

# Üregkutatás Rayleigh-hullámokkal. Szeizmikus modellvizsgálatok<sup>1</sup>

ORMOS TAMÁS<sup>2</sup>

*A dolgozatban egy kutatás első eredményéről számolunk be, amely annak megvizsgálását tűzte ki célul, hogy a felszínközeli üregek, pincék hogyan mutathatóak ki Rayleigh felületi hullámok segítségével. Először a Rayleigh-hullámok amplitúdó-mélység függvényéből és az üregek mélységéből és méretéből közelítő számítással a felszínen mérhető amplitúdóváltozás nagyságára vontunk le kvalitatív következtetéseket. Majd fizikai (analóg) 2-D modelleken ultrahanggal modelleztük a homogén féltérbe helyezett üregek felett kialakuló Rayleigh-hullámokat. A modellszeizmogramokat az e célra fejlesztett diszperzió-amplitúdó analízáló programunk segítségével dolgoztuk fel. Az eredményül kapott frekvencia- és távolságfüggő hullámamplitúdók elemzéséből azt a következtetést vontuk le, hogy a felületi hullámok alkalmasak a felszínközeli üregek kutatására. A kezdeti eredményekre alapozva a további fejlesztés irányaira is teszünk javaslatokat.*

## T. ORMOS: Detection of cavities by Rayleigh waves. Model seismic investigations

*The paper presents the first results of the work focusing on near surface cavity detection by Rayleigh surface waves. At first qualitative conclusions were drawn for the change of the Rayleigh wave amplitude of the depth and size of cavities and the amplitude-depth distribution of Rayleigh waves using approximate analytical treatment. Following this Rayleigh surface wave 2-D physical modeling was made over homogeneous halfspace containing different cavities. The model seismograms were processed with a dispersion-amplitude analyzing program developed by the author. The resulting frequency and distance dependent amplitude distributions showed that the surface waves were suitable for the investigation of the near-surface cavities. Based on these first results further directions of investigation were proposed.*

## Bevezetés

A felszínközeli üregek, valamint a fellazult zónák geofizikai felkutatására elsősorban a geoelektromos, elektromágneses módszerek sikeres alkalmazásával találkozhatunk a szakirodalomban [CSÓKÁS et al. 1974, FERENCZY 1980, QUARTO, SCHIAVONE 1996, BENSON 1995], de mikrogravitációs, mágneses és termikus (IR) eredményekről is olvashatunk.

A szeizmikus módszerek viszonylag ritkábban kerülnek alkalmazásra, így is azonban több érdekes kezdeményezésről számolnak be a szerzők. Leggyakrabban a reflexiók eljárásával kíséreltek meg felszín alatti üregeket kimutatni [COOK 1965, STEEPLES et al. 1986, MILLER, STEEPLES 1991, OWEN et al. 1988, PIWAKOWSKY et al. 1997]. Kézenfekvő és ezért többen vállalkoztak fúróluk közötti átvilágítással és tomográfiával a felszínközeli üregek felderítésére [DRESEN 1972, MCCANN et al. 1986, RÜTER 1992, PATTANTYÚS et al. 1997]. Az említett tanulmányok a rugalmas térhullámoknak az üregekben és azok közvetlen környezetében megfigyelhető átlagsebesség-csökkenéséről, illetve a hullámelhajlás következtében létrejövő árnyékszónában lecsökkent amplitúdók méréséről tudósítanak.

A felületi hullámok kifejezetten üregkutatásra való alkalmazásáról, elméleti, modellszeizmikus és terepi vizsgálatok eredményeiről szóló közleményekkel egyaránt találkozhatunk a szakirodalomban. HSIEH [1979], valamint DRESEN, HSIEH [1979] a németországi Ruhr-vidéken sok helyen fellelhető felhagyott, majd betömedékelt, egy-két méter vastag réteggel lefedett aknák (vertikális hengerrel

modellezett) helyének felderítésére legyező elrendezésű (azonos hullámúttal jellemzett) terítést használtak. 3-D fizikai modellezéssel és a modellek szisztematikus változtatásával kimutatták, hogy a diszperz Rayleigh-hullám hullámhosszának kétszeresénél vastagabb letakarás alatt az aknák már nem mutathatók ki. PRÓNAY és szerzőtársai [1997] a felszínközeli vertikális inhomogenitásokon (pincéken) visszaverődött diszperz felületi hullámok segítségével lokalizálták az üregeket. A problémát általánosítva a laterálisan és vertikálisan változó, valamint lokális inhomogenitások kimutatására a felületi hullámokat az utóbbi időben egyre gyakrabban „hasznosítják” [TAO 1993, DOMBROWSKI 1996, DOBRÓKA 1997, FANCSIK 1997, MISIEK et al. 1997, PRÓNAY et al. 1997].

## 1. Célkitűzések

A jelen munka az említett irodalmi tapasztalatokra alapozva olyan módszer létrehozását célozza meg, amely a felületi hullámok diszperzióanalízise során erre a célra eddig ki nem használt frekvenciafüggő amplitúdó információt kívánja hasznosítani.

A vezetett hullámokat többek között az jellemzi, hogy amplitúdójuk a hullámvezetést okozó közegtől (kis sebességű csatorna, féltér felszíne) távolodva exponenciálisan csökken. Az amplitúdó-mélység függvények alakja a hullámvezető és környezetének geometriai viszonyaitól (rétegvastagságok), a közegek rugalmas tulajdonságaitól (sebességek, sűrűségek), valamint a vezetett hullámok frekvenciájától, illetve frekvenciafüggő fázissebességeitől függ. A hullámvezetőben vagy annak környékén mérhető vezetett hullámok ezért mintegy „integrált” információt hordoznak a hullámvezető környezetéből. Ezen információ kinyerésé-

<sup>1</sup> Beérkezett: 1998. április 23-án

<sup>2</sup> Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszék, H-3515 Miskolc, Egyetemváros

re számos (inverziós) módszer ismeretes a szeizmológiában, a bányá- és mérnökgeofizikában.

Ezen eljárások a mért csatornákból leszarmaztatják a frekvenciafüggő fázis- és/vagy csoportsebesség-függvényeket, amely(ek)-ből az 1-D, illetve 2-D modellek rétegvastagság és sebesség adatait, valamint abszorpcióját becsülik inverzióval. E módszerekről és eljárásokról összefoglalóan DRESEN és RÜTER monográfiájában [1994] olvashatunk részletesebben.

A vezetett hullámok amplitúdójának „kihasználására” elsősorban a hullámvezetőben fellelhető lokális inhomogenitások — pl. széntelepben fellépő fellazult zónák, vetők — esetében került sor [DRESEN, RÜTER 1994]. Ezen inhomogenitások kimutatásának alapja az, hogy a vezetett hullámok visszaverődnek, illetve szóródnak az objektumokon, és ennek következtében az érzékelőkhöz a homogén esetben indokoltnál kisebb amplitúdójú hullám érkezik. Az előzőekben leírtak alapján e jelenségnek a hullámvezetőn kívüli inhomogenitások esetén is mutatkoznia kell, várhatóan a hullámvezető-inhomogenitás távolság növekedésével csökkenő mértékben, természetesen a vezetett hullám amplitúdó-mélység függvényének tükrében.

A fenti bevezető alapján egy lehetséges felszíni üregkutató szeizmikus módszer megvizsgálását tűztük ki célul, amely az alábbi gondolatmenetre épül.

A felületi vezetett hullámok (Rayleigh- és Love-) amplitúdója a mélységgel egyre rohamosabban csökken, a kis frekvenciáktól a nagyobbak felé tartva. Az üregről visszavert, illetve szórt hullámenergia — amely amplitúdócsökkenéshez vezet — ezért nagymértékben függ attól, hogy az üreg mérete (és helyzete) hogyan viszonyul a hullám által átvárt mélységtartományhoz az amplitúdó-mélység függvény alakjának megfelelően. Ebből az következik, hogy a felületi hullámok amplitúdócsökkenésének adott mélységű és méretű üreg esetében a frekvenciától függően különbözőnek kell lennie. Mivel a felületi hullámok rétegzett féltér felszínén általában diszperziót (a hullámterjedés egy frekvencia- és sebességsávban történik) mutatnak, ezért ezen hullámok amplitúdójának frekvenciafüggő elemzéséből reményeink szerint az üregek helyére és méretére lehet következtetni. E frekvenciasáv célszerűen időben változó frekvenciájú jelgerjesztéssel szabályozható.

A fentiek alapján tehát, ha egy üreg felett vonal mentén mért szeizmikus csatornákat diszperzió-amplitúdó analízisnek vetjük alá, a kapott amplitúdó a távolság és frekvencia függvényében („térképszerűen” ábrázolva) a felszínközeli üregek jelzője lehet.

## 2. Közelítő analitikus vizsgálatok

A homogén féltér felszínén terjedő végtelen távoli forrásból eredő Rayleigh felületi hullám elmozdulás-amplitúdójának vertikális  $V_z$  és horizontális  $V_x$  komponenseit az alábbi összefüggések írják le [KEILIS-BOROK 1989, SCHNEIDER 1993]:

$$V_x(\omega, z) = -i \frac{2 - \kappa^2}{\sqrt{1 - \gamma^2 \kappa^2}} \left[ e^{-r_\alpha z} + \frac{\kappa^2 - 2}{2} e^{-r_\beta z} \right],$$

$$V_z(\omega, z) = \frac{\kappa^2 - 2}{\kappa^2} \left[ e^{-r_\alpha z} + \frac{2}{\kappa^2 - 2} e^{-r_\beta z} \right],$$

ahol a jelölések a következő kifejezéseket jelentik:

$$\gamma = V_s / V_p \quad \kappa = C / V_s,$$

valamint

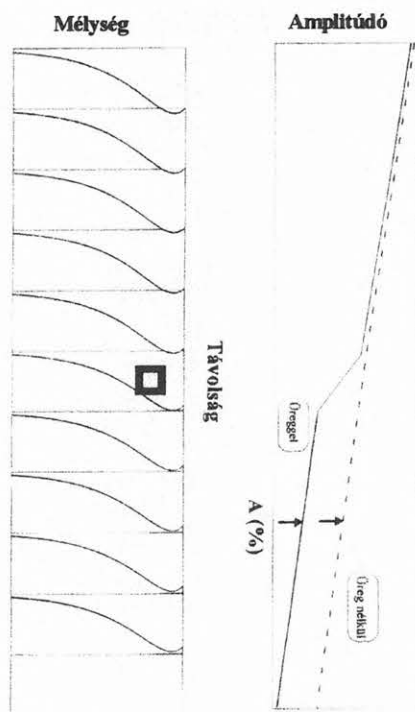
$$r_\alpha = 2\pi \frac{\sqrt{1 - \gamma^2 \kappa^2}}{\lambda} \quad r_\beta = 2\pi \frac{\sqrt{1 - \kappa^2}}{\lambda} \quad \lambda = 2\pi \frac{C}{\omega}.$$

Az amplitúdók számításához még szükséges  $C$  frekvenciafüggetlen fázissebességhez az alábbi egyenlet valós megoldásának megkeresésével jutunk abban az esetben, ha mindkét gyök alatti kifejezés egyszerre pozitív [ÁDÁM 1987] (negatív esetben a Somigliana-hullámok fázissebességét kapjuk):

$$(2 - \kappa^2)^2 - 4 \sqrt{1 - (\gamma \kappa)^2} \sqrt{1 - \kappa^2} = 0.$$

Az így számított amplitúdók csupán relatív értékek lehetnek, hiszen az alkalmazott síkhullámú megoldással a forrásra nem lehet megkötéseket tenni.

Egy üreg hatását a Rayleigh-hullám amplitúdójára közelítő módon úgy elemezhetjük, ha feltételezzük, hogy az üreg hullámterjedés irányára merőleges felületéről a teljes hullámenergia visszaverődik, illetve szóródik. Más szóval úgy tekintjük, mintha az amplitúdó-mélység függvényből az üreg egy, a magasságával megegyező szakaszt „kitakarna”. A közelítés abban áll, hogy feltételezzük az említett szakaszra eső energia teljes szóródását a hullámhossztól függetlenül. A folyamat jellegét az 1. ábra szemlélteti, ahol a szelvényre merőlegesen elhelyezett hosszú, levegővel töltött üreg (sötét négyzettel jelölve) hatására relatív amplitúdócsökkenést várunk a szelvényben. A „monoton” csökkenő amplitúdóval a közeg által meghatározott abszorpció, illetve a geometriai szóródás hatását kívántuk jelezni.



1. ábra. Rayleigh felületi hullám vertikális amplitúdó komponensének változása üreg felett (a folyamat elve)

Fig. 1. The change of the vertical amplitude of the Rayleigh wave above a cave (principle of the process)

Az üregeknél szóródott, illetve visszavert hullámok energiájával csökkentett továbbhaladó hullám amplitúdóját az energiaintegrál segítségével becsülhetjük meg. Az energiaintegrál értéke vagy más néven „relatív energia” [ORMOS 1984, DRESEN, RÜTER 1994] a hullám által képviselt — annak egy periódusára vonatkozó — közepes kinetikai energiával arányos mennyiség. Az előző kifejezésekkel általánosan a következő formában írható fel Rayleigh-hullámra és a teljes homogén féltérre:

$$E_0(\omega) = \int_0^{\infty} \rho(z) [V_x(\omega, z)^2 + V_z(\omega, z)^2] dz,$$

ahol  $\rho(z)$  a sűrűség mélységfüggését jelenti [SCHNEIDER 1993]. A felszín alatti üreg közepének a felszíntől vett mélységét  $z_u$ -vel, az átmérőjét  $d_u$ -vel jelölve, az üreg által szórt  $E_u$  relatív energiarész a fenti közelítésben a következő módon írható:

$$E_u(\omega) = \int_{z_u - d_u/2}^{z_u + d_u/2} \rho(z) [V_x(\omega, z)^2 + V_z(\omega, z)^2] dz.$$

A fentiekből az üreg hatására bekövetkező  $A(\omega, z_u, d_u)$  közelítő relatív amplitúdócsökkenést a frekvencia, valamint az üreg helyzetének és méretének függvényében százalékos formában az alábbiak szerint becsüljük:

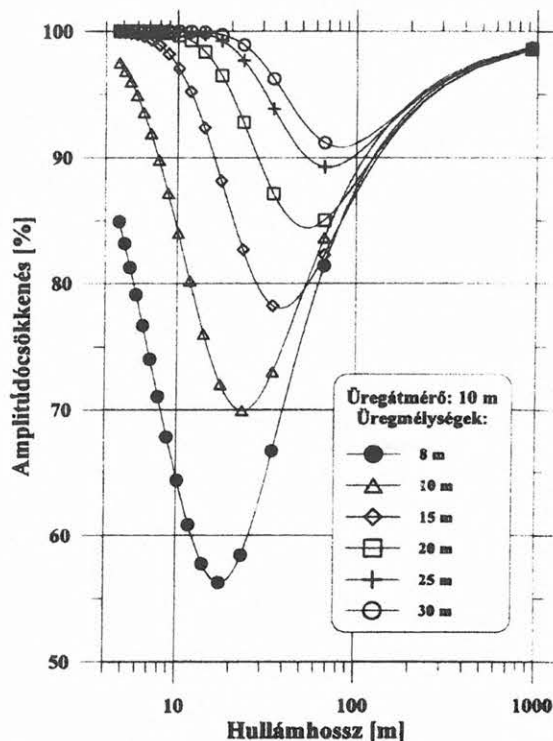
$$A(\omega, z_u, d_u) = \sqrt{\frac{E_0(\omega) - E_u(\omega)}{E_0(\omega)}} \cdot 100 \quad (\%).$$

Mivel esetünkben homogén féltérről van szó, az üreget magában foglaló közeg sűrűsége konstansnak tekintendő, és ezért az  $A(\omega, z_u, d_u)$  értékét nem befolyásolja.

A fenti összefüggésekkel különböző méretű és mélységű üregek okozta, szelvény menti amplitúdócsökkenést számítottuk ki. A homogén féltér paraméterei:  $V_p=2000$  m/s és  $V_s=1000$  m/s. A vizsgált üregek átmérői:  $d_u=10, 5, 2,5$  m. Az üregek középpontjainak mélységei:  $z_u=8, 10, 15, 20, 25, 30$  m. A számított amplitúdóváltozásokat a hullámhossz függvényében azonos méretű és változó mélységű üregekre a 2. ábrán, változó méretű és azonos mélységű üregekre a 3. ábrán mutatjuk be.

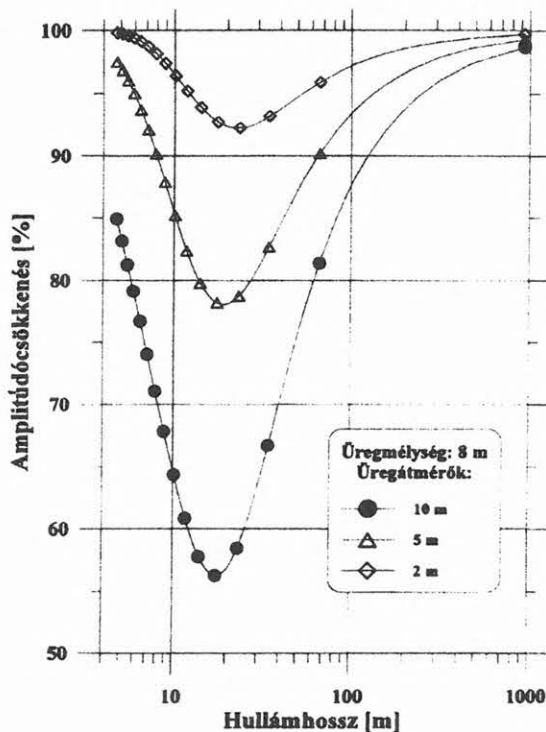
Az ábrákat szemlélve a felszínközeli üregeknek a Rayleigh-hullámok amplitúdócsökkentő hatására vonatkozóan az alábbi következtetések vonhatók le:

Az üregek amplitúdócsökkentő hatása a hullámhossz függvényében szélsőértéket mutat valamennyi üregméret és -mélység esetében. Tehát adott közegre vonatkozóan megállapítható egy hullámhossztartomány, amelyben az amplitúdóváltozás a legnagyobb. Az amplitúdóváltozás-függvény minimumához tartozó hullámhossz nagysága egyes viszonyban van az üreg mélységével: az üreg mélységének növekedésével nő, és fordítva. Az amplitúdóváltozás-függvények szélsőértékeihez tartozó függvényamplitúdók nagysága fordított viszonyban van az üreg mélységével, és egyes viszonyban az üreg méretével. Csökkenő függvényamplitúdó csökkenő üregméretet, illetve mélysegnövekedést jelez. Az amplitúdóváltozás-függvény minimumaihoz tartozó frekvenciasáv (kb. 20–80 Hz) a szeizmikus tartományba esik, így az általánosan használt terepi eszközök az üregekutatásra is alkalmasak (mivel a változást döntő mértékben a Rayleigh-hullám amplitúdójának vertikális komponense határozza meg, elegendő csak a vertikális komponens regisztrálására szorítkozni).



2. ábra. Rayleigh felületi hullám amplitúdóváltozása különböző mélységű, azonos méretű üregek felett. (Közeli modellszámítás,  $V_p=2000$  m/s,  $V_s=1000$  m/s,  $C=933$  m/s)

Fig. 2. The amplitude-change of the Rayleigh wave above caves at varying depth, and at constant size (approximative model calculations,  $V_p=2000$  m/s,  $V_s=1000$  m/s,  $C=933$  m/s)



3. ábra. Rayleigh felületi hullám amplitúdóváltozása különböző méretű, azonos mélységű üregek felett. (Közeli modellszámítás,  $V_p=2000$  m/s,  $V_s=1000$  m/s,  $C=933$  m/s)

Fig. 3. The amplitude-change of the Rayleigh wave above caves at constant depth, and at varying size (approximative model calculations,  $V_p=2000$  m/s,  $V_s=1000$  m/s,  $C=933$  m/s)



Összefoglalásul megállapítható, hogy a homogén feltér felszínén terjedő Rayleigh-hullám amplitúdójának a felszínközeli kétdimenziós üregek hatására bekövetkező szelvény menti csökkenése hullámhossz(frekvencia)függő és változó nagyságú. Nagy és felszínközeli üregek esetében ez a csökkenés elérheti a 30%-ot is. Valószínű azonban, hogy ez a változás a valóságban kisebb mértékű, mert az általunk követett viszonylag egyszerű analitikus modellezésnél alkalmazott elhanyagolásokkal azt feltehetően túlbecsültük. A vizsgálataink alapján azonban várható, hogy az amplitúdócsökkenés mérhető a gyakorlatban is, valamint remény látszik arra is, hogy a csökkenés mértékéből és frekvenciafüggéséből a felszínközeli üregek méretére és mélységére is következtethessünk. A felületi hullámok erre jó lehetőséget kínálnak, mert amplitúdójuk viszonylag nagy és ezért jó jel/zaj viszony érhető el, másrészt a rétegzett feltér felszínén terjedő felületi hullámok a modell geometriája által meghatározott diszperziót mutatnak, így eleve „széles sávú” hullámokkal találkozunk még impulzus jellegű rezgéskeltés esetén is. Igaz a diszperz felületi hullámok esetén a frekvenciafüggő fázis-, illetve csoportsebesség „kezelésével” is meg kell birkóznunk.

A ma már rutinszerűen alkalmazott kisméretű felszíni vibrátorokkal e sávzélesség növelhető, és a diszperz hullámvezetésre a felszínközeli geológiai struktúra miatt nem alkalmas esetekben (hiányzik a „pozitív” sebességváltozás, vagy ez túlságosan mélyen helyezkedik el) a nem diszperz Rayleigh felületi hullámok is megfelelően széles sávban kelthetők ahhoz, hogy a fentiekben vázolt amplitúdócsökkenés-frekvencia összefüggés kimérhető legyen.

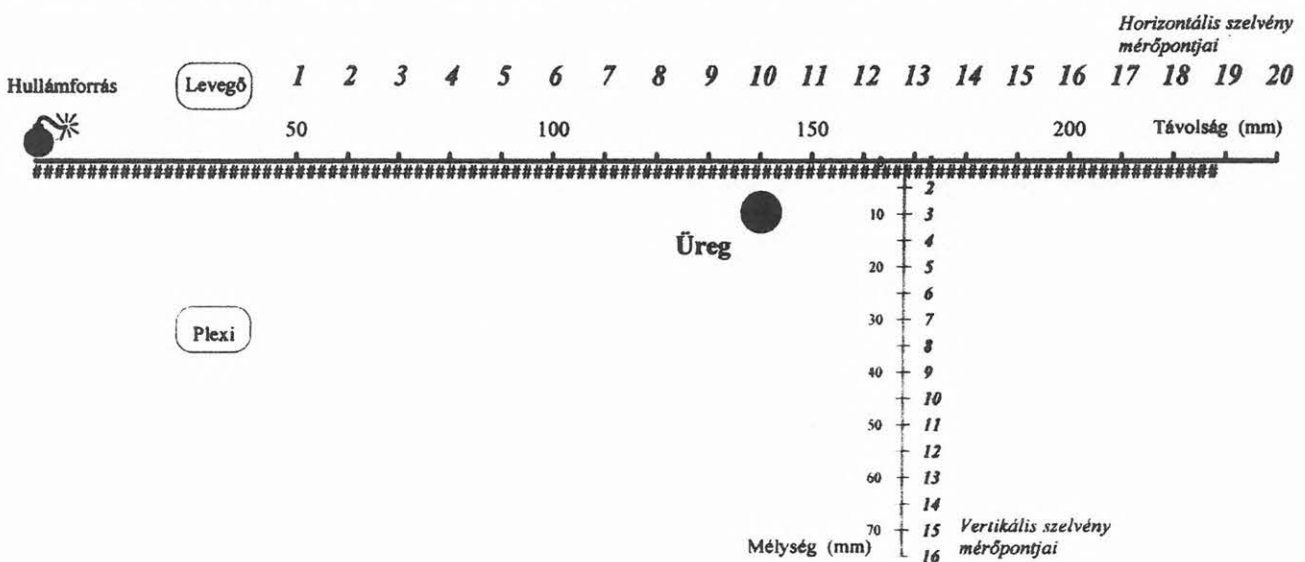
### 3. Analóg szeizmikus modellvizsgálatok

A fenti problémák tisztázására kétdimenziós analóg (fizikai) modellezést terveztünk, illetve végeztünk el. Célunk az volt, hogy első lépésként a lehető legegyszerűbb viszonyok mellett, a valósághoz közelebb álló módszerrel, de mégis ellenőrizhető, „kézben tartható” módon vizsgáljuk meg a felszínközeli üregek hatását a felületi hullámok amplitúdójára. A modellezéshez a Miskolci Egyetem Geo-

fizikai Tanszékén a 2385 sz. OTKA támogatásával létrehozott modellszeizmikus laboratórium berendezéseit használtuk [ORMOS 1995].

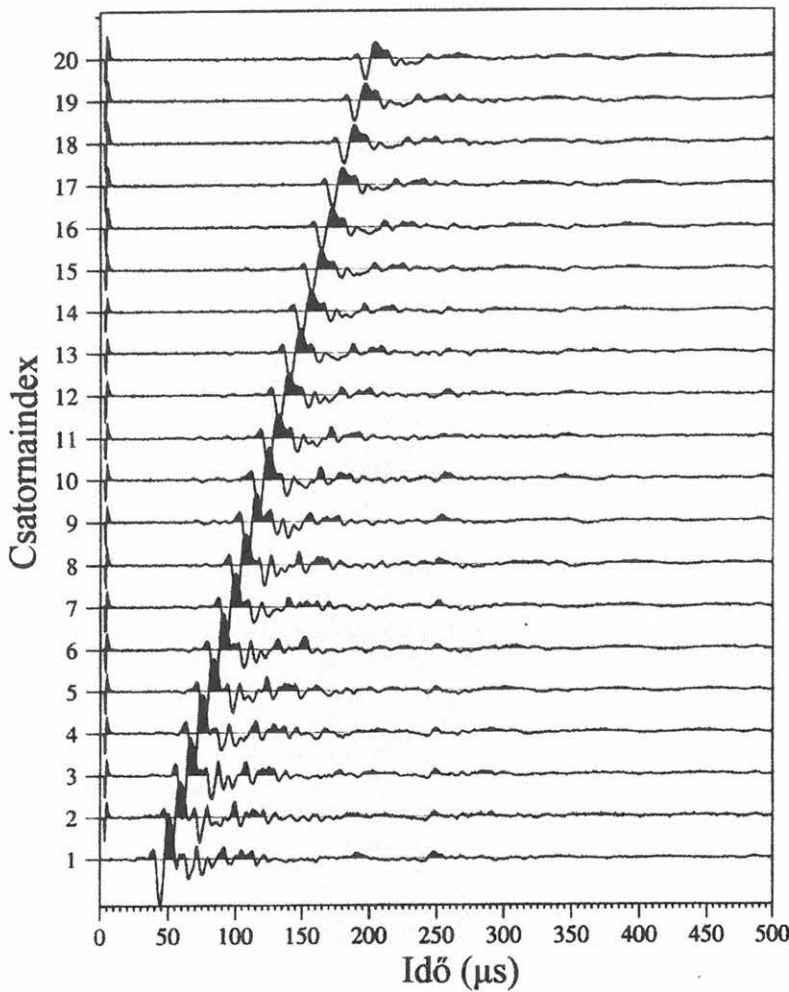
A vizsgálataink céljára szolgáló lemezmodellt 2 mm vastag és 280x900 mm méretű plexilapból készítettük. A modell anyagában a térhullámok terjedési sebességei mérések alapján a következők:  $V_p=2460$  m/s,  $V_s=1300$  m/s. A szelvényre merőleges kiterjedésű üreget a plexilapba fűrt különböző átmérőjű lyukakkal modelleztük. E modellkísérletünkben valamennyi üreg középpontjának a felszíntől vett mélysége azonos volt:  $z_u=10$  mm. Az átmérok  $z_u=2,0$  és 5,0 mm voltak. A szelvényben 20 regisztrálási pontot jelöltünk ki egymástól 10 mm távolságra. A forrás az első mérőponttól 50 mm-re helyezkedett el. A modellmérés elrendezését a 4. ábrán mutatjuk be. Az üreg a 9. és 11. mérőpont között helyezkedett el. A feltüntetett vertikális szelvény mentén is méréseket végeztünk a felületi hullám amplitúdójának mélységgel való változásának ellenőrzésére (üregmentes esetben).

A modellmérések műszerezettsége a már említett publikációban közölttel [ORMOS 1995, 1. ábra] azonos volt. A mérések során a jel/zaj viszony növelésére 256-szoros összegzést alkalmaztunk. Ezzel a nemkívánatos épület- és elektromágneses zajok amplitúdója jelentősen csökkenthető volt. Az üreg jelenléte miatt bekövetkező frekvenciafüggő amplitúdócsökkenés szeparált tanulmányozhatósága miatt impulzus jellegű rezgéskeltést alkalmaztunk. A programozható generátoron beállított (egy periódusnyi, szinusz alakú) forrásjelek középfrekvenciái 30, 60 és 90 kHz voltak. Mindhárom frekvencián az üregmentes (referencia) és a két különböző méretű üreg jelenléte esetén összesen kilenc, egyenként húszcsatornás szeizmogramot készítettünk. (A vertikális szelvény mentén üregmentes esetben ellenőrzés céljából három darab tizenhat csatornás szeizmogram is felvételre került.) Egy, a 90 kHz névleges frekvencián gerjesztett modellszeizmogramot példaképpen az 5. ábrán mutatunk be ( $d_u=5$  mm). A SEG-Y formátumban rögzített teljes szeizmogramra történt amplitúdónormálás után az alkalmazott rajzi méretek mellett a lényegesen kisebb amplitúdójú longitudinális hullámok beérkezései alig, vagy



4. ábra. A szeizmikus modellmérések helyszínrajza

Fig. 4. Site plan of the model seismic measurements



5. ábra. Modellszeizmogram (jelgerjesztés: 90 kHz, üreg:  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm)

Fig. 5. Seismogram section (source: 90kHz, cave:  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm)

nem is látszanak. A szeizmogram a távolság függvényében monoton csökkenő amplitúdót mutat, amely a plexi abszorpciójának következménye.

Az üreg hatására bekövetkező amplitúdócsökkenés megjelenését megvizsgáltuk a szeizmogramok csatorna-amplitúdóinak „nyers” összehasonlításával. A mért csatornák legnagyobb abszolút amplitúdóit megvizsgálva már megállapítható volt egy, az üreg hatására bekövetkező mintegy 10%-os relatív amplitúdócsökkenés. A vizsgálatból azonban az is kitűnt, hogy az amplitúdók abszolút maximumának felhasználása csak nagyon „zajos” eredményt hozhat, és a frekvenciaszelektív elemzésre sincs módunk. Ezért egy, a célnak megfelelő feldolgozó programot készítettünk.

#### 4. Többcsatornás diszperzió-amplitúdó analízis

A kifejlesztendő programtól azt vártuk el, hogy a kiválasztott felületi hullám amplitúdóját adja meg a frekvencia és a távolság függvényében, lehetőleg minél jobb jel/zaj viszony mellett. Az amplitúdó e „kétváltozós” függvénye segítségével reményeink szerint a felszínközeli üregek jelenléte kimutatható lesz az érzékenységvizsgálatokból és az első „nyers feldolgozásból” leszűrt tapasztalatoknak

megfelelően. A programtól megkivántuk azt is, hogy egyaránt képes legyen fogadni és feldolgozni nem diszperzív és diszperzív felületi hullámokat mind impulzusos, mind az időben változó frekvenciájú rezgésekeltés alkalmazásával. Fontos szempont volt az is, hogy mind az adatformátum, mind a mértékegységek tekintetében egyaránt alkalmas legyen modell- és terepi adatok (pl. ESS-3-24) feldolgozására.

A programot a diszperz hullámok csoportsebesség-analíziséhez széles körben használatos, ún. *Modified Moving Window Analysis (MMWA)* módszerére alapoztuk [KODERA et al. 1976], amellyel a diszperz hullámok burkolója maximumának terjedési sebessége (a csoportsebesség) számítható a frekvencia függvényében. Esetünkben az eddig ki nem használt burkoló (pillanatnyi) amplitúdóban rejlő információt hasznosítottuk. A kifejlesztett programmal a felületi hullám csatornánként elvégzett diszperzió-analízise eredményeiből az egyes frekvencia-hoz tartozó maximális amplitúdókat származtatjuk le. A fenti módon kapott burkoló-amplitúdó-frekvencia távolság összefüggést egy felületszerkesztő-rajzoló programmal jelenítjük meg az értelmezés céljára.

A feldolgozott szeizmogramokból a 6a, b. és 7a, b. ábrákon mutatunk be összesen négyet. A 6. ábrán a 30 kHz-en, a 7. ábrán a 90 kHz-en gerjesztett és feldolgozott szeizmogramok láthatók. Az „a” jelű eredmények az üregmentes (referencia), a „b” jelűek az 5 mm átmérőjű üregek esetére vonatkoznak. Az izovonalakra az amplitúdóváltozás értékeit írtuk %-ban. Az amplitúdókat csak az egyes mérésekben belül normáltuk, a mérések között nem.

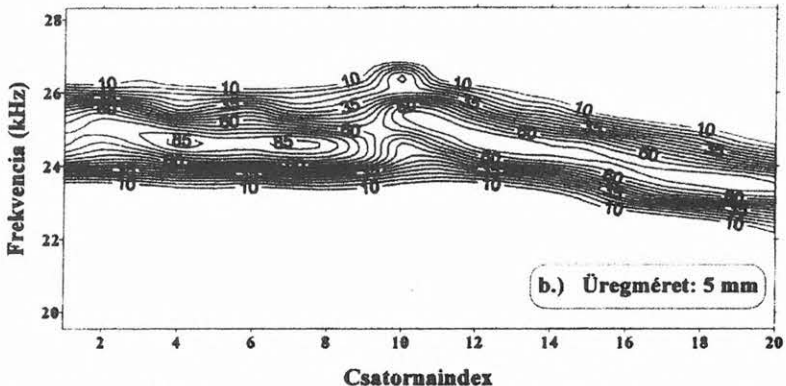
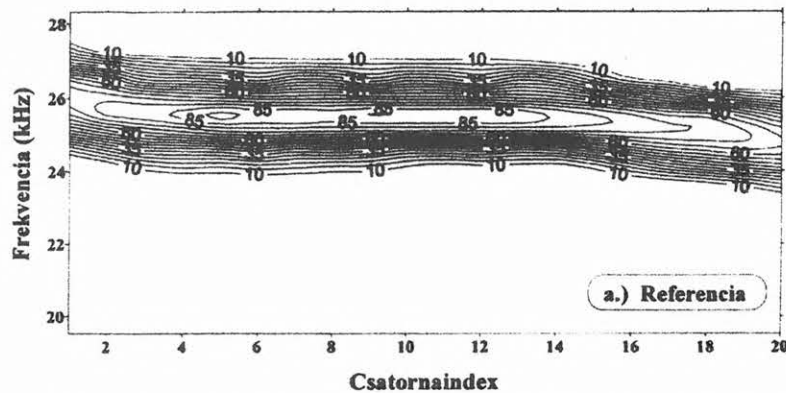
(Ennek az oka az, hogy a modellek módosítása és a modellforrás újbóli elhelyezése után a méréseket nagyon nehéz amplitúdóhelyesen megismételni.)

Az ábrákat szemlélve azonnal feltűnik az, hogy a frekvencia növekedésével a hullám amplitúdója a távolsággal csökken, a várakozásnak megfelelően. A plexi szelektív abszorpciója is megfigyelhető a domináns frekvencia távolsággal való csökkenése mértékének különbözőségével. (Itt kell megjegyezni azt is, hogy a ténylegesen keltett ultrahanghullám frekvenciája kisebb a generátoron beállítottnál. Ennek oka az adó oldali rendszer — erősítő, a piezokerámia anyaga és mérete, valamint főként a csatolás — átviteli viszonyaiban keresendő).

Az amplitúdófüggvények lefutásában tapasztalható kisebb „egyenetlenségek” oka a felületszerkesztés módszerében keresendő (krigelés, anizotrópia faktor=5).

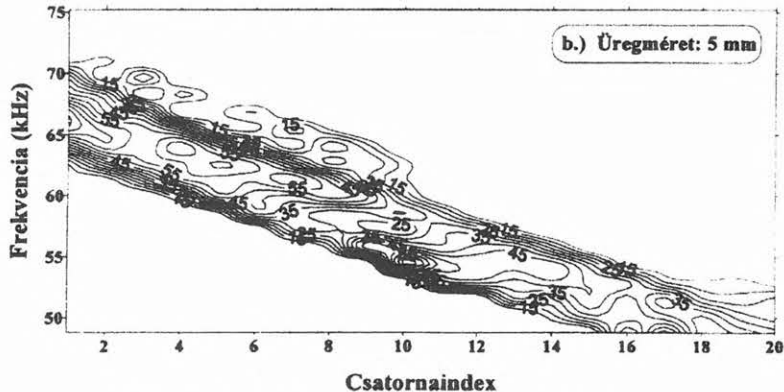
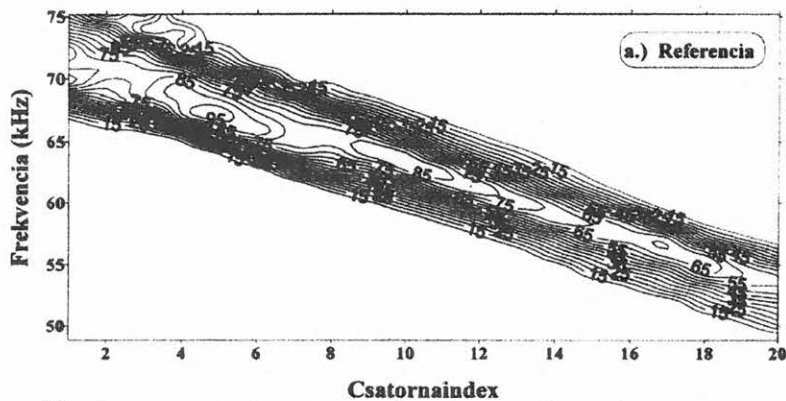
Mindezek ellenére a keresett amplitúdócsökkenést felfedezhetjük a feldolgozott szelvényeken.

Az 5 mm átmérőjű, 10 mm mélyen fekvő üreg valamennyi különböző frekvencián mért és feldolgozott szeizmogramon észlelhető. Az amplitúdócsökkenés a 25 kHz frekvenciatartományban kb. 10%-os (6. ábra), a 40 kHz-es tartományban kb. 15%-os, míg a 60 kHz-es tartományban



6. ábra. A frekvencia–amplitúdó analízis eredményei (jelgerjesztés 30 kHz).  
a) Üreg nélkül (referencia), b) Üreggel  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm

Fig. 6. Result of the frequency–amplitude analysis (source: 30 kHz).  
a) without cave (reference), b) with cave:  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm



7. ábra. A frekvencia–amplitúdó analízis eredményei (jelgerjesztés 90 kHz). a) Üreg nélkül (referencia),  
b) Üreggel  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm

Fig. 7. Result of the frequency–amplitude analysis (source: 90 kHz). a) without cave (reference), b) with cave:  $z_u=10$  mm,  $d_u=5$  mm

kb. 20%-os (7. ábra). Továbbá az üreg környezetében a frekvencia szerint addig viszonylag „nyugodt” lefutású képen mindenhol egy perturbációt figyelhetünk meg, amelynek okozója az üregről szóródott–visszaverődött hullámok interferenciája lehet. Ez a hatás is az üregek jelzője lehet.

## 5. Összefoglalás

A jelen dolgozat egy vizsgálat kezdeti eredményeit mutatja be, amely felületi hullámokkal történő üregekutatásra irányul.

Először közelítő analitikus vizsgálatokkal megállapítottuk, hogy homogén feltételekben elhelyezett kétdimenziós üregek hatása a nem diszperzív Rayleigh-hullámok szelvény mentén mért amplitúdójának frekvenciafüggő csökkenésében jelentkezik. Az amplitúdócsökkenésnek a frekvencia szerint szélsőértéke van. Ennek helye és „nagysága” az üreg méretének és mélységének függvénye az adott közegben, és ezek az értékek hagyományos terepi eszközparkkal mérhetők.

A valós viszonyokat közelítő analóg (vagy fizikai) modellezéssel különböző méretű és mélységű üregek felett több frekvencián impulzusos rezgéskeltéssel (ultrahanggal) felvett modellszeizmogramok kiértékelése alapján megállapítható, hogy az üreg hatására létrejövő frekvenciafüggő amplitúdócsökkenés mérhető, és így a felszínközeli üregek is jelezhetők. Az üregekről szórt hullámok interferenciájának hatása is felismerhető a feldolgozott modellszeizmikus anyagban.

Az elért kezdeti eredmények és kutatás során szerzett tapasztalatok alapján a továbbfejlesztés ígéretesnek tűnik. Ennek során a rétegzett közegbe helyezett üregek hatásának vizsgálata, a közeg által meghatározott abszorpció és a geometriai szóródás hatásának kiszűrése a feldolgozó program fejlesztésével, az időben változó frekvenciájú jelgerjesztés előnyeinek kivizsgálása, valamint természetesen terepi mérések kivitelezése és feldolgozása mind izgalmas kihívást, és megoldandó feladatot jelentenek.

## Köszönetnyilvánítás

Ezen eredmények az 1997-ben zárult OTKA 19088 sz. kutatási téma keretében születtek egy korábbi OTKA-téma (2385) támogatásával is létrehozott modellszeizmikus laboratóriumban. A szerző köszönetét fejezi ki a támogatásért. Köszönet illeti Prof. Dr. hc. Dr. Lothar DRESEN professzort és Dr. Christian SCHNEIDER urat (Ruhr-Universität Bochum, Geofizikai Intézet) egyes számítógépi szubrutinok átadásáért.



- ÁDÁM O. 1987: Szeizmikus kutatás. Egyetemi tankönyv. Tankönyvkiadó, 58–59
- BENSON A. K. 1995: Application of ground penetrating radar in assessing some geologic hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics* **3**, 177–193
- COOK J. C. 1965: Seismic mapping of underground cavities using reflection amplitudes. *Geophysics* **30**, 527–538
- CSÓKÁS J., GYULAI Á., LÉNÁRD M. 1974: Mérnökgeofizika az építőiparban. *Építőanyag* **26**, 1, 13–17
- DOBRÓKA M. 1997: Inversion of guided wave dispersion data. EAGE 59<sup>th</sup> Conference and Technical Exhibition, Geneva, 26–30 May, 1997. Extended Abstracts p. 155
- DOMBROWSKI B. 1996: 3-D modeling, analysis and tomography of surface wave data for engineering, and environmental purposes. Dissertation. Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, **45**
- DRESEN L. 1972: Modellseismische Untersuchungen zum Problem der Ortung oberflächennaher kreiszylindrischer Hohlräume in Felsgestein. Dissertation. Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, **1**
- DRESEN L., HSIEH C.-H. 1979: Ortung verlassener Schächte mit Hilfe von Rayleigh-Wellen. *Glückauf-Forschungshefte* **40**, 190–198
- DRESEN L., RÜTER H. 1994: Seismic Coal Exploration. Part B: In-seam Seismics. Pergamon
- FANCSIK T. 1997: Laterálisan változó rétegpáraméterekkel jellemzett összletek kutatása P-SV hullámokkal. 26. vándorgyűlés, Magyar Geofizikusok Egyesülete, Sopron, 1997. szeptember 10–11. Előadáskivonatok 27. o.
- FERENCZY L. 1980: Felszínközeli üregek mélységének és méretének meghatározása dipól szelvényezéssel. *Magyar Geofizika* **XXI**, 134–142
- HSIEH C.-H. 1979: Ortung verdeckter Bergwerkschächte mit Hilfe von Rayleigh-Wellen. Berichte der Ruhr-Universität Bochum, **7**
- KEILIS-BOROK V. I. 1989: Seismic surface waves in laterally inhomogeneous earth. *Modern Approaches in Geophysics* **9**, Kluwer Academic Publishers
- KODERA K., DE VILLEDARY C., GENDRIN R. 1976: A new method for the numerical analysis of non-stationary signals. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **12**, 142–450
- MCCANN D. M., BARIA R., JACKSON P. D., GREEN A. S. P. 1986: Application of cross-hole seismic measurements in site investigation surveys. *Geophysics* **51**, 914–929
- MILLER R. D., STEEPLES D. W. 1991: Detecting voids in a 0.6 m coal seam, 7 m deep, using seismic reflection. *Geoexploration* **28**, 109–119
- MISIEK R., LIEBIG A., GYULAI Á., ORMOS T., DOBRÓKA M., DRESEN L. 1997: A joint inversion algorithm to process geoelectric and surface wave seismic data. Part II: Application. *Geophysical Prospecting* **45**, 65–95
- ORMOS T. 1984: Csatornahullámok kialakulása a Borsodi Szénmedencében. Egyetemi doktori értekezés. Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék
- ORMOS T. 1995: Felszínközeli geológiai szerkezetek vizsgálata 3-D analóg szeizmikus modellezéssel. *Magyar Geofizika* **36**, 11–18
- OWEN T. E., PARRA J. O., BRIEN J. T. O. 1988: Shear wave seismic reflection system for detection of cavities and tunnels. SEG 58<sup>th</sup> Annual International Meeting, Tulsa. Expanded Abstracts ENG 1.6
- PATTANTYÚS-Á. M., HERMANN L., PRÓNAY ZS., TÖRÖS E. 1997: Komplex geofizikai kutatások a Budai Várban. *Magyar Geofizika* **38**, 37–43
- PIWAKOWSKY B., WATELET J.-M., MOREAUX D. 1997: High-resolution seismic prospecting of old gypsum mines — evaluation of detection possibilities. *Environmental and Engineering Geophysics* **2**, 109–120
- PRÓNAY ZS., HERMANN L., TÖRÖS E., NEDUCZA B., HOLCZINGER L. 1997: Mérnökseizmikus vizsgálatok. 26. vándorgyűlés, Magyar Geofizikusok Egyesülete, Sopron, 1997. szeptember 10–11. Előadáskivonatok 26–27
- QUARTO R., SCHIAVONE D. 1996: Detection of cavities by the self-potential method. *First Break* **14**, 419–431
- RÜTER H. 1992: Crosshole-tomography to research of market in Colditz. *Geophysical Methods of Environmental Research. International TEMPUS Seminar*, Miskolc, 14–19. Sept. 1992
- SCHNEIDER Ch. 1993: Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten mit Rayleigh-Oberflächenwellen. Dissertation. Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, **36**
- STEEPLES D. W., KNAPP R. W., MCELWEES C. D. 1986: Seismic reflection investigations of sinkholes beneath interstate highway 70 in Kansas. *Geophysics* **51**, 295–301
- TAO Yu 1993: Numerische Modellierung zur Untersuchung des Einflusses von lokalen Irregularitäten auf die Ausbreitung von Love-Wellen in geschichteten Medien. Dissert. Berichte des Institutes für Geophysik der Ruhr-Universität Bochum, **3**