

Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungsführungen

T 3135

T 3135

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

2007

ISBN 978-3-8167-7353-5

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Erwin-Schrödinger-Straße
67663 Kaiserslautern
Gebäude 14, Zimmer 515
Telefon (0631) 2 05 - 21 57
Telefax (0631) 2 05 - 35 55
e-mail: jschnell@rhrk.uni-kl.de

Bericht 05026CT/516: Abschlussbericht der DBV Forschungsvorhaben
DBV 250 und DBV 259

Auftraggeber: Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V.
Kurfürstenstraße 129
10785 Berlin

Sachbearbeiterin: Dipl.-Ing. Catherina Thiele, Tel. 0631/205-2010

Datum: 30. Juni 2006

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell

Dipl.-Ing. Catherina Thiele

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Begründung des Forschungsvorhabens	1
2.1	Allgemeines	1
2.2	Normung – Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkrafttragfähigkeit	2
2.3	Literaturrecherche	3
3	Experimentelle Untersuchungen - Vorüberlegungen	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Versuchskörper	5
3.2.1	a/d – Verhältnis	5
3.2.2	Längsbewehrungsgrad	5
3.2.3	Prinzipieller Versuchsaufbau	6
3.3	Versuchsprogramm	6
3.3.1	Versuchsreihe 1 und 2 DBV 250	6
3.3.1.1	Versuchsparameter Versuchsreihe 1	6
3.3.1.2	Versuchsparameter Versuchsreihe 2	7
3.3.2	Versuchsreihe 3 - DBV 259	8
4	Baustoffe	9
4.1	Beton	9
4.1.1	Allgemeines	9
4.1.2	Versuchsserie 1	9
4.1.3	Versuchsreihe 2	10
4.1.4	Versuchsreihe 3	11
4.1.4.1	Rechteckige Öffnungen, Lage der Öffnung im Bauteil, Gruppenanordnung	11
4.1.4.2	Öffnungen im Momentennullpunkt	11
4.1.4.3	Zusatzbeanspruchung durch zentrische Zugkraft	13
4.1.4.4	Nachträglich ergänzte Querschnitte -Ortbetonergänzung	14
4.2	Betonstahl	14
5	Versuchsbeschreibung	15
5.1	Versuchsreihe 1 und 2	15
5.1.1	Versuchsaufbau	15
5.1.2	Messtechnik	15
5.1.3	Versuchsdurchführung	17
5.2	Versuchsreihe 3	17
5.2.1	Allgemeines	17
5.2.2	Öffnungen im Momentennullpunkt	17
5.2.3	Versuche an Elementplatten	18

5.2.4	Versuche mit zusätzlicher Zugnormalkraft	20
6	Versuchsauswertungen	22
6.1	Versuchsreihe 1 und 2	22
6.1.1	Versagen	22
6.1.2	Messergebnisse	22
6.1.3	Fotogrammetrie	26
6.1.4	Übersicht Traglasten	27
6.2	Versuchsreihe 3	31
6.2.1	Lage der Öffnung in Bauteillängsrichtung	31
6.2.2	Versuche mit Zugkraft	32
6.2.3	Rechteckige Öffnungen	34
6.2.4	Öffnungsabstand bei mehreren Öffnungen	35
6.2.5	Öffnungen im Momentennullpunkt	36
6.2.6	Untersuchungen an Elementdecken	37
7	Parameterstudien	38
7.1	Finite- Element Programm ATENA	38
7.2	Einzelöffnungen	39
7.3	Lage der Öffnung in Tragrichtung	40
7.4	Öffnungsabstand	41
7.5	Rechteckige Öffnungen	42
8	Bemessungsgleichungen	46
9	Literatur	47
10	Anhang	49
10.1	Darstellung der Bruchbilder	49
10.2	Versuchsreihe 1 und 2	49
10.2.1	Referenzversuche	49
10.2.2	Versuche mit Einzelöffnungen	50
10.2.3	Erste Tastversuche mit zwei Öffnungen	57
10.2.4	Tastversuche mit Stahlfaserbeton	57
10.2.5	Versuche mit zentrischer Zugkraft	58
10.2.6	Versuche im Momentennullpunkt	60
10.2.7	Lage der Öffnung im Bauteil in Bauteillängsrichtung	61
10.3	Versuchsreihe 3	63
10.3.1	Referenzversuche	63
10.3.2	Gruppenanordnung	64
10.3.3	Rechteckige Öffnungen	65

Zusammenfassung

Auf Grund der fehlenden Bemessungsgrundlagen für die Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken mit integrierten Leitungsführungen wurde an der TU Kaiserslautern ein vom Deutschen Beton- und Bautechnikverein e.V. unterstütztes Forschungsvorhaben durchgeführt.

Die Nutzung von Stahlbetondecken als Installationsraum nimmt immer mehr zu. Dabei werden Leerrohre, Kanäle oder Rohre zur Gebäudetemperierung in die Betondecken einbetoniert, allerdings finden diese Querschnittsschwächungen in den statischen Berechnungen nicht immer ausreichend Beachtung.

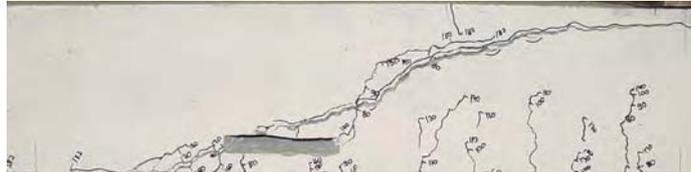


Bild 1-1: Versagensbild eines Bauteilversuchs

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Grundlagen für die Bemessung von durch Rohre geschwächten Decken zu schaffen und den Statischen Nachweis mit Hilfe von modifizierten Bemessungsgleichungen möglich zu machen.

Betrachtet wurden hier einzelne kreisrunde und rechteckige Öffnungen, sowie die Gruppenanordnung von mehreren Öffnungen. Dazu wurde eine Vielzahl von Bauteilversuchen an Stahlbetonplattenstreifen durchgeführt. Diese wurden mit Hilfe von FE-Berechnungen nachvollzogen. Parameterstudien halfen bei der Definition von Bemessungsgleichungen.

Ergebnisse

Die in DIN 1045-1:2001-07 angegebene Bemessungsgleichung (Gl. 70) für die Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung $V_{Rd,ct}$ wird zur Berücksichtigung der Öffnungen um einen Abminderungsfaktor erweitert. Für Verhältnisse d_{\emptyset}/d zwischen 0,2 und 0,5 gilt:

$$V_{Rd,ct,red} = k \cdot V_{Rd,ct} \quad \text{mit:} \quad k = k_{\emptyset} = 1 - \frac{d_{\emptyset}}{d} \quad \text{für kreisrunde Öffnungen}$$

$$k = k_{\square} = 0,95 - \frac{d_o}{d} - \left(\frac{d_o}{d} - 0,03\right) \cdot \ln\left(\frac{d_o}{b_o}\right) \quad \text{für rechteckige Öffnungen}$$

d_{\emptyset} : Durchmesser der runden Öffnung

d : Statische Höhe

d_o : Höhe der rechteckigen Öffnung

b_o : Breite der rechteckigen Öffnung

Anwendungsgrenzen

1. Bei Anordnung von mehreren runden Einzelöffnungen muss zur Anwendung der oben angegebenen Gleichung der Achsabstand der Öffnungen mindestens dem 3-fachen Öffnungsdurchmesser entsprechen.
2. Der Achsabstand von Öffnungen zu Einzellasten sollte mindestens der Statischen Höhe d des Querschnitts entsprechen.
3. Die Traglastabminderung durch Öffnungen im Durchstanzbereich soll in einem weiteren Forschungsvorhaben geklärt werden. Bis auf weiteres kann nur empfohlen werden Durchstanzbereiche von jeglicher Schwächung freizuhalten.
4. Bei kreisrunden Einzelöffnungen deren Mittelachse zwischen Querschnittsmitte und gedrücktem Rand liegt, kann der Faktor k_{\emptyset} um 0,1 erhöht werden.

1 Einleitung

Im Rahmen der vom Deutschen Beton- und Bautechnik- Verein finanzierten Forschungsvorhaben DBV 250 und DBV 259 wurden Untersuchungen an Stahlbetondecken mit integrierten Leitungsführungen durchgeführt.

In diesem Bericht werden Vorgehensweise und Ergebnisse beider Forschungsvorhaben beschrieben.

2 Begründung des Forschungsvorhabens

2.1 Allgemeines

Immer häufiger werden Stahlbetondecken nicht nur als tragendes Bauteil in Anspruch genommen, sondern als Installationsraum genutzt. Es werden beispielsweise luft- oder wasserführende Rohre in Decken einbetoniert, die je nach Bedarf zum Kühlen oder Heizen der angrenzenden Räume genutzt werden. Diese Systeme machen sich die hohe Wärmespeicherkapazität von Beton zunutze.

In zunehmendem Maße werden wegen des Wegfalls abgehängter Decken Leerrohre für z.B. Elektroleitungen in den Massivdecken verlegt.

Bisher existieren weder konstruktive Hinweise zur Anordnung der Rohre noch Bemessungsregeln für die Querkrafttragfähigkeit im Bereich der Öffnungen.

Dies führt regelmäßig zu Problemen wie Konzentration von Leitungen im Anschluss an Schächte, Betonierfehler und Tragfähigkeitsverlust im Bereich enger Leitungsführungen. Oft wird auch die traglastmindernde Wirkung einzelner Öffnungen nicht beachtet.



Bild 2-1: Diverse Leitungsführungen in einer Stahlbetondecke

Mit diesem Forschungsvorhaben sollen konstruktive Anwendungsgrenzen für Leitungsführungen in Stahlbetondecken wie Abstand der Öffnungen untereinander, Lage der Öffnung in Bauteillängsrichtung und Höhenlage der Öffnung im Querschnitt definiert werden.

Weiteres Ziel ist die Ermittlung und Beschreibung des Widerstandswertes von durch integrierte Leitungsführungen geschwächten Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung.

Dabei sollen die folgenden Parameter Beachtung finden:

- Höhenlage der Öffnung im Bauteil,
- Verhältnis Öffnungshöhe oder Öffnungsdurchmesser zur Statischen Höhe,
- Lage der Öffnung im Bauteillängsrichtung,
- Einfluss einer zusätzlichen Beanspruchung durch zentrische Zugkraft,
- Gruppenanordnung von Öffnungen,
- Öffnungen im Bereich von Momentennullpunkten,
- Einfluss der Öffnungen bei nachträglich ergänzten Querschnitten.

Dem Tragwerksplaner sollen Hilfsmittel in Form von Bemessungsdiagrammen zur Verfügung gestellt werden. Auch auf eine „vorsichtshalber“ eingelegte Zusatzbewehrung kann verzichtet werden. Gleichzeitig soll dem sorglosen Umgang mit geschwächten Querschnitten entgegen gewirkt werden.

Erste Tastversuche wurden bereits in [1] vorgestellt. Weiterführend wurden in [2] und [3] erste Ergebnisse aus dem aktuellen Stand der Forschung diskutiert.

2.2 Normung – Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkrafttragfähigkeit

Die Grundlage für die rechnerische Querkrafttragfähigkeit für Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1:2001-07 bildet der empirische Produktansatz gemäß Model Code 90.

$$V_{Rd,ct} = \left[0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (2.1)$$

mit:

- Vorfaktor 0,10

Versuchsauswertungen mit verschiedenen statistischen Verfahren ergeben auf charakteristischem Niveau einen Vorfaktor c_k von etwa 0,14 und auf Niveau des Mittelwertes etwa den Faktor $c_m=0,2$. Teilt man diesen Vorfaktor durch den Teilsicherheitsbeiwert von Beton $\gamma_c=1,5$ folgt der Bemessungswert von $c_d=0,14/1,5=0,093$. Im Normengremium wurde der Vorfaktor c_d , in Hinblick auf mögliche Schnittgrößenumlagerungen, die in Experimenten auf Grund der statisch bestimmten Lagerung nicht vorhanden waren, zu 0,10 festgelegt.

- Maßstabsfaktor κ

$$\kappa = 1 + \sqrt{200/d} \quad (2.2)$$

- Ungerissene Druckzone und Längsbewehrungsgrad $(100 \cdot \rho_1)^{1/3}$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02 \quad (2.3)$$

- Einfluss der Betonzugfestigkeit $f_{ck}^{1/3}$
- Wirkung einer Längsspannung $(-0,12 \cdot \sigma_{cd})$

In DIN 1045-1 sind keine Hinweise zur Berücksichtigung von Querschnittsschwächungen durch integrierte Leitungen enthalten.

2.3 Literaturrecherche

Vorliegende Untersuchungen beschäftigen sich fast ausschließlich mit Öffnungen in Stegen von Unterzügen und Plattenbalken.

Soweit röhrenartige Aussparungen in Decken untersucht werden, handelt es sich entweder um große Durchmesser in kreuzweise gespannten Ortbetondecken mit Hohlkörpern, die aufwändige Zulagebewehrungen erfordern oder um einachsig gespannte Hohlkörperdecken, die als Fertigteile die Lasten überwiegend parallel zu den Hohlräumen abtragen.

In [4] werden von Hottmann und Schäfer Verfahren zur Bemessung von Trägern mit kleinen und großen Stegöffnungen und zum Bemessen von Scheiben entwickelt. Als Grundlage dient die Methode der Stabwerkmodelle. Für relevante Anwendungsfälle werden Modelle entworfen und umfassend erläutert.

Aster untersucht in [5] das Tragverhalten von 40 cm dicken Stahlbetonhohlplatten, die in Ortbetonbauweise mit Verdrängungskörpern hergestellt werden. Die Versuche werden an Hohlplattenstreifen mit verschiedenen Bewehrungsanordnungen (Hutbügel, Trogbügel, X-Bügel) durchgeführt. Vorrangiges Ziel der Untersuchungen ist es hier, die Biegesteifigkeit rechtwinklig zu den Rohrachsen zu bestimmen, die für das Berechnungsverfahren für vierseitig gelagerte Hohlplatten benötigt wird. Die Tragfähigkeit wird durch Bewehrungsanordnung sichergestellt. Es werden Näherungslösungen vorgestellt, die sich an der Bemessung von Vierendeelträgern anlehnen.

In einer umfassenden Arbeit behandelt Twelmeier [6] das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbalken mit großen Stegöffnungen. Alle Versuchskörper wurden mit Querbewehrung ausgeführt. Es werden auch Träger mit Lochgruppen untersucht. Dabei werden vereinfachte Näherungslösungen vorgestellt, die auch auf der Analogie zum Vierendeelträger beruhen. Zur Bemessung von Gruppen kreisförmiger Öffnungen werden in dieser Arbeit Stabwerke gewählt.

Ramm diskutiert in [7] das Statische System, die lokalen Schnittgrößen, den Tragfähigkeitsnachweis und die konstruktive Durchbildung im Öffnungsbereich von Verbund- und Stahlbetonträgern. Weiterhin werden das lokale Verformungsgeschehen und die dadurch beeinflussten Schnittgrößenverläufe behandelt.

Mansur beschreibt in [8] die Arbeiten von Hanson, Somes und Corley, die sich mit der Tragfähigkeit von Stahlbetonplattenbalken mit Stegöffnungen ohne Querkraftbewehrung beschäftigen. Anhand von Versuchsergebnissen wird der Einfluss von Öffnungsgröße, -form und Lage der Öffnung diskutiert. Sie stellten fest, dass eine Öffnung sehr nahe am Auflager keine Traglastreduzierung mit sich bringt. Bei weiterer Entfernung vom Auflager stellt sich eine kontinuierliche Abminderung der Tragfähigkeit bis zu einem konstanten Werte ein. Eine weitere Entfernung von Auflager hat dann keine Traglastabminderung zur Folge. Die vertikale Position der Öffnung im Bauteil hat nach Ihrer Aussage keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit, wobei die Vergrößerung des Durchmessers einen linearen Traglastabfall mit sich bringt. Bei runden Öffnungen mit einem Durchmesser kleiner 25 % der Querschnittshöhe und quadratischen Öffnungen mit einer Öffnungshöhe kleiner als 33 % der Querschnittshöhe konnte keine Traglastabminderung festgestellt werden.

Reineck stellt in [10] und [11] ein mechanisches Modell für Platten ohne Querkraftbewehrung vor, das auch Grundlage der Bemessungsverfahren in DIN 1045-1:2001-07 geworden ist. Die Tragfähigkeit wird in einem so genannten Zahnmodell in vier Traganteile unterteilt. Rissreibung, Biegung des in die Druckzone eingespannten Zahns, Dübelwirkung der Längsbewehrung und Querkraftabtrag in der Druckzone haben Anteile an der Querkrafttragfähigkeit des Querschnitts. Über einen Riss hinweg können Kräfte übertragen werden. Diese sind abhängig von der gegenseitigen Verschiebungen der benachbarten Rissufer. Diese hängen wiederum von den vorhandenen Rissabständen und Rissbreiten ab, die vom Verbundverhalten und der Beanspruchung der Bewehrung abhängig sind. Die Einspannung des Betonzahnes in die Biegedruckzone beansprucht die Zugfestigkeit des Betons. Maßgebende Einflussparameter auf die Tragfähigkeit sind hier die Betonfestigkeitsklasse, der Längsbewehrungsgrad und die einwirkende Normalkraft.

Es ist nicht möglich, die genannten Traganteile getrennt zu betrachten. Die Aktivierung der Einspannung des Zahnes in die Betondruckzone geht mit einer Verschiebung der Rissufer einher und damit mit einer Aktivierung der Rissreibung. Der Einfluss von Öffnungen im Querschnitt wird von Reineck nicht betrachtet.

Im Forschungsbericht Teilvorgefertigte Deckensysteme im Wohnungsbau berichtet Hegger [12] über Versuche an vorgespannten Elementplattenstreifen mit Aussparungen ohne Querkraftbewehrung. Die durchgeführten Versuche brachten die folgenden Ergebnisse:

- Bei einem Öffnungsdurchmesser entsprechend der halben Querschnittshöhe ist eine Traglastabminderung von ca. 50 % zu beobachten.
- Bei kleinen Öffnungen wurde eine Traglasterhöhung bei auflagnaher Öffnungslage beobachtet.
- Bei Anordnung von mehreren Öffnungen wird die Tragfähigkeit durch Spannungsüberlagerungen herabgesetzt.
- Es wird ein Vergrößerungsfaktor für die auftretenden Schubspannungen zu $\frac{1}{\alpha_R} = \frac{h}{(h + d_R)}$ mit h = Plattendicke und d_R = Durchmesser der Öffnung gewählt.

In [13] wird das Tragverhalten von Stahlbetonträgern mit großen Öffnungen erforscht. Vorrangig wird hier die Querkraftverteilung auf die Öffnungsgurte untersucht, die zu einem neuen Bemessungsvorschlag für Träger mit großen Öffnungen führt. Darüber hinaus werden Nachweise zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit vorgeschlagen.

Die vorliegenden Untersuchungen ergeben insgesamt keine ausreichenden Anhaltspunkte für die Tragfähigkeit von Platten ohne Querkraftbewehrung mit integrierten Lüftungskanälen. Für die in jedem Fall zu führenden Statischen Nachweise fehlen bisher ein belastbares Rechenmodell bzw. nachvollziehbare Anwendungsregeln.

3 Experimentelle Untersuchungen - Vorüberlegungen

3.1 Allgemeines

Alle nachfolgend beschriebenen Versuche wurden im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens DBV 250 und DBV 259 wurden insgesamt 73 Versuche gefahren.

Diese gliederten sich wie folgt:

- 6 Tastversuche wurden im Vorfeld der Forschungsvorhaben durchgeführt.
- 15 + 20 Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens DBV 250
In zwei Versuchsreihen wurden Parameter wie das Verhältnis zwischen Öffnungsdurchmesser und Statischer Höhe, Längsbewehrungsgrad, Betonfestigkeit und Höhenlage der Öffnung im Querschnitt variiert.
- 33 Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens DBV 259
Dabei wurden rechteckige Öffnungen, Gruppenanordnungen von Öffnungen, die Lage der Öffnungen in Tragrichtung, Öffnungen im Bereich von Momentennullpunkten, nachträglich ergänzte Querschnitte und die zusätzliche Beanspruchung durch zentrische Zugkraft betrachtet.

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Auswahl der Versuchsparameter und der Versuchsdurchführung beschrieben. Weiterhin werden die Materialparameter und die Ergebnisse dargestellt.

3.2 Versuchskörper

3.2.1 a/d – Verhältnis

Kani beschreibt in seinen Forschungsarbeiten ([15],[16]) das Verhalten von Stahlbetonbalken mit unterschiedlichen Längsbewehrungsgraden und Schubschlankheiten. Die Schubschlankheit berechnet sich aus dem Quotienten des Abstands der Lasteinleitung zum Auflager und der der Statischen Höhe d .

Bei Verhältnissen von $a/d = 2,5$ in Kombination mit hohen Längsbewehrungsgraden wird das Verhältnis des tatsächlich im Versuch erreichten Moment M_{test} zum berechneten aufnehmbaren Moment M_{cal} minimal. Das Querkraftversagen tritt vor dem Biegeversagen ein.

Mit Verhältnissen a/d in den durchgeführten Versuchen zwischen 3,54 und 5,08 konnten sowohl realitätsnahe Belastungssituationen nachgestellt werden als auch vorzeitiges Biegeversagen verhindert werden.

3.2.2 Längsbewehrungsgrad

Vorrangiges Interesse bestand in der Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit, der durch Öffnungen geschwächten Plattenquerschnitte. Die Versuche wurden deshalb so konzipiert, dass ein ausreichend großer Abstand zwischen Biegeversagen und Querkraftversagen der Platte bestand. Dies erforderte relativ hohe Längsbewehrungsgrade von ca. 1,8 %.

Als Querbewehrung wurden jeweils 20 % der Längsbewehrung eingelegt (DIN 1045-1 13.3.2). Diese wirkt wie in der realen Decke als Sollbruchstelle für Biegerisse.

3.2.3 Prinzipieller Versuchsaufbau

Untersucht wurden 40 cm Breite Plattenstreifen mit einbetonierten Plastik-Rohren in verschiedenen Durchmessern. Die „Original - Lüftungsrohre“, z.B. von der Firma Kiefer ([1],[14]) bestehen aus Aluminium. Der Eigentraganteil der einbetonierten Rohre sollte wegen der allgemeinen Gültigkeit der Ergebnisse so gering wie möglich gehalten werden.

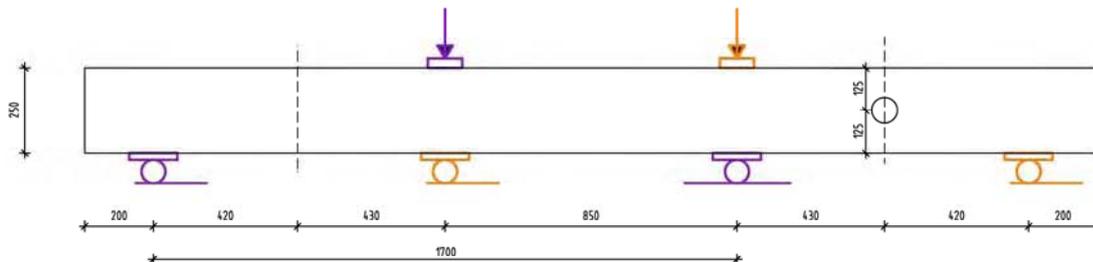


Abbildung 3-1: Versuchsaufbau

Ein Versuchskörper wurde zur optimalen Materialnutzung jeweils für zwei Versuche benutzt. Als Statisches System wurde bei allen Versuchen ein Einfeldträger mit Einzellast in Feldmitte gewählt. In Abbildung 3-1 ist beispielhaft einer der Versuchskörper dargestellt. Die jeweils farbig zugeordneten Lasteinleitungen und Auflagerpunkte zeigen die Statischen Systeme der beiden durchgeführten Versuche.

Die Öffnungen wurden jeweils zwischen Lasteinleitung und Auflager angeordnet. Die genauen Abstände der Öffnungen zum Auflager, Stützweiten und Längsbewehrungsgrade können den folgenden Tabellen (Tabelle 3-1, Tabelle 3-2, Tabelle 3-3) entnommen werden.

Als Referenzversuche wurden mit allen Plattendicken Versuche ohne Öffnungen durchgeführt. Da diese Referenzversuche die Basis für den Vergleich der Versuchsergebnisse und somit für die Erstellung eines Bemessungsmodells dienen, wurden teilweise mehrere Versuche durchgeführt. Dadurch konnte das Vorhandensein eines Ausreißers bei einem Referenzversuch ausgeschlossen werden.

3.3 Versuchsprogramm

3.3.1 Versuchsreihe 1 und 2 DBV 250

Im Rahmen des Forschungsvorhabens DBV 250 wurden 2 Versuchsserien mit insgesamt 29 Versuchen durchgeführt. Die Versuche wurden wie folgt bezeichnet: T_Laufende Nummer_Öffnungsnennendurchmesser_Lage der Öffnung im Querschnitt (z.B. T3_100_Mitte).

Zur Definition eines Widerstandwertes der Querkrafttragfähigkeit wurden die Traglasten der Referenzversuche mit den Versuchen mit geschwächtem Querschnitt verglichen. Mit der Variation der Querschnittshöhe (20, 25, 30 und 35 mm) und des Öffnungsdurchmessers (40, 50, 75, 105, und 125 mm) konnte eine Vielzahl von Verhältnissen d_o/d (Öffnungsdurchmesser / Statischer Höhe) mit Versuchsergebnissen abgedeckt werden. Weiterhin wurde die Höhenlage der Öffnungen im Querschnitt variiert.

3.3.1.1 Versuchsparameter Versuchsreihe 1

In der ersten Versuchsreihe wurden Plattenstreifen mit einer Breite von 40 cm und Dicken von 30 cm und 35 cm untersucht. Dabei wurde das Tragverhalten von runden Einzelöffnun-

gen untersucht. Die Höhenlage der Öffnungen im Querschnitt wurde variiert. Die Stützweite der Dreipunktbiegeversuche betrug in dieser Versuchsreihe 2,10 m. In der nachfolgenden Tabelle sind die Versuchsparameter der ersten Versuchsreihe dargestellt.

Versuchsname	Versuchsdatum	f_c am Versuchstag [N/mm ²]	statische Höhe d [mm]	Außendurchmesser Öffnung d_\varnothing [mm]	d_\varnothing/d
T1_70_unten	18.03.2004	32,4	248	75	0,30
T1_ohne	18.03.2004	32,4	248	0	0,00
T2_70_mitte	19.03.2004	32,8	248	75	0,30
T2_70_oben	19.03.2004	32,8	248	75	0,30
T3_100_mitte	16.03.2004	31,6	248	105	0,42
T3_100_oben	16.03.2004	31,6	248	105	0,42
T4_100_unten	18.03.2004	32,4	248	105	0,42
T4_120_oben	18.03.2004	32,4	248	125	0,50
T5_120_mitte	17.03.2004	32,0	248	125	0,50
T5_Kiefer	17.03.2004	32,0	248	80	0,32
T6_70_mitte	08.03.2004	28,5	297	75	0,25
T6_70_unten	09.03.2004	28,9	297	75	0,25
T7_70_oben	15.03.2004	31,2	297	0	0,00
T8_100_mitte	15.03.2004	31,2	297	105	0,35
T8_100_oben	16.03.2004	31,6	297	105	0,35

Tabelle 3-1: Übersicht Versuchsreihe 1

3.3.1.2 Versuchsparameter Versuchsreihe 2

Die Plattendicken betragen in der zweiten Versuchsserie 20 und 25 cm. Auch in der zweiten Versuchsreihe wurden lediglich runde Öffnungen untersucht. Die Öffnungsdurchmesser und Deckendicken wurden so kombiniert, dass möglichst viele Verhältnisse d_\varnothing/d mit Versuchen abgedeckt werden konnten. Zwei Versuchskörper wurden mit zwei nebeneinander angeordneten Öffnungen ausgeführt. Die Würfelfestigkeit betrug ca. 53. N/mm². Die Stützweite betrug bei dieser Versuchsserie 1,70 m.

Versuchsname	Versuchsdatum	f_c am Versuchstag [N/mm ²]	statische Höhe d [mm]	Außendurchmesser Öffnung d_\varnothing [mm]	d_\varnothing/d
T9_75_mitte	15.07.2004	52,91	167	75	0,45
T9_O	16.07.2004	52,92	167	0	0,00
T10_40_oben	15.07.2004	52,91	167	40	0,24
T10_75_oben	15.07.2004	52,91	167	75	0,45
T11_40_mitte	15.07.2004	52,91	167	40	0,24
T11_50_oben	14.07.2004	52,9	167	50	0,30
T12_40_unten	14.07.2004	52,9	167	40	0,24
T12_50_unten	14.07.2004	52,9	167	50	0,30
T13_75_mitte	20.07.2004	53,75	217	75	0,35
T13_O	20.07.2004	53,75	217	0	0,00
T14_75_oben	20.07.2004	53,75	217	75	0,35
T14_75_unten	20.07.2004	53,75	217	75	0,35
T15_15_75	21.07.2004	54,71	217	75	0,35
T15_25_75	21.07.2004	54,71	217	75	0,35

Tabelle 3-2: Übersicht Versuchsreihe 2

3.3.2 Versuchsreihe 3 - DBV 259

Ziel der dritten Versuchsreihe war die Klärung der folgenden Einflüsse auf die Tragfähigkeit:

- Öffnungsgeometrie, Untersuchung von rechteckigen Öffnungen,
- Gruppenanordnung von Öffnungen, Öffnungsabstand,
- Lage der Öffnung in Tragrichtung,
- Öffnungen im Bereich von Momentennullpunkten,
- nachträglich ergänzte Querschnitte,
- zusätzliche Beanspruchung durch zentrische Zugkraft

In der nachfolgenden Tabelle sind die Parameter der durchgeführten Bauteilversuche der Versuchsreihe 3 dargestellt. Die Stützweite betrug bei allen Versuchen 1,7 m

Veruchs- bezeichnung	statische Höhe d	d_0	d_0/d	Anzahl der Öffnungen	
	[mm]	[mm]			
Gruppenanordnung der Öffnungen					Abstand der Öffnungen
T_305	217	75	0,35	2	$2 \cdot d_0$
T_306	217	75	0,35	2	$3 \cdot d_0$
T_307	217	50	0,23	2	$2 \cdot d_0$
T_308	217	50	0,23	2	$3 \cdot d_0$
Rechteckige Öffnungen					Breite der Öffnung
T_309	217	50	0,23	1	150
T_310	217	50	0,23	1	250
T_311	217	20	0,09	1	150
T_312	217	20	0,09	1	250
T_313	217	20	0,09	1	150
T_314	217	20	0,09	1	250
Lage der Öffnung im Bauteil					Abstand der Öffnung vom Auflagerand
T_315	217	-	-	1	-
T_316	217	75	0,35	1	70
T_317	217	75	0,35	1	220
T_318	217	75	0,35	1	145
T_319	217	50	0,23	1	270
T_320	217	50	0,23	1	170
T_321	217	50	0,23	1	295
T_322	217	50	0,23	1	70
zentrischer Zugkraft					eingeleitete Zugkraft
LBV 01	217	-	-	-	190
LBV 02	217	-	-	-	-
LBV 03	217	75	0,35	1	170
LBV 04	217	50	0,23	1	140
LBV 05	217	40	0,18	1	160
LBV 06	217	75	0,35	1	150
Momentennullpunkt					
T_323	209	-	-	1	-
T_324	209	50	0,24	1	-
T_325	209	75	0,36	1	-
T_326	209	40	0,19	1	-
nachträglich ergänzte Querschnitte					Abstand der Öffnungen
PL1_1	187	16	0,09	6	$2 \cdot d_0$
PL1_2	187	-	-	-	-
PL2_1	187	16	0,09	6	$2,5 \cdot d_0$
PL2_2	187	25	0,13	6	$2,5 \cdot d_0$
PL3_1	187	25	0,13	6	$2 \cdot d_0$
PL3_2	187	32	0,17	6	$2 \cdot d_0$

Tabelle 3-3: Versuchsparameter Versuchsreihe 3

4 Baustoffe

4.1 Beton

4.1.1 Allgemeines

Zur Herstellung aller Versuchskörper wurde sowohl Transportbeton als auch in den Prüfhallen gemischter Beton verwendet. Zu jeder Versuchsreihe wurden Probewürfel (Kantenlänge 150 mm) und Zylinder hergestellt, die zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit des E-Moduls und der Spaltzugfestigkeit nach DIN 1048 benutzt wurden. Zur Bestimmung der Betonfestigkeit am jeweiligen Versuchstag erfolgten über die Dauer der Versuchsreihen mehrerer Prüfungen. Die Bestimmung des E-Modul und der Spaltzugfestigkeit wurde nur einmal pro Versuchsreihe vorgenommen.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Betonprüfungen dargestellt.

4.1.2 Versuchsserie 1

Herstellungsdatum:*	16.02.2004					
Prüfdatum:	08.03.2004					
Alter:	21	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,908	2,343	627	27,87	
2	150*150*150	7,880	2,335	653	29,02	
3	150*150*150	7,912	2,344	641	28,49	
				Mittelwert	28,46	

Tabelle 4-1: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 1, Prüfung 1

Herstellungsdatum:*	16.02.2004					
Prüfdatum:	18.03.2004					
Alter:	31	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,793	2,309	742	32,98	
2	150*150*150	7,769	2,302	728	32,36	
3	150*150*150	7,796	2,310	719	31,96	
				Mittelwert	32,43	

Tabelle 4-2: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 1, Prüfung 2

Herstellungsdatum:*	16.02.2004					
Prüfdatum:	07.04.2004					
Alter:	51	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,915	2,345	880	39,11	
2	150*150*150	7,791	2,308	889	39,51	
3	150*150*150	7,789	2,308	922	40,98	
				Mittelwert	39,87	

Tabelle 4-3: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 1, Prüfung 3

Die E – Modul - Prüfung ergab einen Wert von 26.197 N/mm².

4.1.3 Versuchsreihe 2

Die Ergebnisse der Betonprüfungen der zweiten Versuchsserie sind in den nachfolgenden Tabellen angegeben.

Herstellungsdatum:*	21.06.2004					
Prüfdatum:	14.07.2004					
Alter:	23	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,896	2,340	1177	52,31	
2	150*150*150	7,893	2,339	1202	53,42	
3	150*150*150	7,873	2,333	1192	52,98	
				Mittelwert	52,90	

Tabelle 4-4: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 2, Prüfung 1

Herstellungsdatum:*	21.06.2004					
Prüfdatum:	19.07.2004					
Alter:	28	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,884	2,336	1231	54,71	
2	150*150*150	7,908	2,343	1164	51,73	
3	150*150*150	7,882	2,335	1179	52,40	
				Mittelwert	52,95	

Tabelle 4-5: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 2, Prüfung 2

Herstellungsdatum:*	21.06.2004					
Prüfdatum:	21.07.2004					
Alter:	30	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,890	2,338	1239	55,07	
2	150*150*150	7,935	2,351	1225	54,44	
3	150*150*150	7,886	2,337	1229	54,62	
				Mittelwert	54,71	

Tabelle 4-6: Betondruckfestigkeit Versuchsserie 2 Prüfung 3

Die E-Modul- Prüfung ergab einen E-Modul von 33.100 N/mm².

4.1.4 Versuchsreihe 3

4.1.4.1 Rechteckige Öffnungen, Lage der Öffnung im Bauteil, Gruppenanordnung

Herstellungsdatum:	03.02.2005					
Prüfdatum:	22.03.2005					
Alter:	47	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	7,671	2,273	867	38,53	
2	150*150*150	7,712	2,285	834	37,07	
3	150*150*150	7,670	2,273	836	37,16	
				Mittelwert	37,59	

Tabelle 4-7: Betondruckfestigkeit erste Prüfung

Herstellungsdatum:*	03.02.2005					
Prüfdatum:	07.04.2005					
Alter:	63	Tage				
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]	Masse [kg]	Dichte g/cm ³	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	
1	150*150*150	-	-	881	39,16	
2	150*150*150	-	-	875	38,89	
3	150*150*150	-	-	872	38,76	
				Mittelwert	38,93	

Tabelle 4-8: Betondruckfestigkeit zweite Prüfung

Der E-Modul betrug 27.099 N/mm² und die mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} 3,03 N/mm².

4.1.4.2 Öffnungen im Momentennullpunkt

Der Beton für diese Versuchsreihe wurde im Labor für konstruktiven Ingenieurbau hergestellt.

Herstellungsdatum:	07.06.2005						
Prüfdatum:	05.07.2005						
Alter:	28	Tage					
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT2	150	150	150	7,750	2,296	808	35,91
CT2	150	150	150	7,800	2,311	758	33,69
						Mittelwert	34,80

Tabelle 4-9: Betondruckfestigkeit Versuchskörper T326

Herstellungsdatum:	07.06.2005						
Prüfdatum:	06.07.2005						
Alter:			29	Tage			
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,780	2,305	830	36,89
CT4	150	150	150	7,780	2,305	834	37,07
CT4	150	150	150	7,810	2,314	845	37,56
						Mittelwert	37,17

Tabelle 4-10: Betondruckfestigkeit Versuchskörper T325

Herstellungsdatum:	07.06.2005						
Prüfdatum:	05.07.2005						
Alter:			28	Tage			
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,770	2,302	776	34,49
CT4	150	150	150	7,780	2,305	794	35,29
CT4	150	150	150	7,680	2,276	742	32,98
						Mittelwert	34,25

Tabelle 4-11: Betondruckfestigkeit Versuchskörper T324

Prüfdatum:	06.07.2005						
Alter:			29	Tage			
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,730	2,290	788	35,02
CT4	150	150	150	7,770	2,302	818	36,36
CT4	150	150	150	7,710	2,284	809	35,96
						Mittelwert	35,78

Tabelle 4-12: Betondruckfestigkeit Versuchskörper T323

Der E-Modul betrug 26.145 N/mm² und die mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} 2,48 N/mm².

4.1.4.3 Zusatzbeanspruchung durch zentrische Zugkraft

Herstellungsdatum:	05.08.2005						
Prüfdatum:	29.08.2005						
Alter:	24 Tage						
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,550	2,237	469	20,84
CT4	150	150	150	7,540	2,234	494	21,96
CT4	150	150	150	7,610	2,255	542	24,09
						Mittelwert	22,30

Tabelle 4-13: Betondruckfestigkeit Versuchskörper LBV 1 + LBV 2

Herstellungsdatum:	05.08.2005						
Prüfdatum:	01.09.2005						
Alter:	27 Tage						
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,540	2,234	545	24,22
CT4	150	150	150	7,450	2,207	536	23,82
CT4	150	150	150	7,480	2,216	535	23,78
						Mittelwert	23,94

Tabelle 4-14: Betondruckfestigkeit Versuchskörper LBV 3 + LBV 4

Herstellungsdatum:	05.08.2005						
Prüfdatum:	02.09.2005						
Alter:	28 Tage						
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,520	2,228	516	22,93
CT4	150	150	150	7,450	2,207	494	21,96
CT4	150	150	150	7,440	2,204	505	22,44
						Mittelwert	22,44

Tabelle 4-15: Betondruckfestigkeit Versuchskörper LBD 5 + LBV 6

LBV	E-Modul [MN/m ²]	f _{ct,m} [N/mm ²]
1+2	30803	1,77
3+4	31969	1,91
5+6	32362	1,84

Tabelle 4-16: E-Modul und mittlere Betonzugfestigkeit

4.1.4.4 Nachträglich ergänzte Querschnitte -Ortbetoneergänzung

Herstellungsdatum:	13.03.2006						
Prüfdatum:	11.04.2006						
Alter:	29 Tage						
Proben-Nr.	Abmessungen [mm]			Masse [kg]	Dichte [g/cm ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
	L	B	H				
CT4	150	150	150	7,724	2,289	783	34,80
CT4	150	150	150	7,640	2,264	756	33,60
CT4	150	150	150	7,755	2,298	728	32,36
						Mittelwert	33,59

Tabelle 4-17: Betondruckfestigkeit der Ortbetoneergänzung

Der E-Modul betrug 27671 N/mm² und die mittlere Betonzugfestigkeit f_{ctm} 2,4 N/mm²

4.2 Betonstahl

Für die Längsbewehrung wurden Stabdurchmesser 14 und 16 mm verwendet. Für die Querbewehrung Stabdurchmesser 10 und 12 mm.

Zugfestigkeit, obere Streckgrenze und E-Modul wurden an jeweils 3 Proben der Längsbewehrung bestimmt.

In den nachfolgenden Tabellen sind die Materialkennwerte aufgeführt.

Probe	Durchmesser [mm]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	obere Streckgrenze [N/mm ²]
1	16	-	647	579
2	16	199797	650	578
3	16	194162	658	584
	Mittelwert	196980	652	580

Tabelle 4-18: Bewehrungsstahlproben Versuchsreihe 1, d=16 mm

Probe	Durchmesser [mm]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	obere Streckgrenze [N/mm ²]
1	14	-	668	576
2	14	198185	679	592
3	14	205859	680	576
	Mittelwert	202022	676	581

Tabelle 4-19: Bewehrungsstahlproben Versuchsreihe 1 d=14 mm

Probe	Durchmesser [mm]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	obere Streckgrenze [N/mm ²]
1	16	199800	708	630
2	16	195202	712	632
3	16	193665	712	633
	Mittelwert	196222	710	632

Tabelle 4-20: Bewehrungsstahlproben Versuchsserie 2, d=16 mm

Probe	Durchmesser [mm]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	obere Streckgrenze [N/mm ²]
1	10	187637	675	591
2	10	196643	668	573
Mittelwert		192140	672	582

Tabelle 4-21: Bewehrungsstahlproben Versuchsserie 3 d=10 mm

Probe	Durchmesser [mm]	E-Modul [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	obere Streckgrenze [N/mm ²]
1	16	196815	704	627
2	16	206303	706	629
3	16	199846	709	634
Mittelwert		200988	706	630

Tabelle 4-22: Bewehrungsstahlproben Versuchsserie 3 d=16 mm

5 Versuchsbeschreibung

5.1 Versuchsreihe 1 und 2

5.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus den Auflagerböcken (Linienlager), dem Versuchskörper und der Lasteinleitung.

Die Versuchskörper werden über ihre gesamte Breite von 40 cm auf Linienlagern gelagert. Zwischen der Lagerrolle und dem Versuchskörper dient eine Stahlplatte mit einer Dicke von 20 mm und einer Breite von 10 cm als Lastverteilung. Die Rollen der Linienlager können fixiert werden, so dass entweder ein frei drehbares Lager und ein Festlager entsteht.

Die Belastung der Versuchsträger erfolgt mit einem Lukas-Hydraulikzylinder über eine Kalotte, die auf einem massiven Stahlquader steht und die Einzellast vom Zylinder auf die Breite des Versuchskörpers verteilt. Eine Schicht aus 5 mm dickem Hartgummi dient als Ausgleichsschicht zwischen Stahlquader und Beton.

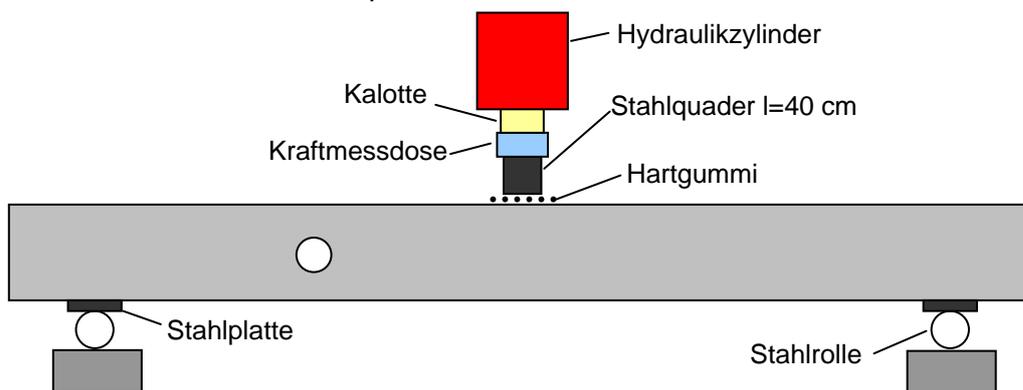


Abbildung 5-1: Versuchsaufbau

5.1.2 Messtechnik

Die Messungen wurden mit dem Messverstärker Spider 8 (Hottinger Baldwin Messtechnik) und der Software Catman aufgezeichnet.

Dieses Datenerfassungsverfahren erlaubt eine kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte während des Versuchs. Die Aufzeichnungsrate wurde zu 1 Hz gewählt.

Die eingeleitete Kraft wird mittels einer Kraftmessdose, die zwischen Hydraulikzylinder und Versuchskörper angeordnet wurde, gemessen.

Die Verformungsmessungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern der Firma Hottinger-Baldwin- Messtechnik durchgeführt. Die Messlänge ergab sich je nach Erfordernis zwischen 10 und 50 mm.

Die Dehnungen der Längsbewehrung wird mittels Dehnungsmessstreifen des Typs LY 6/120 gemessen.

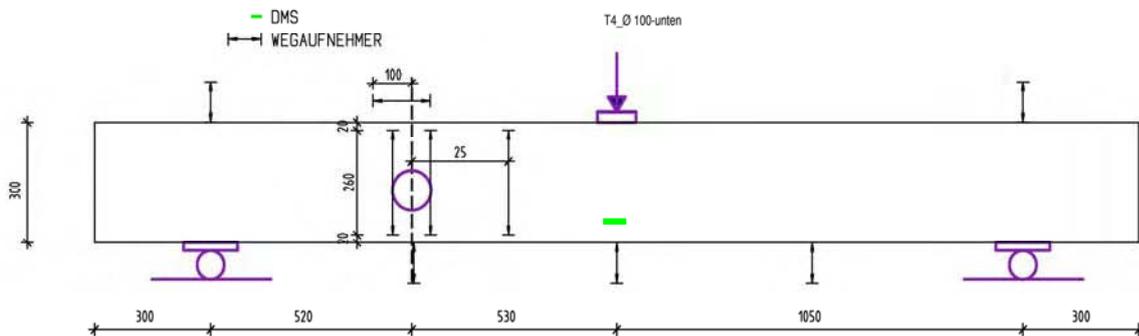


Abbildung 5-2: Messtechnik Versuchskörper T4_100_unten

In Abbildung 5-2 sind beispielhaft für einen Versuchskörper die Messstellen dargestellt.

Die Biegelinie wurde mit Hilfe von 5 Wegaufnehmern in den Viertelpunkten des Trägers aufgezeichnet. Links und rechts der Öffnung sowie im Abstand von 25 cm zur Öffnungsachse wurden Wegaufnehmer in vertikaler Richtung am Plattenstreifen befestigt. Weiterhin wurde ein Wegaufnehmer am oberen Rand des Plattenstreifens im Bereich der Öffnung installiert.

Der Dehnmessstreifen an der Längsbewehrung in Feldmitte gab während der Versuche Aufschluss über den Beanspruchungsgrad der Längsbewehrung und ein eventuell bevorstehendes Biegeversagen des Trägers.

Bei zwei Versuchen wurde zusätzlich zur oben beschriebenen Messtechnik eine Messung mittels Fotogrammetrie durchgeführt. Dazu wurde ein Raster von schwarzen Messmarken auf die Betonoberfläche aufgeklebt und während des Versuchs mit drei fest installierten digitalen Kameras aufgenommen.



Bild 5-1: Fotogrammetrie

Das Auswertprogramm erkennt die Messpunkte und vergleicht die Koordinaten zweier nacheinander folgender Bilderserien. Die verwendete Technik wurde zur besseren Beobachtung der Rissentwicklung konzipiert. Zur Darstellung der Betondehnungen ist die Auflösung der Systems zu gering.

Die Messungen wurden dankenswerterweise von Herrn Lange und Herrn Dr. Schwermann von der RWTH Aachen durchgeführt.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurden Dehnmessstreifen im Bereich der Biegedruckzone über den Öffnungen auf die Betonoberfläche appliziert.

5.1.3 Versuchsdurchführung

Die Belastung der Versuchskörper erfolgte weggeregelt. Die Laststeigerung betrug pro Lastschritt ca. 5-10 kN. Nach Erreichen der Ziellast kann bei Wegregelung eine Abnahme der Last beobachtet werden. Zwischen jedem Lastschritt vergingen etwa fünf Minuten. Etwa nach dieser Zeit konnte der Stillstand der Lastabnahme beobachtet werden.

Mindestens nach dem Erreichen jeder zweiten Laststufe wurden die entstandenen Risse markiert und mit der jeweils erreichten Laststufe beschriftet. Die Bruchbilder mit den eingezeichneten Rissen können dem Anhang entnommen werden.

5.2 Versuchsreihe 3

5.2.1 Allgemeines

Der Versuchsaufbau, die Messtechnik und die Versuchsdurchführung entsprechen dem im den Abschnitten 5.1.1 - 5.1.3 beschriebenen Vorgehen. Im Folgenden werden nur die von dem oben beschriebenen Verfahren abweichenden Versuchsbedingungen erläutert.

5.2.2 Öffnungen im Momentennullpunkt

Zur Untersuchung von Öffnungen im Momentennullpunkt wurden Versuchskörper als Einfeldträger mit Kragarm hergestellt. Die Belastung in Feldmitte entsprach der dreifachen Kragarmbelastung. Die Öffnungen wurden im Momentennullpunkt angeordnet.

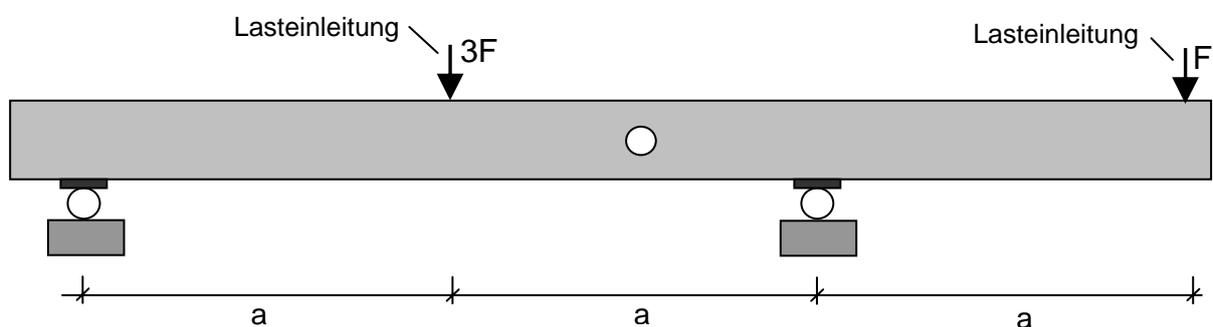


Abbildung 5-3: Versuchsaufbau Öffnungen im Momentennullpunkt

Es wurden insgesamt vier Versuche durchgeführt. Ein Referenzversuch ohne Öffnungen und drei Versuche mit Öffnungsdurchmessern von 40, 50 und 75 mm.

5.2.3 Versuche an Elementplatten

Die Versuchskörper wurden als Plattenstreifen mit jeweils 2 Gitterträgern aus einer Elementplatte aus einem Fertigteilwerk gewonnen. In den folgenden Bildern sind die Querschnitte der Plattenstreifen dargestellt.



Bild 5-2: Querschnitt Elementplatte 1



Bild 5-3: Querschnitt Elementplatte 2



Bild 5-4: Querschnitt Elementplatte 3

Zur Beurteilung der Fugentragfähigkeit wurde die Rautiefe der Fertigteile mit dem Sandflächenverfahren nach Kaufmann [17] bestimmt. Dabei wird eine definierte Sandmenge auf der zu prüfenden Oberfläche kreisförmig so verteilt, dass die Vertiefungen gerade gefüllt sind.

Hilfsmittel dazu sind:

- Gefäß mit bekanntem Hohlrauminhalt
- Trockener Quarzsand, Körnung 0,1-0,5 mm
- Runde Hartholzscheibe (Durchmesser 5 cm, 1 cm dick)
- Zollstock



Bild 5-5: Zubehör Sandflächenverfahren

Nach Heft 525 des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau ist eine Oberfläche rau, wenn der Rauigkeitsparameter $R_t > 0,9$ ist. Der Rauigkeitsparameter R_t berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$R_t = \frac{40 \cdot V[\text{cm}^3]}{\pi \cdot d^2[\text{cm}]} \quad (5.1)$$

mit V : Volumen des Sandes

d : Durchmesser des entstehenden Sandkreises

Im nachfolgenden Bild ist die Oberfläche der in den Versuchen benutzten Elementplatten dargestellt.

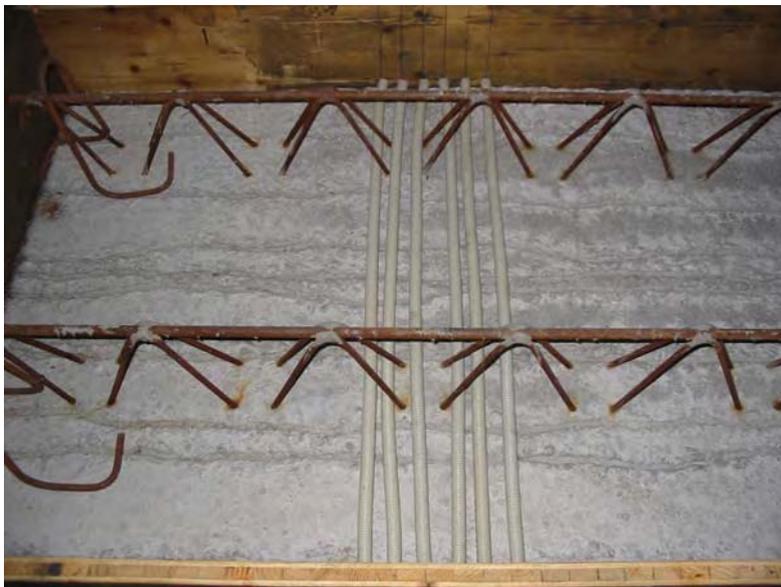


Bild 5-6: Oberfläche der verwendeten Elementplatten

Die Oberfläche wurde profiliert. Allerdings wäre eine Riefung senkrecht zu den Gitterträgern sinnvoller. Die entstandene Oberfläche ist sehr inhomogen. Das Sandflächenverfahren wurde deshalb an mehreren Stellen der Elementplatte angewendet. So kann eine Aussage über die mittlere Rauigkeit getroffen werden.

Zur Erfüllung der Bedingungen nach Heft 525 muss der Durchmesser des entstehenden Kreises bei einer Sandmenge von 2cl kleiner als 16,8 cm sein.

$$0,9 \geq \frac{40 \cdot 20}{\pi \cdot 16,8^2} = 0,902 \quad (5.2)$$



Bild 5-7: Versuche zur Bestimmung der Rautiefe

Die Messungen ergaben sehr unterschiedliche Werte in Abhängigkeit der Lage des Kreismittelpunktes. Lag dieser beispielsweise zwischen zwei Ritzungen, so ergab sich ein Kreisdurchmesser von 10,5 cm (ohne Abbildung). Lag der Kreismittelpunkt jedoch zwischen zwei Ritzungen mit großem Abstand und wurde der Sand bewusst nur zwischen den Ritzungen verteilt so ergaben sich Durchmesser von bis zu 18 cm.

Die Rautiefe der Elementplatten liegt entsprechend der oben angegebenen Formel zwischen 2,3 und 0,79. Die Oberflächenbeschaffenheit der Elementplatten kann also im Mittel als rau angenommen werden.

5.2.4 Versuche mit zusätzlicher Zugnormalkraft

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde der Versuchsaufbau erweitert. Die Zugkrafteinleitung erfolgte mit einem waagrecht angeordneten Hydraulikzylinder. Die Zugkrafteinleitung erfolgte über GEWI – Stäbe. Eine Anschlussbewehrung in den Versuchskörpern stellte die Einleitung der Zugkraft sicher.

Im nachfolgenden Bild ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

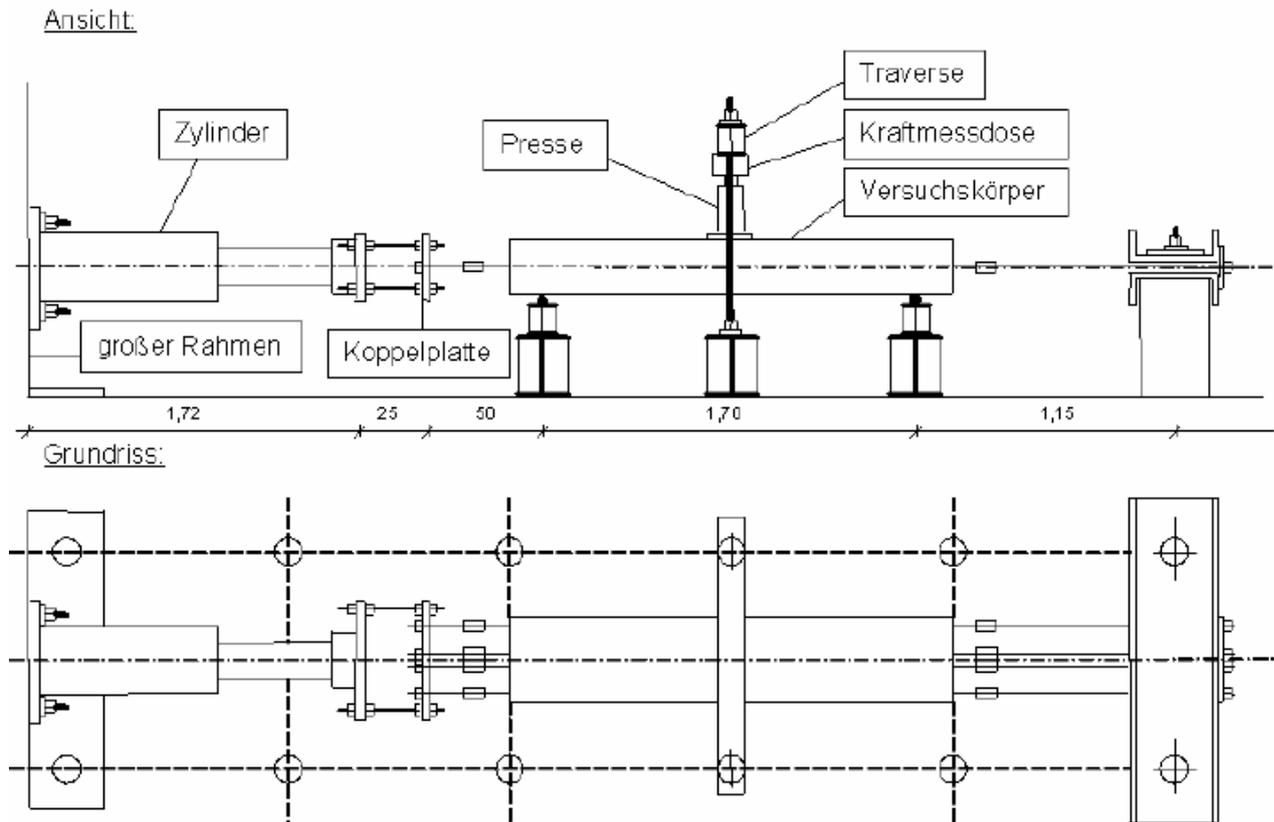


Abbildung 5-4: Versuchsaufbau der Versuche mit Zugkraft

Zur Eintragung der Zugkraft diente ein horizontal angeordneter Zylinder. Der Zylinder wurde über eine Koppelplatte und GEWI-Stäbe mit dem Versuchskörper verbunden. Die Rückverankerung der Zugkraft erfolgte über aus dem Versuchskörper herausgeführte GEWI - Stäbe die an einen Widerlager befestigt wurden.

Auf Grund der unterschiedlichen oberen und unteren Bewehrung entstand beim Einleiten der Zugkraft eine geringe Exzentrizität.

Nach Erreichen der gewünschten Zugkraft wurde die Vertikalkraft mittels einer Hohlkolbenpresse aufgebracht.

Die Zugkraft wurde während der Vertikallastaufbringung konstant gehalten.

6 Versuchsauswertungen

6.1 Versuchsreihe 1 und 2

6.1.1 Versagen

Die Versagensart aller Plattenstreifen war Querkraftversagen. Ausgehend von den Biegerissen im Bereich der Öffnung pflanzte sich der Versagensriss ausgehend von der Öffnung in die Druckzone des Querschnitts fort.

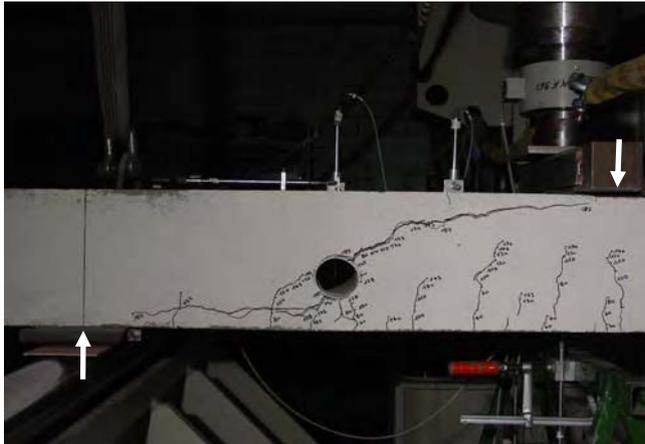


Bild 6-1: Versagensbild VersuchT14_75_unten

In Bild 6-1 ist beispielhaft ein Versagensbild dargestellt. Bei fast allen Versuchen stellte sich ein Schubriss ein, der die Öffnung kreuzte. Nur bei sehr kleinem Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu Statischer Höhe und Lage der Öffnung im oberen Bereich des Querschnitts entstand zwar zunächst ein Riss durch die Öffnung, der zum Versagen führende Schubriss verlagerte sich jedoch in den Bereich unterhalb der Öffnung (Bild 6-2).

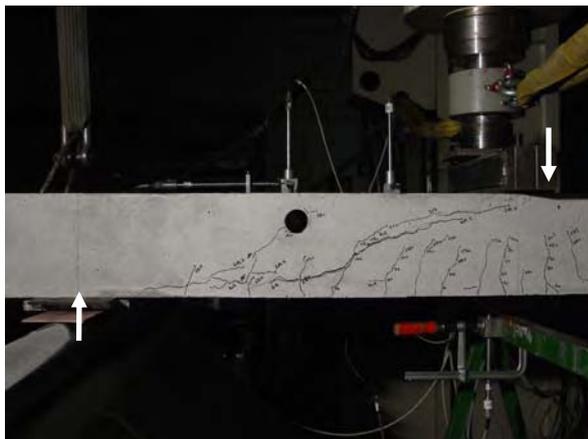


Bild 6-2: Querkraftversagen unterhalb der Öffnung (T11_50_oben)

Die Versagensbilder aller Versuche werden im Anhang dargestellt.

6.1.2 Messergebnisse

Beispielhaft werden hier die Messergebnisse des Versuches T4_120_oben dargestellt und erläutert. Die Messergebnisse aller Versuche können dem Anhang entnommen werden.

Das nachfolgende Diagramm zeigt das Last – Verformungsdiagramm des Versuchskörpers T4_120_oben. Dazu wird die Mittendurchbiegung über die aufgebrachte Kraft aufgetragen. Bei ca. 60 kN erkennt man an der Steifigkeitsänderung den Übergang von Zustand I zu Zustand II. Bei einer Last von 138 kN tritt ein plötzliches Versagen mit einem Lastabfall von 70 kN auf. Eine Bruchvorkündigung kann aus dem Last-Verformungs-Diagramm nicht abgelesen werden.

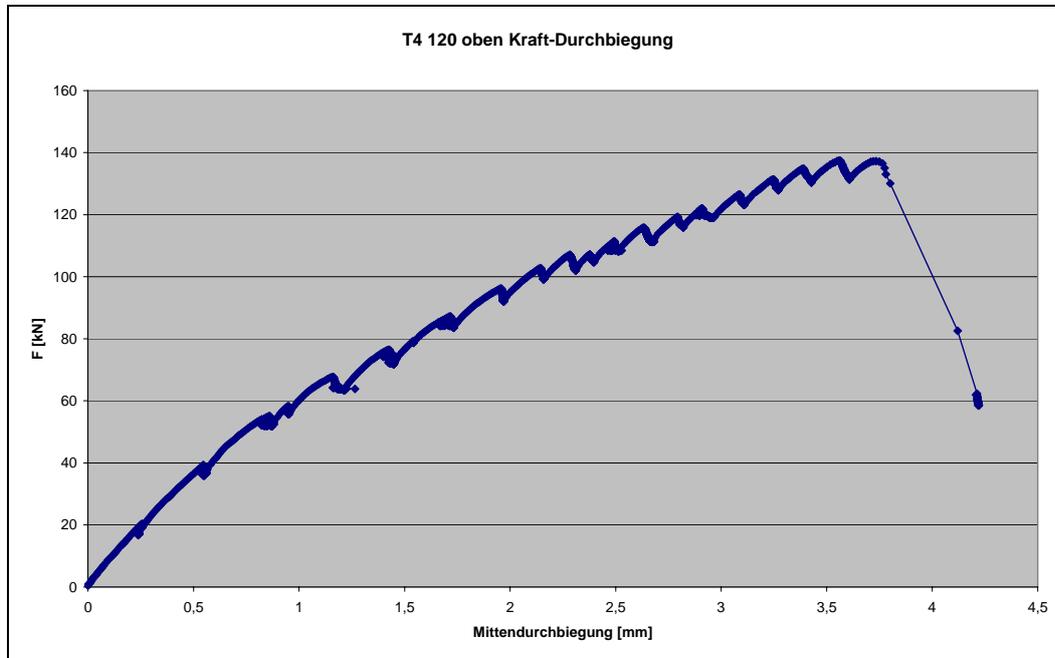


Diagramm 6-1: Kraft-Dehnungsdiagramm T4_120_oben

Diagramm 6-2 zeigt die Biegelinien des Versuchs bei verschiedenen Laststufen. Schon bei ca. 119 kN ist eine, im Vergleich zur Versuchsträgerseite ohne Öffnung, größere Durchbiegung zu beobachten.

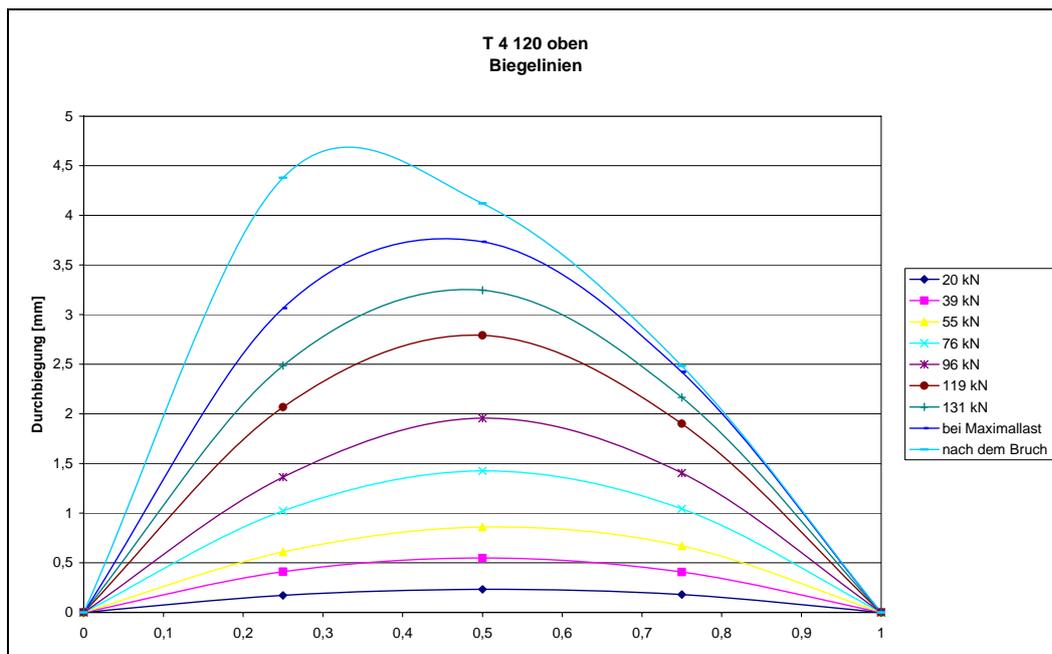


Diagramm 6-2: Biegelinien Versuch T4_120_oben

Ein Wegaufnehmer zeichnete während des Versuches die Dehnungen der Druckzone im Bereich der Öffnungen auf. Bis zu einer Last von 100 kN wird die Druckzone wie erwartet gestaucht. Mit dem ersten Auftreten eines Schubrisses ausgehend vom oberen Öffnungsbe-
reich geht die Stauchung der Druckzone zurück. Bei einer Dehnung von ca. 0,2 ‰ können die entstehenden Zugspannungen am oberen Querschnittsrand nicht mehr aufgenommen werden. Es entsteht ein Riss ausgehend vom oberen Querschnittsrand bis hin zur Öffnung (in Abbildung 6-1 rot dargestellt).

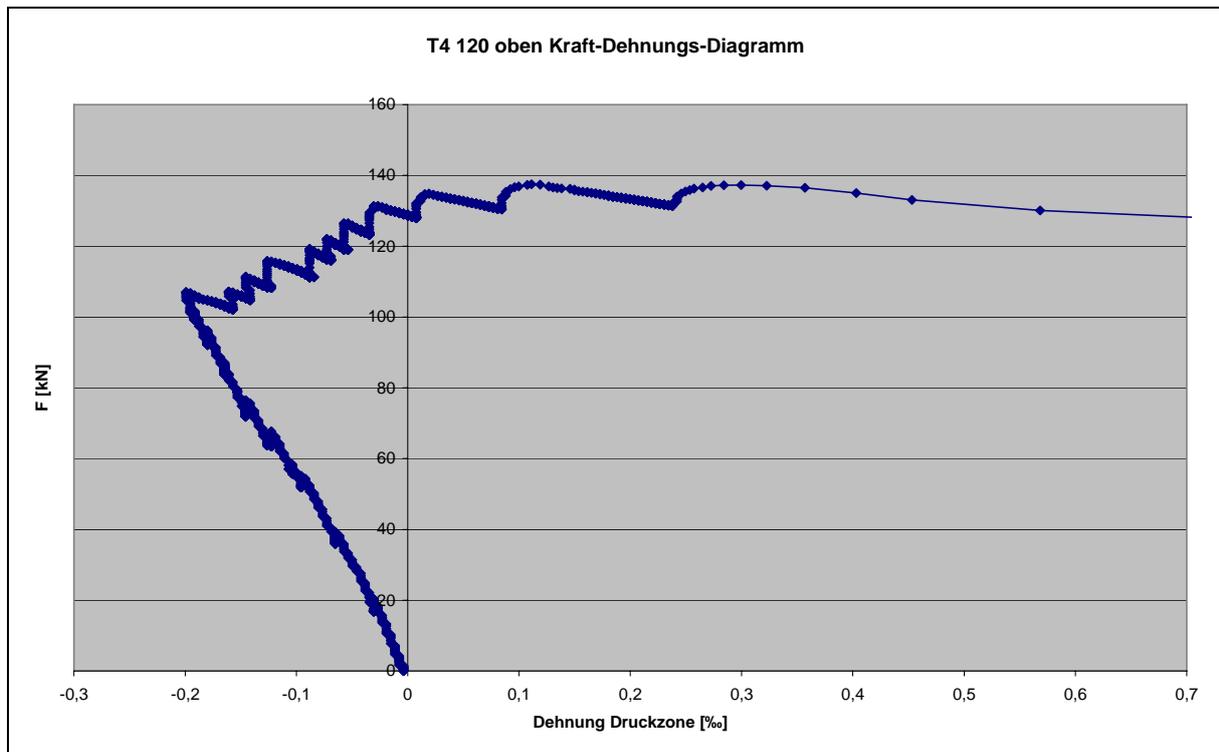


Diagramm 6-3: Dehnung der Druckzone im Bereich der Öffnung

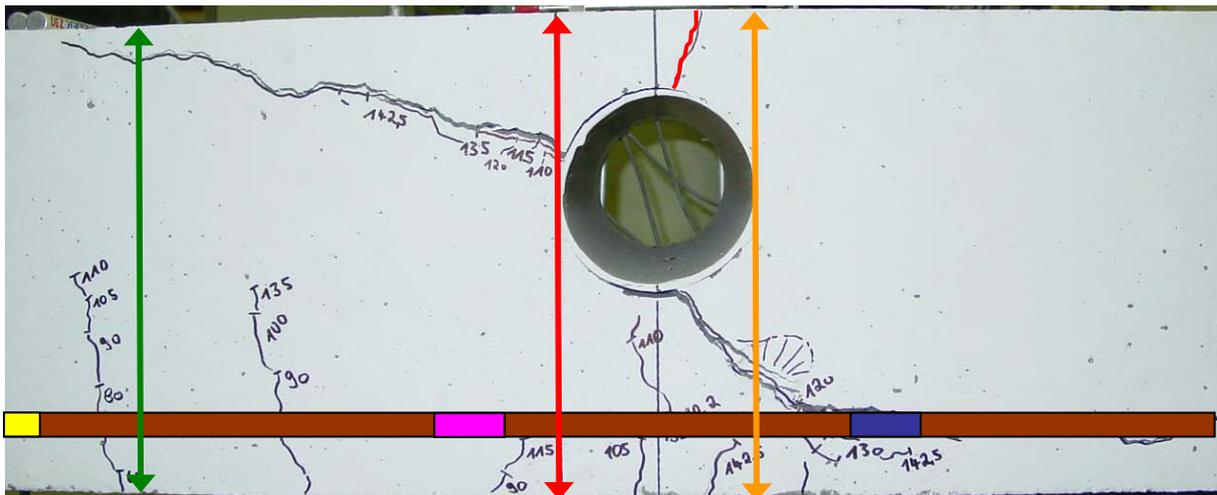


Abbildung 6-1: Versuch T4_120_oben

Diagramm 6-4 zeigt die Dehnungen der Längsbewehrung. In Abbildung 6-1 ist die Lage der Dehnmessstreifen (DMS) im Versuchskörper entsprechend den Farben der Kurven dargestellt. DMS 3 wurde in Feldmitte angeordnet und erfährt die größte Dehnung. DMS 1 liegt im

Bereich zwischen Öffnung und Auflager. Kurz vor dem Erreichen der Traglast steigt die Dehnung überproportional an.

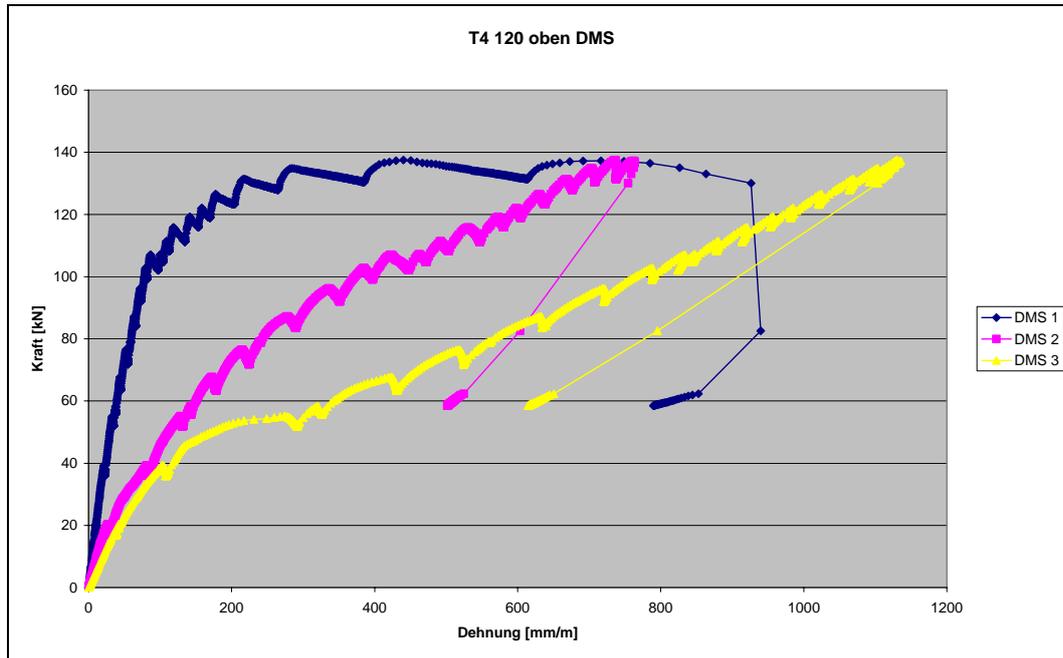


Diagramm 6-4: Dehnung der Längsbewehrung

Diagramm 6-5 zeigt die Messergebnisse dreier Wegaufnehmer, die die Änderungen der Versuchskörperdicke maßen. In Abbildung 6-1 ist die Lage dieser Wegaufnehmer dargestellt. Ab einer Last von etwas 110 kN ist eine deutliche Aufwölbung des Querschnitts im Bereich der Öffnung zu beobachten. Bei dieser Last entstehen auch die ersten Schubrisse ausgehend von der Öffnung.

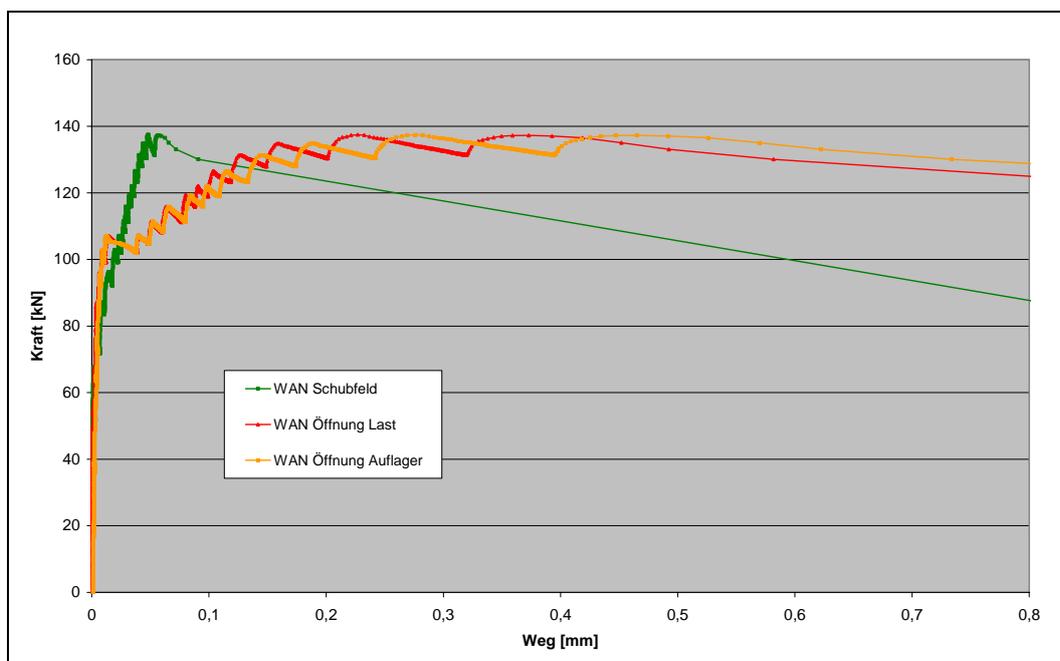


Diagramm 6-5: Messdaten der Wegaufnehmer (Dickenänderung des Querschnitts)

6.1.3 Fotogrammetrie

In Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-5 sind Ergebnisbilder der photogrammetrischen Messung von Versuch T5 (Öffnungsaußendurchmesser 70 mm) dargestellt. Die dargestellten Balken stellen die Abstandsänderung der Messpunkte dar. Die Extremwerte an den Rändern sind Ausreißer die z.B. durch das Lösen einzelner Messpunkte entstehen können. In Abbildung 6-4 kann man die Entstehung der ersten Biegerisse erkennen. Die Risspitze der Biegerisses auf der lastabgewandten Seite der Öffnung hat die Öffnung schon erreicht, während der Biegeriss rechts der Öffnung noch nicht so weit ausgeprägt ist.

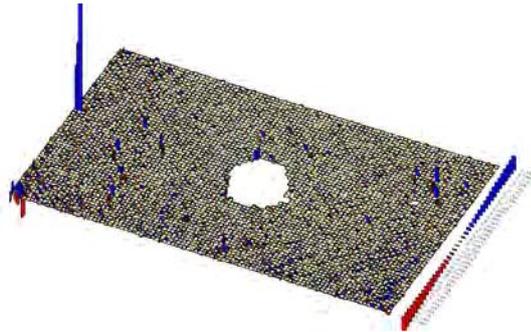


Abbildung 6-2: T5_Kiefer Stadium 1

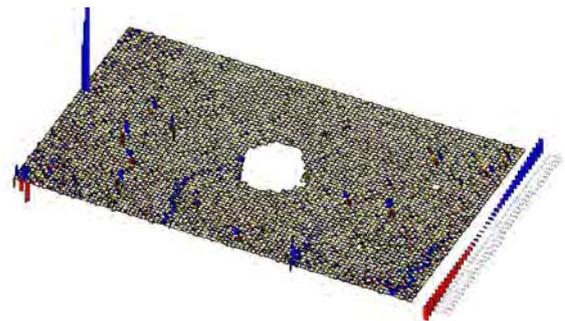


Abbildung 6-3: T5_Kiefer Stadium 2

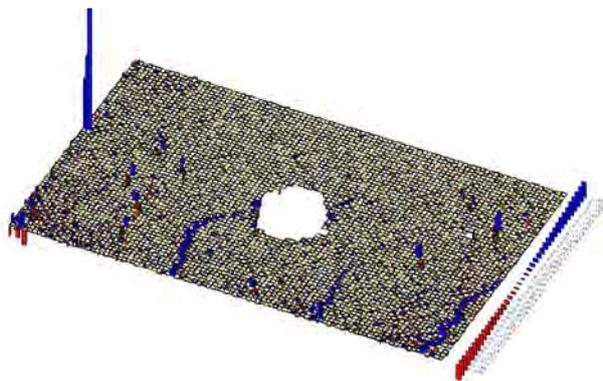


Abbildung 6-4: T5_Kiefer Stadium 3

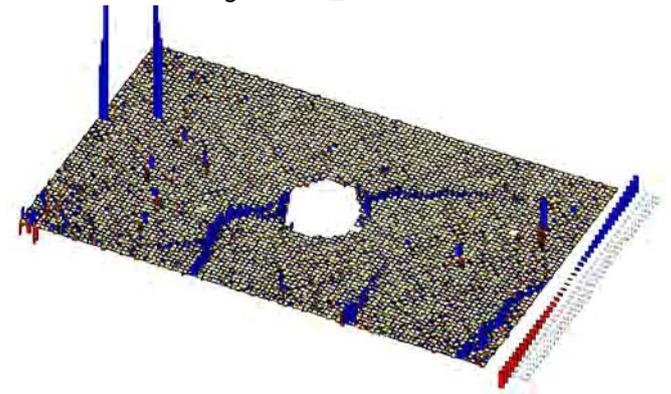


Abbildung 6-5: T5_Kiefer Stadium 4

Der Biegeriss links der Öffnung neigt sich, entwickelt sich oberhalb der Öffnung weiter und pflanzt sich bis zum Erreichen der Traglast in die Druckzone fort. Kurz vor dem Erreichen der Traglast entsteht auf der Höhe der Längsbewehrung ein Schrägriss ausgehend vom maßgebenden Versagensriss.

Im Folgenden ist in den Bildern (Abbildung 6-6 – Abbildung 6-11) die Rissentwicklung des Versuchs T5_120_mitte dargestellt.

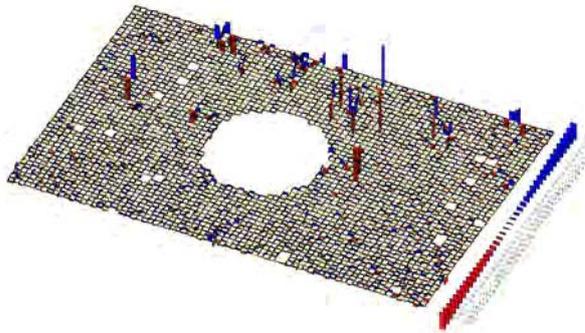


Abbildung 6-6: T5_120_mitte Stadium 1

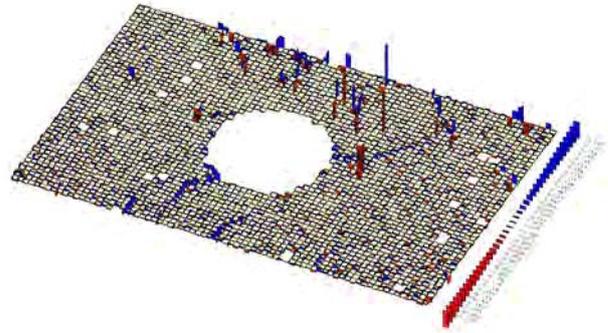


Abbildung 6-7: T5_120_mitte Stadium 2

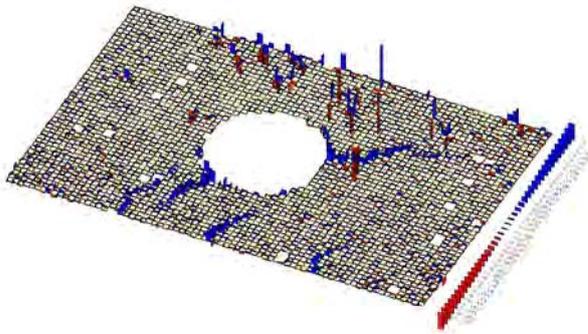


Abbildung 6-8: T5_120_mitte Stadium 3

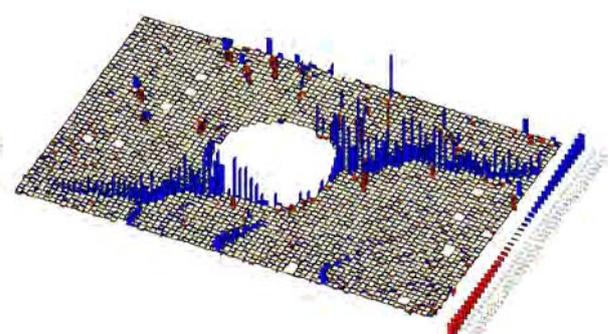


Abbildung 6-9: T5_120_mitte Stadium 4

Die Rissentwicklung in diesem Versuch unterscheidet sich vom oben genannten dadurch, dass der zum Versagen führende Riss sich nicht aus einem Biegeriss entwickelt sondern von der Öffnung ausgehend entsteht. Erst kurz vor Erreichen der Traglast vereinigt sich dieser Riss mit einem Biegeriss links der Öffnung und pflanzt sich dann auf Höhe der Bewehrung Richtung Lasteinleitung fort.

6.1.4 Übersicht Traglasten

In Tabelle 6-1 sind die Traglasten, die Betonfestigkeiten, sowie wesentliche Kennwerte aller Versuche mit einer Einzelöffnung und die entsprechenden Referenzversuche dargestellt. Die Bestimmung der Traglastabminderung gegenüber dem Vollquerschnitt erfolgte zunächst mit zwei unterschiedlichen Vergleichslasten:

1. Vergleich mit dem Referenzlasten aus den Traglastversuchen
2. Vergleich mit dem rechnerisch ermittelten mittleren Widerstandswert $V_{Rm,ct}$

$V_{Rm,ct}$ wurde nach folgender Gleichung ermittelt:

$$V_{Rm,ct} = 0,2 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (6.1)$$

	Versuchs- bezeichnung	f_c [N/mm ²]	ρ_l [-]	A_{cl} [cm ²]	Maximallast im Versuch F_u [kN]	statische Höhe d [mm]	Aussendurchmesser Öffnung d_ϕ [mm]	d_ϕ/d [-]	F_u / rechnerische Referenzlast [-]	$F_u / F_{u,Referenz}$ [-]
Versuchsreihe 1	T1_70_unten	32,4	0,009	9,1	171	248	75	0,30	0,77	0,80
Versuchsreihe 1	T1_ohne	32,4	0,009	9,1	213	248	0	0,00	0,95	1,00
Versuchsreihe 1	T2_70_mitte	32,8	0,009	9,1	188	248	75	0,30	0,85	0,88
Versuchsreihe 1	T2_70_oben	32,8	0,009	9,1	218	248	75	0,30	0,98	1,02
Versuchsreihe 1	T3_100_mitte	31,6	0,009	9,1	159	248	105	0,42	0,71	0,75
Versuchsreihe 1	T3_100_oben	31,6	0,009	9,1	164	248	105	0,42	0,74	0,77
Versuchsreihe 1	T4_100_unten	32,4	0,016	16,1	152	248	105	0,42	0,68	0,71
Versuchsreihe 1	T4_120_oben	32,4	0,009	9,1	137	248	125	0,50	0,62	0,65
Versuchsreihe 1	T5_120_mitte	32,0	0,009	9,1	129	248	125	0,50	0,58	0,61
Versuchsreihe 1	T5_Kiefer	32,0	0,009	9,1	158	248	80	0,32	0,71	0,74
Versuchsreihe 1	T6_70_mitte	28,5	0,014	16,1	218	297	75	0,25	0,76	0,84
Versuchsreihe 1	T6_70_unten	28,9	0,014	16,1	203	297	75	0,25	0,70	0,79
Versuchsreihe 1	T7_70_oben	31,2	0,014	16,1	258	297	0	0,00	0,90	1,00
Versuchsreihe 1	T8_100_mitte	31,2	0,014	16,1	196	297	105	0,35	0,68	0,76
Versuchsreihe 1	T8_100_oben	31,6	0,014	16,1	187	297	105	0,35	0,65	0,72
Versuchsreihe 2	T10_40_oben	52,91	0,020	16,1	203	167	40	0,24	0,83	0,91
Versuchsreihe 2	T10_75_oben	52,91	0,020	16,1	172	167	75	0,45	0,70	0,77
Versuchsreihe 2	T11_40_mitte	52,91	0,020	16,1	193	167	40	0,24	0,79	0,87
Versuchsreihe 2	T11_50_oben	52,9	0,020	16,1	211	167	50	0,30	0,86	0,95
Versuchsreihe 2	T12_40_unten	52,9	0,020	16,1	192	167	40	0,24	0,78	0,86
Versuchsreihe 2	T12_50_unten	52,9	0,020	16,1	177	167	50	0,30	0,72	0,79
Versuchsreihe 2	T13_75_mitte	53,75	0,019	16,1	184	217	75	0,35	0,60	0,73
Versuchsreihe 2	T13_O	53,75	0,019	16,1	254	217	0	0,00	0,82	1,00
Versuchsreihe 2	T14_75_oben	53,75	0,019	16,1	244	217	75	0,35	0,79	0,96
Versuchsreihe 2	T14_75_unten	53,75	0,019	16,1	187	217	75	0,35	0,61	0,74
Versuchsreihe 2	T9_75_mitte	52,91	0,020	16,1	143	167	75	0,45	0,47	0,56
Versuchsreihe 2	T9_O	52,92	0,020	16,1	223	167	0	0,00	0,90	1,00

Tabelle 6-1: Übersicht Versuchsergebnisse

Im nachfolgenden Diagramm ist die in Tabelle 6-1 berechnete Resttragfähigkeit über dem Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu Statischer Höhe aufgetragen. Die mit Gleichung 6.1 berechneten Referenzlasten liegen immer etwas über den im Versuch gemessenen Werten. Deshalb ergibt sich beim Vergleich mit dem berechneten Referenzwerten eine tendenziell größere Abminderung als beim Vergleich mit den Referenzversuchen.

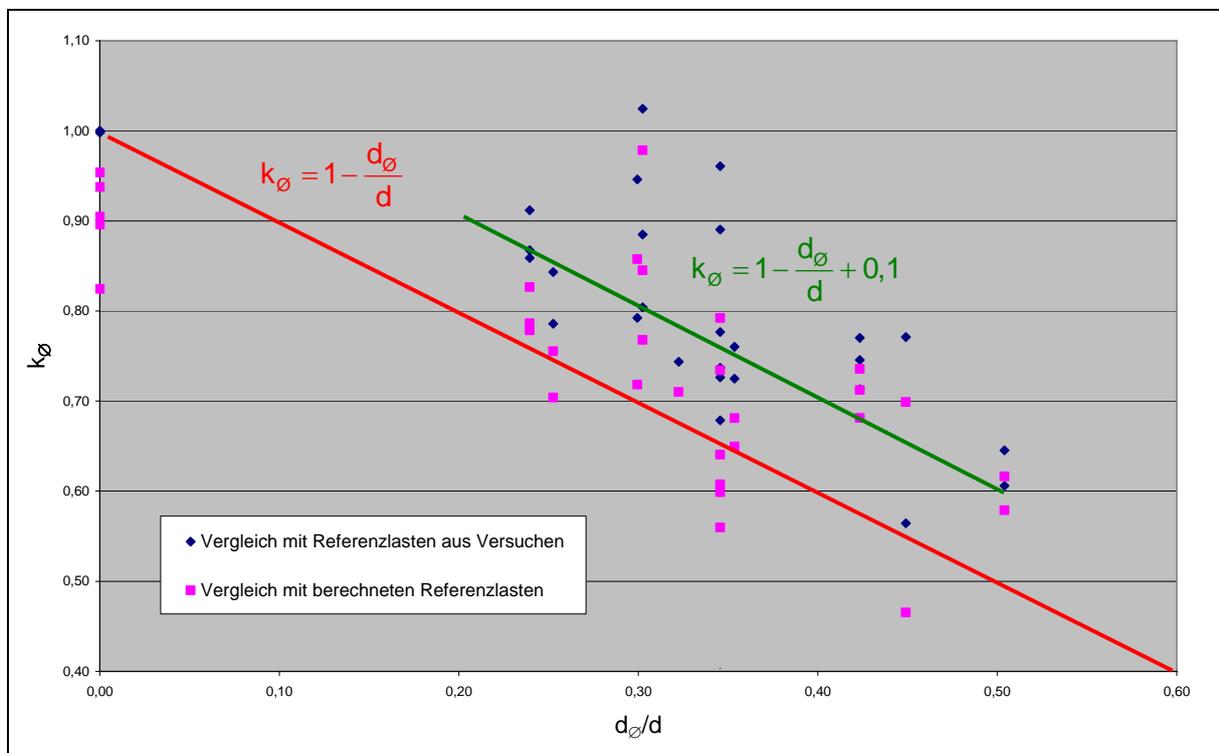


Diagramm 6-6: Resttragfähigkeit k_ϕ

Die in roter Farbe eingetragene Gerade würde einer der Querschnittsreduzierung entsprechenden Tragfähigkeitsabminderung entsprechen. In der nachfolgenden Tabelle wurden die berechneten Tragfähigkeiten mit der Traglast im Versuch verglichen. Der Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit wurde zu

$$k_{\emptyset} = 1 - \frac{d_{\emptyset}}{d} \text{ angesetzt.} \quad (6.2)$$

	Versuchs- bezeichnung	f_c	ρ_l	Querschnitts- breite b	A_{sl}	Maximallast im Versuch F_u	$V_{Rm,ct}$ ohne Abminderung	k_{\emptyset}	$k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,ct}$	$F_u / (k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,ct})$
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
Versuchsreihe 1	T1_70_unten	32,4	0,009	0,400	9,1	171	223	0,698	155	1,102
Versuchsreihe 1	T1_ohne	32,4	0,009	0,400	9,1	213	223	1,000	223	0,954
Versuchsreihe 1	T2_70_mitte	32,8	0,009	0,400	9,1	188	224	0,698	156	1,207
Versuchsreihe 1	T2_70_oben	32,8	0,009	0,400	9,1	218	224	0,698	156	1,397
Versuchsreihe 1	T3_100_mitte	31,6	0,009	0,400	9,1	159	221	0,577	127	1,248
Versuchsreihe 1	T3_100_oben	31,6	0,009	0,400	9,1	164	221	0,577	127	1,289
Versuchsreihe 1	T4_100_unten	32,4	0,016	0,400	16,1	152	270	0,577	156	0,976
Versuchsreihe 1	T4_120_oben	32,4	0,009	0,400	9,1	137	223	0,496	111	1,244
Versuchsreihe 1	T5_120_mitte	32,0	0,009	0,400	9,1	129	222	0,496	110	1,173
Versuchsreihe 1	T5_Kiefer	32,0	0,009	0,400	9,1	158	222	0,677	150	1,054
Versuchsreihe 1	T6_70_mitte	28,5	0,014	0,400	16,1	218	278	0,747	208	1,047
Versuchsreihe 1	T6_70_unten	28,9	0,014	0,400	16,1	203	279	0,747	209	0,971
Versuchsreihe 1	T7_70_oben	31,2	0,014	0,400	16,1	258	288	1,000	288	0,896
Versuchsreihe 1	T8_100_mitte	31,2	0,014	0,400	16,1	196	288	0,646	186	1,054
Versuchsreihe 1	T8_100_oben	31,6	0,014	0,400	16,1	187	289	0,646	187	1,000
Versuchsreihe 2	T10_40_oben	52,91	0,020	0,400	16,1	203	246	0,760	187	1,086
Versuchsreihe 2	T10_75_oben	52,91	0,020	0,400	16,1	172	246	0,551	136	1,268
Versuchsreihe 2	T11_40_mitte	52,91	0,020	0,400	16,1	193	246	0,760	187	1,033
Versuchsreihe 2	T11_50_oben	52,9	0,020	0,400	16,1	211	246	0,701	172	1,223
Versuchsreihe 2	T12_40_unten	52,9	0,020	0,400	16,1	192	246	0,760	187	1,023
Versuchsreihe 2	T12_50_unten	52,9	0,020	0,400	16,1	177	246	0,701	172	1,025
Versuchsreihe 2	T13_75_mitte	53,75	0,019	0,400	16,1	184	308	0,654	201	0,917
Versuchsreihe 2	T13_O	53,75	0,019	0,400	16,1	254	308	1,000	308	0,826
Versuchsreihe 2	T14_75_oben	53,75	0,019	0,400	16,1	244	308	0,654	201	1,213
Versuchsreihe 2	T14_75_unten	53,75	0,019	0,400	16,1	187	308	0,654	201	0,930
Versuchsreihe 2	T9_75_mitte	52,91	0,020	0,400	16,1	143	246	0,551	136	1,057
Versuchsreihe 2	T9_O	52,92	0,020	0,400	16,1	223	246	1,000	246	0,904

Mittelwert:	1,075
Standardabweichung:	0,14
Variationskoeffizient:	0,13

Tabelle 6-2: Gesamtauswertung Versuchsreihe 1 und 2

Wertet man so alle Versuche aus, erhält man im Mittel eine um 7% größere Tragfähigkeit im Versuch im Vergleich zur berechneten Traglast.

In der nachfolgenden Auswertung soll jetzt die Höhenlage der Öffnung im Querschnitt Beachtung finden. Die oben durchgeführte Auswertung erfolgt nun getrennt für die Öffnungslage im unteren Querschnittsbereich, im oberen Querschnittsbereich und bei mittiger Lage im Querschnitt.

	Versuchs- bezeichnung	f_c	ρ_l	Querschnitts- breite b	A_{sl}	Maximallast im Versuch F_u	$V_{Rm,ct}$ ohne Abminderung	k_{\emptyset}	$k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,ct}$	$F_u / (k_{\emptyset} \cdot V_{Rm,ct})$
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
Versuchsreihe 1	T1_70_unten	32,4	0,009	0,400	9,1	171	223	0,698	155	1,102
Versuchsreihe 1	T4_100_unten	32,4	0,016	0,400	16,1	152	270	0,577	156	0,976
Versuchsreihe 1	T6_70_unten	28,9	0,014	0,400	16,1	203	279	0,747	209	0,971
Versuchsreihe 2	T12_40_unten	52,9	0,020	0,400	16,1	192	246	0,760	187	1,023
Versuchsreihe 2	T12_50_unten	52,9	0,020	0,400	16,1	177	246	0,701	172	1,025
Versuchsreihe 2	T14_75_unten	53,75	0,019	0,400	16,1	187	308	0,654	201	0,930

Mittelwert:	1,004
Standardabweichung:	0,06
Variationskoeffizient:	0,06

Tabelle 6-3: Auswertung der Versuche mit Öffnungen im unteren Querschnittsbereich

	Versuchs- bezeichnung	f_c	ρ_1	Querschnitts- breite b	A_{sl}	Maximallast im Versuch F_u	$V_{Rm,ct}$ ohne Abminderung	k_\emptyset	$k_\emptyset \cdot V_{Rm,ct}$	$F_u / (k_\emptyset \cdot V_{Rm,ct})$
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
Versuchsreihe 1	T2_70_mitte	32,8	0,009	0,400	9,1	188	224	0,698	156	1,207
Versuchsreihe 1	T3_100_mitte	31,6	0,009	0,400	9,1	159	221	0,577	127	1,248
Versuchsreihe 1	T5_120_mitte	32,0	0,009	0,400	9,1	129	222	0,496	110	1,173
Versuchsreihe 1	T5_Kiefer	32,0	0,009	0,400	9,1	158	222	0,677	150	1,054
Versuchsreihe 1	T6_70_mitte	28,5	0,014	0,400	16,1	218	278	0,747	208	1,047
Versuchsreihe 1	T8_100_mitte	31,2	0,014	0,400	16,1	196	288	0,646	186	1,054
Versuchsreihe 2	T11_40_mitte	52,91	0,020	0,400	16,1	193	246	0,760	187	1,033
Versuchsreihe 2	T13_75_mitte	53,75	0,019	0,400	16,1	184	308	0,654	201	0,917
Versuchsreihe 2	T9_75_mitte	52,91	0,020	0,400	16,1	143	246	0,551	136	1,057

	Mittelwert:	1,088
	Standardabweichung:	0,10
	Variationskoeffizient:	0,09

Tabelle 6-4: Auswertung der Versuche mit Öffnungen im mittleren Querschnittsbereich

	Versuchs- bezeichnung	f_c	ρ_1	Querschnitts- breite b	A_{sl}	Maximallast im Versuch F_u	$V_{Rm,ct}$ ohne Abminderung	k_\emptyset	$k_\emptyset \cdot V_{Rm,ct}$	$F_u / (k_\emptyset \cdot V_{Rm,ct})$
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
Versuchsreihe 1	T2_70_oben	32,8	0,009	0,400	9,1	218	224	0,698	156	1,397
Versuchsreihe 1	T3_100_oben	31,6	0,009	0,400	9,1	164	221	0,577	127	1,289
Versuchsreihe 1	T4_120_oben	32,4	0,009	0,400	9,1	137	223	0,496	111	1,244
Versuchsreihe 1	T7_70_oben	31,2	0,014	0,400	16,1	258	288	1,000	288	0,896
Versuchsreihe 1	T8_100_oben	31,6	0,014	0,400	16,1	187	289	0,646	187	1,000
Versuchsreihe 2	T10_40_oben	52,91	0,020	0,400	16,1	203	246	0,760	187	1,086
Versuchsreihe 2	T10_75_oben	52,91	0,020	0,400	16,1	172	246	0,551	136	1,268
Versuchsreihe 2	T14_75_oben	53,75	0,019	0,400	16,1	244	308	0,654	201	1,213

	Mittelwert:	1,174
	Standardabweichung:	0,17
	Variationskoeffizient:	0,14

Tabelle 6-5: Auswertung der Versuche mit Öffnungen im oberen Querschnittsbereich

Die oben aufgeführten Auswertungen zeigen, dass bei Lage der Öffnungen im unteren Querschnittsbereich eine größere Traglastabminderung als bei Lage der Öffnungen im mittleren oder oberen Querschnittsbereich. Bei Lage der Öffnung im unteren Teil des Trägers wird ein mittleres Verhältnis von 1,0 der berechneten zu den tatsächlichen Traglasten erreicht. Das bedeutet, dass für die ungünstigste Öffnungslage im untern Trägerbereich die mittlere Traglast mit dem Abminderungsfaktor k_\emptyset berechnet werden kann.

Damit ergibt sich die folgende Bemessungsgleichung für Querschnitte mit kreisrunden Öffnungen mit Verhältnissen von Öffnungsdurchmesser zu statischer Höhe zwischen 0,2 und 0,5 zu:

$$V_{Rd,ct,\emptyset} = k_\emptyset \cdot \left[0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (6.3)$$

$$k_\emptyset = 1 - \frac{d_\emptyset}{d}$$

Bei Einzelöffnungen deren Mittelachse zwischen Querschnittsmittelpunkt und gedrücktem Rand liegt, kann der Faktor k_\emptyset entsprechend Tabelle 6-4 und Tabelle 6-5 um 0,1 erhöht werden:

$$k_\emptyset = 1 - \frac{d_\emptyset}{d} + 0,1$$

6.2 Versuchsreihe 3

6.2.1 Lage der Öffnung in Bauteillängsrichtung

Tabelle 6-6 zeigt die Traglasten und die wesentlichen Versuchsparameter der Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Lage der Öffnung in Bauteillängsrichtung. Da die Versuchsreihen 1 und 2 gezeigt haben, dass die ungünstigste Positionierung bezüglich der Traglast im unteren Querschnittsbereich liegt, wurden die Öffnungen der im folgenden betrachteten Versuche ebenfalls im unteren Querschnittsbereich angeordnet. Der Abstand von Lasteinleitung zu Lagerachse betrug 85 cm.

Versuchsbezeichnung	f_c	ρ_l	Querschnittsbreite b	A_{st}	Abstand der Öffnungsachse von der Auflagerachse	Maximallast im Versuch F_u	$V_{Rm,ct}$	statische Höhe d	Aussendurchmesser Öffnung d_\emptyset	d_\emptyset/d	$F_u /$ rechnerischer Referenzlast
[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Versuchsreihe 3 T_315	38	0,019	0,40	16,1	-	245	271	217	0	0,00	0,90
Versuchsreihe 3 T_316	38	0,019	0,40	16,1	120	195	271	217	75	0,35	0,72
Versuchsreihe 3 T_317	38	0,019	0,40	16,1	195	185	271	217	75	0,35	0,68
Versuchsreihe 3 T_318	38	0,019	0,40	16,1	270	168	271	217	75	0,35	0,62
Versuchsreihe 3 T_319	38	0,019	0,40	16,1	320	204	271	217	50	0,23	0,75
Versuchsreihe 3 T_320	38	0,019	0,40	16,1	220	210	271	217	50	0,23	0,77
Versuchsreihe 3 T_321	38	0,019	0,40	16,1	445	195	271	217	50	0,23	0,72
Versuchsreihe 3 T_322	38	0,019	0,40	16,1	120	231	271	217	50	0,23	0,85

Tabelle 6-6: Versuchsparameter und Traglasten – Lage der Öffnungen in Bauteillängsrichtung

Die Versuchsergebnisse zeigen bereits eine klare Tendenz. Die Tragfähigkeit des Querschnitts fällt mit zunehmender Entfernung vom Auflager ab.

Die in Diagramm 6-7 eingetragenen Geraden zeigen den angestrebten Faktor für die Resttragfähigkeit des geschwächten Querschnitts an. Nur Versuche mit großem Abstand von Öffnung zu Auflagerachse liegen geringfügig unterhalb des berechneten Wertes der Querkrafttragfähigkeit.

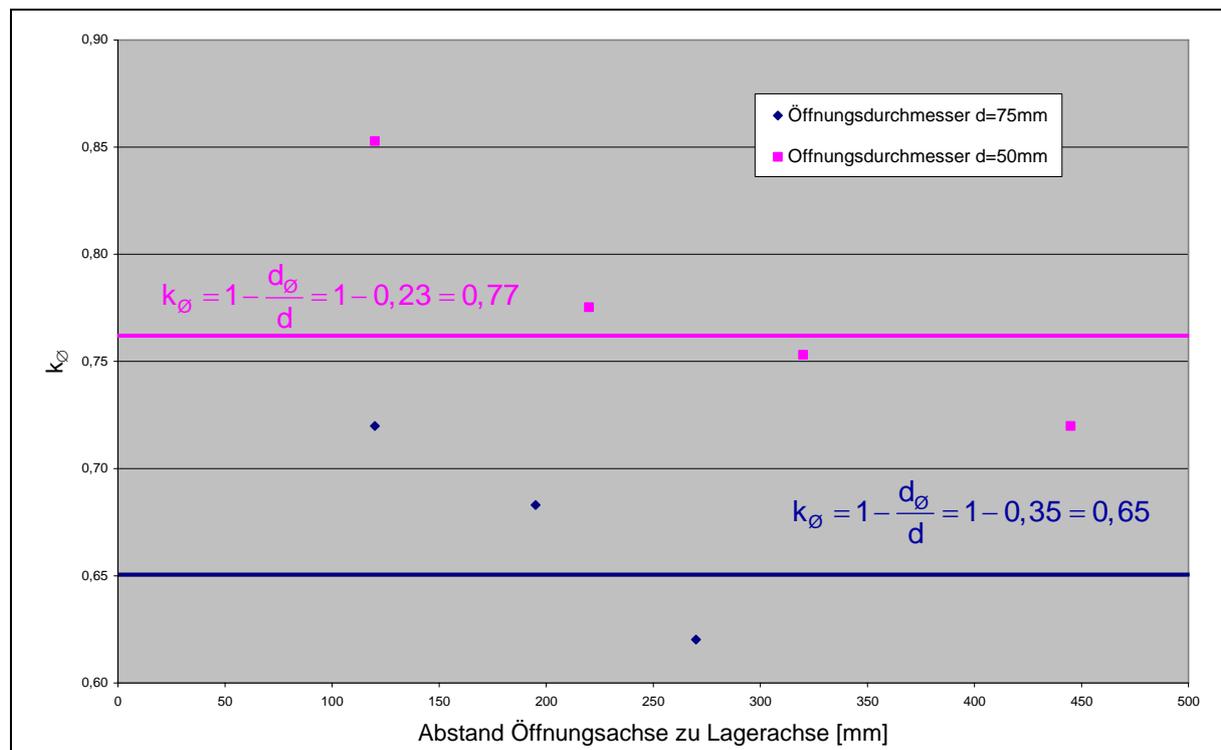


Diagramm 6-7: Lage der Öffnungen in Bauteillängsrichtung

Der auf die Stützweite bezogene Abstand der Öffnungen zur Auflagerlinie betrug in den Versuchsserien 1 und 2 etwa 0,5. In Versuchsreihe 3 betrug der größte betrachtete bezogene Öffnungsabstand 0,52.

In Kapitel 7.3 werden Parameterstudien mit der FE –Methode vorgestellt, die weitere Ergebnisse zum Einfluss der Lage der Öffnung liefern sollen. Hauptsächlich soll geklärt werden, ob die Traglast bei weiterer Näherung an die Lasteinleitung weiter abfällt.

6.2.2 Versuche mit Zugkraft

In Tabelle 6-7 werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt.

Veruchs- bezeichnung	statische Höhe d	d _ö	d _ö /d	eingeleitete Zugkraft	Betonfestigkeit am Versuchstag f _{cm}	Traglast im Versuch
	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[N/mm ³]	[kN]
LBV 01	217	-	-	190	22,3	177
LBV 02	217	-	-	-	23,9	190
LBV 03	217	75	0,35	170	23,9	105
LBV 04	217	50	0,23	140	23,9	126
LBV 05	217	40	0,18	160	22,4	155
LBV 06	217	75	0,35	150	22,4	110

Tabelle 6-7: Versuchparameter und Traglasten – Versuche mit Zugkraft

Der Vergleich der Traglasten der Referenzversuche LBV 1 und LBV 2 zeigt eine Traglastdifferenz von ca. 12 kN. Das entspricht einer Abminderung um 6,5%.

Bei einer Bemessung nach DIN 1045-1 wird die Zugkraft im Querschnitt durch eine Abminderung der Querkrafttragfähigkeit in Abhängigkeit der Zugkraft im Querschnitt wie folgt berücksichtigt:

$$V_{Rd,ct} = \left[0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (6.4)$$

$$= 0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \cdot b_w \cdot d$$

mit $\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{N_{Ed}}{b_w \cdot h}$ ergibt sich:

$$V_{Rd,ct} = 0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot N_{Ed} \cdot \frac{d}{h} \quad (6.5)$$

Auf Niveau des Mittelwertes ergibt sich aus Gleichung 3.4:

$$V_{Rm,ct} = c_k \cdot \gamma_c \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot N_{Ek} \cdot \frac{d}{h}$$

$$= 0,14 \cdot 1,5 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot N_{Ek} \cdot \frac{d}{h} \quad (6.6)$$

$$= 0,2 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot N_{Ek} \cdot \frac{d}{h}$$

Nach Gleichung 3.5 ergibt sich die Abminderung der Querkrafttragfähigkeit zu:

$$\begin{aligned}\Delta V_{Rm,ct} &= -0,12 \cdot N_{Ek} \cdot \frac{d}{h} \\ &= -0,12 \cdot 190 \cdot \frac{21,7}{25,0} = -19,8 \text{ kN}\end{aligned}\quad (6.7)$$

Die rechnerische Querkrafttragfähigkeit $V_{Rm,ct,cal}$ ermittelt sich rechnerisch zu:

$$\begin{aligned}V_{Rm,ct} &= 0,2 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d - 0,12 \cdot N_{Ek} \cdot \frac{d}{h} \\ \kappa &= 1 + \sqrt{200/d} = 1 + \sqrt{200/217} = 1,92 \leq 2,0 \\ \rho_1 &= \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = \frac{16,01}{0,4 \cdot 0,218} = 0,0184 \leq 0,02 \\ f_{ck} &= f_{cm} - 8 = 22 - 8 = 14 \text{ N/mm}^2 \\ &= 0,2 \cdot 1,92 \cdot (100 \cdot 0,0184 \cdot 14)^{1/3} \cdot 0,4 \cdot 0,217 - 0,12 \cdot 0,19 \cdot \frac{0,217}{0,25} = \\ &= 0,098 - 0,0198 = 0,078 \text{ MN} = 78 \text{ kN}\end{aligned}\quad (6.8)$$

In der nachfolgenden Tabelle wurde die rechnerische Traglast $V_{Rm,ct,cal}$ nach Gleichung 3.7 für alle Versuche ermittelt und mit der im Versuch ermittelten Traglast V_{Test} verglichen.

Der Abminderungsfaktor k_\emptyset für einzelne kreisrunde Öffnungen wurde entsprechend den vorhergehenden Auswertungen zu

$$k_\emptyset = 1 - \frac{d_\emptyset}{d} \quad (6.9)$$

angesetzt.

Veruchs- bezeichnung	statische Höhe d	d_5	d_5/d	eingeleitete Zugkraft	Betonfestigkeit am Versuchstag f_{cm}	Querkraft im Versuch V_{Test}	k_\emptyset	$V_{Rm,ct,cal}$	$V_{Test}/V_{Rm,ct,cal}$
	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[N/mm ²]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
LBV 01	217	-	-	190	22,3	88,5		79	1,115
LBV 02	217	-	-	-	23,9	95		103	0,925
LBV 03	217	75	0,35	170	23,9	52,5	0,65	56	0,944
LBV 04	217	50	0,23	140	23,9	63	0,77	68	0,929
LBV 05	217	40	0,18	160	22,4	77,5	0,82	67	1,149
LBV 06	217	75	0,35	150	22,4	55	0,65	55	1,004

Mittelwert	1,01
Standardabweichung	0,10
Variationskoeffizient	9,75

Tabelle 6-8. Vergleich der Bruchlasten mit den berechneten Werten

Die Auswertung in Tabelle 6-8 zeigt, dass der gefundene Abminderungsfaktor k_\emptyset auch bei den Nachweisen von Querschnitten mit Zugbeanspruchung Anwendung finden kann.

6.2.3 Rechteckige Öffnungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens 259 wurden 6 Versuche mit rechteckigen Öffnungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche und die Versuchsparameter können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Bei den Versuchskörpern T_309 bis T_312 wurde die Öffnung im unteren Querschnittsbereich angeordnet. Die Öffnungen in den Versuchskörpern T_313 und T_314 wurden im oberen Trägerbereich angeordnet.

	Versuchsbezeichnung	f_c	ρ_l	Querschnittsbreite b	A_{st}	$V_{Rm,ct}$ ohne Abminderung	Breite der Öffnung	Maximallast im Versuch F_u	statische Höhe d	Öffnungshöhe w	w/d	F_u / rechnerische Referenzlast
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Versuchsreihe 3	T_315	38	0,019	0,400	16,100	271	-	245	217	0	0,00	0,90
Versuchsreihe 3	T_309	38	0,019	0,400	16,100	271	150	157	217	50	0,23	0,58
Versuchsreihe 3	T_310	38	0,019	0,400	16,100	271	250	119	217	50	0,23	0,44
Versuchsreihe 3	T_311	38	0,019	0,400	16,100	271	150	186	217	25	0,12	0,69
Versuchsreihe 3	T_312	38	0,019	0,400	16,100	271	250	159	217	25	0,12	0,59
Versuchsreihe 3	T_313	38	0,019	0,400	16,100	271	150	188	217	25	0,12	0,69
Versuchsreihe 3	T_314	38	0,019	0,400	16,100	271	250	182	217	25	0,12	0,67

Tabelle 6-9: Versuchsparameter der Versuche mit rechteckigen Öffnungen

Das nachfolgend dargestellte Diagramm zeigt den Abminderungsfaktor, der sich bei Vergleich der im Versuch ermittelten Tragfähigkeit F_u zur rechnerischen Tragfähigkeit $V_{Rm,ct}$ ergibt. Die gestrichelt eingetragenen Linien entsprechen dem Abminderungsfaktor für runde Öffnungen mit einem Außendurchmesser von 50 bzw. 25 mm.

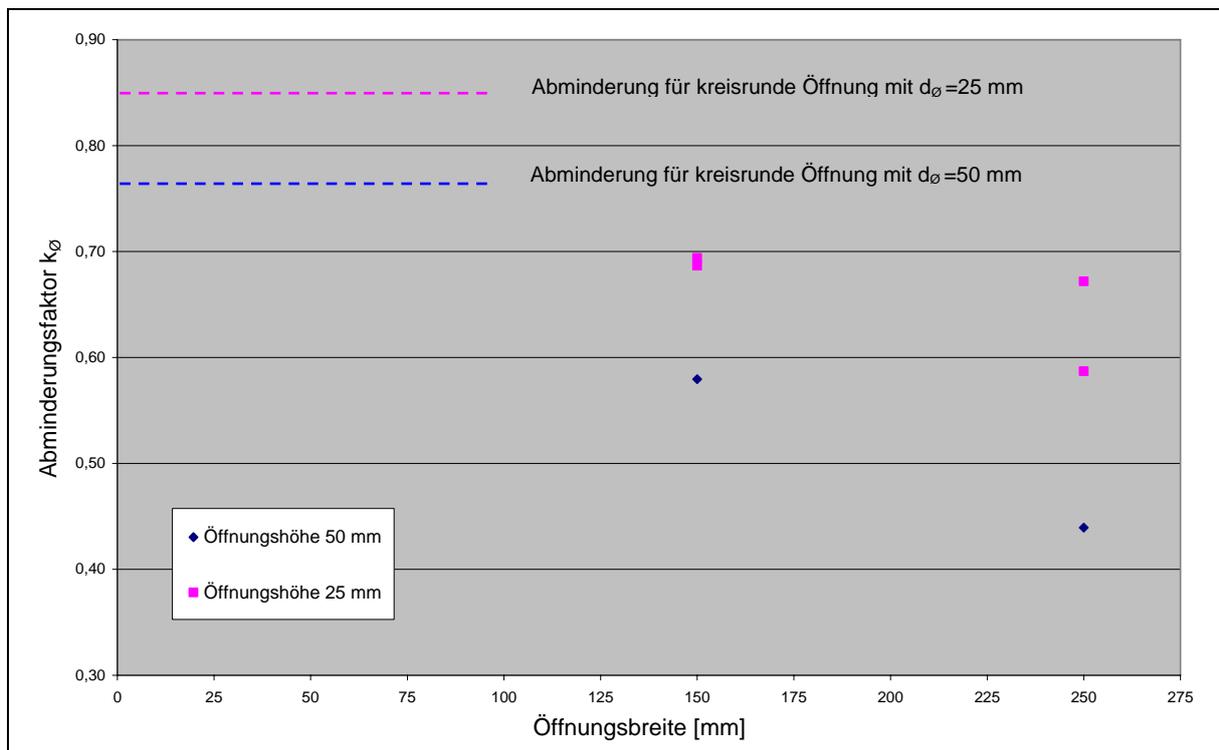


Diagramm 6-8: Einfluss der Öffnungsweite auf die Traglast

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Öffnungsweite die Traglast deutlich abfällt. Es ist zu vermuten, dass eine quadratische Öffnung mit der Kantenlänge a eine größere Traglastabminderung als eine runde Öffnung mit dem Außendurchmesser a verursacht.

Aufgrund der geringen Versuchsanzahl wurden hier FE-Berechnungen durchgeführt, die Abminderungsfaktoren für rechteckige Öffnungen in Abhängigkeit von der Öffnungshöhe und der Öffnungsbreite definieren sollen.

6.2.4 Öffnungsabstand bei mehreren Öffnungen

Vier Versuche mit jeweils zwei Öffnungen sollten erste Aussagen über die gegenseitige Beeinflussung mehrere Öffnungen geben. Ziel der Versuche war es einen Öffnungsabstand zu definieren, bei dem die Tragfähigkeit der Einzelöffnung erreicht wird.

	Versuchsbezeichnung	ρ_1	Querschnittsbreite b	A_{st}	$V_{Rm,ed}$ ohne Abminderung	Öffnungsabstand f	f/d_\emptyset	Maximallast im Versuch F_U	statische Höhe d	Aussendurchmesser Öffnung d_\emptyset	d_\emptyset/d	F_U / rechnerische Referenzlast
	[-]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[mm]	[-]	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Versuchsreihe 3	T_315	0,019	0,400	16,1	271	-	-	245	217	0	0,00	0,90
Versuchsreihe 3	T_307	0,019	0,400	16,1	271	100	2	187	217	50	0,23	0,69
Versuchsreihe 3	T_308	0,019	0,400	16,1	271	150	3	212	217	50	0,23	0,78
Versuchsreihe 3	T_305	0,019	0,400	16,1	271	150	2	161	217	75	0,35	0,59
Versuchsreihe 3	T_306	0,019	0,400	16,1	271	225	3	164	217	75	0,35	0,61

Tabelle 6-10: Versuchsparemeter und Ergebnisse der Versuche mit mehreren Öffnungen

In Diagramm 6-9 ist der mit Versuchen gefundene Abminderungsfaktor k_\emptyset in Abhängigkeit des Verhältnisses von Öffnungsabstand zu Öffnungsdurchmesser aufgetragen. Man erkennt hier, dass bei Versuch T_308 mit einem Öffnungsdurchmesser von 50 mm und einem Öffnungsabstand entsprechend dem 3-fachen Öffnungsdurchmesser die Tragfähigkeit eines Querschnitts mit nur einer Öffnung erreicht wurde.

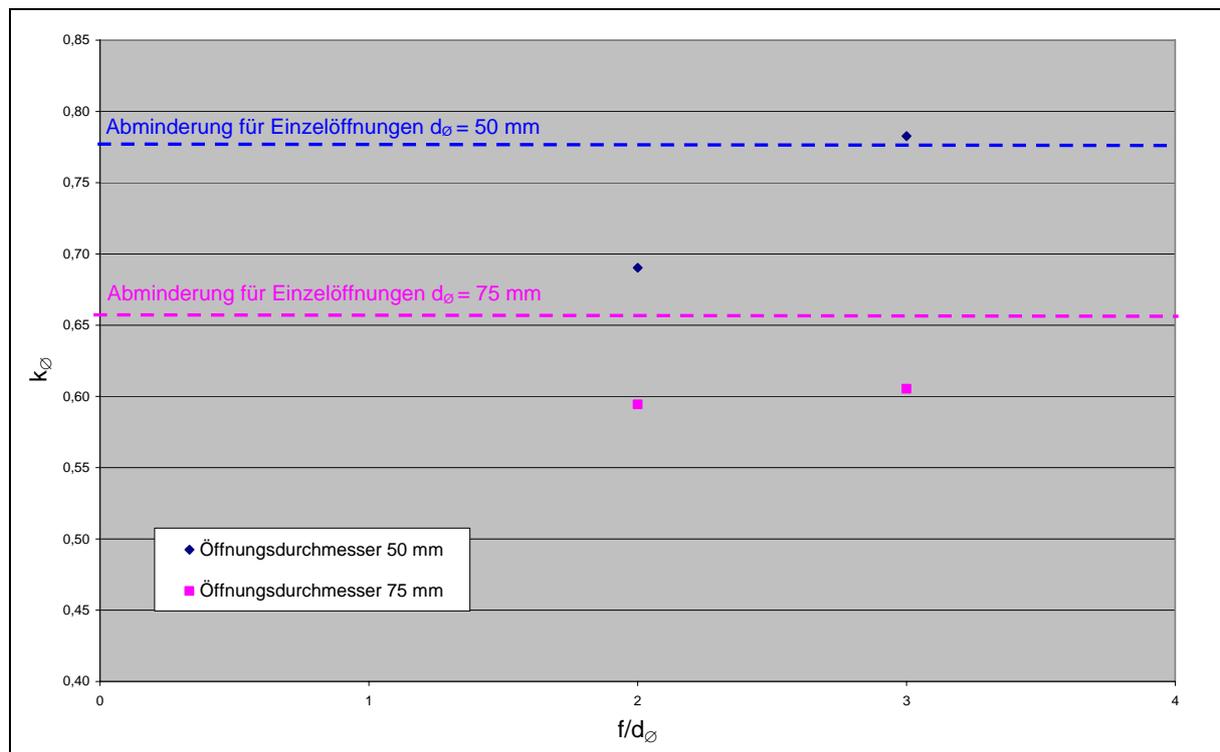


Diagramm 6-9: Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit k_\emptyset in Abhängigkeit vom bezogenen Öffnungsabstand f/d_\emptyset

Finite- Element- Simulationen sollen diese Versuche bestätigen und einen entsprechenden Öffnungsabstand zur Sicherstellung der Tragfähigkeit einer Einzelöffnung oder einen zusätzlichen Abminderungsfaktor bei Unterschreitung des Mindestabstandes ableiten.

6.2.5 Öffnungen im Momentennullpunkt

Tabelle 6-11 zeigt die Versuchsparameter und Ergebnisse der vier durchgeführten Versuche zur Klärung des Einflusses von Öffnungen im Momentennullpunkt.

Hier ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den bisher ausgewerteten Versuchen die im Versuch ermittelten Traglasten über den berechneten liegen. Als Referenzwert wurde deshalb auf der sicheren Seite liegend die Tragfähigkeit des tatsächlichen Referenzversuchs angesetzt.

	Versuchs- bezeichnung	f_c	ρ_l	Querschnitts- breite b	A_{st}	$V_{Rm,el}$ ohne Abminderung	Maximale Querkraft im Versuch F_{Qd}	statische Höhe d	Öffnungsdurch- messer d_\emptyset	d_\emptyset/d	$F_{Qd} / \text{Maximale}$ Querkraft aus dem Referenzversuch
	[-]	[N/mm ²]	[-]	[m]	[cm ²]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
Versuchsreihe 3	T_323	35,8	0,011	0,400	9,050	108	131,5	209	0	0,00	1,00
Versuchsreihe 3	T_324	34,2	0,011	0,400	9,050	106	98,5	209	50	0,24	0,75
Versuchsreihe 3	T_325	37,2	0,011	0,400	9,050	109	76,5	209	75	0,36	0,58
Versuchsreihe 3	T_326	34,8	0,011	0,400	9,050	106	122,5	209	40	0,19	0,93

Tabelle 6-11: Versuchsparameter und Ergebnisse der Versuche mit Öffnungen im Momentennullpunkt

Wie Diagramm 6-10 zu entnehmen ist entspricht die in den Versuchen beobachtete Abminderung gut dem angenommenen Abminderungsfaktor k_\emptyset nach Gleichung 6.2, der als gestrichelte Linie in das Diagramm eingetragen wurde.

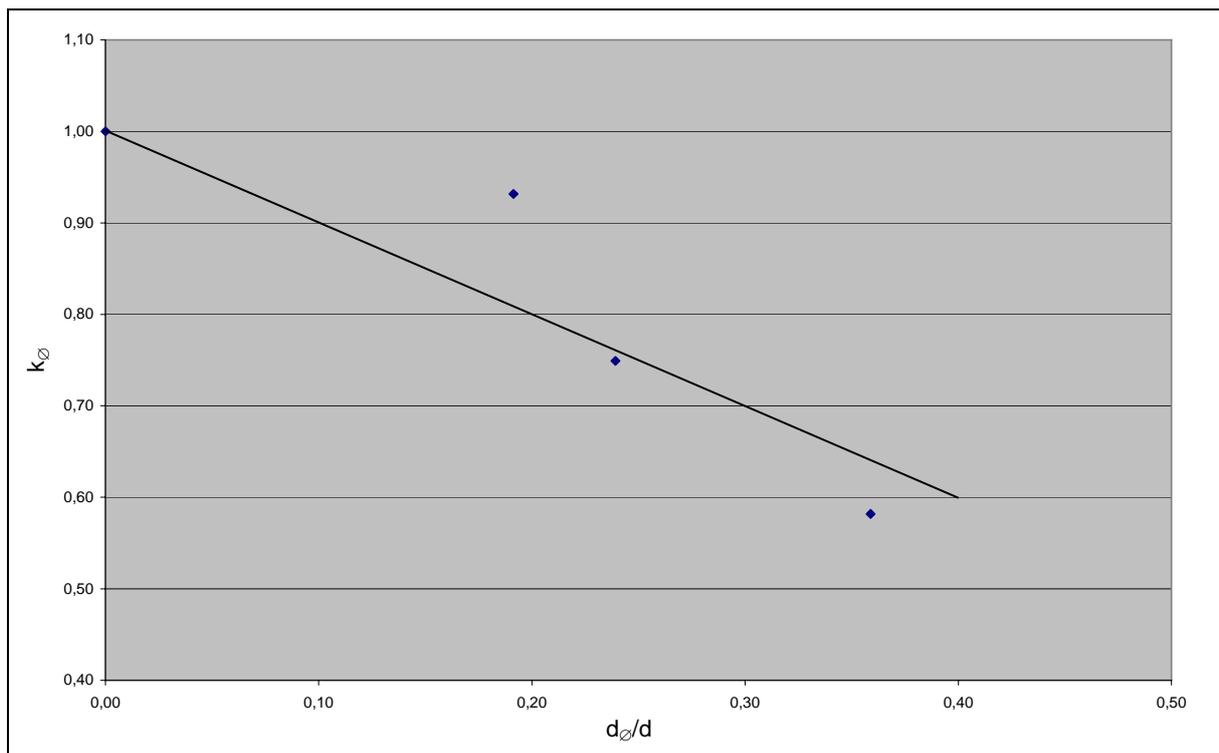


Diagramm 6-10: Tragfähigkeitsabminderung bei Öffnungen im Momentennullpunkt

Der gefundene Abminderungsfaktor k_\emptyset kann auch im Bereich von Momentennullpunkten angewendet werden.

6.2.6 Untersuchungen an Elementdecken

Aus den Versuchen an Elementdecken mit Öffnungen konnten keinerlei Ergebnisse bezüglich der Tragfähigkeitsreduzierung der Verbundfuge durch Öffnungen gewonnen werden. Bei den sechs durchgeführten Versuchen trat jeweils ein Biegeversagen auf. Zwar sind Schubrisse ausgehend von den Öffnungen zu erkennen, doch die Rauigkeit der Fuge und die vorhandenen Gitterträger verhinderten ein vorzeitiges Querkraftversagen.

7 Parameterstudien

7.1 Finite- Element Programm ATENA

Die Parameterstudien zu den oben beschriebenen Versuchen wurden mit dem Finite-Element Programm ATENA [19] durchgeführt.

In Atena steht dem Anwender das Werkstoffmodell SBETA (**Stahl**betonanalyse) zur Verfügung. Dieses macht es möglich, den Verbundwerkstoff Stahlbeton wirklichkeitsnah abzubilden.

Folgende Materialeigenschaften werden in SBETA berücksichtigt:

- nichtlineares Verhalten unter Druckbeanspruchung mit Berücksichtigung von Verfestigungs- und Entfestigungsbereichen,
- Bruchverhalten von Beton unter Zugbeanspruchung auf Basis nichtlinearen Bruchmechanik,
- Berücksichtigung eines bilinearen Festigkeitsverlustes,
- Abminderung der Druckfestigkeit nach Aufreißen des Elementes,
- Berücksichtigung von „tension stiffening“ –Effekten,
- Abminderung der Schubfestigkeit nach dem Reißen,
- Rissmodelle „Fixed Crack Modell“ und „Rotated Crack Model“.

Die Abbildung der Bewehrung erfolgt im FE- Modell diskret mit Stabelementen. Diese besitzen nur eine einaxiale Steifigkeit in Längsrichtung und werden in die Betonelemente eingebettet.

Die Verbindung zwischen Beton- und Bewehrungselementen wird über Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen beschrieben. Dazu stehen in ATENA zwei Modelle zur Verfügung:

- CEB-FIP Model Code1990
- Bigaj

Für die Lösung nichtlinearer Probleme kann ATENA auf folgende implizierte Berechnungsverfahren zurückgreifen:

- Newton- Raphson Verfahren
- Bogenlängenverfahren

Ein eindimensionales Strahloptimierungsverfahren (Line Search) kann mit den oben genannten Lösungsalgorithmen kombiniert werden.

Alle Finite-Element Berechnungen wurden wie die Traglastversuche verschiebungsgesteuert durchgeführt. Anfangs wurden vergleichende Berechnungen mit verschiedenen Lösungsalgorithmen durchgeführt. Dabei wurden unter Verwendung des Bogenlängenverfahrens in Kombination mit dem Line Search Algorithmus die in Bezug auf die Rechenzeit wirtschaftlichsten Ergebnisse geliefert.

Im folgenden werden einige Ergebnisse der FE-Berechnungen im Vergleich zu den Versuchsergebnissen dargestellt.

7.2 Einzelöffnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudien zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Querschnitten mit Einzelöffnungen dargestellt.

Die folgenden Parameter wurden bei der Parameterstudie variiert:

- Bauteildicke,
- Öffnungsdurchmesser,
- Öffnungslage im Querschnitt:

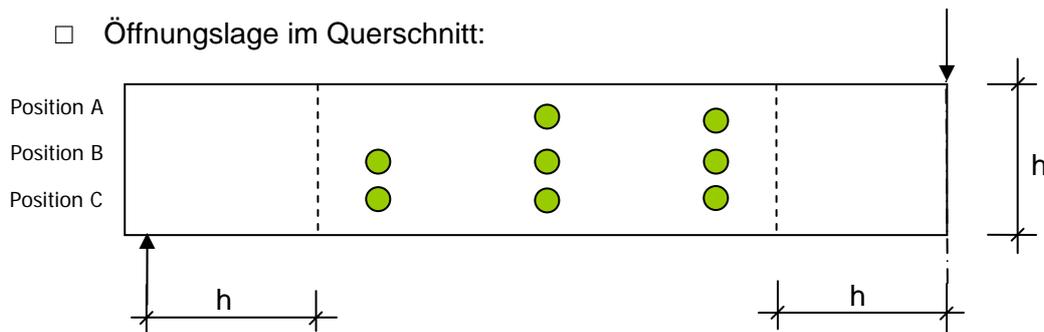


Abbildung 7-1: Lage der Öffnungen im Querschnitt

- Bewehrungsgrad.

In Diagramm 7-1 werden die Ergebnisse der ATENA Rechnungen dargestellt. Der Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit wird über das Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu Statischer Höhe aufgetragen. Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse wurde unterschieden bezüglich der Höhenlage der Öffnung im Querschnitt.

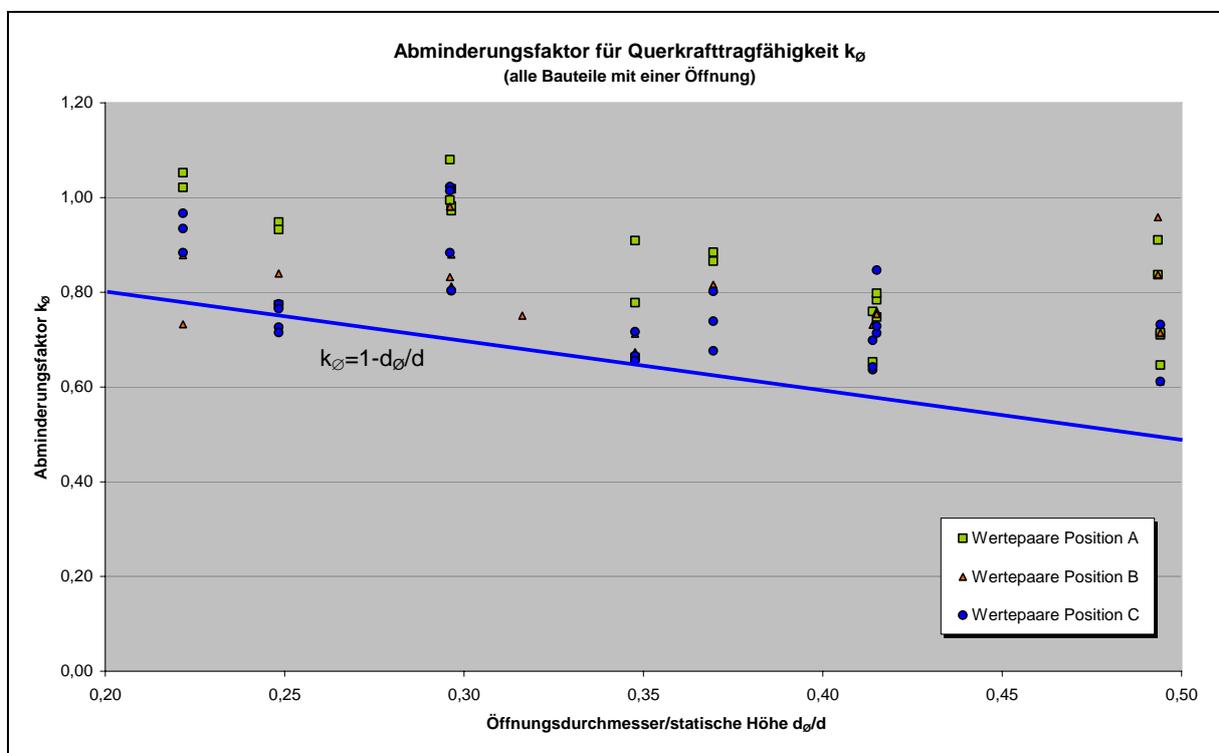


Diagramm 7-1: Abminderungsfaktor für Einzelöffnungen

Wie schon bei den Bauteilversuchen festgestellt bewirken Öffnungen im unteren Querschnittsbereich eine größer Traglastabminderung als Öffnungen im oberen Querschnittsbe-

reich. Der in Gleichung 4.4 definierte Abminderungsfaktor kann unabhängig von der Höhenlage der Öffnung Anwendung finden.

7.3 Lage der Öffnung in Tragrichtung

Auch die Versuchsnachrechnungen zur Bestimmung des Einflusses vom Öffnungsabstand zum Auflager brachten ein mit den Versuchen übereinstimmendes Bild. In Diagramm 7-2 sind die Ergebnisse der FE- Berechnungen dargestellt. Hieraus ergibt sich für alle überprüften Verhältnisse von Öffnungsdurchmesser zu Statischer Höhe, dass die bei dem hier geprüften statischen System die Öffnung ungünstiger auswirkt, je weiter sie vom Auflager entfernt ist.

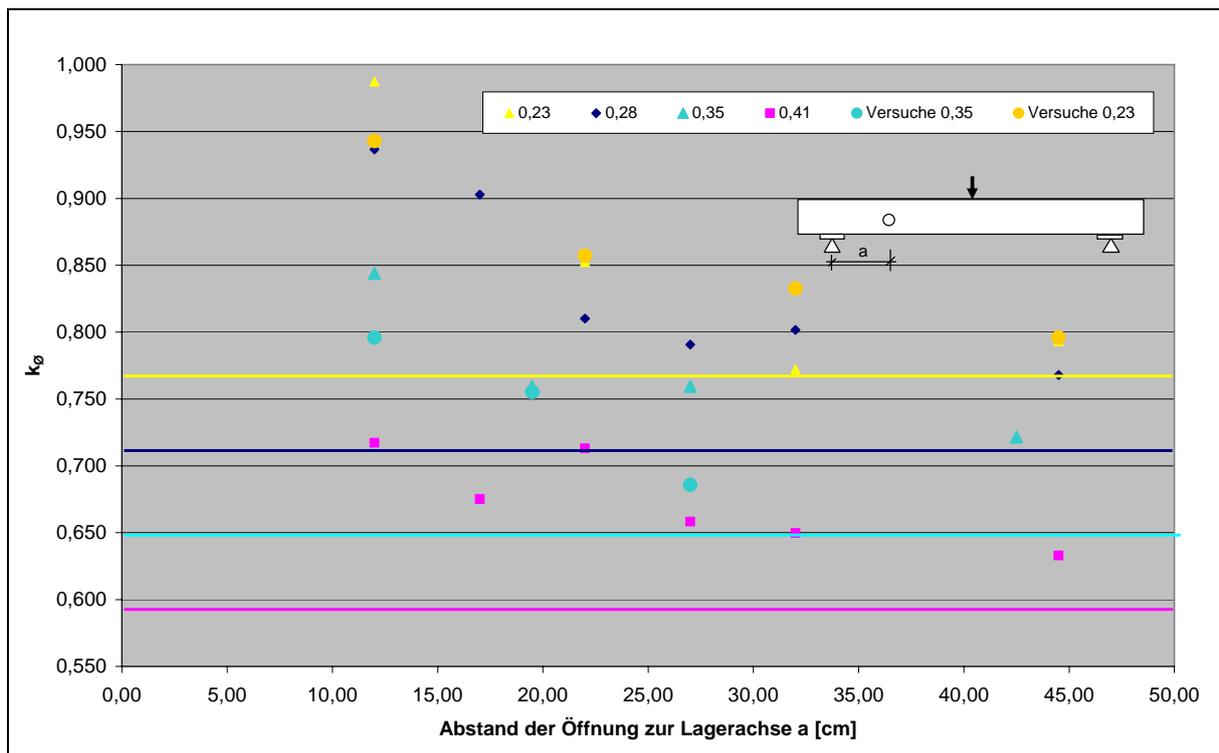


Diagramm 7-2: Abminderungsfaktor in Abhängigkeit von der Lage der Öffnung im Querschnitt

Die durchgezogen dargestellten Linien markieren jeweils den rechnerisch ermittelten Abminderungsfaktor. Die Versuche bzw. FE- Berechnungen sind farblich entsprechend dargestellt. Beispielhaft sollen hier die gelb dargestellten Versuche bzw. FE- Berechnungen betrachtet werden. Bei auflagnaher Anordnung der Öffnung werden hier noch mehr als 90 % der Traglast des Vollquerschnitts. Bei weiterer Entfernung der Öffnung vom Auflager fällt die Traglast auf 80 % des Vollquerschnitts ab.

Beim vorhandenen Versuchsaufbau nimmt bei Entfernung vom Auflager die Momentenbeanspruchung zu. Im realen Bauteil wird im Regelfall die Querkraft mit zunehmendem Abstand vom Auflager kleiner. In den Versuchen wurden die ungünstigen Öffnungsanordnungen weit entfernt vom Auflager getestet. Der Abstand der Öffnungen von der Einzellast betrug mindestens die Statische Höhe des Querschnitts.

7.4 Öffnungsabstand

Ziel der Untersuchungen von Bauteilen mit mehreren Öffnungen ist die Definition eines Mindestabstands der Öffnungen, bei dem die Tragfähigkeit einer Einzelöffnung erreicht wird.

In Diagramm 7-3 wurden für vier Verhältnisse von Öffnungsdurchmesser zu Statischer Höhe die Abminderungsfaktoren für Einzelöffnungen eingetragen. Der Abminderungsfaktor der Versuche bzw. FE- Berechnungen mit mehreren Öffnungen wurde über dem Verhältnis von Öffnungsabstand zu Öffnungsdurchmesser aufgetragen.

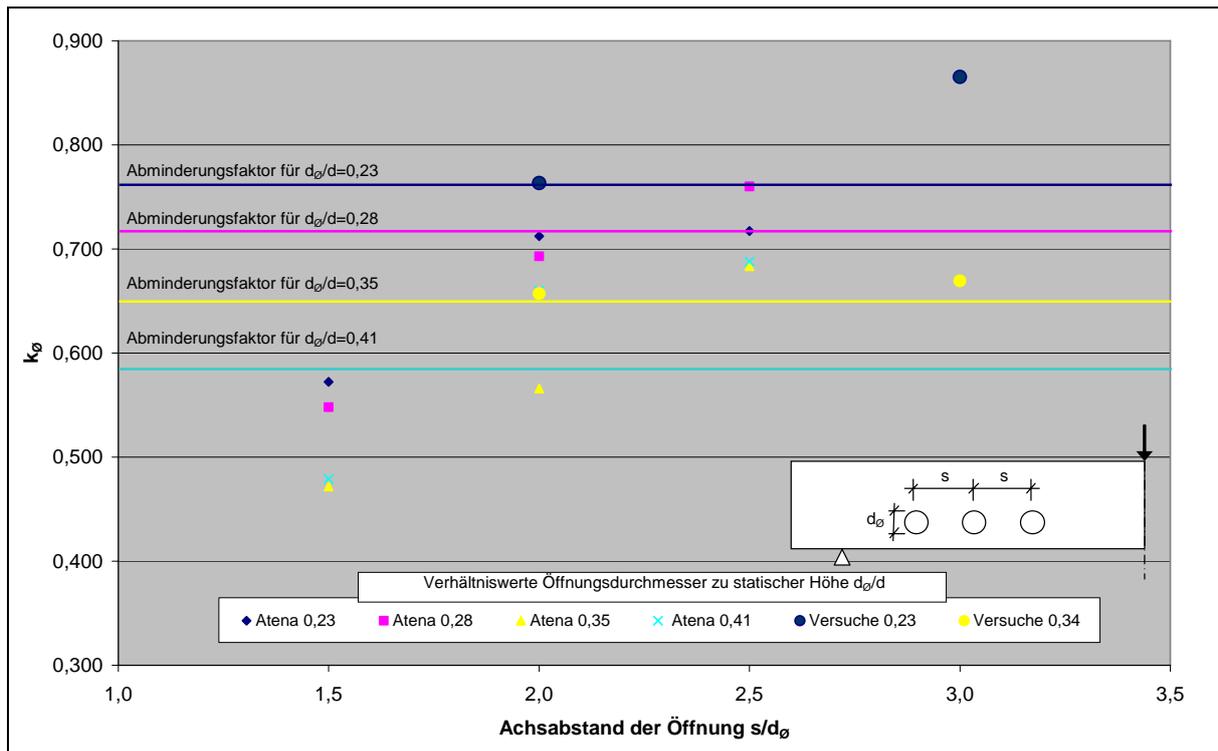


Diagramm 7-3: Einfluss des Öffnungsabstand auf die Tragfähigkeit

Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass bei einem Achsabstand der Öffnungen entsprechend dem dreifachen Öffnungsdurchmesser die Tragfähigkeit bei Anordnung einer Einzelöffnung erreicht wird. Bei Nichteinhaltung der Mindestabstände muss der Tragwiderstand weiter verringert werden. Zur Definition liegen bisher jedoch nicht genügend Versuchsergebnisse vor.

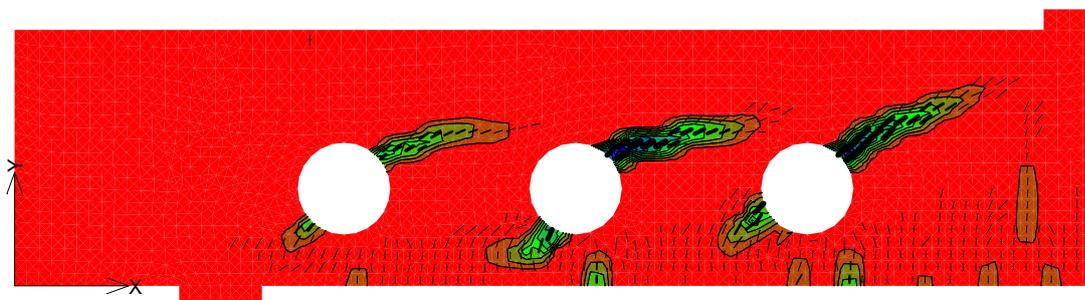


Abbildung 7-2: Atena Ausgabe: Hauptdehnungen und Risse bei Maximallast

Sowohl in den Versuchen, als auch bei den Atena- Berechnungen (siehe Abbildung 7-2) war zu beobachten, dass das Versagen dann eintritt, wenn die Schrägrisse die jeweils nächste

Öffnung erreicht haben. Der Beton zwischen den Öffnungen kann dann keinen Anteil an der Lastabtragung beisteuern.

7.5 Rechteckige Öffnungen

Zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit bei Einzelöffnungen wurden Parameterstudien für drei Verhältnisse von Öffnungshöhe d_o zu Statischer Höhe d durchgeführt. Dabei wurden Öffnungshöhe, Statische Höhe, Längsbewehrungsgrad, Abstand der Öffnung von Auflager und die Feldlänge der Versuchskörper variiert. Die Ergebnisse der Parameterstudien sind in Diagramm 7-4, Diagramm 7-5, und Diagramm 7-6 dargestellt.

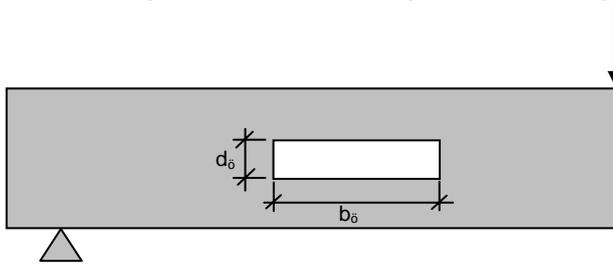


Abbildung 7-3: Darstellung der verwendeten Bezeichnungen

In Abbildung 7-3 sind die in den nachfolgend dargestellten Diagrammen verwendeten Bezeichnungen dargestellt.

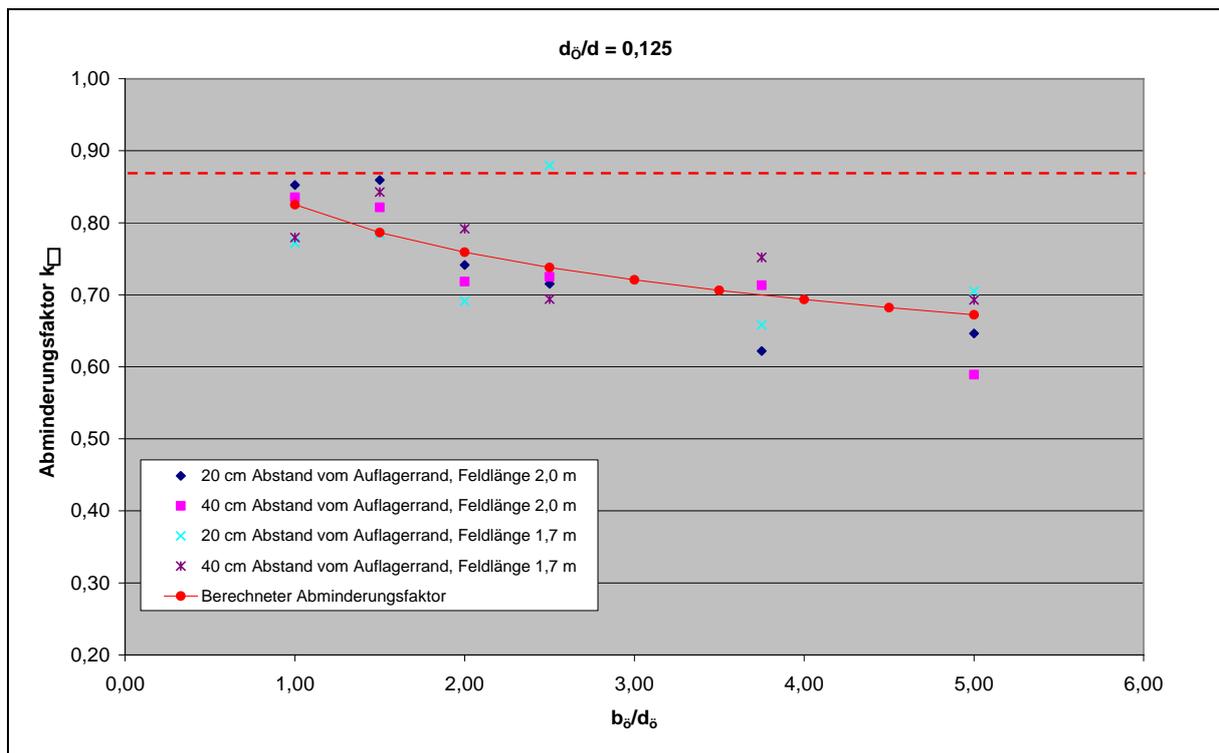


Diagramm 7-4: Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit für $d_o/d=0,125$

Die rot- gestrichelt dargestellte Linie zeigt jeweils den Abminderungsfaktor für das im Diagramm angegebene Verhältnis Öffnungshöhe zu Statischer Höhe für kreisrunde Öffnungen. Bei allen betrachteten Querschnittsabminderungen ist zu erkennen, dass die quadratische Öffnung ($b_o/d_o=1$) eine größere Abminderung hervorruft, als die entsprechende kreisrunde

Öffnung. Dies liegt an der geometrischen Unstetigkeit im Bereich der Öffnungsecken, was zu Spannungsspitzen führt und somit eine frühere Rissbildung begünstigt.

Die Berechnung des in den Diagrammen dargestellten Abminderungsfaktors erfolgte nach folgender Gleichung:

$$k_{\square} = 0,95 - \frac{d_o}{d} - \left(\frac{d_o}{d} - 0,03\right) \cdot \ln\left(\frac{d_o}{b_o}\right) \quad (7.1)$$

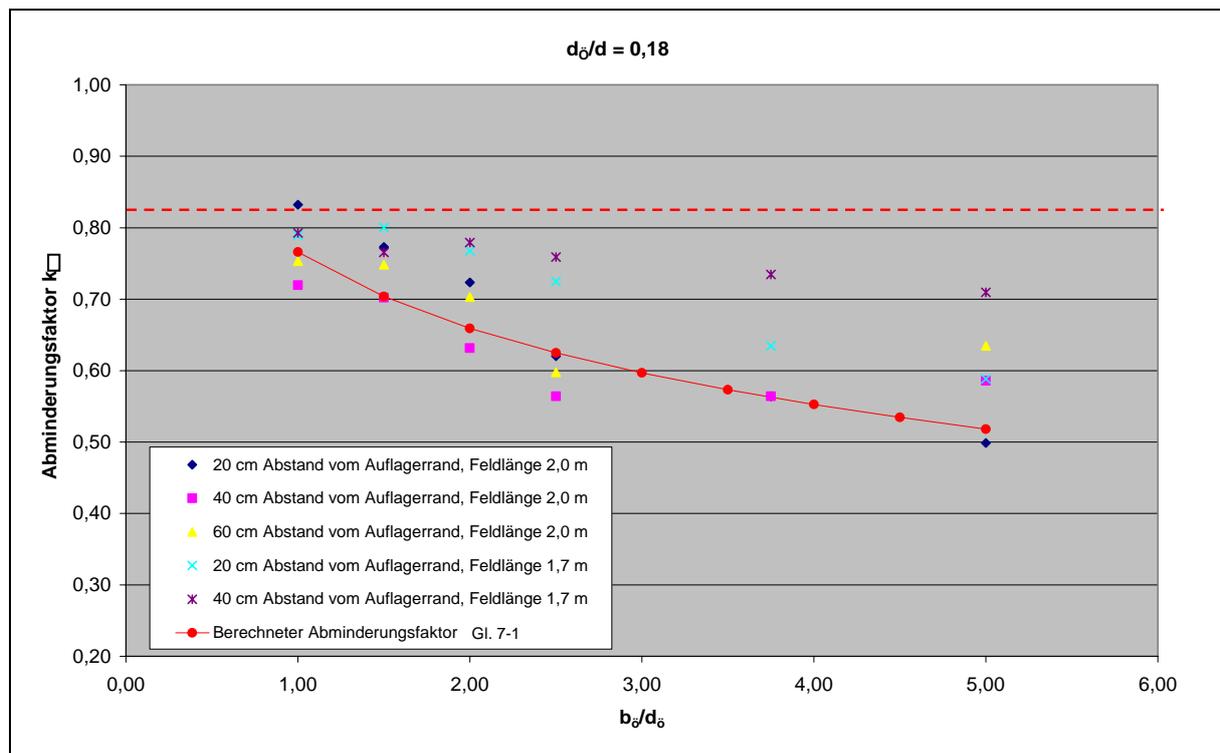


Diagramm 7-5: Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit für $d_o/d=0,18$

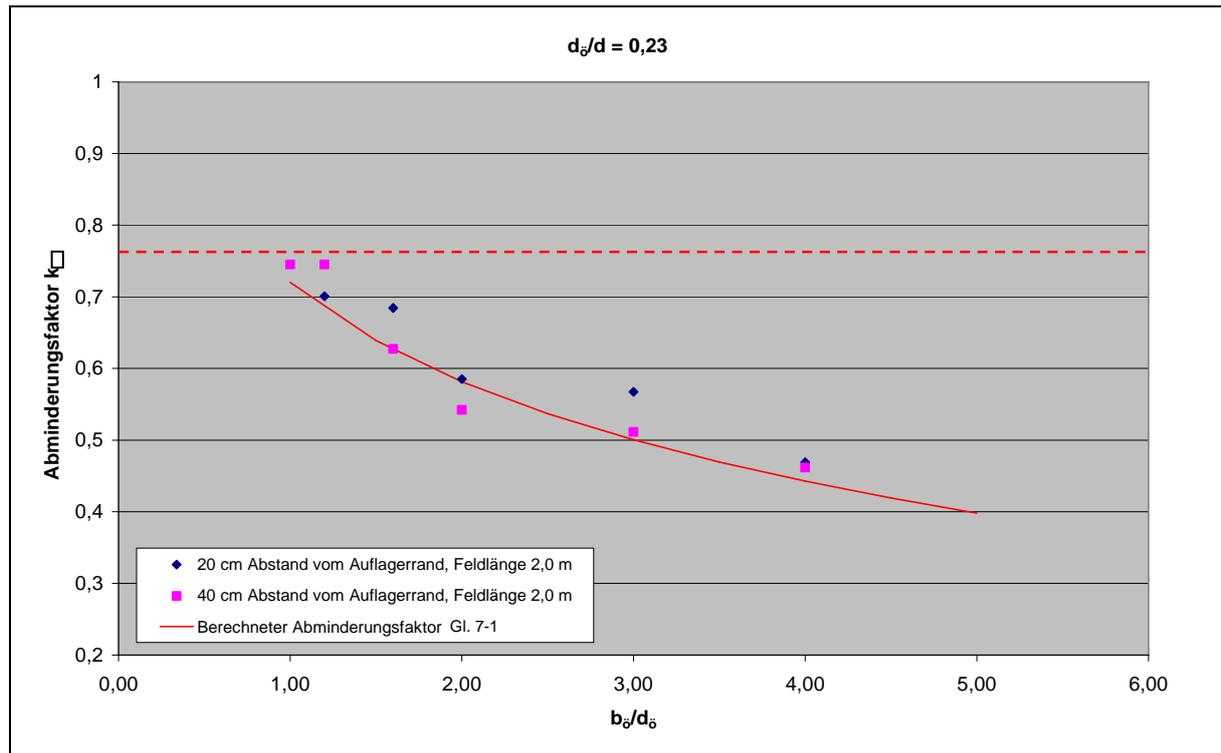


Diagramm 7-6: Abminderungsfaktor der Querkrafttragfähigkeit für $d_0/d=0,23$

Im Folgenden werden nun die durchgeführten Versuche mit dem vorgeschlagenen Abminderungsfaktor verglichen. Diagramm 7-7 zeigt die sich aus den sechs Bauteilversuchen ergebenden Wertepaare und jeweils den berechneten Abminderungsfaktor.

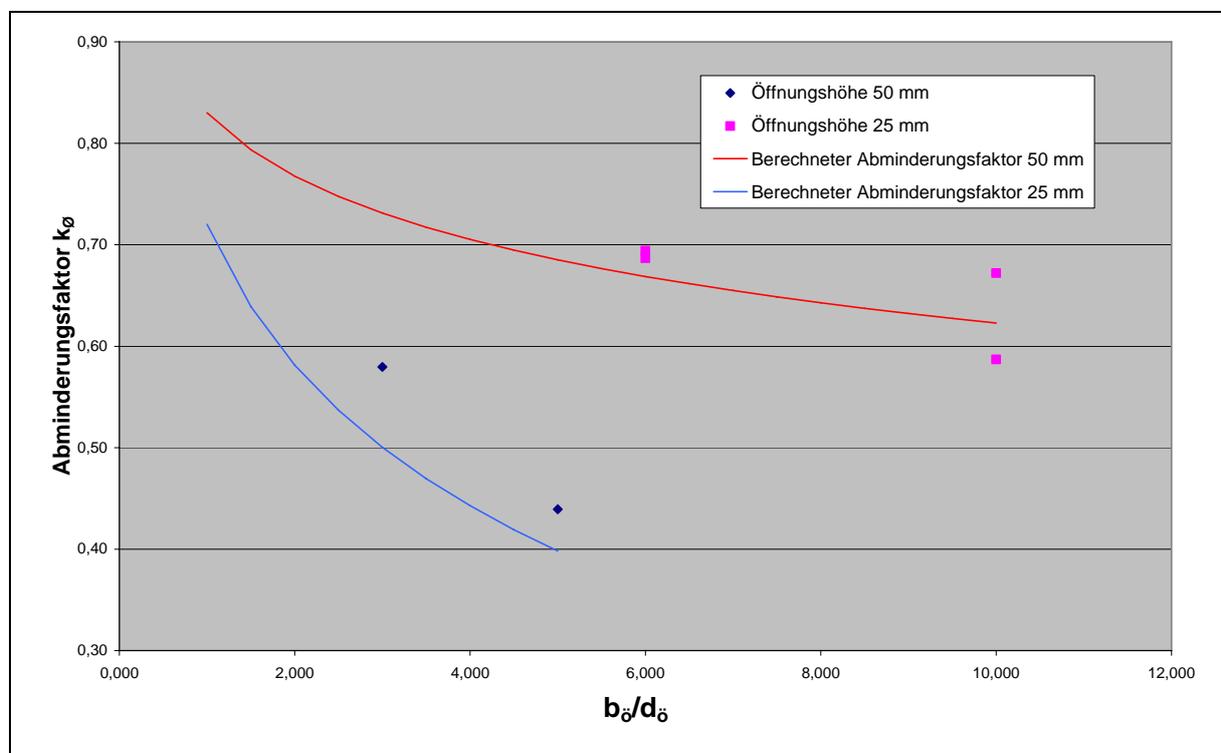


Diagramm 7-7: Vergleich berechneten Abminderungsfaktors mit den Versuchsergebnissen

Die Bauteilversuche stimmen gut mit dem berechneten Abminderungsfaktor überein. Somit kann Gleichung (7-1) für rechteckige Öffnungen Anwendung finden. Auch hier wurde ein Abstand zwischen Öffnung und Lasteinleitung von mindestens der Statischen Höhe eingehalten, was auch bei einer Bemessung berücksichtigt werden muss.

8 Bemessungsgleichungen

Es wird vorgeschlagen, die in DIN 1045-1 angegebene Bemessungsgleichung für die Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung $V_{Rd,ct}$ wurden zur Berücksichtigung der Öffnungen um einen Abminderungsfaktor zu erweitern:

$$V_{Rd,ct,red} = k \cdot V_{Rd,ct} \quad \text{für } 0,2 \leq \frac{d_{\emptyset}}{d} \leq 0,5$$

$$\text{mit } k = k_{\emptyset} = 1 - \frac{d_{\emptyset}}{d} \quad \text{für kreisrunde Öffnungen}$$

$$k = k_{\square} = 0,95 - \frac{d_{\emptyset}}{d} - \left(\frac{d_{\emptyset}}{d} - 0,03 \right) \cdot \ln \left(\frac{d_{\emptyset}}{b_{\emptyset}} \right) \quad \text{für rechteckige Öffnungen}$$

d_{\emptyset} : Durchmesser der runden Öffnung

d : Statische Höhe

d_{\emptyset} : Höhe der rechteckigen Öffnung

b_{\emptyset} : Breite der rechteckigen Öffnung

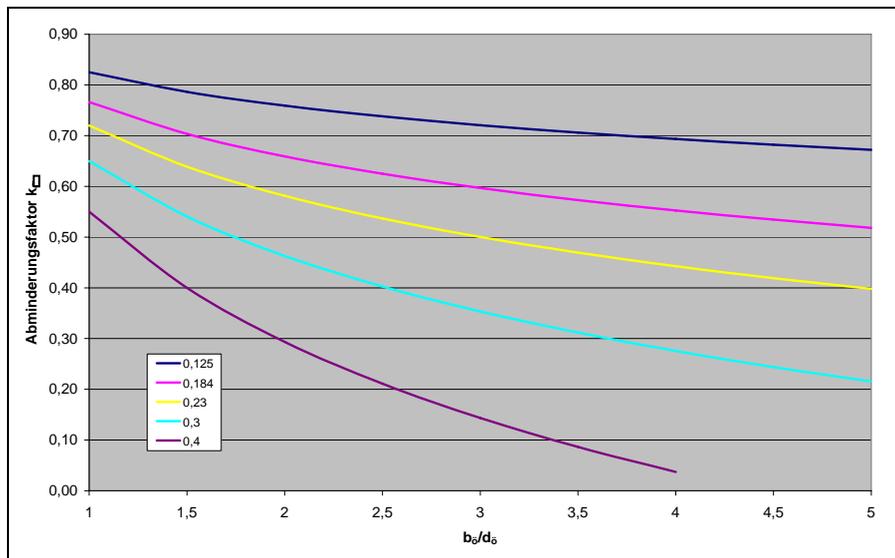


Diagramm 8-1: Bemessungsdiagramm für rechteckige Öffnungen

Bei Anordnung von mehreren runden Einzelöffnungen muss zur Anwendung der oben angegebenen Gleichung der Achsabstand der Öffnungen mindestens dem 3-fachen Öffnungsdurchmesser entsprechen.

Öffnungen im Bereich von Mittelauflagern stellen besonders kritische Bereiche dar. Hier überlagern sich maximale Momente mit maximalen Querkraften.

Der Abstand von Öffnungen zu Einzellasten sollte mindestens der Statischen Höhe d des Querschnitts entsprechen, bzw. dieser Bereich sollte von Öffnungen freigehalten werden.

Die Traglastabminderung durch Öffnungen im Durchstanzbereich soll in einem weiteren Forschungsvorhaben geklärt werden. Momentan kann nur empfohlen werden, Durchstanzbereiche von jeglicher Schwächung freizuhalten.

Die mechanischen Hintergründe der gefundenen Zusammenhänge sollen in einer Dissertation, die an der TU Kaiserslautern erstellt wird, erläutert werden.

9 Literatur

- [1] Schnell, J.; Thiele, C.: Tastversuche zur Tragfähigkeit von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung mit integrierten Luftkanälen. Festschrift Schnütgen: Entwicklungen in Beton- und Faserbetonbau sowie in verwandten Gebieten, Ruhruniversität Bochum, August 2003
- [2] Schnell, J.; Thiele, C.: Concrete Slabs with Air Ducts, Keep Concrete Attractive, fib-Symposium, Budapest, Mai 2005
- [3] Schnell, J.; Thiele, C.: Abminderung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetondecken im Bereich von Leitungsführungen, Neu-Ulm, 15. Februar 2006 Kongressunterlagen 50. Beton-Tage S118-119.
- [4] Hottmann, H.; Schäfer, K.: Bemessen von Stahlbetonbalken und Wandscheiben mit Öffnungen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 459, Beuth Verlag GmbH 1996
- [5] Aster, H.: Vierseitig gelagerte Stahlbetonhohlplatten. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 213, Beuth Verlag GmbH 1970
- [6] Twelmeier, H.; Dallmann, R.; Fischer, Th.; Götttsche, J.: Einfluss von großen Steg-aussparungen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonträgern. IRB Verlag 1985
- [7] Ramm, W.: Über die Anwendung des Traglastverfahrens bei Durchlaufträgern mit großen Stegöffnungen im Verbund- und Stahlbetonbau. Vorträge Deutscher Bau-technik-Tag 2003, Ernst und Sohn 2003
- [8] Mansur, M. A.: Effect of Openings on the Behaviour and Strenth of R/C Beams in Shear. Cement and Concrete Composites 20, 1998
- [9] Kiefer, C.: Betonkernkühlung mit Zuluft. Technik am Bau 6/2002
- [10] Reineck, K.-H.: Ein mechanisches Modell für Stahlbetonbauteile ohne Stegbewehrung. Bauingenieur 66(1991) S.157-165
- [11] Reineck, K.-H.: Ein mechanisches Modell für das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen ohne Stegbewehrung. Bauingenieur 66(1991) S.323-332
- [12] Hegger, J.; Will, N.; Bülte, S.: Teilvorgefertigte Deckensysteme im Wohnungsbau. Abschlussbericht (BBR Z6-5.4.00-15)
- [13] Schnellenbach-Held, M.; Ehmann, S.: Stahlbetonträger mit großen Öffnungen. Beton- und Stahlbetonbau 97, 2002, Heft 3
- [14] Schröder, D.: Betonkernkühlung mit Zuluft. Heizung Lüftung/klima Haustechnik, Heft 2 /2002, S7 - 54
- [15] Kani, G.: Was wissen wir heute über die Schubbruchsicherheit? Der Bauingenieur 43, Heft 5
- [16] Kani, G.N.J.: Basic Facts Concerning Shear Failure. Journal of the American Concrete Institute. 1966, Heft 63,6, S. 675-692

- [17] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. Strassenbau-Technik 3/71 S,171-135.
- [18] Erläuterungen zu DIN 1045-1, Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau, Heft 525
- [19] Cervenka Consulting: ATENA Program Documentation
- [20] Kupfer, H.; Hilsdorf, H.K.; Rüsç, H.: Behaviour of Concrete under Biaxial Stresses. Journal of the American Concrete Institute 1969, Heft 66, S. 656-666

10 Anhang

10.1 Darstellung der Bruchbilder

Im Folgenden werden die Bruchbilder der Versuche dargestellt. Auf den Bildern ist jeweils der Zustand des Betonkörpers nach Erreichen der Traglast dargestellt. Die abgebildeten Fotos zeigen jeweils einen Ausschnitt der Versuchskörper vom Auflager bis zur Lasteinleitung.

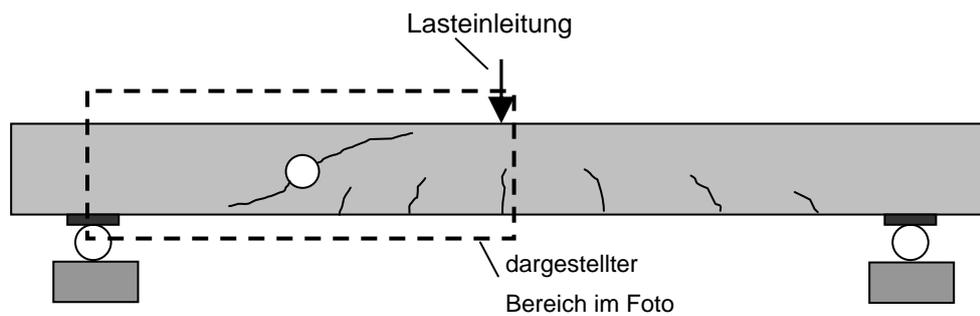


Abbildung 10-1: Darstellung der Bruchbilder

10.2 Versuchsreihe 1 und 2

10.2.1 Referenzversuche

Die nachfolgend dargestellten Bilder zeigen die Bruchbilder der durchgeführten Referenzversuche.

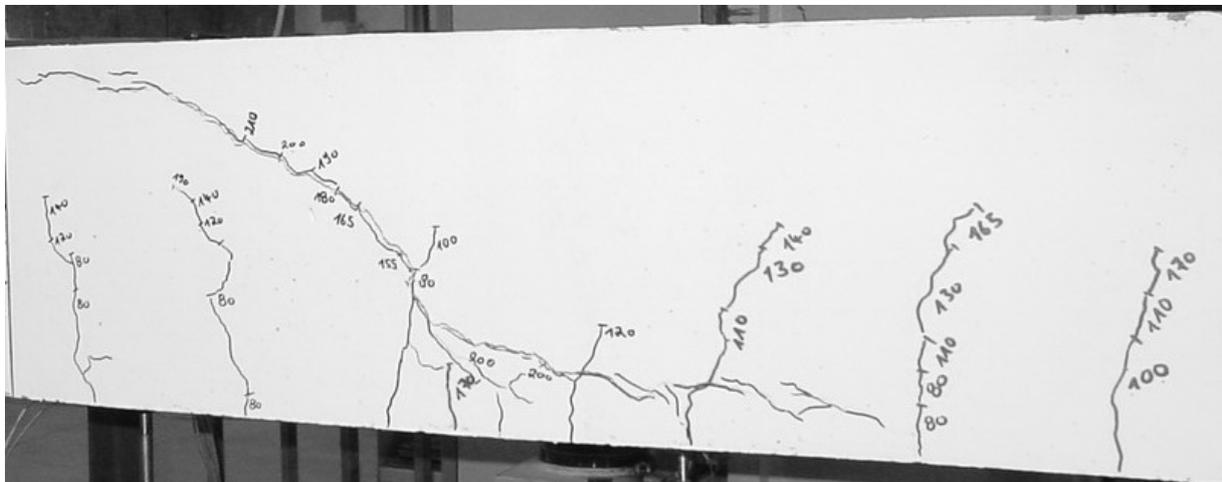


Abbildung 10-2: Bruchbild Versuch T1_ohne Öffnung h=30 cm

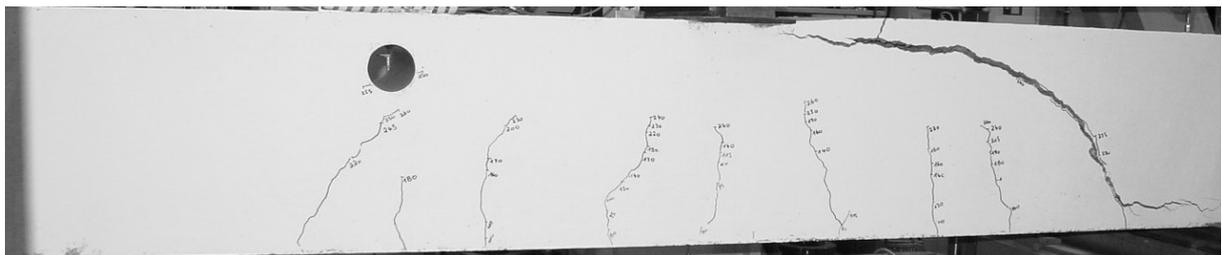


Abbildung 10-3: Versuch T7_70_oben h=35 cm

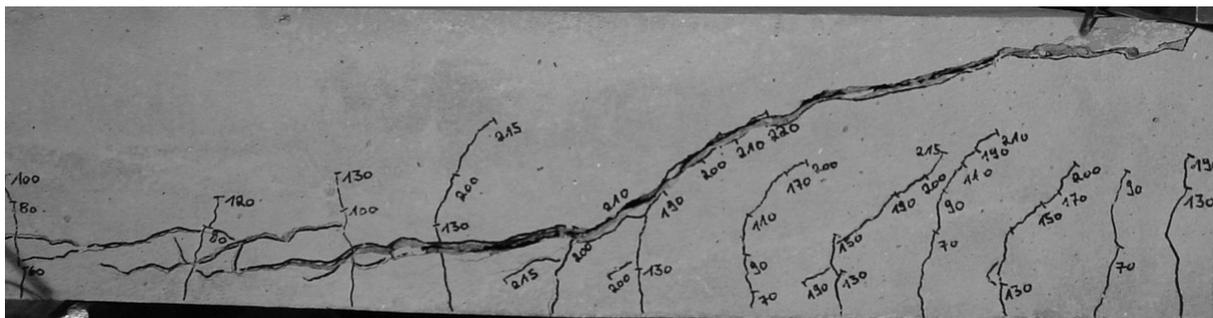


Abbildung 10-4: Versuch T9_ohne Öffnung h=20 cm

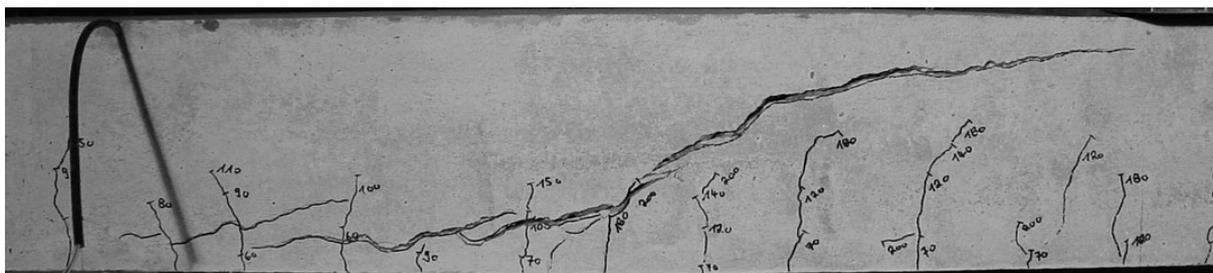
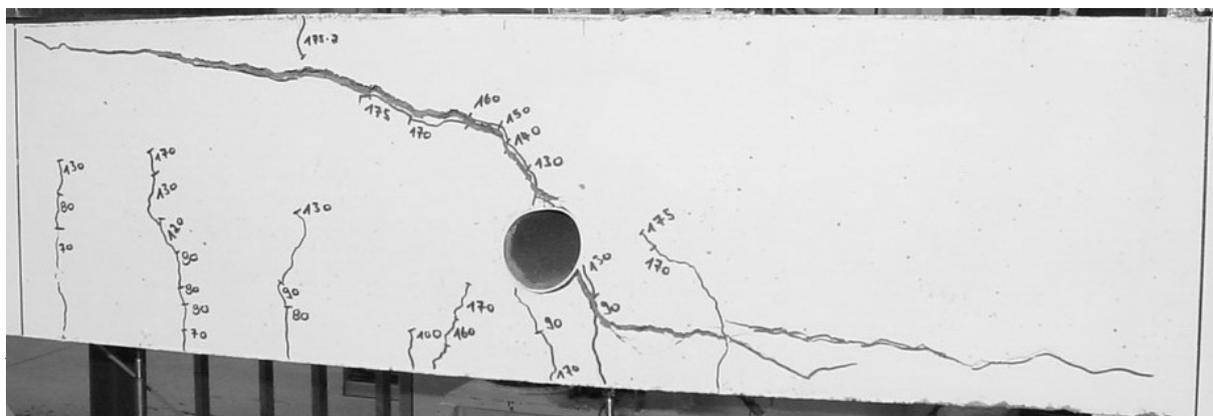


Abbildung 10-5: Versuch T10_40_oben h=20 cm



Abbildung 10-6: Versuch T13_ohne Öffnung h=25 cm

10.2.2 Versuche mit Einzelöffnungen



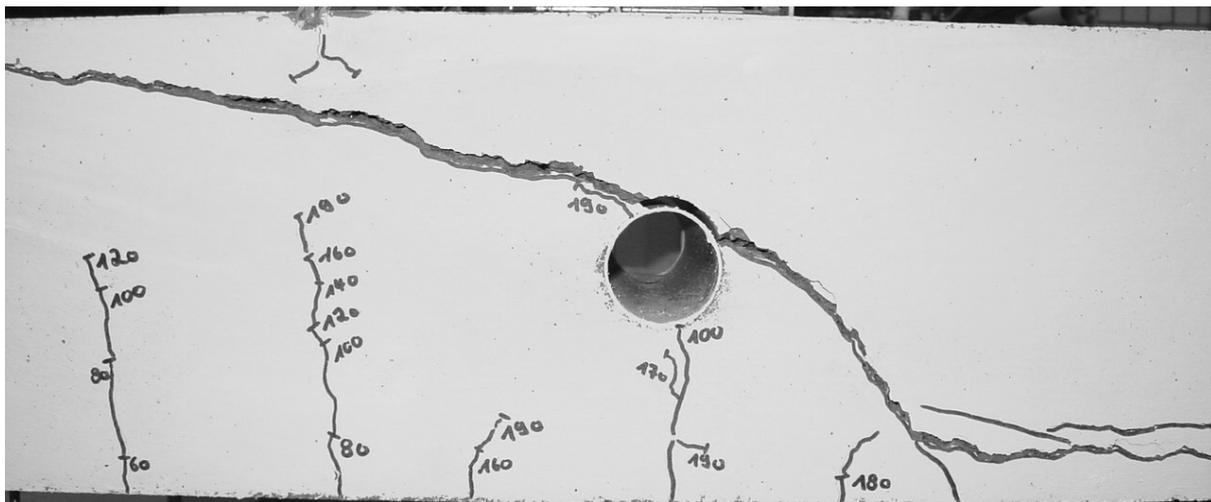


Abbildung 10-8: Versuch T2 70_mitte

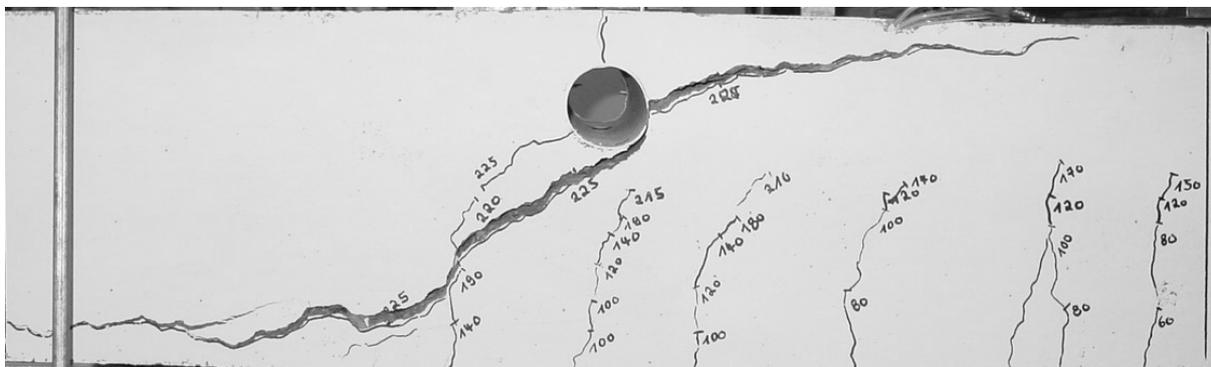


Abbildung 10-9: Versuch T2_70_unten

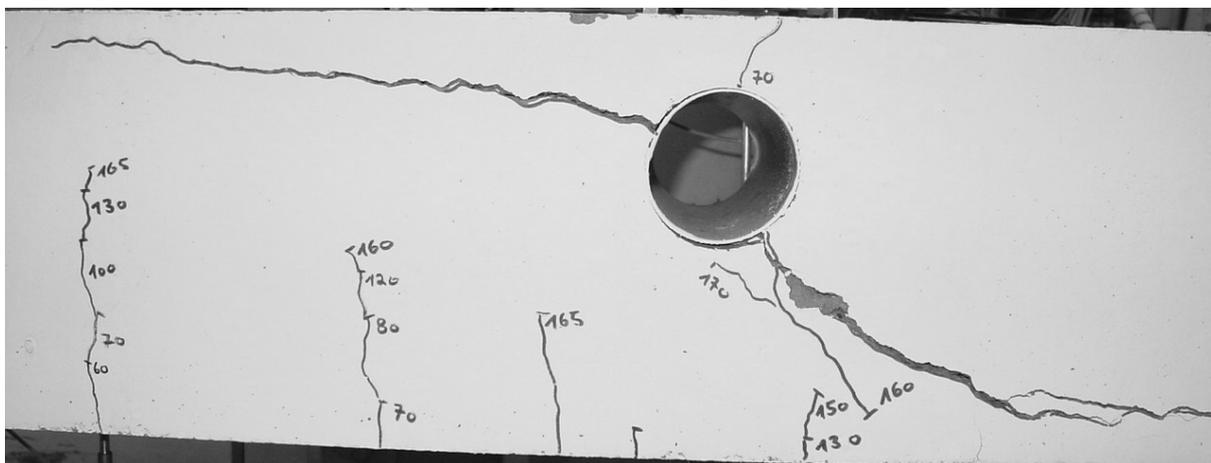


Abbildung 10-10: Versuch T3_100_oben

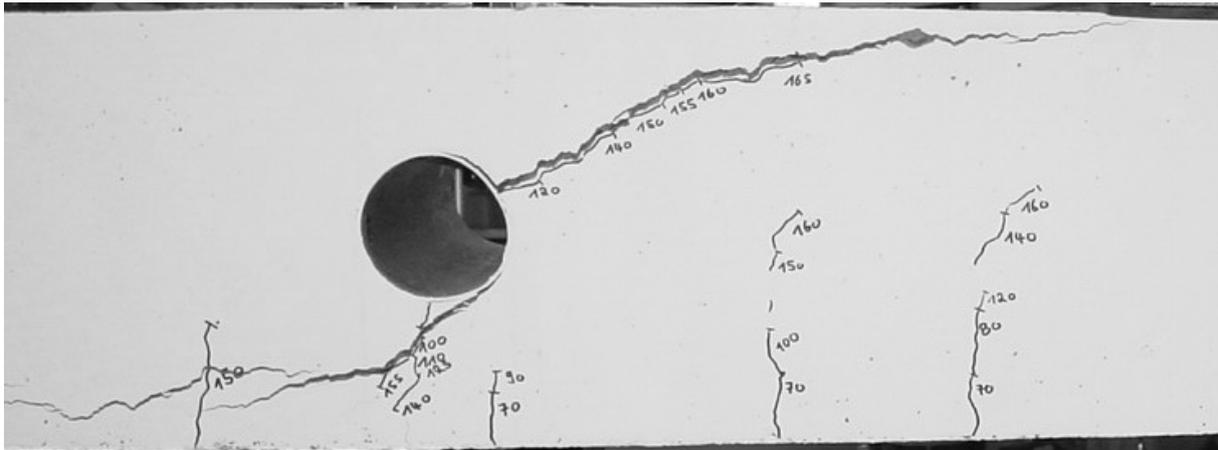


Abbildung 10-11: Versuch T4_100_mitte

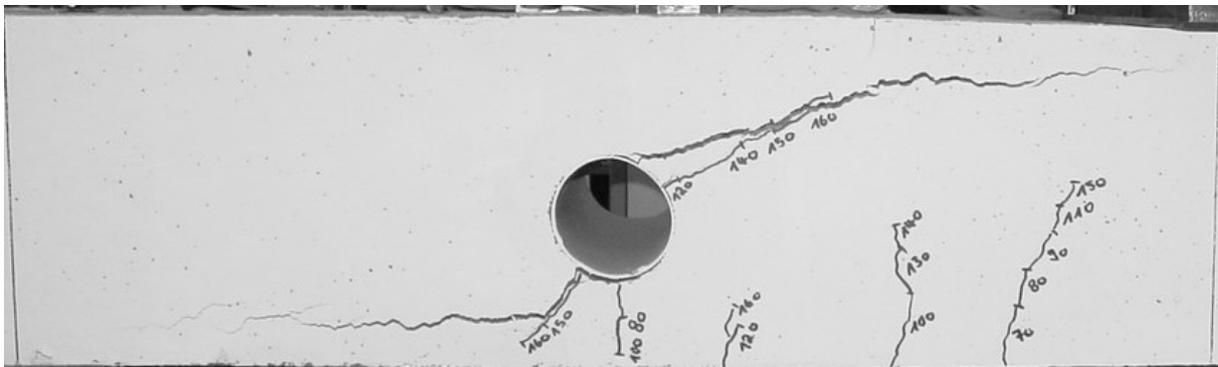


Abbildung 10-12: Versuch T4_100_unten

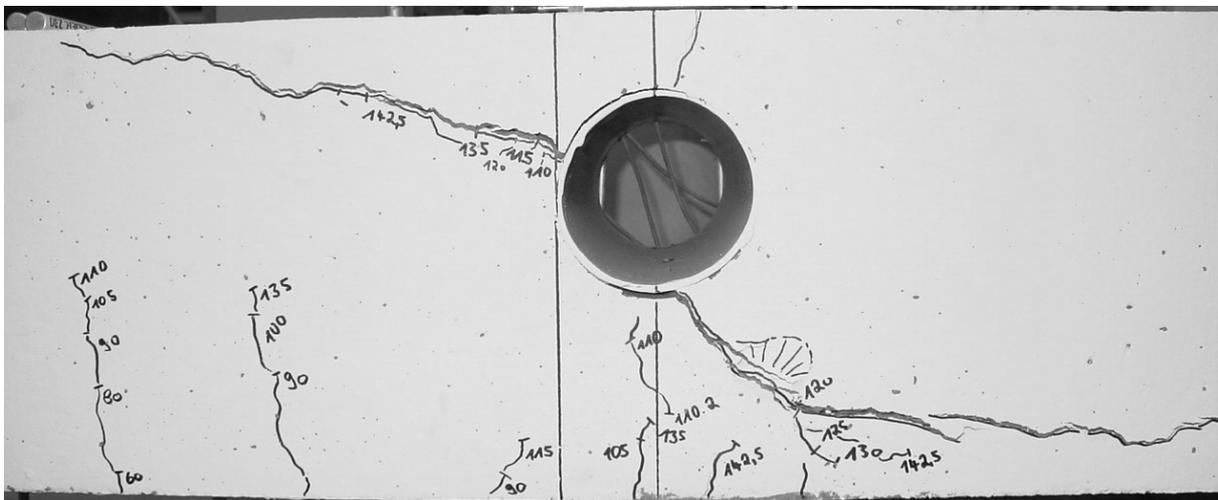


Abbildung 10-13: Versuch T4_120_oben

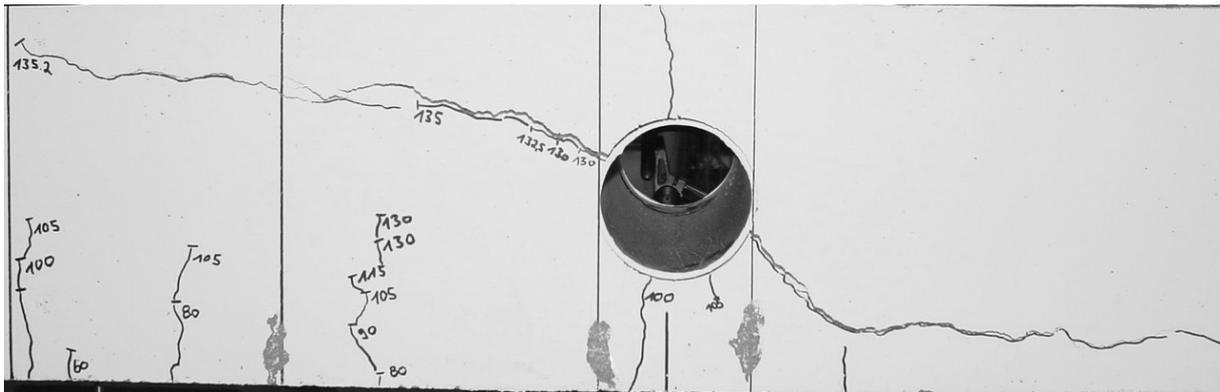


Abbildung 10-14: Versuch T5_120_mittig

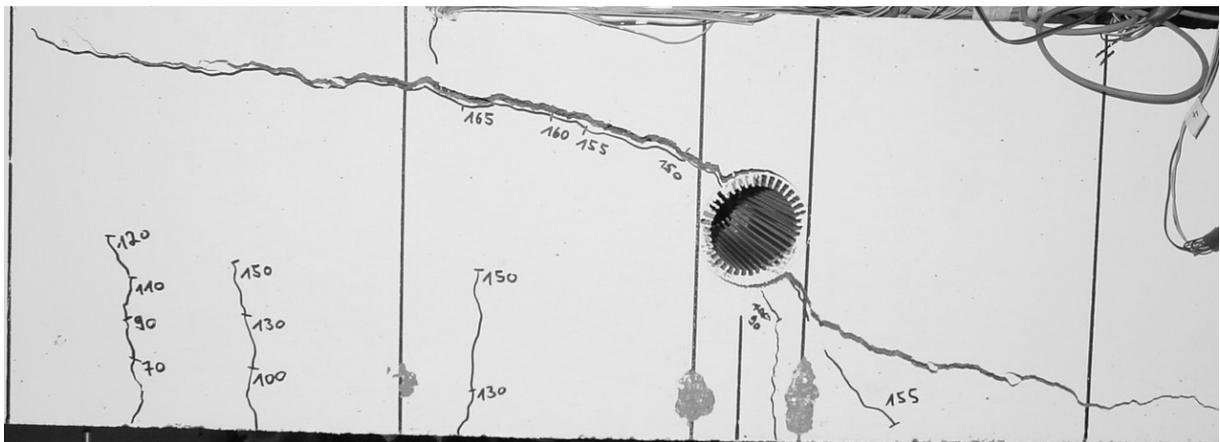


Abbildung 10-15: Versuch T5_Kiefer

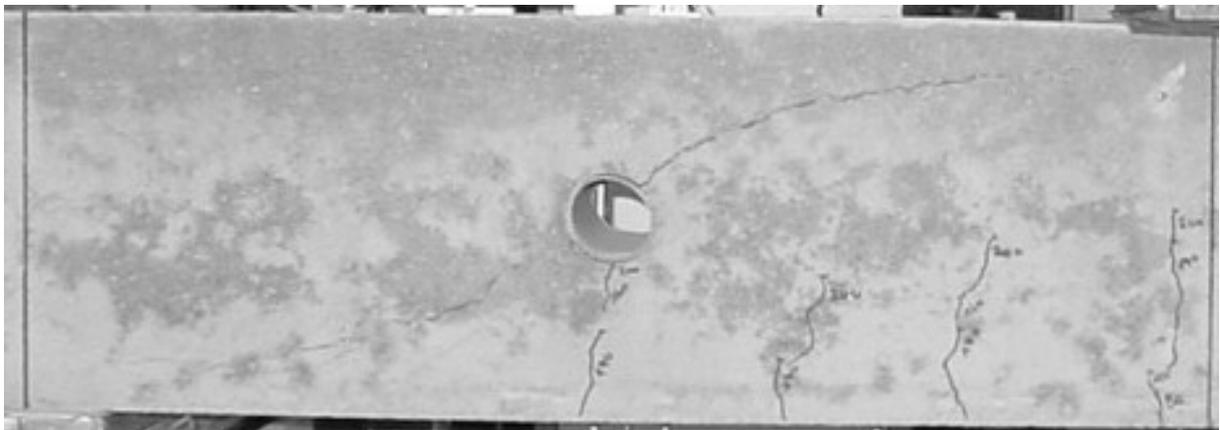


Abbildung 10-16: Versuch T6_70_mittig



Abbildung 10-17: Versuch T6_70_unten

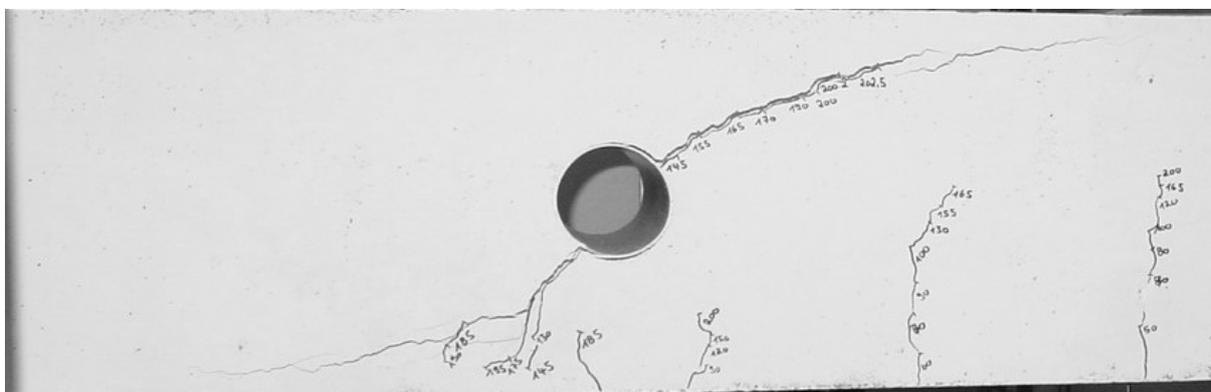


Abbildung 10-18: Versuch T8_100_mittig

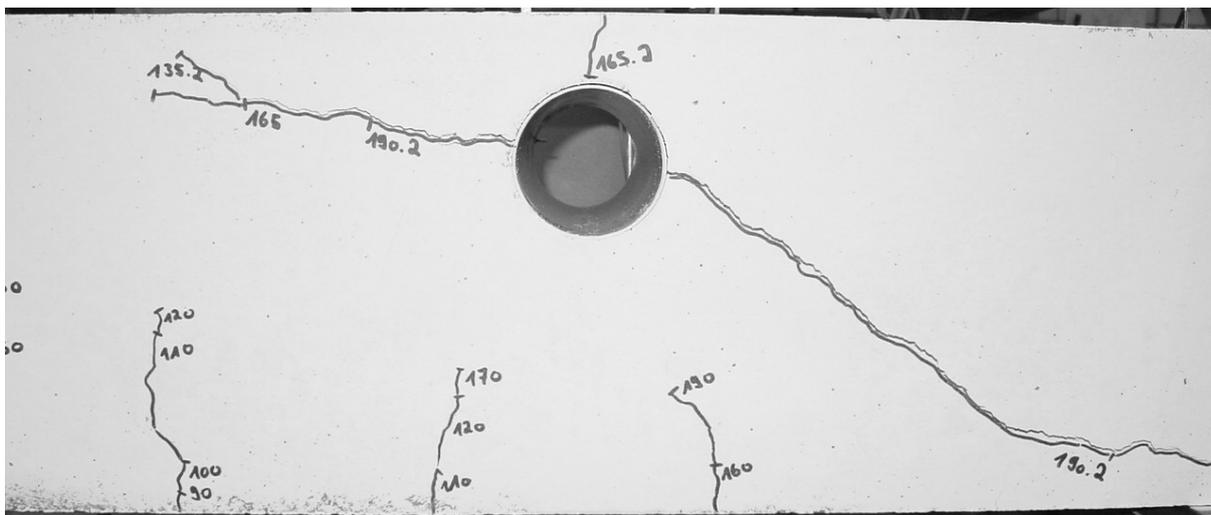


Abbildung 10-19: Versuch T8_100_oben

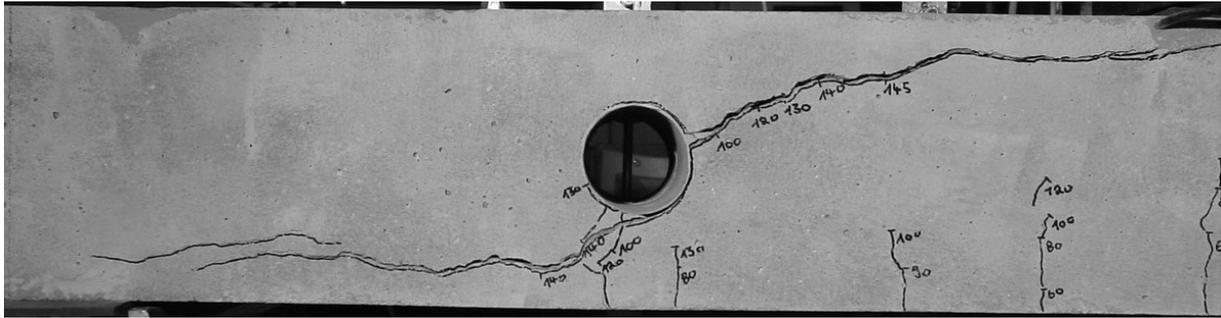


Abbildung 10-20: Versuch T9_75_mittig

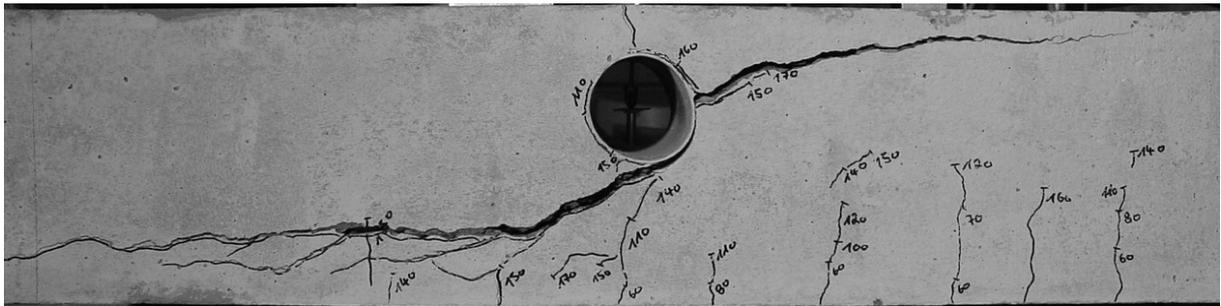


Abbildung 10-21: Versuch T10_75_oben

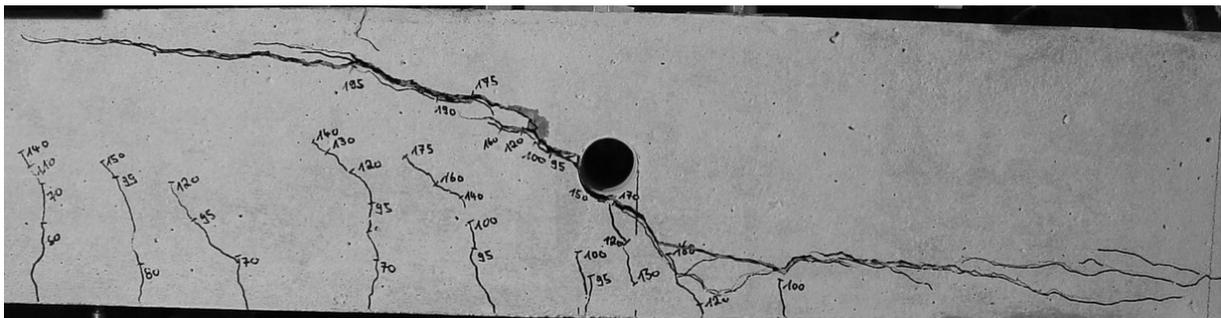


Abbildung 10-22: Versuch T11_40_unten

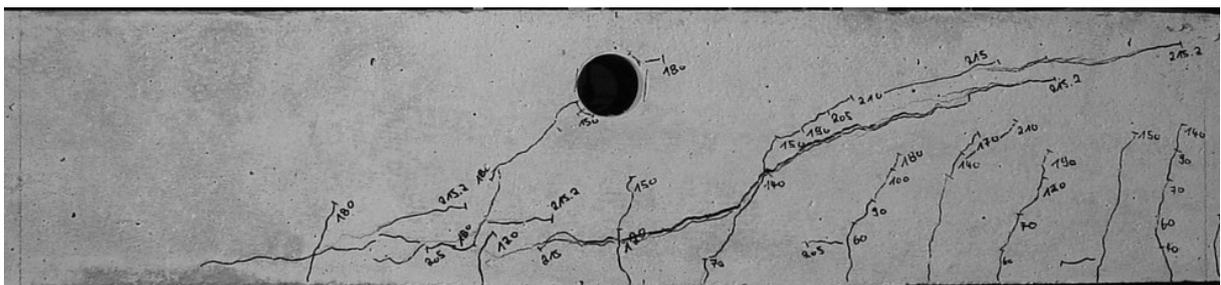


Abbildung 10-23: Versuch T11_50_oben

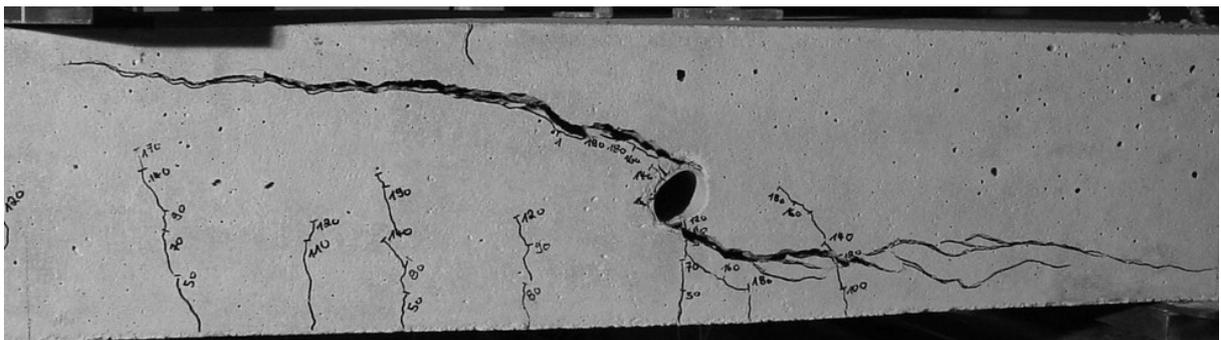


Abbildung 10-24: Versuch T12_40_unten

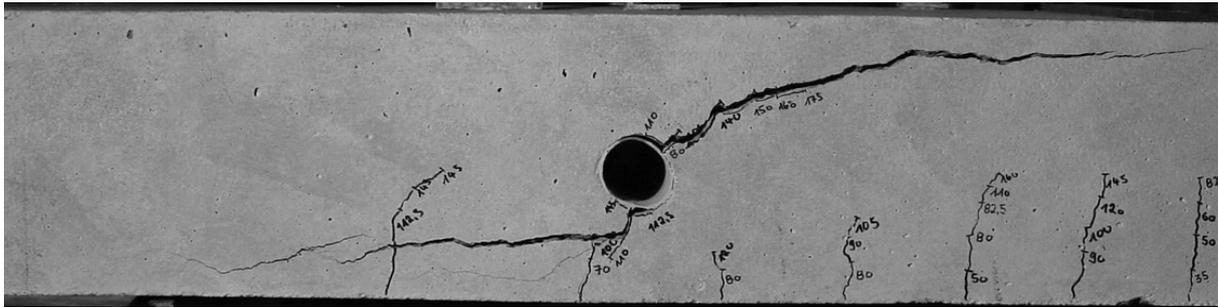


Abbildung 10-25: Versuch T12_50_unten

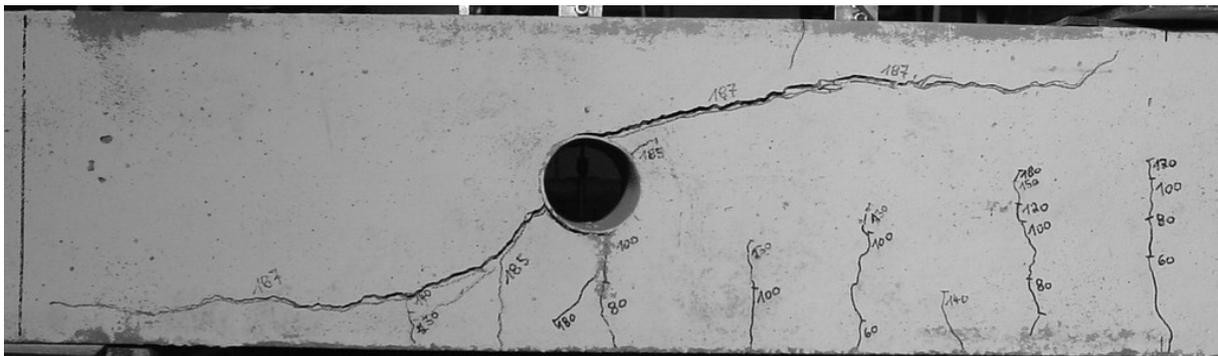


Abbildung 10-26: Versuch T13_75_mitte

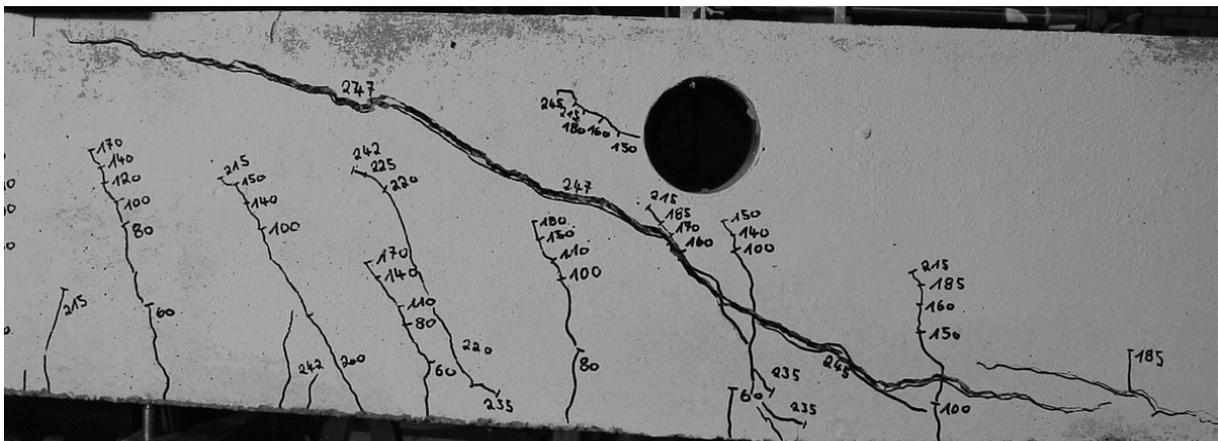


Abbildung 10-27: Versuch T14_75_oben

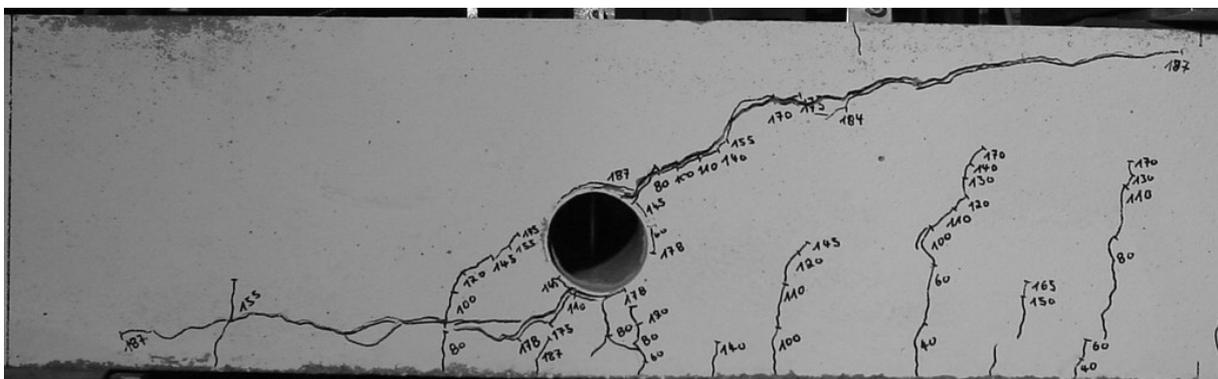


Abbildung 10-28: Versuch T14_75_unten

10.2.3 Erste Tastversuche mit zwei Öffnungen

In der zweiten Versuchsreihe wurden zwei Versuche mit zwei Öffnungen durchgeführt. Dabei betrug der Achsabstand der Öffnungen dem 3,0- bzw 4,3- fachen Öffnungsdurchmesser.

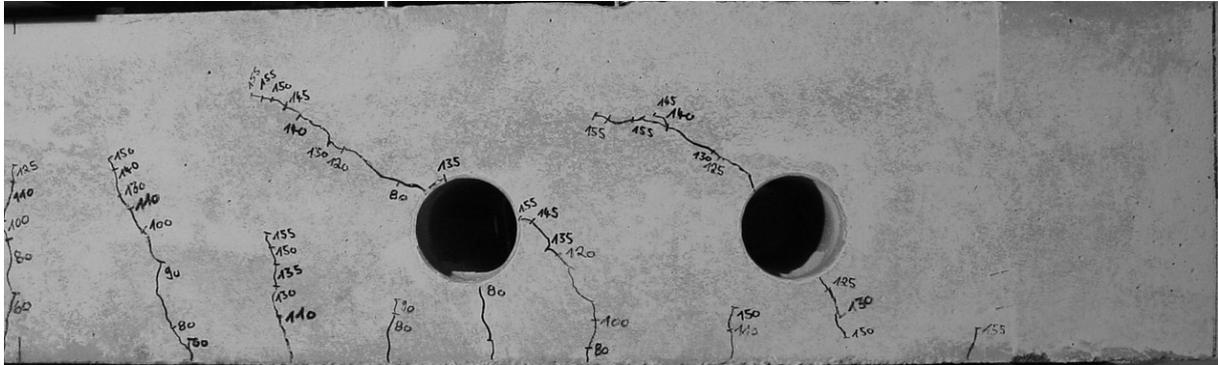


Abbildung 10-29: Versuch T15_25_15

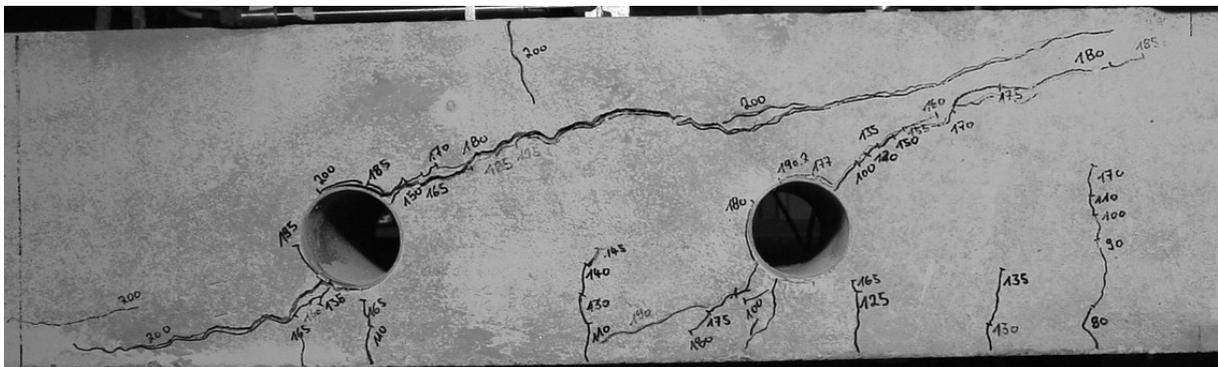


Abbildung 10-30: Versuch T15_75_25

10.2.4 Tastversuche mit Stahlfaserbeton

Die Bruchbilder der Beiden in Stahlfaserbeton hergestellten Versuche sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

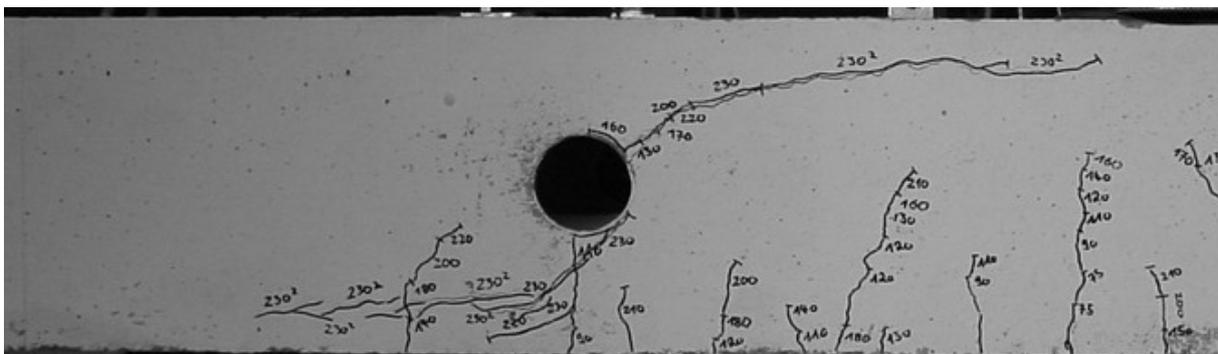


Abbildung 10-31: Versuch T16_25_75_mitte_SFB

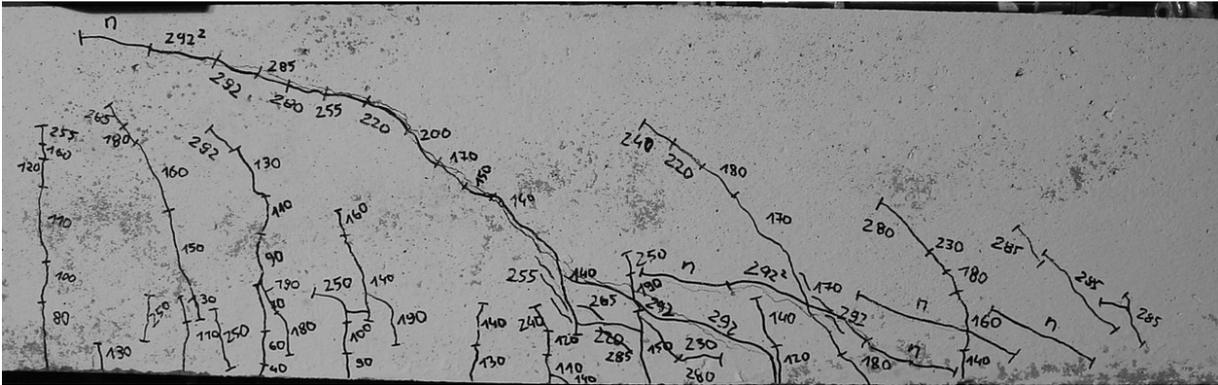
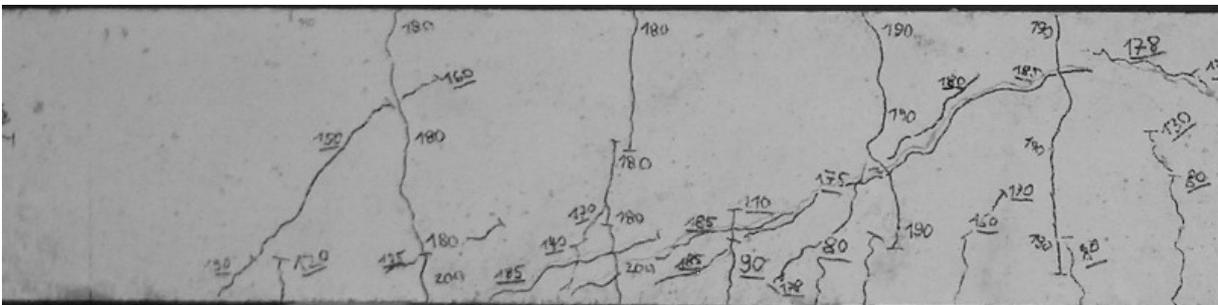


Abbildung 10-32: Versuch T16_25_ohne Öffnung_SFB

Die Bruchbilder werden in den folgenden Bildern dargestellt. Die nicht unterstrichenen Zahlen entstanden bei der Zugkräfteinleitung, während alle weiteren Risse bei Querbelastung mit einem Unterstrich gekennzeichnet wurden.



10.2.5 Versuche mit zentrischer Zugkraft

Abbildung 10-33: Bruchbild Versuch LBV 1

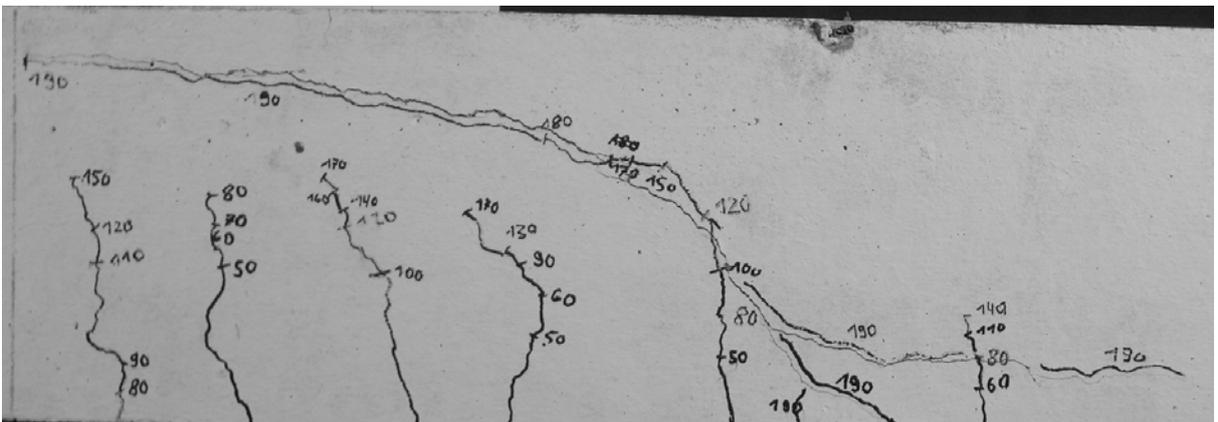


Abbildung 10-34: Bruchbild Versuch LBV 2

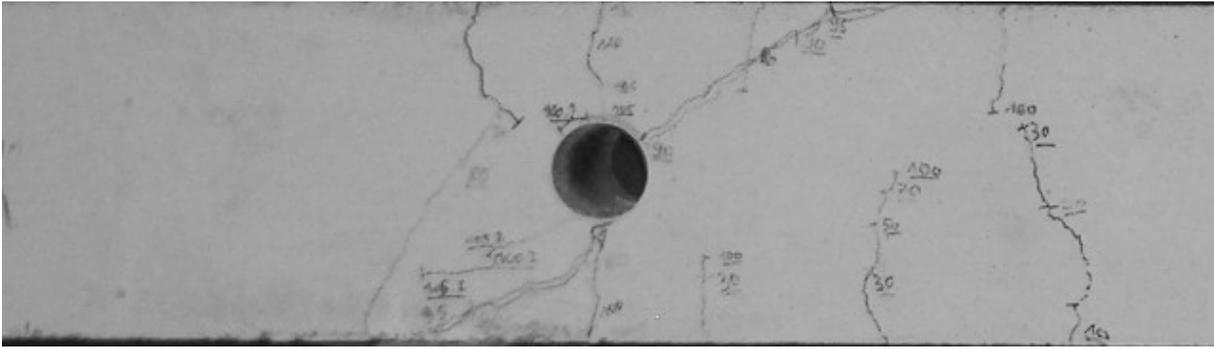


Abbildung 10-35: Bruchbild Versuch LBV 3

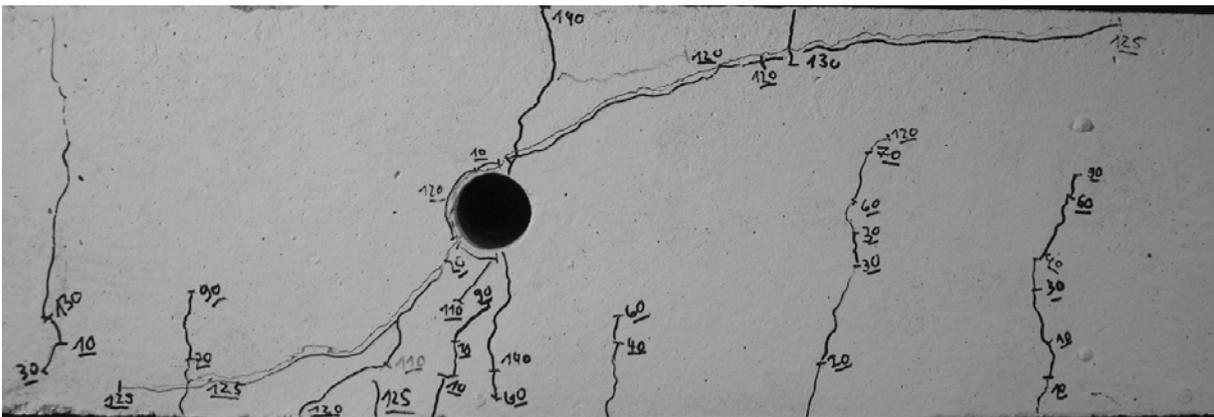


Abbildung 10-36: Bruchbild Versuch LBV 4

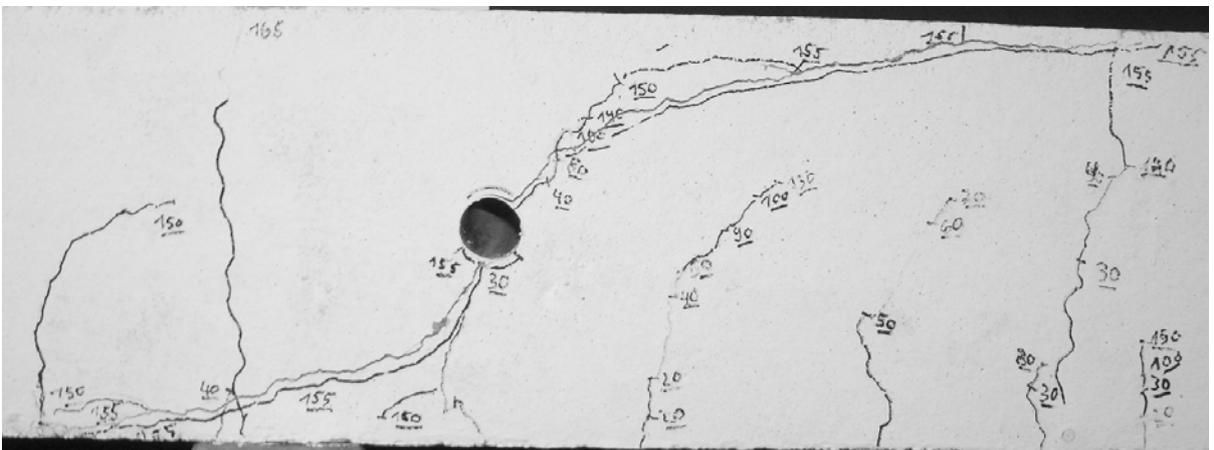


Abbildung 10-37: Versuch LBV 05

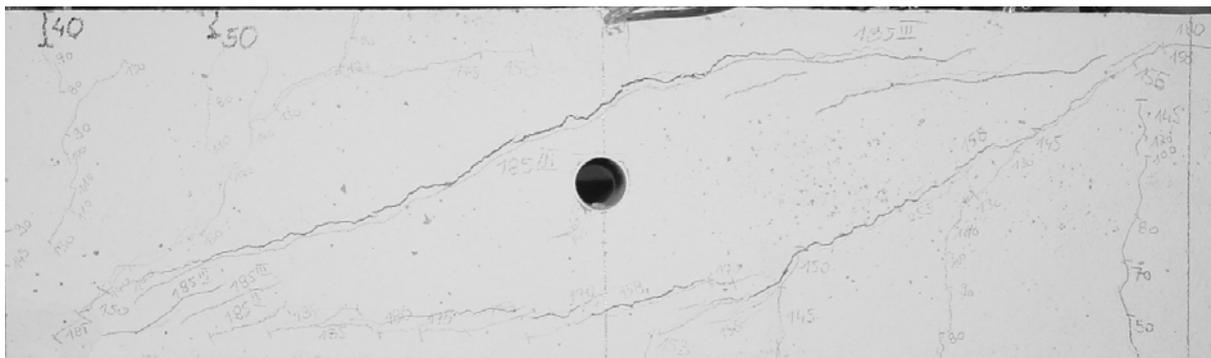


Abbildung 10-42: Versuch T_326

10.2.7 Lage der Öffnung im Bauteil in Bauteillängsrichtung

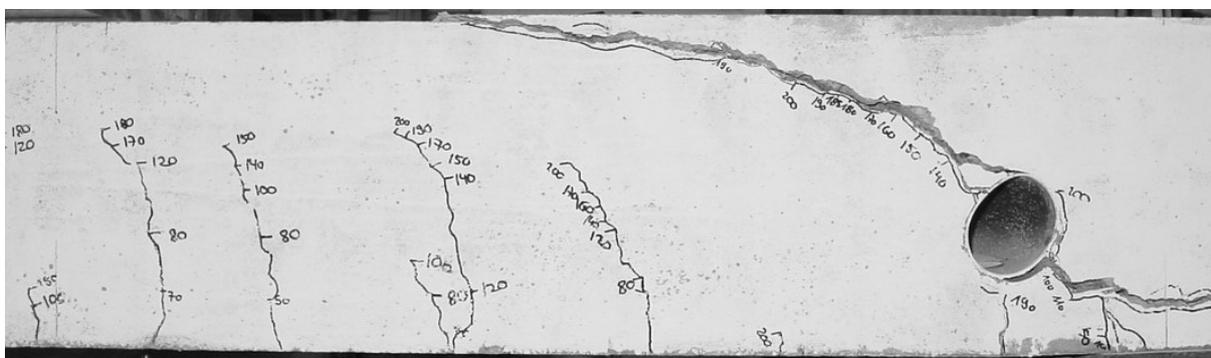


Abbildung 10-43: Versuch T_316

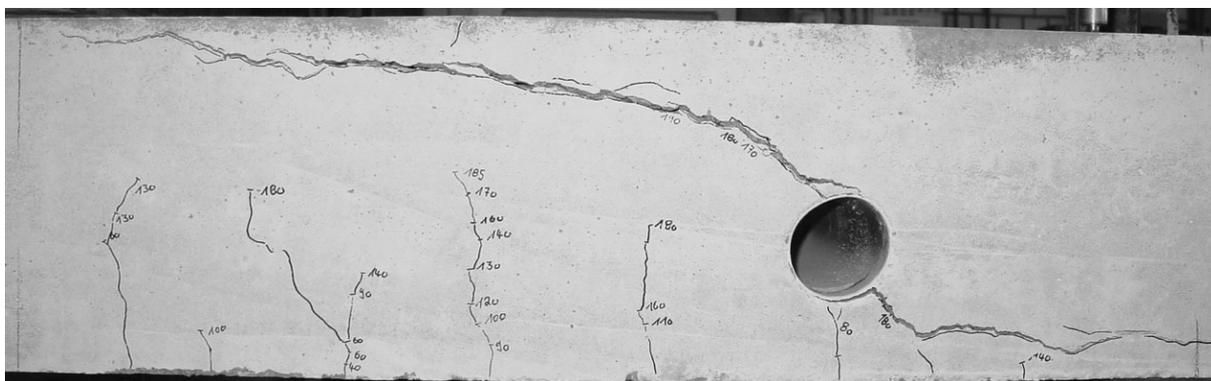


Abbildung 10-44: Versuch T_317

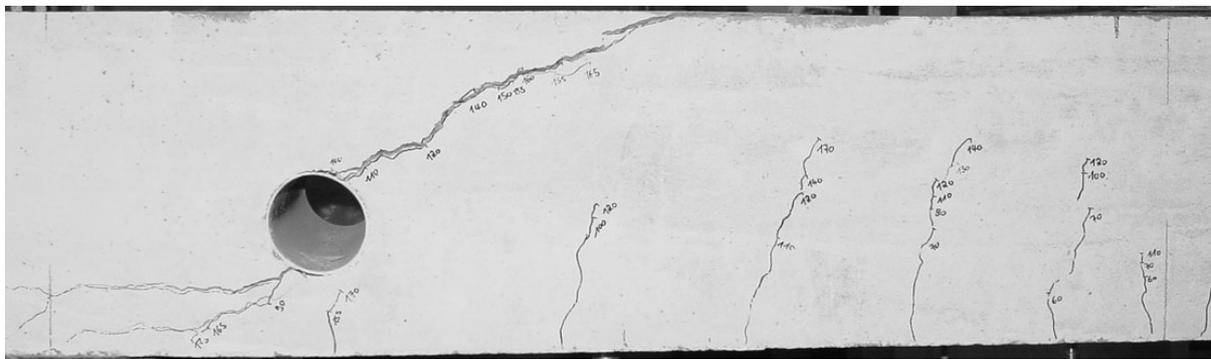


Abbildung 10-45: Versuch T_318

10.3.2 Gruppenanordnung

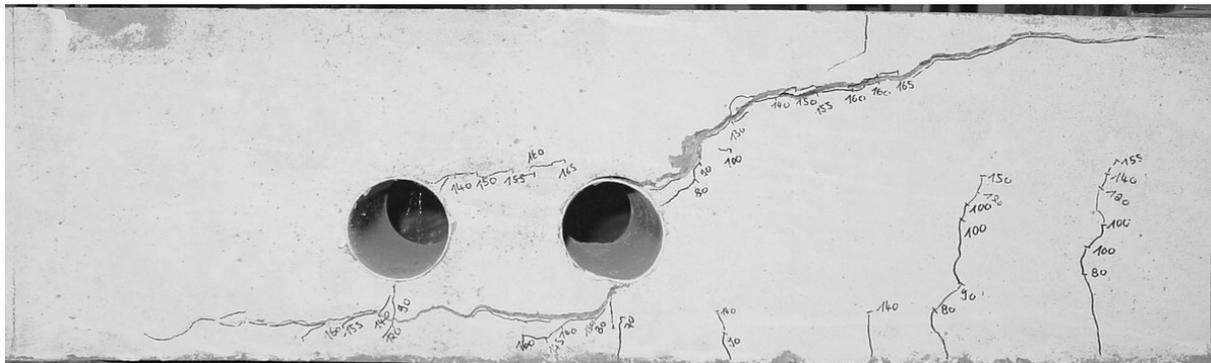


Abbildung 10-54: Versuch T_305

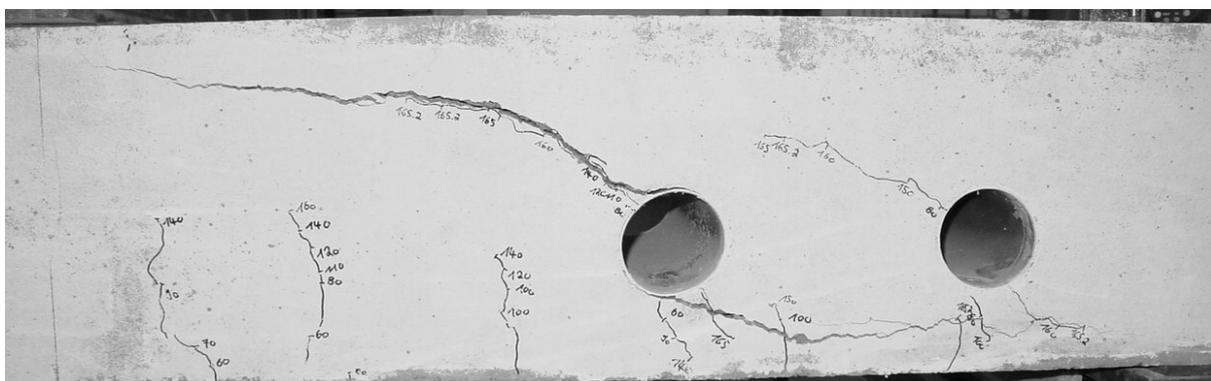


Abbildung 10-55: Versuch T_306



Abbildung 10-56: Versuch T 307

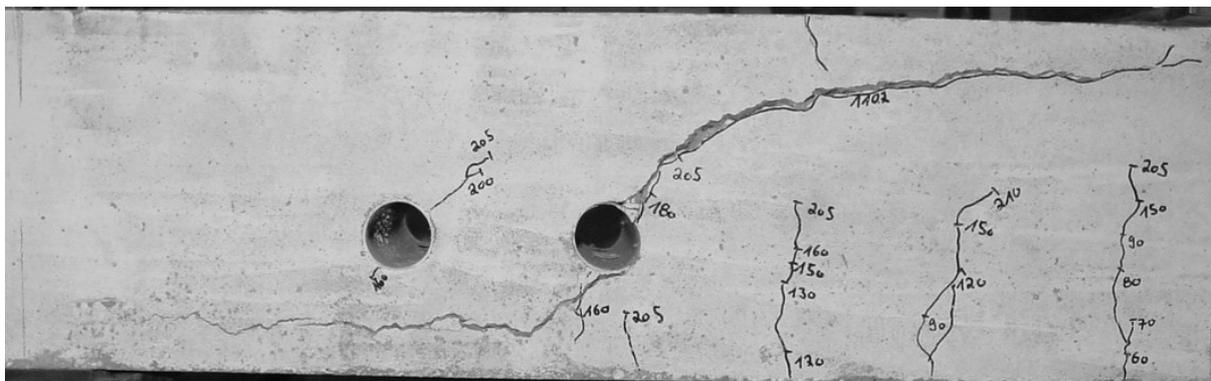


Abbildung 10-57: Versuch T_308

10.3.3 Rechteckige Öffnungen

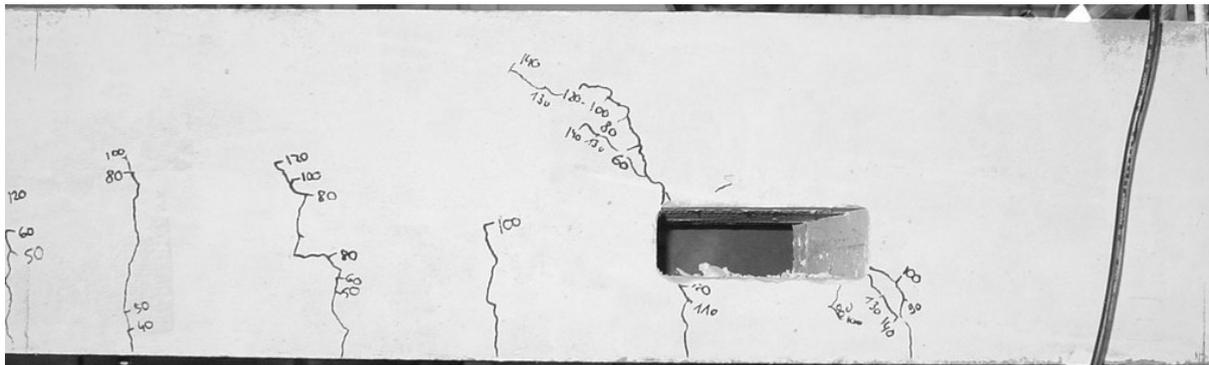


Abbildung 10-58: Versuch T_309

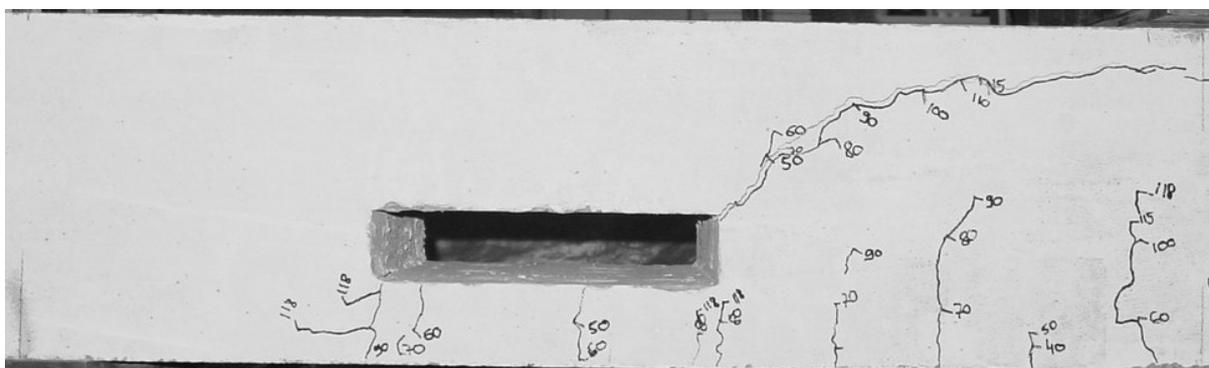


Abbildung 10-59: Versuch T_310

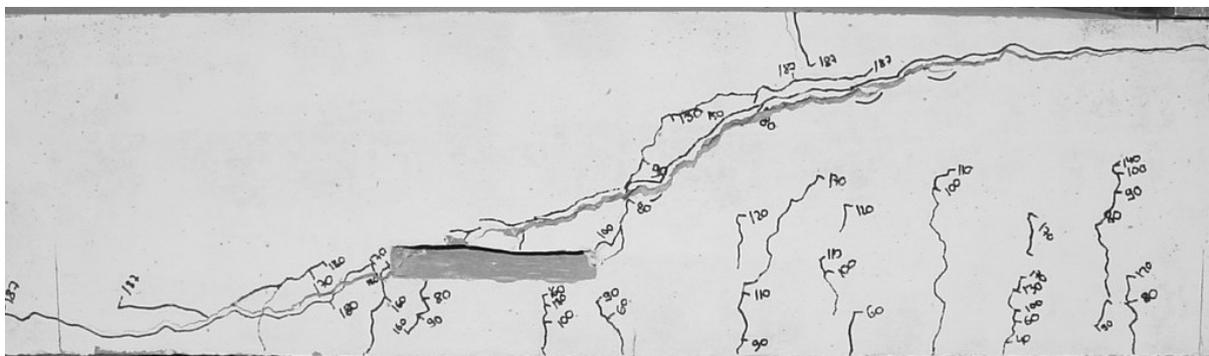


Abbildung 10-60: Versuch T_311

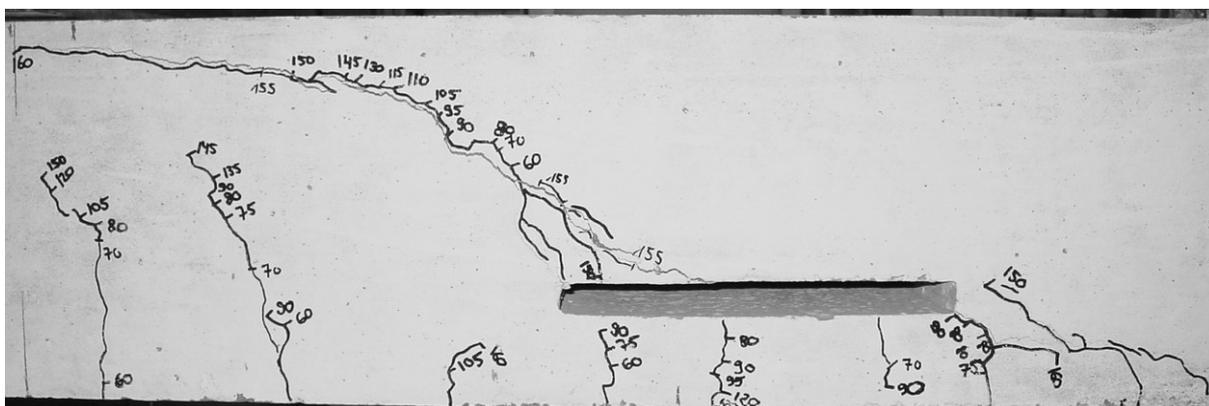


Abbildung 10-61: Versuch T_312

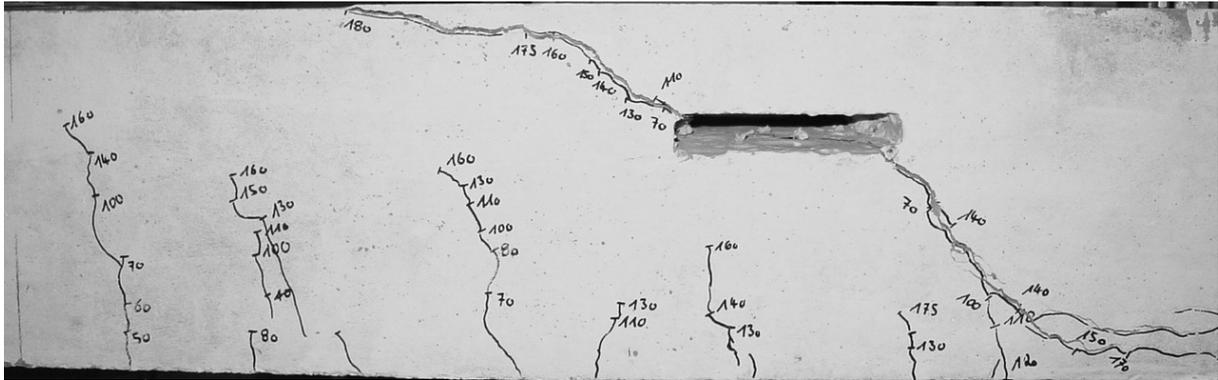


Abbildung 10-62: Versuch T313

