Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 104 (1986)
Heft: 10

Artikel: Vorspannung im Hochbau
Autor: Friedrich, Thomas / Curiger, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76094

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 03.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vorspannung im Hochbau

Von Thomas Friedrich und Peter Curiger, Zürich

Zur Beurteilung einer Anwendung der Vorspannung im Hochbau wird vorerst deren Wirkungsweise in allgemeiner Form dargestellt. Die Möglichkeiten, das Gebrauchsverhalten zu beeinflussen, werden behandelt, und die Beiträge zur Gewährleistung der Tragfähigkeit aufgezählt. Die Anforderungen an Hochbaukonstruktionen werden aufgelistet und daraus bauteilspezifische Kategorien abgeleitet. Dies erlaubt, die Anwendungsgrenzen für die vorgespannten Tragwerke des Hochbaus festzulegen. Die spezifischen Auswirkungen der Vorspannung auf das Tragverhalten der Hochbaukonstruktionen, insbesondere der flächigen Bauteile, sind Gegenstand der weiteren Darlegungen. Im Vordergrund stehen die Effekte zur Verbesserung des Gebrauchsverhaltens sowie die Möglichkeiten einer gezielten Beeinflussung der Tragwirkung mit den damit verbundenen Konsequenzen zur Gewährleistung der Tragfähigkeit.

Mit der Beschreibung ausgeführter Objekte wird auf die konkreten, mit der Vorspannung erzielten Wirkungen eingegangen. Es ist zu erwarten, dass die Vorspannung dank ihrer Eigenschaft, das Tragverhalten zu beeinflussen und zu verbessern, eine erweiterte Anwendung im Hochbau finden wird.

Einleitung

Die Domäne der Vorspannung sind und waren die Balkentragwerke, und damit ist die Anwendung überwiegend auf den Brückenbau abgestimmt. Die genaue Kenntnis des Tragverhaltens dieser in der Tragwirkung eindimensionalen Konstruktionen erlaubt, die Vorspannung gezielt einzusetzen und damit das Tragverhalten positiv zu beeinflussen. Die Auswirkungen auf diese Tragwerke sind bekannt, so dass in Form von zulässigen Spannungen regelrecht Anleitungen für die Bemessung vorgespannter Bauwerke möglich wurden. Für schlanke und weitgespannte Balkentragwerke hat sich die Vorspannung durchgesetzt und ist allgemein akzeptiert. Der moderne Massivbrückenbau ist ohne Vorspannung nicht denkbar.

Hochbaukonstruktionen bestehen zu einem grossen Teil aus flächigen Bauteilen, deren Tragverhalten von einer zweidimensionalen Lastabtragung bestimmt wird. Das zur Beschreibung dieser Tragwirkung notwendige Berechnungsmodell ist komplexer als für den eindimensionalen Fall der Balkentragwerke. Entsprechend schwierig zu beurteilen sind die Auswirkungen der Vorspannung auf solche Tragwerke.

Zulässige Spannungen stellen in diesem Fall kein geeignetes Kriterium für die Nachweise und noch weniger für die Dimensionierung dar. Erst die Anwendung der Plastizitätstheorie Stahl- und Spannbetonbau [7] gestattet eine liberale Auslegung des Tragverhaltens. Die Bemessung orientiert sich nicht mehr an den strengen Regeln für den Querschnitt, sondern an dem Tragverhalten der gesamten Konstruktion. Die Forderung nach Gleichgewicht und das Einhalten der Fliessbedingungen [6] gestattet eine freizügige Beeinflussung in der Lastabtragung innerhalb der vom Widerstand der Konstruktion vorgegebenen Grenzen. Damit lässt sich das Tragverhalten beeinflussen und auf eine entsprechende Widerstandsverteilung abstimmen. Dieses Berechnungsmodell erlaubt, die Vorspannung auf flächige Tragkonstruktionen anzuwenden, um das Tragverhalten gezielt zu beeinflussen.

Mit der Anwendung der Vorspannung zur Gewährleistung der Tragfähigkeit wird gleichzeitig, wie im Brückenbau, das Verhalten unter Gebrauchslasten verbessert.

Wirkungsweise der Vorspannung

Das Prinzip der Vorspannung mit nachträglichem Verbund besteht darin, Stahl hoher Streckgrenze gegen den Beton vorzudehnen. Die mit der Vordehnung des Spannstahls erzeugten Kräfte lassen sich als Einwirkung auf das Tragwerk wie folgt darstellen:

□ Die kontinuierlichen oder konzentrierten Umlenkungen der Spannglieder erzeugen bei geeigneter Kabelführung Kräfte, die den äusseren Lasten entgegenwirken. Durch ihre teilweise Kompensation verringern sich die Schnittkräfte sowie die Durchbiegungen. Daraus resultieren schlankere Querschnitte und entsprechend geringere Eigengewichtsbeanspruchungen (Bild 1).

□ Die eingetragenen Normalkräfte bauen über dem Querschnitt eine Druckspannungsreserve auf, die den Spannungssprung im Stahl beim Entstehen eines Risses reduzieren. Die gleichzeitig vorhandene hohe Querschnittssteifigkeit sorgt für geringe Durchbiegungen unter den Nutzlasten, die nicht bereits durch Umlenkkräfte kompensiert waren (Bild 2).

Diese Aufzählung entspricht der gängigen Modellvorstellung von der Vorspannung als äusseren Last. Diese Last ist wie die übrigen Einwirkungen zu betrachten, die während der Nutzungsdauer des Bauwerkes auftreten. Die Beurteilung dieser Einwirkungen dient als Grundlage für den Nachweis des qualitativ einwandfreien Verhaltens. Die Berücksichtigung der Vorspannung als äussere Last erweist sich für den Nachweis der Gebrauchsfähigkeit als ein geeignetes Berechnungsmodell, zu-

Bild 1. Vorspannung als Belastung aus Umlenkung

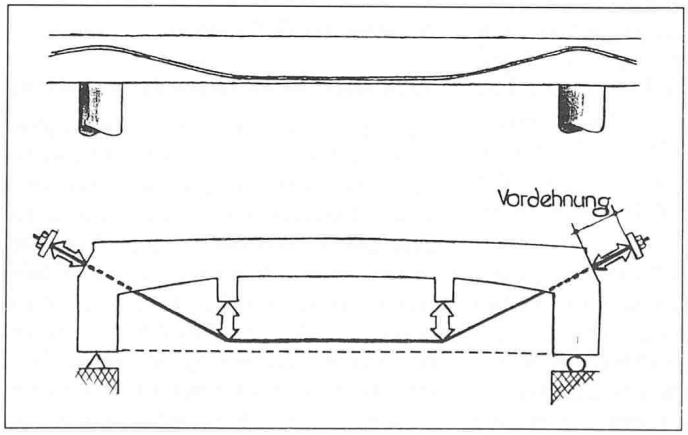
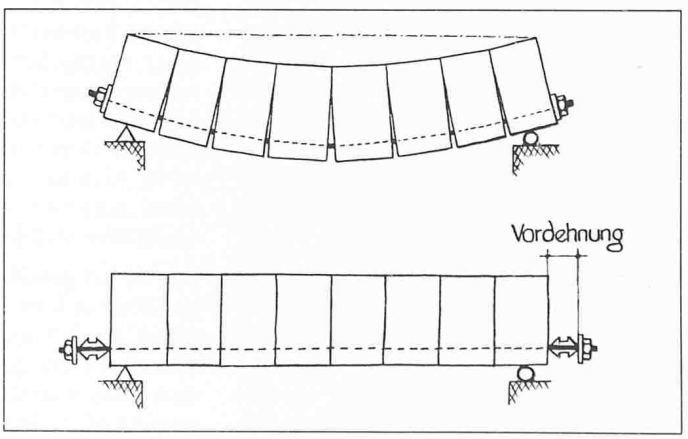


Bild 2. Vorspannung als Normalkraftbeanspruchung



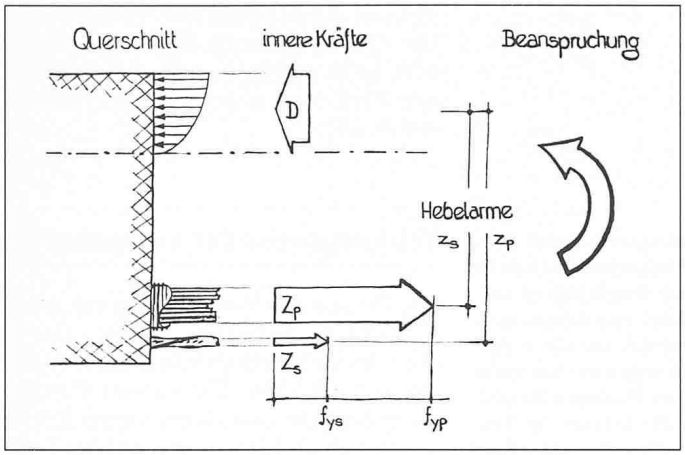


Bild 3. Vorspannunbg als Biegewiderstand

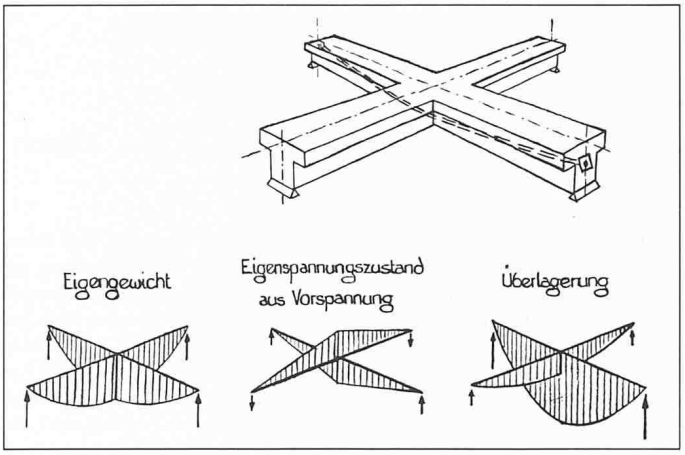


Bild 4. Eigenspannungszustand aus Vorspannung

mal die mit der Vordehnung des Spannstahls erzeugten Kräfte gleichzeitig mit den übrigen Einwirkungen auf das Tragwerk aktiv sind.

Für den Nachweis des Sicherheitsabstandes gegen rechnerische Bruchlasten (Tragfähigkeit) erscheint eine andere Vorstellung zweckmässiger. Zur Ermittlung dieses Sicherheitsabstandes ist es üblich, extreme Lasten einem Tragwerks- und Querschnittswiderstand gegenüberzustellen. Die Frage, ob der Lastfaktor der Vorspannlasten gleich demjenigen der übrigen Lasten ist, lässt schon die ersten Zweifel aufkommen an einem Nachweiskonzept zur Ermittlung der Tragfähigkeit mit der Vorspannung als äusserer Last. Deshalb ist die Berücksichtigung der Vorspannung als Widerstand ein widerspruchsfreies Konzept, besonders weil sich der Widerstand exakt aus der Festigkeit des Spannstahls ermitteln lässt. Dies entspricht dem Konzept des neuen Normentwurfes. [6].

Der Beitrag der Vorspannung zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit lässt sich mit den folgenden zwei Wirkungen darstellen:

□ Die hohe Festigkeit des Spannstahls trägt zu einem hohen Querschnittswiderstand bei (Bild 3).

□ Der durch die Vorspannung statisch unbestimmter Systeme erzeugte Eigenspannungszustand bewirkt eine Umlagerung der Schnittkräfte aus äusseren Lasten [2]. Die spezielle Eigenschaft dieses Zustandes liegt darin, die Beanspruchungen in den Bereichen geringer bis keiner Vorspannung zu Lasten der stark mit Vorspannung durchsetzten Zonen zu reduzieren (Bild 4).

Die beiden aufgeführten Wirkungen ergänzen sich in idealer Weise, indem der hohe konzentrierte Widerstand der Spannstähle nach einer entsprechenden Lastbeanspruchung verlangt, welche durch die Schnittkraftumlagerung mit Hilfe des durch die Vordehnung des Spannstahls erzeugten Eigenspannungszustandes herbeigeführt wird. Dieser Sachverhalt ist in Bild 4 mit dem einfachen Trägerrostmodell dargestellt.

Der für die Lastumlagerung erforderliche Anteil des Eigenspannungszustandes aus Vorspannung wird durch die Behinderung der mit der Vordehnung des Spannstahls eingetragenen Verformung am statisch unbestimmten System erzeugt. Die zur Erfüllung der Verträglichkeit notwendige, lastfreie Schnittkraftverteilung wird auch als Zwängung aus Vorspannung bezeichnet.

Die Eigenschaft der Eigenspannungszustände

Eine wichtige Eigenart der Eigenspannungszustände besteht darin, dass die Summe der durch sie erzeugten Auflagerreaktionen verschwindet, es sich also um Gleichgewichtszustände handelt. Von dieser Eigenschaft wird bei der Ermittlung der Traglast nach dem statischen Satz der Plastizitätstheorie Gebrauch gemacht, indem die Überlagerung von Gleichgewichtszuständen wieder zu solchen führt [1]. Ausgangspunkt dieser Kombination bildet die elastisch ermittelte Schnittkraftverteilung, deren Schlusslinie durch Überlagerung von Eigenspannungszuständen verschoben wird. Die dadurch erwirkbare Schnittkraftumlagerung lässt sich einer vorgegebenen Widerstandsverteilung anpassen (Bild 5). Der so gedachte Schnittkraftverlauf wird sich in Wirklichkeit durch das Ausbilden plastischer Gelenke einstellen, sofern das dazu notwendige Rotationsvermögen vorhanden ist [6].

Die derart gewählten Eigenspannungszustände unterscheiden sich von denjenigen aus Vorspannung dadurch, dass sie sich in der gewünschten Form nur durch das Ausbilden plastischer Gelenke einstellen. Die in Form von Rissen sichtbar werdende Umlagerung kann sich unter Umständen je nach Umlagerungsgrad bereits unter Gebrauchslasten bemerkbar machen.

Dieses Verhalten tritt nicht ein, und ein Nachweis zur Gewährleistung der Rotationsfähigkeit ist nicht erforderlich, wenn der durch Vorspannung erzeugte Eigenspannungszustand herangezogen wird. Dieser stellt sich einzig durch die initialen Beanspruchungen ein und nicht durch das Ausbilden eines plastischen Gelenkes. Durch das Erzeugen der initialen Beanspruchung mit der Vorspannkraft wird sichergestellt, dass der Eigenspannungszustand bereits unter Gebrauchslasten bleibend vorhanden ist und somit das Gebrauchsverhalten beeinflusst. Damit unterscheidet sich der von der Vorspannung erzeugte Eigenspannungszustand von denjenigen, die sich durch aufgezwungene Tragwerksverformungen (Zwängungen aus Temperaturen, Lagersetzungen) herstellen lassen. Während derjenige aus Vorspannung auch bei durch Rissbildung oder Kriechen verursachten Steifigkeitsänderungen der Tragwerkkonstruktion in praktisch voller Grösse erhalten bleibt, werden die Zwangsschnittkräfte aus aufgezwungenen Verformungen weitgehend abgebaut [5]. Im Gebrauchszustand sind die Eigenspannungen aus Vorspannung anders als diejenigen aus aufgezwungenen Verformungen zu behandeln.

Nachweise für vorgespannte Tragwerke

Für den Nachweis der Tragfähigkeit dient im Fall vorgespannter Tragwerke sinnvollerweise die elastisch ermittelte Schnittkraftverteilung aus äusseren Lasten, die mit Hilfe des Eigenspannungszustandes aus Vorspannung so umgelagert wird, dass sie sich der vor allem durch die Vorspannstähle gebildeten Widerstandsverteilung angleicht. Weitere Nachweise sind bei dieser Umlagerung keine zu führen, und ein dadurch

verursachtes schadenbildendes Verhalten bereits unter Gebrauchslasten ist nicht zu erwarten.

Zur Gewährleistung der Gebrauchsfähigkeit ist die Vorspannung auf der Lastseite und für das Ermitteln der Tragfähigkeit auf der Widerstandsseite zu berücksichtigen. Ihre Wirkungsweise erfüllt gleichermassen beiderlei Anforderungen.

Sie bewirkt:

- eine Reduktion der Durchbiegungen
- eine Verminderung der Rissbreiten

und gleichzeitig liefert sie:

- den erforderlichen Tragwiderstand
- einen für die Schnittkraftumlagerung geeigneten Eigenspannungszustand.

Anforderungen im Hochbau

Die Bauteile des Hochbaus sind überwiegend flächige Konstruktionen wie Wände, Fassaden, Decken und Bodenplatten, die in Form von Trägern und Wänden linienförmig und durch Stützen punktförmig gelagert sind. Als wichtigstes stabförmiges Tragelement ist der Abfangträger zu erwähnen, der jedoch immer in Kombination mit einem flächigen Konstruktionsteil anzutreffen ist.

Die Basis zur Dimensionierung der einzelnen Tragelemente bildet die Forderung nach ausreichender Tragfähigkeit und einer genügenden Gebrauchsfähigkeit. Im Gegensatz zu den linienförmigen Tragwerken weisen die Flächentragwerke des Massivbaus, dank ihrer zweidimensionalen Lastabtragung, eine hohe Tragkapazität auf. Das führt dazu, dass weniger die Kriterien der Tragfähigkeit als diejenigen der Gebrauchsfähigkeit die Grundlage zur Bemessung liefern. Je nach Nutzungsziel des Bauwerkes stellen sich verschiedene Anforderungen, deren Erfüllung mit materialtechnischen, konstruktiven und bemessungstechnischen Massnahmen anzustreben ist. Angaben dazu finden sich in [3]. Die weitere Betrachtung bezieht sich auf die bemessungstechnischen Massnahmen, die mit den Anforderungen an das Riss-, Verformungs- und Schwingungsverhalten umschrieben sind.

In den wenigsten Fällen beeinträchtigen Risse oder Verformungen das Tragvermögen, aber sie wirken schädlich auf das Aussehen, die Funktionstüchtigkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes. Wie wenig den dominierenden Anforderungen an das Gebrauchsverhalten speziell im Hochbau Rechnung getragen wird, zeigen die Mängel vieler Bauten in Form von Rissen und Durchbiegungen.

Welches Gewicht diesem Sachverhalt jedoch in Zukunft beizumessen sein wird, machen die Bestrebungen deutlich, den Nachweis der Gebrauchsfähigkeit gleichberechtigt neben denjenigen der Tragfähigkeit zu stellen. Neuere Erkenntnisse über den Einfluss und die Kontrolle der Rissweiten sowie neuere Angaben über Mindestbewehrungsgehalt betonen die Bedeutung des Gebrauchsverhaltens [6].

Aufgrund dieser Konstellationen lassen sich die Hochbaukonstruktionen grob in folgende Kategorien einordnen: solche, bei denen

□ kein Nachweis erforderlich ist, da die geforderte Minimalarmierung allen Anforderungen gerecht wird. Dies trifft auf einen Grossteil der Hochbauten des Wohnungsbaus zu;

□ die Gewährleistung der Tragfähigkeit keinerlei Probleme bietet, während die Anforderungen der Gebrauchsfähigkeit nur mit entsprechenden Massnahmen zu erreichen sind. Dies trifft zu für Bauteile, die neben den üblichen Einwirkungen aus Last solchen aus Zwängungen ausgesetzt sind. Darunter fallen Wände, Decken und Bodenplatten, deren Verformungen aus Schwinden, Kriechen und Temperatureinwirkungen behindert werden. Bauteile mit hohen Anforderungen an die Dichtigkeit (z. B. Behälter, Bauteile im Grundwasser) gehören ebenfalls zu dieser Kategorie;

□ die Tragfähigkeit nur mit entsprechenden Anstrengungen zu gewährleisten ist. Für diesen Fall stellt die Erfüllung der Anforderungen an das Gebrauchsverhalten eine noch viel grössere Hürde dar. Dies trifft zu für weitgespannte Tragwerke sowie solche mit hohen Nutzlasten und Abfangträgern, die aufgrund ihrer grossen Steifigkeit Lasten anziehen. Für derartige Bauteile ist die Tragfähigkeit mit einem entsprechenden Biegewiderstand zu garantieren, und im Fall punktgestützter Platten ist für eine ausreichende Sicherheit gegen Durchstanzen zu sorgen. Die Begrenzung der Durchbiegungen sowie die Vermeidung der Rissbildung stellt sich als wichtigste Aufgabe für ein einwandfreies Verhalten während der Nutzung.

Anwendung der Vorspannung im Hochbau

Von den drei im vorherigen Abschnitt aufgezählten Kategorien eignen sich für die Anwendung der Vorspannung nur die beiden letzten. Dank dem Vorspannprinzip wird mit der Stahlfestigkeit die Tragfähigkeit gewährleistet, und gleichzeitig wirken die mit der Vordehnung erzeugten Kräfte günstig auf das Gebrauchsverhalten. Der Vorteil dieses Prinzips liegt darin, dass bei Verwendung von Vorspannstahl zur Gewährleistung der Tragfähigkeit die Anforderungen der Gebrauchsfähigkeit vielfach automatisch erfüllt sind. Daraus lässt sich bereits eine einfache Be-

Bild 5. Überlagerungsmöglichkeit mit Eigenspannungszuständen

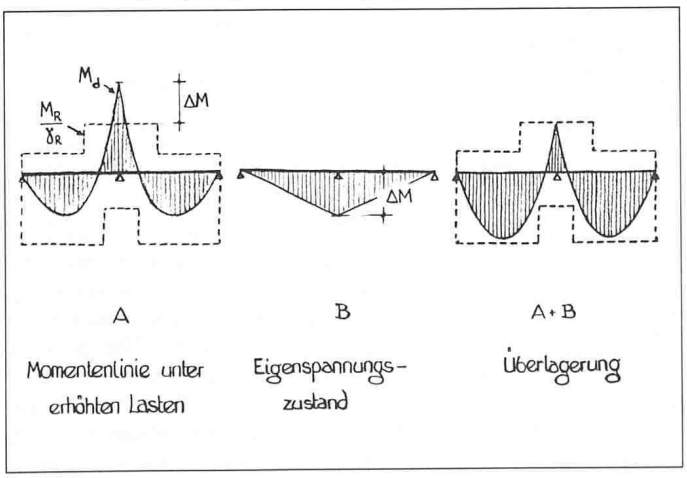
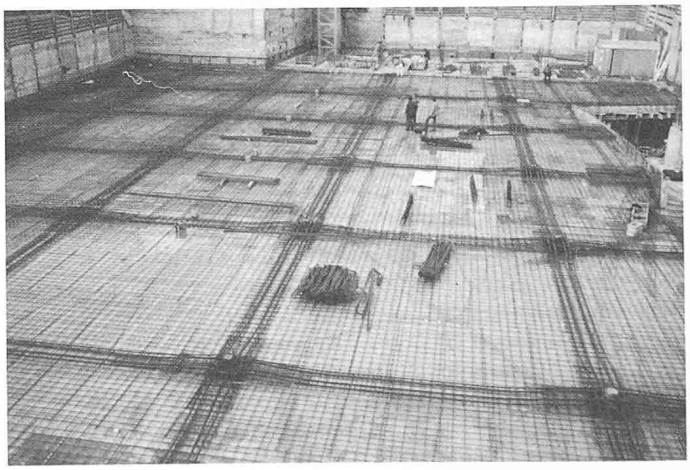


Bild 6. Parkgarage, Leue-Zentrum, Horgen



messungsregel für die Vorspannung ableiten, indem möglichst viel des erforderlichen Widerstands mit Spannstahl abzudecken ist. Die Anordnung und Verteilung des Widerstands ist relativ frei wählbar, da dank dem von ihr erzeugten Eigenspannungszustand eine entsprechende Umverteilung möglich ist. Einzig die Summe der Widerstände muss der totalen Beanspruchung entsprechen. Die im vorhergehenden Abschnitt zuletzt erwähnte Kategorie von Hochbaukonstruktionen ist demnach besonders geeignet für die Anwendung der Vorspannung.

Orientiert sich die Grösse der Vorspannung an den Kriterien der Gebrauchsfähigkeit, so ist entweder die Tragfähigkeit automatisch gewährleistet, oder sie ist problemlos zu gewährleisten, wie dies für einen Grossteil der Bauteile für den Hochbau zutrifft. Für die im vorhergehenden Abschnitt erwähnte mittlere Kategorie von Hochbaukonstruktionen stellt die Vorspannung ein geeignetes Mittel dar, die hohen Anforderungen an das Gebrauchsverhalten zu gewährleisten. Die Bemessung der Vorspannung richtet sich nach den einzuhaltenden Durchbiegungen, den Kriterien für die Rissweiten oder nach den Anforderungen an die Dichtigkeit. Im Falle der Durchbiegungen ist eine Vorspannkraft zu wählen, deren Umlenkkräfte einen Teil der äusseren Lasten kompensieren. Eine Reduktion der für die Rissweite charakteristischen Stahlspannungen im gerissenen Querschnitt gelingt mit entsprechend über dem Querschnitt aufgebauter Druckspannungsreserve. Diese ist für die Bestimmung der erforderlichen Vorspannung massgebend. Für das Einhalten einer ausreichenden Dichtigkeit ist ebenfalls genügend Druckspannung vorzuhalten.

Verhalten verformungsgekoppelter Bauteile

Die Anwendung der Vorspannung im Hochbau sowie die damit zu erzielende Wirkung setzt die Kenntnis des statischen Modells voraus. Die Wahl des Modells wird erschwert durch die komplexe Tragfunktion der gesamten Struktur, und eine Klarheit des statischen Systems wie für linienförmige Tragkonstruktionen ist nicht von vornherein gegeben. Durch das flächige Abtragen der Lasten beeinflussen sich nicht nur die Tragelemente, sondern auch die Tragrichtungen gegenseitig. Man spricht in diesem Fall von einem verformungsgekoppelten Tragsystem. Der Vorteil dieser Systeme besteht in der grossen Tragfähigkeit und der Möglichkeit, die Lastabtragung zu beeinflussen. Die gegenseitige Abhängigkeit der Tragrichtungen durch Koppelung verursacht schon bei geringen Steifigkeitsänderungen eine deutliche Schnittkraftumlagerung. Ein Verlust der Steifigkeit in einer Richtung erzwingt eine Lastumlagerung in die andere, verbunden mit einem Verformungszuwachs. Umgekehrt wird die Richtung der Lastabtragung durch Vorgabe von unterschiedlich angeordneten Steifigkeiten konzeptionell erzwungen (Abfangträger, Unterzüge).

Ein der Steifigkeitsänderung äquivalenter Effekt besteht im Aufbringen konzentrierter Verformungen in Form von Dehnungen oder Krümmungen. Beiden Effekten gemeinsam ist, dass sie sich mit einem Eigenspannungszustand beschreiben lassen. Der eine stellt sich erst bei Überbeanspruchung durch Steifigkeitsänderung ein, während der andere vorgängig erzeugt werden kann (siehe Abschnitt oben).

Analog zur Anordnung unterschiedlicher Steifigkeiten erlaubt das bereichsweise Erzeugen von Verformungszuständen, gezielt den Verlauf der Schnittkräfte und der Verformungen zu beeinflussen. Ein mit einer initialen Krümmung versehener Streifen eines Plattentragwerkes erzielt die gleiche Wirkung wie die eines dort angeordneten Unterzuges.

Diese Streifen lassen sich mit der Anordnung von Vorspannkabeln ausbilden. Die initiale Krümmung wird mit der Vordehnung des Spannstahls sowie mit der Exzentrizität des Kabelverlaufs erzeugt. Der zugehörige Eigenspannungszustand verursacht eine Schnittkraftumlagerung, die dem Verlauf des Widerstandes entspricht. Die vorgespannten Streifen werden stärker beansprucht, während die übrigen Bereiche entlastet werden. Diese Umverteilung erlaubt, den hohen konzentrierten Widerstand aus Vorspannstahl auszunutzen. Die Tragfähigkeit der restlichen Zonen ist mit entsprechender schlaffer Bewehrung zu gewährleisten. Unter Umständen ist dazu bereits die geforderte Minimalbewehrung ausreichend. Als Modell für das verformungsgekoppelte Systemverhalten dient der Trägerrost. Daran lässt sich die günstige Wirkung der Vorspannung nachvollziehen (Bild 4). Mit der Anordnung von konzentrierten Kabeleinheiten gelingt es, das Tragverhalten von verformungsgekoppelten Systemen gezielt zu beeinflussen.

Ausgeführte Objekte

Mit der Beschreibung einiger Objekte des Hochbaus werden die zuvor erwähnten Wirkungsweisen der Vorspannung aufgezeigt und über deren Anwendungsmöglichkeiten berichtet. Die durch die Vorspannung erzielte Verbesserung des Gebrauchsverhaltens sowie ihr Beitrag zur Gewährleistung der Tragfähigkeit und die gezielte Beeinflussung des Tragverhaltens werden erläutert.

Eine klassische Anwendung der Idee, mit konzentrierter Anordnung der Vorspannkabel das Tragverhalten einer flächigen Konstruktion zu beeinflussen, stellt die Stützstreifenvorspannung dar. Die im vorangehenden Abschnitt beschriebene Funktionsweise derart vorgespannter Tragwerke lässt sich am Verhalten vorgespannter Flachdecken studieren. Der günstige Einfluss der Stützstreifenvorspannung auf das Gebrauchs- und Bruchverhalten wurde bereits in [9] und [4] dargelegt und mit der Ausführung von vielen Objekten unter Beweis gestellt.

Der Eigenspannungszustand aus Vorspannung bewirkt eine Lastumlagerung vom Feld in die Gurtstreifen [4]. Damit wird der konzentrierte Widerstand gezielt ausgenutzt. Die für die Feldbereiche erforderliche schlaffe Bewehrung übernimmt, neben den statischen Aufgaben, diejenigen einer Rissesicherung nach den Kriterien der Gebrauchsfähigkeit. Der Einfluss dieser Kabelanordnung auf das Gebrauchsverhalten ist in [9] beschrieben. Die Überlagerung der Schnittkräfte aus ständigen Lasten mit denjenigen aus Vorspannung bewirkt eine Abminderung der konzentrierten Maximalbeanspruchungen und sorgt für eine ausgeglichene Momentenverteilung. Damit verringern sich gleichzeitig die Durchbiegungen. Die vorhandene Normalkraftverteilung beeinflusst das Risseverhalten.

Die nachfolgenden Beschreibungen beziehen sich auf ausgeführte Flachdekken sowie Deckenkonstruktionen mit Unterzügen, da sich an diesen die im vorangehenden Abschnitt aufgezeigten Wirkungen am besten erläutern lassen.

Parkgarage, Leue-Zentrum, Horgen

Die Aufgabe bestand darin, ein Dekkenfeld von ca. 1000 m² mit einer mittleren Spannweite von ca. 8 m und einer geringen Nutzlast von $q = 2{,}5$ kN/m² zu überspannen. Für diese Art von Konstruktionen mit geringen Nutzlasten und mittleren Spannweiten eignet sich die Vorspannung in idealer Weise. Mit den von ihr erzeugten Umlenkkräften werden die Beanspruchungen aus ständigen Lasten nahezu kompensiert, wodurch im Gebrauchszustand geringe Verformungen auftreten. Die notwendige schlaffe Bewehrung dient zur Aufnahme zusätzlicher Nutzlasten und wirkt gleichzeitig als Rissesicherung für eventuelle Zwangsbeanspruchun-

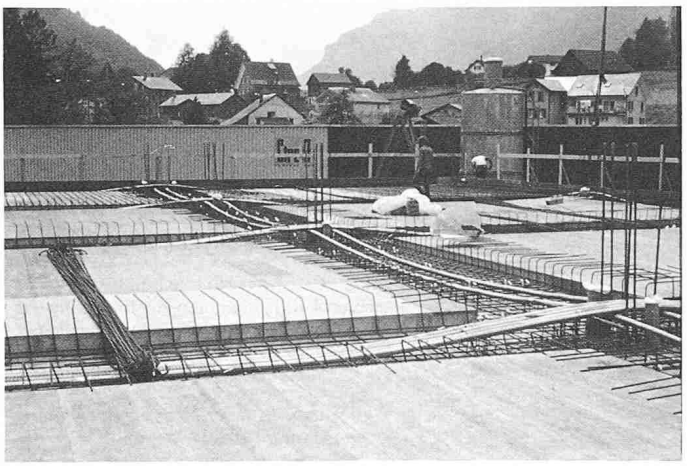


Bild 7. Fabrikations- und Lagerhalle für Schätti AG, Schwanden

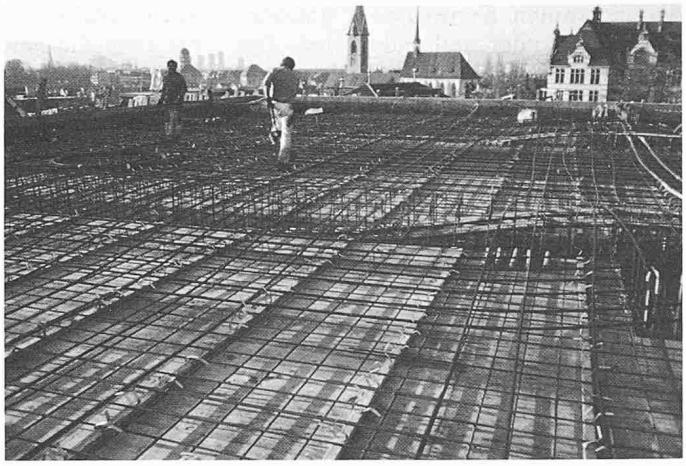


Bild 8. Dachgeschoss, Decke über Opernstudio, Konservatorium und Musikhochschule, Zürich

gen. Mit der Anwendung der Stützstreifenvorspannung wird eine gezielte Lastumlagerung von den Feldern in die Gurtstreifen vorgenommen, so dass in den meisten Feldern zur Gewährleistung der Tragfähigkeit die ohnehin erforderliche Minimalbewehrung bereits ausreichend ist. Die konzentrierte Anordnung der Vorspannung in den Stützstreifen ist in Bild 6 zu erkennen.

Fabrikations- und Lagerhalle für Schätti AG, Schwanden

Die Aufgabe bestand darin, die relativ hohen Nutzlasten (je nach Decke q = 13,0, 8,5, 6,9 kN/m²) über eine Spannweite von 11,30 m bzw. 9,00 m abzutragen. Das vorgenannte Prinzip, die Lastabtragung durch gezielte Anordnung von Steifigkeit bzw. konzentrierter Vorspannung zu beeinflussen, wurde für dieses Objekt durch eine Kombination von beiden Möglichkeiten angewandt. Mit der Ausbildung einer Grosskassettendecke steht in den Gurtstreifen eine durch die Konstruktionshöhe gegebene Steifigkeit zur Verfügung, die durch Vorspannung noch vergrössert wird. Dadurch gelingt es, auch hohe Nutzlasten über eine grosse Spannweite abzutragen. Für die ständigen Lasten bleibt das Tragwerk nahezu verformungsfrei. Die Wahl einer vorgespannten Grosskassettendecke anstelle einer Decke mit vorgespannten Unterzügen bietet den Vorteil einer insgesamt geringeren Konstruktionshöhe sowie geringe Spannweiten für die eigentlichen Feldbereiche, die sich in die breiten Stützstreifen einhängen. Der Verlauf der Gurtstreifen sowie die darin angeordnete konzentrierte Vorspannung sind Bild 7 zu entnehmen.

Dachgeschoss, Decke über Opernstudio, Konservatorium und Musikhochschule, Zürich

Strenge Anforderungen an das Verformungsverhalten führten zu einer vorgespannten Konstruktion. Die ursprüngliche Lösung einer schlaffbewehrten Decke war zwar in der Lage, die Tragfähigkeit zu gewährleisten, den Kriterien an das Gebrauchsverhalten wurde sie jedoch nicht gerecht. Bei diesem Objekt handelt es sich um eine Deckenkonstruktion mit einem Ausmass von ca. 10,70 m auf 24,50 m. Durch zwei über die kurze Spannrichtung angeordnete Unterzüge wurden drei Deckenfelder von nahezu gleichem Ausmass erzeugt. Mit den in den Unterzügen geführten flexiblen Trennwänden lässt sich der von der Decke überspannte Raum aufteilen. Aufgrund der Nutzung der Räume wurden Trennwände vorgesehen, die höchsten akustischen Anforderungen genügen. Aufhängung und Bedienung der Trennwände stellen ihrerseits höchste Anforderungen in Form einer ebenen Deckenfläche sowie minimaler Toleranzen bei den Durchbiegungen für ein einwandfreies Öffnen und Schliessen. Das Gewicht der Trennwände von 3,0 kN/m¹ und die Einwirkung aus Schnee stellen die beweglichen Nutzlasten dar. Die zu realisierende Deckenkonstruktion musste sich an diesen Kriterien orientieren.

Da die Unterzüge aufgrund ihrer Steifigkeit einen Grossteil der ständigen Lasten anziehen und durch eine konzentrierte Vorspannung noch weitere anziehen würden, war man bestrebt, diesen Effekt durch die gleichzeitige Anordnung einer verteilten Deckenvorspannung zu eliminieren. Decke und Unterzug erhalten dadurch unter ständigen Lasten überall das gleiche Niveau. Mit der verteilten Deckenvorspannung in beiden Richtungen sollten zudem die Anforderungen an ein möglichst homogenes Bauwerk erfüllt werden. Die parallel zu den Unterzügen auf Deckenunterseite angeordneten Vorspannkabel bewirken zugleich eine Vergrösserung des zentrischen Anteils der Vorspannung. Damit wird in den Unterzügen durch Vorhalten genügender Druckspannungsreserve eine hohe Steifigkeit erzeugt. Diese sorgt für geringe Durchbiegung unter den erwähnten beweglichen Nutzlasten, so dass die Toleranzgrenzen eingehalten werden. Zur Beeinflussung einer allfälligen Rissbildung aus Zwangsbeanspruchung wurde eine in beiden Richtungen durchgehende Minimalbewehrung angeordnet.

Bild 8 zeigt die Deckenkonstruktion mit den beiden Unterzügen, deren Vorspannbewehrung zu den Auflagern hin sichtbar wird. In den Deckenfeldern sind die kreuzweise verlegte schlaffe Bewehrung sowie die kleinen Kabeleinheiten der verteilten Vorspannung zu erkennen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorspannung erscheint als geeignetes Mittel, die Gebrauchsfähigkeit, die Tragfähigkeit und das Tragverhalten von flächigen Bauteilen zu beeinflussen. Dank der integralen Wirkung der Vorspannung gelingt es, gesamthaft das Tragverhalten einer Konstruktion zu verändern und zu verbessern. Die Wirkungsweise bleibt nicht auf einen einzigen der aufgezählten Punkte beschränkt, es sei denn die Beschränkung ist gewollt, wie z. B. nur zur Verbesserung der Gebrauchsfähigkeit. Vielfach betreffen die Auswirkungen weitere Bauteile und Zustände des Bauwerks als diejenigen, die hier aufgezählt und behandelt wurden. Diese Wirkungsweise zu quantifizieren bereitet oft Mühe. Ein Vergleich mit einer anderen, nicht vorgespannten Konstruktion ist immer unvollständig, solange nur einzelne Aspekte verglichen werden. Deshalb erscheint es wichtig, stets eine Gesamtbetrachtung anzustellen, da die behandelten Gesichtspunkte im Falle einer

vorgespannten Konstruktion untrennbar miteinander verbunden sind. Die aufgeführten Eigenschaften eines vorgespannten, flächigen Tragwerks lassen erwarten, dass die Anwendung der Vorspannung im Hochbau zunehmen wird. Begründet wird diese Erwartung mit folgenden Punkten:

□ Die Bedeutung der Gebrauchsfähigkeit wird zunehmen, was sich in neueren Normenwerken bereits andeutet. Zu deren Gewährleistung liefert die Vorspannung die beste Voraussetzung.

□ Das Tragverhalten von flächigen Bauteilen, wie Stahlbetonplatten, ist sehr flexibel in der Lastabtragung, bedingt durch die Verformungskoppelung und die Steifigkeitsänderungen. Die dadurch möglichen Schnittkraftumlagerungen werden bei der Ermittlung der Tragfähigkeit nach der Plastizitätstheorie bewusst berücksichtigt, um einen für die Anordnung des Widerstandes günstigen Schnittkraftverlauf zu erzeugen. Umgekehrt bietet dieses Tragverhalten die besten Voraussetzungen für eine gezielte Beeinflussung.

□ Die Vorspannung ist das geeignete Instrument für diese Beeinflussung. Mit der Anordnung konzentrierter Kabeleinheiten gelingt eine vorteilhafte Lastumlagerung dank dem gleichzeitig mitgelieferten Eigenspannungszustand. Streifen mit Vorspannung ziehen mehr Schnittkräfte an und entlasten die übrigen Bereiche. Der hohe Widerstand aus Vorspannstahl wird dadurch ausgenutzt. Es sind dies die beiden Aspekte, die Führung grosser Kräfte sowie die Ausnutzung des hochwertigen Stahls, die neben weiteren nach [8] im Vordergrund stehen für eine bedeutend erweiterte Anwendung der Vorspannung, die im Hochbau zu erwarten ist.

Adressen der Verfasser: *Th. Friedrich*, dipl. Bauing., *P. Curiger*, dipl. Bauing., Stahlton AG, Riesbachstrasse 57, 8034 Zürich 8.

An den ausgeführten Objekten Beteiligte

Parkgarage, Leue-Zentrum, Horgen
Bauherr: Kilintra AG, Zürich
Projektverfasser: Hünerwadel + Häberli AG, Zürich
Bauausführung: Pfister AG, Horgen

Fabrikations- und Lagerhalle für Schätti AG, Schwanden
Bauherr: Schätti AG, Schwanden
Projektverfasser: TBF-Marti AG, Schwanden
Bauausführung: Feldmann AG, Bilten

Dachgeschoss, Decke über Opernstudio, Konservatorium und Musikhochschule, Zürich
Bauherr: Stiftung Konservatorium und Musikhochschule, Zürich
Projektverfasser: Ingenieurbureau Eichenberger AG, Zürich
Bauausführung: Arbeitsgemeinschaft Korradi AG, Zürich
Diener AG, Zürich

Literatur

[1] *Marti, P.:* Über die Bedeutung von Gleichgewichtsbetrachtungen im Massivbau. Schweiz. Ingenieur und Architekt, Heft 7, 1983

[2] *Menn, Ch.:* Zur Berechnung schiefer Plattenbrücken. Festschrift G. Rehm, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, Verlag Ernst & Sohn, 1984

[3] *Menn, Ch.:* Konstruktive und bemessungstechnische Massnahmen zur Erhöhung der Dauerfestigkeit von Betontragwerken. Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Verein SIA, Dokumentation 72, Zürich 1984

[4] *Narayanan, R., Schneider, J.:* Berechnung vorgespannter Flachdecken mit Hilfe eines Tischcomputers. Schweiz. Ingenieur und Architekt, Heft 32, 1982

[5] *Schlaich J., Scheef, M.:* Betonhohlkastenbrücken. IABSE, Structural Engineering Documents 1d, 1982

[6] Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Verein SIA: Norm Betonbauten SIA 162, Vernehmlassungsentwurf 1984

[7] *Thürlimann, B., et al.:* Anwendung der Plastizitätstheorie auf Stahlbeton. Fortbildungskurs ETH, Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich, 1983.

[8] *Thürlimann, B.:* Entwicklungen im konstruktiven Ingenieurbau. Hilti-Symposium: «Befestigungstechnik im Bauwesen», Zürich 1985

[9] *Wüthrich, W.:* Post-tensioned concrete flat slabs in building design and construction – The support-strip method of prestressing. Proceedings of the 9th International Congress of the FIP 1982, Vol. 1.

Neue Bücher

Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen

Von *F. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi* und *A. Wagner*. Neuerscheinung bei der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin, Forschungsbericht Nr. 116 «Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik». 68 S., 3 farbige und 34 s/w-Abbildungen. DM 18.50.

Steigende Energiekosten sowie die grosse Importabhängigkeit bei den Primärenergieträgern, wie z.B. Öl, Erdgas und Uran, haben eine Vielzahl von Energieeinsparungsmassnahmen notwendig gemacht. Dabei entfallen rund 45% des Gesamtenergieverbrauchs auf Haushalte und Kleinverbraucher und hievon wiederum ca. 65% auf die privaten Haushalte. Schlüsselt man diesen Verbrauch weiter auf, so werden 81% des letztgenannten Energiebedarfs für die Raumheizung, d.h. zum Ausgleich der über die Gebäudehülle anfallenden Transmissions- und Lüftungswärmeverluste benötigt. Das Fenster hat besondere Bedeutung als wärmeschutztechnisch schwächstes Glied der Gebäudehülle.

Zur wärmeschutztechnischen Beurteilung von Fenster- und Fassadenkonstruktion hinsichtlich von Transmissionswärmeverlusten (k-Wert-Berechnung), Tauwasserbildung und Wärmebrückenwirkungen im Anschlussbereich Fenster-Wand wurde ein eigenentwickeltes Rechenprogramm zur Berechnung dreidimensionaler Temperatur- und Wärmestromverteilungen eingesetzt, das quaderförmige Volumenelemente, finite Differenzen und ein sehr leistungsfähiges, direktes Blockeliminationsverfahren benutzt. Damit können auch die bei Fensterrahmen auftretenden komplizierten Hohlräume berücksichtigt werden. Die Rechenergebnisse stimmen überwiegend mit Messergebnissen an typischen Fensterkonstruktionen überein.

Beim Einsatz dieses Rechenverfahrens erhält der Fensterkonstrukteur bzw. der ausführende Bauingenieur die Möglichkeit, bereits im Entwurfsstadium an der Fensterkonstruktion unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen mit geringem Aufwand Parametervariationen und Optimierungen der Konstruktion durchführen zu können. Damit können Energieverluste verringert und Tauwasserschäden wirkungsvoll vermieden werden.

Zu beziehen ist dieser Forschungsbericht über den Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven. Tel. 0049-471/460 93.