

Geophysikalische In-situ-Bestimmung der Eingangsparameter in die seismischen Standortanalysen am Beispiel des Ambassador House Opfikon

Lorenz Keller¹, Thomas Weber² und Giancarlo Dal Moro³

¹roXplore gmbh, Seismische Untersuchungen, Amlikon TG, CH

²Studer Engineering GmbH, Erdbeben und Geotechnik, Zürich, CH

³Eliosoft, Udine, IT

1 EINLEITUNG

Die Berechnungen der Erdbebensicherheit von Gebäuden orientiert sich an der SIA-Norm 261. Sofern eine seismische Mikrozonierung vorliegt, kann diese für die standortspezifische Bestimmung der Erdbebenanregung verwendet werden. Die seismische Mikrozonierung baut ihrerseits auf den einschlägigen Bestimmungen (BWG, 2004) auf. Sie umfasst nebst der Bestimmung des Gefährdungsspektrums auf hartem Fels (Scherwellengeschwindigkeit $v_s = 1500$ m/s) auch die Ermittlung eines belastbaren Scherwellengeschwindigkeit-Tiefenprofils am Standort, die Messung der Grundfrequenzen der oberflächennahen Böden sowie die Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit in den obersten 30 m ($v_{s,30}$ -Wert).

1.1 Vier Problemkreise der Geophysik bei Standortcharakterisierungen

Bei der akkuraten in-situ-Bestimmung von v_s treten verschiedene Einschränkungen auf:

- Problemkreis 1: Sie ist sehr aufwändig und teuer; z.B. mittels seismischer Crosshole-Tests
- Problemkreis 2: Sie ist mit einer relativ grossen Unsicherheit behaftet, weil Inversionsverfahren eine intrinsische Vieldeutigkeit aufweisen; z.B. hat die Inversion von Dispersionskurven in SASW- oder Standard-MASW-Messungen eine Vielzahl an mathematisch korrekten Lösungen
- Problemkreis 3: Methodenbedingt kann sie eine grosse Fehleranfälligkeit aufweisen; z.B. werden bei der Refraktionstomographie Geschwindigkeitsinversionen nur schlecht bis gar nicht abgebildet.
- Problemkreis 4: Selbst bevorzugte Verfahren (z.B. MASW-Seismik) haben das Problem, dass eine Analyse oft subjektiv beeinflusst ist; z.B. ist die Bestimmung von Dispersionskurven schwierig und fehleranfällig.

1.2 Methodenwahl

Die Inversion von geophysikalischen Messdaten beinhaltet meist das Problem der Unterbestimmtheit resp. der Vieldeutigkeit der Ergebnisse: eine Messreihe kann zu einer Vielzahl von zwar mathematisch korrekten Modellen invertiert werden – aber nur ein einziges beschreibt den geologischen Untergrund auch tatsächlich physikalisch korrekt (Abb. 1). Aus diesem Grund ist eine geeignete Kombination verschiedener (Inversions-)Methoden angezeigt. So wurden am Standort des Ambassador House Opfikon mehrere grundsätzlich unterschiedliche seismische Messverfahren (Zielfunktionen) miteinander verknüpft ausgewertet (*joint analysis*).

Im vorliegenden Beitrag wird eine oberflächenseismische Messkampagne vorgestellt, die mit einem relativ geringen Feldaufwand ein belastbares Geschwindigkeitsprofil bis in rund 40 m Tiefe erbringt. Unter geeigneten Voraussetzungen sind Erkundungstiefen sogar bis 100 m und darüber hinaus möglich.

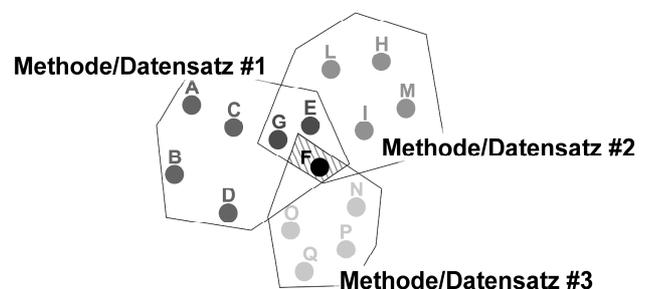


Abb. 1: Ein Inversionsproblem zeigt sich dadurch, dass die Inversion eines einzigen Datensatzes #1 mehrere „korrekte“ Lösungen A bis F ergibt. Auch die Inversionen vom Datensatz #2 und #3 ergeben eine Vielzahl an passenden Resultaten. Erst die verknüpfte Auswertung (*joint analysis*) aller drei Datensätze #1 bis #3 ergibt eine einzelne singuläre und damit den Untergrund wiedergebende Lösung F.

2 FALLBEISPIEL AMBASSADOR HOUSE

Das Ambassador House Opfikon soll totalsaniert und umgebaut werden. Im Rahmen der Umbauarbeiten soll ebenfalls den aktuellen regulatorischen und normativen Bestimmungen zur Erdbebensicherheit von Gebäuden Rechnung getragen werden.

Aus diesem Anlass wurde vom beauftragten Erdbebeningenieur vorgeschlagen, eine seismische Standortanalyse (dynamische Bodenuntersuchung gemäss SIA Merkblatt 2018) vorzunehmen. Zu diesem Zweck wurden am Standort oberflächen-geophysikalische Messungen mit dem Ziel der Bestimmung der eindimensionalen Scherwellengeschwindigkeitsverteilung im Untergrund und der lateralen Verteilung der Grundfrequenz der oberflächennahen Böden ausgeführt.

Aus den bestimmten Parametern Scherwellengeschwindigkeit und Grundfrequenz wurden anschliessend die Standorteffekte für schwache Anregungen durch numerische Modellrechnungen abgeschätzt (Weber et al., 2015).

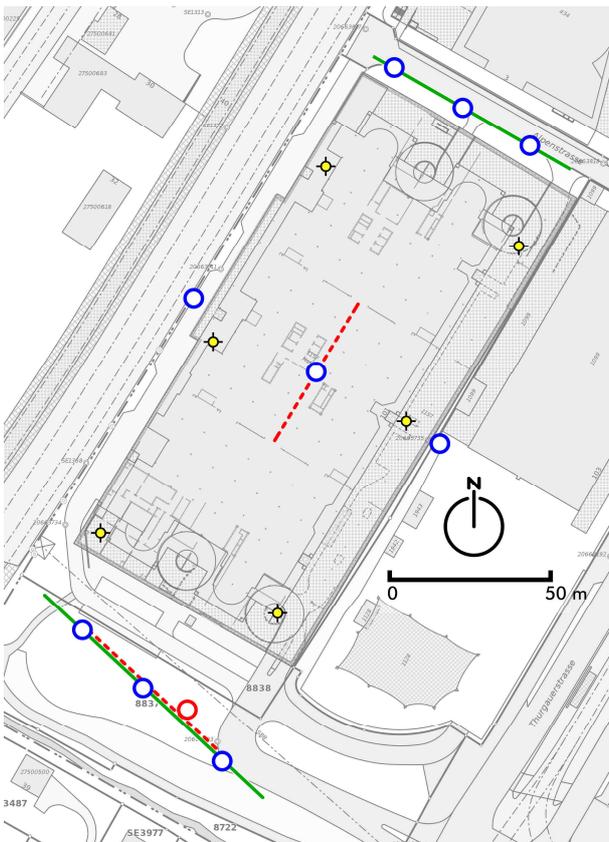


Abb. 2: Situationsübersicht beim Ambassador House Opfikon mit den aktiv-seismischen Mehrkanal-Messungen (MASW) entlang der grünen Linien, den aktiv-seismischen 3C-Messungen (MFA) entlang der rot-punktierten Linien sowie den passiv-seismischen Messungen HVSR an den blauen Krinquellen und MAAM (roter Kreis). Die schwarz-gelben Kreuze bezeichnen die Bohrstandorte.

2.1 Situation am Standort

Das Ambassador House Opfikon, ein bislang als Hotel, Büro- und Gewerberaum genutzter Gebäudekomplex, umspannt eine Fläche von etwa 170 x 75 m und umfasst total 16 Stockwerke (Abb. 2). Das Bauwerk gründet rund 20 m unter Terrain, 40 m sind oberirdisch angelegt. Es liegt zwischen der Bahnlinie Zürich-Oerlikon – Zürich-Flughafen und dem Neubauquartier Glattpark in Zürich Nord.

Sechs Kernbohrungen wurden vor dem Bau zur Erschliessung des geologisch-geotechnischen Aufbaus im Perimeter des Gebäudes abgeteuft. Sie zeigen folgenden, generellen Schichtaufbau: Das Gebäude steht auf quartären Ablagerungen im Übergang zwischen fluviatilen und Verlandungs-Sedimenten der Oberhusen-Ebene. In rund 20 bis 25 m unter Terrain folgen Sand-, Silt- und Mergelsteine der Oberen Süsswassermolasse. Am Übergang zwischen Quartär und Molasse grenzt der harte, sogenannte Meilener Kalk mit maximal 1 m Mächtigkeit die Locker- von den Festgesteinen ab. Die Tiefe zum Mesozoikum ist unbekannt. Leider sind die Bohrlöcher aus der Erkundungsphase für seismische Crosshole-Tests alle nicht mehr zugänglich (siehe Problemkreis 1 im Kapitel 1) – sie sind alle durch das Gebäude bedeckt. Daher muss auf Erkundungen von der Oberfläche aus ausgewichen werden.

2.2 Feldarbeiten

Zur Bestimmung des Parameters Scherwellengeschwindigkeit v_s als Teil der seismischen Standortcharakterisierung wurden am Standort Ambassador House verschiedene aktiv- und passiv-seismische Feldmessungen ausgeführt um anschliessend in der Auswertung über eine ausreichende Datengrundlage für verschiedene verknüpfte Analysen zu verfügen (siehe Problemkreis 2). Die Erfassung des kompletten Datensatzes an allen Messpunkten dauerte insgesamt weniger als fünf Stunden.

- passive Messung des Hintergrundrauschens HVSR [*horizontal-to-vertical spectral ratio*, Nakamura (1989), Sesame (2004)] und MAAM [Miniature Array Analysis of Microtremors, Dal Moro et al. (2015)]
- aktive Messung der Phasengeschwindigkeiten von Rayleigh- und Love-Welle mit einer Mehrkanalseismik MASW [*multichannel analysis of surface waves*, Park et al. (1999)]
- aktive Messung der Gruppengeschwindigkeiten von Rayleigh- und Love-Welle mit einer 3C-Messung MFA [*multiple filter analysis*, Dziewonski et al., (1969), Dal Moro, (2014)]

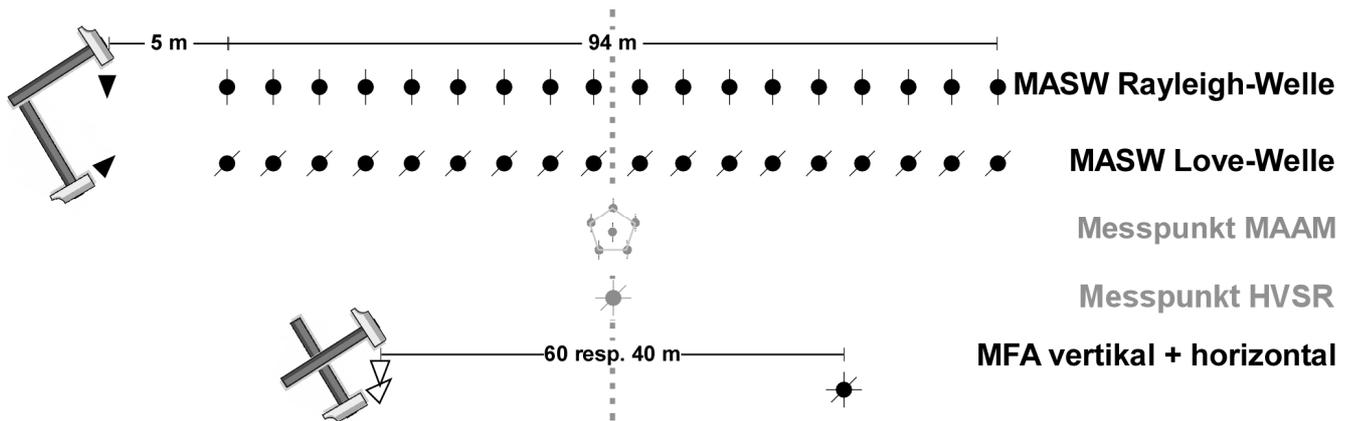


Abb. 3: Layout der verschiedenen Messungen der aktiven (schwarz) und passiven (grau) Seismik. Dreiecke geben die Quellpunkte wieder (Spitze in Richtung der Anregung), die Kreise den Empfänger mit Orientierung der Achse(n).

Um eine verknüpfte Datenanalyse (*joint analysis*) zu ermöglichen wurden die verschiedenen Messungen am möglichst gleichen Standort ausgeführt. Bei Array-Messungen resp. den 3C-Messungen galt es, die Mittelpunkte der Messung identisch zu halten.

2.2.1 Passive Seismik (HVSR)

An acht Messpunkten um das Gebäude herum und einem zusätzlichen Messpunkt auf der Bodenplatte im 5. Untergeschoss (Kringel in Abb. 1) wurde gemäss den Richtlinien des Sesame-Projekts (SESAME 2004) das Hintergrundrauschen mittels geeichtem Dreikomponenten-Geophon während 15 Minuten (an den Mittelpunkten pro Gebäudeseite sowie im Schwerpunkt des ganzen Gebäudekomplexes) resp. 5 Minuten (an den Eckpunkten des Gebäudes) gemessen. Diese Messreihen dienen einerseits der Bestimmung der Verteilung der Fundamentalfrequenzen im Untersuchungsperimeter als Teil der seismischen Mikrozonierung. Andererseits erlauben sie die Definition zusätzlicher Randbedingungen für die Inversion der aktiven Seismik.

2.2.2 Ergänzende passive Messungen MAAM

Im Nachgang der projektspezifischen Berichterstattung wurden zusätzliche Messungen der passiven Seismik mittels Miniature Array Analysis of Microtremors MAAM, eine modifizierte CCA-Messung (*centerless circular array*, Cho et al. 2006, Cho et al. 2013), einer Erweiterung der ESAC-Methodik (*expanded spatial auto-correlation*, Otori et al. 2002), ausgeführt. Total achtzehn 4.5 Hz Geophone, angeordnet in Drei- und Fünfecken verschiedener Radien zwischen einem halben und zwei Meter Radius zeichneten während 20 Minuten das Hintergrundrauschen auf. Diese Messungen wurden nur an der Südseite des Gebäudes ausgeführt

und dienten vor allem zur Eignungsabklärung der Methodik als sehr einfaches Verfahren für künftige Messungen.

2.2.3 Aktiv-seismische Phasengeschwindigkeitsmessung MASW

An den beiden Kurzseiten des Gebäudes wurde je ein Array mit 48 Vertikalgeophonen 4.5 Hz für die Messung der Rayleigh-Welle und 48 tangential gerichteten Horizontalaufnehmern für die Messung der Love-Welle ausgelegt. Der Abstand der Geophone betrug 2 m, woraus eine Arraylänge von 94 m resultiert. Als Quelle dienten sowohl vertikale und horizontale Hammerschläge als auch eine speziell konstruierte, vertikal und tangential gerichtete seismische Shotgun-Quelle. Um lokale Heterogenitäten im oberflächennahen Untergrund auszugleichen, wurden jeweils an beiden Enden des Arrays an verschiedenen Positionen die Anregung ausgeführt, als Aufnehmer-Array wurden jeweils die gleichen Empfänger verwendet.

2.2.4 Messungen der Gruppengeschwindigkeit MFA

Als dritter Datensatz wurden schliesslich noch aktiv-seismische Messungen mit vertikalem und horizontalem Hammerschlag und einem einzigen, geeichten Dreikomponentengeophon 2 Hz in 40 m resp. 60 m Distanz ausgeführt. Auch bei dieser Messung wurden Quelle und Empfänger derart vertauscht, so dass die Lage des Mittelpunktes sämtlicher Messungen identisch ist mit dem entsprechenden HVSR-Messpunkt resp. mit dem Mittelpunkt der Arraymessungen übereinstimmt.

Die hier vorgestellte Methodik (MFA-Analyse kombiniert mit HVSR-Auswertung) ist unter dem Namen HoliSurface® durch Eliosoft (Udine, IT) patentiert.

3 DATENANALYSE

Obwohl die Datengrundlage eine erfolgreiche refraktionsstomographische Auswertung ermöglichen würde, wurde eine solche Analyse nicht weiter verfolgt, da aufgrund der Informationen aus den Bohraufschlüssen damit gerechnet werden musste, dass Geschwindigkeitsinversionen existieren (siehe Problemkreis 3). Zudem erlaubt die aufgrund topographischer Gegebenheiten maximal mögliche Länge der Empfängerarrays eine Erkundung nicht einmal bis zur Tiefenlage der Bodenplatte.

Aus diesen Gründen umfasste die Datenauswertung verschiedene Verfahren der Oberflächenwellenanalyse. Sie alle basieren entweder auf der Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Phasen- oder Gruppengeschwindigkeit oder aber dem spektralen Verhältnis einzelner oder aller Seismogramme unterschiedlicher Komponenten.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen (die sogenannte Phasengeschwindigkeit, – grundsätzlich ist auch nach dem gleichen Schema eine Auswertung der Gruppengeschwindigkeit möglich –) wird sowohl bei der Rayleigh-Welle als auch bei der Love-Welle im Wesentlichen von der Scherwellengeschwindigkeit v_s und den Mächtigkeiten Z einzelner Schichten beeinflusst. In untergeordnetem Masse spielt auch die Dichte ρ eine Rolle und bei der Rayleigh-Welle zusätzlich die Kompressionswellengeschwindigkeit v_p . Deren Einfluss kann allerdings praktisch vernachlässigt werden (Dal Moro, 2014) – oder umgekehrt formuliert: die Kompressionswellengeschwindigkeit und die Dichte lassen sich nicht (in seriöser Weise) mittels Oberflächenwellen-Auswertung bestimmen.

In einem nicht-homogenen Medium zeigen die Oberflächenwellen zudem dispersiven Charakter. Dies bedeutet, dass die Phasengeschwindigkeit von der Frequenz abhängig ist (tatsächlich tritt die Love-Welle nur in einem geschichteten Medium auf).

Durch eine Transformation der Felddaten aus dem Distanz-Laufzeit-Raum in den Frequenz-Phasengeschwindigkeit-Raum wird ein Phasengeschwindigkeitsspektrum erzeugt (Park et al., 1999, Abb. 4). Es ist zu beachten, dass mit dem Begriff „Geschwindigkeitsspektrum“ nicht etwa die aus hinlänglich bekannten SASW- oder MASW-Auswertungen modalen Dispersionskurven gemeint sind sondern die gesamte Matrix an Korrelations-Faktoren im Frequenz-Geschwindigkeits-Diagramm. Im englischen Sprachraum wird dafür auch der Begriff „apparent“ oder „effective dispersion“ verwendet (Tokimatsu et al. 1992, Dal Moro et al. 2004).

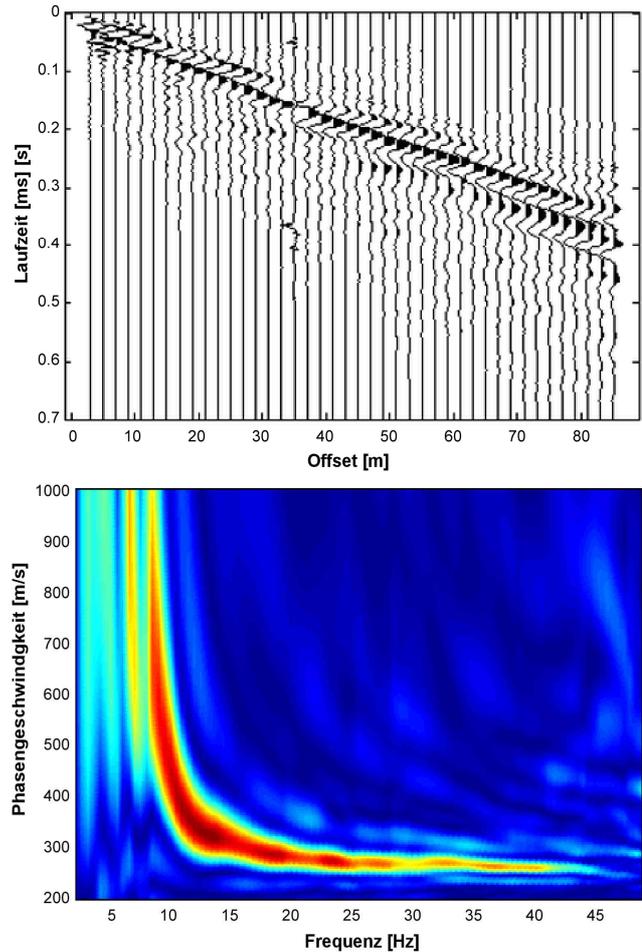


Abb. 4: oben: Seismische Felddaten (Vertikalkomponente der Rayleigh-Welle von einer Shotgun-Quelle). Unten: die entsprechende Transformation als Phasengeschwindigkeitsspektrum. Im Farbbild sind die Korrelationsfaktoren wiedergegeben, in hellen Grautönen hohe Amplituden der Korrelationsfaktoren, in schwarz geringe.

3.1 Full Velocity Spectrum (FVS) Inversion

Um aus dem Geschwindigkeitsspektrum ein Scherwellen-Tiefen-Modell zu gewinnen, werden die Dispersions-eigenschaften invertiert. Meist wird dabei das Geschwindigkeitsspektrum in Form von Dispersionskurven – eine Serie von Frequenz-Geschwindigkeitspaaren an den Stellen maximaler Amplituden im Spektrum – verwendet. Die Bestimmung der Dispersionskurve unterliegt (manuell oder halbautomatisch ausgeführt) einer hohen – und oft fehlerhaften – Subjektivität: nicht immer entspricht eine kontinuierliche Dispersionskurve tatsächlich nur einem Mode; im Gegenteil, sie kann einem schwer zu erkennenden Modensprung entsprechen (siehe Abb. 6).

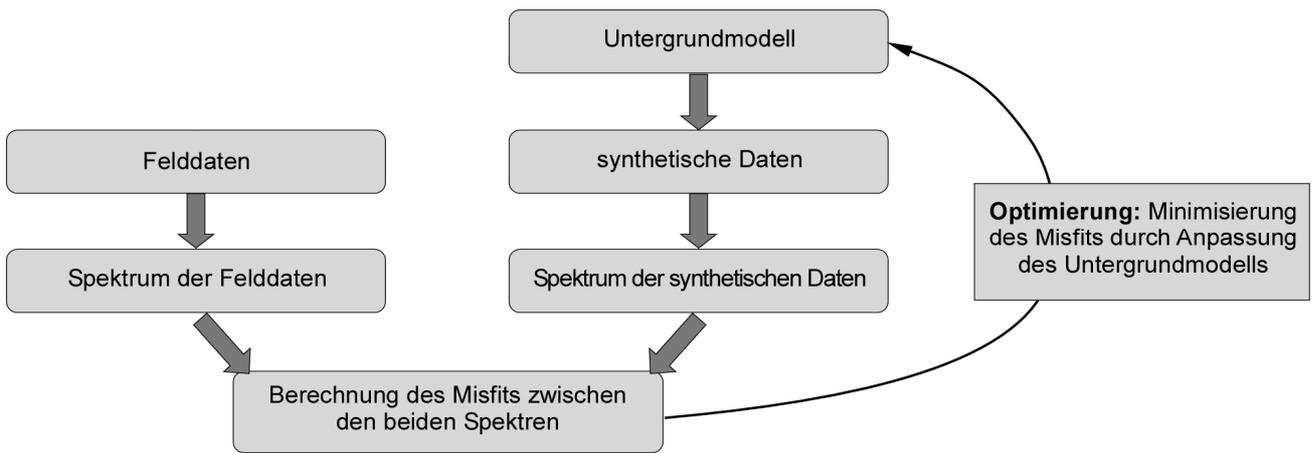


Abb. 5: Ablaufschema einer Full Velocity Spectra Inversion.

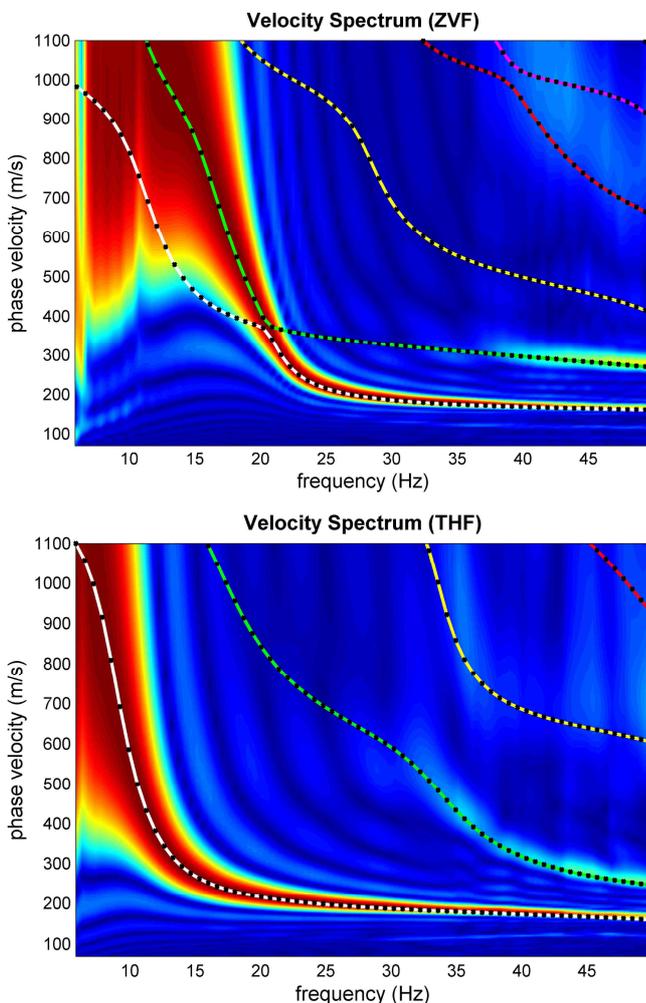


Abb. 6: Geschwindigkeitsspektrum von synthetischen seismischen Daten der Rayleigh-Welle (oben) und Love-Welle (unten) mit berechneten Dispersionskurven verschiedener Moden (gepunktete Linien unterschiedlicher Farben). Das kontinuierlich erscheinende Amplitudenmaximum der Rayleigh-Welle zwischen 25 und 80 Hz weist bei 20 Hz einen Modensprung auf. Die Dispersionskurve der Love-Welle zeigt keinen Modensprung (aus: Dal Moro, 2014).

Damit solche subjektiven Interpretationen in der Grundlage der Inversion verhindert werden können (Problemkreis 4), wurde bei den Inversionen von Geschwindigkeitsspektren eine rein objektive FVS-Inversion (*full velocity spectrum inversion*) angewendet (Abb. 5, Dal Moro, 2014). Dabei werden von einem Startmodell synthetisch seismische Spuren generiert, davon das Geschwindigkeitsspektrum berechnet und anschliessend mit einem Genetischen Algorithmus (Lomax et al., 1994) der Fehler zwischen gemessenem und modelliertem Spektrum durch Anpassungen im Untergrundmodell (v_s und Z , untergeordnet auch p und v_p) iterativ minimiert.

3.2 Verteilung der Grundfrequenzen (Nakamura)

Die Auswertung der passiv-seismischen Messdaten folgte den Empfehlungen des Sesame-Projekts (Sesame, 2004). Die für die im Folgenden vorgestellten Inversionen weiterverwendeten Kurven weisen industriell bedingte Peaks bei 8.3 Hz und bei 16.6 Hz auf. Sie können den Erschütterungen eines nahe gelegenen Freiluft-Umspannwerks zugeordnet werden und haben keine Relevanz für das Untergrundmodell.

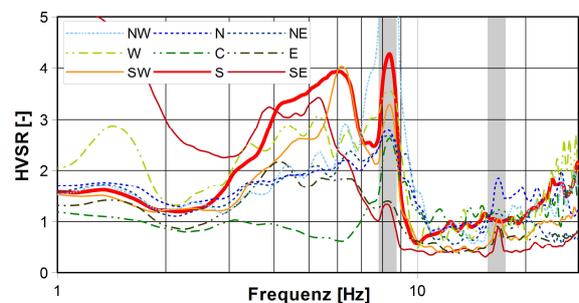


Abb. 7: HVSR-Kurven aller Messpunkte. Die beiden Peak-Serien bei 8.3 und 16.6 Hz (grau hinterlegt) sind industriell bedingt. Als zusätzliche Randbedingung für die Dateninversion der aktiven Daten wurde die dick ausgezogene Kurve vom Messpunkt „S“ auf dem Mittelpunkt des Arrays verwendet.

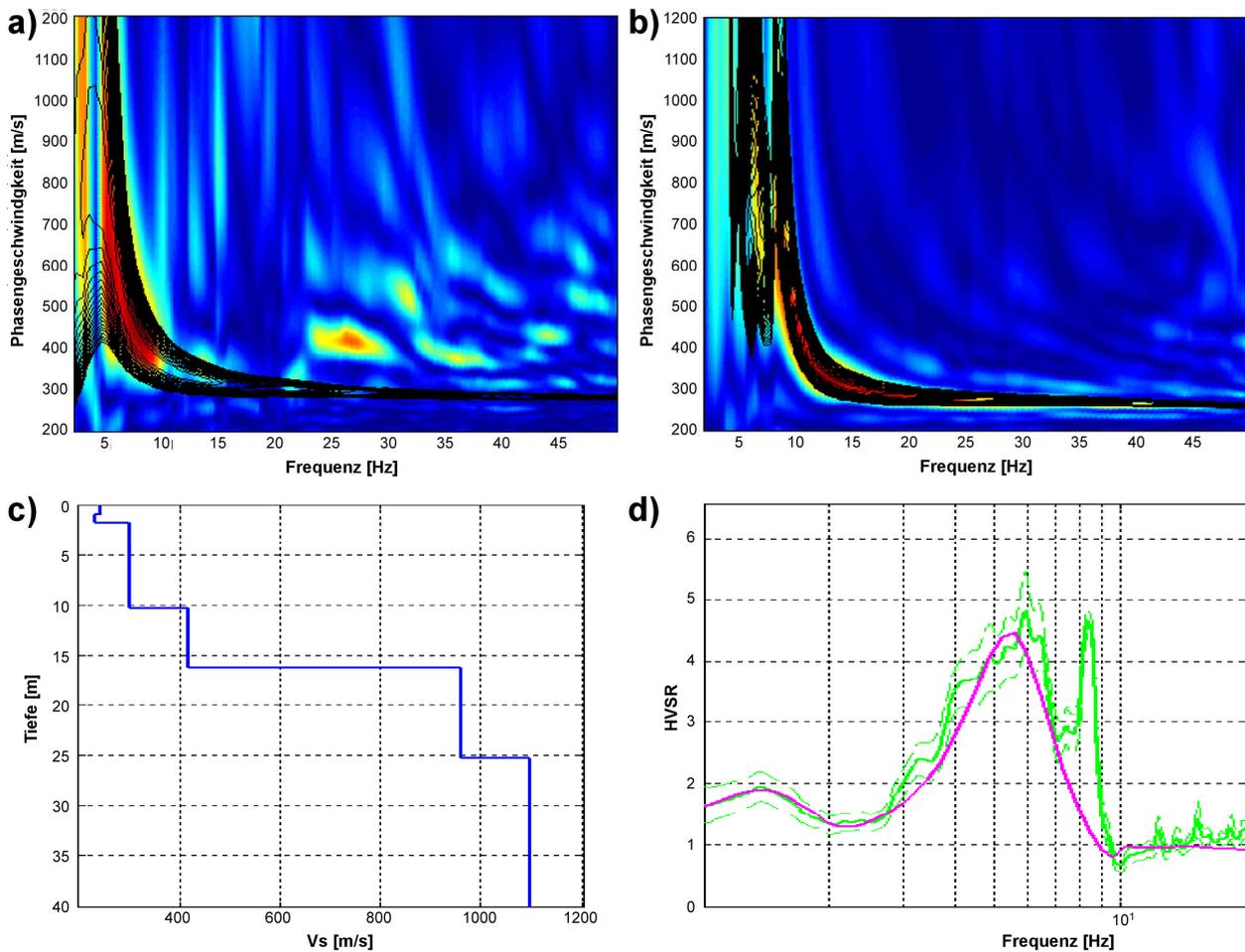


Abb. 8: Ergebnisse der MASW-Inversion. a) Spektrum der Vertikalkomponente und b) Spektrum der Love-Welle, jeweils gemessene (Farbbild) respektiv modellierte (schwarze Isolinien) Werte. c) das Geschwindigkeits-Tiefen-Modell bis 40 m unter Terrain. d) die HVSR-Kurve gemessen (grüne Kurve) und modelliert (magenta Kurve) unter Berücksichtigung eines Impedanz-Kontrasts in 200 m Tiefe.

3.3 Joint-Analyse von MASW und HVSR

Die Mehrkanal-Messungen wurden in Form einer Drei-Zielfunktionen-Inversion (Vertikal- und Horizontalkomponente der Rayleigh-Welle und die Love-Welle) ausgewertet. Das best-passende, resultierende Geschwindigkeitsmodell ist in Abb. 8c dargestellt. Die Modellierung der HVSR-Kurve mit diesem Modell zeigte, dass diese zwischen 1 und 10 Hz sehr gut übereinstimmt – höhere Frequenzen sind in geotechnischen Fragestellungen meist irrelevant –, wird der leichte Peak bei ca. 1.4 Hz nicht abgebildet. Erst ein zusätzlich eingefügter Impedanzkontrast in rund 200 m Tiefe, allerdings etwas schwächer ausgebildet als der Sprung von v_s 17 m unter Terrain, ermöglicht auch im tiefen Frequenzbereich zwischen 1 und 2 Hz eine gute Kongruenz zwischen gemessener und modellierter HVSR-Kurve (Abb. 8d).

3.4 Joint-Inversion von MFA und RVSR

Die getriggerten Daten des einzelnen 3C-Geophons der MFA-Messung erlauben keine Bestimmung der Phasengeschwindigkeit (dazu sind mehrere Empfänger in unterschiedlicher Distanz zur Quelle notwendig). Mittels MFA (*multiple filter analysis*, Dziewonski et al. 1996, Mars et al. 1994, Dal Moro 2015) wird von den drei einzelnen Seismogrammen je ein Gruppengeschwindigkeitsspektrum berechnet (Abb. 9, oben und Mitte) und mittels Genetischem Algorithmus ebenfalls zu einem v_s -Tiefen-Profil (joint-)invertiert. Als dritte Zielfunktion wird zudem – analog zu HVSR – die Rayleigh-Elliptizität (RVSR, *radial-to-vertical-spectral ratio*, Abb. 9, unten) berechnet und mit ausgewertet (als Randbedingung zur weiteren Eingrenzung der möglichen v_s -Modelle oder direkt in den Joint-Inversions-Prozess eingebunden).

Abb. 10 zeigt die best-passenden Modelle der Triple-Zielfunktions-Analyse (Spektren der vertikalen und horizontalen Rayleigh-Wellen-Komponente sowie die RVSR-Kurve) via *Full Velocity Spectra*-Inversion. Daraus ist ersichtlich, dass die v_s -Modelle erst in Tiefen grösser als ungefähr $\frac{2}{3}$ der Quelle-Empfänger-Distanz auseinanderdriften und nicht mehr belastbar sind.

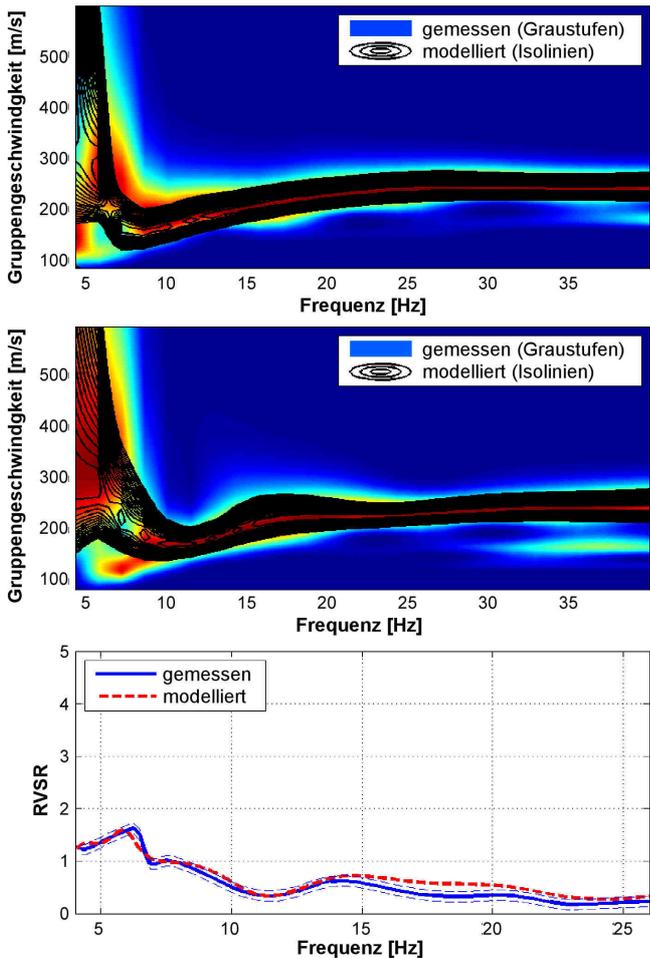


Abb. 9: MFA-(Gruppengeschwindigkeits-)Spektrum der Vertikal- (oben) resp. der Radialkomponente (Mitte). Unten: RVSr der gemessenen (blau) und modellierten (rot) Daten.

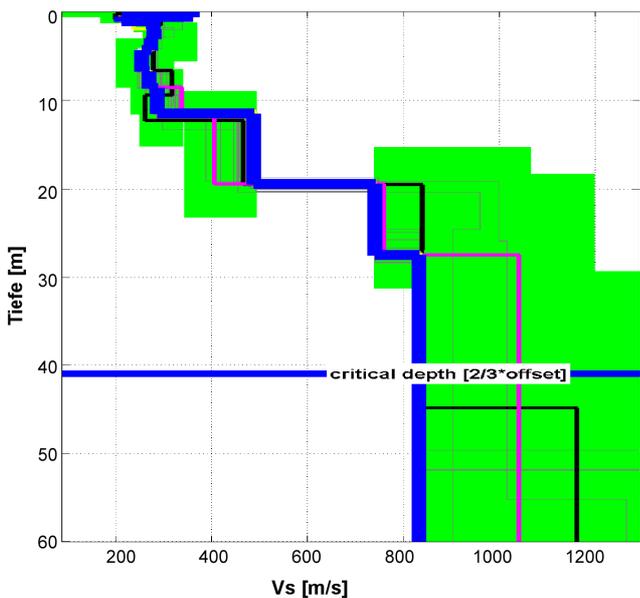


Abb. 10: Ergebnisse der Gruppengeschwindigkeits-Inversion in Kombination mit der RVSr-Kurve. Grün: Suchbereich der v_s -Modelle. Fette Linien: Best-passende v_s -Modelle der einzelnen Zielfunktionen.

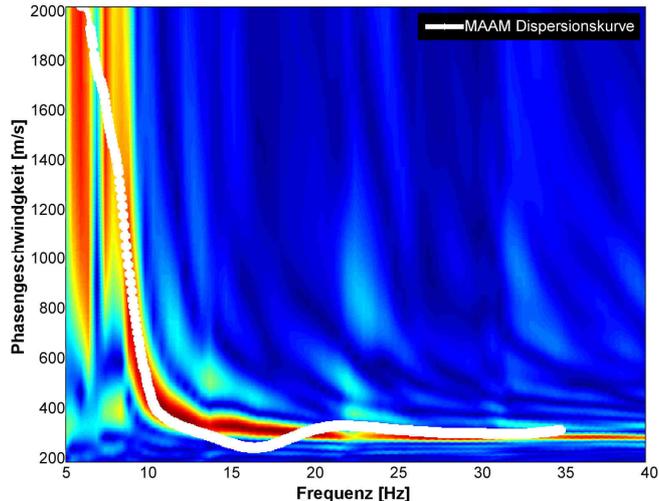


Abb. 11: Das Phasengeschwindigkeitsspektrum der MASW-Daten (Vertikalkomponente der Rayleigh-Welle, als Farbbild) ist praktisch deckungsgleich mit dem überlagerten Spektrum der MAAM-Daten (weiss gepunktete Linie). Die Unterschiede bei Frequenzen >14 Hz sind bedingt durch die stark veränderte Oberflächenbeschaffenheit durch die fortschreitende Bautätigkeit zwischen den Einzelmessungen.

3.5 Spektralanalyse MAAM-Messungen

Die Auswertung der MAAM-Messungen zeigt ein vielversprechendes Phasengeschwindigkeitsspektrum, welches praktisch identisch ist mit dem entsprechenden Spektrum der MASW-Messung (Vertikal-Komponente der Rayleigh-Welle).

3.6 Ergebnisse

Der Vergleich der berechneten v_s -Profile am Standort Ambassador House in Opfikon zeigt (Abb. 12), dass bis ca. 15 m unter Terrain eine sehr hohe Übereinstimmung der verschiedenen Scherwellen-Geschwindigkeitsmodelle und bis 30 m eine immer noch recht gute Kongruenz der Werte besteht. Erst ab einer Tiefe von mehr als 30 m variieren die Modelle in einer – immer noch akzeptablen – Bandbreite von +/- 20% um ein mittleres Modell.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Am Standort des Ambassador House in Opfikon wurde mittels oberflächenseismischer Messungen die Datengrundlage für eine seismische Standortanalyse (Weber et al., 2015) gelegt. Die angewendeten, automatisierten Algorithmen erlauben eine ausschlaggebende Reduktion der fehleranfälligen und der Subjektivität unterliegenden Schritte (beispielsweise dem Picken von Dispersionskurven und der Zuweisung des entsprechenden Modus).

Die Vielzahl an ausgeführten Messungen sowohl der passiven (HVSr und MAAM) als auch der aktiven

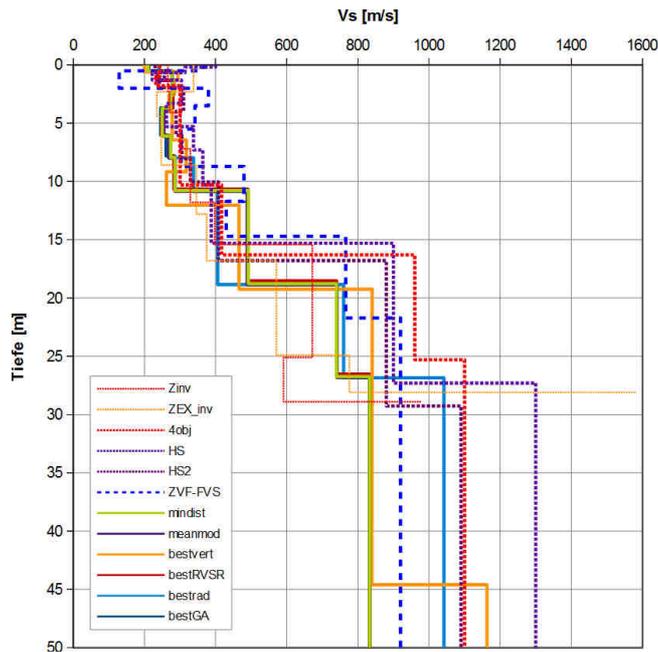


Abb. 12: Darstellung einiger v_s -Modelle der verschiedenen Auswertungen am Standort Ambassador House in Opfikon.

Seismik (MASW und MFA) erlauben des Weiteren vielfältige Kombinationen geeigneter Datensätze für erfolgreiche verknüpfte Inversionen. Daraus folgt eine verbesserte Aussagesicherheit in den Ergebnissen.

In der hier vorgestellten seismischen Standortanalyse wurden nur die Oberflächenwellen analysiert. Dies hat den Vorteil, dass auch Geschwindigkeitsinversionen erfasst werden, was mit refraktionsseismischen Methoden alleine nicht in genügender Genauigkeit möglich ist.

Die Ergebnisse der erstmals in der Schweiz ausgeführten MAAM-Messungen zeigen im Weiteren, dass mit dem zusätzlich reduzierten Feldaufwand ein vielversprechendes Verfahren zur raschen und günstigen Abschätzung eines Scherwellengeschwindigkeitsprofils an einem Untersuchungsstandort bildet. In Kombination mit einer Joint-Inversion 2C- oder 3C-MASW-Seismik könnte in Zukunft in vielen einfacheren Standortuntersuchungen auf aufwändige und teure Crosshole-Tests verzichtet werden.

5 DANKSAGUNG

Wir danken der Bauherrschaft und dem Planer für die Erlaubnis, die präsentierte Arbeit vorstellen zu dürfen.

6 LITERATUR

BWG (2004), Verfahren zur Erstellung und Verwendung von Mikrozonierungsstudien in der Schweiz, Richtlinien BWG.
 Cho, I., Tada, T., Shonzaki, Y. (2006), Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records, *Journal of Geophysical Research*, 111, B09315.

Cho, I., Senna, S., Fujiwara, H. (2013), Miniature array analysis of microtremors, *Geophysics*, 78, KS13-23.

Dal Moro, G., Keller, L., & Poggi, V., (2015), A Comprehensive Seismic Characterization via Multi-Component Analysis of Active and Passive Data, *First Break*, accepted, in press.

Dal Moro, G., Coviello V., & Del Carlo G., (2013), Shear-Wave Velocity Reconstruction via Unconventional Joint Analysis of Seismic Data: a Case Study in the Light of Some Theoretical Aspects, *Engineering Geology for Society and Territory*, 5, 1177-1182.

Dal Moro, G. (2014), Surface wave analysis for near surface applications, Elsevier, Amsterdam.

Dal Moro, G., Ponta, R., Mauro, R. (2015), Unconventional Optimized Surface Wave Acquisition and Analysis: a Geotechnical Application in a Perilagoon Area, *Journal of Applied Geophysics*, 114, 158-167.

Dziewonski, A., Bloch, S., & Landisman M. (1969), A technique for the analysis of transient seismic signal, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59, 427-444.

Lomax, A. & Snieder, R. (1994), Finding sets of acceptable solutions with a genetic algorithm with application to surface wave group dispersion in Europe, *Geophysical Research Letters*, 21, 2617-2620.

Mars, J. & Pedersen, H., (1992), Separation of dispersive waves and phase velocities enhancement, 62th Meeting of Society of Exploration Geophysicists, SEG-92, New Orleans, 1223-1226.

Nakamura, Y., (1989), A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quarterly Report Railway Technical Research Institute*, 30, 25-33.

Ohori, M., Nobata, A., Wakamatsu, K. (2002), A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 2323-2332.

Park, C.B., Miller, R.D. & J. Xia. (1999), Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 63, 800-808.

SIA 261 (2014), Einwirkungen auf Tragwerke, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

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

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

Tokimatsu, K., Tamura, S., Kojima, H. (1992), Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics, *Journal of Geotechnical Engineering*, 118, 10, 1529pp.

Weber T. M., Laue, J., & Keller, L. (2015), Seismische Standortanalyse des Ambassador House Opfikon - Standortsspezifische Bestimmung der Erdbebenanregung als Bemessungsgrundlage von Ertüchtigungsmassnahmen, in: Erdbeben und bestehende Bauten, SIA D 0255, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.