



# Az akusztikus szelvényezési módszer

Műszaki földtudományi szak számára

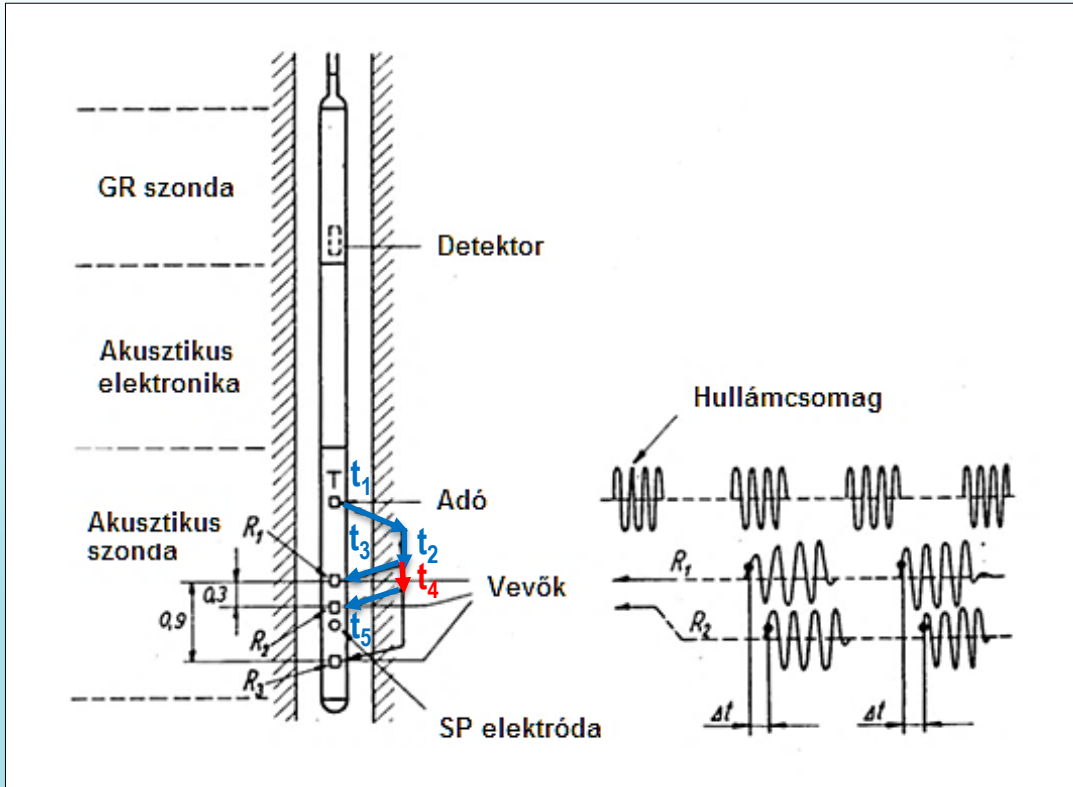
Dr. habil. Szabó Norbert Péter  
egyetemi docens  
Miskolci Egyetem, Geofizikai Intézeti Tanszék  
e-mail: [norbert.szabo.phd@gmail.com](mailto:norbert.szabo.phd@gmail.com)

# Bevezetés

---

- Akusztikus (szónikus) mérés elve
- Alkalmazott olajipari szondák
- Kőzetek jellemző akusztikus terjedési ideje
- Akusztikus szelvényezés alkalmazási területei
- Szónikus porozitás számítása
- Akusztikus mérés korrekciói (agyag, szénhidrogén, kompakció)
- Stoneley-féle áteresztőképesség számítása
- Akusztikus szonda válaszfüggvénye
- Az akusztikus szelvény inverziós felhasználása

# Akusztikus mérés a fúrólyukban



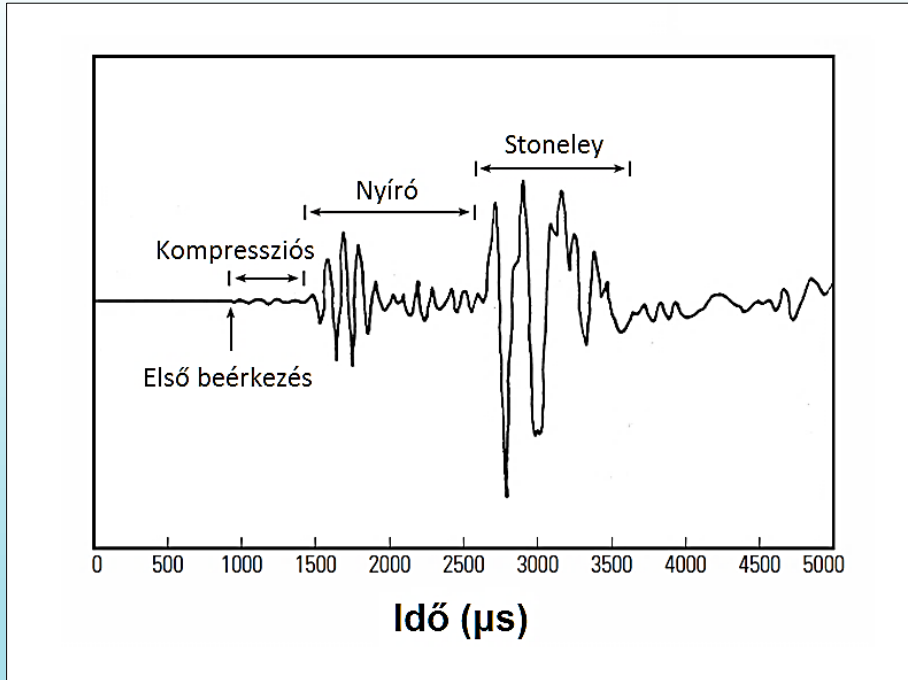
$$t_{R_1} = t_1 + t_2 + t_3$$

$$t_{R_2} = t_1 + t_2 + t_4 + t_5$$

$$\rightarrow t_{R_2} - t_{R_1} = t_4 = \frac{d_{R_1 R_2}}{V_{p,k}}$$

- Piezoelektromos jeladó (10-40 kHz) és két vagy több vevő helyezkedik el a szondán
- Hagyományos szondával a refraktált P-hullám terjedését vizsgáljuk
- Mért paraméter a  $\Delta t$  **akusztikus intervallum-ideje**  $\mu\text{s}/\text{m}$ -ben (rugalmas hullám ennyi idő alatt tesz meg 1 m távolságot a kőzetben)
- Központosított szonda esetén a  $t_4$  idő csak a kőzet sebességétől függ
- Ferde szonda helyzet vagy kaverna esetén  $t_3 \neq t_5$  és  $t_{R_2} - t_{R_1} \neq t_4$
- Több adó alkalmazása adónként két-két vevővel (BHC szonda), korrigált akusztikus intervallum-idejét számtani átlagképzéssel kapjuk
- Vertikális felbontás  $\sim 60$  cm, behatolás  $\sim 15\text{--}25$  cm

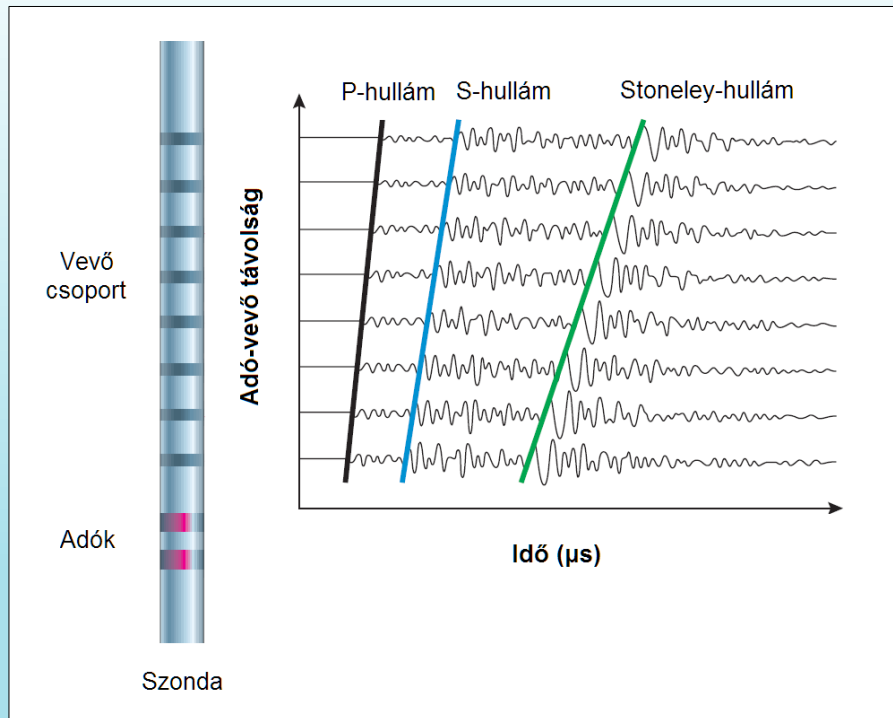
# Akusztikus hullámok



Ellis és Singer (2007)

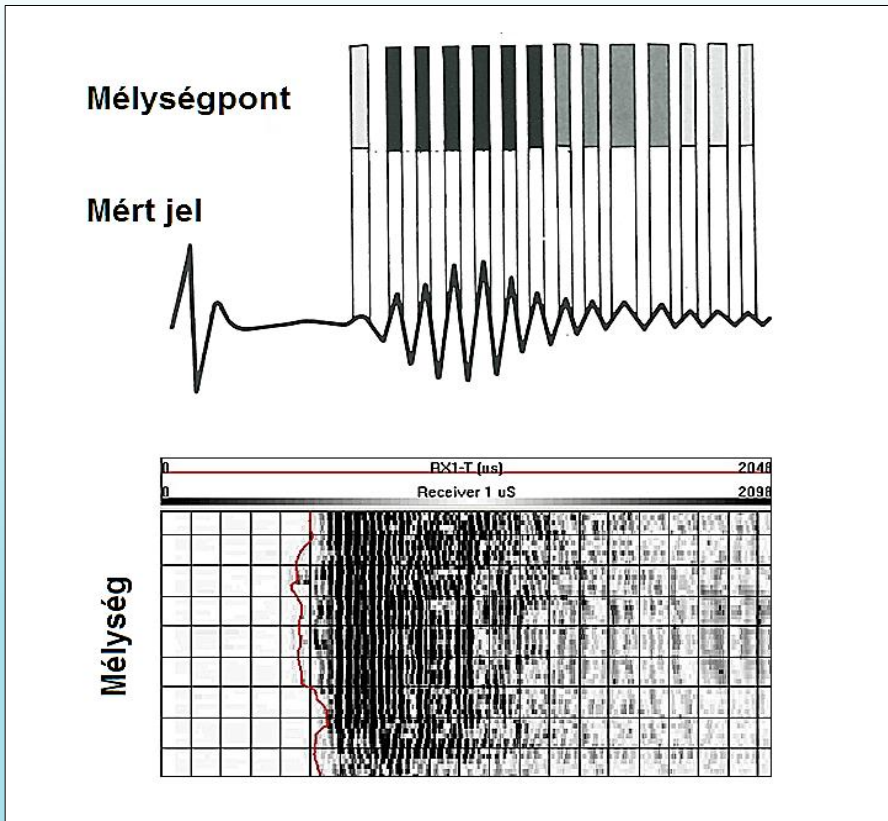
- **Első beérkezés** – longitudinális hullám, az adótól a kőzetig az iszapban nyomáshullám formájában terjed, a kőzetben refraktálódik, végül a vevőbe nyomáshullámként tér vissza → porozitás meghatározása
- **Nyíróhullám** - az adótól a formációba nyomáshullámként, a kőzetben transzverzális hullámként terjed, a vevőbe nyomáshullámként érzékelik → anizotrópia, rugalmas állandók meghatározása
- **Iszaphullám** - az adóból a vevőbe közvetlenül az iszaposzlopon keresztül terjed a fúróiszapnak megfelelő nyomáshullám sebességgel, a teljes hullámképen nehéz elkülöníteni
- **Stoneley hullám** - az iszaphullámnál is kisebb sebességgel, az iszap és kőzet határfelületén terjedő felületi hullám, sebessége függ a frekvenciától (diszperzió), a lyukátmérőtől, a kőzet nyíróhullám sebességétől, az iszap és a kőzet sűrűségétől, az iszaphullám sebességétől → permeabilitás meghatározása

# Többcsatornás monopól szonda



- Egy vagy több monopól adót (energiát minden irányban azonos intenzitással bocsájtja ki) és egy sorozat monopól vevőt tartalmaz
- Hagyományos BHC eszközökhöz képest a vevők kisebb távolságra helyezkednek el egymástól, mellyel nagyobb vertikális felbontóképesség érhető el
- Változtatható a szondahossz és a mintavételi időköz, ezzel szabályozható a behatolási mélység és a felbontóképesség
- Nagyobb adó-vevő távolság miatt az egyes hullámösszetevők elkülönítése könnyebb
- Csatornák együttes feldolgozásával (teljes hullámképek összegzése) P-, S- és Stoneley szelvények számíthatók

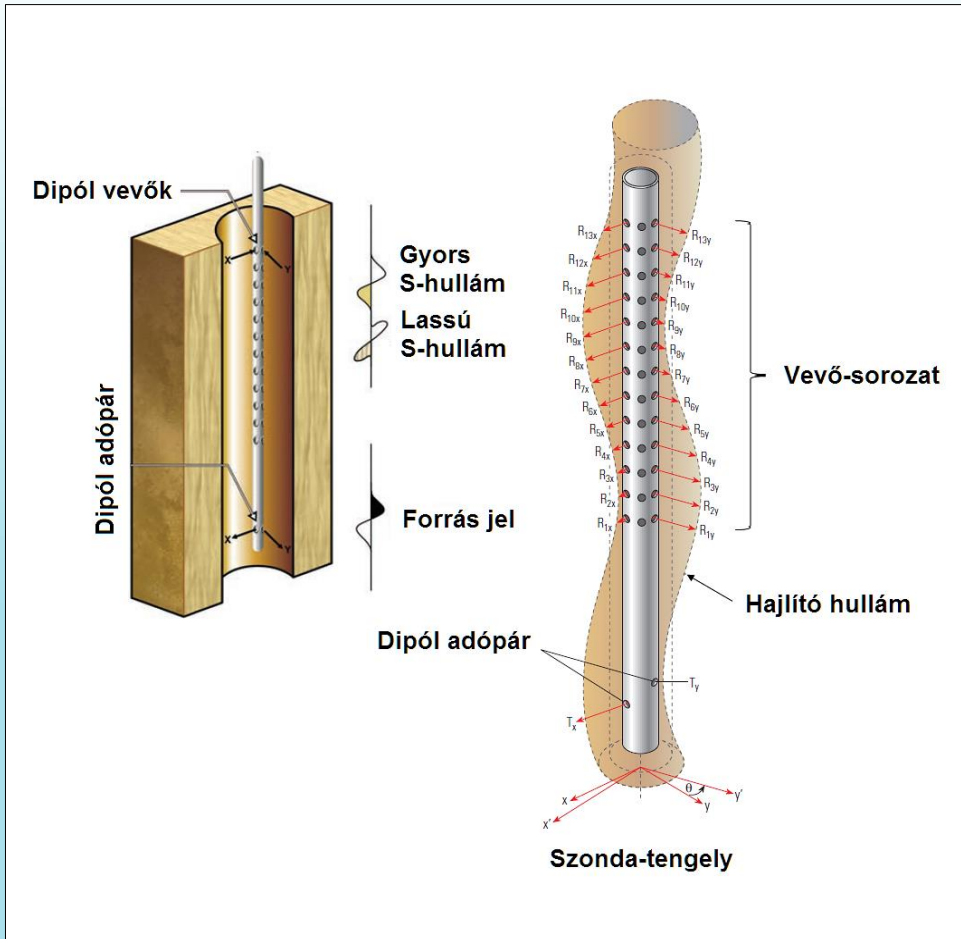
# Többcsatornás monopól szonda



SPWLA glossary (1984)

- Egy vagy több monopól adót (energiát minden irányban azonos intenzitással bocsájtja ki) és egy sorozat monopól vevőt tartalmaz
- Hagyományos BHC eszközökhöz képest a vevők kisebb távolságra helyezkednek el egymástól, mellyel nagyobb vertikális felbontóképesség érhető el
- Változtatható a szondahossz és a mintavételi időköz, ezzel szabályozható a behatolási mélység és a felbontóképesség
- Nagyobb adó-vevő távolság miatt az egyes hullámösszetevők elkülönítése könnyebb
- Csatornák együttes feldolgozásával (teljes hullámképek összegzése) P-, S- és Stoneley szelvények számíthatók
- Teljes hullámképből változó sűrűség-szelvény (VDL) származtatható

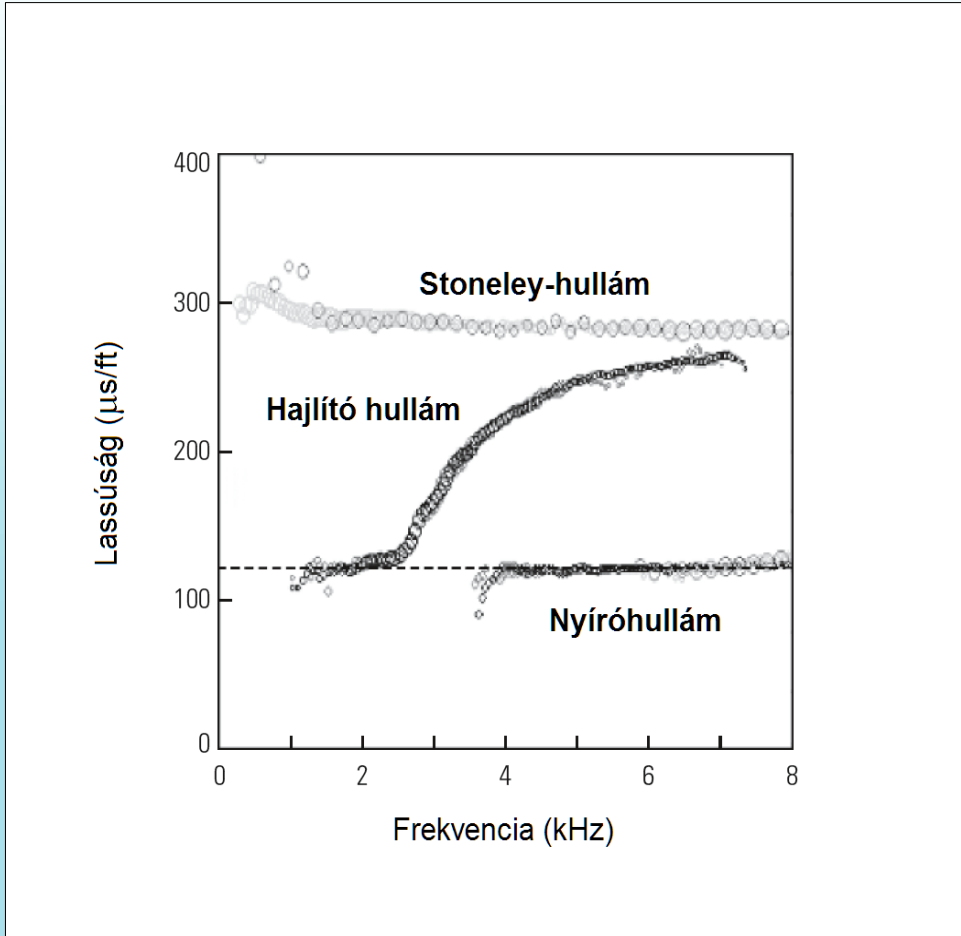
# Kereszt-dipól szonda



Haldorsen és szerzőtársai (2006)

- Kis sebességű közetben a nyíróhullám, melynek sebessége kisebb az iszap sebességénél, nem mérhető monopól vevőkkel
- Keresztirányú adók és vevők (csoportja) lehetővé teszik az egymásra merőleges teljes hullámképek felvételét
- Dipól adók radiális irányban aszimmetrikus kompressziós hullámot generálnak a fúrólukban, mely egyik irányban nyomás növekedést, míg a szemben lévő irányban nyomás csökkenést okoz, a fúróluk fala a hullámterjedés irányára merőlegesen elhajlik, dipól adók által gerjesztett vezetett hullám a **hajlító hullám**
- Diszperzív hullám, sebessége alacsony frekvencián megközelíti a nyíróhullám sebességének a meghatározása

# Kereszt-dipól szonda

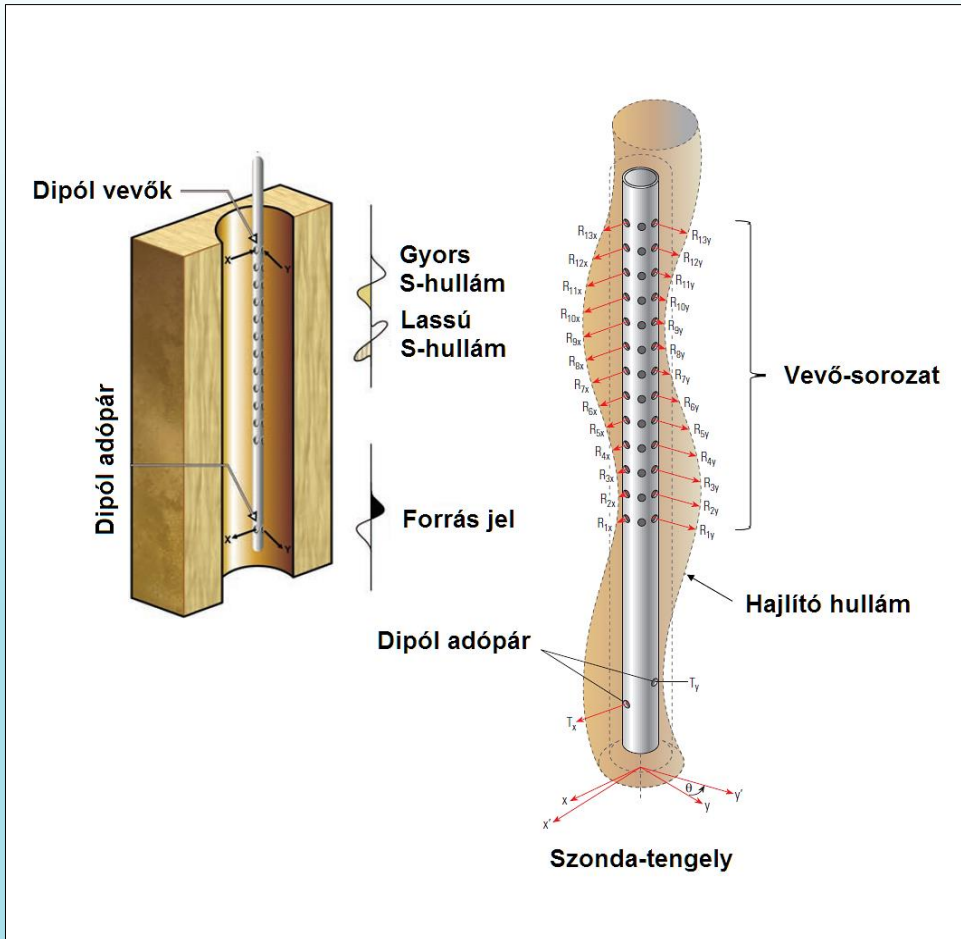


Haldorsen és szerzőtársai (2006)

- Kis sebességű közetben a nyíróhullám, melynek sebessége kisebb az iszap sebességénél, nem mérhető monopól vevőkkel
- Keresztirányú adók és vevők (csoportja) lehetővé teszik az egymásra merőleges teljes hullámképek felvételét
- Dipól adók radiális irányban aszimmetrikus kompressziós hullámot generálnak a fúrólukban, mely egyik irányban nyomás növekedést, míg a szemben lévő irányban nyomás csökkenést okoz, a fúróluk fala a hullámterjedés irányára merőlegesen elhajlik, dipól adók által gerjesztett vezetett hullám a **hajlító hullám**
- Diszperzív hullám, sebessége alacsony frekvencián megközelíti a nyíróhullám sebességét, nyíróhullám sebességének a meghatározása



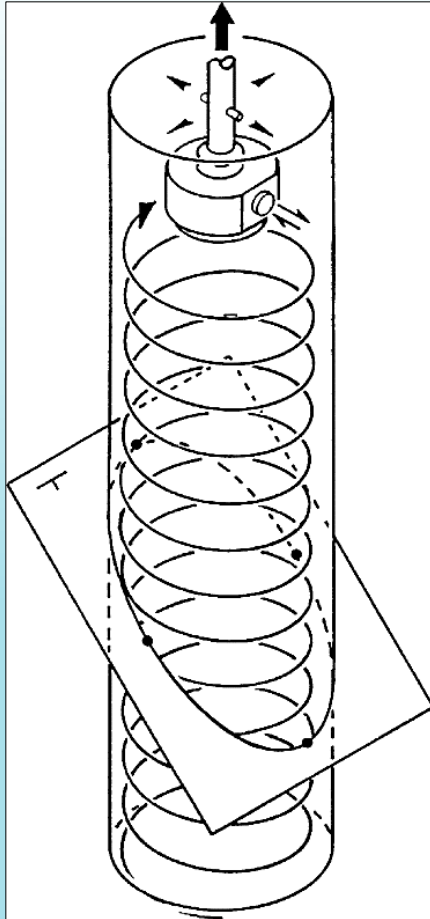
# Anizotrópia meghatározása



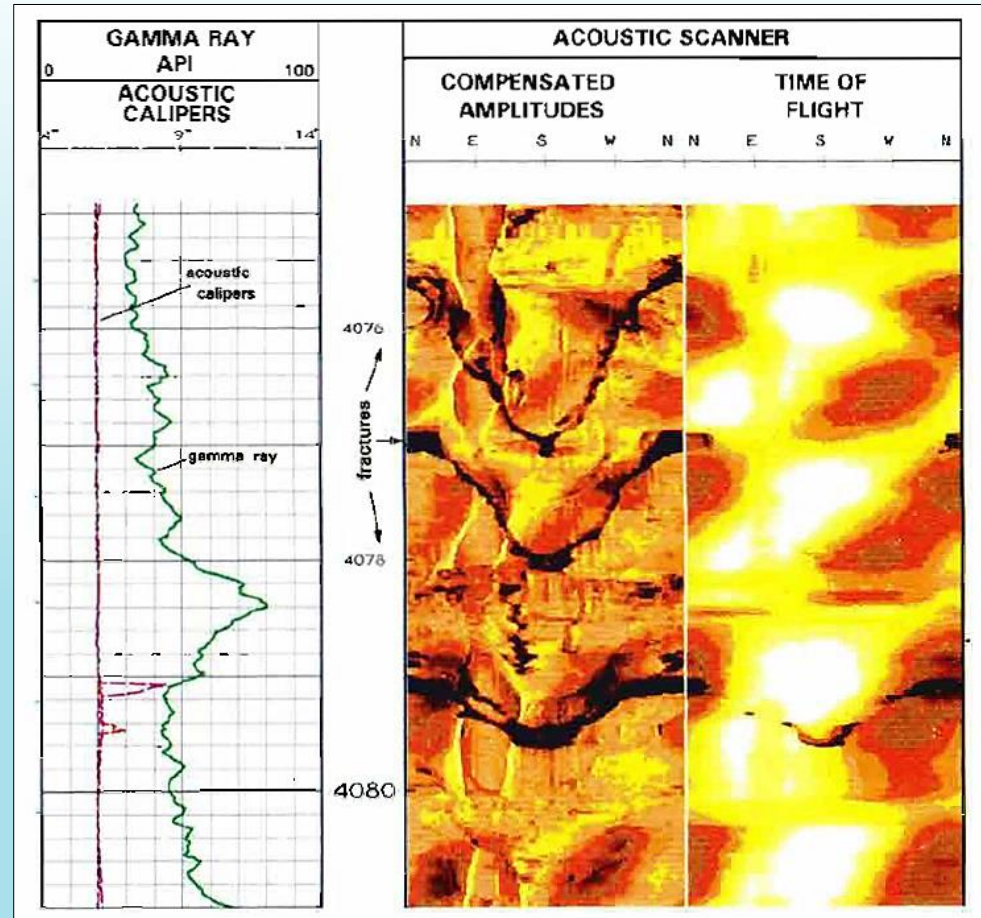
Haldorsen és szerzőtársai (2006)

- Anizotróp közegben a nyíróhullám két egymásra merőleges síkban polarizált hajlító komponensre válik szét, a két nyíróhullám különböző sebességgel terjed tovább → **gyors és lassú nyíróhullám**
- Nyíróhullám anizotrópia oka a litológiai jellemzők irányfüggése, réteghatárok, vetők, repedések jelenléte, lyukátmérő változás, tektonikus feszültségtér
- Nyíróhullámok a repedéssel párhuzamos polarizációs irány esetén gyorsabban terjednek, mint azokra merőlegesen, a mért jelben a két nyíróhullám részvételének aránya függ az anizotrópia irányától ( $\Theta$ )
- Anizotrópia mértékét a gyors és a lassú nyíróhullám intervallumterjedési idők közötti relatív különbségből adjuk meg
- In-situ feszültségirányok meghatározása, rétegrepestés irányának kijelölése

# Akusztikus lyukfalleképezés

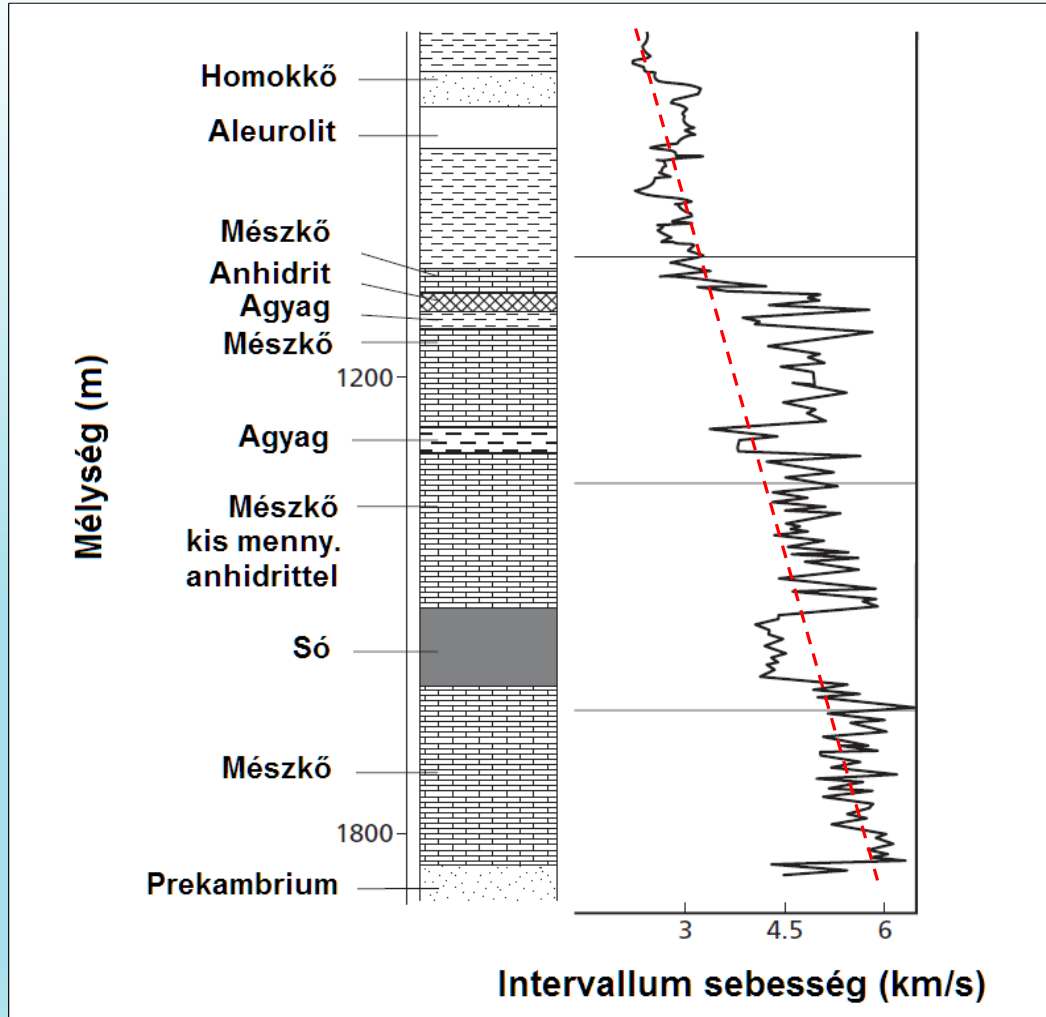


CBIL szonda



Akusztikus amplitúdó és futási idő „image”

# Akusztikus terjedési idő



Pórusfolyadék	$\Delta t_p$ ( $\mu\text{s}/\text{ft}$ )
Izapfiltrátum (édesvíz)	189
Izapfiltrátum (sós víz)	185
Olaj	230
Gáz (metán)	602
Levegő	910

Rider (2002)

Kearey és szerzőtársai (2002)

# Akusztikus szelvény felhasználása

- Törmelékes kőzetek elsődleges porozitásának meghatározása, agyagos-homok(kő) összletek kiértékelése
- Permeabilitás meghatározása a Stoneley-hullám jellemzőinek mérése alapján
- Repedezett kőzetekben a másodlagos porozitás meghatározása
- Rétegtartalom kvalitatív megállapítása (pl. ciklusugrás, VDL szelvény alapján)
- Feszültség irányanalízis, repedésrendszerek orientációjának feltérképezése (kereszt-dipól mérések)
- Rugalmassági állandók in-situ meghatározása, litológia azonosítása (P- és S-hullám egyidejű alkalmazása)
- Képképző (image) módszerekkel lyukfalleképezés ill. a bélésű állapotának felmérése
- Cementkötés minőségének meghatározása (CBL szelvény)
- Szeizmikus mérések kiegészítése (intervallum sebesség meghatározása, a gamma-gamma sűrűség szelvényrel együtt akusztikus impedancia szelvény és szintetikus szeizmogram számítása, a szeizmikus sebességmodell tökéletesítése)

# Porozitás

- **Teljes porozitás** – póruster (szemcseközi tér, kapilláris csatornák és a kötött víz által elfoglalt tér, üregek, repedések, izolált pórusok) aránya a kőzet teljes térfogatához viszonyítva

$$\Phi_t = (V_p / V_t) \cdot 100(\%)$$

- **Effektív porozitás** – egymással összeköttetésben lévő póruster (ahol szabad fluidum áramlás következhet be) aránya a kőzet teljes térfogatához viszonyítva (törmelékes kőzetekben az agyag  $V_{sh}$  térfogatát nem tartalmazza)

$$\Phi_e = \Phi_t (1 - V_{sh}) \cdot 100(\%)$$

- **Elsődleges porozitás** ( $\Phi_1$ ) – kőzettel egy időben keletkezett szemcseközi (vagy kristályközi) póruster aránya a kőzet teljes térfogatához viszonyítva
- **Másodlagos porozitás** – kőzet keletkezése után kémiai vagy mechanikai hatásra létrejött póruster (repedések, üregek) aránya a kőzet teljes térfogatához viszonyítva

$$\Phi_2 = (\Phi_t - \Phi_1) \cdot 100(\%)$$

- **Vegyes porozitás** – primer és szekunder porozitás kombinációja (komplex tárolók)

# Wyllie kísérlete

GEOPHYSICS, VOL. XXI, NO. 1 (JANUARY, 1956), PP. 41-70, 19 FIGS.

## ELASTIC WAVE VELOCITIES IN HETEROGENEOUS AND POROUS MEDIA\*

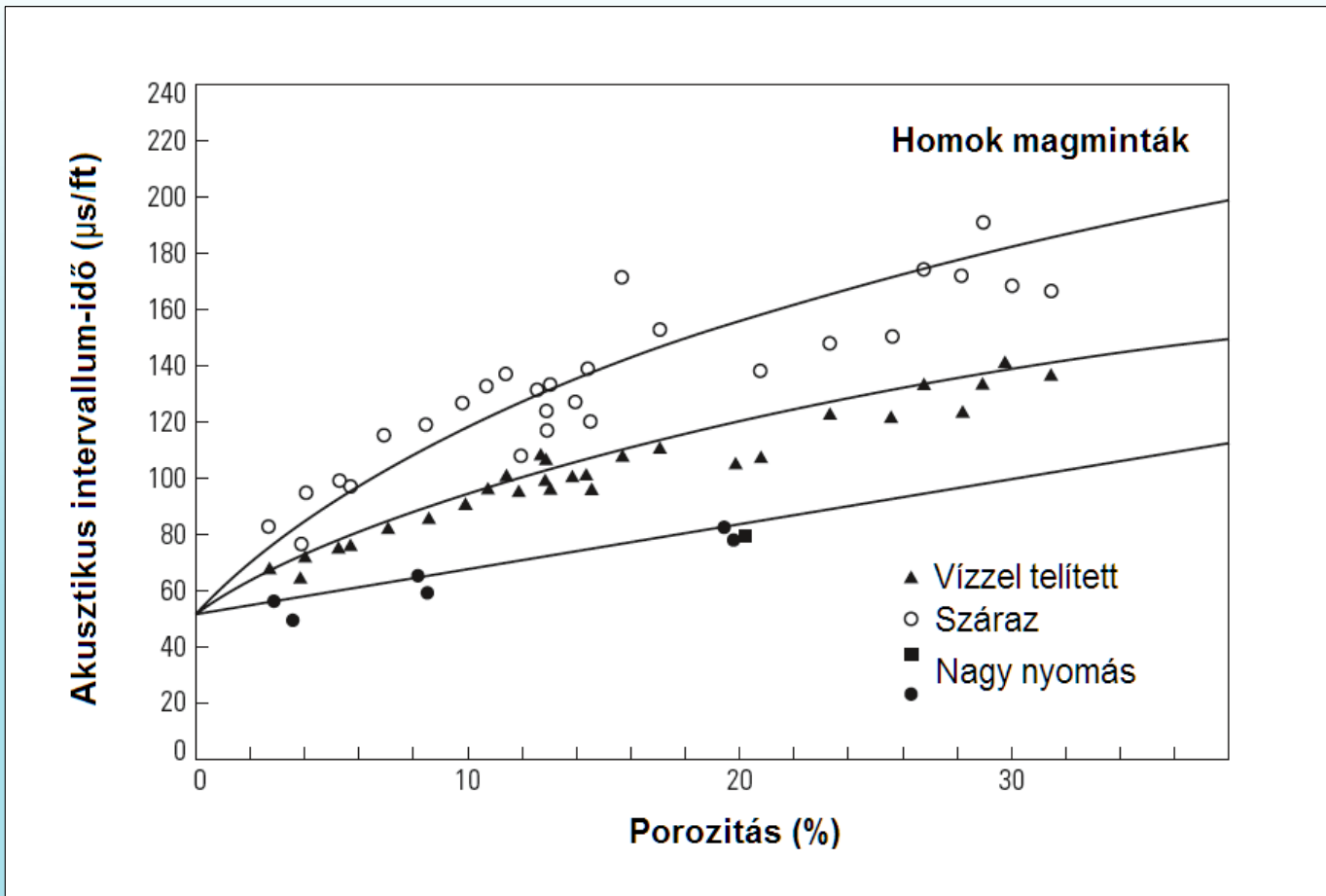
M. R. J. WYLLIE,† A. R. GREGORY,† AND L. W. GARDNER†

### ABSTRACT

Longitudinal wave velocities in numerous synthetic and natural porous media at room temperature and pressure have been measured. Basic characteristics of the measuring device are briefly described. Wave velocities have been found for aggregates of uniform spheres of various diameters both when dry and when saturated with water, brine, organic liquids and plastics. The effect of porosity on the wave velocity through aggregates of glass spheres saturated with plastic has been determined over the porosity range 19%-70%. Experimental measurements have been made of the effect of varying brine-oil and brine-gas saturations on the wave velocity through natural sedimentary rock samples. The effect of salinity and temperature on the wave velocity through sodium chloride brines has been redetermined.

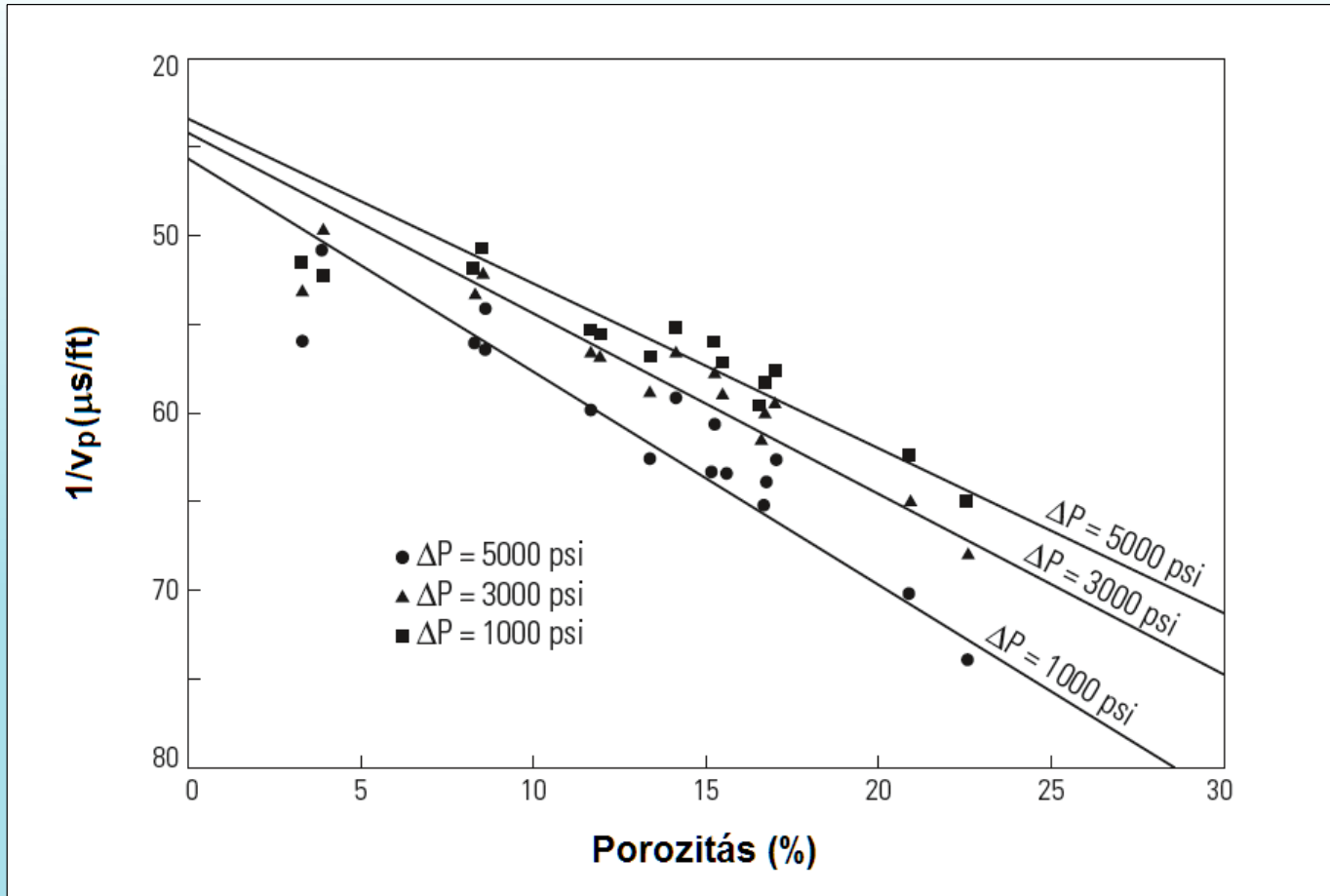
Results are graphically presented to show experimental relationships between wave velocity, porosity, pore content and matrix nature of sedimentary rocks. Some conclusions are drawn regarding general relationships between these factors based on the experimental results and on theoretical considerations. Through these relationships continuous velocity logs in wells can be interpreted to furnish a measure of formation porosity. Some comparisons are given between porosities derived from continuous velocity logs and found by core analysis.

# Wyllie kísérlete



Ellis és Singer (2007)

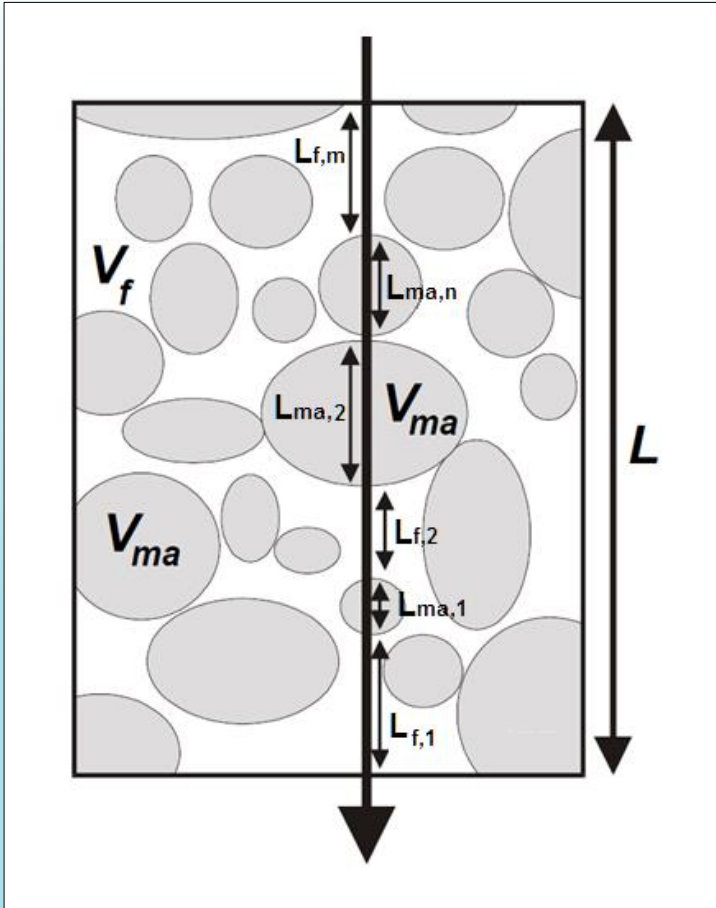
# Wyllie kísérlete



Ellis és Singer (2007)



# Szónikus porozitás



- Mért akusztikus intervallum-ideő a mátrix szemcséin és a pórusfolyadékban áthaladó hullám terjedési idejének összege

$$\Delta t = \frac{t}{L} = \frac{\sum_{i=1}^m L_{f,i}}{L V_f} + \frac{\sum_{j=1}^n L_{ma,j}}{L V_{ma}}$$

- Feltételezve, hogy a folyadékban megtett út arányos a porozitással a **Wyllie-féle átlagideő egyenlet**

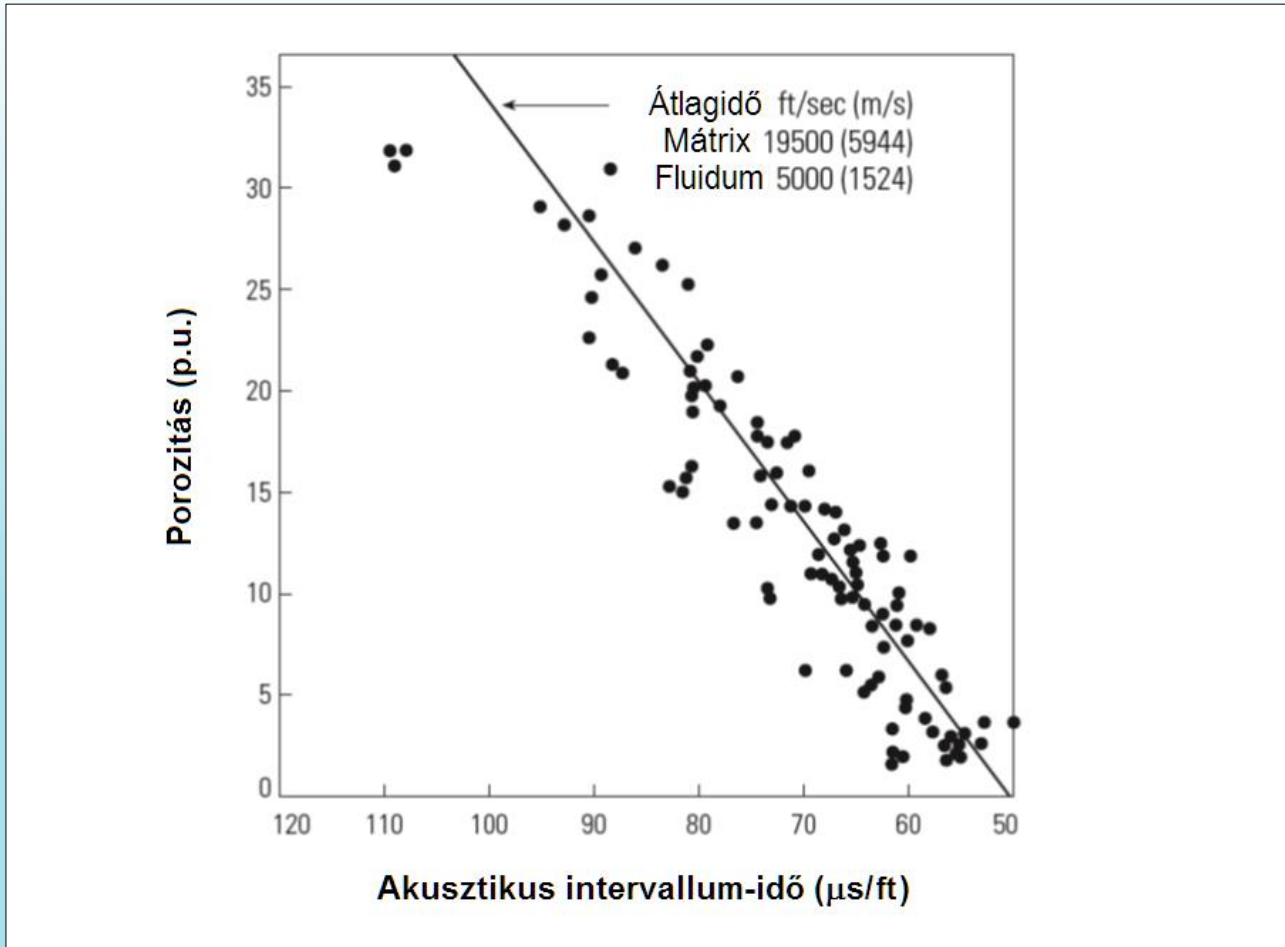
$$\frac{1}{v} = \frac{\Phi}{V_f} + \frac{1-\Phi}{V_{ma}} \rightarrow \Delta t = \Phi \Delta t_f + (1-\Phi) \Delta t_{ma}$$

- Akusztikus porozitás** szennyezetlen porózus kőzetekben

$$\Phi_S = \frac{\Delta t_{\text{mért}} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}}$$

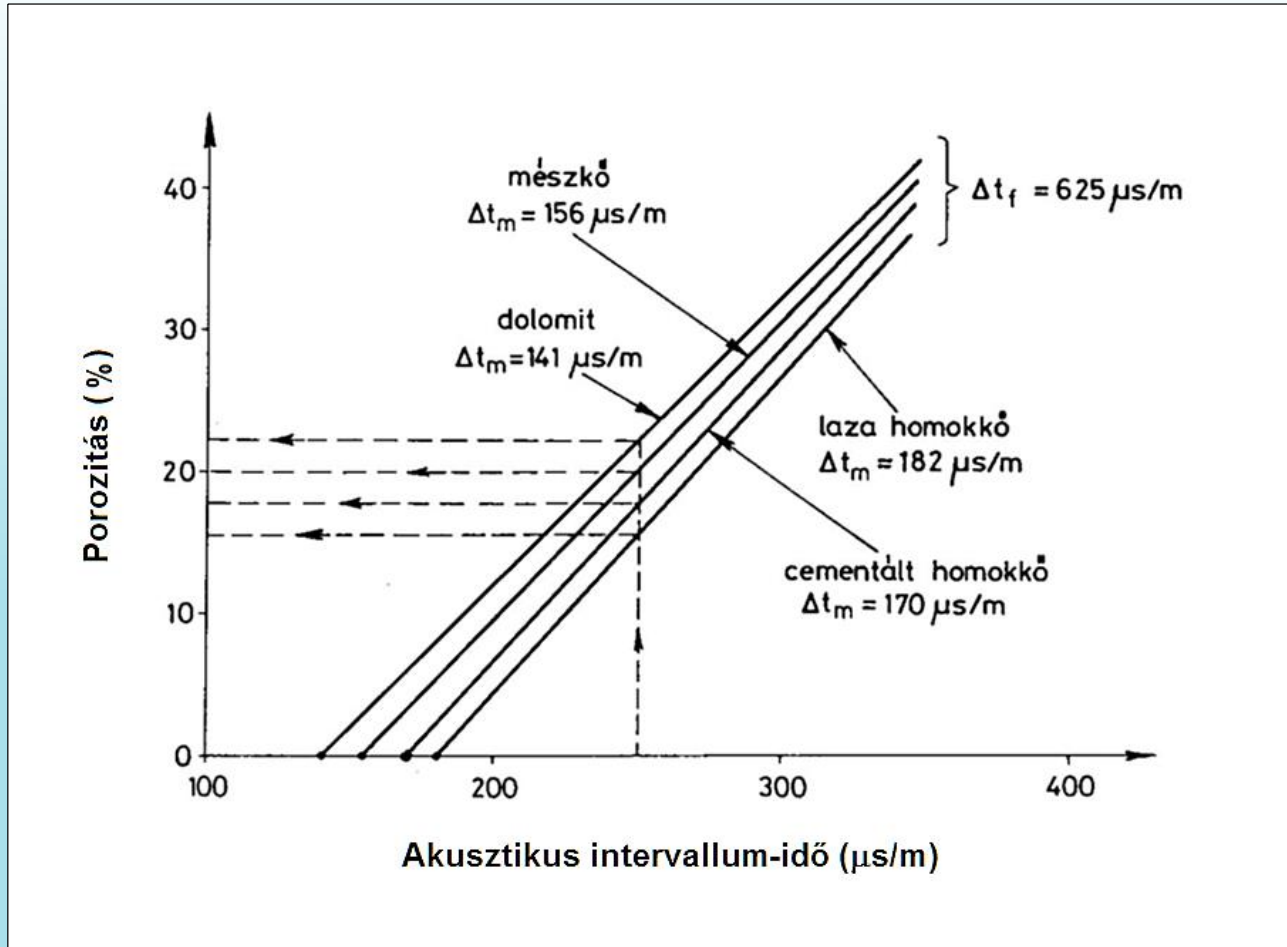
- Mérés porozitás-érzékenysége ( $\partial \Delta t / \partial \Phi = \Delta t_f - \Delta t_{ma}$ ) független a porozitástól

# Szónikus porozitás



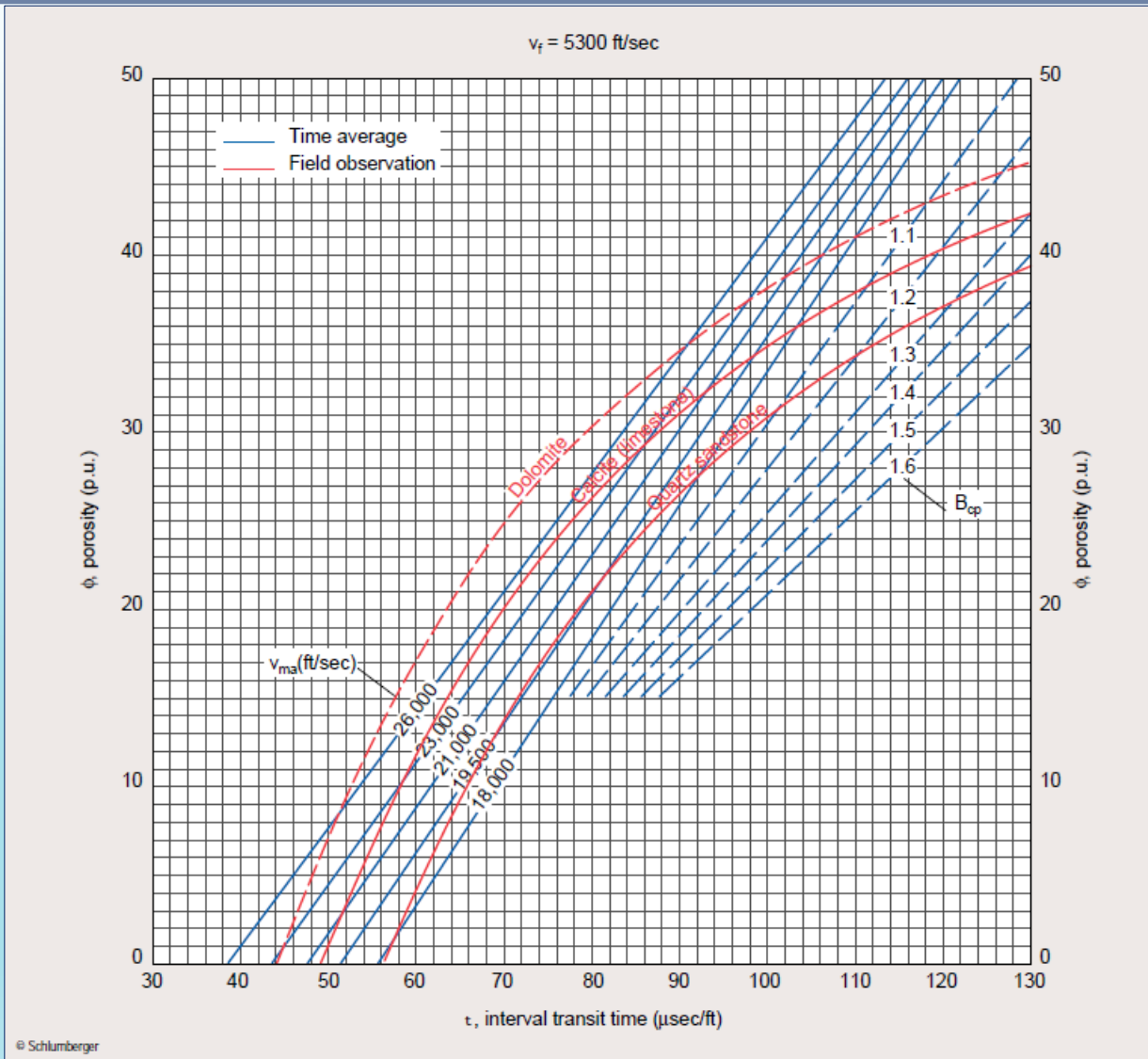
Ellis és Singer (2007)

# Szónikus porozitás



Hursán (1998)

# Konzolidálatlan formációók



# Kompakciós korrekció

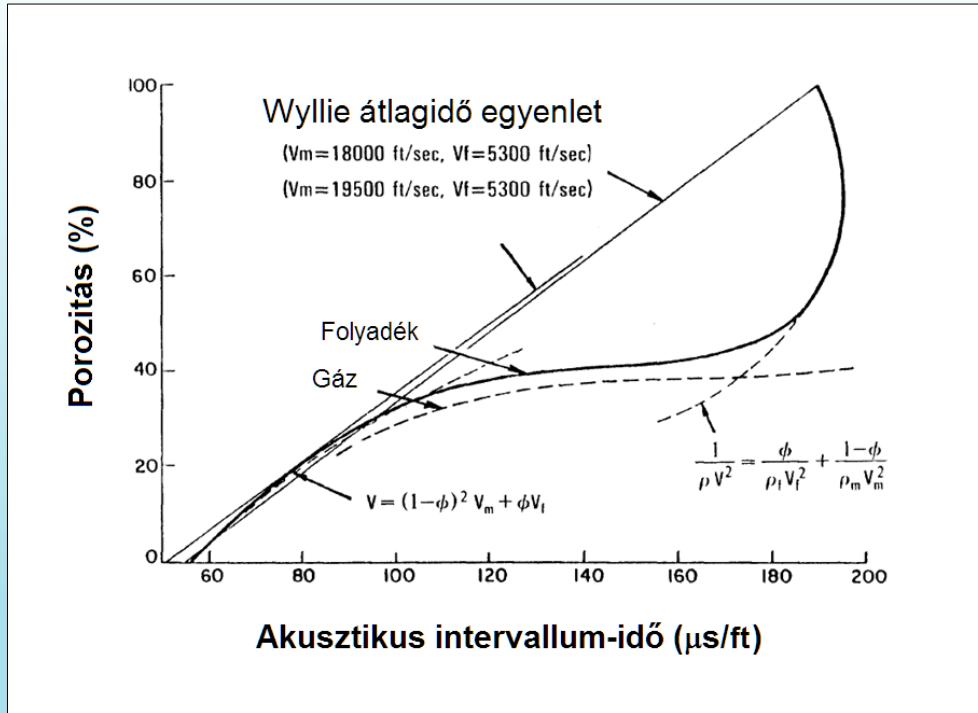
- Wyllie-formula konszolidált, primer porozitású homokkövekben és karbonátokban érvényes
- Kompakciós nyomás következtében a kőzetváz tömörödik, nő a hullámterjedési sebesség
- Gyengén konszolidált üledékekben amíg nem alakul ki a határsebesség (agyagban  $330 \mu\text{s/m}$ ) a mért  $\Delta t$  érték megnő ( $\Delta t_{\text{sh}} > \Delta t_{\text{ma}}$ ), a Wyllie-formula túlbecsüli a porozitást
- Wyllie-féle porozitás adatokon empirikus korrekciót alkalmazunk

$$\Phi_{S, \text{korr}} = \frac{\Delta t_{\text{mért}} - \Delta t_{\text{ma}}}{\Delta t_{\text{f}} - \Delta t_{\text{ma}}} \cdot \frac{1}{c_p}$$

$$c_p = \frac{C \cdot \Delta t_{\text{mért}}^{(\text{agyag})}}{330}, \quad c_p \cong \frac{\Phi_S}{\Phi_R} \cong \frac{\Phi_S}{\Phi_D} \cong \frac{\Phi_S}{\Phi_N} \quad (S_w = 1, V_{\text{sh}} = 0)$$

ahol  $c_p$  kompakciós korrekciós tényező,  $C$  az agyag kompakciós együtthatója (értéke: 0.8–1.2)

# Raymer-Hunt egyenlet



Raymer és szerzőtársai (1980)

- Kompakciós korrekciós tényező meghatározása sokszor bizonytalan, mely a porozitás számítását erősen befolyásolja
- Nincs szükség a kompakciós korrekcióra, ha a porozitás és  $\Delta t$  kapcsolatát nemlineáris függvényt közelítjük
- Porozitás empirikusan számítható

$$\frac{1}{\Delta t_{\text{mért}}} = \frac{\Phi}{\Delta t_f} + \frac{(1-\Phi)^2}{\Delta t_{\text{ma}}}$$

$$\Phi_s = \alpha \frac{\Delta t_{\text{mért}} - \Delta t_{\text{ma}}}{\Delta t_{\text{mért}}}$$

ahol  $\alpha$  tényező értéke 0.6–0.7

- Porozitás tágabb tartományán jobb közelítést ad a Wyllie egyenletnél

# Agyagtartalom korrekció

- Agyagok akusztikus terjedési ( $\Delta t_{sh}$ ) ideje általában nagyobb a mátrixénál, a Wyllie-féle porozitás nagyobb a valóságosnál
- Wyllie egyenlet (konszolidált) agyagos formációkban **lemezes agyag** esetén

$$\Delta t = \Phi \Delta t_f + (1 - \Phi - V_{sh}) \Delta t_{ma} + V_{sh} \Delta t_{sh}$$
$$\Phi_S^{(korr.)} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} - V_{sh} \frac{\Delta t_{sh} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} - V_{sh} \Phi_{s,sh}$$

ahol  $\Phi_{s,sh}$  az agyag akusztikus porozitása,  $V_{sh}$  az agyagtartalom

- Agyagtartalom természetes gamma-intenzitás szelvényből számítható
- Agyaghatásra korigált Wyllie-féle átlagidő egyenlet **diszperz agyag** esetén

$$\Delta t = (\Phi + V_{sh}) \Delta t_f + (1 - \Phi - V_{sh}) \Delta t_{ma}$$

$$\Phi_S^{(korr.)} = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} - V_{sh}$$

# Szénhidrogén korrekció

- Azonos kőzetösszetétel és porozitás mellett az akusztikus terjedési idő az olajjal vagy a gázzal telített kőzeteknél nagyobb (víztárolókhöz képest)
- Kis porozitású kőzetekben a szénhidrogén hatása kicsi – kisépért zónában maradék szénhidrogén van, melynek hatása elhanyagolható
- Konszolidálatlan nagy porozitású (kis elárasztás) kőzetekben empirikus korrekciót alkalmazunk (Alberty és Hashmy, 1980)

$$\Phi_S^{(\text{kor.})} = 0.7 \cdot \Phi_S \quad (\text{gáz})$$

$$\Phi_S^{(\text{kor.})} = 0.9 \cdot \Phi_S \quad (\text{olaj})$$

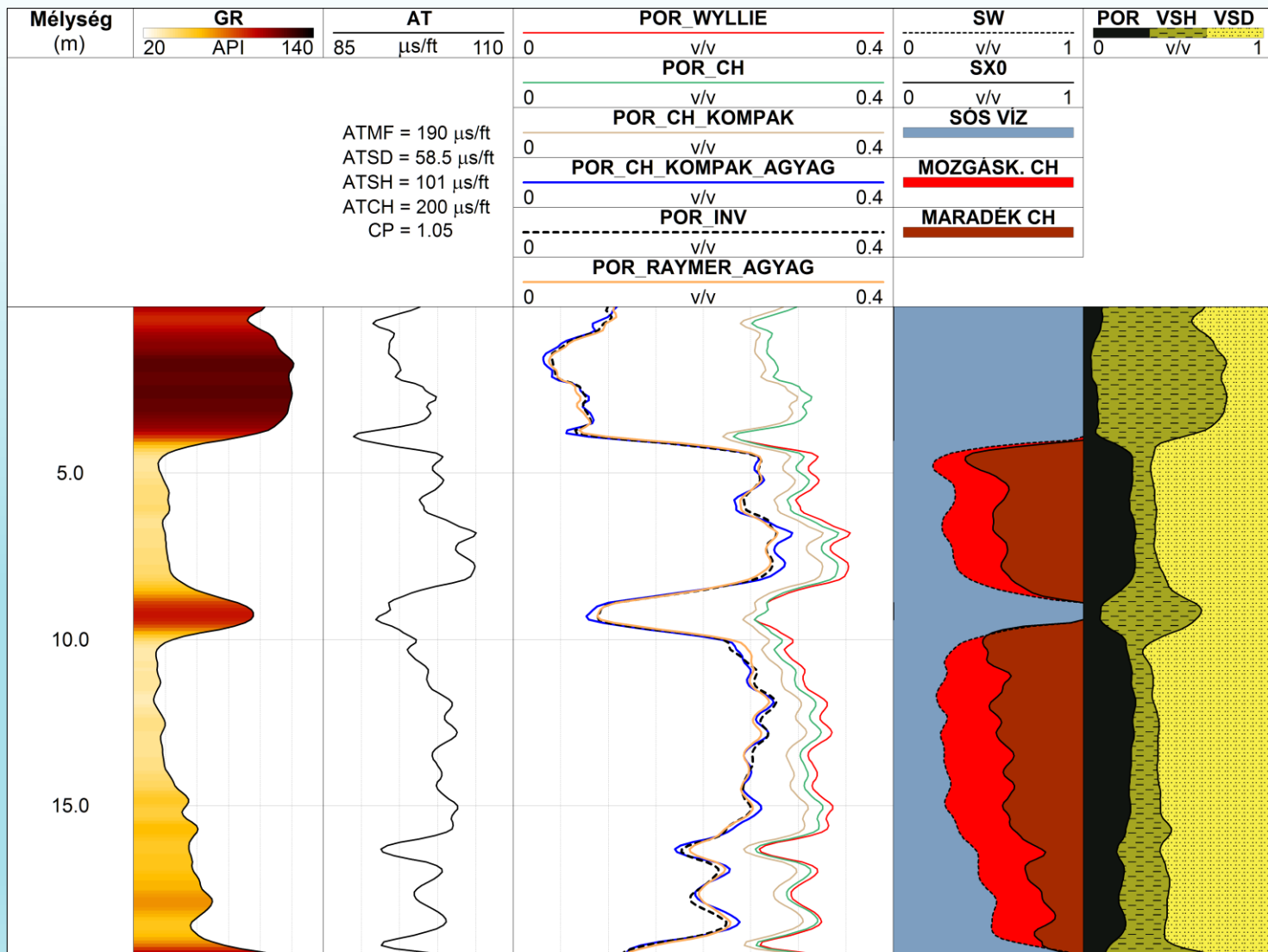
- Szénhidrogén akusztikus intervallum-idejét empirikusan adjuk meg az akusztikus szonda válaszegyenletében

$$\Delta t_{\text{hc}} = \left\{ (\rho_{\text{hc}} - 0.05) \Delta t_{\text{olaj}} + (0.95 - \rho_{\text{hc}}) \Delta t_{\text{gáz}} \right\} / 0.9$$

ahol  $\Delta t_{\text{olaj}}$  és  $\Delta t_{\text{gáz}}$  az olaj és a gáz akusztikus terjedési ideje



# Korrigált szónikus porozitás



# Áteresztőképesség

- **Darcy egyenlet** a pórusfolyadék porózus közegben történő (lamináris) áramlását vagy szivárgását írja le

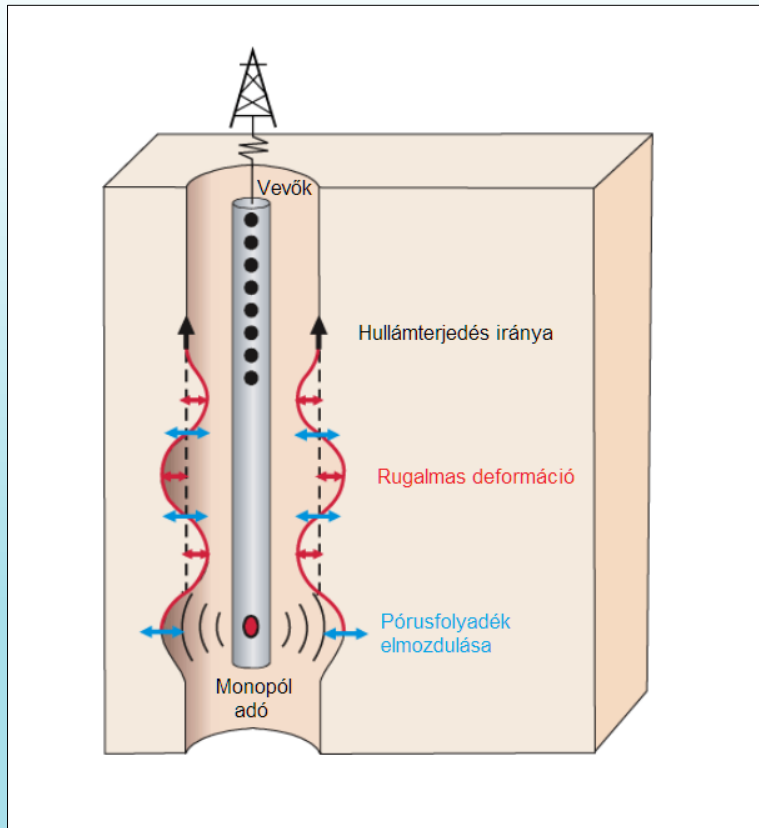
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = - \frac{K}{\Phi \mu} \nabla p$$

ahol  $K$  ( $\text{m}^2$ ) a kőzet permeabilitása,  $\Phi$  ( $\text{v/v}$ ) a porozitás,  $\mu$  ( $\text{Ns/m}^2$ ) a dinamikai viszkozitás,  $\mathbf{u}$  ( $\text{m}$ ) a folyadék relatív elmozdulás vektora,  $t$  ( $\text{s}$ ) az idő és  $p$  ( $\text{N/m}^2$ ) a pórusnyomás

- Permeabilitás függ a porozitástól, agyagtartalomtól, szemcseméret és pórusméret-eloszlástól, texturális jellemzőktől, víztelítettségtől
- **Abszolút permeabilitás**ról beszélünk, ha egyetlen folyadékfázis van jelen, az **effektív permeabilitás** egy folyadékfázissal szemben mutatott áteresztőképesség a többi fázis jelenlétében, **relatív permeabilitás** az effektív és az abszolút permeabilitás hányadosa
- Empirikus összefüggés a porozitás (%), kötött víztelítettség (%) és a permeabilitás között (Timur, 1968)

$$K = 0.136 \frac{\Phi^{4.4}}{S_{w,irr}^2} \quad (\text{mD} = 10^{-15} \text{m}^2)$$

# Stoneley hullám



<http://www-odp.tamu.edu>

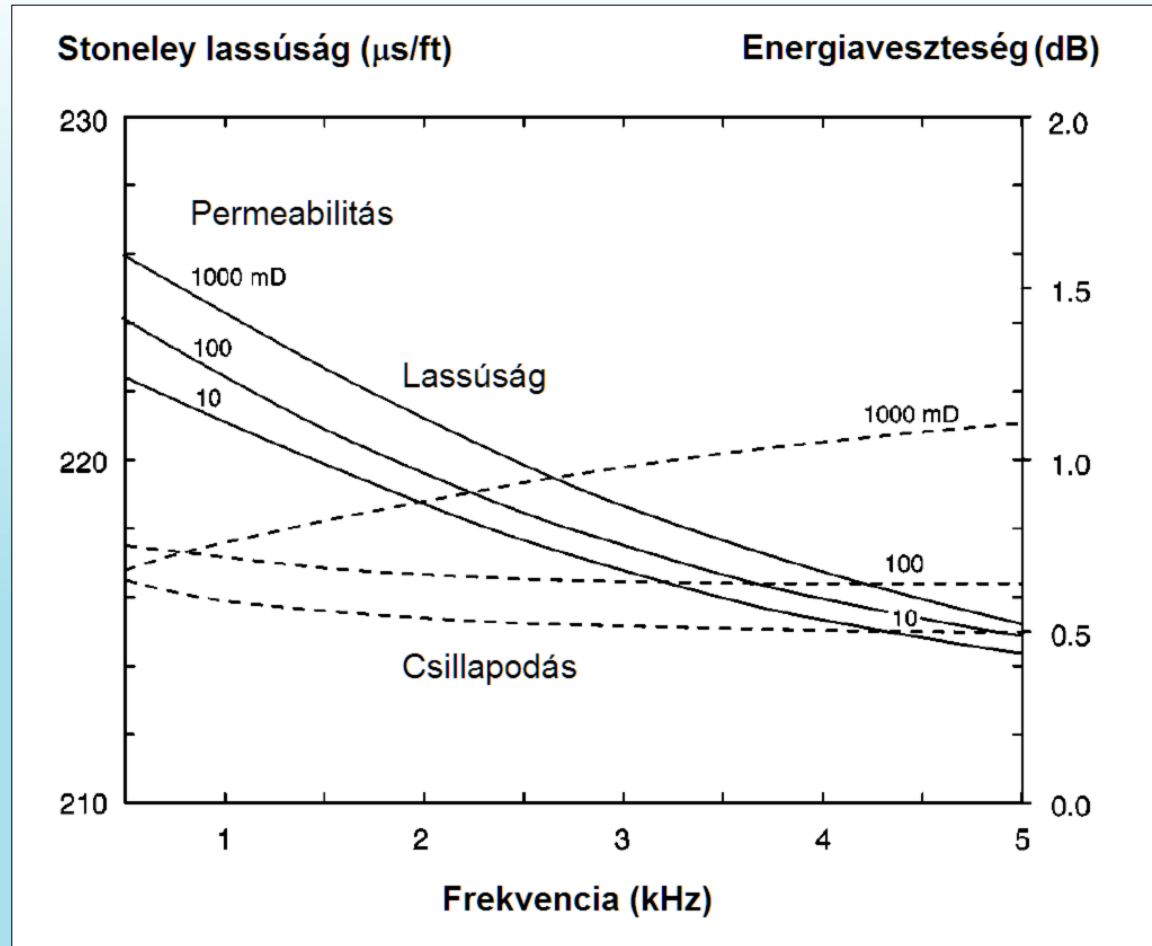
- Stoneley hullám az iszaposzlop és a kőzet határfelületén terjedő **diszperzív felületi hullám**, mely a teljes hullámkép leglassúbb és legnagyobb amplitúdójú összetevője (vizsgálati frekvencia-tartománya általában 0–10 kHz)
- Alacsony frekvenciás határesetben ún. **csőhullám** formájában terjed a fúrólukban, melynek sebessége

$$v_{St}^{(imperv.)} = v_m \left( 1 + \frac{\rho_m v_m^2}{\rho_b v_s^2} \right)^{-1}$$

ahol  $v_m$  (m/s) a fúróiszap kompressziós hullámterjedési sebessége,  $v_s$  a kőzet nyíróhullám sebessége,  $\rho_b$  a kőzetsűrűség,  $\rho_m$  az iszapsűrűség

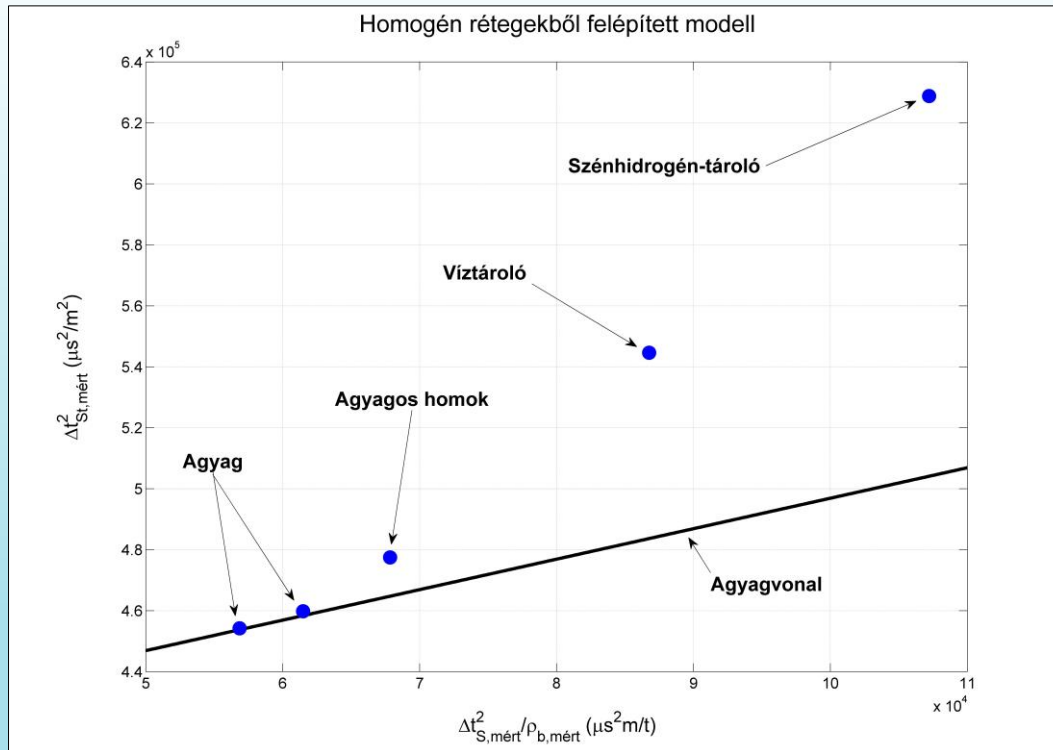
- **Permeabilis kőzetben** a csőhullámok elmozdítják a fluidum részecskéket a mátrixhoz képest, mely a hullám energiájának egy részét felemészti, a jelenséget az akusztikus hullámok **csillapodása és lassulása** kíséri
- Porózus közegben érvényes mozgásegyenletet Biot (1955) dolgozta ki, mellyel a Stoneley hullám jellemzőit kapcsolatba hozhatjuk a homogén izotróp közeg (rugalmasan viselkedő kőzetmátrix és viszkózus pórusfolyadék) porozitásával és permeabilitásával

# Laboratóriumi kísérletek



Brie és szerzőtársai (2000)

# Stoneley-index



Szabó és Kalmár (2013)

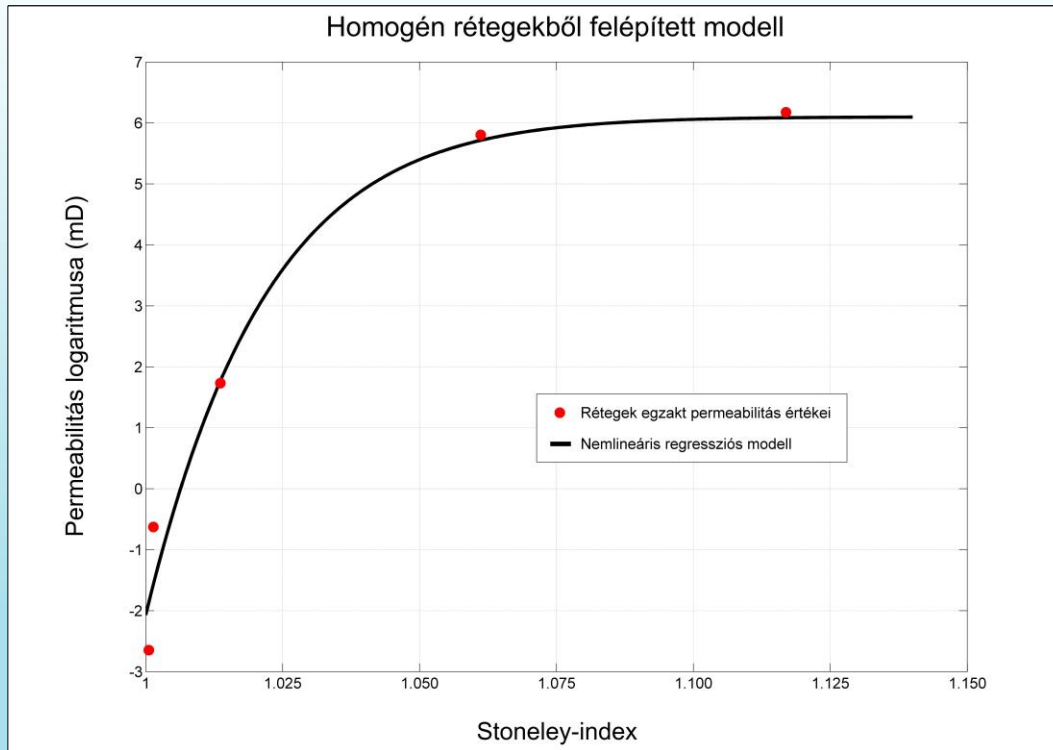
- Buffin (1996) keresztmetszeten ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley intervallumidők négyzetét és a mért közetsűrűsége normált nyíróhullám intervallumidők négyzetét
- Impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el → **agyagvonal**
- Stoneley-hullám lassúság elméleti értéke

$$\Delta t_{St}^{(számított)} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_S^2 + \Delta t_{mf}^2}$$

ahol  $\rho_{mf}$  és  $\Delta t_{mf}$  az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és intervallum ideje

- Agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley intervallumidők irányában a mérési pontok permeábilis formációt jeleznek
- Stoneley index ( $I_{St} = \Delta t_{St,mért} / \Delta t_{St,szám}$ ) a sebesség csökkenésének mértékét fejezi ki az agyagokhoz képest, regressziós kapcsolatban áll a permeabilitással

# Stoneley-index



Szabó és Kalmár (2013)

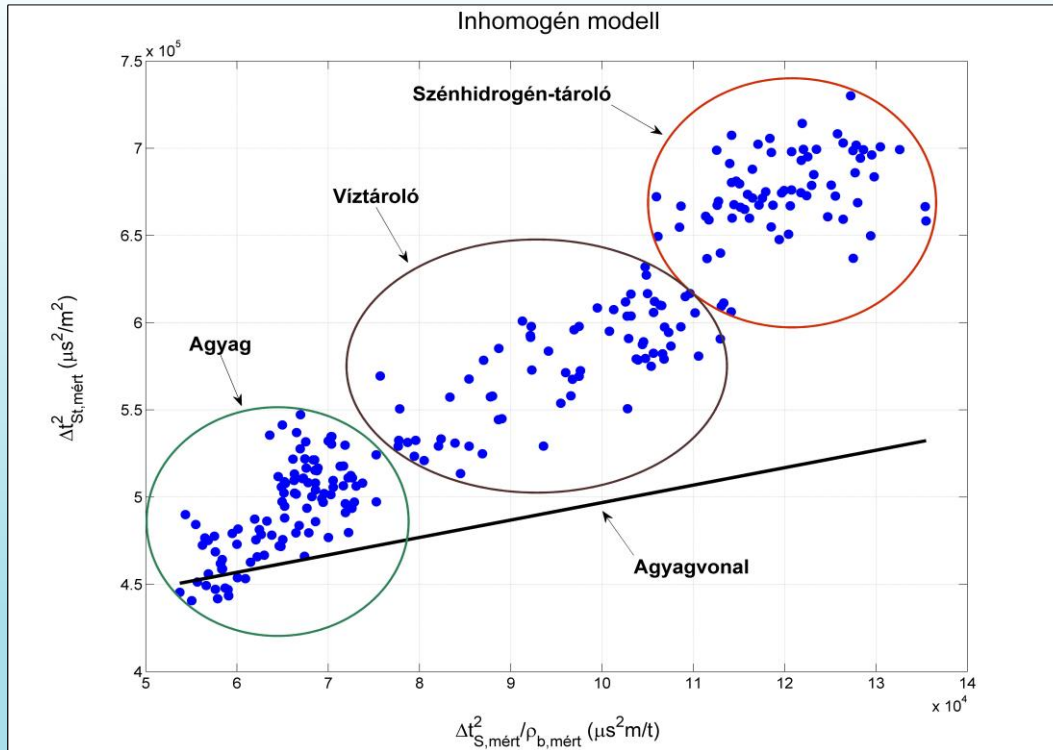
- Buffin (1996) keresztmetszeten ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley intervallumidők négyzetét és a mért közetsűrűsége normált nyíróhullám intervallumidők négyzetét
- Impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el → **agyagvonal**
- Stoneley-hullám lassúság elméleti értéke

$$\Delta t_{St}^{(\text{számított})} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_S^2 + \Delta t_{mf}^2}$$

ahol  $\rho_{mf}$  és  $\Delta t_{mf}$  az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és intervallum ideje

- Agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley intervallumidők irányában a mérési pontok permeábilis formációt jeleznek
- Stoneley index ( $I_{St} = \Delta t_{St, \text{mért}} / \Delta t_{St, \text{szám}}$ ) a sebesség csökkenésének mértékét fejezi ki az agyagokhoz képest, regressziós kapcsolatban áll a permeabilitással

# Stoneley-index



Szabó és Kalmár (2013)

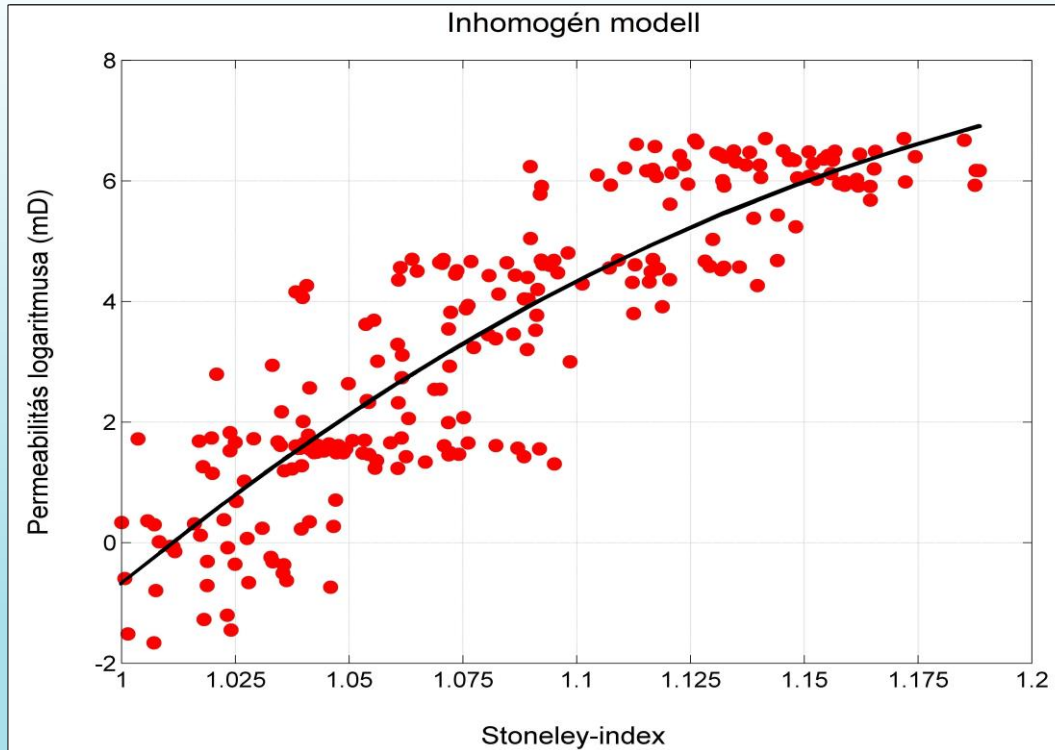
- Buffin (1996) keresztmetszeten ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley intervallumidők négyzetét és a mért közetsűrűsége normált nyíróhullám intervallumidők négyzetét
- Impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el → **agyagvonal**
- Stoneley-hullám lassúság elméleti értéke

$$\Delta t_{St}^{(számított)} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_S^2 + \Delta t_{mf}^2}$$

ahol  $\rho_{mf}$  és  $\Delta t_{mf}$  az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és intervallum ideje

- Agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley intervallumidők irányában a mérési pontok permeábilis formációt jeleznek
- Stoneley index ( $I_{St} = \Delta t_{St,mért} / \Delta t_{St,szám}$ ) a sebesség csökkenésének mértékét fejezi ki az agyagokhoz képest, regressziós kapcsolatban áll a permeabilitással

# Stoneley-index



Szabó és Kalmár (2013)

- Buffin (1996) keresztmetszeten ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley intervallumidők négyzetét és a mért közetsűrűsége normált nyíróhullám intervallumidők négyzetét
- Impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el → **agyagvonal**
- Stoneley-hullám lassúság elméleti értéke

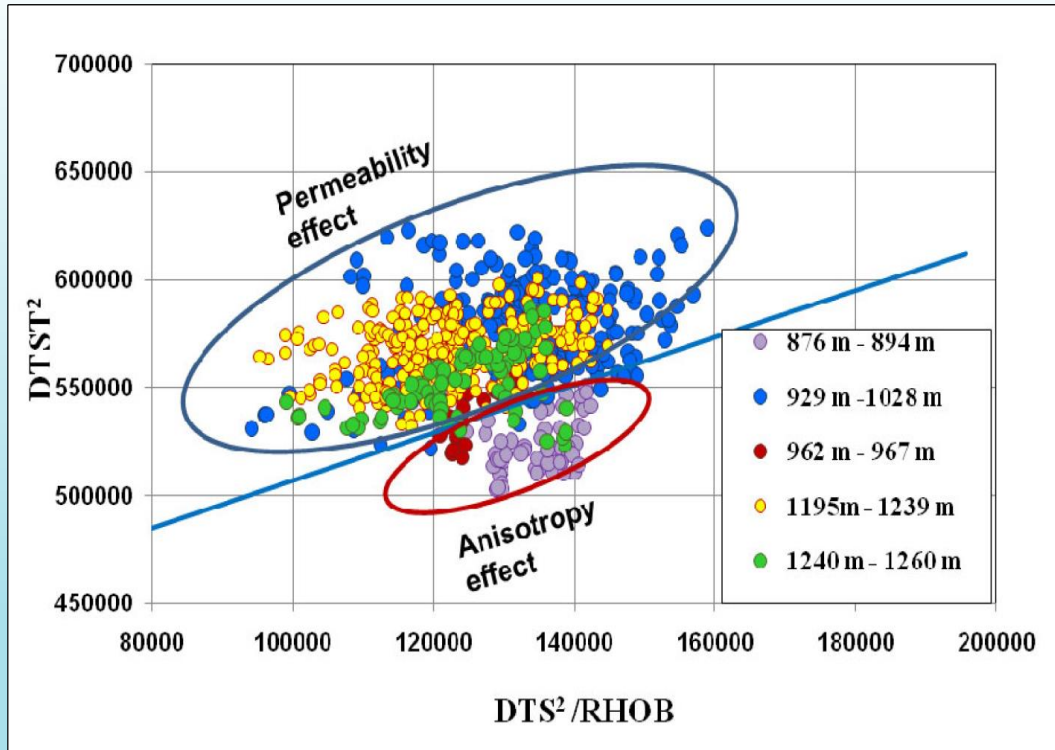
$$\Delta t_{St}^{(számított)} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_S^2 + \Delta t_{mf}^2}$$

ahol  $\rho_{mf}$  és  $\Delta t_{mf}$  az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és intervallum ideje

- Agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley intervallumidők irányában a mérési pontok permeábilis formációt jeleznek
- Stoneley index ( $I_{St} = \Delta t_{St,mért} / \Delta t_{St,szám}$ ) a sebesség csökkenésének mértékét fejezi ki az agyagokhoz képest, regressziós kapcsolatban áll a permeabilitással



# Stoneley-index



Bala (2010)

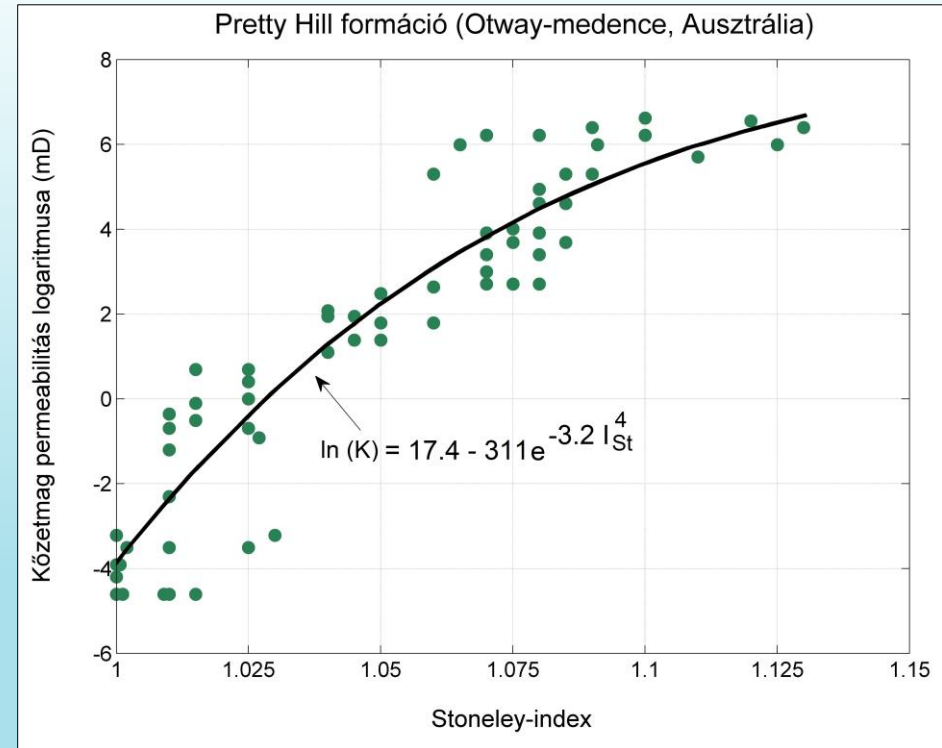
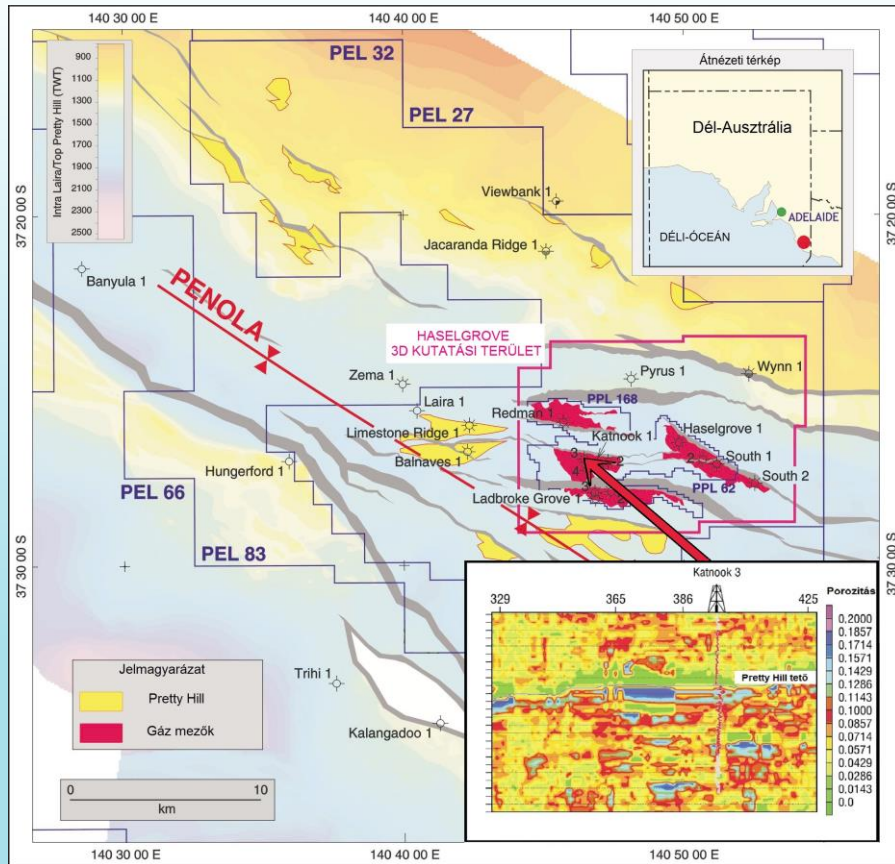
- Buffin (1996) keresztmetszeten ábrázolta az alacsony frekvencián mért Stoneley intervallumidők négyzetét és a mért kőzetsűrűsége normált nyíróhullám intervallumidők négyzetét
- Impermeábilis formációk egy egyenes mentén helyezkednek el → **agyagvonal**
- Stoneley-hullám lassúság elméleti értéke

$$\Delta t_{St}^{(számított)} = \sqrt{\frac{\rho_{mf}}{\rho_b} \Delta t_S^2 + \Delta t_{mf}^2}$$

ahol  $\rho_{mf}$  és  $\Delta t_{mf}$  az iszapfiltrátum térfogatsűrűsége és intervallum ideje

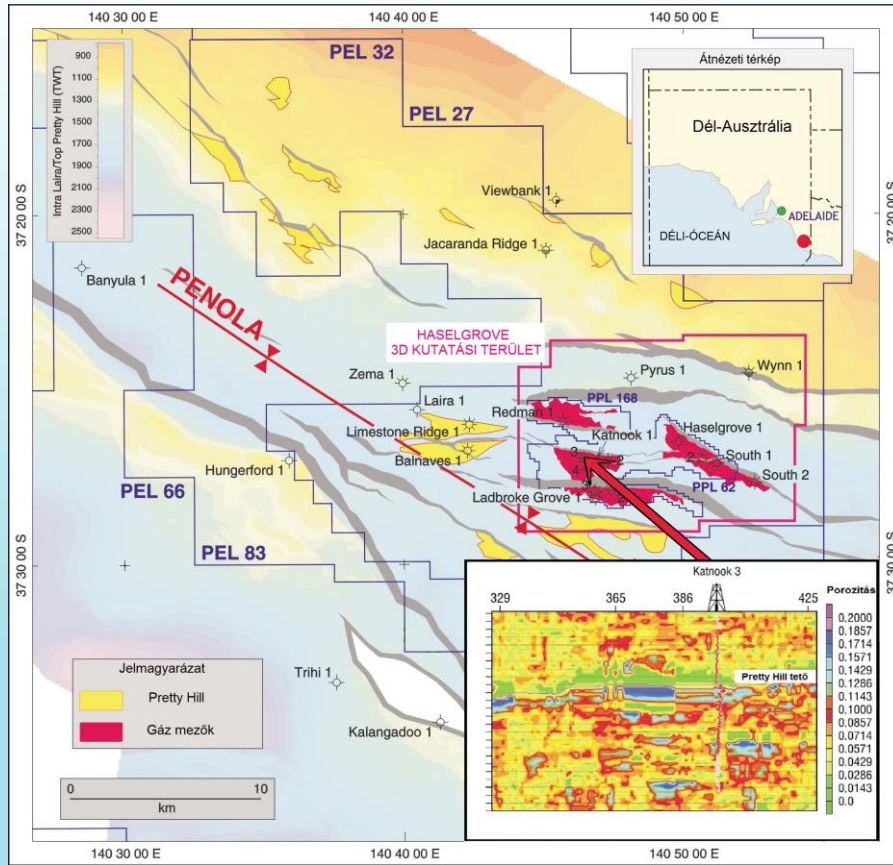
- Agyagvonalhoz képest a nagyobb Stoneley intervallumidők irányában a mérési pontok permeábilis formációt jeleznek
- Stoneley index ( $I_{St} = \Delta t_{St,mért} / \Delta t_{St,szám}$ ) a sebesség csökkenésének mértékét fejezi ki az agyagokhoz képest, regressziós kapcsolatban áll a permeabilitással

# Stoneley-permeabilitás

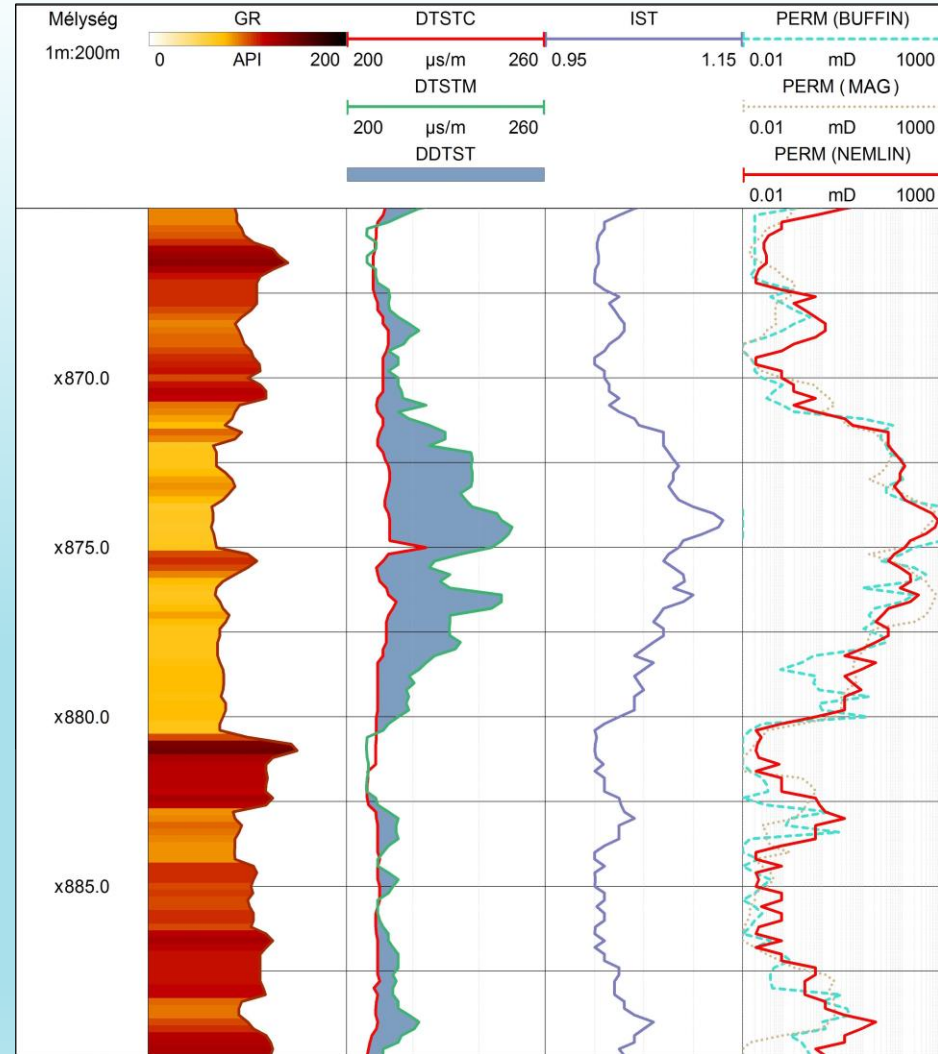


Szabó és Kalmár (2013)

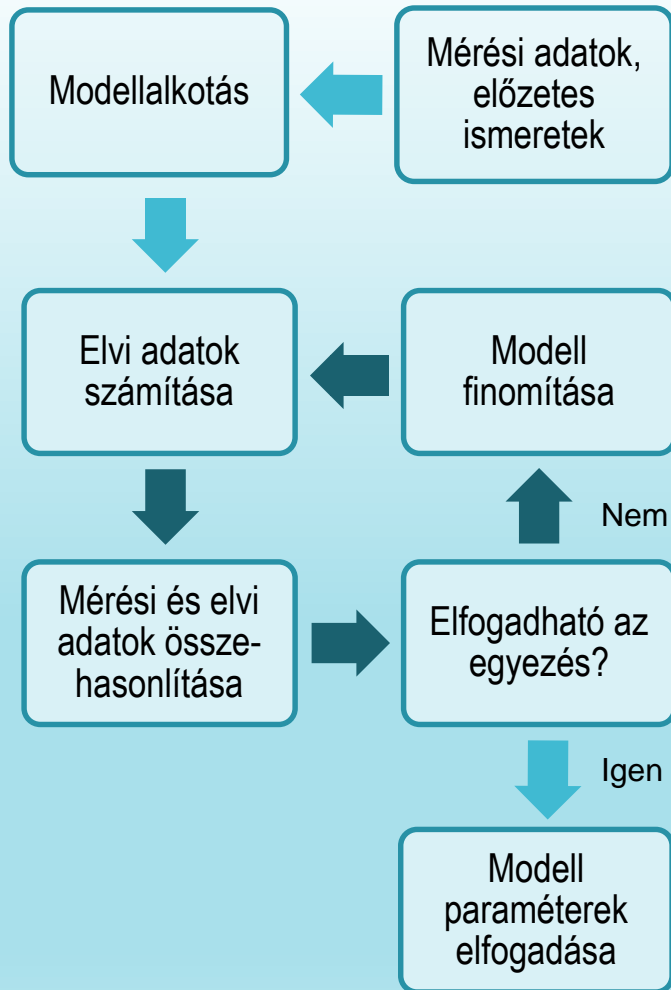
# Stoneley-permeabilitás



Szabó és Kalmár (2013)



# Mélyfúrási geofizika inverz feladata



- Bemenő adatokat a karotázs szelvények képviselik, a meghatározandó modellt a közetfizikai paraméterek (porozitás, agyagtartalom, víztelítettség, kőzetmátrix térfogat) alkotják
- Két fenti mennyiség közötti kapcsolatot az elméleti szonda válaszfüggvények írják le (direkt feladat megoldása)
- Lokális (mélységpontenkénti) egydimenziós inverziós eljárás
- Kismértékben túlhatározott inverz feladat, melynek megoldása a súlyozott legkisebb négyzetek módszerével történik, az adatok eltérő nagyságrendje miatt az adattérbeli eltéréseket normalni kell
- A rétegvastagság meghatározása manuális feladat (expliciten nem szerepel a lokális szonda válaszfüggvényekben)
- Az inverziós ismeretleneket a paraméter-érzékenységi függvények számítása alapján célszerű megválasztani

# Akusztikus szonda válaszfüggvénye

- Szénhidrogén-tároló kőzetekben a mért akusztikus terjedési időt közelítő (elméleti) szonda válaszegyenlet

$$\Delta t = \Phi [S_{x0} \Delta t_{mf} + (1 - S_{x0}) \Delta t_{hc}] \cdot \frac{1}{c_p} + V_{sh} \Delta t_{sh} + \sum_{i=1}^n V_{ma,i} \Delta t_{ma,i}$$

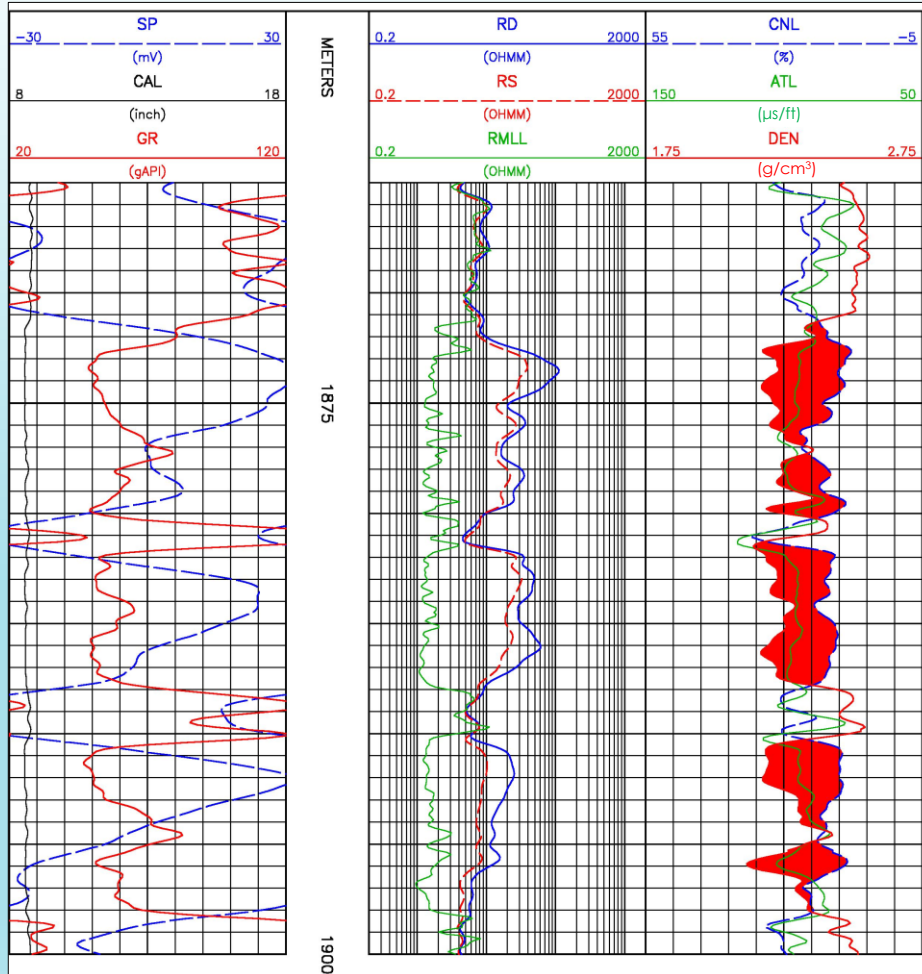
ahol  $\Delta t_{mf}$ ,  $\Delta t_{hc}$ ,  $\Delta t_{sh}$ ,  $\Delta t_{ma}$  az iszapfiltrátum, a szénhidrogén, agyag és a kőzetmátrix akusztikus terjedési ideje,  $n$  az ásványi komponensek száma,  $c_p$  kompakciós korrekciós tényező

- Akusztikus válaszfüggvény a direkt feladat (előremodellezés) keretében számított (elvi) akusztikus terjedési időt adja meg (inverz modellezés)

# Hazai olajipari példa



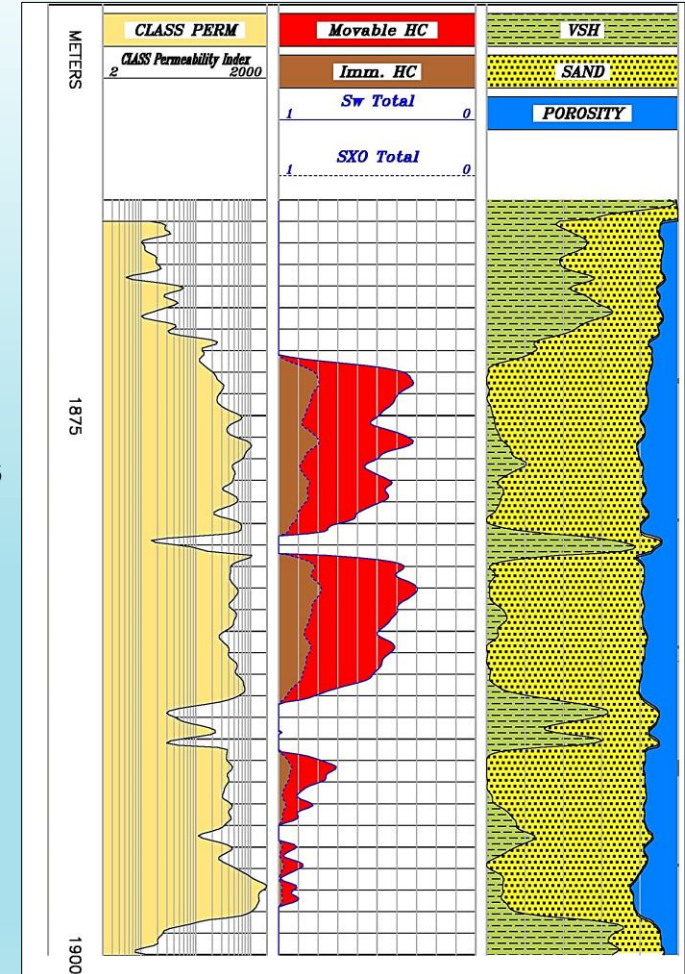
## Bemenő szelvények



Inverz  
modellezés



## Tárolóparaméterek



# Felhasznált irodalom

- Alberty M., Hashmy K.**, 1984. Application of ULTRA to log analysis. SPWLA Symposium Transactions, paper Z, 1–17.
- Bala M. J.**, 2010. Can we determine permeability with the Stoneley wave slowness from acoustic full waveform. 72nd EAGE Conference and Exhibition, P532, 1–5.
- Biot M. A.**, 1955. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28 (2), 168–178.
- Brie A., Endo T., Johnson D. L., Pampuri F.**, 2000: Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves. SPE Reservoir Eval. and Eng. 3 (2), 109–117.
- Ellis D. V., Singer J. M.**, 2007. Well logging for earth scientists. Springer.
- Haldorsen et al.**, 2006. Borehole acoustic waves. Oilfield review, Spring 2006, 34–43.
- Hursán L.**, 1998: Mélyfúrési geofizika. Kézirat, Miskolci Egyetem, Geofizikai Tanszék.
- Kearey P., Brooks M., Hill I.**, 2002. An Introduction to Geophysical Exploration. Wiley-Blackwell.
- Raymer L. L., Hunt E. R., Gardner J. S.**, 1980. An improved sonic transit time-to-porosity transform. Annual Logging Symposium, SPWLA, paper P, 1–12.
- Rider M. H.**, 2002. The geological interpretation of well logs. Rider-French Consulting Ltd.
- SPWLA**, 1984. Glossary of terms and expressions used in well logging. Printed in US.
- Szabó N., Kalmár Cs.**, 2013. Primer porozitású kőzetek permeabilitásának meghatározása Stoneley-féle hullámterjedési idők alapján. Magyar Geofizika, 54. évf., 3. szám, 141–153.
- Timur A.**, 1968. An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationship for sandstone reservoirs. The Log Analyst, Vol. 9, No. 4, 1–18.

**Jó szerencsét!**

