

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A Doktori Iskola vezetője

Prof. Dr. Szűcs Péter

egyetemi tanár,

a földtudományok doktora

**KIS ÁTERESZTŐKÉPESSÉGŰ TÁROLÓK TULAJDONSÁGAINAK
VIZSGÁLATA**

DOKTORI (PhD.) ÉRTEKEZÉS

Írta:

REMECZKI FERENC

Tudományos vezető:

Dr. Jobbik Anita

tudományos főmunkatárs

PhD. földtudományok

Miskolci Egyetem

Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet

Miskolc

2022

Témavezetői ajánlás

Remeczki Ferenc

„Kis áteresztőképességű tárolók tulajdonságainak vizsgálata”

című doktori (PhD.) értekezéshez

Az úgynevezett RCA (Routine Core Analysis) petrofizikai laboratóriumi mérésekkel hatékonyan nyerhetők ki a szénhidrogén tároló rezervoárok értékeléséhez szükséges alapvető információk. Napjainkra egyre fontosabbá vált a kedvezőtlen termeltethetőségi tulajdonságokkal bíró kőzetek nagy pontossággal és megbízhatósággal történő mérési módszereinek és adatfeldolgozási eljárásinak kérdése, melyhez a Jelölt tudományos munkája közvetlenül kapcsolódik és melynek keretében új tudományos eredményei születtek.

A Jelölt értekezését a nemzetközi szakirodalom áttekintésével kezdi majd a kutatási terület rövid földtani bemutatásával folytatja. Az alapadatok mérésekkel és értékelésekkel történő előállítását lényegre törően ismerteti és számos mellékletben részletes mérési eredmények közlésével, illetve eloszlásgörbék bemutatásával támasztja alá azok hitelességét. Az adatok elemzésével és az abszolút porozitáson túli más jellemzők vizsgálatával új poroperm kapcsolatokat ír le. A kőzetben kialakuló gáztranszport folyamatok hatékonyabb elemzéséhez bevezeti a szintetikus modell mintatest fogalmát. A Jelölt felismerte a hagyományos módon számítással történő eljárások korlátait és kidolgozta a kapilláris csőköteg modell alkalmazhatóságát a tapadóvíz telítettség meghatározására. A gyakorlatban könnyen alkalmazható kapcsolatokat írt le, melyek a redukált porozitás vagy a küszöbnyomás ismeretében lehetővé teszik a tapadóvíz telítettség számításával történő meghatározását. Mérésekkel bizonyította, hogy az általa javasolt összefüggésekkel a csőköteg modell alkalmas a permeabilitás meghatározására. Rendkívül újszerű és előremutató Kéreg-modell elmélete egyedülálló a hazai laboratóriumi értékelési gyakorlatban.

Az értekezés logikusan felépített, magában foglalja a Jelölt által végzett kutatómunka jelentősebb eredményeit.

A kutatásokban való folyamatos részvétele, szorgalma és az értekezésben bemutatott eredmények igazolják a Jelölt magas színvonalú tudományos ismereteit és az önálló kutatómunkára való alkalmasságát. Kijelenthető, hogy a Jelölt a tudományos kutatásra való alkalmasság és a gyakorlatias szemlélet igen előnyös összhangját képes megvalósítani. A doktori értekezésben foglalt új tudományos eredmények a tömött homokkövek és márga kőzetek RCA laboratóriumi mérési gyakorlatában fontos előrelépést valósítanak meg.

Megállapítom, hogy az értekezés hiteles adatokat tartalmaz és a dolgozat minden vonatkozásban megfelel a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola által előírt tartalmi és formai követelményeknek. A fentiek alapján támogatom és javaslom a PhD értekezés nyilvános vitára bocsájtását.

Miskolc, 2022. 05. 17.

Dr. Jobbik Anita

tudományos főmunkatárs
PhD földtudományok doktora

TARTALOMJEGYZÉK

Summary	1
Bevezetés	3
1 A vizsgált terület földtani ismertetése	10
2 Nem-hagyományos kőzetminták laboratóriumi méréseinek újszerű kiértékelései	19
3 Szintetikus mintatest kialakítása petrofizikai tulajdonságokból	28
4 Tapadóvíz telítettség meghatározása szintetikus mintatest alkalmazásával.....	45
4.1 HPMI adatokra épülő petrofizikai jellemző becslése.....	51
5 Szintetikus mintatest látszólagos áteresztőképességének meghatározása.....	53
6 Márga kőzetek áteresztőképességének újszerű megközelítése – Kéreg-modell	68
7 Új tudományos eredmények.....	82
Összefoglalás	87
Köszönetnyilvánítás.....	89
Irodalomjegyzék	90
Mellékeltek	98
Mellékletjegyzék.....	99

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. A kutatás során vizsgált magminták származási mélyfúrásai és a neogén aljzat mélységtérképe. 1. Makói-árok, 2.Békési-medence, 3. Derecskei-árok (Remeczki F., 2021b).....	10
2. ábra. 194 darab nem-hagyományos kőzetminta nyers héliumos porozitás adatai (sz.s.sz.)	19
3. ábra. 176 darab nem-hagyományos kőzetminta bemérési áteresztőképesség adatai (sz.s.sz.).....	19
4. ábra. A plug és a small size mintatestek kialakítása (sz.s.sz.)	20
5. ábra. A héliumos piknométerrel és HPMI méréssel meghatározott porozitás értékek összevetése tömött homokkő (a) és márga (b) minták esetén (sz.s.sz.)	21
6. ábra. A tömött homokkő minták hagyományos és a PPD permeabilitás méréseinek számított abszolút permeabilitás eredményei a porozitás függvényében (sz.s.sz.)..	22
7. ábra. A márga minták hagyományos abszolút és a Nano-Perm TM eszközön mért effektív permeabilitás méréseinek eredményei a porozitás függvényében (sz.s.sz.)	22
8. ábra. Hunya-1 jelű mélyfúrásból származó minták pórustorok méret eloszlásai (sz.s.sz.)	23
9. ábra. Hunya-1 kútból származó minták pórustorok sugár eloszlása a higanytelítettség függvényében (sz.s.sz.)	24
10. ábra. Hunya-1 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében (sz.s.sz.)	24
11. ábra. A leválogatott tömött homokkő és márga minták poroperm kapcsolatának ábrázolása (sz.s.sz.)	25

12. ábra. a legjellemzőbb pórustorok sugár és az abszolút permeabilitás kapcsolata (sz.s.sz.)	26
13. ábra. A 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórustorok sugár és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusai közötti kapcsolat (sz.s.sz.)	26
14. ábra. A redukált porozitás és a permeabilitás kapcsolata (sz.s.sz.)	27
15. ábra. Gázmolekulák elhelyezkedése a nanopórusokban szervesanyaggal rendelkező közet esetén (Remeczki F., 2021b)	29
16. ábra. Szintetikus modell mintatest kialakításának sematikus ábrája (sz.s.sz.)	32
17. ábra. A Bék-5/3 szakasz kifűrés után és a belőle kialakított minták (sz.s.sz.)	33
18. ábra. A Bék-5/3 szakaszból kialakított kis méretű mintatestek HPMI adatai (sz.s.sz.)	33
19. ábra. A gázáramlás jellege eltérő Knudsen-számok esetén (sz.s.sz.)	34
20. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta pórustorok méret sugár eloszlása, illetve a metán és a molekulák átmérője (sz.s.sz.)	35
21. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta szimulációs körülményein kialakuló, a Knudsen szám alapján elválasztott áramlástípusok a pórusméretsugár függvényében (sz.s.sz.)	36
22. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta eltérő szimulációs körülmények között kialakuló, a Knudsen szám alapján elválasztott áramlástípusok a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz.)	36
23. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó egyedi térfogatáram értékek, illesztés előtt (sz.s.sz.)	37
24. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó egyedi térfogatáram értékek, illesztést követően (sz.s.sz.)	37
25. ábra. A Bék-5/3/5s minta korrekcióval érintett szakasza (sz.s.sz.)	38
26. ábra. A Bék-5/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	39
27. ábra. A Bék-5/3/5 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	39
28. ábra. A Gyo-1/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	40
29. ábra. A Gyo-1/5/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	40
30. ábra. Köt-5/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	40
31. ábra. Köt-5/4/5 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.)	40
32. ábra. Tömött homokkő és márga minták pórustorok sugár eloszlás görbéi (sz.s.sz.) ..	41
33. ábra. A közetre nem jellemző felületei sérülésekből adódó mikroporok (sz.s.sz.) ..	43
34. ábra. Az eredeti és a felületkezelt minta pórustorok sugár eloszlásai (sz.s.sz.)	43
35. ábra. a) az Ui-1/4s számított illesztés nélküli térfogatárama, b) az Ui-1/4/SEMs számított illesztés nélküli térfogatárama, c) az az Ui-1/4s számított térfogatárama illesztéssel, d) az „a) -b) -c)” számításokhoz használt pórustorok sugár eloszlások (sz.s.sz.)	44
36. ábra. Kapilláris nyomásgörbe levegő-víz rendszerben (sz.s.sz.)	48
37. ábra. A tapadóvíz telítettség meghatározásának elméleti modellje (sz.s.sz.)	49
38. ábra. Szintetikus minta modellel számított tapadóvíz telítettségek homokkő és márga minták esetén (sz.s.sz.)	50
39. ábra. A porozitás abszolút értéke és a tapadóvíz telítettség kapcsolata (sz.s.sz.)	51
40. ábra. A redukált porozitás és a tapadóvíz telítettség kapcsolata (sz.s.sz.)	52
41. ábra. A Szolnoki tömött Homokkövek küszöbnyomásainak és tapadóvíz telítettségeinek kapcsolata (sz.s.sz.)	52
42. ábra. Bék-5/3/5 azonosítójú kis méretű mintatestben kialakuló k_{app}/k_D arány a pórustorok méret függvényében laboratóriumi mérési körülmények között (sz.s.sz.)	54

43. ábra. Bék-5/3/5 azonosítójú szintetikus minta súlyozott látszólagos és Darcy permeabilitásai (sz.s.sz.).....	55
44. ábra. Bék-5/3/5s mintatest pórutorok méret eloszlás görbéje, illetve annak mérésre illesztett változata (sz.s.sz.)	56
45. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó és összesített térfogatárama (sz.s.sz.).....	57
46. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó és összesített látszólagos- és Darcy permeabilitása (sz.s.sz.)	57
47. ábra. Bék-5/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	59
48. ábra. Bék-5/3/5s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	59
49. ábra. Gyo-1/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	59
50. ábra. Gyo-1/5/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	59
51. ábra. Köt-5/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	60
52. ábra. Köt-5/4/5s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.).....	60
53. ábra. A Békés-5 jelű kútból származó minták pórutorok méret eloszlásai (sz.s.sz.) ..	60
54. ábra. A Bék-5/3 sorozat mintáinak bemérési permeabilitás értékei (sz.s.sz.)	61
55. ábra. A 3. számú magfúrásból származó kőzet és az abból kialakított minták (sz.s.sz.)	62
56. ábra. A Bék-5/3 sorozat mintáinak petrofizikai tulajdonságai (sz.s.sz.)	62
57. ábra. Bék-5/3/1-6 minták pórutorok sugár eloszlásai az 10 mikrométernél nagyobb tartományban (sz.s.sz.)	63
58. ábra. Bék-5/3/1s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	64
59. ábra. Bék-5/3/2s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	65
60. ábra. Bék-5/3/3s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	65
61. ábra. Bék-5/3/4s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	65
62. ábra. Bék-5/3/5s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	66
63. ábra. Bék-5/3/6s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)	66
64. ábra. A Hu-1/12 sorozatából kialakított minták és a kifűrés utáni maradék kőzet (sz.s.sz.)	68
65. ábra. A Hu-1/12 sorozat mért permeabilitás értékei (sz.s.sz.)	69
66. ábra. A Hu-1/12 sorozat mért jellemzői (sz.s.sz.).....	69
67. ábra. A Hu-1/12 sorozat mintáinak HPMI mérésből származó pórutorok sugár eloszlásgörbéi (sz.s.sz.)	70
68. ábra. A Hu-1/12/1s azonosítójú minta pórusterében kialakuló áramlás típusok a Knudsen szám és a pórutorok sugár függvényében (sz.s.sz.).....	70
69. ábra. a) A Hu-1/12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a kapilláris kötegekhez tartozó térfogatáram értékek a pórutorok sugár függvényében, b) A Hu-1/12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a látszólagos és a Darcy	

permeabilitás értékek kapilláris kötegenként a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz.).....	71
70. ábra. a) A Hu-1/12/6s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a kapilláris kötegekhez tartozó térfogatáram értékek a pórustorok sugár függvényében, b) A Hu-1/12/6s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a látszólagos és a Darcy permeabilitás értékek kapilláris kötegenként a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz.).....	71
71. ábra. A Hu-1/12/1s azonosítójú minta térfogatáramra a), valamint az áteresztőképességre b) történő illesztése (sz.s.sz.).....	72
72. ábra. A Hu-1/12/6s azonosítójú minta térfogatáramra a), valamint az áteresztőképességre b) történő illesztése (sz.s.sz.).....	72
73. ábra. A Forráskút-8 jelű kút 5-ös szelvényéből származó három mintatest (sz.s.sz.).....	73
74. ábra. A Fk-8/5 sorozat mintáinak pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.).....	74
75. ábra. A kutatás során a Nano-Perm TM eszközzel mért minták térfogatáramai effektív permeabilitásai, felirattal jelölve a Fk-8/5 sorozat mérési eredményeit (sz.s.sz.)....	75
76. ábra. A Fk-8/5/1s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.).....	75
77. ábra. A Fk-8/5/2s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.).....	76
78. ábra. A Fk-8/5/3s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.).....	76
79. ábra. A Kom-12/1/1s minta pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.).....	78
80. ábra. A Fk-8/4/2s minta pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.).....	78
81. ábra. A Fk-8/4/2s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációs eredményei (sz.s.sz.).....	79
82. ábra. A Kom-12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációs eredményei (sz.s.sz.).....	79
83. ábra. A Kéreg-modell sematikus ábrája (sz.s.sz.).....	80
84. ábra. A Fk-8/4/2s a) és a Kom-12/1/1s b) minták szimulációs eredményei, kéreg eltávolítása után (sz.s.sz.).....	81

TÁBLAJEGYZÉK

1. táblázat. A kutatási program során alkalmazott permeaméterek mérési intervallumai (sz.s.sz.).....	9
2. táblázat. A kutatásaim során vizsgált magminták származási helyei (sz.s.sz.).....	18
3. táblázat. Az eljáráshoz szükséges adatokat és az eredmények (sz.s.sz.).....	34
4. táblázat. Ultra-Perm 610D TM eszközzel elvégzett mérés, valamint a szintetikus mintával végzett szimuláció térfogatáram adatai a szerző megjegyzéseivel (sz.s.sz.).....	39
5. táblázat. A vizsgált minták besajtoltsági fajlagos higany mennyisége és teljes porozitása (sz.s.sz.).....	43
6. táblázat. A vizsgált minták mért és számított térfogatáramai (sz.s.sz.).....	44
7. táblázat. Bék-5/3/5s minta mérési, illetve szimulációs eredményei (sz.s.sz.).....	55
8. táblázat. A Bék-5/3/5s minta mérési eredményei és a k_D -re is illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz.).....	56
9. táblázat. Az elvégzett számítások összefoglaló eredményei (sz.s.sz.).....	58
10. táblázat. Mért adatok valamint illesztés nélküli és illesztett szimulációk eredményei (sz.s.sz.).....	64
11. táblázat. A Bék-5/3 sorozat mért adatai, valamint számított térfogatáram és permeabilitás értékei (sz.s.sz.).....	67

12. táblázat. A Hu-1/12 sorozat mérési adatai (sz.s.sz)	69
13. táblázat. A Hu-1/12/1s és Hu-1/12/6s azonosítójú minták effektív permeabilitás adatai (sz.s.sz).....	71
14. táblázat. A Hu-1/12 sorozat szimulációinak összefoglaló eredményei, illesztés nélkül (sz.s.sz).....	73
15. táblázat. A Hu-1/12 sorozat szimulációinak összefoglaló eredményei, illesztésekkel (sz.s.sz).....	73
16. táblázat. A Fk-8/5 sorozat mintáinak effektív áteresztőképesség értékei (sz.s.sz).....	74
17. táblázat. A Fk-8/5 sorozat szimulációs eredményei korrekció nélkül és illesztéssel (sz.s.sz).....	75
18. táblázat. A Fk-8/5/1s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz).....	76
19. táblázat. A Fk-8/5/2s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz).....	77
20. táblázat. A Fk-8/5/3s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz).....	77
21. táblázat. A Fk-8/4/2s és a Kom-12/1/1s minták mért adatai (sz.s.sz).....	78
22. táblázat. A Fk-8/4/2s és a Kom-12/1/s minták szimulációs eredményei (sz.s.sz).....	79

SUMMARY

RCA (Routine Core Analysis) petrophysical and related rock rheological laboratory measurements can be used to obtain the information crucial for the efficient evaluation of hydrocarbon reservoirs, providing the possibility of quality control also. Nowadays, the issue of high-precision and reliable measurement tools, methods and data processing procedures for rocks with unfavorable productivity properties has become increasingly important.

Accordingly, the results presented in my PhD dissertation are of great importance for both the petroleum industry and organizations that are planning to use the geological medium for other climate strategic purposes.

After the production of the basic data, I examined their correlations in order to make generalizable statements about the petrophysical properties of the studied formations (Szolnok and Endrődi). The relationship between porosity and permeability is known to be a long-standing and continuously researched field in petrophysics. Starting from the fact that the order of magnitude of the permeability, in the case of tight sandstones, is mostly influenced by the presence and distribution of larger pores, I examined numerous sample's pore-throat distribution. I concluded that searching for a permeability relationship with the absolute value of porosity shows less effectiveness compared to connections with a characteristic proportion of it. In the search for correlations, I discovered an especially strong relationship between the volume formed by pores with a radius greater than 0.2 micrometers (reduced porosity) and the permeability.

In order to interpret the gas transport processes in the rock more efficiently, I adapted and further developed the theory used for the study of extremely dense rocks, according to which the total mass flow flux in the pores is the sum of the pressure difference-controlled flow and the Knudsen type diffusion flux. I created the concept of the synthetic sample model, with the aim of which I could explain and eliminate the discrepancies in the interpretation of the measured data and fill in the missing measurements. Based on my simulation results, it can be said that in the case of tight sandstones, the simulations with synthetic samples built from capillary bundles show a very good agreement with the measurement results even without the correction of the pore-throat radius distribution curves.

I developed a model describing the applicability of a “cleaned” and measurement-validated synthetic model specimen of a capillary tube bundle to determine connate water

saturation. I have described strong relationships that can be easily applied in practice between the so-called reduced porosity I have introduced, the threshold pressure and the connate water saturations belonging to a critical radius of 0.2 micrometers in the case of Szolnok tight sandstones.

With the help of measurement data, I confirmed, that the capillary tube bundle model describes the behavior of a standard “plug” sample during measurement very well. I was able to determine the apparent and Darcy permeability of the sample, so that the permeability of standard, plug-size samples with cracks and thus significantly different measured results can be properly calculated by careful application of modeling.

In the case of marl and calcareous marl rock types, I also prepared the synthetic samples from the pore-throat radius distribution curves based on HPMT measurement. After performing the simulations, I observed a strange phenomenon. In contrast to the sandstone simulation experiments, where minimal corrections had to be applied where appropriate, the measured and unmatched flow rates of the marl samples differed greatly. The measurement results and the interpretation of the simulations provided further evidence and confirmed my assumption that both small and plug-sized marl samples acquire / suffer significant surface and even sample-wide (microcrack) damage partly during storage and partly during sample preparation.

Given that the flow rate and permeability values measured with the Nano-PermTM device can only be obtained with a strong correction during fitting in the validated model, I concluded that this measured permeability is a resultant of the intact internal ‘core’ and the resulting permeability of a ‘crust’ with a significantly higher value due to surface damage. The Crust Model Theory, which is a completely novel approach, can in many cases explain the productivity and production intensification issues of the domestic unconventional reservoirs.

BEVEZETÉS

Az elmúlt két évtizedben, különösen az utóbbi tíz év tekintetében, jelentős figyelmet kaptak a nem hagyományos szénhidrogén rezervoárok kiaknázásának lehetőségeit kutató projektek, ipari beruházások. Számos neves hazai- és nemzetközi egyetem, valamint kutatóintézet foglalkozik a fenntartható fejlődés, energia ellátásbiztonság részeként olyan módszerek, működési mechanizmusok feltérképezésével, amelyek képesek leírni az egyedi rendszerek közetfizikai- és mechanikai jellemzőit. A rendkívül összetett, többnyire már lokális szinten is jelentkező diszkrepanciák megnehezítik mind a földtani– mind az ásványvagyon értékének becslését és nincs ez másként az alkalmazható másod– vagy harmadlagos termelési technológiák esetében sem. Számos olyan paraméter ismerete, amely egy hagyományos szénhidrogén tároló tekintetében – főként ipari szempontból – szükségtelen és/vagy költséges vizsgálatok, mérések eredményeképpen határozható meg egy mintatest, fúrási magminta, kút vagy kúthálózat esetén, addig egy „tight” vagy „shale” rezervoárból származó mintapopuláció vizsgálatakor nem csak megkerülhetetlen, de jelentősen befolyásolhatja a végeredményt.

Ilyen petrofizikai jellemző az úgynevezett mátrix áteresztőképesség is, amely egy nehezen értelmezhető, de fontos paraméter a kis áteresztőképességű rezervoárok jellemzésénél. Az áteresztőképesség mérése általában állandósult áramlási feltételek mellett vagy tranziens módszerekkel történik, mint a nyomás lecsengés elve (Pressure Pulse Decay). A kis áteresztőképesség eredményeként az úgynevezett „csúszó” vagy „slip” áramlási rendszer nevezhető meg dominánsként. Ilyen esetben a permeabilitás a pórusnyomással együtt változik. Általános módszertan alapján az áteresztőképességet különböző átlagos pórusnyomásokon mérik és az adatokat a Klinkenberg vagy abszolút permeabilitás kinyerésére használják. Az elmúlt években azonban kimutatásra került, hogy a Klinkenberg permeabilitás jelentősen túlbecsüli – kiváltképp a palaközetek esetében – az abszolút áteresztőképesség értékét. Ezen túlmenően, több tanulmány is bizonyítja, hogy a különböző mérési módszerek hasonló nyomáson jelentősen eltérő eredményekhez vezethetnek. Több mérés is alátámasztja, hogy a „shale”-ek esetén kimutatható a térfogatáramra való érzékenység. A folyamatosan növekvő térfogatárammal együtt növekszik az áteresztőképesség is, majd a relatíve magas áramoknál az érték állandósul. A jelenség megkérdőjelezi a nem-állandósult áramlású, mérési gyakorlatban alkalmazott módszerek pontosságát és előírja a gázos áteresztőképesség definíciójának felülvizsgálatát (a nyomás, sebesség és feszültségi állapot figyelembevételével) új

szabványok megfogalmazása érdekében az összehasonlítható és értelmezhető permeabilitás mérések biztosítására. (*Alireza A. M. és Rick C., 2015*)

A palagázkészletek jelentik a világ egyik legbősegebb földgázforrását, nagyrészt kihasználatlanok, a legtöbb kontinensen megtalálhatók. Az erőforrások kiaknázását célzó fejlesztések Észak-Amerikában kezdődtek, túlnyomórészt az Egyesült Államokban, ami a gáz- és olajtermelés fellendüléséhez vezetett. Annak ellenére, hogy jelentős fejlődést sikerült elérni e tárolók tekintetében termelési szempontból, viselkedésük és jellemzőik még mindig kevésbé ismertek. A hidraulikus repesztési műveletek alkalmazhatósága, az áramlási mechanizmus leírása a kőzetmátrixban és a repedésekben, valamint a rövid – hosszú távú termeltethetőség még mindig nyitott kérdések.

Az áteresztőképesség az egyik legfontosabb termeltetést szabályozó paraméter. Alapesetben, a tulajdonság adott kőzettest esetén egy bizonyos, a porózus közegen átáramló fluidumra vonatkoztatva értelmezhető. A kőzet e tulajdonsága a fluidum vezetőképesség mértéke. A paramétert laboratóriumi vizsgálatokkal, szelvényekkel, korrelációkkal határozzák meg konvencionális tárolók esetében. A kiemelkedően kis permeabilitású kőzetekben azonban az áteresztőképesség mérése rendkívül nagy kihívást jelent és nem követi a hagyományos kőzeteknél már megszokott fizikai törvényeket. A gázos áteresztőképesség kis permeabilitású közegekben nem állandó, folyamatosan változik a pórusnyomással. Ezt a nyomásfüggőséget már számos kutató megfigyelte. *Klinkenberg (1941)* módosított Darcy egyenlete alapján gázos áteresztőképesség mérések sorozatából becsülhető a porózus közeg úgynevezett abszolút permeabilitása. Azonban a permeabilitás nyomástól való függése a tömött rendszerek esetében sokkal összetettebb, így a Klinkenberg-féle korreláció – ahogyan az az előbbiekben említésre került – téves eredményeket ad (*Ziarani és Aguilera, 2012; Moghadam és Chalaturnyk, 2015*).

A „shale”-ek permeabilitásával kapcsolatban számos jelentős kutatást látott napvilágot mind eleméleti mind analitikai szempontból (*Moghadam és Chalaturnyk, 2014; Sakhaee-Pour és Bryant, 2012; Javadpour és szerzőtársai, 2007; Ziarani és Aguilera, 2012; Roy és szerzőtársai., 2003*). *Moghadam és Chalaturnyk (2014)* a null sebességgradiens megváltoztatását javasolta az eredeti Klinkenberg-egyenlet mintegy kibővítéseként, amennyiben az áramlás a „slip” tartományba esik. A javasolt egyenlet várhatóan képes megbecsülni a gázos áteresztőképességet a „slip” és korai tranziens áramlási rendszerekben palák esetén. Az egyenlet validálására és az ehhez szükséges paraméterek biztosítására számos laboratóriumi mérést végeztek el. *Ziarani és Aguilera (2012)* egy másodrendű Knudsen-korrelációt vizsgáltak a gázos áteresztőképesség

kiszámításának céljából, és arra a következtetésre jutottak, hogy a Klinkenberg-féle korreláció alábecsüli a csúszóáramlás miatti permeabilitás-növekedést. *Darabi és szerzőtársai (2012)* egy látszólagos permeabilitás függvényt (APF) javasoltak, feltételezve, hogy a Knudsen diffúzió és a csúszási áramlás a domináns áramlási trend a palák pórusaiban. *Rahmanian és szerzőtársai (2013)* azt feltételezték, hogy a palákban történő áramlás viszkózus és szabad molekuláris áramlási komponensből áll. *Singh és szerzőtársai (2014)* szintén javasoltak egy egyenletet, melynek célja a látszólagos áteresztőképesség meghatározása a Darcy és Knudsen áramlás alapján. Ezek, a látszólagos permeabilitás meghatározását célzó egyenletek, számtalan olyan (jellemzően empirikus) paraméteren alapulnak, amelyek meghatározásához szükséges a laboratóriumi mérések elvégzése. Alkalmazásuk ezért nehézségekbe ütközik, ugyanis előfordul, hogy egyes paramétereket nem lehet közvetlenül laboratóriumban mérni. Ezenkívül a látszólagos permeabilitás Knudsen-számhoz való viszonyításához pórustorok átmérő értékekre is szükség van, amelyek sokszor nem állnak rendelkezésre, valamint a vizsgálati körülmények, például az átlagos effektív feszültség függvényében változnak. Ideális esetben a látszólagos áteresztőképességet olyan kézzelfoghatóbb paraméterekhez érdemes kapcsolni, mint a pórusnyomás vagy folyadék áteresztőképesség.

A kiterjedt elméleti vizsgálatok mellett számos kísérleti vizsgálat is történt a palák permeabilitásával kapcsolatban (*Moghadam és Chalaturnyk, 2015; Heller és Zoback, 2013; Bustin és szerzőtársai, 2008; Ghanizadeh és szerzőtársai, 2013; Ghanizadeh és szerzőtársai, 2014; Heller és szerzőtársai, 2014*). Létezik néhány kísérleti technika a fűrt magok permeabilitásának mérésére. A legnépszerűbbek az állandósult állapotú és a nyomáslecsengéses elven működő műszerek, de ide tartoznak a profil permeabilitás, illetve a zúzott kőzet áteresztőképességének mérésére fejlesztett eszközök is. A módszerek között semmilyen konzisztencia nem fedezhető fel és előfordul, hogy nagyságrendi különbségek adódhatnak a mért permeabilitás értékek között. (*Gasparik M. és szerzőtársai, 2015; Rushing és szerzőtársai, 2004; Sinha szerzőtársai, 2012; Clarkson és szerzőtársai, 2012*).

Tapasztalatok alapján a profil permeabilitás mérés általánosságban magasabb értékeket ad ugyanazon vizsgálati körülmények között, mint a nyomáslecsengéses műszer és mindkét módszer magasabb értékeket mér, mint a zúzott kőzet permeabilitás mérése (*Gasparik és szerzőtársai, 2015*). A zúzott kőzet és a profil permeabilitás mérések esetén a kőzetre ható nyomás és az ebből keletkező feszültség nincs jelen. Az effektív feszültség azonban jelentős hatással van a kőzetek permeabilitására, ezért a „nyomásmentes” környezetben történő mérések eredményei nem alkalmasak az in-situ állapotok leírására.

(Heller és szerzőtársai, 2014; Moghadam és Chalaturnyk, 2015). A nyomás lecsengéses műszer egy tranziens módszer, amely a magmintában létrehozott nyomásimpulzus elvén alapul. Az áteresztőképességet indirekt módon határozzák meg a nyomás időbeli változása alapján többnyire a *Brace és szerzőtársai (1968)* által javasolt megoldást alkalmazva. A vizsgálatok különféle pórusnyomásokon és feszültség környezetben végezhetőek el, adott időintervallumon. Az áteresztőképesség tranziens nyomásreakcióból való levezetéséhez azonban további feltételezésekre és paraméterekre van szükség „shale-ek” esetén, amely bizonytalanná teszi a módszer megbízhatóságát. Tekintettel arra, hogy az áramlás fizikája még nem ismert megfelelő mélységekben e közettípusok esetén, ezért a feltételezések számát a lehető legalacsonyabbra kell csökkenteni. Ezen túlmenően, a nyomás lecsengéses módszernél a nyomás az idővel folyamatosan változik. Ez megváltoztatja a mintán áthaladó áramlás sebességét és ezáltal az áteresztőképesség feltételezhető sebesség függését nem lehet rögzíteni. Az állandósult állapotú permeabilitás mérés gáz – általában nitrogén – áramoltatásával történik állandó áramlási sebesség vagy nyomáskülönbség fenntartásával. Az egyensúly elérésekor rögzített nyomáskülönbség és térfogatáram értékek felhasználásával kerül kiszámításra a látszólagos permeabilitás a Darcy egyenlet segítségével. Az áteresztőképességet alapvetően a porózus közegen keresztül történő állandósult állapotú áramlásra határozzák meg, ezért ennek a módszernek az eredményei a definíció alapján származtathatók és nincs szükség az áramlási rendszerre vonatkozó feltételezésekre. A vizsgálatokat különféle térfogatáramokon, átlagos pórus- és palásnyomásokon, lehet elvégezni. A palák permeabilitásának ilyen típusú mérése hosszabb időt vesz igénybe, mint más vizsgálati technikák ezért nem kifejezetten népszerű, habár egyre több kutatóintézet köti meg az idő – mérési pontosság arányában ezt a kompromisszumot.

A laboratóriumokban mért látszólagos permeabilitás szoros kapcsolatban áll az átlagos pórusnyomással az e közetekben jellemző „slip” áramlási rendszer esetében. A pórusnyomás növekedésével a látszólagos permeabilitás csökken a csúszóhatás csökkenése miatt. *Moghadam és Chalaturnyk (2015)* egy olyan áramlási rendszer „térképet” javasolt, amely bemutatja a gázáramlás tartományainak kapcsolatát a permeabilitás és pórusnyomás függvényében. Eredményeik azt mutatják, hogy shale-ek esetében a csúszó vagy a tranziens áramlási tartomány eleje a jellemző, függetlenül a pórusnyomástól. Ezért – habár a tartományi besorolás független a nyomástól – az ilyen kis áteresztőképességű palás kőzetek látszólagos permeabilitása rendkívül érzékeny a pórusnyomásra. *Alireza A. M. és Rick C. (2015)* 4 mintapopulációs mérési programja alapján több mint 1 nagyságrendnyi különbség

is adódhat a permeabilitás tekintetében változó pórusnyománál, amelyet 2-ről 8 MPa-ra emeltek a mérések során.

A fent említettekből kiderül, hogy a terület rendkívül komplex problémákat vett fel, jelentősége – tudományos szempontból – semmiképpen sem kérdőjelezhető meg. A kutatási terület jelentőségét mutatja továbbá az is, hogy a Magyar Olaj és Gázipari Nyrt. kiemelt kutatásként foglalkozik a magyarországi márgák feltárásának és kitermelhetőségének lehetőségével. A témát tehát különös figyelemmel kíséri a hazai ipar is. Kutatási tevékenységem a Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézetei által irányított GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósult meg. A projekt „Nagy hatékonyságú hozamnövelő rétegkezelési eljárások” moduljának „Márga típusú formációkban kialakult porózus tároló rendszerek termelhetőségének vizsgálata, termelésintenzifikálási lehetőségek fejlesztése” megnevezésű kutató csoport operatív vezetőjeként felelőse voltam a kutatói munka koordinálásáért, amely kiterjedt a kőzetmagok beszerzésén, a minták mérésekre optimalizált kialakításán, a mérési programok megtervezésén, irányításán, mérések elvégzésén át az eredmények teljes komplex értelmezéséig. E kutatói csoporton felül további négy munkája kapcsolódott a nem hagyományos tárolók működésének értelmezéséhez, melyek munkájában szintén aktív kutatóként vettem részt.

Az általam megtervezett tudományos program a kis áteresztőképességű, illetve rossz kihozatali tényezővel rendelkező hazai márga és tömött homokkő előfordulások, szénhidrogén rezervoárok vizsgálatának majd vizsgálati eredményeinek felhasználásával az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézetben rendelkezésre álló mérési technológia matematikai modell alapú bővítését, pontosítását, valamint a permeabilitás mérésre alkalmatlan kőzetek eredményeinek pótlását tűzte ki célul. Az eredmény nagyban hozzájárul a Kutatóintézet és más laboratóriumi tevékenységet folytató szervezetek munkájának megkönnyítéséhez a nem-konvencionális kutatási területeken.

A releváns szakirodalom, illetve ipari dokumentációk és termelési adatok áttekintése a hazai ipari tapasztalatok figyelembevételével egyedi vizsgálati program elvégzését tette szükségessé. Az új hipotézisek és a fejleszteni kívánt modellek gyakorlati adaptációjakor különösen nagy figyelmet kell fordítani azok validációjára a már létező, rendelkezésre álló eszközök segítségével. Tekintettel arra, hogy a nem konvencionális szénhidrogén

rezervoárok kutatása kiemelt figyelmet kapott az elmúlt évtizedben, számos olyan kutatás zajlott és zajlik jelen pillanatban is, amelyben a főként termeltetési szempontból nem túl optimálisnak, de működési mechanizmusában még hagyományosnak minősíthető tárolókból származó mintatestek tulajdonságainak mérését célzó protokollok és műszerek integrációját vizsgálják az említett területre (Alireza A. M. és Rick C., 2015). Természetesen több gyártó is foglalkozik céleszközök fejlesztésével, melyek már kifejezetten a nem-hagyományos tulajdonságokat hivatottak vizsgálni.

Az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet eszközparkja több olyan műszerrel rendelkezik, amely alkalmas a kőzetek petrofizikai paramétereinek meghatározására. A Kutatóintézet műszerezettségére képes mind az alapvető, mind a speciális (pl. relatív permeabilitás) paraméterek mérésére széles intervallumban. Fontos megjegyezni azonban, hogy a széles skálájú műszerezettség ellenére, a jelen dolgozatban bemutatott kutatásom számos esetben komoly kihívást jelentett. Porozitás mérésekhez a Quantachrome Ultrapyc-1200eTM héliumos poroziméter valamint a Pascal 140 és 440TM higany besajtolásos műszerek (HPMI - High Pressure Mercury Injection) kerültek alkalmazásra. A héliumos porozitás mérés esetén indirekt módon számítható a porozitás érték a mért szilárd térfogat és/vagy sűrűség értékéből, amelyhez szükség van a minták előzetes tömegmérésére. A HPMI műszer programjába integrált egyenletek alapvetően a mért térfogatértékekből származtatják az eredményeket, ez esetben nincs szükség külön számítások elvégzésére, az eszköz kész eredményeket ad. A higany besajtolásos mérés segítségével számos más paraméter is meghatározásra került, mint a fajlagos felület, a látszólagos sűrűség, a kummulatív térfogat, valamint a pórustorok sugarak mérete és eloszlása, melyek jelentős részét képezték az elemzések elvégzésének.

Az áteresztőképesség széleskörű és pontos meghatározásához a Kutatóintézet saját fejlesztésű, az API RP 40 (American Petroleum Institute, 1998) szabványnak megfelelő úgynevezett N₂ gázos permeaméter, egy szintén az említett szabvány alapján összeállított nyomáslecsengéssel elven működő műszer (PPD – Pressure Pulse Decay), valamint a Core LaboratoriesTM által fejlesztett és forgalmazott Ultra-Perm 610DTM és Nano-PermTM gázos permeaméterek kerültek alkalmazásra a mérési programban.

A folyadék telítéses nyomáslecsengéssel műszert leszámítva, az eszközök az állandósult gázáramlás elvét veszik alapul a mérésekhez. Az N₂ permeaméterrel mért effektív gáz áteresztőképesség értékekből az abszolút - Klinkenberg - permeabilitás meghatározható. A minta előkészítését (minta kialakítása teljes, fűrt magból, mintatestre szabott szárítási protokoll) és beszerelését követően egy, a nitrogén palackra szerelt

nyomásreduktor, egy nyomásszabályzó, valamint egy nyomástávadó segítségével beállításra kerül a megfelelő nyomásérték a gázáramlás megindítása és stabilizálása érdekében. A kimenő oldali nyomás ebben az esetben atmoszférikus minden mért pont esetében, a nyomáskülönbség létrehozása ennek figyelembevételével történik. Az Ultra-Perm 610TM eszköz hasonló módon működik. A lényeges különbség, hogy az utóbbi képes fojtást adni a minta kimenő oldalára, melynek eredményeként a nyomáskülönbség emelhető, így azok a minták is mérhetővé válnak, amelyeket az előbb említett műszerrel nem lehet megmérni, valamint három térfogatáram mérővel rendelkezik, amely szintén pontosítja a méréseket. A Nano-PermTM műszer az előbbiekhöz hasonlóan nitrogén gáz segítségével végzi el a szükséges mérést, azonban képes a rendkívül kis térfogatáramokat detektálni egészen $6,7 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ -ig. Az eszköz a gázáramlás állandósulását követően fojtást ad a kimenő oldalon, amelyet folyamatosan emel miközben méri a térfogatáramokat és számítja a permeabilitást. A beállított kimenő oldali nyomás beállított küszöbértékének elérését követően lezárja a mérési ciklust és automatikusan újraindítja a mérést. Ahogyan az fentebb bemutatásra került, a tranziens módszerek közé tartozó nyomás lecsengéses módszer alapja a nyomásimpulzus. A Kutatóintézetben található műszer is ezt az elvet veszi alapul; a nyomás időbeli változását külön adatkártya rögzíti a permeabilitás meghatározásához. A vizsgálatok nem csak eltérő feszültségkörnyezetben, de különböző hőmérsékleteken is elvégezhetők a temperálható műszertestnek köszönhetően. Mindegyik módszer esetén változtatható a palástnyomás, szükség esetén in-situ nyomáskörülmények is beállíthatók, ez esetben azonban rendkívül nagy körültekintésre van szükség a műszerek túlterhelése és a minták újramérhetősége szempontjából. Az eszközök mérési intervallumai az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat. A kutatási program során alkalmazott permeaméterek mérési intervallumai (sz.s.sz.)

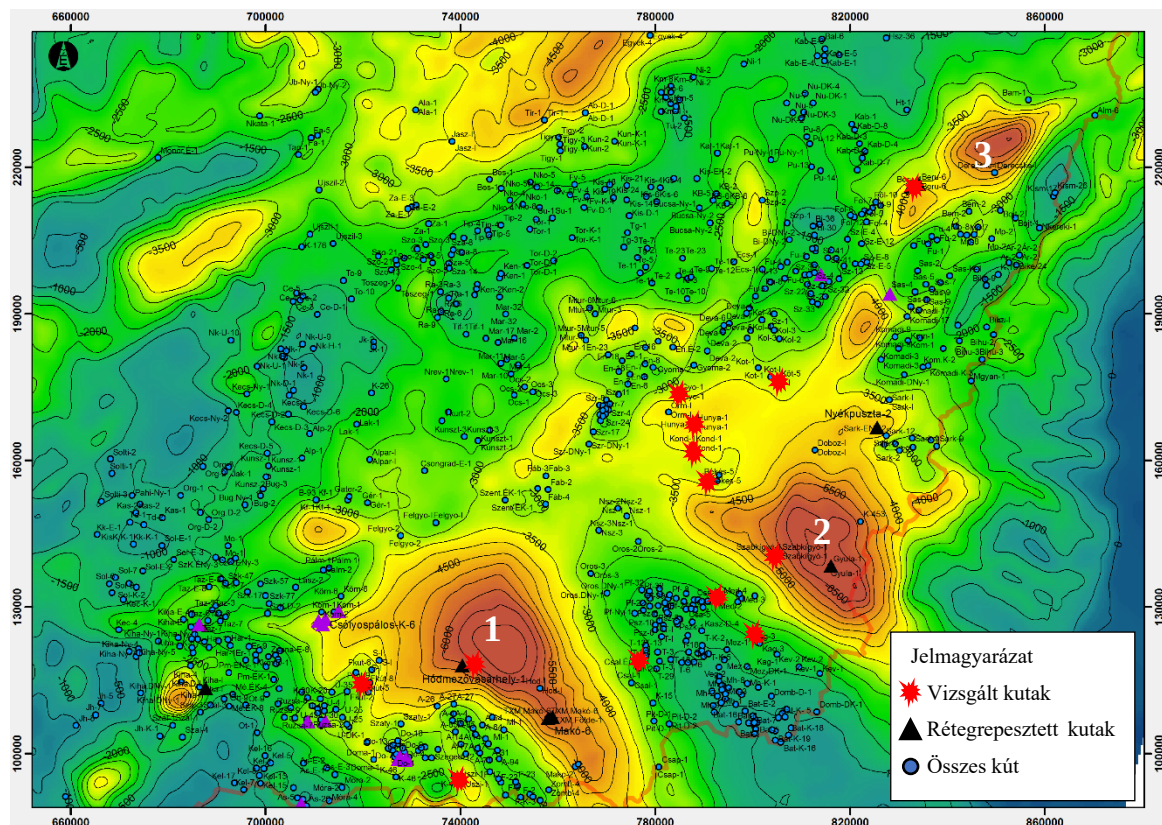
Műszer megnevezése	N ₂ gázos permeaméter:	Ultra-Perm 610 TM permeaméter:	Folyadék telítéses nyomás lecsengéses műszer (PPD):	Nano-Perm TM :
Mérési tartomány	5 D – 1 mD (5 D – 10 ⁻³ D)	5 D – 1 μD (5 D – 10 ⁻⁶ D)	0,1 mD – ~ 0,01 μD (10 ⁻⁴ D – 10 ⁻⁸ D)	1 μD – 1 pD (10 ⁻⁶ D – 10 ⁻¹² D)

A mértékegységek megnevezése D: Darcy; mD: miliDarcy; μD: mikroDarcy valamint pD: pikoDarcy. Az előbbieknél használatában felmerülő kisebb inkonzisztencia is mutatja milyen nagy az az intervallum, amelyet felölel a mért minták eredményeinek halmaza. A félreértések kiküszöbölése végett jelen értekezésben főként a 10⁻⁶ Darcy nagyságrend kerül alkalmazásra, amely a μD, tehát mikroDarcy formában olvasható és értelmezhető. A szerző saját szerkesztésű ábrái, táblázatai az „sz.s.sz.” jelölést viselik.

1 A VIZSGÁLT TERÜLET FÖLDTANI ISMERTETÉSE

A tömött homokkővek és agyagos márgák korszerű repesztési eljárással való termelésére 2006-tól kezdődően került sor. A 3500–6000 méter mélységben elhelyezkedő miocén korú tárolóközetekben néha extrém magas hőmérsékleti és nyomásviszonyok (UHPHT: Ultra High Pressure Ultra High Temperature) miatt számos technikai nehézséggel kell szembenézni, ennek ellenére például a Derecskei-árokban már folyamatosan termelő kutak is létesültek.

A hagyományos és nem hagyományos szénhidrogén előfordulások ugyanabban a földtani térben, hasonló földtani környezetben egymás közelében is előfordulhatnak, olykor közöttük folytonos átmenetek vannak és nem feltétlenül éles határok. Kutatásaim során az alföldi régió, azon belül is a Makói-árok, a Békési-medence és a Derecskei-árok területekre fókuszáltam (1. ábra).



1. ábra. A kutatás során vizsgált magminták származási mélyfúrásai és a neogén aljzat mélységtérképe.
1. Makói-árok, 2. Békési-medence, 3. Derecskei-árok (Remeczki F., 2021b)

Földtani szempontból az Alföld Magyarország legproduktívabb kőolaj- és földgáztermelő területe, jelenleg a nem konvencionális szénhidrogének kutatásának fő célpontja. Az elmúlt tizenöt évben a Makói-árokban (Mindszent, Makó, Makó-árok–I., Hódmezővásárhely területek) késő-miocén, pannóniai korú, tömött homokkő gáz,

gázkondenzátum és márgához kötődő palagáz, a kiskunsági Balotaszállás területén, a Békési-medence Szabadkígyós, Gyulavári és Nyékkpuszta, a Derecskei-árok Berettyóújfalu bányatelkein miocén korú tömött homokkövekben tárolt földgáz kutatása és kezdeti kitermelési próbái valósultak meg.

A Pannon-medence feltöltődésével kapcsolatban számos tanulmány született (*Bérczi és Phillips, 1985; Bérczi 1988; Juhász Gy. 1992; 1994; 1998; Juhász Gy. és Thamóné Bozsó 2006, Thamóné Bozsó és szerzőtársai, 2006; Magyar I., 2010; Juhász Gy. és szerzőtársai 2013; Magyar I. és szerzőtársai, 2013; Sztanó és szerzőtársai, 2013; Bada és szerzőtársai 2014*). A szinrift fázis során, a miocén időszakban sekély szigettenger jellegű üledékgyűjtő alakult ki, amelyben max néhány száz méter üledék rakódott le, az aljzati kiemelkedések fölött csak pár 10 m. Ezt követően a posztrift fázis során, a pannóniai időszakban, erőteljes termális süllyedés következett, amely már több ezer méter üledék lerakódását eredményezte. A pannóniai során döntően két fő üledékbeszállítási irányt feltételeznek a korábbi kutatások: a Pannon-tó részmedencéiben az ÉNy felől érkező folyódelták szerepe emelhető ki a durvaszemcsés törmelékanyag forrásaként, amihez az ÉK felől érkező delták kisebb mennyiségű és finomabb szemcsés üledékanyaga pélitgazdag mélyvízi fácieseket eredményezett (*Juhász Gy., 1992; Juhász és Thamóné Bozsó, 2006; Thamóné Bozsó és szerzőtársai 2006*). A mély részmedencék közül a Makói-árok két aljzati magaslat között húzódik (Algyői- és Battonya–Pusztaföldvári-hát), azonban részleteiben nem ismert, hogy ezek közetanyaga milyen mértékben járult hozzá az árok feltöltéséhez. Nagy valószínűséggel csak a középső-miocén üledékek, valamint a pannon rétegsor legalsó része származhat a lokális hátakról. Az aljzati hátak szintén fontos szerepet játszanak a kapcsolódó medencék hidrogeológiai és diagenetikus folyamatainak kialakításában (*Bérczi, 1988; Mátyás és Matter, 1997; Juhász A., 1999; Juhász A. és szerzőtársai, 2002*).

A Kárpátok, a Dinaridák és a Nyugati-Alpok által körülölelt Pannon-medencében a neogén során elnyúlt árkok és kiemelt hátak mozaikja alakult ki. Az üledékgyűjtőt kitöltő pannóniai összletet a rétegtan az Endrődi, a Szolnoki, az Algyői, az Újfalui és a Zagyvai Formációkba tagolja (*Juhász Gy., 1998*). A kiterjedt kutatások eredményeként (*Juhász Gy., 1992; 1994; 1998; Magyar, 2010; Juhász Gy. és szerzőtársai, 2013; Magyar és szerzőtársai, 2013; Sztanó és szerzőtársai, 2013; 2015; Bada és szerzőtársai, 2014*) nyilvánvalóvá vált, hogy a lerakódó üledék minőségét a pelágikus és a szárazföldi eredetű üledékek egymáshoz viszonyított aránya, illetve a terrigén anyag szemcsemérete határozta meg. Ennek megfelelően a behordástól távoli, vagy a környezetéből kiemelt területeken, ahová nem, vagy legfeljebb szuszpenzióban érkezett szárazföldi eredetű üledék, mészmárga képződött

(Endrődi Formáció Tótkomlói Tagozata). A lebegtetve szállított szárazföldi hordalék arányának növekedése az üledékben felfelé fokozatosan márga, majd agyagmárga képződéséhez vezetett. Ahogy a medence feltöltődése előrehaladt, és a folyótorkolatok, partok egyre közelebb kerültek az adott területhez, a rétegsorban a kőzetlisztes és finomhomokos, vékonypados disztális turbiditek jelenhettek meg.

A részmedencék központi, legmélyebb zónáiban finomhomokos turbiditek képződése szakította meg a lebegtetett üledék háttér-szedimentációját (Szolnoki Formáció). A fenti szerzők alapján szedimentológiai szempontból a főleg agyagból és kőzet - lisztből felépülő lejtőüledékeket Algyői Formációba soroljuk, míg a delta és partmenti környezet változatos üledékeit összefoglalóan az Újfalui Formációba, a már tisztán folyó - vízi rétegeket pedig a Zagyvai Formációba soroljuk.

Derecskei-árok

A Derecskei-süllyedék Kelet-Magyarországon található. A Földes-Berettyóújfalu vonaltól ÉK-i irányban egészen a határig húzódó, 5–7 km mélységű árok (az árok aljzataként a földtörténeti neogénnél idősebb képződmények felszínét értjük) vékonyabb-vastagabb miocén és nagy vastagságú pannon üledékekkel van kitöltve. Az árok É-ÉNy-i pereme egyben geológiai nagyszerkezeti határ is, amely elválasztja a Tisza egység Mecseki és Villányi alegységeit. Az árok és környezete régóta kutatott, szinte csak gázpotenciállal jellemezhető terület.

Az árok szerkezeti viszonyaira a medencét határoló fiatal, jelentős oldaleltolódásos tektonikai síkok jellemzőek, amelyeket a földtani modell is jól szemléltet. *Vakarc és Várnai (1991)* a területen több km-es oldalelmozdulásokat mutattak ki a pannon rétegsorban, a legnagyobb, balos oldalirányú elmozdulás 5,5 km-es. A tektonikai mozgások több fázisban történtek, az idősebb vetőzónák reaktiválódhattak, illetve a feszültségtér változásai szerint változtak. A szerkezeti elemek aktivitásának „kormeghatározása” azért különösen fontos, mert jelentős fluidum-mozgások (felszín alatti vizek, vagy esetleg repesztőfolyadék) elsősorban aktív (így vízvezető) vetők mentén képzelhetők el.

A kárpáti–szarmata időszakban a kainozoos szinrift tektonikai fázisban kezdődött meg a terület mai földtani felépítését meghatározó 6000 méternél is mélyebb Derecskei-árok kialakulása. A vizsgálati területen általános elterjedésű miocén rétegek fűrt vastagsága néhány métertől több 100 méterig változik, kőzettanilag folyóvízi, partközeli és sekélytengeri környezetben lerakódott agyag, aleurit, homok, konglomerátum összletek,

tufit, tufa közbetelepülésekkel tagolt homokkőrétegek, illetve sekélytengeri, lithamniuos, biogén mészkőrétegek jellemzik.

A Derecskei árok több ezer méteres süllyedésének jelentős része már később, az ún. posztrift fázisban zajlott le. Ennek eredményeképpen képződtek a Pannon-tóban lerakódott nagy vastagságú, pannon rétegsorok az árok területén, a különböző mélyvízi fáciesektől a homokos turbiditeken és agyagos lejtő üledékeken át a delta képződményekig, amelyet folyóvízi rétegsorok zárnak. Az Endrődi Márga, a Szolnoki Homokkő és az Algyői Formáció alkotják a hagyományos értelemben vett „alsó-pannóniai” formációkat, a Peremartoni Formációcsoporthoz.

Az Újfalui Homokkő Formáció, a Zagyvai Formáció és a Nagyalföldi Tarkaagyag Formáció alkotják a hagyományos értelemben vett „felső-pannóniai” formációkat, a Dunántúli Formációcsoporthoz. A területen az Újfalui Formáció talpa (egyben a termálvíztest aljaként értelmezett felszín) 1300-1400 m mélységben húzódik, amely alatt az agyagos és vízzárónak tekinthető Algyői Formáció található, azaz a területen a regionális termálvíz-áramlás max. az 1500 m mélységig terjedő térrészre korlátozódik.

A jelentős vastagságú pannóniai összlet folyamatos rétegsort képvisel a késő-miocéntól a negyedidőszak elejéig, jelezve a terület folyamatos süllyedését (*Juhász és szerzőtársai 2006*). E süllyedő tendencia a rétegrepestés szempontjából jelentős tényező, hiszen ilyen geodinamikai környezet sokkal inkább kedvez a már meglevő törések repedések összezáródásának, elagyagosodásának, semmint új törések kialakulásának, felszínre nyílásának.

Az egyes részmedencék között a Szolnoki Formáció vastagság-eloszlásában jelentős különbség mutatkozik. A Derecskei-árokban csak a mélyedés tengelyvonala mentén rakódott le nagy vastagságban ezen képződmény, miközben a határoló lejtőkön továbbra is pelágikus üledékképződés volt jellemző.

A miocén képződményeket a részmedence két oldalán a Beru-1 és a Beru-2 fúrásokkal tárták fel. A miocén tetőzónájában mindkét fúrásban történtek rétegvizsgálatok. A Beru-1 fúrásban a réteg nem tárol szénhidrogént, abból kevés kevertgáz beáramlást tapasztaltak. Az összlet Beru-2 fúrásban rövid rétegvizsgálat során maximum 3000 m³/nap éghetőgáz hozammal volt termeltethető. A Derecskei-árokban az unconventional mező miocén tight homokkövekben található.

Békési-medence

A Békési-medence 2500–7000 m vastag neogén üledéksorral kitöltött aljzatát gyűrt variszkuszi metamorfitok, perm törmelékes és vulkáni sorozatok, germán jellegű alsó triász sziliciklasztos képződmények, középsőtriász platform fáciesű dolomitok alkotják. A miocén riftesedés a kréta kompressziós szerkezetalakuláson átesett aljzatot érintette, ezért a területen a fiatalabb mezozoos képződmények erodálódtak, illetve az aljzat egyes szerkezeti egységei egymással tektonikus kontaktussal, takaróhatárokkal, illetve vetők mentén érintkeznek. A gyenge alpi metamorfózist elszenvedett mezozoos üledékek is valószínűleg túlnyomórészt lenyíródtak, illetve lecsúsztak eredeti metamorf aljzatukról.

A prepannon kainozoos képződményeket elsősorban miocén szárazföldi és sekélytengeri törmelékes üledékes képződmények alkotják erősen tagolt településben és változó vastagságban. Az alsó miocén (eggenburgi-ottnangi) Madarasi Formációba sorolt képződmények vörös (tarka) agyag, aleurolit, homokkő, konglomerátum, melyek elsősorban szárazföldi-folyóvízi felhalmozódási környezetre utalnak. Az Abonyi Formáció a bádeni transzgresszió bázisán megjelenő, fölfelé finomodó abráziós alapkonglomerátum és homokkő, helyenként tufa- és tufitbetelepülésekkel, mely helyenként összefogazódik a Tekeresi Slír nyíltvízi összletével. Az alapkonglomerátumra változatos sekélytengeri képződmények települnek, finom törmelékek váltakoznak pelágikus tengeri agyag és márga rétegekkel. A nagyon sekély zónákban, kis vízmélység esetén, aljzati kiemelkedések körül, mészkőpadok, zátonyok képződtek, amelyek lithothamniumos mészkövek megjelenését eredményezik a törmelékes rétegsorban. A sekélytengeri rétegsorban igen gyakoriak a tufa, tufit betelepülések.

A pannóniai üledékképződés során a szarmatát követően felgyorsult a medence süllyedése és több ezer méter vastag pannóniai üledék halmozódott fel. A medence feltöltődése során térben és időben elkülönülve több fő felhalmozódási szakaszüledékes fáciest lehet elkülöníteni, amelyek, hasonlóan a másik két medencéhez, felfelé csökkenő vízmélységben képződtek: bazális aleuritós mészmárgák, márgák; prodelta mélyvízi turbiditok; deltalejtő medence lejtő márgák, agyagmárgák, homokkövek; delta síkság, delta front homokkövek; alluviális síkság homokkövek és agyagok.

A bazális márgának tekinthető Endrődi Formáció képződményei a medence tengelyében feltehetőleg folyamatosan fejlődtek ki a miocén tengeri mészmárgákból, aleuritós márgákból. Megfigyelhető a rétegsorban közettani változás, felfelé csökken a karbonát tartalom, nő az aleurit mennyisége. A medence legmélyebb részén ez az egység

szervesanyagban gazdag, fekete színű márga-mészmárga, az alatta lévő pirithintéses miocén márgákhoz hasonlóan reduktív környezetben rakódott le. Az aleurit, vagy a finom szemű homokkő vékony csíkokban jelenik meg, fölfelé növekvő mennyiségben. Ez jelzés a deltarendszer későbbi térhódítására.

A prodelta-turbiditek közé sorolandó Szolnoki Homokkő Formáció (Szolnoki Fm.). Ezen képződmény a medence mélyfúrásaiban különböző vastagságban fejlődött ki: Doboz-I: 3950 – 3420 m, Kondoros-1: 3400 – 2775 m, Békés-1: 3178 – 2875 m, Hunya-1: 3524 – 3075 m, Gyoma-1: 3253 – 2760 m, Köt-1: 3042 – 2820 m, Sark-I: 3040 – 2770 m, Sark-ÉNY-1: 3160 – 2900 m. A turbidit összlet az aljzati magaslatok oldalában, a medence lejtőkön elvékonyodik és kiékelődik. Legvastagabb kifejlődése az árkok tengelyében van. A prodelta üledékek között különböző fáciesek voltak elkülöníthetők felfelé haladó sorrendben: disztális üledéklebeny, hordalékkúp, mederkitöltés, csúszási-rogyási képződmények. Az egymásra rakódó hordalékkúpok, melyek különböző deltákból származnak, összefogazódó homoktestekből épülnek fel.

A Békési-medence legmélyebb részén kialakult kompaksiós fáciesek vélhetően több nyomásgáttal is bírnak. Ezek korlátozzák a szénhidrogének vándorlását, csak rövid migrációs utakat tesznek lehetővé. Ezért a szénhidrogén-felhalmozódásokra magában az anyaközetekben, vagy azokkal érintkező összletek tárolóiban lehet számítani. Kutatómunkám során alapvetően a nem-hagyományos szénhidrogéneket feltételezhetően tartalmazó Szolnoki Homokkő és Endrődi Márga formációkra fókuszáltam, a mintakiválasztási és a beszerzési program során ennek megfelelően jártam el.

A Szolnoki Homokkő Formáció jellemzéséről Juhász Gy. és szerzőtársai (1996) szerint a következőket lehet elmondani: „Mélyvízi környezetben keletkezett, turbidit eredetű finomszemcsés homokkő, aleurolit és agyagmárga-márga rétegek váltakozásából áll. Az áthalmozott üledéksorban gyakoriak a szenesedett növénymaradvány feldúsulások, sokszor réteglaphoz kötötten. Vastagsága nagyon változó, a mélymedencékben meghaladja az 1000 m-t, a medenceperemek irányában kiékelődik. A Dunántúlon három tagozatra bontható: Tófeji Homokkő Tagozat (korábban „Tófeji Homokkő F.”), a Dunántúl középső részén a homokos turbidites összlet felső része, ill. délen az egész mélyvízi turbidites rétegsor; Lenti Márga Tagozat (korábban „Lenti Márga F.”), a Tófeji és Lovászi Tagozatok közötti marker szint, nyíltvízi agyagmárga-márga, vékony homokkő csíkokkal; Lovászi Homokkő Tagozat (korábban „Lovászi Homokkő F.”), azonos fáciesű és litológiájú, mint a Tófeji T., a turbiditek alsó részét képviseli, képződése helyenként már a szarmata végén elkezdődött.” Előfordulása az alföldi és dunántúli neogén medencékben jellemző.

Az Endrődi Márga Formációval kapcsolatban (Juhász Gy., 1996) elmondható, hogy „rendkívül változatos vízmélységviszonyok között (15–800 m) képződött nyíltvízi képződmények, vastagságuk átlagosan 100–200 m, maximum 700 m. A rétegsor általában mészmárgával, márgával indul (Tótkomlói Mészmárga Tagozat az Alföldön, Beleznai Mészmárga Tagozat a Dunántúlon), majd fölfelé fokozatosan mélyvízi (hemipelágikus) agyagmárgába megy át (Nagykörűi Agyagmárga Tagozat az Alföldön, Nagylengyeli Agyagmárga Tagozat a Dunántúlon). A mészmárga több litofáciest képvisel: kiemelt hátaik fölött, sekély vízben világosszürke, sárgásszürke, a mélyzónákban sötétszürke, helyenként feketésszürke. Meredek aljzatmorfológia esetén elszórtan az aljzataból származó kavicsok, esetleg kavicscsíkok találhatók a mészmárgában, illetőleg az agyagmárgában is (Dorozsmai Márga Tagozat). A formáció felsőbb részén az agyagmárgában a turbiditek disztális (távoli) részének vékony aleurolit-homokkő csíkjai jelennek meg, fokozatos átmenetként a Szolnoki Formáció felé (Vásárhelyi Márga Tagozat). Valamennyi itt ismertetett tagozat korábban formáció rangú volt. Kora zömében alsó-pannóniai. Az egyes részmedencék legmélyebb részein a hemipelágikus márgák képződése már a szarmata felső részén megkezdődött (Korábbi „Zalai Márga F.”, „Dorozsmai Márga F.”), míg az Alföld DK-i részén a felsőpannóniaiba is átnyúlt.” Előfordulása – a homokkövekhez hasonlóan – az alföldi és dunántúli neogén medencékben jellemző.

Makói-árok

A Makói-árok – a neogén Pannon-medence egyik legfiatalabb részmedencéje – felnyílása és süllyedése nagy valószínűséggel az Algyői-aljzatmagaslat, mint metamorf magkomplexum kiemelkedéséhez kapcsolódott (*Tari és szerzőtársai, 1999; Matenco és Radivojevic, 2012; Bada és szerzőtársai, 2014*). Az erősen differenciált morfológiájú aljzaton brakkvízi üledékképződési környezetben indult meg a tanulmányunkban tárgyalt Endrődi Formáció kőzetanyagának felhalmozódása, míg a szigetként létező kiemelt hátaik körül abráziós partmenti homokkő és konglomerátum képződés folyt (*Juhász Gy., 1998; Sztanó és szerzőtársai, 2013*). A viszonylag nagy szervesanyag-tartalmú, kevert karbonátos–sziliciklasztos üledék felhalmozódását időszakosan a környező aljzatmagaslatokról induló gravitációs tömegmozgások durvább szemcseméretű törmelékanyaga szakította meg, ami homokkő- és konglomerátum betelepüléseket tartalmazó mészmárga-rétegsor kialakulását eredményezte (*Bérczi, 1988; Sztanó és szerzőtársai, 2013*).

Korábban a Makói-árokban mélyült Hód-I jelű fúrás rétegsorának alsó szakaszát is badeni korúnak vélték (*Bérczi, 1988*), de ez *Szuromi és Korecz és szerzőtársai (2004)* vizsgálatai alapján kora-pannóniainak bizonyult. Jelentős vastagságú üledékösszlet korát módosította badeniről kora-pannóniaira a Makó-2 fúrás újvizsgálata is (*Magyar, 2010*). Emiatt vita tárgyává vált, hogy előfordulnak-e egyáltalán a Makói-árokban kárpáti-badeni korú üledékek. Újabb fúrások és szeizmikus szelvények értékelése alapján úgy tűnik, hogy ezek vastagsága mindenképpen jóval csekélyebb, mint a Kiskunhalasi-árokban, és valószínűleg csak az árok keleti oldalán, azaz a Pusztaföldvári-hát nyugati szárnyán található meg, az Algyői-hát keleti szárnyán már nem. Az újabb mélyfúrások közül csupán a Pusztaszer-1 harántolt badeni üledéket, a Székkutas-1-ben a triász aljzatra közvetlenül pannóniai képződmények települnek, míg a Makó-7-ben a korábban badeninek vélt, ám az új eredmények tükrében alsó-pannóniainak tűnő, települése, ill. szeizmikus képe alapján színriftnek tekintett sorozat fedi az aljzatot.

Ahogy a medence feltöltődése előrehaladt, tehát a progradáló lejtő közelebb került az adott területhez, megjelentek az agyagmárgában a kőzetlisztes és finomhomokos, vékonypados turbiditek betelepülései (Endrődi Formáció Vásárhelyi Tagozata). Az agyagmárga rétegsor a Makói-árokban 300–400 m vastag, míg annak peremei felé kivékonyodik. Megemlítendő, hogy *Badics és szerzőtársai (2011)* szerint a több helyen a medencealjzatra települő színrift üledék korát pannóniainak tekintjük, az is az Endrődi Formációba sorolandó (after Magyar 2010).

A progradáló lejtő közelebb kerülésével az Endrődi Formáció Vásárhelyi Tagozatának képződését mindenütt a Szolnoki Formáció lerakódása váltotta fel. Ez utóbbi formáció lerakódása során a lebegtetett üledékek „háttér szedimentációját” újra és újra finomhomokos turbidit képződése szakította meg. A Szolnoki Formáció vastagsága a Makói-árok központi részein az 1100 métert is eléri. A turbiditek fölött itt is az agyagos lejtő és a delta rétegsorok települnek, míg végül folyóvízi üledékek zárják a rétegsort.

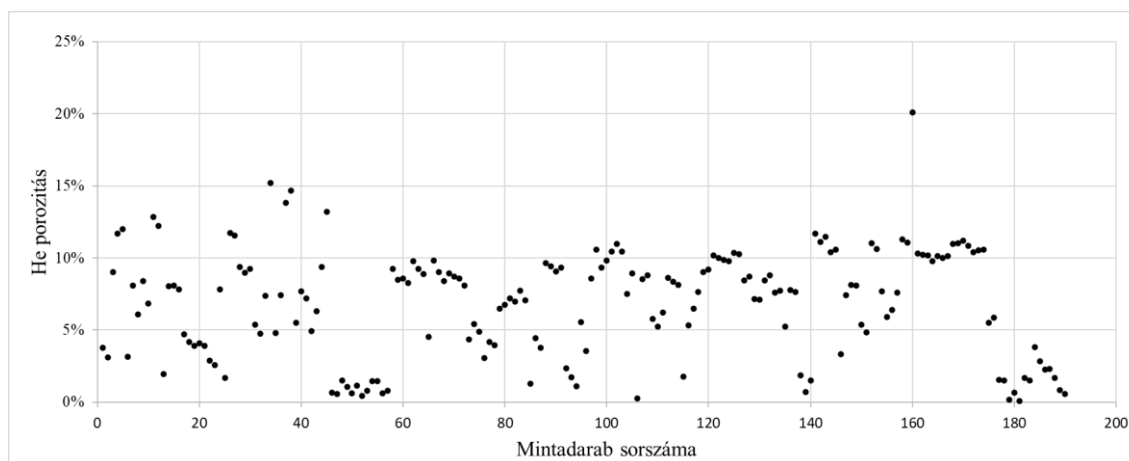
Az 2. táblázat tartalmazza a kiválasztott mélyfúrások azon szakaszainak főbb jellemzőit, ahonnan a kutatásaim során vizsgált magminták származnak.

2. táblázat. A kutatásaim során vizsgált magminták származási helyei (sz.s.sz)

Mélyfúrás jele	Magfúrás száma	Formáció neve	Lito/Krono-sztratigráfia	Fő litológia	Magfúrás felső mélysége (m)	Magfúrás alsó mélysége (m)
Be-1	1	Abonyi	Bádeni	Homokos tufa	3402	3418,5
Be-2	1	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3402	3418,5
Be-2	2	Abonyi	Miocén	Konglomerátum	3475	3493
Be-2	3	Abonyi	Miocén	Agyagos aleurolit	3592,5	3601
Be-2	2	Abonyi	Bádeni	Homokkő, tufa	3620	3638
Be-4	1	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481
Be-4	1	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481
Be-4	2	Abonyi	Miocén	Breccsa	3481	3488
Be-4	3	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3488	3506
Be-4	4	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2
Be-6	2	Abonyi	Bádeni	Breccsa	3711	3729
Be-6	3	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3854	3858,5
Bék-5	1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927
Bék-5	2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165
Fk-5	1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939
Gyo-1	23	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011
Gyo-1	24	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3060	3078
Gyo-1	25	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3130	3147
Hód-I	16	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3433	3442
Hód-I	34	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	5070	5074
Hód-I	25	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4117	4126
Hód-I	27	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4263,8	4271
Hód-I	26	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4195	4204
Hód-I	18	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3527	3535
Hód-I	24	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4017	4026
Hód-I	33	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	4983	4988
Hód-I	26	Szolnoki	Alsó-pannon	Agyagmárga	4195	4204
Hu-1	14	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3691	3711
Hu-1	7	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2877	2882
Hu-1	16	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3830	3848
Hu-1	17	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3907	3913
Hu-1	8	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038
Hu-1	10	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3172	3177
Hu-1	16	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3830	3848
Kom-12	1	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	2584	2585
Kon-1	20	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357
Kon-1	21	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3404	3431
Kon-1	21	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3404	3431
Kon-1	23	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3580	3599
Kon-1	24	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3599	3618
Köt-5	1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903
Köt-5	2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052
Köt-5	3	Endrődi	Alsó-pannon	Márga-Mészmárga	3227	3231
Szab-1	1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285
Szab-1	1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285
Szab-1	2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3510	3528
Szab-1	3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614
Szab-1	3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614
Szab-1	1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285
Ui-1	10	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3290	3300
Ui-1	12	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417
Ui-1	13	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522

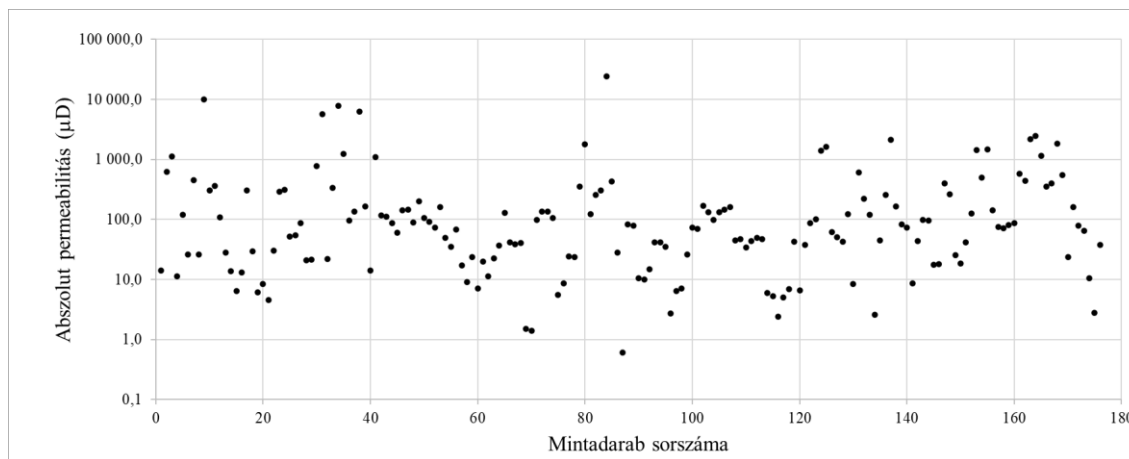
2 NEM-HAGYOMÁNYOS KÖZETMINTÁK LABORATÓRIUMI MÉRÉSEINEK ÚJSZERŰ KIÉRTÉKELÉSEI

Amint azt a célkitűzéseimben megfogalmaztam, a kutatásaim elsősorban a tömött homokkő és márga kőzetekre fókuszáltak. A mintacsoportok kiválasztása és a mérési program összeállítása alapvetően a kutatás helyszínén rendelkezésre álló, valamint a kutatás során várhatóan beszerzésre kerülő eszközök hozzáférhetőségén alapult. A kutatás során vizsgált minták alapadatait az A. melléklet tartalmazza. Az alábbi két ábrán (2. és 3. ábrák) a mérési program kezdetéről származó héliummal mért porozitás, illetve a hagyományos N_2 permeaméteren nitrogénnel mért úgynevezett bemérési áteresztőképesség adatokat mutatom be, a tartományok érzékeltetése céljából a minták megnevezése nélkül.



2. ábra. 194 darab nem-hagyományos kőzetminta nyers héliumos porozitás adatai (sz.s.sz.)

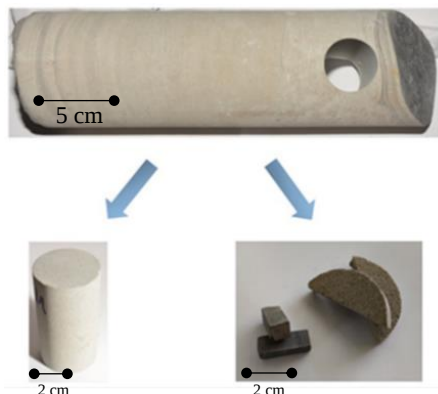
Az 2. ábrán 194 darab nem-hagyományos kőzetminta nyers héliumos porozitás adatai, a 3. ábrán pedig annak a 176 mintának a permeabilitás adatai láthatók, amelyek alkalmasak voltak előzetes bemérésre.



3. ábra. 176 darab nem-hagyományos kőzetminta bemérési áteresztőképesség adatai (sz.s.sz.)

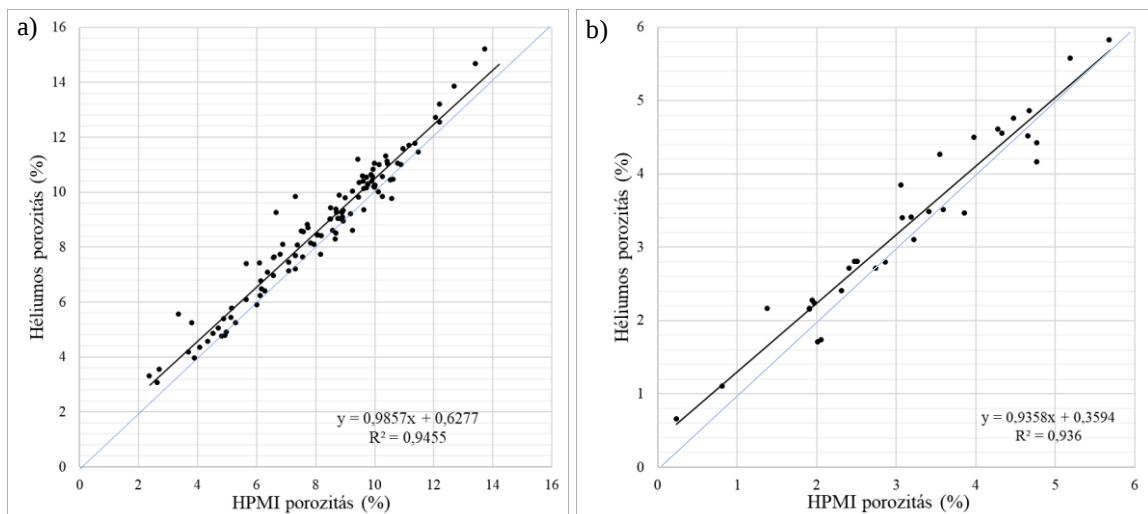
A nagy tömörségű minták esetében egyáltalán nem volt mérhető a gázáram, így a mintapopuláció e csoportja automatikusan a Nano-PermTM műszerhez szükséges előkészítési protokollba került át. A porozitásról elmondható, hogy a mért minták meghatározó részénél 12 % alattiak az értékek, a „beméréses” permeabilitás értékei azonban váratlanul nagy szórást mutattak; az értékek 6 nagyságrendben is megtalálhatók. Fontos megjegyezni, hogy a több száz, illetve ennél nagyobb mikrodarcy-ban mért permeabilitás repedést és/vagy mikrorepedés rendszert jelez a mintában. Az előzetes bemérések után kiválasztottam a vizsgálni kívánt mintacsoportokat és kidolgoztam a mintaelőkészítési és a mérési programot. Várakozásaimnak megfelelően, melyet az előzetes mérések is alátámasztottak, a rendelkezésre álló hagyományos eszközök a porozitás meghatározására alkalmasak voltak, a permeabilitás tudományos kutatást megalapozó pontosságú meghatározására azonban a kezdeti eszközpark csak igen korlátozottan volt igénybe vehető. Biztató volt számomra, hogy a kutatási programom összeállításakor már tervezetten beszerzés tárgyát képezték a Nano-PermTM és az Ultra-Perm 610DTM permeaméter, valamint továbbfejlesztés előtt állt a PPD permeaméter is.

A Kutatóintézetben a porozitás meghatározása általában kétféle módszerrel történik. Hagományos sztenderd (plug size) méretű minták esetén az elterjedtebb és a gyorsabb héliumos piknometria alkalmazását részesítjük előnyben. Jelen kutatómunka során azonban például a márga minták vonatkozásában, a szárítás időszükséglete miatt (Remeczki F. 2020a; 2020c), ez a mérési idő is jelentősen megnövekszik. A másik elterjedt lehetőség a porozitás úgynevezett higany penetrációs méréssel (HPMI) történő meghatározása. Fontos megjegyezni, hogy a méréseket nem ugyanazon a mintatesten végezzük, ezért értékük soha nem lehet pontosan azonos, mint ahogyan a kétféle elven működő eszköz mérési határa sem egyezik meg pontosan. A HPMI mérés alsó pórusméret határa ~3,6 nanométer, míg a héliumos piknometria alsó mérési határa 0,26 nanométer. A sztenderd méretű (plug size) és a kis méretű (small size) mintatestek kialakítását mutatja az 4. ábra.



4. ábra. A plug és a small size mintatestek kialakítása (sz.s.sz.)

Bizonyos minták nagyon törékenyek voltak, így nem minden sztenderd méretű mintának sikerült az úgynevezett kis méretű mintatest párját kialakítani, így az összehasonlítható párok száma kismértékben csökkent. Az 5/a) ábra 112 darab nem-hagyományos tömött homokkő minta, míg az 5/b) ábra 37 darab márga minta porozitás mérési eredményeinek korrelációját, vagyis a héliumos piknométerrel és HPMI méréssel meghatározott porozitás értékek összevetését mutatja. Mint látható mind a homokkővek mind a márgák esetében nagyon jó a mérési eredmények korrelációja. Megfigyelhető az is, hogy a pontok jelentős része, az eszközök mérési tartományainak eltérése miatt, a világoskékkel jelölt azonosérték-vonal felett vannak.

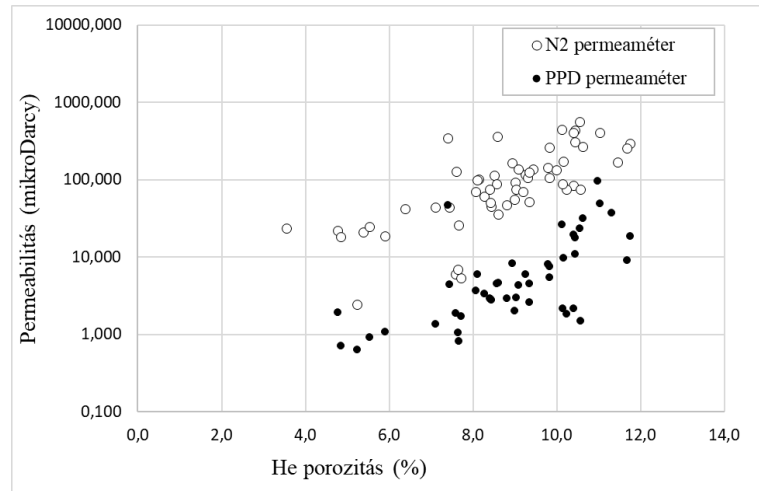


5. ábra. A héliumos piknométerrel és HPMI méréssel meghatározott porozitás értékek összevetése tömött homokkő (a) és márga (b) minták esetén (sz.s.sz.)

A mérési program összeállítása során törekedtem arra, hogy lehetőség szerint maximalizáljam az információszerzést, illetve azzal párhuzamosan optimalizáljam a sérüléssel/roncsolással járó mérések okozta mintamegsemmisülések számát. A tömött homokkővek 62 darabos mintacsoportjából 47 minta vonatkozásában volt lehetőség PPD mérést is elvégezni. A hagyományos és a PPD permeabilitás mérések számított abszolút permeabilitás eredményeit a porozitás függvényében a 6. ábra mutatja.

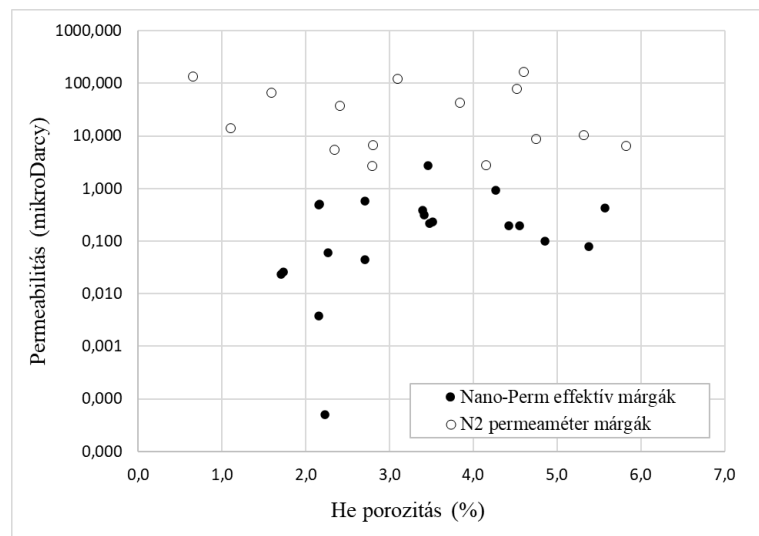
Az eredményekből látható, hogy a hagyományos és ebben a tömörségi tartományban kevésbé pontos permeaméterrel mért eredményekből számított áteresztőképesség értékek legalább egy, de sok esetben két nagyságrenddel nagyobbak adódtak. A jelenség magyarázata abban rejlik, hogy a hagyományos permeaméter térfogatáram mérési lehetősége nagyon kis térfogatáramoknál rendkívül nagy hibával terhelt, továbbá a tömött kőzeteknél a gázáramlás a mérési körülmények miatt nehezen indul meg majd órák vagy akár napok alatt állandósul jelentős idődeficitet okozva ezzel. A tájékoztató adatok kinyerése érdekében mind a rendszer átlagnyomását mind a nyomáskülönbséget

megnövelve történtek a mérések. Összeségében ezek a nem megfelelőségek okozzák a hagyományos elven alapuló bemérésnek, a PPD elven működő méréshez képesti jóval nagyobb értéket mutató eredményeit.



6. ábra. A tömött homokkő minták hagyományos és a PPD permeabilitás méréseinek számított abszolút permeabilitás eredményei a porozitás függvényében (sz.s.sz.)

A márga minták poroperm adatait a 7. ábrán mutatom be.

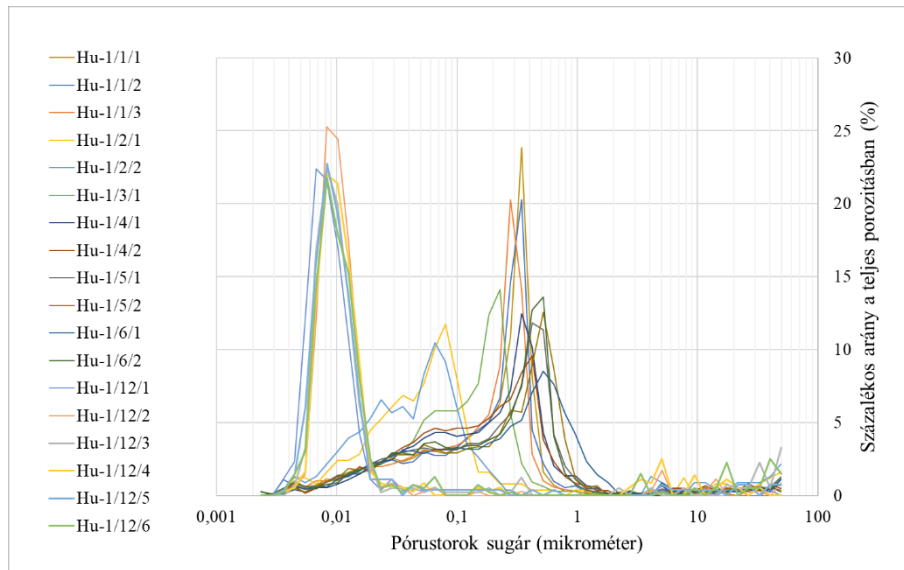


7. ábra. A márga minták hagyományos abszolút és a Nano-PermTM eszközön mért effektív permeabilitás méréseinek eredményei a porozitás függvényében (sz.s.sz.)

A tömött homokkő és márga minták porozitás és permeabilitás adatait az B. melléklet tartalmazza.

A 7. ábra alapján elmondható, hogy a márga minták permeabilitásai széles tartományban változnak, több esetben ugyanahhoz a sorozathoz tartozó minták esetében is. A HPMI mérési eredmények feldolgozásaiból számos igen szemléletes és gyorsan áttekinthető értelmezést készítettem. Minden HPMI méréssel vizsgált mintának ábrázoltam a pórustorok méret eloszlását, melyet példaként a Hunya-1 jelű mélyfúrásból származó

minták esetén a 8. ábrán mutatok be, a többi vizsgált mintára vonatkozó ábrát a C. melléklet tartalmazza.



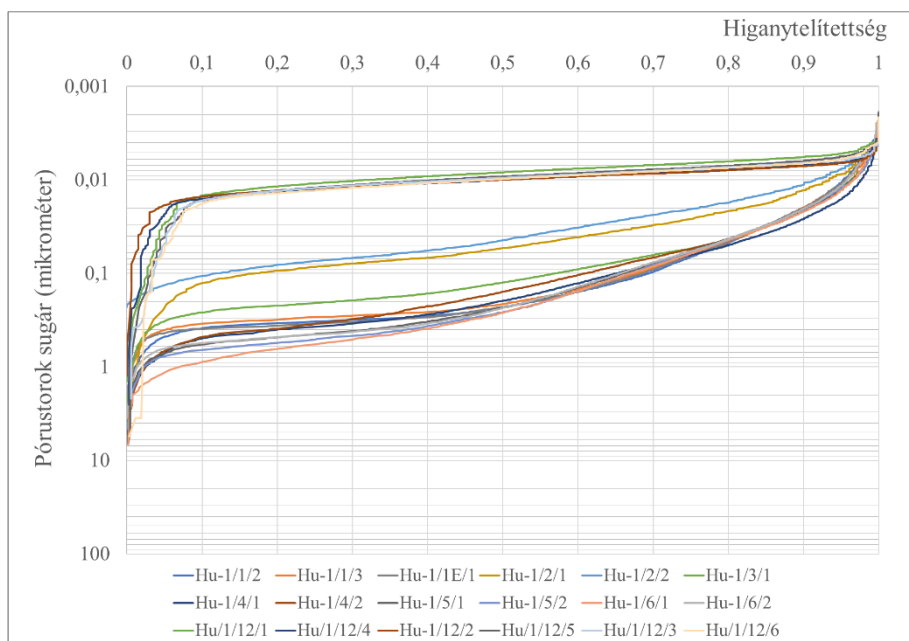
8. ábra. Hunya-1 jelű mélyfúrásból származó minták pórustorok méret eloszlásai (sz.s.sz.)

A 8. ábrán jól elkülönülnek a felsőbb szakaszokból származó tömött homokkő minták (Hu-1/1, /3, /4, /5, és /6), a némileg még kedvezőtlenebb homokkövek (Hu-1/2) és végül az alsó szakaszból (Hu-1/12) származó márga típusú minták eloszlásgörbéi.

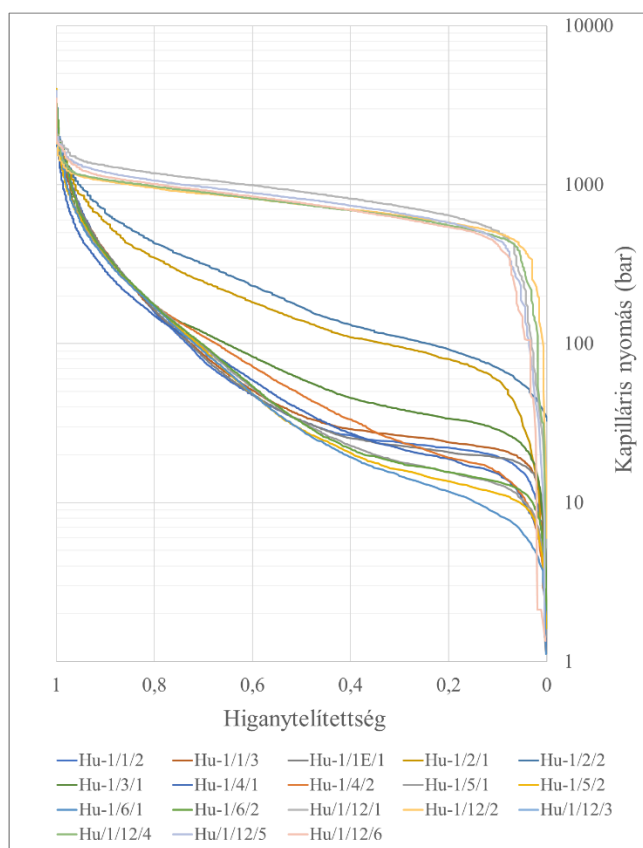
A mérési eredmények feldolgozásával minden minta esetén előállítottam a higany besajtolás százalékos arányának függvényében ábrázolt pórustorok sugár eloszlás görbéket. Az említett görbék nem a porozitás abszolút értékével, amely jelen esetben a teljes besajtolt higany mennyiség, hanem azok egyenértékű tengelyen történő bemutatásával véleményem szerint még szemléletesebb módon ábrázolhatók. Szemléltetésül, maradva Hunya-1 jelű fúrásnál, a 9. ábrán mutatom be az eloszlásgörbe-sereget, a további kutak mintáinak görbéi a D. mellékletben találhatók.

A HPMI mérések alapján elkészítettem továbbá a kapillaris nyomásgörbéket (melyeket a pórustorok sugár függvényében szokás ábrázolni). Az ábrázolt adatok, félgrafikus egyenes illesztéssel megoldással alkalmasak a küszöbnyomás meghatározására is. Példaként a Hunya-1 jelű fúrás mintáinak kapillaris nyomás görbéit a 10. ábrán mutatom be, a továbbiakat az E. melléklet tartalmazza.

Az alapadatok előállítását követően vizsgáltam azok összefüggéseit annak érdekében, hogy általánosítható megállapításokat lehessen megfogalmazni a vizsgált formációk (Szolnoki és Endrődi) petrofizikai tulajdonságaira vonatkozóan. Ismert, hogy a porozitás és permeabilitás összefüggése hosszú ideje és folyamatosan kutatott területe a petrofizikának.

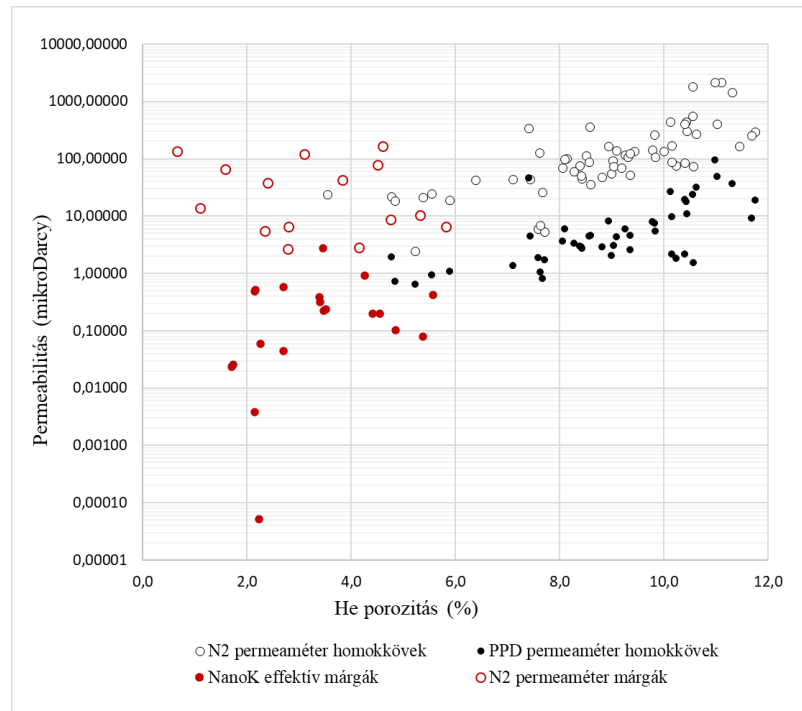


9. ábra. Hunya-1 kútból származó minták pórustorok sugár eloszlása a higanytelítettség függvényében (sz.s.sz.)



10. ábra. Hunya-1 kútból származó minták kapillaris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében (sz.s.sz.)

Megfigyelve a 11. ábrát, látható, hogy igen nehéz erős poroperm kapcsolatot találni, mind a homokkőek mind a márgák esetében.

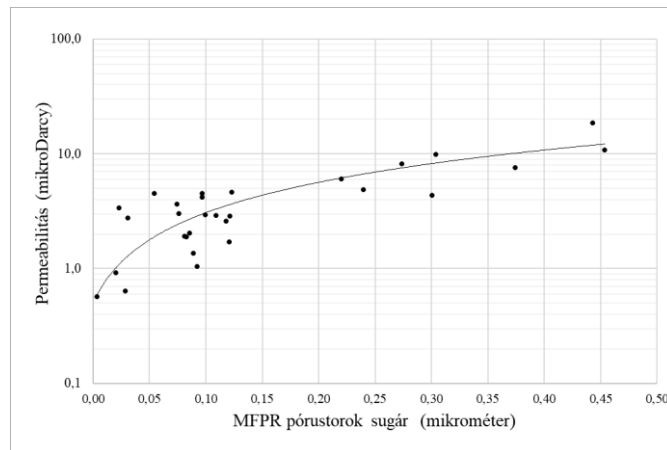


11. ábra. A leválogatott tömött homokkő és márga minták poro-perm kapcsolatának ábrázolása (sz.s.sz.)

A többszörös megfeleléségi ellenőrzést követően lehatárolásra került két mintacsoport, amelyeknél a vizsgálat szempontjából meghatározó mérések mind a plug méretű, mind a kisméretű mintán, tudományos vizsgálathoz megfelelő pontosságban rendelkezésre álltak.

A homokkővek vonatkozásában mindösszesen 28 mintapárnál teljesült ez a feltétel. A fejezet elején bemutattam, hogy porozitás mérés 194, míg permeabilitás mérés 176 esetben történt plug méretű mintákon. Ehhez képest talán kevésnek tűnhet a lehatárolt 28 homokkő minta. Ennek oka elsősorban a plug méretű mintákban gyakran jelen lévő repedésekben és mikor-repedésekben rejlik, hiszen már a legkisebb repedések is ellehetetlenítik a tudományos vizsgálatokhoz szükséges pontosságú áteresztőképesség méréseket, tekintettel arra, hogy repedés jelenlétében nem a minta szövete, hanem a repedés permeabilitását mérjük meg. Itt fontos megjegyezni, hogy a kutatási program tárgyát olyan régi, sok esetben évtizedeket a magraktárakban töltött minták képezték, amelyek a közetreológiai tulajdonságaik következtében a tárolás, a szállítás és a mintakialakítás során könnyen megrepedhettek. Továbbá befolyásoló tényező az is, hogy – a tight rendszerek esetében – csak a tömött homokkő minták közül lehetett nagyobb számú csoportot kialakítani a reprezentatív kutatás elvégzése érdekében, szemben például az aleurolit vagy tufa mintákkal, amelyekből csak pár darab állt a rendelkezésemre. Tanulmányozva az előzőekben bemutatott adatokat és eloszlásokat, arra a következtetésre jutottam, hogy a nem-

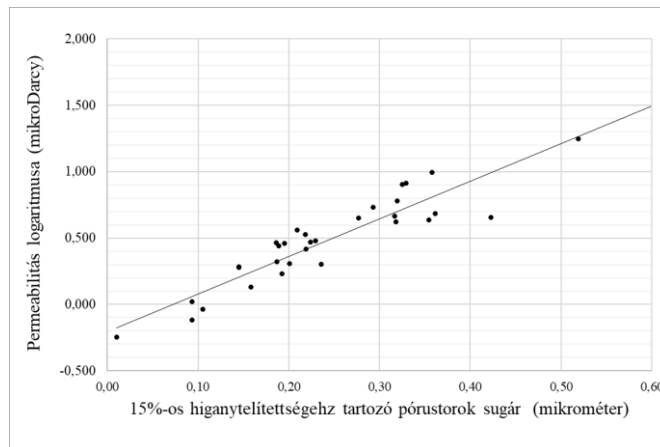
hagyományos homokkővek vonatkozásában nehéz a porozitás abszolút értéke és a permeabilitás között kapcsolatot találni. Ebből következően érdemes például kapcsolatot keresni valamely jellemző pórustorok sugár és a permeabilitás között. Megfelelő kapcsolatot mutat a legjellemzőbb pórustorok sugár (*MFPR*) és az abszolút permeabilitás (k_{abs}) korrelációja (12. ábra és F. melléklet I.). Az 1. összefüggés alkalmazásával a Szolnoki homokkővek permeabilitása becsülhető.



12. ábra. a legjellemzőbb pórustorok sugár és az abszolút permeabilitás kapcsolata (sz.s.sz.)

$$k_{abs} = 25,746 \text{ MFPR} + 0,4959 \quad R^2 = 0,7313 \quad (1.)$$

Erős kapcsolatot tártam fel a HPMI mérésből számítható 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórustorok sugár (r_{15}) és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusa között, melyet a 13. ábrán (F. melléklet II.) mutatok be (Szabó N.P. és szerzőtársai, 2021).

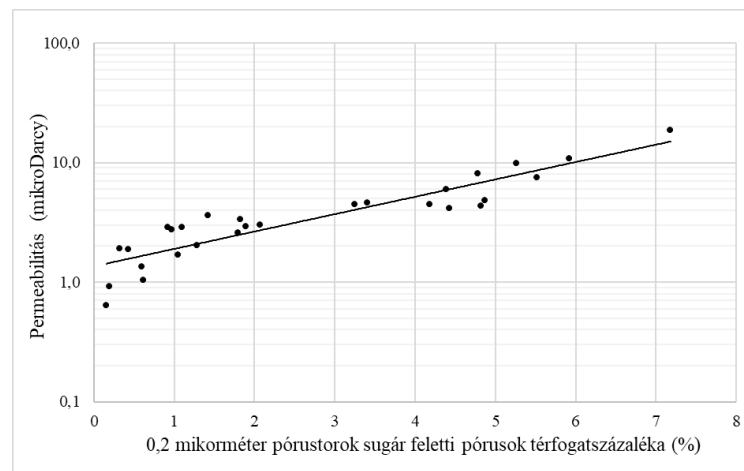


13. ábra. A 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórustorok sugár és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusa közötti kapcsolat (sz.s.sz.)

A 2. összefüggés alkalmazásával a tömött Szolnoki Homokkővek permeabilitása jól becsülhető.

$$\log k_{abs} = 2,8361 r_{15} - 0,206 \quad R^2 = 0,848 \quad (2.)$$

Kiindulva abból, hogy az áteresztőképesség nagyságrendi értékét, tömött homokkövek esetén, a nagyobb pórusok jelenléte és eloszlása befolyásolja a leginkább, alapos vizsgálatnak vettem alá a pórustér eloszlásokat. Arra a következtetésre jutottam, hogy nem a porozitás abszolút értékével, hanem annak valamely jellemző hányadával érdemes a poroperm kapcsolatot keresni. A C., D. és E. mellékletben bemutatott eloszlások elemzése és a korrelációk keresése során nagyon erős kapcsolatot tártam fel a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta térfogat – amelyre bevezettem a redukált porozitás elnevezést ($\phi_{R0,2}$) – és a permeabilitás között (14. ábra és F. melléklet III.).



14. ábra. A redukált porozitás és a permeabilitás kapcsolata (sz.s.sz.)

A 3. összefüggés alkalmazásával a Szolnoki Homokkövek permeabilitása nagy pontossággal becsülhető.

$$k_{abs} = 1,3571e^{0,334} \phi_{R0,2} \quad R^2 = 0,8959 \quad (3.)$$

A nem-hagyományos kőzetminták laboratóriumi méréseinek újszerű kiértékelései kapcsán összefoglalóan elmondható, hogy

- a minták kialakítása és előkészítése rendkívüli körültekintést igényel,
- a porozitás mérése mind héliumos piknometriával, mind HPMI méréssel tudományos elemzésekhez megfelelő pontossággal kivitelezhető,
- a permeabilitás mérése a mérés során kialakuló rendkívül kis térfogatáramok miatt speciális, kifejezetten ilyen célra készített térfogatáram mérővel felszerelt eszközöket igényel, továbbá, hogy a kutatásaim során erős kapcsolatot tártam fel a HPMI mérésből számítható 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórustorok sugár (r_{15}) és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusá között, továbbá nagyon erős kapcsolatot a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta térfogat (redukált porozitás) és az abszolút permeabilitás között.

3 SZINTETIKUS MINTATEST KIALAKÍTÁSA PETROFIZIKAI TULAJDONSÁGOKBÓL

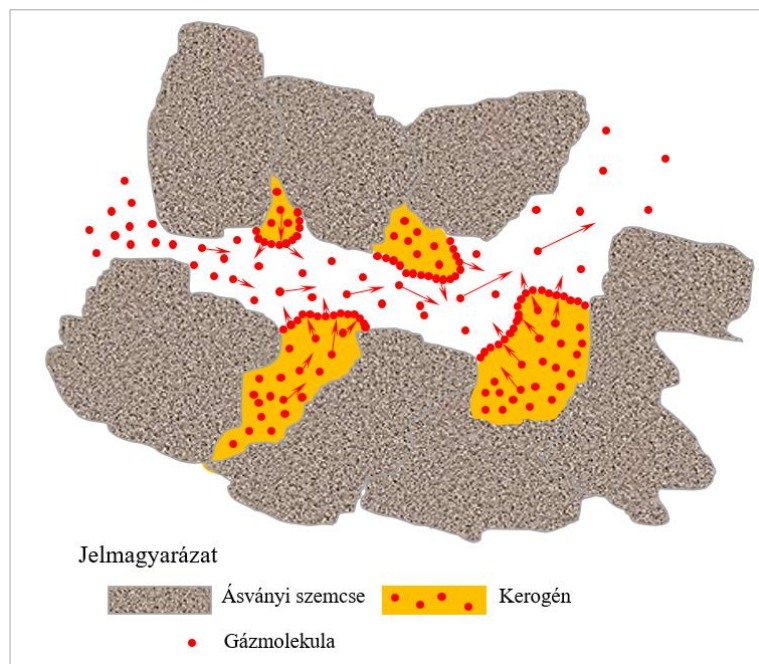
A rendkívül kis permeabilitás egyértelmű következménye a tárolókőzetek pórusszerkezetének. Ezekben a kőzetekben a pórustér meghatározó részét mikro- sőt nano méretű pórusok és póruscsatornák alkotják, az átlagos pórusugár a néhány nanométertől (10^{-9} m) néhány mikrométerig terjed (10^{-6} m).

A tömött kőzetekben jelen lévő nanométer nagyságrendbe eső pórusok létezése napjainkban általában nagy nyomású higany besajtolással (High Pressure Mercury Injection - HPMI), pásztázó elektronmikroszkóppal (Scanning Electron Microscopy - SEM) és atomi erőmikroszkóppal (Atomic Force Microscopy - AFM) igazolható.

A nem-konvencionális tárolók kezdeti nemzetközi termelési adatai és tapasztalatai azt mutatták, hogy az ilyen típusú kőzetekből a gáztermelés a várakozásnál nagyobbnak bizonyult, a rendkívül kis áteresztőképességük ellenére. A kis permeabilitású formációkból történő szénhidrogén-termelés növekedésével párhuzamosan, a nemzetközi szakirodalomban egyre komplexebb tanulmányok foglalkoztak a pala- és tömött homokkő porózus rendszerekben kialakuló transzportfolyamatok kérdéskörével (*Chivan F. és szerzőtársai, 2011; Hadjiconstatinou N. G., 2006*).

A kutatók egyetértettek abban, hogy a nano méretű póruscsatornában a Darcy jellegű áramláson kívül, fontos szerephez jut a diffúziós jellegű, úgynevezett Knudsen áramlás is. Megállapítható, hogy a mikro és nano méretű póruscsatornában lejátszódó áramlásra (különösen laboratóriumi körülmények között) már nem, vagy csak korlátozottan érvényes a hagyományos és széleskörűen alkalmazott Darcy-féle áramlási modell (*Whitaker S., 1986; Zimmermann R. W., 2018*)

Egyensúlyi állapotban a gázmolekulák a kőzetmátrix pórusaiban, szerves anyaggal rendelkező kőzet esetén oldott gázként a kerogénben, valamint adszorbeált gázként a kerogén felületén helyezkednek el (15. ábra). A mélyfúrási- és rétegrepesztési műveletek felborítják az egyensúlyt, így a pórusokban megindul a gázmolekulák áramlása a kis nyomású zóna felé, majd a kerogén szemcsék falának felületét borító gázmolekulák deszorbeálódnak. A gázdeszorpció megváltoztatja a koncentráció-egyensúlyt a kerogén-szemcse és a szemcse felülete között, a kialakuló koncentráció-gradiens megindítja a gázmolekulák nagyon lassú diffúzióját a kerogén-szemcséből a szemcse felszíne majd a pórus felé.



15. ábra. Gázmolekulák elhelyezkedése a nanopórusokban szervesanyaggal rendelkező közet esetén (Remeczki F., 2021b)

A transzport-folyamatok nyilvánvalóan átfedésben vannak, de tekinthetünk úgy az összetett folyamatra, hogy először a gázáramlás indul meg, ezt követi a gáz deszorpciója, végül pedig a gáz diffúziója következik be. Fontos hangsúlyozni, hogy a kerogén-szemcsében zajló diffúzió nem azonos a Knudsen diffúzióval.

Az újszerű megközelítés megköveteli a konvencionális mérési programok adaptációját és az azokban felhasznált eszközök mérési eredményeinek a megszokottól eltérő integrációját, esetleg a rendelkezésre álló speciális eszközök bevonását. A HPMT mérések – amelyekre már a nemzetközi szakirodalomban sem hagyományos módszerként referálnak – elvégzésével igazolhatóvá vált a nanopórusok jelenléte a vizsgált kőzetmintákban.

Kutatómunkámban a nanopórusokkal is rendelkező porózus közegben kialakuló gáz transzport-folyamatok leírásához Javadpour és szerzőtársainak modelljét adaptáltam (Javadpour, F. és szerzőtársai, 2007; Javadpour, F. és szerzőtársai, 2009) oly módon, hogy modellemben a gáz deszorpciójától és a kerogén-szemcsékben kialakuló diffúziótól eltekintek.

A pórusokban kialakuló áramlás teljes tömegáram fluxusa (J) a nyomáskülönbség vezérelte tömegáram (advekciónak) fluxusának (J_a) és a Knudsen típusú diffúzió (J_D) fluxusának összege. Az advektív tömegáram fluxusát egy kör keresztmetszetű póruscsatornában lamináris áramlásnál a Hagen-Poiseuille egyenletből határozhatjuk meg. Roy és szerzőtársai (2003) megmutatták, hogy a nanopórusokban kialakuló Knudsen

diffúzió nyomásgradiens formájában leírható. *Brown és szerzőtársai (1946)* egy elméleti dimenzió nélküli paramétert (F) vezettek be a póruscsatorna falán jelentkező siklás figyelembevételére. A gázáramlás teljes tömeg fluxusa az alábbi módon írható fel:

$$J = J_a + J_D \quad (4.)$$

A J_a tömegáram egy ideális gázra lamináris áramlásban egy kör alakú csőben elhanyagolható hosszúságú belépési hatással a Hagen-Poiseuille-egyenletből származtatható:

$$J_a = -\frac{\rho r^2}{8\mu} \nabla p \quad (5.)$$

A sűrűség és a nyomás viszonyára az ideális gáztörvényt alkalmazva felírható

$$J_a = -\frac{r^2}{8\mu} \frac{\rho_1}{p_1} p \nabla p \quad (6.)$$

ahol ρ_1 és p_1 a sűrűség és a nyomás értéke egy adott pórus bemeneténél. A (6) egyenlet integrálva a pórus hosszára, valamint az átlagsűrűség (ρ_{avg}) és az átlagnyomás (p_{avg}) meghatározásával adódik, hogy

$$J_a = -\frac{r^2}{8\mu} \frac{\rho_{avg}}{L} \Delta p \quad (7.)$$

ahol ρ_{avg} (kg/m^3). A nagyon apró pórusok esetében a csúszás- vagy siklásmentes határfeltétel nem érvényesül (*Hadjiconstatinou N.G., 2006; Karniadakis. G. és szerzőtársai, 2005; Hornyák G.L. és szerzőtársai, 2008*) A nanopórusok felületén fellépő csúszási jelenség megkönnyíti a gázáramlást. Ahogyan az már említésre került, *Brown és szerzőtársai (1946)* bevezettek egy elméleti dimenzió nélküli F együtthatót a kapilláris csövecskék – jelen esetben a pórusokat annak tekintve – csúszási sebességének korrekciójára.

$$J = -\left(\frac{2rM}{3 \times 10^3 RT} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + F \frac{r^2 \rho_{avg}}{8\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{L} \quad (8.)$$

ahol R a gázállandó ($= 8,314 \text{ J/mol/K}$) és r a pórus sugár, méterben. A (8) egyenlet azt mutatja, hogy a kisebb pórusméretek, illetve a kisebb nyomások magasabb F tényezőt eredményeznek.

$$F = 1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{\mu}{p_{avg} r} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \quad (9.)$$

Ahol α a gázmolekuláknak a cső faláról a tükrereflexióhoz képest diffúzan visszaverődő része (Maxwell J.C., 1995), a tényező meghatározására többféle közelítő összefüggést publikáltak. Számításaimhoz Chivan megoldását alkalmaztam, amelyben a konstansok értéke rendre $\alpha_0=1,358$, $A=0,178$, $B=0,4348$.

$$\frac{\alpha_0}{\alpha} - 1 = \frac{A}{Kn^B} \quad (10.)$$

A Knudsen szám (19) a gáz molekula közepes szabad úthosszának (λ) és a póruscsatorna átlagos átmérőjének (d) a hányadosa, adott hőmérsékleten és nyomáson.

$$Kn = \frac{\lambda}{d} \quad (11.)$$

A gáz molekula közepes szabad úthossza az alábbi egyenlettel határozható meg

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 p} \quad (12.)$$

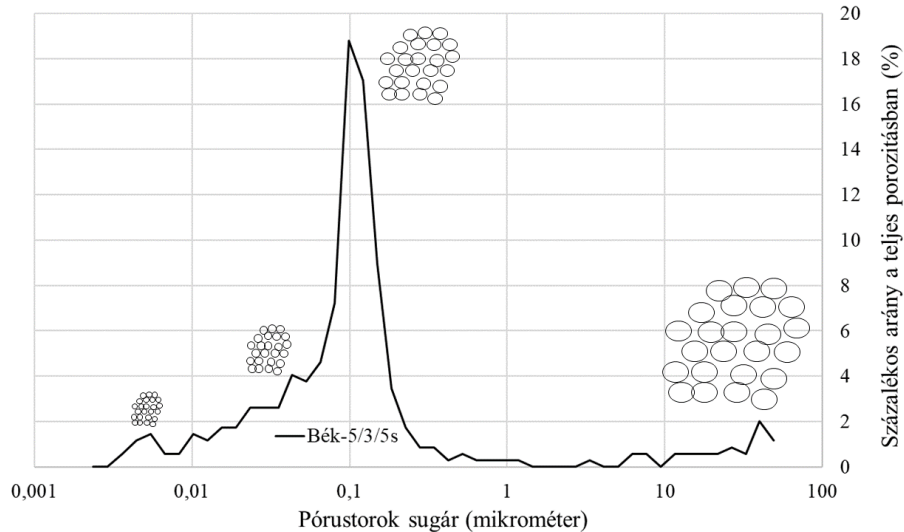
ahol k_B a Boltzmann állandó, T a hőmérséklet, p a nyomás, σ a gázmolekula átmérője az egyenletben. A $\pi \sigma^2$ szorzatot ütközési hatáskeresztmetszetnek is szokás nevezni.

A fentebb bemutatott elméleti megközelítés alkalmazásával létrehoztam a modell mintatest fogalmát. A modell vagy szintetikus mintatest létrehozásával az volt a célom, hogy a korábbiakban bemutatott (2. fejezet), a mért adatok értelmezésében megjelenő diszkrétanációkat magyarázni, illetve eliminálni lehessen.

A szintetikus minta kialakításának koncepciója arra épült, hogy az RCA mérések közé sorolható HPMI mérésből származó, laboratóriumi gyakorlatban könnyen kinyerhető adatok felhasználásával lehessen megvalósítani. Mint ismert, a HPMI mérés során keletkező kapilláris nyomásgörbéből (Mercury Injection Capillary Pressure - MICP) meghatározható a minta pórustorok mértet eloszlása. Tekintettel arra, hogy a permeabilitás méréseket szabványos mintadugókon – szemben a HPMI méréssel, amelyet úgynevezett kis mintatesteken – szokás elvégezni, a szintetikus minta „kialakításánál” is szabványos hengeres mintatest került meghatározásra. A szintetikus minta átmérője azonos az általánosan (és jelen kutatásban is) alkalmazott szabvány mérettel.

Számos szabvány méretben kialakított mintatestben kisebb-nagyobb, kialakításból és/vagy raktározási sérülésből adódó repedést azonosítottunk, így ebből kifolyólag a mért permeabilitás értékeket nem tekinthetjük reprezentatívnak a rezervoár közetre vonatkozólag. A probléma eliminálásának érdekében minden mintatestnek a saját valós méretében készítettem el a szintetikus változatát.

A szintetikus minta alapvetően egy kapilláris csőkötegekből álló modell, amelyben a HPMI mérés pórustorok méret eloszlás görbéje adja meg a kapillárisok átmérőjét, illetve az adott kapilláris átmérőhöz tartozó köteg számosságát (16. ábra). A kapilláris csőköteg össztérfogatát és a beáramlási keresztmetszetet - adott mintában - a porozitás abszolút értéke határozza meg.



16. ábra. Szintetikus modell mintatest kialakításának sematikus ábrája (sz.s.sz.)

A szintetikus mintatest „laboratóriumi” körülmények közé helyezve, az alkalmazási feltételeket szigorúan betartva, alkalmas a mintán átáramló gázáram vizsgálatára.

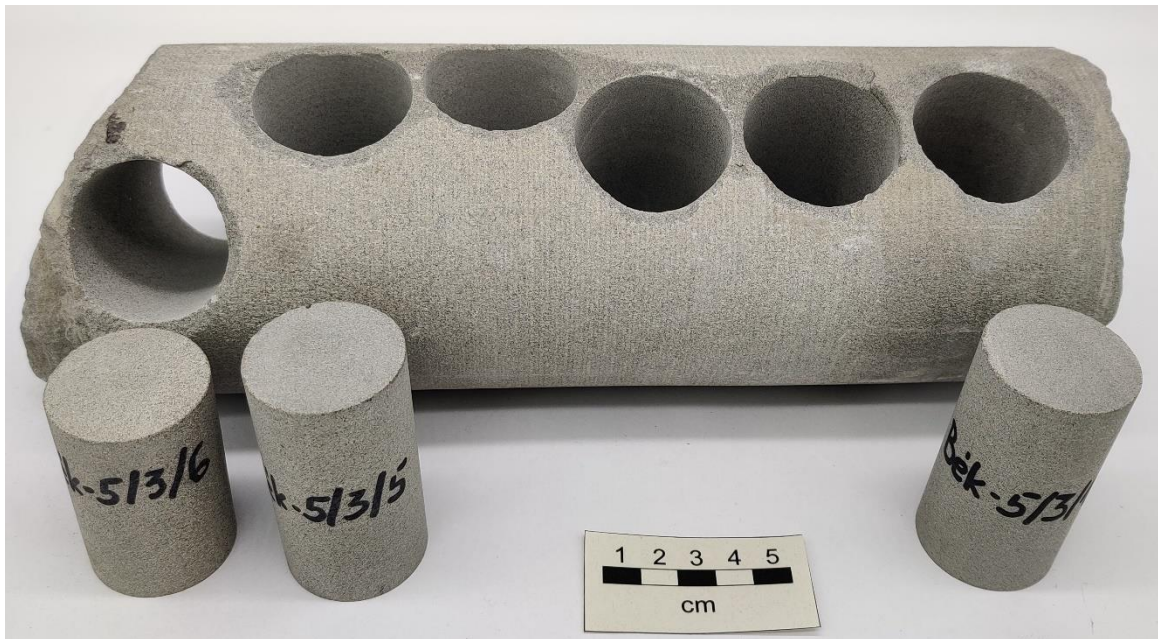
Az alkalmazás peremfeltételei közé tartozik, hogy rendelkezünk egy a minta petrofizikai tulajdonságaival erős egyezést mutató valós sztenderd méretű mintán gázzal mért permeabilitás értékekkel.

A kutatási céljaimban megfogalmazottaknak megfelelően olyan laboratóriumi gyakorlatban gyorsan és egyszerűen alkalmazható eljárásokat igyekeztem kidolgozni, amelyek elegendő pontosságúak az ipari gyakorlat számára.

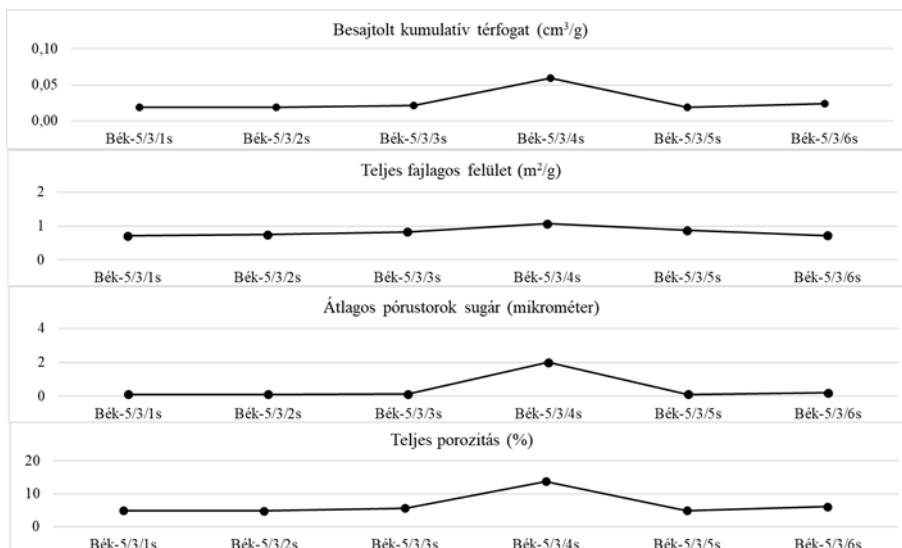
A petrofizikai tulajdonságok hasonlóságának szemléletes vizsgálatához elegendő adatot szolgáltat a HPMI mérés adathalmaza. A kis mintatesteken végzett higany besajtolás származtatott eredményei többek között

- a teljes besajtolt higany mennyiség (Total cumulative volume, cm^3/g),
- a teljes fajlagos felület (Total specific surface area, m^2/g),
- az átlagos pórusugár (Average pore radius, mikrométer),
- a legjellemzőbb pórusugár (Most frequent pore radius, mikrométer),
- a teljes porozitás (Total porosity, %).

A felsorolt jellemzők egybevetésével a minták hasonlósága vagy különbözősége nagy biztonsággal vizsgálható. A 17 és 18. ábra közvetlenül egymás közelségéből kifűrt mintatesteket és a kis mintatesteken mért HPMI eredményeket mutatja.



17. ábra. A Bék-5/3 szakasz kifűrés után és a belőle kialakított minták (sz.s.sz.)



18. ábra. A Bék-5/3 szakaszból kialakított kis méretű mintatestek HPMI adatai (sz.s.sz.)

A modell feltételezi, hogy a pórustér szerkezete (mikro és nano pórusok) megengedi a pórustér térfogatának változatlan értékű figyelembevételét csövecskékből álló kapilláris kötegek formájában.

A továbbiakban a szintetikus mintával lényegében ugyanúgy járunk el, mint a valós áteresztőképesség mérések során, amely a gázáramlás szimulálását jelenti. Tekintettel arra, hogy a modell validálása a rendkívül kis értékű áteresztőképességgel bíró közetek mérésére kifejlesztett Nano-PermTM, valamint az ennél kissé jobb tulajdonságú közetek esetében az

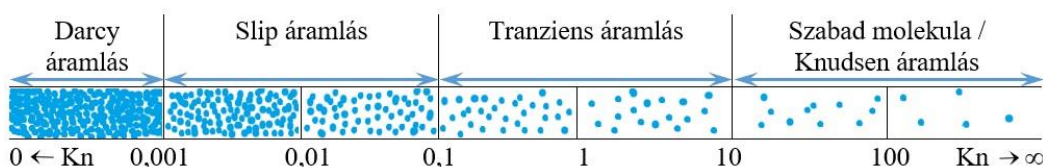
Ultra-Perm 610DTM eszközzel történt, a szimulált mérés körülményeinek is meg kell egyeznie az eszközök mérési körülményeivel úgymint a méréshez alkalmazott gáz, a mérés átlagnyomása és hőmérséklete, valamint a nyomáskülönbség. Az eljáráshoz szükséges adatokat és az eredményeket a 3. táblázat összegzi.

3. táblázat. Az eljáráshoz szükséges adatokat és az eredmények (sz.s.sz.)

Input	Minta adatai: HPMI porozitás, HPMI pórustorok sugár eloszlás és relatív térfogaszázalék, sztenderd méretű minta hossza és átmérője Méréshez használt gáz: molekula átmérő, moláris tömeg, mérés körülménye között a dinamikai viszkozitás és a sűrűség Ultra-Perm 610D TM vagy Nano-Perm TM műszer effektív permeabilitás méréséből sztenderd méretű minta esetén a mérés átlagnyomása, a nyomáskülönbség és az adott nyomáskülönbséghez tartozó térfogatáram
Output	Kapilláriskötegenként: térfogatáram

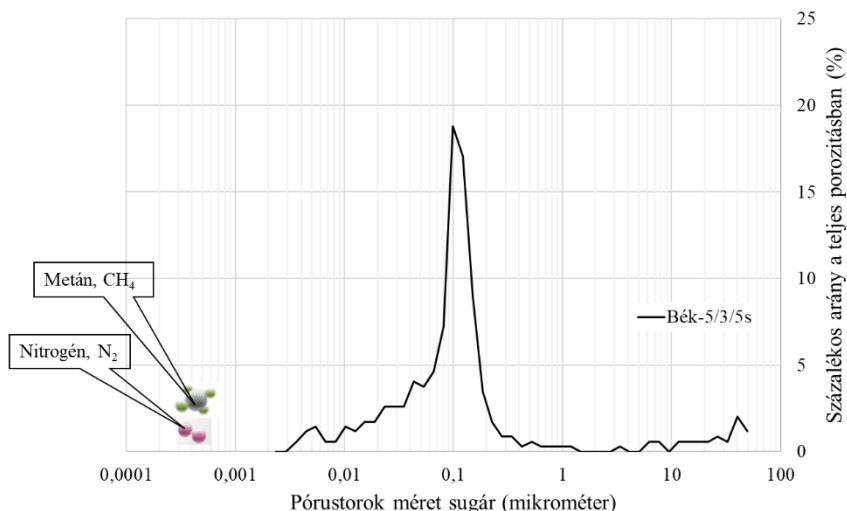
A 2. fejezetben (hagyományos mérési kiértékelések) bemutattam, hogy bizonyos, többnyire tömött homokkő minták megnyugtató permeabilitás mérései, egészen a kutatási időszak végéig megfelelő eszköz hiányában nem valósultak meg. Ebből következően ennek a mintacsoportnak csak kis számú, de reprezentatív elemeire vannak megnyugtató pontossággal kezelhető permeabilitás adatok. A bemutatásra kiválasztott minta a Békés-5 jelű mélyfúrásból származik, litológiai besorolása alapján Szolnoki Alsó-Pannon Homokkő, azonosítója Bék-5/3/5. A kiválasztott minta adatai alapján elvégeztem a szintetikus modell validálását az Ultra-Perm 610DTM eszköz által mért eredményekkel, melyet egy példán keresztül mutatok be.

A szimuláció első lépésében meghatározásra kerültek a különböző kapillaris sugarakhoz tartozó Knudsen szám értékek, amelyek alapján adott kapillaris átmérő tartományokban leírható a gázáramlás jellege (19. ábra).



19. ábra. A gázáramlás jellege eltérő Knudsen-számok esetén (sz.s.sz.)

A 20. ábrán jól látható, hogy a kiválasztott minta pórusterének legapróbb pórustorok sugarai a 0,01 mikrométer alatti tartományban vannak.



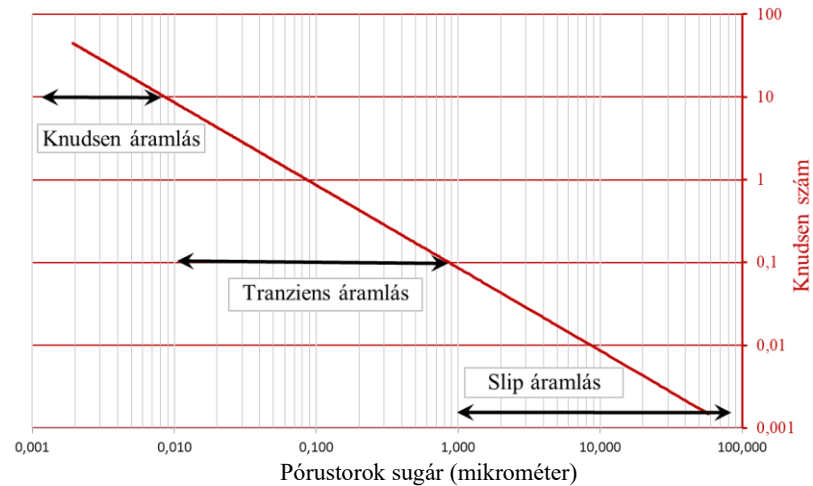
20. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta pórustorok méret sugár eloszlása, illetve a metán és a molekulák átmérője (sz.s.sz.)

Ebben a mérettartományban a pórusok és a benne lévő molekulák mérete már csak egy nagyságrendben különbözik egymástól. Az itt kialakuló áramlás úgynevezett átmeneti vagy tranziens áramlás, amely már nagyon közel van a szabad molekula mozgás (Knudsen áramlás) tartományához.

A Bék-5/3/5s azonosítójú minta HPPI mérési adataiból előállított szintetikus mintatestben kialakuló áramlások vizsgálhatók a fentebb bemutatott eljárás elvégzésével. Az eljárás alapja a pórustorok sugár - relatív térfogatszázalék pontsor. A 20. ábrán az úgynevezett „Pore size distribution – custom ranges” adatok vannak ábrázolva, amelyek minden minta esetében ugyanolyan osztásközüek. A szimulációhoz használt pontsor azonban egy ettől jóval finomabbra bontott osztásközü változat, amelyet a riport fájl „Date report”-ja tartalmaz, eltérő hosszúságú, általában 500-700 pontpárból áll.

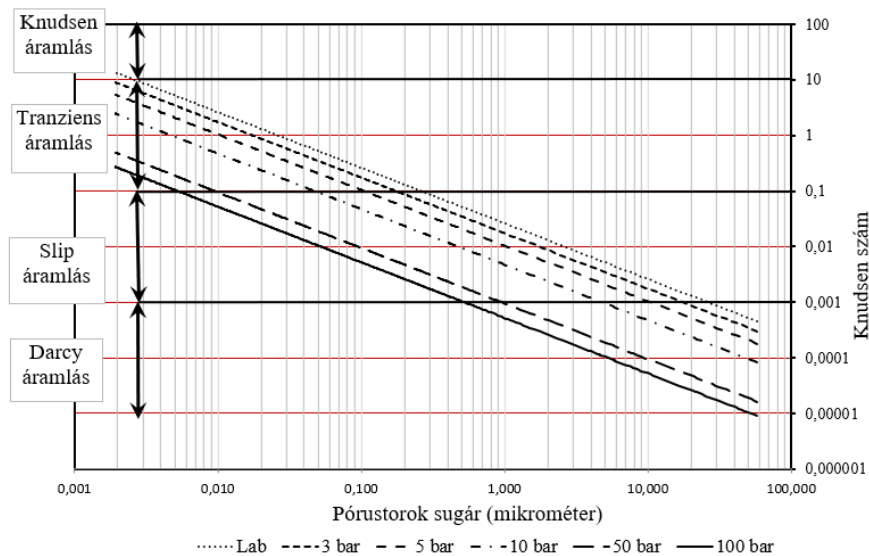
A 20. ábra a Bék-5/3/5s azonosítójú minta pórustorok méret eloszlását, míg a 21. ábra a különböző pórustorok sugár értékekhez, a szimuláció alap beállításának laboratóriumi körülményein kialakuló áramlások típusát mutatja.

Megfigyelhető, hogy az Ultra-Perm 610DTM működési körülményein, amelyeket a szimuláció beállításainál alkalmaztam, a Darcy jellegű áramlás tartománya nem jelenik meg. Ebből kifolyólag a minta pórusaiban kialakuló áramlások már nem írhatók le pontosan az egyszerű Darcy egyenlettel, illetve annak módosításaival.



21. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta szimulációs körülményein kialakuló, a Knudsen szám alapján elválasztott áramlástípusok a pórusméretszög függvényében (sz.s.sz.)

Megvizsgáltam, hogy a nyomás és a hőmérséklet növekedése hogyan befolyásolja az áramlási tartományokat. Az elvégzett számítások összefoglaló eredményét a 22. ábrán mutatom be.



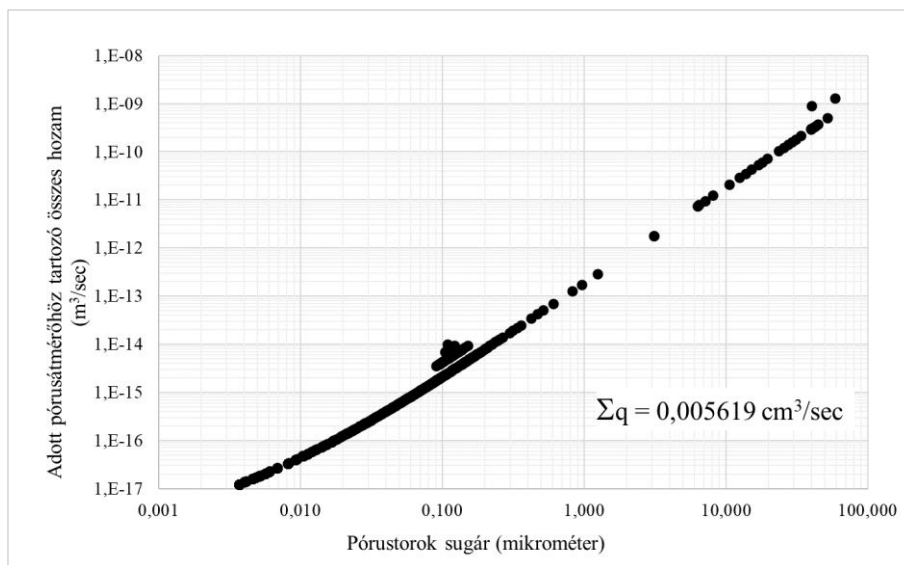
22. ábra. A Bék-5/3/5s azonosítójú minta eltérő szimulációs körülmények között kialakuló, a Knudsen szám alapján elválasztott áramlástípusok a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz.)

Összevetve az 22. ábrát, az előző, 21. ábrával látható, hogy a függőleges tengelyen ábrázolt Knudsen szám tartománya több nagyságrenddel szélesebbé vált a kisebb értékek irányába. A nyomás növekedésével egyre kisebb értékű pórustorok sugár tartományban jelenik meg a Darcy típusú áramlás és ezzel párhuzamosan egyre jobban tolódik el a többi tartomány is.

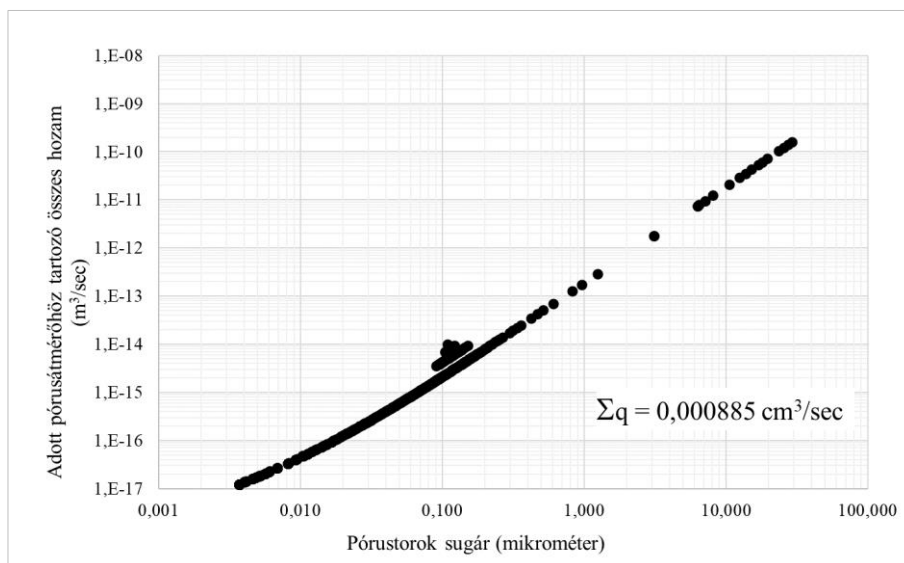
A szintetikus minta szimulációs körülményeinek beállításához kapcsolódóan fontos megjegyezni a következőket. Az előző fejezetben leírtak szerint, a minták előléte és kialakítása bizonyos mértékben megváltoztatja annak eredeti tulajdonságait nyomot

hagyva ezáltal a pertofizikai tulajdonságain is. Továbbá, hogy a kis méretű mintatest, amely a szintetikus minta alapja, nem része, nem egyezik meg vele és ily módon nem is 100%-ban reprezentatív a plug méretű mintára vonatkozólag. Ebből következően a szimulációs során a plug méretű mintán mért értékekhez kell illeszteni a szintetikus mintatestet.

Az 23. és 24. ábrákon a pórustorok sugarakhoz tartozó diszkrét pontok a szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó egyedi térfogatáram értékeket, valamint azok összegét mutatják, előbbi az eredeti, utóbbi a mérési eredményekhez illesztett pórustorok sugár eloszlás alapján. Az illesztési nyomáskülönbséghez tartozó mérési ponton a plug méretű mintán, az Ultra-Perm 610DTM eszközben mért keresztül áramló gáz térfogatárama 0,00087 cm³/sec volt.

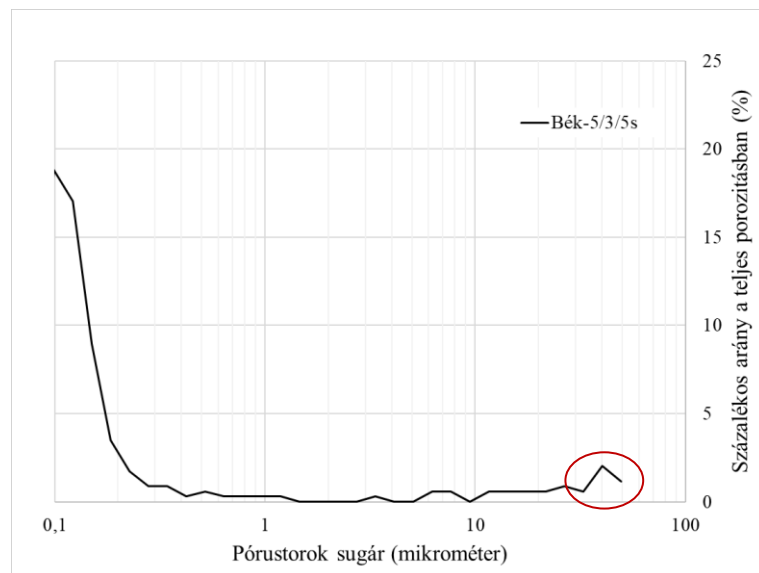


23. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó egyedi térfogatáram értékek, illesztés előtt (sz.s.sz.)



24. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó egyedi térfogatáram értékek, illesztést követően (sz.s.sz.)

Annak érdekében, hogy a mérési körülményeken mért eredő térfogatáram, mint a szimuláció illesztési kritériuma, teljesüljön egy kis mértékű korrekciót kellett végrehajtani a HPMI mérésből származó pórustorok sugár adatokon. A korrekció csak a legnagyobb sugár értékekhez tartozó értéket érintette, mindössze csekély mértékben. A 27 mikrométer pórustorok sugár értékénél nagyobb adatokat kellett eltávolítani (25. ábra) ahhoz, hogy a szimulációban az Ultra-Perm 610DTM eszközzel mért térfogatáram alakuljon ki.



25. ábra. A Bék-5/3/5s minta korrekcióval érintett szakasza (sz.s.sz.)

Az 23. és 24. ábrákon látható pontok mennyiségéből következik, hogy a kapilláris csökötegek száma igen jelentős, jelen esetben 658 féle különböző átmérőjű csövecske alkotja a szintetikus modell alapját. Azt, hogy egyféle méretű kapilláris csövecskéből hány darab alkot egy-egy köteget, azt a pórustorok méret eloszlásgörbe határozza meg. Jelen modell mintatest esetén az eredő térfogatáramot mindösszesen $2,52 \cdot 10^6$ darab kapilláris csövecskén áthaladó gázmennyiség összege határozza meg.

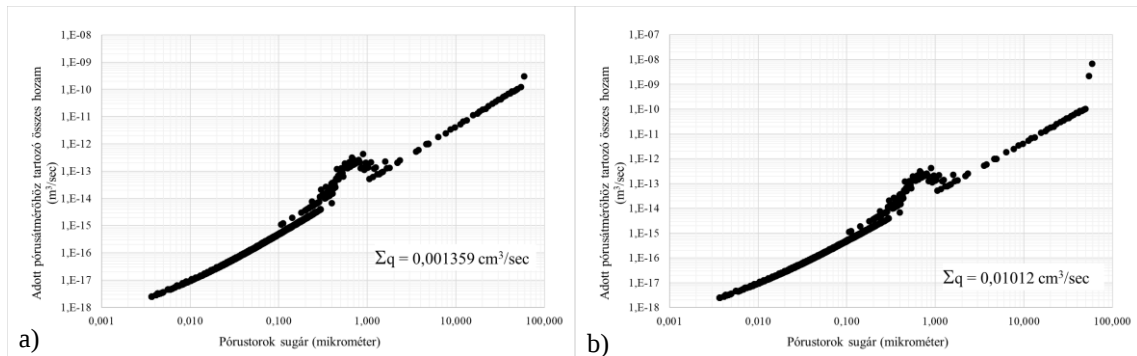
A további eredmények bemutatása céljából felhasznált mintapopuláció kiválasztásának folyamata szintén terhelt a többnyire tömött homokkő minták megnyugtató pontosságú permeabilitás mérési eredményeinek hiányával. A mintacsoport ebben az esetben is csak kis számú, de reprezentatív elemmel rendelkezik. A bemutatásra kiválasztott minták eltérő mélyfúrásokból származnak (Békés-5, Gyoma-1, Köröstarcsa-5) litológiai besorolásuk alapján Szolnoki Alsó-Pannon Homokkő formációba tartoznak.

Az 4. táblázat néhány az Ultra-Perm 610DTM eszközzel elvégzett mérés, valamint a szintetikus mintával végzett szimuláció térfogatáram adatait tartalmazza. Az illesztések értelmezéséhez rövidebb megjegyzéseket fűztem. Grafikusan még szemléletesebben

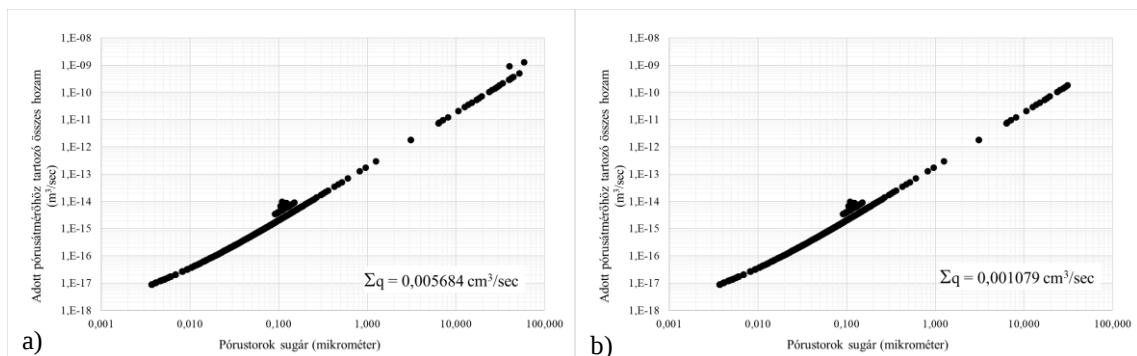
bemutathatók az illesztéssel érintett módosítások. Ábrázoltam az eredeti és illesztett szimulációs eredményeket (26. – 31. ábrák).

4. táblázat. Ultra-Perm 610DTM eszközzel elvégzett mérés, valamint a szintetikus mintával végzett szimuláció térfogatáram adatai a szerző megjegyzéseivel (sz.s.sz)

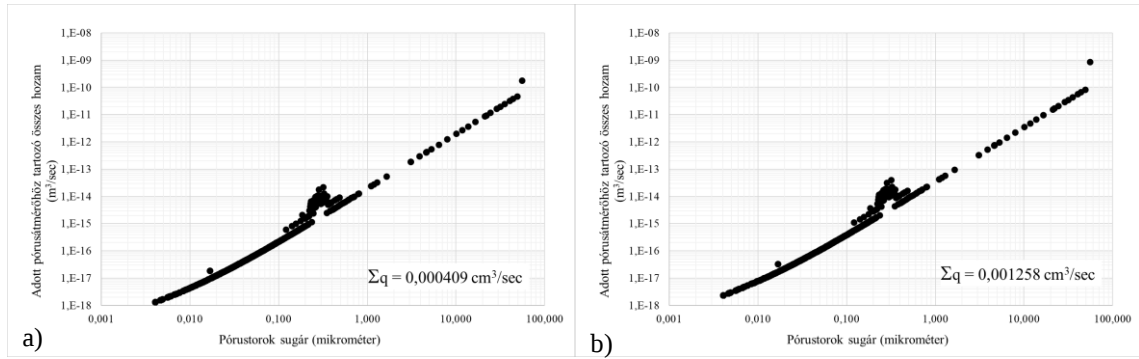
	Ultra-Perm 610D TM mérés	HPMI adatokkal végzett szimuláció Illesztés nélkül	HPMI adatokkal végzett szimuláció Illesztéssel	Megjegyzés
	Bék-5/1/1	Bék-5/1/1s	Bék-5/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0089	0,001360	0,010120	Az 58 mikrométeres kapilláris méretből 6%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során. Vélhetően mikrorepedés van a plug méretű mintában.
	Bék-5/3/5	Bék-5/3/5s	Bék-5/3/5s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0008	0,005684	0,001079	Az illesztés során el kellett távolítani a 33 mikrométeresnél nagyobb tartományban 3,09% relatív térfogatot.
	Gyo-1/1/1	Gyo-1/1/1s	Gyo-1/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0012	0,000409	0,001258	Az 55 mikrométeres kapilláris méretből 0,87%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során.
	Gyo-1/5/1	Gyo-1/5/1s	Gyo-1/5/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0027	0,001092	0,002627	Az 55 mikrométeres kapilláris méretből 0,92%-os, a 49-esből 1%-os ill. a 47-esből is 1%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során.
	Köt-5/1/1	Köt-5/1/1s	Köt-5/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0007	0,059063	0,000340	Az illesztés során el kellett távolítani a 68-624 mikrométeres tartományban 1,55% relatív térfogatot. Repedés a kis méretű mintában.
	Köt-5/4/5	Köt-5/4/5s	Köt-5/4/5s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,001	0,002778	0,002163	Az illesztés során el kellett távolítani az 52 mikrométeresnél nagyobb tartományban 0,39% relatív térfogatot.



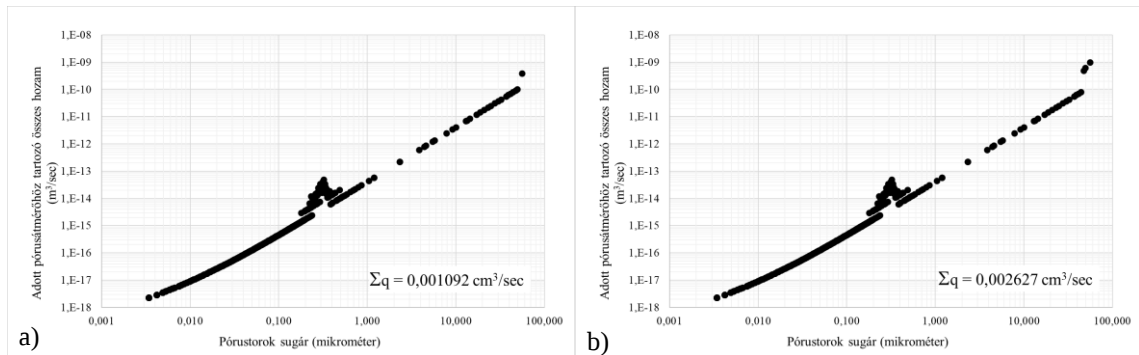
26. ábra. A Bék-5/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)



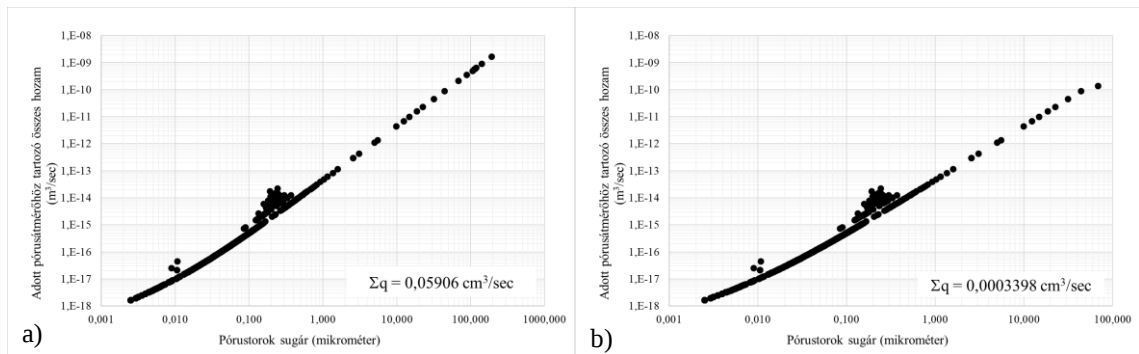
27. ábra. A Bék-5/3/5 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)



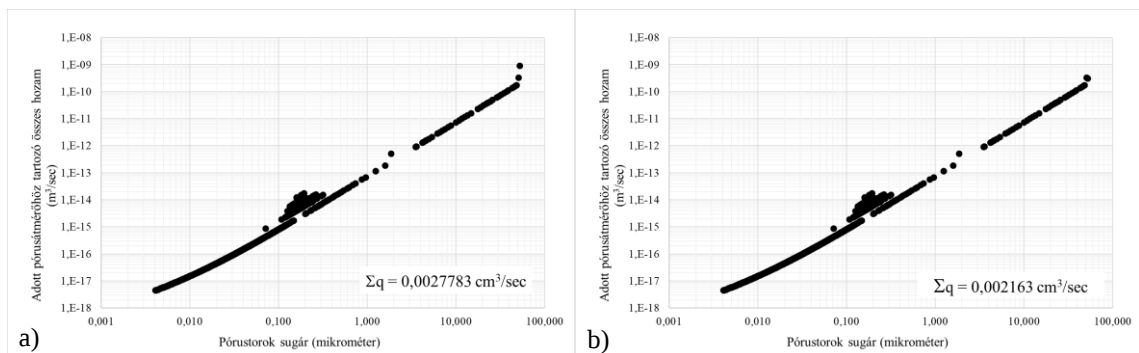
28. ábra. A Gyo-1/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)



29. ábra. A Gyo-1/5/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)



30. ábra. Köt-5/1/1 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)



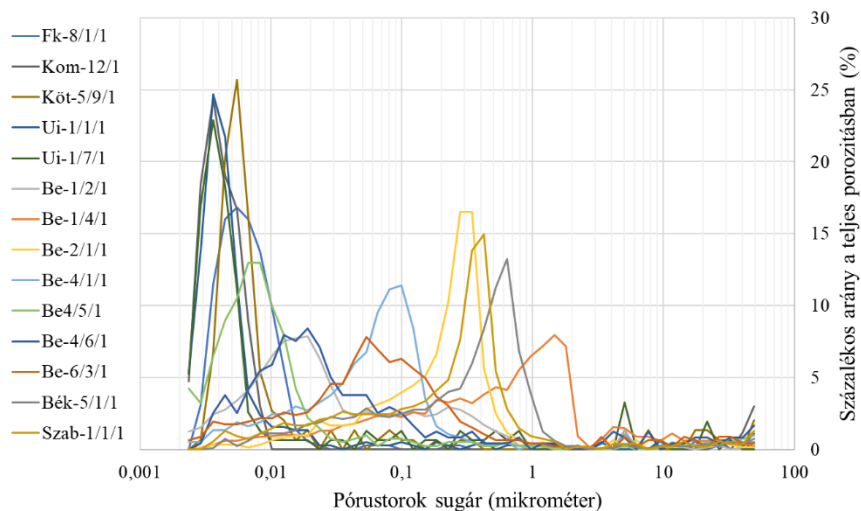
31. ábra. Köt-5/4/5 a) eredeti és b) illesztett szimulációs eredményei (sz.s.sz)

Fenti példák alapján elmondható, hogy a kapilláriskötegekből épített szintetikus mintákkal végzett szimulációk a pórustorok sugár eloszlás korrekciója nélkül is nagyon jó egyezést mutatnak a mérési eredményekkel. Az is látható, hogy a nagy- és kis minták nem

teljesen azonosak, így bizonyos esetekben hozzá kellett adni, más esetekben el kellett venni egészen kis mértékű pórustereket, hogy a kisminta HPMI adataival a sztenderd mintán mért eredményeket kapjam.

A fentebb bemutatott eljárás, megfelelő adatok birtokában, alkalmas szintetikus mérési eredmények előállítására. A számított térfogatáramok támogatják az egyéb petrofizikai mérési eredmények értelmezését és így a rendkívül kis permeabilitással rendelkező kőzetek megismerhetőségét.

A 32. ábrán – szemléltetés céljából - különböző tömött homokkő és márga minták pórustorok sugár eloszlásgörbéi láthatók. Jól megfigyelhető, hogy a teljes porozitás értéket nagyon eltérő alakú eloszlásgörbék határozzák meg.



32. ábra. Tömött homokkő és márga minták pórustorok sugár eloszlásgörbéi (sz.s.sz.)

Megfigyelhető továbbá, hogy a vizsgált minták meghatározó részénél a 2 és 100 mikron közötti tartományban eltérő mértékben és eloszlásban vannak értékek. Ez önmagában nem jelentene problémát, de ugyanazon mintapopuláción belül – például ugyanabból a magszakaszból származó minták esetén – kérdéseket vet fel. Kutatásaim során hosszasan foglalkoztam e jelenség magyarázatával.

A nem-hagyományos tárolókból származó kőzetmintákon elvégzett mérési program kivitelezése és az eredmények értékelése során a következőket tapasztaltam:

- Bizonyos, egyéb tulajdonságaikban nagy hasonlóságot mutató mintatesteken elvégzett mérések nagyon eltérő permeabilitás értékeket eredményeztek. Továbbá a higany penetrációs mérésekből származó pórustorok méret eloszlások meglepő különbségeket mutattak a 10 mikron feletti tartományokban.

- Több esetben a jelentős eltérések két mérőműszer „határánál” jelentkeztek. A Nano-PermTM mérési tartományán kívül estek a minták, a hagyományos eszköz pedig nagyságrendekkel jobb áteresztőképesség értéket mért.
- Számos esetben szemmel látható repedéseket lehetett megfigyelni a minták felületén.

A tapasztalatok alapján a következő megállapításokat tettem:

- Az áteresztőképesség mérések mellett vizsgálni kell - a pórustorok sugár eloszlás alapján - a mintatestben kialakuló áramlási rendszereket.
- A vizsgált magminták évtizedek óta a magraktárban voltak tárolva; ebből következően megsérülhettek. Az így keletkező, a közetre nem jellemző repedések azonban eltorzítják a mérési eredményeket.
- A mintakialakítás során szintén keletkezhetnek felületi sérülések (mikrorepedések), melyek jelentősen megnövelhetik a mért áteresztőképességet.

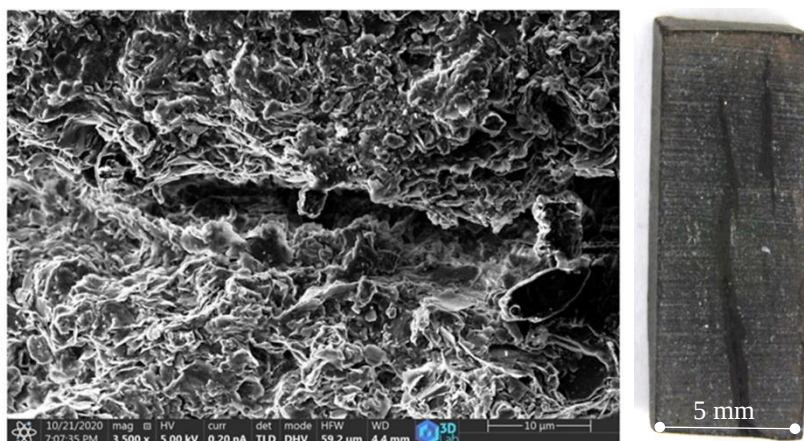
Az okok feltárásának és a megfelelő korrekció elvégzésének érdekében három egymás mellett párhuzamosan haladó kutatási programot indítottam el. A mikrorepedések és felületi sérülések detektálása érdekében elektron mikroszkópos (SEM) és computer tomográfiás (CT) vizsgálatok történtek. A CT vizsgálat, a rendelkezésre álló eszköz felbontóképességéből, valamint a kiértékelés elérhetőségének korlátaiból adódóan nem szolgáltatott használható eredményeket.

A mintatestben kialakuló áramlási rendszer vizsgálata a szintetikus minta elméleti modelljének alkalmazásával valósult meg. A mért permeabilitás értékek korrekcióját két eltérő okból lehet szükséges alkalmazni:

- a mintában kialakuló áramlástan rendszer nem Darcy jellegű, vagy
- a mintatestben, illetve annak felületén lévő mikrorepedések hatására jelentősen megnő a permeabilitás.

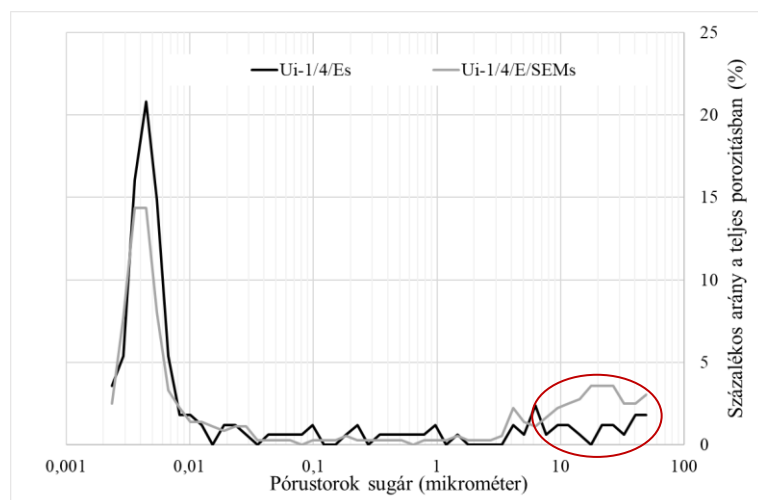
Mikroszkópos felvétel céljából az eredeti Ui-1/4 magból egy darab plug méretű (Ui-1/4) és két darab kis méretű (Ui-1/4s és Ui-1/4/SEM) mintatest került kialakításra.

A mikroszkópos felvételek szemléletesen igazolják a közetre nem jellemző felületi sérülésekből adódó mikrorepedések jelenlétét (33. ábra), melyekből kiindulva a minta felszínétől befelé haladva egy sérült zónát tételezek fel.



33. ábra. A közetre nem jellemző felületei sérülésekből adódó mikrorepedések (sz.s.sz.)

Feltételezésem szerint az Ui-1/4/SEM mintán, a mikroszkópos felvétel elkészítéséhez szükséges felületi kezelés további sérüléseket és így mikrorepedéseket hozott létre. A jelenség vizsgálatára mind az Ui-1/4s, mind az Ui-1/4/SEM mintatesteken HPMI mérések történtek. A 34. ábrán a 10 mikrométernél nagyobb tartományban, jól megfigyelhető a felületkezelt minta sérülésekből adódó megemelkedett pórustorok eloszlása.



34. ábra. Az eredeti és a felületkezelt minta pórustorok sugár eloszlásai (sz.s.sz.)

5. táblázat. A vizsgált minták besajtott fajlagos higany mennyisége és teljes porozitása (sz.s.sz.)

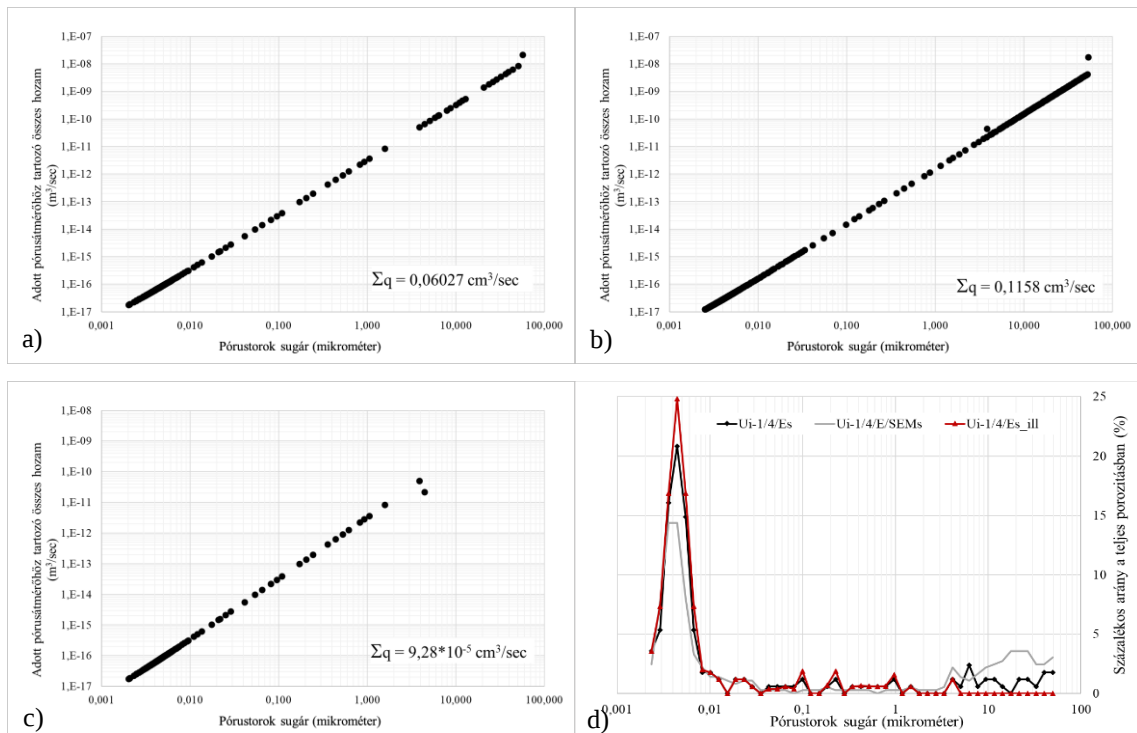
HPMI mérési eredmények	Ui-1/4s	Ui-1/4/SEM
Teljes besajtott mennyiség (cm ³ /g) :	0,01750	0,02030
Teljes porozitás (%) :	4,76570	5,30820

Az 5. táblázat a két mintára vonatkozólag két fontos információt mutat, a besajtott fajlagos higany mennyiség, illetve a teljes porozitás formájában, amely adatokból és a 33. ábrából levonható a az következtetés, hogy a mikroszkópos felvétel érdekében elvégzett felületkezelés tovább rontotta a felszínközeli sérült zónát.

Elvégeztem a szintetikus mintákon a térfogatáram meghatározását és összehasonlítottam a plug méretű mintán elvégzett Nano-PermTM mérés eredményével, illetve eltávolítva a legnagyobb pórusméreteket illesztettem a szimulációt a mérésre (6. táblázat és 34. ábra).

6. táblázat. A vizsgált minták mért és számított térfogatáramai (sz.s.sz.)

	Ui-1/4	Ui-1/4s	Ui-1/4/SEMs	Ui-1/4s
Mért és számított eredmények	Nano-Perm TM mérés	Számított, illesztés nélkül	Számított, illesztés nélkül	Számított, illesztéssel
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,00009015	0,06027827	0,11579600	0,00009281



35. ábra. a) az Ui-1/4s számított illesztés nélküli térfogatáram, b) az Ui-1/4/SEMs számított illesztés nélküli térfogatáram, c) az az Ui-1/4s számított térfogatáram illesztéssel, d) az „a) -b) -c)” számításokhoz használt pórusatok sugár eloszlások (sz.s.sz.)

Az eredmények egyértelműen alátámasztják azt a feltételezésemet, hogy a minták kialakítása, előkészítése és speciális mérésekhez szükséges felületi kezelése jelentős mértékben befolyásolják az 1, de leginkább a 10 mikrométer feletti tartományba eső pórusok relatív térfogatszázalékát. Ebből következően a szintetikus modell alkalmazásánál a felületi sérülések okozta jelenséggel különös körültekintéssel kell eljárni. Nyilvánvalóan a minta sérülékenysége elsősorban a közet reológiai tulajdonságaitól függ, ennek vizsgálata azonban nem képezi részét jelen kutatásnak.

4 TAPADÓVÍZ TELÍTETTSÉG MEGHATÁROZÁSA SZINTETIKUS MINTATEST ALKALMAZÁSÁVAL

A tapadó vagy másnéven maradó víztelítettség (S_{wi}) átfogó ismerete rendkívül lényeges a relatív permeabilitás előrejelzéséhez és a kezdeti szénhidrogén-készletek becsléséhez. Mennyiségének meghatározása kulcs fontosságú a rezervoárok petrofizikai értelmezésének vonatkozásában, hiszen a szénhidrogén előfordulások földtani vagyon meghatározásának alapvető paramétere, valamint fontos szerepet játszik a tároló termelés előrejelzésében is. Azonban a tömött kőzetek bonyolult pórusszerkezetei és azok kialakulási körülményeinek több tényezője megnehezíti a paraméter hagyományos módszerekkel történő pontos meghatározását az ilyen típusú tárolókban.

A tapadóvíz telítettség (S_{wi}) a kőzetszöveten adszorbeált, a mikro- és nanopórusokban valamint az úgynevezett „zsákutca” pórusokban rekedt víz térfogatának ($V_{S_{wi}}$) aránya a kőzet teljes pórustérfogatához (V_p) viszonyítva. (Cheng és szerzőtársai, 2017). Jelen disszertáció írásáig elvégzett kutatások alapján a tapadóvíz telítettség nukleáris mágneses magrezonancia (NMR) kísérletekből (Borgia és szerzőtársai 1996), súlymérési módszerből (Coskun és Wardlaw 1995; Taktak és szerzőtársai 2011), HPMI mérésekből (Bear és szerzőtársai, 2011; Zhang és szerzőtársai, 2017) valamint félig áteresztő membrános kapilláris nyomás módszerből (Coskun és Wardlaw, 1995; Taktak és szerzőtársai 2011) számítható vagy nyerhető ki. Ezeknek a módszereknek azonban vannak hátrányai. Az NMR adatok értelmezésének módszere a mért jel egy gyors (spin-spin, T_2) és egy lassú (spin-rács, T_1) relaxációs idővel rendelkező részre való felosztásán alapul. Az előbbi kötött vízként, az utóbbit szabad fluidumként értelmezik (Looyestijn 2001). Általában a $T_{2cutoff}$ értéket jelölik meg a mozgó és a maradó víz határaként az NMR T_2 eloszlásában. A különböző kiértékelési módszerekkel meghatározott $T_{2cutoff}$ értékek eltérő S_{wi} eredményekhez vezetnek az NMR kísérletek esetén. Az úgynevezett súlymérési vagy centrifugálás módszer hátránya, hogy a megfelelő centrifugális erő megválasztása rendkívül nehéz kis áteresztőképességű minták esetén. Hasonlóképpen nehéz az alkalmas kapilláris sugár alsó határának megválasztása, amely kulcsa a HPMI mérési eredményeinek sikeres kiértékelésének. A félig áteresztő membrán vizsgálat kivitelezési ideje túlságosan hosszú. Ezenkívül a szeparátor korlátozott teherbírása miatt ezzel a módszerrel nem lehet teljes kapilláris nyomásgörbét előállítani. A pórushálózat modellezése (Goral et al. 2018; Zhu et al. 2019) és más további módszerek (Remeczki F. és Horváth G. 2021) is használhatók a

S_{wi} kutatására azonban a fenti kísérleti módszerek egyike sem képes tapadó víztelítettség meghatározására in-situ körülmények között.

A korábbi tanulmányok szerzői azt javasolták, hogy az elméleti modellekben a tapadó vizet tekintsük egyszerűen egy adott kapilláris sugár méretnél kisebb pórusokban lévő víznek, illetve afölött vízfilmnek. A szubkapilláris pórusokban lévő víz nem képes a mozgásra, mert az áramlást biztosító nyomás nem tudja legyőzni a kapilláris erőt. Feltételezve, hogy a kőzet felszíne hidrofil, a vízfilm a molekuláris erők által a pórusfalon megkötött vízzel egyenlő. A vízréteg vastagsága nem állandó, amit főként a pórustorok sugara, a folyadék tulajdonságai, a nyomáskülönbség, a hőmérséklet és egyéb körülmények befolyásolnak (Li et al. 2015). A tömött rezervoárok porózus szerkezete rendkívül összetett in-situ körülmények között, különösen a heterogén rendszerekben. Civan (2001) rámutatott, hogy az egyes pórusokban, amelyek nem állnak összeköttetésben, köztük a kisebb, pórusszerkezet szempontjából sarkoknak és „zsákutcának” mutakozó mikro-nano méretű térszerűségekben lévő fluidumok megrekedhetnek az így keletkező áramlási szempontból elhalt vagy álló fluidumzónákban. Ennek következményeképpen az ilyen típusú tapadó víz, amelyet holt- vagy állóvíznek is neveznek, a pórusokban marad és áramlási körülmények között nem képes a mozgásra. Az elkerülő áramlási rendszer és a speciális pórusszerkezet miatt a víz tökéletesen mozdulatlan, nincs csatorna, amely lehetővé tenné az áramlást. Effektív feszültségállapot mellett azonban az említett rendszer kevésbé összenyomható. Yu-Liang Su és szerzőtársai (2020) tettek javaslatot egy új csőkapilláris modell bevezetésére, amely a fraktálelmélet alapján képes számítani a tapadóvíz telítettségét a holtvíz figyelembevételével.

Ismert, hogy a rendkívül tömör, gyakran sérült vagy repedezett/töredezett kőzetminták tapadóvíz telítettségének mérése komoly kihívást jelent a laboratóriumi gyakorlatban, sokszor nem is lehetséges. A Purcell által javasolt módszer (Purcell, W. R., 1949) általánosan elfogadott, különösen a hagyományos tárolók esetén, azonban, ahogyan az a korábbiakban bemutatásra kerül, számos kutatás foglalkozik más megközelítések alkalmazhatóságának feltárásával.

Purcell módszere a HPMI mérésből származó MICP adatokat használja fel, oly módon, hogy a higany besajtolás során felvett nyomásértékekből meghatározza adott kőzettulajdonságokat figyelembe véve a higany-levegő majd abból a víz-levegő rendszerre vonatkozó kapilláris nyomás értékeket minden pórustorok sugárhoz (13. egyenlet). A 14. összefüggéssel az előbb említett eredményekből számíthatók a tapadó víztelítettség értékek.

$$p_{c\ w/g} = \frac{\frac{2\sigma_{w/g} \cos \theta_{w/g}}{r}}{\frac{2\theta_{Hg/air} \cos \theta_{Hg/air}}{r}} * p_{c\ Hg/Air} = \frac{\sigma_{w/g} \cos \theta_{w/g}}{\theta_{Hg/air} \cos \theta_{Hg/air}} * p_{c\ Hg/air} \quad (13.)$$

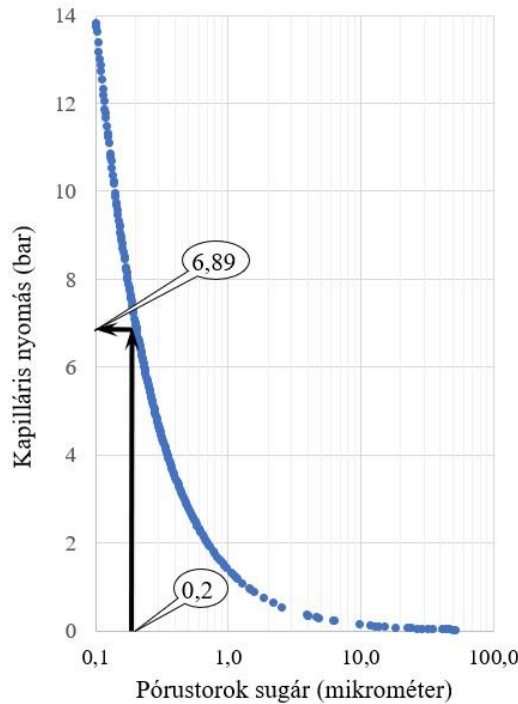
ahol, $p_{c\ w/g}$ a kapilláris nyomás víz-gáz rendszer esetén (bar), $\sigma_{w/g}$ a felületi feszültség víz-gáz rendszer esetén (Jm^{-2}), $\theta_{w/g}$ a nedvesítési szög víz-gáz rendszer esetén ($^{\circ}$), $p_{c\ Hg/air}$ a kapilláris nyomás higany-gáz rendszer esetén, $\theta_{Hg/air}$ a nedvesítési szög higany-gáz rendszer esetén.

$$S_{wi} = \sum_{j=2}^n \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{p_{c\ w/g}^2} \right)_{j-1} + \left(\frac{1}{p_{c\ w/g}^2} \right)_j \right] * (S_{wj} - S_{wj-1}) \quad (14.)$$

ahol, S_{wi} a teljes minta tapadó víztelítettség értéke, S_{wj} pedig a j -edik kapillárishoz számított tapadó víztelítettség érték.

A bemutatott egyenletekből látható, hogy a Purcell módszer a HPMI méréshez kialakított kis méretű mintatestre jellemző pórustorok méret eloszlást veszi alapul a 3. fejezetben leírtaknak megfelelően a kis mintatest sérüléseiből adódó torzítást és az abból következő hibákat is beleértve. Laboratóriumi gyakorlatunkban a Purcell módszer hátránya, hogy az alapul vett pórustorok méret eloszlásból a kiértékelő szubjektív módon távolítja el a véleménye szerint a közetre nem jellemző pórustorok sugarakat.

A szakirodalom tanulmányozása alapján arra jutottam, hogy érdemes a jelen értekezésben bemutatott kapilláris csököteg modell, „letisztított” és méréssel validált szintetikus modellmintatestjét alkalmazni a tapadóvíz telítettség meghatározására. Ezt a modellt alapul véve feltételezzük, hogy a tapadóvíz térfogatot a nano- és mikropórusokban lévő, valamint a nagyobb átmérőjű kapillárisok falán vízfilmgyűrű formájában elhelyezkedő víztérfogatok alkotják. Arra vonatkozólag, hogy mely kapilláris sugarat tekintjük a kétféle formában lévő víz határának a szakirodalmi normákat veszem alapul. Az ajánlás a gáz-víz rendszerben kialakuló kapilláris-nyomásgörbe egy bizonyos értékéhez tartozik. Általánosan elfogadott a 6,89 bar értékhez tartozó 0,2 mikrométeres, úgynevezett kritikus pórusugár, amely érték alatti sugárral rendelkező kapillárisokat teljesen (100 %-ban) víztelítettnek tekintjük. A kiválasztott határfeltétel magyarázata a közet-víz-levegő rendszerben kialakuló kapilláris erőviszonyokban rejlik. A 36. ábrán egy víz-levegő kapilláris nyomásgörbe látható a kritikus pórustorok sugár feltüntetésével.



36. ábra. Kapillaris nyomásgörbe levegő-víz rendszerben (sz.s.sz.)

Feltételezve, hogy a közet, vagyis a modellben a kapillaris kötegek csövecskéinek fala hidrofil, a víz pedig a falhoz tapad, a kritikus pórusugárnál nagyobb kapillaris-kötegek esetén meghatároztam az eltérő vastagságú vízfilm-gyűrűket. A vízzel 100 %-ig telített hengerek (kapillaris-kötegek) és a vízfilm-gyűrűk (melyek teljes hosszban végig húzódnak a kapillaris-kötegeken) térfogatainak összege adja a teljes mintában lévő víz térfogatát, melyből az „ S_{wi} ” számítható.

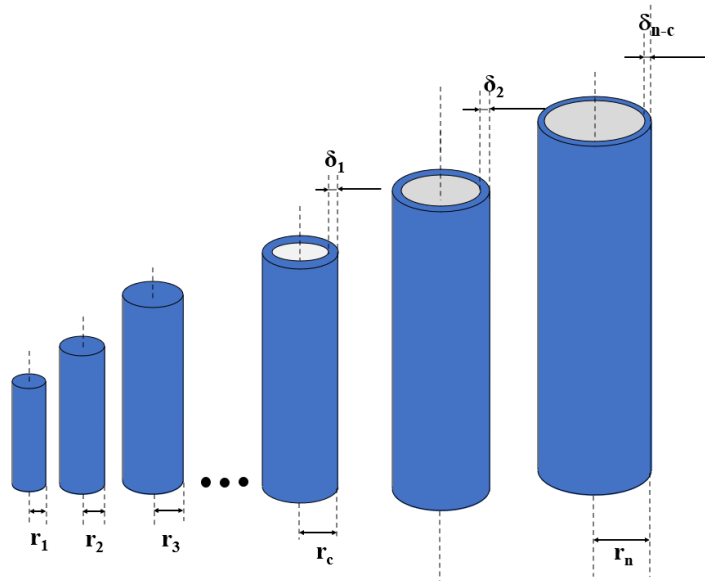
Korábbi vizsgálatok megerősítették, hogy a vízréteg vastagsága függ a kialakuló nyomásgradienstől, valamint a hőmérséklettől (*Mo és szerzőtársai, 2015; Tian és szerzőtársai, 2014, 2015; Yu és Cheng 2002; Yu és Li 2001*). A mikrocsoves kísérleteik alapján *Tian és szerzőtársai (2014)* a nyomásgradiens, a víz viszkozitása és a vízréteg vastagsága közötti összefüggést a következőképpen mutatta be:

$$\delta = \begin{cases} r * 0,25763e^{-0,261r}(dp)^{-0,419}\mu_w & (dp < 1 \text{ MPa/m}) \\ r * 0,25763e^{-0,261r}\mu_w & (dp > 1 \text{ MPa/m}) \end{cases} \quad (15.)$$

A víz viszkozitását elsősorban a hőmérséklet befolyásolja, amely a következőképpen fejezhető ki (*Cheng és szerzőtársai, 2017*):

$$\mu_w = 1,4e^{-0,0176 T} \quad (16.)$$

A 37. ábra a tapadóvíz telítettség meghatározásához felállított modellel szemlélteti.



37. ábra. A tapadóvíz telítettség meghatározásának elméleti modellje (sz.s.sz.)

Napjainkra több kutató számos publikációban megjelentette, hogy a 0,2 mikrométerben javasolt kritikus pórustorok sugár nem megfelelő a tömött kőzetek vonatkozásában. Javasolják, a 13,67 bar kapilláris nyomás értékhez tartozó 0,1 mikrométeres pórusugár használatát. Úgy vélem a javaslatuk nem elég meggyőző, azonban szeretném megjegyezni, hogy a szakirodalmi javaslatok közötti döntő állásfoglalás messze túlmutat jelen kutatásom céljain. Ebből kifolyólag minden vizsgált minta esetén mindkét kritikus érték vonatkozásában elvégeztem a számításokat. A tapadóvíz értékeire vonatkozó különbségek igen jelentősnek adódtak. A 0,1 mikrométeres pórusugár alkalmazásával a tapadóvíz telítettségek jóval kisebb értékűnek adódnak, amely a földtani vagyon meghatározásánál kedvezőbb környezetet teremt a koncesszió tulajdonosának.

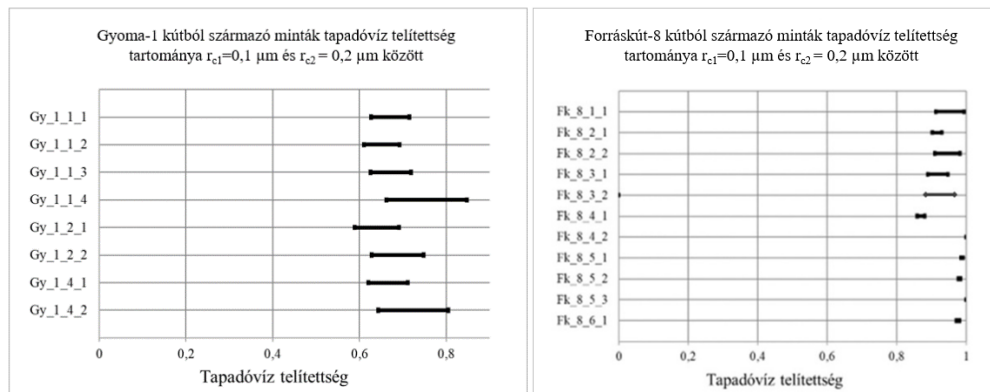
A modellt alkalmazva, az egyenértékű kapillárisok átmérő szerint növekvő sorozatának vonatkozásában egy kitüntetett (kritikus r_c) pórustorok sugarat olyan maximum értéknek véve, amely sugár alatti kapillárisok teljesen víztelítettek; továbbá a kritikus sugárnál nagyobb kapillárisok vonatkozásában a tapadóvíz jelenlétét az azok falán kialakuló vízfilm-gyűrűkkel (δ) figyelembe véve, a modellminta tapadóvíz telítettsége az alábbi (17.) összefüggéssel számítható:

$$S_{wi} = 1 - \frac{\sum_{j=c}^n (r_j - \delta_{j-c+1})^2 \pi L N_{Cj}}{\sum_{j=1}^n r_j^2 \pi L N_{Cj}} \quad (17.)$$

ahol S_{wi} a minta tapadóvíz telítettsége, r_j az adott kapilláris sugara (m), N_C adott kapilláris átmérőhöz tartozó kötegben lévő csövecskék száma, L a minta hossza (m).

A modellel a víz viszkozitás értékén keresztül (16. egyenlet és G. melléklet) vizsgálható a tapadóvíz telítettség nyomás- és hőmérsékletfüggése is.

A 38. ábra, két példán keresztül mutatja be a számított víztelítettségeket homokkő (Gyoma-1) és márga (Forráskút-8) formációkból származó minták esetén (a részletesebb adatokat a H. melléklet tartalmazza). A kisebb értékek rendre a 0,1, a nagyobbak a 0,2 mikrométeres kritikus pórusugárhoz tartoznak.



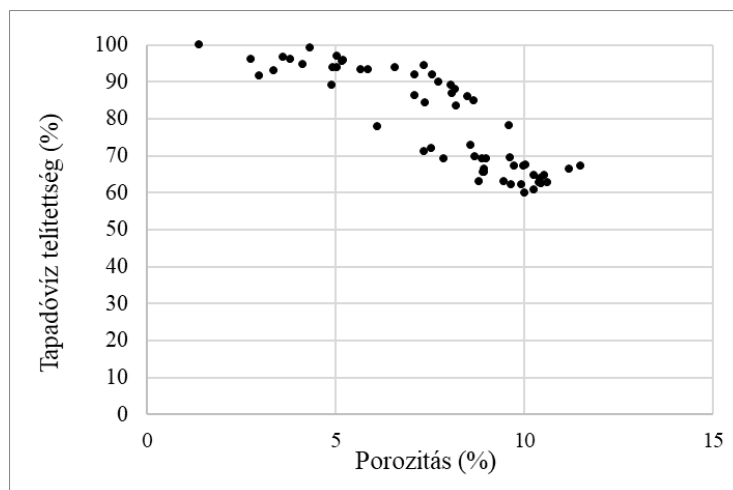
38. ábra. Szintetikus minta modellel számított tapadóvíz telítettségek homokkő és márga minták esetén (sz.s.sz)

A 38. ábra alapján megállapítható, hogy különösen a tömött homokkővek esetén igen jelentős a különbség a két eltérő kritikus pórusugárhoz tartozó tapadóvíz telítettség érték között. Az ipari gyakorlat számára különösen fontos, hogy a szakemberek megfelelő körültekintéssel járjanak el annak megítélésben, hogy milyen kritikus pórusugár érték mellett legyen meghatározva a tapadóvíz telítettség.

4.1 HPMI adatokra épülő petrofizikai jellemző becslése

A következőkben a hagyományos és az újszerű megközelítések kombinációjával született, úgynevezett hibrid, eredményeimet mutatom be. Mint azt a 2. és 4. fejezetekben bemutattam széles mintapopuláción meghatároztam hagyományos módon a küszöbnyomást, valamint a 0,2 mikrométernél nagyobb pórustorok sugár értékekhez tartozó porozitás hányadosokat, a modellmintatest alkalmazásával pedig kiszámítottam a tapadóvíz telítettség értékeket a Beru-1, -4, -6, Békés-5, Forráskút-8, Gyoma-1, Hunya-1, Köröstarcsa-5 és Szabadkígyós-1 jelű mélyfúrások esetén (Remeczki F. 2020d; 2021a).

Az adatok közötti korrelációkat vizsgálva, a porozitás abszolút értéke és – a 0,2 mikrométerhez tartozó – tapadóvíz telítettség között az alábbi ábrán látható, nem túlságosan erős korrelációs eredményeket kaptam (39. ábra).

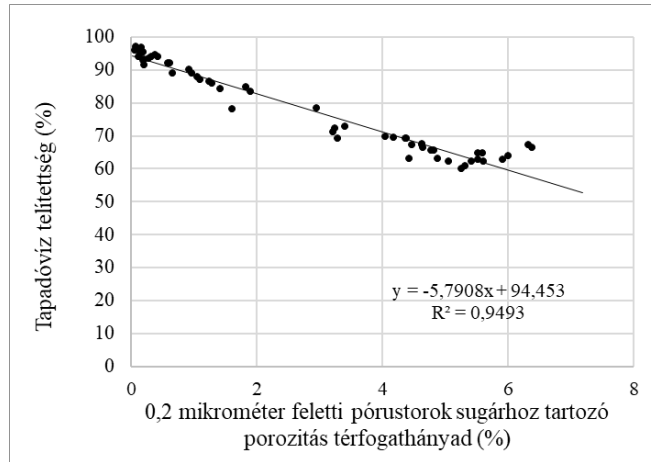


39. ábra. A porozitás abszolút értéke és a tapadóvíz telítettség kapcsolata (sz.s.sz.)

Erős kapcsolatot találtam azonban az általam bevezetett úgynevezett redukált porozitás értékek és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek között (40. ábra és I. melléklet I.); a kapcsolatot a 18. összefüggés írja le:

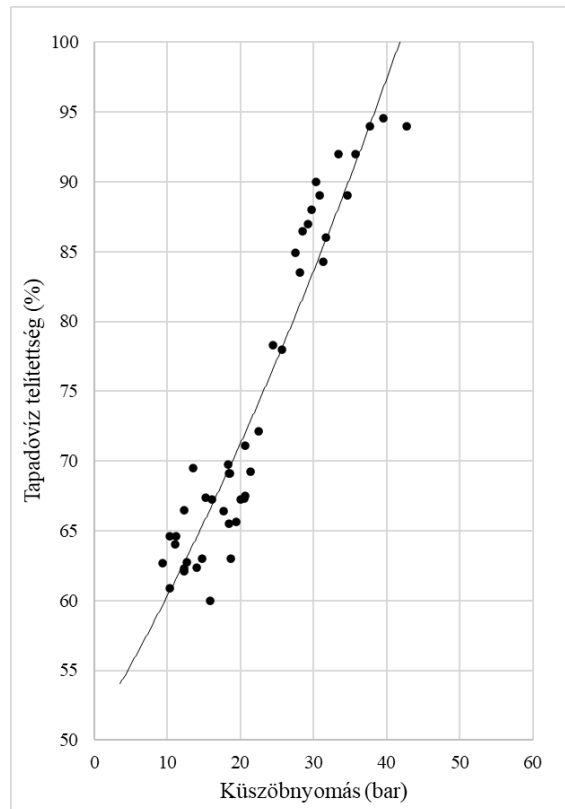
$$S_{wi0,2} = -5,7908 \phi_{R0,2} + 94,453 \quad R^2 = 0,9493 \quad (18.)$$

A 18. összefüggés alkalmazásával a vizsgált területeken mind a Szolnoki Homokkő, mind az Abonyi Formációba tartozó aleurolit minták tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal meghatározható, melyhez elegendő a kis méretű mintatesteken elvégzett HPMT mérési adatainak rendelkezésre állása.



40. ábra. A redukált porozitás és a tapadóvíz telítettség kapcsolata (sz.s.sz.)

A Szolnoki tömött Homokkövek küszöbnyomásainak és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek kapcsolatát a 41. ábra (I. melléklet II.) mutatja.



41. ábra. A Szolnoki tömött Homokkövek küszöbnyomásainak és tapadóvíz telítettségeinek kapcsolata (sz.s.sz.)

A korrelációt a következő, 19. összefüggés kielégítő pontossággal írja le:

$$S_{wi0,2} = 0,0071 p_{th}^2 + 0,8809 p_{th} + 50,806 \quad R^2 = 0,9076 \quad (19.)$$

A 19. összefüggés egy, a korrelációt jól leíró másodfokú polinom, amely alkalmazásával a kapilláris nyomásgörbékből félgrafikus úton meghatározó küszöbnyomás ismeretében a vizsgált kutak vonatkozásában a tömött homokkövek tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal számítható.

5 SZINTETIKUS MINTATEST LÁTSZÓLAGOS ÁTERESZTŐKÉPESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA

Az előző fejezetekben (3. és 4. fejezetek) bemutattam, hogy az általam felállított szintetikus minta modell alkalmas a mintában kialakuló áramlási típusok és az átáramló térfogatáram meghatározására, valamint a tapadóvíz telítettség számítására.

Visszatérve a modell elméleti alapjaihoz az összenyomható gázok Darcy-egyenleten alapuló térfogati fluxusát a 20. egyenlet írja le

$$\frac{q}{A} = - \left(\frac{k_D \rho_{avg}}{\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{L} \quad (20.)$$

ahol q a térfogatáram, k_D a Darcy-permeabilitás, A az áramlás keresztmetszeti felülete, L a közeg hossza. A fenti formájú egyenlet alapvetően hagyományos rendszerek esetén alkalmazható, azaz abban az esetben amikor a pórustorok méret eloszlás tartománya a 10 és több 100 μm között van. Hasonló elven felépítve a 8. egyenletből a nanopórusú rendszerekre vonatkozó térfogati gázáram meghatározására a 21. egyenlet alkalmazható:

$$\frac{q}{A} = - \left(\frac{2rM}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + F \frac{r^2}{8\mu} \right) \frac{(p_2 - p_1)}{L} \quad (21.)$$

A pórusméret és/vagy a nyomás értékeinek növelésével a 21. egyenlet a Darcy egyenletre egyszerűsödik.

Megfigyelve a 20. és 21. egyenletek alakját jól látható, hogy bevezethető az úgynevezett látszólagos permeabilitás k_{app} (apparent permeability) paraméter:

$$k_{app} = \frac{2r\mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} + F \frac{r^2}{8} \quad (22.)$$

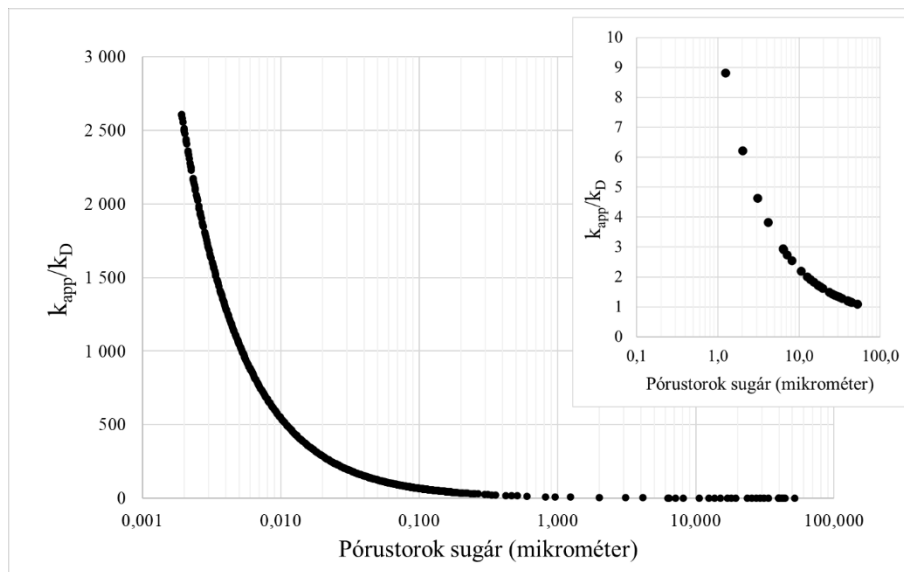
Az egyenlet megadja az adott r sugarú kapilláris adott gázra vonatkozó effektív látszólagos áteresztőképességét, mely mind formájában mind mértékegységében megegyezik a Darcy permeabilitással és annyival több annál, hogy magában foglalja a Knudsen típusú diffúziós áramlás hatását is.

A látszólagos és a Darcy permeabilitás hányadosának ábrázolása alkalmas a Knudsen típusú diffúziós áramlás okozta többlet gázáramlás részarányának elemzésére (18. egyenlet).

$$\frac{k_{app}}{k_D} = \frac{2\mu M}{3 \times 10^3 RT \rho_{avg}} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5} \frac{8}{r} + \left\{ 1 + \left(\frac{8\pi RT}{M} \right)^{0.5} \frac{\mu}{p_{avg} r} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \right\} \quad (23.)$$

Megvizsgálva a 23. egyenletet megállapítható, hogy minél kisebb a póruscsatorna sugara és/vagy az áramlás átlagos nyomása annál nagyobb lesz a különbség a k_{app} látszólagos és k_D Darcy permeabilitás között. Az összefüggés egyben azt is mutatja, hogy a Knudsen diffúzió aránya a gáz teljes tömegáramához viszonyítva kisebb nyomásokon jelentősebb. A k_{app} és k_D hányadosa megközelíti az egyet, ha vagy a pórusnyomás vagy a hőmérséklet megnő. A jelenség magyarázatát a Knudsen szám nyomás - és hőmérséklet függésében találjuk.

Az előbb említett jelenséget a „Bék-5/3/5s” azonosítójú minta szintetikus modelljén keresztül mutatom be. A 23. egyenlet alapján meghatároztam a szintetikus minta egyes kapillárisaiban kialakuló látszólagos és Darcy permeabilitások hányadosát.

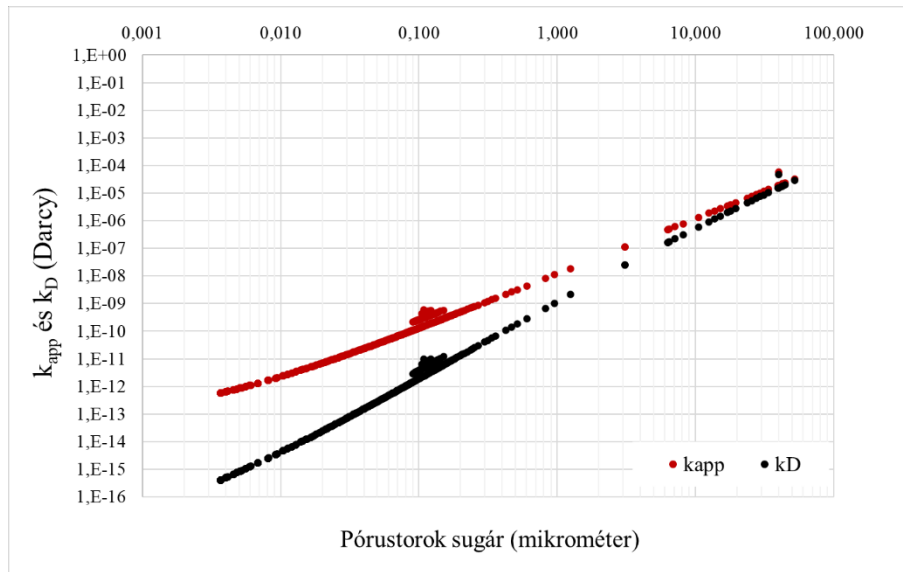


42. ábra. Bék-5/3/5 azonosítójú kis méretű mintatestben kialakuló k_{app}/k_D arány a pórustorok méret függvényében laboratóriumi mérési körülmények között (sz.s.sz.)

A 42. ábrán jól megfigyelhető, hogy amennyiben laboratóriumi körülményeket állítunk be a szimulációban, akkor már a legnagyobb 60 mikrométeres pórustorok sugárnál a látszólagos és Darcy permeabilitások hányadosa nagyobb lesz egynél. Ez egyrészt azt jelenti, hogy a mintában nincs Darcy jellegű áramlás, másrészt azt, hogy minél kisebb pórustorok sugár tartomány határozza meg a minta permeabilitásának nagyságrendjét annál jelentősebb a diffúzió hatása, vagyis a látszólagos permeabilitás számszerű értéke kezdetben többszöröse, majd több százszorosa, sőt ezerszerese a Darcy permeabilitásnak, hangsúlyozva, hogy ez az egyes pórustorok sugarakhoz tartozó kapillárisok esetén értendő.

A 20., 22. és 23. egyenletek segítségével eltérő sugarú csövekben meghatározható mind a látszólagos, mind a Darcy féle permeabilitás, mindezt a szintetikus modellbe helyezve, vagyis figyelembe véve a csőkezekben lévő kapilláris csövecskék számát,

kiszámíthatók az általam súlyozott permeabilitásnak nevezett értékek a szintetikus minta minden létező pórustorok sugarához (43. ábra).



43. ábra. Bék-5/3/5 azonosítójú szintetikus minta súlyozott látszólagos és Darcy permeabilitásai (sz.s.sz.)

Tekintettel arra, hogy a modellben kapilláris kötegek építik fel a szintetikus minta pórusterét a kapilláriscsövenként meghatározott permeabilitások párhuzamos kapcsolásával a minta látszólagos (k_{app}) és Darcy permeabilitása (k_D) meghatározható az alábbi összefüggéssel (24. és 25. egyenletek):

$$k_{appmintá} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{appj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi} \quad (24.)$$

$$k_{Dmintá} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{Dj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi} \quad (25.)$$

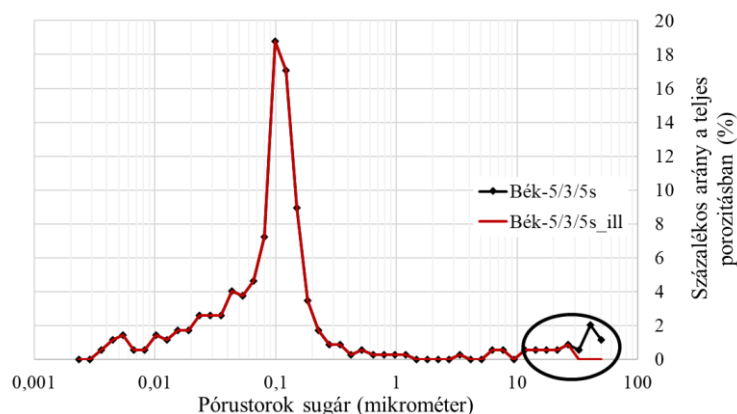
A 24. és 25. egyenleteket a Bék-5/3/5s illesztés nélküli pórustorok sugár méret eloszláson alapuló szintetikus mintatestre alkalmazva a 7. táblázatban látható, adott térfogatáramhoz és nyomáskülönbséghez tartozó, gázra vonatkozó effektív permeabilitás eredményeket kapjuk, szemben a „Mérés” oszlopban található Ultra Perm 610DTM eszköz mérési eredményeivel. A 7. táblázat alapján megállapítható, hogy a szintetikus modell számított eredménye némileg nagyobb értékeket ad, mint a mérési eredmények.

7. táblázat. Bék-5/3/5s minta mérési, illetve szimulációs eredményei (sz.s.sz.)

	Mérés	Szimuláció
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,00087	0,006474
k_{app} (mikroDarcy)		63,9656
k_D (mikroDarcy)	6,3000	14,2666

Gyakorlati szempontok alapján ez a különbség azonban elhanyagolható, a mérés és a szimulációs eredmények egyezése megfelelő. A különbség okairól már korábban leírtam, hogy kisebb részben a reprezentativitás, nagyobb részben a kis méretű mintatest felületi roncsolódása okozza. Ezen utóbbi tényező eliminálása az illesztéssel valósítható meg.

Az illesztés elvégzése során ebben az esetben a mérési körülményeken kívül nem csak a térfogatáram, hanem a permeabilitás értékek egyezése is feltétel. Mindez egy újabb iterációval történő kiegészítést igényel. Az Ultra Perm 610DTM eszköz kiértékelése egyszerű gázra vonatkozó Darcy egyenletet alkalmaz, ebből kifolyólag a permeabilitás egyezése, k_D -re történő illesztéssel könnyen megvalósítható. A Bék-5/3/5 azonosítójú minta levégeléséből származó kis méretű (Bék-5/3/5s) mintatest pórustorok méret eloszlás görbáját, valamint annak mérésre illesztett változatát a 44. ábra mutatja



44. ábra. Bék-5/3/5s mintatest pórustorok méret eloszlás görbéje, illetve annak mérésre illesztett változata (sz.s.sz.)

A 44. ábrán megfigyelhető, hogy k_D -re történő megfelelő illesztés érdekében a 31 mikrométernél nagyobb sugarú kapilláris kötegeket el kellett távolítani.

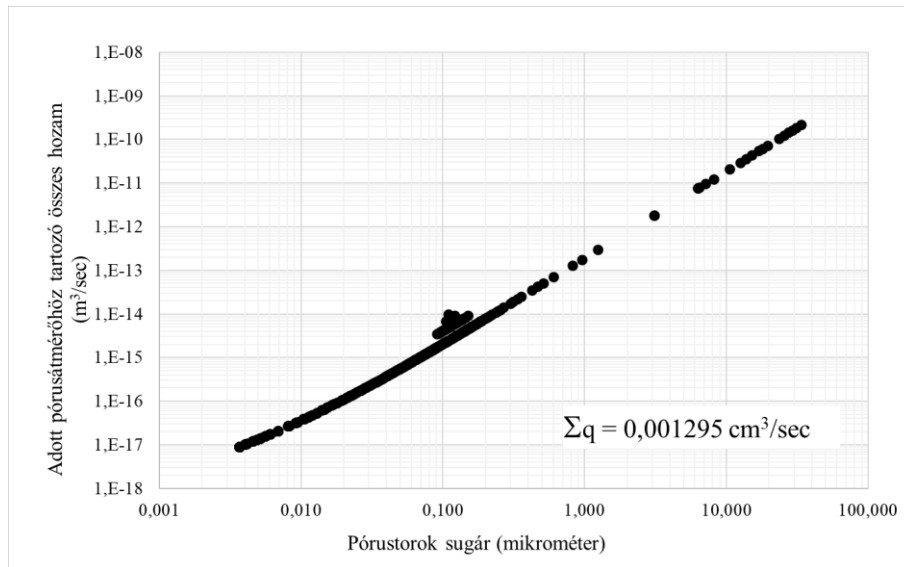
A 8. táblázatban, illetve a 45. és 46. ábrákon bemutatott eredmények vonatkozásában elmondható, hogy a kapilláris csőmodell egyszerűségének ellenére a szimuláció eredményei mind gyakorlati értékelés mind tudományos elemzés szempontjából megfelelő pontosságúak.

8. táblázat. A Bék-5/3/5 minta mérési eredményei és a k_D -re is illesztett szimuláció eredményei (sz.s.sz.)

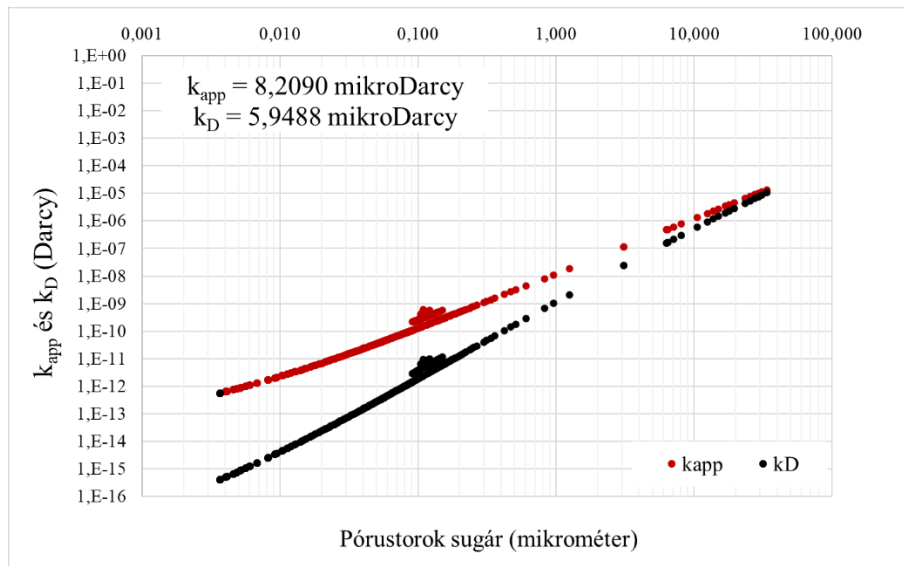
	Mérés	Illesztett szimuláció
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,00087	0,00130
k_{app} (mikroDarcy)		8,20900
k_D (mikroDarcy)	6,3	5,94886

Fontos hangsúlyozni, hogy a szóban forgó tartományok a térfogatáram és a permeabilitás vonatkozásában is rendkívül kicsik, az ilyen tulajdonságú közetekben történő

transzportfolyamatok tanulmányozása experimentálisan komoly kihívást jelent a laboratóriumoknak.



45. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó és összesített térfogatárama (sz.s.sz.)



46. ábra. A Bék-5/3/5s szintetikus minta kapilláris kötegeihez tartozó és összesített látszólagos- és Darcy permeabilitása (sz.s.sz.)

Fontos tehát, hogy a laboratóriumi gyakorlat számára olyan egyszerűen és gyorsan kezelhető eszközöket adjunk, amelyek csökkenthetik a vizsgálatok mérési idejét és a humánerőforrás igényt.

A szintetikus mintákkal végzett vizsgálatot a következőkben mutatom be. Visszatérve a 3. fejezetben bemutatott mintákhoz, ugyanezen minták esetében meghatároztam az áteresztőképességeket.

Az Ultra-Perm 610DTM eszköz mérési eredményi alapján rendre kiviteleztem a szintetikus mintával végzett szimulációkat, először az eredeti HPMI mérésből származó

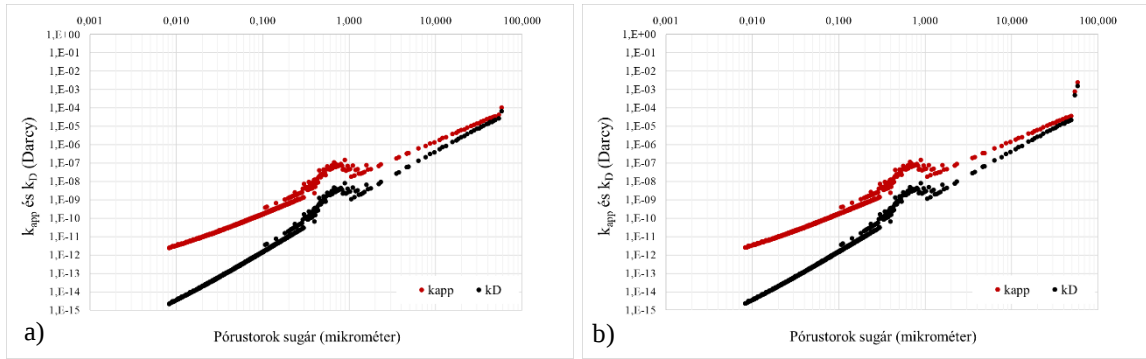
nyers adatokkal majd ezt követően a térfogatáramra és az eszközzel mért Darcy permeabilitásra illesztve. A permeabilitásra történő illesztés egy újabb iteráció bevezetésével jár.

A hat mintára elvégzett számítások eredményeit összefoglalóan a 9. táblázatban mutatom be.

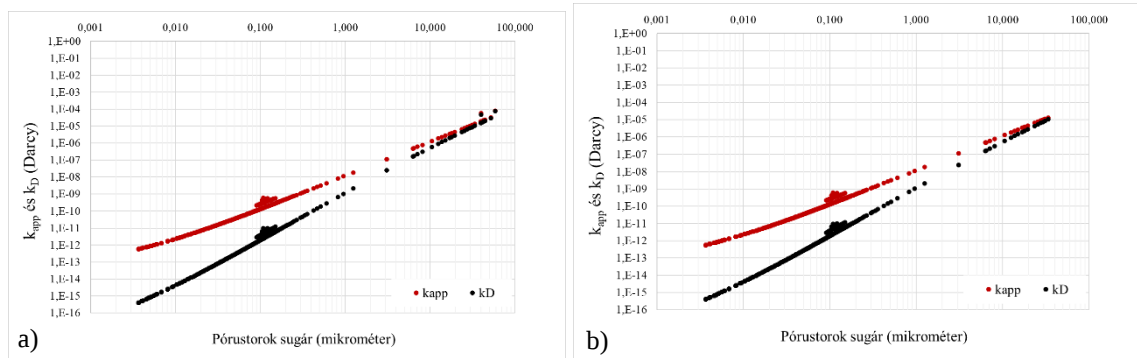
9. táblázat. Az elvégzett számítások összefoglaló eredményei (sz.s.sz)

	Ultra-Perm 610D TM mérés	HPMI adatokkal végzett szimuláció illesztés nélkül	HPMI adatokkal végzett szimuláció illesztéssel	Megjegyzés
	Bék-5/1/1	Bék-5/1/1s	Bék-5/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0089	0,001360	0,010120	Az 58 mikrométeres kapilláris méretből 6%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során. Vélhetően mikropedés van a plug méretű mintában.
k _{app} (mikroDarcy)		35,2825	405,9911	
k _D (mikroDarcy)	296,0000	21,6171	263,0148	
	Bék-5/3/5	Bék-5/3/5s	Bék-5/3/5s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0008	0,005684	0,001295	Az illesztés során el kellett távolítani a 33 mikrométeresnél nagyobb tartományban 3,09% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)		29,9563	8,2090	
k _D (mikroDarcy)	6,3000	26,4046	5,9489	
	Gyo-1/1/1	Gyo-1/1/1s	Gyo-1/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0012	0,000409	0,001258	Az 55 mikrométeres kapilláris méretből 0,87%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során.
k _{app} (mikroDarcy)		30,7687	62,9374	
k _D (mikroDarcy)	38,2000	18,1658	37,9683	
	Gyo-1/5/1	Gyo-1/5/1s	Gyo-1/5/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0027	0,001092	0,002627	Az 55 mikrométeres kapilláris méretből 0,92%-os, a 49-esből 1%-os ill. a 47-esből is 1%-os relatív térfogattal kellett növelni az illesztés során.
k _{app} (mikroDarcy)		51,4448	144,3771	
k _D (mikroDarcy)	85,8000	30,2933	86,3286	
	Köt-5/1/1	Köt-5/1/1s	Köt-5/1/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,0007	0,059063	0,000340	Az illesztés során el kellett távolítani a 68-624 mikrométeres tartományban 1,55% relatív térfogatot. Repedés a kis méretű mintában.
k _{app} (mikroDarcy)		12851,3207	31,4034	
k _D (mikroDarcy)	19,8000	14159,6704	20,8247	
	Köt-5/4/5	Köt-5/4/5s	Köt-5/4/5s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)	0,001	0,002778	0,002163	Az illesztés során el kellett távolítani az 52 mikrométeresnél nagyobb tartományban 0,39% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)		29,3667	20,4164	
k _D (mikroDarcy)	14,5000	21,2702	14,5482	

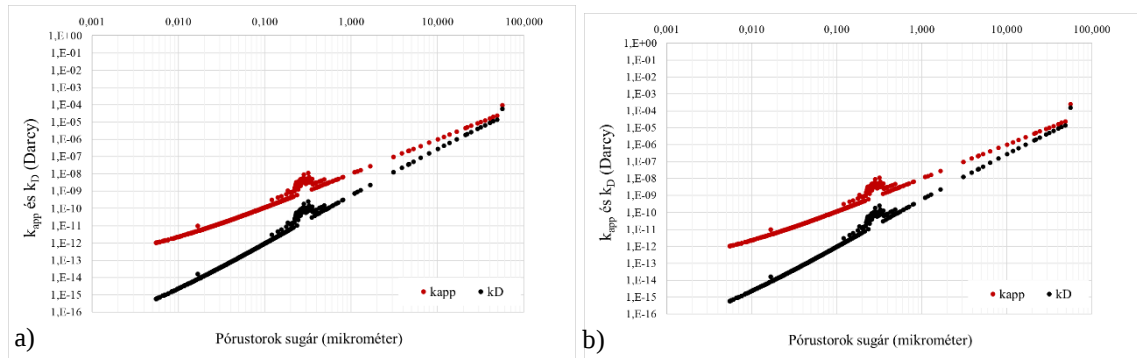
Az eredmények grafikus ábrázolása jóval szemléletesebb, az egymás mellett elhelyezett ábrák jól látszik egyrészt, hogy mely esetben kellett hozzátenni vagy elvenni a pórustérfogatból a mérési eredménnyel történő egyezés érdekében, másrészt, hogy ezt milyen mértékben volt szükséges megtenni. A következőkben a szintetikus mintákkal végzett modellezés során eredményül kapott kapilláris kötegekhez tartozó, úgynevezett súlyozott látszólagos- és Darcy permeabilitásokat mutatom be (47-52. ábrák).



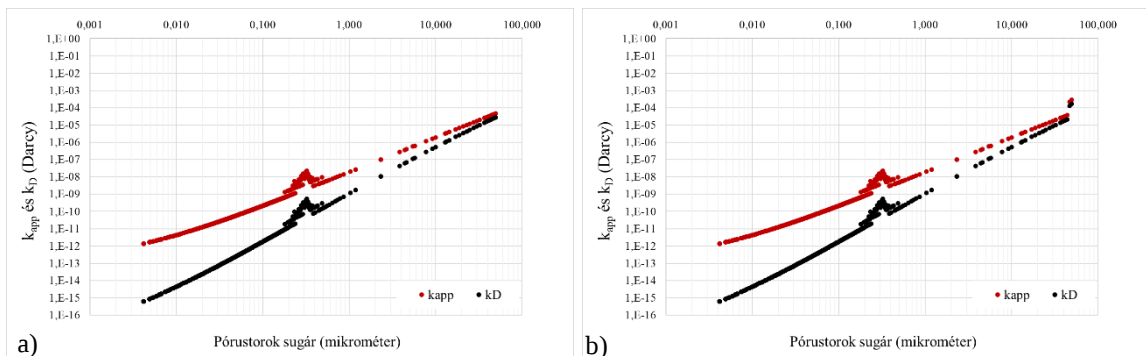
47. ábra. Bék-5/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)



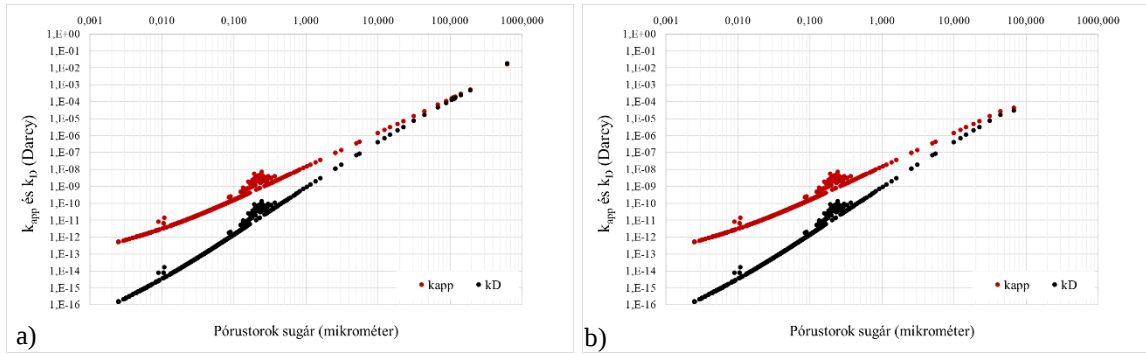
48. ábra. Bék-5/3/5s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)



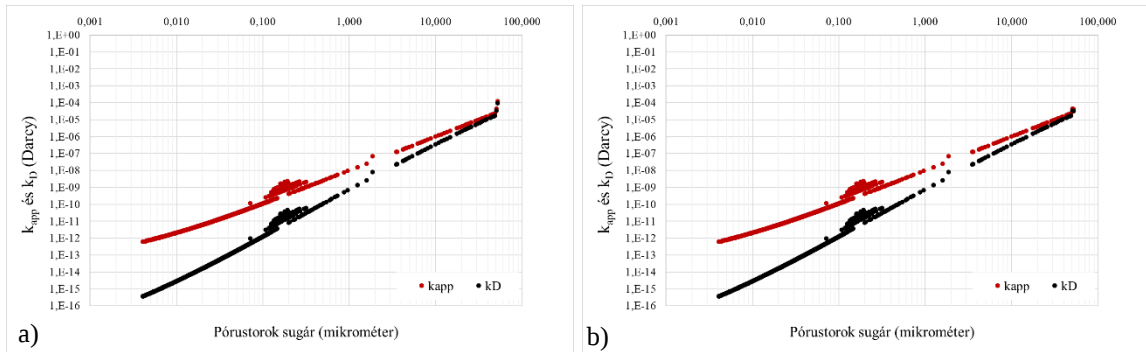
49. ábra. Gyo-1/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)



50. ábra. Gyo-1/5/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)



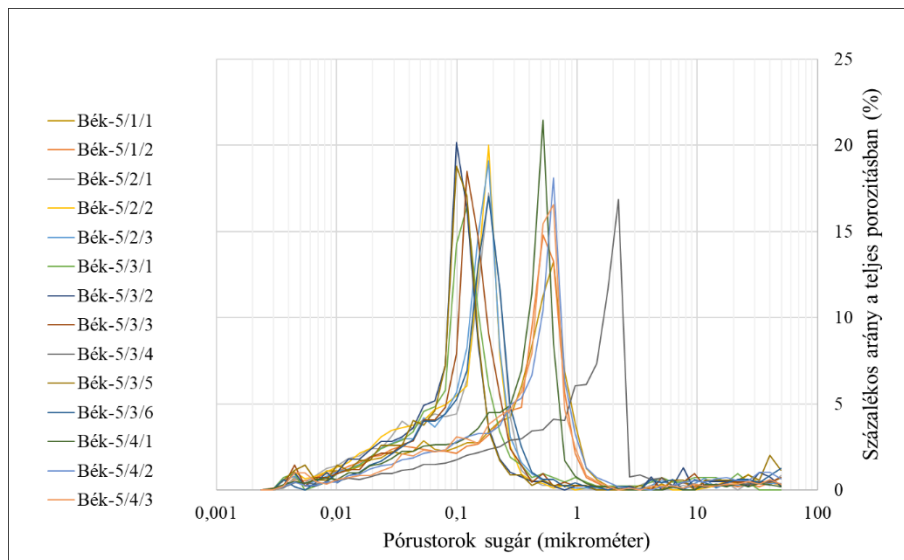
51. ábra. Köt-5/1/1s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)



52. ábra. Köt-5/4/5s szintetikus minta modellezésének eredményei; a) illesztés nélkül, b) illesztéssel (sz.s.sz.)

A 9. táblázat és a 47.-52. ábrák alapján megállapítható, hogy a szintetikus mintamodell nagy pontossággal írja le a sztenderd méretű minták viselkedését.

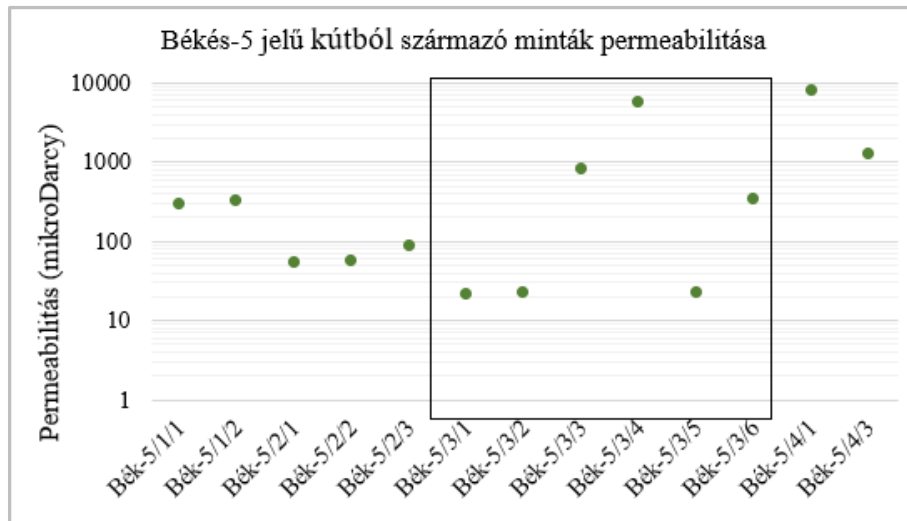
A következőkben egy, a szintetikus mintákkal megoldható, a hiányzó permeabilitás adatok helyettesítését célzó vizsgálatomat mutatom be. A lenti ábra a Békés-5 jelű kútból származó minták pórustorok méret eloszlásait mutatja (53. ábra).



53. ábra. A Békés-5 jelű kútból származó minták pórustorok méret eloszlásai (sz.s.sz.)

A Bék-5/3 sorozat mintáinak bemérési permeabilitás értékeit mutatja az 54. ábra (kivételt képez az előzőekben tárgyalt Bék-5/3/5 mintára vonatkozó Ultra-Perm 610D™

mérési eredmény, amely nem szerepel ezen az ábrán). Megfigyelhető, hogy a 3/1-es, 3/2-es és 3/5-es indexelésű teljes szelvényű magból kialakított minták permeabilitásai, hasonlóan a pórustorok méret eloszlásaikhoz, azonos nagyságrendbe esnek, míg a 3/3-as, 3/4-es és 3/6-os indexelésű teljes szelvényű magból kialakított minták permeabilitása nagyságrendi szórást mutat.



54. ábra. A Bék-5/3 sorozat mintáinak bemérési permeabilitás értékei (sz.s.sz.)

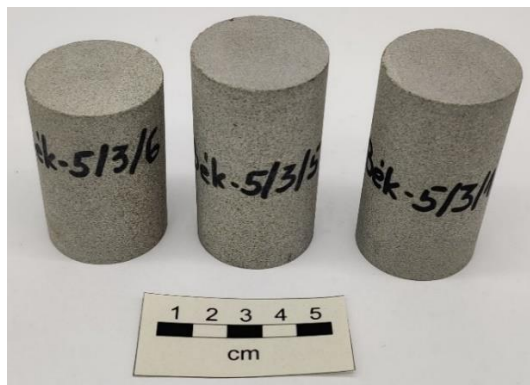
Tovább vizsgálva a Békés-5 jelű kútból származó tömött homokkő minták mérési körülményeit és adatait egy érdekes jelenséget figyeltem meg. Az 55. ábra, a 17. ábrától kissé eltérő módon, a 3. számú magfúrásból származó ép kőzetet és az abból kialakított mintákat mutatja be, melynek célja a homogenitás érzékeltetése.

Az ugyanezekhez a mintákhoz tartozó kis mintatesteken elvégzett higanypenetrációs mérések, a vizsgálat szempontjából legjellemzőbb tulajdonságainak (teljes porozitás, teljes besajtolt higany mennyiség, teljes fajlagos felület és az átlagos pórus sugár) eredményeit szemléletesen az 56. ábra mutatja be, amely megegyezik a 18. ábrával, ám relevanciája miatt szükségesnek ítélem meg azt újra feltüntetni. Megállapítható, hogy a minták nagyon erős hasonlóságot mutatnak, amely nem indokolja a permeabilitások ilyen nagymértékű eltéréseit.

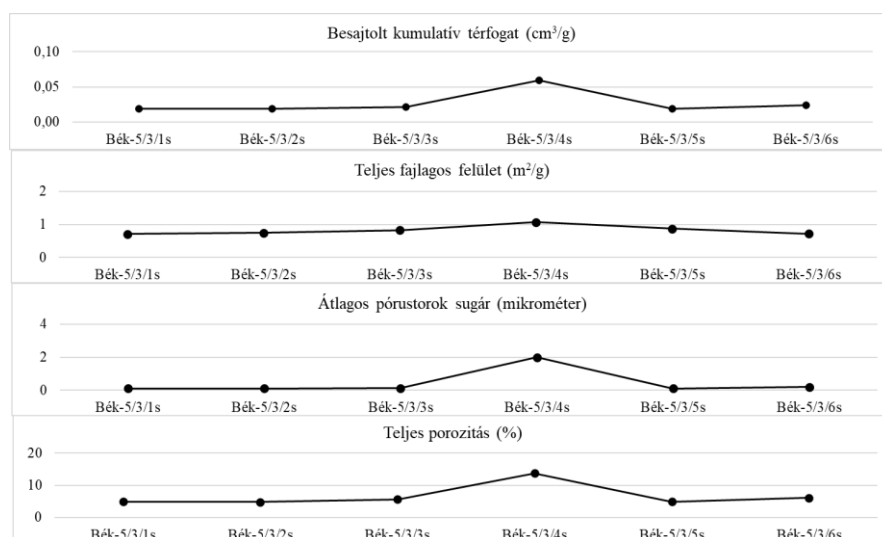
Az 56. ábra jól szemlélteti, hogy az egymás közvetlen közeléből kialakított kis méretű mintatestek HPMI mérésből származó petrofizikai tulajdonságai, egyetlen kivétellel, rendkívüli hasonlóságot mutatnak. Feltételezhető tehát, hogy a nagy hasonlóságot mutató pórustér-rendszerrel rendelkező mintatestek áteresztőképesség értékeinek is hasonlóan kellene lennie.

Fontos hangsúlyozni, hogy a modellezés során ezen a ponton van lehetőség a mikrorepedések eliminálására is. A kőzetmátrixra nem jellemző mikrorepedéseket el lehet,

illetve javasolt távolítani a modellmintából (Remeczki F. 2020b; Remeczki F. és szerzőtársai 2020). Ezt a folyamatot a Bék-5/3/5s szintetikus mintára az előzőekben mutattam be.

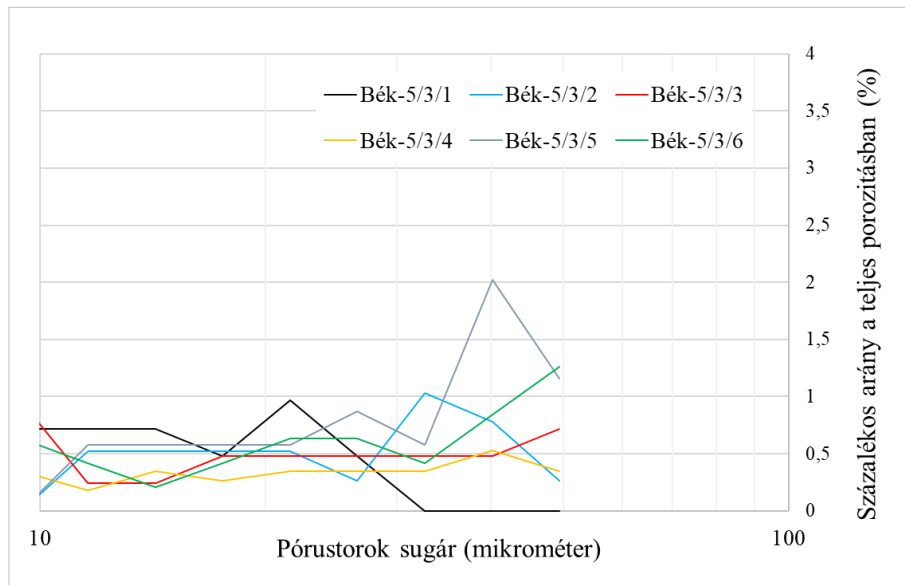


55. ábra. A 3. számú magfűrásból származó kőzet és az abból kialakított minták (sz.s.sz.)



56. ábra. A Bék-5/3 sorozat mintáinak petrofizikai tulajdonságai (sz.s.sz.)

Az eljárás minden esetben nagy körütekintést igényel, melynek során kellő alapossggal kell vizsgálni és összehasonlítani az ugyanabból a szakaszból származó minták pórusméret eloszlás hisztogramjait. Az 57. ábra a Bék-5/3/1-től /6-ig minták pórustorok sugár eloszlásainak 10 mikron feletti tartományait mutatja be. Minden minta esetén vannak értékek a 10 mikron feletti tartományban, a Bék-5/3/5 mintát vizsgálva egészen magas értékek is megfigyelhetők, melyeket nem volt célszerű beépíteni a szintetikus minta modellbe.

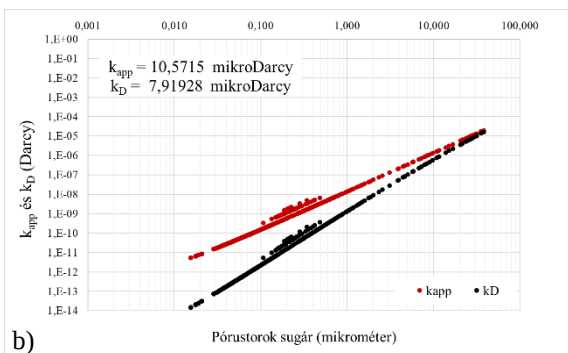
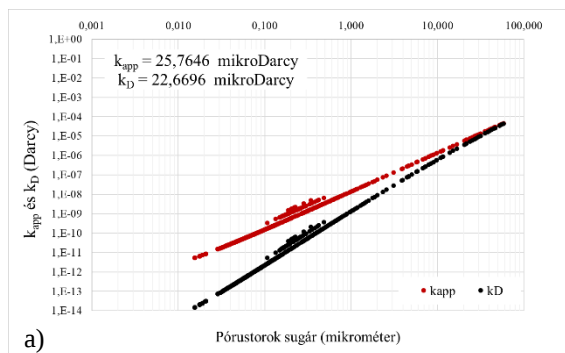


57. ábra. Bék-5/3/1-6 minták pórustorok sugár eloszlásai az 10 mikrométernél nagyobb tartományban (sz.s.sz.)

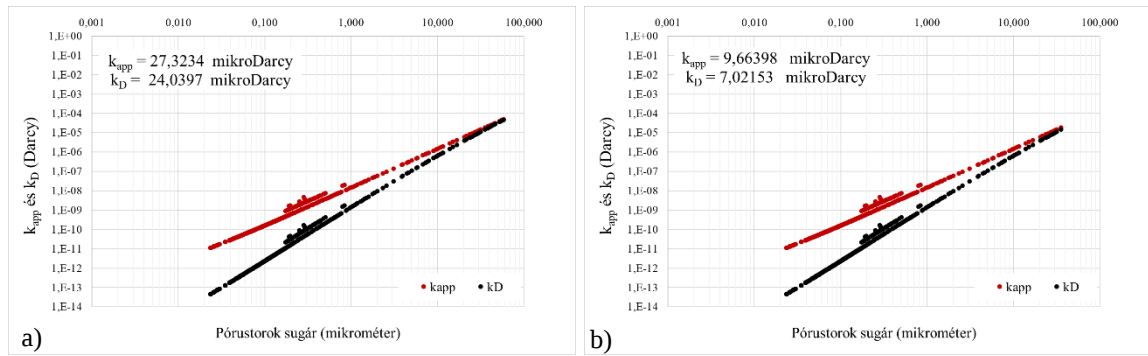
Kiindulva a Bék-5/3/5 mintán elvégzett Ultra-Perm 610DTM eszközön mért adatokból, amelyre illesztve az előzőekben már meghatároztam a látszólagos és a Darcy permeabilitást, továbbá abból az 56. ábrán is látható tényből, hogy a hat mintából ötnek a HPMI mérésből származtatható petrofizikai tulajdonságai nagyon hasonlóak, arra a következtetésre jutottam, hogy célszerű a Bék-5/3/5 szintetikus mintán elvégzett illesztést alkalmazni a többi minta szintetikus mintáján is. Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy minden mintánál eltávolítottam a 37 mikrométernél nagyobb kapillárisokat a szintetikus modellből és a Bék-5/3/5 minta Ultra-Perm 610DTM eszközön mért effektív áteresztőképesség mérésének körülményeit állítottam be. Az elvégzett illesztés nélküli és illesztett szimulációk eredményeit a 10. táblázatban foglalom össze, illetve az 58 – 63. ábrákon mutatom be.

10. táblázat. Mért adatok valamint illesztés nélküli és illesztett szimulációk eredményei (sz.s.sz.)

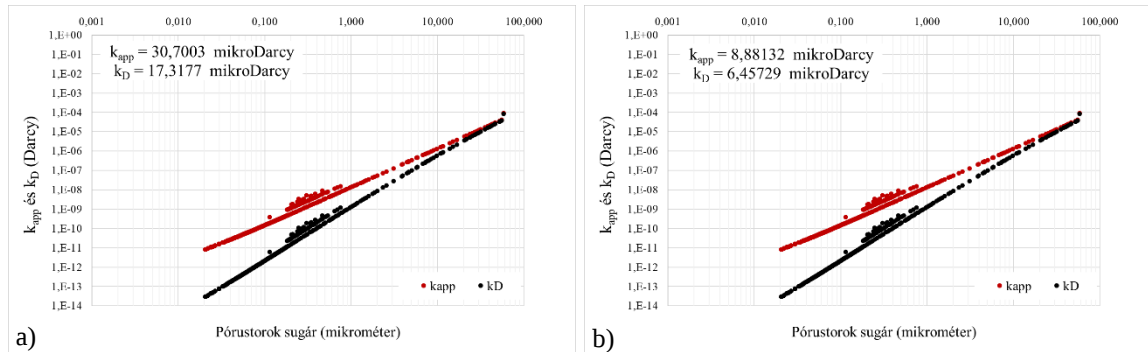
	N ₂ permeaméter	Ultra-Perm 610D™ permeaméter	HPMI adatokkal végzett szimuláció illesztés nélkül	HPMI adatokkal végzett szimuláció illesztéssel	Megjegyzés
	Bék-5/3/1	Bék-5/3/1	Bék-5/3/1s	Bék-5/3/1s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)			0,006095	0,002357	Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 1,68% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			25,7646	10,5715	
k _D (mikroDarcy)	20,8000		17,5303	7,9193	
	Bék-5/3/2	Bék-5/3/2	Bék-5/3/2s	Bék-5/3/2s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)			0,006473	0,002169	Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 2,08% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			27,3234	9,6640	
k _D (mikroDarcy)	21,4000		24,0397	7,0215	
	Bék-5/3/3	Bék-5/3/3	Bék-5/3/3s	Bék-5/3/3s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)			0,006674	0,001982	Repedés van a plug méretű mintában. Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 2,16% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			30,7003	8,8813	
k _D (mikroDarcy)	783,0000		17,3177	6,4573	
	Bék-5/3/4	Bék-5/3/4	Bék-5/3/4s	Bék-5/3/4s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)			0,002288	0,000785	Repedés van a plug méretű mintában. Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 0,72% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			9,5456	3,3799	
k _D (mikroDarcy)	5650,0000		8,3977	2,4543	
	Bék-5/3/5	Bék-5/3/5	Bék-5/3/5s	Bék-5/3/5s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)		0,0008	0,005684	0,001295	Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 3,19% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			29,9563	8,2090	
k _D (mikroDarcy)	21,8	6,3	26,4046	5,9489	
	Bék-5/3/6	Bék-5/3/6	Bék-5/3/6s	Bék-5/3/6s	
Térfogatáram (cm ³ /sec)			0,006115	0,001939	Repedés van a plug méretű mintában. Az illesztés során el kellett távolítani a 37 mikrométeresnél nagyobb tartományban 1,89% relatív térfogatot.
k _{app} (mikroDarcy)			27,6056	8,7481	
k _D (mikroDarcy)	340		24,5476	6,3542	



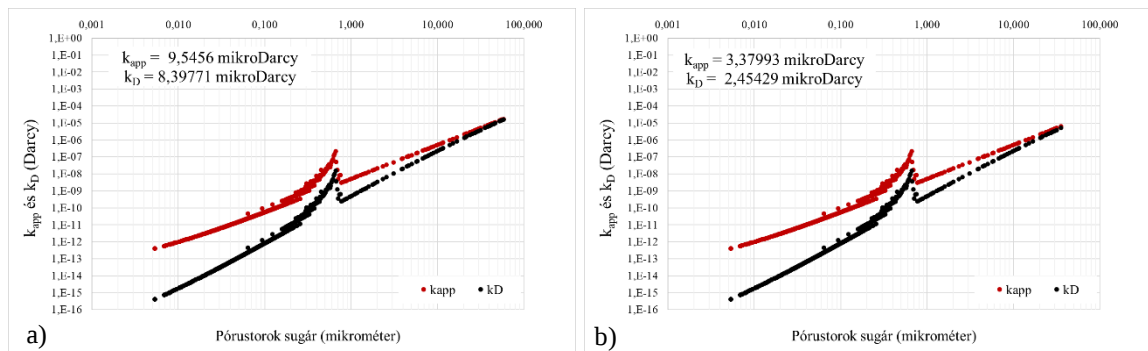
58. ábra. Bék-5/3/1s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)



59. ábra. Bék-5/3/2s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)



60. ábra. Bék-5/3/3s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)

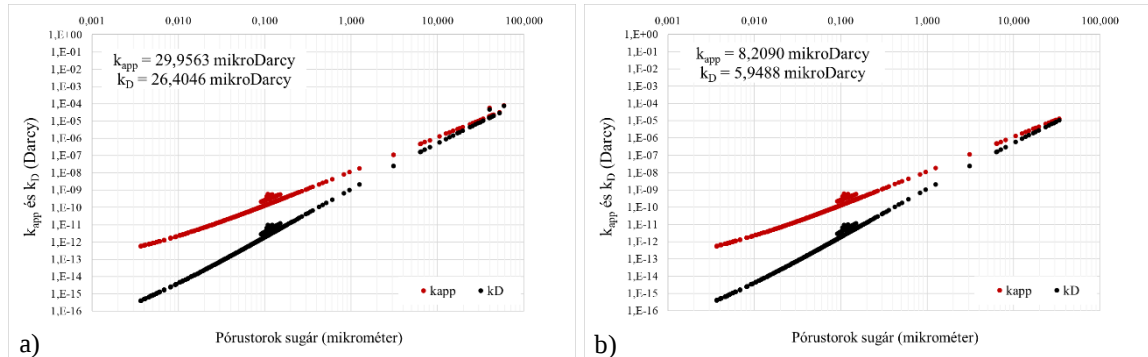


61. ábra. Bék-5/3/4s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)

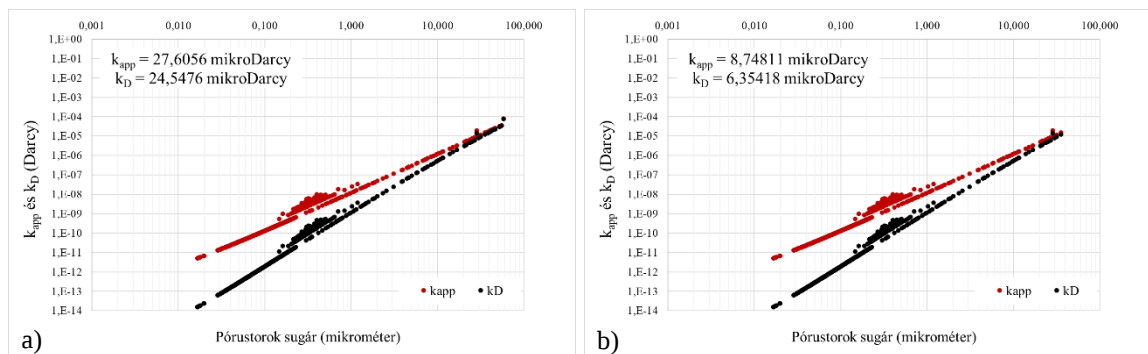
A fenti, 61. ábrán láthatók a Bék-5/3/4s minta kapilláris kötegenkénti permeabilitás eloszlásai a pórustorok sugár függvényében. Megfigyelhető, hogy a szóban forgó minta eloszlásgörbéi teljesen más lefutást adnak, mint a sorozat többi mintájának eloszlásai. Természetesen ez az eltérés a pórustorok eloszlás görbén is jól megfigyelhető (57. ábra). A szimulációs eloszlásgörbén kiemelkedő csúcs alapján gondolhatnánk, hogy talán nagyobb permeabilitással rendelkezik, mint a sorozat többi tagja. A jelenségre nem véletlenül ennél az esetről adok magyarázatot, hiszen ebben a környezetben könnyebb átlátni az okokat.

Megfigyelve az ábrázolás függőleges tengelyét látható, hogy a tengely mértékegysége „Darcy”. Több oka is van annak, hogy miért választottam ezt a mértékegységet. Egyrészt már a bevezetőben is említettem, hogy egészen kis permeabilitás értékekről van szó, sokszor a mértékegységek rövidített prefixumai megtévesztőek

lehetnek és/vagy a szövegszerkesztés vagy a használt szoftverek korlátaiból adódóan nem mindig van lehetőség görög betűket alkalmazni. Ebből következik, hogy a mikroDarcy nagyságrendben lévő értékeket, félreérthetetlenül a 10^{-6} Darcy környékén/felett találjuk az ábrákon. Megfigyelhető továbbá az is, hogy a görbék viszonylag meredeken haladnak az egyre kisebb permeabilitás értékek felé a pórustorok sugár csökkenésével. Az „a)” jelű ábrákon a 60 mikrométeres pórustorok sugártól a 10 mikrométeres pórustorok sugárig haladva „visszafelé” a görbéken az egyes kapillaris kötegekhez tartozó pontok két nagyságrenddel csökkennek, még tovább haladva az 1 mikrométeres pórustorok sugárig további két-három nagyságrendbeli csökkenés következik be a permeabilitás értékekben. Ebből következik, hogy mind a szintetikus minta, mind a valódi mintatest eredő áteresztőképességének nagyságrendjét a mintában lévő legnagyobb kapillarisok határozzák meg. Visszatérve tehát a Bék-5/3/4s minta ábrájára, ahol a mérésre történő illesztés alapja a fekete pontokkal jelzett k_D -ban meghatározott permeabilitás érték volt, elmondható, hogy a minta permeabilitásának nagyságrendjét meghatározó kapillaris sugarakhoz képest a csúcs három-négy nagyságrenddel lejjebb jelentkezik. Ez a permeabilitás számértékében a második-harmadik tizedesjegyben látszódik csak meg, ebből kifolyólag a hatása elhanyagolható.



62. ábra. Bék-5/3/5s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)



63. ábra. Bék-5/3/6s illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációk eredményei (sz.s.sz.)

Az eredmények alapján elmondható, hogy a Bék-5/3 sorozat mérési problémáit a szintetikus modellezéssel vizsgálni lehetett és a modellezés alátámasztotta azt a feltételezést, hogy a sorozat elemei nagy hasonlóságot mutatnak a térfogatáram és a permeabilitás vonatkozásában is (11. táblázat).

11. táblázat. A Bék-5/3 sorozat mért adatai, valamint számított térfogatáram és permeabilitás értékei (sz.s.sz)

Minta azonosító	Bék-5/3/1s	Bék-5/3/2s	Bék-5/3/3s	Bék-5/3/4s	Bék-5/3/5s	Bék-5/3/6s
Besajtott kumulatív térfogat (cm ³ /g)	0,0188	0,0187	0,0217	0,0595	0,0190	0,0241
Teljes fajlagos felület (m ² /g)	0,7120	0,7430	0,8260	1,0650	0,8720	0,7180
Átlagos pórustorok sugár (mikrométer)	0,1172	0,1091	0,1300	1,9896	0,1078	0,1969
Teljes porozitás (%)	4,9008	4,8309	5,6532	13,7295	4,9354	6,1125
Számított térfogatáram (cm ³ /s)	0,0024	0,0022	0,0020	0,0008	0,0013	0,0019
Permeabilitás (k _D) (mikroDracy)	7,9193	7,0215	6,4573	2,4543	5,9489	6,3542

A modellezés körültekintő alkalmazásával a repedéssel rendelkező és így nagyon eltérő mért eredményeket szolgáltató sztenderd plug méretű minták permeabilitása meghatározható.

Az 58. – 63. ábrák tanulmányozása alapján elmondható, hogy a kapilláris csőköteg modell nagyon jól leírja az eredeti sztenderd plug méretű minta mérés közbeni viselkedését. Az eredmények már az illesztés nélküli adatsorral is nagyságrendben a mérési eredményekkel egyeznek, elenyésző korrekcióval pedig rendkívüli pontossággal közelítik a mérési eredményeket.

6 MÁRGA KÖZETEK ÁTERESZTŐKÉPESSÉGÉNEK ÚJSZERŰ MEGKÖZELÍTÉSE – KÉREG-MODELL

A márga és mészmárga típusú kőzetek esetén is előállítottam a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásgörbékből a szintetikus mintatesteket. Elvégezve a szimulációkat egy különös jelenséget figyeltem meg. Ellentétben a homokkövek szimulációs kísérleteivel, ahol adott esetben minimális korrekciókat kellett alkalmazni, a márga minták mért és illesztés nélkül számított tömegáramai nagyon nagy mértékben tértek el egymástól.

Ahogy korábban (3. fejezet) leírtam a HPMI méréshez kialakított kis mintatest nem minden esetben reprezentatív teljes mértékben a nagy (sztenderd plug méretű) mintatestre, amelyen a permeabilitás mérés történik. A homokkövek esetén, amennyiben szükséges, minimális korrekcióval az illesztés elvégezhető. A márgák kapcsán azonban olyan nagy mértékűnek adódtak az eltérések, hogy arra magyarázatot kellett találni.

Az alábbiakban három szemléletes példán keresztül mutatom be a jelenséget. Az első kiválasztott mintacsoport a Hunya-1 jelű mélyfúrásból származik a magminta a Hu-1/12 sorozatából kialakított 6 darab sztenderd méretű, illetve 6 kis méretű mintából áll. Besorolását tekintve Endrődi Márga minták.



64. ábra. A Hu-1/12 sorozatából kialakított minták és a kifűrés utáni maradék kőzet (sz.s.sz.)

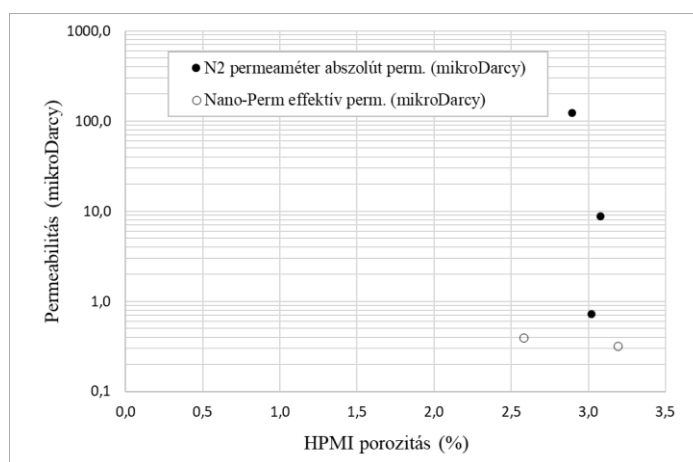
A 64. ábrán a Hu-1/12 teljes szelvényű mag minta kialakítás utáni maradványa, valamint a mérési program befejezését követően megmaradt minták láthatók. A 2-es minta

repedést tartalmaz, a 3-as és 5-ös minták közetreológiai vizsgálat miatt megsemmisültek, a 4-es félbe vágott mintán proppant-benyomódás vizsgálat elvégzésére került sor.

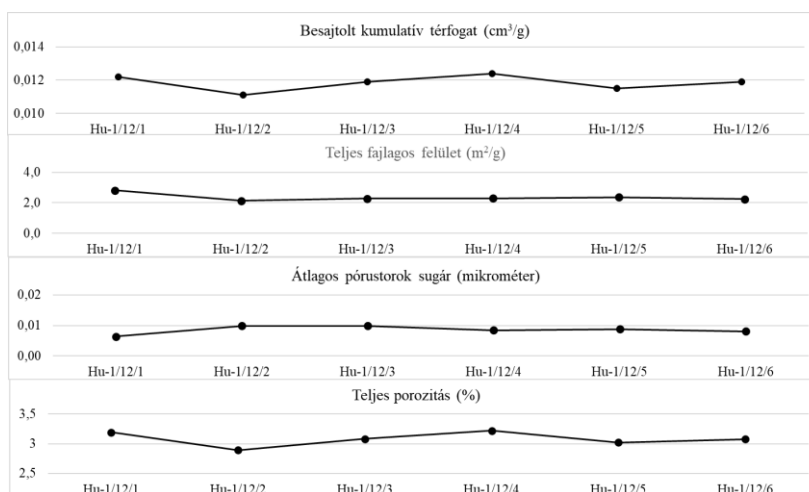
A minták alapvető mérési adatait a 12. táblázat tartalmazza.

12. táblázat. A Hu-1/12 sorozat mérési adatai (sz.s.sz.)

Minta azonosító	He porozitás (%)	Nano-Perm TM effektív perm. (mikroDarcy)	N ₂ permeaméter abszolút perm. (mikroDarcy)	Minta azonosító	HPMI porozitás (%)
Hu-1/12/1	3,409	0,31852	—	Hu-1/12/1s	3,193
Hu-1/12/2	3,098	—	122,30	Hu-1/12/2s	2,894
Hu-1/12/3	3,619	—	8,726	Hu-1/12/3s	3,080
Hu-1/12/4	3,098	—	—	Hu-1/12/4s	3,222
Hu-1/12/5	3,467	—	0,730	Hu-1/12/5s	3,022
Hu-1/12/6	3,396	0,39045	—	Hu-1/12/6s	3,079

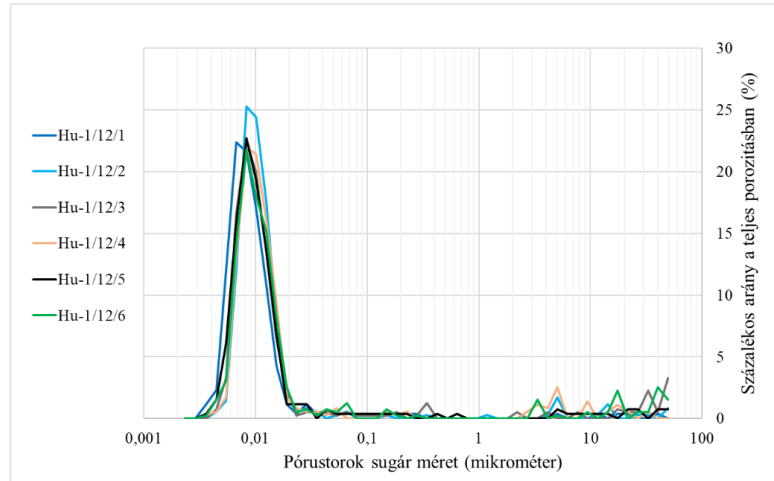


65. ábra. A Hu-1/12 sorozat mért permeabilitás értékei (sz.s.sz.)



66. ábra. A Hu-1/12 sorozat mért jellemzői (sz.s.sz.)

A Hu-1/12 sorozat mintáinak HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásgörbéit a 67. ábra mutatja, melyről megállapítható, hogy a minták szinte teljesen megegyező eloszlást mutatnak.



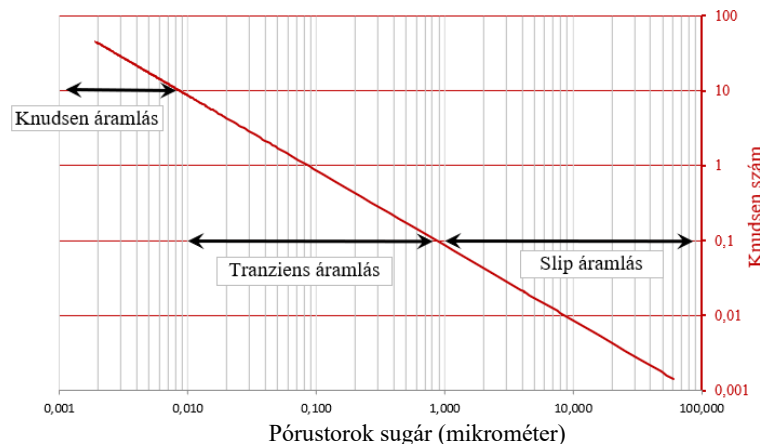
67. ábra. A Hu-1/12 sorozat mintáinak HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásgörbéi (sz.s.sz.)

A bemutatott mérési eredményekből levonható az a következtetés, hogy a mért permeabilitások több nagyságrendi eltérését a plug méretű minták sérülései és mikrorepedései okozzák, hiszen a petrofizikai jellemzőik úgy, mint pórustorok sugár méret eloszlás, teljes besajtolt kumulatív térfogat, teljes fajlagos felület, átlagos pórustorok sugár és a teljes porozitás nagyon nagy hasonlóságot mutatnak.

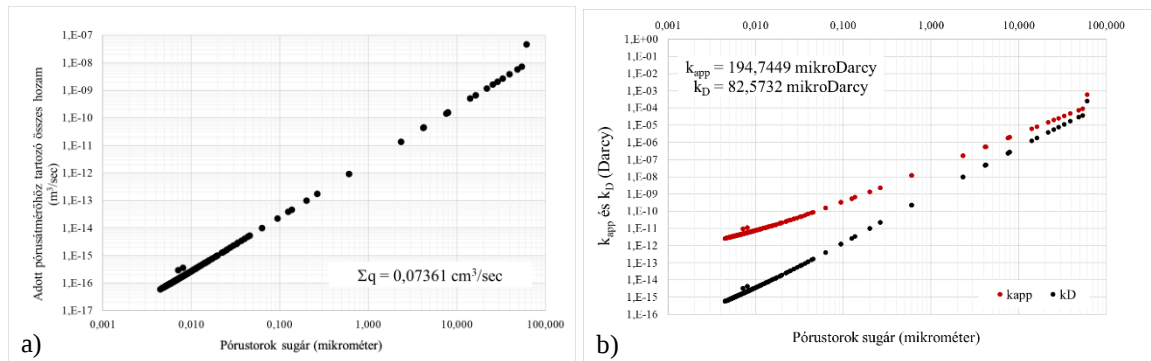
Ezt alátámasztja, hogy mindössze a 12. táblázatban látható két minta volt alkalmas a Nano-PermTM permeaméterrel történő mérésre. Ebből következően a szintetikus mintatestek szimulációit ennek a két mintának a mérési körülményei (68. ábra) és eredményei alapján végeztem. Szeretném felhívni a figyelmet arra, hogy a mérési körülményeken egyetlen pórusméret tartományban sincs Darcy jellegű áramlás.

Első lépésben az úgynevezett illesztés nélküli, vagyis a teljes pórustorok sugár eloszlásra végeztem el a számításokat, melyek eredményeit a 69. és 70. ábrák szemléltetik.

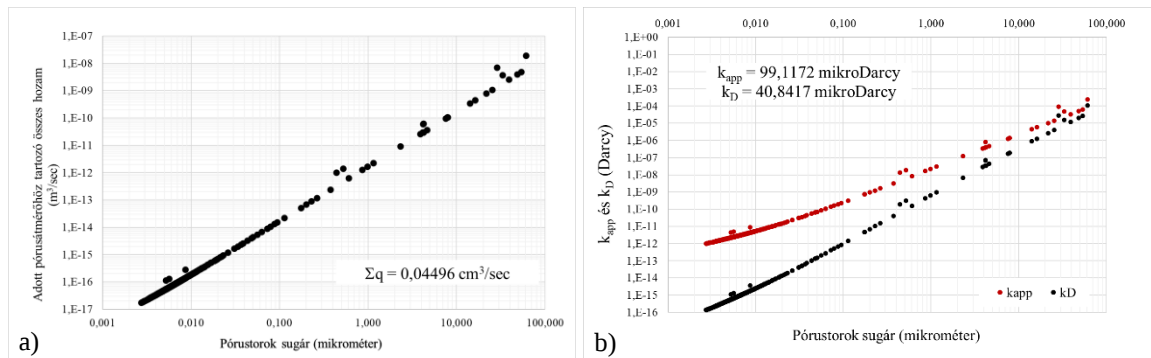
Nagyon hasonló lefutású és nagyságrendű eredményeket kaptam a Hu-1/12/1s és Hu-1/12/6s azonosítójú minták szimulációjában is.



68. ábra. A Hu-1/12/1s azonosítójú minta pórusterében kialakuló áramlás típusok a Knudsen szám és a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz.)



69. ábra. a) A Hu-1/12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a kapilláris kötegekhez tartozó térfogatáram értékek a pórustorok sugár függvényében, b) A Hu-1/12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a látszólagos és a Darcy permeabilitás értékek kapilláris kötegenként a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz)



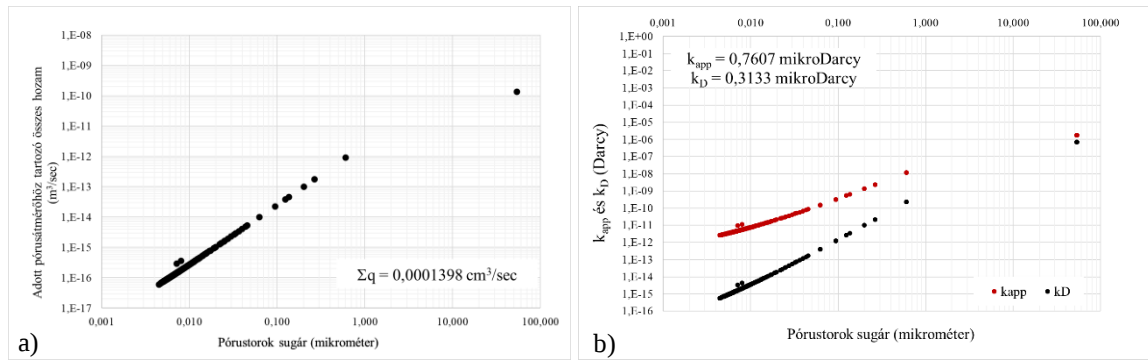
70. ábra. a) A Hu-1/12/6s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a kapilláris kötegekhez tartozó térfogatáram értékek a pórustorok sugár függvényében, b) A Hu-1/12/6s azonosítójú minta illesztés nélküli eredményei; a látszólagos és a Darcy permeabilitás értékek kapilláris kötegenként a pórustorok sugár függvényében (sz.s.sz)

13. táblázat. A Hu-1/12/1s és Hu-1/12/6s azonosítójú minták effektív permeabilitás adatai (sz.s.sz)

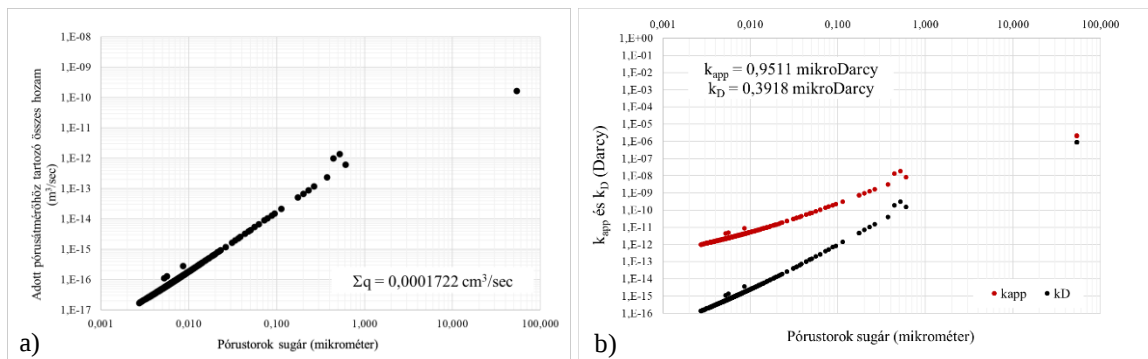
	Nano-Perm TM mérés effektív	
Minta azonosító	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Effektív áteresztőképesség (mikroDarcy)
Hu-1/12/1	1,30318E-04	0,31852
Hu-1/12/6	1,68083E-04	0,39045

A 13. táblázat a Nano-PermTM permeabilitás mérés térfogatáram és áteresztőképesség pontpárjait tartalmazza, melyeket összevetve a 69. és 70. ábrákon látható az eredeti HPMI mérésekből származó pórustér eloszlás alapján számított értékekkel megállapítható, hogy a számított eredmények két-három nagyságrenddel nagyobbak.

Ahogy az 5. fejezetben már említettem, ebben az esetben is a térfogatáramra, valamint az áteresztőképességre történik az illesztés, melynek eredményeit az 71. és 72. ábrákon mutatom be.



71. ábra. A Hu-1/12/1s azonosítójú minta térfogatáramra a), valamint az áteresztőképességre b) történő illesztése (sz.s.sz.)



72. ábra. A Hu-1/12/6s azonosítójú minta térfogatáramra a), valamint az áteresztőképességre b) történő illesztése (sz.s.sz.)

Az illesztett eredményekről elmondható, hogy mind a két esetben el kellett távolítani a pórustorok sugár eloszlás legnagyobb - a 0,85 mikrométer és annál nagyobb értékhez tartozó - kapillárisait és mindkét esetben szinte teljesen megegyező úgynevezett egyenértékű kapilláris köteg alkalmazásával lehetett a mérési eredményeket elérni.

Az egyenértékű kapilláris kötegeket a 71. és 72. ábrákon egy-egy elkülönülő pont, illetve az áteresztőképességeknél pontpár jelzi.

Az eredeti probléma, amely a Hu-1/12 sorozatából kialakított minták mért permeabilitás értékeinek, hasonló petrofizikai tulajdonságaik ellenére jelentkező igen jelentős szórása (65. ábra) így a következőképpen oldható meg. Az illesztett egyenértékű kapilláris köteg alkalmazásával kiterjesztettem a szintetikus minták szimulációit azokra a mintákra is, amelyeknél tulajdonságaik miatt (feltételezhető és szemmel látható mikrorepedések jelenléte) nem volt lehetőség a Nano-PermTM eszközzel való mérés elvégzésére.

Elvégeztem a szimulációkat mind a Hu-1/12/1s, mind a Hu-1/12/6s illesztési eredményének – egyenértékű relatív térfogatszázalék – megfelelően; az eredmények lényegében azonosnak adódtak. A szimulációk eredményeit összefoglalóan a 14. és a 15. táblázatban, az illesztést bemutató ábrákat szemléletesen a J. mellékletben mutatom be.

14. táblázat. A Hu-1/12 sorozat szimulációinak összefoglaló eredményei, illesztés nélkül (sz.s.sz)

Minta azonosító	Nano-Perm TM mérés		HPMI mérés pórustér eloszlásának felhasználásával (korrekció nélkül)		
	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Effektív áteresztőképesség (mikroDarcy)	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)
Hu-1/12/1s	1,3032E-04	0,31852	7,3610E-02	194,7450	82,5732
Hu-1/12/2s	—	—	1,1923E-02	91,6088	38,2051
Hu-1/12/3s	—	—	4,3577E-02	64,3490	25,7173
Hu-1/12/4s	—	—	5,1058E-03	18,8764	5,7063
Hu-1/12/5s	—	—	1,2640E-02	69,4833	25,9896
Hu-1/12/6s	1,6808E-04	0,39045	4,4958E-02	99,1172	40,8417

15. táblázat. A Hu-1/12 sorozat szimulációinak összefoglaló eredményei, illesztésekkel (sz.s.sz)

Minta azonosító	Mérésre illesztett pórustér eloszlás, illetve a Hu-1/12/1s illesztett pórustér eloszlásával számított			Mérésre illesztett pórustér eloszlás, illetve a Hu-1/12/6s illesztett pórustér eloszlásával számított		
	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)
Hu-1/12/1s	1,3980E-04	0,7607	0,3133			
Hu-1/12/2s	1,0404E-04	0,7850	0,3233	1,2579E-04	0,9532	0,3926
Hu-1/12/3s	1,1515E-04	0,8168	0,3365	1,3694E-04	0,9918	0,4086
Hu-1/12/4s	1,5726E-04	0,8650	0,3563	1,2360E-04	1,0516	0,4332
Hu-1/12/5s	1,3970E-04	0,8660	0,3567	1,2454E-04	1,0516	0,4332
Hu-1/12/6s				1,7218E-04	0,9511	0,3918

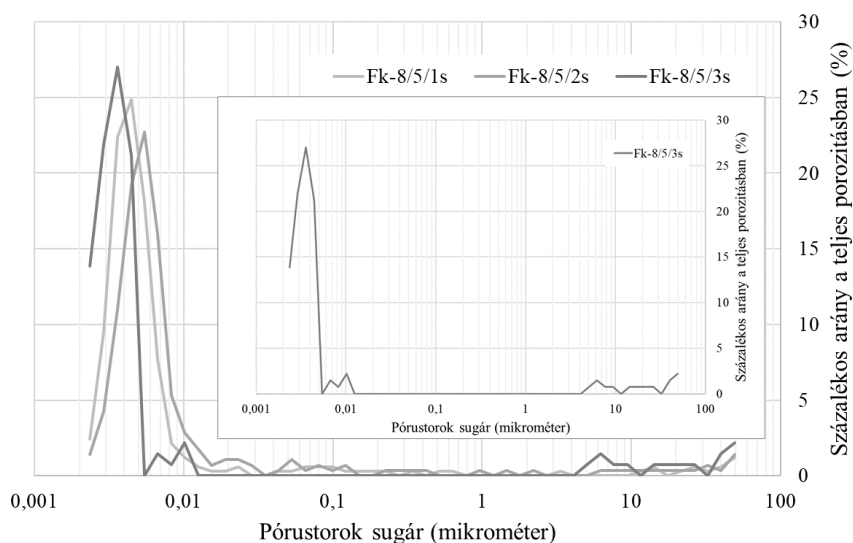
A 14. és 15. táblázatok továbbá a J. melléklet alapján elmondható, hogy a szintetikus minta modell alkalmazásával a hiányzó minták mért térfogatáram és permeabilitás adatait, jelentős mértékű pórustér eltávolításával, illetve egyenértékű kapilláris köteg alkalmazásával rendkívül pontosan elő lehet állítani.

A következőkben egy érdekes jeleséget mutatok be. A Forráskút-8 jelű kút 5-ös szelvényéből származó három mintatest kapcsán további kérdések merültek fel. A minták litológiai az Endrődi Formációba tartoznak.



73. ábra. A Forráskút-8 jelű kút 5-ös szelvényéből származó három mintatest (sz.s.sz.)

A sorozat különleges abban a vonatkozásban, hogy mind a három sztenderd plug méretű mintatesten el lehetett végezni a permeabilitás mérését a Nano-PermTM műszerrel, továbbá kis méretű mintatestek kialakítására és HPMI mérésekre is volt lehetőség.



74. ábra. A Fk-8/5 sorozat mintáinak pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.)

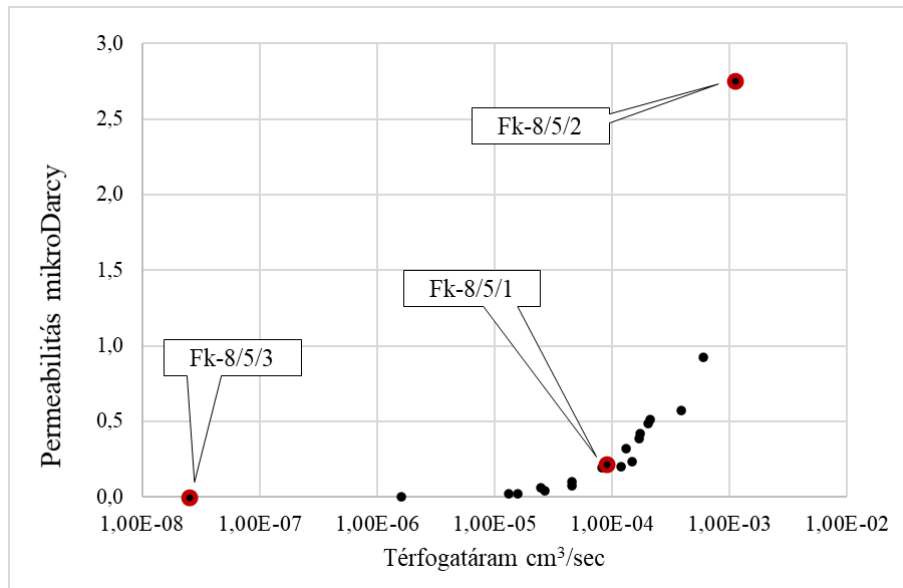
A 74. ábrán a három kis méretű mintatest pórustorok sugár eloszlása látható, külön kiemelve az Fk-8/5/3s minta eloszlását, amely egy azon néhány eloszlás közül, ahol gyakorlatilag „középen” hiányzik közel három nagyságrendnyi pórustorok sugár és így egyben pórustér. Ismert, hogy a HPMI mérés két eszközön, két lépésben zajlik, az első eszköz 2 bar nyomásig sajtol be, vagyis tölti ki a nagyobb pórusokat, majd a második eszközben történik a nagy nyomású injektálás. Az első szakasz a 4 mikrométernél nagyobb pórustorok sugarakhoz tartozó pórusteret tölti fel. Amennyiben hipotézisként azt vetjük fel, hogy a szóban forgó minták esetén ennek a mérettartománynak a jelenléte a felszíni sérülésekből adódik és eltávolítjuk azokat, akkor megállapítható, hogy a Fk-8/5/3s minta vonatkozásában egészen a 0,01 mikrométeres pórustorok sugár értékig nincsenek értékek.

A 16. táblázatban látható mérési eredmények mutatják, hogy a három mintatest több nagyságrendben egymástól eltérő mérési eredményeket adott.

16. táblázat. A Fk-8/5 sorozat mintáinak effektív áteresztőképesség értékei (sz.s.sz.)

Minta azonosító	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Effektív áteresztőképesség (mikroDarcy)
Fk-8/5/1	0,000089529	0,2203249
Fk-8/5/2	0,001107998	2,7525984
Fk-8/5/3	0,000000025	0,0000512

Fontos megjegyezni, hogy a Fk-8/5 sorozat mintáinak eredményei voltak a mérési programban mért legkisebb és legnagyobb értékű térfogatáram és permeabilitás adatai.

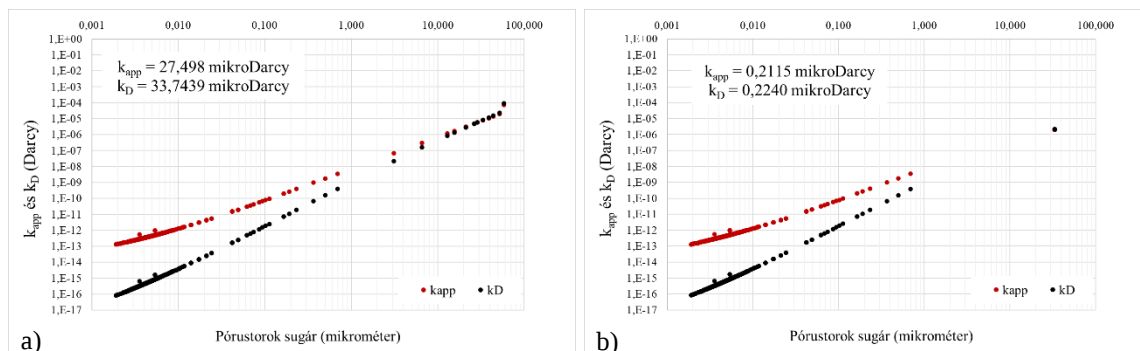


75. ábra. A kutatás során a Nano-PermTM eszközzel mért minták térfogatáramai effektív permeabilitásai, felirattal jelölve a Fk-8/5 sorozat mérési eredményeit (sz.s.sz.)

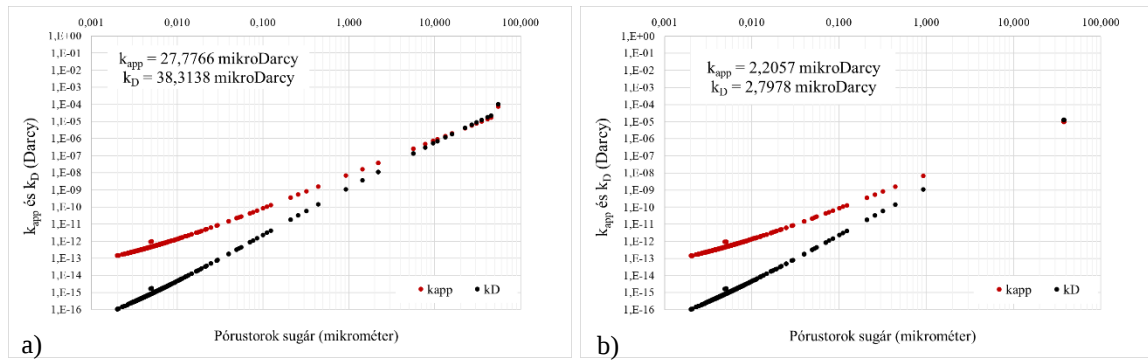
A jelenség vizsgálatához ismét a szintetikus modellt alkalmaztam. A már ismert módon elvégeztem az illesztés nélküli, majd a térfogatáramra és permeabilitásra történő illesztéses szimulációkat. Ezek eredményeit összefoglalóan a 17. táblázatban, valamint a 76. – 78. ábrákon mutatom be.

17. táblázat. A Fk-8/5 sorozat szimulációs eredményei korrekció nélkül és illesztéssel (sz.s.sz.)

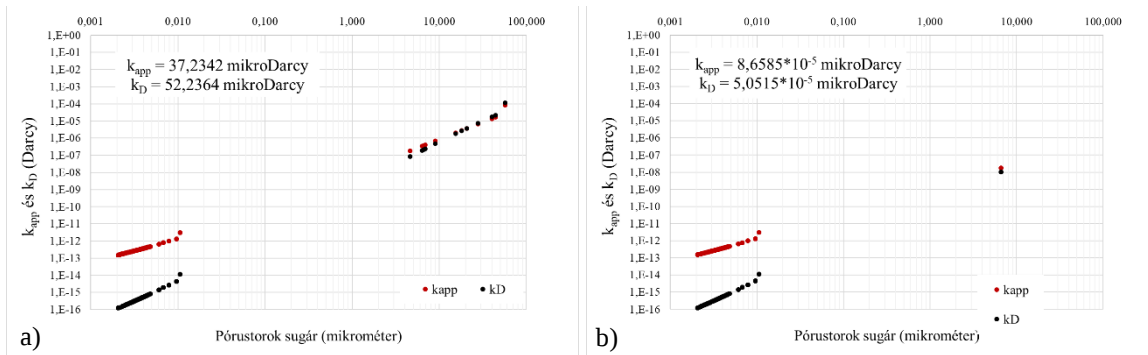
Minta azonosító	HPMI mérés pórustér eloszlásának felhasználásával (korrekció nélkül)			Mérésre illesztett pórustér eloszlásával számított		
	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)
Fk-8/5/1s	8,70E-03	2,75E+01	3,37E+01	1,15E-04	2,12E-01	2,24E-01
Fk-8/5/2s	1,10E-02	2,78E+01	3,83E+01	8,02E-04	2,21E+00	2,80E+00
Fk-8/5/3s	1,04E-02	3,72E+01	5,22E+01	6,71E-07	8,66E-05	5,05E-05



76. ábra. A Fk-8/5/1s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.)



77. ábra. A Fk-8/5/2s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.)



78. ábra. A Fk-8/5/3s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett szimulációs eredményei b) (sz.s.sz.)

A 76. – 78. ábrákon rendre jól megfigyelhető, hogy a mérési eredmények – melyek nagyságrendekkel voltak kisebbek – beállítása érdekében az 1 mikrométernél nagyobb pórustorok sugártartomány alkotta pórusteret el kellett távolítani, és minden esetben különböző egyenértékű kapilláris köteggel kellett helyettesíteni. Az alábbi 18. – 20. táblázatok a pórustorok sugár eloszlás kezdeti (nagyobb értéktől a kisebb felé) szakaszainak eredeti és az egyenértékű kapilláris köteg alkalmazásával történő, illesztett adatait mutatják

18. táblázat. A Fk-8/5/1s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz.)

	Pórustorok sugár (mikrométer)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott köteggben (db)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott köteggben (db)
		HPMI mérésből származó adatok		Permeabilitás méréshez illesztett adatok	
Illesztett szakasz Fk-8/5/1	58,328	0,920	32,935		0
	51,874	0,310	14,031		0
	43,966	0,310	19,533		0
	38,942	0,310	24,897		0
	33,244	0,310	34,165	0,080	8,817
	28,888	0,310	45,244		0
	26,350	0,310	54,380		0
	21,205	0,310	83,966		0
	15,567	0,310	155,814		0
	12,956	0,310	224,933		0
	10,714	0,310	866,463		0

19. táblázat. A Fk-8/5/2s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz)

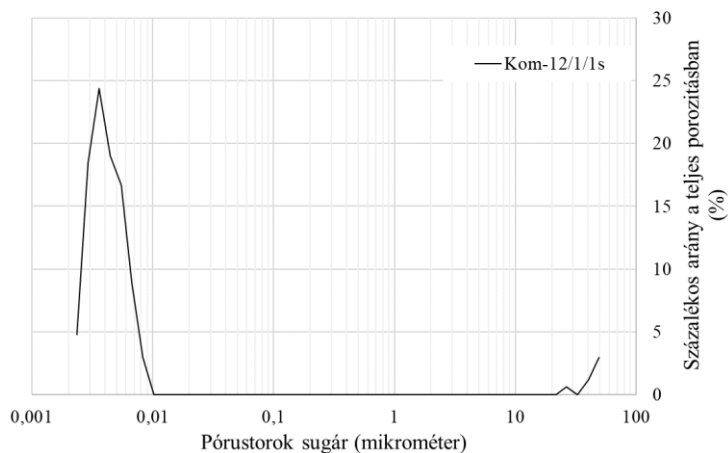
	Pórustorok sugár (mikrométer)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott kötegekben (db)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott kötegekben (db)
		HPMI mérésből származó adatok		Permeabilitás méréshez illesztett adatok	
Illesztett szakasz Fk-8/5/2	54,862	1,060	48,743		0
	45,533	0,350	23,365		0
	38,047	0,350	28,751	0,300	28,683
	35,256	0,350	38,972		0
	33,520	0,350	52,007		0
	27,100	0,350	65,963		0
	22,604	0,350	94,807		0
	15,960	0,350	190,174		0
	13,274	0,350	274,916		0
	10,805	0,350	414,923		0
	9,613	0,350	524,204		0
	7,745	0,350	807,572		0
	5,619	0,350	1534,225		0
	4,064	0,000	0		0
	2,188	0,350	10121,103		0
	1,773	0,000	0		0
	1,434	0,350	23556,447		0

20. táblázat. A Fk-8/5/3s minta egyenértékű kapilláris illesztése (sz.s.sz)

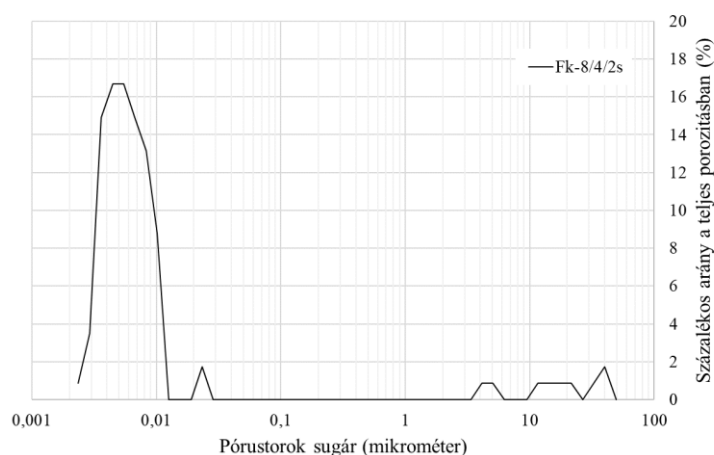
	Pórustorok sugár (mikrométer)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott kötegekben (db)	Relatív térfogat (%)	Kapillárisok száma az adott kötegekben (db)
		HPMI mérésből származó adatok		Permeabilitás méréshez illesztett adatok	
Illesztett szakasz Fk-8/5/3	56,699	2,190	48,070		0
	44,301	0,730	26,247		0
	40,043	0,730	32,125		0
	27,843	0,730	66,444		0
	20,750	0,730	119,633		0
	18,051	0,730	158,079		0
	15,352	0,730	218,560		0
	8,973	0,730	639,833		0
	6,880	0,730	1088,261		0
	6,601	0,730	1182,102	0,034	55,057
	6,333	0,730	1284,161		0
	4,605	0,730	2428,991		0

A 18. – 20. táblázatokban a „HPMI mérésből származó adatok” oszlopokban az illesztés során eltávolított pórusteret, míg a „Permeabilitás méréshez illesztett adatok” oszlopokban az egyenértékű kapillárisokat definiáló alapadatokat, vagyis az adott pórustorok sugárhoz tartozó relatív térfogatot és a kapillárisok számát tüntettem fel.

A mérések közül a Fk-8/5/3s mintán kívül összesen még két olyan esetet lehet vizsgálni, amelyeknél a néhány mikrométer, valamint a század- és ezred mikrométer közötti tartomány úgymond „hiányzik”. Ezek a Komádi-12 jelű fűrés 1-es, illetve a Forráskút-8 jelű fűrés 4-es szakaszából származnak. Pórustorok sugár eloszlásaikat a 79. és 80. ábrák mutatják be.



79. ábra. A Kom-12/1/s minta pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.)



80. ábra. A Fk-8/4/2s minta pórustorok sugár eloszlása (sz.s.sz.)

A szóban forgó minták Nano-PermTM műszerrel mért effektív permeabilitás mérésből származó adatait a 21. táblázat mutatja.

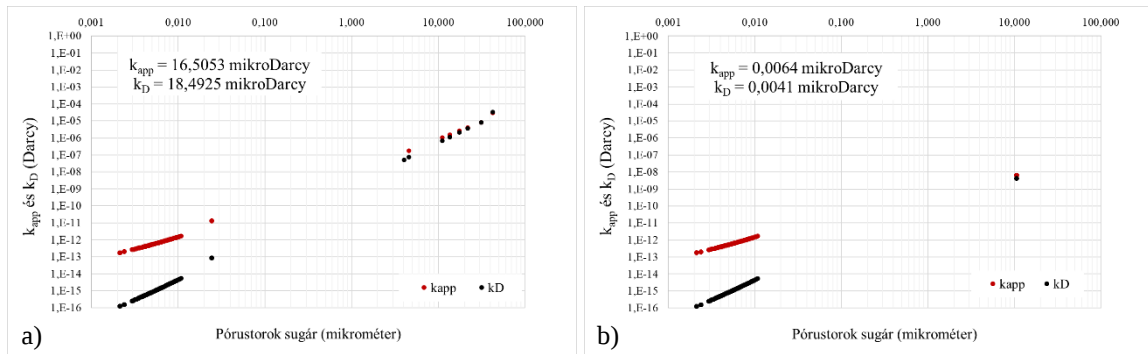
21. táblázat. A Fk-8/4/2s és a Kom-12/1/s minták mért adatai (sz.s.sz.)

Minta azonosító	Nano-Perm TM mérés	
	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Effektív áteresztőképesség (mikroDarcy)
Fk-8/4/2s	1,59106E-06	0,00380
Kom-12/1s	2,46112E-05	0,05935

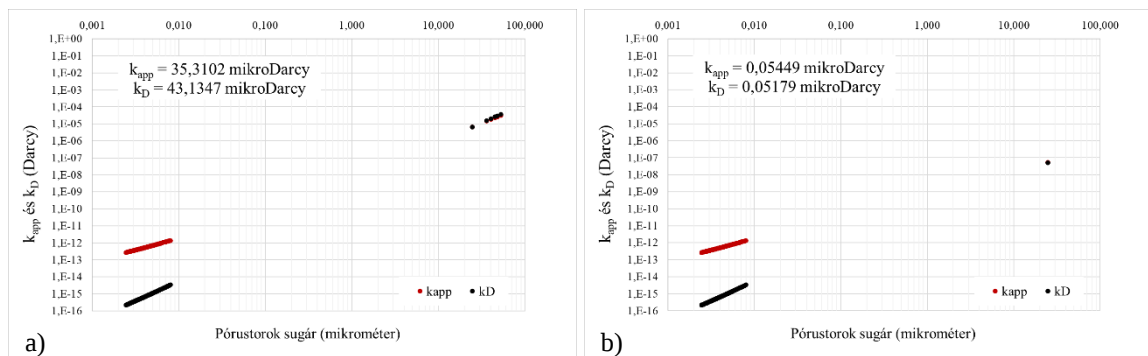
Elvégeztem a szimulációkat a szintetikus mintákon, melyek eredményeit a 81. és 82. ábrák, valamint a 22. táblázat összegzik.

A bemutatott példák eredményeinek értékelése során megállapítható, hogy a márga minták esetén a sztenderd plug méretű minták mérési eredményei és a HPPI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásból készített szintetikus mintán elvégzett szimulációk

eredményei, az azonos mérési körülmények ellenére mind térfogatáramokban, mind permeabilitás értékekben nagyságrendi eltéréseket mutatnak.



81. ábra. A Fk-8/4/2s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációs eredményei (sz.s.sz.)



82. ábra. A Kom-12/1s azonosítójú minta illesztés nélküli a) és illesztett b) szimulációs eredményei (sz.s.sz.)

22. táblázat. A Fk-8/4/2s és a Kom-12/1/s minták szimulációs eredményei (sz.s.sz.)

Minta azonosító	HPMI mérés pórustér eloszlásának felhasználásával korrekció nélkül			HPMI mérés pórustér eloszlásának felhasználásával mért adatokra illesztve		
	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)	Térfogatáram (cm ³ /sec)	Látszólagos áteresztőképesség (mikroDarcy)	Darcy áteresztőképesség (mikroDarcy)
Fk-8/4/2s	2,90E-03	1,65E+01	1,85E+01	3,96E-07	6,40E-03	4,10E-03
Kom-12/1s	1,73E-01	3,53E+01	4,31E+01	2,97E-05	5,45E-02	5,17E-02

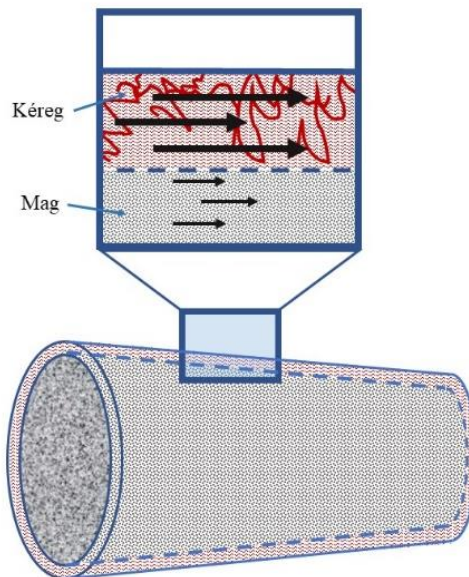
A szimulációs eredmények értékelése alapján kijelenthető, hogy a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlás nem reprezentatív a nagyobb, sztenderd plug méretű mintára nézve. Ebből kifolyólag a mért áteresztőképességek nem az adott pórustorok sugár eloszlású pórusteret jellemzik.

Az egyenértékű pórustorok sugár, illetve annak relatív térfogatszázalékával jellemzett egyenértékű kapilláris köteg bevezetésével a Nano-PermTM eszközzel mért értékek előállíthatók, mégpedig egy bizonyos szakasz eltávolításával és az egyenértékű kapilláris köteg alkalmazásával.

A fentebb bemutatott példák további bizonyítéku szolgálnak és megerősítik azt a feltételezésemet, miszerint mind kis méretű, mind a plug méretű minták jelentős felületi és

az akár egész mintára kiterjedő (mikrorepedés) sérüléseket szenvednek részben a tárolás részben a mintakialakítás során. Feltételezhető, hogy a mérések során a mintatesten keresztüláramló gázáram meghatározó része nem a mintatestben hanem annak csak a sérült, „repedezett” ily módon jóval nagyobb áteresztőképességgel bíró felületi zónáiban áramlik.

A jelenség sematikus rajzát a 83. ábra szemlélteti.



83. ábra. A Kéreg-modell sematikus ábrája (sz.s.sz.)

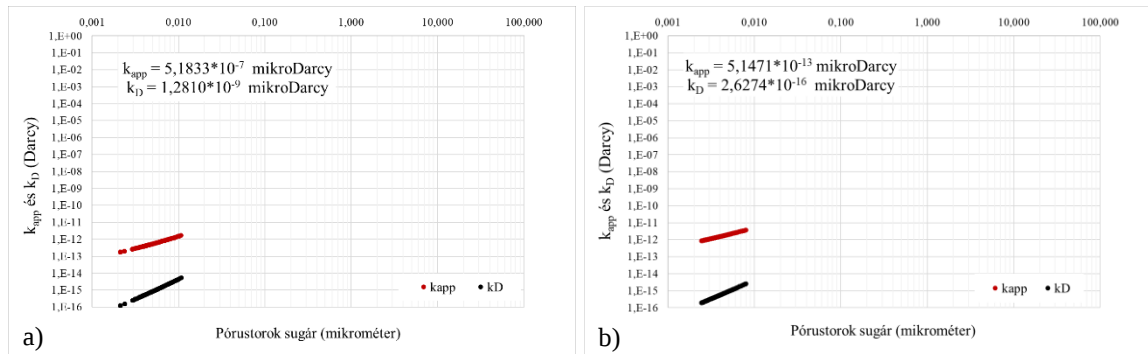
Tekintettel arra, hogy a Nano-PermTM eszközzel mért térfogatáram és permeabilitás értékek a validált modellben az illesztés során csak erős korrekcióval állíthatók elő, arra a következtetésre jutottam, hogy ez a bizonyos mért permeabilitás egy eredő áteresztőképesség, amely a sértetlen belső „mag” és a felületi sérülések által jóval kedvezőbb permeabilitású „kéreg” eredő permeabilitásának eredménye.

Kutatásaim során tehát arra a következtetésre jutottam, hogy az Endrődi Márga típusú kőzeteknél a szintetikus modellmintán végzett szimulációk során szükséges a modell mintatest sérült zónájának eltávolítása és egy bizonyos egyenértékű kapilláris bevezetése, ily módon előállítható az eredeti „plug size” mintatest mérési körülményein tapasztalt viselkedése; az illesztés alapját valamely effektív permeabilitás mérésből származó mért térfogatáram képezi.

A „plug size” méretű mintatest eredő áteresztőképességét (mért térfogatáram) a sértetlen belső mag áteresztőképességének és a felületi sérülések miatt megváltozott áteresztőképességű köpeny/héj áteresztőképességének eredője adja.

A sérült „kéreg” teljes eltávolításával feltételezhetően a márga típusú kőzetek eredeti mátrix áteresztőképessége becsülhető. Mindkét szóban forgó minta esetében elvégeztem a

számításokat arra az esetre, amelyben a teljes „kérget” alkotó pórustér eltávolításra kerül, az eredményeket a 84. ábra mutatja.



84. ábra. A Fk-8/4/2s a) és a Kom-12/1/1s b) minták szimulációs eredményei, kéreg eltávolítása után (sz.s.sz.)

A 84. ábrán látható eredmények rendkívül kis áteresztőképességeket mutatnak. A Fk-8/5/3, a Fk-8/4/2 és a Kom-12/1/1, valamint párjaik: a Fk-8/5/3s, a Fk-8/4/2s és a Kom-12/1/1s minták vizsgálata felveti azt a kérdést, hogy vajon a permeabilitás nagyságrendjét és értékét meghatározó egyenértékű kapilláris köteg – amely a mért értékekre van illesztve – a minta sajátja-e vagy az a sérülésekből adódik és így eredeti állapotában a mintáknak nem is jellemzője.

A kérdés megválaszolása túlmutat jelen dolgozat határain és véleményem szerint csak más földtudományi szakterületek együttműködésével és a petrofizikai vizsgálatokon túl más jellegű vizsgálatok igénybevételével válaszolható meg.

7 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az alábbiakban a 2. - 6. fejezetekben kifejtett kutatómunkám eredményeképpen született, új tudományos eredményeimet tézisek formájában foglalom össze.

1. tézis

Nem-hagyományos kőzetminták átteresztőképességének meghatározása nagy nyomású higany besajtolásos (HPMI) mérés eredményeinek felhasználásával

Az általam javasolt összefüggések alkalmazásával a Szolnoki Formáció tömött homokköveinek abszolút permeabilitása, HPMI mérési adatok birtokában, gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal meghatározható (Szabó N.P. és szerzőtársai, 2021).

A Szolnoki Homokkő Formációból származó jellemzően kedvezőtlen petrofizikai tulajdonságú kőzetminták poroperm kapcsolatainak vizsgálatai során arra a következtetésre jutottam, hogy a nem-hagyományos homokkövek vonatkozásában nem tárható fel a porozitás abszolút értéke és az abszolút permeabilitás között megfelelően megalapozott függvénykapcsolat.

Mérési eredményekkel alátámasztott kapcsolatot mutattam ki a legjellemzőbb pórustorok sugár (MFPR) és az abszolút permeabilitás korrelációjára, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$k_{abs} = 25,746 \text{ MFPR} + 0,4959 \quad R^2 = 0,7313$$

Erős kapcsolatot tártam fel a HPMI mérésből számítható 15%-os higanytelítettséghez tartozó pórustorok sugár (r_{15}) és az abszolút permeabilitás tízes alapú logaritmusá között, melyet a következő összefüggés ír le:

$$\log k_{abs} = 2,8361 r_{15} - 0,206 \quad R^2 = 0,848$$

Nagyon erős kapcsolatot tártam fel a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta pórustérfogat (redukált porozitás: $\phi_{R0,2}$) és az abszolút permeabilitás között, melyet a következő összefüggés ír le:

$$k_{abs} = 1,3571 e^{0,3345 \phi_{R0,2}} \quad R^2 = 0,8959$$

2. tézis

Szintetikus modell mintatest kialakítása petrofizikai tulajdonságokból porózus közegben kialakuló gázáramlás vizsgálatára

Kőzetmintákon elvégzett térfogatárammérésekkel igazoltam, hogy az általam javasolt kapilláriskötegekből épített szintetikus minta szimulációk eredményei nagyon jó egyezést mutatnak a mért térfogatáramokkal (Remeczki F. 2020b).

A nem-hagyományos szénhidrogén rezervoárokból származó kőzetminták, kis méretű (small size) mintatestjein végzett rutin (RCA – Routine Core Analysis) mérésekből származó információk alapján, a kinetikus gázelmélet alkalmazásával, továbbá az általam javasolt érvényességi feltételek mellett létrehozható petrofizikai tulajdonságokból álló, szintetikus sztenderd (plug size) mintatest alkalmas a kőzetben kialakuló anyagtranszport (gáz) folyamatok vizsgálatára.

A szintetikus mintatest egy kapilláris csökötegekből álló modell, amelyben a HPMI mérés pórutorok méret eloszlás görbéje adja meg a kapillárisok átmérőjét és méreteloszlását, illetve az adott kapilláris átmérőhöz tartozó kötegben lévő kapilláris csövecskék számát.

A modellezés bemenő adatai	Minta adatai: HPMI porozitás, HPMI pórutorok sugár eloszlás és relatív térfogaszázalék. Méréshez használt gáz: molekula átmérő, moláris tömeg, a gáz dinamikai viszkozitása és sűrűsége mérési körülményeken. A hasonlósági kritériumoknak megfelelő sztenderd méretű minta effektív permeabilitás mérése az átlagnyomás, a nyomáskülönbség és az adott nyomáskülönbséghez tartozó térfogatáram, a minta hossza és átmérője.
A modellezés végeredményei	Kapilláriskötegenként: Knudsen-szám által definiált áramlási rendszer típusa és a térfogatáram

3. tézis

Tapadóvíz telítettség meghatározása szintetikus mintatest alkalmazásával

Megállapítottam, hogy a modellel vizsgálható a tapadóvíztelítettség érzékenysége a kritikus pórutorok sugár értékére, továbbá a tapadóvíztelítettség nyomás- és hőmérsékletfüggése. Ehhez megalkottam a modellminta tapadóvíz telítettségének meghatározására alkalmas összefüggést (Remeczki F., 2020d; Remeczki F., 2021a).

A szintetikus minta modellt alkalmazva, az egyenértékű kapillárisok átmérő szerinti növekvő sorozatának vonatkozásában egy kitüntetett pórutorok-sugarat (kritikus pórutorok sugár: r_c) olyan maximum értéknek véve, amely sugár alatti kapillárisok teljesen víztelítettek; továbbá a kritikus sugárnál nagyobb kapillárisok vonatkozásában a tapadóvíz jelenlétét az azok falán kialakuló vízfilm-gyűrűkkel (δ) figyelembe véve, a modellminta tapadóvíz telítettsége (S_{wi}) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$S_{wi} = 1 - \frac{\sum_{j=c}^n (r_j - \delta_{j-c+1})^2 \pi L N_{Cj}}{\sum_{j=1}^n r_j^2 \pi L N_{Cj}}$$

4. tézis

HPMI adatokra épülő petrofizikai jellemző becslése

A redukált porozitás ($\phi_{R0,2}$) vagy a kapilláris nyomásgörbékéből félgrafikus úton meghatározott küszöbnyomás (p_{th}) ismeretében a tömött homokkövek tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal számítható az általam megalkotott képletek segítségével.

A hagyományos módszerek (RCA) és az új szintetikus modell hibrid alkalmazásával közelítő függvényt vezettem be az általam definiált redukált porozitás értékek ($\phi_{R0,2}$) és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek ($S_{wi0,2}$) között, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$S_{wi0,2} = -5,7908 \phi_{R0,2} + 94,453 \quad R^2 = 0,9493$$

Az összefüggés alkalmazásával a Szolnoki Homokkő minták tapadóvíz telítettsége gyakorlati szempontoknak megfelelő pontossággal meghatározható, melyhez elegendő a kis méretű mintatesteken elvégzett HPMI mérés adatainak rendelkezésre állása.

Függvényt vezettem be a Szolnoki tömött homokkövek küszöbnyomásainak (p_{th}) és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek ($S_{wi0,2}$) között, melyet az alábbi összefüggés ír le:

$$S_{wi0,2} = 0,0071 p_{th}^2 + 0,8809 p_{th} + 50,806 \quad R^2 = 0,9076$$

5. tézis

Szintetikus mintatest áteresztőképességének meghatározása

Az általam javasolt új szintetikus minta modell eljárással az eltérő sugarú kapilláris csövekben meghatározható mind a látszólagos (k_{app}), mind a Darcy féle (k_D) permeabilitás.

A szintetikus modell kapilláris kötegeire alkalmazva a számítási módszert meghatározhatók az általam súlyozott permeabilitásnak nevezett értékek a szintetikus minta minden pórustorok sugarához. Mérési eredményekkel történő igazolással bizonyítottam, hogy a kapilláris csövenként meghatározott permeabilitások párhuzamos kapcsolásával a minta látszólagos és Darcy permeabilitásának meghatározására érvényesek a következő összefüggések:

$$k_{appminta} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{appj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi}$$

$$k_{Dminta} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_{Dj} r_j^2 N c_j \pi)}{\sum_{j=1}^n r_j^2 N c_j \pi}$$

6. tézis

Márga kőzetek áteresztőképességének újszerű megközelítése – Kéreg-modell

Márga kőzetek áteresztőképességének újszerű megközelítésére megalkottam a Kéreg-modellt. Az így létrehozott szintetikus minta modell alkalmas a jelenség vizsgálatára, a sérült „kéreg” egyenértékű kapilláris köteggel történő jellemzéséhez szükséges illesztés elvégzésére valamint a sértetlen „mag”-ban kialakuló gázáramlás jellemzőinek (áramlás típusa, térfogatáram és permeabilitás) meghatározására (Remeczki F., 2020a, 2020c, 2021b).

Megállapítottam, hogy a márga minták esetén a sztenderd plug méretű minták mérési eredményei és a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlásból készített szintetikus mintán elvégzett szimulációk eredményei, az azonos mérési körülmények ellenére mind térfogatáramokban, mind permeabilitás értékekben nagyságrendi eltéréseket mutatnak.

Megállapítottam, hogy az Endrődi Márga minták esetén a HPMI mérésből származó pórustorok sugár eloszlás nem reprezentatív a nagyobb, sztenderd méretű mintára nézve, továbbá, hogy a mért áteresztőképességek nem az adott pórustorok sugár eloszlású pórusteret jellemzik.

Arra a következtetésre jutottam, hogy az Endrődi Márga típusú kőzeteknél a szintetikus modellmintán végzett szimulációk során szükséges a modell mintatest úgynevezett sérült zónájának eltávolítása és egy bizonyos egyenértékű kapilláris bevezetése, így módon előállítható az eredeti mintatest mérési körülményeken tapasztalt viselkedése.

Az Endrődi Marga típusú kőzetek permeabilitásának vonatkozásában javaslatot tettem egy új elméleti megközelítésre, amely szerint a sztenderd méretű valós kőzetmintán mért permeabilitást nem tekinthető reprezentatív értéknek a minta teljes térfogatára és így módon a vizsgált kőzettípusra sem. A sztenderd méretű mintatest mért permeabilitására a sértetlen belső „mag” és a felületi sérülések miatt megváltozott áteresztőképességű „köpeny” permeabilitásának eredőjeként kell tekinteni.

A szintetikus minta modell alkalmas a jelenség vizsgálatára, a sérült „kéreg” egyenértékű kapilláris köteggel történő jellemzéséhez szükséges illesztés elvégzésére valamint a sértetlen „mag”-ban kialakuló gázáramlás jellemzőinek (áramlás típusa, térfogatáram és permeabilitás) meghatározására.

Eredményeim gyakorlati hasznosíthatósága

A formációspecifikus poroperm összefüggések alkalmazásával a kőzet permeabilitásának mérés nélküli, gyorsabb és költséghatékonyabb becsléshez jutunk.

A szintetikus modellminta alkalmazásával mérés nélkül, könnyen és megbízhatóan számítható a kőzet tapadóvíz telítettsége, különböző p , T , Δp és r_c mellett.

Az értekezésben bemutatott szintetikus modell mintatesttel végzett számítási példák és eredmények alapján megállapítható, hogy az új minta modell bevezetése a laboratóriumi gyakorlatba hatékonyan elősegíti a mérési eredmények értelmezését és jól alkalmazhatók a nem-hagyományos rezervoárokból származó kőzetminták viselkedésének mélyebb megértésére.

Lehetőséget biztosít továbbá arra is, hogy ezzel az újabb vizsgálattal olyan kőzetminták esetén is meghatározható legyen a permeabilitás (az alkalmazhatósági feltételeknek megfelelően), amelyek sérültek, vagy olyan kis méretűek, hogy azokból szabványos permeaméterben mérhető mintatest nem alakítható ki.

A hagyományos laboratóriumi gyakorlat és az új tézisek kombinálásával növelhető a mért petrofizikai tulajdonságok megbízhatósága és jelentősen csökkenthető a sérülések vagy mintakialakítás következtében kialakuló károsodások petrofizikai tulajdonságokra gyakorolt hatása.

A Kéreg-modell elmélet, amely egy teljes mértékben újszerű megközelítés, számos esetben magyarázatul szolgálhat a hazai nem-hagyományos tárolók termeltethetőségi- és termelés-intenzifikációs kérdéseire és problémáira.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az úgynevezett RCA (Routine Core Analysis) petrofizikai, valamint a kapcsolódó kőzetreológiai laboratóriumi mérésekkel hatékonyan és a minőségellenőrzés lehetőségével nyerhetők ki a szénhidrogéntároló rezervoárok értékeléséhez szükséges információk. Napjainkra egyre fontosabbá vált a kedvezőtlen termeltethetőségi tulajdonságokkal bíró kőzetek nagy pontossággal és megbízhatósággal történő mérési eszközeinek, módszereinek és adatfeldolgozási eljárásinak kérdése.

Ennek megfelelően a doktori értekezésben bemutatott eredményeim mind olajipari, mind a földtani közeg egyéb klímastratégiai célú felhasználása szempontjából nagy jelentőséggel bírnak.

Az alapadatok előállítását követően vizsgáltam azok összefüggéseit annak érdekében, hogy általánosítható megállapításokat lehessen megfogalmazni a vizsgált formációk (Szolnoki és Endrődi) petrofizikai tulajdonságaira vonatkozóan. Ismert, hogy a porozitás és permeabilitás összefüggése hosszú ideje és folyamatosan kutatott területe a petrofizikának. Kiindulva abból, hogy az áteresztőképesség nagyságrendi értékét, tömött homokkövek esetén, a nagyobb pórusok jelenléte és eloszlása befolyásolja a leginkább, vizsgáltam a pórustéreloszlásokat. Arra a következtetésre jutottam, hogy nem a porozitás abszolút értékével, hanem annak valamely jellemző hányadával érdemes a permeabilitás kapcsolatát keresni. A korrelációk keresése során nagyon erős kapcsolatot tártam fel a 0,2 mikrométernél nagyobb sugarú pórusok alkotta térfogat (redukált porozitás) és a permeabilitás között.

A kőzetben kialakuló gáztranszport folyamatok hatékonyabb értelmezéséhez adaptáltam majd továbbfejlesztettem a rendkívül tömött kőzetek vizsgálatára is alkalmazott elméletet, mely szerint a pórusokban kialakuló áramlás teljes tömegáram fluxusa a nyomáskülönbség vezérelte tömegáram (advekción) fluxusának és a Knudsen típusú diffúzió fluxusának összege. Létrehoztam a szintetikus modell mintatest fogalmát, amellyel az volt a célom, hogy a mért adatok értelmezésében megjelenő diszkrepanciákat magyarázni, illetve eliminálni továbbá a hiányzó méréseket pótolni lehessen. Szimulációs eredményeim alapján elmondható, hogy a tömött homokkövek esetén a kapilláriskötegekből épített szintetikus mintákkal végzett szimulációk a pórustorok sugár eloszlás korrekciója nélkül is nagyon jó egyezést mutatnak a mérési eredményekkel.

Kidolgoztam a kapilláris csőköteg „letisztított” és méréssel validált szintetikus modellmintatestjének alkalmazhatóságát leíró modellt a tapadóvíz telítettség

meghatározására. A gyakorlatban könnyen alkalmazható erős kapcsolatokat írtam le az általam bevezetett úgynevezett redukált porozitás, illetve a tömött Szolnoki Homokkövek vonatkozásában a küszöbnyomás és a 0,2 mikrométeres kritikus sugárhoz tartozó tapadóvíz telítettségek között.

Mérési adatokkal alátámasztottam, hogy a kapilláris csőköteg modell nagyon jól leírja a szabványos „plug” méretű minta mérés közbeni viselkedését. Összefüggést írtam fel a minta látszólagos és Darcy permeabilitásának meghatározására valamit elmondható, hogy a modellezés körültekintő alkalmazásával a repedéssel rendelkező és így nagyon eltérő mért eredményeket szolgáltató sztenderd, plug méretű minták permeabilitása meghatározható.

A márga és mészmárga típusú kőzetek esetén is előállítottam a HPMT mérésből származó pórustorok sugár eloszlásgörbékből a szintetikus mintatesteket. Elvégezve a szimulációkat egy különös jelenséget figyeltem meg. Ellentétben a homokkövek szimulációs kísérleteivel, ahol adott esetben minimális korrekciókat kellett alkalmazni, a márga minták mért és illesztés nélkül számított tömegáramai rendkívül nagy mértékben tértek el egymástól. A mérési eredmények és a szimulációk értelmezése további bizonyítékul szolgáltak és megerősítették azt a feltételezésemet, miszerint mind kis méretű, mind a plug méretű márga minták jelentős felületi és akár az egész mintára kiterjedő sérüléseket – mikropedéseket – szereznek/szenvednek részben a tárolás részben a mintakialakítás során.

Tekintettel arra, hogy a Nano-PermTM eszközzel mért térfogatáram és permeabilitás értékek a validált modellben az illesztés során csak erős korrekcióval állíthatók elő, arra a következtetésre jutottam, hogy ez a bizonyos mért permeabilitás egy eredő áteresztőképesség, amely a sértetlen belső „mag” és a felületi sérülések által jóval kedvezőbb permeabilitású „kéreg” eredő permeabilitásának az eredménye.

A Kéreg-modell elmélet, amely egy teljes mértékben újszerű megközelítés, számos esetben magyarázatul szolgálhat a hazai nem-hagyományos tárolók termeltethetőségi és termelés-intenzifikációs kérdéseire és problémáira.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsőként témavezetőmnek, Dr. Jobbik Anitának szeretném megköszönni az áldozatos, hosszú és kitartó segítséget, a precíz szakmai irányítást, mentorálást. Az újszerű szemlélet, amelyet a kutatásaim során tanulhattam meg az ő fáradhatatlan jellemének köszönhetően, végig kíséri majd a szakmai és tudományos pályafutásomat.

Köszönettel tartozom továbbá Dr. Szabó Norbert Péter professzor úrnak a tanácsaiért és útmutatásáért, amely nagyban hozzájárul e kutatómunka létrejöttéhez.

Köszönet illeti az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet munkatársait, Igazgató urat, kutatótársaimat, kollégáimat segítségükért és szakmai tanácsaikért.

Egyúttal köszönetet mondok, hogy a Széchenyi 2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával megvalósuló az Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projekt megvalósításában részt vehettem, a projekt támogatása jelentősen segítette kutatásaimat.

Végül köszönöm családomnak, akik végig támogattak és erőt adtak a tanulmányaim és kutatásaim során.

IRODALOMJEGYZÉK

- Alireza A. M. and Rick C. (2015): Laboratory Investigation of Shale Permeability. *SPE/CSUR Unconventional Resources Conference - Calgary*, SPE-175919-MS, 27 p.
- American Petroleum Institute (1998): Permeability determination. In: *Recommended Practices for Core Analysis* (API Publishing Services, Washington, D.C., 1998) 6-1 - 6-60
- Bada G., Dombrádi E., Horányi A., Molnár G., Sztanó O. and Shevelev M. (2014): The Algyó Turbidite Gas Play in the Mako Trough, Pannonian Basin, Hungary. *Neftyanoe Khozyaistvo* 5, 72–76.
- Badics B., Uhrin A., Vető I., Bartha A. és Sajgó Cs. (2011): Medenceközponti földgáz előfordulás elemzése a Makói-árokban. *Földtani Közlöny* 141 (1), 23–40.
- Bear J., Rubinstein B. and Fel L. (2011): Capillary pressure curve for liquid menisci in a cubic assembly of spherical particles below irreducible saturation. *Transport in Porous Media* 89 (1), 63–73.
- Bérczi I. (1988): Preliminary sedimentological investigation of a Neogene depression in the Great Hungarian Plain. In: Royden L. H. and Horváth F. (eds): *The Pannonian Basin: A study in basin evolution*. AAPG Memoir 45, 107–116.
- Bérczi I. and Phillips R. L. (1985): Process and depositional environments within Neogene deltaic–lacustrine sediments, Pannonian Basin, Southeast Hungary. *Geophysical Transactions* 31, 55–74.
- Borgia G., Bortolotti V., Brancolini A., Brown R. and Fantazzini P. (1996): Developments in core analysis by NMR measurements. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 14 (7–8), 751–760.
- Brace W.F., Walsh J.B. and Frangos, W.T. (1968): Permeability of granite under high pressure. *Journal of Geophysical Research* 73, 2225–2236.
- Brown G.P., Dinado A., Cheng G.K. and Sherwood T.K. (1946): The Flow of Gases in Pipes at Low Pressures. *Journal of Applied Physics* 17 (10), 802–813.
- Bustin R.M., Bustin A.M.M., Cui A., Ross D. and Pathi V.M. (2008): Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics. *SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, USA*, SPE 119892-MS
- Cheng Y., Zhang C. and Zhu L. (2017): A fractal irreducible water saturation model for capillary tubes and its application in tight gas reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 159, 731–739.

- Civan F. (2001): Scale effect on porosity and permeability: kinetics, model, and correlation. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 47 (2), 271–287.
- Civan F., Rai C. S. and Sondergeld C. H. (2011): Shale gas permeability and diffusivity inferred by improved formulation of relevant retention and transport mechanisms. *Transport in Porous Media* 86, 925–944.
- Clarkson C.R., Jensen J.L., Pedersen P.K. and Freeman M. (2012): Innovative Methods for Flow Unit and Pore Structure Analysis in a Tight Siltstone and Shale Gas Reservoir. *AAPG Bulletin* 96 (2), 355–374.
- Coskun S.B. and Wardlaw N.C. (1995): Influences of pore geometry, porosity and permeability on initial water saturation-An empirical method for estimating initial water saturation by image analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 12 (4), 295–308.
- Darabi H., Ettehad A., Javadpour F. and Sepehrnoori K. (2012): Gas Flow in Ultra-Tight Shale Strata. *Journal of Fluid Mechanics* 710, 641–658.
- Gasparik M., Gensterblum Y., Ghanizadeh A., Weniger P. and Krooss B.M. (2015): High-Pressure/High-Temperature Methane-Sorption Measurements on Carbonaceous Shales by the Manometric Method: Experimental and Data-Evaluation Considerations for Improved Accuracy. *SPE Journal*, 20 (4), 790-809.
- Ghanizadeh A., Amann-Hildenbrand A., Gasparik M., Gensterblum Y., Krooss B.M. and Littke R. (2013): Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales: II. Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany). *International Journal of Coal Geology* 123, 20–33.
- Ghanizadeh A., Gasparik M., Amann-Hildenbrand A., Gensterblum Y. and Krooss B.M. (2014): Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales. I. *Scandinavian Alum Shale. Marine and Petroleum Geology* 51, 79–99.
- Goral J., Deo M. and Andrew M. (2018): Pore network modeling of Marcellus Shale using digital rock analysis with machine learning image segmentation. *ZEISS Application Note*, 34 p.
- Hadjiconstatinou N.G. (2006): The limits of Navier-Stokes Theory and Kinetic extensions for describing small-scale gaseous hydrodynamics. *Physics of Fluids* 18 (11), 11301-11320.
- Heller R. and Zoback M. (2013): Laboratory Measurements of Matrix Permeability and Slippage Enhanced Permeability in Gas Shales. *Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, USA, August 12-14*, SPE 168856-MS

- Heller R., Vermilyen J. and Zoback M. (2014): Experimental Investigation of Matrix Permeability of Gas Shales. *AAPG Bulletin* 98 (5), 975–995.
- Hornýak G.L., Tibbals H.F., Dutta J. and John J. Moore (2008): Introduction to Nanoscience and Nanotechnology (1st ed.). (CRC Press., Boca Raton, 2008), 198-257.
- Javadpour F. (2009): Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone). *Journal of Canadian Petroleum Technology* 48 (8), 16-21.
- Javadpour F., Fisher D. and Unsworth M. (2007): Nanoscale Gas Flow in Shale Gas Sediments. *Journal of Canadian Petroleum Technology* 46 (10), 55-61.
- Juhász A. (1999): Diagenetic constraints on Paleohydrodynamic and Thermal Reconstruction of Neogene Sediments at the Békés Basin – Battonya High Hydrocarbon Province, SE Hungary. —PhD
- Juhász A., M. Tóth T., Ramseyer K. and Matter A. (2002): Connected fluid evolution in fractured crystalline basement and overlying sediments, Pannonian Basin, SE Hungary. *Chemical Geology* 182, 91–120.
- Juhász Gy. (1992): A pannóniai (s.l.) formációk térképezése az Alföldön: elterjedés, fácies és üledékes környezet. *Földtani Közlöny* 122, 133–165.
- Juhász Gy. (1994): Magyarországi neogén medencerészek pannóniai s.l. üledéksorának összehasonlító elemzése. *Földtani Közlöny* 124, 341–365.
- Juhász Gy. (1996): Endrődi Márga Formáció. In: *Gyalog L. (1996): A földtani térképek jelkulcsa és a rétegtani egységek rövid leírása. (Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 1996) 74-75*
- Juhász Gy. (1998): A magyarországi neogén mélymedencék pannóniai képződményeinek litosztratigráfiája. In: Bércszi I. & Jámor Á. (szerk.): *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana*. (MOL–MÁFI kiadvány, Budapest, 1998), 469–483.
- Juhász Gy. és Thamóné B. E. (2006): Az alföldi pannóniai s.l. képződmények ásványi összetétele II. —A pannóniai s.l. homokok és homokkővek ásványi összetétel változásának tendenciái és földtani jelentőségük. *Földtani Közlöny* 136 (2), 431–450.
- Juhász Gy., Németh G., Gajdos I. és Pap S. (1996): Szolnoki Homokkő Formáció. In: *Gyalog L. (1996): A földtani térképek jelkulcsa és a rétegtani egységek rövid leírása. (Magyar Állami Földtani Intézet, Budapest, 1996) p.74*
- Juhász Gy., Pogácsás Gy., Magyar I. and Hatalyák P. (2013): The Alpar canyon system in the Pannonian Basin, Hungary – its morphology, infill and development. — *Global and Planetary Change* 103, 174–192.

- Juhász Gy., Pogácsás Gy., Magyar I., Vakarcs G. (2006): Integrált-sztratigráfiai és fejlődéstörténeti vizsgálatok az Alföld pannóniai s.l. rétegsorában. *Földtani Közlöny* 136 (1), 51-86.
- Karniadakis. G., Arniadakis G., Beskok A. and Aluru N. (2005): Microflows and Nanoflows Fundamentals and Simulation; *Interdisciplinary Applied Mathematics* 29, 1-61.
- Klinkenberg L.J (1941): The permeability of porous media to liquids and gases. *API Drilling and Production Practice*, 200–213.
- Li H.B., Guo H.K., Li H.J. and Liu W. (2015): Thickness analysis of bound water film in tight reservoir. *Journal of Natural Gas Geoscience* 26 (1), 186–192.
- Looyestijn W.J. (2001): Distinguishing fluid properties and producibility from NMR logs. In: *Knut Backe and Ton Loermans (edt.) (2001): Proceedings of the 6th Nordic Symposium on Petrophysics* 1–9.
- Magyar I. (2010): A Pannon-medence ösföldrajza és környezeti viszonyai a késő miocénben. (GeoLitera, Földrajzi és Földtani Tanszékcsoport, Szeged, 2010) 140 p.
- Magyar I. (2010): A Pannon-medence ösföldrajza és környezeti viszonyai a késő miocénben. *GeoLitera*, Szeged, 140 p.
- Magyar I., Radivojevic D., Sztanó O., Synak R., Ujszászi K. and Pócsik M. (2013): Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene. *Global and Planetary Change* 103, 168–173
- Matenco L. and Radivojevic D. (2012): On the formation and evolution of the Pannonian Basin: Constraints derived from the structure of the junction area between the Carpathians and the Dinarides. *Tectonics* 31, 31 p.
- Mátyás J. and Matter A. (1997): Diagenetic indicators of meteoric flow in the Pannonian Basin, southeastern Hungary. In: *Mintanez I. P., Gregg J. M. and Shelton K. L. (eds): Basin Wide Diagenetic Patterns: Integrated Petrologic, Geochemical, and Hydrologic Considerations, Society for Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 57*, 281–296.
- Maxwell J.C. (1995): *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell Vol. II*, Harmon P.M. (ed.), (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995) 1862-1873.
- Mo S., He S., Lei G., Gai S. and Liu Z (2015): Effect of the drawdown pressure on the relative permeability in tight gas: a theoretical and experimental study. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 24, 264–271.
- Moghadam A.A. and Chalaturnyk R. (2014): Expansion of the Klinkenberg's slippage equation to low permeability porous media. *International Journal of Coal Geology* 123, 2–9.

- Moghadam A.A. and Chalatyrynk R. (2015): Analytical and Experimental Investigations of Gas Flow Regimes in Shales Considering the Influence of Mean Effective Stress. *SPE Journal* 21 (2), 557-572.
- Purcell W. R. (1949): Capillary Pressures – Their Measurement Using Mercury and the Calculation of Permeability Therefrom. *Transactions of AIME*, 1 (2), 39-48
- Rahmanian M., Aguilera R. and Kantzas A. (2013): A New Unified Diffusion--Viscous-Flow Model Based on Pore-Level Studies of Tight Gas Formations. *SPE Journal* 18 (1), 38–49.
- Remeczki F. (2020a): Extensive measurement protocol for porosity determination in case of calcareous marl samples. *Doktoranduszok Fóruma: Miskolc, 2019. november 21: Műszaki Földtudományi Kar szekciókiadványa*, 12-27.
- Remeczki F. (2020b): Matematikai módszer a márga minták kialakítása során keletkező mikrorepedések hatásának eliminálására. *Bányászati és Kohászati Lapok - Bányászat* 153 (2-3), 27-31.
- Remeczki F. (2020c): Petrofizikai vizsgálatok nehézségei márga minták esetén. *A 17 éves PEME XX. (E/2.) PhD - On-line Konferenciájának előadásai II*, 37-43.
- Remeczki F. (2020d): Connate water saturation determination with a mathematical method – in case of Hungarian tight gas reservoir samples. *IX. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia 2020: Tanulmánykötet*, 425-433.
- Remeczki F. (2021a): Evaluation of calculated connate water saturation values in case of unconventional rock samples. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 58-68.
- Remeczki F. (2021b): Áteresztőképesség meghatározása és korrekciója tight és shale formációkból származó mintatestek esetén. PULSE Zárókonferencia, Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet, 2021.10.25.,
https://www.afki.hu/files/16749/PULSE_zaro_RF.pdf
- Remeczki F. and Horváth G. (2021): Laboratory experiment to investigate permeability change in tight sandstone samples in case of water based formation damage. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 50-57.
- Remeczki F., Szabó N.P. and Dobróka M. (2020): Flow rate and permeability determination in rock samples from unconventional reservoirs - to support geophysical inversion model. *Geosciences and Engineering: A publication of the University of Miskolc* 8 (13), 154-166.
- Roy S., Raju R., Chuang H.F., Cruden B.A. and Meyyappan M. (2003): Modeling gas flow through microchannels and nanopores. *Journal of Applied Physics* 93, 4870–4879.

- Rushing J.A, Newsham K.E., Lasswell P.M., Cox J.C. and Blasingame T.A. (2004): Klinkenberg-Corrected Permeability Measurements in Tight Gas Sands: Steady-State versus Unsteady-State Techniques. *2004 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26-29 September*. SPE 89867
- Sakhaee-Pour A. and Bryant S. (2012): Gas Permeability of Shale. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 15 (4), 401–409.
- Singh H., Javadpour F., Ettehadtavakkol A. and Darabi H. (2014): Nonempirical apparent permeability of shale. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 17 (3), 414–424.
- Sinha S., Braun E. M., Passey Q. R., Leonardi S. A., Wood A. C., Zirkle T. and Kudva R. A. (2012): Advances in Measurement Standards and Flow Properties Measurements for Tight Rocks such as Shales. *2012 SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 20-22 March*. SPE 152257
- Su Y.L., Fu J.G., Li L., Wang W.D., Zafar A., Zhang M. and Ouyang W.P. (2020): A new model for predicting irreducible water saturation in tight gas reservoirs. *Petroleum Science* 17, 1087-1100.
- Szabó N.P., Remeczki F., Jobbik A., Kiss K. and Dobróka M. (2021): Interval inversion based well log analysis assisted by petrophysical laboratory measurements for evaluating tight gas formations in Derecske through, Pannonian basin, east Hungary. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 208 (C), 13 p.
- Sztanó O., Horányi A., Molnár G. and Bada G. (2015): One basin, three different turbidite systems: Late Miocene, Makó Trough, Pannonian Basin, Hungary. In: *Abstract Book of 31st IAS Meeting of Sedimentology, Krakow, Poland*, p. 518.
- Sztanó O., Szafián P., Magyar I., Horányi A., Bada G., Hughes D. W. and Wallise R. J. (2013): Aggradation and progradation controlled clinothems and deep-water sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian Basin, SE Hungary. *Global and Planetary Change* 103, 149–167.
- Szuromi-Korecz A., Sütő-Szentai M. and Magyar I. (2004): Biostratigraphic revision of the Hód-I well: Hungary's deepest borehole failed to reach the base of the Upper Miocene Pannonian Stage. *Geologica Carpathica* 55, 475–485.
- Taktak F., Rigane A., Boufares T., Kharbachi S. and Bouaziz S. (2011): Modelling approaches for the estimation of irreducible water saturation and heterogeneities of the commercial Ashtart reservoir from the Gulf of Gabes, Tunisia. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 78 (2), 376–383.

- Tari G., Dövényi P., Dunkl I., Horváth F., Lenkey L., Stefanescu M., Szafián P. and Tóth T. (1999): Lithospheric structure of the Pannonian basin derived from seismic, gravity and geothermal data. In: *Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F., Séranne, M. (eds.) The Mediterranean Basins: tertiary Extension within the Alpine Orogen. (Geological Society, London, Special Publications)* 156, 215–250.
- Thamóné B. E., Juhász Gy. és Ó. Kovács L. (2006): Az alföldi pannóniai s.l. képződmények ásványi összetétele I. —A pannóniai s.l. homokok és homokkövek jellemzői és eredete. *Földtani Közlöny* 136, 407–430.
- Tian X.F., Cheng L.S., Li X.L. et al. (2014): A new method to calculate relative permeability considering the effect of pore-throat distribution. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology* 32 (6), 100–104.
- Tian X.F., Cheng L.S., Yan Y.Q. et al. (2015): An improved solution to estimate relative permeability in tight oil reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 5 (3), 305–314.
- Vakarcz G. és Várnai P. (1991): A Derecskei-árok környezetének szeizmosztratigráfiai modellje. *Magyar Geofizika* 32, 38-50.
- Whitaker S. (1986): Flow in porous media I: A theoretical derivation of Darcy's law. *Transport in Porous Media* 1, 3-25.
- Yu B. and Cheng P. (2002): A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (14), 2983–2993.
- Yu B.M. and Li J.H. (2001): Some fractal characters of porous media. *Fractals* 9 (3), 365–372.
- Zhang L., Tong J., Xiong Y. and Zhao Y. (2017): Effect of temperature on the oil–water relative permeability for sandstone reservoirs. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 105, 535–548.
- Zhu L., Zhang C., Zhang C., Zhang Z., Zhou X. and Zhu B. (2019): An improved theoretical nonelectric water saturation method for organic shale reservoirs. *IEEE Access*. 7, 51441–51456.
- Ziarani A.S. and Aguilera R. (2012): Knudsen's permeability correction for tight porous media. *Transport in Porous Media* 91 (1), 239–260.
- Zimmerman R.W. (2018): Fluid flow in porous media (The Imperial College Lectures in Petroleum Engineering Vol. 5), 1-19, 135-148.

Saját publikációk jegyzéke

- Szabó N.P., Remeczki F., Jobbik A., Kiss K. and Dobróka M. (2021): Interval inversion based well log analysis assisted by petrophysical laboratory measurements for evaluating tight gas formations in Derecske through, Pannonian basin, east Hungary. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 208 (C), 13 p, (Q1)
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109607>
- Remeczki F. (2021a): Evaluation of calculated connate water saturation values in case of unconventional rock samples. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 58-68. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.1.6>
- Remeczki F. and Horváth G. (2021): Laboratory experiment to investigate permeability change in tight sandstone samples in case of water based formation damage. *Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye* 11 (1), 50-57.
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.1.5>
- Remeczki F., Szabó N.P. and Dobróka M. (2020): Flow rate and permeability determination in rock samples from unconventional reservoirs - to support geophysical inversion model. *Geosciences and Engineering: A publication of the University of Miskolc* 8 (13), 154-166.
- Remeczki F. (2020b): Matematikai módszer a márga minták kialakítása során keletkező mikrorepedések hatásának eliminálására. *Bányászati és Kohászati Lapok - Bányászat* 153 (2-3), 27-31.
- Remeczki F. (2020d): Connate water saturation determination with a mathematical method – in case of Hungarian tight gas reservoir samples. *IX. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia 2020: Tanulmánykötet*, 425-433.
- Remeczki F. (2020c): Petrofizikai vizsgálatok nehézségei márga minták esetén. *A 17 éves PEME XX. (E/2.) PhD - Online Konferenciájának előadásai II*, 37-43.
- Remeczki F. (2020a): Extensive measurement protocol for porosity determination in case of calcareous marl samples. *Doktoranduszok Fóruma: Miskolc, 2019. november 21: Műszaki Földtudományi Kar szekciókiadványa*, 12-27.

MELLÉKELTEK

Mellékletjegyzék

<i>A. melléklet. A kutatás során vizsgált minták alapadatai</i>	100
<i>B. melléklet. A tömött homokkő és márga minták porozitás és permeabilitás adatai</i>	104
<i>C. melléklet. A vizsgált minták pórustorok méret eloszlásai</i>	106
<i>D. melléklet. A vizsgált minták higany besajtolás százalékos arányának függvényében ábrázolt pórustorok sugár eloszlás görbéi</i>	111
<i>E. melléklet. Kapilláris nyomásgörbék</i>	116
<i>F. melléklet. 1. tétel mért és számított adatai</i>	121
<i>G. melléklet. Tapadóvíz viszkozitásának meghatározása</i>	124
<i>H. melléklet. Tapadóvíz telítettségek</i>	125
<i>I. melléklet. 4. tétel számított adatai</i>	126
<i>J. melléklet. Hu-1/12 sorozat szimulációs eredményei grafikusan</i>	128

A. melléklet. A kutatás során vizsgált minták alapadatai

Mintadugó neve	Formáció neve	Lito/Kronoszt ratigráfia	Fő litológia	Magfúrás felső mélysége (m)	Magfúrás alsó mélysége (m)	Vételezett minta felső mélysége (m)	Vételezett minta alsó mélysége (m)
Be-1/1/1	Abonyi	Bádeni	Homokos tufa	3402	3418,5	3415	3415,2
Be-1/1/2	Abonyi	Bádeni	Homokos tufa	3402	3418,5	3415	3415,2
Be-1/2/1	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3402	3418,5	3405,1	3405,3
Be-1/4/1	Abonyi	Miocén	Konglomerátum	3475	3493	3481,9	3482,1
Be-1/4/2	Abonyi	Miocén	Konglomerátum	3475	3493	3481,9	3482,1
Be-1/5/1	Abonyi	Miocén	Agyagos	3592,5	3601	3596,3	3596,4
Be-2/1/1	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3620	3638	3620	3620,1
Beru2-2.3.1 V	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa	3620	3638	3622,9	3623
Beru2-2.3.4 F	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa	3620	3638	3624,2	3624,3
Beru2-2.4.3 V	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa-tufit	3620	3638	3628,8	3628,9
Beru2-2.5.4 F	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa-agglom.	3620	3638	3631,2	3631,3
Beru2-2.6.3V	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa-agglom.	3620	3638	3633,8	3633,9
Beru2-2.3.9 GF	Tari dácittufa	Bádeni	Tufa	3620	3638	3626,4	3626,5
Be-4/1/1	Abonyi	Miocén	Homokkő	3470	3481	3474,35	3474,5
Be-4/1/2	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481	3474,35	3474,5
Be-4/1/3	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481	3474,35	3474,5
Be-4/2/1	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481	3472,25	3472,4
Be-4/2/2	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481	3472,25	3472,4
Be-4/2/3	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3470	3481	3472,25	3472,4
Be-4/3/1	Abonyi	Miocén	Breccsa	3481	3488	3482,25	3482,35
Be-4/4/1	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3488	3506	3489,2	3489,3
Be-4/4/2	Abonyi	Bádeni	Homokkő	3488	3506	3489,2	3489,3
Be-4/5/1	Abonyi	Miocén	Aleurolit	3579	3607,2	3590	3590,2
Be-4/5/2	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3590	3590,2
Be-4/5/3	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3590	3590,2
Be-4/5/4	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3590	3590,2
Be-4/6/1	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3589	3589,08
Be-4/7/1	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3586,8	3586,9
Be-4/7/2	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3579	3607,2	3586,8	3586,9
Be-6/3/1	Abonyi	Bádeni	Breccsa	3711	3729	3715	3715,1
Be-6/4/1	Abonyi	Bádeni	Aleurolit	3854	3858,5	3855,4	3855,5
Bék-5/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927	2918,7	2919
Bék-5/1/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927	2918,7	2919
Bék-5/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927	2923,2	2923,3
Bék-5/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927	2923,2	2923,3
Bék-5/2/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2918	2927	2923,2	2923,3
Bék-5/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/3/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/3/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/3/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/3/5	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/3/6	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3156,7	3156,9
Bék-5/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3164,8	3165
Bék-5/4/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3150	3165	3164,8	3165
MM-11A	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmaréka	2780	2782	2780	2782
FK-5/4E-	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939	2936,15	2936,5
FK-5/1E-P	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939	2929,9	2930,25
Fk-5/2/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939	2935,8	2936
Fk-5/2/2	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939	2935,8	2936
Fk-5/4/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	2929	2939	2936,15	2936,5
Gyo-1/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	3007,8	3008,42
Gyo-1/1/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	3007,8	3008,42
Gyo-1/1/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	3007,8	3008,42
Gyo-1/1/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	3007,8	3008,42
Gyo-1/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	2998,78	2999,22
Gyo-1/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	2998,78	2999,22
Gyo-1/2/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2993	3011	2998,78	2999,22
Gyo-1-3-E-F	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3060	3078	3061,75	3062
Gyo-1/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3060	3078	3070,7	3071,25

Mintadugó neve	Formáció neve	Lito/Kronosztatigráfia	Fő litológia	Magfűrés felső mélysége (m)	Magfűrés alsó mélysége (m)	Vételezett minta felső mélysége (m)	Vételezett minta alsó mélysége (m)
Gyo-1/4/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3060	3078	3070,7	3071,25
Gyo-1/4/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3060	3078	3070,7	3071,25
Gyo-1/5/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3130	3147	3133,6	3134,13
Gyo-1/5/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3130	3147	3133,6	3134,13
Gyo-1/5/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3130	3147	3133,6	3134,13
Gyo-1/5/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3130	3147	3133,6	3134,13
Hód-I/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3433	3442	3434,46	3434,64
20-Hód-I/10/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	5070	5074		
20-Hód-I/10/2	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	5070	5074		
Hód-I/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4117	4126	4117	4126
Hód-I/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4117	4126	4117	4126
Hód-I/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4263,8	4271	4263,8	4271
Hód-I/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4195	4204	4195	4204
Hód-I/4/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4195	4204	4195	4204
Hód-I/5/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3527	3535	3532,05	3532,2
Hód-I/5/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3527	3535	3532,05	3532,2
Hód-I/6/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4017	4026	4017	4026
Hód-I/6/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4017	4026	4017	4026
Hód-I/7/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4017	4026	4017	4026
Hód-I/7/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	4017	4027	4017	4027
20-Hód-I/8	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	4983	4988		
20-Hód-I/9/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Agyagmárga	4195	4204		
Hu-1-7E-T-1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3691	3711	3697	3711
Hu-1/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2877	2882	2877	2878,9
Hu-1/1/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2877	2882	2877	2882
Hu-1/1/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2877	2882	2877	2882
Hu-1/10/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3830	3848	3830	3848
Hu-1/11/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3907	3913	3907	3913
Hu-1/12/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3907	3913	3907	3913
Hu-1/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/2/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/4/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3033	3038	3033	3038
Hu-1/5/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3172	3177	3172	3177
Hu-1/5/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3172	3177	3172	3177
Hu-1/6/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3172	3177	3172	3177
Hu-1/6/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3172	3177	3172	3177
Hu-1/9/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3830	3848	3830	3848
Kom-12/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	2584	2585	2584,25	2584,65
Kon-1/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357	3330	3357
Kon-1/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357	3330	3357
Kon-1/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357	3330	3357
Kon-1/3/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357	3330	3357
Kon-1/3/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3330	3357	3330	3357
Kon-1/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3404	3431	3416,39	3416,97
Kon-1/4/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3404	3431	3416,39	3416,97
Kon-1/4/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3404	3431	3416,39	3416,97
Kon-1/6/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3580	3599	3580	3599
Kon-1/7	Endrődi	Alsó-pannon	Mész márga	3580	3599	3580	3599
Kon-1/8/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3599	3618	3617,5	3617,7
Kon-1/8/2	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3599	3618	3617,5	3617,7
Kon-1/8/3	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3599	3618	3617,5	3617,7
Köt-5/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2896	2896,2
Köt-5/1/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2896	2896,2
Köt-5/2/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2898,7	2898,9
Köt-5/2/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2898,7	2898,9
Köt-5/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8

Mintadugó neve	Formáció neve	Lito/Kronoszt ratigráfia	Fő litológia	Magfúrás felső mélysége (m)	Magfúrás alsó mélysége (m)	Vételezett minta felső mélysége (m)	Vételezett minta alsó mélysége (m)
Köt-5/3/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8
Köt-5/3/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8
Köt-5/3/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8
Köt-5/3/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8
Köt-5/3/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	2894	2903	2894,6	2894,8
Köt-5/4/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/5	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/6	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/7	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/4/8	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3048,35	3048,85
Köt-5/5/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3051,5	3051,7
Köt-5/6/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3046	3046,25
Köt-5/6/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3043	3052	3046	3046,25
Köt-5/7/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga-Mészmárga	3227	3231	3227,35	3227,55
Köt-5/8E/R-01	Endrődi	Alsó-pannon	Márga-Mészmárga	3227	3231	3230	3230,35
Köt-5/9/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3227	3231	3229,75	3230
Köt-5/9/2	Endrődi	Alsó-pannon	Márga-Mészmárga	3227	3231	3229,75	3230
Szab-1/1/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3283,2	3283,5
Szab-1/1/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3283,2	3283,5
Szab-1/1/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3283,2	3283,5
Szab-1/1/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3283,2	3283,5
Szab-1/1/5	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3283,2	3283,5
Szab-1/10/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3510	3528	3516,45	3516,55
Szab-1/11/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3605	3605,15
Szab-1/12/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3600,05	3600,3
Szab-1/12/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3600,05	3600,3
Szab-1/12/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3600,05	3600,3
Szab-1/12/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3600,05	3600,3
Szab-1/13/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3596,35	3596,5
Szab-1/13/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3596	3614	3596,35	3596,5
Szab-1/3/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3279,6	3279,8
Szab-1/3/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3279,6	3279,8
Szab-1/3/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3279,6	3279,8
Szab-1/3/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3279,6	3279,8
Szab-1/5/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3274,25	3274,45
Szab-1/5/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3274,25	3274,45
Szab-1/5/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3274,25	3274,45
Szab-1/6/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,75	3271,95
Szab-1/6/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,75	3271,95
Szab-1/6/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,75	3271,95
Szab-1/6/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,75	3271,95
Szab-1/6/5	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,75	3271,95
Szab-1/7/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,1	3271,25
Szab-1/7/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3271,1	3271,25
Szab-1/8/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,6	3269,8
Szab-1/8/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,6	3269,8
Szab-1/8/3	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,6	3269,8
Szab-1/8/4	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,6	3269,8
Szab-1/8/5	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,6	3269,8
Szab-1/9/1	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,8	3270
Szab-1/9/2	Szolnoki	Alsó-pannon	Homokkő	3266	3285	3269,8	3270
Ui-1/1/1	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3290	3300	3299,8	3300
Ui-1/1E-P	Endrődi	Alsó-pannon	Mészmárga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/10E/R-03	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/10E-T1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1-10-E-T2	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522

Mintadugó neve	Formáció neve	Lito/Kronoszt ratigráfia	Fő litológia	Magfúrás felső mélysége (m)	Magfúrás alsó mélysége (m)	Vételezett minta felső mélysége (m)	Vételezett minta alsó mélysége (m)
Ui-1/11/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/11E/R-06	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/12E/R-04	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1-13-E-P	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/14E/R-05	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/2E-03-T	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-2-E-01-45	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-2-E-01-P	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-2-E-02-45	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-2-E-02-T	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1/3E-03-T	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-3-E-01-T	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-3-E-02-P	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3404	3417	3404	3417
Ui-1-4-E-45	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/5E/R-01	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1-6-E-P	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/7/1	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1/8E/R-02	Szolnoki	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522
Ui-1-9-E-45	Endrődi	Alsó-pannon	Márga	3504	3522	3504	3522

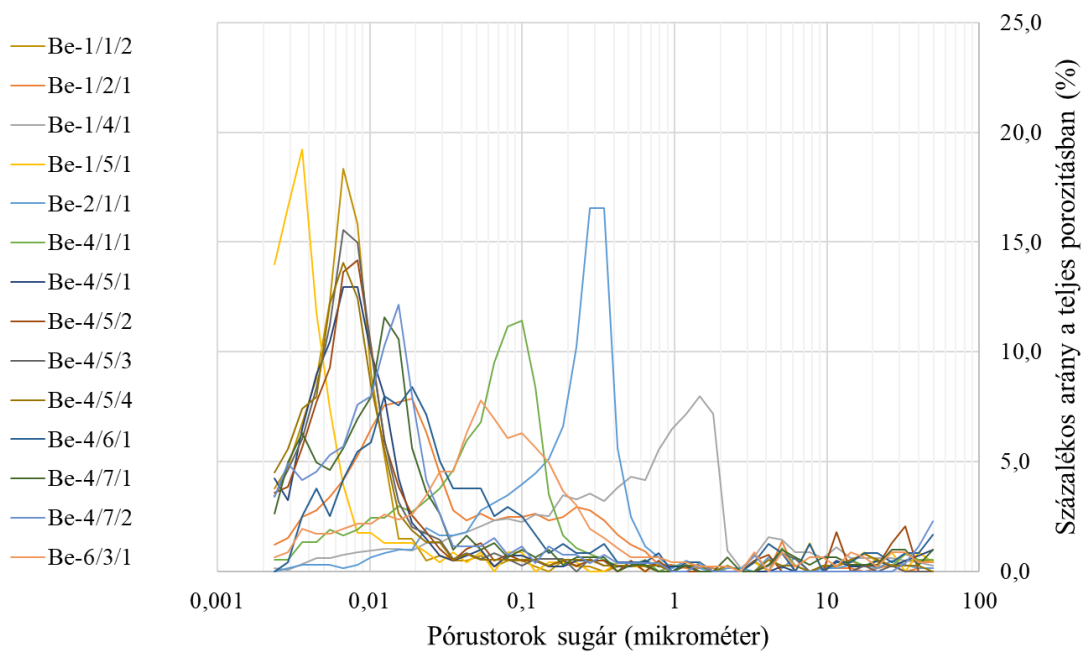
B. melléklet. A tömött homokkő és márga minták porozitás és permeabilitás adatai

Minta azonosító	He porozitás (%)	HPMI porozitás (%)	N2 permeaméter (mikroDarcy)	PPD permeaméter (mikroDracy)
Bék-5/1/1	11,76	11,37	291,00	18,54
Bék-5/2/1	9,36	8,69	51,30	2,59
Bék-5/2/2	9,00	8,50	54,70	2,02
Bék-5/3/1	5,38	4,90	20,80	
Bék-5/3/5	4,78	4,94	21,80	1,91
Bék-5/3/6	7,41	6,11	340,00	46,40
Gyo-1/1/1	9,26	8,89	116,10	5,98
Gyo-1/1/2	8,51	8,70	111,20	
Gyo-1/1/3	8,57	7,53	87,30	4,47
Gyo-1/1/4	8,28	8,67	60,20	3,35
Gyo-1/2/1	9,79	9,00	141,70	7,99
Gyo-1/4/1	9,84	7,33	104,80	5,39
Gyo-1/4/2	9,02	8,51	91,90	
Gyo-1/4/3	8,40	8,21	74,00	2,93
Gyo-1/5/1	8,94	8,94	162,10	8,14
Gyo-1/5/3	8,60	8,58	35,40	4,59
Gyo-1/5/4	8,07	7,38	68,80	3,62
Hu-1/1/1	9,43		134,90	
Hu-1/1/2	9,09	8,92	136,00	4,31
Hu-1/1/3	9,32	8,95	106,00	
Hu-1/2/1	5,55	3,35	24,20	0,92
Hu-1/2/2	3,55	2,70	23,50	
Hu-1/3/1	8,59	9,25	357,00	
Hu-1/4/1	10,56	9,93	1770,00	
Hu-1/4/2	9,35	9,64	124,00	4,50
Hu-1/5/1	9,83	10,26	258,00	7,51
Hu-1/5/2	10,45	10,63	302,00	10,74
Hu-1/6/2	10,44	10,54	430,00	17,60
Köt-5/1/1	9,03	8,86	73,60	3,01
Köt-5/1/2	9,20	10,01	69,50	
Köt-5/2/1	10,16	8,81	169,60	9,78
Köt-5/2/2	10,01	9,46	132,30	
Köt-5/4/1	8,44	8,06	44,70	2,75
Köt-5/4/4	7,12	7,10	43,30	1,35
Köt-5/4/5	8,43	8,08	49,90	2,86
Köt-5/4/6	8,82	7,72	47,20	2,89
Köt-5/4/7	7,60	6,57	5,90	1,89
Köt-5/4/8	7,72	8,17	5,30	1,70
Köt-5/5/1	5,23	3,80	2,40	0,64
Köt-5/6/2	7,64	7,56	6,90	1,04
Szab-1/1/1	11,69	11,18	254,00	9,11
Szab-1/1/2	11,11	10,42	2125,60	
Szab-1/1/3	11,46	11,48	164,90	
Szab-1/1/4	10,40	9,61	83,40	2,17
Szab-1/1/5	10,57	9,59	73,80	1,50
Szab-1/11/1	7,44	7,09	43,50	4,38
Szab-1/12/1	8,15	7,85	99,40	
Szab-1/12/2	8,10	7,96	96,80	5,92
Szab-1/12/4	4,85	4,52	18,00	0,71
Szab-1/13/1	11,03	10,00	397,50	48,34
Szab-1/13/2	10,62	9,88	265,90	31,64
Szab-1/3/1	7,67	7,33	25,60	0,82
Szab-1/3/2	5,90	6,02	18,60	1,08
Szab-1/3/3	6,39	6,29	41,70	
Szab-1/3/4	7,62	6,61	125,00	
Szab-1/5/1	11,31	10,39	1424,00	36,65
Szab-1/6/2	10,24	10,03	75,00	1,82
Szab-1/6/5	10,15	9,73	87,50	2,14
Szab-1/7/2	10,13	9,65	438,20	26,29
Szab-1/8/1	10,99	10,46	2153,00	95,65
Szab-1/8/5	10,40	9,91	401,50	19,24
Szab-1/9/2	10,56	10,26	549,00	23,29

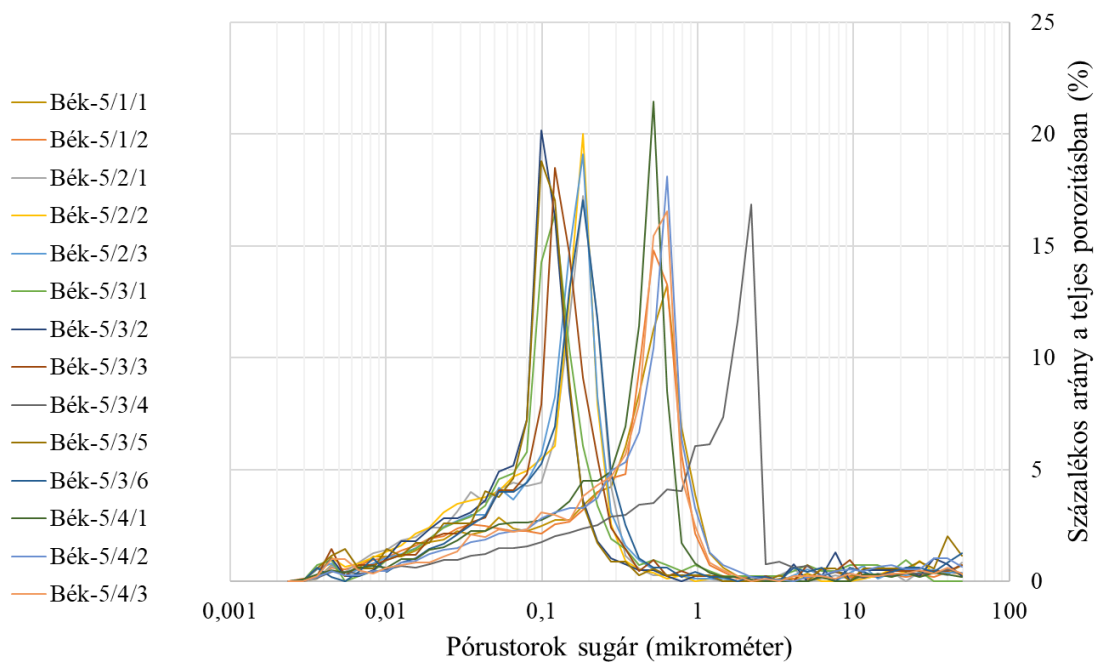
Minta azonosító	He porozitás (%)	HPMI porozitás (%)	N ₂ permeaméter (mikroDarcy)	Nano-Perm effektív (mikroDarcy)
Fk-5/4/1	0,66	0,24	136,00	
Fk-8/1/1	4,56	4,33		0,20
Fk-8/2/1	4,49	3,98		
Fk-8/2/2	4,61	4,28	165,30	
Fk-8/3/1	2,16	1,91		0,51
Fk-8/3/2	2,15	1,92		0,49
Fk-8/4/1	1,10	0,82	14,00	
Fk-8/4/2	2,16	1,38		0,00
Fk-8/5/1	3,48	3,41		0,22
Fk-8/5/2	3,46	3,86		2,75
Fk-8/5/3	2,23	1,98		0,00
Fk-8/6	2,81	2,51		
Hu-1/10/1	2,34		5,50	
Hu-1/11/1	4,75	4,48	8,70	
Hu-1/12/1	3,41	3,19		0,32
Hu-1/12/4	3,10	3,22	122,30	
Hu-1/12/6	3,40	3,08		0,39
Kom-12/1	2,27	1,95		0,06
Kon-1-6-1	2,79	2,87	2,70	
Kon-1-8-1	5,82	5,68	6,50	
Köt-5/7/1	3,84	3,06	43,10	
Köt-5/9/1	2,71	2,74		0,57
Köt-5/9/2	2,80	2,48	6,60	
Ui-1/1/1	5,57	5,19		0,42
Ui-1/11E/1	4,52	4,66	79,20	
Ui-1/7/1	1,71	2,01		0,02
Ui-1-10-E-T2	2,71	2,41		0,04
Ui-1-13-E-P	1,59		65,20	
Ui-1-2-E-01-45	3,51	3,59		0,24
Ui-1-2-E-01-P	4,26	3,55		0,93
Ui-1-2-E-02-45	5,32		10,50	
Ui-1-2-E-02-T	5,38			0,08
Ui-1-3-E-01-T	4,86	4,68		0,10
Ui-1-3-E-02-P	4,16	4,77	2,80	
Ui-1-4-E-45	4,42	4,77		0,20
Ui-1-6-E-P	2,41	2,31	37,80	
Ui-1-9-E-45	1,73	2,06		0,03

C. melléklet. A vizsgált minták pórustorok méret eloszlásai

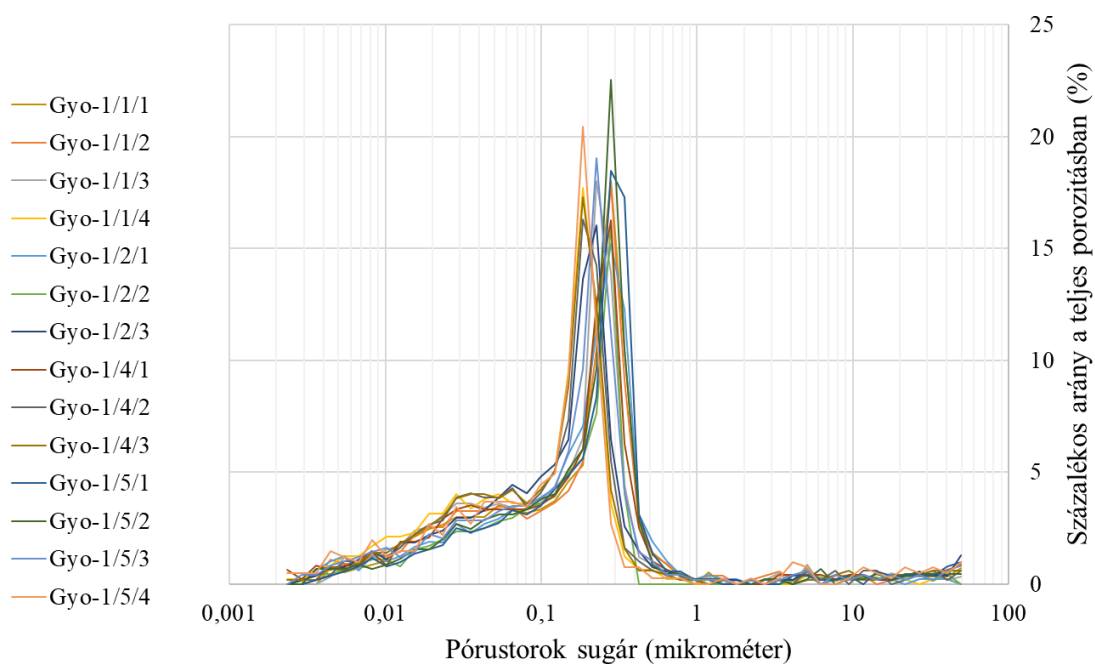
Kút megnevezése: Berettyóújfalu-1; -2; -4; -6 (Beru-1,-2,-4,-6)



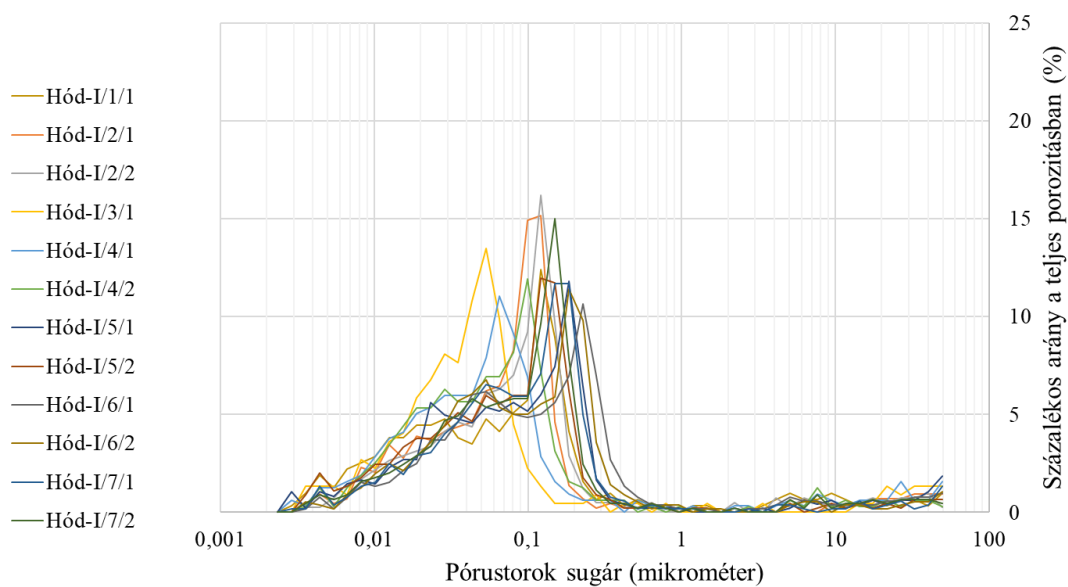
Kút megnevezése: Békés-5 (Bék-5)



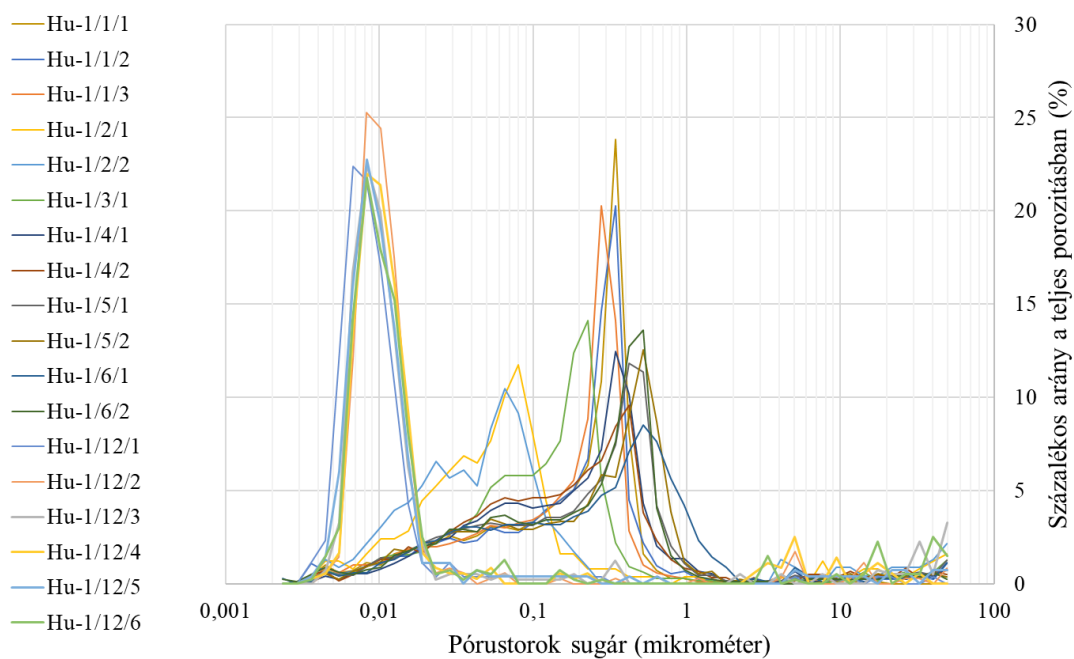
Kút megnevezése: Gyoma-1 (Gyo-1)



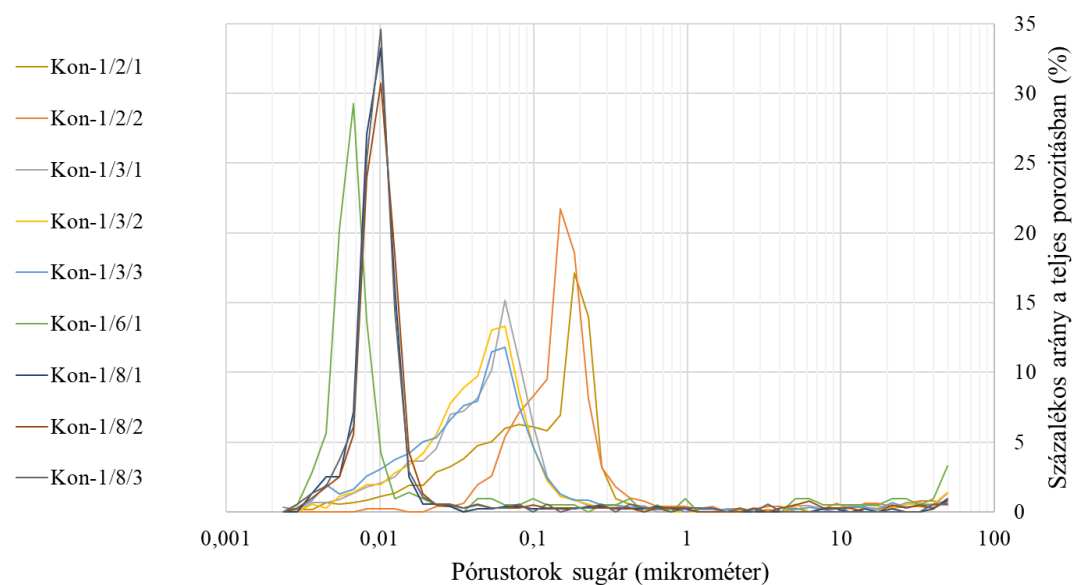
Kút megnevezése: Hódmezővásárhely-I (Hód-1)



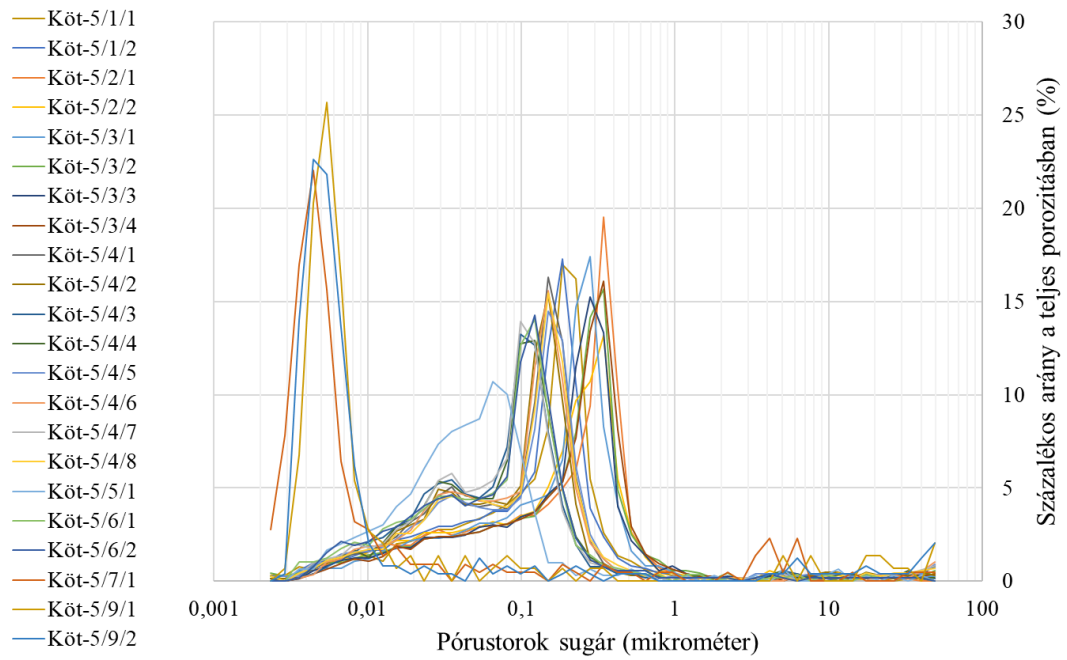
Kút megnevezése: Hunya-1 (Hu-1)



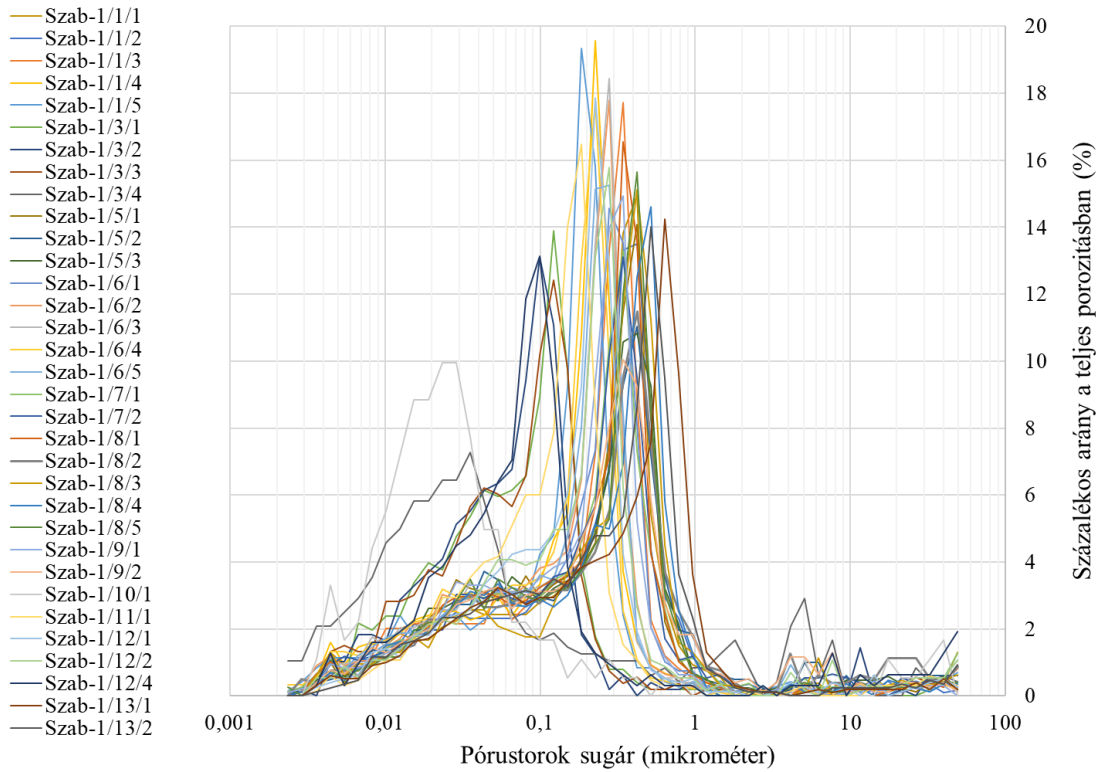
Kút megnevezése: Kondoros-1 (Kon-1)



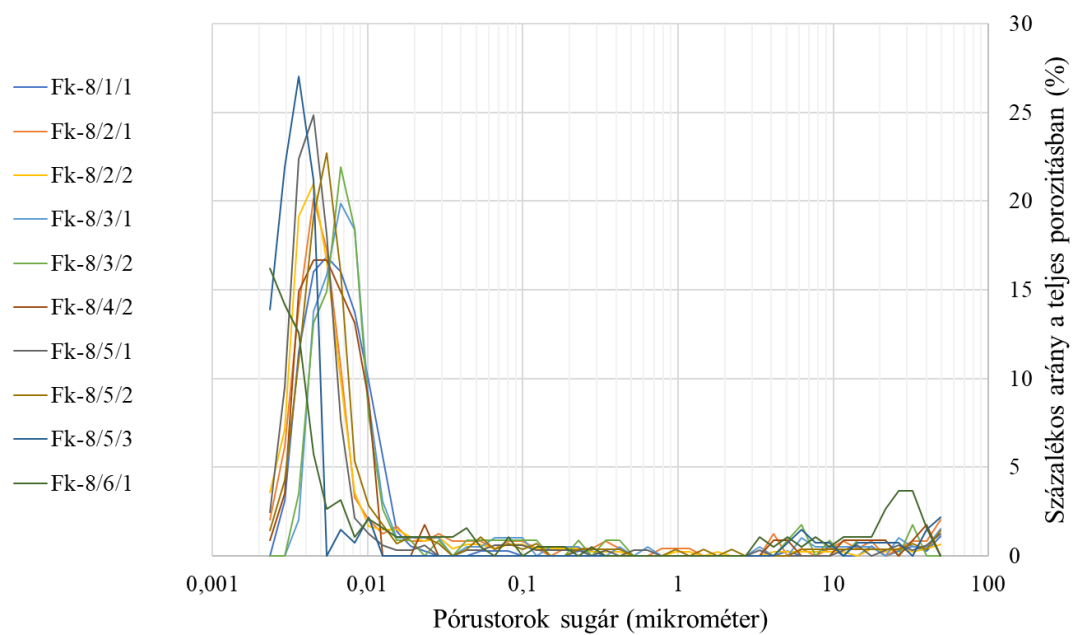
Kút megnevezése: Köröstarcsa-5 (Köt-5)



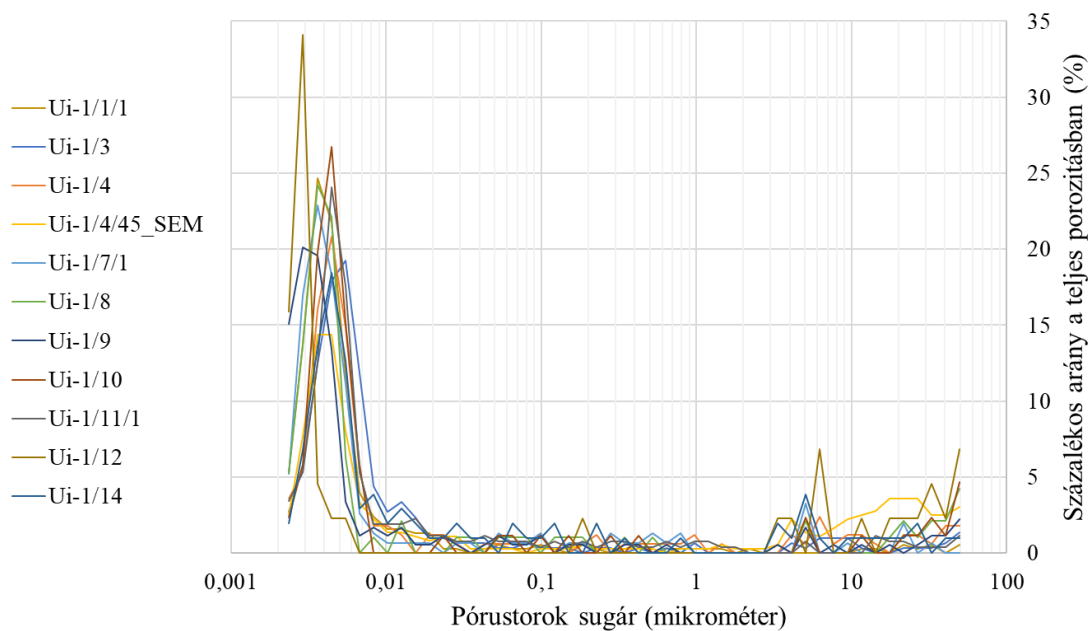
Kút megnevezése: Szabadkígyós-1 (Szab-1)



Kút megnevezése: Forráskút-8 (Fk-8)

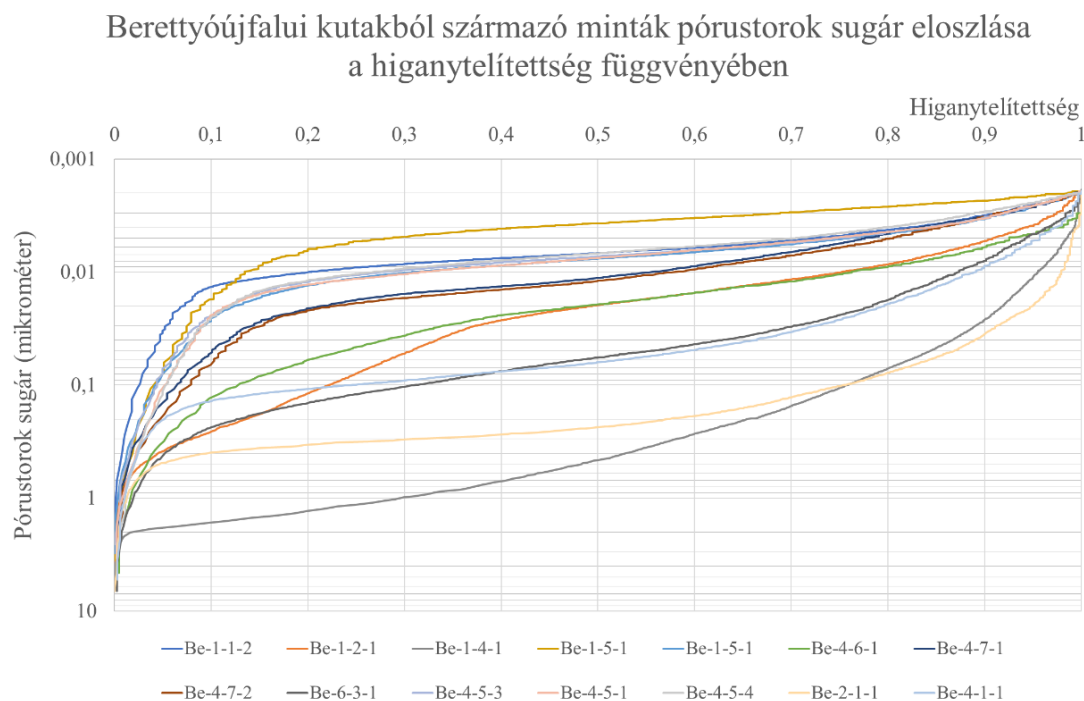


Kút megnevezése: Újszentiván-1 (Ui-1)

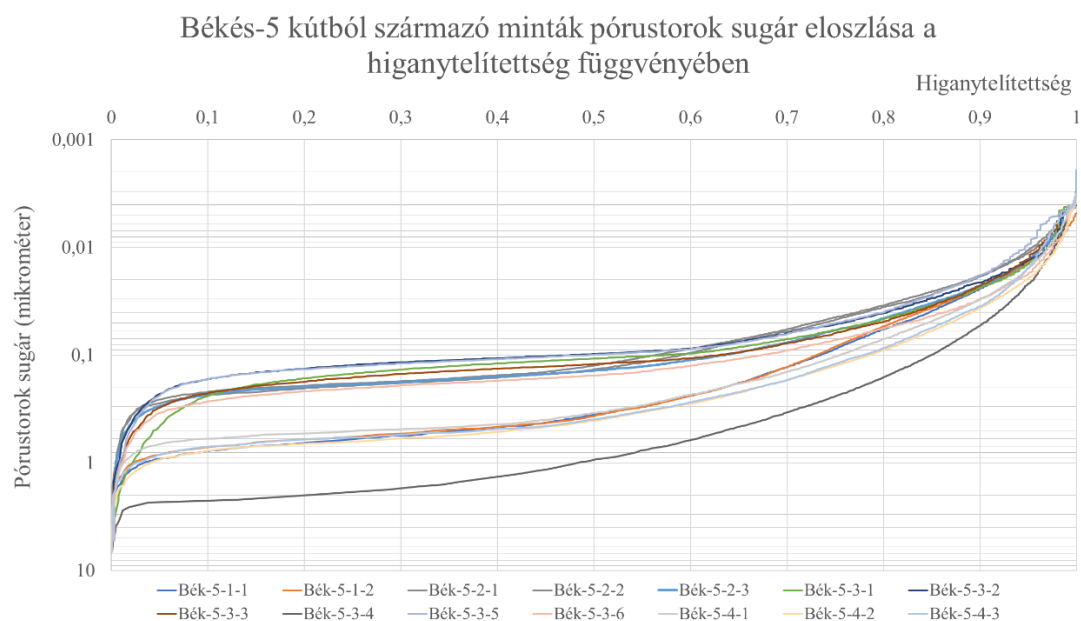


D. melléklet. A vizsgált minták higany besajtolás százalékos arányának függvényében ábrázolt pórustorok sugár eloszlás görbéi

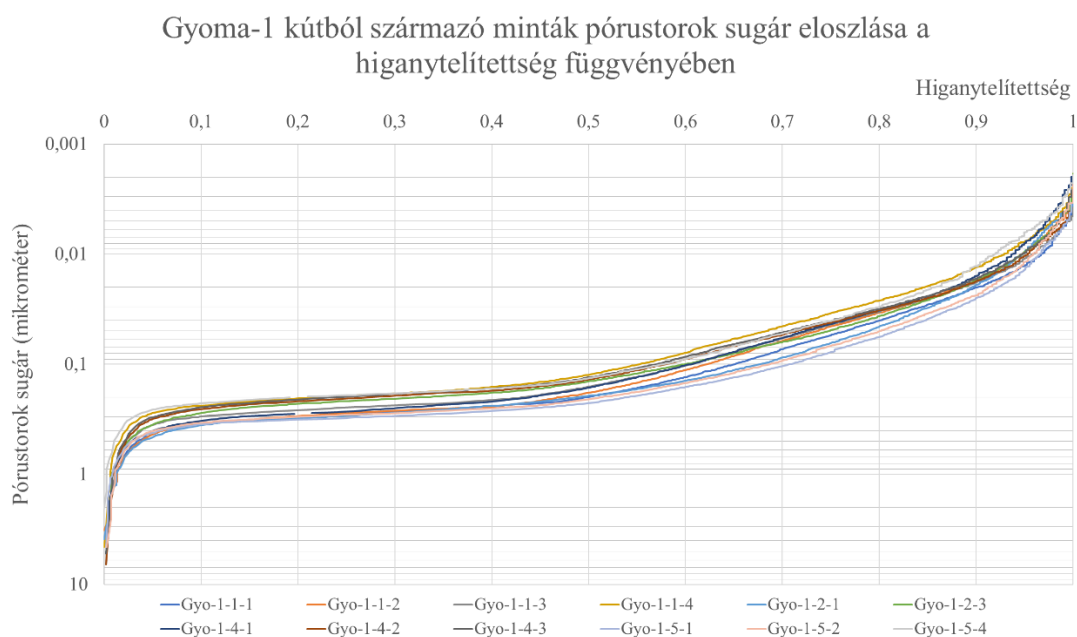
Kút megnevezése: Berettyóújfalu-1,-4,-6 (Beru-1,-4,-6)



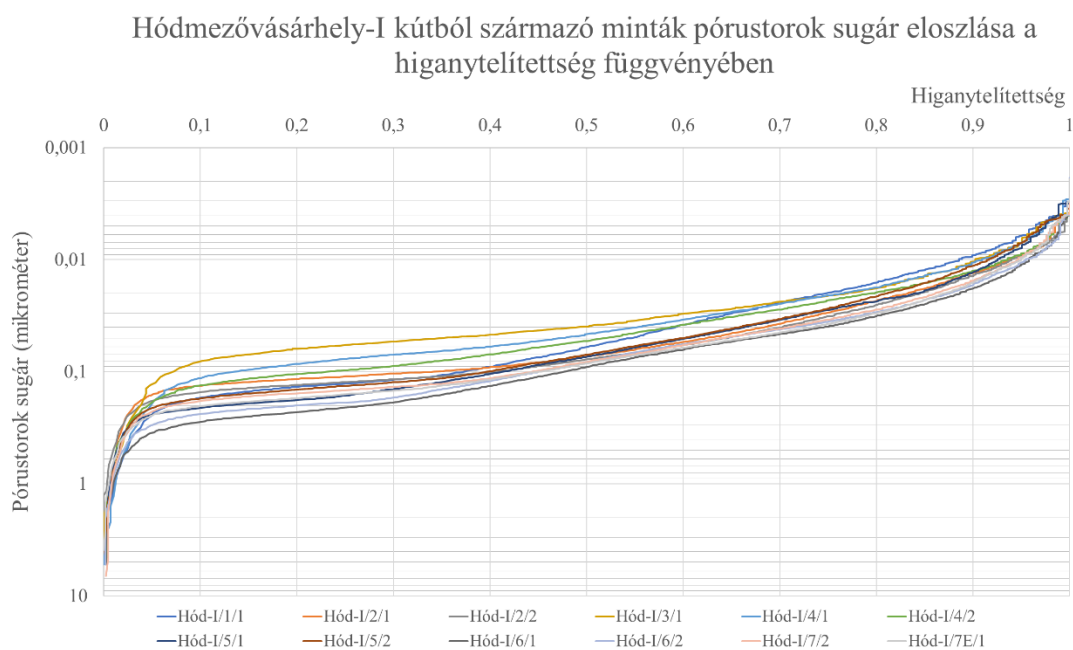
Kút megnevezése: Békés-5 (Bék-5)



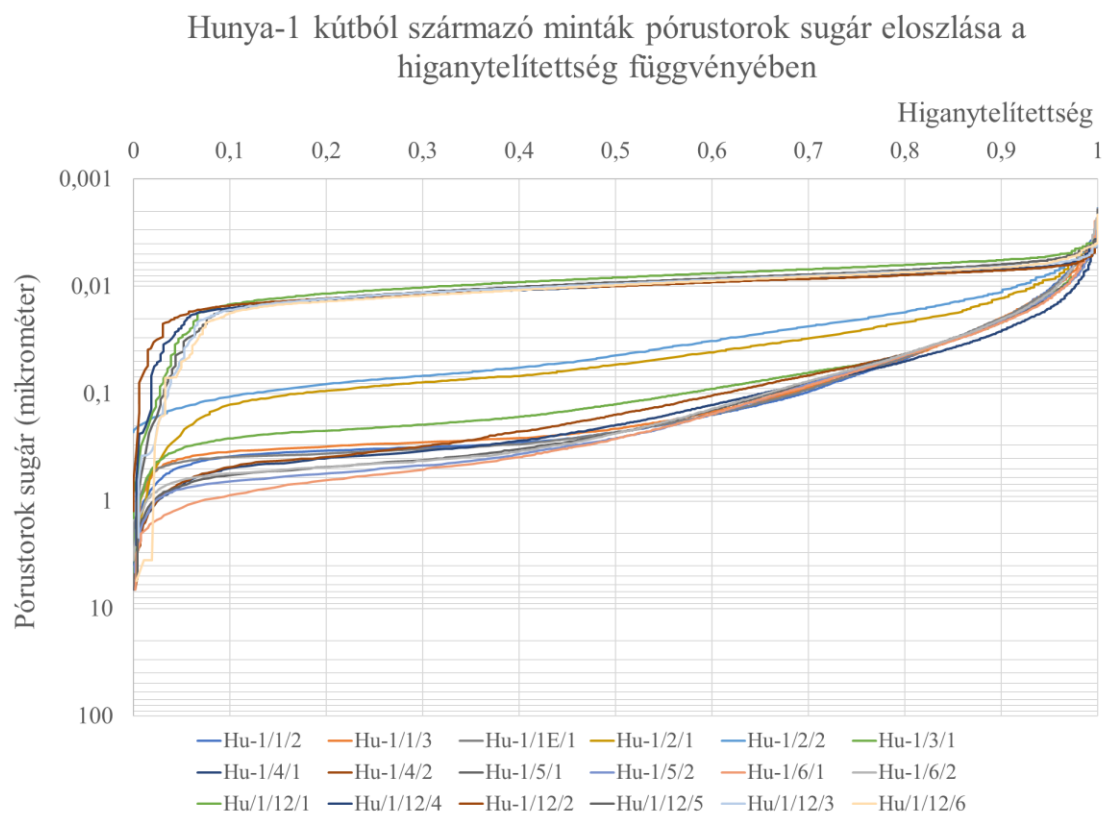
Kút megnevezése: Gyoma-1 (Gyo-1)



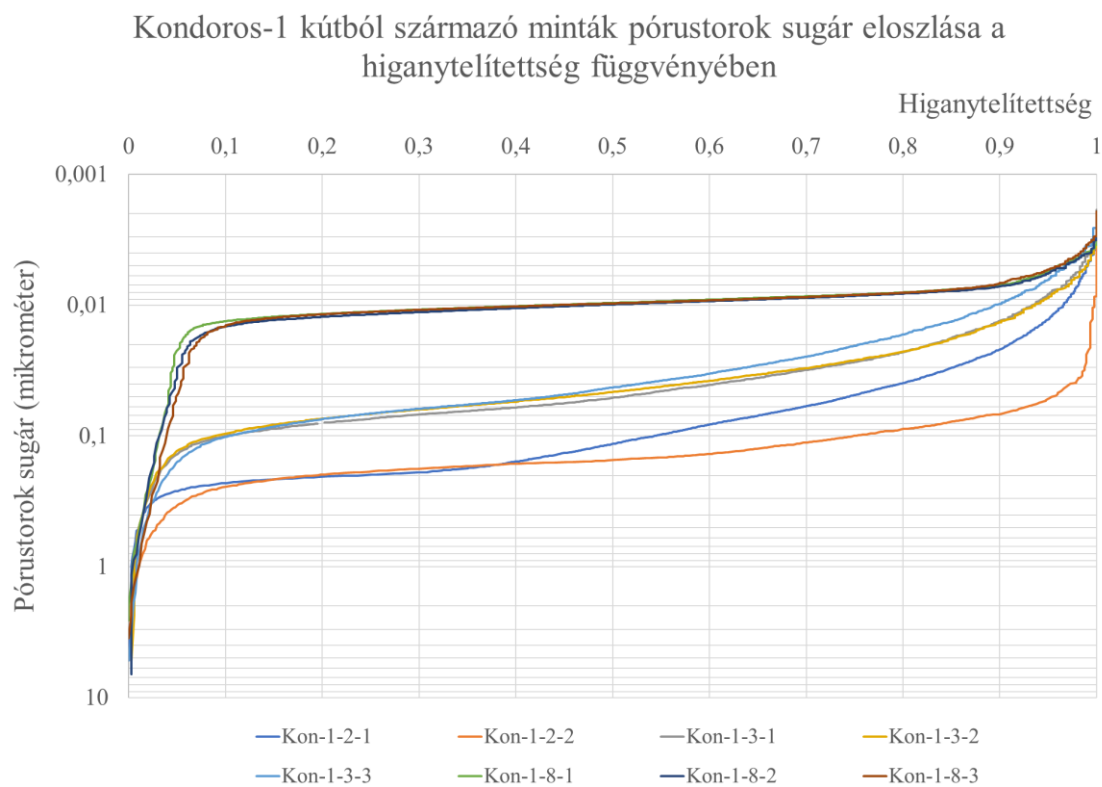
Kút megnevezése: Hódmezővásárhely-I (Hód-1)



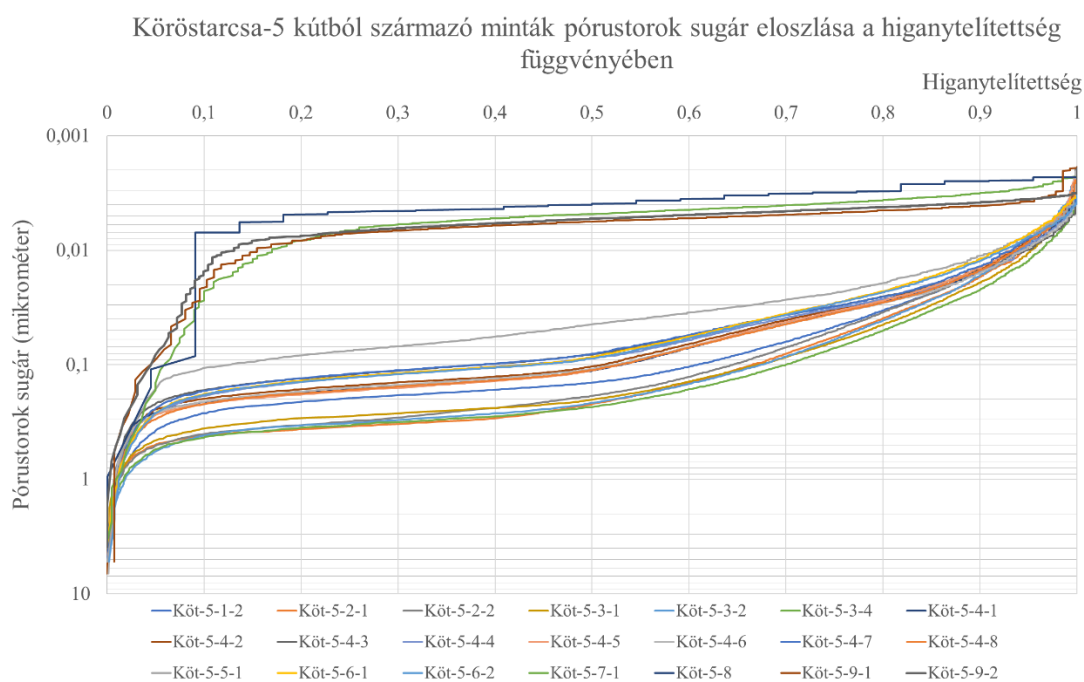
Kút megnevezése: Hunya-1 (Hu-1)



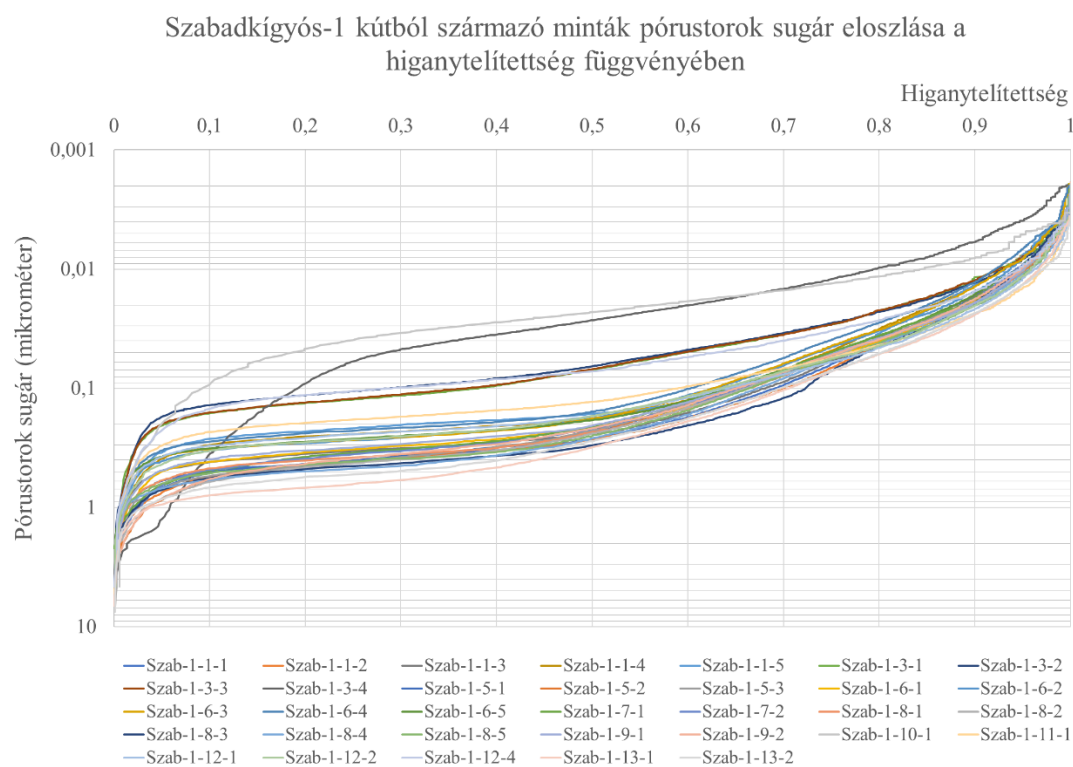
Kút megnevezése: Kondoros-1 (Kon-1)



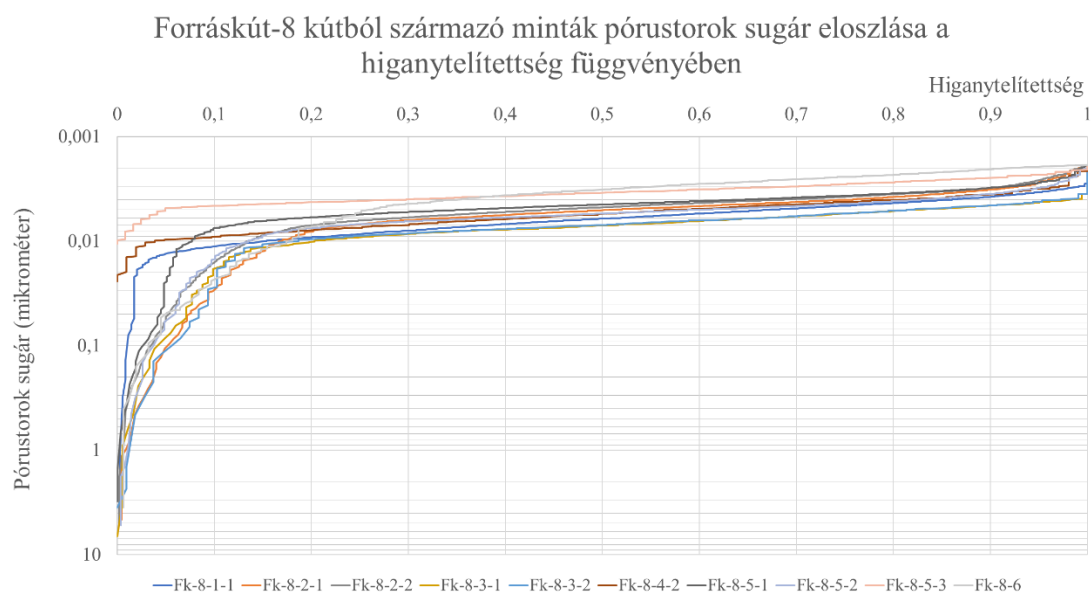
Kút megnevezése: Köröstarcsa-5 (Köt-5)



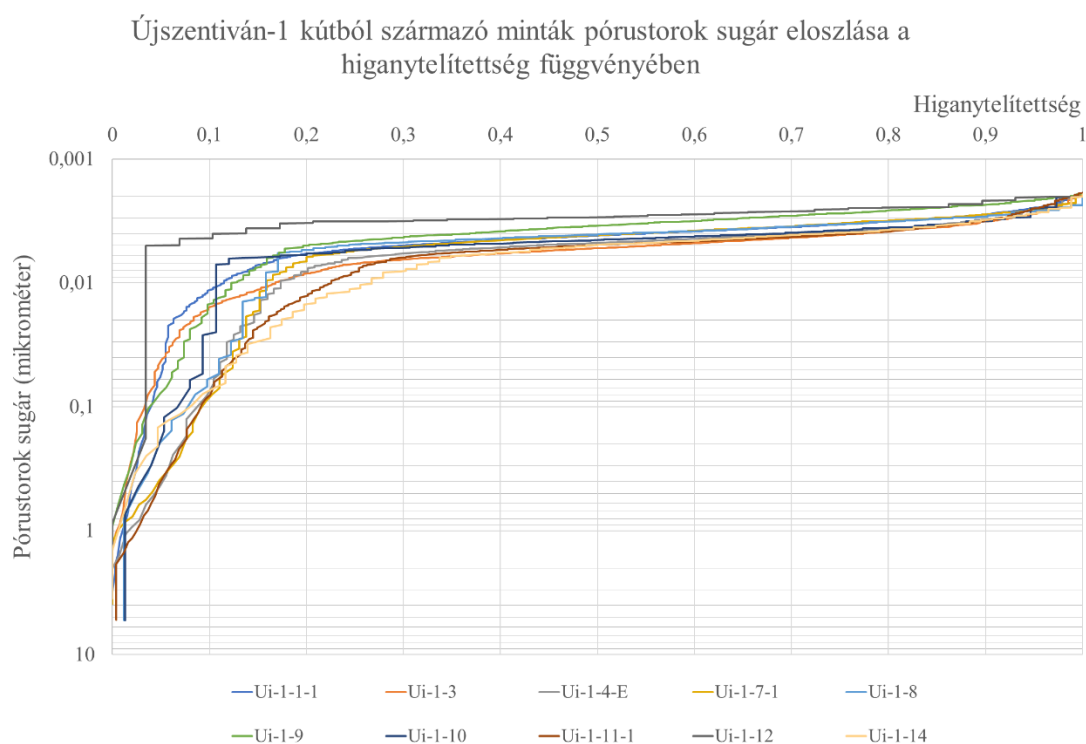
Kút megnevezése: Szabadkígyós-1 (Szab-1)



Kút megnevezése: Forráskút-8 (Fk-8)



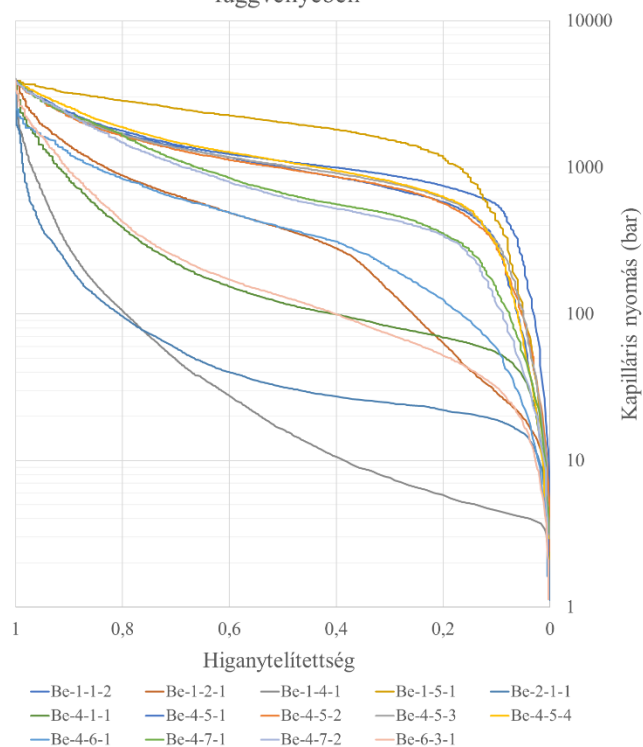
Kút megnevezése: Újszentiván-1 (Ui-1)



E. melléklet. Kapillaris nyomásgörbék

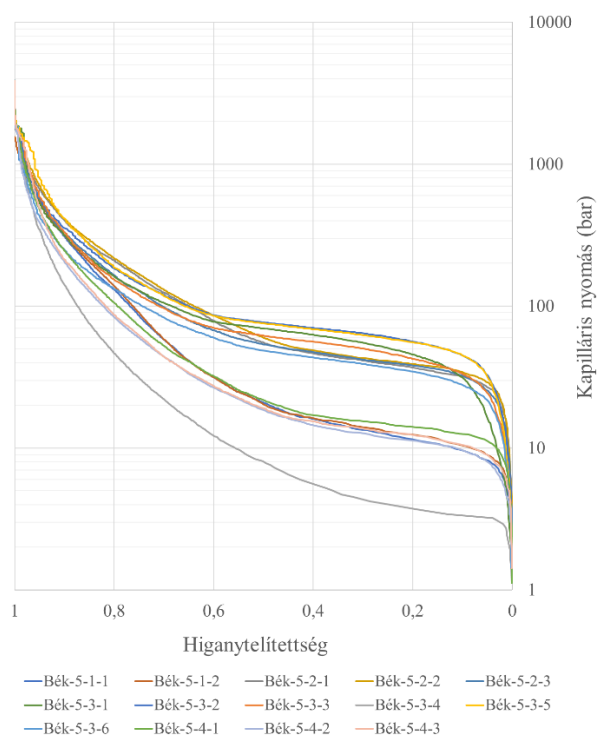
Kút megnevezése: Berettyóújfalu-1,-4,-6 (Beru-1,-4,-6)

Berettyóújfalu kutakból származó minták
kapillaris-nyomásgörbéi a higanytelítettség
függvényében



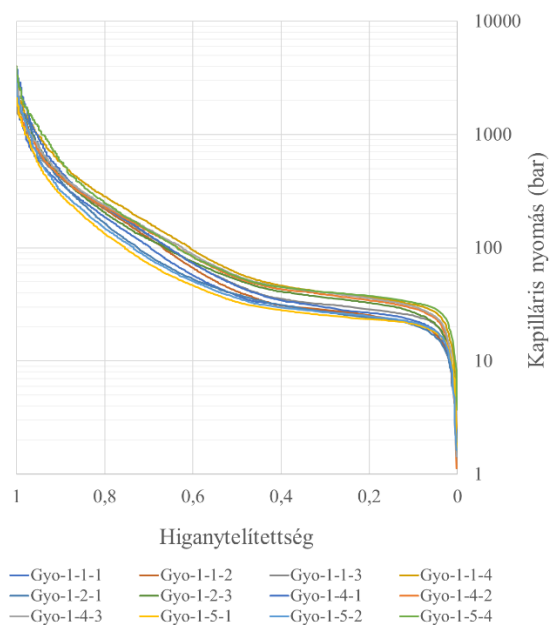
Kút megnevezése: Békés-5 (Bék-5)

Békés-5 kútból származó minták kapillaris-
nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



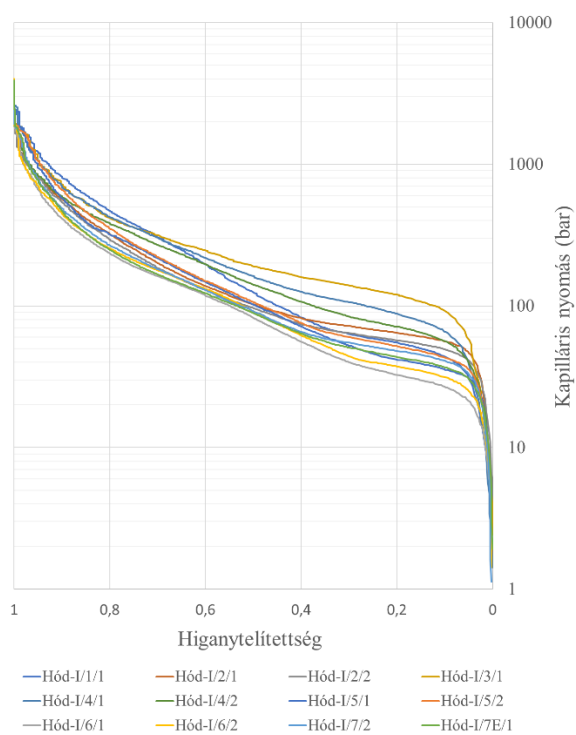
Kút megnevezése: Gyoma-1 (Gyo-1)

Gyoma-1 származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



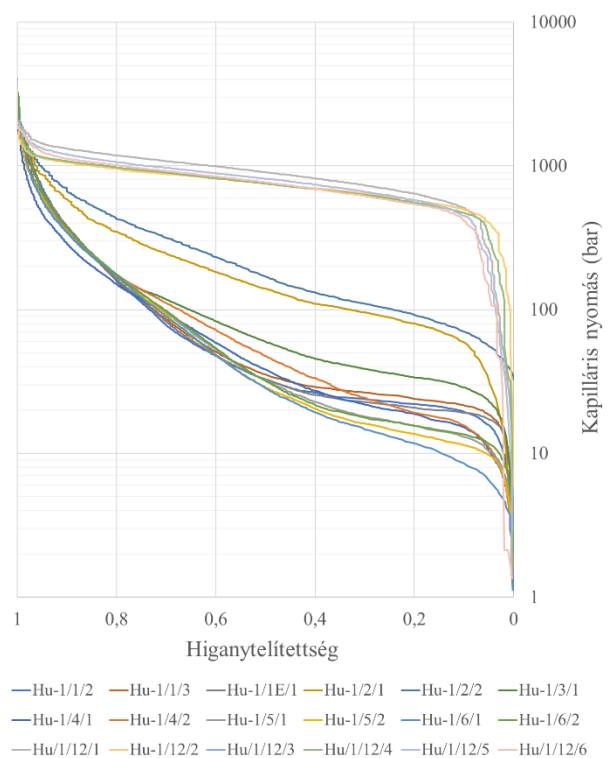
Kút megnevezése: Hódmezővásárhely-I (Hód-1)

Hódmezővásárhely-I kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



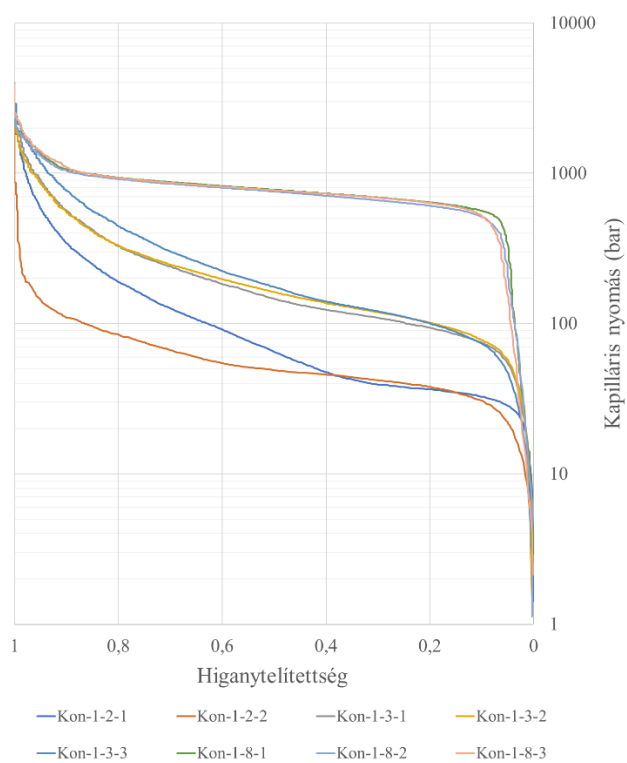
Kút megnevezése: Hunya-1 (Hu-1)

Hunya-1 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



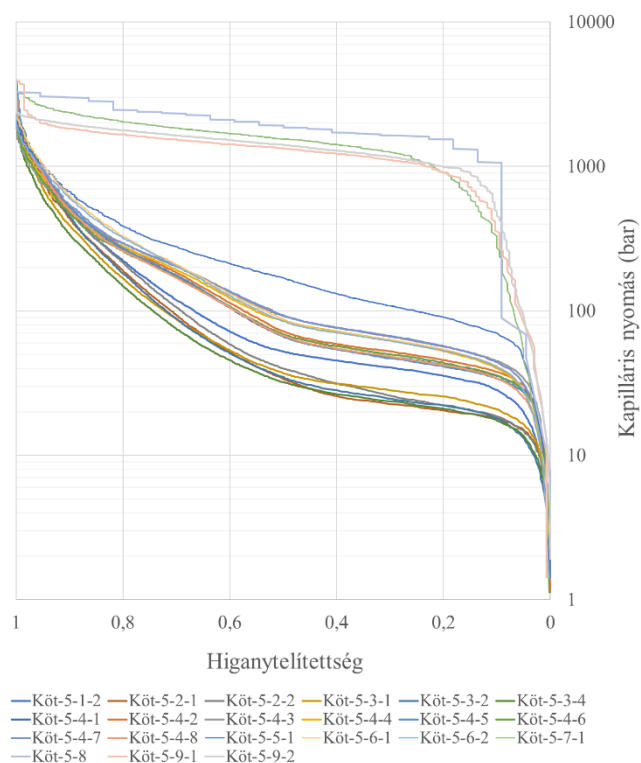
Kút megnevezése: Kondoros-1 (Kon-1)

Kondoros-1 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



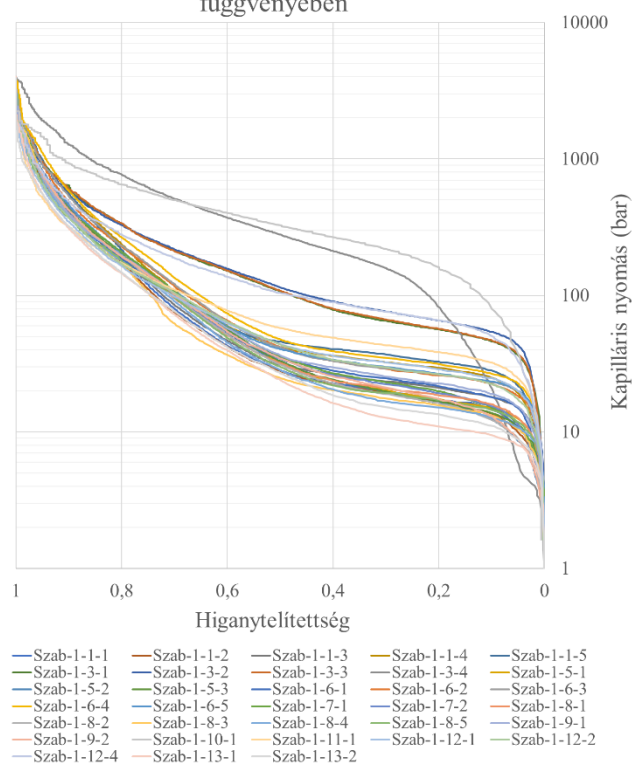
Kút megnevezése: Köröstarcsa-5 (Köt-5)

Köröstarcsa-5 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



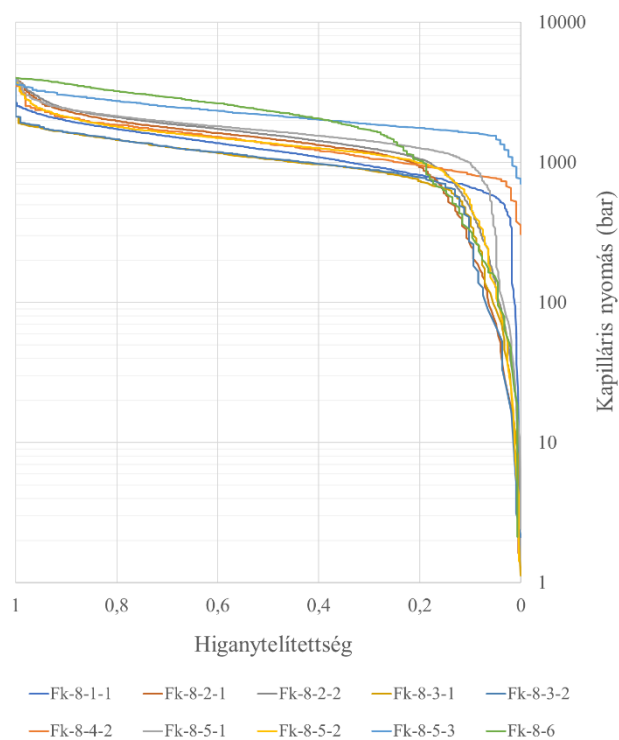
Kút megnevezése: Szabadkígyós-1 (Szab-1)

Szabadkígyós-1 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



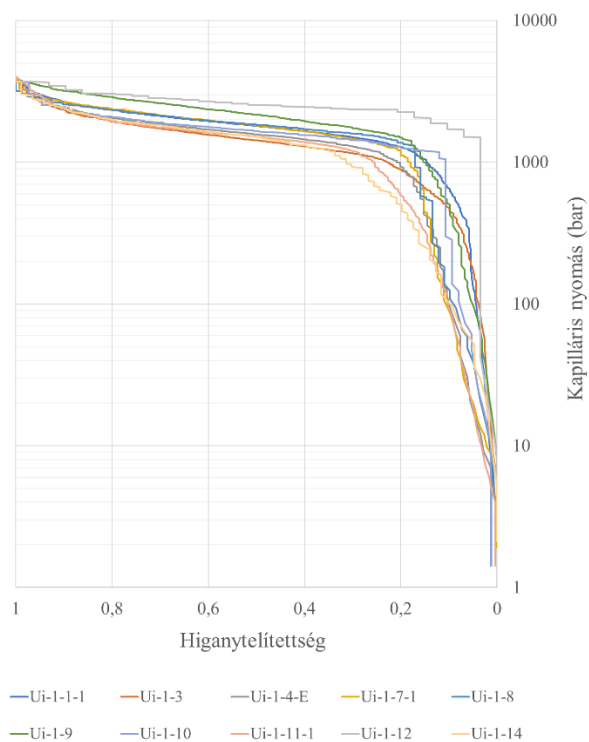
Kút megnevezése: Forráskút-8 (Fk-8)

Forráskút-8 kútból származó minták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



Kút megnevezése: Újszentiván-1 (Ui-1)

Újszentiván-1 magminták kapilláris-nyomásgörbéi a higanytelítettség függvényében



F. melléklet. 1. tétel mért és számított adatai

I.

Mintadugó azonosítója	Abszolút permeabilitás (mikroDarcy)	MFPR (mikrométer)
Bék-5/1/1	18,5370	0,44291
Bék-5/2/1	2,5890	0,11833
Bék-5/2/2	2,0200	0,08600
Bék-5/3/5	1,9090	0,08133
Gyo-1/1/1	5,9770	0,22018
Gyo-1/1/3	4,4710	0,09702
Gyo-1/1/4	3,3460	0,02328
Gyo-1/4/3	2,9270	0,09973
Gyo-1/5/1	8,1370	0,27418
Gyo-1/5/3	4,5880	0,12337
Gyo-1/5/4	3,6230	0,07483
Hu-1/1/2	4,3080	0,30067
Hu-1/2/1	0,9190	0,02049
Hu-1/4/2	4,4990	0,05432
Hu-1/5/1	7,5120	0,37426
Hu-1/5/2	10,7430	0,45363
Köt-5/1/1	3,0050	0,07604
Köt-5/2/1	9,7820	0,30424
Köt-5/3/1	4,1710	0,09678
Köt-5/3/2	4,8380	0,23995
Köt-5/4/1	2,7460	0,03088
Köt-5/4/4	1,3500	0,08937
Köt-5/4/5	2,8590	0,12138
Köt-5/4/6	2,8910	0,10901
Köt-5/4/7	1,8870	0,08304
Köt-5/4/8	1,6980	0,12079
Köt-5/5/1	0,6350	0,02879
Köt-5/6/2	1,0400	0,09269

1. tézis mért és számított adatai

II.

Mintadugó azonosítója	Abszolút permeabilitás (mikroDarcy)	r_{15} (mikrométer)
Bék-5/1/1	18,5370	0,698888
Bék-5/2/1	2,5890	0,219591
Bék-5/2/2	2,0200	0,201283
Bék-5/3/5	1,9090	0,14542
Gyo-1/1/1	5,9770	0,31976
Gyo-1/1/3	4,4710	0,27717
Gyo-1/1/4	3,3460	0,21825
Gyo-1/4/3	2,9270	0,22411
Gyo-1/5/1	8,1370	0,32965
Gyo-1/5/3	4,5880	0,31708
Gyo-1/5/4	3,6230	0,20969
Hu-1/1/2	4,3080	0,354718
Hu-1/2/1	0,9190	0,105339
Hu-1/4/2	4,4990	0,422737
Hu-1/5/1	7,5120	0,523162
Hu-1/5/2	10,7430	0,593756
Köt-5/1/1	3,0050	0,22958
Köt-5/2/1	9,7820	0,358001
Köt-5/3/1	4,1710	0,318541
Köt-5/3/2	4,8380	0,361454
Köt-5/4/1	2,7460	0,189539
Köt-5/4/4	1,3500	0,158624
Köt-5/4/5	2,8590	0,195465
Köt-5/4/6	2,8910	0,186232
Köt-5/4/7	1,8870	0,14539
Köt-5/4/8	1,6980	0,192458
Köt-5/5/1	0,6350	0,093734
Köt-5/6/2	1,0400	0,093734

1. tétel mért és számított adatai

III.

Mintadugó azonosítója	Abszolút permeabilitás (mikroDarcy)	Hg porozitás (%)	0,2 mikrométer feletti pórusok százaléka (%)	0,2 mikrométer feletti pórusok térfogatszázaléka (%)
Bék-5/1/1	18,537	11,369	63,18	7,183
Bék-5/2/1	2,589	8,692	20,65	1,795
Bék-5/2/2	2,020	8,502	15,12	1,286
Bék-5/3/5	1,909	4,935	6,51	0,321
Gyo-1/1/1	5,977	8,888	49,4	4,390
Gyo-1/1/3	4,471	7,529	43,14	3,248
Gyo-1/1/4	3,346	8,670	21,07	1,827
Gyo-1/4/3	2,927	8,208	23,1	1,896
Gyo-1/5/1	8,137	8,939	53,44	4,777
Gyo-1/5/3	4,588	8,585	39,65	3,404
Gyo-1/5/4	3,623	7,384	19,26	1,422
Hu-1/1/2	4,308	8,915	54,09	4,822
Hu-1/2/1	0,919	3,348	5,72	0,192
Hu-1/4/2	4,499	9,636	43,38	4,180
Hu-1/5/1	7,512	10,262	53,82	5,523
Hu-1/5/2	10,743	10,625	55,69	5,917
Köt-5/1/1	3,005	8,862	23,38	2,072
Köt-5/2/1	9,782	10,010	52,54	5,259
Köt-5/3/1	4,171	8,811	50,24	4,426
Köt-5/3/2	4,838	9,457	51,55	4,875
Köt-5/4/1	2,746	8,061	11,99	0,967
Köt-5/4/4	1,350	7,104	8,36	0,594
Köt-5/4/5	2,859	8,077	13,58	1,097
Köt-5/4/6	2,891	7,722	11,96	0,924
Köt-5/4/7	1,887	6,571	6,6	0,434
Köt-5/4/8	1,698	8,175	12,87	1,052
Köt-5/5/1	0,635	3,803	4,08	0,155
Köt-5/6/2	1,040	7,562	8,2	0,620

G. melléklet. Tapadóvíz viszkozitásának meghatározása

A rezervoárok pórusterét kitöltő víz viszkozitásának becslésére számos összefüggést ismer a szakirodalom. Jelen dolgozatban bemutatott modell alkalmazása során Meehan [1] összefüggése megfelelő pontossággal használható. A Meehan által közölt összefüggés Van Wingen [2] és Russel [3] diagramjai alapján készült.

Ajánlása alapján atmoszférikus nyomáson és telephőmérsékleten a víz viszkozitása a következő összefüggéssel számítható:

$$\mu_w^* = A + \frac{B}{T - 255.6}$$

ahol

$$A = -4.518 \cdot 10^{-5} + 9.313 \cdot 10^{-4} \cdot X - 3.93 \cdot 10^{-3} \cdot X^2$$

és

$$B = 3.9241 \cdot 10^{-2} + 0.532 \cdot X^2$$

melyben X a Na-Cl sótartalom móltörtje.

A nyomás hatásának a figyelembe vétele az $f(p,T)$ korrekciós tényezővel lehetséges, így módon a víz viszkozitása adott nyomáson

$$\mu_w = \mu_w^* \cdot f(p,T)$$

ahol

$$f(p,T) = 1 + 1.3246 \cdot 10^{-9} \cdot p^2 \cdot (T - 277.8).$$

- [1] Meehan N.: Continous Tables. Petroleum Engineer, 1980.
- [2] Van Wingen: Secondary recovery of oil in the United States. API. 1950, 127.o.
- [3] Russel M.: Pressure Build up and flow test in wells. SPE AIME, Dallas 1967.

H. melléklet. Tapadóvíz telítettségek

Mintadugó neve	Telítettség $r_c=0,1$	Telítettség $r_c=0,2$	Mintadugó neve	Telítettség $r_c=0,1$	Telítettség $r_c=0,2$
Be-1/1/2	0,947	0,952	Gyo-1/1/1	0,627	0,715
Be-1/2/1	0,795	0,860	Gyo-1/1/2	0,610	0,692
Be-1/4/1	0,398	0,461	Gyo-1/1/3	0,625	0,719
Be-1/5/1	0,918	0,924	Gyo-1/1/4	0,662	0,848
Be-2/1/1	0,507	0,614	Gyo-1/2/1	0,588	0,691
Be-4/1/1	0,795	0,907	Gyo-1/2/2	0,628	0,748
Be-4/5/1	0,923	0,933	Gyo-1/4/1	0,621	0,711
Be-4/5/2	0,899	0,909	Gyo-1/4/2	0,643	0,805
Be-4/5/3	0,923	0,933	Hu-1/1/1	0,591	0,672
Be-4/5/4	0,894	0,905	Hu-1/1/2	0,571	0,655
Be-4/6/1	0,835	0,866	Hu-1/1/3	0,578	0,664
Be-4/7/1	0,885	0,899	Hu-1/11/1	0,951	0,956
Be-4/7/2	0,913	0,931	Hu-1/2/1	0,870	0,930
Be-6/3/1	0,729	0,835	Hu-1/4/2	0,602	0,695
Bék-5/1/1	0,504	0,563	Hu-1/5/1	0,579	0,646
Bék-5/1/2	0,510	0,567	Hu-1/5/2	0,566	0,627
Bék-5/2/1	0,601	0,833	Hu-1/6/1	0,562	0,624
Bék-5/2/2	0,604	0,862	Hu-1/6/2	0,579	0,646
Bék-5/2/3	0,568	0,839	Szab-1/1/1	0,538	0,665
Bék-5/3/1	0,495	0,655	Szab-1/1/2	0,498	0,640
Bék-5/3/2	0,462	0,609	Szab-1/1/3	0,545	0,674
Bék-5/3/3	0,467	0,604	Szab-1/1/4	0,547	0,621
Bék-5/3/4	0,448	0,501	Szab-1/1/5	0,567	0,783
Bék-5/3/5	0,420	0,590	Szab-1/10/1	0,917	0,935
Bék-5/3/6	0,474	0,587	Szab-1/11/1	0,615	0,864
Bék-5/4/1	0,496	0,569	Szab-1/12/2	0,581	0,692
Bék-5/4/2	0,439	0,505	Szab-1/12/4	0,780	0,913
Bék-5/4/3	0,476	0,539	Szab-1/13/1	0,500	0,569
Fk_8_1_1	0,912	0,993	Szab-1/13/2	0,530	0,603
Fk_8_2_1	0,903	0,93	Szab-1/3/1	0,761	0,960
Fk_8_2_2	0,909	0,982	Szab-1/3/2	0,799	0,946
Fk_8_3_1	0,889	0,947	Szab-1/5/1	0,554	0,627
Fk_8_4_1	0,859	0,881	Szab-1/6/2	0,573	0,675
Fk_8_4_2	1,000	1,000	Szab-1/6/3	0,574	0,673
Fk_8_5_1	0,985	0,991	Szab-1/6/5	0,565	0,672
Fk_8_5_2	0,977	0,984	Szab-1/7/2	0,541	0,621
Fk_8_5_3	1,000	1,000	Szab-1/8/2	0,512	0,583
Fk_8_6_1	0,972	0,980	Szab-1/8/5	0,553	0,623
			Szab-1/9/2	0,528	0,609

I. melléklet. 4. tétel számított adatai

I.

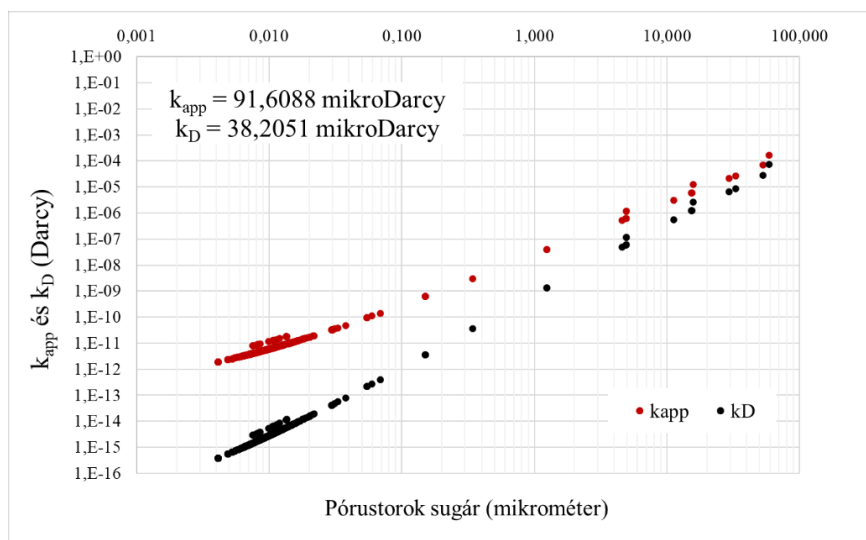
Mintadugó neve	0,2 mikrométer feletti pórustorok sugárhoz tartozó porozitás térfogathányad (%)	Tapadóvíz telítettség (%)	Mintadugó neve	0,2 mikrométer feletti pórustorok sugárhoz tartozó porozitás térfogathányad (%)	Tapadóvíz telítettség (%)
Be-1/1/2	0,079	97,040	Köt-5/2/1	5,259	60,157
Be-4/1/1	0,279	93,415	Köt-5/3/1	4,426	63,742
Be-4/5/1	0,188	95,490	Köt-5/3/2	4,875	63,394
Be-4/5/2	0,126	93,982	Köt-5/4/1	0,967	89,612
Be-4/5/3	0,136	95,918	Köt-5/4/4	0,594	92,802
Be-4/5/4	0,213	93,206	Köt-5/4/5	1,097	87,583
Be-4/6/1	0,211	91,511	Köt-5/4/6	0,924	90,417
Be-4/7/1	0,148	94,810	Köt-5/4/7	0,434	94,482
Be-4/7/2	0,159	96,784	Köt-5/4/8	1,052	88,371
Bék-5/2/2	1,286	86,000	Köt-5/5/1	0,155	96,283
Bék-5/3/1	0,663	89,000	Köt-5/6/2	0,620	92,114
Bék-5/3/5	0,321	94,000	Köt-5/9/1	0,061	96,522
Bék-5/3/6	1,611	78,000	Szab-1/1/1	6,386	66,499
Gyo-1/1/1	4,390	69,129	Szab-1/1/2	6,004	64,012
Gyo-1/1/2	4,056	69,741	Szab-1/1/3	6,333	67,365
Gyo-1/1/3	3,248	72,137	Szab-1/1/5	2,958	78,306
Gyo-1/1/4	1,827	84,936	Szab-1/11/1	1,244	86,441
Gyo-1/2/1	4,375	69,083	Szab-1/12/1	3,293	69,241
Gyo-1/4/1	3,212	71,108	Szab-1/3/1	0,381	94,563
Gyo-1/4/3	1,896	83,505	Szab-1/5/1	5,526	62,741
Gyo-1/5/1	4,777	65,645	Szab-1/6/2	4,631	67,512
Gyo-1/5/3	3,404	72,809	Szab-1/6/3	4,638	67,317
Gyo-1/5/4	1,422	84,271	Szab-1/6/5	4,475	67,214
Hu-1/1/2	4,822	65,507	Szab-1/7/2	5,051	62,096
Hu-1/1/3	4,653	66,414	Szab-1/8/1	5,615	62,350
Hu-1/2/1	0,192	92,956	Szab-1/8/5	5,425	62,311
Hu-1/4/2	4,180	69,487	Szab-1/9/2	5,315	60,879
Hu-1/5/1	5,523	64,640			
Hu-1/5/2	5,917	62,678			
Hu-1/6/2	5,602	64,613			

4. tétel számított adatai

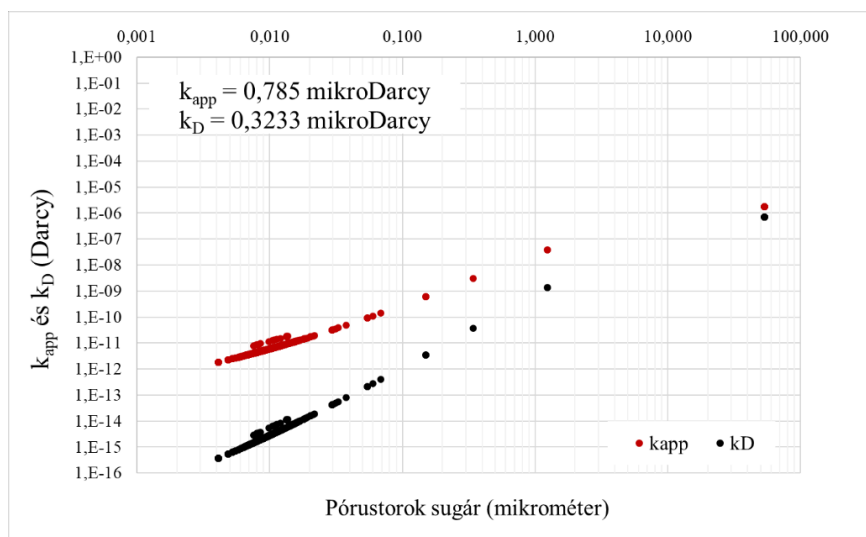
II.

Mintadugó neve	Tapadóvíz telítettség (%)	Küszöbnyomás (bar)	Mintadugó neve	Tapadóvíz telítettség (%)	Küszöbnyomás (bar)
Bék-5/2/2	86,000	31,704	Köt-5/2/1	60,157	15,825
Bék-5/3/1	89,000	34,605	Köt-5/3/1	63,742	18,666
Bék-5/3/5	94,000	42,674	Köt-5/3/2	63,394	14,774
Bék-5/3/6	78,000	25,633	Köt-5/4/1	89,612	30,794
Gyo-1/1/1	69,129	18,445	Köt-5/4/4	92,802	33,344
Gyo-1/1/2	69,741	18,286	Köt-5/4/5	87,583	29,177
Gyo-1/1/3	72,137	22,475	Köt-5/4/6	90,417	30,389
Gyo-1/1/4	84,936	27,469	Köt-5/4/7	94,482	37,704
Gyo-1/2/1	69,083	18,498	Köt-5/4/8	88,371	29,750
Gyo-1/4/1	71,108	20,598	Köt-5/6/2	92,114	35,719
Gyo-1/4/3	83,505	28,138	Szab-1/1/1	66,499	12,289
Gyo-1/5/1	65,645	19,390	Szab-1/1/2	64,012	11,062
Gyo-1/5/4	84,271	31,330	Szab-1/1/3	67,365	15,285
Hu-1/1/1	67,238	16,060	Szab-1/1/5	78,306	24,435
Hu-1/1/2	65,507	18,432	Szab-1/11/1	86,441	28,507
Hu-1/1/3	66,414	17,707	Szab-1/12/1	69,241	21,357
Hu-1/4/2	69,487	13,483	Szab-1/3/1	94,563	39,542
Hu-1/5/1	64,640	10,340	Szab-1/5/1	62,741	12,723
Hu-1/5/2	62,678	9,306	Szab-1/6/2	67,512	20,628
Hu-1/6/2	64,613	11,212	Szab-1/6/3	67,317	20,541
			Szab-1/6/5	67,214	19,983
			Szab-1/7/2	62,096	12,256
			Szab-1/8/1	62,350	13,985
			Szab-1/8/5	62,311	12,257
			Szab-1/9/2	60,879	10,284

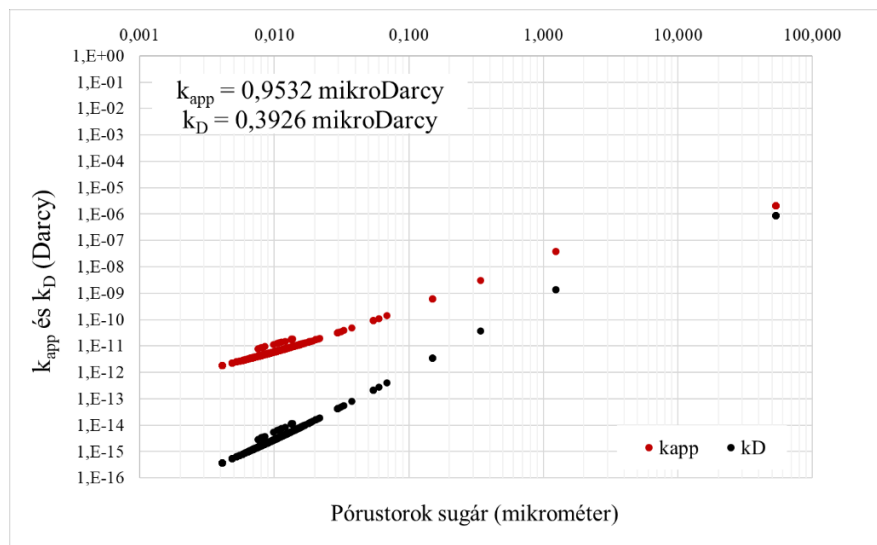
J. melléklet. Hu-1/12 sorozat szimulációs eredményei grafikusán



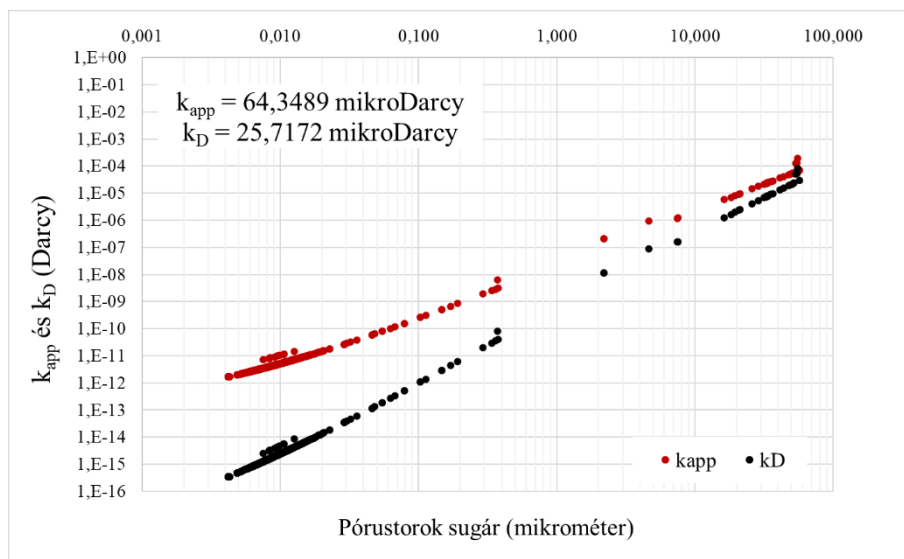
Hu-1/12/2s illesztés nélkül



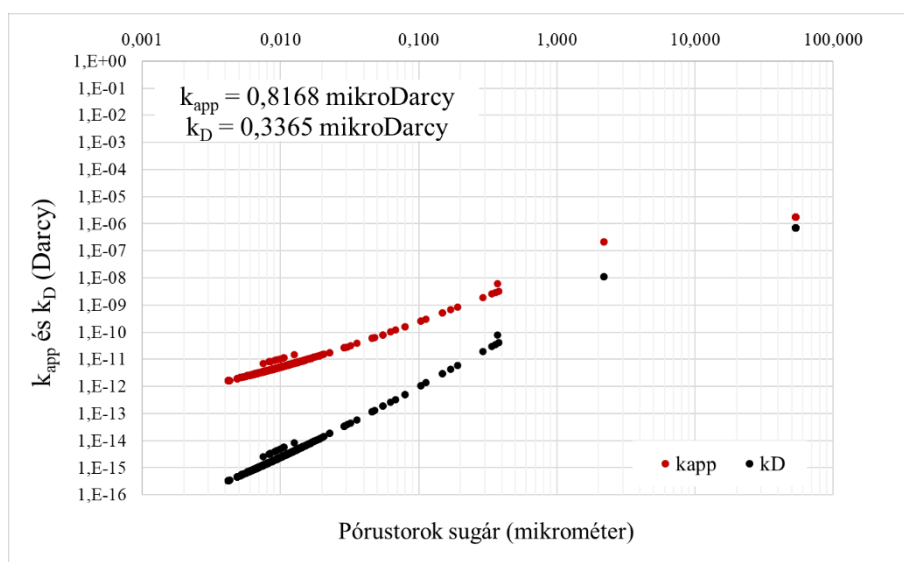
Hu-1/12/2s a Hu-1/12/1s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



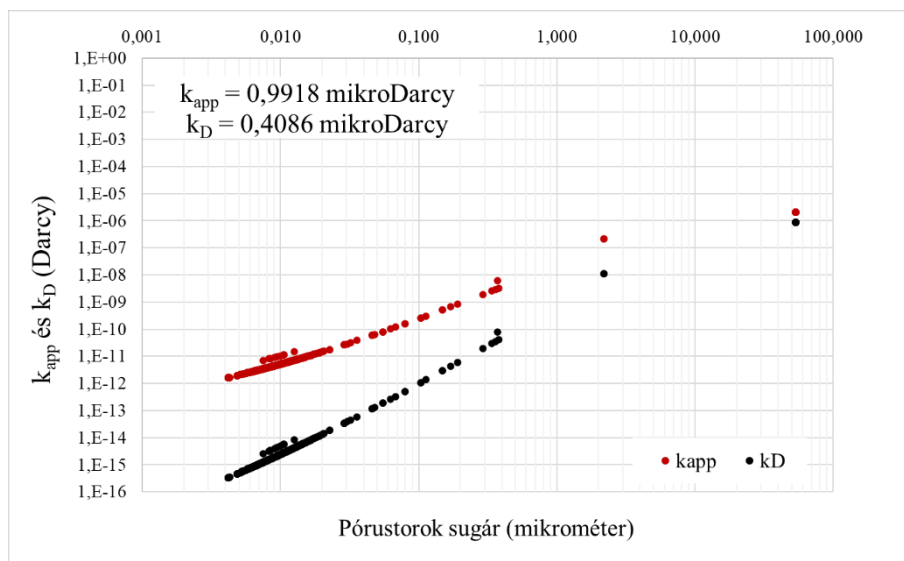
Hu-1/12/2s a Hu-1/12/6s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



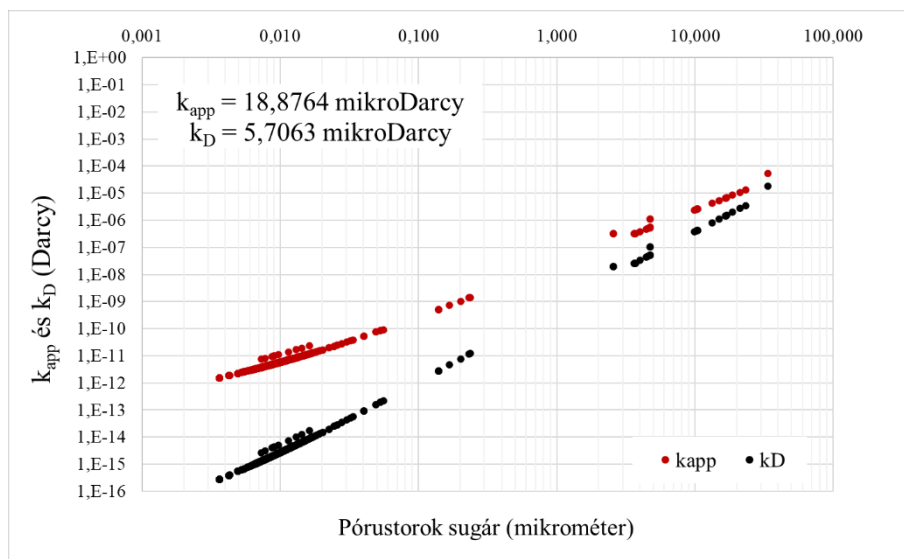
Hu-1/12/3s illesztés nélkül



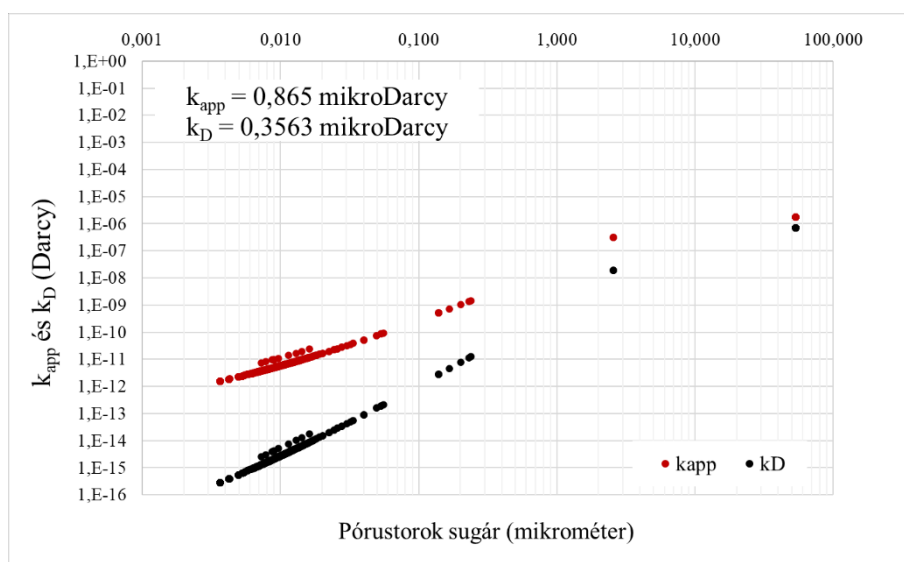
Hu-1/12/3s a Hu-1/12/1s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



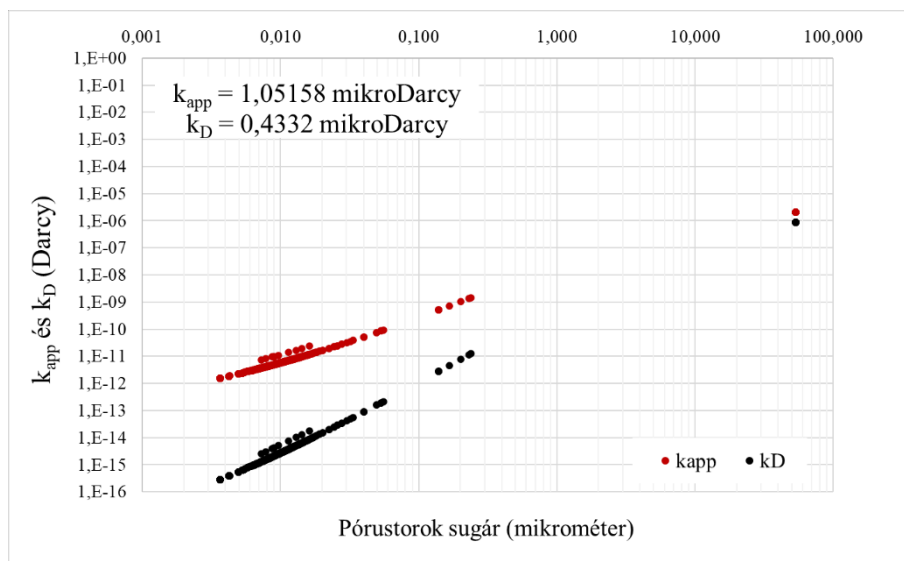
Hu-1/12/3s a Hu-1/12/6s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



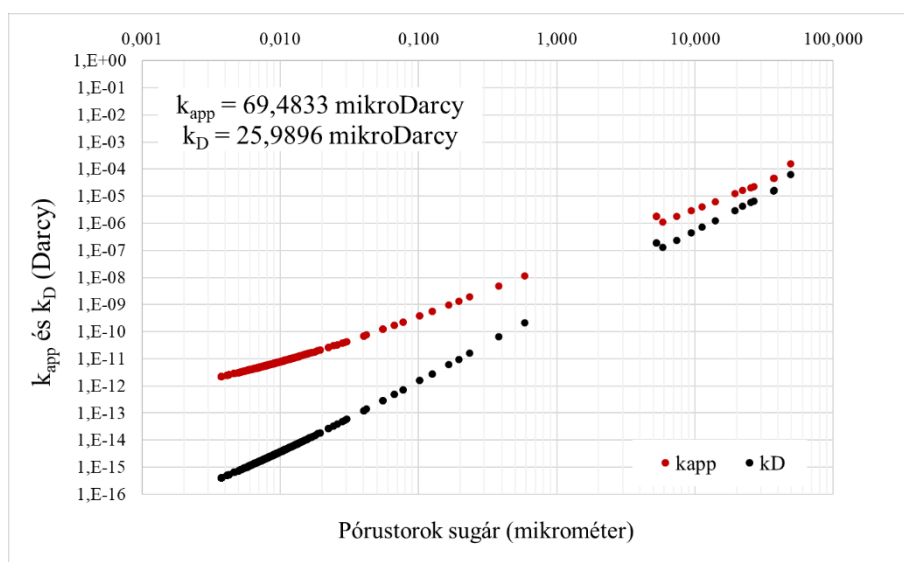
Hu-1/12/4s illesztés nélkül



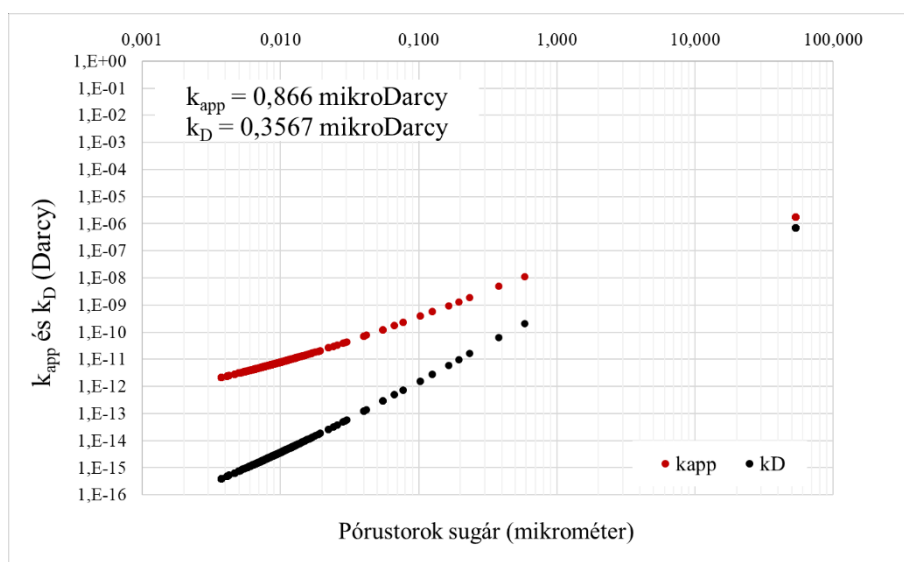
Hu-1/12/4s a Hu-1/12/1s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



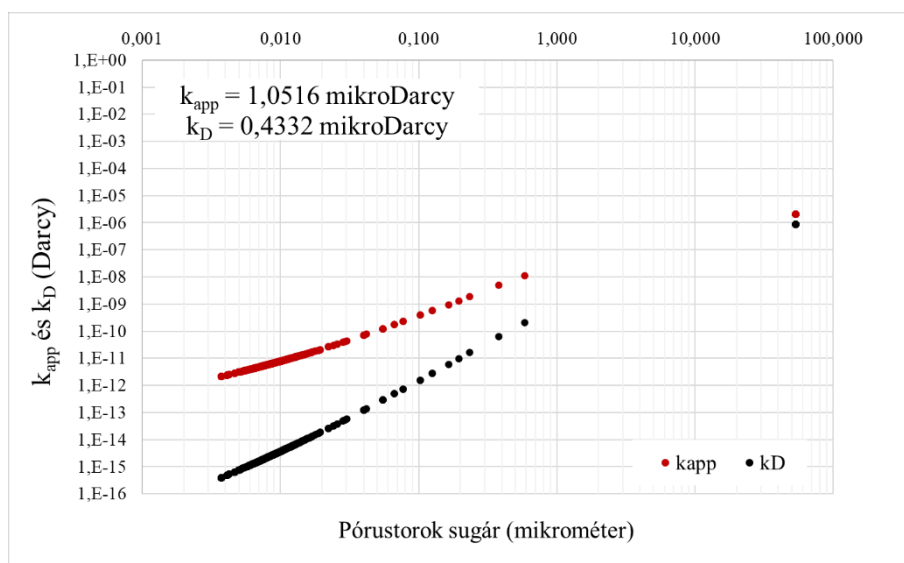
Hu-1/12/4s a Hu-1/12/6s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



Hu-1/12/5s illesztés nélkül



Hu-1/12/5s a Hu-1/12/1s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve



Hu-1/12/5s a Hu-1/12/6s minta egyenértékű kapilláris kötegével illesztve