Beitrag der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) zur Entwicklung der Vorspanntechnik

Autor(en): **Ladner, Marc**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **96 (1978)**

Heft 14

PDF erstellt am: **29.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-73668

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

system of cables: vertical, hooping and horizontal. These cables numbering 254 were mono-strands non-injected (unbonded). [2] The main objective of the tests was to determine the scheme of ruin and the coefficient of security at rupture of the vessel as well as the limit of elastic and reversible behaviour. The model, built in 1975, was annalized under constant interior working pressure in the cavities and increased up to the point of rupture. The behaviour of the model was globally elastic until an interior pressure ranging from about 120 to 130 kg/cm² was reached. This corresponds to approximately twice the maximum working pressure of 65 kg/cm². The longterm tests (pressure maintenance) revealed no unusual phenomena. The pressure attained at the time of rupture was 240 kg/cm². The rupture appeared through the braking up of the stanch skin of some of the peripheral cavities and by the rupture of a hooping cable (Fig. 5 and 6). For the majority of the hooping cables, situated in the central section of the vessel, as well as for the vertical cables around the peripheral cavities, the elastic limit was reached or even exceeded.

This study is being continued by extended tests related to the behaviour of the stanch skin, anchored in warm concrete and subject to an important compression.

[2]) See: – "Tests on model of a prestressed concrete nuclear pressure vessel with multiple cavities", by R. Favre, M. Koprna, J.-P. Jaccoud, Volume 36–II, The memories of the AIPC;
– "Behaviour of a nuclear pressure vessel model with multiple cavities", by same authors, Publication No. 161 of EPFL.

Adresse de l'Auteur: *R. Favre,* Professeur à l'EPFL, Institut de béton armé et précontraint, 33, av. de Cour, 1007 Lausanne.

Beitrag der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) zur Entwicklung der Vorspanntechnik

Von **Marc Ladner,** Dübendorf

In den letzten Jahren hat in der Entwicklung der Vorspanntechnik eine gewisse *Akzentverschiebung* stattgefunden. Diese spiegelt sich deutlich in der Art der Aufträge wider, welche die EMPA für die angesprochene *Industrie* durchzuführen hatte. Waren vor einigen Jahren auch noch grössere Untersuchungen an Spannbetonbauteilen durchzuführen – etwa an grossen Spannbetonträgern mit Aussparungen im Steg [1] oder an Betongelenken für eine Gerberträgerbrücke –, so konzentrierten sich die Arbeiten in jüngster Zeit hauptsächlich auf die Untersuchung von *grossen Spanngliedern* und deren *Verankerungen* auf ihr *Ermüdungsverhalten unter schwingend aufgebrachter Belastung* sowie unter *extremen Temperaturbedingungen.* Da diese Probleme nicht spezifisch für den Spannbetonbau sind, sondern sich auch bei all jenen Konstruktionen stellen, bei denen grosse Kräfte mittels Seilen oder Kabeln aufgenommen werden müssen, wie z.B. bei abgespannten Netztragwerken oder Schrägseilbrücken, so ist es wohl kaum verwunderlich, dass sich die Tätigkeit der EMPA auch auf diese Gebiete erweitert hat. Im folgenden soll nun versucht werden, anhand einiger Beispiele diese Entwicklungstendenzen aufzuzeigen.

Prüfeinrichtungen und Versuche

Im Jahr 1969 wurde an der EMPA eine Versuchseinrichtung entwickelt, die es erstmals erlaubte, *Ermüdungsversuche mit Schwingweiten von bis zu 2,5 MN bei Oberlasten von bis zu 6,7 MN mit einer Frequenz von 4,2 Hz* aufzubringen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Anlage ist in [2] gegeben. Mit Hilfe dieser Anlage war es möglich, dass Hi-AM (High-Amplitude)-Verankerungssystem bei Paralleldrahtbündeln und bei Litzenbündeln, das für die *Rheinbrücke Mannheim–Ludwigshafen* und für die *Überdachung der Olympia-Sportstätte in München* zur Ausführung gelangte, auf sein Ermüdungsverhalten wirklichkeitsnah zu untersuchen [3, 4, 5].

Ausser diesen Ermüdungsversuchen mussten auch *statische Zerreissversuche* durchgeführt werden, wobei auch der Nachweis zu erbringen war, dass eine *Alterung* oder eine *chemische Zersetzung des Kunstharzes im Verankerungskopf* die Tragfähigkeit des Verankerungssystems nicht beeinträchtige. Dazu musste die zur Verfügung stehende Kraftumlenkungsvorrichtung, mit deren Hilfe die statischen Zerreissversuche in der vorhandenen 20-MN-Presse durchgeführt werden, mit einer Heizanlage ausgerüstet werden, mit der die Temperaturen an den Ankerköpfen der Prüflinge bis auf über 115 °C erhöht werden konnte.

Eine Erweiterung der Ermüdungsprüfanlage wurde dadurch bedingt, dass auch *Randseile der Olympia-Zeltdachkonstruktion* auf Ermüdung zu untersuchen waren, die über einen *Sattel mit geringem Krümmungsradius umgelenkt* waren. Ziel dieser Versuche war es, ein Seil mit grösstmöglicher Steifigkeit zu finden, das sich aber dennoch einigermassen leicht krümmen liess. Auch in diesem Fall wurde versucht, durch einen geeigneten Ausbau der bestehenden Einrichtung dieser Forderung nachzukommen [2].

Ausser den erwähnten Versuchen wurde auch ein Teil der notwendigen Untersuchungen mit den an der EMPA vorhandenen Einrichtungen vorgenommen, wodurch ein schweizerisches Produkt als erstes Litzenspannverfahren die Zulassung in der Bundesrepublik Deutschland erlangte. Insbesondere gelangten dort auch einige Neuerungen zur Prüfung, zu denen vor allem auch die *Zwischenverankerungen* gehören [6].

Zeitschwingversuche bei Tieftemperaturen (—30 °C) mussten an einem Spannkabel durchgeführt werden, das aus 139 Einzeldrähten ⌀ 6 mm bestand. Da nur wenige Lastwechsel (n = 670) zwischen einer Unterlast von P_u = 4,95 MN und einer Oberlast von P_o = 5,65 MN gefordert waren, musste auf die Verwendung der üblichen schnellen Pulsatoren (Frequenz = 4,2 Hz) zur Krafterzeugung verzichtet werden, da das Einstellen der Lastgrenzen mit diesen Geräten nicht ganz einfach ist: Es vergehen nämlich mindestens 10 bis 15 Minuten, bis die Kraftamplitude und die Mittelkraft einigermassen genau eingestellt werden kann. Für 500 Lastwechsel benötigen aber diese Pulsatoren nur 2 Minuten, so dass diese Zeit kaum ausreicht, um die Kraftgrenzen auch nur einigermassen zu erreichen. In diesem Fall musste daher auf eine andere Kraftsteuerungseinrichtung, nämlich auf den *Hydro-Pacer,* ausgewichen werden, mit dem bei den angegebenen Kraftgrenzen eine Frequenz von 0,5 Hz erreicht werden konnte. Ausserdem musste bei diesem Versuch eine Kühleinrichtung um den oberen Verankerungskopf und um das Kabel selber gebaut werden, was in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber unter Beizug einer Spezialfirma bewerkstelligt wurde. Die Kontrolle und Messung sowie die während des Versuches notwendigen Korrekturen der Temperatur wurden von der EMPA übernommen.

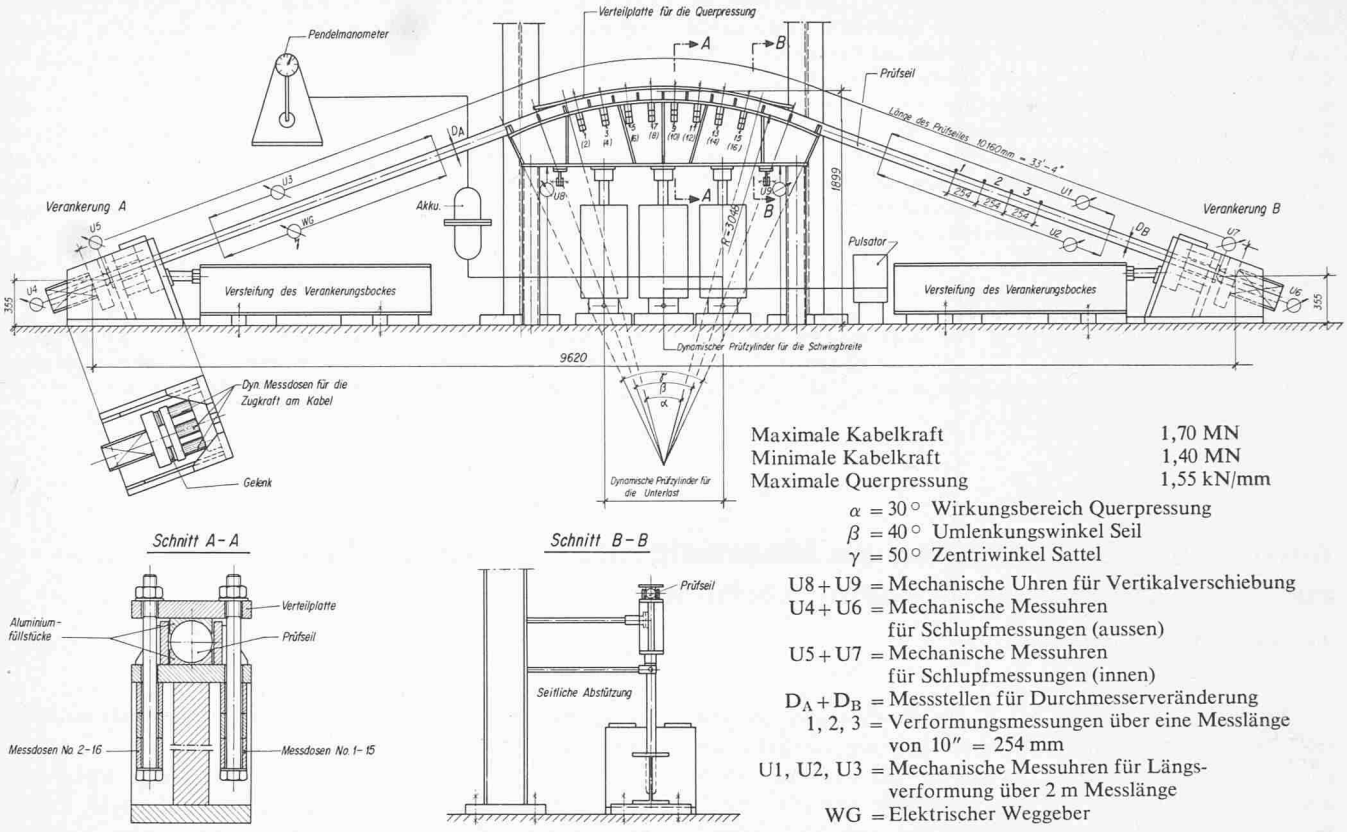

Bild 1. Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung zur Durchführung von Ermüdungsversuchen an umgelenkten Stahlseilen (Masse in mm)
Schematical presentation of the test rig for carrying out fatigue tests on steel cables which change direction (measurements in mm)

Ganz *besondere Ermüdungsprobleme grosser Stahlseile* treten im *Sattel der Pfeiler von Schrägseilbrücken* auf. Hier entstehen neben der Kraftamplitude auch *Eigenspannungen* infolge der Seilkrümmung und Querpressungen, die dadurch hervorgerufen werden, dass meistens mehrere Kabellagen neben- und übereinander angeordnet sind. Um auch für diese Bauwerke möglichst praxisnahe Versuchsbedingungen zu schaffen, wurde an der EMPA eine Versuchseinrichtung entwickelt, deren Arbeitsprinzip hier kurz beschrieben werden soll [7].

Die Versuchseinrichtung besteht aus zwei Ankerblöcken, die auf dem Aufspannboden der EMPA verankert werden (Bilder 1 und 2). Dazwischen befindet sich der Umlenksattel mit einem variablen Radius. Dieser Umlenksattel ist auf hydraulische Einzelprüfzylinder gestellt, die zur Erzeugung der notwendigen Kabelkräfte dienen. Ein Teil dieser Zylinder wird zu einer Gruppe zusammengefasst und an einen mit Stickstoff gefüllten Druckspeicher (Akkumulator) angeschlossen, der seinerseits durch ein Federkraftmanometer unter Druck gehalten wird. Die Aufgabe dieser ersten Gruppe ist es, den Betrag der Unterlast während der Schwingversuche konstant zu halten. Mit der zweiten Gruppe von Prüfzylindern wird die Schwingbreite der Kraft aufgebracht, indem diese an einen Pulsator angeschlossen wird.

Die Kraftmessung im Kabel und die Steuerung der Versuchslasten erfolgt über besondere dynamische Kraftmessdosen, die auf beiden Seiten des Kabels eingebaut sind. Diese gestatten, die Kabelkraft bis auf ungefähr ±5 kN genau zu erfassen. Zur Vermeidung von unerwünschten Biegebeanspruchungen im Kabel während der Schwingversuche können zwischen den festen Stahlplatten der Ankerblöcke und den Kabelköpfen Gelenke eingebaut werden, so dass eine saubere Einleitung der Zugkraft ins Kabel gewährleistet ist.

Neben der Kraftmessung im Versuchsseil lassen sich je Ankerblock auch *Schlupfmessungen beidseitig des Kabelkopfes* durchführen. Ausserdem können auf den freien Kabellängen die Verlängerungen des Kabels infolge Kraftzunahme (Bestimmung des Verformungsmoduls vom ganzen Seil) über eine Messlänge von 2 m bequem festgestellt werden. Dafür stehen sowohl mechanische als auch elektrische Weggeber zur Verfügung, so dass es also möglich ist, auch während der Schwingversuche ohne Versuchsunterbruch die Dehnungszunahme zu verfolgen und zu überwachen. Zusätzlich können auch *Durchmesseränderungen* bestimmt werden.

Das Aufbringen von *Querpressungen* im Bereich des Umlenksattels geschieht über eine Verteilplatte, die mittels Schraubenbolzen auf das Kabel gepresst wird. Zur Feststellung der wirksamen Pressung wird die von jedem Bolzen abgegebene Kraft über eine dazwischengeschaltete Messdose ermittelt. Versuche haben gezeigt, dass die Schwankungen der Querpressung infolge der Schwingbeanspruchung im Kabel kleiner als 5% werden.

Die Anlage ist für die in Bild 1 angegebenen Abmessungen und Kräfte gebaut. Sie lässt sich aber mit relativ einfachen Mitteln auch für flachere und entsprechend längere Kabel verwenden. Damit ist auch eine Kraftsteigerung möglich, die zudem noch durch Hinzunahme eines vierten Prüfzylinders erhöht werden könnte. Die Möglichkeiten im einzelnen müssten fallweise genau abgeklärt werden. Hingegen dürfte eine Begrenzung der Anlage einerseits durch die auf 15 mm beschränkte Hubhöhe der von einem Pulsator gespiesenen Einzelprüfzylinder gegeben sein. Einfach gestaltet sich auch eine Vergrösserung der Querpressung, die bis auf 2,45 kN/mm gesteigert werden kann, ohne dass zusätzliche Bolzen erforderlich wären.

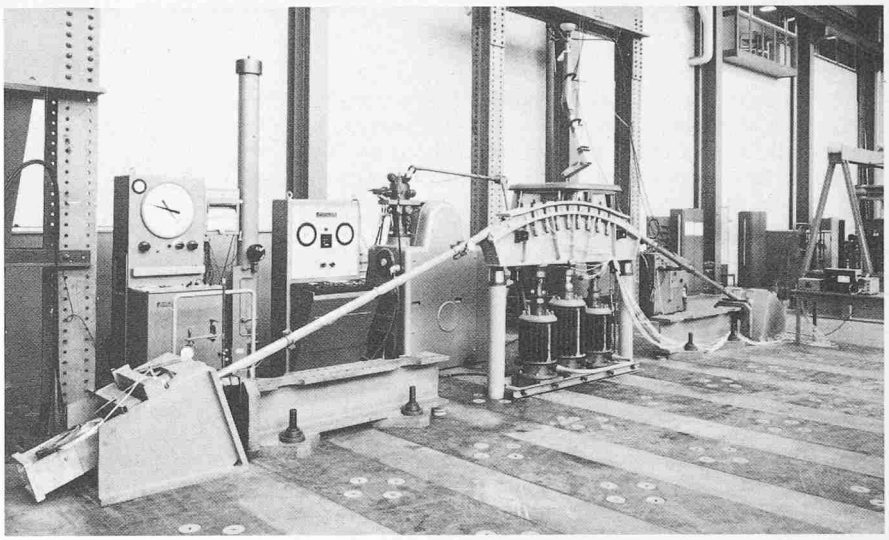

Bild 2. Ansicht der Prüfanlage für umgelenkte Seile bis zu etwa 2 MN Oberlast
View of the testing arrangement for cables which change direction for loading up to around 2 MN

Eine zweite Anlage, die auch der Ermüdungsprüfung umgelenkter Stahlseile dient, steht ebenfalls zur Verfügung. Sie erlaubt Kräfte bis zu $P_o \triangleq 6{,}0$ MN bei Kraftamplituden von etwa $\triangle P \triangleq 1{,}0$ MN. Die Seillänge ist allerdings kürzer als bei der in Bild 1 dargestellten Anlage und beträgt nur etwa $l = 6000$ mm.

Besondere Versuche

Aus den vielen Belastungsversuchen an Brücken, die von der EMPA durchgeführt werden, sollen hier zwei Fälle herausgegriffen werden, die wegen ihres Umfanges und ihrer Besonderheiten den Rahmen der üblichen Untersuchungen sprengen. Es handelt sich um eine *Strassenunterführung bei Eiken,* Kt. Aargau [8], und um eine *Strassenbrücke aus teilweise vorgespanntem Leichtbeton* bei *Schaffhausen* [9].

Beim erstgenannten Objekt handelt es sich um eine *Drillingshohlbalkenbrücke ohne Querträger, die schief gelagert ist.* Um das Verhalten dieser nicht alltäglichen Konstruktion etwas genauer abzuklären, wurden sowohl an einem Einzelhohlbalken, bevor die Fugen in der Fahrbahnplatte geschlossen wurden, als auch an der fertigen Drillingsbrücke sehr umfangreiche Belastungsversuche durchgeführt. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in [8] angegeben.

Bei der Leichtbetonbrücke interessierte man sich vor allem am *Schwingungsverhalten* des Bauwerkes, weshalb die Brücke mit einem *Schwinger an verschiedenen Orten angeregt* wurde. Auch diese Versuche lieferten interessante Resultate und trugen dazu bei, die Kenntnisse über das *dynamische Verhalten von Leichtbetonkonstruktionen mit teilweiser Vorspannung* zu vertiefen. Diese ergänzten auch sehr schön die Untersuchungen, die von der EMPA über das dynamische Verhalten von Brückenbauwerken unter Verkehr gegenwärtig im Gange sind. Eine weitere Untersuchung auf diesem Gebiet betrifft den *Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Schwingungsformen unter einem Lastwagen* der *Limmatbrücke bei Neuenhof,* worüber in [10] ausführlich berichtet wurde.

Abschliessend sei noch darauf hingewiesen, dass die EMPA auch im Rahmen der Normierungsarbeiten aufgrund ihres Erfahrungsschatzes mithelfen möchte, dass in den einschlägigen Normen des Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Vereins SIA [11] sinnvolle und verantwortbare Vorschriften enthalten sind, die aber keine unnötigen Erschwernisse für die technische Weiterentwicklung darstellen.

Ausblick

Die Anforderungen, die heute an Vorspannsysteme und an Kabel, die im Schrägseilbrückenbau Verwendung finden sollen, gestellt werden, sind sehr hoch und mannigfaltig. Immer mehr wird von den Bauherrschaften verlangt, dass durch Versuche, die hinsichtlich ihrer Anforderungen und Randbedingungen die Wirklichkeit möglichst nah nachbilden, der Nachweis erbracht werde, dass ein System diesen Anforderungen auch genüge. Häufig bereitet es aber ganz erhebliche Schwierigkeiten, diesen Nachweis unter Einhaltung aller Randbedingungen überhaupt zu erbringen. Die EMPA war bis anhin bemüht, diesen Aufgaben gerecht zu werden und damit einen Beitrag zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Spannsysteme zu liefern. Die Versuchsanlagen, die ihr dabei zur Verfügung stehen, erlauben es, recht flexible Prüfanlagen zu konzipieren. Sie wird deshalb auch weiterhin bestrebt sein, alle Anstrengungen zu unternehmen, um auf diese Weise und auch durch Unterstützung von Forschungs- und Normierungsarbeiten die technische Entwicklung auf diesem Gebiet zu fördern.

Literaturverzeichnis

[1] *Portmann M., Huber J. W., Wachter H. R.:* «Der Neubau des Personenbahnhofes Bern.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 39, 1966.

[2] *Meier U., Rösli A.:* «Versuchseinrichtung für Zugschwellbeanspruchungen an grossen Spannkabeln.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 4, 1971.

[3] *Meier U.:* «Das Olympiadach in München und die dafür durchgeführten Grossversuche.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 16, 1971.

[4] *Zenobi G.:* «Die Verankerungen der Haupttragseile für die Olympia-Zeltdachkonstruktion in München.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 35, 1972.

[5] *Andrä W., Saul R.:* «Versuche mit Bündeln aus parallelen Drähten und Litzen für die Nordbrücke Mannheim–Ludwigshafen und des Zeltdaches in München.» Die Bautechnik, Heft 9, 10 und 11, 1974.

[6] *Mehlborn G., Mehmed H. Chr.:* «Spannverfahren-Entwicklung und aktuelle Probleme.» Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 9, 1976.

[7] *Ladner M., Balas S.:* «Versuchseinrichtung zur Durchführung von Ermüdungsversuchen an umgelenkten Stahlseilen.» Material und Technik, Heft 1, 1976.

[8] *Herzog M., Fent B.:* «Belastungsversuch an einer schiefen Drillingshohlbalkenbrücke.» Strasse, Brücke, Tunnel, Heft 9, 1973.

[9] *Balas S.:* «Die Leichtbetonbrücke Schaffhausen. Belastungs- und Schwingversuche.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 28/29, 1976.

[10] *Stucki Ch., Studer W., Ladner M.:* «Nachrechnung des dynamischen Verhaltens einer Brücke.» Material und Technik, Heft 1, 1974.

[11] *Norm SIA 162:* «Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Betonwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton.»

Norm SIA 191: «Boden- und Felsanker.»