

Generelle Berechnung: Sunnibergbrücke

Autor(en): **Menn, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **116 (1998)**

Heft 44

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79587>

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.

Christian Menn, Chur

Generelle Berechnung

Sunnibergbrücke

Bei der Erarbeitung eines Brückenkonzepts wird in der Regel eine «Tragwerksidee» durch massstäbliches Aufzeichnen der Hauptelemente und parallel dazu durch zugehörige, statische Berechnungen soweit konkretisiert, dass die Machbarkeit nachgewiesen ist und die Massen bzw. Kosten einigermaßen zuverlässig ermittelt werden können.

Bei der Sunnibergbrücke bestand die «Tragwerksidee» aus einer mehrfeldrigen Schrägkabelbrücke mit schlanker Fahrbahn. Im Bezug zu Landschaft, Topographie und Linienführung der Strasse passten eindeutig vier Pylone (bzw. fünf Felder) mit einer mittleren Auskragung von rund 65 m am besten; und aus der lokalen Festlegung der Pfeilerstandorte mit Blick auf den Flusslauf ergab sich für die beiden mittleren Pfeiler eine Auskragung von je 70 m; entsprechend einer Hauptspannweite von 140 m in Brückenmitte. Die Pylone (über der Fahrbahn) sollten wegen der hohen Pfeiler möglichst niedrig, etwa $\frac{1}{10}$ der Spannweite bzw. $\frac{1}{4}$ der Pfeilerhöhe, sein. Das entspricht einer Kabelneigung von $\tan \alpha \approx 0,2$. Flachere Kabel sind im Blick auf die starke Zunahme der Trägereinsenkungen nicht möglich. Überbau und Pfeiler mussten eine Einheit bilden, da Momente aus feldweiser Last nicht in den biegeweichen Nachbarfeldern aufgenommen werden können, sondern direkt in die Pfeiler eingeleitet werden müssen. Die Pfeilerköpfe liessen sich mit dem im Grundriss gekrümmten (und auch am Brückende) fugenlosen Fahrbahnträger in der Horizontalebene stabilisieren.

Bei einer Quer-Spannweite der Fahrbahnplatte von etwas mehr als 10 m zwischen den Aufhängungen wurde eine Plattendicke von 40 cm mit 80 cm dicken (den Nocken der Kabelverankerungen entsprechenden) Randversteifungen gewählt. Der Abstand der Kabelveranke-

rungen (Kabel-Feldlänge a) wurde im Blick auf den Freivorbau, die Kabelgrösse und die Trägerstabilität (Knicken infolge Normalkraft) auf 6 m festgelegt.

Konzeptberechnungen

Bei der Konzepterarbeitung wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Ermittlung des Kabelquerschnitts
- Abschätzung der Betonspannungen im Trägerquerschnitt über dem Pfeiler
- Ermittlung des Querschnitts am Pylonfuss
- Ermittlung des Querschnitts am Pfeilerfuss; Pfeilerform
- Berechnung des Querträgers am Pfeilerkopf
- Abschätzung des Querträgerabstands bei den Pfeilern
- Berechnung der Pfahlfundation
- Berechnung der Zwängungen infolge Temperaturänderung
- Ermittlung der kritischen Träger-Normalkraft

Einwirkungen

Folgende Einwirkungen wurden berücksichtigt: Das Eigengewicht des Trägers (inkl. 17 cm Belag) beträgt etwa 190 kN/m. Es wurden in der Konzeptberechnung nur Eigengewicht und Verkehrslasten berücksichtigt; Wind, Schnee und Erdbeben sind im Endzustand nicht massgebend, da der Brückenträger an den Enden fest mit dem Terrain verbunden ist. Im Bauzustand ist «Wind» jedoch ausserordentlich wichtig und kann nur mit entsprechenden Abspannvorrichtungen aufgenommen werden.

Bei der Einzellast $Q = 300$ kN wird ein Stosszuschlag von 80% und ein «Exzentrizitätszuschlag» (einseitige Laststellung) von 80% berücksichtigt. Für die verteilte Last wird 4 kN/m^2 angenommen, was der Fahrbahnbreite entsprechend $q = 36 \text{ kN/m}$ ergibt.

Ermittlung des Kabelquerschnitts

Die maximale vertikale Belastung Q_s auf einen Kabelkopf ergibt sich für Eigengewicht und verteilte Last aus dem Feldanteil eines Kabels ($\frac{1}{2}$ Brückenbreite $\times$ Abstand a der Kabelverankerung) und für die Einzellast aus $\frac{1}{2} Q \times$ Stosszuschlag und Ex-

zentrizitätszuschlag und einer Abminderung auf 60%, da angenommen werden kann, dass 60% der Einzellast auf das direkt belastete Kabel und je 20% (über den Träger) auf die Nachbarkabel wirken (Bild 1). Damit beträgt die Kabelkraft S :

$$Q_s = \frac{g+q}{2} \cdot a + \frac{Q}{2} \cdot 1,8 \cdot 1,8 \cdot 0,6$$

$$S = \frac{Q_s}{\sin \alpha} \quad (\alpha = \text{Kabelneigung})$$

Der Kabelquerschnitt wird aus der zulässigen Stahlspannung $\sigma_s = 0,45 f_{sy}$ bestimmt.

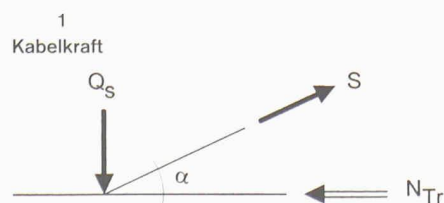
Abschätzung der Betonspannungen im Trägerquerschnitt über Pfeiler

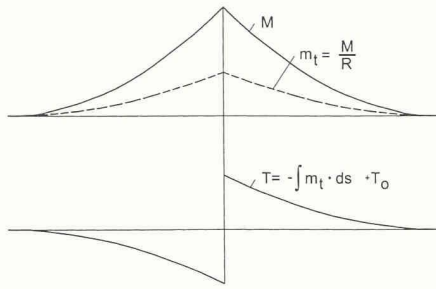
Mit dieser Abschätzung soll nachgewiesen werden, dass der vorgesehene Trägerquerschnitt bei der maximalen Träger Spannweite ausreicht. Flachere Kabel erzeugen entsprechend hohe Normalkräfte im Träger, so dass die Grenzspannweite eines schlanken Trägerquerschnitts rasch erreicht wird. Im vorliegenden Fall wurde vorgesehen, die Platte in Pfeilernähe höchstens auf die Dicke der Randversteifung zu verstärken. Die Normalkraft N_T ergibt sich aus Vollast im Hauptfeld; die entsprechende Druckspannung im Träger beträgt etwa 11 N/mm^2 ; dazu kommt noch eine Biegespannung aus der Annahme, dass im ersten 6-m-Kabelfeld die ganze Einzellast durch Trägerbiegung aufgenommen wird, so dass sich eine «zulässige» maximale Beton-Randspannung von etwas weniger als 20 N/mm^2 ergibt.

Ermittlung des Querschnitts am Pylonfuss

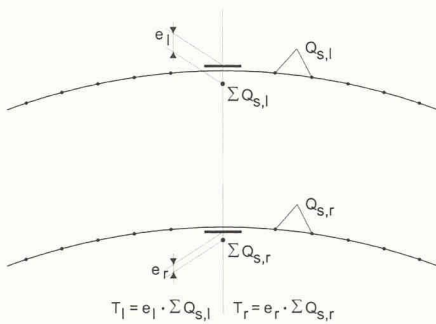
Der Querschnitt am Pylonfuss ist statisch der wichtigste und heikelste Querschnitt des ganzen Tragwerks; er ist auch massgebend für die Stützenform. Die Beanspruchung (inkompatibel/ungünstig) errechnet sich aus Längsbiegung infolge voller Verkehrslast im Hauptfeld sowie Normalkraft und Querbiegung (infolge Brückenkrümmung im Grundriss) aus Eigengewicht und gleichmässig verteilter Verkehrslast beidseits des Pylons. Der Querschnitt besteht aus den beiden äusseren «Flansch»-Rechtecken und dem verstärkten «Steg»-Rechteck.

Das Querbiegemoment entspricht dem Torsionsmoment des Kragsystems (Träger mit Schrägkabeln). Dieses «Gesamt»-Torsionsmoment wird wie bei einem gekrümmten Träger aus den Biege- bzw. Drehmomenten berechnet (Bild 2); die einzelnen Querbiegemomente (auf jeden Pylonfuss) können aber auch direkt

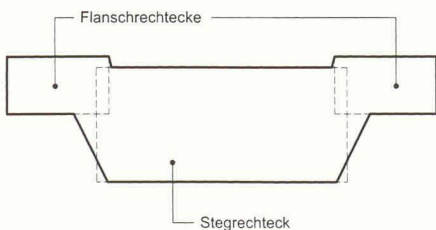




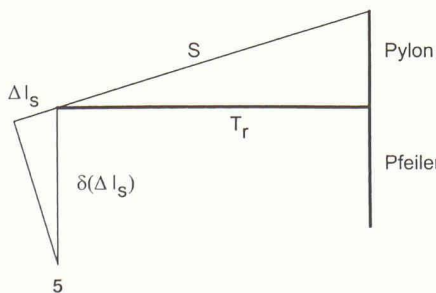
2
Torsionsmoment, berechnet aus Längsbiegung



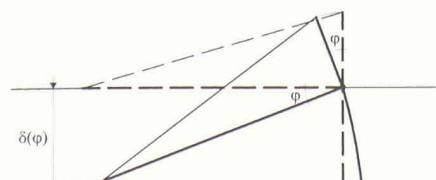
3
Torsionsmomente, berechnet aus vertikalen Kabelkomponenten



4
Querschnitt am Pylonfuss



5
Trägereinsenkung aus Kabelverlängerung



6
Trägereinsenkung aus Pfeilerkopfwinkel φ

aus der Summe der Kabelkopfbelastungen Q_s (hier ohne Einzellast) und ihrem Abstand zur Pylonachse berechnet werden (Bild 3).

Für die Ermittlung der Querschnittsabmessungen wurde die Normalkraft anteilmässig auf alle drei Rechtecke, die Längsbiegung auf die «Flansch»-Rechtecke und die Querbiegung auf das «Steg»-Rechteck verteilt (Bild 4).

Ermittlung des Querschnitts am Pfeilerfuss

Die Einsenkung in Brückenmitte setzt sich im wesentlichen aus der Einsenkung infolge der Kabeldehnung (Bild 5) und dem Pfeilerkopfwinkel φ (Bild 6) infolge Vollast im Hauptfeld zusammen. Der Pfeilerquerschnitt kann dabei vereinfacht als Rechteck angenommen werden; aus den Querschnitten am Pfeilerkopf in halber Höhe und am Pfeilerfuss ergibt sich die Pfeilerkopfverdrehung genügend genau.

Berechnung des Querträgers am Pfeilerkopf

Der Querträger am Pfeilerkopf führt die Querbiegemomente an den Pylonfüssen (über Biegung) in Normalkräfte in den Pfeilerstielen über (Bild 7).

Abstand des Querträgerabstands der Pfeiler

Die Pfeiler-Querträger übernehmen die Umlenkkräfte aus der Krümmung der Pfeilerstiele und reduzieren deren Knicklänge. Beim höchsten Pfeiler genügen zwei Querträger, um die Schlankheit der Pfeilerstiele auf weniger als 50 zu reduzieren.

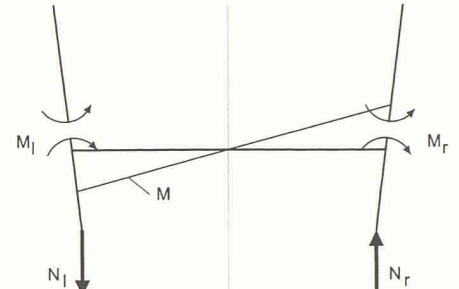
Berechnung der Pfahlfundation

Die Pfeiler übertragen praktisch keine Biegung auf die Fundation, und die Pfähle können zentrisch unter der Pfeilernormalkraft angeordnet werden.

Zwängungen infolge Temperaturänderungen in Träger-Pfeilern

Die erzwungene Auslenkung der Pfeilerköpfe der beiden mittleren Pfeiler kann aus der Verformung des Träger-Grundsysteins (Träger an einem Widerlager frei) abgeschätzt werden. Diese Auslenkung wird praktisch nur durch die Rahmenmomente in den Pfeilerstielen kompensiert. Der saisonalen Temperaturänderung entsprechend kann bei ungerissenem Querschnitt ein E-Modul des Betons von 10 000 N/mm² angenommen werden.

Für die Ermittlung der Trägerbiegung um die Vertikalachse wird die Horizontalkraft des Träger-Zweigelenkbogens (infolge Temperaturänderung) berechnet. Daraus ergibt sich das grösste Biegemoment (um die vertikale Querschnittsach-



7
Umwandlung der Querbiegung in Normalkräfte der Pfeilerstiele

se) in Brückenmitte und die Zwängungs-Normalkraft auf die Brückenwiderlager.

Ermittlung der kritischen Träger-Normalkraft

Der Abstand der Kabelverankerungen a wurde so festgelegt, dass Trägerknicken über eine Kabel-Feldlänge a nicht massgebend ist. Dagegen kann Trägerknicken über zwei Feldlängen kritisch werden, da eine Trägersausbiegung bei flachen Kabeln nur eine relativ kleine Kabelrückstellkraft erzeugt.

Die kritische Träger-Normalkraft $N_{T,krit}$ lässt sich durch Gleichsetzen der stabilisierenden und destabilisierenden (über $2a$ gleichmässig verteilten) Ersatzlasten q ermitteln.

$$\text{Aus } \Sigma q_{st} = \Sigma q_{dst} \text{ folgt } N_{T,krit}$$

Stabilisierend wirken:

- Die Vergrösserung der Kabelkraft

$$\Delta S = \frac{E_s A_s \cdot f \cdot \sin \alpha}{l_s}$$

infolge der Einsenkung f , die (bei gleicher Einsenkung) einer über $2a$ gleichmässig verteilten Ersatzlast von

$$q_{3s} = 0,8 \frac{f \cdot \sin^2 \alpha \cdot E_s A_s}{a \cdot l_s} \text{ entspricht;}$$

$$E_s A_s: \text{Dehnsteifigkeit Kabel} \\ l_s: \text{Kabellänge}$$

- Die der Trägerverformung entsprechende Ersatzlast

$$q_{tr} = \frac{4,8 \cdot f \cdot E_T I_T}{a^4}$$

$$E_T I_T: \text{Biegesteifigkeit Träger}$$

Destabilisierend wirkt bei der Ausbiegung f die Umlenkkraft infolge der Trägernormalkraft N :

$$q_{dst} = \frac{2 \cdot f \cdot N}{a^2}$$

Damit ergibt sich für die kritische Normalkraft im Träger:

$$N_{T, \text{krit}} = \frac{0,4 \cdot a \cdot E_s A_s \cdot \sin^2 \alpha}{l_s} + \frac{2,4 \cdot E_T I_T}{a^2}$$

(Berechnet für die gesamte Querschnittsbreite und zwei gegenüberliegende Kabel)

Bei bekannter kritischer Träger-Normalkraft lässt sich dann auch einfach die Trägersdurchbiegung zweiter Ordnung infolge Verkehrslast berechnen.

$$w = w_0 \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{T, \text{krit}}}}$$

Adresse des Verfassers:

Christian Menn, dipl. Ing. ETH SIA, Prof. Dr. Dr. h.c., Plantaweg 21, 7000 Chur

Dialma Jakob Bänziger, Aldo Bacchetta, Zürich, Karl Baumann, Chur

Statik und Konstruktion

Sunnibergbrücke

Die Ausführungsstatik der Sunnibergbrücke wird detailliert anhand der Hand- und Computerberechnungen dargelegt. Neben konstruktiven Hinweisen finden sich ergänzend ausgewählte Ergebnisse aus dem End- und Bauzustand.

Die Sunnibergbrücke ist Bestandteil der Umfahrung Klosters, die voraussichtlich im Jahre 2007 eröffnet werden kann (Bild 1). Das als fünffeldrige Schrägseilbrücke ausgebildete Tragwerk mit einer Gesamtlänge von 526 m stellt das markanteste Bauwerk der gesamten Umfahrgestrecke dar. Es werden deshalb höchste Anforderungen an die Gestaltung, die Einpassung in die Landschaft, eine hohe Dauerhaftigkeit im rauen Gebirgsklima und eine möglichst umweltschonende Bauausführung gestellt. Nach wettbewerbsartigen Studienaufträgen an drei erfahrene Ingenieurbüros hatte die Jury als Variante einen Konzeptvorschlag von Christian Menn im Wettbewerb untersuchen lassen, der sich in der statischen und konstruktiven Bearbeitung als realisierbar erwies.

Kurzbeschreibung Projekt

Konzept und Hauptabmessungen

Die Brücke weist mit vier Pylonen drei grosse Hauptfelder von 128, 140 und 134 m und zwei kleinere Randfelder von 59 und 65 m Spannweiten auf. Wegen der starken Krümmung im Grundriss kann der Brückenträger an beiden Enden ohne Dilatationsfugen fest mit den Widerlagern verbunden werden. Dadurch werden die aufgelösten Brückenpfeiler auf Fahrbahnhöhe längs und quer fast unverschiebbar

gehalten, und die Pfeilmomente infolge feldweiser Trägerbelastung nehmen deshalb nach unten linear ab. Die Pfeilerform reflektiert diesen Kräfteverlauf. Die Pylone über der Fahrbahn sind mit 14 bis 16 m Höhe relativ kurz; sie sind wegen der Lichtraumverhältnisse in der Kurve leicht nach aussen geneigt und bilden mit den Pfeilern eine statische und formale Einheit. Die Längenänderungen des Überbaus werden durch horizontale Radiusveränderungen aufgenommen.

Geologie, Foundationen, Widerlager

Die geologischen Sondierungen zeigten, dass der Fels sehr tief liegt. Rechts der Landquart befindet sich eine mächtige Bergsturzmasse mit Bachablagerungen. Im Bereich der Landquart stehen die Alluvionen an. Links der Landquart liegt die jetzt stabile Casanna-Rutschmasse, überlagert von Bachablagerungen des Dros-

bachs. Diese geologischen Verhältnisse führten zusammen mit der Topographie zu folgendem Fundationskonzept: Die Widerlager bestehen im wesentlichen aus erdgefüllten Körpern mit einer Bodenplatte. Sie sind mit dem Brückenträger monolithisch verbunden und bilden die Abstützpunkte für die horizontale Stabilisierung des Brückensystems. Der Pfeiler P1 auf der Geländeterrasse vor dem Steilabfall der rechten Talflanke ist mit zwei Kleinschächten, die Pfeiler P2, P3 und P4 sind auf je sechs Bohrpfeilen fundiert. Das massive Pfahlkopfbankett ist im Grundriss um 0,75 m gegen die Kurveninnenseite versetzt, weil die inneren Pfeilerstiele aus der Trägerkrümmung wesentlich mehr Vertikallast erhalten.

Pfeiler und Pylone

Die Pfeiler weisen in Brückenlängsrichtung einen parabolischen Anzug und eine Breitenvariation auf (Bild 2). In Querrichtung wachsen die Pfeiler von 8,80 m an der Basis zu 13,40 m Breite bei OK Fahrbahnplatte. Es entsteht auf diese Weise eine kelchförmige räumliche Struktur. Die Pylone überragen den Brückenträger als Ab-

1

Situation. Reproduziert mit Bewilligung des Meliorations- und Vermessungsamts des Kantons Graubünden vom 23. 9. 98

