

# Esettanulmány a dunántúli löszpartok szeizmikus jellemzőiről<sup>1</sup>

ÁDÁM OSZKÁR<sup>2</sup>

A szeizmikus felszíni zavarhullámok inverziójához szükséges a felszínközeli 100 m-es, elsősorban lösz képződményekből álló teljes rétegsor szeizmikus analízise. Ezt sikerült megvalósítani 1998–99-ben a Dunaújvároshoz közeli löszhátságon. Vizsgáltuk a zavarhullám jellegét felszíni mérés (254 m-es vonal mentén), felszíni vertikális gerjesztéssel, teljes hullámkép felvételével, az eredmények részletes analízisével, az  $e$  célból létesített mélyfúrás háromkomponensű VSP szelvényezésével és a numerikus modellezéssel. Ezek eredményéről számolunk be. A vizsgálatok elsődleges célja a zavarhullám test-, vagy felületi hullám jellegének meghatározása, mivel a terület földtani felépítése szeizmikus hullámvezetőt indikál.

## O. ÁDÁM: Case history about the seismic characteristics of the Loess plateau along the Danube river

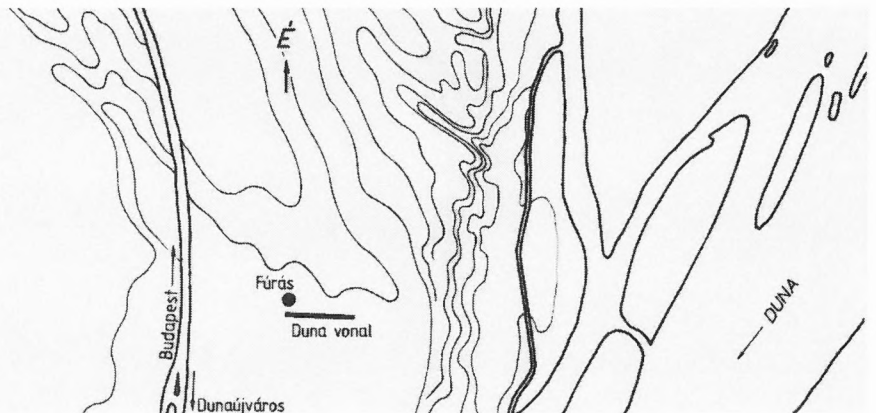
To the inversion of seismic ground roll it is necessary to analyse the sedimentation of the 100 m thick surface layers of the area which are composed of loess-like sediments. This was fulfilled on the area of a loess plateau near Dunaújváros (Fejér county) during the years of 1998–1999. We analysed the characteristic features of the ground roll by help of surface measurement along a spread of 254 m, used a vertical source on the surface, the registration of full waves, analysing the sedimentation of loess in a well drilled to 100 m depth by three components VSP, geophysical logs and finally by numerical modelling. We shall give account in this short paper about the results concerning the waveguide phenomenon expected from sedimentation, and the roles of surface or body waves in respect of ground roll.

## Bevezetés

A felszíni zavarhullámok inverziója című kutatási téma (OTKA) eredményeiről 1998 folyamán két dolgozatban [ÁDÁM 1998a, ÁDÁM 1998b] és az ELGI-ben 1998-ban rendezett poszter bemutatón is beszámoltunk. Az első ciklus leglényegesebb eredménye, hogy a Hortobágyon és a hat különböző dunántúli területen a felszíni zavarhullámok legfontosabb jelenségei és azok paraméterei azonosak. Így az analitikus közelítő függvények, a  $t(x)$  menetidőgörbék, a  $V_{p,s}(z)$  sebességértékek tartománya,  $F-K$  és  $C(f)$  diszperziós függvények jellege hasonló, ha számszerűen nem is pontosan azonos. Természetesen, ezzel a kutatás nem fejeződött be, mert kérdőjelek maradtak. Az egyik ilyen legnagyobbak tűnő kérdőjel: vajon a felszíni zavarhullámok („ground roll”) *testhullámokból* (SV-, ill. P-SV) épülnek fel egy hullámvezetőben, vagy felületi hullám jön létre (esetünkben Rayleigh) egy meglehetősen laza, könnyű kőzetekből álló rétegsor felszínén. Az eddigi eredmények e tekintetben még nem mindenben fogadhatók el bizonyítottan. Ezek a kérdések indokolták, hogy az inverzió problémáját tovább tanulmányozzuk, bevonva a szeizmikus lyukszelvényezés (VSP) és karotázs méréseket is. Az új mérések helyéül a Duna jelű kísérleti szelvényt jelöltük ki, ahol újra mértünk és fúrólukát is mélyítettünk. Ezekről a munkálatakról a következőkben számolunk be.

## 1. A terület földtani-geofizikai felépítése

A Duna jelű mérési vonal (1. ábra) Dunaújváros előtt néhány száz méterrel a part felé, a lösz hátságon van. A területen 80 m mély fúrást mélyítettünk, amelyben a rétegsort mintavétellel is meghatároztuk és az akusztikus (szónikus) mérés mellett a legtöbb szokásos elektromos és radioaktív karotázs paramétert is felvettük.



1. ábra. A Duna kísérleti vonal helyszínrajza.  
Vonal: —, mélyfúrás: ●

Fig. 1. Topographic map of site Duna line.  
Experimental line: —, well: ●

A 2. ábrán a mérési eredmények kicsinyített változatát mutatjuk be, amelyen a földtani értelmezést is feltüntettük. Ezek szerint, jó egyezésben az irodalmi adatokkal, a fúrásban harántolt rétegsor: felszíntől 51,6 m-ig lösz, 51,6–82 m-ig felső pannóniai homok és agyag (esetleg öregebb lösz). A mért paraméterek, ill. egyéb információk szerint a két összlet diszkordánsan érintkezik egymással. A kőzeten belül a 100%-os víztelítettség határ 22 m mélyen van, míg a 0%-os határ (ahol a lösz már valóban száraz) 14 m-re becsülhető. E felett csak tapadó víz van és ebben a

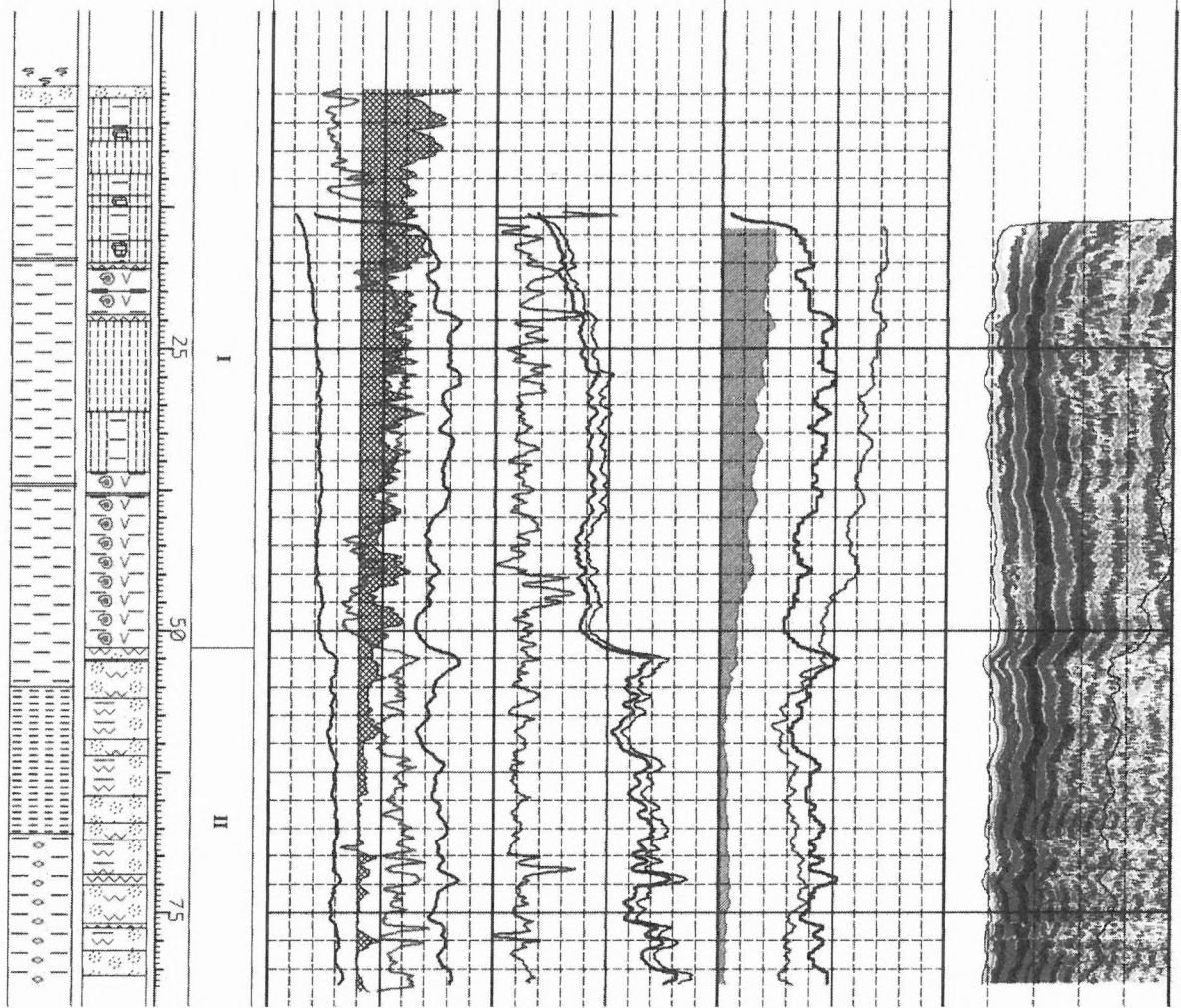
<sup>1</sup> Beérkezett: 2000. március 9-én

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

Fúrdsi rétegsor  
Geofizikai rétegsor

Összlethezár

Vp	Nyirási modulus	Strength index	Ak. hullámkép
200 [m/s] 2200	0 [GPa]	2 0	0.05
Vs	Young modulus	Poisson szám	
200 [m/s] 2200	0 [GPa]	5 0.3	0.5
Sűrűség	Akuszt. csill.	$V_p/V_s$	$T_p$
1.5 [g/cm <sup>3</sup> ] 2.5	0 [db]	50 2	7
50 [mm] 250		$V_p/V_s$	$T_s$
		2	7
			500 [usec] 2500
			500 [usec] 2500



**Jelmagyarázat**

1 agyag	12 kavicsos agyag	14 fész. v. agyag	19 agyagkő	33 homokos aleurit
36 mézshonkr. lösz	37 agyagos lösz	38 aleurit	39 lösz	40 homok
43 aleurites homok	47 agyagos ale. homok	59 homokkő	85 talaj	

2. ábra. A mélyfúrás karotázsszelvényei és értelmezésük  
Fig. 2. Well logs and their interpretation (legend in the figure)

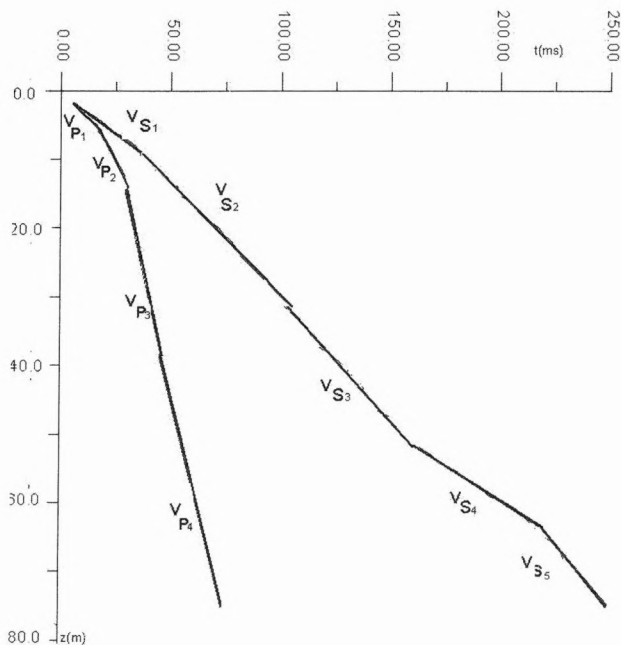
szakaszban akusztikus hullámkép nem mérhető. A szelvényben a helyi kiugró sebesség értékek mészkonkréciós szinteket jelölnek [ZILAHY-SEBESS 1999].

A mélyfúrást szeizmikusan is szelvényeztük (VSP), a fúráspontról 1 és 10 m távolságban kalapácsos hullámkeltelessel. A háromkomponenses ( $v_z, v_x, v_y$ ) geofonsonda 14 Hz-es geofonjai elmozdulási sebességet mértek. Megkíséreltük a légágyú használatát is a kalapács helyett, de az eredmény nem volt jobb, csak költségesebb.

A szeizmikus lyukszelvényezés alapadatainak közvetlen kiértékelése, valamint a korábbi refrakciós mérési eredmények lehetővé tették, hogy a további munkához egy elsődleges szeizmikus rétegmodellt állítsunk elő, amely a későbbiekben a részletesebb számítások alapjául szolgált. A menetidő-diagramokat a 3. ábrán, az intervallumsebességeket az 1. táblázatban mutatjuk be, ahol  $P_i$  és  $S_i$  a 3. ábrán lévő intervallumok sorszámai.

1. táblázat

$i$	$\Delta Z_i$ (m)	$V_{P_i}$ (m/s)	$\Delta Z_i$ (m)	$V_{S_i}$ (m/s)
1	4,62	363	8,34	223
2	9,26	673	13,03	322
3	23,62	1572	29,58	333
4	37,5	1355	11,35	210
5			12,7	352
	$\Sigma \Delta Z_i = 75$ m		$\Sigma \Delta Z_i = 75$ m	



3. ábra. A vertikális szeizmikus szelvényezés esetén P- és S-hullámok menetidőgörbéi.  $V_{P_i}$  és  $V_{S_i}$  — intervallumsebességek

Fig. 3. Time-distance curves of P- and S-waves at vertical seismic profiling.  $V_{P_i}$  and  $V_{S_i}$  — interval velocities

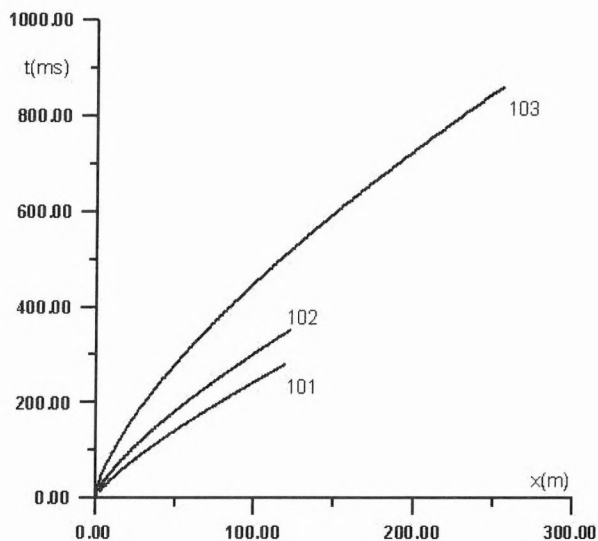
Amint a menetidőgörbékéből és a táblázat adataiból is kitűnik, túl nagy sebességkülönbség nincs az egyes határfelületeken. A P-hullámok sebessége csak a talajvíz szintjénél növekszik meg lényegesen. Ezt mutatják a szónikus mérési adatok is. A P és S sebességek növekszenek a mélységgel, amely természetes következménye is a kőzet keletkezési körülményeinek, mivel a lösz tulajdonképpen na-

gyon finom szemcséjű agyagásványokból épül fel, amelyek a terhelés következtében tömörödnek. A Poisson-szám 0,44-ről 0,36-ra csökken. Jelentős változást 50 m körül találunk [ZILAHY-SEBESS 1999].

Az intervallumsebesség-eloszlások azonban nem cáfolják a 4. ábrán bemutatott bemerülő hullám jelleget, amelyet ezen a területen is hasonlóan kaptunk, mint a másik hat területen. Az 4. ábrán lévő mért menetidőgörbék egyenletét és a leszámított sebességfüggvényeket a 2. táblázatban soroljuk fel.

2. táblázat

Menetidő egyenlet	Analitikus sebességfüggvény	A közelítés középhibája
$t_{101}(x) = 6,6x^{0,8}$ ms	$V(z) = 244,4z^{1/4,62}$ m/s	0,003
$t_{102}(x) = 10,2x^{0,736}$ ms	$V(z) = 94z^{1/3,8}$ m/s	0,0024
$t_{103}(x) = 18,9x^{0,69}$ ms	$V(z) = 128,6z^{1/3,2}$ m/s	0,004



4. ábra. A Duna kísérleti vonal menetidőgörbéi a felszínen mérve. 101, 102, 103 — jellegzetes hullámfázisok menetidőgörbéi

Fig. 4. Time-distance curves of Duna experimental lines measured on the surface. 101, 102, 103 — time-distance curves of characteristic wave trains

## 2. A modell és a modellszámítás

A modellszámítás alapjául a 1. táblázatban megadott — a lyukszelvényezés első feldolgozásának eredményeként kapott — intervallumsebességek adatai szolgáltak. A véges differenciás modellezést a Georisk Kft. végezte WÉBER Zoltán, az MTA szeizmológiai állomásának kutatója közreműködésével.

A modell méretei:

Horizontálisan: – 300 + 300 m

Vertikálisan: 0 – 200 m

Forrás: (0 m, 0 m) a felszínen

Rácsáló mérete: 0,5 m

Időbeli lépésköz: 0,2 ms

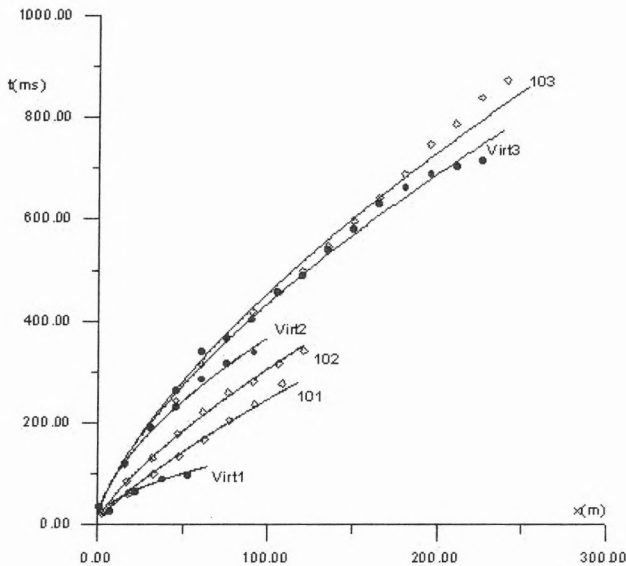
A számítások során — amelyek a nagyon részletes rácsháló miatt tekintélyes mennyiségű gépórát vettek igénybe — azt a véges differenciás számítási eljárást választottuk ki, amely a hullámfrontok szerkesztéséhez is lehetőséget

biztosított. A számos algoritmus közül ZAHRADNYIK, PRIOLO [1995] és ZAHRADNIK [1995] által leírt eljárás mellett döntöttünk, s emellett EMERMAN, STEPHEN [1983], valamint SCHMIDT, JENSEN [1985] viszko-elasztikus közegre felírt megoldásait is alkalmaztuk. Ez utóbbira azért volt szükség, mert már az első dolgozat [ÁDÁM 1964] írásakor felmerült, hogy az abszorpció és a diszperzió jelentősége az egyes zavarhullám-csoportokon belül létezik. Ezek együttes fellépése pedig a viszko-elasztikus közeg egyik jellemző tulajdonsága, amely mérnöki tervezéseknél jelentős lehet. Ezt a kérdést az előző dolgozatban is vizsgáltuk, és azt találtuk, hogy kivétel nélkül minden területen létezett, sőt lehetőség volt a frekvenciafüggő abszorpció kiutatására is [ÁDÁM 1998a].

A mért és a számított menetidőgörbék összehasonlítását a 5. ábrán mutatjuk be. A számított menetidőgörbék közelítő függvényeket a 3. táblázatban találjuk.

3. táblázat

Menetidők jele (korr. párok)	Egyenlete (ms)	Pontok száma	Az egyenlet közelítésének közép- hibája
virt1	$t_{virt1}(x)=14,1x^{0,5}$	70	0,08
virt2	$t_{virt2}(x)=23,3x^{0,6}$	186	0,0039
virt3	$t_{virt3}(x)=19,3x^{0,68}$	239	0,003



5. ábra. Számított és mért szeizmogramok összehasonlítása. Mért: ———, számított: - - - - -

Fig. 5. Comparison of computed and measured time distance curves. Measured: ———, computed: - - - - -

Az 5. ábráról láthatjuk, hogy ha az egyezés nem is tökéletes, de a közelítés feltételeit kielégíti. Mivel mind a mért, mind a számított szeizmogramok nagyon kis frekvenciájúak, az összevetés csak a hullámcsoporthoz vonatkozatható. Amint a táblázat adataiból kitűnik, a közelítések szórás értékei elfogadhatóak.

A modellszámítás második fontos feladata volt a zavarhullám jellegének meghatározása az adott rétegsorban.

Amint azt korábbi dolgozatainkban bemutattuk, a zavar-

hullám jellegét elsősorban az elmozdulási sebesség trajektóriák alapján minősíthetjük SV testhullámnak [ÁDÁM 1964, 1967, 1998a (13. oldal, 3. ábra)]. De hivatkozhatunk arra is, hogy az abszorpció egyenletben (amely az [ÁDÁM 1998a] (9) egyenlete)

$$\frac{\text{Log}(A_i)}{\text{Log}(A_0)} = -n_g \frac{\text{Log}(X_i)}{\text{Log}(X_0)} - \frac{\tau}{2}(X_i - X_0),$$

a hullám test ill. sík jellegének a távolság  $n_g$  hatványkitevője értékében meg kell jelennie (az idézett dolgozatokban ezek az adatok is szerepelnek, a legutóbbiban a 23. oldalon táblázatban).

A  $V(z)=Az^{1/n}$  sebességfüggvénynek megfelelő hullámfrontok meglehetősen bonyolult módon számíthatók. A paraméteres alapegyenletek [KAUFMAN 1953]:

$$t = \frac{n}{A^n p^{n-1}} \int_0^\theta \sin^{n-2} \theta d\theta \quad (1a)$$

$$x = \frac{n}{A^n p^n} \int_0^\theta \sin^n \theta d\theta \quad (1b)$$

$$z = \frac{\sin^n \theta}{A^n p^n} \quad (1c)$$

ahol  $A$  (dimenziója  $1/s$ ),  $z$  (dimenziója  $m$ ) és  $n$  (dimenzió nélküli) a  $V(z)$  sebességfüggvény paraméterei,  $\theta$  a sugár

beesési szöge,  $p = \frac{1}{\sin \theta}$  a sugárparaméter.

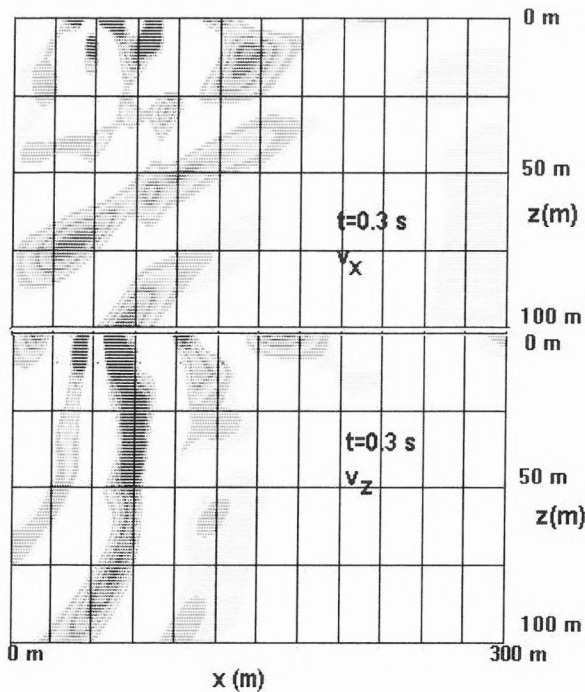
A határozott integrálokat numerikus integrálással lehet megoldani. A megoldást  $t=\text{állandó}$  mellett az  $(x,z)$  síkban kell előállítani. Az (1a) egyenletre a sugárszerkesztéshez van szükség. Probléma azonban az, hogy a megoldásokat minden beérkezésre külön-külön kell számolni, egy minden beérkezést magában foglaló megoldás nagyon problematikusnak tűnik. Ezért térünk rá a lyukszelvényezés alapján felállított rétegmodellre a véges differenciák azon módszerének az alkalmazására, amely lehetővé tette egy-egy adott  $t$  időpillanatban a mintavételt és azok  $T=\text{állandó}$  időmetszeti ábrázolását.

A 6a. ábrán a  $v_x$  és  $v_z$  elmozdulási sebességek  $T=0,3$  s időpillanatban vett mintáit mutatjuk be az amplitúdószintek körberajzolásával. Erre a megoldásra azért volt szükség, mert a zavarhullám általában nagyon kis frekvenciájú, s így hullámformában nehezen követhető.

A 6b. ábrán az egyes mintavételi pontokon  $T=0,3$  s és  $T=0,7$  s állandó időmetszetben a  $v_x$  és  $v_z$  elmozdulási sebesség komponenseket vektorként fogtuk fel és vektoriálisan összeadva az eredőt ábrázoltuk, amelynek hossza

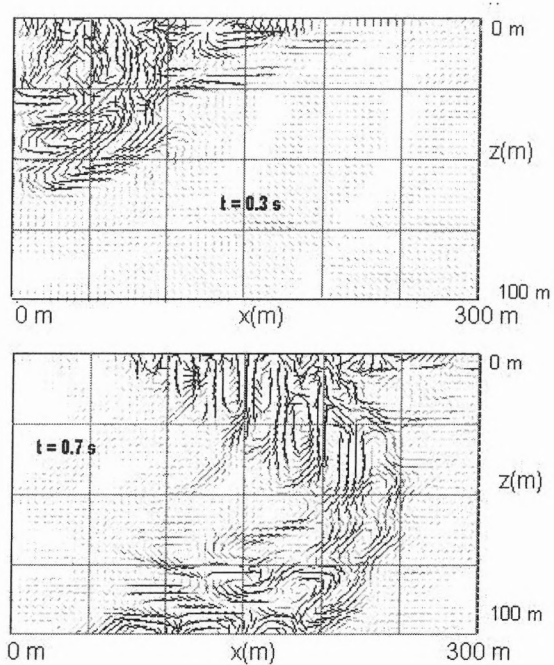
$$v_{xz} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad (2)$$

A két ábrázolásmód között elvi különbség nincs, de a vektoriális ábrázolás jobban kiemeli és láthatóvá teszi a hullámfront jellegét. Mind a két ábra azt igazolja, hogy a hullámfrontok nem síkok, azaz felületi hullámot, amelynek a frontja sík (Rayleigh- és Love-hullám), csak a szeizmogram nagyon késői szakaszain találhatunk.



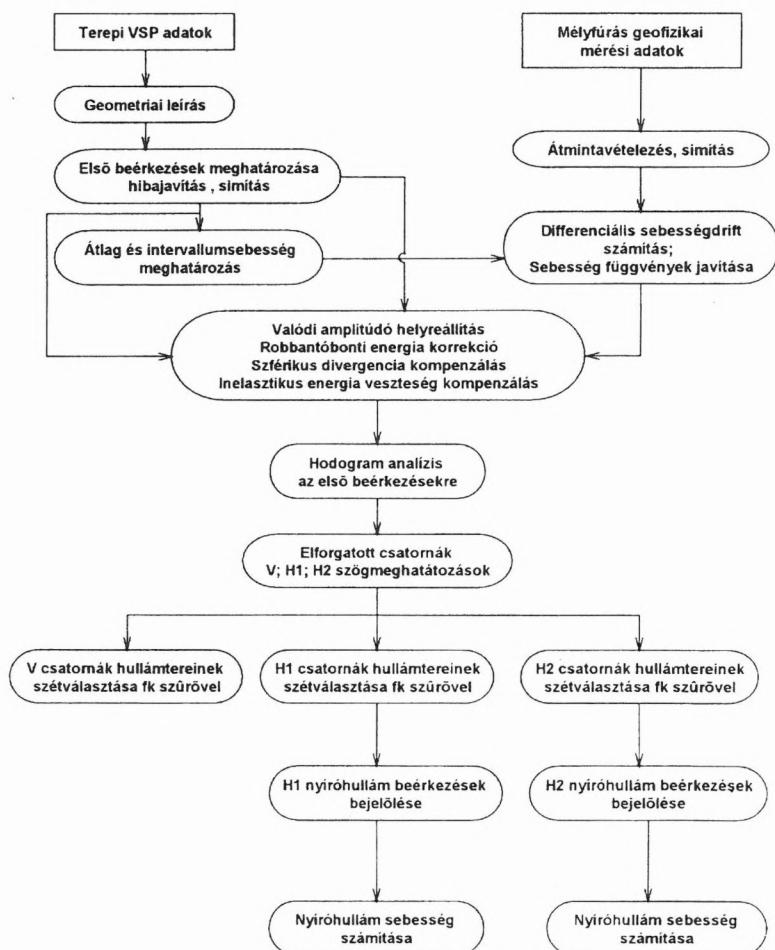
6a. ábra. A  $v_x$  és  $v_z$  amplitúdók hullámfrontjai  $T=0,3$  s-nál

Fig. 6a. Wavefronts of  $v_x$  (above) and  $v_z$  (below) amplitudes at  $T=0,3$  s on the  $(x,z)$  plane



6b. ábra. Az elmozdulási sebességek  $|V_{x,z}|$  vektoros ábrázolása a (2) egyenlet szerint  $T=0,7$  s és  $T=0,3$  s metszetben

Fig. 6b. Wavefront of  $|V_{x,z}|$  vector amplitudes as given by equation (2) at  $T=0,7$  s and  $T=0,3$  s



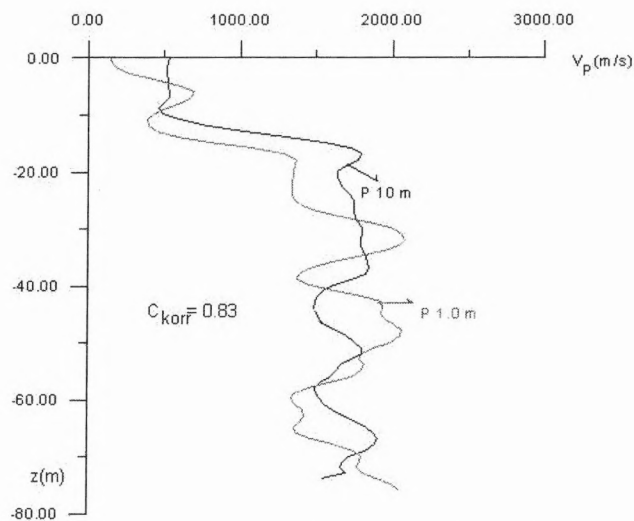
7. ábra. A VSP feldolgozás folyamatábrája Promax számítógépen

Fig. 7. Flow charts of processing of VSP on Promax computer

### 3. A vertikális szeizmikus szelvényezés

A vertikális szeizmikus szelvényezés eredményeit az ELGI Promax számítógépén is feldolgoztuk. A feldolgozás folyamatábráját a 7. ábrán mutatjuk be. A teljes műveletre azért volt elsődlegesen szükség, mert a háromkomponenses szonda jellege megkívánta, hogy minden adatsor azonos síkra vonatkozzék [GÚTHY et al. 1999].

A következőkben a VSP feldolgozás eredményei alapján az egyik legfontosabb kérdésre, a sebesség anizotrópiára mutatunk be néhány ábrát. A lyukszelvényezést két forráspontból indítottuk, amelyek egyikét a lyuk szájától 1 m-re, a másikat 10 m-re telepítettük. A két forráspontból kapott eredmények (sebességmenetek) közötti különbség — a korrelációs együtthatóval kifejezve — a vertikális geofonnal mért  $P$ -hullám esetében kisebb,  $C_{\text{korr}}=0,83$  (8a. ábra). Az  $S$ -hullám esetében, — amelyet horizontális elmozdulásokra számoltunk — lényegesen nagyobb eltérések adódtak. Így a két (1 és 10 m) forráspontból kapott sebességértékek között a korreláció csak  $C_{\text{korr}}=0,39$  (8b. ábra).



8a. ábra. A rétegsor anizotrópia ( $x=1$  m és 10 m-es távolságú forrásból)  $P$ -hullámra

Fig. 8a. The anisotropic behaviour of the sediments for  $P$ -wave (source in  $x=1$  m and 10 m distance)

A VSP és a szónikus sebességértékek közötti különbség (14 m alatt) meglehetősen nagy. Ennek legfőbb oka a lényegesen különböző frekvencia. A VSP forrása a felszínen volt, száraz löszben. Ebből eleve adódik a kisfrekvenciás jelleg, amelyet a szeizmogramok egyértelműen igazolnak. A korrelációs együtthatók  $C_{\text{korr}}=0,81$ , ill.  $C_{\text{korr}}=0,69$  (8c. ábra).

Mindezekből arra következtethetünk, hogy a  $P$ -hullám sebessége kevésbé érzékeny az anizotrópiára, vagyis az  $S$ -, ill.  $SV$ -hullám sebessége jelentős mértékben függ az iránytól is.

### Összefoglalás

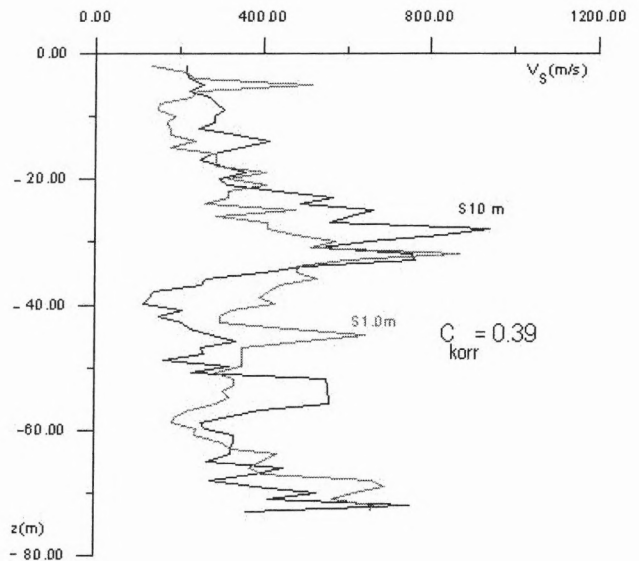
A terepi mérések esetén a felszíni zavarhullámok vizsgálata nem fejeződik be csak a felszínen mért szeizmikus adatmennyiséggel, hanem ki kell terjednie a teljes rétegsor

megismerésére, a mélyfúrásos feltárára is. Vizsgálataink eredményei:

1) A mélyfúrásban végzett VSP mérések adata segítségével felállított modellre a véges differenciás modellezéssel jó eredménnyel sikerült előállítani a felszíni zavarhullám képet.

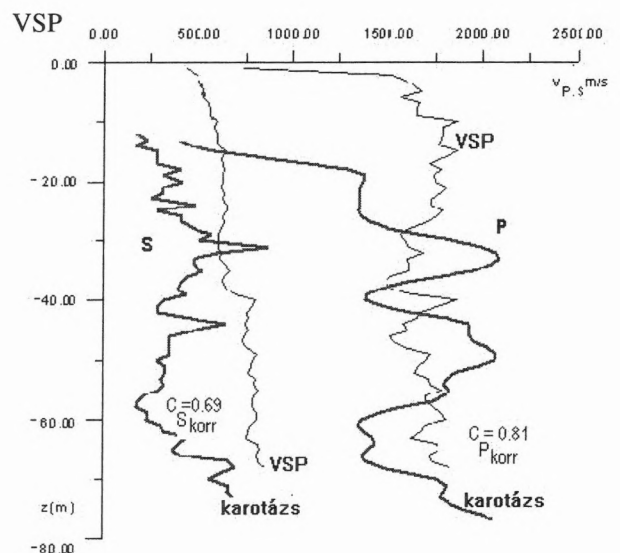
2) A modellezéssel meghatároztuk a hullámok jellegét, amely a teljes időtartományban  $P$ -, ill.  $P$ - $SV$ -testhullámnak bizonyultak. Felületi hullámra utaló indikáció, ha van is, nehezen ismerhető fel.

3) A  $P$ - és  $S$  hullámok terjedési sebességei a rétegsor anizotrópiájára érzékenyek, a  $P$ -hullám kevésbé, az  $S$ -hullám jelentősebben.



8b. ábra. A rétegsor anizotrópia ( $x=1$  m és 10 m-es távolságú forrásból)  $S$ -hullámra

Fig 8b. The anisotropic behaviour of the sediments for  $S$ -wave (source in  $x=1$  m and 10 m distance)



8c. ábra. Szónikus és VSP ( $x=1$  m) sebességadatok összehasonlítása

Fig. 8c. Comparison of sonic and VSP ( $x=1$  m) velocities

## Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki elsősorban az OTKA vezetőségének a T026415 sz. szerződés elfogadásáért, amely lehetővé tette a munkálatok nem kis költségű megoldását, valamint munkatársaimnak: HEGYBÍRÓ Zsuzsannának, JÁNVÁRINÉ KÁNTOR Ilonának, GÚTHY Tibornak, CSABAFI Róbertnek, ZILAHY-SEBESS Lászlónak, WEBER Zoltánnak és HERMANN Lászlónak a jelentős munkával járó megoldások megvalósításáért.

## HIVATKOZÁSOK

- ÁDÁM O. 1964: Szeizmikus felszíni zavarhullámok (ground roll) dinamikai tulajdonságainak vizsgálata. Magyar Geofizika **V**, 1-2, 39–50
- ÁDÁM O. 1967: A szeizmikus felszíni zavarhullámok. Geofizikai Közlemények **XVIII**, 3, 11–46
- ÁDÁM O. 1998: Felszíni zavarhullámok inverziója. Magyar Geofizika **39**, 1, 12–25

- ÁDÁM O. 1998: Felszíni zavarhullámok inverziója. Magyar Geofizika **39**, OTKA különszám, 46–47
- Georisk Kft. (inc. WÉBER Z.). 1999: Felszíni szeizmikus zavarhullámok modellezése véges differenciák módszerével. Kézirat
- EMERMAN S., STEPHEN R. 1983: Comment on “Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations” by R. CLAYTON and B. ENGQUIST. BSSA **73**, 661–665
- KAUFMAN H. V. 1953: Velocity functions in seismic prospecting. **18**, 2, 289–297
- SCHMIDT H., JENSEN F. B. 1985: Full wave solution for propagation in multilayered viscoelastic media with application to Gaussian beam reflection at fluid–solid interfaces. J. Acoust. Soc. Am. **77**, 813–825
- ZAHRADNIK J., PRIOLO E. 1995: Heterogenous formulation of elastodynamic equations of finite difference schemes. Geophysical Journal International, **120**, 663–676
- ZAHRADNIK J. 1995: Simple elastic finite difference scheme. BSSA **85**, 1879–1887
- ZILAHY-SEBESS L. 1999: Dunaújváros VI. mélyfúrás karotázszelvényeinek kiértékelése. Kézirat