

Előzetes szerkezeti és litológiai elemzések az archív Lithoprobe Line-4 mélyszeizmikus szelvény mentén – Vancouver-sziget, Kanada

TAKÁCS E.^{1,2,@}, HAJNAL Z.³, GÚTHY T.¹, ANNESLEY I. R.^{3,4}

¹Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Szolgálat
1123 Budapest, Alkotás utca 50.

²Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar
3515 Miskolc-Egyetemváros, A/2 épület, II. emelet

³University of Saskatchewan, Department of Earth Sciences
114 Science Place, Saskatoon, SK, S7N 5E2, Canada

⁴Université de Lorraine, Département de Géologie
34 Cours Léopold, Nancy, Lorraine 54000, France

@E-mail: erno.takacs@sztfh.hu

Az elmúlt évben elvégeztük a Lithoprobe-program keretében Vancouver-szigeten mért Line-4 elnevezésű mélyszeizmikus szelvény (1984) archív adatainak újrafeldolgozását. A kanadai kutatási program aktívan 1984-től 2005-ig tartott. Célja a szárazföld és a határoló kontinentális peremek szerkezetének, összetételének és fejlődéstörténetének háromdimenziós térben történő meghatározása volt az észak-amerikai kontinens teljes szélességén keresztül. A multidiszciplináris program eredményeként eddig több mint 1500 publikáció jelent meg. Az utóbbi időben felvetődött, hogy az archív adatokat (Kanadai Geológiai Szolgálat) újszerű kvalitatív és kvantitatív feldolgozási eljárásokkal ismét feldolgozzuk. Tanulmányunkban a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága, Földtani Szolgálatát által elért első eredményeinket mutatjuk be, amelyek egy nemzetközi kutatási együttműködés első lépéseit jelentik.

Takács, E., Hajnal, Z., Gúthy, T., Annesley I. R.: Preliminary structural and lithological studies along the archive Lithoprobe Line-4 deep seismic profile – Vancouver Island, Canada

Last year we reprocessed archive data from the Line-4 (1984) deep seismic section shot on Vancouver Island, which was acquired as part of the Lithoprobe program. The Canadian research program ran from 1984 to 2005. Its objective was to determine the structural, compositional and evolutionary history of the mainland and its adjacent continental margins in 3D space over the entire width of the North American continent. The multidisciplinary program has resulted more than 1500 publications up to now. Recently, the idea was raised to reprocess the archive data (Canadian Geological Survey) using novel qualitative and quantitative processing techniques. In our study, we present the first results of our work at the Geological Survey of Supervisory Authority for Regulatory Affairs (Hungary), which represent the first steps of international research collaboration.

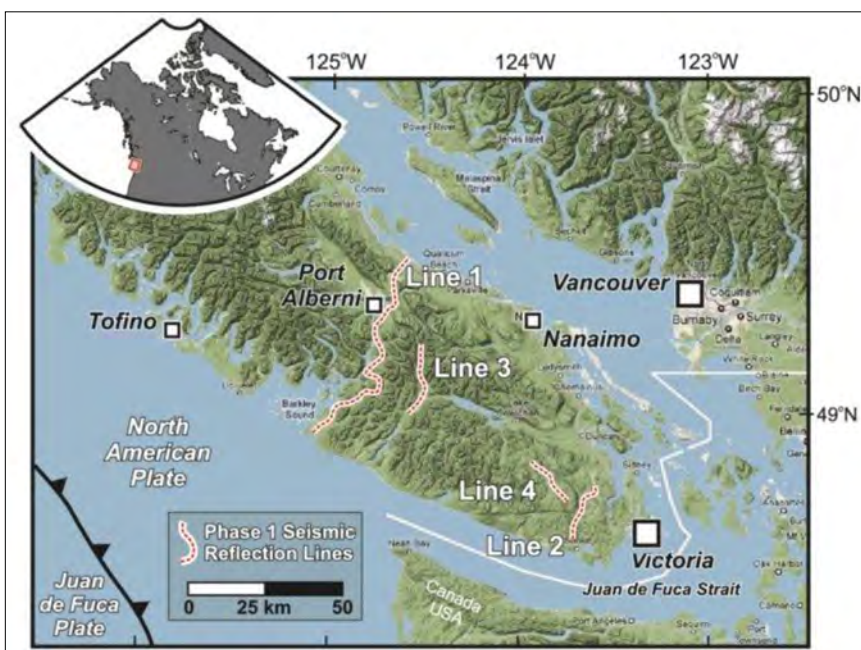
Beérkezett: 2024. május 3.; *elfogadva:* 2024. szeptember 2.

1. Bevezetés

A kanadai Vancouver-szigeten négy mélyszeizmikus szelvényt mértek a Lithoprobe-program keretében (1. ábra), amelyek segítségével 1985-ben látványosan leképezték a csendes-óceáni és a szárazföldi kéreglemez alábukási zónáját. A szigeten mért szelvények közül a Line-4 jelű jól mutatja a Juan de Fuca óceáni kéreglemez É-amerikai kontinentális lemez alá bukása (2. ábra) következtében kialakult Leach River Fault (LRF) mestervetőt is (Green et al. 1985, 1986, Clowes 2010). Nemrég felkérést kaptunk a kanadai Saskatchewan Egyetemről a mélyszeizmikus adatok újszerű algoritmusokkal történő újrafeldolgozására. Mivel úgy gondoltuk, hogy az újrafeldolgozás során nyert tapasztalatok megtérülhetnek a Kárpát-medence még összetettebb mélyföldtani viszonyainak tisztázásához, kipróbáltunk két

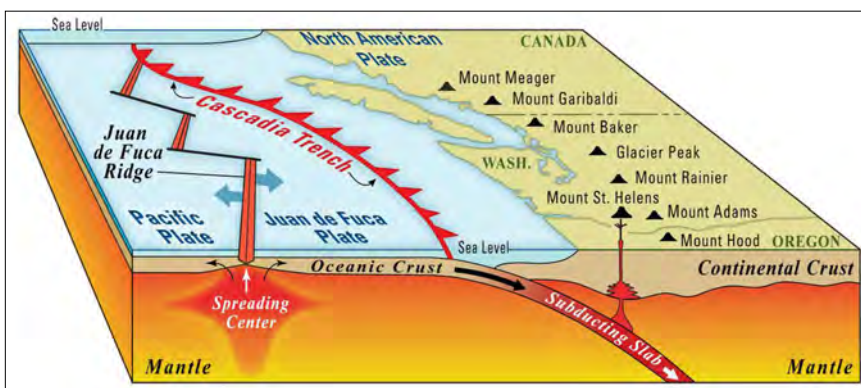
olyan adatfeldolgozási eljárást, amelyek lehetővé tették az archív adatok korábbiaknál magasabb jel/zaj viszonyú és litológiai szempontból is értelmezhető megjelenítéseit. Tanulmányunkban mindazokat az eddig elért eredményeket mutatjuk be, amelyeket a CRS (Common Reflection Surface) és az AVO (Amplitude Versus Offset) adatfeldolgozási eljárások alkalmazásával értünk el.

A Line-4 jelű mélyszeizmikus adatok reflexiók felvételezése a Lithoprobe program legelső fázisában, 1984-ben történt. A vibroszeiz rezgéskeltéssel mért szelvény földrajzi hossza kb. 22 km, a korrelált felvételek teljes hossza pedig 16 s volt. A fellelhető terepi mérési dokumentáció sajnos nem volt teljes, ezért az újrafeldolgozáshoz szükséges geometriai leírások pontosítása a rendelkezésre álló egyéb általános információkból és az egyes terepi felvételek első beérkezéseinek szimmetriája, aszimmetriája alapján tör-



1. ábra Vancouver sziget DK-i részének topográfiai térképe a négy Lithoprobe szelvény helyének feltüntetésével (Clowes 2010)

Figure 1 Topographic map of the SE part of Vancouver Island showing the location of the four Lithoprobe sections (Clowes 2010)



2. ábra A Juan de Fuca óceáni kéreglemez É-amerikai kontinentális lemez alábukása (<https://www.usgs.gov/media/images/subduction-juan-de-fuca-plate-beneath-north-american-plate>)

Figure 2 The Juan de Fuca oceanic crustal plate collapsing under the North American continental plate (<https://www.usgs.gov/media/images/subduction-juan-de-fuca-plate-beneath-north-american-plate>)

tént. Így gyakorlatilag az egyedi felvételekből következtetünk a terepi geometriára. Mivel az eredeti szelvényhez nagyon hasonló (azonban jobb minőségű) szelvényt állítottunk elő, feltételezzük, hogy a kialakított geometriai leírás a ténylegestől csak minimális mértékben térhet el.

2. Az archív mélyszeizmikus adatok előfeldolgozása

A szeizmikus terepi adatok előfeldolgozása során amplitúdóhű adatfeldolgozást hajtottunk végre. Igyekeztünk helyreállítani a reflexiók beérkezések relatív amplitúdóit, és kerültük mindazon műveleteket, amelyek torzítják azokat (automatikus erősítésszabályozás, teljes csatornaki-egyenlítés, többszörös jel/zaj viszonyok javítása). Erre azért volt szükség, mert végső célkitűzésünk olyan inverziós algoritmusok kipróbálása volt, amelyek a reflexiók amplitúdók változásai alapján eredményeznek litológiailag kiértékelhető kőzetfizikai modelleket (AVO-inverzió és Simultaneous Model-based inverzió). A szeizmikus előfeldolgozás lépéseit az 1. táblázatban közöljük.

1. táblázat Az archív terepi mélyszeizmikus adatok amplitúdóhű előfeldolgozásának lépései
Table 1 Steps in true amplitude preprocessing of archival field deep seismic data

Sorszám	Feldolgozási műveletek
1.	Geometria leírás
2.	Csatornaszerkesztések (KILL, MUTE)
3.	Valódi amplitúdóhelyreállítás (TAR)
4.	Felszínkonzisztens amplitúdókiegyenlítés
5.	Felszínkonzisztens dekonvolúció
6.	Frekvencia-sávszűrés (5–8–40–45 Hz)
7.	Sebességmeghatározás (Velocity Spectra)
8.	Normál Moveout korrekció (NMO)
9.	Domborzati statikus korrekció
10.	Időben változó statikus javítás (TRIM)
11.	Sebességmeghatározás (Velocity Spectra)
12.	Normál Moveout korrekció (NMO)
13.	Hagyományos CDP szerinti összegzés
14.	Kirchhoff-féle időtartománybeli migráció
15.	Frekvencia-sávszűrés (5–8–40–45 Hz)

A lehetőség szerinti részletes sebességmeghatározás fontos eleme volt a feldolgozási folyamatnak egyrészt azért, mert ez a reflexiók adatfeldolgozása egyik alapvető művelete. Másrészt pedig Késmárky és Hajnal (1991) korábbi sebességvizsgálataik alapján csökkent P-hullám-sebességű zónákat mutattak ki a Line-1 jelű szelvény mentén, a földkéreg mélyebb tartományában (4 és 8 s TWT környezetében). Jelenlegi feldolgozásunk egyik célja annak vizsgálata volt, hogy hasonló intervallumsebesség-anomáliák a Line-4 jelű szelvény hasonló mélység tartományában is észlelhetők-e? Ennek a kérdésnek az a gyakorla-

ti jelentősége, hogy az ilyen zónák *fluid tartalomra és/vagy serpentinites zónákra utalhatnak, amelyek jelentős szerepet játszanak a szubdukciós folyamatokban* (Watanabe et al. 2007, Pagé, Hattori 2017).

3. A CRS szerinti összegzés és az AVO-inverzió alapjai

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a tanulmányban alkalmazott újszerű szeizmikus adatfeldolgozási eljárások elméleti és gyakorlati hátterét. Arra törekedtünk, hogy a szerteágazó szakirodalmi hivatkozások közül csak azokat jelöljük meg, amelyek a leginkább követhetővé teszik ezt az áttekintést.

3.1. A közös reflexiók felület (Common Reflection Surface) szerinti összegzés

Az eljárást az 1990-es évek végén olyan bonyolult felépítésű földtani szerkezetek szeizmikus leképezésére dolgozták ki, amelyekre a hagyományos közös mélységpont (CDP) szerinti összegzés nem adhat kellően pontos képet. Ennek oka, hogy *nagyobb dőlésű (vagy gyúrt) határfelületek esetén a szeizmikus hullámok nem egy-egy pontról (CDP), hanem elemi felületekről (CRS) verődnek vissza, ami azonban figyelembe vehető az egyedi csatornák összegzésekor* (Mann et al. 1999, Jäger et al. 2001).

A reflektált hullámok menetidőinek kiszámításához a CRS-eljárás három hullámtér-attribútumot alkalmaz, amelyeket geometriai optikai alapon határoztak meg. Mindhárom attribútum a hullámfrontokkal van összefüggésben (Bazelaire et al. 1999, Menyoli et al. 2004). Ezek a „nulla-ofszetű sugár” felszíni beérkezési szöge, a „normál beesési pont (NIP) hullám” frontjának a görbülete és a „normál (N) hullám” frontjának a görbülete. A fenti sugárelmélet matematikailag az alábbi formában adható meg a reflektált P-hullámok beérkezéseire (Mandal et al. 2014):

$$t^2(x_m, P) \approx \left(t_0 + \frac{2 \sin \alpha_0}{v_0} (x_m - x_0) \right)^2 + \frac{2 t_0 \cos^2 \alpha_0}{v_0} \left(\frac{(x_m - x_0)^2}{R_N} + \frac{h^2}{R_{NIP}} \right),$$

ahol t a menetidő, t_0 a „nulla-ofszetű menetidő”, x_0 a „nulla-ofszetű sugár” beérkezési helye a felszínen, h a féltávolság a forrás és a vevő között, x_m a középpont koordinátája és v_0 a felszínközeli sebesség (Kiss, Takács 2021). Az α_0 , R_{NIP} és R_N paraméterek a fentiekben megnevezett CRS-attribútumokat jelentik.

Minden CRS összegzéshez előállításához először egy megfelelő jel/zaj viszonyú modellszelvényt kell előállítani a hagyományos CDP szerinti összegzéssel. E „pilot” szelvény alapján történik a reflexiók dőlésének meghatározása, változó meredekségű egyeneseket illetve az összegzéshez minden mintavételi helyén automatikus koherencia-

analízist alkalmazva. A dőlésmeghatározás jelentősége egyrészt az, hogy a dőlt (vagy görbült) reflektorokon meg lehet határozni a „normál beesési pontok (NIP)” visszaverődési helyét és a „nulla-ofszetű sugár” felszíni beérkezési szögének α_0 értékekét. Másrészt pedig a dőlésértékeket a későbbi CRS-összegzés előtt figyelembe lehet venni az NMO-korrekció (valójában DMO-korrekció) végrehajtásakor. A hullámfront görbületek (R_{NIP} és R_N) szintén automatikus koherenciaanalízissel számíthatók, a fenti egyenlet szerinti analitikus menetidőgörbéket illetve az összegzés előtti csatorna gyűjteményekre.

Az újszerű összegzési eljárásnak több előnye is van szerkezetileg bonyolult földtani viszonyok esetén (Kiss, Takács 2021). Egyrészt magasabb jel/zaj viszony érhető el a hagyományos CDP-összegzéshez képest, mivel olyan mélységgel változó sugarú elemi felületeket használ az egyedi csatornák összegzéséhez, amelyek több reflexiós pontot foglalnak magukban, mint a horizontálisához közeli visszaverő felületekre kidolgozott CDP-összegzési eljárás. Ez a tesztek alapján meghatározott kritikus paraméterfüggvény (TWT-keresési sugár) határozza meg, hogy a különböző mélységekben milyen sugarú távolságon belül történik az összegzés. Másrészt pedig a reflektáló felületeket pontosabb geometriával lehet leképezni, mivel a CRS algoritmus figyelembe veszi a meredek reflektorok dőlését is. Az eljárás lényegét Yilmaz (1999) nagyon szemléletesen foglalta össze egy rövid ajánlásában nagyon találó címmel: „When Reflections are not Hyperbolas and Reflectors are not Points”.

Mindezek mellett megjegyezzük, hogy a CRS-összegzés alkalmazása gyakorlatilag két adatfeldolgozási gráf végrehajtását igényli. Először el kell végezni egy hagyományos CDP szerinti adatfeldolgozást, azután pedig a CRS összegzéshez szükséges további speciális műveleteket.

3.2. Az észlelési távolságtól függő amplitúdók (Amplitude Versus Offset) analízise

Az észlelési távolságtól (vagy beesési szögtől) függő AVO- (AVA-) analízis kőzetfizikai, matematikai és gyakorlati alapjaiba Chopra és Castagna (2014) nyújt részletes betekintést. A módszer az összegzés előtti reflexiós amplitúdók beesési szög szerinti inverzióján alapszik. Egy szeizmikus határfelületre beeső P-hullám esetén ugyanis a határfelületen keletkező visszavert és átmenő P- és S-hullámok amplitúdóját, azaz a reflexiós és transzmissziós koefficienseket matematikailag a Zoeppritz-féle (1919) mátrixegyenlet írja le a 0° – 90° szögtartományban. A gyakorlatban a mátrixegyenlet többféle egyszerűsítését alkalmazzák az inverzió elvégzésekor. A legnépszerűbbek az Aki-Richards- és a Shuey-féle közelítések (Richards és Frasier 1976, Shuey 1985). Ezek a közelítések megfelelőek a beesési szögeknek abban a tartományában, melyet egy szokásos felszíni szeizmikus felmérés során észlelünk. Shuey (1985) megközelítése szerint a P-hullám reflexiós koefficiensek lineáris függvénnyel írhatók le a 0° – 30° közötti tartományban a beesési szög szinusz négyzetének függvényében, és

az egyenes meghatározza a két alapvető AVO-attribútumot, amelyek a tengelymetszet (A) és a meredekség (B):

$$R(\theta) = A + B \sin^2 \theta,$$

ahol

$$A = \frac{1}{2} \frac{\Delta(\rho\alpha)}{(\rho\alpha)}$$

és

$$B = \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\Delta\beta}{\beta} - 2 \frac{\beta^2}{\alpha^2} \frac{\Delta\rho}{\rho} \right),$$

illetve θ a beesési szög, α és β a P- és S-hullám sebessége, ρ pedig a kőzetek sűrűsége. Ez a két AVO-attribútum egyenes illesztésével kiszámítható az összegzés előtti CDP-gyűjtemények minden egyes mintavételi helyén a reflektált amplitúdók $\sin^2 \theta$ függvényében történő megjelenítésével (lásd még Takács 1996).

Az alapvető AVO-attribútumokat ritkán alkalmazzák önmagukban, mivel közvetlenebb kőzetfizikai tartalommal rendelkező és litológiai szempontból is informatívabb paraméterek származtathatók belőlük. A szénhidrogén-kutatásban az úgynevezett „skalázott Poisson-tényező-változás” az egyik legelterjedtebben használt indikátor a porózus földtani formációk kimutatására az összegzés előtti szeizmikus adatok alapján. Hilterman (1990) levezetése a Shuey-féle közelítésen alapul. Rámutatott arra, hogy ha a háttér Poisson-tényezőt (σ) $1/3$ -nak tételezzük fel, ami átlagosan megfelel a $V_p/V_s = 2$ értéknek, akkor az $A + B$ összeg arányos a Poisson-tényező relatív változásával ($\Delta\sigma$):

$$A + B = \frac{9}{4} \Delta\sigma.$$

Másként fogalmazva, a Poisson-tényező relatív változásai kiszámíthatók az alapvető AVO-attribútumokból, legalábbis a 0 – 30° beesési szögtartományban:

$$\Delta\sigma \sim A + B.$$

Megjegyezzük, hogy bár az AVO-analízis és -inverzió módszerét a szénhidrogén-kutatás céljára fejlesztették ki (Ostrander 1984), meggyőződésünk szerint az eljárás körültekintő alkalmazása több más kutatási területen is megtérülhet, mint például a mélyszerkezet- és a geotermikus kutatás (Takács et al. 2021, Masri, Takács 2022, 2023).

4. Az elért eredmények

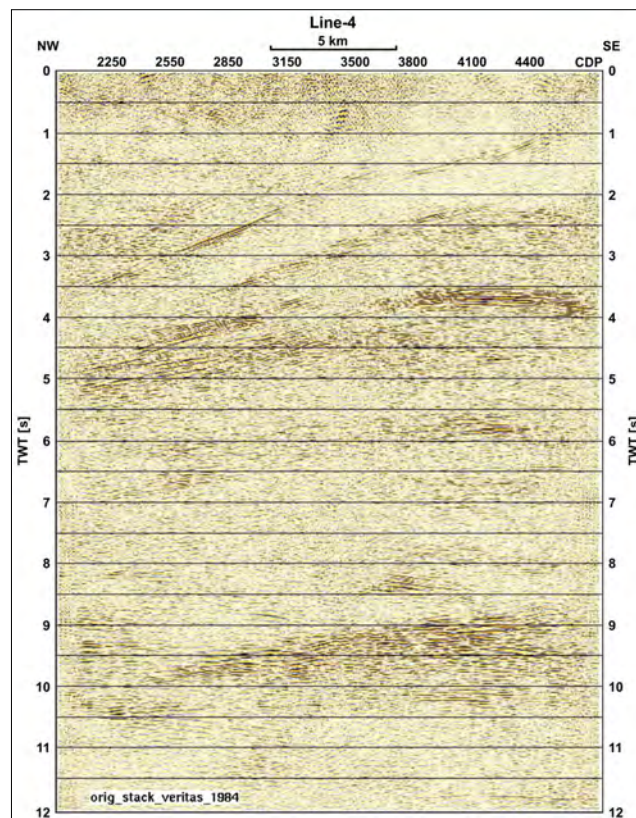
Ebben a fejezetben bemutatjuk mindazokat az eredményeket, amelyeket a fentiekben tárgyalt kvalitatív és kvantitatív adatfeldolgozási eljárások alkalmazásával értünk el az archív Lithoprobe Line-4 (1984) mélyszeizmikus adatok jelenlegi újrafeldolgozásával. A későbbiek szempontjából is érdemes itt felhívni a figyelmet arra, hogy a *Line-4 szelvény iránya közel merőleges a Juan de Fuca lemez elmozdulási irányára (1. ábra)*. Emiatt az alábukó lemez valódi, meredekebb dőlése csak sokkal kisebb látszólagos dőléssel jelenik meg e szelvény vertikális metszetében. A szel-

vény orientációjával kapcsolatban szintén fontos megjegyezni, hogy a bemutatott összes változat nagyobb CDP-számokkal jelzett oldala mutat ÉNy felé, a másik pedig DK felé (kisebb CDP számok).

4.1. CRS (Common Reflection Surface) szerinti összegzés

A Lithoprobe-program keretében mért Line-4 elnevezésű mélyszeizmikus szelvény adatainak CRS újrafeldolgozásával az volt a célunk, hogy az eddigieknél tisztább szerkezeti képet kapjunk az É-amerikai kontinentális lemez alá bukó Juan de Fuca óceáni lemezről, valamint a felette kialakult földtani formációkról. Ilyen értelemben először egy kvalitatív újrafeldolgozást hajtottunk végre az archív adatokon. A Vancouver-szigeten mért szelvények adatainak eredeti feldolgozást a Veritas Ltd. végezte el 1984-ben, és olyan összegszelvényeket állítottak elő, amelyek ráirányították a figyelmet a szubdukciós zóna nagyobb energiájú reflexióira (Green et al. 1985, 1986). Az akkori eszközökkel azonban nem sikerült értelmezhető migrált változatokat készíteni, és nem készült amplitúdóhű feldolgozás sem a világviszonylatban is érdeklődésre számot tartó adatok felhasználásával. Először az utóbbi hiányosságot pótoltuk a 2. fejezetben tárgyalt előfeldolgozás során, egyelőre csak a Line-4 mélyszeizmikus szelvény mentén. Célkitűzésünk egy olyan, két lépésből álló módszertani eljárás kidolgozása volt, amelyet később alkalmazhatunk a többi szelvény archív adataira is egy kvázi térbeli szerkezeti és litológiai kép kialakítására. Az eredeti (Veritas, 1984) Line-4 összegszelvényt a 3. ábrán mutatjuk be későbbi összehasonlítás céljából, utána pedig a CRS szerinti újrafeldolgozásunk eredményeit közöljük. Megjegyezzük, hogy az archív és az újrafeldolgozott szelvények CDP-számozása a terepi geometria újbóli felépítése miatt eltérő. A terepi észlelési rendszer újraépítésének szükségességére a Bevezetés végén már utaltunk.

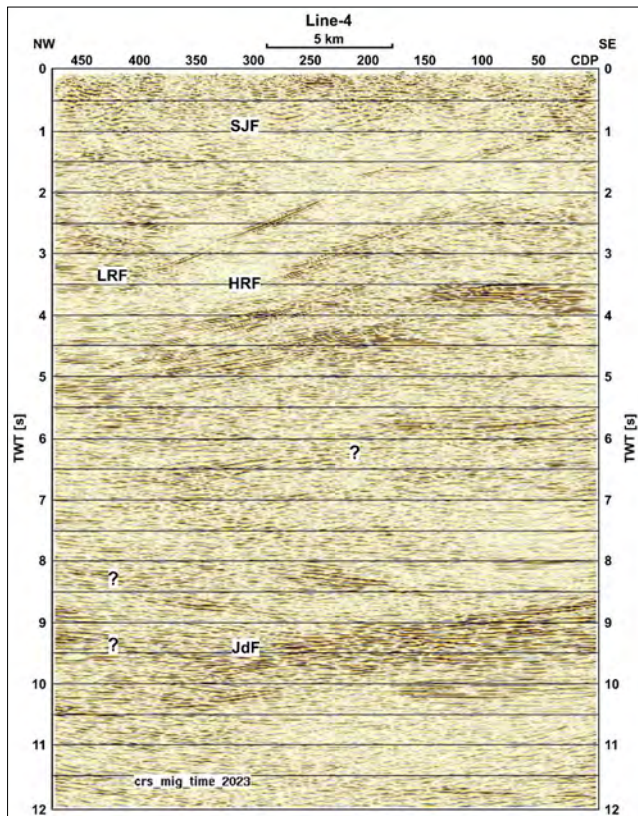
A CRS szerinti összegzés első kritikus paraméterének (dőléstáblázat) kiszámításhoz modellszelvényként a hagyományos CDP-feldolgozás eredményeként előállított migrált összegszelvényt használtuk. A másik kritikus paraméter (a mélységgel változó keresési sugár) meghatározásához pedig a Fresnel-zóna értékeiből indultunk ki. Koráb-



3. ábra A Veritas Ltd. által 1984-ben készített Line-4 végleges összegszelvény (a Kanadai Geológiai Szolgálat szíveségéből)
 Figure 3 The Line-4 final stack processed by Veritas Ltd. in 1984 (courtesy of Geological Survey of Canada)

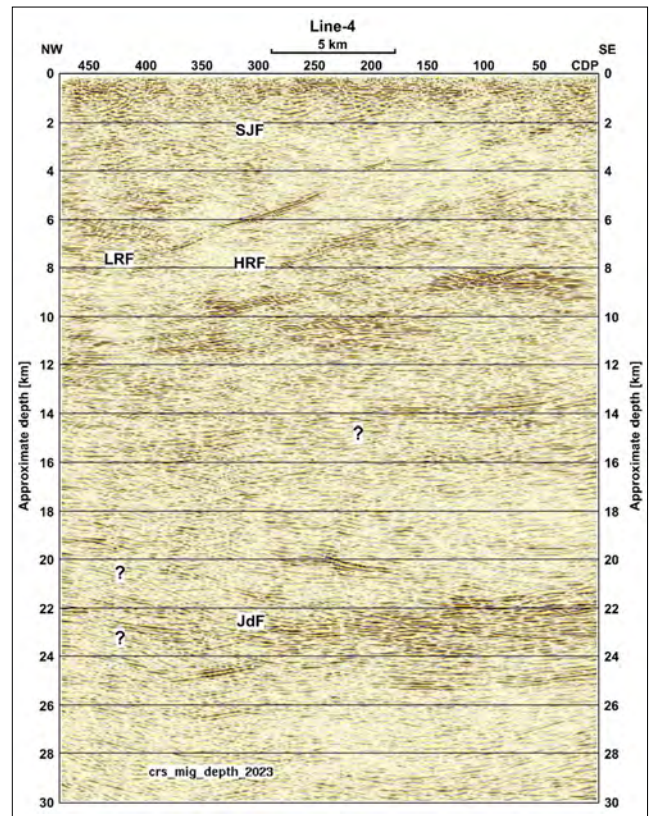
2. táblázat A CRS szerinti adatfeldolgozás lépései
 Table 2 Steps of data processing according to the CRS

Adatok és feldolgozási műveletek	Megjegyzés
Modellszelvény (hagyományos CDP szerinti migrált összegszelvény)	Bemenő adatok
1. AGC 1000 ms időablakkal	Adatfeldolgozási műveletek
2. Dőlésszámítás	
3. AGC (1000 ms) eltávolítás	
Dőlés és Semblance-együttható táblázatok	Kimenő adatok
CDP előfeldolgozás során nyert csatornagyűjtemények NMO-korrekció nélkül, RMS sebességtér és dőléstáblázatok	Bemenő adatok
4. CRS szerinti összegzés	Adatfeldolgozási műveletek
5. Frekvenciaszűrés (5–8–40–45 Hz)	
6. Összegzés utáni Kirchhoff-féle idő- és mélységmigráció	
Migrált CRS szerinti összegszelvény idő- és mélységtartományban	Kimenő végleges adatok



4. ábra A CRS összszelvény Kirchhoff-féle időmigrált változata (0–12 s): JdF – Juan de Fuca lemez, HRF – Hurricane Ridge vető, LRF – Leach River vető, SJF – San Juan vetőzóna

Figure 4 CRS stack after Kirchhoff time-migration (0–12 s): JdF – Juan de Fuca Plate, HRF – Hurricane Ridge Fault, LRF – Leach River Fault, SJF – San Juan Fault (Zone)



5. ábra A CRS összszelvény Kirchhoff-féle mélység-migrált változata hozzávetőleges mélységskálával (0–30 km): JdF – Juan de Fuca lemez, HRF – Hurricane Ridge vető, LRF – Leach River vető, SJF – San Juan vetőzóna

Figure 5 CRS stack after Kirchhoff depth-migration with approximate depth scale (0–30 km): JdF – Juan de Fuca Plate, HRF – Hurricane Ridge Fault, LRF – Leach River Fault, SJF – San Juan Fault (Zone)

bi tapasztalatainkhoz hasonlóan ezeket a számított értékeket csökkenteni kellett, elkerülendő a túlságosan kevert (simított) képet. A CRS-összegzéssel kapott végleges szelvényen Kirchhoff-féle idő- és mélységtartománybeli migrációt hajtottunk végre. A teljes CRS adatfeldolgozási folyamatot a 2. táblázatban foglaljuk össze.

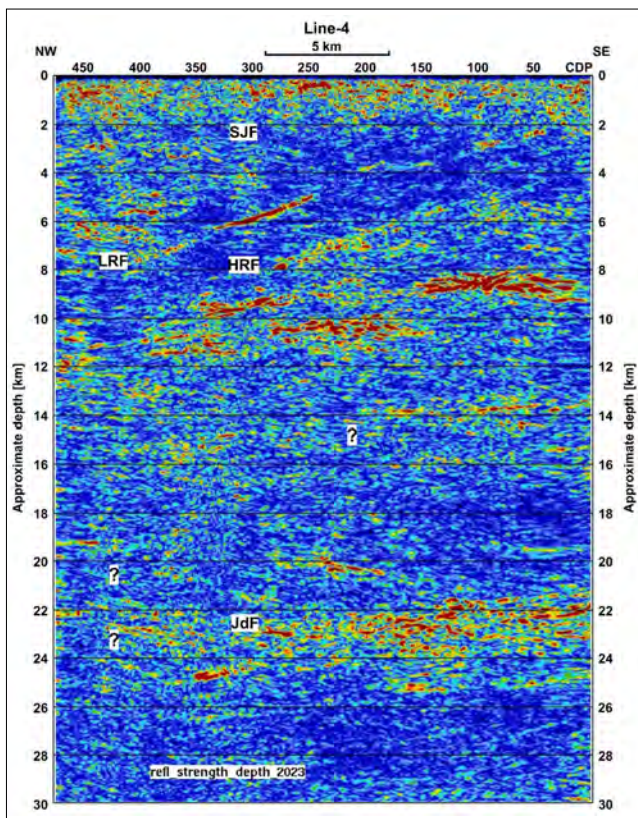
A fenti adatfeldolgozási folyamat végeredményeit, azaz a CRS összszelvény idő- és mélységmigrált változatait a 4. és 5. ábrán mutatjuk be. A 6. ábrán a mélység-szelvény Hilbert-transzformációval készült reflexióerősség változata látható (Taner et al. 1979). Megjegyezzük, hogy a felüntetett mélységskála hozzávetőleges, mivel a földkéreg mélyebb tartományaiban a hagyományos (RMS) reflexiós sebesség meghatározása bizonytalan. A tanulmányunkban közölt mélység-szelvények azonban így is megfelelő rálátást nyújtanak a hozzávetőleges mélységviszonyokra. A szelvények szerkezeti és litológiai értelmezését az 5. fejezetben fogjuk részletezni.

4.2. AVO (Amplitude Versus Offset) inverzió

Fentiek után a Line-4 mélyszeizmikus adatok AVO-inverziójával az volt a célunk, hogy az előzőekben ismertetett kvalitatív szerkezeti leképezésen túl olyan közetfizikai pa-

raméterekkel összefüggő adatokat is előállítsunk, amelyek litológiai következtetések levonására alkalmasak a vizsgált (Cascadia) szubdukciós zónában. Ebben az értelemben kvantitatív újrafeldolgozást is végrehajtottunk a Line-4 szelvény mentén. Ehhez az adta a motivációt, hogy az utóbbi időszakban számos olyan földtani publikáció jelent meg, melyek serpentinites zónák előfordulását valószínűsítik szubdukciós övekben (pl. DeShon, Schwartz 2004, Watanabe et al. 2007, Pagé, Hattori 2017). Mindezek és a korábbi közetfizikai cikkek is felhívják a figyelmet arra, hogy a serpentinin anomálishan közetfizikai tulajdonságokkal rendelkezik a rugalmas hullámok terjedése szempontjából (pl. Christensen 1996). *A serpentinitre anomálishan alacsony P-hullám-sebesség és -sűrűség, valamint magas Poisson-tényező jellemző és anomálishan erős reflexiókat okozhat. Morfológiai szempontból fontos megjegyezni, hogy a serpentinites zónák pikkelyesek (lamináltak) lehetnek ebben a kutatási mélység tartományban* (Watanabe et al. 2007).

Az AVO-analízis elméleti háttérét tárgyaló 3.2. alfejezetben utaltunk az alapvető AVO-attribútumokra (*A* tengelymetszet és *B* meredekség) és az ezekből származtatható litológiai értelmezhető paraméterekre. A tengelymetszet (*A*) arányos a nulla beesési szögű P-hullám reflexiós



6. ábra A végleges CRS összegszelvény Kirchhoff-féle mélységmigrált változatának reflexióerősség-attribútuma hozzávetőleges mélységskálával (0–30 km): JdF – Juan de Fuca lemez, HRF – Hurricane Ridge vető, LRF – Leach River vető, SJF – San Juan vetőzóna

Figure 6 Reflection strength attribute of the Kirchhoff depth-migrated CRS stack with approximate depth scale (0–30 km): JdF – Juan de Fuca Plate, HRF – Hurricane Ridge Fault, LRF – Leach River Fault, SJF – San Juan Fault (Zone)

koeficienssel, ezért pontosabban fejezi ki a szeizmikus hártárfelületek reflektivitását, mint a teljes észlelt szögterományban összegzett szelvény összeg csatornáinak amplitúdóviszonyai. A skálázott Poisson-tényező-változás AVO-attribútumnak (A + B) még nagyobb gyakorlati jelentősége van, és emiatt elterjedten alkalmazzák a szénhidrogén-kutatásban. A Poisson-tényező (σ) ugyanis nagyon érzé-

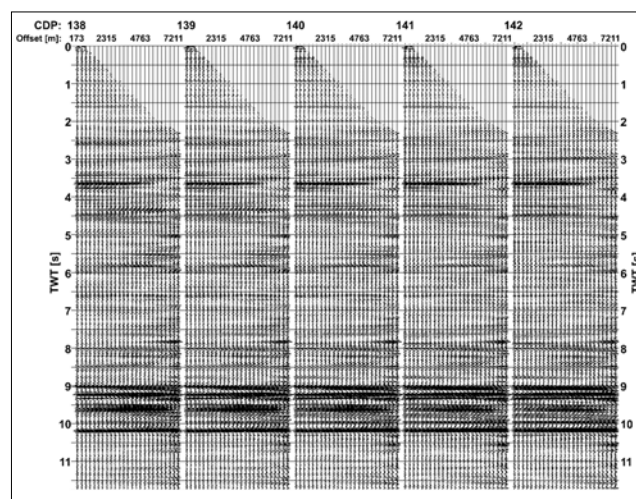
keny a litológiai változásokra, mivel magában foglalja a P- és az S-hullámok terjedési sebességeit is (V_p és V_s):

$$\sigma = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2).$$

Míndezek miatt a fent említett két, a litológiai paramétereket (reflektivitás és Poisson-tényező) jól tükröző AVO-attribútum szelvényt állítottuk elő (tengelymetszet és skálázott Poisson-tényező-változás). Az adatfeldolgozás lépéseit a 3. táblázatban közöljük.

Az AVO-inverzió bemenő adatainak jel/zaj viszonyának javításához nagy mértékben hozzájárult a parabolikus Radon-transzformáció alkalmazása (Russell et al. 1990), melyet hét szomszédos migrált CDP-gyűjtemény azonos sugárúttal rendelkező csatornáinak vertikális összegzése (szupergyűjtemények előállítás) után hajtottunk végre. A 7. ábrán a parabolikus Radon-transzformáció végeredménye látható a CDP = 140 közös mélységpont környezetében, szemléltetve az adatok koherenciáját.

A reflexiók amplitúdók AVO-inverziójával kapott eredményeket a 8., 9. és 10. ábrán mutatjuk be. A kék színű görbék a korábbi RMS sebesség meghatározásból (1. táblázat) számí-



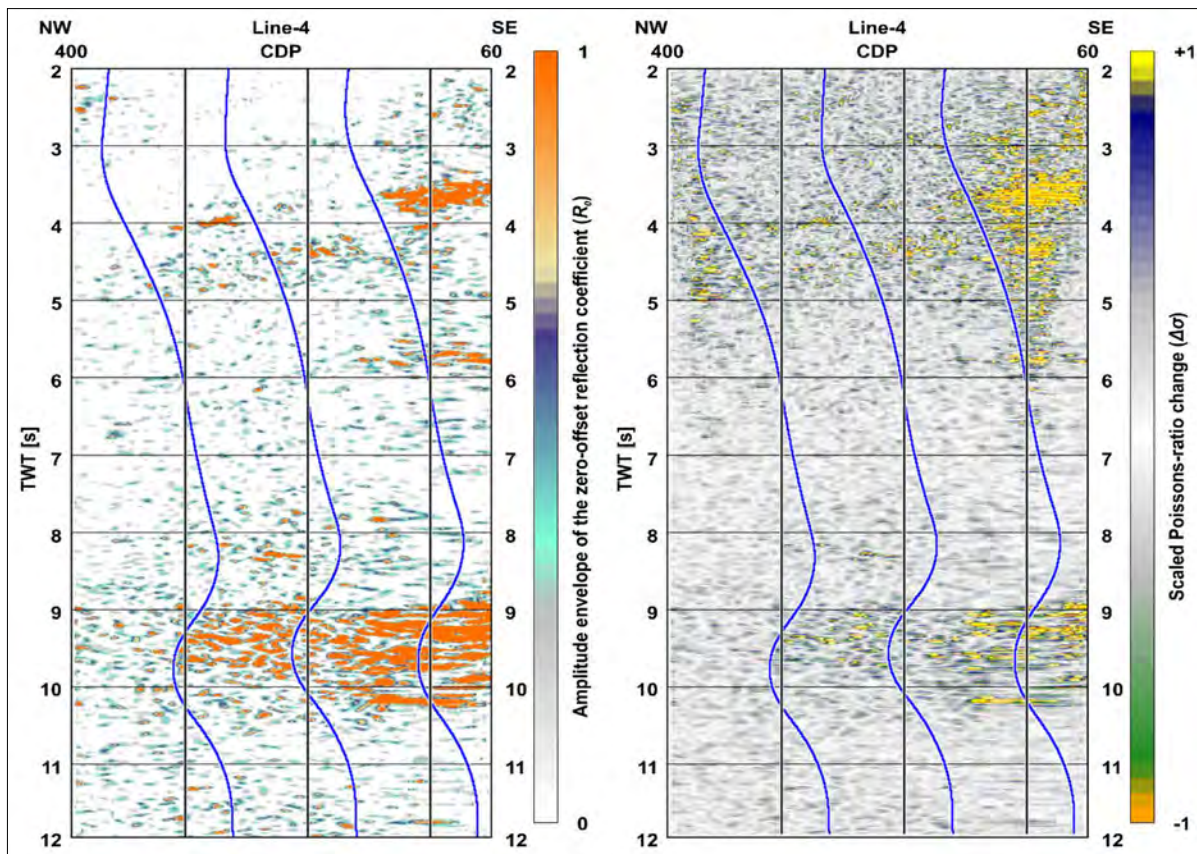
7. ábra A vertikális összegzés és a parabolikus Radon-transzformáció eredménye a CDP = 140 közös mélységpont környezetében

Figure 7 Results of Vertical Stacking and Parabolic Radon Transform around CDP = 140

3. táblázat Az AVO-adatfeldolgozás lépései

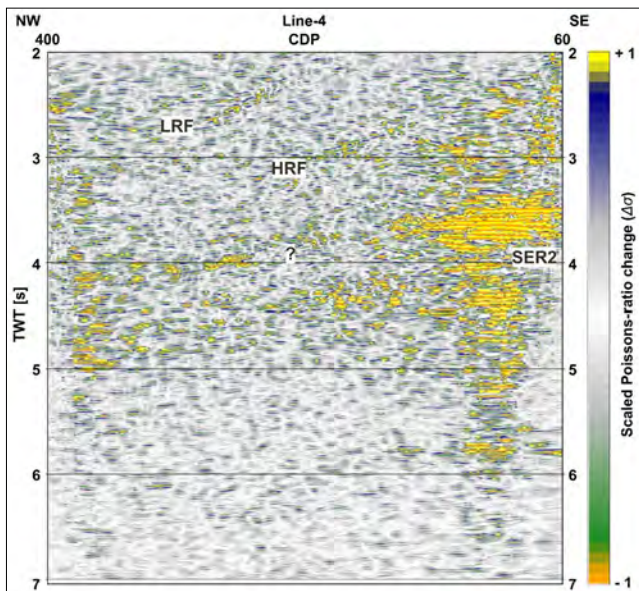
Table 3 Steps of AVO data processing

Adatok és feldolgozási műveletek	Megjegyzés
Migrált CDP-gyűjtemények és a reflexiók adatfeldolgozás során meghatározott P-hullám-sebességtér	Bemenő adatok
1. Szupergyűjtemények előállítás (7)	Adatfeldolgozási műveletek
2. Parabolikus Radon-transzformáció	
3. Beesési szög szerinti konverzió a P-hullám-sebességtér felhasználásával	
4. AVO-inverzió	Végleges kimenő adatok
Tengelymetszet és skálázott Poisson-tényező-változás AVO-attribútum szelvények	



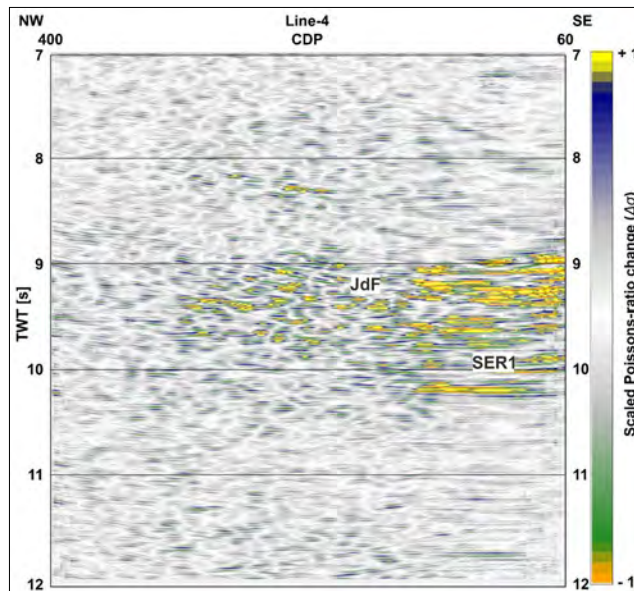
8. ábra AVO-attribútumok (CDP = 60–400 és TWT = 2–12 s között). Bal oldalon: tengelymetszet, jobb oldalon: skálázott Poisson-tényező-változás. A kék görbék a reflexiók RMS-sebesség meghatározásból számított P-hullám-intervallum-sebességeket reprezentálják

Figure 8 AVO attribute sections (CDP = 60–400 and TWT = 2–12 s). Left: Intercept, right: Scaled Poisson's Ratio Change. The blue curves represent the P-wave interval velocities obtained by reflection Velocity Analysis



9. ábra A skálázott Poisson-tényező-változás AVO-attribútum-szelvény kinagyított része (CDP = 60–400, TWT = 2–7 s): SER2 – feltételezett szerpentinites zóna

Figure 9 Enlarged part of the Scaled Poisson's Ratio Change attribute section (CDP = 60–400, TWT = 2–7 s): SER2 – presumed serpentinite zone



10. ábra A skálázott Poisson-tényező-változás AVO-attribútum-szelvény kinagyított része (CDP = 60–400, TWT = 7–12 s): SER1 – feltételezett szerpentinites zóna

Figure 10 Enlarged part of the Scaled Poisson's Ratio Change attribute section (CDP = 60–400, TWT = 7–12 s): SER1 – presumed serpentinite zone

tott P-hullám-intervallumsebességeket ábrázolják néhány CDP-helyen megjelenítve. Megjegyezzük, hogy természeténél fogva az RMS sebességtr az ilyen mélyebb kutatási tartományokban nem adhat részletes, csak simított képet.

A tengelymetszet szelvény esetében az értékek amplitúdóburkolóját jelenítettük meg, kiemelve a jelentős nulla beesési szögű P-hullám reflexiókoefficiensekkel jellemezhető helyeket a szelvény mentén. Szintén fontos megjegyezni, hogy ezeket az ábrákat széleiken lekorlátoztuk a korábban közöltekhez képest annak érdekében, hogy a szelvény tetején és két oldalán az eredetileg kapott zajos részeket kizárjuk a megjelenítésből. A skálázott Poisson-tényező-változást mutató attribútumszelvényeken citromsárga színek jelölik a Poisson-tényező nagy pozitív változásait és narancssárgák a nagy negatív változásokat.

Az AVO-inverzió végrehajtásával olyan közetfizikai információt igyekeztünk kinyerni az összegzés előtti reflexiók adatokból, amelyek (adott határok mellett) lehetővé teszik a litológiai értelmezését a mélykéreg tartományában is. Adott határok alatt a beesési szögek korlátozott tartományát értjük. *Esetünkben a legmélyebb kutatási zónából (kb. 8,5–10,5 s TWT) mindössze 0–10° reflexiók beesési szögeket kaptunk a terepi észlelési geometriából következően (a maximális észlelési távolság kb. 10 km volt az 1984. évi mérések során). Tekintettel arra azonban, hogy a legmélyebb kutatási tartományból is sikerült jól értelmezhető AVO-attribútumokat kaptunk, úgy gondoljuk, ezek az attribútumok a fenti korlát ellenére is alkalmasak további analízisre (közetfizikai elemzésre).*

A 9. és 10. ábra a skálázott Poisson-tényező változásait mutatja, a jobb láthatóság érdekében két részletben kinyitva (2–7 és 7–12 s).

5. Az eredmények szerkezeti és litológiai értelmezése

Az előzőekben bemutatott amplitúdóhű idő- és mélység-tartományban migrált CRS összegszelvények különböző

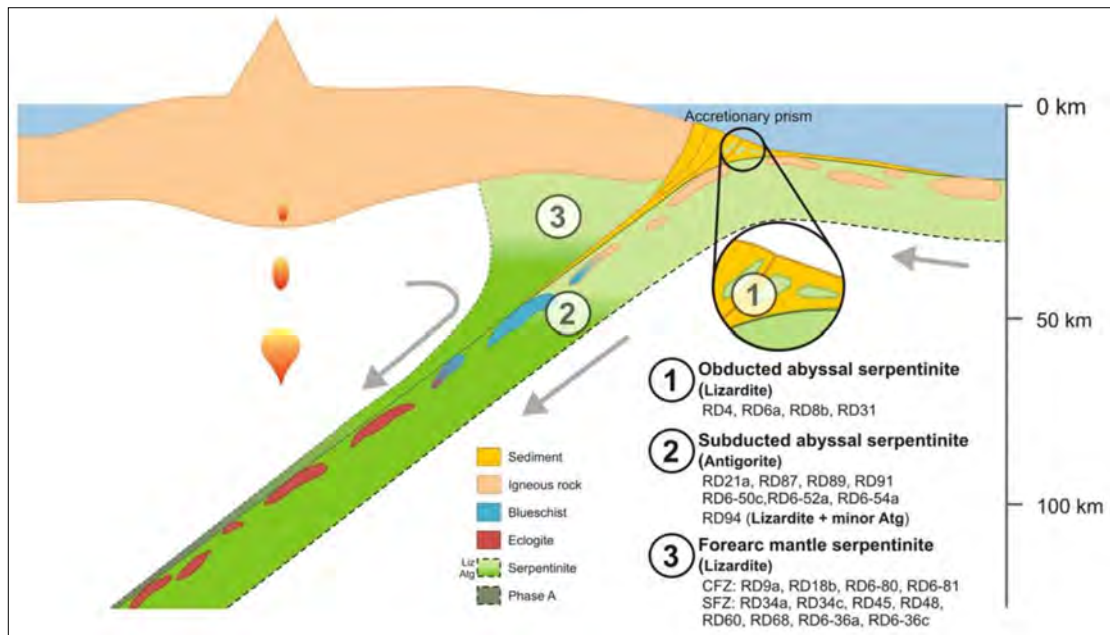
változatai (4., 5. és 6. ábra) segítségével minden eddiginél magasabb jel/zaj viszonyú képeket sikerült előállítani a földkéreg belső szerkezetéről a Cascadia szubdukciós zónában, egyelőre csak a tanulmányozott Line-4 mély-szeizmikus szelvény mentén. A szelvény síkjában (amely közel merőleges az alábukó óceáni lemez elmozdulási irányára) kitűnően észlelhető a Juan de Fuca mikrolemez erős reflexiókötege (körülbelül 8,5–10,5 s, illetve hozzávetőleg 21–26 km között). Emellett a felette kialakult földtani szerkezetek is jól tanulmányozhatók. A szelvény síkjában ÉNy felé dőlő (körülbelül 1,0–3,5 s, illetve hozzávetőleg 2–8 km közötti) kiemelkedő amplitúdójú reflexiót a Leach River vetővel azonosítjuk Green et al. (1985, 1986) publikációi alapján. Az új szelvényváltozatok összevetése után a korábbiaknál megalapozottabb elképzelésünk van a San Juan vető felszíni kilépési helyére is (CDP = 150–225). Az általunk értelmezett vető (vetőzóna) szelvény menti geometriája részletesebb, mint ahogy azt előzőleg publikálták, és nincs ellentmondásban a legutóbbi elképzeléssel (Clowes 2010).

A 6. ábrán közölt Hilbert-féle reflexióerősséget ábrázoló attribútumszelvény azt mutatja, hogy a Juan de Fuca lemez (legalábbis annak felső zónája) egy körülbelül 4–5 km vastagságú reflexióköteggel azonosítható, és ezek a reflexiók a szelvény DK-i részén a legerősebbek a CDP = 1–230 szakaszon, hozzávetőleg 21–26 km mélységek között. Hasonlóan erős reflexióköteg figyelhető meg egy kevésbé mély tartományban, a CDP = 20–160 szakaszon is, hozzávetőleg 8–10 km között. *Az erős reflexiókat serpentinites zónáknak tulajdonítjuk, amelyek pikkelyes szerkezete repedéseket biztosíthat mélységi fluidumok számára (Watanabe et al. 2007, Pagé, Hattori 2017). Jelenlegi eredményeink mellett azonban az sem kizárható, hogy részleges közetolvadékok okozzák a magas reflektivitású mélybeli zónákat.*

Fenti elképzeléseinket megerősítik a 8., 9. és 10. ábrán közölt AVO-attribútumok (tengelymetszet- és skálázott Poisson-tényező-változás) is. A szelvény menti szeizmikus adatok összegzés előtti inverziójával számított AVO-

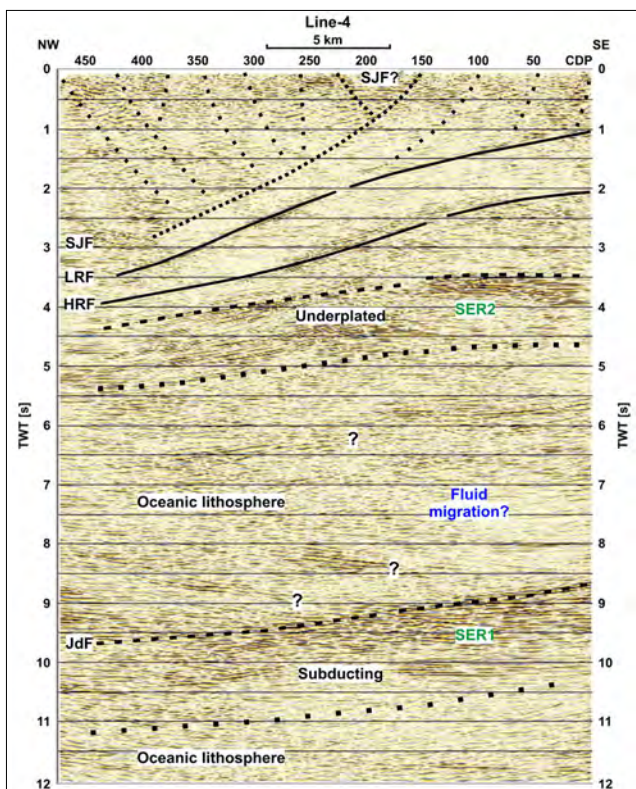
4. táblázat | A serpentinit közetfizikai és morfológiai jellemzői szubdukciós övekben
Table 4 | Petrophysical and morphological characteristics of serpentinite in subduction belts

Közetfizikai és morfológiai jellemzők	Hivatkozások	Jelen eredmények viszonya a hivatkozott publikációkhoz
Alacsony P-hullám-sebesség (V_p)	Christensen (1996)	Többnyire megegyezik
Alacsony sűrűség (ρ)	Christensen (1996)	Jelen tanulmányban még nem vizsgált
Magas Poisson-tényező (σ)	Christensen (1996); Watanabe et al. (2007)	Megegyezik
Magas V_p/V_s arány	DeShon and Schwartz (2004); Watanabe et al. (2007)	Jelen tanulmányban még nem vizsgált
Magas reflektivitás (R)	Watanabe et al. (2007)	Megegyezik
Pikkelyes (lemezes) kifejlődés	Watanabe et al. (2007)	Jelen eredmények alapján nagyon valószínű
Lehetséges mélybeli fluidumtároló zóna	Watanabe et al. (2007); Pagé and Hattori (2017)	A korábbi publikációk alapján nagyon valószínű



11. ábra Szubdukciós szerkezet vázlata (Dominikai Köztársaság) serpentinitminták helyzetének feltüntetésével (Pagé, Hattori 2017)

Figure 11 Schematic sketch of a subduction structure (Dominican Republic) with position of serpentinite samples (Pagé, Hattori 2017)



12. ábra A Line-4 mélyszeizmikus szelvény legújabb szerkezeti és litológiai értelmezése Green et al. 1986 és Clowes 2010 nyomán: JdF – Juan de Fuca lemez, HRF – Hurricane Ridge vető, LRF – Leach River vető, SJF – San Juan vetőzóna, SER1 és SER2 – feltételezett serpentinites zónák

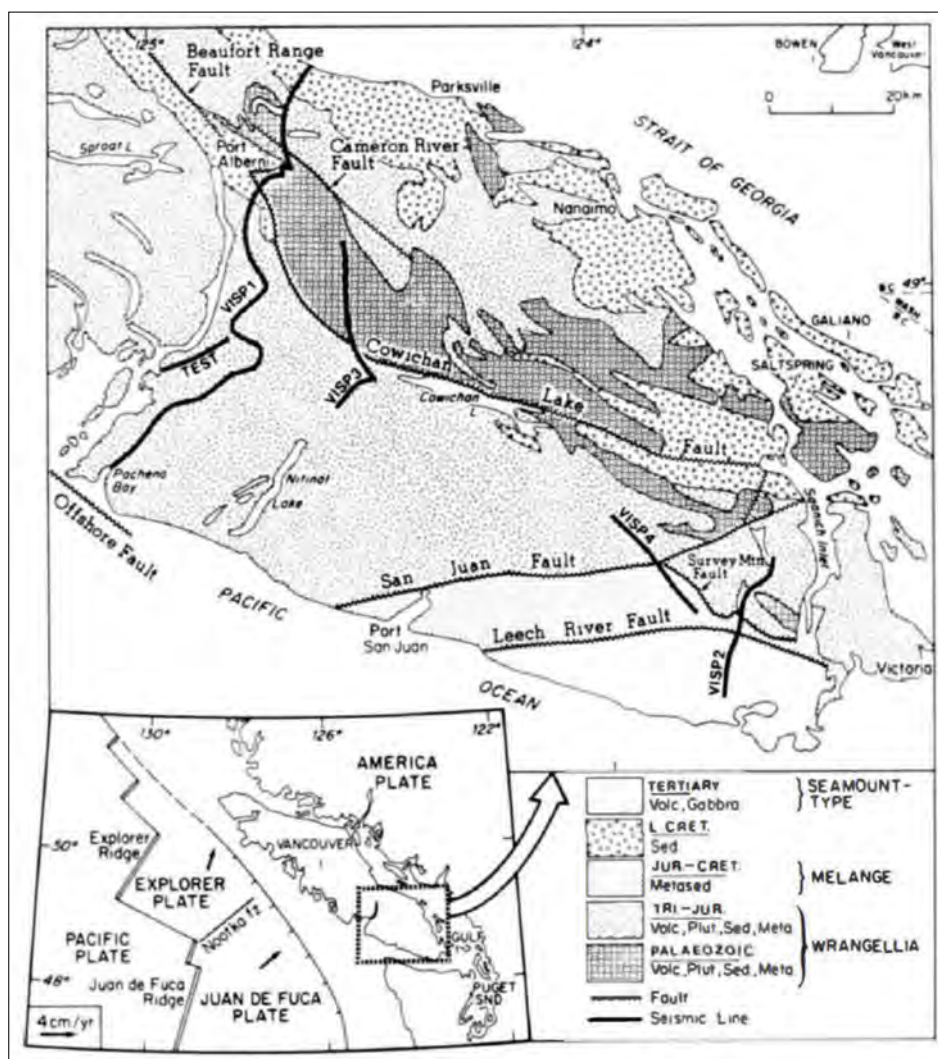
Figure 12 The most recent structural and lithological interpretation of the Line-4 deep seismic section after Green et al. 1986 and Clowes 2010: JdF – Juan de Fuca Plate, HRF – Hurricane Ridge Fault, LRF – Leach River Fault, SJF – San Juan Fault (Zone), SER1 and SER2 – presumed serpentinite zones

jellemzők nagyon hasonló képet mutatnak, mint az előzőekben összegecsatornákból előállított Hilbert-féle reflexióerősség szelvény. Mindezek mellett a serpentinites zónának (vagy olvadékoknak) tulajdonított legerősebb reflexiók a szelvény ugyanazon DK-i szakaszán és ugyanazon mélységtartományában mutatnak anomális AVO-válaszokat, mint a hagyományos (összegzés utáni) reflexióerősség-attribútum.

A 4. táblázatban összefoglaljuk mindazokat a kőzetfizikai és morfológiai tulajdonságokat, amelyek a serpentinit jellemzői, és egyúttal indikátorai lehetnek a szubdukciós övekben, valamint összehasonlítjuk ezeket a tulajdonságokat a jelen tanulmányban kapott eredményekkel.

Felvetődik a kérdés, hogy miként alakulhatott ki a tanulmányozott Cascadia szubdukciós öv környezetében az általunk valószínűsített két serpentinites zóna a kb. 8–10 km és 21–26 km mélység tartományban? A választ Zhang et al. (2021) adják meg, miszerint *magas hőmérsékletű szubdukciós zónákban az alábukó lemez dehidratálódik, és a mobilizált magas hőmérsékletű fluidum felfelé áramolva újabb serpentinites zónákat alakíthat ki a földkéreg megfelelő feltételekkel rendelkező kisebb mélységű környezetében is.* Ennek szemléltetésére mutatjuk be a 11. ábrát Pagé és Hattori (2017) után.

A 12. ábrán az új eredmények és korábbi publikációk (Green et al. 1986, Clowes 2010) alapján közöljük jelenlegi szerkezeti értelmezésünket a Line-4 Lithoprobe szelvény mentén. Az értelmezés időtartományban történt, a hozzávetőleges mélység viszonyokról áttekintést ad az 5. és a 6. ábra. Jelenlegi elképzelésünk a későbbiekben módosulhat a Line-1, -2 és -3 szelvények archív adatainak hasonló szemléletű feldolgozásával nyert térbeli információ figyelembevételével.



11. ábra Vancouver-sziget DK-i részének egyszerűsített földtani térképe, a VISP 4 felirat jelöli a Line-4 Lithoprobe szelvény nyomvonalát (Green et al. 1986)

Figure 11 Simplified geologic map of the DK portion of Vancouver Island. VISP 4 marks the Line-4 Lithoprobe profile (Green et al. 1986)

A fenti modell egyes szerkezeti elemeinek (San Juan vető és Leach River vető) térbeli áttekintéséhez a 13. ábrán bemutatott egyszerűsített földtani térkép nyújt segítséget (Green et al. (1986). A Line-4 szelvény mentén ÉNy–DK irányban haladva a San Juan vető (értelmezésünk szerint vetőzóna) különíti el a triász és júra korú főleg vulkáni kőzeteket a júra és kréta korú metaszedimentektől. A minden eddigi szelvényváltozaton jól korrelálható Leach River és Hurricane Ridge mestervetők a szelvény DK-i elvégződésén túl érik el a felszínt. Végezetül megjegyezzük, hogy a mélyszeizmikus szelvény felső részének (~0–2 s TWT) eddig nem látott szerkezeti értelmezéséhez jelentős mértékben hozzájárult a CRS szerinti összegzés és a Hilbert-transzformációval előállított reflexióerősség-attribútum (6. ábra). A feltételezett serpentinites zónák (SER1 és SER2) felismeréséhez elsősorban a tengelymetszet és a skálázott Poisson-tényező-változás AVO-attribútumok nyújtottak nélkülözhetetlen információt (8., 9. és 10. ábra).

6. Következtetések és további célok

A Line-4 archív Lithoprobe adatokon végrehajtott amplitúdóhű újrafeldolgozás, a CRS (Common Reflection Surface) szerinti összegzés, valamint az összegzés előtti AVO (Amplitude Versus Offset) inverzió olyan új szerkezeti és litológiai információt nyújtottak, melyek lehetővé tették a mélyszeizmikus szelvény adatainak korábbiaknál pontosabb elemzését. A CRS-összegzés utáni adatok az eddigieknél jobban megvilágították a Juan de Fuca óceáni mikrolemez É-amerikai kontinentális lemez alá bukásának szelvény menti geometriáját és a felette lévő földtani formációk szerkezetét. Az összegzés előtt migrált adatok AVO-inverziója fontos litológiai következtetések levonását tette lehetővé. Az előállított AVO-attribútumok (tengelymetszet és skálázott Poisson-tényező-változás) alapján előzetes elképzelésünk az, hogy a tanulmányozott szelvény két mélység tartományában (kb. 21–26 km és 8–10 km) serpentinites zónák alakulhattak ki elsősorban a szelvény

DK-i részén. Ugyanakkor részleges olvadékok jelenléte sem teljesen kizárható az eddigi eredményeink alapján.

Fenti elképzeléseink pontosítása céljából szeretnénk végrehajtani P- és S-impedancia-modellek, illetve V_p/V_s arány előállítását is a már rendelkezésre álló és megfelelően előfeldolgozott összegzés előtti adatokból (Simultaneous Model-based inversion). Ehhez – mélyfúrás-geofizikai szelvények nyilvánvaló hiánya miatt – a reflexiós sebességvizsgálatból kapott adatokat fogjuk modellként használni. Végül célkitűzésünk az itt bemutatott módszertan alkalmazása a Vancouver-szigeten mért összes szeizmikus szelvény adatain egy kvázi 3D kép kialakítása érdekében. Mindezen célok megvalósítása tekintetében egyetlen lehetséges korlátot látunk, amely az adott észlelési rendszer mellett a legmélyebb kutatási zónából (kb. 21–26 km) észlelhető maximális reflexiós beesési szög (kb. 10°). A jelen tanulmányunkban bemutatott AVO-inverzió azonban e korlát ellenére is eredményes volt, ezért várható, hogy a továbbiakban tervezett inverziós eljárás is jól értelmezhető kőzetfizikai eredményeket fog adni.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a Szabályozott Tevékenységek Felügyeleti Hatósága (SZTFH), Földtani Szolgálatának az eredmények kidolgozásához szükséges időkeret biztosítását. Ezúton fejezzük ki köszönetüket a kézirat lektorainak, Gombár Lászlónak és Török Kálmánnak segítőkész és hasznos megjegyzéseikért. Köszönet illeti Kemény Mártont a kézirat legelső változatának házon belüli ellenőrzéséért.

A tanulmány szerzői

Takács Ernő, Hajnal Zoltán, Gúthy Tibor, Irvine R. Annesley

Hivatkozások

Bazelaire E., Majer P., Hubral P. (1999): Seismic and optics: hyperbolae and curvatures. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 261–281.

Chopra S., Castagna J. P. (2014): AVO, Investigations in Geophysics 16, Society of Exploration Geophysicist, Tulsa, Oklahoma, 288 p.

Christensen N. I. (1996): Poisson's ratio and crustal seismology. *Journal of Geophysical Research*, 101, 3139–3156.

Clowes R. (2010): Initiation, development, and benefits of Lithoprobe – Shaping the direction of Earth science research in Canada and beyond. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 47, 291–314.

DeShon H. R., Schwartz S. Y. (2004): Evidence for serpentinization of the forearc mantle wedge along the Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*, 31, L21611.

Green A., Clowes R., Yorath C. (1985): Lithoprobe seismic reflection profiles from southeastern Vancouver Island. *Geological Survey of Canada Open File No. 1180*: 24 p.

Green A. G., Clowes R. M., Yorath C. J., Spencer C., Kanasewich E. R., Brandon M. T., Brown A. (1986): Seismic reflection imaging of the subducting Juan de Fuca plate. *Nature*, 319, 210–213.

Hilterman F. (1990): Is AVO the seismic signature of lithology? A case history of Ship Shoal–South Addition. *The Leading Edge*, 9, 15–22.

Jäger R., Mann J., Höcht G., Hubral P. (2001): Common-reflection-surface stack: image and attributes. *Geophysics*, 66, 97–109.

Késmárky I., Hajnal Z. (1991): Lithoprobe, Vancouver Island interval velocity case study. *Geophysical Transactions*, 37, 57–73.

Kiss V., Takács E. (2021): Vulkanári formáció szeizmikus leképezése egy Tokaj környéki kutatási területen CRS-összegzési eljárás alkalmazásával. *Magyar Geofizika*, 62, 61–72.

Mandal B., Sen M. K., Vaidya V. R., Mann J. (2014): Deep seismic image enhancement with the common reflection surface (CRS) stack method: evidence from the Aravalli–Delhi fold belt of northwestern India. *Geophysical Journal International*, 196, 902–917.

Mann J., Jäger R., Müller T., Höcht G., Hubral P. (1999): Common-reflection-surface stack – a real data example. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 301–318.

Masri E. N., Takács E. (2022): AVO study on a known geothermal reservoir located in the fractured carbonate formations of the pre-Cenozoic basement, Northwest Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 57, 477–494.

Masri E. N., Takács E. (2023): Simultaneous model-based inversion of pre-stack 3D seismic data targeting a deep geothermal reservoir, Northwest Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 58, 19–33.

Menyoli E., Gajewski D., Hübscher C. (2004): Imaging of complex basin structures with the common reflection surface (CRS) stack method. *Geophysical Journal International*, 157, 1206–1216.

Ostrander W. J. (1984): Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence. *Geophysics*, 49, 1637–1648.

Pagé L., Hattori K. (2017): Tracing halogen and B cycling in subduction zones based on obducted, subducted and forearc serpentinites of the Dominican Republic. *Scientific Reports*, 7:17776, 1–9.

Russell B., Hampson D., Chun J. (1990): Noise elimination and the Radon transform, Part 1 and Part 2. *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, pp. 18–23, 31–37.

Shuey R. T. (1985): A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 50, 609–614.

Takács E. (1996): Az észlelési távolságtól függő amplitúdók analízise (AVO) és a hazai alkalmazás lehetőségei. *Magyar Geofizika*, 37, 154–169.

Takács E., Kemény M., Gúthy T., Hegedűs E., Fancsik T. (2021): Rugalmassági paraméterek AVO-inverzióval történő becslése a Moho-mélység-tartományában – PGT-4 szeizmikus szelvény. *Magyar Geofizika*, 62, 73–83.

Taner M. T., Koehler F., Sheriff R. E. (1979): Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44, 1041–1063.

Watanabe T., Kasami H., Ohshima S. (2007): Compressional and shear wave velocities of serpentinized peridotites up to 200 MPa. *Earth Planets Space*, 59, 233–244.

Yilmaz Ö. (1999): When reflections are not hyperbolas and reflectors are not points. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 139–141.

Zhang Y., Gazel E., Gaetani G. A., Klein F. (2021): Serpentine-derived slab fluids control the oxidation state of the subarc mantle. *Science Advances*, 7, 1–7.

Zoeppritz K. (1919): Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen (On the reflection and transmission of seismic waves at surfaces of discontinuity). *Nachrichte von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 66–84.