

5. Tragverhalten unter Querschub in Mittellage

5.1 Einführung

Bereits erste Voruntersuchungen bestätigen, daß das Tragverhalten liegender Kopfbolzendübel unter reiner Querschubbeanspruchung für eine Mittellage der Verbundfuge grundsätzlich komplexer als für eine Randlage ist. Für die Gesamttragfähigkeit der Verbundfuge stehen gemäß Bild 5-1 insgesamt drei *Tragkomponenten* zur Verfügung:

- Diskrete *Kraftanteile* F_K über die *Kopfbolzen* selbst,
- *Reibkräfte* F_R infolge Querbiededruck aus Durchlaufwirkung der Stahlbetonplatte,
- *Kraftanteile* F_S über die *Stegoberkante* durch Auflagerung der Stahlbetonplatte.

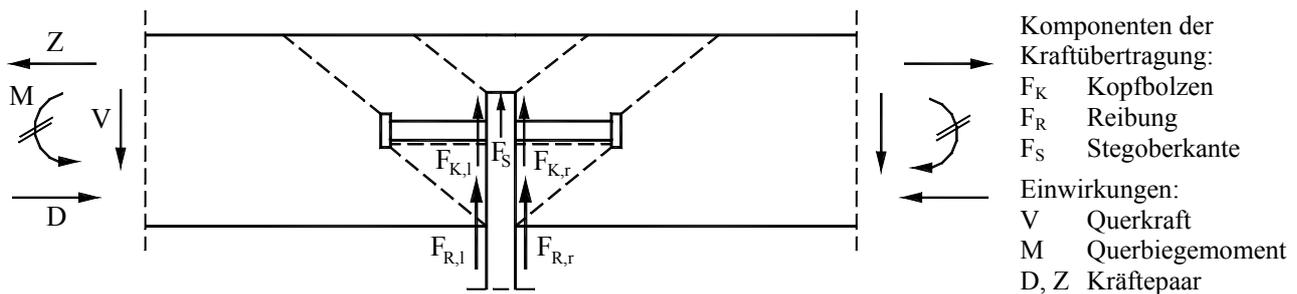


Bild 5-1. Modell für die Kraftübertragung bei liegenden Kopfbolzen unter Querschub in Mittellage

In Kuhlmann & Kürschner [2.68], Kapitel 2 sind die in der Literatur vorhandenen Untersuchungen zu den drei o. g. Kraftübertragungsmechanismen ausführlich dokumentiert. Darauf aufbauend wird im Rahmen dieser Arbeit der *Stand der Forschung* nur auszugsweise zusammengefaßt. Die schwerpunktmäßige Betrachtung der Kraftübertragung durch Reibung wird in Abschnitt 5.2 durch ausgewählte Konstruktionsbeispiele, deren Trag- und Verformungsverhalten auch durch mehrere Tragwirkungen bestimmt wird, ergänzt. Die in Abschnitt 5.3 beschriebenen *experimentellen Untersuchungen* wurden durch das *Deutsche Institut für Bautechnik* unterstützt und sind ausführlich in Kuhlmann & Kürschner [2.68] dokumentiert. Die Versuche sind zur Erfassung der realen Tragwirkung eines Dübels so ausgerichtet, daß weitere tragfähigkeitssteigernde Einflüsse wie Reibung und Spitzendruck innerhalb praktischer Anwendungsgrenzen weitestgehend minimiert werden. Daran anschließend werden in Abschnitt 5.4 Ergebnisse der *numerischen Untersuchungen* zur reinen Dübeltragwirkung vorgestellt. Darüber hinaus werden in Abschnitt 5.5 die Untersuchungen durch *weiterführende Parameterstudien* zur Kraftübertragung in Verbundfugen ausschließlich über Reibung ergänzt. Auf Grundlage der Ergebnisse der Teiluntersuchungen werden in Abschnitt 5.6 *Bemessungsregeln* entwickelt und *Empfehlungen für die konstruktive Durchbildung* vorgestellt.

5.2 Stand der Forschung

5.2.1 Allgemeines

Der Stand der Forschung für die Kraftübertragung durch *Kopfbolzendübel* wird ausführlich in den Abschnitten 3.2 und 4.2 beschrieben. Die folgenden Untersuchungen in den Abschnitten 5.3 bis 5.5 zeigen, daß der Einfluß infolge Kontaktpressung aus Plattenlagerung auf der *Stegoberkante* für die Gesamttragfähigkeit der Verbindung von untergeordneter Bedeutung ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Darstellung der in der Literatur vorhandenen Untersuchungen zu dieser Tragkomponente verzichtet und auf Kuhlmann & Kürschner [2.68], Abschn. 2.4 verwiesen.

Im Verbundbau werden in der Kontaktfläche zwischen Beton- und Stahlgurt oftmals sehr hohe Kraftanteile durch *Reibung* übertragen. Dabei können folgende Beispiele genannt werden:

- Reibungsverbund bei Verbundträgern mit Betongurten aus Fertigteilen (siehe Bild 5-3),
- Kopfbolzen in Verbundstützen aus kammerbetonierten Walzprofilen (siehe Bild 5-4),
- Betondübel unter Querschubbeanspruchung (siehe Bild 5-5) etc..

Für eine effiziente konstruktive Durchbildung dieser Verbundfugen wurde bereits eine Vielzahl von Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von reinen Reibverbindungen durchgeführt, vgl. Abschnitt 5.2.2.1. In Abschnitt 5.2.2.2 werden die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Ermittlung des Reibbeiwertes zwischen Beton und Stahl kurz zusammengefaßt. Eine ausführlichere Diskussion der Superposition der einzelnen Traganteile aus den verschiedenen Kraftübertragungsmechanismen der o. g. Verbundfugen wird in Abschnitt 5.2.3 geführt.

Die Untersuchungen von Däuwel [2.5] zum Tragverhalten von einbetonierten Stahlträgern, sog. Slim-Floor Träger, zeigen am Beispiel von ASB-Trägern, daß auch ohne herkömmliche Verbundmittel eine beträchtliche Verbundwirkung allein durch Reibung verursacht werden kann. Die zur Aktivierung der Reibung erforderliche Klemmwirkung erfolgt z. B. durch Stauchung des Stahlsteges nahe der Auflager, durch Querkontraktion des zugbeanspruchten Betons in den auflagerfernen Bereichen, durch Umlenkung infolge Trägerkrümmung und durch Querbiegung der Platte. Für den Nachweis der Verbundsicherung schlägt Däuwel [2.5] eine planmäßige Nutzung der Reibung vor.

5.2.2 Kraftübertragung durch Reibung

5.2.2.1 Verformungsverhalten

In Roik & Bürkner [2.49] und Mangerig & Zapfe [2.69] sind insgesamt 140 reine *Reibversuche* mit zwischen zwei Betonkörpern unter konstanter Anpressdruckkraft A eingeklemmten Stahlstegen dokumentiert. Die prinzipielle Gestaltung der Versuchskörper gleicht der realen Bauwerkssituation von Verbundträgern mit obergurtlosen Stahlprofilen, d. h. der Stahlsteg bindet in den Betongurt ein, und mit quer dazu angeordneten Stahlbetonplatten mit konstantem Stützmoment, vgl. Bild 5-2.

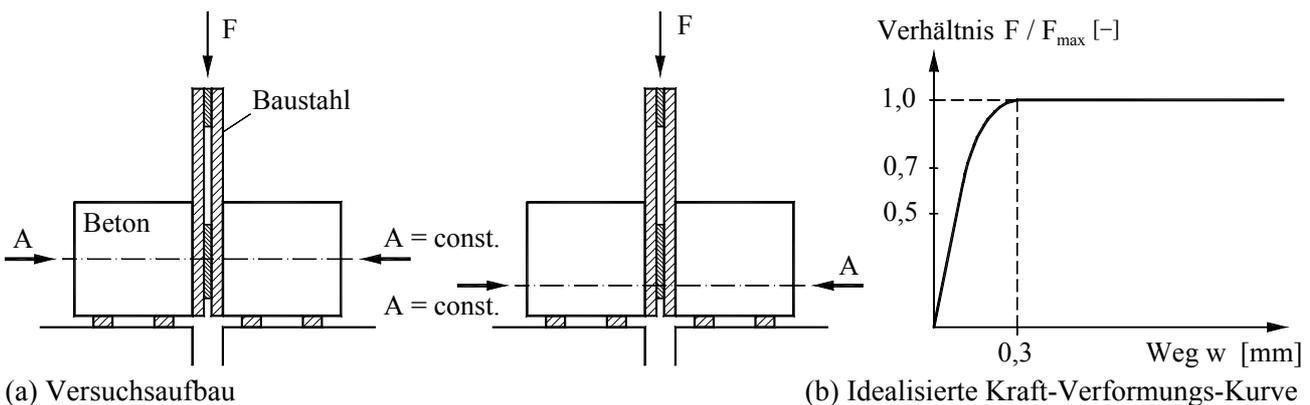


Bild 5-2. Reibversuche nach Roik & Bürkner [2.49] und Mangerig & Zapfe [2.69]

Das *Kraft-Verformungs-Verhalten* zeigt bis zum Erreichen von ca. 50 bzw. 70 % der Reiblast eine nahezu lineare Beziehung und weist mit Verschiebungswerten von 0,06 bis 0,1 mm eine sehr hohe Anfangssteifigkeit auf. Im Anschluß daran nimmt die Steifigkeit ab. Bis zum Erreichen der Reiblast bei ca. 0,3 mm Weg geht die Kraft-Verformungs-Kurve in ein nahezu ideal-plastisches Verhalten über. Trotz stark zunehmenden Schlupf ist keine Kraftabnahme zu verzeichnen. Die Gleitreibung ist bei konstanter Normalkraft als ein sehr duktiles Verbundmittel einzustufen. Die in der Verbundfuge übertragbare Kraft hängt vorrangig von der Normalkraft und weniger vom Schlupf ab.

5.2.2.2 Reibbeiwerte

Die experimentellen Untersuchungen von Roik & Bürkner [2.49], Roik & Hanswille [2.51] und Mangerig & Zapfe [2.69] zeigen übereinstimmend, daß die Reibungszahl μ zwischen Beton und Stahl besonders von der *Oberflächenbehandlung des Stahls und des Betons* abhängig ist. Ein Einfluß der *Betonfestigkeit* und der *Exzentrizität des Anpressdrucks* konnte nicht nachgewiesen werden.

Darüber hinaus wurde in Roik & Bürkner [2.49] für Reibungsverbund mit HV-Schrauben aufgrund der örtlich begrenzten Kraftausbreitung ein Einfluß der *Stahldicke* festgestellt, vgl. Bild 5.3 (a). Der für diesen Fall beobachtete negative Einfluß einer abnehmenden Stahldicke auf die Größe der aktivierten Reibfläche und damit auf den Reibbeiwert wird für die hier durchgeführten Untersuchungen aufgrund der vergleichsweise großen Abmessungen der Reibflächen als nicht zutreffend angesehen. In Tabelle 5-1 werden daher nur die in Roik et al. [2.53], Abschn. 4.8.3.3 zusammengestellten und für Stahldicken von mindestens 15 mm hergeleiteten mittleren und charakteristischen Reibbeiwerte in Abhängigkeit von der Oberflächenbehandlung des Baustahls und des Betons dargestellt.

Tabelle 5-1. Reibbeiwerte nach Roik et al. [2.53]

Literatur	Oberflächenbehandlung		Reibbeiwert μ [-]	
	Baustahl	Beton	50 %-Fraktil	5 %-Fraktil
Roik & Bürkner [2.49]	walzrauh ¹	ohne Schalöl mit Schalöl	0,766 0,646	0,75 0,63
	Zink-Primer ¹	ohne Schalöl	0,618	0,60
Roik & Hanswille [2.51]	gleitfester Anstrich ^{1,2}	ohne Schalöl	0,402	0,35
	Walzstahlkonservierung ^{1,3}	ohne Schalöl	0,257	0,25

¹ mit leichtem Rostansatz
² entspricht technischen Lieferungsbedingungen der Deutschen Bundesbahn (TL. Nr. 918300, Bl. 85)
³ mit Eisenoxyd-Rot-Shop-Primer (25 μm)

Eine statistische Neuauswertung der Versuche von Roik & Bürkner [2.49] und Mangerig & Zapfe [2.69] nach Eurocode 3, Anhang Z [1.9] führt zu charakteristischen Reibbeiwerten μ_k von 0,57 und 0,54, siehe Zapfe [2.16], Abschn. 7.2.1. Zum Vergleich sind in Tabelle 5-2 die in den aktuellen Normen angegebenen Reibbeiwerte mit den Anforderungen an die Oberflächenqualität angegeben. Nach Eurocode 4, Teil 1-1 [1.1], Abschnitte 9.4.3.3 und 9.4.3.5 sollte die mit dem Beton in Kontakt stehende Baustahloberfläche im allgemeinen frei von Farbe oder anderen Beschichtungen wie beispielsweise Öl, Schmutz, Rost, loser Walzhaut oder Bohrspäne sein, um eine gleichmäßige Flächenpressung zu ermöglichen und die Wirksamkeit der Reibverbindung nicht zu beeinträchtigen.

Tabelle 5-2. Reibbeiwerte nach aktuellen Normen

Norm	Reibbeiwert	Hinweise zur Oberflächenbehandlung
E DIN 18800-5, El. (572) Eurocode 4-1-1, 6.5.2.1 Eurocode 4-2, 6.5	$10 \leq t_{\text{Stahl}} < 15 \text{ mm}$: $\mu_k = 0,5$ $t_{\text{Stahl}} \geq 15 \text{ mm}$: $\mu_k = 0,55$ Hinweis: $\gamma_v = 1,25$	– Stahloberflächen müssen mit Sand- oder Stahlkies gestrahlt und frei von losem Rost und Anstrich sein. – Für beschichtete Stahloberflächen wird auf die Literatur bzw. experimentelle Ermittlung der Reibungszahl hingewiesen.
DIN 18800-1, El. (764) ¹	$\mu_d = 0,5$ Hinweis: Zur Abdeckung von Unsicherheiten weitere Abminderung mit Faktor 1,5.	– Stahloberflächen müssen unbeschichtet und fettfrei, spritzverzinkt, zinksilikatbeschichtet oder ungeschützt sein. – Vollständige Aushärtung der Beschichtung vor dem Einbau.

¹ Für die Anforderungen an die Oberflächenqualität wird auf DIN 4141-1, Kapitel 6 verwiesen.

Für Anwendungen von Reibungsverbund im Brückenbau sind in Roik & Bürkner [2.49] und Roik & Hanswille [2.51] insgesamt 16 Versuche dokumentiert, die vor dem statischen Reibversuch mit einer *dynamischen Druckschwellbeanspruchung* von insgesamt 3 bzw. 0,2 Mio. Lastspielen und mit Oberlasten von 70 bzw. 85 % der zu erwartenden Reiblast vorbelastet wurden. Aufgrund einer Verbesserung des Formschlusses in der Verbundfuge durch Verzahnung der Betonteilchen mit der Stahloberfläche ist grundsätzlich ein gutmütiges Verhalten von Reibverbindungen unter dynamischer Beanspruchung zu beobachten, siehe auch Däuwel [2.5], Abschnitt 5.3.2. Die dabei erzielten Reibbeiwerte liegen im allgemeinen mindestens auf dem Niveau der statischen Referenzversuche.

5.2.2.3 Zusammenfassung

Reine Reibverbindungen mit konstantem Anpressdruck zeigen ein nahezu ideal-elastisch, idealplastisches *Verformungsverhalten*. Der Übergang zum Reibplateau erfolgt bei ca. 0,3 mm Relativverschiebung. Im Fall von liegenden Kopfbolzen unter Querschub nimmt die resultierende Anpressdruckkraft A mit der Querschubbeanspruchung F jedoch nahezu proportional zu, so daß bei Verhältnissen F/A kleiner als dem Reibbeiwert μ ein mit zunehmenden Beanspruchungen rein ideal-elastisches Verhalten unterhalb der Gleitgrenze zu erwarten ist.

Im Gegensatz zur Betonfestigkeit und Exzentrizität des Anpressdrucks besitzen die Oberflächenbehandlungen der beiden Materialien einen bedeutenden Einfluß auf den *Reibbeiwert*. Für praxisübliche Oberflächenbehandlungen sind in der Literatur entsprechende Reibbeiwerte angegeben.

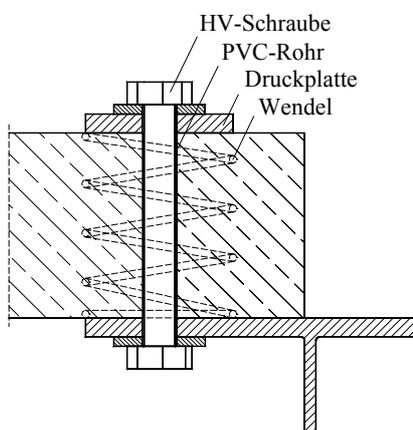
5.2.3 Kombinierte Kraftübertragung

5.2.3.1 Allgemeines

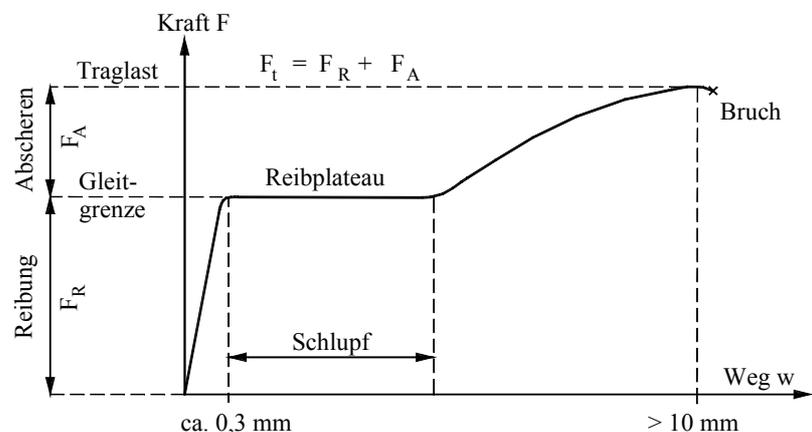
Besonders im Verbundbau gibt es eine Vielzahl von Verbindungen bei denen sich die Gesamttragfähigkeit aus der *Addition einzelner Traganteile* ergibt. Im folgenden werden einzelne Beispiele solcher Verbundfugen entsprechend Abschnitt 5.2.1 etwas näher erläutert und diskutiert.

5.2.3.2 Reibungsverbund

Im Fall von Reibungsverbund werden entsprechend Bild 5-3 Betonfertigteile durch HV-Schrauben mit dem Stahlträger verbunden. Diese *Reib-Abscher-Verdübelung* verhält sich im Prinzip wie eine gleitfeste Schraubenverbindung.



(a) Beispiel



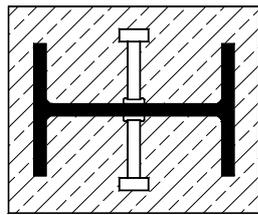
(b) Idealisierte Kraft-Verformungs-Kurve nach Roik & Hanswille [2.51]

Bild 5-3. Verbundfuge mit Reibungsverbund

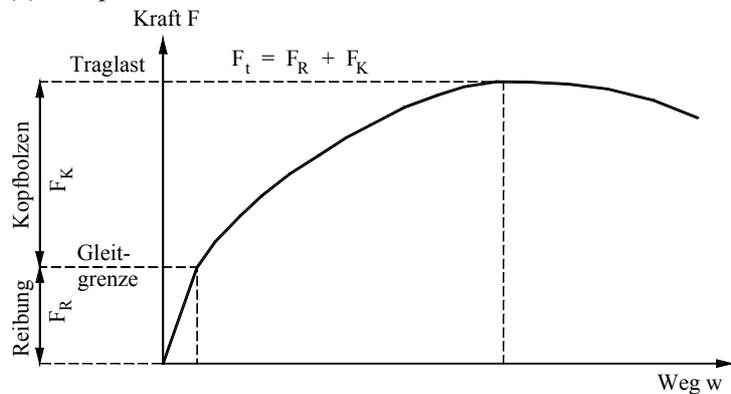
Bis zum Erreichen der Reiblast werden die Kräfte ausschließlich über *Reibung* übertragen. Mit Erreichen der Reiblast, die von der vorhandenen Vorspannkraft der Schraube abhängig ist, treten in Abhängigkeit vom Lochspiel auf konstantem Kraftniveau Gleitungen auf, bis schließlich der Schraubenschaft am Beton anliegt und die Schraube bis zum Bruch zusätzlich auf *Abscheren* beansprucht wird. Die Untersuchungen von Roik & Hanswille [2.51] zeigen, daß die experimentellen Traglasten mit den rechnerischen Traglasten P_t unter Annahme einer additiven Tragwirkung aus Reibungs- und Abscherkräften P_R und P_A sehr gut übereinstimmen. Wird kein Lochspiel vorgesehen, so zeigt die Kraft-Verformungs-Kurve nach Erreichen der Reiblast infolge sofortiger Aktivierung der Abschertragwirkung eine stetige Steifigkeitsänderung bis zum Bruch an, vergleichbar mit Bild 5-4 (b). Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 5.2.2.2 weisen diese Verbundfugen unter nicht ruhender Beanspruchung ein besonders günstiges Verhalten auf.

5.2.3.3 Kopfbolzen in Verbundstützen aus kammerbetonierten Walzprofilen

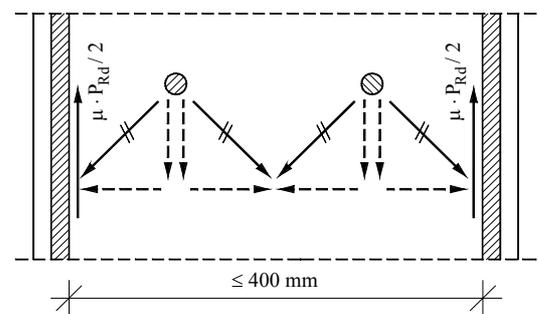
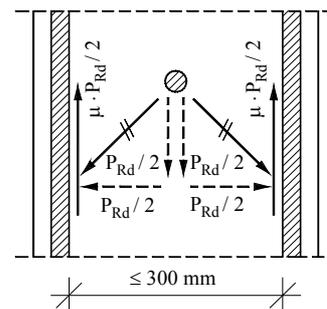
Auf Grundlage der Untersuchungen von Roik & Hanswille [2.50] darf die Tragfähigkeit der Verbundfuge in Verbundstützen aus kammerbetonierten Walzprofilen unter additivem Ansatz der *Dübeltragfähigkeit* entsprechend Abschnitt 3.2.1 einerseits und der aktivierten *Reibungskräfte* an den Flanschinnenseiten andererseits ermittelt werden. Die aktivierten Reibungskräfte dürfen mit $\mu \cdot P_{Rd} / 2$ für jeden Flansch und jede Dübelreihe entsprechend Bild 5-4 berücksichtigt werden.



(a) Beispiel



(b) Idealisierte Kraft-Verformungs-Kurve



(c) Modell

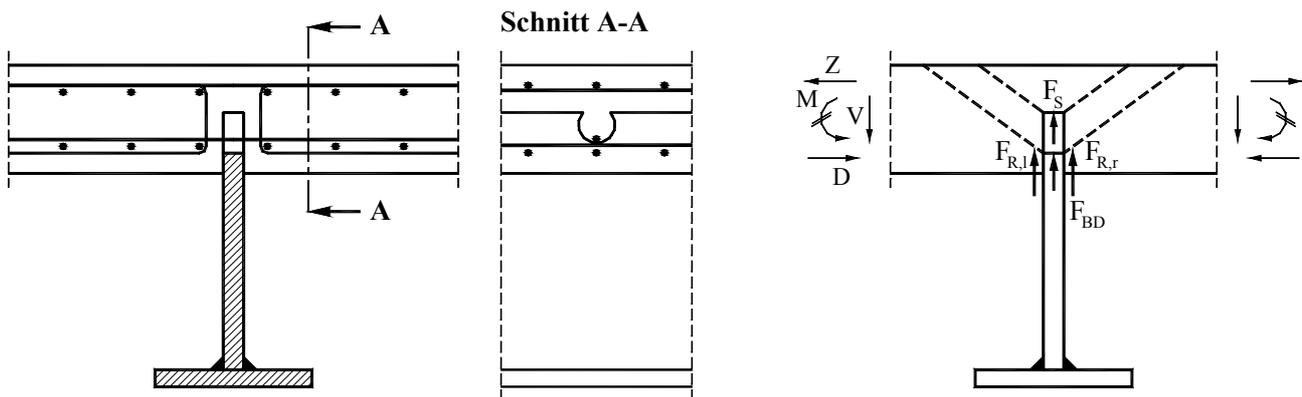
Bild 5-4. Kopfbolzen in Verbundstützen aus kammerbetonierten Walzprofilen nach Roik & Hanswille [2.50]

Analog zu den Erfahrungen mit Reibungsverbund verhält sich die Verbundfuge bis zum Erreichen der Reiblast sehr steif. Erst nach Überschreiten der Gleitgrenze treten nennenswerte Relativverschiebungen auf, die bis zum Versagen der Verbundfuge mehr als 10 mm betragen. Der qualitative Verlauf der Kraft-Schlupf-Beziehung entspricht nach Überschreiten der Reiblast den bisherigen Erfahrungen für stehende Kopfbolzen im Verbundbau.

5.2.3.4 Betondübel unter Querschub

Auf Grundlage der Untersuchungen von Wurzer [2.15] und Zapfe [2.16] können Verbundträger mit obergurtlosen Stahlprofilen auch mit Betondübeln entsprechend Bild 5-5 (a) ausgeführt werden. Für die Abtragung der vertikalen Auflagerkräfte der quergespannten Platte stehen entsprechend Bild 5-5 (b) folgende Tragkomponenten zur Verfügung:

- Reibkräfte F_R infolge Querbiegedruck aus Durchlaufwirkung der Stahlbetonplatte,
- Kraftanteile F_S über die Stegoberkante, die durch ein Überschreiten der Teilflächenpressung und durch Durchstanzen des Stahlbetons oberhalb des Steges begrenzt wird,
- Kräfte F_{BD} über den Dübelfuß, die durch ein Durchstanzen des Stahlbetons beginnend am Dübelfuß begrenzt wird.



(a) Beispiel

(b) Modell für Querschub nach Zapfe [2.16]

Bild 5-5. Verbundträger mit Betondübel

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen von Zapfe [2.16], Abschnitt 7.2 und in Übereinstimmung mit dem Modell in Bild 5-5 (b) führt eine Querschubbeanspruchung aufgrund sehr hoher Reibkräfte auch bei ungünstig gewählten Randbedingungen wie z. B. Einfetten der Stegbleche nicht zum Versagen unmittelbar in der Verbundfuge, sondern zu einem Versagen der Stahlbetonplatte infolge Quertragwirkung. Niedrigere Bewehrungsgrade von weniger als 0,4 % führen zu einem *Biegeversagen* der Platte, höhere Bewehrungsgrade zu einem *Schubversagen*. Nennenswerte Relativverschiebungen zwischen Stegblech und Stahlbeton werden nicht festgestellt. Weitere Untersuchungen unter Ausschaltung der Reibung in den Kontaktflächen zeigen, daß in diesem Fall die Kraftübertragung überwiegend durch räumliche Druckstreben zum Fußbereich der Betondübel erfolgt und schließlich die Stahlbetonplatte infolge *Durchstanzen* versagt.

Zusammenfassend belegen die Untersuchungen von Zapfe [2.16], daß unter praxisnahen Bedingungen – selbst bei konstruktiver Minimierung des Reibbeiwertes – die Verbundfuge selbst aufgrund der aktivierten Reibung so leistungsfähig wird, daß die Querschubbeanspruchbarkeit durch ein *Versagen der Stahlbetonplatte* und nicht der Verbundfuge begrenzt wird. Die Untersuchungen bestätigen, daß ein additiver Ansatz der Traganteile F_R und F_{BD} infolge Reibung und Druckstreben zum Fußbereich der Betondübel grundsätzlich möglich ist. Weitere Redundanz ist durch den Kraftanteil F_S über die Stegoberkante gegeben. Ein additiver Ansatz der beiden Kraftanteile F_S und F_{BD} zusätzlich zu den aktivierten Reibkräften F_R ist aufgrund der Überlagerung der Ausstanzkörper, vgl. Bild 5-5 (b), auf sicherer Seite auszuschließen. Abschließend bleibt festzustellen, daß die in den Versuchen erzielten Traglasten weit oberhalb der im realen Bauwerk zu erwartenden Querschubbeanspruchungen, d. h. oberhalb der Summe der Querkräfte links und rechts des Trägers, liegen. Ein abschließendes Bemessungsmodell für den Nachweis von Verbundfugen mit Betondübel unter Querschub wird in Zapfe [2.16] nicht angegeben.

Die Versuche von Zapfe [2.16] mit implizierter Schwindrißbildung oberhalb bzw. seitlich des Stegbleches weisen keine negativen Auswirkungen von *Betonschwinden* auf das Tragverhalten der Verbundfuge unter Querschub auf. In Übereinstimmung dazu zeigen auch die Untersuchungen von Däuwel [2.5], Abschn. 5.3.7 zum Tragverhalten einbetonierter Stahlträger, daß unter Annahme einer konstanten Querbiegung das Schwinden des Betons in Trägerquerrichtung keinen negativen Einfluß auf die Verbundkräfte infolge Reibung aus Querbiegedruck hat.

5.2.4 Zusammenfassung

Verbundkonstruktionen mit liegenden Kopfbolzendübeln in Mittellage der Verbundfuge weisen unter Querschub drei mögliche Tragkomponenten auf: über die *Dübel* selbst, über *Reibung* und über *Kontaktpressung* auf der Stegoberkante. Im Unterschied zu stehenden Kopfbolzen ist bei der Kraftübertragung nicht nur der Dübel allein, sondern auch die umliegende Stahlbetonplatte maßgeblich beteiligt. Bei isolierter Betrachtung der einzelnen Kraftübertragungsmechanismen sind in der Literatur bereits eine Vielzahl von Untersuchungen vorhanden. Darauf aufbauend wird anhand von ausgewählten Konstruktionsbeispielen aus dem Verbundbau gezeigt, daß die *Addition mehrerer Tragwirkungen* für die Ermittlung der Tragfähigkeit grundsätzlich möglich ist.

5.3 Experimentelle Untersuchungen

5.3.1 Versuchsprogramm

Die Versuchsserie in Mittellage der Verbundfuge ist in acht Versuchsreihen M-R1 bis M-R8 gegliedert und umfaßt insgesamt 16 Einzelversuche, vgl. Tabelle 5-3.

Tabelle 5-3. Zuordnung der Versuchsreihen in Mittellage zu den Parametern

Reihe	Varierte Parameter	Konstante Parameter	
M-R1	Betongüte C20/25 → C30/37 → C40/50 bzw. M-R1/1 → M-B → M-R1/3	$h_c = 210$ mm $a = 165$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
M-R2	Plattendicke 160 mm → 210 mm → 260 mm bzw. M-R2/1 → M-B → M-R2/3	C30/37 $a = 165$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
M-R3	Achsabstand der Kopfbolzen 110 mm → 165 mm bzw. M-R3/1 → M-R2/3	C30/37 $h_c = 260$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
M-R4	Durchmesser der Bügelbewehrung (Dübeldurchmesser 19 mm) 8 mm → 10 mm bzw. M-R4/1 → M-R4/2	C30/37 $h_c = 210$ mm $a = 165$ mm	$d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 19$ mm
M-R5	Anzahl der Bügel je Kopfbolzen 0,5 → 1 → 2 bzw. M-R5/1 → M-B → M-R5/3	C30/37 $h_c = 210$ mm $a = 165$ mm	$d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
M-R6	Konstruktive Durchbildung oberhalb des Stahlsteges mit Weichfaser → ohne Weichfaser bzw. M-B → M-R6/2	C30/37 $h_c = 210$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm $a = 165$ mm $d_{Dü} = 22$ mm
M-R7	Anzahl der Kopfbolzen je Verbundfuge 3 → 4 bzw. M-R7/1 → M-B	C30/37 $h_c = 210$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm zentrisch, 1-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
M-R8	Dübelabstände a/a_v zweireihiger Dübelanordnungen 110 mm/55 mm → 110/110 → 165/55 → 165/110 bzw. M-R8/1 → M-R8/2 → M-R8/3 → M-R8/4	C30/37 $h_c = 260$ mm $d_{s,Bü} = 1 \text{ } \varnothing 10$	$d_{s,L} = 10$ mm nicht vers., 2-reihig $d_{Dü} = 22$ mm
Hinweis: Bis auf Körper M-R6/2 wurden alle Körper mit einer Weichfasereinlage oberhalb des Stegbleches ausgeführt.			

Die Konzeption der Versuche in Mittellage der Verbundfuge baut auf dem gleichen Grundgedanken wie die Untersuchungen in Randlage auf, siehe Abschnitt 4.3.1. Eine Versuchsreihe beinhaltet zwei bis vier Versuchskörper. Mit Ausnahme der Reihe M-R4 und M-R8 geht die Variation von einem sog. *Basiskörper* M-B aus, d. h. innerhalb einer Reihe wird gegenüber diesem Körper nur ein Konstruktionsparameter entsprechend des im Hochbau üblichen Anwendungsbereichs variiert. Der Basiskörper stellt für Anwendungen im Hochbau eine Art Standardfall dar. Dieser Körper besitzt einen Dübeldurchmesser von 22 mm, eine Bolzenlänge von 125 mm, eine Betonplattendicke von 210 mm, einen Achsabstand der Dübel von 165 mm und einen Bügel des Durchmessers 10 mm je Dübel. Abgesehen von den Körpern M-R1/1 und M-R1/3 wurde durchweg eine Betongüte C30/37 angestrebt. Zur besseren Vergleichbarkeit und Erhöhung der Aussagefähigkeit sind die Konstruktionsparameter dieses Basiskörper in Anlehnung an den Standardkörper von Breuninger [2.4], Abschnitt 3.2.2 für Längsschub in Mittellage der Verbundfuge gewählt.

5.3.2 Versuchsbeschreibung

5.3.2.1 Geometrie

Das Bild 5-6 zeigt die *prinzipielle Geometrie* der Versuchskörper. Die dargestellten Schnitte parallel zur Verbundfuge für ein- und zweireihige Dübelanordnungen zeigen die gewählten Konstruktionsparameter der Körper M-B und M-R8/4. Um in den Versuchen zusätzliche Traganteile der Verbundfuge durch Spitzendruck auszuschließen, sind mit Ausnahme des Körper M-R6/2 in Beanspruchungsrichtung *Weichfasereinlagen* mit einer Mindestkantenlänge von 30 mm angeordnet.

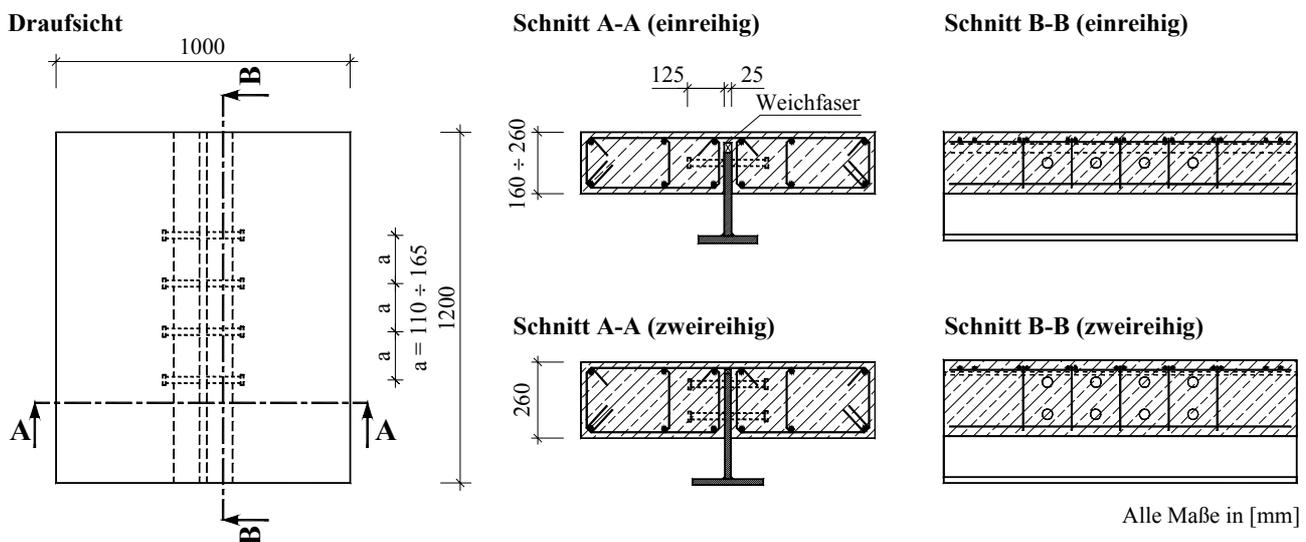


Bild 5-6. Versuchskörper für reinen Querschub in Mittellage

5.3.2.2 Herstellung

Um den günstigen Einfluß von Reibung bei der Kraftübertragung in der Verbundfuge innerhalb praktischer Anwendungsgrenzen weitgehend zu minimieren, wurden die Stahlstege vor dem Betonieren zweimal mit Schalöl behandelt. Die Stahlbetonplatten wurden wie im realen Bauwerk vollflächig liegend hergestellt. Der Transportbeton wurde mit einem Betonkübel eingebaut und mit Flaschen- und Tischrüttler verdichtet. Nach dem Betonieren wurden die Körper etwa sieben Tage lang feucht gehalten. Die Lagerung der Versuchskörper erfolgte im Fertigteilwerk und in der Versuchshalle.

5.3.2.3 Versuchsaufbau

(a) Versuchsstand

Die Bilder 5-7 und 5-8 zeigen den Aufbau der Versuche. Die Versuchskörper wurden gegenüber der realen Situation im Bauwerk um 180° um die horizontale Achse gedreht, d. h. „kopfüber“, eingebaut. Die Krafteinleitung und Lagerung der Körper verursachten mit der Einleitung der Querschubbeanspruchung gleichzeitig ein Stützmoment. Der Versuchsaufbau ermöglichte – in etwa wie im realen Tragwerk – eine proportionale Steigerung des Stützmomentes zur Querschubbeanspruchung. Der Abstand x der Elastomerlager senkrecht zum Stahlsteg betrug im Regelfall 700 mm, in einigen wenigen Fällen auch 200 bzw. 900 mm. Die Versuche wurden in einem Versuchsrahmen mit einem servohydraulisch gesteuerten Prüfzylinder geprüft. Die maximale Kapazität des Prüfzylinders betrug 2,5 MN.

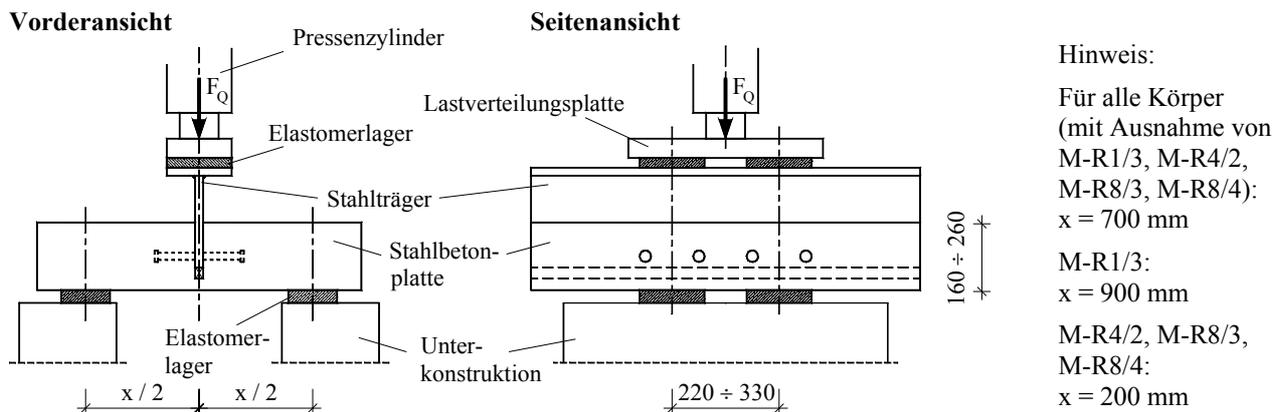


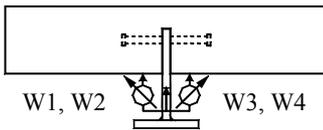
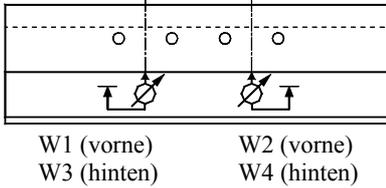
Bild 5-7. Versuchsaufbau



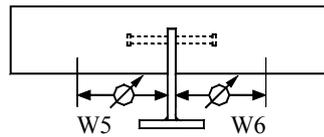
Bild 5-8. Versuchsstand

(b) Messungen

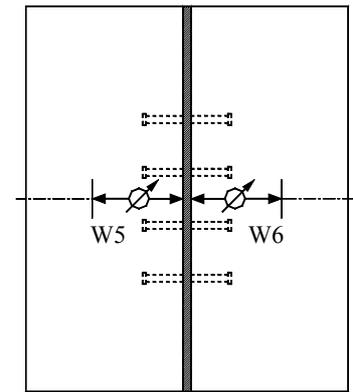
Das Bild 5-9 zeigt die prinzipielle Anordnung der *Wegmessungen* und Bild 5-8 die Realisierung in den Versuchen. An jedem Körper wurden vier Ohm'sche Wegnehmer (W1 ÷ W4) zur Messung der vertikalen Relativverschiebung zwischen dem Betonkörper und dem Stahlsteg und zwei induktive Wegnehmer (W5, W6) zur Messung der Andrückung des Betonkörpers in der Biegedruckzone an den Stahlsteg befestigt.

Schnitt quer zur Verbundfuge**Schnitt parallel zur Verbundfuge**

(a) Vertikale Relativverschiebung

Schnitt quer zur Verbundfuge

(b) Andrückung

Plattenunterseite**Bild 5-9.** Wegmessungen

Bei den Körpern M-R4/1, M-R8/1 und M-R8/4 wurden zusätzlich noch *Dehnungsmessungen* durchgeführt. Die Dehnmeßstreifen mit 10 mm Meßlänge wurden an Bügelbewehrung, Stützbewehrung und Kopfbolzen angebracht. Bei der Bügelbewehrung wurde der Dehnmeßstreifen mittig auf der zuvor glattgeschliffenen Innenseite des Bügelschenkels plaziert; bei der Stützbewehrung zentrisch über dem Stahlsteg. An den Kopfbolzen wurden zwei Dehnmeßstreifen in Kopfnähe auf der Ober- und Unterseite des Schaftes angeordnet.

(c) Belastungsgeschichte

Die Belastung während der Versuchsdurchführung erfolgte in Übereinstimmung mit Eurocode 4, Teil 1-1 [1.1], Abschnitt 10.2.4 analog zu den Untersuchungen in Randlage, siehe Abschnitt 4.3.2.3 (c). Im Gegensatz zu den Versuchen in Randlage wurde nach Beendigung der 25 Lastwechsel und nach Verlassen des elastischen Bereichs bis zum deutlichen Überschreiten des Traglastbereichs eine Verschiebegeschwindigkeit von nur 0,005 mm/s gefahren.

5.3.2.4 Materialkennwerte**(a) Beton**

Das Betonieren der Versuchskörper erfolgte in insgesamt acht Chargen. Zur Ermittlung der Zylinderdruckfestigkeit wurden von jedem der 16 Versuchskörper drei Zylinder 150 x 300 mm gemäß DIN 1048, Teil 1 [1.18] hergestellt. Darüber hinaus wurde von den drei unterschiedlich angestrebten Betonfestigkeitsklassen der Körper M-R1/1, M-R1/3 und M-R8/1 an jeweils drei zusätzlichen Zylindern der Sekantenelastizitätsmodul ermittelt. Die Prüfkörper wurden entsprechend Abschnitt 5.3.2.2 gelagert. Die Prüfung der Zylinder erfolgte jeweils am Tag der Versuchsdurchführung des jeweiligen Körpers. Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen sind in Tabelle 5-6 angegeben. Für den Sekantenelastizitätsmodul wurden für die Körper in der o. g. Reihenfolge mittlere Werte von 29.314, 33.018 und 32.483 N/mm² ermittelt.

(b) Kopfbolzen

Die aus den Abnahmeprüfzeugnissen der Klasse B gemäß DIN 50049 [1.20], Abschn. 3.1 entnommenen Werkstoffwerte des Bolzenmaterials der Stahlgüte S 235 sind in Tabelle 5-4 dargestellt. Die vom Hersteller [2.75] angegebenen Sollwerte und die in Eurocode 4, Teil 1-1 [1.1], 6.3.2.1 (1) im Rahmen einer ENV-Anmerkung gestellten Mindestanforderungen an die Geometrie der Schweißwulst sind auf der Basis einer statistischen Auswertung von 20 Messungen eingehalten.

Tabelle 5-4. Materialkennwerte des Kopfbolzens

Kopfbolzen	Streckgrenze $f_{p\ 0,2}$ [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_u [N/mm ²]	Bruchdehnung A_5 [%]
$d_{Dü} = 19\text{ mm}, h_{Dü} = 125\text{ mm}$	509	533	19
$d_{Dü} = 22\text{ mm}, h_{Dü} = 125\text{ mm}$	522	546	18
Soll	≥ 350	450 ÷ 600	≥ 15

(c) Betonstahl

Die mechanischen Kennwerte der Stabbewehrung in Tabelle 5-5 wurden gemäß DIN 50125 [1.10] und DIN EN 10002-1 [1.11] anhand des Durchschnitts von jeweils drei Proben ermittelt.

Tabelle 5-5. Materialkennwerte des Betonstahls

Betonstahl	Streckgrenze $f_{p\ 0,2}$ [N/mm ²]	Zugfestigkeit f_u [N/mm ²]	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]
$d_{s,Bü} = 8\text{ mm}$	570	623	200.602
$d_{s,Bü} = 10\text{ mm}$	585	687	199.693
$d_{s,Bü} = 12\text{ mm}$	589	670	200.334
$d_{s,Bü} = 16\text{ mm}$	574	659	202.537

(d) Baustahl

Für die Reihen M-R1 bis M-R7 wurde ein Baustahl mit der Bezeichnung S235 JR G2 und für die Reihe M-R8 ein Baustahl S355 JR G2 verwendet. Die Stahlbleche wurden im Werk sandgestrahlt.

5.3.3 Versuchsergebnisse**5.3.3.1 Allgemeines**

Der Versuchskonzeption gemäß Abschnitt 5.3.1 lag der Gedanke zugrunde, durch konstruktive Maßnahmen – innerhalb praktischer Anwendungsgrenzen – möglichst ein Versagen in der Verbundfuge in Abhängigkeit einzelner Konstruktionsparameter, vgl. Kapitel 4, zu begünstigen und gleichzeitig ein Versagen der Stahlbetonplatte auf Biegung oder Schub auszuschließen. Dazu wurden zusätzlich zur Dübeltragwirkung wirkende Traganteile entweder minimiert oder ganz ausgeschaltet.

Im Rahmen der Versuchsplanung wurden folgende Maßnahmen getroffen:

- Anordnung von *Weichfaser* zur Vermeidung weiterer Traganteile über die Stegblechoberkante,
- relativ *kleine Stützweite*, *Sandstrahlen der Stahlstege* und *zweimaliges Einfetten der Stahlstege* zur Minimierung des Traganteils aus Reibung,
- relativ *hoher Grad der Stütz- und Querkraftbewehrung* zur Vermeidung eines vorzeitigen Versagens der Stahlbetonplatte.

Trotz dieser gezielt ungünstig gewählten Randbedingungen haben die Versuche gezeigt, daß trotz gezielter Minimierung der Haftung die Verbundfuge unter Querschubbeanspruchung infolge Reibung so leistungsfähig war, daß überwiegend die Querkrafttragfähigkeit der Stahlbetonplatte für das Versagen maßgebend wurde.

Dementsprechend wurde in Abweichung von der ursprünglichen Planung in den Versuchen M-R4/2, M-R8/3 und M-R8/4 die Stützweite bis zu einer nahezu zentrischen Lasteinleitung so weit minimiert, so daß unter noch höheren Versuchslasten ein lokales Versagen in der Verbundfuge begünstigt werden konnte.

5.3.3.2 Überblick

In Tabelle 5-6 sind die Ergebnisse der Querschubversuche in Mittellage der Verbundfuge zusammengefaßt. Die Werte der Konstruktionsparameter sind in den Tabellen 5-3 und 5-7 dokumentiert.

Tabelle 5-6. Betonfestigkeiten, Versuchslasten, Verformungen und Versagensarten

Körper	Druckfestigkeit des Betons f_c [N/mm ²]	Stützweite der Platte x [mm]	Versuchslast bei Traglast $F_{t,Q,e}$ [kN]	Linienlast bei Traglast $q_{t,Q,e}$ [kN/m]	Querbiegemoment bei Traglast $m_{t,Q,e}$ [kNm/m]	Vertikale Relativver- schiebung bei Traglast $v_{t,Q,e}$ [mm]	Andrückung bei Traglast $a_{t,Q,e}$ [mm]	Versuchslast bei Versuchsabbruch $F_{A,Q,e}$ [kN]	Linienlast bei Versuchsabbruch $q_{A,Q,e}$ [kN/m]	Vertikale Relativver- schiebung bei Abbruch $v_{A,Q,e}$ [mm]	Versagensart
M-B	40,5	700	716,9	597,4	104,5	1,14	0,41	425,8	354,8	23,6	Platte auf Schub
M-R1/1	30,4	700	681,8	568,2	99,4	1,49	0,38	374,7	312,3	19,6	Platte auf Schub
M-R1/3	57,7	900	732,8	610,7	137,4	1,14	0,44	314,0	261,7	20,2	Platte auf Schub
M-R2/1	46,0	700	526,8	439,0	76,8	1,24	0,41	307,6	256,3	28,2	Platte auf Schub
M-R2/3	45,4	700	1.080,3	900,3	157,5	1,13	0,33	645,9	538,3	24,0	Platte auf Schub
M-R3/1	29,0	700	1.078,4	898,7	157,3	1,58	0,50	615,9	513,3	21,3	Platte auf Schub
M-R4/1	39,1	700	727,0	605,8	106,0	1,55	0,34	429,6	358,0	21,3	Platte auf Schub
M-R4/2	39,1	200	1.384,5	1.153,8	57,7	13,23	0,23	416,2	346,8	25,3	Dübelabscheren
M-R5/1	46,8	700	861,6	718,0	125,7	1,12	0,41	370,6	308,8	11,1	Platte auf Schub
M-R5/3	47,5	700	869,0	724,2	126,7	0,98	0,41	486,4	405,3	18,7	Platte auf Schub
M-R6/2	30,0	700	668,9	557,4	97,5	1,18	0,40	401,2	334,3	19,2	Platte auf Schub
M-R7/1	46,3	700	738,4	615,3	107,7	0,99	0,38	409,4	341,2	23,2	Platte auf Schub
M-R8/1	48,7	700	1.233,0	1.027,5	179,8	2,02	0,45	627,7	523,1	27,7	Platte auf Schub
M-R8/2	49,7	700	1.543,5	1.286,3	225,1	2,05	0,64	754,6	628,8	20,6	Platte auf Schub
M-R8/3	46,7	200	2.424,0	2.020,0	101,0	6,62	0,25	1.638,6	1.365,5	36,9	Beton nahe Dübel
M-R8/4	43,6	200	2.481,6	2.068,0	103,4	11,63	0,28	1.503,0	1.252,5	29,6	Beton nahe Dübel

Hinweis: Betondeckung $c = 20$ mm, Trägerlänge $b = 1.200$ mm, Linienlast $q_{t,Q,e} = F_{t,Q,e} / b$ bzw. $q_{A,Q,e} = F_{A,Q,e} / b$

Die Gesamtheit der Versuche zeigt unter Berücksichtigung der jeweiligen Plattendicke mit Erreichen der Tragfähigkeit ein ausgesprochen hohes *Lastniveau*, das oberhalb des in einem realen Bauwerk zu erwartenden Lastspektrums liegt, siehe Linienlasten in den Abschnitten 2.2.4.1 und 2.3.3 und Querbiegemomente in Abschnitt 5.5.2.

Die in den Versuchen beobachteten *Versagensarten* wurden vorrangig von der Stützweite x der Stahlbetonplatte, siehe Bild 5-7, bestimmt.

- Für den Fall einer *exzentrischen Einleitung der Querschubbeanspruchung* (Stützweite x von mindestens 700 mm) zeigte der Betongurt ein für Stahlbetonbalken typisches Verhalten. Aufgrund relativ hoher Stützbewehrungsgrade und zusätzlicher Tragfähigkeitssteigerungen in der Verbundfuge durch Reibung infolge Biegedruck wurde gegenüber dem Biegeversagen bzw. dem Versagen in der Verbundfuge das *Querkraftversagen der Stahlbetonplatte* maßgebend.
- Im Fall einer *nahezu zentrischen Einleitung des Querschubs* (Stützweite x von 200 mm) wurde lokales *Dübelversagen* infolge Abscheren der Bolzen bzw. örtlicher Betonschädigungen in den Fußbereichen der Dübel gegenüber Betonkantenbruch maßgebend.

Zur weiteren Beurteilung des Tragverhaltens der Stahlbetonplatte in den Abschnitten 5.3.3.3 und 5.3.3.4 sind in Tabelle 5-7 die wichtigsten Daten zur Bewehrungsführung zusammengestellt.

Tabelle 5-7. Zusammenstellung der Daten zur Bewehrungsführung der Versuchskörper

Körper	Plattendicke	Statische Nutzhöhe	Durchmesser der Stützbewehrung	Anzahl der Stäbe über der Stützung	Bewehrungsgrad über der Stützung	Bügel Durchmesser nahe der Verbundfuge	Bügelanzahl je Dübel nahe der Verbundfuge	Bügelanzahl nahe der Verbundfuge	Bügel Durchmesser in Platte	Bügelanzahl in Platte	Grad der Querkraftbewehrung	Durchmesser der Längsbewehrung
	h_c [mm]	d [mm]	$d_{s,s}$ [mm]	n_s [-]	ρ_s [%]	$d_{s,Bü}$ [mm]	a/s [-]	$n_{Bü,Vb}$ [-]	$d_{s,Bü,P}$ [mm]	$n_{Bü,P}$ [-]	ρ_w [%]	$d_{s,L}$ [mm]
M-B	210	182	16	14	1,29	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R1/1	210	182	16	14	1,29	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R1/3	210	182	16	14	1,29	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R2/1	160	132	16	14	1,78	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R2/3	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R3/1	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R4/1	210	182	16	14	1,29	8	1	5	12	10	0,42	10
M-R4/2	210	182	16	14	1,29	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R5/1	160	132	16	14	1,78	10	1	2	12	10	0,42	10
M-R5/3	210	182	16	12	1,10	10	2	8	12	8	0,34	10
M-R6/2	210	182	16	14	1,29	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R7/1	210	182	16	12	1,10	10	1	4	12	8	0,34	10
M-R8/1	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R8/2	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R8/3	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10
M-R8/4	260	232	16	14	1,01	10	1	5	12	10	0,42	10

Hinweis: Betondeckung $c = 20$ mm, Trägerlänge $b = 1.200$ mm, Stegdicke $t_s = 25$ mm

5.3.3.3 Trag- und Verformungsverhalten

(a) Allgemeines

In den folgenden Abschnitten wird das Trag- und Verformungsverhalten an ausgewählten Beispielen beschrieben. Dabei wird grundsätzlich zwischen Versuchen mit *exzentrischer Einleitung der Querschubbeanspruchung* (Stützweite $x = 700$ bzw. 900 mm) und mit *nahezu zentrischer Einleitung des Querschubs* ($x = 200$ mm) unterschieden.

(b) Exzentrische Einleitung des Querschubs

Repräsentativ für die 13 Versuche mit exzentrischer Einleitung des Querschubs wird in den Bildern 5-10 bis 5-12 am Beispiel des Körpers R4/1 das *Kraft-Verformungs-Verhalten*, die *Dehnungsmessungen* an der Stütz- und Bügelbewehrung und die *Rißentwicklung* auf der Stirnseite des Verbundträgers beschrieben. Alle die in diesem Abschnitt zusammengefaßten Versuche zeigten bei der Versuchsdurchführung ein für Stahlbetonplatten typisches Verhalten.

Bereits mit den 25 Lastwechseln bildeten sich durch Erreichen der Biegezugfestigkeit des Betons im Bereich des Stegbleches erste Biegerisse. Dementsprechend lag mit Beendigung der Lastwechsel eine Biegeplatte im Zustand II vor. Im Anschluß an die Vorbelastung kündigten sich bei etwa 85 bis 95 % der Traglast erste Schrägrisse auf der Plattenstirnseite an. Mit der Bildung der Schrägrisse vergrößerten sich auch die Bügeldehnungen überproportional. Mit Erreichen und Überschreiten der Traglast nahmen die Schrägrisse besonders auf der „schwächeren“ Seite des eigentlich symmetrischen Betongurtes zu. Das Versagen erfolgte schließlich in der Stahlbetonplatte auf Querkraft.

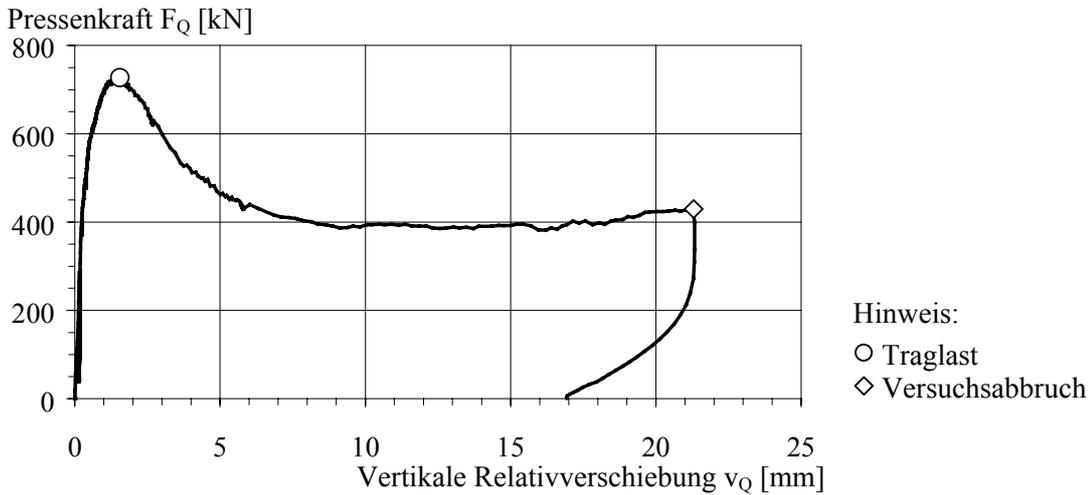


Bild 5-10. Kraft-Verformungs-Verhalten bei Schubversagen der Stahlbetonplatte, M-R4/1

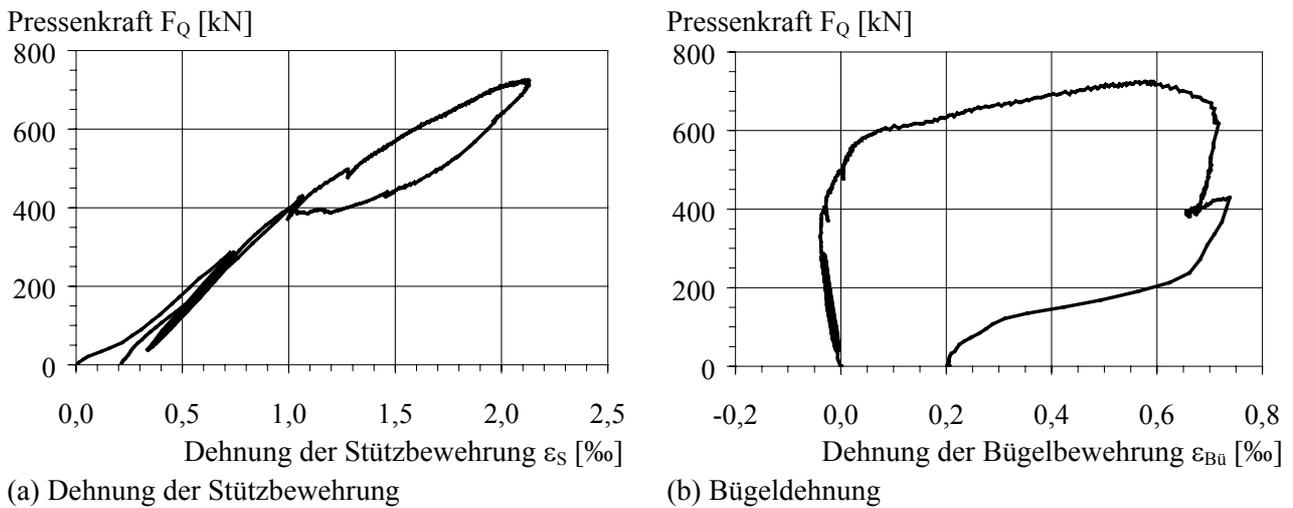
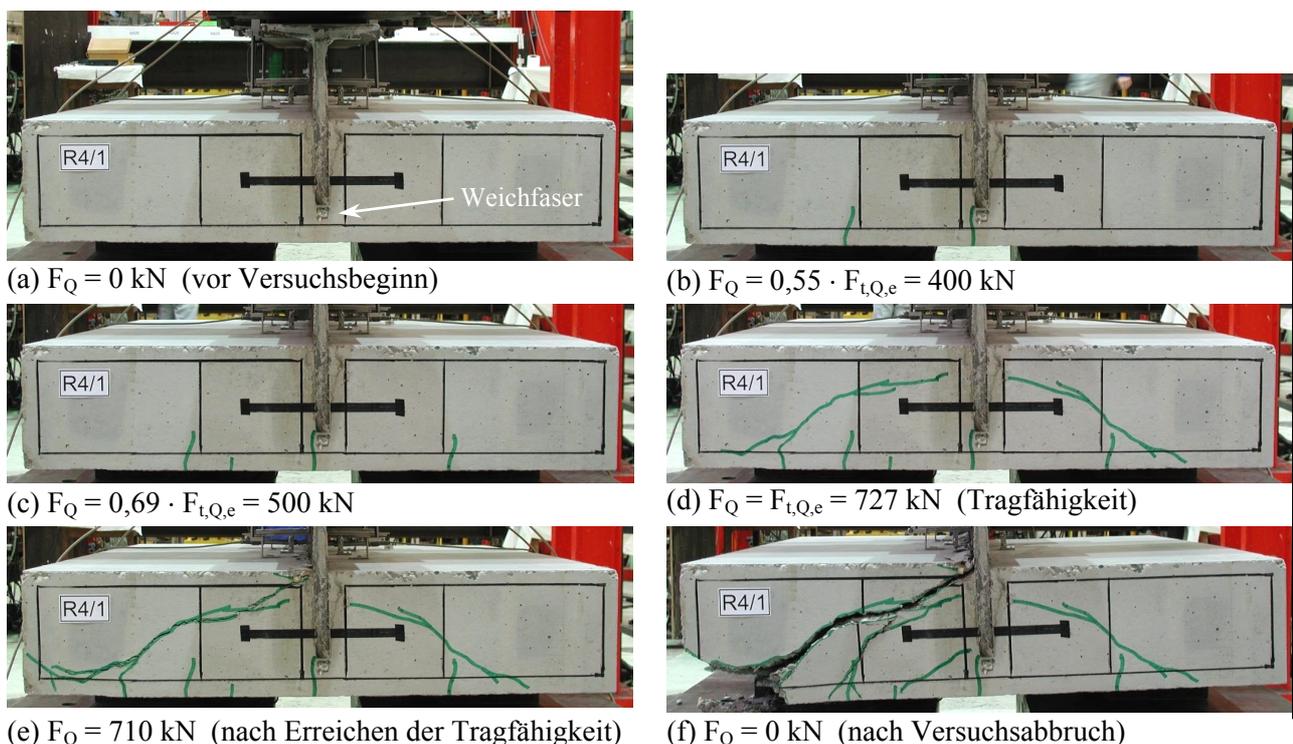


Bild 5-11. Dehnungsmessungen, Körper M-R4/1



Hinweis: Mit schwarzer Farbe ist die projizierte Lage der Kopfbolzen und Bewehrung markiert.

Bild 5-12. Rißentwicklung bei exzentrischer Einleitung des Querschubs, Körper M-R4/1 (einreihig)

Aufgrund der Aktivierung hoher Reibkräfte unterhalb der Gleitgrenze fanden bei allen Versuchen während des gesamten Belastungsverlaufes keine nennenswerten *vertikalen Relativverschiebungen* in der Verbundfuge statt. Die gemessenen Relativverschiebungen lassen sich auf den Rißversatz infolge Schubrißbildung in der Platte zurückführen.

Der Einfluß einer *Weichfasereinlage* oberhalb des Stegbleches auf das Tragverhalten der Verbundfuge kann auf Grundlage eines Vergleichs der Ergebnisse der Körper M-R1/1 und M-R6/2 beurteilt werden. Bei ansonsten identischen Konstruktionsparametern wies Körper M-R6/2 gegenüber M-R1/1 eine Weichfaser oberhalb des Stegbleches auf. Das in beiden Versuchen beobachtete Rißbild unterschied sich qualitativ nicht signifikant, vgl. die Bilder 5-12 und 5-13. Durch die zusätzliche Aktivierung der Kontaktpressung bildeten sich oberhalb des Stegbleches ansatzweise lokale Durchstanzzrisse. Die Reibwirkung verhinderte nennenswerte Schlupfverformungen und hielt so die Rißbildung infolge Durchstanzen in Grenzen. Wegen Querkraftversagens der Stahlbetonplatte war bei Körper M-R6/2 gegenüber M-R1/1 keine Tragfähigkeitssteigerung erkennbar.

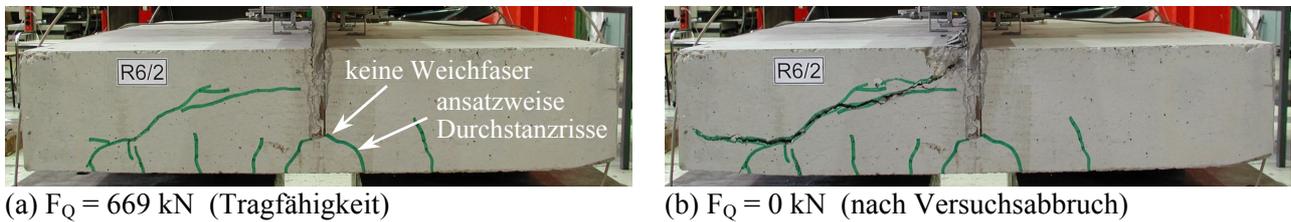
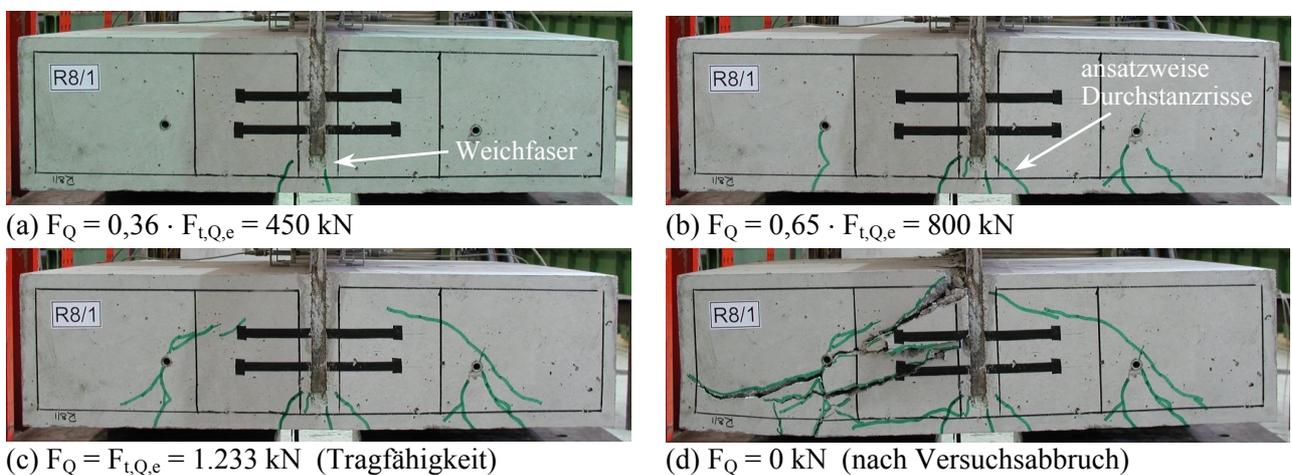


Bild 5-13. Rißentwicklung bei Körper M-R6-2 ohne Weichfaser

Gegenüber einreihigen Dübelanordnungen war bei *zweireihigen Dübelanordnungen* weder in der Rißentwicklung, siehe Bild 5-14, noch im Trag- und Verformungsverhalten ein nennenswerter Unterschied erkennbar.



Hinweis: Mit schwarzer Farbe ist die projizierte Lage der Kopfbolzen und Bewehrung markiert.

Bild 5-14. Rißentwicklung bei exzentrischer Einleitung des Querschubs, M-R8/1 (zweireihig)

(c) Nahezu zentrische Einleitung des Querschubs

Bei insgesamt drei Versuchen wurde die Stützweite auf 200 mm reduziert und somit eine nahezu zentrische Querschubeinleitung erreicht. Repräsentativ für diese drei Versuche wird anhand des Körpers M-R4/2 in den Bildern 5-15 und 5-16 das *Kraft-Verformungs-Verhalten* und die *Rißentwicklung* dargestellt.

Die Kraft-Verformungs-Kurve weist bei einem Lastniveau von etwa 90 % der Tragfähigkeit einen Knick auf, der auf die lokale Betonschädigung und die Entstehung von Fließgelenken im Fußbereich der Dübel hinweist. Im Anschluß daran nimmt die Relativverschiebung bei nur geringer Kraftzunahme deutlich zu, bis die Dübel schließlich abscheren und die Gesamtkraft abfällt. Nach erfolgter Zusammendrückung der Weichfaser stellt sich schließlich ein konstantes Kraftniveau ein.

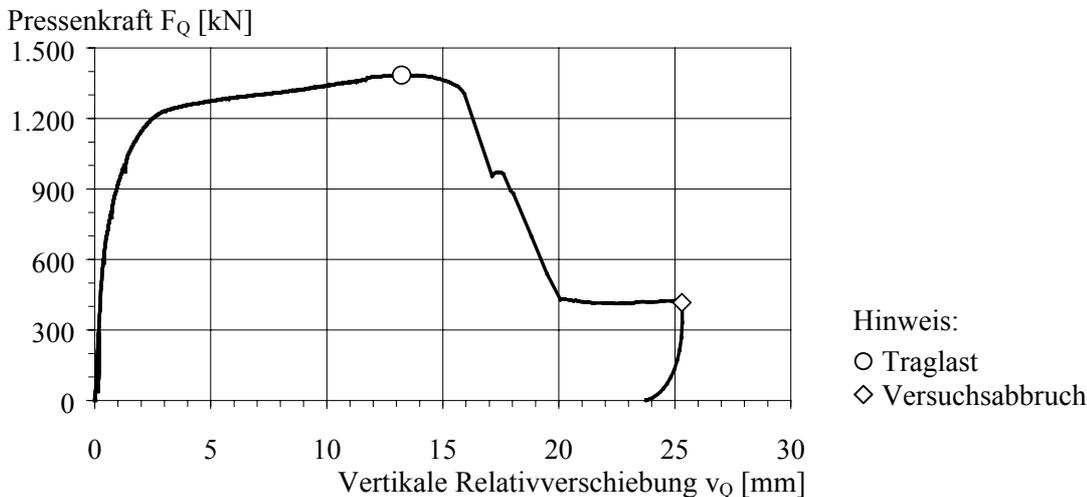
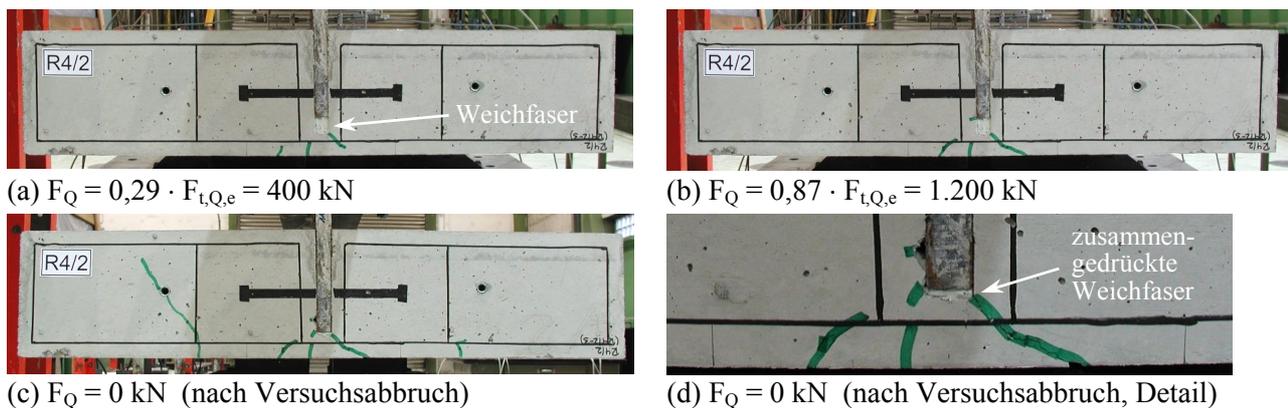


Bild 5-15. Typisches Kraft-Verformungs-Verhalten bei Abscheren der Dübel, Körper M-R4/2

Aufgrund der vergleichsweise geringen Exzentrizität wurden entsprechend geringere Reibkräfte in der Verbundfuge aktiviert und somit Relativverschiebungen in der Verbundfuge entsprechend den Bildern 5-15 und 5-16 ermöglicht. Die Bolzen wurden auf Abscheren und der Beton auf der lastzugewandten Seite der Dübel mehraxial beansprucht. Den größeren Dübelbeanspruchungen steht gegenüber, daß infolge der nahezu zentrischen Krafteinleitung die Entstehung eines Ausbruchkörpers auf der Unterseite des Versuchskörpers bzw. der Plattenoberseite verhindert wird. Im Endeffekt führte die Verhinderung eines Betonkantenbruchs bei einem deutlich höheren Lastniveau und deutlich sichtbaren Relativverschiebungen zu einem Versagen in der Verbundfuge. Ein Vergleich der Tragfähigkeiten der Körper M-R4/1 und M-R4/2, die bis auf die Lagerung im Versuchsstand nahezu identisch waren, ergab eine Steigerung der Tragfähigkeit um den Faktor 1,9.



Hinweis: Mit schwarzer Farbe ist die projizierte Lage der Kopfbolzen und Bewehrung markiert.

Bild 5-16. Typische Rißenwicklung bei nahezu zentrischer Einleitung des Querschubs, M-R4/2

5.3.3.4 Auswertung der Versuche

(a) Allgemeines

Die Versuchsauswertung wird aufgrund des unterschiedlichen Trag- und Verformungsverhaltens in Abhängigkeit von der *Ausmitte der Querschubbeanspruchung* in zwei Teile unterteilt.

(b) Exzentrische Einleitung des Querschubs

Die Auswertung der 13 Einzelversuche mit exzentrischer Einleitung der Querschubbeanspruchung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt soll gezeigt werden, daß die auftretenden Querschubkräfte in der Verbundfuge allein durch Reibung übertragen werden können. Im zweiten Schritt soll anhand einfacher mechanischer Modelle aus dem Massivbau gezeigt werden, daß das Versagen der Versuchskörper durch die Querkrafttragfähigkeit der Stahlbetonplatte bestimmt wird.

Die Versuchsbeobachtungen entsprechend Abschnitt 5.3.3.3 (b) legen aufgrund der vernachlässigbaren Relativverschiebungen in der Verbundfuge und der vernachlässigbaren Dehnungen nahe des Dübelkopfes (Ergebnisse aus Messungen an den Körpern M-R4/1 und M-R8/1) eine Kraftübertragung ausschließlich über *Reibung unterhalb der Gleitgrenze* ohne nennenswerte Aktivierung der Dübeltragwirkung nahe. Aufbauend auf dem in Bild 5-17 dargestellten Stabwerkmodell soll im folgenden gezeigt werden, daß die in den Versuchen zur Übertragung der Querschubkräfte in der Biegedruckzone der Platte erforderlichen Reibungszahlen μ_{erf} unterhalb der sonst üblichen Mittelwerte entsprechend Tabelle 5-1 (Oberflächenbehandlung: walzrauh, mit Schalöl) liegen.

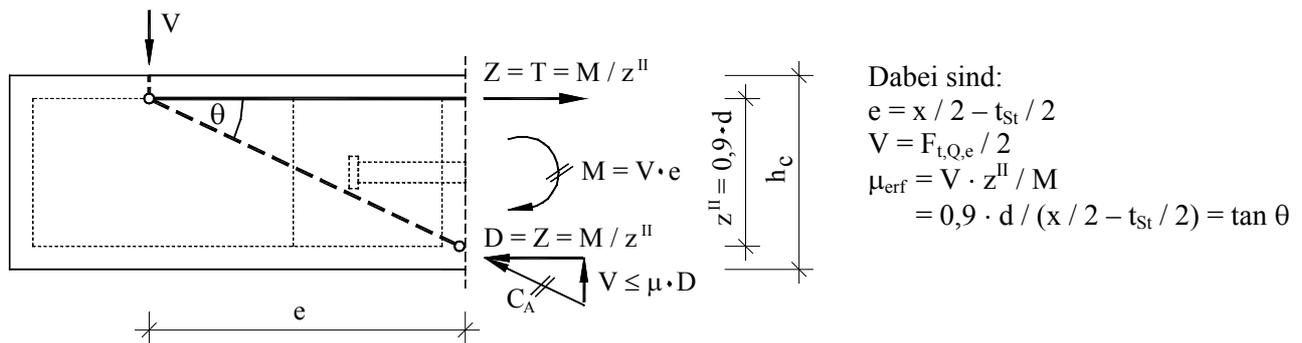


Bild 5-17. Streben-Zugband-Modell zur Ermittlung des erforderlichen Reibbeiwertes

Die hergeleitete Beziehung zur Ermittlung des *erforderlichen Reibbeiwertes* zeigt, daß für die zugrunde gelegte Versuchskonfiguration allein die Geometrie und nicht das Lastniveau maßgebend ist. Ist der vorhandene Reibbeiwert größer als der erforderliche Wert, so wird der Querschub allein über Haftreibung mit vernachlässigbaren Relativverschiebungen übertragen. Ist der vorhandene Reibbeiwert kleiner, dann liegt eine kombinierte Tragwirkung aus Gleitreibung und Kopfbolzen mit deutlich sichtbaren Verformungswerten vor. Auf Grundlage dieses Modells werden im folgenden die Versuche einzeln ausgewertet. Die Eingangsgrößen sind in Abschnitt 5.3.3.2 und die Ergebnisse in Tabelle 5-8 dokumentiert.

Tabelle 5-8. Rechnerisch für Haftreibung erforderliche Reibbeiwerte

Körper	Erf. Reibbeiwert $\mu_{\text{erf}} [-]$	Körper	Erf. Reibbeiwert $\mu_{\text{erf}} [-]$	Körper	Erf. Reibbeiwert $\mu_{\text{erf}} [-]$	Statistische Auswertung: $\mu_{\text{erf,mittel}} = 0,497$ $\mu_{\text{erf,max}} = 0,619$ $\mu_{\text{erf,min}} = 0,352$
M-B	0,485	M-R3/1	0,619	M-R7/1	0,485	
M-R1/1	0,485	M-R4/1	0,485	M-R8/1	0,619	
M-R1/3	0,374	M-R5/1	0,352	M-R8/2	0,619	
M-R2/1	0,352	M-R5/3	0,485			
M-R2/3	0,619	M-R6/2	0,485			

Die statistische Auswertung zeigt, daß selbst der maximal erforderliche Reibbeiwert von 0,619 noch unterhalb des entsprechenden charakteristischen Wertes von 0,63 liegt, siehe Tabelle 5-1. Diese Untersuchung bestätigt, daß die in der Verbundfuge wirkenden Querschubbeanspruchungen trotz nur gering gewählter Ausmitten e infolge Biegedruck ausschließlich durch Haftreibung – ohne zusätzliche Tragwirkung der Kopfbolzen – übertragen werden können. Aufgrund der vernachlässigbaren Relativverschiebungen in der Verbundfuge und der vernachlässigbaren Dehnungen nahe des Dübelkopfes wird ein Verhalten der Versuchskörper wie bei statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonplatten mit mittiger Linienlast ermöglicht.

Zur qualitativen Beurteilung der maßgebenden Versagensmechanismen werden im folgenden die einzelnen Versuche auf Grundlage des vereinfachten Streben-Zugband-Modells in der Ebene entsprechend Bild 5-18 (a) bei Erreichen der Tragfähigkeit nachgerechnet.

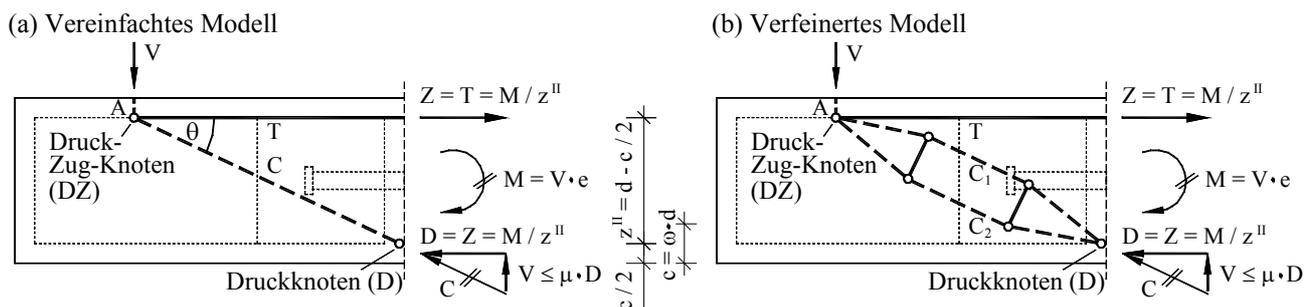


Bild 5-18. Vereinfachtes und verfeinertes Streben-Zugband-Modell zur Versuchsrechnung

Sowohl die Nachweise der Zug- und Druckstäbe als auch der Knoten erfolgen mit nur geringfügigen Modifikationen in Übereinstimmung mit Schlaich & Schäfer [2.54] und Marti et al. [2.38]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-9 dokumentiert.

Tabelle 5-9. Ergebnisse aus Versuchsrechnung auf Grundlage des Streben-Zugband-Modells

Körper	Geometrie			Kräfte		Druck-Zug-Knoten			Druckknoten	
	ω [-]	c [mm]	θ [°]	C [kN]	$Z = T = D$ [kN]	$\sigma_{DZ,T} / f_y$ [-]	$\sigma_{DZ,A} / (0,85 \cdot f_c)$ [-]	$\sigma_{DZ,C} / (0,85 \cdot f_c)$ [-]	$\sigma_{D,A} / f_c$ [-]	$\sigma_{D,C} / f_c$ [-]
M-B	0,183	33,2	26,1	814,6	731,5	0,45	0,17	0,23	0,45	0,56
M-R1/1	0,243	44,3	25,3	796,4	719,7	0,45	0,22	0,30	0,45	0,55
M-R1/3	0,128	23,3	21,3	1.009,9	941,1	0,58	0,12	0,21	0,58	0,67
M-R2/1	0,222	29,3	19,2	801,9	757,4	0,47	0,11	0,21	0,47	0,53
M-R2/3	0,128	29,7	32,8	998,2	839,4	0,52	0,23	0,25	0,52	0,73
M-R3/1	0,200	46,4	31,7	1.024,9	871,6	0,54	0,36	0,40	0,54	0,75
M-R4/1	0,189	34,4	26,0	828,5	744,5	0,46	0,18	0,24	0,46	0,57
M-R5/1	0,218	28,8	19,2	1.309,1	1.236,2	0,77	0,18	0,34	0,77	0,86
M-R5/3	0,133	24,3	26,7	966,5	863,4	0,62	0,18	0,23	0,62	0,78
M-R6/2	0,247	44,9	25,3	782,5	707,4	0,44	0,22	0,30	0,44	0,54
M-R7/1	0,137	24,9	26,7	822,5	735,0	0,53	0,16	0,20	0,53	0,66
M-R8/1	0,119	27,6	32,9	1.135,6	953,7	0,59	0,25	0,26	0,59	0,84
M-R8/2	0,117	27,1	32,9	1.420,3	1.192,3	0,74	0,30	0,32	0,74	1,05

Hinweise:

- Die angegebenen Kräfte C , Z , T und D ergeben sich aus einer Belastung $V = F_{t,Q,e} / 2$ (mit $F_{t,Q,e}$ aus Tabelle 5-6)
- Bezeichnungen: D = Druckknoten, DZ = Druck-Zug-Knoten,
 A = Auflagerpressung, C = Druckkraft im Stab, T = Zugkraft im Stab
- Beziehungen: $\omega = (A_s \cdot f_y) / (b \cdot d \cdot f_c)$; $c = \omega \cdot d$; $z'' = d - c / 2$
- Die fett gedruckten Werte sind maßgebend.

Unter Berücksichtigung von vergleichbaren Untersuchungen im Stahlbetonbau weisen die bezogenen Spannungen an den Knoten für Versuchsnachrechnungen übliche Streubreiten auf. Auch das Spektrum der maßgebenden bezogenen Spannungen liegen mit Zahlenwerten zwischen 0,53 und 1,05 im üblichen Erfahrungsbereich, vgl. DAStb-Heft 478 [1.17], Teil A, Abschn. 1.4.3. Die Ergebnisse in Tabelle 5-9 zeigen, daß die bezogenen Spannungen der Druckstreben am Druckknoten maximale Werte aufweisen und somit für die Tragfähigkeit entscheidend sind. In Wirklichkeit liegen jedoch keine konzentrierten Druckstreben sondern infolge Kraftausbreitung flaschenförmige Druckspannungsfelder mit Querkzugspannungen vor, siehe *verfeinertes Streben-Zugband-Modell* in Bild 5-18 (b). In Übereinstimmung mit den beschriebenen Versuchen bestätigen die Untersuchungen von Baumann [2.1], daß sich unter Ausbildung von flaschenförmigen Druckspannungsfeldern bei einer Ausnutzung der Druckspannungen am Knoten von nur 60 % der Einaxialfestigkeit bereits Spaltrisse bilden können, die ein Versagen der Druckstrebe einleiten.

Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Versuchsnachrechnungen entsprechend Tabelle 5-9 auf Grundlage des zweidimensionalen Streben-Zugband-Modells führen im Hinblick auf die Abbildung des maßgebenden Versagensmechanismus und auf das Niveau der experimentellen Tragfähigkeiten zu durchaus guten Ergebnissen. Als Ansatz für weitere Untersuchungen zeigt Bild 5-19 exemplarisch ein weiterentwickeltes, statisch unbestimmtes Stabwerkmodell, siehe DAStb-Heft 430 [1.16], Abschn. 3.2. Dieses Modell stellt eine Kombination aus dem *vereinfachten Streben-Zugband-Modell* und dem *Standard-Stabwerkmodell* von B-Bereichen dar.

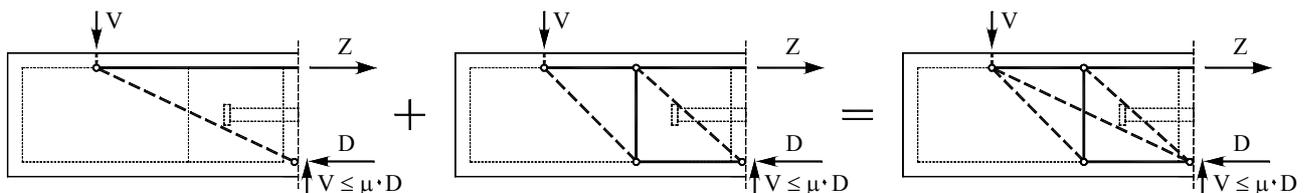


Bild 5-19. Verfeinerte Modellentwicklung zur Beschreibung des Tragverhaltens

Weiterführende Untersuchungen auf der Basis von verfeinerten Stabwerkmodellen wie in Bild 5-19 gezeigt oder Spannungsfeldern sind durchaus denkbar, werden im Rahmen dieser Untersuchungen aufgrund der Komplexität aber nicht weiter durchgeführt.

(c) Nahezu zentrische Einleitung des Querschubs

Insgesamt wurden drei Versuche mit nahezu zentrischer Einleitung der Querschubkräfte durchgeführt. Infolge der relativ direkten Krafteinleitung wird einerseits die Entstehung eines Ausbruchkörpers auf der Plattenoberseite, d. h. auf der Unterseite des Versuchskörpers, verhindert und andererseits die Tragwirkung infolge Reibung deutlich reduziert. Letztendlich führt die nahezu zentrische Krafteinleitung sowohl zu einer deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit als auch zu einem Versagen unmittelbar in der Verbundfuge statt in der angrenzenden Stahlbetonplatte, vgl. Abschnitt 5.3.3.3 (c). Da die Entstehung eines Betonkantenbruchs durch eine direkte Auflast verhindert wird und somit kein typisches Querschubversagen liegender Kopfbolzen in Randlage vorliegt, werden die experimentellen Dübeltragfähigkeiten in Tabelle 5-10 unter Annahme einer alleinigen Kraftübertragung über die Verbundmittel den rechnerischen Dübeltragfähigkeiten stehender bzw. randferner Kopfbolzen entsprechend Abschnitt 3.2.1 gegenübergestellt.

Tabelle 5-10. Vergleich der Versuche mit den rechnerischen Tragfähigkeiten stehender Kopfbolzen

Körper	Versuch			Rechnung			Vergleich	
	$F_{t,Q,e}$ [kN]	n_{Du} [-]	$P_{t,Q,e}$ [kN]	$P_{t,B}$ Gl. (3-2) [kN]	$P_{t,S}$ $\eta_{min} = 0,6$ [kN]	$P_{t,S}$ $\eta_{max} = 0,85$ [kN]	$P_{t,S} / P_{t,Q,e}$ $\eta_{min} = 0,6$ [-]	$P_{t,S} / P_{t,Q,e}$ $\eta_{max} = 0,85$ [-]
M-R4/2	1.384,5	8	173,1	145,9	90,7	128,5	0,524	0,742
M-R8/3	2.424,0	16	151,5	220,2	124,5	176,4	0,822	1,164
M-R8/4	2.481,6	16	155,1	210,4	124,5	176,4	0,803	1,137

Hinweise: – Die Eingangswerte sind in Abschnitt 5.3.1 und 5.3.2.4 dokumentiert.
– Die Bestimmungsgleichung für $P_{t,S}$ einschließlich Vorfaktor η ist in Tabelle 5-11 angegeben.

Die Ergebnisse zeigen, daß für alle drei Fälle rein rechnerisch Stahl- gegenüber Betonversagen maßgebend wird. Aufgrund des relativ großen Einflusses des Vorfaktors η auf die Tragfähigkeit infolge Dübelabscheren sind die dazu in der Literatur vorhandenen Untersuchungen in Tabelle 5-11 zusammengefaßt. Unter Berücksichtigung der minimalen und maximalen Werte für den Vorfaktor η wird in Tabelle 5-10 eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt. Die unterschiedlichen Werte für den Vorfaktor η resultieren aus unterschiedlichen Untersuchungen mit abweichenden Bettungseigenschaften der Kopfbolzen im Stahlbeton wie z. B. Bewehrungsführung, Gestaltung und Lagerung der Versuchskörper.

Tabelle 5-11. Vorfaktor für die Tragfähigkeit stehender Kopfbolzen bei Stahlversagen

Bestimmungsgleichung	Vorfaktor η [-]	Literatur
$P_{t,S} = \eta \cdot f_u \cdot \pi \cdot d_{Du}^2 / 4$	0,6 = η_{min}	Fuchs [2.7]
	0,675	Klingner & Mendonca [2.31]
Hinweis:	0,7	Roik & Hanswille [2.50]
siehe Gl. (3-3)	0,8	E DIN 18800-5 [1.4], Eurocode 4-1-1 und 4-2 [1.1], [1.2]
	0,81	Hanswille [2.59]
	0,85 = η_{max}	Roik et al. [1.5], Ollgaard et al. [2.43]

Die Grenzwertbetrachtung zeigt für die Körper M-R8/3 und M-R8/4 mit zweireihiger Dübelanordnung und einer Plattendicke h_c von 260 mm, daß die experimentell ermittelten Dübeltragfähigkeiten im Erfahrungsbereich bisheriger Untersuchungen liegen. Bei Körper M-R4/2 mit einreihiger Dübelanordnung und einer Plattendicke h_c von 210 mm liegt der experimentell ermittelte Wert sogar noch deutlich darüber. Im Falle von Körper M-R4/2 sind die direkten Druckstreben zwischen den Dübelfußpunkten und Auflagerungspunkten des Versuchskörpers, vgl. Vorderansicht in Bild 5-7, gegenüber den Körpern M-R8/3 und M-R8/4 aufgrund einer geringeren Plattendicke h_c bei gleichzeitig konstanter Stützweite x etwas flacher geneigt. Dies führt im Falle von Körper M-R4/2 zu einer vergleichsweise größeren horizontalen Komponente der Druckstrebe je Dübel und somit zu einer größeren Aktivierung von Reibkräften je Dübel.

Abschließend kann festgestellt werden, daß die Tragfähigkeiten bei nahezu zentrischer Krafteinleitung trotz Reduzierung der Reibwirkung deutlich zunehmen und die rechnerische Tragfähigkeiten stehender Kopfbolzen im Hinblick auf die Bemessung als Obergrenze angesehen werden können.

5.3.4 Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, daß bereits bei vergleichsweise *geringen Ausmitten der Querschubkräfte* relativ zum Stahlsteg die infolge Biegedruck aus Durchlaufwirkung der Platte aktivierbaren Reibkräfte so groß werden, daß die Übertragung der vertikalen Kräfte allein über Reibung sichergestellt werden kann. Dementsprechend wird für die Tragfähigkeit im auflagernahen Bereich der Platte nicht ein Versagen der Verbundfuge sondern der Stahlbetonplatte maßgebend. Die Aktivierung der Reibkräfte in der Biegedruckzone bewirkt eine direkte Lagerung der Platte. Durch eine zusätzliche Auflagerung der Platte auf der Stegblechoberkante konnte in den Versuchen weder eine Steigerung der Tragfähigkeit noch ein großen Einfluß auf die Ribbildung festgestellt werden.

Bei *nahezu zentrischer Einleitung der Querschubkräfte* ist in den Versuchen trotz deutlicher Reduktion der Reibkräfte durch die verhinderte Entwicklung des Ausbruchkörpers infolge direkter Auflast eine sprunghafte Steigerung der Tragfähigkeit zu verzeichnen. Dabei liegen die Dübeltragfähigkeiten in den Versuchen in der Größenordnung von stehenden Kopfbolzen. Für diesen Fall wird im Hinblick auf die Bemessung die Tragfähigkeit je Dübel durch die Tragfähigkeit stehender Kopfbolzen begrenzt.

5.4 Numerische Untersuchungen

5.4.1 Einführung

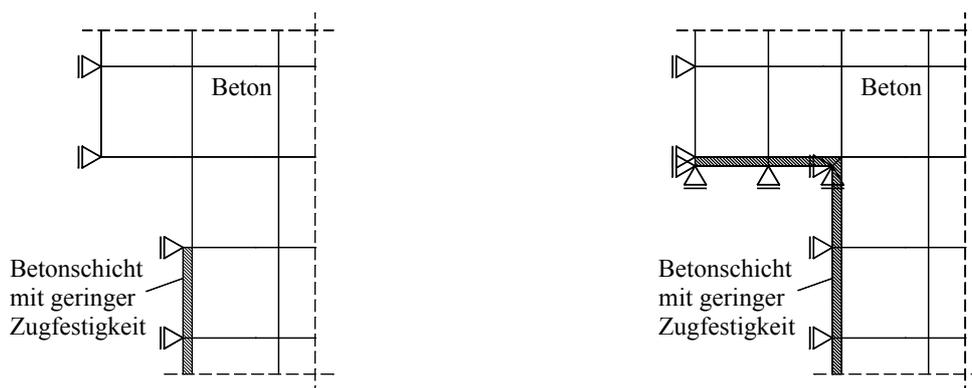
Auf Grundlage der ausführlichen numerischen Untersuchungen für eine Randlage der Verbundfuge in Abschnitt 4.4 werden in Abschnitt 5.4.2 lediglich die Besonderheiten der *Modellierung* für eine Mittellage beschrieben. Auch diese numerischen Untersuchungen basieren auf dem in Abschnitt 1.5 (c) beschriebenen FE-Programm MASA [2.71], [2.73]. In der Darstellung der FE-Ergebnisse in Abschnitt 5.4.3 wird zunächst das *Trag- und Verformungsverhalten* näher erläutert und anschließend der Einfluß einzelner Konstruktionsparameter diskutiert. Um das Tragverhalten der reinen Dübelverbindung genauer zu erfassen, werden im ersten Schritt nur *Traganteile über die Kopfbolzen* selbst und im zweiten Schritt *Traganteile über die Kopfbolzen und die Stegblechoberkante* berücksichtigt.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wird die Übertragbarkeit der für eine Randlage der Verbundfuge beobachteten Abhängigkeitsbeziehungen einzelner Konstruktionsparameter überprüft. Die Übertragbarkeit der Beziehungen kann im wesentlichen bestätigt werden und es gelingt zu zeigen, daß das Tragfähigkeitsniveau in Mittellage im Vergleich zur Randlage insgesamt etwas höher liegt. Der Einfluß zusätzlicher Traganteile über Reibung wird im Rahmen der numerischen Untersuchungen bewußt ausgeschlossen und in Abschnitt 5.5 in weiterführenden Parameteruntersuchungen ausführlich diskutiert.

5.4.2 Modellierung

5.4.2.1 Elemente

Die Modellierung der einzelnen Komponenten der Verbundfuge als **Volumen- und Balkenelemente** erfolgt in Anlehnung an Abschnitt 4.4.2.1. In Abweichung zur Randlage der Verbundfuge wird in Mittellage der Stahlsteg nicht mitmodelliert, siehe Bild 5-20, und die Stützbewehrung in Balkenelementen diskretisiert.



(a) Ohne vertikaler Lagerung auf der Stegblechoberkante (b) Mit vertikaler Lagerung auf der Stegblechoberkante

Bild 5-20. Modellierung der Kontaktflächen im Bereich der Stegblechoberkante

Die **Kontaktfläche zwischen Stahlbeton- und Baustahlgurt** wird analog zur **Kontaktfläche zwischen Kopfbolzen und Beton** mit einer ein Millimeter dicken Schicht von Volumenelementen modelliert. Der Schicht wird als Material ein *Beton mit geringer Zugfestigkeit* zugewiesen. Neben einer geringen Zugfestigkeit weist dieses Material sowohl einen kleinen Elastizitätsmodul als auch eine für den Beton übliche Druckfestigkeit auf und ermöglicht so die Übertragung von Druckkräften, aber auch ungehinderte Ablösungs- und Relativverschiebungen. In Bild 5-20 wird die Modellierung der Kontaktfläche einschließlich der Lagerungsbedingungen im Bereich der Stegblechoberkante

dargestellt. Dabei wird entsprechend den planmäßigen Traganteilen zwischen den FE-Modellen *mit bzw. ohne vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante* unterschieden.

5.4.2.2 Materialgesetze

Für die Parameterstudie werden für alle verwendeten Materialien die in Abschnitt 4.4.2.2 (b) dokumentierten Kennwerte und Spannungs-Dehnungs-Beziehungen verwendet.

5.4.2.3 Diskretisierung

Auf Grundlage des in Abschnitt 4.4.2.3 beschriebenen und in Abschnitt 4.4.3.1 verifizierten FE-Modells in Randlage der Verbundfuge wird für eine Mittellage ein räumliches FE-Modell entwickelt, siehe Bild 5-21. Dabei werden für das FE-Modell in Mittellage gegenüber der Randlage im wesentlichen die Lagerungsbedingungen modifiziert, um die Durchlaufwirkung der Platte im Stützbe-
reich abzubilden. Entsprechend den planmäßigen Traganteilen wird dabei grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Lagerungen im Bereich der Stegoberkante unterschieden, siehe Bild 5-20.

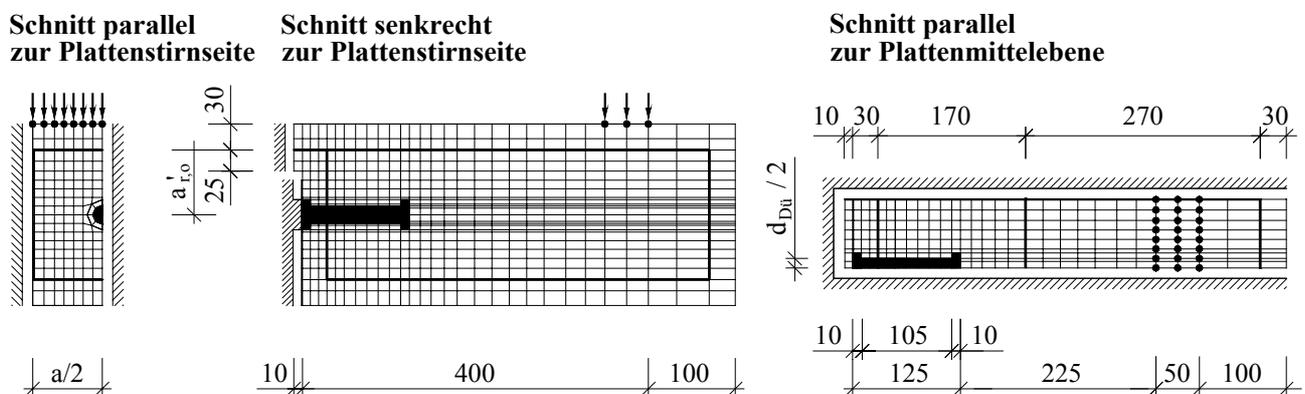


Bild 5-21. FE-Modell für reinen Querschub in Mittellage ohne Lagerung auf der Stegoberkante

5.4.3 Ergebnisse

5.4.3.1 Trag- und Verformungsverhalten

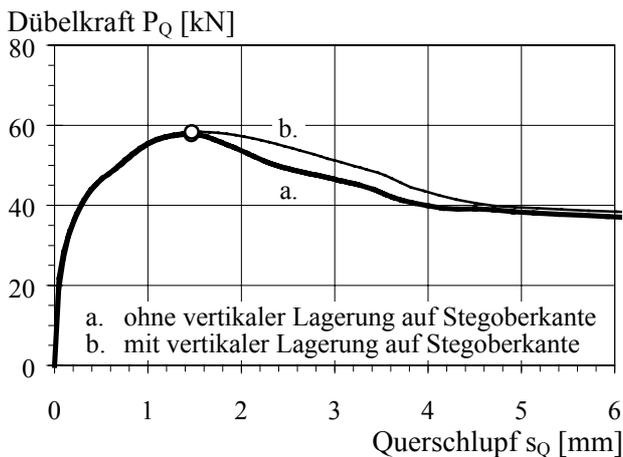
(a) Allgemeines

Das Trag- und Verformungsverhalten liegender Kopfbolzen unter Querschub in Mittellage wird im folgenden anhand der in Abschnitt 5.4.3.2 (a) und 5.4.3.3 (a) beschriebenen Standardkörper der beiden numerischen Untersuchungen exemplarisch beschrieben und im Rahmen der numerischen Parameterstudien weiter ergänzt. Neben der Schlupfentwicklung wird im weiteren die Reiß- und Spannungsentwicklung bei verschiedenen Last- und Verformungsstufen in drei unterschiedlichen Schnittebenen entsprechend dem in Bild 4-30 beschriebenen Schema bildhaft dargestellt.

(b) Schlupfentwicklung

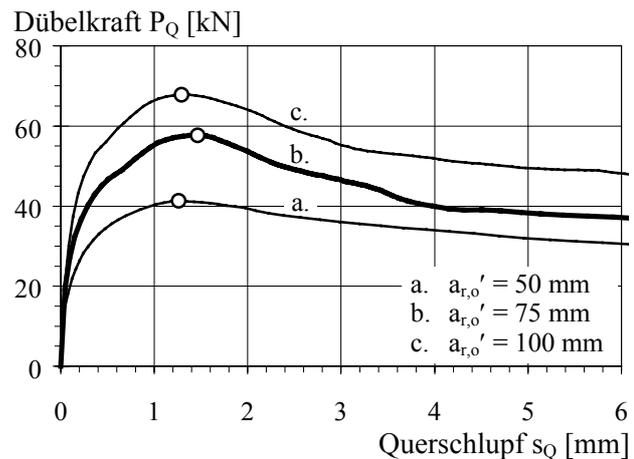
Die in den Bildern 5-22 und 5-23 dargestellten Dübelkennlinien zeigen in Abhängigkeit von den planmäßigen Traganteilen und vom wirksamen oberen Randabstand plausible Ergebnisse. Die zusätzliche Aktivierung der Teilflächenpressung auf der Stegoberkante führen wie in den Versuchen auch in den numerischen Untersuchungen zu keinen nennenswerten Steigerungen der Tragfähigkeit je Dübel. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen in Randlage besitzt dagegen der wirksame obere Randabstand einen bedeutenden Einfluß auf die Dübeltragfähigkeit. Alle FE-Rechnungen zei-

gen, daß eine geeignete Bewehrungsführung nahe der Verbundfuge nicht nur zu einer Steigerung der Tragfähigkeit sondern auch zu einer Verbesserung der Duktilität und der Resttragfähigkeit führt.



Hinweis: Die fett gedruckte Linie entspricht dem Standardkörper der FE-Parameterstudie nach Tabelle 5-12, die andere Linie dem Standardkörper der Tabelle 5-13.

Bild 5-22. Kraft-Schlupf-Verhalten des FE-Modells mit und ohne Traganteil über der Stegoberkante



Hinweis: Die fett gedruckte Linie entspricht dem Standardkörper (m.WF) der FE-Parameterstudie nach Tabelle 5-12

Bild 5-23. Kraft-Schlupf-Verhalten des FE-Modells in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand

(c) Reiß- und Spannungsentwicklung

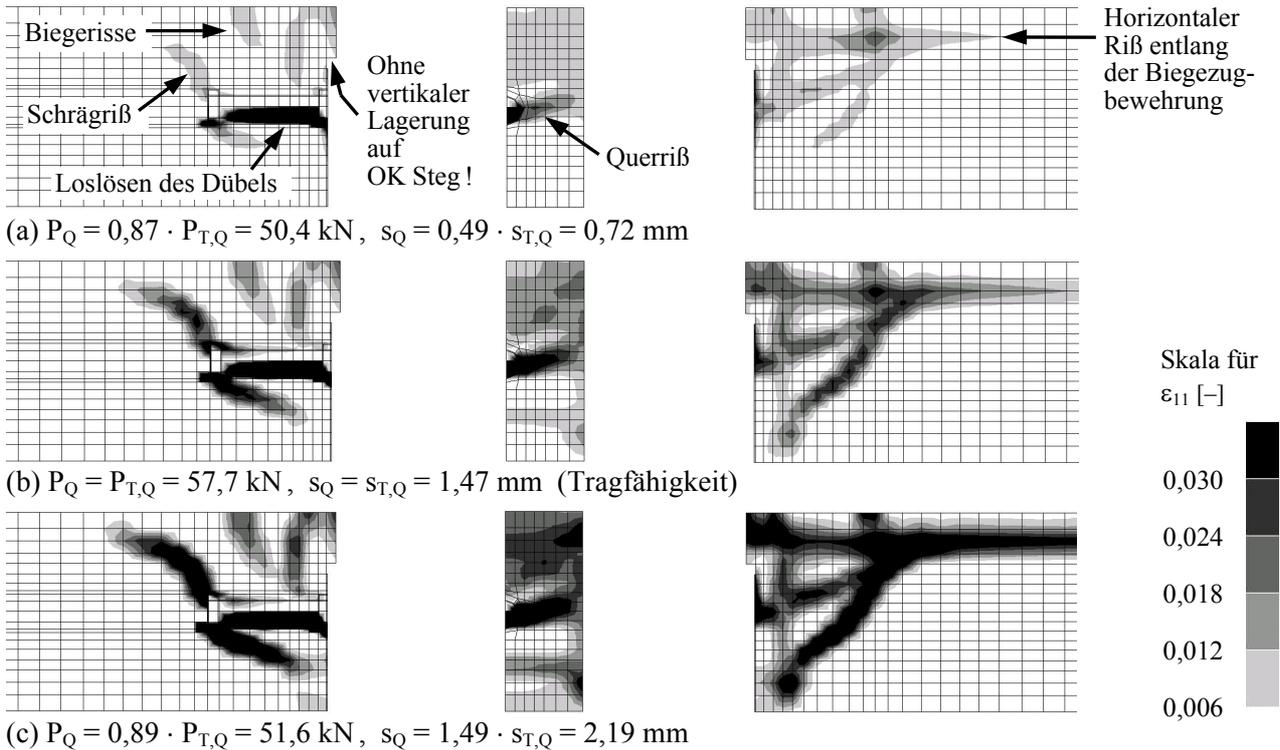
In den Abbildungen der Bilder 5-24 bis 5-27 wird die Reiß- und Spannungsentwicklung von liegenden Kopfbolzen in Mittellage der Verbundfuge in Abhängigkeit von der Lagerungsart im Bereich der Stegoberkante dargestellt. Das Trag- und Verformungsverhalten in Mittellage der Verbundfuge stimmt mit den Beobachtungen in Randlage im wesentlichen überein. Wegen der Gemeinsamkeiten wird im weiteren schwerpunktmäßig nur auf die Besonderheiten der Mittellage eingegangen.

Mit ansteigender Querschubbeanspruchung nehmen proportional dazu das Stützmoment und damit der Biegezug oberhalb des Stegbleches zu. Mit Erreichen der Biegezugfestigkeit des Betons entstehen Risse an der Plattenoberseite parallel zum Stahlsteg. Bei Verzicht auf die Weichfasereinlage oberhalb des Stegbleches, d. h. vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante, entwickeln sich ansatzweise schräg verlaufende Risse ähnlich zu einem Durchstanzversagen von Stahlbetonplatten.

Unabhängig von der Anordnung der Weichfasereinlage zeigen die Spannungsbilder in der Biegedruckzone der Platte einen ausgeprägten Druckspannungsbereich und eine Konzentration der Beton-druckspannungen auf der lastzugewandten Seite des Dübels nahe der Schweißwulst. Darüber hinaus zeigen die Spannungsbilder mit vertikaler Lagerung der Platte auf der Stegoberkante einen ausgeprägten Bereich mit erhöhten Druckspannungen im Beton oberhalb des Stegbleches.

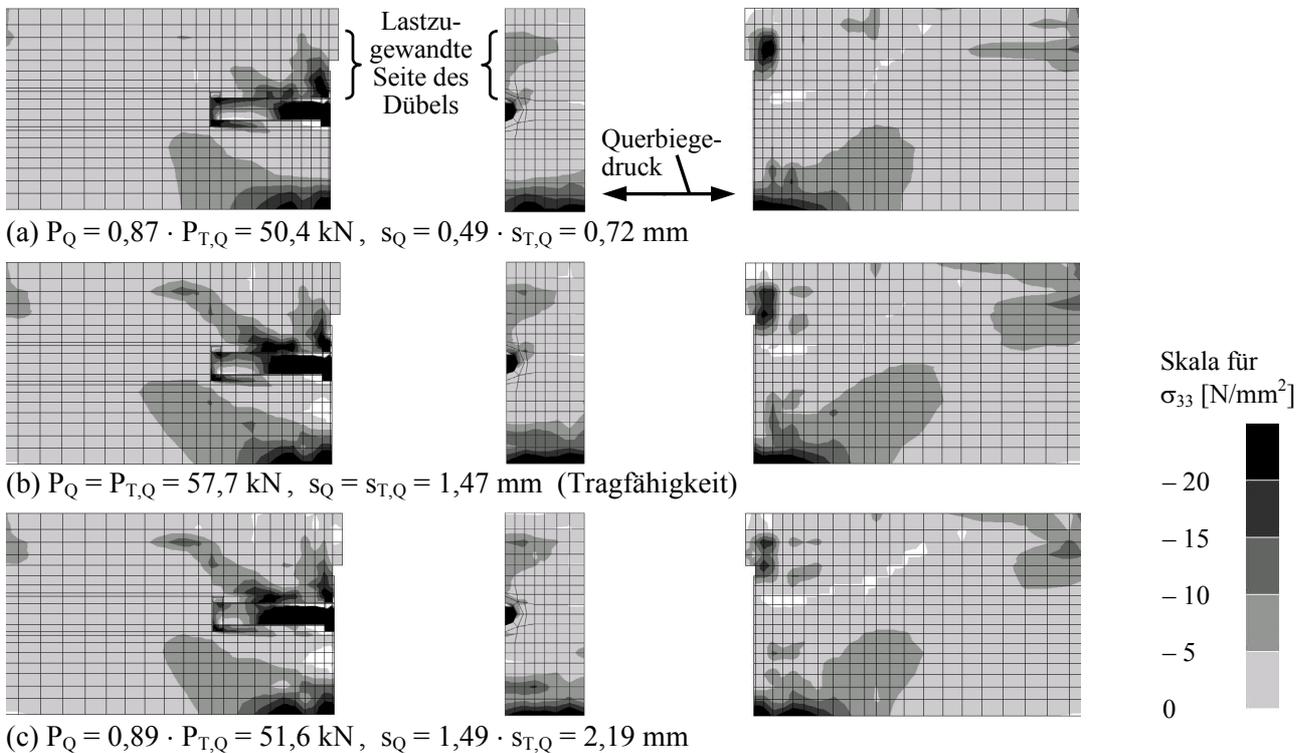
Zur Plausibilitätskontrolle wird in Bild 5-28 das Reiß- und Spannungsbild bei Erreichen der Tragfähigkeit für den Fall dargestellt, bei dem die Querschubkräfte nicht über Kopfbolzen sondern ausschließlich über Kontaktpressung auf der Stegblechoberkante übertragen werden können. Das Reißbild zeigt auf niedrigem Tragfähigkeitsniveau ein linienförmiges Durchstanzversagen oberhalb des Stegbleches. Die Risse beginnen an der Seitenkante des Stegbleches und entwickeln sich geneigt bis zur Plattenoberseite fort. Infolge Dübelwirkung der Stützbewehrung verbleibt eine nennenswerte Resttragfähigkeit. Das Spannungsbild bei Erreichen der Traglast zeigt Spannungskonzentrationen nicht nur im Bereich der Biegedruckzone der durchlaufenden Platte sondern auch im Beton oberhalb des Stegbleches.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die in FE-Rechnungen beobachtete Riß- und Spannungsentwicklung grundsätzlich gut mit den Ergebnissen für die liegenden Dübel in Randlage übereinstimmt und die Unterschiede mit einfachen mechanischen Überlegungen plausibel erklärbar sind.



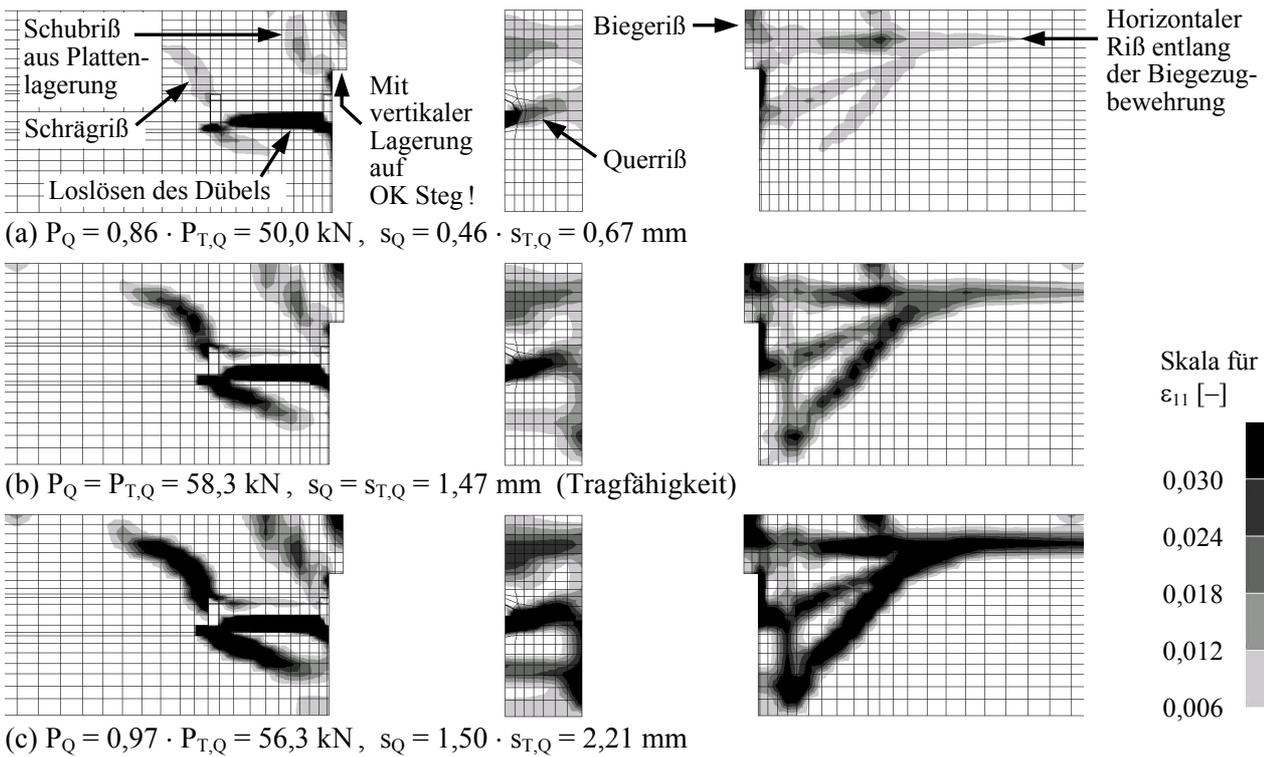
Hinweis: $- a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g)
 - Die FE-Netze sind unverzerrt, d. h. ohne Überhöhung der Verformungen dargestellt.

Bild 5-24. Rißentwicklung des FE-Modells mit liegenden Kopfbolzen und **ohne** vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante (m.WF) entsprechend den Hauptdehnungen ϵ_{11}



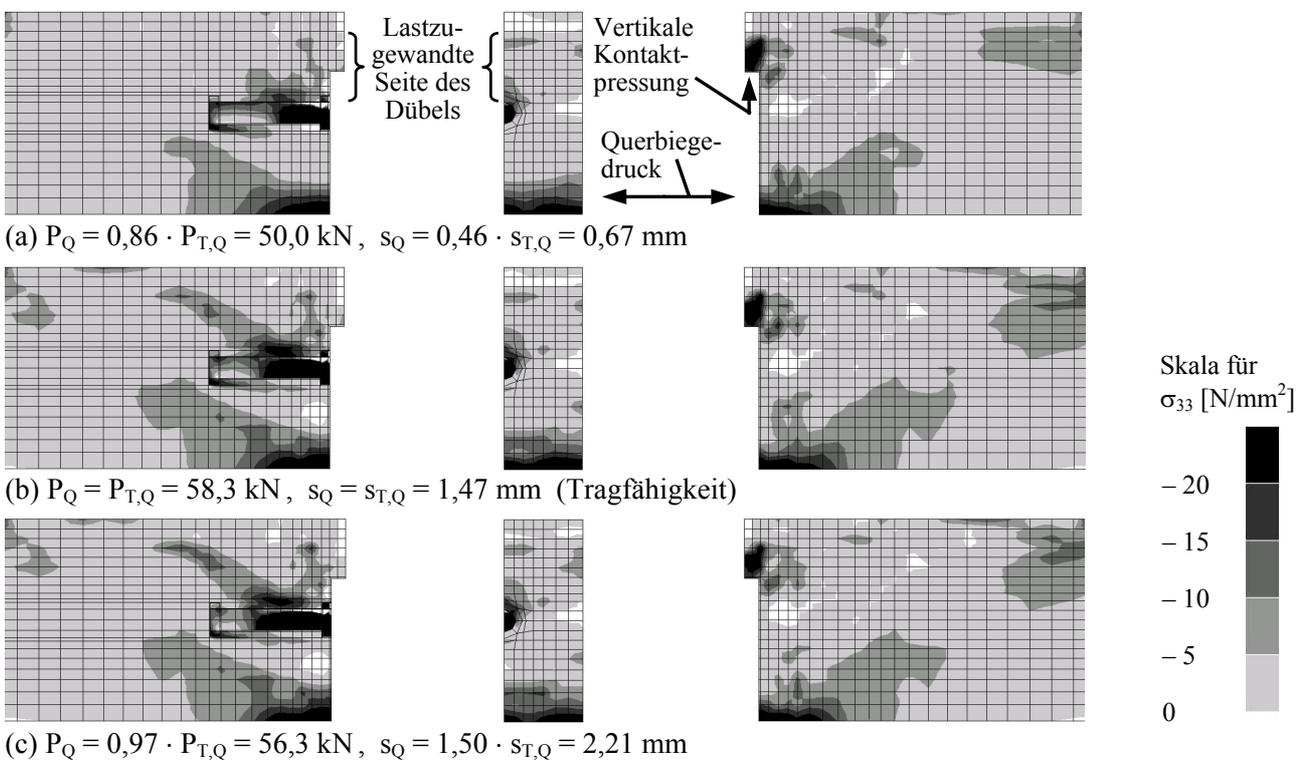
Hinweis: $- a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g)
 - Die FE-Netze sind unverzerrt, d. h. ohne Überhöhung der Verformungen dargestellt.

Bild 5-25. Spannungsentwicklung des FE-Modells mit liegenden Kopfbolzen und **ohne** vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante (m.WF) entsprechend den Hauptspannungen σ_{33}



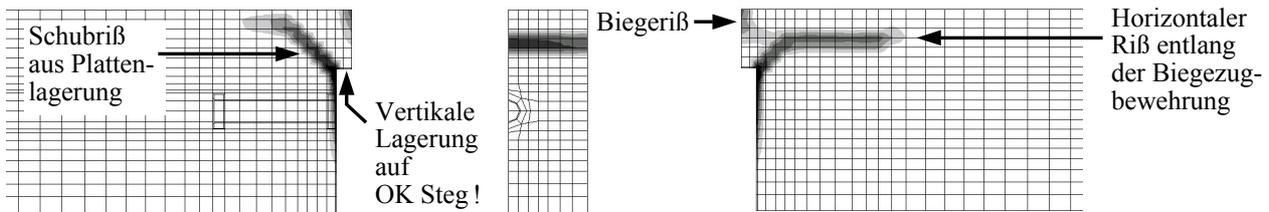
Hinweis: - $a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g)
- Die FE-Netze sind unverzerrt, d. h. ohne Überhöhung der Verformungen dargestellt.

Bild 5-26. Rißentwicklung des FE-Modells mit liegenden Kopfbolzen und **mit** vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante (o.WF) entsprechend den Hauptdehnungen ϵ_{11}



Hinweis: - $a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g)
- Die FE-Netze sind unverzerrt, d. h. ohne Überhöhung der Verformungen dargestellt.

Bild 5-27. Spannungsentwicklung des FE-Modells mit liegenden Kopfbolzen und **mit** vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante (o.WF) entsprechend den Hauptspannungen σ_{33}



Hinweis: – $a_{r,o}' = 75$ mm, $f_c = 30$ N/mm², $a/s = 1$, $d_{s,L} = d_{s,L} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g)
 – Skalierung wie in den Bildern 5-24 und 5-26. Die FE-Netze sind unverzerrt dargestellt.

Bild 5-28. Rißbild des FE-Modells ohne Kopfbolzen und mit alleiniger Kraftübertragung über Druckkontakt auf der Stegoberkante bei Erreichen der Tragfähigkeit

5.4.3.2 Querschubabtragung nur über Kopfbolzen

(a) Allgemeines

In diesem Abschnitt wird ausführlich der Einfluß einzelner Konstruktionsparameter auf die Tragfähigkeit der reinen Dübelverbindung diskutiert. Aus diesem Grund werden weitere Traganteile über die Stegoberkante durch die fiktive Anordnung einer Weichfaser, d. h. *ohne vertikaler Lagerung auf der Stegoberkante*, entsprechend Bild 5-20 (a) und über Reibung ausgeschlossen. Die statistische Auswertung der FE-Ergebnisse erfolgt dabei für jeden isoliert betrachteten Parameter nach zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten. In einem ersten Schritt soll die in den Untersuchungen für eine Randlage der Verbundfuge beobachteten *Abhängigkeitsbeziehungen* einzelner Parameter auch für eine Mittellage überprüft werden. Darüber hinaus soll in einem zweiten Schritt untersucht werden, ob das *Tragfähigkeitsniveau* in Mittellage im Vergleich zur Randlage insgesamt etwas höher liegt.

In Tabelle 5-12 sind die in dieser *Parameterstudie* berücksichtigten Konstruktionsparameter und deren Wertebereich aufgelistet. Der Parameterbereich orientiert sich an dem experimentellen Teil der Untersuchungen. Darüber hinaus wird auch der Grad und die Steifigkeit der Stützbewehrung variiert. Die unterschiedliche Modellierung der Verbindung der als Balkenelemente diskretisierten Stützbewehrung wirkt sich wesentlich auf die Dübelwirkung der Bewehrung und damit auf die Tragfähigkeit der Verbindung aus. Dabei entspricht eine gelenkige Verbindung der Balkenelemente einer sehr dünnen, d. h. im Grenzfall einer biegeschlaffen Mattenbewehrung und führt daher zu einem unteren Grenzwert der Tragfähigkeit. Im Gegensatz dazu führt eine biegesteife Verbindung der Balkenelemente zu einem oberen Grenzwert der Tragfähigkeit.

Tabelle 5-12. Konstruktionsparameter und deren Wertebereich für die numerische Parameterstudie

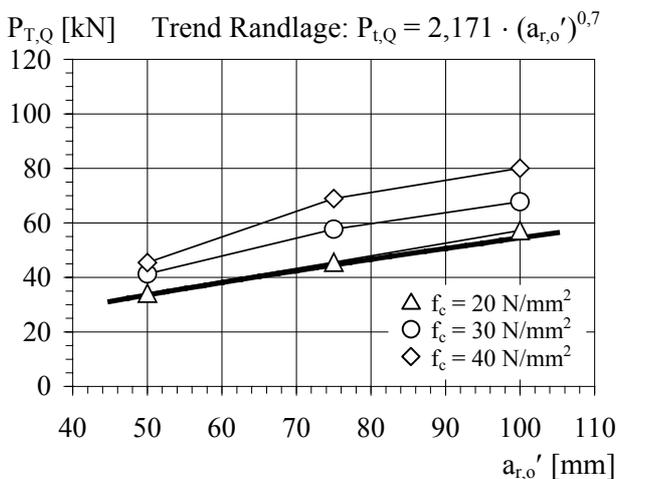
Konstruktionsparameter	Wertebereich
Wirksamer oberer Randabstand	$a_{r,o}' = 50, 75$ und 100 mm
Betonfestigkeit	$f_c = 20, 30$ und 40 N/mm ²
Bügelanzahl je Dübel	$a/s = 0, 1$ und 2
Durchmesser der Längsbewehrung	$d_{s,L} = 10, 12$ und 16 mm
Dübeldurchmesser	$d_{Dü} = 19, 22$ und 25 mm
Stützbewehrung	Grad der Stützbewehrung
	Modellierung
	$\rho_s = 0,25, 0,5, 0,75, 1$ und $1,5$ % gelenkig (g) und biegesteif (b)
Hinweis: Die fett dargestellten Parameterwerte entsprechen dem Standardkörper dieser numerischen Parameterstudie.	

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist bei allen Berechnungen analog zu den numerischen Untersuchungen für die Randlage der Verbundfuge in Abschnitt 4.4.3.3 die *Verformungsschrittweite* je Rechnung so groß gewählt, daß mit 20 ± 1 Verformungsstufen die Traglast erreicht wird. Die Eingangsgrößen und Ergebnisse dieser Parameterstudie sind in Anhang C dokumentiert.

Im folgenden sind in den Bildern zur *Gewichtung der Einflußparameter* den FE-Ergebnissen für eine Mittellage der Verbundfuge die Abhängigkeitsbeziehungen für eine Randlage entsprechend Gl. (4-21) als „Trendlinie für Randlage“ (dicke Kurve) gegenübergestellt. Zur Übersicht werden in den Bildern alle FE-Ergebnisse berücksichtigt, auch die, bei denen ein reines Biegeversagen der Platte bzw. ein Übergang vom Versagen der Verbundfuge zum Biegeversagen erkennbar ist. Darüber hinaus werden in den Diagrammen zur Ermittlung des *Tragfähigkeitsniveaus im Vergleich zur Randlage der Verbundfuge* die FE-Ergebnisse auf die Querschubtragfähigkeit in Randlage nach Gl. (4-21) bezogen und in Abhängigkeit des untersuchten Parameters dargestellt. In diesem Fall werden die FE-Ergebnisse bei denen ein eindeutiges Biegeversagen vorliegt nicht weiter berücksichtigt.

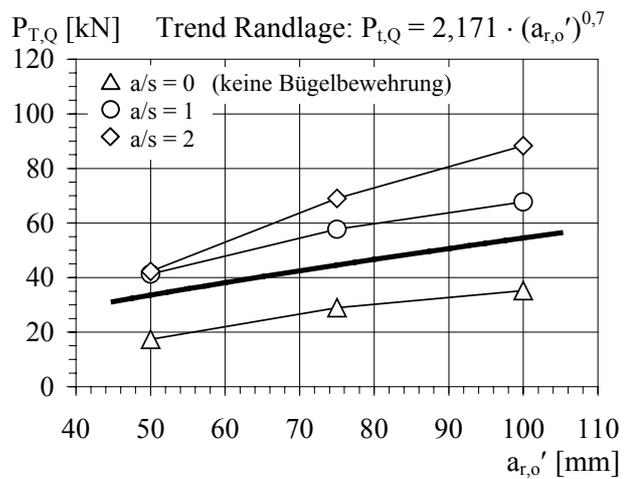
(b) Wirksamer oberer Randabstand

In den Bildern 5-29 bis 5-33 ist die Dübeltragfähigkeit in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand der Dübel dargestellt.



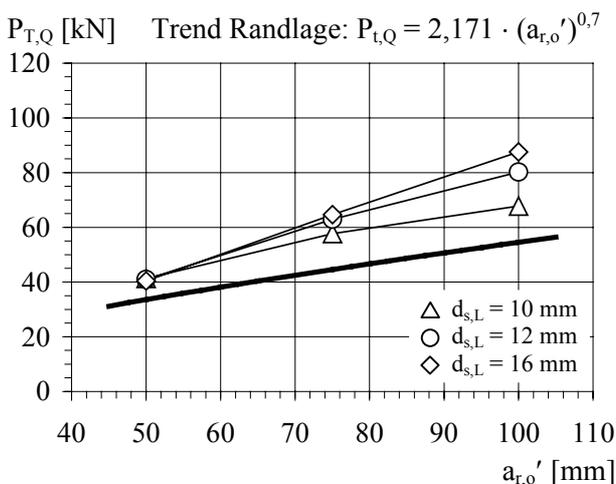
Bed.: $a/s = 1, d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

Bild 5-29. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$ und von der Betonfestigkeit f_c



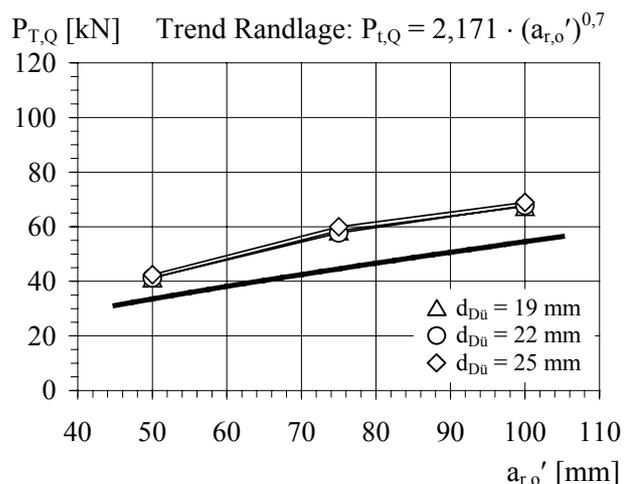
Bed.: $f_c = 30$ N/mm², $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

Bild 5-30. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$ und von der Bügelanzahl je Dübel a/s



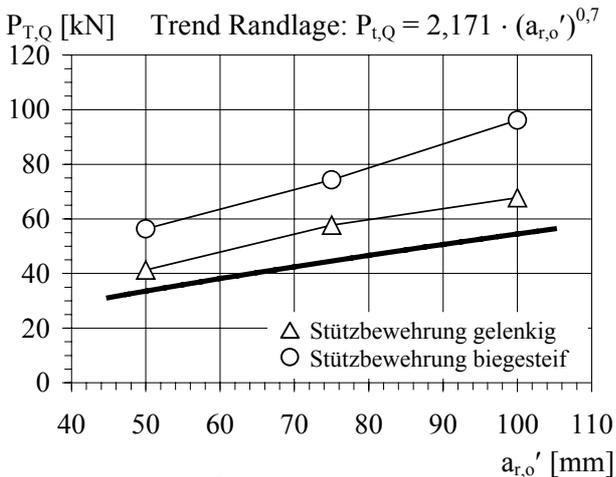
Bed.: $f_c = 30$ N/mm², $a/s = 1, d_{s,Bü} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

Bild 5-31. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$ und vom Durchmesser der Längsbewehrung $d_{s,L}$



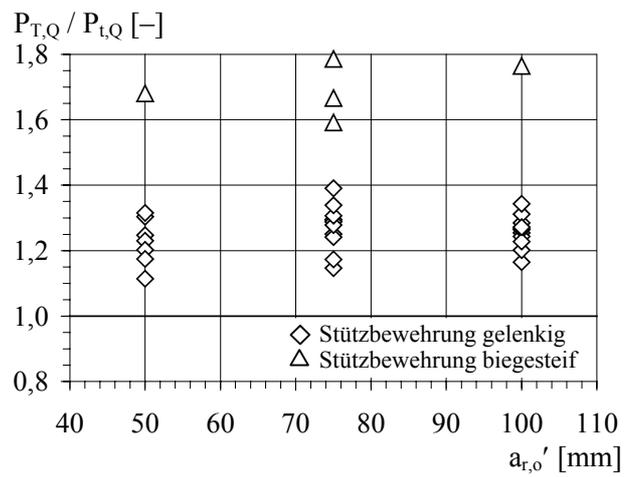
Bed.: $f_c = 30$ N/mm², $a/s = 1, d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

Bild 5-32. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$ und vom Dübelndurchmesser $d_{Dü}$



Bed.: $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$, mit WF.

Bild 5-33. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$ und von der Modellierung der Stützbewehrung



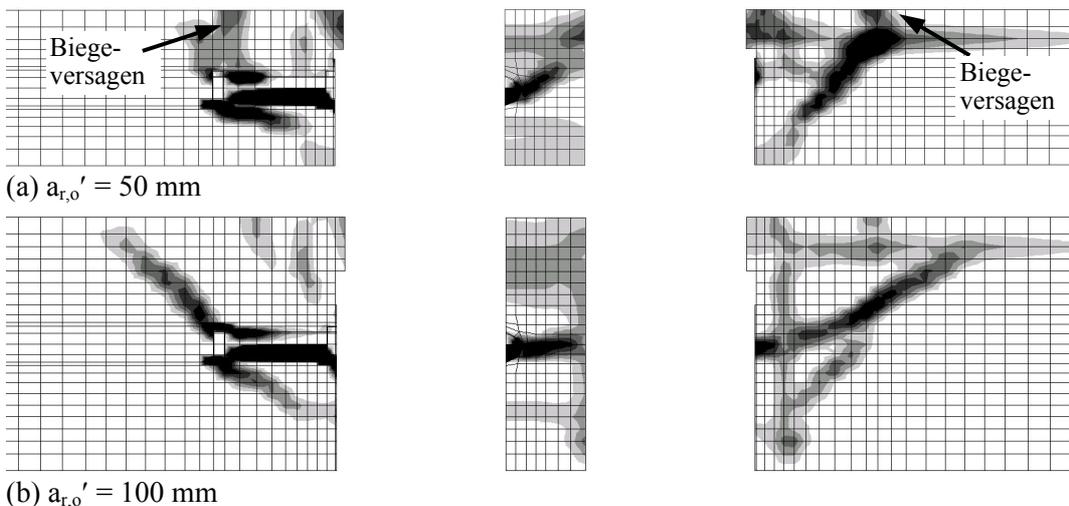
Hinweis: FE-Tragfähigkeiten, die aus Biegeversagen der Platte resultieren, sind hier nicht berücksichtigt.

Bild 5-34. Quotient aus Tragfähigkeit $P_{T,Q}$ nach FE-Berechnung und rechnerischer Tragfähigkeit $P_{t,Q}$ nach Gl. (4-21) in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$

Die Dübeltragfähigkeit steigt mit zunehmendem wirksamen oberen Randabstand deutlich an. Die FE-Ergebnisse für eine Mittellage der Verbundfuge zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem Trend der Untersuchungen für eine Randlage.

Ein direkter Vergleich der Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung bei Mittellage der Verbundfuge mit den Tragfähigkeiten bei Randlage nach Gl. (4-21) zeigt, daß das Traglastniveau bei einer gelenkigen Verbindung der Balkenelemente (dünne, biegeschlaffe Mattenbewehrung) im Mittel um 25,6 % bzw. bei einer biegesteifen Verbindung (dicke, biegesteife Stabbewehrung) im Mittel um 69,8 % höher liegt. Darüber hinaus bestätigt Bild 5-34, daß das Verhältnis der Tragfähigkeiten von Mittel- zur Randlage für die jeweilige Modellierung der Balkenelemente in etwa konstant ist.

In Bild 5-35 ist in Ergänzung zu Bild 5-24 (b) das Reißbild bei Erreichen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand dargestellt. Das Reißbild für einen wirksamen oberen Randabstand von 50 mm deutet auf ein kombiniertes Versagen von Verbundfuge und Platte hin.

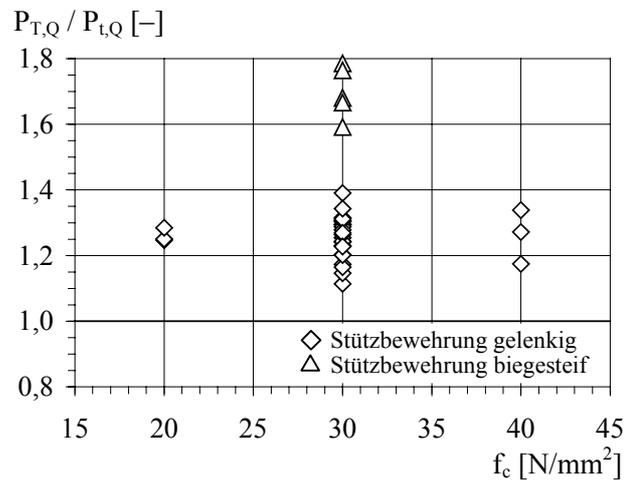
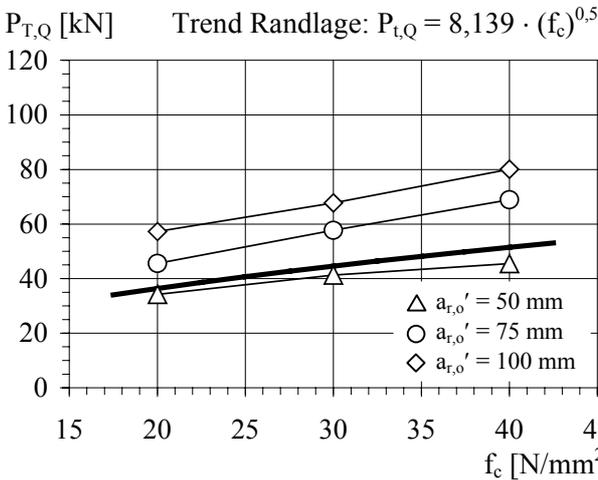


Hinweis: $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g), mit WF. Skalierung wie in den Bildern 5-24 und 5-26. Die FE-Netze sind unverzerrt dargestellt.

Bild 5-35. Reißbild des FE-Modells bei Erreichen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand

(c) Betonfestigkeit

In Bild 5-36 ist die Dübeltragfähigkeit in Abhängigkeit von der Zylinderdruckfestigkeit des Betons für unterschiedliche wirksame obere Randabstände dargestellt. Die Tragfähigkeit der Verbundfuge steigt mit zunehmender Betonzugfestigkeit, die direkt von der Betondruckfestigkeit abhängt, deutlich an. Eine statistische Auswertung der FE-Ergebnisse ergibt wie in Randlage der Verbundfuge einen Exponenten von im Mittel 0,50. Dementsprechend zeigt auch der Quotient der Tragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit gemäß Bild 5-37 einen in etwa konstanten Verlauf.



Bed.: $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

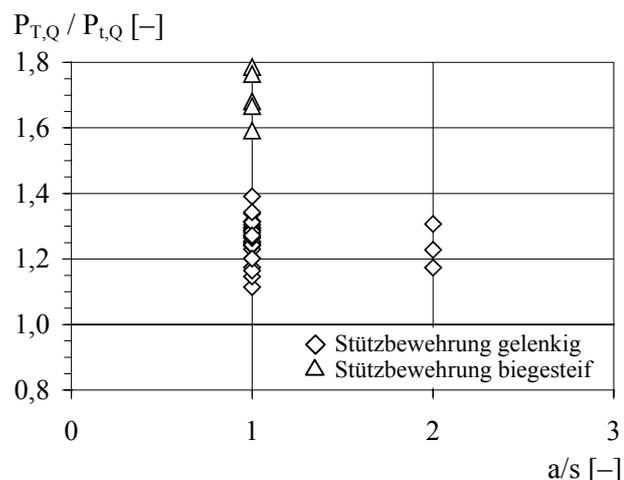
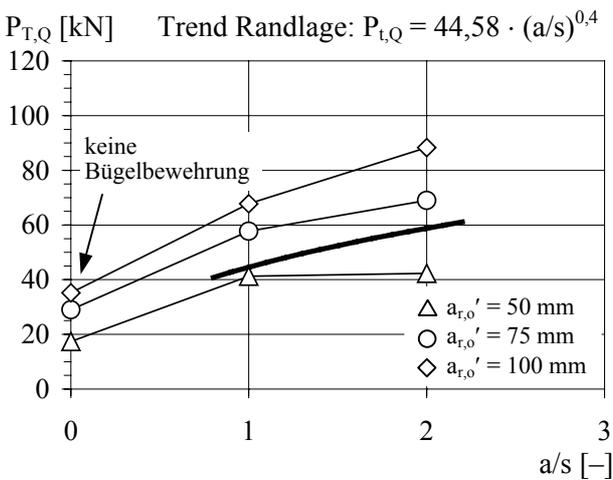
Hinweis: FE-Tragfähigkeiten, die aus Biegeversagen der Platte resultieren, sind hier nicht berücksichtigt.

Bild 5-36. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit f_c und vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$

Bild 5-37. Quotient aus Tragfähigkeit $P_{T,Q}$ nach FE-Berechnung und rechnerischer Tragfähigkeit $P_{t,Q}$ nach Gl. (4-21) in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit f_c

(d) Bügelanzahl je Dübel

In Bild 5-38 ist die absolute Dübeltragfähigkeit und in Bild 5-39 die auf die rechnerische Tragfähigkeit in Randlage der Verbundfuge nach Gl. (4-21) bezogene Dübeltragfähigkeit in Abhängigkeit von der Bügelanzahl je Dübel aufgetragen.



Bed.: $f_c = 30$ N/mm², $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a = 160$ mm, $\rho_s = 1$ % (g), mit WF.

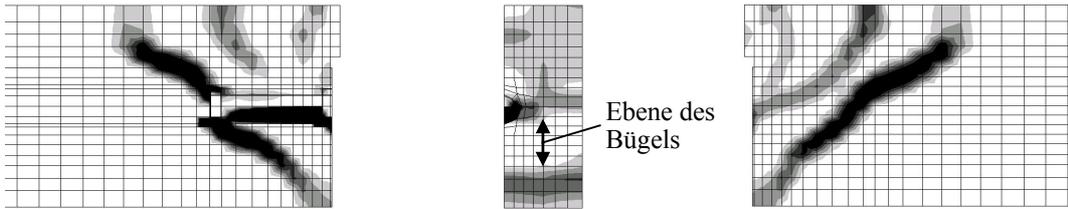
Hinweis: FE-Tragfähigkeiten, die aus Biegeversagen der Platte resultieren, sind hier nicht berücksichtigt.

Bild 5-38. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit von der Bügelanzahl je Dübel a/s und vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$

Bild 5-39. Quotient aus Tragfähigkeit $P_{T,Q}$ nach FE-Berechnung und rechnerischer Tragfähigkeit $P_{t,Q}$ nach Gl. (4-21) in Abhängigkeit von der Bügelanzahl je Dübel a/s

Für einen wirksamen oberen Randabstand von 50 mm bewirkt eine Verdopplung der Bügelanzahl je Dübel von eins auf zwei keine nennenswerte Tragfähigkeitssteigerung, siehe Bild 5-38. In diesem Fall findet ein Übergang vom Versagen der Verbundfuge zum Biegeversagen der Platte statt. Wird dieses Ergebnis für die Auswertung ausgeklammert, so führt eine Verdopplung der Bügelanzahl von eins auf zwei bei einer Mittellage der Verbundfuge in guter Übereinstimmung mit den Untersuchungen in Randlage zu einer mittleren Tragfähigkeitssteigerung von 25,0 %. Dieser Wert für eine Mittellage entspricht einem Exponentenwert von 0,32. Der Exponentenwert in Randlage beträgt 0,4.

Das für eine Verbundfuge mit zweifacher Verbügelung in Bild 5-40 dargestellte Rißbild bei Erreichen der Traglast zeigt eine gute Übereinstimmung mit einer einfachen Verbügelung.

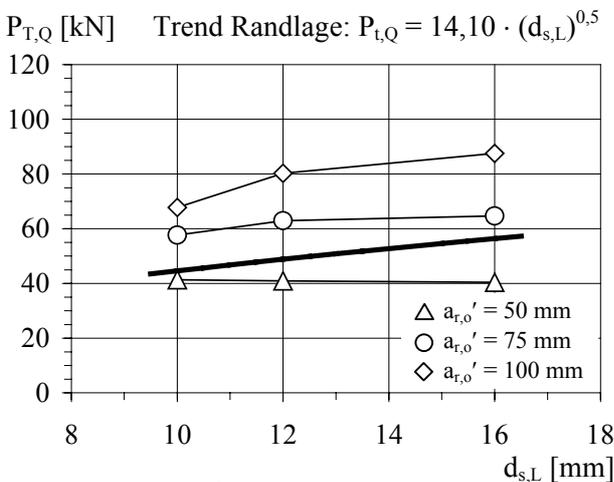


Hinweis: – $a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 2$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_D = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g), m. WF.
– Skalierung wie in den Bildern 5-24 und 5-26. Die FE-Netze sind unverzerrt dargestellt.

Bild 5-40. Rißbild des FE-Modells mit zwei Bügel je Dübel bei Erreichen der Tragfähigkeit

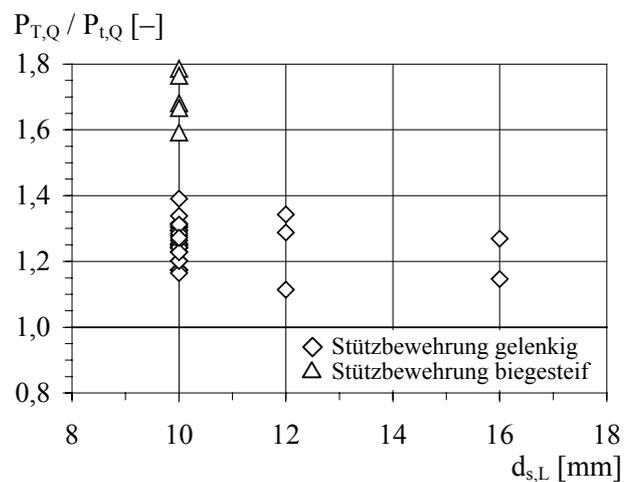
(e) Durchmesser der Längsbewehrung

In Bild 5-41 ist die absolute und in Bild 5-42 die auf die Tragfähigkeit für eine Randlage der Verbundfuge bezogene Dübeltragfähigkeit für eine Mittellage in Abhängigkeit vom Durchmesser der Längsbewehrung dargestellt.



Bed.: $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g), mit WF.

Bild 5-41. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom Durchmesser der Längsbewehrung $d_{s,L}$ und vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$



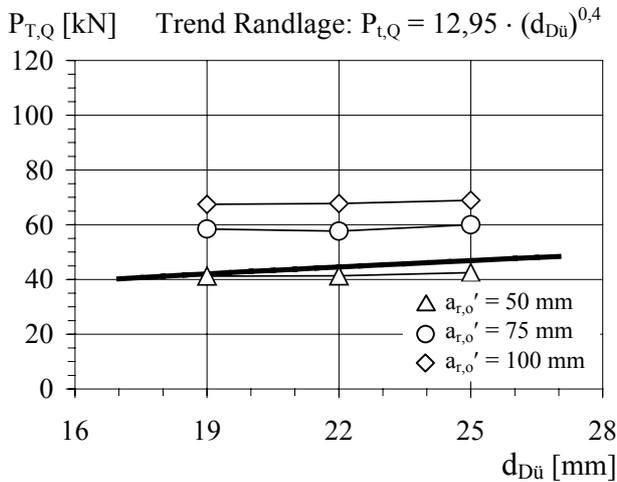
Hinweis: FE-Tragfähigkeiten, die aus Biegeversagen der Platte resultieren, sind hier nicht berücksichtigt.

Bild 5-42. Quotient aus Tragfähigkeit $P_{T,Q}$ nach FE-Berechnung und rechnerischer Tragfähigkeit $P_{t,Q}$ nach Gl. (4-21) in Abhängigkeit vom Durchmesser der Längsbewehrung $d_{s,L}$

Grundsätzlich bestätigen die FE-Ergebnisse mit zunehmendem Durchmesser der Längsbewehrung eine Steigerung der Tragfähigkeit. Allerdings tritt mit abnehmendem Randabstand und größer werdendem Durchmesser der Längsbewehrung der Einfluß des Bewehrungsdurchmessers zunehmend in den Hintergrund, da parallel dazu zusehends ein Biegeversagen der Platte gegenüber einem Versagen der Verbundfuge für die Tragfähigkeit maßgebend wird.

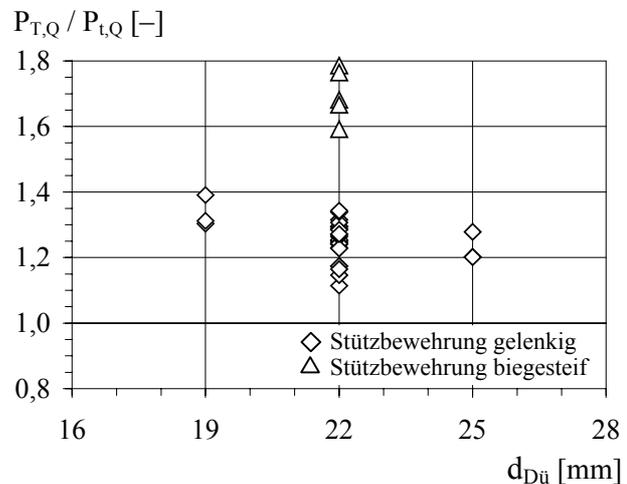
(f) Dübeldurchmesser

Die in den Bildern 5-43 und 5-44 über dem Bolzendurchmesser aufgetragenen Ergebnisse von FE-Berechnungen weisen daraufhin, daß bei einer Mittellage der Verbundfuge der Einfluß des Dübeldurchmessers auf die Tragfähigkeit etwas in den Hintergrund tritt. Auf Grundlage der FE-Ergebnisse ist kein wesentlicher Einfluß des Dübeldurchmessers auf die Tragfähigkeit erkennbar.



Bed.: $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $\rho_s = 1 \%$ (g), mit WF.

Bild 5-43. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom Dübeldurchmesser $d_{Dü}$ und vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$

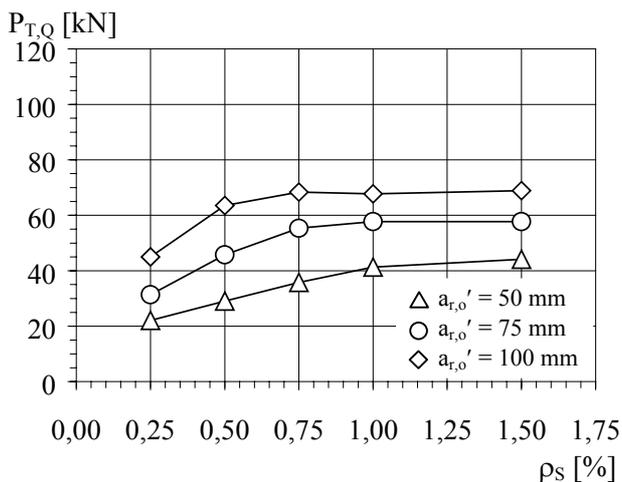


Hinweis: FE-Tragfähigkeiten, die aus Biegeversagen der Platte resultieren, sind hier nicht berücksichtigt.

Bild 5-44. Quotient aus FE-Tragfähigkeit $P_{T,Q}$ und rechnerischer Tragfähigkeit $P_{t,Q}$ nach Gl. (4-21) in Abhängigkeit vom Dübeldurchmesser $d_{Dü}$

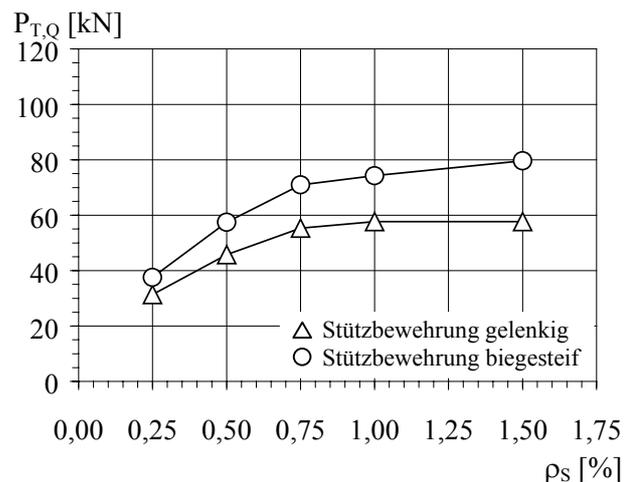
(g) Stützbewehrung

In den Bildern 5-45 und 5-46 sind die Tragfähigkeiten der FE-Rechnungen für unterschiedliche wirksame obere Randabstände und unterschiedliche Arten der Modellierung der Stützbewehrung in Abhängigkeit vom Grad der durchlaufenden Stützbewehrung dargestellt.



Bed.: $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, mit WF., Stützbew. gelenkig

Bild 5-45. Tragfähigkeiten nach FE-Rechnung in Abhängigkeit vom Grad der Stützbewehrung ρ_s und vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o'}$

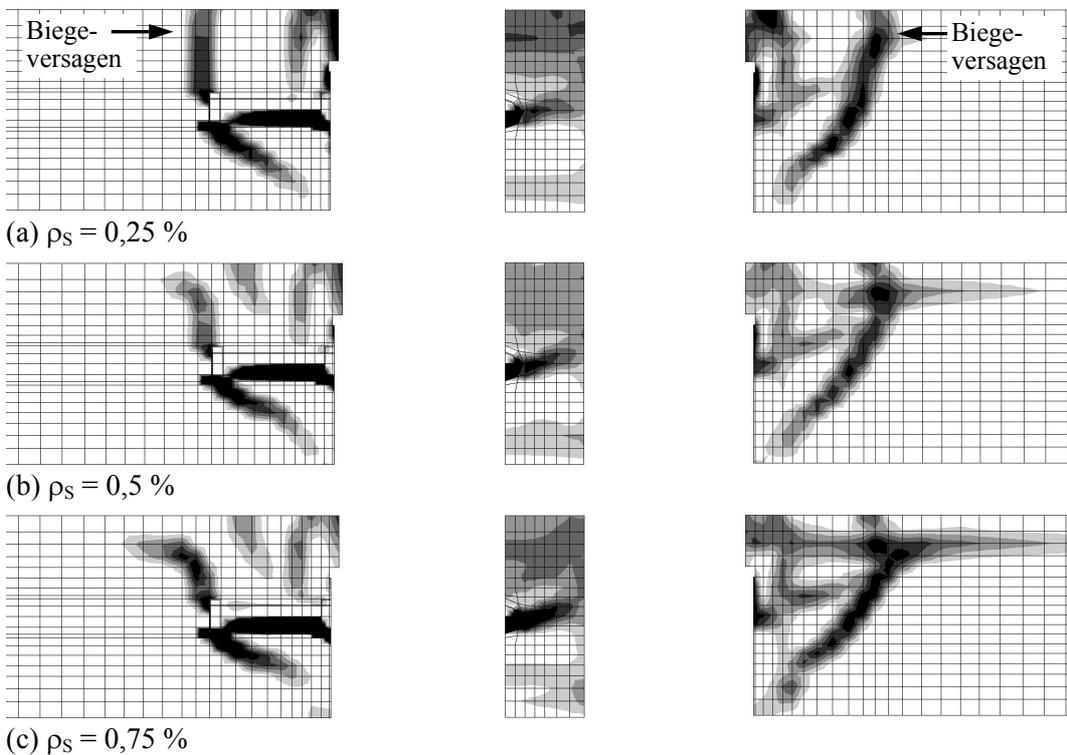


Bed.: $a_{r,o'} = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $a/s = 1$, $a = 160 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, mit WF.

Bild 5-46. Tragfähigkeiten nach FE-Rechnung abhängig vom Grad der Stützbewehrung ρ_s und von der Modellierung der Stützbewehrung

Die Ergebnisse der FE-Berechnungen zeigen einen Einfluß des Bewehrungsgrades der Platte auf die Dübeltragfähigkeit. Auf Grundlage der Reißbilder bei Erreichen der Tragfähigkeit entsprechend Bild

5-47 ist deutlich zu erkennen, daß mit abnehmendem Bewehrungsgrad zunehmend ein Biegeversagen der Platte und weniger ein Versagen der Verbundfuge für die Traglast maßgebend wird, siehe auch Bild 5-24 (b). Damit ist der Grad der Stützbewehrung kein direkter Einflußparameter für die Tragfähigkeit der Verbundfuge selbst sondern für die Biegetragfähigkeit der Stahlbetonplatte.



Hinweis: – $a_{r,o}' = 75 \text{ mm}$, $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10 \text{ mm}$, $d_{Dü} = 22 \text{ mm}$, $h_{Dü} = 125 \text{ mm}$, $a = 160 \text{ mm}$, m. WF., gelenkig
– Skalierung wie in den Bildern 5-24 und 5-26. Die FE-Netze sind unverzerrt dargestellt.

Bild 5-47. Rißbild des FE-Modells bei Erreichen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom Grad der Stützbewehrung

(h) Zusammenfassung

Die numerischen Untersuchungen für eine Mittellage der Verbundfuge unter Annahme einer Kraftübertragung ausschließlich über die Kopfbolzendübel bestätigen im wesentlichen die in Kapitel 4 für eine Randlage der Verbundfuge hergeleiteten Abhängigkeitsbeziehungen der Tragfähigkeit von einzelnen Konstruktionsparametern. Dementsprechend ist der Quotient der Dübeltragfähigkeiten in Mittel- zur Randlage weitgehend konstant. Unter Vernachlässigung der FE-Rechnungen bei denen eindeutig Biegeversagen für die Tragfähigkeit maßgebend wird, ergibt sich dieser Verhältniswert unter Annahme einer gelenkigen Verbindung der Balkenelemente (dünne, biegeschlaffe Mattenbewehrung) im Mittel zu 1,256 bzw. bei einer biegesteifen Verbindung (dicke, biegesteife Stabbewehrung) zu 1,698. Der bei baupraktischen Anwendungen zu erwartende Erhöhungsfaktor für die Dübeltragfähigkeit dürfte je nach Wahl der Bewehrung (z. B. Durchmesser, Stababstand, Matten- oder Stabbewehrung) zwischen diesen beiden Grenzwerten liegen.

5.4.3.3 Querschubabtragung über Kopfbolzen und Stegoberkante

(a) Allgemeines

Gegenüber den numerischen Untersuchungen in Abschnitt 5.4.3.2 wird in diesem Abschnitt neben den *Kopfbolzen* zusätzlich die *Flächenpressung* auf der Stegblechoberkante für die Kraftübertragung aktiviert. Eine Kraftübertragung über *Reibung* wird weiterhin ausgeschlossen.

Die Untersuchungen in Abschnitt 5.4.3.1 (b) haben gezeigt, daß eine zusätzliche Aktivierung der Kontaktpressung neben der Dübeltragwirkung das Trag- und Verformungsverhalten nur gering beeinflußt. Eine nennenswerte Steigerung der Dübeltragfähigkeit durch eine Aktivierung der Kontaktpressung ist nicht zu verzeichnen. Ein direkter Vergleich der entsprechenden Rißbilder, siehe Bilder 5-24 und 5-26, legt den Schluß nahe, daß aufgrund der *Überlagerung der beiden Betonausbruchkörper* infolge Dübeltragwirkung (Kantenbruch) und Kontaktpressung (linienförmiger Durchstanzkörper) die Gesamttragfähigkeit der Verbindung nicht weiter beeinflußt wird. Für die Gesamttragfähigkeit der Verbindung ist schließlich die Tragkomponente über die Kopfbolzendübel maßgebend.

Aufgrund des geringen Einflusses der Flächenpressung auf das Trag- und Verformungsverhalten der Verbundfuge wird an dieser Stelle eine gegenüber Abschnitt 5.4.3.2 (a) reduzierte *Parameterstudie* entsprechend Tabelle 5-13 durchgeführt. Bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen werden den FE-Rechnungen das räumliche Modell gemäß Bild 5-21 unter Berücksichtigung der in Bild 5-20 (b) dargestellten Modifikationen zugrunde gelegt. Die Eingangsgrößen und Ergebnisse der FE-Rechnungen sind ebenfalls in Anhang C dokumentiert.

Tabelle 5-13. Konstruktionsparameter und deren Wertebereich für die numerische Parameterstudie

Konstruktionsparameter		Wertebereich
Wirksamer oberer Randabstand		$a_{r,o}' = 50, 75$ und 100 mm
Betonfestigkeit		$f_c = 20, 30$ und 40 N/mm ²
Bügelanzahl je Dübel		$a/s = 0, 1$ und 2
Stützbewehrung	Grad der Stützbewehrung	$\rho_s = 0,25, 0,5, 0,75, 1$ und $1,5$ %
	Modellierung	gelenkig und biegesteif
Hinweis: – Die fett dargestellten Parameterwerte entsprechen dem Standardkörper dieser numerischen Parameterstudie. – Die Stegdicke beträgt 30 mm. Im FE-Modell erfolgt die Kontaktpressung demzufolge über eine Breite von 15 mm.		

(b) Einfluß einzelner Parameter

Die Bilder 5-48 bis 5-51 zeigen die Tragfähigkeiten je Dübel für eine gelenkige und biegesteife Modellierung der Balkenelemente in Abhängigkeit ausgewählter Konstruktionsparameter.

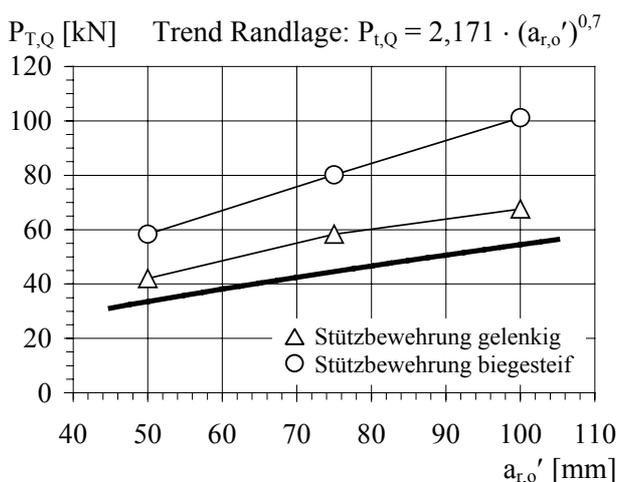


Bild 5-48. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom wirksamen oberen Randabstand $a_{r,o}'$ und von der Modellierung der Stützbewehrung

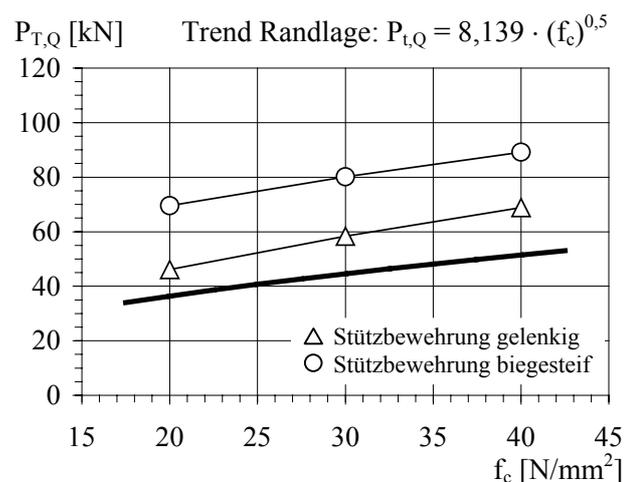
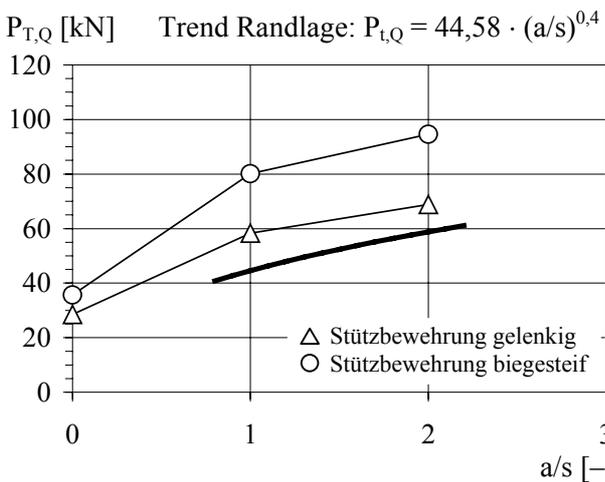
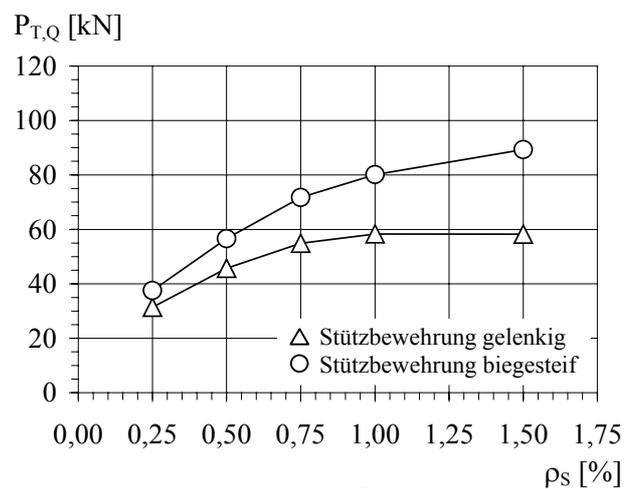


Bild 5-49. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit f_c und von der Modellierung der Stützbewehrung



Bed.: $a_{r,o'} = 75$ mm, $f_c = 30$ N/mm², $a = 160$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, $\rho_s = 1$ %, ohne WF.

Bild 5-50. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit von der Bügelanzahl je Dübel a/s und von der Modellierung der Stützbewehrung



Bed.: $a_{r,o'} = 75$ mm, $f_c = 30$ N/mm², $a = 160$ mm, $d_{Dü} = 22$ mm, $h_{Dü} = 125$ mm, $a/s = 1$, $d_{s,Bü} = d_{s,L} = 10$ mm, ohne WF.

Bild 5-51. Tragfähigkeiten nach FE-Berechnung in Abhängigkeit vom Grad der Stützbewehrung ρ_s und von der Modellierung der Stützbewehrung

Die Diskussion der untersuchten Parameter zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Untersuchungen in Randlage der Verbundfuge. Gegenüber einer gelenkigen Verbindung der Balkenelemente der Stützbewehrung führt eine biegesteife Modellierung zu einer Tragfähigkeitssteigerung von im Mittel 36,0 %, bei einem Minimalwert von 19,7 % und einem Maximalwert von 53,5 %. Das Tragfähigkeitsniveau in Mittellage der Verbundfuge liegt im Vergleich zur Randlage im Mittel um 26,4 % bei einer gelenkigen Verbindung der Balkenelemente bzw. um 78,2 % bei einer biegesteifen Verbindung höher.

5.4.4 Zusammenfassung

Die numerischen Untersuchungen in Mittellage der Verbundfuge bestätigen die in Kapitel 4 für eine Randlage der Verbundfuge beobachtete *Gewichtung einzelner Konstruktionsparameter* auf die Tragfähigkeit. Das Tragfähigkeitsniveau liegt unter alleiniger Berücksichtigung der *Dübeltragwirkung* bei einer gelenkigen Modellierung der Stützbewehrung im Mittel 25,6 % bzw. bei einer biegesteifen Modellierung 69,8 % über der Tragfähigkeit in Randlage. Wird neben der Dübeltragwirkung zusätzlich die *Kontaktpressung* auf der Stegblechoberkante aktiviert, so liegen die o. g. Erhöhungswerte bei 26,4 und 78,2 %. Die Ergebnisse der FE-Berechnungen belegen, daß eine zusätzliche Berücksichtigung der Flächenpressung auf der Stegoberkante einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Tragfähigkeit und das Tragverhalten der Verbundfuge besitzt. Auf Grundlage der numerischen Untersuchungen darf zur Ermittlung der Gesamttragfähigkeit aufgrund der Überlagerung der beiden Betonausbruchkörper keine rechnerische Superposition der Einzeltragfähigkeiten der beiden o. g. Tragkomponenten erfolgen.

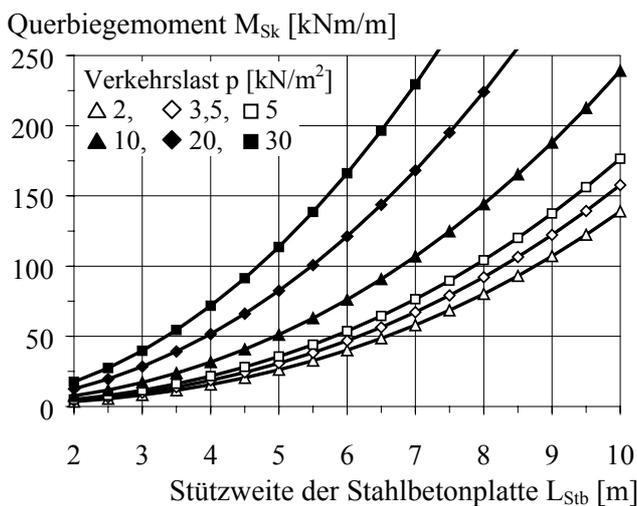
5.5 Weiterführende Parameteruntersuchungen

5.5.1 Einführung

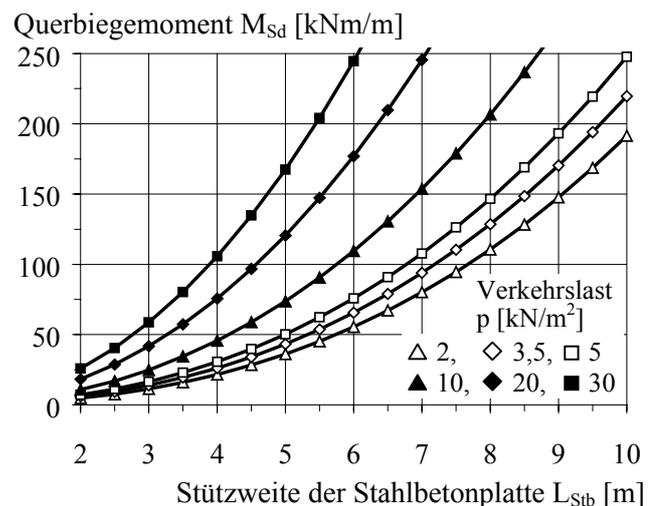
Auf Grundlage der in Abschnitt 2.2.4 durchgeführten Parameterstudie zur Ermittlung der Querschubbeanspruchungen für eine Mittellage der Verbundfuge im Hoch- und Industriebau werden zunächst in Abschnitt 5.5.2 für Durchlaufplatten die zugehörigen elastischen *Querbiegemomente* und anschließend in Abschnitt 5.5.3 die in der Verbundfuge infolge Biegedruck *aktivierten Reibkräfte* ermittelt und mit den Querschubbeanspruchungen verglichen. Die Ergebnisse sollen zeigen, daß innerhalb des untersuchten Parameterbereichs die in der Verbundfuge vorhandene Querschubbeanspruchung i. d. R. allein durch Reibung zwischen den Verbundpartnern übertragen werden kann.

5.5.2 Stützmomente

In Fortsetzung der Parameterstudie nach Abschnitt 2.2.4 lassen sich die linear-elastischen Querbiegemomente M_S nach einfachen baustatischen Regeln ermitteln. Die Ergebnisse sind in den Bildern 5-52 und 5-53 getrennt nach *Zweifeld- und Mehrfeldplatten* sowohl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) als auch der Tragsicherheit (GZT) dargestellt.

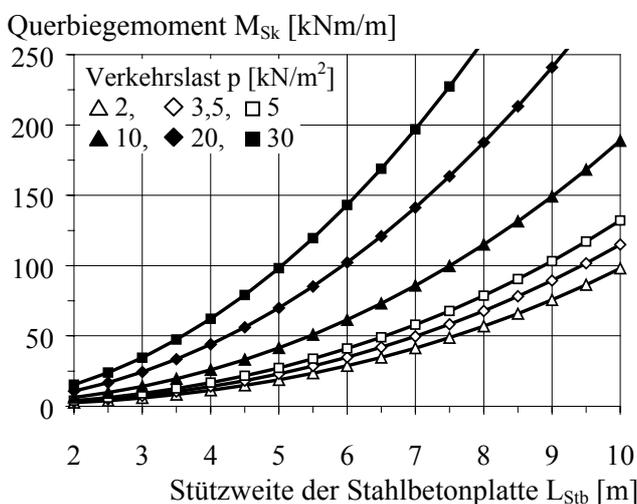


(a) GZG

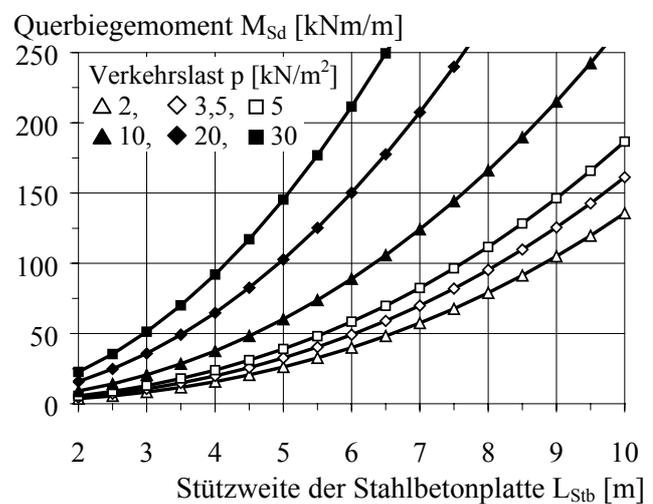


(b) GZT

Bild 5-52. Elastische Querbiegemomente einer Stahlbeton-Zweifeldplatte im GZG und GZT



(a) GZG



(b) GZT

Bild 5-53. Elastische Querbiegemomente einer Stahlbeton-Mehrfeldplatte im GZG und GZT

Für die Ermittlung der Stützmomente von Mehrfeldplatten in Bild 5-53 wurden unendlich viele Felder und eine schachbrettartige Anordnung der Verkehrslast angenommen. Die Schaubilder zeigen mit zunehmender Stützweite der Platte einen überproportionalen Anstieg der Biegemomente über der linienförmigen Stützung. Im Vergleich dazu nehmen entsprechend Abschnitt 2.2.4.1 die Querschubbeanspruchungen mit der Plattenstützweite in etwa linear zu.

5.5.3 Reibkräfte

5.5.3.1 Allgemeines

Die *aktivierte Reibkraft* R_S je laufenden Meter Trägerlänge wird unter Annahme einer Betondeckung c_v von 20 mm und einem Bewehrungsdurchmesser $d_{s,S}$ von 10 mm wie folgt ermittelt:

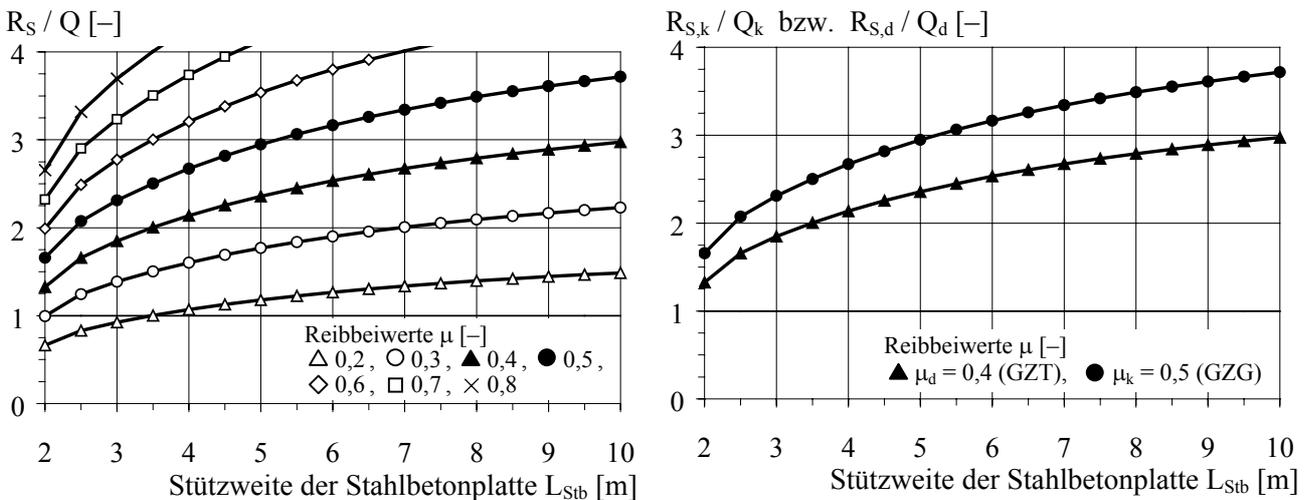
$$R_S = 2 \cdot \mu \cdot M_S / z^{II} \quad \text{mit: } z^{II} \approx 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot (h_c - c_v - d_{s,S} / 2) \quad (5-1)$$

Auf Grundlage vorhandener Untersuchungen in Abschnitt 5.2.2.2 wird im allgemeinen für die Bemessung ein charakteristischer Reibbeiwert μ_k von 0,5 empfohlen. Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_v für Verbundmittel von 1,25 ergibt sich der Bemessungswert μ_d zu 0,4. Der mittlere Reibbeiwert liegt im allgemeinen in einem Bereich von 0,6 bis 0,8.

In den folgenden Abschnitten ist der *Quotient aus aktivierten Reibkräften R_S und einwirkenden Querschubkräften Q* entsprechend Abschnitt 2.2.4.1 in Abhängigkeit von der Plattenstützweite L_{Stb} dargestellt. Ein Verhältniswert größer eins bedeutet, daß die vorhandenen Querschubbeanspruchungen allein über Reibung unterhalb der Gleitgrenze abgetragen werden. Bei Werten kleiner eins wird ein Teil des Querschubs entsprechend dem Quotientenwert über Reibung abgetragen. Der verbleibende Kraftanteil ($\Delta Q = Q - R_S$) muß über andere Tragmechanismen abgetragen werden. Das allgemeine Trag- und Verformungsverhalten von reinen Reibverbindungen und von Verbindungen mit mehreren Tragkomponenten einschließlich Reibung wird ausführlich in Abschnitt 5.2 beschrieben.

5.5.3.2 Zweifeldplatten

Das Bild 5-54 zeigt für Zweifeldplatten den Quotienten aus den Reibungskräften und den einwirkenden Querschubbeanspruchungen in Abhängigkeit von der Plattenstützweite.



(a) Reibbeiwerte von 0,2 bis 0,8

(b) Reibbeiwerte $\mu_k = 0,5$ (GZG) bzw. $\mu_d = 0,4$ (GZT)

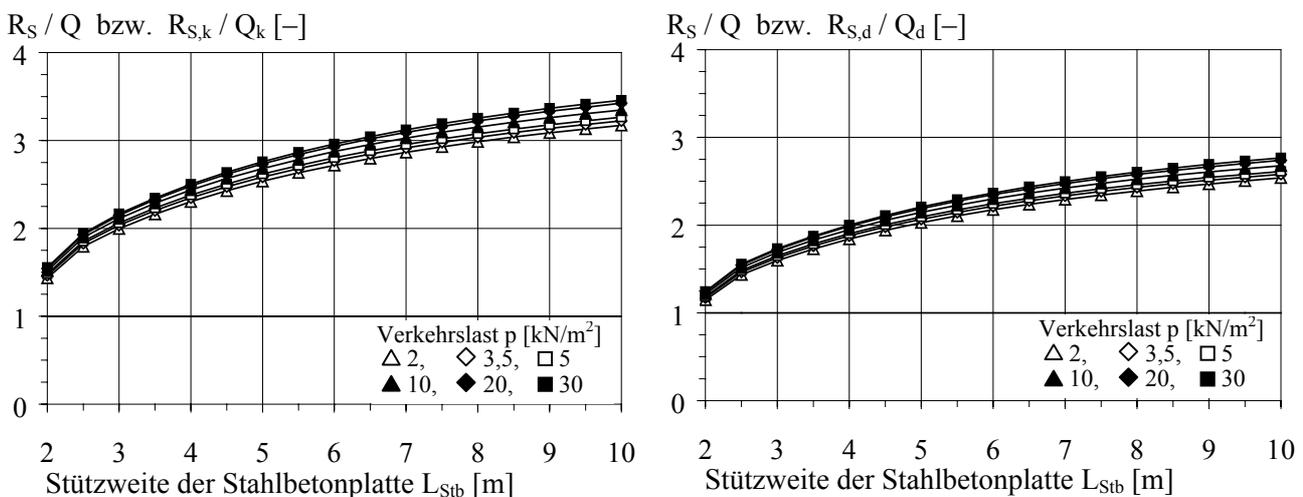
Bild 5-54. Verhältnis der aktivierbaren Reibkraft zur Querschubbeanspruchung in Abhängigkeit von der Stützweite der Zweifeldplatte und vom Reibbeiwert

Während Bild 5-54 (a) das gesamte Spektrum möglicher Reibbeiwerte μ zwischen Stahl und Beton entsprechend Tabelle 5-1 von 0,2 bis 0,8 in 0,1-Schritten abdeckt, werden in Bild 5-54 (b) zur besseren Übersicht ausschließlich die beiden Kurven für Reibbeiwerte von 0,4 bzw. 0,5 entsprechend den Werten für den Grenzzustand der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit aufgezeigt.

Die Abbildungen in Bild 5-54 zeigen, daß mit zunehmender Plattenstützweite und ansteigendem Reibbeiwert der Quotient R_S / Q anwächst. Der Quotient ist letztlich unabhängig vom Niveau der angesetzten Flächenlast q , da Zähler R_S und Nenner Q jeweils linear abhängig von der Flächenlast q_d bzw. q_k sind und sich diese bei der Quotientenbildung herauskürzt. Nur aufgrund des geringeren ansetzbaren Reibbeiwertes μ liefert der Quotient R_S / Q für den Grenzzustand der Tragsicherheit ($\mu_d = 0,4$) gegenüber der Gebrauchstauglichkeit ($\mu_k = 0,5$) etwas reduzierte Werte. Die Ergebnisse belegen, daß innerhalb der getroffenen Annahmen bei Zweifeldplatten die Querschubbeanspruchungen der Verbundfuge ausschließlich über Reibung abgetragen werden kann.

5.5.3.3 Mehrfeldplatten

Im Gegensatz zu Zweifeldplatten wird bei unendlichen Durchlaufplatten zur Ermittlung der maximalen Querschubbeanspruchungen und der maximalen Stützmente die Verkehrslast feldweise schachbrettartig angeordnet. Dementsprechend ist der Quotient R_S / Q nicht mehr völlig unabhängig von der einwirkenden Verkehrslast, siehe Abschnitt 5.5.3.2. In Bild 5-55 ist die Entwicklung des Quotientenwertes für ausgewählte Reibbeiwerte von 0,4 und 0,5 in Abhängigkeit von der Plattenstützweite und der Höhe der angesetzten Verkehrslast dargestellt.



(a) Reibbeiwert $\mu = \mu_k = 0,5$ (GZG)

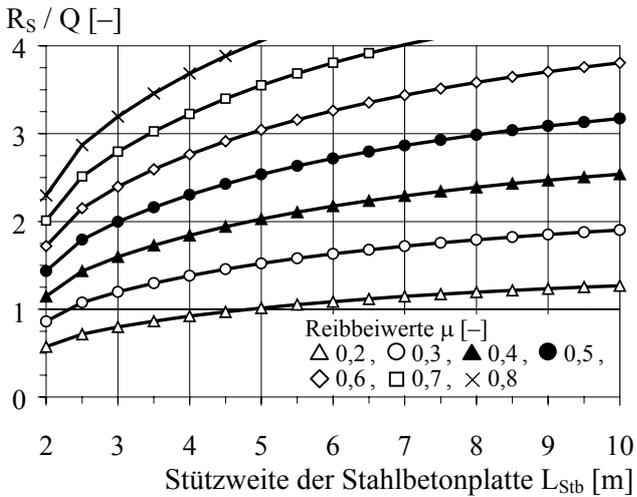
(b) Reibbeiwert $\mu = \mu_d = 0,4$ (GZT)

Bild 5-55. Verhältnis der aktivierbaren Reibkraft zur Querschubbeanspruchung in Abhängigkeit vom Reibbeiwert, von der Stützweite der Mehrfeldplatte und von der Verkehrslast

Der Verlauf des Verhältniswertes ist für konstante Verkehrslasten in etwa affin zu den Beobachtungen für Zweifeldplatten. Die Kurven zeigen für eine Verkehrslast p von 2 kN/m^2 die jeweils kleinsten Quotientenwerte. Dabei liegen auch hier alle Verhältniswerte über 1,0.

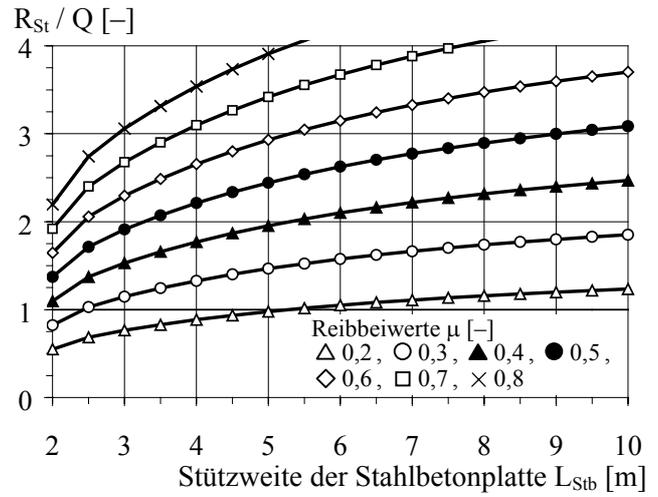
Zur Beurteilung des Einflusses des Reibbeiwertes auf den Quotientenwert R_S / Q wird die Verkehrslast ungünstig zu 2 kN/m^2 angenommen und in Bild 5-56 (a) in Abhängigkeit von der Plattenstützweite und des Reibbeiwertes dargestellt. Darüber hinaus wird in Bild 5-56 (b) die Verkehrslast nicht mehr wie in den Bildern 5-55 und 5-56 (a) angenommen schachbrettartig sondern vollflächig verteilt gewählt. Für den Fall einer vollflächigen Verteilung der Verkehrslast kürzt sich der Einfluß des Verkehrslastniveaus – wie auch für Zweifeldträger – heraus und führt gegenüber einer schach-

brettartig verteilten Verkehrslast zu geringfügig ungünstigeren Verhältniswerten. Der qualitative Kurvenverlauf bleibt identisch und auch hier liegen die Werte für übliche Reibzahlen im GZG und GZT deutlich über eins.



Hinweis:
Das Bild zeigt mit $p = 2 \text{ kN/m}^2$ den ungünstigsten Fall.

(a) Verkehrslast schwachbrettartig verteilt



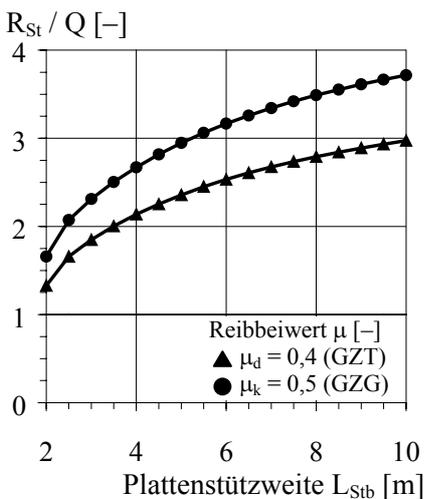
Hinweis:
Das Bild ist für alle Verkehrsflächenlasten konstant.

(b) Verkehrslast vollflächig verteilt

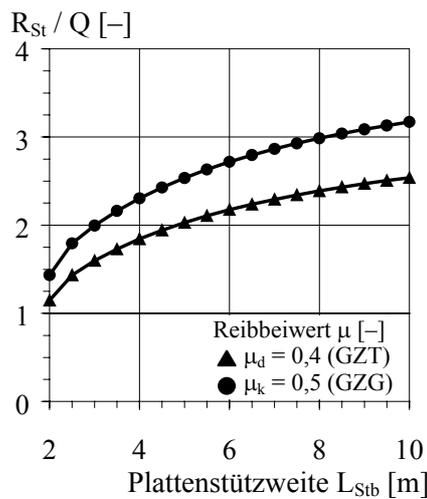
Bild 5-56. Verhältnis der aktivierbaren Reibkraft zu Querschubbeanspruchung in Abhängigkeit von der Verteilung der Verkehrslast, von der Stützweite der Mehrfeldplatte und vom Reibbeiwert

5.5.3.4 Diskussion

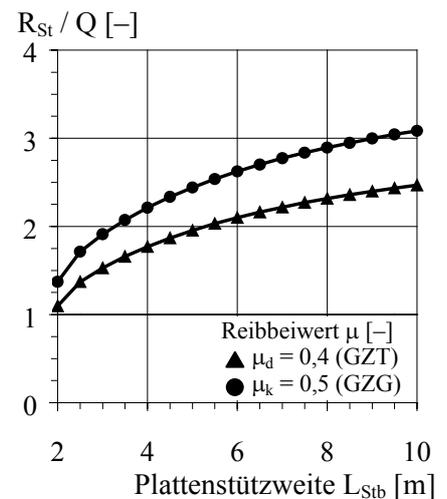
In Bild 5-57 sind die Ergebnisse dieser weiterführenden Parameterstudie in Abhängigkeit vom statischen System der Platte für im GZG und GZT übliche Reibbeiwerte zusammengefaßt. Für die Bemessung ist der Grenzzustand der Tragsicherheit maßgebend. Für den untersuchten Parameterbereich liegen alle Quotientenwerte deutlich über eins, d. h. die einwirkende Querschubbeanspruchung kann vollständig über *Reibung unterhalb der Gleitgrenze* abgetragen werden.



(a) Zweifeldplatte



(b) Mehrfeldplatte,
Verkehrslast schwachbrettartig



(c) Mehrfeldplatte,
Verkehrslast vollflächig

Bild 5-57. Verhältnis der aktivierbaren Reibkraft zu Querschubbeanspruchung in Abhängigkeit vom statischen System der Platte, von der Plattenstützweite und vom Reibbeiwert

Den gezeigten Untersuchungen liegen linear-elastisch ermittelte Querbiegemomente zugrunde. Werden entsprechend DIN 1045-1 [1.13], Abschn. 8.3 unter Anwendung von normal- bzw. hochduktilen Betonstahl bis zu 15 bzw. 30 % der linear-elastisch ermittelten Stützmomente ins Feld umgelagert, so verringert sich der Quotientenwert entsprechend um bis zu ungefähr 0,15 bzw. 0,3. Infolgedessen reduzieren sich proportional zum Querbiegemoment auch die aktivierten Reibkräfte und außerdem können die Querschubbeanspruchungen u. U. etwas zunehmen. Für diesen Fall sollten die Auswirkungen auf die Beanspruchungen in der Verbundfuge berücksichtigt werden. In der Bemessungspraxis dürften im Regelfall besonders bei kleinen Plattenstützweiten keine nennenswerten *Momentenumlagerungen* zu erwarten sein. Dagegen dürfen zeitabhängige Momentenumlagerungen aus Kriechen und Schwinden des Betons nicht vernachlässigt werden.

Das *Schwinden des Betons* kann – ebenso wie *Temperatureinwirkungen* – auch zu einer Verkürzung der Stahlbetonplatte in Trägerquerrichtung und damit zu ungewollten Schwindrissen entlang der Stahlträger (z. B. oberhalb oder seitlich des Stegbleches) führen. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Zapfe [2.16], Abschn. 7.2.2 und von Däuwel [2.5], Abschn. 5.3.7 darf i. allg. davon ausgegangen werden, daß trotz ungünstiger Schwindrißbildung ein Form- und Kraftschluß in der Biegedruckzone der Platte infolge Querbiegung zumindest aus ständig wirkenden Lasten aufgebaut werden kann. Die zum Form- und Kraftschluß erforderliche Rotation in Trägerquerrichtung wird durch eine reduzierte Biegesteifigkeit infolge Rißbildung an der Plattenoberseite weiter begünstigt, so daß die rechnerische Reibtragfähigkeit der Verbundfuge voll aktiviert werden kann. Die in den Untersuchungen von Zapfe [2.16] und Däuwel [2.5] berücksichtigte ungünstige Schwindrißbildung wird im Falle von horizontal liegenden Kopfbolzen aufgrund der Rückverankerung der Stahlträger in der Stahlbetonplatte über den Dübelkopf erst gar nicht unmittelbar am Träger auftreten.

Die durchgeführten Untersuchungen decken vorrangig den Parameterbereich im Hoch- und Industriebau mit flächigen Verkehrslasten p_k zwischen 2 und 30 kN/m² ab, siehe Abschnitt 2.2.2. Die Ergebnisse dieser Parameterstudie lassen sich – zumindest im Hinblick auf die flächig verteilten Verkehrslasten – grundsätzlich auch auf den *Brückenbau* übertragen. Unter Einbeziehung der experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 5.3 kann bei Straßenbrücken davon ausgegangen werden, daß die Querschubbeanspruchungen infolge flächig verteilter Verkehrslasten und infolge Radlasten, die einen Abstand zum Stegblech aufweisen, aufgrund der resultierenden Stützmomente allein über Reibung in den Trägersteg übertragen werden. Für eine Radlaststellung mit vernachlässigbarem Abstand zum Trägersteg erfolgt die Übertragung der Querschubkräfte in der Verbundfuge aufgrund des geringen Hebelarms nicht mehr über Reibung sondern über die Dübel. Für diesen Fall nahezu zentrischer Krafteinleitung wird das Tragvermögen der Verbundfuge durch die Tragfähigkeit stehender Kopfbolzen begrenzt, da ein Betonkantenbruch durch eine direkte Auflast verhindert wird. Darüber hinaus sind im Vergleich zu den Versuchen sogar noch weitere Tragreserven infolge Reibung aus gleichzeitig wirkenden ständigen Lasten zu erwarten. Im Falle von Eisenbahnbrücken sind die zeitlich veränderlichen Beanspruchungen in der Verbundfuge und damit auch die aktivierten Reibkräfte durch die definierte Gleisanordnung in Brückenquerrichtung eindeutig bestimmt.

5.5.4 Zusammenfassung

Diese Parameteruntersuchung bestätigt, daß innerhalb der getroffenen Annahmen die einwirkenden Querschubbeanspruchungen im Regelfall allein über Reibung in der Verbundfuge übertragen werden können. Nur in Sonderfällen bei sehr geringen Plattenstützweiten und Momentenumlagerungen sind Fälle denkbar, bei denen ein Teil der sowieso geringen Querschubbeanspruchung über andere Tragmechanismen in der Verbundfuge wie z. B. über die Kopfbolzendübel übertragen werden muß.

5.6 Ergebnisse

5.6.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt faßt die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Untersuchungen zusammen. Neben der Beschreibung des *Tragverhaltens* werden sowohl Gleichungen zur Bestimmung der rechnerischen *Tragfähigkeit* und *Bemessungstragfähigkeit* von Verbundfugen mit liegenden Kopfbolzen unter Querschub in Mittellage der Verbundfuge als auch *konstruktive Hinweise* zur Detailausbildung der Stahlbetonplatte im auflagnahen Bereich aufgeführt.

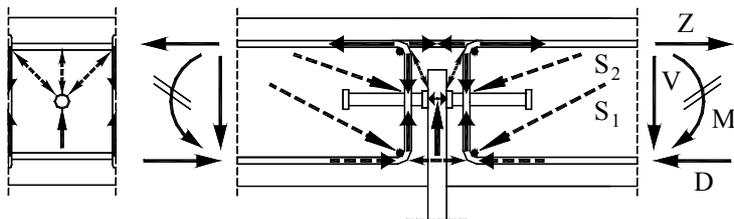
5.6.2 Tragverhalten

Unter praxisüblichen Randbedingungen ergeben sich für die Kraftübertragung entsprechend Bild 5-1 insgesamt drei mögliche Mechanismen: über die *Kopfbolzen* selbst, über *Reibung* infolge Biegedruck und über *Kontaktpressung* infolge Plattenlagerung auf der Stegoberkante. Die experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen, daß eine zusätzliche Plattenlagerung auf der Stegoberkante weder zu einer Tragfähigkeitsteigerung der Verbundfuge noch zu einer nennenswerten Beeinflussung des Ribbildes führt. Wegen der Überlagerung der beiden Betonausbruchkörper infolge **Kontaktpressung** und Dübeltragwirkung entsprechend Bild 5-1 sollte der Einfluß des Spitzen-drucks auf die Gesamttragfähigkeit vernachlässigt werden. Die Kontaktpressung wird im Rahmen des Bemessungsvorschlags nicht weiter berücksichtigt.

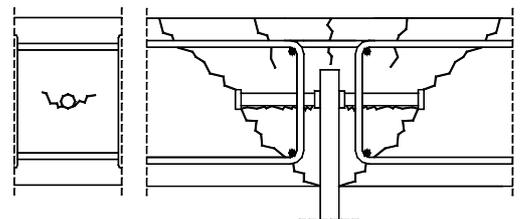
Darüber hinaus konnte gezeigt werden, daß das Trag- und Verformungsverhalten vorrangig durch die Dübel selbst, aber besonders durch die Aktivierung von Reibung beeinflusst wird. Im folgenden wird das Tragverhalten zunächst getrennt für beide Tragwirkungen beschrieben, siehe Bilder 5-58 und 5-59. In Wirklichkeit liegt besonders mit zunehmenden Relativverschiebungen in der Verbundfuge eine Überlagerung beider Tragwirkungen vor. Das Bild 5-58 zeigt zunächst unter Annahme einer reinen **Dübeltragwirkung** den Kraftfluß und die Ribbildung nahe der Verbundfuge anhand eines einfachen Modells und die Verifikation durch die numerischen Untersuchungen.

(a) Modell

Kraftfluß

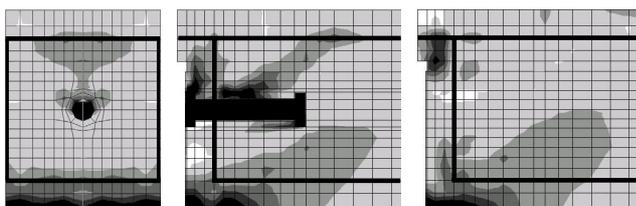


Rißbildung

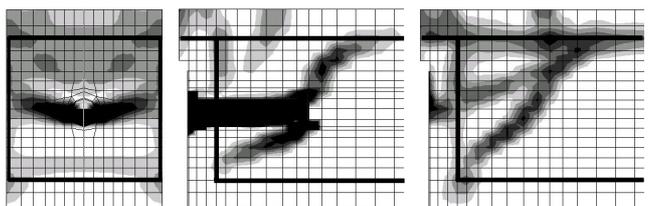


(b) Verifikation durch FE-Rechnungen

Hauptspannungen σ_{33}



Rißbildung entsprechend Hauptdehnungen ϵ_{11}



Hinweis: Bildfolge der FE-Ergebnisse von links nach rechts: Schnitt parallel zur Plattenstirnseite durch Bewehrung, Schnitt senkrecht zur Plattenstirnseite durch Kopfbolzen und Schnitt senkrecht zur Plattenstirnseite durch Bügelbewehrung.

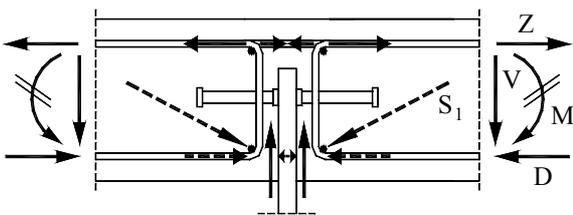
Bild 5-58. Tragverhalten von liegenden Kopfbolzen in Mittellage unter Querschub unter alleiniger Berücksichtigung der Dübeltragwirkung

Wird eine Kraftübertragung zwischen den Verbundpartnern ausschließlich über die Kopfbolzen zugrunde gelegt, so weist das in Mittellage der Verbundfuge beobachtete Tragverhalten eine starke Analogie zur Lage am Plattenrand auf, vgl. Bilder 4-75 und 5-58. Das Tragverhalten der reinen Dübelverbindung ist bereits ausführlich in Abschnitt 4.6.2 beschrieben und wird hier nicht weiter erläutert. Darüber hinaus beeinflusst die Durchlaufwirkung vorrangig den Beanspruchungszustand der Platte quer zum Stahlträger und führt trotz Ausschaltung von Reibeffekten im Vergleich zur Randlage der Verbundfuge zu durchaus nennenswerten Steigerungen der Dübeltragfähigkeiten, da die Druckstrebe S_1 im Bereich der Biegedruckzone der Platte zu liegen kommt und sich dadurch etwas günstiger in die Bügelecken abstützen kann, vgl. Abschnitte 4.6.2 und 5.4.3.2 (h). Die gedankliche Zerlegung des Querbiegemomentes in ein horizontales Kräftepaar erklärt die Entstehung von Biegezugrissen auf der Plattenoberseite parallel zum Stahlträger. Der Biegedruck schließt sich über Druckkontakt durch das Stegblech hindurch kurz.

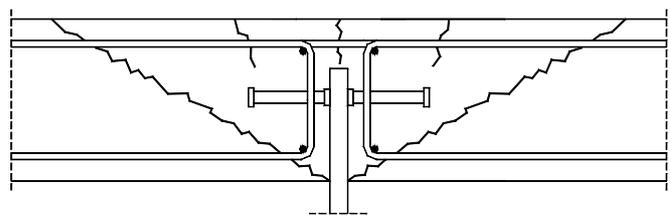
Im weiteren wird das Tragverhalten der Verbundfuge unter Berücksichtigung der **Reibtragwirkung** beschrieben. Analog zur Beschreibung der reinen Dübeltragwirkung wird in Bild 5-59 zunächst ein einfaches Modell zur Beschreibung des Kraftflusses und der Rißbildung bis vor Erreichen der Gleitgrenze vorgestellt und anschließend durch Versuchsbeobachtungen verifiziert.

(a) Modell

Kraftfluß



Rißbildung



(b) Verifikation durch Versuche

Rißbildung bei Tragfähigkeit

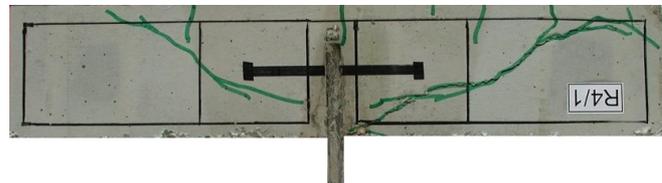


Bild 5-59. Tragverhalten von liegenden Kopfbolzen in Mittellage unter Querschub unter alleiniger Berücksichtigung der Tragwirkung durch Reibung infolge Biegedruck

Falls der Verbundquerschnitt wie in Bild 5-1 infolge Durchlaufwirkung der Platte mehrere Möglichkeiten zur Kraftübertragung bietet, so folgt der Kraftfluß bevorzugt den steiferen Lastpfaden. Ein Vergleich des Trag- und Verformungsverhaltens von kombinierten Reib- und Bolzenverbindungen legt den Schluß nahe, daß sich eine reine Reibverbindung entsprechend Bild 5-2 bis zum Erreichen der Gleitgrenze eindeutig steifer verhält als eine reine Dübelverbindung. Demzufolge wird *bis zum Erreichen der Gleitgrenze* der größte Teil der Querschubbeanspruchung über Reibung und nicht über die Dübel zwischen den Verbundpartnern übertragen. Ist die infolge Biegedruck aktivierbare Reibkraft größer als die einwirkende Querschubkraft, so erfolgt die Kraftübertragung wie in Bild 5-59 gezeigt im Bereich der Biegedruckzone der Platte. Die Dübel entziehen sich zunächst ihrer Mitwirkung und werden theoretisch erst nach Erreichen der Gleitgrenze entsprechend den Bildern 5-3 (b) und 5-4 (b) zusätzlich aktiviert.

Im Hinblick auf das Trag- und Verformungsverhalten der Verbindung *nach Erreichen der Gleitgrenze* liegen noch keine experimentell oder numerisch abgesicherten Ergebnisse vor. Auf Grundlage der in der Literatur vorhandenen Untersuchungen zu Reibungsverbund und Kopfbolzen in Verbundstützen mit kammerbetonierten Walzprofilen kann entsprechend den Bildern 5-3 (b) und 5-4 (b)

eine gewisse Überlagerung der beiden Tragkomponenten in Verbindung mit weiteren Steigerungen der Tragfähigkeit erwartet werden.

Im Gegensatz zu den Konstruktionsbeispielen mit Reibungsverbund und Kopfbolzen in Verbundstützen aus kammerbetonierten Walzprofilen, siehe Abschnitte 5.2.3.2 und 5.2.3.3, ist in Verbundquerschnitten mit liegenden Kopfbolzendübeln die maximal *aktivierbare Reibkraft*, die sog. Reiblast, nicht ein von vornherein konstanter Kraftwert. Vielmehr hängt in realen Bauteilen – ähnlich wie in den Versuchen – das auftretende Stützmoment und damit die aktivierbare Reibkraft i. d. R. direkt mit der Höhe der einwirkenden Querschubbeanspruchung zusammen. Unter Berücksichtigung einiger Vereinfachungen besteht in realen Bauteilen eine in etwa lineare Proportionalitätsbeziehung zwischen der Höhe des Stützmoments und dem Wert der Querschubbeanspruchung.

Wie die weiterführenden Parameterstudien in Abschnitt 5.5.3 gezeigt haben, liegen die Randbedingungen und *Beanspruchungsverhältnisse in realen Bauteilen* so vor, daß in fast allen denkbaren Fällen die Querschubbeanspruchungen auch unter Berücksichtigung des Sicherheitskonzeptes kleiner sind als die infolge Biegedruck aktivierten Reibkräfte. Dementsprechend können die vertikalen Auflagerkräfte der Platte in der Praxis fast ausschließlich über Reibung unterhalb der Gleitgrenze in die Stahlträger übertragen werden. Eine rechnerische Berücksichtigung der Dübeltragfähigkeiten wird demnach erst gar nicht erforderlich.

Treten im Gegensatz zu den Annahmen der weiterführenden Parameterstudien gemäß Abschnitt 5.5 *große Einzellasten* wie z. B. im Brückenbau auf, so werden die daraus resultierenden Querschubbeanspruchungen wie in den Versuchen i. allg. über Reibung übertragen, vgl. Abschnitt 5.5.3.4. Mit abnehmendem Abstand der Einzellast zum Trägersteg nimmt die Reibtragfähigkeit jedoch zusehends ab. Im Grenzfall nahezu zentrischer Krafteinleitung entsprechend Abschnitt 5.3.3.3 (c) und 5.3.3.4 (c) erreichen die Tragfähigkeiten der liegenden Kopfbolzen die Werte stehender Dübel, da der Betonkantenbruch durch eine direkte Auflast verhindert wird. In solchen Fällen sind bei baupraktischen Anwendungen im Vergleich zu den Versuchen noch weitere Tragreserven infolge Reibung aus gleichzeitig wirkenden ständigen Flächenlasten und eventuell aus Kontaktpressung auf der Stegoberkante zu erwarten.

Darüber hinaus bestätigen auch die Versuche, daß selbst bei ungünstig gewählten Einwirkungsverhältnissen M/V von Stützmoment zu Querkraft die Reibverbindung bereits so leistungsfähig ist, daß ein *Versagen der Stahlbetonplatte* und nicht der Verbundfuge maßgebend wird.

5.6.3 Tragfähigkeit

Die Gesamttragfähigkeit von liegenden Kopfbolzen unter Querschub in Mittellage der Verbundfuge resultiert im wesentlichen aus zwei Traganteilen. Für beide Traganteile werden im folgenden zur Ermittlung der rechnerischen Tragfähigkeit jeweils eine Bestimmungsgleichung angegeben.

Aufbauend auf die Tragfähigkeitsbeziehung in Randlage der Verbundfuge entsprechend Gl. (4-21) und unter Einbeziehung der numerischen Untersuchungen entsprechend Abschnitt 5.4 ergibt sich für die **rechnerische Dübeltragfähigkeit** in Mittellage folgende Bestimmungsgleichung:

$$P_{t,Q} = 6,945 \cdot (f_c \cdot d_{s,L})^{0,5} \cdot (d_{Dü} \cdot a/s)^{0,4} \cdot (d_{s,Bü})^{0,3} \cdot (h_{Dü})^{0,2} \cdot (a_{r,o}')^{0,7} \cdot A_{t,Q} \cdot B_Q \quad (5-2)$$

Dabei sind:

$P_{t,Q}$ Querschubtragfähigkeit bei Betonkantenbruch [N]

$A_{t,Q}$ Lagefaktor; = 1 bei Randlage; = 1,25 bei Mittellage

B_Q Faktor für die Beanspruchung der Stahlbetonplatte; = 1 Längsdruck; = 0,8 Längszug

Die Bezeichnungen werden in Abschnitt 4.6.3 und in Bild 3-1 näher definiert. Die Erhöhung der Dübeltragfähigkeit von 25 % bei Anordnung der Bolzen in Mittel- statt in Randlage, vgl. Lagefaktor $A_{t,Q}$, ergibt sich aus umfangreichen numerischen Untersuchungen und stellt eine konservative Abschätzung dar, siehe Abschnitt 5.4.3.2 (h). Je nachdem ob bei der Modellierung der Stützbewehrung eine gelenkige Verbindung der Balkenelemente (dünne, biegeschlaffe Mattenbewehrung) oder biegesteife Verbindung (dicke, biegesteife Stabbewehrung) angenommen wird, ergibt sich als mittlerer Erhöhungsfaktor 1,256 bzw. 1,698. Der bei baupraktischen Anwendungen zu erwartende Erhöhungsfaktor dürfte je nach Wahl der Bewehrung (z. B. Durchmesser, Stababstand, Matten- oder Stabbewehrung) zwischen diesen beiden Grenzwerten liegen.

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen und weiterführenden Parameteruntersuchungen entsprechend den Abschnitten 5.3 und 5.5 wird für die **rechnerische Reibtragfähigkeit** aus Klemmwirkung infolge Querbiegung je Bemessungsschnitt und laufenden Meter Trägerlänge in Übereinstimmung mit den Bildern 5-60 und 5-61 folgende Beziehung angegeben:

$$R_{t,Q} = \mu \cdot M_S / z^{II} \quad (5-3)$$

Dabei sind:

$R_{t,Q}$	Reibtragfähigkeit aus Klemmwirkung infolge Querbiegung je Bemessungsschnitt [kN/m]
μ	Mittlerer Reibbeiwert entsprechend Tabelle 5-1 [-]
M_S	Querbiegemoment [kNm/m]; M_S zugehörig zur Querkraft V auf der Beanspruchungsseite
z^{II}	Innerer Hebelarm im Zustand II [m]; aus Biegebemessung oder vereinfacht: $z^{II} \approx 0,9 \cdot d$

Obwohl bei vergleichbaren Verbindungen entsprechend Abschnitt 5.2.3.2 und 5.2.3.3 eine *lineare Superposition der beiden Traganteile* aus Dübel- und Reibtragwirkung grundsätzlich in Rechnung gestellt werden kann, wird im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des hohen Tragfähigkeitsvermögens der beiden Einzelkomponenten auf eine Addition der beiden Tragfähigkeiten auf sicherer Seite verzichtet. Nach Meinung des Verfassers ist eine lineare Superposition der beiden Tragfähigkeiten aber grundsätzlich möglich und durchaus realistisch, da der zur Aktivierung der Reibkräfte in der Kontaktfläche erforderliche Biegedruck durch Tragmechanismen wie Kornverzahnung, Rißreibung und Dübelwirkung der Bewehrung auch über die überdrückte Rißfläche des Ausbruchkörpers aus Dübeltragwirkung hinweg transportiert werden kann, siehe Bilder 5-58 und 5-59.

5.6.4 Bemessungsvorschlag

Aufbauend auf Abschnitt 5.6.3 wird für den Nachweis der Verbundsicherung für beide Tragkomponenten jeweils eine Bemessungsgleichung vorgestellt. Die beiden Traganteile sollten bei der Nachweisführung auf sicherer Seite nur alternativ berücksichtigt – also nicht superponiert – werden.

In Übereinstimmung mit dem Bemessungswert der Querschubtragfähigkeit in Randlage der Verbundfuge entsprechend Gl. (4-48) und der rechnerischen Dübeltragfähigkeit in Mittellage entsprechend Gl. (5-2) wird für die **Bemessungstragfähigkeit je Dübel** folgende Gleichung vorgeschlagen:

$$P_{Rd,Q} = 6 \cdot (f_{ck} \cdot d_{s,L})^{0,5} \cdot (d_{Dü} \cdot a/s)^{0,4} \cdot (d_{s,Bü})^{0,3} \cdot (h_{Dü})^{0,2} \cdot (a_{r,o}')^{0,7} \cdot A_Q \cdot B_Q / \gamma_v \quad (5-4)$$

Dabei sind:

$P_{Rd,Q}$	Bemessungswert der Querschubtragfähigkeit bei Betonkantenbruch [N]
A_Q	Lagefaktor; = 1 bei Randlage; = 1,14 bei Mittellage
B_Q	Faktor für die Beanspruchung der Stahlbetonplatte; = 1 Längsdruck; = 0,8 Längszug
γ_v	Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite für Verbundmittel; = 1,25

Analog zu Abschnitt 4.6.4 ergibt sich ein vereinfachter Bemessungsvorschlag wie folgt:

$$P_{Rd,Q} = 12 \cdot (f_{ck} \cdot d_{s,L})^{0,5} \cdot (d_{Dü} \cdot a/s)^{0,4} \cdot (d_{s,Bü})^{0,3} \cdot (a_{r,o'})^{0,7} \cdot A_Q / \gamma_v \quad (5-5)$$

Die Bezeichnungen werden im einzelnen in Abschnitt 4.6.4 näher definiert. Für die Gültigkeit dieser Bestimmungsgleichung sind die dort angegebenen Randbedingungen einzuhalten.

Der vorgeschlagene Lagefaktor von 1,14 bei Mittellage der Verbundfuge ist aus Vereinfachungsgründen von der Bestimmungsgleichung für die Spalttragfähigkeit infolge Längsschub entsprechend den Gl. (3-6) und (3-7) abgeleitet und liegt gegenüber dem o. g. Faktor von 1,25 um weitere 10 % auf der sicheren Seite.

Zur *ingenieurmäßigen Abschätzung eines unteren Grenzwerts der Dübeltragfähigkeit* kann auch ein vereinfachter Modellansatz in Anlehnung an Abschnitt 4.5.2 angewandt werden, vgl. Abschn. 4.6.4.

Aufbauend auf Gleichung (5-3) wird für den **Bemessungswert der Reibtragfähigkeit** aus Klemmwirkung infolge Querbiegung je Bemessungsschnitt und laufenden Meter Trägerlänge in Übereinstimmung mit den Bildern 5-60 und 5-61 folgende Beziehung angegeben:

$$R_{Rd,Q} = (\mu_k \cdot M_{Sd}) / (z^{II} \cdot \gamma_v) \quad (5-6)$$

Dabei sind:

$R_{Rd,Q}$	Bemessungswert der Reibtragfähigkeit infolge Querbiegung je Bemessungsschnitt [kN/m]
μ_k	Charakteristischer Reibbeiwert entsprechend Tabelle 5-1 [-]
M_{Sd}	Bemessungswert des Querbiegemoments [kNm/m]; M_{Sd} zugehörig zur Querkraft V_{Sd}
z^{II}	Innerer Hebelarm im Zustand II [m]; aus Biegebemessung oder vereinfacht: $z^{II} \approx 0,9 \cdot d$
γ_v	Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite für Verbundmittel; = 1,25

Es bleibt festzuhalten, daß sich die für die Reibtragfähigkeit angegebenen Beziehungen gemäß Gl. (5-3) und (5-6) auf einen *Bemessungsschnitt* bzw. auf eine Stegblechseite je laufenden Meter Trägerlänge beziehen, siehe Bilder 5-60 und 5-61. Demzufolge ist dieser Wert bei der *Nachweisführung* direkt mit dem zum Querbiegemoment zugehörigen oder auf sicherer Seite mit dem maximalen Wert der Querkraft neben dem Auflager zu vergleichen. Vereinfacht kann auch überschlägig der doppelte Wert der Reibtragfähigkeit mit der Plattenauflegerkraft, die aus der betragsmäßigen Addition der beiden Querkräfte links und rechts neben dem Auflager resultiert, verglichen werden.

Aus Vereinfachungsgründen kann der *innere Hebelarm* z^{II} auf sicherer Seite auch mit der statischen Nutzhöhe d angenommen werden. Der Einfluß von *Momentenumlagerungen* in Trägerquerrichtung vom Stütz- in den Feldbereich sind entsprechend aktuellen Regelwerken zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 5.5.3.4. Zur konservativen Abschätzung der Reibtragfähigkeit können für die Ermittlung des *Querbiegemoments* auch nur die ständig wirkenden Einwirkungen zugrunde gelegt werden.

In Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Zapfe [2.16] und von Däuwel [2.5] darf davon ausgegangen werden, daß das *Schwinden des Betons* in Trägerquerrichtung unter Annahme einer konstanten Querbiegung im allgemeinen keinen negativen Einfluß auf die Verbundkräfte infolge Reibung aus Querbiegedruck hat, siehe Abschnitte 5.2.3.4 und 5.5.3.4. Der für die Untersuchungen von Zapfe [2.16] und Däuwel [2.5] berücksichtigte ungünstigste Fall einer Schwindrißbildung unmittelbar entlang der Stahlstege ist bei Verbundfugen mit horizontal liegenden Kopfbolzendübeln aufgrund der Rückverankerung der Stahlträger in der Stahlbetonplatte über die Dübelköpfe in baupraktischen Anwendungen nicht zu erwarten.

5.6.5 Hinweise zur konstruktiven Durchbildung

In Ergänzung zu den Bemessungsregeln in Abschnitt 5.6.4 sind im folgenden Hinweise zur konstruktiven Durchbildung der Stahlbetonplatte im auflagnahen Bereich zusammengefasst, vgl. Abschnitt 4.6.6. Das Bild 5-60 zeigt einen typischen Verbundquerschnitt mit liegenden Kopfbolzen in Mittellage der Verbundfuge einschließlich der *Bemessungsschnitte* zum Nachweis der Verbundsi- cherung, der Unterteilung in *B- und D-Bereiche* und *Hinweise zur Bewehrungsführung*.

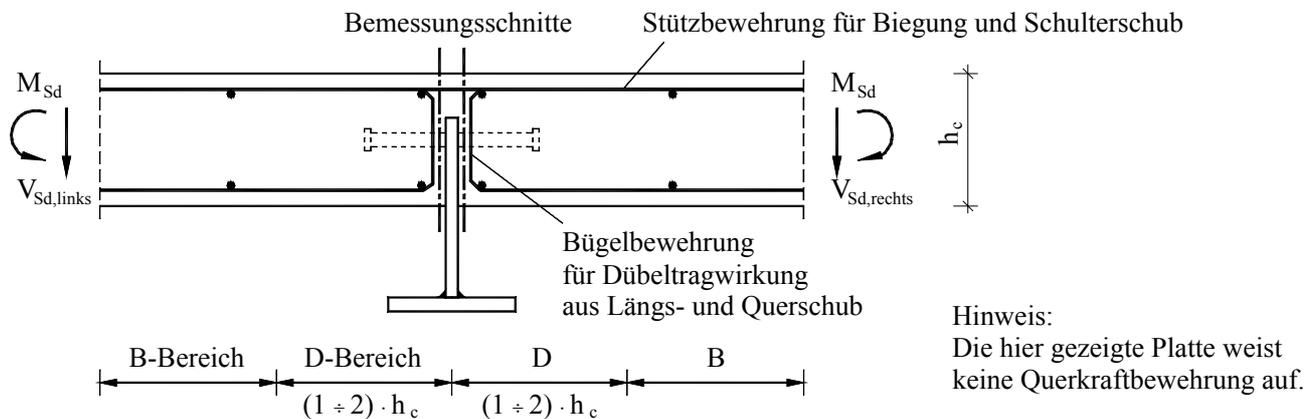
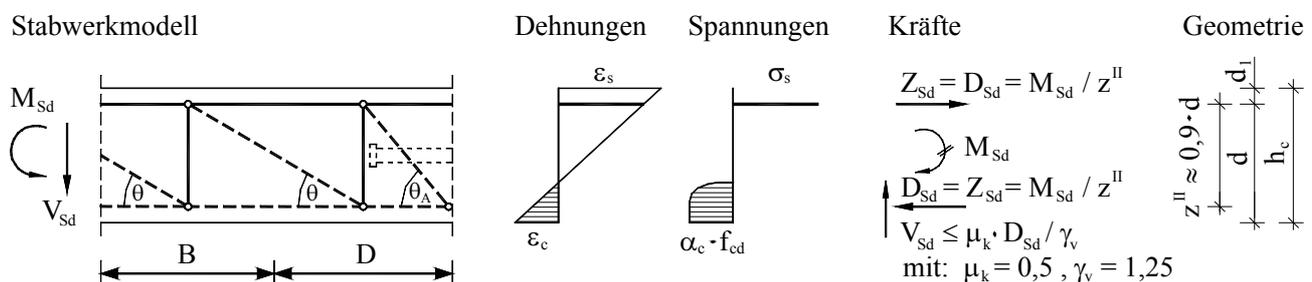


Bild 5-60. Hinweise zur Bemessung von typischen Verbundquerschnitten mit liegenden Kopfbolzen

Im Auflagerbereich ergibt sich die *obere Lage der Querbewehrung* aus der Biegebemessung und dem Nachweis des Schulterschubs. Die *Bügelbewehrung* nahe der Verbundfuge stellt die Dübeltragwirkung sicher, ist dementsprechend auch ausreichend zu verankern und darf für die Querkraftbemessung der Platte nicht weiter angerechnet werden. Für die Querkraftbemessung der Platte ist der auflagnahen Bereich in Übereinstimmung mit Schlaich & Schäfer [2.54] in *B- und D-Bereiche* unterteilt.

Wird beim Querkraftnachweis der Stahlbetonplatte eine Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich, so kann die Bemessung nach dem in Bild 5-61 angegebenen *Stabwerkmodell* in Anlehnung an Schlaich & Schäfer [2.54] erfolgen. Das vereinfachte Stabwerkmodell beinhaltet bereits den Übergang von D- zu B-Bereich. Darüber hinaus sind noch ergänzende Angaben zur Biegebemessung und zum Nachweis der Querschubtragfähigkeit der Verbundfuge durch Reibung dargestellt.



Empfehlung: $\theta = 20^\circ \div 45^\circ$, $\tan \theta_A \approx 2 \cdot \tan \theta$

Bild 5-61. Stabwerkmodell im auflagnahen Bereich der Platte – Reibtragwirkung

Treten in Auflagernähe neben den verteilten Lasten zusätzlich *hohe Einzellasten* auf, so kann ein statisch unbestimmtes Stabwerkmodell in Anlehnung an Bild 5-19 entwickelt werden. Für die Bemessungspraxis sind für dieses Stabwerkmodell im DASTb-Heft 430 [1.16], Abschn. 3.2 standardisierte Nachweisgleichungen angegeben.

Das in Bild 5-61 gezeigte *Stabwerkmodell* ist für den in der Praxis sehr häufig auftretenden Fall entwickelt worden, bei dem die Querschubkräfte in der Verbundfuge fast ausschließlich über Reibung statt über Dübel übertragen werden. Tritt hingegen die Dübel- gegenüber der Reibtragwirkung in den Vordergrund so kann für die Bemessung das in Bild 5-62 dargestellte Stabwerkmodell zugrunde gelegt werden, vgl. Abschnitt 4.6.6.

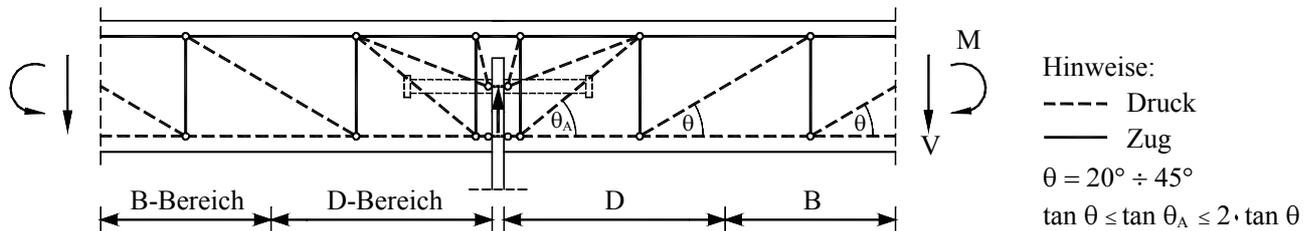


Bild 5-62. Stabwerkmodell im auflagnahen Bereich der Platte – Dübeltragwirkung

5.7 Zusammenfassung

Auf der Grundlage von umfangreichen experimentellen und theoretischen Untersuchungen ist festgestellt worden, daß das Tragverhalten liegender Kopfbolzen unter Querschub in einer Mittellage der Verbundfuge komplexer als in einer Randlage ist. Neben der reinen *Dübeltragwirkung* spielt besonders bei praktischen Anwendungen die *Reibtragwirkung* eine bedeutende Rolle. Der Einfluß der *Kontaktpressung* aus Plattenlagerung auf der Stegoberkante ist für die Gesamttragfähigkeit der Verbindung wegen der Überlagerung des beiden Betonausbruchkörper infolge Dübeltragwirkung und Kontaktpressung von untergeordneter Bedeutung. Für praktische Anwendungen ist daher ein additiver Ansatz der Kontaktpressung mit den anderen Tragkomponenten auszuschließen.

Die experimentellen Untersuchungen und weiterführenden Parameterstudien belegen, daß die *Verbundcharakteristik* maßgeblich durch die Reibung bestimmt wird. Bei praxisüblichen Anwendungen wird die Gleitgrenze im allgemeinen nicht erreicht, so daß nur in Sonderfällen die Dübeltragwirkung rechnerisch angesetzt wird. Für die Bemessungspraxis wurden auf Grundlage theoretischer Untersuchungen *Bemessungsgleichungen für die Dübel- und die Reibtragwirkung* entwickelt. Weiterführende *Hinweise zur konstruktiven Durchbildung* der Stahlbetonplatte im auflagnahen Bereich ergänzen die Untersuchungen und runden den Bemessungsvorschlag ab.