

ZUR VERFOLGUNG DER AEROELASTISCHEN ANTWORT VON WINDBELASTETEN, SCHWINGUNGSANFÄLLIGEN TRAGWERKEN

Dr.-Ing. Imre Kovacs, Dynamik Consulting, Weinstadt
Dr.-Ing. Casimir Katz, SOFiSTiK AG, Oberschleißheim

Zusammenfassung:

Die Interaktion eines Bauwerks mit einem künstlich erzeugten natürlichen Windfeld im Zeitbereich wurde schon mehrfach beschrieben. Die Vorteile gegenüber der normalerweise angewendeten Verfahren im Frequenzbereich sind nicht nur die Berücksichtigung zahlreicher nichtlinearer Effekte, sondern auch die bessere Anschaulichkeit der Ergebnisse. Der letzte Baustein der nun implementiert wurde besteht in der Berücksichtigung der Scanlan'schen Derivativa der Winderregung, mit der sich die bekannten Stabilitätseffekte selbsterregter Schwingungen beschreiben lassen.

Summary:

The interaction of a structure with an artificial generated natural wind field in the time domain has already been described for different projects. The advantages compared to the usual spectral methods in the frequency domain are not only the numerous non linear possibilities, but also the better vividness of the results. The last feature which has been implemented now is the inclusion of the flutter derivativa according to Scanlan, allowing the simulation of numerous stability effects.

1. Theoretische Grundlagen

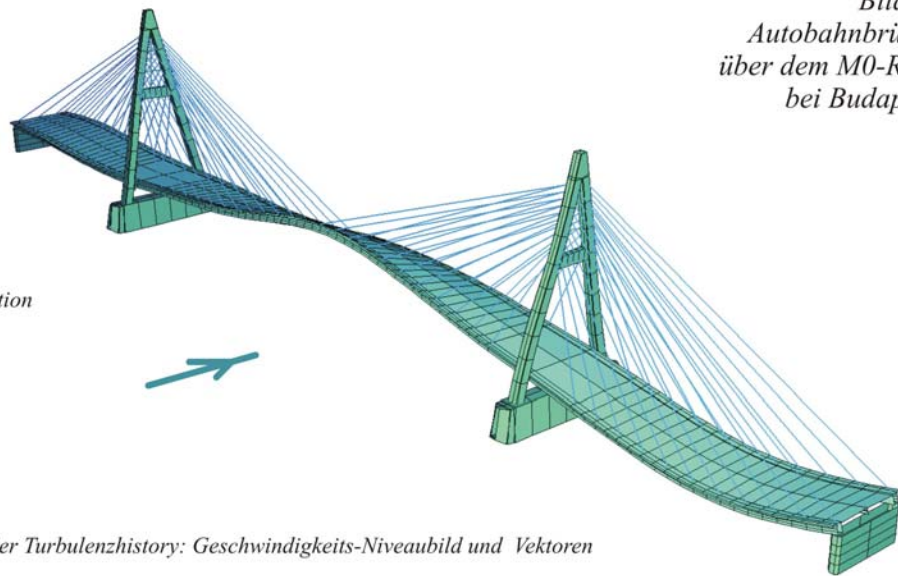
SOFILOAD / DYNA erlauben die Schnittkraftermittlung an großen Tragwerken unter Einwirkung von böigem Wind. Die eigens entwickelte **künstliche Windgenerierung** soll den zufälligen, natürlichen Wind mathematisch abbilden und ist ein wesentlicher Bestandteil des Programms SOFILOAD-WH: ohne sie funktioniert gar keine Simulationsrechnung. Das Verfahren soll hier jedoch nicht weiter erörtert werden.

Die bisherige Form mit einer **stationären Näherung** der auf den Querschnitt wirkenden Windkraft wird im wesentlichen an großen Brückentragwerken und Türmen angewandt. Der Sinn dieser ersten Entwicklungsstufe war, die **Interaktion zwischen Strömung und schwingender Brücke** überhaupt – wenn auch mit einfacheren Mitteln – zu verfolgen, d.h. die Veränderung der Windkräfte infolge der Bewegungen des Querschnitts zu erfassen. Die Kraftermittlung wäre ohne Berücksichtigung dieser Rückwirkung fehlerhaft, und zwar umso mehr, je nachgiebiger das Bauwerk ist. Diese Korrektur war sowohl aus Sicherheits- als auch aus wirtschaftlichen Gründen erforderlich.

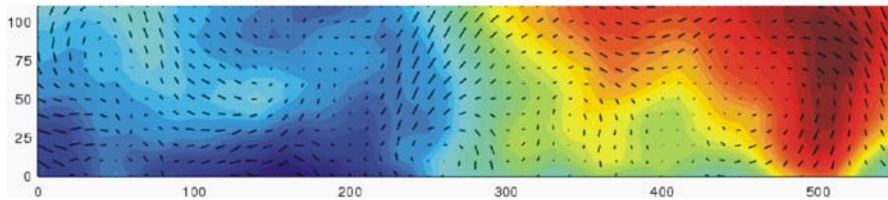
2002 haben wir das Programm erstmalig am Beispiel der Nachrechnung der Tingkau-Brücke Hongkong vorgestellt; Bild 1 zeigt eine ähnliche Anwendung aus der selben Zeit, die Autobahnbrücke über dem M0-Ring bei Budapest und zwar die schwingende Brücke und das gerade auftreffende, künstlich generierte Windgeschwindigkeitsfeld.

Bild 1:
Autobahnbrücke
über dem M0-Ring
bei Budapest

1.1 Momentaufnahme
aus der Antwort-Simulation



1.2 Momentaufnahme aus der Turbulenzhistory: Geschwindigkeits-Niveaubild und Vektoren



Diese sogenannte **stationäre Modellierung** der Brücke-Strömungs-Interaktion war allerdings vereinfacht: man betrachtete jeden einzelnen Augenblick der gegenseitigen Bewegung für sich allein, d.h. so als hätte der Körper im Luftstrom in der vorausgehenden Zeit eine gerade Bahn beschrieben. Bild 2 zeigt den Unterschied: in Wirklichkeit ist die Bahn nicht gerade sondern gekrümmt, der schwingende Körper beschreibt Wellen in dem Strom, und das macht einen großen Unterschied bei flexiblen, niederfrequenten Bauwerken, denn durch die gekrümmten Stromlinien werden die Druckverhältnisse in der Luft modifiziert. Je nach Wellenlänge der Bahn des schwingenden Körpers verändert sich außerdem der für die viskose Luft zur Verfügung stehende Luftraum, in welchem das Medium die auf den Körper übertragenen Kräfte 'verarbeiten muss': aus all diesen resultiert, dass sich die Größe der Windkraft relativ zum stationären Fall verändert und – was sehr wichtig ist – dass Phasenverschiebungen zwischen Körperbewegung und Windkraftschwankung entstehen.

Es ergibt sich also ein zusätzlicher, **instationärer Windkraftanteil**, der u.a. für ein Großteil der aeroelastischen Instabilitäten – Torsionsgalloping, Flattern – verantwortlich ist.

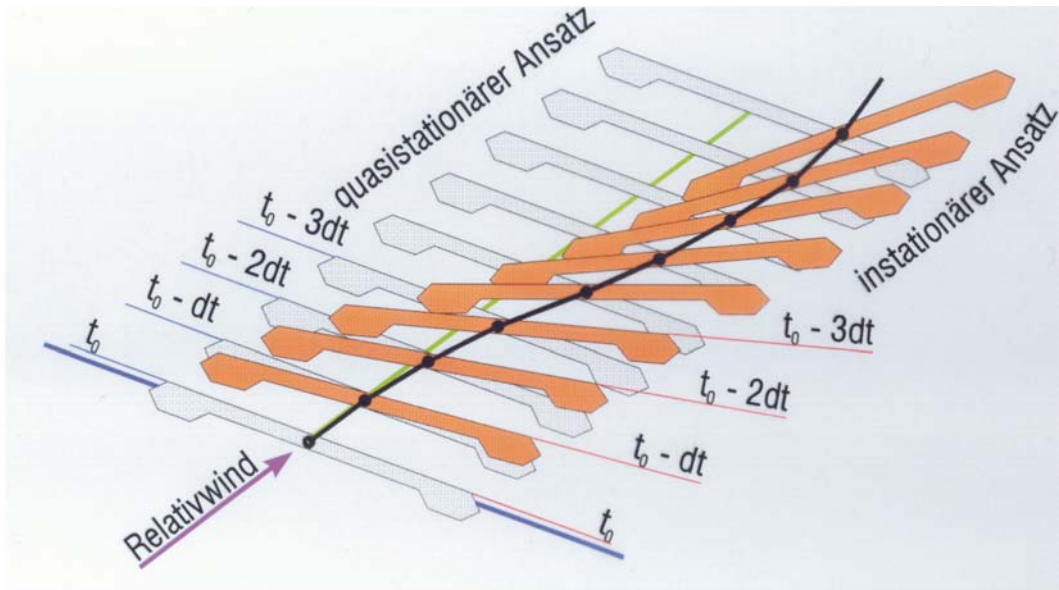


Bild 2: Unterschiedliche Bewegungsmodelle und Rechenansätze der Windkraftberechnung

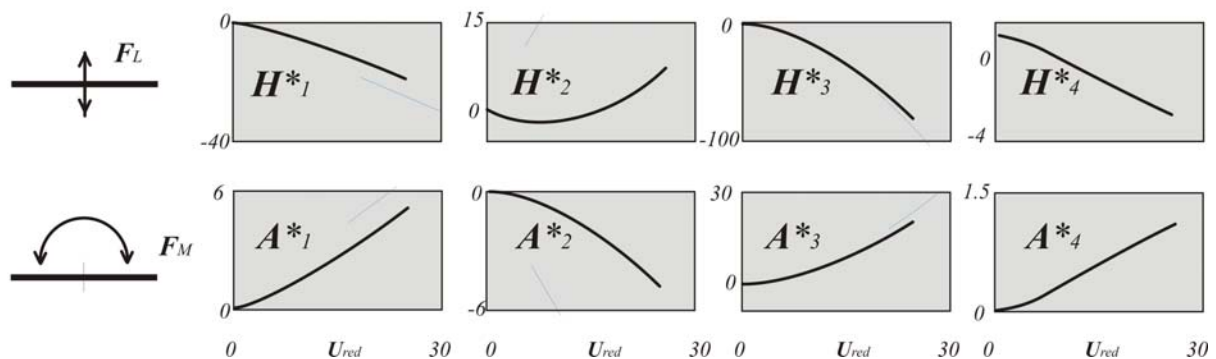
Bild 3: Aeroelastische Derivativa
nach der Definition von Scanlan

$$U_{red} = \frac{U}{f \cdot B} = \frac{2\pi}{K}$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 B^* \left[KH_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^*(K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^*(K) \alpha + K^2 H_4^*(K) \frac{h}{B} \right]$$

$$F_M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1^*(K) \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^*(K) \frac{B \dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^*(K) \alpha + K^2 A_4^*(K) \frac{h}{B} \right]$$

Derivativa im Theodorsen-schen Grenzfall:



In den Formeln in Bild 3 sind mit F_L (= Auftriebskraft) und F_M (= Kippmoment) die beiden wichtigsten Windkräfte in Abhängigkeit von den Bewegungen in der Strömung definiert. Man erkennt, ohne in die Einzelheiten zu gehen, dass die Bewegungskomponenten h und α über die Luftkräfte miteinander gekoppelt werden (z.B. Translation weckt auch Kippmomente, oder Verdrehung auch Auftriebskräfte). Auch erkennt man, dass geschwindigkeits-proportionale – also phasenverschobene

– Kräfte auftreten. Dieses Kräftekomplex bewirkt dann, dass auch die Eigenschwingungsformen zu gekoppelten Formen werden und dass sie – wegen der o.a. Phasenversatz der Kräfte – aeroelastisch gedämpft oder angefacht werden.

Die speziellen Eigenschaften des Querschnitts sind über die sogenannten Scanlan-schen **Derivativa**, also die Funktionen $\mathbf{H}^*_1 \div \mathbf{H}^*_4$ bzw. $\mathbf{A}^*_1 \div \mathbf{A}^*_4$ eingeführt, die im Vorfeld aus Windkanalmessungen abgeleitet werden, diese bilden die instationären Windkraftkoeffizienten. Sie sind windgeschwindigkeits- oder auch bewegungs-frequenz-abhängig und sind als Funktion der dimensionslosen **reduzierten Windgeschwindigkeit** \mathbf{U}_{red} definiert.

Als klassisches Beispiel zeigt die Diagrammserie rechts im Bild die von Theodorsen analytisch abgeleiteten Derivativa des dünnen Blattquerschnitts. Auch die stationären Näherungen sind als blaue Asymptoten eingezeichnet: für $\mathbf{U}_{\text{red}} \rightarrow \infty$ (= unendlich niedrige Frequenz) nähert sich die instationäre Windkraft ihrer stationären Näherung an. Im allgemeinen Fall werden die Derivativa nicht analytisch berechnet sondern im Windkanal gemessen: Bild 4 zeigt dazu als Beispiel die Fußgängerbrücke Strasbourg-Kehl mit den gemessenen Derivativa des etwas eigenwilligen, zweiteiligen Decks.

Der Bearbeitungsgang eines Projekts lässt sich wie folgt beschreiben: Die Bauteile, die erfahrungsgemäß Anfälligkeiten gegenüber instationären Effekten zeigen, werden von dem planenden Ingenieur schon im Vorfeld ausgewählt (z.B. Brückendeck) und die Querschnitte im Windkanal entsprechend getestet. In dem heute meist verbreiteten Messverfahren wird ein prismatischer Stab-Abschnitt in der Windkanalströmung harmonisch bewegt und die Reaktionskräfte in den Lagerpunkten gemessen, es gibt aber auch andere Testverfahren. Eine entsprechende Auswertung ergibt aus den Messergebnissen die instationären Windkräfte bzw. die daraus entwickelten Derivativa-Diagramme. Es sei auch noch erwähnt, dass die instationären Windkräfte im allgemeinen Fall je nach Anblaswinkel unterschiedlich sind, so dass mehrere Mess-Serien zur ausreichenden Erfassung der instationären Antwort erforderlich werden. Die Reaktionen sind häufig auch amplitudenabhängig, deshalb müssen die Testamplituden korrekt vorgegeben werden. Der Umfang und die Parameter der Windkanaltests werden üblicherweise je nach Erfordernis vom Brückenbau-Ingenieur festgelegt.

In dem Time-History-Programm wiederum – einer erweiterten Version von DYNA – werden die Windkräfte mit etwas Aufwand, Knoten für Knoten, Zeitschritt für Zeitschritt identifiziert. Zunächst wird der vergangene Deformationsverlauf $\mathbf{h}(\mathbf{t})$ und $\alpha(\mathbf{t})$ durch eine harmonische Funktion angenähert, d.h. dem tatsächlichen Verlauf wird eine optimale Sinusfunktion mit dem minimalen Fehler angepasst. Daraus ergibt sich dann die momentan am besten passende Bewegungsfrequenz, -amplitude und -phase, gegebenenfalls auch noch der momentane mittlere Anblaswinkel. Die auf diesem Wege abgeleiteten Derivativa $\mathbf{H}^*_1 \div \mathbf{H}^*_4$ bzw. $\mathbf{A}^*_1 \div \mathbf{A}^*_4$ werden in die in Bild 4 gezeigten Scanlan-schen Formeln eingeführt, um die Windkräfte zu bestimmen. Diese Verfahrensweise wird natürlich nur für diejenigen Bauwerkselemente angewandt, die als anfällig eingestuft wurden; die auf die restliche Struktur wirkenden Windkräfte werden – wie in der früheren Programmversion – auf der gewohnten Art mit der stationären Näherung berechnet.

2. Erste Anwendungen

2005 wurde beim SOFiSTiK-Seminar im Vortrag von Morgenthal einiges zum aerodynamischen Entwurf der Fußgängerbrücke Strasbourg-Kehl gezeigt, wobei eine für die Derivativa speziell modifizierte Programmversion zum Einsatz kam.

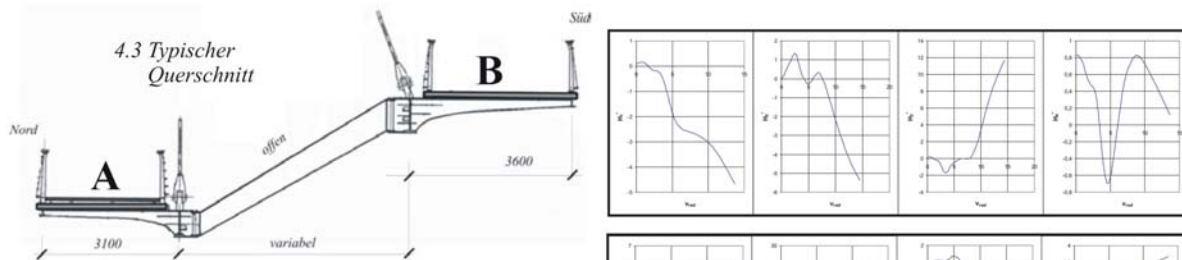
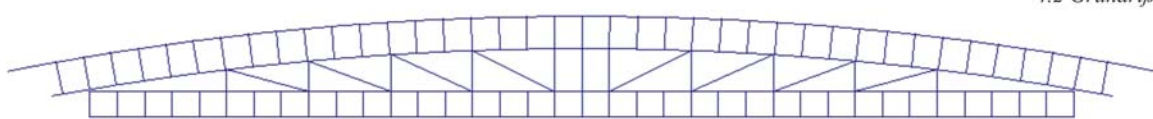


Bild 4: Fußgängerbrücke Strasbourg - Kehl

4.5 Torsionstilger - Modell und Ausführung

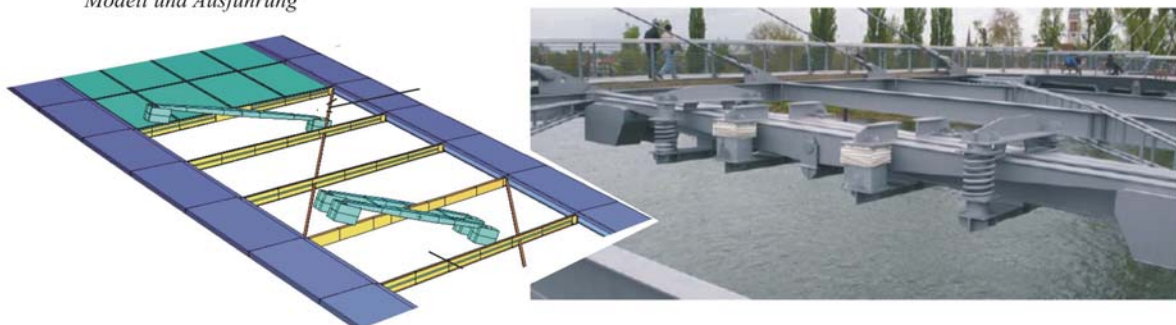


Bild 4: Fußgängerbrücke Strasbourg-Kehl

Die Brücke war im übrigen ein der aeroelastisch empfindlichsten Bauwerke überhaupt: sie zeigte eine mit 14 m/s sehr frühe Galloping-Instabilität der Torsionsschwingungen, die nur mit Hilfe von mehreren Torsionstilgern unterdrückt werden konnte. Einer davon ist auch im Bild gezeigt. Wir haben die Tilger unter Anwendung von SOFILOAD-WH ausführlich dimensioniert und verschiedene Fehlverhalten wie z.B. Beschädigungen oder Ausfälle simuliert.

Der Einfluss der Derivativa auf die Stabilität wurde unter anderem an der Nachrechnung der Klöppel-Thiele-Diagramme erprobt. Bild 5 zeigt das Stabilitätsdiagramm des Theodorsen-schen Blattquerschnittes mit den (etwas ungeschickten) 2-fachen Interpolationen: die Stabilitätsgrenze wird in Abhängigkeit (a) vom Eigenfrequenzverhältnis ϵ , (b) vom Massenfaktor μ und (c) vom Trägheitsradius r/b angegeben. Wir haben die Diagramme punktweise an 2 DOF – Modellen über Time-Histories gegengerechnet: wie die Zahlen zeigen, haben sich Unterschiede von nur wenigen Prozenten, und diese auch nur bei $\mu = 10$ (also bei sehr niedrigen Bauwerksmassen) ergeben, während die Übereinstimmung in dem realistischen Bereich um $\mu = 30 \div 100$ sehr gut war.

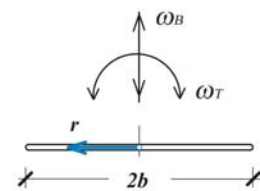
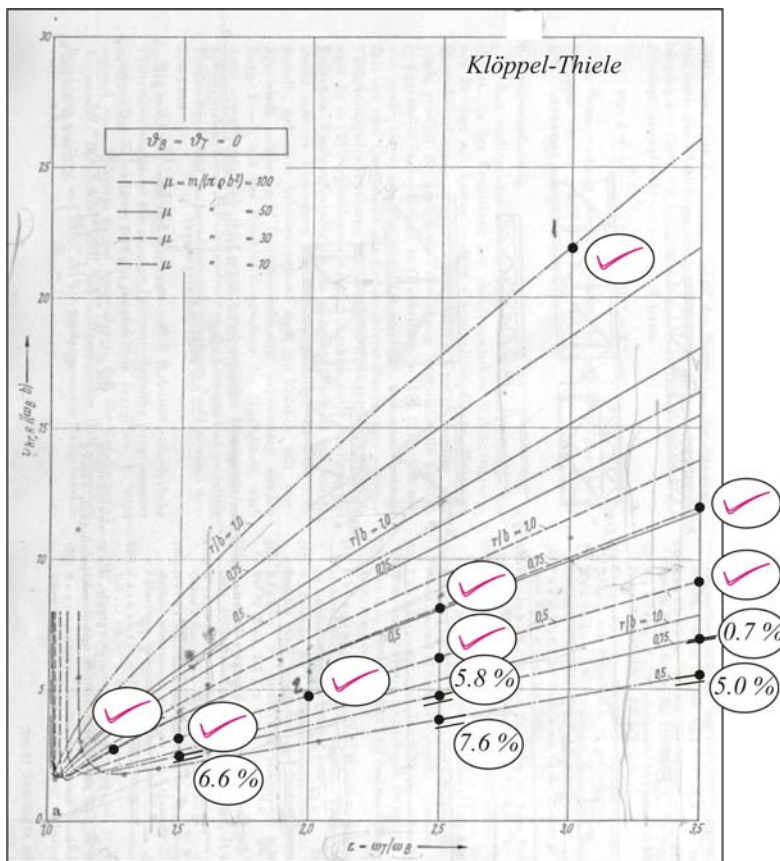


Bild 5: Gegenrechnung des Klöppel-Thiele Stabilitätsdiagramms

3. Aktuelle Anwendung

Das folgende Beispiel – die erste Brücke, an der wir die instationäre Modellierung voll durchprobiert haben – zeigt u.a., wie komplex das Verhaltensweise einer verhältnismäßig weichen Konstruktion nahe an der Stabilitätsgrenze ist und wie problematisch – ja hoffnungslos – die Schnittkraftermittlung ohne entsprechendem Hilfsmittel wird. Bild 6 zeigt die Brandangersund Brücke Norwegen, eine sehr schlanke und ungewöhnlich anfällige Bogenbrücke am Eingang des gleichnamigen Fjords. Wir haben von der norwegischen Straßenbehörde den Auftrag zur unabhängigen Prüfung des Tragverhaltens des kühnen Entwurfs bekommen. Vermutlich gab es irgendwelche technische Bedenken des Auftraggebers weswegen diese zweite Prüfung beschlossen wurde. Einige Angaben zum Bauwerk: der Bogen ist sehr schlank, hat eine beträchtliche Spannweite von 240 m und dazu einen verhältnismäßig geringen Stich von nur 30 m. Die Hänger erfüllen u.a. auch eine Ausfachungsfunktion und bringen wertvolle Steifigkeiten. Uns hat in erster Linie die laterale Schlankheit der Konstruktion beunruhigt, die Querschnittsbreite beträgt nur 7.6 m, also weniger als 1/30 der Spannweite.

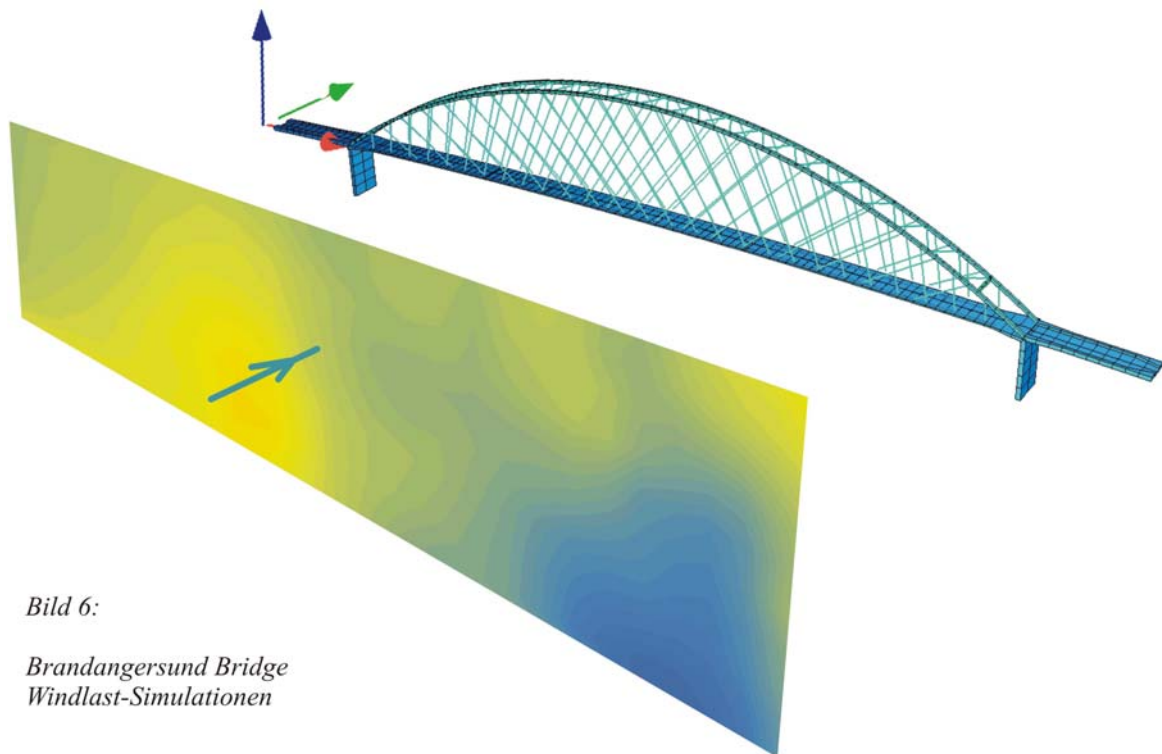
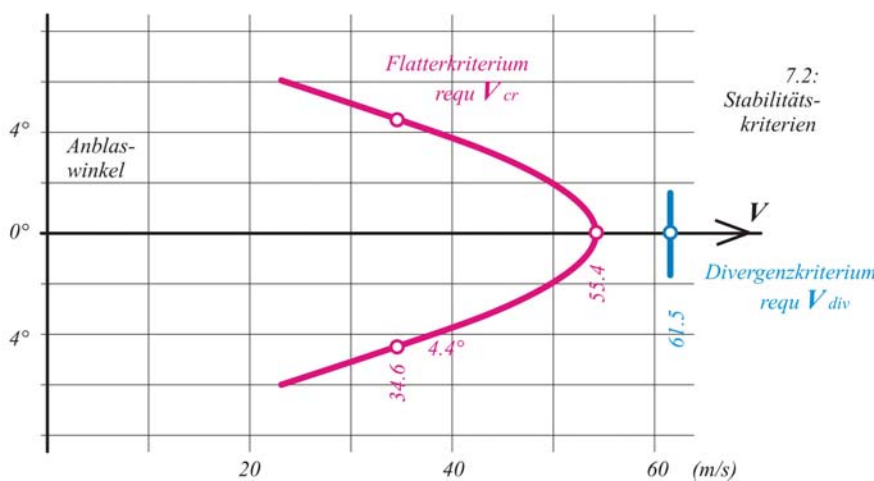
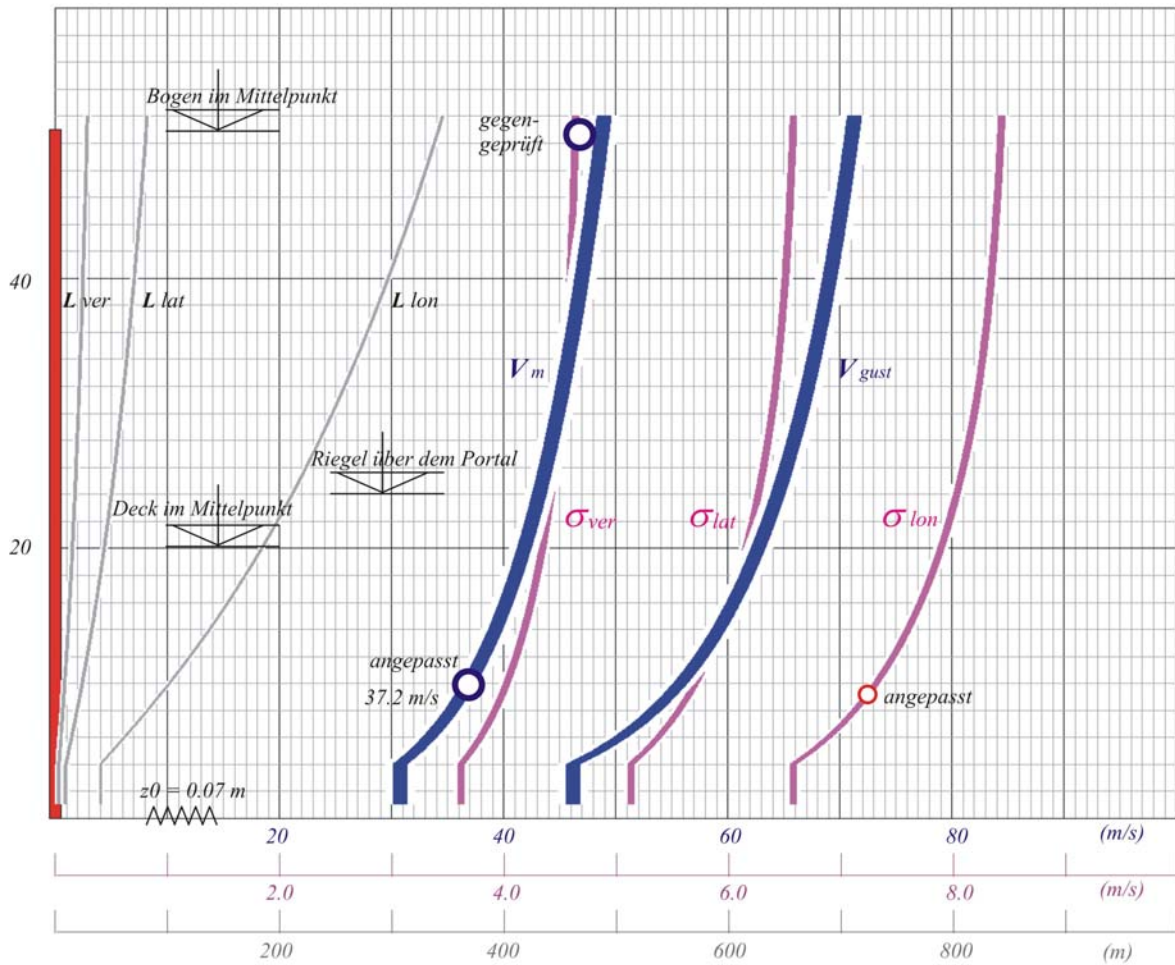


Bild 6:

*Brandangersund Bridge
Windlast-Simulationen*

In Bild 7 oben sieht man das gewohnte Diagramm der Sofistik-Windprofile: zu den Windverhältnissen haben wir ein Gutachten des Norwegian Meteorological Institute (in norwegischer Sprache) bekommen; für den kritischen Fall Wind quer des 100 Jahres Windes wurden dort die gekennzeichneten drei Geschwindigkeitsparameter angegeben und daraus wurde mit SOFILOAD die effektive Rauigkeit und alle weiteren im Bild dargestellten Profile, Turbulenzen, Integralmaße rekonstruiert. Unten sind die aus den Profilen abgeleiteten Stabilitätskriterien für das Deck eingezeichnet, einmal für das Flattern – je nach Anblaswinkel unterschiedlich – , und einmal für die

Torsionsdivergenz, die hier noch eine wichtige Rolle spielen wird. Wie man solche Grenzen festlegen kann, ist im Moment nebensächlich, es sei nur noch bemerkt, dass es dafür noch keine allgemein anerkannte Methodik existiert.



7.1:
100 - Jahres - Wind,
Nachweis im ULS-Zustand
Wind-, Turbulenz- und
Integralmaßprofile

Bild 7:
Brandangersund Bridge
Windeigenschaften
rekonstruiert auf der Basis
des meteorologischen
Gutachtens

In Bild 8 sieht man die ersten Eigenschwingungen, oder besser: rechnerische Eigenschwingungen der Brücke, denn man weiß natürlich, dass diese – selbst wenn man annimmt, dass die Modellierung so und so perfekt ist – durchaus auch ungenau sein können. Man kann drohende Instabilitäten erkennen:

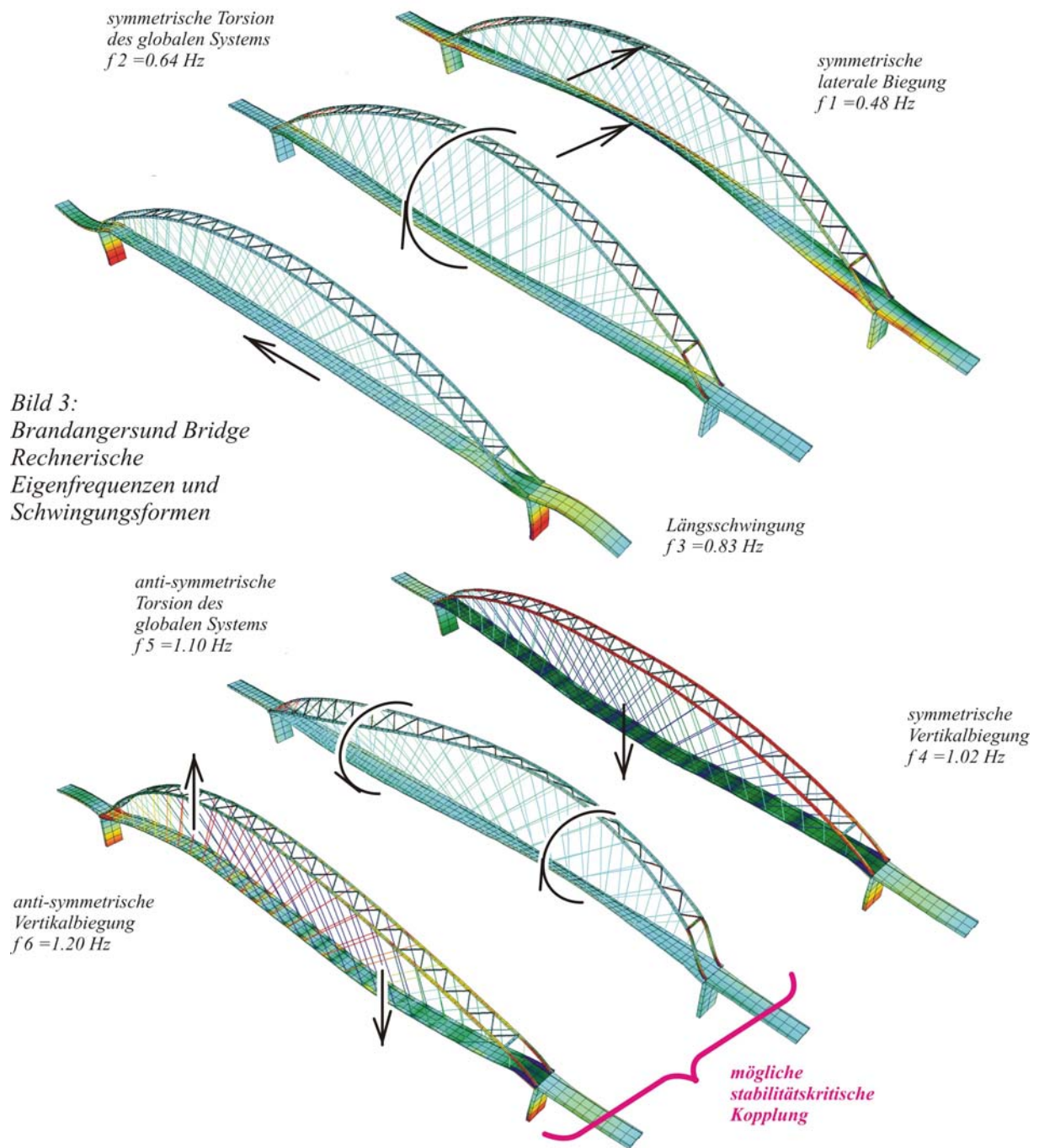
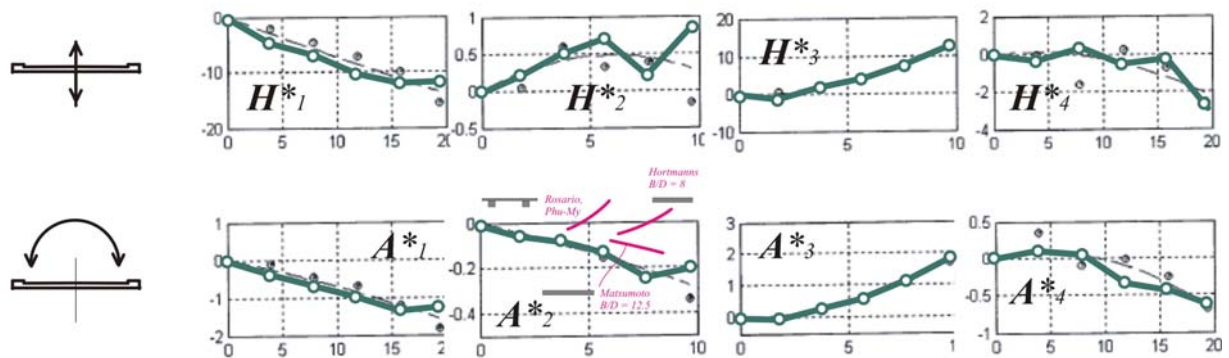


Bild 8: Eigenfrequenzen

Für das Flattern sind Kopplungsmöglichkeiten bei niedrigen Eigenfrequenzen gefährlich, die unter Mitwirkung des Windes zu aeroelastischen Instabilitäten führen könnten. Wir waren in diesem Punkt gründlicher als das ansonsten sehr fachkundige Aufsteller-Team aus Norwegen und Dänemark und haben erkannt, dass die im Bild gekennzeichnete Kopplung von f_5 und f_6 , der antisymmetrischen Biegung und Torsion, gefährlich werden kann. Die rechnerische Biegeeigenfrequenz liegt zwar etwas über der Torsionseigenfrequenz, aber bei dieser Nähe der rechnerischen Eigenfrequenzen kann es durchaus zu einer wirklichen Konstellation kommen, die zu Flatterschwingungen führt.

Bild 9: Brandangersund Bridge. Aeroelastische Derivativa des Decks



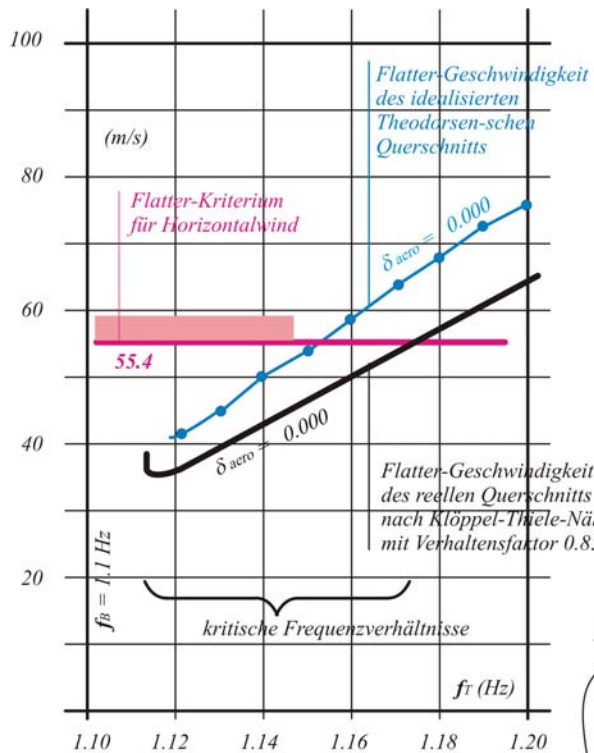
Nun kommt es zu einer Analyse, die wir hier nur in Stichworten wiedergeben wollen: Im Bild 10 oben sieht man die übliche, klassische Verfahrensweise zur Prüfung der Stabilität. Das linke Bild ist praktisch gleich dem Klöppel-Thiele Diagramm im engeren Bereich der praktisch in Frage kommenden Eigenfrequenzkonstellationen. Die blaue Punktreihe ergibt die kritischen Windgeschwindigkeiten im idealisierten Theodorsenschen Grenzfall: man sieht, dass die Linie im untersuchten Bereich deutlich unter dem Stabilitätskriterium verläuft (rote Linie). Man weiß, dass der wirkliche Querschnitt nur ungünstiger sein kann: die erreichbare Stabilität verläuft etwa entlang der schwarzen Linie. Der Fall ist also auf jeden Fall ausgesprochen kritisch.

Nachdem das erkannt wurde, haben wir das getan, was der Ingenieur immer in solchen Fällen tut: Argumente gesammelt, die dennoch für eine Stabilität sprechen:

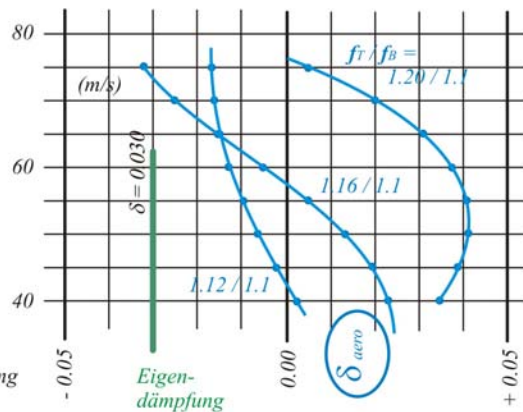
- (1) es könnte sein – bzw. die Derivativa könnten zeigen – , dass diese letzte Reduktion doch nicht so groß ausfällt
- (2) die antisymmetrische Torsionseigenschwingung ist keine reine Torsion, sondern mit lateraler Biegung kombiniert
- (3) die mitschwingenden Bogenmassen im Torsionsfall wirken stabilisierend
- (4) auch bei negativer aeroelastischer Dämpfung haben wir noch Reserven dadurch, dass das Bauwerk mit $\delta_{\text{eigen}} = 0.03$ über eine positive eigene Strukturdämpfung verfügt.

All diese Effekte sind auf analytischen Wege sehr schwer verfolgbar, es gibt nur mühsame Näherungen, die wir auch in diesem Falle angewandt haben: es hat sich letztendlich das untere, korrigierte Diagramm ergeben.

Um es einfach zu formulieren: man sieht, dass die Stabilität sehr wahrscheinlich tatsächlich gerettet ist, Flattern tritt im schlimmsten Falle erst bei einer Windgeschwindigkeit von 90 m/s auf – d.h. erst dort wird die Eigendämpfung eliminiert – , allerdings, die Brücke muss bei Windgeschwindigkeiten über 50 m/s mit immer kleiner werdender restlicher Dämpfung klar kommen. Im Bild rechts unten sieht man grau hinterlegt, wie die restliche Dämpfung bei höheren Windgeschwindigkeiten aussieht.



10.1: Flattergeschwindigkeit nach vereinfachtem Nachweisverfahren nach Klöppel-Thiele



10.2: aeroelastische Dämpfung des idealisierten Querschnitts bei verschiedenen Frequenz-Relationen

10.3: Flattergeschwindigkeit des realen Querschnitts unter näherungsweise Berücksichtigung der 3D-Effekte

10.4: Dämpfung reduziert durch aeroelastische Anfachung

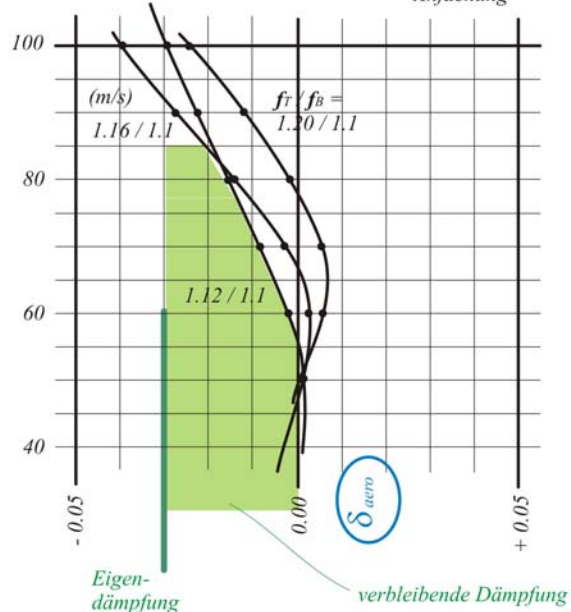
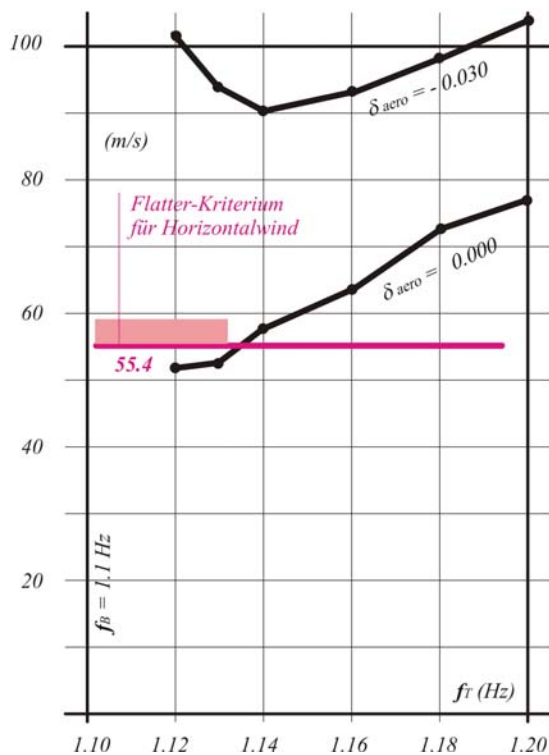


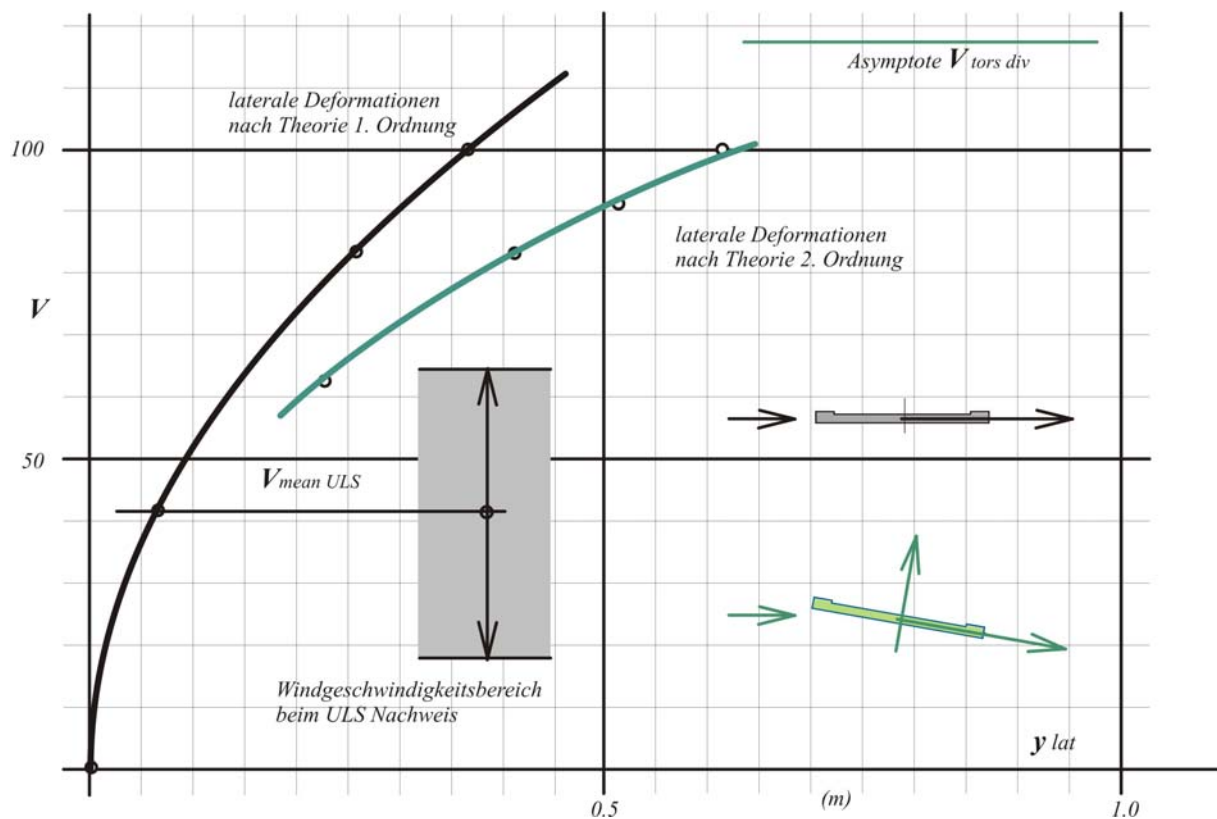
Bild 10: Brandangersund Bridge Aeroelastische Dämpfung der antisymmetrischen Eigenschwingungen

Das ist ein klarer Hinweis dafür, dass die Schnittkräfte unter Windbelastung ungünstiger werden als sie unter stabilen Verhältnissen wären – , ein sekundärer Effekt der nahen Stabilitätsgrenze, etwas, was wir aus der Statik, unter Stichwort Theorie zweiter Ordnung, sehr gut kennen. Es gibt dann noch eine weitere, ähnliche Wirkung:

Bild 11 zeigt die Entwicklung der Torsionsdeformationen unter gleichmäßigem, statischem Wind mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten, mit SOFiSTiK unter Berücksichtigung der Theorie 1. und der 2. Ordnung berechnet. Man sieht an den

beiden Diagrammlinien, dass die Verdrehungen in Wirklichkeit deutlich progressiver als nach dem linearen Theorie, also nach dem Verhältnis der Staudrücke verlaufen. Das ist im wesentlichen auch die Bestätigung der Feststellung von Hans Ole Hansen, dass nämlich die statische Torsionsinstabilität (= die Divergenz) bei 118 m/s liegt. Die Diagrammlinie läuft tatsächlich zu einer solchen Asymptote hin.

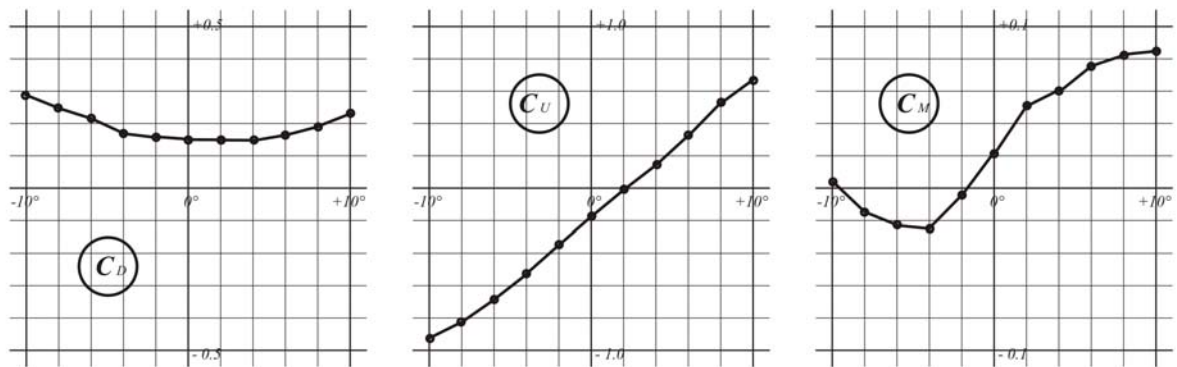
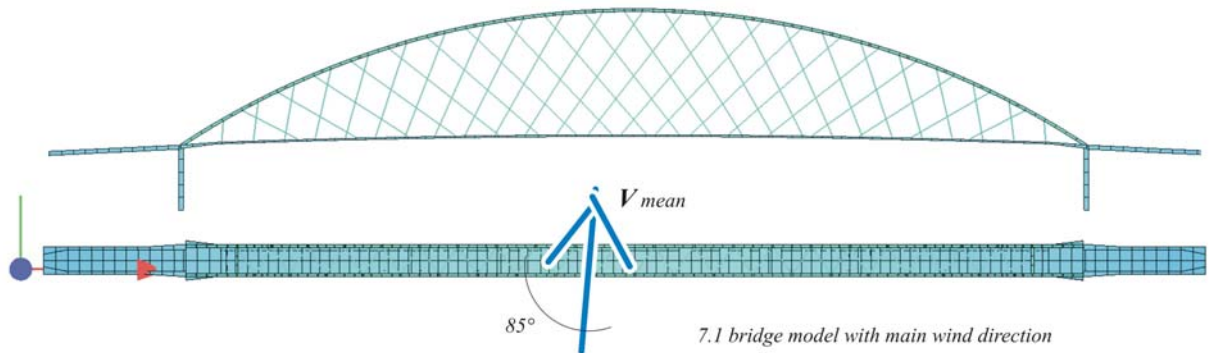
Bild 11: Brandangersund Bridge, Simulation unter konstantem Wind.
Progressive Entwicklung der lateralen Deformationen des Decks
als Folge der Torsionsdivergenz



Das Stabilitätskriterium lag nach Bild 7 bei 61.5 m/s, wir sind in einem horriblen Abstand dazu. Auch zu diesem Punkt müssen wir also feststellen, dass die Stabilität selbst nicht in Gefahr kommen kann; müssen allerdings auch hier einen deutlichen sekundären Effekt auf die Schnittkräfte erwarten. Man sieht schon im realen Geschwindigkeitsbereich eine deutliche Progression: die Frage bleibt allerdings unbeantwortet, welche von den Schnittkräften, und wie stark, nichtlinear vergrößert werden müssen?

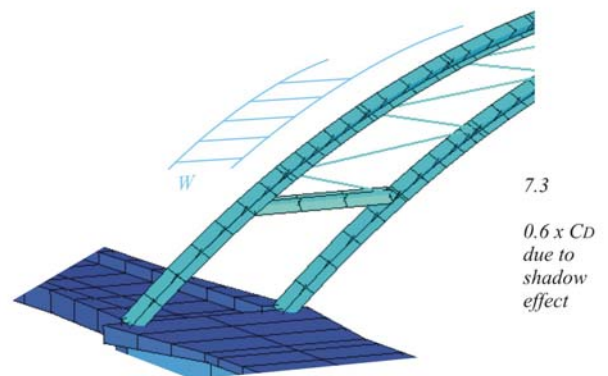
Aus diesen Überlegungen ergab sich, dass klassische Berechnungsverfahren hier nicht mehr angewendet werden konnten und eine nichtlineare Analyse mit sekundären Effekten erforderlich war. Dazu wurde eine Reihe von zufällig erzeugten Windschrieben untersucht, wobei der Teilsicherheitsbeiwert für Wind als eine entsprechend höhere Windgeschwindigkeit (= $\sqrt{\gamma}$ -fach) einging. Dieser Ansatz der Sicherheit ist zwar nicht im Eurocode so beschrieben, er ist unserer Meinung aber nach nicht nur vernünftig sondern auch zweckmäßig, da sich damit auch die Kohärenz bzw. Turbulenzwerte entsprechend verändern.

Das dynamische Modell der Brücke bestand aus 491 Stab und 88 Seil-Elementen. Für die Windkräfte wurden 124 Angriffspunkte als Deck-Elemente definiert. Die Abschattung des zweiten Bogens wurde mit einem Faktor von 0.6 auf die Windkräfte berücksichtigt.



7.2 computed aerodynamic coefficients of the deck (assumed for all deck elements)

Fig 7: Bridge model with main computed aerodynamic properties



Das Spektrum der Wind Komponenten folgt der Definition nach Karman und wurde bis zu 1.2 Hz mit einer Schrittweite von 0.001 Hz aufgelöst. Die Kohärenzen wurden nach Karman-Harris derart berechnet, dass Modifikationen in der Nähe der Gelände bzw. Wasseroberfläche berücksichtigt wurden. Für die dynamische Berechnung wurde ein Zeitschritt von 0.025 s verwendet, der die niedrigste Eigenfrequenz mit 80 Schritten auflöst.

Die Ergebnisse der nichtlinearen Rechnung ergaben, dass die horizontalen Biegemomente unter böigem Wind ca. 4-fach über den Biegemomenten unter mittlerem Wind sind. Üblicherweise geht das Verhältnis - selbst bei so hoher Turbulenz wie hier - nicht über den Faktor 2.5 bis 3 hinaus. Der entscheidende Anteil, etwa 20 %, ist dabei dem secondary Effekt der Torsions-Divergenz zuzuschreiben, während die Wirkung der Derivativa mit etwa 6 – 8 % zu beziffern ist.

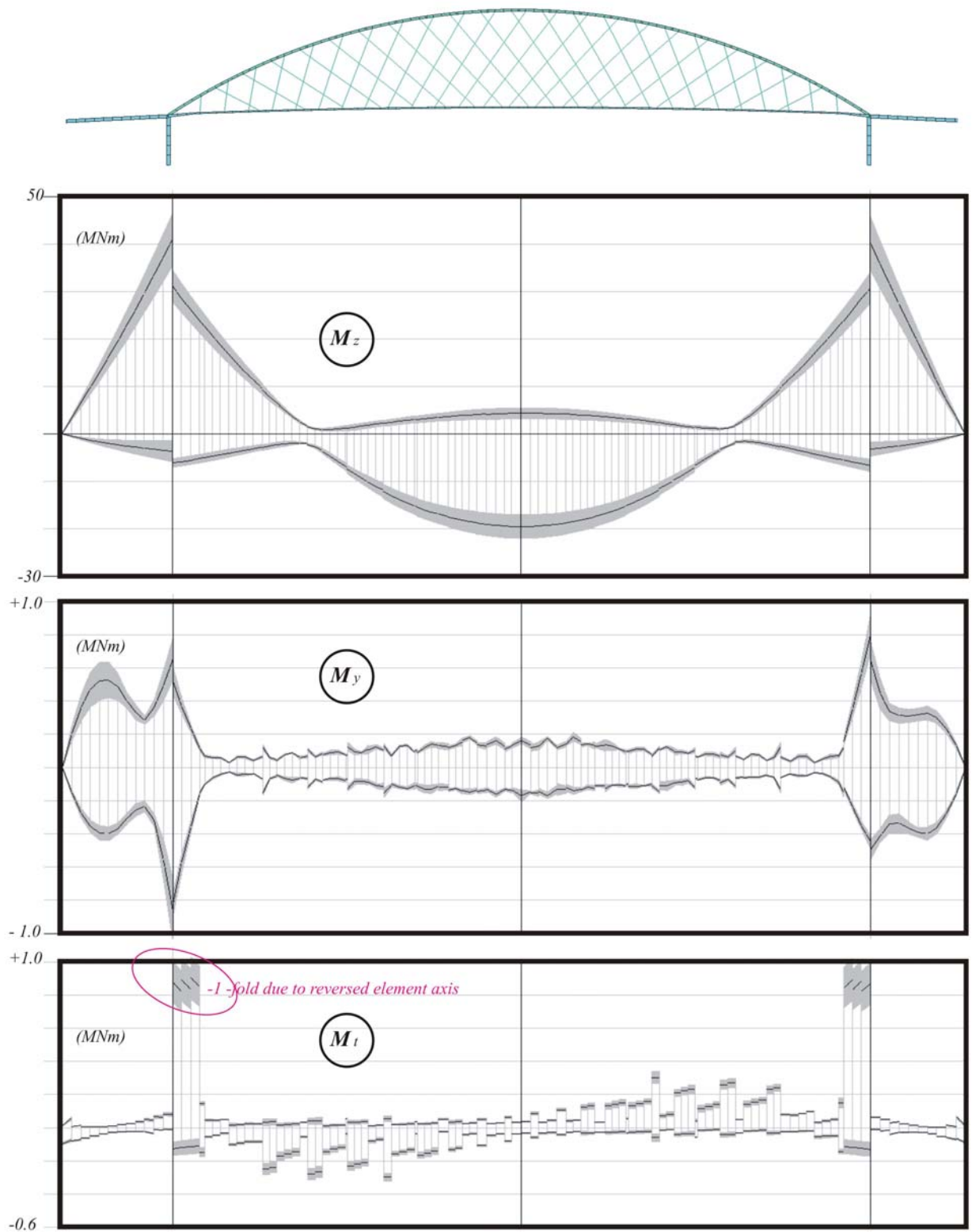


Fig 8: Maximal-minimal sectional forces of the deck under ULS wind loading on the basis of an evaluation of 5 time history simulations

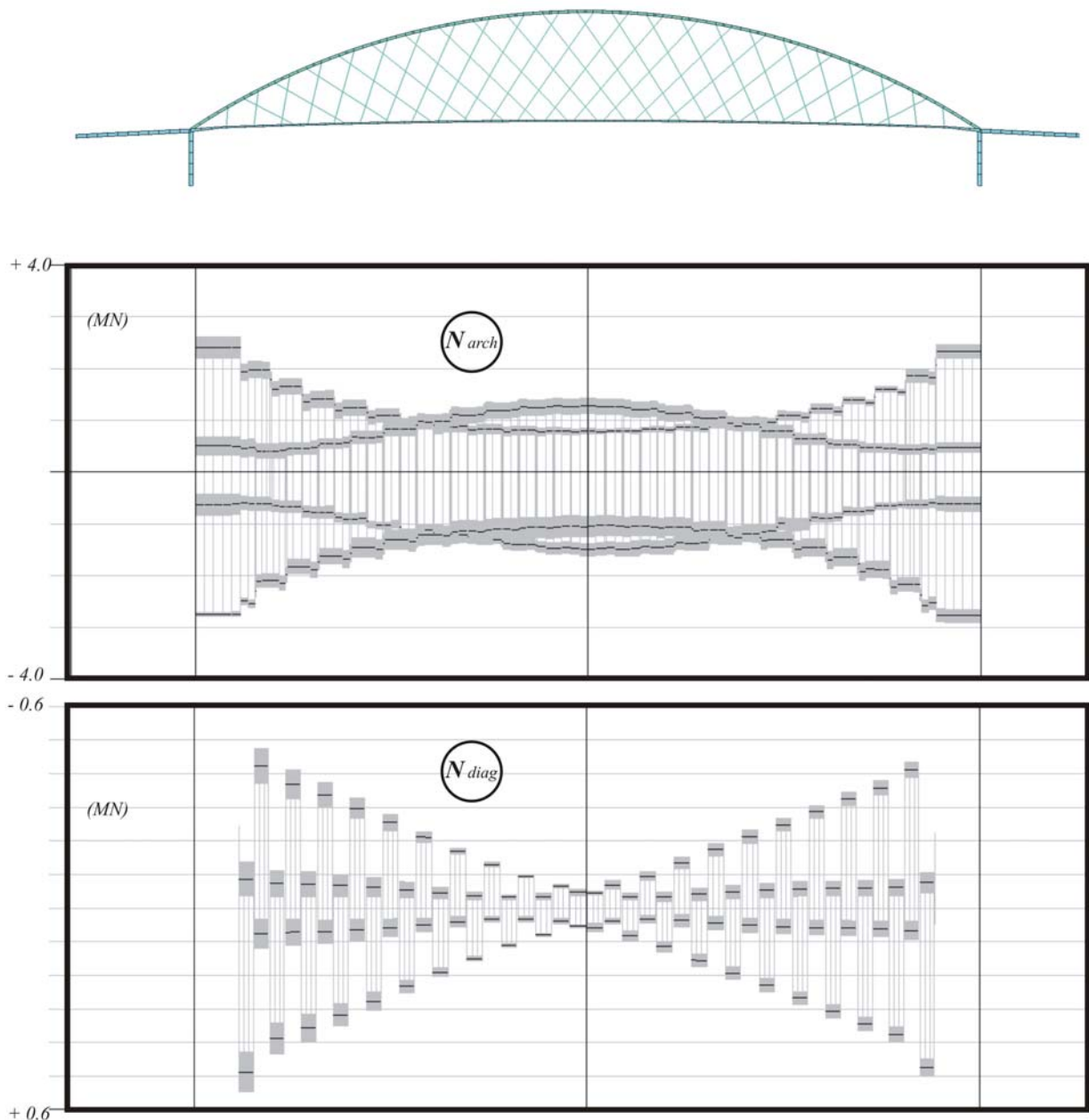


Fig 9: Maximal-minimal length forces in the arch framework (top: arch, bottom: diagonals) under ULS windloading on the basis of an evaluation of 5 time history simulations

4. Schlussfolgerung

Bei dem beschriebenen Objekt wurden wohl die Grenzen der numerischen Simulationsmöglichkeiten in einen Bereich vorgeschoben die besondere Anforderungen an den Anwender stellen. Schlanke Bauwerke und die gestiegene Verantwortung machen dies aber erforderlich.

5. Literatur

Eine ausführliche Literaturliste ist im Handbuch zu SOFILOAD zu finden.