



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

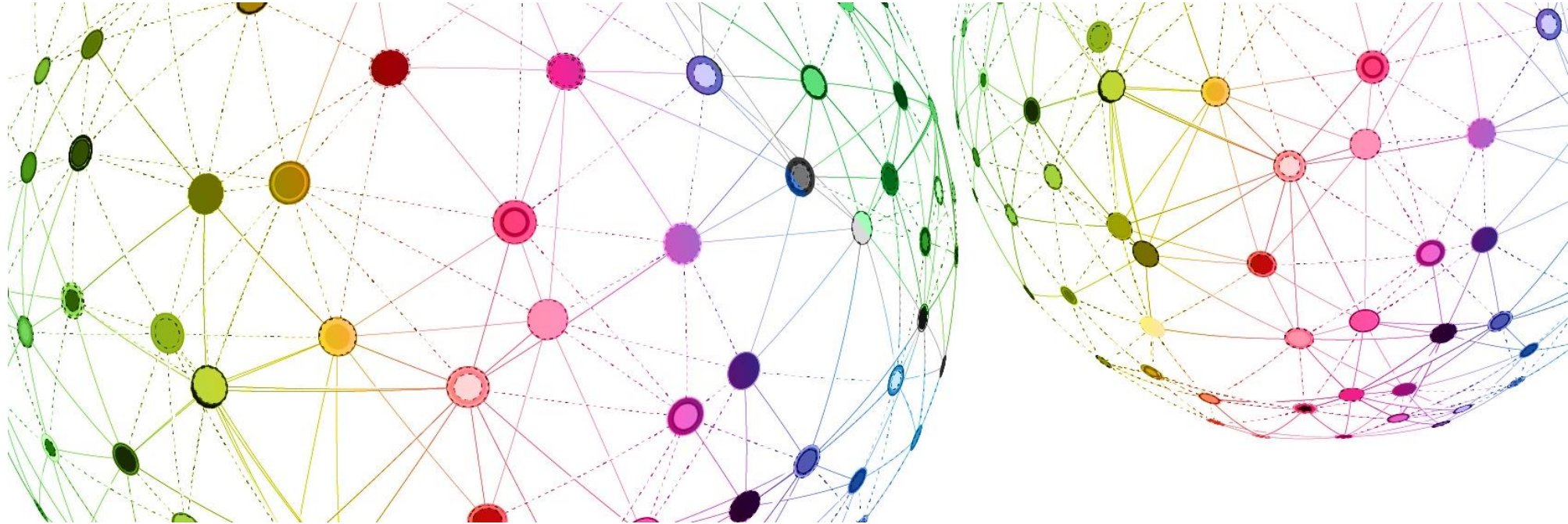
Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE



Schweizerischer Erdbebendienst
Service Sismologique Suisse
Servizio Sismico Svizzero
Swiss Seismological Service



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



© shutterstock 19778194

RICHTLINIE TEIL C3

**SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG: BEDEUTUNG UND ANALYSEMETHODEN. ÜBERBLICK
ZUR STUDIE «DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT VS30 > 1105 M/S»**

Paolo Bergamo¹, Amin Askarinejad², Federico Galster², Donat Fäh¹

¹ Schweizerischer Erdbebendienst, ETHZ, paolo.bergamo@sed.ethz.ch ; ² Bundesamt für Energie BFE



INHALT DER PRÄSENTATION

- Einführung – Seismische Standortverstärkung
 - *Was ist das?*
 - *Warum ist das wichtig?*
 - *Wie schätzt man das?*
- Studie «Deamplifikation an Talsperrenstandorten mit $V_{s30} > 1105$ m/s»
 - *Input-Datensätze*
 - *Befund*
 - *Empfehlungen für geophysikalische Untersuchungen zur Standortcharakterisierung*
- Schlussfolgerungen der Präsentation



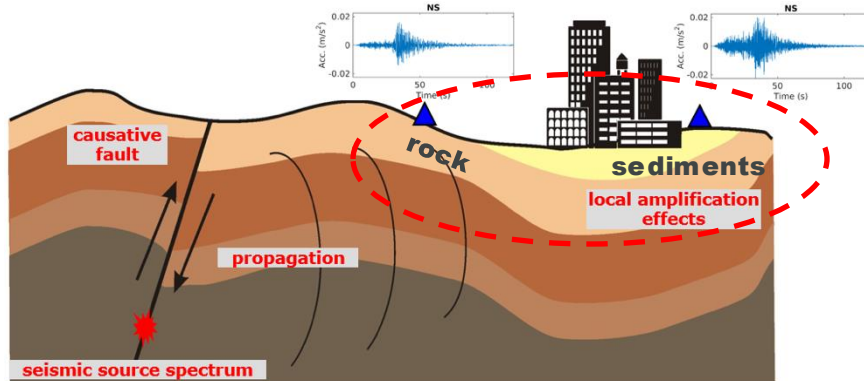
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Seismische Standortverstärkung – was ist das?

Der Begriff "Seismische Standortverstärkung", "Seismische Standortamplifikation" bezieht sich auf die Wirkung des oberflächennahen Untergrunds auf seismische Wellen, die sich von der Kruste aus ausbreiten

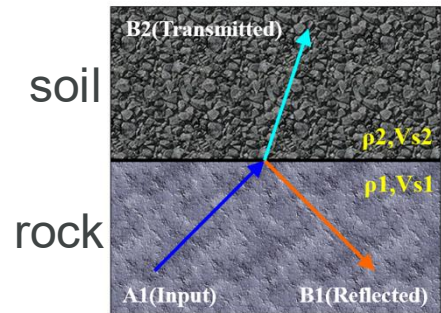
Zwei Hauptmechanismen:

- 1) Auswirkung des seismischen Impedanzkontrasts
- 2) Wirkung der 1D-Resonanz



nach Ciaccio & Cultrera (2014)

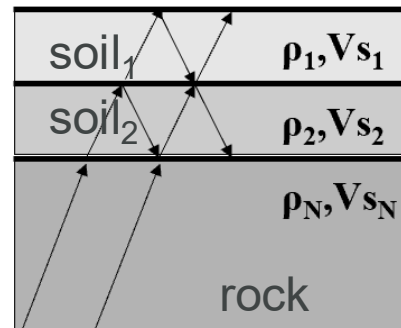
Impedanz-Kontrast



$$B_2 = \frac{2\rho_1 V_{s1}}{\rho_1 V_{s1} + \rho_2 V_{s2}} \times A_1$$
$$\rho_1 > \rho_2, V_{s1} > V_{s2}$$

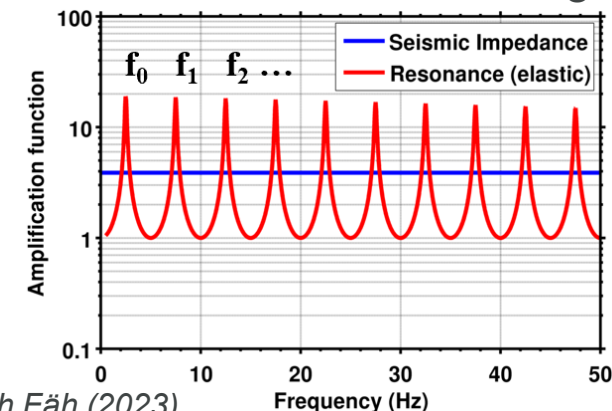
nach Fäh (2023)

Resonanz



In Sedimenten sind Wellen "gefangen" und können interferieren, was zu einer Verstärkung führt

Funktion der Bodenverstärkung



nach Fäh (2023)

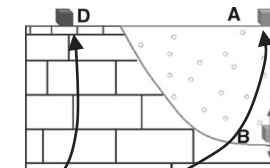


1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Seismische Standortverstärkung – Warum ist das wichtig ?

Die Standortverstärkung weist eine grosse Variabilität auf.

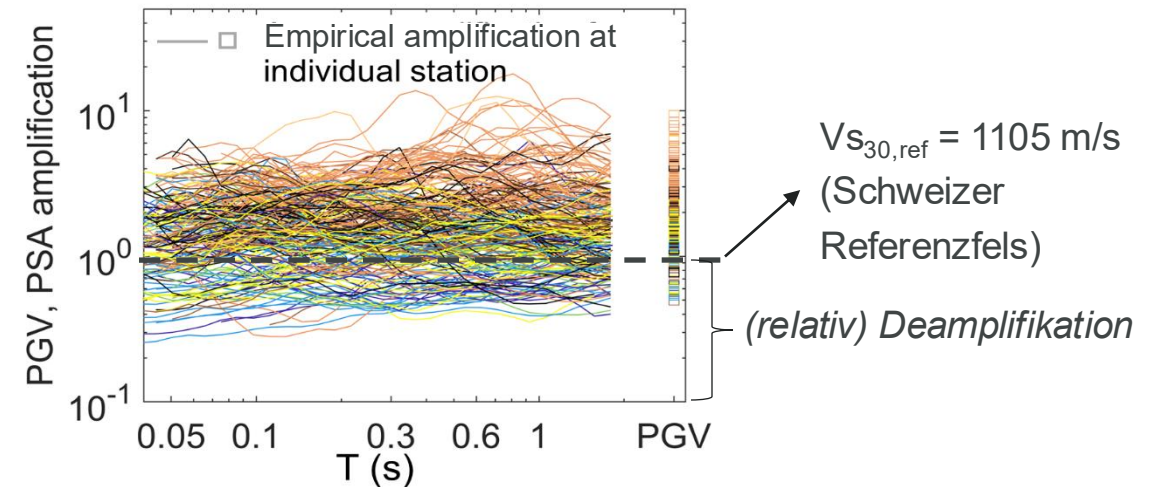
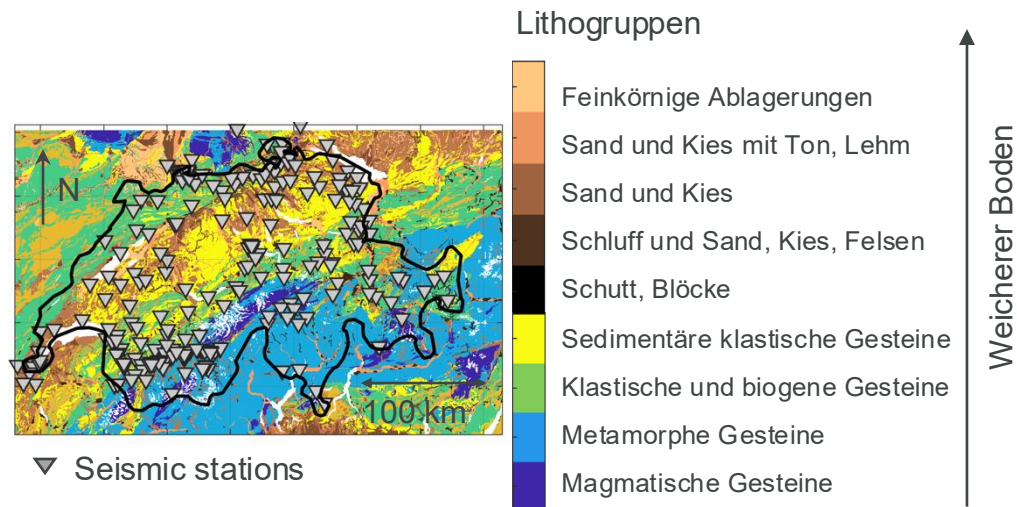
D = Schweizer
Referenzfels (V_{s30}
= 1105 m/s)



A = Ziel Standort

Standortverstärkung bei $A = SA_A / SA_D$

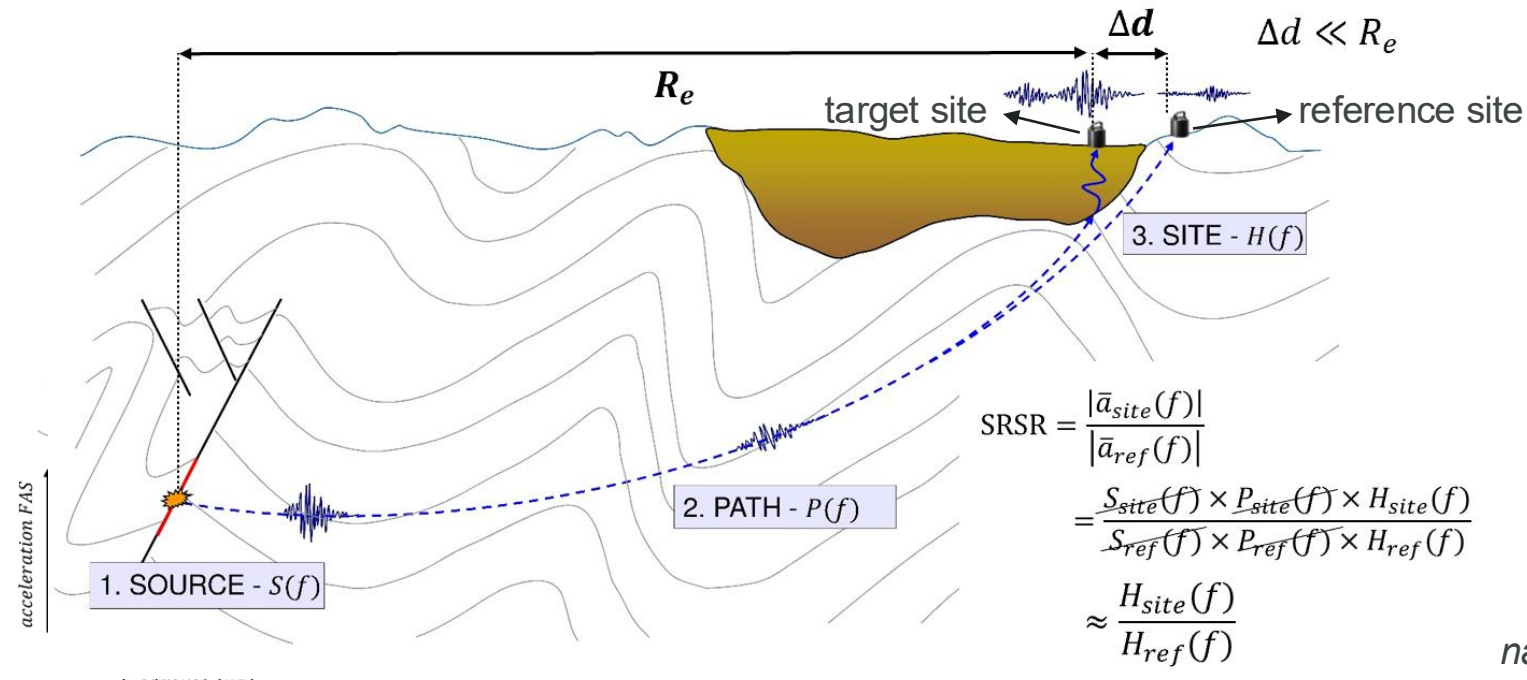
Cadet et al. (2012)





1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

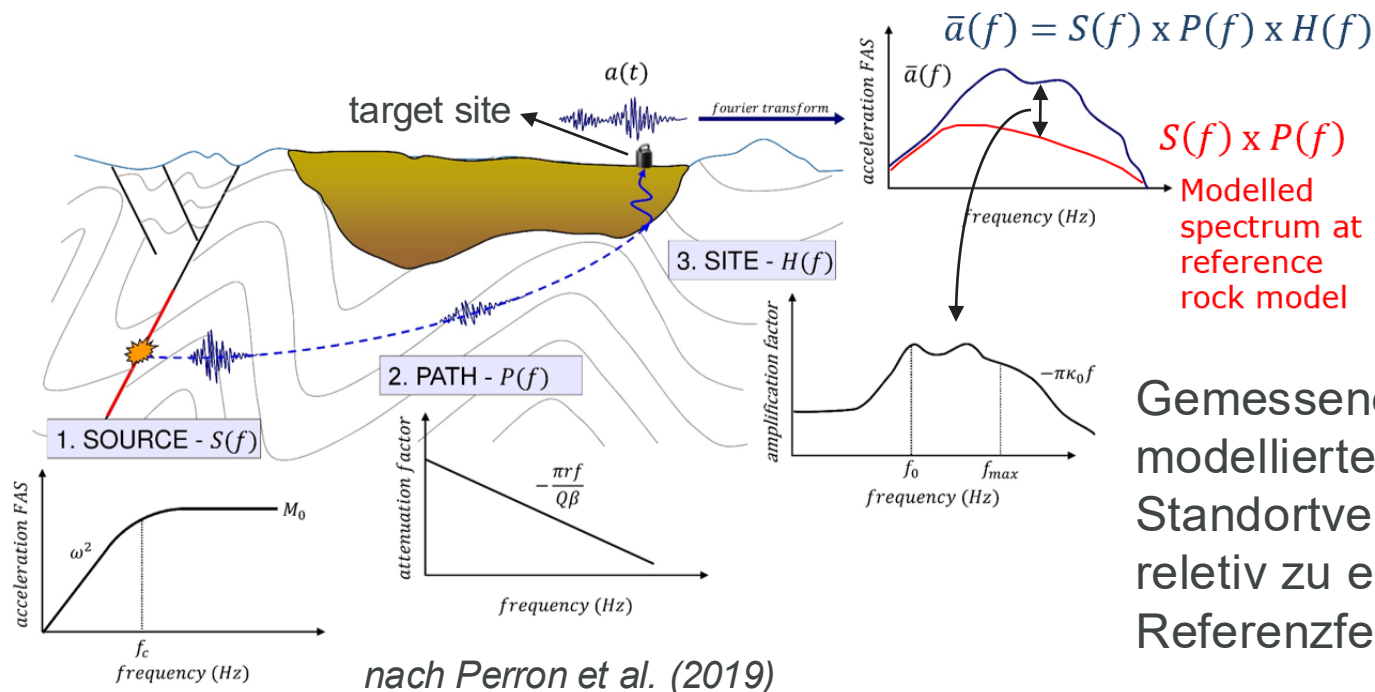
Seismische Standortverstärkung – Wie schätzt man das? (Verf.1b, 2, R. C3)
A) Direkte Messung der Standortverstärkung aus seismischen Aufzeichnungen -> Spektralverhältnis zwischen Standort und Referenz (SRSR)



nach Perron et al. (2019)

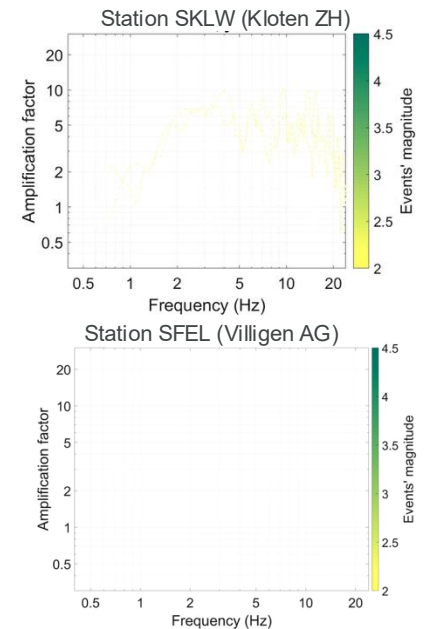
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Seismische Standortverstärkung – Wie schätzt man das? (Verf.1b, 2, R. C3)
A) Direkte Messung der Standortverstärkung aus seismischen Aufzeichnungen -> «Empirical Spectral Modeling» (ESM)



Gemessenes Spektrum /
modelliertes Spektrum =
Standortverstärkungsfunktion
relativ zu einem Standard-
Referenzfelsmodell

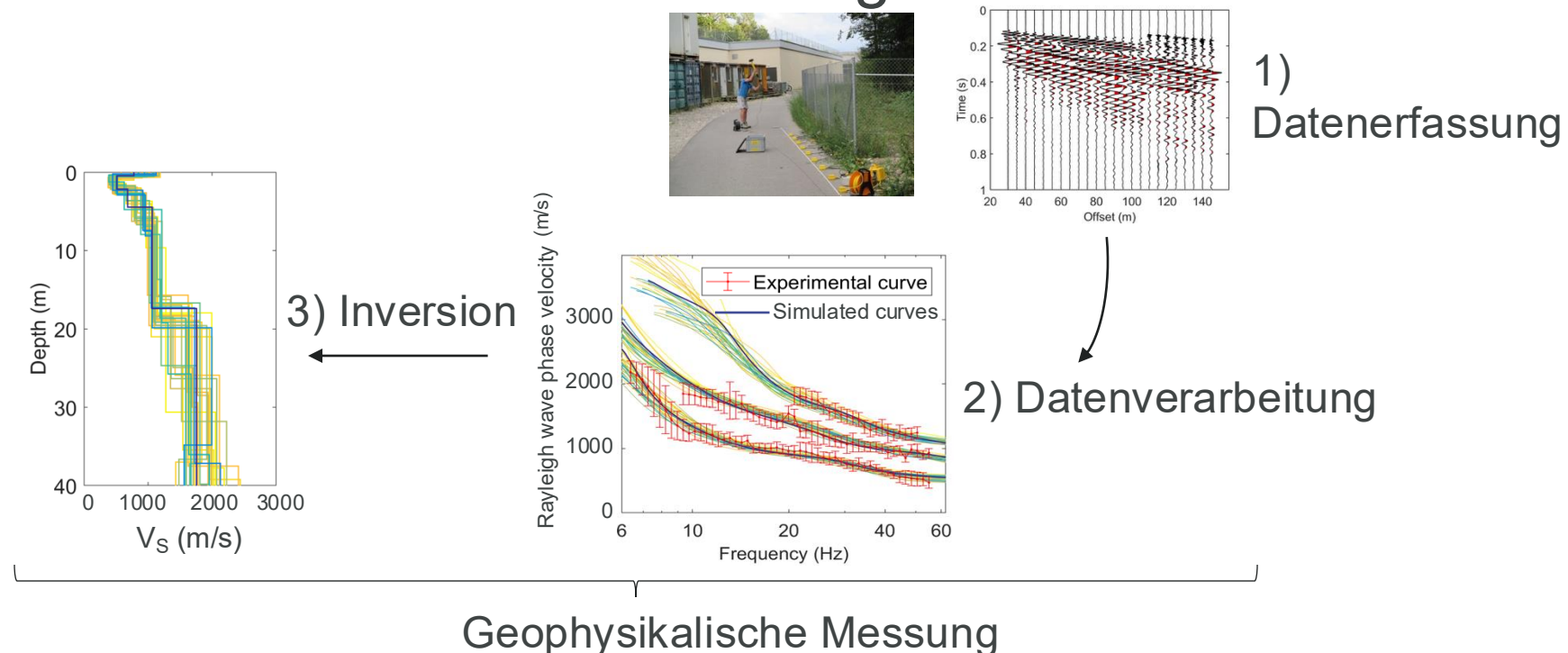
Beispiele





1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

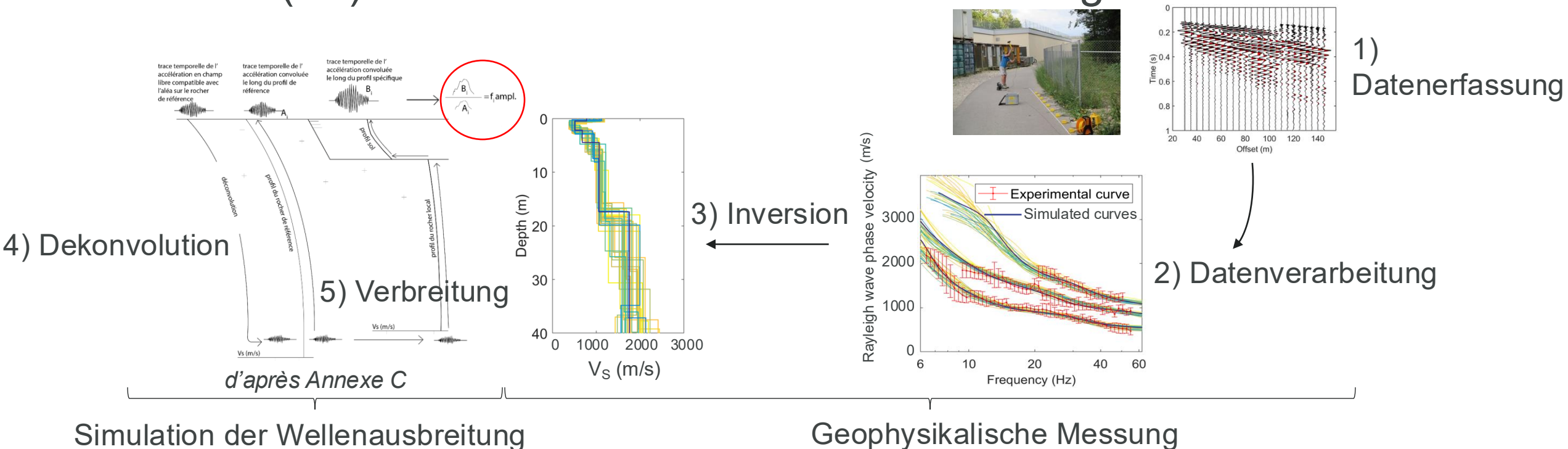
Seismische Standortverstärkung – Wie schätzt man das? (Verf.1b, 2, R. C3)
B) Geophysikalische Messungen des lokalen Geschwindigkeitsprofils von Scherwellen (V_s) + Simulation der Wellenausbreitung





1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Seismische Standortverstärkung – Wie schätzt man das? (Verf.1b, 2, R. C3)
B) Geophysikalische Messungen des lokalen Geschwindigkeitsprofils von Scherwellen (V_s) + Simulation der Wellenausbreitung



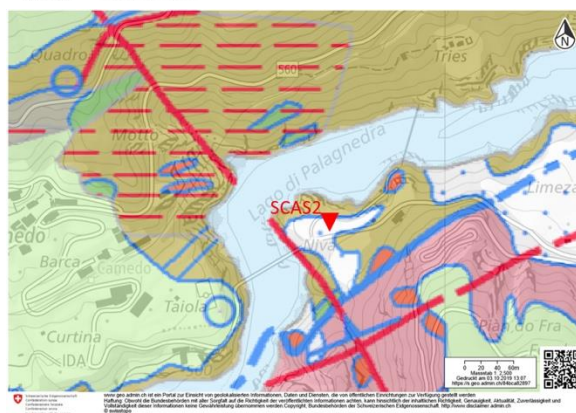


1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)



SCAS2



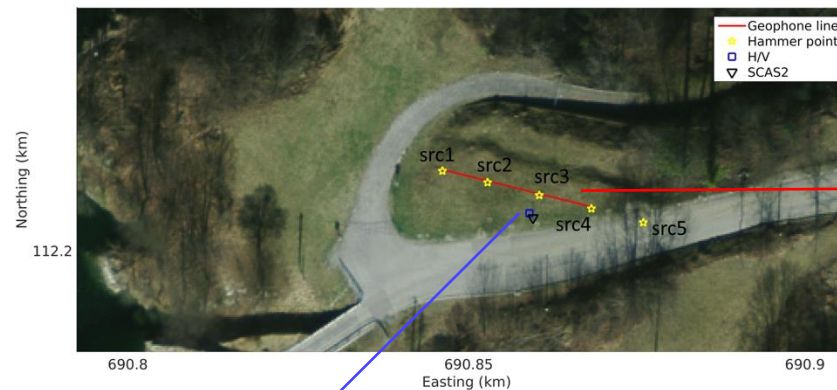
- Kristallines Gestein
- Hangbruch
- Gneis "Monte Rosa"
- Moräne
- Verwerfung



1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)

1) Datenerfassung



Aktive
seismische
Messung



24 3-Komponenten-
Geophone, 4.5 Hz

Quelle: 6 kg
Hammer auf
dreieckiger
Metallplatte (P- und
S-Wellen
Refraktionsuntersuc
hung) und flacher
Metallplatte
(MASW)

Erfassung von Umgebungsgeräuschen



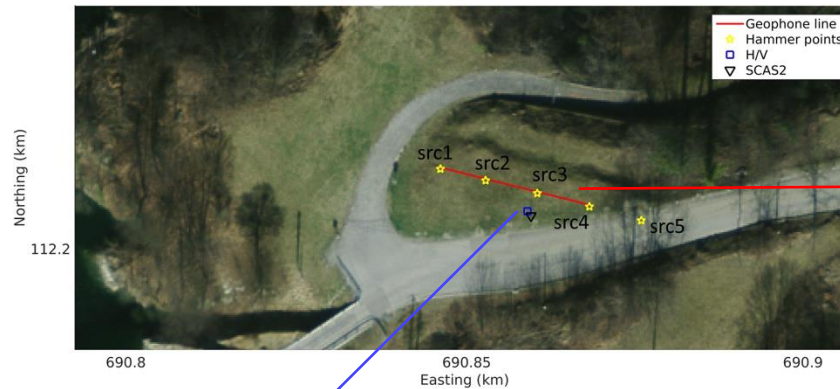
Lennartz 5-s Sensor
Datenerfassung : 1 Stunde



1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

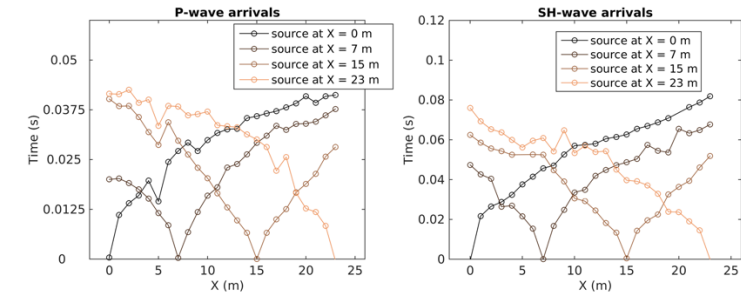
Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)

2) Datenverarbeitung

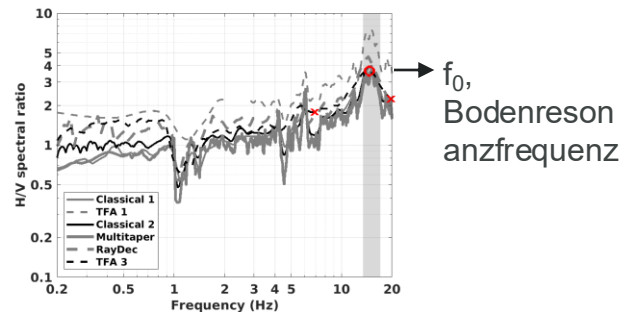


Aktive
seismische
Messung

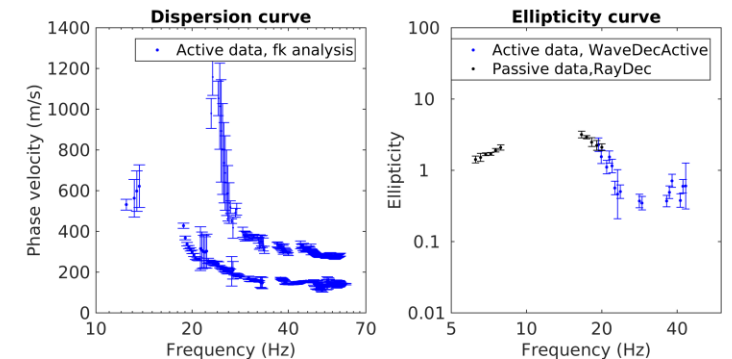
Refraktion für P- und S-Wellen



Erfassung von Umgebungsgeräuschen



MASW

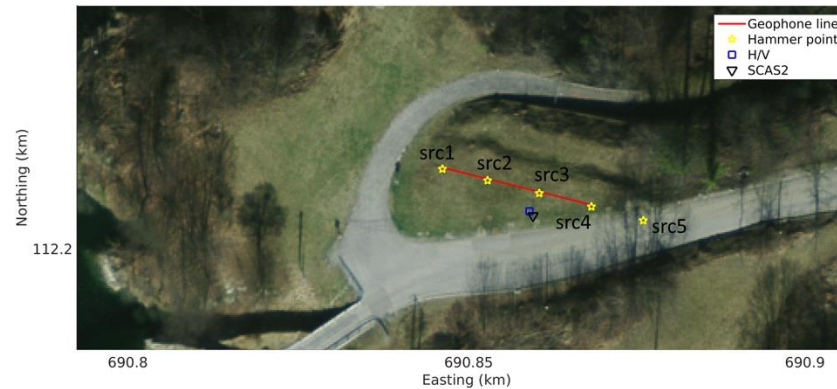




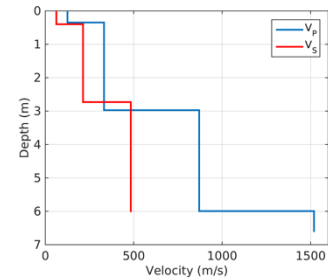
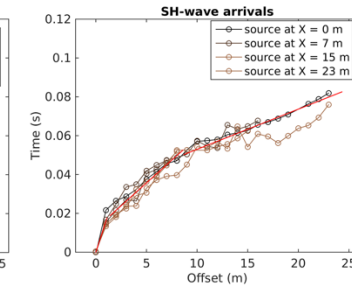
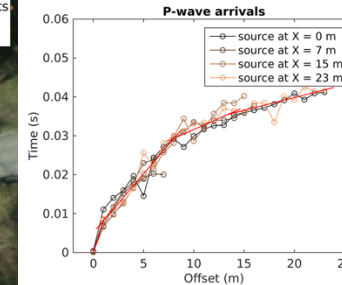
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)

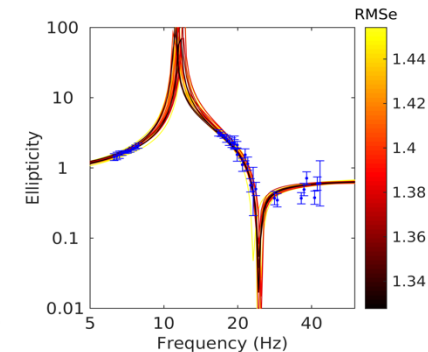
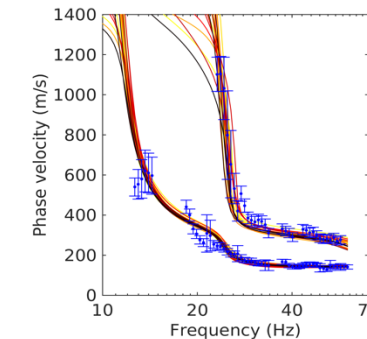
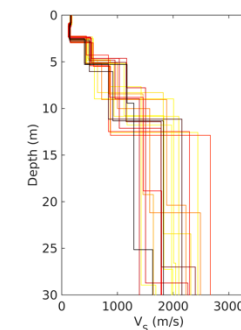
3) Inversion



Refraktion für P- und S-Wellen



MASW

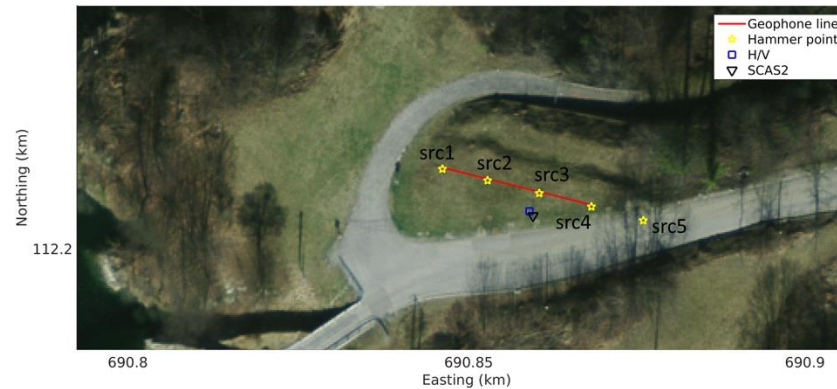




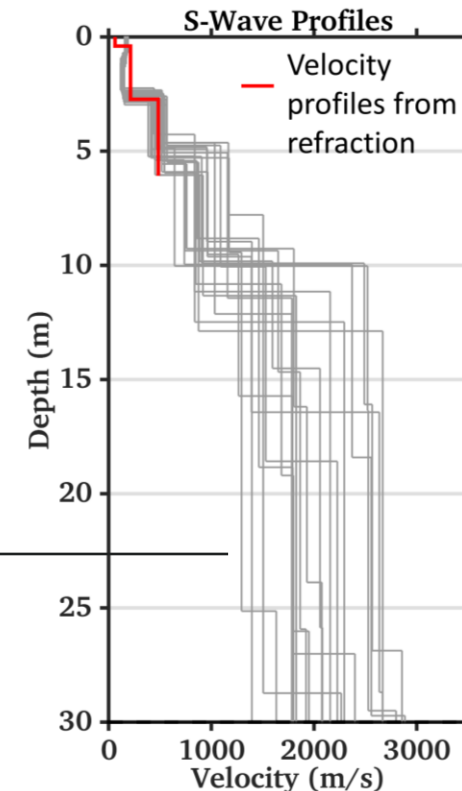
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)

3) Inversion



Die 20 besten S-Wellen-
Geschwindigkeitsprofile der
Rayleigh-Wellen-Dateninversion



$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

$$V_{s30} = 894 \pm 40 \text{ m/s}$$

Tiefe bis zu $V_s > 800$
m/s = 5.1 m

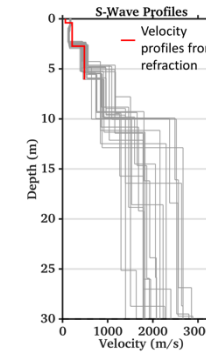
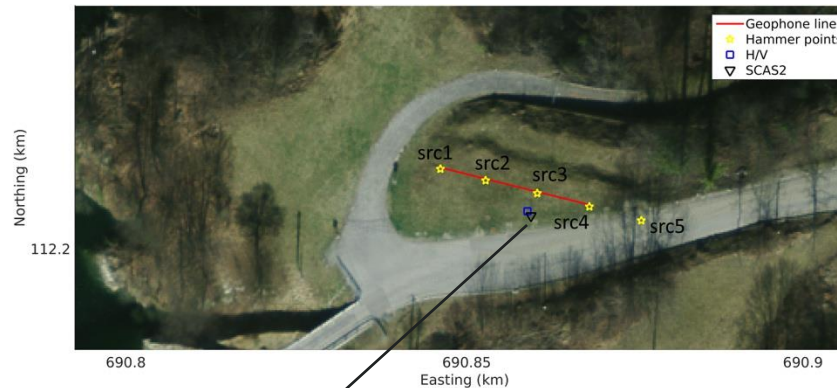
Durchschnittliche V_s
Oberflächensedimente
= 273 m/s

Klasse E gemäss
Richtlinie C3



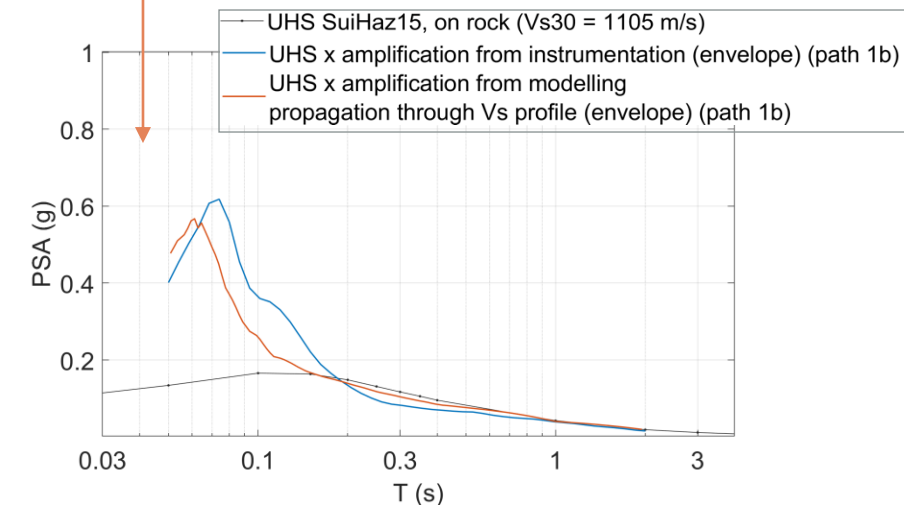
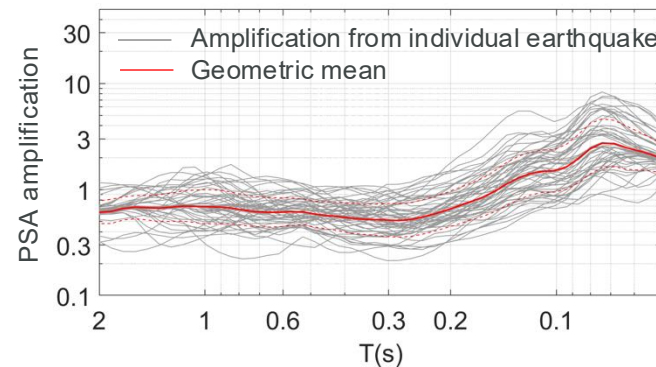
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)



Dekonvolution +
Modellierung der
Wellenausbreitung
durch das Vs-Profil

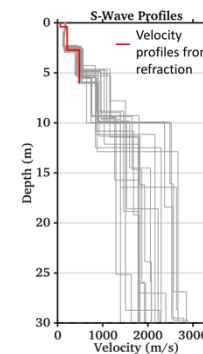
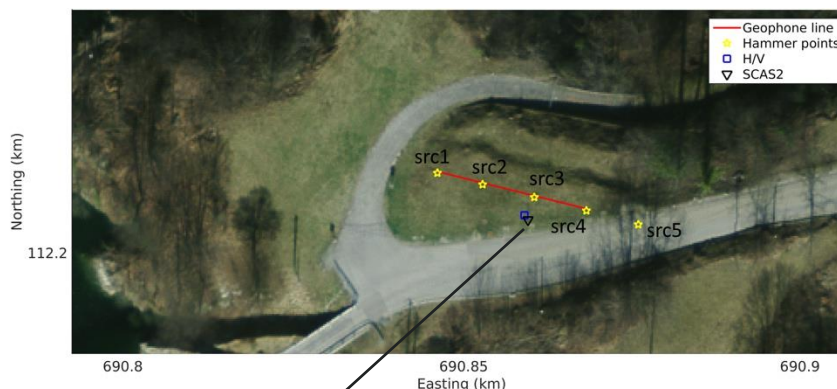
Empirische
Standortverstärkungs-
funktion aus den
seismischen
Aufzeichnungen der
Station





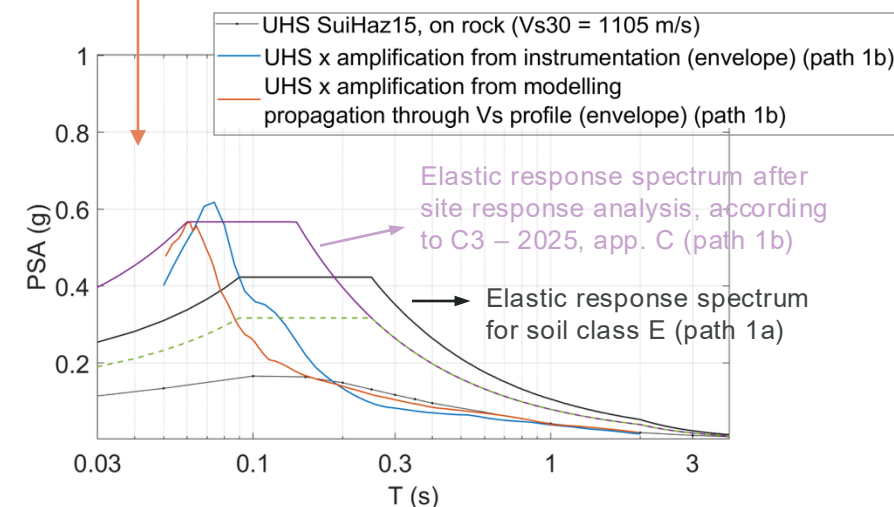
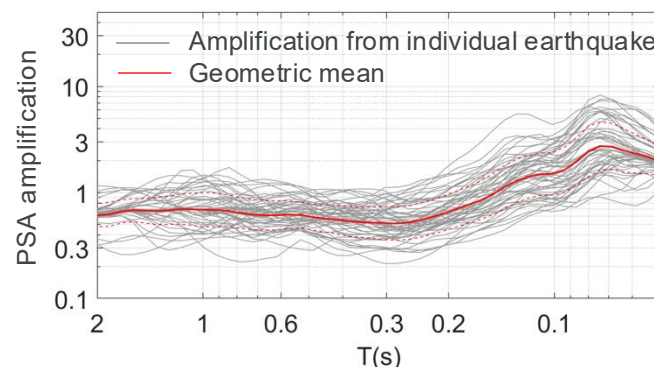
1/3) EINFÜHRUNG SEISMISCHE STANDORTVERSTÄRKUNG

Beispiel: Standortverstärkung an der seismischen Station SCAS2 (Camedo, TI)



Dekonvolution +
Modellierung der
Wellenausbreitung
durch das Vs-Profil

Empirische
Standortverstärkungs-
funktion aus den
seismischen
Aufzeichnungen der
Station





2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT VS30 > 1105 M/S

- Projekt « Deamplifikationspotenzial in Bezug auf das elastische Antwortspektrum für Talsperrenstandorten mit $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$ »



Deamplifikation im Vergleich zum Schweizer
Referenzfels ($V_{s30} = 1105 \text{ m/s}$)



2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$

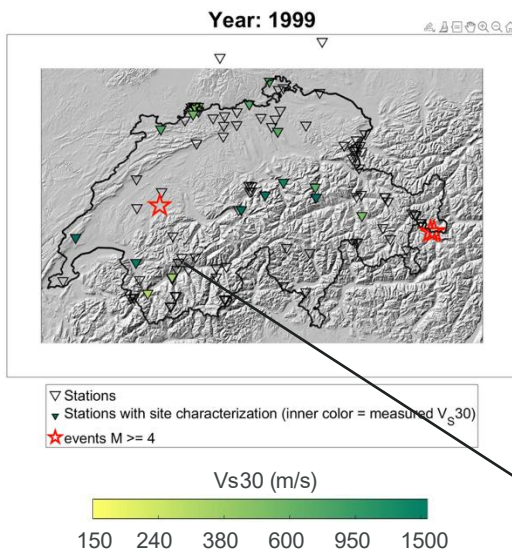
- Projekt « Deamplifikationspotenzial in Bezug auf das elastische Antwortspektrum für Talsperrenstandorten mit $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$ »
- Im Auftrag des BFE an den SED (Schweizerischer Erdbebendienst an der ETH Zürich)
- Ziele:
 - *Berechnung empirischer Deamplifikationsfaktoren zum Vergleich mit den Anpassungsfaktoren von Danciu und Fähr (2017)*
 - *Ermittlung der zulässigen Deamplifikation für Standorte mit $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$*
 - *Empfehlungen für Standortuntersuchungen zur zuverlässigen Anwendung der Deamplifikation*



2/3) STUDIE

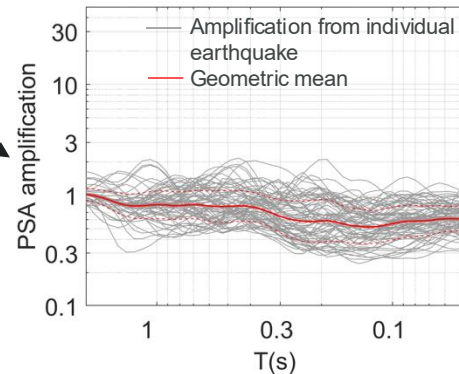
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 1: *Berechnung empirischer Deamplifikationsfaktoren zum Vergleich mit den Anpassungsfaktoren von Danciu und Fäh (2017)*

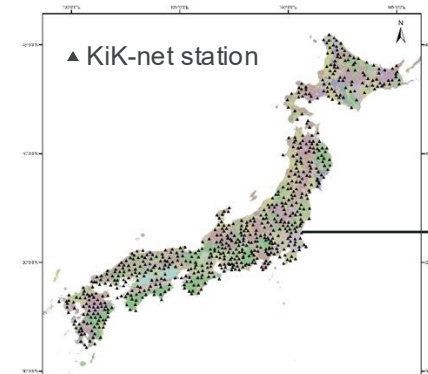


Empirische Verstärkungsfunktionen aus der spektralen Modellierung (Aufzeichnungen 1999 – 2024)

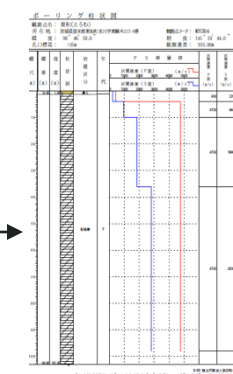
Station STSW2, Tseuzier (VS)
 $V_{S30} = 1057$ m/s



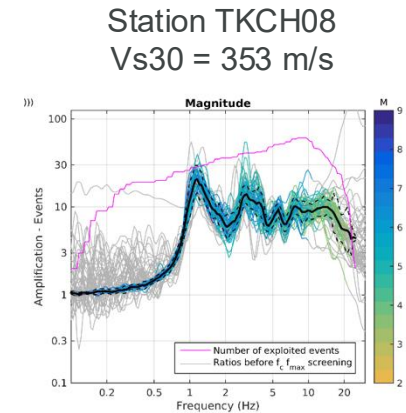
Japanische KiK-Net Stationen (Aufnahmen 1997 - 2013)



Offene
Zugangsdaten



Gemessene
 V_s Profil (P-S
logging)



Verhältnis von
Oberfläche /
Bohrloch

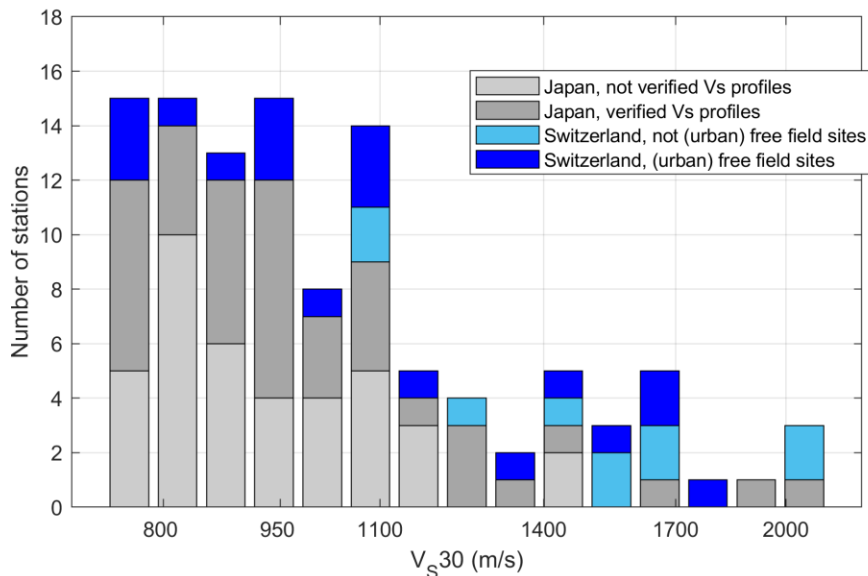


2/3) STUDIE

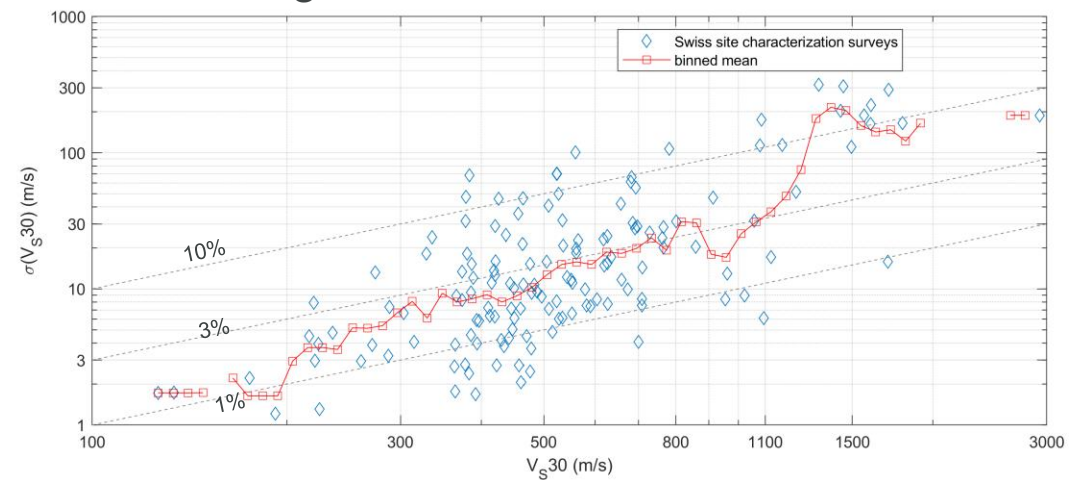
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 1: *Berechnung empirischer Deamplifikationsfaktoren zum Vergleich mit den Anpassungsfaktoren von Danciu und Fäh (2017)*

Wir konzentrieren uns auf Stationen mit $V_{S30} > 750$ m/s



Wir klassifizieren die Stationen in V_{S30} -Intervallen unter Berücksichtigung der geschätzten σ von V_{S30}

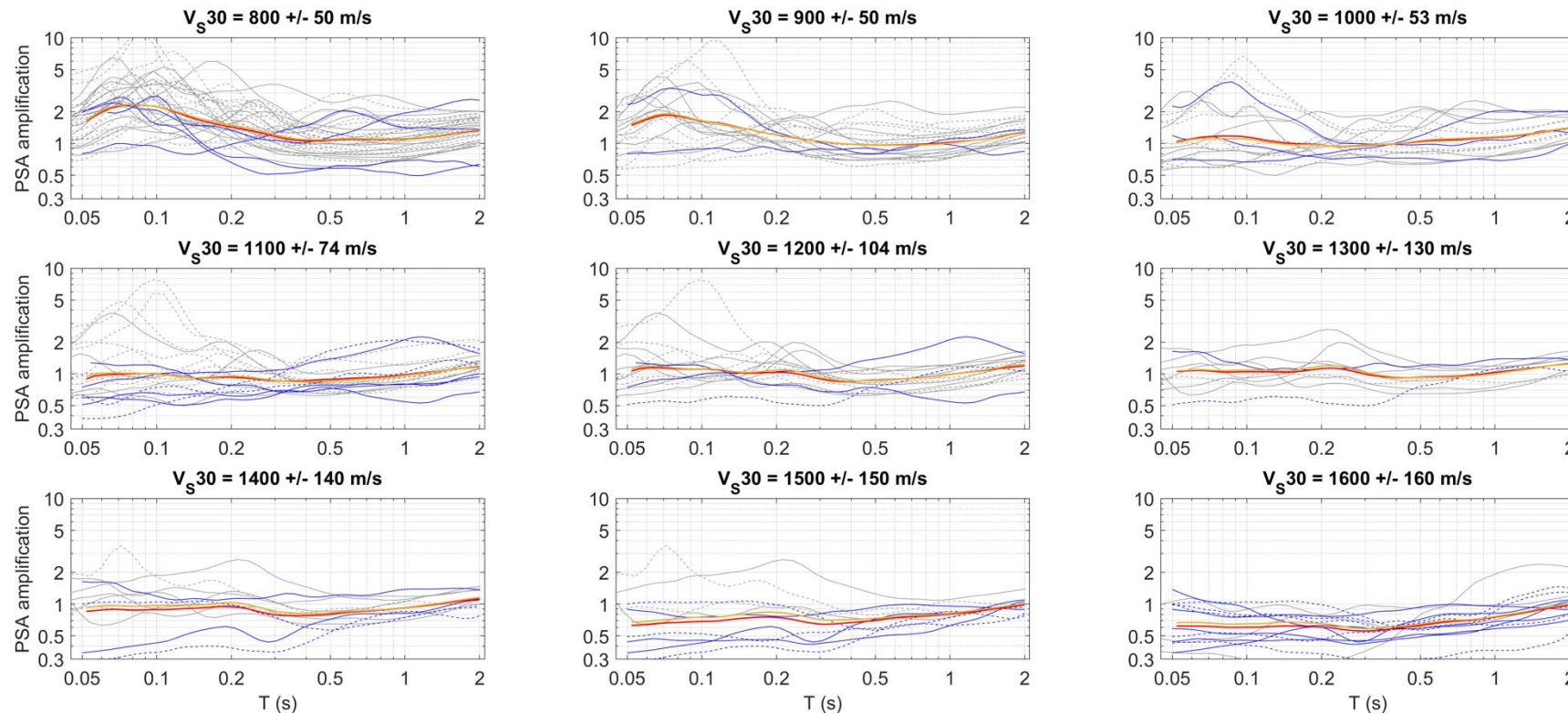




2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 1: *Berechnung empirischer Deamplifikationsfaktoren zum Vergleich mit den Anpassungsfaktoren von Danciu und Fäh (2017)*



Empirische Verstärkungsfunktionen seismischer Stationen:

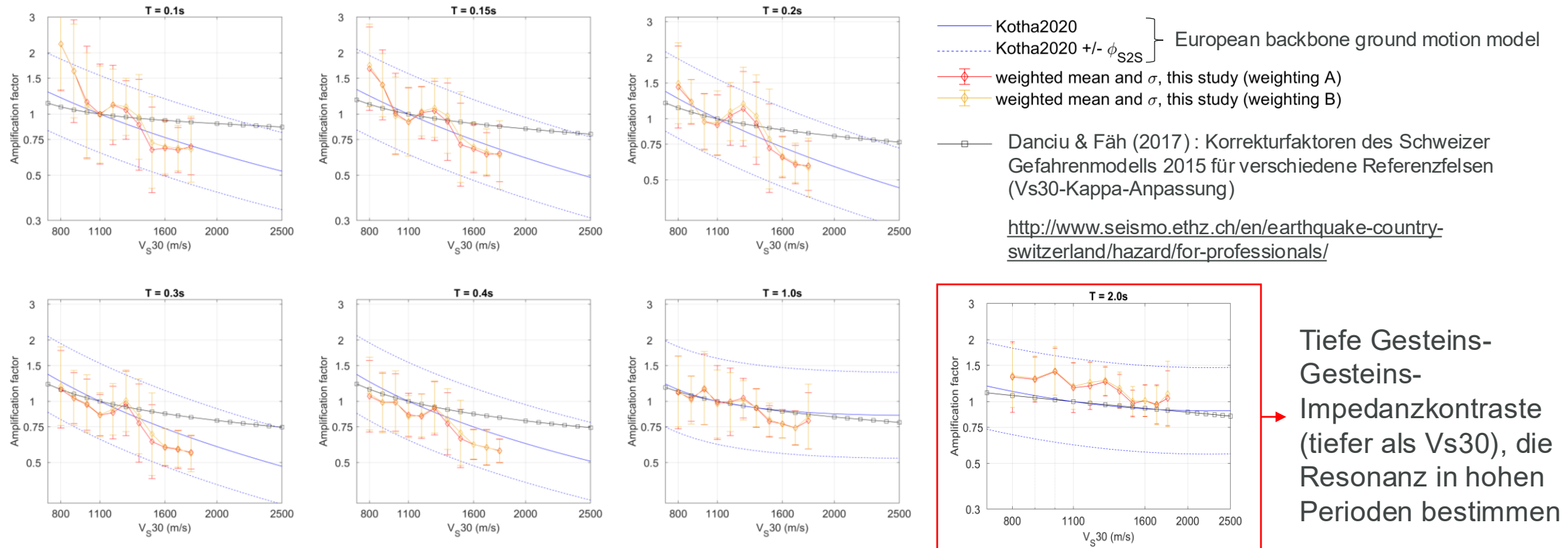
- Schweizer Stationen « free field »
- - - Weitere Schweizer Stationen
- KiKnet-Stationen mit zuverlässigen V_s -Profilen
- - - Weitere KiKnet-Stationen
- Gewichteter Durchschnitt, A-gewichtet
- Gewichteter Durchschnitt, B-gewichtet



2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 1: *Berechnung empirischer Deamplifikationsfaktoren zum Vergleich mit den Anpassungsfaktoren von Danciu und Fäh (2017)*





2/3) STUDIE

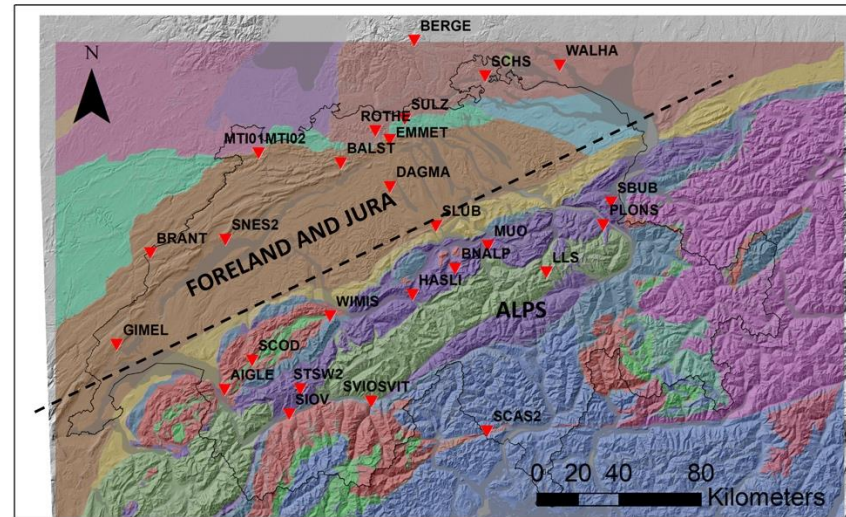
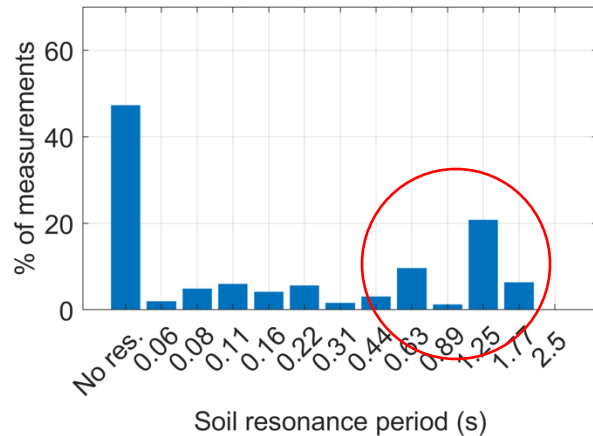
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT VS30 > 1105 M/S

Ziel 2: *Ermittlung der zulässigen Deamplifikation für Standorte mit Vs30 > 1105 m/s*

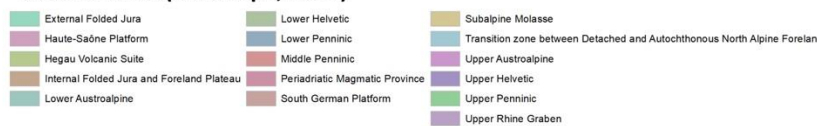
Mittelland und Jura

- Prävalenz von Sedimentgesteinen
- Hochperiodische Resonanzen, die tiefen Impedanzkontrasten zwischen Gesteinen entsprechen: häufiger

Foreland and Jura



Tectonic units (Swisstopo, 2024)

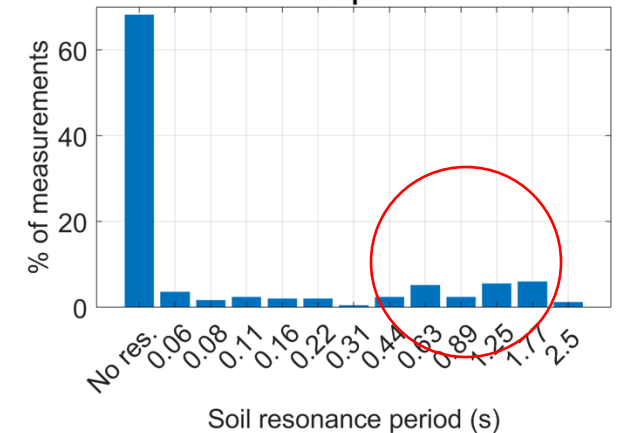


520 Messungen des Umgebungsgeräusche auf Böden der Klasse A oder Gesteinsaufschlüssen

Alpenraum

- Prävalenz von metamorphen und kristallinen Gesteinen
- Hochperiodische Resonanzen, die tiefen Impedanzkontrasten zwischen Gesteinen entsprechen: seltener

Alps

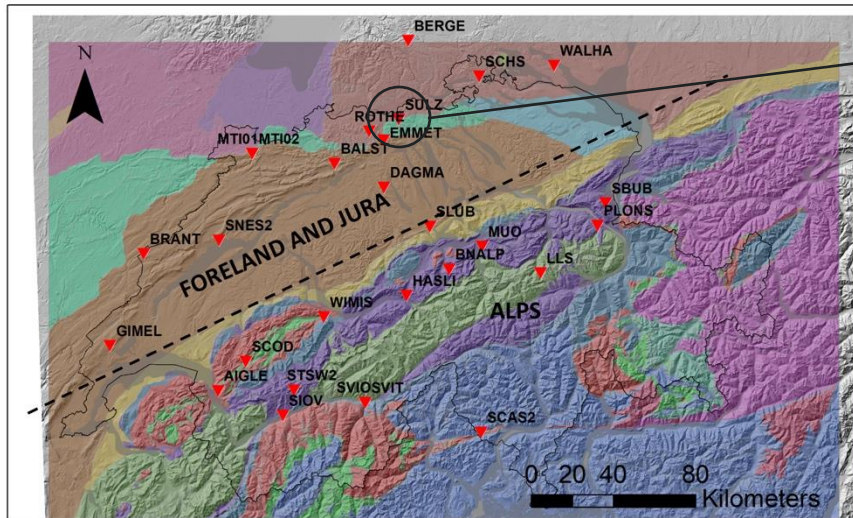




2/3) STUDIE

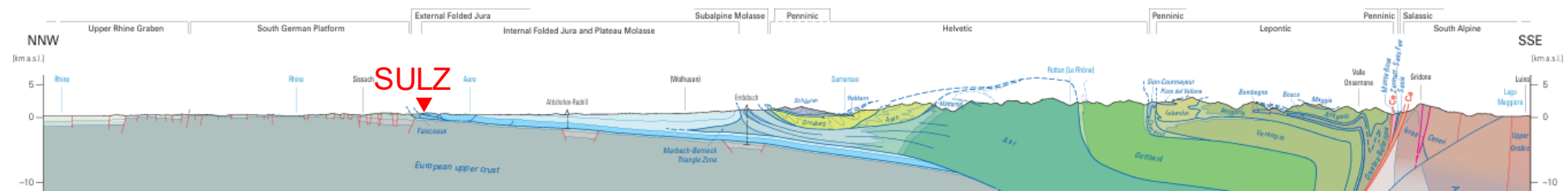
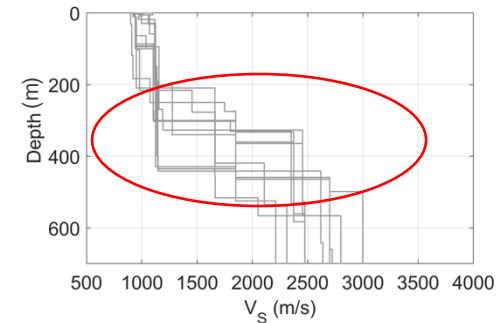
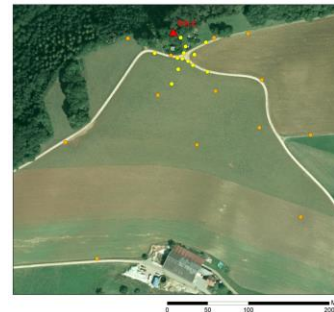
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 2: *Ermittlung der zulässigen Deamplifikation für Standorte mit $V_{S30} > 1105$ m/s*



Station **SULZ** (Sulz, AG), $V_{S30} = 1168$ m/s

Passive Messung von Oberflächenwellen



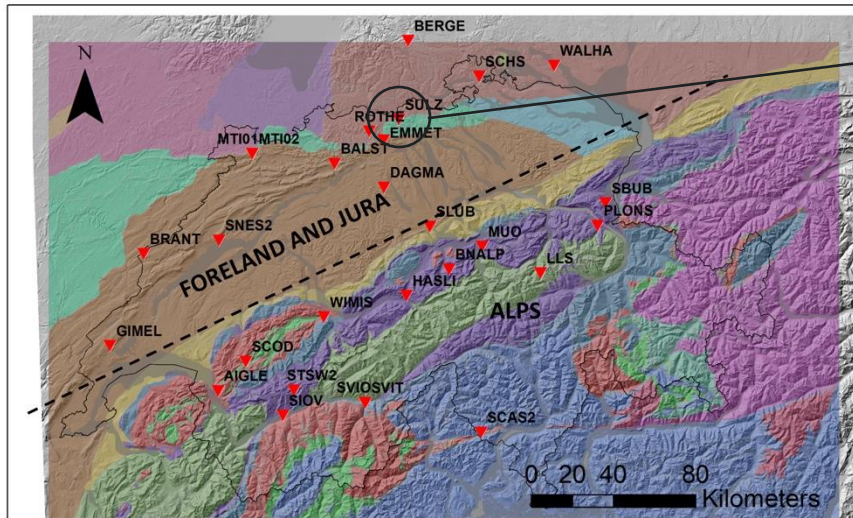
nach Gouffon et al. (2024), Swisstopo



2/3) STUDIE

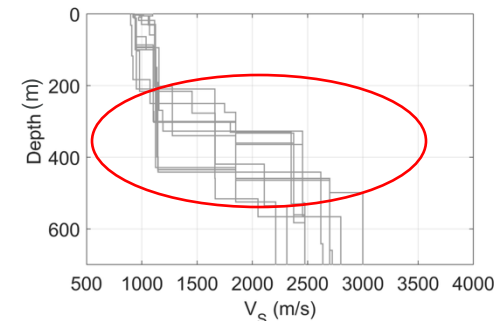
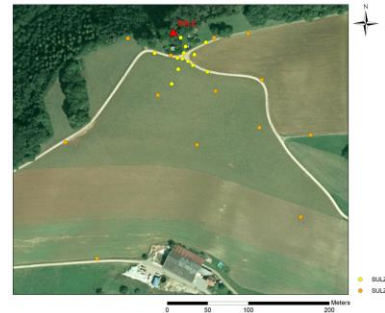
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 2: *Ermittlung der zulässigen Deamplifikation für Standorte mit $V_{S30} > 1105$ m/s*

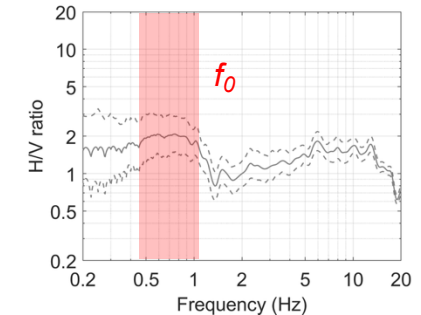


Station **SULZ** (Sulz, AG), $V_{S30} = 1168$ m/s

Passive Messung von Oberflächenwellen

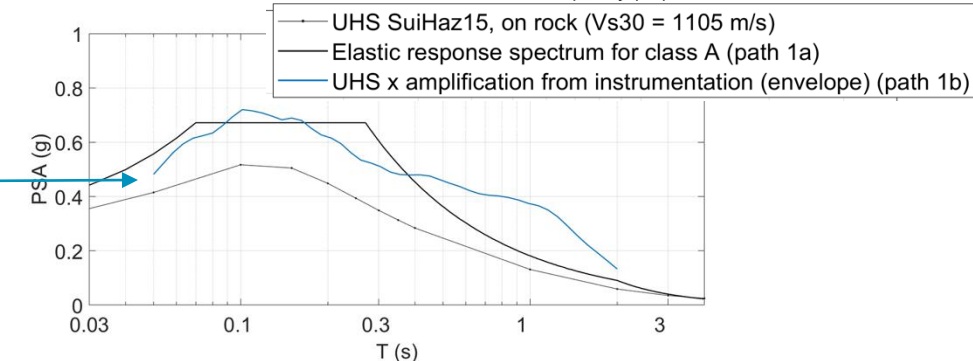
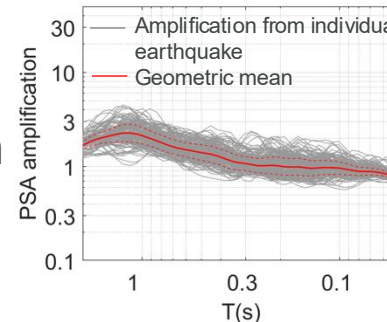


Spektralverhältnis H/V



nach Stamm
et al. (2008)

Stationsverstärkungsfunktion
aus Erdbebenaufzeichnungen





2/3) STUDIE

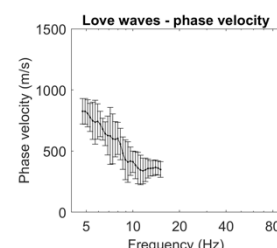
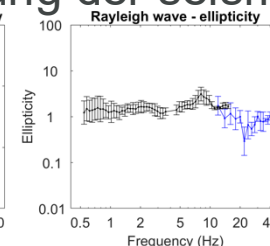
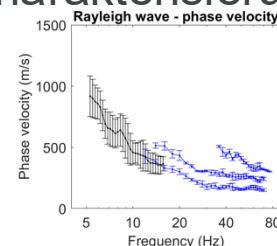
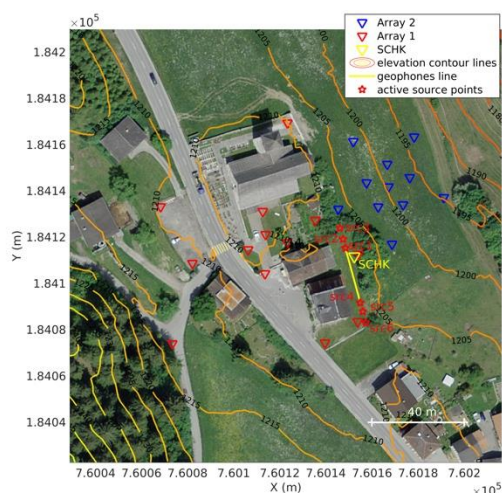
DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT VS30 > 1105 M/S

Ziel 3: Empfehlungen für Standortuntersuchungen zur zuverlässigen Anwendung der Deamplifikation

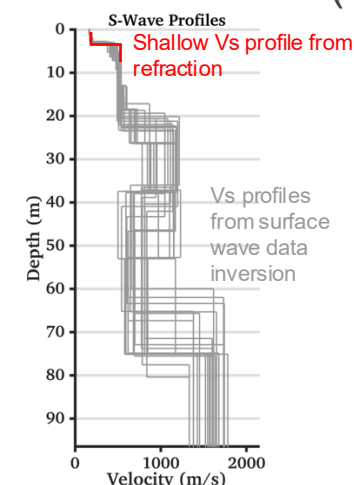
Empfehlungen für nicht-invasive geophysikalische Messungen

- Gemeinsame Messungen von aktiven und passiven Oberflächenwellen
- Verwendung von 3-Komponenten-Geophonen -> Rayleigh- und Love-Wellen-Dispersionskurven, Rayleigh-Elliptizität
- Gemeinsame Oberflächenwellen- und P/S-Wellenbrechungsmessungen > Bestimmung flacher Impedanzkontraste

Beispiel: Standortcharakterisierung der seismischen Station SCHK (Churwalden, GR)



— Kurven aus passiver Messung
— Kurven aus der aktiven Messung



Verfügbare Verarbeitungssoftware:
- Geopsy (Open Source)
- Rayfract...



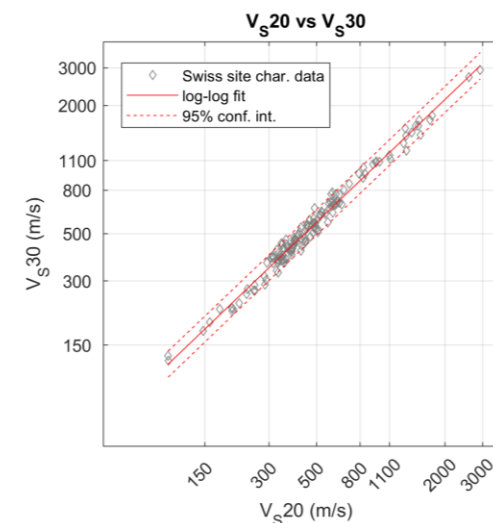
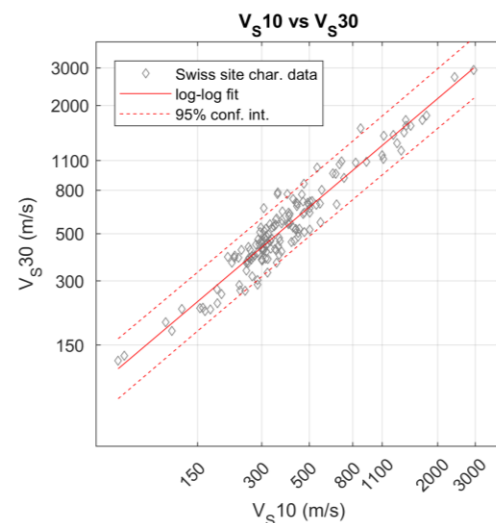
2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 3: *Empfehlungen für Standortuntersuchungen zur zuverlässigen Anwendung der Deamplifikation*

Empfehlungen für nicht-invasive geophysikalische Messungen

- Es ist notwendig, eine angemessene Untersuchungstiefe zu erreichen, um die Schätzung von V_{S30} einzuschränken



Daten von 120 charakterisierten seismischen Stationen in der Schweiz (SED site characterization database, 2015)

V_{S30} -Vorhersage basierend auf V_{S10}
(links) und V_{S20} (rechts)



2/3) STUDIE

DEAMPLIFIKATION AN TALSPERRENSTANDORTEN MIT $V_{S30} > 1105$ M/S

Ziel 3: *Empfehlungen für Standortuntersuchungen zur zuverlässigen Anwendung der Deamplifikation*

Empfehlungen für nicht-invasive geophysikalische Messungen

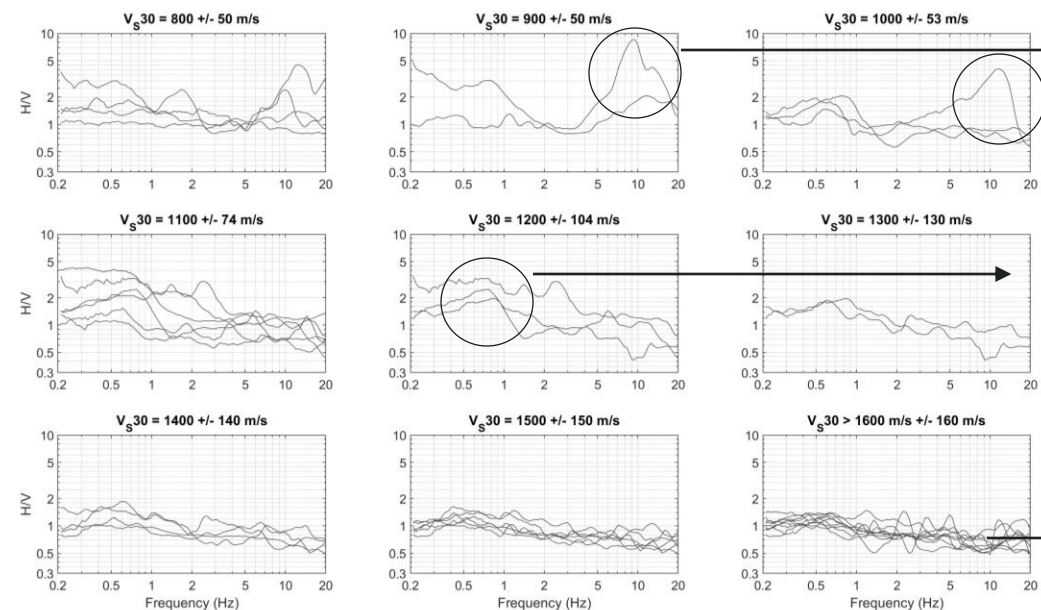
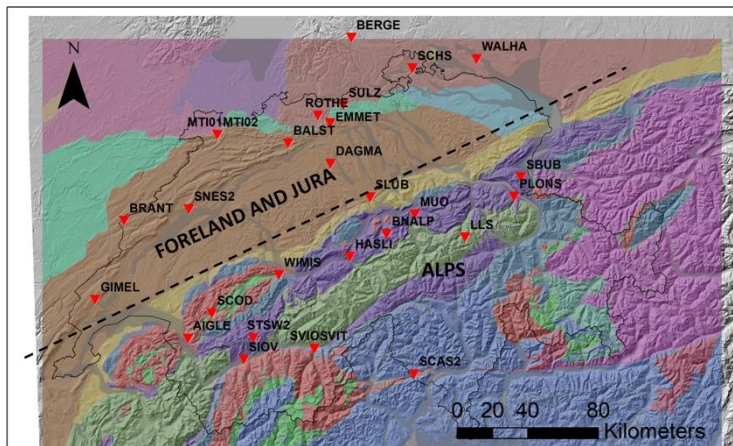
- H/V-Spektralverhältnis von Umgebungsgeräuschen zur Detektion von Impedanzkontrasten, auch in der Tiefe

H/V gemessen an Schweizer Stationen mit $V_{S30} > 750$ m/s

H/V-Messung bei STSW2 (Tseuzier, VS)



3-C Lennartz 5 s Sensor
Aufnahmedauer: > 30 Minuten



Flache
Impedanzkontraste (abgebautes
Gestein auf
kompaktem
Gestein)

Impedanzkontraste in der Tiefe

"Flaches" H/V ->
keine Resonanz



3/3) SCHLUSSFOLGERUNGEN DER PRÄSENTATION

■ Einführung – Seismische Standortverstärkung

Was ist das?

- Der Begriff "Seismische Standortverstärkung", "Seismische Standortamplifikation", bezieht sich auf die Wirkung des Oberflächenbodens auf seismische Wellen, die sich von der Kruste aus ausbreiten.
- Hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Geschwindigkeitsprofil von Scherwellen
- Im allgemeinen, sie verstärkt die Amplituden der seismischen Wellen, die sich in der Kruste ausbreiten.

Warum ist das wichtig?

- Die seismische Standortverstärkung verändert die Amplituden der seismischen Wellen erheblich (um den Faktor 10) und auf komplexe Weise (die von der Frequenz abhängt)

Wie kann es gemessen werden?

- Geophysikalische Messungen des lokalen Geschwindigkeitsprofils von Scherwellen (V_s) + Simulation der Wellenausbreitung
- Direkte Messung der seismischen Reaktion durch regionale Seismizität: spektrales Verhältnis von Standort zu Referenz, empirische spektrale Modellierung



3/3) SCHLUSSFOLGERUNGEN DER PRÄSENTATION

- Die Studie "Deamplifikationspotenzial in Bezug auf das elastische Antwortspektrum für Talsperrenstandorten mit $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$ "

Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none">- Empirische Verstärkungsfunktionen von schweizerischen und japanischen Stationen- Empirische Verstärkungsfunktionen aus erdbebenseismischen Aufzeichnungen
Wichtigste Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none">- Die Verstärkung der Stelle nimmt mit zunehmender V_{s30} ab. Bei $V_{s30} > 1105 \text{ m/s}$: Deamplifikation (im Vergleich zum Schweizer Referenzfels)- Danciu&Fäh-Korrekturfaktoren (2017): geeignete Option für die Deamplifikationsmodellierung, ausser in Hochperioden ($T > 1\text{s}$)- V_{s30} ist nur ein Proxy: Impedanzkontraste in der Tiefe können die Verstärkung in hohen Perioden bestimmen
Empfehlungen für geophysikalische Untersuchungen	<ul style="list-style-type: none">- Nicht-invasive Techniken können wirksam sein, vorausgesetzt, dass mehrere Messungen zusammen durchgeführt werden (Oberflächenwellen + Refraktion + H/V)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit
paolo.bergamo@sed.ethz.ch