

Zur Bemessung hallenbautypischer Verbindungen

Hartmut Pasternak
Anja Schwarzlos
BTU Cottbus, Lehrstuhl für Stahlbau, Deutschland

KURZFASSUNG: Es wird über ein Forschungsprojekt berichtet, welches sich mit der Bemessung von Verbindungen, die als typisch für den Hallenbau anzusehen sind, befaßt. Es werden die Grenzen der Norm EC3, Annex J, in Bezug auf diese Verbindungen aufgezeigt. Lösungsvorschläge, Möglichkeiten zur Berechnung und die Ergebnisse des Projektes werden zusammengefaßt dargestellt. Dabei wird insbesondere auf die Anwendung der Finiten Elemente Methode eingegangen.

1 EINLEITUNG

Können Erkenntnisse für Verbindungen im Geschosßbau auch auf den Hallenbau übertragen werden. Diese Frage stand im Mittelpunkt eines Forschungsprojektes. Im Geschosßbau werden vor allem Walzprofile verwendet, da die Spannweiten beschränkt sind. Die Komponente „Eigengewicht der Träger“ spielt hier eine geringere Rolle als im Hallenbau mit sehr viel größeren Spannweiten. Für Verbindungen (biegesteif, gelenkig, sowie nachgiebig – bei der Klassifizierung nach der Steifigkeit) zwischen Riegeln und Stützen aus Walzprofilen gibt es mehrere Bemessungshilfen /1/, /2/.

Im Hallenbau werden oft Schweißprofile genutzt, einerseits um die Tragstruktur den Schnittgrößen anzupassen (Bauteile mit veränderlicher Höhe), andererseits um im Hinblick auf die großen Spannweiten (ab 30 m) das Gewicht und damit die Eigenlasten so gering wie möglich zu halten. Als hallenbautypische Verbindungen sind also vor allem Verbindungen zwischen geschweißten Riegel- und Stützenprofilen anzusehen (siehe Abbildung 1).

In früheren Normen war die Modellierung der Rahmenecken, Firstpunkte und auch Fußpunkte auf die beiden Grenzfälle „biegesteif“ und „gelenkig“ beschränkt. Durch den EC3, Annex J /3/, kann nun die Nachgiebigkeit der Verbindung, welche unter anderem von der Ausbildung des Rahmenknotens abhängig ist, berechnet und in der Systemberechnung berücksichtigt werden.

Die Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit des Knotens hat Auswirkungen auf die Schnittgrößen und Verformungen des Systems. Durch die Berücksichtigung kann der Rahmen wirklichkeitsnaher modelliert werden. Durch Variation der Steifigkeit des Knotens (über die jeweilige konstruktive Ausbildung) wird die Optimierung der Schnittgrößen und Verformungen ermöglicht. Daraus ergeben sich wirtschaftliche Vorteile /5/, /6/. Der EC3, Annex J weist jedoch bestimmte Anwendungsbeschränkungen auf, die vor allem auf die hallenbautypischen Verbindungen zutreffen. Dies soll im folgenden näher beschrieben werden.

Zur Bemessung hallenbautypischer Verbindungen

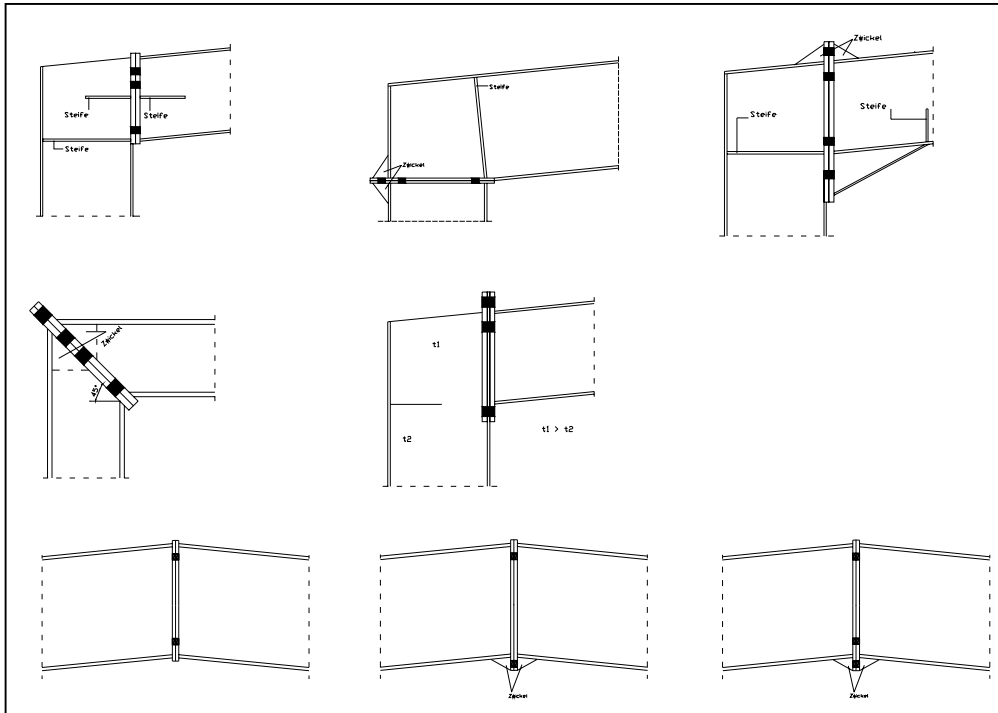


Abbildung 1 Rahmenknoten

2 EINSCHRÄNKUNGEN DES EC3, ANNEX J AUF DEN GESCHOBBAU UND ERWEITERUNGSMÖGLICHKEITEN FÜR DEN HALLENBAU

2.1 Schlankheit des Stegbleches

Im Hallenbau werden ab etwa 30m Spannweite geschweißte Profile für Riegel und Stützen verwendet. Dabei werden Stegbleche mit großen b/t -Verhältnissen verwendet. Im EC3, Annex J wird die Schlankheit der Stegbleche jedoch auf $d/t_w \leq 69\epsilon$ begrenzt.

Stahlsorte	Streckgrenze	ϵ	Grenزشlankheit
S 235 (Fe 360)	235 N/mm ²	1,0	69
S 275 (Fe 430)	275 N/mm ²	0,92	63
S 355 (Fe 510)	355 N/mm ²	0,81	55

Tabelle 1 Grenزشlankheiten

Über die Begrenzung der Schlankheit soll das Schubbeulen als Versagensart ausgeschlossen werden. Die Beschränkung im Annex J und die angestrebten hohen Schlankheiten stehen im Widerspruch zueinander.

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung des Schubbeulens bei Stegen, welche in die Querschnittsklasse 3 oder 4 aufgrund ihrer Schlankheit einzuordnen sind, ist die Anwendung

des Cardiff-Modells. Hier wird die Tragfähigkeit des Stegbleches aus einem Anteil aus Schubfeld, einem Anteil aus Zugfeld und einem Anteil aus Rahmenwirkung berechnet. /7/ Dieses Berechnungsmodell läßt sich gut in den Algorithmus des Annex J für die Bestimmung der Tragfähigkeit und der Steifigkeit eingliedern. /8/

Eine andere Möglichkeit zur Berücksichtigung der überkritischen Tragreserven des Stegbleches ist die Anwendung der Finiten Elemente Methode. Bei der Durchführung des Projektes „Bemessung hallenbautypischer Verbindungen“ wurden die Verbindungen mit finiten Elementen modelliert und berechnet. Zum Vergleich wurden die Rahmenknoten mit dem Programm „JOINT“ gegengerechnet. Hier kann gewählt werden, ob die überkritischen Tragreserven des Stegbleches berücksichtigt werden sollen oder nicht. Im Vergleich der Berechnung nach EC3, Annex J (ohne Berücksichtigung der Tragreserven) und unter Anwendung des Cardiff-Modells ist eine Annäherung der Ergebnisse an die FE-Rechnung bei Berücksichtigung der überkritischen Tragreserven zu verzeichnen. Die Traglasten und Steifigkeiten aus der FE-Rechnung liegen jedoch beträchtlich über denen aus der „Handrechnung“ nach dem Komponentenmodell.

2.2 Normalkraft N_{sd}

Eine weitere Eingrenzung der Verbindungen durch den EC3, Annex J auf den Geschoßbau ist die Beschränkung der vorhandenen Normalkraft auf 10% der plastischen Grenznormalkraft des angeschlossenen Riegels. Diese Begrenzung der Normalkraft entspricht eher dem Geschoßbau, da dort die auftretenden Horizontalkräfte durch Stabilisierungskerne (Treppenhäuser...) aufgenommen werden. Während der Projektbearbeitung wurden zur Überprüfung auch Normalkräfte (bzw. entsprechende Verschiebungen) angesetzt. Dabei ergab sich, daß die Verbindungen teilweise mit Normalkräften bis zu 30% der plastischen Grenznormalkraft des angeschlossenen Riegels bei etwa gleicher Momententragfähigkeit belastet werden können. Entsprechende Ergebnisse wurden auch bei experimentellen Untersuchungen bei früheren und ähnlich angelegten Forschungsvorhaben erzielt. Zur Bemessung von Verbindungen speziell für den Hallenbau wird in einem weiteren Forschungsvorhaben die Interaktion zwischen Normalkraft und Momententragfähigkeit untersucht.

2.3 Schraubenzahl je horizontale Reihe

Die Begrenzung durch den EC3, Annex J auf 2 Schrauben je waagerechte Schraubenreihe wurde durch ein Forschungsprojekt der RWTH Aachen aufgehoben. Hierbei wurden Verbindungen mit 4 Schrauben je Reihe untersucht und Bemessungshilfen geschaffen /5/. Aufgrund dessen wurden innerhalb des Projektes „Bemessung hallenbautypischer Verbindungen“ keine derartigen Verbindungen berücksichtigt.

2.4 Berücksichtigung der Vorspannkraft

Bei der Durchführung der FE-Rechnungen wurde beachtet, daß die Verbindungen mit hochfesten Schrauben, welche vorgespannt sind, ausgeführt werden. Durch verschiedene Untersuchungen im Vorfeld des Projektes wurde der Einfluß der Vorspannung der Schrauben auf die Verbindungen (und damit auf das gesamte Rahmensystem) erfaßt /9/, /10/.

Durch die Vorspannung wird die Anfangssteifigkeit der Verbindung gegenüber nicht vorgespannten Schraubenverbindungen gesteigert. Bei der FE-Rechnung wurde eine der Norm entsprechende Vorspannkraft (100%) auf die Schrauben aufgebracht. Im Vergleich dazu wird der Vorspannung beim Komponentenmodell keine Beachtung geschenkt.

Zur Bemessung hallenbautypischer Verbindungen

2.5 Weitere Einschränkungen in der konstruktiven Ausbildung der Rahmenknoten

Durch das Projekt „Bemessung hallenbautypischer Verbindungen“ wurden weitere Beschränkungen durch den EC3, Annex J, siehe Abschnitt J.1.1 durch die Anwendung der Finiten Elemente Methode umgangen. So wurde beispielsweise eine Variante von Rahmenecken untersucht, bei denen der Riegel auf den Stützenkopf aufgelagert und nicht an den Stützenflansch angeschraubt ist. Im Annex J werden weiterhin Vouten, nicht eingebaute Steifen und Zwickel (zur Aussteifung des überstehenden Kopfplattenteils) bei der Bemessung durch das Komponentenmodell nicht berücksichtigt. All diese Varianten sind im Projekt enthalten.

Die Anwendung der FEM ist aufwendig und die Ergebnisse sind sorgfältig abzuwägen.

3 ZUR MODELLIERUNG DER VERBINDUNGEN

3.1 Modellgenerierung

Bei der Erstellung der Finiten-Elemente-Modelle wurde hauptsächlich auf eine einfache Modellierung der Verbindungen geachtet. Dabei sollten die Rechenzeit und der Speicherbedarf im Hinblick auf hinreichend genaue Ergebnisse möglichst gering gehalten werden. Für die Berechnung wurde das Programmpaket ABAQUS genutzt.

Bei der Modellierung von Riegel, Stütze und Kopfplatten wurden Schalenelemente angewendet. Dabei handelte es sich um sogenannte „dicke“ Schalenelemente. Dies bedeutet, daß der Schub nicht vernachlässigt wird. Für die Schraubenmodellierung wurden Balkenelemente verwendet. Diese vereinfachte Abbildung der Schrauben konnte gemacht werden, da die Verbindungen stets so konfiguriert wurden, daß ein schlagartiges Versagen infolge der Verbindungsmittel ausgeschlossen werden kann. Der Kontakt zwischen den Kopfplatten bzw. zwischen Kopfplatte und Stützenflansch sowie zwischen Schraubenschaft und Lochleibung wurde mittels Fachwerkelementen hergestellt. Diesen Elementen kann bei der Materialvereinbarung zugewiesen werden, daß Druck übertragbar ist, aber bei Zug die Elemente ausfallen.

Für die Materialdefinition wurde das ideal-elastische ideal-plastische Materialgesetz genutzt. Dabei wurden die Materialkenngrößen Elastizitätsmodul und Streckgrenze mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,1$ abgemindert. Die begrenzte Bruchdehnung der Schrauben wurde über eine ausführlichere Eingabe der Materialkennlinie berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung der Vorspannung der Schrauben wurde eine der in der Norm vorgeschriebenen Grenzvorspannkraft äquivalente Spannung aufgebracht.

Die Rahmenecke (Abbildung 2) stellt den Fall dar, wo der Riegel auf den Stützenkopf aufgelagert ist. Diese Art der Ausbildung einer Rahmenecke ist, wie in Abschnitt 2 beschrieben, nicht im Annex J, nach Abschnitt J.1.1 enthalten.

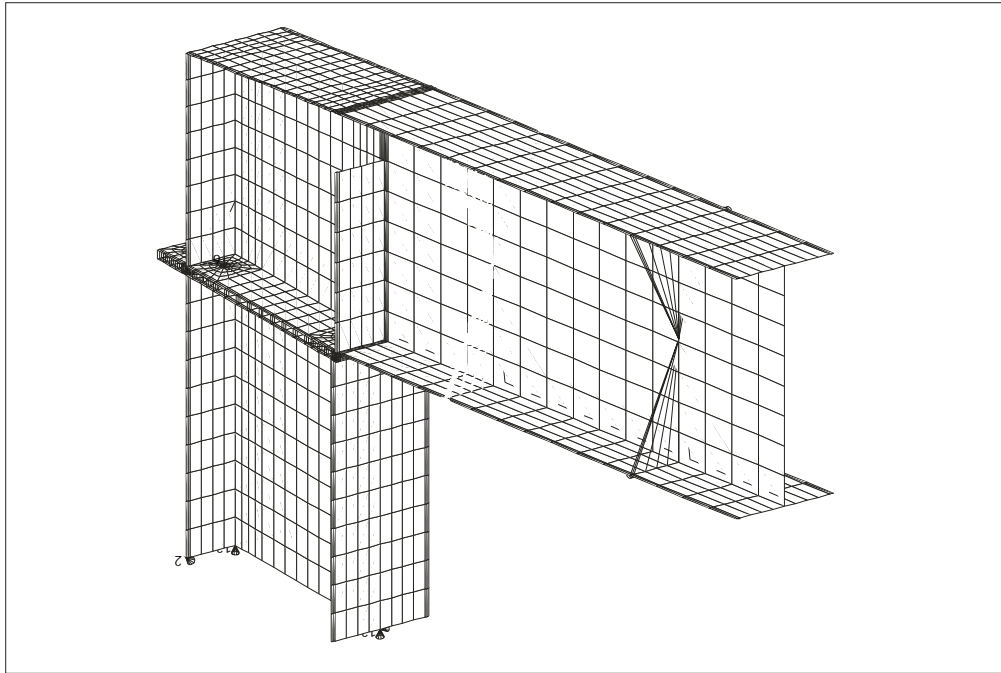


Abbildung 2 FE-Modell einer Rahmenecke mit nicht eingepaßter Steife (RE2-V10)

3.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Ergebnisse wurde mit Hilfe von Ergebnissen aus Versuchen aus einem früheren und ähnlich gelagerten Projekt der Forschungsstelle durchgeführt. Mit den Ergebnissen der FE-Rechnung und der experimentellen Untersuchungen konnten so Kalibrierungsfaktoren für die Rahmenknoten gewonnen werden.

4 ZU DEN ERGEBNISSEN DER FINITEN-ELEMENTE-RECHNUNG

4.1 Darstellung der Ergebnisse

Es wurden innerhalb des Projektes verschiedene Varianten von Rahmenecken und Firstpunkten untersucht. Die Varianten ergaben sich aus verschiedenen gewählten konstruktiven Ausbildungen (Anordnung von Steifen, Zwickeln, überstehende oder bündige Kopfplatten, etc.) sowie über die Riegelhöhe bzw. Stützenbreite und den dazu entsprechenden Dicken der Stege und Flansche.

Die Ergebnisse wurden in einem Katalog /11/ zusammengefaßt. Darin enthalten sind die geometrischen Angaben und die Ergebnisse aus der FE-Untersuchung. Die Ergebnisse sind einerseits als Momenten-Rotationscharakteristiken in Diagrammform abgebildet. Andererseits wurden die Ergebnisse in Tragfähigkeitstabellen zusammengefaßt. Aus den Diagrammen kann für die gewählte Verbindung das Grenztragmoment abgelesen und mit der entsprechenden Verdrehung (Rotation) kann die Steifigkeit berechnet werden. Weiterhin läßt sich aus den

Zur Bemessung hallenbautypischer Verbindungen

Diagrammen das Duktilitätsverhalten der Verbindung erkennen. In den Tragfähigkeitstabellen sind Angaben zum Grenzmoment, zur Grenzquerkraft, zu den Steifigkeiten und zur Klassifizierung der Verbindung hinsichtlich Steifigkeit und Tragfähigkeit enthalten.

4.2 Auswertung

Mit den Ergebnissen der FE-Rechnung sind für ausgewählte Rahmenecken Angaben zur Beanspruchbarkeit und Steifigkeit zusammengestellt werden. In Abbildung 3 sind als Beispiel Verformungen (50fach überhöht) und die Vergleichsspannungen dargestellt. Bei der Auswertung der Ergebnisse der FE-Rechnungen wurden zusätzliche Vergleichsrechnungen nach dem Komponentenmodell - EC3, Annex J durchgeführt.

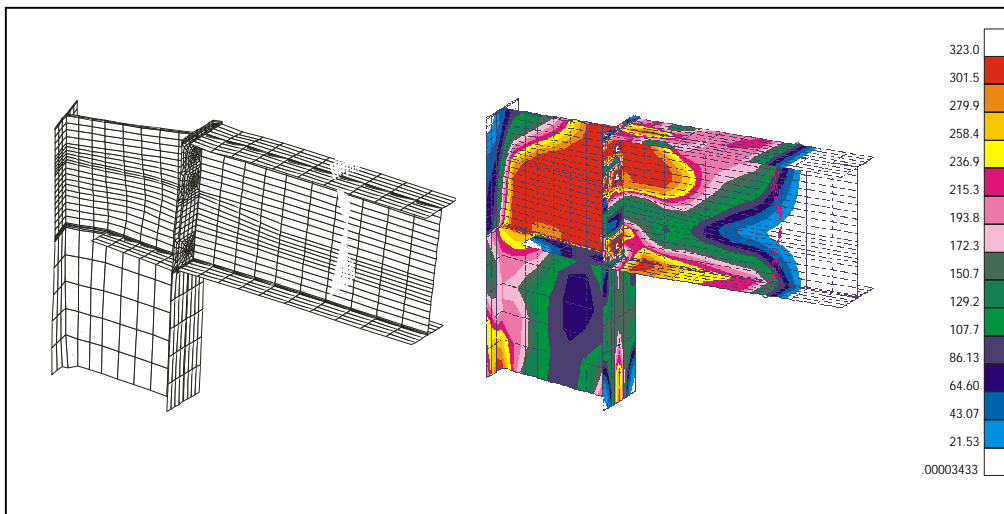


Abbildung 3 Verformungen und Spannungen [N/mm²] einer Rahmenecke (RE1-V5) im Traglastzustand

Beim Vergleich der Ergebnisse zeigte sich, daß die Ergebnisse der FE-Rechnung für die Firstpunkte eher den Ergebnissen nach EC3, Annex J entsprechen als die Ergebnisse der FE-Rechnung für die Rahmenecken. Es wird daher für die Firstpunkte (Riegel-Riegel-Verbindung) eine größere Übereinstimmung mit dem EC3, Annex J angenommen. Dies könnte durch die verschiedenen Versagensverhalten der Verbindungen RIEGEL-RIEGEL und RIEGEL-STÜTZE erklärt werden. Beim Firstpunkt können sich im Gegensatz zur Rahmenecke keine Zugfelder ausbilden und damit ist überkritisches Tragverhalten nicht vorhanden. Eine auszugsweise Gegenüberstellung ist in Tabelle 2 zu finden. Die beiden in der Tabelle 2 aufgeführten Verbindungen sind in Abbildung 4 und 5 dargestellt.

	F1-V7		RE1-V1	
	M_{Rd} [kNm]	$S_{i,ini}$ [kNm/rad]	M_{Rd} [kNm]	$S_{i,ini}$ [kNm/rad]
FE-Rechnung	290	884000	411	130000
EC3, Annex J	228	181228	104	22598
FE/EC3	1,27	4,88	3,93	5,75

Tabelle 2 Vergleich FE-Rechnung und Komponentenmodell

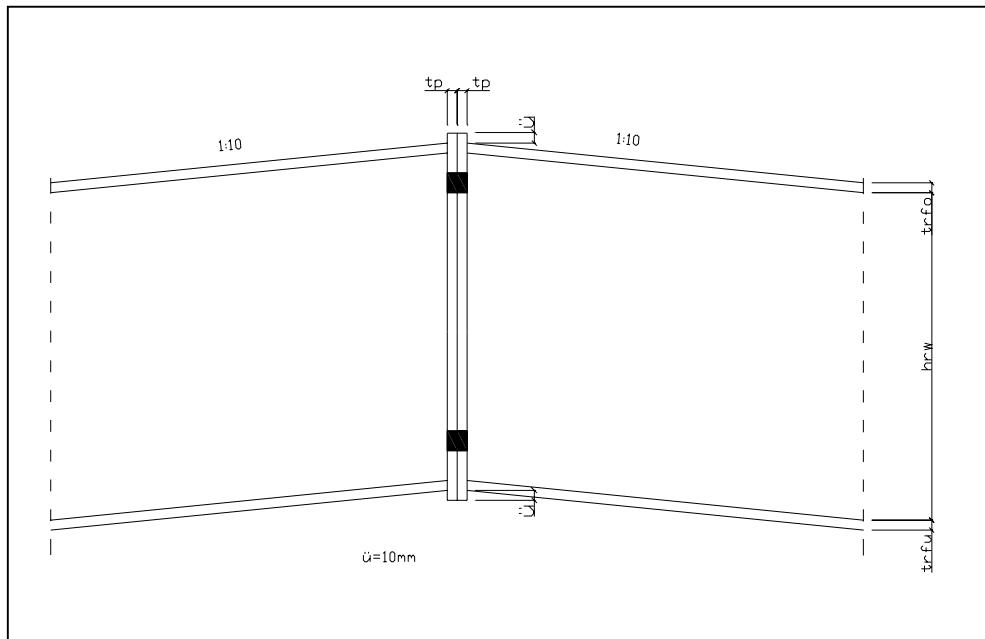


Abbildung 4 Firstverbindung F1-V7

Die Firstverbindungen der Reihe F1 sind durch 2 innenliegende Schraubenreihen und bündige Kopfplatten gekennzeichnet. Variiert wurden die Verbindungen über die Riegel- und Kopfplattenabmessungen, sowie über die Schraubendurchmesser und die entsprechenden Schraubenabstände.

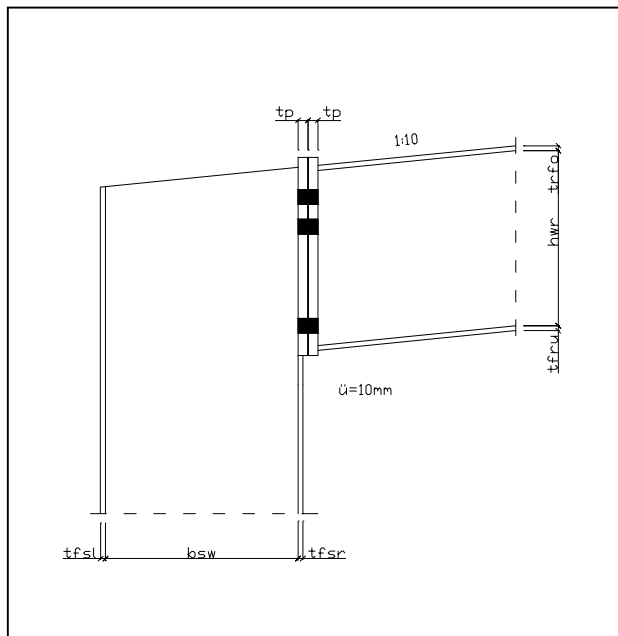


Abbildung 5 Rahmenecke RE1-V1

Bei den Rahmenecken der Reihe RE1 wurden ebenfalls beidseitig bündige Kopfplatten angesetzt. Der Stützenflansch im Verbindungsbereich wird durch eine zweite Kopfplatte ersetzt. Bei dieser Rahmeneckenreihe wurden stets 3 Schraubenreihen angelegt. Die Varianten wurden über verschieden angeordnete Steifen sowie über die Abmessungen erreicht. Das fehlende Deckblech am Stützenkopf stellt bei diesen Rahmenecken nur den unausgesteiften Fall des Zugbereiches des Stützenstegbleches dar. Genaue Angaben zu den Verbindung F1-V7 und RE1-V1 sind im Katalog /11/ zu finden.

Zur Bemessung hallenbautypischer Verbindungen

Das Versagen der Verbindungen war vor allem durch das Versagen der Druckzone gekennzeichnet. Zusätzliche Steifen oder Zwickel zur Aussteifung im Zugbereich und Begrenzung der Fließbereiche machten sich daher kaum bemerkbar. Dieses Versagenverhalten kann vorrangig auf die gewählten Schlankheiten der Stützen- und Riegelquerschnitte zurückgeführt werden.

5 SCHLUß

Es kann bemerkt werden, daß die grundlegenden Erkenntnisse über Verbindungen im Geschoßbau auch auf den Hallenbau größtenteils übertragen und genutzt werden können. Bestimmte Einflüsse, die aus den Gegebenheiten des Hallenbaus resultieren wie schlankere Stegbleche, größere auftretende Normalkräfte oder vom EC3, Annex J abweichende konstruktive Ausbildungen der Rahmenecken, welche bisher durch das Regelwerk noch nicht erfaßt werden, können durch die Anwendung der Finiten Elemente Methode berücksichtigt werden.

Gedankt wird der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), welche das Projekt gefördert hat.

6 LITERATUR

- /1/ DStV/DAST: „Typisierte Verbindungen im Stahlhochbau“, Köln, 1984
- /2/ F. F. Tschemmernegg, Th. Angerer, M. Frischhut: „Bemessungshilfen für nachgiebige Stahlknoten mit Stirnplattenanschlüssen“, Stahlbau-Kalender 1999, Kap. 5, S. 457-514, Ernst&Sohn
- /3/ Eurocode 3 – New Revised Annex J: Joints in Building Frames, ENV 1993-1-1, 1997
- /4/ DAST: „Plastische Bemessung von Stirnplatten-Anschlüssen mit 4 Schrauben in einer Reihe“, Forschungsbericht 5/2000, RWTH Aachen, LS für Stahlbau
- /5/ P. Hoeß: „Optimierung von Stockwerkrahmen aus Stahl mit biegesteifen und biegeweichen Rahmenknoten“, Dissertation, Institut für Baustatik, Universität Karlsruhe, 1994
- /6/ K. Weynand, M. Feldmann, G. Sedlacek: „Nachgiebige Anschlüsse im Stahlbau: Modell nach Eurocode 3, Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“, Stahlbau 66 (1997), Heft 11, S. 770-781
- /7/ H. Pasternak: „Knee Joints with thin webs. Carrying behaviour, local and global modelling“, Technical Report, Tempus 2184, Budapest 1993
- /8/ H. Pasternak, L. Horvath, L. Katula: „Approximation of the moment-rotation characteristic of knee joints with thin webs in single-story buildings“, Beitrag zu „The seventeenth czech and slovak international conference on steel structures and bridges“, Bratislava, 1994
- /9/ C. Faella, V. Piluso, G. Rizanno: „Experimental analysis of bolted connections: Snug versus preloaded bolts“, Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 7, July 1998
- /10/ A. Schwarzlos: „Analytische Untersuchung des Einflusses der Vorspannung auf Kopfplattenverbindungen“, Diplomarbeit, BTU Cottbus, Lehrstuhl für Stahlbau, September 1999
- /11/ H. Pasternak, A. Schwarzlos: Abschlußbericht und Katalog zum AiF-Projekt „Bemessung hallenbautypischer Verbindungen“, Projektnr. 11856 B, BTU Cottbus, LS Stahlbau, 2001