

## Erdbebenberechnungen bei Staudämmen

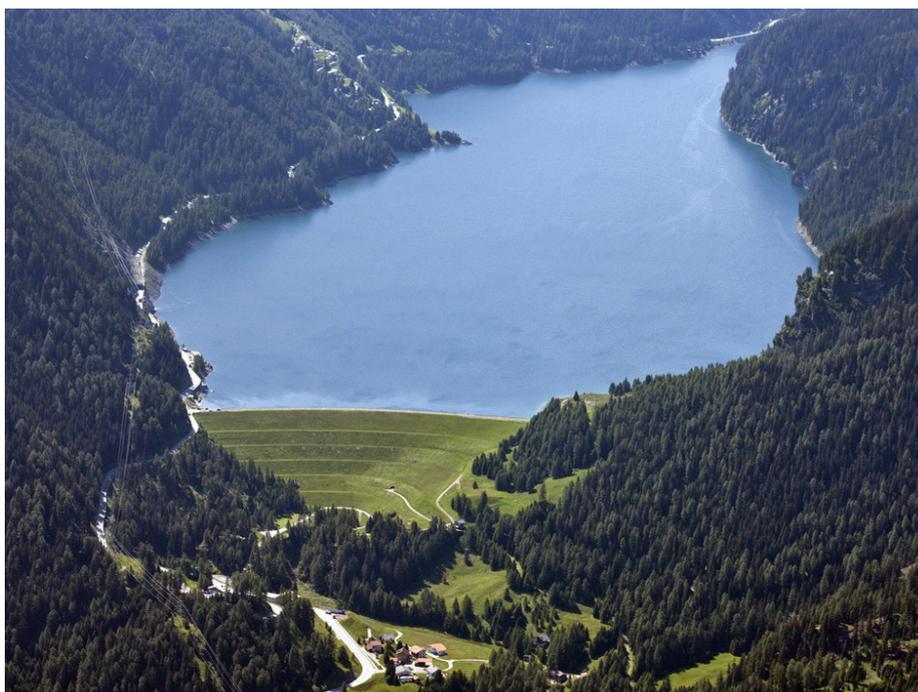
### *Bestimmung des maximalen Schermoduls basierend auf geophysikalischen Messungen am Beispiel der Stauanlage Marmorera*

Thomas M. Weber, Dr. sc. techn.  
Studer Engineering GmbH, Thurgauerstrasse 56, 8050 Zürich

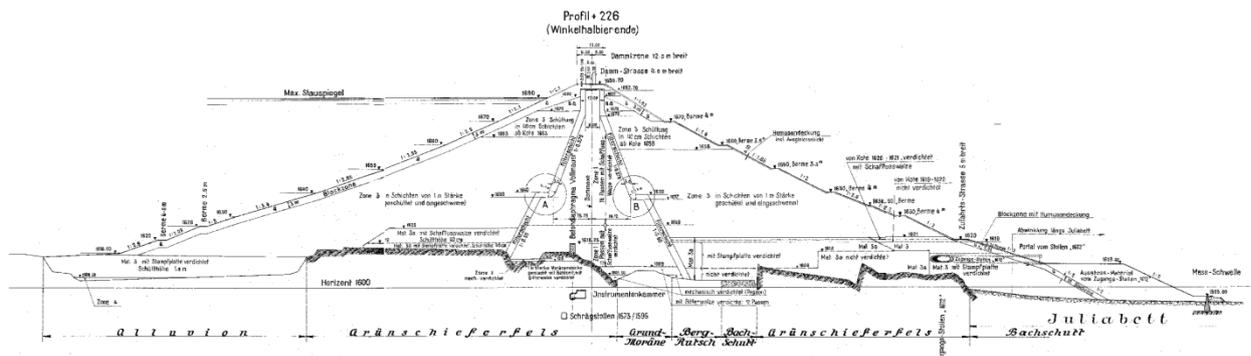
## 1 Einführung

Nach den Richtlinien des Bundesamtes für Energie - Sicherheit von Stauanlagen (BWG 2003) wurden alle Stauanlagen der Schweiz unter Aufsicht des Bundes bis zum Jahr 2013 auf ihre Erdbebensicherheit überprüft. Dies betrifft auch die Stauanlage Marmorera, die vom ewz betrieben wird und sich in Graubünden im Surses unterhalb des Julierpasses befindet.

Beim Staudamm Marmorera handelt es sich um einen gezonten Erdschüttdamm mit Kerndichtung, Filterschicht und Stützkörper. Es wurden ausschliesslich lokale Erdmaterialien bestehend aus Moräne, Bergsturzmateriale und Gehängeschutt im Dammkörper verbaut. Bei der Herstellung des Dammes wurde der Dichtungskern mit Schaffussswalzen verdichtet und der Stützkörper mit Hochdruckwasserstrahlen eingeschwenmt (Zingg 1953). Auf der Wasserseite wurde eine Schutzschicht mit grobem Blockmateriale gegen Wellenschlag angeordnet. Die Luftseite des Dammes ist mit Humus bedeckt und begrünt. Die Dammfussbereiche sind durch Blocksatz stabilisiert. Eine Luftbildaufnahme sowie der Hauptquerschnitt Profil +226 sind in Bild 1 bzw. Bild 2 dargestellt.



**Bild 1:** Luftbild der Stauanlage Marmorera



**Bild 2: Hauptquerschnitt Profil +226 durch den Staudamm Marmorera**

Mit einer maximalen Dammhöhe von 91 m und einem Reservoirvolumen von ca. 60 Mio. m<sup>3</sup> gehört die Stauanlage Marmorera zur Talsperrenklasse I - grosse Stauanlagen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Kennzahlen der Stauanlage. Aufgrund der Grösse der Anlage werden erhöhte Anforderungen an die Erdbebensicherheit und die Nachweisführung der Stauanlage gestellt. Dies beinhaltet beispielsweise die Forderung nach Messungen von Bodenkennwerten und den rechnerischen Nachweis des Staudammes mit numerischen Methoden im Zeitverlaufsverfahren (BWG 2003).

**Tabelle 1: Kennzahlen der Stauanlage Marmorera**

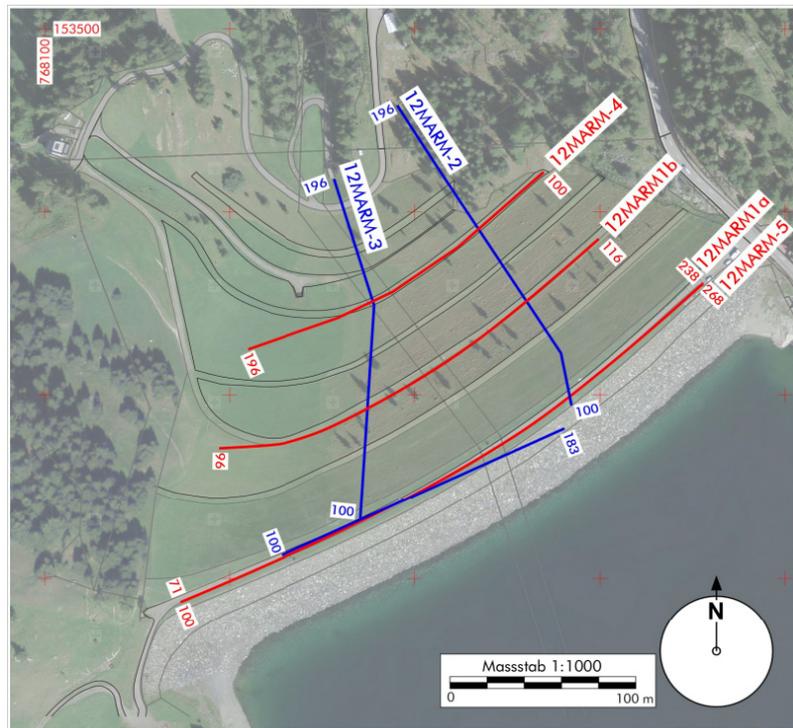
Dammtyp	gezonter Erdschüttdamm mit Kerndichtung
maximale Dammhöhe	91 m
Kronenlänge	400 m
Kronenkote	1684.40 m ü.M.
Fundationskote	1593.40 m ü.M.
Dammbreite Krone	12 m
Fussbreite	400 m
Böschungsneigung Wasserseite	variabel min. 1 V : 2.1 H
Luftseite	variabel min. 1 V : 1.63 H
Dammvolumen	2.7 Mio. m <sup>3</sup>
Stauzielkote	1680.00 m ü.M.
totales Volumen des Reservoirs	ca. 60 Mio. m <sup>3</sup>
Beginn des Bauprojekts	1949
Jahr des ersten Vollstaus	1954
Talsperrenklasse	Klasse I

Für die Mehrzahl der geotechnischen Bodenparameter stehen umfangreiche Untersuchungen aus der Bauzeit sowie aus dem Betrieb der Anlage zu Verfügung. Für die dynamischen Bodenkennwerte wird bei der Erdbebenüberprüfung der Schwerpunkt auf Feldversuche mit geophysikalischen Messungen des Dammes gelegt. Mittels seismischer Tomographie wird ein räumliches Modell der Scherwellengeschwindigkeiten des Dammes und des Untergrundes erstellt. Der vorliegende Artikel geht auf die geophysikalischen Messungen am Staudamm ein und beschreibt die Kalibrierung des dynamischen Schermoduls für das numerische Berechnungsmodell des Dammes.

## 2 Geophysikalisches Messprogramm

Bereits in den 1940-er Jahren wurden geophysikalische Untersuchungen mittels P-Wellen Refraktionsseismik zur Bestimmung des Felshorizontes und der Lockergesteinsmächtigkeit durchgeführt. Die alten Messergebnisse sind jedoch für die geforderte Erdbebenanalyse kaum aus-

sagekräftig. Aus diesem Grund wurde im Jahr 2012 durch die Firma roXplore gmbh ein umfangreiches seismisch-geophysikalisches Untersuchungsprogramm durchgeführt (Keller 2012). Als Methoden wurden Refraktionsseismik und MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) von der Dammoberfläche, Tomographiemessungen von der Dammoberfläche zu den Kontrollgängen im Damminneren sowie H/V-Messungen an der Dammoberfläche durchgeführt. Eine Übersicht der gemessenen Profile ist in Bild 3 dargestellt. Bild 4 zeigt Teile der Geophonauslage auf der Dammkrone und im Kontrollgang sowie den Scherwellenvibrator zur Anregung eines harmonischen Scherwellensweeps.



**Bild 3:** Lageplan der Profilmessungen (Keller 2012), rot - Arrays auf der Dammoberfläche, blau - Arrays im Kontrollgang des Damminneren

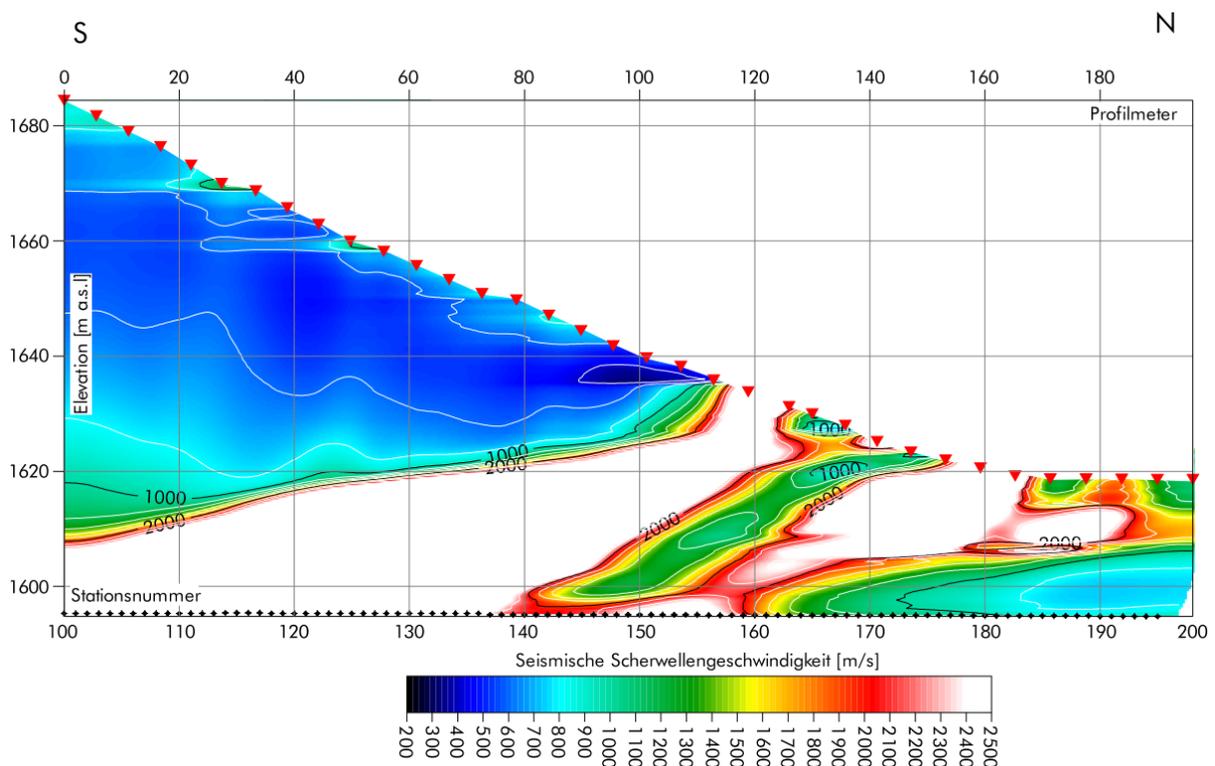


**Bild 4:** Seismisch geophysikalische Messungen, links: Anregung von Scherwellen auf der Dammkrone mit Scherwellen-Vibrator und Geophonauslage; rechts; Geophonauslage im Kontrollgang des Dammes (Keller 2012)

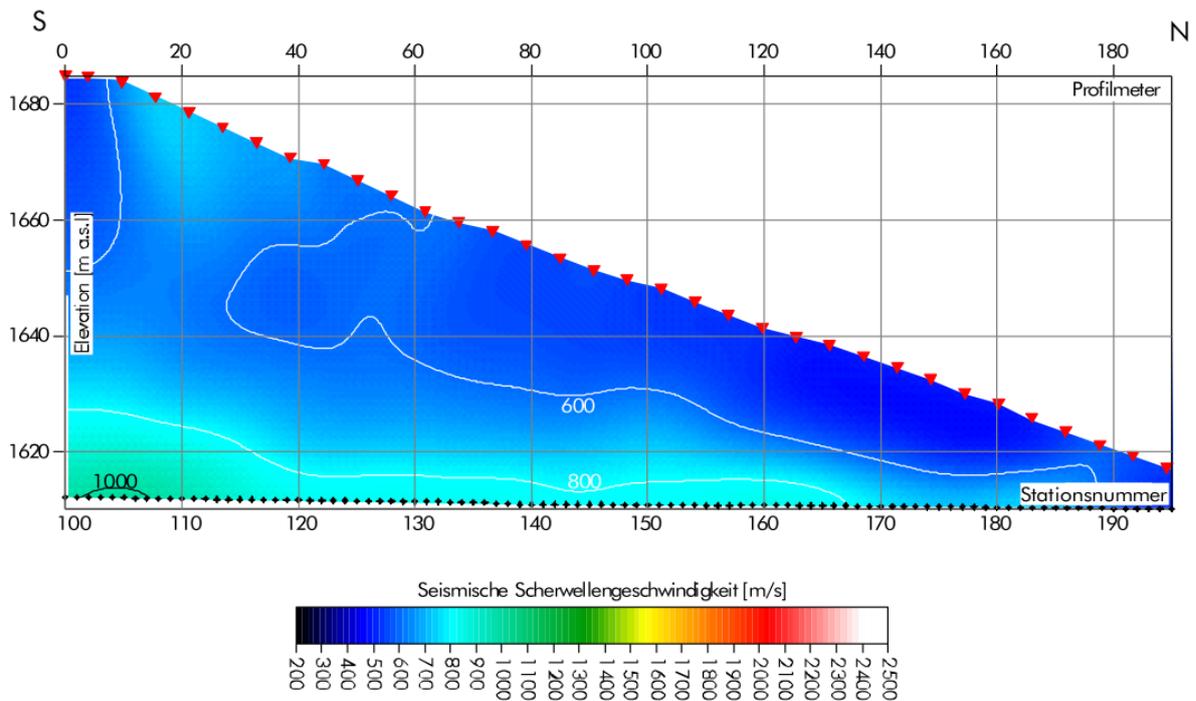
Insgesamt wurden 4 tomographische Profile aufgenommen, zwei Profile in Dammmachse und zwei Profile im Dammquerschnitt. Die tomographischen Messungen sind möglich, da der Staudamm in Dammmachse und auf der Luftseite quer zur Dammmachse über mehrere Kontrollgänge verfügt. Die Kontrollgänge verlaufen im Grundriss entsprechend den Messprofilen 12MARM-1a, 12MARM-2 und 12MARM-3 in Bild 3. Die Wellenanregung erfolgt an der Dammoberfläche, während in den Kontrollgängen die Receiver angeordnet werden (siehe Bild 4). Ausgewählte Ergebnisse der Tomographiemessungen sind in den Abbildungen Bild 5 bis Bild 7 dargestellt.

Die beiden tomographischen Profile im Dammquerschnitt (Bild 5 und Bild 6) zeigen eine relativ homogene Struktur des Dammkörpers. Die Scherwellengeschwindigkeiten variieren zwischen 500 m/s und 800 m/s. In Bild 5 ist deutlich der Felshorizont mit einer Scherwellengeschwindigkeit von ca. 2500 m/s zu erkennen, da dieser Kontrollgang des Querschnittes 12MARM-2 ausschliesslich unter dem Dammkörper im Fels verläuft. Die Tomographie gibt mit verminderten Scherwellengeschwindigkeiten auch Hinweise auf eine geologische Störzone im Fels.

Auffällig bei den tomographischen Querschnittsmessungen ist, dass sich der Dammkern, der Filter und der Stützkörper nicht durch eine wesentlich andere Scherwellengeschwindigkeit voneinander unterscheiden. Dieses Phänomen kann vor allem mit der ähnlichen geologischen Herkunft und Charakteristik der Materialien begründet werden. Der Vergleich der Sieblinien zeigt, dass nur der Kernbereich einen grösseren Feinkornanteil besitzt, das Korngerüst mit Grösstkorn Kies bzw. Steinen aber recht ähnlich ist. Die Lagerungsdichten aller Materialien sind aufgrund des verdichteten Einbaus hoch, und die entsprechenden Raumgewichte weisen nur geringe Unterschiede auf.

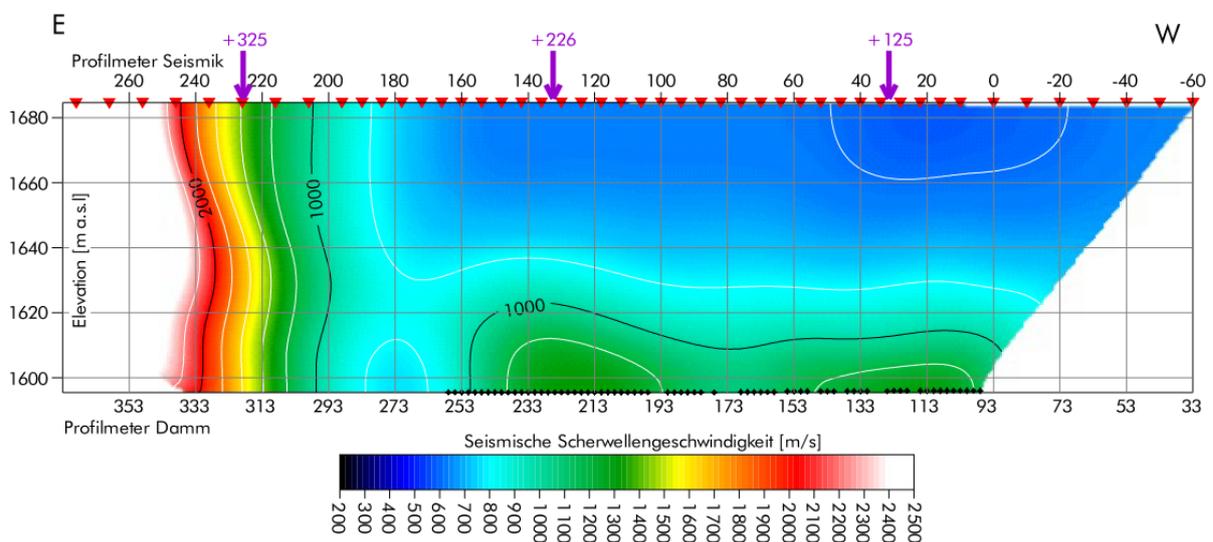


**Bild 5: Tomographie des luftseitigen Dammkörpers im Schnitt 12MARM-2 in Bild 3 mit Anregung an der Dammoberfläche und Messung im Kontrollgang 1595 (Keller 2012)**



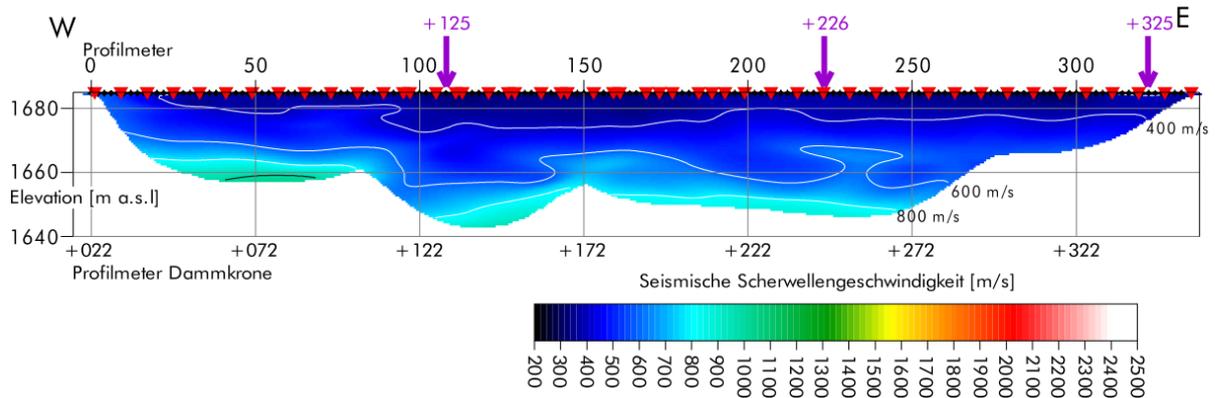
**Bild 6: Tomographie des luftseitigen Dammkörpers im Schnitt 12MARM-3 in Bild 3 mit Anregung an der Dammoberfläche und Messung im Kontrollgang 1615 (Keller 2012)**

Bild 7 zeigt den tomographischen Längsschnitt des Dammes entlang der Dammkrone (12MARM1a in Bild 3). Die Messwerte zeigen verhältnismässig konsistente Werte im Vergleich zu den tomographischen Querschnitten. Der Felsverlauf an der Ostseite des Dammkörpers (Bild 7 linker Bereich) kann aufgrund der Kontrollgangführung und begrenzten räumlich Anordnung der Geophonauslage nicht zuverlässig bestimmt werden.

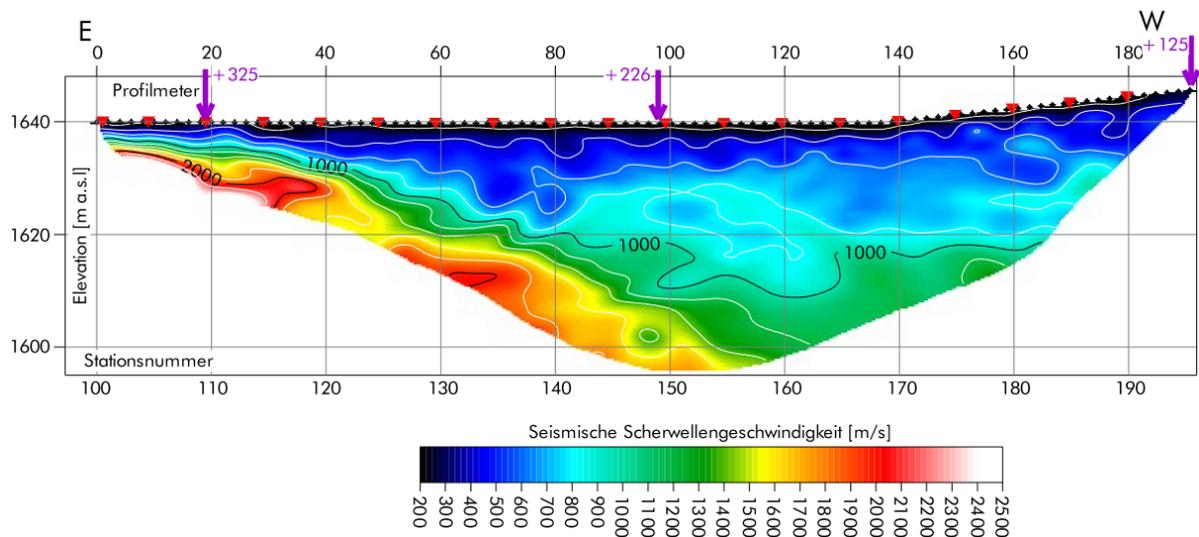


**Bild 7: Tomographie in Dammachse im Schnitt 12MARM1a in Bild 3 mit Anregung auf der Dammkrone und Messung im Kontrollgang 1595 (Keller 2012)**

Die Ergebnisse der Refraktionsseismik sind in den folgenden beiden Abbildungen Bild 8 und Bild 9 zusammengefasst. Die Scherwellengeschwindigkeiten des Dammkörpers liegen im Bereich zwischen 300 m/s bis 800 m/s. Bei der Messung auf der Berme 1640 (Bild 9) ist deutlich der Felshorizont mit Scherwellengeschwindigkeiten von ca. 2'000 m/s zu erkennen.



**Bild 8: Refraktionsseismik in Dammmachse entlang der Dammkrone (Schnitt 12MARM-5 in Bild 3) (Keller 2012)**



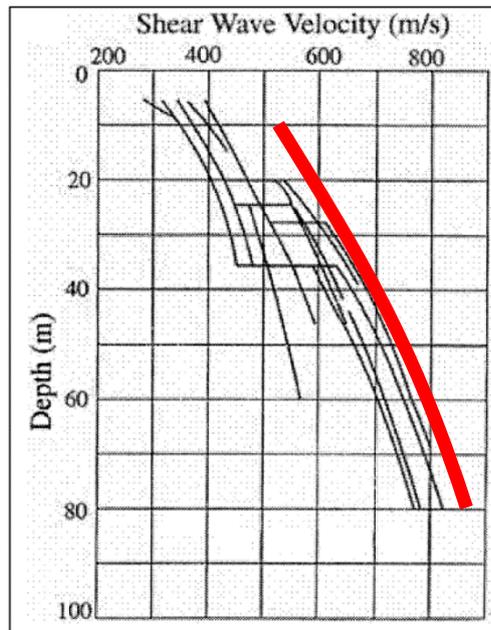
**Bild 9: Refraktionsseismik in Dammmachse entlang der Berme 1640 (Schnitt 12MARM-4 in Bild 3) (Keller 2012)**

Die geringeren gemessenen Scherwellengeschwindigkeiten der Refraktionsseismik an der Dammoberfläche im Vergleich zu den Ergebnissen der Tomographiemessungen sind durch die höhere Auflösung der Oberflächenseismik in Oberflächennähe zu begründen.

Mit den geophysikalischen Untersuchungen wurde die Scherwellengeschwindigkeiten des Dammkörpers und des Felsuntergrundes auf der Luftseite des Dammes gemessen. Die Messdaten zeigen im Allgemeinen konsistente Ergebnisse. Im Vergleich zu Angaben von Sawada & Takahashi (1975) liegen die Scherwellengeschwindigkeiten des Dammkörpers Marmorera im Bereich hoher Scherwellengeschwindigkeiten, wie in Bild 10 dargestellt ist. Basierend auf der Refraktionsseismik liegen die Scherwellengeschwindigkeiten in 20 m Tiefe bei ca.  $v_s \approx 600$  m/s und basierend auf der Tomographiemessung in 80 m Tiefe im Bereich zwischen  $v_s \approx 800$  m/s bis 1000 m/s.

Die Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit im Dammkörper wird als Datenbasis verwendet, um den maximalen Schermodul als dynamischen Bodenparameter für die numerische Berechnung zu kalibrieren.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die H/V-Messungen auf dem Dam keine verwertbaren Ergebnisse brachten. Durch die Topographie des Dammes konnten die gemessenen H/V-Maxima keiner Schwingperiode des Dammes zugeordnet werden, selbst wenn man die Direktivität der Wellenausbreitung im Dammkörper berücksichtigt. Die Methode H/V nach Nakamura (1989) gilt für horizontal geschichteten Halbraum und kann nicht direkt auf Dammstrukturen übertragen werden.



**Bild 10: Scherwellengeschwindigkeit des Dammkörpers Marmorera in Rot im Vergleich zu Werten nach Sawada & Takahashi (1975)**

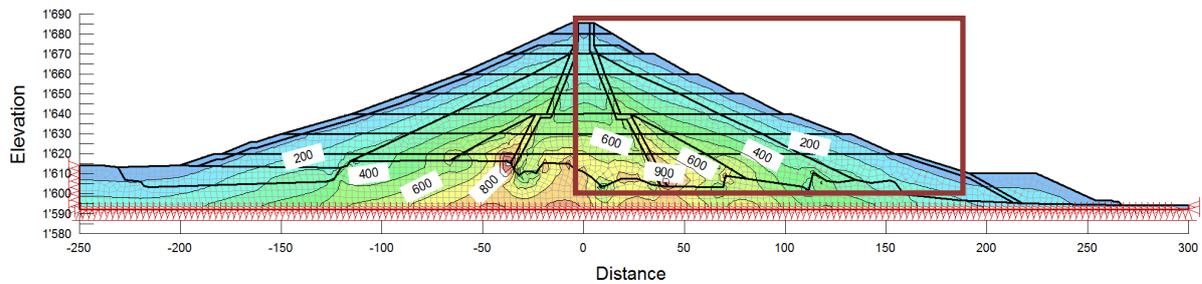
### 3 Kalibrieren des maximalen Schermoduls

Der maximale Schermodul  $G_{\max}$  und die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  stehen mit Einfluss der Dichte in einem direkten Zusammenhang:  $G_{\max} = v_s^2 \cdot \rho$ . Hierbei wird davon ausgegangen, dass die durch Scherwellen verursachten Scherdehnungen in einem sehr kleinen Dehnungsbereich liegen ( $\gamma < 10^{-6}$ ). Die Dichte der Dammkörpermaterialien beim Staudamm Marmorera beträgt laut geotechnischen Berichten im Mittel  $2.3 \text{ g/cm}^3$ .

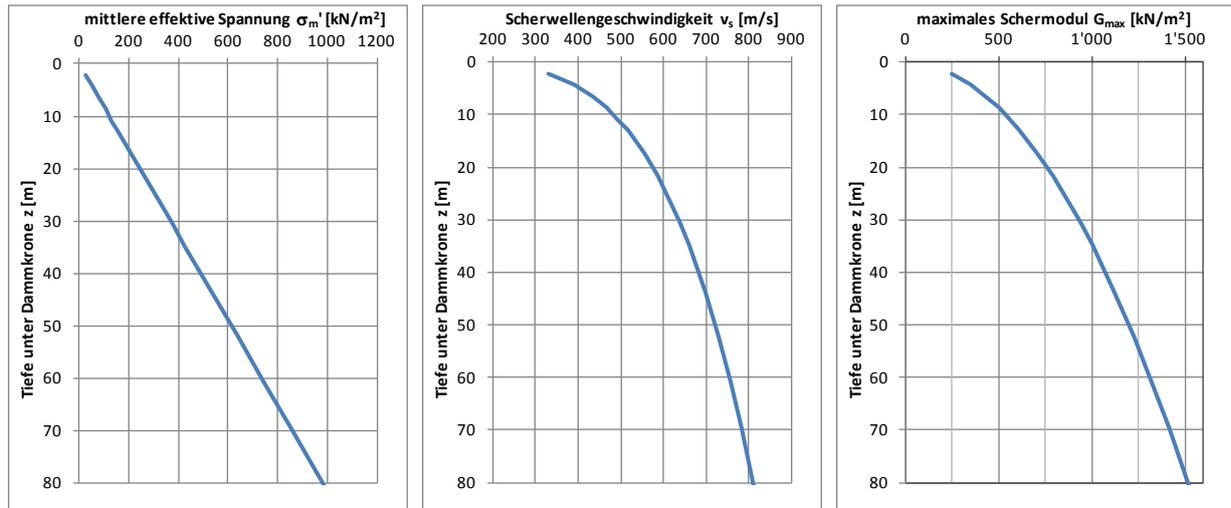
Nach Seed & Idriss (1970) bzw. Seed et al. (1984) kann der maximale Schermodul  $G_{\max}$  in Abhängigkeit von der mittleren effektiven Spannung  $\sigma_m'$  dargestellt werden. Die Korrelation ist wie folgt angegeben:

$$G_{\max} = 220 K_2 (\sigma_m')^{0.5} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Der Parameter  $K_2$  wird mittels der Scherwellengeschwindigkeit der geophysikalischen Messergebnisse und einer Spannungsanalyse geeicht. Basierend auf der Analyse des Eigenspannungszustandes des Dammes mit elastisch-plastischem Stoffverhalten (Mohr-Coulomb) ist die Verteilung der mittleren effektiven Spannungen  $\sigma_m'$  im Lockergestein des Dammkörpers in Bild 11 dargestellt. Das rote Rechteck entspricht der Tomographiemessung in Bild 6. Dabei ergeben sich in der Dammaufstandsfläche in Dammmitte in ca. 80 m Tiefe Spannungswerte  $\sigma_m'$  um ca.  $900 \text{ kN/m}^2$  für den effektiven Spannungszustand bei leerem Reservoir. Anhand der Spannungsverteilung im Dammkörper (Bild 11) und der Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit (z.B. Bild 6 und Bild 8) wurde ein Wert von  $K_2 = 220$  ermittelt (z = 20 m -  $\sigma_m' = 300 \text{ kN/m}^2$  -  $v_s = 600 \text{ m/s}$  / z = 80 m -  $\sigma_m' = 900 \text{ kN/m}^2$  -  $v_s = 800 \text{ m/s}$ ). Bild 12 zeigt die mittlere effektive Spannung  $\sigma_m'$ , Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und den maximalen Schermodul  $G_{\max}$  im Dammkörper in Abhängigkeit von der Tiefe z unter der Dammkrone entsprechend der Formulierung von Seed & Idriss (1970) für ein Wert  $K_2 = 220$ .

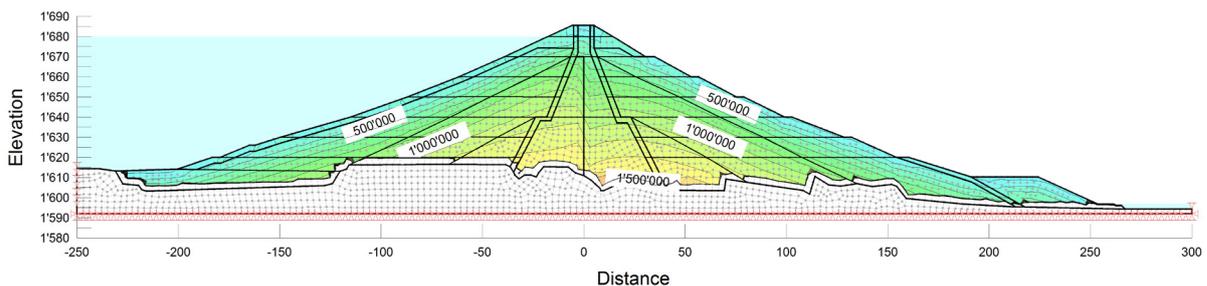


**Bild 11: Initialer statischer Spannungszustand im Dammkörper nach Bauende vor Reservoirfüllung, mittlere effektive Spannung  $\sigma_m'$  [kN/m<sup>2</sup>], rot markierter Bereich der Tomographie-messung (Weber et al. 2013)**



**Bild 12: Mittlere effektive Spannung  $\sigma_m'$ , Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und maximales Schermodul  $G_{max}$  im Dammkörper in Abhängigkeit der Tiefe  $z$  unter der Dammkrone**

Die Spannungsabhängigkeit des maximalen Schermoduls  $G_{max}$  wird im numerischen Modell für den initialen Zustand der dynamischen Berechnung definiert. Bild 13 zeigt die Verteilung des maximalen Schermoduls  $G_{max}$  zu Beginn der Erdbebenermittlung im Zeitverlaufsverfahren mit dem Programm QUAKE/W des Softwaresystems GeoStudio 2012.



**Bild 13: Verteilung des maximalen Schermoduls  $G_{max}$  [kN/m<sup>2</sup>] im Dammkörper zu Beginn der dynamischen Berechnung (Weber et al. 2013)**

Für eine umfassende Erdbebenermittlung sind noch weitere dynamische Bodenkennziffern festzulegen. Dazu gehören die dehnungsabhängigen linear-äquivalenten Parameter des Schermoduls und des Dämpfungsverhältnisses. Für die Festlegung der normierten Abnahmekurven des Schermoduls, die in den Maximalwert des Schermoduls  $G_{max}$  eingehängt werden, soll an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen werden, z.B. Studer et al. (2007) und Towhata (2008). Gleiches gilt für das dehnungsabhängige Dämpfungsverhalten von Lockergesteinsmaterialien.

## 4 Schlussfolgerung

Mittels seismisch-geophysikalischen Messungen, wie der Tomographie, der Refraktionsseismik und MASW, wurde die Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit im Dammkörper der Stauanlage Marmorera eingehender untersucht und eingegrenzt. Basierend auf der Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit wurde der spannungsabhängige maximale Schermodul  $G_{\max}$  korreliert. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Scherwellengeschwindigkeiten des Dammkörpermaterials bei Marmorera im Vergleich zu Werten aus der Literatur verhältnismässig hoch liegen und somit der Damm eine hohe initiale Schersteifigkeit besitzt.

Die initiale Schersteifigkeit hat einen grossen Einfluss auf das Erdbebenverhalten des Dammes, da sie massgebend die Amplifikation der Erdbebenanregung im Dammkörper von Untergrund hin zur Krone beeinflusst. Die maximale Schersteifigkeit bildet den wichtigen Anfangswert zur Definition der dehnungsabhängigen Schersteifigkeit der Dammmaterialien in der numerischen Berechnung. Die durchgeführten geophysikalischen Messungen eignen sich sehr gut, um die maximale Schersteifigkeit der Dammmaterialien zu bestimmen und damit das Ergebnis der dynamischen Erdbebenberechnungen des Dammes zu präzisieren. Zusammenfassend wird empfohlen, die initiale Schersteifigkeit von Dammmaterialien bestehender Dämme mit geophysikalischen Methoden zu messen, um die dynamischen Kennwerte einer numerischen Berechnung zu präzisieren.

## 5 Danksagung

Der Autor möchte sich für die sehr gute Zusammenarbeit und das geschenkte Vertrauen sowie für die Erlaubnis zur Veröffentlichung der Daten bei Andreas Siegfried und Patrick Saudan vom ewz - Elektrizitätswerk der Stadt Zürich - bedanken. Ein besonderer Dank gilt auch Jan Laue von der Technische Universität Lulea in Schweden und Lorenz Keller von roXplore gmbh für die Unterstützung und Zusammenarbeit im Projekt. Abschliessend sei auch Jost Studer gedacht, der das Projekt leider nicht bis zu Ende führen konnte.

## 6 Literatur

- BWG (2003) Sicherheit der Stauanlagen. Basisdokument zum Nachweis der Erdbebensicherheit, Bundesamt für Wasser und Geologie, Schweiz.
- Keller, L. (2012) Projekt Stauanlage Marmorera, Bericht zu den geophysikalischen Untersuchungen im Zusammenhang der Erdbebenüberprüfung. roXplore gmbh, Amlikon, November 2012.
- Nakamura Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Report Railway Tech. Res. Inst., 30-1: 25-30.
- Sawada, Y. & Takahashi, T. (1975) Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dam, Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.695-702.
- Seed, H.B. & Idriss, I.M. (1970) Soil moduli and damping for dynamic response analysis. Report No. EERC 70-10, Berkeley CA.
- Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M & Tokimatsu, K. (1984) Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils. Report No. UCB/EERC-84/14, University of California Berkeley.
- Studer, J.A., Laue, J. & Koller, M.G. (2007) Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- Towhata, I. (2008) Geotechnical Earthquake Engineering. Springer Verlag, Berlin.
- Weber, T.M., Studer, J.A. & Laue, J. (2013) Stauanlage Marmorera, Nachweis der Erdbebensicherheit. Studer Engineering GmbH, Bericht 6301-01, Mai 2013.
- Zingg, W (1953) Der Staudamm Castiletto des Juliawerkes Marmorera. Schweizerische Bauzeitung, 71(33): 470-475.