

Rugalmassági paraméterek AVO-inverzióval történő becslése a Moho környezetében – PGT-4 szeizmikus szelvény

TAKÁCS E.[@], KEMÉNY M., GÚTHY T., HEGEDŰS E., FANCSIK T.

Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat,
1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

[@]E-mail: takacs.erno@mbfsz.gov.hu

Az 1992-ben magyar–kanadai–svájci együttműködésben DK-Magyarországon mért PGT-4 jelű szelvény mentén regisztrált mélyszeizmikus adatok az azóta eltelt közel három évtized során újabb és újabb vizsgálatok elvégzését és újszerű eredmények elérését tették lehetővé. Mindezek az eredmények Posgay Károly (1925–2019) nemzetközi viszonylatban is előrelátó gondolatainak köszönhetőek, mind a mélyszeizmikus mérések tervezése és megvalósítása, mind pedig az adatok feldolgozása és földtani-szerkezeti értelmezése tekintetében. A legújabb eredmények közreadásával egykori mentorunk, tanítónk és szakmai irányítónk tiszteletére szeretnénk emléket állítani.

Az elmúlt évben (2020) végrehajtottuk az archív adatok speciális, amplitúdóhú újrafeldolgozását és Amplitude Versus Offset (AVO) inverzióját a PGT-4 szelvény mentén, valamint az eredmények előzetes közetfizikai és reológiai értelmezését. A teljes szelvény mentén közvetlenül a Mohorovičić-diszkontinuitás felett kapott alacsony V_p/V_s arányok egy összetett szerkezetű részleges olvadék- (vagy fluidtartalmú) zóna jelenlétét valószínűsítik. Feltételezésünket kutatásunk folytatásával és újabb közetfizikai paraméterek szeizmikus adatokból történő meghatározásával szeretnénk igazolni (Poisson-hányados és Lamé-paraméterek), vagy elvetni és egyéb magyarázatot találni az alsókéregben kimutatott anómális zónára.

Takács, E., Kemény, M., Gúthy, T., Hegedűs, E., Fancsik, T.: Elastic parameter estimation in the vicinity of Moho using AVO inversion – PGT-4 seismic section

Deep seismic data collected with Hungarian-Canadian-Swiss cooperation along the PGT-4 profile in SE-Hungary in 1992 enabled to obtain peculiar subsequent results in the last three decades. Those achievements are consequences of the farseeing ideas of Károly Posgay (1925–2019) both in point of planning and realizing deep seismic surveys, as well as his thoughts regarding the data processing and geological-structural interpretation. By publishing the latest results, the authors wish to honor the memory of their scientific mentor.

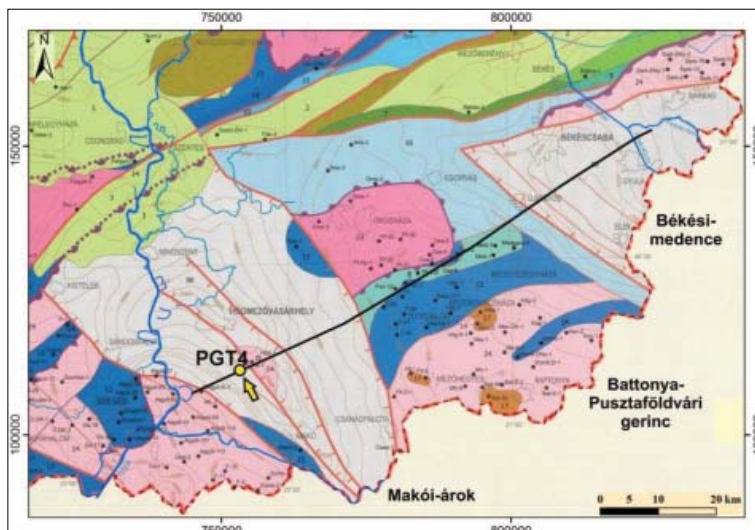
In the last year (2020) we performed true amplitude reprocessing on the archive data, carried out Amplitude Versus Offset (AVO) inversion along the PGT-4 profile, and implemented rock physical and rheological interpretations. The low V_p/V_s ratio values, obtained directly above the Moho, suggest a complex zone of lithology with partial melt (or rocks with fluid) along the whole section. To prove (or disapprove) this assumption, as a continuation of our studies, we are planning to derive other more specific rock physical parameters from the seismic data (i.e. Poisson's ratio and the Lamé parameters).

Beérkezett: 2021. március 24.; *elfogadva:* 2021. június 4.

Előzmények

A Makói-árkot, a Battonya–Pusztaföldvári gerincet és a Békési-medencét összekötő, hozzávetőlegesen 90 km hosszúságú PGT-4/1992 jelű mélyszeizmikus szelvény első földtani-szerkezeti értelmezése rávilágított a DK-

magyarországi litoszféra összetett képére (Posgay et al. 1996). A szeizmikus adatok lehetővé tették mind a kainozoos üledékek, mind pedig a prekainozoos medencealzat felszíne alatti változatos földtani formációk részletes elemzését. Új felfedezés volt egy a szelvény síkjában ÉK-i dőlésű, a teljes földkéregtől harántoló mestervető (ve-



1. ábra A PGT-4/1992 mélyszeizmikus szelvény nyomvonala Haas et al. (2010) prekainozoos medencealjzat térképén a 2000-ben elvégzett AVO-inverzió helyének feltüntetésével

Figure 1 PGT-4/1992 deep seismic profile displayed on the map of pre-Cenozoic basement (Haas et al. 2010) showing the location of the AVO inversion performed in 2000

tőrsorozat) kimutatása, valamint kiváló képet kaptunk a Moho-szelvény menti reflektivitásának és mélységének jelentős változásáról (többek között a földkéreg Békési-medence alatti elvékonyodásáról). A fent említett mester-vető térbeli helyzetének meghatározása a szénhidrogén-ipar által az 1994. és 1995. években mért három regionális szeizmikus szelvény adatainak mélykéregre fókuszált újrafeldolgozása után vált lehetővé (Gúthy et al. 2018). A Magyar Földtani és Geofizikai Intézetben végrehajtott újrafeldolgozási folyamat legfontosabb elemei az amplitúdóhű

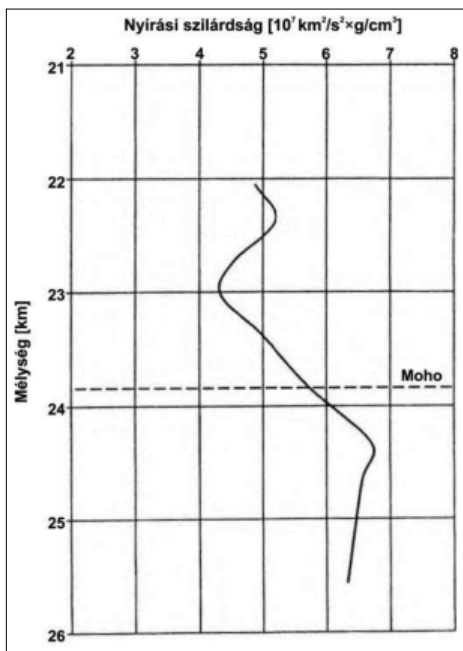
feldolgozás, az alacsony frekvenciák kiemelése és az összegzés előtti mélység migráció voltak.

A PGT-4 szelvény egy pontján korábban végrehajtott Amplitude Versus Offset- (AVO) inverzió eredményként, a Moho felett egy kb. 2 km szélességű csökkent nyírési szilárdságú zónát valószínűsítettünk (Takács, Hajnal 2000). A mélyszeizmikus szelvény nyomvonalát, valamint a korábbi inverzió helyét és eredményét az 1. és 2. ábrán közöljük.

2020-ban végrehajtottuk az archív PGT-4-adatok kéreg–köpeny határra célzott amplitúdóhű újrafeldolgozását, és Hilbert-attribútumokat állítottunk elő a szeizmikus jellemzők további vizsgálatára. A nyírési szilárdságra vonatkozó 2000. évi megállapításunk megerősítésére a szelvény teljes hosszában AVO-inverziót hajtottunk végre az azóta rendelkezésünkre álló korszerűbb adatfeldolgozó programcsomag felhasználásával (Hampson–Russell Software Services, Ltd. 2006). Célunk a Moho környezetében feltételezhető szerkezeti, közetfizikai és reológiai viszonyok eddigieknél részletesebb vizsgálata volt a mélyszeizmikus szelvény teljes hosszában.

Az archív mélyreflexiós adatok újrafeldolgozása

A DK-Magyarországon magyar–kanadai–svájci együttműködésben a PGT-4/1992 jelű szelvény mentén észlelt mélyreflexiós adatok terepi felvételezése egyidejűleg két-féle rendszerrel történt. Ezek egyrészt az akkori Eötvös Loránd Geofizikai Intézetnél rutinszerű szeizmikus kutatásra használt MDS-18 típusú észlelési rendszer (Halliburton Geophysical Services, USA), másrészt pedig a kanadai PRS (Portable Recording Seismograph) adatgyűjtők voltak (Posgay et al. 1996). Az utóbbi egyedi szeiz-



2. ábra Nyírési szilárdság változások a Moho környezetében egy korábban elvégzett AVO-inverzió alapján (Takács és Hajnal 2000)

Figure 2 Variation of the rigidity in the vicinity of the Moho based on a preliminary AVO inversion (Takács and Hajnal 2000)

1. táblázat | Az 1992-ben végrehajtott terepi adatgyűjtés paraméterei
Table 1 | Parameters of the field survey carried out in 1992

Terepi paraméter	PRS észlelési rendszer	MDS-18 észlelési rendszer
Forrás típusa/ lyukmélység	robbantás 50 kg / 70 m	robbantás 50 kg / 70 m
Lövések száma	288	288
Adatgyűjtés alulvágó frekvenciája	2 Hz csillapítatlan frekvencia	4,5 Hz csillapítatlan frekvencia
Szeizmométerek száma	195	160
Geofonköz	100 m	50 m
Maximális forrás–geofon távolság	19,5 km	8 km
Felvételek hossza	60 s	48 s

mikus érzékelők előnye az volt, hogy alacsonyabb frekvenciás jeleket – névlegesen 2 Hz alulvágó frekvenciával, de gyakorlatilag 0 Hz-től – tudtak észlelni a földkéreg legmélyebb tartományából, mint az ipari reflexiós kutatásokra általában használt érzékelők (10 Hz). A terepi adatgyűjtés legfontosabb paramétereit az 1. táblázatban foglaljuk össze.

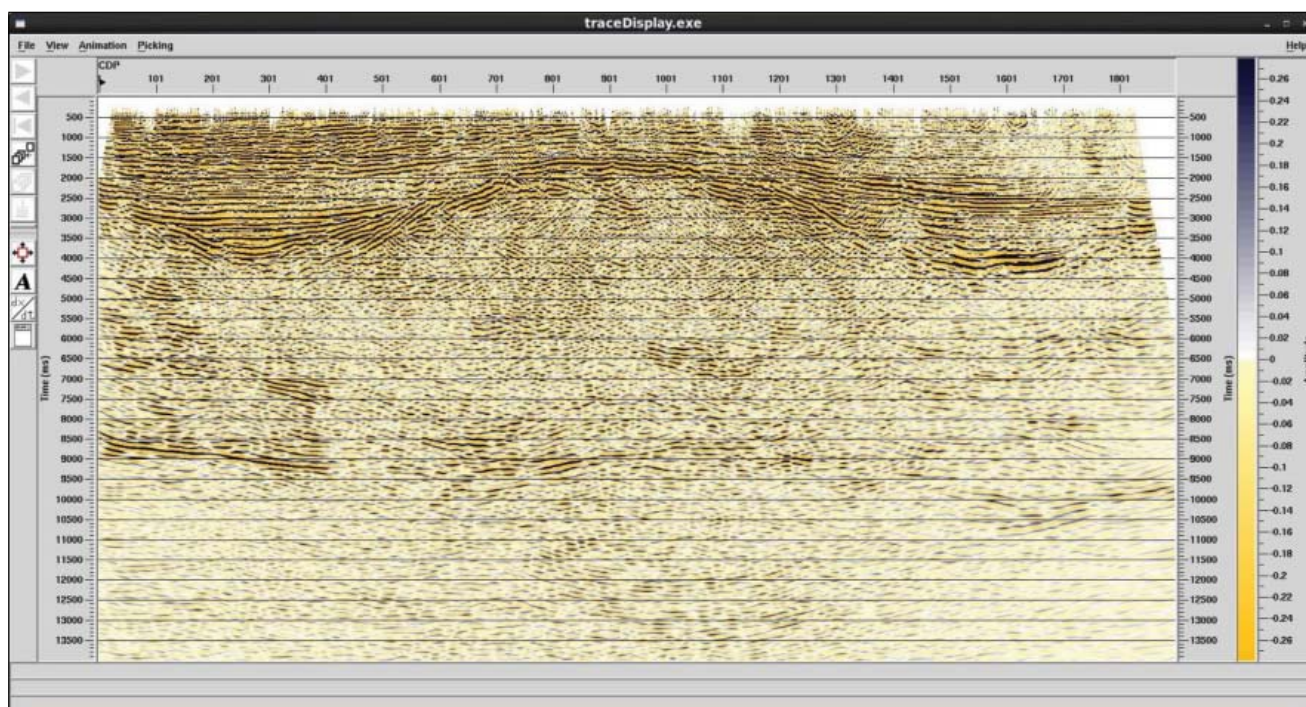
Az archív adatok 2020. évi AVO-analízisére (2000. évi elemzésünkhöz hasonlóan) a PRS adatokat választottuk egyrészt azok alacsony frekvenciás jellege, másrészt pedig a nagyobb forrás–geofon távolságok miatt. Előbbi a mélyreflexiók torzítatlan észlelése, utóbbi pedig az AVO-inverzió megbízható végrehajtása szempontjából volt fontos követelmény. Az adatfeldolgozás során mindkét alkalommal törekedtünk a valódi reflexiós amplitúdók lehetőség szerinti helyreállítására és a relatív amplitúdó viszo-

nyok megőrzésére. Másképp fogalmazva, olyan amplitúdóhű feldolgozást hajtottunk végre a mélyszeizmikus adatokon, amely után a reflexiós amplitúdók elméletileg csak a közetfizikai változásoktól függenek (Mazzotti, Mirri 1991). A 2. táblázatban a 2020. évi reflexiós adatfeldolgozás lépéseit foglaljuk össze.

Az archív szeizmikus adatok újrafeldolgozásakor egyrészt szigorúan törekedtünk a valódi reflexiós amplitúdók helyreállítására (1., 5. és 6. adatfeldolgozási lépések). Másrészt pedig kerültük a relatív amplitúdókat torzító műveletek alkalmazását (AGC, csatornaki egyenlítés és többcsatornás szűrések). A felvételenként 50 kg dinamittal keltett reflexiós beérkezések mellett képződő nagyenergiájú hang- és felszíni zavarhullámok eltávolítására az általában alkalmazott többcsatornás műveletek helyett a lineáris zajokat inkább kivágtuk a terepi felvételekből

2. táblázat | A PRS-adatok 2020. évi reflexiós újrafeldolgozásának lépései
Table 2 | Reprocessing sequence applied on the PGT-4 data in 2020

Sorszám	Adatfeldolgozási művelet	Megjegyzés
1.	Valódi amplitúdó-helyreállítás	–
2.	Sávszűrés	2–20 Hz
3.	Csatornaszerkesztések	felső MUTE
4.	Csatornaszerkesztések	belső MUTE
5.	Felszín konzisztens amplitúdókor.	–
6.	Felszín konzisztens dekonvolúció	jóslási távolság: 32 ms
7.	Sávszűrés	2–20 Hz
8.	Maradék statikus korrekciók	maximális energia szerint
9.	Sebességanalízis	–
10.	NMO-korrekció	–
11.	Időben változó trim statikusok	2000 ms-os csúszó ablakban
12.	CDP szerinti csatornaösszegzés	–
13.	F-X dekonvolúció	ablakméret: 10 csatorna × 300 ms
14.	Sávszűrés	2–18 Hz
15.	Kirchhoff-féle időmigráció	maximális dőlés 70°
16.	Sávszűrés	2–14 Hz
17.	Látszólagos dőlés szerinti szűrés	–4/+14 ms/csatornaköz

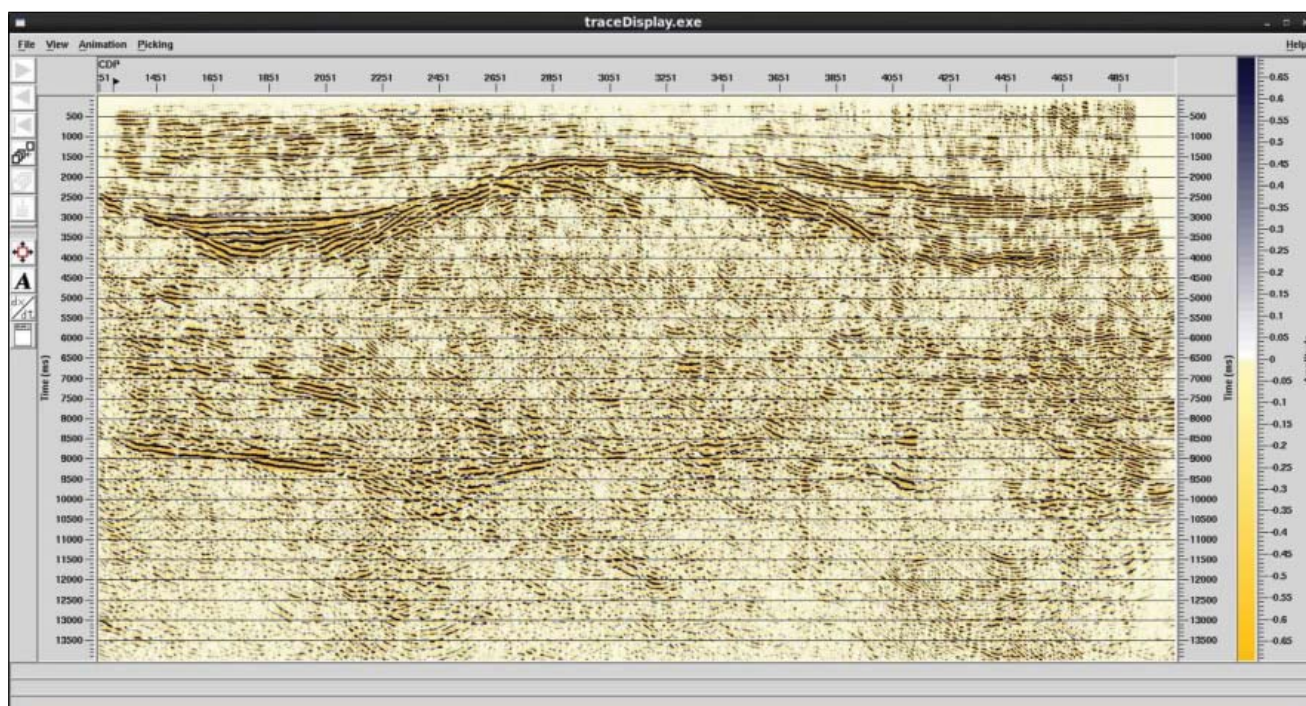


3. ábra A PGT-4/PRS-adatok 1992. évi feldolgozásának eredménye (migrált időszelvény 14 s-ig megjelenítve)

Figure 3 Result of the PGT-4/PRS data processing performed in 1992 (migrated time section displayed between 0–14 s)

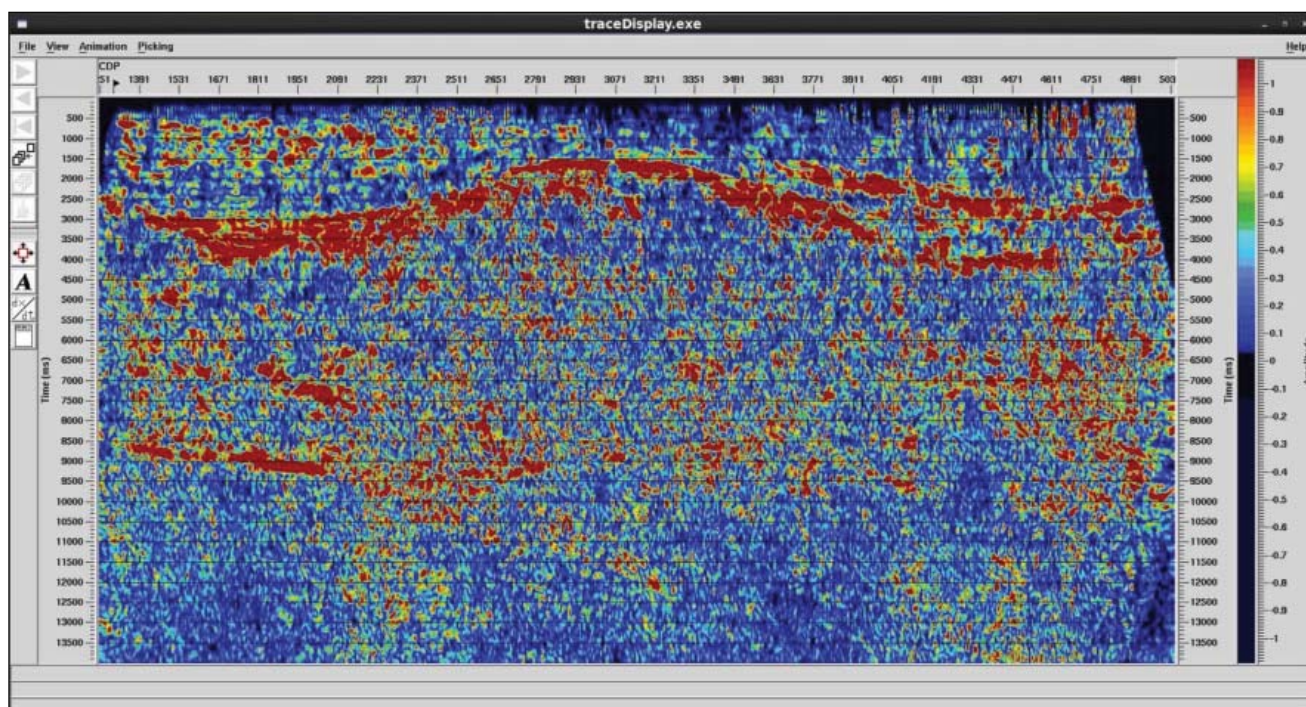
(4. lépés), elkerülve ezzel az említett műveletek esetleges amplitúdótorzító hatását. Az összegzés előtti AVO-analízis szempontjából ezt megengedhetőnek tartottuk a PRS észlelési rendszer hosszú ofszet tartománya miatt (max. 19,5 km). Megjegyezzük, hogy a 13. és 17. sorszámú több-

csatornás műveletek az AVO-vizsgálatokat nem érintették, mivel azok bementét az összegzés (12. lépés) előtt kaptuk meg. A frekvenciatartományt a teljes feldolgozási folyamat során alacsony sávban tartottuk (2., 7., 14. és 16. lépések).



4. ábra A PGT-4/PRS-adatok 2020. évi újrafeldolgozásának eredménye (migrált időszelvény 14 s-ig megjelenítve)

Figure 4 Result of the PGT-4/PRS data processing performed in 2020 (migrated time section displayed between 0–14 s)



5. ábra | Az újrafeldolgozott szelvény reflexióerősség-attribútuma (2020)

Figure 3 | Reflection strength attribute of the reprocessed section (2020)

Az 1992. és 2020. évi adatfeldolgozások eredményeként kapott migrált időszelvények a 3. és 4. ábrán hasonlíthatók össze.

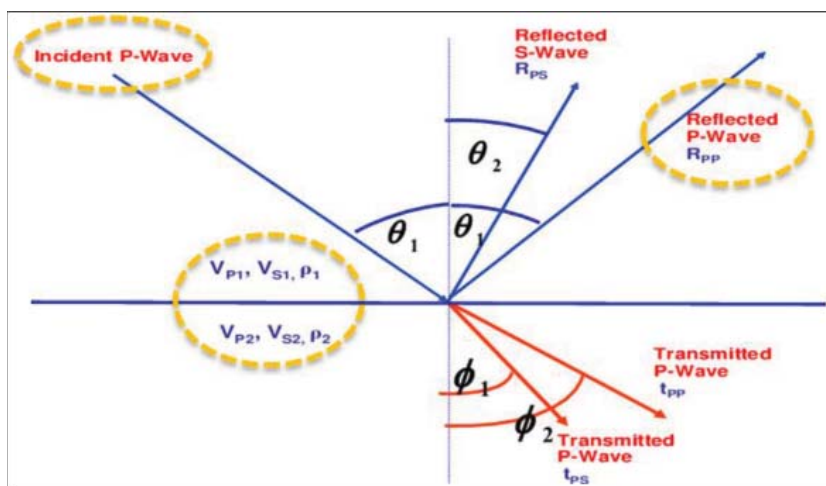
A két szelvény összevetésekor nyilvánvaló, hogy az újrafeldolgozott változat (4. ábra) a korábbinál sokkal koherensebb szerkezeti képet mutat az alsókéreg – felső köpenymélység tartományában, amely jelenlegi vizsgálataink célját képezte. Ennek terhére elvesztettük a kainozoos üledékek jobb felbontását, azonban újrafeldolgozásunk során nem az volt a célkitűzés. Az újrafeldolgozott migrált összecszelvényre előállítottuk a reflexióerősség, pillanatnyi fázisattribútumokat és látszólagos frekvencia Hilbert-attribútumait. Az 5. ábrán azt a reflexióerősség-változatot közöljük, amely a földtani-szerkezeti értelmezés szempontjából a leginformatívabbnak bizonyult. A hagyományos megjelenítésű migrált időszelvény (4. ábra) egybevetve, mindkettő jól mutatja a prekainozoos medencealzat felszínét, a teljes földkérget harántoló vetősorozatot és a Moho változékonyságát a szelvény mentén.

AVO-inverzió végrehajtása a teljes szelvény mentén

Az AVO-analízis fizikai, közetfizikai és szeizmikus hullámterjedési alapjait egy korábbi cikkben részletesen összefoglaltuk (Takács 1996), ezért az alábbiakban csak azokra a tényekre utalunk, melyek a jelen publikációban közölt eredmények magyarázatát és alátámasztását szolgálják.

Az eljárás gyakorlati alkalmazását az teszi lehetővé, hogy beeső P-hullám esetén a szeizmikus határfületről visszavert P-hullám amplitúdója négy paramétertől függ (6. ábra). Ezek a felület felett és alatt elhelyezkedő földtani képződmények közetfizikai paraméterei, azaz a P-hullám-sebesség (V_p), az S-hullám-sebesség (V_s) és a közetek sűrűsége (ρ), valamint a P-hullám beesési szöge (θ). Következésképpen, ha a mért adatokból meg tudjuk határozni a visszavert P-hullám amplitúdóváltozását a beesési szög függvényében (AVO-válasz), akkor kezdeti modell felvétele után (V_p , V_s és ρ) inverziós algoritmus-sal ki lehet számítani a három kérdéses közetfizikai paramétert. Megjegyezzük, hogy a határfületre beeső P-hullámokra és az S-hullámokra is összetett mátrix-egyenletek írják le az összes keletkező hullámtípus amplitúdójának változását a teljes $0-90^\circ$ szögtartományban (Zoeppritz 1919). A gyakorlati megvalósítás során közelítő megoldások használatosak, amelyek azonban a reflexiós kutatásban előforduló $\sim 0-40^\circ$ beesési szögtartományban pontos eredményt adnak (Aki, Richards 1980, Shuey 1985).

Ostrander (1984) alapvető publikációja után világszerte elterjedt az AVO-analízis szénhidrogénipari kutatásban történő sikeres alkalmazása. Az azóta már rutinszerűen alkalmazott eljárásról bebizonyosodott, hogy nemcsak szemcséközi porozitású homokkő-formációkra használható, hanem karbonátos tárolók esetén is (Harvey 1993, Lynch et al. 1997). Az AVO-inverzió az összegzés előtti P-hullám reflexiók amplitúdóinak beesési szög függvényében történő elemzésével lehetővé teszi a P- és az S-hullám terjedési sebességek és a közetek sűrűségé-



6. ábra | A szeizmikus határfelületen kialakuló hullámtípusok beeső P-hullám esetén
Figure 6 | Wave-types generated at a seismic interface in case of incident P-wave

nek meghatározását (Chopra, Castagna 2014). Ezáltal lehetőséget ad a földtani rétegsor rugalmassági paramétereinek számítására (V_P/V_S arány, Poisson-hányados és Lamé-paraméterek), közvetlen S-hullám felvételezés nélkül.

Goodway (2001) részletesen tárgyalta a Lamé-paraméterek (λ és μ) segítségével jellemezhető litológiai összefüggéseket, Russell (2006) pedig rámutatott a szeizmikus „elasztikus impedanciainverzió” előnyeire a szénhidrogén-kutatásban. Ezzel a $\lambda\rho$ és $\mu\rho$ (elasztikus impedancia) attribútumok előállítása is bekerült a szénhidrogénipari kutatások eszköztárába.

Felvetődött a kérdés (Takács, Hajnal 2000, Takács 2001), hogy a fenti reflexiós adatfeldolgozási eljárások előnyeit esetleg más földtani célkitűzések megvalósítására is ki lehet aknázni – például mélyreflexiós adatokból a Moho környezetében tapasztalható rugalmassági paraméterek becslésére. A szeizmikus hullámterjedési sebességek és a közettani szempontból legfontosabb rugalmassági

paraméterek gyors áttekintéséhez a 3. táblázat nyújt segítséget. A 4. táblázatban pedig a PGT-4 szelvény mentén 2020-ban végrehajtott, a Moho környezetére fókuszált AVO-inverziós feldolgozásunk teljes folyamatát mutatjuk be.

Az AVO-analízis és -inverzió összegzés előtti eljárások, ezért a bemenő adatok természetesen zajosabbak, mint a végleges összegszelvény. A 4. táblázatban bemutatott adatfeldolgozási folyamatban szupergyűjtemények előállításával növeltük a bemenő, NMO- (Normal Move-out) korrigált CDP-gyűjtemények jel/zaj viszonyát (1. adatfeldolgozási lépés). A parabolikus radontranszformáció végrehajtásával célunk a véletlen zajok további elnyomása, valamint a többszörösök és a maradék NMO-hibák eltávolítása volt (2. lépés). Az észlelési távolság – beesésiszög-konverziót az AVO-inverzió végrehajtásához kellett elvégezni (3. lépés). Végül az AVO-inverzió szolgáltatta a V_P/V_S arány értékeit a teljes PGT-4 szelvény mentén (4. lépés).

3. táblázat | A hullámterjedési sebességek és a rugalmassági paraméterek összefüggései (ρ a közetek sűrűségét jelöli)
Table 3 | Relations between the wave propagation velocities and the elastic parameters (ρ is the density of the rocks)

Hullámterjedési sebesség	Összefüggés
P-hullám-sebesség	$V_P = [(\lambda + 2\mu)/\rho]^{1/2}$
S-hullám-sebesség	$V_S = (\mu/\rho)^{1/2}$
Rugalmassági paraméter	Összefüggés
A P- és az S-hullám-sebességek aránya (főleg a litoszféra kutatásban használatos)	V_P/V_S
Poisson-hányados (főleg a CH-kutatásban használatos)	$\sigma = (1/2)[(V_P^2 - 2V_S^2)/(V_P^2 - V_S^2)]$
Összenyomhatatlanság (első Lamé-paraméter)	$\lambda = \rho(V_P^2 - 2V_S^2)$
Nyírási szilárdság (második Lamé-paraméter)	$\mu = \rho V_S^2$

4. táblázat A PGT-4/PRS-adatok 2020. évi AVO-feldolgozásának lépései
Table 4 AVO processing sequence applied on the PGT-4/PRS data in 2020

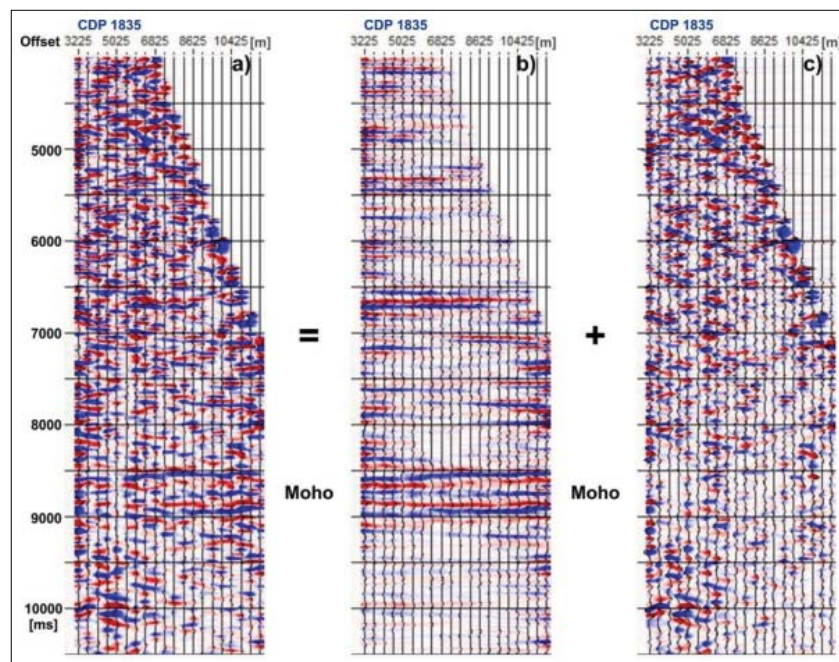
Adatok és feldolgozási műveletek	Megjegyzés
Amplitúdóhű NMO-korrigált CDP-gyűjtemények és a reflexiós adatfeldolgozás során meghatározott sebességtér	Bemenet
1. Szupergyűjtemények előállítása	AVO-adatfeldolgozási műveletek
2. Parabolikus radontranszformáció	
3. Észlelési távolság – beesési szög konverziója	
4. AVO inverzió	
V_p/V_s arány attribútumszelvény	Kimenet

A fent említett adatfeldolgozási műveletek közül, az NMO-korrigált reflexiós beérkezések koherenciájának javítása szempontjából, a parabolikus radontranszformáció (Russell et al. 1990) bizonyult a leghatékonyabbnak. A 7. ábrán a művelet eredményét mutatjuk be egy CDP-szupergyűjtemény példáján keresztül (a szupergyűjteményeket hét szomszédos CDP azonos észlelési távolságú csatornáinak összegzésével állítottuk elő).

A 8. ábrán három egymás melletti közös beesési szög szerinti CDP-gyűjteményre mutatunk példát, szemléltetve az AVO-inverzióhoz előállított bemenő adatok kiváló minőségét és a Moho mélységéből észlelt reflexiós köteget (8,5 és 9,0 s között). Megjegyezzük, hogy az ábrán látható gyűjtemények egyes csatornáihoz itt már azonos beesési szögek tartoznak (0–24°) az inverzió követelményének megfelelően. E gyűjtemények előállítása megfelelően pontos P-hullám-sebességmodell ismeretében nem

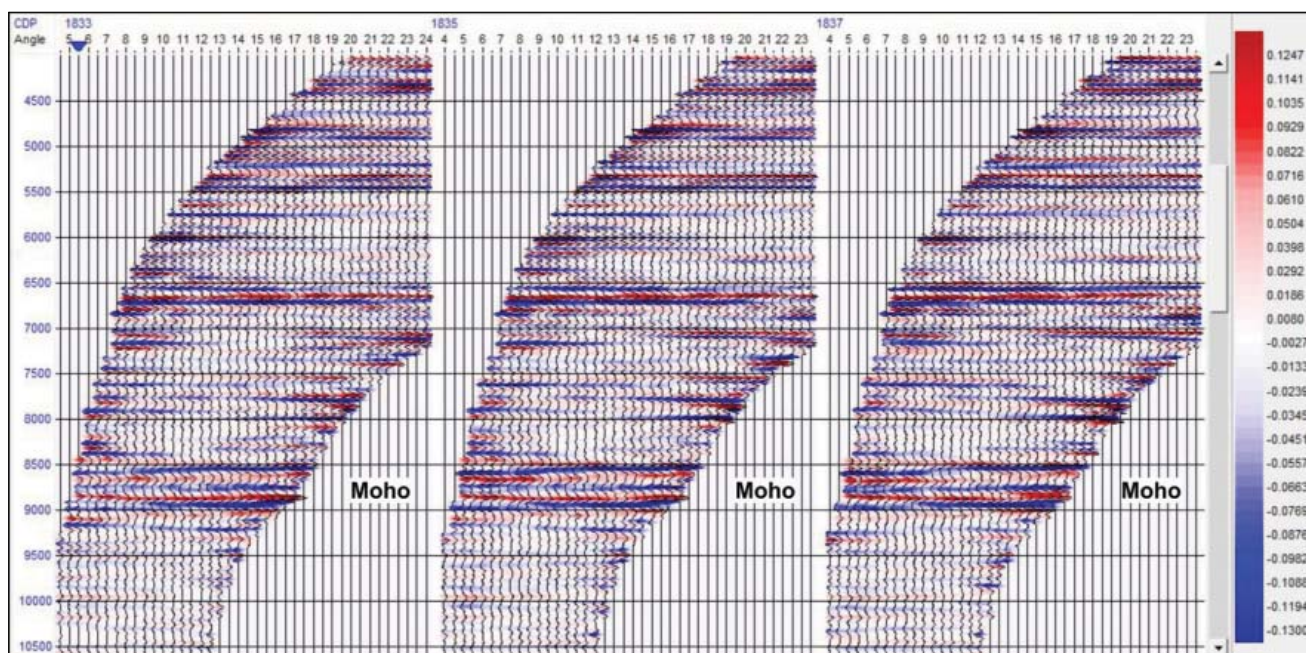
okoz problémát. Esetünkben, az észlelési távolság – beesési szög átalakításhoz a reflexiós adatfeldolgozáskor meghatározott RMS (Root Mean Square) sebességtérrel használtuk intervallum sebességekre való átalakítás után.

A teljes szelvény mentén végrehajtott AVO-inverzió eredményeként kapott V_p/V_s attribútum szelvény (9. ábra) mélyföldtani-szerkezeti és kőzettani értelmezésre is alkalmasnak bizonyult. A 9a. ábra a korábbi (Posgay et al. 1999, Gúthy et al. 2018) kéregmodell vázlatos megjelenítése az újrarendelt migrált szelvény amplitúdó burkoló változatán. A 9b. ábra a V_p/V_s arányokat mutatja az inverzió számára szükséges és elégséges fedésszámú időtartományban (4–10 s). E tartomány fölött és alatt az inverzió nem tudott megfelelő adatokat szolgáltatni a kis fedésszámok miatt. Az ábrán a hideg színek magasabb, a meleg színek pedig alacsonyabb V_p/V_s -értékeket jelentenek. Előzetes értelmezésünk szerint a piros színű zóna



7. ábra A parabolikus radontranszformáció eredménye a) bemenő CDP-szupergyűjtemény, b) zajtól megtisztított adatok, c) becsült zaj

Figure 7 Result of the parabolic Radon transform a) input CDP supergather, b) noise free data, c) estimated noise



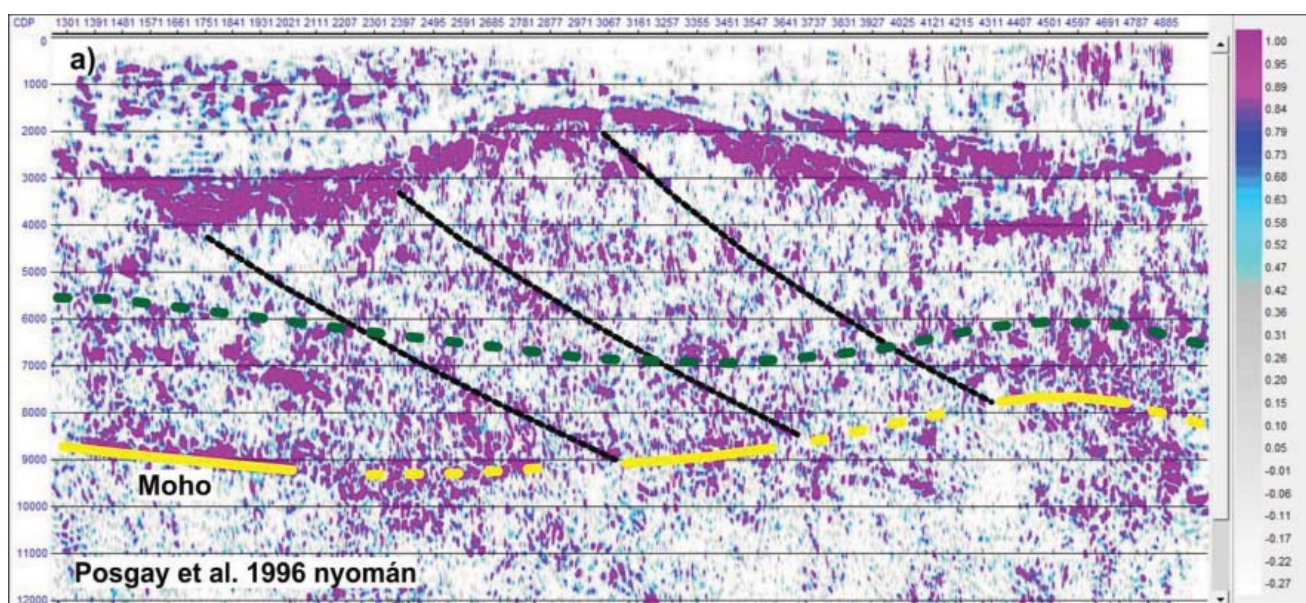
8. ábra | Amplitúdóhű feldolgozású közös beesési szög szerinti CDP-gyűjtemények (0–24°)

Figure 8 | CDP angle gathers after true amplitude processing (0–24°)

az alsó kéregbe történő magasabb hőmérsékletű és képlékenyebb (kisebb V_p/V_s arányú és szilárdságú) felső-köpeny–olvadékok benyomulását jelezheti, vagy pedig fluidtartalmat ebben a mélységtartományban. Ezen eredmények alapján a teljes szelvény mentén lehetségesnek tartjuk egy csökkent szilárdságú zóna kialakulását közvetlenül a Moho felett (vö. 2. ábra). Itt megjegyezzük, hogy a 9b. ábra feliratában a „2D AVO-inverzió” valójá-

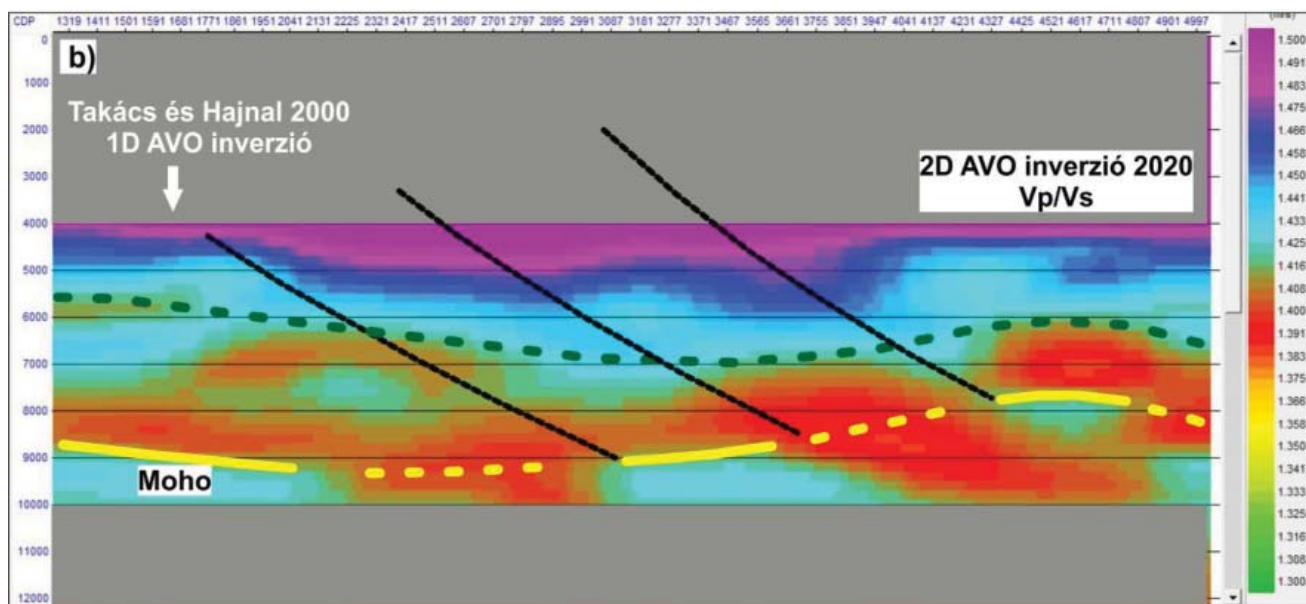
ban a szelvény teljes hosszában végrehajtott 1D inverziók sorozatát jelenti, mivel az AVO-inverzió az előfeldolgozott CDP-gyűjtemények adatait használja.

Fenti feltételezésünket az a tény erősíti meg, hogy a Poisson-hányados nemlineáris függvénye a V_p/V_s -értékeknek és az alacsonyabb V_p/V_s arányok egyúttal alacsonyabb Poisson-hányados-értékeket is jelentenek (Chopra, Castagna 2014). A Poisson-hányados viszont mechanikai



9a. ábra | Az alsó kéreg szerkezete a korábbi és a legújabb eredmények integrálásával (PGT-4); a) amplitúdó burkoló szelvény értelmezése (Posgay et al. 1996 nyomán)

Figure 9a | Structure of the lower crust based on the integration of historic and recent results (PGT-4); a) interpretation of the amplitude envelope section (after Posgay et al. 1996)



9b. ábra | Az alsó kéreg szerkezete a korábbi és a legújabb eredmények integrálásával (PGT-4); b) AVO-inverzióval kapott VP/Vs attribútumszelvény a korábbi inverzió helyének megjelölésével (Takács, Hajnal 2000)

Figure 9b | Structure of the lower crust based on the integration of historic and recent results (PGT-4); b) VP/Vs attribute section obtained by AVO inversion showing the location of the preliminary inversion (Takács, Hajnal 2000)

definíció szerint a kőzetek szilárdságával arányos, azaz alacsonyabb értékei alacsonyabb szilárdságú közeget jeleznek. Eszerint a PGT-4 szelvény Moho feletti zónájában kimutatott alacsony V_p/V_s arányok a környezetükhöz képest kisebb szilárdságú és képlékenyebb kőzetek jelenlétét valószínűsítik (pl. részleges olvadék, vagy fluidtartalom). E feltételezés igazolása vagy elvetése további

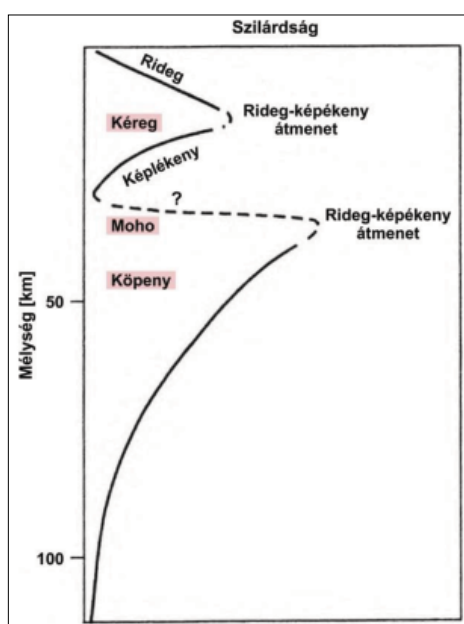
részletes vizsgálatokat igényel, melyeket a következő fejezetben foglalunk össze.

Végezetül a 10. ábrán Molnár (1988) a *Nature* című folyóiratban megjelent publikációja nyomán bemutatjuk a kontinentális litosféra szilárdságváltozásait (rideg, képlékeny és átmeneti zónák). Ez alapján is megállapítható, hogy a cikkünk előző fejezeteiben bemutatott eredmények beleillenek az ábrán közölt reológiai modell nagyobb léptékű vázlatába (vö. 2. és 9b. ábra).

Az eredmények összefoglalása és további tervek

A PGT-4 mélyszeizmikus szelvény mentén alacsony frekvenciás (2 Hz) érzékelőkkel felvett archív mélyreflexiók adatok 2020. évi újrafeldolgozásával, a mélykéreg tartományában a korábbinál magasabb koherenciájú összegszelvényt sikerült előállítani (3. és 4. ábrák). Az újrafeldolgozott szelvényváltozat kiemeli a Makói-árok és a Battonya–Pusztaföldvári gerinc alatt korábban felismert és a szelvény síkjában ÉK-i irányú látszólagos dőléssel jelentkező, a teljes földkérget harántoló vetőket (Posgay et al. 1996, Posgay et al. 1997, Gúthy et al. 2018). A vetősorozat valószínűleg a földkéreg K-i irányú megnyúlásának eredményeként alakult ki (Tari et al. 1992, Györfi 1994, Hajnal et al. 1996, Horváth et al. 2015).

Az 5. ábrán közölt reflexióerősség-szelvény elemzésekor ezúton is megerősítést nyert a földkéreg Békésmenede alatti elvékonyodása (Posgay et al. 1995, Posgay et al. 1996, Gúthy et al. 2018) a feltételezett extenzió következtében. Erre utal az attribútumszelvény Békésmenede alatti részén a kis reflektivitású (sötétkék színű)



10. ábra | Szilárdságváltozások a kontinentális litoszférában (Molnár 1988 nyomán)

Figure 10 | Variation of the rigidity in the continental lithosphere (after Molnar 1988)

terület felemelkedése. A szelvény ugyanezen szakaszán, a felemelkedett Moho alatti alacsony reflektivitású zónában nagyobb energiájú (piros színű), de alacsony koherenciájú reflexiók is megfigyelhetők. Ezek a reflexió-törödékek a kiemelt helyzetbe került, magasabb hőmérsékletű köpenyanyag fokozatos lehűlése miatt alakulhattak ki geokémiai összetételtől függően. A reflexióerősség Békési-medence alatti eloszlása alapján, riftesedésre utaló nyomok is felfedezhetők (reflexióhiányos zónák megjelenése a prekainozoos medencealjzat felszínéig és egy helyen a neogén üledékekben is).

A PGT-4 szelvény teljes hosszán 2020-ban elvégzett AVO-inverzió eredménye (V_p/V_s) igazolta a Makói-árok területén korábban végrehajtott inverzió eredményét (Takács, Hajnal 2000), azaz a Moho felett egy kb. 2 km széles csökkent szilárdságú zóna jelenlétét (lásd 2. és 9b. ábra). Az anomális közetfizikai paraméterekkel jellemzett zónát a környezeténél kisebb szilárdságú, képlékenyebb kőzetek jelenlétével magyarázzuk (pl. részleges olvadék vagy fluidtartalom).

A Mohora fókuszált AVO-inverziós eljárásunk újdonságnak tekinthető abban a tekintetben, hogy mindeddig kevés olyan publikáció ismert, melyekben a szerzők a kéreg mélyebb tartományaiban észlelt reflexiók AVO-analízisével foglalkoztak (pl. Pratt et al. 1993, Simon 1998). Az amerikai COCORP és a német DEKORP projektek keretében végrehajtott elemzések csak a vizsgált reflexiók polaritásának és AVO-válaszának egyszerű tanulmányozására korlátozódtak, a közetfizikai paraméterek meghatározása nélkül. Az amerikai tanulmány azonban fluidtartalmat valószínűsített a Georgia állam DK-i területe alatt (a középső kéregben) felfedezett ún. Surrency Bright Spot kiváltó okaként.

Megjegyzendő, hogy a PGT-4 szelvény alsó kéreg és felső köpeny átmeneti zónájában kapott V_p/V_s arányok valamivel alacsonyabbak a várt értékeknél (9b. ábra). Ez azonban összhangban van azzal, hogy a szelvény hosszában 9 ponton rendelkezésre álló archív MT szondázási adatok is a szokásosnál alacsonyabb fajlagosellenállás-értékeket mutatnak a teljes szelvény mentén (Kiss János szóbeli közlése 2021).

Végezetül megemlíjtük, hogy a jelen cikkben közölt újszerű eredményeket további vizsgálatokkal kívánjuk ellenőrizni. Elvégezzük a V_p/V_s -adatok kalibrációját más típusú elemzésekkel kapott kéregadatok szakirodalmi összefoglalásai alapján (Christensen 1996, Holbrook et al. 1992). A vizsgált mélységtartományban előállítjuk a Poisson-hányados-változás szelvényt ($\Delta\sigma$) és végrehajtuk a rendelkezésre álló szeizmikus adatok „elasztikus impedanciainverzióját” (Russell, Hampson 2006). Utóbbi adatfeldolgozás eredményei a Lamé-paraméterekkel (λ – összenyomhatatlanság, μ – nyírási szilárdság) arányos szeizmikus attribútumok lesznek.

Jelen írásunkat kísérleti tanulmányként szántuk közreadni a témakörben, és további vizsgálataink során néhány pontosítással is ki fogjuk egészíteni (összegzés előtti migráció alkalmazása és a kezdeti V_p , V_s és ρ közetfizikai mo-

dellek pontosabb meghatározása a kutatott mélységtartományban).

Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket Posgay Károlynak (1925–2019), aki egykori iránymutatásaival lehetővé tette a jelen cikkben bemutatott legújabb eredmények elérését.

Posgay Károly életének utolsó kutatóéveiben is aktívan foglalkozott a hazai litoszféra reológiai tulajdonságainak megismerésével, elsősorban a mélyszeizmikus adatok és a feltételezhető hőmérséklet-, nyomás- és geokémiai viszonyok összevetésével. Ezekre vonatkozó eredményeit sajnos már nem tudta közzétenni. A cikkben bemutatott új eredmények a Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat 2020. évi Litoszférakutatás költségvetési projektjének keretében valósultak meg, korábbi szemléletformáló útmutatásai nyomán.

Köszönet illeti Zahuczki Pétert, aki eredeti kéziratunk lektorálása során segítőkész javaslatokat tett az AVO-inverzióval kapcsolatos néhány szövegrész sokkal pontosabb megfogalmazáshoz.

A tanulmány szerzői

Takács Ernő, Kemény Márton, Gúthy Tibor, Hegedűs Endre, Fancsik Tamás

Hivatkozások

- Aki K., Richards P. G. (1980): Quantitative Seismology: Theory and Methods, Vol. I and II. W. H. Freeman and Co.
- 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.
- Goodway B. (2001): AVO and Lamé constants for rock parameterization and fluid detection. CSEG Recorder, June 2001, pp. 39–61.
- Gúthy T., Takács E., Kovács A. Cs., Fancsik T., Csabafi R., Török I., Hegedűs E. (2018): Recent developments in imaging the Earth's crust by deep seismic data beneath the eastern parts of the Pannonian Basin, Interpretation, 6, SB23-SB35, 13 p.
- Györfi I. (1994): Structural development of Neogene basins in SE Hungary and the Transylvanian Central Range (in Hungarian), MSc tézisek, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- Haas J., Budai T., Csontos L., Fodor L., Konrád Gy. (2010): Magyarország pre-kainozoos földtani térképe. Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat, digitális adattár.
- Hajnal Z., Reilkoff B., Posgay K., Hegedűs E., Takács E., Asudeh I., Mueller S., Ansorge J., DeIaco R. (1996): Crustal-scale extension in the central Pannonian basin. Tectonophysics, 264, 191–204.
- Hampson-Russell Software Services, Ltd. (2006): AVO Guide, 85 p.

- Harvey P. J. (1993): Porosity identification using AVO in Jurassic carbonate, offshore Nova Scotia. *The Leading Edge*, 12, pp. 180–184.
- Holbrook S., Mooney W. D., Christensen N. I. (1992): The seismic velocity structure of the deep continental crust. In: *Continental Lower Crust*, Fountain D. M., Arculus R., Kay R. (eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 1–43.
- Horváth F., Musitz B., Balázs A., Végh A., Uhrin A., Nádor A., Koroknai B., Pap N., T. Tóth T., Wórum G. (2015): Evolution of the Pannonian Basin and its geothermal resources. *Geothermics*, 53, 328–352.
- Lynch S., Crook H., Peel S., Foster P., Cowan G. (1997): Carbonate reservoir characterization using 3D AVO – A case study from offshore Tunisia. In: 59th Meeting of EAGE, Geneva.
- Mazzotti A., Mirri S. (1991): An experience in seismic amplitude processing. *First Break*, 9/2, 65–73.
- Molnár P. (1988): Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics, *Nature*, 335/8, 131–137.
- Ostrander W. J. (1984): Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence. *Geophysics*, 49/10, 1637–1648.
- Posgay K., Bodoky T., Hegedűs E., Kovácsvölgyi S., Lenkey L., Szafián P., Takács E., Tímár Z., Varga G. (1995): Asthenospheric structure beneath a Neogene Basin in southeast Hungary. *Tectonophysics*, 252, 467–484.
- Posgay K., Takács E., Szalay I., Bodoky T., Hegedűs E., J. Kántor I., Tímár Z., Varga G., Bérczi I., Szalay Á., Nagy Z., Pápa A., Hajnal Z., Reilkoff B., Mueller S., Ansorge J., R. De Iaco R., Asudeh I. (1996): International deep reflection survey along the Hungarian Geotraverse. *Geophysical Transactions*, 40/1–2, 1–44.
- Posgay K., Bardócz B., Bodoky T., Albu I., Gúthy T., Hegedűs E., Takács E. (1997): A Hódmezővásárhely–Makói árok és a Békési-medence nagy mélységű nyírás zónái térbeli elhelyezkedésének közelítő meghatározása. *Magyar Geofizika*, 38/2, 95–123.
- Pratt T. L., Brown L. D., Mondary J. (1993): AVO and fluids in the deep crust: A COCORP case study. *The Leading Edge*, 12/3, 186–192.
- 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.
- Russell B., Hampson D. (2006): The old and the new in seismic inversion. *CSEG Recorder*, December 2006, pp. 5–11.
- Shuey R. T. (1985): A simplification of the Zoeppritz equations. *Geophysics*, 50, 609–614.
- Simon M. (1998): AVO analysis by offset-limited prestack migrations of crustal seismic data. *Tectonophysics*, 286, 143–153.
- Takács E. (1996): Az észlelési távolságtól függő amplitúdók analízise (AVO) és a hazai alkalmazás lehetőségei. *Magyar Geofizika*, 37/3, 154–169.
- Takács E., Hajnal Z. (2000): Amplitude Versus Offset case study on the Moho. *Geophysical Transactions*, 43/2, 93–111.
- Takács E. (2001): Az AVO analízis alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata. PhD-tézisek, Miskolci Egyetem, Miskolc, p. 88.
- Tari G., Horváth F., Rumpler J. (1992): Styles of extension in the Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 208, 203–219.
- Zoeppritz (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*, pp. 66–84.