

# Untersuchung von zwei Standorten in Yverdon mit Hilfe von Bodenunruhe Array-Messungen

Gabriela Stamm, Donat Fäh  
Schweizerischer Erdbebendienst ETH Zürich

## 1. Standorte

In Yverdon wurden an zwei verschiedenen Standorten Bodenunruhe Array-Messungen durchgeführt, mit dem Ziel, Scherwellengeschwindigkeits-Profile des Untergrunds zu erstellen. Ein Array (Array 3), dessen grösster Ring einen Durchmesser von ca. 1.4 km aufweist, wurde auf dem Gelände des Industriegebiets Y-Park aufgestellt. Zwei weitere, kleinere Arrays (Array 1 mit  $\varnothing_{\max} = 65$  m und Array 2 mit  $\varnothing_{\max} = 390$  m) befanden sich im Stadtzentrum, nahe der Starkbeben-Station Yverdon-Jordils (siehe Abb. 1).

Der kleinste (Ring 1) und der mittlere Ring (Ring 2) von Array 3 bestanden aus neun Stationen, der grösste (Ring 3) aus sechs. Da die Stationen des grössten Rings während der Nacht aufgezeichnet wurden sie in Kellern von umliegenden Häusern installiert. Die Zentralstation vom Ring 3 konnte ca. 70 m von jener der beiden kleineren Ringe entfernt installiert werden. Die weiteren fünf Stationen wurden möglichst regelmässig um diese Zentralstation herum aufgestellt. In der Innenstadt wurde die Geometrie beider Arrays dem Strassenverlauf angepasst, die jeweils neun Stationen sind daher kreuzförmig angeordnet.



**Abbildung 1:** Array-Messungen beim Standort Y-Park (links) und in der Innenstadt (rechts).  
▲ = Starkbebenstation Yverdon-Jordils.

Beide Standorte weisen eine minimale Topographie auf und sind somit für Array-Messungen gut geeignet. Auf dem Gebiet des Y-Parks konnten die Stationen hauptsächlich auf Feldern bzw. Wiesen aufgestellt werden, zur besseren Ankopplung wurden die Sensoren eingegraben. Der Standort Y-Park war zudem frei von jeglichem Durchgangsverkehr. In der Innenstadt wurden die Stationen auf asphaltiertem Untergrund installiert. Zwei stark befahrene Strassen lieferten Störquellen innerhalb von Array 2. Array 1 befand sich teilweise in einer autofreien Zone und war somit etwas ruhiger gelegen.

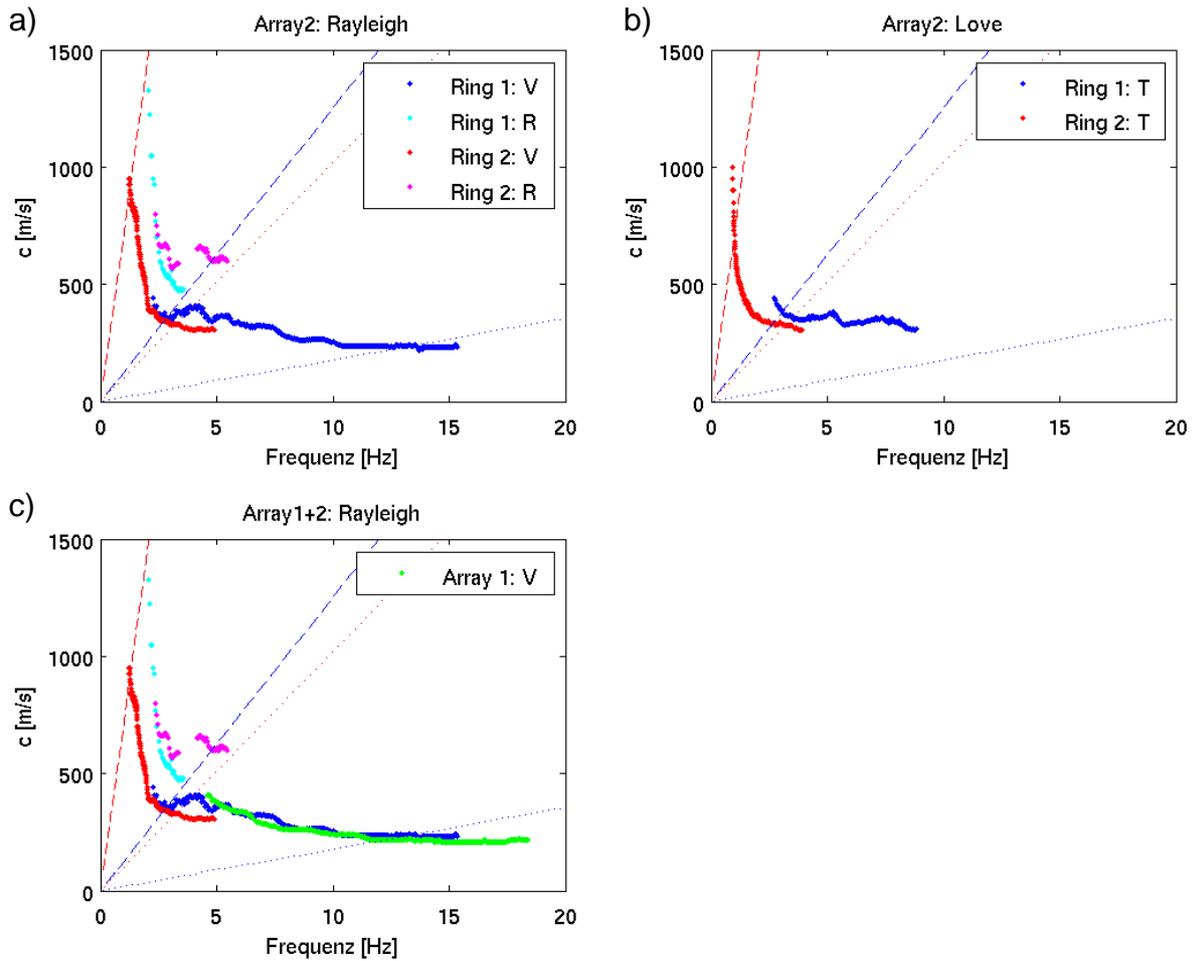
## 2. Methode und Resultate

Die verwendeten Sensoren (Lennartz LE-3D 5s) zeichnen vertikale und horizontale Komponenten der Bodenbewegung auf. Mit dem Programm "array-tool" (Kind, 2004; Fäh et al., 2006) wurden unter Verwendung der hochauflösenden  $f-k$  Methode nach Capon (1969) sowohl Rayleigh- als auch Love-Dispersionskurven bestimmt (siehe Abb. 2 und Abb. 3). Mit dem Programm "build-array" (Kind, 2002) wurde zudem für jeden Ring der theoretisch auflösbare  $f-c$  Bereich bestimmt. Diese werden in den Abbildungen 2 und 3 durch die gestrichelten und gepunkteten Linien begrenzt. Der Durchmesser eines Rings bestimmt die grösste auflösbare Wellenlänge (gestrichelte Linie), der kleinste Abstand zwischen zwei Sensoren die kleinste auflösbare Wellenlänge (gepunktete Linie). Um eine über einen grossen Frequenzbereich zusammenhängende Dispersionskurve zu erhalten, sollten sich die Auflösungsbereiche der verschiedenen Ringe innerhalb eines Arrays überschneiden. Lediglich beim grössten Ring des Array 3 besteht keine Überlappung mit dem nächst kleineren Ring, es gibt eine kleine Lücke (siehe Abb. 3).

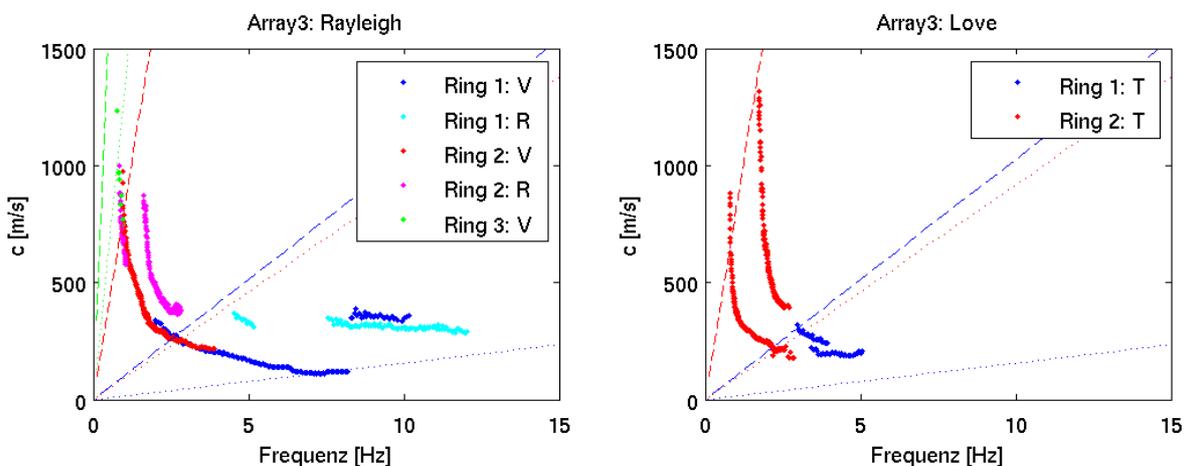
Die Auswertung der vertikalen Komponenten von Array 2 ergibt eine Rayleigh-Dispersionskurve im Bereich von 1 – 15 Hz. Da der Array 1 und Array 2 nahe beieinander liegen ergibt die Auswertung von Array 1 eine mit jener des kleineren Rings von Array 2 vergleichbare Kurve (siehe Abb. 2 c). Die Werte zwischen 1.3 und 3 Hz werden der Fundamentalmode zugeordnet. Jene zwischen 5 und 13 Hz können sowohl als Fundamental- (blaue Modelle in Abb. 5) als auch als erste höhere Mode (rote Modelle in Abb. 5) angepasst werden. Die Auswertung der transversalen Komponenten ergab für den Array 2 die Dispersionskurve der Love-Fundamentalmode zwischen 1 und 3 Hz. Ein weiterer Abschnitt von 5 – 8 Hz kann wiederum sowohl als Fundamental- als auch als erste höhere Mode angepasst werden. Die radialen Komponenten zeigen ebenfalls Teile der Dispersionskurve der ersten höheren Rayleigh-Mode (rote Modelle in Abb. 5).

Für den Array 3 ergab die Auswertung der vertikalen Komponenten die Dispersionskurve der Rayleigh-Fundamentalmode im Bereich von 1 – 8 Hz, sowie einen Teil einer höheren Mode bei höheren Frequenzen (8.5 – 10 Hz). Die radialen Komponenten des zweiten Rings ergaben zusätzlich einen Teil der Dispersionskurve der vermutlich ersten höheren Rayleigh-Mode (1.7 – 2.5 Hz). Die transversalen Komponenten zeigen Teile der Dispersionskurven der Fundamentalmode sowie der ersten höheren Mode der Love-Wellen.

Für die spätere Inversion wurden nur jene Teile der Dispersionskurven verwendet welche innerhalb ihres jeweils theoretisch auflösbaren Bereichs liegen.



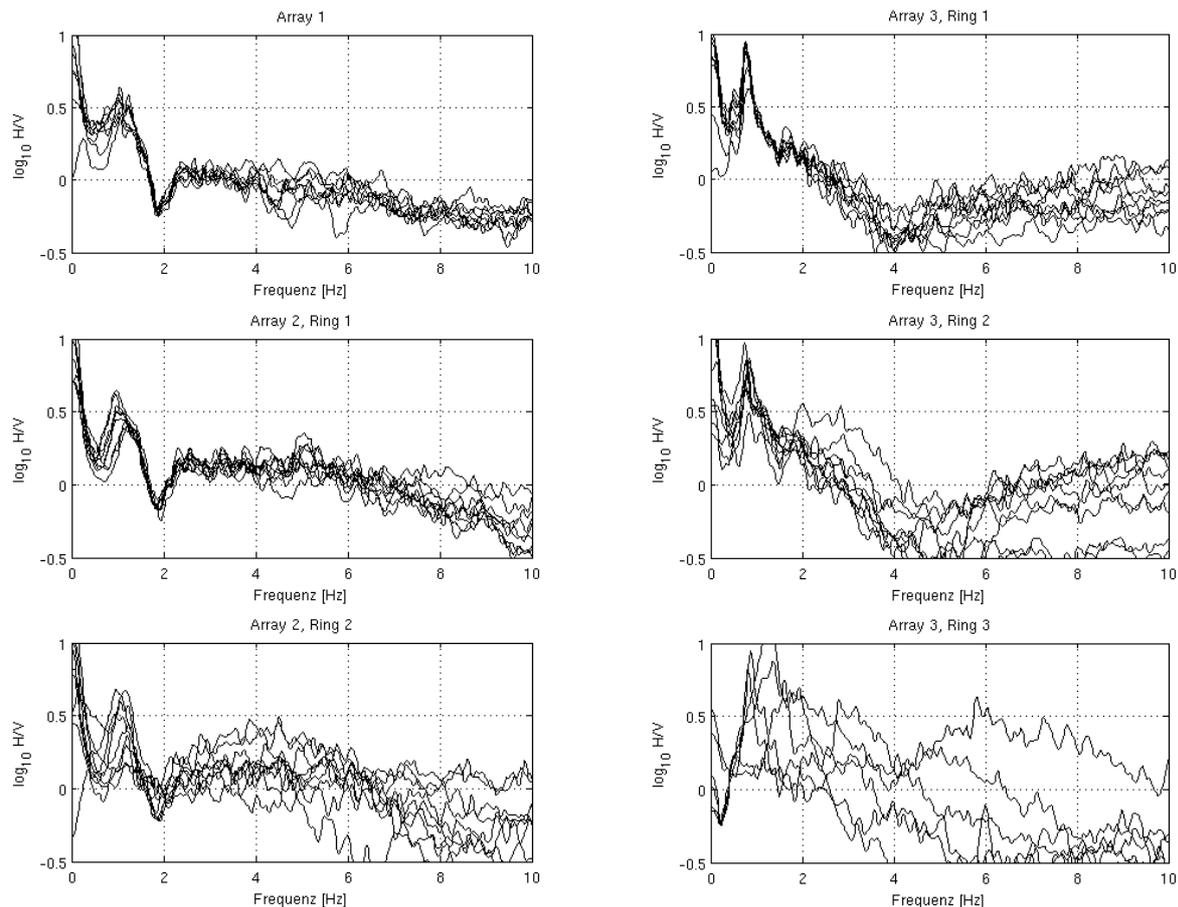
**Abbildung 2:** Rayleigh- (links) und Love-Dispersionskurven (rechts) für Array 1 und Array 2. V: vertikale Komponenten, R: radiale Komponenten, T: transversale Komponenten. Die gestrichelten und gepunkteten Linien zeigen den auflösbaren Bereich jedes Rings an. (a) Rayleigh-Dispersionskurven für Array 2, (b) Love-Dispersionskurven für Array 2, (c) Rayleigh-Dispersionskurve für Array 1 (grün), verglichen mit jenen von Array 2. Die Auswertung der horizontalen Komponenten von Array 1 ergab keine brauchbaren Dispersionskurven.



**Abbildung 3:** Rayleigh- (links) und Love-Dispersionskurven (rechts) für Array 3. V: vertikale Komponenten, R: radiale Komponenten, T: transversale Komponenten. Die gestrichelten und gepunkteten Linien zeigen den auflösbaren Bereich jedes Rings an. Die Auswertung der horizontalen Komponenten von Ring 3 ergab keine brauchbaren Dispersionskurven.

Zusätzlich wurden für jeden Ring eines Arrays die H/V-Spektren der einzelnen Stationen berechnet und miteinander verglichen. Mit Ausnahme des grössten Rings (Ring 3) von Array 3 zeigten alle Stationen innerhalb eines Arrays stabile H/V-Kurven (siehe Abb. 4). Die Annahme eines "eindimensionalen Untergrunds" ist also für Array 1, Array 2 sowie für die beiden kleineren Ringe von Array 3 gerechtfertigt.

Für die späteren Inversionen wurden für den Array 2 eine Eigenfrequenz  $f_0$  von 0.9 – 1 Hz und für den Array 3 eine  $f_0$  von 0.7 – 0.8 Hz verwendet.



**Abbildung 4:** Vergleich der H/V-Spektren aller Stationen innerhalb eines Rings.

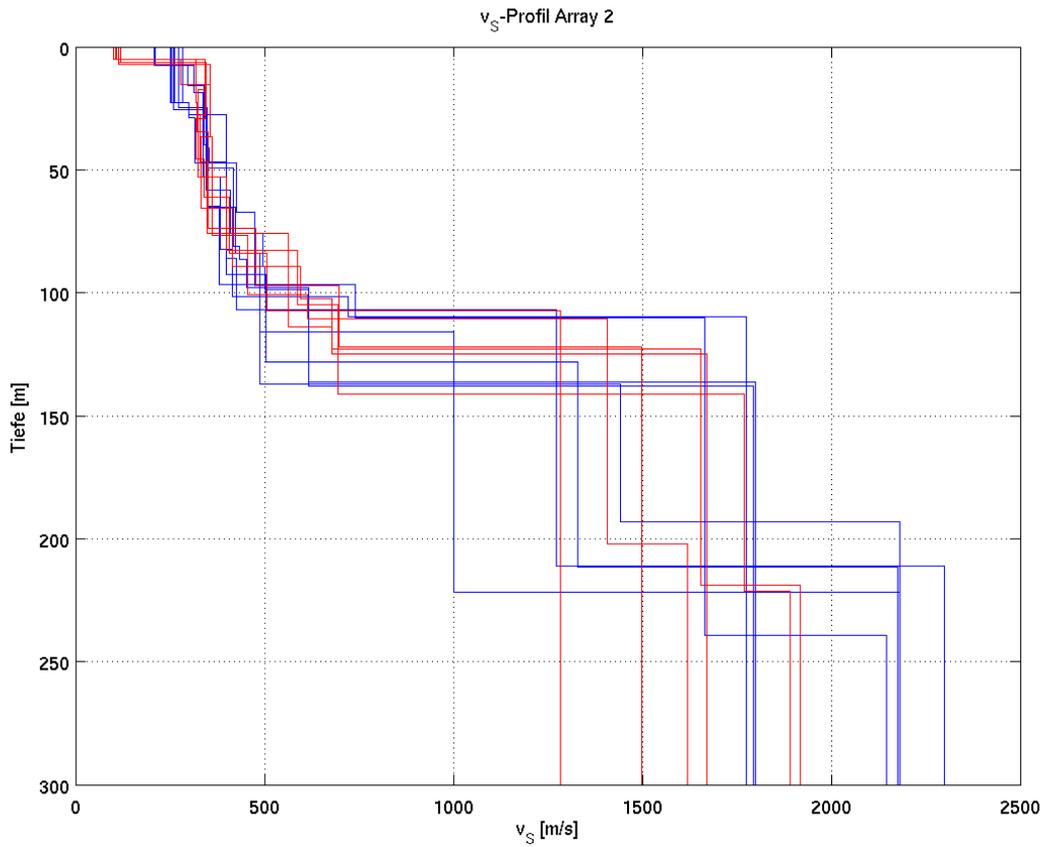
Die  $v_S$ -Profile wurden schliesslich durch Inversion einer Kombination von Rayleigh- und Love-Dispersionskurven und der Elliptizität erhalten. Dazu wurde ein von D. Fäh entwickeltes Programm benutzt, welches auf einem genetischen Algorithmus (nach D. Carroll, University of Illinois) basiert. Dabei werden die Dispersionskurven jeweils mit Hilfe der Modensummutation entwickelt, unter Verwendung der von Panza (1985), Panza & Suhadolc (1987) und Florsch et al. (1991) entwickelten Algorithmen.

Es wurden Inversionen für den Array 2 und Array 3 durchgeführt (siehe Kap. 3: Abb. 5 und Abb. 6). Aus den Abbildungen 2c und 4 ist ersichtlich, dass der Untergrund bei Array 1 (unmittelbar bei der Starkbebenstation Yverdon-Jordils) mit jenem von Array 2 vergleichbar ist.

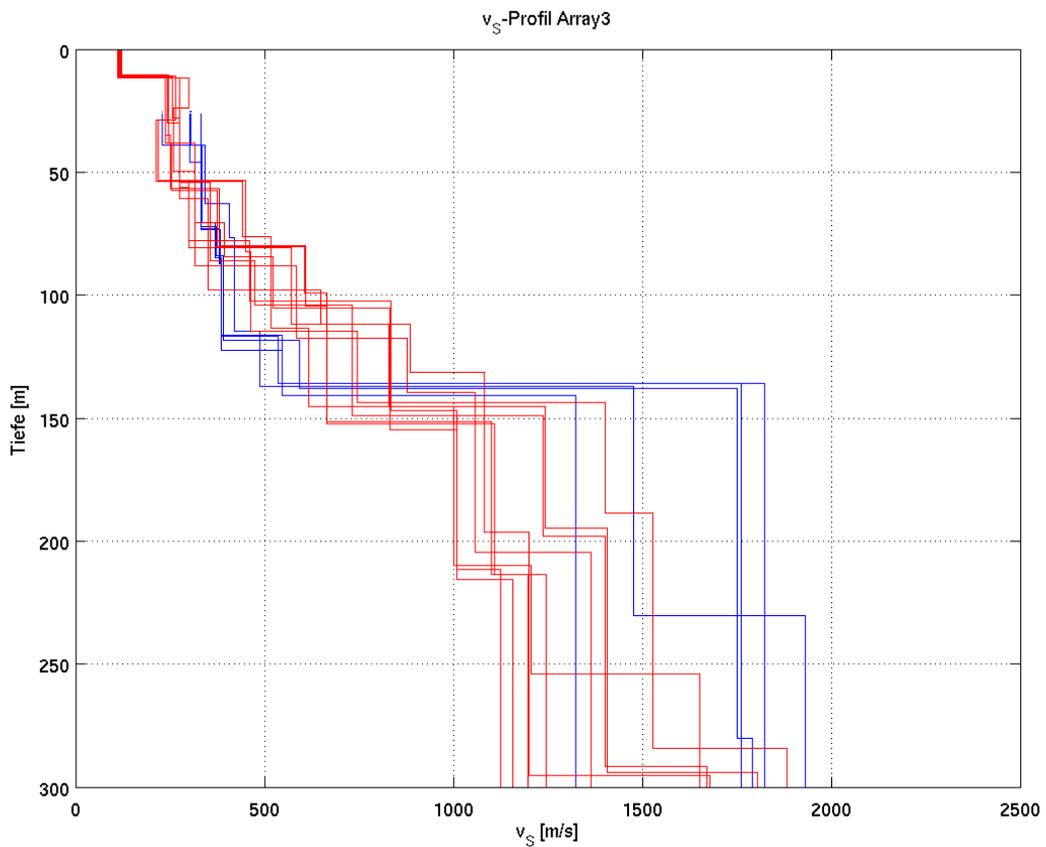
### 3. Diskussion der $v_S$ -Profile

Die mittels Inversion erhaltenen  $v_S$ -Profile für den Array 2 werden in Abbildung 5 gezeigt. Je nachdem ob der Rayleigh-Dispersionskurvenabschnitt zwischen 5 und 13 Hz der Fundamental- (blaue Modelle) oder der ersten höheren Mode (rote Modelle) zugeordnet wird, ergeben sich zwei verschiedene Typen von Untergrundmodellen. Die blauen Modelle zeigen an der Oberfläche eine etwa 20 m mächtige Schicht mit einer  $v_S$  von ca. 270 m/s. Dann steigen die Werte kontinuierlich an, bis in einer Tiefe von etwa 100 m  $v_S$  zwischen 400 und 500 m/s erreicht werden. Die Gesamtmächtigkeit der Lockersedimente beträgt 110 bis 140 m. Die roten Modelle hingegen lösen an der Oberfläche eine nur etwa 5 – 6 m dicke Schicht mit einer  $v_S$  von 100 – 120 m/s auf. Anschliessend folgt eine ca. 70 m mächtige Schicht mit einer  $v_S$  von 320 – 360 m/s. Dann steigen die  $v_S$ -Werte kontinuierlich an, bis in einer Tiefe von etwa 110 m Schwerwellengeschwindigkeiten zwischen 550 und 600 m/s erreicht werden. Der Übergang zum Fels erfolgt, wie bei den blauen Modellen, in einer Tiefe von 110 – 140 m. Die roten Modelle sind zu bevorzugen, da sie die Gesamtheit der verschiedenen beobachteten Dispersionskurvenabschnitte besser anpassen können.

Die für Array 3 beobachteten Dispersionskurven können ebenfalls durch zwei verschiedene Typen von Untergrundmodellen (Abb. 6) erklärt werden. Die roten Modelle können die Dispersionskurve der Rayleigh-Fundamentalmode bei hohen Frequenzen (5 - 7 Hz) gut anpassen. Sie vermögen daher eine oberflächennahe Schicht mit einer  $v_S$  von ca. 120 m/s aufzulösen, welche übrigens bereits beim Betrachten der Dispersionskurve der Rayleigh-Fundamentalmode in Abb. 3 erkennbar ist. Diese Schicht weist eine Mächtigkeit von ca. 10 m auf. Danach steigt die  $v_S$  gleichmässig an, bis sie in einer Tiefe von 100 - 120 m Werte zwischen 700 und 800 m/s erreicht. Die blauen Modelle hingegen können die oberflächennahe(n) Schicht(en) nicht auflösen. In einer Tiefe von 140 m wird jedoch ein deutlicher Übergang zu höheren  $v_S$  (Fels) sichtbar. Zwischen 40 und 70 m Tiefe ist die  $v_S$  ziemlich konstant bei 330 m/s, zwischen 70 und 120 m bei 390 m/s.



**Abbildung 5:** Durch Inversion erhaltene, mögliche  $v_S$ -Profile für den Standort bei der Starkbebenstation Yverdon-Jordils (Array 2).



**Abbildung 6:** Durch Inversion erhaltene, mögliche  $v_S$ -Profile für den Standort Y-Park (Array 3).

#### 4. Literaturverzeichnis

- Capon, J., 1969. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, *Proceedings of the IEEE*, **57**, 1408-1418.
- Fäh, D., Stamm, G. & Havenith, H.-B., 2006. Analysis of three-component ambient vibration array measurements, *submitted*.
- Florsch, N., Fäh, D., Suhadolc, P. & Panza, G.F., 1991. Complete synthetic seismograms for high frequency multimode SH-waves, *Pageoph.*, **136**, 529-560.
- Kind, F., 2002. Development of Microzonation Methods: Application to Basel, Switzerland, *Dissertation No. 14548*, ETH Zürich.
- Kind, F., 2004. Array tool for Matlab.
- Panza, G.F., 1985. Synthetic seismograms: the Rayleigh waves modal summation, *J. Geophys.*, **58**, 125-145.
- Panza, G.F. & Suhadolc, P., 1987. Complete strong motion synthetics, *Seismic Strong Motion Synthetics*, ed. Bolt, B.A, Computational Techniques, **4**, 153-204.