

Brückenverstärkung durch aussenliegende Vorspannung

Autor(en): **Hofacker, Heinrich / Baumann, Karl**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **114 (1996)**

Heft 23

PDF erstellt am: **14.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78984>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Türen gerüttelt, auch an jener der ETH. Ob die verschiedensten amerikanischen Rezepte, die den Hochschulen zugeordnet werden, auf fruchtbaren Schweizer ETH-Böden fallen, wird noch zu diskutieren sein. Wenn die Donatoren häufig und die Vergabungen gross sein werden, könnte dies die Gespräche vereinfachen. Vorerst aber haben wir mit unseren selbsterarbeiteten Steuerfranken zu haushalten.

Nur ein intensiver Kontakt der ETH zur Wirtschaft bringt die notwendige Basis für ein klares gegenseitiges Verständnis und damit auch die Bereitschaft der Wirtschaft, die verschiedenen Disziplinen und Bereiche der Hochschule tatkräftig zu unterstützen. Diese Bereitschaft durfte ich in den vergangenen 15 Jahren auf eindrückliche Art erfahren.

Wie steht es um die Qualität der Lehre an der ETH? Aus dem Fachbereich des Bauingenieurwesens lässt sich feststellen, dass unsere Absolventen auch im Ausland gute Chancen für ihre Ingenieurtaetigkeit haben. So wie die Bauingenieurfacultät haben auch andere Ingenieurdisziplinen der ETH sich in den letzten Jahren bemüht, ihre Studienpläne zukunftsgerichtet zu ge-

stalten. Um weiterhin gut ausgebildete Ingenieure in die Praxis zu entlassen, muss das Niveau unserer Lehre absolut erhalten und gewahrt bleiben. Der Trend, der sich im Bereich der Maturitätsausbildung abzeichnet, ist nicht dazu angetan, ein tragbares Fundament für den Einstieg in die Hochschule zu gewährleisten.

Zur Qualität der Lehre gehört aber auch die Qualität des Studienklimas. Es wird auch in Zukunft darum gehen, dass wir uns bemühen, ein solches zu schaffen, denn zur Substanz der ETH gehören positiv motivierte Studenten, die mit Elan und Freude das vorgegebene Studienpensum bis zum Abschluss bringen. Im Rahmen dieser Studien sind entsprechende Praktika motivationsfördernd. Ich möchte dazu das Beispiel eines sechssemestrigen Bauingenieur-Studenten erwähnen: «Es muss ein einmaliges Erlebnis sein, wenn man als angehende Ingenieur beim Durchschlag eines Bewässerungstollens in Südafrika als erster der Schweizer Crew durch den Kopf der Tunnelbohrmaschine kriechen darf.»

In der Bauparte haben wir zurzeit, und dies nicht erst seit gestern, eine Bi-

Literatur

[1]

Vitruv: Zehn Bücher über Architektur (De architectura) (verfasst 33-22 v. Chr.), Übers. von C. Fensterbusch, Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft, 1976.

[2]

Baukunst, in: Ch. L. Stieglitz (Hrsg.), Encyclopädie der bürgerlichen Baukunst, Leipzig: Fritsch, ab 1792.

senlage mit rauen Winden. Der Brotkorb wird allen höher gehängt. Durchblick und Weitblick sind gefragt. Das Baugeschehen wird sich nicht umfassend vor unserer Haustüre abspielen, sondern weiter weg. Unsere jungen Ingenieure werden sich daher auch im Ausland bewähren müssen, wie dies eine ganze Anzahl bereits mit Erfolg getan hat.

Darum hat jeder von uns im Lehrkörper die Verpflichtung, die Studentinnen und Studenten so zu fördern, dass sie gewillt und fähig sind, Verantwortung zu übernehmen.

Adresse des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. E.h. Robert Fechtig, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH-Zürich

Heinrich Hofacker, Zürich, und Karl Baumann, Bonaduz

Brückenverstärkungen durch aussenliegende Vorspannung

Nach einer längeren Periode von Brückenneubauten kommt seit einigen Jahren im konstruktiven Ingenieurbau der Sanierung und Verstärkung bestehender Brückenobjekte eine immer grösser werdende Bedeutung zu. Die Vorspanntechnik, deren theoretische Aspekte nicht zuletzt dank langjährigen Forschungen an der ETH heute weitgehend abgeklärt sind, erhält dabei eine wichtige neue Funktion, und es erscheint reizvoll, die sich bietenden neuen statischen und konstruktiven Möglichkeiten aufzuzeigen.

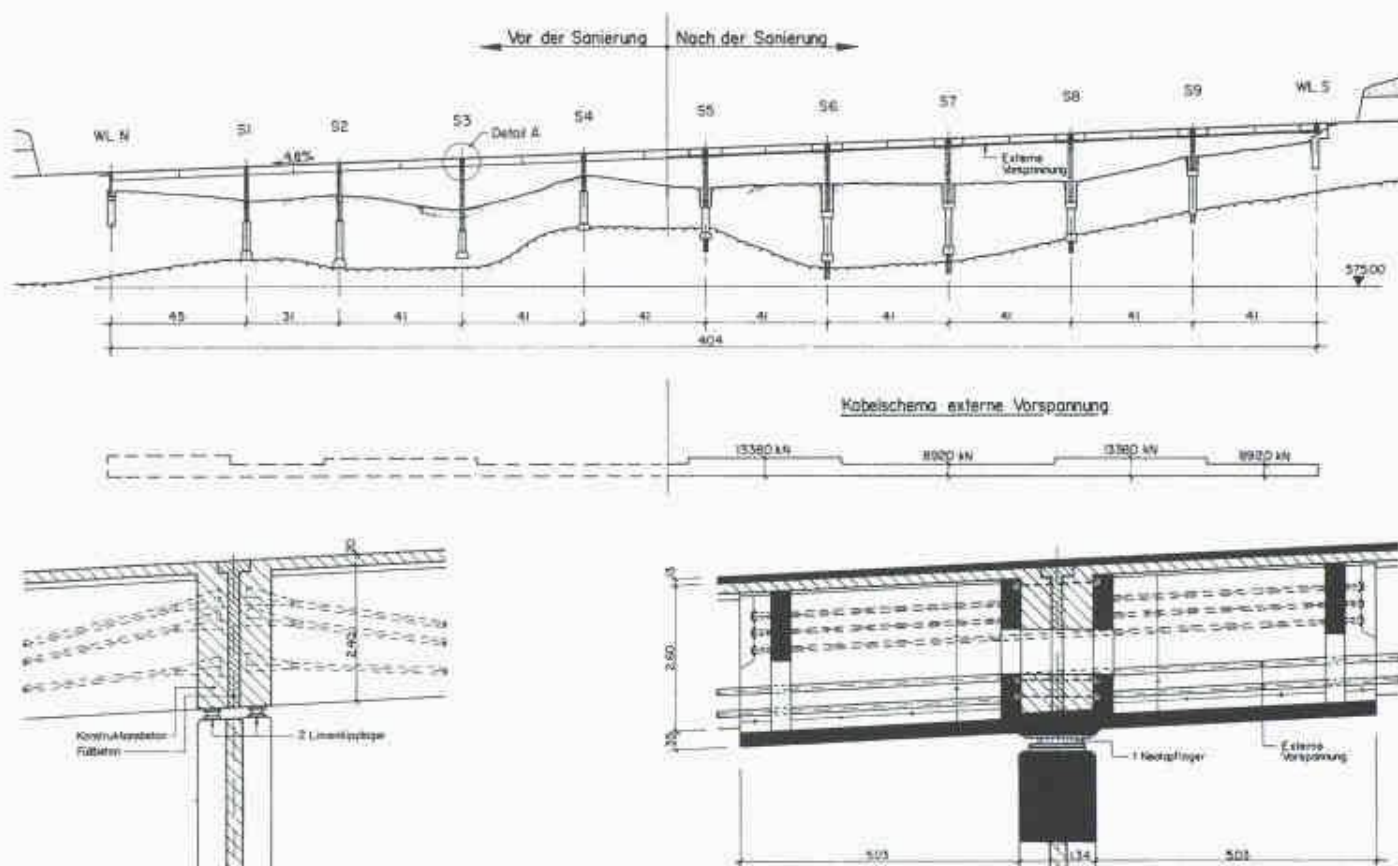
Bei Bauwerksverstärkungen stellt sich zuerst immer die Frage nach dem Zustand des bestehenden Tragwerks. Dabei muss einerseits die Baustoffqualität (Beton, Bewehrungsstahl, Spannstahl) möglichst zutreffend beurteilt werden. Andererseits sind örtliche Schwächungen wie Risse,

Korrosionserscheinungen usw. zu beachten und deren Einfluss auf das statische Tragverhalten zu quantifizieren. Zur Abklärung des Tragverhaltens des vorhandenen Bauwerks können vielfach mit Hilfe eines einfachen Belastungsversuchs zusätzliche Informationen gewonnen werden. Wird der gleiche Belastungsversuch an sanierten Tragwerk wiederholt, lässt sich zudem die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahmen überprüfen. Neben der vorhandenen Baustoffqualität und den festgestellten Schäden müssen die Kennwerte der zukünftigen Beanspruchungen festgelegt werden. Normalerweise werden den Sanierungsprojekten die Belastungen gemäss Norm SIA 160/89 zugrunde gelegt. Der Lastfaktor für die Eigenlasten γ_g kann allenfalls in Anlehnung an SIA 462 reduziert werden, da die Eigenlasten am Objekt überprüft werden können und demzufolge bekannt sind. Sobald eindeutige Klarheit über die Baustoffqualität, den Schädigungsgrad und die dem Tragwerk zu-

grunde gelegten Kennwerte der Belastungen besteht, kann die eigentliche Aufgabe der Tragwerkverstärkung gezielt an die Hand genommen werden. Das nachträgliche Anbringen einer externen Vorspannung stellt dabei ein Mittel dar, das bestehende Tragwerk zu verstärken und eignet sich besonders dann, wenn der Biege- widerstand über grössere Bereiche deutlich erhöht werden muss.

Erhöhung des Biege- widerstandes

Bei der Anordnung einer externen Vorspannung spielen nicht nur statische, sondern oftmals weit mehr konstruktive Überlegungen eine Rolle. Allein schon die Kabelgeometrie lässt sich nicht nur aus statischen Überlegungen festlegen (z.B. Entscheid Kabelverlauf polygonal oder gerade), sondern man muss auch Rücksicht auf das bestehende Objekt nehmen. Bei Verstärkungen vorhandener Tragwerke liegt das Schwerkraft auf der Erhöhung der Tragsicherheit, die Nachweise für die Gebrauchstauglichkeit müssen aber auch erbracht werden, bieten jedoch meist keine besonderen Probleme. Eine Ausnahme bilden Tragwerke, die infolge starker und anhaltender Verformungen oder Rissbildungen die Anforderungen an die



1
Sanierung Lehnenviadukt Höll der N2:
Längsschnitt (oben) und Stützendetails (unten
links alt, rechts saniert)

Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllen. In der statischen Berechnung kann die Vorspannung entweder auf der Widerstandsseite oder als Wirkung von Anker-, Umlenk- und Reibungskräften auf der Lastseite berücksichtigt werden. Im Tragsicherheitsnachweis ergibt sich häufig die Situation, dass neben der schlaffen Bewehrung eine vorhandene Vorspannung mit injizierten Kabeln und eine externe Vorspannung zusammenwirken. Für diesen Fall eignet sich die erste Methode besser, da unter anderem das effektive Spannungsniveau in der vorhandenen Vorspannung nicht genau bekannt ist (Langzeitverluste). Der Biege widerstand von Querschnitten, die zusätzlich mit einer externen Vorspannung verstärkt wurden, unterscheidet sich nur wenig vom konventionellen Fall mit Bewehrung und Vorspannung im Verbund:

$$M_{pl} = A_s \cdot f_{ty} \cdot z_s + A_p \cdot f_{tp} \cdot z_p + A_{p,ext} \cdot \sigma_{pe} \cdot z_{p,ext}$$

- A_s Querschnittsfläche schlaffe Bewehrung
- f_{ty} Fließspannung schlaffe Bewehrung
- z_s Hebelarm schlaffe Bewehrung
- A_p Querschnittsfläche Vorspannung im Verbund

- f_{tp} Fließspannung Vorspannung im Verbund
- z_p Hebelarm Vorspannung im Verbund
- $A_{p,ext}$ Querschnittsfläche externe Vorspannung
- σ_{pe} Spannungsniveau in externer Vorspannung zum Zeitpunkt $t = \infty$
- $z_{p,ext}$ Hebelarm externe Vorspannung

In dieser Formel müssen die Ausdrücke σ_{pe} und $z_{p,ext}$ besonders beachtet werden.

Wird die Spannung der externen Vorspannung im Bruchzustand mit σ_{pe} berücksichtigt, so wird eine allfällige Spannungserhöhung in der externen Vorspannung vernachlässigt. Es gibt zwar Rechenmethoden, mit denen sich ein Spannungszuwachs nachweisen lässt, doch sind diese Methoden komplex, fehlerempfindlich und ergeben oft nur einen minimalen rechnerischen Spannungszuwachs. Die Summe der Spannungsverluste infolge von Schwinden, Kriechen, Relaxation und Reibung sind viel geringer als im Falle einer Vorspannung im Verbund (für ein neues Tragwerk). Die Schwindverformungen sind praktisch vollständig abgeklungen, die Kriechverformungen infolge der externen Vorspannung sind sehr gering und

die Reibungsverluste der externen Kabel sind ebenfalls weit kleiner als bei Verbundkabeln in Hüllrohren. Damit liegt die Spannung σ_{pe} in der Größenordnung von 95% $\sigma_{p,0}$.

Der Hebelarm der externen Vorspannung muss durch konstruktive Massnahmen «erzwungen» werden. Im Falle von polygonalen Kabeln erfüllen die Umlenkkonstruktionen die Aufgabe der Fixierung der Kabel in der gewünschten Lage. Werden die Kabel jedoch über eine Spannweite gerade geführt, so sind einzelne Fixiervorrichtungen notwendig. Oft genügt dabei eine einzelne Fixiervorrichtung in Feldmitte, um den gewünschten Effekt zu erzielen. Ohne Fixierung nimmt der Hebelarm $z_{p,ext}$ im Bruchzustand infolge der sehr grossen Durchbiegungen im Feldbereich stark ab. Bei polygonal verlegten externen Vorspannkabeln ist des weiteren der Tragsicherheitsnachweis für das Gefährdungsbild «Minimale Auflast und maximale externe Vorspannkraft» zu erbringen. Dieser Nachweis lässt sich nur mit der Methode Anker- und Umlenkkräfte führen, wobei die Langzeitverluste der bestehenden Vorspannung im Verbund vorsichtig anzusetzen sind. Zudem muss berücksichtigt werden, dass die ständigen

Auflasten (Belag, Konsolköpfe usw.) nicht vorhanden sein können.

Das Hauptproblem bei Verstärkungen mit externer Vorspannung liegt eindeutig im Bereich der Krafteinleitungen. Die Krafteinleitungsbereiche werden am besten mit Hilfe geeigneter Fachwerkmodelle bemessen. Die externen Vorspannkraft werden vorzugsweise über neu zu betonierende, massive Querträger an den Brückenden direkt in die bestehende Konstruktion eingeleitet. Bei vorhandenen Tragwerken ist es nicht immer möglich, neue Querträger an den Brückenden auszubilden. In solchen Fällen muss die Kraft lisenenartig über Reibung zwischen altem und neuem Beton und oder Dübelwirkung in die Hauptträger eingeleitet werden (Beispiel Gessnerbrücke). Für solche Krafteinleitungspunkte ist der konstruktive Gestaltung besonderes Augenmerk zu liefern. Wird die Vorspannkraft rechnerisch nur durch Reibung zwischen altem und neuem Beton übertragen, sollte die Schubspannung in der Reibungsfläche $\tau_R \leq 0.5 \text{ N/mm}^2$ (Bruchniveau) betragen. Auch in diesem Fall sollte jedoch auf eine konstruktive Verdübelung und eine allfällige Quervorspannung nicht verzichtet werden.

Erhöhung des Schubwiderstandes

Der Schubwiderstand von Balkentragwerken wird gemäss den heutigen Normen mit Fachwerkmodellen nachgewiesen, wobei der Neigungswinkel der Druckdiagonalen in Abhängigkeit der Normalkraft zwischen etwa $\alpha = 25^\circ$ bis $\alpha = 60^\circ$ liegt. Bei vertikalen Schubdübeln schreibt sich der Schubwiderstand zu $V_R = A_s \cdot f_{ty} \cdot z \cdot \cot \alpha / s$. A_s , f_{ty} , z und s sind in einem vorhandenen Tragwerk gegeben. Die zusätzlichen Druckkräfte der externen Vorspannung führen zu einem flacheren

Neigungswinkel α , wodurch der Schubwiderstand leicht erhöht werden kann. Bei polygonal geführten externen Kabeln können die Schubwiderstände zusätzlich als Wirkung von Anker- und Umlenkkraften berücksichtigt werden. Einen Spezialfall der externen Vorspannung stellt die Schubverstärkung mit nachträglich angebrachten Zugstangen dar. Die Wirksamkeit dieser Verstärkungsmassnahme muss durch eine einwandfreie Krafteinleitung sichergestellt werden.

Konstruktive Besonderheiten

Damit die statische Wirksamkeit einer Brückenverstärkung mit aussenliegender Vorspannung über Jahre hinweg gewährleistet und überwacht werden kann, sind folgende konstruktive Probleme zu lösen:

- Zugänglichkeit zu den Kabeln
- Korrosionsschutz
- Langzeitmessungen
- Austauschbarkeit der Kabel

Zugänglichkeit

Der grosse Vorzug freiliegender Kabel gegenüber den konventionellen einbetonierten Spannkabeln liegt darin, dass sie jederzeit kontrolliert werden können. Schadensszenarien, wie beispielsweise durch abgeschnittene Entlüftungsröhrchen eindringendes Salzwasser ab Fahrbahnoberfläche direkt zu den Spannkabeln, wobei Korrosionserscheinungen erst spät und nur durch Aufspitzen des Betons zutage treten, dürfen im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden. Für die Langzeitüberwachung der Kabel ist es deshalb wichtig, dass die Zugänglichkeit sichergestellt wird, was bei einem Hohlkastenquerschnitt weniger aufwendig ist als bei einem unten offenen Brückenquerschnitt.

Korrosionsschutz

Die auf dem Markt erhältlichen Kabeltypen weisen je nach ihrem Aufbau

(Litzen oder Drähte) verschiedene Möglichkeiten des Korrosionsschutzes auf. Für eine spätere eventuelle Auswechslung eines Kabels bewährt sich Fett als umgebendes Medium der Litzen oder Drähte, wobei dem Temperatur- und Alterungsverhalten des Mediums Beachtung zu schenken ist. Ausserdem ist zu überprüfen, ob der Korrosionsschutz konsequent bis zur Verankerung (und einschliesslich dieser) ausgeführt ist.

Langzeitmessungen/Auswechselbarkeit

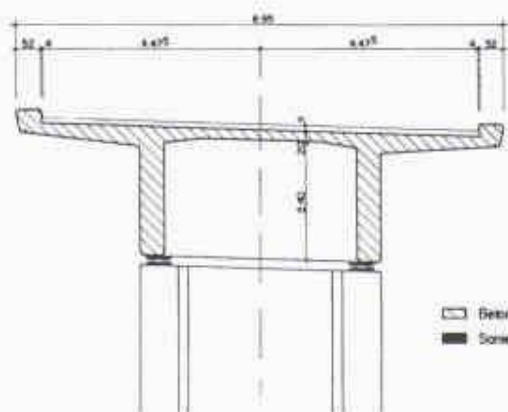
Der Bauherr hat ein legitimes Interesse an der Möglichkeit, später ein Kabel ersetzen zu können, oder zumindest den zeitlichen Verlauf eines eventuellen Spannkraftabfalles mit einfachen Mitteln zu messen. Dies ist bei der Gestaltung des Widerlagers und auch bei der Wahl des Spannsystems zu beachten. Beispielsweise ist bei langen Brücken ein genügender Überstand der Litzen über den Ankerkopf hinaus sicherzustellen.

Zwei Anwendungsbeispiele

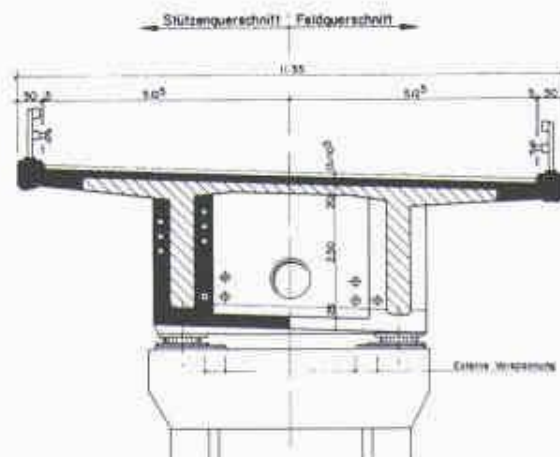
Sanierung Lehnenviadukt Höll

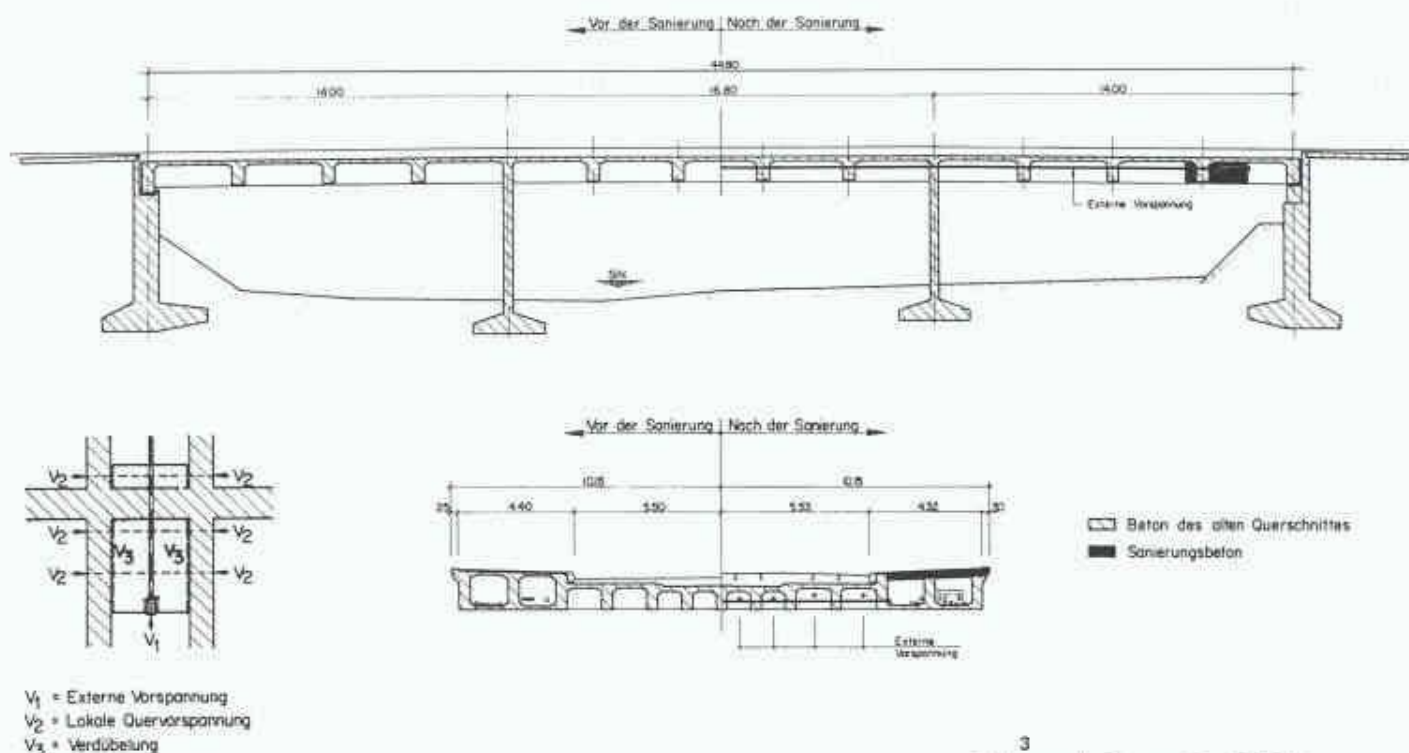
In den Jahren 1990 bis 1993 wurde der 1967 bis 1969 erstellte Lehnenviadukt Höll der N2 (Kanton Uri) einer umfassenden Sanierung unterzogen. Das ursprüngliche Bauwerk besitzt einen Plattenbalkenquerschnitt und besteht aus 10 Brückenfeldern von je rund 41 m Spannweite (1).

Im Bauzustand wurden die einzelnen Spannweiten als einfache Balken gelagert und für Eigengewicht, ständige Last und Verkehrslast voll vorgespannt. Wenige Wochen nach dem Vorspannen wurde der Zwischentaum je zweier benachbarter Spannweiten ausbetoniert und der Überbau zu einem Durchlaufsystem mit zwei Dilatationsfugen umgebaut, wobei die Abdeckung des negativen Momentes nur mit



□ Beton des alten Querschnittes
■ Sanierungsbeton





3

Sanierung der Gessnerbrücke Zürich:
Längsschnitt (oben), Schema Kräfteinleitung
(unten links) und Querschnitt (unten rechts)

schlaffer Bewehrung erfolgte. Die sehr hohe Vorspannung führte dann zu Zwängen, so dass über den Stützen Risse auftraten und die Durchlaufwirkung teilweise verloren ging. Das ursprüngliche Fehlen einer Standspur auf der rund 400 m langen Brücke erwies sich zudem als betrieblicher Nachteil angesichts des stetig zunehmenden Verkehrsvolumens auf der N2, und führte zum Wunsch der Bauherrschaft nach Verbreiterung der Fahrbahnplatte (2).

Das Sanierungsprojekt des Lehnviaduktes Höll umfasste insgesamt folgende Bauarbeiten

- Sanierung der Längsträger
- Verbreiterung der Fahrbahnplatte
- Verstärkung der Fundationen als Folge des Mehrgewichtes des Überbaues
- Sanierung von Stützmauern und Betonschäden

Die Grundidee zur Sanierung des Überbaues bestand darin, die volle Durchlaufwirkung über den Stützen wiederherzustellen und das System zu einem fugenlosen Tragwerk umzubauen. Die Durchlaufwirkung wurde durch Umbetonieren und Vorspannen der Längsträger in den Stützenbereichen erreicht. Infolge der relativ grossen Mehrlasten aus der Verbreiterung der Fahrbahnplatte mussten die Biege widerstände im Bereich der Feldmitten ebenfalls deutlich erhöht werden. Die zweite Forderung konnte durch eine ex-

terne Vorspannung erfüllt werden. Die vier Hauptkabel der externen Vorspannung zu je $P_n = 2250$ kN sind hinter den Widerlagern verankert und verlaufen geradlinig über die ganze Länge des Tragwerkes.

Sanierung Gessnerbrücke Zürich

Die heutige Gessnerbrücke über die Sihl stammt aus den Jahren 1952/53 und wurde als dreifeldrige Rahmenbrücke mit Plattenbalkenquerschnitt aus Eisenbeton erstellt (3). Infolge späterer Umbauten (Tramverlegung) vergrösserten sich die ständigen Lasten, so dass das Tragwerk im Fahrbahn- und Trambereich den heutigen Anforderungen der SIA-Normen bei weitem nicht mehr entspricht. Neben einer umfassenden Betonsanierung wurde das Tragwerk ohne Beeinträchtigung des Strassen- und Tramverkehrs auf der stark befahrenen Brücke statisch verstärkt. Die Sanierungs- und Verstärkungsarbeiten wurden 1995 durchgeführt.

Auch bei diesem Brückenbauwerk erwies sich die Anwendung einer aussenliegenden Vorspannung als sinnvoll und zweckmässig. Im Bereich des Plattenbalkenquerschnittes (Tram- und Fahrbahnbereich) wurden geradlinig verlaufende Spannkabel eingebaut. Durch die Optimierung der Lage der Kabel im Querschnitt gelang es, die normengemässe Tragsicherheit des Bauwerkes in allen massgebenden Feld- und Stützenquer-

schnitten zu erreichen. Aus Kostengründen wurde die Vorspannkraft nicht hinter den Widerlagerquerschnitten, sondern hinter dem letzten Feldquerträger der Randfelder eingeleitet, was ein sorgfältiges Überprüfen der Beanspruchungen im Verankerungsbereich (5) bedingte. Für die Verstärkungsarbeiten wurde ein durchgehender Gerüstboden unter der Brücke eingebaut, so dass die Arbeiten praktisch unhemerkt von der Öffentlichkeit abgewickelt werden konnten.

Zusammenfassung

Die Anwendung einer aussenliegenden Vorspannung zur Verstärkung bestehender Brückenbauten ist eine bewährte, der modernen Spannbetontechnologie entsprechende Möglichkeit zur Verlängerung der Lebensdauer von Tragwerken bei gleichzeitiger Steigerung der Lastkapazität. An zwei Beispielen von Brückenverstärkungen wird die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten stellvertretend aufgezeigt.

Adresse der Verfasser:

Heinrich Hofacker, dipl. Ing. ETH/SIA/
ASIC, Stucki, Hofacker + Partner AG, Engweg
7, 8006 Zürich, Karl Braumann, dipl. Ing. ETH,
Vignel 10, 7402 Bonaduz