

Még néhány mondat a paksi kutatási jelentéshez

Prónay Zs.

E-mail: pronayzsolt@gmail.com

A *Magyar Geofizikában* Bodoky Tamás tollából megjelent, a paksi kutatási jelentésben lévő S-hullám-szeizmikus szelvényeken látható felszínközeli vetők értelmezését vizsgáló cikkén fellelkesedve, a jelentésben lévő egyetlen szeizmikus felvétel alapján megvizsgáltam, hogy mire lehet képes az S-hullám-szeizmika a területen. Képes lehet-e – legalábbis elvileg – az engedélyezés szempontjából kritikus határt jelentő 0,5 m-es elmozdulások leképezésére. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a használt geofonköz, a hullámforrásokkal elért jelfrekvencia nem eredményez megfelelő felbontóképességet, valamint a feldolgozás minőségét is kérdésessé teszi.

After publishing the paper “To the margin of an exploration report” by Tamás Bodoky in Hungarian Geophysics dealing with the interpretation of near surface faults on the seismic S-wave sections measured in the project area of Paks II. NPP it was investigated using the only record available in the report what are the possibilities of the method. Is it possible to image the 0.5 m displacements which is a crucial licensing requirement? It was proved that the geophone spacing applied, the dominant frequency obtained do not result sufficient resolution end for that parameters even the quality of the processing is questionable.

Beérkezett: 2021. augusztus 9.; *elfogadva:* 2021. szeptember 1.

Bevezetés

Bodoky Tamás a *Magyar Geofizika* 61/4. számában megjelent „Egy kutatási jelentés margójára” [1] című cikkében megvizsgálta a Paks-II. földtani vizsgálatához a telephelyen belül mért S-hullám-szeizmikus szelvényeket, és újraértelmezte azokat neotektonika jeleit keresve rajtuk. A szerző a kész, feldolgozott S-hullám-reflexiós szelvényeket értelmezte újra a felszínközeli vetők szempontjából. A mérés paramétereit és a feldolgozást nem vizsgálta, részben azért, mert a képként rendelkezésére álló szelvényekhez „a szokásos szeizmikusadat-feldolgozás eszközeivel – amelyek egy otthoni gépen amúgy sem állnak rendelkezésre – nem férünk hozzájuk” [1]. A cikk elolvasása után újra megnéztem a „Felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentése” [2] című összefoglalóban lévő egyszem szeizmogramot, és kétségeim támadtak a mérések tervezésével, kivitelezésével és feldolgozásával kapcsolatban.

A hazai és az orosz szabályozás alapján [3, 4] ugyanis a földrengésbiztonsági kutatásoknak azt kell bizonyítaniuk, hogy a telephelyen belül a Dunaszentgyörgy–Harta vetőzóna elmozdulásai a negyedkori rétegeket nem érik el, azokba nem hatolnak be – illetve, ha mégis –, akkor a hatásuk ott elhanyagolhatóan csekély. Az orosz szabályozás szerint az elmozdulásoknak fél méter alatt kell maradniuk [4],

ez a vetők méretével kapcsolatban elhangzó egyetlen konkrét szám. Mivel – értelmezésem szerint – ez azt jelenti, hogy már egy fél méteres vető is kizáró oknak számít, ezért a geofizikai mérések tervezése során olyan módszereket és paramétereket kell választani, amelyek – legalább elméletileg – ki tudják mutatni a 0,5 m-es vetőket is. A cikkben e feltételek megvalósulását vizsgálom, kizárólag a függőleges irányú elmozdulások esetében, mert az ilyen kis vízszintes elmozdulások kimutatása 2D módszerekkel eleve reménytelen.

A „Felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentése” [2] című anyagban található, általam hozzáférhető egyetlen terépi felvétel alapján azonban úgy tűnik, hogy az S-hullám-reflexiós mérések paramétereit nem voltak alkalmasak a kvarter rétegsor megfelelő felbontású vizsgálatára, amelyen belül az elmozdulások mértékét kellett volna meghatározni. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a geoelektromos mérésekkel is hasonló a helyzet, hogy a talajvizet „megtaláló” P-hullám-refrakcióról ne is beszéljünk, akkor azt mondhatjuk, hogy szinte csak az árkolások és a fúrások vizsgálták valójában ezt az egész atomerőmű engedélyezése szempontjából lényeges térrészt.

Ebben a cikkben – a kevés rendelkezésemre álló adat miatt – csak egy, a telephelyen kívül, de annak vizsgálatra előírt 10 km-es környezetén belül mért szelvényt tudok

vizsgálni, amely a Duna bal partján helyezkedik el. A kutatásban a telephelyen kívül és belül is ugyanazokat a módszereket és paramétereket használták, de az eltérő földtani viszonyok miatt a levont következtetések nem feltétlenül általánosíthatók a teljes vizsgált területre. A telephelyen belüli szeizmikus mérések esetében az akár 2–5 m vastag feltöltésben a jelek nagyfrekvenciás komponensei jobban csillapodnak, miközben az alatta lévő rétegsorban, az ártéri kavicsokhoz képest, várhatóan nagyobb az S-hullám-sebesség. Mindkét tényező külön-külön is növeli a jelek hullámhosszát, ennek alapján a telephelyen belül sem várható a kintinél jobb felbontóképesség, viszont – szerencsés esetben – a reflexiók beérkezései jobban elkülönülhetnek egymástól. A telephelyen belüli kutatást egyébként is jelentősen nehezítették a környezeti zajok, valamint – ahogy a jelentés idevágó részében ezt a szerzők megfogalmazták [2] – „a szelvényminőséget befolyásoló legjelentősebb felszíni hatást az utak és betonlappal borított területek mentén tapasztalt jeltorzító hatások jelentették”. Érdekes ezzel kapcsolatban a felszíni geofizikai kutatások jelentés [2] 81. ábráját megnézni, ahol a telephely északi, egyébként legkevésbé zajos részén mért sekélyreflexiók szelvénynek éppen az a tartománya nem értelmezhető a felszínközeli hatók miatt (utak, beton alapok), ami a kutatás szempontjából a leginkább érdekes lenne.

A reflexiók mérésekről általában

A reflexiók mérések „használhatóságát” – sok egyéb mellett – leginkább a következő tényezők határozzák meg:

- *Frekvencia*: a rétegek sebességével együtt a hullámhossz, ezzel pedig a reflexiók mérések felbontóképességét határozzák meg. Minél nagyobb az alkalmazott, pontosabban a rétegsor által átengedett frekvencia, annál jobb a mérés felbontóképessége.
- *Fedésszám*: azt határozza meg, hogy egy adott mélységpontban hány, különböző adó-vevő távolsággal (ofszettel) mért csatornát összegzünk. Minél nagyobb, annál jobb a szelvény jel/zaj viszonya. A fedésszám a mélység-

gel változhat, általában nő. Értéke a frekvenciával együtt azt is meghatározza, hogy a sebességanalízis során mennyire pontosan tudjuk meghatározni a sebességeket (általában a csatornákat különböző sebességeket feltételezve korrigáljuk, majd összegezzük, és ezek közül választjuk ki azt a sebességet, ahol a maximális reflexióerősséget kapjuk).

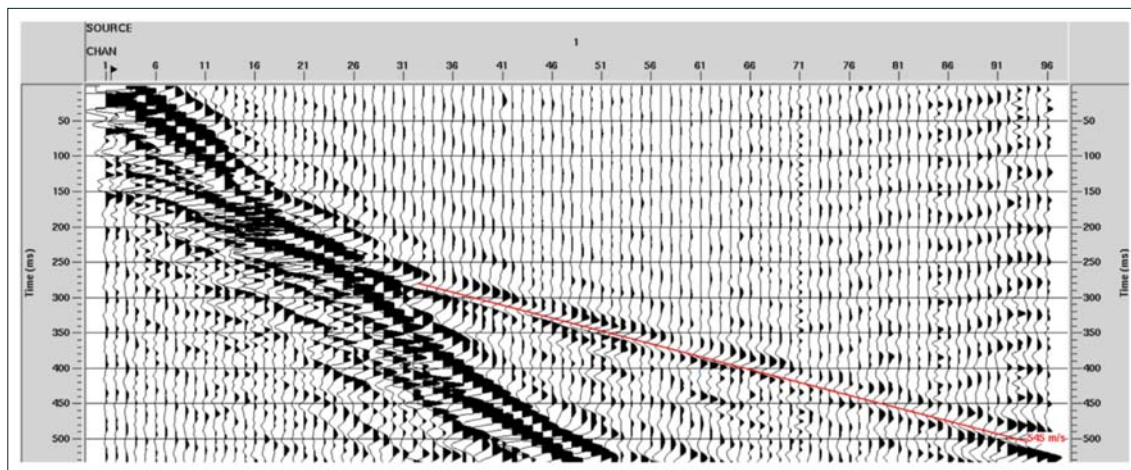
A most vizsgált mélységtartományt a hagyományos szénhidrogén-kutató szeizmikában egységesen laza rétegnek nevezik, és a statikus korrekció (a domborzat és a laza réteg sebesség- és vastagságváltozásainak korrekciója) során általában levágják [5], mert nagymértékű inhomogenitása miatt csak „útban van” a feldolgozás során. Ezért a mérések tervezése különös hozzáértést és figyelmet igényel, nem elegendő a hagyományos szeizmikában megszokott tervezési rutin alkalmazása [6].

Az S-hullám-mérések – az „optimum window”

Az S-hullám-mérések célja a 2D P-hullám-szelvényeken „leképezett legfiatalabb rétegeket is harántoló vetők” [2] követése volt a kisebb mélységek felé. Erre a P-hullám-méréshez képest kisebb geofon- és robbantópontköz, valamint a kisebb S-hullám-sebesség miatti nagyobb felbontóképesség valóban lehetőséget is adott. A mérések zömét az MFGI szakemberei végezték, míg az egyik szelvény egy szakaszán a Geomega Kft. végzett reflexiók szelvényezést. A jelentés szerint [2] az MFGI-mérések paraméterei a következők voltak:

Forrás

- *típus*: elektrodinamikus vibrátor SH típusú hullámgerjesztéshez kb. 7 kg mozgó tömeggel
- *gyártó*: Geosym GmbH (Hannover, Németország)
- *típus*: ELVIS III S8 elektrodinamikus vibrátor
- *sweepfrekvencia*: 20–80 Hz
- *forrásponttávolság*: 2 m
- *gerjesztések száma*: pontonként 2, ellentétes irányból indítva



1. ábra. Korrelált S-hullám-felvétel [2]

Észlelés

- *adatgyűjtő műszer*: 428XL Lite Acquisition System 408-as FDU-kal
- *geofonok*: Longet, 10 Hz-es egyedi, horizontális geofonok (LGT-20D10H)
- *aktív csatornák száma*: 96 db
- *geofonpont-távolság*: 2 m
- *felvételhossz*: 11 sec (10 sec sweep + 1000 ms)
- *mintavétel*: 0,5 ms

Az egyik, fenti paraméterekkel mért szelvényt, vélhetőleg nem a legrosszabbat, a jelentés [2] 34. oldalán tették közzé a következő ábrafelirattal (1. ábra): „22. ábra: Pa-22-S szelvény első robbantóponti felvétele. A piros vonal kvarter-pannon réteghatárról refraktált hullámra illesztett egyenes, mely 545 m/s becsült refraktor sebességet eredményez”.

Az ábrán a szerzők piros vonallal bejelölték a pannon-kvarter határról beérkező refraktált hullámbeérkezést. Ebből látható, hogy az ugyanerről a réteghatárról jövő reflexiót hol kell keresni a felvételen. Ennek közelítő helyét a 2. ábrán világoskék vonal jelöli. Az összes, minket érdeklő beérkezés ennél kisebb időnél várható. Sajnos azonban a reflexiók felismerésének további korlátai is vannak. A reflexiókat elfedő direkt és felületi hullámokat az egyszerűség kedvéért az ábrán egy lila vonallal jelölttem. Az ettől balra, azaz a kisebb ofszetek (adó-vevő távolság) felé eső idő-ofszet ablakban lehet reflexiókat felismerni. Ha a jelek hullámalakját is figyelembe vesszük, akkor a zölddel beszínezett, sokszöggel lefedett területet kapjuk, ahonnan elméletileg egyáltalán lehetséges reflexiókat kapni. Ez az ún. „optimum window” [7, 8], amely a sekélyreflexiók kutatás tervezésének alapja. Vagyis, ha nagyon megengedőek vagyunk, akkor ennek szélessége a pannon-kvarter határon nagyjából 16 csatorna, de például 50 ms-nál már csak 6. Az ezekhez tartozó elméleti maximális fedésszám így rendre 8 és 3. Véletlen zajt feltételezve a jel/zaj viszony az összegzett csatornák számának, más néven a fedésszámnak a négyzetgyökével nő [9], esetünkben 2,8 és 1,7 szeresére.

Tehát ha feltételezzük, hogy a bemutatottnál rosszabb minőségű felvétel nincs, felvételenként és csatornánként nagyon pontosan ki tudjuk vágni a direkt, refraktált és felületi hullámcsomagokat úgy, hogy a reflexiókat ne „bántuk” (*surgical mute*), akkor az alkalmazott mérési paraméterek mellett 50 ms-nál mélységpontonként 3, azaz három csatornát tudunk összegezni (*stack*), ami 100 ms körül felmegy max. 10-re (de ami ennél az időnél látszik, az inkább a korreláció mellékmaximuma). Valljuk be, ez nem sokat javít a jel/zaj viszonyon, valamint a feldolgozásnál többször is használt „sebességanalízis” mint művelet, elegendő számú csatorna híján, értelmét veszti, pedig a dinamikus korrekciónál (amikor a reflexió változó ofszet miatti görbületét korrigáljuk) a kis sebességből következő nagy időtolások miatt a jó sebességfüggvény alapvető fontosságú.

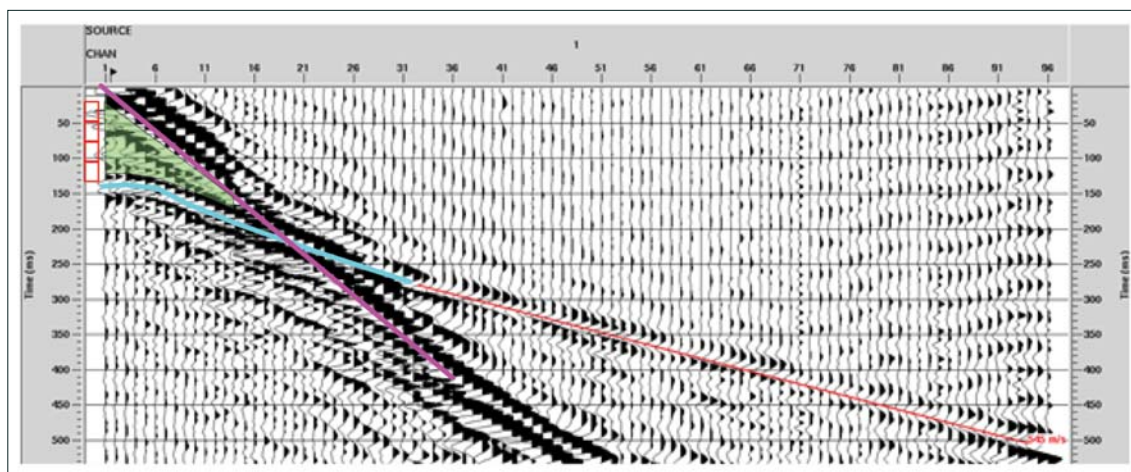
Ezek szerint a lehető legkedvezőbb esetben mért szelvény is csak néhány összestackelt csatornából áll, ami az értelmezéshez vajmi kevésnek tűnik. Ráadásul, ha figyelembe vesszük, hogy:

- vélhetőleg a legjobb felvételt tették be a jelentésbe, vannak tehát rosszabbak is, még kisebb „optimum window”-val,
- a *mute* nem hagyja érintetlenül a más hullámtípushoz közeli, esetleg azzal interferáló reflexiókat, ezáltal vagy visszamarad valami oda nem való beérkezés, vagy tovább csökken a fedésszám,
- a domborzat és a laza feltöltés miatt a statikus korrekció is csökkentheti az értékelhető csatornák számát,

akkor a valóságos helyzet még az eddig leírtaknál is rosszabb.

Az S-hullám-mérések – a frekvencia és a felbontóképesség

Visszaulva a mérési paraméterekre látható, hogy a használt hullámforrás 20–80 Hz közötti frekvenciasávban működött. Bár a csonkító függvényt (*taper*) nem ismerjük, de hogy valami közelítő hullámhosszat számolhassunk, ezért koszinuszfüggvénynek vettük, amely a *sweep* (a szeizmikus



2. ábra. Jellemző beérkezések és az „optimum window” a felvételen

vibrátor által gerjesztett időben változó frekvenciájú jelcsomag) végein 10–10%-ot érint. Így az autokorrelációs függvény – amelynek segítségével a 10 s hosszú sweepből az impulzusforrásokhoz hasonló jelet képeznek – maximumának szélességéből számított elméleti frekvencia nagyjából 56 Hz lehetett. A felvételen lement időkből számított frekvenciák ehhez közel vannak, a két jól látható reflexióra 45 és 52 Hz.

Az érdekesség kedvéért a 2. ábrán látható szelvény bal szélén piros négyszögekkel feltüntettem az első beérkezés környékén mért hullámhosszat. Eszerint a vizsgálható idő-ofszet ablak, amelyben a kvarteren belüli reflexiók vannak, maximum 3,5 hullámhossznyi.

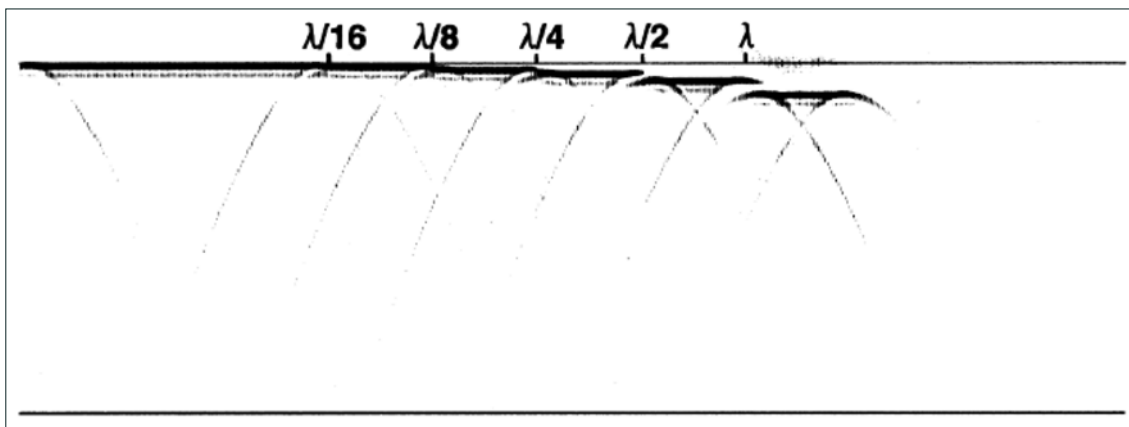
A domináns frekvenciából, a jelentésben leírt [2] 150–170 m/s sebességgel számítva 2,7–3,0 m közötti hullámhosszakot kapunk a negyedidőszaki rétegsorban. Ha a legmegengedőbbek vagyunk, és hullámhossznak a 2,7 m-t és felbontásnak a $\lambda/4$ -et vesszük, az eredmény 0,675 m [5], tehát már optimális esetben és elméletileg sem található meg velük a 0,5 m-es vetők. A vetők elvetési magasságát a hullámhossz függvényében a 3. ábra mutatja. Jól látszik az ábrán, hogy a $\lambda/4$ elvetési magasságot zajmentes, igen jó

minőségű felvételen, gyakorlatilag csak szintetikus szeizmogramon, ismerhetjük fel. Vagyis az adott sweepel elért, legjobb esetben 70 cm körüli elméleti felbontás kevésnek tűnik.

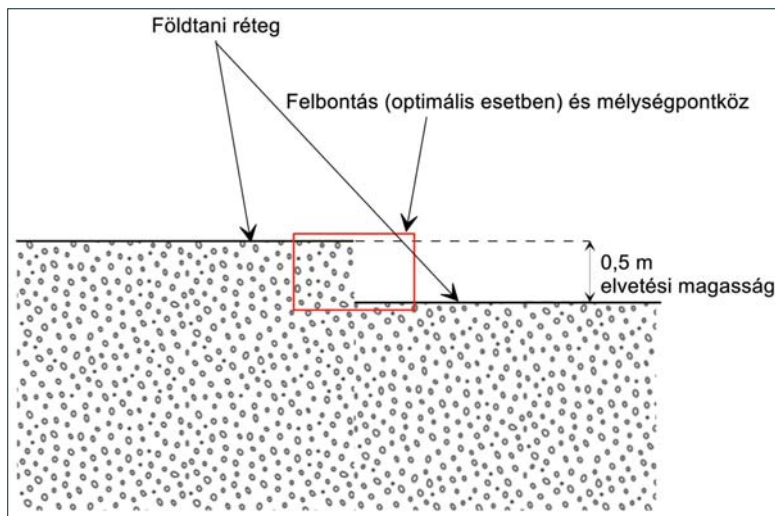
Míndezek ellenére, amennyiben elfogadjuk a hullámhossz negyedét felbontásnak, ami valós helyzetben azért nehezen teljesül, a mérések felbontása, legalábbis vertikális irányban közel volt az elvártnak (4. ábra).

Visszatérve még a frekvenciára, azt találtam, hogy ugyanezen a területen a P-hullám 3D szeizmikus méréseknél végzett frekvenciateszteknel [6], 100 Hz környékén még vannak az S-hullám-mérésnél nagyobb mélységből jövő jelek (a mélyszeizmikus mérés sweepjének felső határfrekvenciája 96 Hz volt). Tehát a 3D mérésekhez használt mérési frekvencia nagyobb volt, mint a kisebb mélységekre kihegyezett, „nagy felbontású” mérés esetében alkalmazott mérési frekvencia!

Bár a mérésekhez használt vibrátor elméletileg az alkalmazottnál nagyobb frekvenciájú jeleket is képes generálni (S-hullám esetében 320 Hz [10]), ha ez a gyakorlatban nem sikerül, máshol kell keresni a megoldást a frekvencia növelésére.



3. ábra. Különböző elvetési magasságú vetők megjelenése a hullámhossz arányában ábrázolva [5]



4. ábra. A keresendő elvetési magasság és az MFGI által végzett S-hullám-reflexiók mérése felbontása (elméletileg, optimális esetben) és mélységpontköze által meghatározott piros téglalap

Ismeretes, hogy a kis tömegű vibrátorok talajhoz csatolása problémás lehet, ami korlátozhatja a maximális elérhető frekvenciát. Erre utal a földtani kutatási program zárójelentésében [11] talált mondat: „Minden egyes vibrálási helyen addig változtatták a vibrátor pozícióját, amíg a vibrátortalpon regisztrált jelcsomag amplitúdóspektruma legjobban megközelítette az elméleti jelalak amplitúdóspektrumát”. A probléma kiküszöbölésére két út lehetséges. Vagy olyan nyomvonalat kell keresni a szelvényeknek, ahol jó lehet a csatolás – például földút –, vagy nagyobb tömegű vibrátort kell használni – például IVI Minivib [12] –, esetleg valamilyen impulzusforrást.

A Geomega Kft. által mért S-hullám-reflexiók szelvény

„A Pa-21-P szelvény kijelölt szakaszán mind az MFGI, mind a Geomega Kft. végzett terepi felvételezést. Mindkét szelvény 1 km hosszban mérődött a Pa-21-P szelvény nyomvonala mentén, kezdőpontjuk azonban nem egyezik” [2]. Az MFGI mérési paramétereit az előző fejezetekben részletesen vizsgáltam. A Geomega Kft. mérésénél csak az ettől eltérő paraméterek hatását nézem. A mérési paraméterei [2]:

Forrás

- *típus:* S-hullám-kalapács 18 kg mozgó tömeggel, mintegy 330 J energiával
- *forrásponttávolság:* 3 m
- *gerjesztések száma:* pontonként 3–6, egy irányból megütve

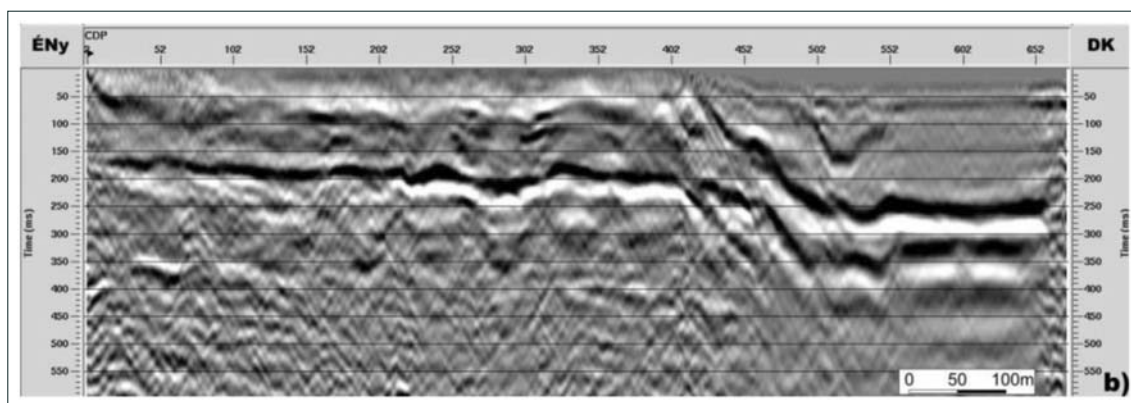
Észlelés

- *adatgyűjtő műszer:* DMT SUMMIT II Compact egységek
- *geofonok:* Geospace GS-30CT 3 komponensű egyedi geofonok
- *ütés irányú horizontális komponens regisztrálásával*
- *aktív csatornák száma:* 60 db
- *geofonpont-távolság:* 3 m
- *felvételhossz:* 1280 ms)
- *mintavétel:* 0,5 ms

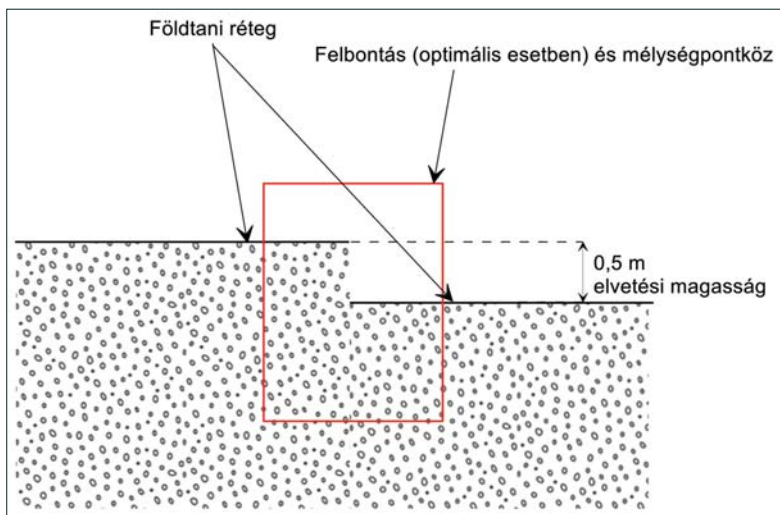
Vizsgáljuk meg a paramétereket ugyanazon szempontok szerint, mint az MFGI-ét! Mind a geofon-, mind a robbantópontköz 2 m-ről 3 m-re nőtt. Ez azt jelenti, hogy az „optimum window”-ba még kevesebb csatorna „fért”, így ha csak ezt nézzük, a 2. ábrán bemutatott felvétel helyén a pannon-kvarter határon 11 db, 50 ms körül pedig 4 db használható csatorna maradt. Így az elméleti maximális fedésszámok 5-re és 2-re csökkentek, ezáltal a javulás a jel/zaj viszonyban 2,2 és 1,4. Vagyis még a kevésnél is kevesebb.

A hullámforrás is megváltozott. A csatolás valószínűleg javult, az energia talán nőtt, ellenben a 18 kg-os mozgó tömeg vélhetőleg kisebb frekvenciákat eredményezett, mint a kis vibrátor. Erről nem találtunk információkat a jelentésben, csak annyit, hogy azért jobb a Geomega szelvénye, mert az ő hullámforrásuk 10 Hz frekvenciát is tudott, szemben az MFGI 20 Hz-ével [11]. Ez a kijelentés nem ördögtől való, ugyanis a jel időbeli hossza annál rövidebb, minél szélesebb az a frekvenciatartományban, tehát a nagyobb sávszélesség javíthatja a felbontást. Azonban a kétféle módon mért szelvényt együtt nézve – például [2] 31. ábra – jól látható, hogy a Geomega szelvénye jellemzően kisebb frekvenciás. Az ábrán a hullámok időbeli szélességét lemérve, és abból frekvenciát számolva az jön ki, hogy a szelvény kisebb frekvenciás részén, 600 m környékén, a frekvencia kb. 16 Hz, míg a nagyobb frekvenciás részen, 400 m körül, nagyjából 20 Hz. Ha a $\lambda/4$ -gyel definiált elvi felbontóképességet számítjuk, akkor 150 m/s sebességnél 1,9 és 2,3 m közötti értékeket kapunk. Vagyis a szép sima szelvény a vízszintes és függőleges irányú felbontás jelentős csökkenésének „köszönhető”, és a szelvény még elméletileg sem képes a keresett kisebb méretű vetők leképezésére (6. ábra), ráadásul minden paraméterében elmarad az MFGI, ilyen szempontból egyébként szintén problémás méréseitől.

A harmadik, igen lényeges eltérés az MFGI és a Geomega mérése között az, hogy míg az MFGI két irányból gerjesztette az S-hullámokat, addig a Geomega csak egy irányból [2], teljesen elveszítve ezzel annak a lehetőségét, hogy ellenőrizni, vagy igazolni tudják, hogy valóban az S-hullámokat dolgozták fel.



5. ábra. A Pa-21-es szelvény mentén mért Pa-21-S Geomega-szelvény feldolgozott összagszelvénye [2]

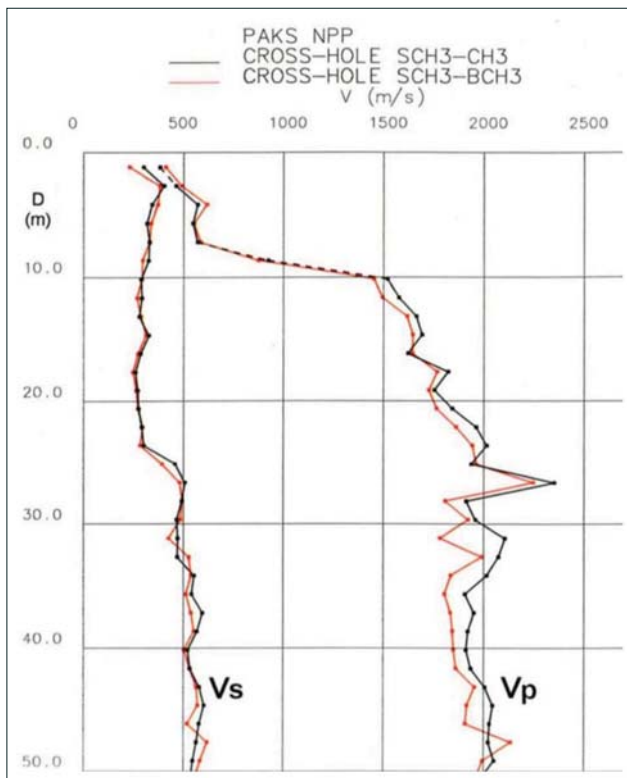


6. ábra. A keresendő elvetési magasság és a Geomega által végzett S-hullám-reflexiós mérés felbontása (elméletileg, optimális esetben) és mélységpontköze által meghatározott piros téglalap

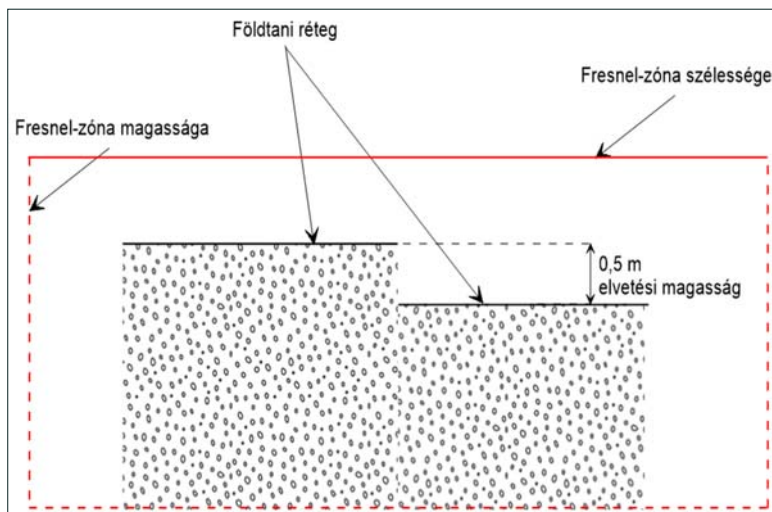
Refrakciós mérések

A geofizikai mérések feldolgozása mindig valamilyen modell feltételezésén alapul. A refrakciós mérések modellje viszonylag egyszerű: egy kis sebességű alatt egy nagy sebességű réteg található, amely miatt a refraktorig a kritikus szöggel le, és onnan a felszínig felmenő és a határfelület mentén terjedő hullám egy bizonyos távolság felett „megelőzi” a laza rétegben terjedő direkt hullámot. A feldolgozás – szerencsés esetben – több réteget is tud kezelni, en-

nek feltétele – sok egyéb mellett –, hogy a mélyebben lévő réteg sebessége minden esetben nagyobb legyen, mint a kisebb mélységben elhelyezkedőé [5]. A P-hullám-refrakció hátrányai között szokták emlegetni [13–15], hogy laza üledékek esetében a talajvízszint – mint jelentős, akár két-háromszoros sebességugrás – korlátozza a behatolási mélységet. A módszer egyszerű modellje, ritka lövési rendszere – és annak köszönhetően, hogy csak az első beérkezéseket használja – nem „szereti” a hirtelen dőlés- és sebességváltozásokat, megszakadó, elugró és ki-



7. ábra. Az ISMES által végzett crosshole-mérések eredményei [17]



8. ábra. A keresendő elvetési magasság és a P-hullám-refrakciós mérés Fresnel-zónái által meghatározott piros téglalap (a szaggatott vonal azt jelzi, hogy nem fér az ábrára)

ékelődő rétegeket [16]. Vagyis pont arra nem való, amire ez esetben használták, ugyanis a jelentés [2] szerint „a paksi telephelyen elvégzett nagy felbontású 2D P-hullám-refrakciós mérések alapvető célja a meglévő földtani információk bővítése...” volt.

Milyen földtani információkra gondolhatott a szerző? Ne feledjük, hogy a geofizikai mérések fő célja a neotektonika vizsgálata. Bodoky Tamás jó szándékú értelmezése szerint [1] „a kiinduló feltételezés feltehetőleg ... az volt, hogy a negyedkori rétegek talpán elegendően nagy, ugrásszerű paraméterváltozás jelentkezik, azaz növekedés a szeizmikus longitudinális hullámok terjedési sebességében”. Ehhez azonban el kellett volna érni a negyedkori rétegek talpát. A mérések tervezését, vagyis inkább annak a megállapítását, hogy a módszer egyáltalán alkalmas-e a feladatra, a környékbeli talajvízszint-figyelő kutak adatai jelentősen elősegíthették volna, de a közelben folyó Dúnának is gyanút kellett volna ébresztenie. De ha ezek sem, akkor az interneten megtalálhatók például az ISMES által 1995-ben végzett *crosshole*-mérések (egymástól néhány méterre lévő fúrások között, azonos mélységben lévő hullámforrással és vevővel végzett mérések) eredményei 7. ábra [17], amelyek egyértelműen mutatják, hogy elérhető-e a refrakciós mérés a kívánt mélységet. Az ábráról leolvasható, hogy a P-hullám-sebesség 10 m körüli mélységben éri el a vízzel telített laza üledékre, gyakorlatilag a vízre, jellemző 1500 m/s sebességet, és alatta fokozatosan nő, addig a víztartalomra csak alig érzékeny S-hullám-sebességben 23–34 m körül van egy sebességnövekedés, ami vélhetően a pannon-kvarter határ.

A refrakciós mérések magyarázó részében ilyen gyöngyszemek találhatók: „ugyanakkor jelentős tényezőként jelentkezhet, hogy a klasszikus refrakciós feldolgozási eljárás során megadott laza réteg sebessége (V_0) az egész területre közel állandó értékű volt ... Összegezve ez annyit jelent, hogy V_0 értéke valójában nem konstans, így a lokális anomáliák nagy része V_0 konstans értéként történő keze-

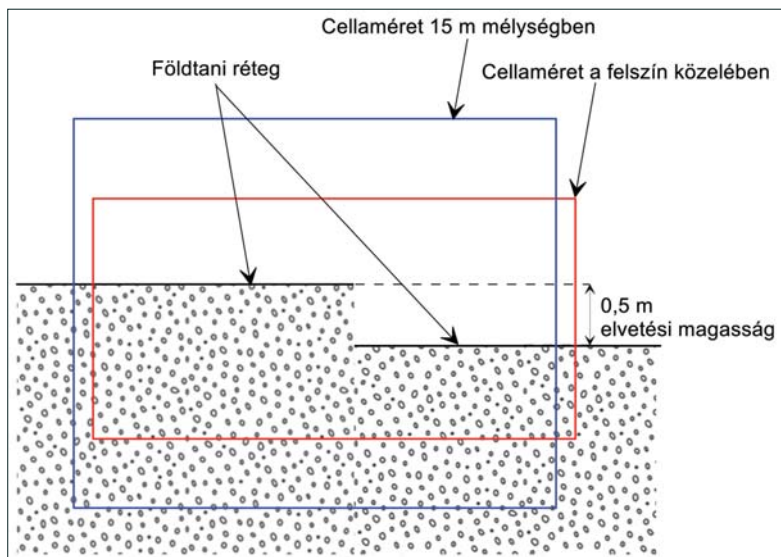
lése miatt keletkezett V_1 sebességperturbációk eredménye”. A legegyszerűbb refrakciós feldolgozás a Hagedoorn-féle, 1959-ben publikált, plusz–mínusz módszer [18] is tudja kezelni a V_0 változásokat. Még egyszer, az évszám: 1959. Ráadásul a kvartert érintő vetők, jó esetben, a V_0 sebesség csökkenésével jelenhetnek meg a refrakciós mérésekben.

Nézzük a szokásos, elvárt és elméleti maximális felbontást összehasonlító ábrát (8. ábra). A vertikális felbontás refrakciós módszer esetében nehezen megfogható, mert nem párhuzamos rétegeket próbálunk elkülöníteni, hanem az első beérkezés idejét mérjük. Ezért nézzük inkább a Fresnel-zóna méretét (az a terület a határfelületen, ahonnan a különböző utakon beérkező hullámok konstruktívan interferálnak, ezért ezek nem elkülöníthetők egymástól) [19]! Ha 30 Hz domináns frekvenciát feltételezünk, és a crosshole-adatokat használjuk a módszerhez „lebutítva”, a számítások során (7. ábra, a refraktor mélysége 10 m, laza réteg sebessége 500 m/s), a kritikus távolságnál, tehát ahol a direkt hullám a kritikus szöggel reflektálódik, a Fresnel-zóna kiterjedése függőleges irányban 4,2, vízszintesen 6,5 m-nek adódik.

Geoelektromos mérések

„A nagy felbontású 2D szárazföldi geoelektromos mérések célja a 2D és 3D szeizmikus méréseken azonosított, felszín közelébe hatoló tektonikus szerkezetek helyzetének pontosítása, továbbá a 3D vízi szeizmikus módszerrel a vízen kimutatott szerkezetek és paleomedrek szárazföldi folytatásának vizsgálata volt” [2], valamint „mérések célja, hogy megvizsgálja közrejátszik-e tektonikai eredetű ok (vető) az eltérő morfológia ... megjelenésében” [11].

Bodoky Tamás az egyik problémát már megfogalmazta [1]: „Az alapfeladat megoldására, vagyis a neotektonikus elmozdulások észlelésére ezek a mérések ugyanis alkalmatlanok. A negyedkori rétegeken belül egy elmozdulás



9. ábra. A keresendő vető magassága és a cellaméret összehasonlítása

mindkét oldalán ugyanazok az anyagok (ugyanazok a fajlagosellenállás-értékek) találhatóak, vagyis egy ellenállás-szelvényezés számára ezek az elmozdulások láthatatlanok”.

A szerző a geoelektromos méréseket is nagy felbontásúnak nevezi, de a mérési paraméterek ennek ellentmondanak. Az elektródaköz 4 m, ezzel a legkisebb AB távolság 12 m volt, azaz még ha lenne is valamilyen kis ellenállás-változás a vetőnél, mondjuk az eltérő nedvességtartalom miatt, a hosszú „áramutakkal” azt is elkenték. Loke szerint [20], aki a leggyakrabban használt elektromos feldolgozó programot írta, amelyikkel egyébként a jelentésben [2] szereplő geoelektromos szelvényeket is feldolgozták, a geoelektromos mérések felbontása a mélységgel exponenciálisan romlik. Ehhez igazodva a feldolgozó programban az alapértelmezett cellaméretet fentről lefelé haladva vertikálisan 2, 2,2, 2,4, 2,68, 2,92 és 3,24 m, míg horizontálisan mindig 4 m. Tehát már felszínközeli is lényegesen nagyobb a cellaméret, mint a kutató elvetődés. A problémát a 9. ábra illusztrálja. A cellaméretet a programban ugyan lehet változtatni, de mivel azok a mérési geometriához és a módszer felbontóképességéhez illeszkednek – és ettől a művelettől több adat nem lesz –, a valódi felbontást nem változtatja meg, csak interpolál.

Magukkal a mérésekkel kapcsolatban további kérdéseket vet fel, hogy – mint a zárójelentésben fogalmazták – „a mért adatok pontosságának további növelése érdekében a műszer minden egyes mérési pontot négy alkalommal mért meg (négyes összeg), az így kapott négy érték egymáshoz képesti tűréshatára 10% volt”. Az említett tűréshatár például az AGI műszernél alapértelmezésben 2%, amennyiben az eltérés ezt meghaladja, újra mér, addig, amíg el nem éri a kívánt pontosságot, vagy a beállított maximális ismétlésszámot, valamint hangjelzéssel tudatja az észlelővel, hogy valami probléma van [21]. A legtöbb feldolgozó program is „eldobja” a küszöbértéknél nagyobb hibákkal terhelt adatokat. A DC2InvRes programnál például ez a határ alapértelmezés szerint 3% [22]. A 10%-os

hiba még a feldolgozott szelvényre is sok, a szerzők által használt Res2DInv program használati utasítása szerint, az inverzió után elvárt pontosság 1–5% [23].

A 10%-os tűréshatár beállítása természetesen nem jelenti azt, hogy minden adat ilyen pontatlan, de az, hogy ilyen magas értéket használtak (kellene használni?), felveti annak a gyanúját, hogy az adatok jelentős része nem volt megbízható. Ebben az esetben pedig a szelvények sem azok. Van egy angol rövidítés, hogy mit okoz, ha kétes megbízhatóságú adatokat dolgozunk fel: SISO (*shit in, shit out*).

Végül, de nem utolsósorban a feladat megoldása szempontjából kedvezőtlen a kiválasztott Wenner–Schlumberger-elektrodaelrendezés is [2]. Loke-tól idézve: „megállapítható, hogy ez az elektródarendszer jó a vertikális irányú változások leképezésében (pl. horizontális szerkezetek), de meglehetősen gyenge (a ‘relatively poor’ kifejezést használja) a horizontális változások érzékelésében” [20]. Tehát, ha a fent felsorolt problémáktól el is tekintünk, már maga az elektródarendszer is nyilvánvalóan alkalmatlan arra, amire használták.

Összefoglalás

A cikkben azt vizsgáltam, hogy a Paks-II. telephely távolabbi környezetében, ahol egyébként a mérési feltételek kedvezőbbek, mint a telephelyen belül, az atomerőmű engedélyezése szempontjából kulcsfontosságú, a kvarter rétegekben esetleg meglévő, a 0,5 m-es elvetési magasságú vetőket az elvégzett geofizikai vizsgálatok alapján, az egyes módszereknél alkalmazott paraméterekkel – legalábbis elvileg – ki lehetett-e mutatni. A 0,5 m-t az indokolta, hogy ez volt az egyetlen konkrét szám, amely a telephellyel kapcsolatos előírásokban megjelent [4]. A vizsgálatot elsősorban a számunkra hozzáférhető „A felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentése” [2], másodsorban „Földtani kutatási program zárójelentése” [11] alapján végeztem. Mivel a valós körülményeket csak részlegesen lehetett a forrás-

munkákból megismerni, a vizsgálatot az elméletileg elérhető felbontóképességek vizsgálatára alapoztam. Gyakorlatból tudjuk, hogy az elméleti felbontás reális körülmények között nem érhető el, tehát ha ezt a feltételt teljesítik is a mérések, a valóságban csak ennél lényegesen nagyobb elvetési magasságú vetődés kimutatására alkalmasak. Meg kell jegyezni továbbá, hogy a telephely belsejéből semmilyen felvétel nem állt rendelkezésemre, ezért azt nem tudtam vizsgálni. Azonban az alkalmazott eszközök és paraméterek megegyeztek a kívül mértékekkel, viszont a laza feltöltés és az alatta lévő rétegsorban várható nagyobb sebesség kisebb felbontást tesz lehetővé, ráadásul a szeizmikus zaj is nagyobb, ezért nagy valószínűséggel a telephelyen belülre is érvényesek az itt leírtak.

A megállapítások röviden összefoglalva:

- Az MFGI által végzett S-hullám-reflexiós mérések során alkalmazott geofonköz nem tette lehetővé értelmezhető fedésszám elérését és ezzel a jel/zaj viszony érezhető javítását, valamint a kevés használható csatorna miatt nem lehetett megbízható sebességanalízist végezni a kvarter rétegekben.
- Ugyanezen mérések esetében az alkalmazott 20–80 Hz-ig terjedő sweep, a közölt 150–170 m/s sebesség esetében, az elvárt felbontáshoz képest túl nagy hullámhossz miatt nem volt alkalmas a keresett vetőméret kimutatására, bár ha elfogadjuk a hullámhossz negyedét felbontásnak, akkor – legalábbis vertikális irányban – közel volt hozzá. Jellemző, hogy a lényegesen nagyobb mélységekre kihelyezett (P-hullám) 3D szeizmikus mérések-nél is nagyobb volt a felső határfrekvencia, mint az S-hullám-mérések esetében.
- A Geomega Kft. által végzett S-hullám-mérés minden, a felbontás szempontjából lényeges paraméterében (geofonköz, frekvencia) elmaradt az MFGI által mértéktől, így a feladat megoldására még inkább alkalmatlan volt.
- A P-hullámos refrakciós mérés a módszer fizikai elve és a mérésnél használt paraméterei miatt eleve alkalmatlan volt a feladat megoldására, ráadásul a refraktált hullám „fennakadt” a nem túl nagy mélységű talajvíz felszínén ami, már csak a Duna közelsége miatt is, előre várható volt.
- A geoelektromos mérések az alkalmazott mérési paraméterek mellett, a maguk fizikai és felbontásbeli korlátaival, ezt súlyosbítva a nem erre a célra való elektrodaelrendezéssel eleve alkalmatlanok voltak a feladat megoldására.

Még rövidebben: a vizsgált geofizikai mérések részben rosszul megválasztott módszerekkel, alkalmatlan paraméterekkel készültek, így még elvileg sem érték el a feladat megoldásához elvárható felbontóképességet, ezért gyakorlatilag alkalmatlanok voltak a kvarterbeli kisebb függőleges irányú vetők kimutatására. A fent leírtak természetesen nem jelentik azt, hogy az S-hullám-reflexiós mérések az alkalmazott paraméterekkel nem lehetnek alkalmasak a nagyobb, több méteres, vetők kimutatására.

A cikk szerzője

Prónay Zsolt

Hivatkozások

- [1] Bodoky T. (2020): Egy kutatási jelentés margójára. Magyar Geofizika, 61/4, 203–213.
- [2] Tóth T. et al. (2015): Felszíni geofizikai kutatások értékelő jelentése. <https://drive.google.com/file/d/0B1ObjabIdVkmQXpJWWFadVFEQ28/view>
- [3] 118/2011. (VII. 11.) Kormányrendelet: a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről. Magyar Közlöny, 2011/78. <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1100118.kor>
- [4] Gosatomnadzor of Russia (Federal Nuclear and Radiation Safety Authority of Russia) (2002): NP-032-01, Federal Codes and Standards in the Area of Atomic Energy Applications, Nuclear Power Plant Siting, Main Criteria and Safety Requirements. Bulletin of Russian Gosatomnadzor, No. 1(20)
- [5] Yilmaz Ö. (2001): Seismic Data Analysis. Society of Exploration Geophysicists. ISBN 978-156080-094-1
- [6] Gombár L., Deák F. (2015): Szerkezetkutató 3D szeizmikus mérések a Paksi Atomerőmű környezetében. Magyar Geofizika, 55/1, 139–150.
- [7] Hunter J. A. et al. (1982): Optimum field techniques for bedrock reflection mapping with the multichannel engineering seismograph. In: Current research, Geol. Surv. Can., pp. 125–129.
- [8] Hunter J. A. et al. (1984): Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph – some simple techniques. Geophysics, 49, 1381–1385.
- [9] Sengbush R. L. (1983): Seismic Exploration Methods. Springer Netherlands. ISBN 978-94-0116397-2
- [10] <http://geotomographie.de/assets/equipment/Productsheet-Elvis.pdf>
- [11] Konrád Gy. et al. (2016): Földtani kutatási program zárójelentése. MVM Paks II.
- [12] <http://www.indvehicles.com/minivibS6.html>
- [13] Ádám O. (1987): Szeizmikus kutatás I-II. Tankönyvkiadó
- [14] Meskó A. (1994): Rugalmas hullámok a földben – A szeizmikus kutatómódszer. Akadémiai Kiadó
- [15] Wallace D. E. (1970): Some limitations of seismic refraction methods in geohydrological surveys of deep alluvial basins. Groundwater, 8/6, 8–13.
- [16] ASTM D5777 – 18, Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation.
- [17] (2006): Paks üzemidő hosszabbítása 6. melléklet, Geológiai és hidrogeológiai képződmények. <https://docplayer.hu/105995789-6-melleklet-geologiai-es-hidrogeologiai-kepzoedmenyek.html>
- [18] Hagedoorn J. G. (1959): The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. Geophysical Prospecting, 7, 158–182

- [19] Sheriff R. E. (1980): Nomogram for Fresnel-zone calculation. *Geophysics*, 45/5, 986–972.
- [20] Loke M. H. (2002): Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. <http://personales.upv.es/jpadin/coursenotes.pdf>
- [21] (2009): The SuperSting with swift automatic resistivity and IP system – Instruction Manual, Advanced Geosciences Inc. Austin, Texas, USA
- [22] <http://www.resistivity.net/dc2dinvres/>
- [23] Loke M. H. (2020): RES2DINVx64 ver. 4.10 Manual. Geotomo Inc. Penang Malaysia