

# Agyagos termelő homokokban végzett víztelítettségi vizsgálatok áttekintő elemzése

W. H. FERTL – G. W. HAMMACK\*

*Mind az USA-ban, mind a tengeren túl, számos interpretációs technika áll rendelkezésre a fűrőlyukelemzésnél a vízzaturáció számítására agyagos homokoknál. A dolgozat röviden kifejti a különböző értelmezési módszerek elméletét és megbeszéli előnyeiket és alkalmazásuk korlátait. Tényleges terepi esetek felhasználásával összehasonlítja a különböző technikákat, változó agyagosság-értékeket véve figyelembe.*

*Végül bemutat egy újonnan kidolgozott módszert és megvizsgálja ennek alkalmazhatóságát.*

*Как в США, так и в других заокеанических странах разработан ряд методов интерпретации данных исследования скважин для вычисления водонасыщенности глинистых песков. В работе коротко излагается теория различных методов интерпретации и обсуждаются их достоинства, а также ограничения их применения. На фактических примерах дается сопоставление различных методов, с учетом различных величин глинистости.*

*В заключение излагается вновь разработанный метод и анализируется его применимость.*

*In den Vereinigten Staaten, sowie auch in Europa zahlreiche Interpretationstechniken stehen zu Verfügung bei der Bohrloch-Analyse für die Berechnung der Wassersaturation in tonigen Sandsteinen. Der Aufsatz stellt kurz die Theorie der verschiedenen Interpretationsmethoden dar und bespricht ihre Vorteile sowie die Schranken ihrer Anwendbarkeit. Auf Grund von realen Feldmessungen werden die verschiedenen Techniken einem Vergleich unterzogen unter Berücksichtigung von verschiedenen Tongehalt – Perzenten.*

*Endlich wird eine neu ausgearbeitete Methode vorgeführt und ihre Anwendbarkeit geprüft und bestätigt.*

## Bevezetés

A lyukelemzésnél számos interpretációs eljárás áll rendelkezésre a víztelítettség meghatározására agyagos termelő homokokban. Összehasonlító tanulmányozásnak vetettük alá ezeket a módszereket úgy, hogy valamennyi megvizsgált egyenletnél ugyanazokat a paraméter-értékeket használtuk.

Tanulmányunk megmutatja, hogy ez vagy az az interpretációs módszer miért vet el vagy tart meg egy-egy szóbakerülő agyagos homokot. Egyúttal segítségül akar szolgálni esetleges jövőbeli helytelen értelmezések ellen azért, hogy kiválassztja az egyes esetek kezelése számára legalkalmasabb módszert.

Megkíséreltük itt azt, hogy több jól ismert víztelítettség-számítási technikát bemutassunk a vízzaturáció számítására agyagos homokoknál, olyan paramétereket használva, melyek jellemzőek egy olyan agyagos-homok-területre, mint pl. a Gulf-Coast környéke. A módszereket röviden kifejtsük elméletileg és megtárgyaljuk előnyeiket és hátrányaikat. A jól ismert eljárások kiegészítése-

\* W. H. Fertl okl. olajmérnök és filozófiai doktor, vezető állású fűrőlyukelemző a Continental Oil Company termelésutatói osztályán a formáció-kiértékelési csoportban és mint oktató is működött a Texas-i egyetemen.

G. W. Hammack a Texas-i egyetemen fizikát tanult, majd különböző olajvállalatoknál szolgált: most vezető állású formáció-kiértékelő mérnök a Continental Oil Company-nál.



képpen új értelmezési módszert fejlesztettünk ki, mely előnyösen kerül ki az egyéb megoldásokkal való összehasonlításból.

Úgy érezzük, hogy a különböző agyagos-homok-interpretációs módszerek eme összehasonlító elemzése és az új, egyszerű megoldás kifejítése alapot szolgáltat a feltalálható agyagos-homokok kiértékelésének megjavításához.

### A rétegzett agyag-modell.

Az agyagos homokok interpretációjára kifejlesztett egyik legelső modell Poupon és társaitól származik. A modell kétfajta közegből áll, melyek váltakozó rétegekben helyezkednek el, mint pl. tiszta homok, vagy tiszta agyagrétegek. A megoldásnál felteszik, hogy a pala- és homoklemezek vezetőképessége szigorúan additív. A modell azt is felteszi, hogy az agyagrétegek és a szomszédos agyag-formációk elektromos vezetőképessége megegyezik.

Az ilyen „szendvics-típusú” agyagos homok vezetőképessége, mint az agyag és homok-frakció kombinált hatása így fejezhető ki:

$$C = V_{sh} C_{sh} + (1 - V_{sh}) C_{sd}, \quad (1)$$

ahol:  $C$  = az agyagos homok mért vezetőképessége,  
 $C_{sh}$  = a lemezes agyagkomponens vezetőképessége,  
 $C_{sd}$  = a tiszta homok vezetőképessége és  
 $V_{sh}$  = az agyagrétegek aránya a teljes térfogatban (agyagosság).

Ha az (1) egyenletet behelyettesítjük az alapvető Archie-képletbe, a következő kifejezést kapjuk a vízsaturációra, mely érvényes mind a tiszta, mind az agyagos homokokra:

$$s_w^n = \frac{a}{\Phi m} \left( \frac{1}{R_t} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right) \cdot \frac{R_w}{(1 - V_{sh})}. \quad (2)$$

A Humble-egyenletet alkalmazva és a saturációs kitevő ( $n$ ) értékét  $n = 2,0$ -nak véve a rétegzett agyagos modell vízsaturációjának számítására a következő formát kapjuk:

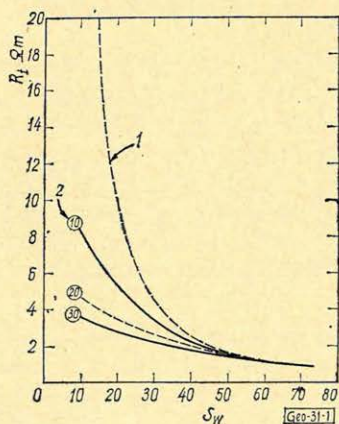
$$S_w = \sqrt[2]{\frac{0,9}{\Phi} \left( \frac{1}{R_t} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right) \cdot \frac{R_w}{(1 - V_{sh})}}. \quad (3)$$

Amint azt a (3) egyenletből láthatjuk, megbízható értékekre van szükség a porozitás ( $\Phi$ ), a formáció-víz-ellenállás ( $R_w$ ), az agyagosság ( $V_{sh}$ ) és a szomszédos agyagformáció ellenállása számára. Az 1. ábrában bemutatjuk a számított víztelítettség függését a formáció-ellenállástól és az agyagosságtól ( $V_{sh} = 10, 20, 30$ ), mely a termelő zónában jelen van. Egyéb, a Gulf-Coast-i hely-

1. ábra. Rétegzett agyag-homok-modell (Poupon és társai). 1 tiszta homok – 2 agyagosság (%)

Фиг. 1. Модель слоистого разреза, сложенного глинами и песками (Пупон и др.) 1 – чистые пески, 2 – глинистость (в %-ах)

Fig. 1. Geschichtetes Modell von tonigem Sandstein (Poupon und andere). 1 reiner Sand – 2 Tongehalt (%)





zettel kompatibilis adatok: a porozitásra: 30%, az  $R_w$ -re: = 0,045 és az  $R_{sh-ra}$  = 1,0.

### Az agyag-iszap modell

Ezt az agyag-homok-modellt L. DeWitte alkotta meg 1950-ben. Ez nem azonos az ő jóval általánosabban ismert  $SP$  – modelljével. Itt az agyag a tiszta homok pórusterében eloszolva helyezkedik el, más szóval: a formációban levő agyagásványok a formációfolyadékkal iszapot alkotnak.

Figyelembe véve mind az eloszló agyag és a vele levő víz keverékének az ellenállását, mind az eloszló agyagos anyag részellenállását ( $R_c$ ), felírhatjuk a következő összefüggést:

$$\frac{\text{Iszaptérfogat}}{R_z} = \frac{\text{Víz térfogat}}{R_w} + \frac{\text{Agyagtérfogat}}{R_c},$$

vagy

$$\frac{\Phi S_w + V_{sh}}{R_z} = \frac{\Phi S_w}{R_w} + \frac{V_{sh}}{R_c},$$

ahol:

$R_z$  = a szórt agyag és vele együtt levő víz keverékének ellenállása,

$R_c$  = a szórt agyag rezisztivitása,

$$(\Phi S_w + V_{sh}) = (R_z/R_t)^{1/2} \text{ és}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{(\Phi S_w + V_{sh})^2}{R_z} = (\Phi S_w + V_{sh}) \cdot \left( \frac{\Phi S_w}{R_w} + \frac{V_{sh}}{R_c} \right). \quad (4)$$

Ennek az egyenletnek az átalakításával a következő típusú összefüggés adódik:

$$Ax^2 + Bx + C = 0,$$

vagyis:

$$\frac{1}{FR_w} \cdot S_w^2 + \Phi S_w \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_c} \right) \cdot V_{sh} + \left( \frac{V_{sh}^2}{R_c} - \frac{1}{R_t} \right) = 0.$$

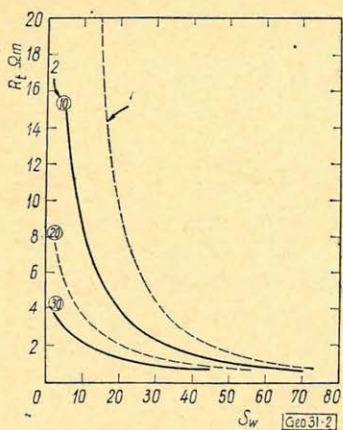
Így a vízzaturációra ( $S_w$ ) a következő értékeket kapjuk:

$$S_w = \frac{R_w}{2\Phi} \left\{ -y + \sqrt{y^2 - \frac{4}{R_w} \left( \frac{V_{sh}^2}{R_c} - \frac{1}{R_t} \right)} \right\}, \quad (5)$$

ahol:  $y = V_{sh} \left( \frac{1}{R_w} + \frac{1}{R_c} \right).$

A 2. ábrában bemutatjuk a vízzaturáció számított értékeit a formációellenállás és az agyagosság függvényében. Érdekes megjegyezni, hogy az (5) egyenlet alkalmazása alacsony rezisztivitású termelő homokoknál a vízzaturációra túl alacsony értékeket szolgáltat, sőt az  $S_w$  értéke még negatívnak is adódhat. Ez a helyzet kifejezettebbé lesz, amint a szóban forgó agyagos homokoknál az agyagosság mértéke növekszik.

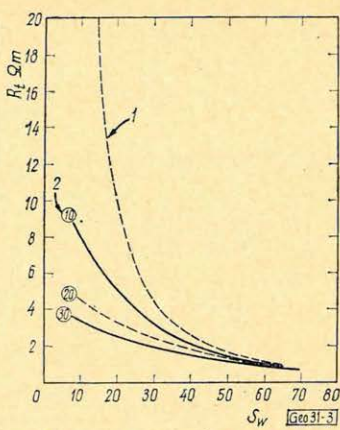




2. ábra. Agyag-homok-keverék – modell (L. DeWitte) 1 tiszta homok – 2 agyagosság (%)

Фиг. 2. Модель смешанной глинисто-песчаной среды (ДеВитте) 1 – чистые пески 2 – глинистость (в %-ах)

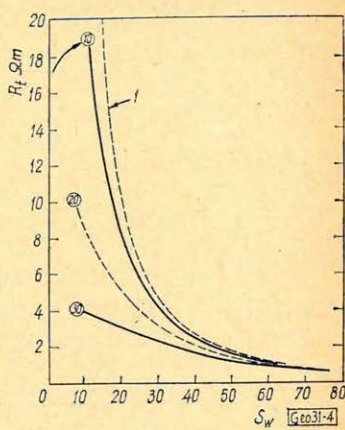
Fig. 2. Ton-Sand-Mischung – Modell (DeWitte). 1 reiner Sand – 2 Tongehalt (%)



3. ábra. Az  $y = a + c \cdot x^2$  alakú megoldás. 1 tiszta homok – 2 agyagosság (%)

Фиг. 3. Решение вида  $y = a + c \cdot x^2$  1 – чистые пески, 2 – глинистость (в %-ах)

Fig. 3. Lösung von der Form:  $y = a + C \cdot x^2$ . 1 reiner Sand – 2 Tongehalt (%)



4. ábra. Általánosított Archie-egyenlet (Hossin). 1 tiszta homok – 2 agyagosság (%)

Фиг. 4. Обобщенное уравнение Арши (Хоссин) 1 – чистые пески, 2 – глинистость (в %-ах)

Fig. 4. Verallgemeinerte Archie-Gleichung (Hossin). 1 reiner Sand – 2 Tongehalt (%)

### Parabolikus egyenlet alkalmazása

Az agyagos-homokos termelő rétegekben fellépő vízsaturáció számítására igen gyakran alkalmazott egyik összefüggés ilyen alakú:  $y = a + cx^2$ . Az agyag-homok-modellt illetően az agyagos zóna ellenállását két elektromos komponens összegeként fejezik ki, ahol az egyik a jelenlevő agyag által, a másik a pórus-térben elszórt folyadék által szolgáltatott rész. Matematikailag ez a modell így fejezhető ki:

$$C = V_{sh} C_{sh} + \frac{\Phi^m}{a \cdot R_w} \cdot S_w \quad (6)$$

Ebből az egyenletből a vízsaturáció mind a tiszta, mind az agyagos homokokra számítható. Ha behelyettesítjük az egyenletbe a Humble-összefüggést és a saturációs kitevőt  $n = 2,0$ -nak vesszük, akkor a víztelítettség számítására a következő képletet kapjuk:

$$S_w = \frac{0,9}{\Phi} \sqrt{\left( \frac{1}{R_t} - \frac{V_{sh}}{R_{sh}} \right) R_w} \quad (7)$$

Itt is bemutatjuk (3. ábra) a számított vízsaturáció változását a formáció-rezisztivitás és az agyagossági fok függvényében. De  $\Phi$  Witte megoldásához hasonlóan tapasztalataink azt mutatják, hogy a (7) egyenlet alkalmazásával számított víztelítettségi értékek az agyagos termelő homokokban túlzottan optimisztikusak. Az így kapott  $S_w$ -értékek általában túl kicsinyek és ha a termelő zóna agyagossága növekszik, az  $S_w$  értéke negatívvá is válhat.



## Az általánosított Archie-egyenlet

Az agyag-homok-rezervoár-modell leírására más egyenletet javasolt Hossin. Az ő modellje módot ad a vízsaturáció számítására agyagos, termelő homokokban, ha a formáció-ellenállás, a porozitás, és a zóna agyagossága ismeretes. A két parallel elektromos vezető gondolatát alkalmazva (mint az agyag és a homok), melyek hatása összeadódik, felírhatjuk, hogy:

$$C = C_{sh} + C_{sd} \quad (8)$$

ahol:  $C$  = a mért konduktivitás,  
 $C_{sh}$  = az agyag-komponens vezetőképessége,  
 $C_{sd}$  = a homok-komponens vezetőképessége.

A fizikai paraméterekkel kifejezve Hossin az alábbi alakú kifejezés felírását javasolja:

$$C = C_{sh} + C_{sd} = V_{sh}^2 C_c + \frac{\Phi^m}{a \cdot R_w} \cdot S_w^n, \quad (9)$$

ahol:  $\frac{1}{C_c} = R_c$  = a szórt agyag rezisztivitása. Ezt az értéket – rendszeren a tapasztalatokra alapozva – így közelítjük meg:  $R_c = 0,4 \times R_{sh}$  (ahol  $R_{sh}$  az agyagrezisztivitás a szomszédos agyag-zónában).

A (9) egyenlet egyszerű matematikai átalakításával – ideértve a Humble-egyenlet felhasználását – és az  $n = 2,0$  szaturációs kitevő helyettesítésével a következő kifejezést kapjuk a víztelítettség számára:

$$S_w = \frac{0,9}{\Phi} \sqrt{\left( \frac{1}{R_t} - \frac{V_{sh}^2}{R_c} \right) \cdot R_w}. \quad (10)$$

A 4. ábrán bemutatjuk a számított vízsaturációt, mint a formáció-ellenállás és az agyagosság függvényét.

## A Doll-módszer

Doll egy nem közölt módszerében a Hossin által javasolthoz igen hasonló eljárást ajánl. Doll is az additív elvet használja az agyagra és tiszta homokra, mint komponensekre és az alábbi módon fejezi ki a formáció-rezisztivitást:

$$\frac{1}{\sqrt{R_t}} = \frac{V_{sh}}{\sqrt{R_c}} + \frac{S_w}{\sqrt{F \cdot R_w}}. \quad (11)$$

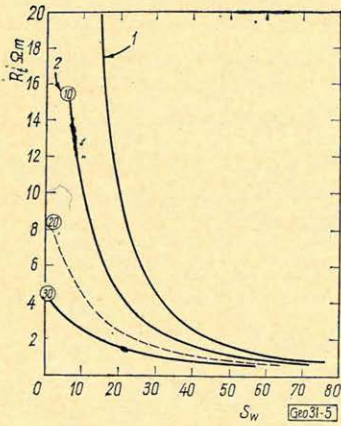
Matematikai átalakítás és az  $a = 1,0$ , valamint az  $(m) = 2,0$  (cementációs kitevő), továbbá az  $(n) = 2,0$ , (szaturációs kitevő) értékek behelyettesítése után a következő formulát kapjuk az agyagos homokban való vízsaturáció-számításra:

$$S_w = \frac{1}{\Phi} \left( \sqrt{\frac{R_w}{R_t}} - V_{sh} \sqrt{\frac{R_w}{R_t}} \right). \quad (12)$$

Rövid pillantás a (12) egyenletre mutatja, hogy a határfeltételek teljesítve vannak ( $R_c \rightarrow R_w$  és  $V_{sh} \rightarrow 0$ ).



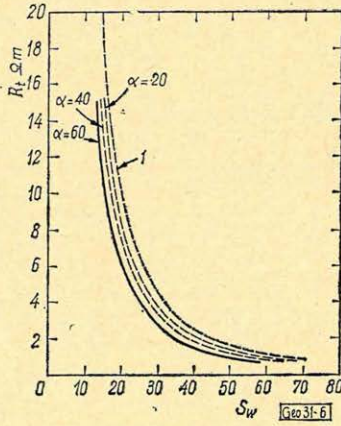
Az 5. ábrában bemutatjuk, hogy az ezzel a módszerrel számított vízszaturáció hogyan alakul a formáció-rezisztivitás és az agyagosság függvényében. Érdekes megemlíteni, hogy az a módszer igen optimisztikus adatokat szolgáltat, vagyis túl alacsony vízszaturációs értékeket. Különösen áll ez olyan termelő zónákra, melyeknél az agyagosság százalékszámja magas.



5. ábra. Doll-módszer (kézirát) 1 tiszta homok – 2 agyagosság (%)

Фиг. 5. Метод Долла (по рукописи) 1 – чистые пески, 2 – глинистость (в %-ах)

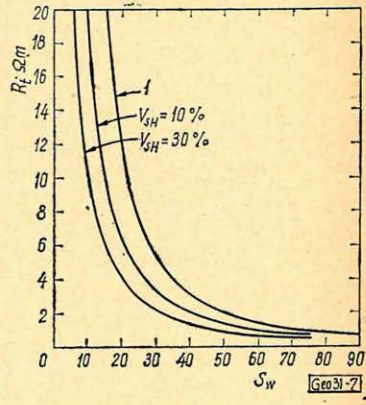
Fig. 5. Doll-Methode (unpubliziert). 1 reiner Sand – 2 Tongehalt (%)



6. ábra. Patchett-módszer ( $R_{mf} = 0,45 \text{ ohm m}$ ,  $R_w = 0,045 \text{ ohm m}$ ) 1 tiszta homok

Фиг. 6. Метод Патчетта ( $R_{mf} = 0,45 \text{ омм}$ ,  $R_w = 0,045 \text{ омм}$ ) 1 – чистые пески

Fig. 6. Patchett – Methode. 1 reiner Sand



7. ábra. Simandoux-módszer. 1 tiszta homok

Фиг. 7. Метод Симанду 1 – чистые пески

Fig. 7. Simandoux-Methode 1 reiner Sand

### Patchett módszere

Számos kvantitativ agyagos-homok-technikát ajánlottak már, ahol ilyen típusú formulákat használnak:

$$\frac{1}{R_t} = A \cdot S_w + \frac{B}{R_w} \cdot S_w^2, \quad (13)$$

ahol  $A$  és  $B$  – a fizikai paraméterekkel kifejezve – az agyag vezetőképességét ( $C_s$ ) és a tiszta-homok formációfaktorának reciprok értékét ( $F$ ) reprezentálják. Ismeretes továbbá, hogy az agyagosság befolyásolja az  $SP$  – görbét. De Witte már az előbb ajánlott egy módosított  $SP$  – egyenletet, mely figyelembe veszi az agyageffektust így:

$$PSP = K \log \frac{C_s F + S_w/R_w}{C_s F + S_w/R_{mf}}$$

Patchett a két egyenletet kombinálva a vízszaturációt a következő matematikai alakban fejezte ki:

$$S_w = \sqrt{\frac{FR_w}{R_t} \cdot \frac{R_{mf}}{R_{mf} - R_w} \cdot \frac{x-1}{x}}, \quad (14)$$



ahol:

$$x = I0^{PSP/K}$$

$F$  = formáció-faktor a sűrűség-mérésből (*density log*) a Humble egyenlet felhasználásával,

$R_w$  = a formáció-víz rezisztivitása megbízható forrásból.

Kitűnik, hogy ez a megoldás javított kiértékelést ad az agyagos termelő homokokra, feltéve, hogy az  $SP$ -görbét közvetlenül felhasználhatjuk. Ez viszont azt involválja, hogy ez a technika nem alkalmazható ott, ahol az  $SP$ -görbét az elárasztás erősen befolyásolja, vagy olyan esetekben, amikor az iszap-filtrátum rezisztivitási értéke a formáció-vízét erősen megközelíti. Nyilván nem alkalmazható a módszer olajbázisú iszappal fúrt, vagy gázzal töltött kutakban.

A 6. ábrában bemutatjuk a számított vízszaturációt, mint a formáció-ellenállás és a tároló-közet agyagosságának függvényét. Amint az általános szokás, az agyagosságot az  $SP$ -eltérítés függvényében fejeztük ki (pl. így:  $\alpha = PSP/SSP$ ).

### A Simandoux egyenlet

*Simandoux* kiterjedt tanulmányokat végzett homokból és agyagból összetett mesterséges közegeket illetően és ezek alapján a következő alakú kifejezést ajánlotta a vezetőképesség számára:

$$C_t = V_{sh} C_c + S_w \cdot \frac{\Phi^m}{a \cdot R_w}. \quad (15)$$

Itt  $C_c$  a szórt agyag konduktivitása. Ha a szaturációs kitevőre az  $n = 2,0$  értéket vesszük fel, akkor a *Waxman* és társai által (1968) találthoz hasonló parabolikus egyenletet kapunk:

$$y = bx + cx^2.$$

Matematikai átalakítás és a Humble egyenletek alkalmazása után a vízszaturációt így fejezhetjük ki:

$$S_w = \left\{ -\frac{V_{sh}}{R_c} + \sqrt{\left(\frac{V_{sh}}{R_c}\right)^2 + 5\left(\frac{\Phi^2}{R_t R_w}\right)} \right\} \cdot \frac{0,4 R_w}{\Phi^2}. \quad (16)$$

A Francia Petróleum Intézetben végrehajtott laboratóriumi kísérletek ezt az összefüggést alátámasztották. Úgy érezzük, hogy pillanatnyilag ez a megoldás szolgáltatja a legjobb módot a víztelítettség számítására az agyagos termelő homokokban. Ez az egyenlet lényeges része lett a számítógépre kidolgozott *Saraband* homokkő-analízisnek, melyet *Schlumberger*ék használnak otthon és melyet a Tengerentúli *Schlumberger* cég rendelkezésre bocsát a párisi számítóközpontjában elvégzett számításoknál.

A 7. ábra bemutatja a vízszaturáció ezzel a képlettel számított értékeit a formáció-rezisztivitás és az agyagosság függvényében.

### Új agyagos-homok-módszer

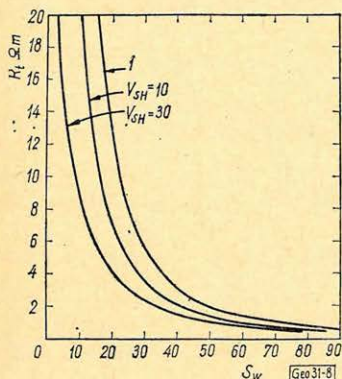
Amint már előbb is tárgyaltuk, a *Doll*-féle megoldás közvetlen alkalmazása a vízszaturáció számára olyan értékeket szolgáltat, melyek igen kicsinyek lehetnek, sőt még negatívvá is válhatnak. Véleményünk szerint azonban ezen a



korlátozottságon segíteni lehet. Doll alapvető megfontolásaiból kiindulva, a módszer módosítását ajánljuk. A megoldás abban áll, hogy két különböző szaturációs kitevőt használunk, és pedig  $n = 2,0$ -t a tiszta homokos tagra, és  $n_1 = 1,0$ -át az agyag-komponensre. Ennek megfelelően a Doll-féle egyenlet általunk javasolt módosított alakja a következő lesz:

$$S_w = \frac{1}{\Phi} \left\{ (0,81 R_w/R_l)^{\frac{1}{n}} - V_{sh} (R_w / (0,4 R_{sh}))^{\frac{1}{n}} \right\}. \quad (17)$$

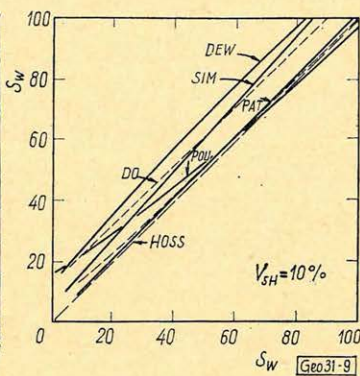
Miután az  $n$  értékét kipróbáltuk, az  $n_1$  számára az  $n_1 = 1,0$  értéket választottuk. A 8. ábra mutatja a számított vízszaturáció változásokat a formáció-rezisztivitás és a rezervoár-kőzet agyagosságának függvényében. Amint később erről még szólni fogunk, úgy látszik, hogy a javasolt módszer a víztelítettség számára hasonló értékeket ad, mint a Simandoux egyenlet, és pedig az agyagos-széles értékközébe, különösképpen pedig olyan rezervoárjellemzőkre, melyek a Gulf-coaston felfedezhetők.



8. ábra. Az új módszer ( $n = 1,0$ ). 1 tiszta homok

Fig. 8. Новый разработанный метод ( $n = 1,0$ ) 1 — чистые пески

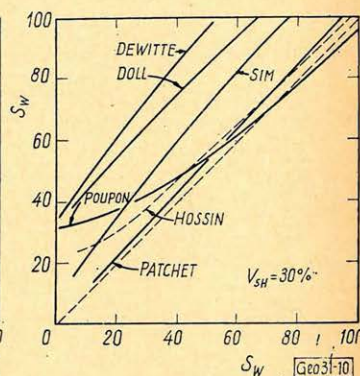
Fig. 8. Die neue Methode. 1 reiner Sand



9. ábra. Az agyagos-homokos módszerek (vízszintes tengely) összehasonlítása az Archie egyenlettel (függőleges tengely), százalékban

Fig. 9. Сопоставление методов определения водонасыщенности глинистых песков (горизонтальная ось) с уравнением Арши (вертикальная ось) в %-ах

Fig. 9. Vergleich der Ton-Sand-Methoden (horizontale Achse) mit der Archie-Gleichung (vertikale Achse), %



10. ábra. Az agyagos-homokos módszerek összehasonlítása (vízszintes tengely) az Archie egyenlettel (függőleges tengely), százalékban

Fig. 10. Сопоставление методов определения водонасыщенности глинистых песков (горизонтальная ось) с уравнением Арши (вертикальная ось) в %-ах

Fig. 10. Vergleich der Ton-Sand-Methoden (horizontale Achse) mit der Archie-Gleichung (vertikale Achse), %

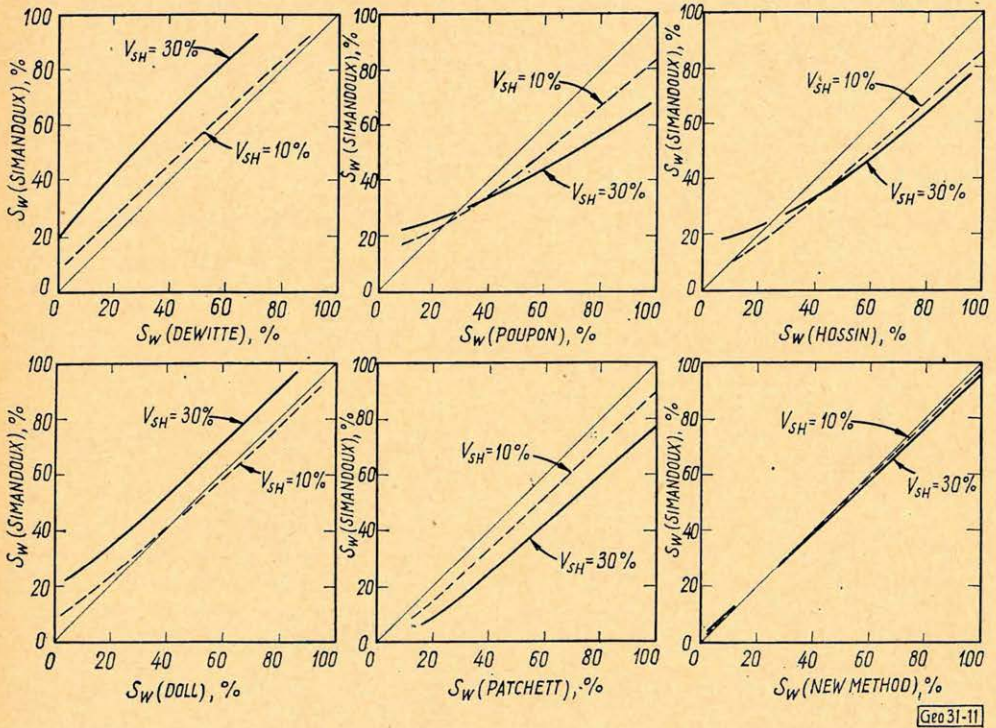
### A különböző módszerek összehasonlítása

A 9. és 10. ábrákon megkíséreltük, hogy bemutassuk az imént tárgyalt agyagos-homok-technikák viszonyát, összehasonlítva azokat a tiszta homokokra vonatkozó sztenderd Archie-típusú egyenlettel. Ezekből a grafikus ábrázolásból kitűnik, hogy attól függően, hogy az elemző szakember melyik agyagosági módszert választotta, bármilyen potenciális termelő zóna ajánlásra



vagy elvetésre kerülhet. Azt is megjegyezhetjük, hogy az ilyen nyilvánvaló ellentmondások kifejezettebbé válnak, ha a rezervoár-kőzet agyagossága növekszik. Pl. egy eléggé agyagos tároló kőzet ( $V_{sh} = 30\%$ ) szélősegesen optimista  $S_w$  – értékeket adhat, ha a De Witte – vagy Doll – megoldást választjuk, míg a Poupon-féle megoldás az  $S_w > 75\%$  tartományban még az Archie-féle tisztahomok-megoldásnál is pesszimistikusabbnak mutatkozik. A 9. és 10. ábrákon mutatkozó specifikus kölcsönös kapcsolatok a különféle agyagos-homok módszerek között nem szorulnak magyarázatra.

Még érdekesebb azonban valamennyi, ebben a dolgozatban tárgyalt agyagos-homok-technika közvetlen összehasonlítása, ha a Simandoux-egyenletet használjuk referencia-bázisnak. A 11. ábrán látható a számítási eredmények grafikus ábrázolása olyan formációra, melynek agyagossága  $10\%$  és egy eléggé agyagos ( $V_{sh} = 30\%$ ) rezervoár-kőzetre.



Geo31-11

11. ábra. Több agyagos-homokos módszer összevetése a Simandoux-egyenlet adta megoldással  
 Фиг. 11. Сопоставление некоторых методов определения водонасыщенности глинистых песков с решением по уравнению Симанду

Fig. 11. Vergleich mehrerer Ton-Sand-Methoden mit der Lösung geliefert von der Simandoux-Gleichung

Amint várható, valamennyi agyagos-homok-technikánál a látható eltérések kifejezettebbé válnak az agyagtartalom növekedtével egy potenciális termelő homokban. Mindebből több fontos következtetést vonhatunk le.

Eléggé tiszta, azaz nem túl agyagos formációkban ( $V_{sh} < 10\%$ ) a De Witte – Doll- és Patchett- megoldások gyakorlatilag egymáshoz közeleső eredményeket adnak. Ugyanez áll a Hossin-féle módszerre is abban az alsó tarto-



mányban, melynél  $S_w < 40\%$ . Azonban a legjobb megegyezést a Simandoux módszer és a mi újonnan kidolgozott agyagos-homok-módszerünk között találjuk (11. f. ábra). Az agyagosabb rezervoár-kőzetben ( $V_{sh} = 30\%$ ) a fentebbi észrevételek még kifejezettebben igazolódhatnak. A Doll- és DeWitte-megoldások 10–25 szaturáció-százalékkal is túl optimistikusnak bizonyulnak, míg Poupon és Hossin túl pesszimistikus értéket adnak az  $S_w > 26-28\%$ -os értéknél, Patchett pedig az egész szaturációs tartományban. Itt is kiváló egyezést látunk azonban a mi újonnan kifejlesztett módszerünk és a Simandoux módszer között (11. f. ábra).

Végül ellenőriztük új módszerünk és a Simandoux-féle megoldás megegyezési tartományát olyan rezervoár-feltételek mellett is, melyek a Gulf-coast vidékén találhatóéktól eltérnek. A tanulmányozott helyzetek között vannak kis és nagy-porozitású kőzetek, édes és sós vizek és az agyag-rezisztivitás különböző értékei, valamint az agyagosság változó értéke a rezervoár-kőzetben (10%-tól 40%-ig).

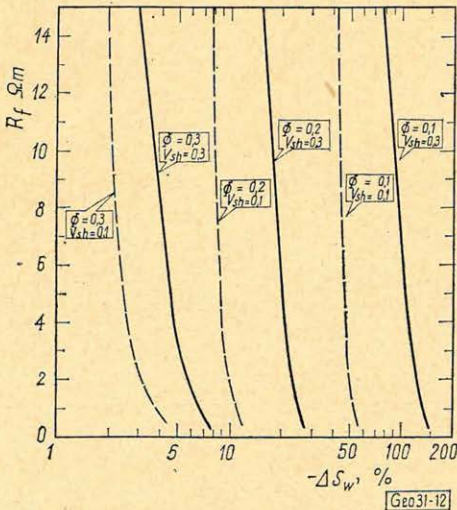
Általában a mi módszerünkkel és a Simandoux-egyenlettel meghatározott vízsaturáció-értékek között az eltérés matematikailag az alábbi módon fejezhető ki:

$$\Delta S_w = \underbrace{\left(1 - \frac{0,4}{\Phi}\right) \left(\frac{R_w V_{sh}}{\Phi R_c}\right)}_{f_1} + \underbrace{\frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{R_w}{R_t}} \left(\frac{0,4}{R_t}\right) \sqrt{\left(\frac{V_{sh}}{R_c}\right)^2 R_w R_t + 5 \cdot \Phi^2 - 0,9}}_{f_2}$$

vagy:

$$\Delta S_w = f_1 + f_2$$

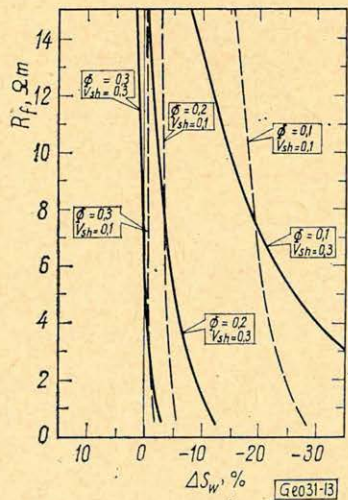
Tekintsük külön-külön az  $f_1$  és  $f_2$  tagokat. Az alábbi következtetések vonhatók le:



12. ábra. A Simandoux-módszer és az új módszer összevetése ( $R_w = 1,0$  és  $R_c = 6,0$ ).

Fig. 12. Сопоставление метода Симанду с новым методом ( $R_w = 1,0$  и  $R_c = 6,0$ )

Fig. 12. Vergleich der Simandoux-Methode mit der neuen Methode ( $R_w = 1,0$  und  $R_c = 6,0$ )



13. ábra. A Simandoux-módszer és az új módszer összehasonlítása ( $R_w = 0,04$  és  $R_c = 0,4$ )

Fig. 13. Сопоставление метода Симанду с новым методом ( $R_w = 0,04$  и  $R_c = 0,4$ )

Fig. 13. Vergleich der Simandoux-Methode mit der neuen Methode ( $R_w = 0,04$  und  $R_c = 0,4$ )



(1)  $f_1$  független a formáció-rezisztivitásától,

(2)  $f_2$  csökken, ha az  $R_c$  növekszik.

Nyilván nem várhatjuk, hogy a Simandoux és a mi új módszerünk közötti egyezés minden elképzelhető rezervoárhelyzetben jó lesz, minthogy a számított vízszaturációk közötti eltérés ( $\Delta S_w$ ) a porozitásnak, az agyagosságnak, a formáció-víz rezisztivitásának, az agyagos keveréknek és a formációnak kombinált függvénye. A 12. ábra bemutat egy esetet, ahol nincs egyezés: itt  $R_w = 1,0$ , és  $R_c = 6,0$ . Ilyen helyzet előfordulhat pl. a Sziklás-hegység területén.

Általában azonban azt várhatjuk a módszertől, hogy öt százaléknál kisebb eltéréssel szolgáltatja a Simandoux-egyenlet adta szaturáció-értékeket, ha  $R_w$  kisebb, mint 0,065 és a  $\Phi$  nagyobb, mint 25%. Továbbá:  $R_f$ -nek a termelő zónában 0,8-nál nagyobb kell lennie és az agyagosság a tároló-kőzetben ne haladja meg a 30%-ot. A 13. ábra bemutatja azokat a viszonyokat, melyek a Gulf-Coast közelében várhatók, vagyis ahol  $R_w = 0,04$  és  $R_c = 0,4$ . Megjegyezzük, hogy ilyen feltételek mellett valamennyi „gyakorlatilag” érdekes (művelő) Gulf-homok esetében igen jó egyezés áll fenn a Simandoux és az új módszer szerinti értékek között. Ugyancsak megjegyezhetjük, hogy mindazon homokoknál, melyeknél a porozitás 25%-nál nagyobb (vagy ezzel egyenlő), és az agyagosság 10–30%, kiváló egyezés áll fenn a két egyenlet között.

### Végkövetkeztetések

Ma az ipar különböző technikákat alkalmaz folyamatosan az agyagos homokok vizsgálatára. A kiszámított szaturációs értékekben mutatkozó eltérések növekednek a tartóközet agyagosságával együtt. A DeWitte és Doll- technikák túl optimisztikus értékeket szolgáltatnak és erősen agyagos termelő zónákban teljesen irreális eredményeket adnak. Az átmeneti zónákban elhelyezkedő agyagos termelőhomokokban, azaz olyanokban, ahol magas értékű vízszaturáció van jelen, a Hossin és Poupon-módszerek túl pesszimisztikusak és alkalmazásuk olyan zónák elvetéséhez vezethet, melyek gyakorlatilag kihasználhatók lennének.

Tanulmányunk alapján vagy a Simandoux-egyenlet, vagy az általunk kifejlesztett új módszer használatát ajánljuk agyagos-homok-technikaként, különösen olyan rezervoároknál, melyek a Gulf-coast területhez hasonló jellegűek.

### IRODALOM

- DeWitte, L.: Kapesolat porózus kőzetek folyadéktartalma és rezisztivitásai között; Oil and Gas Journal, 1950 augusztus 24., 120–132 old.
- Doll, H. G.: Kéziratban levő módszer.
- Hossin, A.: Vízszaturáció számítása az agyagos cement-módszerrel (általánosított Archie-egyenlet); Bull. A. F. T. P.
- Patchett, J. G.: Módszer a vízszaturáció meghatározására agyagos homokokban, Journal Petroleum Technology, 1967 október.
- Poupon, A. és társai: Adalék az elektromos szelvények interpretációjához agyagos homokokban; Journal Petroleum Technology, 1954 augusztus, 29–34 old.
- Simandoux P.: Dielektromos mérések porózus közegben, alkalmazás a vízszaturáció mérésére, az agyagos kőzetek viselkedésének vizsgálata; Revue de l'Institut Français du Petrole, Pótkötet, 1963.
- Waxman, M. H. és Smits L. J. M.: Elektromos vezetőképesség olajtartalmú agyagos homokokban; Society of Petroleum Engineers Journal, 1968. június.