
Analiza combinată MASW + HVSR

De ce o singură tehnică nu este suficientă pentru determinarea profilului de viteze și cum se interpretează împreună dispersia și raportul spectral cu Easy MASW și Easy HVSR.

1. Problema: un set de date, multe subsoluri

Orice tehnică geofizică suferă de non unicitate: aceleași măsurători îi corespund numeroase modele de subsol diferite, toate compatibile cu datele. Nu este un defect al instrumentelor: este o proprietate a informației pe care măsurătoarea o conține.

Pentru a măsura cât cântărește cu adevărat acest efect, am realizat un experiment controlat. Am pornit de la un profil de subsol **cunoscut**, cu opt straturi, având Vs30 de 325 m/s. Din acel profil am generat curba de dispersie pe care un sondaj MASW ar fi măsurat-o. Apoi ne-am prefăcut că nu cunoaștem răspunsul și am mers invers: din date, să reconstruim terenul. De două sute de ori, cu ipoteze inițiale diferite.

O sută douăzeci și două de încercări au produs un profil care explică datele cu o eroare sub 3 % — o ajustare pe care orice operator ar considera-o excelentă. Dar acele profiluri nu sunt variante ale aceluiași teren.

122 profiluri · Vs30 de la 300 la 679 m/s

toate compatibile cu aceeași curbă de dispersie

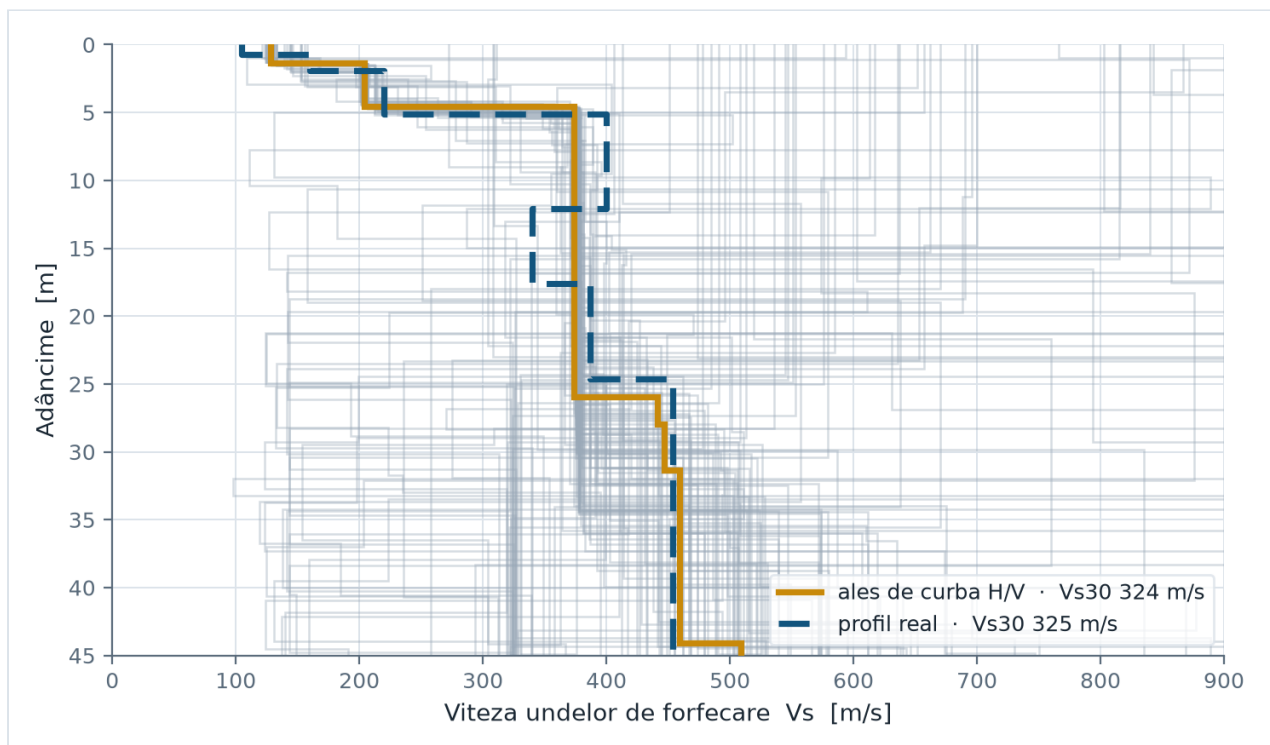


Figura 1. Cu gri, cele 122 de profiluri care explică la fel de bine aceleași date MASW. Cu albastru întrerupt, profilul real; cu auriu, cel selectat prin adăugarea curbei H/V. Dispersia singură nu face distincție între liniile gri: le consideră pe toate acceptabile.

Limita dintre **categoria B și categoria C** (360 m/s) cade în mijlocul distribuției: 83 dintre aceste profiluri se încadrează în categoria C, 39 în categoria B. Un profil din trei, pornind de la aceleași date, conduce la o clasificare seismică diferită.

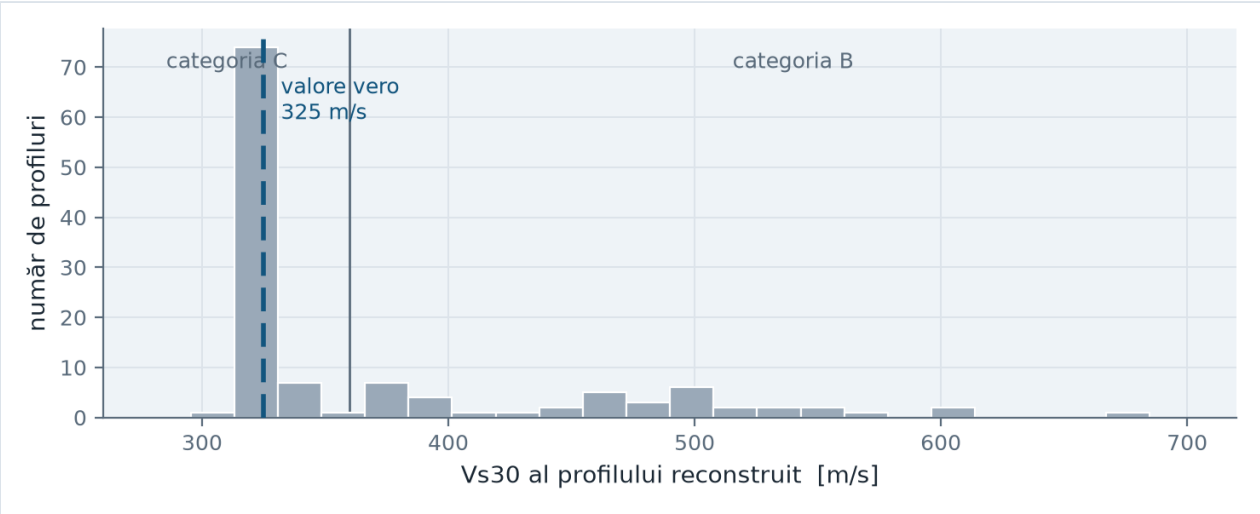


Figura 2. Distribuția valorilor Vs30 ale celor 122 de profiluri echivalente, cu benzile categoriilor de teren. Linia întreruptă indică valoarea reală.

DE REȚINUT

Când un program returnează *un* profil, nu afirmă că celelalte sunt greșite: returnează unul dintre profilurile compatibile cu măsurătoarea. Un misfit mic arată că modelul este compatibil cu datele, **nu că ar fi singurul.**

2. Limitele MASW, în detaliu

2.1 Adâncimea pe care datele o pot descrie

Un sondaj MASW rezolvă în mod fiabil lungimi de undă de ordinul **lungimii dispozitivului**. Fiecare punct selectat, la frecvența f și viteza de fază v , corespunde unei lungimi de undă $\lambda = v/f$; adâncimea investigată este cuprinsă aproximativ între $\lambda/3$ și $\lambda/2$.

Lungimea dispozitivului	λ maximă utilă	Adâncime investigată	Vs30 determinabil?
24 m	~24–48 m	8–12 m	nu, în mare parte extrapolat
48 m	~48–96 m	16–24 m	parțial
72 m	~72–144 m	24–36 m	da

Comparația cu cei 30 m ceruți de Vs30 este imediată. Cu dispozitive scurte — adică majoritatea celor realizate în practică — **partea adâncă a profilului nu este măsurată, ci extrapolată.**

ASPECT CRITIC: PUNCTELE AFLATE ÎN AFARA CAPACITĂȚII DE MĂSURARE

Într-un caz real, cu un dispozitiv de 24 m, două puncte fuseseră selectate la 4,7 și 5,0 Hz cu viteze de 491 și 428 m/s: lungimi de undă de **104 și 85 de metri**, de peste patru ori lungimea dispozitivului. Pentru a le explica, inversia a plasat un substrat de 717 m/s la 18 metri adâncime — un substrat inexistent. Ajustarea rămânea excelentă și niciun indicator nu semnală problema. După eliminarea celor două puncte, conflictul a dispărut.

2.2 Ambiguitatea modală

Curba de dispersie nu este una singură: există un mod fundamental și o serie de moduri superioare. În spectrul de viteză se identifică o curbă bine definită, care este interpretată în mod normal ca mod fundamental. **Uneori nu este:** când energia se distribuie pe modurile superioare, modul fundamental poate fi slab sau complet absent, iar curba cea mai evidentă este în realitate un mod superior.

În testele noastre, atribuirea modului fundamental unei curbe care era în schimb primul mod superior a dus Vs30 de la 325 la **451 m/s**: o categorie de teren greșită, cu o eroare de ajustare a dispersiei sub 1 %. Repetată de 155 de ori, eroarea s-a dovedit **sistematică** — mereu în aceeași direcție, niciodată aleatorie.

2.3 Undele Love: ce ar aduce în plus

O modalitate de a demasca eroarea modală este achiziția unui al doilea tip de undă. **Undele Love**, care necesită geofoni orizontali transversali și o sursă dedicată, furnizează o a doua curbă de dispersie pe care același model trebuie să o explice: o atribuire modală eronată pe componenta Rayleigh apare ca incompatibilitate cu componenta Love.

Trebuie spus cu onestitate că, în verificările noastre, analiza combinată cu simpla curbă H/V s-a dovedit capabilă să respingă modelele eronate în aproape toate cazurile examinate. Utilitatea suplimentară a undelor Love rămâne plauzibilă și este documentată în literatură, dar **nu a fost demonstrată cantitativ** pe datele noastre: din acest motiv o tratăm ca pe o dezvoltare posibilă și nu ca pe o cerință.

3. Ce aduce HVSR

Tehnica HVSR obține, din zgomotul seismic ambiental înregistrat cu un tromometru cu trei componente într-o singură stație, raportul spectral dintre componentele orizontale și cea verticală. Vârful acelei curbe identifică **frecvența fundamentală de rezonanță** a amplasamentului.

3.1 Elipticitatea: puntea dintre date și stratigrafie

Pentru a obține un profil din curba H/V este nevoie de un model fizic care să arate ce H/V ar produce un teren dat. Ipoteza adoptată — aceeași cu cea a principalelor instrumente științifice din domeniu — este că zgomotul ambiental este dominat de unde Rayleigh în modul fundamental și că, prin urmare, curba H/V

măsurată poate fi aproximată prin curba de **elipticitate** a undelor Rayleigh: raportul dintre componenta orizontală și cea verticală a mișcării eliptice pe care o particulă o descrie la trecerea undei.

Elipticitatea constrânge bine frecvența de rezonanță, care în primă aproximație depinde de *raportul* dintre viteza medie și adâncimea contrastului principal — nu de cei doi termeni luați separat. Un teren lent și subțire și unul mai rapid și mai adânc produc aceeași f_0 și curbe H/V aproape imposibil de deosebit.

ÎNTR-O SINGURĂ FRAZĂ

Curba H/V arată **unde este fundul**; dispersia MASW arată **cum este alcătuit deasupra**. Niciuna dintre ele, singură, nu arată ambele lucruri.

3.2 De ce funcționează împreună

Cerința ca un **singur** model stratificat să explice simultan curba de dispersie și curba H/V elimină o mare parte din ambiguitate: dispersia fixează vitezele primilor metri, curba H/V ancorează adâncimea contrastului principal și constrânge porțiunea adâncă pe care dispozitivul nu o atinge. În experimentul din Figura 1, dintre cele 122 de profiluri imposibil de deosebit doar pe baza dispersiei, cel care explică cel mai bine și curba H/V are **Vs30 = 324 m/s** față de 325 reali.

4. Cum se execută analiza

1 Pe teren

În același punct: dispozitivul MASW obișnuit cu sursă activă și o înregistrare HVSR de 15–20 de minute cu tromometru cu trei componente, de preferință în centrul dispozitivului. **Cele două sondaje trebuie să se refere la același punct**: dacă aparțin unor poziții diferite, analiza combinată nu are sens.

2 În Easy MASW — picking și export

Se prelucrează urmele și se realizează picking-ul curbei de dispersie, atribuind fiecărei curbe propriul număr de mod. Înainte de export este util să se verifice lungimea de undă a punctelor de joasă frecvență ($\lambda = v/f$) și să se excludă cele care depășesc dublul lungimii dispozitivului.

Comanda **Exportă dispersia** produce un fișier .dsp: text simplu, o linie pe punct, cu tipul de undă, numărul de mod, frecvența și viteza de fază. Sunt exportate toate curbele modale selectate.

3 În Easy HVSR — import și inversie

După prelucrarea curbei H/V, comanda **Importă dispersia MASW** încarcă fișierul .dsp și indică numărul de puncte și de moduri. Caseta **Folosește dispersia MASW** permite activarea și dezactivarea contribuției dispersiei fără a reimporta nimic: este modalitatea de a compara, în cadrul aceluiași proiect, rezultatul cu și fără.

Se definește modelul stratificat și se pornește **Căutarea**: inversia evaluează fiecare model candidat comparându-l cu ambele curbe, minimizând suma ponderată a celor două abateri.

5. Recomandări practice pentru inversia în Easy HVSR

5.1 Construirea modelului

- **Cinci sau șase straturi**, nu trei. Cu puțini parametri liberi modelul nu are mijloacele de a satisface două curbe simultan, iar rezultatul este un compromis care nu mulțumește niciuna.
- **Limite de căutare largi în adâncime**. Viteza de fază a undelor Rayleigh nu poate depăși cu mult V_s a semispațiului: dacă datele conțin viteze de 400–500 m/s, o limită $V_s \text{ max}$ de 900 m/s pe ultimul strat este deja restrictivă. Valori de 1500–2000 m/s lasă inversia să lucreze.
- **Adâncime totală de cel puțin 30 m**, dacă interesează V_{s30} : altfel acea valoare depinde în mare măsură de semispațiu.

5.2 Blocarea sau nu a primului strat

În inversia bazată doar pe curba H/V se recomandă blocarea primului strat cu valori cunoscute, deoarece fără o informație externă problema rămâne nedeterminată. **Cu dispersia importată acea recomandare nu mai este valabilă**: primii metri sunt tocmai ceea ce MASW măsoară cel mai bine. Blocarea primului strat pe o valoare de încercare înseamnă a impune modelului o informație mai puțin fiabilă decât cea conținută în date.

Blocarea rămâne potrivită atunci când valoarea provine dintr-o măsurătoare directă — un foraj, o încercare în gaură — și nu dintr-o estimare.

5.3 Citirea rezultatului

Trebuie verificate **ambele** curbe calculate, nu doar una: elipticitatea suprapusă peste curba H/V măsurată și curba de dispersie suprapusă peste punctele importate.

Ce se observă	Ce înseamnă
Curba calculată nu atinge punctele la frecvențe joase	Modelul nu are material suficient de rapid în adâncime: măriți $V_s \text{ max}$ al ultimului strat. Dacă limita este deja mare, verificați dacă acele puncte se încadrează în banda utilă a dispozitivului

Ce se observă	Ce înseamnă
Curba calculată trece deasupra punctelor la frecvențe înalte	Vitezele superficiale ale modelului sunt prea mari; dacă primul strat este blocat, blocarea este cea care împiedică scăderea
Un parametru coincide cu propria limită de căutare	Constrângerea decide rezultatul, nu datele: lărgiți intervalul pentru a vedea unde s-ar opri de fapt inversia
O curbă este reprodusă bine, iar cealaltă vizibil prost	Cele două măsurători sunt în conflict: cauza trebuie căutată în date (puncte în afara benzii, mod atribuit greșit, sondaje în puncte diferite) înainte de parametri
Elipticitatea atinge valori mult mai mari decât H/V măsurat	Contrast de impedanță foarte brusc: elipticitatea teoretică diverge la rezonanță. Introduceți un strat intermediar sau atenuați saltul de viteză

Easy HVSR analizează automat aceste condiții la finalul fiecărei căutări și le prezintă în caseta **Sugestii**. Este util să fie citită înainte de modificarea parametrilor prin încercări: în majoritatea cazurilor indică deja direcția corectă.

5.4 Convergența

Numărul de parametri liberi crește rapid odată cu straturile: șase straturi cu grosimi și viteze libere înseamnă unsprezece necunoscute. Dacă apare avertismentul privind numărul maxim de iterații, este preferabil să se procedeze în două etape — întâi cu grosimile blocate, pentru a determina vitezele, apoi eliberând geometria pornind de la rezultatul obținut — în loc să se mărească doar numărul de iterații.

REGULA CEA MAI IMPORTANTĂ

Nu calitatea ajustării ne spune dacă un profil este corect, ci **câte profile diferite obțin aceeași ajustare**. Analiza combinată nu îmbunătățește un rezultat deja bun: reduce numărul de răspunsuri posibile, iar acest lucru face rezultatul utilizabil.

Datele experimentale citate provin din teste controlate pe modele cunoscute, prelucrate cu motorul de calcul GeoStru. Alegerea datelor sintetice este deliberată: numai cunoscând răspunsul exact este posibilă măsurarea erorii. Pe date reale non unicitatea este mai mare, nu mai mică.

Easy MASW și **Easy HVSR** — GeoStru · geostru.eu

Manuale: help.geostru.io/masw · help.geostru.io/easyhvsr