

Nyugat-Magyarországi Egyetem
Kitaibel Pál doktori iskola
Geo-környezettudományi program

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS

**Szökevényforrások kimutatásának lehetősége
szonár mérésekkel**

Sorszám: 89

Prónay Zsolt

Témavezető: Dr. Ádám Antal r. t.

Sopron
2005.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	6
2	A szökevényforrások.....	8
2.1	<i>A budai hévizek</i>	<i>8</i>
2.1.1	<i>Történeti áttekintés.....</i>	<i>8</i>
2.1.2	<i>Hidrológiai áttekintés.....</i>	<i>11</i>
2.2	<i>Az ismert budapesti szökevényforrások.....</i>	<i>13</i>
3	A vízi szeizmikus és akusztikus módszerek	15
3.1	<i>A szárazföldi és vízi szeizmikus módszerek összehasonlítása.....</i>	<i>15</i>
3.2	<i>A vízi szeizmikus és akusztikus módszerek és eszközök áttekintése.....</i>	<i>17</i>
4	A szonár módszer	21
4.1	<i>A módszer rövid története.....</i>	<i>21</i>
4.2	<i>A szonár jellemzői</i>	<i>23</i>
4.3	<i>A dunai méréseknél használt szonár berendezés</i>	<i>26</i>
5	Fizikai alapok	30
5.1	<i>A hullámsebesség értéke vízben a hőmérséklet függvényében.....</i>	<i>33</i>
5.2	<i>A víz sűrűsége a hőmérséklet függvényében</i>	<i>35</i>
5.3	<i>A reflexiós együttható várható értéke.....</i>	<i>37</i>
5.4	<i>A gáztartalom hatása a reflexiós együtthatóra</i>	<i>39</i>
6	Matematikai modellezés	42
6.1	<i>A modellezés elve.....</i>	<i>42</i>
6.2	<i>A matematikai modellezés végrehajtása és paramétere.....</i>	<i>44</i>
6.3	<i>A matematikai modellezés eredményei.....</i>	<i>47</i>
6.4	<i>Az elkent réteghatár vizsgálata</i>	<i>49</i>
6.5	<i>Az iránykarakterisztika vizsgálata</i>	<i>52</i>
7	Fizikai modellezés	55

7.1	<i>A fizikai modellezés körülményei</i>	55
7.2	<i>A fizikai modellezés eredményei</i>	57
8	Terepi mérések	60
8.1	<i>Mérési eredmények</i>	60
8.2	<i>Más értelmezési lehetőségek</i>	66
8.2.1	<i>Oldalbeérkezések</i>	66
8.2.2	<i>Egyéb objektumok a fenéken</i>	68
9	Közvetett bizonyítékok a szökevényforrások létezésére	70
9.1	<i>A kőzetanyag</i>	70
9.2	<i>A meleg víz jelenléte</i>	73
10	Analógiák	76
10.1	<i>Seiche</i>	76
10.2	<i>A „black smoker”-ek vizsgálata</i>	77
10.3	<i>Az óceánok hőmérsékletének mérése</i>	79
11	Összefoglalás	81
12	Tézisek	82
13	Irodalomjegyzék	84

Ábrajegyzék

1. **ábra.** A Rudas fürdő
2. **ábra.** A budapesti emeletes hévízrendszer elvi vázlata
3. **ábra.** A jelentősebb ismert szökevényforrások
4. **ábra.** A szeizmikus reflexiós mérés elve
5. **ábra.** A szeizmikus hullámforrások összehasonlítása frekvencia és energia szerint
6. **ábra.** A szonárral felszerelt USCG Miami
7. **ábra.** Az alap paraméterek ablaka a vezérlőprogramban
8. **ábra.** A mérőprogram főablaka
9. **ábra.** A hullámtörés és visszaverődés elve
10. **ábra.** Hullámsebesség a vízben a hőmérséklet függvényében különböző szerzők szerint
11. **ábra.** A víz sűrűsége a hőmérséklet függvényében különböző szerzők szerint
12. **ábra.** Meleg víz szonár képe
13. **ábra.** A víz CO₂-elnyelő képessége a nyomás függvényében 30 m/°C geotermikus lépcső esetén
14. **ábra.** Gázbuborékok szonár képe
15. **ábra.** A diffrakciós összegzés elve és az eredmény különböző rácsállandók esetén
16. **ábra.** Az Al koncentráció változása a távolság függvényében
17. **ábra.** A számításoknál használt egyszerűsített modell
18. **ábra.** Szintetikus szeizmogram a csóvában $\pm 0,3$ m simítás esetén
19. **ábra.** Szintetikus szeizmogram a csóvában ± 1 m simítás esetén
20. **ábra.** A számításoknál használt jelalak
21. **ábra.** 0, 10 és 20 mm-es átmeneti zóna hatása a jelalakra
22. **ábra.** 50 mm-es átmeneti zóna hatása a jelalakra
23. **ábra.** A reflexió amplitúdója az átmeneti zóna vastagságának függvényében
24. **ábra.** A módosított modell
25. **ábra.** Különböző iránykarakterisztikával számított szintetikus szeizmogramok
26. **ábra.** Az iránykarakterisztika hatása

-
- 27. ábra.** A mérőrendszer a szörfdeszkán és az „anomália” az előtérben
- 28. ábra.** A fizikai modellezésnél használt mérőrendszer
- 29. ábra.** Csapvízzel töltött zacskó mint anomália a medencében
- 30. ábra.** Uszodavízzel töltött zacskó szonár képe
- 31. ábra.** Értelmezett szonár felvétel a csapvízzel töltött zacskó fölött
- 32. ábra.** A szonár mérések helyszínrajza
- 33. ábra.** Melegvíz-beáramlás az Ínség-szikla mellett
- 34. ábra.** Kis szökevényforrások szonár képe
- 35. ábra.** Szökevényforrás-sorozat
- 36. ábra.** Nagy szökevényforrás
- 37. ábra.** Szökevényforrás egy szikla „árnyékában”
- 38. ábra.** Mélyedéshez köthető szökevényforrások
- 39. ábra.** Szökevényforrás
- 40. ábra.** Szikla szonár képe
- 41. ábra.** A szonár iránykarakterisztikája
- 42. ábra.** A mederfenék és gradiense
- 43. ábra.** A Gellért-hegy környékének fedetlen földtani térképe
- 44. ábra.** Földtani szelvény a Szabadság hídtól délre
- 45. ábra.** A szeizmikus aljzat és a szökevényforrások kapcsolata
- 46. ábra.** Seiche szonár képe
- 47. ábra.** A hidrotermális áramlás elve
- 48. ábra.** „Black smoker”
- 49. ábra.** „Black smoker”-ek szonár képe
- 50. ábra.** Szeizmikus sebességből számított hőmérséklet-eloszlás két időpontban

Táblázatok jegyzéke

- 1. táblázat.** A vízi szeizmikus módszerek összefoglalása
- 2. táblázat.** A boomer és a szonár fő paramétereinek összehasonlítása
- 3. táblázat.** Az adatgyűjtő fő paraméterei
- 4. táblázat.** A víz sebessége és sűrűsége 4 és 40 °C-on különböző szerzők szerint
- 5. táblázat.** A várható reflexiós együtthatók és a kiszámításukhoz használt adatok
- 6. táblázat.** Az átlagsűrűség és a reflexiós együttható változása a felszabaduló gáz hatására

1 Bevezetés

A szökevényforrások valamilyen felszíni víz szintje alatt eredő források. Kimutathatóságuk problémája 2001-ben, a tervezett budapesti 4-es metróvonal Duna alatti szakaszának vizsgálata során vetődött fel. Az ott mért szonár szelvényeken olyan jelenségeket fedeztünk fel, amelyeket addigi tapasztalataink alapján nem tudtunk megmagyarázni. A lehetőségek végiggondolása során jutottunk el annak a feltételezéséig, hogy az azonosíthatatlan jeleket meleg víz beáramlása okozhatja.

A kutatás különös aktualitását az adja, hogy várhatóan nemsokára elkezdik fűrni a metró alagútját, amely érinti az ELGI által 1999-ben talált sasbércet, és az esetleges hévízbetörés következtében károsodhatnak a közeli fürdőket ellátó kutak. Budapest már a rómaiak, de különösen a török hódoltság idejétől számítva fürdőváros. A termálvizek egy részének elvesztése vagy szennyeződése nagy csapás lenne a város turisztikai vonzerejére is.

A szökevényforrások kutatása bizonyos szempontból egyszerűbb, mint a megszokott szeizmikus mérés, a feladat megoldásához ugyanis a földtani rétegsor adataira nincs szükség, elegendő a víz vizsgálata.

A szonár frekvenciája az ultrahang tartományába esik, ezért a jó felbontás és a nagyobb frekvencián jelentkező kisebb külső zajszint miatt olyan jelenségek is kimutathatók lehetnek, amelyeket más módszerek nem tudnak leképezni.

Dolgozatomban annak vizsgálatával foglalkozom, hogy a szökevényforrások megjelenhetnek-e a szonár szelvényeken. A továbbiakban egyaránt vizsgálom a kérdés elméleti és gyakorlati oldalát. Fizikai és matematikai modellezéssel próbálom rekonstruálni a melegvíz-beáramlás hatását a szonár szelvényeken. A szakirodalom alapján összefoglalom a szökevényforrásokról szerzett eddigi ismereteket és a Gellért-hegy környékének a téma szempontjából lényeges geológiai és hidrogeológiai

viszonyait. Bemutatom az itt végzett szonár mérések eredményeit és a kimutatott szökevényforrásokat.

A vizsgált téma jelentősége nem korlátozódik kizárólag a Gellért-hegy alatti Duna-szakaszra. Az óceánok mélyén levő „fekete füstölők”-ből (black smoker) nagy hőmérsékletű víz áramlik az óceánokba. Egyes feltételezések szerint a földi élet létrejötte is ezekhez a jelenségekhez kapcsolódik. A vizsgálat elve — hogy a hideg vízbe beáramló meleg víz szonár mérésekkel kimutatható — a két feladat esetén közös, így a tapasztalatok kölcsönösen felhasználhatók lehetnek.

A hőmérséklettől függő terjedési sebesség, nagyobb dimenziókban, felhasználható a tengerek és óceánok hőmérséklet-változásainak mérésére, ezáltal a feltételezett globális felmelegedés óceánokra gyakorolt hatásának ellenőrzésére, a változások eloszlásának vizsgálatára is. Ezenfelül módot adhat annak a folyamatos ellenőrzésére is, hogy nem alakultak-e ki a hurrikánok, tájfunok létrejöttére különösen alkalmas feltételek az óceánokban, így például a Katrina hurrikánhoz hasonló természeti katasztrófák korai előrejelzésre is lehetségessé válhat.

2 A szökevényforrások

2.1 A budai hévizek

2.1.1 Történeti áttekintés

A budai hévforrások vizét már az ókorban is használták, dokumentálhatóan először a kelták, majd a rómaiak, akik meghatározó szerepet játszottak Aquincum kialakulásában és fejlődésében. A mai Római Strandfürdő területén lévő források vizét a rómaiak vezetéken juttatták el a katonai és a polgárvárosba, így biztosítva a folyóvizet és táplálva az ottani fürdőket (pl. Therma Maiores). Budapest jelenlegi területén eddig 19, római korból származó fürdőt tártak fel.

A honfoglalást követő legkorábbi emlék 1178-ból való, amely a mai Óbuda-Újlak területén említ települést Felhévíz néven. A betegápolással foglalkozó Szent János-rend szállt meg itt és fürdőt, kórházat alapított. A későbbi leírások szerint a Szent Gellért-hegy tövében, az alhévizi forrásoknál lévő „ispotályt” II. Endre királyunk leányának a tiszteletére Szent Erzsébetnek nevezték el. Zsigmond és Mátyás uralkodása alatt a fürdők virágzásnak indultak.



1. ábra. A Rudas fürdő

A források jelentősége a török időkben teljesedett ki. Edward Brown angol utazó a XVII. század végén 8 budai fürdőt említ, köztük az Aga-ilidzsét (Aga fürdő), a mai Gellért fürdő helyén; a Jesil Direkli Ilidzsaszit (Zöldoszlopos fürdő), a Rudas fürdő (1. ábra) akkori megfelelőjét.

A XIX. század második felében a Margit-szigeti és városligeti fúrások vizére épült fürdőkkel újra fellendült a fürdőkultúra Budapesten.

Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül, tudománytörténeti szempontból nézve a budai hévizek kutatása szempontjából legfontosabb eseményeket és neveket említhetem meg (ALFÖLDI 1979, LORBERER 2002, TÖRÖS 2003):

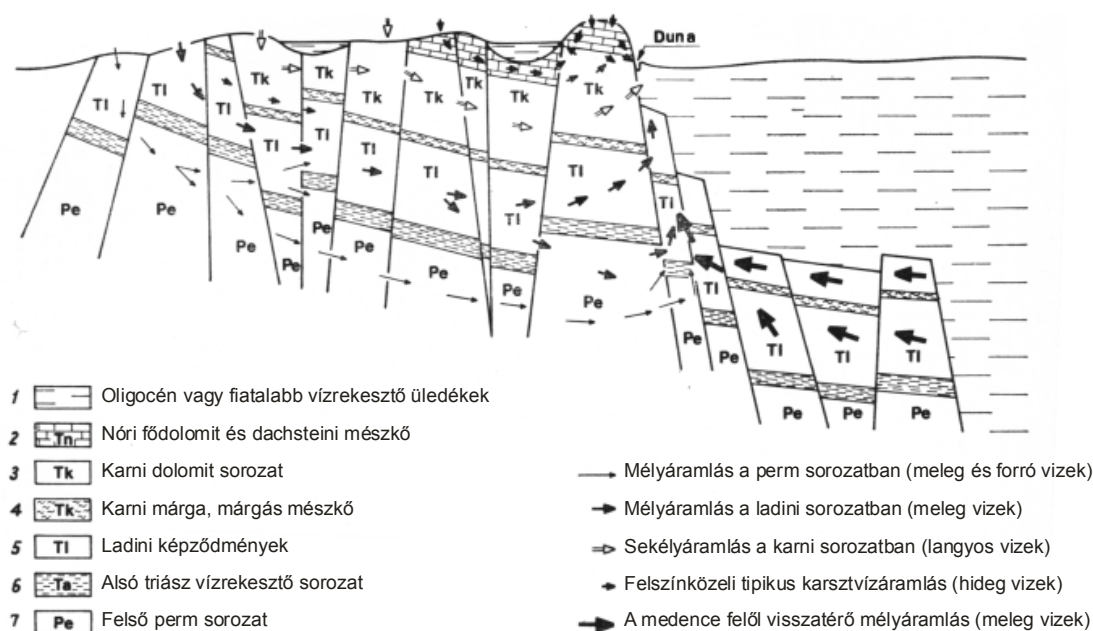
- 1549. Wernherus Bázelen megjelentet egy kiadványt Magyarország forrásairól (WERNHER 1549), amelyben többek között leírja a budai hévizek és a Duna vízszintváltozása közötti kapcsolatot is.
- 1857. Molnár János: „A budai meleg források physikai és vegytani viszonyairól” című (MOLNÁR 1857) műve tekinthető az első tudományos igényű leírásnak a források vizéről.
- 1857-ban megjelenik Szabó József „A Budai meleg források földtani viszonyairól” (SZABÓ 1857) című cikke.
- 1867-ben Zsigmondy Vilmos vezetésével mélyült a Margit-sziget északi részén egy fúrás (ZSIGMONDY 1873), amelyből 118 m-es mélységből 43 °C-os, 2500 liter/perc mennyiségű víz szökött a felszínre.
- 1878-ban a Hősök terén lemélyült fúrásból, 970 m-es mélységből 74 °C-os, 497 liter/perc hozamú víz tört fel (ZSIGMONDY 1878).
- 1869. Molnár János egyik munkájában leírja a Gellért- és a József-hegyi források egymással való összefüggését (MOLNÁR 1869), a Császármalom-tó lecsapolásával a Gellért-hegyi források szintje mintegy fél méterrel lett alacsonyabb.
- 1920. Schafarzik Ferenc leírja, hogy az általa 21 évvel korábban megfigyelt szökevényforrások szintje mintegy 1 m-el lejjebb szállt (SCHAFARZIK 1921). Ennek okát a Duna-part lépcsős kiépítésében látja.
- 1932. Földvári Aladár és Papp Ferenc a Schafarzik-források helyén rendkívül alacsony vízállásnál megfigyelik, hogy a források immár a Duna vízszintje alatt fakadnak, közvetlenül a partvonal mentén (FÖLDVÁRI, PAPP 1932).
- 1942-ben megjelenik Papp Ferenc „Budapest meleg gyógyforrásai” című összefoglaló munkája (PAPP 1942).

- A közelmúltból mindenképpen kiemelendő Vendl Aladár, Pávai Vajna Ferenc (hévíz kutatás), Kessler Hubert (karsztvízgenetika) és Than Károly (vízanalitikai módszerek kidolgozása) munkássága.
- 1968. A VITUKI kiadványaként megjelenik az eddigi legátfogóbb tudományos összefoglaló munka (ALFÖLDI et al. 1968). Ebben az időszakban elsősorban a VITUKI kutatói vizsgálják folyamatosan a hévizeket és a hozzájuk kapcsolódó jelenségeket.
- 1976. Publikálják az Alföldi-Lorberer-féle többszintű 3D alááramlás elméletet (ALFÖLDI, LORBERER 1976), amely a mai napig a legjobban magyarázza meg a budai hideg- és melegvíz-források működését.
- 1999. A tervezett DBR4 metróvonal Duna alatti átvezetése kapcsán ismét előtérbe kerül a Gellért-hegy környéki melegvizek kutatása.

2.1.2 Hidrológiai áttekintés

Budapest területét a Duna vonala morfológiai alapon a pesti síkságra és a budai oldali hegyvidékre osztja fel. Földtani szempontból a Budai-hegység karsztosodott triász és eocén kőzeteivel a Dunántúli-középhegységgel közös vízrendszert képez. A kőzetekbe beszivárgó csapadékvíz a karsztban lefelé áramlik és a földi hőáram hatására felmelegszik. Ez a víz részben az utánpótlódó karsztvíz hidrosztatikai nyomása és eltérő fajsúlya, részben a pesti oldali impermeábilis oligocén agyagmárga rétegeinek torlasztó hatása miatt a területet kettéosztó törésvonalak mentén kerül a felszínre. Ez a budai termális vonal, amely inkább egy sáv, amelyben több törésvonal, illetve ezek kereszteződései találhatóak (ALFÖLDI 1979, LORBERER 2002, TÖRÖS 2003).

A budapesti Duna-szakasz környezetében felszökő források működési elvét a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. A budapesti emeletes hévízrendszer elvi vázlata (ALFÖLDI 1979)

A Duna vonalában lévő törésrendszerek mentén két víztározó rendszer közvetlenül érintkezik. Ny-on a nyílt tükrű karszt mélybe szivárgó vize, K-en pedig a forró és meleg vizes mélykarszt vize ugyanazon törési rendszer mentén áramlik a felszínre.

A mai hévforrások tevékenysége a pliocén végén kezdődött és a hegység részek fokozatos kiemelkedésével összefüggésben toldott kelet felé, amint ez a forrásmézőkő-barlangok és a hévizes forrásbarlangok képződésében is nyomon követhető (ALFÖLDI 1979).

A legtöbb forrás és kút a József-hegy tövében, a Lukács és Császár fürdők területén található. A 20-30 °C-os langyos források a Malom-tó körüli magasabb térszínen, a 40-65 °C-os hévforrások a Duna-terazon fakadnak. Ettől északra az Óbuda–Rómaifürdő–Csillaghegy–Békásmegyer térségében csak langyos vizű, délen a Rác, Rudas és Gellért fürdőknél pedig csak 33-47 °C-os meleg források fordulnak elő. Az eltérések oka a források tápterületeinek eltérő kifejlődésében van. A déli körzet forrásainak felszíni karsztos vízgyűjtő területe kisebb, míg az északi forráscsoportokhoz nagyobb kiterjedésű nyílt karszt kapcsolódik, növelve ezzel a hideg- és melegvíz-keveredésnek a lehetőségét.

sékletére vonatkozó adataink sincsenek. Három jelentős forráscsoportot különböztünk meg (ALFÖLDI et al. 1968):

1. Gellért-hegyi csoport a Gellért fürdő és Rudas fürdő közötti Duna-szakaszon;
2. Lukács–Császár fürdői csoport a Margit híd budai hídfőjétől északra;
3. Margit-sziget É-i csoport. Ide tartoznak az elkotort Fürdő-sziget helyén felfakadó források is.

A szökevényforrások csoportokban jelennek meg, a jelentősebbek közelítő helyei láthatók a 3. ábrán. Ezek közül a Gellért-hegy előterében levőket Schafarzik Ferencről nevezték el, míg további források ismertek a pesti oldalon, a Budapesti Corvinus Egyetem („Közgáz”) előtt Vitális Sándor, valamint a „Névtelen” szökevényforrás a Szabadság híd alatt a budai oldalon (JUHÁSZ 2000). Leírtak még forrásokat a Dunában a Margit-sziget nyugati partjánál és a Lánchíd és a Bomba (Batthyányi) tér közötti szakaszon (SZABÓ 1886).

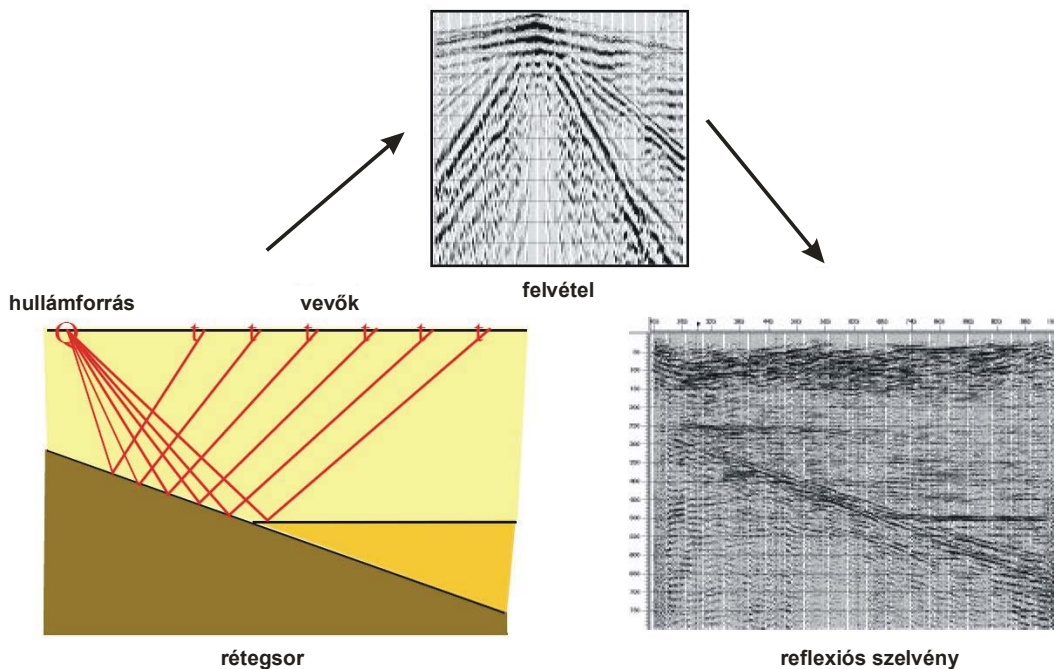
Az eddig ismert szökevényforrások közös jellemzője, hogy megfelelő körülmények esetén a partról megfigyelhetők, illetve, mint például a néhai Fürdő-sziget esetén, alacsony vízállás esetén a Duna szintje fölé kerülnek. Nincs azonban racionális okunk azt feltételezni, hogy a kevésbé jól megfigyelhető helyeken nem fakadhatnak szökevényforrások.

3 A vízi szeizmikus és akusztikus módszerek

3.1 A szárazföldi és vízi szeizmikus módszerek összehasonlítása

A hazai geofizikusok körében a szárazföldi szeizmika az ismertebb, ezért szükségesnek éreztem a módszerek hasonlóságainak, de különösen különbségeinek rövid leírását.

A mérések alapelve közös: a rugalmas hullámok egy része az eltérő sebességű vagy sűrűségű közegek határfelületéről visszaverődik, míg a másik részük belép a következő rétegbe. A reflexiós mérések során, több más hullámtípus mellett, ezeket a visszavert hullámokat (reflexió) regisztráljuk az idő függvényében (4. ábra). A feldolgozás során a terjedési sebesség ismeretében a felvételekből mélységszelvény állítható elő.



4. ábra. A szeizmikus reflexiós mérés elve (KRUK 2003)

Egyes hullámtípusok mind a vízi, mind a szárazföldi méréseknél megtalálhatók, míg a szeizmikus szakemberek életét sokszor megkeserítő felületi hullámok — transzverzális hullámok lévén — a vízben nem terjednek. Vízrel telített laza üledékek (pl. iszap) esetén a hullámtípusok konverziója, amikor a P- (longitudinális) és SV- (vertikálisan polarizált transzverzális) hullámok a reflexió során egymásba alakulnak, nem lép fel. A laza réteg nagy frekvenciákat csillapító és energiaelnyelő hatása is elmarad a vízi méréseknél, az adó és a vevő egyaránt a jó csatolást biztosító vízben van, ezért a vízi méréseknél nagyobb frekvenciák használhatók, így jobb felbontás érhető el. A vízi méréseknek kétségtelen előnyeivel szemben egy nagy hátrányuk van: a víz-levegő határfelület és a fenék között ide-oda verődő, alig csillapodó többszörösök jelenléte. Ezek energiája nagyságrendekkel nagyobb lehet a reflexiókénál, így sok esetben a vízmélység kétszeresére korlátozódik a kutatható mélység. A probléma kemény mederfenék esetén jelentős, laza, iszapos fenék esetén a többszörösök amplitúdója kicsi, sokszor elhanyagolható (CSERNY, PRÓNAY 2004).

3.2 A vízi szeizmikus és akusztikus módszerek és eszközök áttekintése

A hullámok visszaverődésén alapuló geofizikai mérések fő jellemzője a horizontális és vertikális felbontóképesség, valamint a behatolási mélység. Adott földtani viszonyok között mindkettő a frekvencia függvénye. Vertikális felbontásnak elméleti megfontolások alapján a hullámhossz negyedét, horizontálisnak az ennek megfelelő útkülönbség reflektáló felületre eső vízszintes vetületét tekinthetjük. Kis frekvenciához nagy behatolás és nagy hullámhossz tartozik, míg nagy frekvencia esetén a jó felbontás ára a szerény behatolási mélység. Ezért a rugalmas hullámokon alapuló vízi mérések kategorizálásához leggyakrabban a frekvenciájukat használják.

Módszer	Jellemző frekvencia (Hz)	Jellemző felbontás	Hullámforrás
Hagyományos sokcsatornás	10-100	több tíz méter	Robbantás, airgun csoport
Nagyfelbontású sokcsatornás	50-500	tíz méter, méter	Kis légkamrás airgun, GI gun, watergun, minisparker
Hagyományos egycsatornás	10-100	több tíz méter	Nagy légkamrás airgun (10-20 kJ) vagy airgun csoport
Nagyfelbontású egycsatornás	100-1 000	méter, deciméter	Kis sparker (2 kJ), kis airgun, GI gun, watergun
Nagyon nagy felbontású egycsatornás	1 000-10 000	centiméter, deciméter	Boomer, sparker
Szonár	10 000-500 000	centiméter, milliméter	Piezo

1. táblázat. A vízi szeizmikus módszerek összefoglalása

A fizikában a frekvencia szerinti beosztás alapja az emberi hallás. A hang (akusztikus) tartomány a 20-20 000 Hz-es frekvenciasáv. Ez alatt az infra-, fölötté az ultrahang tartomány van.

A vízi szeizmikus mérések mind a három tartományt érintik, frekvenciatartományuk alapján az 1. táblázatban látható nevezéktan honosodott meg (USGS 2004). A beosztás az egyes szerzőknél eltér, ezért a táblázat összeállításánál a számomra leglogikusabbnak tűnő határokat használtam.

A vízi mérések esetén, mint a geofizika sok ágában, bizonyos kifejezéseknek nincs általánosan használt magyar megfelelőjük, ezért kénytelen vagyok angol (vagy angol eredetű) szavakat használni. (Mivel Magyarország nem nagyhatalom az oceanográfiában, ez a helyzet várhatóan nem is fog változni.)

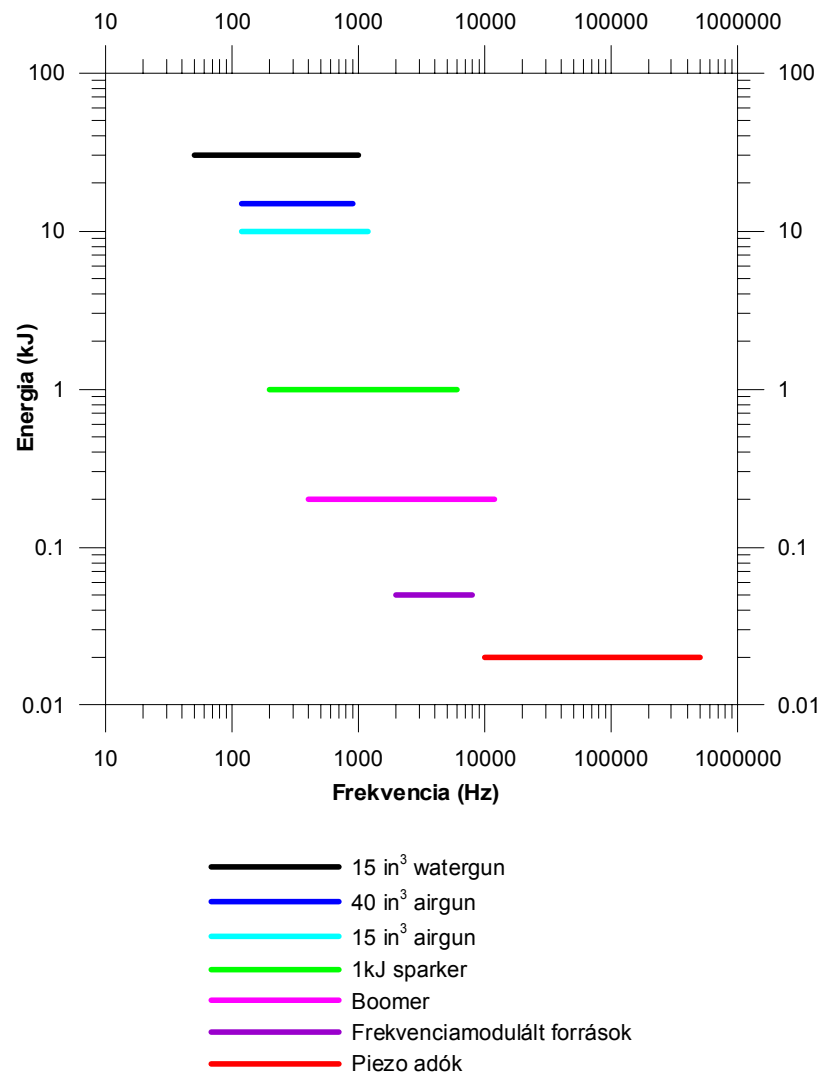
Az alábbiakban röviden ismertetem a táblázatban szereplő legfontosabb eszközöket (MOSHER, SIMPKIN 1999):

- Airgun: Sűrített gázzal működő szeizmikus rezgéskeltő. Az eszköz a tároló kamrájában levő nagy nyomású gázt elektromágnessel vezérelt szelepen keresztül néhány ms alatt robbanásszerűen a vízbe eresztí.
- GI gun (Generated Injection Airgun): Két szinkronizált airgun, amelyek közül az első kelti az energiát, a másik akkor lö, amikor az első gázbuborékja a maximális kiterjedését éri el, így a buborékok összeomlása időben elhúzódik, ezért a helyükre bezúduló víz mint másodlagos forrás hatása csökken.
- Watergun: Az airgunhoz hasonló eszköz, amelyben a sűrített gáz egy dugattyú segítségével a kamrában levő vizet löki ki, ez kelti a rugalmas hullámokat.
- Sparker (villanyágyú): Olyan szeizmikus hullámforrás, amelyben az energiát két elektróda között átugró szikra kelti. A szikra a környezetében elpárologtatja a vizet, és az így keletkezett gázbuborék helyére áramlik be a víz, ami rugalmas hullámokat generál.

- Boomer: Olyan szeizmikus rezgéskeltő eszköz, amely a kondenzátorokban tárolt energiát egy tekercsen keresztül sűti ki, ami örvényáramokat kelt egy alumínium lemezben, ennek hatására az a mögötte levő vízzel együtt elmozdul.
- Piezo: Elektromos tér hatására a méretét megváltoztató, illetve nyomás hatására elektromos áramot termelő kristállyal működő eszköz.

A táblázatból látható, hogy a legszélesebb frekvenciasáv a szonáré, elképzelhető, hogy a későbbiekben ezt is tovább osztják. Az is kiderül, hogy a szonárok elsősorban az ultrahang sávban dolgoznak.

A módszereket az eszközök szempontjából nézve a kisfrekvenciás oldalon vannak az airgunok, a nagyfrekvenciáson a piezoelektromos (piezo) források és a köztük lévő frekvenciasávot töltik be a boomerek, a sparkerek és az egyéb eszközök. Az 5. ábrán a hullámforrások átlagos energiája és frekvenciája látható (TRABANT 1984). Mint az a szeizmikában általános, a nagyobb energiákhoz kisebb frekvencia tartozik.



5. ábra. A szeizmikus hullámforrások összehasonlítása frekvencia és energia szerint (TRABANT 1984)

4 A szonár módszer

4.1 A módszer rövid története

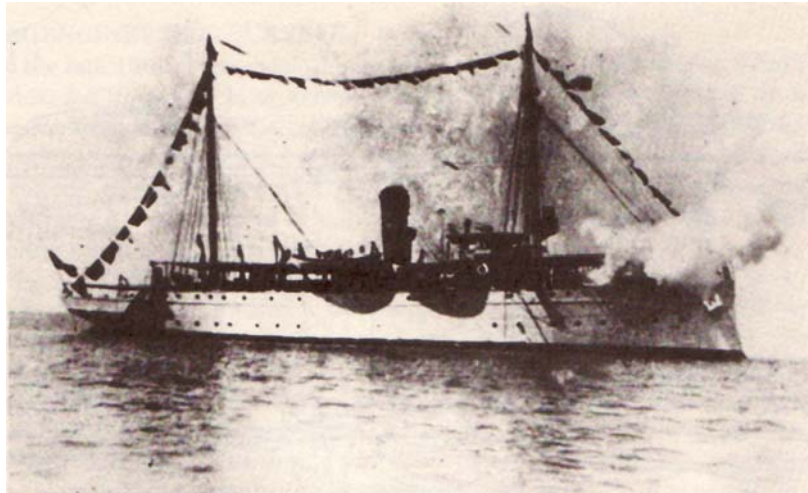
A szonár a radarhoz hasonlóan képzett betűszó fonetikus magyar formája, a „Sound Navigation and Ranging” angol (amerikai) kifejezésből származik. Fejlődése, mint sok technológiai újításé, az I. és II. világ-, valamint a hidegháborúnak „köszönhető”.

Szonár rendszerekkel az állatvilágban is találkozhatunk, a delfinek hanglokátor rendszere nemcsak a zsákmány távolságának és sebességének, hanem alakjának és anyagának felismerésére is alkalmas.

A módszer kialakulását és fejlődését az alábbi évszámokkal jellemezhetjük (TRABANT 1984, LEONARD 2002):

A víz mint közvetítő közeg szerepét már Leonardo da Vinci felismerte, aki 1490-ben, szabad fordításban, a következőket írta: „Ha megállítod a hajódat és egy cső egyik végét a vízbe dugod, másikat meg a füledhez illeszted, a hajókat messziről meghallhatod”. Ez a passzív (saját hullámforrás nélküli) szonár alapötlete.

- 1687-ben Newton elméleti alapon megbecsülte a hang sebességét a vízben.
- 1826-ban Culladon és Sturm a Genfi-tavon villanófény és víz alatti harang segítségével először mérte meg a hang sebességét a vízben. Az eredmény 1430 m/s, ami meglepően pontos.
- 1900-ban a Submarine Signal Company (a Raytheon elődje) bemutatja az első gyakorlati alkalmazást: ködkürt és víz alatti harang egyidejű használatával, a hajón levő vevő segítségével, lehetővé teszi a világítótorony távolságának meghatározását.
- 1905-ben Berggraf norvég mérnök hasonló módszerrel vízmélységet mér.



6. ábra. A szonárral felszerelt USCG Miami

- 1914-ben Fessendon jéghegyet észlel 2 tengeri mérföld távolságról, de a műszer 50 tmf. távolságra is „ellát”. A fejlesztést a Titanic tragédiája motiválta. Az eszközt az USA Parti Őrségének Miami nevű hajójára szerelték (6. ábra) és a kísérletek során véletlenül 57 m mélyről reflexiót kaptak, így fedezték fel az akusztikus mélységmérőt.
- 1924-ben a Submarine Signal Company (USA) elkészíti az első kereskedelmi forgalomba került akusztikus mélységmérőt, amelyet a Berkshire nevű utasszállító hajóra szerelnek.
- 1931-ben az amerikai haditengerészet bevezeti a szonárt, ekkortól használják ezt a nevet is.
- A II. világháború alatt a szonár sokat fejlődik, az ASDIC készülék (Anti-Submarine Detection Investigation Committee) segítségével tudják felvenni a szövetségesek a harcot a német tengeralattjárókkal, amelyek a víz alól az S-Gear (Sondergerät für Aktive Schallortung = különleges aktív hanglokátor berendezés) rendszer segítségével célozták meg a hajóikat.
- Az 1950-es évek elejétől használják földtani kutatásra a vízi akusztikus módszereket. Az első nagyfelbontású rendszert, amit „marine sonoprobe”-nak neveztek, a Magnolia Petroleum Company (USA) kutatólaboratóriumában fejlesztették ki. Az eszköz magnetostrickiós elven, 3,8 kHz frekvencián működött.

4.2 A szonár jellemzői

A szonárnak két alapvető változata van, az impulzus üzemű és a „chirp” szonár. Az impulzus üzemű eszköz egy adott frekvenciájú négyszögjellel hajtja meg az adót (ping), míg a chirp egy időben elnyújtott, változó frekvenciájú jelcsomaggal. Az első változat esetén az időszelvény már a mérés során előáll, míg a másodikonál a regisztrátumot korrelálni kell az elméleti jelalakokkal, hogy láthassuk az eredményt. Ezért az impulzus üzemű szonárral kisebb sebességű vezérlő számítógép esetén is megfelelő térbeli sűrűségű mérés végezhető, míg a chirp üzeműnek nagyobb a hardver igénye.

A szonároknál mind az adó, mind a vevő „lelke” egy-egy piezokristály. A piezoelektromos elven működő eszközöket alapvetően három paraméterrel, az energiával, a frekvenciával és az irányítottsággal szokták jellemezni. Az energiát, ha a kábelekben elszenvedett veszteségektől eltekintünk, egyértelműen a jelgerjesztés során kisütött kondenzátor paraméterei határozzák meg. A jó hatásfok miatt a piezokat a saját frekvenciájukon célszerű használni. Ez a kristály anyagától (a benne terjedő hullám sebességétől) és vastagságától függ. A forrás (és a vevő) irányítottságát a kristály átmérőjének és vastagságának aránya határozza meg. A piezokristály gyártása során a bárium-titanát masszát formába öntik és kiégetik, aminek során a keverék megszilárdul. Ezek után nagy nyomáson „aktiválják” a kristályt (PRÓNAY 2001).

Elvileg bizonyos szilárdsági és technikai korlátoktól eltekintve bármilyen, előre meghatározott paraméterű kristály előállítható lenne. A gyakorlatban viszonylag kis méretűeket készítenek, és a megkívánt paramétereket forrás-, illetve vevőcsoportok segítségével biztosítják. A csoportosításokkal kiküszöbölhetők a nem kívánt mechanikus rezonanciák, áthidalhatók a gyártástechnológiai korlátok, valamint megvalósíthatóvá válik, hogy egy eszközön belül változtatható legyen mind a frekvencia, mind a hullámforrás irányítottsága (beam steering).

A szonárnak, mint minden más módszernek, előnyei és hátrányai vannak más, hasonló célra használt eszközökkel szemben. Ezeket a jellemzőket a Magyarországon is gyakran használt boomerrel összehasonlítva lehet a legjobban érzékelteni (2. táblázat). A szonárral az ELGI, az IKB-Seistec gyártmányú boomerrel a Geomega Kft. (TÓTH et al. 2001) végzett méréseket a kérdéses Duna szakaszon. A felhasznált adatok a gyártók specifikációiból származnak (IKB TECHNOLOGIES 2001, EDO CORPORATION 2000).

	Boomer	Szonár
Frekvenciasáv (kHz)	1-10	80
Domináns frekvencia (kHz)	5	80
Irányítottság (\pm °)	30	8
Behatolás (m)	2-150	0-5
Felbontás (cm)	25	0,5
Tömeg (kg)	95	3

2. táblázat. A boomer és a szonár fő paramétereinek összehasonlítása

A két eszköz között a legtöbb különbség az alkalmazott frekvenciából származik. A nagy frekvencia a kis hullámhossz következtében jó felbontást biztosít. A csillapodás viszont frekvenciafüggő, ezért a szonárjel behatolási mélysége szerény. Nagy frekvencián könnyebb irányított forrást készíteni, ennek fő oka a geometriai méret. Ugyancsak a méret az oka a tömegbeli különbségeknek. Nagy frekvencián nemcsak a jelek, hanem a zajok is erősebben csillapodnak, ezért a szonár frekvenciasávjában a külső zajok (hajó, szél, parti forgalom) több nagyságrenddel kisebbek, mint a boomer esetében. Ráadásul a külső zajok frekvenciaspektrumának zöme a szonár frekvenciájától távol, az akusztikus és az ez alatti tartományba esik. A kimutathatóságot az akusztikus impedancia különbségén kívül a háttérzaj nagysága határozza meg, a jelnek nagyobbak kell lennie, mint a zajnak. Ezért a szonár esetén a kimutathatóság határa lecsökken, kisebb kontraszt is észlelhető lehet. A vízi akusztikus források és vevők irányítottsága az eszközök geometriájától függ. Nagy frekvenciákhoz kisebb méret tartozik, így a frekvencia és a forrás átmérőjének aránya szinte tetszőlegesen

megválasztható, ezért a nagyfrekvenciás piezo források és vevők sugárzási kúpjának nyílásszöge kicsi, szélsőséges esetben akár tized fok is lehet. Ugyanakkor túl kis nyílásszöget a gyakorlatban azért nem használnak, mert az erősen dőlt felületek leképezésére nem alkalmas.

A fentieket összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a boomer elsődleges felhasználási területe a mederfenék alatti rétegsor, míg a szonáré a mederfenék domborzatának és magának a vízoszlopnak a leképezése. Mérési frekvenciájukat és minden egyéb paraméterüket a fő feladatokra optimalizálták.

4.3 A dunai méréseknél használt szonár berendezés

A dunai mérésekhez és a balatoni iszapvastagság ellenőrzésekhez az ELGI meglévő eszközei nem voltak megfelelőek, ezért egy nagyfrekvenciás szonár berendezést készítettünk. Az adó oldal elektronikáját Szabados László kollégám készítette, az adó- és a vevőkristályt az EDO cégtől vásároltuk, az adatgyűjtő digitális oszcilloszkóp a Pico Technologies cég terméke, míg a vezérlő és adatgyűjtő programot én készítettem el.

A mérésekhez kiválasztott frekvencia 80 kHz, így a felbontás 1 cm alatti, míg a várható behatolási mélység a balatoni iszapban nagyobb, mint 3 m. A nagy felbontásra a pontos mélység- és iszapvastagság méréshez volt szükségünk. A dunai mérésekhez a nagyobb vízmélység miatt nagy felvételhosszra (>16 000 minta) kellett felkészülni.

Az elkészített hullámforrás a kisütött teljesítménye 3-5 kW. Az adó ezt a nagy teljesítményt csak nagyon rövid ideig adja le, ezért a forrás egy átlagos méretű 12 V-os akkumulátorról legalább 6 órán keresztül üzemeltethető.

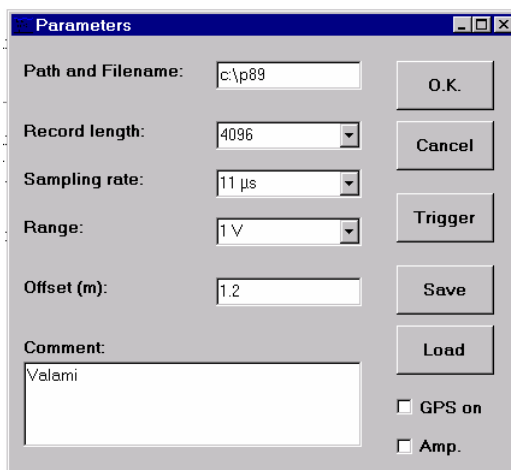
A vevő által mért jelek digitális rögzítését egy Pico PLC-212 típusú digitális oszcilloszkóppal oldottuk meg, amely egy hordozható számítógép párhuzamos portjára csatlakozik. Az oszcilloszkóphoz adott segédprogramokból felépített vezérlőprogram az adatok rögzítésén és tárolásán kívül a mérés helyét is rögzíti a GPS-től kapott koordináták alapján.

Az adatgyűjtő fő paramétereit a 3. táblázat foglalja össze:

Csatornaszám:	2
Mintavételi idő:	0,3 μ s-10 ms
Felvételhossz:	1-32000 minta
Felbontás:	12 bit
Erősítés:	1-100-szoros

3. táblázat. Az adatgyűjtő fő paramétereit

A vezérlőprogram Windows 9x, NT és XP alatt fut, így szinte bármely terepi használatra szánt számítógépen futtat. A programnak három változata készült el. Ezek abban térnek el egymástól, hogy az alapváltozat egy csatornája mellett a második csatorna mit mér. A második verzióban ez is egy szonár csatornát mér, így az eszköz kétszatornás. A harmadik változat esetén a második egy segédcsatorna, amely DC jeleket fogadhat. Ez a kimenete lehet például egy hőmérőnek, magnetométernek, áramlásmérőnek stb. A program összes változata fogadja a GPS jeleket is, amelyeket a szeizmogramok fejlécében rögzít.



7. ábra. Az alap paraméterek ablaka a vezérlőprogramban

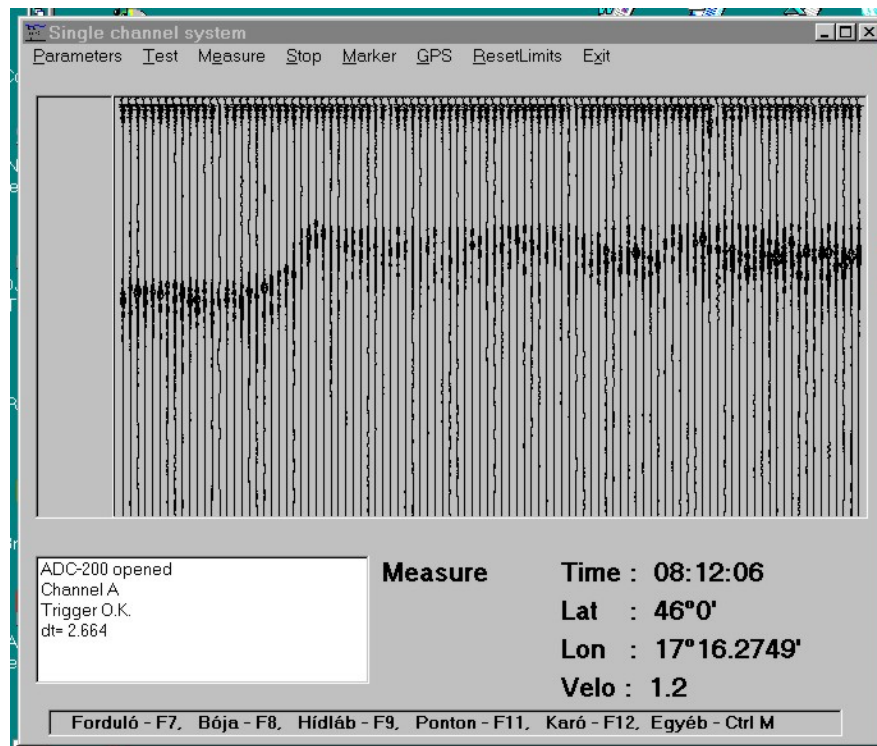
a felvételszámot automatikusan eggyel növeli, a többi paramétert változatlanul hagyja.

A vezérlőprogram első ablakában a mérés alapvető paraméterei állíthatók be (7. ábra). Az első ilyen adat a felvétel neve és száma. Ezt követi a felvételhossz és a mintavételi idő, amelyek egy legördülő ablakban választhatók ki. Ezek után a műszer érzékenysége állítható (csatornánként), majd az adó-vevő távolság és az esetleges megjegyzések írhatók be a megfelelő rovatokba.

Az alap paramétereket a program egy „ini” fájlban tárolja, újabb elindításakor

A következő a tulajdonképpeni főablak (8. ábra). A menüsor első funkciójával vissza lehet lépni a paraméter ablakba. A második a teszt üzemmód, ahol a mért csatornát a teljes ablakban meg lehet nézni, így részletesen vizsgálható a jelalap és ellenőrizhető az esetleges túlvezérlés. A harmadik funkció az üzemszerű mérés, amikor a program egymás mellett jelenít meg egyszerre maximum 100 mért csatornát. A negyedik funkcióval a mérés szüneteltethető, míg az ötödikkel markerek helyezhetők el a csatorna fejlécében. Az egyszerű kezelhetőség érdekében néhány gyakran használt azonosító be van építve. Ezek: forduló, bója, hídláb, ponton, karó és egyéb. A markerek

a funkciógombok használatával is elhelyezhetők. A hatodik funkció a GPS bekapcsolására és tesztelésére szolgál. Az utolsó funkció a programból kilépésre szolgál.



8. ábra. A mérőprogram főablaka

Az ablakban a mért csatornák mellett megjelenik egy közelítő mélységskála (1500 m/s sebesség és a beállított adó-vevő távolság figyelembevételével), az idő, a GPS koordináták WGS-84 rendszerben, a sebesség m/s-ban és az üzemmód. A segédcsatorna használata esetén a mért érték mV-ban, vagy egy kívülről megadható átszámítási táblázat segítségével valódi értéké transzformálva jelenhet meg.

Az időegység alatt mérhető csatornák számát a vevő oldalon a következő paraméterek határozzák meg:

Felvételhossz

Adatátvitel ideje az adatgyűjtő és a számítógép között

Adatfelírás sebessége a winchesterre

Csatorna megjelenítésének sebessége

A fent felsorolt műveletekhez szükséges idő összeadódik. Ez az a minimális idő, aminek el kell telnie két egymást követő felvétel között. A felvételhosszt a feladat határozza meg, csökkenteni általában nem lehet. A másik három tényezőt a terepen használt számítógép, illetve az adatgyűjtő paraméterei határozzák meg, beleavatkozni csak a megjelenítésnél lehet. Ennek gyorsítására elkészült a mérőprogram egy olyan változata, amely a Windows DirectX technológiája segítségével ezt, az egyébként a többihez képest meglepően lassú, műveletet felgyorsítja. A fejlesztés része még, hogy a program az ábrázolandó csatornaszám elérése után nem törli a képernyőt, hanem továbbgördíti (scroll), és így lehetővé teszi a felvételek menet közbeni folyamatos ellenőrzését. A DirectX segítségével a csatorna megjelenítésének és továbbgördítésének ideje kevesebb, mint hagyományos módon csak a csatornarajzolásé.

5 Fizikai alapok

Az akusztikus hullámegyenlet Newton második törvénye és a Hooke-törvény alapján, konstans sűrűség feltételezésével, a következő alakban írható fel (KRUK 2003):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \bar{\mathbf{r}}^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -w(t)\delta(\bar{\mathbf{r}}), \quad (1)$$

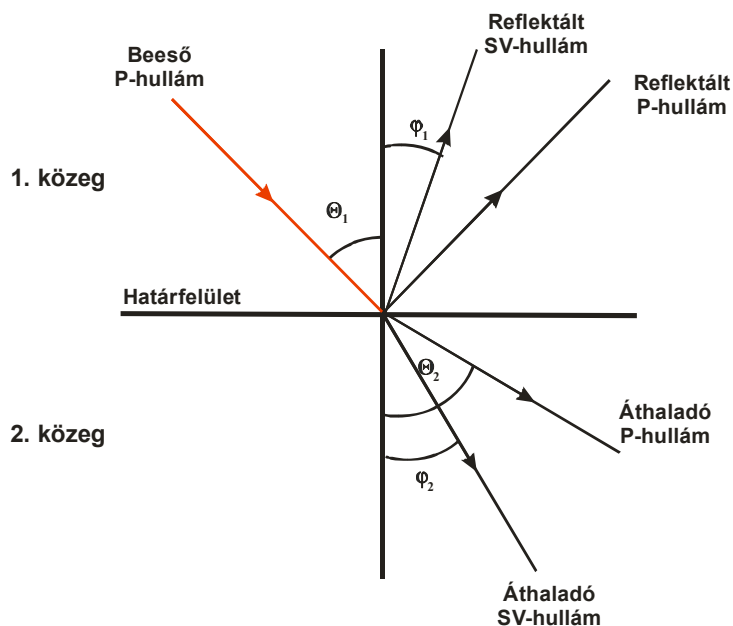
ahol u az elmozdulás, $\bar{\mathbf{r}}$ a helyvektor, v a hullámsebesség, t az idő, $w(t)$ a jelalak és δ a Dirac-delta (impulzus) függvény.

A szeizmikus gyakorlatban a hullámegyenletet csak különleges esetekben használják, mivel annak egyik speciális megoldása, a geometriai optika képletei (Fermat- és Huygens-elv, Snellius–Descartes-törvény) általános esetben jól leírják a szeizmikus hullámjelenségeket.

A szökevényforrások kimutathatóságának vizsgálatához a reflexiós együtthatóra van szükségünk, amely megadja, hogy egy határfelületre érkező jel mekkora része verődik vissza. Számítása a két réteg sűrűségének és hullámsebességének, és a beesési szögnek a felhasználásával történik. A felületre beeső P-hullám esetén a két réteg határán általános esetben a következő hullámtípusok jönnek létre:

- Reflektált P-hullám
- Reflektált SV-hullám
- Áthaladó P-hullám
- Áthaladó SV-hullám

Az SV-hullámok konverzióval jönnek létre, a P-hullámok vízszintes határfelület esetén SH-hullámmá nem alakulnak át. A jelenséget vázlatosan a 9. ábrán mutatom be.



9. ábra. A hullámtörés és visszaverődés elve

Az egyes hullámtípusok amplitúdója a sebesség- és sűrűségkontraszt, valamint a beesési szög függvénye. A jelenséget a Zoeppritz-egyenlet írja le (ZOEPPRITZ 1919):

$$\begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ -\cos\theta_1 & \sin\theta_1 & -\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{v_{p1}}{v_{s1}} \cos 2\theta_1 & \frac{\rho_2 v_{s2}^2 v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2 v_{p2}} \sin 2\theta_2 & \frac{-\rho_2 v_{s2} v_{p1}}{\rho_1 v_{s1}^2} \cos 2\theta_2 \\ \cos 2\theta_1 & \frac{-v_{s1}}{v_{p1}} \sin 2\theta_1 & \frac{-\rho_2 v_{p2}}{\rho_1 v_{p1}} \cos 2\theta_2 & \frac{-\rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{p1}} \sin 2\theta_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_{RP} \\ A_{RS} \\ A_{TP} \\ A_{TS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 \\ -\cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ -\cos 2\theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ahol v_{p1} , v_{s1} , ρ_1 , v_{p2} , v_{s2} , ρ_2 rendre az első és második réteg P- és S-sebessége, valamint sűrűsége, A_{RP} , A_{RS} , A_{TP} , A_{TS} pedig a reflektált valamint az áthaladó P- és S-hullám amplitúdója, θ_1 és θ_2 a beeső és megtörő (áthaladó) P-hullám függőlegessel bezárt szöge.

Vízben az S-hullámok nem terjednek, így a hullámtípus konverzió elhagyásával a reflexiós együttható képlet jelentősen leegyszerűsödik (AKI, RICHARDS 1980):

$$R = \frac{A_R}{A_I} = \frac{v_1 \rho_1 \cos \Theta_1 - v_2 \rho_2 \cos \Theta_2}{v_1 \rho_1 \cos \Theta_1 + v_2 \rho_2 \cos \Theta_2} \quad (3)$$

A képletben szereplő sebesség és sűrűség szorzatokat akusztikus impedanciának nevezik. Több reflektáló réteghatár esetén a transzmissziós együttható (a jel hányad része lép be az új közegbe) is lényegessé válik, ugyanis csak az a jel verődhet vissza a mélyebb reflektorról, amelyik el is jutott odáig:

$$T = 1 - R \quad (4)$$

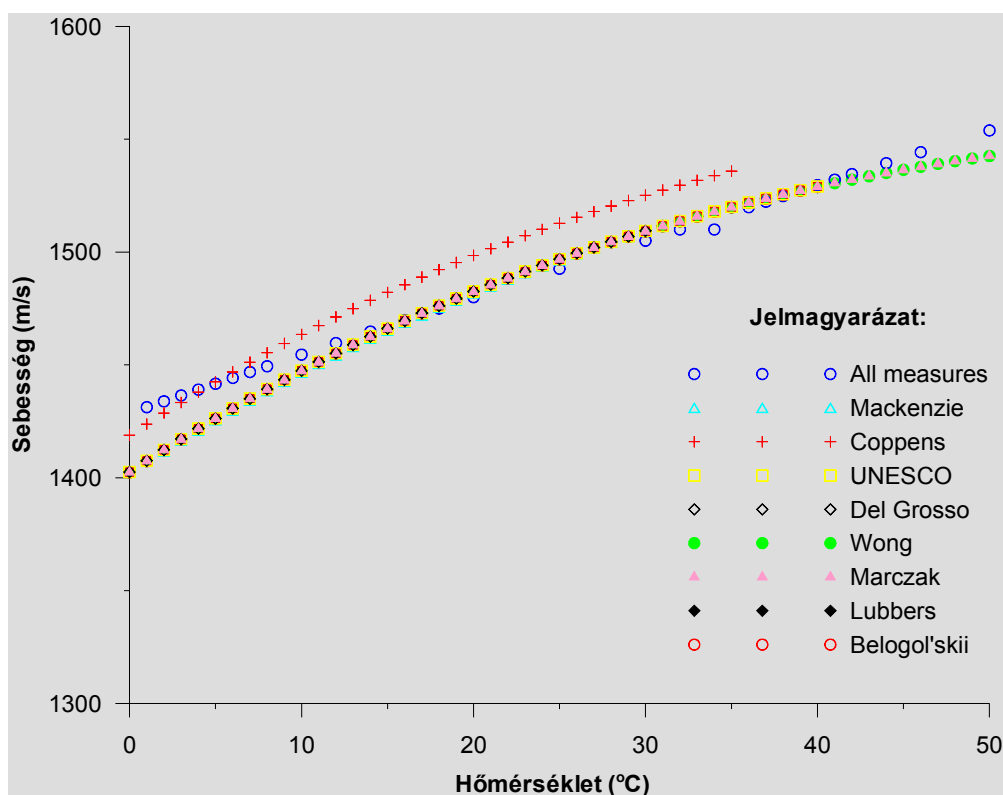
A fenti képletek a sima, ideális réteghatárra beeső hullámokra vonatkoznak. A szonár esetén az adó-vevő távolság elhanyagolhatóan kicsi a reflektor mélységéhez képest, ezért vízszintes réteghatár esetén a beesés közel függőleges. Ilyenkor a koszinuszok értéke 1, és a képlet tovább egyszerűsödik, és ismert paraméterek esetén lehetőséget ad a visszavert jel nagyságának becslésére.

A képletek alkalmazásához a fizikai paraméterek, a sebesség és a sűrűség konkrét értékeire van szükség. Ezek nélkülözhetetlenek a matematikai modellezéshez, a bemenő adatok megbízhatósága alapvetően befolyásolja ugyanis a számítások végeredményét.

A hullámsebesség és sűrűség értékére a hőmérséklet függvényében a szakirodalomban sok táblázat és képlet található. Ezek részben megerősítik egymást, de az ellentmondás sem ritka. A beszerzett adatsorok összehasonlításával meghatározom azt a sávot, amelybe a Gellért-hegy környékén várható 0-40 °C hőmérséklet-tartományban a sebesség- és sűrűségértékek esnek.

5.1 A hullámsebesség értéke vízben a hőmérséklet függvényében

Hullámsebesség értékeket a hőmérséklet függvényében laboratóriumi táblázatokban, illetve a vízi mérések szakirodalmában találhatunk. A kémiai táblázatokban a csapvíz és a desztillált víz szerepel. A szakirodalomban talált értékek nagy része az óceánokra és tengerekre vonatkozik, és a hőmérsékleten kívül bemenő paraméter a mélység és a sótartalom is. Vizsgálataim során mélységnek 0 m-t, a sótartalomnak (NaCl) 0 ppm-et vettem. Kis sótartalomnál a sebesség közel konstans, alig változik a sókoncentrációval, ezért elhanyagolásával nem vittem jelentős hibákat az adatsorokba. A folyók és tavak vizének tényleges sebességértékei a desztillált és a sós víz között vannak, ezért az eredményként meghatározott sáv szélesebb a valósánál, de a várható valódi értékeket tartalmazza.



10. ábra. Hullámsebesség a vízben a hőmérséklet függvényében különböző szerzők szerint

A 10. ábra sebességértékeit megvizsgálva kitűnik, hogy, bár látszólag sok függvényünk van, valójában csak három független adatsorunk van. Coppens (COPPENS 1981) értékei (piros kereszt) rendszerint magasabbak, mint a többi. Az „All measures” valódi mért értékeket közöl (ALL MEASURES 2004), ezért ez a görbe a legkevésbé sima (kék körök), az adatok szórnak. 0 °C közelében ezek a közölt értékek a legnagyobbak. Az összes többi szerző láthatólag közös, az UNESCO által közzétett adatsorból dolgozott, csak a függvény leírásához használt képlet típusa és fokszáma tér el egymástól (MACKENZIE 1981; DEL GROSSO 1974; WONG, ZHIU 1995; MARCZAK 1997; LUBBERS, GRAAFF 1998; BELOGOL'SKII et al. 1999). Az összes adat szerint a sebesség a hőmérséklettel monoton nő.

A sebességértékek sávjának felső korlátját 1-4 °C-ig az „All measures”, e fölött Coppens adatai képezik. Az alsó korlát a közös adatsor, kivéve azt a néhány hőmérsékletet, ahol az „All measures” adatai kiugranak.

A három független adatsor alapján a vizsgálatok szempontjából lényeges hőmérsékleteken a sebességek és sebességkülönbségek egész értékre kerekítve az alábbi (4. táblázat) táblázatban foglalhatók össze:

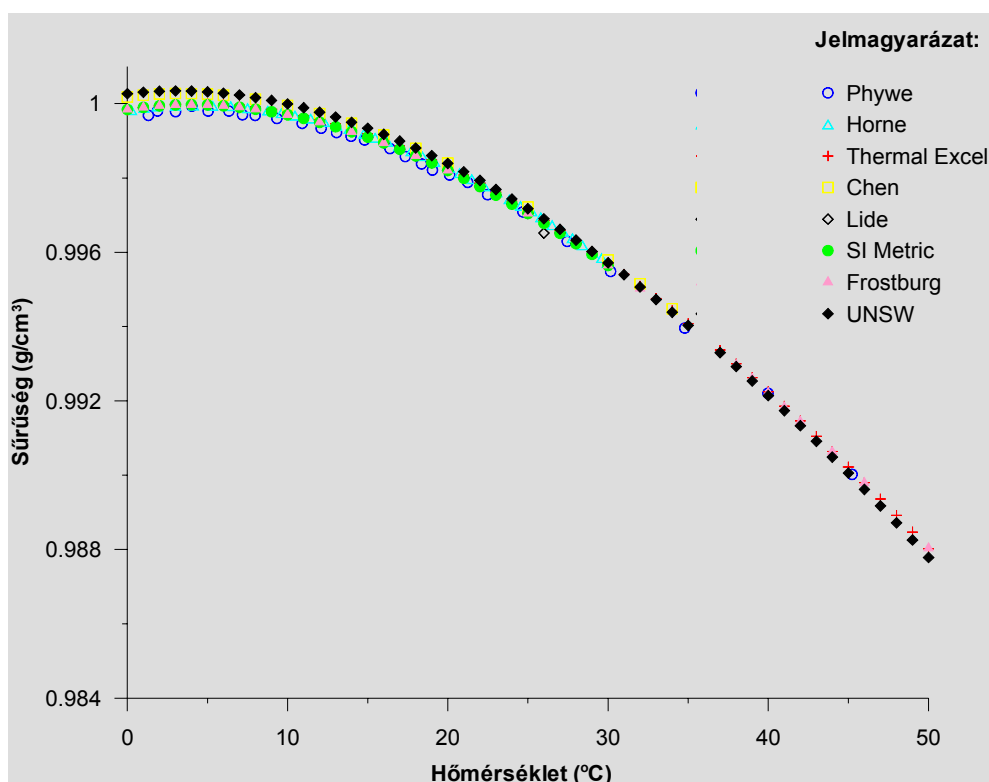
Adat forrása	Sebesség 4 °C-on (m/s)	Sebesség 40 °C-on (m/s)	Sebességkülönbség (m/s)
Coppens	1438	1545	107
All measures	1439	1530	91
Wong és Zhiu	1422	1529	107

4. táblázat. A víz sebessége és sűrűsége 4 és 40 °C-on különböző szerzők szerint

Az adatok tanulsága szerint a sebességkülönbség 90-110 m/s között várható, ami nagyjából 6-7% sebességkontrasztot jelent.

5.2 A víz sűrűsége a hőmérséklet függvényében

A sűrűsége a szakirodalomban található adatokról gyakorlatilag ugyanaz mondható el, mint a sebességről, tehát az egyes szerzők adatai olykor jelentősen eltérnek egymástól. A fő különbség közöttük, hogy, mivel a sűrűség adatokat a gyakorlatban többször alkalmazzák, ezért több, egymástól független adatsor áll a rendelkezésünkre (11. ábra). Ez elsősorban a laboratóriumokban leginkább használatos 0-30 °C hőmérsékletsávra érvényes.



11. ábra. A víz sűrűsége a hőmérséklet függvényében különböző szerzők szerint

Az ábrán látható értékek egy része kémiai táblázatokból származik, mint a Phywe laborbeli mérőeszközök gyártó cég kalibráló adatsora (PHYWE 2003), Lide kémia kézikönyve (LIDE 2004), és a Frostburg State University General Chemistry Online (SENESE 2005) internetes honlapja. Horne és Goldman elsősorban amerikai tavakkal foglalkozó limnológiai szakkönyvből (HORNE, GOLDMAN 1994) és Chen a Bodeni-tó

vizével foglalkozó művéből (CHEN 1986) is használtam fel adatokat. A többi érték a „Thermal Excel”, az „SI Metric”, és a „University of New South Wales” (UNSW 2005) internetes honlapokról származnak.

Az adatok sávjának felső korlátja 35 °C-ig az UNSW (University of New South Wales) által megadott (fekete négyszög), a fölött a „Thermal Excel” (piros kereszt) értékei. Az alsó korlátot a Phywe (kék kör) és 35 °C felett az UNSW adatai jelentik.

Az adatok 30 °C felett nagyjából együtt futnak, míg ez alatt, de különösen 0 és 4 °C között komoly eltérések vannak. A minket érdeklő 4-40 °C tartományban a sűrűség a hőmérséklet növekedésével csökken, de ez a csökkenés kisebb, mint 1%.

5.3 A reflexiós együttható várható értéke

A reflexiós együttható a meglehetősen szóró bemenő adatok miatt nem számítható ki egyértelműen, ezért értékére egy alsó és egy felső becslést, valamint egy középső, legvalószínűbbnek tartott értéket határoztam meg.

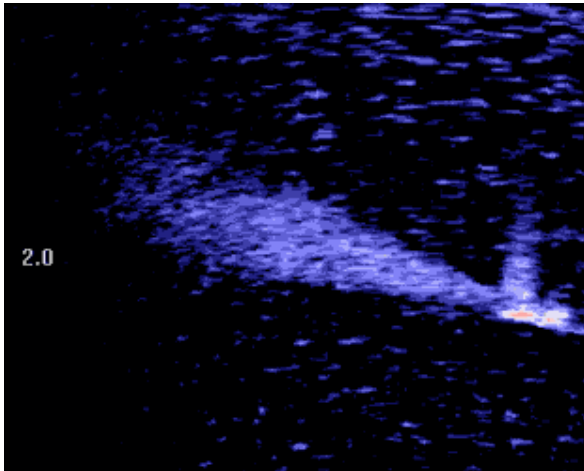
A számítások alapjául a valós körülményeket vettem, a mérések idején a Duna hőmérséklete 4-5 °C volt, a Gellért fürdő környékén a források, illetve kutak vizének hőmérséklete 40 °C-nak vehető. Ezért a 4 és 40 °C-hoz tartozó sebesség- és sűrűség-értékeket használtam. Az adatok és az eredmények a következő táblázatban találhatóak:

	Sebesség (m/s)		Sűrűség (kg/m ³)		Reflexiós együttható (%)
	4 °C	40 °C	4 °C	40°C	
Minimum	1421,04	1528,7	999,859	992,142	2,61
Maximum	1439,04	1545,2	1000,339	992,250	3,8
Legvalószínűbb	1430	1528,9	1000	992,207	2,95

5. táblázat. A várható reflexiós együtthatók és a kiszámításukhoz használt adatok

A sebesség maximális értéke 40 °C-nál Coppens (COPPENS 1981) adatsora alapján extrapolált, mert az eredeti táblázatban csak 35 °C-ig voltak értékek.

Az adatokat a különböző szerzők eltérő pontossággal adták meg, ezért a kezelhetőség kedvéért a táblázatban az értékeket ugyanannyi tizedesre kerekítettem.



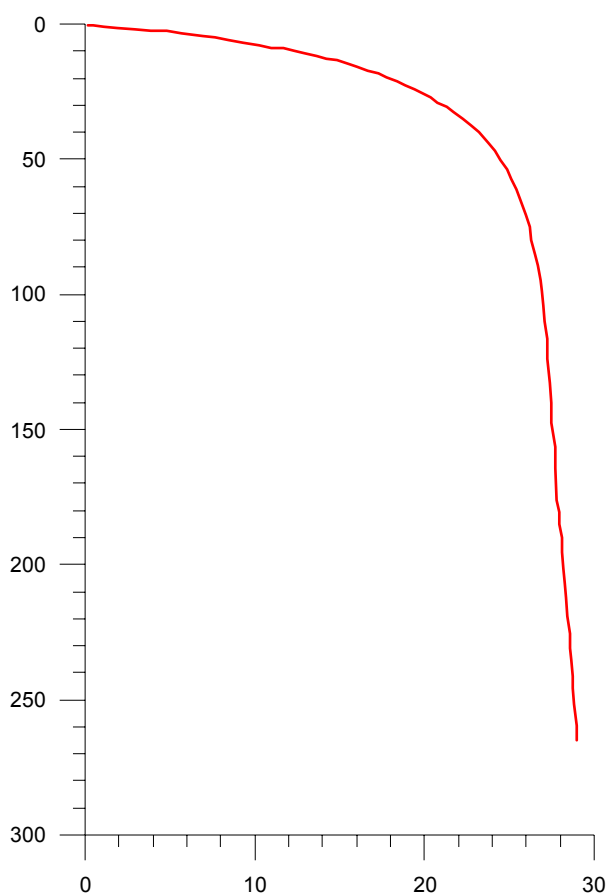
12. ábra. Meleg víz szonár képe (BELCHER 1999)

12. ábrán bemutatom egy kísérlet eredményét, melynek során egy orvosi ultrahanghoz hasonló katonai képalkotó eszközzel 1 MHz frekvencián felvételeket készítettek egy tartályban, miközben egy csövön át meleg vizet fecskendeztek bele (BELCHER 1999).

A reflexiók együtthatókat kiszámítottam a mérés szempontjából legrosszabb és legjobb esetre is. Az értékek a 3% közelében vannak, nagyságrendi eltérés nincs, ezért kijelenthetjük, hogy a 4 és 40 °C hőmérsékletű víz közötti fizikai kontraszt kimutatásához 3% alatti reflexiót kell tudni kimutatni, ami a geofizikai gyakorlatban nem szokatlan. Példaként a

5.4 A gáztartalom hatása a reflexiós együtthatóra

A szökevényforrások vize jelentős mennyiségű oldott gázt tartalmaz. Mivel a gáz sűrűsége több nagyságrenddel kisebb, mint a vízé, már kis gáztartalom hatása is jelentősen megváltoztatja az átlagsűrűséget és ezen keresztül a reflexiós együtthatót.



13. ábra. A víz CO₂-elnyelő képessége a nyomás függvényében
30 m/°C geotermikus lépcső esetén (JUHÁSZ 1987)

A gáztartalom hatásának számításához konkrét adatokra lenne szükség. A hévizek összetételét a vizsgált területhez közeli Gellért I. forráscsoport vegyelemzési adatai alapján ismerjük. A mérések szerint a gáztartalom elsődlegesen CO₂-ot jelent és 210-350 mg/l értékek között változik (SZALONTAI 1967). A víz nagyobb nyomáson nagyobb gázmennyiséget tud elnyelni, ezért amikor a hévizek felfelé mozognak, a ben-

nük oldott gázok jelentős része felszabadul és a felszínre áramlik, esetleg a felszín alatti üregekben becsapdázódik (pl. Molnár János-barlang CO₂-s terem). A dolgozat szempontjából az előbbi esetnek van jelentősége. A víz CO₂-elnyelő képessége Juhász szerint (JUHÁSZ 1987) a mélység függvényében 30 m/°C geotermikus lépcső esetén a 13. ábrán látható. Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a gázzal telített vízből fölfelé haladva nagy mennyiségű CO₂ szabadulhat fel. Már a szökevényforrások kutatásának kezdetén is megfigyelték, hogy a vízbeáramlási helyeken gázbuborékok is megjelennek, ez azt jelenti, hogy valamilyen, nem ismert mélységben a víz gázzal telített, és ennek a gázmennyiségnek egy része szabadul fel, máskülönben a buborékok jelenléte nem magyarázható meg.

A hévíz ugyan több km mélységből jön, de a felszabaduló gázmennyiség becsléséhez tételezzük fel, hogy 10 m mélységben éri el a telített állapotot, ami Juhász adatai szerint (JUHÁSZ 1987) 1270 mg/l. Innen csökken a meleg víz gáztartalma a felszínig vezető útja során a Gellért I. forráscsoportban mért értékre. Ebben az esetben nagyjából 1000 mg CO₂ szabadul fel minden egyes liter vízből, ez az átlagsűrűség figyelembevételével kb. 0,7 l gáz. Ez meglehetősen soknak tűnik. A számításokat 5 m vízmélységre megismételve a felszínen a következőket kapjuk:

Felszabaduló gáz (mg/l)	280	420
Átlagsűrűség (kg/m³)	720,4	580,6
Reflexiós együttható (%)	16	26

6. táblázat. Az átlagsűrűség és a reflexiós együttható változása a felszabaduló gáz hatására

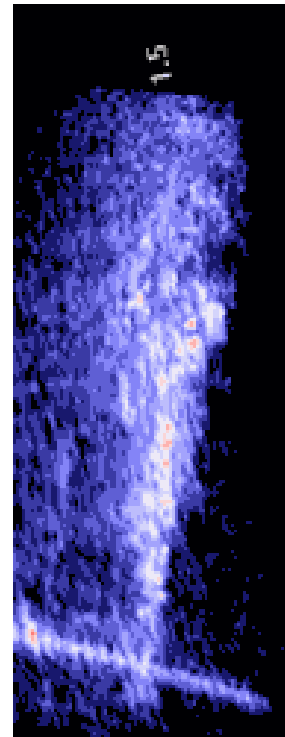
Mivel a CO₂ sűrűsége normál állapotban a víznek csupán kb. 1/700-ad része, így már kis mennyiségben is nagy hatása van az átlagsűrűségre. A fenti számítások szerint a gáztartalom megnövekedésének nagyságrendekkel nagyobb hatása van a sűrűségre és ezen keresztül a reflexiós együtthatóra, mint a hőmérsékletnek, ezért az eltérő gázmennyiséget tartalmazó víz beáramlása már önmagában is kimutatható lehet.

A táblázatban a reflexiós együttható számításánál csak a gáztartalomtól származó sűrűségcsökkenést vettem figyelembe, a gáz jelenlétéből adódó sebességváltozást és a hőmérsékletkülönbséget nem. Ha Wyllie képlete szerint a kétfázisú rendszerben a gáz okozta sebességcsökkenést is figyelembe vesszük (WYLLIE 1956), az átlagos reflexiós együttható értéke még jobban, akár 57%-ra is megnőhet.

A számítások szerint már a kismértékű gázkiválás is a hőmérséklet-különbség hatását meghaladó befolyással van a reflexiós együtthatóra és drasztikusan javítja a szökevényforrások kimutathatóságát.

A gáz átlagsűrűsége gyakorolt hatásán kívül másképpen is megjelenhet a szelvényeken. Az akár fél cm átmérőjű buborékok reflexiós együtthatója gyakorlatilag egy, azaz a teljes energiát visszaverik. Ezért a gázfelszabadulás diffrakciók sorozataként jelenik meg a szonárszelvényen.

Gázbuborékok fizikai modellezésének az eredménye látható a 14. ábrán. A méréshez orvosi ultrahanghoz hasonló katonai képalkotó berendezést használtak 1 MHz frekvencián (BELCHER 1999). Egy csövön át 1 mm-nél kisebb légbuborékokat fújtak a vízbe és erről készítettek felvételeket. A kapott erős reflexiók jól illusztrálják a gáz hatását.



14. ábra. Gázbuborékok szonár képe (BELCHER 1999)

6 Matematikai modellezés

6.1 A modellezés elve

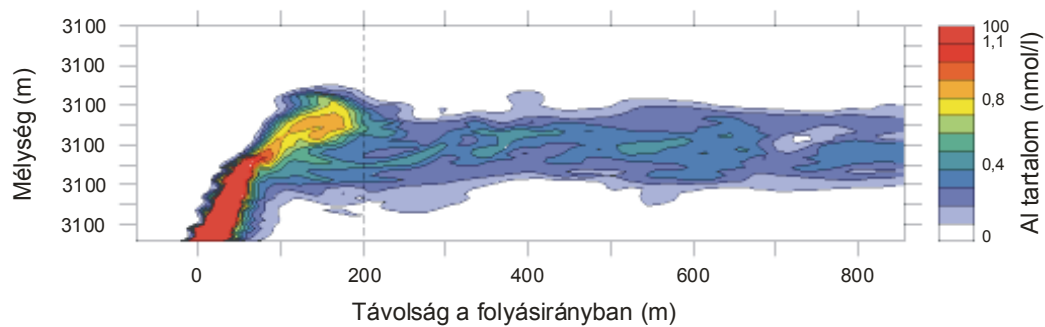
A szökevényforrások matematikai modellezésére az általában használatos geometriai optika nem használható, mert az ahhoz vezető közelítések nem alkalmazhatók. A réteghatárok nem síkok, reális modell esetén a fizikai paraméterek változása nem ugrásszerű (nincs klasszikus réteghatár). Ezért a számításoknál a diffrakciós összegzés (hyperbolic superposition, Kirchhoff-módszer) módszerét használtam (TROY 1970, YOUNG et al. 1984). Az eljárás alapelve az, hogy a vizsgált területet pontsorokra bontjuk fel. A modellben minden egyes pont mint önálló másodlagos hullámforrás működik, és az eredmény hullámkép ezen diffrakciók összegeként adódik. A módszer visszaadja a töréseknél, szakadásoknál megfigyelhető diffrakciókat, de az interferencia miatt, amint a 15. ábrán jól látható, megfelelő paraméterek esetén a felületről származó jelek „összeállnak”, alattuk a diffrakciók kioltják egymást. A modellbeli határfelületet piros szaggatott vonallal jelöltük.

Az ábra a rácsállandó (a felbontás finomsága) függvényében mutatja be a diffrakciós összegzést. 50 m-es rácsméret esetén minden egyes pontról különálló diffrakció jelenik meg. A felbontás növelésével a diffraktáló pontok száma nő, és 5 m-nél a felület pontjairól jövő diffrakciók már interferálnak egymással. Jól látható, hogy a reflektor alatt az interferencia destruktív. A rácsot tovább finomítva a kép kitisztul, a felület „összeáll” és a diffrakciók, ahogy az illik, csak a szakadási helyek környékén maradnak meg. A dőlt határfelület a szeizmogramon nem látható, a bemutatott példában alkalmazott algoritmus és lövési rendszer szerint onnan nem verődött vissza jel a vevő irányába.

6.2 A matematikai modellezés végrehajtása és paramétere

A számításoknál a vizsgált területet kis kiterjedésű négyzetekre osztottam, és mindegyik elemi cellát pontdiffraktornak tekintettem. Ilyen módon a szabálytalan alakú, elkent határu melegvíz-, „csóva” is leképezhetővé vált. Az eltérő sebességű celláknál nem csak a futásidőket, hanem a paraméter kontraszt és a beesési szög függvényében az amplitúdó viszonyokat is vizsgáltam. A szintetikus szeizmogram kiszámításánál az adó és a vevő közelítő iránykarakterisztikáját is figyelembe vettem, hogy az eredmény minél közelebb lehessen a valós mérésekhez.

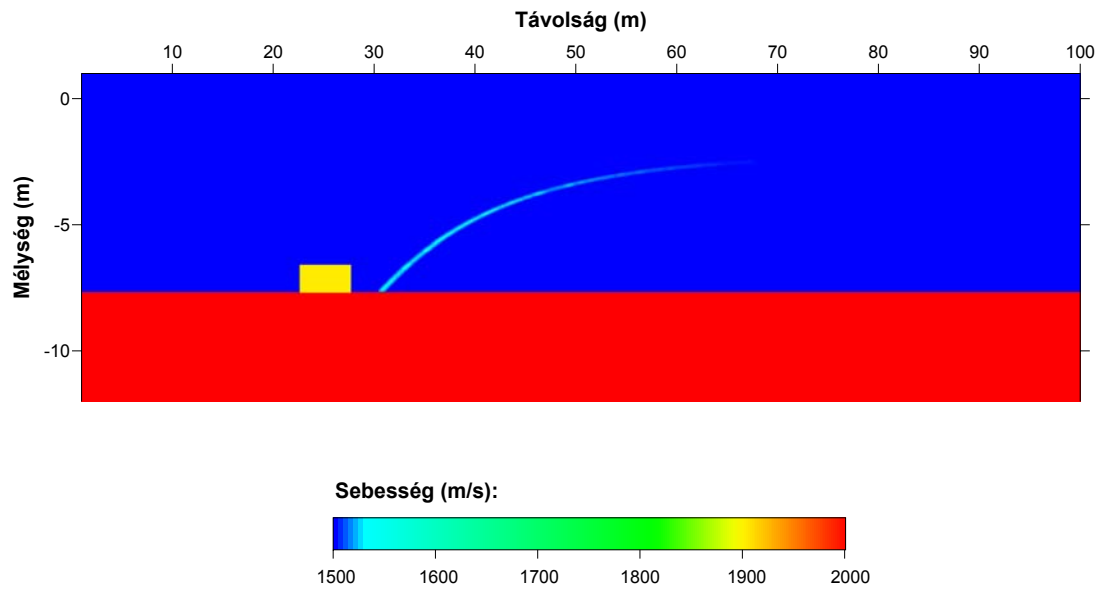
A modellezés mindig annyit ér, amilyen megbízhatóak a bemenő adatok. A megfelelő hőmérsékletekhez tartozó sebesség- és sűrűségadatokat az 5. fejezet alapján vettem fel. A két áramló közeg közötti keveredés kezelése nem képezi a dolgozat tárgyát, a jelenséget az áramlás irányában lineárisan csökkenő hőmérséklettel, függőleges irányban a sebességértékek simításával közelítettem. A szakirodalom nem volt túl bőséges a témában, de a találtak alapján a keveredés csak nagyobb távolságon (vagy idő alatt) megy végbe, tehát a forrás közvetlen közelében a kontraszt csökken ugyan, de fennmarad. Erre az eredményre jutottak a geokémiai transzport folyamatok modellezése során a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Vents Program kutatói is (LAVELLE, WETZLER 1999). Ők azt vizsgálták, hogy az áramló folyadékba befecskendezett alumínium tartalmú oldat koncentrációja hogyan változik a mélység és a távolság függvényében (16. ábra). A modellben az áramlás enyhén turbulens. A forrás közelében fennmarad egy nagy töménységű mag, és még nagy távolságoknál is észlelhető egy, az eredeti koncentráció néhány százalékát kitevő csóva.



16. ábra. Az Al koncentráció változása a távolság függvényében (LAVELLE, WETZLER 1999)

A szintetikus szeizmogramok számításához egyszerűsített modellt használtam, amelyben csak a sebességek szerepeltek. A hideg víz sebességét 1500 m/s-nak tekintettem és ehhez arányosítottam a meleg víz paramétereit. Az egyszerűsítés oka memória- és futásidő-megtakarítás volt. Ezekkel a módosításokkal várhatóan nem vittem a modellezés megbízhatóságát (pixelekre osztás) meghaladó hibát a rendszerbe. A számításoknál használt sebességmodell a 17. ábrán látható. A pixelméret vízszintesen és függőlegesen egyaránt 2 cm volt, ezért az eredmény szelvényen a diffrakciós hiperbolák jól összegződtek, nyilvánvaló mű jelenségek nem láthatók. A modellezésnél figyelembe vettem a dunai mérésnél használt szonár sugárzási karakterisztikáját is. A gömbi szóródást és a közegbeli csillapodást elhanyagoltam, ezek a jelenségek ugyanis esetünkben a műszer erősítésének növelésével kompenzálhatók.

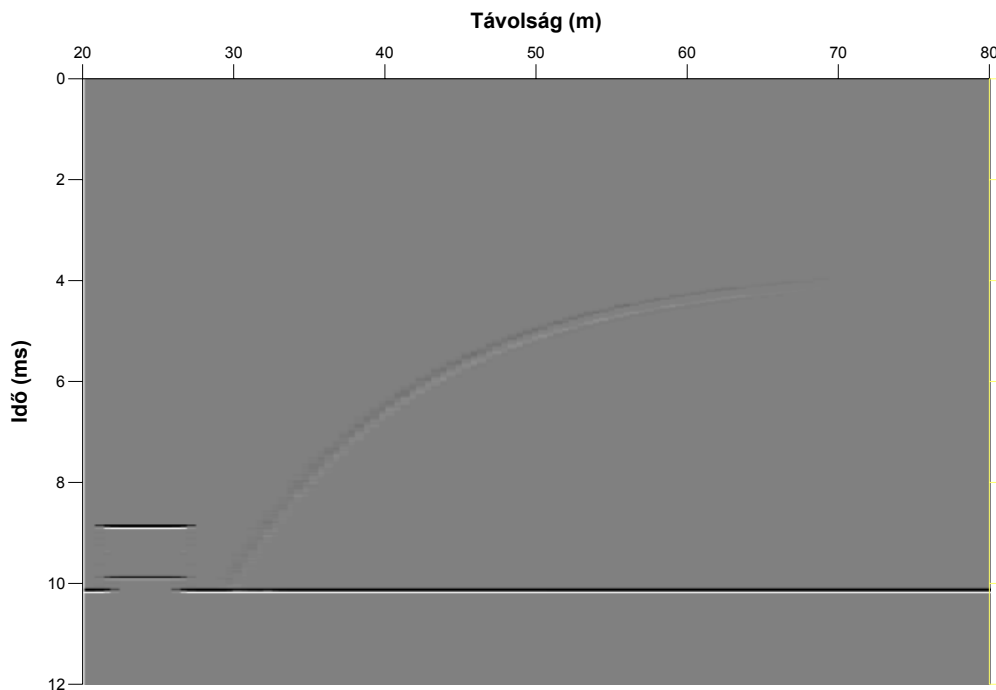
A modellben mindezek mellett elhelyeztem az aljzaton egy, a mederfenékénél kisebb, de a víznél nagyobb sebességű téglalapot is. Ezzel egyrészt az algoritmus ellenőrzése, másrészt az esetleges oldalhatások vizsgálata volt a célom.



17. ábra. A számításoknál használt egyszerűsített modell

6.3 A matematikai modellezés eredményei

A modellezés eredményeként kapott szintetikus szeizmogramot szürke árnyalatos megjelenítésben a 18. ábrán mutatom be. A fekete szín a nagy pozitív, míg a fehér a nagy negatív amplitúdókat jelöli. A szintetikus szeizmogramon a csatornák 0,5 m-re vannak egymástól. Jól látható, hogy a program megfelelően működik, a mederfenék feletti, víznél nagyobb sebességű kiemelkedés miatt a fenék kisebb időknél jelenik meg és a jel amplitúdója is lecsökkent. A szeizmogram a függőleges irányban a sebességmezőn alkalmazott 30 cm-es simítás ellenére a melegvíz-csóvát is jól leképezi, a fenékről jövő reflexió nagyságával összehasonlítva és a műszer dinamikáját figyelembe véve a meleg vízről származó jel egyértelműen kimutatható.

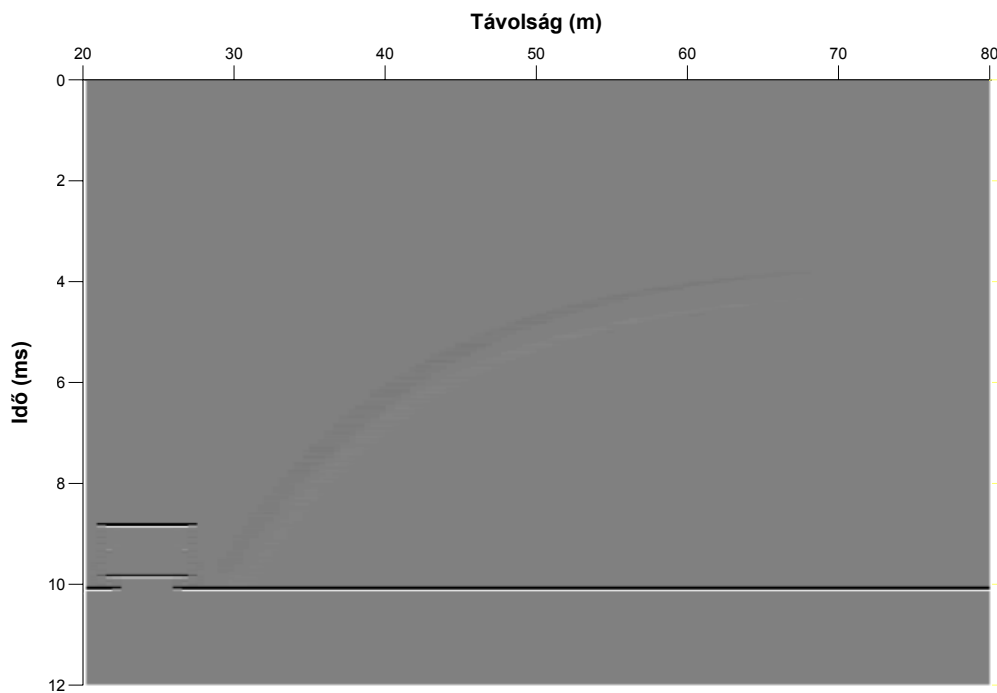


18. ábra. Szintetikus szeizmogram a csóvában $\pm 0,3$ m simítás esetén

Az erősítés szorzója állandó, értéke 20

A számításokat több különböző simítás figyelembevételével, de a többi paramétert változatlanul hagyva megismételtem. A ± 1 m-es simítással készített szelvény látható a 19. ábrán. A jel amplitúdója ugyan szemmel láthatólag lecsökkent, de ebben az

esetben is még kimutatható nagyságú reflexiót kaptam. A valóságban ilyen kis amplitúdójú jelek esetén a külső és a műszerzaj, valamint a vevő érzékenysége kritikus lehet. További vizsgálatokat végeztem a réteghatáron nem ugrásszerű paraméterváltozás hatásának tanulmányozására, ennek eredményei a következő (6.4) alfejezetben találhatóak.



19. ábra. Szintetikus szeizmogram a csóvában ± 1 m simítás esetén

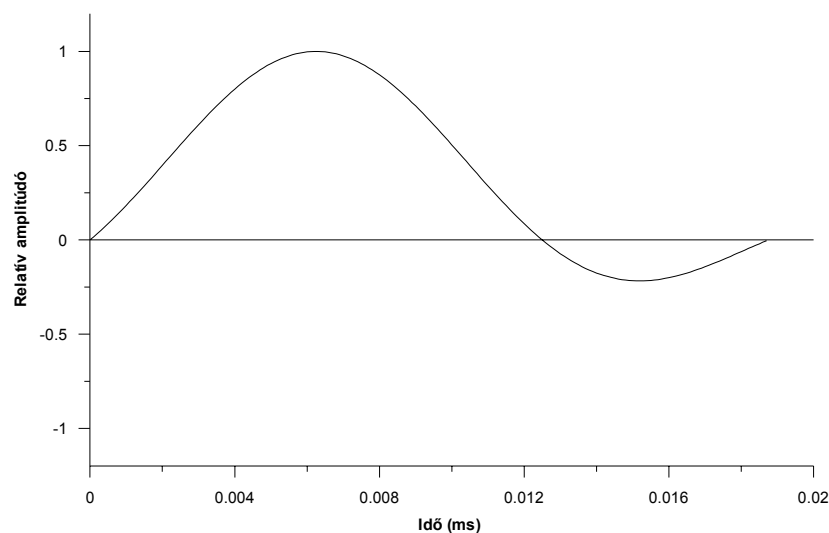
Az erősítés szorzója állandó, értéke 50

A fenékről kiemelkedő téglalap melletti csatornák jeleit megvizsgálva diffrakciót csak nyomokban találhatunk, ami az adó és a vevő szűk iránykarakterisztikájának köszönhető.

Az eredmények alapján kijelenthetjük, hogy a valóságoshoz közeli paraméterekkel végzett matematikai modellezés szerint, a keveredés kontraszt-csökkentő hatásának figyelembevételével, a meleg víz beáramlása a hőmérséklet-eltérésekből adódó sebességkülönbség alapján egyértelműen kimutatható.

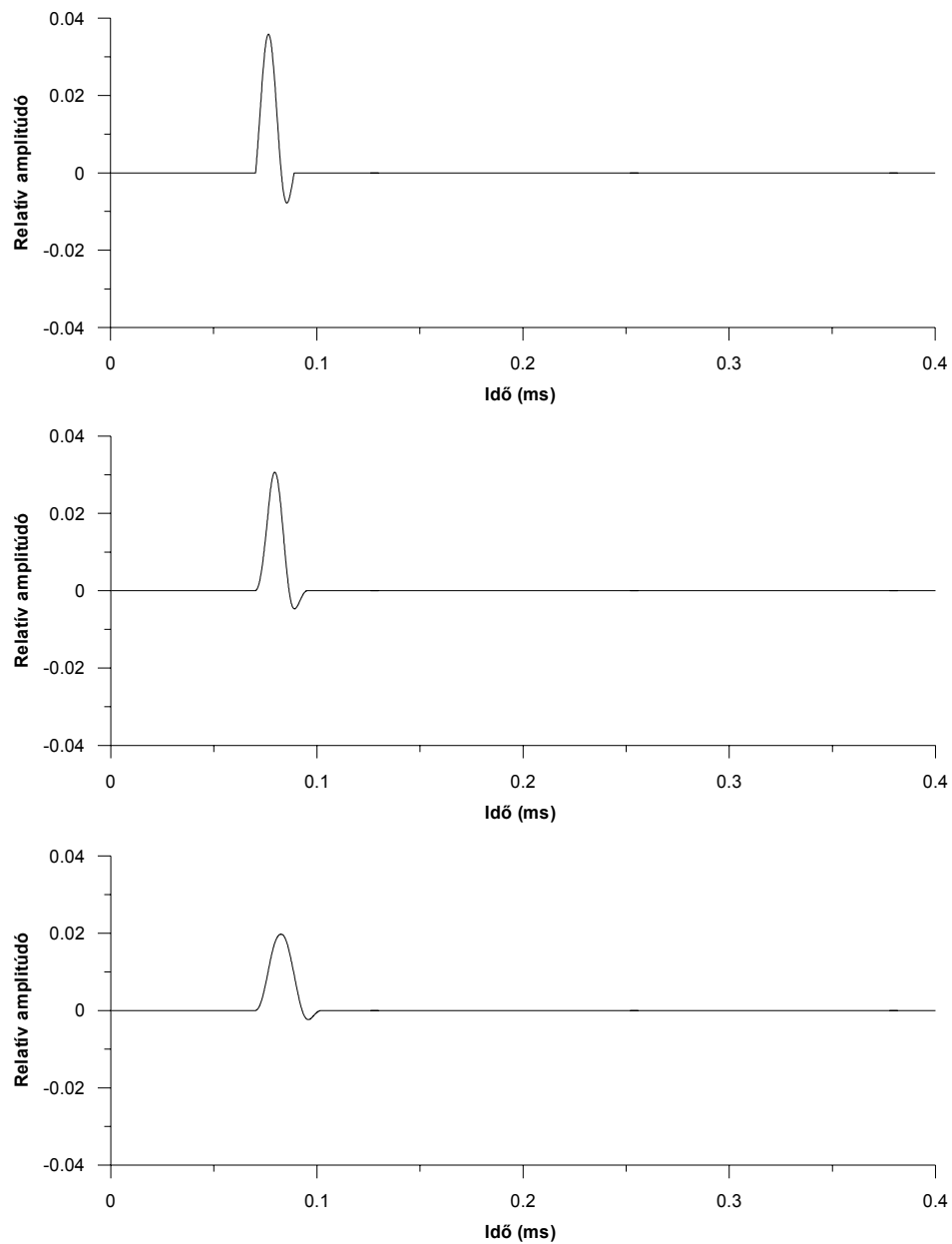
6.4 Az el kent réteghatár vizsgálata

A matematikai modellezés során vetődött fel az a kérdés, hogy ha a két víztömeg keveredését simítással szimuláljuk, akkor a simítás nagyságának függvényében hogyan alakul a jelalak. A probléma nem újkeletű, már a Geophysics 2., 1937-es évfolyamában Wolf (WOLF 1937) is felvetette a kérdést. A vizsgálat során a különböző mértékben el kent réteghatárnak a reflexió amplitúdójára gyakorolt hatását is számszerűsítettem. A számítások során a 20. ábrán látható 80 kHz-es elméleti jelalakot (wavelet) használtam, ami egy x irányban eltolt, egy periódusra csonkított sinc függvény, amely így a valódi szonárjelekhez hasonló frekvenciájú és minimum fázisú.



20. ábra. A számításoknál használt jelalak

A 4 °C és 40 °C hőmérsékletű vizek Coppens által megadott (COPPENS 1981) sebességértékeit használtam. Így az első közeg sebessége 1438, míg a másodiké 1545 m/s volt. A modellezésnél mélység irányban a lépésköz 1 mm volt, az időbeli mintavétel kb. két nagyságrenddel nagyobb volt, mint amit a frekvencia megkövetelt, így a digitalizálásból származó hiba minimális volt. A számítások során a két réteg közötti átmenet hosszát változtattam 0 és 500 mm között és ezekkel a paraméterekkel meghatároztam a reflektált jel várható alakját. A 21. ábrán felülről lefelé haladva a 0, 10,

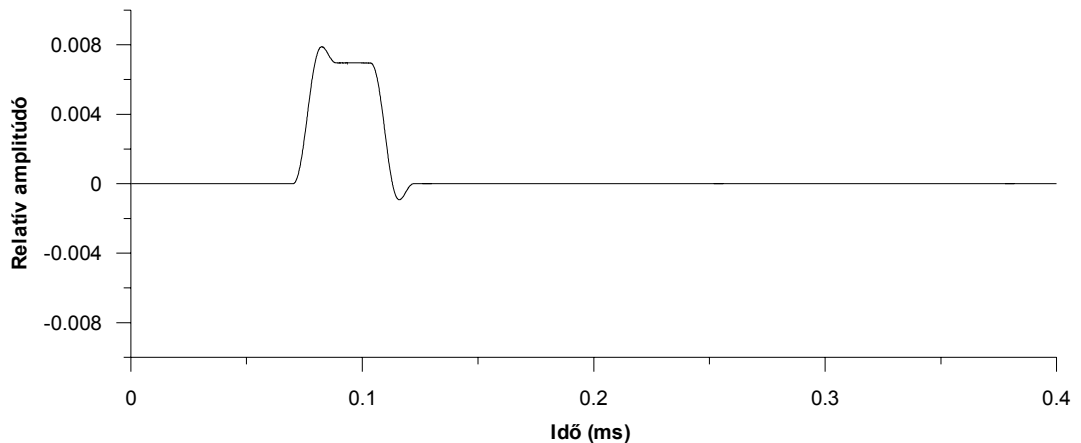


21. ábra. 0, 10 és 20 mm-es átmeneti zóna hatása a jelalakra

A felső hullámképen az átmeneti zóna 0 mm, a középsőn 10 mm, az alsón 20 mm

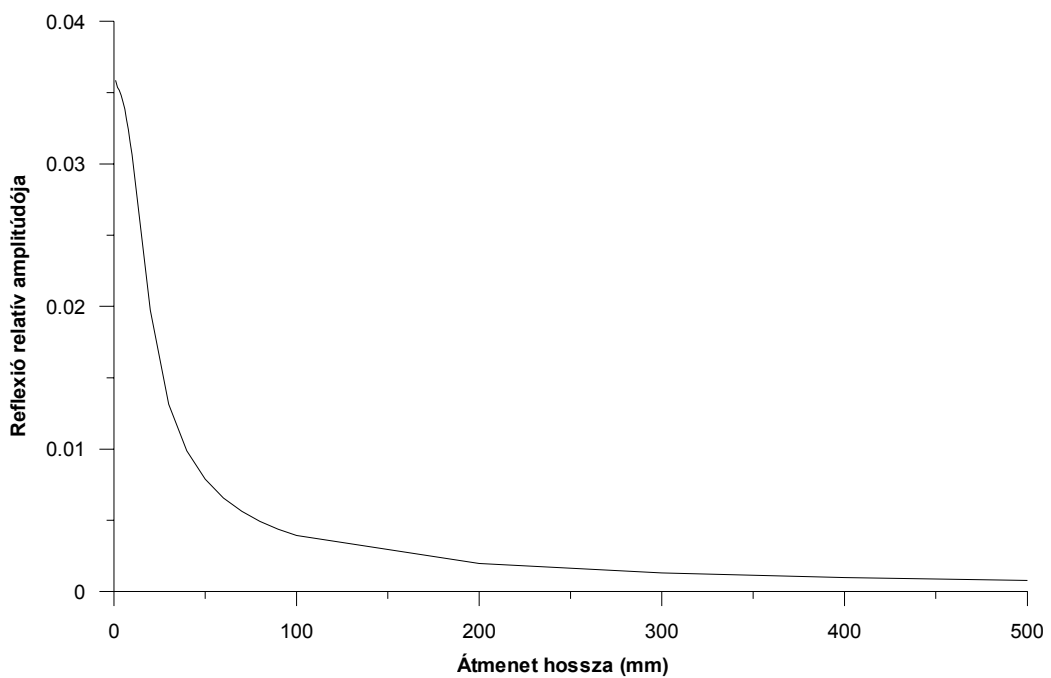
20 mm-es, a 22. ábrán az 50 mm-es átmenet hatása látható. Gyors változás esetén elsősorban a jel amplitúdója változik, nagyobb simításnál a jelalak is torzul.

Különböző vastagságú átmeneti zónák figyelembevételével kiszámítható a jelcsomag maximális amplitúdója a simítás függvényében. A 21. ábrán jól látható, hogy az átmenet hosszának növelésével az amplitúdó először gyorsan, majd egyre kisebb



22. ábra. 50 mm-es átmeneti zóna hatása a jelalakra

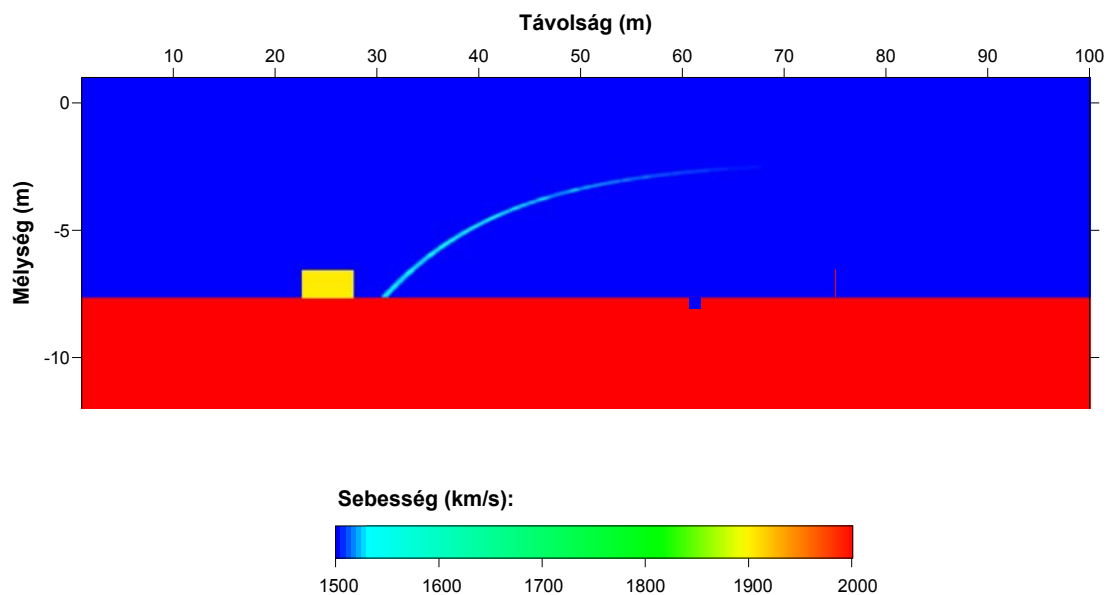
mértékben csökken. Az ugrásszerű réteghatárhoz képest az 500 mm-en elkent réteghatárról jövő reflexió amplitúdója 2,2%, tehát a víztömegek gyors keveredése, a vastag átmeneti réteg a szökevényforrások kimutathatóságát korlátozza. A számítások azt mutatják, hogy a beáramló meleg víz a kilépés helye közelében, kis keveredésnél mutatható ki, a csóvában a kimutathatóság rohamosan csökken. Ez a csökkenés a 23. ábra alapján számszerűsíthető.



23. ábra. A reflexió amplitúdója az átmeneti zóna vastagságának függvényében

6.5 Az iránykarakterisztika vizsgálata

Megvizsgáltam a mérőrendszer iránykarakterisztikájának a hatását is a szeizmogramra, valamint azt, hogy egy kis horizontális kiterjedésű objektum hogyan jelenik meg a felvételeken. Ehhez az előző, a 17. ábrán látható modellt módosítottam olyan módon, hogy a fenéken elhelyeztem még egy gödröt és egy kiálló póznát is. A gödörben víz van, az oszlop sebessége megegyezik a fenékével. A 24. ábrán az új modell látható.

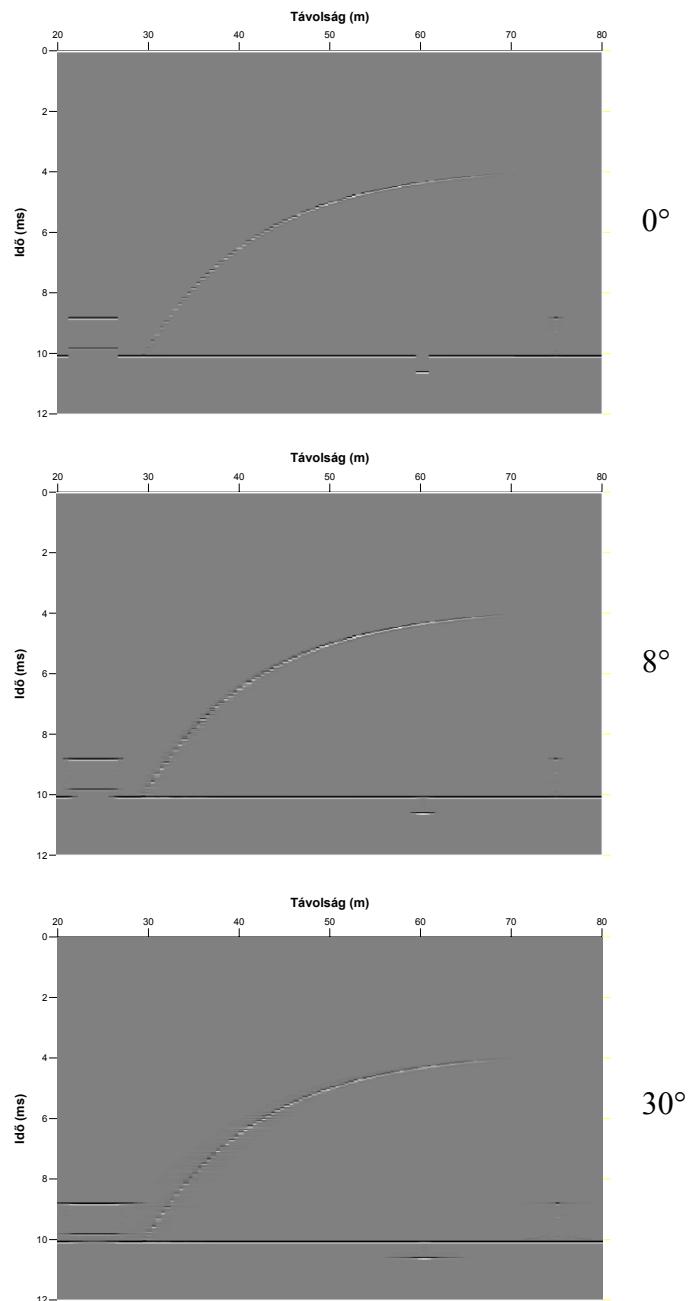


24. ábra. A módosított modell

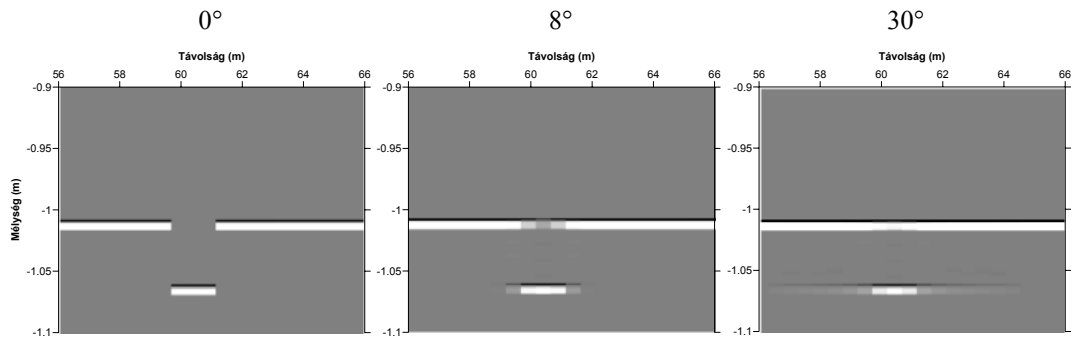
A számításokat három esetre végeztem el:

- A sugárzási kúp fél nyílásszöge 0° , az eszköz csak maga alá „lát”;
- A sugárzási kúp fél nyílásszöge 8° , megegyezik a Dunán használt szonáréval;
- A sugárzási kúp fél nyílásszöge 30° , megegyezik a Dunán használt boomer iránykarakterisztikájával.

Az eredmények a 25. ábrán láthatók. Jól megfigyelhető, hogy 0° -os sugárzási kúpnál gyakorlatilag visszakapjuk a kezdőmodellt, 30° esetén nagyon, 8° -nál kissé elkent a kép. Az is jól látszik, hogy kis sugárzási kúp esetén a csóva meredekebb része kisebb amplitúddal képeződik le.



25. ábra. Különböző iránykarakterisztikával számított szintetikus szeizmogramok



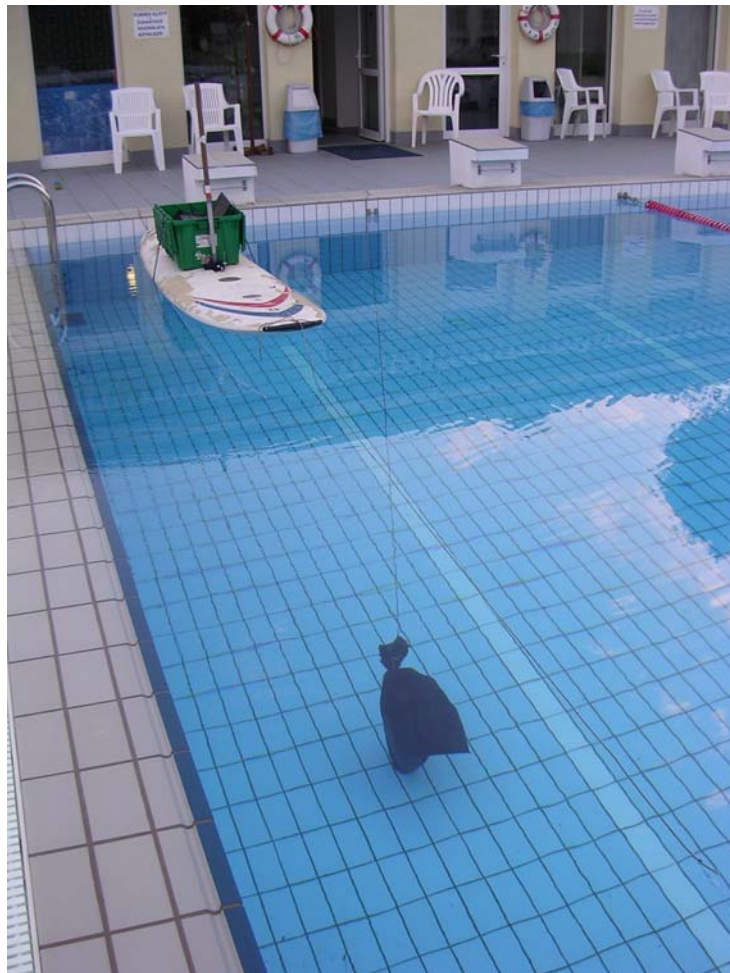
26. ábra. Az iránykarakterisztika hatása

Az iránykarakterisztika részletesebb vizsgálatára a 26. ábrán kinagyítva bemutatom a modell 60 m-e körül levő gödör hatását. 0° -os sugárzási kúp esetén a mélyedés közvetlen környéke is jól leképeződik, 8° -nál a lyuk alja megjelenik, a tetejét csak amplitúdó-csökkenés jelzi. 30° -nál a teteje nem látszik, az alja látszólag önálló réteggént jelentkezik. A gödör oldala — nagy meredeksége — miatt egyik esetben sem látszik.

7 Fizikai modellezés

7.1 A fizikai modellezés körülményei

A szökevényforrások kimutathatóságának igazolására fizikai modellezést is végeztem. Ennek során ugyanazokat az eszközöket használtam, mint a valódi mérésnél, így egyértelműen demonstrálhattam, hogy az adott felszereléssel a vízbeli hőmérséklet-különbségekről származó reflexiók közel reális körülmények között kimutathatók.



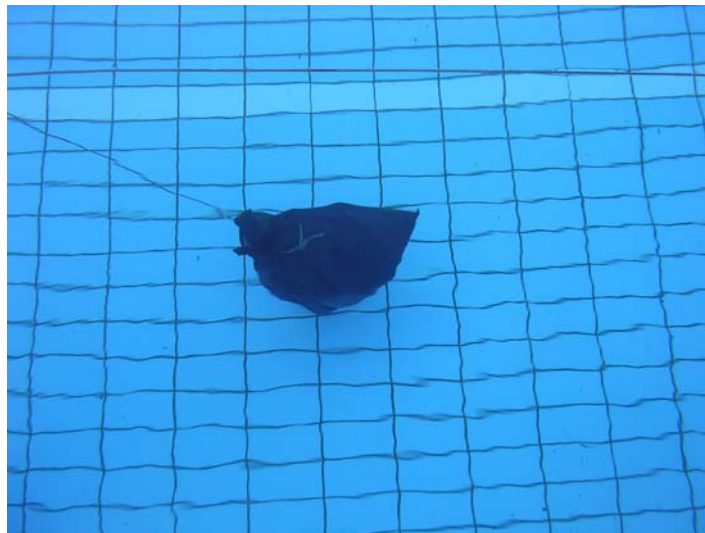
27. ábra. A mérőrendszer a szörfdeszkán és az „anomália” az előtérben



28. ábra. A fizikai modellezésnél használt mérőrendszer

A számítógép képernyőjén egy mért csatornán a medence fenekéről származó reflexió látható

A méréseket a VITUKI Szabadidősport Park medencéjében az üzemeltető Zubor Bt. segítségével végeztük el. A medencében lévő víz mélysége 1,5-1,6 m, hőmérséklete 27 °C volt. Ennél lényegesen melegebb vizet a helyszínen nem tudtunk előállítani,

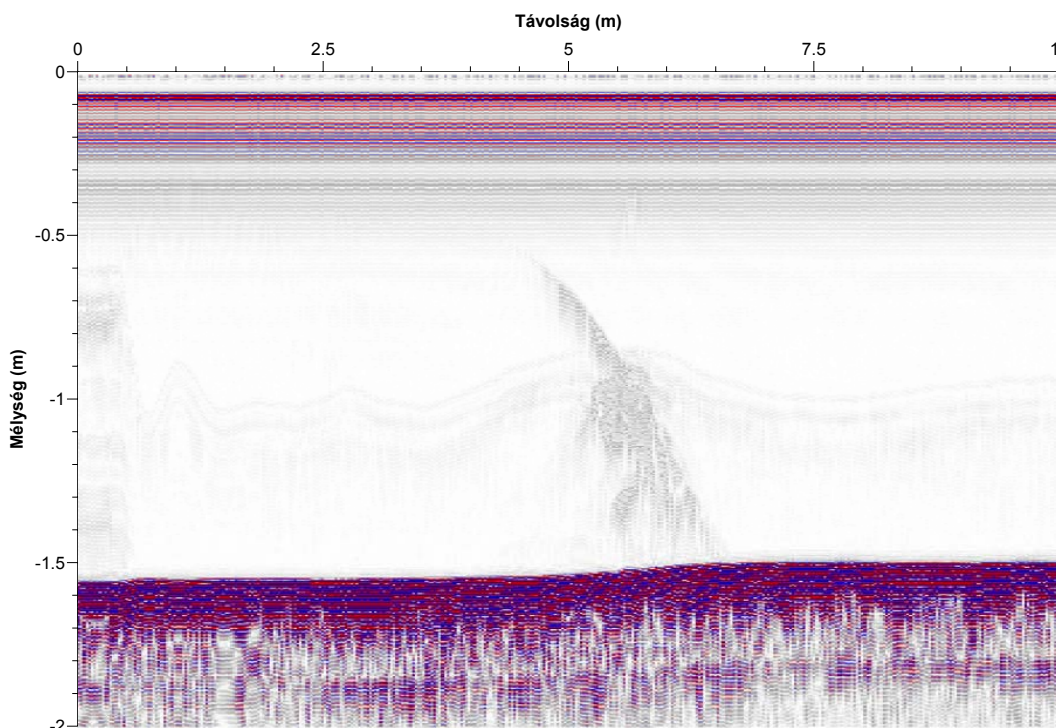


29. ábra. Csapvízzel töltött zacskó mint anomália a medencében

ezért a vízbeáramlást hideg, 22 °C-os csapvízzel szimuláltuk. A mérőrendszert egy szörfdeszkán helyeztük el, erre szereltük az adó-vevő párt is (27-28. ábra).

7.2 A fizikai modellezés eredményei

A műszer és a mérési elrendezés ellenőrzésére először mindenféle beavatkozás nélkül hossz-szelvényteket mértünk a medencében. Mivel a hideg vizet a mérés ideje alatt csak nylonzacskóban tudtuk a megfelelő helyen tartani (29. ábra), a második szelvény esetén a zacskót uszodavízzel töltöttük fel, annak vizsgálatára, hogy maga a zacskó befolyásolja-e a mérést. Egyesek szerint a Fresnel-zóna (BERKHOUT 1984, LINDSEY 1989) mérete alapján a vékony fólia nem lenne szabad, hogy megjelenjék a felvételen, mások ellenben (MUSKAT 1938, WIDESS 1973) kimutathatónak tartják, ezért ellenőrzésképpen szükségét éreztem ennek a mérésnek a végrehajtását is. A zacskó 5,5 m körül 90 cm mélységben jól látható jelet produkált (30. ábra).



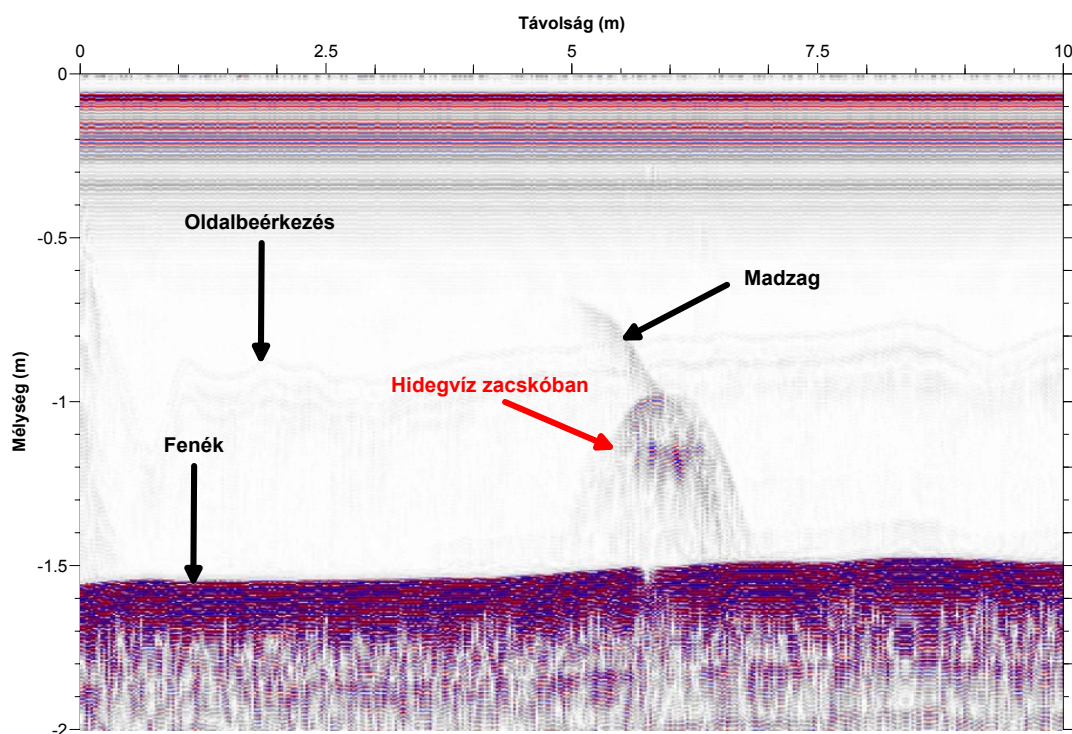
30. ábra. Uszodavízzel töltött zacskó szonár képe

A piros szín nagy pozitív, a kék nagy negatív, a fehér 0 amplitúdót jelent

Számításokat végeztem a „vékony réteg”-nek tekintett zacskóról származó jel vizsgálatára. A PVC fólia vastagságát 0,01 mm-nek, sebességét 2000 m/s-nak véve össze-

geztem a zacskó két oldaláról származó reflexiókat. A vizsgálatoknál a fólia hullámforráshoz közelebbi oldaláról származó reflexió erősségét egységnyinek vettem. A másik oldaláról származó visszaverődés ellentétes polaritású, és a réteghatáron elszenvedett visszaverődés miatt kisebb. A két jel eredőjének amplitúdója 0,16, tehát elég nagy ahhoz, hogy kimutatható legyen. Értéke 0,1 mm falvastagságot feltételezve is hasonló nagyságrendű, tehát a zacskónak valóban látszania kell..

A harmadik szelvényt a hideg vízzel feltöltött zacskó fölött mértük (31. ábra). A kimutathatóság szempontjából nem volt jelentősége annak, hogy hideg vízben meleget, vagy melegben hideget keresünk, a kontraszt ugyanakkora, csak a jel polaritása ellentétes.



31. ábra. Értelmezett szonár felvétel a csapvízzel töltött zacskó fölött

A piros szín nagy pozitív, a kék nagy negatív, a fehér 0 amplitúdót jelent

A 30. és a 31. ábrát összehasonlítva láthatjuk, hogy az uszodavíz esetén a jelek amplitúdója kisebb, mint a hideg víz esetében, a reflexiók a szürke tartományba esnek, míg a 31. ábrán a kék és a piros színek is megjelennek. Mindkét esetben meghatároz-

tam a mesterséges anomáliáról származó jel maximális értékét és összehasonlítottam őket. Az uszodavízzel töltött zacskóról származó reflexió amplitúdója a hideg vízének a 22%-a, tehát a hideg vízről és a fóliáról jövő reflexió szignifikánsan nagyobb.

Itt kell még megjegyezni, hogy az uszodavízzel végrehajtott kísérlet esetén lehetséges, hogy a hosszú éjszakai szünet alatt a medence vize sűrűsége szerint rétegződött, a hidegebb víz a medence aljára süllyedt, így ez, és a felszín közeléből megtöltött zacskó tartalma között is volt hőmérsékletkülönbség.

A bemutatott szonárszelvényeken semmilyen, az amplitúdót megváltoztató beavatkozás nem történt, csak az A/D konverter minimális DC szintjét távolítottuk el frekvencia szerinti szűréssel. A 31. ábrán bejelöltük a lényeges hullámbeérkezéseket is.

A fizikai modellezés során készült felvételeket megvizsgáltuk az oldalbeérkezések szempontjából is. Ilyen módon az egyes beérkezések arányait egyértelműen meghatározhattuk. A kevesebb, mint fél méter távolságban levő falról regisztrált oldalbeérkezés amplitúdója az 5°C hőmérsékletkülönbségű vízhez képest 5,7%, ezért a szelvény ebből a szempontból zavartalannak tekinthető.

Az elvégzett kísérletek során a sebesség- és sűrűségkülönbség sokkal kisebb mértékű volt, mint a dunai mérésnél, ahol a folyó 4 °C-os vizébe áramlik be a szökevényforrás várhatóan 40 °C meleg vize. A legvalószínűbb értékekkel számított reflexiós együttható 0,5%. A fizikai modellezés tanulsága szerint a dunai mérésnél használt frekvenciával és mérőrendszerrel ez a kis kontraszt is határozottan, jó jel/zaj viszony-nyal kimutatható.

8 Terepi mérések

8.1 Mérési eredmények

A terepi méréseket a szőkevényforrások kimutathatósága szempontjából különösen alkalmas időpontban végeztük. A Duna vízállása alacsony volt, ezért az átlagosnál intenzívebb melegvíz- és gázbeáramlásra számíthattunk, a folyó hőmérséklete 4 °C körül volt, ezért a várható akusztikusimpedancia-kontraszt az elméleti maximális érték közelében volt.

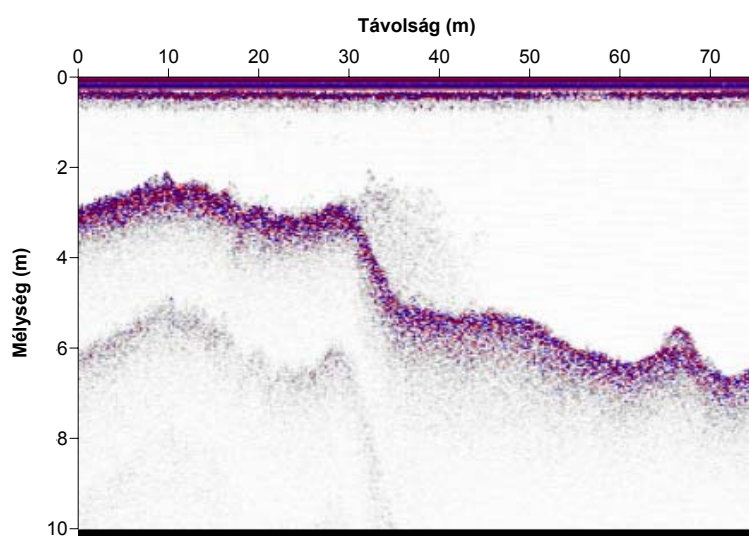


32. ábra. A szonár mérések helyszínrajza

A fehér vonalak a mérések nyomvonalát jelölik

A mérési hálózat a Szabadság híd D-i oldalán folyásirányban mintegy 400 m-t, míg keresztirányban a Duna motorcsónakkal hajózható teljes szélességét lefedte és mind hossz-, mind keresztirányú szelvényeket tartalmazott (32. ábra). A terület átlagos lefedettsége kb. 1 szonár csatorna/m² volt. Ez azonban nem teljesen egyenletesen oszlott meg, az érdekes, nagyobb változékonyságot mutató helyeken sűrűbb, míg a homogénebb képet mutató részekben ritkább volt. A szelvénytűréség elegendő volt a meder és a fölötte lévő víztömeg részletes leképezésére.

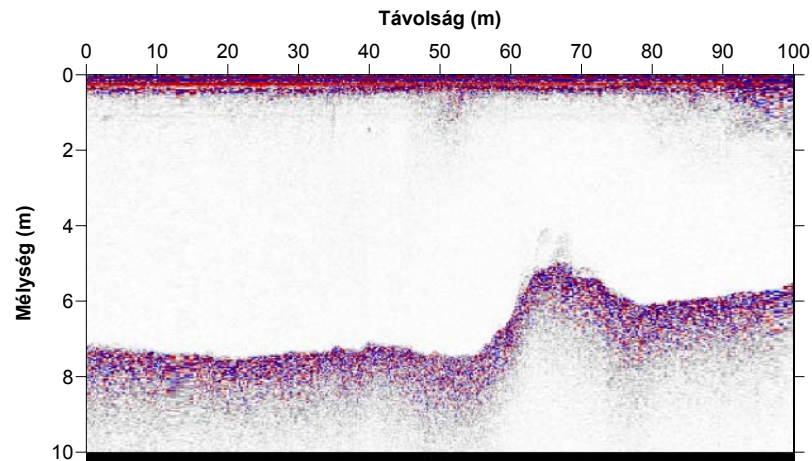
A méréshez 80 kHz-es irányított piezo adó-vevő párt használtunk. A kellően nagy, az ultrahang tartományba eső frekvencia biztosította, hogy a külső zaj (csónakmotor, forgalom a parton stb.) hatásával nem kellett számolni. A műszer erősítését úgy választottuk meg, hogy az elektronika kikerülhetetlen belső zaja kb. négy nagyságrenddel kisebb volt, mint a jelszint, így eltávolítása, ha egyáltalán szükség volt rá, digitális szűrők felhasználásával nem okozott gondot.



33. ábra. Melegvíz-beáramlás az Ínség-szikla mellett

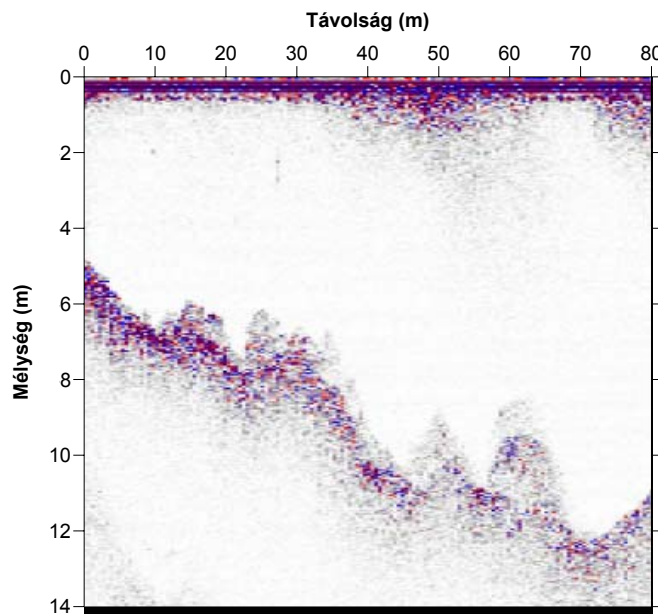
A 33. ábrán melegvíz-beáramlás nyomai láthatók az Ínség-szikla közelében. A meleg víz a kiálló szikla „árnyékában”, a szelvény 30-40. m-e között, egy hirtelen dőlésváltás, feltehetőleg vető mentén áramlik fel. Ez az a környék, a Gellért-hegy alatti Duna-szakasz, ahol már rég óta ismeretesek szökevényforrások. A szelvény közelében a

mérés során intenzív buborékolás volt megfigyelhető, ami megerősíti a beáramlás lehetőségét.



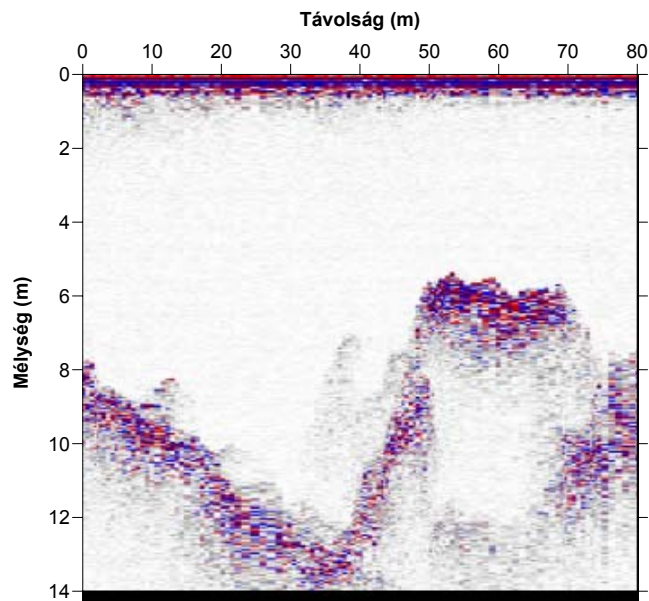
34. ábra. Kis szökevényforrások szonár képe

A 34. ábrán kis szökevényforrás látható a „domb” oldalánál és tetején. A jelenség egy kiemelkedéshez, valamilyen keményebb közethez kötött. A meleg víz kis magasságra jut fel, ezért vízhozama vélhetőleg szerény.



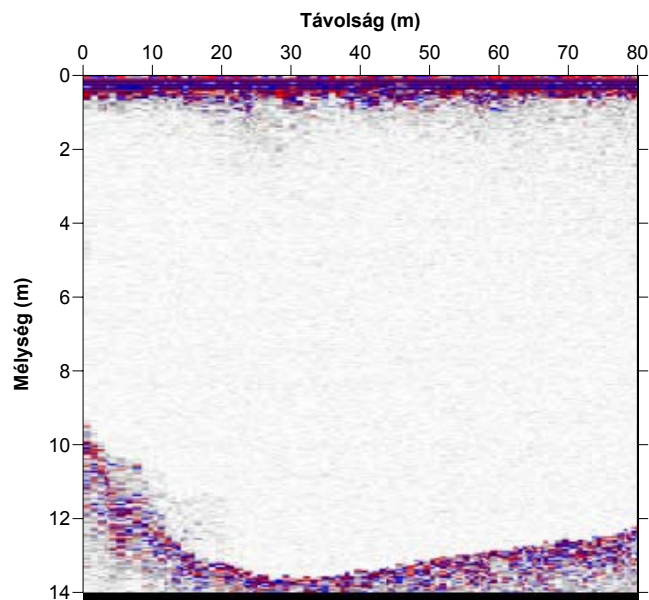
35. ábra. Szökevényforrás-sorozat

A 35. ábrán egy egész szökevényforrás-sorozatot mutatok be. Jól láthatóan mindegyik a fenék domborzatának változásához kötődik.



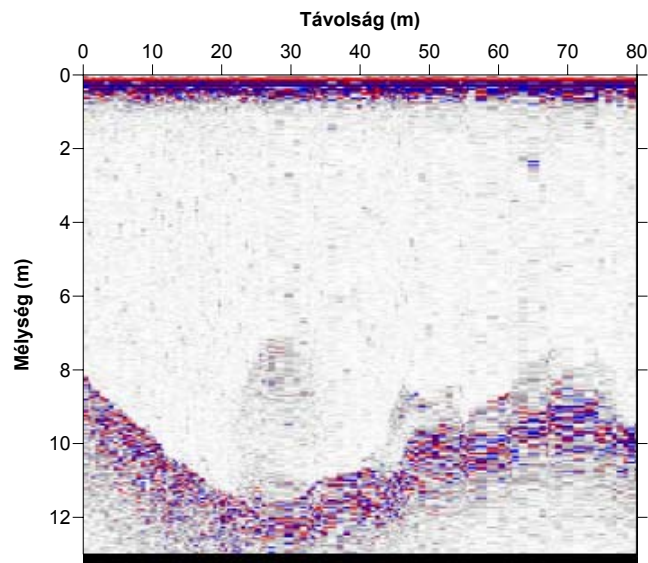
36. ábra. Nagy szökevényforrás

A 36. ábrán egy nagy szökevényforrást ábrázoló szelvényrészlet látható. A meleg víz 2,5-3 m magasra jut fel, így várható vízhozama jelentős.



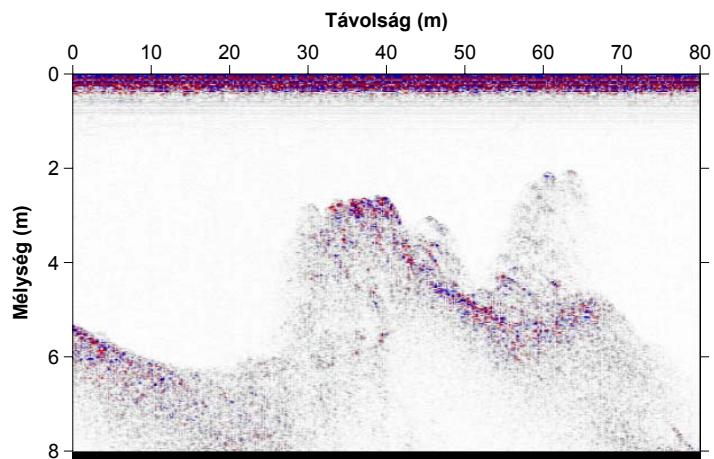
37. ábra. Szökevényforrás egy szikla „árnyékában”

A 37. ábrán kis vízhozamú forrás képe látható a fenékből kiemelkedő szikla „árnyékában”. Valószínűleg a domborzatnak köszönhető, hogy az áramlás ellenére fennmaradt a kimutatható paraméterkontraszt.



38. ábra. Mélyedéshez köthető szökevényforrások

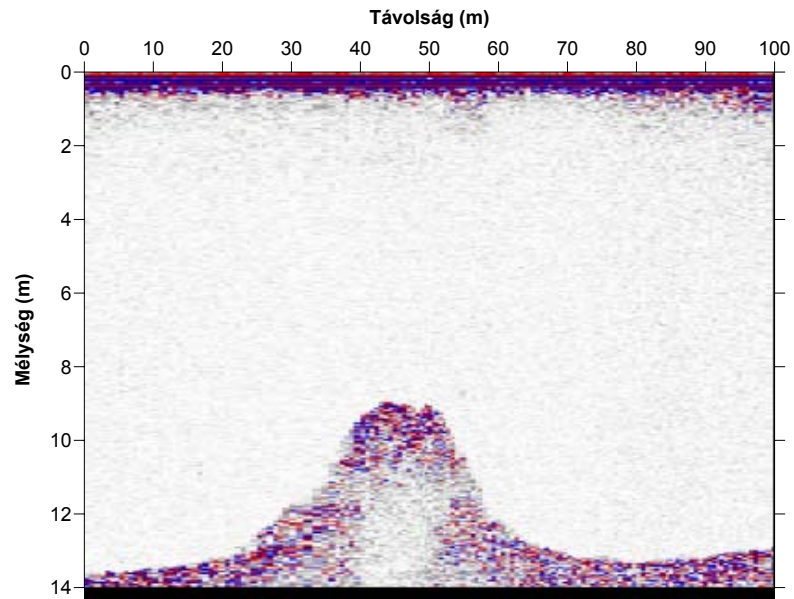
A 38. ábrán bemutatott jelenségek mindegyike a Duna fenékén levő mélyedéshez köthető, valószínűleg maga a szökevényforrás korlátozta az üledék lerakódását. A szelvény egy elázott csatlakozó miatt sajnos zajos.



39. ábra. Szökevényforrás

A 39. ábrán egy szökevényforrás látható a szonárszelvény 55-65. m-e között. A képet nézve egy szél fújta szökőkút jut az eszembe, a felszálló vízoszlop a Duna sodrásának hatására, ahogy az várható, egyre jobban elhajlik. A forrás helye is jellemző, ott tör fel, ahol a repedezett kőzetet nem, vagy csak alig borítja üledék. Az is általános, hogy ezeken a helyeken a fenék domborzata is megváltozik, ami megerősíti a jelenség földtani eredetét.

Annak bizonyítására, hogy az előző ábrákon látható jelenségek nem a fenék domborzatának változásairól származnak, a 40. ábrán egy mederfenékből kiemelkedő sziklát mutatok be. Jól látható, hogy sehol sincsenek a szökevényforrásokra hasonlító beérkezések.

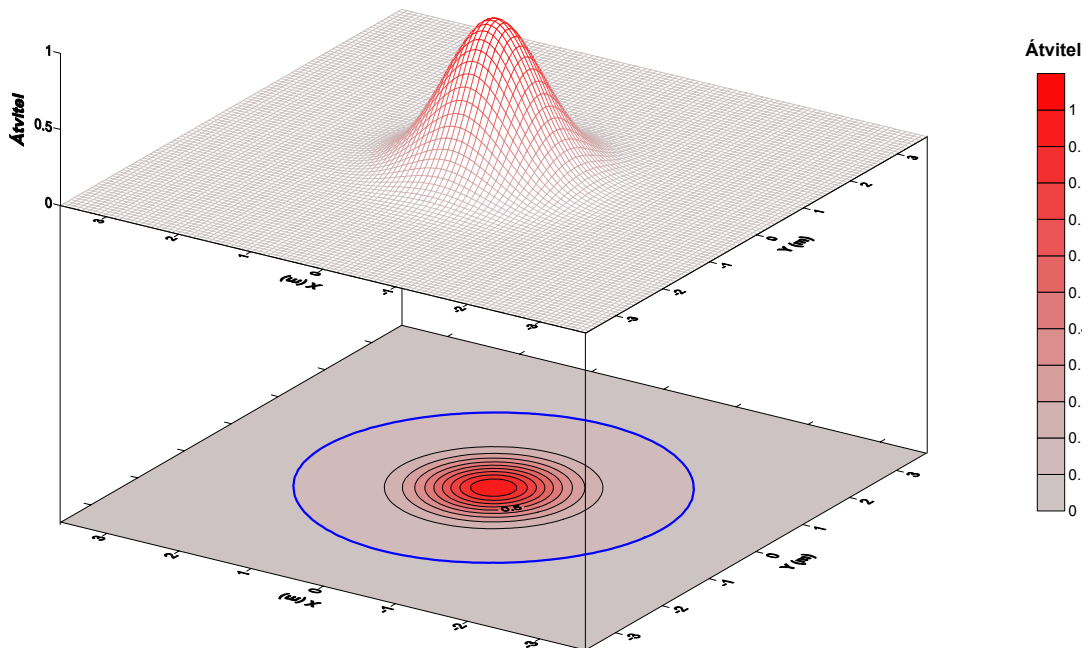


40. ábra. Szikla szonár képe

8.2 Más értelmezési lehetőségek

8.2.1 Oldalbeérkezések

A szonárméréseknél használt adó és vevő sugárzási kúpjának fél nyílásszöge 8° volt, ez az érték, a szokásoknak megfelelően, a -3 dB-es pontra vonatkozik. Az egyes szögekhez tartozó sugárzási és vételi karakterisztika figyelembevételével és 5 m mélységet feltételezve kiszámítottam az elméleti amplitúdóeloszlást a szonár helyének a fenékre eső függőleges vetületéhez viszonyítva, amit a szakirodalomban a szonár iránykarakterisztikájának (footprint) neveznek. Ez a 41. ábrán látható. Kék körrel jelöltem azt az amplitúdót — amely, ha a maximális amplitúdó teljesen kitölti a műszer dinamikáját — már a legelső bitre sincs hatással. Ez 5 m mélységben körülbelül 2 m, tehát a 2 m-nél távolabb lévő tárgyaknak semmilyen hatásuk sincs a szeizmogramra, vagyis az elképzelhető legrosszabb esetben is csak a 2 m-nél közelebb levő objektumokról származhat oldalbeérkezés. Ez vonalirányban maximum 4-5 csatorna.

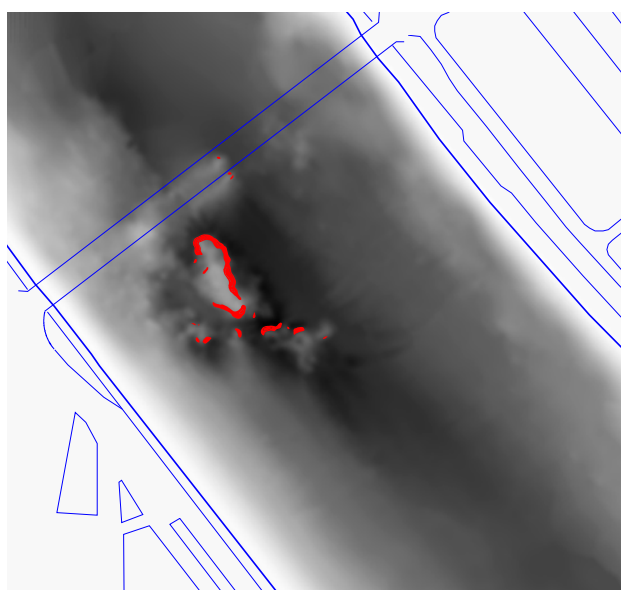


41. ábra. A szonár iránykarakterisztikája

A kék körön kívülről jövő beérkezés nem fér bele a műszer dinamikájába

Mivel a parttól távolabb a fenékről jövő beérkezések nem töltik ki a műszer teljes dinamikáját és a reflexiók együttható sem 1, így a valóságban az oldalhatás a számítottnál lényegesen kisebb távolságról lenne észlelhető.

A számítások eredményét megerősíti, hogy a hídpillér közvetlen közelében elhaladva, valamint a Szabadság hídtól É-ra levő hajóroncsról sem kaptunk oldalbeérkezést.



42. ábra. A fenék (TÓTH et al. 2001) és gradiense

Világos színek jelölik a kisebb, sötétek a nagyobb mélységeket, a piros foltok a 30°-nál nagyobb meredekséget jelentik

Mindezeket összefoglalva kijelenthetem, hogy a használt eszközökkel az oldalbeérkezések előfordulásának esélye elhanyagolható. Ennek ellenére mind a saját mérési eredményeink (PRÓNAY, TÖRÖS 2001), mind pedig a GEOMEGA (TÓTH et al. 2001) mederfenék domborzati térképének felhasználásával kiszámítottam a fenék gradienst (42. ábra) és összehasonlítottam az általunk értelmezett jelenségek helyével. Oldalbeérkezések a nagy gradienssel jellemezhető (tehát meredek) felületekről származhatnak. A szelvényeken talált összes (nem független, mert több szelvényen is szerepelhet ugyanaz) szökevényforrásként értelmezett beérkezés 1,6%-a van a nagy gradiensű terület 4 m-es környezetében, tehát 10 m-es vízmélységig ezt az értelmezési lehetőséget nyugodt lelkiismerettel elvethetjük.

8.2.2 Egyéb objektumok a fenéken

A következőkben összefoglalom, hogy milyen egyéb természetes és mesterséges objektumok tudnak a szökevényforrásokhoz hasonló jeleket előidézni a szelvényeken. Közös bennük, hogy a magasságukhoz képest kis szelvény irányú kiterjedésük van, különben más jellegű szonárképet kapnánk róluk.

Roncsok: a közelben mind hajó- mind hídroncsok ismeretesek. Ezek közül a nagyobb darabok helye ismert. Kisebb hídroncsdarabok is lehetnek a Dunában, de ezek jellemzően elfekszenek a fenéken, így nem adnak a környezetükből akár méterekkel kiemelkedő reflektorokat.

Sziklák: ezek közül a kisebbek jöhetnek szóba, elsősorban a túszerűek. A tetejükről származó diffrakciók hasonló képet eredményezhetnek a szelvényeken, mint a szökevényforrások. Ha elfogadnánk ezt a hipotézist, akkor a fenéknek helyenként egy fakír ágyára kellene hasonlítania, de ilyen sziklatúket nem ismerünk a Duna medrében, ha esetleg léteztek is, a folyó lekoptatta, eltakarította volna őket. Sziklatúket a közeli Gellért-hegyen sem ismerünk, ezért nem valószínű, hogy hasonló földtani körülmények között a mederben ilyenek keletkeztek volna.

Cölöpök: a mederben lehetnek a híd építése vagy újjáépítése során levert cölöpök, esetleg a történelmi időkben létezett, fából készült híd visszamaradt alkatrészei. A különböző okból levert cölöpök feltételezhetőleg rendszert alkottak, így az értelmezési térképen szabályos geometriai mintázatot kellene adniuk. Ilyen mintázatot nem találtunk.

Hulladék: a tágan értelmezett szemét kategóriába soroltam minden, eddig fel nem sorolt nem természetes eredetű tárgyat. Ilyenek lehetnek például a partról vagy a hídról származó megmunkált kövek, a sziklákon fennakadt elsüllyedt fák, vagy a szikláknál elvesztett horgonyok. A partvonal vagy a híd építése során a vízbe esett kövek a part és a híd közelében kell, hogy koncentrálódjanak. Az általunk értelmezett jelen-

ségekre ez nem jellemző. Ráadásul ezek a kövek természetfilozófiai okokból nem állhatnak a rövidebb oldalukon, így a magasságukhoz képest kis kiterjedés feltétel nem teljesülhet. Az egyéb elvesztett objektumok, mint a horgony, vagy az elsüllyedt fák egyedi esetek, a vizsgált területen nagyobb számban nem valószínűsíthetők.

A kérdéses Duna-szakaszt más módszerrel is — nagyfrekvenciás sidescan sonárral — részletesen felmértük. A felvételek a fényképekhez hasonló minőségű képet adtak a fenéken levő objektumokról. Ennek alapján a fenék domborzata és a fenéken levő tárgyak jól ismertek. Ezek az eredmények jelentősen csökkentik a félreértelmezés lehetőségét.

Elképzelhető, hogy a szökevényforrásnak értelmezett jelenségek között akad néhány más okkal magyarázható, ezek elsősorban az elkülönült reflexiók lehetnek, de ahol a jelenségek nagy számban, koncentráltan fordulnak elő, kicsi a tévedés esélye.

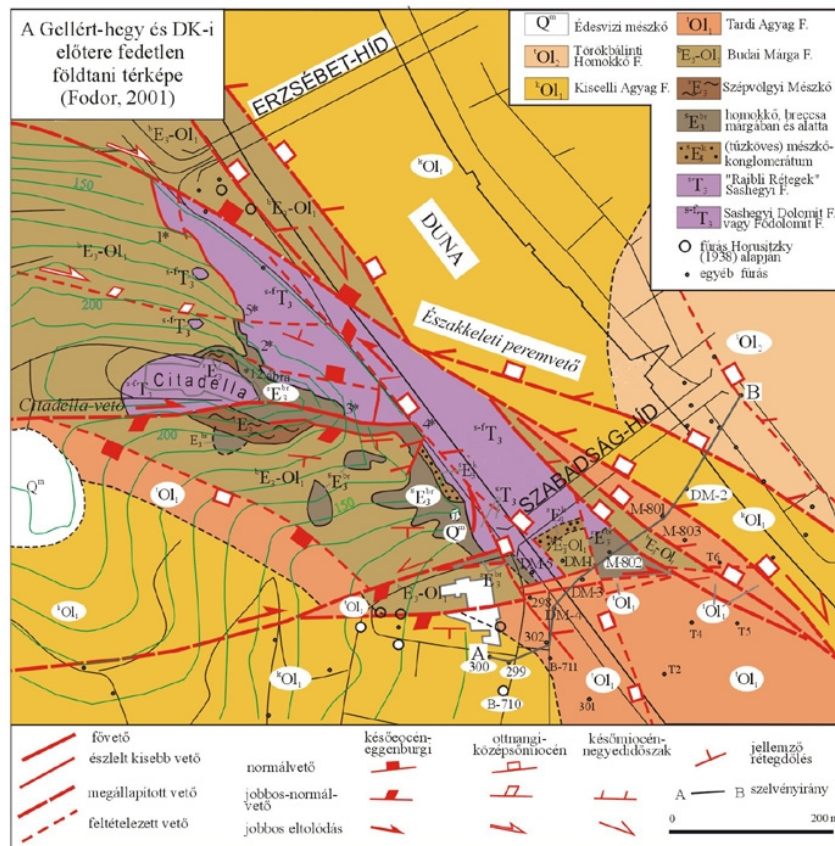
9 Közvetett bizonyítékok a szökevényforrások létezésére

Ahhoz, hogy a vizsgált területen a Dunában szökevényforrás lehessen, két alapvető feltételnek kell teljesülnie:

1. A felszín közelében lévő kemény, repedezett kőzet;
2. Meleg, vagy nagy gáztartalmú víz jelenléte a kőzetben.

9.1 A kőzetanyag

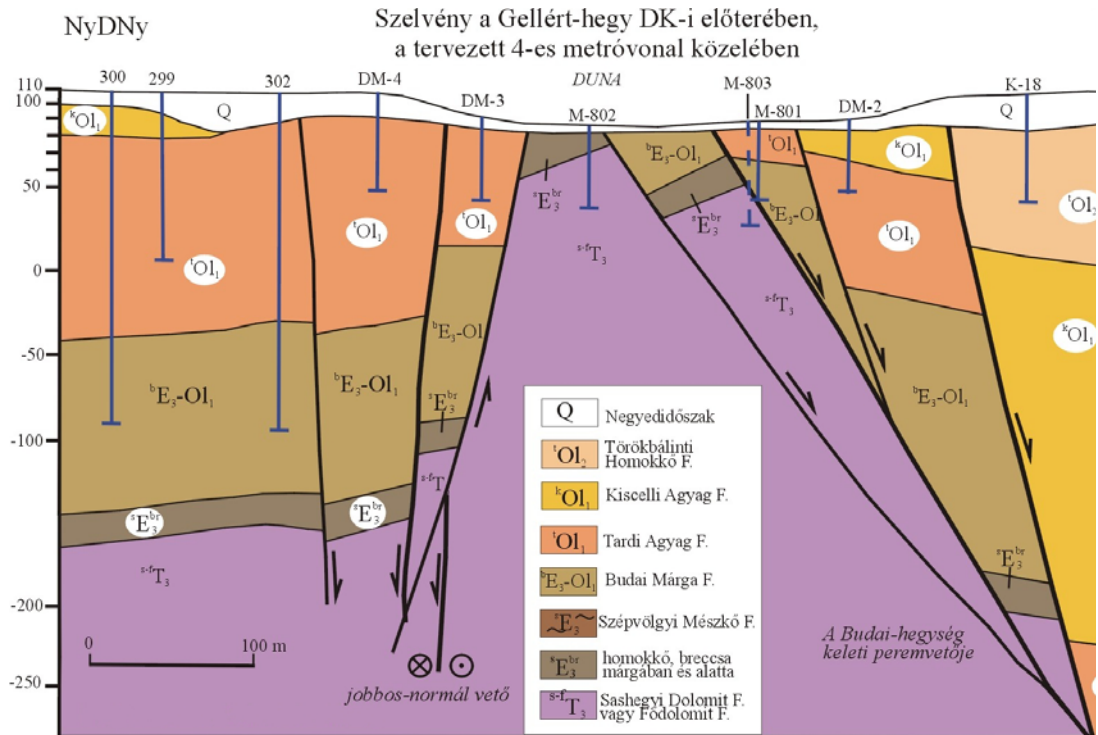
A 43. ábrán a Gellért-hegy környékének fedetlen földtani térképe látható (FODOR 2001), amely tartalmazza a vizsgált területet is. Ennek alapján közelítő képet kapha-



43. ábra. A Gellért-hegy környékének fedetlen földtani térképe (FODOR 2001)

tunk a Duna alatt található kőzetanyagról és a fő szerkezeti irányokról. Jól látható, hogy a dolomit a Szabadság hídtól ÉNy felé nyúlik el, ennek a Duna fenekét alkotó része az ún. Ínség-szikla.

Az egyes formációk mélységbeli elhelyezkedését és a rétegsort a fúrások alapján



44. ábra. Földtani szelvény a Szabadság hídtól délre (KORPÁS 2002)

szerkesztett szelvény alapján a 44. ábra mutatja (KORPÁS et al. 2002).

Az ELGI 1999-es vízi szeizmikus mérései (PRÓNAY 1999) egyértelműen kimutatták, hogy a vizsgált területen a Duna-beli zátonyok egy sasbérc részei és ez a környezetéhez képest kiemelkedett kőzettömeg nagy szeizmikus sebességgel jellemezhető, tehát „kemény” anyag. A szeizmikus módszer a kőzetanyagot közvetlenül nem tudja meghatározni, de azt tudjuk, hogy a korabeli leírások alapján a Szabadság, — akkor Ferencz József — híd budai pillérét dolomitra építették. Az M-802 fúrás is az említett sasbércen mélyült, amely néhány méter kavics és bázistörmelék alatt dolomitot harántolt (RAINCSÁKNÉ 2000, HORVÁTH et al. 2001), így feltételezhetjük, hogy az egész szerkezet anyaga nagyrészt dolomit.

A geológiai vizsgálatok szerint (KORPÁS et al. 2002) a Gellért-hegyet alkotó képződmények közül a felső triász Sashegyi Dolomitban, a felső eocén báziskonglomerátumban-lepelbreccsában és Szépvölgyi Mészköben, a felső eocén–alsó oligocén Budai Márgában és a pleisztocén édesvízi mészkőben barlangok és üregek találhatóak. A vonalvezetés (4-es metró) legkényesebb szakasza a triász/felső eocén határképződmények több méteres morfológiai tagoltságát is elérő zónája, amelyik kitüntetett karsztfelület. Következésképpen ezen a határon, továbbá alatta és felette olyan, üledékekkel kitöltött vagy vízzel teli és eddig felderítetlen üregek fordulhatnak elő, amelyek méretei:

- a Sashegyi Dolomit esetében a 6 m-es hosszúságot, a 2 m-es szélességet és a 3,5 m-es magasságot,
- a báziskonglomerátum és lepelbreccsa esetében pedig a 12 m-es hosszúságot, a 11 m-es szélességet és a 13 m-es magasságot is elérhetik.
- A Budai Márgában elsősorban hasadék (forrás) barlangok fordulhatnak elő, és ezek a formáció báziszintjeiben várhatók. Hosszuk az ismert analógiák alapján 27 m, szélességük 2,25 m, míg magasságuk 6,5 m is lehet.
- Ami a tektonikus kontaktusokat illeti, a Sashegyi Dolomitot, a báziskonglomerátumot és lepelbreccsát, valamint a Budai Márgát egymástól vagy bármelyiküket a Tardi Agyagtól elválasztó nyitott törések meredek, legalább hatvan fokos dőlésűek, s szélességük a felszíni, valamint fúrési adatok alapján elérheti a 2 m-t. E törések közül különösen fontos a metró tervezett nyomvonalát metsző ÉNy–DK irányú, legalább három vonalból álló vetőnyaláb, amely a sasbércet K felől határolja le.

Az eddigieket összefoglalva megállapíthatjuk, hogy mindegy, hogy a sasbércet dolomit, breccsa, Szépvölgyi Mészkö vagy Budai Márga alkotja, mindegyik erősen tektonizált, és nemcsak repedések, hanem nagyméretű üregek, barlangok is előfordulhatnak bennük, tehát potenciális vízvezető képességük nagy.

9.2 A meleg víz jelenléte

Régóta ismert, hogy a Gellért-hegy környékén hévizek vannak és a környéken szökevényforrások is működnek. Most nézzük, hogy a parttól távolabb milyen egyéb adataink vannak meleg víz jelenlétére a Duna-beli mederfúrásokban (HORVÁTH et al. 2001):

- DM-2: a fúrásban a makroszkópos kőzetleírás alapján több erősen tektonizált szakaszt harántoltak. Ennek ellenére a furat a meleg víz szempontjából meddőnek bizonyult, azonban a közet hőmérséklet 50 m-es mélységben (39,75 mBf szinten) mért 27 °C-os értéke a hévíztároló kőzet közelségére utal.
- DM-3: a fúrás meleg vizet nem talált, de a hőmérséklet a szelvény talpán 39 °C volt, ami a hévíz közelségére utal.
- DM-4: a tektonikai zónákban a kőzetanyag morzsolódott állapotú volt, amelyekből 26 °C hőmérsékletű, kis mértékű vízbeszivárgást mutattak ki.
- M-801: a kútban a Tardi Agyag alatt jelentkezett hévíz nyugalmi vízszintje 85 – 90 cm-rel a Duna egyidejű vízszintje felett állt be.
- M-803: a fúrás során megütött hévíz szintje a Duna aktuális vízszintje felett 118 cm-rel állt be. A víz hőmérséklete a próbaszivattyúzás során a kezdeti 27-ről 42,7 °C-ra emelkedett.

A fent említett fúrások (45. ábra) vagy harántoltak meleg vizet adó repedést, vagy a közvetlen közelükben mentek el vagy álltak meg. Az adatok egyúttal azt is mutatják, hogy a karsztvíz hőmérséklete viszonylag kis távolságon belül is erősen változik.

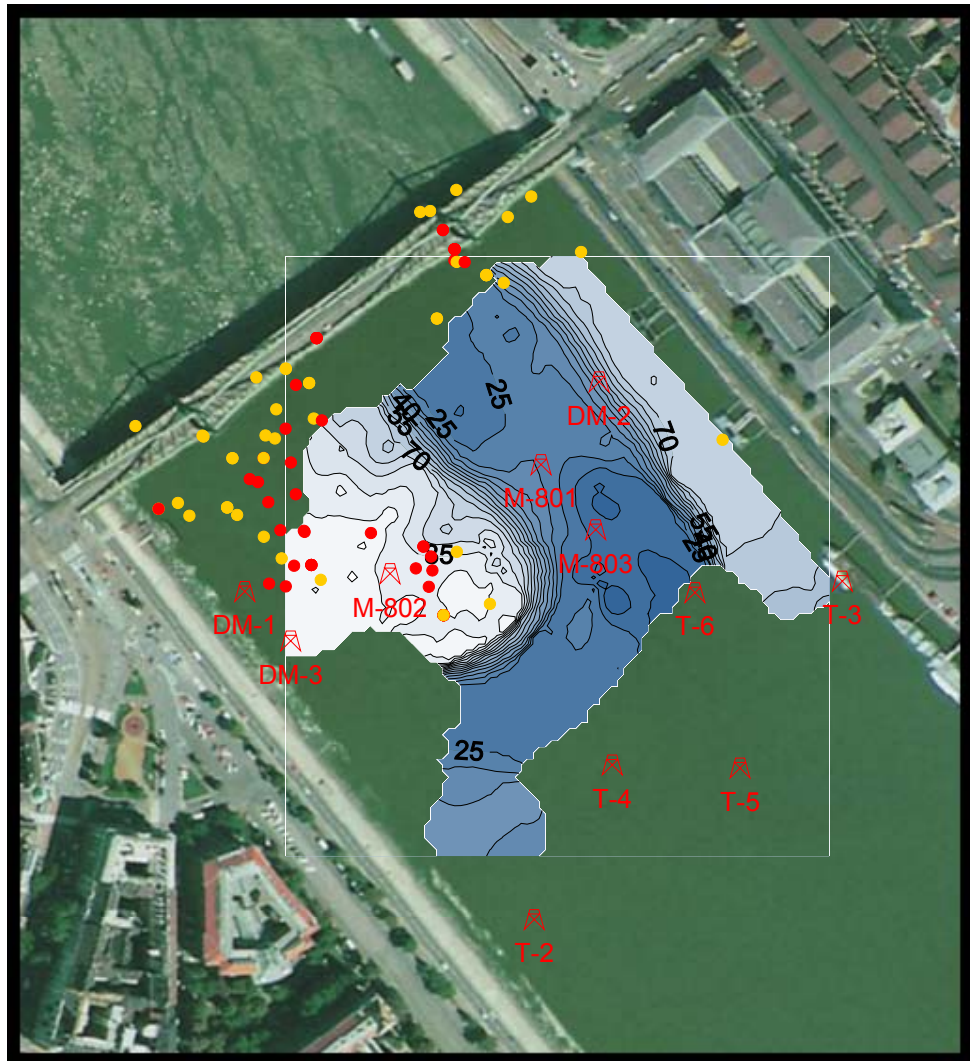
A földtani adatok összefoglaló jelentése (HORVÁTH et al. 2001) a következőket állapítja meg: „(a vízföldtani viszonyok) a budai oldali mederben (DM-3 jelű fúrás térsége) kedvezőtlen(ek), ezen a szakaszon fennáll az erősebb termálvíz betörés veszélye a repedezett, tektonizált szakaszokon, ... A veszélyes szakasz hossza mintegy

50 - 100 m a vonal mentén. Kedvezőtlen esetben, például egy nyitott repedésből 1 000 – 2 000 l/min nagyságú vízbetörés is előfordulhat, annak ellenére, hogy az igazi nagy veszélyt jelentő karsztosodott, repedezett márgát elkerüli a nyomvonal”.

Összehasonlítottam a terület szeizmikus mérésekből (PRÓNAY et al. 2000; PRÓNAY, TÖRÖS 2001) szerkesztett „kemény kőzet”-re vonatkozó tengerszint feletti magasság térképeit a nagy és közepes vízhozamú szökevényforrásokra utaló reflexiók helyével (45. ábra). A források vízhozama a vízvezető repedés átmérőjétől és az áramlás sebességétől függ, mivel az átmérőt nem ismerjük, a szökevényforrásokat a sebességgel arányos követhető magasságuk (relatív vízhozam) alapján osztályoztuk. Azt látjuk, hogy bár az aljzattérkép nem fedi le az egész területet, de ahol a repedezett kőzet a felszín közelében van, ott koncentrálnak a jelenségek (elsősorban egy ÉNy-DK-i irányú sáv). Egy másik pontfelhő a pesti oldalon van, itt sajnos hiányoznak a szeizmikus adatok, de a fenék morfológiája alapján itt sem lehet mélyen a repedezett kőzet. A híd pesti pillérénél figyeltek már meg gázbuborékokat (SZALONTAI 2002), ami szintén megerősíti, hogy ezen a környéken meleg víz áramlik be.

Több fúrásban találtak hidrotermális bomlásból származó dolomitlisztet, ami azt igazolja, hogy a kőzetben, valamikor legalábbis, volt meleg víz (MOLNÁR 1995, HORVÁTH et al. 2001).

A fentieket összefoglalva a szökevényforrásra utaló reflexiók földtani szempontból rendre logikus helyen vannak, a források feltörésének alapvető feltételei, a repedezett kőzet és a meleg víz egyaránt jelen van a területen. Kétségtelen, hogy a fúrások a fenék közelében nem tártak fel meleg vizet, de a lyukak kis száma miatt ennek geometriai valószínűsége egyébként is rendkívül csekély.



45. ábra. A szeizmikus aljzat és a szökevényforrások kapcsolata (PRÓNAY, TÖRÖS 2001)

A sötétebb kék színek nagyobb, a világosabbak kisebb aljzattmélységet jelentenek. Az izovonalakon látható számok tengerszint feletti magasságok. A piros körök a nagy, a sárgák a közepes vízhozamú szökevényforrások helyét jelölik. A fúrótorny szimbólumok jelzik a mederfúrásokat.

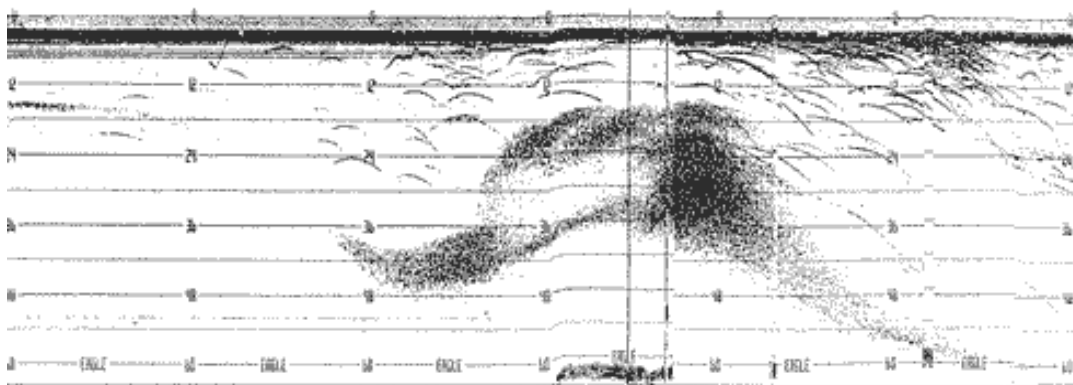
10 Analógiák

10.1 Seiche

A seiche egy állóhullámtípus a vízben, amely a partokról visszaverődő hullámok interferenciája révén jön létre. Ezeket a hullámokat létrehozhatják földrengések, hegyomlások, de leggyakrabban a szél hozza létre, amely a tó vizét elnyomja az egyik part felé, majd ez a víztömeg a szél elálltával visszalendül és a partok között, a pohárban lötyögtetett vízhez hasonlóan, ide-oda verődik. Ezek a hullámok megbolygatják a hőmérsékletük és így sűrűségük szerint rendeződött vízrétegeket, és a fenék domborzatának hatására az eltérő hőmérsékletű vizek függőleges irányban is mozgásba jönnek, keverednek. A jelenséget egy szögletes edényben a következő képlettel írhatjuk le (DEAN, DALRYMPLE 1991):

$$T = \frac{2l}{n\sqrt{gh}}, \quad (5)$$

ahol T a seiche periódusideje, l a medence hossza, n a módus sorszáma, h a vízmélység és g a nehézségi gyorsulás.



46. ábra. Seiche szonár képe (SHINE, MARTIN 1988)

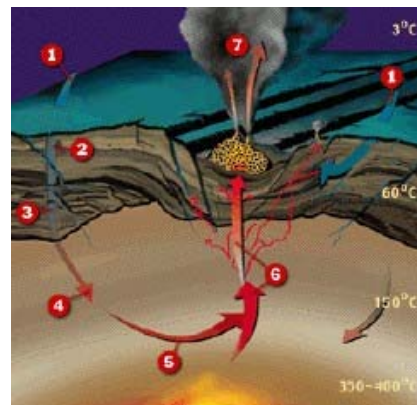
Ilyen jelenségeket szinte minden nagyobb tóban megfigyeltek a Genfi-tótól kezdve a Nagy Tavakig. A Balatonról is ismert, hogy erős szél esetén a siófoki és a keszthelyi

vízmércén mért vízszint között akár több mint fél méter szintkülönbség is lehet, de a kis vízmélység és a Tihanyi-szoros csillapító hatása miatt komoly lengések nem alakulnak ki. A 46. ábrán egy seiche papírról digitalizált szonár képe látható (SHINE, MARTIN 1988) amely meglepően hasonlít a mi felvételeinkre. Ez a szelvény is jól mutatja, hogy a kis hőmérséklet-különbségek hatása szonárral kimutatható. Ennél jobb felvételhez sajnos nem sikerült hozzájutnom.

Hasonló jelenség folyókban nem alakulhat ki, ugyanis az áramlás miatt a sűrűség szerinti rétegződés nem jöhet létre. Seiche-hez hasonló hullámokat az elhaladó hajók hozhatnak létre, ezek azonban csak néhány percig maradnak fenn, így a méréseket nem befolyásolják.

10.2 A „black smoker”-ek vizsgálata

A „black smoker”-ek és a hozzájuk hasonló jelenségek az óceáni hátságok környezetében jönnek létre. Az egymástól távolodó kéreglemezek környékén a töréseken át az óceán vize a mélybe áramlik, majd felmelegedve és ásványi anyagokkal telítődve újra felemelkedik (47. ábra). Az ilyen jelenségek összefoglaló neve a hidrotermális áramlás (hydrothermal vent). Közülük a „black smoker”-ek a legmelegebbek. Színük az oldott ásványi anyagoktól, főleg a vas-monosulfidtól fekete (48. ábra), innen kapták a nevüket is. Léteznek ún. „white smoker”-ek is, ezek hőmérséklete kisebb, színüket főleg a kalcium és szilícium adja. Ezek a „füstölők” azért érdekesek, mert



47. ábra. A hidrotermális áramlás elve

bár környezetükben a körülmények látszólag nem kedveznek az életnek, a környékükön sokféle csőféreg él, amelyeket az egyik legősibb életformának tartanak. Egyes tudósok szerint bizonyos bolygók, például a Jupiter holdja, az Európa, hasonló életfeltételei a baktériumokon kívül a csőférgeknek is kedvezők lehetnek, így ez lehet a Földön kívül az egyik lehetséges életforma.



48. ábra. „Black smoker” (TUNNICLIFFE 1999)

Mindezekből az következik, hogy a legmodernebb eszközök bevetésével vizsgálják az óceánok fenekén ezeket a forróvíz-beáramlásokat. Az óceánok mélyén a hőmérséklet 4 °C körüli, míg a nagy nyomás miatt a több mint 300 °C-os beáramló víz is folyadék halmazállapotú marad.

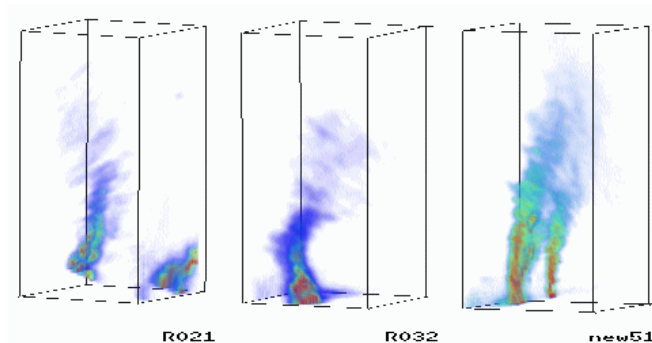
Egyes helyeken a „füstölők” a kiváló ásványi anyagokból kéményeket is építenek. A „black smoker”-eket többek között szonárral is vizsgálják, a hullámsebességek alapján állapítják meg a hőmérséklet-eloszlást a felszálló forró vízben. Háromra mutat példát a 49. ábra. Felbontása

sajnos elég szerény, de a lényeg látható rajta. A sebességeket színekkel kódolták.

Ez a példa is jól mutatja, hogy a hőmérséklet-különbségeket

szonármérésekkel ki lehet

mutatni, bár kétségtelen, hogy ebben az esetben a hőmérséklet-, és ezzel az akusztikus impedancia-különbség jelentősen meghaladja a Dunán mérhető.



49. ábra. „Black smoker”-ek szonár képe (RONA et al. 1998)

10.3 Az óceánok hőmérsékletének mérése

A szeizmikus hullámsebesség alapján végzett hőmérsékletmérés következő példája lehet az óceánok és óceáni áramlások szezonális vizsgálata. Az előző fejezetben leírtakkal szemben itt a távolságok nagyságrendje száz vagy ezer km, a mért hőmérséklet-különbségek nagyságrendekkel kisebbek és a mérés nem a visszavert, hanem az áthaladó hullámok futásidejének mérésén alapul.

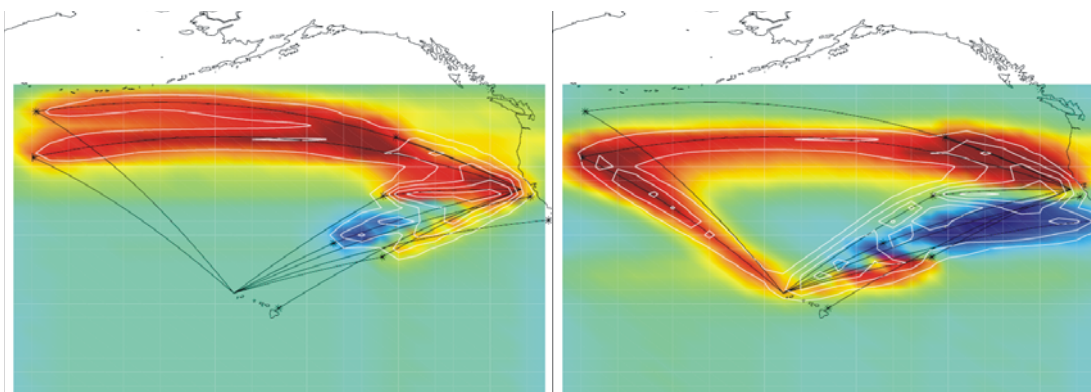
A globális vizsgálatok alapját képező hidrofonhálózatot az USA a hidegháború idején telepítette, hogy folyamatosan nyomon követhesse az orosz tengeralattjárókat és felszíni hajókat. Ebből következik, hogy a legtöbb vizsgálatot az amerikaiak végezték, de saját, ideiglenesen telepített hidrofonokkal más országbeli tudósok is végeztek vizsgálatokat, valamint felhasználták a nukleáris robbantások tilalmát ellenőrző ENSZ szervezet, a CTBTO hálózatát is.

A legismertebb és legnagyobb projekt az ATOC (Acoustic Thermometry of the Ocean Climate). Ennek keretében két aktív hullámforrást helyeztek el az óceán fenekén és a meglévő katonai, valamint ideiglenesen telepített hidrofonokkal végeztek észleléseket. Az egyik forrás Kalifornia partjainál, a másik Hawaii közelében volt. Az adók működését a bálnák és egyéb tengeri emlősök védelmében többször hosszabb időre felfüggesztették. A kaliforniai most sem működik, így az adatsorok nem teljesekek. A tengervíz hőmérsékletének szezonális változásai jól nyomon követhetők a regisztrátumokon. A mérési geometria ismeretében szeizmikus tomográf algoritmus-sal a sebesség- és így a hőmérséklet-eloszlás kiszámítható. Erre mutat példát a nyári és a téli időszakból a 50. ábra (DUSHAW et al. 1999).

Az ATOC program nem egyedülálló, több hasonló projekt ismeretes, például (DUSHAW, WORCHESTER 2001):

- CEPTTE: Central Equatorial Pacific Tomography Experiment
- HOME: Hawaiian Ocean Mixing Experiment

- THETIS: Tomography System for monitoring the Western Mediterranean Basin



50. ábra. Szeizmikus sebességből számított hőmérséklet-eloszlás két időpontban (DUSHAW et al. 1999)

A bal oldali ábrán az 1996 tavaszi, a jobb oldalin az 1998 őszi állapot látható

A fenti analógiák segítségével bemutattam, hogy különböző módszerekkel és frekvenciákon, eltérő körülmények között és dimenziókban a víz hőmérsékletének eltéréseiből származó sebesség, illetve akusztikusimpedancia-különbség kimutatható. Ez megerősíti azt a véleményemet, hogy hasonló elv alapján a Dunában is lehetséges a szökevényforrások kimutatása.

11 Összefoglalás

Az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet 2001-ben, a tervezett DBR4-es metróvonal Duna alatti átvezetésének vizsgálatával kapcsolatban szonár méréseket végzett a folyó Szabadság híd alatti szakaszán. A szelvényeken a szakembereket is meglepő reflexiós beérkezések voltak, amelyeket, elsősorban logikai úton, a meleg vizű szökevényforrásokról származó hullámjelenségeknek tulajdonítottak. Dolgozatom célja ennek a jelenségnek a részletes vizsgálata, azaz a szökevényforrások kimutathatóságának elméleti geofizikai, matematikai, fizikai, kísérleteken és analógiákon alapuló bizonyítása.

Kitűzött céloknak megfelelően a dolgozatban számításokkal, matematikai és fizikai modellekkel, illetve analógiák alapján bemutattam, hogy a szökevényforrások más, hőmérsékletükből vagy gáztartalmukból adódó eltérő fizikai paramétereik miatt, a Duna vizében szonár reflexiók segítségével kimutathatók. Ehhez egyéb feltételeknek is teljesülniük kell, a Duna-víz hőmérséklete a kontraszt maximálása érdekében kicsi kell, hogy legyen, míg alacsony vízállásnál a szökevényforrások hozama nagyobb, ez is javítja a kimutathatóságot. A méréseket télen, kis vízállásnál, optimális körülmények között végeztük el, ezért a feltételezett vízbeáramlási helyek kimutatásának sem fizikai, sem mérés technikai akadálya nem volt.

A szökevényforrások kimutatása nem egyszerű feladat, csak bizonyos hidrológiai és mérés technikai feltételek együttes teljesülése esetén lehetséges. Mivel az állandóan változó vízben keressük a szintén változó szökevényforrásokat, a mérés nem feltétlenül reprodukálható, Hérakleitosz szavaival élve: nem léphetünk kétszer ugyanabba a folyóba.

12 Tézisek

1. Kémiai, fizikai és geofizikai szakirodalmi adatokból kiindulva számításokat végeztem, amelyekkel igazoltam, hogy kétréteges lépcsős modellt feltételezve a Duna hideg, és a szökevényforrások meleg vizének eltérő sebessége és sűrűsége alapján a köztük levő határfelületről a szeizmikus (akusztikus) hullám visszaverődése várható, így a szökevényforrások kimutatására a reflexiós módszer elvileg alkalmas. Bizonyítottam, hogy a beáramló vizekből felszabaduló gáz — a reflexiós együtthatót a hőmérséklet-különbségnél akár egy nagyságrenddel jobban megnövelve — javítja a kimutatás esélyét.

2. Diffrakciós összegzésen alapuló szeizmikus modellező programot készítettem, amelynek segítségével kimutatható volt — hogy a hideg és meleg víz keveredésének figyelembevételével is — mérhető amplitúdójú reflexió kapható a dunai szökevényforrásokról. A számításokat különböző nagyságú átmeneti (keveredési) zónát feltételezve megismételtem és vizsgáltam az eredő jelalakot valamint a reflexiók amplitúdóját. Kimutattam, hogy a dunai méréseknél használt piezoelektromos adó és a vevő frekvenciájának és iránykarakterisztikájának figyelembevételével számított szintetikus szeizmogramokon a reflexiók, valamint keveredés miatti elhalásuk jelensége is jól követhető.

3. Vezérlő és mérőprogramot írtam a szonár adatgyűjtőhöz, amely képes a digitális oszcilloszkóp felparaméterezésére (mintavételi idő, felvételhossz, csatornaszám, stb.), a mért csatornák megjelenítésére és szabványos szeizmikus formátumban Winchesteren rögzítésére. A csatornák fejlécében elhelyezi a GPS koordinátákat, illetve a kiválasztott, a mérés helyének azonosítására alkalmas vagy valamilyen megjegyzést tartalmazó markerek valamelyikét. A terepi és kísérleti mérések során mindvégig ezt a programot használtuk.

4. A terepi mérésnél használt mérőeszközök felhasználásával végzett fizikai modellezés segítségével sikerült egyértelműen kimutatnom, hogy már 5 °C hőmér-

sékletkülönbség is mérhető reflexiót eredményez. A dunai méréseknél a várható hőmérsékletkülönbség 35 °C, volt ezért a szökevényforrások megbízható kimutatásának nincs fizikai vagy méréstechnikai akadálya. Vizsgáltam továbbá, hogy az eltérő hőmérsékletű víz egyhelyben tartásához használt nylon zacskó mennyire befolyásolja az eredményeket, és bizonyítottam, hogy bár a vékony műanyag fólia is jól látható a szelvényen, a vízről kapott reflexió amplitúdója szignifikánsan nagyobb, mintegy ötszörös.

5. Szonár mérések segítségével négy nagyobb, jól elkülöníthető csoportban, illetve elszórtan több, mint ötven eddig ismeretlen szökevényforrást tudtam kimutatni a Duna Szabadság híd alatti szakaszán. Különböző vizsgálatok segítségével az esetek döntő többségében sikerült kizárnom az egyéb értelmezési lehetőségeket. Megállapításaimat alátámasztják, hogy a kimutatott szökevényforrások földtani szempontból logikus helyeken vannak, ahol a potenciálisan vízvezető repedezett kőzet a mederfenéken, vagy ennek közvetlen közelében van.

13 Irodalomjegyzék

- AKI, K. ÉS RICHARDS, P. G., 1980: Quantitative Seismology; Theory and Methods. W.H. Freeman; San Francisco, USA
- ALFÖLDI L., BÉLTEKY L., BÖCKER T., HORVÁTH J., KESSLER H., KORIM K., ORAVECZ J. ÉS SZALONTAI G., 1968: Budapest hévizei. VITUKI, Budapest
- ALFÖLDI L. ÉS LORBERER Á., 1976: A karsztos hévizek 3 dimenziós áramlásának vizsgálata kútadatok alapján. Hidrológiai Közlöny **56**, 10, p. 433-443
- ALFÖLDI L., 1979: Budapesti hévizek. VITUKI Közlemények
- ALL MEASURES, 2004: Materials and Formulae. www.allmeasures.com
- BELCHER, E. MATSUJAMA, B. ÉS TRIMBLE, G., 1999: Object Identification with Acoustic Lenses. Applied Physics Laboratory, University of Washington, WA, USA
- BELOGOL'SKII, V. A., SEKOYAN, L. M., SAMORUKOVA, S. R., STEFANOV, V. I. ÉS LEVTSOV, V. I., 1999: Pressure dependence of the sound velocity in distilled water. Measurement Techniques, **42**, 4, p. 406-413
- BERKHOUT, A. J., 1984: Seismic resolution. Geophysical Press, Vol. 12, London–Amsterdam
- BILANIUK, N. ÉS WONG, G. S. K., 1993: Speed of sound in pure water as a function of temperature. J. Acoust. Soc. Am. **93**, p. 1609-1612
- CHEN, L. O., 1986: Water of lake Constance. CRC-Handbook, Boca Raton, FL, USA
- COPPENS, A. B., 1981: Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. J. Acoust. Soc. Am. **69**, p. 862-863
- CSERNY T. ÉS PRÓNAY ZS., 2004: Szeizmoakusztikus mérések a Balatonon. Földtani Kutatás, **41**, 2, p. 3-12
- DEAN, R. G. ÉS DALRYMPLE, R. A., 1991: Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists; *In*: LIU, L. F. (*edi.*): Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 2. World Scientific Press, Singapore
- DEL GROSSO, V. A. ÉS MADER, C. W., 1974: New equation for the speed of sound in natural waters. J. Acoust. Soc. Am. **56**, p. 1084-1091
- DUSHAW, B. D., WORCESTER, P. F., CORNUELLE, B. D. ÉS HOWE, B. M., 1993: On equations for the speed of sound in seawater. J. Acoust. Soc. Am., **93**, p. 255-275

- DUSHAW, B. D., BAGGEROER, A. B., MENEMEMMLIS, D., WUNSCH, C., BIRDSALL, T. G., METZGER, K.; CLARK, C., COLOSI, J. A.; CORNUELLE, B. D., DZIECIUCH, M., MUNK, W., WORCESTER, P. F., COSTA, D., HOWE, B. M., MERCER, J. A., SPINDEL, R. C. ÉS FORBES, A. M. G., 1999: The Acoustic Thermometry of the Ocean Climate: Towards depth-averaged temperature maps of the North Pacific Ocean. Proceedings of Int. Symp. on Acoustic Tomography and Thermometry, Tokyo, Japan
- DUSHAW, B. D. ÉS WORCHESTER, P. F., 2001: Acoustic Remote Sensing of the North Pacific on Gyre and Regional Scales. aog.ucsd.edu/publications/unrefereed_pubs/clivar2K.pdf
- EDO CORPORATION, 2000: User's Manual. EDO Corporation
- FÖLDVÁRI A. ÉS PAPP F., 1932: Újabb adalékok a Gellérthegyi szökevény-források ismeretéhez. Hidrológiai Közlöny XII. kötet
- HORNE, A. J. ÉS GOLDMAN, C. R., 1994: Lake Ecology Overview, **in**: WETZEL R. G., Limnology. 2nd edition. McGraw-Hill Co., New York, USA
- HORVÁTH T., FÁY M. ÉS SÁNDOR Cs., 2001: A Budapest 4 metróvonal Duna alatti átvezetésének földtani kutatásának összefoglalása. Földtani Kutatás **38**, 2, p. 35-44
- IKB TECHNOLOGIES, 2001: www.seistec.com
- JUHÁSZ J., 1987: Hidrogeológia. Akadémiai Kiadó, Budapest
- JUHÁSZ J., 2000: A 4. sz. metró kutatásának hidrogeológiai eredményei. Földtani Kutatás **38**, 2, p. 25-34
- KINSLER, L. E. FREY, A. L., COPPENS, A. B. ÉS SANDERS, J. V., 1962: Fundamentals of Acoustics. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA
- KORPÁS L., FODOR L., MAGYARI Á., DÉNES GY. ÉS ORAVECZ J., 2002: A Gellért-hegy földtana, karszt- és szerkezetfejlődése. Karszt és barlang, 1998-1999. (2002.) évfolyam I-II. füzet, p. 57-93
- KRUK, J., 2003: Reflection seismics I. ETH; Zürich, Svájc
- LAVELLE, J. W., ÉS WETZLER, M. A., 1999: Diffuse venting and background contributions to chemical anomalies in a neutrally buoyant ocean hydrothermal plume. Journal of Geophysical Research, Oceans, **104**, p. 3201-3209
- LEONARD, J., 2002: Acoustic Notes. MIT Departement of Ocean Engineering, Cambridge, MA, USA

- LIDE, D. R., 2004: Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, 84th Edition, Boca Raton, FL, USA
- LINDSEY, J. P., 1989: The Fresnel zone and its interpretative significance. The Leading Edge, **8**, 10, p. 33-39
- LORBERER Á., 2002: Adalékok a hazai hévízkutatás történetéhez. babber.hu/publications/a_hazai_hevizkutatas_tortenete.html
- LORBERER Á., 2002: Budapest hévizei mérnökgeológiai szemmel. Alagút- és Mély-építő Szakmai Napok kiadványa, Eger
- LUBBERS, J. ÉS GRAAFF, R., 1998: A simple and accurate formula for the sound velocity in water. Ultrasound Med. Biol. **24**, 7, p. 1065-1068
- MACKENZIE, K. V., 1981: Nine-term equation for the sound speed in the oceans. J. Acoust. Soc. Am. **70**, p. 807-812
- MARCZAK, W., 1997: Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids. J. Acoust. Soc. Am. **102**, p. 2776-2779
- MESSE, H., 2003: Physical characteristics of water. www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm ThermExcel
- MOLNÁR J., 1857: A budai meleg források physikai és vegytani viszonyairól. Királyi Természettudományi Társulat Évkönyve, III. kötet
- MOLNÁR J., 1869: A hévvizek Buda környékén. MTA Matematikai és Természettudományi Közleményei VII. kötet
- MOLNÁR P., 1995: Barlangföldtan. <http://freeweb.interware.hu/bajnab/oktatas/alapfoku/8.htm>
- MOSHER, D. C. ÉS SIMPKIN, P., 1999: Status and Trends of Marine High-Resolution Seismic Reflection Profiling: Data Acquisition. Geoscience Canada, **26**, p. 174-188
- MUNSON, B. ÉS AXLER, R., 2003: Understanding Lake Ecology. waterontheweb.org
- MUSKAT, M., 1938: The reflection of longitudinal wave pulses from plane parallel plates. Geophysics **3**, p. 198-218
- NOAA OFFICE OF COAST SURVEY, 2001: Data Quality Assurance (DQA) for Multibeam and Hydrographic Equipment. <http://nauticalcharts.noaa.gov/csdl/http/dqa.htm>NOAA
- PAPP F., 1942: Budapest meleg gyógyforrásai. Bp. Közp. Gyógy- és Üd. Biz. Rheuma és Fürdő-kut. Int. Kiadv., Budapest

- PHYWE, 2003: Phywe Physics Experiments. <http://www.phywe.com>
- PRÓRAY ZS., 2001: Mérnökgeofizikai módszerfejlesztés. ELGI jelentés (kézirat)
- PRÓRAY ZS. ÉS TÖRÖS E., 2001: Szakvélemény a budapesti 4. sz. metróvonal I. szakasz Szent Gellért tér-Duna alatti átvezetés kiegészítő mérnökgeofizikai vizsgálatáról. ELGI jelentés (kézirat)
- PRÓRAY ZS., TÖRÖS E. ÉS HERMANN L., 2000: Szeizmikus mérések a tervezett 4. sz. metróvonal Duna alatti átvezetéséhez. Földtani Kutatás **37**, 2, p. 19-24
- RAINCSÁK GY.-NÉ, 2000: A Budapest 4. sz. metróvonal és környezetének földtani viszonyai. Földtani Kutatás **37**, 2, p. 4-19
- RONA, P., BEMIS, K., KENCHAMMANA-HOSEKOTE, D. ÉS SILVER, D., 1998: Acoustic Imaging and Visualization of Plumes Discharging from Black Smoker Vents on the Deep Seafloor. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA p. 475-478
- SANDERSON, B. G., DIETRICH, D. ÉS STILGOE, N., 2000: A Numerically Effective Calculation of Sea Water Density. Marine Models 2, p. 19-34
- SCHAFARZIK F., 1921: Szökevény hévforrások a Gellérthegy tövében. Földtani Közlemények L. kötet
- SENESE, F., 2005: General Chemistry Online.
antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/index.shtml
- SHINE, A. J. ÉS MARTIN, D. S., 1988: Loch Ness Habitats Observed by Sonar and Underwater Television. The Scottish Naturalist, p. 111-199
- SNELLING, D. J., 2001: Water Chemistry. simetric.co.uk/si_water.htm SI Metric
- SZABÓ J., 1857: A Budai meleg források földtani viszonyairól. Természettudományi Társulat Évkönyvei III. kötet
- SZABÓ J., 1886: Jegyzetek. (Kézirat)
- SZALONTAI G., 1968: Budapest gyógyvizeinek minőségi változása. In: ALFÖLDI ET AL.: Budapest hévizei. VITUKI, Budapest
- SZALONTAI G., 2002: Szóbeli közlés.
- TÖRÖS E., 2003: A dunai hévízforrások és hatásuk a geokörnyezetre. Államvizsgadolgozat (Kézirat)
- TÓTH T., CSONTOS L., DÖVÉNYI P., FEKETE N., MAGYARI Á., NAGYMAROSY A., SZAFIÁN P., VIDA R. ÉS WINDHOFFER G., 2001: Szakvéleményt a budapesti 4. metró-

- vonali szakaszának Duna alatti átvezetése földtani viszonyairól a területen végzett szeizmikus felmérés eredményei alapján. Jelentés (Kézirat)
- TRABANT, P. K., 1984: Applied High-Resolution Geophysical Methods. International Human Resources Development Corporation; Boston, USA
- TROREY, A. W., 1970: A simple theory for seismic diffraction. *Geophysics* **35**, p. 762-784
- TUNNICLIFFE, V. ÉS THOMSON, R., 1999: Oceans Background Report. Fisheries and Oceans of Canada, Ottawa, Ontario, Canada
- UNSW, 2005: Density calculation.
web.maths.unsw.edu.au/~bxs/DieCAST/MANUAL/density.html
- USGS, 2004: Seismic Definition. USGS-CMG, Menlo Park, CA, USA
- WERNHER GY., 1549: De admirandis Hungariae aquis hypomnematum. Magánkiadás, Bázeli, Svájc
- WIDESS, M. B., 1973: How thin is a thin bed? *Geophysics* **38**, p. 1176-1180
- WOLF, A., 1937: The reflection of elastic waves from transition layers of variable velocity. *Geophysics* **2**, p. 357-363
- WONG, G. S. K., ÉS ZHU, S., 1995: Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, p. 1732-1736
- WYLLIE, M. R. J., Gregory, A. R., Gardner, L. W., 1956: Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* **21**, p. 41-47
- YOUNG, T. K., MONASH, C. B. ÉS TURPENING, R. M., 1984: Computer Modeling of Vertical Seismic Profiling. *Geophysical Prospecting* **32**, p. 851-870
- ZOEPPRITZ, K., 1919: On the reflection and propagation of seismic waves. *Göttinger Nachrichten*, Göttingen, Németország p. 66-84
- ZSIGMONDY V., 1873: Mitteilungen über die Bohrthermen zu Harkány, auf der Margarethen-Insel nächst Ofen und zu Lippik und den Bohrbrunnen zu Alcsut mit Tafeln. Magánkiadás, Pest
- ZSIGMONDY V., 1879: A városligeti artézi kút Budapesten. *Földtani Közlöny* IX. kötet