

# Seismische und dynamische Untersuchungen einer zweifeldrigen Hängebrücke

Hamid Sadegh-Azar

*HOCHTIEF Construction AG, Consult IKS Energy, Lyoner Straße 25, 60528 Frankfurt am Main*

Damian Nowak

*HOCHTIEF Construction AG, Consult UK Office, Whitehill Way, Swindon SN5 6NX, UK*

**ZUSAMMENFASSUNG:** Im folgenden Beitrag wird die seismische und dynamische Analyse einer zweifeldrigen Hängebrücke in Chile präsentiert. Die Brücke soll den Chacao Kanal (Canal De Chacao) überqueren und die Chiloe Insel mit dem Chilenischen Festland verbinden. Der vorgesehene Standort der Brücke liegt in einer der seismisch aktivsten und höchst gefährdeten Zonen der Welt. In unmittelbarer Umgebung wurde das bisher stärkste Erdbeben der Welt registriert (Valdivia-Erdbeben von 1960 mit einer Magnitude von 9.5). Die rigorose Erfassung der Boden-Brücken-Wechselwirkung und der Einfluss der Boden-Schichtung auf die Erdbebenanregung stellten zwei wesentliche Teile der dynamischen Analyse der Hängebrücke dar. Bei üblichen Bauwerken werden diese zwei Aspekte nur vereinfacht und sehr grob berücksichtigt. Im Falle extremer Bauwerke wie großer Hängebrücken sind diese Einflussfaktoren jedoch nicht zu unterschätzen und müssen deshalb genauer berücksichtigt werden. Hierfür wurden verschiedene Ansätze gewählt und miteinander verglichen.

## 1. EINLEITUNG

Gut 1000 Kilometer südlich und eineinhalb Flugstunden von Santiago entfernt liegt Chiloe, die größte Insel von Chile. Die 250 Kilometer lange und 50 Kilometer breite Insel soll über die geplante Chiloe Brücke (Puente Bicentenario Chiloe) mit dem Chilenischen Festland verbunden werden (Abb. 1). Mit 2,6 Kilometern Länge soll die Puente Bicentenario Chiloe einmal die längste Hängebrücke Südamerikas werden (Abb. 2a-c). Die zwei Hauptfelder der Brücke haben eine Spannweite von 1180m und 1055m. Die Pylone sind 147m, 180m und 198m hoch (Abb. 3).

Der Mittelpylon und der Nordpylon sind auf Pfählen mit einem Durchmesser von 3m gegründet. Die Pfahllänge beträgt 45m am Mittelpylon und 70m am Nordpylon. Aufgrund günstiger Bodenverhältnisse wurde für den Pylon am südlichen Ufer eine Flachgründung gewählt. Die Gewichtsankerblöcke an den beiden Enden der Brücke sind ebenfalls flach gegründet. Das Brückendeck ist als ein Stahlkastendeck ausgebildet und liegt etwa 60m über dem Meeresspiegel. In Abbildung 4 ist ein typischer Deckquerschnitt dargestellt.

Der Standort der Brücke liegt in einer der seismisch aktivsten und höchst gefährdeten Zonen der Welt. In unmittelbarer Umgebung wurde das bisher stärkste Erdbeben der Welt registriert (Valdivia-Erdbeben von 1960 mit einer Magnitude von 9,5 auf der Richter Skala). Die Brückenbemessung wird somit maßgeblich durch den Lastfall Erdbeben beeinflusst.

Einer der wesentlichen Aspekte der Erbebenbemessung ist die Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen dem Boden und dem Brückentragwerk. Die Berücksichtigung der Ausbreitung von Erdbebenwellen im Baugrund, die Ermittlung von dynamischen Gründungskennwerten (Impedanzen) und die Ermittlung der Schnittkräfte im Tragwerk selbst, erfolgt häufig mit unterschiedlichen Berechnungsverfahren und Programmen. Es ist deshalb notwendig Schnittstellen zu definieren, an denen die Erdbebenanregung und die dynamischen Gründungskennwerte berechnet und dann in einem zweiten Schritt auf das Tragwerksmodell zur Bestimmung der Schnittkräfte übertragen werden. Die Wahl dieser Schnittstellen kann dabei einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Im folgenden Abschnitt werden unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung der Boden-Brücken-Wechselwirkung und die Wahl der Schnittstelle zwischen Tragwerk und Baugrund vorgestellt. Im Weiteren werden die Ergebnisse von dynamischen Berechnungen unter Heranziehung der einzelnen Ansätze diskutiert.



Abbildung 1: Geplanter Standort der Chiloé Brücke



a) Gesamtansicht



b) Ansicht Mittelpylon



c) Mittelpylon – Ansicht vom Brückendeck

Abbildung 2: Ansichten der Brücke – Computer-Simulation

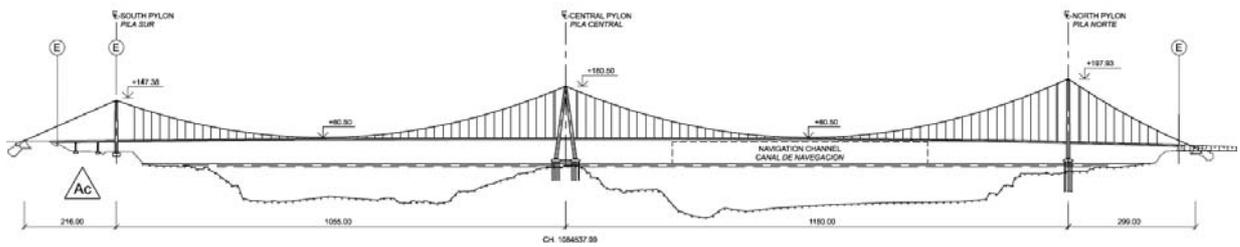


Abbildung 3: Längsschnitt der Brücke

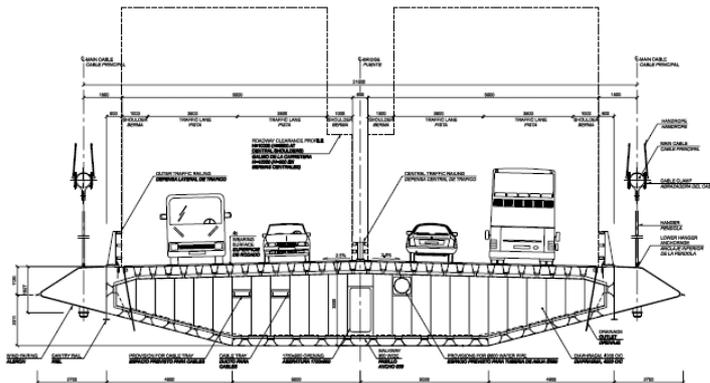


Abbildung 4: Typischer Deckquerschnitt

## 2. DYNAMISCHE ANALYSE, DEKONVOLUTIONSANALYSE UND BODEN-BAUWERK WECHSELWIRKUNG

Zur Brückenanalyse wurden mehrere Modelle und Teilmodelle erstellt. In diesem Beitrag werden nur ausgewählte Modelle und deren Eigenschaften vorgestellt und diskutiert. Bei der Bemessung jedoch wurden die Extremwerte der Schnittkräfte mehrerer Brückenmodelle und Ansätze berücksichtigt.

Ein typisches Berechnungsmodell der Brücke ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Pylone, das Brückendeck, die Pfähle und auch die Kabel und die Hänger wurden als 3D-Strabelemente modelliert. Insgesamt wurden 6 verschiedene Deckquerschnitte eingesetzt. Eine vollständige Beschreibung der Modellierung und Analyse ist in Sadegh-Azar (2007) zu finden.

Die im Folgenden beschriebenen Ansätze zeigen drei unterschiedliche Varianten für die Trennung zwischen dem Brückenmodell, das üblicherweise nach dem Antwortspektrumverfahren oder dem Zeitverlaufsverfahren berechnet wird, und dem Bodenmodell mit Berechnung im Frequenzbereich. Abbildung 6 zeigt mögliche Schnittstellen am Beispiel der Gründung für den Nordpylon der Brücke.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Trennung zwischen dem Brückenmodell und dem Bodenmodell nicht notwendig wäre, wenn die Berechnung an einem Gesamtmodell durchgeführt werden könnte. Mit den heutigen Rechenkapazitäten und Programmen ist dies jedoch kaum möglich und die Resultate wären auch schwer zu handhaben und zu verifizieren.

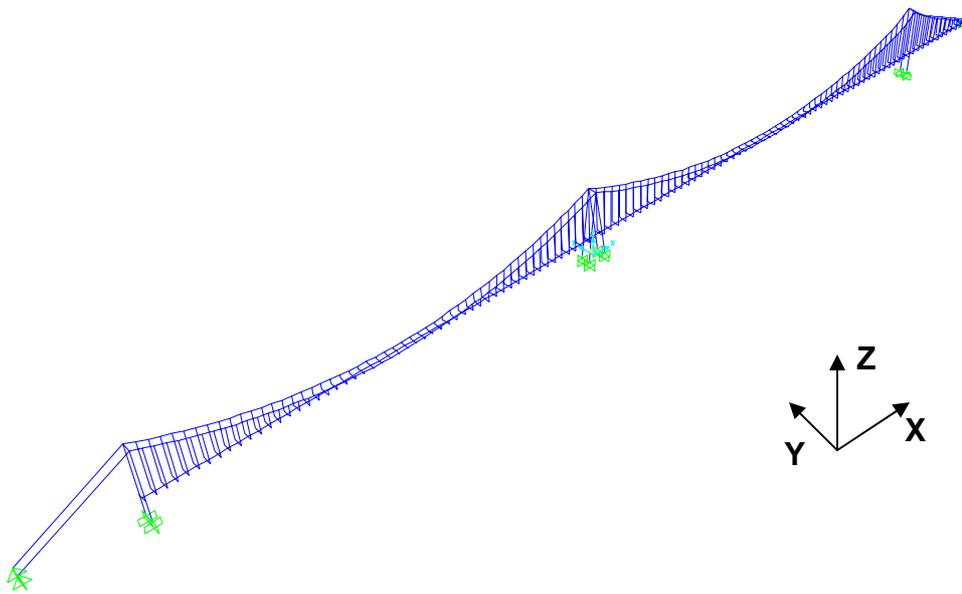


Abbildung 5: Typisches Berechnungsmodell der Brücke

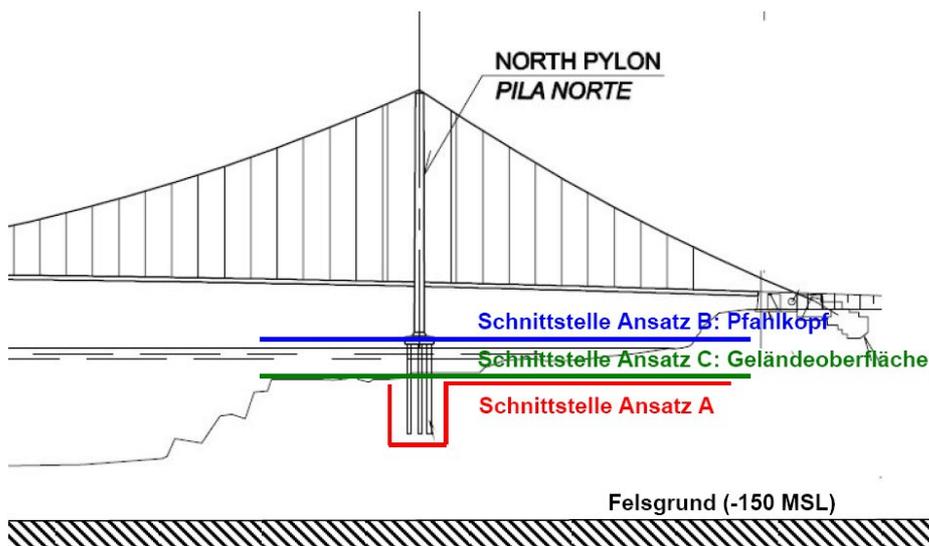


Abbildung 6: Unterschiedliche Ansätze für die Trennung zwischen Brückenmodell und Bodenmodell

**Ansatz A: Berechnung am Gesamtbrückenmodell einschließlich der Pfähle. Berücksichtigung der Bodenwechselwirkung über statische Feder-elemente an den Pfählen.**

Bei diesem Ansatz wird die gesamte Brücke zusammen mit den Pfahlköpfen und den zugehörigen Pfählen modelliert. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung wird durch entsprechende statische Feder-elemente an den Pfählen berücksichtigt. Die Erdbebenanregung wird ausgehend von der Anregung am Felsgrund (in ca. -150m Tiefe) in Höhe der Geländeoberfläche ermittelt. Das Bodenmodell zur Berechnung der

Erdbebenanregung beinhaltet nur die Bodenschichten und nicht die eingebetteten Pfähle.

Im Fall der Chiloe Brücke erfolgte die Berechnung mit dem Programm SHAKE91 (Idriss, I.; Sun, J., 1992). Die zuvor ermittelten Zeitverläufe der Bodenbeschleunigung wurden an der Oberkante des Felsuntergrunds (-150m MSL) angesetzt.

Die elastischen Scherwellengeschwindigkeiten der Bodenschichten wurden durch Messungen am Standort der Fundamente bestimmt. Die Berechnungen werden mit den Medianwerten und den Extremwerten der Scherwellengeschwindigkeiten durchgeführt. Für Bodenschichten über dem Wasserpegel wurde die Querdehnungszahl zu 0,35 und für Schichten unter dem Wasserpegel zu 0,45 und größer angenommen (P-Wellengeschwindigkeit > 1500 m/s).

Die resultierenden Spektren am Nordpylon auf Geländeoberfläche sowie das Ursprungsspektrum (auf Fels) sind in Abbildung 7 dargestellt. In diesem Bild ist auch das geglättete Bemessungsspektrum dargestellt, welches in der weiteren Analyse der Brücke angesetzt wird. Wegen den verhältnismäßig steifen Bodenschichten ist die Abweichung der Spektren auf Geländeoberfläche und auf Fels relativ gering. Eine geringe Erhöhung ist bei ca. 3 Hz zu sehen.

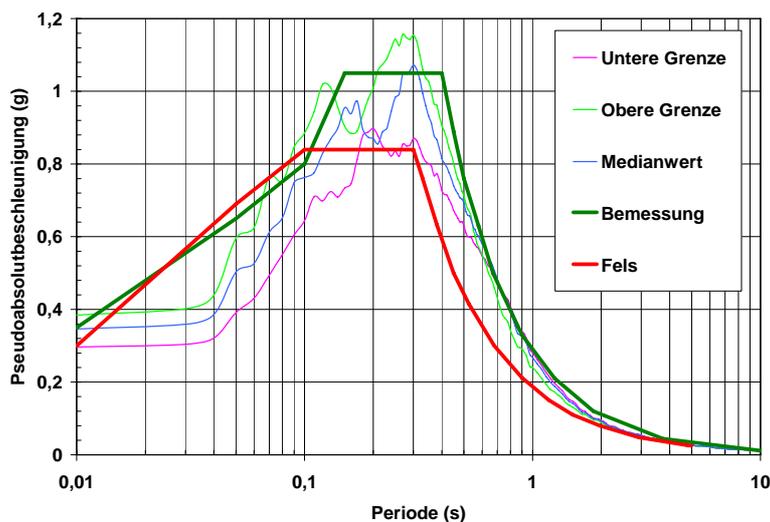


Abbildung 7: Resultierende Erdbebenanregung (Spektren) am Nordpylon auf Geländeoberfläche für Medianwerte und Extremwerte der Bodeneigenschaften und das Ursprungsspektrum (auf Fels)

Im speziellen Fall der Chiloe Brücke stellte sich heraus, dass der Einfluss der Bodenbeschaffenheit auf die Erdbebeneinwirkung gering ist. Der Grund hierfür war die relativ steife Bodenschichtung, welche zudem keine größeren Inhomogenitäten aufwies. Der Einfluss der Bodenbeschaffenheit kann allerdings bei weichem Untergrund zu erheblichen Überhöhungen und Frequenzverschiebungen führen.

**Ansatz B: Berechnung an einem Teilmodell. Brücke bis Pfahlkopfplatte abgebildet. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung durch Impedanzen am Pfahlkopf berücksichtigt.**

Bei diesem Ansatz wird die Brücke nur bis zum Pfahlkopf modelliert. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung wird durch entsprechende Impedanzen an der Pfahlkopfplatte berücksichtigt. Die Erdbebenanregung wird hier in Höhe der Pfahlköpfe ermittelt. Das Bodenmodell zur Berechnung der Erdbebenanregung beinhaltet die Bodenschichten, die Pfähle und die masselose Pfahlkopfplatte. Die Methodik entspricht der Substrukturmethode nach Kausel [3]. Die Gesamtlösung des Boden-Brücken-Systems ergibt sich aus der Kombination der kinematischen Interaktion mit dem masselosen und starren Fundament und der dynamischen Bauwerksanalyse mit den zugehörigen Impedanzen und der Erdbebeanregung aus der kinematischen Interaktion am Fundament.

Um die Erdbebenanregung in Höhe der Pfahlköpfe zu erhalten, wird das Boden-Pfahl-System mit der masselosen Pfahlkopfplatte modelliert. Zur dynamischen Berechnung im Frequenzbereich können Programme wie SASSI (Lysmer, J. et al, 1981) oder FLUSH (Lysmer, J. et al, 1975) verwendet werden. Für die Berechnung der Chiloer Brücke wurde das Programm PILAX (Hartmann, H.G., 1986) herangezogen. PILAX basiert auf einer schnellen und leistungsfähigen Berechnungsmethode aus der Weiterentwicklung der sogenannten semifiniten Randelemente von Waas (Waas, G., 1980 und Waas, G. et al, 1985) und ist auch unter dem Namen „Methode der dünnen Schichten“ (Thin-Layer-Method) bekannt. Ähnlich leistungsfähige Methoden wie die „Boundary-Element-Method“ erfordern im Allgemeinen einen erheblich höheren Berechnungsaufwand. Der Boden wird als Halbraum betrachtet, der in der wichtigen oberen, einer Baugrunderkundung zugänglichen Zone als horizontal geschichtet, darunter als homogen aufgebaut gedacht wird (Abb. 8). Die Berechnung erfolgt durch eine rigorose Methode im Frequenzbereich, wobei analytische und FE-Lösungen der Greenschen Funktionen verwendet werden, das heißt Verschiebungen an bestimmten Orten infolge von Einheitsanregungen an anderen Orten berechnet werden.

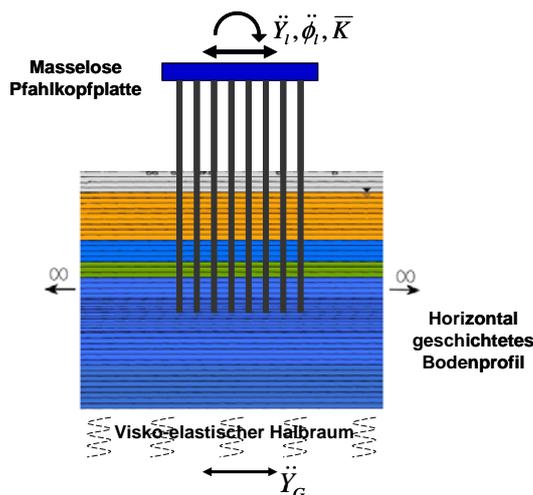


Abbildung 8: Die wichtigsten Berechnungsannahmen in PILAX

Die Impedanzen am Fußpunkt der Pylone werden in Form von 6x6-Matrixen zusammen mit den zugehörigen Dämpfungswerten ermittelt. Hierzu werden Einheitskräfte in den

jeweiligen Freiheitsgraden (der Pfahlkopfplatte) angesetzt. Hieraus wird zunächst die Flexibilitätsmatrix und nach Inversion die Steifigkeitsmatrix ermittelt:

$$\bar{K} = K_r + i K_i$$

wobei  $K_r$  der Realteil und  $K_i$  der Imaginärteil der Steifigkeitsmatrix ist. Beide Teile sind frequenzabhängig. Der äquivalente Dämpfungsgrad ergibt sich zu:

$$\beta = \frac{K_i}{2K_r}$$

und beinhaltet sowohl die Materialdämpfung als auch die Abstrahlungsdämpfung im Baugrund. Unabhängig von den berechneten Dämpfungswerten wird der Dämpfungsgrad auf maximal 30% begrenzt. In Abbildung 9 sind die berechneten Impedanzen in Brückenquerrichtung (Y-Richtung) der Pfahlkopfplatte am Nordpylon dargestellt.

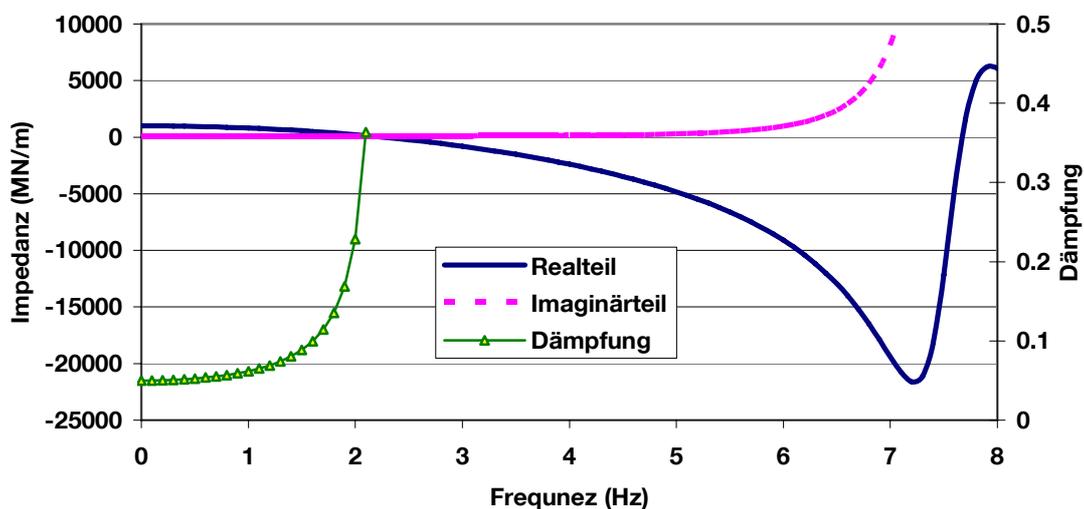


Abbildung 9: Impedanzen in Brückenquerrichtung (Y-Richtung) des Pfahlkopfes am Nordpylon

**Ansatz C: Berechnung am Teilmodell mit Abbildung von Pfählen bis zur Geländeoberfläche. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung über Ansatz von Impedanzen an Einzelpfählen berücksichtigt.**

Bei diesem Ansatz umfasst das Brückenmodell das gesamte Brückentragwerk zusammen mit der Pfahlgründung bis zur Geländeoberfläche. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung wird durch entsprechende Impedanzen an den Einzelpfählen berücksichtigt. Die Erdbebenanregung wird in Höhe der Geländeoberfläche ermittelt. Die Boden-Brücken-Wechselwirkung wird ähnlich wie bei Ansatz B berücksichtigt. Allerdings wird hier die Schnittstelle zwischen dem Brückenmodell und dem Bodenmodell auf die Geländeoberfläche gelegt.

Der Berechnungsaufwand ist hierbei erheblich höher, da die Impedanzen der einzelnen Pfähle und die Erdbebenanregung unter Berücksichtigung der Gruppenwirkung ermittelt werden müssen. Im Falle der Chiloe Brücke konnten wegen der relativ hohen Bodensteifigkeit und der gleichmäßigen Anordnung der Pfähle die Impedanzen vereinfacht für einen Einzelpfahl ermittelt und im Gesamtmodell mit einem pauschalen Gruppenfaktor versehen werden. Die Erdbebenanregung an der Geländeoberfläche konnte dann für alle Pfähle einheitlich angesetzt werden.

### 3. VERGLEICH DER BERECHUNGSANSÄTZE

Für die beschriebenen Ansätze A, B und C wurden Berechnungen nach dem Antwortspektrenverfahren durchgeführt. Für den Ansatz B wurde dabei der Fall einer vollständigen Impedanzmatrix und einer vereinfachten Impedanzmatrix mit nur Diagonalwerten untersucht. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden zusätzlich lineare und nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt, auf die jedoch hier nicht weiter eingegangen wird.

Die maßgebenden Resultate für den Nordpylon und den Mittelpylon sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Biegemomente in Längs- und Querrichtung beziehen sich jeweils auf ein einzelnes Pylonbein an der Schnittstelle zur Pfahlkopfplatte.

Die Berechnungsergebnisse mit den Ansätzen A, B und C unterscheiden sich erheblich. Bei Ansatz A wird das Brückenmodell direkt mit dem an der Geländeoberfläche ermittelten Spektrum analysiert und der Boden durch Federn an den Pfählen modelliert. Diese Vorgehensweise ist bei weniger komplexen Bauwerken in der Praxis durchaus üblich. Sie berücksichtigt jedoch nur unzureichend die dynamische Boden-Tragwerk-Wechselwirkung, da die frequenzabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Bodens völlig unberücksichtigt bleiben. Zudem wird die kinematische Wechselwirkung der Pfähle mit dem umgebenden Boden außer Acht gelassen. Die Methodik ist relativ einfach und kann bei komplexen Bauwerken zum Vergleich, jedoch auf keinen Fall zur Bemessung genutzt werden.

Bei den methodisch identischen Ansätzen B und C (der Unterschied liegt lediglich in der Lage der Schnittstelle zum Bodenmodell) wird die dynamische Boden-Brücken-Wechselwirkung detailliert berücksichtigt. Ansatz B liefert allerdings im Vergleich zu Ansatz C erheblich höhere Beanspruchungen.

Beide Methoden basieren auf der Substrukturmethode nach Kausel (Kausel et al, 1978) und die Wahl der Schnittstelle (Pfahlkopfplatte oder Geländeoberfläche) dürfte deshalb zu keinen unterschiedlichen Ergebnissen führen. Allerdings stimmt diese Aussage nur, wenn beide Berechnungen im Frequenzbereich durchgeführt werden und somit die Impedanzen bei der Ermittlung der Schnittgrößen am Brückenmodell genau berücksichtigt werden. Durch die Anwendung des Antwortspektrumverfahrens gehen jedoch die frequenzabhängigen Impedanzen größtenteils verloren. Dieser Effekt ist bei der Chiloe Brücke besonders stark ausgeprägt, da einige wichtige Eigenformen der Brücke genau in den überhöhten Bereich der Erdbebenanregung der masselosen Pfahlkopfplatte fallen. Die Schnittstelle zwischen dem Boden- und dem Brückenmodell sollte deshalb so gewählt werden, dass eine fiktive Überhöhung maßgeblicher

Frequenzen oder Frequenzbereiche vermieden wird. Dies ist bei Ansatz C der Fall, der deshalb genauere Ergebnisse mit niedrigeren Beanspruchungen der Brücke liefert.

Modell	Impedanzmatrix	Biegemomente Nordpylon		Biegemomente Mittelpylon	
		My (Längsrichtung) [MNm]	Mx (Quer-richtung) [MNm]	My (Längsrichtung) [MNm]	Mx (Quer-richtung) [MNm]
1) Ansatz A Antwortspektrverfahren	-	211	189	180	204
2) Ansatz B Antwortspektrverfahren	Vollständig	440	234	525	517
3) Ansatz B Antwortspektrverfahren	Nur Diagonalwerte	350	235	344	482
4) Ansatz C Antwortspektrverfahren	Einzelpfahl	236	168	182	191

Tabelle 1: Wesentliche Resultate aus den verschiedenen Berechnungsmethoden für den Nord- und Mittelpylon

Die Resultate in Tabelle 1 (Zeile 2 und 3) zeigen zudem, dass bei Ansatz B die Modellierung einzelner Federelemente unter der Pfahlkopfplatte nicht ausreicht, um die Gesamtantwort des Systems wiederzugeben. Die Kopplungen der einzelnen Federelemente (nichtdiagonale Terme in der Matrix) müssen hier wegen dem einen relativ hohen Einfluss mitberücksichtigt werden.

## 5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die stark unterschiedlichen Ergebnisse der vorgestellten Berechnungsansätze verdeutlichen die Signifikanz einer genaueren Berücksichtigung der Boden-Brücken-Wechselwirkung. Die Wahl der Schnittstelle zwischen dem Baugrundmodell und dem Tragwerksmodell hat einen erheblichen Einfluss auf die Resultate. Im vorliegenden Beispiel der Chiloe Brücke unterschieden sich die Biegemomente am Pylonfuß aus den verschiedenen Ansätzen um den Faktor von mehr als zwei. Die Berechnung unterhalb der Schnittstelle zum Baugrundmodell (Ansätze B und C) erfolgte im Frequenzbereich, während oberhalb der Schnittstelle die Berechnung nach dem Antwortspektrumverfahren erfolgte. Hierdurch ist die Substrukturmethode (Aufteilung in Boden- und Bauwerkssubstrukturen) nur noch bedingt gültig und verliert an Genauigkeit. Eine geeignete Wahl der Schnittstelle zwischen den beiden Modellen ist deshalb besonders wichtig, um die resultierenden Ungenauigkeiten auf ein Minimum zu reduzieren.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Idriss, I.; Sun, J., 1992. User's Manual for SHAKE91, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis California
- Sadegh-Azar, H., 2007. „Die Bicentenario-Chiloe-Brücke: Seismische und dynamische Untersuchungen“, Bautechnik, Seiten157-168,
- Kausel, E., Whitman, R.V., Morray, J.P., Elsabee, F., 1978. The spring method for embedded foundations, Nuclear Engineering and Design 48
- Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S. and Ostadan, F., 1981. SASSI - A System for Analysis of Soil Structure Interaction,” Report No. UCB/GT/81-02, Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F., Seed, H.B., 1975. FLUSH - A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems," Report No. EERC 75-30, Earthquake Engineering, Research Center, University of California, Berkeley, California, 83 pp.
- Hartmann, H.G., 1986. Pfahlgruppen in geschichtetem Boden unter horizontaler dynamischer Belastung, Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der TH Darmstadt
- Waas, G., 1980. Dynamisch belastete Fundamente auf geschichtetem Baugrund”, VDI-Bericht Nr. 381
- Waas, G., Riggs H.R., Werkle, H., 1985. Displacement Solutions for Dynamic Loads in Transversely-Isotropic Stratified Media“, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13,173-193