

# A mélyszeizmikus kutatások újabb eredményei: kapcsolat az alkalmazott kutatásokkal<sup>1</sup>

POSGAY KÁROLY, HEGEDŰS ENDRE, BODOKY TAMÁS, CSABAFI RÓBERT, FANCSIK TAMÁS, KOVÁCS ATTILA CSABA, TAKÁCS ERNŐ<sup>2</sup>

Hazánk területén a kéreg és a felső köpeny szerkezetének megismerésére irányuló nemzetközi összefogással végzett új generációs szeizmikus sebesség- és szerkezetvizsgálatok (CELEBRATION 2000) 2000-ben indultak. A vizsgálatok évről évre bővültek. 2001 évben a VRANCEA, 2002-ben az ALP, 2003-ban a SUDETES program keretében folytatódtak a kutatások. Az eredmények közül olyan kelet-magyarországi 3-D feldolgozásokat mutatnak be a szerzők, amelyekből vulkáni takaró alatti szerkezetekre lehet következtetni.

A kéreg kőzettani vizsgálatánál felhasználták az új generációs szeizmikus mérések során meghatározott sebességeket is. Feltevésük szerint a mélyreflexiós szelvényekből viszonylag fiatal metamorf folyamatokra is lehet következtetni. Az előadásban a konsolidált kéregben található közel vízszintes reflektáló felületek keletkezésével kapcsolatban egy új elképzelést ismertettek. A hazai kutatások során a kőzeteket felépítő ásványtársulások stabilitási zónáinak és a kőzetek teherbíró képességének törvényszerűségeit szeizmikus szelvényekkel összehasonlítva arra a következtetésre jutottak, hogy a konsolidált kéreg közel vízszintes reflektáló felületeinek nagy része a képződésükkor uralkodó hőmérséklet, nyomás és geokémiai viszonyoknak megfelelően alakult ki. Ez az elképzelés a kainozoos medence aljzatából kapott kutatási eredmények értelmezéséhez is új szempontot adhat.

**K. POSGAY, E. HEGEDŰS, T. BODOKY, R. CSABAFI, T. FANCSIK, A. Cs. KOVÁCS, E. TAKÁCS: New results of deep seismic investigations: a link to the industrial surveys**

*In Hungary the new generation seismic velocity and deep structure investigations (CELEBRATION 2000) carried out in international co-operation started in the year of 2000. The investigations were expanded from year to year. The work proceeded in the frames of VRANCEA, ALP and SUDETES projects in 2001, 2002 and 2003 respectively. Results of areal (3-D) processing of the seismic data from Eastern-Hungary are presented, from those conclusions concerning the structures below the volcanic layers can be drawn.*

*The seismic velocities determined from new generation seismic measurements are utilised at the investigations of the crust's petrology. It is pointed out that from deep reflection profiles one can conclude to the young processes of metamorphism also. In connection with sub-horizontal reflecting horizons in the consolidated crust a new idea is presented. It is shown that comparing seismic sections with the rules of stability zones of mineral compounds of rocks and with that of weight-bearing capacity of rocks one can conclude that most of the sub-horizontal reflecting horizons in the consolidated crust were formed in accordance with the temperature, pressure and geochemical environment prevailing at their development. The idea may give a new viewpoint for the interpretation of the results got from investigations of the basement of the Cainozoic basin.*

## Bevezetés

A mélyszeizmikus kutatások a kéreg és a felső köpeny szerkezetéről mind hazai, mind nemzetközi viszonylatban jelentős eredményeket adtak, és a medencék kialakulásáról alkotott elképzeléseket is új színnel gazdagították. A kutatások addigi történetét, eredményeit illetve nyitott kérdéseit 1998-ban a Magyar Geofizikában foglaltuk össze [POSGAY et al. 1998].

## „Új generációs” mélyszeizmikus mérések

Közép-Európában az első, jelentős nemzetközi összefogással végzett új generációs mélyszeizmikus (tomografikus feldolgozásra is alkalmas) kéregkutató mérést a lengyel kutatók szervezték, akiknek a későbbi mérésekben is döntő szerepük volt. A *Polonaise'97* projekt célja a TESZ (Trans-European Suture Zone) és környezete szerkezetének megismerése volt [GUTERCH et al. 1999].

Ezt követte a CELEBRATION 2000 (Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction, 2000) program, amelyben már az ELGI is részt vett. Ebben a szelvények összhossza 8900 km volt [GUTERCH et al. 2001, 2003]. A CEL szelvények elhelyezkedését az 1. ábrán a narancssárga vonalak jelzik.

A 2001. évi VRANCEA program [HAUSER et al. 2002] keretében mért szelvényt az 1. ábrán zöld, az ALP 2002 hálót [BRÜCKL et al. 2003] világoskék vonalak jelölik. A mérési sorozat utolsó szakaszában készített SUDETES vonalakat [GRAD et al. 2003] az ábrán kék színnel jelöltük.

Az eredmények szemléltetésére a 2. ábrán az ország ÉK-i részén a tomográfias inverzióval meghatározott P-hullám sebességeloszlásának 8 km mélységben készített vízszintes metszetét mutatjuk be [HEGEDŰS et al. 2003a]. Figyelemre méltó, hogy a neogén tektonikára az ország nagy részén jellemzőnek tartott ÉK–DNy-i irány helyett ezen a területen az alaphegységben a Keleti-Kárpátokkal párhuzamos, nagy sebességű anomália rajzolódott ki.

A 3. ábra ÉK-Magyarországról az 5,8 és 6,5 km/s sebességű felületek térbeli elhelyezkedését mutatja be DNy-i irányból nézve. Az 5,8 km/s felület a preausztriai alaphegység felszíne közelében húzódik, míg a 6,5 km/s sebesség

<sup>1</sup> Beérkezett: 2003. november 28-án

<sup>2</sup> Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.

egy mélyebb felületet, illetve a kép jobb oldalán a Nagyecsed környéki vulkanizmus mélyebb szerkezetét jellemzi. Az ábra DNy-i oldalán látható mélyedés adat hiányból adódott.

Az ALP 2002 program kiterjesztéseként a kéreg felső harmadának kutatására területi méréseket is végeztünk [HAJNAL et al. 2002a]. A mérés a Nyírségben mintegy 700 km<sup>2</sup>-nyi területen történt, célunk az üledékek és az ezekben változatosan elhelyezkedő vulkáni rétegek, továbbá a harmadkori medencealjzat 3-D sebességképének áttekintő meghatározása volt. A 4. ábrán a *P* beérkezések idejéből 3-D tomográfiával meghatározott sebességmező 2,8 km mélységű színezett metszete és feketével a gravitációs anomáliák látszik. Az 5. ábra a sebességmetszetet és a vertikális mágneses anomáliákat mutatja. Az ábra közepén látható sebességanomália és egy kisebb gravitációs anomália egybeeséséből a medencealjzat kiemelkedésére lehet következtetni. A mágneses térkép itt nem jelez anomáliát. Ez a nagyobb szuszceptibilitású vulkáni kőzetek (és kedvező esetben a vulkáni takaró) jelentős elvékonyodását jelezheti [POSGAY 1967].

### Értelmezési kérdések

Az új generációs mérések eredményeként meghatározható szeizmikus sebességtér a szeizmikus reflektáló felületek értelmezésében is új lehetőséget ad. A Föld szilárd kérgében található közel vízszintes reflektáló felületek keletkezése már egy 1984-ben Londonban rendezett nemzetközi konferencián, amely több geofizikai és földtani társulat közös rendezvénye volt, jelentős vitát váltott ki [MATTHEWS 1986]. A vitára jellemző, hogy a lemeztektonika geofizikai megalapozásában nagy tekintélyt kivívott MATTHEWS elismerte, hogy az értekezlet többsége a bázikus betelepülésekkel, lencsékkel indokolja a lamellás reflexiókat, de nem értett ezzel egyet!

A hazai kutatások során is gyakran észleltünk közel horizontális reflexiókat a pretercier medencealjzat alatt, így ez a kérdés az ELGI kutatóit is foglalkoztatta. A Föld kérgét az irodalomban közölt szilárdsági modellszámításoknál egy vagy két réteggel közelítik. A közel vízszintes reflektáló felületek keletkezésének vizsgálatánál célszerűbb pontosabb modellezésre törekedni, azaz többréteges modellel végezni a számításokat [POSGAY et al. 2001].

A Földben keletkező feszültségek a másodperctől több százmillió évig tarthatnak. A különböző nagyságú és időtartamú igénybevételekre a kőzetek reológiai viselkedése is eltérő lehet, rugalmasan, ridegen, vagy folyékonyan is válaszolhatnak. A rugalmasnak feltételezett testnél a feszültség arányos az alakváltozással. A tektonikai erők nagysága irány szerint változhat. Amennyiben a legnagyobb és legkisebb főfeszültségek különbsége meghaladja a kőzet szakítószilárdságát, a test tönkremegy: a ridegrugalmas tartomány felső határa felett folytonossághiány, törés vagy plasztikus folyás lép fel. A litoszféra rugalmas-rideg részében a reológiát a súrlódásos tönkremenés értékével jellemezzük a pórusterfogatban levő folyadék nyomásának figyelembevételével [RANALLI 1995].

A hőmérséklet az atomok vibrálását túlviheti a rugalmassági határon: duktilis, azaz viszkózus lesz a kőzet, alakváltozását kúszás jellemzi. A duktilis tartományban a

megfelelő átalakítással az úgynevezett Dorn-összefüggést [RANALLI 1995] használtuk.

A kúszási kúszób (aktivációs) energia értékének felvételénél a kéreg tulajdonságainak jobb megközelítése érdekében a longitudinális intervallumsebességek és a kőzetek laboratóriumban meghatározott kúszási kúszób energiája közötti empirikus összefüggést, az úgynevezett *VP-E* diagramot [MEISSNER 1989, MEISSNER et al. 1991] vettük figyelembe. A sebesség meghatározásánál ugyanis lényegesen több szakaszra bontottuk a litoszférát, mint azt az irodalomból ismert reológiai modelleknek tették, illetve tehetők. MEISSNERÉK statisztikus vizsgálata lehetővé teszi, hogy ne általános (laboratóriumi és terepi) ismeretekből becsüljük meg a kőzetparamétereket, hanem a területen mért sebességadatok alapján.

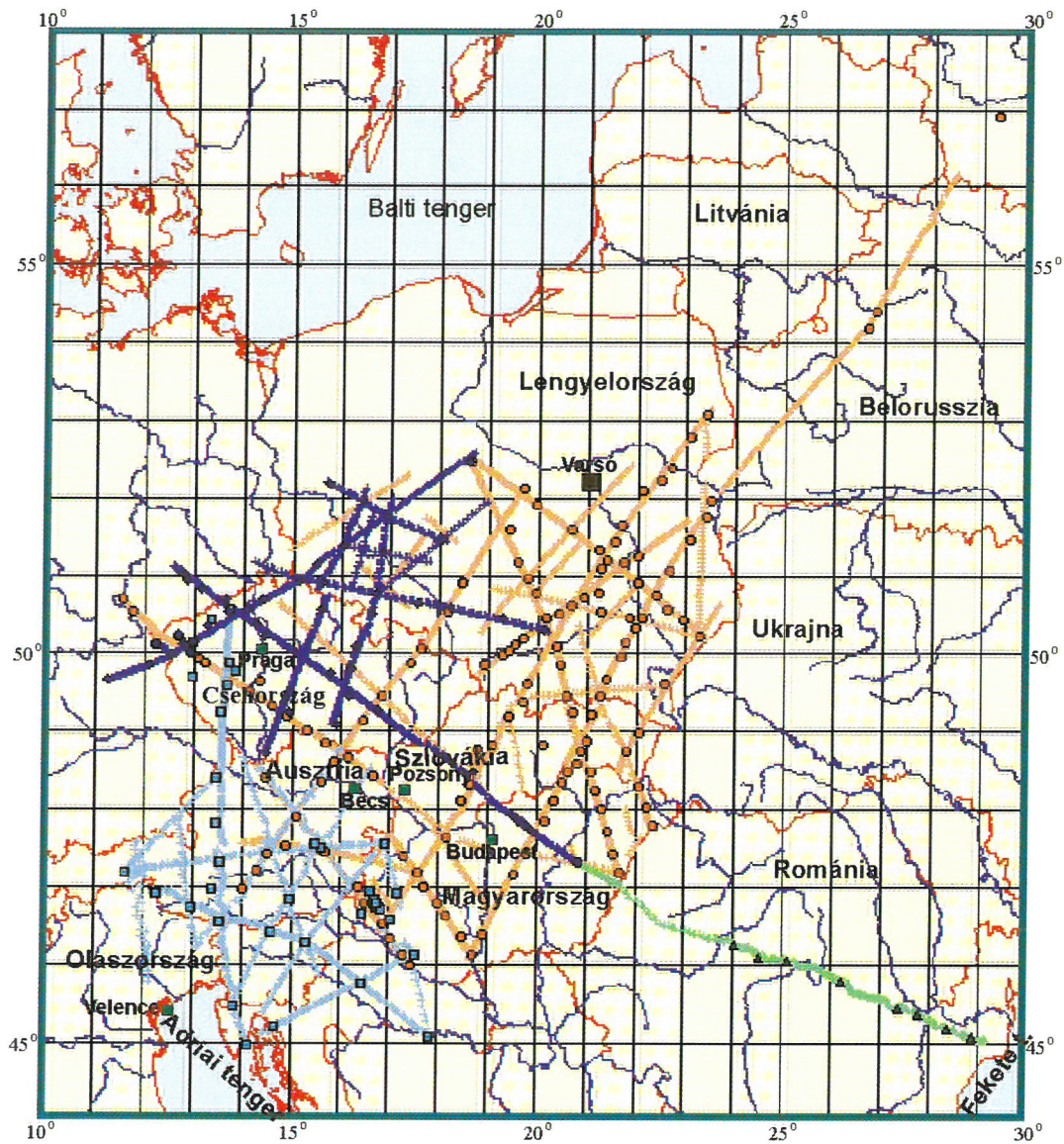
A közel vízszintes reflexiók vizsgálatához a kisebb mélységekben részletgazdag, tomográfiával meghatározott sebességképet használtuk fel, ahol a közelben ilyen feldolgozásra alkalmas mérés volt. Nagyobb mélységre (8–10 km felett) a reflexiók kéregkutatásoknál meghatározott sebességet alkalmaztunk. Ez a finomítás a litoszférának az irodalomban ismertett módszereknél részletesebb reológiai vizsgálatát teszi lehetővé.

A *VP-E* diagramból kiválasztott *E* érték alapján kerestük ki a szakirodalomban közölt laboratóriumi mérési adatokból az anyagi állandók nagyságát. További szempont volt az is, hogy olyan kőzet — laboratóriumi mérésekből ismert — paramétereit válasszuk, amelynek a laboratóriumban nagy hőmérsékleten és nyomáson mért sebessége egyezik a tomográfiásan, illetve a KESZ-1 mélyreflexiók szelvényen meghatározott sebességgel és előfordulása a kérdéses intervallumban valószínű [POSGAY et al. 2001].

A metamorf fáciesek zónái a metabazalt jellemző ásványtársulásai szerint láthatók a 6. ábrán. Az ábrán feltüntetjük a mérési területre jellemző hőmérséklet-mélység menetet [DÖVÉNYI et al. 1983, ČERMÁK, BODRÍCVETKOVA 1987, LENKEY 1999], amely mentén a mai mélységi hőmérsékletváltozásnak megfelelő stabilitási zónák várhatók. A görbe mentén tüntettük fel a KESZ-1 litoszféra- és asztenoszféra-kutató szeizmikus szelvényen meghatározott szakaszsebességek felső litoszférába eső részét [POSGAY et al. 1981]. A szakaszsebességek jól egyeztetethetők az egyes ásványtársulási stabilitási zónákkal. Az amfibolit fáciesben látható sebességváltozás valószínűleg a felső és alsó amfibolit fácies határzónáját mutatja.

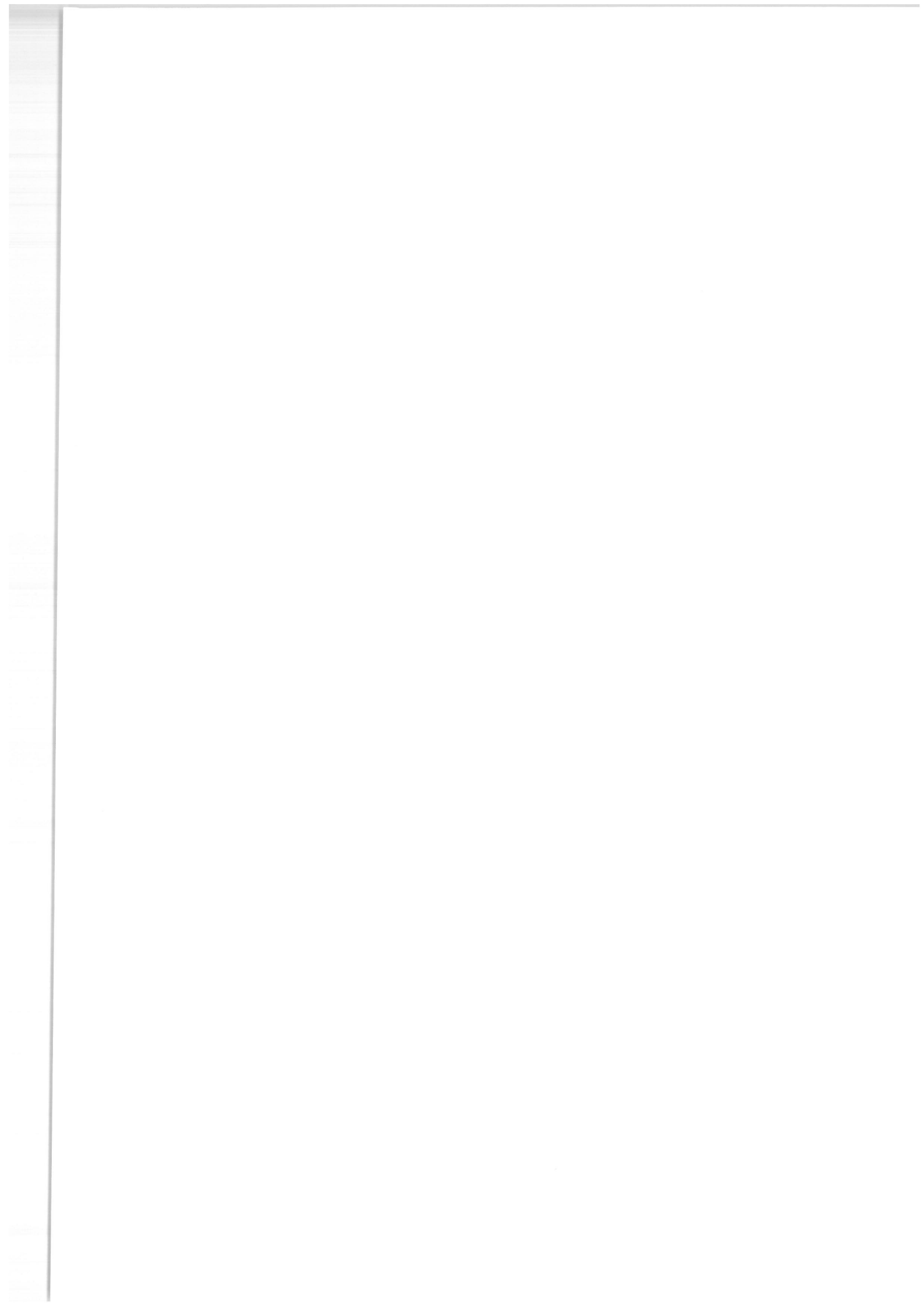
### Közel vízszintes reflexiók

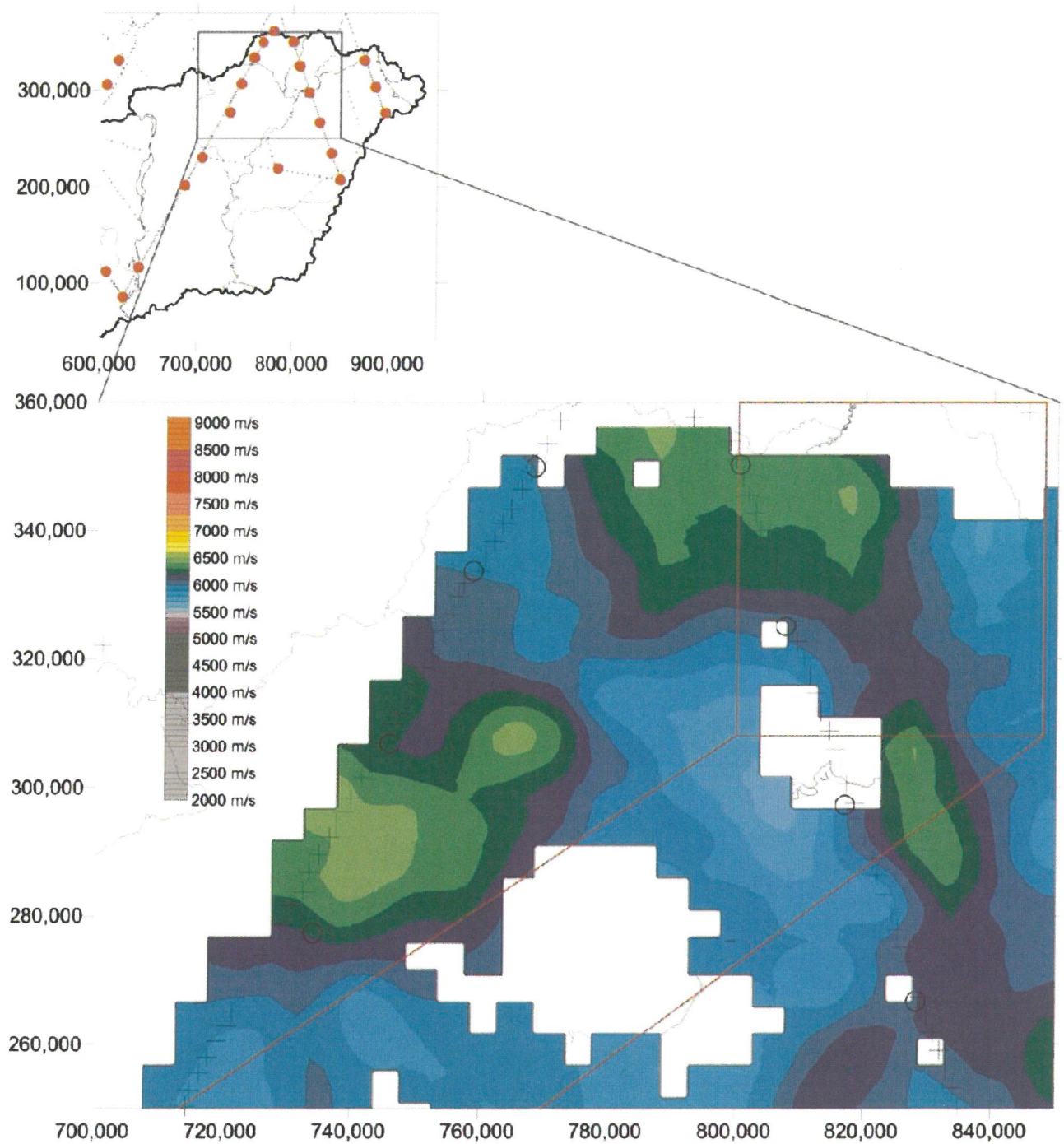
A szeizmikus szelvények helyszínrajzán (7. ábra) a preneogén medencealjzat felépítése Magyarország szerkezetföldtani térképe alapján látható. A következőkben a PGT-1 szelvény egy (az ábrán vastag vonallal jelölt) szakaszát ismertetjük és vetjük össze a kérdéses mélységben feltételezhető metamorf és reológiai viszonyokkal, majd a kóliai szupermély kutatófúrás, illetve egy Kanadában mért szeizmikus szelvény adataival hasonlítjuk össze. Ezután egy, a Derecskei-árkot keresztező szénhidrogén-kutató szelvénynek egy szakaszát vizsgáljuk meg. Ezt a vizsgálatot a CEL-04 nemzetközi litoszféra-kutató szelvénynek a szakaszhoz közel eső részén kapott tomográf sebességadatokkal végezzük.



1. ábra. Nemzetközi litoszférakutató mérések helyszínrajza. A narancssárga vonalak a 2000. évben mért CELEBRATION, a zöld vonal a 2001. évi VRANCEA, a világoskék a 2002-ben mért ALP, és a sötétkék vonalak a 2003-ban mért SUDETES elnevezésű szelvények helyét mutatják

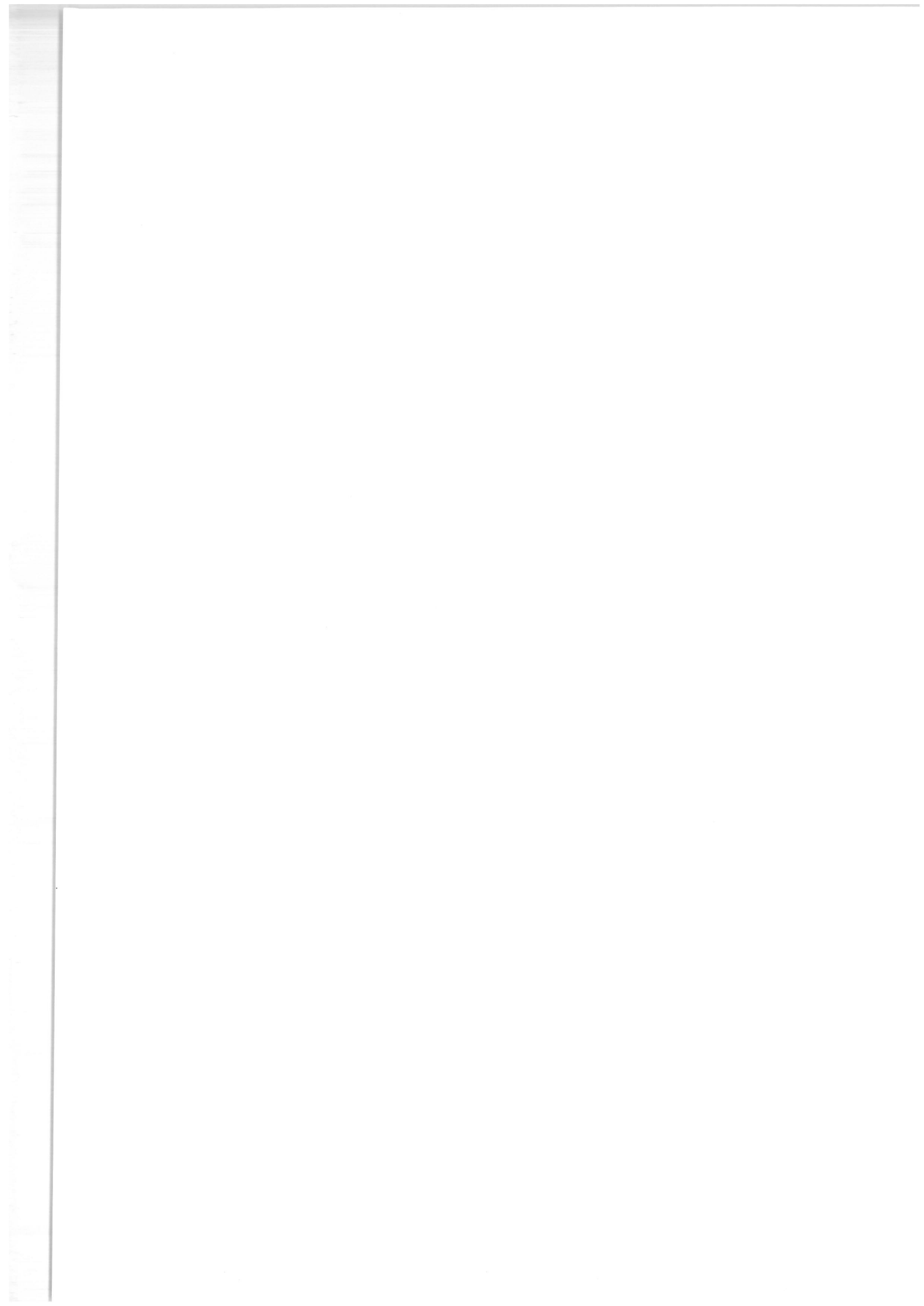
Fig. 1. Location map of the international lithospheric projects. Orange lines mark CELEBRATION profiles measured in 2000, the green one marks VRANCEA profile measured in 2001, the light blue ones mark ALP profiles measured in 2002 and the dark blue ones show SUDETES profiles of 2003

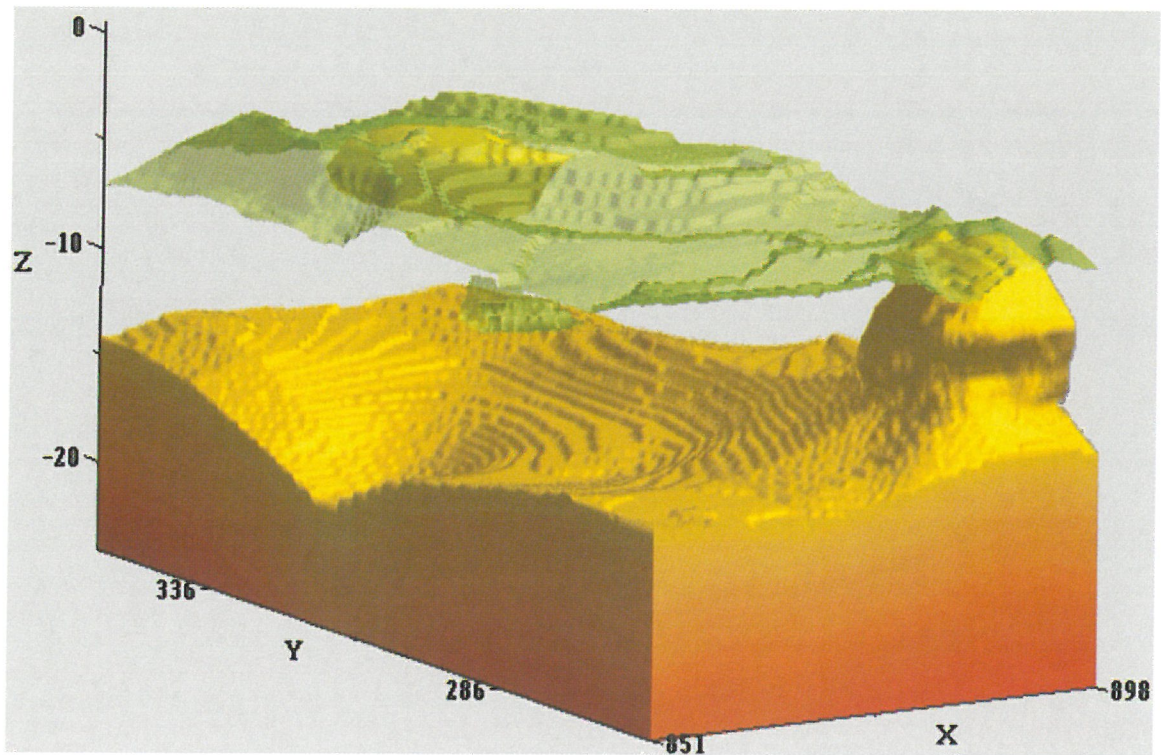




2. ábra. Az ország ÉK-i része  $P$ -hullám sebességeloszlásának 8 km mélységben készített vízszintes metszete [HEGEDŰS et al. 2003a alapján]. Az ábra bal felső sarkában a kelet-magyarországi CEL szelvények és robbantópontok helyszínrajzán levő négyzet mutatja a sebességmetszet helyét. Figyelemre méltó, hogy a neogén tektonikára eddig jellemzőnek tartott ÉK–DNY-i irány helyett az alaphegységben a Keleti-Kárpáttal párhuzamos nagy sebességű anomália rajzolódott ki

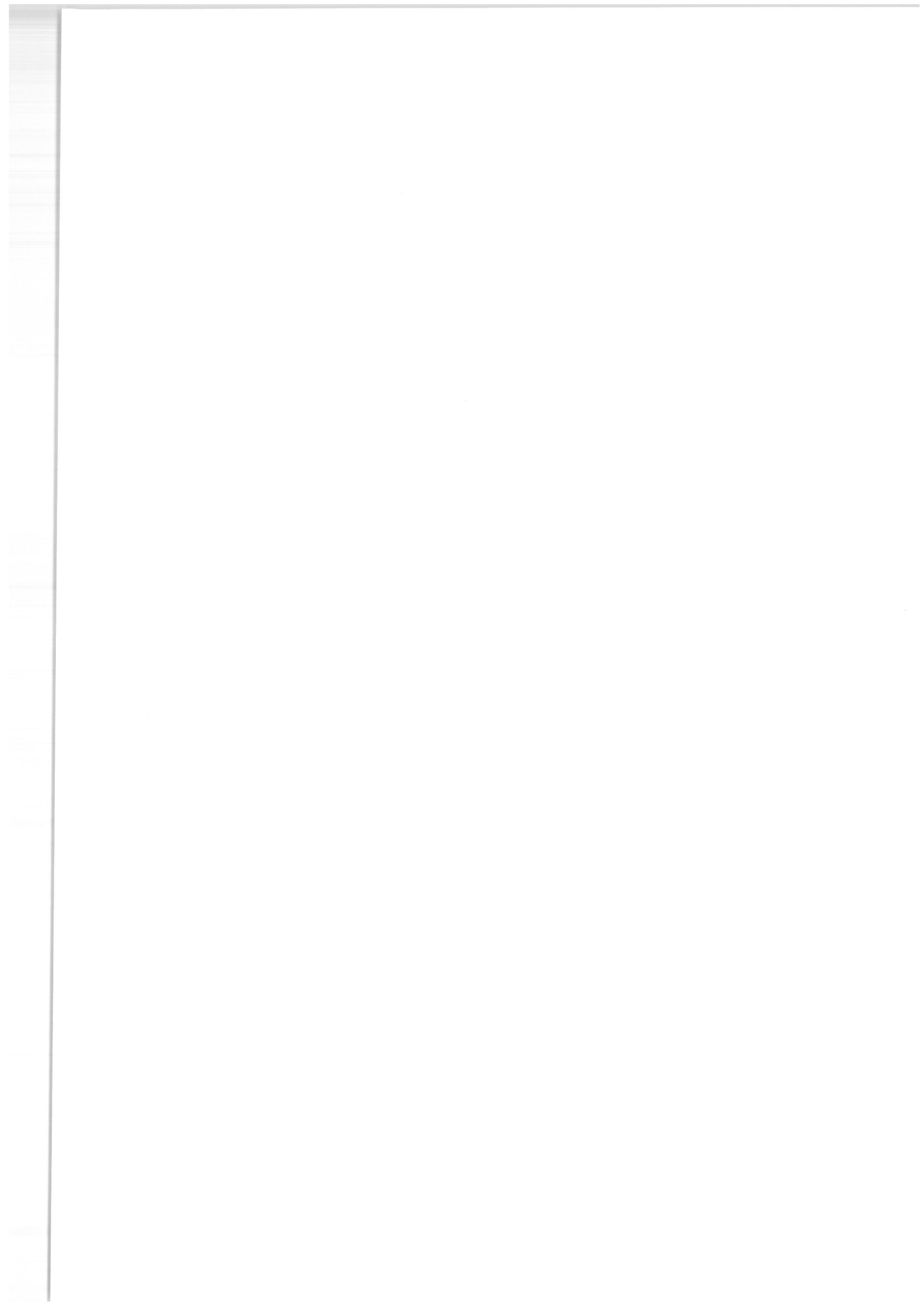
Fig. 2. Horizontal slice of the seismic velocity distribution of North-Eastern Hungary in a depth of 8 km [modified after HEGEDŰS et al. 2003a]. Location of the slice and the relating source points are shown at the upper left corner of the figure. It is remarkable that instead of the NE–SW direction characteristic of the Neogene tectonics in the region a high velocity anomaly parallel with the Eastern-Carpathians appears within the basement

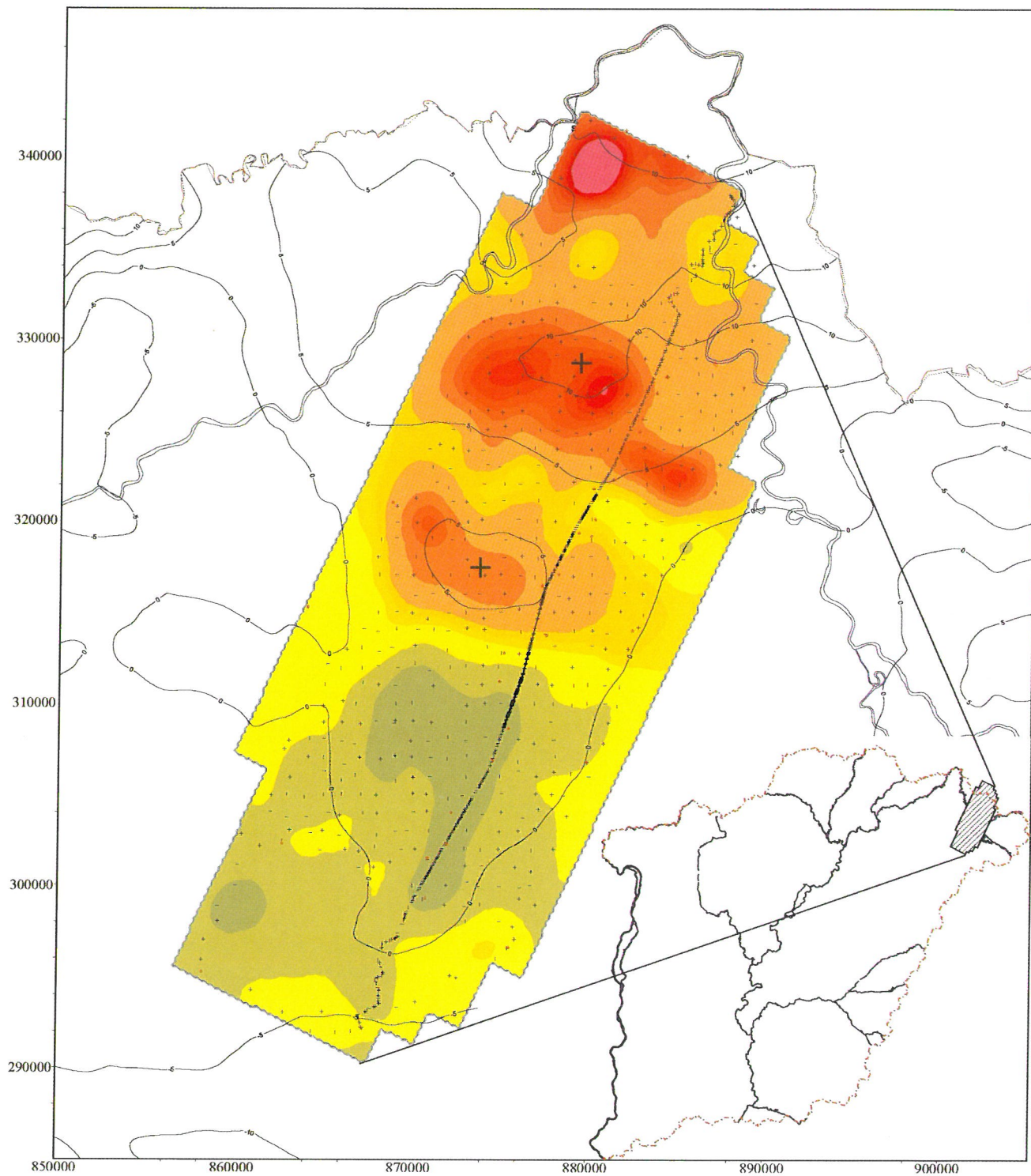




3. ábra. ÉK-Magyarországon a CEL szelvényekből meghatározott sebességfelületek térbeli képe. A zöldre rajzolt, 5,8 km/s sebességet ábrázoló felület a preausztriai korú alaphegység mélységének táján van, a sárga-barna, 6,5 km/s sebességfelület a mélyebb, illetve a kép jobb oldalán a Nagyecsed környéki szerkezetre lehet jellemző

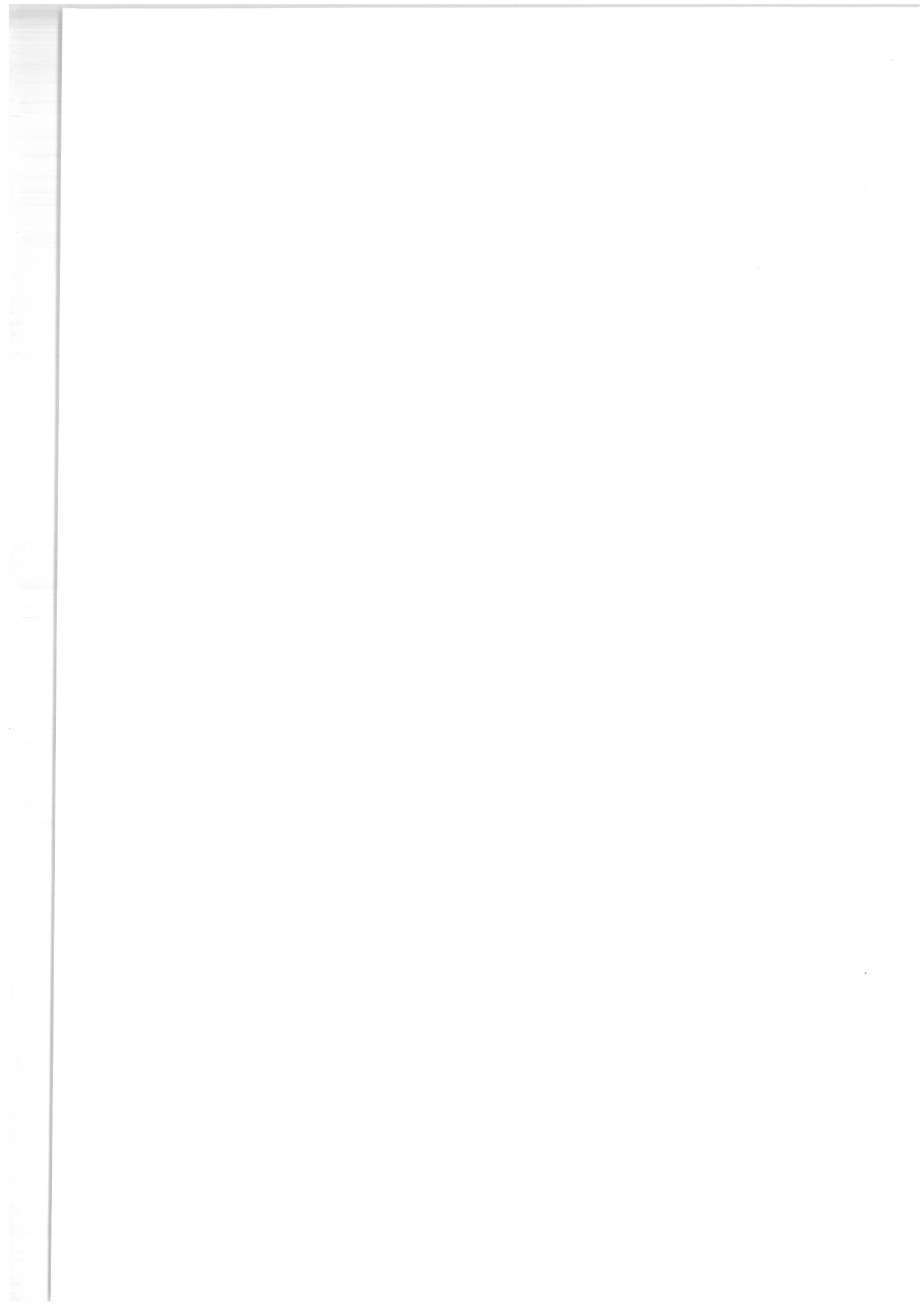
Fig. 3. Axonometric representation of iso-velocity interfaces determined from the CEL profiles. The green one represents the seismic velocity of 5.8 km/s and corresponds roughly to the basement of Neogene basin, the yellow one representing a velocity of 6.5 km/s is much deeper and depicts the paleovolcanic structure of Nagyecsed

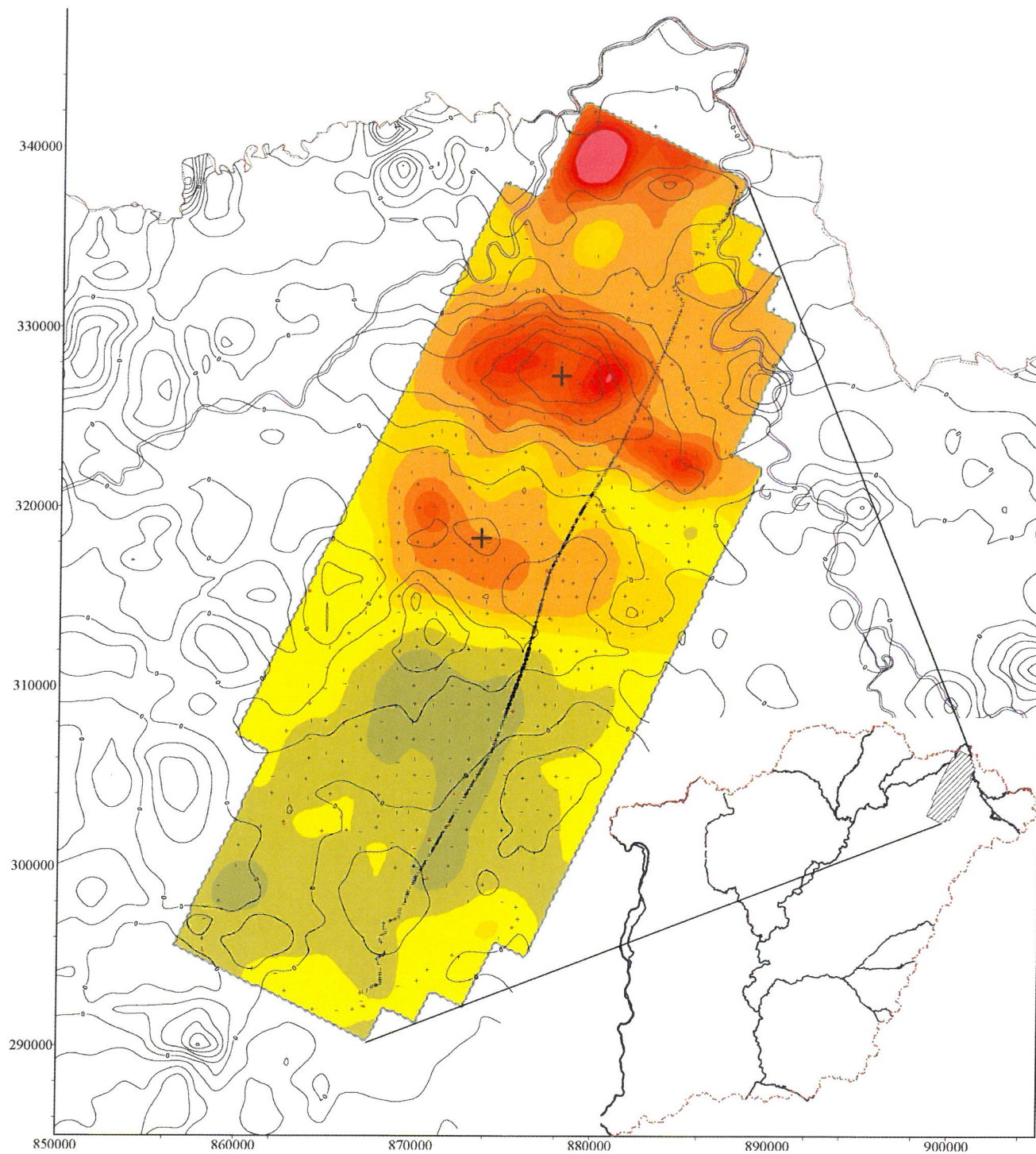




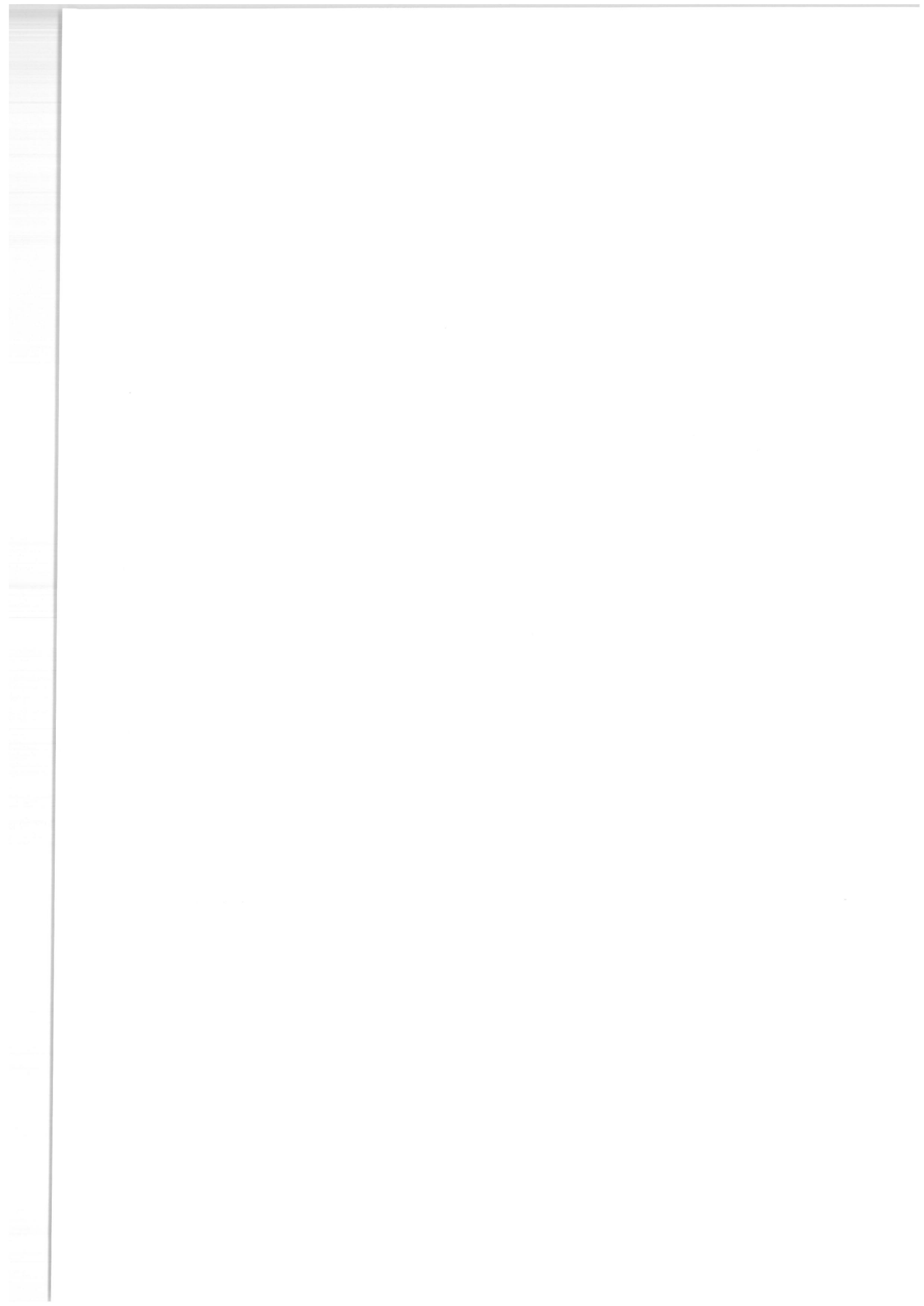
4. ábra. Az ALP 2002 program egyik kiegészítő mérése során észlelt  $P$  beérkezések idejéből 3-D tomográfiával meghatározott sebességmező 2,8 km mélységű színezett metszete [HAJNAL et al. 2002b alapján]. A fekete vonalak a gravitációs anomáliaképet mutatják. A mellékábra a kutatás helyét vázolja

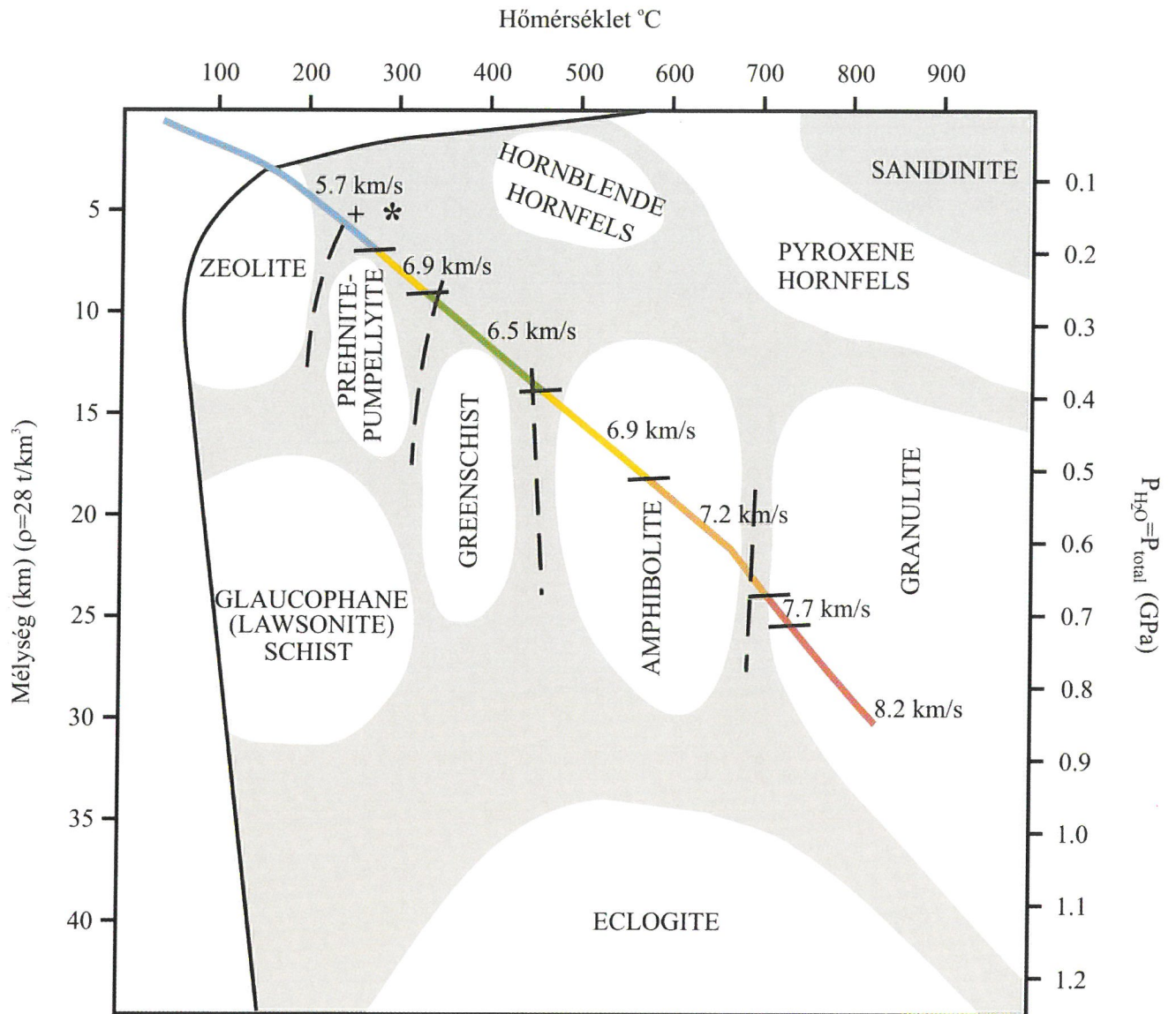
Fig. 4. Coloured horizontal slice of a velocity distribution in a depth of 2.8 km which is determined by real 3-D tomographic processing from a supplementary dataset of the ALP project [after HAJNAL et al. 2002b]. The black lines represent the gravity anomalies. The location is shown at the lower right corner





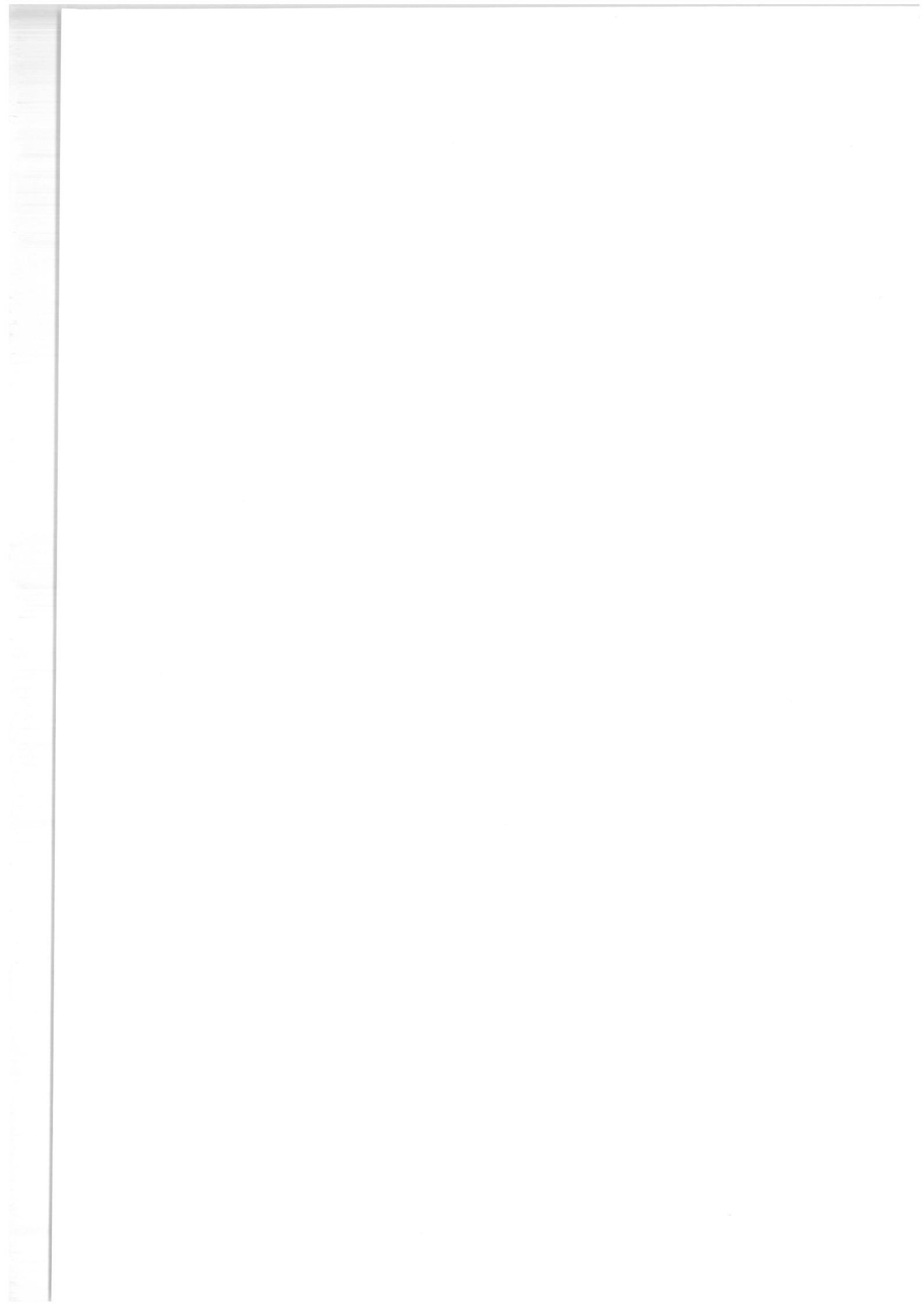
5. ábra. A 4. ábrán látható sebességmetszet és fekete vonallal a vertikális mágneses anomáliák láthatók  
 Fig. 5. The same slice as in Fig. 4 with a magnetic anomaly (vertical component) map in the background

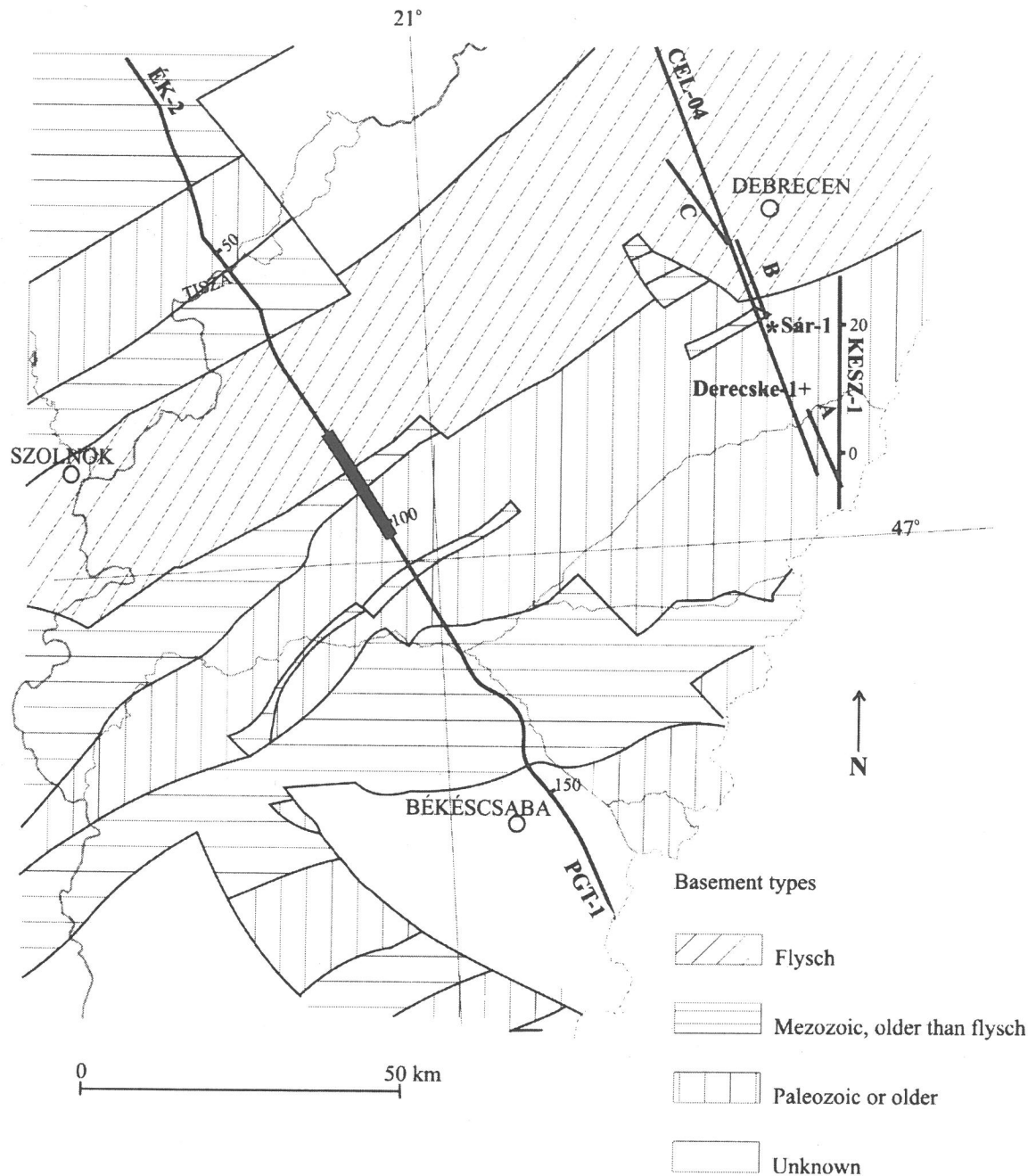




6. ábra. Az ásványok kísérletileg meghatározott állandósági viszonyai figyelembevételével meghatározott közelítő ásványtársulási diagram [FYFE et al. 1978 alapján]

Fig. 6. Approximate locations of mineral facies in terms of experimentally determined mineral stabilities [modified after FYFE et al. 1978]





7. ábra. Szeizmikus szelvények helyszínrajza. A preneogén medencealjzat felépítését Magyarország szerkezetföldtani térképe alapján vázoltuk

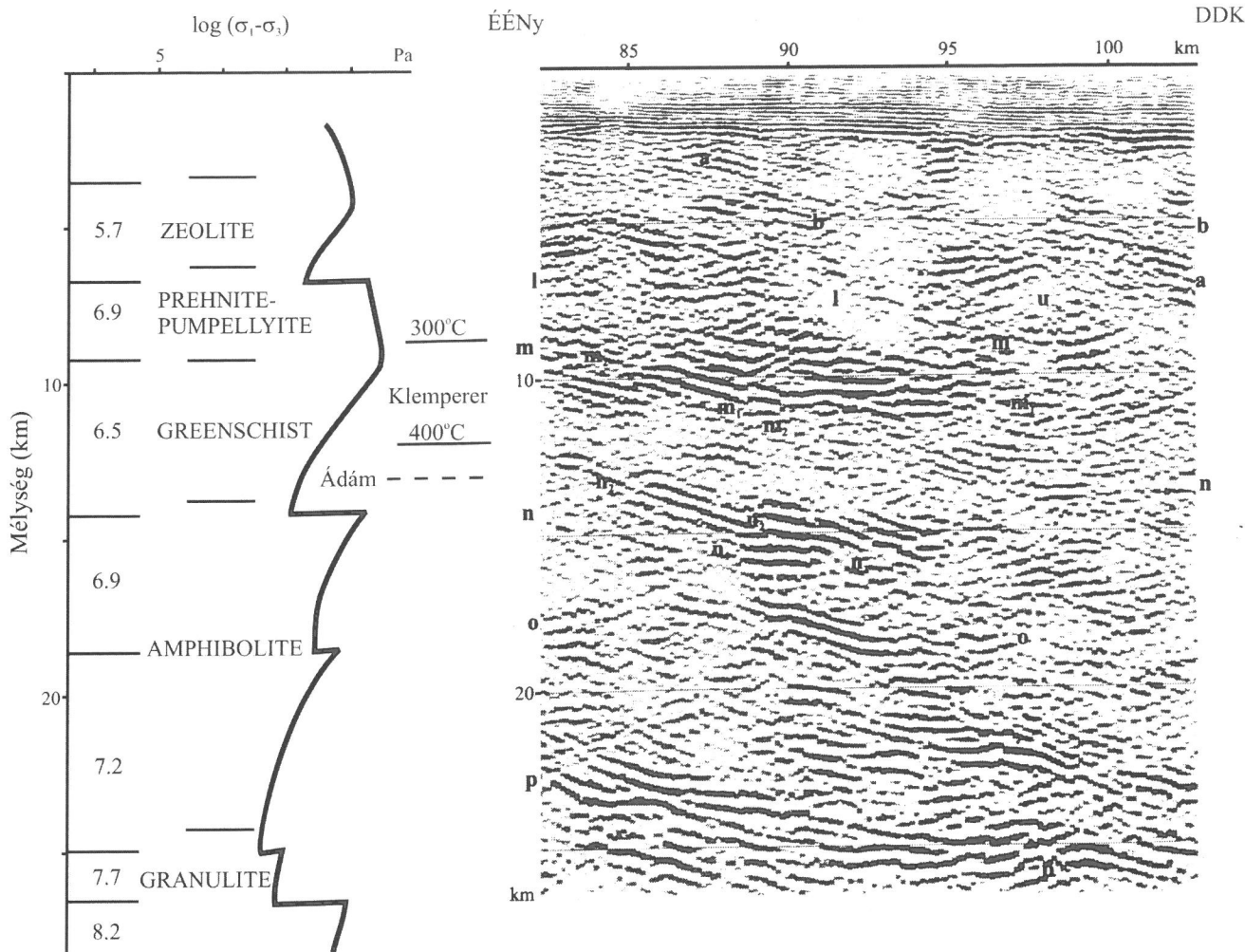
Fig. 7. Location maps of seismic profiles. The structure of the Paleogene basement is taken from the uncovered geological map of Hungary

Az 8. ábra bal oldalán tüntettük fel a KESZ-1 mély-reflexiók szelvényen meghatározott szakaszsebességeket, a kőzetek ennek felhasználásával meghatározott szilárdságszelvényét, továbbá a kettő között a 6. ábra alapján becsült metamorf fácieseket. Az ábra jobb oldalán a PGT-1 migrált mélységszelvény [POSGAY et al. 1995] egy szakaszának felső része látható. Ezenkívül feltüntettük azt a mélységet, amelynél 300–400 °C hőmérséklet várható, ahol KLEMPERER [1987] szerint a „jól reflektáló alsó kéreg” kezdődik, továbbá ÁDÁM [1987] jól vezető rétegének regionálisan meghatározott mélységét.

Az üledékes kőzetekre jellemző reflexiósor alatt a medencealjzatban 85. és 90. szelvénykilométertől DDK felé

lejtő (*a-a*-val jelölt) reflexiókat az ausztriai orogén időszak feltolódásos szerkezetével hozzuk kapcsolatba. Úgy 4 km alatt — a zeolit fácies maximális szilárdságú mélységében — közel vízszintes (*b-b*-vel jelölt) zavar látszik, amely alatt 100. szelvénykilométer táján ismét a lejtő reflektáló felületek vehetők ki. Ehhez hasonló reflexiók szerkezet a később tárgyalt derecskei szelvényszakaszon jól tanulmányozható.

A szelvény elején, kb. a 90. szelvénykilométerig, 7 km mélység táján ugyancsak kevésbé határozott (*l-l*-lel jelölt) vízszintes reflexió látható, amely egybeesik egy nagyobb szilárdságú (és sebességű) zóna felső részével. Ez tartozhatna a prehnit–pumpellit metamorf fáciesű zónába.



8. ábra. A PGT-1 migrált mélység szelvény [POSGAY et al. 1995 alapján] egy szakaszának felső része. A *b-b*, *l-l*, *m-m*, *n-n*, *o-o*, *p-p* betűkkel jelzett közel vízszintes reflexiók az ásványstabilitási zónák, illetve a szilárdsági burkoló görbe változói részével egyező mélységben található

Fig. 8. Upper part of a section from the PGT-1 migrated seismic depth profile. The sub-horizontal reflections indicated by the letters of *b-b*, *m-m*, *n-n*, *o-o* and *p-p* can be found in the same depth as the major changes of the mineral stability zones or of the stability curve

A mélyebben látható közel vízszintes reflexiók kötegek az egyes ásványtársulási zónák feltételezhető stabilitási tartományának felső részén vannak, és mélységük egyezik a közetzilárdság növekedési helyeivel, illetve maximumaival. A nagyobb amplitúdóval jelentkező (*m-m*, *n-n*, *o-o*, *p-p*-vel jelölt) jellegzetes reflexiók kötegek közül a legfelső (*m-m*) mélysége egyezik a KLEMPERER által meghatározott zónával, amely a jelen esetben megfelel a zöldpala fácies stabilitási mélységtartománya felső részének. Figyelemre méltó, hogy ez alatt helyezkedik el az ÁDÁM Antal által regionálisan meghatározott jól vezető réteg. A közel vízszintes (pl. *m<sub>1</sub>-m<sub>1</sub>*, *n<sub>1</sub>-n<sub>1</sub>*) reflexiók között láthatók (maximálisan 17°-kal) lejtő reflexiók is (pl. *m<sub>2</sub>-m<sub>2</sub>*, *n<sub>2</sub>-n<sub>2</sub>*), amelyek amplitúdója egyezik a vízszintes amplitúdókéval. Remélhető, hogy a vízszintes és a ferde felületek értelmezésére tervezett további vizsgálatok a tektonikai és metamorf folyamatok pontosításához vezetnek.

A kólai mélyfúráson áthaladó szeizmikus szelvény jelentős tektonikai hatásokat mutat. A tektonikai szerkezetre jellemző képet a közel vízszintes reflexiók a szelvény jelentős részén felülírták (9. ábra). GANCHIN és társai szerint

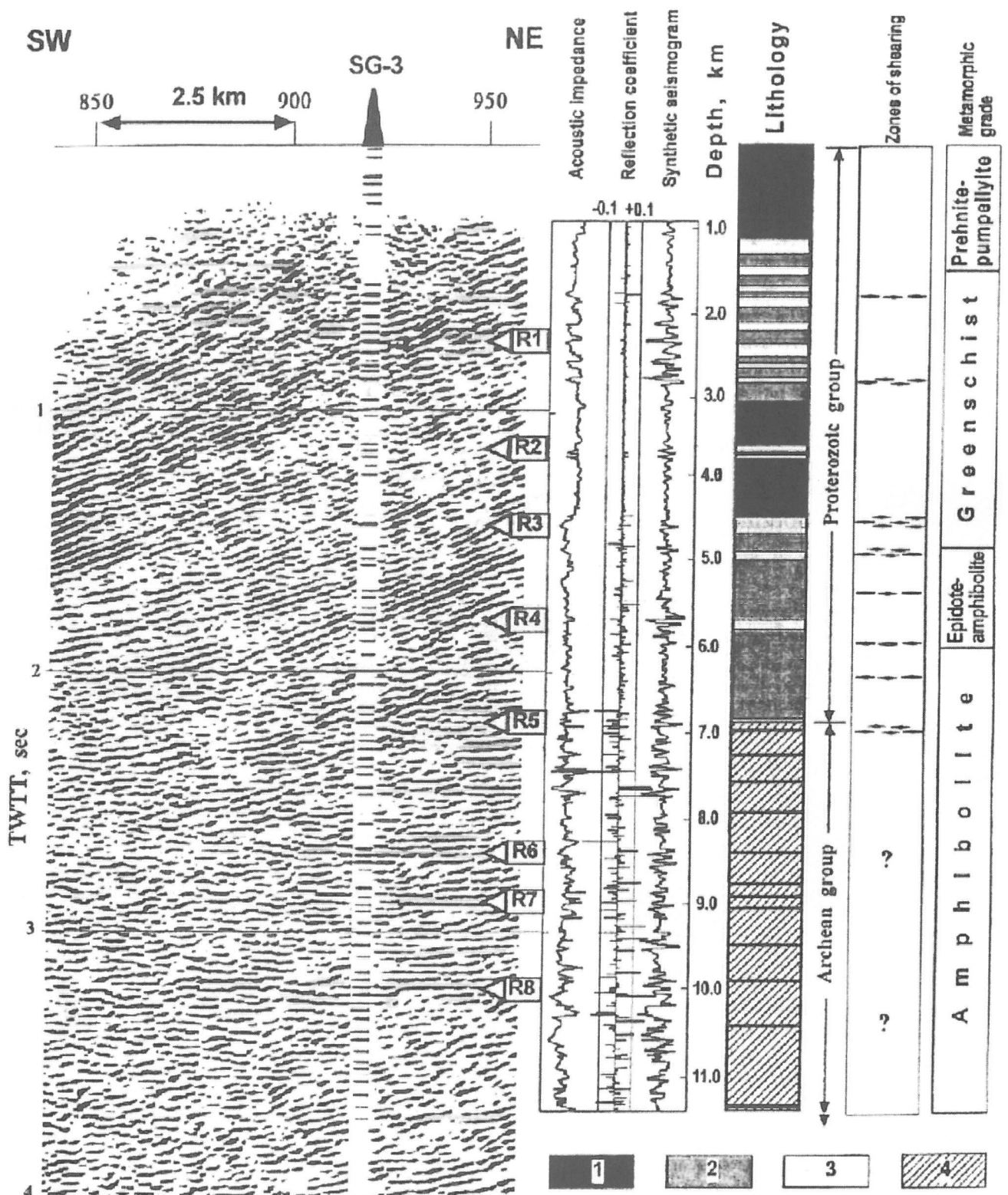
a közetfeszültség hatására tönkrement [KOZLOVSKY 1987] közet vízzel telt üregei kelthetik a reflexiókat. A közel vízszintes kifejlődés a kéregbeli közel lineáris *P-T* viszonyokat tükrözi.

A LITHOPROBE — a világ egyik legeredményesebb litoszféra-kutató tudományos egyesülése — szelvényein hazánk területét meghaladó, több mint 120 000 km<sup>2</sup> területen figyeltek meg kiemelkedő amplitúdójú, közel vízszintes, kötegesen jelentkező reflexiókat [MANDLER, CLOWES 1997, 1998, HAJNAL et al. 2002b]. Ezek a reflexiók a környezetük sugallta, bonyolult szerkezeti képpel nincsenek összhangban, ezért a szerzők utólagos, középső proterozoós (1,3 Ga) bázikus, ultrabázikus közet benyomulásaként értelmezik ezt a jelenséget. A 10. ábrán látható, hogy a szeizmikus kép nagyon hasonlít az utólagos felülírást mutató hazai szelvényekre. Feltételezhető, hogy mind a kólai, mind a kanadai megfigyelések is utólagos metamorf elkülönüléssel magyarázhatók.

A 11. ábrán egy kelet-magyarországi szénhidrogén-kutató reflexiók mélység-szelvény részlete látható. Helyét a 7. ábrán A betűvel jelöltük. A szelvényrészlet közepe táján,

az ábra alsó felében, a medencealjzatban egy (a-a-val jelölt) több kilométer széles elmozdulási zónára következtettünk. Ez feltehetőleg az ausztriai orogén idején keletkez-

hetett és később ismét felújult. A lejtő reflexiókat az ábra közepén, 4,5–5,5 km között, közel vízszintes (b-b-vel jelölt) rétegződés zavarja meg.



9. ábra. Kóla-i fúrási és szeizmikus szelvény [GANCHIN et al. 1998]

Fig. 9. Bore hole and seismic section from the Kola peninsula [after GANCHIN et al. 1998]

FYFE és társai [1978] szerint a prográd metamorfózis vízvesztéssel és egyben tömörődéssel jár. Nagyfokú metamorfózis után, ha a kőzet kis  $P$ - $T$  viszonyok közé kerül, csak kis mennyiségben vesz fel vizet, és nagy része a régebbi szerkezetét őrzi. Amennyiben metamorf kőzetben jelentősebb vízfelvétellel járó retrográd metamorf átalakulást találunk, abból FYFE és társai szerint feltolódásra következtethetünk.

Ezt a gondolatmenetet követve feltételezhető, hogy a variszkuszi időben már metamorfizálódott, tömörödött kőzet rész az ausztriai orogén során takarós szerkezetű lett és későbbi tektonikai hatásokra az elmozdulási zóna közvetlen környékén megrepesztett, fellazult, ami lehetővé tette, hogy vízfelvétellel a kőzetben az éppen uralkodó viszonyoknak megfelelő ásványtársulások keletkezzenek. Az átkristályosodáskor a maximális főfeszültség és hőmérsékleti gradiens a maihoz hasonló, azaz függőleges lehetett és hatására alakulhatott ki metamorf elkülönüléssel a horizontális közeli szerkezet, amely a ferde elmozdulási övet felülírta.

A 12. ábrán a CEL-04 szeizmikus szelvény mérési területre eső részének tomográfiával meghatározott sebességeloszlása látható. Az  $A$  szelvényrész kisebb sebességéből a kőzeteket ért igénybevételre következtethetünk. Tőle balra a Derecskei-árok látszik. A  $B$  szakasz nagyobb sebessége a sárándi mélyfúrásból is ismert kiemelt blokkot jelzi.

A CEL-04 nemzetközi szelvényen az  $A$  szakasz közelében tomográfiával meghatározott sebességképet a reflexiós szelvényre vetítve látjuk a 13. ábrán. A vizsgálatnál figyelembe vettük a *Sár-1* szénhidrogén-kutató mélyfúrásban 4800 m mélységben mért 290 °C talphőmérsékletet ([ÁRKAI et al. 1998], helyét \*-gal jelöltük a 6. ábrán; a fúrás helyét a 7. ábrán szintén feltüntettük), továbbá a *Derecske-1* mélyfúrásban 5200 m mélységben mért 250 °C talphőmérsékletet ([DÖVÉNYI, HORVÁTH 1988], helyét +-tel jelöltük az említett ábrákon). A mélyfúrásokban meghatározott hőmérsékletértékek nagyobbak, mint amelyek a környékre meghatározott átlagos hőmérséklet-mélység görbéből adódnak. A jelentős anomáliát a Derecskei-árokban lévő 6500 m-nél is vastagabb [KILÉNYI et al. 1991] fiatal üledékek okozzák. Hővezető képességük lényegesen kisebb, mint a medencealjzatot alkotó idősebb kőzeteknek. Az árok alján ezért lényegesen nagyobb a hőmérséklet, mint hasonló mélységben a kisebb üledékvastagságú területeken. A *Derecske-1* mélyfúrás a neogén üledékeket 5000 m vastagságban harántolta, a *Sár-1* fúrást pedig a Derecskei-árok szélén mélyítették le.

Az ásványtársulási stabilitási zónákat és a kőzetszilárdági burkoló görbéket a 13. ábrán az  $X$ -szel jelölt helyen meghatározott tomográfiás sebességeloszlás, továbbá a fúrásokban mért hőmérsékleti értékek felhasználásával vázoltuk. A retrográd átkristályosodással felülírt szelvényrész ma a prehnit-pumpellit stabilitási zóna felső részén található.

A 14. ábrán egy egyszerűsített szerkezeti vázlat látható. A szubhorizontális reflexiók alatti — 5600 m/s értéknél kisebb,  $d$ -vel jelölt — sebesség egyrészt hőmérsékleti hatásnak, másrészt az átkristályosodott kőzet alatt keletkezett pórusfolyadék túlnyomásaként értelmezhető [HYNDMAN 1988]. A medencealjzat felszíne közelében meghatározott —  $e$ -vel jelölt, 5800 m/s-nál nagyobb — sebesség a retrográd folyamat során keletkezett legszilárdabb kőzet részét jelezheti.

## Közel vízszintes reflektáló rétegek kialakulási ideje

Az 11. ábrán  $a$ - $a$ -val jelölt nyírás zóna — iránya, dőlése és jellege alapján, a Tisza nagyszerkezeti egységre jellemző — felső kréta (80 Ma) korú feltolódási zónaként értelmezhető. A  $b$ - $b$ -vel jelölt vízszintes reflexiós köteg az  $a$ - $a$  zónát írta felül, ezért 80 Ma-nál fiatalabb. A Pannon-medencében és környékén az alpi regionális metamorf események ÁRKAIÉK [ÁRKAI 2001] által történt felismerése, időbeli és térbeli rendszerezése az elmúlt évtized jelentős eredménye. A fiatalabb (pl. mezo-alpi: 30–40 Ma) metamorfózisról csak kevés adatot találunk a szakirodalomban [BALOGH et al. 1990, ÁRKAI et al. 2000, ÁRKAI 2001, BALOGH, PÉCSKAY 2001]. Ezeket tektonotermális hatásként említik, és a koradat leírásánál érzékeltetik annak bizonytalanságát. A szeizmikus szelvényekben, fúrással elérhető mélységben megjelölt, közel vízszintes reflexiós kötegek helyén végzett metamorf kor vizsgálat nem ismert. A közölt adatokat extrapolálva, egyik lehetőségként feltételezhető, hogy a viszonylag kis mélységű, közel vízszintes reflexiók a Pannon-medence kialakulása előtt keletkeztek.

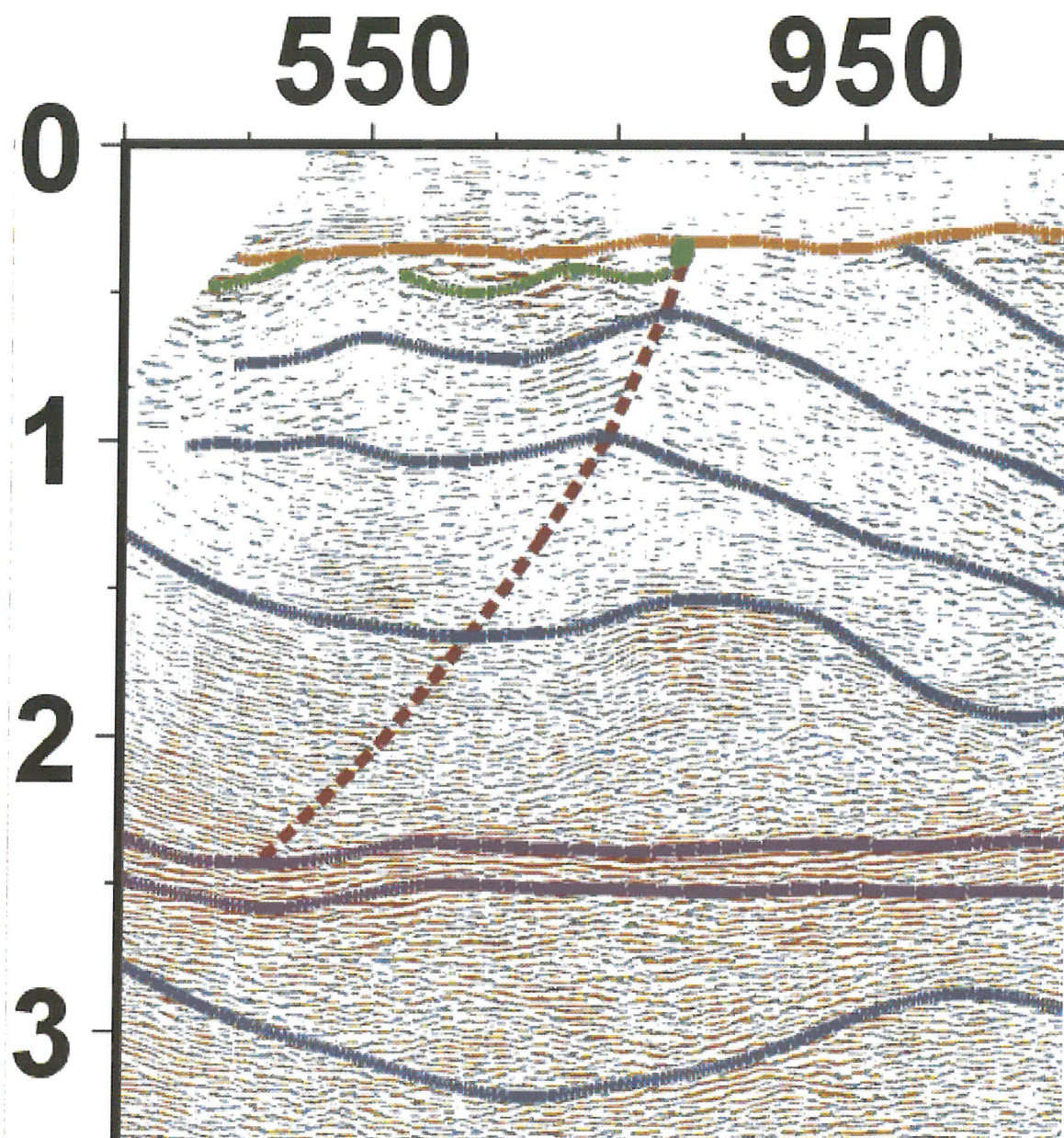
A közel vízszintes reflexiók egy fiatalabb keletkezés lehetőségét is felvetik. A reflexiós kötegek mélységének egyezése a metamorf stabilitási, továbbá a nagyobb kőzetszilárdságú zónák mélységével azt sugallja, hogy a reflektáló felületek a maihoz közeli kéregvastagság mellett keletkeztek. Ez a kéreg a Pannon medencerendszerrel a miocén folyamán alakult ki. (A kezdeti és fő szinrift fázis: 24–14 Ma, a termális süllyedés fázisa: 14–4 Ma időszakra tehető [HÁMOR et al. 2001].) A süllyedés és hőtörténeti modellezés [DÖVÉNYI 1994] eredményei szerint a gyors kezdeti süllyedés után lassabb termális süllyedés időszaka következett. Az izoterma felületek nagyobb változása csak a kezdeti időszakban tételvezhető fel, ezután az utolsó 2–10 Ma alatt pedig mélységi helyzetük és a geotermikus gradiens értéke csak keveset változhatott. A mély üledékes medencék ezt a képet módosították. A tektonikai folyamatokhoz viszonyítva a medence üledékek felfűtődése „készt” [STEGENA, DÖVÉNYI 1983].

A fentiek szerint a termális süllyedés idején levő viszonyok kedvezhettek újabb stabil ásványtársulások kialakulásának [POSGAY 2003]. A közel vízszintes reflektáló felületek keletkezésének utóbb leírt lehetőségét valószínűsíti az a tapasztalat is, mely szerint ezek a reflexiók a legtöbbször a fiatal extenziós területeken fordulnak elő [MEISSNER 1986; MOONEY, MEISSNER 1992].

## Összefoglalás

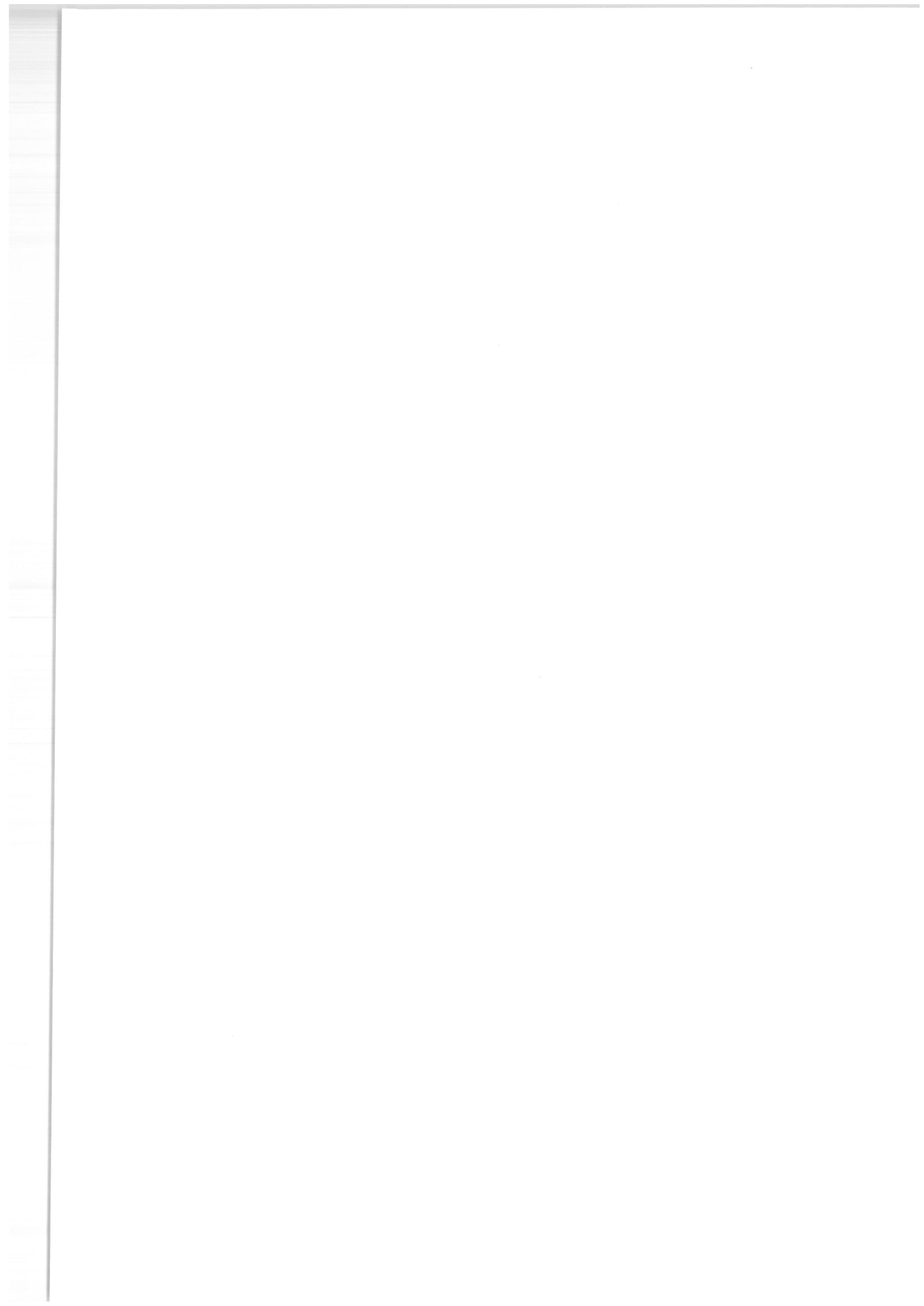
A CELEBRATION 2000, a következő évi VRANCEA 2001 és az ALP 2002 elnevezésű nemzetközi, refrakciós, tomográfiás kéregkutatásban Európából és Észak-Amerikából 10–30 intézmény vett részt. Az említett projektekben alkalmazott szeizmikus mérési eljárás megfelelő módosítással a gyakorlati geofizikában is eredményesen felhasználható.

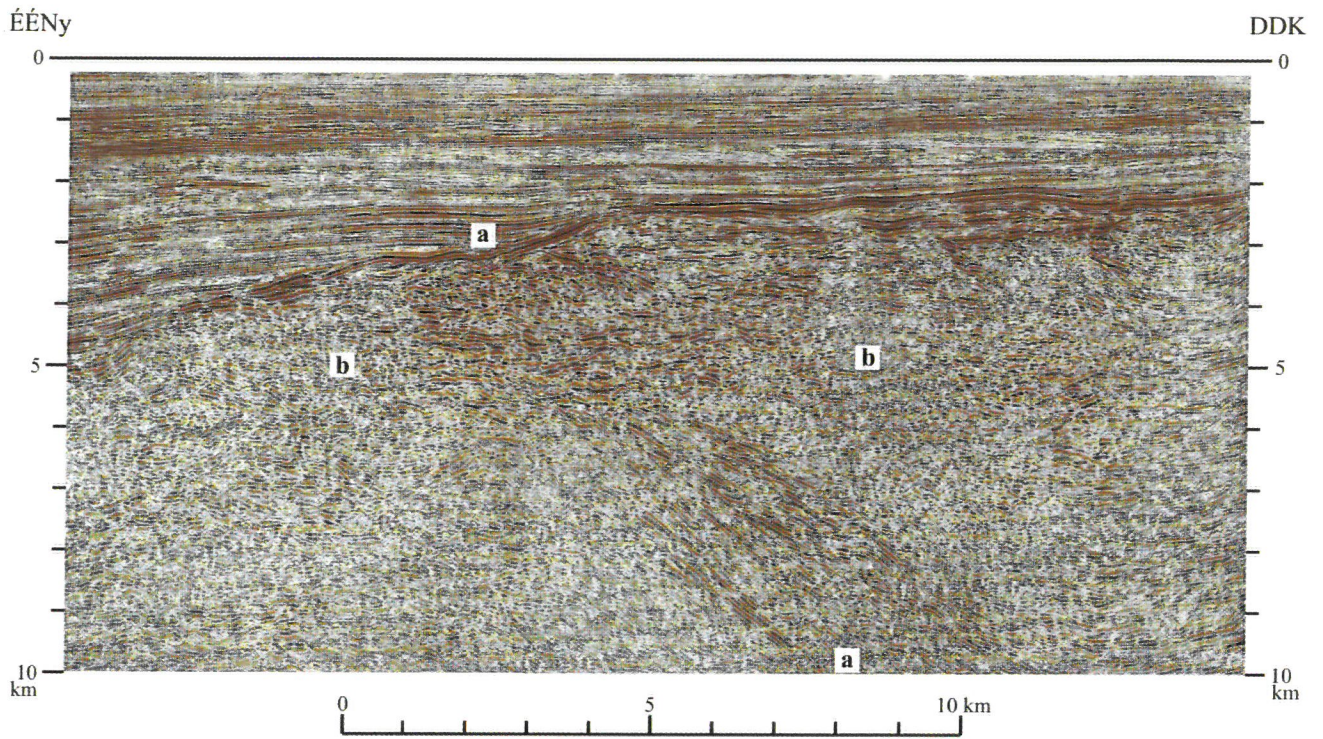
A CELEBRATION projekt egyik részeredményéből az ország ÉK-i részének tomográfiás inverzióval meghatározott  $P$ -hullám sebességeloszlásából a vulkáni kőzetek felszínközeli és mélybeli részének együttes értelmezésén kívül a neogénnél idősebb tektonikai elemekre is lehetett következtetni.



10. ábra. Kanadai kéregkutató szeizmikus szelvény egy részlete [HAJNAL et al. 2002b alapján]

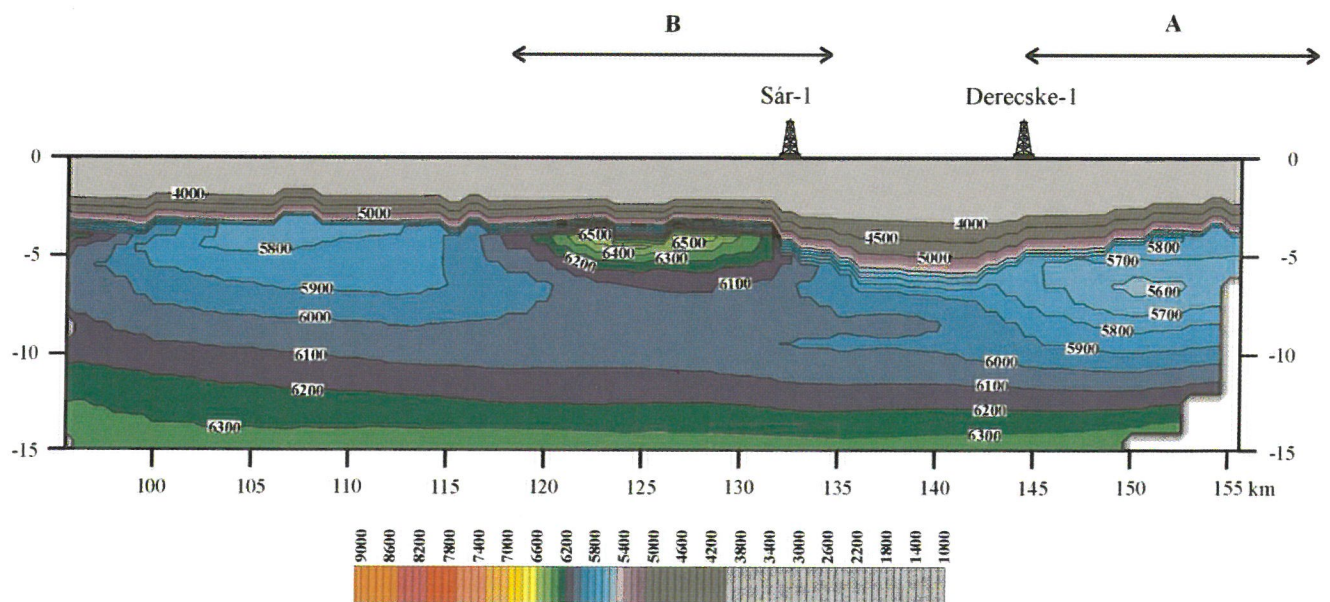
Fig. 10. A part of a deep seismic profile in Canada [modified after HAJNAL et al. 2002b]





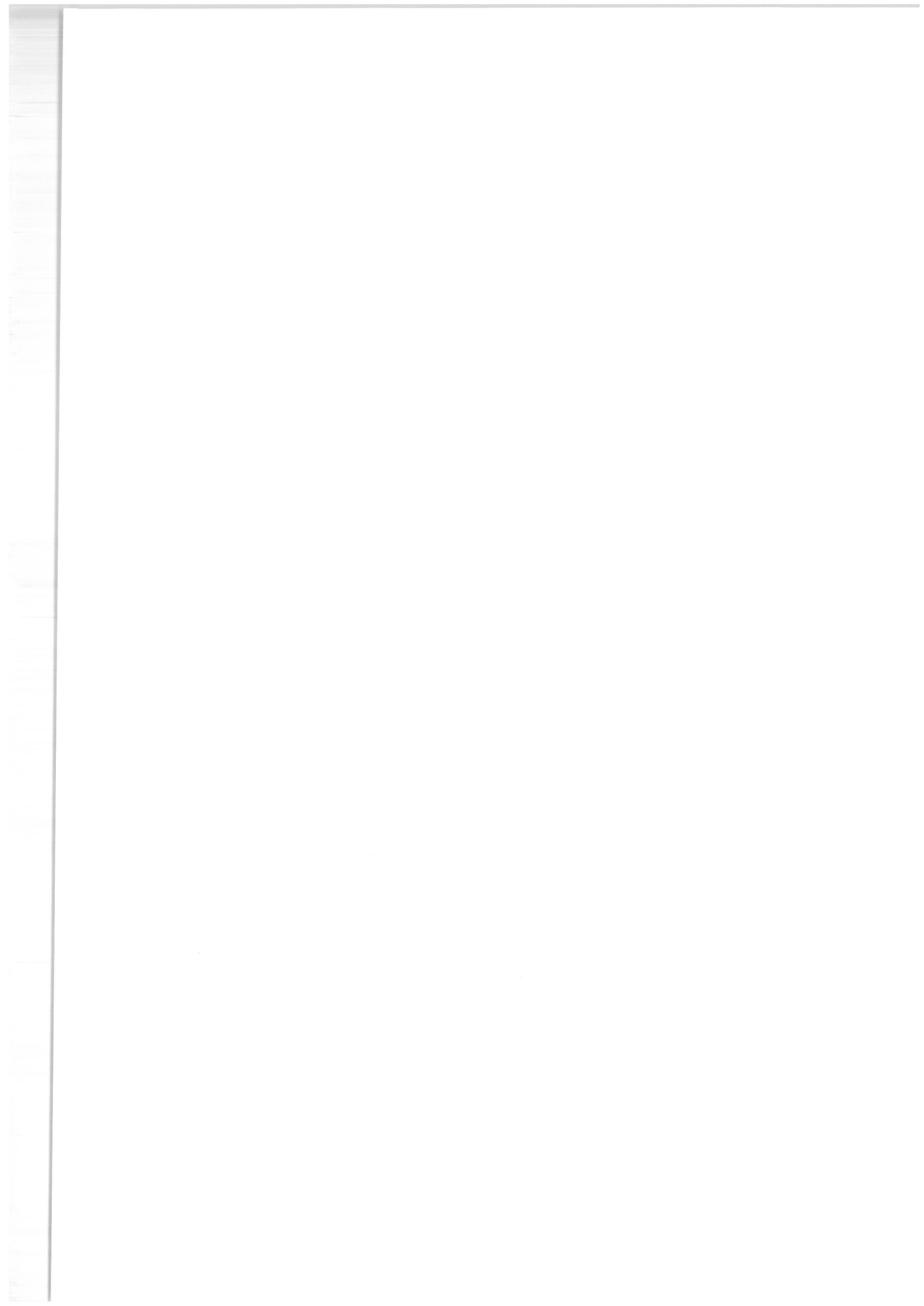
11. ábra. Kelet-magyarországi szénhidrogén-kutató reflexiós mélységsvlvény részlete [POSGAY et al. 2001]. Helyét a 7. ábrán A betűvel jelöltük. A medence aljzatban jól látható nyírási zónát 4,5–5,5 km mélységben közel vízszintes réteg-zördés írta felül

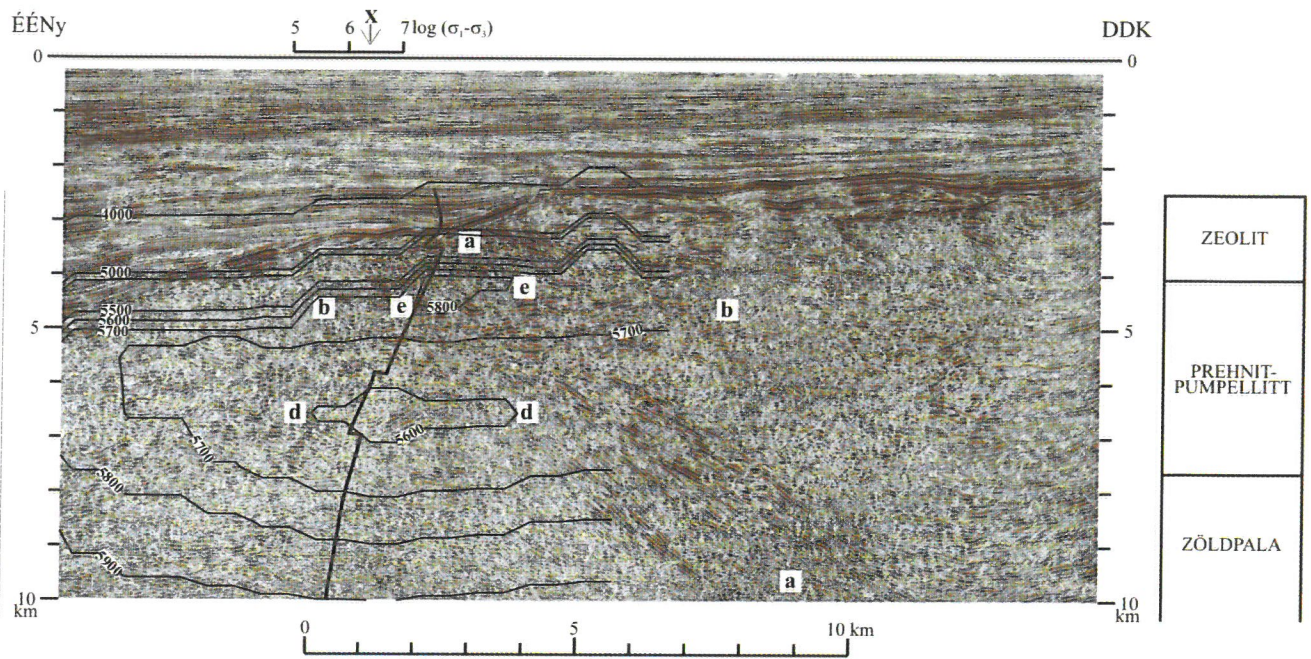
Fig. 11. Part of an industrial seismic depth section from Eastern Hungary [after POSGAY et al. 2001]. Its location is indicated by A in Fig. 7. Within the basement it can be seen that a shear zone has been overwritten by sub-horizontal reflections in a depth of 4.5–5.5 km



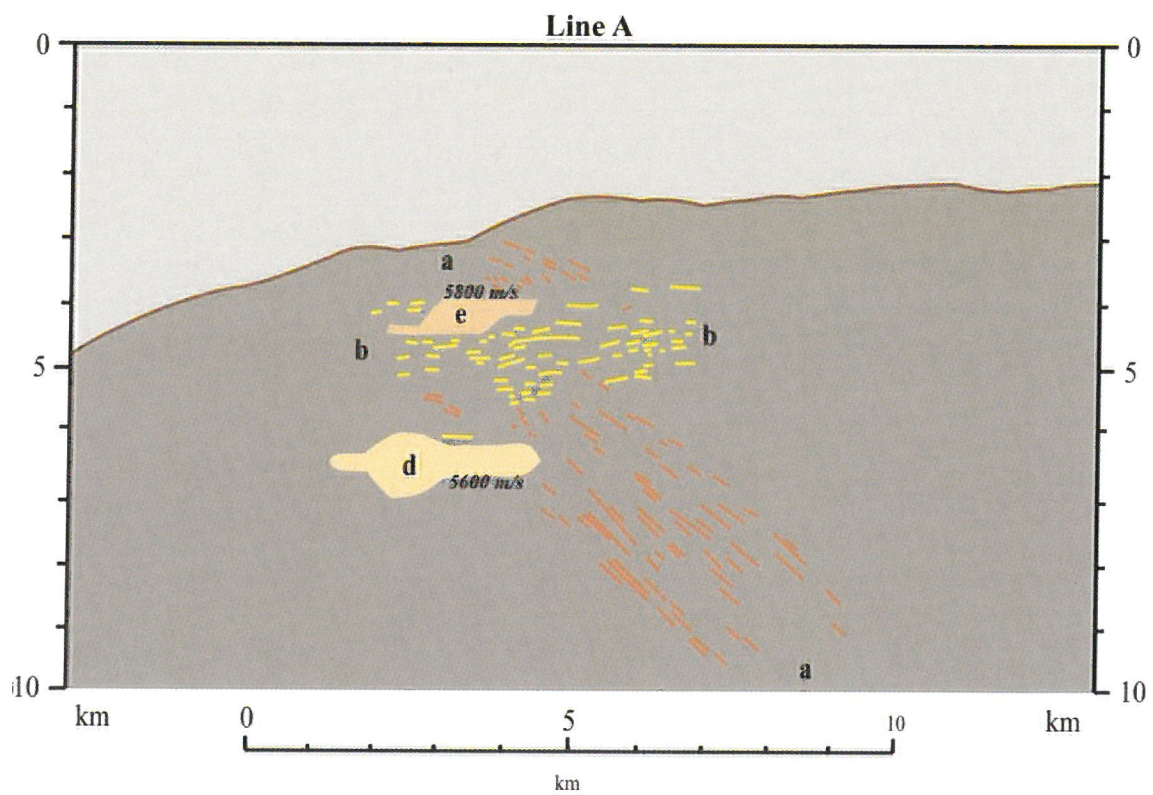
12. ábra. A CEL-04 szeizmikus szelvény mérési területre eső részének tomográfiával meghatározott sebességeloszlása

Fig. 12. Part of the velocity section of profile CEL-04 derived through 3-D tomographic analysis

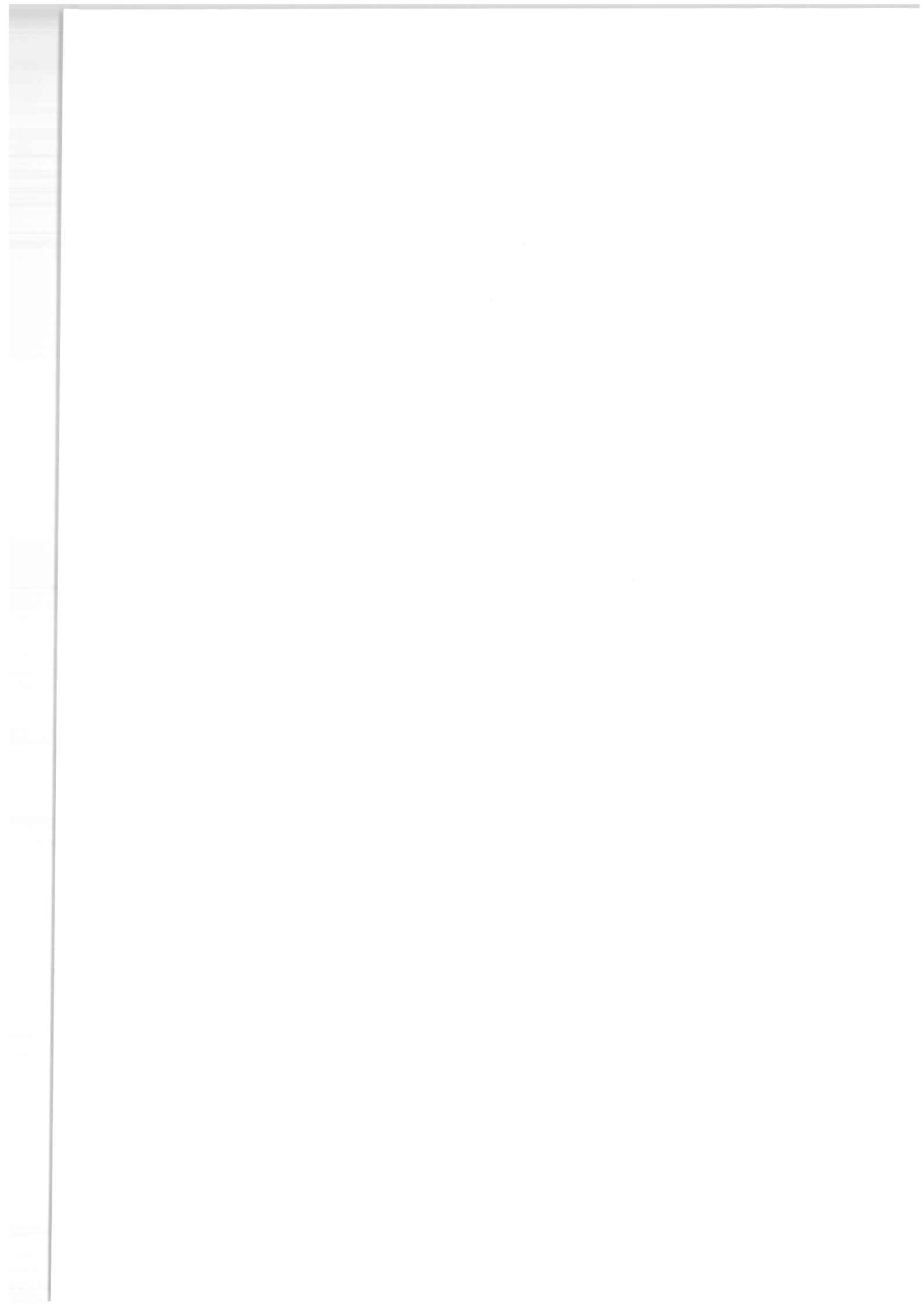




13. ábra. Az A reflexiós szelvényrész a tomográfias sebességekkel és a feltételezett kőzetstabilitási zónákkal  
 Fig. 13. Velocity distribution of profile CEL-04 projected into the depth section of profile A and the approximate locations of mineral facies



14. ábra. Az A szakasz egyszerűsített szerkezeti vázlata  
 Fig. 14. A simplified structural sketch of profile A



Az ALP 2002 program kiterjesztéseként végzett területi kutatások nemcsak az üledékek és az ezekben változatosan elhelyezkedő vulkáni rétegek, továbbá a harmadkori medence aljzata 3-D sebességképének áttekintő meghatározását tették lehetővé, hanem a *P* beérkezések idejéből 3-D tomográfiával meghatározott sebességmező komplex vizsgálatából a medencealjzat olyan helyi kiemelkedésére is lehetett következtetni, ahol kedvező esetben a vulkáni takaró jelentősen elvékonyodhat.

A tomográfiai feldolgozások során meghatározott sebességek a kéreg közzettani vizsgálatánál is felhasználhatók voltak. A közel vízszintes reflexiók tanulmányozásánál — ahol a közelben tomográfiai szelvény is volt — a tomográfival meghatározott sebességkép a reflexiók eredmények értelmezéséhez új szempontot adott.

A közel vízszintes reflektáló felületeknek a metamorf ásványtársulások mai stabilitási zónáival, továbbá a reológiai szelvény viszonylag nagyobb szilárdságú zónáival mutatott mélységi egybeeséséből arra lehet következtetni, hogy a közel vízszintes reflexiók kötegek a kéreg korábbi szerkezetének retrográd metamorf átírása során keletkeztek. Az elmondottak alapján valószínű, hogy a konszolidált kéregben a szeizmikus reflektáló felületek a jelenlegihez hasonló mélységi, hőmérsékleti és nyomásviszonyokat is tükrözik.

A preneogén medencealjzatban egy közel vízszintes reflexiókat adó rétegsor egy ferde nyírású zónát írt felül. Ez a jelenség csak a feltölődési zónában és közvetlen környékén volt megfigyelhető. A retrográd folyamathoz a vizet a nyírású zóna szolgáltatta.

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is köszönik, hogy a MOL Rt. és az ELGI vezetősége hozzájárult az adatok közléséhez. A mélyreflexiók szeizmikus szelvények kiváló feldolgozását TIMÁR Zoltánnak, az ábrák gondos elkészítését BANCIU Gábornénak köszönik a szerzők. A tomográfiai számítások nagy része a Magyar Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Program keretében működő SUN 10 000 számítógépen történt.

### HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM A. 1987: Are there two types of conductivity anomaly (CA) caused by fluid in the crust? *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **45**, 209–215
- ÁRKAI P. 2001: Alpine regional metamorphism in the main tectonic units of Hungary: A review. *Acta Geologica Hungarica* **44**, 2–3, 329–344
- ÁRKAI P., BÉRCZI-MAKK A., BALOGH K. 2000: Alpine low-T prograde metamorphism in the post-Variscan basement of the Great Plain, Tisza Unit (Pannonian Basin, Hungary). *Acta Geologica Hungarica* **43**, 1, 43–63
- ÁRKAI P., BÉRCZI-MAKK A., HAJDU D. 1998: Alpine prograde and retrograde metamorphisms in an overthrust part of the basement, Great Plain, Pannonian Basin, Eastern Hungary. *Acta Geologica Hungarica* **41**, 2, 179–210
- BALOGH Kad., KOVÁCS Á., PÉCSKAY Z., SVINGOR É., ÁRKAI P. 1990: Very low-grade and low-grade metamorphic rocks in the pre-Tertiary basement of the Drava Basin, SW-Hungary, II: K-Ar and Rb-Sr isotope geochronologic data. *Acta Geologica Hungarica* **33**, 1–4, 69–78
- BALOGH Kad., PÉCSKAY Z. 2001: K/Ar and Ar/Ar geochronological studies in the Pannonian–Carpathians–Dinarides (PANCARDI) region. *Acta Geologica Hungarica* **44**, 2–3, 281–299
- BRÜCKL E., BODOKY T., HEGEDŰS E., HRUBCOVÁ P., GOSAR A., GRAD M., GUTERCH A., HAJNAL Z., KELLER G.R., ŠPIČAK A., SUMANOVAC F., THYBO H., WEBER F., ALP 2002 Working Group 2003: Alp 2002 seismic experiment. *Studia geophysica et geodaetica*, Prague **47**, 671–679
- ČERMÁK V., BODRI-CVETKOVA L. 1987: Kelet- és Közép-Európa geotermikus modellje. *Magyar Geofizika* **28**, 4, 153–189
- DÖVÉNYI P. 1994: Geofizikai vizsgálatok a Pannon-medence litoszféraféjlesztésének megértéséhez. Kandidátusi értekezés. ELTE TTK Geofizikai Tanszék irattára, 127 old.
- DÖVÉNYI P., HORVÁTH F. 1988: A review of temperature, thermal conductivity and heat flow data from the Pannonian Basin. In: *The Pannonian Basin, a study in basin evolution (Eds: ROYDEN, L. H. and HORVÁTH, F.)*. AAPG Memoir **45**, 195–234
- DÖVÉNYI P., HORVÁTH F., LIEBE P., GÁLFI J., ERKI I. 1983: Geothermal conditions of Hungary. *Geophysical Transactions* **29**, 1, 3–114
- FYFE W. S., PRICE N. J., THOMPSON A. B. 1978: Fluids in the Earth's crust. Developments in geochemistry. Elsevier Sci. Publ. C. Amsterdam–Oxford–New York
- GANCHIN Y. V., SMITHSON S. B., MOROZOV I. B., SMYTHE D. K., GARIPOV V. Z., KARAEV N. A., KRISTOFFERSON Y. 1998: Seismic studies around the Kola Superdeep Borehole, Russia. *Tectonophysics* **288**, 1–16
- GUTERCH A., GRAD M., KELLER G. R. 2001: Seismologists Celebrate the New Millennium with an Experiment in Central Europe. EOS, Trans., American Geophysical Union **82**, 45, p. 529–534–535
- GUTERCH A., GRAD M., KELLER G.R., POSGAY K., VOZÁR J., ŠPIČAK A., BRÜCKL E., HAJNAL Z., THYBO H., SELVI O., CELEBRATION 2000 Experiment Team 2003: CELEBRATION 2000 Seismic Experiment. *Studia geophysica et geodaetica*, Prague **47**, 659–669
- GUTERCH A., GRAD M., THYBO H., KELLER G. H., The POLONAISE Working Group 1999: POLONAISE '97 — an international seismic experiment between Precambrian and Variscan Europe in Poland. *Tectonophysics* **314**, 101–121
- GRAD M., ŠPIČAK A., KELLER G. R., GUTERCH A., BROŽ, M., HEGEDŰS E., Working Group 2003: Sudetes seismic experiment. *Studia geophysica et geodaetica*, Prague **47**, 681–689
- HAJNAL Z., HEGEDŰS E., KELLER R., HARDER S., BRUECKL E., FANCSIK T., KOVÁCS A. Cs., CSABAFI R., BODOKY T., POSGAY K. 2002a: Detailed investigation of shallow lithospheric anomalies in the Pannonian Basin. Fall Meeting Abstracts, EOS Trans. AGU **83**, 47
- HAJNAL Z., LEWRY J., TAKÁCS E., NÉMETH B., BEZDÁN S., GYÖRFI I. 2002b: Integráció a kollíziós övek tanulmányozásában. HAJNAL Z., a MTA külső tagjának székfoglalója
- HAUSER F., PRODEHL M., LANDES M., the VRANCEA working group 2002: Seismic experiments target earthquake-prone region in Romania. EOS Transactions AGU **83**, 41, 457–463
- HÁMOR G., JÁMBOR Á., POGÁCSÁS Gy. 2001: Paleogeographic/structural evolutionary stages and the related volcanism of the Carpathian–Pannonian Region. *Acta Geologica Hungarica* **44**, 2–3, 193–222
- HEGEDŰS E., FANCSIK T., KOVÁCS A. Cs., BODOKY T., CSABAFI R., POSGAY K. 2003a: 3D crustal velocity structures of the Pannonian basin derived from CELEBRATION 2000 seismic data. EGS–AGU–EUG Joint Assembly, Nice, France

- HEGEDŰS E., HAJNAL Z., KELLER R., HARDER S., BRUECKL E., FANCSIK T., KOVÁCS A. Cs., CSABAFI R., BODOKY T., POSGAY K. 2003b: Detailed wide-angle refraction-reflection surveys in frame of the ALP 2002 international lithospheric program. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France
- HYNDMAN R. D. 1988: Dipping seismic reflectors, electrically conductive zones, and trapped water in the crust over a subducting plate. *J. Geophys. Res.* **93**, B11, 13391–13405
- KILÉNYI É., KRÖLL A., OBERNAUER D., ŠEFARA J., STEINHAUSER P., SZABÓ Z., WESSELY G. 1991: Pre-Tertiary basement contour map of the Carpathian Basin beneath Austria, Czechoslovakia and Hungary. *Geophysical Transactions* **36**, 15–36
- KLEMPERER S. L. 1987: A relation between continental heat flow and the seismic reflectivity of the lower crust. *J. Geophys.* **61**, 1–11
- KOZLOVSKY Ye. A. 1987: The superdeep well of the Kola Peninsula. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- LENKEY L. 1999: Geothermics of the Pannonian Basin and its bearing on the tectonics of basin evolution. PhD thesis. Vrije Univ., Amsterdam
- MANDLER H. A. F., CLOWES R. M. 1997: Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections. *Geology* **25**, 3, 271–274
- MANDLER H. A. F., CLOWES R. M. 1998: The HSI bright reflector: further evidence for extensive magmatism in the Precambrian of Western Canada. *Tectonophysics* **208**, 71–81
- MATTHEWS D. H. 1986: Seismic reflections from the lower crust around Britain. *In*: DAWSON, J. B., CARSWELL, D. A., HALL, J., WEDEPOHL, K. H. (Eds) *The Nature of the Lower Continental Crust*. Geological Society Special Publications **24**, 11–22
- MEISSNER R. 1986: Twenty years of deep seismic reflection profiling in Germany — a contribution to our knowledge of the nature of the lower Variscan crust. *In*: DAWSON, J. B., CARSWELL, D. A., HALL, J., WEDEPOHL, K. H. (Eds) *The Nature of the Lower Continental Crust*. Geological Society Special Publications **24**, 1–10
- MEISSNER R. 1989: Rupture, creep, lamellae and crocodiles: happenings in the continental crust. *Terra Nova* **1**, 17–28
- MEISSNER R., WEVER Th., SADOWIAK P. 1991: Continental collisions and seismic signature. *Geophys. J. Int.* **105**, 15–23
- MOONEY W. D., MEISSNER R. 1992: Multi-genetic origin of crustal reflectivity: a review of seismic reflection profiling of the continental lower crust and Moho. *In*: *Continental lower crust* (Eds: FOUNTAIN, D. M., ARCULUS, R. and KAY, R. W.) *Developments in Geotectonics* 23. Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 45–79
- POSGAY K. 1967: A magyarországi földmágneses hatók áttekintő vizsgálata. *Geofizikai Közlemények* **16**, 4, 1–118
- POSGAY K. 2003: A litoszférában észlelt, kötegesen megjelenő, közel vízszintes reflektáló felületek értelmezése. A Miskolci Egyetemen habilitációs eljárás keretében tartott előadás
- POSGAY K., ALBU I., PETROVICS I., RÁNER G. 1981: Character of the Earth's crust and upper mantle on the basis of seismic reflection measurements in Hungary. *Earth Evol. Sci.* **1**, 272–279
- POSGAY K., BODOKY T., HEGEDŰS E. 1998: Szeizmikus litoszféra- és asztenoszféra-kutatás — eredmények és nyitott kérdések. *Magyar Geofizika* **39**, 3, 90–99
- POSGAY K., BODOKY T., HEGEDŰS E., KOVÁCSVÖLGYI S., LENKEY L., SZAFIÁN P., TAKÁCS E., TIMÁR Z., VARGA G. 1995: Asthenospheric structure beneath a Neogene basin in southeast Hungary. *In*: *Interplay of extension and compression in basin formation* (Eds: CLOETINGH, S., D'ARGENIO, B., CATALANO, R., HORVÁTH, F. and SASSI, W.). *Tectonophysics* **252**, 467–484
- POSGAY K., PÁPA A., FANCSIK T., BODOKY T., HEGEDŰS E., TAKÁCS E. 2001: Metamorphic and rheologic effects shown by seismic data in the Carpathian Basin. *Acta Geologica Hungarica* **44**, 2–3, 113–134
- RANALLI G. 1995: *Rheology of the Earth*. Chapman & Hall, London, Glasgow, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras
- STEGENA L., DÖVÉNYI P. 1983: Procedure to correct temperatures and temperature gradients for geological effects. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I.4*, **112**, 25–34