Befestigungstechnik

Rolf Eligehausen
Thomas M. Sippel

1 Einleitung

Die moderne Befestigungstechnik erlaubt die Einleitung von nahezu beliebig hohen Lasten in Beton- und Stahlbetonbauteile. Verwendet werden Einlegeteile und Dübel. Einlegeteile wie Ankerschienen, Ankerplatten mit angeschweißten Kopfbolzen und Gewindehülsen werden in die Schalung eingelegt und einbetoniert. Dübel werden in nachträglich gebohrten Bohrlöchern verankert. Man unterscheidet je nach Wirkungsprinzip kraft- und wegkontrolliert spreizende Dübel, Hinterschnittdübel und Verbunddübel.

In diesem Beitrag werden einige am IWB zum Thema Befestigungstechnik durchgeführte Forschungsvorhaben erläutert, die Bemessung von Befestigungen beschrieben und die zukünftige Entwicklung in Europa diskutiert.

2 Forschungsvorhaben am IWB

Seit 1982 werden am IWB intensive Forschungen auf dem Gebiet der Befestigungstechnik durchgeführt. Diese Arbeiten werden dankenswerterweise überwiegend von der Befestigungsindustrie gefördert. Die Arbeiten verfolgen im wesentlichen folgende Ziele:

- Klärung des Tragmechanismus und des Tragverhaltens der verschiedenen Befestigungsmittel im ungerissenen und gerissenen Beton.

- Ableitung eines Verfahrens zur Bemessung von Befestigungen unter den verschiedenen Belastungsrichtungen und für die verschiedenen Versagensarten.

- Erarbeitung von Kriterien zur Prüfung und Beurteilung von Befestigungsmitteln.

- Einbringen und möglichst Durchsetzen der Forschungsergebnisse in den zuständigen nationalen und internationalen Gremien.

Langfristig wird angestrebt, daß Befestigungen mit Einlegeteilen und Dübeln mit der gleichen Selbstverständlichkeit angewendet werden wie andere Verbindungstechniken (z.B. Schweißen oder Schrauben). Dazu sind u.a. sichere Befestigungsmittel, ein allgemein akzeptiertes Bemessungsverfahren sowie geschulte Handwerker erforderlich.

Befestigungselemente können bei Zugbeanspruchung durch Herausziehen, Betonausbruch, Spalten des Betons oder Bruch der Stahlteile versagen (Bild 1). Im folgenden werden einige Ergebnisse der Forschungen zu diesen Versagensarten (ohne Stahlbruch) sowie zu weiteren Problemen erläutert.

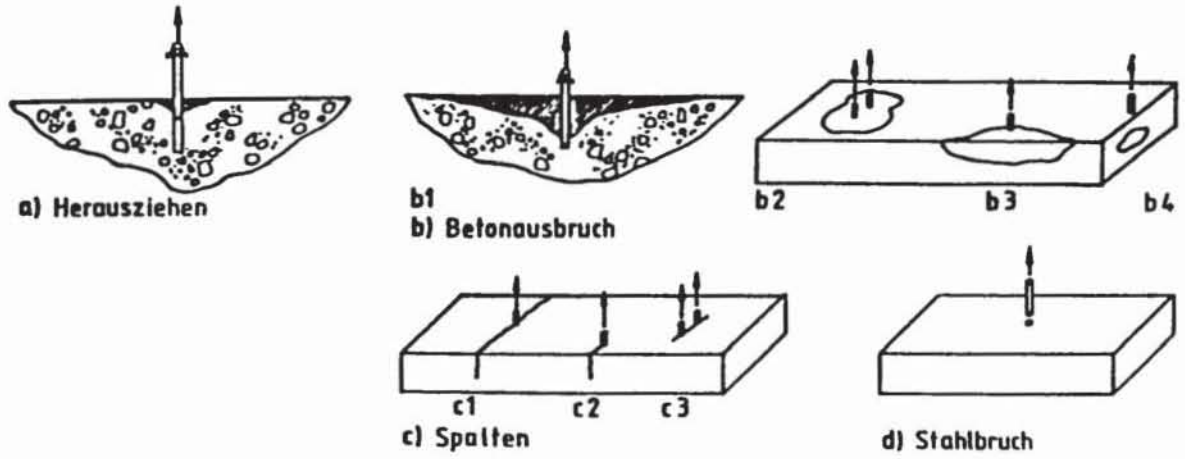


Bild 1: Versagensarten von zugbeanspruchten Befestigungen, nach [9]

2.1 Betonausbruch

Betonausbruch ist die am häufigsten vorkommende Versagensart. Bild 2 zeigt einen typischen Bruchkegel eines Hinterschnittdübels. Die Bruchlast hängt hauptsächlich von der Verankerungstiefe, die die Größe der Bruchfläche bestimmt, und der Betonzugtragfähigkeit ab.

Bild 2: Ausbruchkörper eines Hinterschnittdübels, entnommen aus [9]

Experimentelle [1,2], analytische [3] und numerische Untersuchungen [4] zeigen eindeutig, daß sich bereits bei 30% bis 50% der späteren Bruchlast Mikrorisse im Beton im Lasteinleitungsbereich von Kopfbolzen bilden. Diese Umfangsrisse wachsen bis zur Höchstlast stabil an und haben bei Höchstlast je nach Verankerungstiefe ca. 40% bis 60% der Mantelfläche des späteren Bruchkegels durchtrennt. Dieser wird im abfallenden Ast der Last-Verschiebungskurve (instabiles Rißwachstum) vollständig ausgebildet.

Das Verhalten von Befestigungen bei der Versagensart Betonausbruch kann mit nichtlinearen FE-Programmen nur dann zutreffend berechnet werden, wenn das Materialmodell für Beton die nichtlineare Bruchmechanik berücksichtigt. Ein solches Programm auf der Grundlage des sog. "non-local microplane model" wurde am Institut entwickelt [5]. Bild 3 zeigt die damit berechnete Rißbildung im Beton bei Höchstlast.

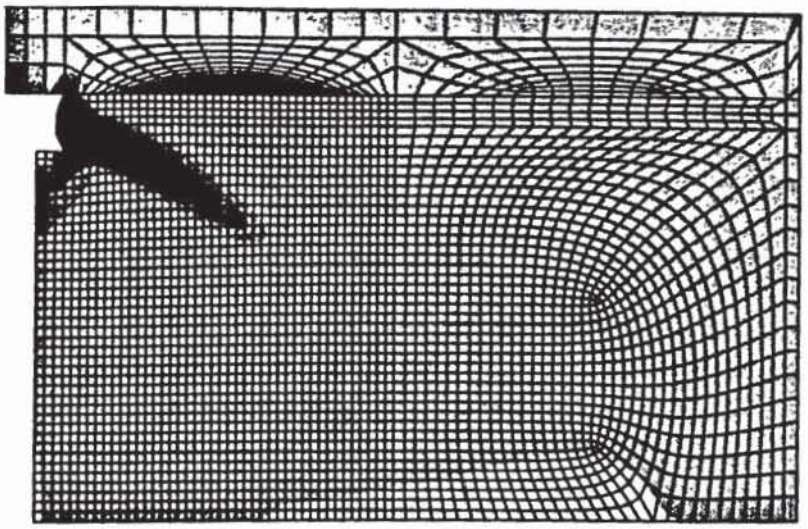


Bild 3: Rißbildung im Beton bei Höchstlast. Kopfbolzen mit einer Verankerungstiefe h_{ef} = 150 mm, nach [4]

In der Befestigungstechnik wird planmäßig die Zugtragfähigkeit des Betons ausgenutzt. Dies widerspricht dem Grundsatz des Stahlbetons, wonach Zugkräfte durch Bewehrung aufzunehmen sind. Dieser Grundsatz ist i.a. richtig, weil im Beton häufig Zugspannungen aus der Behinderung von aufgezwungenen Verformungen (z.B. infolge von Temperaturänderungen) entstehen, die die Zugspannungen aus äußerer Last vergrößern (Bild 4a). Erreicht die resultierende Zugspannung die Zugfestigkeit, versagt ein unbewehrtes Bauteil. Demgegenüber wird die Ausbruchlast durch Zwangszugspannungen nur wenig beeinflußt, weil ihre Richtung über den größten Teil des Bruchkegels von der Richtung der aus der Lasteinleitung hervorgerufenen Zugspannungen abweicht. Rufen Zwangszugspannungen Risse im Beton hervor und weist das Bauteil eine Zugbewehrung auf, wird die Ausbruchlast um ca. 30% reduziert [20]. Dieser Effekt wird bei der Bemessung von Befestigungen berücksichtigt.

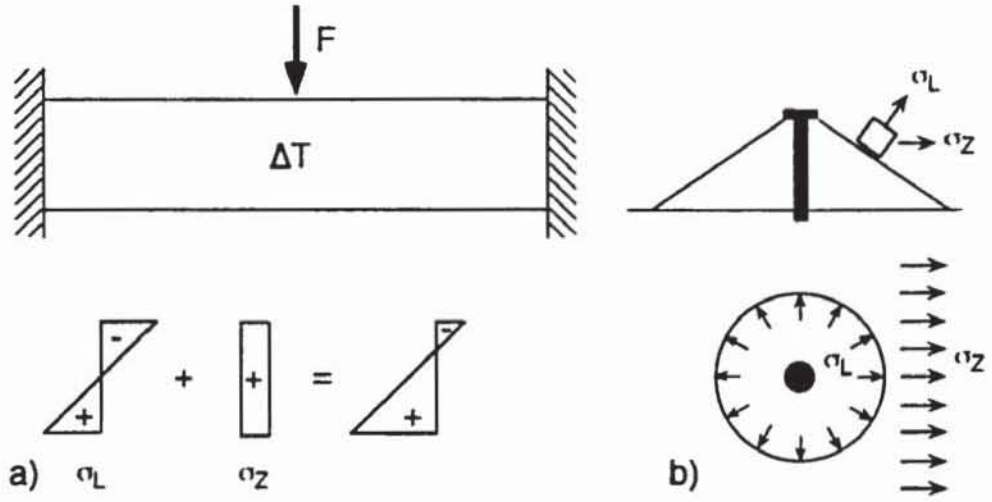


Bild 4: Einfluß von Zwangszugspannungen auf die Tragfähigkeit eines
a) Betonbalkens
b) Kopfbolzens
nach [6]

Die Bruchoberfläche von Einzelbolzen ist proportional zum Quadrat der Verankerungstiefe h_{ef}. Die Ausbruchlast steigt jedoch nur proportional zu $h_{ef}^{1,5}$ an (Bild 5). Dieser Maßstabseffekt kann mit der Bruchmechanik erklärt werden [2,3,8]. Er gilt aber nicht nur für die Betonausbruchlast, sondern für alle Fälle, in denen Beton auf Zug beansprucht wird und ein Dehnungsgradient vorhanden ist. Als Beispiel seien die Biegezugfestigkeit sowie die Querkrafttragfähigkeit von Platten ohne Schubbewehrung erwähnt. In beiden Fällen nimmt bekanntlich die Bruchspannung mit zunehmender Bauteildicke ab.

Die Höhe der Bruchlast wird zusätzlich von geometrischen Gegebenheiten wie Abstand zum Bauteilrand oder zu benachbarten Befestigungselementen beeinflußt. Überschneiden sich die Bruchkegel benachbarter Bolzen oder Dübel bzw. wird der Bruchkegel durch einen Bauteilrand begrenzt, wird die Bruchlast reduziert.

Dieses in zahlreichen Versuchen festgestellte Verhalten läßt sich durch ein einfaches mechanisches Modell, dem κ-Verfahren, beschreiben [9,10]. Eine Weiterentwicklung ist das CC (Concrete Capacity)-Verfahren. In diesem Modell wird der Ausbruchkörper einer Einzelbefestigung als Pyramide mit quadratischem Grundriß idealisiert (Bild 6). Die Höhe der Pyramide entspricht der Verankerungstiefe h_{ef} und die Länge der Basisseite beträgt 3 h_{ef}. Die Bruchlast einer Ankergruppe ergibt sich durch Multiplikation der Bruchlast einer Einzelbefestigung mit dem Quotienten der Grundfläche des Ausbruchkörpers zur Grundfläche einer Einzelbefestigung (Gleichung (1)). Bei Befestigungen am Bauteilrand ist zusätzlich der Einfluß des Bauteilrandes auf die Spannungs-

verteilung im Beton zu berücksichtigen (Faktor $\psi_{S,N}$ in Gleichung (1)). Beispiele für die Berechnung der Grundfläche von zugbeanspruchten Befestigungen sind in Bild 7 dargestellt.

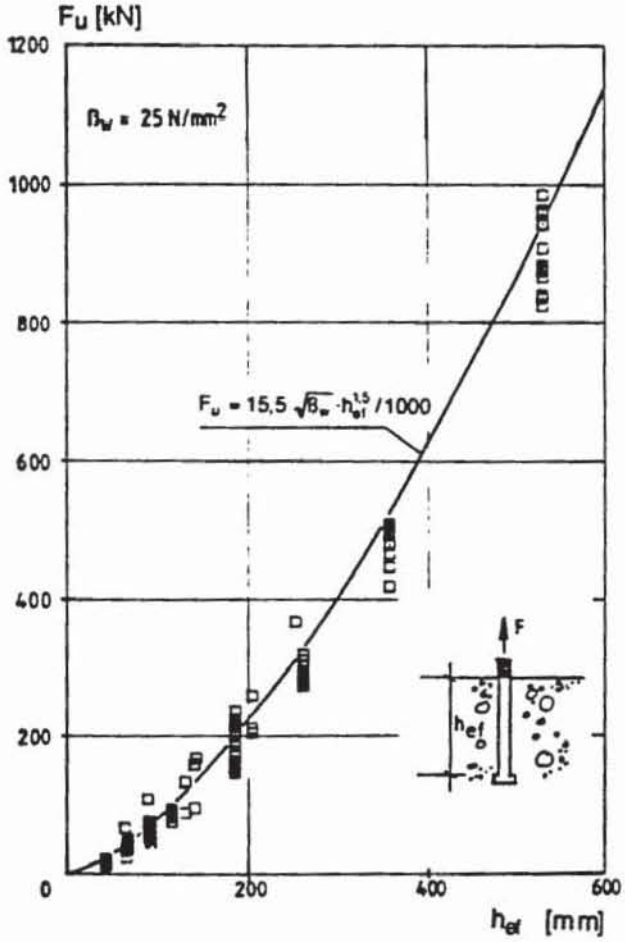


Bild 5: Betonausbruchlast von Kopfbolzen in Abhängigkeit von der Verankerungstiefe, nach [7]

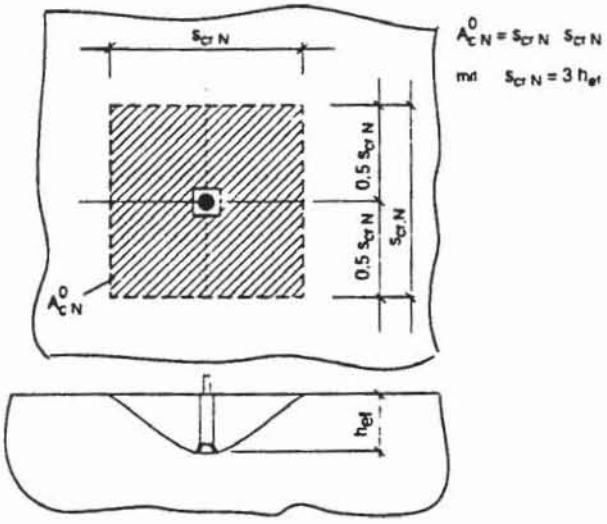


Bild 6: Idealisierter Betonausbruchkörper einer Einzelbefestigung und Fläche $A_{c,N}$, nach [14]

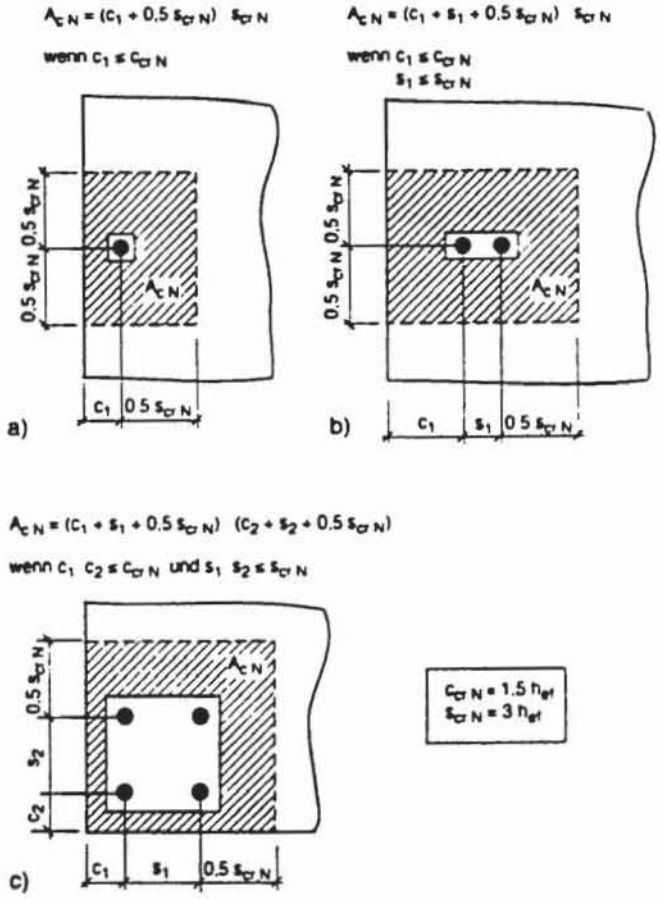


Bild 7: Beispiele für die Grundfläche $A_{c,N}$, nach [14]

$$N_u = \frac{A_{c,N}}{A^o_{c,N}} \cdot \psi_{S,N} \cdot N^o_u \qquad (1)$$

mit

N_u	=	Betonausbruchlast einer beliebigen Befestigung
$A_{c,N}$	=	Fläche des Ausbruchkörpers einer Einzelbefestigung mit großem Randabstand auf der Betonoberfläche
	=	$9\ h_{ef}^2$
$A_{c,N}$	=	Vorhandene Fläche des Ausbruchkörpers der Verankerung auf der Betonoberfläche. Sie wird begrenzt durch die Überschneidungen der einzelnen Ausbruchkörper benachbarter Befestigungen ($s \le 3\ h_{ef}$) sowie durch Bauteilränder ($c \le 1{,}5\ h_{ef}$)
$\psi_{S,N}$	=	Einflußfaktor zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung im Beton an Rändern
	=	$0{,}7 + 0{,}3 \cdot c/(1{,}5\ h_{ef}) \le 1{,}0$ (1a)

$N_{u,o}$ = Mittlere Ausbruchlast einer Einzelbefestigung im ungerissenen Beton

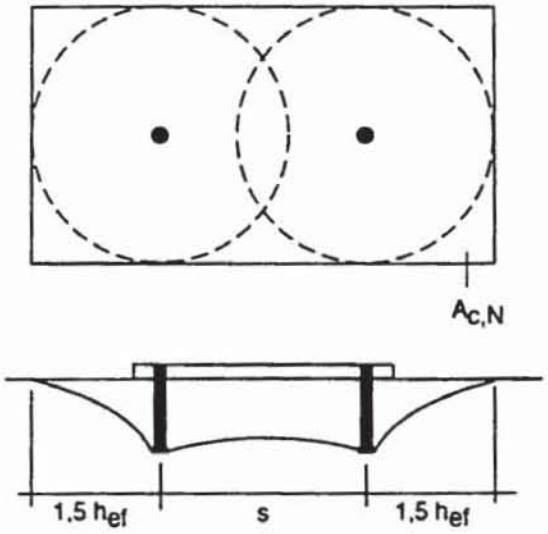
$$= k \cdot \beta_w^{0,5} \cdot h_{ef}^{1,5} \qquad (1b)$$

k = 13,5 Dübel

= k = 15,5 Kopfbolzen

Das CC-Verfahren gilt auch für Befestigungen unter Querlasten, die durch Betonkantenbruch [11] oder Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite [12] versagen. Der Einfluß einer exzentrischen Belastung auf die Bruchlast wird nach einem Vorschlag in [13] erfaßt.

Das CC-Verfahren ist ausführlich in [14] erläutert. Es ist als eine Visualisierung der κ-Faktoren im κ-Verfahren anzusehen. Beide Verfahren liefern in der Regel die gleichen Bruchlasten (Bild 8). Dies bedeutet, daß auch das κ-Verfahren von einem pyramidenförmigen Ausbruchkörper ausgeht.



$$N_u = \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot N_u^0$$

$$A_{c,N} = 3\,h_{ef} \cdot (3\,h_{ef} + s)$$

$$A_{c,N}^0 = 9\,h_{ef}^2$$

$$N_u = \frac{3\,h_{ef} \cdot (3\,h_{ef} + s)}{9\,h_{ef}^2} \cdot N_u^0$$

$$= (1 + s/h_{ef}) \cdot N_u^0$$

$$= \kappa_s \cdot N_u^0$$

Bild 8: Bruchlast einer Zweifachbefestigung nach dem κ- und CC-Verfahren

2.2 Herausziehen

Die Herausziehlast von Metallspreizdübeln wurde eingehend in [15] untersucht. Sie ist abhängig von der Größe der Spreizzone sowie der Aufweitung des Bohrlochs über den Bohrlochumfang und die Spreizzonenhöhe, dem Widerstand des Betons gegenüber einer lokalen Eindrückung und dem Reibbeiwert zwischen Stahl und Beton. Bild 9 zeigt die Rechenannahmen am Beispiel eines Einschlagdübels. Während im ungerissenen Beton Betonausbruch maßgebend ist, versagen Einschlagdübel im gerissenen Beton in der Regel durch Herausziehen (Bild 10). Nach den Untersuchungen wird die Herausziehlast von Einschlagdübeln wesentlich durch Montageparameter wie Schneideneckmaß des verwendeten Bohrers und Grad der Verspreizung beeinflußt. Werden Einschlagdübel nicht vollständig verspreizt, was in der Praxis häufig der Fall sein dürfte [16], sinkt die Herausziehlast deutlich ab.

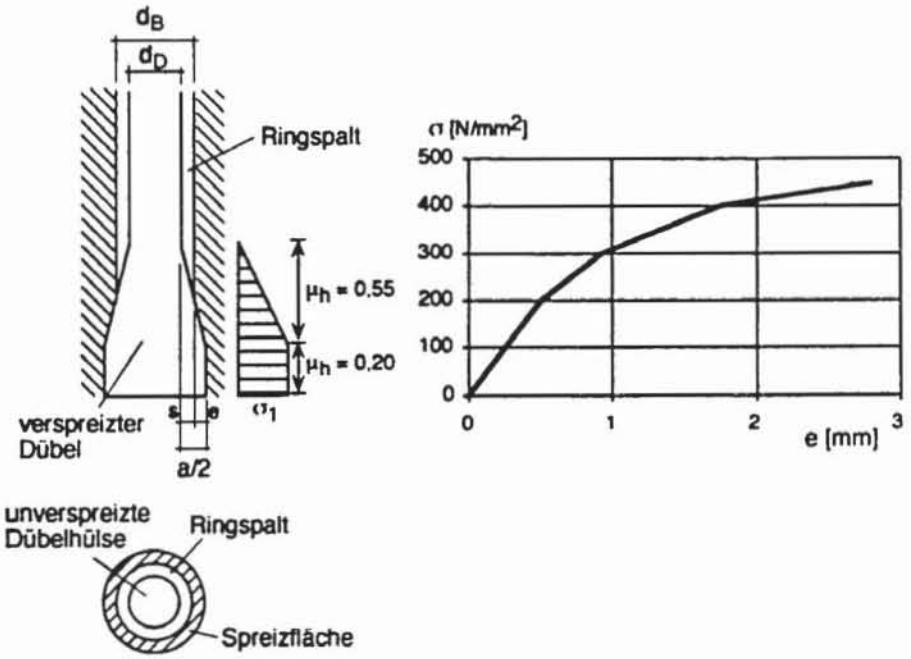


Bild 9: Annahmen zur Berechnung der Herausziehlast von Einschlagdübeln im ungerissenen Beton, nach [15]

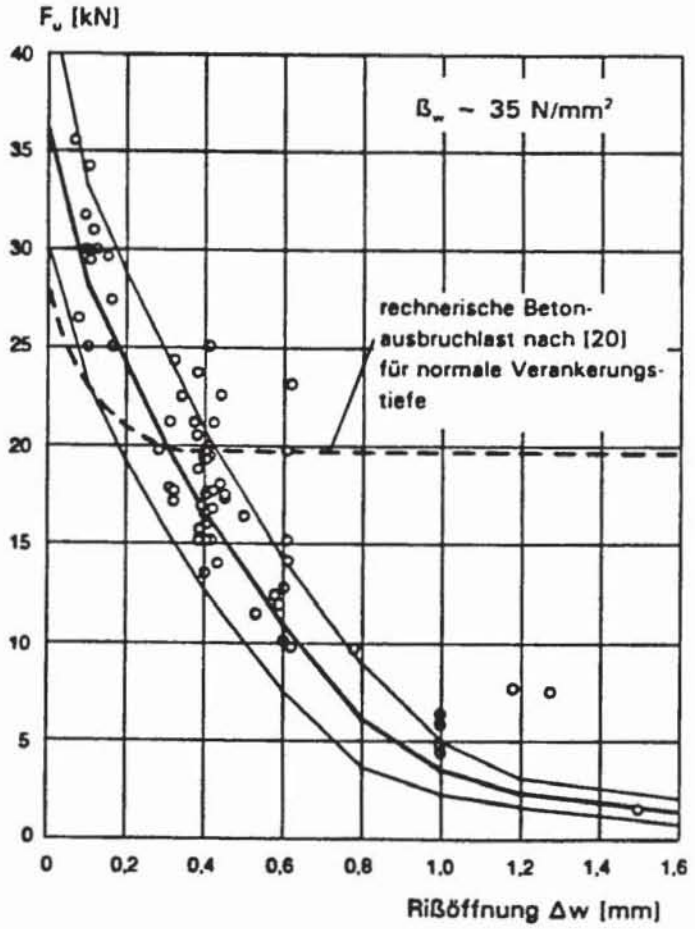


Bild 10: Einfluß der Rißbreite auf die Bruchlast von Einschlagdübeln M12 mit doppelter Verankerungstiefe, Vergleich Rechnung mit Versuchsergebnissen, nach [15]

Bei zugbeanspruchten Kopfbolzen ergeben sich in Abhängigkeit von den Betonpressungen im Lasteinleitungsbereich unterschiedlich große Verschiebungen, die zu einer Reduzierung der wirksamen Verankerungstiefe und damit der Betonausbruchlast führen können (Bild 11). In [17] wurde mit Hilfe eines physikalischen Modells der Zusammenhang zwischen Spannung in der Lasteinleitungsfläche und Verschiebung des Bolzenkopfes abgeleitet. Mit Hilfe dieser Spannungs-Verschiebungskurven läßt sich die Versagenslast in Abhängigkeit von der Verankerungstiefe, der Betondruckfestigkeit und der Größe der Lasteinleitungsfläche angeben. Die ermittelten Gleichungen erfassen sowohl die Versagensarten Betonausbruch und Herausziehen als auch den gesamten dazwischenliegenden Übergangsbereich. Zur Gewährleistung einer Betonausbruchlast nach Gleichung (1b) darf die Pressung in der Lasteinleitungsfläche je nach Verankerungstiefe ca. 12 bis 15 β_w nicht überschreiten (Bild 12). Im gerissenen Beton sind deutlich niedrigere Pressungen zulässig.

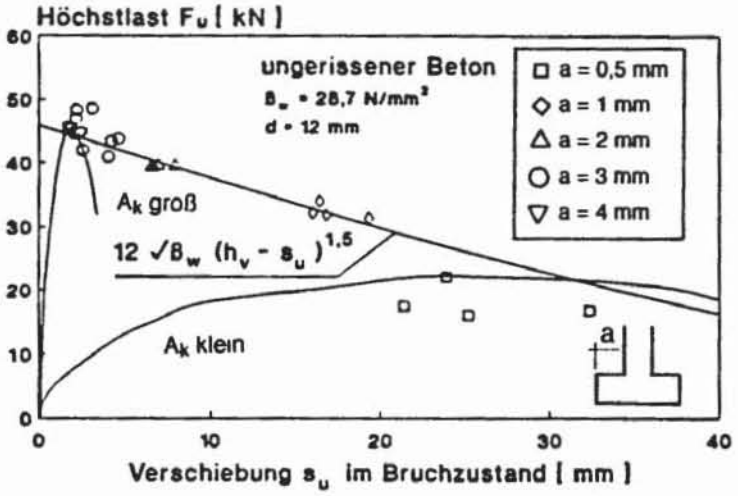


Bild 11: Last-Verschiebungskurven von Kopfbolzen bei unterschiedlicher Größe der Lasteinleitungsfläche, schematisch, nach [17]

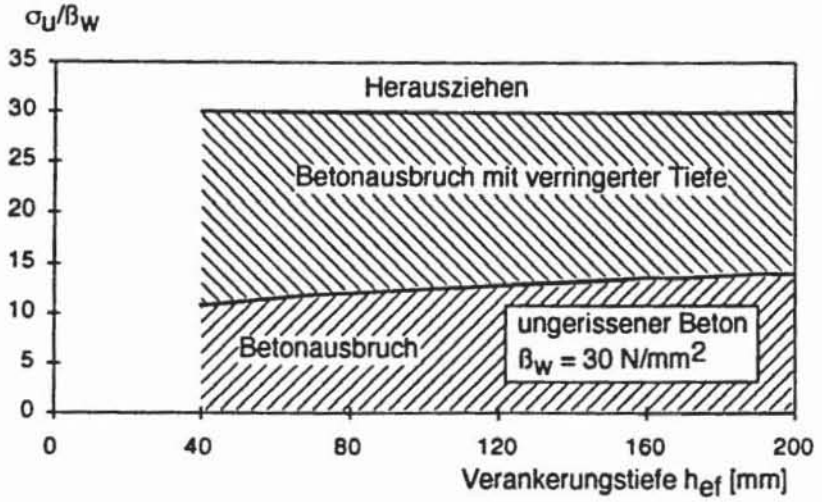


Bild 12: Kritische Pressung im Lasteinleitungsbereich zur Gewährleistung der Betonausbruchlast nach Gleichung (1a) (ungerissener Beton) in Abhängigkeit von der Verankerungstiefe, nach [17]

2.3 Spalten

Die Versagensart Spalten des Betons kann bei allen Befestigungstypen auftreten, wenn die Bauteildicke oder der Achs- und Randabstand zu gering sind. Bislang werden die erforderlichen Achs- und Randabstände sowie die Bauteildicke experimentell bestimmt, weil ausreichend genaue Modelle noch nicht vorliegen.

In einem laufenden Forschungsvorhaben wird das Verhalten von Dübeln am Bauteilrand mit Hilfe des oben beschriebenen nichtlinearen FE-Programms studiert [18]. Dabei werden dreidimensionale Modelle eingesetzt. Die Rechenergebnisse zeigen, daß vor Erreichen der Höchstlast stabiles Wachstum der Radialrisse auftritt. Mit zunehmendem Achsabstand geht die Versagensart "Spalten" in "Betonausbruch" über. Die Spaltbruchlast hängt vom Verhältnis Spaltkraft zu Zugkraft, geometrischen Größen wie Rand- und Achsabstand sowie Bauteildicke und der Betonzugtragfähigkeit ab. Bild 13 zeigt den Einfluß der Verankerungstiefe auf die Spaltbruchlast eines Kopfbolzens in einem quaderförmigen Bauteil ($c = 2\ h_{ef}$, $d = 2\ h_{ef}$) nach Rechnung und Versuch. Derzeit werden weitere umfangreiche Versuche durchgeführt, um die aus den numerischen Untersuchungen abgeleiteten Gleichungen auf ihre Richtigkeit zu überprüfen.

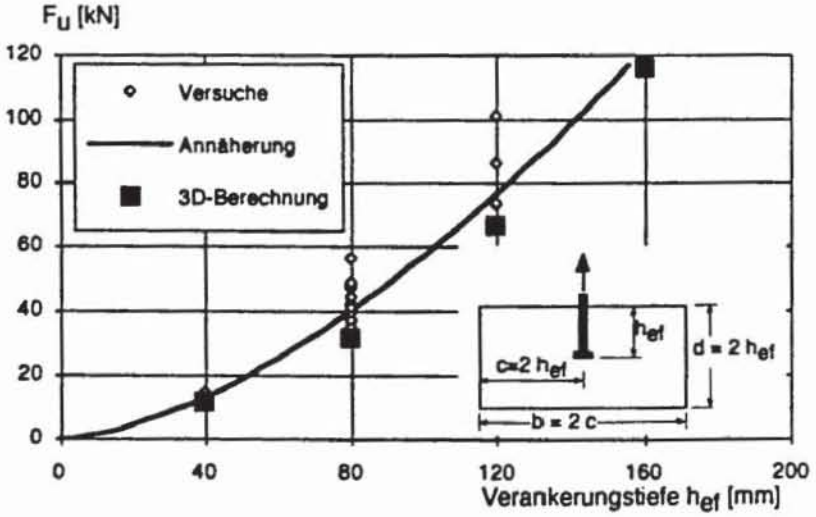


Bild 13: Bruchlast von Kopfbolzen in Abhängigkeit von der Verankerungstiefe bei der Versagensart Spalten nach Rechnung [18] und Versuchen [19]

2.4 Befestigungen im gerissenen Beton

Bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen wird i.a. von einer gerissenen Zugzone (Zustand II) ausgegangen, weil der Beton nur eine sehr geringe Zugfestigkeit besitzt, die zudem durch in der Berechnung nicht berücksichtigte Eigen- oder Zwangsspannungen ganz oder teilweise verbraucht werden kann. Da Befestigungen häufig im gerissenen Beton angeordnet werden, wurde ihr Verhalten intensiv studiert.

Das Tragverhalten von allen Befestigungselementen wird durch Risse im Beton wesentlich beeinflußt. Bei Kopfbolzen ist eine Reduktion der Betonausbruchlast um ca. 30% zu erwarten (Bild 14). Die bisher verwendeten Spreiz- und Verbunddübel, die für den Einsatz im ungerissenen Beton konstruiert sind, sind für Anwendungen im gerissenen Beton meist nicht geeignet. Bild 15 zeigt dies am Beispiel eines kraftkontrolliert spreizenden Dübels des Bolzentyps. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Tragverhaltens im gerissenen Beton wurden von der Industrie zahlreiche Typen von Hinterschnittdübeln, neu konstruierte kraftkontrolliert spreizende Dübel sowie rißtaugliche Verbunddübel entwickelt. Bei den kraftkontrolliert spreizenden Dübeln kommt es wesentlich auf die Optimierung der Reibung zwischen Konus und Spreizhülse in Abhängigkeit von der Dübelgeometrie an [22]. Sie muß ausreichend niedrig sein, damit der Dübel sicher nachspreizt. Andererseits darf sie jedoch nicht zu niedrig sein, weil sonst der Konus durch die Hülse gezogen wird und die Bruchlast absinkt. Erfüllen die Dübel diese Bedingungen, unterscheidet sich ihre Bruchlast bei den zulässigen Rißbreiten nicht wesentlich von derjenigen von Hinterschnittdübeln (vergl. Bild 14). Rißtaugliche Verbunddübel weisen entweder zusätzlich eine Hinterschneidung auf oder sie werden durch Anordnung von Konen auf der Ankerstange zu Spreizdübeln umkonstruiert, wobei die Mörtelschale als Spreizhülse dient.

Die Eignung von Dübeln für Anwendungen im gerissenen Beton wird im Rahmen des Zulassungsverfahrens überprüft (vergl. Abschnitt 4). Dazu wurden Prüf- und Beurteilungskriterien abgeleitet [23]. Sie berücksichtigen die in der Praxis zu erwartenden Rißbreiten und Rißbreitenänderungen [24] sowie das typische Verhalten von im Riß verankerten Dübeln [25,26]. Die Vorschläge wurden weitgehend in der BRD [27] sowie in Europa [38,39] übernommen.

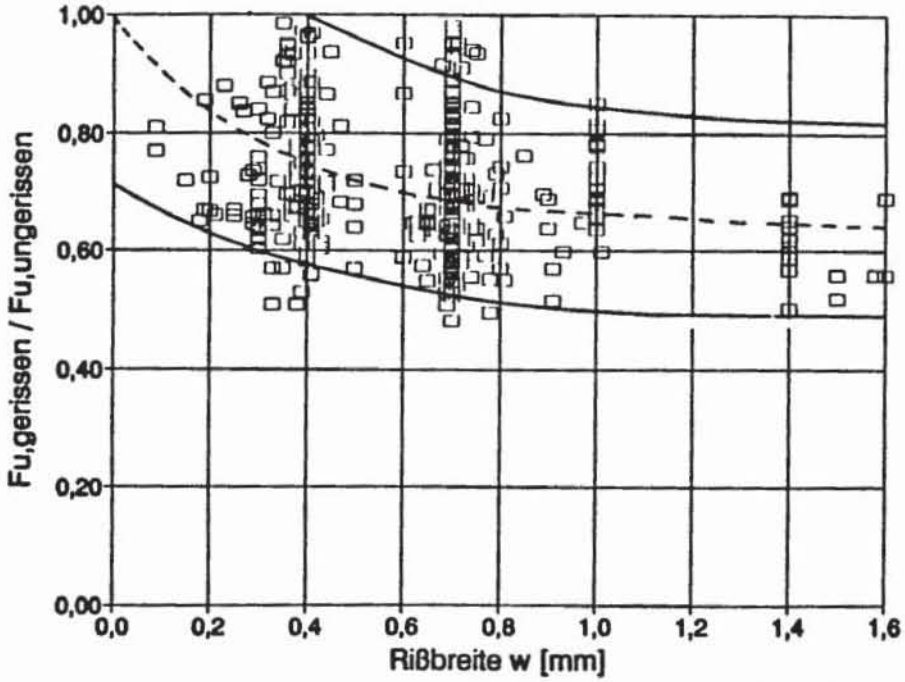


Bild 14: Verhältnis der Betonausbruchlast von Hinterschnittdübeln und Kopfbolzen im gerissenen Beton zur Ausbruchlast im ungerissen Beton als Funktion der Rißbreite, nach [20]

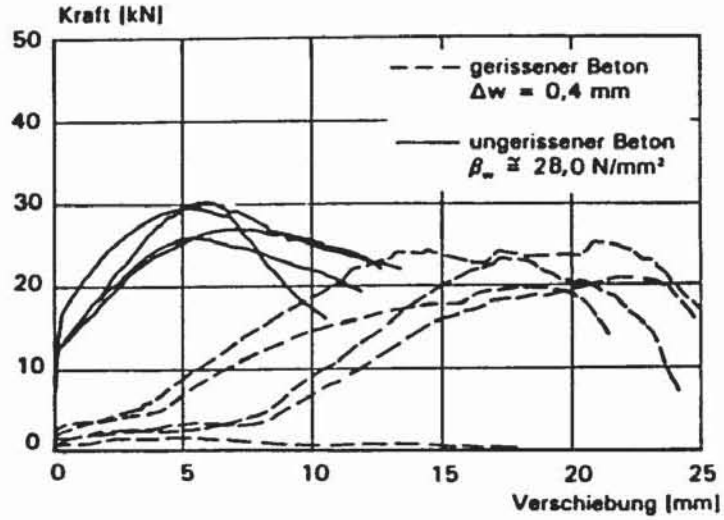


Bild 15: Last-Verschiebungskurven eines kraftkontrolliert spreizenden Dübels M12, der für Anwendungen im ungerissenen Beton konstruiert ist, im ungerissenen und gerissenen Beton, nach [21]

2.5 Sonstige Vorhaben

Der Einsatz von Dübeln bei oftmals wiederholter Belastung ist derzeit nur mit Genehmigung im Einzelfall durch die Bauaufsichtsbehörde zulässig, weil allgemein akzeptierte Beurteilungsgrundlagen fehlen. Daher wurde in [28] das Verhalten von Befestigungen unter oftmals wiederholter Belastung studiert. Es wurde festgestellt, daß die verformungsfreie Kraftübertragung zwischen Anbauteil und Beton von entscheidender Bedeutung für die einwandfreie Funktion der Befestigung ist. Dieser Kraftschluß läßt sich nur verwirklichen, wenn eine dauernd wirkende, ausreichend hohe Vorspannung der Dübel vorhanden ist. Die derzeit zugelassenen Dübel gewährleisten diese jedoch nicht. Das in der Arbeit enthaltene Rechenmodell liefert Kriterien, die bei der Ertüchtigung von Dübeln für Anwendungen bei nicht vorwiegend ruhender Belastung einzuhalten sind.

Bis ca. 1985 wurden zur Befestigung von vorgehängten Fassaden häufig Befestigungselemente aus galvanisch verzinktem Stahl eingesetzt. In diesen Fällen ist langfristig mit Korrosion zu rechnen. Um die Korrosionsgefahr abschätzen zu können, wurden eingehende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten von verzinkten Stahlteilen in Beton durchgeführt [29]. Dabei wurden insbesondere die Verhältnisse im Bohrloch berücksichtigt. Nach den Ergebnissen ist eine galvanische Verzinkung nur als temporärer Korrosionsschutz anzusehen. Nach Abtrag der Zinkschicht ist für Dübel kein Schutz durch die Alkalität des Betons gegeben, da die Bohrlochwandung innerhalb weniger Jahre karbonatisiert. Daher ist mit einer relativ hohen Abtragungsrate für den Stahl zu rechnen. Diese Ergebnisse werden durch Untersuchungen an Bauwerken bestätigt. Bei kraftkontrolliert spreizenden Dübeln wird zusätzlich die Funktionsfähigkeit durch Korrosionsprodukte im Spreizbereich stark beeinträchtigt, wodurch die Tragfähigkeit im ungünstigsten Fall unter die zulässige Last absinken

kann. Aufgrund dieser Ergebnisse erscheint es dringend notwendig, den Ist-Zustand von älteren vorgehängten Fassaden zu untersuchen, um Versagen der Befestigungen zu vermeiden.

Die am IWB und an anderen Forschungsstellen erarbeiteten Forschungsergebnisse wurden von einer Arbeitsgruppe des CEB in einem State-of-the-Art-Report zusammengefaßt [30], der demnächst im Buchhandel erscheint.

Das Verhalten von Befestigungen bei Brandbeanspruchung wird derzeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig untersucht.

Bisher wird die Verteilung der an der Ankerplatte angreifenden Schnittkräfte auf die einzelnen Befestigungselemente nach der Elastizitätstheorie berechnet. Bei Einhaltung bestimmter Anforderungen an die Duktilität der Befestigungselemente ist auch die Anwendung der Plastizitätstheorie möglich. Derzeit werden diese Anforderungen erforscht.

Das Tragverhalten von Ankerschienen wurde experimentell und numerisch studiert. Es wird im nachfolgenden Beitrag [31] erläutert.

3 Bemessung von Befestigungen

3.1 Allgemeines

Die zulässigen Anwendungsbedingungen von Befestigungsmitteln sind in Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, festgeschrieben. Darin wurde bisher zwischen Befestigungen in der aus Lastspannungen erzeugten Druckzone bzw. Zugzone unterschieden. Für Verankerungen in der Druckzone war in jedem Fall nachzuweisen, daß in Haupttragrichtung des als Ankergrund dienenden Bauteils im Bereich der Befestigung unter Berücksichtigung der durch die Dübel eingeleiteten Lasten keine Zugspannungen im Beton vorhanden sind ($\sigma \leq 0$). Die Nebentragrichtung wurde vernachlässigt. Nach dieser Definition liegen Befestigungen in Wänden bei Vorhandensein einer ausreichend hohen Nutzlast in der Druckzone.

Allerdings wurde in den Zulassungen zusätzlich gefordert, den Einfluß von Zwängungsspannungen bei der Bemessung der Befestigung zu berücksichtigen. Da bei Wänden Zwangsspannungen in Horizontalrichtung entstehen, die zu Rissen im Beton führen können, war bei Wänden auch bisher schon in vielen Fällen von einer Zugzone auszugehen. Dieser Gesichtspunkt wurde jedoch in der Praxis häufig nicht beachtet.

Mittlerweile ist allgemein anerkannt, daß Risse im Beton nicht nur durch Zugspannungen aus äußeren Lasten, sondern häufiger durch Zwangsschnittgrößen infolge Behinderung von Verformungen (z.B. infolge von Schwinden des Betons, Temperaturschwankungen oder Stützensenkungen)

hervorgerufen werden. Diese Erkenntnis wird in DIN 1045 [32] und Eurocode No.2 [33] berücksichtigt. Diese Normen fordern nämlich i.a. unabhängig von der Höhe der äußeren Last das Einlegen einer Mindestbewehrung zur Beschränkung der Breite von Rissen infolge von Zwangsschnittkräften; d.h. man geht im Gebrauchszustand des Bauteils davon aus, daß Risse im Beton auftreten. Nur bei Bauteilen in trockenen Innenräumen wird keine Mindestbewehrung gefordert, weil eventuell auftretende breite Risse die Dauerhaftigkeit der Konstruktion wegen der fehlenden Korrosionsgefahr nicht beeinträchtigen.

Es erscheint sinnvoll, in der Befestigungstechnik von den gleichen Grundlagen auszugehen wie im Stahlbetonbau. Daher ist nach den 1993 neu erteilten Zulassungen bzw. Zulassungsergänzungen sowie der "Bemessungsrichtlinie" des DIBt [34] im allgemeinen davon auszugehen, daß der Beton gerissen ist. Ungerissener Beton darf in Sonderfällen nur dann angenommen werden, wenn in jedem Einzelfall nachgewiesen wird, daß das Befestigungsmittel mit der gesamten Verankerungslänge im ungerissenen Beton liegt. Dieser Nachweis gilt als erfüllt, wenn Gleichung (2) eingehalten ist.

$$\sigma_L + \sigma_Z \leq 0 \qquad (2)$$

σ_L = Spannungen im Beton, die durch äußere Lasten einschließlich Dübellasten hervorgerufen werden.

σ_Z = Spannungen im Beton, die durch innere Zwangsverformungen (z.B. Schwinden des Betons) oder durch von außen wirkende Zwangsverformungen (z.B. durch Auflagerverschiebungen oder Temperaturschwankungen) hervorgerufen werden. Wird kein genauer Nachweis geführt, so ist σ_Z zu 3 N/mm^2 anzunehmen.

Die Spannungen σ_L und σ_Z sind unter der Annahme zu berechnen, daß der Beton ungerissen ist (Zustand I). Bei flächigen Bauteilen, die in zwei Richtungen Lasten abtragen (z.B. Platten, Wände) ist Gleichung (2) für beide Richtungen zu erfüllen.

Nach Gleichung (2) muß man davon ausgehen, daß Befestigungen in Wänden in der Regel im gerissenen Beton liegen, weil in Wandlängsrichtung Zugspannungen aus den Dübellasten und aus Zwang hervorgerufen werden und keine Druckkraft aus anderen Lasten vorhanden ist.

Kann Gleichung (2) nicht eingehalten werden, was in vielen Anwendungen der Fall sein wird, dürfen nur Befestigungssysteme eingesetzt werden, die für Anwendungen im gerissenen Beton zugelassen sind. Es wurde nach eingehender Diskussion darauf verzichtet, im gerissenen Beton Dübel für einen eingeschränkten Anwendungsbereich (z.B. überwiegende Querlast) zuzulassen, weil der Nachweis, daß bei Auftreten einer Zugkraft <u>gleichzeitig</u> eine ausreichend hohe Querkraft

vorhanden ist, mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Dieser Standpunkt wurde auch bei den Beratungen für eine europäische Zulassungsleitlinie [39] bestätigt. Danach muß die charakteristische Zugtragfähigkeit eines Dübels mindestens 30% des Wertes bei Betonausbruch für die vorhandene Verankerungstiefe betragen.

3.2 Bemessung auf Basis der bestehenden Zulassungen

Die Zulassungen von Dübeln, die ohne Einschränkungen in der Zug- und Druckzone von Stahlbetonbauteilen verwendet werden dürfen, erlauben die Bemessung auf der Basis des sogenannten $\varkappa$-Verfahrens. Dieses Verfahren geht von der zulässigen Last eines Einzeldübels mit großen Achs- und Randabständen aus. Sie ist unabhängig von der Lastrichtung. Die Einflüsse verminderter Achs- und Randabstände werden durch sogenannte $\varkappa$-Faktoren berücksichtigt. Die zulässige Last eines Dübels ergibt sich dann durch Multiplikation der maximal zulässigen Last mit den jeweiligen $\varkappa$-Faktoren.

Das $\varkappa$-Verfahren ist einfach und leicht anwendbar, besitzt aber einige Nachteile. So wird z.B. die höhere Tragfähigkeit der Dübel unter Querzugbelastung bei der Berechnung der zulässigen Last nicht berücksichtigt. Andererseits werden die in der Regel höheren erforderlichen Randabstände unter Querzugbelastung für alle Belastungsrichtungen angesetzt. Bei der Bemessung von exzentrisch belasteten Dübelgruppen muß nach dem bisherigen Konzept für alle Dübel der Gruppe die Last des höchstbeanspruchten Dübels angesetzt werden. Die genannten Vorgehensweisen liegen auf der sicheren Seite, stellen aber zum Teil erhebliche Einschränkungen für die Praxis dar.

3.3 Neues Bemessungskonzept

Die in Zukunft zu erteilenden Zulassungsbescheide für Befestigungsmittel sollen nicht mehr das Bemessungsverfahren, sondern nur noch charakteristische Kennwerte des jeweiligen Systems enthalten. Die Bemessung erfolgt nach einem Bemessungsverfahren für Verankerungen in Beton [34] unter Berücksichtigung der charakteristischen Werte für den jeweiligen Dübel. Es basiert wie Eurocode No.2 [33] auf dem Sicherheitskonzept der Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. [10]).

Es werden 3 Bemessungsverfahren unterschieden. Bei dem Verfahren A sind die charakteristischen Widerstände abhängig von der Belastungsrichtung und berücksichtigen alle möglichen Versagensarten. Das Bemessungsverfahren wurde aus den Ergebnissen von umfangreichen Zulassungsversuchen und Forschungsarbeiten (u.a. [1] bis [21]) entwickelt und stellt den derzeitigen Stand der Befestigungstechnik dar. Beim Bemessungsverfahren B wird ein charakteristischer Widerstand unabhängig von der Belastungsrichtung angenommen und der Einfluß von verminderten Achs- und Randabständen mit Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Es entspricht im Prinzip dem bisher in den Zulassungen für rißtaugliche Dübel enthaltenen Verfahren. Beim Bemessungsverfahren C wird ein charakteristischer Widerstand angegeben. Er gilt für alle Belastungsrichtungen und bestimmte

Mindestwerte für Achs- und Randabstände, die nicht unterschritten werden dürfen. Es entspricht dem bisherigen Verfahren für Metallspreizdübel im ungerissenen Beton.

Es ist damit zu rechnen, daß in Kürze Zulassungen für Dübel erteilt werden, die auf dem Bemessungsverfahren A aufbauen. Auch die Zulassungen für Kopfbolzen und Ankerschienen sollen auf dieses Bemessungsverfahren umgestellt werden, wobei zusätzlich der Einfluß einer Rückhängebewehrung auf das Tragverhalten der Befestigung berücksichtigt werden wird.

Der Nachweis der Tragfähigkeit erfolgt nach Gleichung (3).

$$S_d \leq R_d \tag{3}$$

mit S_d = Bemessungswert der Einwirkung
R_d = Bemessungswert des Widerstandes

Demnach müssen die Einwirkungen auf die Dübel kleiner oder gleich dem Widerstand sein. Ist diese Bedingung erfüllt, dann ist die Befestigung ausreichend sicher bemessen. Dieser Nachweis ist für jede Beanspruchungsart (zentrischer Zug, Querzug, Schrägzug) sowie für jede Versagensart (Stahlbruch, Betonbruch, Herausziehen) zu führen.

Der Bemessungswert der Einwirkungen entspricht der einwirkenden Last multipliziert mit dem Teilsicherheitsbeiwert für die Last. Die Berechnung der Verteilung der an der Ankerplatte angreifenden Schnittkräfte (Normalkraft, Querkraft, Biege- und Torsionsmomente) auf die Einzeldübel einer Gruppe erfolgt nach der Elastizitätstheorie unter Annahme einer gleichen Steifigkeit für alle Dübel. Damit die Rechenannahmen in etwa eingehalten sind, muß die Ankerplatte ausreichend steif sein. Bei Schrägzuglast unter einem bestimmten Winkel ist die Ermittlung getrennt für den Zug- bzw. Querzuganteil der Schrägzuglast zu führen.

Der Bemessungswert des Widerstandes errechnet sich aus der charakteristischen Tragfähigkeit unter Zug- bzw. Querzugbeanspruchung, der bei Betonausbruch nach dem CC-Verfahren (vergl. Abschnitt 2.1) ermittelt wird, dividiert durch den Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand der jeweiligen Versagensart.

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Lasten hängt von der Art der Belastung ab (Eigengewicht oder Verkehrslast) und ist EC2 [33] zu entnehmen. Da sich Eigengewichtslasten mit größerer Sicherheit als veränderliche Lasten vorhersagen lassen, ist dieser Sicherheitsbeiwert (γ_G = 1,35) geringer als für Verkehrslasten (γ_Q = 1,50).

Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Materialwiderstand hängen von der Bruchart und der Montagesicherheit des Dübelsystems ab und werden in den Zulassungsbescheiden angegeben. Bei Betonversagen berechnet sich der Sicherheitsbeiwert zu

$$\gamma_{Mc} = \gamma_c \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \tag{4}$$

γ_c	=	Teilsicherheitsbeiwert für Beton auf Druck = 1,5
γ_1	=	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Streuung der Zugfestigkeit von Baustellenbeton
	=	1,2 bei normal hergestelltem und nachbehandeltem Beton
γ_2	=	Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der Montagesicherheit eines Dübelsystems
	=	1,0 für Systeme mit hoher Montagesicherheit
	=	1,2 für Systeme mit normaler Montagesicherheit
	=	1,4 für Systeme mit geringer aber noch ausreichender Montagesicherheit

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_1 wurde aus den Ergebnissen der Untersuchungen [35,36] abgeleitet.

Der Teilsicherheitsbeiwert zur Kennzeichnung der Montagesicherheit eines Dübelsystems wird aus den Ergebnissen von Versuchen berechnet, die im Rahmen des Zulassungsverfahrens durchgeführt werden. In diesen Versuchen werden Montageungenauigkeiten nachgeahmt, die auf der Baustelle auftreten können. Es wird jedoch davon ausgegangen, daß bei der Montage grobe Fehler (z.B. Verwendung eines falschen Bohrers) durch entsprechende Maßnahmen auf der Baustelle ausgeschlossen werden.

Der Teilsicherheitsbeiwert für den Materialwiderstand bei Stahlversagen γ_{Ms} ist abhängig von der Beanspruchungsrichtung der Dübel und in den jeweiligen Zulassungsbescheiden angegeben.

4 Regelungen in Europa

Nach der Bauproduktenrichtlinie [37] müssen Bauteile, die dauerhaft in Bauwerke eingebaut werden sollen, festgelegte wesentliche Anforderungen erfüllen (Bild 16). Dieser Nachweis der Brauchbarkeit kann auf der Grundlage von harmonisierten Europäischen Normen oder Europäischen Technischen Zulassungen erfolgen. Für Dübel sind nach allgemeiner Auffassung Europäische Technische Zulassungen erforderlich. Daher wird derzeit intensiv an einer entsprechenden Richtlinie für die Prüfung und Beurteilung von Dübeln gearbeitet [39]. Die Richtlinie unterteilt sich in folgende Teile:

Teil 1: Metalldübel, Allgemeine Anforderungen
- Annex A: Versuchsbeschreibung
- Annex B: Zulässige Anwendungsbedingungen
- Annex C: Bemessungsmethoden

Teil 2: Kraftkontrolliert spreizende Dübel
Teil 3: Hinterschnittdübel
Teil 4: Wegkontrolliert spreizende Dübel
Teil 5: Verbunddübel

Die Teile 1 bis 3 wurden bereits verabschiedet, die Teile 4 und 5 werden bis ca. Ende 1995 fertiggestellt werden. Es ist zu erwarten, daß die Richtlinie auf andere Dübelsysteme (z.B. Deckenabhänger, Kunststoffdübel, Setzbolzen) erweitert wird. Die Regeln bauen weitgehend auf den Erfahrungen und Forschungen in Deutschland auf.

Nach der Richtlinie können Dübel für Anwendungen im gerissenen und ungerissenen Beton bzw. nur im ungerissenen Beton zugelassen werden. Der Nachweis des ungerissenen Betons erfolgt nach Gleichung (2). Für jedes Dübelsystem sind folgende Prüfungen erforderlich:

- Versuche zum Nachweis der Eignung des Dübelsystems
- Versuche zur Ableitung der zulässigen Last

In den Eignungsversuchen ist nachzuweisen, daß das Tragverhalten der Dübel bei Auftreten von Bedingungen, die von den normalen Anwendungsbedingungen abweichen, nicht zu stark beeinflußt wird. Solche ungünstigen Bedingungen sind zum Beispiel:

- Abweichungen von der vorgeschriebenen Montageanleitung
- Betonfestigkeit höher als angenommen
- Rißbreite größer als angenommen
- Mehrfache Änderung der Rißbreite bei veränderlicher Belastung des Bauteils

Außerdem ist in den Eignungsversuchen nachzuweisen, daß die Dübel ein befriedigendes Langzeitverhalten aufweisen.

Die Bemessung von Dübelbefestigungen erfolgt nach Annex C "Bemessungsmethoden". Diese stimmen weitgehend mit der Bemessungsrichtlinie des DIBt [34] überein. Aus den Ergebnissen der Zulassungsversuche werden die im jeweiligen Bemessungsverfahren einzusetzenden charakteristischen Kennwerte abgeleitet.

Es ist damit zu rechnen, daß in den nächsten Jahren zahlreiche Europäische Technische Zulassungen erteilt werden.

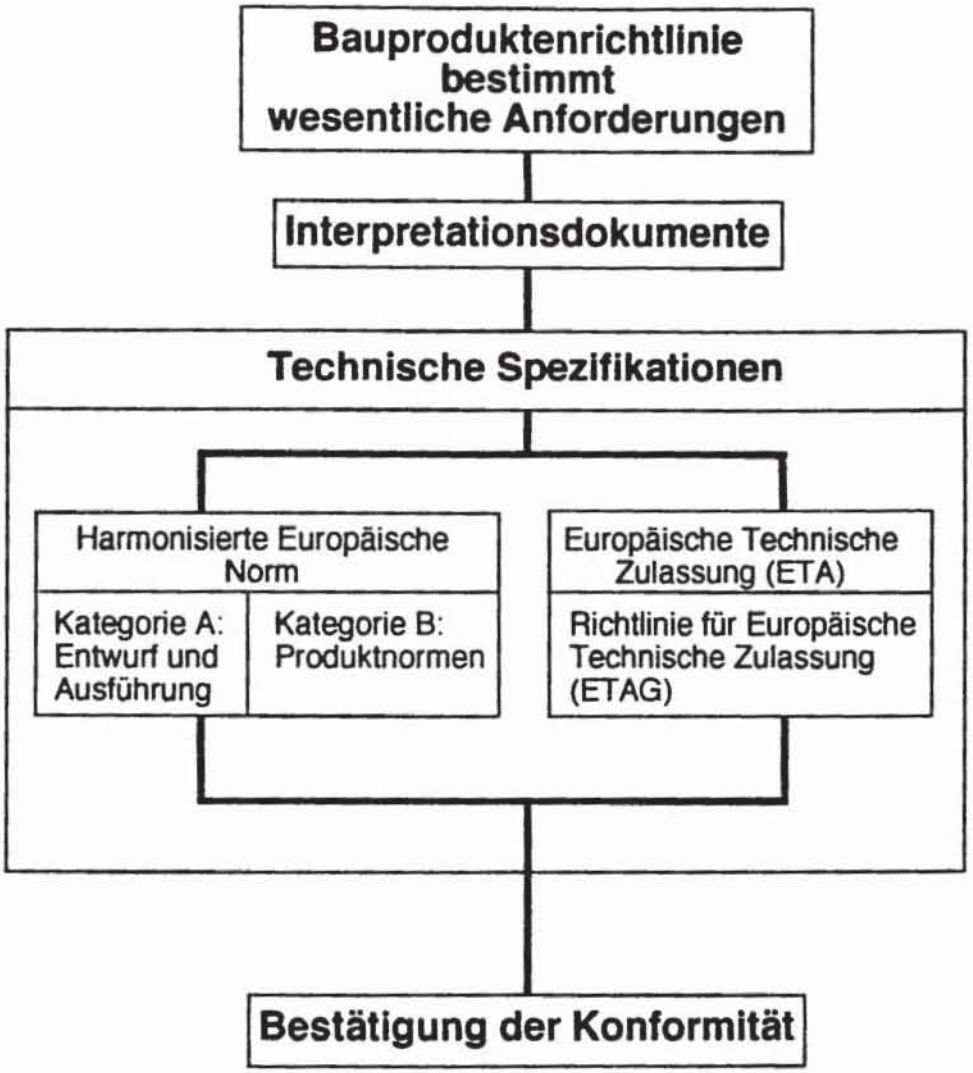


Bild 16: Regelung nach der Bauproduktenrichtlinie zur Bestätigung der Konformität, nach [40]

5 Zusammenfassung

Die Befestigungstechnik leistet einen selbstverständlichen und unentbehrlichen Beitrag zum wirtschaftlichen Bauen. Eine Vielzahl von Befestigungssystemen gewährleisten - bei sachgemäßer Anwendung - die sichere Einleitung auch hoher Lasten in Beton und Mauerwerk. Aufgabe des Anwenders ist es, das für den jeweiligen Ankergrund und Verwendungszweck optimale Befestigungselement aus dem breiten Angebot auszuwählen und zu montieren. Trotz der Informationsfülle von Firmenunterlagen und Zulassungsbescheiden ist ein Wissensdefizit über Funktionsprinzipien, Anwendungsbedingungen und -bereiche sowie richtige Montage festzustellen. Um dieses Wissensdefizit abzubauen, wird am IWB seit ca. 13 Jahren Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Befestigungstechnik betrieben.

Die Eignung und Funktionsfähigkeit von Einlegeteilen und Dübeln wird in der Regel durch bauaufsichtliche Zulassungen nachgewiesen, die verbindliche Vorschriften für die Befestigungen bauaufsichtlich relevanter, tragender Konstruktionen enthalten.

Im gerissenen Beton dürfen nur geeignete Einlegeteile (Kopfbolzen, Ankerschienen und Wellenanker) und geeignete Dübel (geeignete nachspreizende Dübel, Hinterschnittdübel und spezielle Verbunddübel) eingesetzt werden. Ausnahmen gelten nur bei Mehrfachbefestigungen von leichten Unterdecken. Demgegenüber ist ein Einsatz von Einschlag- und üblichen Verbunddübeln nur im ungerissenen Beton zulässig.

In Zukunft sollen Europäische Technische Zulassungen für Befestigungsmittel erteilt werden. Daher wird derzeit intensiv an einer entsprechenden Leitlinie für die Prüfung und Beurteilung von Dübeln gearbeitet. Die Arbeiten sollen in Kürze abgeschlossen werden. Die zu erwartenden Regeln bauen weitgehend auf den Erfahrungen in Deutschland auf.

6 Literatur

[1] Eligehausen, R.; Sawade, G.: Verhalten von Beton auf Zug. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1985, Heft 5, S. 315-322, Heft 6, S. 389-391

[2] Sawade, G.; Eligehausen, R.: A Fracture Mechanics Based Description of Pull-Out Tests on Headed Studs in Concrete. Fracture Mechanics of Concrete Structures, RILEM Report, Chapman and Hall, London, 1989

[3] Sawade, G.: Ein energetisches Materialmodell zur Berechnung des Tragverhaltens von zugbeanspruchtem Beton. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994

[4] Ozbolt, J.; Eligehausen, R.: Numerical Analysis of Headed Studs Embedded in Large Concrete Blocks. Tagungsband, Second International Conference "Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Zell am See, April 1990

[5] Ozbolt, J.: Fracture Analysis of Concrete Structures - Improved Microplane Model. Bericht Nr. 4/17-93/5, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1993

[6] Eligehausen, R.; Ozbolt, J.: Use of the Tensile Strength in Anchorage to Concrete. Tagungsband, IABSE Colloquium "Structural Concrete", Stuttgart, 1991, S. 731-736

[7] Eligehausen, R.; Fuchs, W.; Ick, U; Mallée, R.; Schimmelpfennig, K.; Schmal, B.: Tragverhalten von Kopfbolzenverankerungen bei zentrischer Zugbeanspruchung. Bauingenieur 67 (1992), S. 183-196

[8] Eligehausen, R.; Ozbolt, J.: Size Effect in Anchorage Behavior. Proceedings, ECF8, Fracture Behavior and Design of Materials and Structures, Turin, Okt. 1990

[9] Rehm, G.; Eligehausen, R.; Mallée, R.: Befestigungstechnik, Beton-Kalender 1992, Band II, Verlag Wilh. Ernst & Sohn, 1992, S. 597-725

[10] Eligehausen, R.: Bemessung von Befestigungen mit Teilsicherheitsbeiwerten. Bauingenieur 65 (1990), S. 295-305

[11] Fuchs, W.: Tragverhalten von Befestigungen unter Querlasten im ungerissenen Beton. Dissertation, Universität Stuttgart, 1990

[12] Zhao, G.: Tragverhalten von randfernen Kopfbolzenverankerungen bei Betonbruch. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993

[13] Riemann, H.: Das "erweiterte κ-Verfahren" für Befestigungsmittel, Bemessung an Beispielen von Kopfbolzenverankerungen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 12, 1985, S. 808-815

[14] Fuchs, W.; Eligehausen, R.: Das CC-Verfahren zur Berechnung der Betonausbruchlast von Verankerungen. Erscheint demnächst in Bauingenieur

[15] Lehmann, R.: Tragverhalten von Metallspreizdübeln im ungerissenen und gerissenen Beton bei der Versagensart Herausziehen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993

[16] Meszaros, J; Eligehausen, R.: Überprüfung von Dübeln auf Baustellen. Bericht Nr. M 655/08-92/32, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1992

[17] Furche, J.: Zum Trag- und Verschiebungsverhalten von Kopfbolzen bei zentrischem Zug. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994

[18] Pukl, R.; Ozbolt, J.; Schlottke, B.; Eligehausen, R.: Splitting of Concrete, Part 3: Computer Simulation of Concrete Members Under Combined Load. Bericht Nr. 16/6-93/13, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1993

[19] Furche, J.; Walser, P.: Spalten von Betonbauteilen infolge Lasteinleitung durch formschlüssige Befestigungsmittel. Bericht Nr. 16/1-91/6, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1991

[20] Eligehausen, R.; Balogh, T.: Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Concrete. Erscheint demnächst in ACI Structural Journal

[21] Dieterle, H.; Bozenhardt, A.; Hirth, W.; Opitz, V.: Verhalten von Dübeln im unbewegten Parallelriß unter Schrägzugbelastung. Bericht Nr. 1/45-89/19, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1989

[22] Mayer, B.: Funktionsersatzprüfungen für die Beurteilung der Eignung von kraftkontrolliert spreizenden Dübeln. Dissertation, Universität Stuttgart, 1991

[23] Eligehausen, R.; Tewes, R.: Rationale for the UEAtc Draft Directive on Anchor Bolts Used in the Tensile Zone of Reinforced Concrete Members. Bericht Nr. 1/29-88/4, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1988

[24] Eligehausen, R.; Bozenhardt, A.: Crack width as measured in actual structures and conclusions for the testing of fastening elements. Bericht Nr. 1/42-89/9, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1989

[25] Eligehausen, R.: Behaviour of Anchors in Line and Intersecting Cracks. Bericht Nr. 1/47A-90/3, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1990

[26] Eligehausen, R.; Asmus, J.: Zuverlässigkeitsprüfungen an Dübeln in Linienrissen. Bericht Nr. 1/49A-91/1A, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1991

[27] Institut für Bautechnik: Rahmenprogramm für Eignungs- und Zulassungsversuche für Dübel, die in der Betonzugzone eingesetzt werden sollen, Berlin, Januar 1989

[28] Lotze, D.: Tragverhalten und Anwendung von Dübeln unter oftmals wiederholter Belastung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993

[29] Menzel, K.: Zur Korrosion von verzinktem Stahl in Beton. Dissertation, Universität Stuttgart, 1992

[30] Comité Euro-International du Béton: Fastenings to Reinforced Concrete and Masonry Structures. Bulletin D'Information No. 206 und 207, Lausanne, August 1991 und Verlag Thomas Telford, London, 1994

[31] Wohlfahrt, R.: Tragverhalten von Ankerschienen. Tagungsband, Forschungskolloquium des DAfStb, Stuttgart, Nov. 1994

[32] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Ausgabe Juli 1988

[33] ENV 1992-1-1: 1991 (Eurocode No. 2): Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau, Juni 1992

[34] Deutsches Institut für Bautechnik: Bemessungsverfahren für Dübel zur Verankerung in Beton, Berlin, Juni 1993

[35] Gollwitzer, S.; Abdo, T.; Rackwitz, R.: Zuverlässigkeit von Dübelbefestigungen in Beton. Bericht des Lehrstuhls für Massivbau, TU München, 1989

[36] Bergmeister, K.: Neue Bemessung von Dübelverbindungen im Stahlbetonbau. Bericht Nr. 7/5-89/20, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, 1989

[37] The Council of the European Communities: Council Directive of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products (89/106/EEC)

[38] UEAtc Technical Guide on Anchors for Use in Cracked and Noncracked Concrete, Juni 1992

[39] European Organisation for Technical Approvals (EOTA): Guideline for European Technical Approval of Anchors for Use in Concrete; Parts I, II und III, Fassung Juli 1994

[40] Litzner, H.U.: Transition from ENV to EN: Implications of the Review Period - The Role of CEB. Beitrag zur Sitzung des Advisory Committee des CEB, 1994