

Grimsel Seebrücke: Aspekte der Winddynamik

Dr. Daniel Gsell, Walt + Galmarini AG, Zürich

Zusammenfassung

Über den Grimselsee ist eine neue Schrägseilbrücke geplant. Der Entwurf der schlanken über 350 m gespannten Brücke stammt von Professor Christian Menn. Solch schlanke Brücken bedürfen spezieller Untersuchungen der Einwirkung Wind: das Phänomen der Wirbelablösung am Brückenträger kann die Gebrauchstauglichkeit des Tragwerkes beeinträchtigen. Selbsterregte Schwingungen können zum Kollaps der Brücke führen. Mit Windkanalversuchen und fluiddynamischen Simulationen können diese Phänomene untersucht, quantifiziert und beherrscht werden.

1 Einleitung

Die Kraftwerke Oberhasli (KWO) ist eines der führenden Wasserkraftunternehmen der Schweiz. In mehreren voneinander unabhängigen und in sich wirtschaftlichen Projektteilen will die KWO ihre Anlagen sanieren und aufwerten, das vorhandene Potential an Wasserkraft besser nutzen und die Kraftwerksleistung erhöhen. Die „Verlegung der Grimselpassstrasse“ ist eine Folge der geplanten Vergrößerung des Grimselseespeichers. Die zwei Staumauern „Seeuferegg“ und „Spittelamm“ sollen beide um 23 m erhöht werden. Das Nutzvolumen des Grimselseespeichers vergrößert sich dadurch von 95 Mio m³ auf 170 Mio. m³. Die Grimselpassstrasse führt heute am östlichen Ende der Seeufereggsperrre vorbei. Durch die Erhöhung des Stauziels wird ein Teil der Strasse entlang des Ostufers unter Wasser gesetzt. Die KWO ersetzt die Kantonsstrasse am Ostufer des Grimselsees mit einer neuen Strasse mit geänderter Linienführung: Neu wird der Verkehr über den Grimselnollen und eine Seebrücke wieder zum „Chalten Cher“ geführt.

Das Projekt für die Grimselseebrücke stammt aus dem Entwurf des renommierten Brückenbauers Christian Menn. Der von Christian Menn im März 2005 entwickelte Entwurf schlägt eine Schrägkabelbrücke vor. Im Hochgebirge muss das Konzept der Brücke im Blick auf die technischen Anforderungen bezüglich Sicherheit, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit neben den üblichen, normierten Einwirkungen vor allem auch extremen, lokalen Belastungen aus Wind, Schnee und Eis Rechnung tragen. Die Brücke weist im Seebereich keine Pfeiler auf. Die beiden Pylone befinden sich unmittelbar am Seeufer und bilden den Abschluss der 350 m weit gespannten Brücke. Der Grund für diese konzeptionelle Massnahme liegt vor allem in der unbekanntem Grösse und Richtung der Eisbewegungen auf dem See. Der auf nahezu 2000 M. ü. M. gelegene See kann bereits im Frühwinter eine mächtige Eisschicht aufweisen, die beim Absenken des Sees infolge Ufertopographie, Lawinen, Wind und Erdbeben unberechenbare Drücke auf im See stehende Pfeiler ausüben kann.

Im einzigartigen Umfeld der Grimsel spielt eine ausgewogene Balance zwischen Kosten und Ästhetik im weiteren Sinne (Einfügen des Bauwerks in die Landschaft und Gestaltung des Bauwerks selbst) eine wichtige Rolle. Die Brücke soll mit ihrer leichten, modernen, transparenten Eleganz einen Kontrast zur Wucht der Landschaft und der Massigkeit der im alten Stil ausgebauten Schwergewichts-Staumauern bilden.

Die Planung der Seebrücke wird durch die Ingenieurgesellschaft INGE Grimselbrücken plus (Bänziger Partner AG, Dr. Deuring Oehninger AG, Kissling Zbinden AG und Walt + Galmarini AG) erarbeitet.

2 Konstruktion der Brücke



Bild 1: Photomontage der Grimsel Seebrücke.

2.1 Brückenträger

Die Brücke weist zwei Fahrspuren von 3.50 m Breite auf und zusätzlich, auf der östlichen Seite, Richtung Stausee, ein Gehweg (Bild 2). Der Brückenträger ist 350 m weit gespannt und die Breite des Trägers beträgt über die gesamte Länge 10.6 m. Der Brückenträger wird als Verbundquerschnitt ausgeführt. An die U-förmigen Stahl Hauptlängsträger mit 3 cm Wandstärke sind die Kabelverankerungen geschweisst. Die Hauptlängsträger werden mit Ortsbeton ausgegossen. Mit Ausnahme des ersten Feldes, welches eine Spannweite von 15.9 m aufweist, sind alle 8.25 m, bei den Kabelverankerungen, Querträger angeordnet. Die Fahrbahnplatte ist aus vorfabrizierten Betonelementen aufgebaut, welche zusätzlich auf sekundären Längsträger, in den Drittelpunkten, aufliegen.

Der Brückenträger wird gelenk- und fugenlos zwischen die beiden Ufer eingespannt. Dadurch können die Biegemomente infolge Wind erheblich reduziert werden. Diese Einspannung bedingt Zwängungskraft infolge Temperaturunterschiede. Im Falle der Abkühlung, werden die entstehenden Zugkräfte mit Felsankern gehalten.

2.2 Schrägseile

Die zwei Abspannkabelebenen bestehen aus Paralleldrahtkabeln mit Längen zwischen 36 m und 186 m. Die Hüllrohrdurchmesser betragen 90 mm bzw. 110 mm. Die beiden Kabelebenen sind im Stil des A-

Pyons vereint. Durch diese Anordnung entsteht zwischen den Kabeln und dem Brückendeck ein Dreieck, wodurch die Torsionssteifigkeit des Brückensystems erhöht wird.

Die Rückhalteketten sind in einer Ebene angeordnet. Sie werden in den sogenannten Kristallen gebündelt und mit Hilfe von Ankern im Fels verankert.

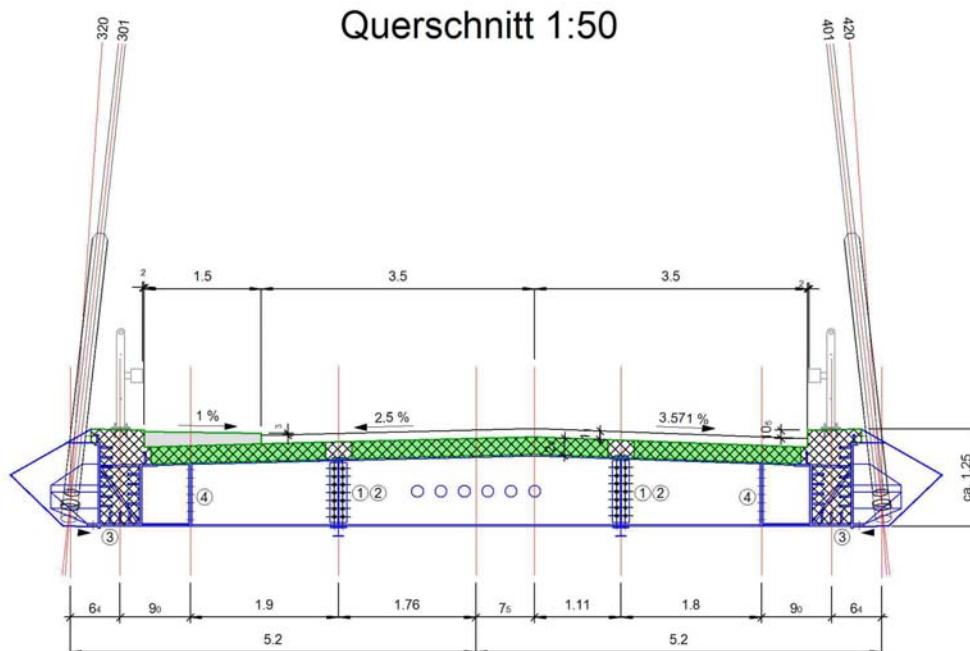


Bild 2: Querschnitt der Grimseel Seebrücke.

3 Winddesign schlanker Brücken

In den SIA Normen ist das Thema nicht behandelt. Der Eurocode EN 1991-1-4:2005 gibt Hinweise, welche für eine erste Abschätzung nützlich sind. Aufgrund der Komplexität der Thematik, müssen je nach Schlankheit und Brückentyp vertiefere Untersuchungen durchgeführt werden. Umfassend aufbereitete Grundlagen findet man bei Emil Simiu und Robert H. Scanlan [1]. Zudem sind in [2] und [3] zu verschiedenen Themen der Aerodynamik und Aeroelastizität von Brücken wertvolle Artikel gesammelt.

Für seilverspannte Brückentragwerke sind u.a. folgende dynamische Phänomene massgebend:

- Vortex Shedding: die Ablösefrequenz der Wirbel entspricht einer Eigenfrequenz des Brückenträgers. Je nach aerodynamischer Form können grosse Biege- oder Torsionsschwingungen die Folge sein.
- Fluttern: selbsterregte Schwingungen des Brückenträgers. Durch die Änderung der umströmten Form des Querschnittes infolge dessen Auslenkung aus der Ruhelage, können aufschaukelnde Kräfte entstehen. Reines Torsionsflattern oder Kombinationen von Torsions- und Biegemoden können auftreten.
- Buffeting: die Anregung der Brücke durch Böen erfolgt stochastisch. Die Resonanzfrequenzen der Brücke können durch entsprechende Böenfrequenzen angeregt werden, was im Vergleich zur statischen Windlast höhere Amplituden zur Folge hat.
- Kabelschwingungen: Phänomene wie Regen-Windinduzierte Schwingungen oder Galloping von Kabeln mit dünnen Eisschichten können die Kabel in Schwingungen versetzen.

Bild 3 bildet ein typisches Vorgehen ab, welches zur Erreichung einer im Wind stabilen schlanken Schrägseilbrücke verfolgt werden kann. Die Grundlage dazu bildet eine gute Kenntnis der Windverhältnisse am zukünftigen Standort. Daraus wird eine Bemessungswindgeschwindigkeit festgelegt.

Aus dem statischen Entwurf und aus Anforderungen an die Verkehrsführung resultiert ein erster Querschnitt der gegebenenfalls aerodynamisch etwas optimiert werden kann. Für diesen Querschnitt muss, basierend auf der Norm, Erfahrungen aus anderen Projekten und/oder CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) ein statischer Koeffizient c_D (Drag-Coefficient) abgeschätzt werden. Basierend darauf wird die Querbeanspruchung des Brückentragwerks untersucht und gegebenenfalls modifiziert.

Anschliessend werden dynamische Abschätzungen, nach Norm oder mit Hilfe von CFD-Simulationen, vorgenommen. Erweist sich das Tragwerk als kritisch, werden sogenannte Sectionmodel-Tests durchgeführt. Es handelt sich um eine quasi zwei dimensionale Untersuchung des Querschnittes im Windkanal. Ein Stück der Brücke wird im Windkanal, im Massstab 1:30 – 1:50 unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsgesetze, elastisch gelagert, so dass die erste Torsions- und die vertikale Biegeeigenfrequenz abgebildet werden. Das Modell wird im Windkanal umströmt und die resultierenden Amplituden der wirbelinduzierten Schwingungen (vortex-induced) und der selbsterregten Schwingungen (Stabilitätsprobleme) in laminarer und turbulenter Strömung gemessen. Treten infolge der Wirbelablösung zu grosse Amplituden auf oder schaukelt sich der Querschnitt bei zu tiefen Windgeschwindigkeiten auf, müssen Modifikationen vorgenommen werden.

Erfüllt der Querschnitt die Vorgaben, werden die statischen Koeffizienten (c_L , c_D und c_M) in Abhängigkeit des vertikalen Anströmwinkels gemessen. Basierend auf den gemessenen Koeffizienten, wird die statische Beanspruchung des Tragwerkes und die Reaktion auf Böen erneut ermittelt und überprüft. Zudem werden statische Stabilitätsprobleme untersucht (statische Torsionsinstabilität und horizontales Beulen). Bei sehr weitgespannten Brücken werden zuletzt Windkanalversuche am vollen, dreidimensionalen, aeroelastischen Modell durchgeführt. Untersucht wird das Verhalten der Brücke bei böigem Wind und die Flatterwindgeschwindigkeit wird erneut bestimmt. Bei diesem Test, zeigt sich auch, ob höhere Schwingungsmoden oder deren Kombinationen bei tieferen kritischen Windgeschwindigkeiten instabil werden, was bei sehr weit gespannten Brücken durchaus der Fall sein kann.

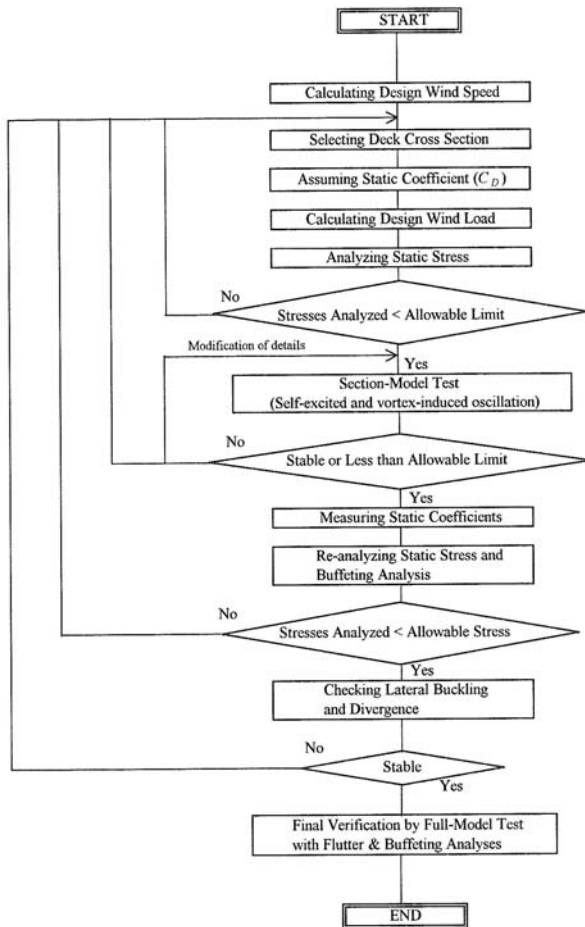


Bild 3: Vorgehensweise Winddesign bei der Akashi Kaikyo Bridge [3].

4 Winddesign der Grimsel Seebrücke

4.1 Einwirkungen

Unmittelbar neben dem zukünftigen Brückenstandort betreibt das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie ihre ANETZ-Station Grimsel Hospiz. Von MeteoSchweiz können somit Windmessdaten bezogen werden. Folgende Daten wurden für das Projekt Grimsel Seebrücke bezogen:

- Sekunden-Spitzenwert alle 10 Minuten
- 10-MinutenMittelwerte
- StundenMittelwerte

Die Daten zwischen 1989 und 2008 wurden mit Hilfe der Extremwertstatistik (Gumbelverteilung) ausgewertet.

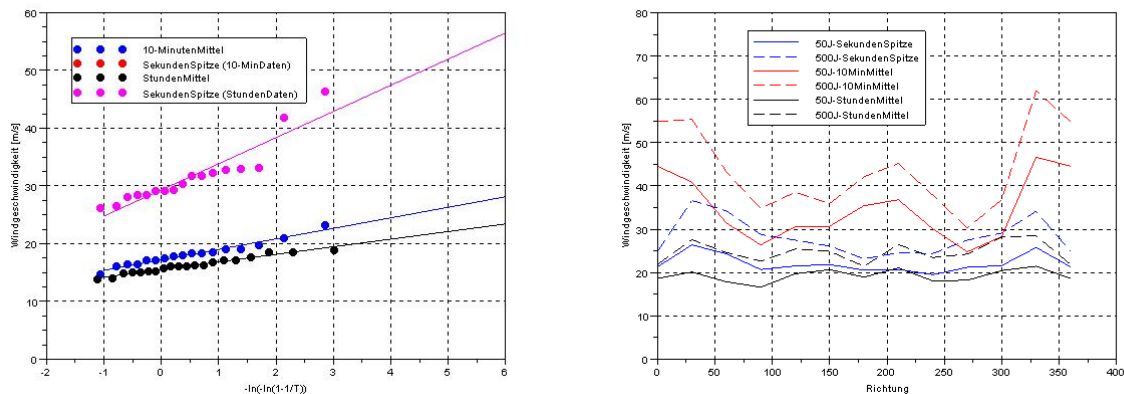


Bild 4: Links: Gumbelauswertung der letzten 17 Jahre. Rechts: Windrichtungsabhängige Auswertung der Winddaten (0° entspricht Norden.)

Zusätzlich wurden Strömungssimulationen im Geländemodell durchgeführt. Dies mit dem Ziel, Aussagen über die zu erwartenden maximalen Windgeschwindigkeiten auf dem Brückenträger zu machen. Folgende 50-jährige Sturmereignisse wurden der Bemessung zugrunde gelegt:

- Sekundenspitzenwert (Böenspitzen) 50.2 m/s
- 10-MinutenMittelwert 30.5 m/s

Für das dynamische Verhalten sind auch die Turbulenzeigenschaften des Windes massgebend. Bei starken Winden ist der massgebende Energieinhalt des Windes bei Frequenzen zwischen 0.3 und 1.0 Hz zu suchen. Basierend auf den Daten von MeteoSwiss kann eine solche Spektralanalyse nicht durchgeführt werden. Eine Abschätzung der Turbulenzintensität aufgrund der Sekundenspitzenwerte und der 10-MinutenMittelwerte wurde durchgeführt. Auf der Grimsel muss mit Turbulenzintensitäten von ca. 20 % gerechnet werden.

Auf der Grimsel, auf 2000 m.ü.M., beträgt die Dichte der Luft 1.1 kg/m³. Dies aufgrund des reduzierten Druckes.

4.2 Bemessungskriterien

Bezüglich Winddynamik müssen zwei Kriterien definiert werden. Maximale Beschleunigungen im Gebrauchszustand und eine Bemessungswindgeschwindigkeit, bis zu welcher das Tragwerk keine Stabilitätsprobleme aufweisen darf.

Die Gebrauchstauglichkeit kann beeinträchtigt werden, wenn zu grosse, gut spürbare Beschleunigungen des Brückenträgers auftreten. Typischerweise treten grösserer Beschleunigungen auf, wenn die Ablösefrequenz der Wirbel, einer Eigenfrequenz der Brücke entspricht. Dies ist oft schon bei relativ tiefen Windgeschwindigkeiten der Fall. Aus den SIA Normen sind keine solchen Kriterien zu entnehmen. Zusammen mit dem Bauherrn und der späteren Betreiberin (Oberingenieurkreis 1 des Kantons Bern) wurden folgende Kriterien festgelegt:

Windgeschwindigkeit		Beschleunigung	Auswirkung	RMS Heave	RMS Pitch
[m/s]	[km/h]	[m/s ²]		[mm]	[°]
0 – 10	0 – 36	< 0.1	< gut spürbar	< 10	< 0.1
10 – 30	36 – 108	< 0.5	< unangenehm	< 50	< 0.5
30+	108+	< 1.5	< untolerierbar	< 150	< 1.5

Die Definition der Bemessungswindgeschwindigkeit wird üblicherweise basierend auf den 10-MinutenMittelwerten gemacht. Die 10-MinutenMittelwerte eignen sich daher sehr gut, da das Tragwerk zuerst aufgeschaukelt werden muss, bevor grosse Amplituden erreicht werden. Bei tiefen Eigenfrequenzen < 1 Hz und kleinen Systemdämpfungen ist diese Zeitspanne etwa realistisch.

Für die Grimsel Seebrücke wurde als Bemessungswindgeschwindigkeit folgender Ansatz gemacht:

- Die Brücke muss stabil sein bis zu einem Sturm mit der Wiederkehrperiode von 500 Jahren
- Aufgrund von Modellierungsunsicherheiten wird die 500 jährige Windgeschwindigkeit mit einem Sicherheitsfaktor von 1.25 beaufschlagt.

Auf der Grimsel beträgt der 500 jährige Extremwert des 10Minutenmittelwertes der Windgeschwindigkeit 38 m/s. Damit beträgt die Bemessungswindgeschwindigkeit $v_d = 47.5$ m/s.

Dieser Wert wurde auch mit der Chinesischen und der Britischen Norm verglichen. Beide Normen ergeben für die Grimsel ähnliche Bemessungswindgeschwindigkeiten.

4.3 Erster untersuchter Querschnitt

Der ursprüngliche Querschnitt der Grimsel Seebrücke hatte 1.30 m hohe, geschlossene Geländer. Die Geländer waren als Glasscheiben geplant. Die theoretischen Abschätzungen zeigten, dass winddynamische Probleme nicht ausgeschlossen werden können. Der Querschnitt wurde trotzdem im Windkanal (Force Technology, Dänemark) untersucht. Dazu wurde ein Modell im Massstab 1:30 erstellt. Das Modell wurde elastisch gelagert, so dass die Eigenfrequenzen der beiden Grundschnungen in Torsion und vertikaler Biegung im Modellmassstab abgebildet werden. Das Modell wird typischerweise aus Holz gefertigt. Bei offenen Querschnitten, muss das Modell im Windkanal unter- bzw. überspannt werden, so dass die erste Biegeschwingung des Modells selbst eine deutlich höhere Eigenfrequenz aufweist, als dies eingestellten Eigenfrequenzen der Lagerung. Das heisst, dass sich das Modell nun als quasi starrer Körper verhält.

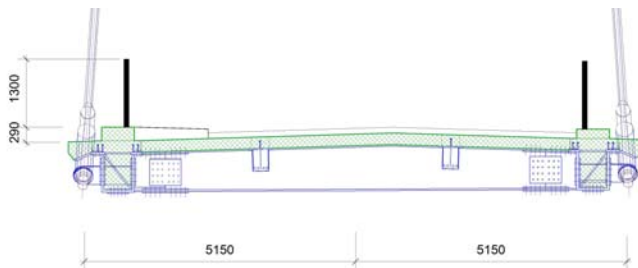


Bild 5: Links: erster untersuchter Querschnitt der Seebrücke. Rechts: Section-Modell im Windkanal.

Folgende mechanische Eigenschaften wurden abgebildet:

- Erste Biege-Eigenfrequenz vertikal: 0.40 Hz
- Erste Torsions-Eigenfrequenz: 0.64 Hz
- Masse pro Länge: 13'500 kg/m
- Rotationsträgheitsmoment pro Länge: 176'000 kg*m²/m

Die kleinere Dichte der Luft wurde berücksichtigt, in dem die Masse des Modells entsprechend hoch skaliert wurde.

Bei einem typischen Versuch im Windkanal wird die Windgeschwindigkeit langsam gesteigert, stufenweise. Zwischen den einzelnen Stufen der Windgeschwindigkeit, wird immer so lange gewartet, bis das System eingeschwungen ist. Der erste Versuch zeigt die Resultate wie sie in Bild 6 dargestellt sind.

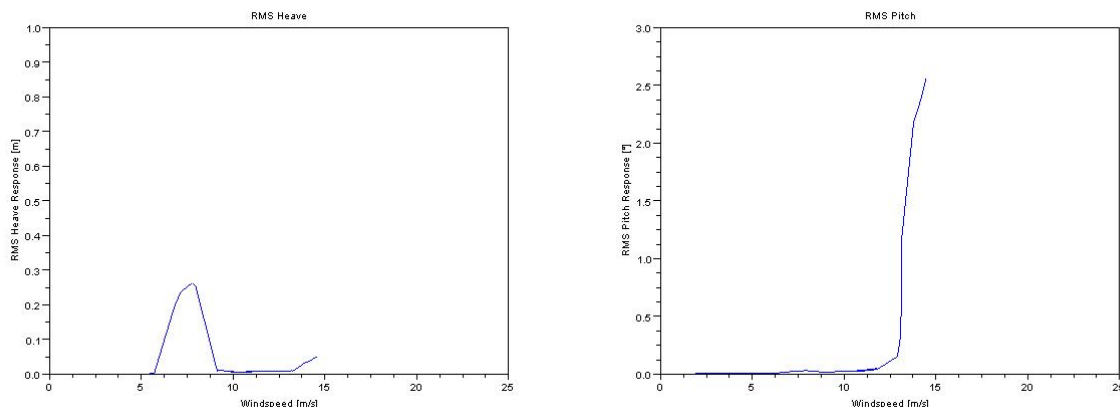


Bild 6: Im Windkanal gemessene Amplituden am ursprünglichen Querschnitt (Links: vertikale Biegeschwingung und Rechts: Torsionsschwingungen).

Der erste Peak in den Diagrammen auf Bild 6 zeigt eine vertikale Biegeschwingung bei einer Windgeschwindigkeit von 7.5 m/s. Die RMS Amplitude beträgt 0.25 m. Steigert man die Windgeschwindigkeit weiter, entsteht bei einer Windgeschwindigkeit von 13 m/s eine grosse Torsionsschwingung. Der Versuch wurde abgebrochen, da die Amplituden zu gross waren.

Bestimmt man nach EN 1991-1-4:2005 die Windgeschwindigkeiten, bei der die Wirbelablösefrequenz der einer Eigenfrequenz des Tragwerkes entspricht, erhält man mit der Strouhalzahl $St = 0.14$, $d = 2.6$ m und den jeweiligen Eigenfrequenzen:

- Vertikale Biegeschwingung: $v_{krit} = 0.4 \text{ Hz} * 2.6 \text{ m} / 0.14 = 7.4 \text{ m/s}$
- Torsionsschwingung: $v_{krit} = 0.63 \text{ Hz} * 2.6 \text{ m} / 0.14 = 11.7 \text{ m/s}$

Diese Werte stimmen gut mit den Versuchsergebnissen überein, dass man davon ausgehen kann, dass es sich um ein Vortex-Shedding Problem handelt. Das VortexShedding selbst ist nicht das eigentliche Problem, es tritt bei jeder Brücke auf. Entscheidend ist, wie gross die Kräfte infolge der Wirbelablösung auf den Querschnitt sind.

Der Querschnitt wurde anschliessend mit einer CFD-Software nach gebildet. Die Software basiert auf der Vortex Particle Methode und wurde von Dr. Paul Pieringer, ABES Pircher und Partner GmbH in Graz, implementiert. Die Methodik eignet sich sehr gut für Untersuchungen von Brückenquerschnitten. Der starre Brückenquerschnitt, zwei dimensional, wird von einer Strömung mit vorgegebenem v_∞ umströmt. Die Methodik erlaubt es, den starren Querschnitt elastisch zu Lagern und die volle aeroelastische Kopplung zu simulieren. Wichtige Hinweise auf die aerodynamischen Phänomene erhält man nur schon durch die Möglichkeit die Strömung zu visualisieren (Bild 7).

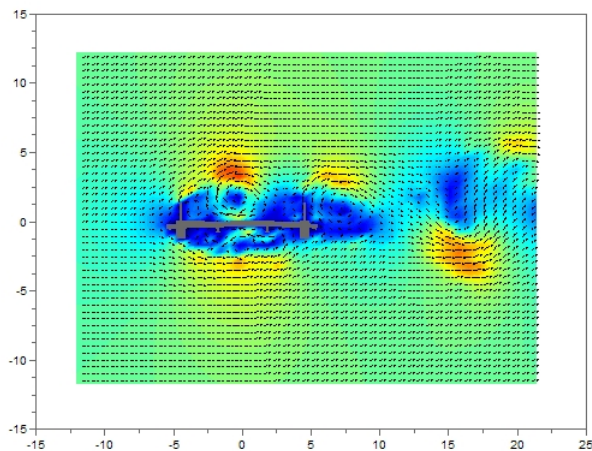


Bild 7: CFD Simulation des ursprünglichen Brückenquerschnittes der Grimsel Seebrücke.

Durch die hohen Geländer bedingt, entstehen grosse Wirbelwalzen, welche sich periodisch von der Brücke ablösen. Diese Wirbel üben periodische Kräfte auf den Brückenträger aus, was ein starkes aufschaukeln bedingt.

Diese Untersuchungen, im Windkanal wie auch mit Hilfe der Simulation, wurden mit laminarer Strömung gemacht. Zudem wird angenommen, dass über die gesamte Länge der Brücke die Strömung gleich ist. Beide dieser Annahmen führen zur Überschätzung der Anregung des Querschnittes.

Die 1.3 m hohen Geländer wurden anschliessend entfernt und weitere Versuche wurden durchgeführt. Es zeigte sich, dass die hohen Amplituden infolge Vortex-Shedding nicht mehr auftraten. Der Querschnitt wurde bei einer Windgeschwindigkeit von 35 m/s instabil, ein Torsionsflattern.

4.4 Aerodynamische Optimierung des Querschnittes

Grundsätzlich kann zur Optimierung des Verhaltens der Brücke das Tragwerk selbst oder die aerodynamische Form verändert werden:

- **Tragwerk:**
Durch eine Versteifung des Tragwerkes können dessen Eigenfrequenzen erhöht und somit die kritische Windgeschwindigkeit der Brücke erhöht werden. Eine Erhöhung der Masse, ohne die Frequenzen zu erniedrigen, wirkt sich auch positiv auf das Verhalten im Wind aus.
- **Aerodynamischen Querschnittsform:**
Durch eine gezielt Optimierung der umströmten Form des Querschnittes, können die Anregungskräfte und die Anfälligkeit gegenüber Instabilitäten reduziert werden.

Um die Eigenfrequenzen des Tragwerkes massgeblich zu verändern, ohne dass die Spannweite reduziert wird, sind erhebliche Mehraufwendungen an Material notwendig. Dies ist mit grossen Mehrkosten verbunden, weshalb die Optimierung über Anpassungen an der aerodynamischen Form bevorzugt wurde.

Mit Hilfe der CFD-Software und ergänzenden Berechnungen wurden zahlreiche Formänderungen und deren Einfluss auf das Verhalten bezüglich Wirbelablösung und der Stabilität des Querschnittes untersucht. Folgende Vorgehensweisen zur theoretischen Beschreibung der Phänomene wurden gewählt:

- **VortexShedding**
Mit Hilfe der CFD Simulation wurden am starren Modell die Kräfte ermittelt, welche am Quer-

schnitt als Resultierende wirken. Dazu wurde der Zeitverlauf der Kräfte und des Momentes über ca. 30 Minuten für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten simuliert. Dieser Kraftverlauf wurde einem Einmassenschwinger-Modell beaufschlagt und die Schwingungsantwort für die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten bestimmt.

- **Stabilität:**

Die klassischen Flutter-Gleichungen nach Simiu und Scanlan [1] wurden herangezogen.

$$m[\ddot{h} + a\ddot{\alpha} + 2\zeta_h\omega_h\dot{h} + \omega_h^2h] = L_h \quad (6.5.2a) \quad L_h = \frac{1}{2}\rho U^2 B \left[KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K)\alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (6.5.7)$$

$$I \left[\frac{a}{r_g^2} \ddot{h} + \ddot{\alpha} + 2\zeta_\alpha\omega_\alpha\dot{\alpha} + \omega_\alpha^2\alpha \right] = M_\alpha \quad (6.5.2b) \quad M_\alpha = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \left[KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K)\alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right] \quad (6.5.8)$$

wobei A_i und H_i die Flutter-Koeffizienten sind. Diese Koeffizienten wurden mit Hilfe der CFD Software bestimmt und die Gleichungen gelöst. Die kritische Geschwindigkeit kann berechnet werden.

Es wurden unterschiedliche aerodynamische Modifikationen des Querschnittes untersucht und hinsichtlich der Stabilität und des VortexShedding beurteilt.

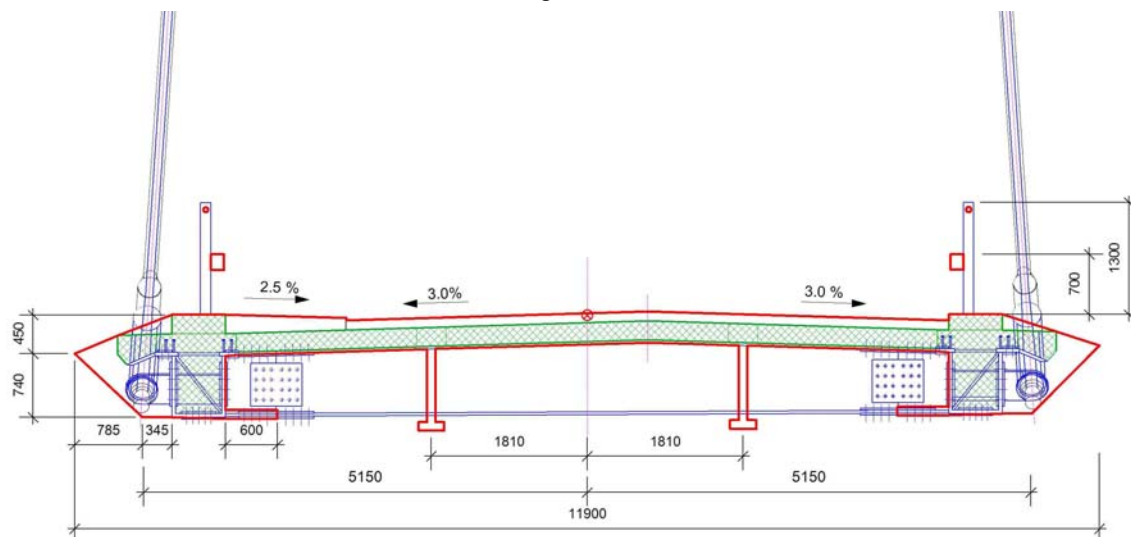


Bild 8: Aerodynamisch optimierter Querschnitt der Grimsel Seebrücke.

Folgende Modifikationen haben sich als effizient herausgestellt und sollen anschliessend im Windkanal untersucht werden:

- Weglassen des 1.3 m hohen geschlossenen Geländers (es wird nur noch mit einem Schneewall von 0.7 m bei den Geländern gerechnet).
- Einführen einer dreiecksförmigen Windnase beidseitig des Trägers.
- Verlängern der sekundären Längsträger (Baffles). Diese werden im Endzustand als Schienen für den Unterhaltswagen benötigt und zudem ermöglichen sie einen effizienten Bauvorgang.
- Einführen eines horizontalen Bleches als Verbreiterung des Hut-Profiles.
- Der Gehweg wird um 4 cm runtergesetzt. Ziel dieser Massnahme ist, dass ein Schneepflug, wenn er genügend schnell fährt, den Schnee nicht an die Leitplanke schiebt, sondern, dass der Schnee unter der Leitplanke durch von der Brücke weg befördert wird.

4.5 Windkanaluntersuchungen am optimierten Querschnitt

Der in Bild 8 abgebildete Querschnitt wurde anschliessend im Windkanal untersucht. Neben den rein aerodynamischen Modifikationen wurde durch den Projektfortschritt bedingt auch die Struktur etwas modifiziert, was in einem leicht geänderten dynamischen Verhalten resultierte:

Vertikale Biegefrequenz	0.42 Hz
Vertikale Biege Dämpfung	0.3 %
Trägheitsmasse	13'810 kg/m
Torsionseigenfrequenz	0.80 Hz
Torsionsdämpfung	0.4 %
Rotationsträgheitsmasse	186'100 kg m ² /m

Im Windkanal wurde der Träger mit und ohne schneeverstopfter Leitplanke untersucht. Da der Fall mit vom Schnee geschlossener Leitplanke aerodynamisch kritischer ist, wurde dieser Fall zusätzlich mit unterschiedlichen Anströmwindwinkeln untersucht.

VortexShedding:

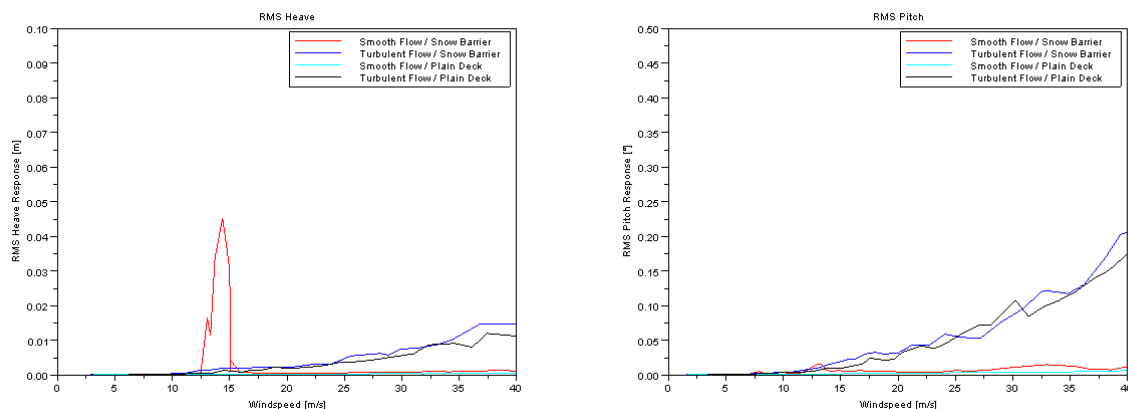


Bild 9: Amplitudenverläufe mit der Windgeschwindigkeit für 4 untersuchten Fälle (Turbulenter Wind, laminarer Wind, mit Schnee und ohne Schnee). Links sind die Biegeschwingsamplituden und Rechts die Torsionschwingsamplituden abgebildet.

Bild 9 zeigt die Amplituden des Section-Modells. Es zeigte sich, dass nur mit schneeverstopften Geländern bei laminarer Strömung mit einer geringen Schwingungsamplitude zu rechnen ist. Im Falle der turbulenten Strömung, wie diese in der Natur vorherrscht, ist keine signifikante Schwingungsamplitude infolge periodischer Wirbelablösung zu erwarten.

Stabilität:

Die Stabilität des Querschnittes wurde im Windkanal für dieselben Fälle untersucht. Parallel dazu wurden die kritischen Geschwindigkeiten mit Hilfe von CFD bestimmt. Die Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation ist gut. Um den Einfluss unterschiedlicher Schneeformen auf dem Brückenträger zu berücksichtigen, wurden zahlreiche Simulationen durchgeführt und die kritische Windgeschwindigkeit bestimmt. Dies ist notwendig, da der Grimselpass in den Wintermonaten jeweils geschlossen ist, wodurch sich die aussergewöhnliche Situation ergibt, dass bei Schneefall der Schnee auf der Fahrbahn liegen bleibt und sich somit unterschiedliche Schneeformen ausbilden können.

Die kritische Windgeschwindigkeit im Windkanal wurde nur erreicht für den Fall der schneeverstopften Geländer für die Anströmwindwinkel 0° und -5° , d.h. leicht schräg von oben. Bei den Instabilitäten handelt es

sich um ein reines Torsionsflattern. Im Windkanal konnten keine höheren Windgeschwindigkeiten gefahren werden. Dies ist durch die im Voraus festgelegte Zeitskalierung bedingt, was notwendig ist um die Steifigkeit der elastischen Lagerung zu bestimmen.

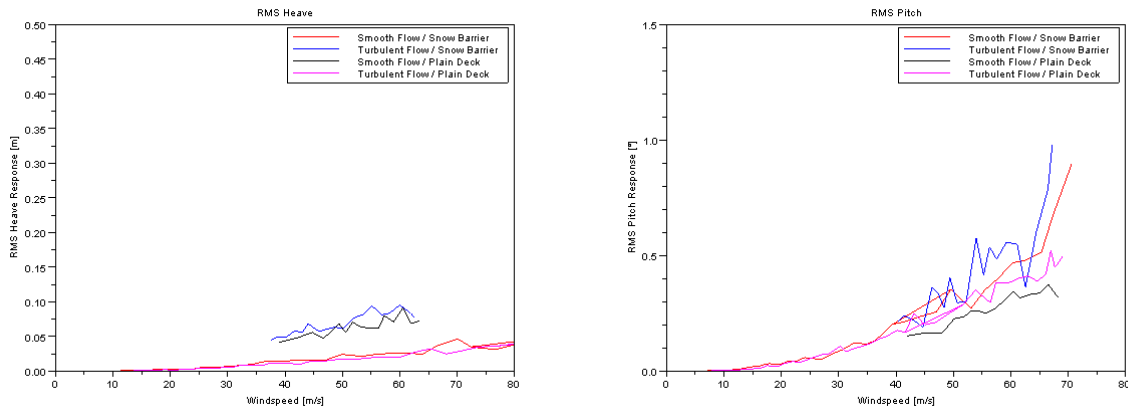


Bild 10: Amplitudenverläufe mit der Windgeschwindigkeit für 4 untersuchten Fälle (Turbulenter Wind, laminarer Wind, mit Schnee und ohne Schnee). Links sind die Biegeschwingsamplituden und Rechts die Torsionschwingsamplituden abgebildet.

Der Vergleich der gemessenen zu den berechneten kritischen Geschwindigkeiten zeigt eine gute Übereinstimmung.

	Windkanal	Simulation
Verstopftes Geländer 0°	62 m/s	64 m/s
Verstopftes Geländer -5°	62 m/s	58 m/s
Verstopftes Geländer +8°	68 m/s	> 70 m/s
Offenes Geländer 0°	> 70 m/s	> 70 m/s

5 Weitere Untersuchungen

Neben der Böenanregung des Brückenträgers wurde insbesondere die Problematik der Kabelschwingungen untersucht. In der Literatur wird versucht mit hoch komplexen theoretischen Modellen in Zusammenhang mit Experimenten die Phänomene zu beschreiben. Praktische Ansätze existieren nur teilweise und sind sehr konservativ. International wurde in den letzten Jahren versucht, Richtlinien für die dynamische Auslegung der Schrägkabel zu erarbeiten (siehe z.B. [4]). Es gibt eine Reihe von sehr konservativen Kriterien, welche angewendet werden können. Es heisst aber nicht, dass wenn ein Kabel diese Kriterien nicht erfüllt, ein dynamisches Problem vorliegen muss. Die meisten Schrägkabel bestehender Brücken verletzen diese Kriterien, die Brücken funktionieren aber trotzdem ohne Probleme.

Ein weiteres, unbekanntes Problem stellt die Vereisung der Kabel dar. Findet dieses Phänomen überhaupt statt? Von welcher Form und von welcher Art Eis sind dann diese Vereisungen? Fallen sie bedingt durch den Wind und die Kabelschwingungen von selber wieder ab? Gegenüber dem Brückenträger wurde bei den Kabeln daher ein etwas anderes Vorgehen gewählt. Es wurde gezeigt, dass wenn solche Schwingungen mit grossen Amplituden auftreten, trotzdem keine Tragsicherheitsprobleme vorhanden sind. Dadurch ist Zeit vorhanden das Eis zu entfernen und die Probleme mit zusätzlichen, nachträglich

angebrachten Dämpfungsmassnahmen zu beseitigen. Die entsprechenden Einbaumöglichkeiten sind bereits bei der Ausführungsplanung der Brücke zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] Wind effects on structures : fundamentals and applications to design / Emil Simiu, Robert H. Scanlan. - Third ed. - New York [etc.] : Wiley, cop. 1996.
- [2] Aerodynamics of large bridges : proceedings of the first International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, Copenhagen, Denmark, 19-21 February 1992 / ed. by Allan Larsen; org. by Danish Maritime Institute. - Rotterdam [etc.] : Balkema, 1992.
- [3] Bridge aerodynamics : proceedings of the International Symposium on Advances in Bridge Aerodynamics, Copenhagen, Denmark, 10-13 May 1998 / ed. by Allan Larsen & Søren Esdahl. – Rotterdam
- [4] Wind-Induced Vibration of Stay Cables, Report No. FHWA-HRT-05-083