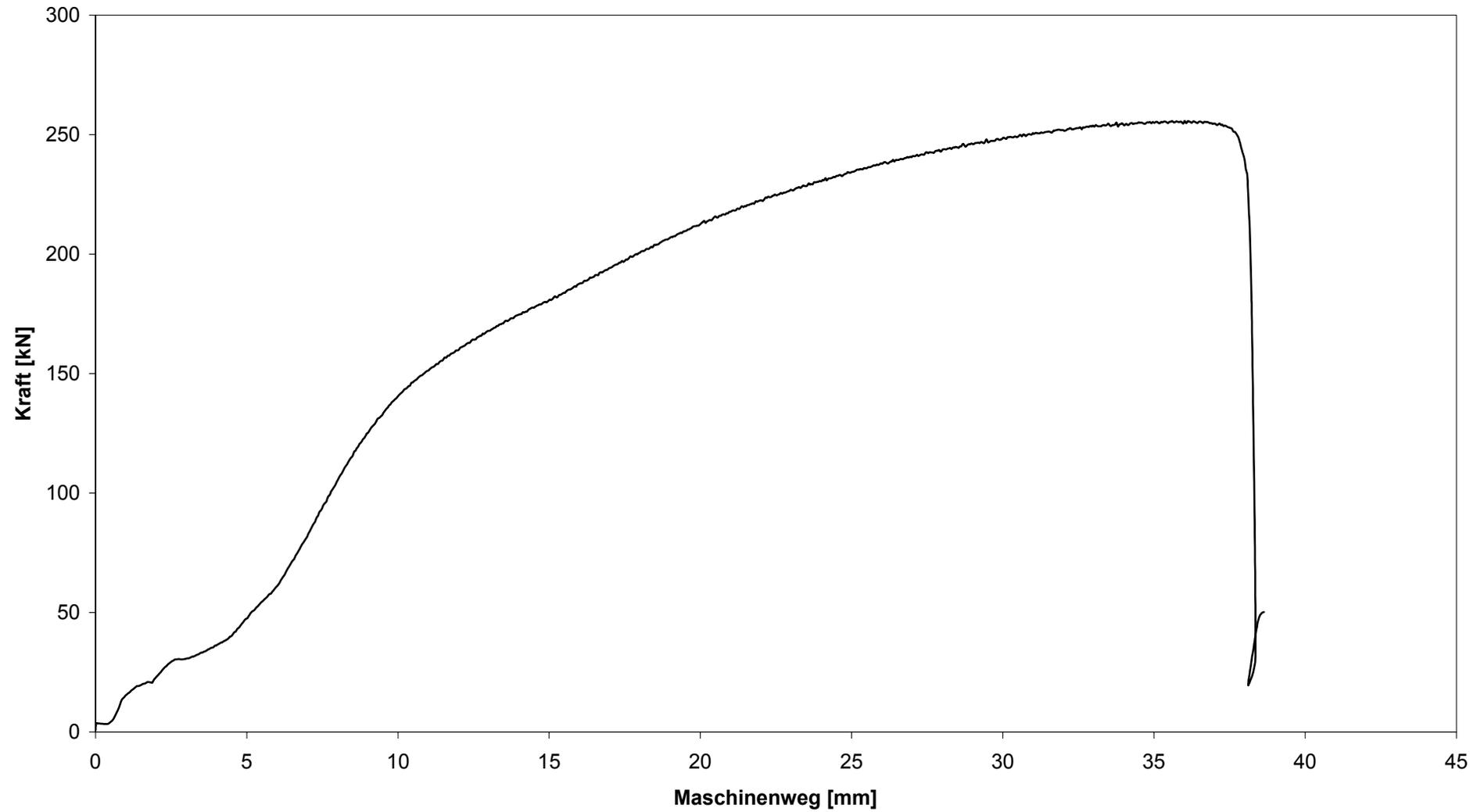
**Versuch 9**



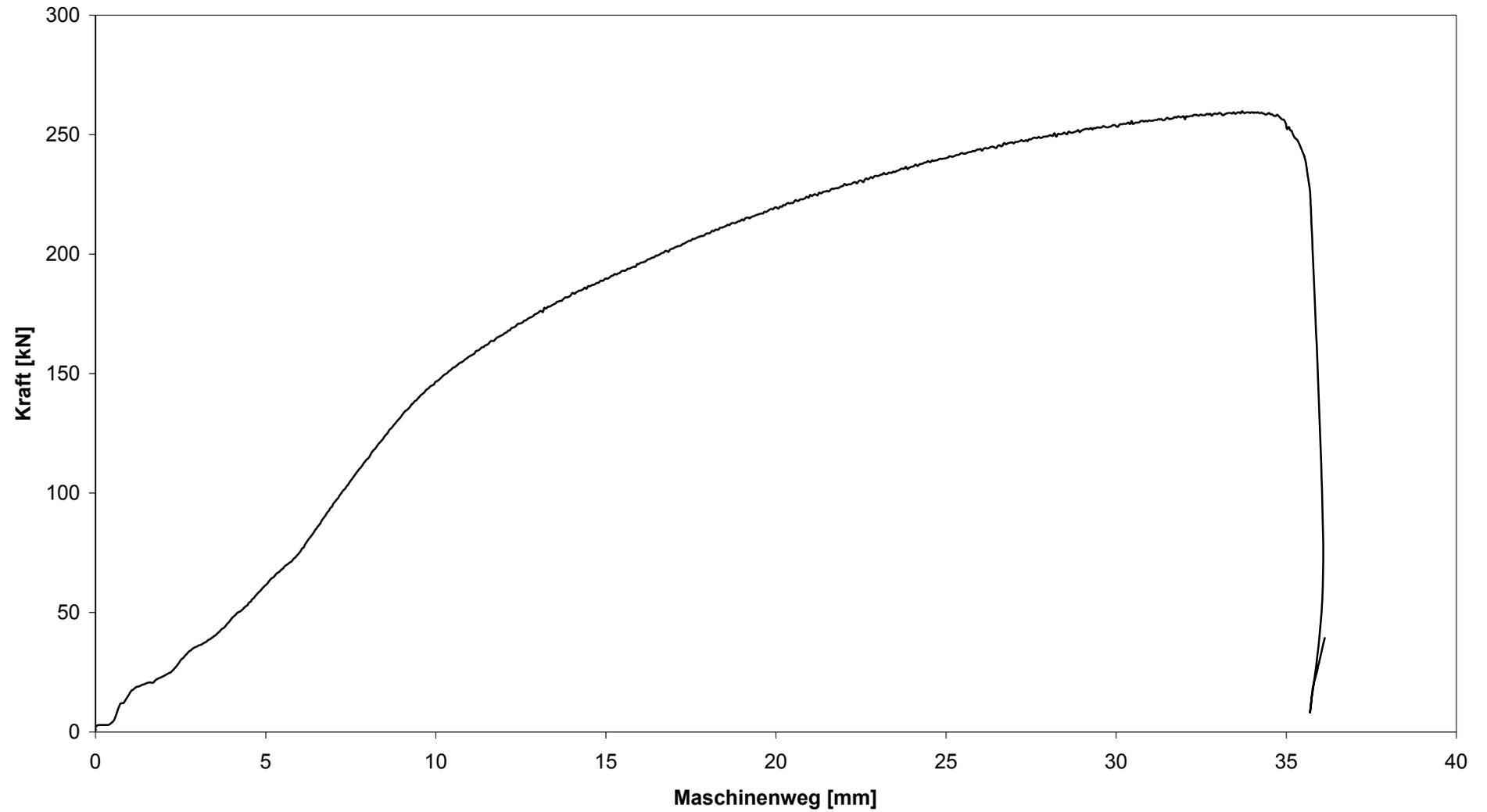
**Versuch 10**



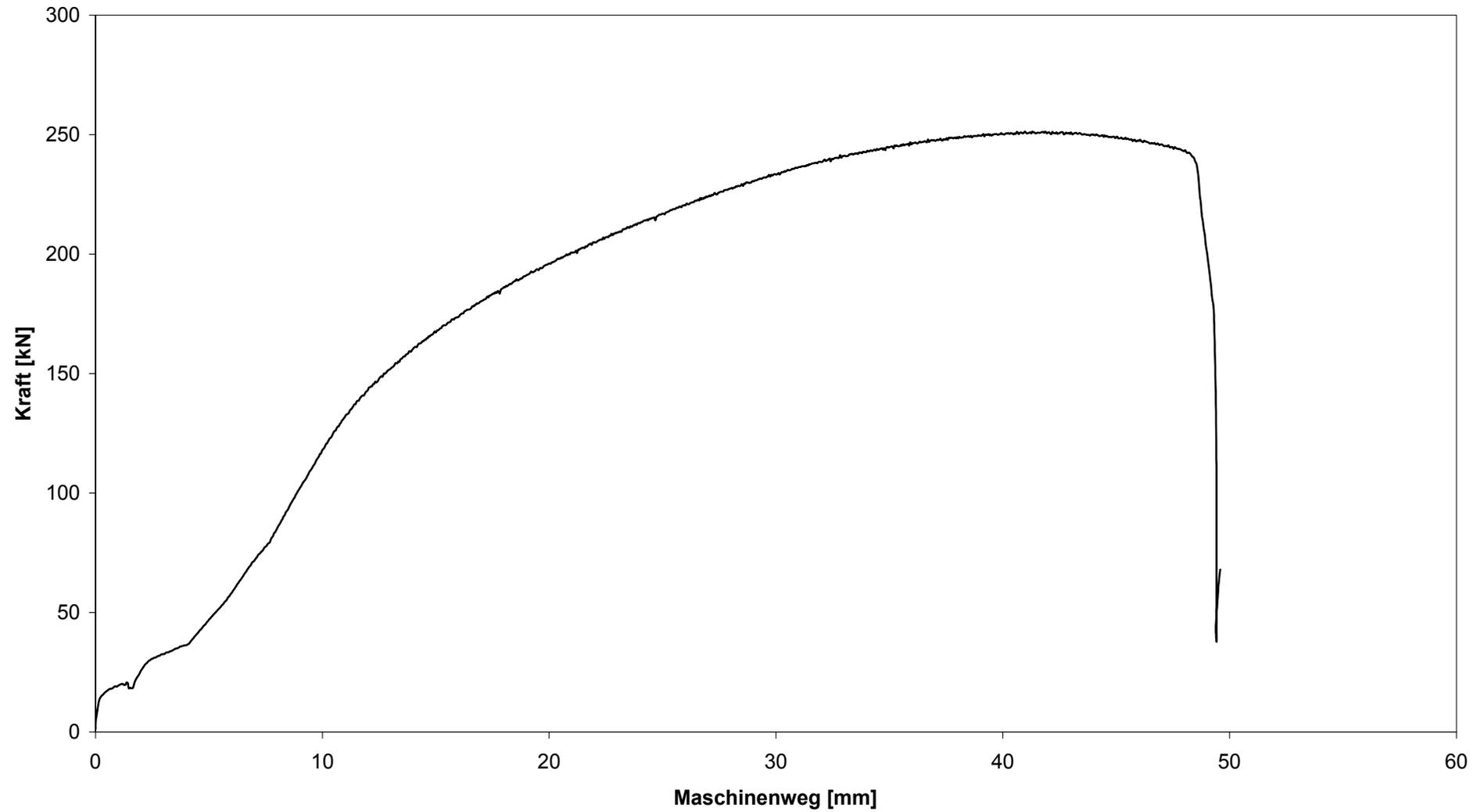
### Versuch 11



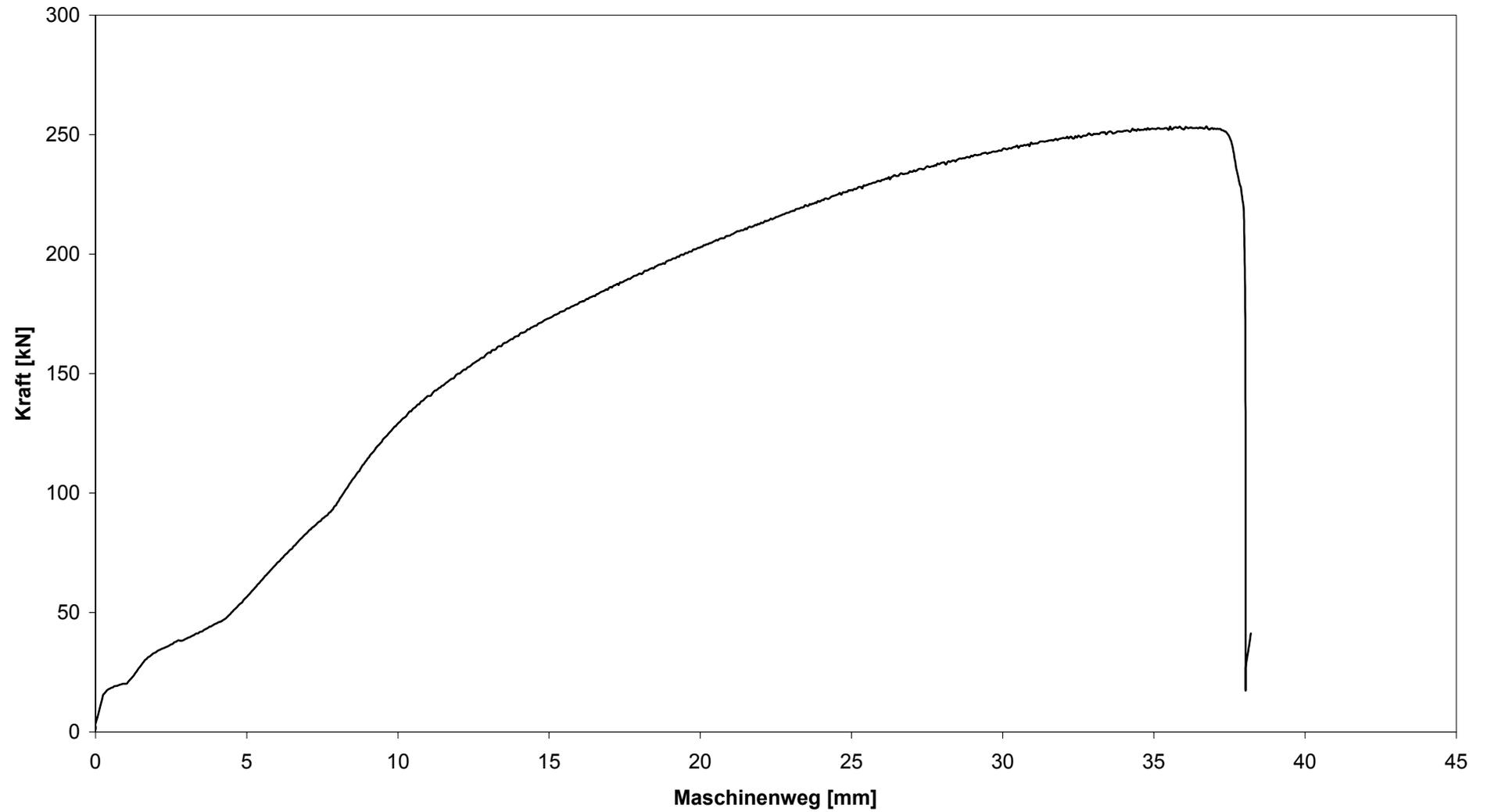
**Versuch 12**



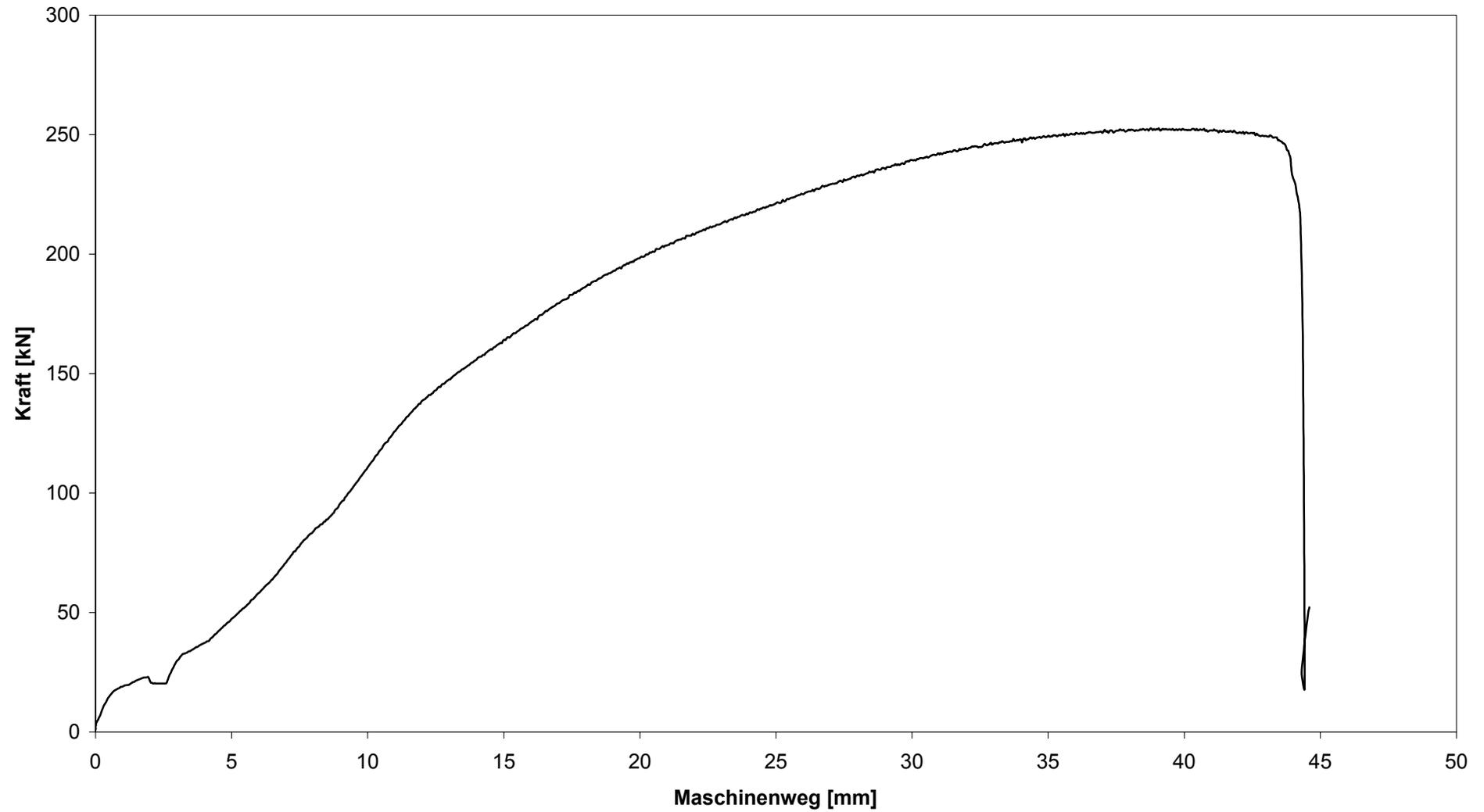
### Versuch 13



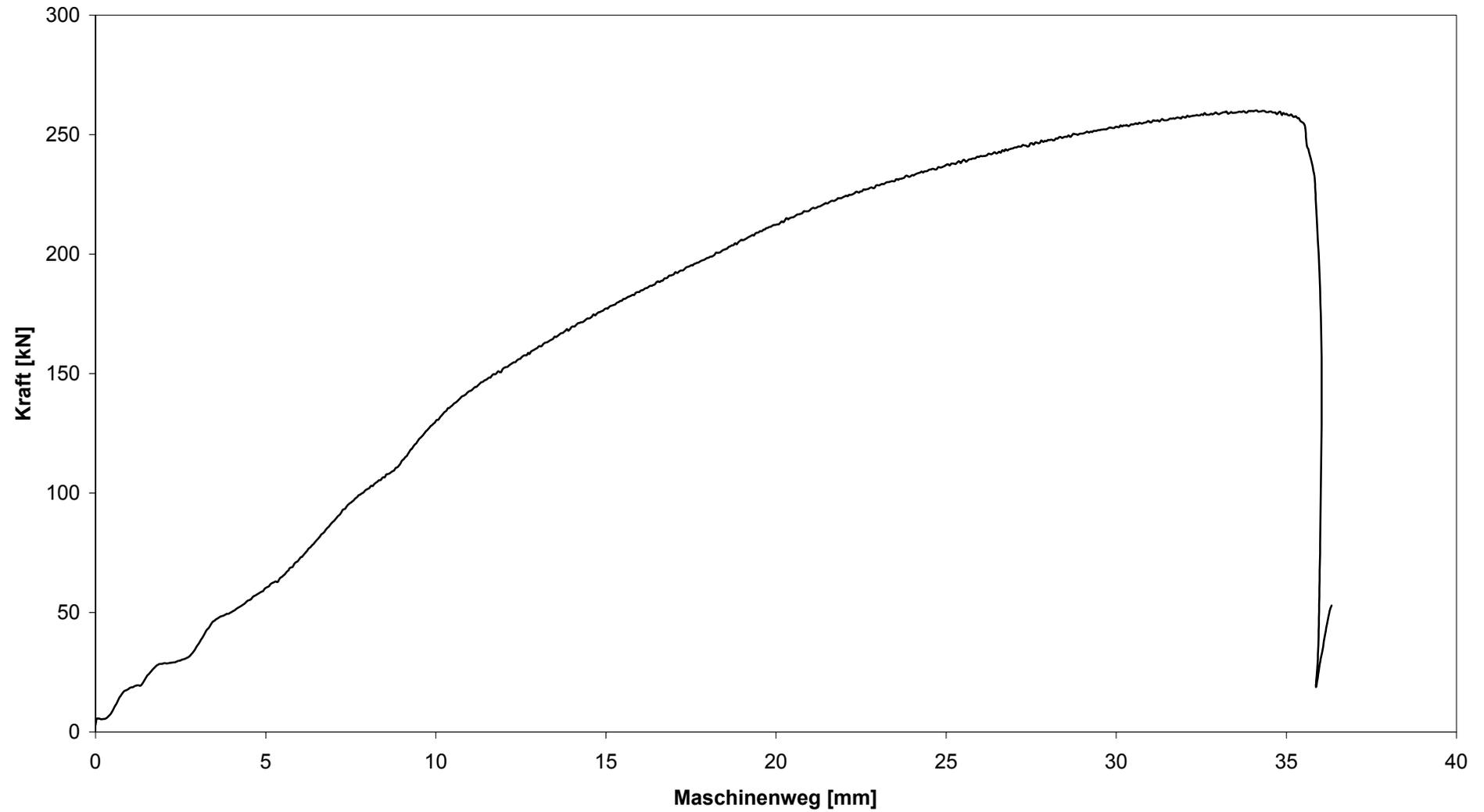
**Versuch 14**



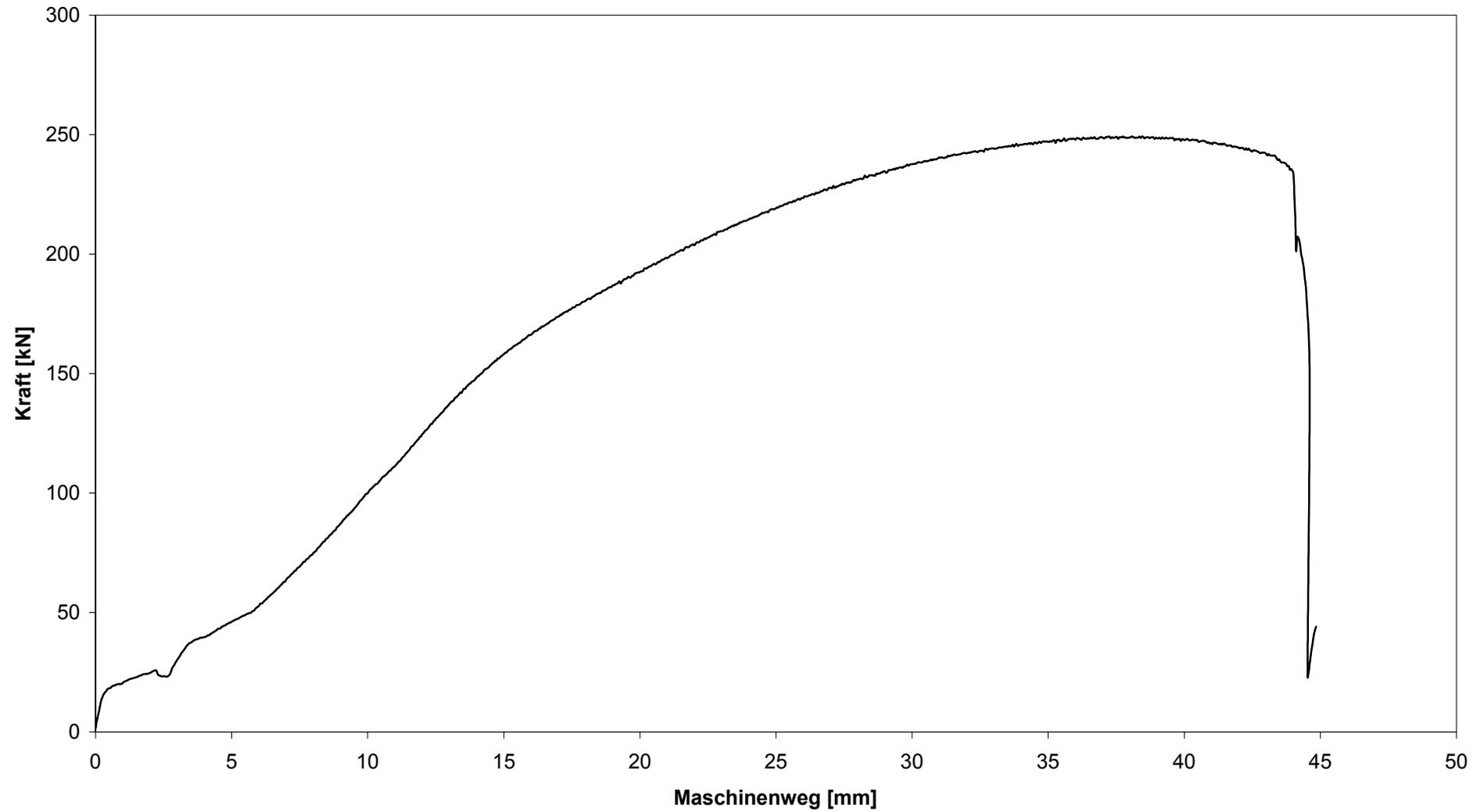
**Versuch 15**



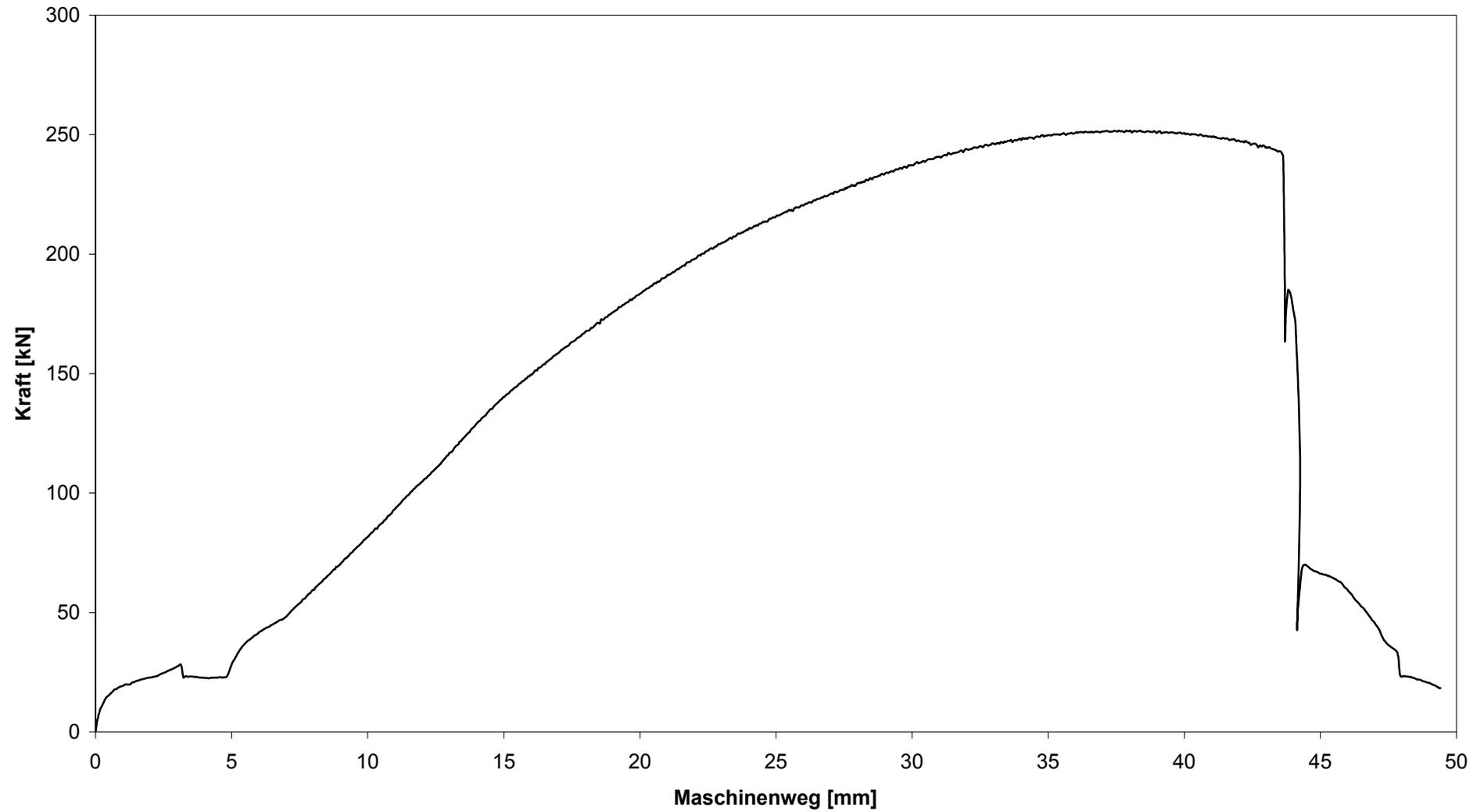
**Versuch 16**



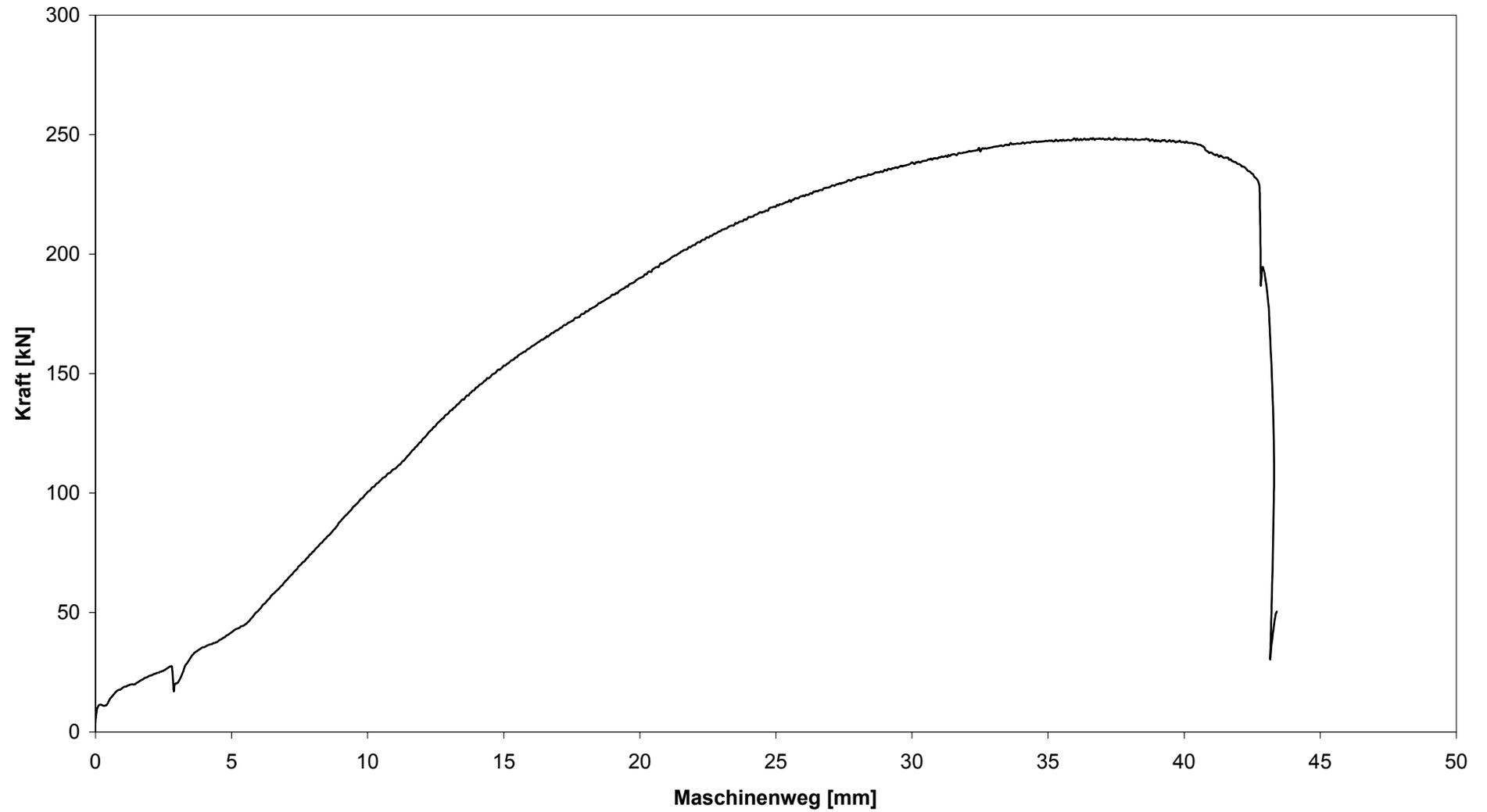
**Versuch 17**



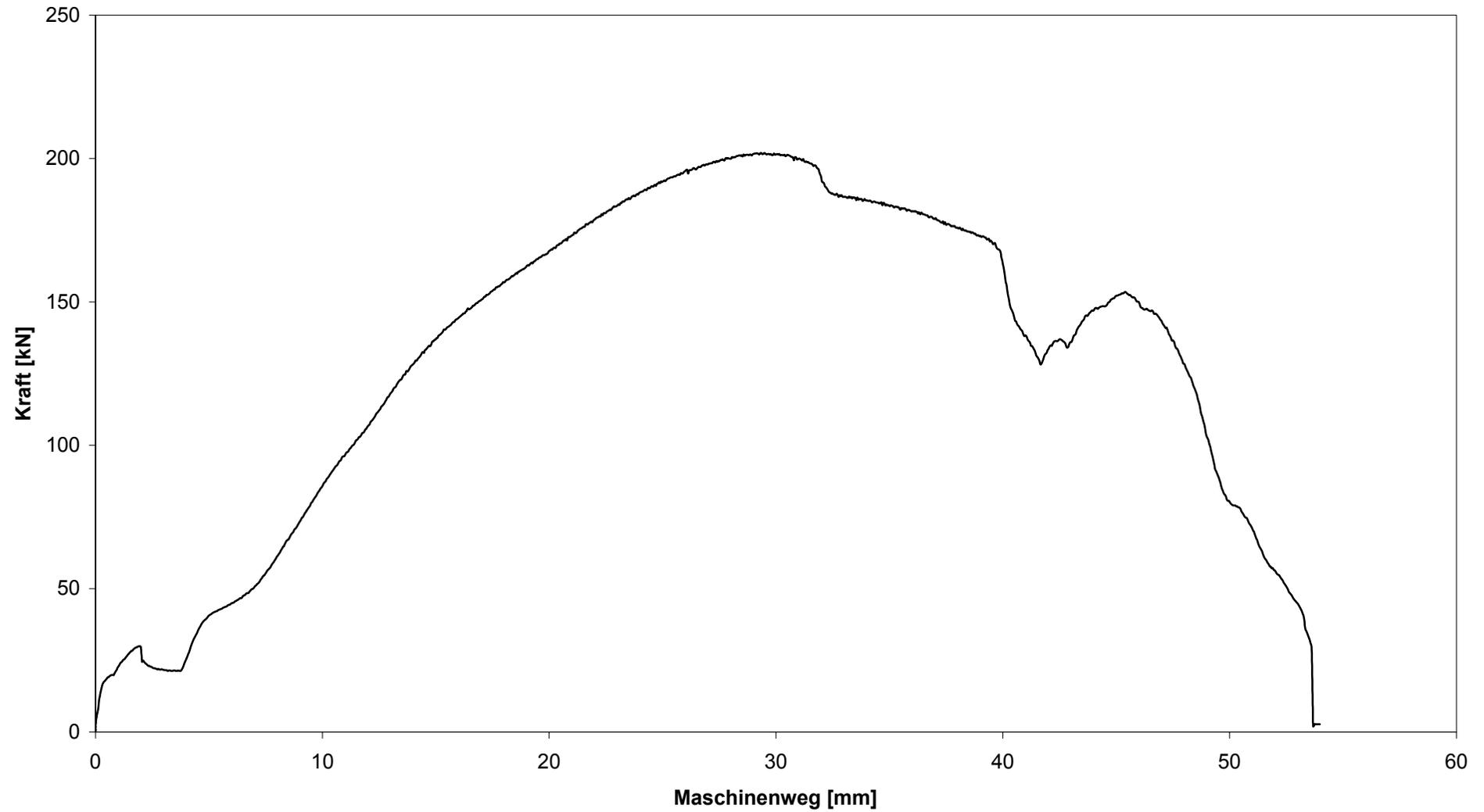
**Versuch 18**



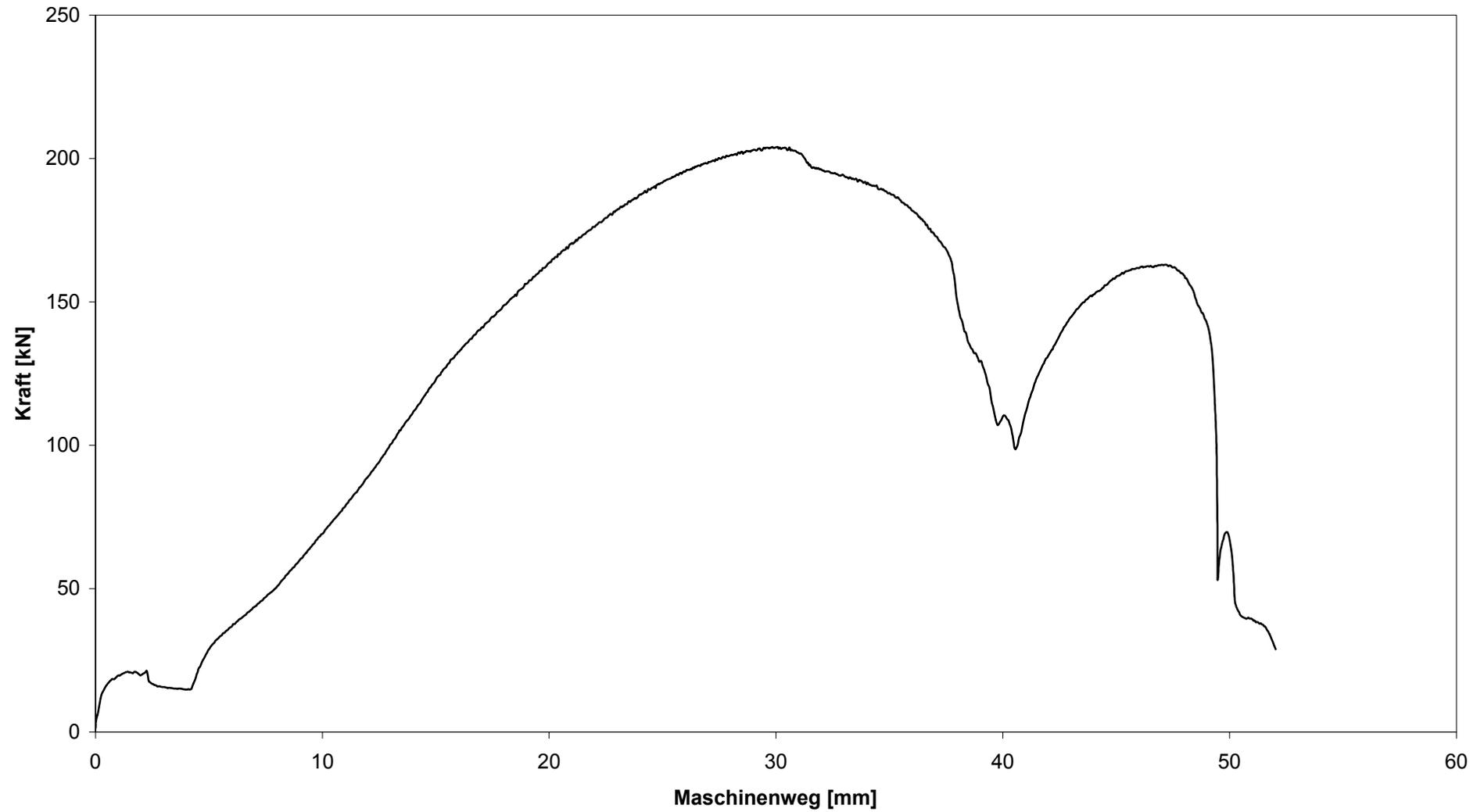
**Versuch 19**



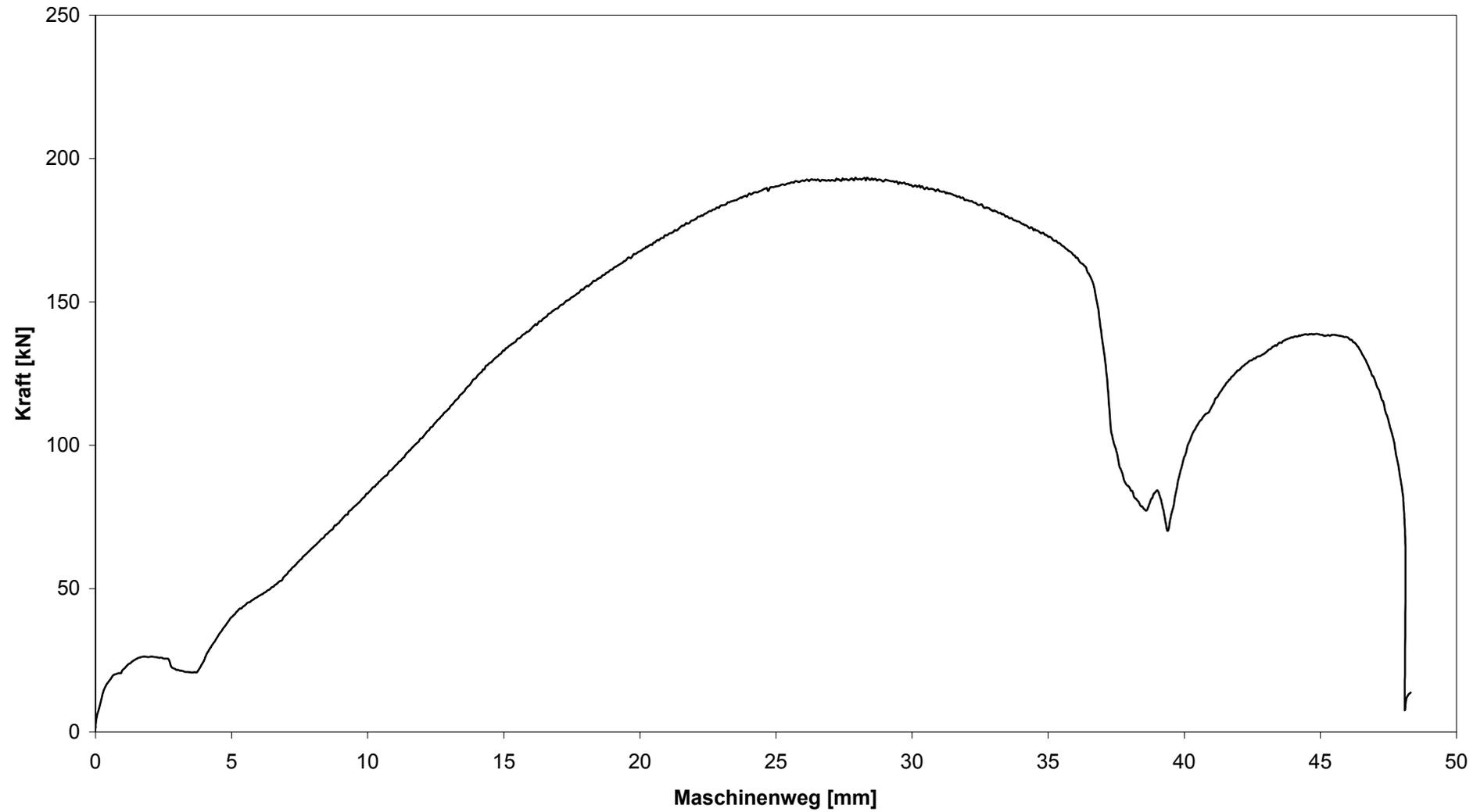
**Versuch 20**



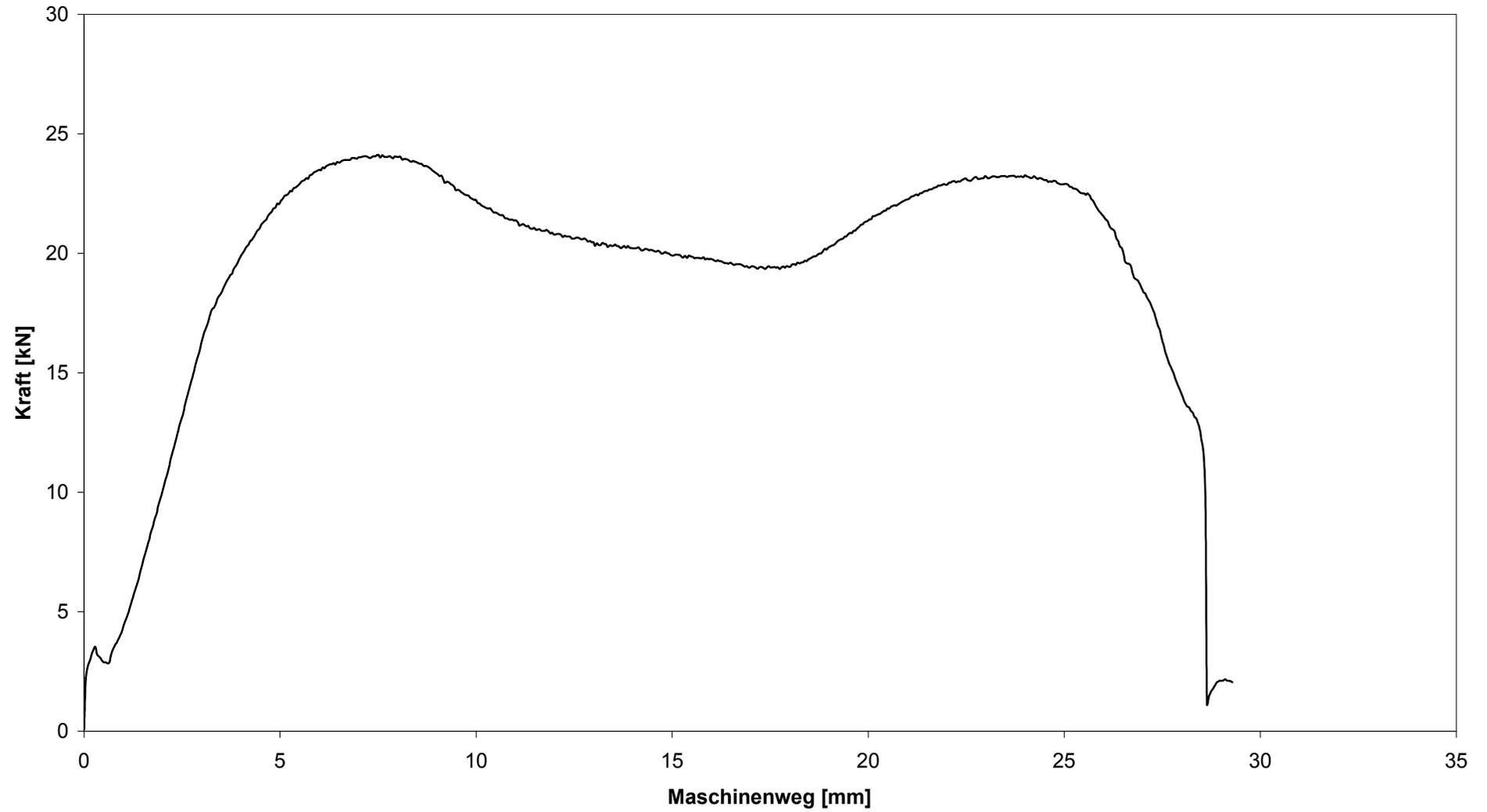
### Versuch 21



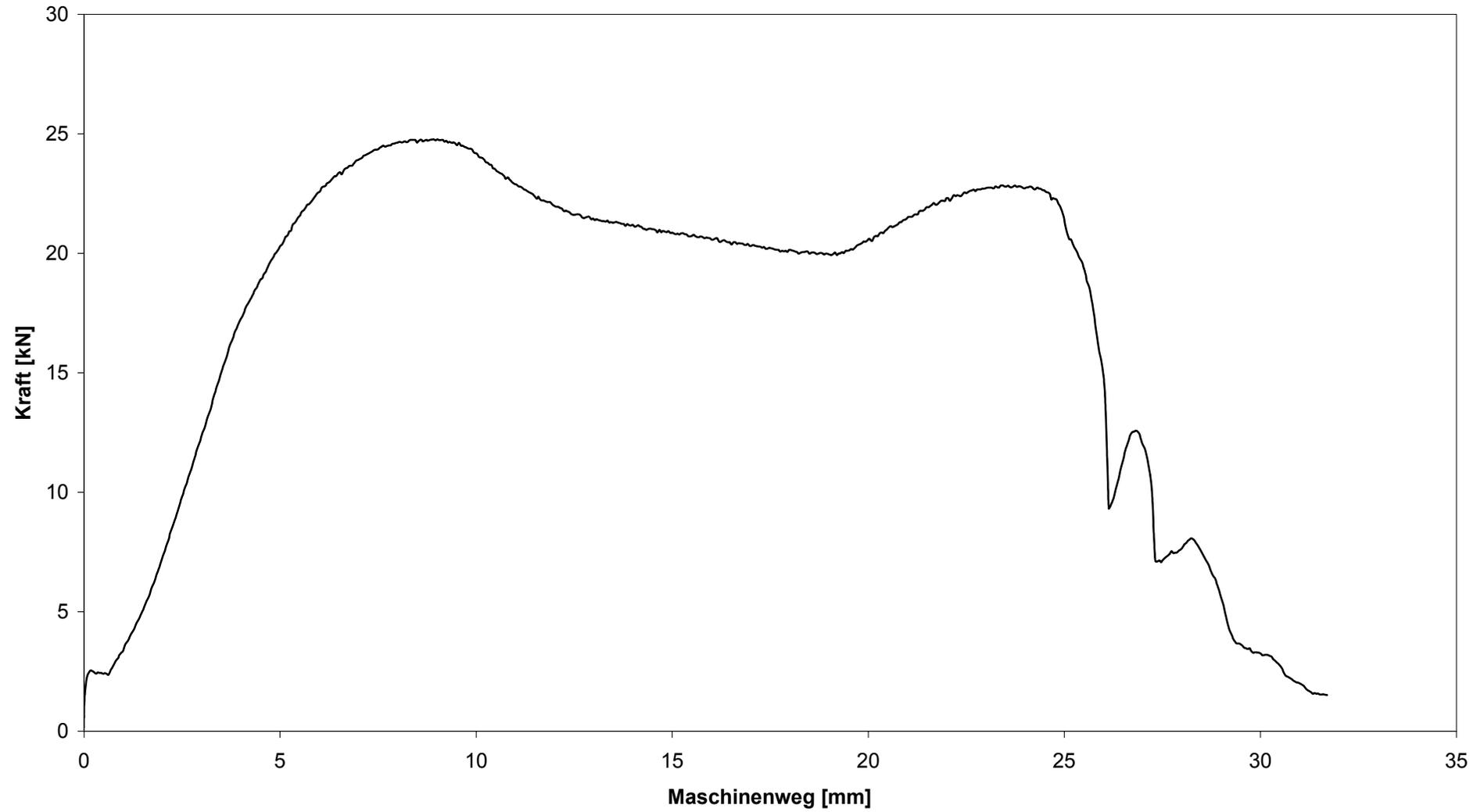
**Versuch 22**



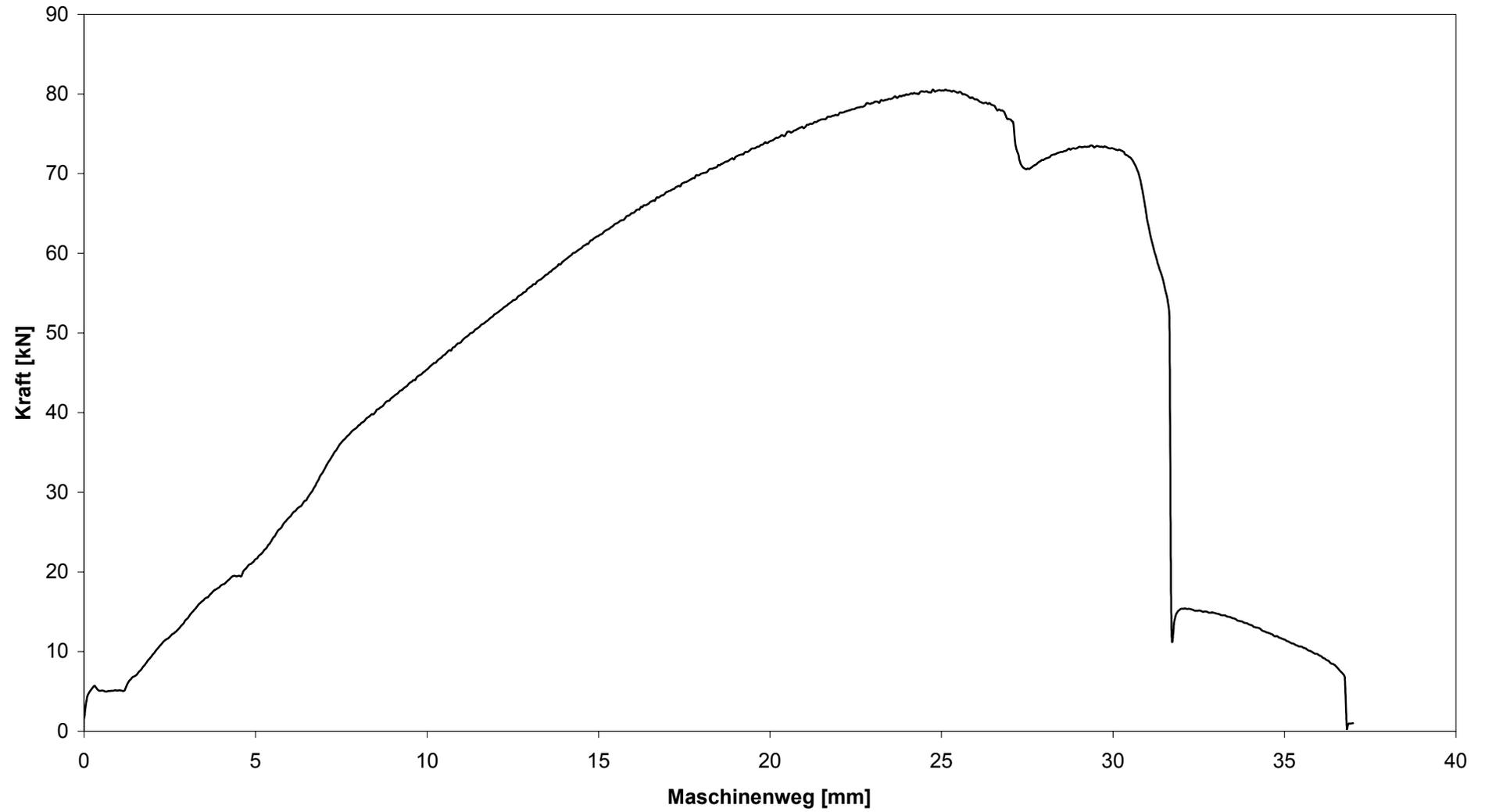
**Versuch 23**



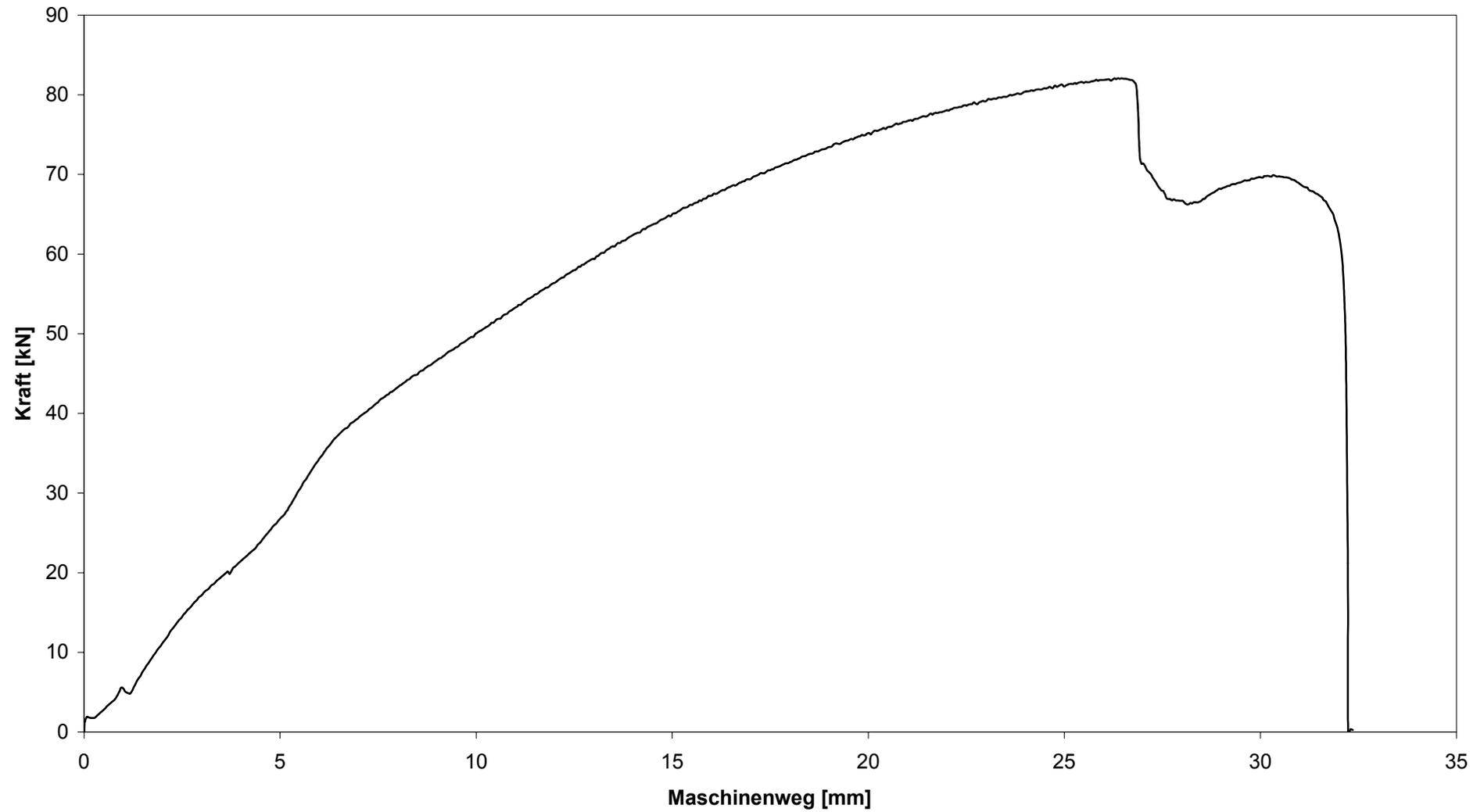
**Versuch 24**



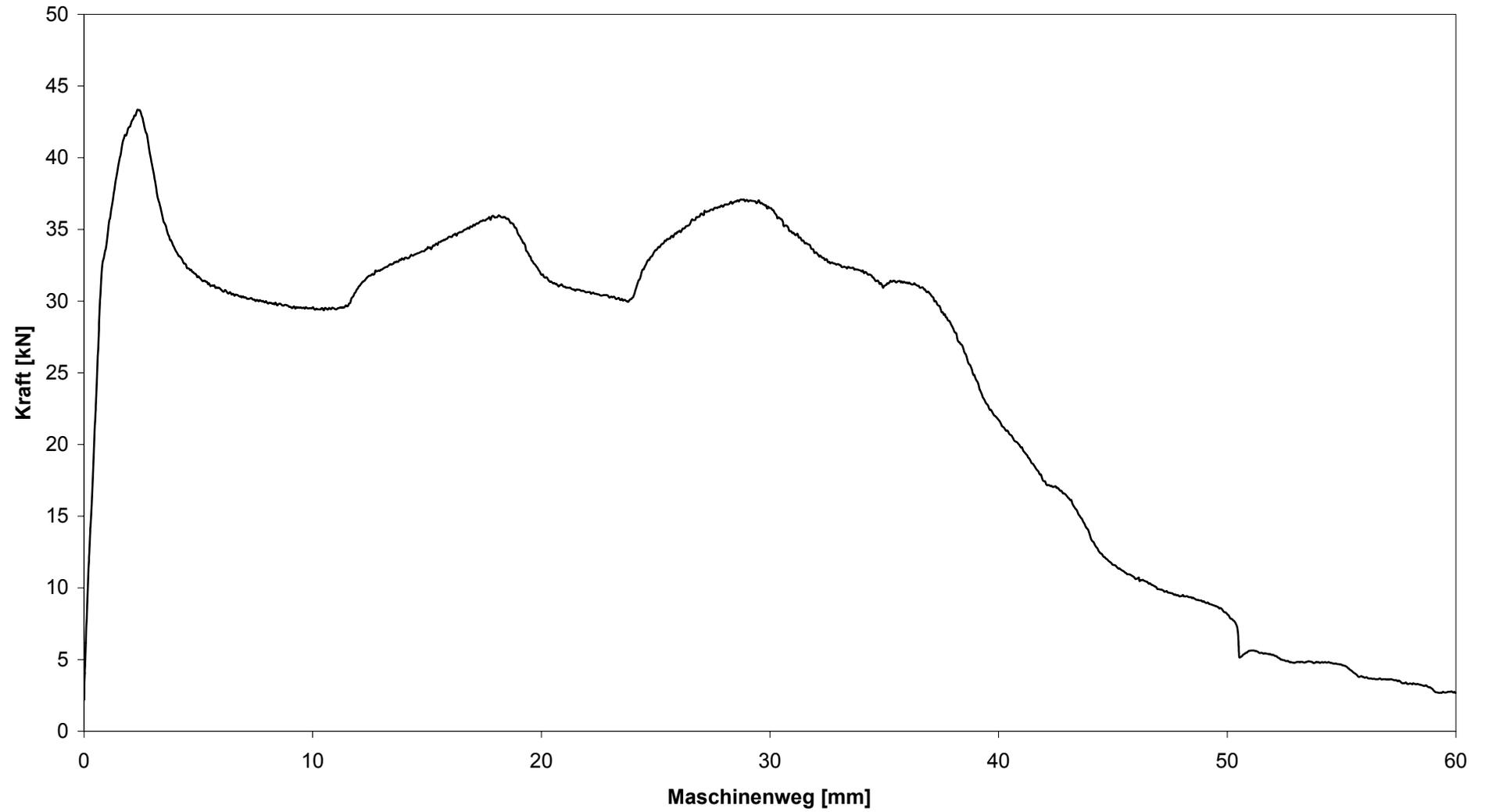
**Versuch 25**



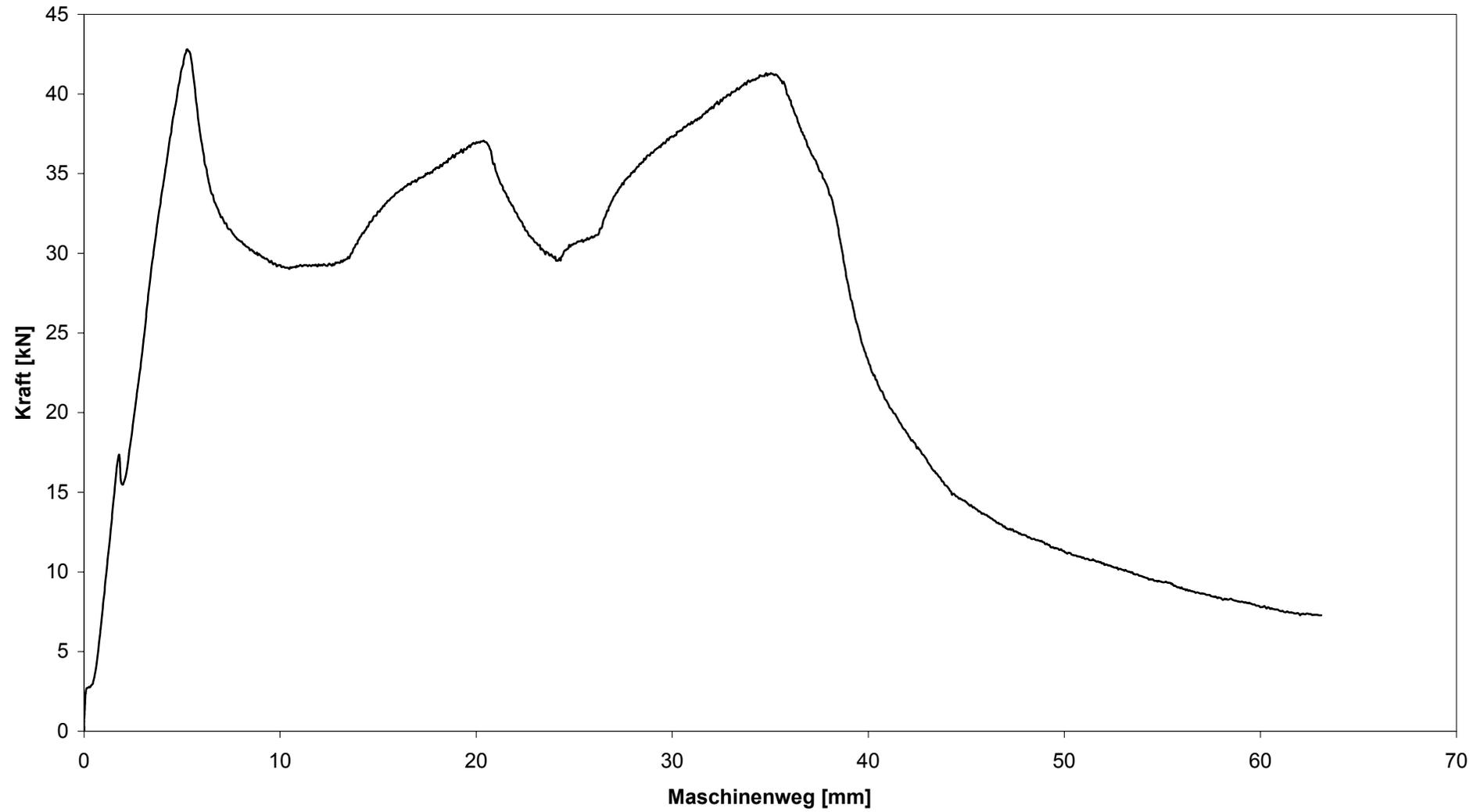
**Versuch 26**



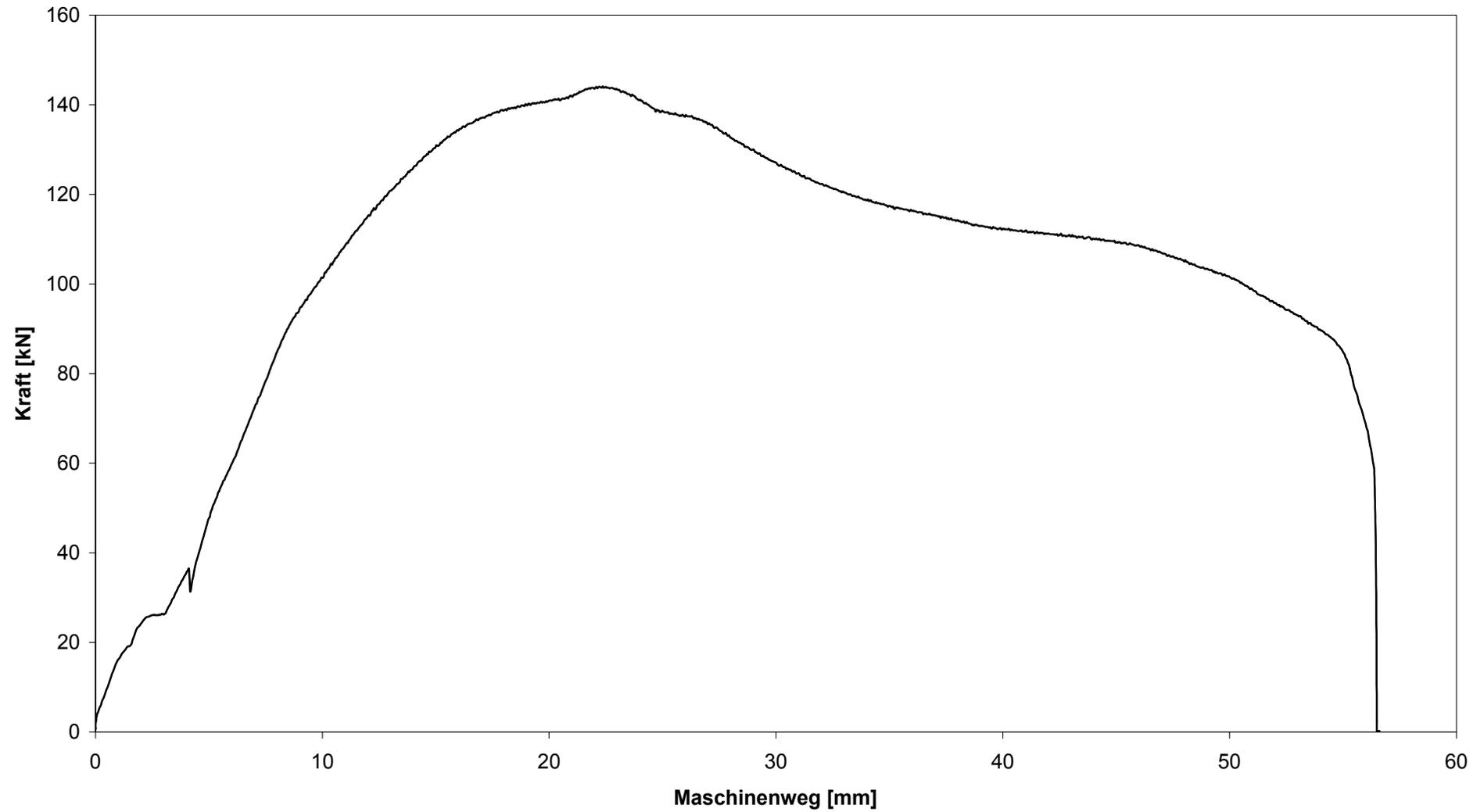
**Versuch 27**



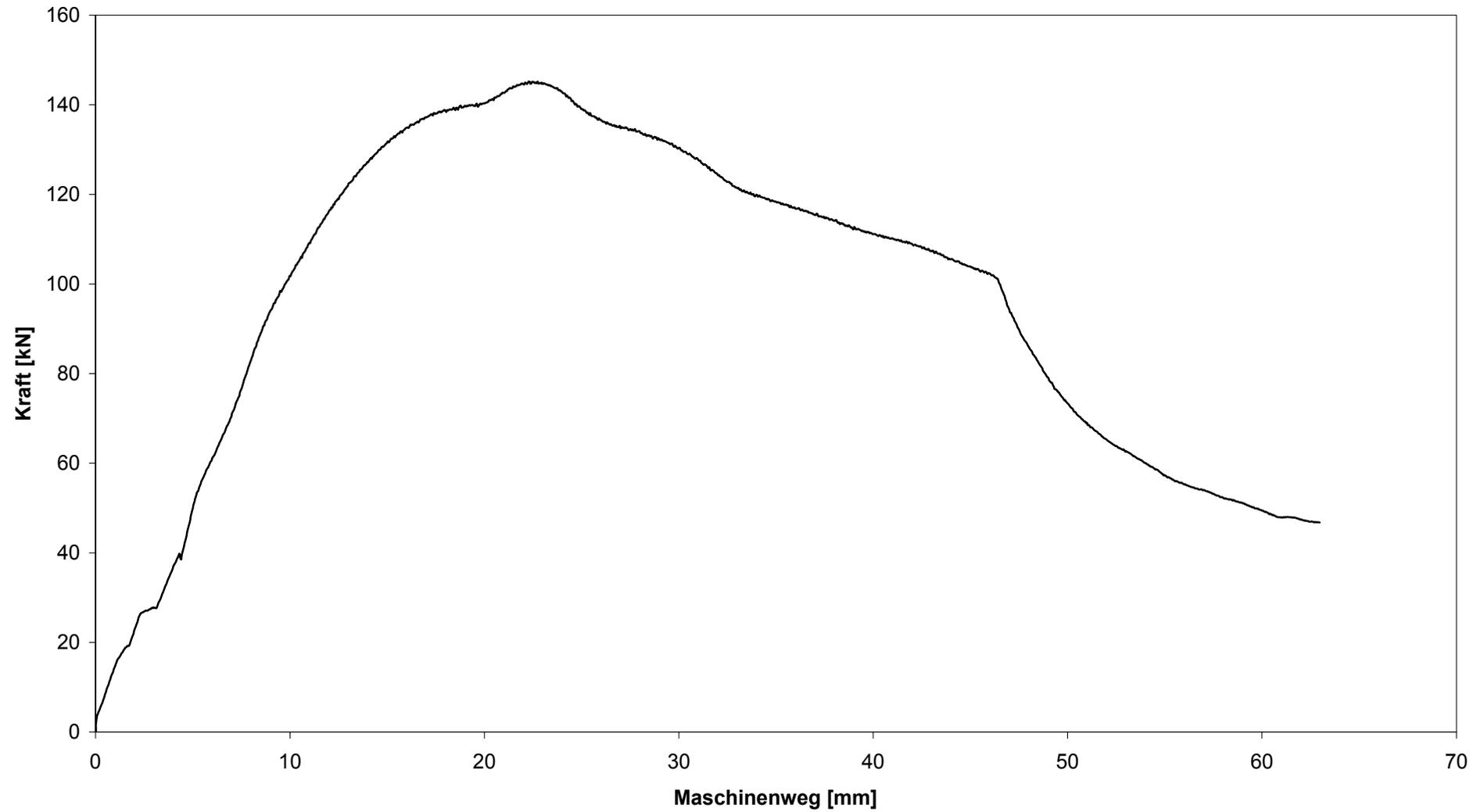
**Versuch 28**



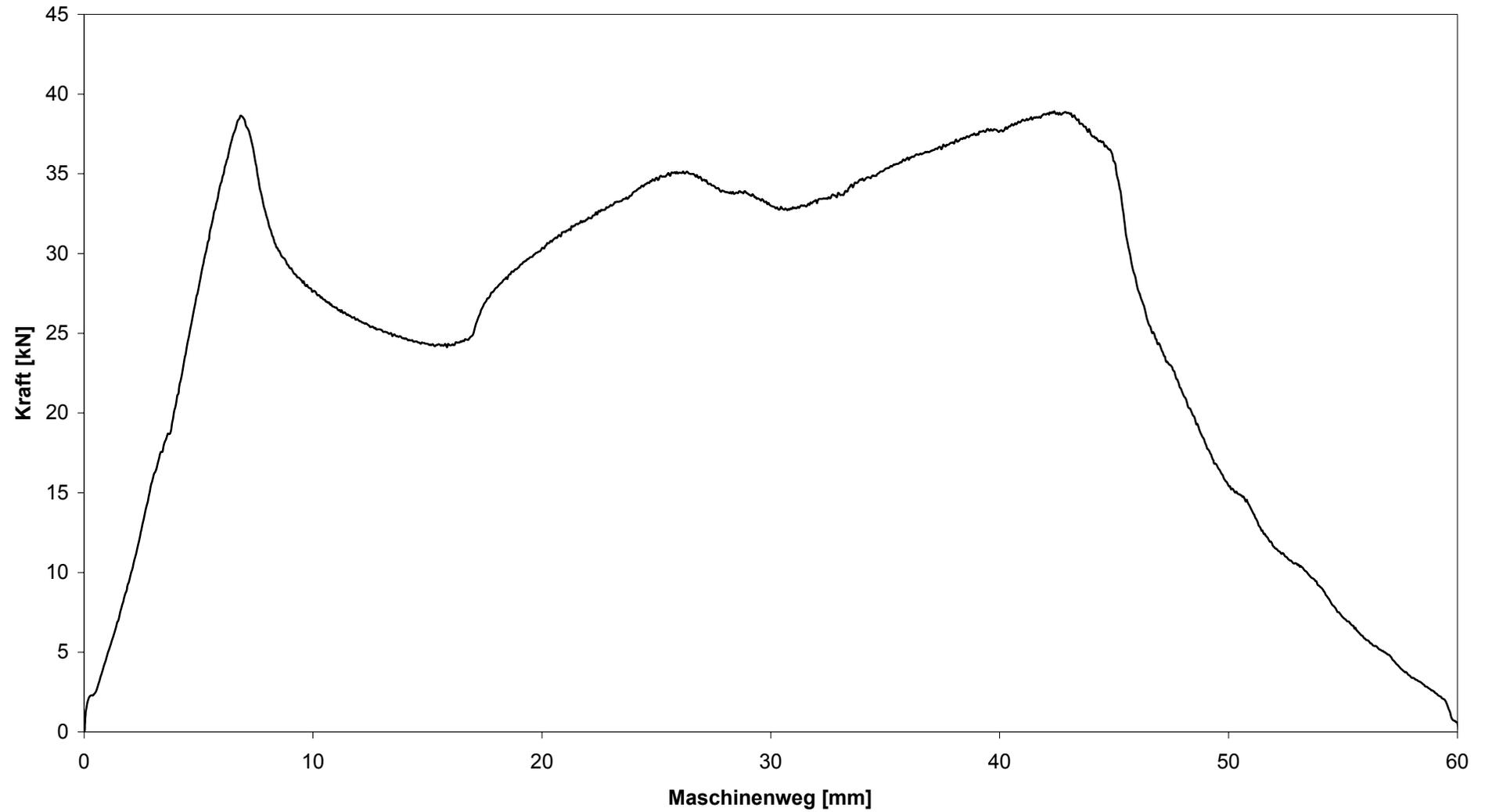
**Versuch 29**



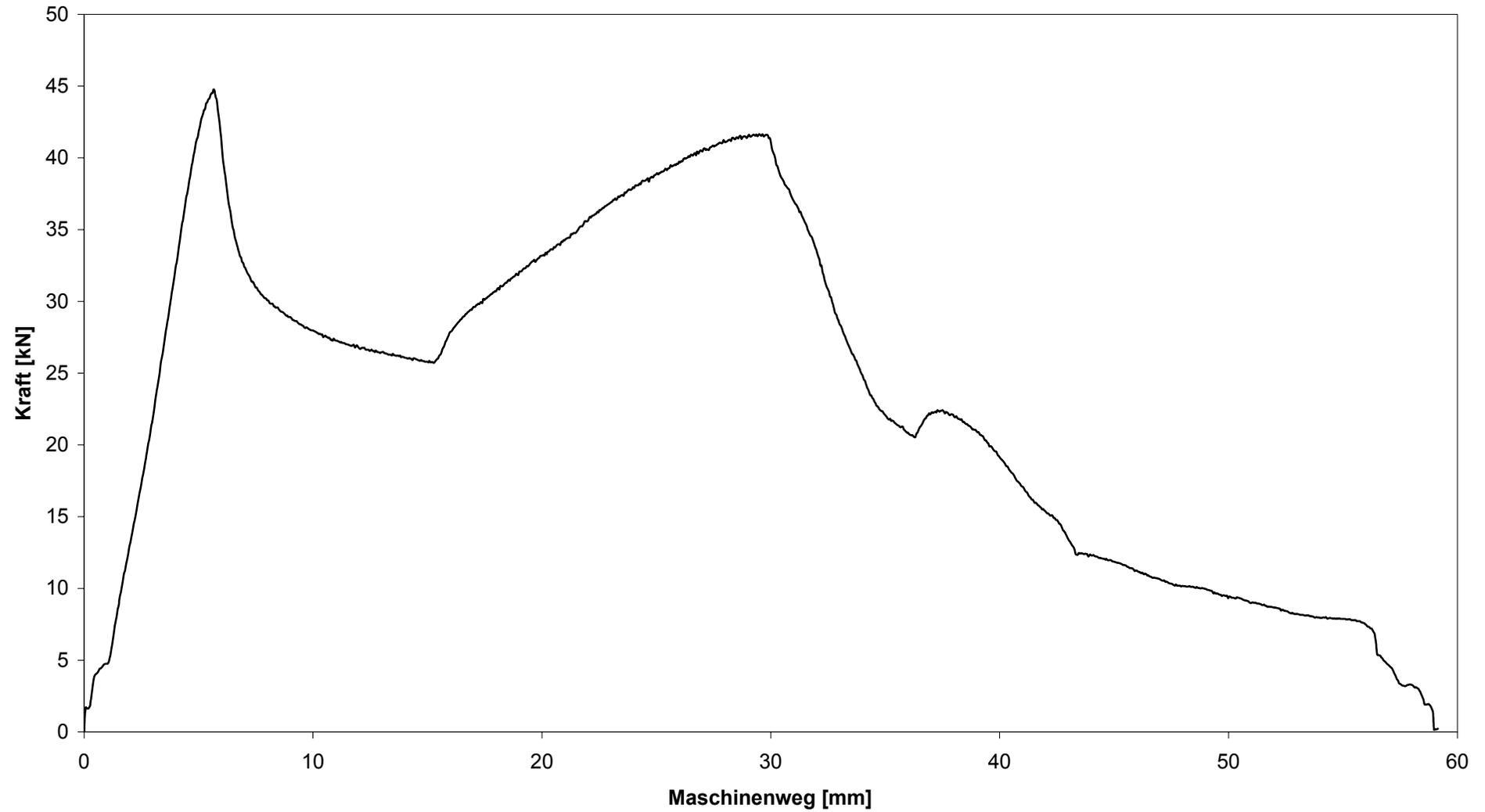
**Versuch 30**



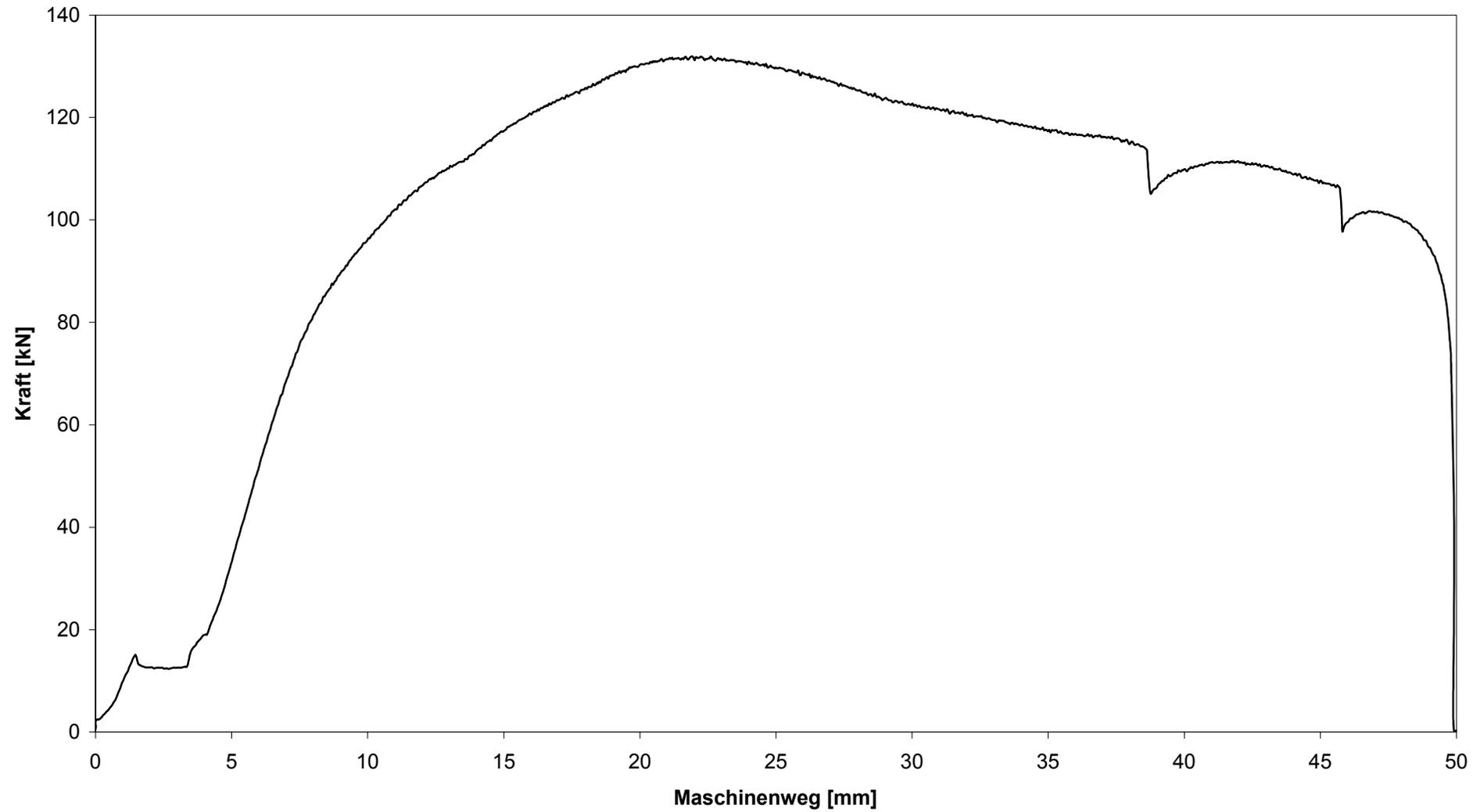
**Versuch 31**



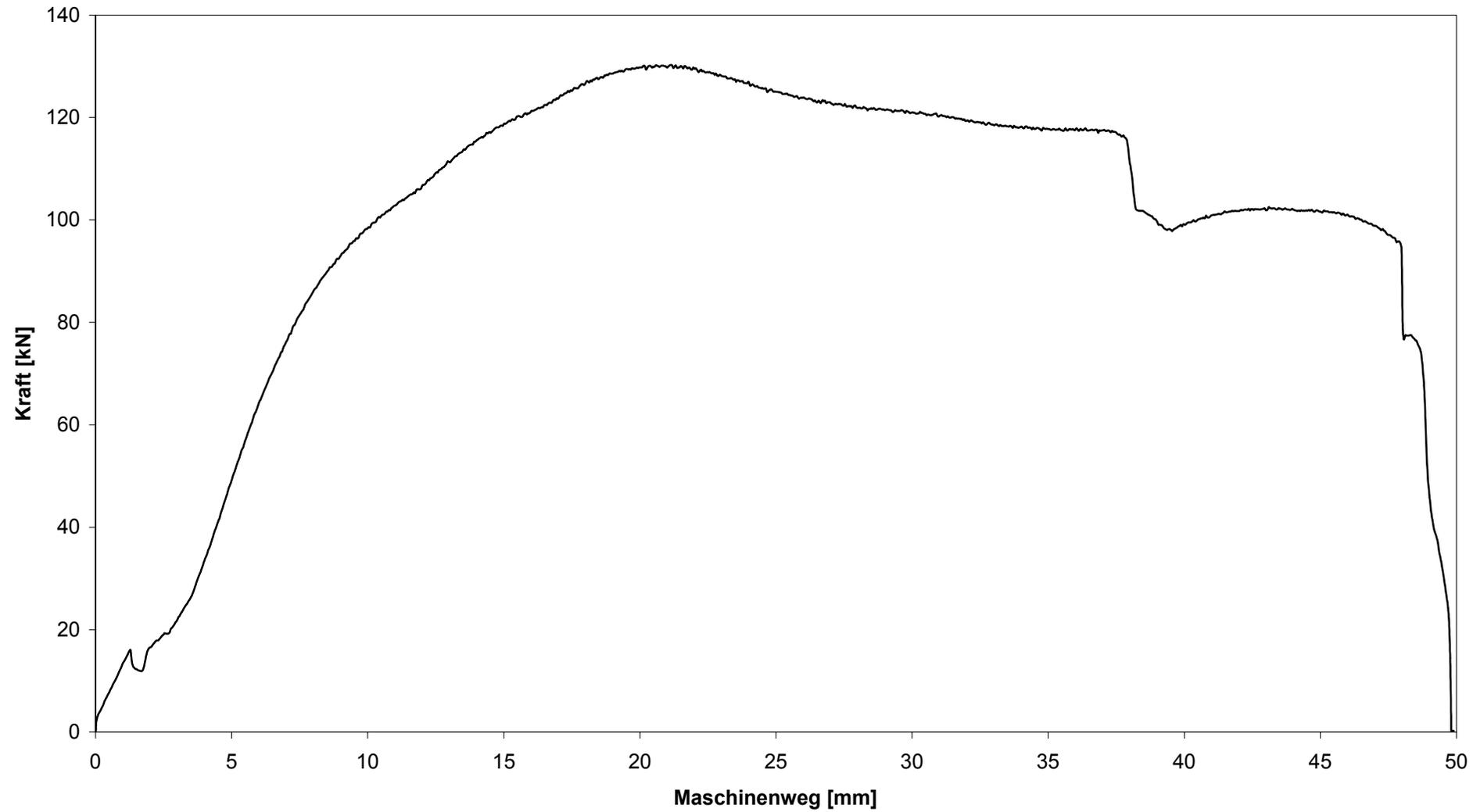
**Versuch 32**



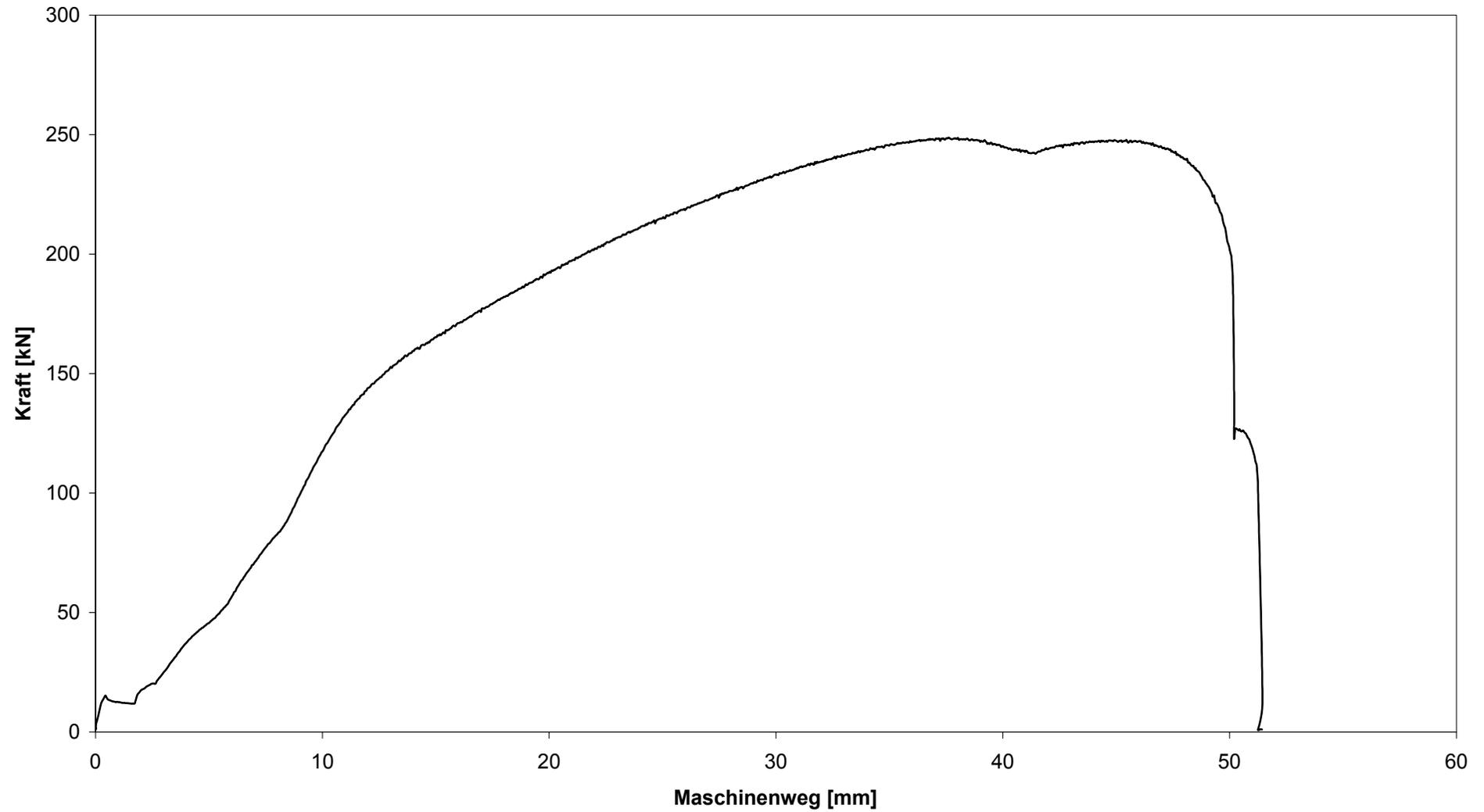
**Versuch 33**



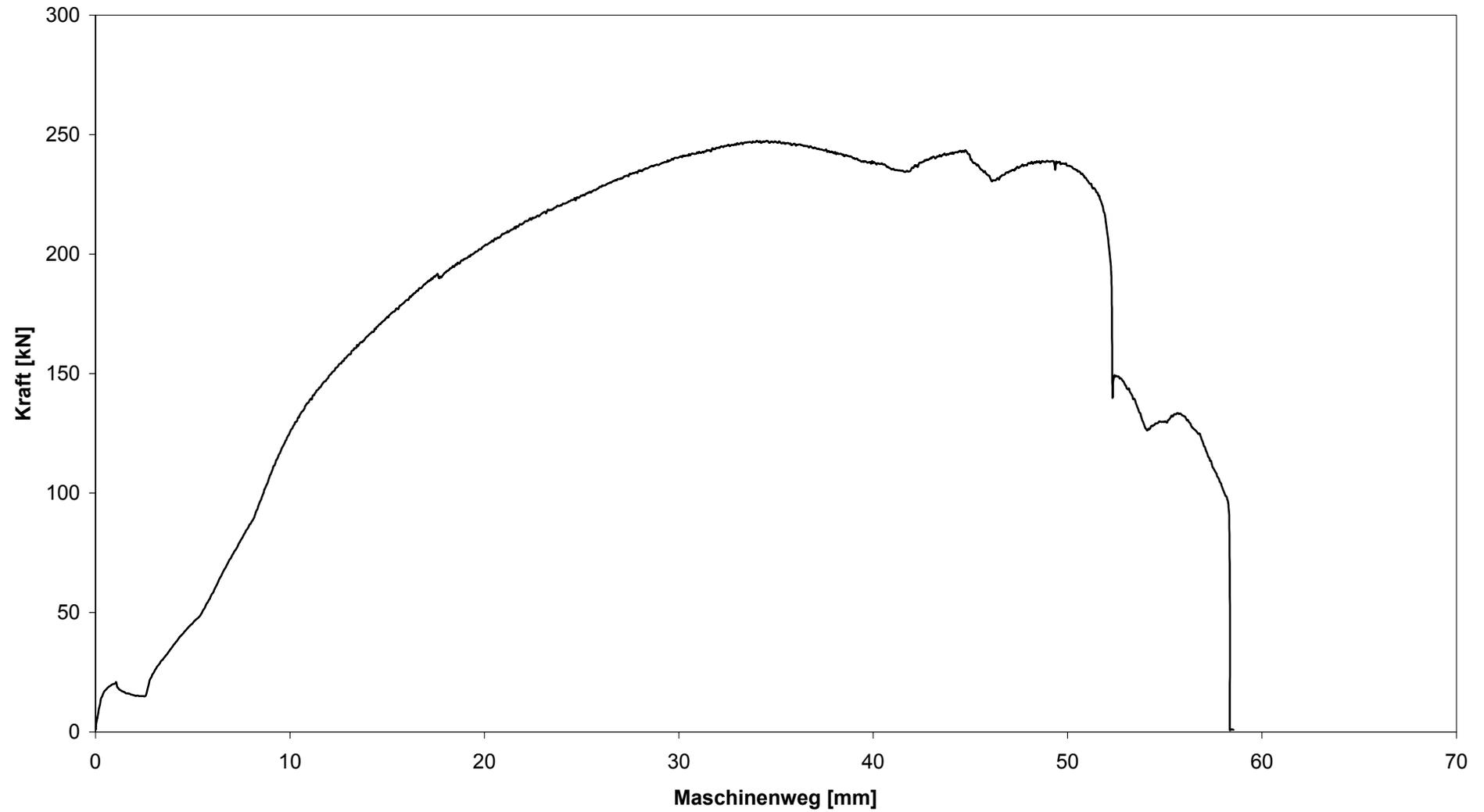
**Versuch 34**



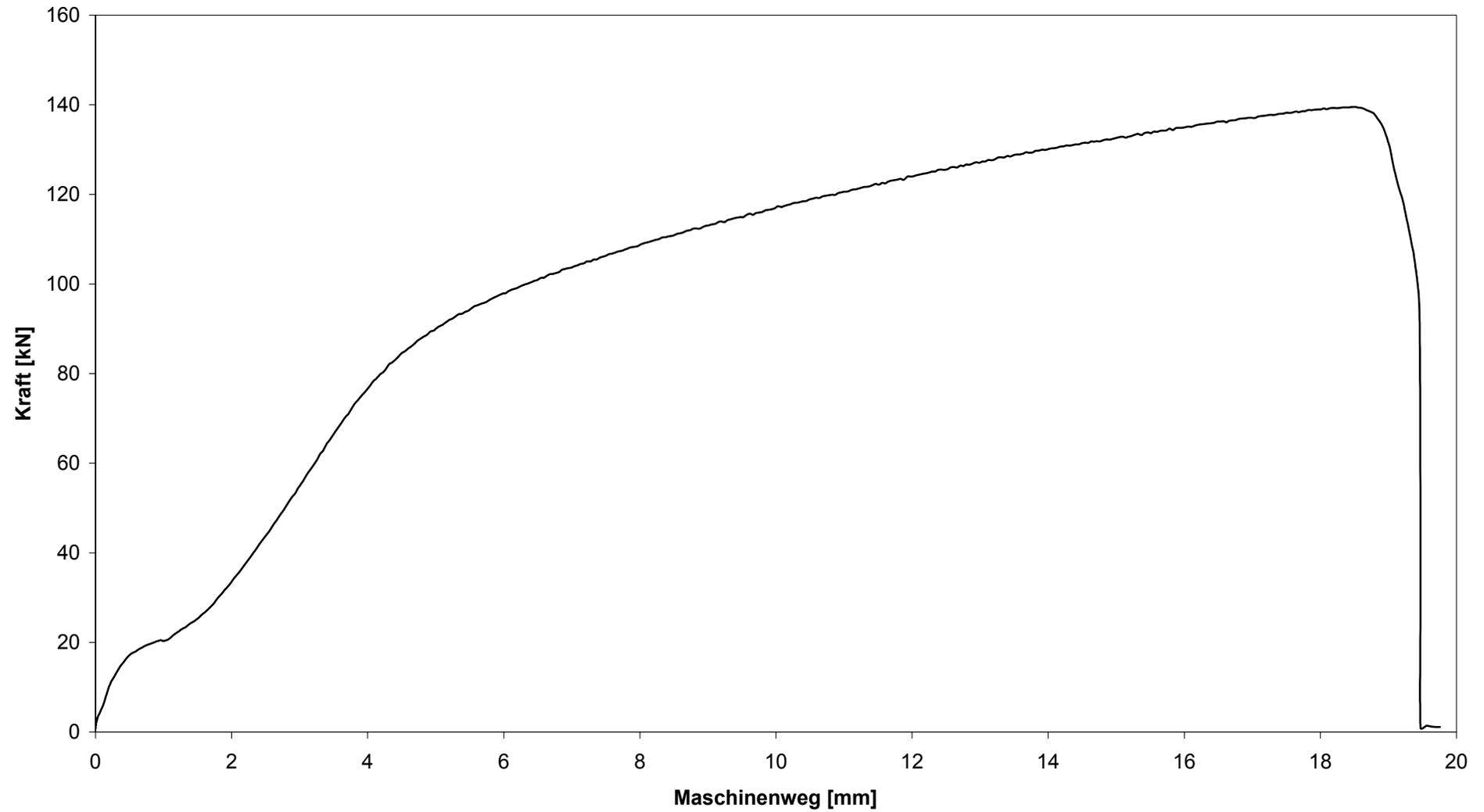
**Versuch 35**



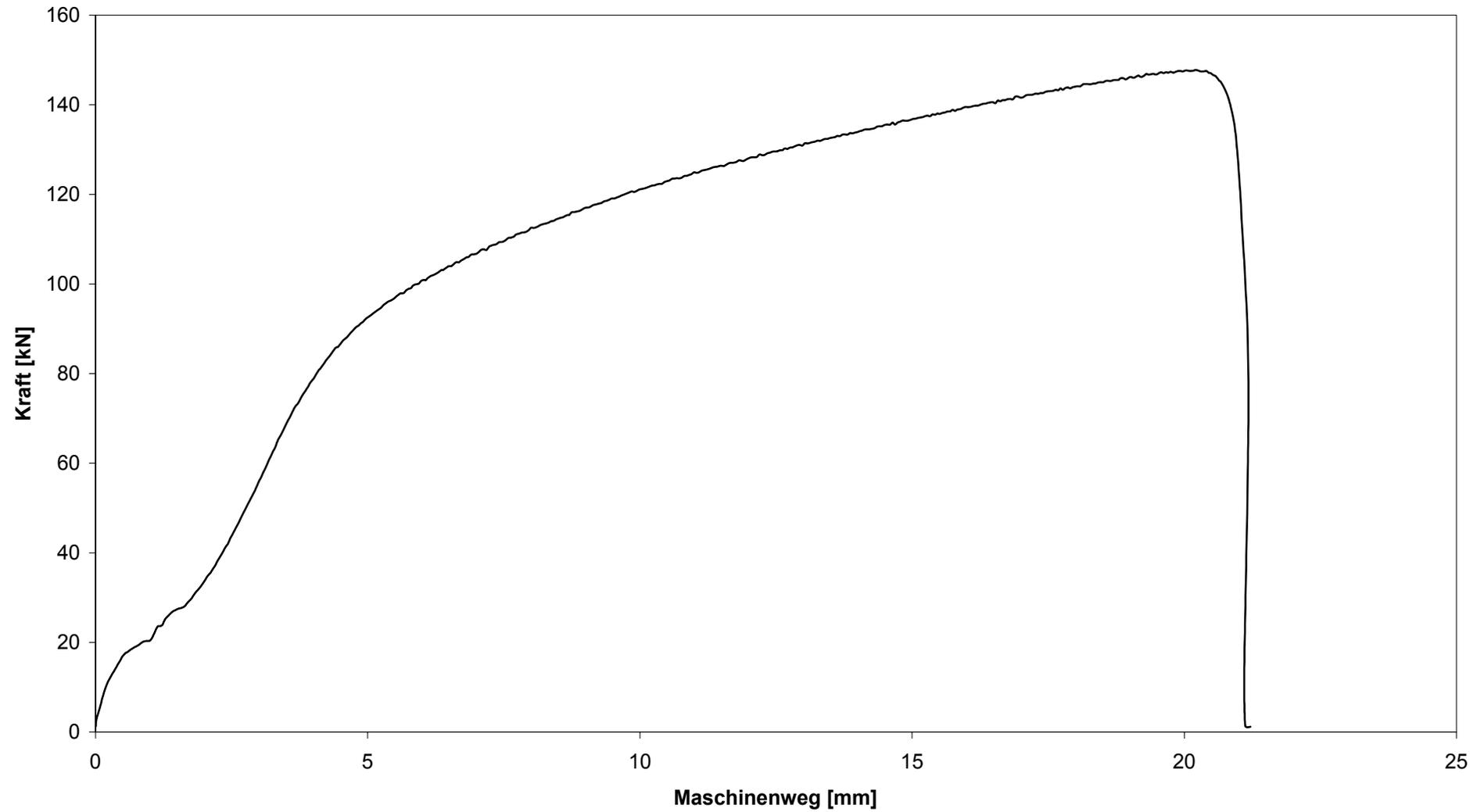
**Versuch 36**



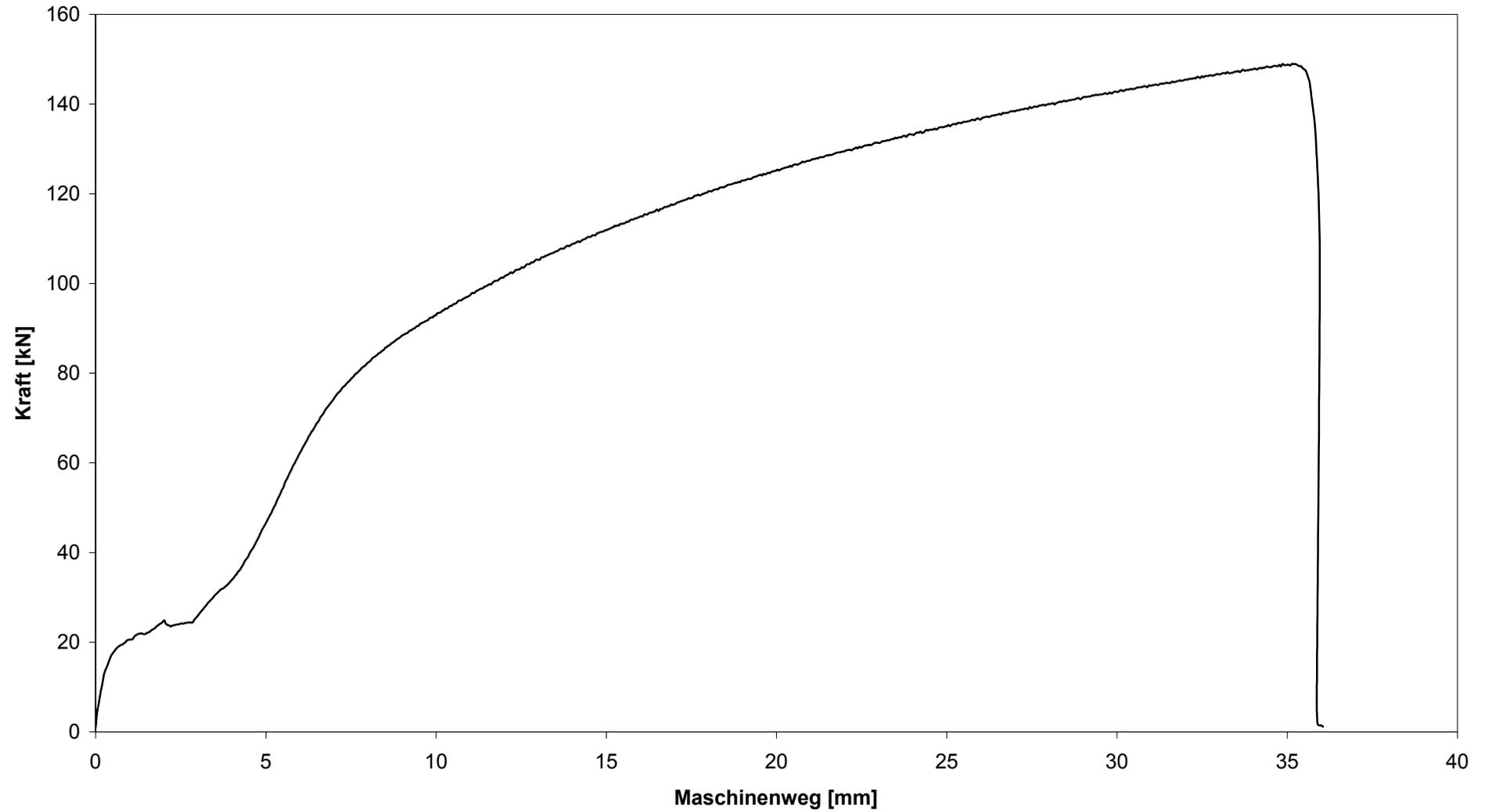
**Versuch 37**



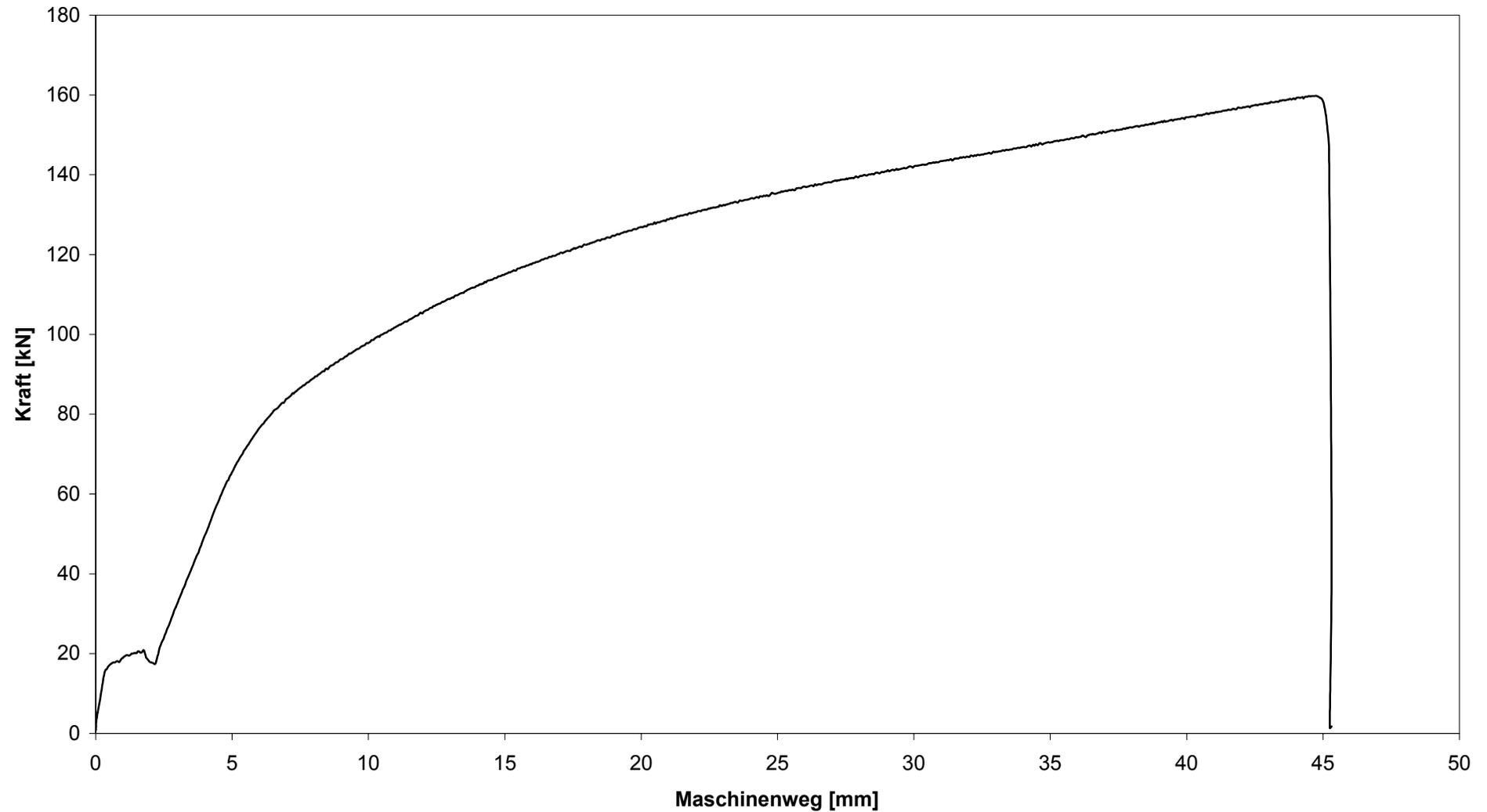
**Versuch 38**



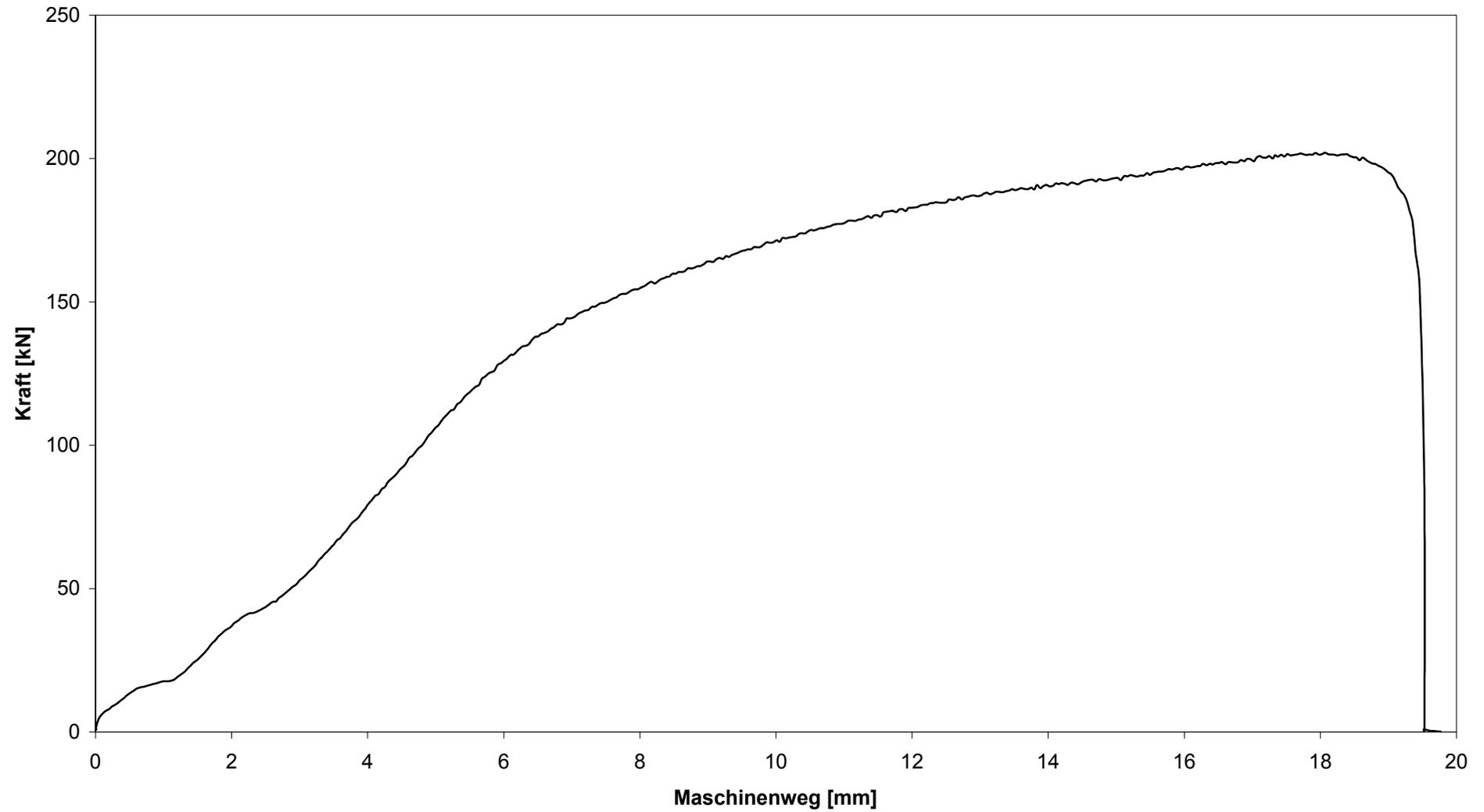
**Versuch 39**



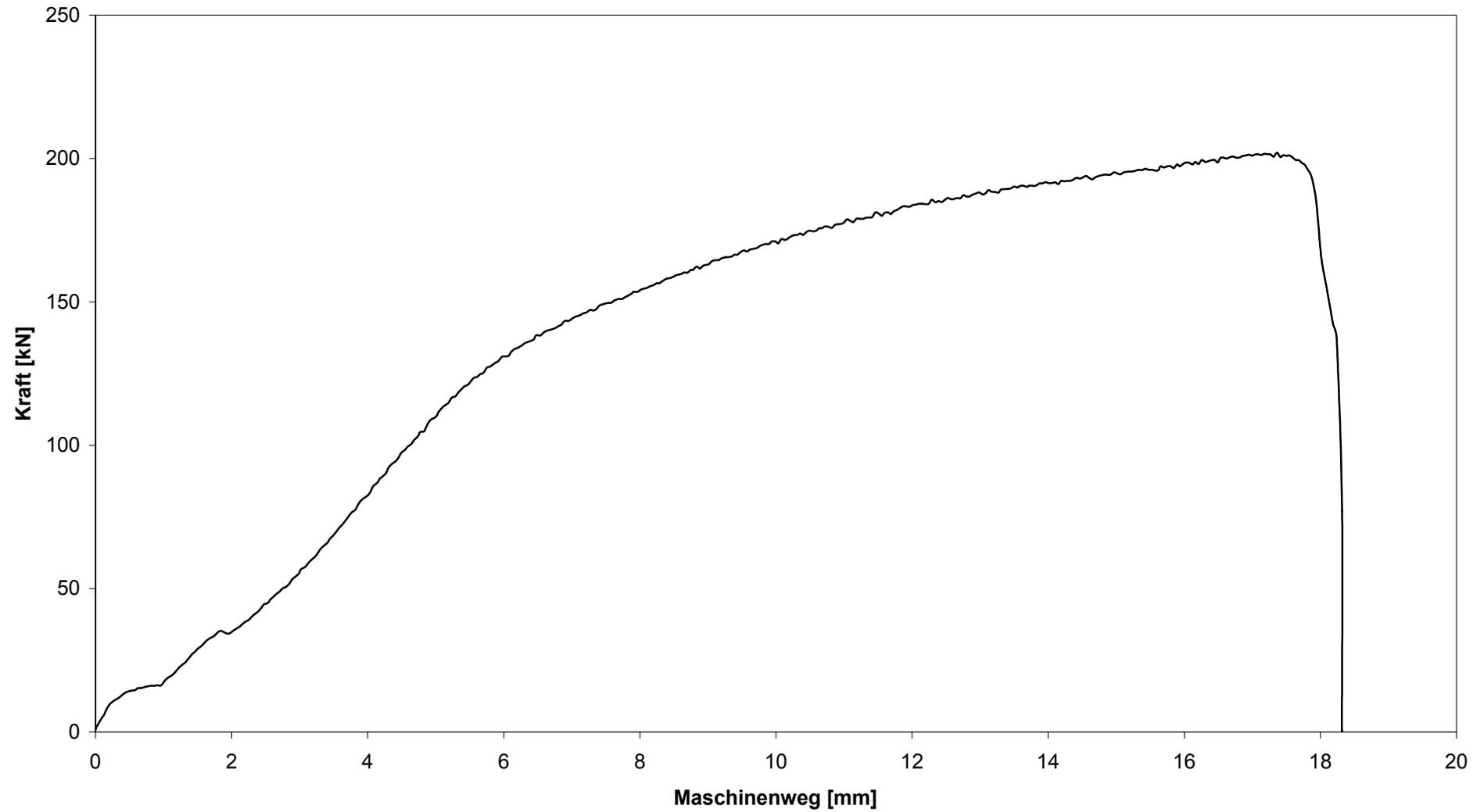
**Versuch 40**



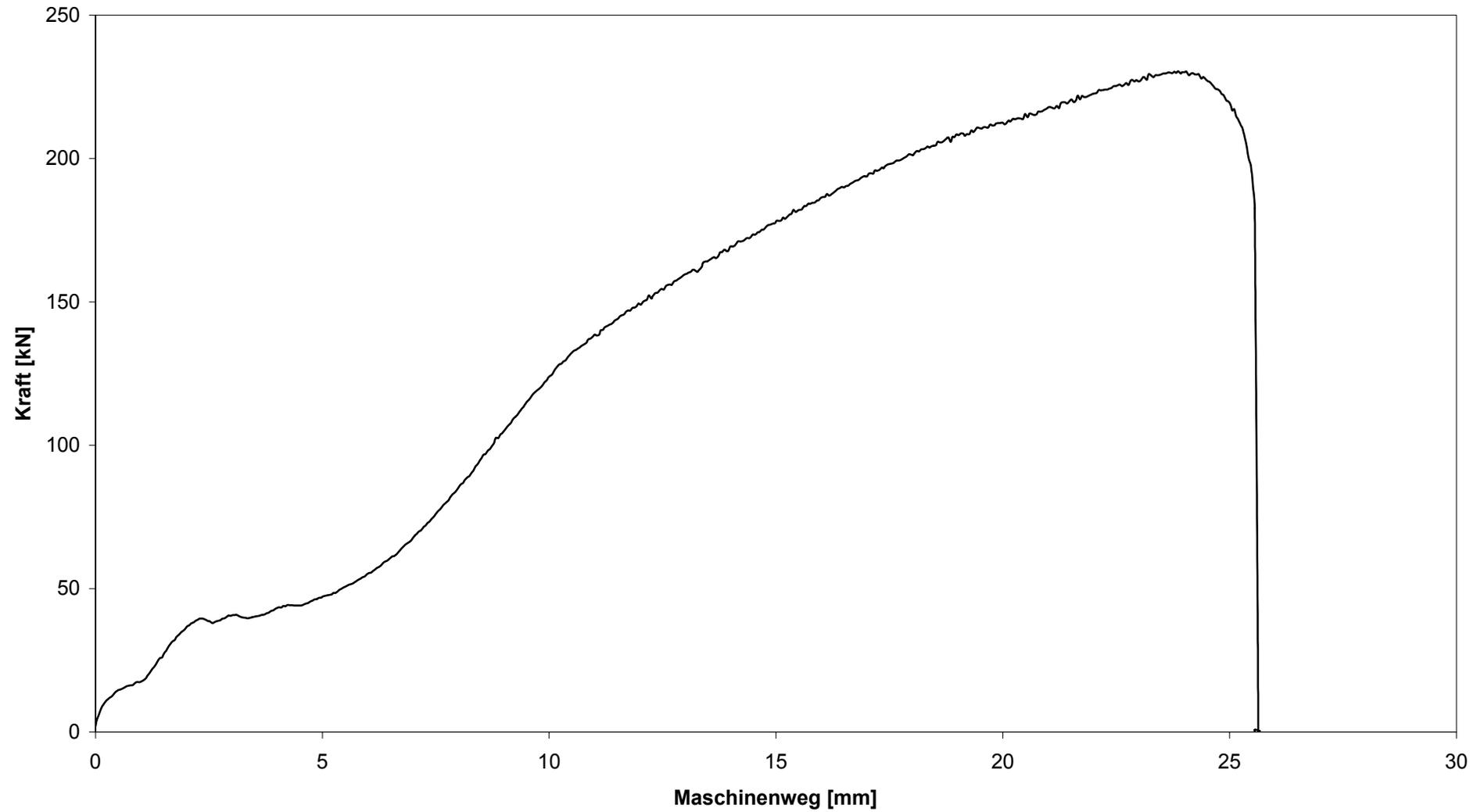
**Versuch 41**



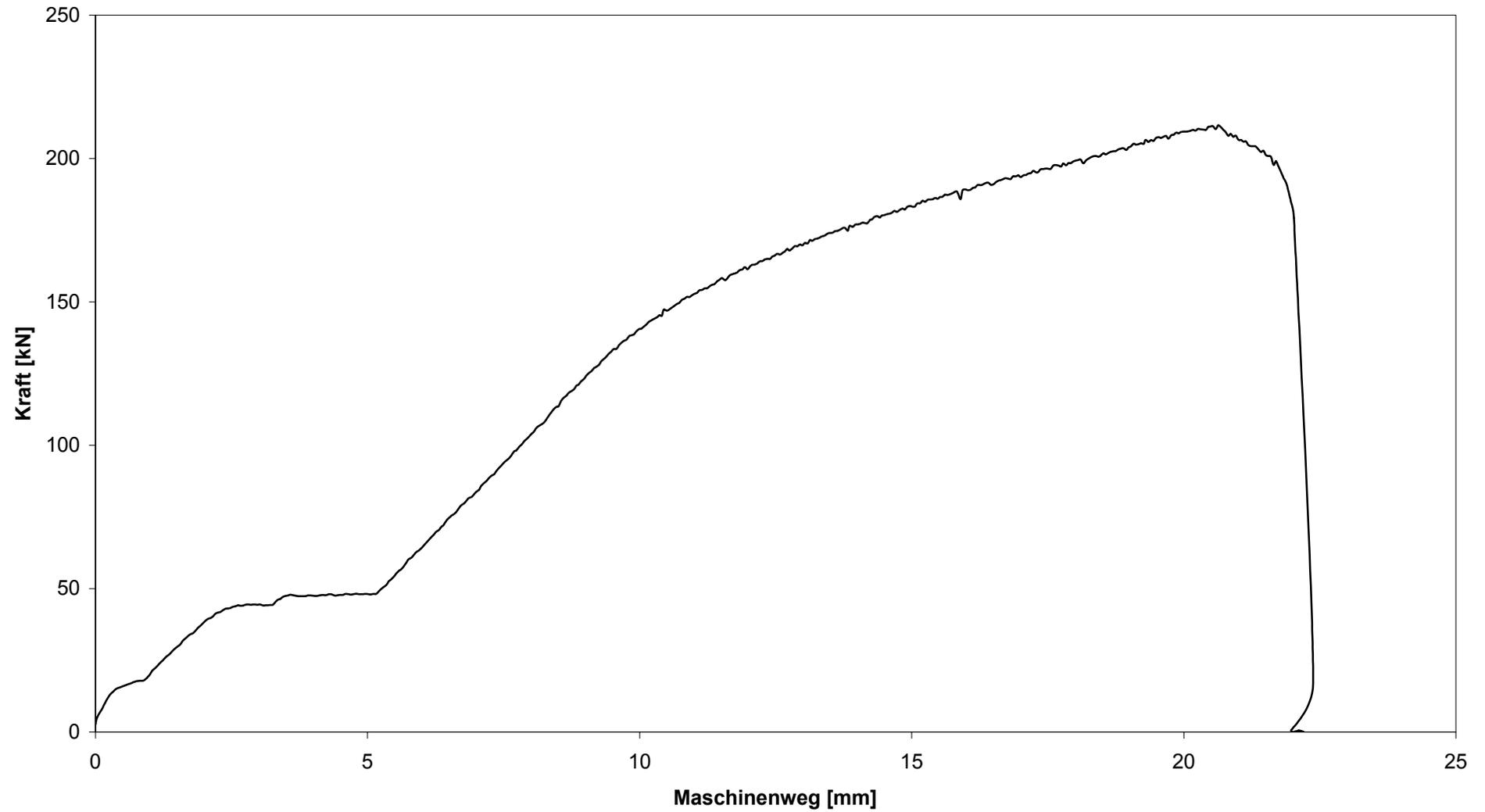
**Versuch 42**



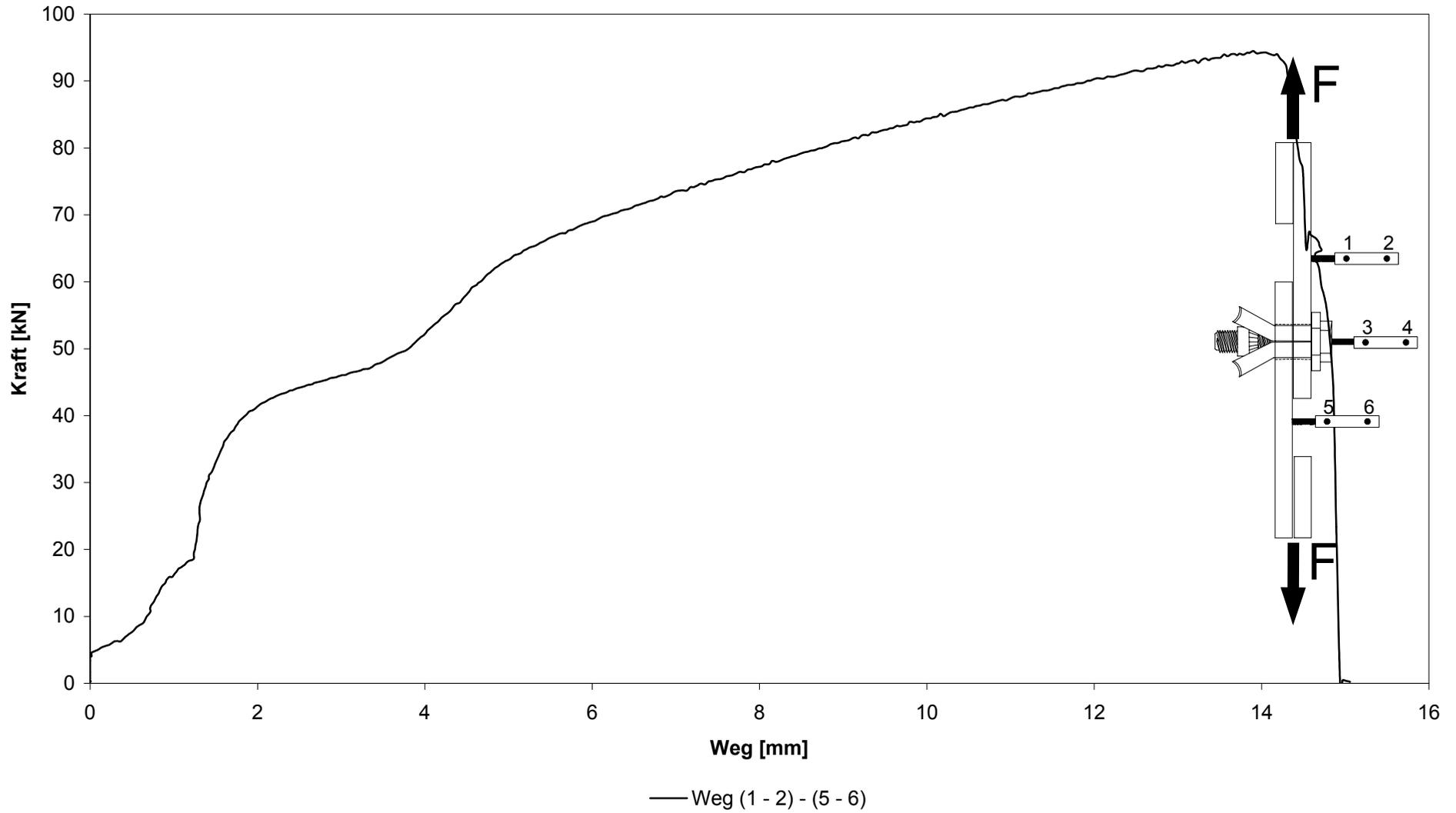
**Versuch 43**



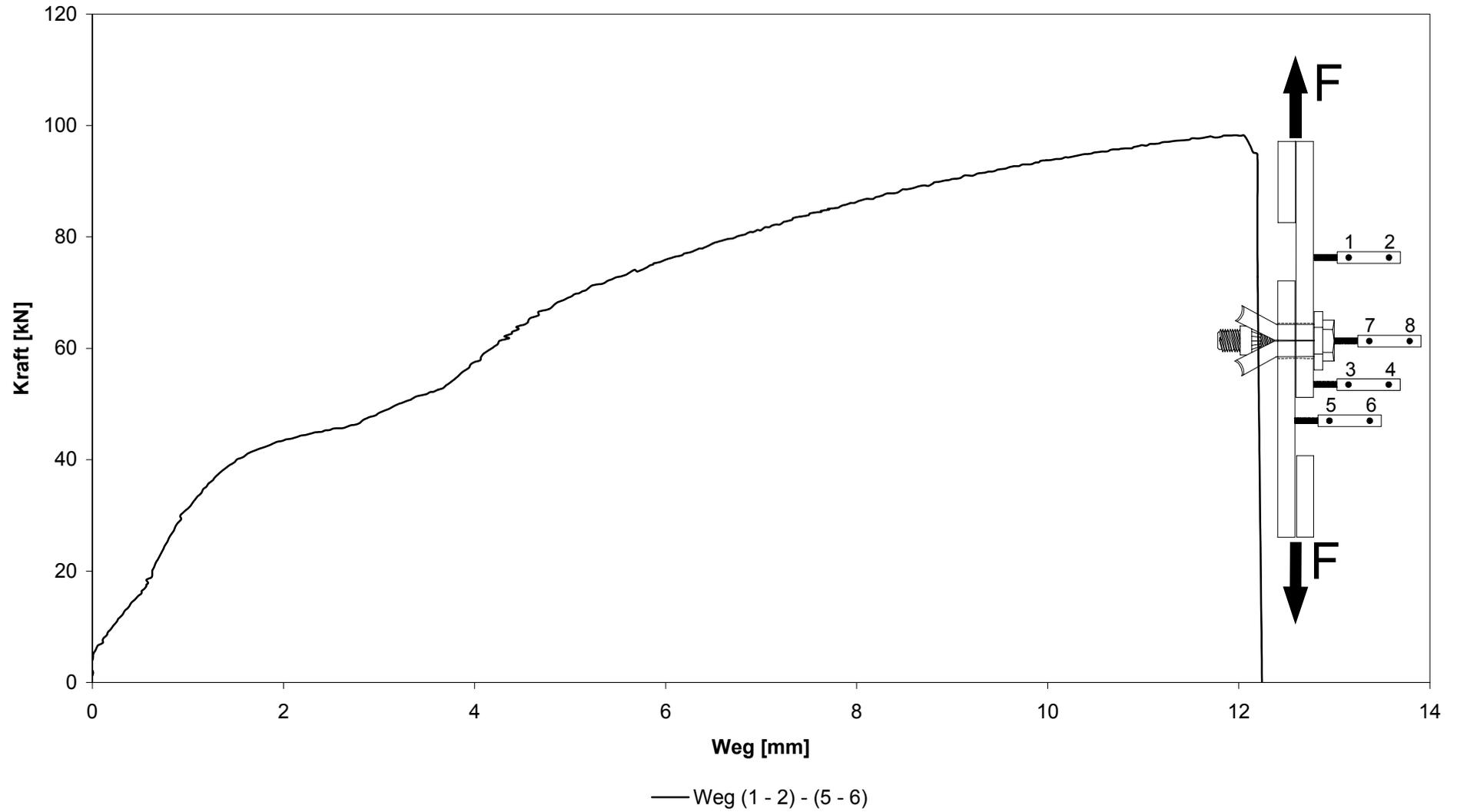
**Versuch 44**



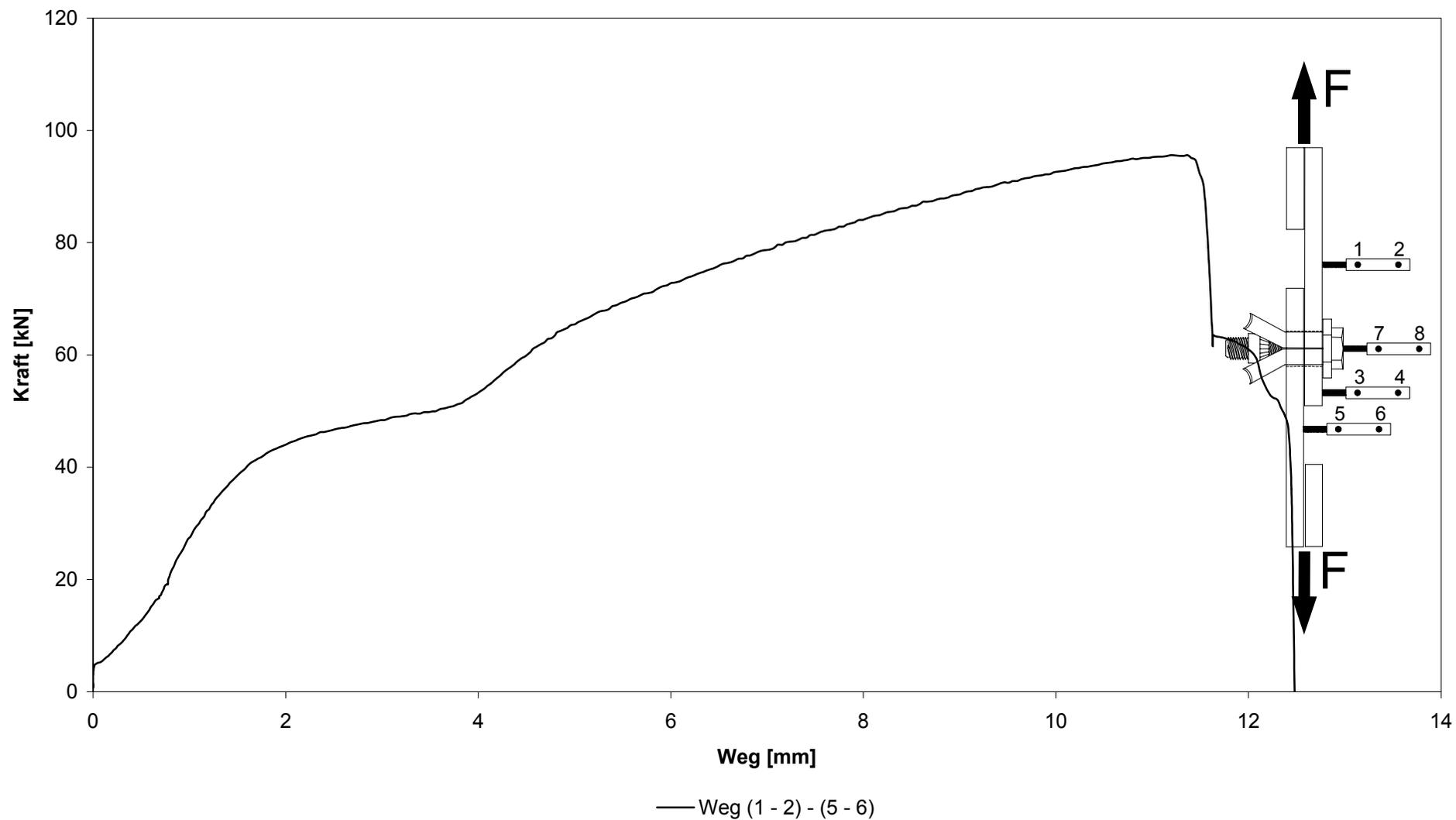
**Versuch 1**



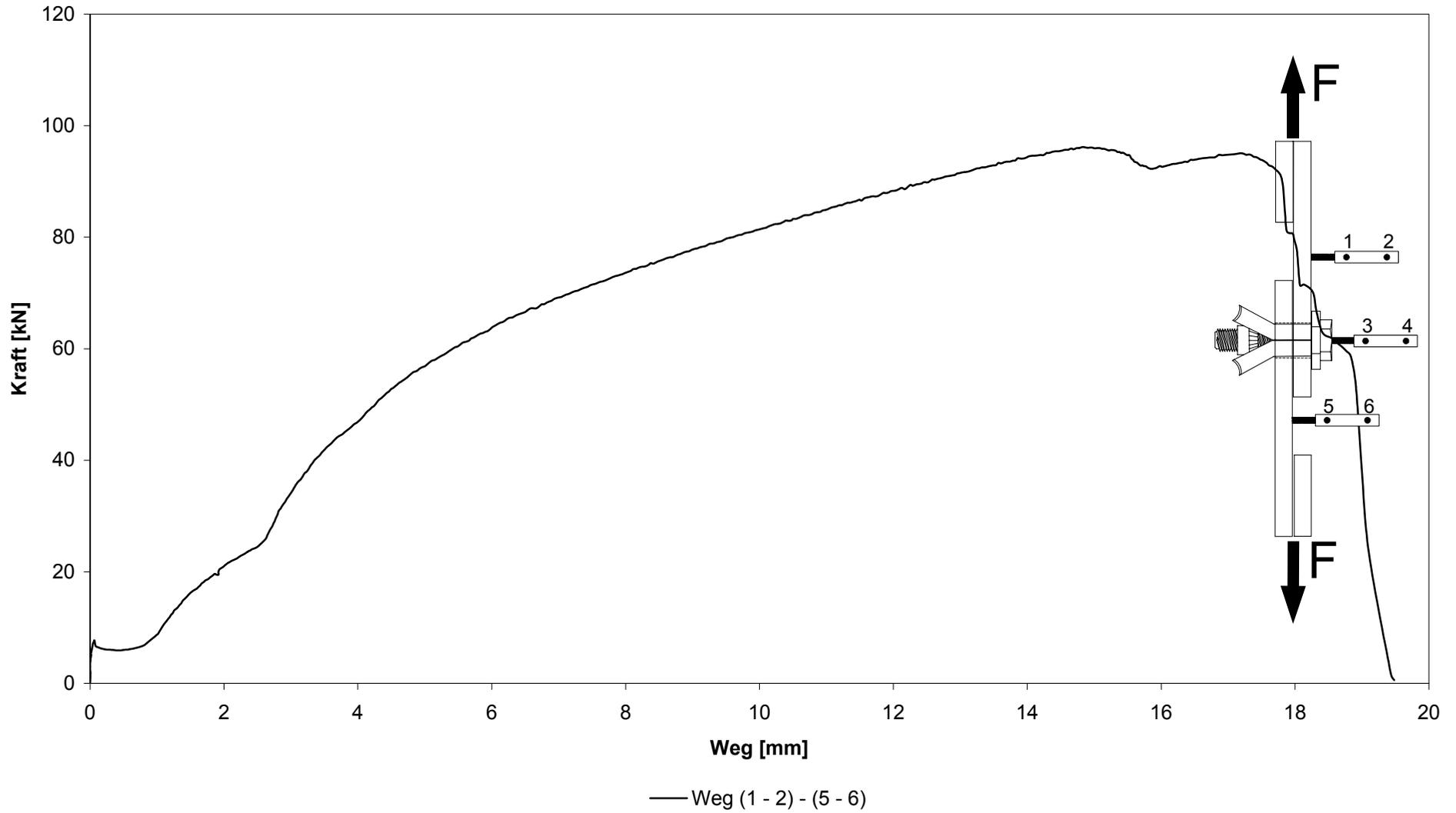
**Versuch 2**



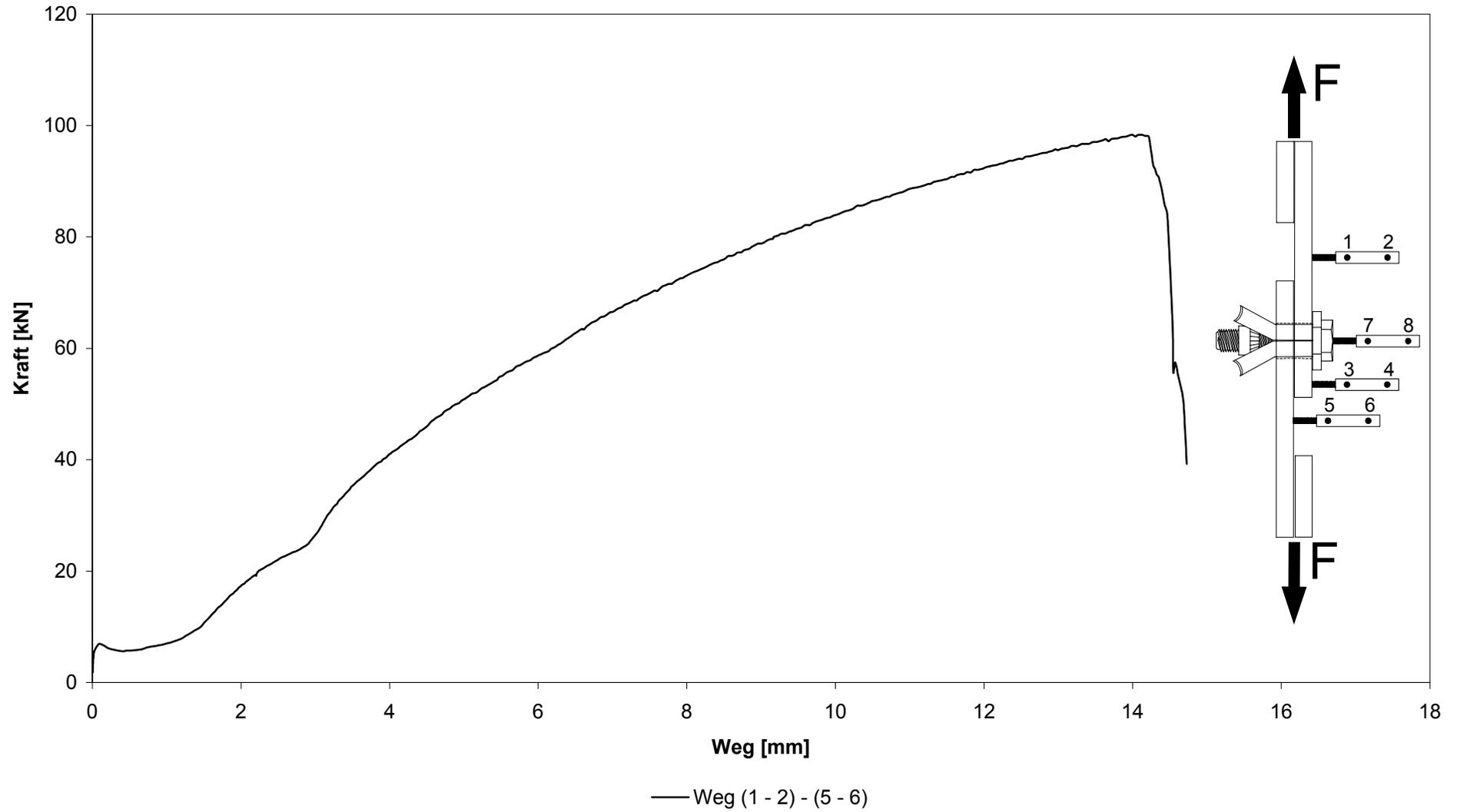
### Versuch 3



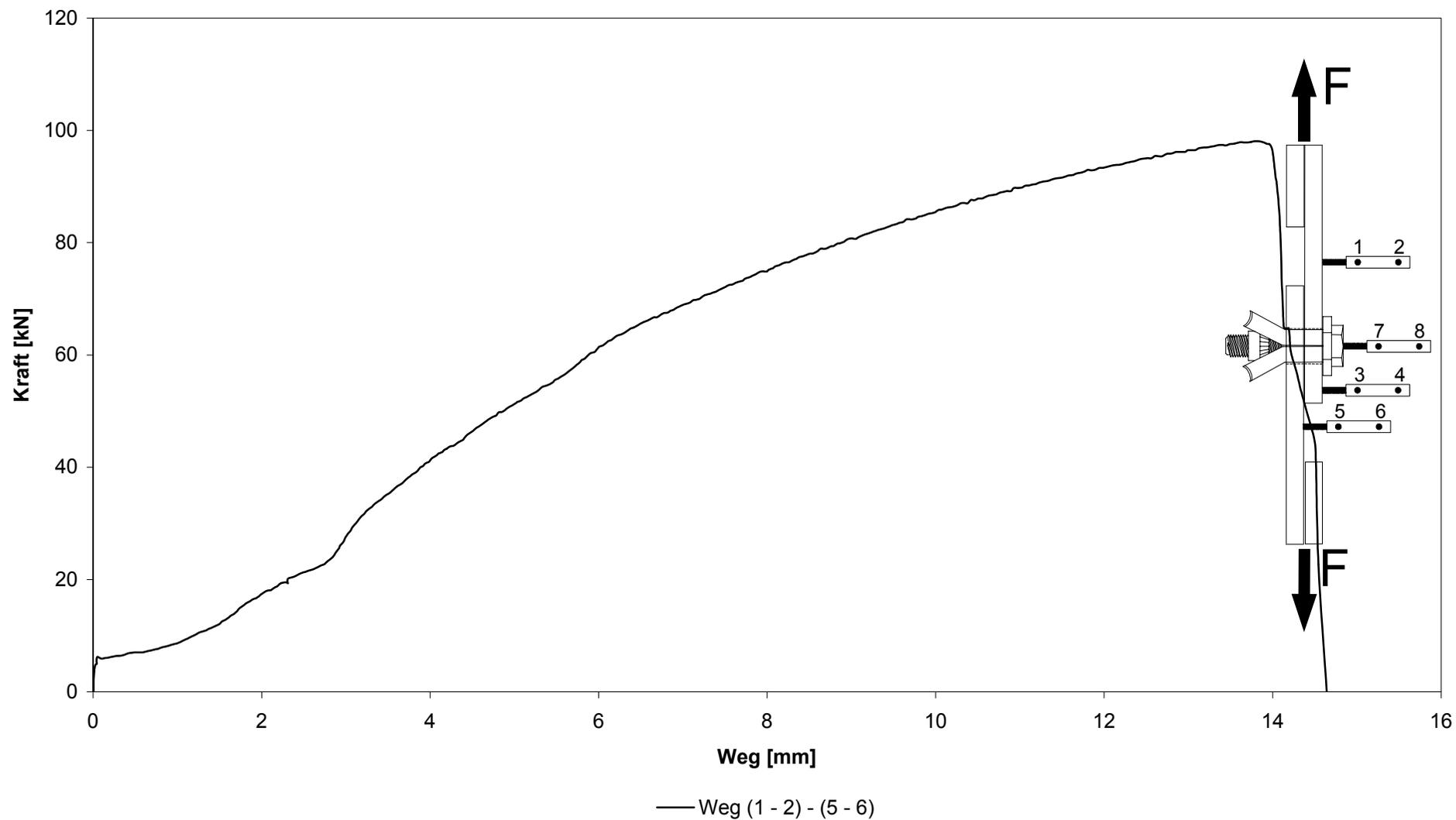
**Versuch 4**



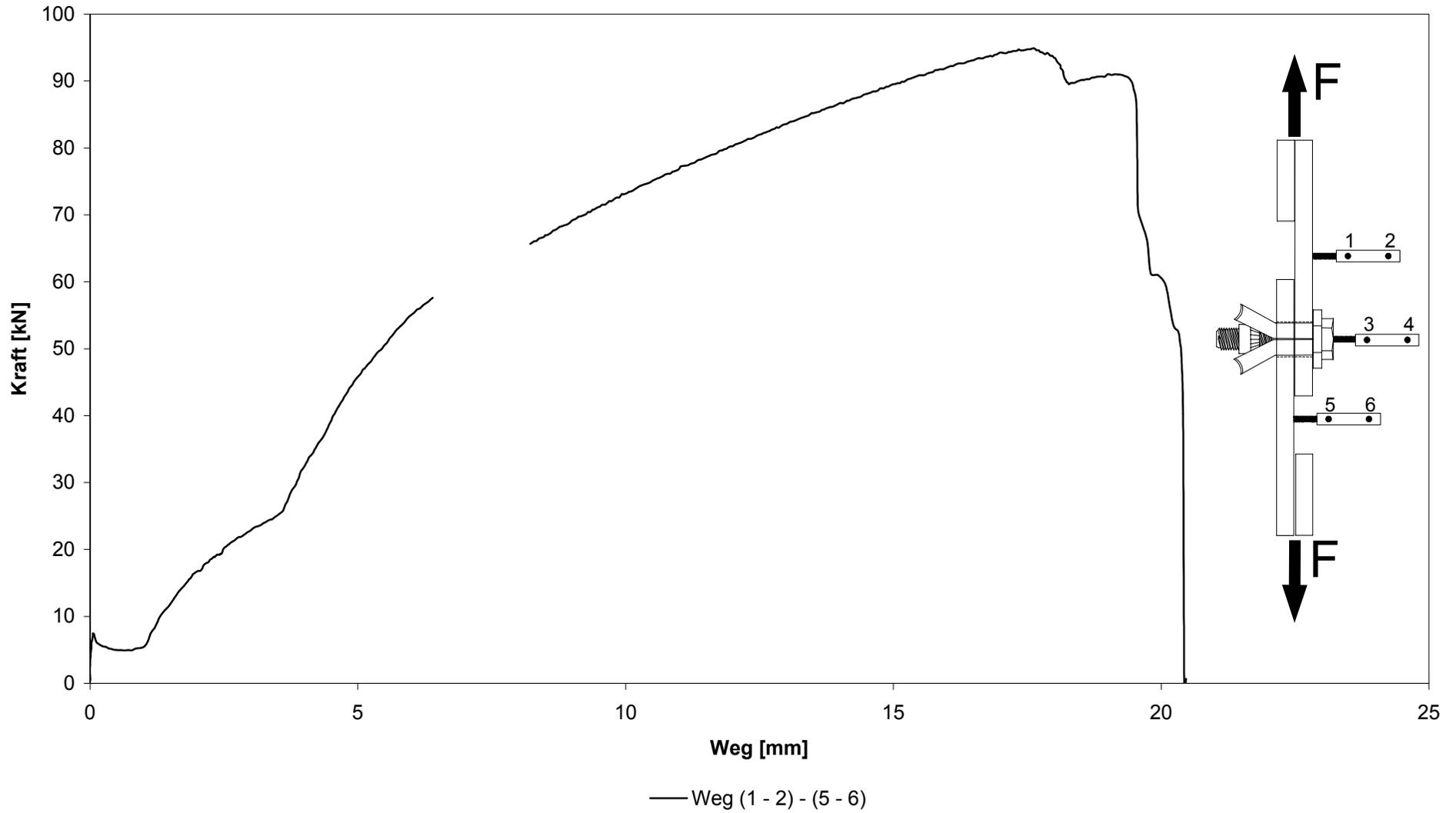
**Versuch 5**



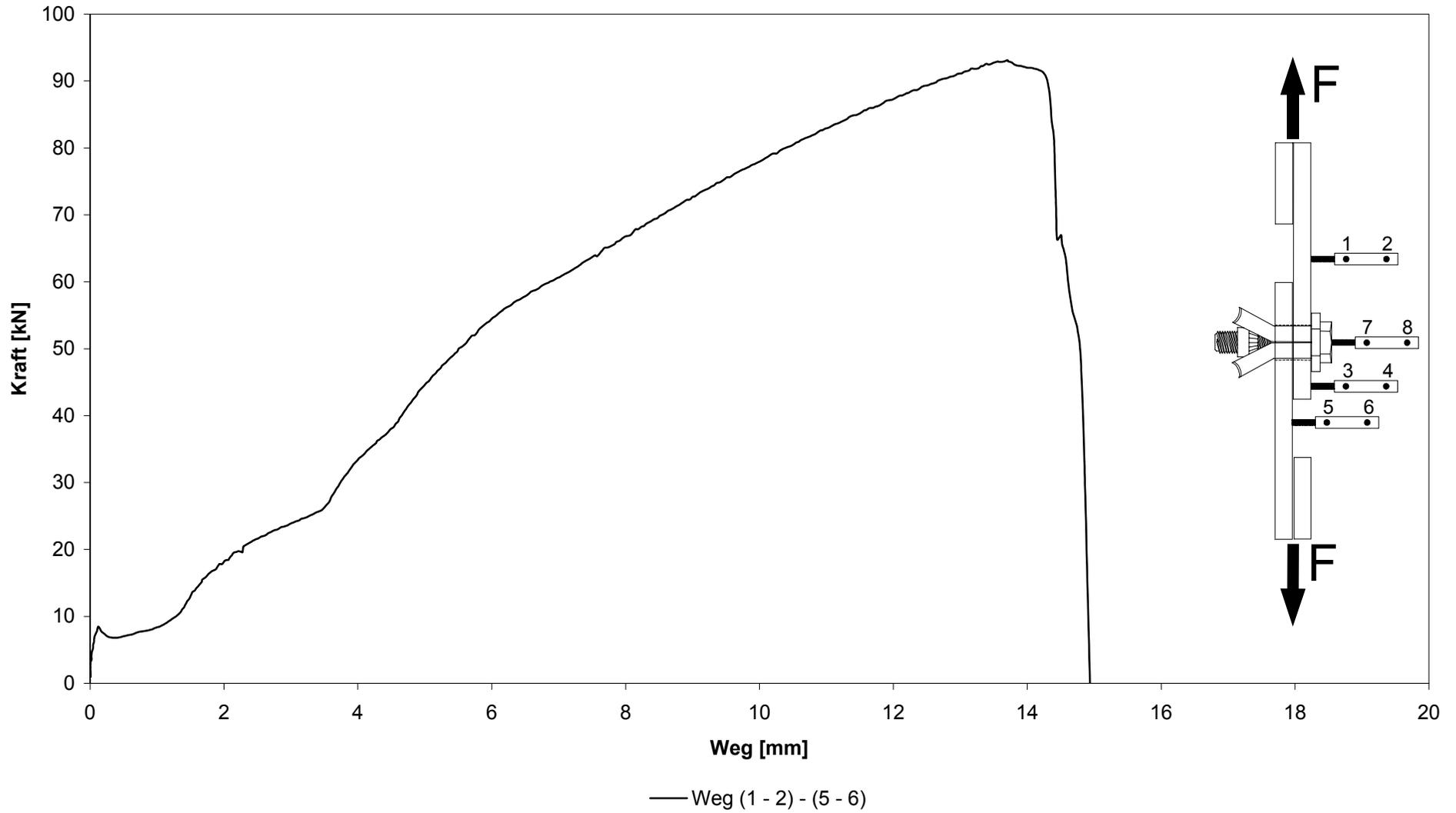
### Versuch 6



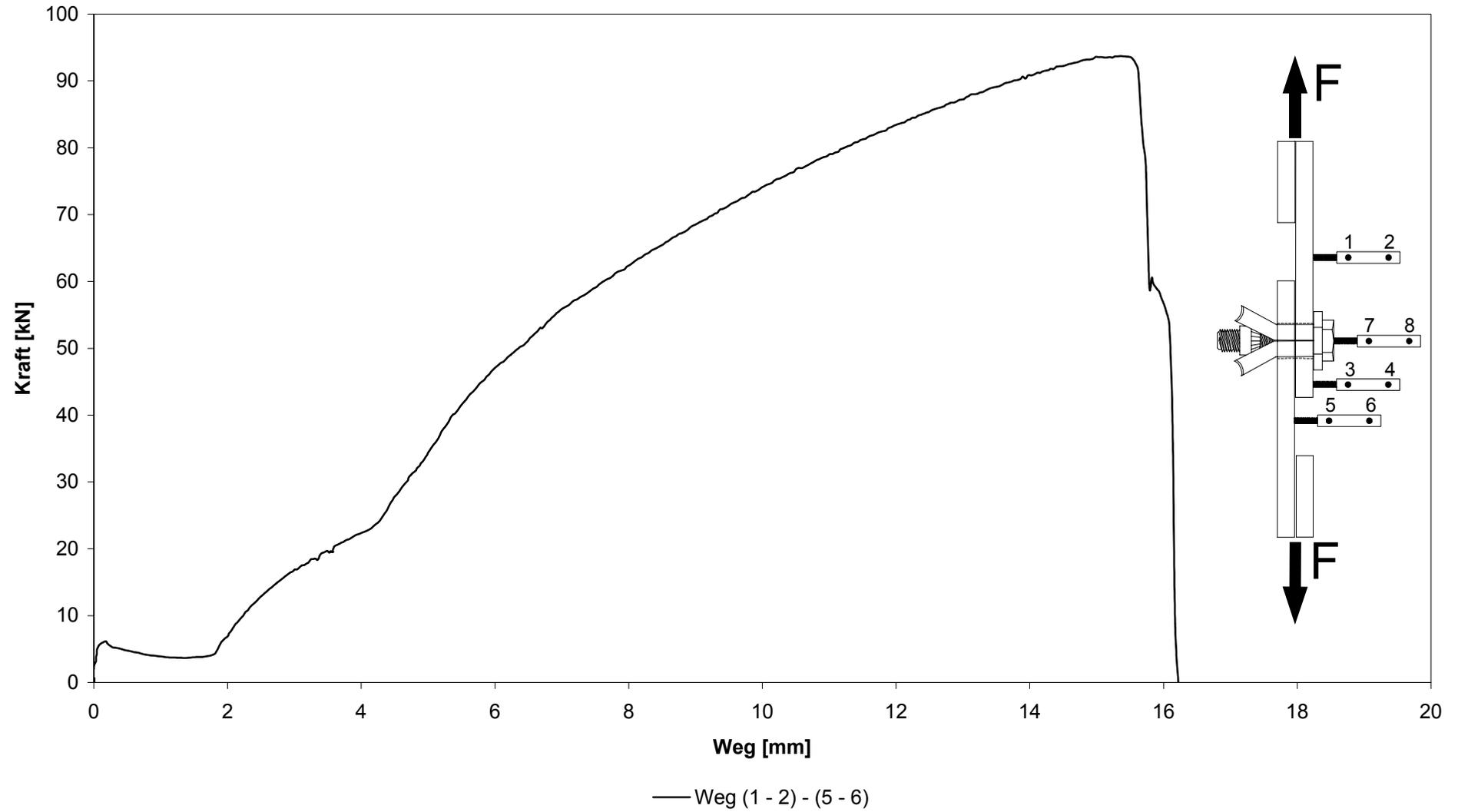
### Versuch 7



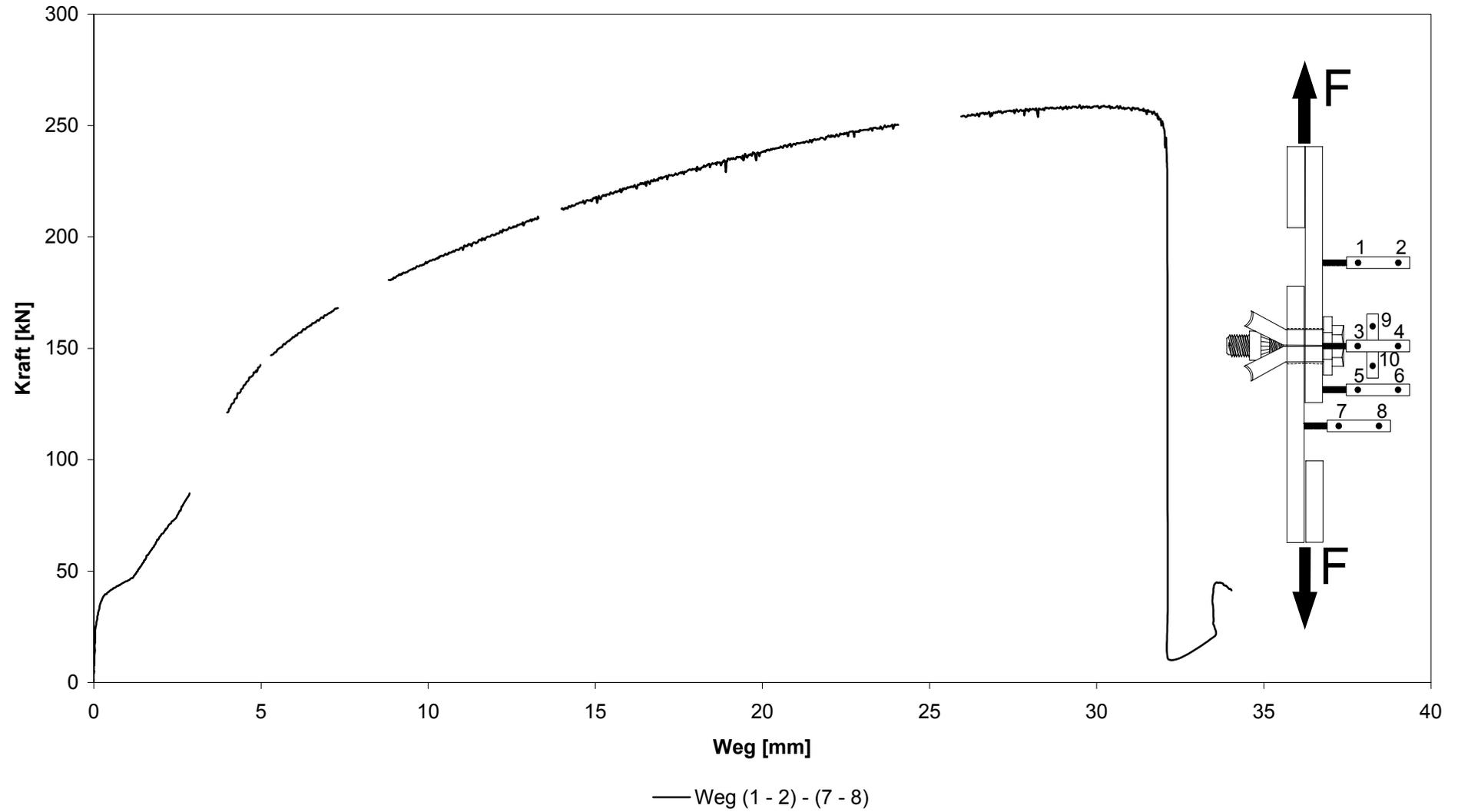
**Versuch 8**



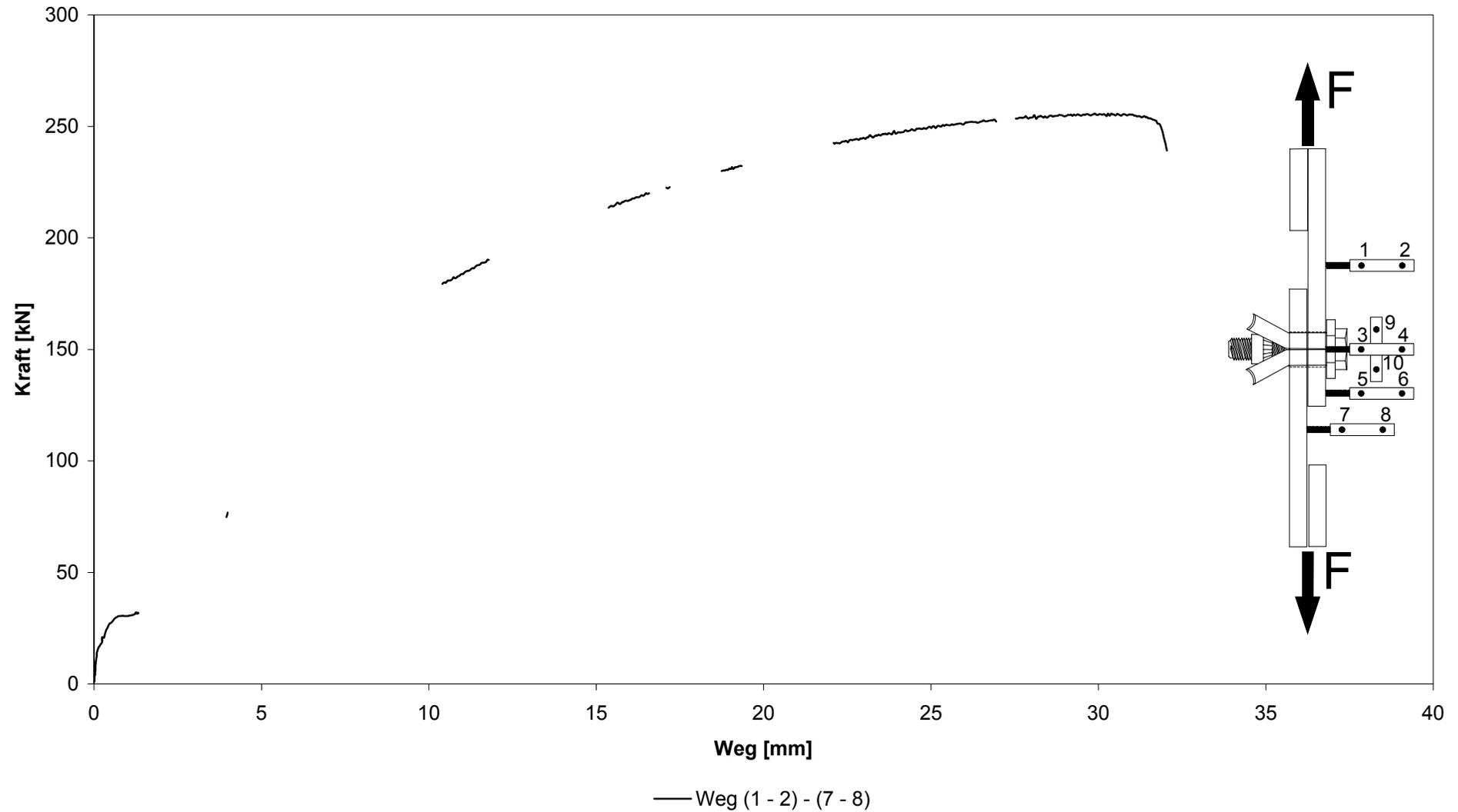
### Versuch 9



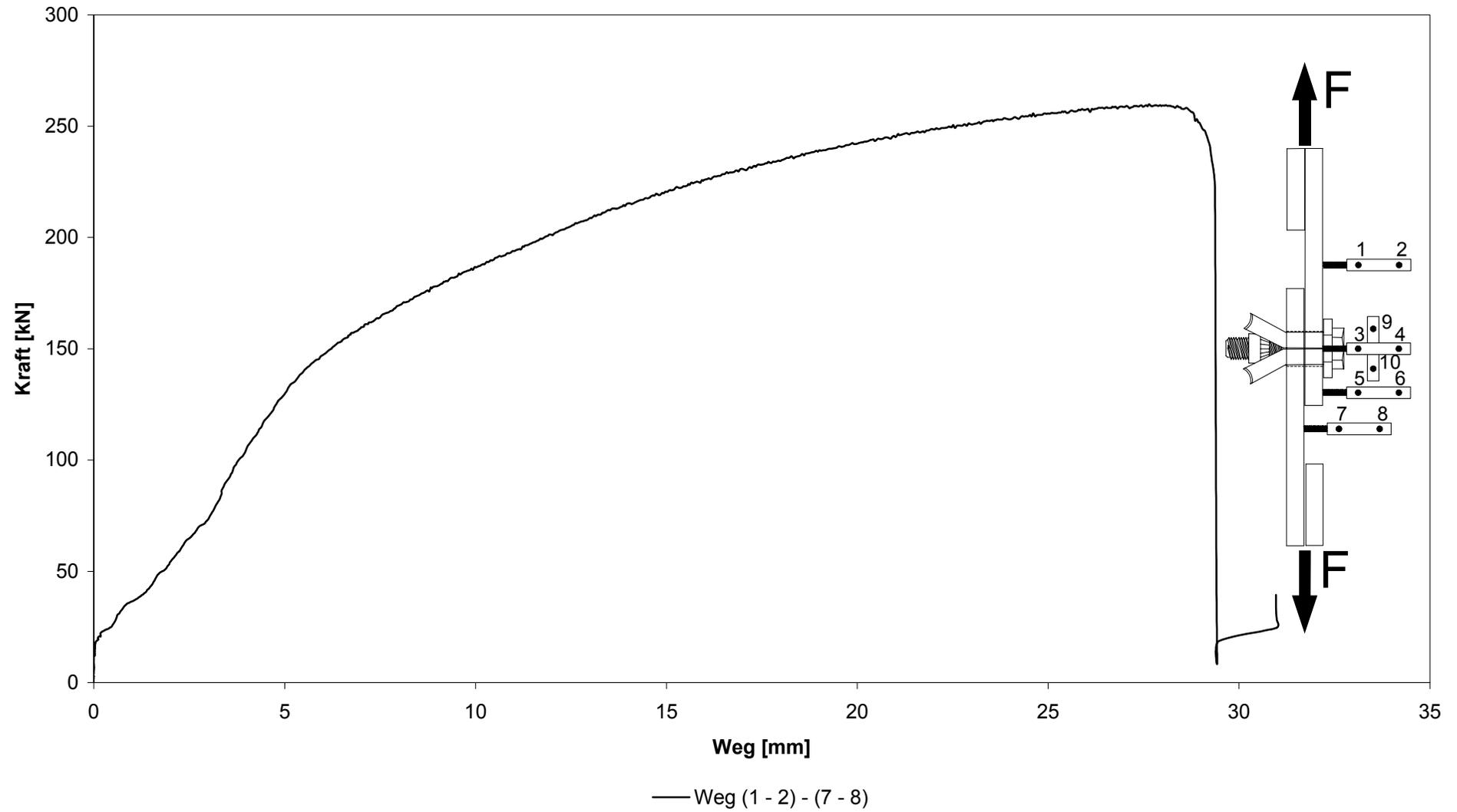
Versuch 10



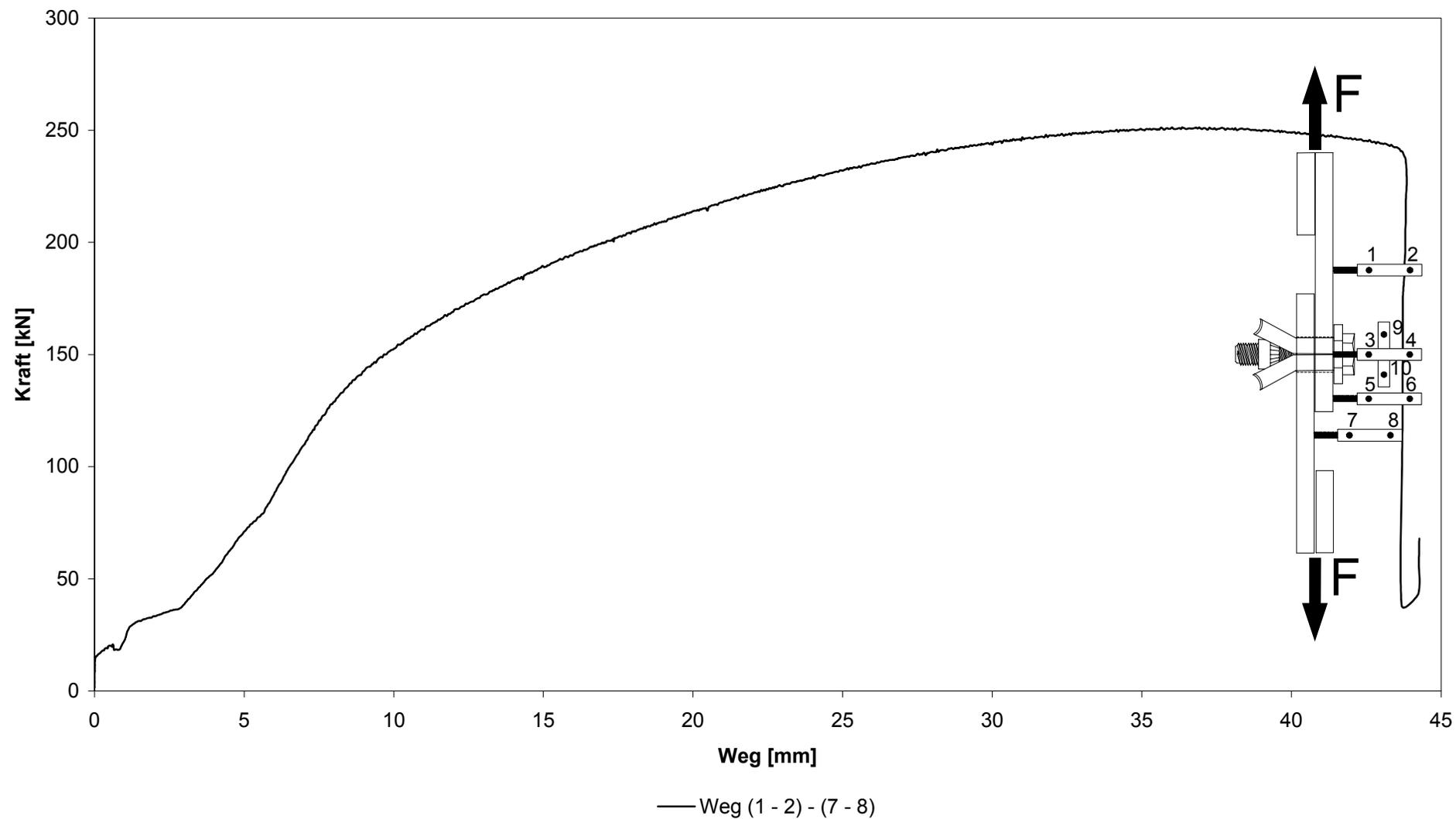
### Versuch 11



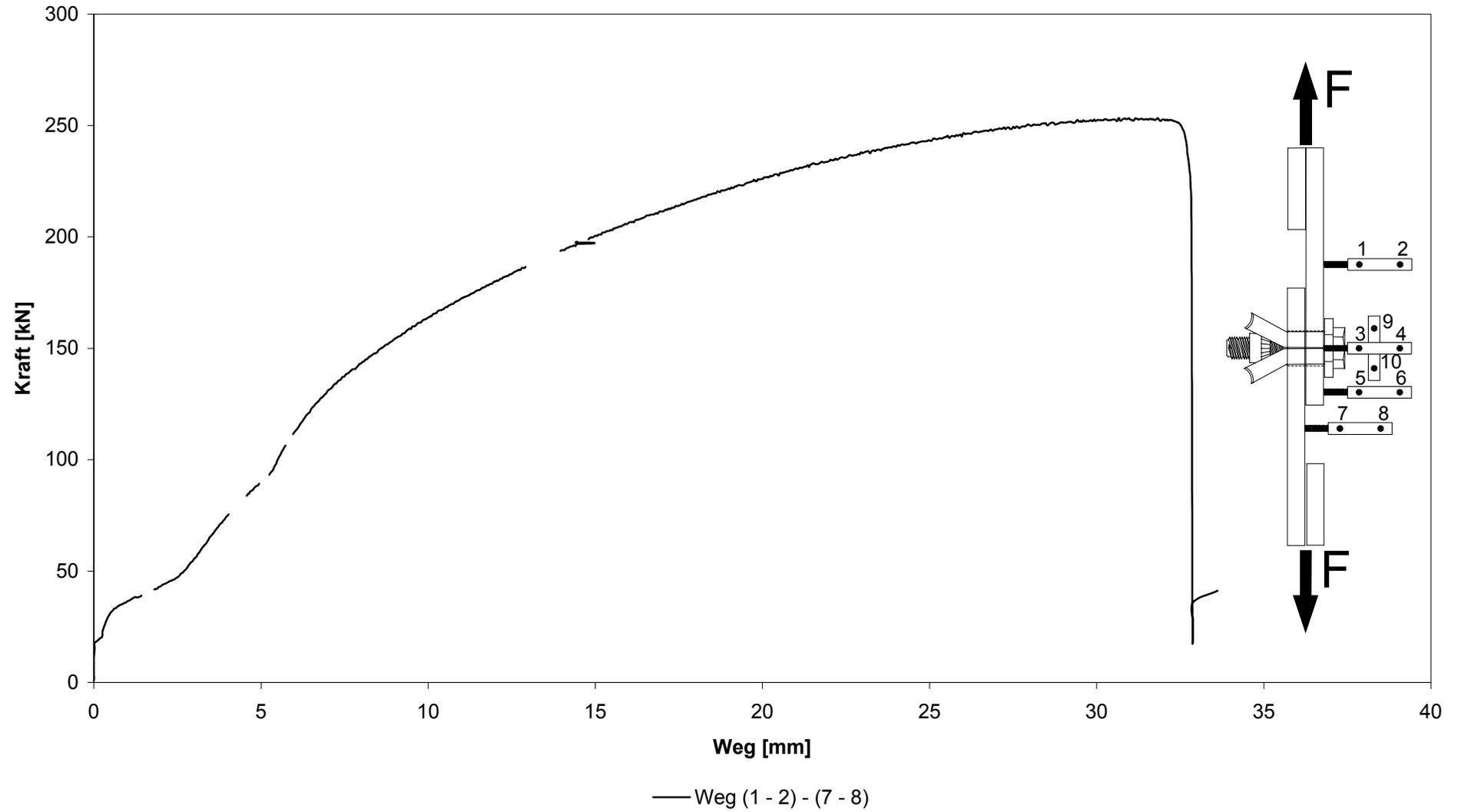
### Versuch 12



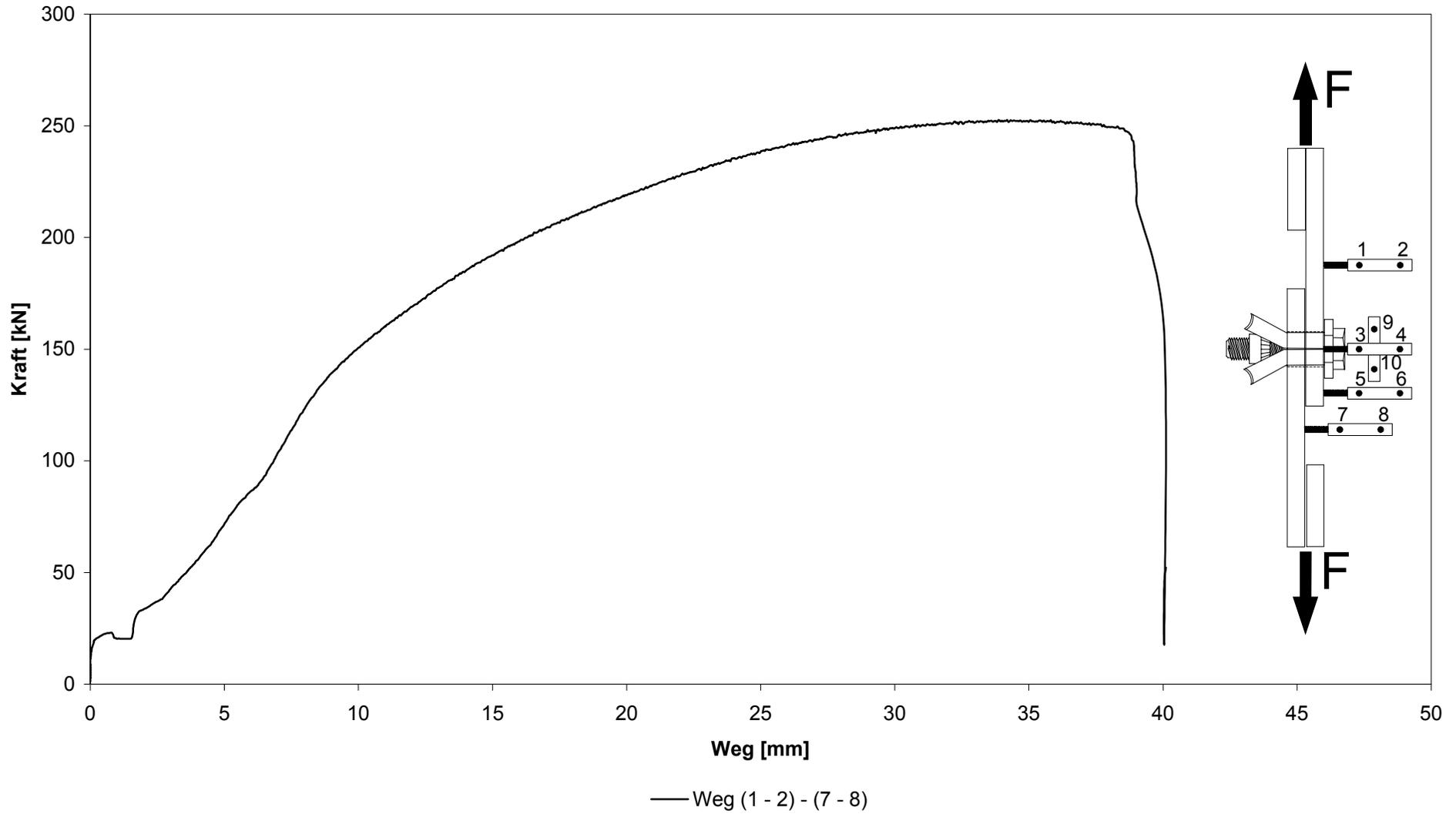
### Versuch 13



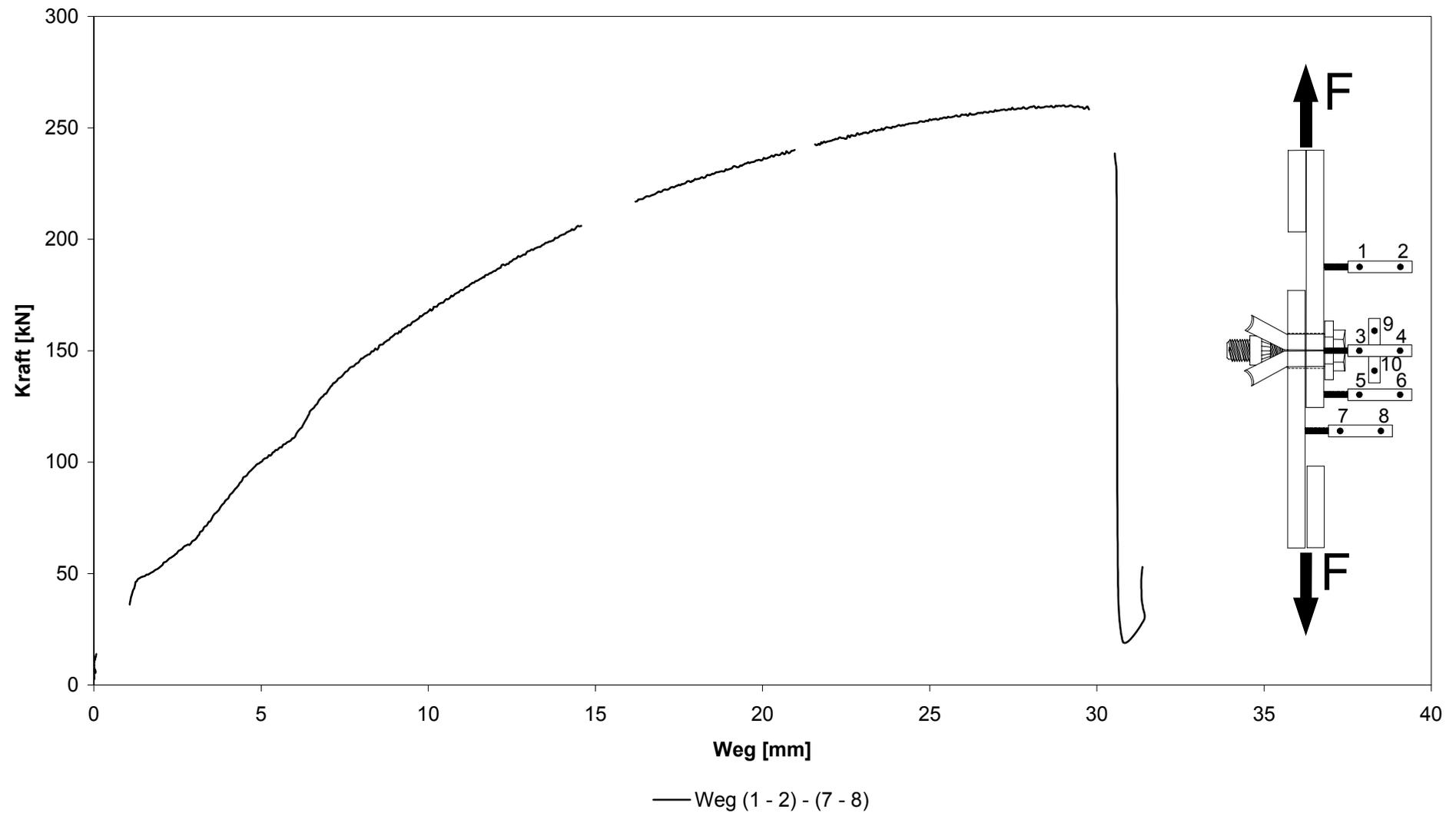
### Versuch 14



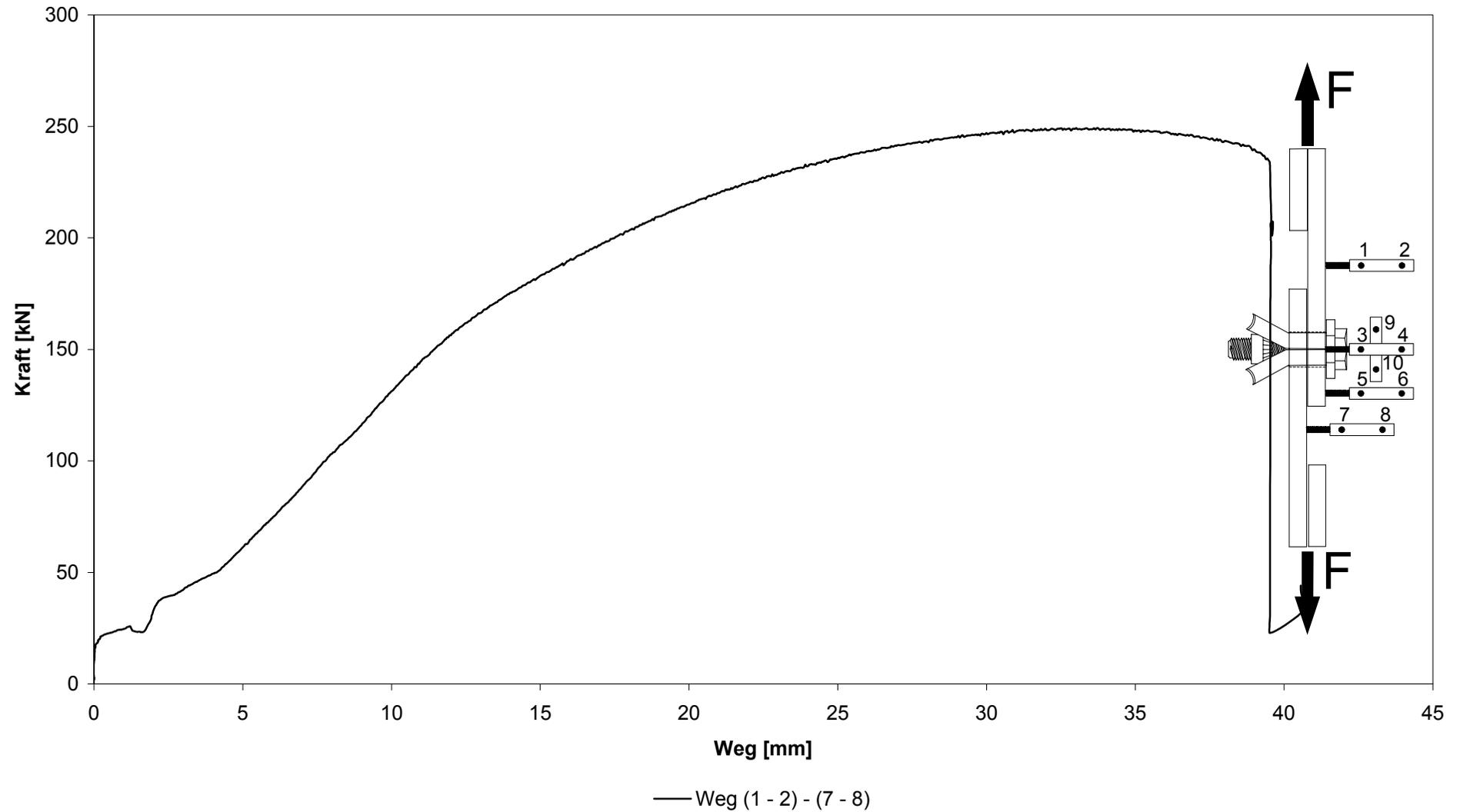
Versuch 15



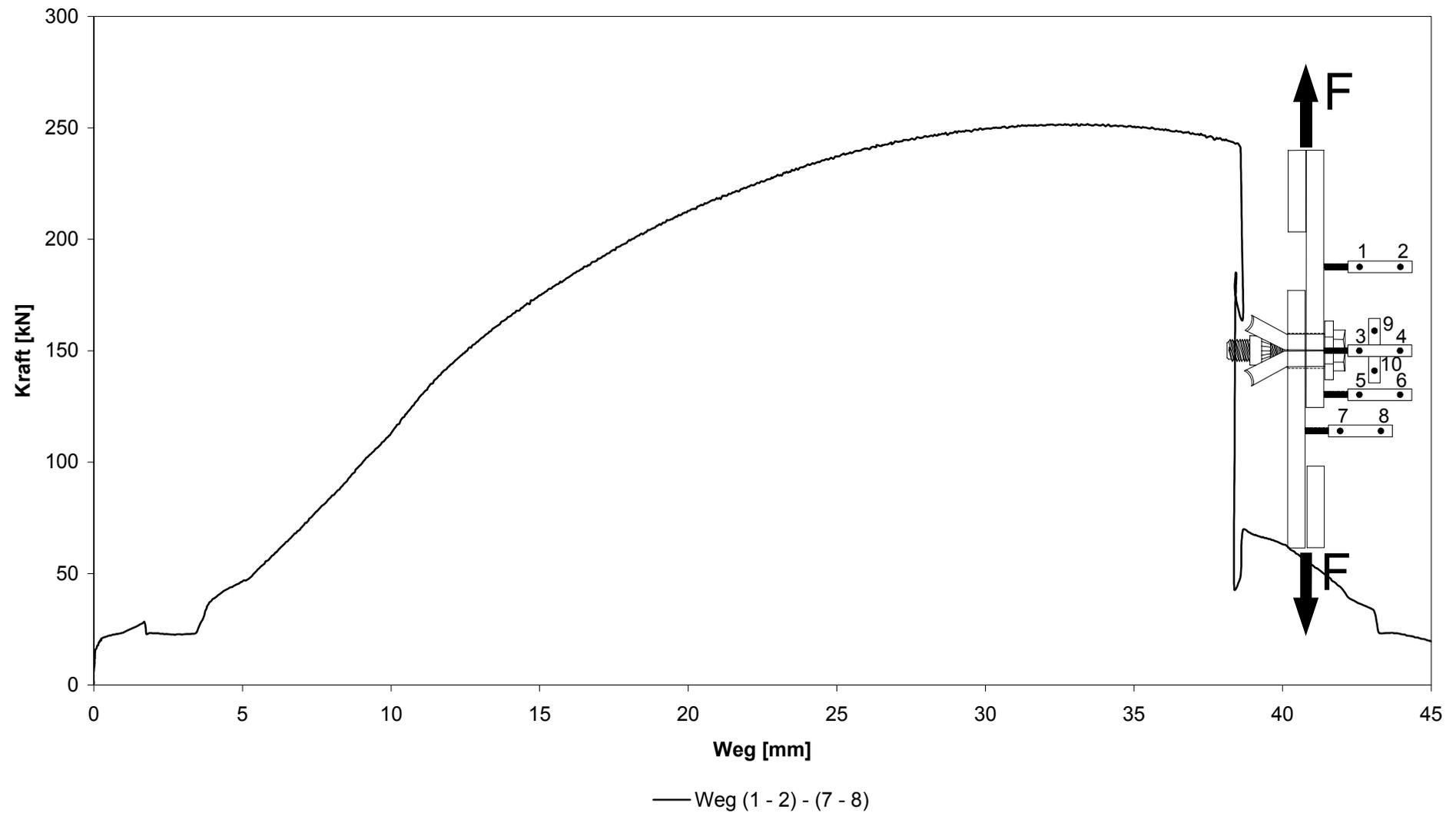
### Versuch 16



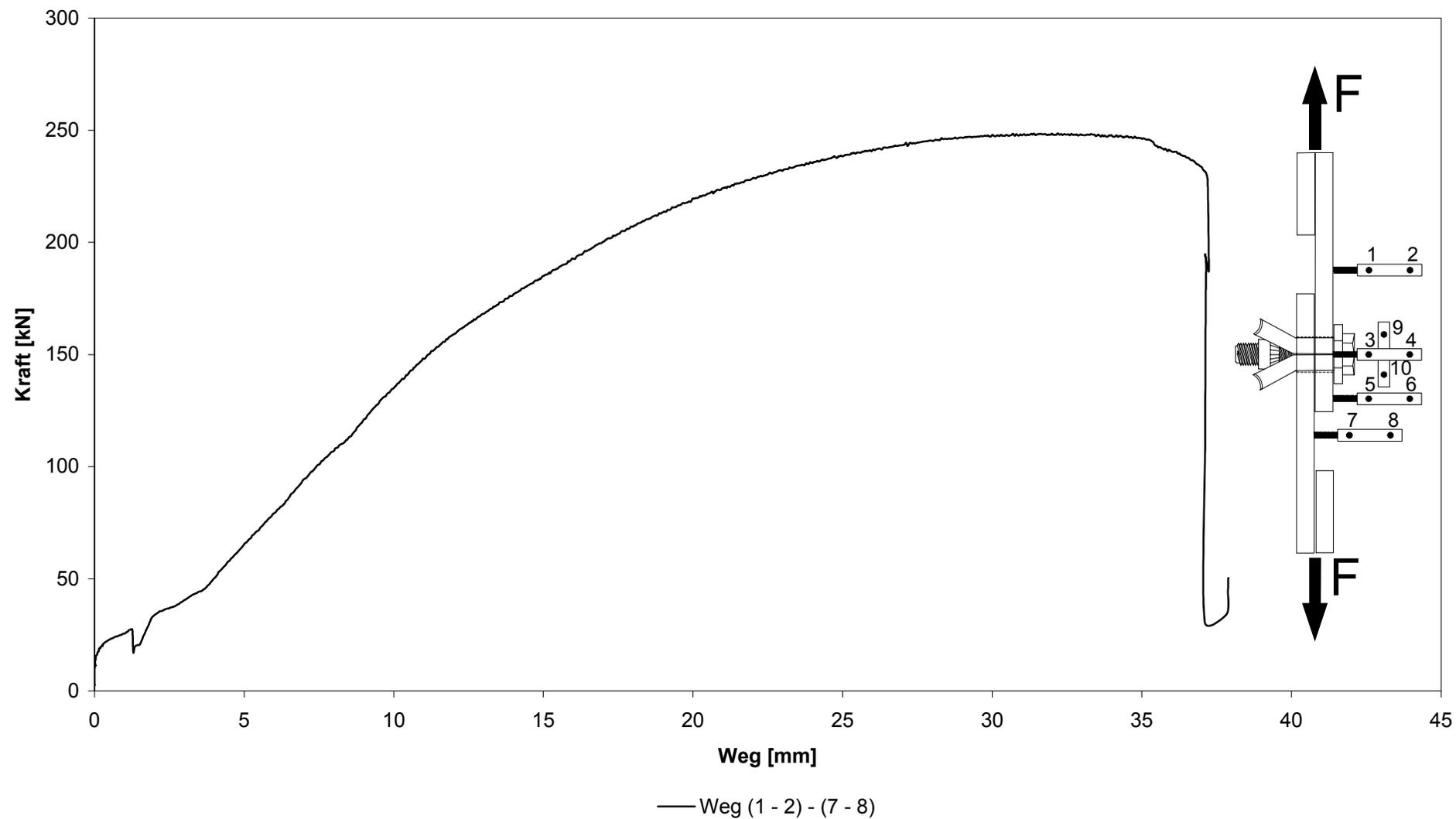
### Versuch 17



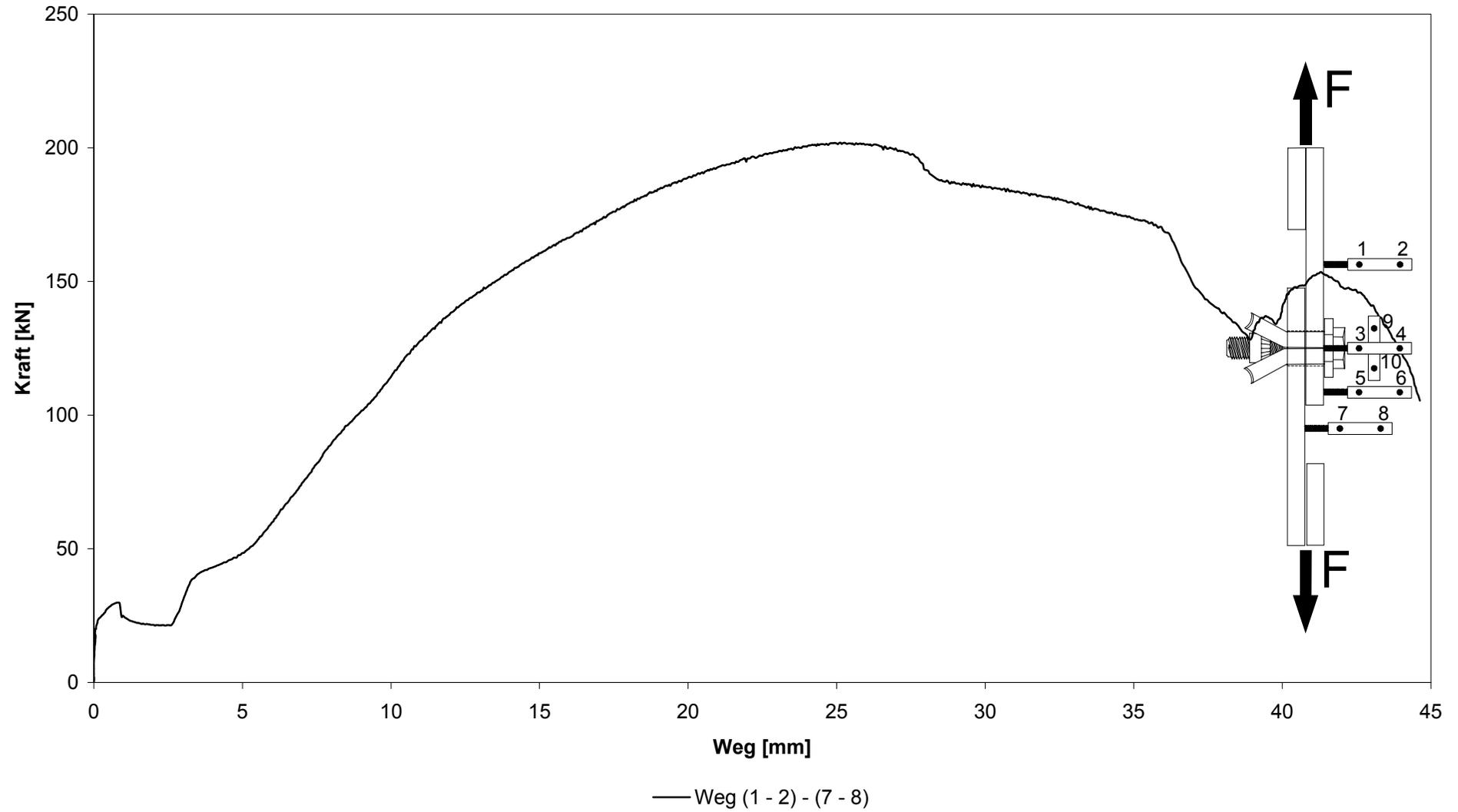
### Versuch 18



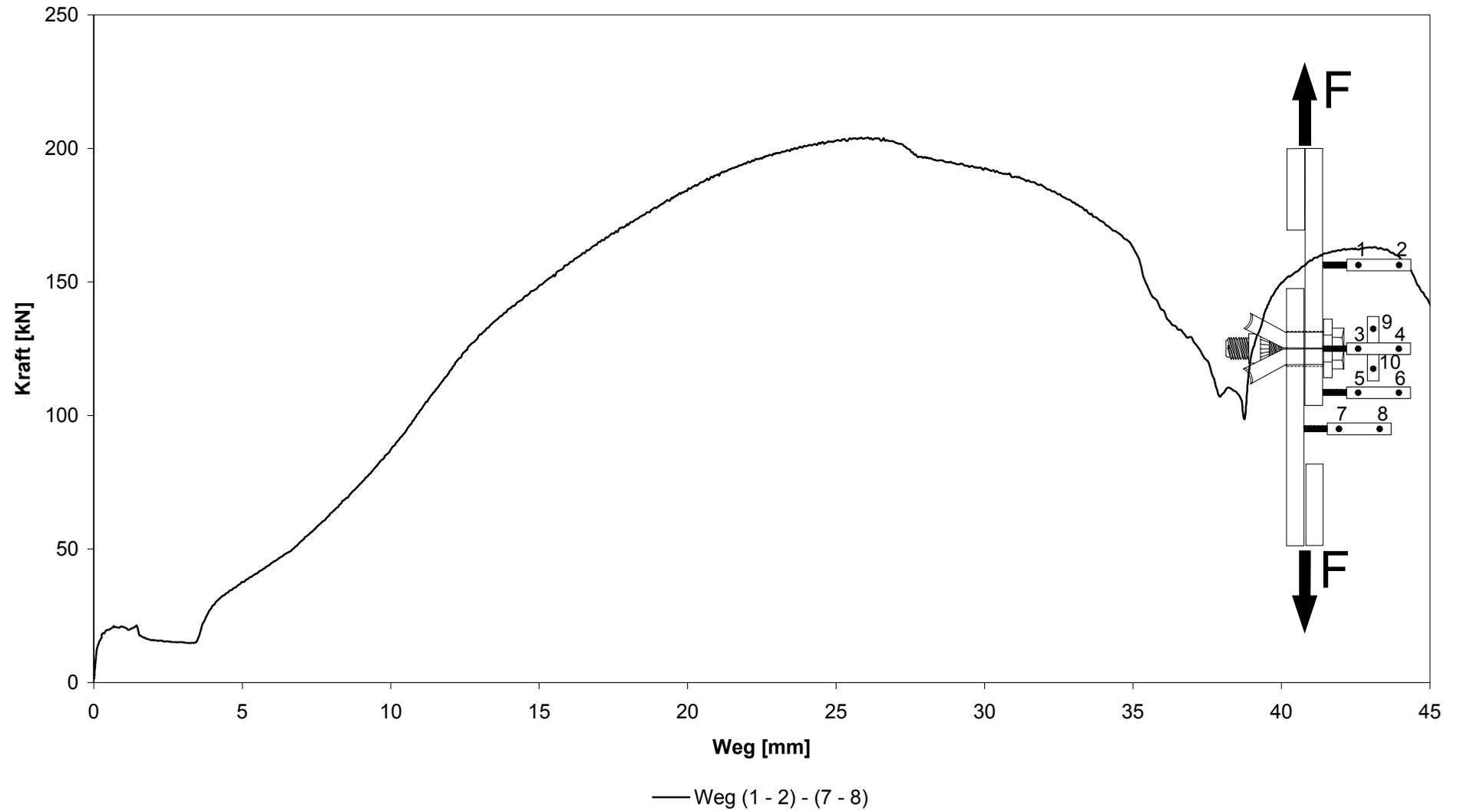
### Versuch 19



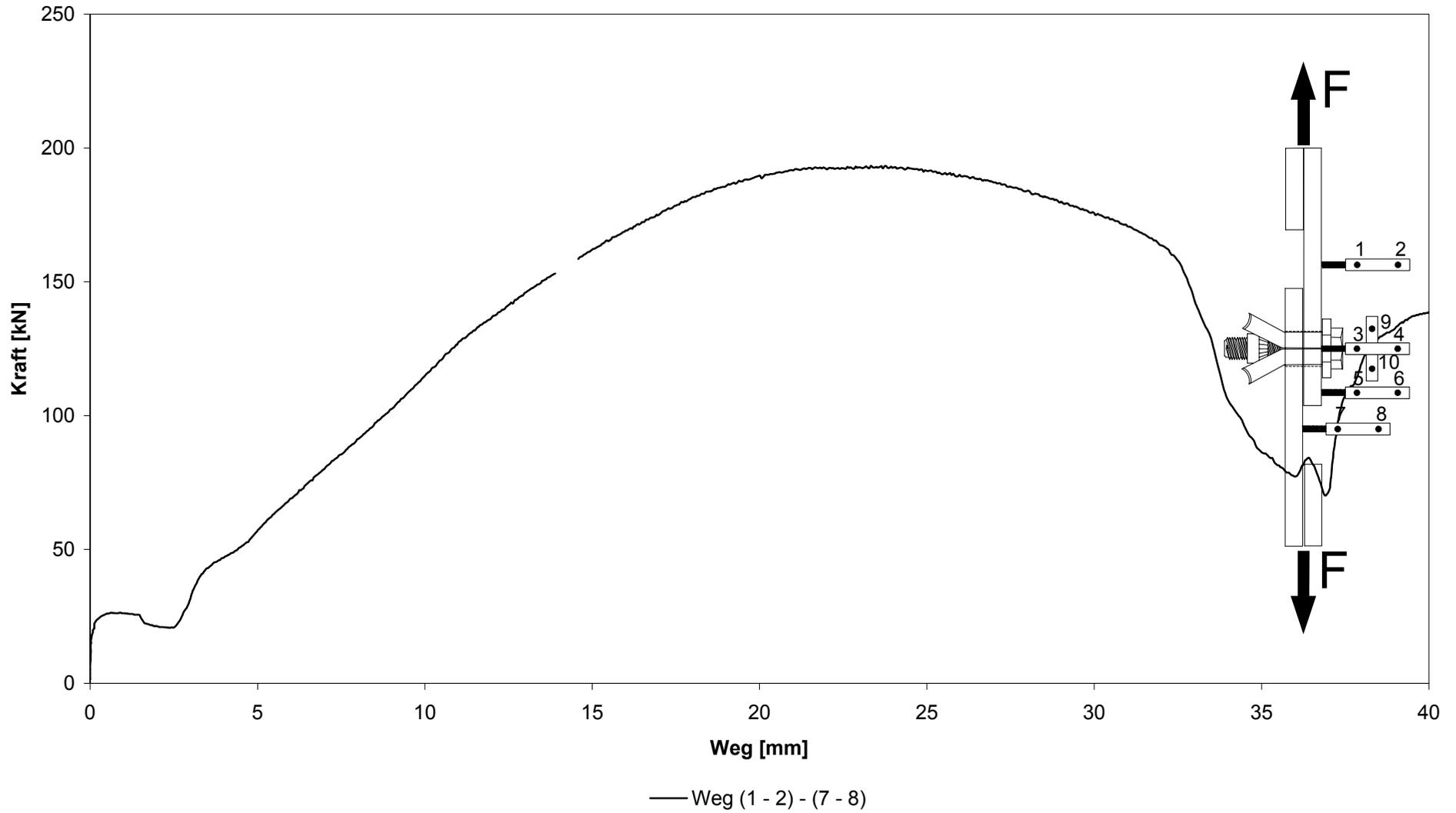
### Versuch 20



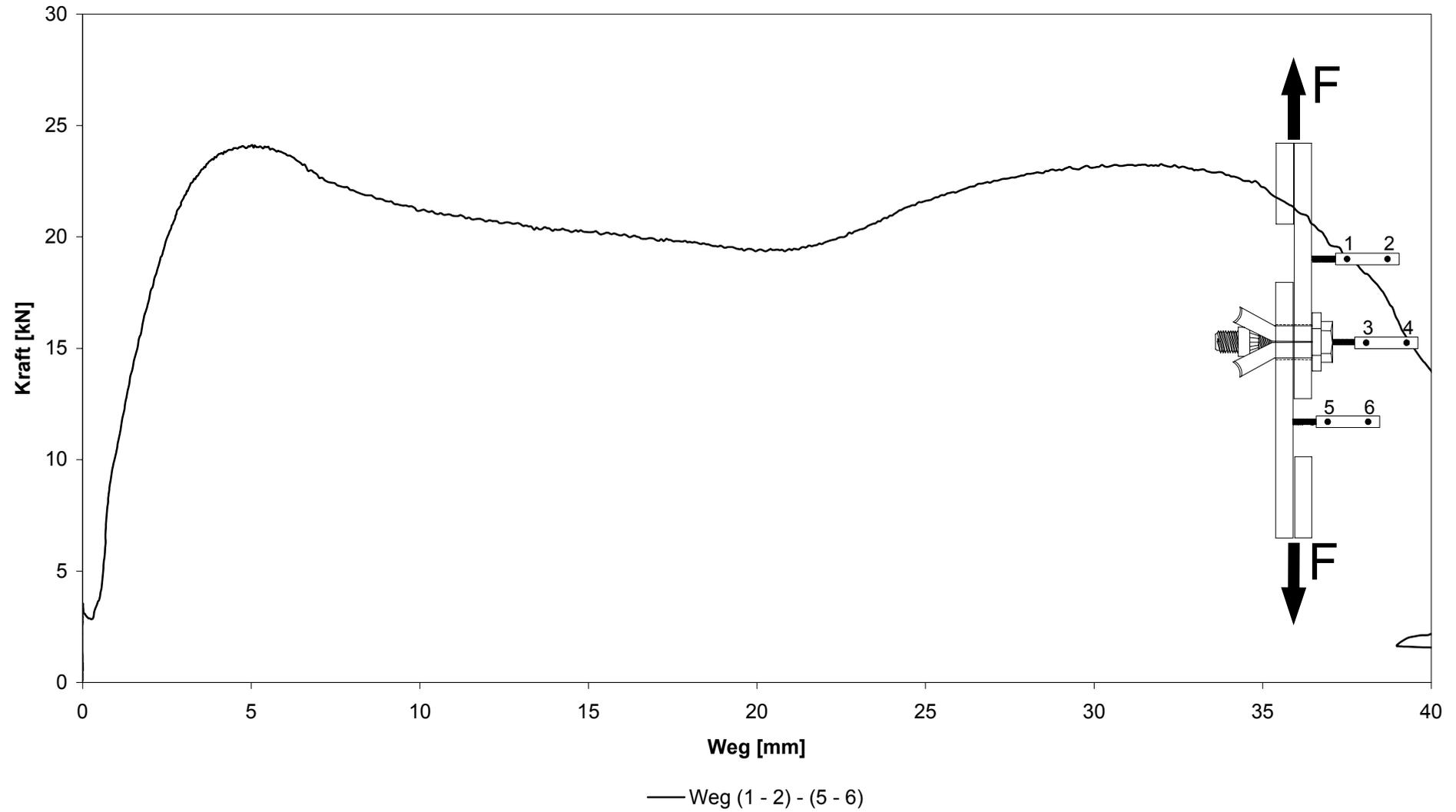
**Versuch 21**



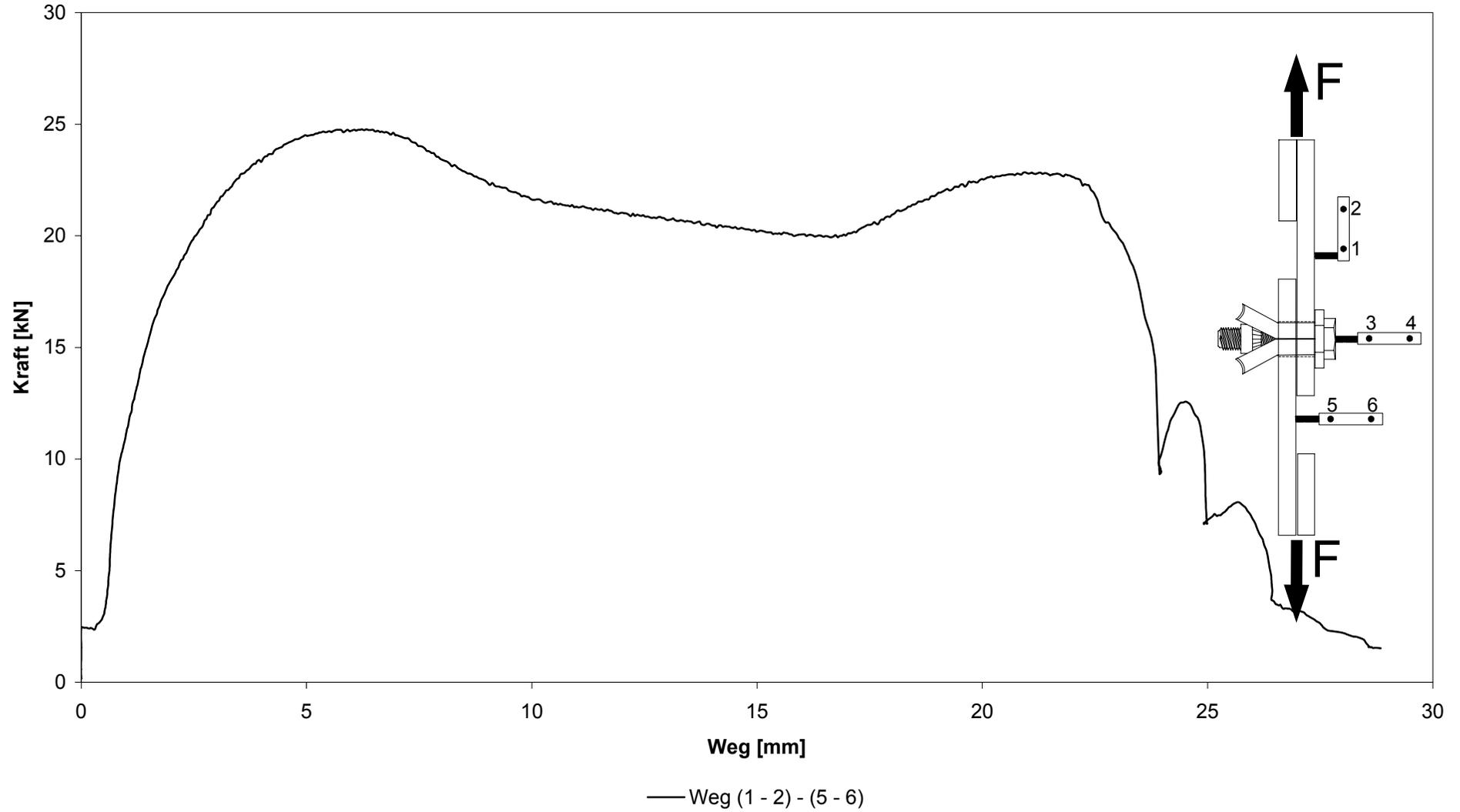
**Versuch 22**



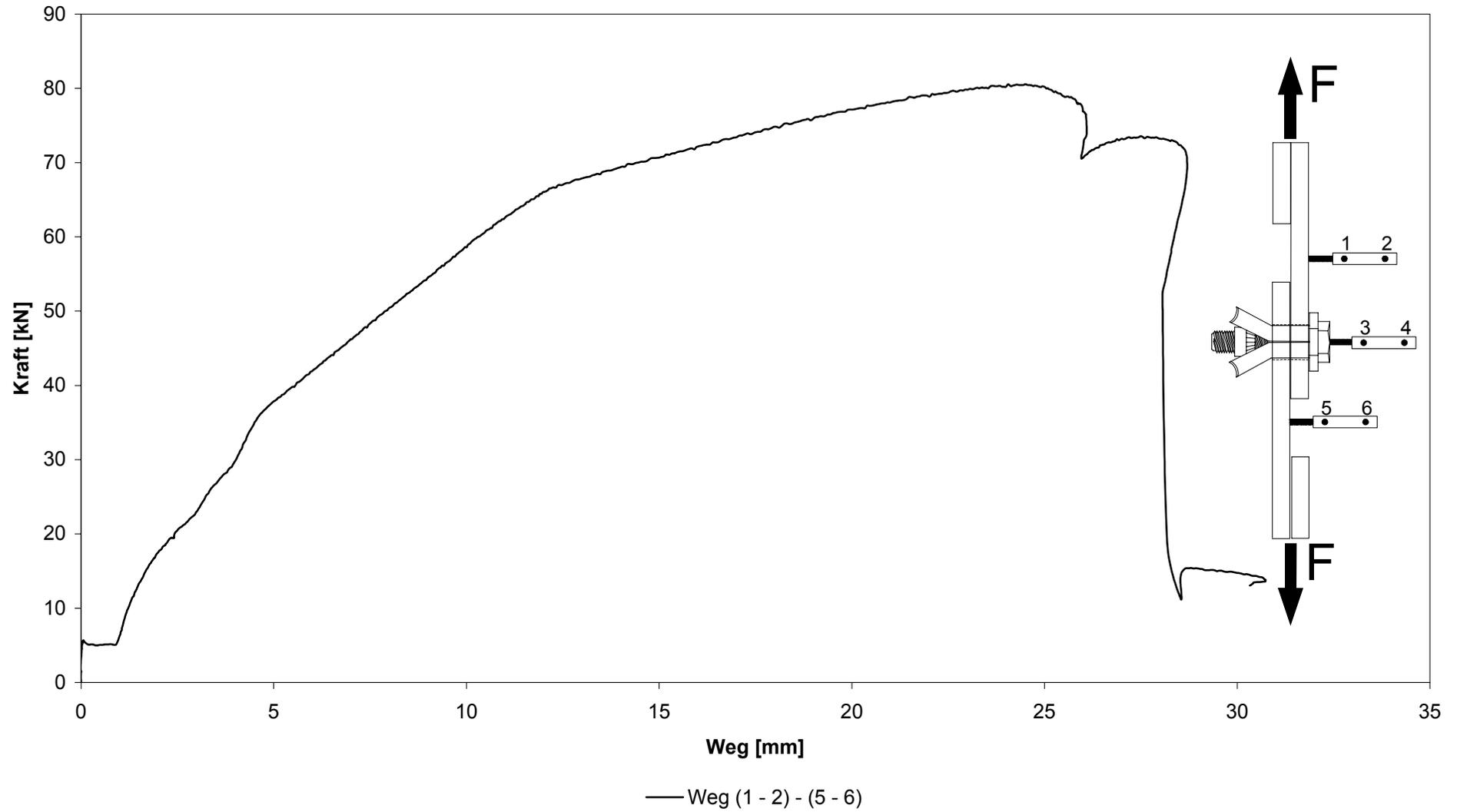
### Versuch 23



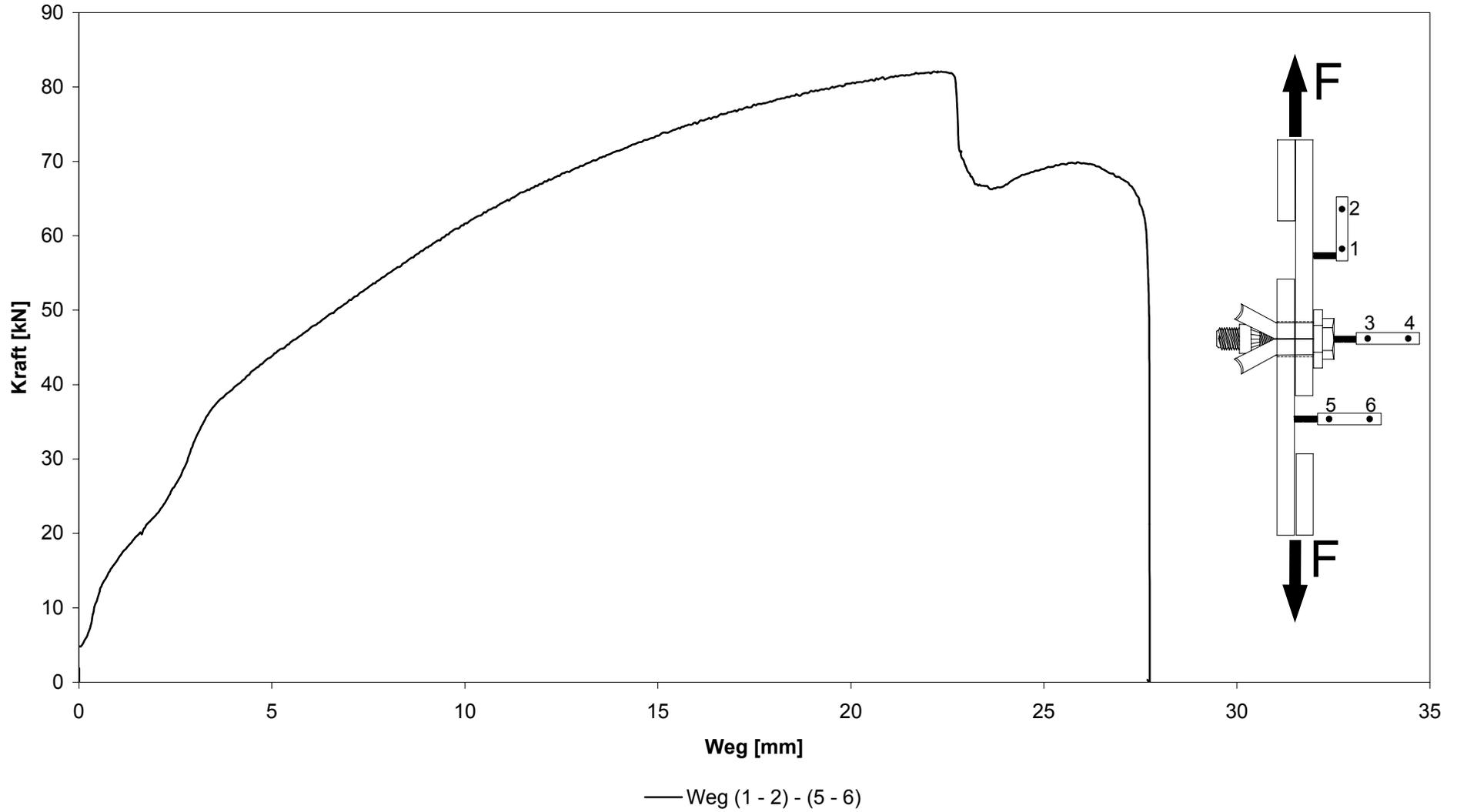
### Versuch 24



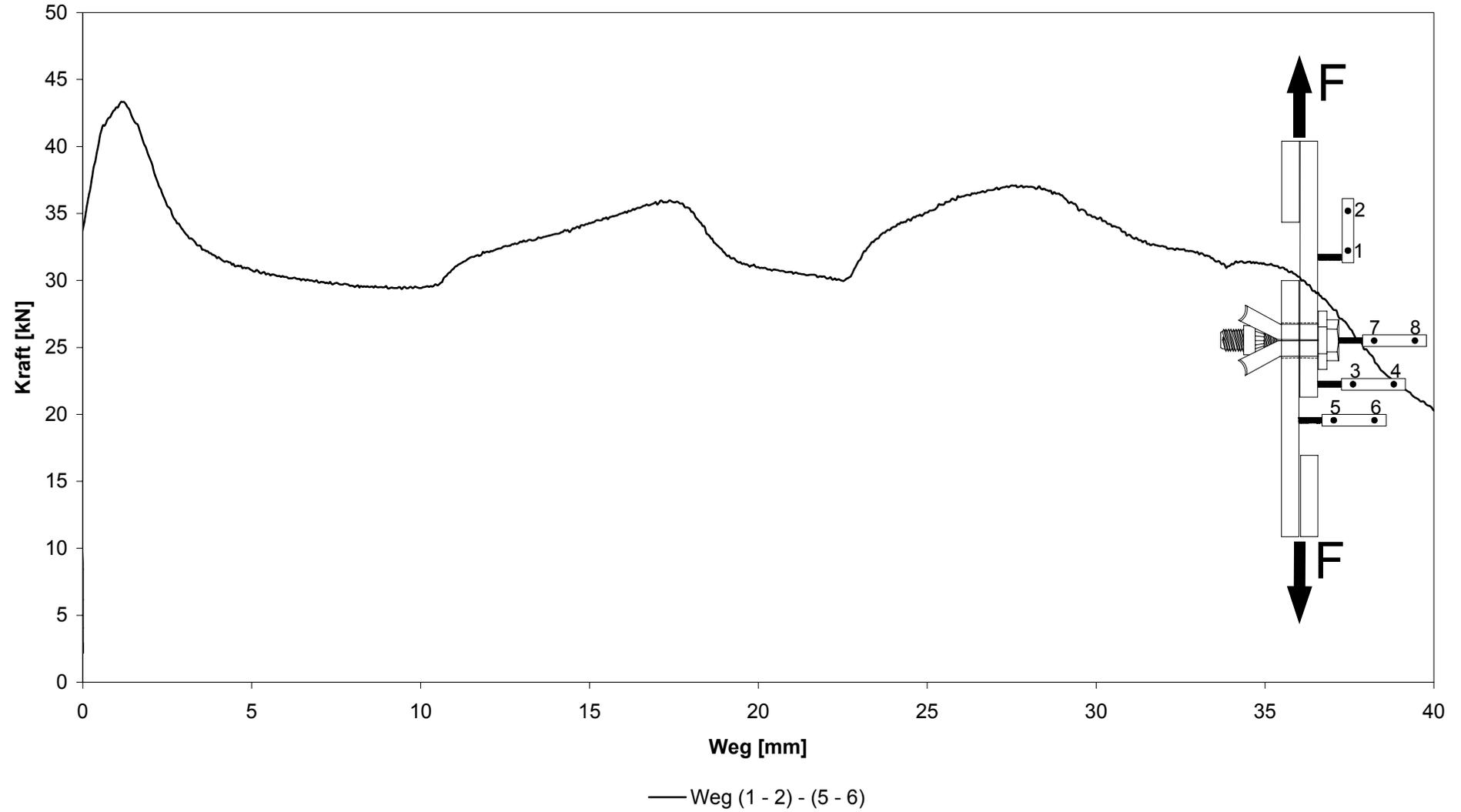
**Versuch 25**



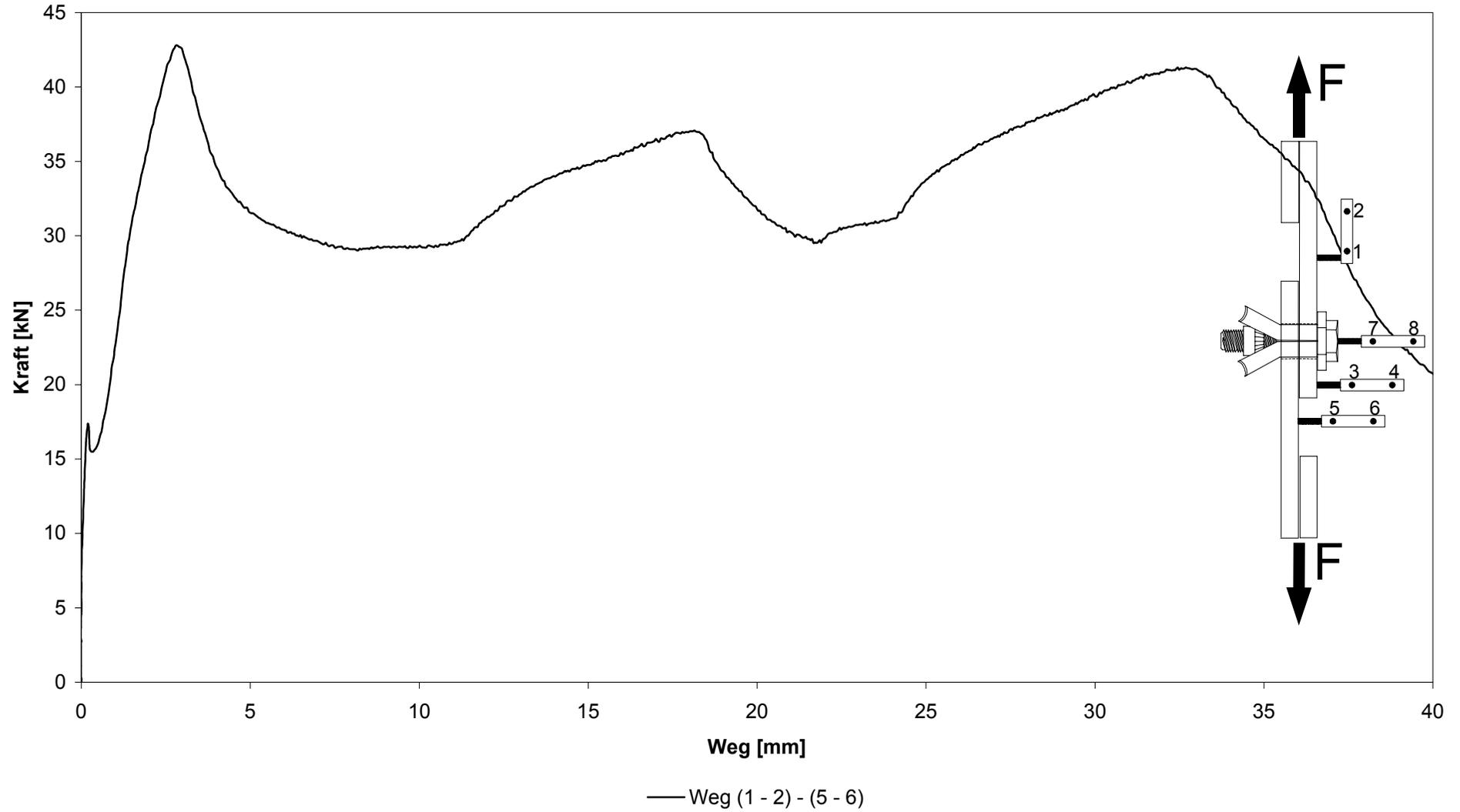
Versuch 26



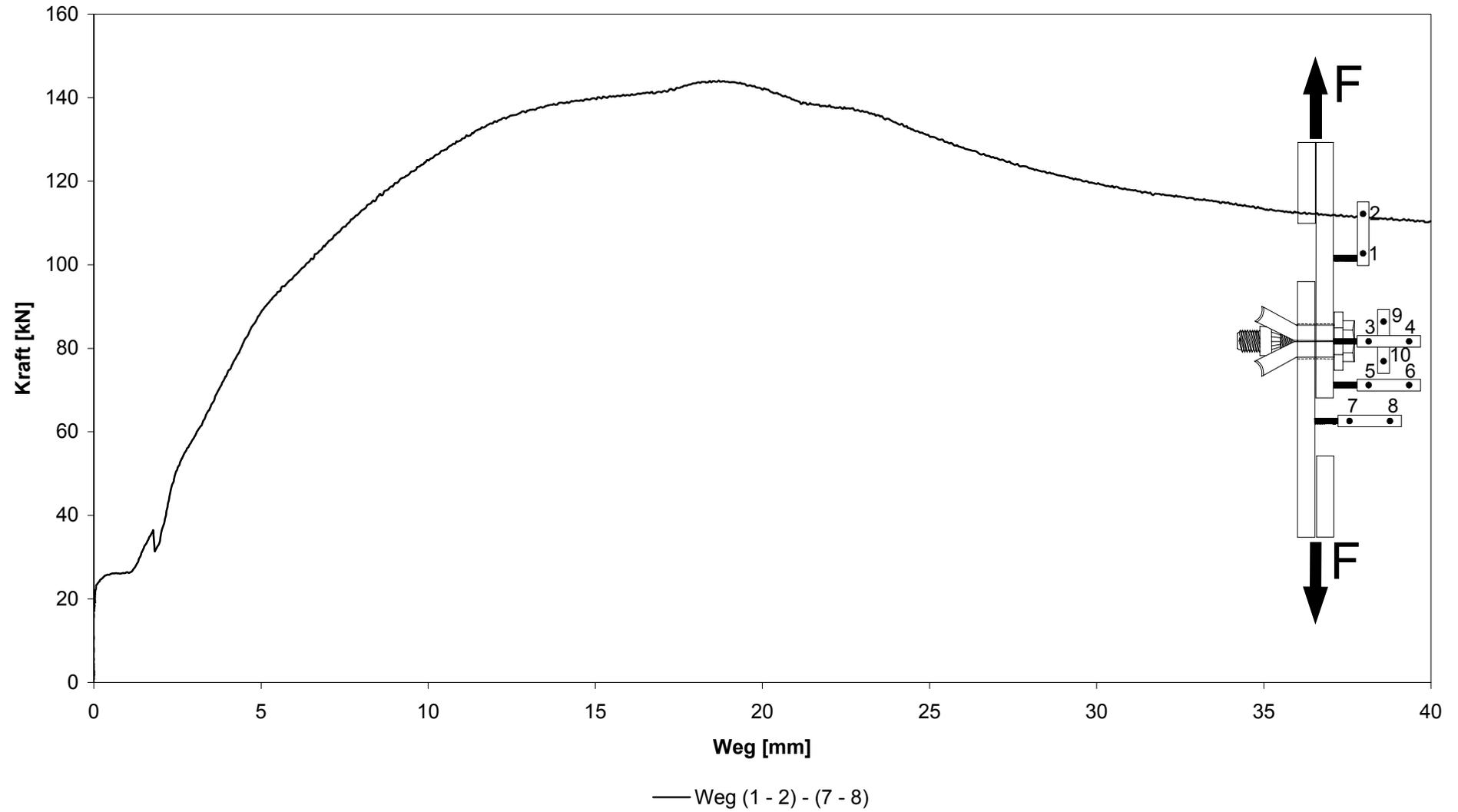
### Versuch 27



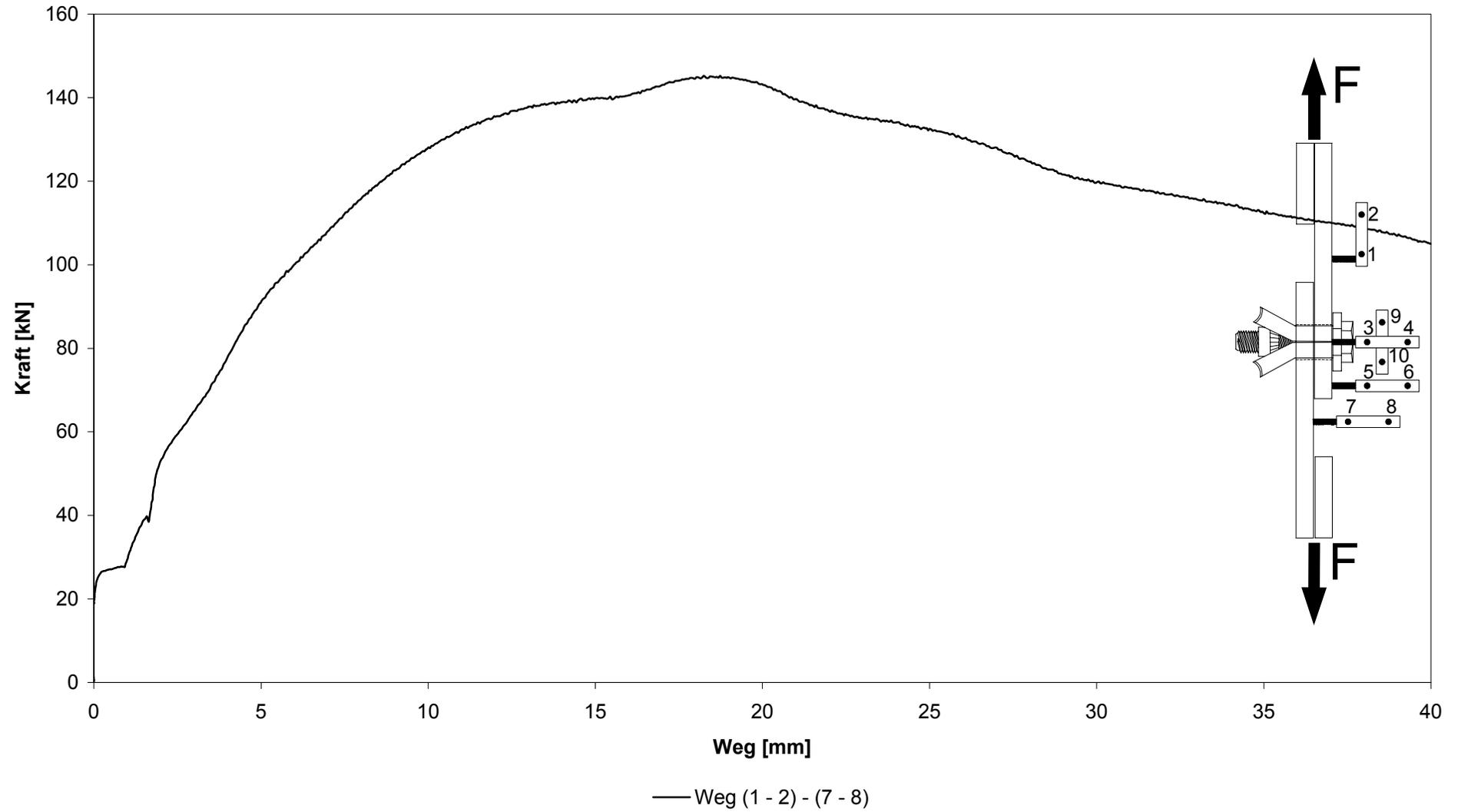
### Versuch 28



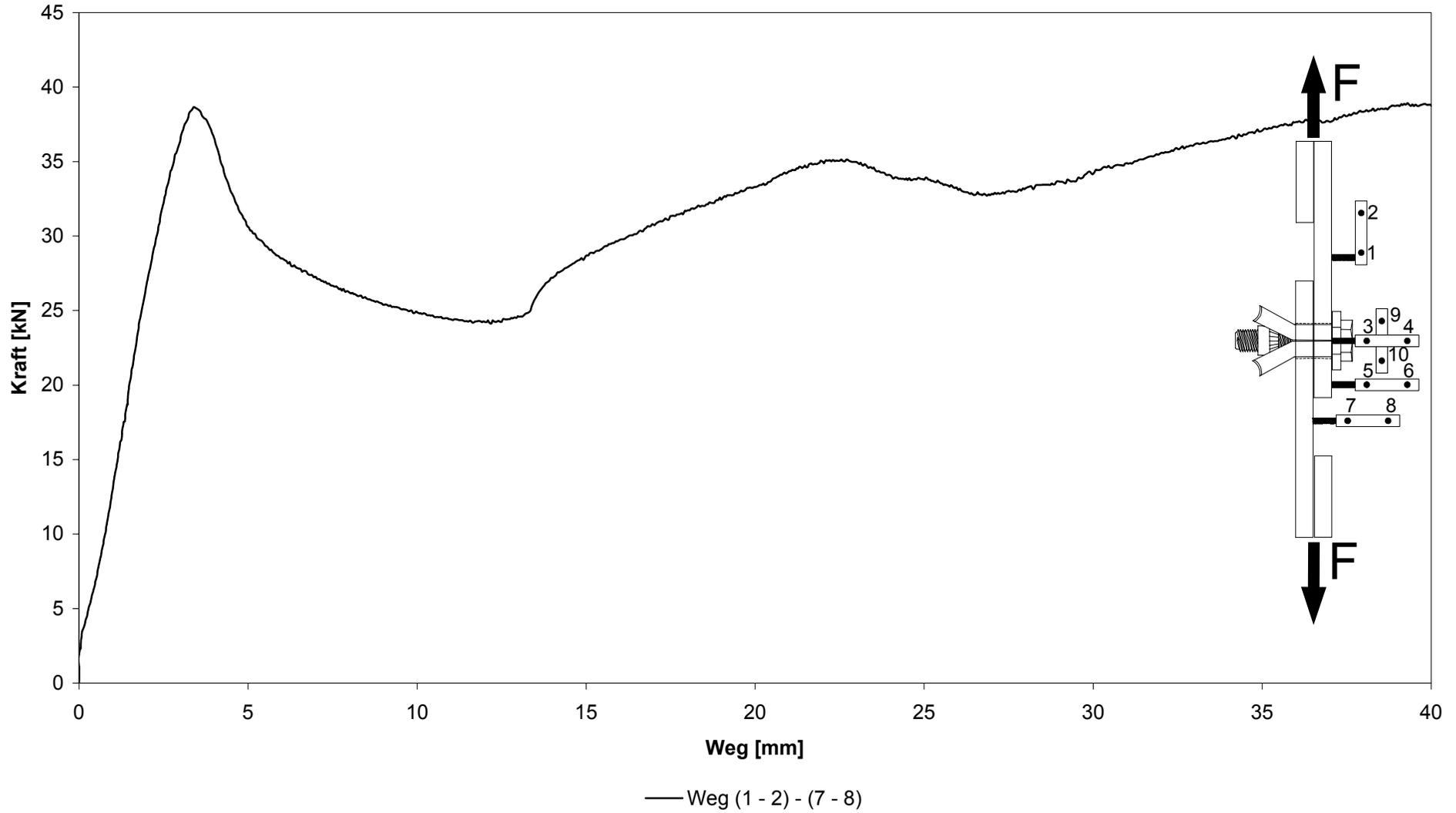
### Versuch 29



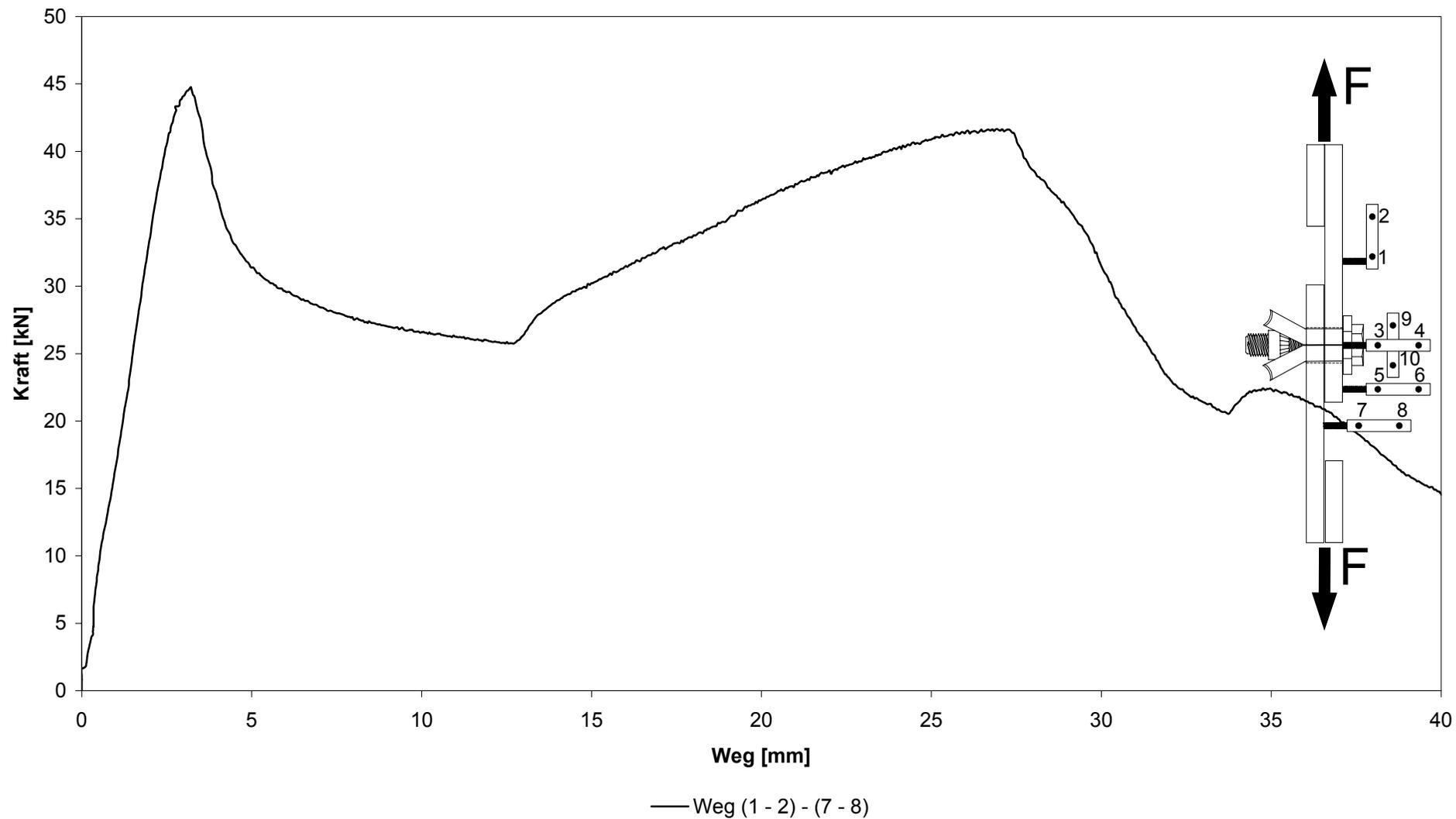
### Versuch 30



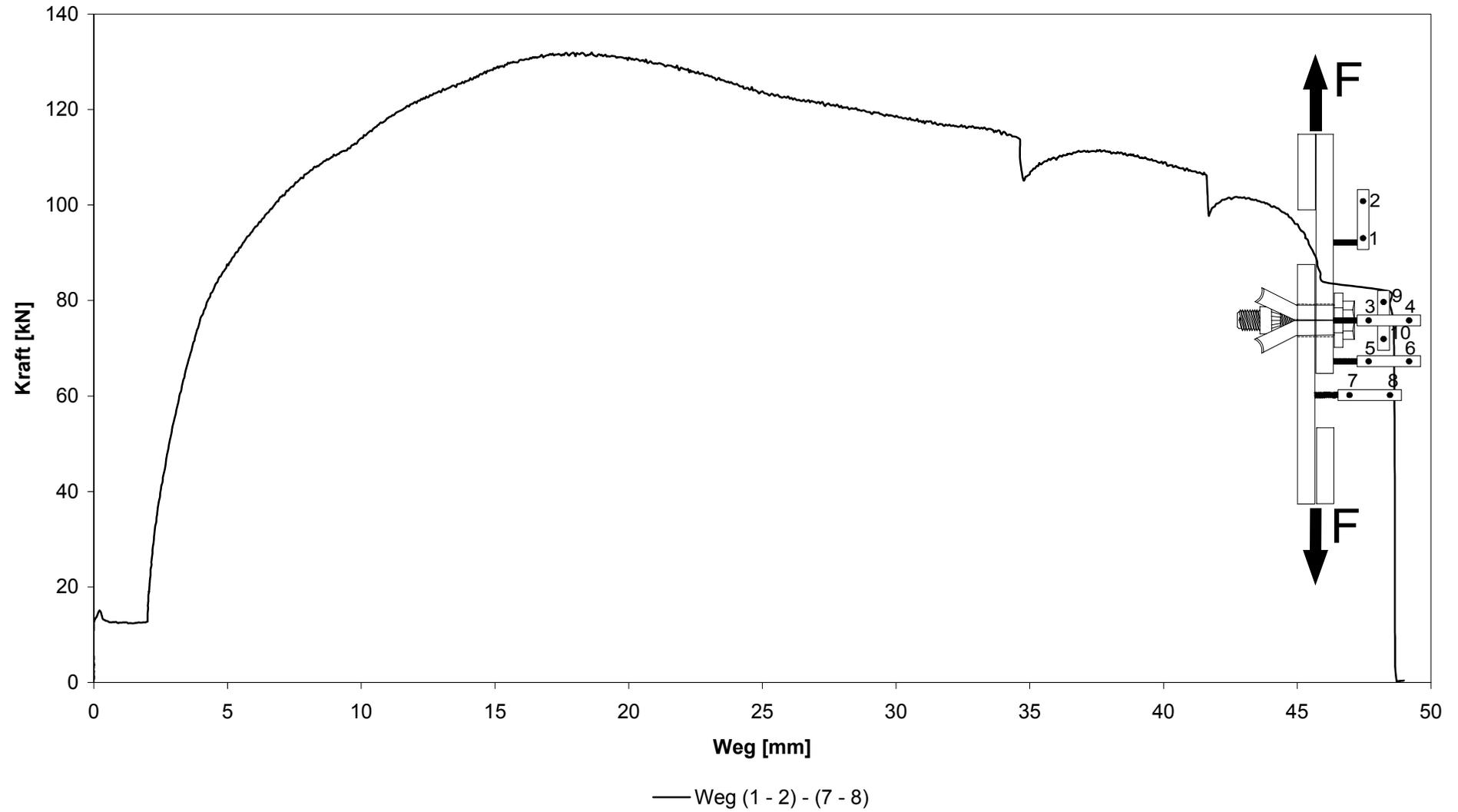
### Versuch 31



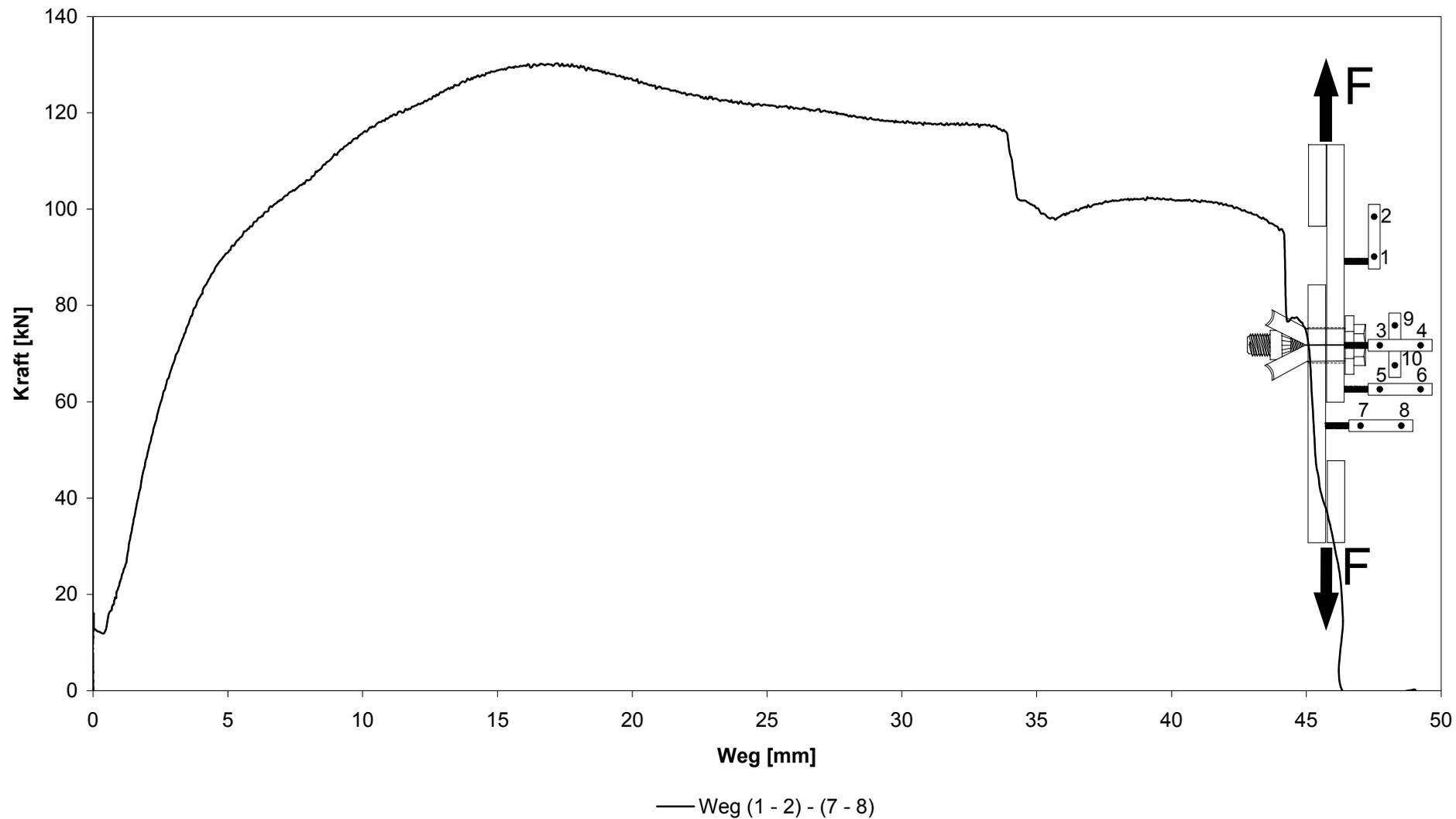
### Versuch 32



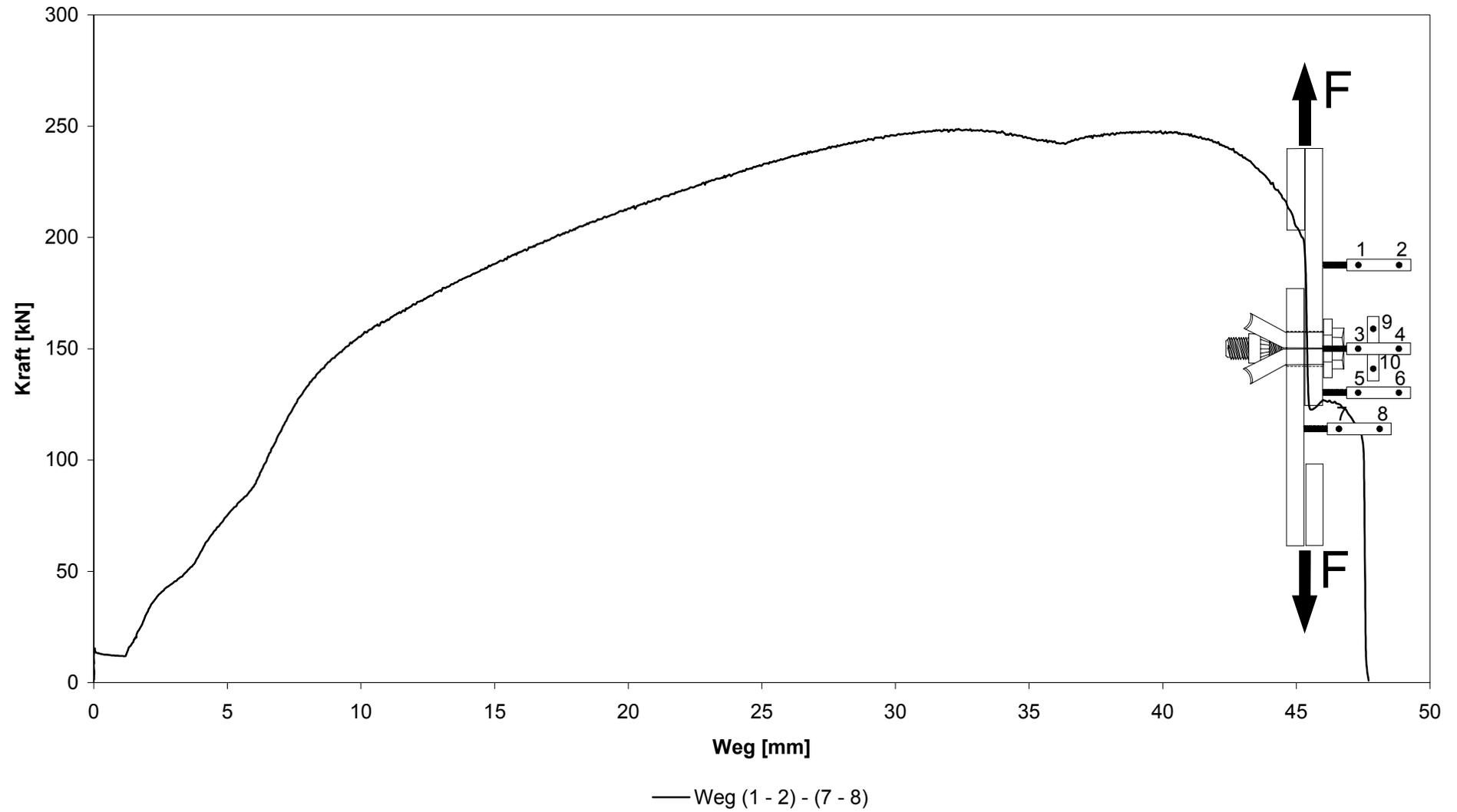
### Versuch 33



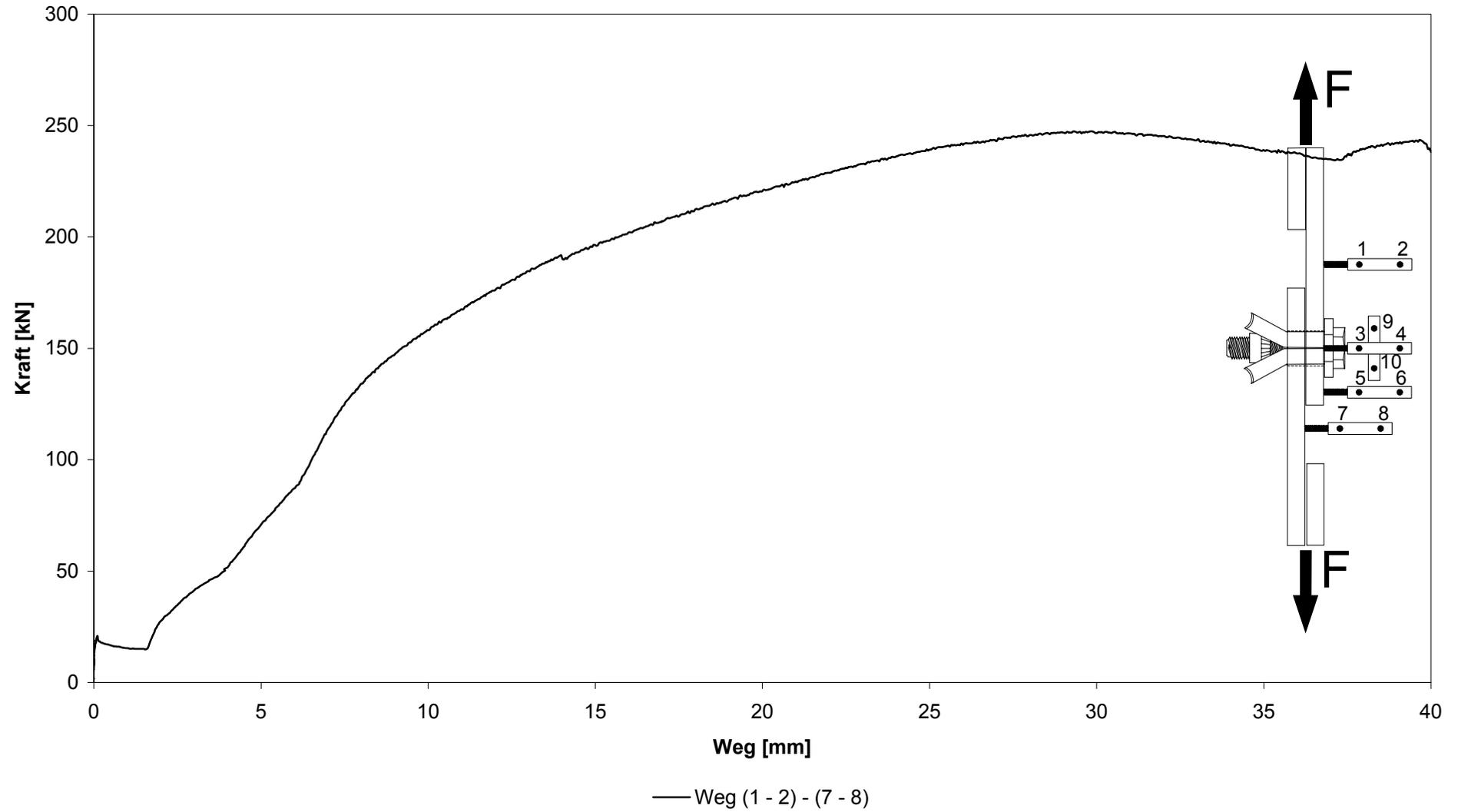
### Versuch 34



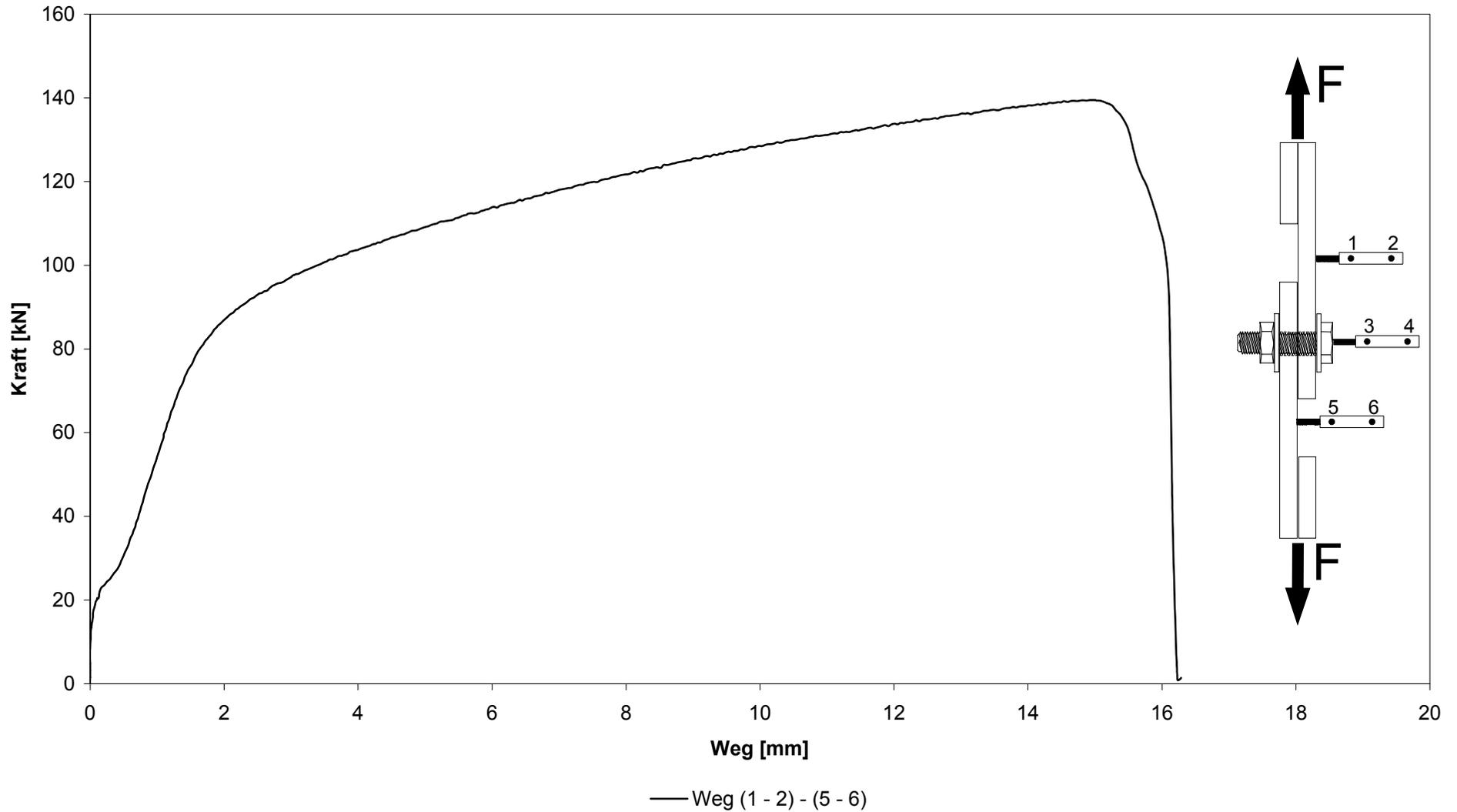
### Versuch 35



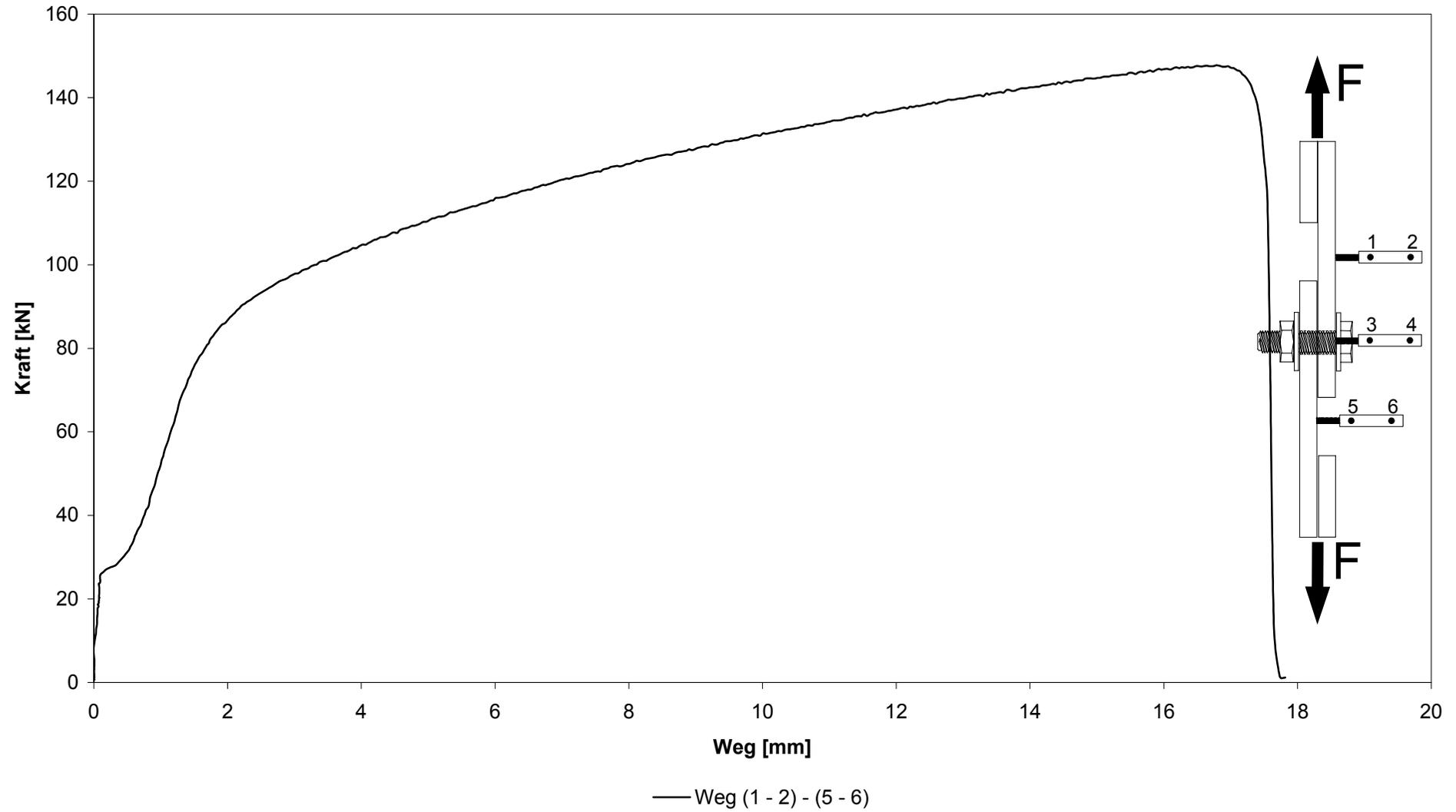
### Versuch 36



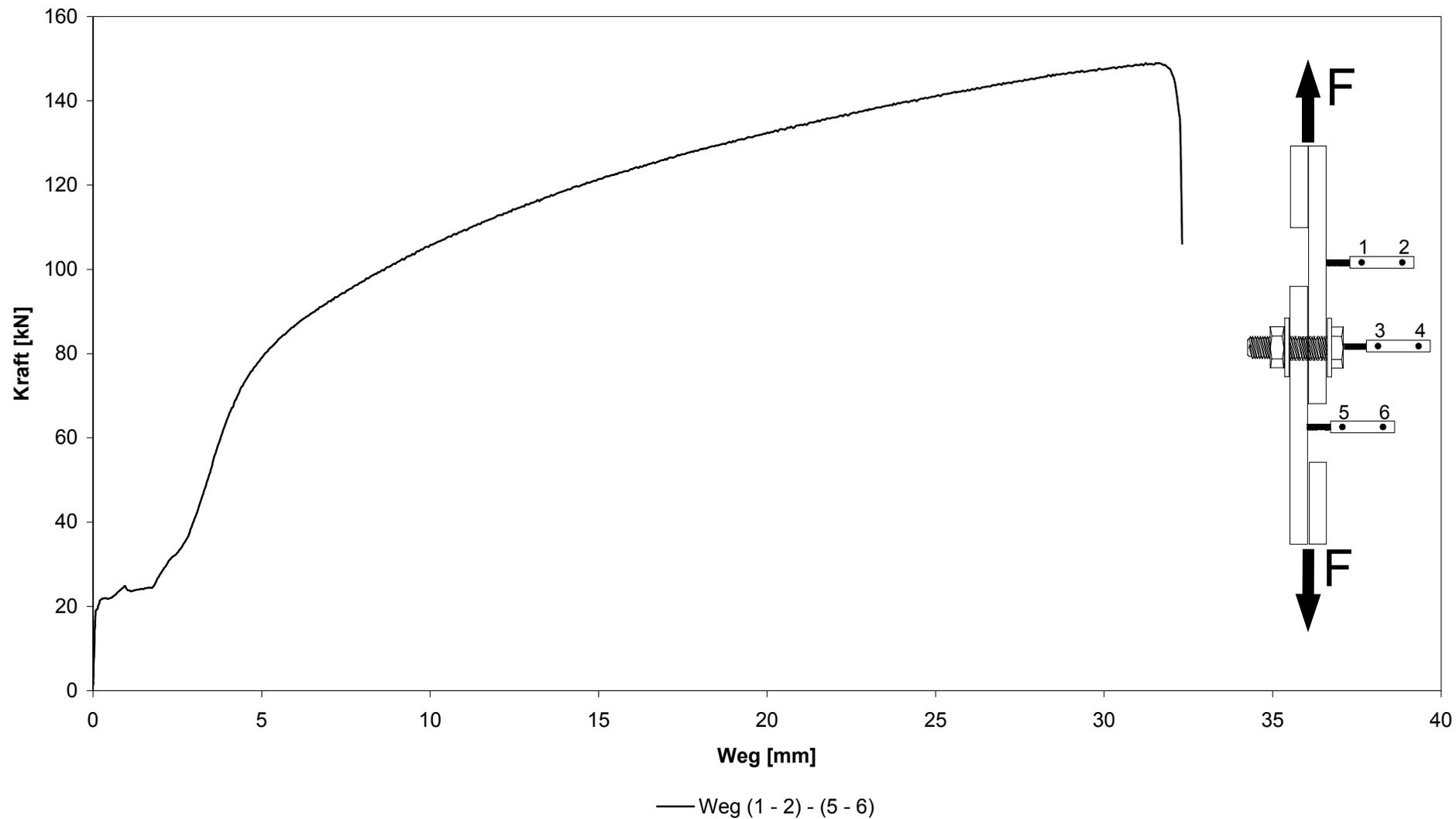
Versuch 37



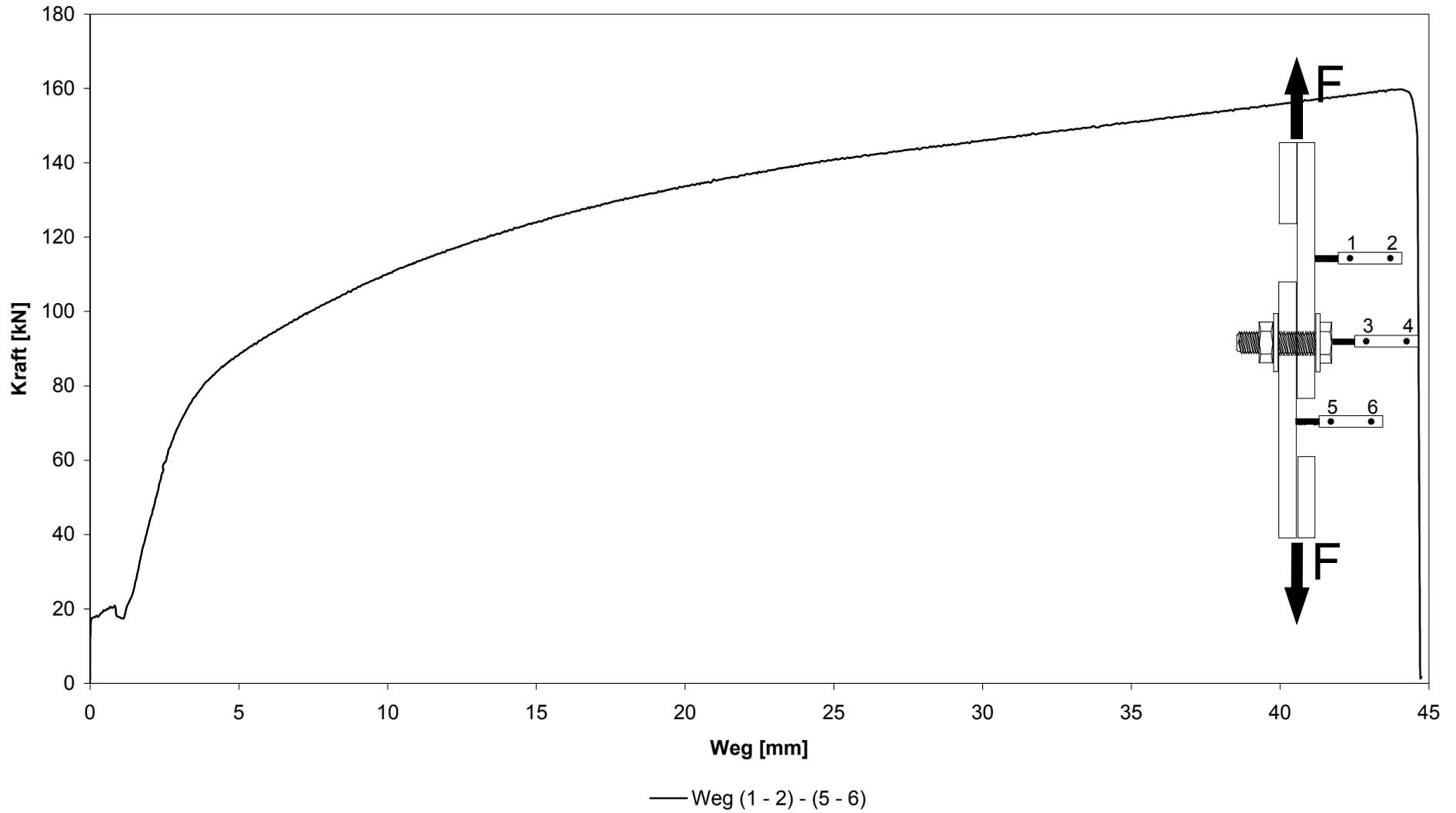
### Versuch 38



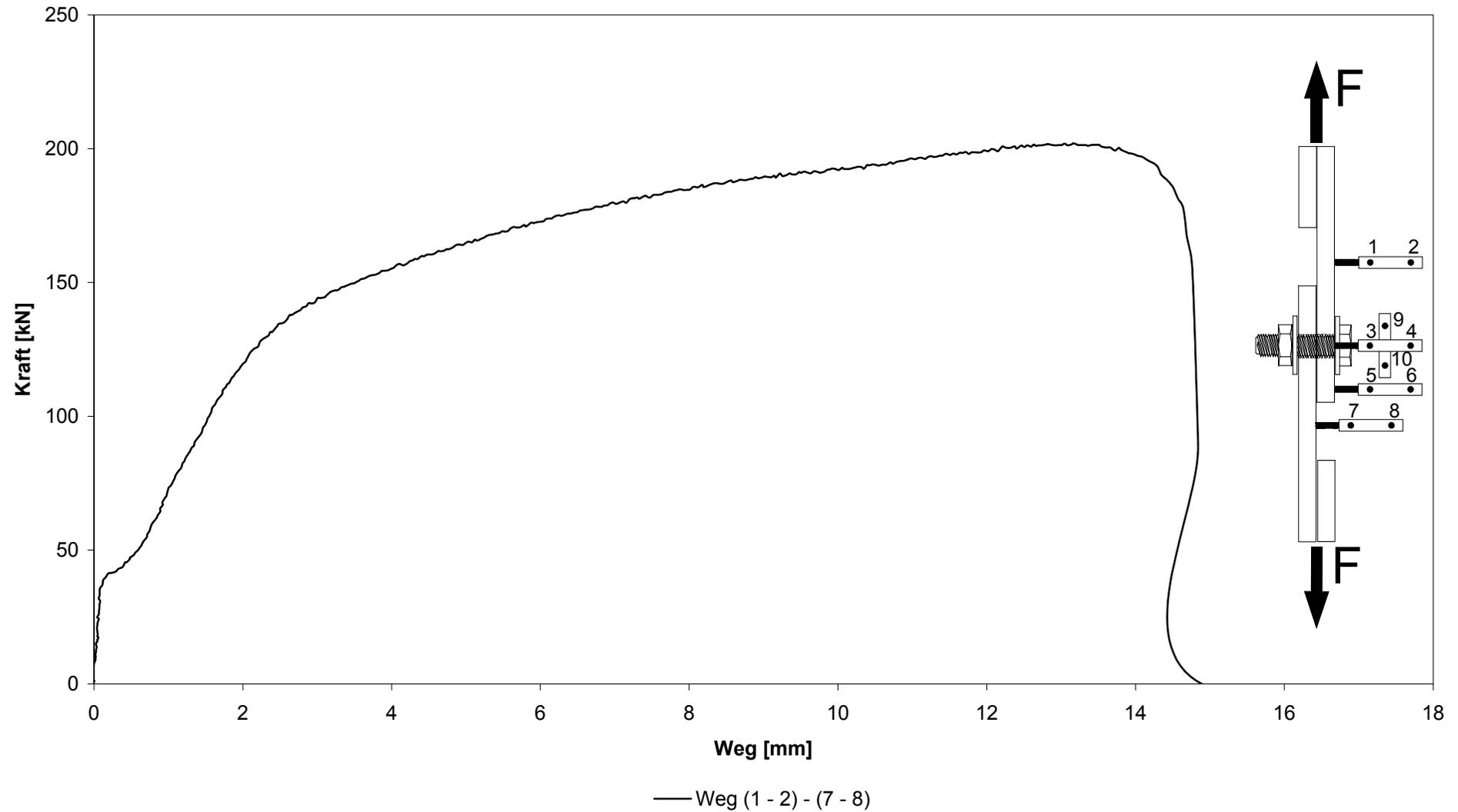
### Versuch 39



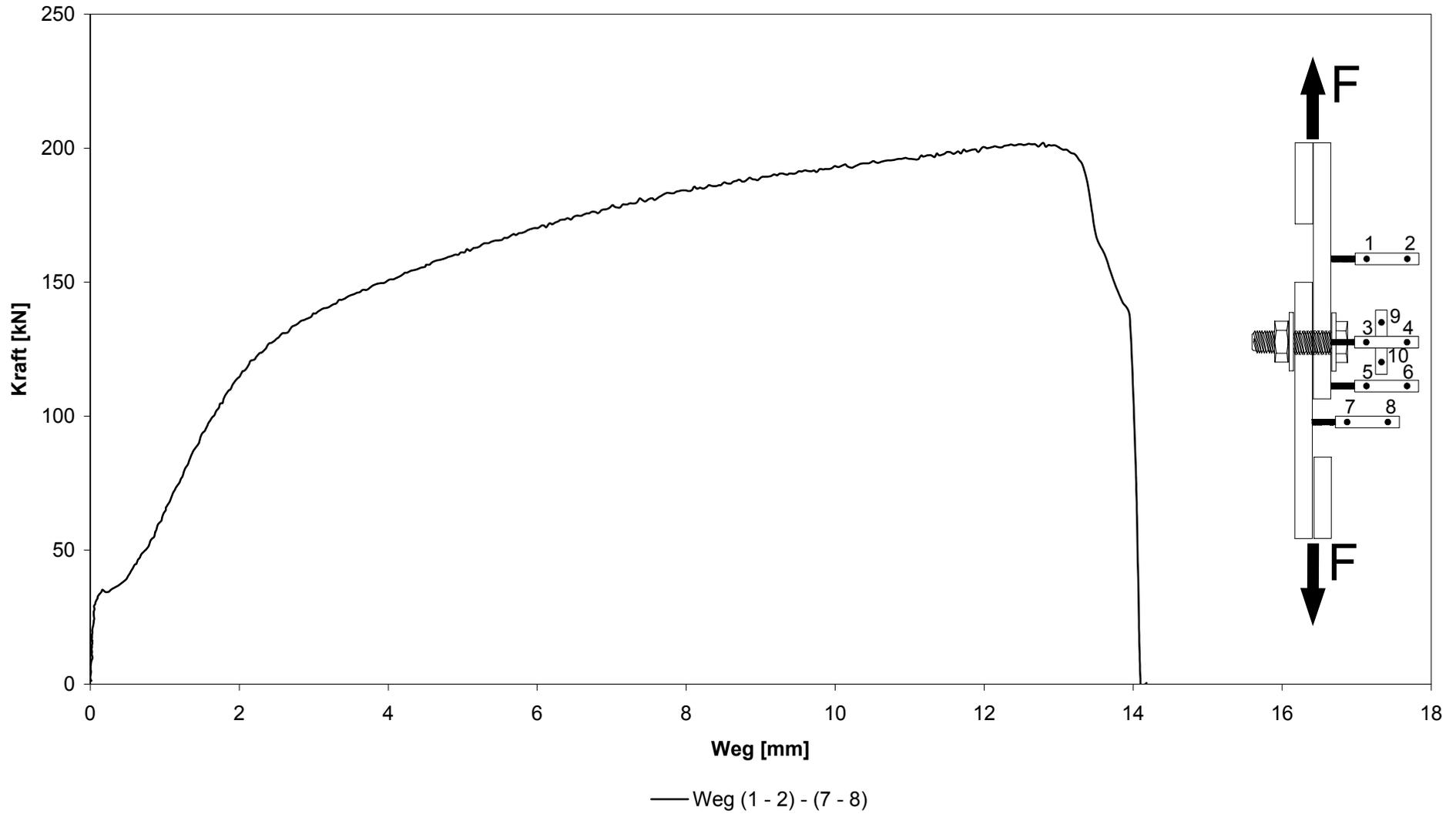
Versuch 40



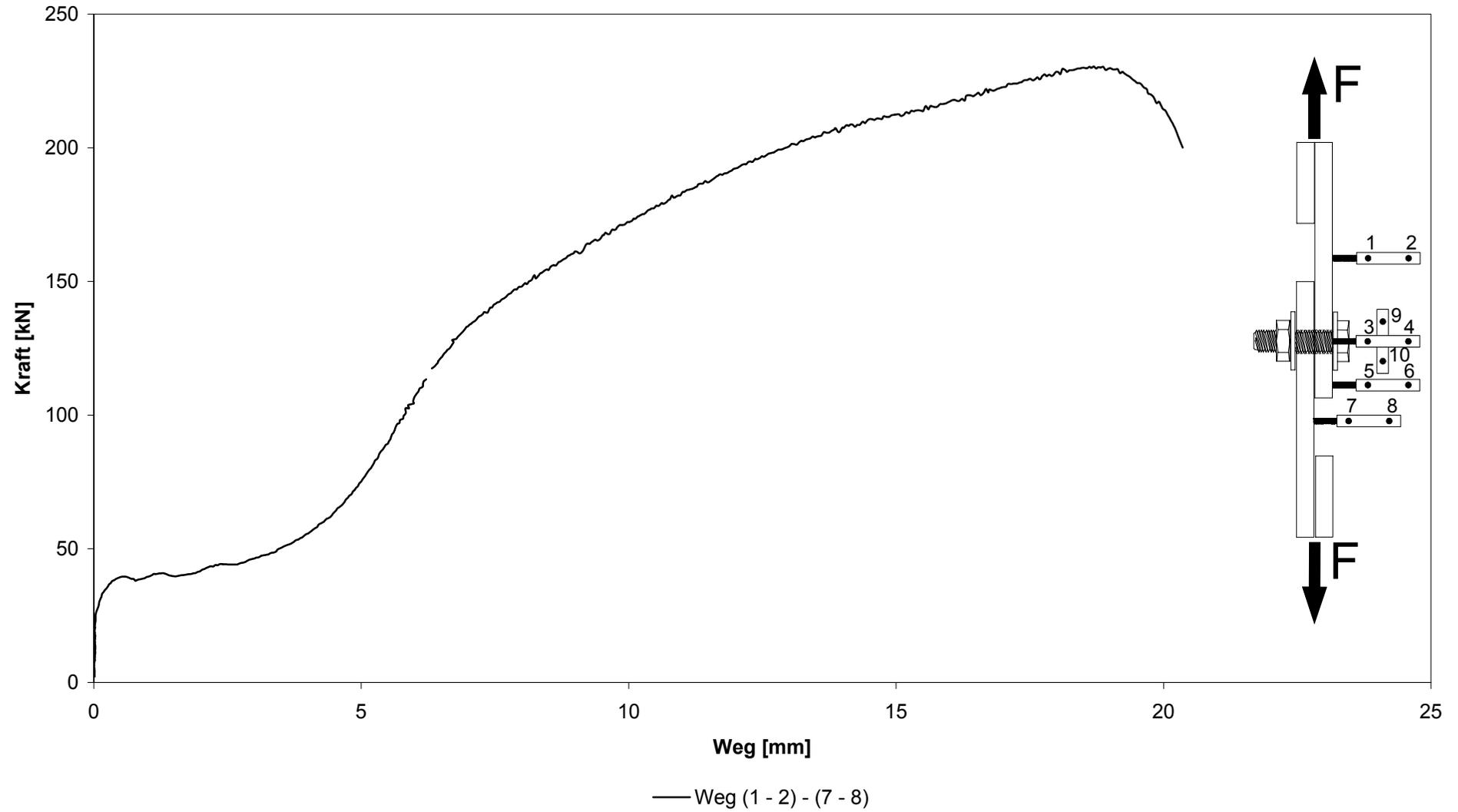
**Versuch 41**



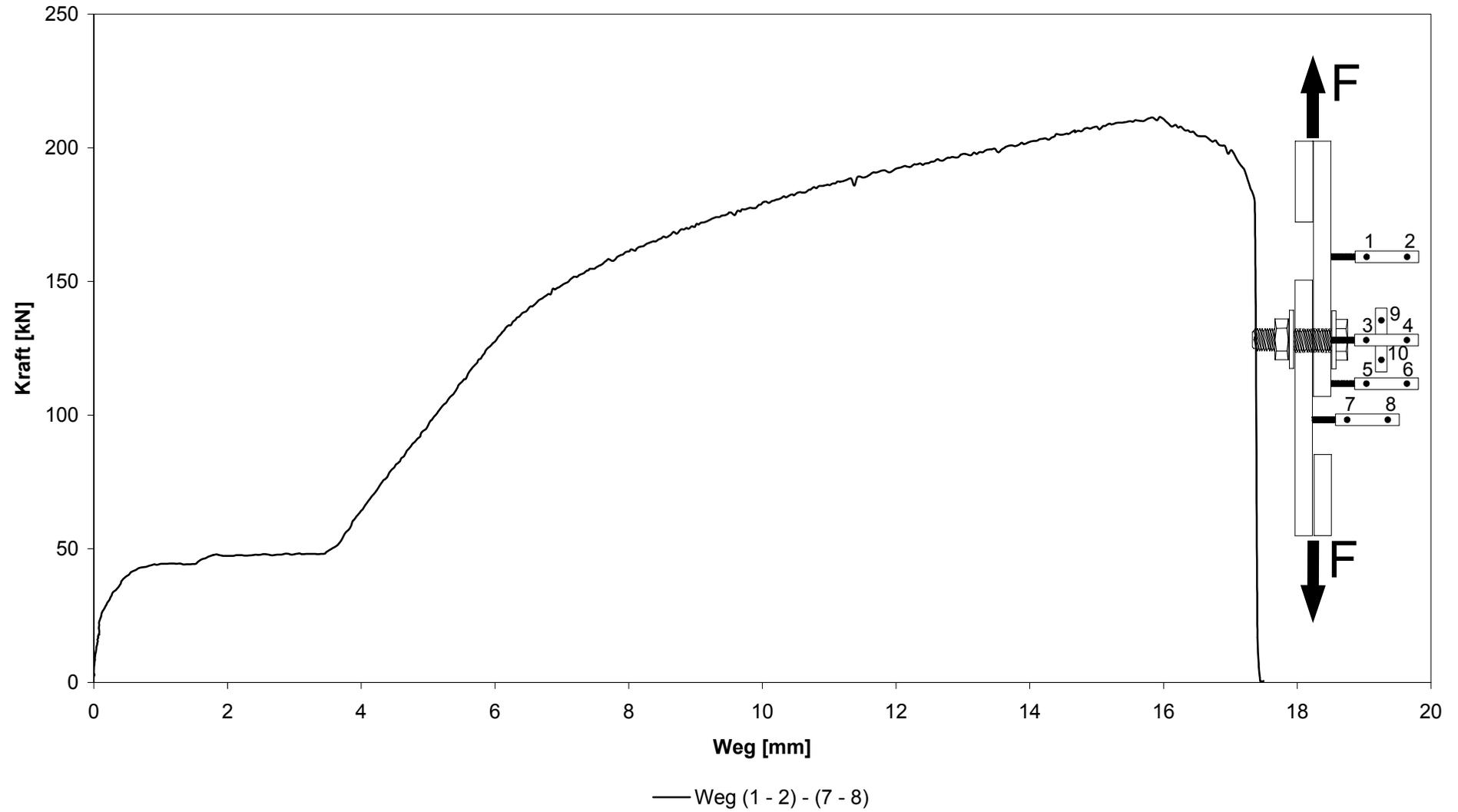
Versuch 42



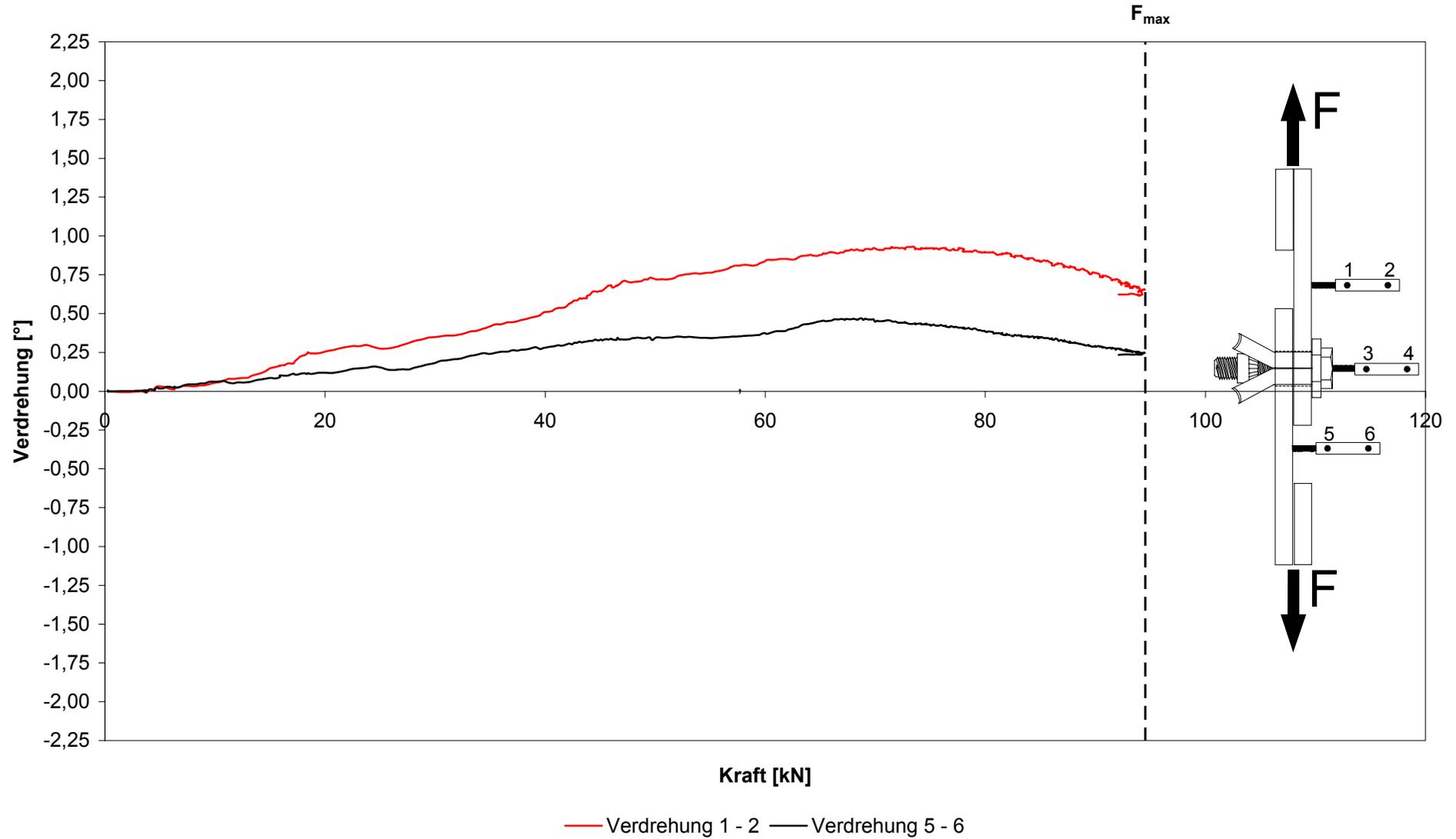
Versuch 43



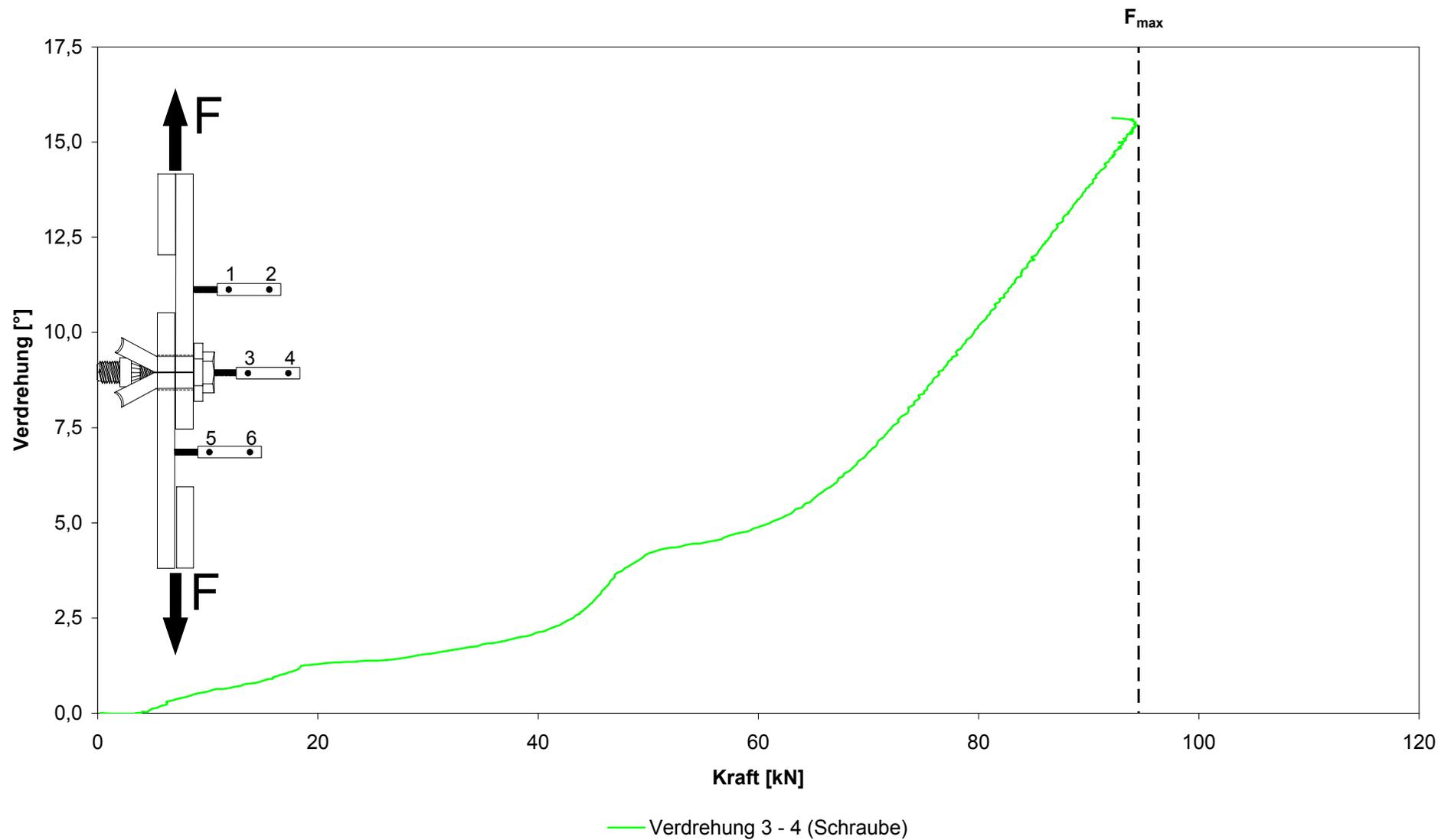
### Versuch 44



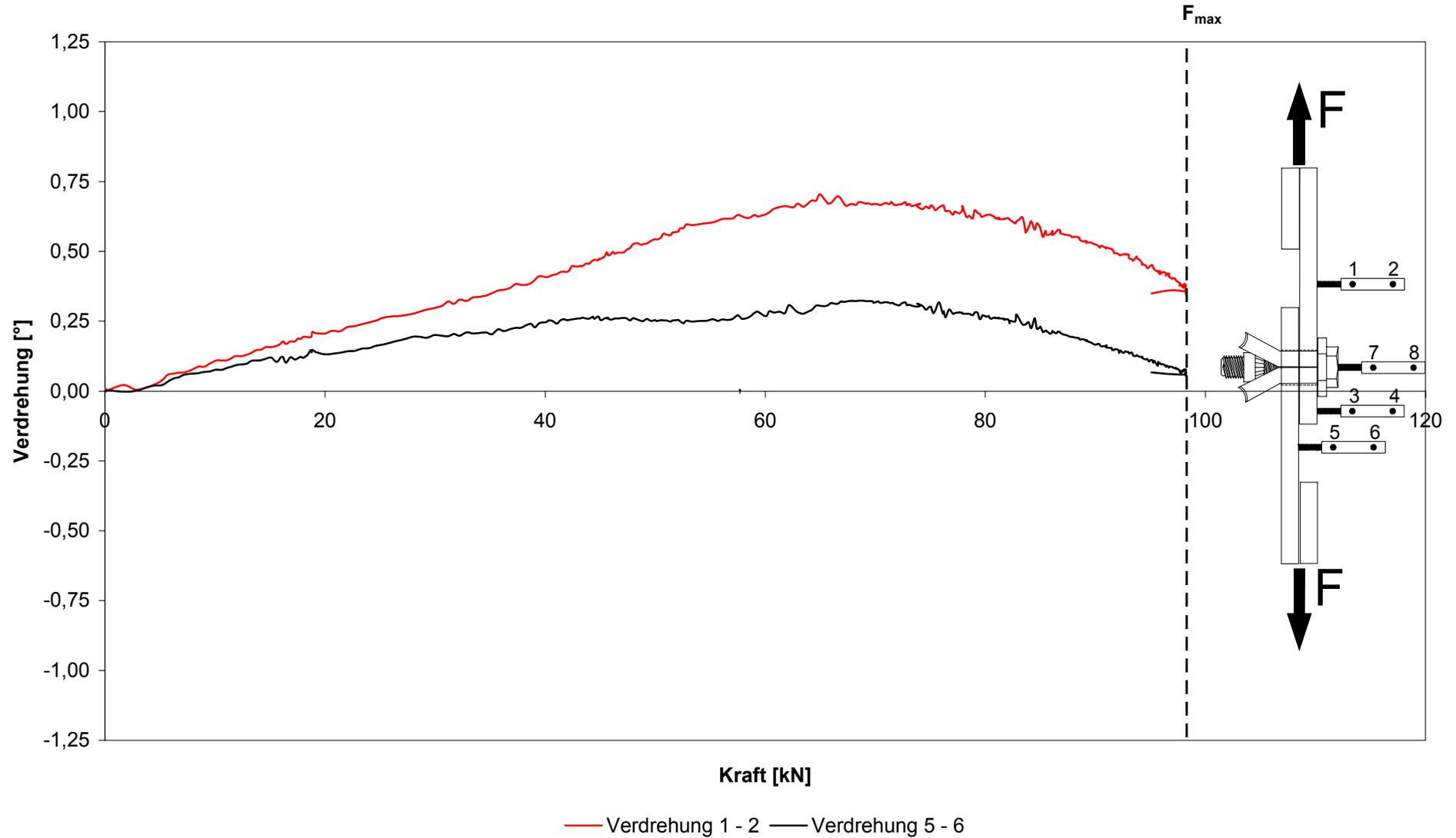
### Versuch 1



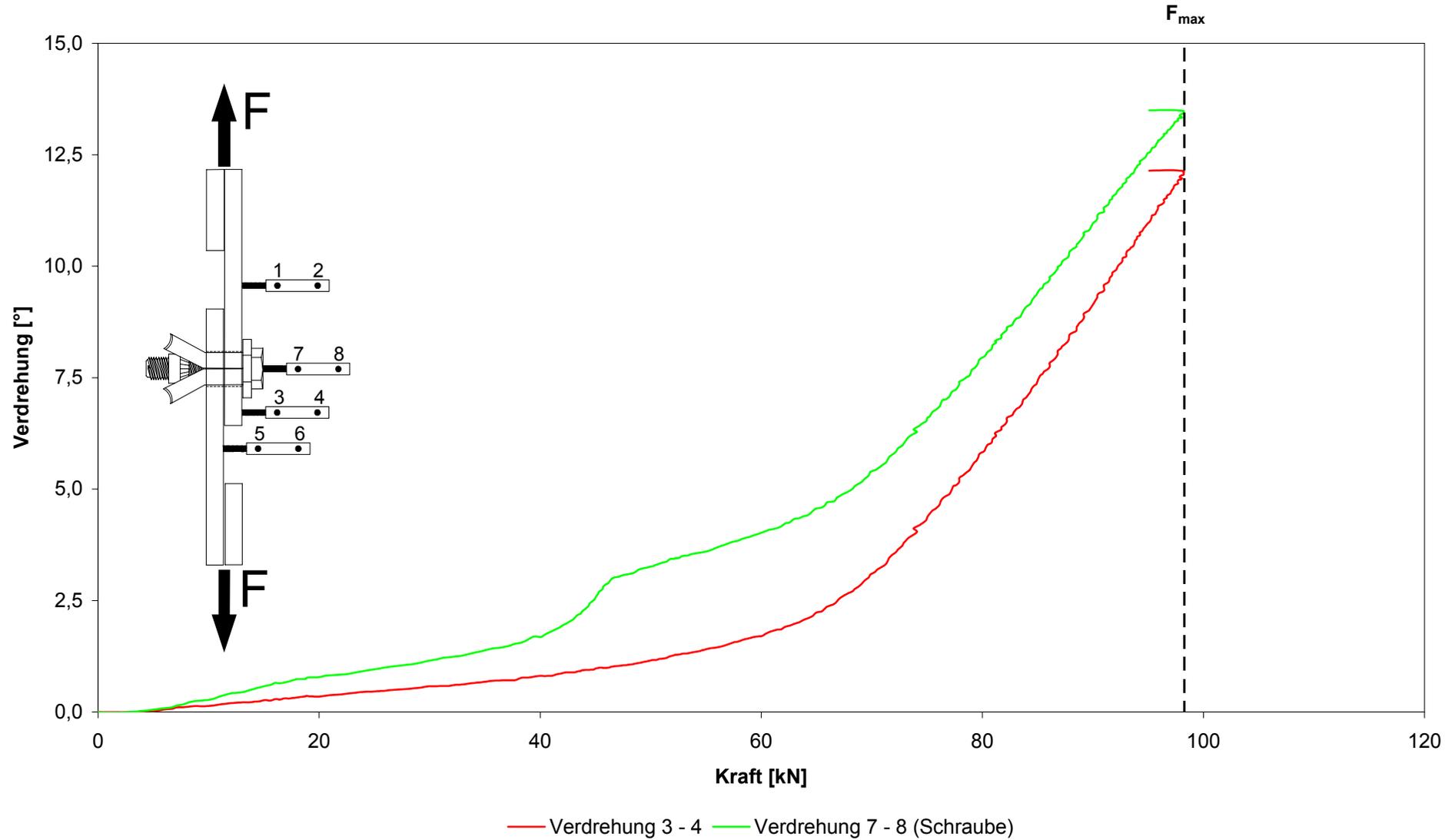
### Versuch 1



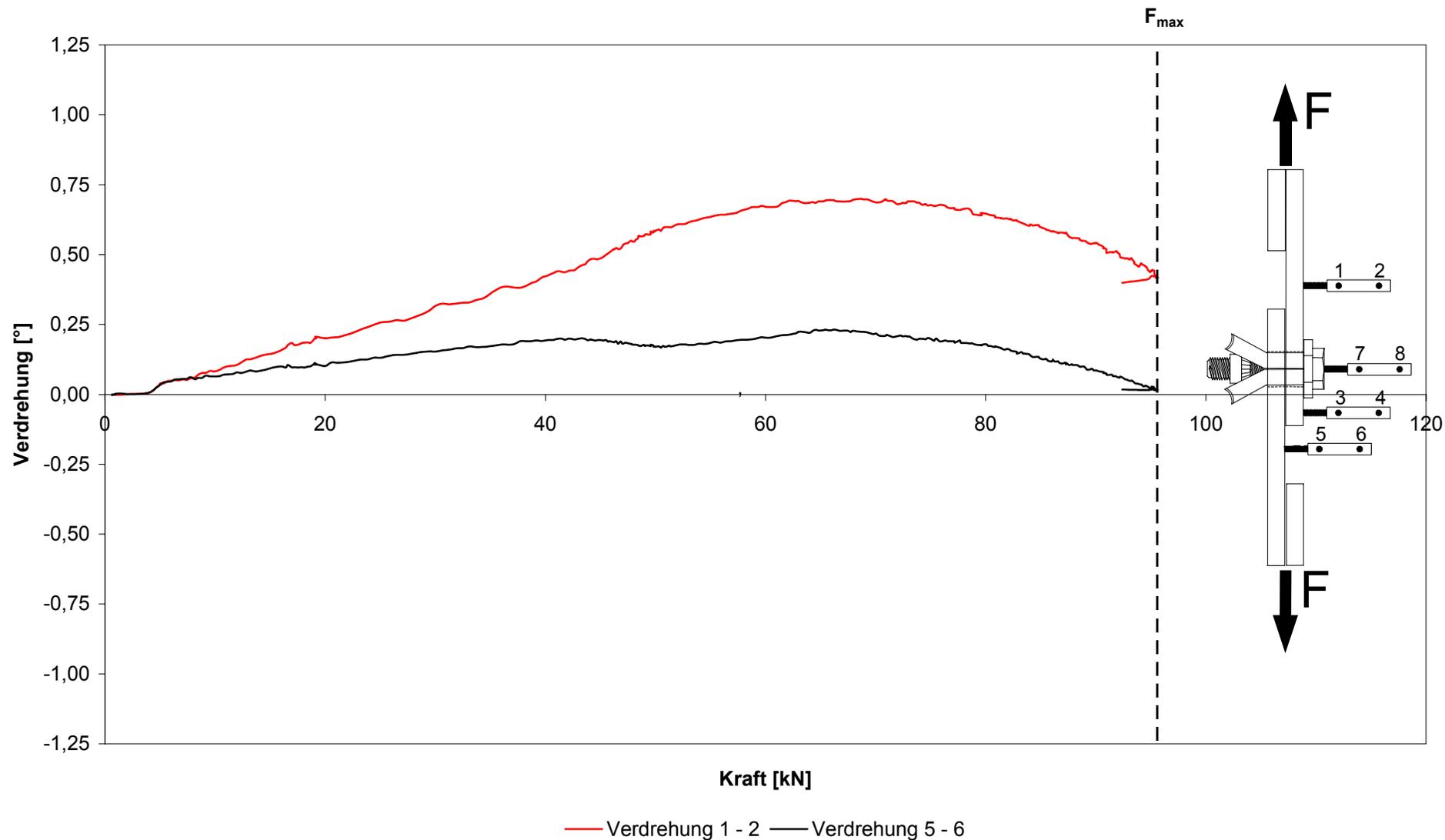
### Versuch 2



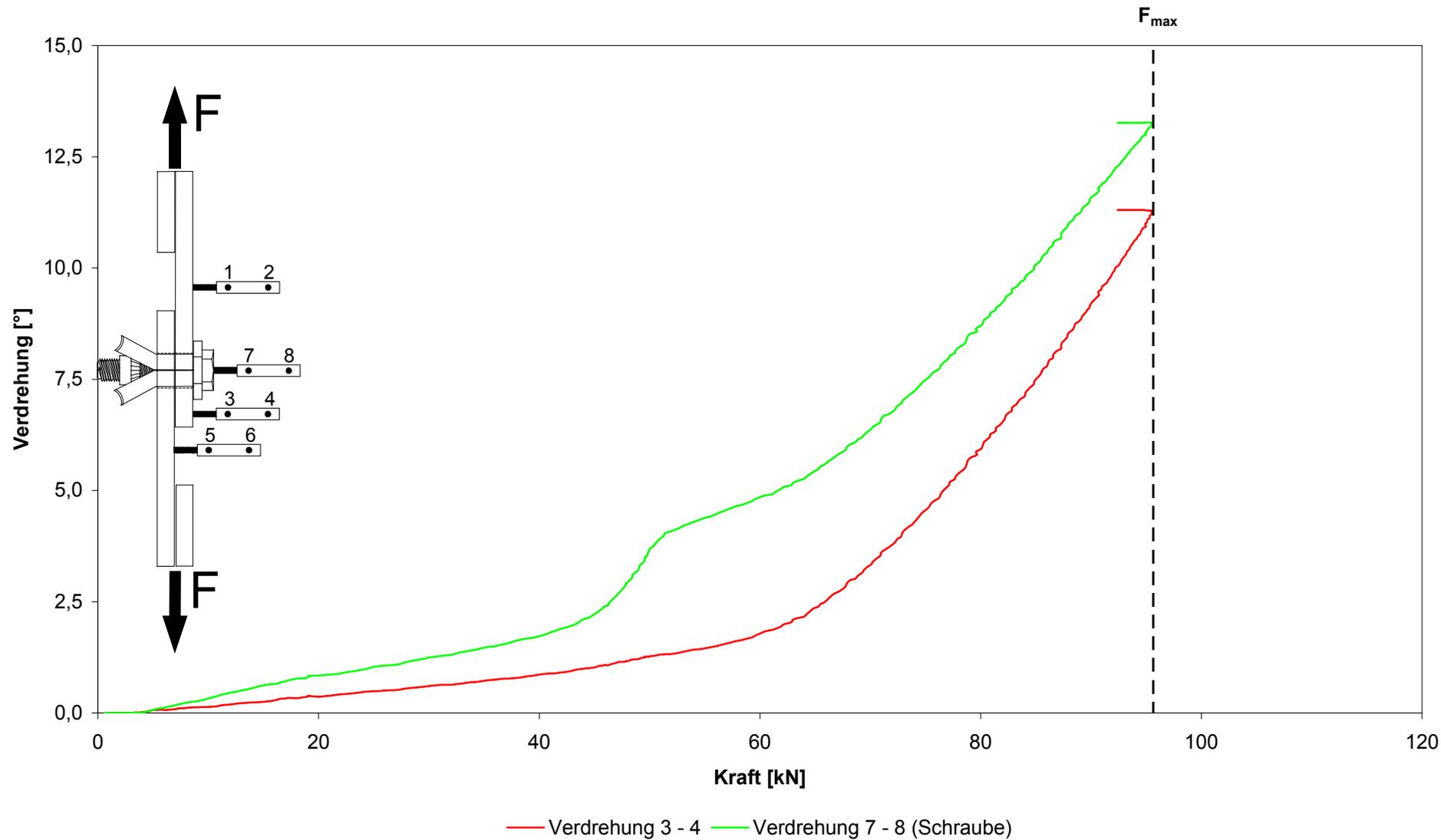
### Versuch 2



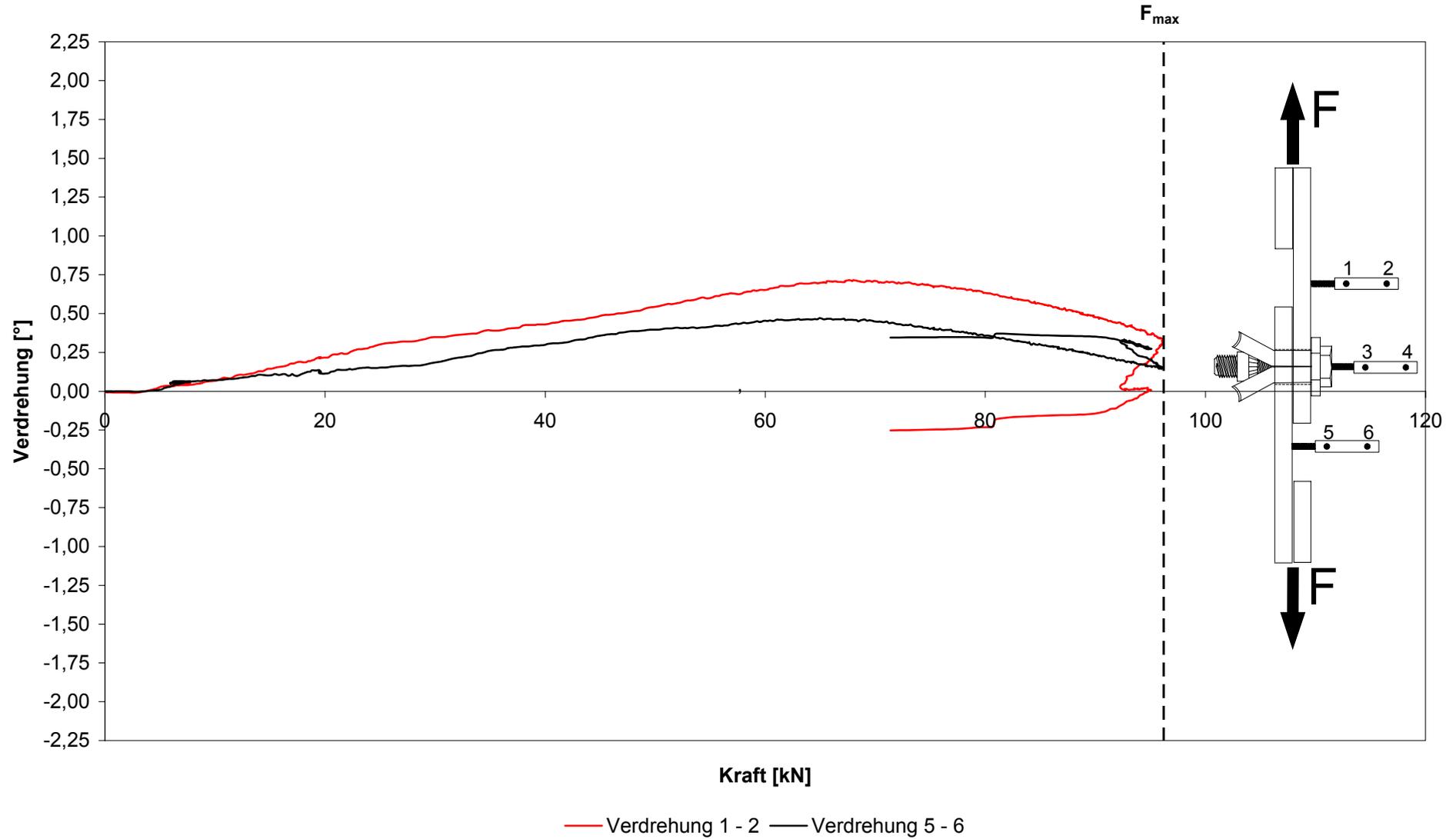
### Versuch 3



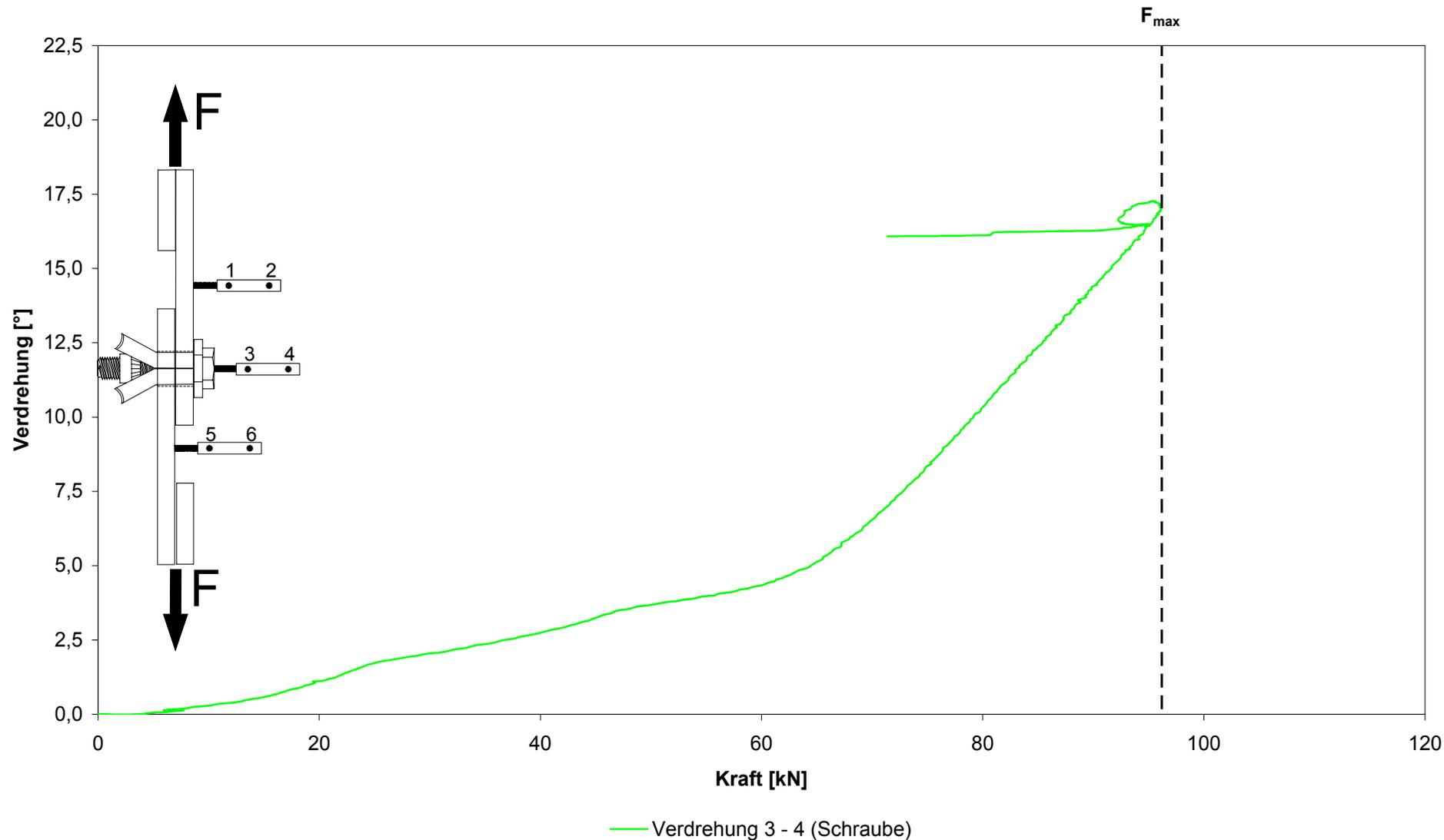
### Versuch 3



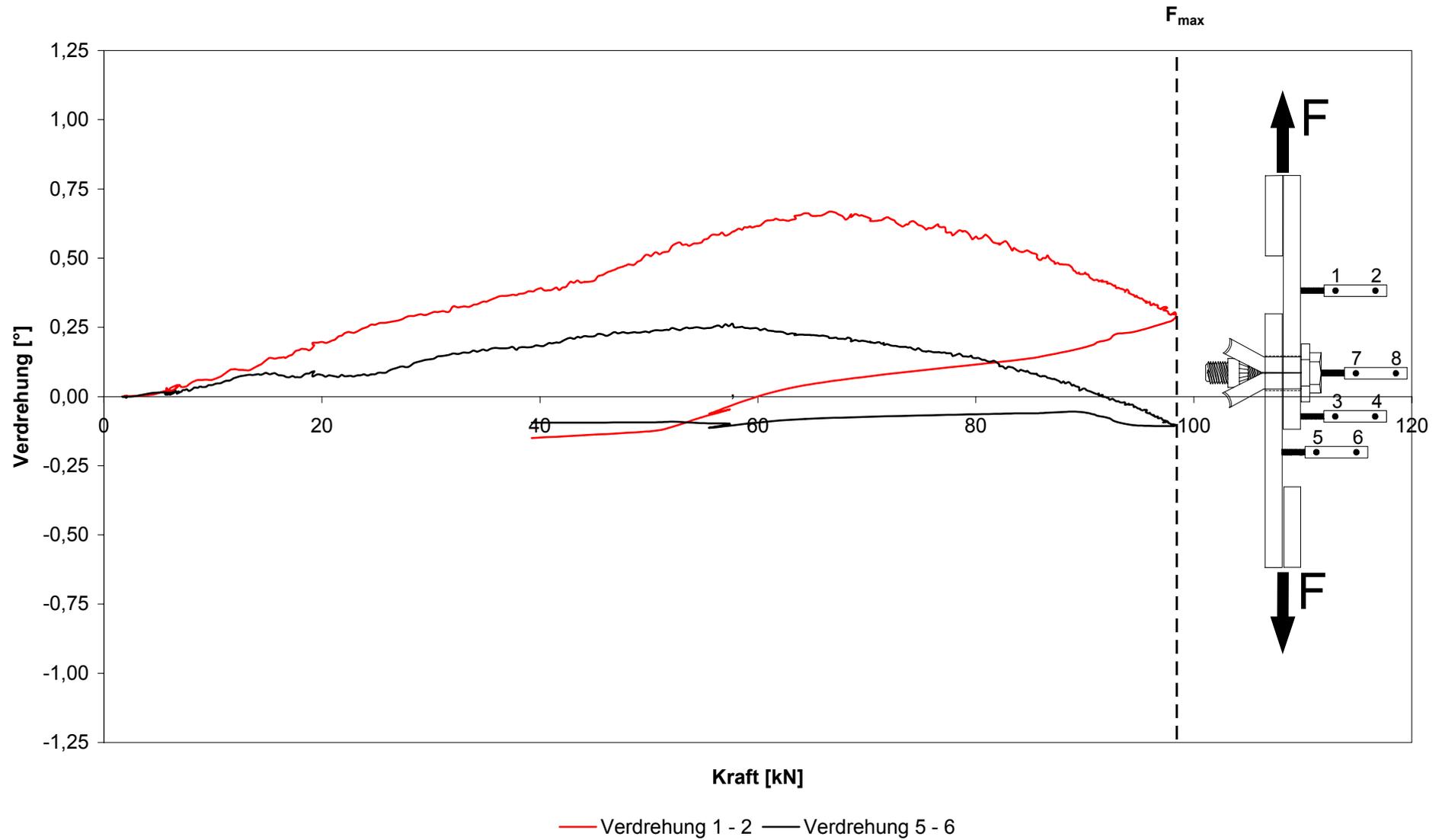
### Versuch 4



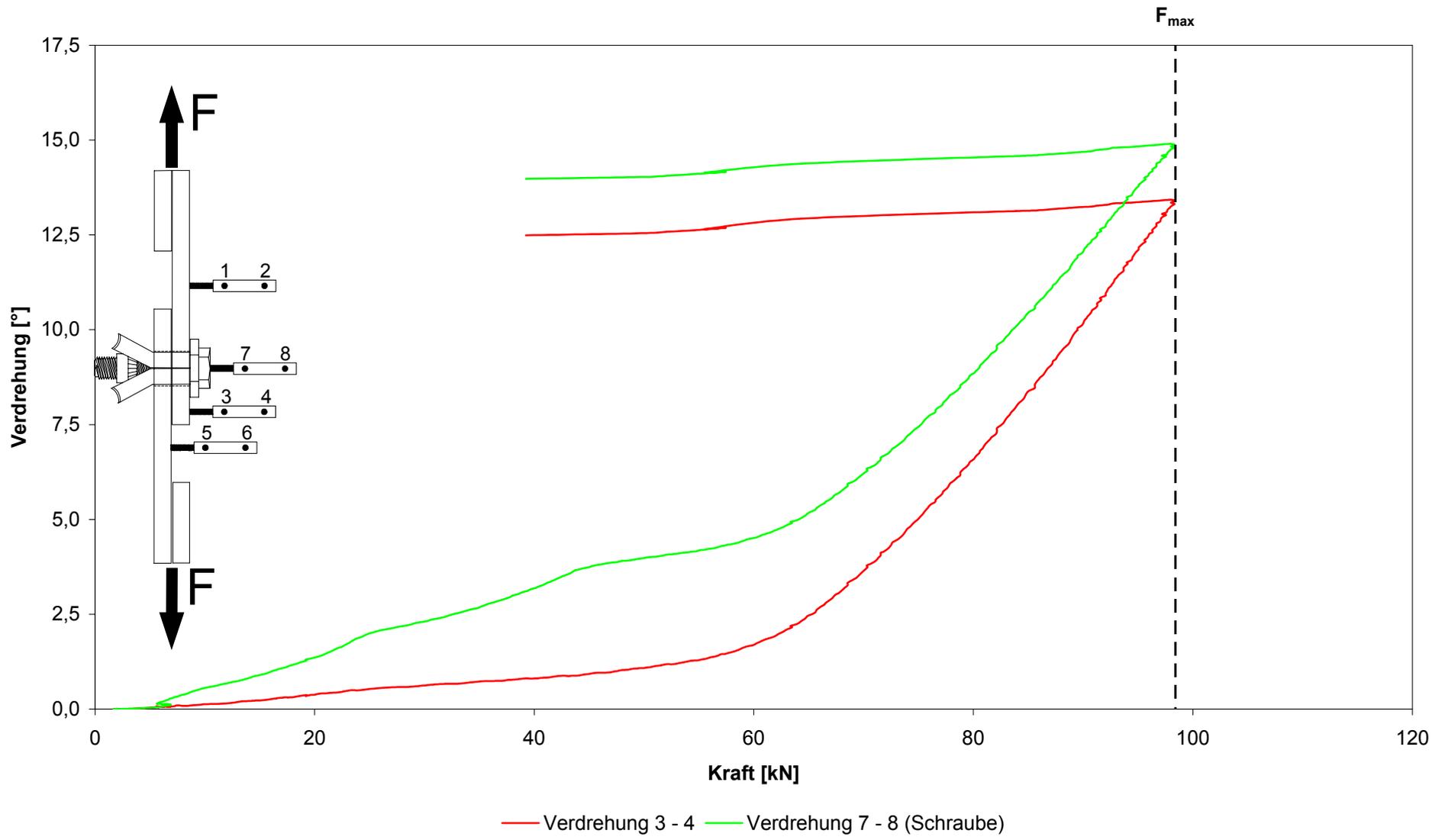
### Versuch 4



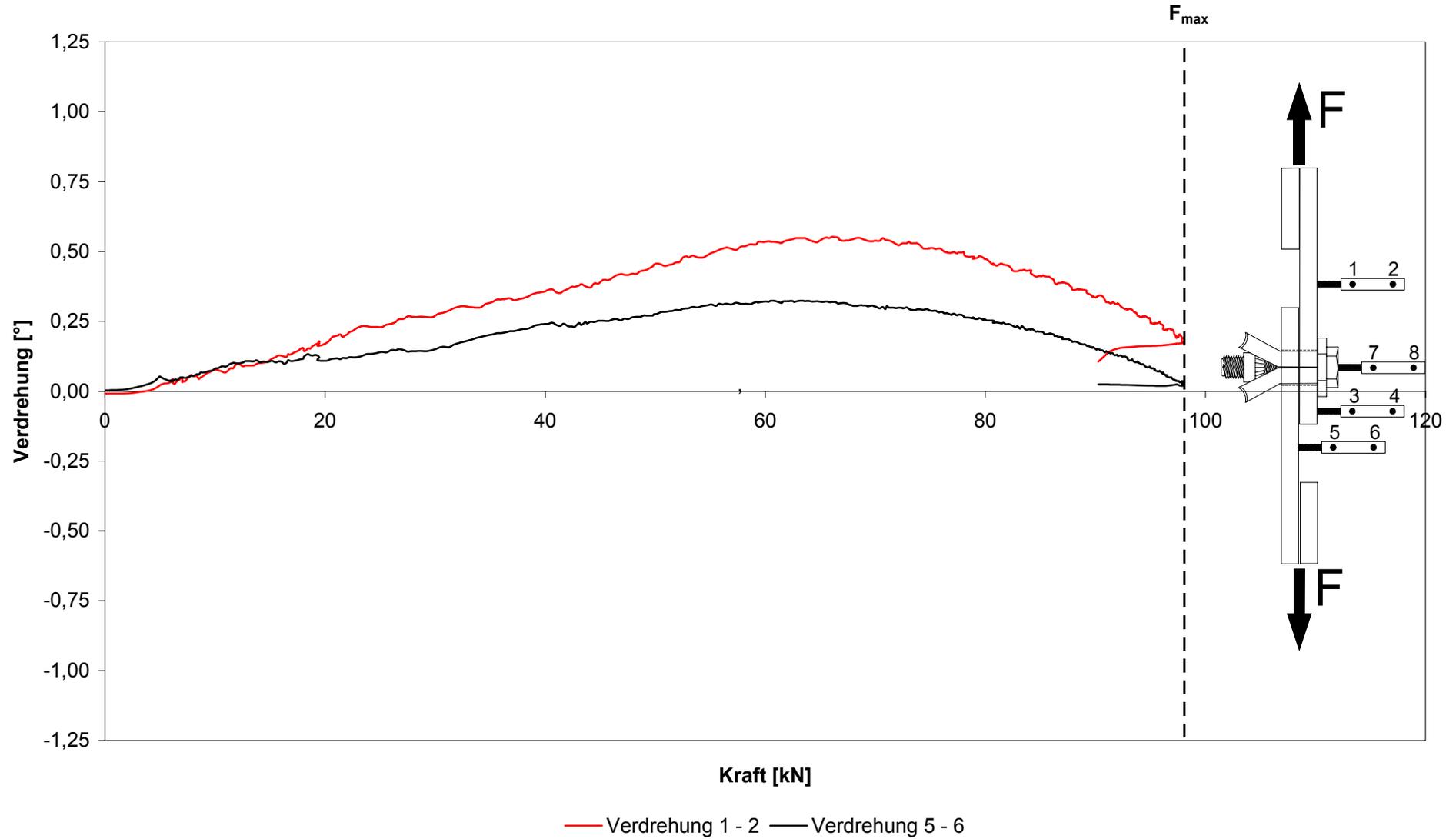
**Versuch 5**



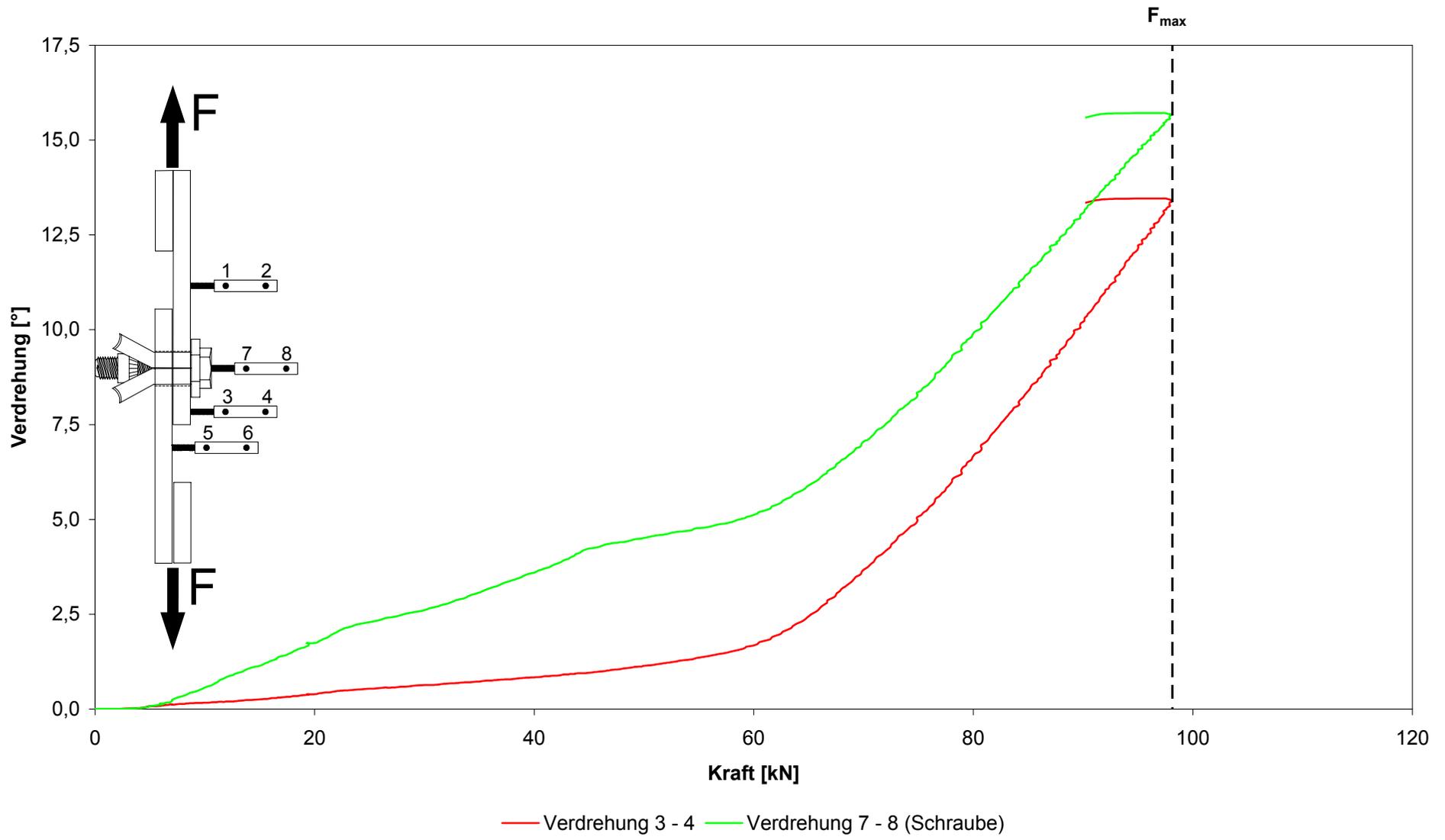
Versuch 5



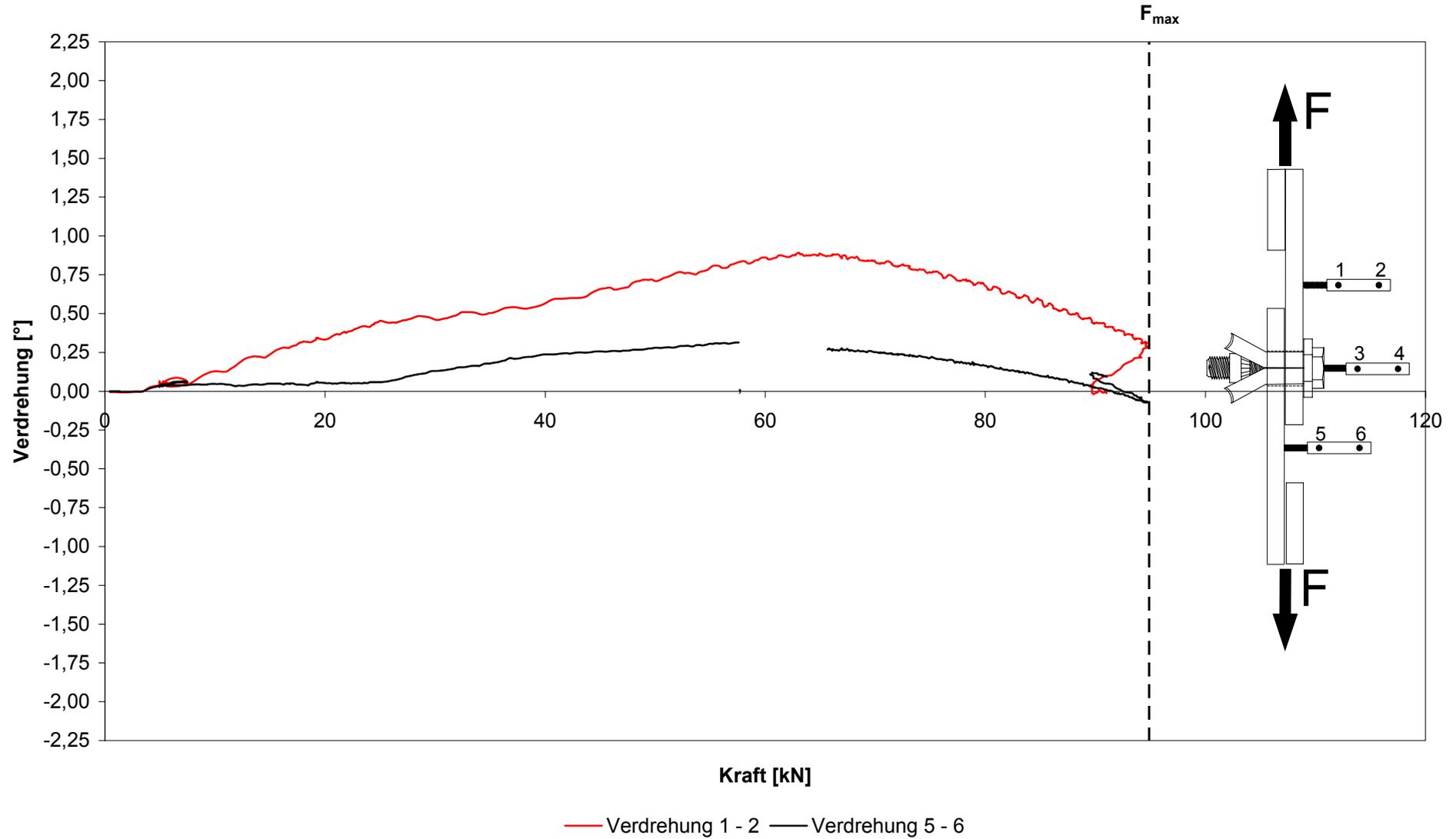
### Versuch 6



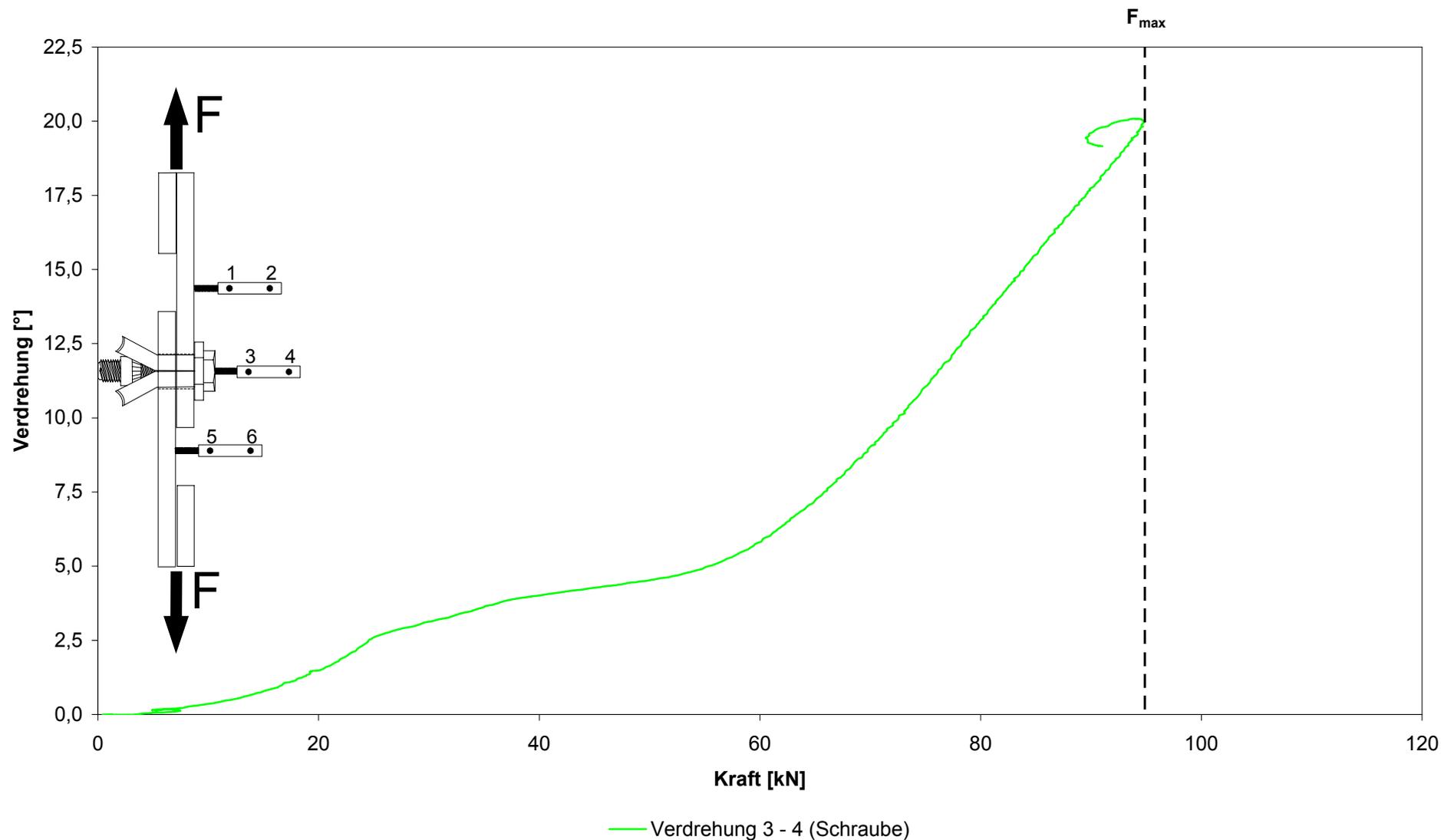
Versuch 6



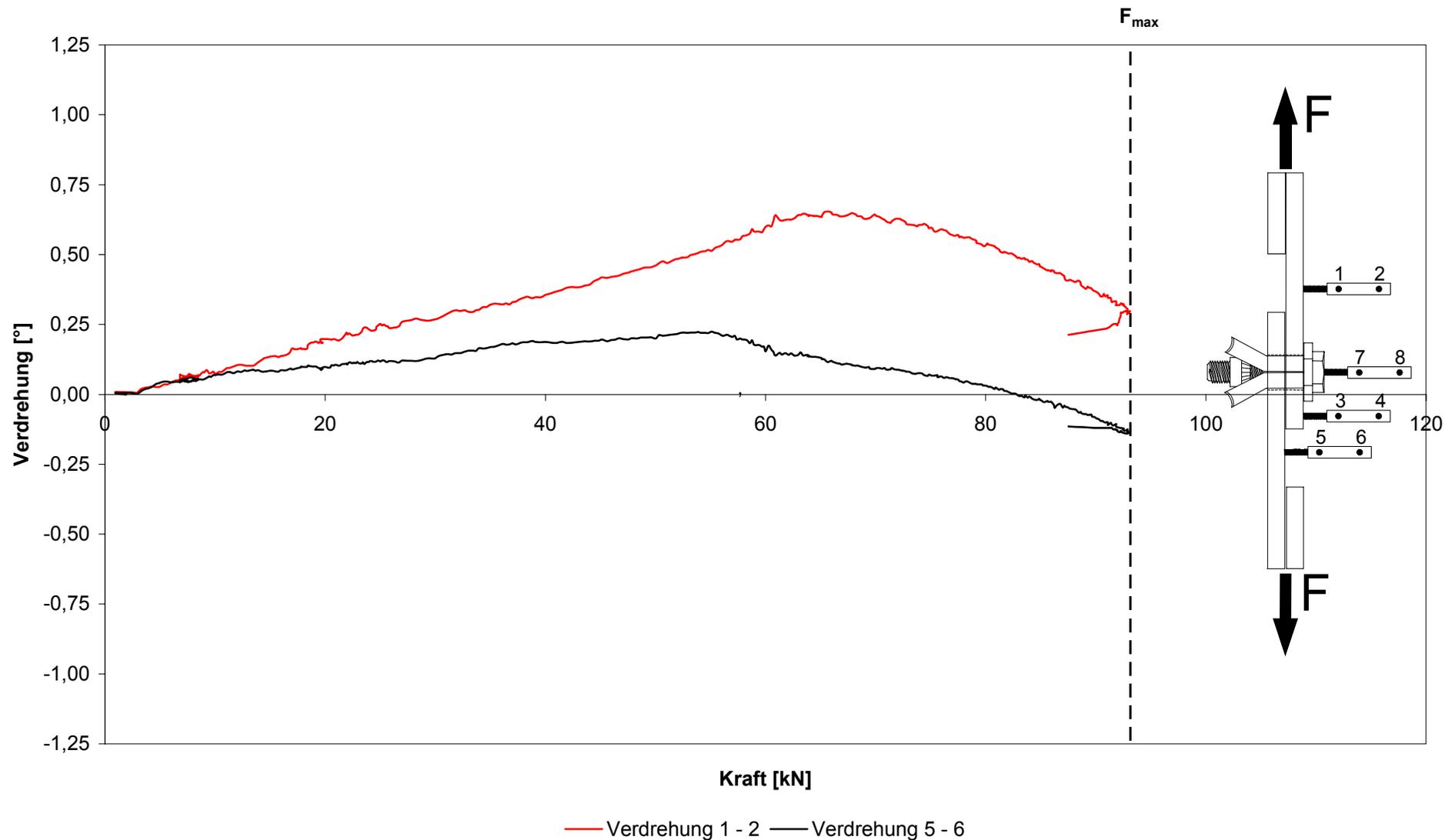
### Versuch 7



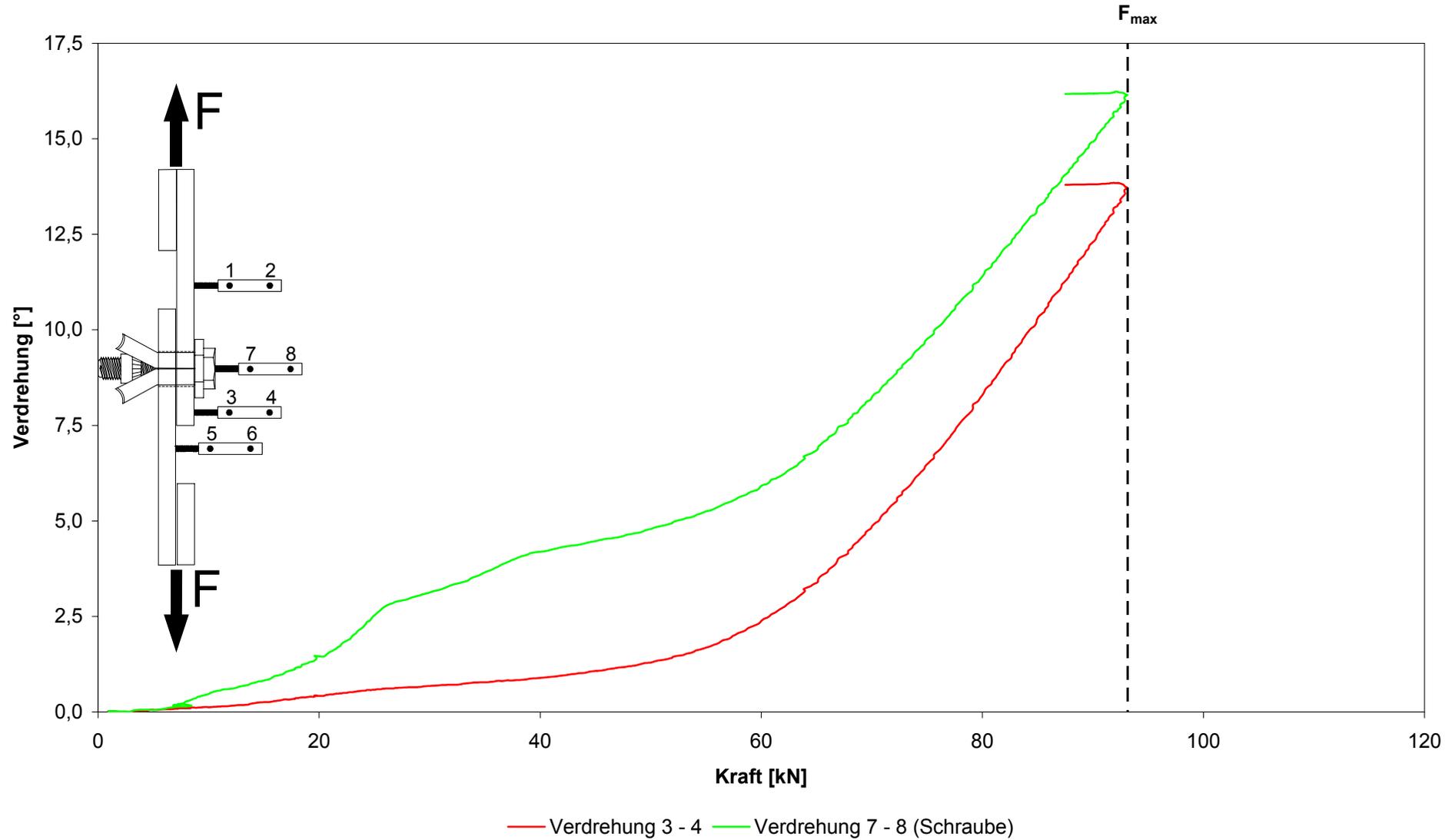
### Versuch 7



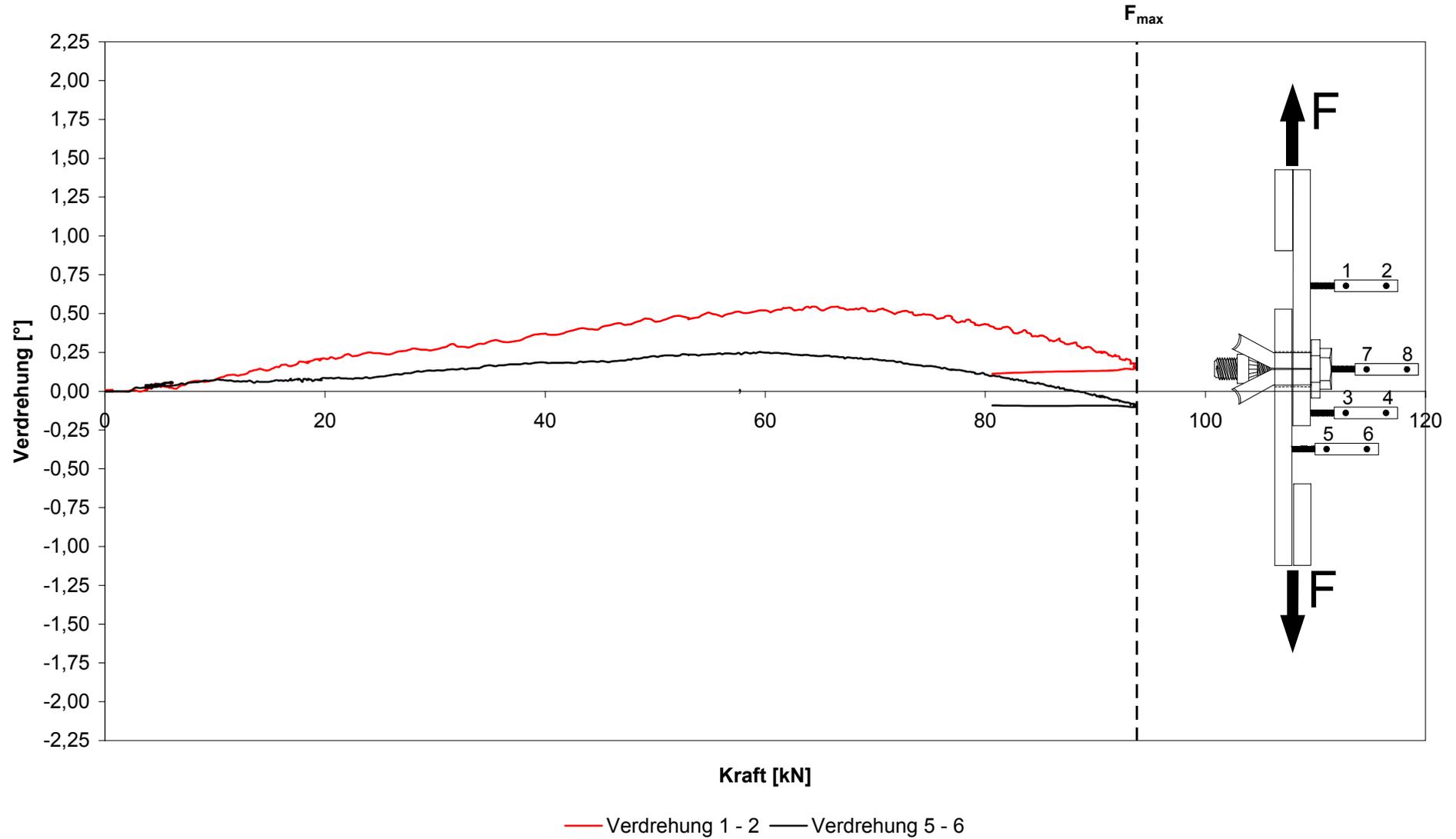
### Versuch 8



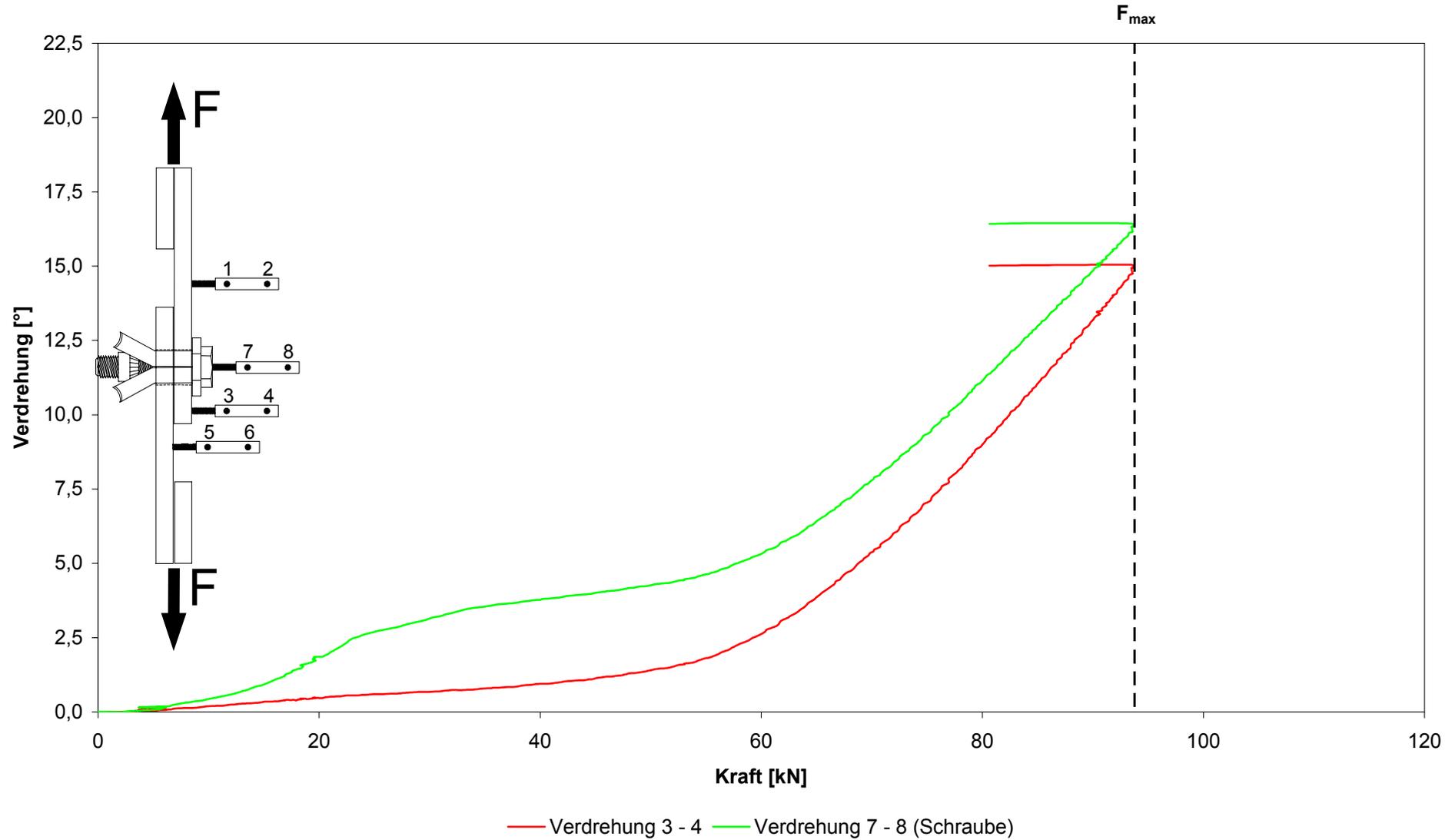
### Versuch 8



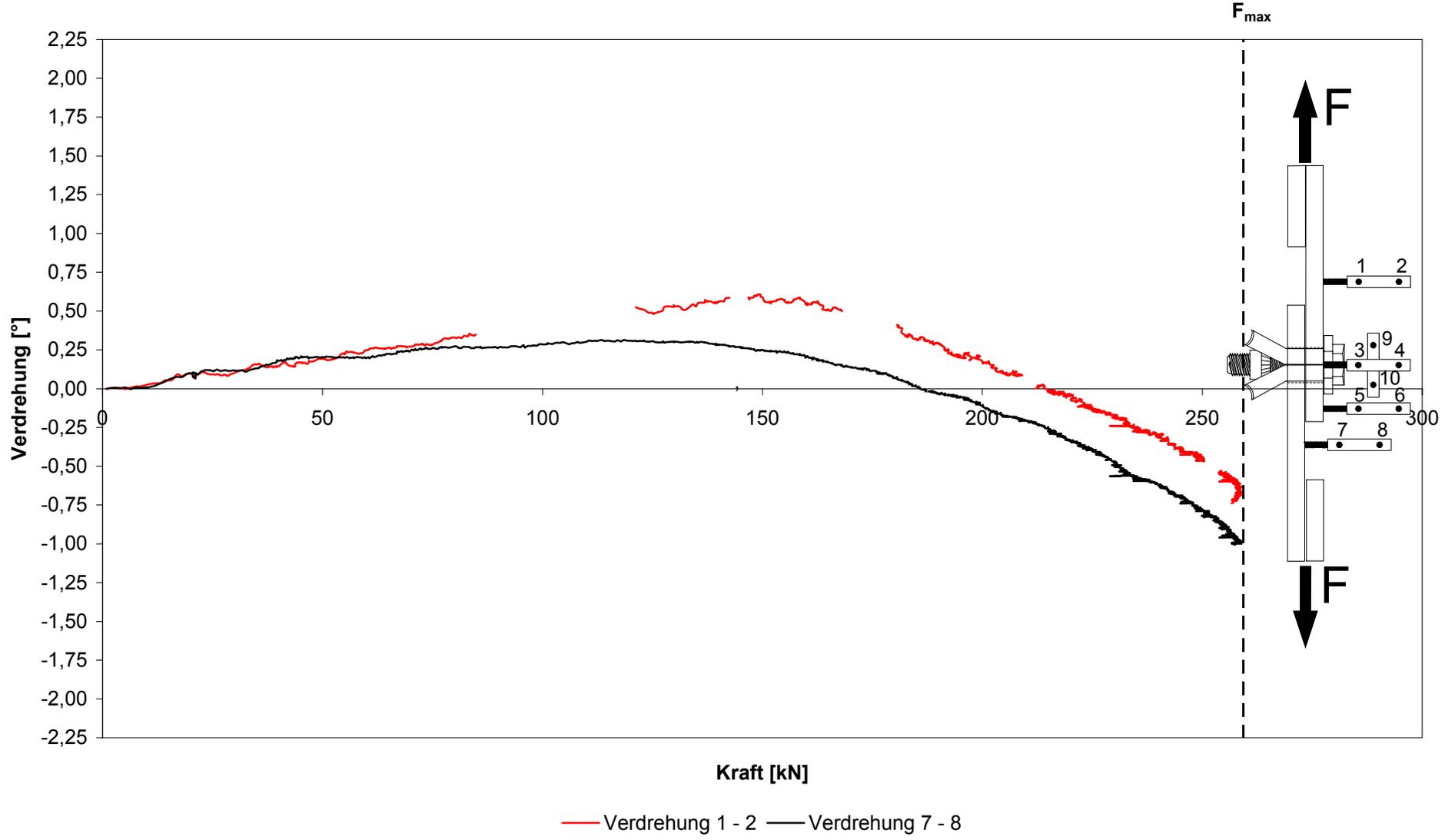
### Versuch 9



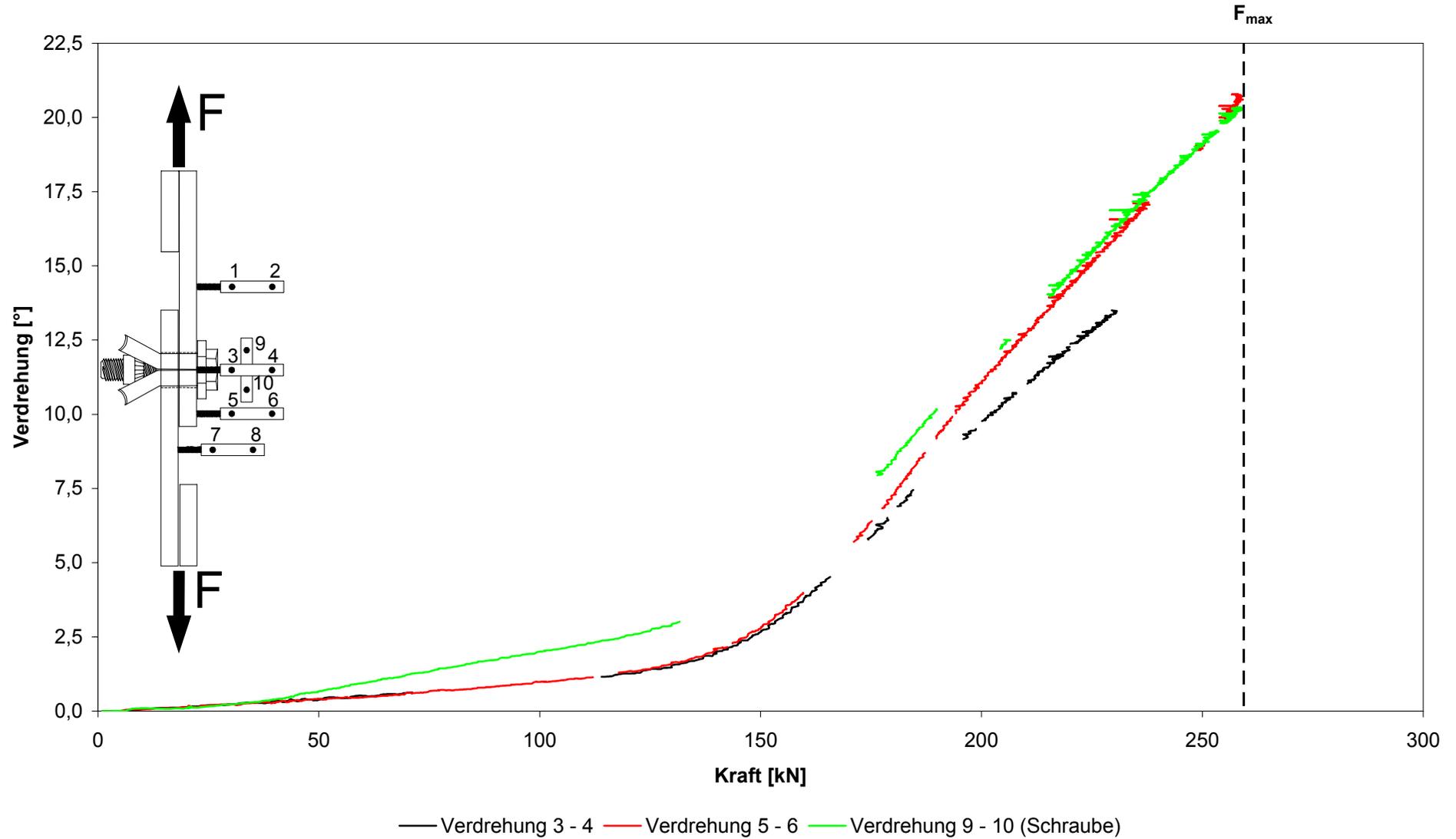
### Versuch 9



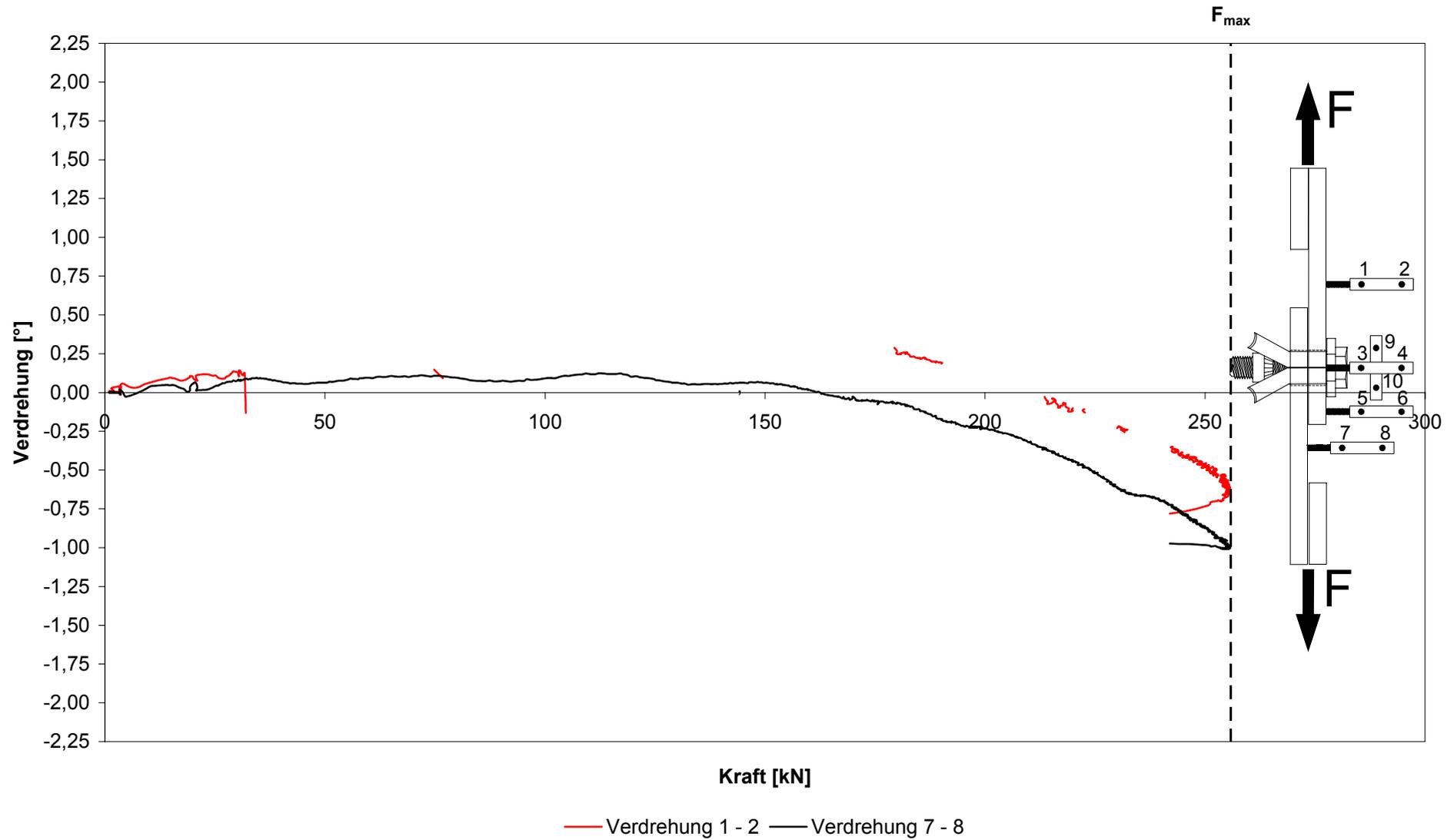
**Versuch 10**



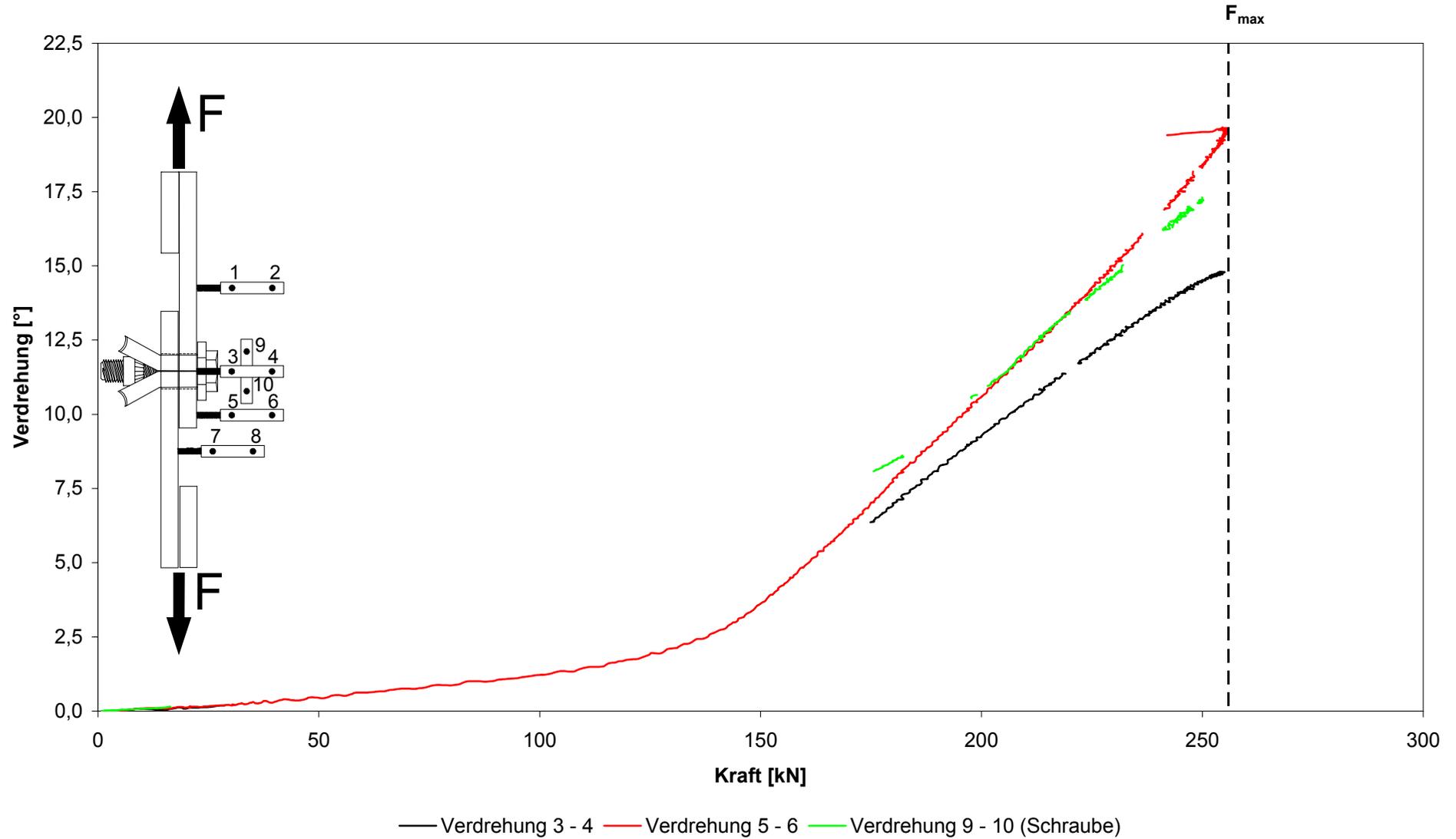
Versuch 10



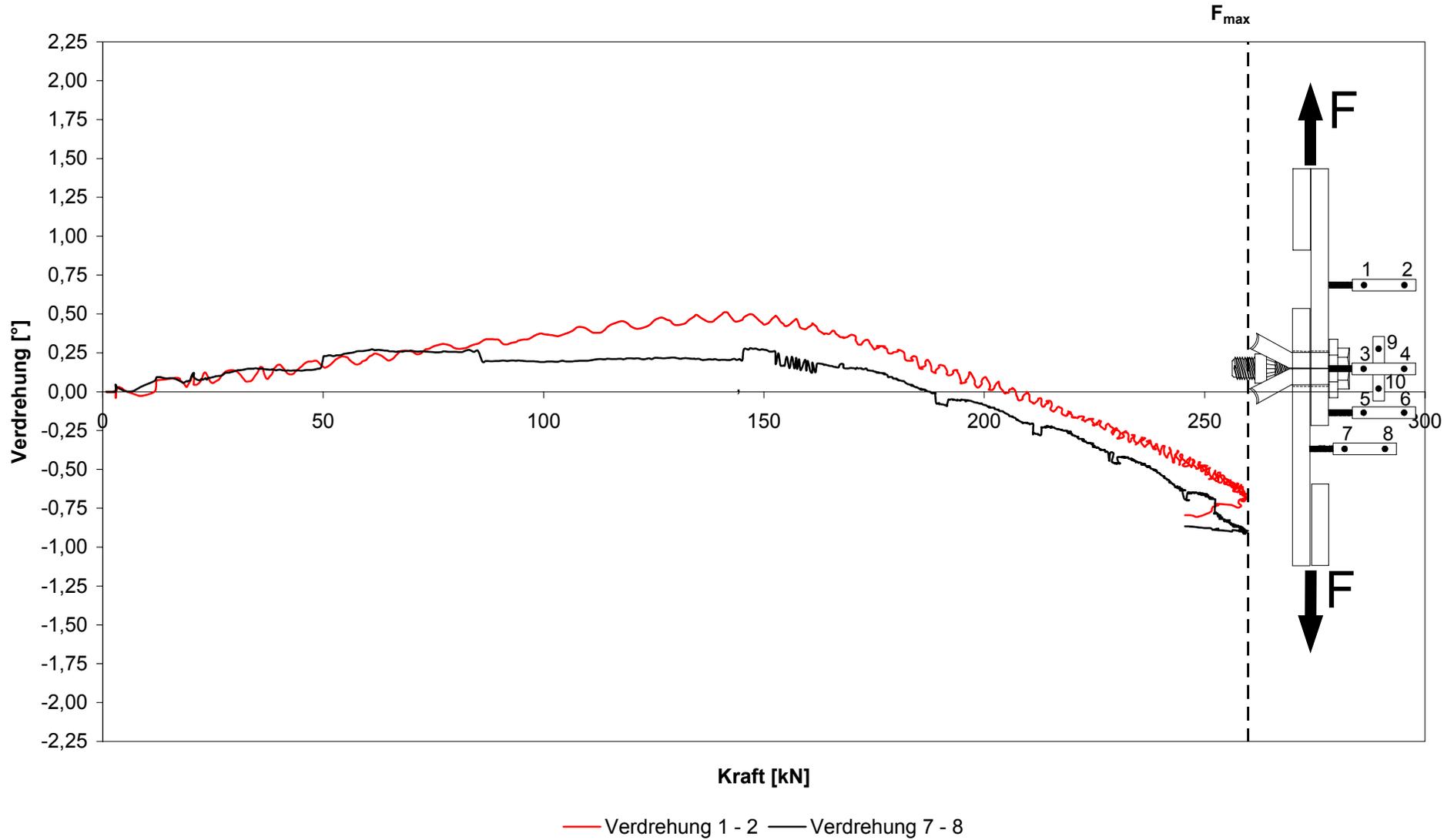
### Versuch 11



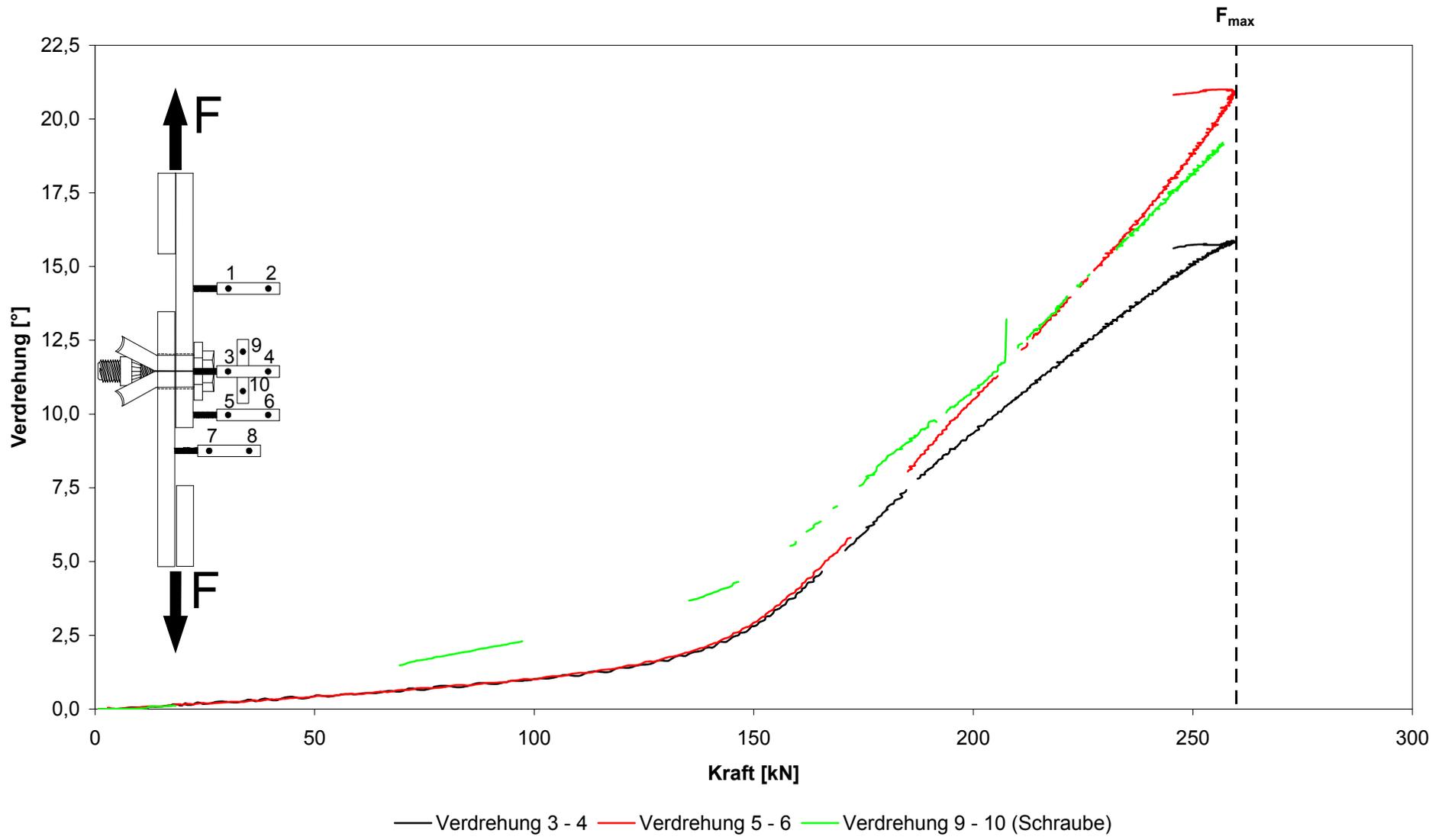
Versuch 11



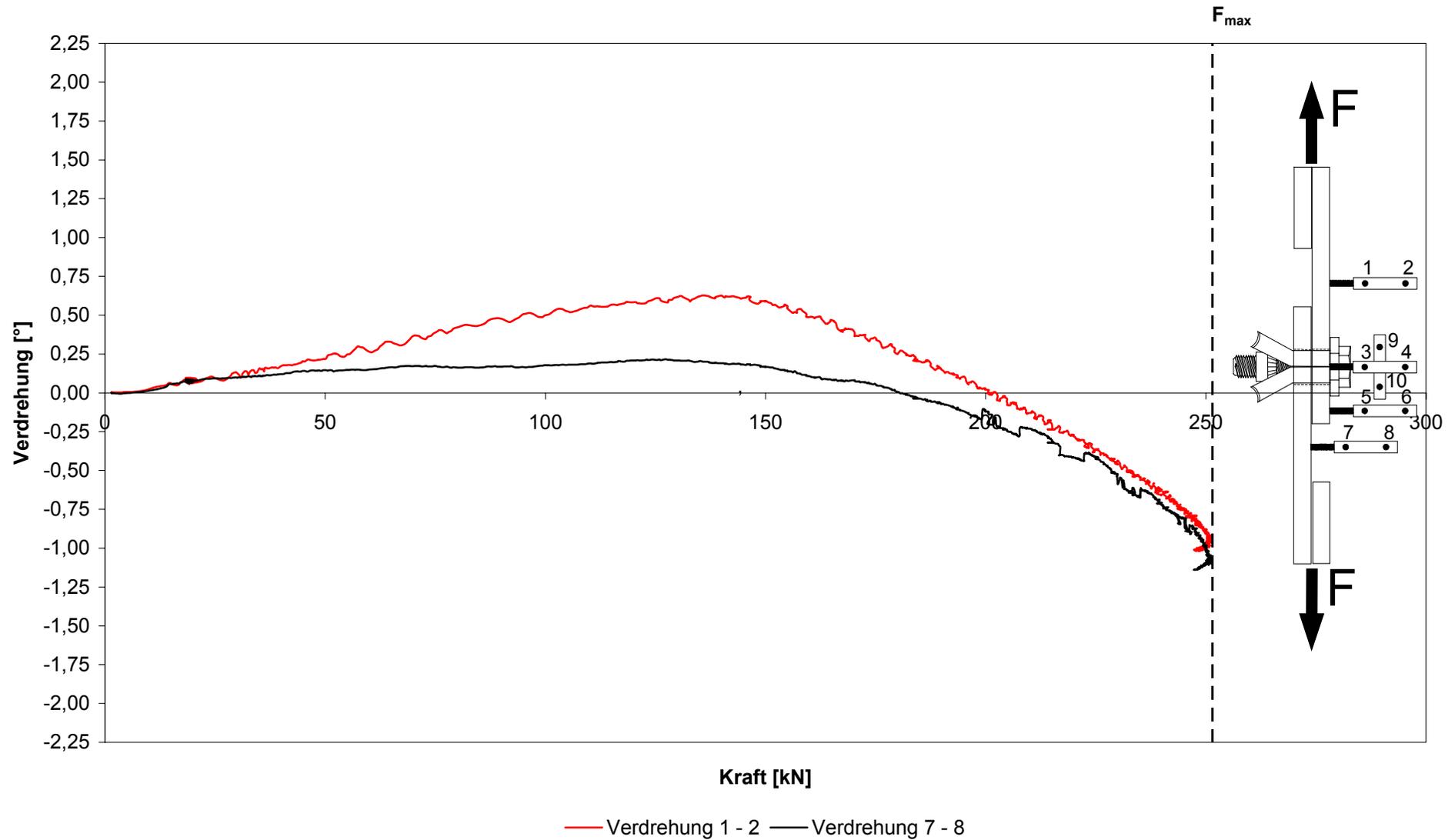
### Versuch 12



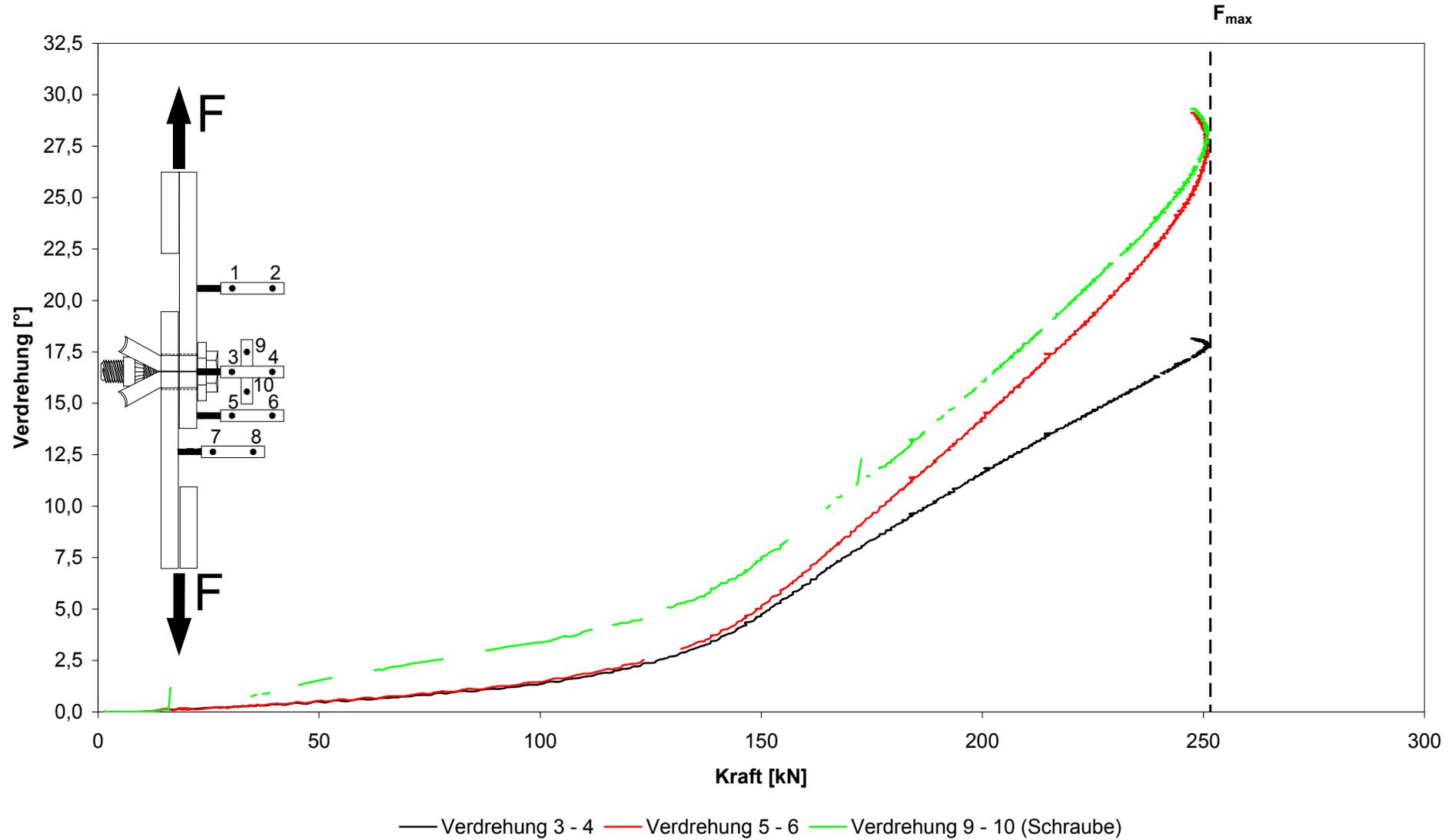
Versuch 12



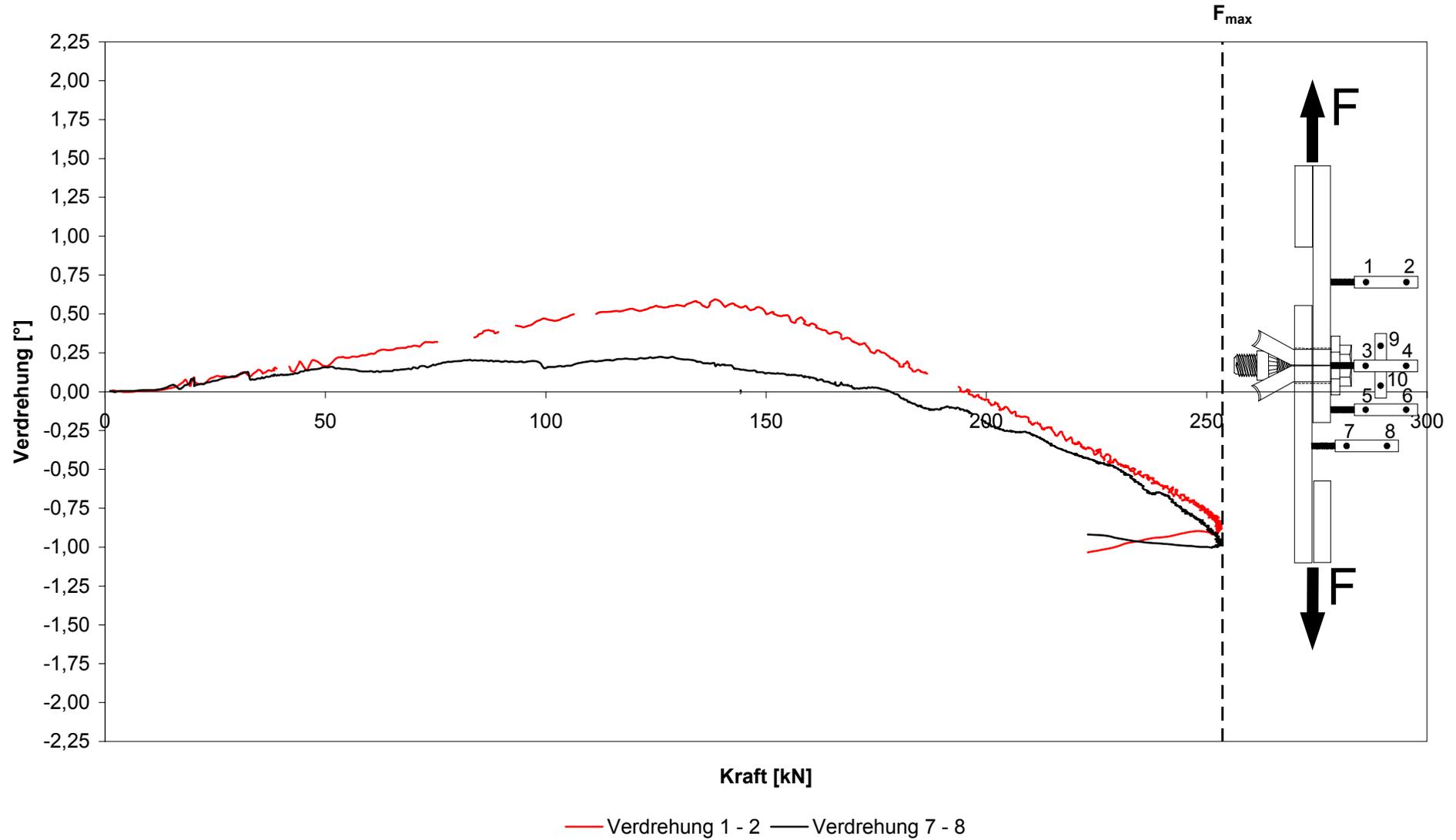
### Versuch 13



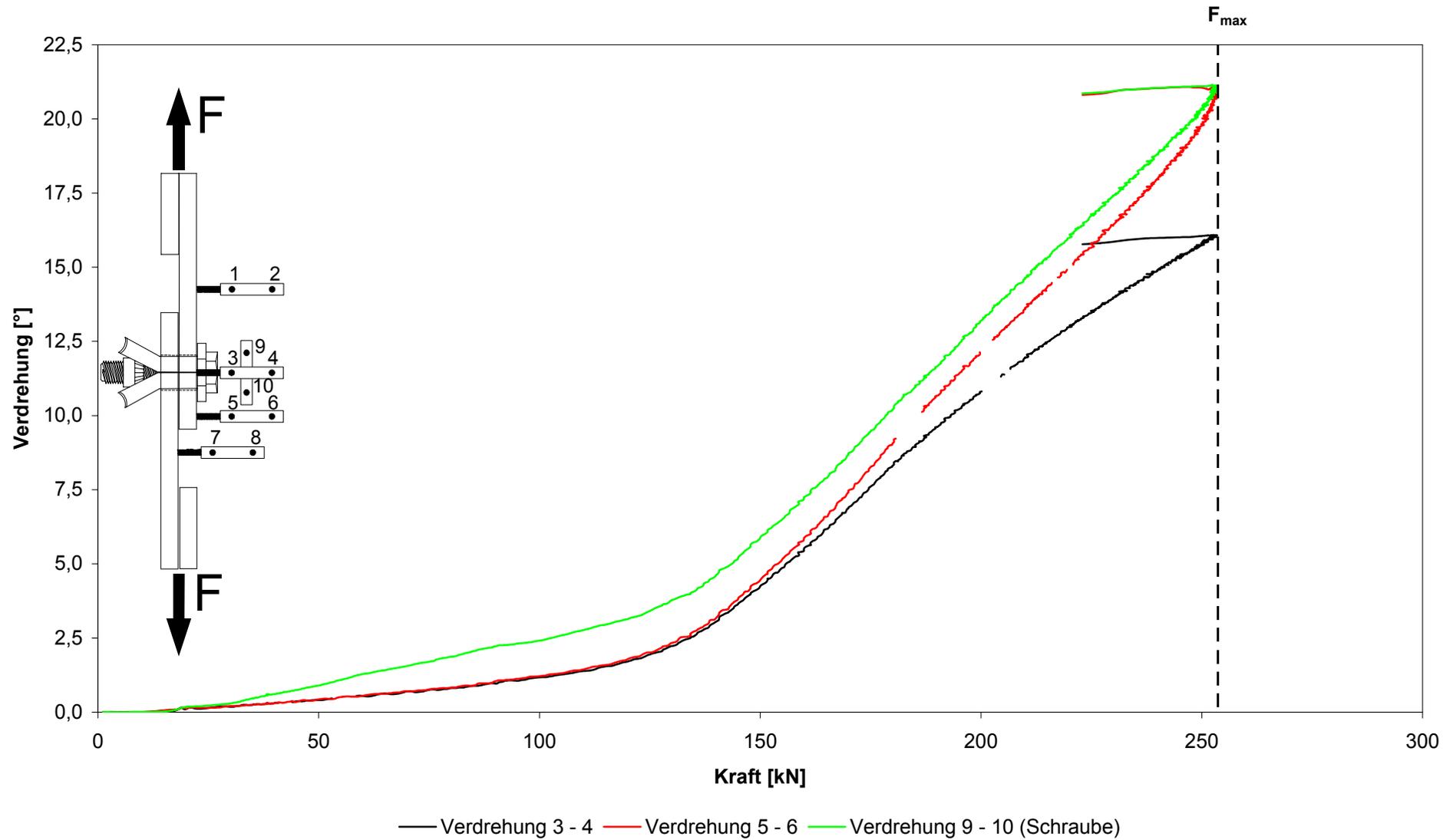
### Versuch 13



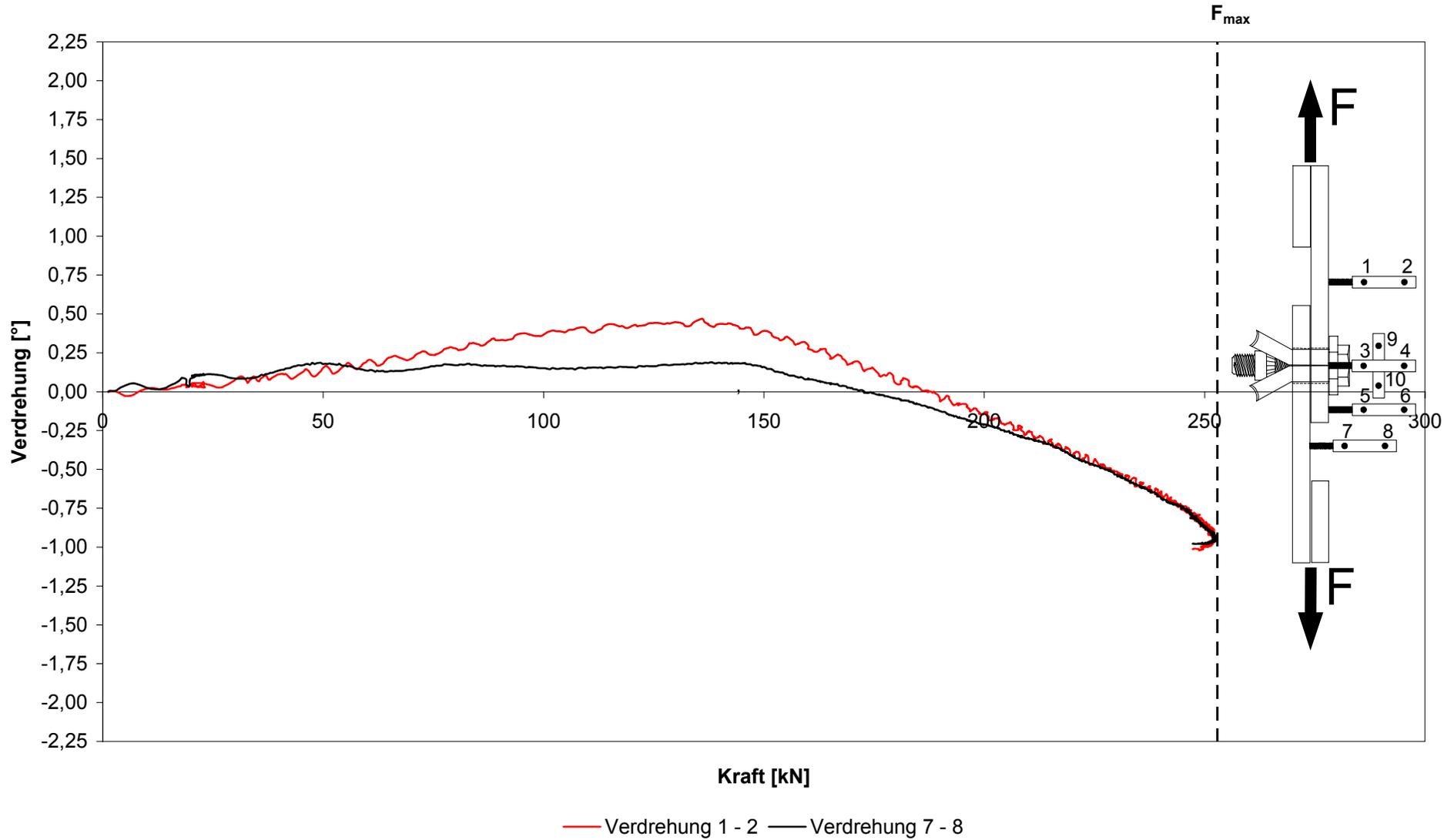
### Versuch 14



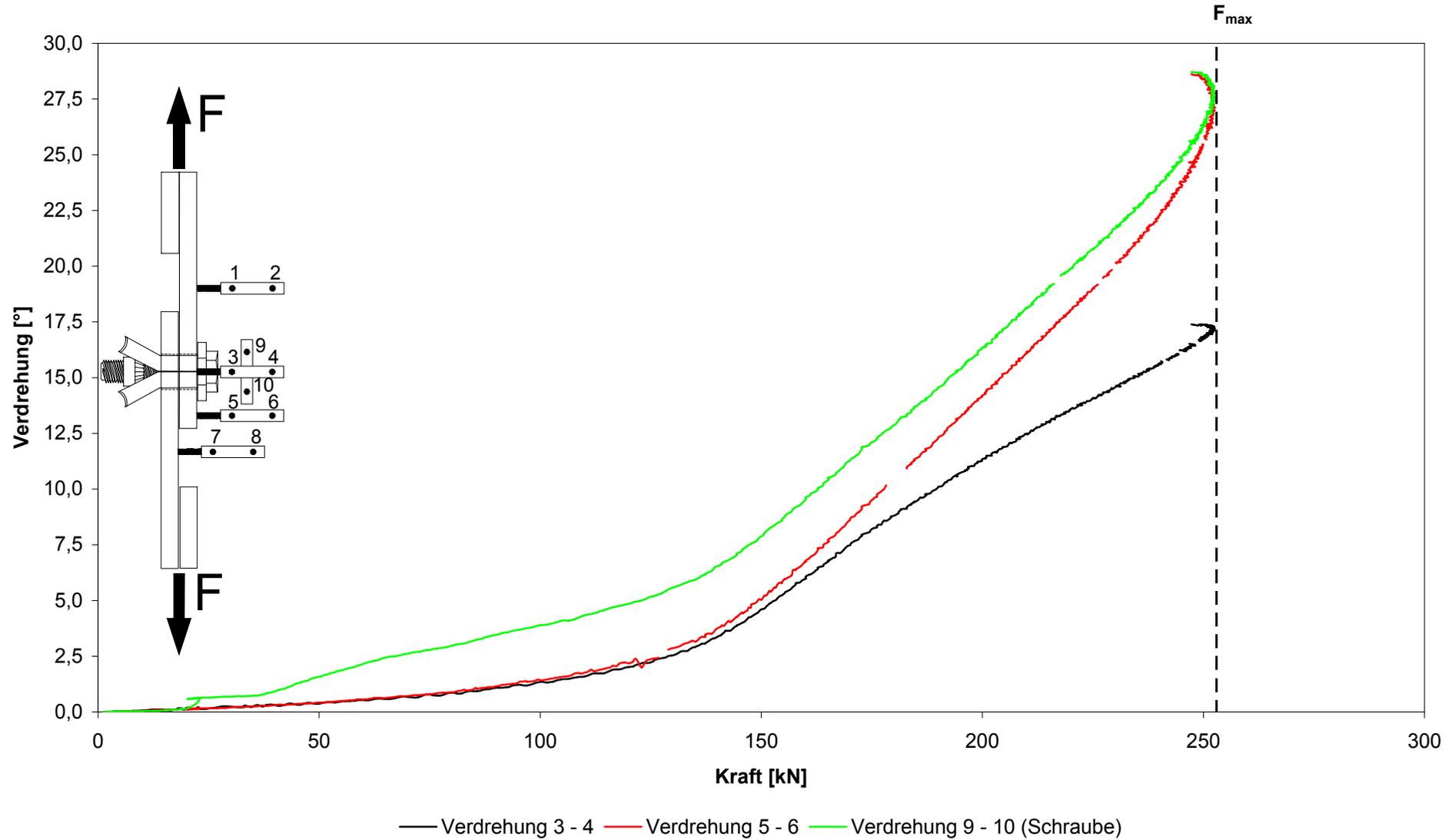
Versuch 14



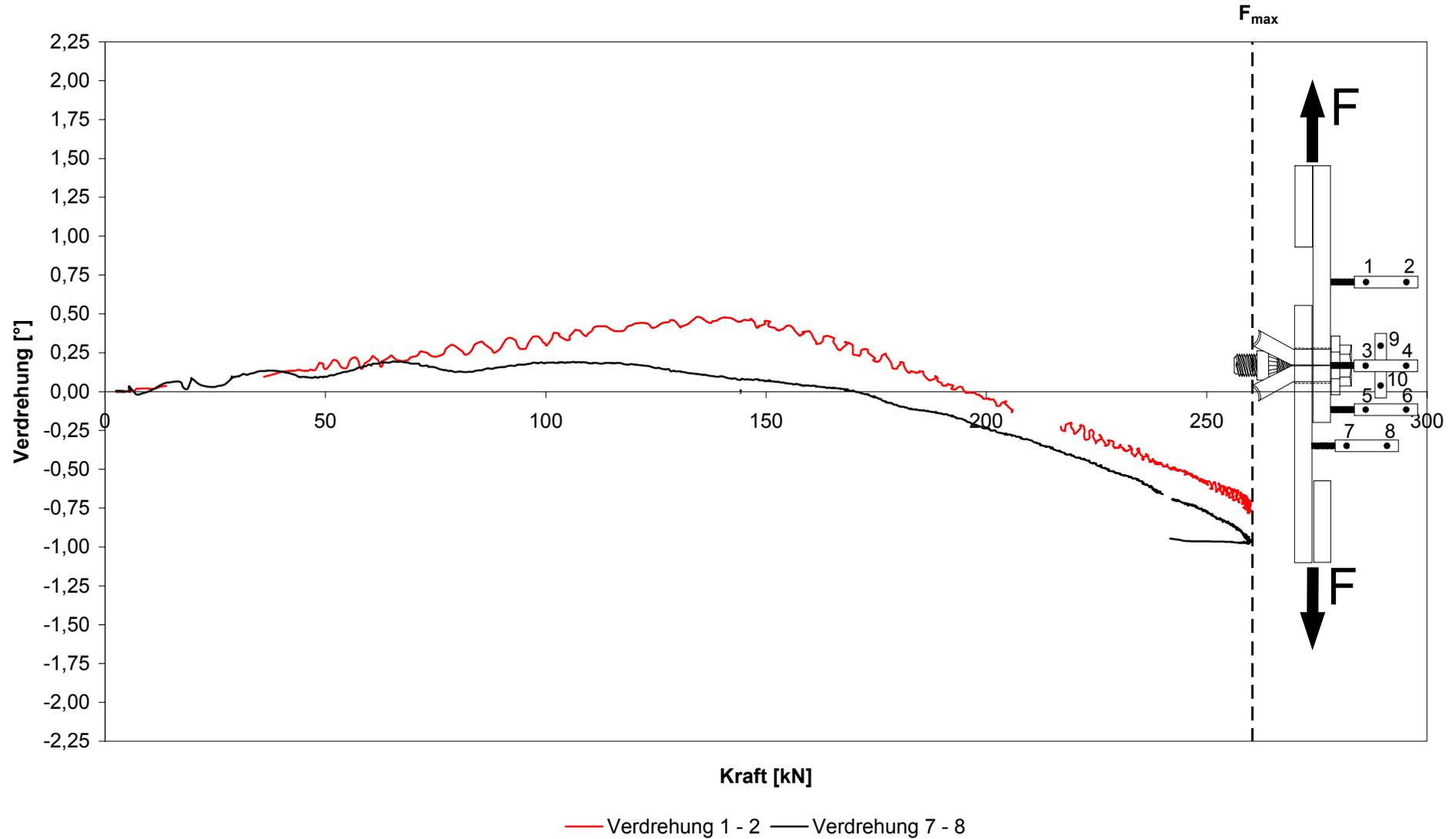
**Versuch 15**



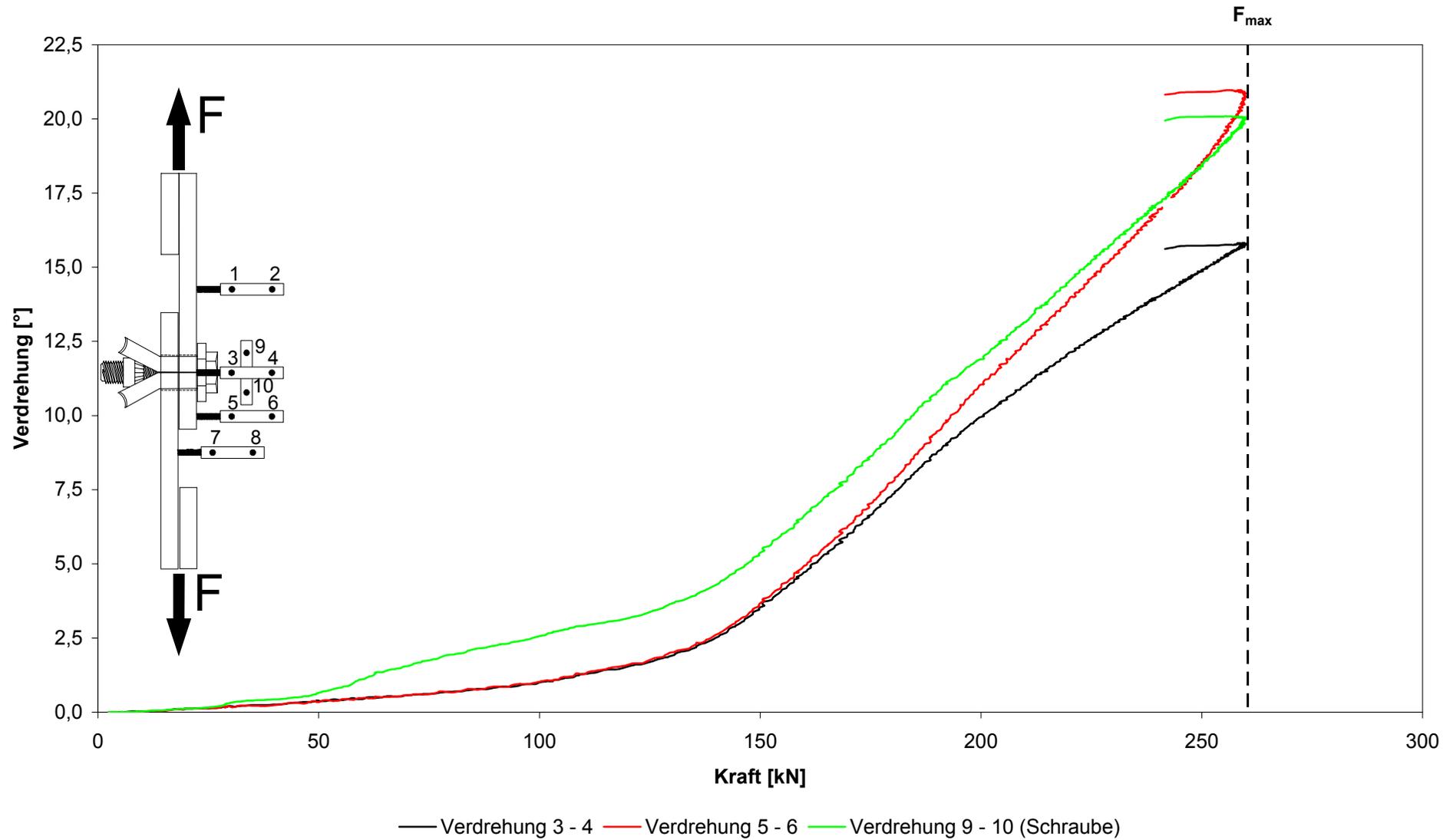
Versuch 15



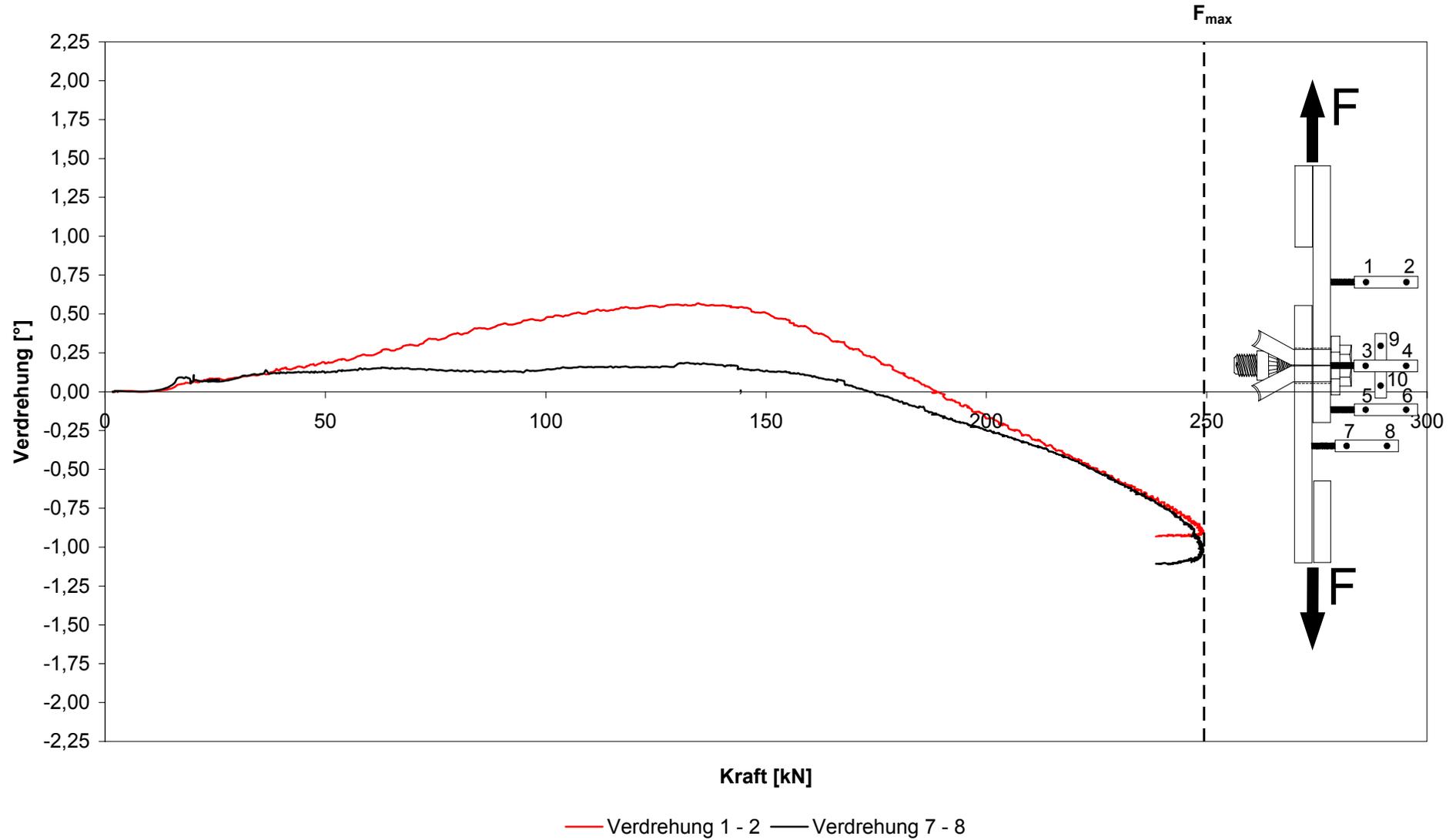
Versuch 16



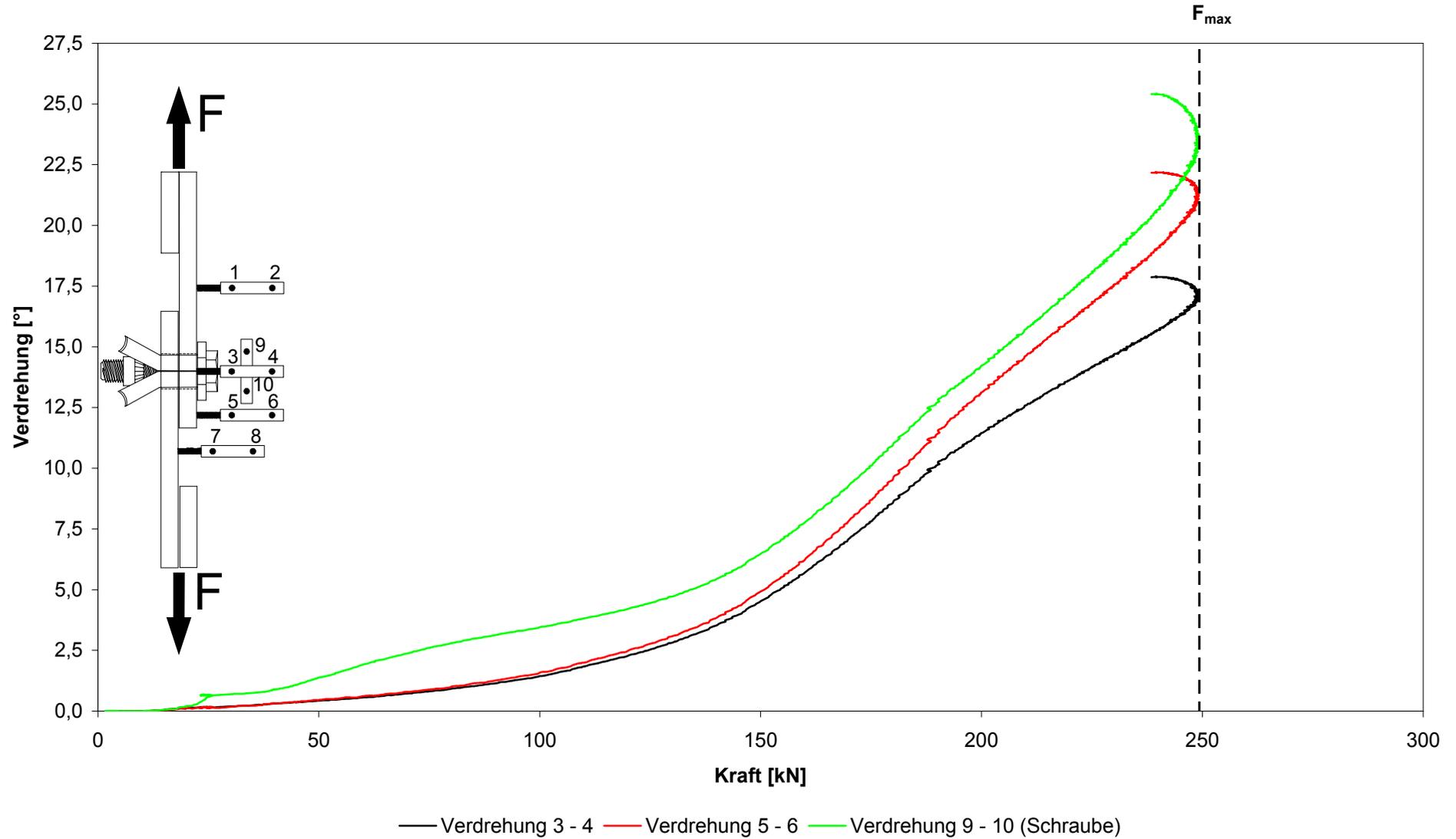
Versuch 16



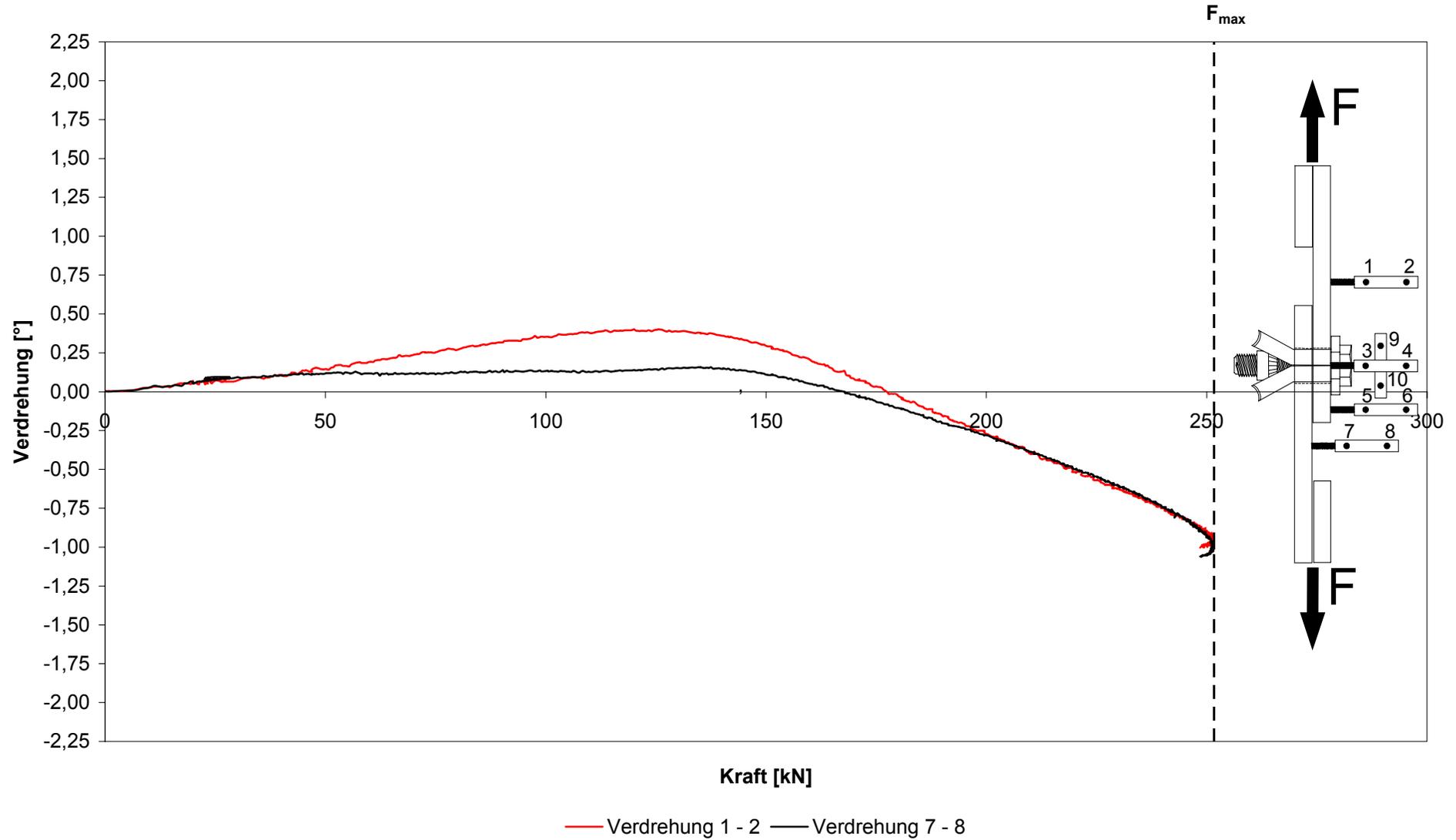
### Versuch 17



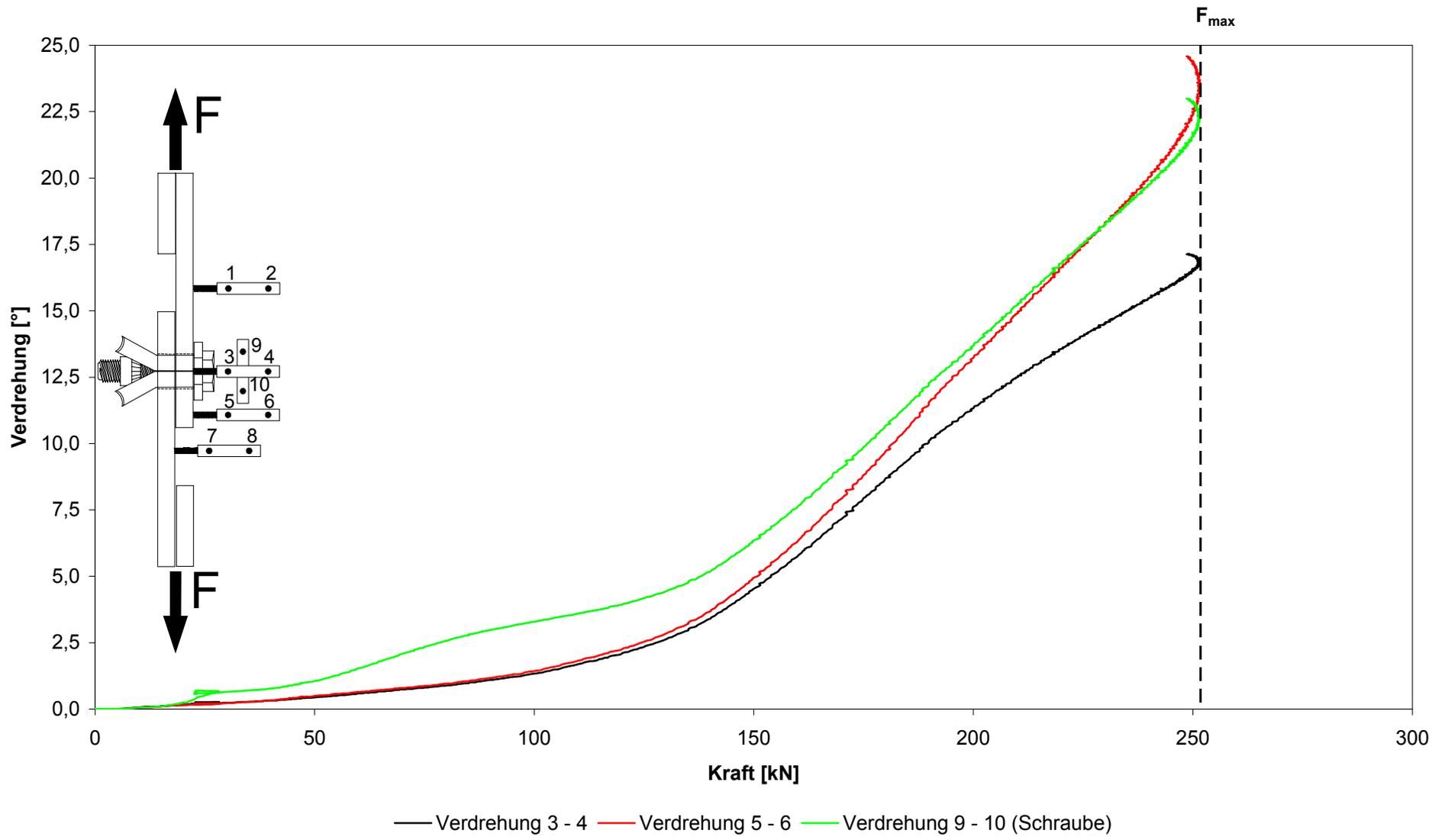
Versuch 17



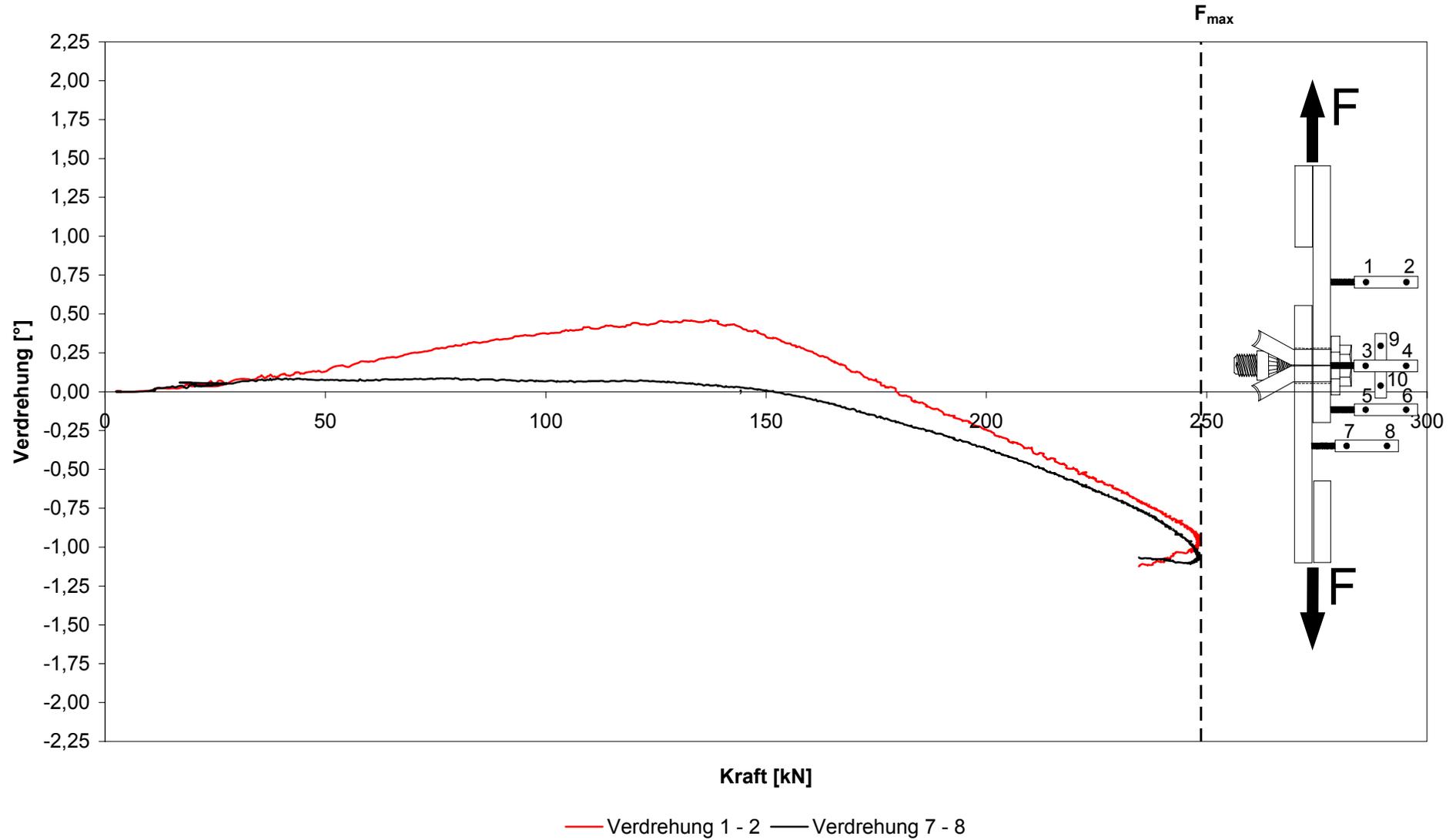
### Versuch 18



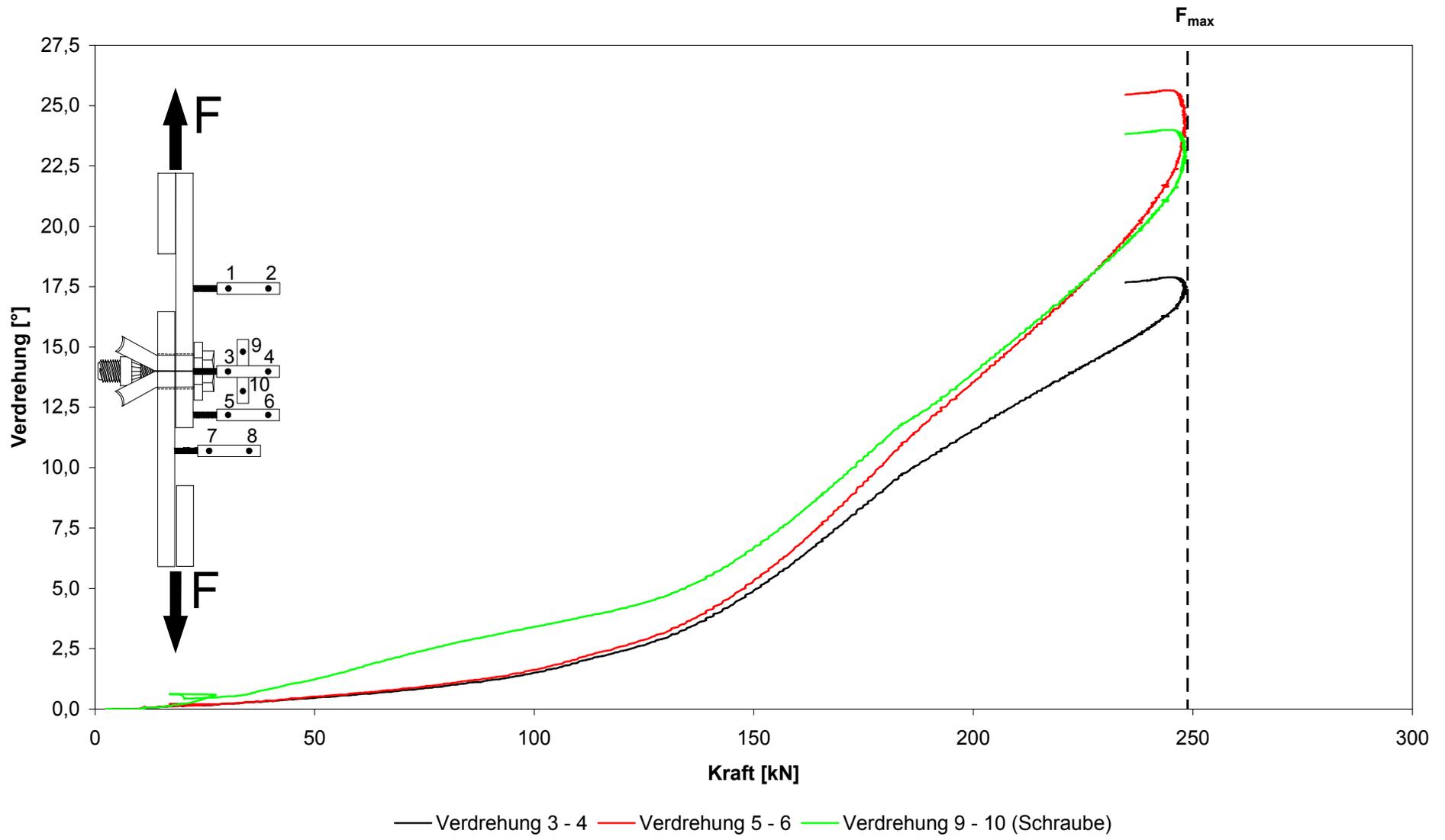
Versuch 18



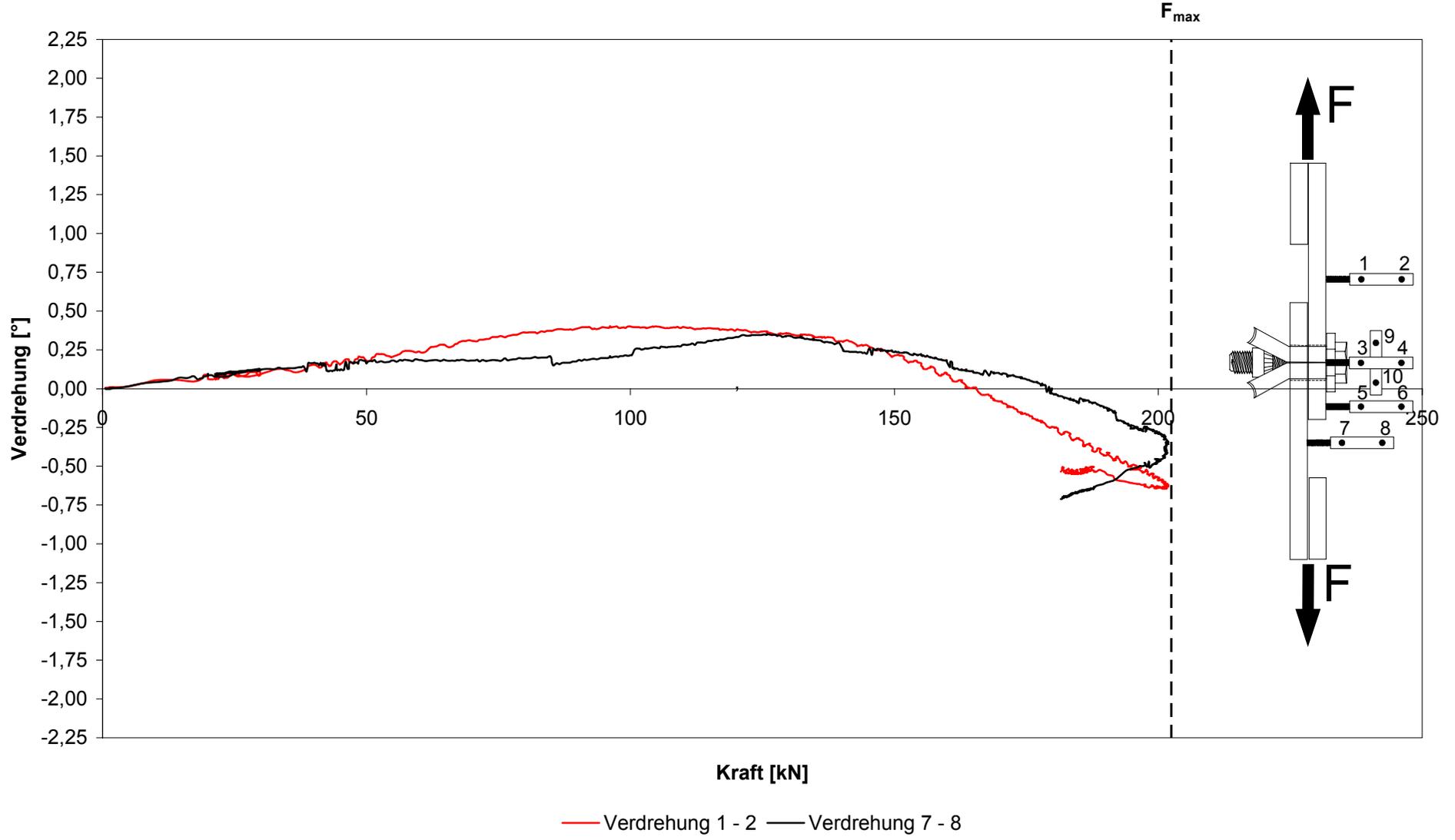
### Versuch 19



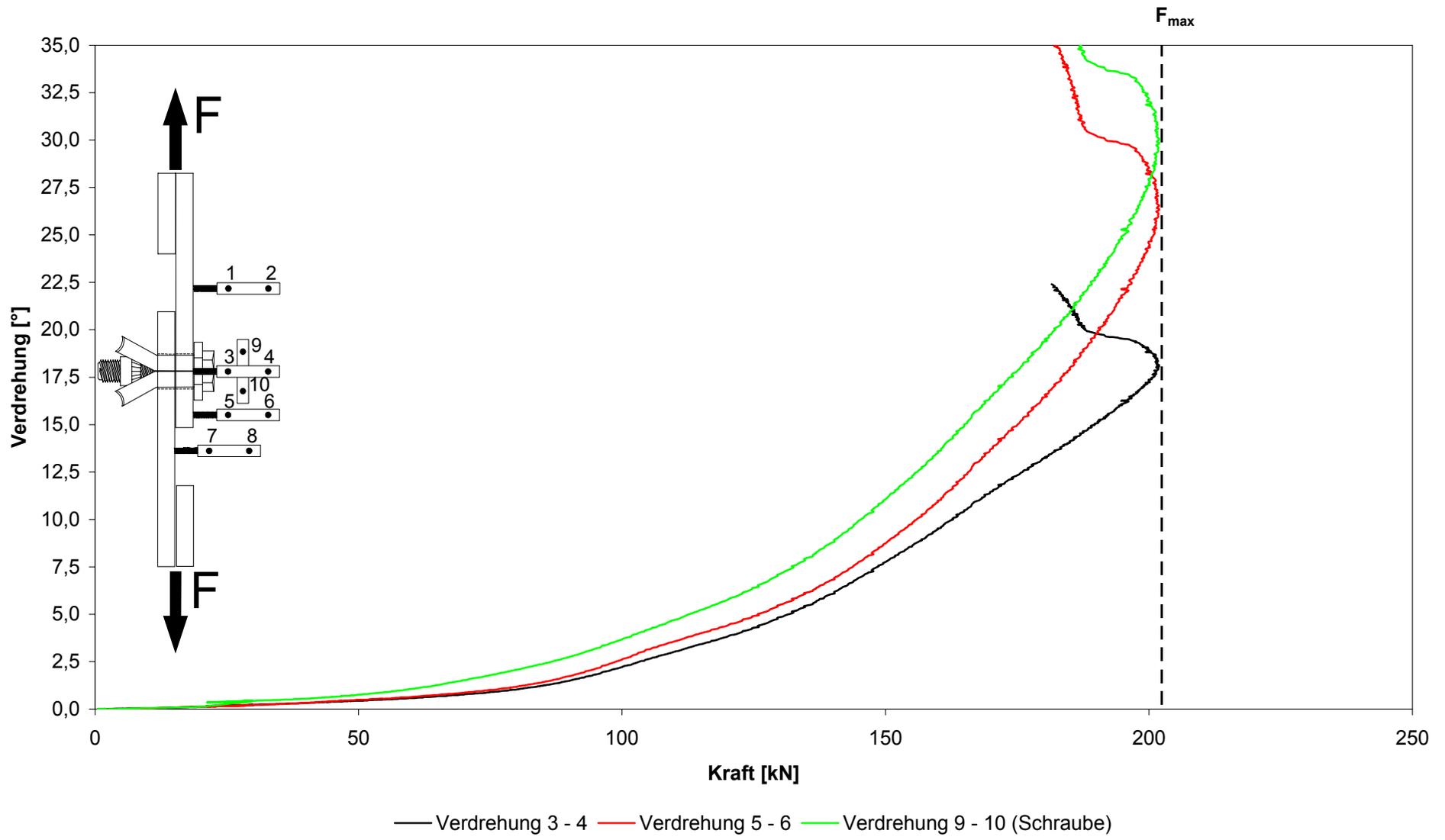
Versuch 19



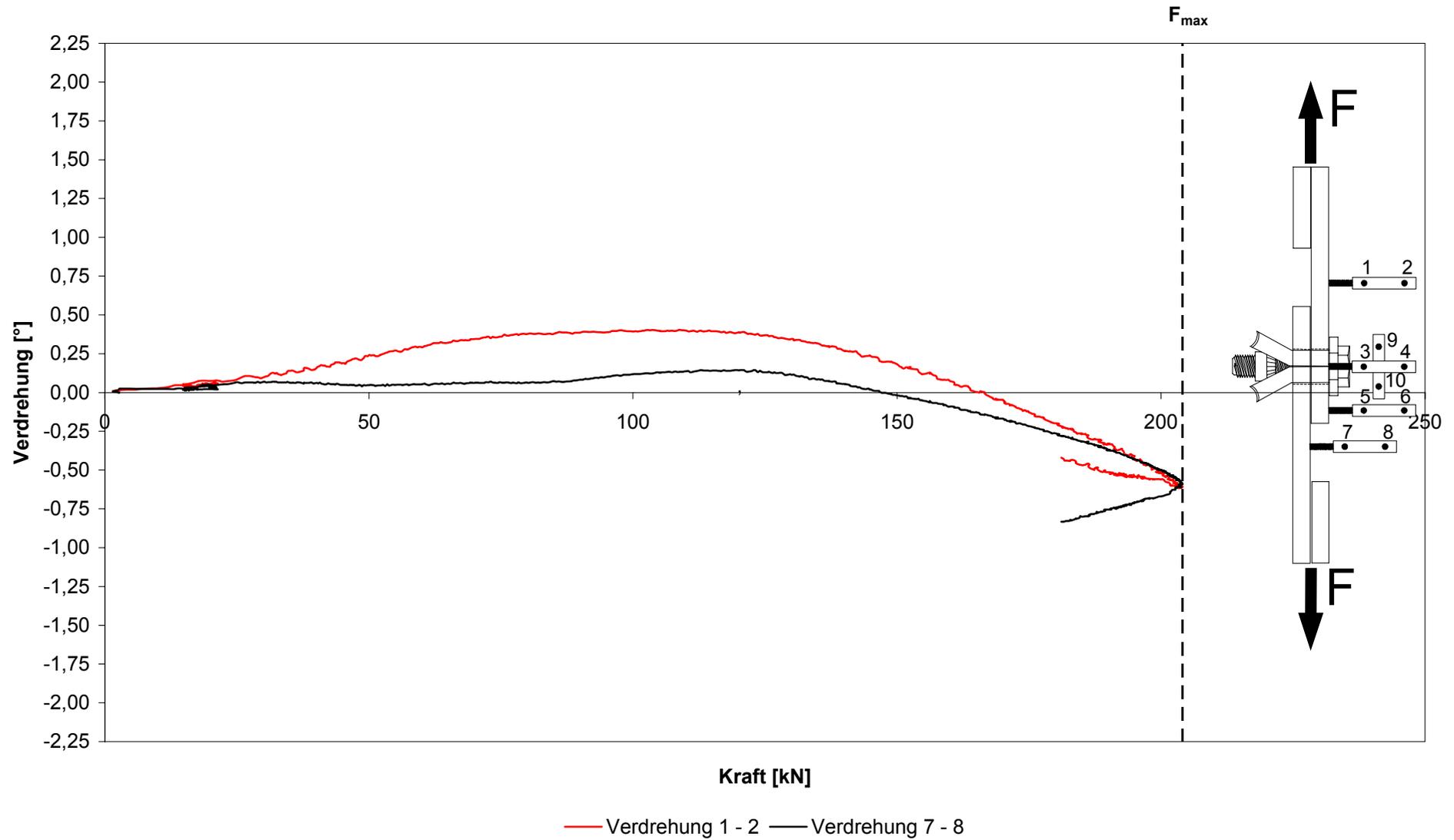
**Versuch 20**



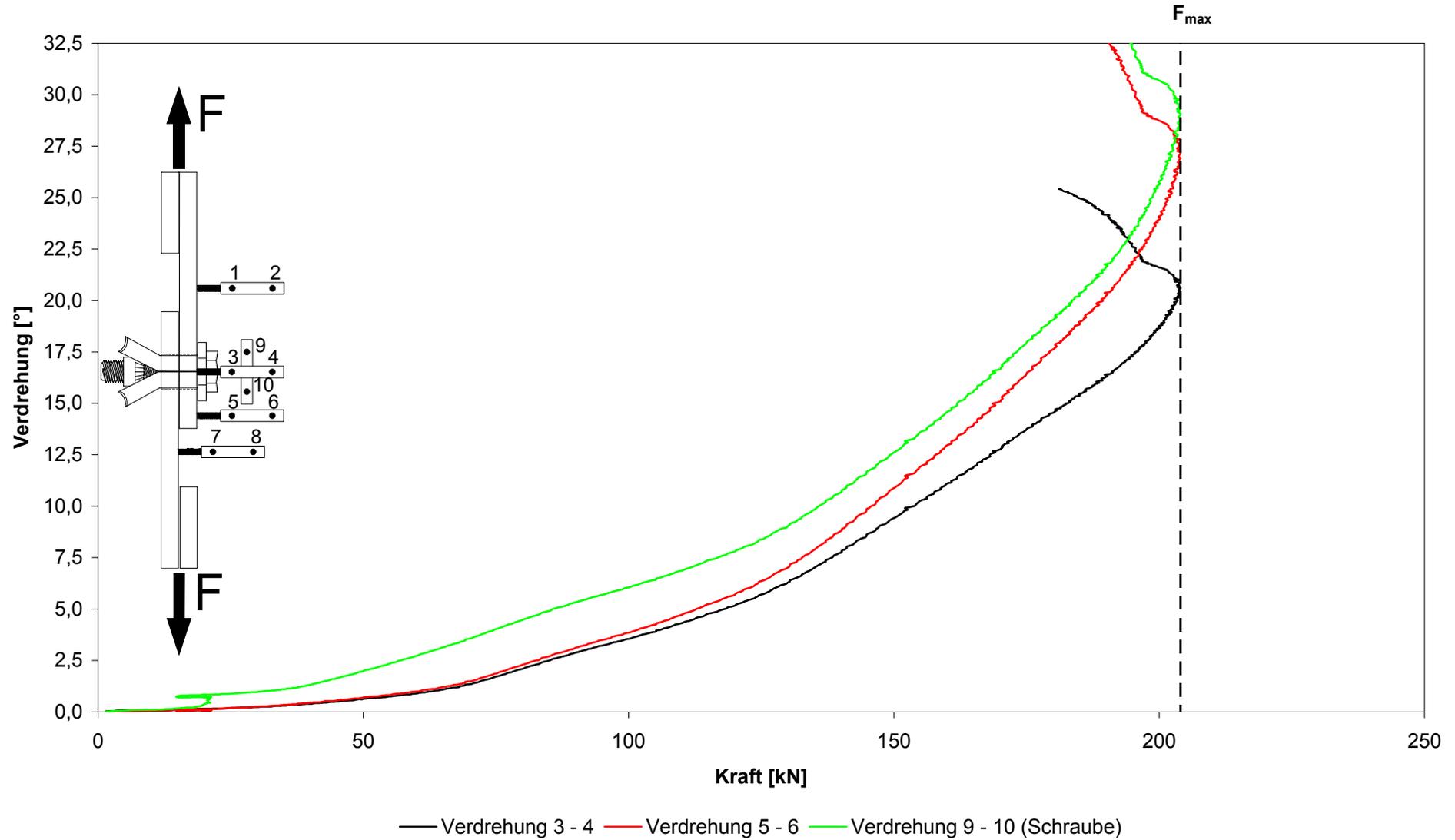
Versuch 20



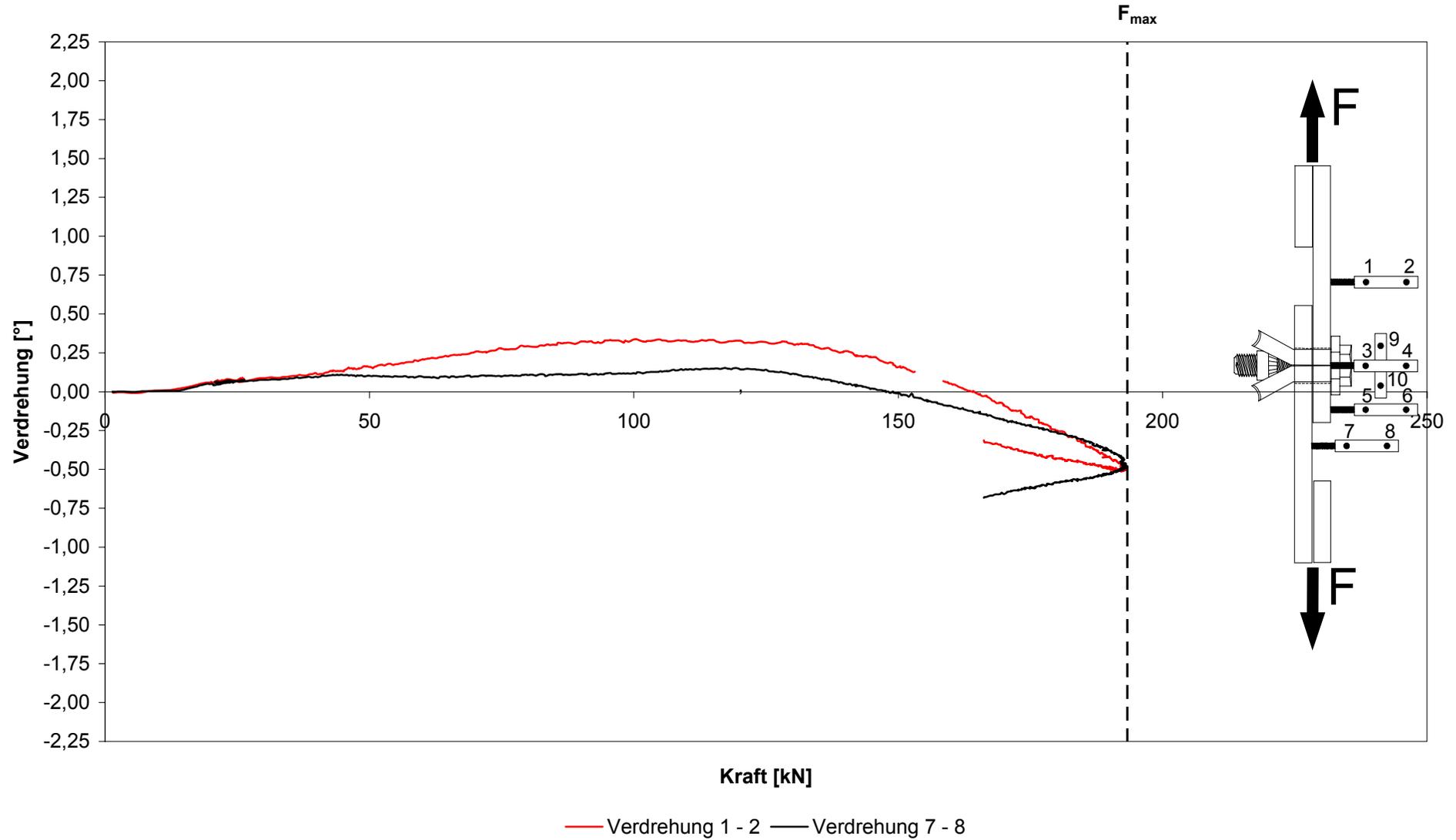
### Versuch 21



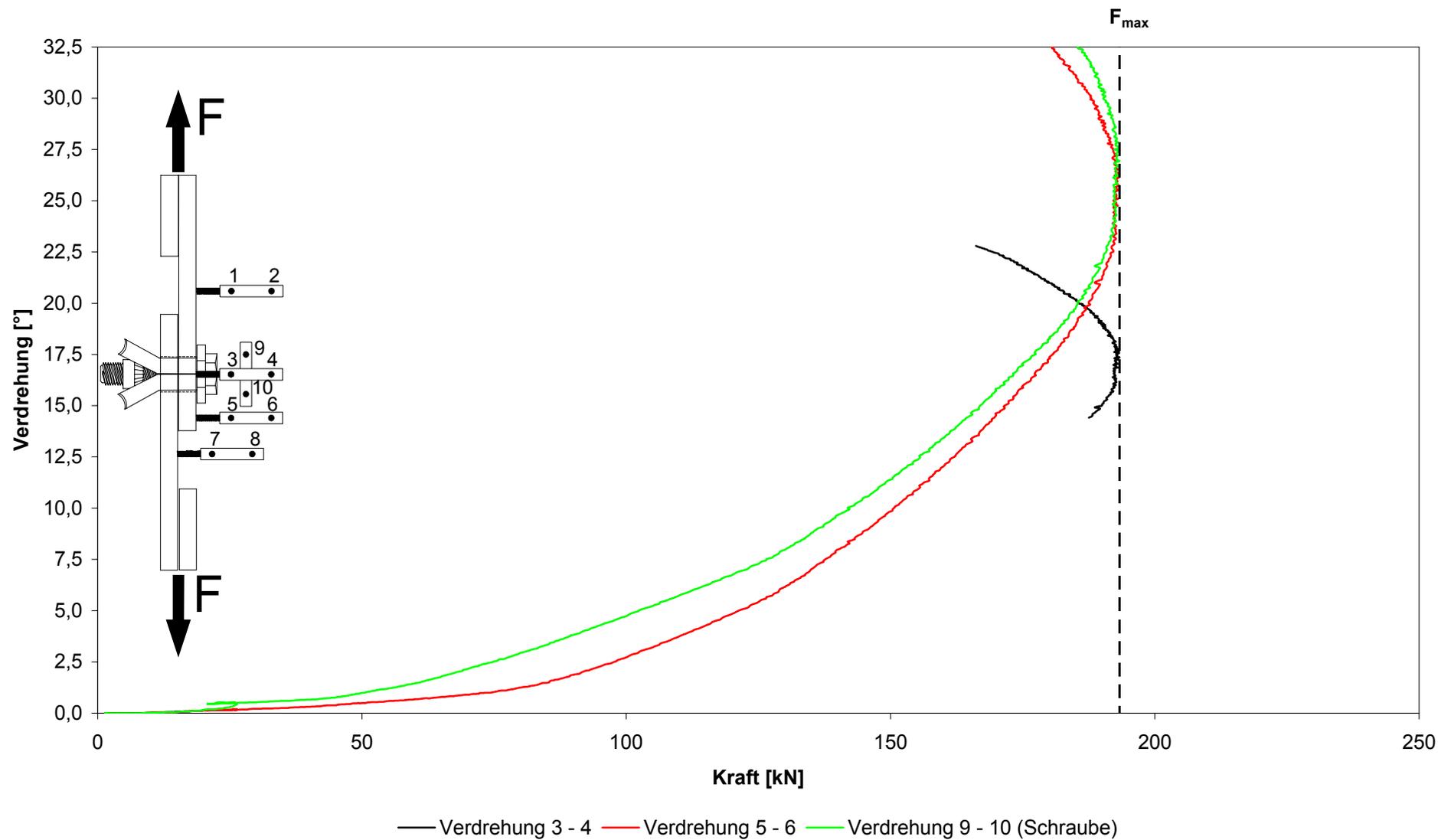
### Versuch 21



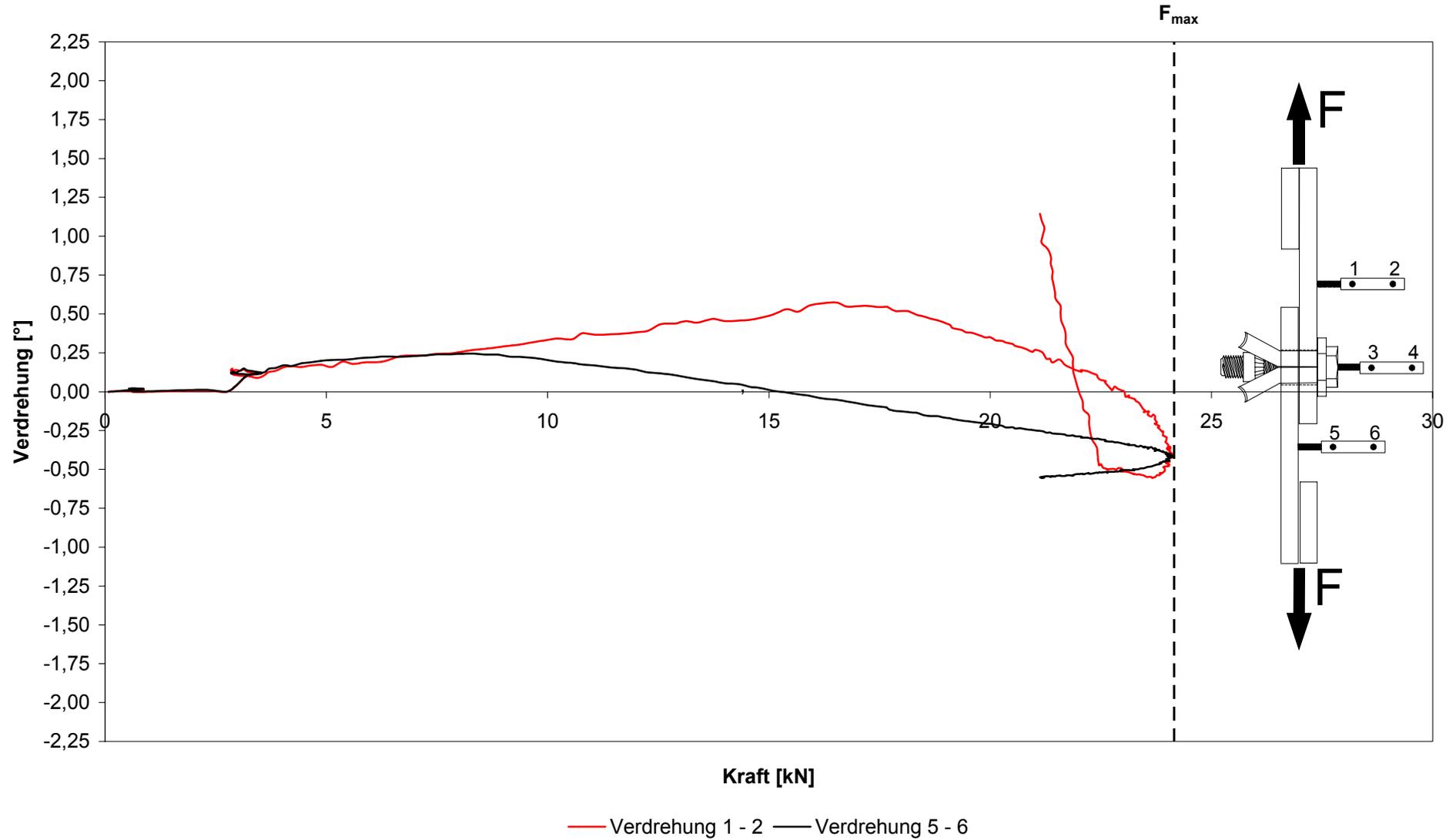
### Versuch 22



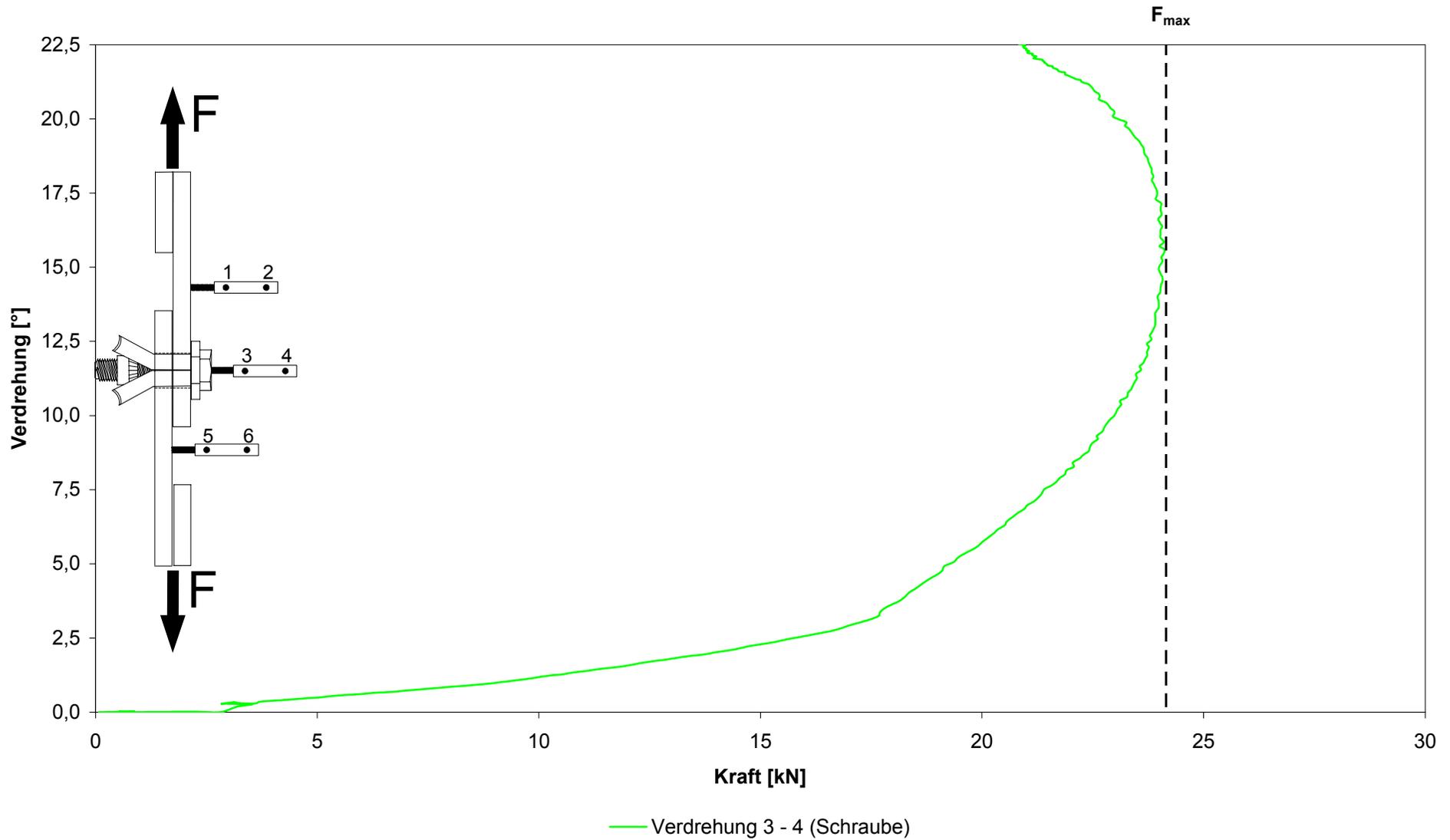
### Versuch 22



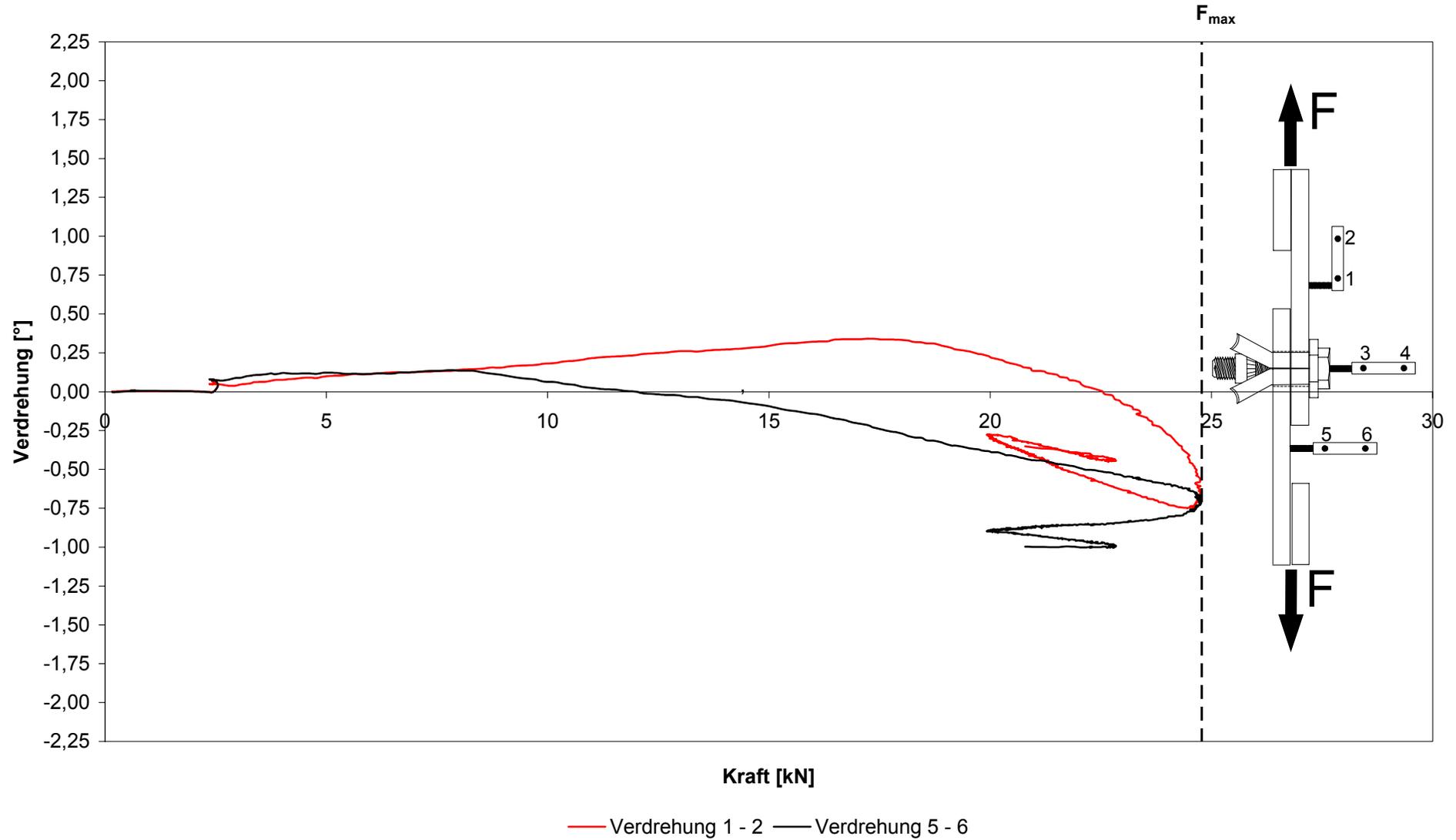
### Versuch 23



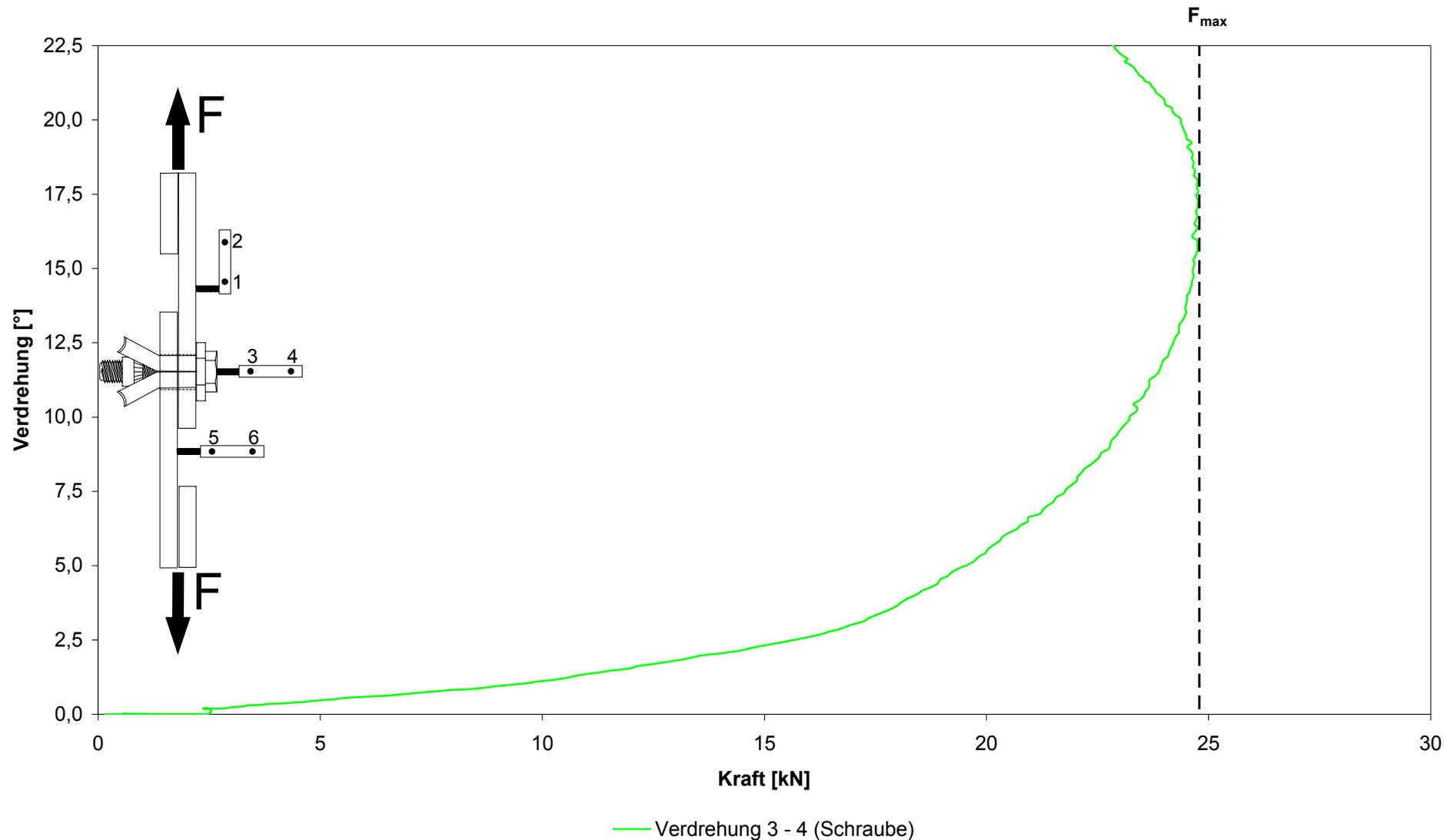
### Versuch 23



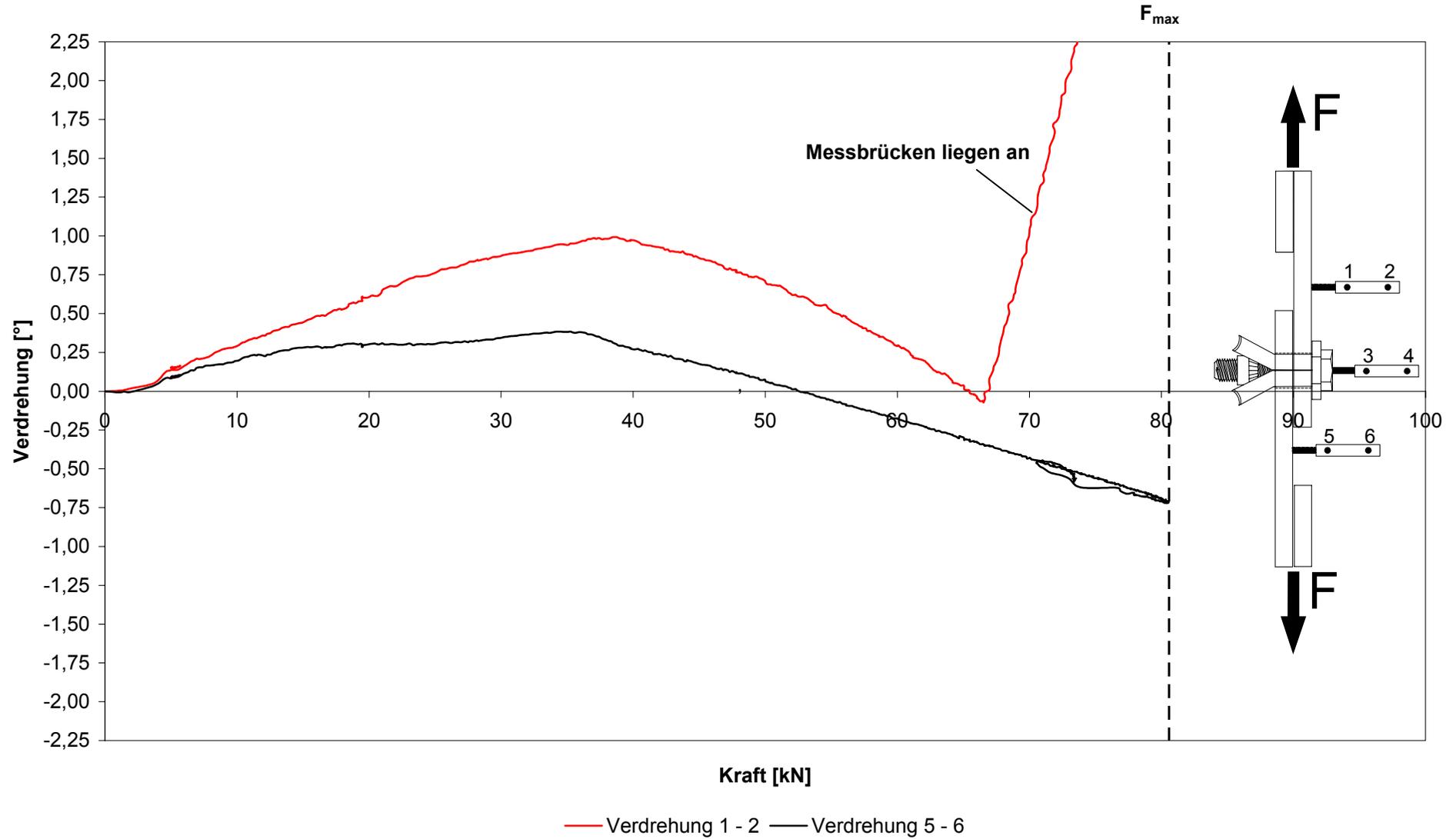
**Versuch 24**



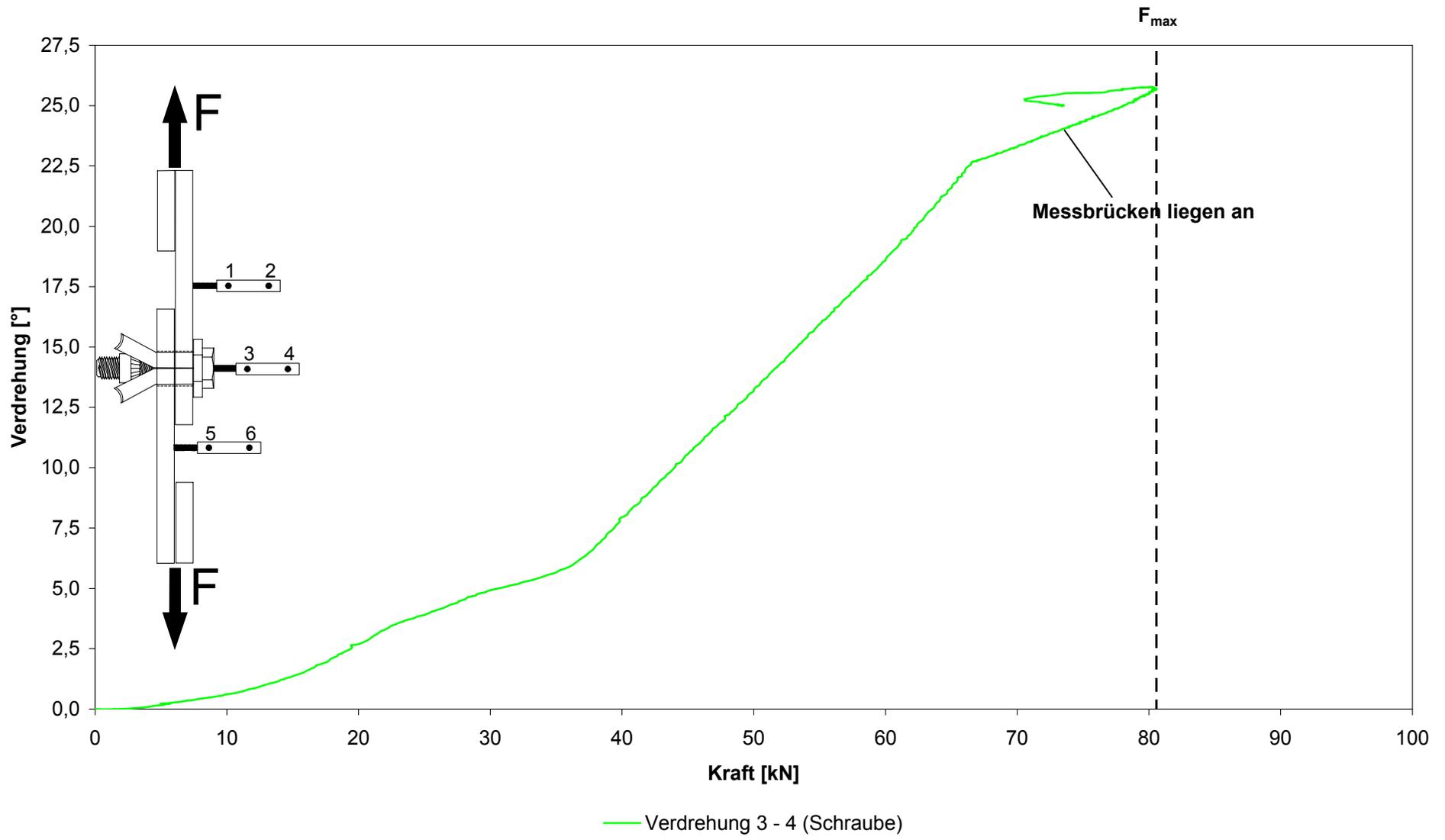
### Versuch 24



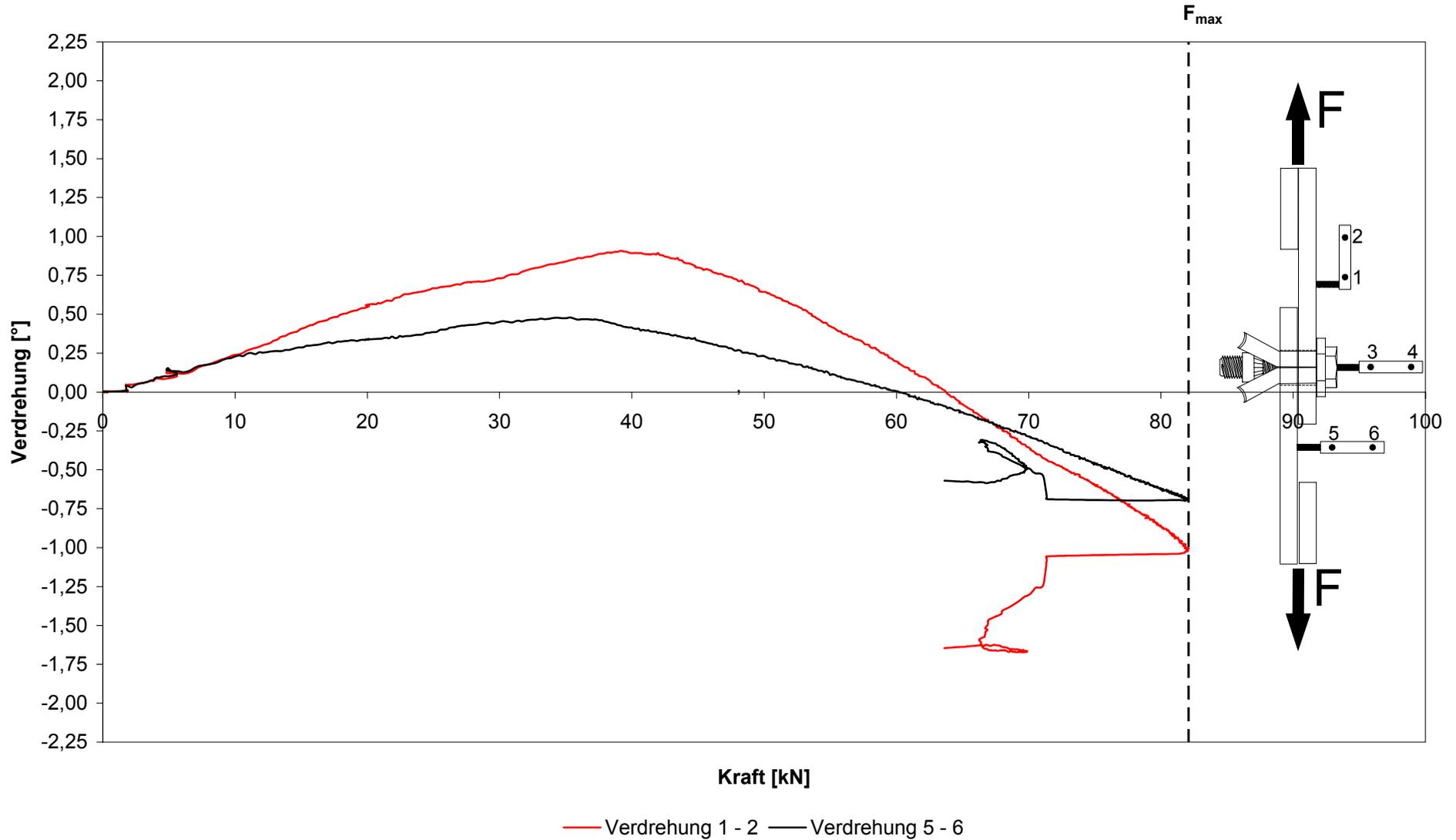
Versuch 25



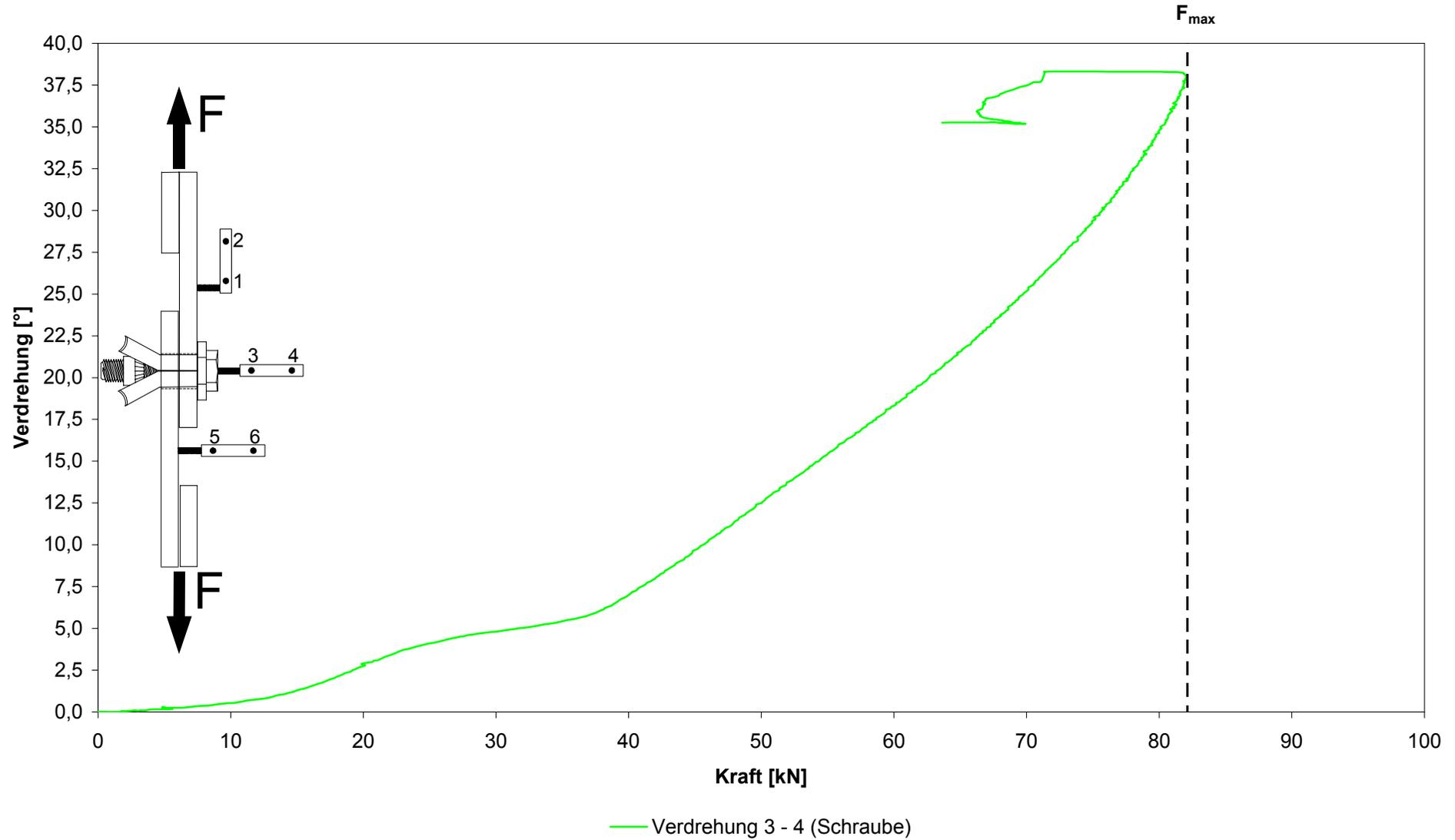
Versuch 25



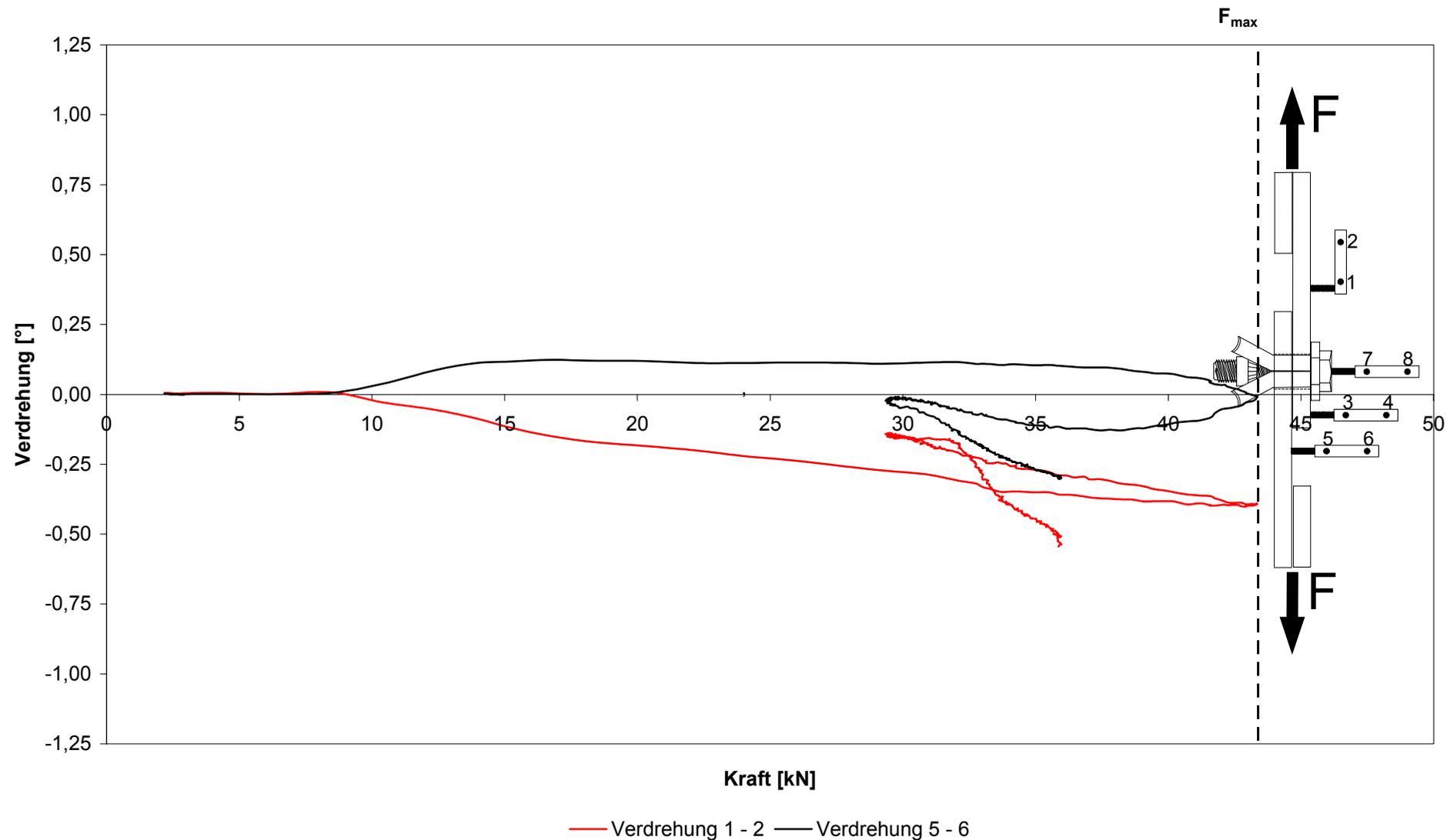
Versuch 26



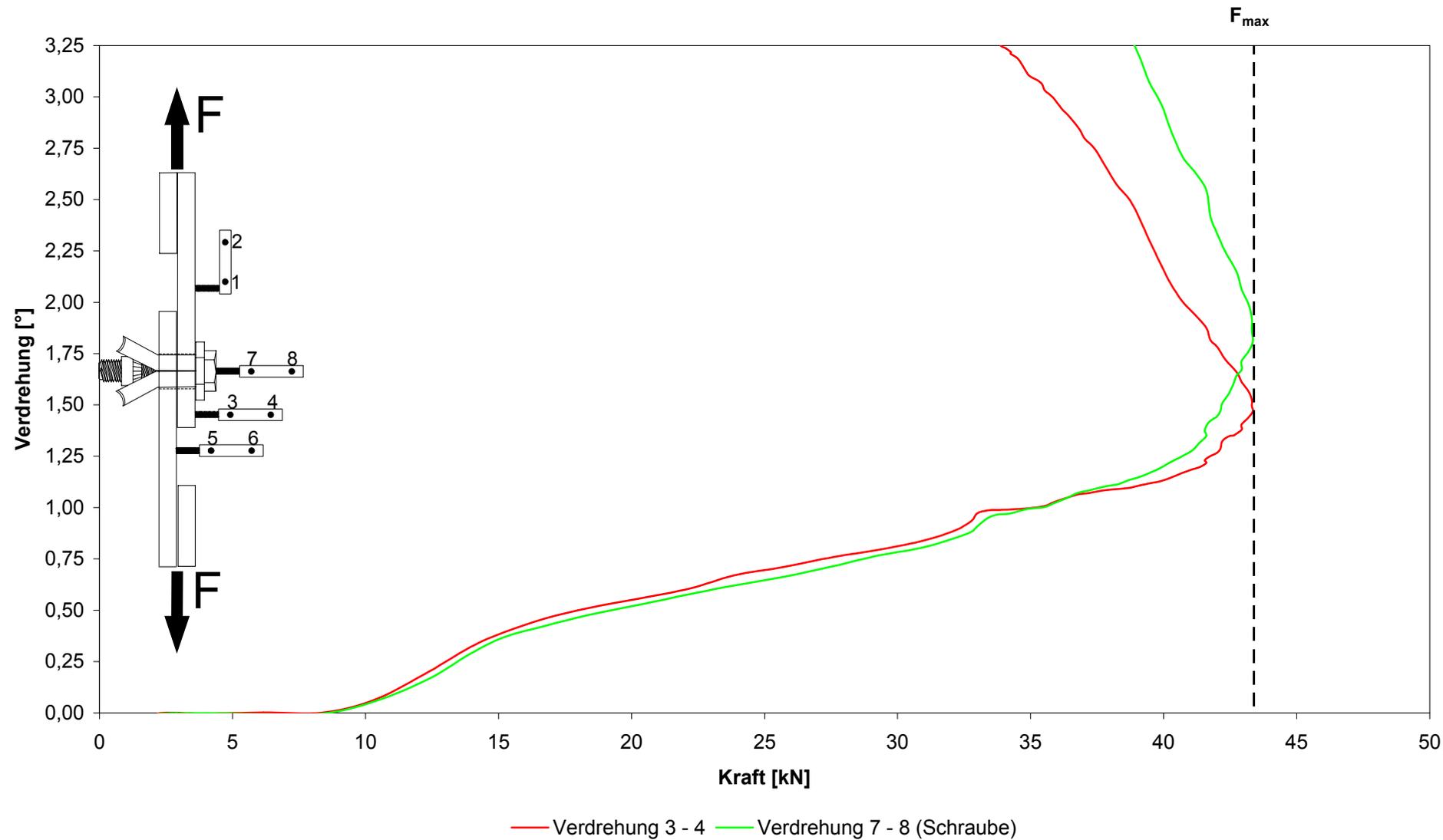
Versuch 26



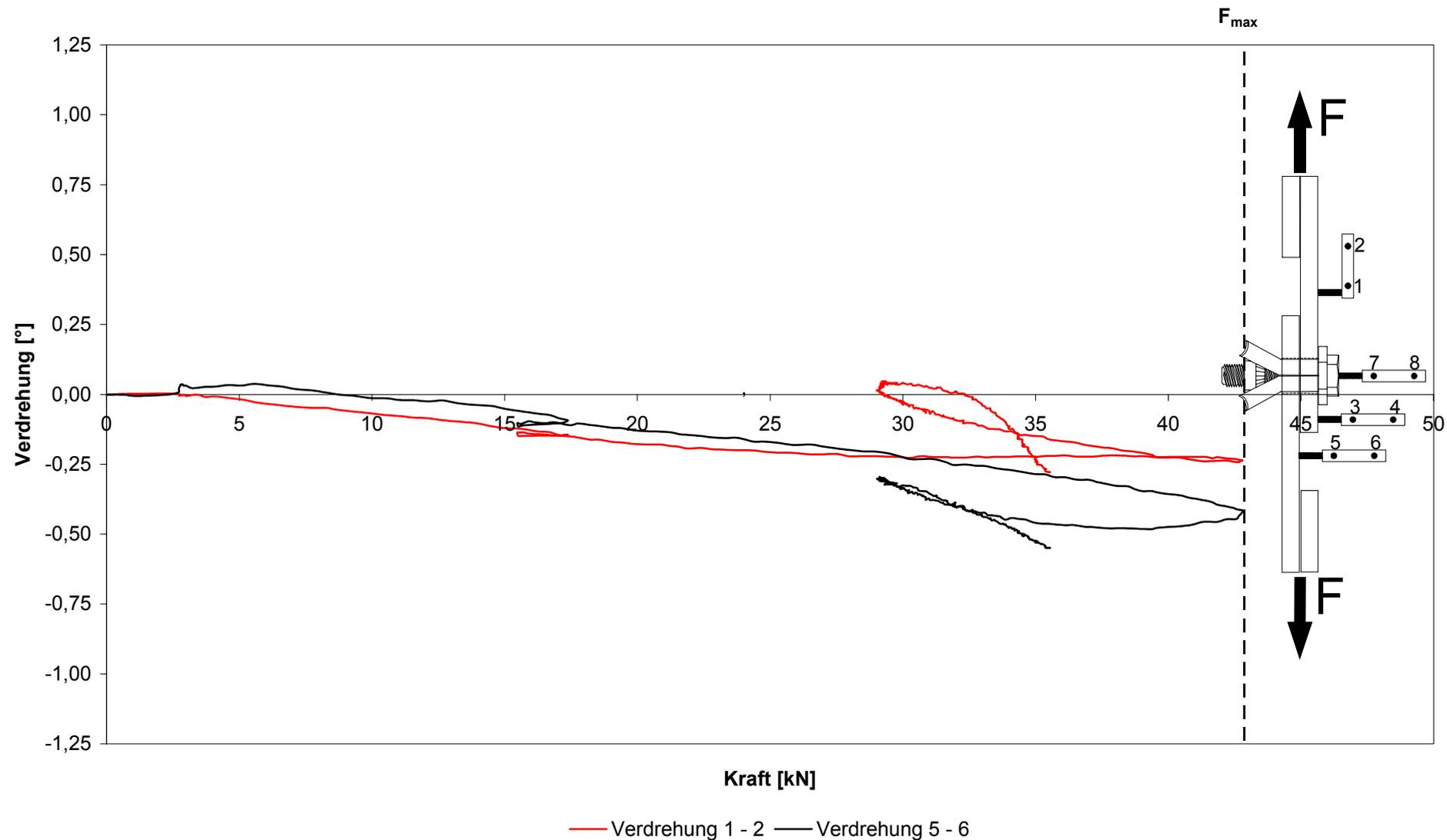
**Versuch 27**



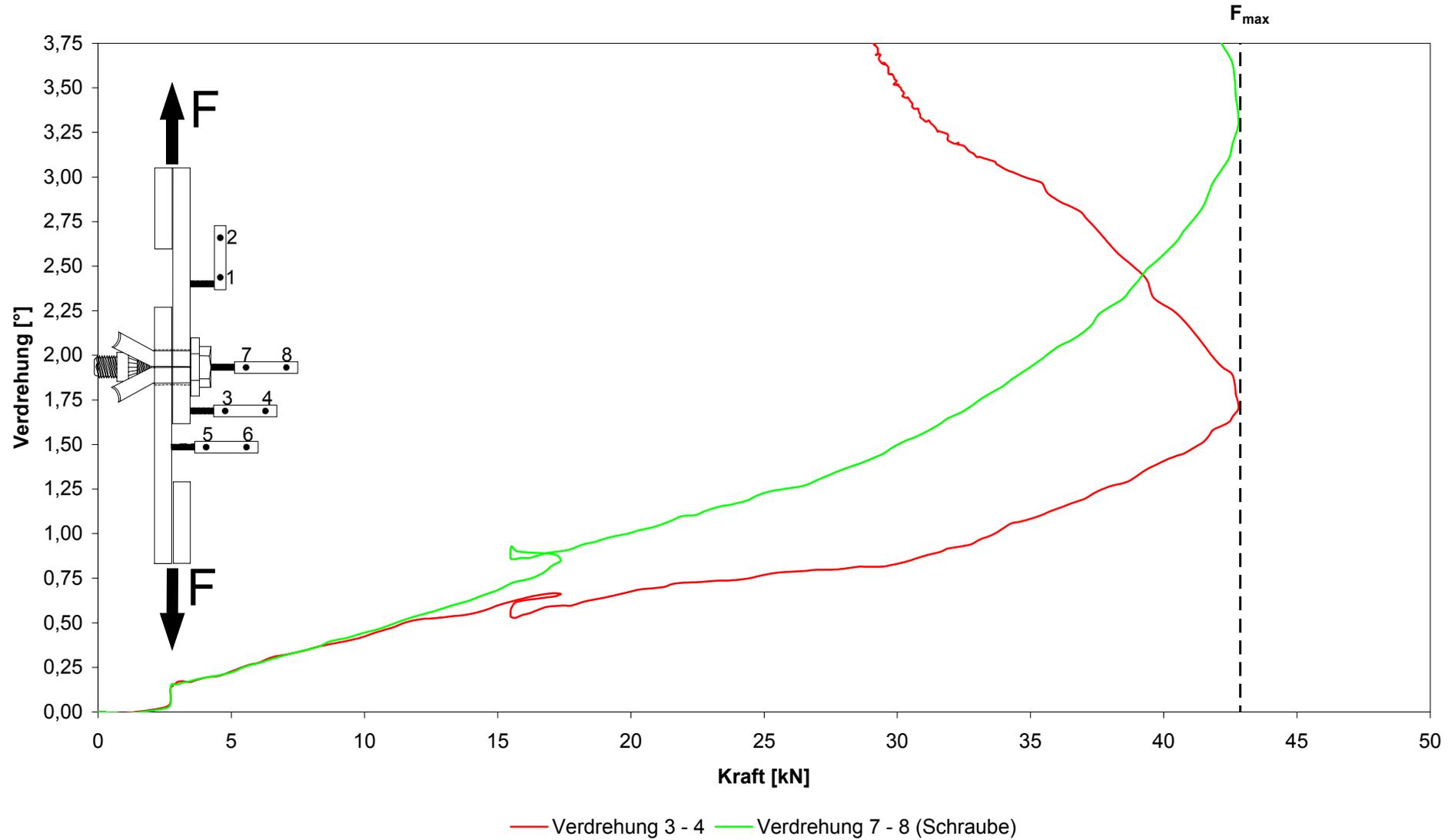
### Versuch 27



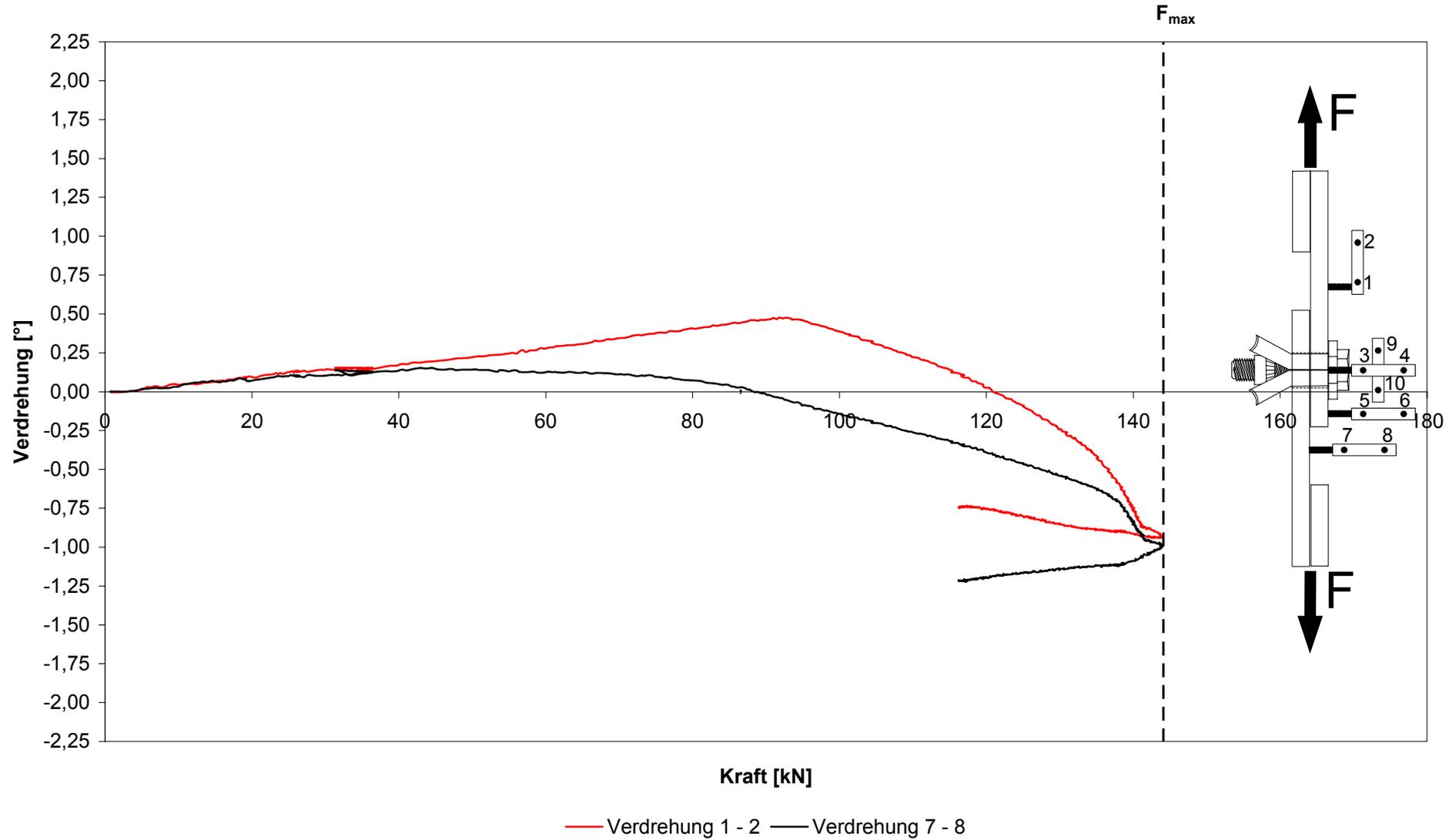
**Versuch 28**



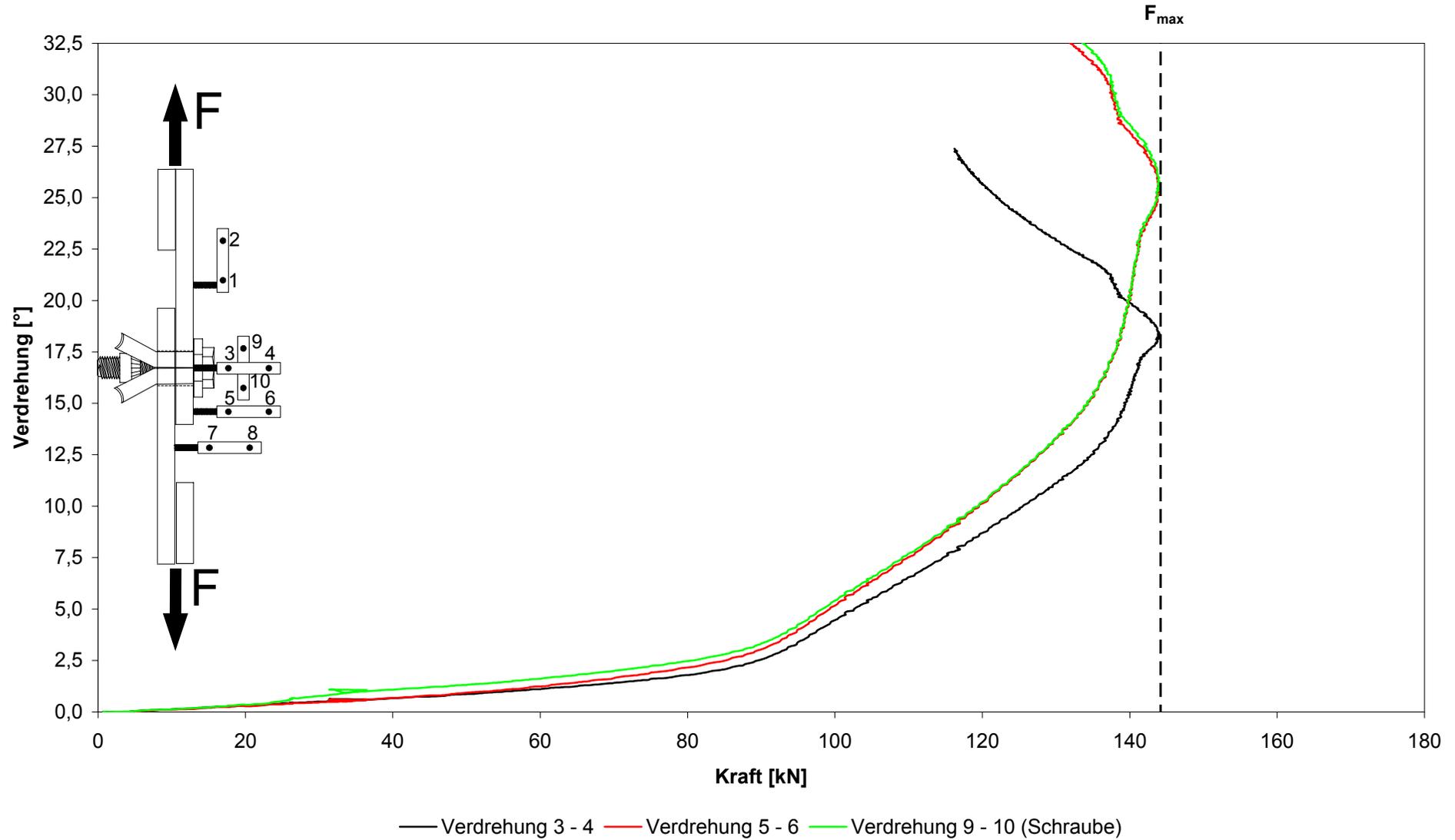
Versuch 28



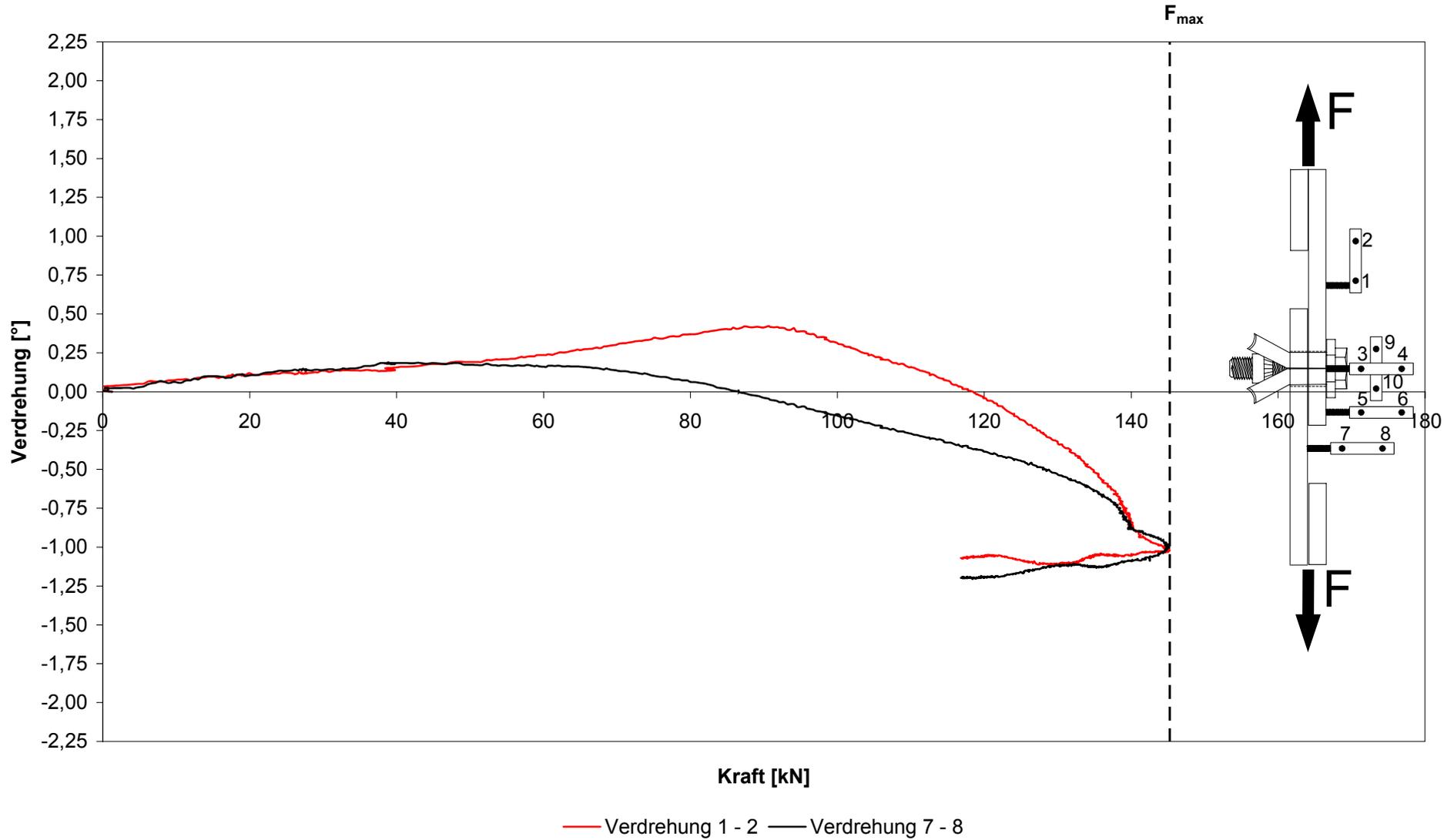
Versuch 29



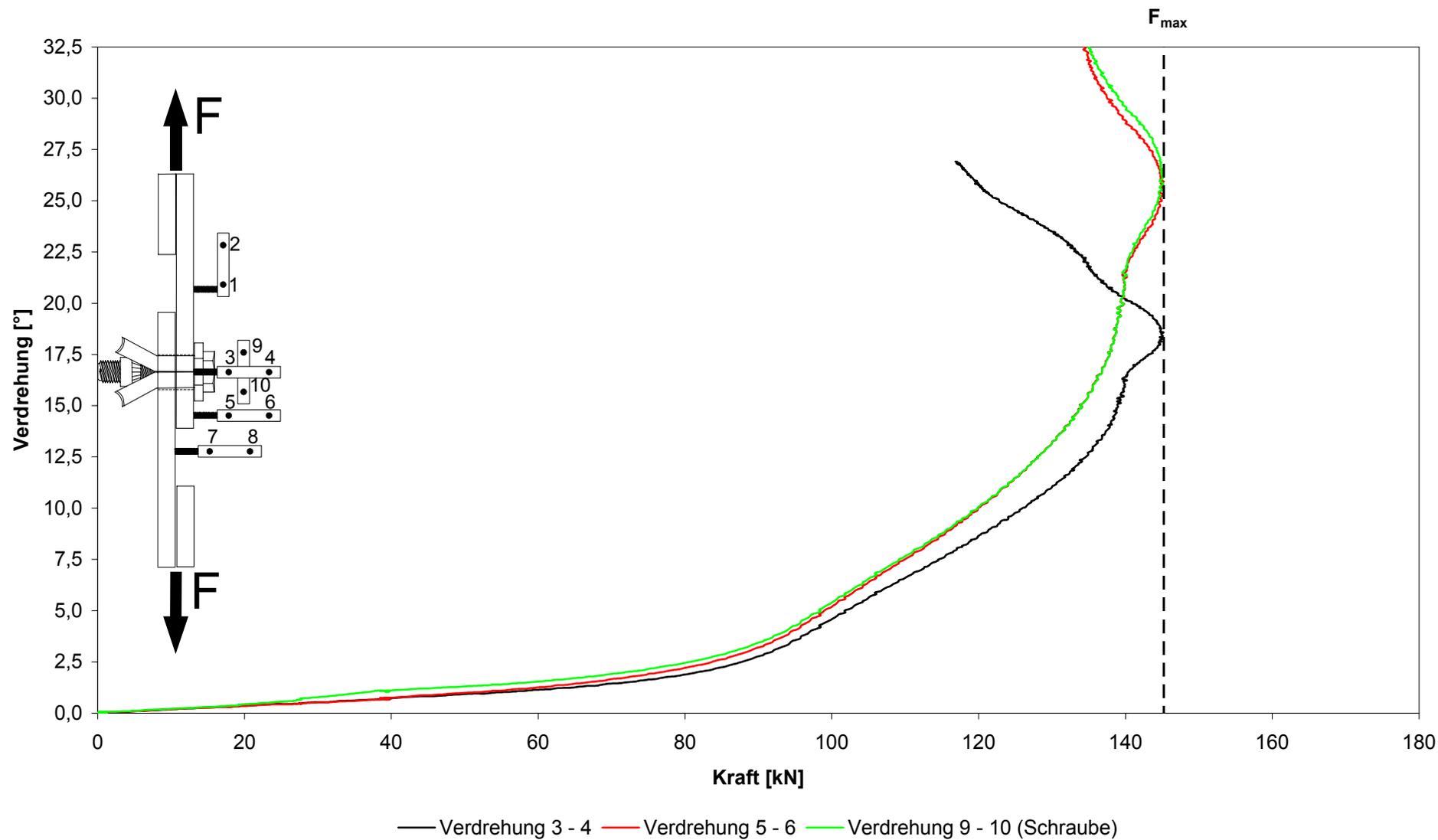
### Versuch 29



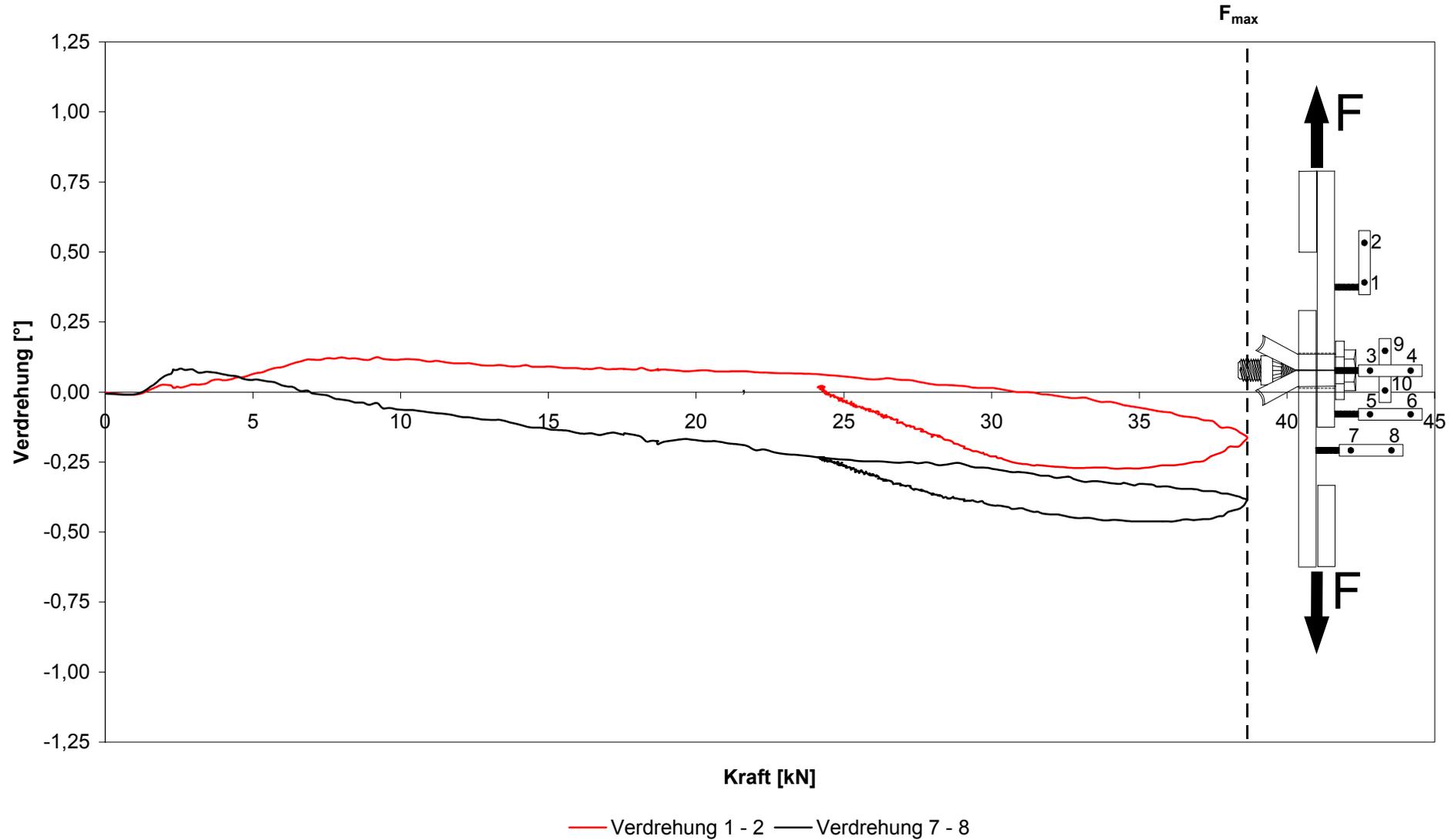
### Versuch 30



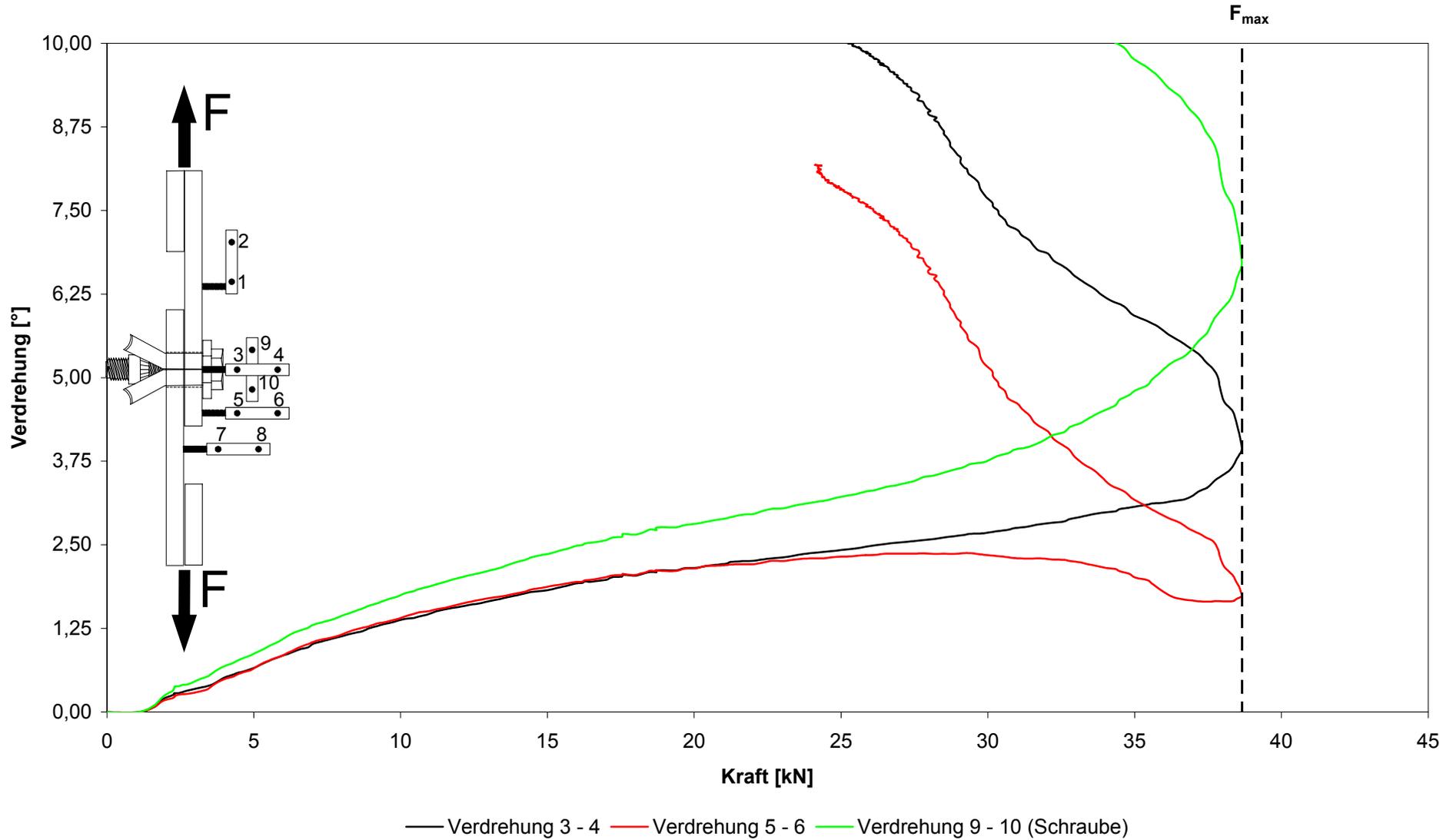
### Versuch 30



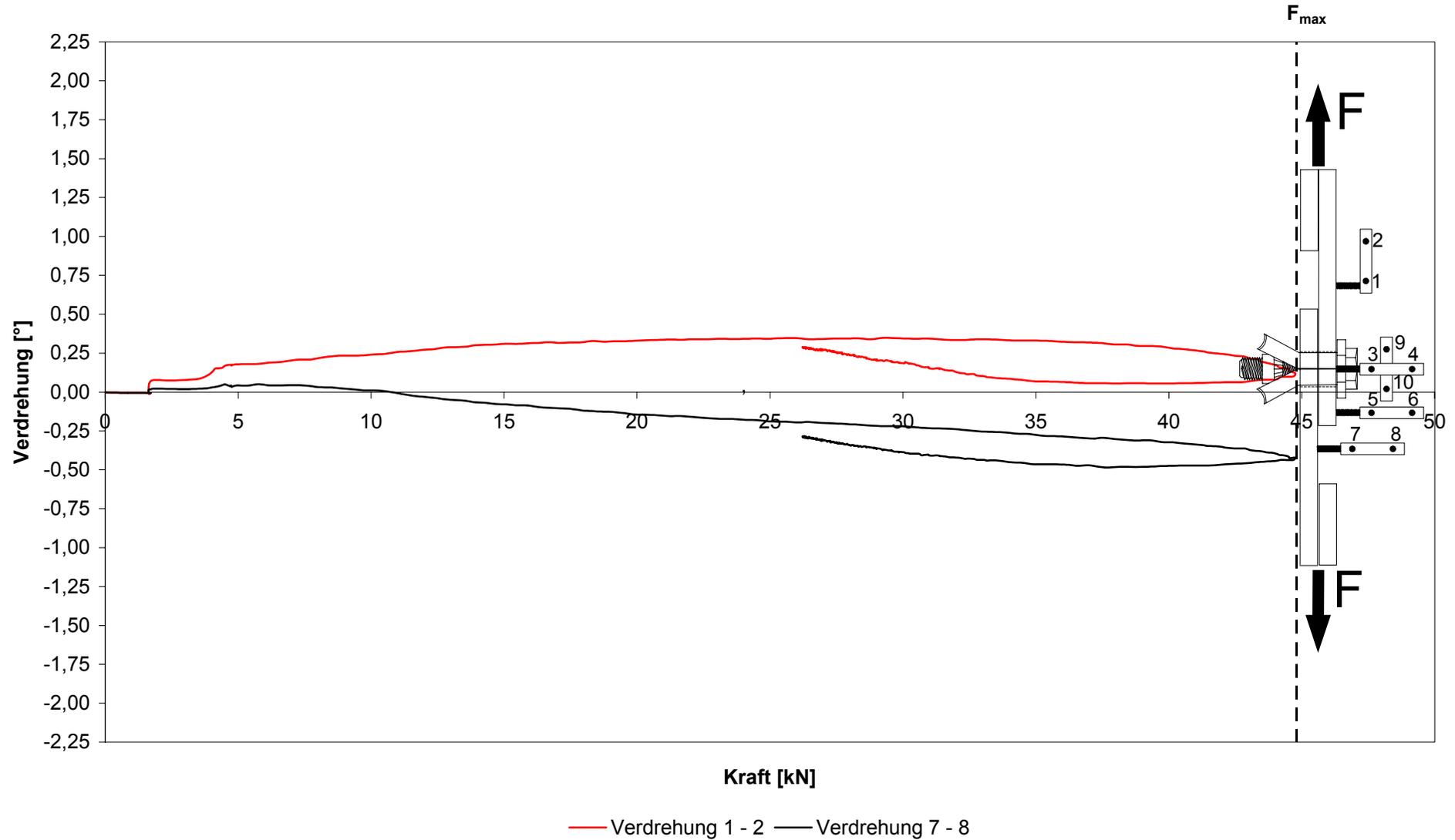
**Versuch 31**



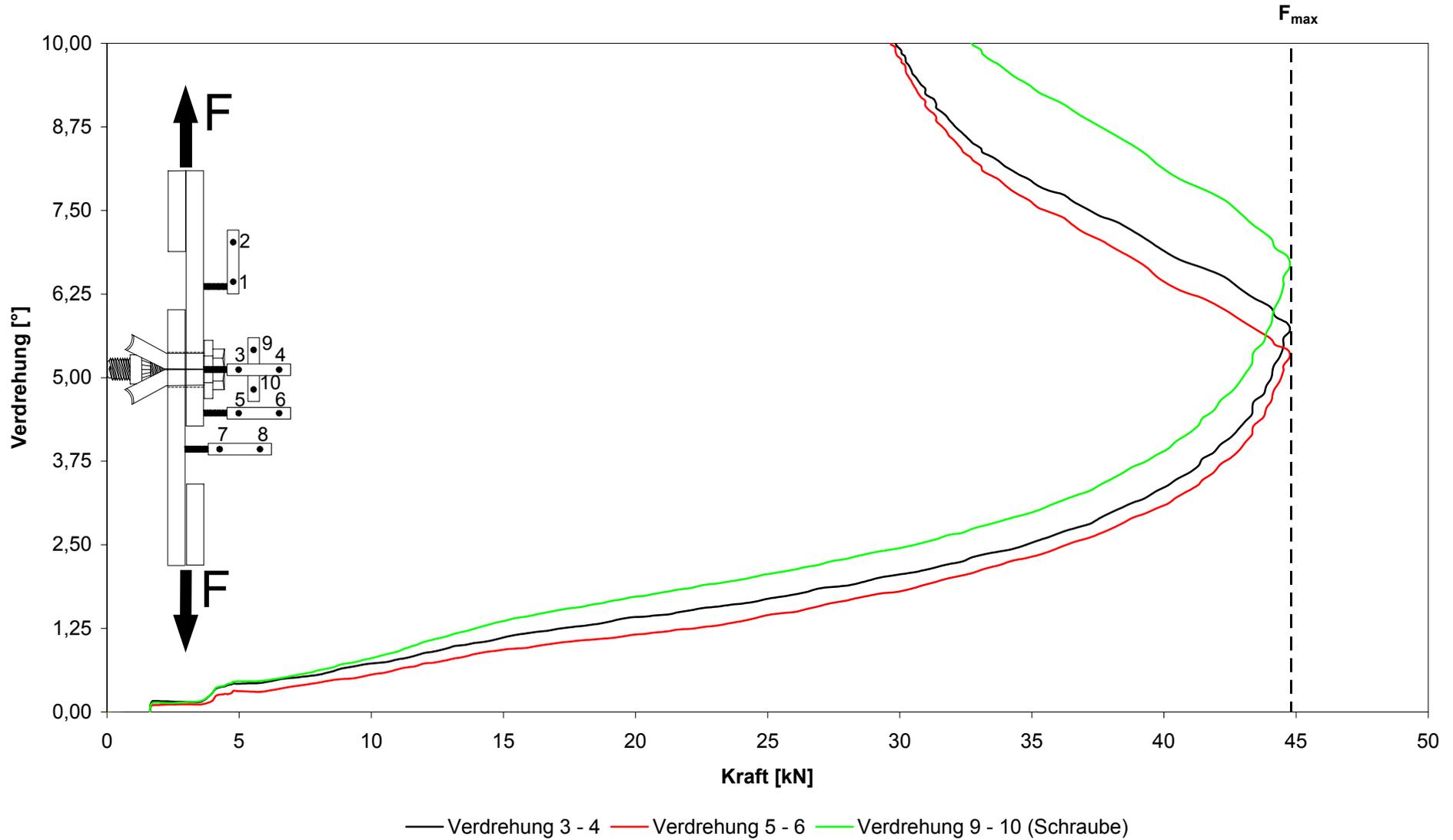
Versuch 31



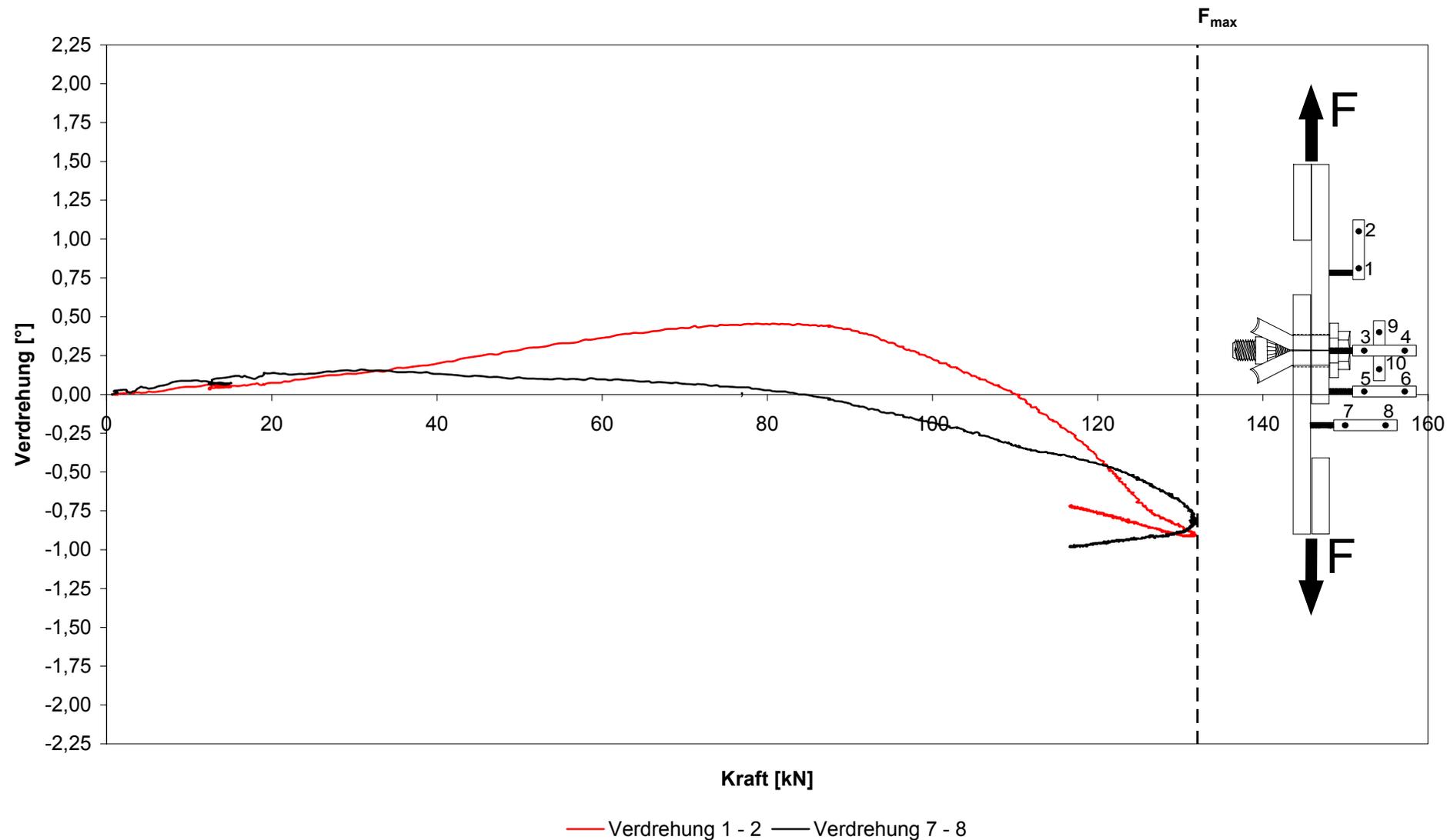
Versuch 32



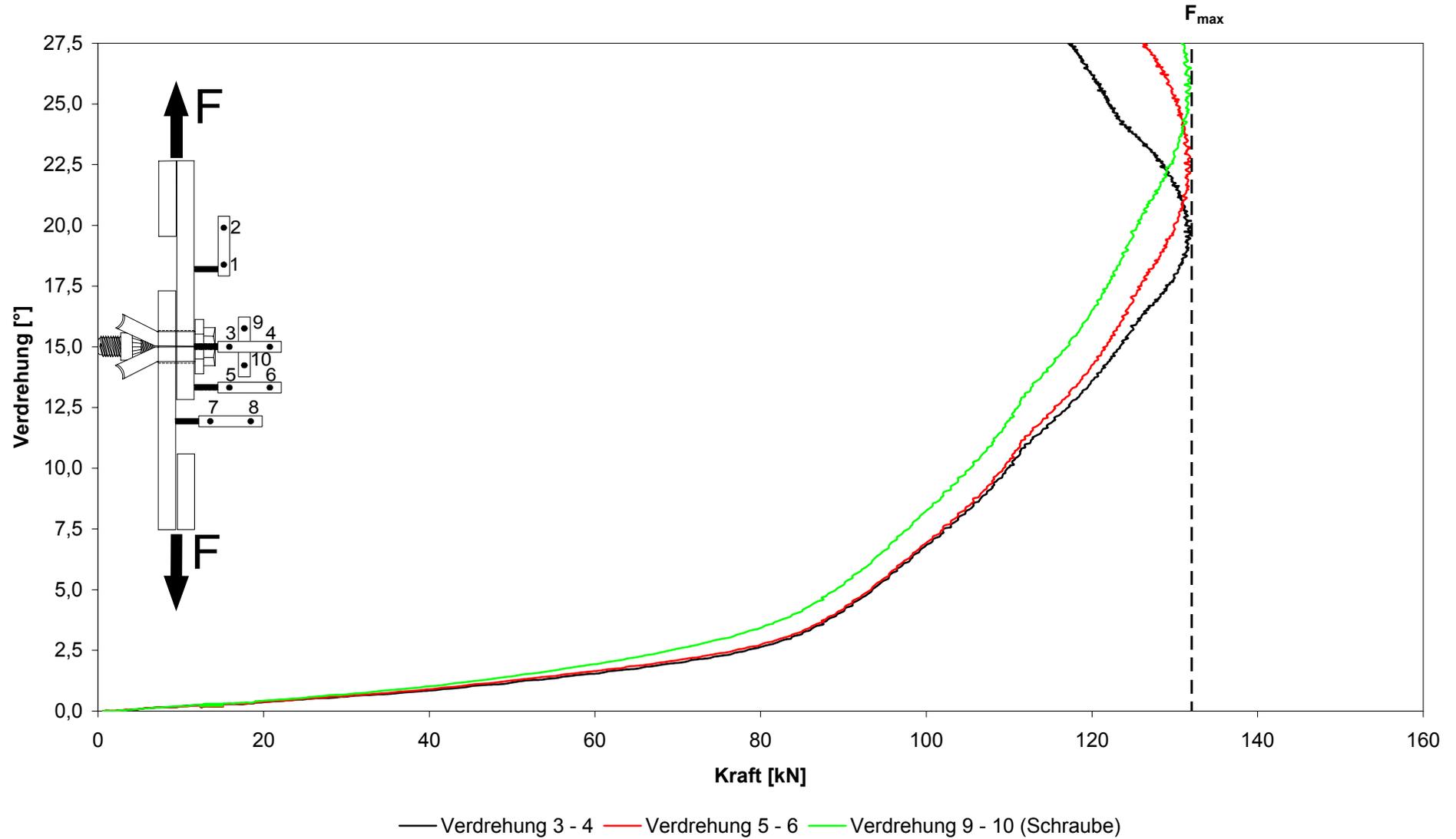
Versuch 32



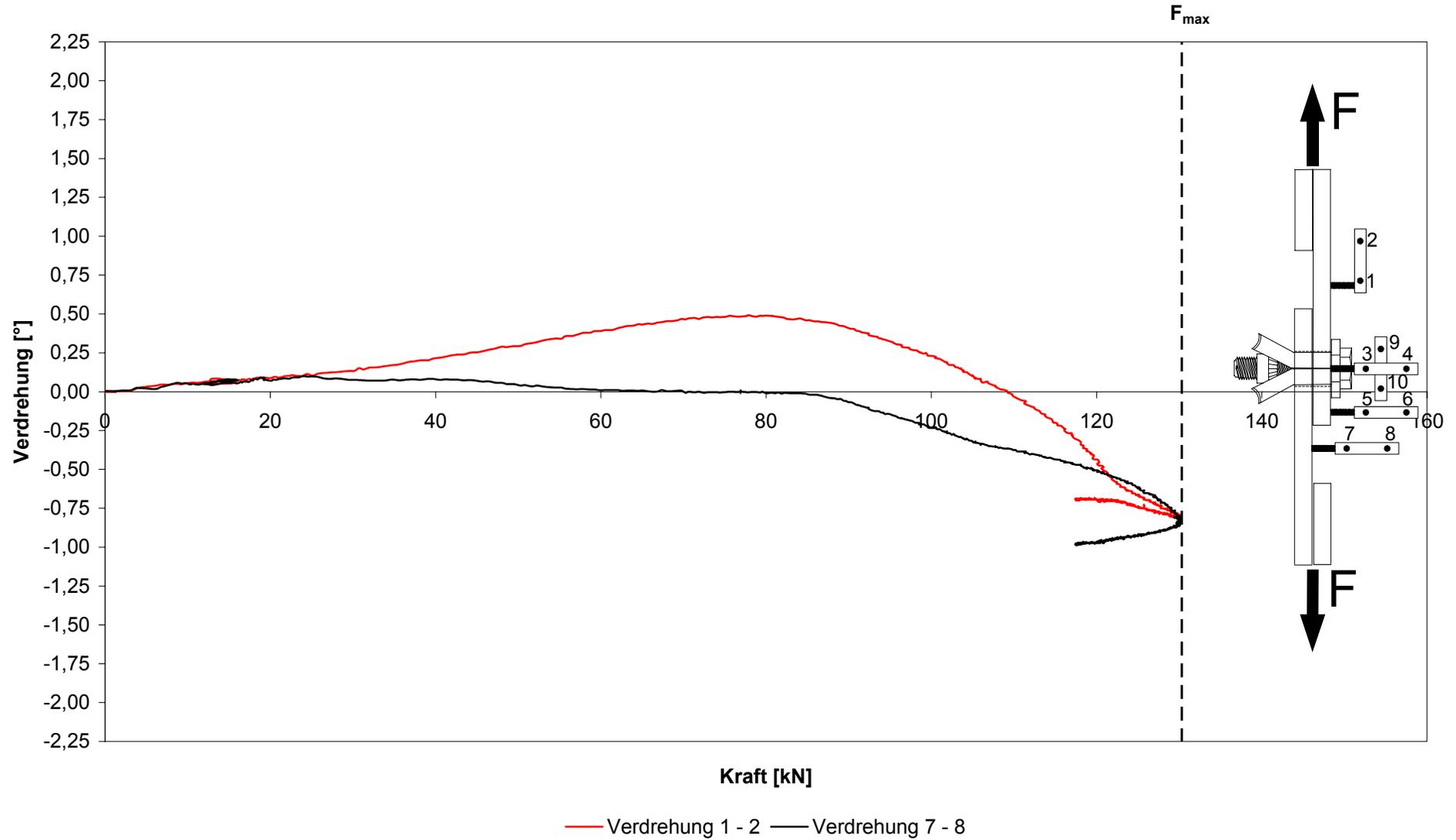
### Versuch 33



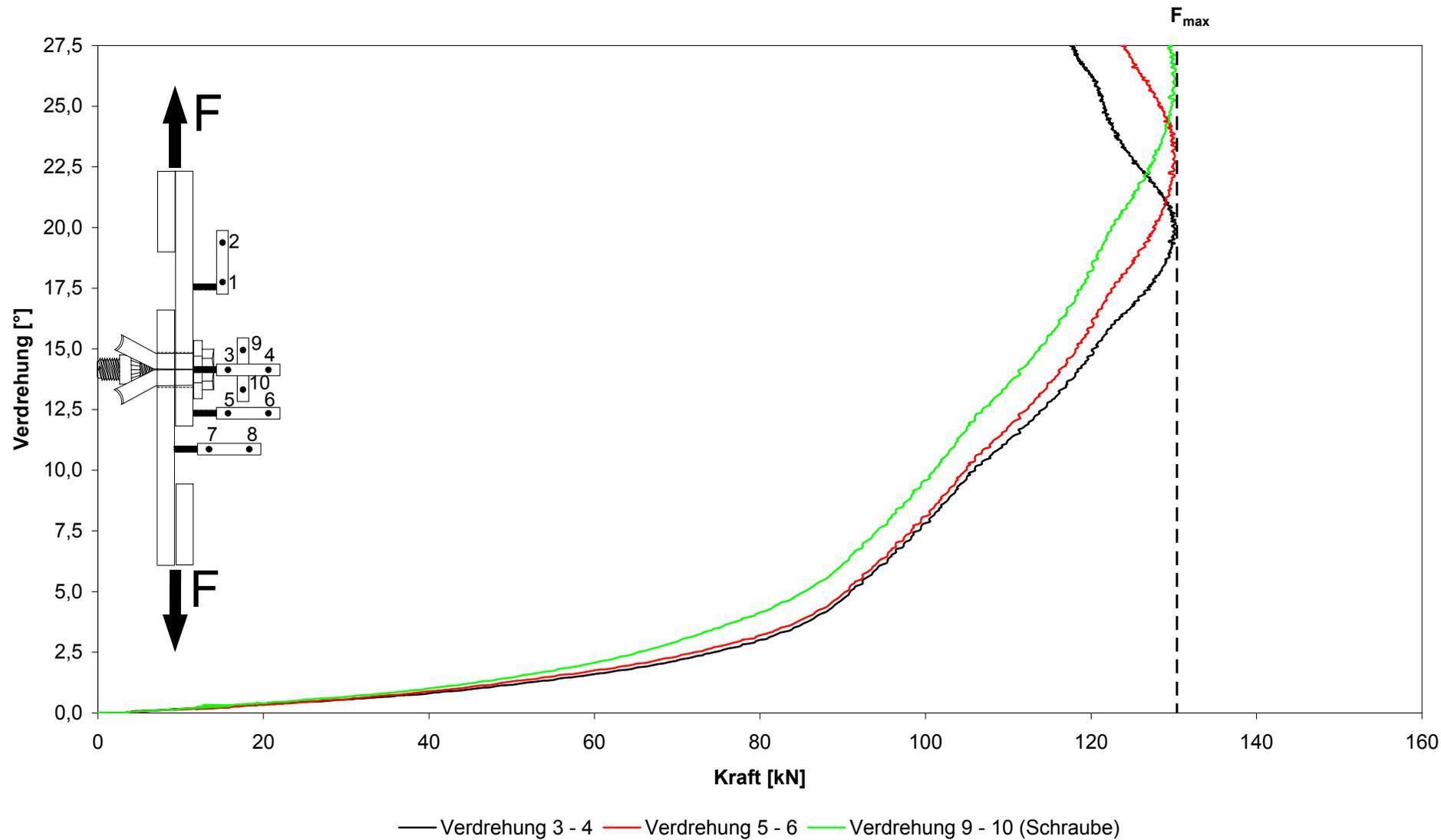
### Versuch 33



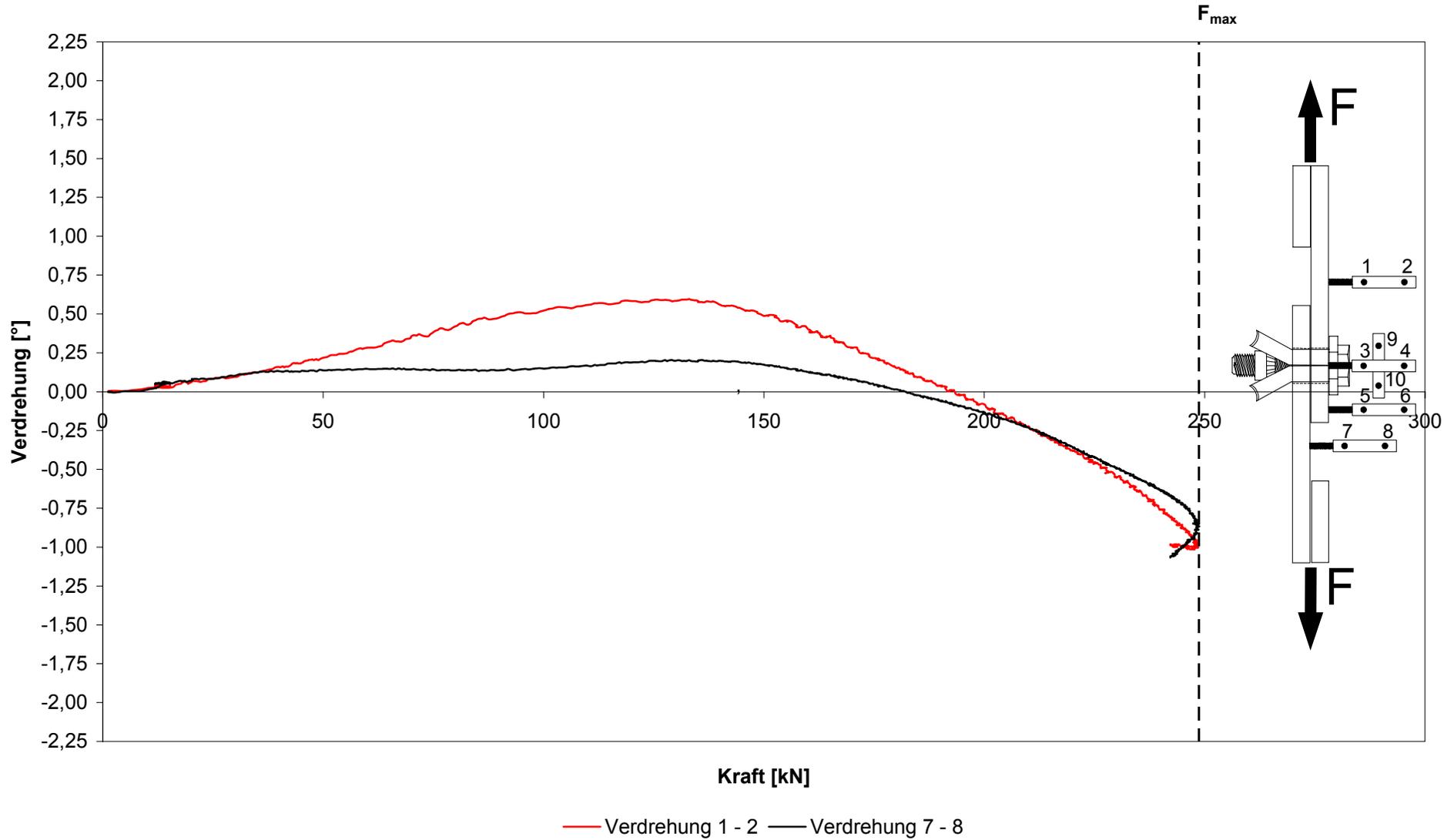
Versuch 34



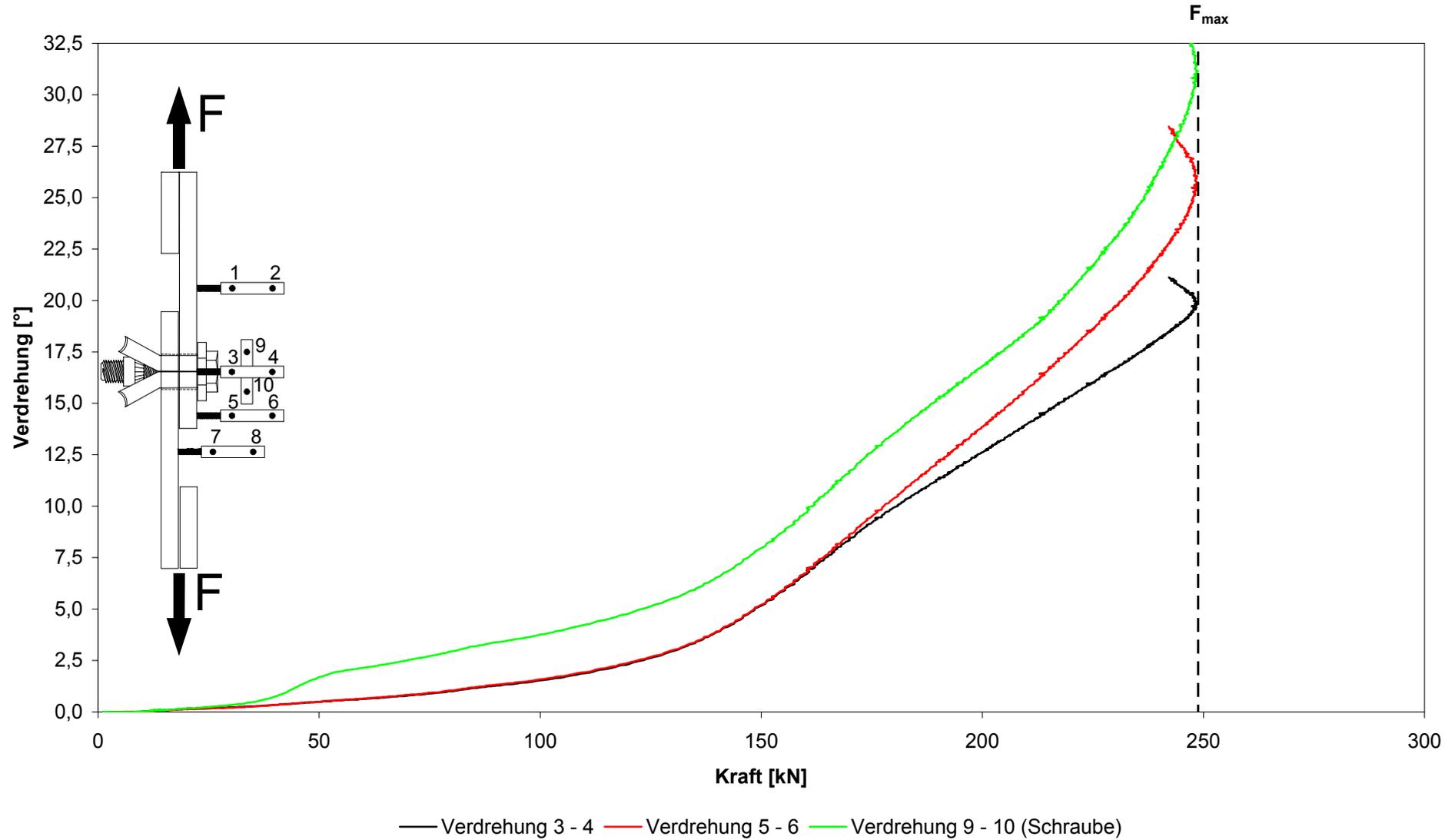
### Versuch 34



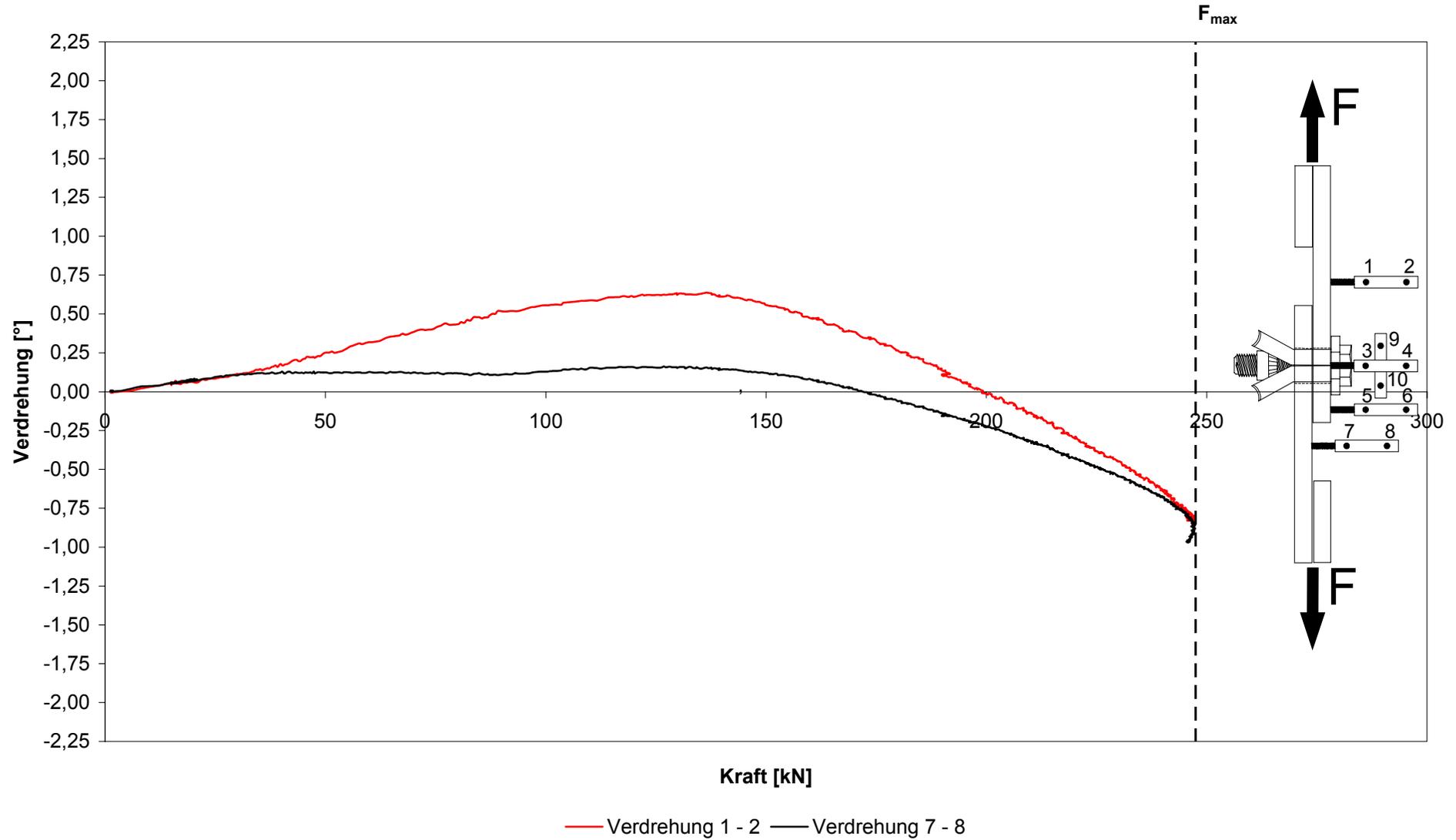
Versuch 35



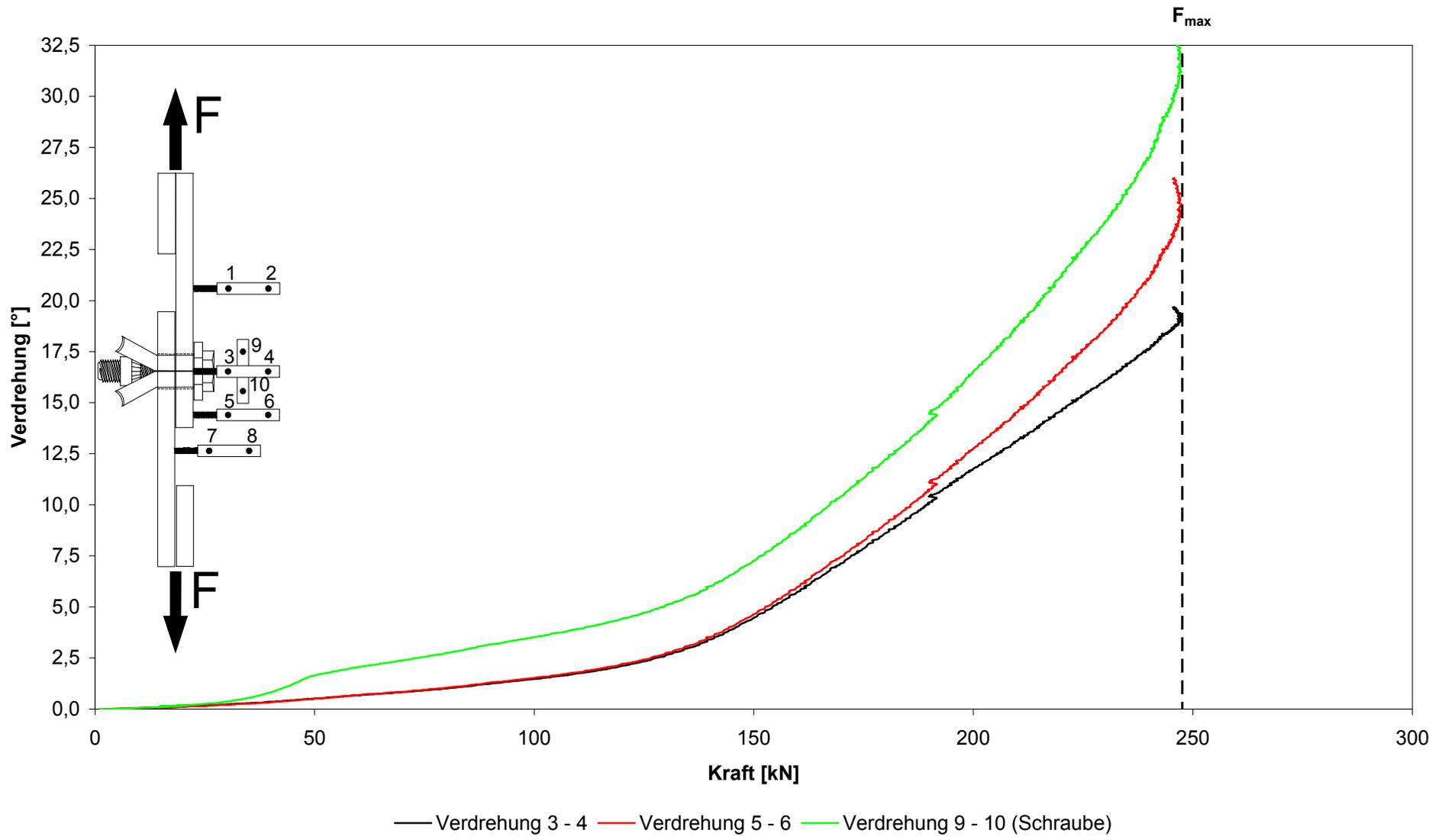
### Versuch 35



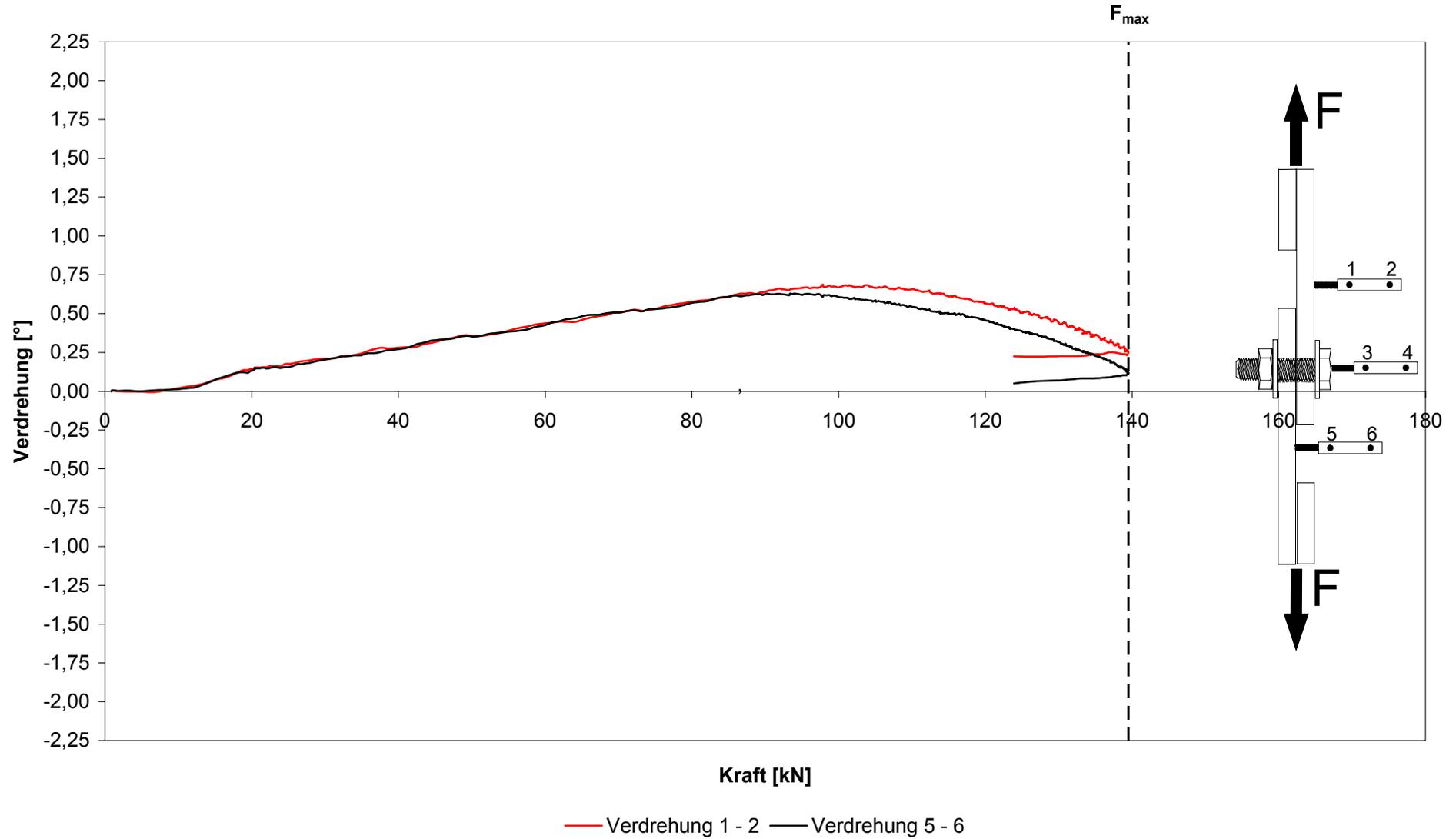
### Versuch 36



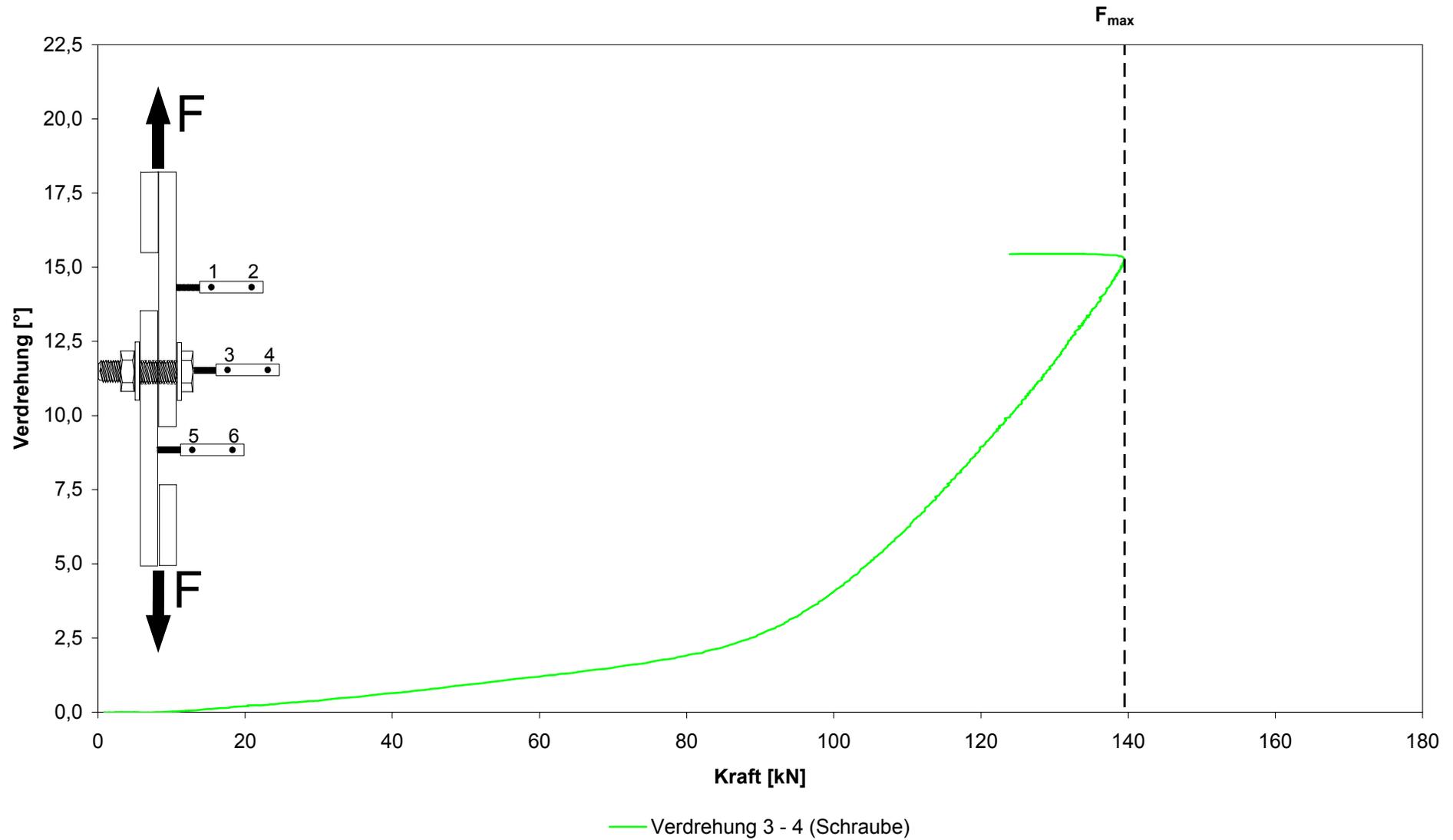
Versuch 36



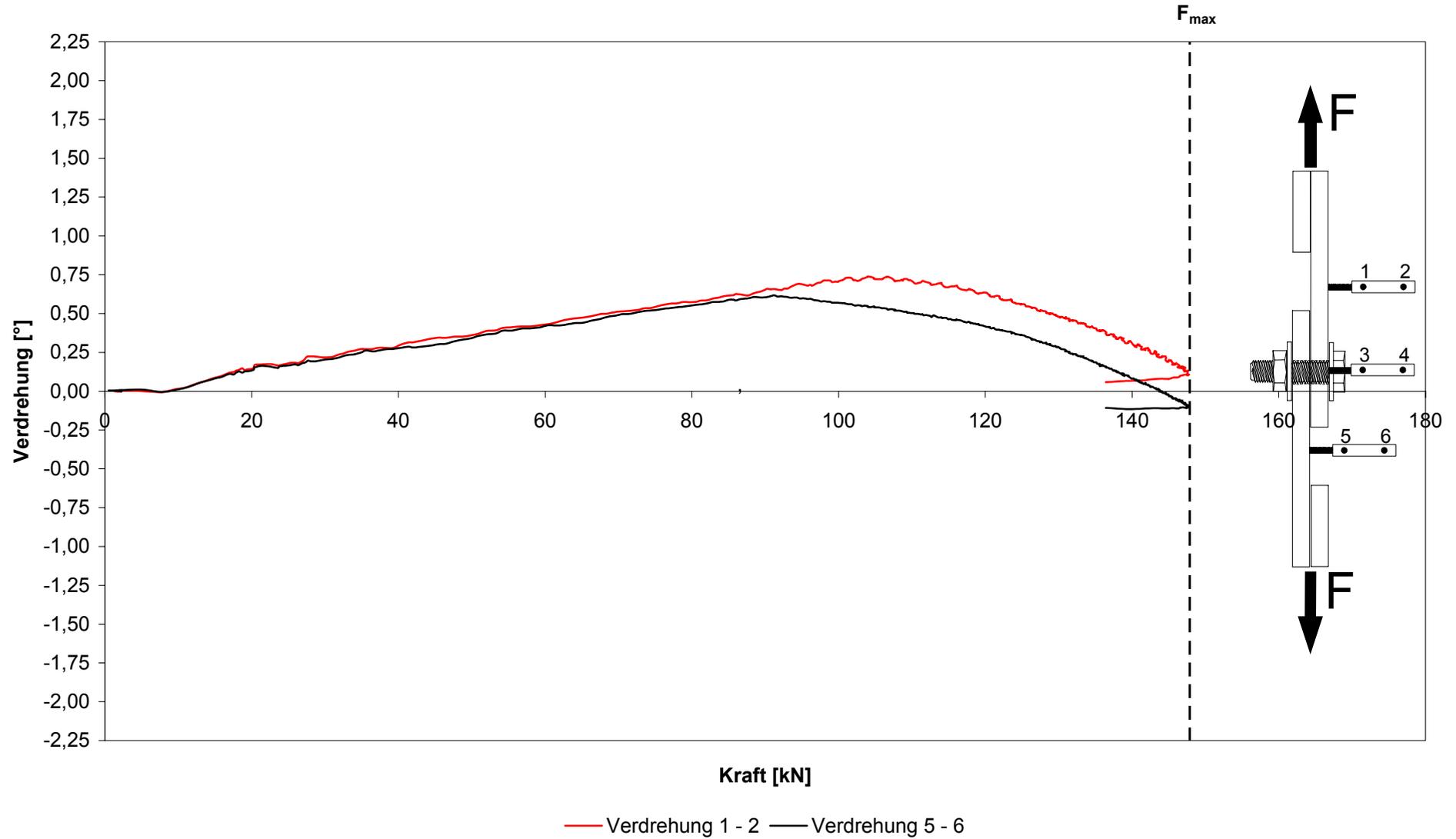
### Versuch 37



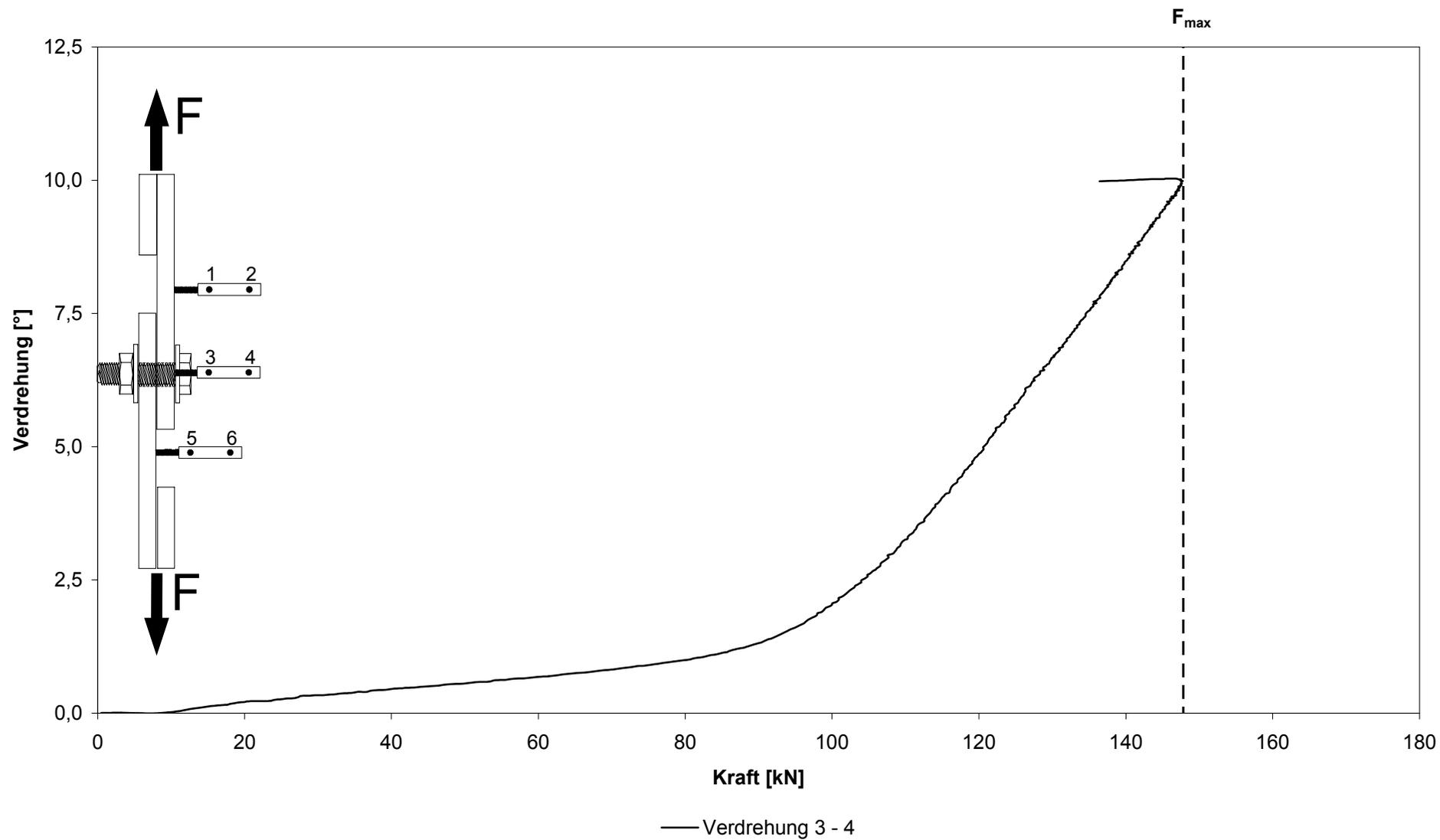
### Versuch 37



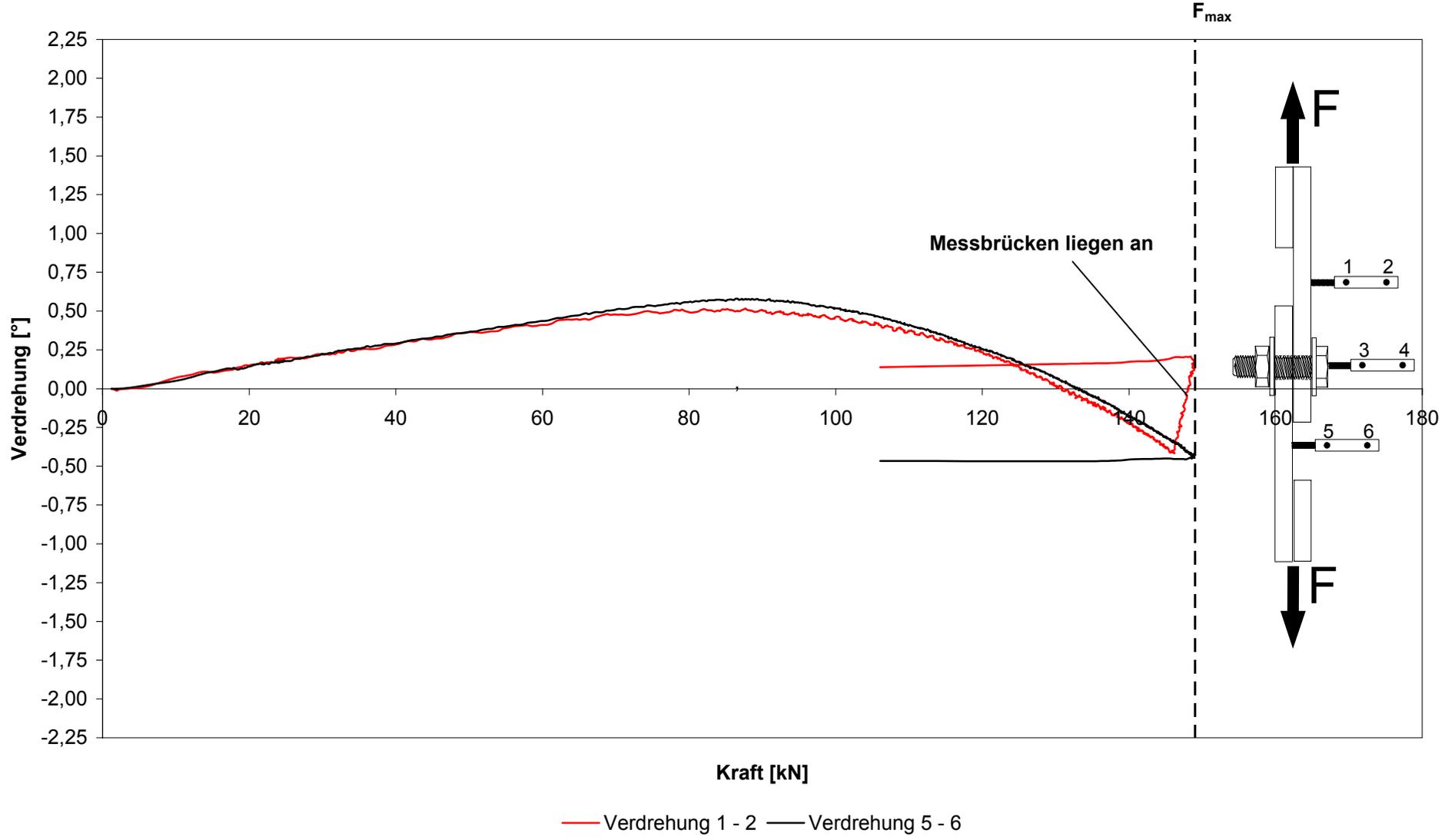
### Versuch 38



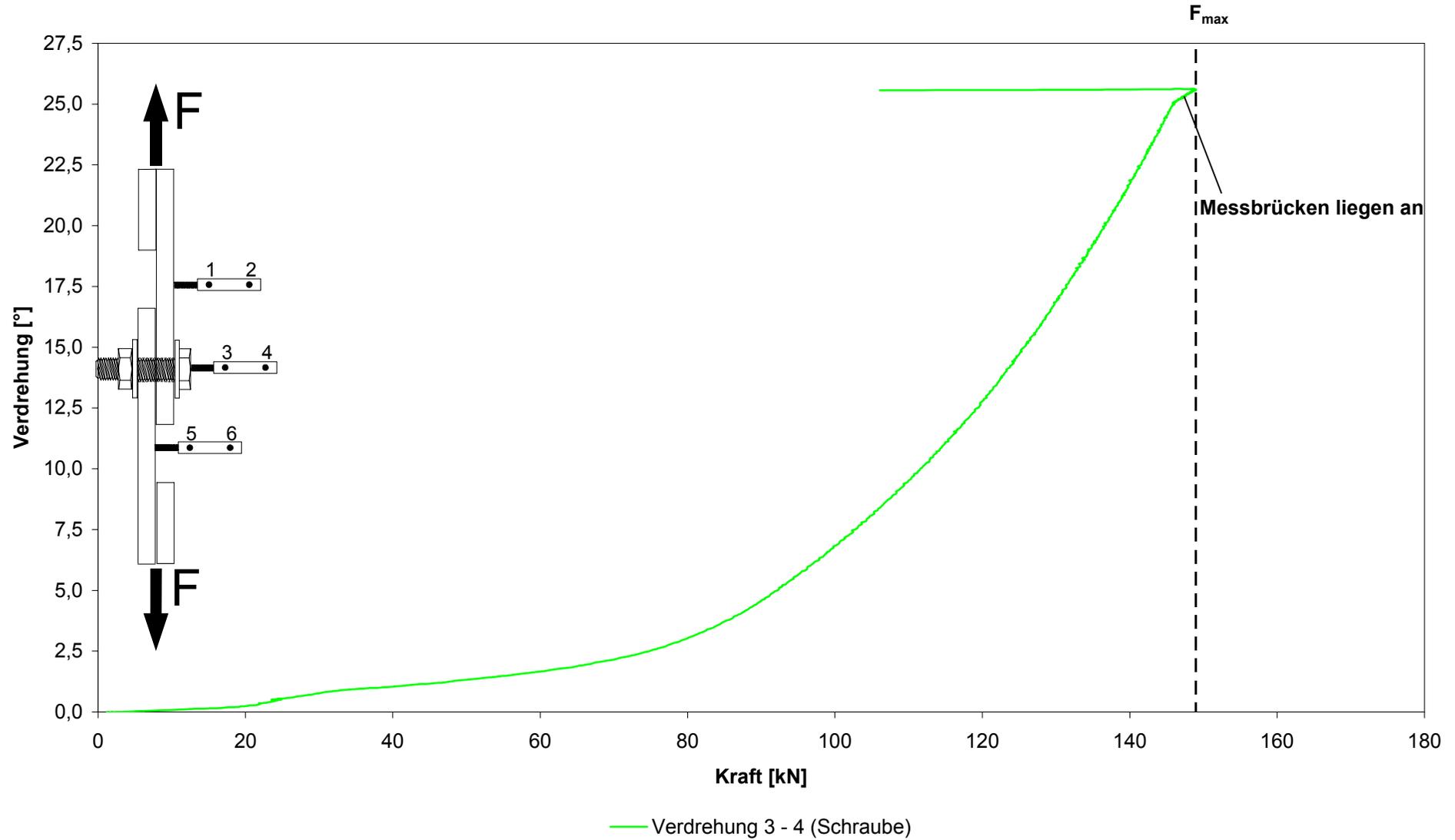
### Versuch 38



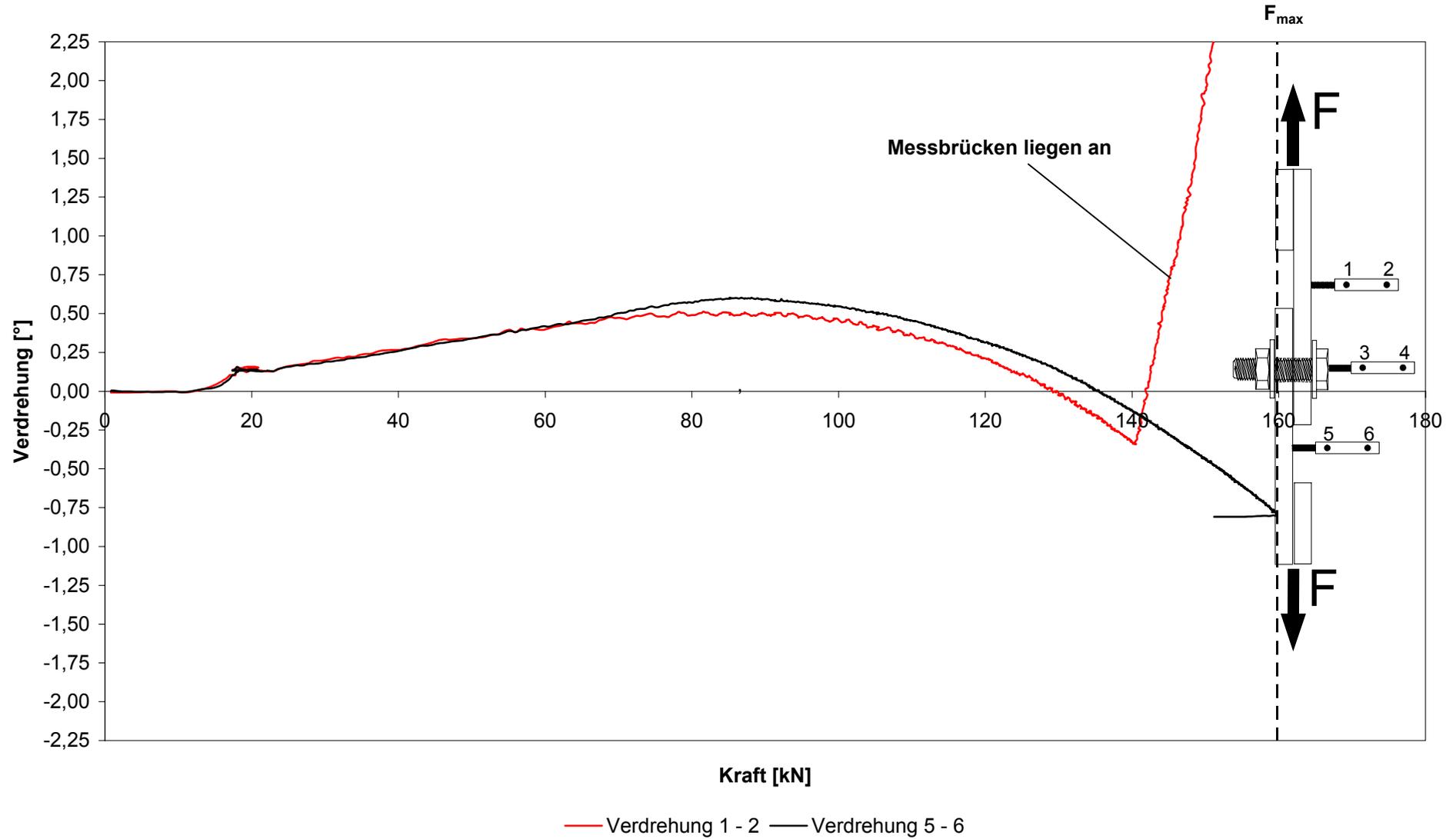
Versuch 39



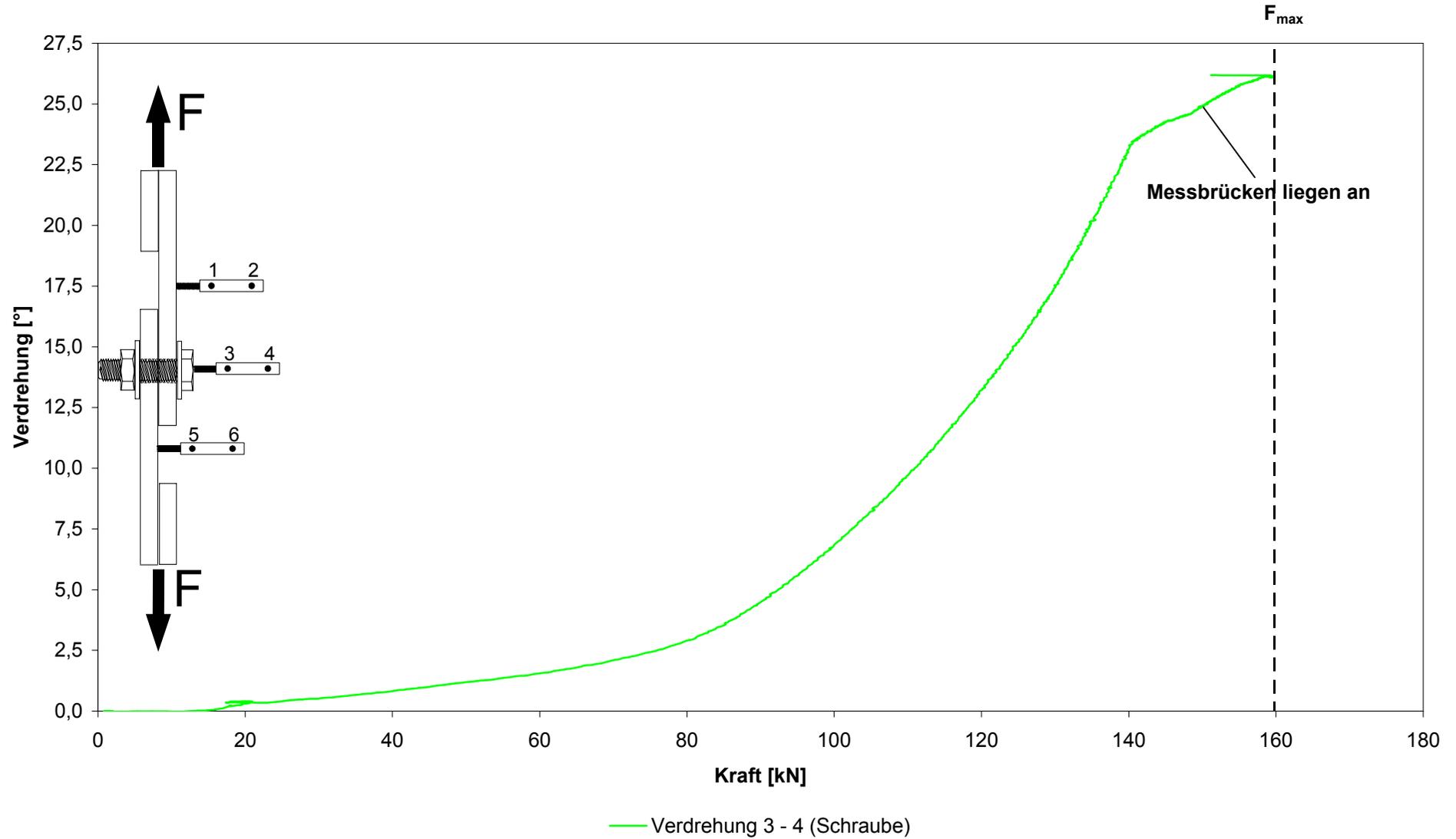
Versuch 39



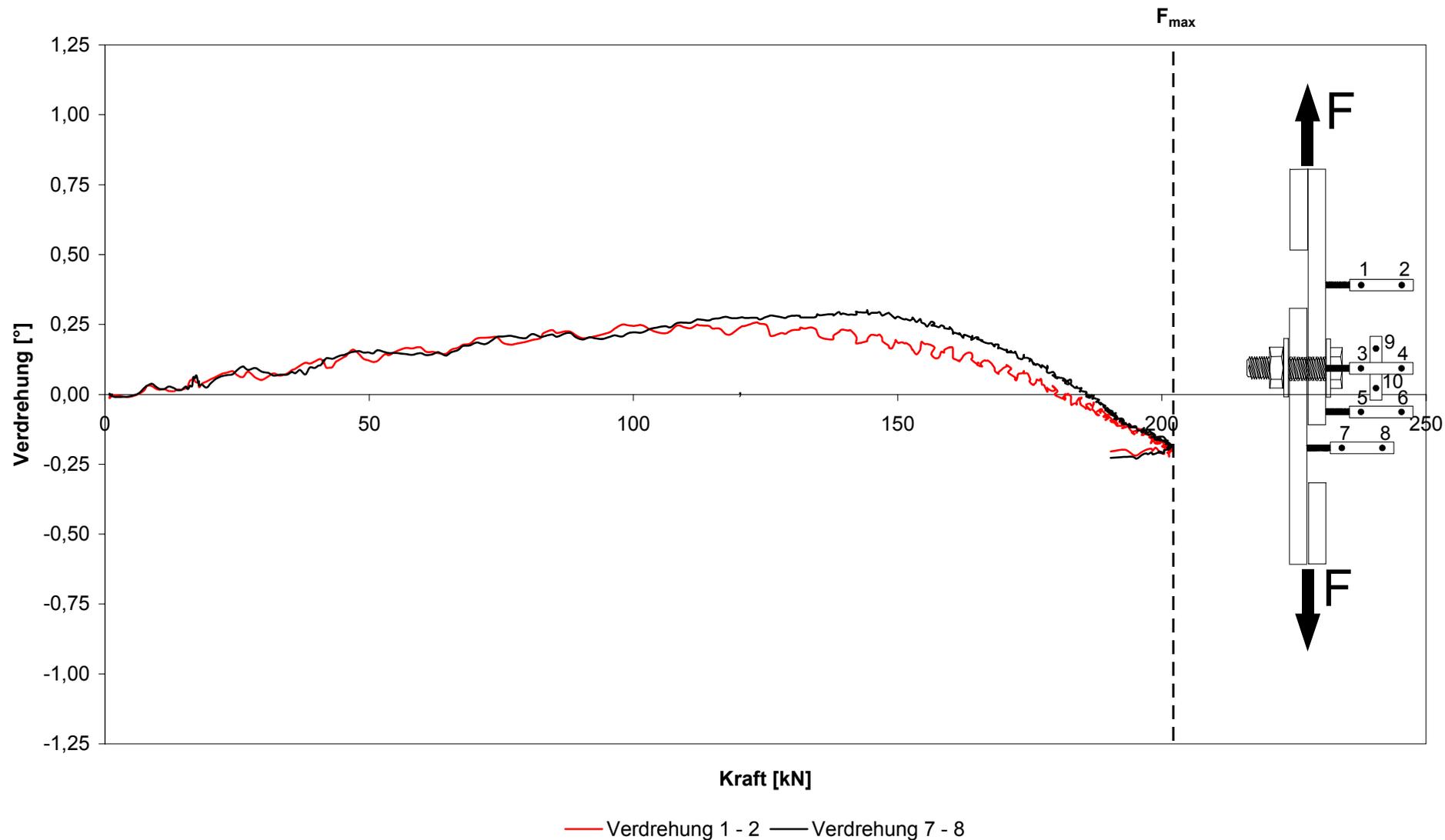
Versuch 40



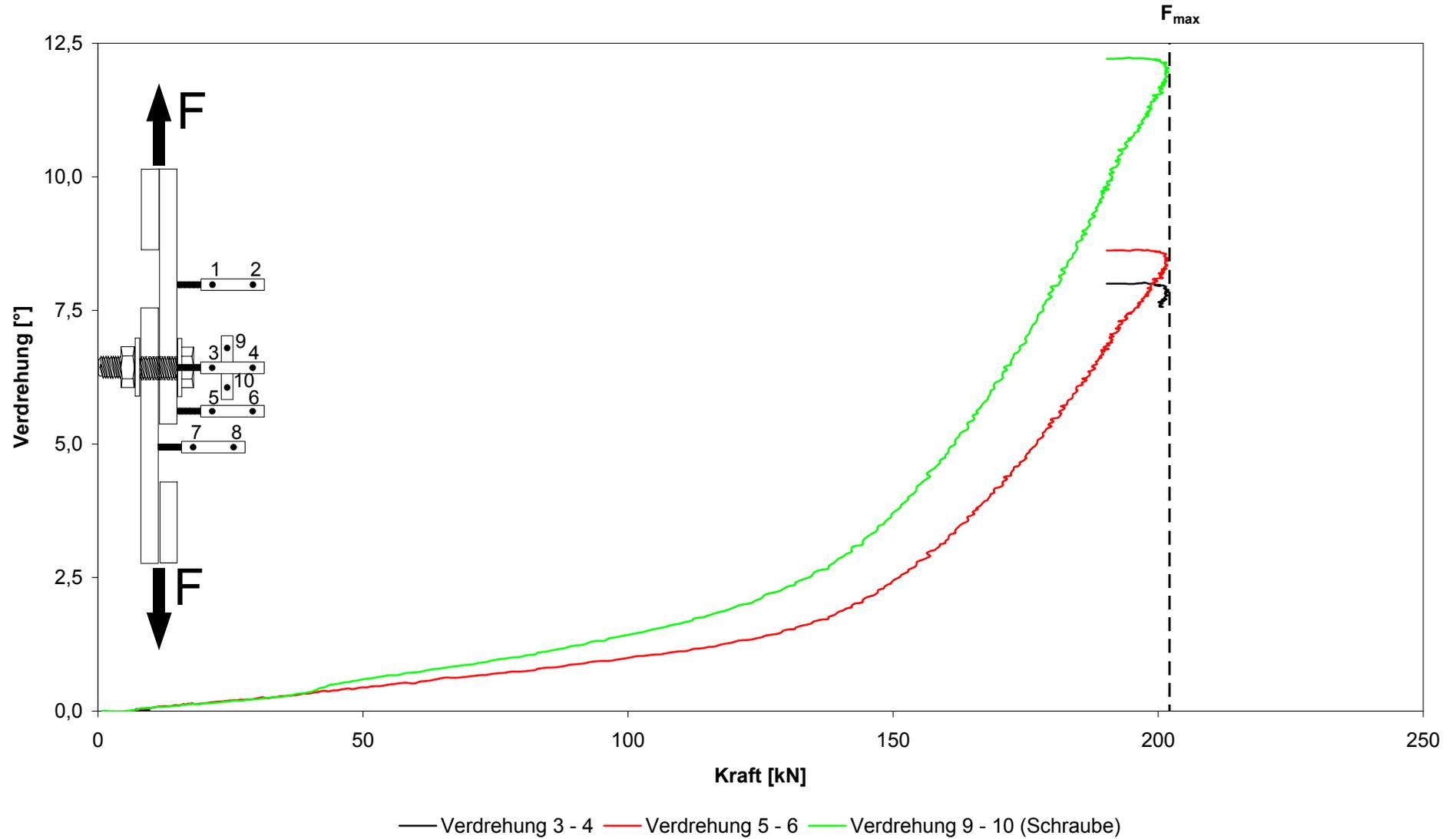
### Versuch 40



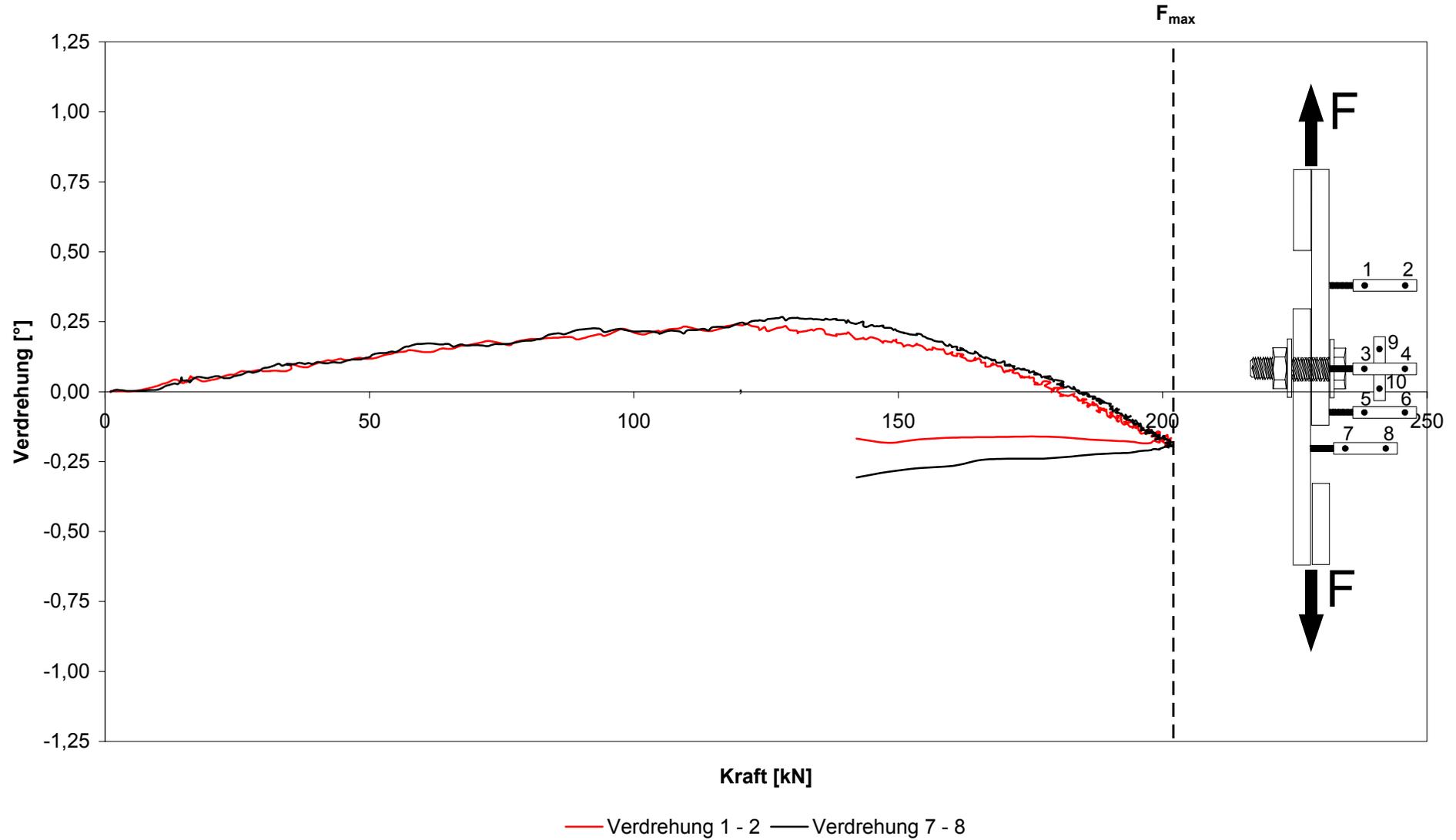
### Versuch 41



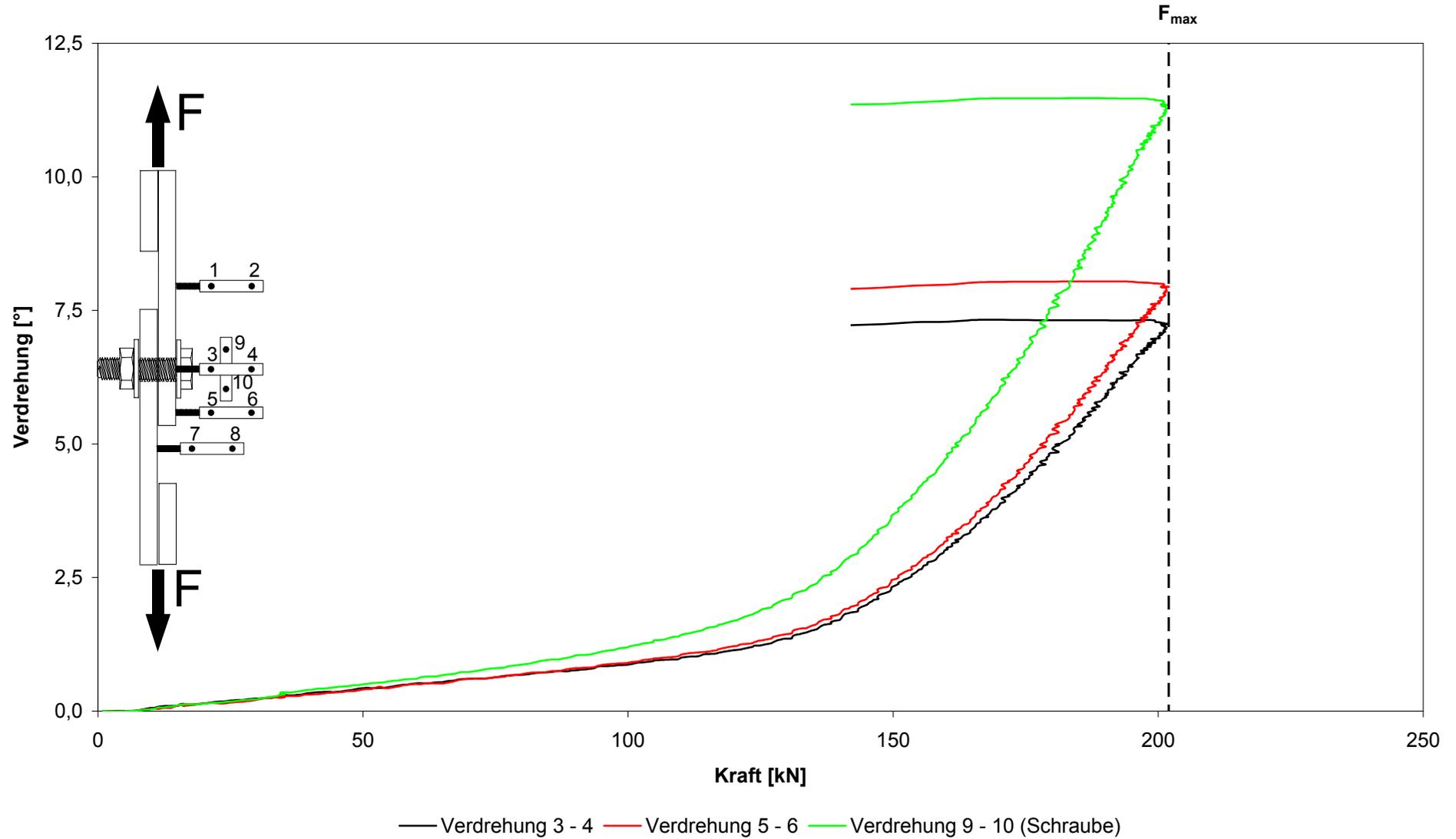
### Versuch 41



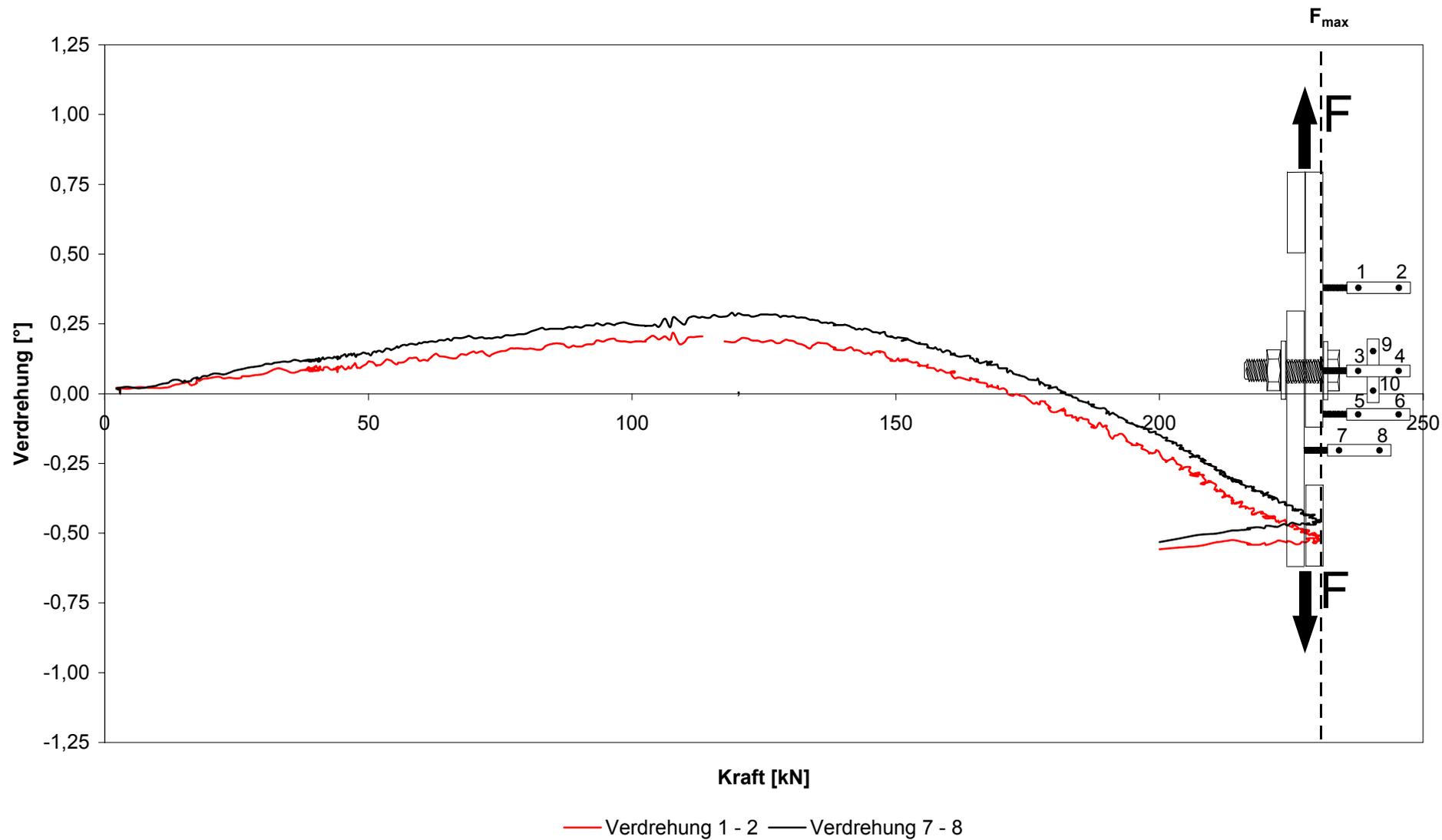
### Versuch 42



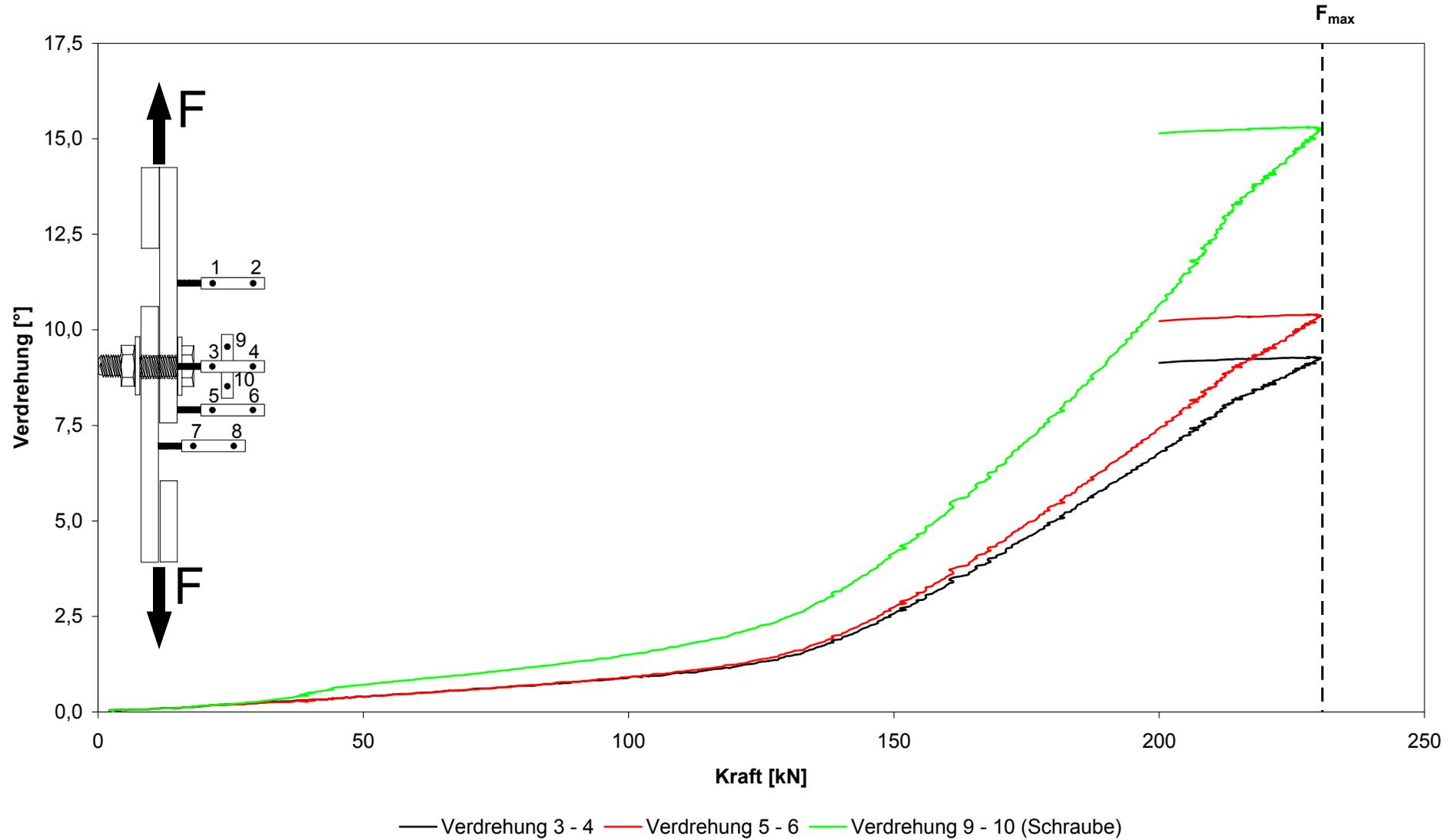
Versuch 42



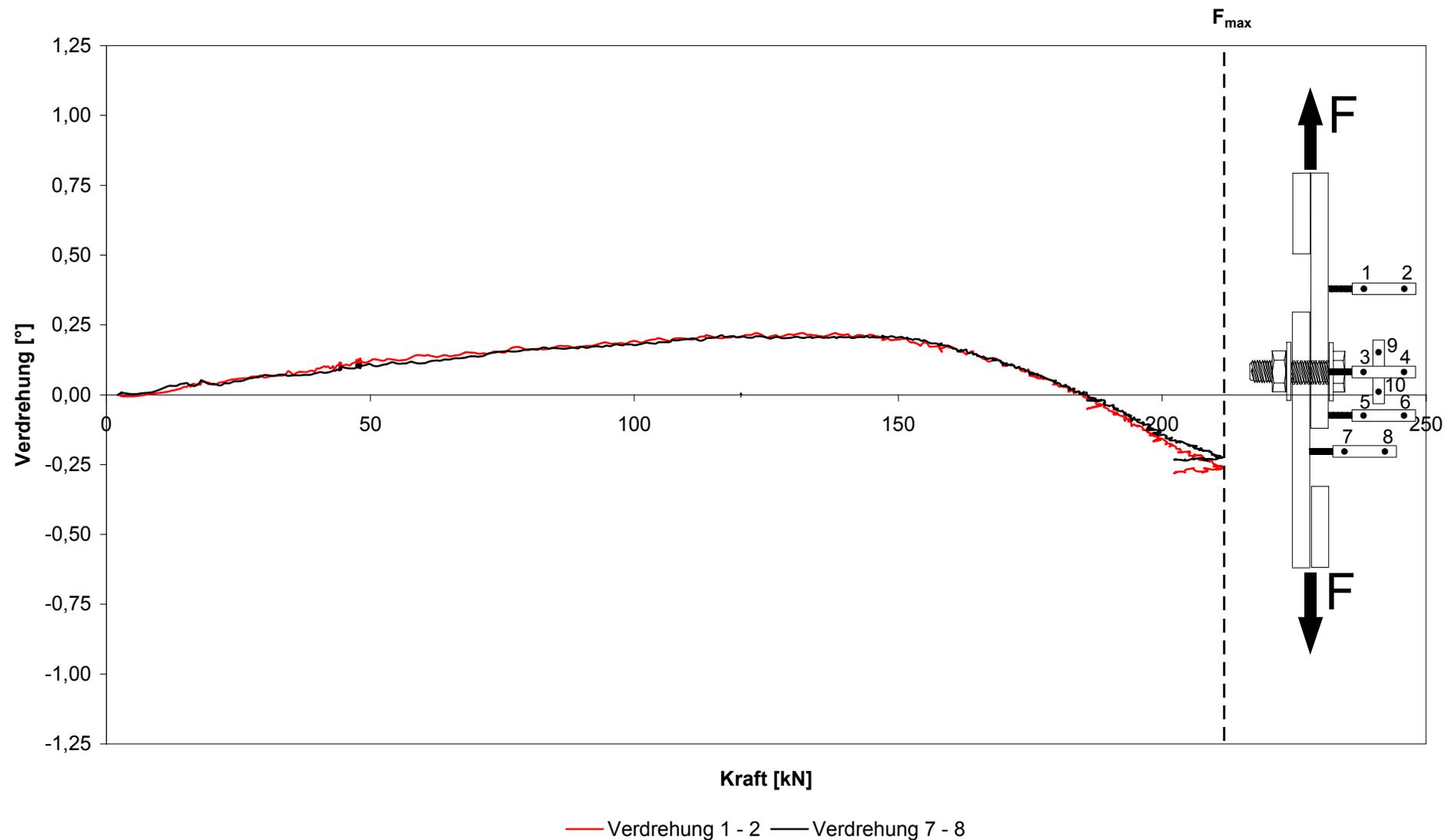
### Versuch 43



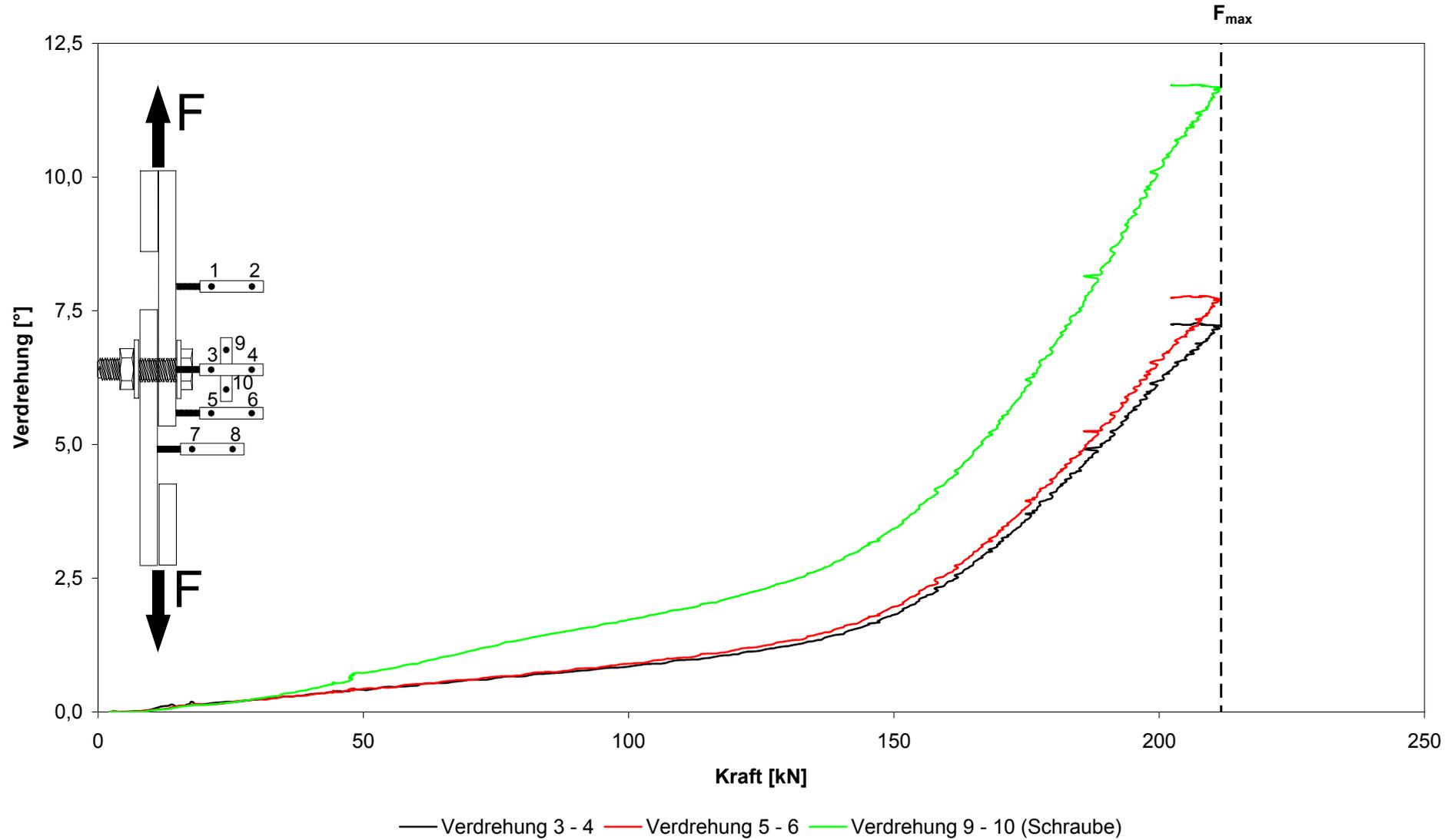
Versuch 43



### Versuch 44



### Versuch 44

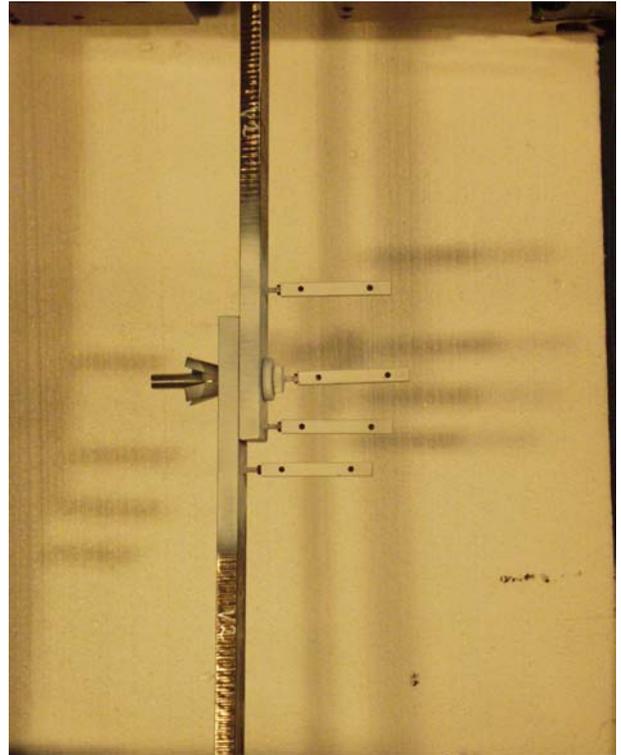
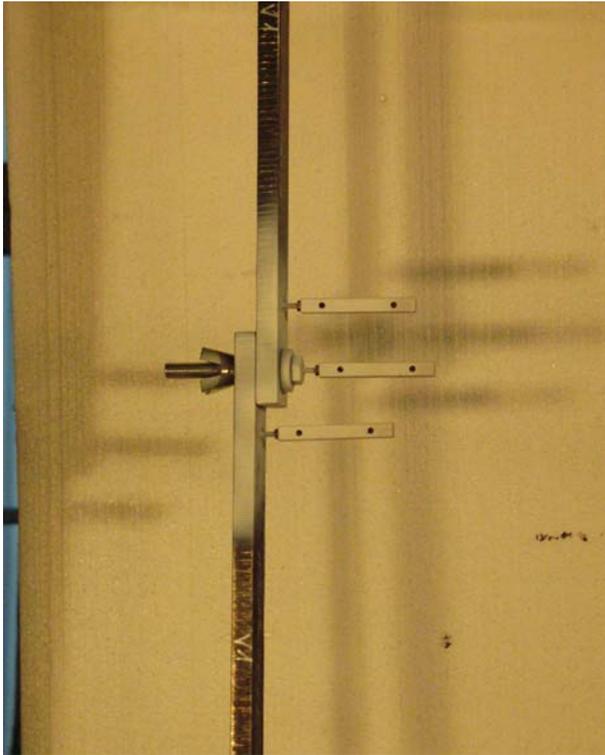




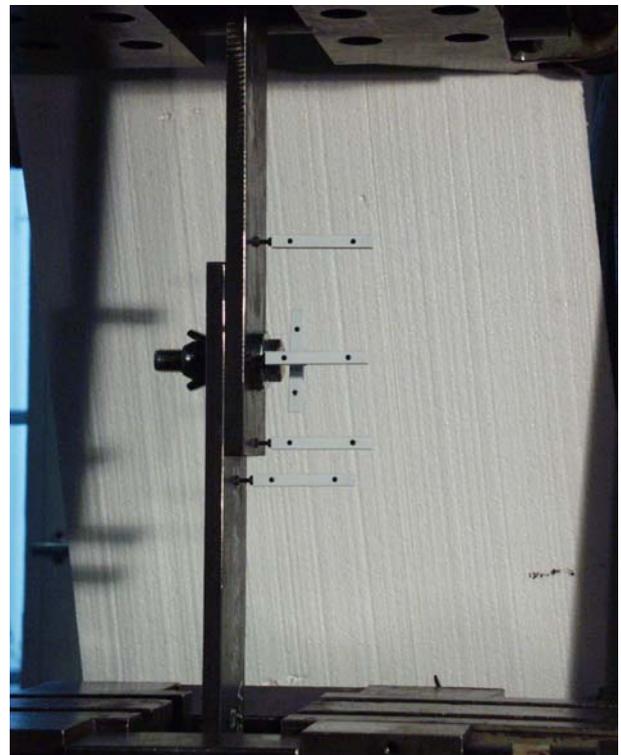
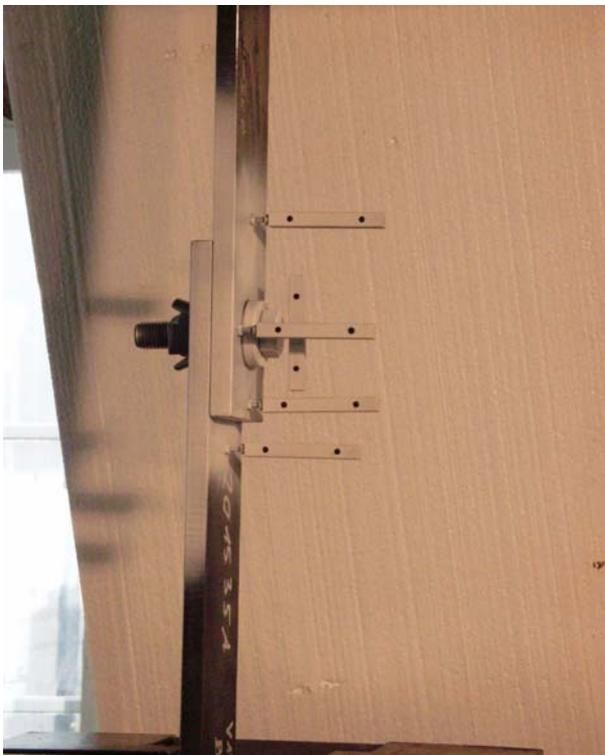
**Abbildung 1: Unterschiedliche Hülsenausbildung bei Stahlbaudübeln M12 (Länge 1, links, Länge 2, rechts).**



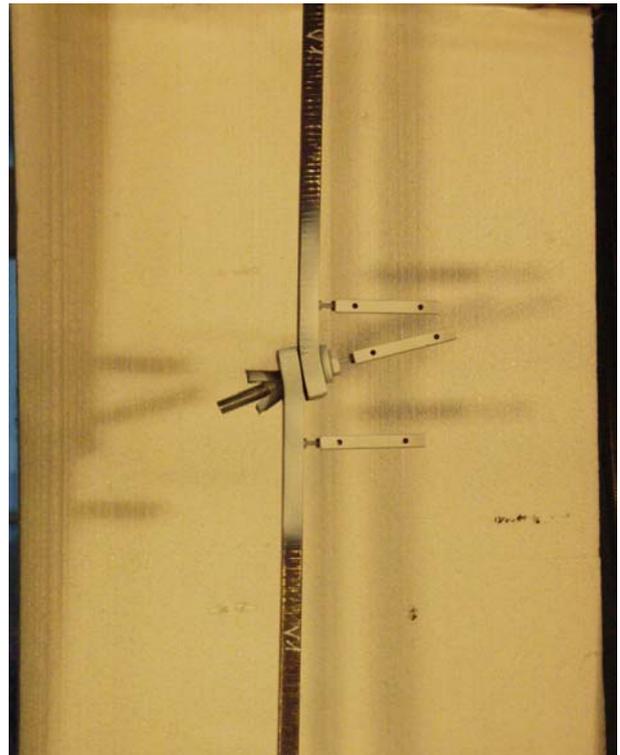
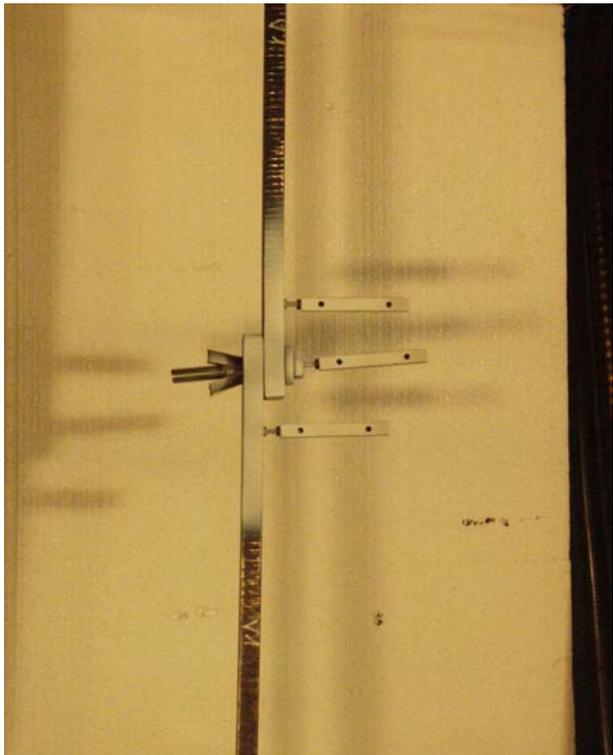
**Abbildung 2: Unterschiedliche Hülsenausbildung bei Stahlbaudübeln M12: zu geringe Auflagefläche bei Länge 1.**



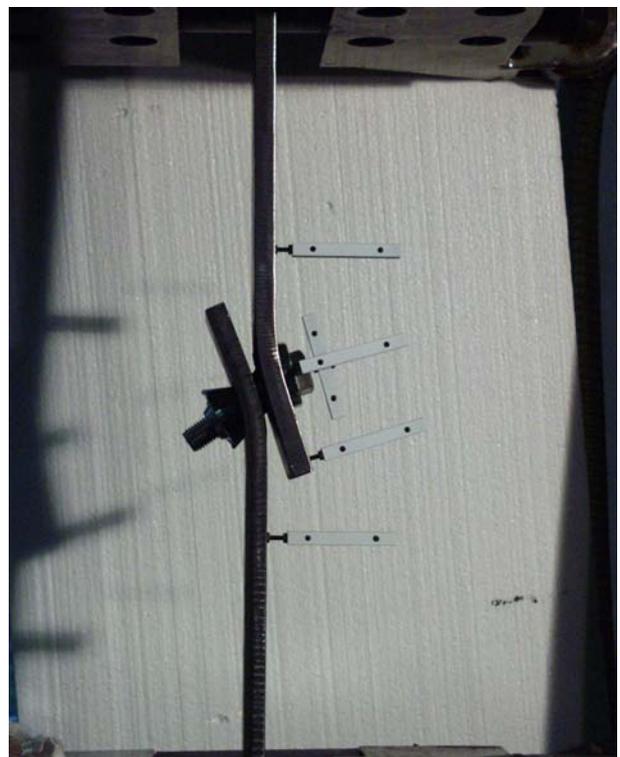
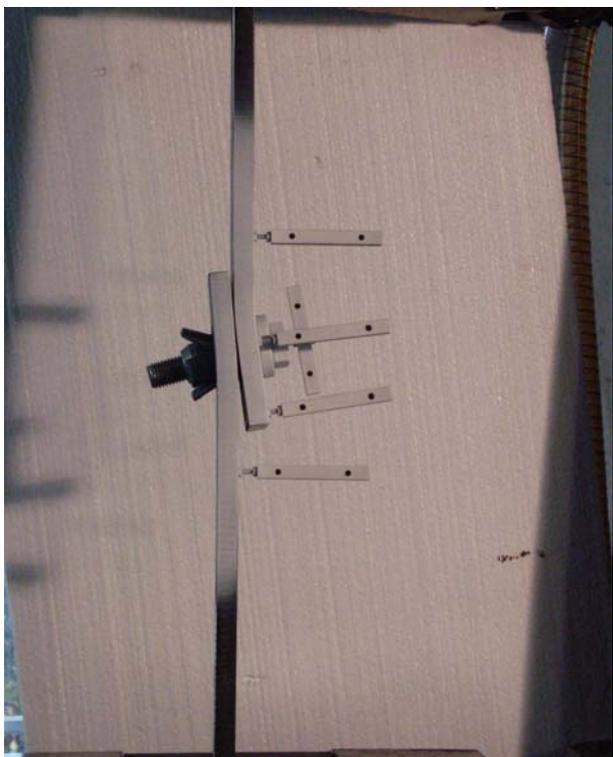
**Abbildung 3: Beispiele für den Aufbau der Versuche an Stahlbaudübeln M12,  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  (Versuch 1, links, Versuch 2, rechts).**



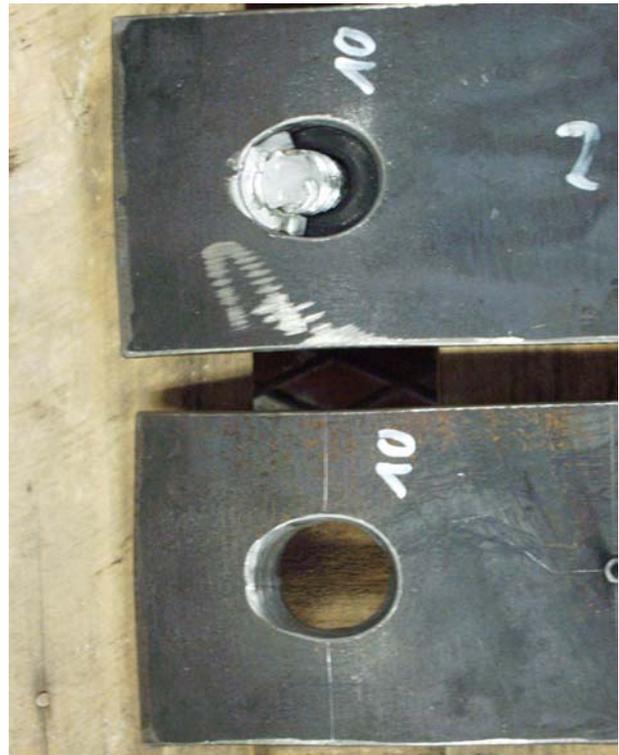
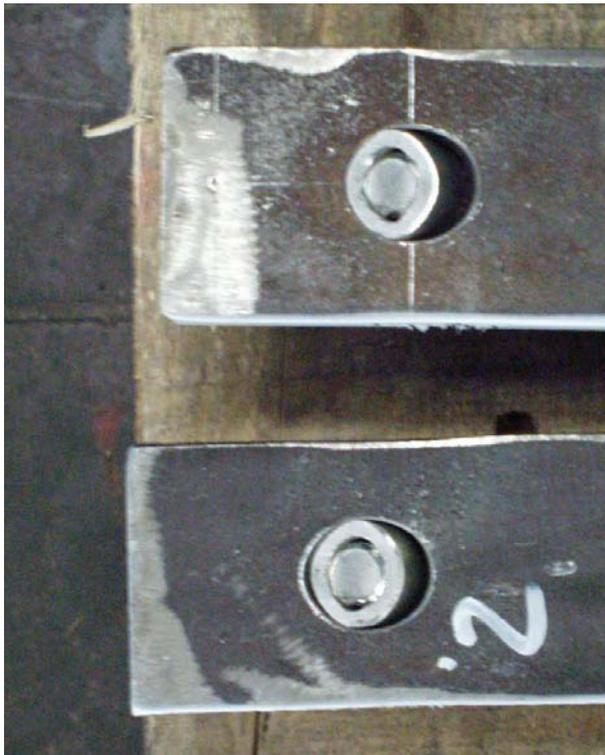
**Abbildung 4: Beispiele für den Aufbau der Versuche an Stahlbaudübeln M20 mit Gummi,  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  (Versuch 10, links, und Versuch 14, rechts).**



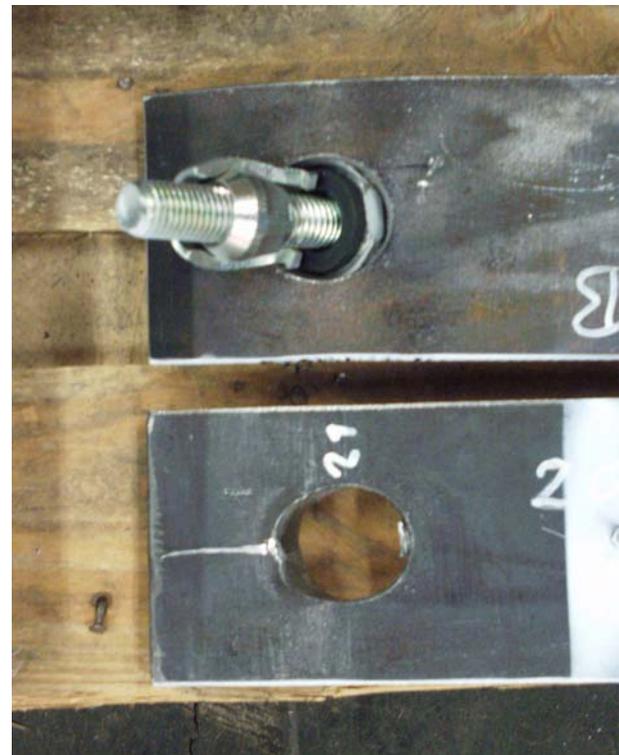
**Abbildung 5: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M12,  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  unter Gebrauchslast (Versuch 1, links) und nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 1, rechts).**



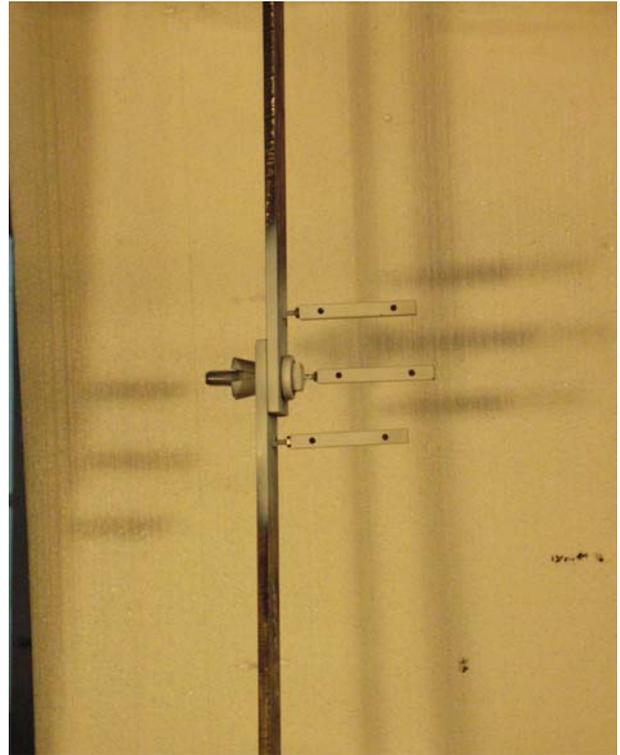
**Abbildung 6: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M20,  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  unter Gebrauchslast (Versuch 14, links) und nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 11, rechts).**



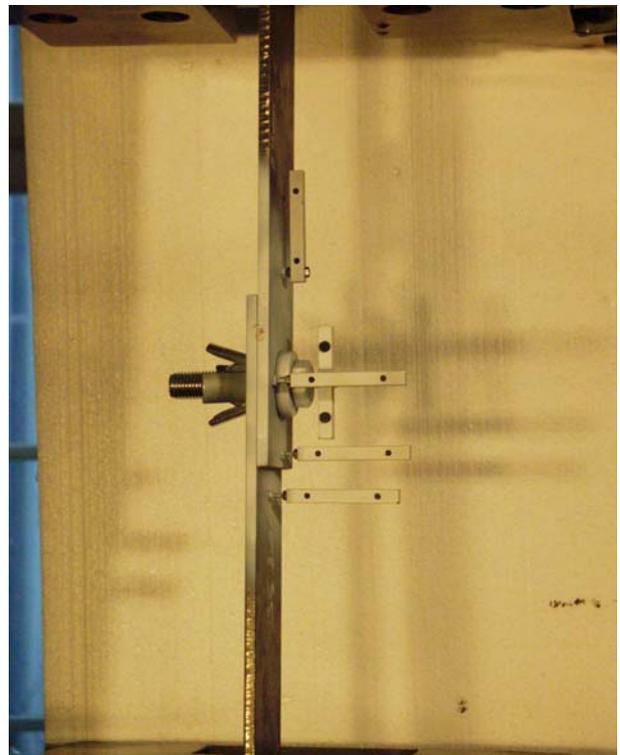
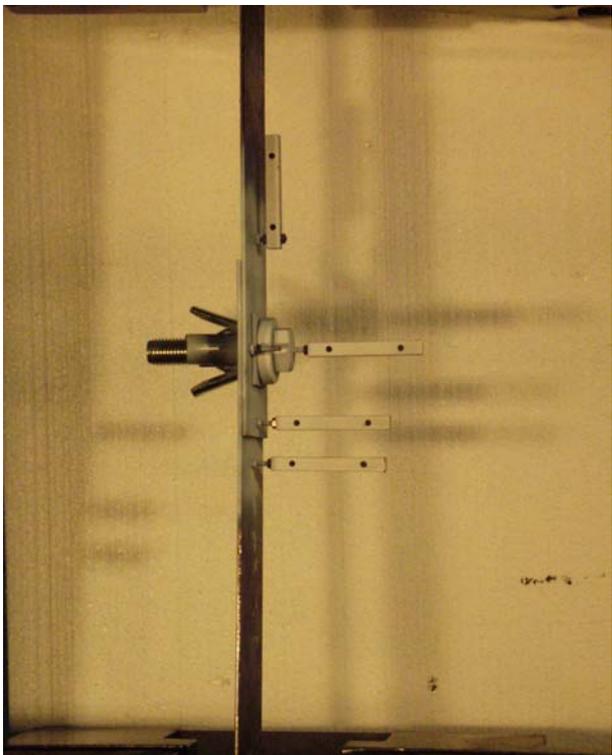
**Abbildung 7: Versagen durch Abscheren bei Stahlbaudübeln M12 ohne Gummi (Versuch 2, links) und Stahlbaudübeln M20 mit Gummi (Versuch 10, rechts).**



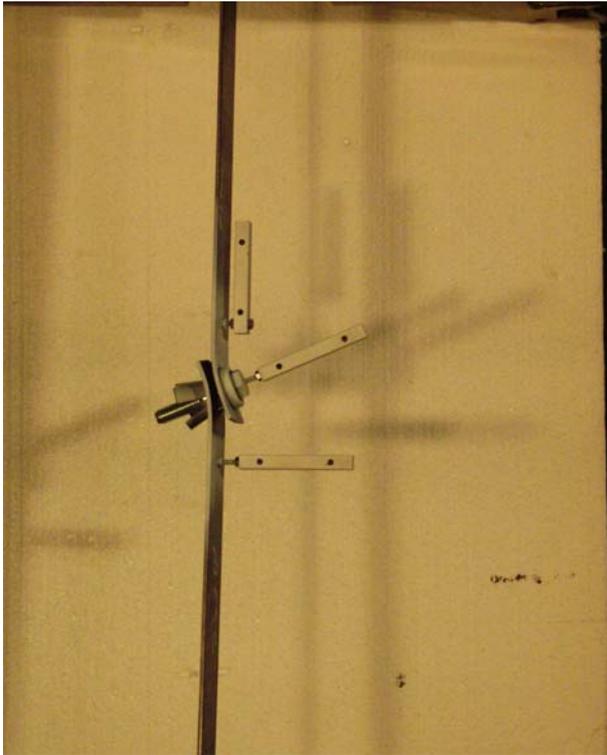
**Abbildung 8: Versagen durch Abscheren und Herausziehen bei Stahlbaudübeln M20 mit Gummi bei Lochdurchmessern  $d_{L,nom} = 40\text{mm}$ .**



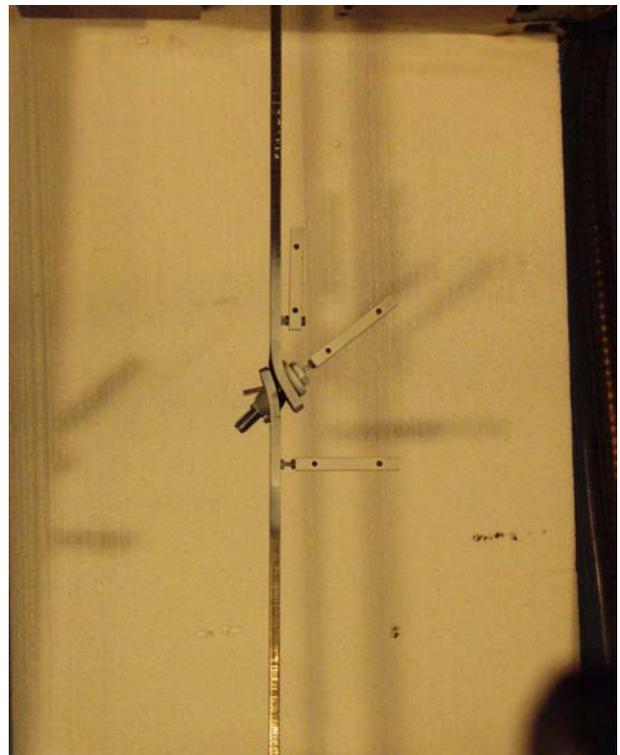
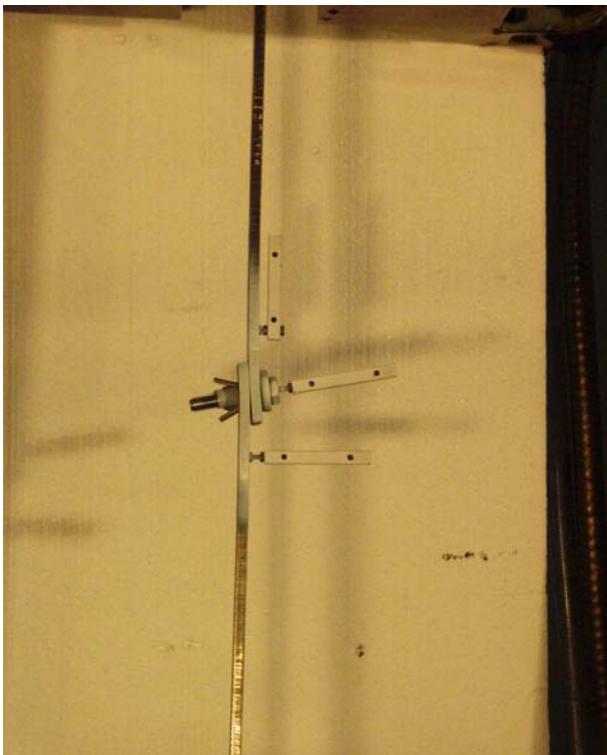
**Abbildung 9: Beispiele für den Aufbau der Versuche an Stahlbaudübeln M12,  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  (Versuch 23, links) und  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  (Versuch 25, rechts).**



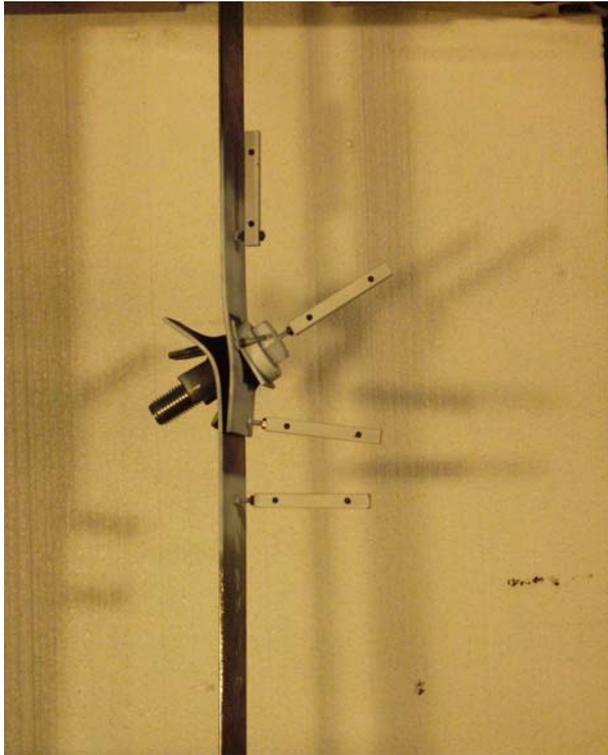
**Abbildung 10: Beispiele für den Aufbau der Versuche an Stahlbaudübeln M20,  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  (Versuch 27, links) und  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  (Versuch 29, rechts).**



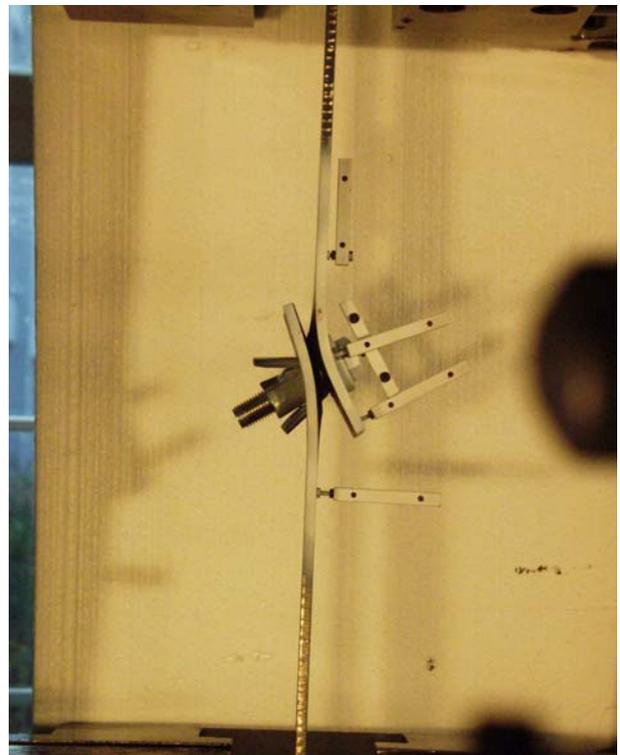
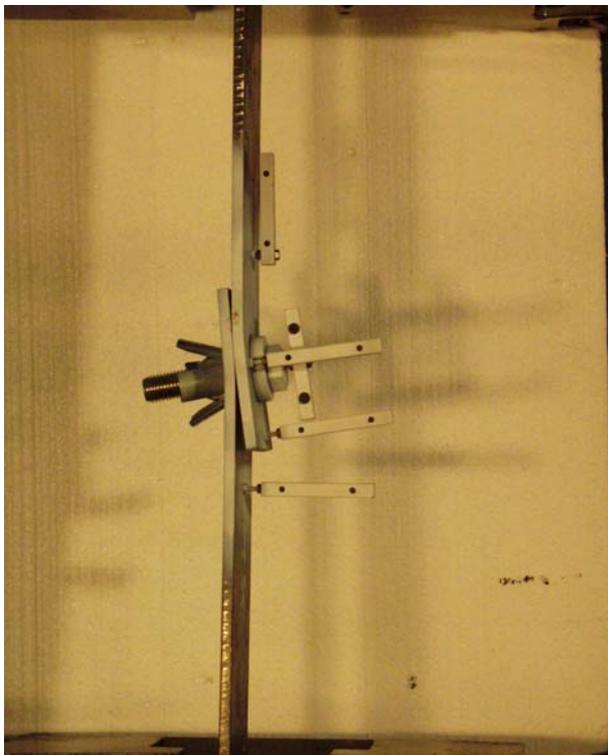
**Abbildung 11: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M12,  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 24, links).**



**Abbildung 12: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M12,  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  unter Gebrauchslast (Versuch 26, links) und nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 26, rechts).**



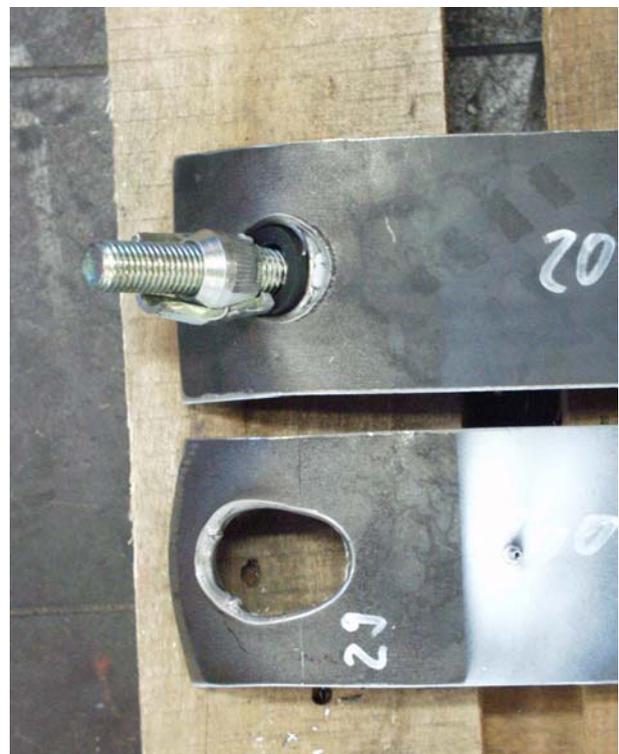
**Abbildung 13: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M20,  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 27, links).**



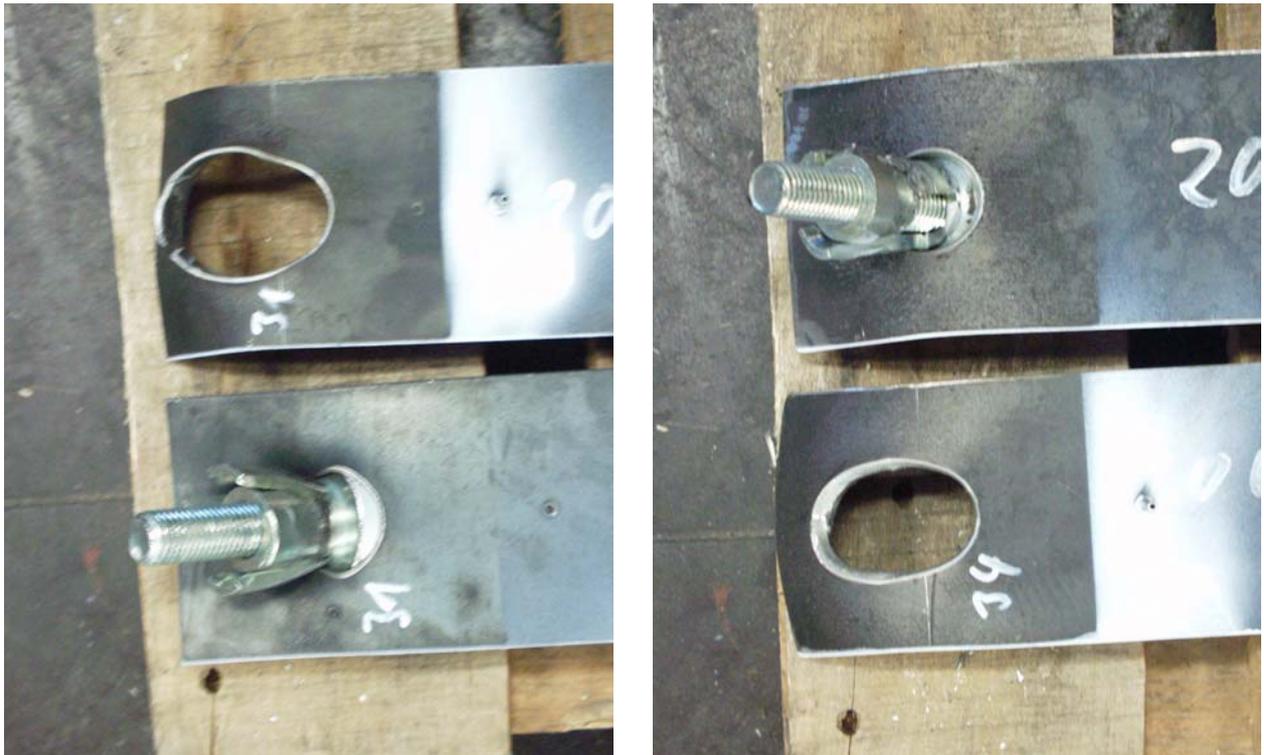
**Abbildung 14: Beispiele für die Verdrehung der Stahlbaudübeln M20,  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  unter Gebrauchslast (Versuch 29, links) und nach Überschreiten der Maximallast (Versuch 29, rechts).**



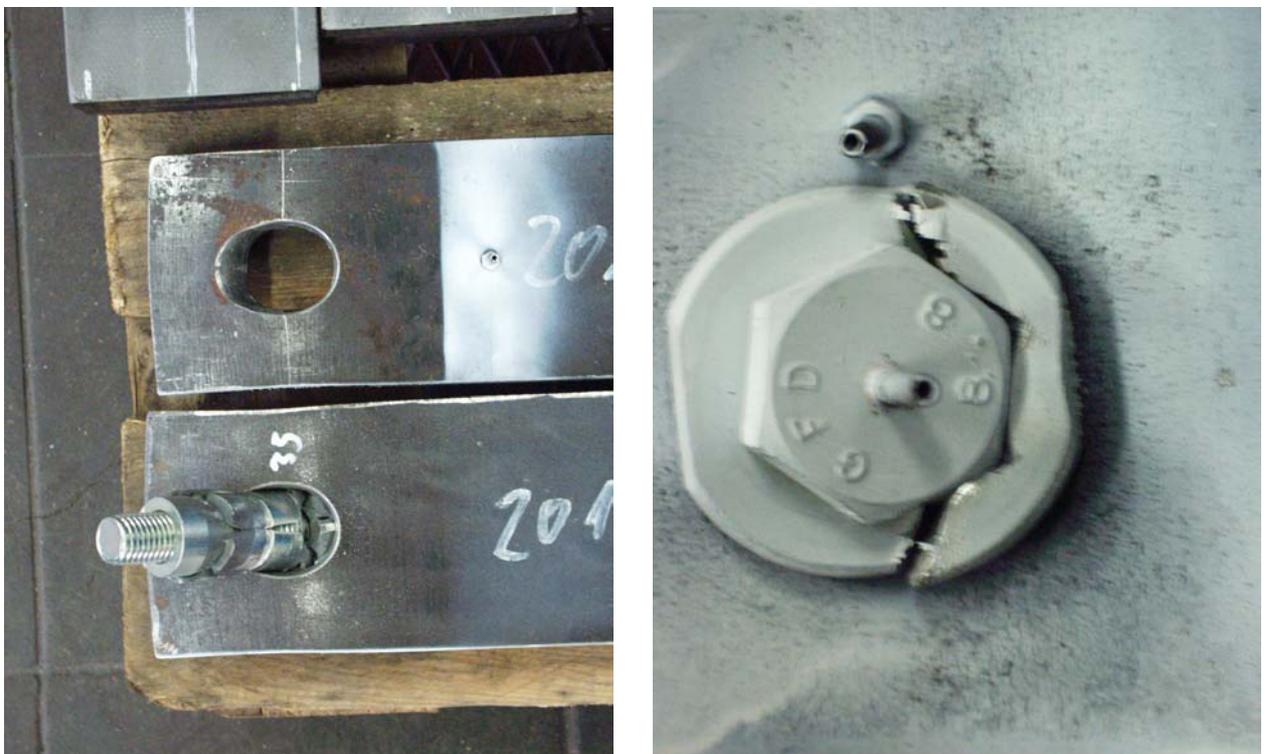
**Abbildung 15: Versagen durch Lochleibung und Herausziehen bei Stahlbaudübeln M12 ohne Gummi bei Klemmdicke  $t = 2 \times 3 \text{mm}$  (Versuch 23, links) und  $t = 2 \times 8 \text{mm}$  (Versuch 26, rechts).**



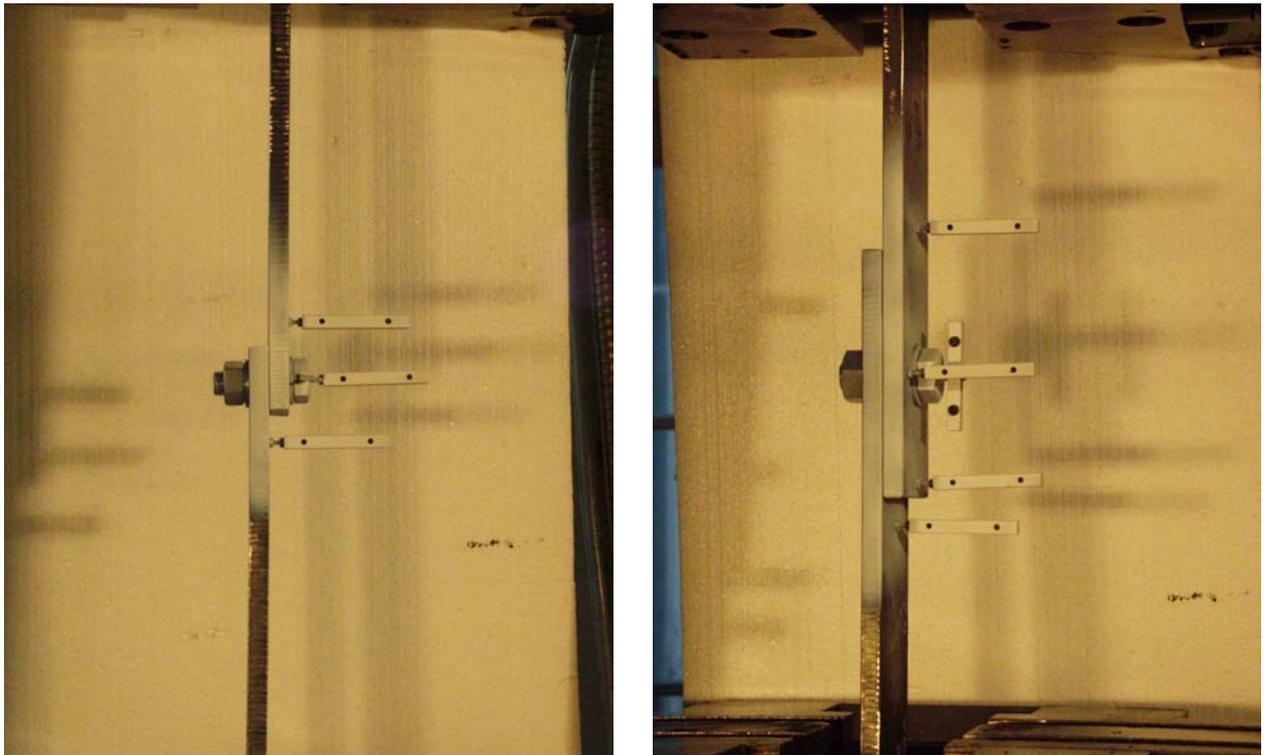
**Abbildung 16: Versagen durch Lochleibung und Herausziehen bei Stahlbaudübeln M20 ohne Gummi bei Klemmdicke  $t = 2 \times 3 \text{mm}$  (Versuch 28, links) und  $t = 2 \times 8 \text{mm}$  (Versuch 29, rechts).**



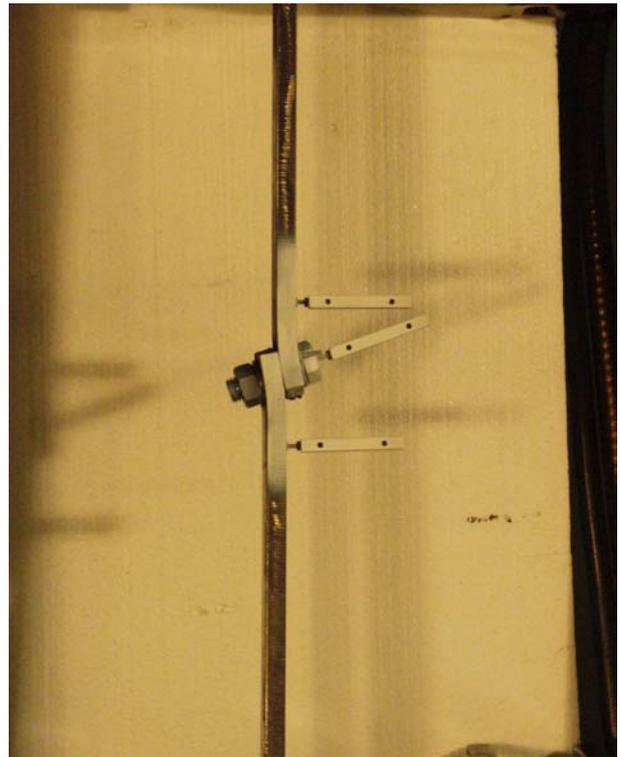
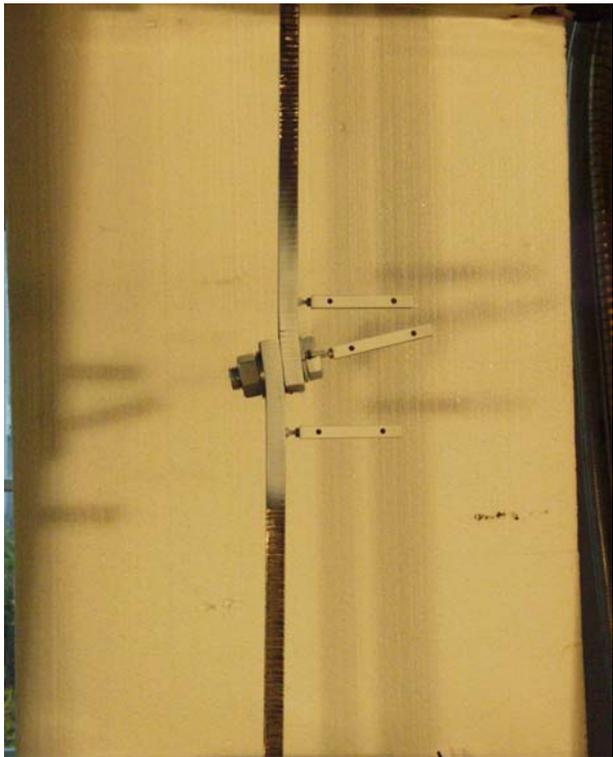
**Abbildung 17: Versagen durch Lochleibung und Herausziehen bei Stahlbaudübeln M20 ohne Gummi bei Klemmdicke  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$  (Versuch 31, links) und  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$  (Versuch 34, rechts)**



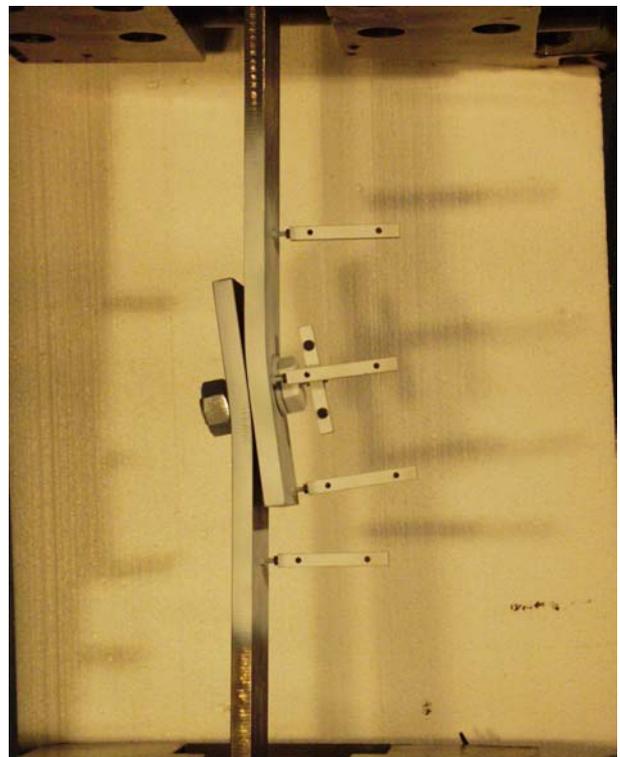
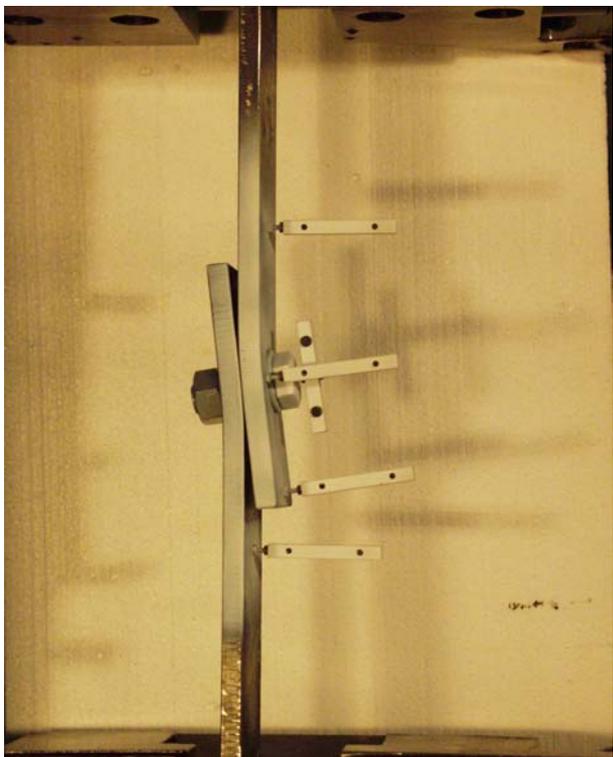
**Abbildung 18: Versagen durch Lochleibung und Herausziehen bei Stahlbaudübeln M20 ohne Gummi bei  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$  (Versuch 35, links) sowie Bruchbild an Konterseite der Hülse (Versuch 36, rechts)**



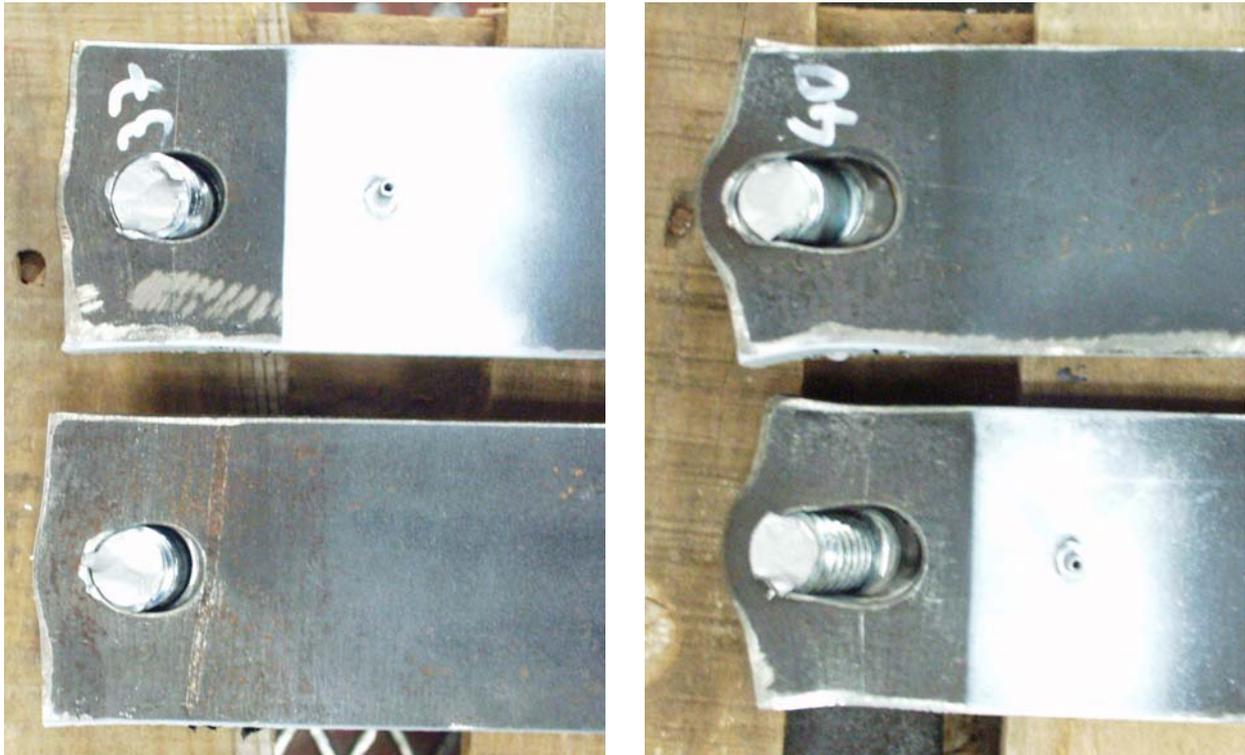
**Abbildung 19: Beispiele für den Aufbau der Versuche an Schrauben M20 (Versuch 37, links) und M24 (Versuch 42, rechts).**



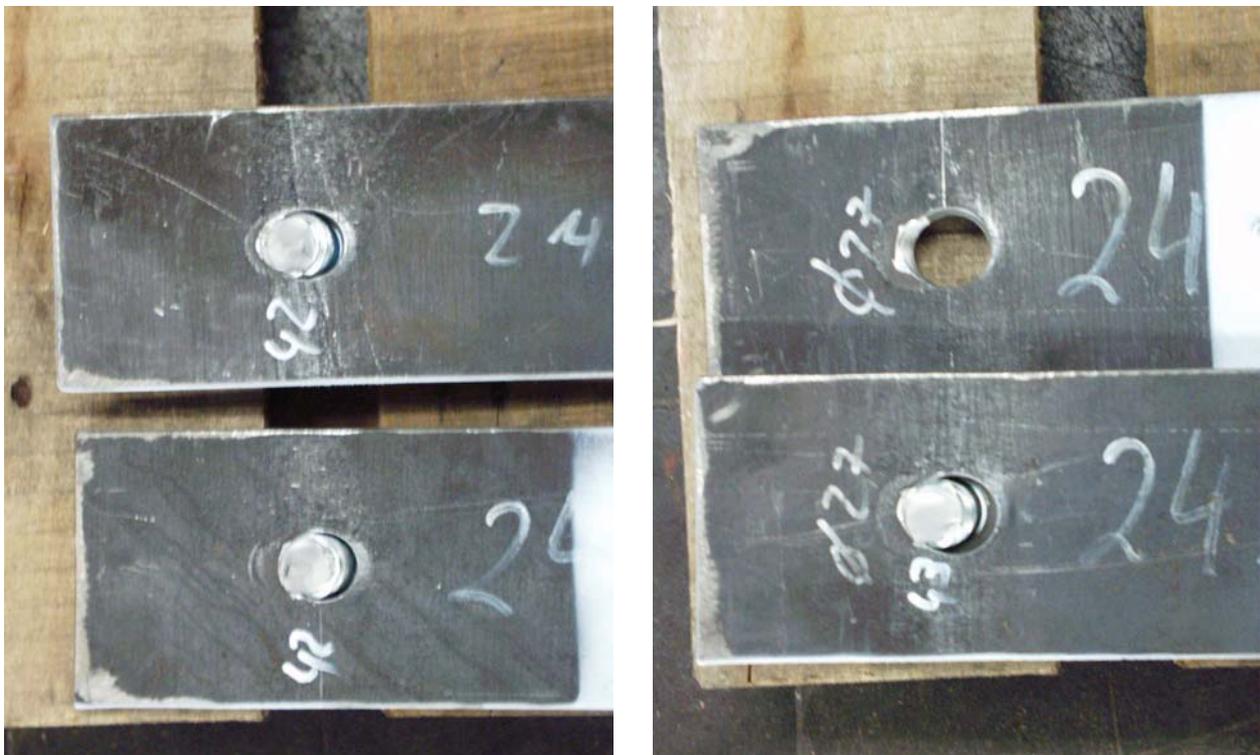
**Abbildung 20: Beispiele für die Verdrehung der Schrauben M20 nach Überschreiten der Maximallast, Lochdurchmesser  $d_{L,nom} = 20\text{mm}$  (Versuch 37, links) und  $d_{L,nom} = 23\text{mm}$  (Versuch 39, rechts)**



**Abbildung 21: Beispiele für die Verdrehung der Schrauben M24 nach Überschreiten der Maximallast, Lochdurchmesser  $d_{L,nom} = 24\text{mm}$  (Versuch 42, links) und  $d_{L,nom} = 27\text{mm}$  (Versuch 44, rechts)**

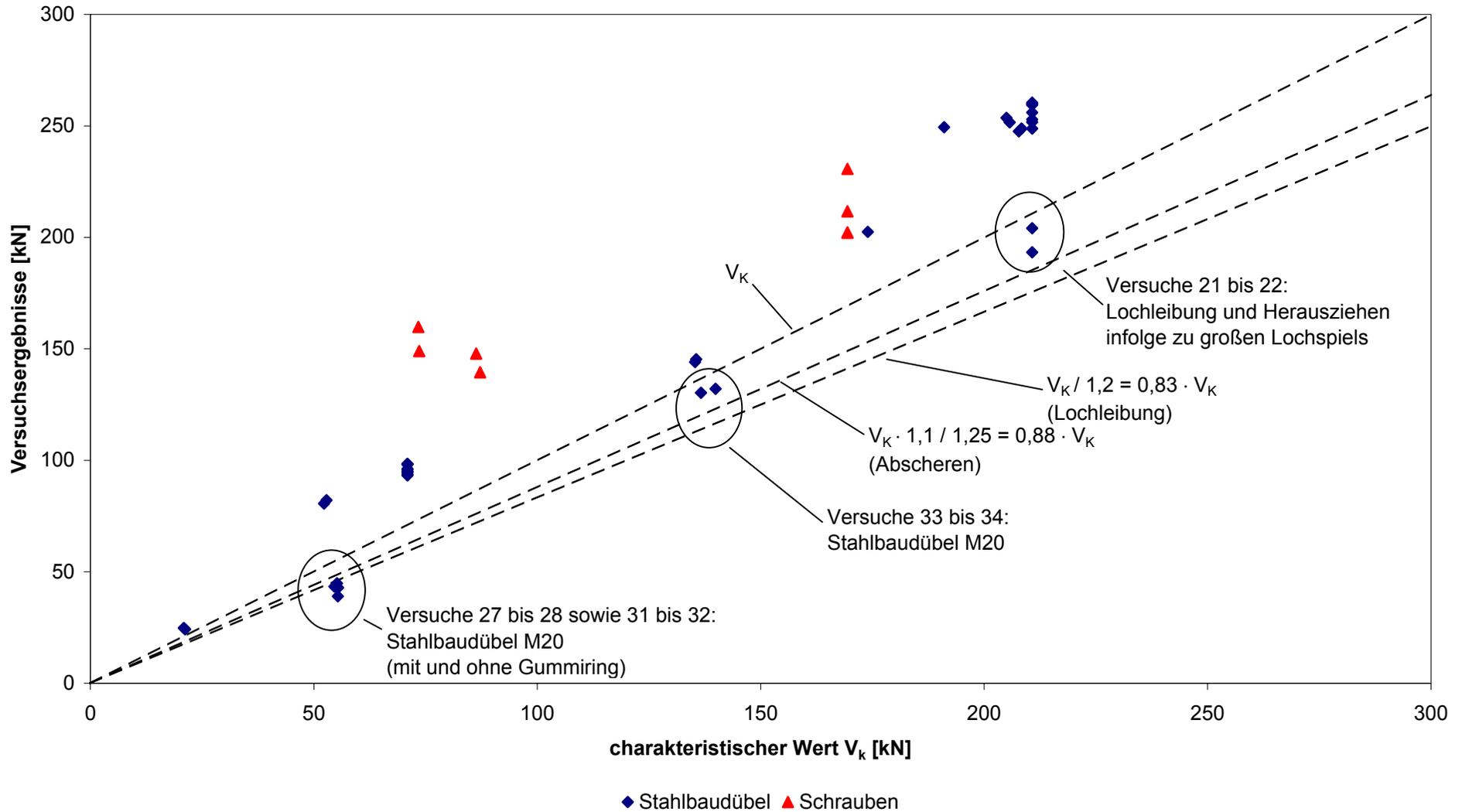


**Abbildung 22: Versagen durch Abscheren bei Schrauben M20, Lochdurchmesser  $d_{L,nom} = 20\text{mm}$  (Versuch 37, links) und  $d_{L,nom} = 23\text{mm}$  (Versuch 40, rechts)**

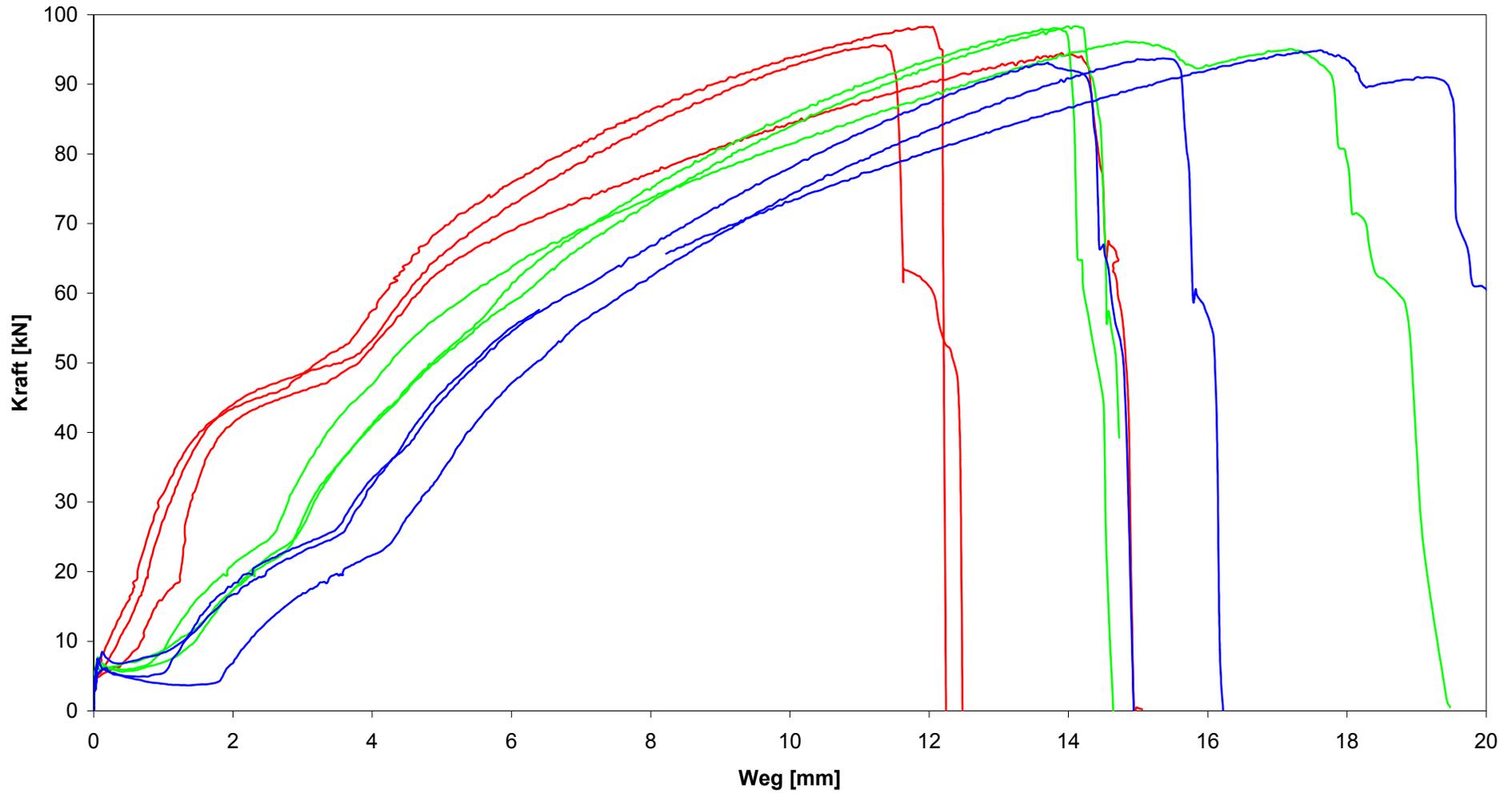


**Abbildung 23: Versagen durch Abscheren bei Schrauben M24, Lochdurchmesser  $d_{L,nom} = 24\text{mm}$  (Versuch 42, links) und  $d_{L,nom} = 27\text{mm}$  (Versuch 43, rechts)**

### Vergleich der Versuchsergebnisse mit den charakteristischen Werten

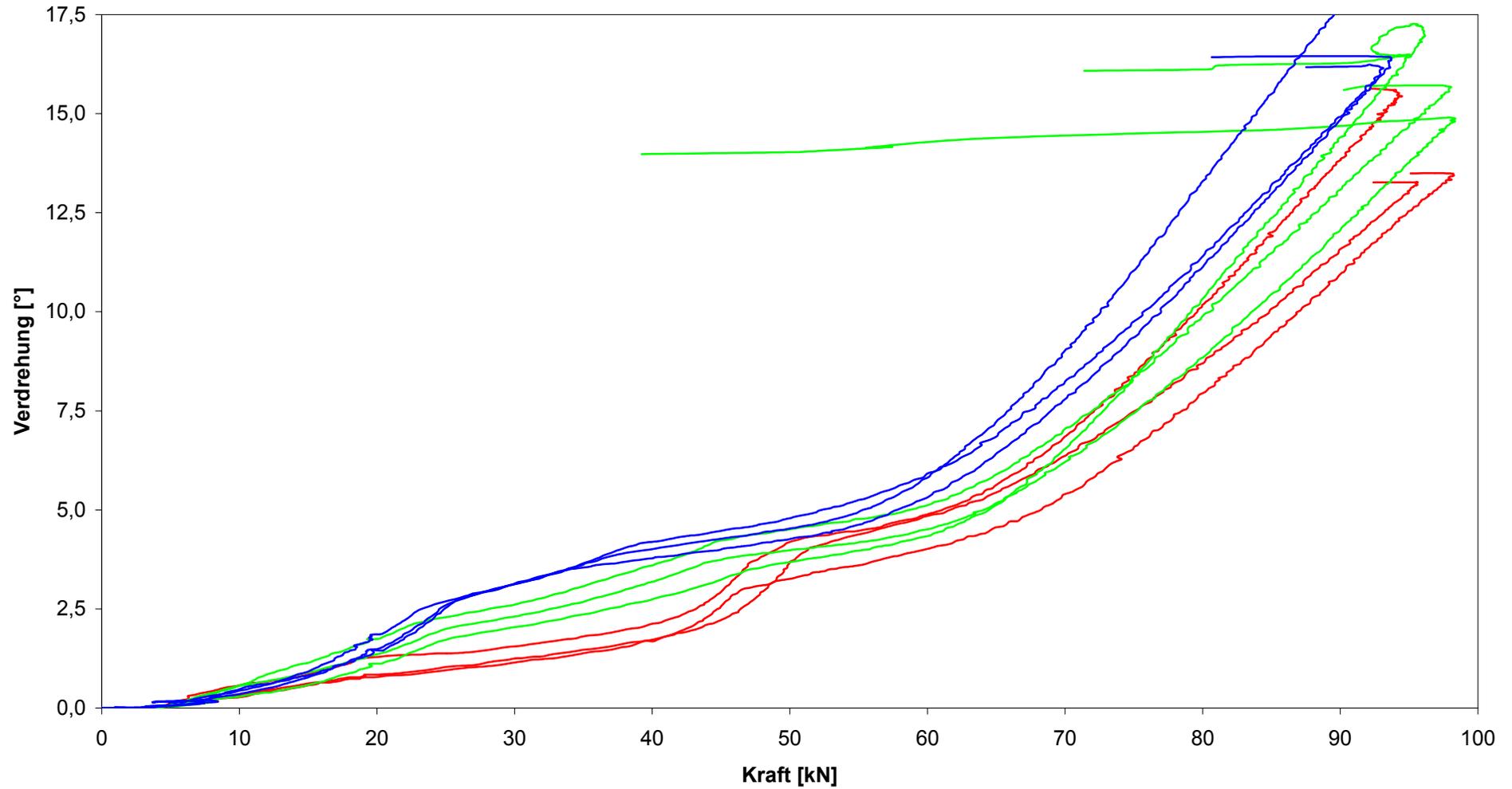


Lochdurchmesser: Stahlbaudübel M12



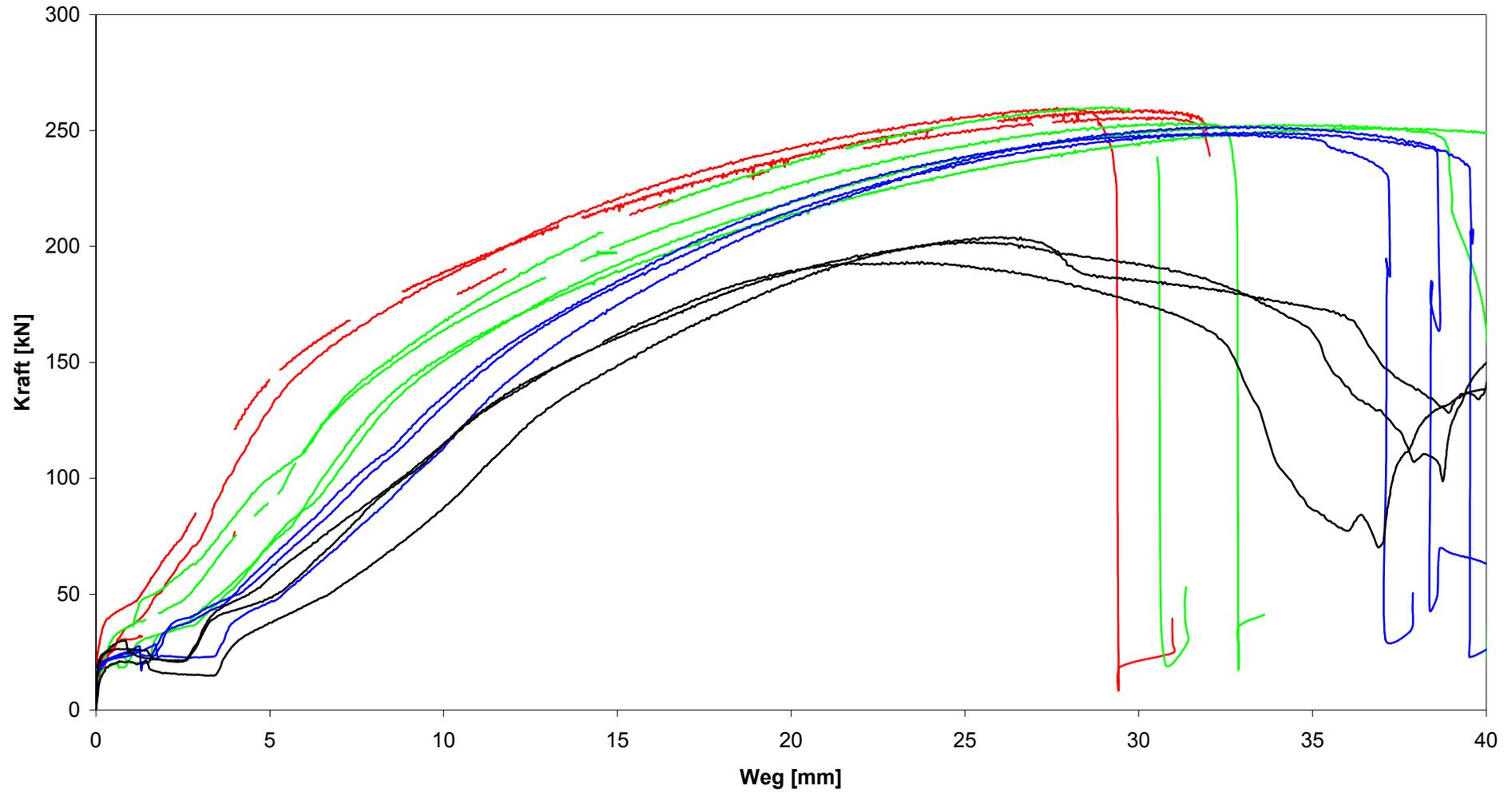
— Versuche 1 bis 3: d = 20mm — Versuche 4 bis 6: d = 21mm — Versuche 7 bis 9: d = 22mm

**Lochdurchmesser: Stahlbaudübel M12**



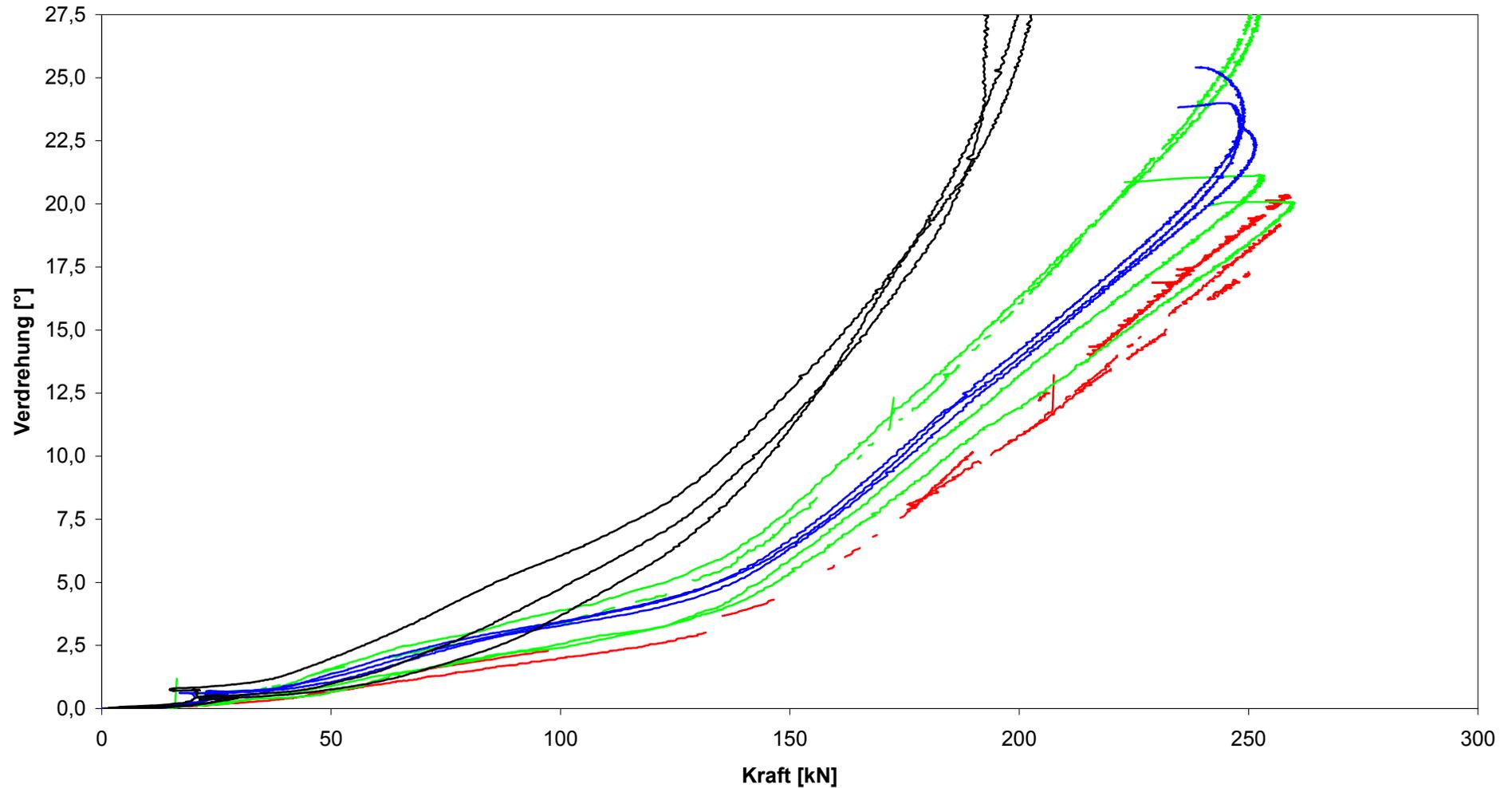
— Versuche 1 bis 3: d = 20mm — Versuche 4 bis 6: d = 21mm — Versuche 7 bis 9: d = 22mm

Lochdurchmesser: Stahlbaudübel M20



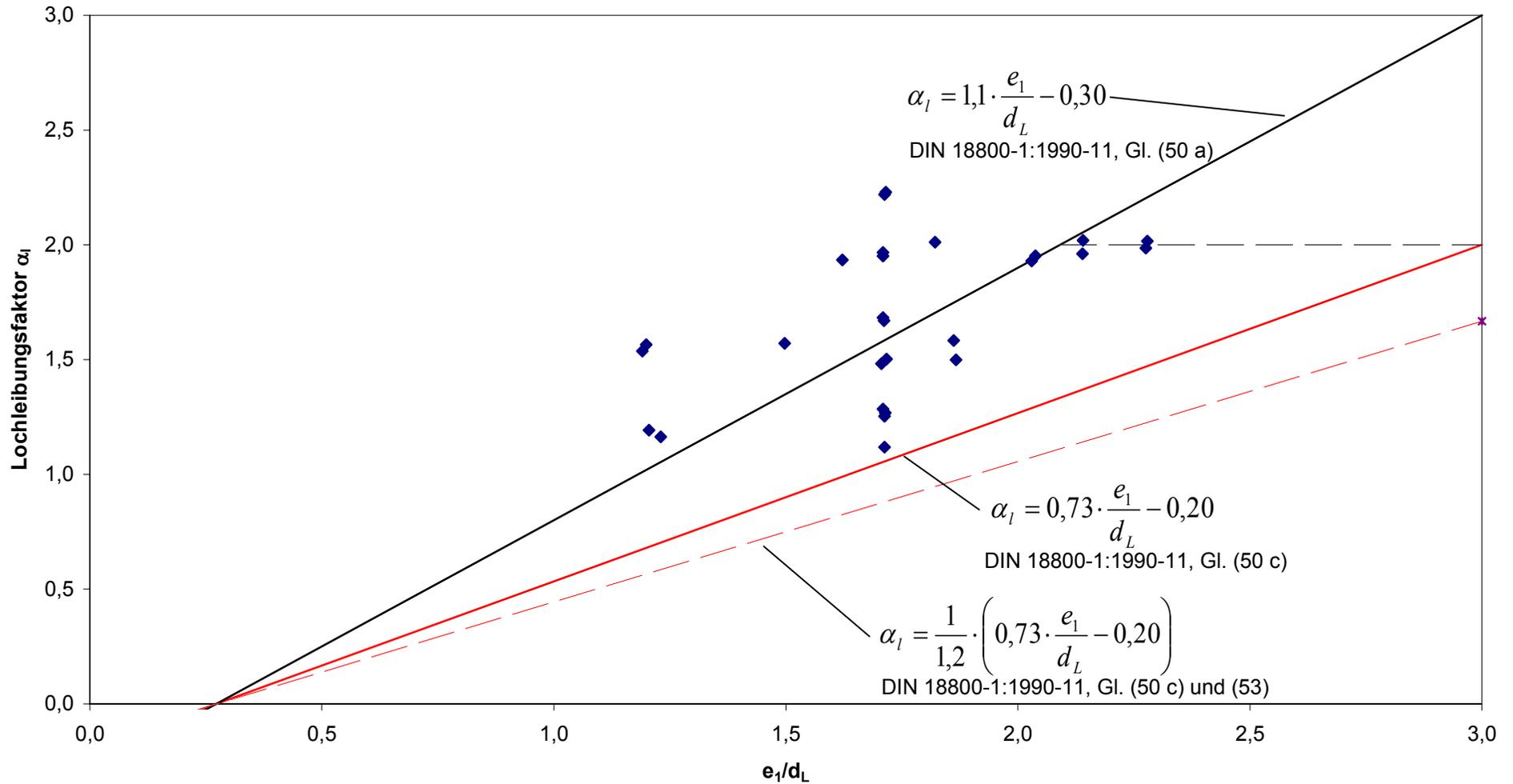
— Versuche 10 bis 12: d = 33mm — Versuche 13 bis 16: d = 35mm — Versuche 17 bis 19: d = 37mm — Versuche 20 bis 22: d = 40mm

Lochdurchmesser: Stahlbaudübel M20



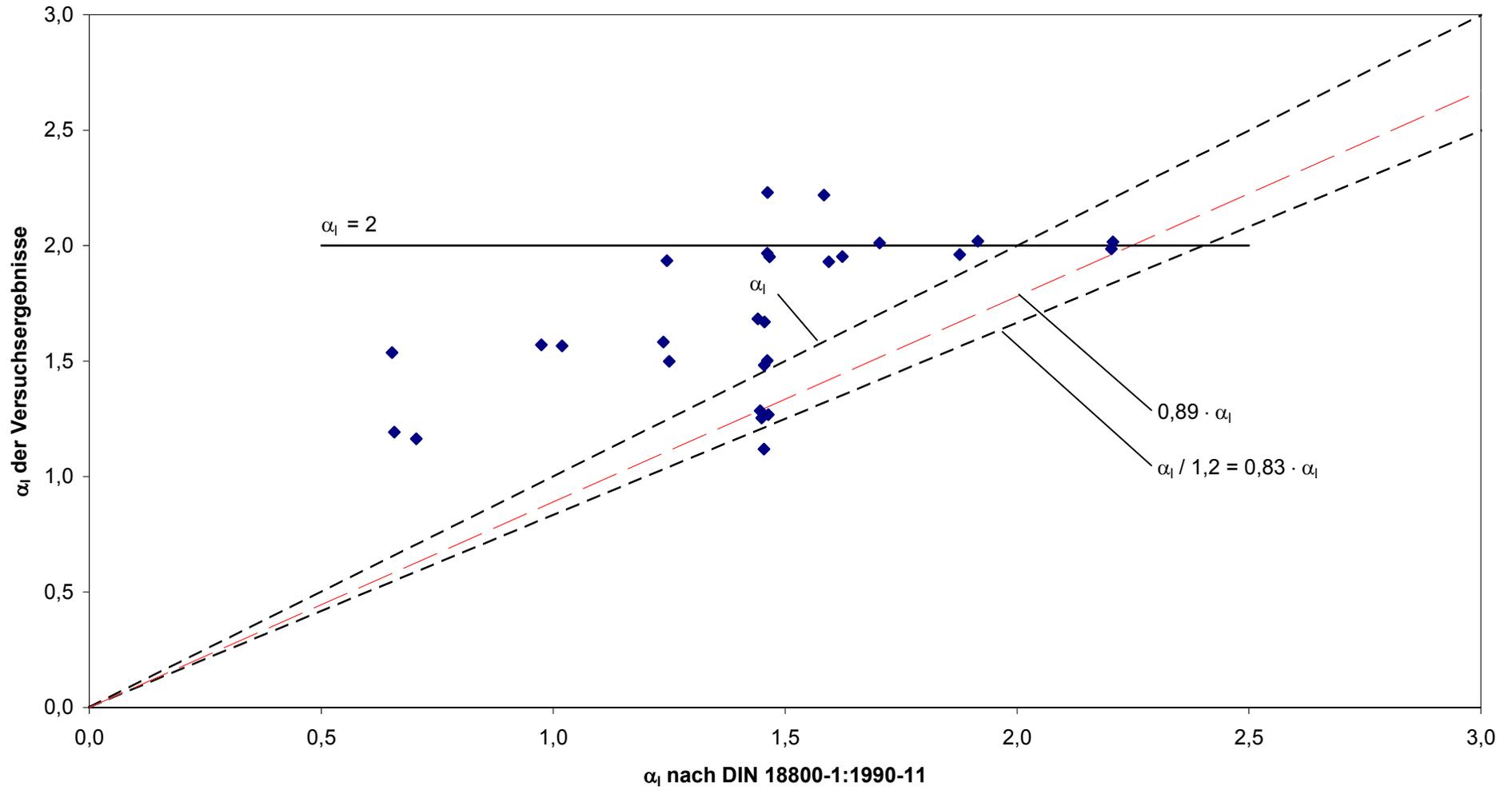
— Versuche 10 bis 12: d = 33mm — Versuche 13 bis 16: d = 35mm — Versuche 17 bis 19: d = 37mm — Versuche 20 bis 22: d = 40mm

Lochleibung:  $\alpha_l$



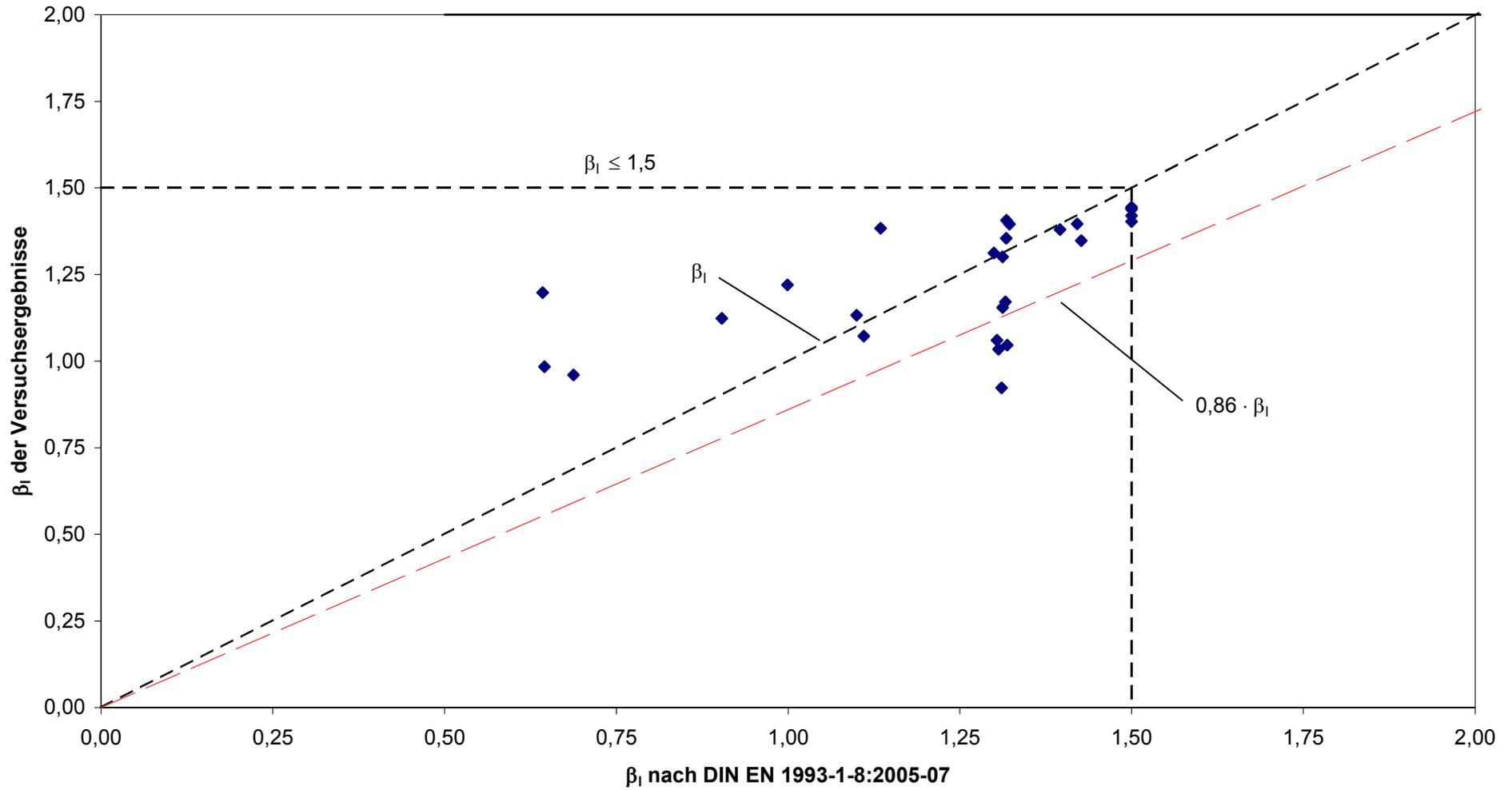
◆ Versuchsergebnisse Stahlbaudübel mit Versagen durch Lochleibung

### Lochleibung: Vergleich der Versuchsergebnisse mit DIN 18800-1:1990-11



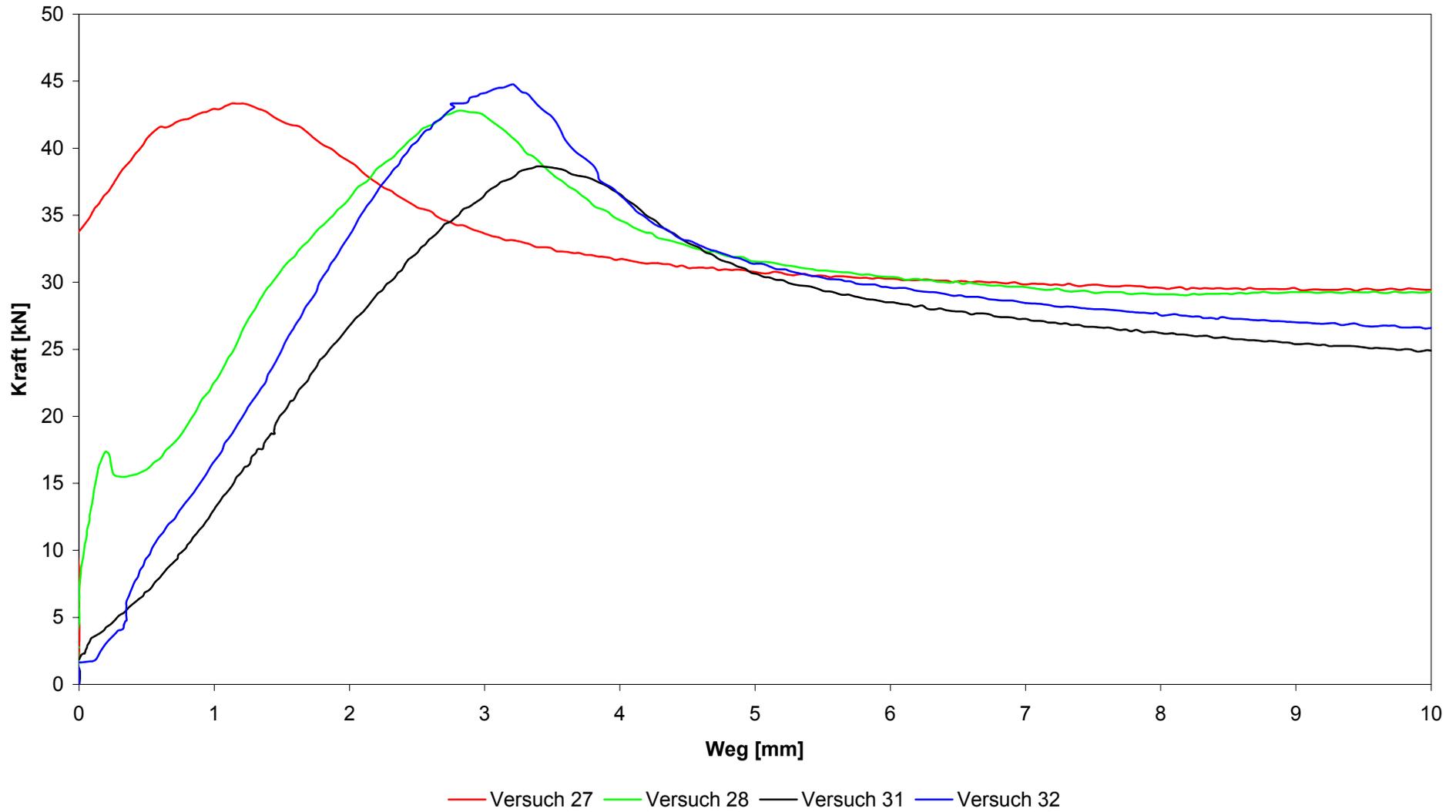
◆ Versuchsergebnisse Stahlbaudübel mit Versagen durch Lochleibung

### Lochleibung: Vergleich der Versuchsergebnisse mit DIN EN 1993-1-8:2005-07

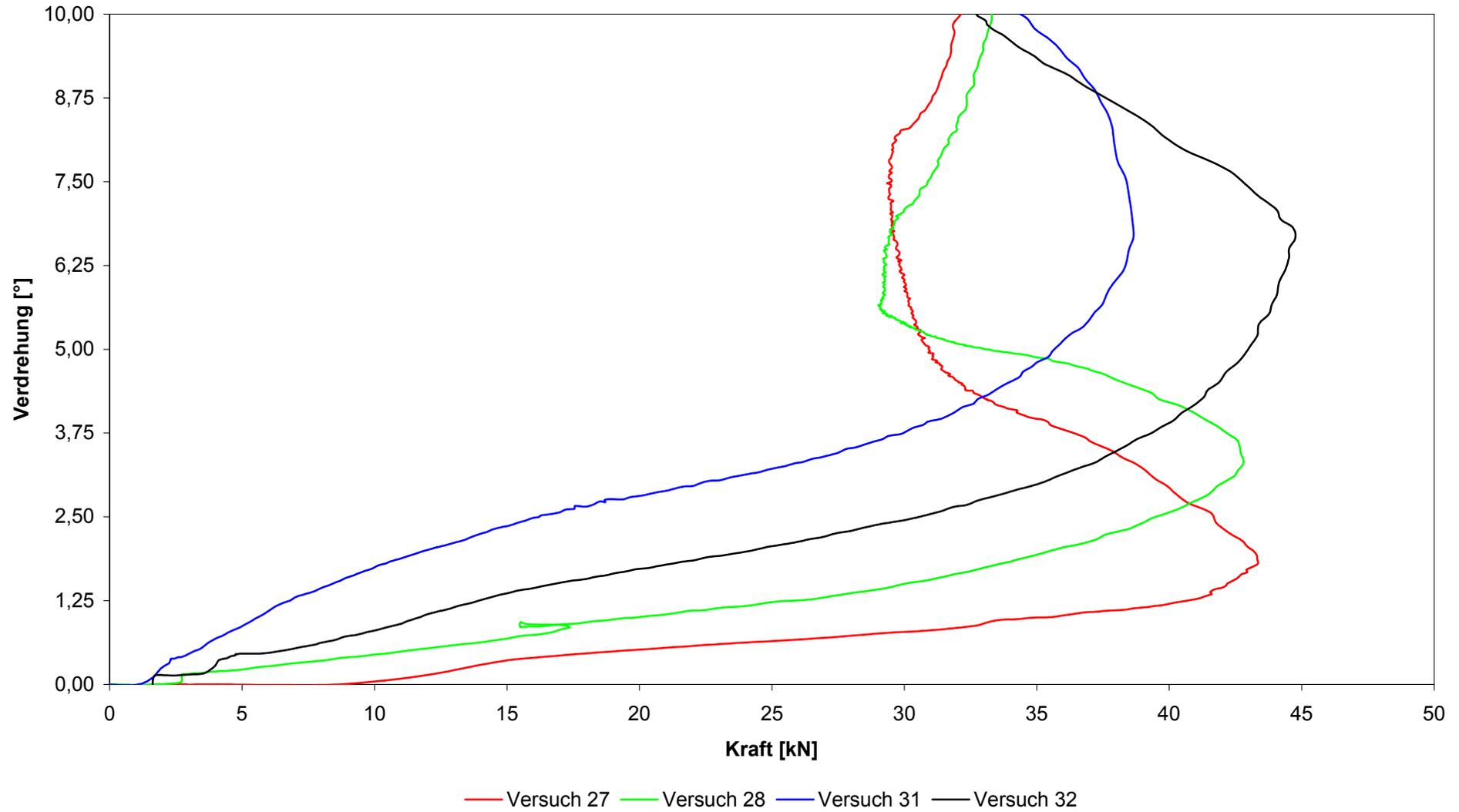


◆ Versuchsergebnisse Stahlbaudübel mit Versagen durch Lochleibung

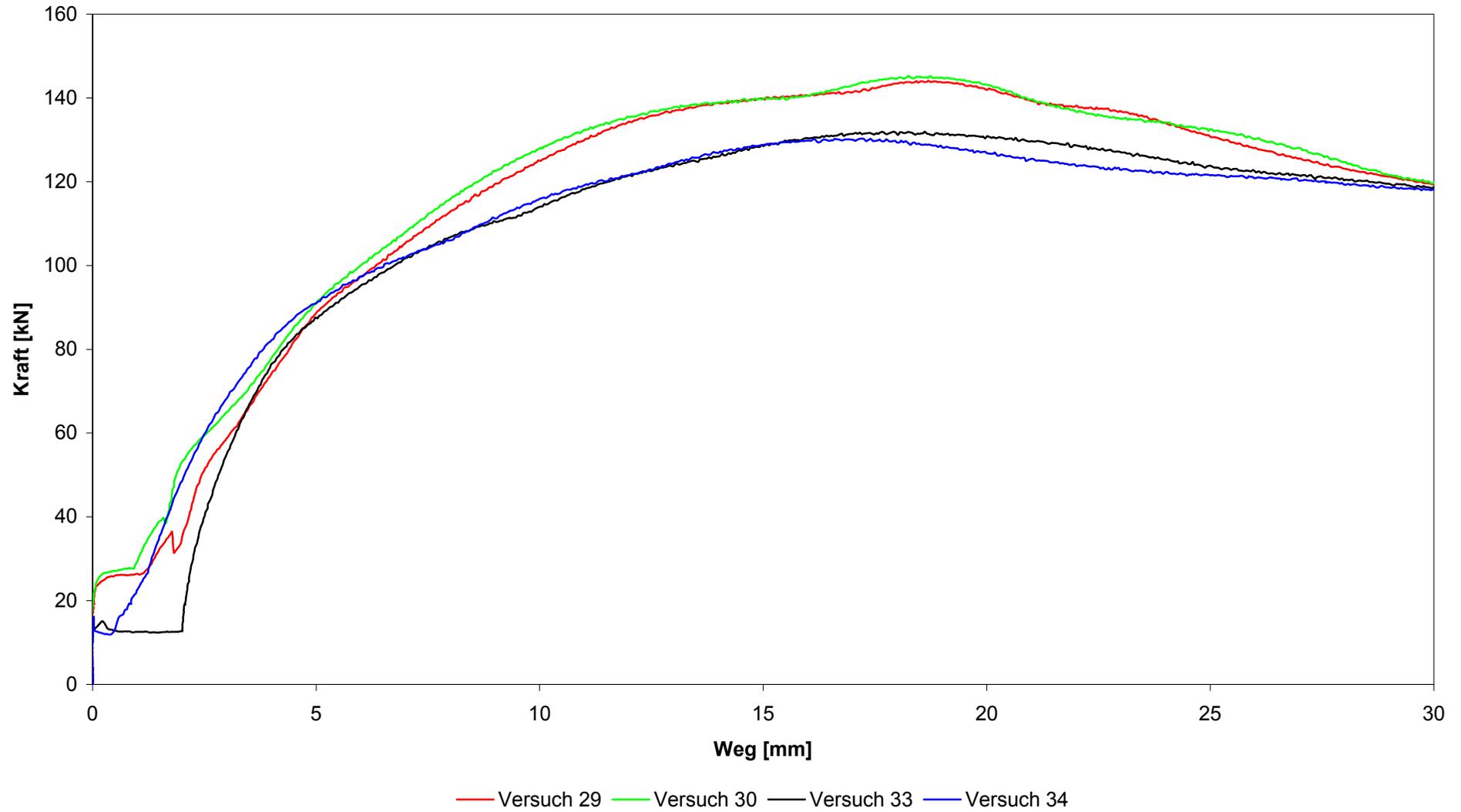
Hülseausbildung: Blechdicke  $t = 2 \times 3 \text{ mm}$ , Verschiebungen



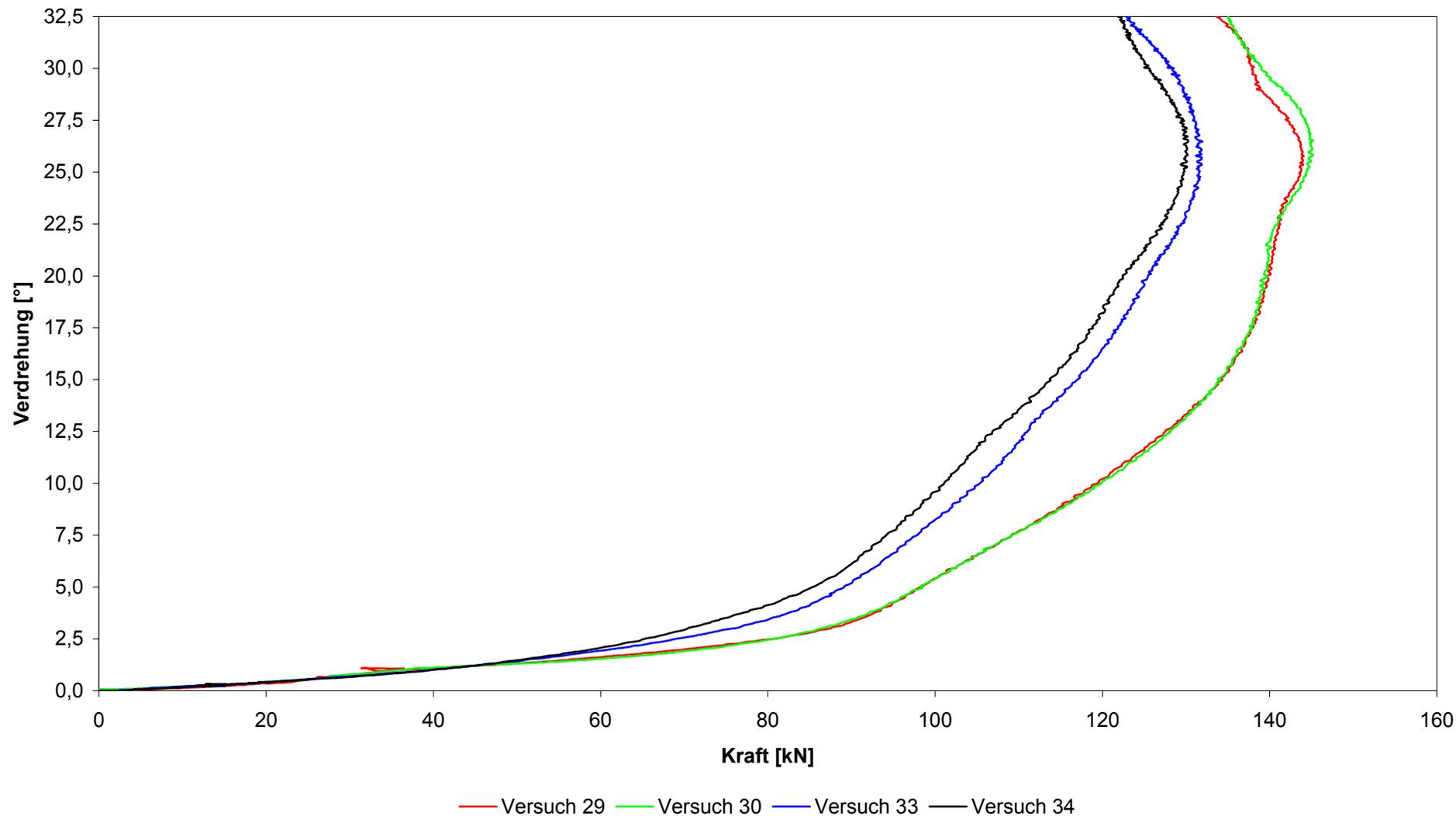
**Hülseausbildung: Blechdicke  $t = 2 \times 3 \text{mm}$ , Verdrehungen**



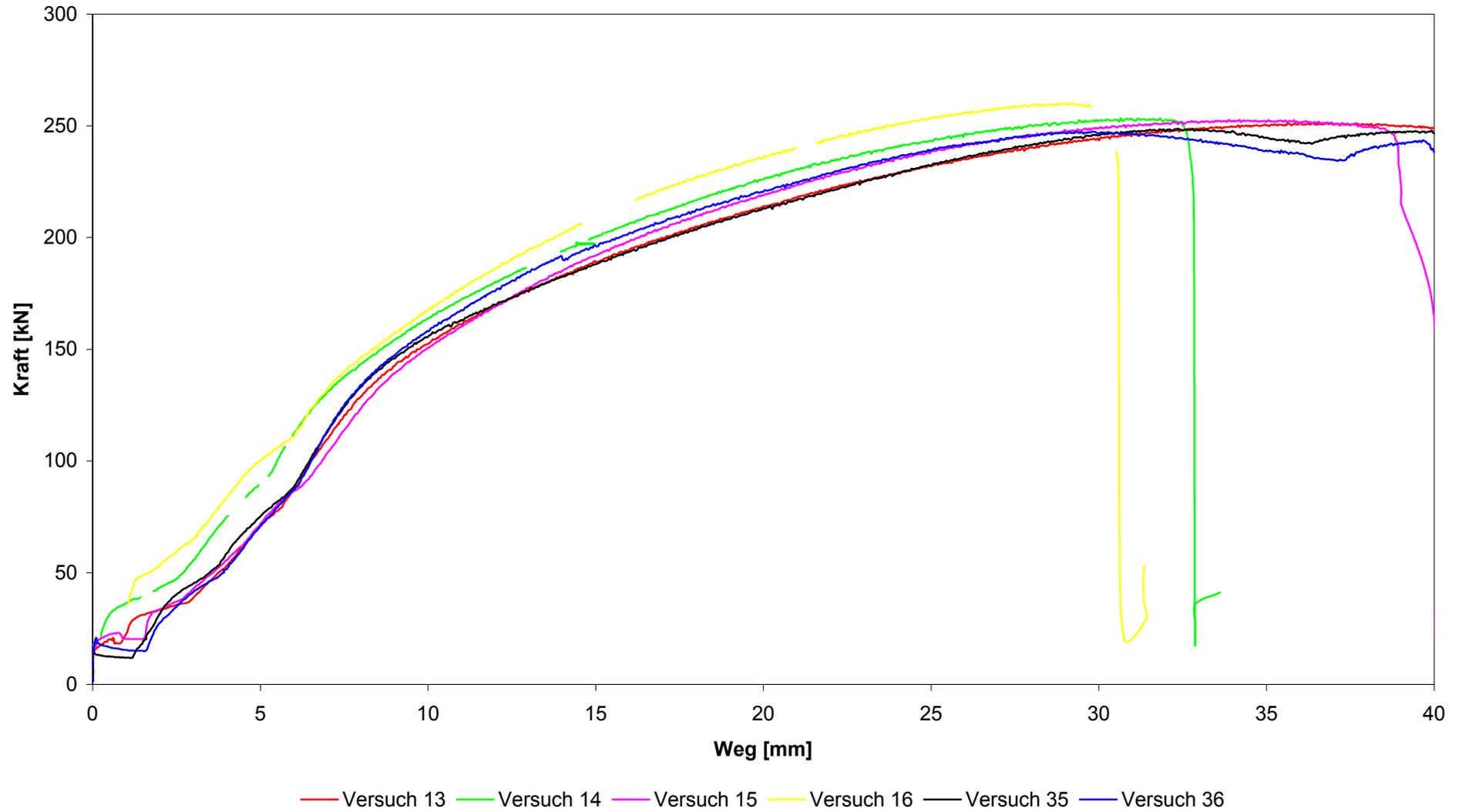
Hülseausbildung: Blechdicke  $t = 2 \times 8 \text{ mm}$ , Verschiebungen



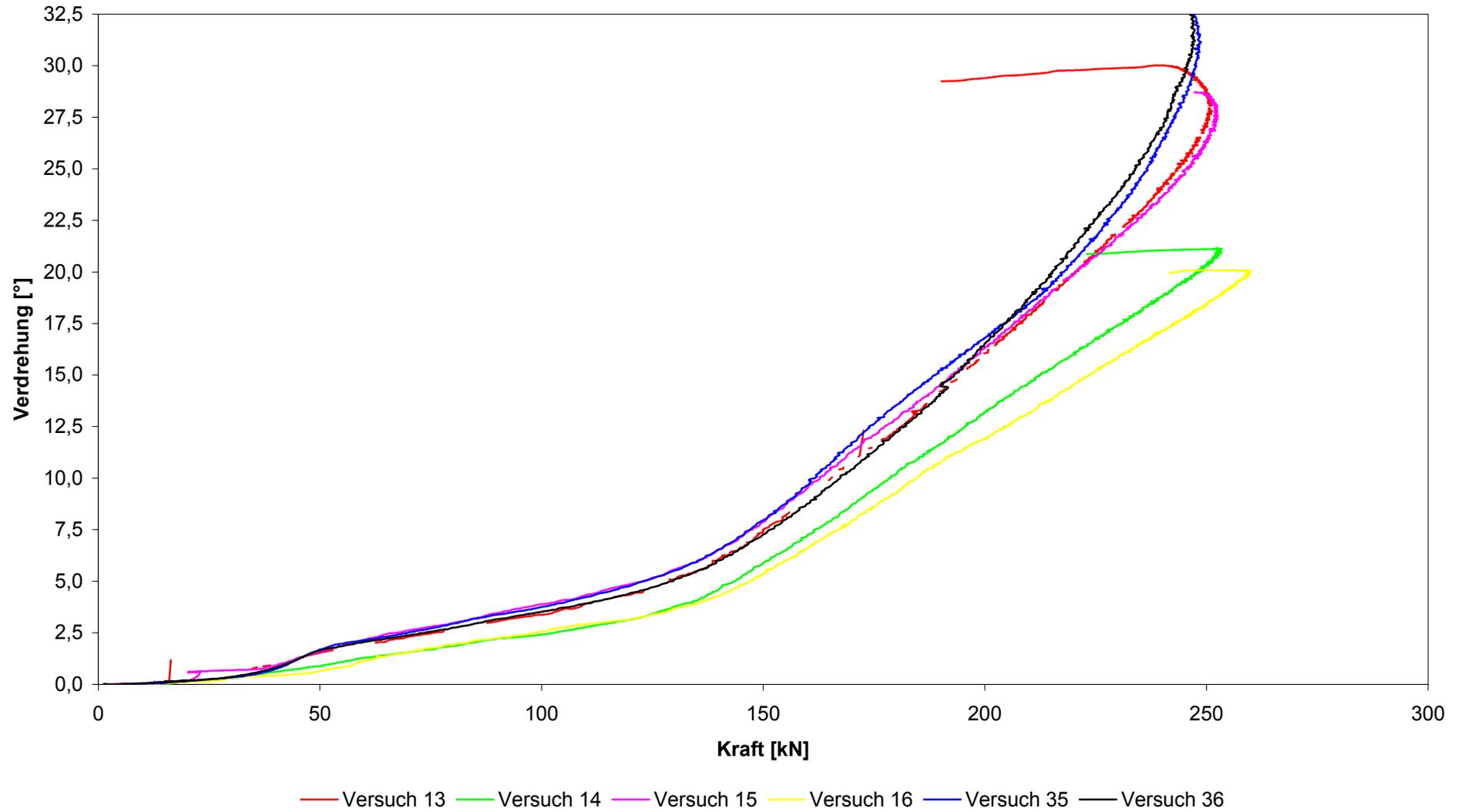
**Hülseausbildung: Blechdicke  $t = 2 \times 8 \text{mm}$ , Verdrehungen**



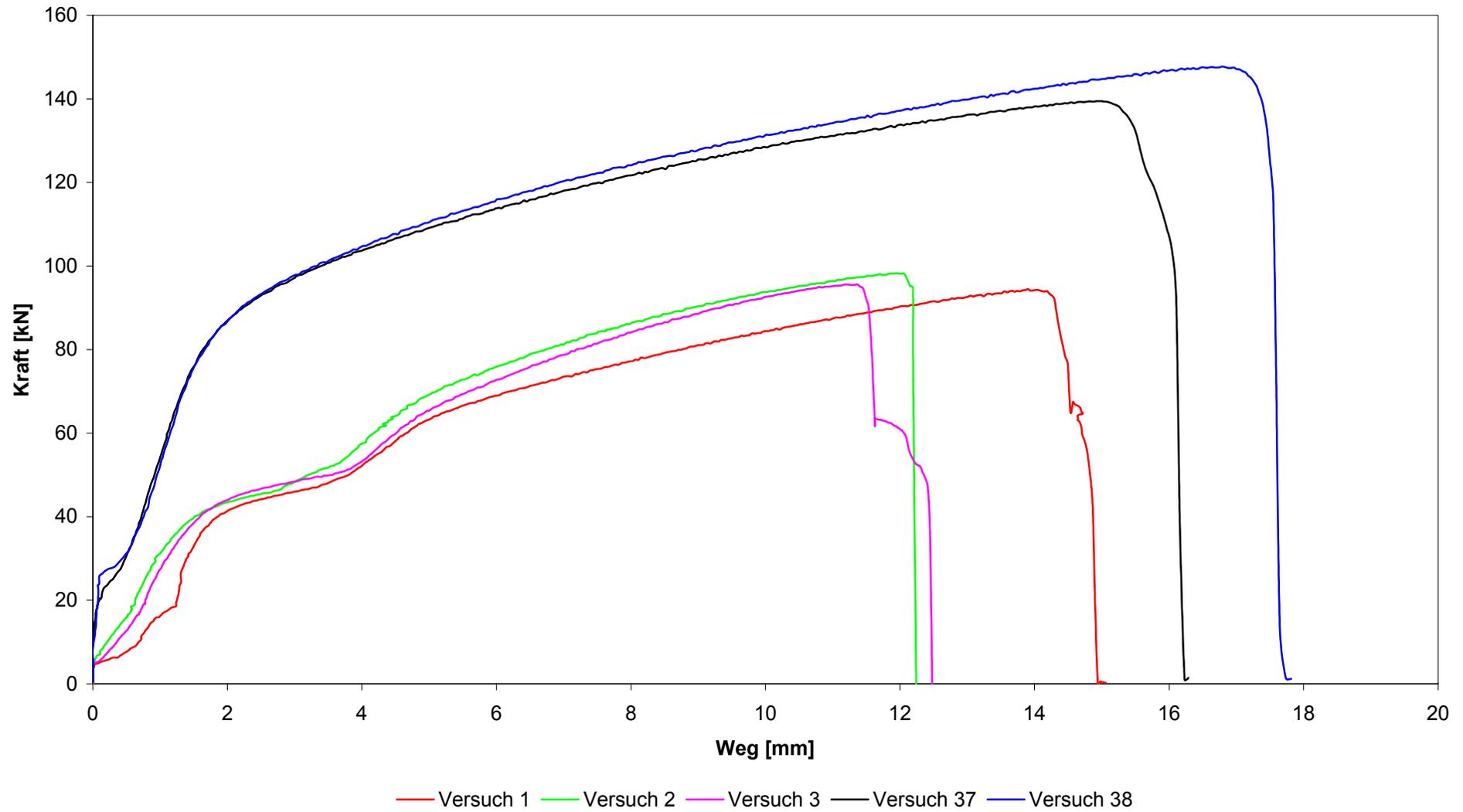
### Hülseausbildung: Blechdicke $t = 2 \times 15 \text{ mm}$ , Verschiebungen



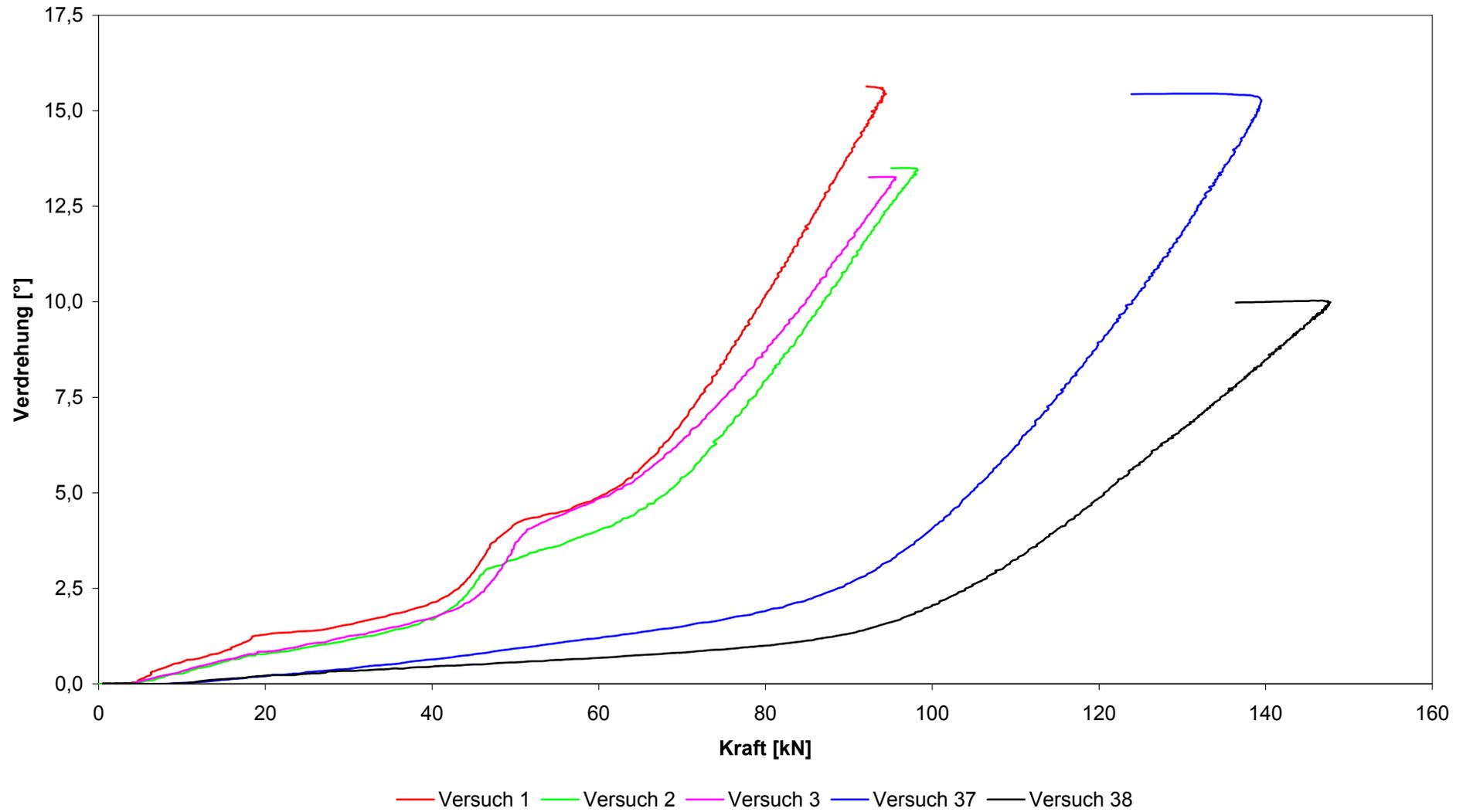
**Hülseausbildung: Blechdicke  $t = 2 \times 15 \text{ mm}$ , Verdrehungen**



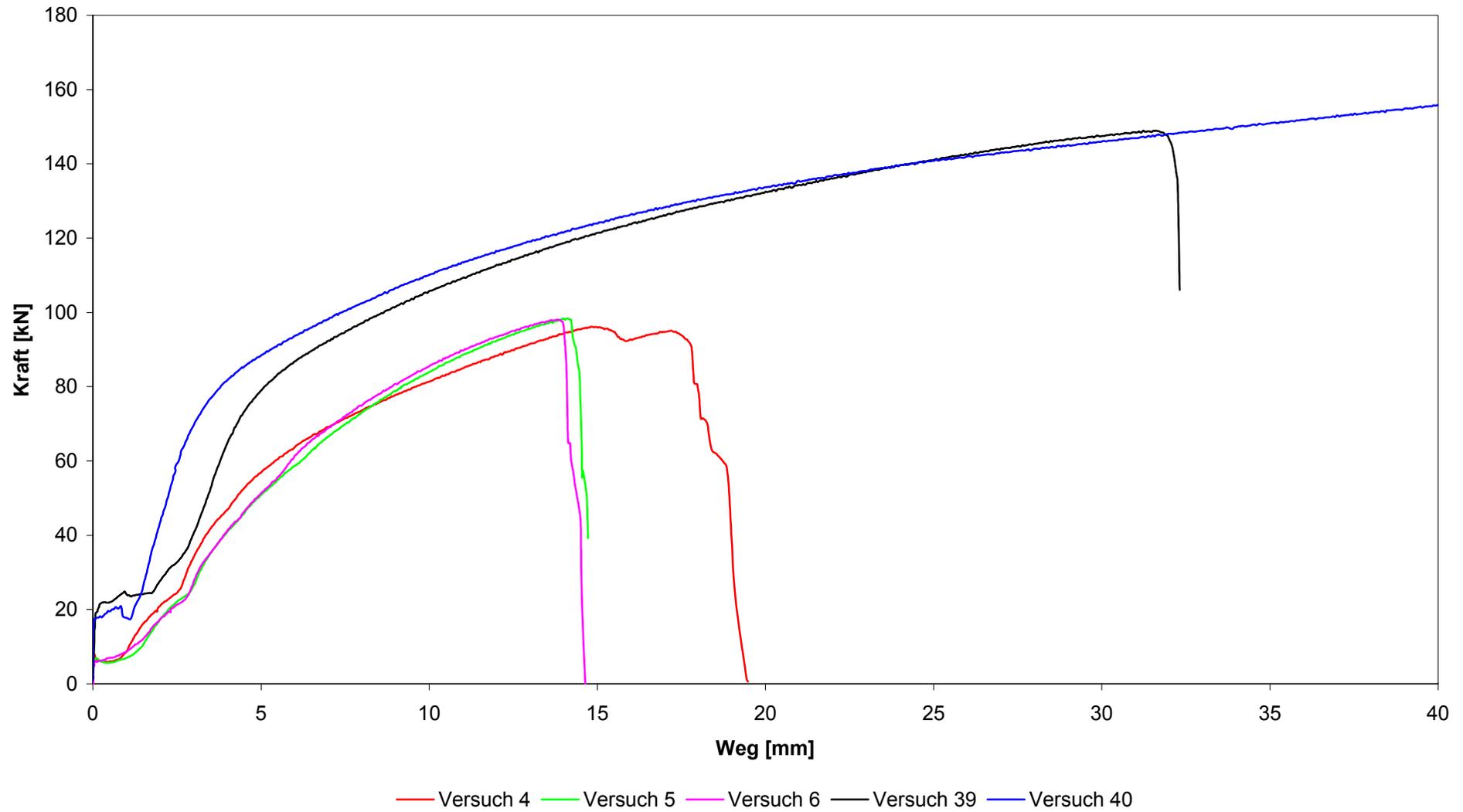
### Schraubenverbindungen: M20, $d_L = 20\text{mm}$ , Verschiebungen



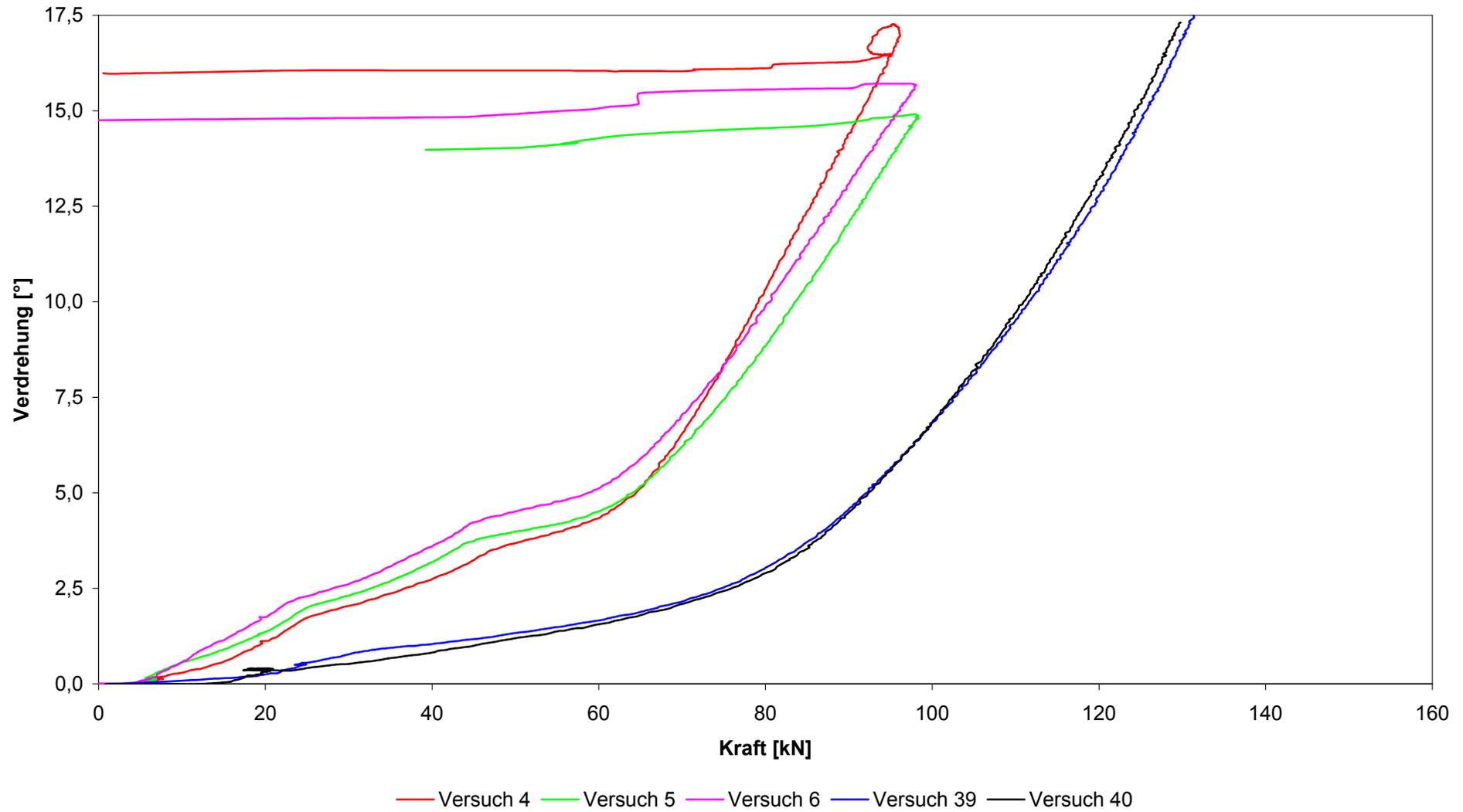
Schraubenverbindungen: M20,  $d_L = 20\text{mm}$ , Verdrehungen



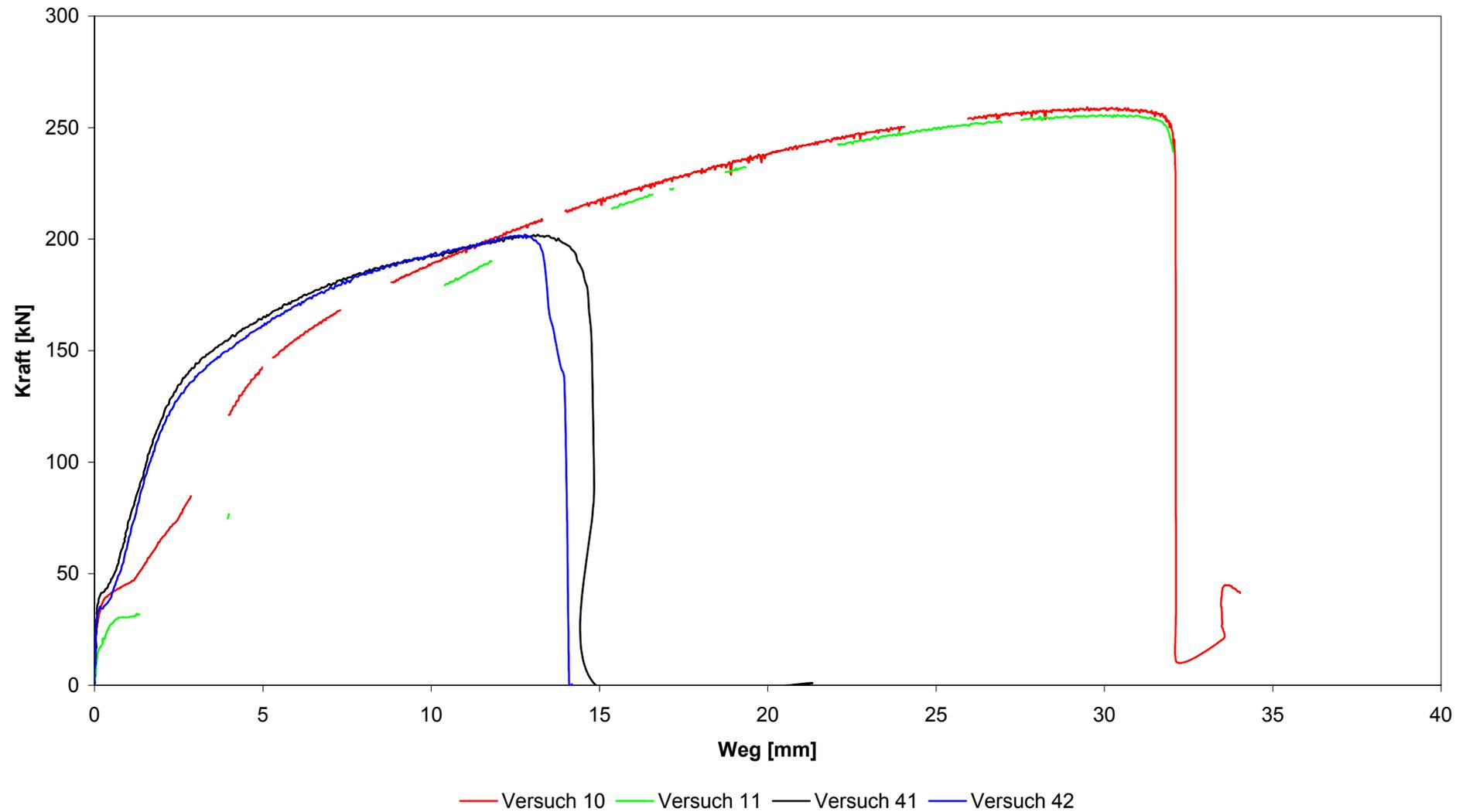
### Schraubenverbindungen: M20, $d_L = 23\text{mm}$ , Verschiebungen



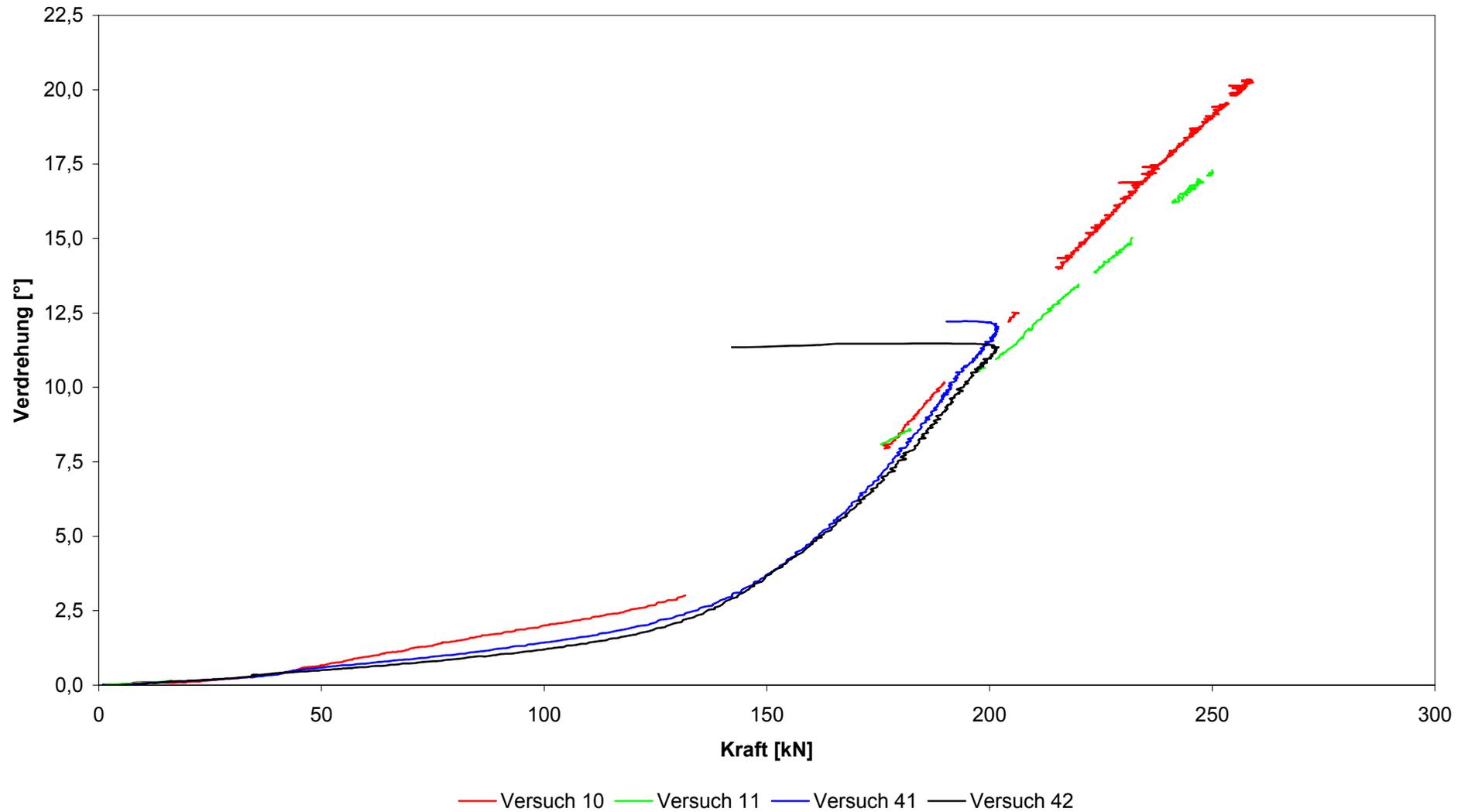
Schraubenverbindungen: M20,  $d_L = 23\text{mm}$ , Verdrehungen



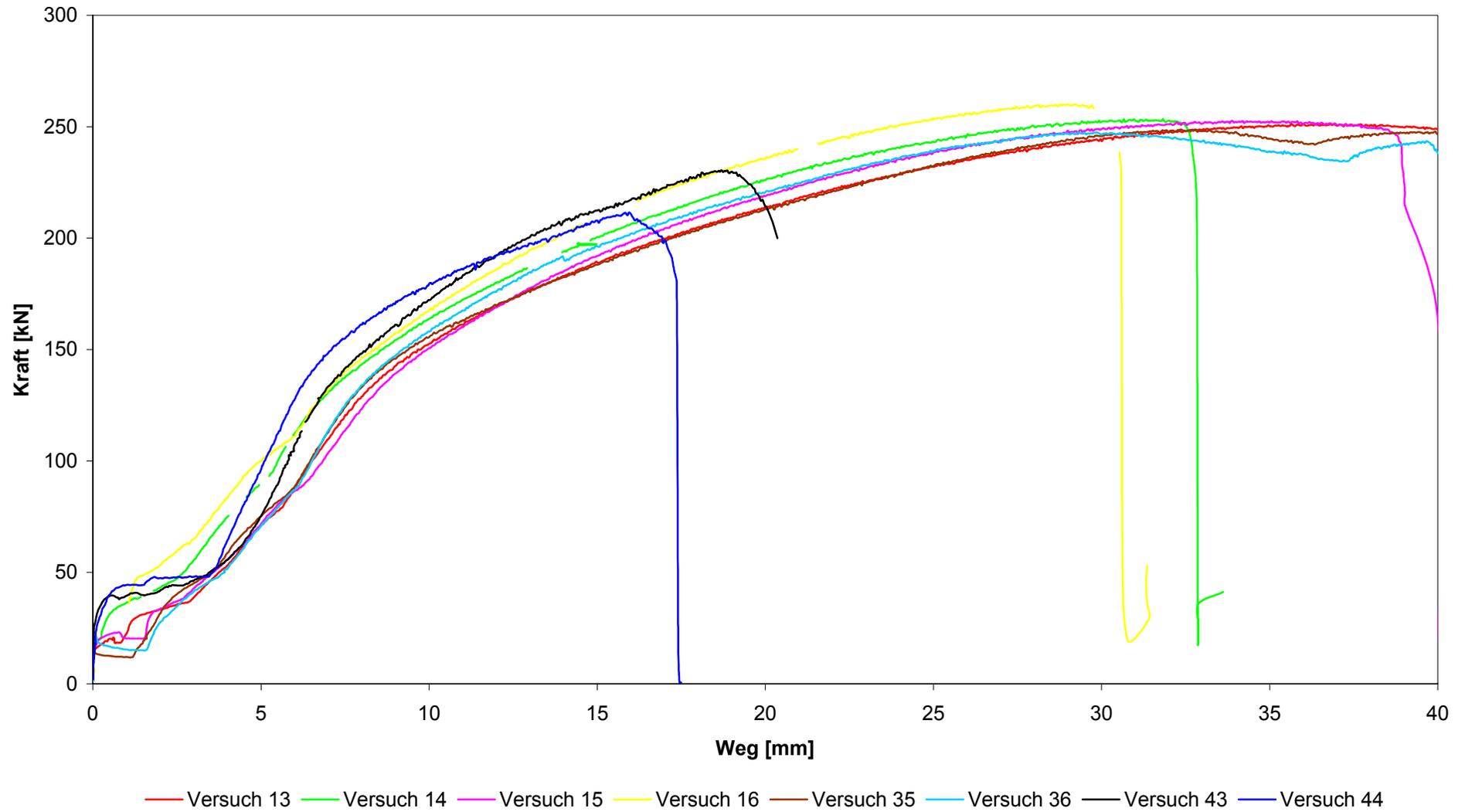
### Schraubenverbindungen: M24, $d_L = 24\text{mm}$ , Verschiebungen



**Schraubenverbindungen: M24,  $d_L = 24\text{mm}$ , Verdrehungen**



### Schraubenverbindungen: M24, $d_L = 27\text{mm}$ , Verschiebungen



**Schraubenverbindungen: M24,  $d_L = 27\text{mm}$ , Verdrehungen**

