

Spannglieder ohne Verbund im Hochbau – Bemessung und Ausführung leicht gemacht

em.Univ.Prof. Brt.h.c. Dr.Dr.-ing.E.h. Manfred Wicke
Universität Innsbruck

1 Einleitung

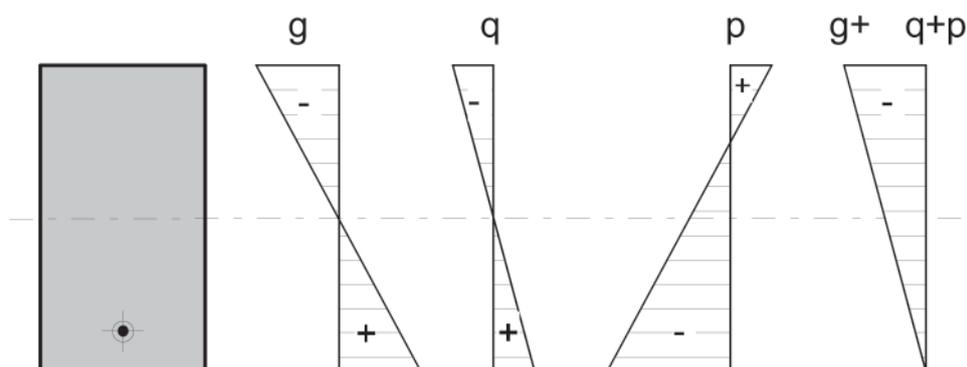
Im Brückenbau hatte die Spannbetonbauweise in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts großartige Erfolge zu verzeichnen. Obwohl sie zu Beginn des Ausbaus des Fernstraßennetzes neu am Markt war, sind beispielsweise in Österreich weit mehr als die Hälfte der seither gebauten Brückenflächen in dieser Bauweise ausgeführt worden. Im Hochbau blieb ihr ein derartiger Erfolg in Europa versagt, wogegen im Fernen Osten und in den USA die Vorspannung von Hochbaudecken einen bedeutenden Marktanteil aufweist. Die Ursachen für diesen unterschiedlichen Markterfolg sind vielschichtig. Technische Gründe sind die verschiedenen Tragstrukturen, die für Brücken und Hochbauten verwendet werden, sowie die unterschiedlichen Zielvorstellungen für den Einsatz von Spannbeton. Weiters gibt es bei Planern und Baufirmen überlieferte Lösungsansätze, die einer Übernahme der Spannbetonbauweise in den Hochbau im Wege stehen. Nach eingehender Analyse der bestehenden Situation wurden am Institut für Betonbau der Universität Innsbruck in den vergangenen zehn Jahren Strategien entwickelt, die dem entgegenwirken und in den westlichen Bundesländern bereits sehr erfolgreich zum Einsatz kommen. Die freie Spanngliedlage ist ein kostengünstiges Bauver-

fahren, das sich an die ausführenden Unternehmen wendet. Für die Tragwerksplaner wurde das Konzept des vorgespannten Stahlbetons entwickelt, das größere Schlankheiten gegenüber Stahlbetondecken ermöglicht und dennoch sehr einfach zu handhaben ist.

2 Unterschiede zwischen Brücken- und Hochbauten

Im Brückenbau hat sich die ursprüngliche Zielvorstellung des Spannbetons, nämlich die Rissefreiheit, voll durchgesetzt. Vornehmlich werden Platten- und Balkentragwerke in Spannbeton ausgeführt. Solche werden möglichst zwängungsfrei gelagert, damit allfällige Zwängungen aus Temperaturänderungen und Schwinden vermieden werden oder zumindest möglichst klein ausfallen. Dies kommt einer Vorspannung sehr entgegen, da die momentanen und zeitlichen Verkürzungen des Betons zufolge der Vorspannkraft ebenfalls keine Zwänge hervorrufen. Bei zwängungsfreier Lagerung kann die Zugkraft im Spannglied in voller Größe als Druckkraft in den Beton übertragen werden. Damit ergeben sich aus der Vorspannung größtmögliche Druckspannungen, die den Zugspannungen aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen entgegenwirken (Bild 1). Die

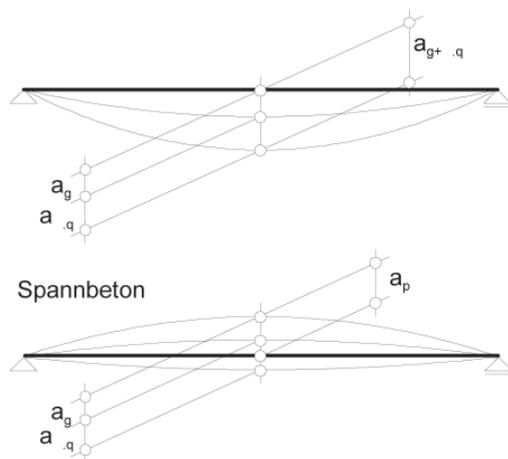
Bild 1: Nachweis der Betonspannungen zur Einhaltung der Rissefreiheit (BK 2002)



Voraussetzungen für die Erfüllung der Zielvorstellung der Rissefreiheit bzw. der Vermeidung von Zugspannungen sind optimal gegeben.

Im Hochbau werden lediglich im Fertigteilbau zwängungsfreie Lagerungen ausgeführt, weshalb der Spannbeton dort mit der gleichen Zielvorstellung wie im Brückenbau erfolgreich eingesetzt wurde. Im Ortbeton hingegen werden Lager und Gelenke weit gehend vermieden. Es werden fugenlose Decken mit biegesteifen Verbindungen mit Stützen, Wänden und Kernen bevorzugt. Bei diesen Randbedingungen sind Risse unvermeidlich. Anfänglich werden diese durch das Abklingen der Hydrationswärme und später durch das allmählich einsetzende Schwinden verursacht. Somit kann das Paradigma der Rissefreiheit, das bisher zur Berechnung der erforderlichen Vorspannkraft durch Einhalten von zulässigen Zugspannungen in der vorgedrückten Zugzone diente, nicht mehr sinnvoll aufrechterhalten werden. An seine Stelle tritt der Nachweis der Durchbiegungen (Bild 2) unter den maßgeblichen Einwirkungen und der Wirkung der Vorspannung.

Bild 2: Verringerung der Durchbiegung durch die Vorspannung (BK2002)



Bei weit gespannten Stahlbetondecken bestimmt der Durchbiegungsnachweis und nicht der Tragsicherheitsnachweis die Deckendicke. Die Durchbiegung wird ihrerseits in hohem Maße von der Eigenlast der Decke beeinflusst. Es ist deshalb sinnvoll, die Decken schlanker anzulegen und die zulässigen Durchbiegungen durch den zusätzlichen Einbau von Spanngliedern einzuhalten. Die erforderliche Vorspannkraft wird somit aus der Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen und nicht mehr aus jener der zulässigen Spannungen berechnet.

3 Spannverfahren

Im Brückenbau wurden in der Vergangenheit Spannglieder mit nachträglichem Verbund verwendet. Spannglieder mit sofortigem Verbund kamen nur bei Fertigteilen zur Anwendung. Erst in jüngster Zeit kommen verbundlose Spannglieder zum Einsatz. Mit der Markteinführung der Monolitze und der daraus hergestellten Bänder verfügt die Bauwirtschaft über Spannglieder, die in gerissenen Stahlbetonbauteilen problemlos eingesetzt werden können. Im Einzelnen lassen sich die nachstehenden Unterschiede zu Spanngliedern mit Verbund erkennen.

- Die Tragsicherheit ist etwas geringer, da der Spannstahl in der Regel nicht ins Fließen gebracht werden kann.
- Der doppelte Korrosionsschutz der Monolitze bleibt auch im Riss voll erhalten. Die zulässige Rissbreite ist somit nicht mehr vom Spannstahl abhängig, sondern richtet sich nach dem Betonstahl und beträgt $w_{zul} = 0,30 \text{ mm}$.
- Die zusätzliche Stahldehnung am Riss ist sehr gering. Die Rissbreiten bewirken bei Spanngliedern ohne Verbund Dehnungen über die gesamte Länge, während sie bei im Verbund liegenden Stählen nur Dehnungen innerhalb der einzelnen Einleitungslängen bewirken. Letztere sind entsprechend größer.
- Die Spannungsschwankungen unter wechselnden Lasten sind somit ebenfalls gering, was sich günstig auf die Ermüdungsfestigkeit auswirkt.

Für den baulichen Brandschutz gelten für beide Spannverfahren die gleichen Anforderungen. Allerdings haben Brandversuche am IBMB der TU Braunschweig gezeigt, dass mit verbundlosen Spanngliedern vorgespannte Platten kleinere bleibende Durchbiegungen aufweisen als Stahlbetonplatten, was eine allfällige Nachnutzung erleichtert.

Unter Abwägung der angeführten Vor- und Nachteile wird für die weiteren Überlegungen den verbundlosen Spanngliedern der Vorzug gegeben. Für solche wurden die beiden bereits erwähnten Strategien, nämlich die freie Spanngliedlage und der vorgespannte Stahlbeton, entwickelt.

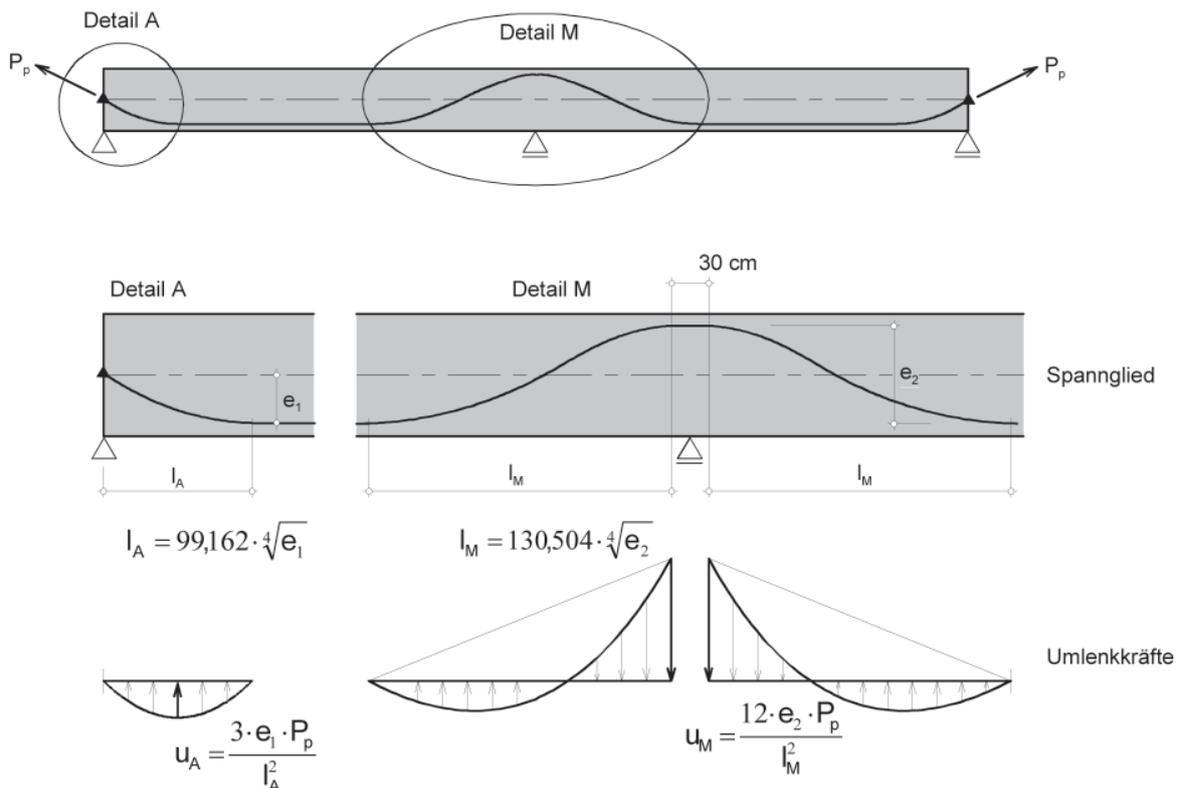
4 Die freie Spanngliedlage

Die freie Spanngliedlage ist ein Verfahren zur Verlegung der verbundlosen Spannritzen und wendet sich somit an die Baufirmen. Die freie Spanngliedlage trägt diese Benennung, da sie in der Regel ohne Unterstellungen des Spanngliedes auskommt. Für Decken bis 45 cm Dicke ist dies in den einschlägigen österreichischen Zulassungen vorgesehen. In Deutschland ist DIN 1045-1, Abschnitt 12.10.4.(7) heranzuziehen. In den bisherigen Zulassungen waren die Unterstellungen für die Spannglieder in 1,0 bis 1,3 m Abstand gefordert worden. Da plattenartige Bauteile in der Regel keine Schrägzugbewehrung benötigen, müssen die Spanngliederunterstellungen an den geplanten Verlauf des Spanngliedes einzeln angepasst und eingemessen werden, was sehr kostenintensiv ist. Bei der freien Spanngliedlage wird hingegen das Spannglied nur an den Hochpunkten mit der oberen schlaffen Bewehrung an jeweils zwei Stellen verbunden und hängt sonst frei durch (Bild 3). Im Feldbereich liegt das Spannglied an der unteren schlaffen Bewehrung auf und wird mit dieser verrödelt. Im Übergangsbereich von

der unteren zur oberen Spanngliedlage sind keine Spanngliederunterstellungen erforderlich. Im Verankerungsbereich wird das Spannglied bis zur Plattenmitte angehoben. Der Wegfall des Unterstellens der Spannglieder ergibt Einsparungen, die sich in einer Reduktion der Kosten für die Vorspannarbeiten von bis zu 20 % niederschlagen.

Die freie Lage des Spanngliedes zwischen den Befestigungen an der oberen bzw. unteren schlaffen Bewehrungslage war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen am Institut für Betonbau der Universität Innsbruck. Theoretische Ableitungen und die Vermessung von Spanngliedern ergaben übereinstimmend einen Verlauf der Spannglieder in Form einer Parabel 4. Ordnung. Dieser Verlauf gilt in gleicher Weise für Einzellitzen, Zwillings- oder Vierlingsbänder aus Monolitzen. Im Bereich einer Endanhebung ist das Spannglied einfach gekrümmt, bei einer Mittelanhebung wechselt es zweimal die Krümmungsrichtung (Bild 3), weshalb diese beiden Fälle getrennt ausgewertet wurden. Die nachstehenden Angaben beziehen sich auf verbundlose Litzen F 150 (0,62"). Von Interesse ist der Zusammenhang zwischen der Höhe der Anhebung e und der

Bild 3: Spannglied und Umlenkkräfte bei freier Spanngliedlage (Betonkalender 2002)



frei durchhängenden Länge der Spannlitze l. Diese beträgt

für die Randanhebung $l_A \approx 99 \cdot 4\sqrt{e}$ und

für die Mittenanhebung $l_M \approx 131 \cdot 4\sqrt{e}$,

wobei e und l in cm einzusetzen sind. Die Länge l_M wird von der jeweils äußersten Befestigung an der oberen Bewehrungslage gemessen. Mit diesen Angaben ist die Lage des Spanngliedes in der freien Strecke bestimmt und es können daraus seine Neigung und Krümmung durch Differenzieren ermittelt werden.

Eingehend geprüft wurde die Lagesicherheit der Litzen während des Betoniervorgangs. Mit finanzieller Unterstützung durch die Sektion Spannbeton des Österreichischen Betonvereins konnten Betonierversuche unter Baustellenbedingungen durchgeführt werden. Die Versuchsergebnisse und die darauf aufbauenden Vergleichsrechnungen bestätigten die Richtigkeit der festgelegten Befestigungen an den Bewehrungslagen aus Betonstahl. Die erweiterten Zulassungen für Spannglieder ohne Verbund enthalten Regelungen, die auf den obigen Forschungsergebnissen beruhen.

Die Begrenzung der größten Plattendicke mit 0,45 m ergibt sich aus der Forderung, den minimalen Krümmungsradius der Litzen von $R_{\min} = 2,50$ m bei der Mittenanhebung nicht zu unterschreiten. Bei einfeldrigen Tragwerken, die nur Randanhebungen aufweisen, bestehen gegen größere Trägerhöhen keine technischen Bedenken. Das Gleiche gilt für durchlaufende Tragwerke, falls die Einhaltung des kleinsten Krümmungsradius über der Mittenanhebung durch entsprechende Unterstellungen des Spanngliedes gesichert ist.

Mit den bei den Betonierversuchen gewonnenen Erfahrungen bezüglich des Arbeitsablaufs wurde folgende Montageanweisung entwickelt:

- Einbau der unteren Bewehrungslage auf Abstandhaltern
- Auslegen der Spannglieder auf der unteren Bewehrung, ohne feste Verbindung der Hüllrohre mit dem Ankerkörper bzw. dem Übergangsrohr
- Einbau der Abstandhalter für die obere Bewehrungslage
- Verlegen der oberen Bewehrung
- Anheben der Spannglieder an den Hochpunkten und verbinden mit der oberen Bewehrung

- Verbinden der Spannglieder mit der unteren Bewehrung
- Abdichten des Anschlusses der Spannglieder an die Übergangsrohre der Verankerungen mittels Klebeband

Für die Abstandhalter der beiden schlaffen Bewehrungslagen sind die Anforderungen von ÖNORM B 4700:2001, Tabelle 13 „Abstandhalter; Richtwerte für Anzahl und Anordnung“ unbedingt einzuhalten, damit ein ausreichend steifer Bewehrungskorb entsteht. Die Spannglieder liegen geschützt unterhalb der oberen Bewehrung und können beim Betonieren von den Arbeitern nicht betreten werden.

5 Vorgespannter Stahlbeton

Die Nachweisverfahren für den klassischen Spannbeton, gemeint sind die volle oder beschränkte Vorspannung, gingen von ungerissenen Betonquerschnitten aus. Weiters galt die Forderung, dass das Tragwerk in Spannrichtung frei beweglich sein müsse. Im Hochbau muss hingegen stets mit Rissbildung in Form von Biege- und Trennrissen gerechnet werden. Dies waren auch die wesentlichen Gründe, warum bei den nicht zwängungsfrei gelagerten Decken im Hochbau die Vorspannung kaum zum Einsatz kam.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob ein unverschieblich festgehaltener Träger vorgespannt werden kann. Es zeigt sich, dass dies mit geraden Spanngliedern tatsächlich nicht möglich ist. Das Spannglied steht zwar unter Zug, der Träger kann sich aber nicht verkürzen und somit keine Längsdehnungen und Längsspannungen erhalten. Die Vorspannkraft fließt zur Gänze in die festgehaltenen Auflager ab. Das Gleiche gilt auch für die Normalkraft von umgelenkten Spanngliedern. Allerdings treten bei diesen zusätzlich Umlenkkräfte auf, die sehr wohl einen Spannungszustand im Beton bewirken. Das gekrümmte Spannglied ist nur im Gleichgewicht, wenn an seiner Innenleibung radial nach außen gerichtete Umlenkkräfte der Größe $u = P/R$ angreifen. Die Reaktionen wirken auf den Beton zum Krümmungsmittelpunkt des Spanngliedes hin und beanspruchen den Beton auf Biegung und Querkraft. Diese Wirkung bleibt auch dann erhalten, wenn der Beton Trennrisse zufolge Schwindens aufweist.

Durch das Aufbringen einer Vorspannung wird vornehmlich das Verhalten eines Tragwerks im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) beeinflusst. Zum Nachweis der Tragsicherheit (ULS) können sowohl der Spannstahl als auch der Betonstahl herangezogen werden. Somit steht es dem Planer frei, die Anteile dieser beiden Bewehrungen nach anderen Anforderungen festzulegen.

Im Hochbau wird unter Gebrauchslast die Einhaltung einer zulässigen Durchbiegung angestrebt (siehe Abschnitt 2). Anstelle der Vermeidung von Rissen tritt die Begrenzung der Rissbreiten. Diese kann jedoch bei verbundlosen Spanngliedern nur durch Betonstahl erreicht werden. Weiters ist eine möglichst geringe Vorspannkraft anzustreben, damit Verkürzungen der Plattenmittelfläche und damit Zwängungen in den anschließenden Bauteilen klein gehalten werden. Die geringste Vorspannkraft ergibt sich, wenn die Tragsicherheit alleine durch den Betonstahl nachgewiesen wird. Die erforderliche Vorspannkraft berechnet sich dann aus der Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen. Dabei ist jedoch maßgebend, welcher Anteil der Vorspannkraft als Druckkraft in den Beton eingeleitet wird. Im Zweifelsfall ist lediglich die Wirkung der Umlenkkräfte anzusetzen. Es liegt somit auf der Hand, derart konstruierte Bauteile als vorgespannten Stahlbeton zu benennen.

Vorgespannter Stahlbeton weist eine Reihe günstiger Eigenschaften auf. Der hohe Anteil von Bewehrungen aus Betonstahl wirkt sich günstig auf die Rissbreiten aus und verleiht ihm die Duktilität des Stahlbetons. Durch den geringen Vorspanngrad werden Zwangsbeanspruchungen durch Rissbildung weit gehend abgebaut. Falls zur Tragsicherheit auch verbundlose Spannglieder beitragen, dann sind zur Sicherung gegen progressiven Kollaps in den Feldern Zwischenverankerungen auszuführen. Bei vorgespanntem Stahlbeton entfällt diese Forderung und die Spannglieder müssen nur an den Plattenrändern verankert werden. Dies ergibt eine zusätzliche Kosteneinsparung.

Manche Regelwerke gestatten beim Durchstanzen von Flachdecken die vertikale Komponente der Vorspannkraft entlastend anzusetzen. Diesbezüglich lassen neueste Versuchsergebnisse zur Vorsicht raten. Die Monolitzen und insbesondere die Viererbänder durchörterten den

Durchstanzkegel und schwächen ihn somit, was bei der Bemessung zu beachten wäre. Der vorgespannte Stahlbeton ist auch hierbei von Vorteil, da er im Vergleich zu anderen Bemessungskonzepten mit der geringsten Anzahl von Litzen das Auslangen findet.

Auf Grund der zahlreichen Erfahrungen mit der neuen Bauweise lassen sich die Entwurfskriterien für eine Decke aus vorgespanntem Stahlbeton wie folgt zusammenfassen:

- Die Deckendicke kann in der Regel um 15 % – im Ausnahmefall bis zu 25 % – kleiner gewählt werden als jene Werte, die man aus den Grenzschlankheiten gemäß ÖNORM B 4700, Tabelle 12, 3. Spalte erhält.
- Zum Nachweis der Tragsicherheit wird lediglich Betonstahl verwendet.
- Falls der Durchbiegungsnachweis nicht gelingt, werden Spannlitzen im erforderlichen Ausmaß zugelegt, ohne den Querschnitt des Betonstahls zu reduzieren.

Dieses einfache Bemessungskonzept führt zu konstruktiv einfachen, duktilen und robusten Konstruktionen, die nahe dem Kostenminimum liegen.

6 Normen und Zulassungen

- ÖNORM EN 1992-1-1: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau.
- ÖNORM B 4700: 2001: Stahlbetontragwerke, EUROCODE-nahe Berechnung, Bemessung und konstruktive Durchbildung.
- DIN 1045-1: 2001: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- Erweiterung der Zulassung für Vorspannung ohne Verbund der Firmen DSI und VT-Vorspanntechnik; GZl. 860.300/27-VI/B/97 vom 26.11.1997, Republik Österreich, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien.
- Zulassung 2002, Monolitzenspannverfahren VSL F 150 ohne Verbund, GZ 327120/25-III/A/7/02, Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

- Zulassung 2/2004, Litzenverfahren VSL F 150 ohne Verbund aus Spanngliedern mit 2, 3 und 4 Litzen GZ: 327120/12-II/ST2-04, Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.

7 Literaturliste

Fachpublikationen

- 1997 WICKE, M.: Vorgespannter Stahlbeton. 4. Leipziger Massivbauseminar 97 »Aus Schäden lernen im Konstruktiven Ingenieurbau«, Band 4, S. III-1 bis 12, Leipzig 1997.
- 1998 WICKE, M.; MAIER, K.: Freie Spanngliedlage. Bauingenieur 4/1998, S. 162-169.
- 1998 WICKE, M.; MAIER, K.: Free Tendon Layout. Österreichische Beiträge zum XIII. FIP-Kongress in Amsterdam. Heft 32/Mai 1998 der Schriftenreihe des Österr. Betonvereines, S. 3-8, Wien 1998.
- 1998 WICKE, M. et al.: Verbundlose Vorspannung im Hochbau - Freie Spanngliedlage. Schriftenreihe des Österreichischen Betonvereines, Heft 34/September 1998, 96 Seiten, Wien 1998.
- 1999 WICKE, M.: Die Freie Spanngliedlage bei verbundloser Vorspannung. Festschrift Falkner - »Betonbau – Forschung, Entwicklung und Anwendung«, Heft 142 IBMB, Braunschweig 1999, S. 313-320.
- 2000 MAIER, K.; WICKE, M.: Die Freie Spanngliedlage - Entwicklung und Umsetzung in die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 2/2000, S. 62-71.
- 2000 WICKE, M.; MAIER, K.: Verbundlose Spannglieder in Hochbaudecken: Freie Spanngliedlage - Vorgespannter Stahlbeton. Tagungsband zum Münchner Massivbauseminar 2000 (Sonderpublikation der Zeitschrift Bauingenieur, Hrsg. K. Zilch), S. 144-156
- 2001 WICKE, M.: Verbundlose Spannglieder im Hochbau: Freie Spanngliedlage, vorgespannter Stahlbeton. Braunschweiger Bauseminar 2001, 8./9.11.2001, Braunschweig 2001, ISBN 3-89288-140-5, S. 49-60.
- 2002 WICKE, M.; MAIER, K.: Anwendung des Spannbetons. In: Beton-Kalender 2002, 91. Jahrgang, Band 2, S. 113-179, Ernst & Sohn, a Wiley Company Berlin 2002.
- 2002 MAIER, K.: Free Tendon Layout. Proceedings of IABSE Symposium Melbourne 2002.
- 2002 BRUNNSTEINER, A.: Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund. Ausführungsbeispiele mit freier Spanngliedlage. Schriftenreihe der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Heft 50, S. 85-90, Wien 2002.

Dissertation

- 1999 MAIER, K.: Die Freie Spanngliedlage bei verbundloser Vorspannung im Hochbau. Dissertation an der Universität Innsbruck, Innsbruck 1999.

Diplomarbeiten

- 1994 MÖSSMER, Ch.: Berechnung der Vorspannkräfte an einer verbundlos vorgespannten, einfeldrigen Stahlbetonplatte zur Beherrschung der Durchbiegungen. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1994.
- 1994 LONSING, M.: Durchbiegungskontrolle einer zweifeldrigen Stahlbetonplatte durch Vorspannung ohne Verbund. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1994.
- 1995 SCHINDELAR, J.: Erforderliche Vorspannkräfte zur Erfüllung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit einer Flachdecke mittels verbundloser Vorspannung. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1995.
- 1996 BIRGMANN, H.: Kostenvergleich von einachsigen gespannten Stahlbetonplatten mit und ohne verbundloser Vorspannung. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1996.
- 1997 NEUMAIR, R.: Einhaltung der zulässigen Durchbiegungen zweiachsiger gespannter Rechteckplatten mittels verbundloser Spann-litzen. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1997.
- 1999 ERLACHER, A.: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit einer verbundlos vorgespannten Flachdecke. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 1999.
- 2000 SEEBER, K.: Parameterstudie zur Untersuchung des Einflusses der Normalkraft infolge Vorspannung in einer Hochbau-Flachdecke. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 2000.
- 2000 LANER, A.: Eigenfrequenzanalyse einer verbundlos vorgespannten Hochbaufachdecke. Diplomarbeit am Institut für Betonbau, Innsbruck 2000.