

TECHNISCHE UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN

# Ausziehversuche mit Betonstahlhaken unter Brandlast

---

Studienarbeit Massivbau

**Tobias Schilly**

**Matrikelnummer 375991**

**Betreuung: Jun.-Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele**

**Februar 2014**

1	Ausgangssituation .....	3
2	Versuchsbeschreibung .....	3
2.1	Ermittlung der Prüflast .....	8
2.2	Erwartung .....	10
3	Durchführung und Auswertung der Brandversuche .....	11
3.1	U1 .....	11
3.1.1	Aufbau des Probekörpers U1 .....	11
3.1.2	Versuchsverlauf, Beobachtung und Auswertung .....	12
3.2	U2 .....	16
3.2.1	Aufbau U2 .....	16
3.2.2	Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung .....	17
3.3	Q1 .....	21
3.3.1	Aufbau Q1 .....	21
3.3.2	Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung .....	22
3.4	Q2 .....	24
3.4.1	Aufbau .....	24
3.4.2	Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung .....	25
4	Weitere Auswertungen .....	27
5	Referenzversuche .....	28
5.1	Beschreibung .....	28
5.2	Auswertung und Vergleich mit München .....	28
6	Vereinfachte Simulation .....	30
7	Fazit .....	32
8	Schlussbemerkung .....	34
A)	Bewehrungsplan und Schnittzeichnungen .....	35
B)	Rissweiten .....	36
C)	Resttragfähigkeit U1 .....	37
D)	Resttragfähigkeit U2 .....	39
E)	Resttragfähigkeit Q1 .....	40
F)	Resttragfähigkeit Q2 .....	41
G)	Betonfestigkeiten .....	43
H)	Referenzversuche .....	45
9	Abbildungsverzeichnis .....	48

## **1 Ausgangssituation**

Querkraftbewehrung in Platten darf auch mit einschnittigen Bügeln, welche mit Haken verankert werden, realisiert werden. Handelt es sich um zwei 135° Haken, so zählt die Bewehrung als Bügel. Wenn ein oder beide Enden jedoch als 90° Haken ausgeführt sind, so ist die Bewehrung als Zulage zu bezeichnen. (1992-1-1)

Wenn Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer gestellt werden, die höher als R 90 (früher F 90) sind, so dürfen auf der brandbeanspruchten Seite keine 90°-Haken zur Verankerung verwendet werden (Fingerloos et al. 2012).

Als Durchstanzbewehrung sind jedoch Biegeformen mit 90°-Haken auf der brandbeanspruchten Seite erlaubt (Fingerloos et al. 2012). Abbildung 2 zeigt solch eine Biegeform.

Diese Regelung erscheint nicht konsequent, da in beiden Fällen die gleiche Belastung vorliegt, jedoch unterschiedliche Anforderungen gestellt werden.

Es stellt sich somit die Frage, wie sich 90°-Haken im Vergleich mit 135°-Haken unter Brandbeanspruchung verhalten.

## **2 Versuchsbeschreibung**

Querkraftbewehrung in Platten, insbesondere Durchstanzbewehrung kann auf viele verschiedene Arten und Weisen realisiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es zwei verschiedene Endverankerungen von Querkraft/Durchstanzbewehrung in Platten auf ihre Feuerwiderstandsdauer hin zu untersuchen.

Verglichen wurden 90° und 135° Endhaken bei einer Betondeckung von zwei Zentimetern im gerissenen und im ungerissenen Querschnitt. Es wurden ausschließlich Bewehrungsstäbe  $\phi$  8 geprüft.

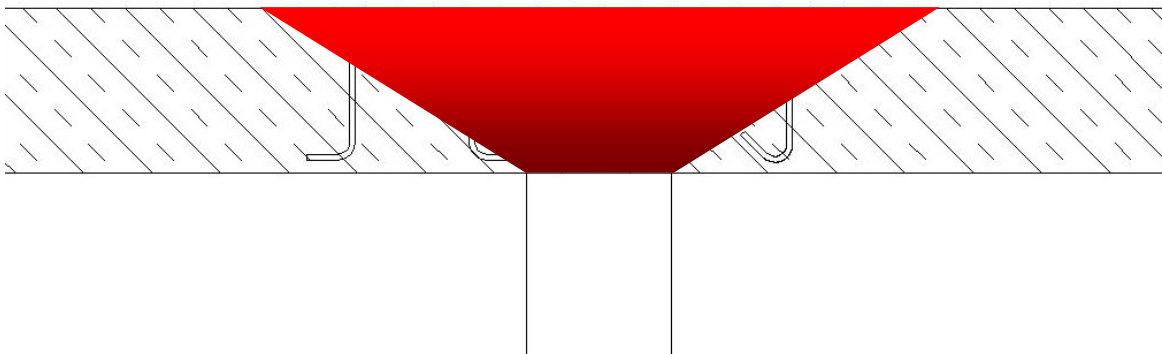
Um die Ergebnisse der Versuche zu validieren, wurden zusätzlich Referenzversuche bei Normaltemperatur durchgeführt. Näheres dazu in Kapitel 4.



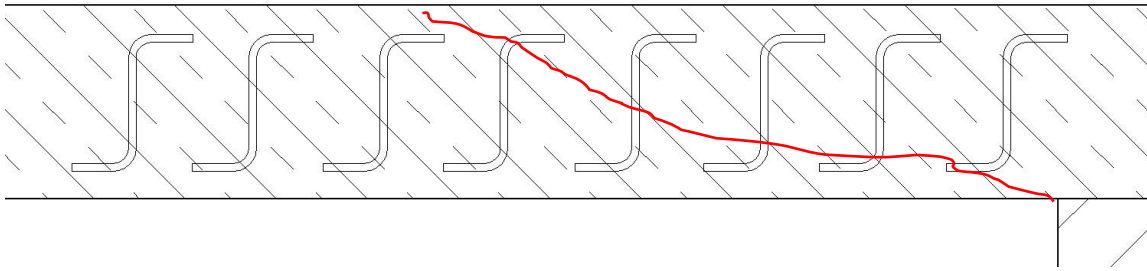
**Abbildung 1: Haken mit Gewebepband zur Verbundschwächung**

Der Entwurf eines Versuchskörpers gestaltete sich als schwierig, da es erforderlich war, dass Querkraftversagen auftrat. Zudem sollte der Längsbewehrungsgrad realistische Werte aufweisen und der Versuchskörper musste sowohl von den Lasten, als auch von den Abmessungen her im Brandofen prüfbar sein. Als einfache Alternative bot es sich an die Haken direkt zu prüfen.

Betrachtet man einen Durchstanzkegel zusammen mit der Durchstanzbewehrung, oder einen Querkrafttriss im Feld mit Querkraftbewehrung, erkennt man die Grundlage für den Versuchsaufbau.

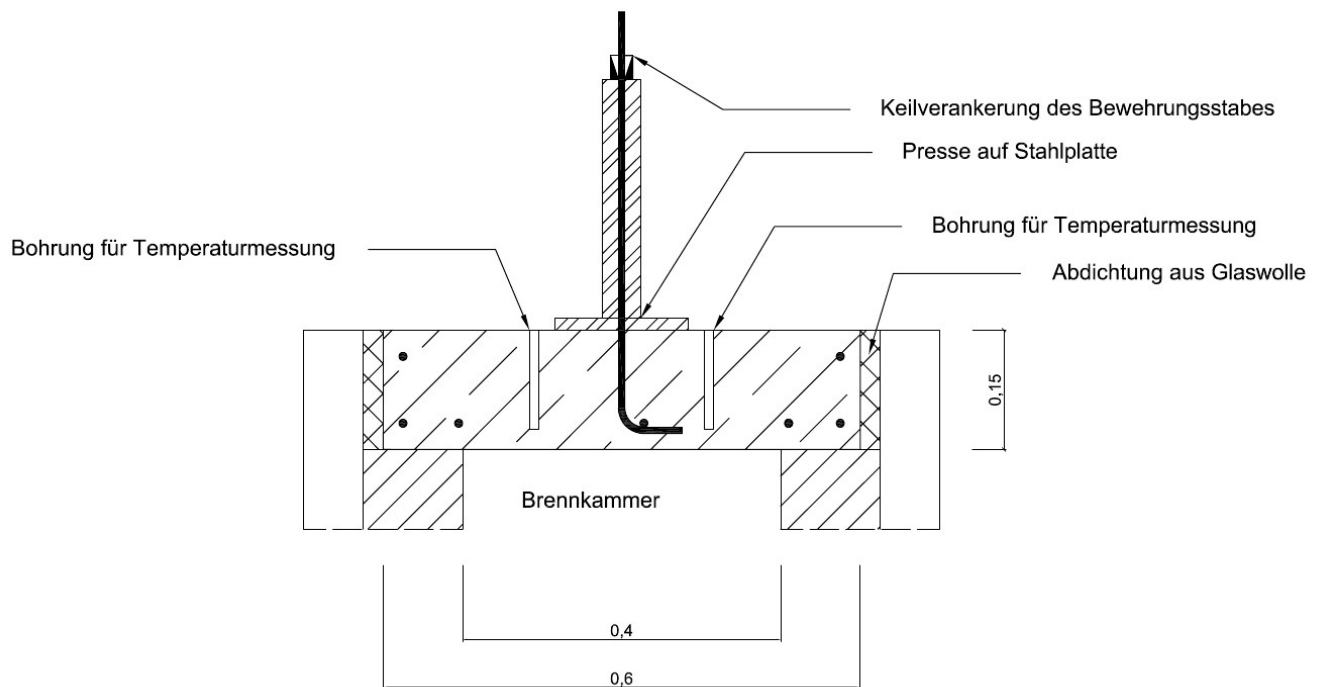


**Abbildung 2: Platte mit Durchstanzbewehrung**



**Abbildung 3: Querkraftbewehrung im Feld**

In eine 15 cm dicke Platte wurden je 4 Haken einbetoniert, wobei 40 cm des Eisens aus der Platte herausschauten. Wie in Abbildung 1 zu erkennen, waren die Bewehrungsseisen oberhalb der Krümmung mit Gewebekband umwickelt. Damit sollte der Verbund geschwächt werden, um ausschließlich das Tragverhalten der Endhaken untersuchen zu können. Da nicht bekannt war wo genau der Querschnitt infolge Durchstanzen oder Querkraft reißen würde, bildete man mit dem geprüften Querschnitt den ungünstigsten Fall ab. Mit der Verbundschwächung sollte zudem sichergestellt werden, dass die Druckspannungen durch die Presse nicht günstig auf die Tragfähigkeit wirken und das Ergebnis verfälschen. Zur Lasteinleitung wurden die Haken durch eine Presse geführt, festgekeilt und einzeln belastet (siehe Abbildung 4)



**Abbildung 4: Skizze Versuchsaufbau**

Insgesamt wurden vier Versuchskörper hergestellt. und deren Namen.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Varianten und deren Namen.

**Tabelle 1: Versuchsmatrix**

Versuchskörper	90° Haken	135° Haken	Ø Rissweite	Querstab ?
Q1	90_Q1_1	135_Q1_1	0,231 mm	φ10
	90_Q1_2	135_Q1_2		
Q2	90_Q2_1	135_Q2_1	0,214 mm	φ10
	90_Q2_2	135_Q2_2		
U1	90_U1_1	135_U1_1	ungerissen	nein
	90_U1_2	135_U1_2		
U2	90_U2_1	135_U2_1	ungerissen	nein
	90_U2_2	135_U2_2		

In jeder Platte wurden 14 Bohrungen angeordnet, um die Temperaturen in Höhe der Haken zu messen. In jedes Bohrloch wurde ein Thermoelement eingebracht und mit hochfestem, schnellhärtendem Mörtel verfüllt (MKT VMZ 345). Die Daten von Messpunkt 01 und Messpunkt 14 waren nur bedingt aussagekräftig, da sie sich je nach Position der Platte vollständig oder gerade noch über dem Plattenaufleger befanden und somit nicht direkt der Hitze ausgesetzt wurden. Zudem fielen ab und zu einzelne Messpunkte aus. In der Auswertung der einzelnen Versuche wird näher darauf eingegangen. Im Schnitt standen pro Versuch 12 zuverlässige Messstellen zur Verfügung.

Die Dicke der Platte von 15 cm geht auf Tabelle 5.8 in EC 2 zurück (siehe Abbildung 5). Während der Versuchsvorbereitung war noch nicht klar, wie lange ein Versuch dauern würde. Die Betondeckung wurde so ausgelegt, dass der Querschnitt den Anforderungen an eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten entspricht. Es war jedoch davon auszugehen, dass die Versuche länger dauern würden. Die Platte musste zu Versuchsende immer noch so kalt sein, dass die Pressen keinen Schaden nahmen. Gewählt wurden dann 15 cm Beton, was REI 180 entspricht.

Feuerwiderstandsklasse	Mindestabmessungen (mm)			
	Plattendicke $h_s$ (mm)	einachsig	Achsabstand a	
			$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 < l_y/l_x \leq 2$
1	2	3	4	5
REI 30	60	10*	10*	10*
REI 60	80	20	10*	15*
REI 90	100	30	15*	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50

$l_x$  und  $l_y$  sind die Spannweiten einer zweiachsig gespannten Platte (beide Richtungen rechtwinklig zueinander), wobei  $l_y$  die längere Spannweite ist.  
Bei Spannbetonplatten ist die Vergrößerung des Achsabstandes entsprechend 5.2 (5) zu beachten.  
Der Achsabstand a in den Spalten 4 und 5 gilt für zweiachsig gespannte Platten, die an allen vier Rändern gestützt sind. Trifft das nicht zu, sind die Platten wie einachsig gespannte Platten zu behandeln.  
\* Normalerweise reicht die nach EN 1992-1-1 erforderliche Betondeckung aus.

**Abbildung 5: Tabelle 5.8 aus DIN EN 1992-1-2**

Schlussendlich wäre eine solche Dicke nicht nötig gewesen, da ab dem zweiten Versuch die Stahlplatten der Pressen zur besseren Kühlung aufgeständert wurden. Beim ersten Versuch hatte sich gezeigt, dass sich die Pressen auf 60° - 70°C erwärmen. Diese Temperatur ist vollkommen unkritisch und führte zu keinerlei Schäden. Sie reichte aber aus um den Druck zu steigern und erschwerte es somit konstante Lasten aufrecht zu erhalten.

Die Versuchskörper teilten sich in zwei verschiedene Varianten auf: gerissene und ungerissene. Abbildung 4 zeigt einen Schnitt durch einen gerissenen Querschnitt, erkennbar an dem in der Hakenkrümmung angeordneten Querstab. Dieser ist erforderlich, da mit diesen Versuchen die Zugzone einer Platte nachgebildet wurde in der Querstäbe erforderlich sind (1992-1-1). Von diesem Typ wurden zwei Versuchskörper erstellt und getestet: Q1 und Q2.

Die Versuche, die die Druckzone nachbilden, wurden ohne Querstäbe und ungerissen ausgeführt. Sie sind mit U1 und U2 bezeichnet.

Als Zielfestigkeit des Betons wurde 25 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen angesetzt. Die Ergebnisse der Würfelprüfungen sind in Anhang G).

Bewehrungspläne und maßstäbliche Schnittzeichnungen für die Versuchskörper sind in Anhang A) zu finden.

Abgesehen von den Querstäben in den gerissenen Versuchskörpern befindet sich der Haken in einem unbewehrten Bereich der Größe 40 cm x 35 cm.

Die Risse in Q1 und Q2 wurden nachträglich mit Risskeilen erzeugt. Da die Platten nur 15 cm dick waren, konnte man die Risskeile nicht darin belassen, da diese sonst

bis zu 30 cm in den Ofen geragt hätten. Somit wurden neben den Risskeilen Bohrungen Ø26 gesetzt und nach dem Öffnen der Risse mit hochfestem, schnellhärtendem Mörtel verfüllt (Topolit Blitz 3). Ein Tag später wurden dann die Keile gezogen und deren Bohrlöcher mit dem gleichen Mörtel geschlossen. Die endgültigen Rissweiten lagen im gewünschten Bereich von 0,2 mm – 0,4mm, schwankten untereinander jedoch stark. Obwohl immer das gleiche Material zum Verfüllen verwendet wurde und die Aushärtezeiten gleich lang waren, war eine exakte Voraussage der endgültigen Rissbreiten nicht möglich.

Eine Tabelle mit Rissweiten vor und nach dem Ziehen der Keile ist in Anhang B) zu finden.

Für genormte Brandversuche ist vorgeschrieben, dass die Versuchkörper bis zu Ausgleichsfeuchte getrocknet werden müssen. Für Beton beträgt dieser Zeitraum etwa 100 Tage (DIN EN 1363-1).

Um die Wartezeit zu verkürzen, wurden die Versuchkörper eingehaust und mit einem Bautrockner 10 Tage lang aktiv getrocknet. Einer der Würfel wurde regelmäßig gewogen um festzustellen ob Massenkonstanz erreicht war (vgl. Abbildung 6). Zu Beginn der aktiven Trocknungsphase war die Festigkeitsentwicklung des Betons weit genug fortgeschritten um Schäden durch Schwinden zu vermeiden.

Anschließend lagerten die Versuchkörper ca. einen Monat in einer beheizten, trockenen Halle und waren in dieser Zeit keinerlei Feuchtigkeit ausgesetzt.

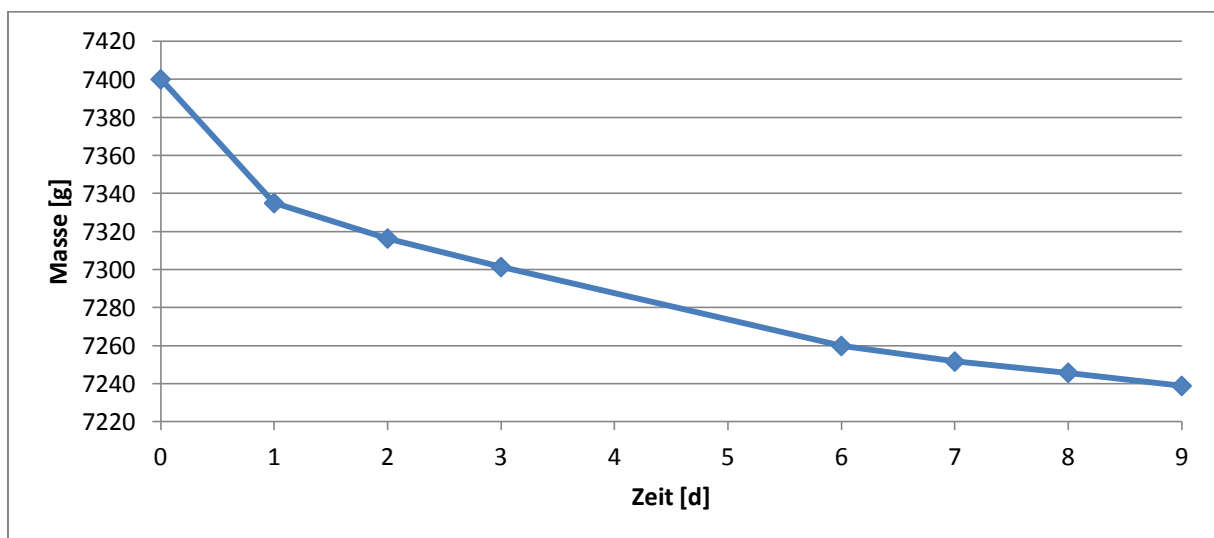


Abbildung 6: Würfelgewicht

## 2.1 Ermittlung der Prüflast

Ein Bewehrungsstab  $\phi$  8 hat eine charakteristische Tragfähigkeit von 25 kN. Der Beiwert für Endhaken beträgt, unabhängig ob 90°-Haken oder 135°-Haken,  $\alpha_1 = 0,7$  (1992-1-1). Dieser Beiwert bedeutet nichts anderes, als dass ein Endhaken 30% der



Traglast aufnehmen kann. Somit ergibt sich für die ungerissenen Querschnitte U1 und U2 eine mögliche Last von  $0,3 \cdot 25 \text{ kN} = 7,5 \text{ kN}$  je Haken.

Für die Querschnitte Q1 und Q2 ergibt sich eine höhere Traglast, da hier noch der nichtangeschweißte Querstab berücksichtigt werden muss. Der zusätzliche Beiwert bestimmt sich wie folgt:

$$\alpha_3 = 1 - K \cdot \lambda$$

$$K = 0,1 \text{ (1992-1-1 Bild 8.4)}$$

$$\lambda = \frac{A_{\text{Querstab}}}{A_{\text{Stab}}} = \frac{10^2}{8^2} = 1,56$$

$$\alpha_3 = 1 - 0,1 \cdot 1,56 = 0,844$$

Die Tragfähigkeit des Hakens mit Querstab beträgt  $(1 - (0,844 \cdot 0,7)) \cdot 25 \text{ kN} = 10,23 \text{ kN}$

Die Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung unterscheidet sich natürlich von diesen Werten und erfordert weitere Überlegungen:

Die Lastfallkombination  $E_{fi,d}$  kann direkt aus den Einwirkungen bei Normaltemperatur bemessen werden.  $E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d$ . Ohne genaueren Nachweis darf für Betonbauteile  $\eta_{fi} = 0,7$  angenommen werden (Hosser et al.).

Für die Berechnung der Prüflasten wurden folgende Annahmen getroffen:

- der Querschnitt ist bei Normaltemperatur voll ausgelastet,  $E_k / R_k = 1,0$
- das Eigengewicht überwiegt
- die Verbundschwächung beträgt 100%

Somit ergaben sich die Prüflasten für den ersten Versuch:

Tragkraft des Querschnitts:  $500 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,5 \text{ cm}^2 = 25 \text{ kN}$

Beiwert der Verankerungslänge für Haken:  $\alpha_1 = 0,7 \text{ (1992-1-1)}$

Tragkraft des Hakens bei Normaltemperatur:  $(1 - 0,7) \cdot 25 \text{ kN} = 7,5 \text{ kN}$

Reduktionsfaktor für den Brandfall:  $\eta_{fi} = 0,7$

Tragkraft des Hakens unter Brandlast:  $0,7 \cdot 7,5 \text{ kN} = 5,25 \text{ kN}$

Für die Versuche U2, Q1 und Q2 wurden höhere Prüflasten verwendet, in den jeweiligen Auswertungen ist deren Zustandekommen erläutert.

Eine Messung der Verformung fand bei U1 statt. Gemessen wurde der Abstand von der Oberkante der Presse bis zur Oberkante der Verankerungskeile. Die Messung wurde in unregelmäßigen Abständen per Hand mit einem Metermaß durchgeführt. Bei den restlichen Versuchen wurde auf die Verformungsmessung verzichtet.

## 2.2 Erwartung

Rechnerisch besteht zwischen den beiden geprüften Biegeformen kein Unterschied in der Traglast, weder bei Normaltemperatur, noch unter Brandlast.

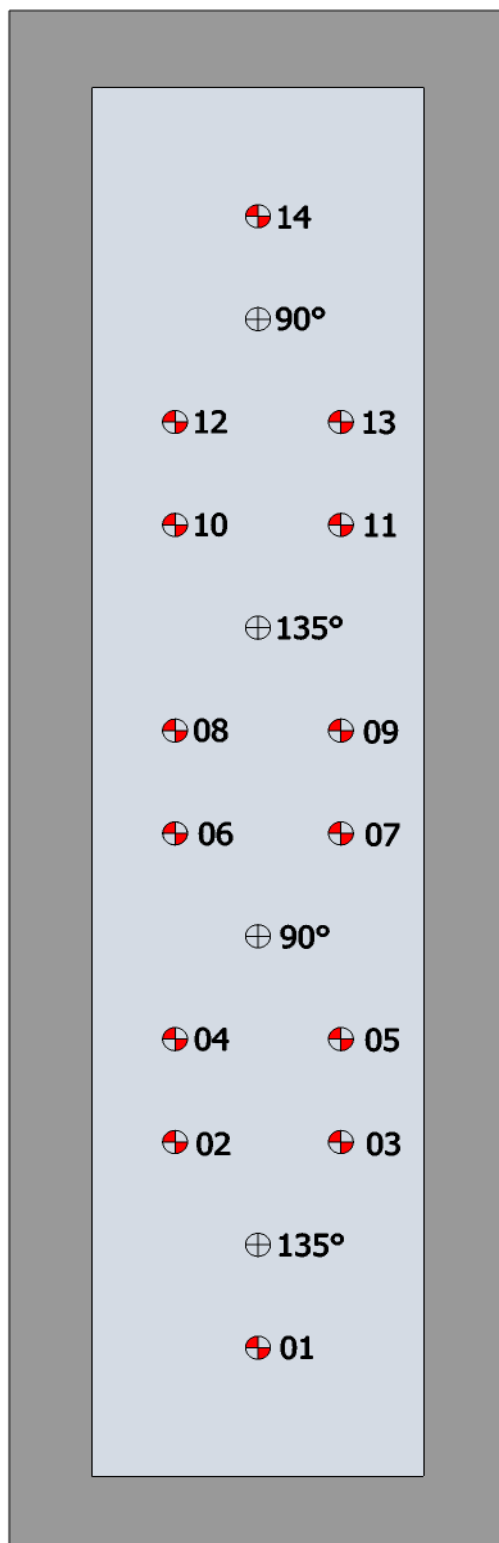
Bei Betrachtung der Geometrie fällt jedoch auf, dass der 90° Haken, da er parallel zur Plattenunterseite verläuft, im kritischen Verankerungsbereich nur von der Mindestbetondeckung geschützt ist. Der 135° Haken streift nur mit der Krümmung die Mindestbetondeckung und ist ansonsten im kühleren Bereich verankert.

Gerade in Randbereichen von Bauteilen liegen die Isothermen bei Brandlast sehr nah beieinander. Theoretisch betrachtet müsste der 135° Haken Wärme im größeren Umfang ableiten und in geringerem Umfang aufnehmen als der 90° Haken. Somit würden sich Unterschiede bei der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung zugunsten des 135° Hakens ergeben.

### 3 Durchführung und Auswertung der Brandversuche

#### 3.1 U1

##### 3.1.1 Aufbau des Probekörpers U1



⊕ 14 Temperaturmesspunkt Nr.

⊕ 90° Haken mit Winkelangabe

Brenner auf Seite von  
Messpunkt 01

Bohrlochdurchmesser für  
die Messpunkte: 12,03 mm

Füllgut: MKT VMZ 345

Tiefe der Messpunkte von  
unbeflammter Seite aus  
gemessen:

01: 128,96 mm

02: 127,49 mm

03: 128,87 mm

04: 127,90 mm

05: 125,61 mm

06: 124,83 mm

07: 129,38 mm

08: 130,15 mm

09: 126,55 mm

10: 125,40 mm

11: 124,85 mm

12: 128,50 mm

13: 126,86 mm

14: 126,20 mm

Abbildung 7: Messpunkte U1

Die Messpunkte 01 und 14 lagerten auf dem Rand des Ofens auf und sind aus diesem Grund in der folgenden Auswertung ausgelassen. Gleiches gilt für Messpunkt 06 der während der Prüfung offensichtlich falsche Werte anzeigte.

Die Benennung der Haken erfolgt gemäß Abbildung 7 von oben nach unten:

90\_U1\_1

135\_U1\_1

90\_U1\_2

135\_U1\_2

### 3.1.2 Versuchsverlauf, Beobachtung und Auswertung

Bei U1 handelt es sich um den ersten Versuch dieser Reihe. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Erfahrungswerte vorlagen, wurde die errechnete Traglast für eine 100%ige Verbundschwächung verwendet, was 5,25 kN entspricht.

Nach 120 Minuten wurde der Versuch ohne ein Versagen der Haken abgebrochen. Die Stahltemperatur im Bereich der Endhaken betrug zu diesem Zeitpunkt im Mittel 540°C. Nach dem vereinfachten Rechenverfahren hat der Stahl bei dieser Temperatur keine Tragfähigkeit mehr, bei einer genaueren Betrachtung sind es noch 57% (1992-1-2).

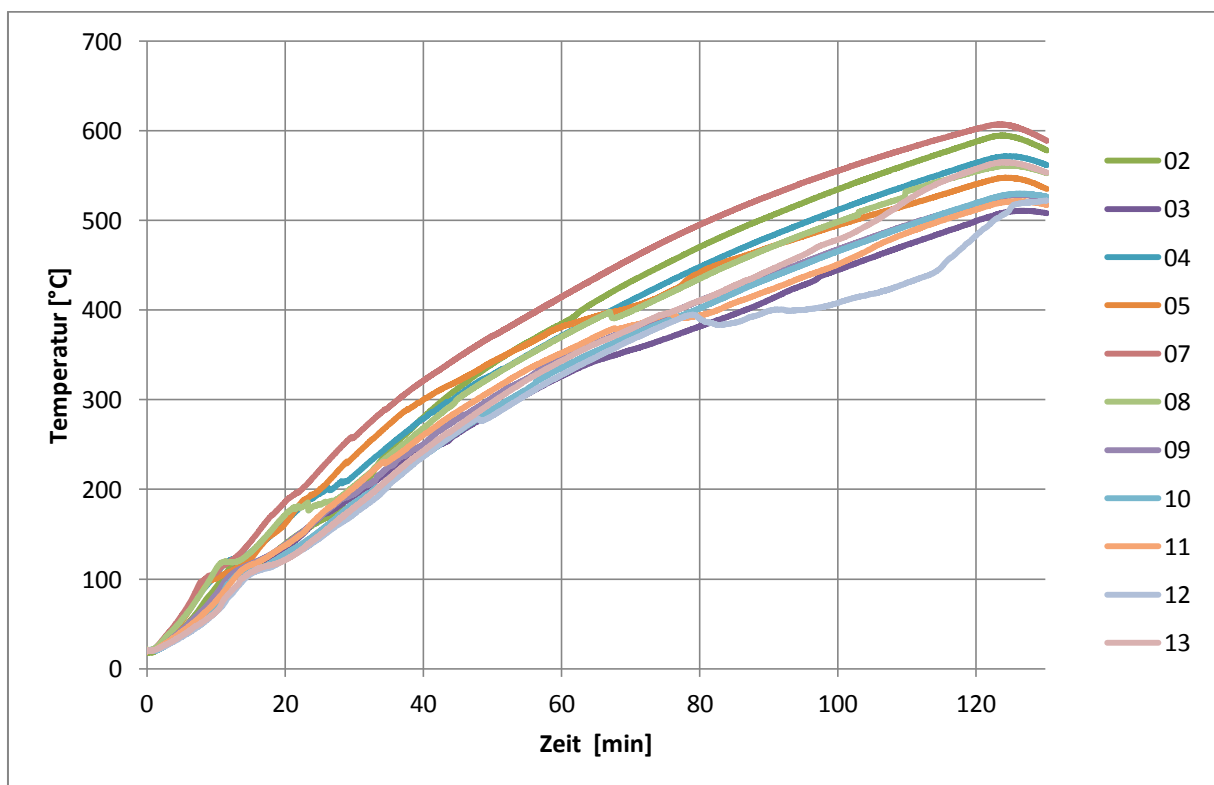


Abbildung 8: Verlauf der Temperatur

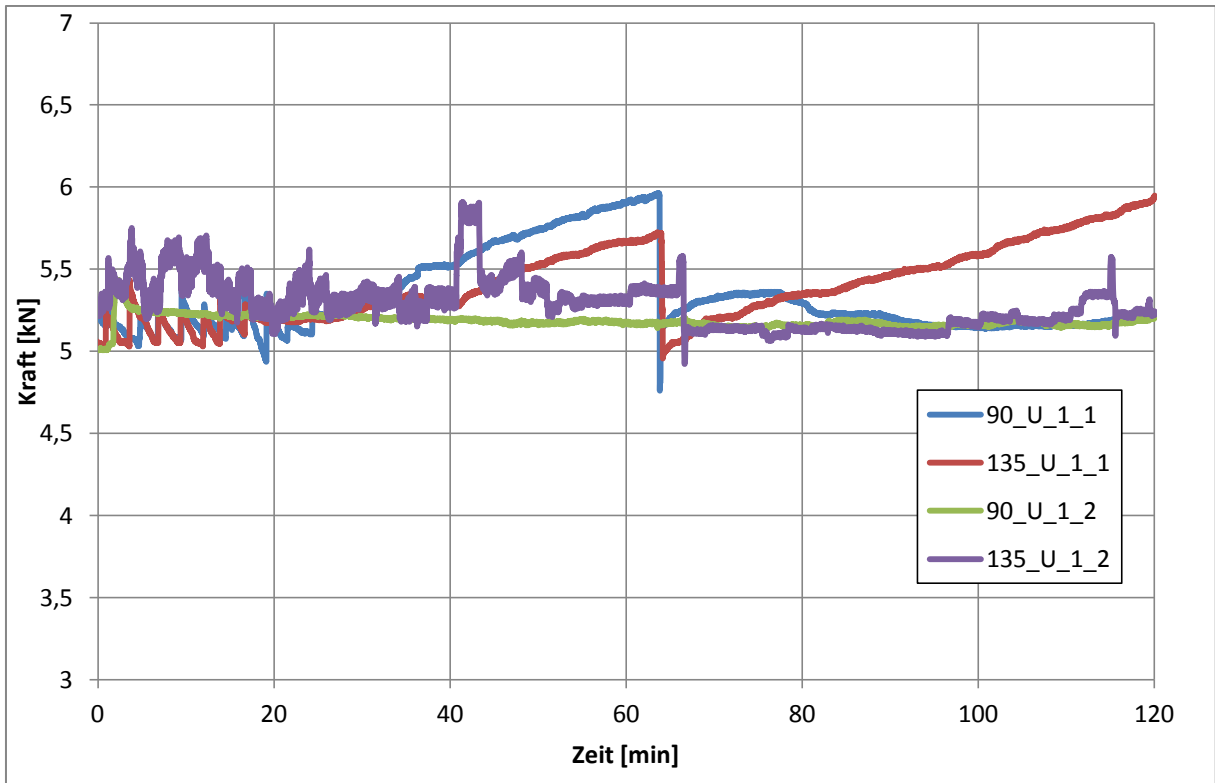


Abbildung 9: Verlauf der Kraft

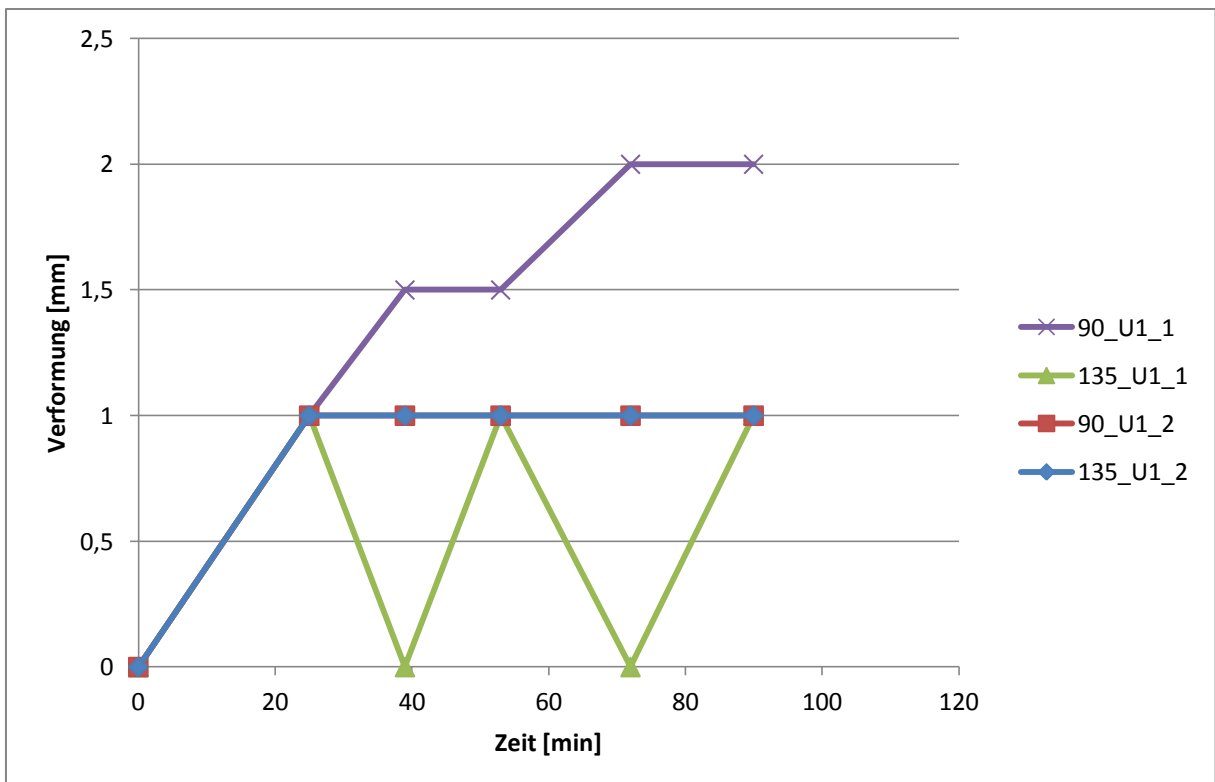


Abbildung 10: Verlauf der Verformungen

Abbildung 10 zeigt die Verformungen während des Versuchs. Zeitpunkt 0 ist der Versuchsstart. Die Haken waren zu diesem Zeitpunkt schon 10 Minuten unter Last. Durch die gewählte Messmethode ist die Genauigkeit stark eingeschränkt. Vor allem

der Verlauf von 135\_U1\_1 macht dies deutlich. Bei Verformungen im Millimeter- und Zehntelmillimeterbereich ist eine Abweichung von  $\pm 0,5$  mm nicht tolerierbar. Deshalb wurde die Messung der Verformung eingestellt.

Nach Abbruch des Versuchs wurden die Resttragfähigkeiten der Haken bestimmt. Ein Verlauf ist am Ende des Kapitels exemplarisch dargestellt. Die restlichen Verläufe der Belastungen sind in Anhang C) zu finden.

**Tabelle 2: Übersicht Versuch U1**

Haken Nr.	Tragfähigkeit	Temperatur im Verankerungsbereich	Versagensart
90_U1_1	12,42 kN	521°C	Aufbiegen
135_U1_1	22,19 kN	526°C	Stahlbruch
90_U1_2	12,08 kN	569°C	Aufbiegen
135_U1_2	21,38 kN	544°C	Stahlbruch

Die angegebenen Temperaturen sind die Mittelwerte der Messpunkte, die in direkter Nachbarschaft zu den Haken lagen. Gemessen wurde kurz vor bzw. kurz nach dem Versagen des jeweiligen Hakens. Die Höhenlage der Haken wurde durch Abstandshalter auf 20 mm festgelegt, ihre Mittelachse lag somit 126 mm von der Oberkante des Querschnitts entfernt. Es wurde versucht die Temperaturmessstellen in Höhe der Mittelachse des Stahls zu platzieren. Sie schwankten herstellungsbedingt um  $\pm 4$  mm, blieben damit aber im Höhenbereich des Stahlquerschnittes. Sie konnten jedoch nur als Anhaltswerte dienen und sind nicht absolut zu betrachten, da sie zum einen Abstände von 15 cm zum Haken aufweisen und zum anderen komplett von Beton bzw. hochfestem Mörtel umgeben waren. Kühleffekte durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Stahls bleiben unberücksichtigt. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit kann der Stahl Wärme an den kühleren Bereich im Beton, die Pressen und die Außenluft abgeben (Siehe auch Kapitel 6)

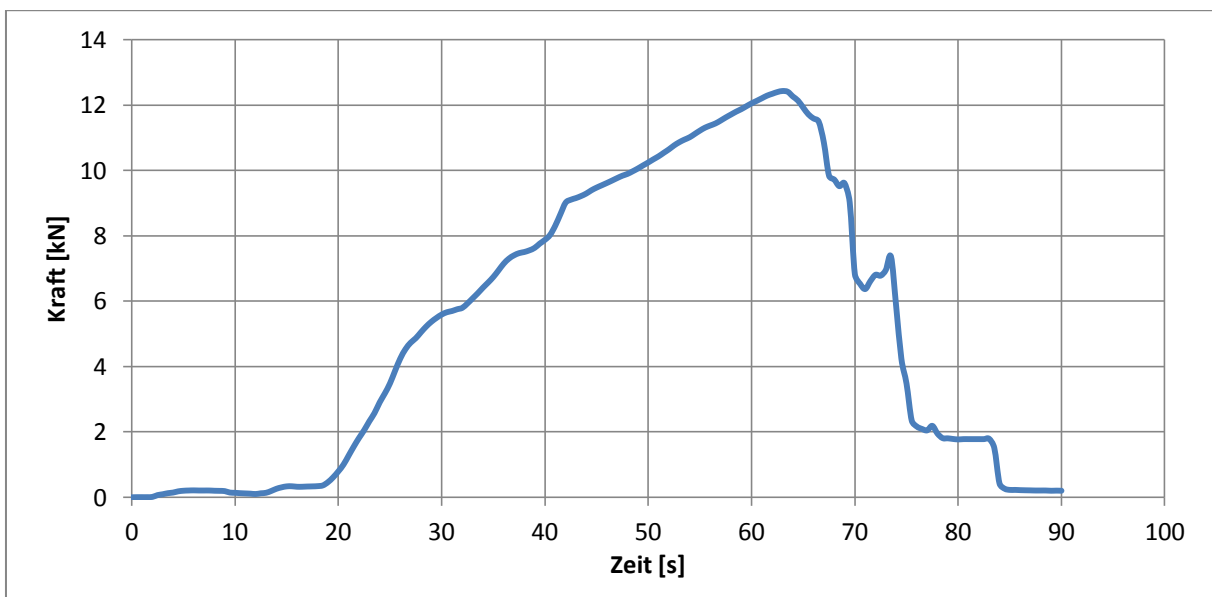
Beim Überschreiten der Traglast kam es eindeutig zu Stahlversagen. Die 90° Haken wurden von der Presse aus dem Betonkörper herausgezogen. Abbildung 11 zeigt einen 90° Haken der nach dem Abkühlen per Hand aus dem Probekörper gezogen werden konnte. Der Verlauf der Kraft ist in Abbildung 12 zu sehen.

Bei den aufgezeichneten Werten handelt es sich um Last-Zeit-Kurven. Konstante Last bei fortschreitender Zeit deutet auf Stahlfließen hin. Bei dieser plastischen Verformung des Stahls wird der Haken zurückgebogen. Im Folgenden wird dieser Versagenstyp „Aufbiegen“ genannt (Siehe auch Abbildung 11). Ein plötzliches Abfallen der Last kann sowohl Stahl- als auch Betonbruch bedeuten. Bei den Brandversuchen kam es kein einziges Mal zu Betonbruch, sondern immer nur zu Stahlbruch. Bei den Referenzversuchen waren beide Versagensarten vertreten.



**Abbildung 11: 90° Haken nach Versuch**

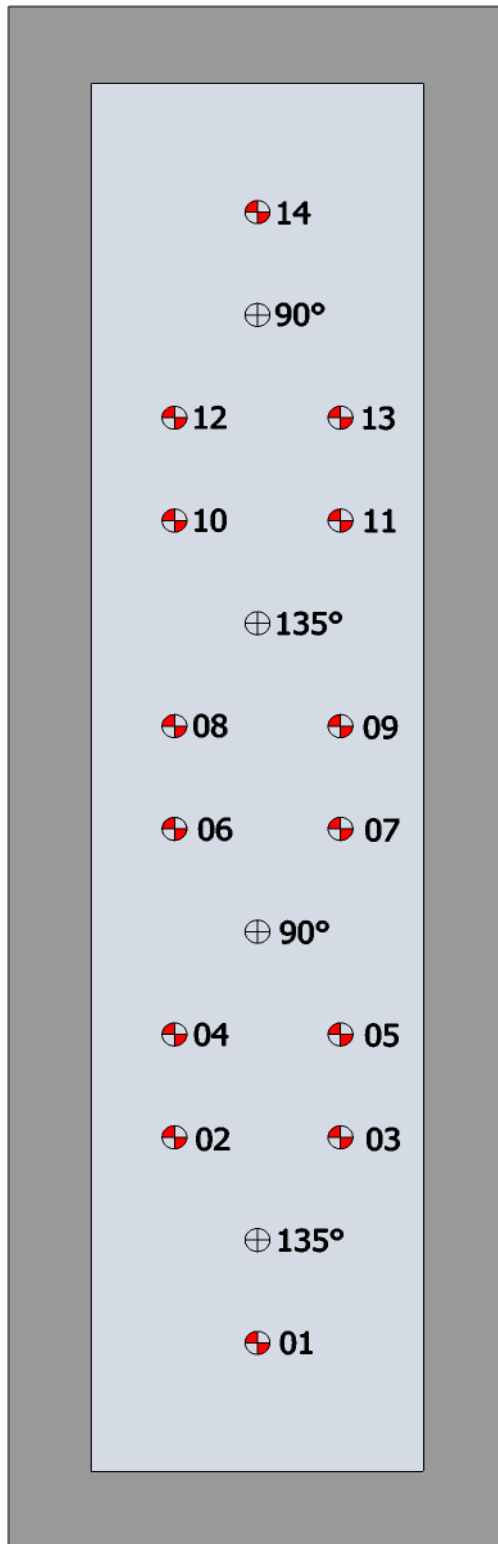
Die bräunlichen Verfärbungen auf der Betonoberfläche stammen von der Fußplatte der Presse. Im Raum zwischen Beton und Stahlplatte wurde durch ausgetretenes Wasser, welches verkochte, Rost und Schmutz von der Stahlplatte gelöst. Abgesehen von solchen optischen Beeinträchtigungen war die Oberseite der Platte unbeschädigt.



**Abbildung 12: Resttragfähigkeit 90\_U1\_2**

## 3.2 U2

### 3.2.1 Aufbau U2



 **14** Temperaturmesspunkt Nr.

 **90°** Haken mit Winkelangabe

Brenner auf Seite von  
Messpunkt 01

Bohrlochdurchmesser für die  
Messpunkte: 12,03 mm

Füllgut: MKT VMZ 345

Tiefe der Messpunkte von  
unbeflammter Seite aus  
gemessen:

**01:** 127,14 mm

**02:** 128,60 mm

**03:** 127,35 mm

**04:** 128,76 mm

**05:** 128,71 mm

**06:** 126,75 mm

**07:** 128,98 mm

**08:** 126,97 mm

**09:** 127,76 mm

**10:** 127,03 mm

**11:** 127,54 mm

**12:** 129,08 mm

**13:** 128,43 mm

**14:** 125,25 mm

Abbildung 13: Messpunkte U2



Die Messpunkte 1 und 14 lagerten auf dem Rand des Ofens auf und zeigten deswegen mitunter bedeutend niedrigere Temperaturen an.

Abgesehen von der Tiefe der Bohrungen der Thermoelemente, die herstellungsbedingt um  $\pm 4$  mm schwankten sind U1 und U2 identisch. Beide sind exakt gleich bewehrt, aus dem gleichen Beton gegossen und wurden mit den anderen Versuchskörpern zusammen gelagert.

Die Benennung der Haken erfolgt von oben nach unten:

90\_U2\_1

135\_U2\_1

90\_U2\_2

135\_U2\_2

Bei diesem Versuch wurde eine Kamera in der Brennkammer installiert. Ziel war es das Verhalten der Plattenunterseite beobachten zu können. Vor allem die Zeitpunkte der Betonabplatzungen waren von Interesse.

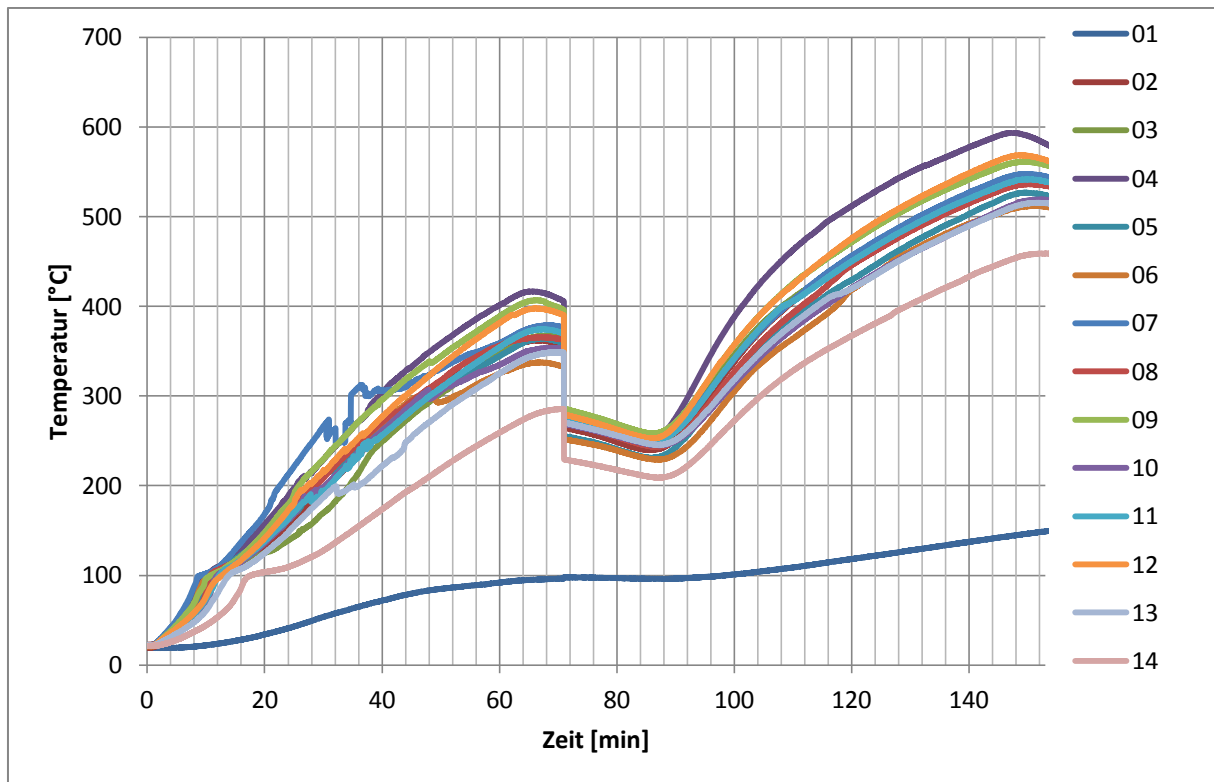
Es handelte sich um eine speziell gekühlte Kamera, die Temperaturen über  $1000^{\circ}\text{C}$  schadlos überstehen kann. Die einzige Lichtquelle für die Aufnahmen waren der Gasbrenner und nach einer gewissen Zeit die glühende Auskleidung der Brennkammer. Folglich ist die Qualität der Aufnahmen hinsichtlich Auflösung und Helligkeit stark eingeschränkt und brachte keine neuen Erkenntnisse.

### **3.2.2 Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung**

Aufgrund eines technischen Defektes fiel der Gasbrenner des Kleinprüfstandes während dem Versuch aus. Es waren schon 60 Minuten vergangen, die Temperatur im Ofen betrug  $950^{\circ}\text{C}$ .

Der Defekt konnte behoben werden, sorgte aber für einen starken Temperaturabfall in der Brennkammer. Der Ofen wurde eine Stunde später mit einer angepassten Temperaturkurve neugestartet. Die Temperatur in der Brennkammer war zwar stark abgefallen, die Betonplatte hatte jedoch Wärme gespeichert und wies noch eine Temperatur von etwa  $250^{\circ}\text{C}$  auf. 15 Minuten nach Ofenneustart betrug die Temperatur wieder durchschnittlich  $480^{\circ}\text{C}$  und lag somit auf dem gleichen Niveau wie kurz vor dem Ausfall.

Da die Ofensteuerung und die Aufzeichnung der Messwerte über den gleichen Computer liefen, war es nicht möglich für die ganze Zeit des Ausfalls die Messwerte der Thermoelemente aufzuzeichnen. Etwa 30 Minuten fehlen. Im Folgenden wird diese Lücke einfach übersprungen und macht sich in einem Sprung der Temperatur bei Minute 70 bemerkbar.



**Abbildung 14: Verlauf der Temperatur**

Durch die in Versuch U1 gewonnenen Erkenntnisse wurde für U2 die Prüflast auf 17 kN festgelegt. Die höchste Last bei U1 betrug 22 kN. Somit liegt die Vermutung nahe, dass bei Normaltemperatur der Haken mehr als 25 kN trägt. Rechnet man unter Berücksichtigung der Schwächung des Stahls durch die hohen Temperaturen im Verankerungsbereich nach, bestätigt sich diese Vermutung.

Bild 4.2a in EC 2-1-2 enthält einen Beiwert zur Berücksichtigung des Abfalls der charakteristischen Stahlfestigkeit.

Für 500°C beträgt dieser 0,65. Somit ergibt sich  $22 \text{ kN} / 0,65 = 33 \text{ kN}$

Die Referenzversuche bestätigen diese Größenordnung (vgl. auch Kapitel 4).

Angelehnt an  $\eta_{fi}$ , setzte sich die neue Last aus der rechnerischen Maximaltragfähigkeit bei Normaltemperatur und dem Reduktionsfaktor zusammen. 70% von 25 kN sind in etwa 17 kN. Nachkommastellen spielen keine Rolle. 17 kN Pressenkraft entspricht etwa 200 bar Druck, der durch die Pumpen erzeugt wurde. Die Pressen wurden von drei verschiedenen Arten von Pumpen betrieben. Die elektrisch betriebene Pumpe ermöglichte es, die Last mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  kN einzustellen. Die druckluftbetriebene Pumpe lag in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich für Lasten größer 10 kN. Bei kleineren Lasten sorgen die Druckstöße für starke Ungleichmäßigkeiten. Die beiden Handpumpen hatten Streubereiche von  $\pm 0,5$  kN. Die Abweichung nach unten ergibt sich aus Undichtigkeiten der Pumpen und Pressen sowie Stahldehnung durch Temperatur

und Last. Die Abweichung nach oben entstand beim Nachregeln der Pumpen, da diese per Hand eigestellt werden mussten.

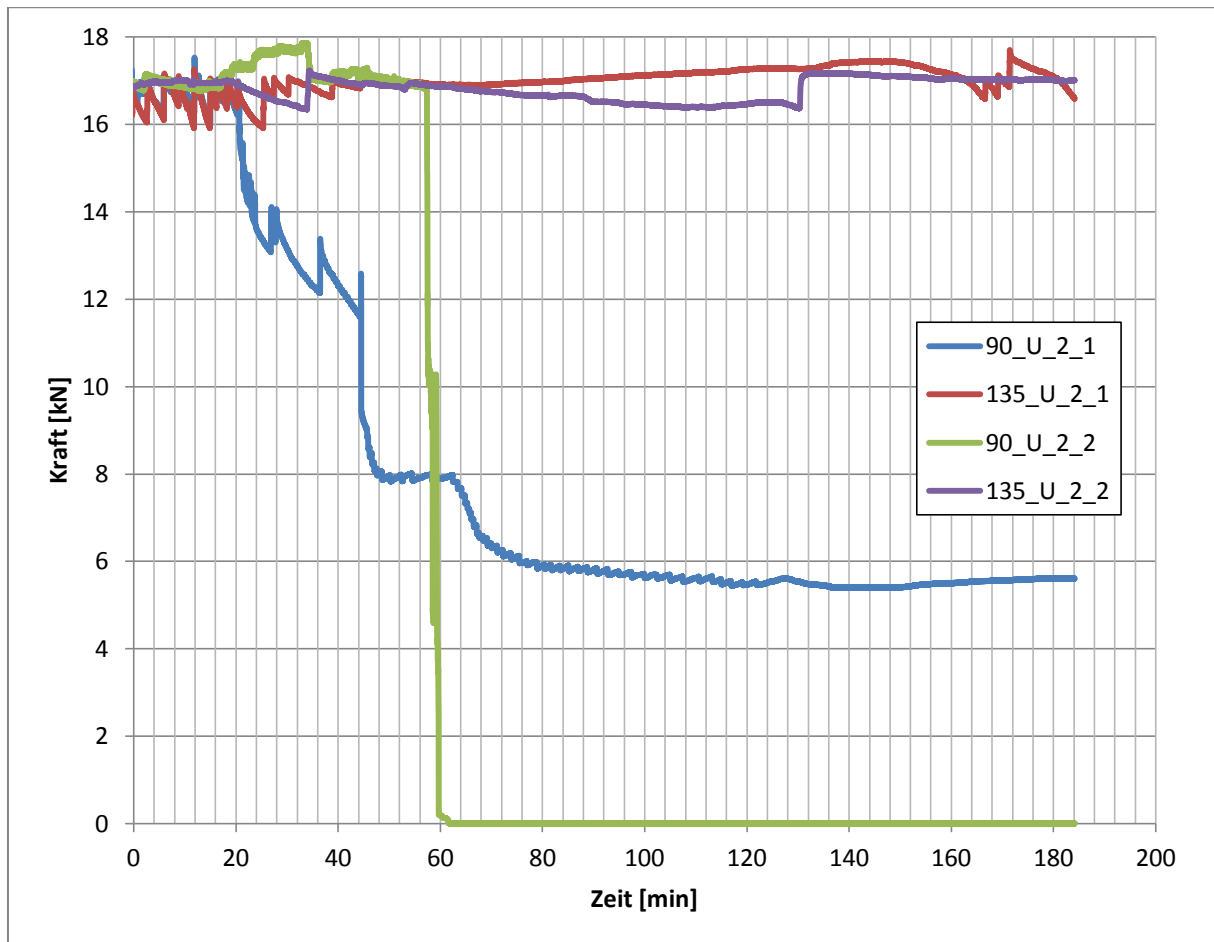


Abbildung 15: Verlauf der Kraft

Tabelle 3: Übersicht Versuch U2

Haken Nr.	Tragfähigkeit	Temperatur im Verankerungsbereich	Versagensart
90_U2_1	17 kN (23 min)	153°C (23 min)	Aufbiegen
135_U2_1	18,35 kN	536°C	Stahlbruch
90_U2_2	17 kN (59 min)	354°C (59 min)	Aufbiegen
135_U2_2	25,35 kN	540°C	Stahlbruch

23 Minuten nach Beginn der Prüfung versagte der Haken 90\_U2\_1. Die Temperatur betrug im Mittel 150°C, also noch weit entfernt von kritischen Werten. Rechnerisch hat der Stahl bei dieser Temperatur noch die volle Tragfähigkeit (1992-1-2).

36 Minuten später, also 59 Minuten nach Versuchsstart, folgte der zweite 90° Haken. Die Temperatur lag bei 380°C und somit einem Tragkraftverlust von 10% (1992-1-2).

In Minute 61 fiel der Brenner aus. Die Lasten wurden die ganze Zeit über aufrecht erhalten und aufgezeichnet. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Achsen von Abbildung 14 und 15.

Nachdem die Temperatur im Versuchskörper im Mittel überall über 500°C lag, was nach 370 Minuten der Fall war und die verbliebenen 135° Haken nicht versagten, wurde der Versuch abgebrochen und die Resttragfähigkeit bestimmt.

Für 135\_U2\_1 betrug diese 18,35 kN und für 135\_U2\_2 25,35 kN. Die Verläufe der Last über die Zeit sind in Anhang D) zu finden.

135\_U2\_2 konnte nach Abkühlen der Versuchskörper mit einer Zange aus dem Beton gezogen werden. Der Stahl hatte sich nicht wie die 90° Haken gerade gezogen, sondern war durchgerissen. Die Last-Zeit-Kurve des Versuchs ist in Abbildung 18 dargestellt.

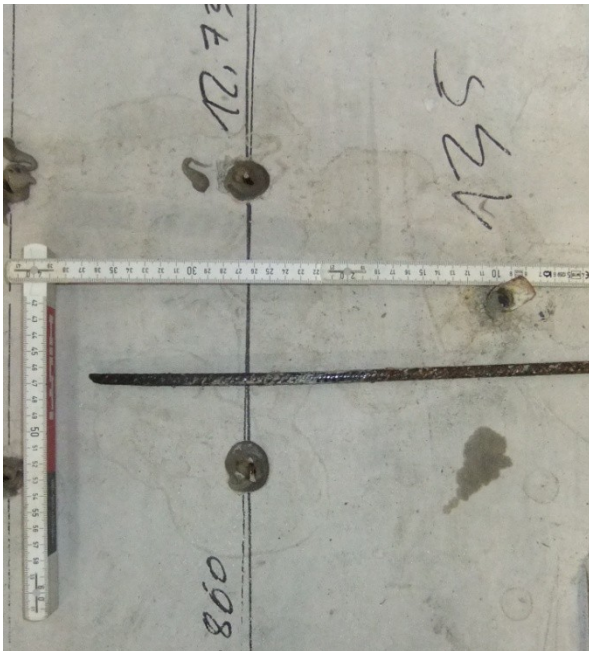


Abbildung 16



Abbildung 17

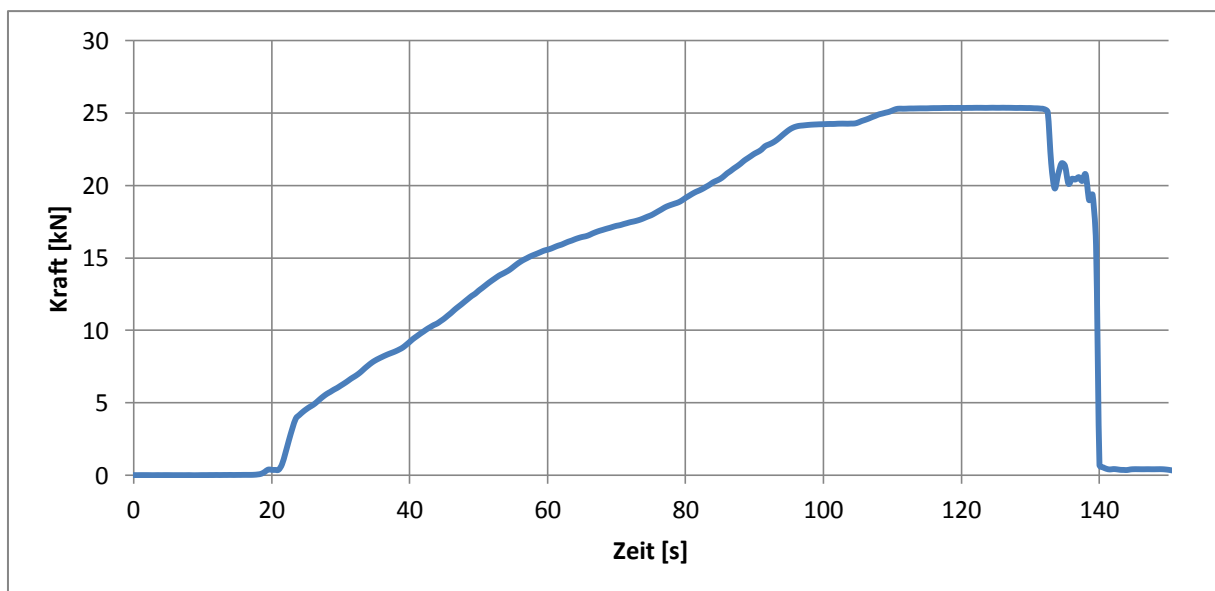
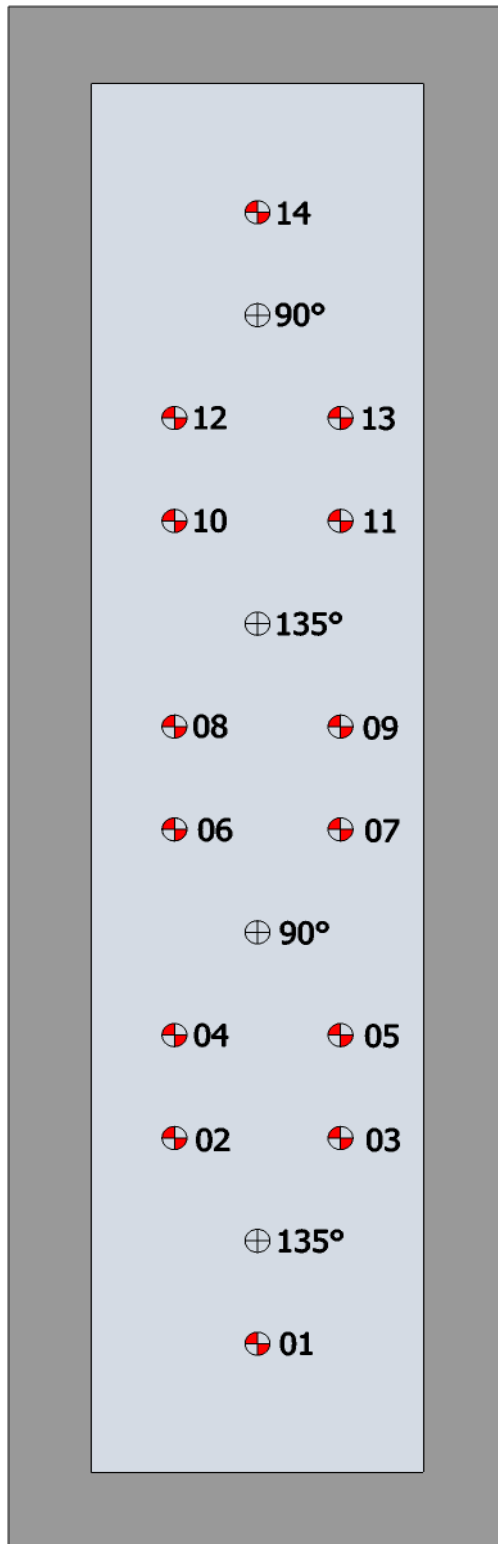


Abbildung 18: Resttragfähigkeit 135\_U2\_2

### 3.3 Q1

#### 3.3.1 Aufbau Q1



⊕14 Temperaturmesspunkt Nr.

⊕90° Haken mit Winkelangabe

Brenner auf Seite von  
Messpunkt 14

Bohrlochdurchmesser für die  
Messpunkte: 12,03 mm

Füllgut: MKT VMZ 345

Tiefe der Messpunkte von  
unbeflammter Seite aus  
gemessen:

**01:** 128,37 mm

**02:** 128,18 mm

**03:** 128,94 mm

**04:** 129,40 mm

**05:** 128,10 mm

**06:** 128,54 mm

**07:** 127,68 mm

**08:** 128,67 mm

**09:** 126,71 mm

**10:** 128,42 mm

**11:** 126,96 mm

**12:** 128,62 mm

**13:** 128,49 mm

**14:** 127,69 mm

Abbildung 19: Messpunkte Q1

Die Versuchskörper Q1 und Q2 wurden beide mit einem Querstab  $\phi 10$  in der Hakenkrümmung ausgeführt. Dieser nicht angeschweißte Querstab erhöht die Tragfähigkeit des Querschnitts um ca. 20% ( $\alpha_3$ ). Zudem wurden die Versuchskörper in Höhe der Haken gerissen. Dies wiederum hat eine Schwächung der Tragfähigkeit zur Folge.

Da die Bestimmung der Prüflast auf rechnerischem Weg bei den ersten Versuchen viel zu niedrige Lasten ergeben hatte, wurde auf eine erneute Berechnung verzichtet. Die verwendete Prüflast setzte sich aus Erfahrungswerten aus den ersten Versuchen zusammen. So wurden für Q1 12 kN und 17 kN als Lasten gewählt.

Die Verteilung der Prüflasten im Detail:

90\_Q1\_1: 12 kN

135\_Q1\_1: 17 kN

90\_Q1\_2: 17kN

135\_Q1\_2: 12 kN

### 3.3.2 Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung

Nach 86 Minuten versagte 90\_Q\_1\_2. Der Versuch wurde nach 110 Minuten abgebrochen, da die Temperatur in Höhe des Stahls überall über 500°C lag, die verbliebenen Haken aber nicht versagten.

Anschließend wurde die Resttragfähigkeit bestimmt.

**Tabelle 4: Übersicht Versuch Q1**

Haken Nr.	Tragfähigkeit	Temperatur im Verankerungsbereich	Versagensart
90_Q1_1	14 kN	508°C	Aufbiegen
135_Q1_1	24 kN	520°C	Stahlbruch
90_Q1_2	17 kN (86 min)	451°C (86 min)	Aufbiegen
135_Q1_2	19,6 kN	546°C	Stahlbruch

Der Verlauf der Temperatur ist in Abbildung 20 und der Verlauf der Last in Abbildung 21 dargestellt.

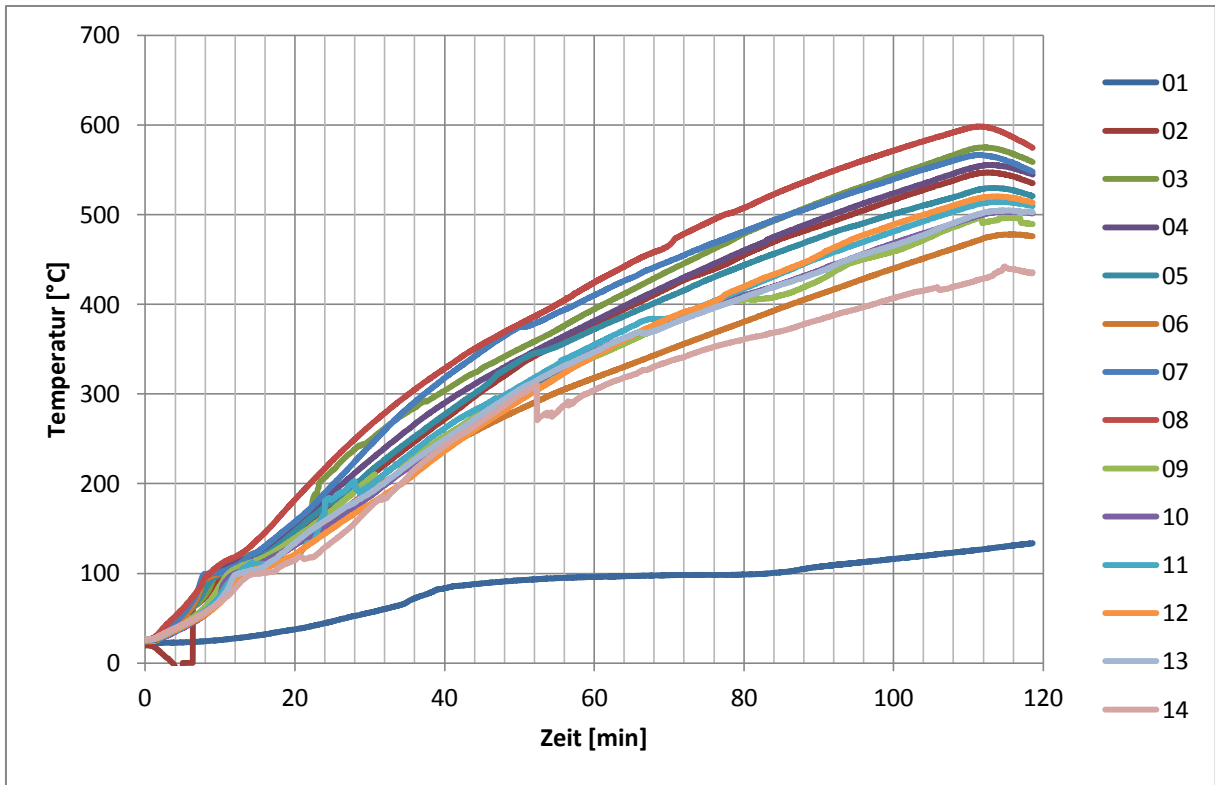


Abbildung 20: Verlauf der Temperatur

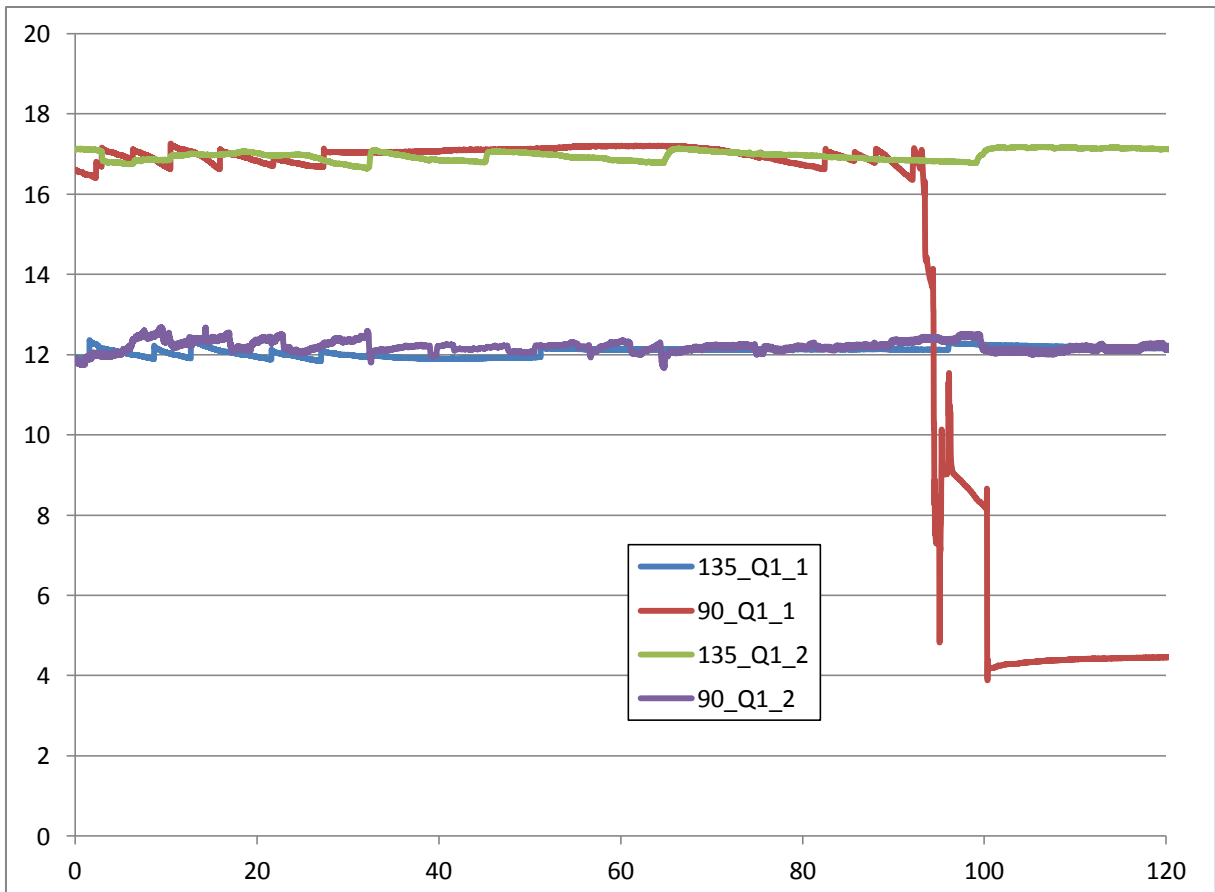
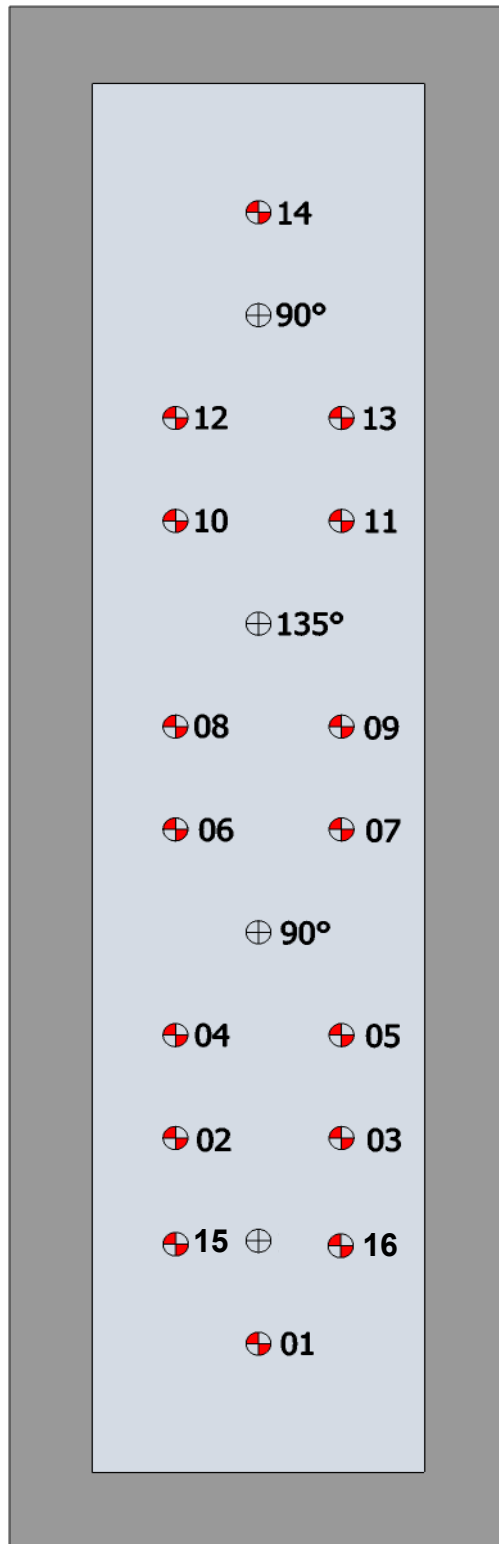


Abbildung 21: Verlauf der Kraft

### 3.4 Q2

#### 3.4.1 Aufbau



 **14** Temperaturmesspunkt Nr.

 **90°** Haken mit Winkelangabe

Brenner auf Seite von  
Messpunkt 01

Bohrlochdurchmesser: 12,03  
mm

Füllgut: MKT VMZ 345

Tiefe der Messpunkte von  
unbeflammter Seite aus  
gemessen:

**01:** 124,56 mm

**02:** 124,4 mm

**03:** 126,8 mm

**04:** 123,6 mm

**05:** 123,86 mm

**06:** 123,5 mm

**07:** 123,6 mm

**08:** 125,8 mm

**09:** 123,2 mm

**10:** 125,27 mm

**11:** 122,7 mm

**12:** 129,28 mm

**13:** 124,37 mm

**14:** 122,94 mm

**15:** 116,68 mm

**16:** 122,83 mm

Abbildung 22: Messpunkte Q2



Aufbauend auf den Ergebnissen aus Q1 wurden die Lasten für Q2 verändert. Die 135° Haken wurden beide mit 17 kN belastet und die 90° Haken beide mit 12 kN.

Die Benennung der Haken erfolgte analog zu den restlichen Versuchen. Von oben nach unten:

90\_Q2\_1

135\_Q2\_1

90\_Q2\_2

135\_Q2\_2

Bei diesem Versuchskörper wurden noch zwei weitere Messpunkte gesetzt. Rechts und links von 135\_Q2\_2 in den Achsen der übrigen Messpunkte und somit genau im Riss. Sie tragen die Nummern 15 und 16.

### 3.4.2 Versuchsdurchführung, Beobachtungen Auswertung

Messpunkt 06 wurde beim Einbau beschädigt und lieferte keine Messwerte. Messpunkt 02 fiel nach 16 Minuten aus. Grund war ein beschädigtes Verbindungskabel zwischen Thermoelement und Messgerät. Es konnte ausgetauscht werden, sodass ab Minute 23 wieder Messwerte von diesem Messpunkt zur Verfügung stehen.

Nach 94 Minuten versagte 90\_Q2\_1 und nach 98 Minuten 90\_Q2\_2 (siehe auch Abbildung 24).

Als nach flächendeckendem Überschreiten von 500°C kein Versagen der verbliebenen 135° Haken auftrat, wurde der Versuch nach 110 Minuten abgebrochen.

Die Resttragfähigkeiten betragen 25 kN (135\_Q2\_1) und 26 kN (135\_Q2\_2). Bei beiden Versuchen handelte es sich um ein schlagartiges Versagen. Bei 135\_Q2\_2 war es so heftig, dass sich die Verankerungskeile lösten.

**Tabelle 5: Übersicht Versuch Q2**

Haken Nr.	Tragfähigkeit	Temperatur im Verankerungsbereich	Versagensart
90_Q2_1	12 kN (94 min)	466°C (nach 94 Minuten)	Aufbiegen
135_Q2_1	25 kN	518°C	Stahlbruch
90_Q2_2	12 kN (98 min)	440°C (nach 98 Minuten)	Aufbiegen
135_Q2_2	26 kN	522°C	Stahlbruch

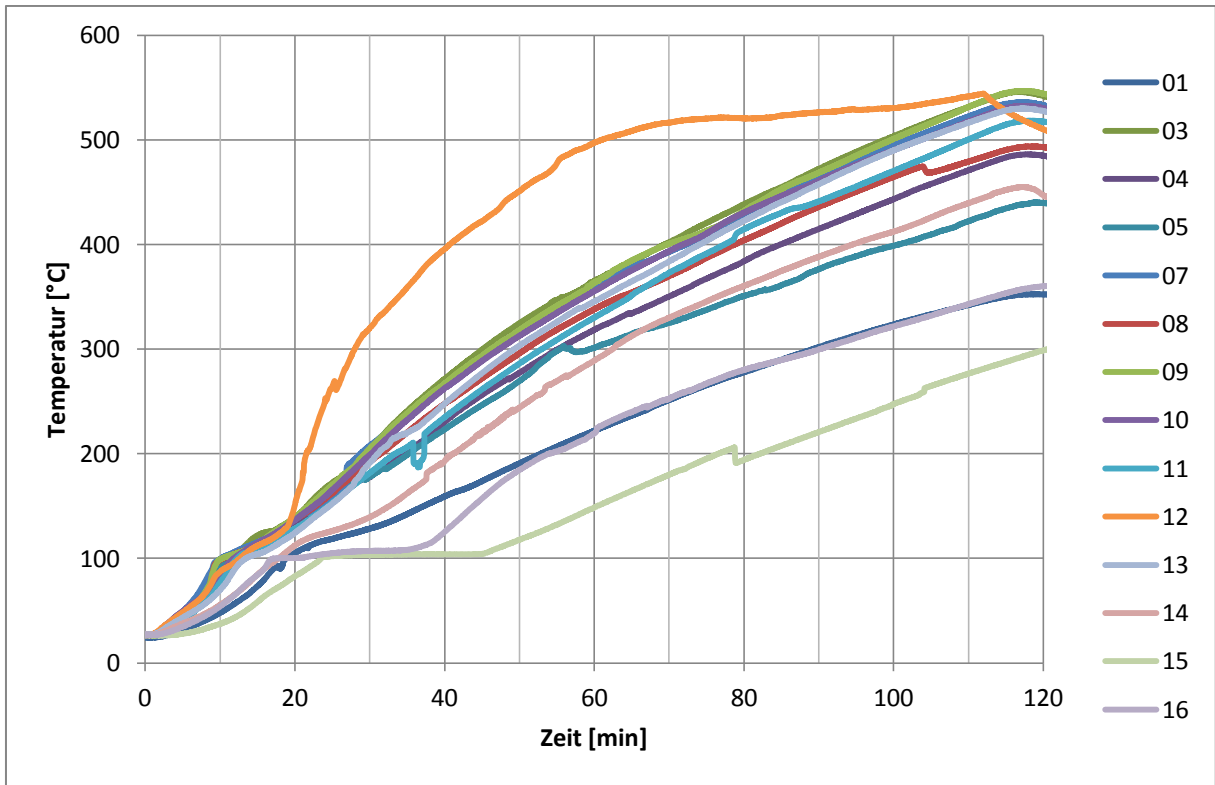


Abbildung 23: Verlauf der Temperatur

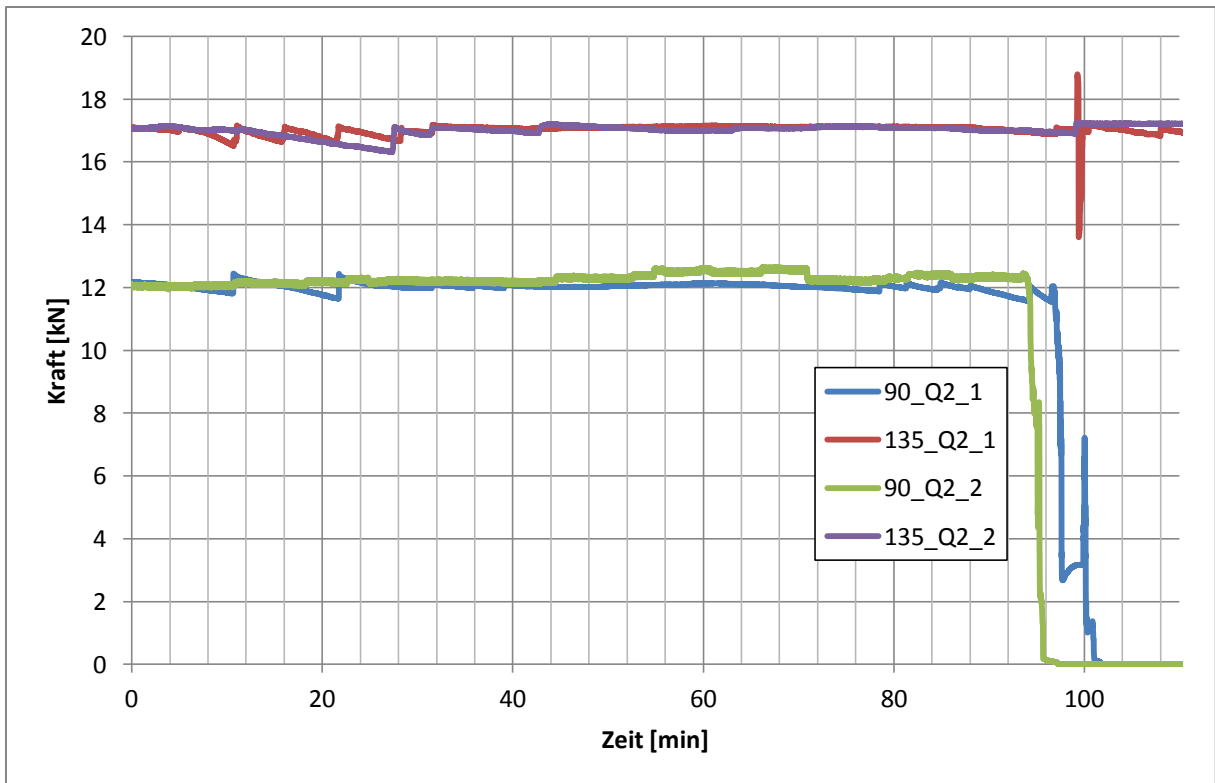


Abbildung 24: Verlauf der Kraft

## 4 Weitere Auswertungen

Die Unterseite war erwartungsgemäß in einem weniger guten Zustand. Unter den Haken gab es Betonabplatzungen unterschiedlichster Größe. An den Stellen, an denen der Beton nicht abgeplatzt war, besaß er keinerlei Haftung mehr und bröselte bei leichter Berührung ab. Die Tiefe der Abplatzungen betrug bis zu 2,5 cm.



Abbildung 25: U1 nach Versuch

Die Größe der Abplatzungen lässt keinen Rückschluss auf die verbauten Haken zu. Die Abplatzung auf der linken Seite gehört zu 135\_U1\_2, es folgt 90\_U1\_2 mit fast der gleichen Größe. Die Abplatzungen auf der rechten Seite gehören zu 135\_U1\_1 und 90\_U1\_1 (ganz rechts).

Somit liegt die Vermutung nahe, dass durch die Beflammung von nur einer Seite mit nur einem Brenner eine ungleiche Temperaturverteilung in der Platte entsteht.

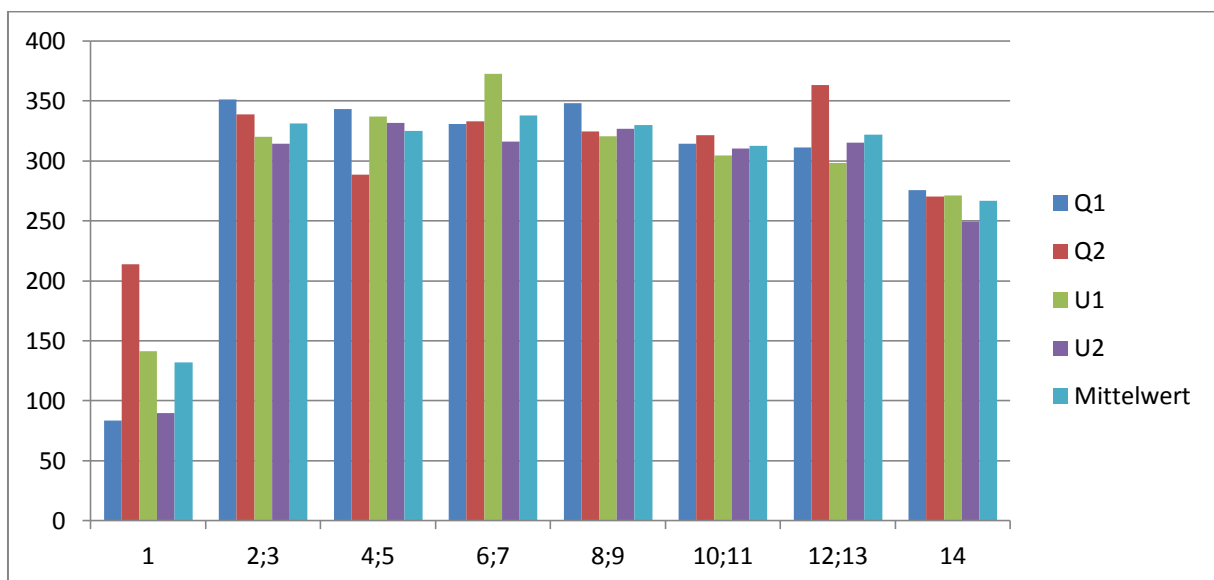


Abbildung 26 Temperaturverlauf längs der Platte

Die Abbildung zeigt den Verlauf der Temperatur längs der Platte. Es sind die Mittelwerte über die gesamte Versuchszeit. Nebeneinanderliegende

Thermoelemente wurden zusammengefasst. Gemittelt über alle Versuche ergibt sich im beflamnten Bereich eine homogene Temperaturverteilung.

## **5 Referenzversuche**

Das Tragverhalten von 135° und 90° Haken unter Brandbeanspruchung ist stark unterschiedlich. EC 2 erweckt jedoch den Eindruck, dass bei Normaltemperatur kaum ein Unterschied zwischen beiden Hakenformen besteht. Sollte schon bei Normaltemperatur ein unterschiedliches Tragverhalten vorliegen, so hätte dies Einfluss auf die Bewertung des Tragverhaltens im Brandfall. Aus diesem Grund wurden Referenzversuche bei Normaltemperatur durchgeführt, um in Kombination mit alten Versuchen aus München (1968) ein genaueres Bild über das Tragverhalten von Haken gewinnen zu können.

### **5.1 Beschreibung**

Um dem Aufwand gering zu halten wurden nur ungerissene Querschnitte ohne Querstab verwendet.

In Anlehnung an Ausziehversuche an Betonstahlhaken, die 1968 in München durchgeführt wurden, kamen ähnliche Querschnitte wie damals zum Einsatz. Je ein Haken wurde in einen Betonblock der Abmessungen 20 cm x 20 cm x 15 cm einbetoniert. Die Betondeckung nach unten betrug 2 cm. Auf der Oberseite schaute der Haken 40 cm aus der Platte heraus um die Presse anbringen zu können.

Der Verbund zwischen Beton und Stahl war oberhalb der Krümmung mit Gewebepapier geschwächt.

Durchgeführt wurden 6 Versuche, 3 mit 90°- und 3 mit 135° - Haken. Im Unterschied zu den Versuchen in München waren die Versuchskörper nur 15 cm und nicht 20 cm hoch. Die Vergleichbarkeit mit den Brandversuchen war wichtiger als eine exakte Übereinstimmung mit den Münchener Versuchen.

### **5.2 Auswertung und Vergleich mit München**

Bei den 135° Haken versagte ausschließlich der Beton. Es kam zur Spaltung der Versuchskörper (Siehe auch Abbildung 17). Die Abmessungen der Versuchskörper waren zu klein gewählt worden. Die mittlere Maximalbelastung lag bei 27,9 kN.



**Abbildung 27: Referenzversuche nach der Prüfung**

Die 90° Haken versagten durchschnittlich bei 29,7 kN. Wie schon bei den Brandversuchen wurden die Stäbe geradegezogen. In einem Fall kam es zu Stahlversagen.

Die Last- Zeit-Kurven sind in Anhang G) abgebildet.

Die erzielten Lasten liegen alle über dem berechneten Lastniveau und noch über der rechnerischen Maximaltragfähigkeit von 25 kN. Von daher ist die Annahme des Eurocodes, dass beide Haken sich gleich verhalten, korrekt, solange man das Sicherheitskonzept des Eurocodes anwendet. Im realen Grenzzustand der Tragfähigkeit, also kurz vor dem tatsächlichen Versagen, reicht diese Annahme jedoch nicht mehr aus.

1968 wurde an der Technischen Hochschule in München eine Serie Ausziehversuche an Betonstahlhaken durchgeführt. Von den 444 Versuchen erfolgten 315 mit Rippentorstahl III b. Die Materialeigenschaften dieses Stahls sind mit Bst 500A vergleichbar. Die restlichen Versuche erfolgten mit glattem Betonstahl und / oder mit heute irrelevanten Stahlfestigkeiten.

Variiert wurden Betongüte, Lage der Haken zur Betonierichtung, Hakenabmessung, Hakenform und Querstäbe im Krümmungsbereich. Die überwiegend getestete „Normalform“ war ein 180° Haken. 135° und 90° Haken wurden überwiegend als  $\phi 12$  getestet.

Die Abmessungen der Versuchskörper betragen 20 cm x 20 cm x 20 cm. Der Verbund zwischen Betonstahl und Beton war oberhalb der Krümmung aufgehoben (Rehm et al. 1968).

Von den 30 mit  $\phi 12$  durchgeführten Versuchen waren fünfzehn 90° und fünfzehn 135° Haken. Bei den Versuchen mit  $\phi 8$  handelte es sich um drei 90° Haken.

Die überwiegende Versagensursache für 90° Haken war Stahlbruch. Bei 16 Versuchen versagte der Stahl, bei 2 der Beton. Bei den 135° Haken kam es 9-mal zu Stahlbruch und 6-mal zu Betonbruch.

Das Versagen der 90° Haken stimmt mit den Referenzversuchen überein. Bei den 135° Haken liegen die Ergebnisse jedoch etwas auseinander. Ein Vergleich der Betonfestigkeiten liefert keine Erklärung. Bei unseren Versuchen betrug diese 27,3 N/mm<sup>2</sup>, bei den Versuchen in München schwankte die Festigkeit zwischen 26 N/mm<sup>2</sup> und 43,8 N/mm<sup>2</sup>. Grund für das unterschiedliche Verhalten der Versuchskörper wird die Höhe der Probekörper sein. 5 cm Differenz liegen zwischen den Münchner Versuchskörpern und unseren Referenzversuchen. Dies entspricht einem Drittel des Querschnitts.

## **6 Vereinfachte Simulation**

Die Messungen in den Platten beschränkten sich auf die Temperatur in Höhe des Stahls. Es war jedoch nicht möglich mit den gegebenen Werten ein exaktes Temperaturprofil der Platte zu gewinnen. Vor allem die Temperaturverteilung in direkter Nähe zum Stahl konnte damit nicht ermittelt werden.

Um eine bessere Vorstellung davon zu erhalten wurde eine thermische Simulation durchgeführt. Mit dem Programm HEAT2 8.0 wurden jeweils ein 90° und ein 135° Haken in der Platte modelliert. Die Betrachtung beschränkt sich auf zwei Dimensionen. Über der Plattenoberkante wurden noch 10 cm Luft mitmodelliert.

An der Plattenunterseite sind 900°C angesetzt, an der oberen Grenzschicht 20°C. Die Starttemperatur betrug 20°C. Die Materialeigenschaften von Stahl, Beton und der Luftschicht beruhen auf einer Datenbank nach DIN 4108-4. Diese Datenbank ist nur bedingt geeignet, da die Hochtemperaturbereiche der Werkstoffe dort nicht erfasst sind. Änderungen der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmespeicherkapazität werden in dieser Datenbank nicht berücksichtigt. Exakte Ergebnisse sind damit nicht möglich. Für einen Überblick reicht sie jedoch aus. Simuliert wurde eine Stunde mit einem Aufzeichnungsintervall von einer Sekunde.

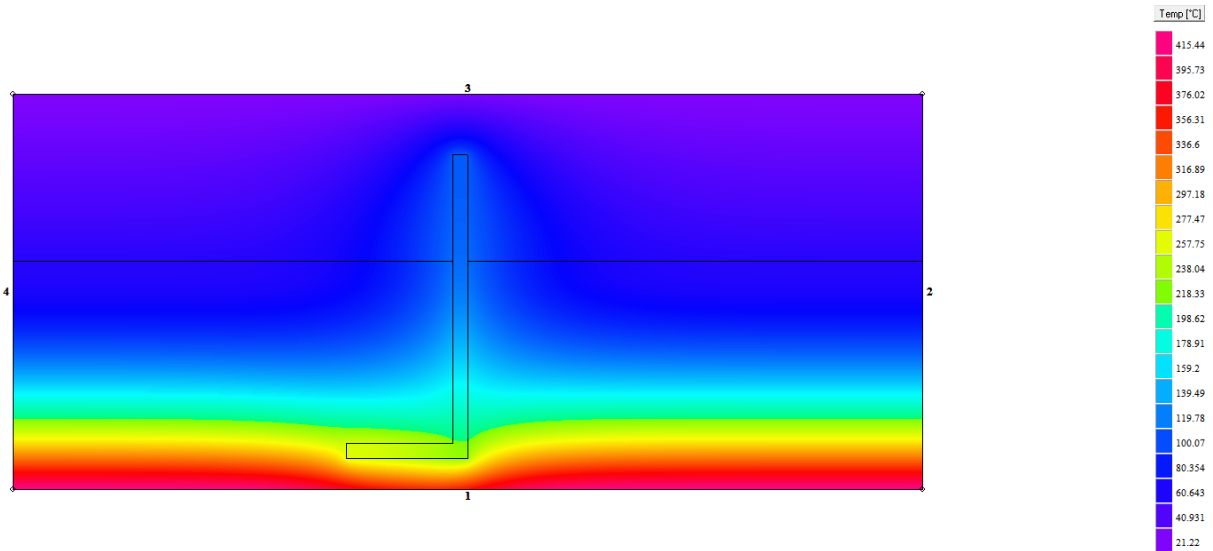


Abbildung 28: Temperatur 90° Haken

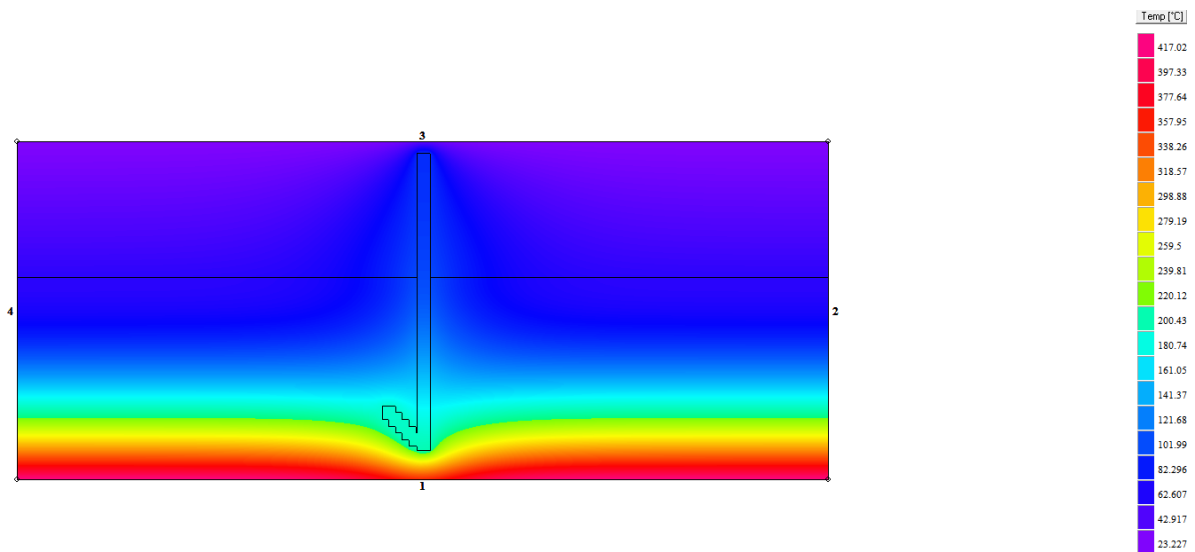


Abbildung 29: Temperatur 135° Haken

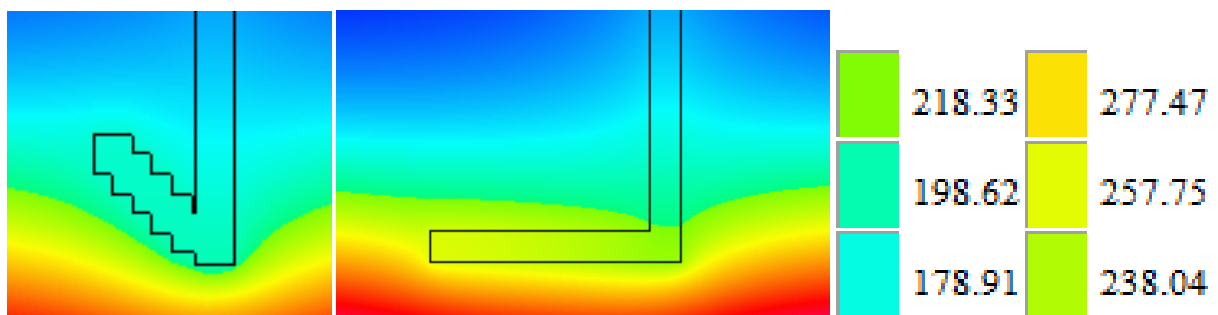


Abbildung 30: Detailansicht Verankerungsbereich

Die Temperaturskalen sind bei beiden Ergebnisgrafiken identisch. Der Bereich in dem der Haken Einfluss auf die Temperaturverteilung nimmt ist in etwa der 2-fache Stabdurchmesser. Mit nachträglich eingebrachten Thermoelementen wäre dieser Bereich nicht erfassbar gewesen.

Gut zu erkennen ist, dass der 135° Haken kühler als der 90° Haken bleibt. Der Unterschied beläuft sich auf etwa 60°C in der Krümmung. Eine 3-dimensionale Simulation oder eine 2-dimensionale mit erhöhter Genauigkeit der Geometrie wird sicherlich exaktere Werte der Temperaturverteilung liefern, am Unterschied zwischen beiden Biegeformen wird sich grundsätzlich jedoch nichts ändern.

## 7 Fazit

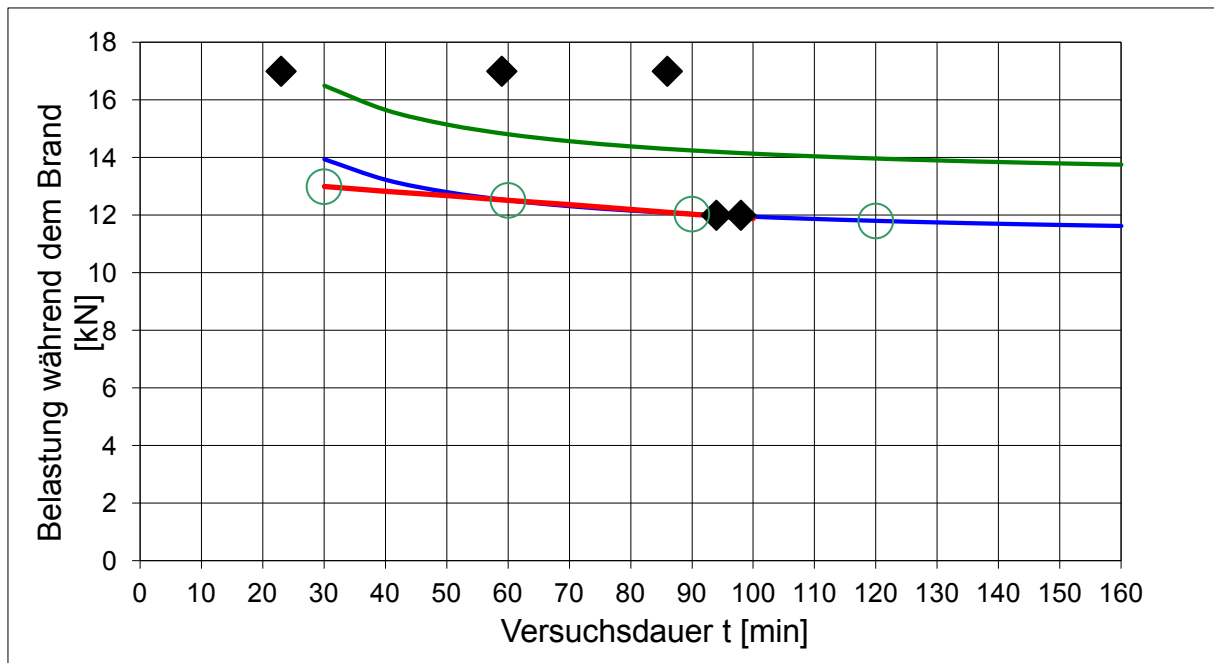
**Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse**

Nr.	Winkel	Querstab/ Riss?	Prüflast	Versagens- zeitpunkt	Resttragfähigkeit	Versagensart
90_U1_1	90°	Nein	5,25 kN	-	12,1 kN	Aufbiegen
90_U1_2	90°	Nein	5,25 kN	-	12,4 kN	Aufbiegen
90_U2_1	90°	Nein	17 kN	23 Minuten	-	Aufbiegen
90_U2_2	90°	Nein	17 kN	59 Minuten	-	Aufbiegen
90_Q1_1	90°	Ja	17 kN	86 Minuten	-	Aufbiegen
90_Q1_2	90°	Ja	12 kN	-	14 kN	Aufbiegen
90_Q2_1	90°	Ja	12 kN	98 Minuten	-	Aufbiegen
90_Q2_2	90°	Ja	12 kN	94 Minuten	-	Stahlbruch
135_U1_1	135°	Nein	5,25 kN	-	22,2 kN	Stahlbruch
135_U1_2	135°	Nein	5,25 kN	-	21,4 kN	Stahlbruch
135_U2_1	135°	Nein	17 kN	-	18,4 kN	Aufbiegen
135_U2_2	135°	Nein	17 kN	-	25,4 kN	Stahlbruch
135_Q1_1	135°	Ja	12 kN	-	19,6 kN	Stahlbruch
135_Q1_2	135°	Ja	17 kN	-	24,5 kN	Stahlbruch
135_Q2_1	135°	Ja	17 kN	-	25,6 kN	Stahlbruch
135_Q2_2	135°	Ja	17 kN	-	27 kN	Stahlbruch

Für die 90°-Haken war es möglich den Verlauf der Tragfähigkeit nach TR 020 der EOTA zu bestimmen (siehe auch Abbildung 31). Dieser Bericht befasst sich mit der Tragfähigkeit von Verankerungselementen unter Brandlast.

Für die 135°-Haken war dies leider nicht möglich, da diese während dem Versuch nicht versagten.





**Abbildung 31: Auswertung 90°-Haken**

Die schwarzen Rauten sind die gemessenen Zeitpunkte des Versagens. Die Regressionskurve ist in grün dargestellt. Die blaue Kurve ist die durch den niedrigsten Versuchswert verschobene Regressionskurve. Mit den Schnittpunkten der blauen Kurve mit den Versuchsdauern von 60 und 90 Minuten wurde die rote Gerade definiert. Diese beschreibt die Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung. Mit den grünen Kreisen sind die Werte für R30, R60, R90 und R120 markiert (European Organisation for technical Approvals 2004).

Für die 135°-Haken konnte ein solcher Verlauf nicht bestimmt werden, da während der Versuche kein Versagen eintrat. Die mittlere Resttragfähigkeit lag bei 23 kN. Die Standardabweichung betrug 3,06 kN. Mit einem Variationskoeffizienten von 0,133 liegen die Ergebnisse in einem guten Bereich. Der charakteristische Wert für die Tragfähigkeit von 135°-Haken bei Branddauern länger als 110 Minuten beträgt auf Grundlage der Versuchsergebnisse 15 kN. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage von (DIN EN 1990).

Das Gebrauchslastniveau für einen Haken unabhängig von seiner Verankerungsgeometrie liegt bei ausreichender Verankerungslänge bei 15,5 kN. Bei einem Querschnitt  $\phi 8$  ergibt sich eine maximale Tragfähigkeit von 25 kN. Unter Berücksichtigung von den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_g = 1,35$ ,  $\gamma_q = 1,5$ ,  $\gamma_s = 1,15$  und  $\gamma_{g+q} = 1,4$  (Annahme da  $E_{GK}$  und  $E_{QK}$  unbekannt) ergibt sich eine zulässige Last von  $25 \text{ kN} / 1,4 / 1,15 = 15,5 \text{ kN}$ .

Dieser Wert ist für 90°-Haken unter Brandlast unerreichbar. Für die 135°-Haken sollte er zumindest 90 Minuten lang schaffbar sein. Weitere Versuche werden unerlässlich sein um genauere Aussagen über die Tragfähigkeit treffen zu können.

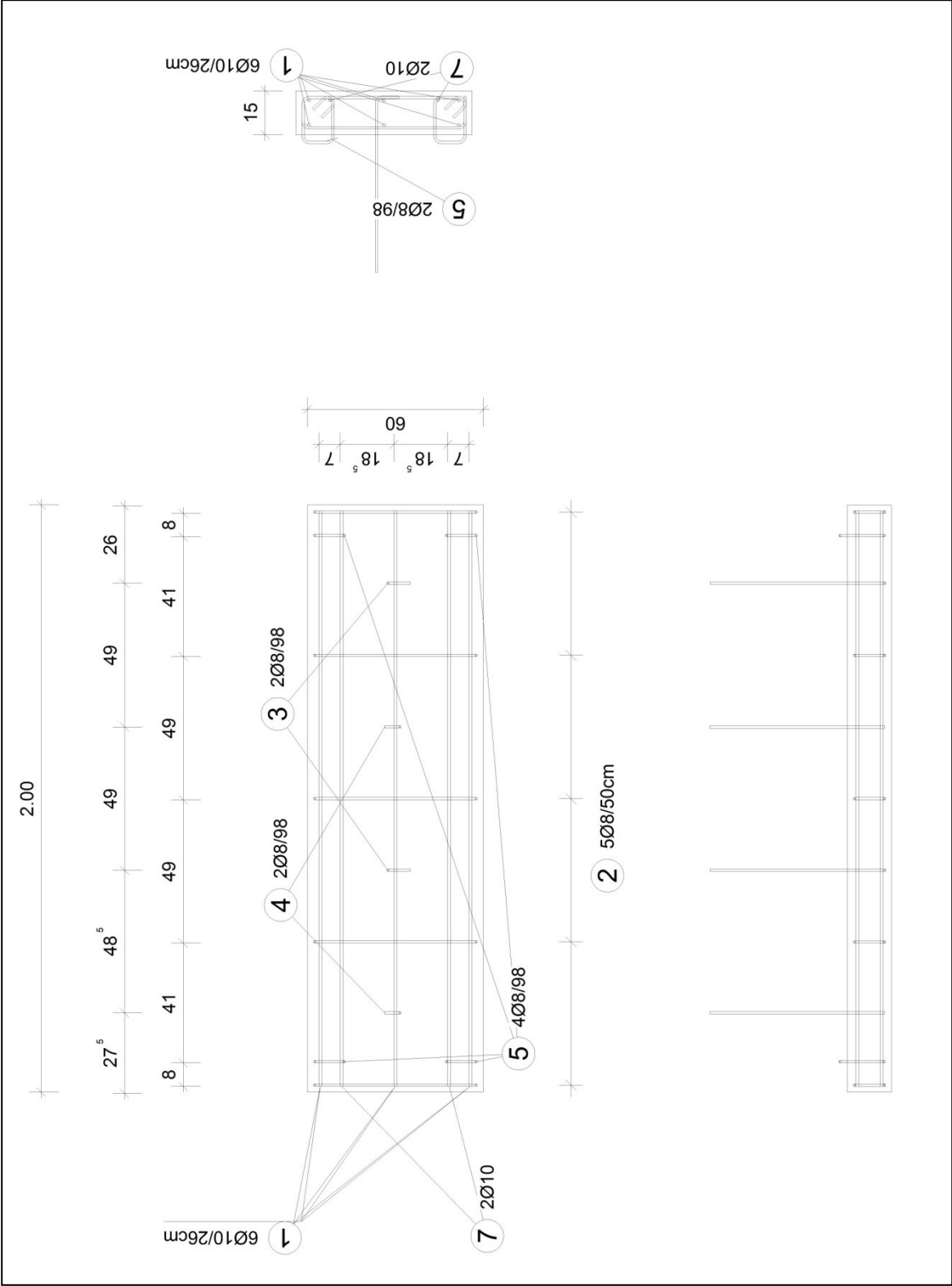
Auf Grundlage der Ergebnisse wird empfohlen auf die Verwendung von 90°-Haken bei erhöhten Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer zu verzichten.

## **8 Schlussbemerkung**

Vor Beginn der Versuche bestand die Vermutung, dass 135° Haken unter Brandlast eine höhere Tragfähigkeit aufweisen als 90° Haken. Die Versuche bestätigen diese Vermutung. Die Tragfähigkeit von 135° Haken ist unter Brandlast fast doppelt so hoch wie die von 90° Haken. Ein exaktes Verhältnis oder gar ein Rechenmodell kann auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht ermittelt werden. Die Ergebnisse sind vielmehr eine Grundlage für mögliche weitergehende Versuche. Denn es wurden weitere Fragen aufgeworfen, die zum Verständnis von Verankerung unter Brandlast wichtig sind: Wie beeinflussen die Betonfestigkeit und die Betonzusammensetzung das Tragverhalten der Haken? Welchen Einfluss haben Risse bzw. ab welcher Rissweite haben Risse Einfluss? Ändert sich das Tragverhalten wenn der Querschnitt stärker bewehrt wird, der Haken also nicht mehr in einem ungestörten Betonquerschnitt liegt? Wie ändert sich das Tragverhalten wenn Plattendicke und Plattenaufbau variiert werden?

Alles durchaus noch wichtige Fragen die geklärt werden müssen.

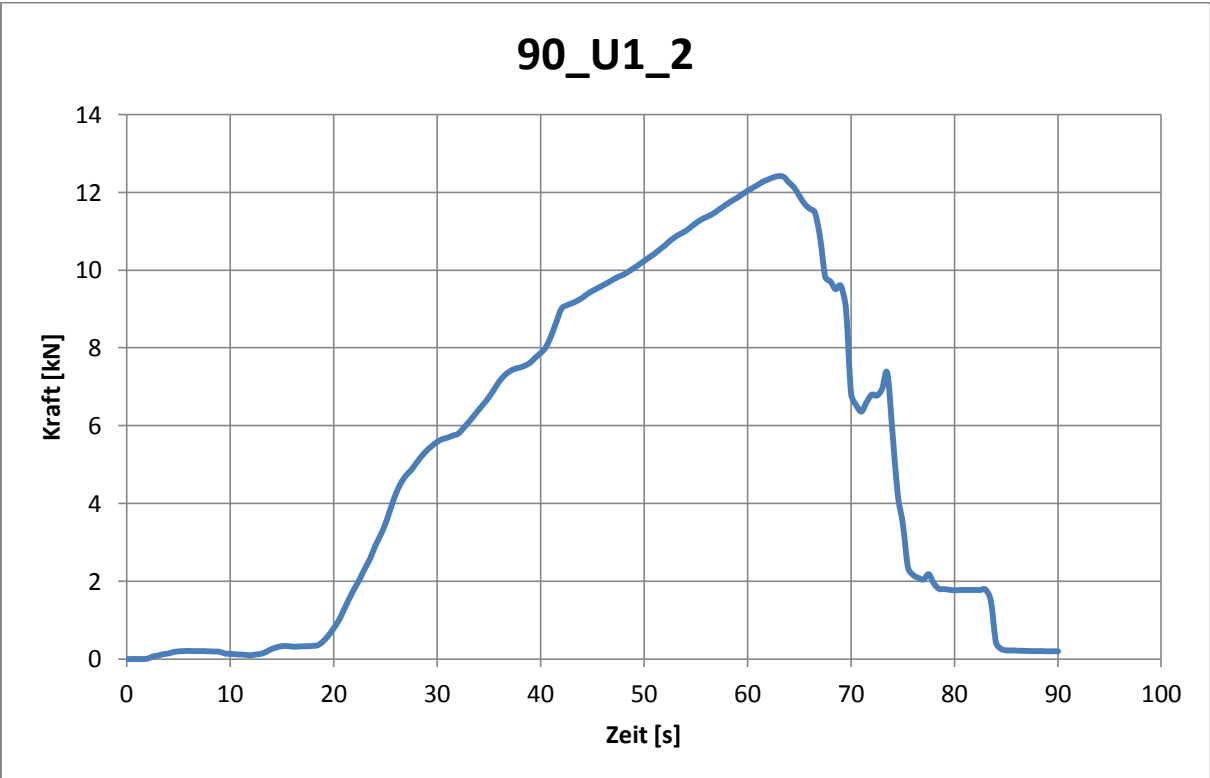
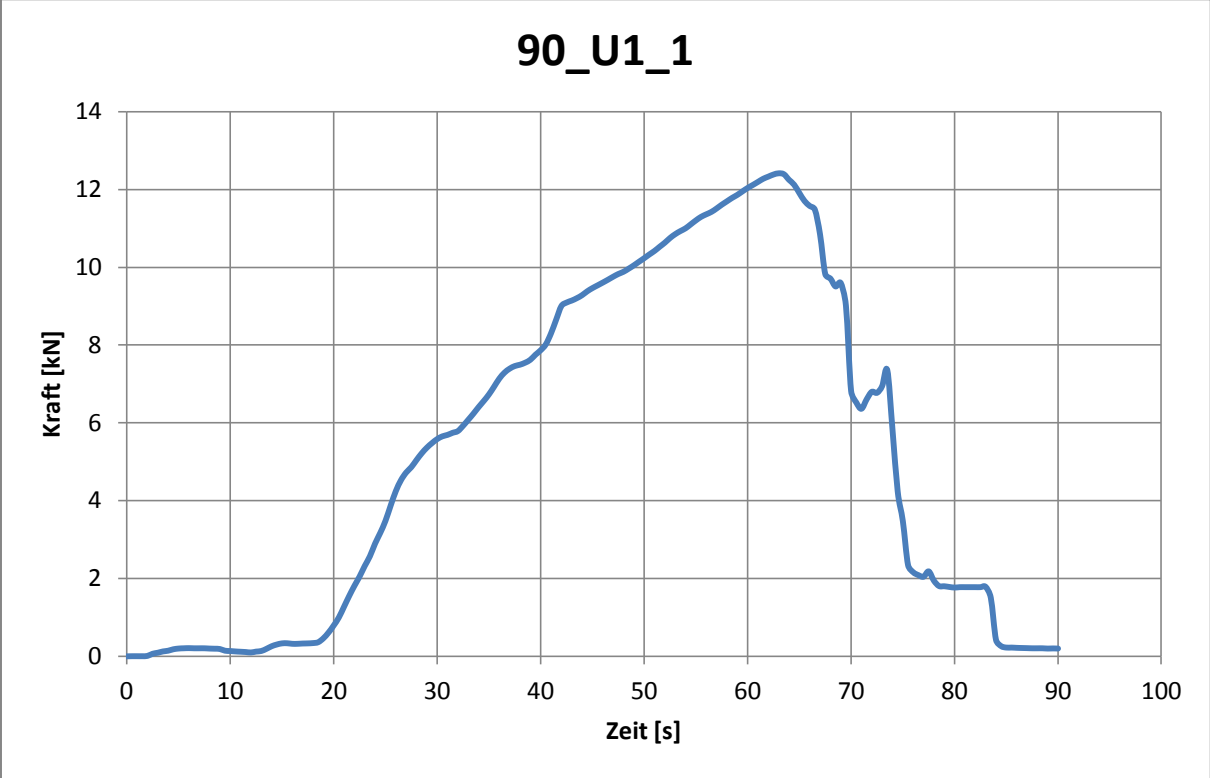
# A) Bewehrungsplan und Schnittzeichnungen

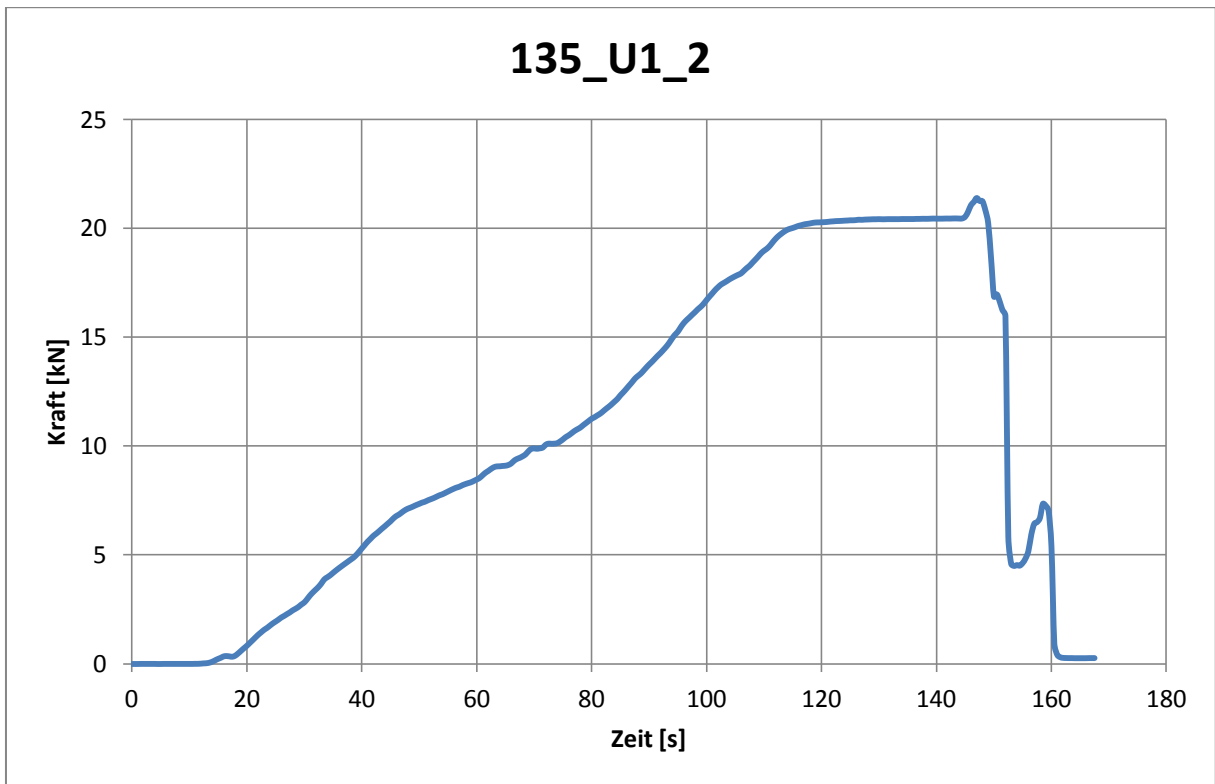
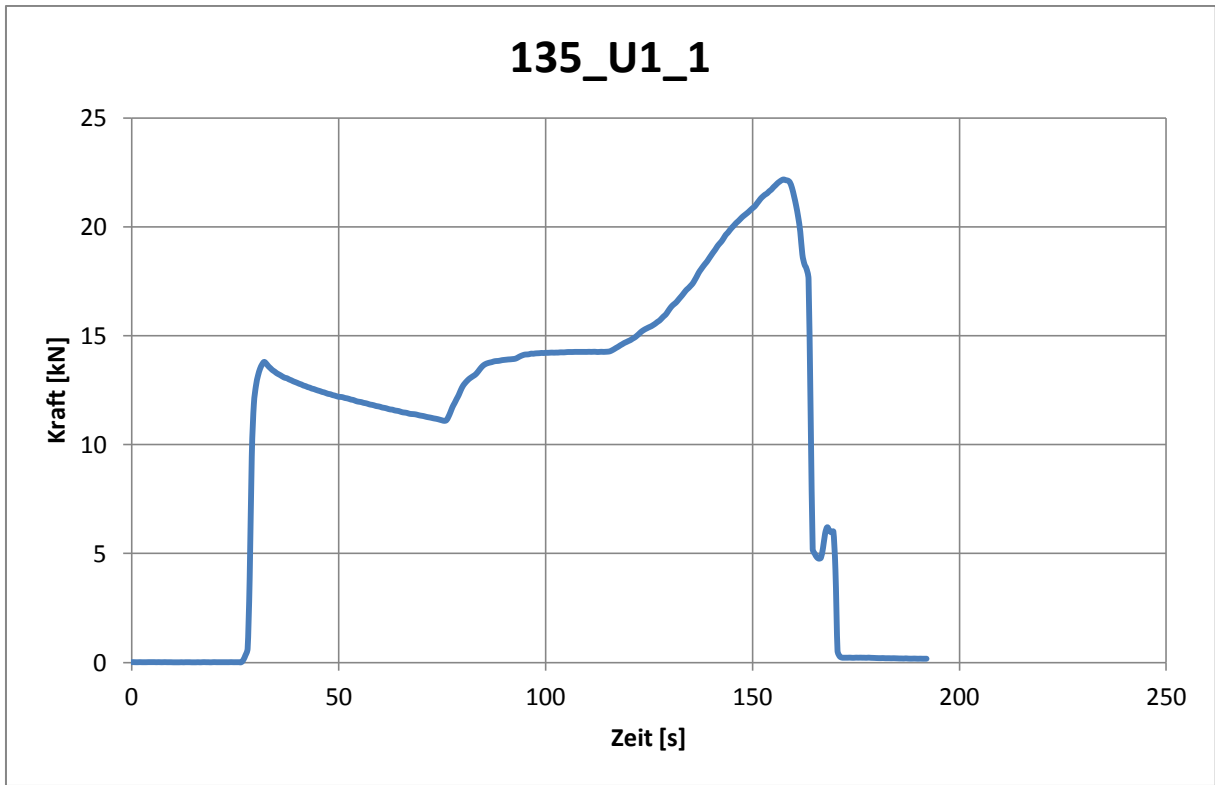


## B) Rissweiten

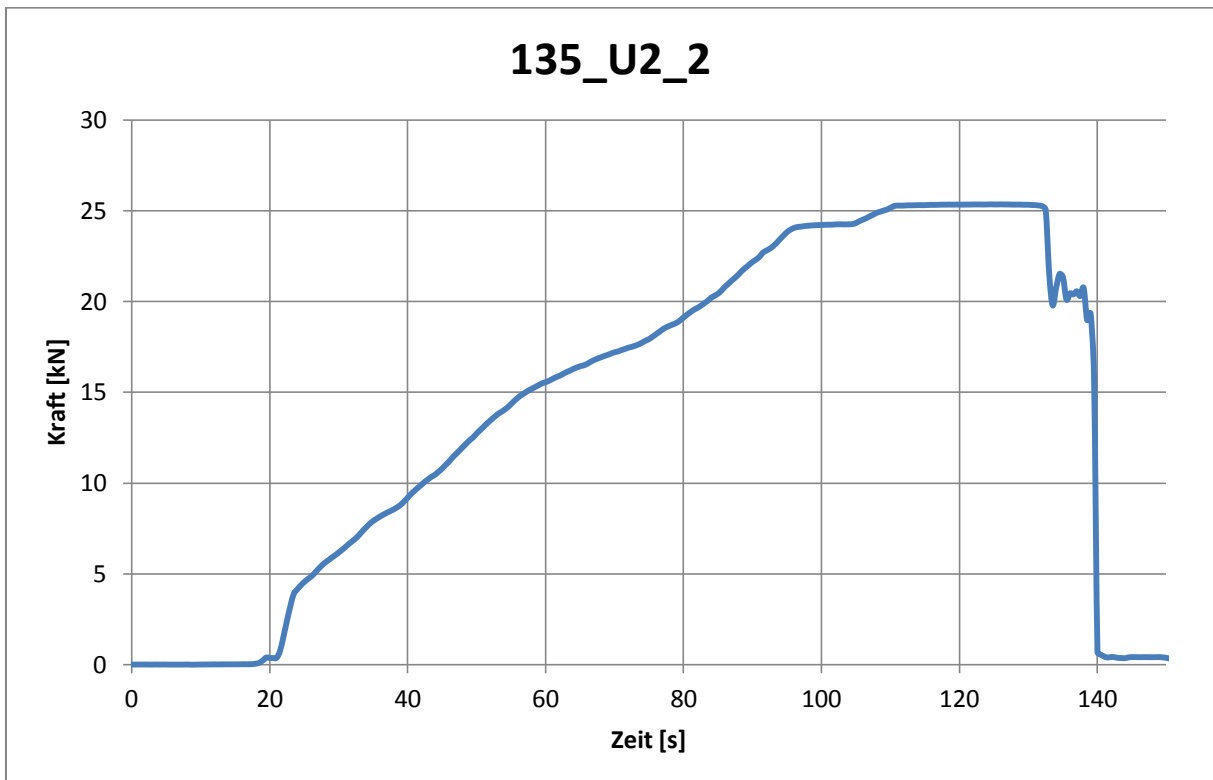
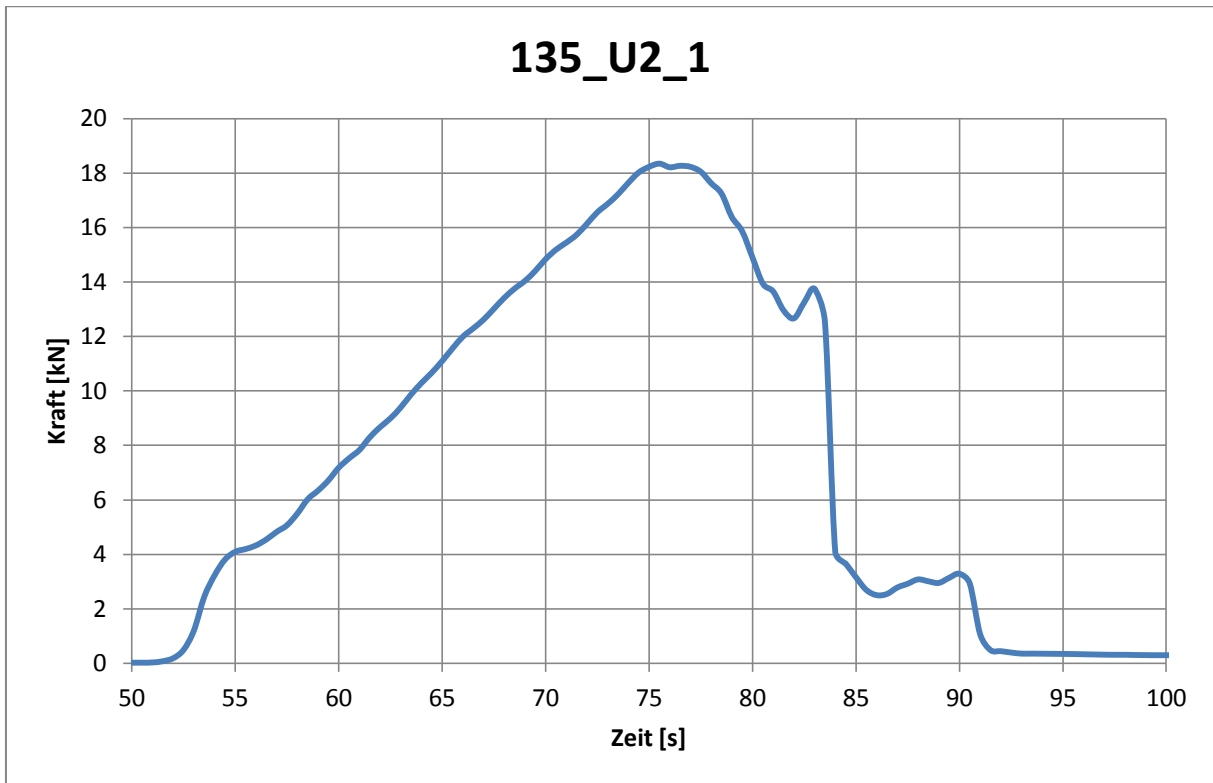
Tatsächliche Rissbreiten x0,01 mm				
Q1 Mittlere Rissbreite		23,125		
		Uhr links	Uhr rechts	Mittelwert
Riss 1	gesetzt	30	30	30
	verfüllt	-4	-5	-4,5
	Summe			25,5
Riss 2	gesetzt	31	31	31
	verfüllt			-5
	Summe			26
Riss 3	gesetzt	30	30	30
	verfüllt			-6
	Summe			24
Riss 4	gesetzt	31	29	30
	verfüllt			-13
	Summe			17
Q2 Mittlere Rissweite		21,375		
		Uhr links	Uhr rechts	Mittelwert
Riss 1	gesetzt	34	12	23
	verfüllt			-1
	Summe			22
Riss 2	gesetzt	29	31	30
	verfüllt			-9
	Summe			21
Riss 3	gesetzt	33	30	31,5
	verfüllt	-3	-7	-10
	Summe			21,5
Riss 4	gesetzt	31	31	31
	verfüllt			-10
	Summe			21

C) Resttragfähigkeit U1

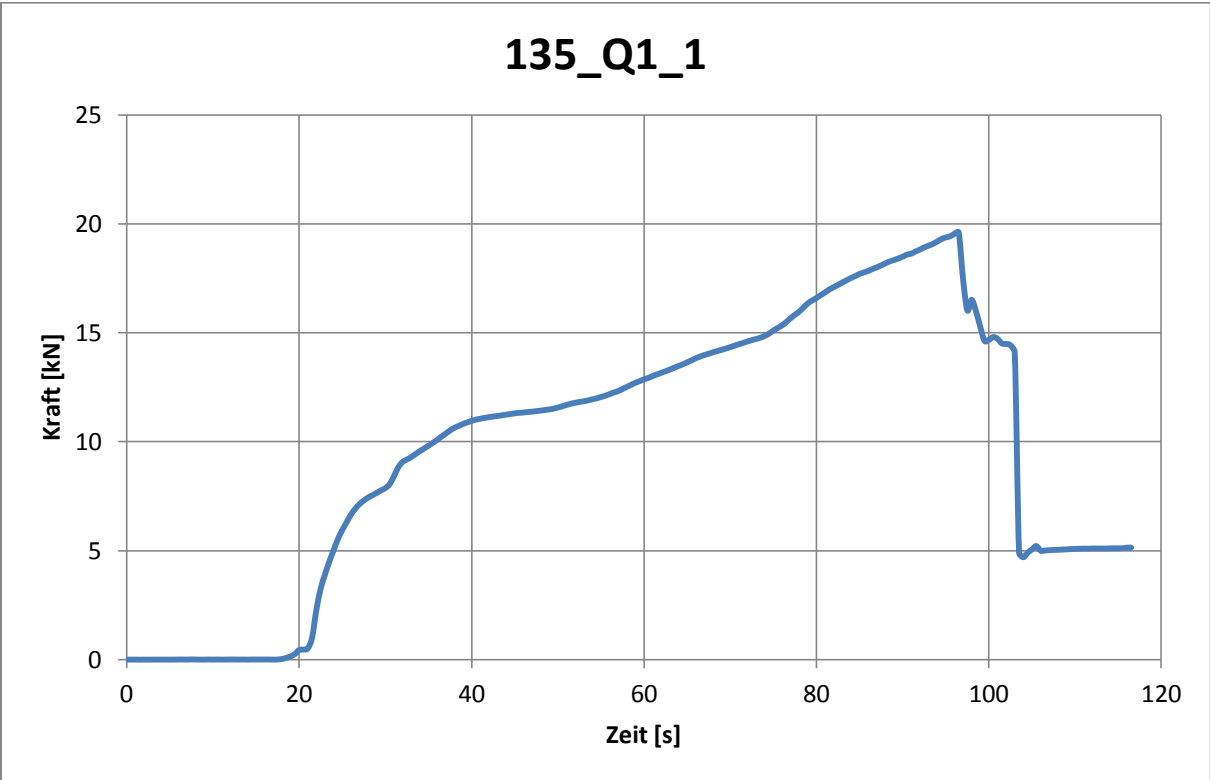
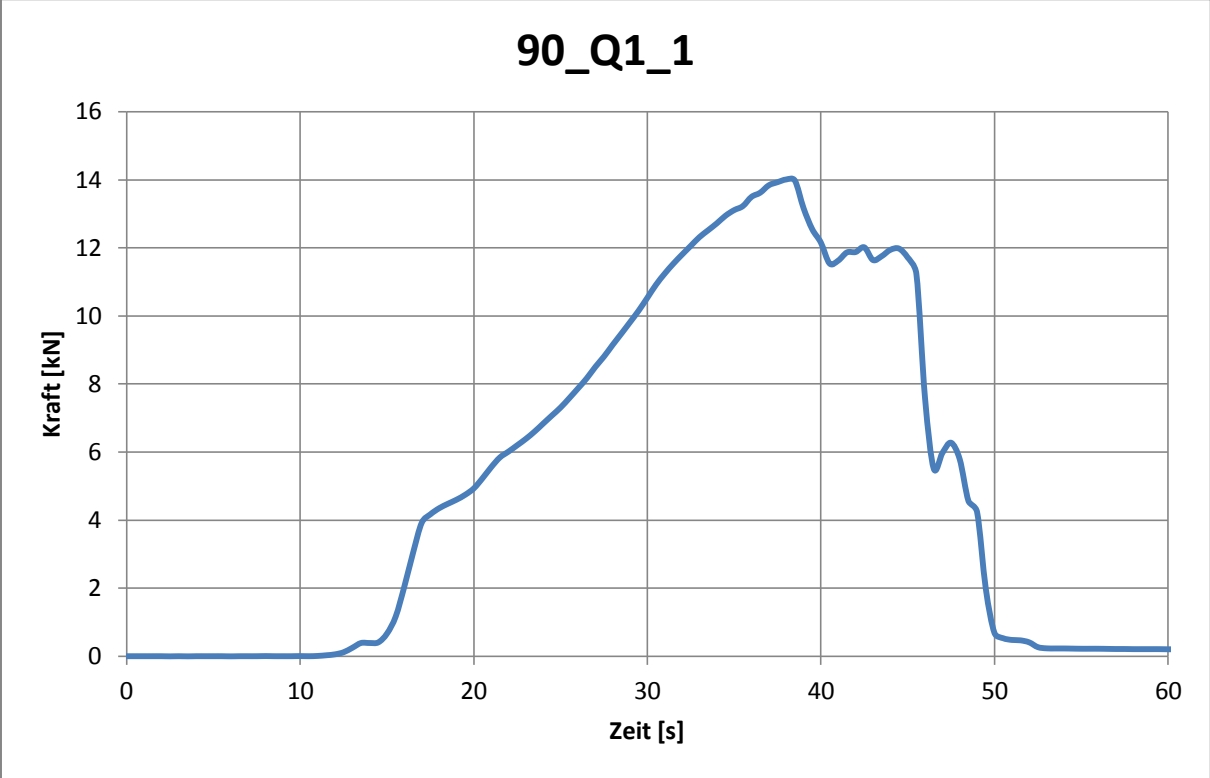




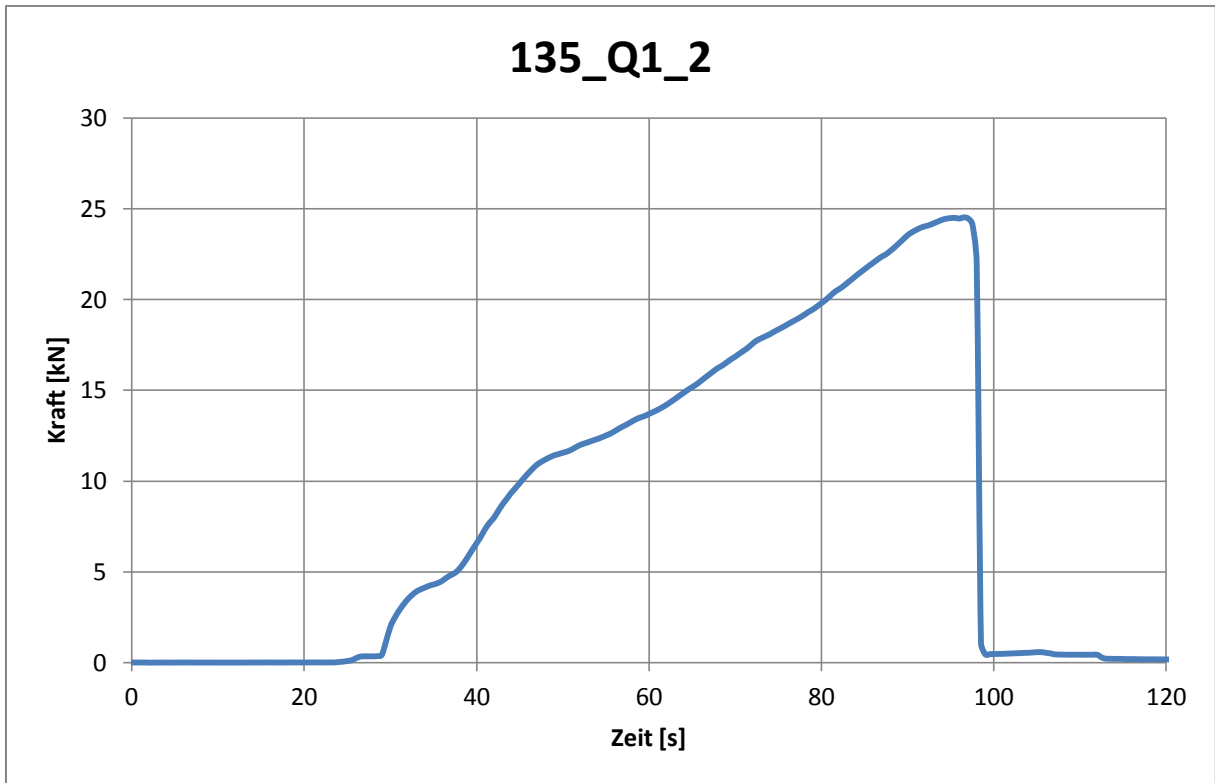
### D) Resttragfähigkeit U2



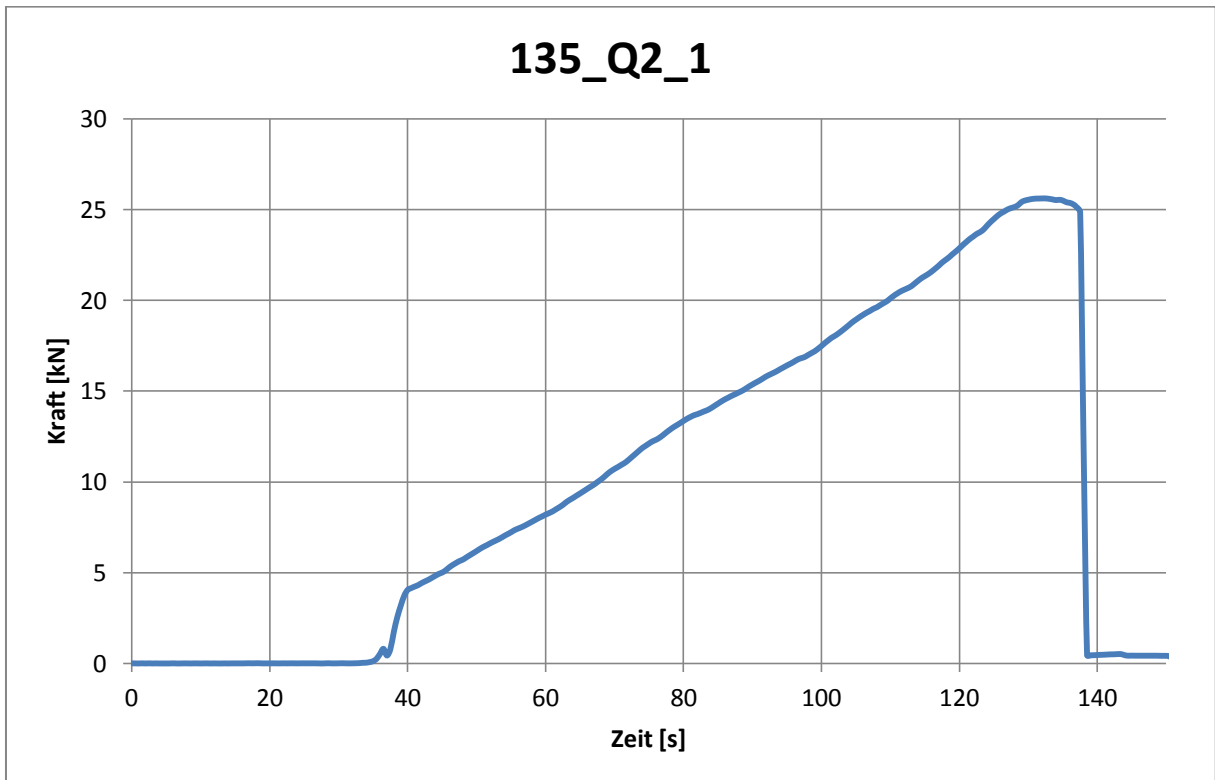
E) Resttragfähigkeit Q1



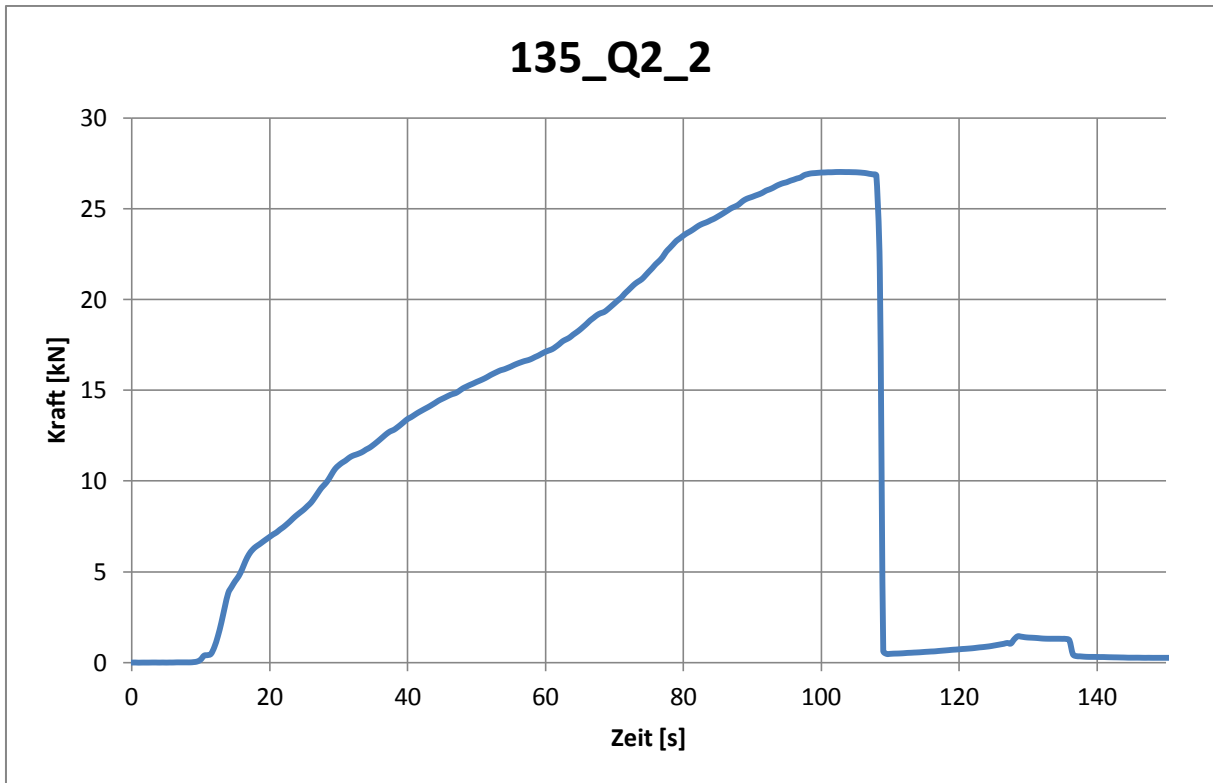




#### F) Resttragfähigkeit Q2



# 135\_Q2\_2



## G) Betonfestigkeiten

Festigkeit der Würfel von U1 und U2

Projekt-Nr.:	Massivbau ; Schilly 29.08.13		
Auftraggeber:	V. Götz, C. Thiele		
Prüfer / Helfer:	H. Altpeter		
Baustelle / Überwachungsprüfung:			
Zu erwartende Festigkeitsklasse:	≤ C50/60	≥ C55/67	keine Angabe
Lagerungsbedingung:	Wasser	trocken	sonst.
Druckflächen abgeglichen/abgeschliffen:			
Herstelltag	Prüftag	Anliefertag	Prüfalter
	22.10.13		

### DIN EN 12390-1

Nennmaß $d$ [mm]	150
------------------	-----

Zulässige Abweichungen vom Nennmaß  
 $d_x$ : 0,0 mm     $d_y$ : 0,0 mm     $d_z$ : 0,0 mm

#### Faktoren

Formfaktor

Faktor für Lagerung

Bei kalibrierten Formen entfällt die Überprüfung der Ebenheit und Rechtwinkligkeit

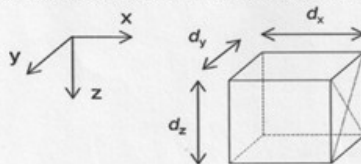
Bezeichnung	Abmessung in Prüflage			Ebenheit $\pm 0,0006 d$		Rechtwinkligkeit $\pm 0,5 \text{ mm}$	
	$d_x$ [mm]	$d_y$ [mm]	$d_z$ [mm]	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
1	150,2	150,0	149,8				
2	150,0	149,9	150,0				
3	150,4	150,1	150,2				

### DIN EN 12390-3, DIN EN 12390-7

Bezeichnung	Masse	Volumen	Rohdichte	Druckfläche	Höchstkraft	Druckfestigkeit $f_c$	
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> ·10 <sup>3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	Versuch [N/mm <sup>2</sup> ]	DIN 1045 [N/mm <sup>2</sup> ]
1	7,256				558800		
2	7,205				564600		
3	7,289				426300		
Mittelwert							

Bemerkungen	
-------------	--

In Prüflage senkrecht zur Einfüllrichtung (Markierte Seite = Einfüllrichtung Beton)



Anforderungen an die Ebenheit

$d$	$0,0006 d$
100	0,06
150	0,09
200	0,12
250	0,15
300	0,18

Datum, Unterschrift

H. Altpeter

# Festigkeit der Würfel von Q1 und Q2

## FOR 22-300 Druckfestigkeit und Rohdichte (Würfel) nach DIN EN 12390-3 und DIN EN 12390-7

Projekt-Nr.:	Studienarbeit Hr. Schilly		
Auftraggeber:	U. Götz / C. Thiele		
Prüfer / Helfer:	Zimmermann		
Baustelle / Überwachungsprüfung:			
Zu erwartende Festigkeitsklasse:	$\leq$ C50/60	$\geq$ C55/67	keine Angabe
Lagerungsbedingung:	Wasser	trocken	sonst.
Druckflächen abgeglichen/abgeschliffen:			
Herstelltag	28.8.13	Prüftag	28.10.13
Anliefertag	25.10.13	Prüfalter	

### DIN EN 12390-1

Nennmaß $d$ [mm]	150
------------------	-----

Zulässige Abweichungen vom Nennmaß  
 $d_x$ : 0,0 mm     $d_y$ : 0,0 mm     $d_z$ : 0,0 mm

#### Faktoren

Formfaktor

Faktor für Lagerung

Bei kalibrierten Formen entfällt die Überprüfung der Ebenheit und Rechtwinkligkeit

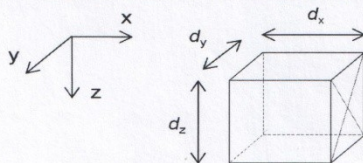
Bezeichnung	Abmessung in Prüflage			Ebenheit $\pm 0,0006 d$		Rechtwinkligkeit $\pm 0,5 \text{ mm}$	
	$d_x$ [mm]	$d_y$ [mm]	$d_z$ [mm]	erfüllt	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
1	150,0	150,3	149,7	X		X	
2	152,0	150,0	150,2	X		X	
3	151,2	149,7	149,7	X		X	

### DIN EN 12390-3, DIN EN 12390-7

Bezeichnung	Masse	Volumen	Rohdichte	Druckfläche	Höchstkraft	Druckfestigkeit $f_c$	
	$m$ [kg]	$V$ [m <sup>3</sup> · 10 <sup>-3</sup> ]	$D$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	$F$ [N]	Versuch [N/mm <sup>2</sup> ]	DIN 1045 [N/mm <sup>2</sup> ]
1	7,368				680 000		
2	7,483				638 100		
3	7,384				589 900		
<b>Mittelwert</b>							

Bemerkungen	
-------------	--

In Prüflage senkrecht zur Einfüllrichtung (Markierte Seite = Einfüllrichtung Beton)



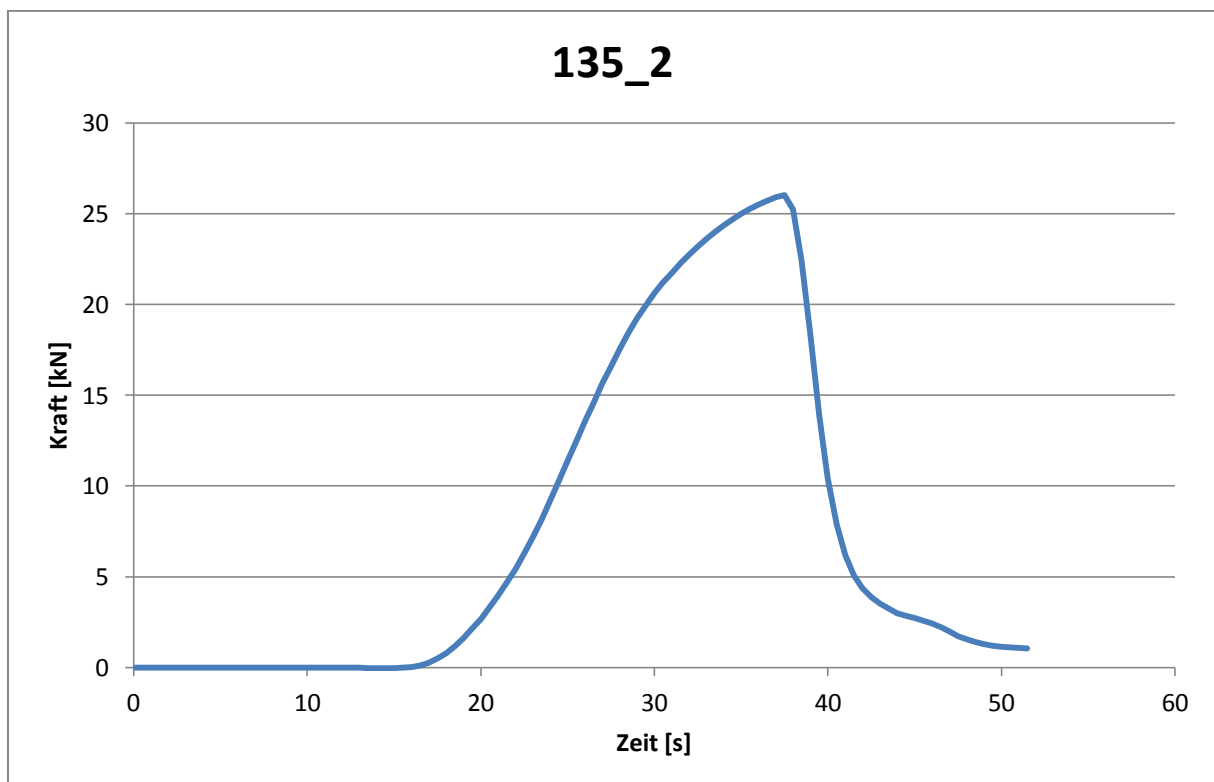
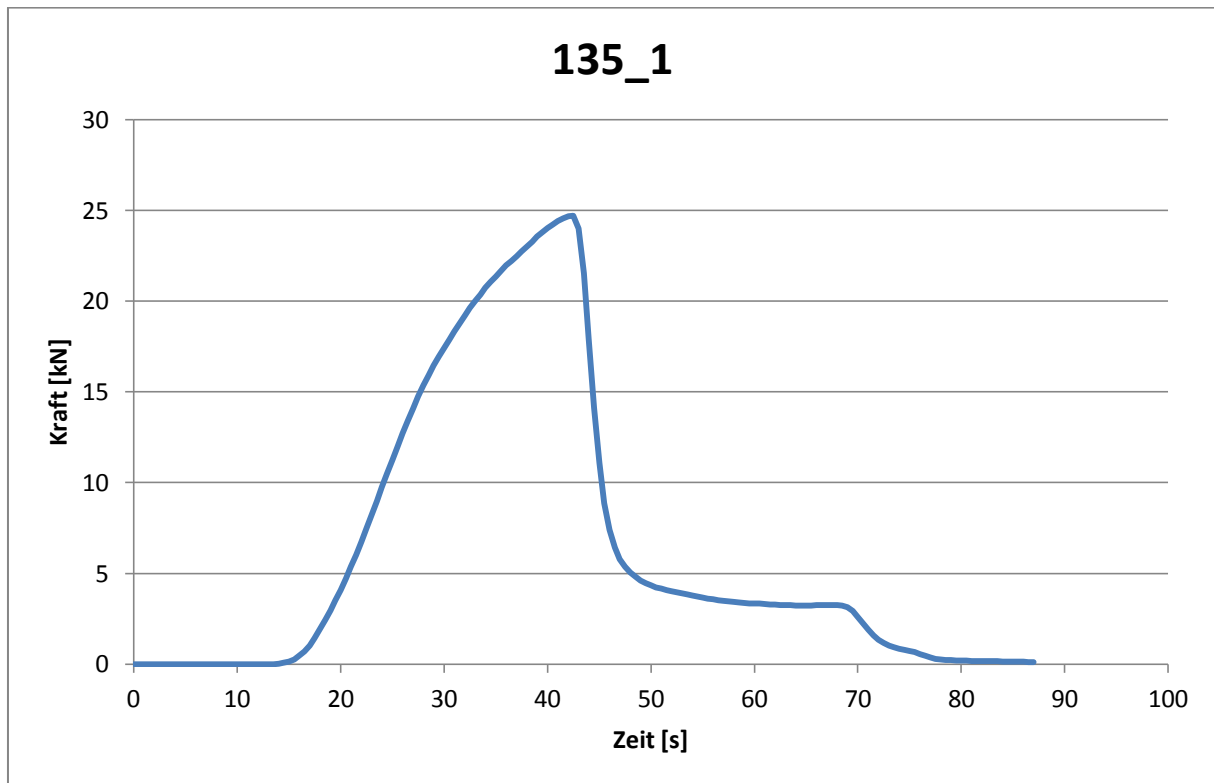
#### Anforderungen an die Ebenheit

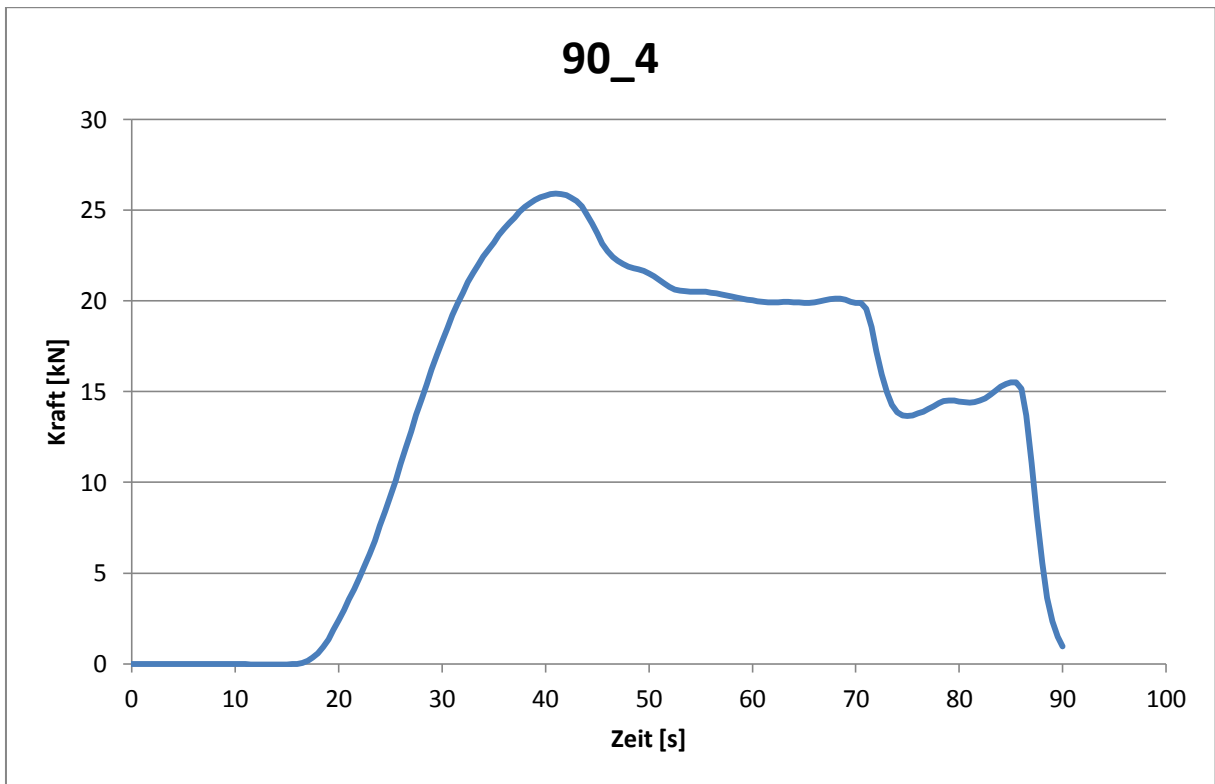
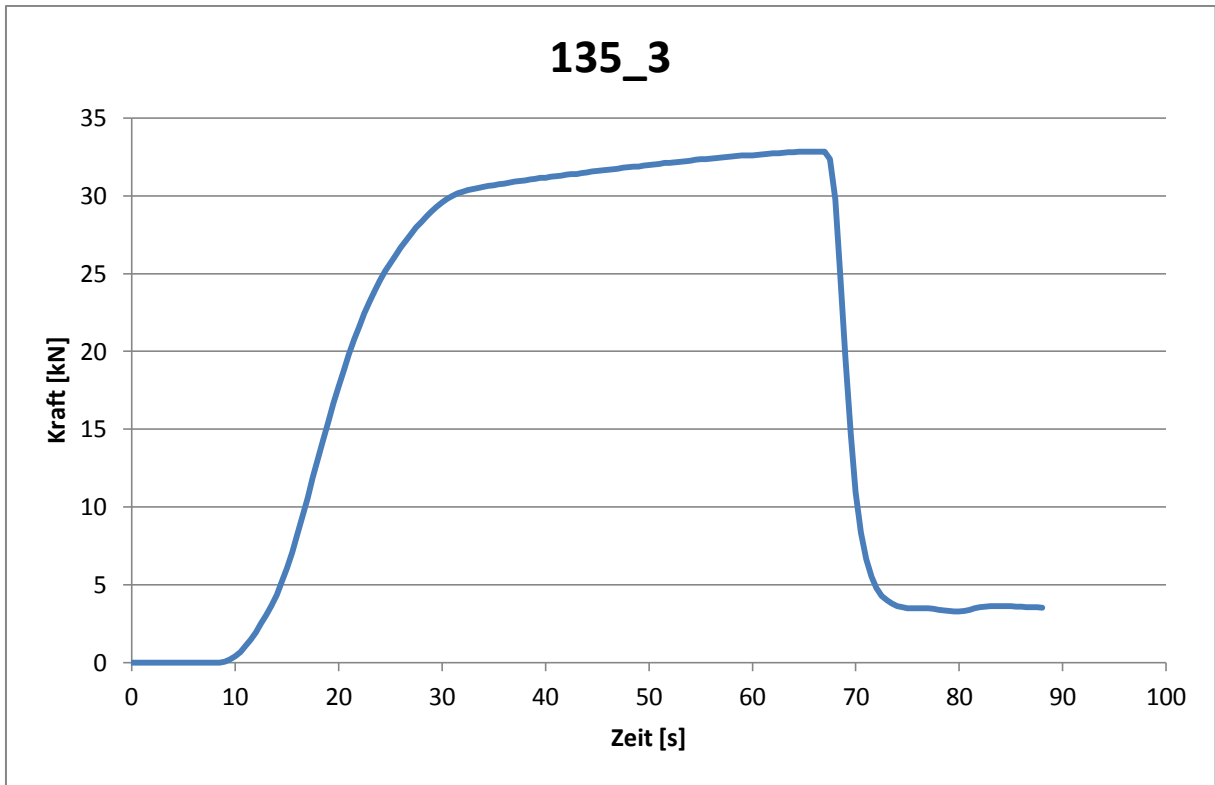
$d$	$0,0006 d$
100	0,06
150	0,09
200	0,12
250	0,15
300	0,18

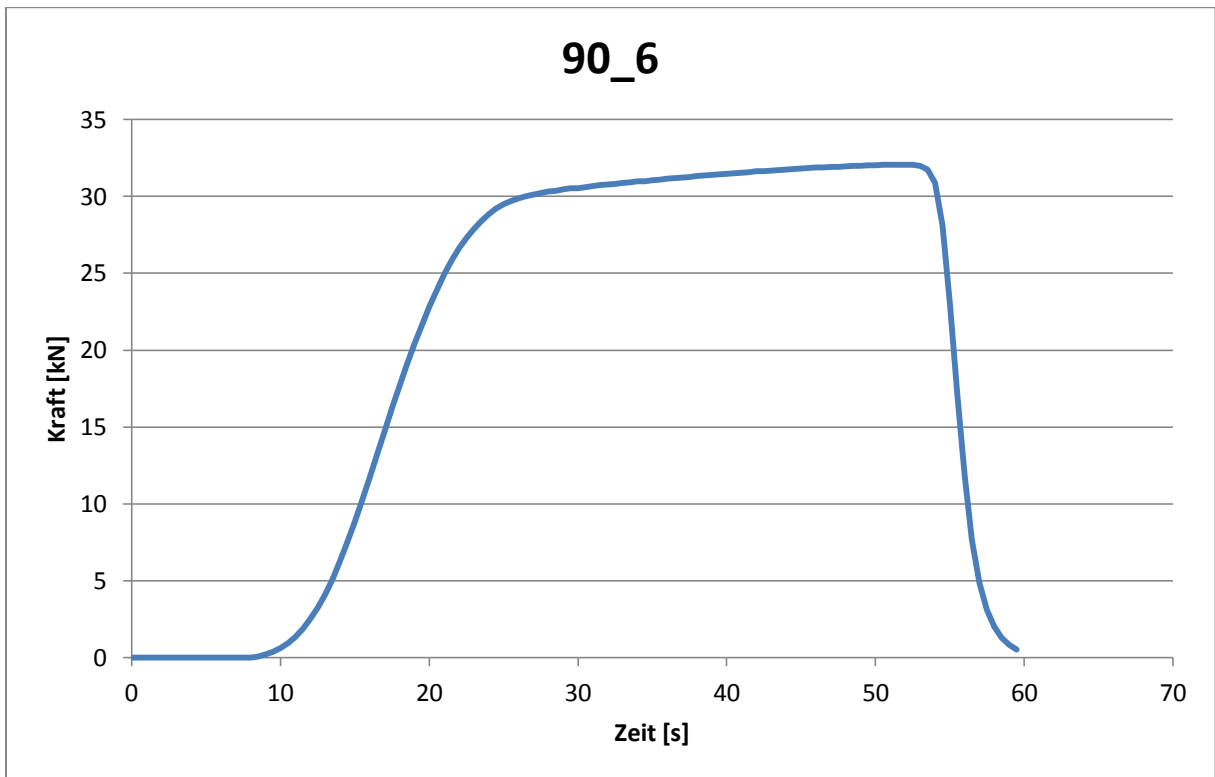
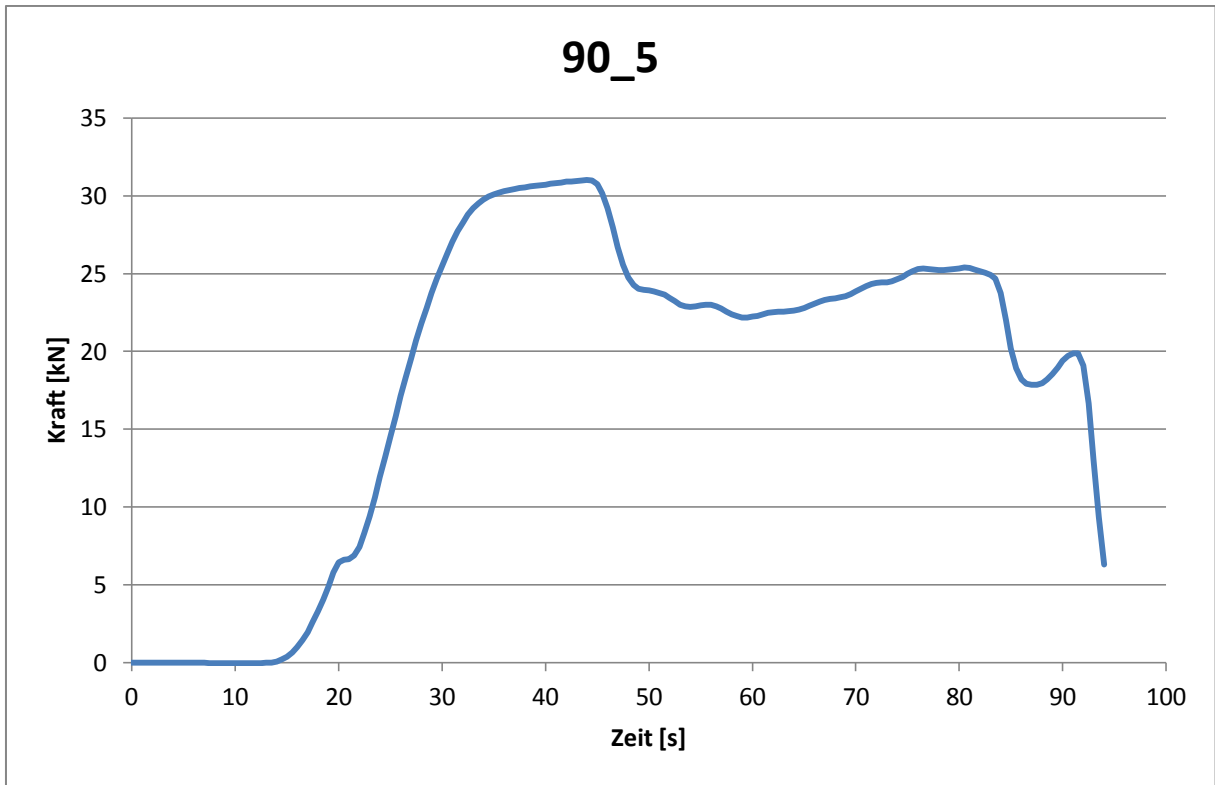
Datum, Unterschrift \_\_\_\_\_

## H) Referenzversuche

Die erste Zahl im Diagrammtitel gibt den Winkel des Hakens an, die zweite die Nummer des Versuchs.







## 9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Haken mit Gewebekband zur Verbundschwächung S.4: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 2: Platte mit Durchstanzbewehrung S.4: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 3: Querkraftbewehrung im Feld S.5: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 4: Skizze Versuchsaufbau S.5: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 5: Tabelle 5.8 aus DIN EN 1992-1-2 S.7: DIN EN 1992-1-2:2011-01
- Abbildung 6: Würfelgewicht S.8: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 7: Messpunkte U1 S.11:Tobias Schilly 2013
- Abbildung 8: Verlauf der Temperatur S.12: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 9: Verlauf der Kraft S.13: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 10: Verlauf der Verformungen S.13: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 11: 90° Haken nach Versuch S.15: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 12: Resttragfähigkeit 90\_U1\_2 S.15: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 13: Messpunkte U2 S.16: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 14: Verlauf der Temperatur S.18: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 15: Verlauf der Kraft S.19: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 16                      Abbildung 17: S.20: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 18:Resttragfähigkeit 135\_U2\_2 S.20: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 19: Messpunkte Q1 S.21: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 20: Verlauf der Temperatur S.23: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 21: Verlauf der Kraft S.23: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 22: Messpunkte Q2 S.24: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 23: Verlauf der Temperatur S.26: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 24: Verlauf der Kraft S.26: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 25: U1 nach Versuch S.27: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 26 Temperaturverlauf längs der Platte S.27: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 27: Referenzversuche nach der Prüfung S.29: Tobias Schilly 2013
- Abbildung 28: Temperatur 90° Haken S.31: Tobias Schilly 2014
- Abbildung 29: Temperatur 135° Haken S.31: Tobias Schilly 2014
- Abbildung 30: Detailansicht Verankerungsbereich S.31: Tobias Schilly 2014
- Abbildung 32: Auswertung 90°-Haken S.34: Catherina Thiele 2014



## 10 Literaturverzeichnis

1992-1-2, Dezember 2010: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall. Online verfügbar unter [www.beuth.de](http://www.beuth.de).

DIN EN 1990, Dezember 2010: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Online verfügbar unter [www.beuth.de](http://www.beuth.de).

1992-1-1, Januar 2011: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Online verfügbar unter [www.beuth.de](http://www.beuth.de).

DIN EN 1363-1, Oktober 2012: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

European Organisation for technical Approvals (Hg.) (2004): Evaluation of Anchorages in Concrete concerning Resistance to Fire (EOTA technical report, 020).

Fingerloos, Frank; Hegger, Josef; Zilch, Konrad (2012): Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang Kommentierte Fassung. 1. Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Hosser, Dietmar; Richter, Ekkehard; Kampmeister, Björn: Konstruktiver Brandschutz nach den Eurocodes. In: Betonkalender 2013, Bd. 102, S. 1–63. Online verfügbar unter [www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de).

Rehm, G.; Martin, H.; Müller (1968): Ausziehversuche mit Betonstahlhaken. Bericht / Materialprüfamnt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München. München: Materialprüfamnt für das Bauwesen der TH.