Seismische Standortanalyse des Ambassador House Opfikon - Standortspezifische Bestimmung der Erdbebenanregung als Bemessungsgrundlage von Ertüchtigungsmassnahmen

Thomas M. Weber[1], Jan Laue[2] und Lorenz Keller[3]
[1]Studer Engineering GmbH, Erdbeben und Geotechnik, Zürich
[2]Institut für Geotechnik, ETH Zürich, Zürich
[3]roXplore gmbh, Seismische Untersuchungen, Amlikon (TG)

1 EINLEITUNG

Das Ambassador House Opfikon soll nach 26-jähriger Nutzung saniert und umgebaut werden. Es umfasst eine Grundrissfläche von 170m mal 75m und besteht aus 16 Stockwerken, wovon 5 Geschosse in den Untergrund einbinden. Die vorhandenen Aussteifungskerne des Stahlbetonbaus sind verhältnismässig schwach, um die Erdbebenbelastung nach SIA 261 (2014) aufzunehmen. Der erste Entwurf eines Ertüchtigungskonzeptes sieht umfangreiche bauliche Massnahmen der Verstärkung vor, die einen hohen Aufwand bedeuten und auch die baulichen Abläufe stark behindern. Der Berater des Bauherrn schlägt deshalb vor, eine seismische Standortanalyse zur genauen Bestimmung der Erdbebenanregung durchzuführen. Je nach Ergebnis liesse sich eine Optimierung der Ertüchtigungsmassnahmen ermöglichen.

2 NORMATIVE RAHMENBEDINGUNGEN

Der Lastfall Erdbeben ist für Neubauten in der Tragwerksnorm SIA 261 (2014) in Abschnitt 16 geregelt. Dort ist die Erdbebenanregung innerhalb von Zonen mit Grundwerten der Bodenbeschleunigung angegeben. Das Antwortspektrum wird durch die Bedeutung des Bauwerks und den Untergrund bestimmt. Der Untergrund wird hierbei stark vereinfachend mit sechs Baugrundklassen beschrieben. Ferner empfiehlt die SIA 261 (2014) in Abschnitt 16.2.2.3, falls seismische Mikrozonierungsstudien vorhanden sind, diese für die Bestimmung der Erdbebenanregung zu verwenden.

Für bestehende Gebäude wird das SIA Merkblatt 2018 (2004) zur Überprüfung bezüglich Erdbeben herangezogen und verweist grundsätzlich auf die Erdbebenanregung der SIA 261 (2014). Das SIA Merkblatt 2018 (2004) ermöglicht jedoch alternativ die Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums durch eine bodendynamische Untersuchung nach Abschnitt 5.1.3. Eine seismische Standortanalyse im Sinne einer bodendynamischen Untersuchung ermittelt ein standortspezifisches Antwortspektrum, welches die Grundlage für den Erdbebennachweis bei bestehenden Gebäuden bildet. Das sandortspezifische Antwortspektrum ersetzt dann das Antwortspektrum nach SIA 261 (2014).

Das SIA Merkblatt 2018 (2004) wird in naher Zukunft durch die Tragwerksnorm SIA 269/8 (2014) zur Erhaltung von Tragwerken bezüglich Erdbeben abgelöst. Der Abschnitt zur Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums soll erhalten bleiben. Somit ist die Durchführung einer seismischen Standortanalyse mit der Bestimmung eines standortspezifischen Antwortspektrums für bestehende Gebäude konform zu den Schweizerischen Tragwerksnormen SIA 269/8 (2014) und SIA 261 (2014).

3 METHODIK

Der Stand der Technik zur Erstellung seismischer Standortgutachten in der Schweiz ist in BWG (2004) dargelegt. Das Verfahren zur Erstellung von seismischen Mikrozonierungsstudien gliedert eine Standortstudie in folgende Arbeitsschritte:

- Bestimmung des Antwortspektrums auf "hartem" Fels ($v_{s,30}$=1500m/s) nach Giardini et al. (2004)
- Messung der Grundfrequenz des Standortes
- Messung des Scherwellengeschwindigkeitsprofils am Standort
- Erstellen des dynamischen Bodenmodells mit Scherwellengeschwindigkeits- und Dichteprofil
- Abschätzung der Standorteffekte für schwache Anregungen durch numerische Simulation
- Vergleich der Fundamentalfrequenzen der oberflächennahen Böden

– Anpassung bzw. Optimierung des dynamischen Baugrundmodells
– Auswahl des Bemessungserdbebens für Fels, welches das Spektrum der Gefährdung abdeckt
– Berechnung der Standorteffekte unter Berücksichtigung der Dehnungsabhängigkeit des Schermoduls und der Dämpfung sowie der Unsicherheiten im Parametersatz des Bodenmodells
– Bestimmung des elastischen Antwortspektrums für den Lockergesteinsstandort

Dieses Vorgehen der seismischen Mikrozonierung wurde bereits bei mehreren Mikrozonierungsstudien angewendet, so z.B. für Brig-Visp, Basel und Luzern (Résonance 2005, 2012; Fäh & Huggenberger, 2006). Für die Standortanalyse des Ambassador House wird entsprechend der Methodik BWG (2004) in vergleichbarer Weise vorgegangen.

4 SEISMISCHE STANDORTANALYSE

4.1 Grundlagen

4.1.1 Seismische Gefährdung

Die seismische Gefährdung ist landesweit vom Schweizerischen Erdbebendienst (SED) berechnet worden (Giardini et al. 2004) und bildet die Basis der vorliegenden Studie. Die Gefährdungsdaten beziehen sich auf einen Felsstandort ("harter Fels") mit der Scherwellengeschwindigkeit $v_{s,30}$=1500m/s. Das Antwortspektrum ist in Abb. 7 als dunkle durchgezogene Linie dargestellt und beinhaltet bereits den Bedeutungsfaktor des Ambassador House. Das Fels-Spektrum des SED ist nur im Periodenbereich zwischen 0.08s (12Hz) und 2.0s definiert. Der Verlauf des Spektrums ist für sehr kleine Perioden nicht genau bekannt. Um Spekulationen über den Verlauf zu umgehen, wurde dieser Spektralbereich als konstant angenommen. Für die dynamische Analyse der Tragstruktur des Ambassador House hat dieser Periodenbereich jedoch keine Bedeutung.

Basierend auf der Gefährdungsberechnung des SED (Giardini et al., 2004) wurde die seismische Gefährdung für die Tragwerksnorm SIA 261 (2003) aufbereitet. Nach SIA 261 (2003, 2014) besitzt die Baugrundklasse A - Fels eine Scherwellengeschwindigkeit von $v_{s,30}$≥800m/s, welche sich am Eurocode (EN 1998-1) orientiert. Aufgrund der unterschiedlichen Definitionen des Fels mit unterschiedlichen Scherwellengeschwindigkeiten ergeben sich unterschiedliche Antwortspektren der Erdbebenanregung.

Zurzeit wird die seismische Gefährdung in der Schweiz durch den Erdbebendienst überarbeitet. Für den Raum Zürich sind vermutlich keine grundlegenden Abweichungen der Beschleunigungswerte zu erwarten (Fäh 2014). Die Veröffentlichung der neuen Gefährdungsdaten ist für September 2015 vorgesehen.

4.1.2 Geologie

Der geologische Aufbau des Untergrundes am Standort Ambassador House wurde durch das Geotechnische Institut (1985) untersucht und beschrieben. Auch der Geologische Atlas der Schweiz (Pavoni et al., 1992) gibt Auskunft über die grundlegende geologische Beschaffenheit des Standortes (Abb. 1). Die Geländeoberfläche ist vom Quartär geprägt. Die obersten Schichten bestehen aus fluvialen Ablagerungen. Darunter lagern wenige Meter dicht gelagerte Grundmoräne, die vermutlich glazial vorbelastet ist. Ab 20m bis 25m Tiefe steht tertiäre Süsswassermolasse an.

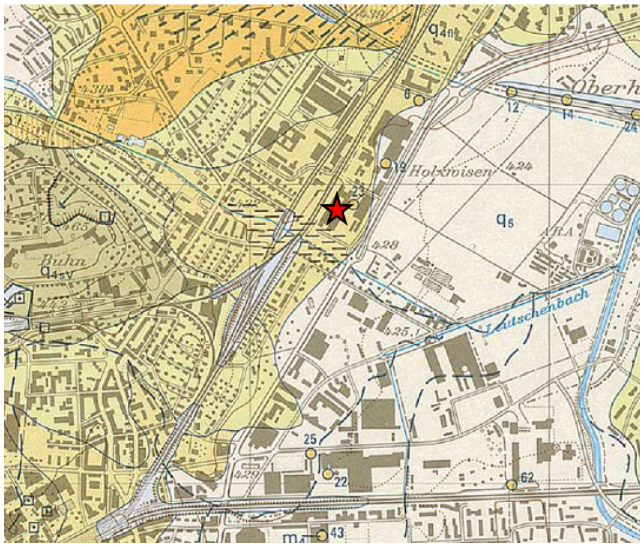

Abb. 1: Ausschnitt aus dem Geologischen Atlas der Schweiz, Kartenblatt 90 Zürich (Pavoni et al., 1992), mit Markierung des Standortes Ambassador House.

4.1.3 Geophysikalische Messungen

Die wesentliche Grundlage der seismischen Standortanalyse bilden eigens durchgeführte seismische Array- und Punktmessungen am Standort (Keller, 2014). Auswerteverfahren der Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) und Inversionsanalysen mittels Joint-Inversion und Holistic Surfacewave Analysis kommen zur Anwendung, um das standortspezifische Profil der Scherwellengeschwindigkeit zu bestimmen (Abb. 2). H/V-Messungen werden nach der Methode Nakamura (1989) bzw. SESAME (2004) ausgewertet und dienen zur Bestimmung der Grundperiode des Standortes und zur Kontrolle des festgelegten Scherwellenprofils. Keller et al. (2015) gehen vertieft auf die geophysikalischen Messungen ein.

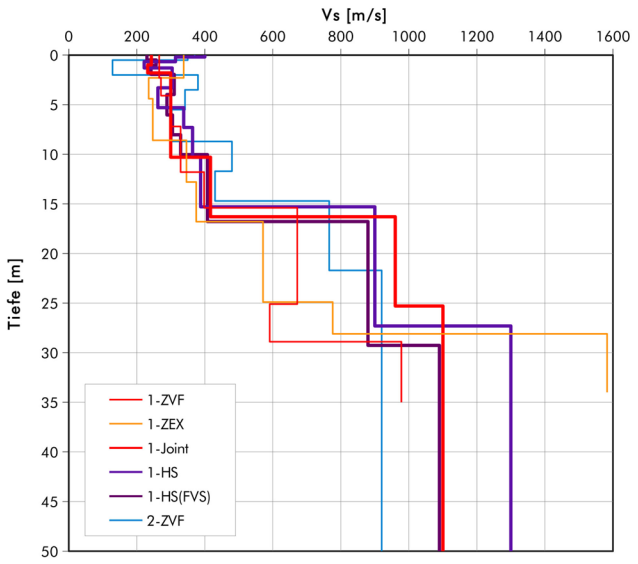

Abb. 2: Zusammenfassung der Scherwellengeschwindigkeitsprofile aus den geophysikalischen Array-Messungen mit verschiedenen Auswertungsverfahren (Keller, 2014).

4.2 Dynamisches Bodenmodell

Das seismische Bodenmodell für den Standort des Ambassador House wird vorrangig aus den geophysikalischen Messungen von Keller (2014) und aus den geotechnischen Untersuchungen des Geotechnischen Instituts (1985) entwickelt. Das Ambassador House bindet mit einer flachen Fundation ca. 16m in den Baugrund ein. Die Kote der Unterkante des Flachfundaments befindet sich auf ca. 414m ü.M. Die Einbindung des Gebäudes wird bei der Standortanalyse berücksichtigt und die Erdbebenanregung auf Fundationskote bestimmt. Der Wechsel von fluvialen Ablagerungen auf dichte Moräne zeichnet sich in den geophysikalischen Messungen in ca. 16m Tiefe unter OKT ab. Da die fluvialen Ablagerungen genauso mächtig sind, wie die Einbindetiefe des Gebäudes, wird davon ausgegangen, dass diese weichen Lockergesteinsschichten für die Untergeschosse komplett ausgehoben wurden, und das Gebäude auf dichter Moräne gegründet ist.

Die Scherwellengeschwindigkeit der dichten Moräne ist mit ca. 800m/s bis 900m/s sehr hoch. In der Modellierung wird davon ausgegangen, dass dieser Moränenbereich sehr dicht gelagert ist. Ab ca. 25m bis 28m Tiefe (siehe Abb. 2) erhöht sich die Scherwellengeschwindigkeit. Bei diesem Schichtwechsel wird der Übergang zur Oberen Süsswassermolasse angesetzt. Die Molasse wird oberflächlich mit Scherwellengeschwindigkeiten um 1100m/s entsprechend Geotechnischem Institut (1985) als wenig fest und mürbe angesprochen. Ab 50m Tiefe wird die Molasse kompakter eingeschätzt.

Aufgrund der Streuung der Schwerwellengeschwindigkeit wird im Bodenmodell eine statistische Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit innerhalb einer Bandbreite von ±10% um dem Mittelwert $v_{s,mittel}$ in den Grenzen $v_{s,min}$ und $v_{s,max}$ angesetzt. Eine weitere Unsicherheit ist die Tiefe, in der die Scherwellengeschwindigkeit des Fels von 1500m/s erreicht wird. So werden zwei Schichtgrenzen untersucht. Ein Profilsatz hat die Felsoberfläche in 100m Tiefe. Ein zweiter Profilsatz hat die Felsoberfläche in 200m Tiefe mit einem stärkeren Impedanzkontrast, welcher durch Hinweise in der geologischen Schichtung mit dem Wechsel von der Oberen Süsswassermolasse auf die Obere Meeresmolasse gerechtfertigt ist. Insgesamt wurden 400 Profilvariationen der Schwerwellengeschwindigkeit analysiert.

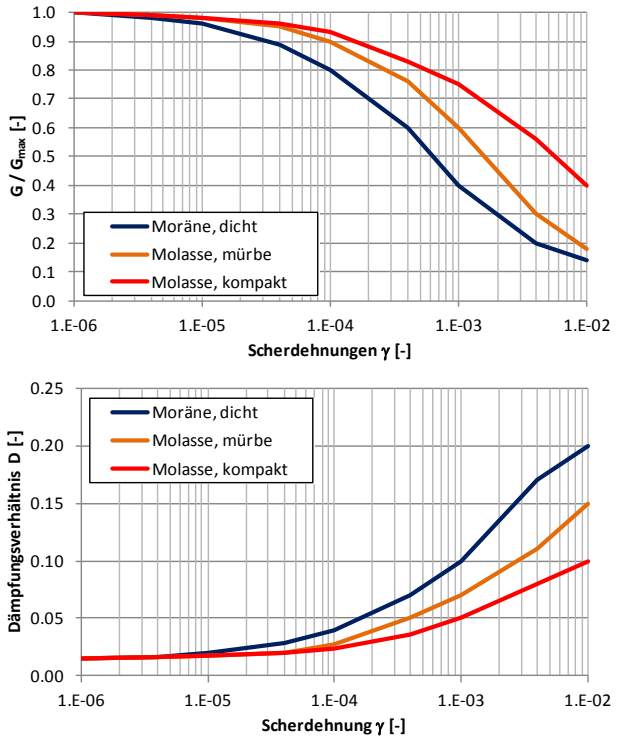

Abb. 3: Linear-äquivalente Bodenkennwerte der Bodenmaterialien, oben: Kurven G/G_{max}, unten: Kurven des dehnungsabhängigen Dämpfungsverhältnisses.

Im Bodenmodell werden für die Lockergesteinsschichten bzw. die verwitterten Gesteinsschichten linear-äquivalente Bodenkennwerte angesetzt. Nach Studer et al. (2007) und Towhata (2008) zeigen Erdmaterialien eine Abhängigkeit der dynamischen Eigenschaften von Korngrössenverteilung, Lagerungsdichte und Überlagerungsdruck. Entsprechend werden für die Schichten unterschiedliche Parametersätze anhand der Literatur abgeschätzt. Die Moräne wird als dicht gelagerter Kies-Sand modelliert. Für die obere mürbe Schicht der Süsswassermolasse werden Parameter

von stark verwittertem Fels angesetzt. Der kompakten Molasse sind Eigenschaften von wenig verwittertem Fels zugeordnet. Für den Felsuntergrund des Halbraums wird eine konstante Schwellengeschwindigkeit angenommen, und das Dämpfungsverhältnis wird mit 1.5% festgelegt. Das dehnungsabhängige Verhältnis der Schubmoduln G/G_{max} und das dehnungsabhängige Dämpfungsverhältnis D sind für die Bodenmaterialien in Abb. 3 dargestellt.

4.3 Berechnung

Die numerische Simulation der Wellenausbreitung im Untergrund und Berechnung der Standorteffekte erfolgt nach der Random Vibration Theory (RVT) (z.B. Kottke & Rathje, 2008) an einem eindimensionalen Bodenmodell mit linear-äquivalenten Bodenkennwerten und vertikal einfallender Scherwellenfront. Unsicherheiten des Scherwellenprofils werden durch Variation der Scherwellengeschwindigkeiten abgedeckt. Die daraus resultierende Streuung der Ergebnisse wird statistisch ausgewertet und durch den Mittelwert und die Standartabweichung beschrieben.

Im Unterschied zu anderen Analyseverfahren, z.B. SHAKE (Schnabel et al., 1972), arbeitet die RVT mit spektrenkonformen künstlich generierten Zeitverläufen. Als Eingangsanregung wird das Antwortspektrum des SED verwendet (vgl. Abb. 7). Eine Auswahl und Aufbereitung von gemessenen Erdbebenzeitverläufen erübrigt sich damit. Die Starkbebendauer der künstlichen Zeitverläufe wird auf 10s festgelegt.

Als Ergebnis der Standortanalyse mittels RVT wird eine Übertragungsfunktion der Lockergesteinsschichten oberhalb des harten Felshorizontes bestimmt, deren Berechnung mit der Software STRATA von Kottke & Rathje (2008) erfolgt. Die Übertragungsfunktion gibt das Verhältnis der spektralen Erdbebenbeschleunigung auf Kote der Fundamentenaufstandsfläche auf Lockergestein im Verhältnis zur Erdbebenbeschleunigung auf der Oberfläche des Felsuntergrundes an. Diese Übertragungsfunktion wird mit dem Antwortspektrum des Felsuntergrundes multipliziert.

5 ERGEBNISSE

In den folgenden Abbildungen sind ausgewählte Zwischenergebnisse dargestellt (Abb. 4 bis Abb. 6). Abb. 4 zeigt die Verteilung der Scherdehnung mit der Tiefe. In 100m Tiefe betragen die Scherdehnungen im Mittel um $\gamma \approx 10^{-5}$ während sie zur freien Oberfläche hin zurückgehen. Vergleicht man diesen Dehnungsbereich mit den linear-äquivalenten Bodenkennwerten in Abb. 3, ist ein annähernd lineares Verhalten des Bodens zu erwarten. Eine Reduktion des Schermoduls ist nur um wenige Prozent zu verzeichnen, und die Dämpfung bewegt sich im Bereich zwischen 1.5% und 1.8% (siehe Abb. 5). In Abb. 6 sind die Übertragungsfunktionen in Abhängigkeit der Periode für die einzelnen analysierten Bodenprofile dargestellt. Ferner wird der Mittelwert und ± eine Standardabweichung der variierten Scherwellenprofile dargestellt. Die Werte der grössten Amplifikation treten im Periodenbereich zwischen 0.04s bis 0.4s auf und betragen um die 1.5.

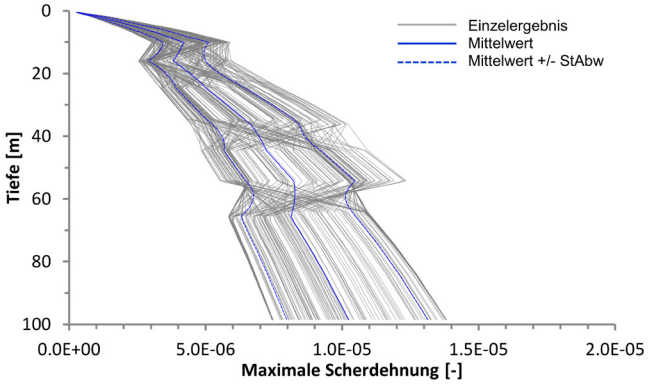

Abb. 4: Tiefenprofil der maximalen Scherdehnungen mit Darstellung der Einzelergebnisse, des Mittelwertes und ± einer Standardabweichung.

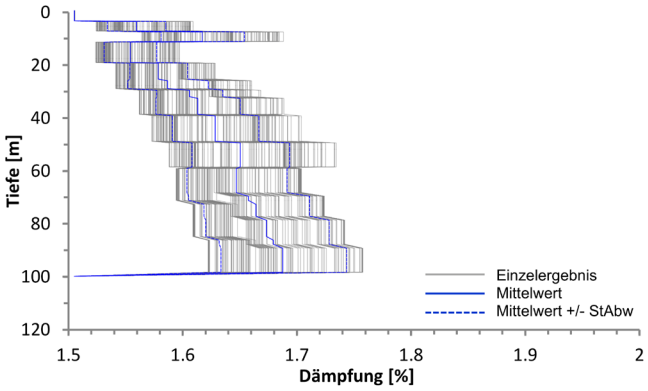

Abb. 5: Tiefenprofil der mobilisierten Dämpfung mit Darstellung der Einzelergebnisse, des Mittelwertes und ± einer Standardabweichung.

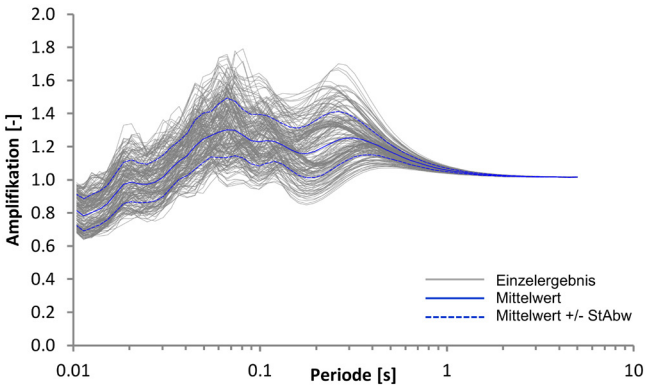

Abb. 6: Variationen der Übertragungsfunktion, Verhältnis der spektralen Beschleunigung auf Kote UK Fundament zur Felsoberfläche mit Darstellung der Einzelergebnisse, des Mittelwertes und ± einer Stabw.

Entsprechend des Vorgehens nach BWG (2004) werden die Ergebnisse der Amplifikationsberechnung mit den Messergebnissen der H/V-Messungen verifiziert. Das Bodenmodell wird als plausibel beurteilt.

6 ANWENDUNGSGRENZEN

Die vorliegende Standortanalyse erfolgt an einem eindimensionalen Bodenmodell. Liegen keine eindimensionalen Bedingungen vor, z.B. in engen Bergtälern oder stark einfallendem Felshorizont, ist eine mehrdimensionale Modellierung angezeigt.

Des Weiteren wird in der Literatur über Diskrepanzen von gemessenen und berechneten Übertragungsfunktionen berichtet (z.B. Ito & Towhata, 2012). Das Übertragungsverhalten der Lockergesteinsschichten reagiert z.T. sensibel auf Variationen der linear-äquivalenten Bodenkennwerte. Die Übertragung wird teilweise bei steifen Böden überschätzt und bei weichen Böden unterschätzt. Diskrepanzen nehmen mit zunehmenden Scherdehnungen und einer rechnerisch stärker ausgeprägten Nichtlinearität zu (Kaklamanos et al., 2015).

Für die Standortanalyse des Ambassador House ist aufgrund der Topographie und des Dehnungsbereichs die verwendete linear-äquivalente Methode an einem eindimensionalen Modell gerechtfertigt.

In der vorliegenden Analyse wird die Erdbebenanregung auf Fundationskote berechnet. Die seitliche Anbindung des Gebäudes im Baugrund wird vernachlässigt. Genau genommen müsste die räumliche Bauwerk-Boden-Interaktion untersucht werden, um den Einfluss des seitlichen Erdreichs auf die Untergeschosse zu bestimmen. In den Bodenschichten oberhalb des Fundamentes findet eine weitere Amplifikation der Erdbebenwellen statt. Die Spitzenbodenbeschleunigung wird zwar nur leicht erhöht, während andere Spektralbereiche jedoch eine massgebliche Amplifikation erfahren. Aufgrund der grossen Abmessungen (170m x 75m) und grossen Massen des Gebäudes ist das Verhältnis des dynamischen Erddruck auf die Seitenwände zum Gebäudegewicht recht klein (ca. 5% - 10%), so dass eine Vernachlässigung der seitlichen Anregung als zulässig erachtet wird.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Für das Ambassador House wird entsprechend der Methodik des BWG (2004) die Erdbebenanregung auf Kote der Fundamentenunterkante standortspezifisch berechnet. In der Untersuchung wurde durch geophysikalische Messungen und Bohrlochaufnahmen das dynamische Untergrundverhalten eingegrenzt. Im Vergleich zu den stark vereinfachenden Baugrundklassen der SIA 261 kann somit das Übertragungsverhalten der Lockergesteinsschichten in Bezug auf den Felshorizont weitgehend präzise und frequenzabhängig bestimmt werden. Als Grundlage der Erdbebenanregung dienen die Gefährdungsdaten das SED nach Giardini et al. (2004). Die Berechnung des Übertragungsverhaltens der Lockergesteinsschichten erfolgte mit der Random Vibration Theorie und linear-äquivalenten Bodenkennwerten.

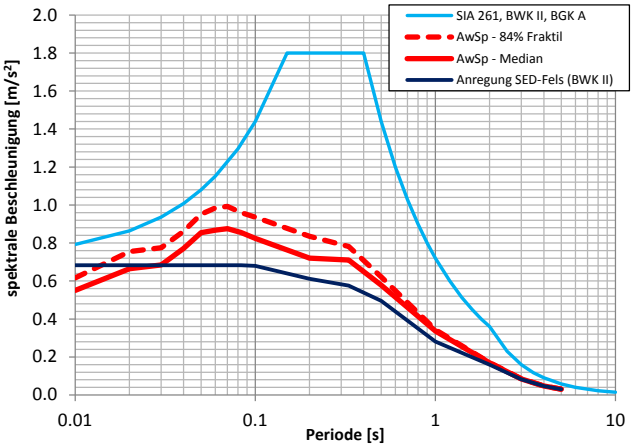

Abb. 7: Vergleich der elastischen Antwortspektren der standortspezifischen Analyse mit dem Antwortspektrum nach SIA 261.

Abb. 7 zeigt die standortspezifische Erdbebenanregung und die Erdbebenanregung nach SIA 261. Für den Nachweis der Tragsicherheit des Ambassador House und die Bemessung von Ertüchtigungsmassnahmen kann die Verwendung des 84% Fraktilwertes der Scherwellenprofilvariation als standortspezifisches Antwortspektrum empfohlen werden. Der Vergleich der Spektren verdeutlicht, dass die Erdbebenanregung nach SIA 261 für BGK A am Standort Ambassador House in dem für das Gebäude massgebenden Periodenbereich von ca. 0.5s bis 1.0s recht konservativ ist. Die standortspezifischen Beschleunigungswerte betragen in diesem Spektralbereich etwa die Hälfte der Anregung nach SIA 261. Die Konservativität des Normspektrums ist vorrangig durch die Variabilität der Erdbebenzone 1 und durch die unterschiedlichen Definitionen bzw. Eigenschaften von Felsstandorten zu begründen. Im Periodenbereich kleiner 0.07s sind die Werte des standortspezifischen Antwortspektrums nur geringfügig kleiner als die des Antwortspektrums nach SIA 261. Beschleunigungswerte an der Geländeoberfläche am Standort des Ambassador House sind vergleichbar mit anderen Standortstudien in Zürich, z.B. Fäh et al. (2004) und Ambrasas & Tronjanowski (2014).

Das standortspezifische Antwortspektrum ersetzt das elastische Antwortspektrum nach SIA 261 (2014)

und beinhaltet den Bedeutungsfaktor γ_f=1.2 der Bauwerksklasse II. Es gilt nur für das bestehende Gebäude des Ambassador House Opfikon, da die dynamischen Bodeneigenschaften des Standortes und die Einbindetiefe des Gebäudes in den Baugrund berücksichtigt sind. Mit diesem standortspezifischen Antwortspektrum können die Ertüchtigungsmassnahmen des Ambassador House weiterentwickelt und bemessen werden. Aufgrund der reduzierten Kraftwirkung des Bemessungserdbebens im massgebenden Spektralbereich besteht ein Optimierungspotential der vorgeschlagenen Erdbebenmassnahmen.

Eine Kostenersparnis möglicher Ertüchtigungsmassnahmen kann durch eine Standortanalyse allgemein nicht garantiert werden. Eine seriöse Standortanalyse benötigt in der Regel mehrere Arbeitswochen Aufwand. Es ist daher vor allem dann sinnvoll, eine solche Analyse in Erwägung zu ziehen, wenn sich sehr aufwendige Massnahmen andeuten, oder komplexe Eingriffe unter schwierigen betrieblichen oder denkmalpflegerischen Randbedingungen eine Präzisierung der Massnahmen anzeigen.

8 DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei Halter AG Gesamtleistungen für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung im Projekt und die Erlaubnis zur Publikation der Ergebnisse, insbesondere bei Projektleiter Herrn A. Wüthrich, sowie bei Basler & Hofmann AG Herrn D. Krähenbühl und J. Habenberger.

9 LITERATUR

Ambrasas, P. & Trojanowski, K. (2014) Seismische Mikrozonierung im Raum Zürich. Projektarbeit am IGT der ETH Zürich, Dezember 2014.

BWG (2004) Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz. Richtlinien des Bundesamtes für Wasser und Geologie BWG.

EN 1998-1 (2004) Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten.

Fäh, D., Roten, D, Steiner, B., Kästli, P., Havenith, H.-B., Wiemer, S. & Fritsche, S. (2004) Standortspezifische elastische Antwortspektren für Gebäude des ETH Zentrums. Schweizerischer Erdbebendienst.

Fäh, D. & Huggenberger, P. (2006) INTERREG III - Erdbebenmikrozonierung am südlichen Oberrhein, Zusammenfassung. Schweizerischer Erdbebendienst, Zürich / Universität Basel.

Fäh, D. (2014) Improving the input for the next generation seismic hazard maps for Switzerland. Swiss Seismological Service, ETH Zürich.

Geotechnisches Institut (1985) Ambassador House Opfikon, Geotechnischer Bericht, GTZ 185.0190, Zürich, 12. Juli 1985.

Giardini, D, Wiemer, S., Fäh, D & Deichmann, N. (2004) Seismic hazard assessment of Switzerland, 2004. Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich.

Ito, T & Towhata, I. (2012) Dynamic analysis of ground with rigorous use of strain dependency and its application to seismic microzonation of alluvial plane. Natural Hazard, 64(2):1079-1104.

Kaklamanos, J., Baise, L.G., Thompson, E.M. & Dorfmann, L. (2015) Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 69: 207-219.

Keller, L. (2014) Bericht zur seismischen Standortanalyse, Ambassador House Opfikon. Geophysikalische Oberflächenmessungen. roXplore gmbh, Amlikon, 10. November 2014.

Keller, L., Weber, T.M. & Dal Moro, G. (2015) Geophysikalische In-situ-Bestimmung der Eingangsparameter in die seismischen Standortanalysen am Beispiel des Ambassador House Opfikon, SIA-Dokumentation D 0255 "Erdbeben und bestehende Bauten", 14. DACH-Tagung, Zürich, 20.-21. August 2015.

Kottke, A.R. & Rathje, E.M. (2008) Technical manual for Strata. Pacific Earthqauke Engineering Research Center, UC Berkeley.

Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. QR of RTRI, 30(1), 25-33.

Pavoni, N., Jäckli, H. & Schindler C. (1992) Geologischer Atlas der Schweiz - Kartenblatt 90 Zürich, 1:25'000.

Résonance (2005) Spektrale Mikrozonierung der Region Brig-Visp. Technischer Bericht. Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Courage, Rovina+Partner AG, Varen, Bureau d'Ingénieurs et géologues Tissières SA, Martigny.

Résonance (2012) Spektrale Mikrozonierung Luzern für ausgewählte Untersuchungsgebiete. Technischer Bericht. Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Courage, Keller+Lorenz AG, Luzern.

Schnabel, P.B., Lysmer, J., & Seed, H.B.(1972) SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. EERI Report 72-12, UC Berkeley.

SESAME (2004) Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations, Measurements, Processing and Interpretation, SESAME European Research Project WP12-Deliverable D23.12, Project-No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.

SIA 261 (2003, 2014) Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein.

SIA 269/8 (2014) Erhaltung von Tragwerken - Erdbeben. Entwurf zur Vernehmlassung. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein.

SIA Merkblatt 2018 (2004) Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten Verein.

Studer, J.A., Laue, J. & Koller, M.G. (2007) Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

Towhata, I. (2008) Geotechnical Earthquake Engineering. Springer Verlag, Berlin.