



SZIVÁRGÁSHIDRAULIKAI LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK KAVICSOS HOMOKBAN

TDK Dolgozat

2021

KÉSZÍTETTE:

GAZDA FANNI

I. éves építőmérnök hallgató

KONZULENSEK:

FARKAS DÁVID

DR. FARKAS-KARAY GYÖNGYI

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	1
2. CÉLKITŰZÉSEK	2
3. ELMÉLETI BEVEZETŐ ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK	3
3.1 A TALAJVÍZ ÉS ÁRAMLÁSA.....	3
3.2 A SZIVÁRGÁS SEBESSÉGE.....	3
3.3 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA	5
3.3.1 Dupuit-módszer próbaszivattyúzás kiértékelésére.....	5
3.3.2 A szemeloszlási görbén alapuló számítások	6
3.4. A KISMINTA-MODELLEZÉS ELMÉLETI ALAPJAI	9
3.4.1. A Mosonyi-Kovács modelltörvény.....	10
4. KORÁBBI VIZSGÁLATOK	13
4.1 SZEMELOSZLÁSI GÖRBÉN ALAPULÓ SZÁMÍTÁSOKKAL FOGLALKOZÓ KORÁBBI VIZSGÁLATOK	13
4.2 KISMINTAMODELLEL VÉGZETT KORÁBBI VIZSGÁLATOK	14
5. A KISMINTAMODELL FELÉPÍTÉSE ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZERTAN	16
5.1 A KISMINTAMODELL FELÉPÍTÉSE	16
5.3 A TALAJMINTA VIZSGÁLATA.....	18
5.2 A MÉRÉSEK FOLYAMATA	20
6. EREDMÉNYEK.....	21
6.1 A VÍZHOZAM-LESZÍVÁS GÖRBE ALAKULÁSA.....	21
6.2 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ IDŐBELI VÁLTOZÁSA	21
6.3 A SZEMELOSZLÁSI GÖRBE ALAPJÁN SZÁMÍTOTT SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK.....	22
7. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE.....	24
7.1 A LESZÍVÁS ÉS VÍZHOZAM KAPCSOLATÁNAK ALAKULÁSA.....	24
7.2 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ IDŐBELI VÁLTOZÁSA	25
7.3 A SZEMELOSZLÁSI GÖRBE ALAPJÁN SZÁMÍTOTT SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK.....	26
7.3.1 A módszerek rangsorolása az új talaj esetén és az eredmények kiértékelése	27
7.3.2 A módszerek minősítése, érzékenységvizsgálat és lehetséges korrekciók	29
7.3.3 A módszerek rangsorolása a két talajra együttesen nézve.....	30
7.3.4 Az eredmények összehasonlítása korábbi vizsgálatok eredményeivel	31
8. ÖSSZEFOGLALÁS	34
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	36
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	37
FELHASZNÁLT IRODALOM	39
MELLÉKLETEK	45

Ábrajegyzék

1. ábra: A Darcy-törvény érvényessége (Freeze and Cherry 1979, Mádlné és társai 2013)	4
2. ábra: Leszívási vízfelszín kialakulása nyílt felszínű víztartóban (Mack, T.J. et al. 2010)	6
3. ábra: A kismintamodell felépítése (Farkas 2021b).....	17
4. ábra: A két talaj szemeloszlási görbéi	18
5. ábra: A vízhozam-leszívás görbe 0-4-es homokra	21
6. ábra: A szivárgási tényező átlagos értékének változása az idő függvényében.....	22
7. ábra: A vízhozam-leszívás görbék a 0-1-es (Hegedűs 2020, Farkas 2021b) és a 0-4-es talaj esetén	24
8. ábra: Kismintamoddellel és elméleti módszerekkel kapott szivárgási tényezők.....	26

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A talaj besorolása (Devlin 2015)	19
2. táblázat: A talajok paraméterei.....	19
3. táblázat: A szemeloszlási görbe alapján számított szivárgási tényező értékek	23
4. táblázat: A leszívás értékek aránya azonos vízhozamok esetén	25
5. táblázat: Szemeloszlási görbékkel számolt szivárgási tényező értékek	27
6. táblázat: A szemeloszlási görbén alapuló, szivárgási tényezőt számoló módszerek rangsorolása a 0-4-es és ahhoz hasonló talajra való alkalmazhatóság szerint	28
7. táblázat: Érzékenységvizsgálat a Barr, Sauerbrei és Pavchich egyenletekre	30
8. táblázat: A szemeloszlási görbén alapuló, szivárgási tényezőt számoló módszerek rangsorolása mindkét talajmintára való alkalmazhatóság szerint.....	31

Képjegyzék

1. kép: A laboratóriumi kismintamodell.....	16
2. kép: Alsó perem bukója.....	16
3. kép: Piezométertáblán kialakult szintek	16
4. kép: 0-1 mm-es talaj beépítést megelőzően.....	19
5. kép: 0-4 mm-es talaj beépítést megelőzően:	19
6. kép: Vízsintek leolvasása a piezométertábláról	20
7. kép: Talajminta szitálása	20

1. BEVEZETÉS

A különböző mélyépítési munkák elvégzéséhez szükséges az adott talaj megismerése, többek közt a talajra jellemző szivárgási tényező értékének ismerete. A terepi mérések szolgálnak a legpontosabb adatokkal, hiszen ekkor adottak a körülmények, azonban ezek helyhez kötöttségük és nagy költségigényük miatt kevésbé elterjedtek. A szivárgási tényező meghatározásának a laboratóriumi körülmények közt is elvégezhető módjai például a próbaszivattyúzás kismintamodellezés segítségével, valamint a szemeloszlási görbén alapuló számítások. A dolgozatom elkészítése során ezt a két módszert használtam.

A kismintamodellezés legnagyobb előnye, hogy egy nagyobb méretekben lejátszódó folyamatot laboratóriumi körülmények között is lehet modellezni, így nincs szükség terepi vizsgálatokra. Hátránya azonban, hogy a megfelelően kicsinyített modell geometriájának előállítása és a mérések előkészítése időigényes. Ezt ellensúlyozza, hogy a modell elkészülte után széleskörűen használható, többek közt kúthidraulikai vizsgálatok végzésére, numerikus modellezésre, permanens és nem permanens állapot előállítására, illetve szivárgási tényező megállapítására is (Farkas 2021b).

A szemeloszlási görbén alapuló számítások használata gyakori, azonban az alkalmazható módszerek nagy száma és az általuk adott eltérő eredmények miatt ez a megoldás kevésbé pontos adatokkal szolgál. Emiatt szükségessé vált a módszerek felülvizsgálata, ehhez azonban olyan talajmintákkal kell rendelkezni, amelyeknek tudjuk a szivárgási tényezőjét. A kismintamodell eredményeinek a szemeloszlási görbén alapuló módszerek eredményeivel való összevetésével lehetőség nyílik az adott talajhoz legpontosabb értéket adó módszer kiválasztására.

2. CÉLKITŰZÉSEK

A kutatásom elsősorban a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék korábbi szivárgáshidraulikai vizsgálatainak folytatására és a talajminta szivárgási tényezőjének meghatározásával kapcsolatos megállapításokra irányult. A célkitűzéseim a következő pontokban foglalhatóak össze:

- új 0-4 mm-es szemcseméret-tartománnyal rendelkező talajminta vizsgálata a kismintamodellben,
- a modellbe telepített termelőkút leszívás-vízhozam görbéjének előállítása és elemzése,
- a szivárgási tényező meghatározása a kismintamérések eredményei alapján a Dupuit-módszert használva,
- a 0-4 mm-es kavicsos homok talajminta szemeloszlási görbéjének előállítása szabványos szitasorral,
- a korábbi tanszéki kutatásokkor használt szemeloszlási görbe elemzésén alapuló módszereken felül új összefüggések feltárása a szakirodalomban,
- a szivárgási tényező meghatározása a talaj szemeloszlási görbéje alapján, különböző elméleti módszerekkel,
- a korábbi és új módszerek alkalmazhatóságának vizsgálata az új talajmintán,
- a kismintamoddellel, illetve szemeloszlási görbén alapuló elméleti módszerekkel kapott eredmények összehasonlítása, elemzése,
- rangsor állítása az elméleti összefüggések között a saját és korábbi kutatások adatai alapján.

3. ELMÉLETI BEVEZETŐ ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

3.1 A TALAJVÍZ ÉS ÁRAMLÁSA

A talajvíznek számos definíciója létezik, Ubell 1959-ben az alábbi módon írta le: „*Talajvíznek nevezzük azt a földfelszín közelében elhelyezkedő föld alatti vizet, ami a laza üledékes kőzetek szemcséi közötti hézagokat összefüggően kitölti, a nehézségi erő és a hidrosztatikus nyomás hatása alatt áll, és készletében a felszíni befolyásoló tényezők hatására gyakori, közvetlenül érzékelhető változások állnak elő.*”

Hazánkban a talajvizek legfontosabb csoportja a laza üledékes kőzetekben elhelyezkedő víz, mely általában rövid időtartamon belül permanens mozgásban lévőknek tekinthető. Ezt a mozgást szivárgó mozgásnak nevezzük (Kovács 1972).

A porózus közegben áramló, szivárgó vízre segítő és fékező erők hatnak, melyek befolyásolják a mozgását. A leggyakoribb elősegítő hatás a gravitáció, ennek hatását akadályozza a súrlódási és a nehézségi erő (Kovács 1972, Juhász 2002).

A szivárgási tartományokat a meghatározó és elhanyagolható fékező erők szerint az alábbi csoportokba sorolhatók:

- turbulens áramlás, ha a fékező erők közül csak a tehetetlenséget vesszük számításba
- átmeneti tartomány, ha a tehetetlenség mellett a súrlódással is számolunk
- lamináris szivárgás, ha csak a súrlódást tekintjük fékezőerőnek,
- mikroszivárgás, ekkor már szerepet kapnak a molekuláris erőhatások is (Kovács 1972).

Ezek a tartományok dimenzió nélküli számokkal jellemezhetők. Az átmeneti tartomány alsó és felső határai a tehetetlenségi és súrlódási erők hányadosával állapíthatók meg, melyeket a Reynolds-szám értéke jelöl ki (Juhász 2002).

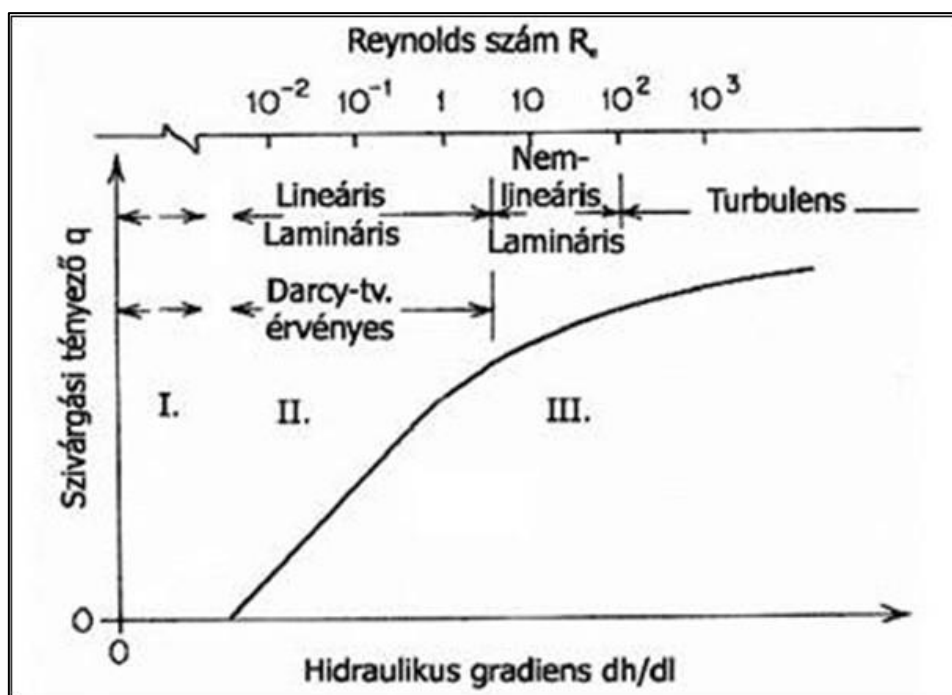
3.2 A SZIVÁRGÁS SEBESSÉGE

A porózus közegben történő vízáramlás kvantitatív tanulmányozása Henry Darcy francia hadmérnök kísérleteivel kezdődött. Ezen kísérletek eredményét 1856-ban publikálta, melynek legfontosabb összefüggését ma már Darcy-törvényként ismerjük. A Darcy-törvény azt mondja ki, hogy a szivárgás sebessége és a hidraulikus gradiens egyenesen arányos, ahol az arányossági tényező a k szivárgási tényező, más néven áteresztőképességi együttható (Darcy 1856). Az egyenlet egy általános felírási formája:

$$v = -k \cdot \frac{dh}{dr} = -k \cdot I \quad [1]$$

Ahol:

- v a szivárgás látszólagos sebessége [m/s],
- k a szivárgási tényező, áteresztőképességi együttható [m/s],
- $\frac{dh}{dr}$ a mozgást létrehozó vízszintkülönbségek és szivárgási hossz hányadosa [-],
- I hidraulikus gradiens [-] (Kovács 1972).



1. ábra: A Darcy-törvény érvényessége (Freeze and Cherry 1979, Mádlé és társai 2013)

A Darcy-törvény érvényessége korlátozott, ezt a korlátot a Reynolds-szám segítségével is jellemezhetjük. Az összefüggés csak az 1. ábrán II-vel jelölt tartományban érvényes, látható, hogy a görbe csak itt lineáris. Az I-sel jelölt tartományban a pórusokban fellépő tapadóerők és a súrlódási erő meghaladja a gravitációs hajtóerőt, ez a szivárgás nélküli, vagy mikroszivárgási tartomány. A turbulencia miatt fellépő tehetetlenségi erők miatt a III. tartományban sem lineáris az összefüggés a szivárgási tényező és a hidraulikus gradiens között. Az $Re > 10^2$ esetben a szivárgás turbulens, tehát itt sem érvényes a Darcy-törvény (Freeze and Cherry 1979, Mádlé és társai 2013).

3.3 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

3.3.1 Dupuit-módszer próbaszivattyúzás kiértékelésére

A szivárgási tényező meghatározására az egyik legpontosabb módszer a próbaszivattyúzás. Permanens áramlások esetén a próbaszivattyúzás vizsgálatok kiértékelésére a Dupuit egyenletet használhatjuk. A módszer előnye, hogy nincs szükség nagyon bonyolult matematikai összefüggésekre és gyorsan számolható a szivárgási tényező.

Az egyenlet nyílt felszínű és nyomás alatti vízádókra is felírható, azonban az általam végzett kísérlet során nyílt felszínű vízádót vizsgáltam, ezért csak ezt az esetet részletezem a továbbiakban.

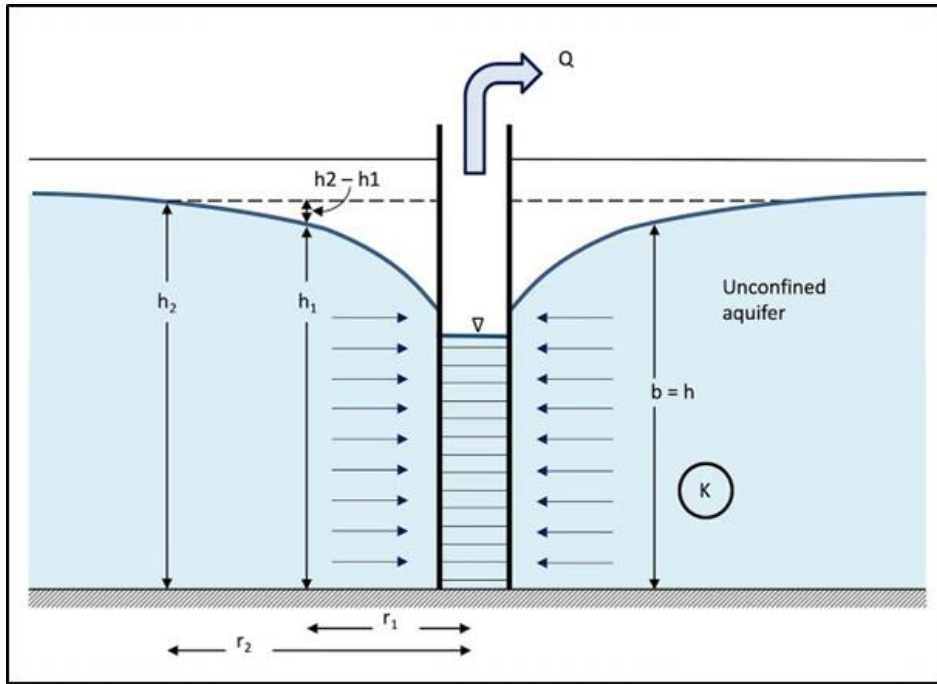
Ha minden pontban vízszintes szivárgást feltételezünk és elhanyagolhatónak vesszük a kúppaláston kialakuló vízszint-elszakadást, akkor a következő összefüggést kapjuk szabad felszínű rétegekre (Dupuit 1863):

$$k = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{(h_1^2 - h_2^2)} \quad [2]$$

Ahol:

- Q a szivattyúzás során állandósult vízhozam [m^3/s],
- r_1 az első megfigyelőkút távolsága a termelőkúttól [m],
- r_2 a második megfigyelőkút távolsága a termelőkúttól [m],
- h_1 az első megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlopnyomás [m],
- h_2 a második megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlopnyomás [m].

A felsorolásban szereplő paraméterek fizikai jelentését a 2. ábrán láthatjuk.



2. ábra: Leszívási vízfelszín kialakulása nyílt felszínű víztartóban (Mack, T.J. et al. 2010)

Ez az egyenlet csak a következő feltételek mellett érvényes szabad felszínű víztartókra:

- az áramlási tér homogén és izotróp,
- a vízvezető réteg alulról vízszintes síkkal határolt, felül fedetlen, beszivárgás vagy párolgás a fedetlen felszínen át nem következik be,
- Dupuit feltétel: a kúttengellyel koncentrikus hengerfelületek potenciálfelületek és a sebesség egy-egy ilyen henger mentén állandó és arányos a hengerfelület függőlegesében kialakuló felszíni eséssel (Kovács 1972).
- a szivárgó vízmozgás az áramlási tér minden pontjában a Darcy-törvény érvényességi határán belül marad, szivattyúzás megkezdéséig a víztartóban lévő víz nyugalomban van,
- a vízmozgás permanens. (Farkas 2021b)

A Dupuit-módszer azonban nagy leszívások esetén már nem használható, különösen a kút közelében, ahol a sebesség függőleges komponense már nem elhanyagolható (Ubell 1958).

3.3.2 A szemeloszlási görbén alapuló számítások

A k szivárgási tényező kísérleti tapasztalatok alapján részben az áramlási közeg, részben az áramló folyadék tulajdonságainak függvénye (Blohm 2016). A tényező folyadéokra jellemző része egyenesen arányos a folyadék sűrűségével és fordítottan arányos a folyadék dinamikai viszkozitásával (μ). Az áramlási közegre jellemző része függ a kőzet belső geometriájától (C) és egyenesen arányos a szemcseátmérő négyzetével (d^2) (Mádl és társai 2013). Ez lehetőséget

ad arra, hogy a szivárgási tényező értékét az áramlási közeg tulajdonságai alapján megbecsüljük.

A közeg tulajdonságai alapján a szemcseméretet vizsgálva lehet megbecsülni a szivárgási tényezőt. Bár ez a módszer kevesebb időt vesz igénybe és sok esetben kisebb pénzügyi befektetést igényel, az így megállapított értékek általában kevésbé megbízhatóak, mint a próbaszivattyúzás során kapott eredmények. Ennek oka, hogy a szemcseméreten alapuló számítások nem veszik figyelembe a víztartó réteg egyéb tulajdonságait, például annak vastagságát (Verbovšek és társai 2015), ezen felül számos ilyen módszer konstans értéknek veszi a porozitást. A szemcsék alakja is fontos lehet a térkitöltésük szempontjából, ezt néhány módszer egy alaktényező bevezetésével veszi figyelembe.

A szemcseméreten alapuló szivárgási tényező meghatározással többen is foglalkoztak, nagyrészt kísérleti alapon meghatározott arányszámokat használva.

A legelső ilyen egyenletet Seelheim (1880) írta fel:

$$k = A \cdot d_{50}^2 \quad [3]$$

melyben:

- k a talajra jellemző szivárgási tényező [m/s]
- A az egyenlet paramétere [-],
- d_{50} az átesett tömegmennyiség 50%-ához tartozó szemcseátmérő [mm]

Az A paramétert Seelheim 0,0037-re, majd később Hagen (1869) 0,0036-ra, Jáky (1944) 0,01-re, Kröber (in Éliás és Juhász, 1966) 0,0041-re vette fel. Jordan és Weder (1995) szerint ezt az egyenletet az $U > 5$ egyenlőtlenségi mutatójú talajokra ajánlott használni. (Farkas 2021b)

Egységesítve a korábbi összefüggéseket, Vuković és Soro (1992) a Darcy-Weissbach egyenlet alapján általános képletet írtak fel:

$$k = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot N \cdot \varphi(n) \cdot d_e^2 \quad [4]$$

ahol:

- ρ víz sűrűsége [kg/m³],
- g nehézségi gyorsulás [m/s²],
- μ dinamikai viszkozitás [Ns/m²]
- N talajszemcsék alakai tényezője [-],

- n porozitás [-],

$$n = 0,255 \cdot (1 + 0,83^U) \quad [5]$$

ahol az U az egyenlőtlenségi mutató, $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ [-]

- $\varphi(n)$ porozitástól függő tényező [-],
- d_e átesett tömegmennyiség e %-ához tartozó szemcseátmérő [m].

E képlet alapján számít szivárgási tényezőket a Devlin (2015) által közzétett ingyenesen elérhető „HydrogeoSieveXL2.3.2” nevű Excel környezetben megírt program, mely az alábbi módszereket tartalmazza: Hazen (1892), Slichter (1898), Krüger (1919), Terzaghi (1943), Zamarin (1954), Zunker (1930), Sauerbrei (1932), Krumbein and Monk (1942), Kozeny (1953), Beyer (1964), USBR (in Biała 1966), Alyamani and Sen (1993), Barr (2001), Chapuis (2004), Shepherd (1989). Az itt szereplő legtöbb módszerhez tartoznak alkalmazhatósági feltételek, melyeknek megfelelő talajmintákra ajánlott alkalmazni az adott összefüggést. (A különböző módszerek paraméterei a 4. egyenletre és alkalmazhatósági feltételeik a mellékletben találhatóak.)

Ezen felül szakirodalmi kutatásom során az alábbi összefüggéseket tártam fel, melyek az általam vizsgált talajmintánál használhatók:

Gustafson (2005)

$$k [m/s] = E(U) \cdot \left(\frac{d_{10}}{1000} \right)^2 \quad [6]$$

Ahol d_{10} az átesett tömegmennyiség 10%-ához tartozó szemcseátmérő [mm] és

$$E(U) = 10,2 \cdot 10^6 \cdot \frac{E^3}{1 + E} \cdot \frac{1}{g(U)^2} \quad [6.1]$$

$$E = 0,8 \cdot \frac{1}{2 \cdot \ln(U)} - \frac{1}{U^2 - 1} \quad [6.2]$$

$$g(U) = \frac{1,3}{\log_{10} U} \cdot \frac{U^2 - 1}{U^{1,8}} \quad [6.3]$$

teljesülnek.

Harleman et al. (1963)

$$k = 6,54 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{g}{v} \cdot d_{10}^2 \quad [7]$$

Ahol:

- d_{10} az átesett tömegmennyiség 10%-ához tartozó szemcseátmérő [m].
- v kinematikai viszkozitás [m²/s]

Kenney et al. (1984)

$$k [m/s] = 0,005 \cdot d_5^2 \quad [8]$$

Ahol d_5 az átesett tömegmennyiség 5%-ához tartozó szemcseátmérő [mm].

Pavchich (in VNIIG, 1991)

$$k = \frac{0,04}{v} \cdot \sqrt[3]{U} \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2 \quad [9]$$

Ahol d_{17} az átesett tömegmennyiség 17%-ához tartozó szemcseátmérő [m].

Alkalmazhatóságának feltétele: $0,06 \text{ mm} < d_{17} < 1,5 \text{ mm}$.

USCRO (Urumović és társai 2020)

$$k = \frac{\rho g}{\mu} \cdot 1,56 \cdot 10^{-5} \cdot d_{20}^{2,32} \cdot \frac{1}{100} \quad [10]$$

Alkalmazhatóságának feltétele: $U \leq 5$.

3.4. A KISMINTA-MODELLEZÉS ELMÉLETI ALAPJAI

A kismintavizsgálatok alapját az képezi, hogy ha két folyamat hasonló, akkor az egyik során megfogalmazott összefüggések bizonyos feltételek mellett érvényesek lesznek a másik folyamatra is.

A különböző méretekben lejátszódó jelenségek jellemző mennyiségei közötti kapcsolat kérdésével elméleti úton először Newton foglalkozott. Megállapította, hogy két rendszer mechanikai hasonlóságának a geometriai hasonlóságon kívül szükséges feltétele még az is, hogy a megfelelő idők, erők és tömegek viszonya állandó legyen. (Ivicsics 1962)

Hasonlónak nevezzük azokat a hidromechanikai folyamatokat, amelyekben az egymásnak megfelelő jellemző mennyiségek viszonya állandó. (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968). A hasonlóságok vizsgált 3 formája a geometriai, kinematikai és dinamika hasonlóság.

Geometriai hasonlóság

A geometriai hasonlóság feltétele, hogy a vizsgált rendszerben pontnak pont, egyenesnek egyenes felel meg, és a megfelelő távolságok aránya állandó. Az egymásnak megfelelő pontok távolságának hányadosát a „C” geometriai arányszám fejezi ki, mely szabadon választható a 0-tól végtelenig tartó nyílt intervallumon. Tehát a kismintavizsgálatok során egy bizonyos mértékben nagyított vagy kicsinyített változatát vizsgáljuk az eredeti rendszernek (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Kinematikai hasonlóság

Az összehasonlított rendszerek kinematikailag hasonlóak, ha a lezajló mozgási folyamatok egymásnak megfelelő időtartamaira teljesül a $\frac{t'}{t''} = C_t$ egyenlet, ahol C_t a kinematikai hasonlóságot leíró arányszám, melynek értéke úgy, mint a geometriai méretszorzónak, szabadon választható. A C és C_t értékek egyértelműen meghatározzák a hosszúság és idő dimenziójú mennyiségek viszonyát (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Dinamikai hasonlóság

Két rendszer dinamikai szempontból is hasonló, ha a $\frac{p'}{p''} = C_F$ arány állandó. C_F a dinamikai hasonlóság arányszáma, melynek értéke szintén szabadon választható, azonban ezzel már a hosszúság, idő, erő (vagy tömeg) alapidimenziókból származtatható mennyiségek viszonzyszáma is meghatározott. (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Gyakran kismintatörvényeknek is nevezik a C , C_t és C_F mennyiségcsoportokat (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

3.4.1. A Mosonyi-Kovács modelltörvény

Mosonyi és Kovács (1952) a szivárgási kismintákkal valós számolás lehetővé tételéhez szükséges átszámítási tényezők meghatározása során a nehézségi és belső súrlódásból származó

erők egyenlőségéből indult ki és a nagyméretű szivárgási folyamatra, valamint kicsinyített megfelelőjére a

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [11]$$

és az

$$I'' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [12]$$

egyenleteket írták fel, ahol:

- γ a víz térfogatsúlya [N/m³],
- l a szivárgási hossz [m],
- z a geodéziai magasság [m],
- $\frac{dv}{dz}$ a szivárgási sebesség hely szerinti megváltozása, sebességgradiens [-].

Ebből levezethető a következő egyenlet:

$$\frac{v'}{v''} = 1 \quad [13]$$

Amennyiben a Darcy-törvény érvényes, felírható a

$$k' \cdot I' = k'' \cdot I'' \quad [14]$$

összefüggés.

Innen, feltételezve, hogy a kismintavizsgálatok esetén ugyanolyan a talaj, mint a nagyméretű szivárgási folyamatnál, a

$$k' = k'' \quad [15]$$

végeredményül az

$$I' = I'' \quad [16]$$

egyenlőségre jutunk (Mosonyi és Kovács 1956, Ivicsics 1968).

Mivel a két rendszert hasonlóknak tekintettük, a talaj szemcsenagyságát is a geometriai arányszámnak megfelelően változtatni kellene. Ha ez megtörténne, torzítatlan modellről beszélnénk. Azonban a szemcsenagyság és a hézagtenyező megfelelő mértékű kicsinyítésekor a talaj fizikai állapotában és a víz mozgásállapotában hirtelen minőségi változások mennének végbe, hiszen például egy homokos talaj agyagos vagy iszapos talajjá válna, amelyben a víz áramlása nagy mértékben eltér. Emellett ez a művelet gyakorlatilag is nehezen megvalósítható lenne, ezért a kísérletek során úgynevezett torzított modellel számolunk, ahol a két folyamat

ugyanolyan talajban játszódik le. A Mosonyi-Kovács törvény a Darcy-törvény érvényességét feltételezve tekinti hasonlóknak a két folyamatot, ezért ekkor két léptékben megegyező hidraulikus gradiensek és szivárgási sebességek fognak kialakulni. Ugyanez fog teljesülni a talajjellemzőkre és a szemcseméretek közti összefüggésre is (Mosonyi 1955).

4. KORÁBBI VIZSGÁLATOK

Ebben a fejezetben az általam használt kismintamoddellal végzett korábbi kutatásokat és a szemeloszlási görbéket használó, azok alkalmazhatóságát vizsgáló kutatásokat foglaltam össze.

4.1 SZEMELOSZLÁSI GÖRBÉN ALAPULÓ SZÁMÍTÁSOKKAL FOGLALKOZÓ KORÁBBI VIZSGÁLATOK

Számos kutató végzett már hasonló vizsgálatot, ahol a szemeloszlási görbén alapuló elméleti módszerek megbízhatóságát vizsgálták.

Svensson (2014) kavicsos homok, homok, iszapos homok és iszapos agyagos homok talajokat vizsgált helyszíni (próbaszivattyúzás és nyeletés), laboratóriumi (állandó nyomású áteresztőképesség mérés) és szemeloszlási görbékből számító elméleti módszerekkel (Kozeny-Carman, Hazen, Gustafson). Eredményei alapján kijelentette, hogy a Kozeny-Carman módszer rendre nagyobb szivárgási tényezőket adott, mint a Gustafson. Ezen felül a nyeletéses méréseket alapul véve a Gustafson módszer felülbecsülheti a tényleges szivárgási tényezőt.

Pucko és Verbovšek (2015) Szlovénia hat különböző pontján gyűjtött talajmintákat értékelték ki a Hazen, USBR, Kozeny-Carman, Beyer, Slichter és Terzaghi módszerekkel. A magminták furataiban próbaszivattyúzást és nyeletéses vizsgálatokat hajtottak végre, melyekkel szintén szivárgási tényezőket határoztak meg. Az elméleti módszerekkel számított szivárgási tényezőket egymással korreláltatták, ezek alapján állapították meg a módszerek használhatóságát. Ezt követően az eredményeket összevetették a terepi szivárgási tényezőkkel és megállapították, hogy a USBR módszer áll legközelebb a próbaszivattyúzásból származtatott értékhez, viszont ez a többi elméleti módszerrel gyenge korrelációt mutatott.

Onwe és társai (2016) Nigériában tizenöt különböző helyszínen végeztek próbaszivattyúzást és vettek talajmintát laborvizsgálat céljából. A Beyer, Hazen, Slichter, USBR, Kozeny-Carman és Pavchich módszerekkel kapott eredményeket egyenként korreláltatták a próbaszivattyúzás eredményeivel. Ezek alapján a legjobb egyezést a Pavchich módszerrel kapták.

Cabalar és Akbulut (2016) eltérő szemcseméret-tartományokkal (osztályozottsággal) rendelkező Narli homok, illetve szemcsés állagra aprózódott homokkő mintákat teszteltek. Az összesen tizenhat féle szemcsetartomány közül a legtágabb határokkal a 4,750-0,075 mm, a legszűkebb 0,600-0,425 mm intervallumok rendelkeztek. Laboratóriumi állandó nyomású áteresztőképesség vizsgálatokat hajtottak végre az összes mintán, majd meghatározták a jellemző szemcseméreteket (pl. d_{10} , d_{20} , stb.), amik ismeretében elméleti módszerekkel is

kiszámították a minták szivárgási tényezőjét. Az alkalmazott kilenc módszerből a Slichter és Terzaghi adták a legjobb egyezést a laboratóriumi állandó nyomású áteresztőképesség vizsgálatok során kapott eredményekkel. A leggyengébben a Kozeny-Carman és NAVFAC (Naval Facilities Engineering Command) szerepeltek. Megállapították, hogy a minták osztályozottsága nagy mértékben befolyásolja a szivárgási tényezőt. Ezen felül megfigyelték, hogy a szemcsék alakja is nagyban befolyásolja az eredményt: a gömbölyűbb szemcsék kisebb fajlagos hozamot produkáltak, mint a szögletesebbek. Kijelentésük oka a szemcsealakokból következő eltérő hézagaránnyal magyarázható.

Ríha és társai (2018) három különböző átmérőben gyártott üveggolyókkal helyettesítették a talajszemcséket, laboratóriumi kísérleteiket pedig tizenhét elméleti módszerrel elemezték. A laboratóriumi kísérletek eredményeivel a legjobb egyezést azokkal az összefüggésekkel kapták, ahol a porozitástól függő tagot az $\frac{n^3}{(1-n)^2}$ hányadossal azonosították, illetve a figyelembe vett szemcseátmérő a d_{10} -zel egyezett meg. Ennek fényében a Terzaghi, Chapius, Kozeny-Carman és Zunker módszereket részesítették előnyben.

Arfeen és Khan (2020) különböző textúrájú talajokat vizsgáltak azzal a céllal, hogy ne csak kavicsos és homokos mintákon teszteljenek elméleti módszereket. Kutatásuk alatt homok, agyagos homok, homokos agyag és iszapos agyag mintákkal dolgoztak. Cabalar és Akbulut (2016) munkájához hasonlóan ők is laboratóriumi állandó nyomású áteresztőképesség vizsgálattal határozták meg a telített talajminták szivárgási tényezőjét. A Hazen, Slichter, Beyer, Alyamani and Sen, Kozeny, valamint Gustafson összefüggések közül a Slichter és Gustafson adta a legjobb egyezést a laboratóriumi eredményekkel. A módszerek csak akkor bizonyultak hatékonyak, amikor a minták túlnyomórészt homokot tartalmaztak, így az iszap- és agyagtalajok esetén egyik módszer se bizonyult jól használhatónak.

4.2 KISMINTAMODELLEL VÉGZETT KORÁBBI VIZSGÁLATOK

Az először 2011-ben üzembe helyezett modellt Dr. Hajnal Géza és Tolnai Sándor tervezte, majd 2015-ben és 2018-ban Farkas Dávid a jobb alkalmazhatóság érdekében különböző változtatásokat végzett rajta. (Farkas 2021b)

A fizikai modellel végzett kutatásból korábban több TDK dolgozat, diplomamunka és cikk készült el, melyek alkalmazott módszereket tekintve két fő csoportba sorolhatók: laboratóriumi vizsgálatok, illetve numerikus modellezés.

Laboratóriumi méréseket elsőnek Barta és Veczán (2011) kiviteleztek a szivárgáshidraulikai kismintán homogén és rétegzett talajmintákon. Az első numerikus modell megalkotása a kismintáról Csáki (2011) nevéhez fűződik, aki a fizikai mérésekkel kapott szivárgási tényezőket ellenőrizte Soil Vision Office végeeselemes szoftverben. Barta és társai (2012), illetve Szabó és társai (2012) numerikus modellezéssel (Visual MODFLOW 2.8.2.2 és FEFLOW 5.0 szoftverekkel) és laboratóriumi mérésekkel bizonyították, hogy a leszívási folyamat hengersizimetriája nem sérül a vizsgálatok alatt. A fizikai modellben kialakuló nyomás- és vízszintek egyezőségét, tehát a szabad felszíni szivárgás feltételét Barta és társai (2013) vizsgálták numerikus modellezéssel. A 2015-ben átalakított kismintán Vig (2016) végzett újabb laboratóriumi kísérleteket, melyek során kialakult leszívási görbéket numerikus modellezéssel állította elő Visual MODFLOW Classic szoftverrel (Vig és társai 2016). A 2015-ben elvégzett mérésor alapján Farkas és társai (2019a) publikáltak elsőnek kalibrált és igazolt numerikus modellváltozatokat a FEFLOW 7.0 szoftverkörnyezetben, melyek a kismintát képezik le. 2018-tól a fizikai modell nemcsak szivárgáshidraulikai, hanem kúthidraulikai vizsgálatokra is alkalmassá vált (Hegedűs 2018, Hegedűs és társai 2019), ezen felül új módszertan kidolgozására került sor nempermanens vizsgálatok elvégzésére és kiértékelésére (Farkas és társai 2019b). A nemlineáris áramlás kimutatásával kapcsolatban Hegedűs (2019) a MODFLOW NLFP szoftverrel készített több modellváltozatot, ahol a lineáristól eltérő állapot kimutatásának feltétele sikeres volt. Hegedűs (2020, 2021) a modellen különböző intenzitású és időtartamú csapadékesemények időbeli hatását vizsgálta a víztartóban kialakuló szintekre, illetve az anyakúttal kitermelt hozamra. A nemlineáris áramlással és kúthidraulikai vizsgálatokkal kapcsolatban Farkas és társai (2021) foglalták össze eredményeiket. Farkas (2021a) valós terepi mérések adataival igazolta kisminta mérései helyességét, majd 2015-től folytatott szivárgás-és kúthidraulikai vizsgálatait disszertációjában közölte (Farkas 2021b).

5. A KISMINTAMODELL FELÉPÍTÉSE ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZERTAN

A következőkben az általam is használt kismintamodell felépítését, a beépített talajminta vizsgálatának eredményét, illetve a mérések folyamatát mutatom be.

5.1 A KISMINTAMODELL FELÉPÍTÉSE

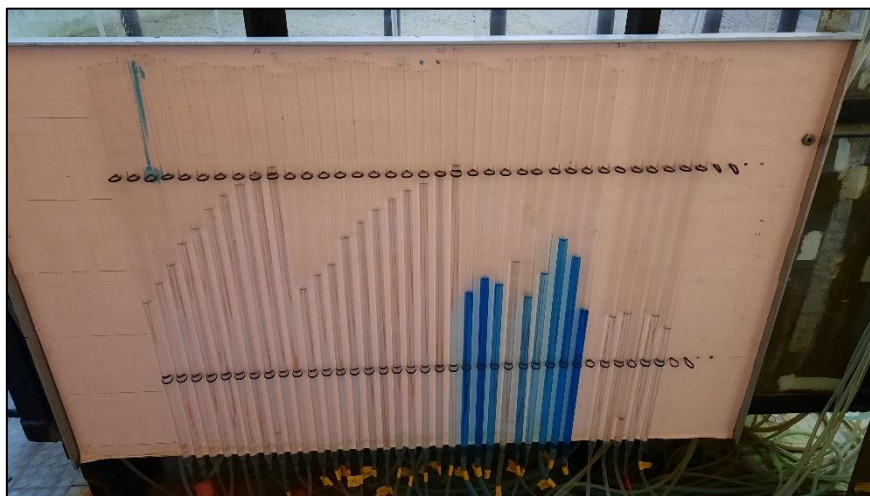
A méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének laboratóriumában felállított kismintamodellen végeztem (1. kép).



1. kép: A laboratóriumi kismintamodell

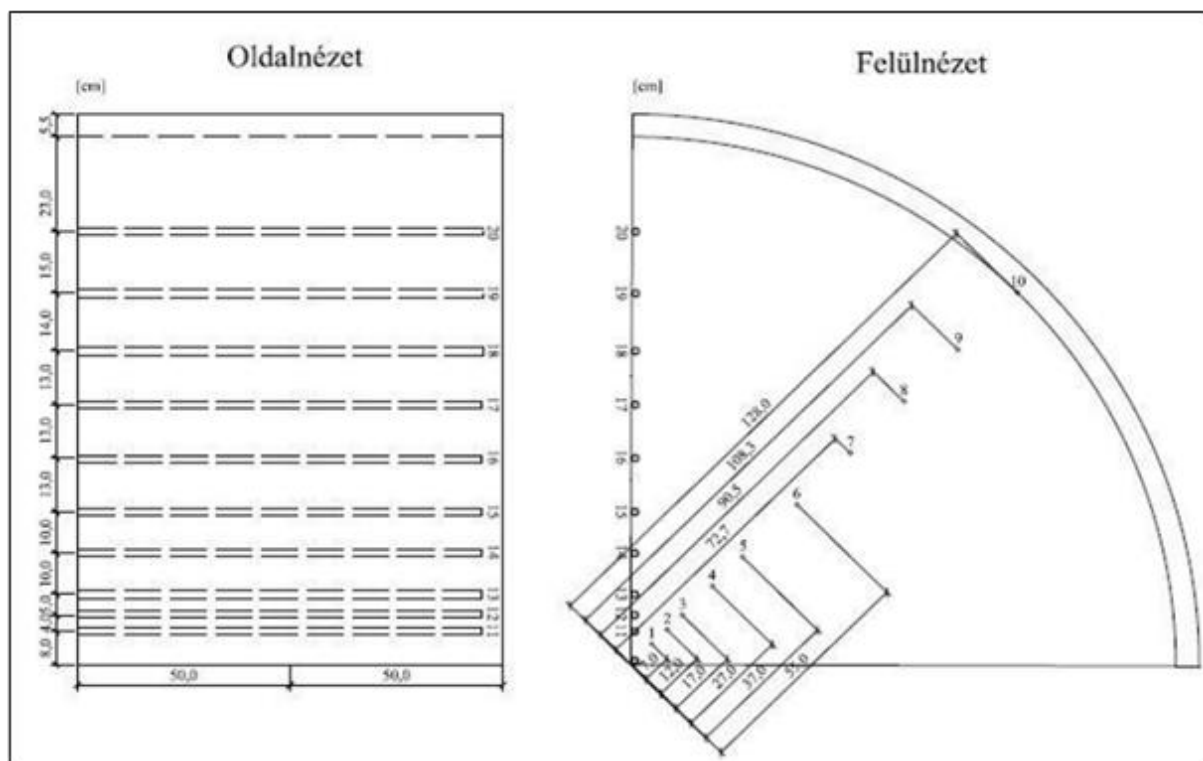


2. kép: Alsó perem bukója



3. kép: Piezométertáblán kialakult szintek

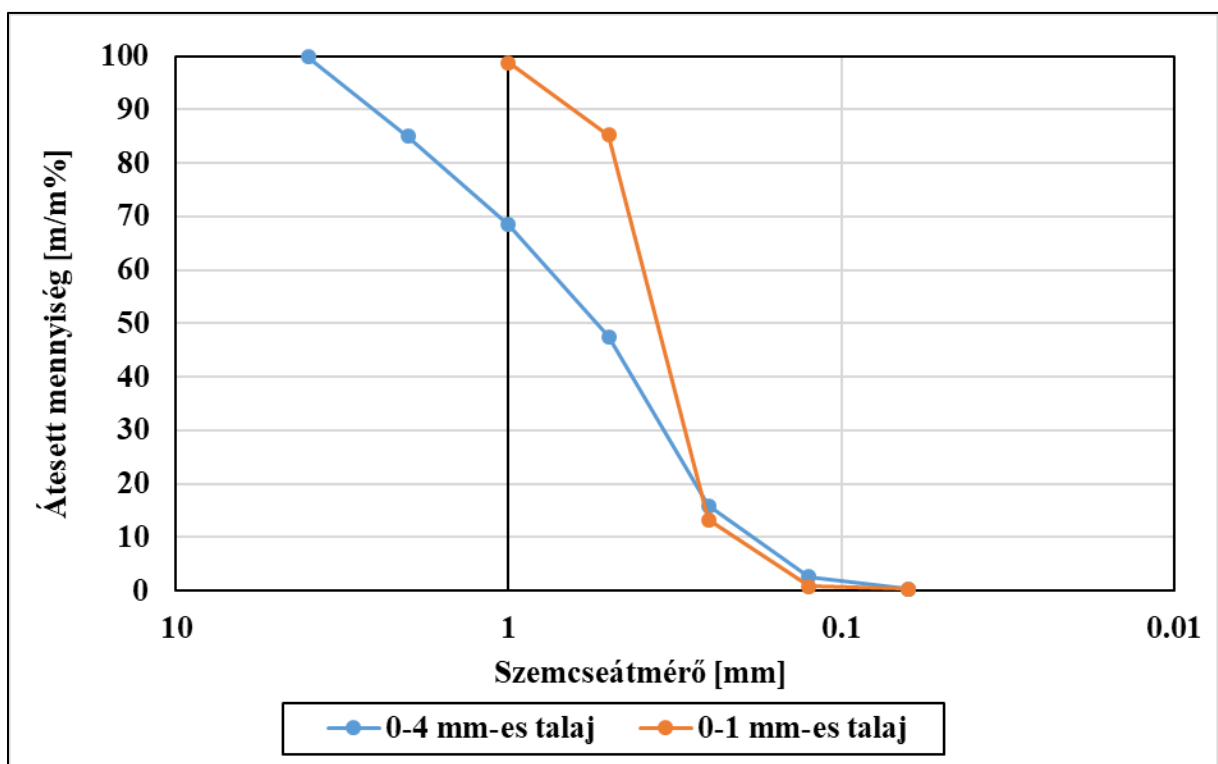
A modell alaprajza egy negyed körcikk, a magassága 100 cm, tömege körülbelül 100 kg, térfogata 1,4 m³. Mivel homogén víztartóban a próbaszivattyúzások hengerszimmetrikus leszívásokat eredményeznek, a 90°-os oldalfalak által közbezárt szögű rész elegendő információt biztosít az egész kútra és környezetére nézve. A modell teljes sugara 133,5 cm, a modelltér sugara 128 cm. Jelenleg a modell a víz be- és kivezetésénél egy-egy bukót (2. kép) tartalmaz, ezek biztosítják az egyenletes vízkivételt és szintkülönbségük képezi a leszívást. A modellből kilépő víz hőmérsékletét egy, az alsó bukóban elhelyezkedő laborhőmérővel lehet megállapítani. A modell fenéklemezén tíz piezométer található, ezek segítségével állapítható meg a nyomásszint-görbe, melyet a vízkitermelés eredményez. A tíz megfigyelőkút átmérője 17 mm, távolságuk az oldalfaltól 8, 12, 17, 27, 37, 50, 63, 76, 90 és 105 cm, ezek a termelés alatt a modellben kialakult vízszintet mutatják (3. ábra). A modellben szerepel egy 11. vízszintmérési pont a felső peremet alkotó víztérben, így ez a kút az oldalfal mellett, a fenéklemez 10. piezométere pedig a szimmetriatengelyen méri a vízszintet. Ezek segítségével ellenőrizhető, hogy a felső perem teljes hengerfelületén ugyanaz a kezdeti szint alakult-e ki. A piezotábla fixen rögzített üvegcsövekből áll (3. kép), az ezekben kialakult vízszintek alapján állapítható meg a hozzájuk tartozó piezométernél kialakult nyomásszint vagy a megfigyelőkútbeli vízszint. (Hegedüs 2018, Farkas 2021b)



3. ábra: A kismintamodell felépítése (Farkas 2021b)

5.3 A TALAJMINTA VIZSGÁLATA

2021. augusztus 12-én új talajmintát építettek be a kismintamodellbe, a méréseket ezen az új talajon végeztem. Annak érdekében, hogy a talajmintáról részletesebb adatokkal rendelkezsek, a beépített 0-4-es kavicsos homokot mintavétel után szabványos szitasorral kiértékeltem (7. kép). A talajból két mintát vettem, de jelentős eltérés nem volt az eredmények között. A mintához tartozó szemeloszlási görbe a 4. ábrán látható, a korábban a kismintamodellben használt 0-1-es homokhoz tartozó görbével együtt (Farkas és társai 2019b). Látható, hogy a két görbe a 0,25 mm-es szemcseátmérőt elérve már együtt halad, azaz a kis méretű szemcsék aránya közelítőleg megegyezik a két talajban.

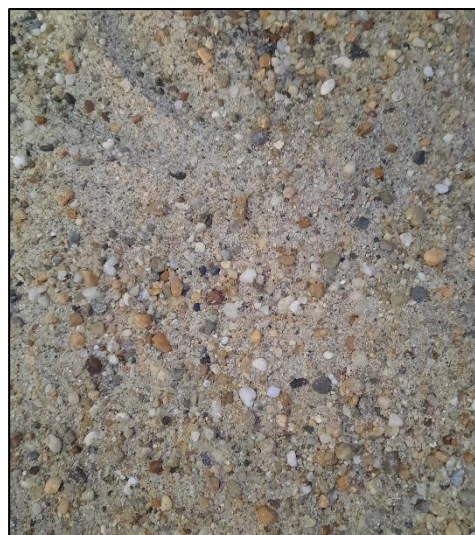


4. ábra: A két talaj szemeloszlási görbéi

A talajminták beépítés és telítés előtti állapotáról készült a 4. és 5. kép.



4. kép: 0-1 mm-es talaj beépítést megelőzően



5. kép: 0-4 mm-es talaj beépítést megelőzően

A szemcseméreték eloszlása alapján megállapítható, hogy a talaj durva homok besorolású, azonban nagy arányban tartalmaz közepes homokot és finom kavicsot is (1. táblázat).

1. táblázat: A talaj besorolása (Devlin 2015)

Szemcseátmérő tartomány [mm]	Besorolás szemcseátmérő alapján	Talajminta mennyisége [%]
2,0-4,0	finom kavics	19,69
0,5-2,0	durva homok	35,551
0,25-0,5	közepes homok	30,072
0,063-0,25	finom homok	14,687

Ahhoz, hogy szemeloszlási görbe alapján számítsunk szivárgási tényezőt, különböző paraméterekre van szükség, ezek a 2. táblázatban találhatók, kiegészítve a korábbi talaj adataival Farkas és társai (2019b) mérései alapján.

2. táblázat: A talajok paraméterei

Paraméter	0-4 mm-es kavicsos homok	0-1 mm-es homok
d_{60} [mm]	0,883	0,410
d_{50} [mm]	0,632	0,374
d_{20} [mm]	0,294	0,268
d_{17} [mm]	0,269	0,257
d_{10} [mm]	0,203	0,204
d_5 [mm]	0,150	0,157
U [-]	4,35	2,01
n [-]	0,367	0,430

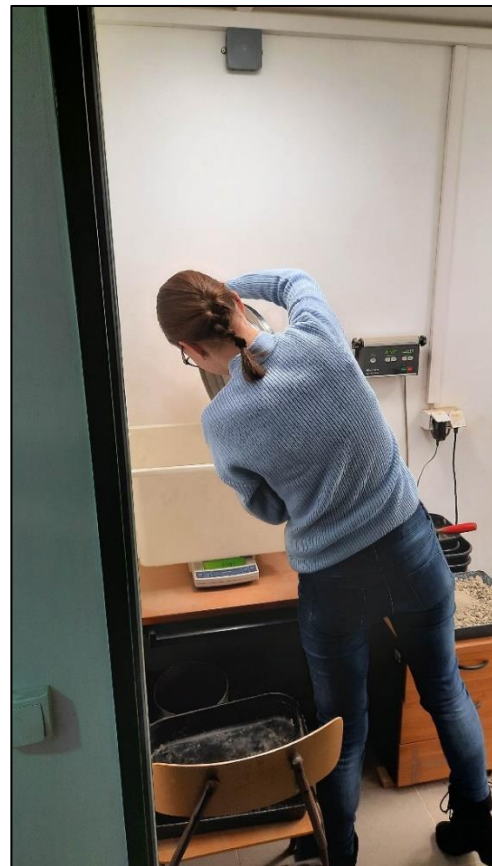
5.2 A MÉRÉSEK FOLYAMATA

A kismintán végzett mérések során az alsó bukó szintjének változtatásával értem el különböző leszívásokat, a felső bukót mindvégig változatlanul hagyva. Az alsó bukó magasságát 3 cm-es lépcsőnként csökkentettem, ezzel az anyakút és a felső peremfeltétel közti nyomásszintkülönbség növekedését értem el. Két mérés közt mindig legalább két óra telt el, ez elegendő volt a permanens áramlás kialakulásához (Farkas 2021b). Nagyobb leszívásoknál ez több időt vett igénybe, ekkor megvártam, míg az egymás utáni mérések azonos értéket adnak ugyanannál a leszívásnál. A piezométerekben és megfigyelőkutakban egy adott peremfeltétel hatására kialakult nyomásszinteket a piezotábláról leolvasva milliméteres pontossággal feljegyeztem (6. kép). A vízszintek rögzítése után egy stopperóra és egy mérőhenger segítségével köbözéssel megmértem a vízhozamot. Ezt még egyszer megismételve a két mérés átlagával számoltam a későbbiek során.

A kismintamodellen végzett 23 darab laboratóriumi mérés alapján a Dupuit-módszerrel számoltam szivárgási tényezőt. Az egyenletet minden kútpárra felírtam, az így kapott $\left(\frac{10}{2}\right) = 45$ értéket átlagolva számítottam ki a szivárgási tényező értékét egy adott mérésre.



6. kép: Vízszintek leolvasása a piezométertábláról



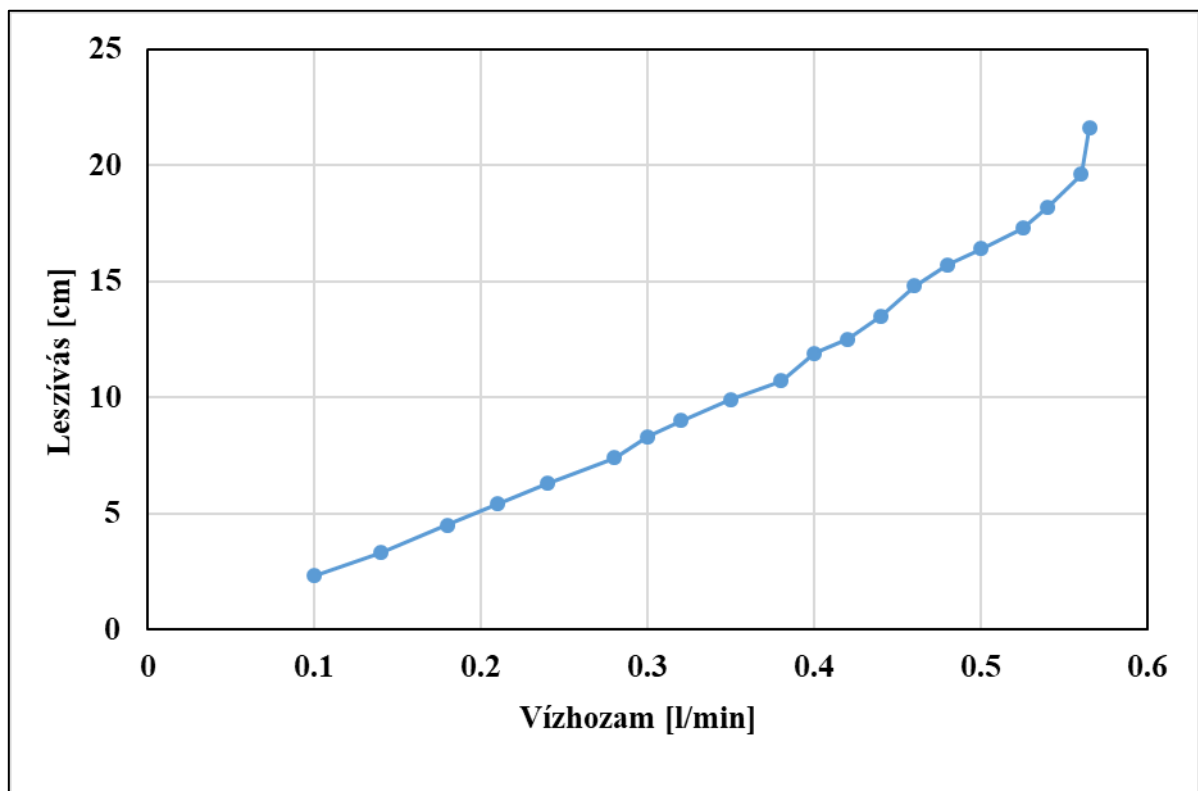
7. kép: Talajminta szitálása

6. EREDMÉNYEK

A következőkben a kismintamoddellal való mérések és a szemeloszlási görbén alapuló számítások eredményeit mutatom be.

6.1 A VÍZHOZAM-LESZÍVÁS GÖRBE ALAKULÁSA

A kismintamoddellben az egyes vízhozamokhoz tartozó leszívásokat ábrázoltam az. 5. ábra diagramján. A legkisebb leszívás 2,3 cm volt, ehhez 0,10 l/min vízhozam tartozott. A 0,57 l/min értékű legnagyobb kitermelt vízhozam a 21,6 cm-es leszívásnál jött létre. A mérések során a legkisebb leszívástól haladtam a legnagyobb felé. A görbe első felén (a vízhozam 0,38 l/min-es értékéig) az adatokat jelölő pontokra egyenes illeszthető, lineáris összefüggés van a vízhozam és a leszívás között. Ennek ideális esetben a görbe egészére teljesülnie kéne, de a nagyobb leszívás értékeknél a görbe meredeksége nő, tehát nem lineáris áramlás alakulhatott ki.

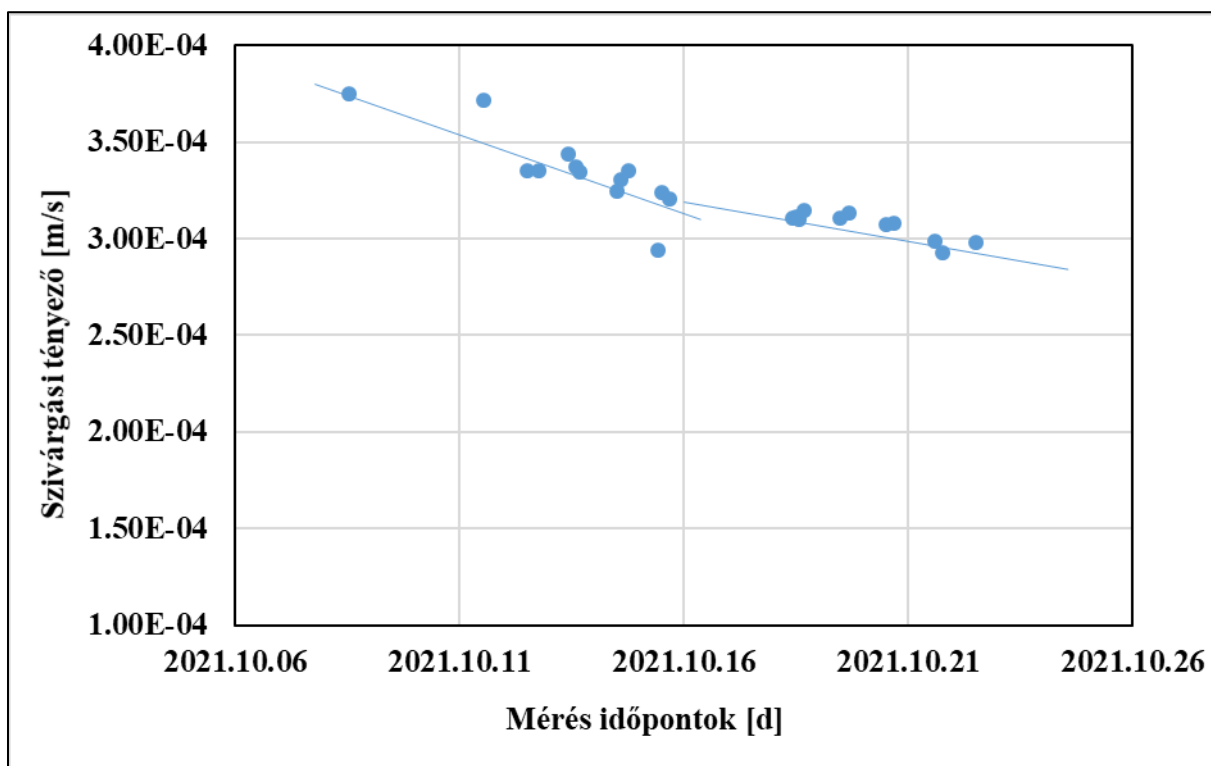


5. ábra: A vízhozam-leszívás görbe 0-4-es homokra

6.2 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ IDŐBELI VÁLTOZÁSA

Az összesen 23 darab mérés elvégzése után az egyes mérésekre számolt átlagos szivárgási tényező értékeket átlagolva $3,22 \cdot 10^{-4}$ m/s -ot kaptam. Ez az érték kb. másfélszerese a korábbi 0-1-es talajon ugyanezzel a módszerrel és kismintamoddellal 2018-2019-ben végzett vizsgálatok

során kapott $2,25 \cdot 10^{-4}$ m/s-os értéknek. Ez megfelel annak az elvárásnak, hogy a szivárgási tényezőnek nagyobb szemcseméret esetén nagyobbak kell lennie. Az átlagos szivárgási tényező értékek változása az idő függvényében a 6. ábrán látható. Az egyes szakaszokra kézi illesztésű egyeneseket helyeztem. A változás okait a 7.2 fejezetben mutatom be.



6. ábra: A szivárgási tényező átlagos értékének változása az idő függvényében

6.3 A SZEMELOSZLÁSI GÖRBE ALAPJÁN SZÁMÍTOTT SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK

A vizsgált talaj szitálással kapott adatait felhasználva a „HydrogeoSieveXL2.3.2” program segítségével számoltam szivárgási tényező értékeket, majd ezeket kiegészítettem a Seelheim összefüggés különböző paramétereire felvett értékeivel, valamint a Kenney, Gustafson, Harleman, USCRO és Pavchich módszerekkel. Az eredményeket táblázatba foglaltam, ahol megjelenítettem a laboratóriumi mérésekből származó átlagos szivárgási tényezőt is (3. táblázat). A legkisebb értéket a Kenney, a legnagyobb értéket a Jáky módszerrel kaptam.

3. táblázat: A szemeloszlási görbe alapján számított szivárgási tényező értékek

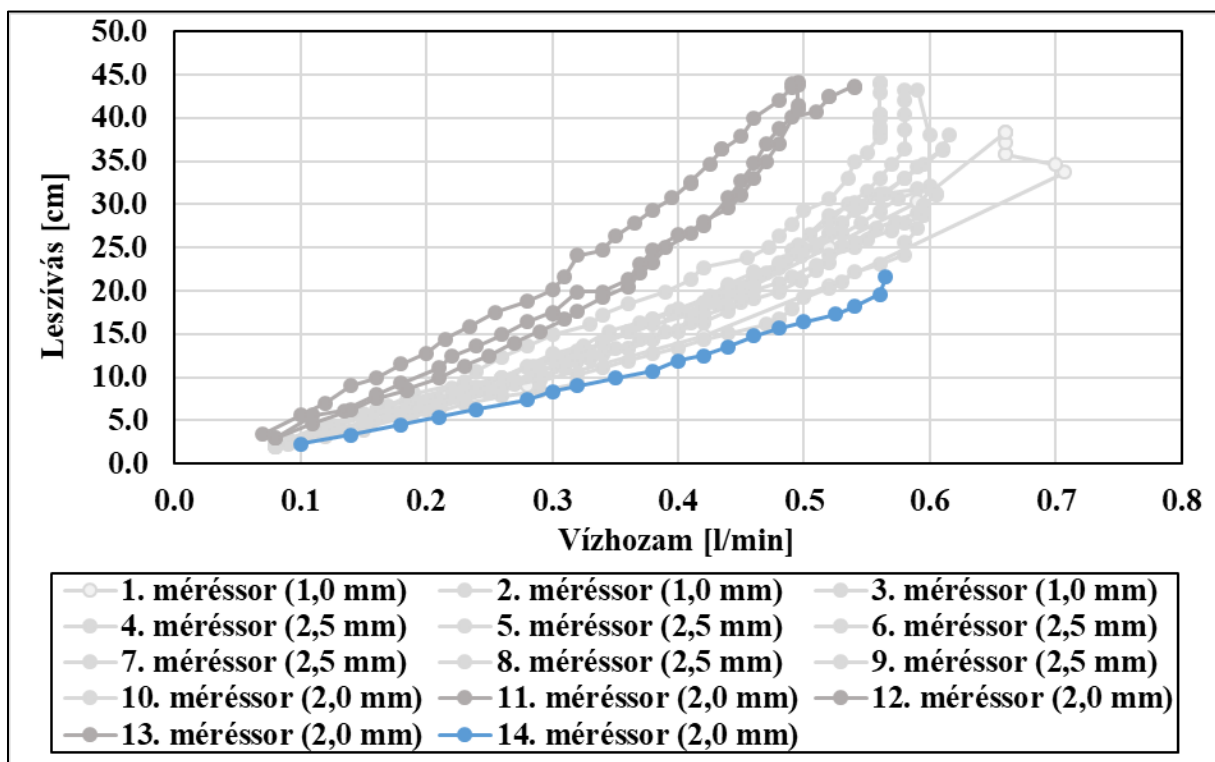
Alkalmazott módszerek	k [m/s]
Kenney	1,13E-04
Slichter	1,48E-04
Alyamani and Sen	1,62E-04
Barr	1,98E-04
Terzaghi	2,55E-04
Harleman	2,63E-04
Chapuis	2,69E-04
USBR	2,80E-04
Sauerbrei	3,45E-04
Beyer	4,24E-04
Krumbein and Monk	4,80E-04
Hazen	4,94E-04
Gustafson	5,22E-04
Pavchich	5,72E-04
Shepherd	7,65E-04
USCRO	8,91E-04
Seelheim	1,40E-03
Hagen	1,42E-03
Kröber	1,61E-03
Kozeny-Carman	1,80E-03
Jáky	3,93E-03
Kismintamodell (Dupuit módszer)	3,22E-04

7. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Mivel az általam is használt kismintamodellt alkalmazva számos TDK dolgozatot és diplomamunkát is készítettek már, szeretném kihasználni az ez által nyújtott lehetőségeket, így a továbbiakban az eredményeimet a korábban 0-1-es homokon végzett vizsgálatok eredményeivel összehasonlítva fogok következtetéseket levonni.

7.1 A LESZÍVÁS ÉS VÍZHOZAM KAPCSOLATÁNAK ALAKULÁSA

A 7. ábrán a leszívás-vízhozam görbék közül az 1-13. mérőssorok a 0-1-es homokhoz tartoznak Hegedűs (2020) és Farkas (2021b) adatai alapján, a 14. mérőssor az új 0-4-es talaj vizsgálatokor készült adatokat tartalmazza. A korábbi mérések különböző perforációjú anyagúttal zajlottak, de a jelenlegi mérésnél is használt 2 mm-es perforációjú anyagúttal a 10-13. mérőssoroknál is használták már. Ezek az adatok azonban nem elég megbízhatóak a jelenlegi eredményekkel való összehasonlításához, mivel a kismintamodellben a szinte folyamatos vizes környezet hatására nagy mértékű rozsdásodás alakult ki a felső peremen, ami áramlási akadályt képzett (Hegedűs 2020). Ezen okból az azonos leszívásokhoz kisebb vízhozam tartozott, ami az ábrán úgy jelenik meg, hogy a görbék meredeksége folyamatosan nőtt. Az első 9 mérőssor azonban nagyrészt együtt halad, a 14. mérőssor pedig burkológörbéként illeszkedik az eddigi mérőssorok alá.



7. ábra: A vízhozam-leszívás görbék a 0-1-es (Hegedűs 2020, Farkas 2021b) és a 0-4-es talaj esetén

Észrevehető, hogy ezeknél a mérősoroknál (1-9, 14) hasonló vízhozam értékeknél (kb. 0,55 és 0,60 l/min között) figyelhető meg az a jelenség, hogy a leszívás növelésekor a vízhozam már csak kis mértékben vagy egyáltalán nem nő. Azonban ezt a maximális vízhozam értéket a 0-1-es homokkal való mérések esetén (1-9. mérősorok) nagyobb leszívás értéknél éri el a görbe, mint a 0-4-es homoknál (14. mérősor). Látható az is, hogy a 14. adatsor görbéje egyre távolodik a többi értéktől, azonos vízhozamok kisebb leszívás értékeknél valósulnak meg. Mivel az anyakút úgy lett kialakítva, hogy perforációjának nagysága nem befolyásolja az áteresztőfelületet, azaz a kisebb perforációjú anyakúthoz nagyobb lyukszám tartozik (Farkas 2021b), ezért ez elméletileg nem befolyásolja a vízhozam alakulását. A mérések között ezen túl nincs más eltérés, csak a talaj változása, tehát a leszívási görbék eltérő alakulásának oka a talajok közti különbségben keresendő. Az eltérés azzal magyarázható, hogy a lazább, több nagy szemcsét tartalmazó talaj "gyorsabban" közvetíti a felső peremen kialakult vízszintet az anyakút felé, mint a kis szemcsés. Ez alapján összefüggés van a szivárgási tényező és az azonos vízhozamhoz tartozó leszívások közt. Néhány leszívás értéket táblázatba foglaltam (4. táblázat), ahol kiszámoltam a régi és új talajhoz tartozó leszívás arányát. Mivel a 0-1-es homokhoz tartozó értékek széles tartományokban helyezkednek el, ezért a maximumukkal és minimumukkal is számoltam. A régi talajminta maximumának arányát nem gondolom mérvadó mennyiségnek, mivel azokat a már rozsdásodott felső peremmel mérték. A szivárgási tényezők hányadosa $\frac{k_{0-4}}{k_{0-1}}=1,43$, ezt a kiszámolt arányokkal a 4. táblázatban összehasonlítva megállapítható, hogy feltehetőleg nem lineáris összefüggés van szivárgási tényezők aránya és az azonos vízhozamhoz tartozó leszívás értékek aránya között.

4. táblázat: A leszívás értékek aránya azonos vízhozamok esetén

Vízhozam [l/min]	Leszívás [cm]		$\frac{h_{r,min}}{h_0}$	Leszívás [cm]	$\frac{h_{r,max}}{h_0}$	Leszívás [cm]	$\frac{h_{r,max}}{h_0}$
	Új talajminta (h ₀)	Régi talajminta minimuma (h _{r,min})		Régi talajminta maximuma (h _{r,max})		Régi talajminta maximuma korrózió előtt	
0,1	2,3	2,6	1,13	5,6	2,43	2,8	1,22
0,3	8,3	8,9	1,07	20,1	2,42	12,7	1,53
0,5	16,4	19,2	1,17	40,5	2,50	29,3	1,79

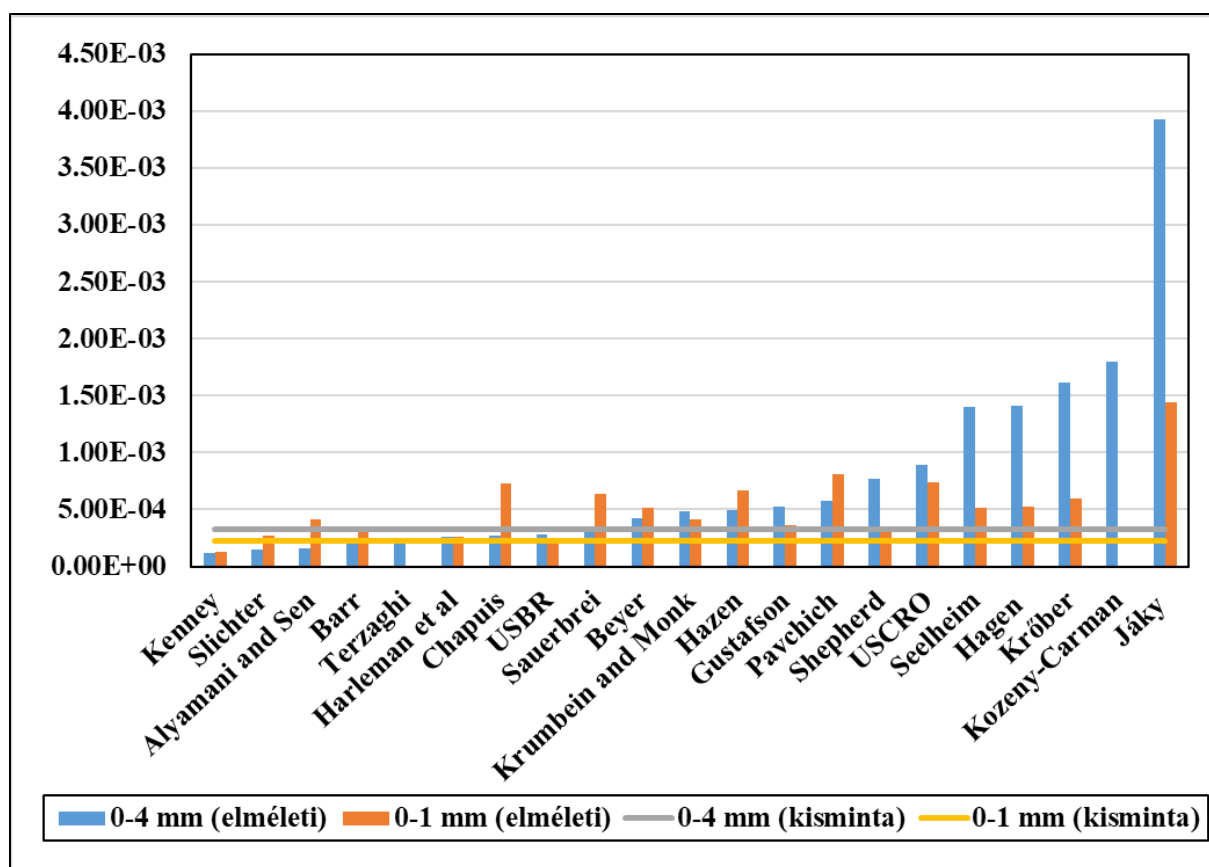
7.2 A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ IDŐBELI VÁLTOZÁSA

A 6. ábra alapján megállapítható, hogy a talajban még időfüggő folyamatok mentek végbe a vizsgálat alatt, mivel a szivárgási tényező még nem állt be egy konstans értékre. Ezt a jelenséget figyelte meg Klotz (1971), és a talajban maradt légbuborékok szivattyúzáskor való távozásával magyarázta. Mivel kísérletében az állandó szivárgási tényező érték kialakulása kb. egy-másfél

hónapot vett igénybe a mérések kezdetétől számítva (Klotz 1971, Farkas 2021b), feltételezhető, hogy az általam vizsgált talajban is ez a folyamat ment végbe. Klotz kutatása során kb. 30%-os csökkenést mutatott a szivárgási tényező értéke, míg a méréseim során csak 25%-ot csökkent, tehát nagy valószínűséggel a görbe hamarosan elér egy közel konstans értéket. Ezt az is mutatja, hogy a mérések első és második szakaszának szivárgási tényezőire egy-egy egyenest illesztve az egyenesek meredeksége csökken. A korábbi mérések elején a kezdeti magasabb értékeket Farkas (2021b) szintén a légfázis talajból való távozásával magyarázta, ami a megfigyelőkutak és piezométerek csöveinek falán légbuborékok formájában is megjelent. Ezt a légbuborékokkal járó folyamatot a mérések elején én is tapasztaltam.

7.3 A SZEMELOSZLÁSI GÖRBE ALAPJÁN SZÁMÍTOTT SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK

A szemeloszlási görbe alapján számolt eredményeket összehasonlítottam a kismintamoddellel végzett mérések eredményeivel, mivel feltehetőleg ez a legpontosabb meghatározási mód a talaj szivárgási tényezőjére. Az összefüggésekből és a kismintamoddellel kapott értékeket mindkét talaj esetén a 8. ábra tartalmazza.



8. ábra: Kismintamoddellel és elméleti módszerekkel kapott szivárgási tényezők

A különböző módszerekkel kapott eredmények százalékos eltérését a kismintamoddell kapott értéktől az 5. táblázat tartalmazza, a 0-1-es talajra kapott értékekkel és azok eltéréseivel együtt Farkas (2021b) adatai alapján.

5. táblázat: Szemeloszlási görbékkel számolt szivárgási tényező értékek

Alkalmazott módszerek	0-4-es talaj		0-1-es talaj	
	k [m/s]	Eltérés a kismintamoddell értéktől [%]	k [m/s]	Eltérés a kismintamoddell értéktől [%]
Kenney	1,13E-04	65	1,23E-04	45
Slichter	1,48E-04	54	2,73E-04	21
Alyamani and Sen	1,62E-04	50	4,13E-04	83
Barr	1,98E-04	39	3,25E-04	44
Terzaghi	2,55E-04	21	-	-
Harleman	2,63E-04	19	2,65E-04	18
Chapuis	2,69E-04	17	7,25E-04	222
USBR	2,80E-04	13	2,30E-04	2
Sauerbrei	3,45E-04	7	6,37E-04	183
Beyer	4,24E-04	32	5,14E-04	129
Krumbein and Monk	4,80E-04	49	4,14E-04	84
Hazen	4,94E-04	53	6,70E-04	198
Gustafson	5,22E-04	62	3,60E-04	60
Pavchich	5,72E-04	78	8,14E-04	262
Shepherd	7,65E-04	137	3,26E-04	45
USCRO	8,91E-04	176	7,43E-04	230
Seelheim	1,40E-03	335	5,16E-04	129
Hagen	1,42E-03	339	5,20E-04	131
Kröber	1,61E-03	400	5,92E-04	163
Kozeny-Carman	1,80E-03	458	-	-
Jáky	3,93E-03	1120	1,44E-03	540
Kismintamoddell (Dupuit módszer)	3,22E-04	-	2,25E-04	-

7.3.1 A módszerek rangsorolása az új talaj esetén és az eredmények kiértékelése

A méréseim és a korábbi mérések eredményei alapján felállítottam egy rangsort, hogy melyik szemeloszlási görbéken alapuló módszer használatát ajánlom adott talajfélékre. A 6. táblázat tartalmazza a 0-4-es talajmintára a kritériumok alapján használható módszereket alkalmazhatóság szerint csoportosítva. Az alkalmazhatóság határait a következők alapján állapítottam meg: a kismintamoddell számolt szivárgási tényező maximumának és minimumának különbsége és a szivárgási tényezők átlagának hányadosa $\frac{3,75-2,93}{3,22} \approx 0,25$, tehát a 25%-on belüli eltérések még nem jelentősek, hiszen a mérések során is ennyivel változott a szivárgási tényező. Az 50%-os határt a korábbi kutatások alapján állapítottam meg, mivel Farkas (2021b) alapján a kismintamoddell-kísérletek során az egyes vizsgálatok eredményei

30% illetve 36%-os eltérést mutattak. Tehát az ezen belül eső értékek még elfogadhatók. A 100%-os eltérésnél kisebbeket közepes becslésnek ítélt meg, mivel ezek már nem mondhatóak pontos becslésnek. A 200%-nál nagyobb eltérés nagyságrendi átlépést jelent, ezért az ebbe a kategóriába tartozó módszerek használatát nem ajánlom.

6. táblázat: A szemeloszlási görbén alapuló, szivárgási tényezőt számoló módszerek rangsorolása a 0-4-es és ahhoz hasonló talajra való alkalmazhatóság szerint

Módszerek	A kismintamodelltől való eltérés [%]	Alkalmazhatóság
Chapuis, Harleman, Sauerbrei, Terzaghi, USBR	0-25	Megbízható
Barr, Beyer, Krumbein and Monk	25-50	Elfogadható
Alyamani and Sen, Gustafson, Hazen, Kenney, Pavchich, Slichter	50-100	Közepes becslés
Shepherd, USCRO	100-200	Nagyon gyenge becslés
Hagen, Jáky, Kozeny-Carman, Kröber, Seelheim,	200-	Használata nem ajánlott

A kismintamoddellel kapott eredményhez az új talaj esetén legközelebb a Sauerbrei módszerrel számolt érték esik, de a USBR, Chapuis és Terzaghi egyenletekkel kapott értékek is jól megközelítik a laboratóriumi eredményt. Főleg azért emelném ki ezt a hármat, mivel a tendenciák alapján (7.2 pont) a kismintamoddellel kapott szivárgási tényező értéke még csökkenhet, tehát ezek a becslések később pontosabbnak bizonyulhatnak, mint a Sauerbrei módszerrel kapott, mivel az túlbecsüli az eredményt. A próbaszivattyúzás során kapott értéktől legnagyobb mértékben a Jáky módszer eredménye tér el, mely annak több, mint tízszeresét adta. A nagy pontatlanság egyik lehetséges oka a vizsgált homok $U=4,35$ -ös egyenlőtlenségi mutatója, mely közel van az $U=5$ -ös határhoz, melynél nagyobb egyenlőtlenségi mutatójú talajokra nem ajánlott használni a Seelheim összefüggésen alapuló egyenleteket. Azonban ezzel nem magyarázható, hogy ezek a módszerek (Jáky, Kröber, Hagen, Seelheim) a 0-1-es homok (melyre $U=2,01$) szivárgási tényezőjét is legalább 100%-kal túlbecsülik, bár kisebb eltéréssel. Megállapítható, hogy ezen számolási módszerek csak kisebb $U<2$ értékekre adhatnak megfelelő értékeket, mivel úgy tűnik, hogy az U csökkenésével értékük egyre közelíti a kismintamoddellezéssel kapott eredményeket, tehát a nagyjából egységes szemcseméretű talajokra feltehetőleg jobb becsléseket adnak. A nagy eltérés oka lehet még, hogy a legmesszebb eső értékeket adó módszerek, melyek közül mindegyik erősen túlbecsüli a szivárgási tényezőt, a Kozeny-Carman kivételével mind a d_{50} paramétert használják. Ezzel szemben a legjobb becslést adó módszerek mindegyike a d_{10} paramétert használja a Sauerbrei

kivételével, mely a d_{17} -tel számol. Ezek alapján levonható az a következtetés, hogy valószínűleg a kicsi i értékhez tartozó d_i értékek a szivárgás szempontjából meghatározóbb jellemzői a talajnak, mint a nagy i értékekhez tartozók. Ez azt jelenti, hogy a kis átmérőjű szemcsék mennyisége befolyásolja a legnagyobb mértékben a talajban végbemenő szivárgó mozgást.

Az új talajra az előző méréshez képest két új módszerrel is lehet szivárgási tényező értékeket számolni, mivel a Terzaghi és Kozeny-Carman egyenletek csak nagyrészt durva homokot tartalmazó talajokra használhatóak. Közülük a Terzaghi módszerrel kapott eredmény közel van a mért eredményhez, a Kozeny-Carman egyenlet viszont nagyon eltérő becslést ad, annak ellenére, hogy a talajminta legnagyobb százalékban durva homokot tartalmaz.

7.3.2 A módszerek minősítése, érzékenységvizsgálat és lehetséges korrekciók

Bizonyos összefüggések a két talajra nézve eltérő mértékben adnak rossz becsléseket a szivárgási tényező értékeire, például ilyen a Shepherd egyenlet. Bár mindkét talaj szivárgási tényezőjét túlbecsüli, a 0-1-es talajra 50% alatti eltéréssel becsléssel meg a k értékét, míg a 0-4-es talaj szivárgási tényezőjét már 137%-kal túlbecsüli. Ezt a hibát valószínűleg az okozza, hogy a 3. egyenletben Shepherd a porozitástól függő tényezőt ($\varphi(n)$) konstans 1 értékre vette fel. Az általam használt egyenletekben a porozitás függ az egyenlőtlenségi mutatótól (U), amely az új talaj esetén több, mint kétszerese a régi talajénak. Tehát az alapján, hogy a porozitás a 4. egyenlet szerint exponenciálisan csökken az U növekedésével, egy porozitással egyenesen arányos tényező bevezetésével már jobb közelítést érne el a 0-4-es talajra is. Egy másik ilyen összefüggés a Pavchich egyenlet, de a Shepherd-del ellentétben itt a régi talaj szivárgási tényezőjét becsléssel túl nagyobb mértékben, olyannyira, hogy nagyobb értéket adott a 0-1-es talajra, mint a 0-4-es talajra, ami hibás feltételezés. Ugyanez mondható el a Alyamani and Sen, Barr, Beyer, Chapuis, Hazen, Harleman, Kenney, Sauerbrei és Slichter formulákról is. Az Alyamani and Sen, Hazen és Pavchich összefüggések ráadásul egyik talaj kismintamodellezéssel megállapított szivárgási tényezőjét sem közelítik meg jól, ezért ezeknek a módszereknek a használatát nem ajánlom olyan talajminták esetén, melyek a mérések során használt talajokhoz hasonlóak (lásd 2. táblázat). A probléma legvalószínűbb oka a Pavchich, Barr és Sauerbrei összefüggéseknél a porozitástól függő tényező ($\varphi(n)$), melyet ennél a három egyenletnél ugyanaz a képlet ír le. A d_e értékek is okozhatnak nagy eltéréseket, mivel a négyzetükkel számolunk, de a két talajmintának a d_{10} és d_{17} paraméterei (melyekkel ezek az egyenletek számolnak) közel azonosak, ezért itt ez nem okozhat nagy változást a szivárgási tényező értékeire nézve.

Az itt bemutatott egyenletekre érzékenységvizsgálatot végeztem, ennek eredménye a 7. táblázatban található. Mivel a $\varphi(n)$ tényezővel egyenesen arányos a szivárgási tényező, ezért ilyen értékeket külön nem számoltam, hiszen a szivárgási tényező ekkor ugyanakkora arányban nő, mint a $\varphi(n)$. Látható, hogy a porozitás növekedése nagyobb eltéréseket okoz, mint a csökkenése. A régi talaj porozitása kb. 17%-kal nagyobb, mint az új talajé, ez magyarázatot nyújt arra, hogy például a Sauerbrei összefüggés régi talajra adott értéke 85%-kal nagyobb, mint az új talajra számított. Ez okozza azt, hogy míg a szivárgási tényező értéke a 0-4-es talajra jól megközelíti a próbaszivattyúzás eredményét, addig a 0-1-es talajra a laboratóriumi értéktől teljesen eltérő eredményt ad. Ezekhez hasonlóan viselkedik a Chapuis egyenlet is, mivel ott a $\varphi(n)$ függvény a hézag tényezővel ($e = \frac{n}{1-n}$) számol, és exponenciális az összefüggés.

7. táblázat: Érzékenységvizsgálat a Barr, Sauerbrei és Pavchich egyenletekre

A porozitás megváltoztatásának aránya [%]	A porozitás értékei [-]	$\varphi(n)$ [-]	Szivárgási tényező megváltozásának aránya [%]
-50	0,184	0,0093	92
-20	0,294	0,0509	59
-10	0,331	0,0806	35
-5	0,349	0,1002	19
-1	0,364	0,1188	4
0	0,367	0,1238	0
1	0,371	0,1291	4
5	0,386	0,1520	23
10	0,404	0,1857	50
20	0,441	0,2739	121
50	0,551	0,8296	570

Megfigyelhető továbbá, hogy az összefüggések közül a Gustafson egyenlet az egyetlen, melynek a kismintamoddellel számolt értéktől való eltérése a két talajmintára azonos mértékű és azonos irányú. Ez a módszer az itt vizsgált talajok szivárgási tényezőit kb. 60%-kal túlbecsüli, de a közel egyenlő nagyságú eltérések miatt egy (pl. 0,62 értékű) konstans tényező bevezetésével az eredménye javítható lenne.

7.3.3 A módszerek rangsorolása a két talajra együttesen nézve

A 8. táblázatba csak azok a módszerek kerültek, amelyek a kritériumok alapján mindkét talajra alkalmazhatók. A kismintamoddellel kapott értéktől való eltérésük maximuma szerint csoportosítottam őket, hiszen ha egy összefüggés az egyik talajra jó becslést ad, de a másikra a laboratóriumi eredménytől nagyon eltérő az értéke, akkor nem mondható, hogy mindkét talaj

esetén ajánlott használni az adott módszert. Ugyanilyen megfontolásból nem az eltérések átlagával számoltam.

8. táblázat: A szemeloszlási görbén alapuló, szivárgási tényezőt számoló módszerek rangsorolása mindkét talajmintára való alkalmazhatóság szerint

Módszerek	A kismintamodelltől való eltérés legnagyobb értéke [%]	Alkalmazhatóság
USBR, Harleman	0-25	Megbízható
Barr	25-50	Elfogadható
Alyamani and Sen, Gustafson, Kenney, Krumbein and Monk, Slichter	50-100	Közepes becslés
Beyer, Hazen, Sauerbrei, Shepherd	100-200	Nagyon gyenge becslés
Chapuis, Hagen, Jáky, Kröber, Pavchich, Seelheim, USCRO	200-	Használata nem ajánlott

A módszerek közül a legkisebb eltéréseket a két talajra nézve a USBR módszer adja, ezért ennek a használatát ajánlom a 0-1-es és 0-4-es talajhoz hasonló áramlási közegek vizsgálatakor.

Bár a Harleman egyenlet is jól becsülte meg az értékeket, ez főleg nagyságrendi közelítésnek használható, mivel szinte azonos szivárgási tényező értékeket adott a két talajmintára, annak ellenére, hogy a kismintamoddellel 43%-os eltérést állapítottam meg. A Barr összefüggés eredményei relatív közel (50%-nál közelebb) vannak a mért eredményekhez, de azok a módszerek közé tartozik, melyek a régi talaj szivárgási tényezőjét nagyobbak becsülték, mint az újét, ezért használatát nem ajánlom. Az 50%-nál nagyobb eltérést adó módszerek már nem szolgáltatnak pontos információt.

7.3.4 Az eredmények összehasonlítása korábbi vizsgálatok eredményeivel

A következőkben szemeloszlási görbékkel számoló elméleti módszerek megbízhatóságával foglalkozó kutatók eredményeivel fogom összehasonlítani a kapott adatokat.

Az eredmények összehasonlítása előtt fontos megjegyezni, hogy ezek a kutatások terepi módszerekkel (próbaszivattyúzással és nyeletéssel) illetve laboratóriumi módszerekkel (permeaméteres, állandó nyomású vizsgálat) folytak, kismintamodellezés nem volt köztük. A terepi módszerek egy adott, nagy kiterjedésű területet vizsgálnak, ahol a vízvezető réteg homogenitásának feltétele nagyobb eséllyel sérülhet különböző természetes (pl: inhomogén zónák, más talajféleségek beékelődése, állatok járatai, növények gyökerei, stb.) és antropogén (pl: közművek, építmények alapozása, stb.) okok miatt. Ezért nem mondható, hogy csak a talajfélét jellemzi a kapott szivárgási tényező, mivel a terület sajátosságai is befolyásolják azt.

A laboratóriumi módszer pedig nagyon kicsi, pontszerű talajmintát vizsgál, ez az esetleges heterogenitás miatt lehet, hogy nem tükrözi jól a valós viszonyokat. A kismintamodellezés a próbaszivattyúzás homogén talajban lejátszódó kicsinyített változataként ezeket a hibákat nagyrészt kiküszöböli. Tehát egy adott talajtípus szivárgási tényezőjét ez tudja a legpontosabban megbecsülni. Egy adott területre jellemző szivárgási tényezőt továbbra is a próbaszivattyúzással lehet a legpontosabban becsülni, hiszen a valós viszonyokat ez írja le a legjobban. Azonban, ha egy talajfélére általánosan szeretnénk meghatározni szivárgási tényezőt, amit a szemeloszlási görbén alapuló módszerek is tesznek, akkor elméletileg a kismintamodellezés a legpontosabb módszer.

A méréseim eredményei is alátámasztják Svensson (2014) megállapítását, hogy a Gustafson módszer felülbecsülheti a tényleges szivárgási tényező értékeket, tehát a 7.3.2 pontban említett korrekcióval a Gustafson összefüggés feltehetőleg hasonló talajösszetétellel rendelkező mintákra is pontosabb adatokat adna. Ezen kívül a Svensson (2014) által megállapított tendencia, hogy a Kozeny-Carman egyenlet nagyobb szivárgási tényezőket ad, mint a Gustafson módszer, mely szintén megfigyelhető az általam vizsgált talajok esetén is. A Kozeny-Carman egyenlet pontatlanságát Cabalar és Akbulut (2016) is megállapította. Bár Ríha és társai (2018) jó eredményeket kaptak ezzel az összefüggéssel, a többi kutatást és az általam kapott adatokat is figyelembe véve a Kozeny-Carman egyenletet nem sorolom a megbízható módszerek közé. Hasonlóan Ríha és társai (2018) a Chapuis egyenletet is jónak ítélték meg, azonban ez az összefüggés a 0-1 mm-es talaj szivárgási tényezőjét nagyobbra becsülte, mint a 0-4 mm-es talajét, ezért ennek alkalmazását nem ajánlom.

Cabalar és Akbulut (2016) észrevételeivel további egyezést jelentett, hogy a Terzaghi módszer kicsi (21%-os a 0-4-es talajra), a Slichter egyenlet pedig kicsi (21%-os a 0-1-es talajra) illetve közepes (54%-os a 0-4-es talajra) eltérést mutatott a kismintamodell referenciaértékeihez képest. A Terzaghi módszert Ríha és társai (2018) is előnyben részesítették, ezért több forrás alapján megállapítható, hogy ez a módszer megbízható. Habár a Slichter összefüggés értékei közel voltak a referenciaértékekhez, a Chapuis egyenlethez hasonlóan nagyobb értékeket adott a kisebb szemcseátmérőjű talajra, így használata nem ajánlott.

Hasonló következtetésre jutottam, mint Pucko és Verbovšek (2015), akiknek a kutatása során ugyanúgy a USBR módszer közelítette meg legjobban a terepi próbaszivattyúzásból kapott értéket. Ugyan a vizsgált talajok egyikénél azt tapasztaltam, hogy a Sauerbrei módszer jobb közelítést adott, a 7.3.1 pontban kifejtettem, hogy a vizsgálatok folytatása során ez változhat.

Emellett a két talajra együttesen nézve már a USBR módszer bizonyult a legmegbízhatóbbnak (7.3.3), ez a felvetés tehát más kutatásokkal összevetve is helytáll.

Összességében arra jutottam, hogy más kutatók eredményeivel is összehasonlítva a kapott adatokat, a 0-4-es talajhoz hasonló áramlási közegek szivárgási tényezőjének becslésére a USBR, Harleman és Terzaghi módszereket ajánlom. A 0-1 és 0-4 mm-es szemcsemérettel rendelkező talajok esetében a USBR összefüggés használatával érhető el a legpontosabb eredmény, azonban közeli becslésként a Harleman módszer is megfelel, okait a 7.3.3 fejezetben mutattam be.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatomban szivárgáshidraulikai vizsgálatokkal foglalkoztam és szivárgási tényezőt állapítottam meg próbaszivattyúzással kismintamodell segítségével, illetve szemeloszlási görbén alapuló elméleti módszerekkel.

A laboratóriumi, kismintamoddellel történő vizsgálatokat olyan új talajon végeztem, amivel még nem foglalkoztak a kismintamoddelt használó korábbi kutatások során. A vízhozam-leszívás görbe alapján megállapítottam, hogy a szivárgási tényező (azaz a talaj anyagi minősége) befolyásolta a görbék lefutását és különböző talajoknál az azonos vízhozamokhoz tartozó leszívás értékek közt a szivárgási tényezővel feltehetőleg nem lineárisan arányos összefüggés van. A kapott görbék alakja hasonló volt, csak a meredekségük különbözött.

A mérések adatait felhasználva a Dupuit módszerrel számoltam átlagos szivárgási tényező értéket, ez $3,22 \cdot 10^{-4}$ m/s lett. Azonban ez az érték nem volt időben állandó, csökkenést mutatott. Az adatok első és második felére egyeneseket illesztve és Klotz (1971) és Farkas (2021b) kísérleti megfigyelései alapján megállapítható, hogy a szivárgási tényező értéke hamarosan elér egy konstans értéket, emiatt a mérések folytatása ajánlott, hogy egy pontosabb értéket kapjunk.

Nem csak a próbaszivattyúzás adatai alapján számoltam szivárgási tényező értékeket, hanem különböző szemeloszlási görbével számoló elméleti módszereket is alkalmaztam. Ehhez először szabványos szitasorral kiértékeltem a kismintamodell talajából vett mintát, majd a „HydrogeoSieveXL2.3.2” programot használva megkaptam a talaj jellemző paramétereit. Az ebben a programban használt szivárgási tényezőt számító módszereket kiegészítettem Farkas (2021b) által a kismintamodell korábbi talajára használt összefüggésekkel, illetve egyéb szakirodalmi forrásokban talált módszerekkel. Így az új talajra összesen 21 darab ilyen elméleti módszert alkalmaztam. Az új módszerekkel kiszámoltam a korábbi, 0-1-mm-es talajra számolt szivárgási tényezőket is.

A szemeloszlási görbével számoló elméleti módszerek alkalmazhatóságának vizsgálatához szükséges volt a kismintamodell használata, mellyel az újonnan beépített talaj szivárgási tényezőjének kiszámolása után a korábbi talajra vonatkozó értékekkel együtt már két különböző áramlási közeg adatait ismertem. Ez azért volt fontos, mert egy adott talaj adatai nem szolgáltatott volna elegendő információt ahhoz, hogy általánosabb kijelentéseket tegyek. A dolgozatomban céljai közt szerepelt, hogy megállapítsam, melyik szemeloszlási görbén alapuló számítási módszerek használhatóak több talajfélre is, ezzel remélhetőleg elősegítve azt, hogy

a jövőben csökkenjen az időigényes próbaszivattyúzások száma és mindössze a talajminta paramétereit felhasználva lehessen szivárgási tényezőt számolni.

A kismintamoddellal kapott szivárgási tényező értéket referenciaértékként használva összehasonlítottam a szemeloszlási görbéken alapuló számítások eredményeivel, ez alapján vizsgáltam a különböző módszerek alkalmazhatóságát. Az új talajra a legjobb egyezést a Sauerbrei egyenlet adta, de a USBR, Chapuis, Harleman és Terzaghi összefüggések is jól megközelítették a kismintamoddell alapján Dupuit módszerrel számolt értéket. A két talajra együttesen nézve azonban a USBR módszer bizonyult a legjobbnak, melyet a Harleman követett.

Más szakirodalmi forrásokkal összevetve az eredményeket azt a következtetést vontam le, hogy a 0-4-es talajra a legjobb a USBR, Harleman és Terzaghi módszerekkel számolni a szivárgási tényező értékét. Mindkét talajra együtt nézve a legpontosabb eredményt a USBR összefüggés adta, feltehetőleg ez többféle talajmintára is megbízható értéket ad, ezért alapvetően ennek a használatát ajánlom. Azonban ahhoz, hogy ezek a megállapítások megalapozottabbak legyenek, további vizsgálatok lennének szükségesek.

KITEKINTÉS

A szivárgáshidraulikai vizsgálatokat a továbbiakban is szeretném folytatni, ezt szükségesnek gondolom ahhoz, hogy a különböző szemeloszlási görbével számoló elméleti módszerek pontosságát megfelelően lehessen vizsgálni, és határozottan ki lehessen jelteni egyes módszerek alkalmazhatóságát. Ezért a dolgozatom elkészülte után eltérő szemcseméretű talajok használatával szeretném a különböző módszerek alkalmazhatósági határait vizsgálni, illetve szeretném megfigyelni, hogy eltérő osztályozottsággal rendelkező talajokra melyik módszerek használata ajánlott.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani Farkas Dávid tanszéki konzulensemnek, hogy lehetőséget adott számomra a tanszéki kutatásokhoz való csatlakozáshoz, és a dolgozat elkészítése közben mindenben segítségemre volt. Hálás köszönet a szakmai dolgokban való segítségnyújtásért és a folyamatos bátorításért, támogatásért.

Köszönet Dr. Farkas-Karay Gyöngyinek, konzulensemnek, hogy segítőkészségével és alaposágával segítette a dolgozatom elkészítését, és felmerülő kérdéseimmel bármikor fordulhattam hozzá.

JELÖLÉSJEGYZÉK

A	Seelheim-egyenlet paramétere [-]
C	geometriai arányszám [-]
d_{10}	átesett tömegmennyiség 10 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_{17}	átesett tömegmennyiség 17 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_{20}	átesett tömegmennyiség 20 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_{50}	átesett tömegmennyiség 50 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_{60}	átesett tömegmennyiség 60 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_e	a szemcseátmérőre vonatkozó szemeloszlási görbétől függő változó [mm]
$\frac{dh}{dr}$	mozgást létrehozó vízszintkülönbségek és szivárgási hossz hányadosa [-]
$\frac{dv}{dz}$	a szivárgási sebesség hely szerinti megváltozása, sebességgradiens [-]
g	nehézségi gyorsulás [m/s ²]
I	hidraulikus gradiens [-]
k	szivárgási tényező, áteresztőképességi együttható [m/s]
l	szivárgási hossz [m]
N	talajszemcsék alakai tényezője [-]
n	porozitás [-]
Q	a szivattyúzás során állandósult vízhozam [m ³ /s]
Re	Reynolds-szám [-]
U	egyenlőtlenségi mutató [-]
v	a szivárgás sebessége [m/s]
r_1	első megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m]
r_2	második megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m]
h_1	első megfigyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m]
h_2	második megfigyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m]

z	geodéziai magasság, hengerkoordináta [m]
$\varphi(n)$	porozitástól függő tag [-]
γ	víz térfogatsúlya [N/m ³]
η	dinamikai viszkozitás [Ns/m ²]
ν	kinematikai viszkozitás [m ² /s]
ρ	víz sűrűsége [kg/m ³]

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Alyamani, M. S., Sen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water* 31(4):551–555
- Arfeen, N., Khan, T. A. (2020). Evaluation of PSD Models for the Estimation of Hydraulic Conductivity for Different Soil Textural Classes, *International Journal of Engineering Works*, Vol. 7, Issue 10, PP. 338-341, <https://doi.org/10.34259/ijew.20.710338341>
- Barr, D. W. (2001). Coefficient of permeability determined by measurable parameters. *Ground Water* 39(3):356–361
- Barta E., Veczán É. (2011). Szivárgási tényező kísérleti meghatározása különféle talajoknál. TDK dolgozat, BME Vízépítőmérnöki szekció
- Barta, E., Hajnal, G., Karay, Gy., Vasvári, V. (2013). Determination of the Coefficient of Permeability by Physical Model test and Numerical Modelling, *Proceedings of the 35th IAHR Congress*, Chengdu, Kína, 2013.09.08-2013.09.13. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. Paper CD. 11 p. (ISBN:978-7-89414-588-8)
- Barta, E., Hajnal, G., Veczán, É., Vasvári, V. (2012). Bestimmung des durchlassigkeitsbeiwertes mithilfe von modellversuchen, in: zenz g (ed.): *Wasserbau symposium 2012: Global Denken - Lokal Handeln*. 672 p. Graz: verlag der Technischen Universität Graz, 2012. Pp. 307-314. (ISBN:978-3-85125-230-9)
- Beyer, W. (1964). Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. *Wasserwirtschaft, Wassertechnik* 14(6):165–168
- Białas, Z. (1966). O usrednianiu współczynników filtracji z zastosowaniem elektronicznej cyfrowej maszyny matematycznej [Averaging filter coefficients using digital electronic mathematical machines]. *Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu*, Warsaw, Poland, 47 p.
- Blohm, F. J. A. (2016). Determination of Hydraulic Conductivities through Grain-Size Analysis, Ms.c. Thesis, Boston College, Department of Earth and Environmental Sciences
- Cabalar, A. F., Akbulut, N. (2016). Evaluation of actual and estimated hydraulic conductivity of sands with different gradation and shape. *SpringerPlus* 5, 820, <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2472-2>
- Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotechnical Journal* 41:787–795

Csáki, N. (2011). Szivárgási tényező meghatározása laboratóriumi vizsgálatokkal és numerikus modellezéssel, TDK dolgozat, BME Vízépítőmérnöki Szekció, 63 p.

Darcy, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Paris. 647 p.

Devlin, J. F. (2015). HydrogeoSieveXL: an Excel-based tool to estimate hydraulic conductivity from grain-size analysis, Hydrogeology Journal 23:837–844 DOI 10.1007/s10040-015-1255-0

Dupuit, J. (1863). Etudes théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et a travers les terrains permeables. 2ème edition; Dunot, Paris, 304 pp.

Éliás, E., Juhász, J. (1966). Az anizotrópia tényező meghatározása, MTA Szivárgási és Kúthidraulikai Ankét, Budapest, I.A.-5

Farkas, D. (2021a). Szivárgáshidraulikai kismintamodell igazolása terepi mérésekkel, Hidrológiai Közlöny, ELFOGADVA

Farkas, D. (2021b). Próbaszivattyúzás folyamatának és hatásainak vizsgálata terepi és laboratóriumi körülmények között, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola, Budapest

Farkas, D., Hajnal, G., Vasvári, V. (2019a). Validation of a Physical and Numerical Model to Solve Problems of Seepage Flow. Periodica Polytechnica – Civil Engineering 63(2) pp. 388-400.

Farkas, D., Hegedűs, N., Farkas-Karay Gy. (2021). Well hydraulics in pumping tests - a laboratory sandbox study, 6th IAHR Europe Congress, Febr. 15-18, 2021, Warsaw, Poland.

Farkas, D., Hegedűs, N., Farkas-Karay, Gy. (2019b). Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kismintamodell felhasználásával. Hidrológiai Közlöny 99(4) pp 42-51.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). Groundwater – Prentice-Hall Inc., New Jersey., 624 p.

Gustafson, E., (2005). Järnets förekomst i grundvattnet i isälvsavlagningar i Dalarna, Uppsala: Geotryckeriet.

Hagen, G. (1869). Handbook of Hydraulics Structures (in German), Berlin

Harleman, D.R.F., Melhorn, P.F., Rumer, R.R., (1963). Dispersion-permeability correlation in porous media. Journal of the Hydraulic Division, 89, 2, 67–85.

Hazen, A. (1892). Some physical properties of sands and gravels with special reverence to their use in filtration. 24th Annual Report, Massachusetts State Bureau of Health, Pub. Doc. 34, S. 539–556. Boston

Hegedűs, N., (2018). Kúthidraulikai vizsgálatok kismintamodellezéssel, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Víz- és Környezetmérnöki szekció, Budapest,

Hegedűs, N., (2019). Kúthidraulikai vizsgálatok kisminta- és numerikus modellezéssel, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest

Hegedűs, N., (2020). Csapadékesemények szabad felszínű víztartókra és próbaszivattyúzásra gyakorolt hatása, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest

Hegedűs, N., (2021). Csapadékesemények próbaszivattyúzásra gyakorolt hatásának laboratóriumi vizsgálata, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest

Hegedűs, N., Farkas, D., Farkas-Karay, Gy., (2019). Kúthidraulikai vizsgálatok kismintamodellezéssel pp. 32-33. 2 p. Almássy Endre XXVI. Konferencia a Felszín Alatti Vizekről 2019-03-26 Siófok, Magyarország

Ivicsics, L. (1962). Vízépítési kismintavizsgálatok, A Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet technikai szaktanfolyamának jegyzete, VITUKI, Budapest

Ivicsics, L. (1968). Hidromechanikai Modellkísérletek, Műszaki könyvkiadó, Budapest, pp. 1-30.

Jáky, J. (1944). Talajmechanika, Egyetemi Nyomda, Budapest.

Jordan, H., Weder, H. J. (1995). Hydrogeologie – Grundlagen und Methoden, 2nd edition., Enke Verlag, Stuttgart. 603 p.

Juhász, J. (2002). Hidrogeológia, Akadémia kiadó, Budapest, 1176 p.

Kenney TC, Lau D, Ofoegbu GI (1984). Permeability of compacted granular materials. Can Geotech J 21: 726-729.

Klotz, D. (1971). Untersuchung von Grundwasserströmungen Durch Modellversuche im Maßstab 1:1. In: Geologica Bavarica 64: 75-119.

Kovács, Gy. (1972). A szivárgás hidraulikája, Akadémiai Kiadó, Budapest. 535 p.

- Kozeny, J. (1953). *Hydraulik: Ihre Grundlagen und Praktische Anwendung* [Hydraulics: fundamentals and practical application]. Springer, Vienna. 588 p.
- Krumbein, W. C., Monk, G. D. (1942). Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 151:153–163
- Krüger, E. (1919). Die Grundwasserbewegung [Groundwater flow]. *Int Mitt Bodenkd* 8:105–122
- Mack, T.J. et al (2010). Conceptual model of water resources in the Kabul Basin, Afghanistan: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2009–5262, 240 p.
- Mádlné Sz., J., Czauner, B., Simon, Sz., Erőss, A., Zsemle, F., Pulay, E., Havril, T. (2013). *Hidrogeológia, Eötvös Loránd Tudományegyetem*, 3.f. 28-32, 4.f. 41-42
- Mosonyi, E. (1955). Hidraulikai hasonlóság a kismintatörvények és a kísérletek értékelése, a várható eredmények, Kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest. pp. 41-44. 53 p.
- Mosonyi, E., Kovács, Gy. (1952). Kismintatörvények a nehézségi és sűrűlódőerő együttes figyelembevételével, *Hidrológiai Közlöny*, 32. évf. 7-8. sz., pp. 274-277
- Mosonyi, E., Kovács, Gy. (1956). "Loi de modèles réduits de filtration" (Act of reduced models of filtration), *Symposia Darcy, IAHS, Dijon, France*, pp. 111–115.
- Onwe, I. M., Akudinobi, B. E. B., Aghamelu, O. P. (2016). Estimating the Hydraulic Conductivity of the Ajali Sandstone in the Udi Area of South Eastern Nigeria from Pumping Test and Grain Size Based Empirical Analysis, *J Hydrogeol Hydrol Eng* 2016, 5:3, DOI: 10.4172/2325-9647.1000143
- Palotás, L. (1961). *Mérnöki Kézikönyv*, IV. kötet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 1428 p. pp 68-73.
- Pucko, T., Verbovšek, T., (2015). Comparison of hydraulic conductivities by grain-size analysis, pumping, and slug tests in Quaternary gravels, NE Slovenia, *Open Geosci.* 2015; 7:308–317., DOI 10.1515/geo-2015-0032
- Ríha, J., Petrula L., Hala, M., Alhasan, Z. (2018). Assessment of empirical formulae for determining the hydraulic conductivity of glass beads, *J. Hydrol. Hydromech.*, 66, 2018, 3, 337–347., DOI: 10.2478/johh-2018-0021

- Sauerbrei, I. I. (1932). К вопросу о коэффициенте фильтрации грунтов и методике его исследования, Известия ВНИИГ [On the Problem and Determination of the Permeability Coefficient. Proceedings VNIIG]
- Seelheim, F., (1880). Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. Zeitschrift für analytische Chemie. 19, 387–418
- Shepherd, R.G. (1989). Correlations of permeability and grain size. Ground Water, 27(5): 633-638.
- Slichter, C. (1898). 19th Annual Report: Part II – Papers Chiefly of a Theoretic Nature, chapter Theoretical Investigation of the Motion of Ground Waters, pp. 295-384. US Geological Survey.
- Svensson, A. (2014) Estimation of Hydraulic Conductivity from Grain Size Analyses, Ms.c. Thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of GeoEngineering, Göteborg, Sweden.
- Szabó, G., Hajnal, G., Vasvári, V. (2012). Inverse numerische modellierung zur bestimmung des durchlässigkeitsbeiwertes, in: zenz g (ed.): Wasserbau symposium 2012: Global Denken - Lokal Handeln. 672 p. Graz: verlag der technischen universität graz, 2012. Pp. 233-240. (ISBN:978-3-85125-230-9)
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. John Wiley, New York, London. 510 p.
- Ubell K. (1959): A talajvízháztartás és jelentősége Magyarország vízgazdálkodásában, Vízügyi. Közlem., 2. sz.
- Ubell, K. (1958). Az elméleti kúthidraulika módszereinek gyakorlati alkalmazása, Vízügyi Közlemények, 1958. pp 306-333.
- Urumović, K., Borović, S., Urumović, K. Sr., Navratil, D. (2020). Validity range and reliability of the United States Bureau of Reclamation (USBR) method in hydrogeological investigations. Hydrogeology Journal 28, 625–636. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02080-2>
- Vig, T. (2016). Szivárgási tényező meghatározása kisminta kísérletekkel. Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
- Vig, T., Farkas, D., Hajnal, G. (2016). Szivárgási tényező vizsgálata kisminta kísérlet és numerikus modell segítségével In: Török, Á.; Görög, P.; Vásárhelyi, B. (szerk.), Mérnökgeológia – Közetmechanika, Budapest, Magyarország, Hantken Kiadó, pp 43-54.

VNIIG, (1991). Recommendations on the Laboratory Methods of Investigation of the Permeability and Filtration Stability of Soils. P 49-90/VNIIG. The B. E. Vedenev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering, JSC, Leningrad, 93 p. (In Russian.)

Vuković, M., Soro, A. (1992). Hydraulics of water wells: theory and application. Water Resources, Littleton, CO.

Zamarin, I. A. (1954). Projektirovaniye gidrotechnicheskikh sooruzseniy. Moszkva.

Zunker, F. (1930). Das Verhalten des Wassers zum Boden. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde A25(1):7

MELLÉKLETEK

Melléklet 1. táblázat: HydrogeoSieveXL 2.3.2. szoftverben használt módszerek 4. egyenletre vonatkozó paraméterei és alkalmazhatóságuk feltételei 1. rész

Source	N	$\varphi(n)$	d_e	Applicable Conditions
Hazen simplified (Freeze and Cherry, 1979)	$100 \frac{\mu}{\rho g}$	1	d_{10}	uniformly graded sand, $n = 0.375$ $T = 10^\circ\text{C}$
Hazen (1892) ^a	6×10^{-4}	$[1 + 10(n - 0.26)]$	d_{10}	$0.01 \text{ cm} < d_{10} < 0.3 \text{ cm}$ $U < 5$
Slichter (1898) ^a	1×10^{-2}	$n^{3.287}$	d_{10}	$0.01 \text{ cm} < d_{10} < 0.5 \text{ cm}$
Terzaghi (1925) ^a	10.7×10^{-3} smooth grains 6.1×10^{-3} coarse grains	$\left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}}\right)^2$	d_{10}	sandy soil, coarse sand
Beyer (1964) ^a	$5.2 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U}$	1	d_{10}	$0.006 \text{ cm} < d_{10} < 0.06 \text{ cm}$ $1 < U < 20$
Sauerbrei (1932) ^a (Vuković and Soro, 1992)	$(3.75 \times 10^{-5}) \times \tau$ $\tau \cong 1.093 \times 10^{-4} T^2$ $+ 2.102 \times 10^{-2} T$ $+ 0.5889$	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	d_{17}	sand and sandy clay $d_{17} < 0.05 \text{ cm}$
Krüger (1919) ^a	4.35×10^{-4}	$\frac{n}{(1 - n)^2}$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta w_i}{d_i}}$	medium sand $U > 5$ $T = 0^\circ\text{C}$
Kozeny-Carmen (1953) ^a	8.3×10^{-3}	$\frac{n^3}{(1 - n)^2}$	$\frac{d_{10}}{\text{or } 1}$ $\frac{3 \Delta w_1}{2 d_1} + \sum_{i=2}^n \Delta g_i \frac{d_i^g + d_i^d}{2 d_i^g d_i^d}$ $d_1 = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_i^g} + \frac{1}{d_i^d} \right)}$	Coarse sand
Zunker (1930) ^a	0.7×10^{-3} for nonuniform, clayey, angular grains 1.2×10^{-3} for nonuniform 1.4×10^{-3} for uniform, coarse grains 2.4×10^{-3} for uniform sand, well rounded grains	$\frac{n}{(1 - n)}$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta g_i \frac{d_i^g - d_i^d}{d_i^g d_i^d \ln \left(\frac{d_i^g}{d_i^d} \right)}}$	no fractions finer than $d = 0.0025 \text{ mm}$
Zamarin (1928) ^a	8.65×10^{-3}	$\frac{n^3}{(1 - n)^2} C_n$ $C_n = (1.275 - 1.5n)^2$	$\frac{1}{\sum_{i=1}^n \Delta g_i \frac{\ln \left(\frac{d_i^g}{d_i^d} \right)}{d_i^g - d_i^d}}$	Large grained sands with no fractions having $d < 0.00025 \text{ mm}$

Melléklet 2. táblázat: HydrogeoSieveXL 2.3.2. szoftverben használt módszerek 4. egyenletre vonatkozó paramétereit és alkalmazhatóságuk feltételei 2. rész

USBR (United States Bureau of Reclamation) (Bialas, 1966) ^a	$(4.8 \times 10^{-4})(10^{0.3})$	1.0	$d_{20}^{1.15}$	Medium grained sands with $U < 5$; derived for $T = 15^\circ\text{C}$
Barr (2001)	$\frac{1}{(36)5C_s^2}$ $C_s^2 = 1$ for spherical grains $C_s^2 = 1.35$ for angular grains	$\frac{n^3}{(1-n)^2}$	d_{10}	unspecified
Alyamani and Sen (1993)	1300	1.0	$[I_o + 0.025(d_{50} - d_{10})]$	unspecified
Chapuis (2004)	$\frac{\mu}{\rho g}$	$10^{1.291e-0.6435}$ $e = \frac{n}{1-n}$	$d_{10}^{10^{(0.5504-0.2937e)}}$	$0.3 < n < 0.7$ $0.10 < d_{10} < 2.0 \text{ mm}$ $2 < U < 12$ $d_{10}/d_5 < 1.4$
Krumbein and Monk (1942)	7.501×10^{-6}	$e^{(-1.31 \times \sigma_\phi)}$ $\sigma_\phi = \frac{d_{84\phi} - d_{16\phi}}{\frac{4}{\frac{d_{95\phi} - d_{5\phi}}{6.6}}}$	$2^{(d_{16\phi} + d_{50\phi} + d_{84\phi})}$	natural sands with lognormal grain size distribution
Shepherd (1989)	142.8, channel deposits 489.6, beach sand 1632, dune sand	1	$d_{50}^{(r/2)}$ $r = 1.65$, channel deposits $r = 1.75$, beach sand $r = 1.85$, dune sand	$0.0063 < d^{50} < 2$