



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola**

**PRÓBASZIVATTYÚZÁS FOLYAMATÁNAK ÉS HATÁSAINAK
VIZSGÁLATA TEREPI ÉS LABORATÓRIUMI KÖRÜLMÉNYEK
KÖZÖTT**

Doktori értekezés

Farkas Dávid

**Tudományos vezető:
Dr. Hajnal Géza
Egyetemi docens**

Budapest, 2021. május

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	1
2. CÉLKITŰZÉSEK	3
3. ELMÉLETI MÓDSZEREK ÉS KORÁBBI MÉRÉSEK	4
3.1. Próbaszivattyúzás elméleti háttere	4
3.1.1. Darcy-törvény	4
3.1.2. Nyomás alatti vízadókban végzett időben állandósult próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek	5
3.1.3. Nyomás alatti vízadókban végzett időben változó próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek	6
3.1.4. Nyílt felszínű vízadókban végzett próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek	8
3.2. Próbaszivattyúzás-vizsgálatokhoz alkalmazott előírások	9
3.2.1. Szakirodalmi áttekintés módszere.....	9
3.2.2. Hazai szabványok	10
3.3. Szivárgási tényező meghatározása szemeloszlási görbék alapján	11
3.4. Kúthidraulikai vizsgálatok	13
3.4.1. Szabad szivárgási felület vizsgálata	13
3.4.2. Szűrőveszteség meghatározása	15
3.5. Kismintavizsgálatok elmélete	15
3.5.1. Hasonlóságok.....	15
3.5.2. Mosonyi-Kovács modelltörvény.....	17
4. KISMINTÁVAL ÉS TEREPEEN VÉGZETT KORÁBBI SZIVÁRGÁS- ÉS KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK	19
4.1. Szakirodalomban szereplő egyéb kismintamodellek geometriája	19
4.2. A kismintával végzett korábbi laboratóriumi mérések eredményei	21
4.2.1. Laboratóriumi mérések	21
4.2.2. A kismintát leképező korábbi numerikus modellek.....	24
4.2.3. Mintaterületeken végzett terepi próbaszivattyúzások ismertetése	26
5. MÉRÉSI ÉS SZÁMÍTÁSI MÓDSZERTAN	31
5.1. Kismintamodell paramétereinek ismertetése	31
5.2. A vizsgált talaj jellemzői	34
5.3. Szivárgási tényező meghatározása	36
5.3.1. Permanens mérések kivitelezése	36
5.3.2. Nempermanens mérések kivitelezése	37
5.4. Nemlineáris áramlás vizsgálata	38
5.5. Kúthidraulikai vizsgálatok	39
5.6. Kismintamodell vizsgálata numerikus modellezéssel	40
5.6.1. Modellépítés.....	41
5.6.2. Modellváltozatok összefoglalása	41
5.7. Kismintamodell igazolása terepi mérésekkel	44
6. EREDMÉNYEK	45
6.1. Talajminta szivárgási tényezőjének meghatározása	45

6.1.1. A 2015-ös permanens mérések eredményei.....	45
6.1.2. A 2018-19-es permanens mérések eredményei	45
6.1.3. Nempermanens mérések eredményei.....	47
6.1.4. Szemeloszlási görbe alapján számított szivárgási tényező értékek összehasonlítása	49
6.2. Kúthidraulikai vizsgálatok eredményei	51
6.2.1. Az anyakutak teljesítőképessége.....	51
6.2.2. Kútellenállás kimutatása laboratóriumi mérésekkel	53
6.2.3. A szabad szivárgási felület vizsgálata a leszívás függvényében.....	55
6.3. Nemlineáris áramlás vizsgálata a kismintamodellben	57
6.3.1. Nemlineáris áramlás a modelltérben.....	57
6.3.2. Nemlineáris áramlás a termelőkút közelében	58
6.4. Numerikus modellezés eredményei	60
6.4.1. Laboratóriumi szivárgási tényezővel végzett modellváltozat	60
6.4.2. A mérésekkel való legpontosabb egyezés vizsgálata – FA modell.....	62
6.4.3. A leszívás távolhatásának vizsgálata – FB modell	63
6.4.4. Az FA és FB modellek összehasonlítása	63
6.4.5. Modellváltozatok validálása, a modellek használhatóságának korlátai	65
6.5. Kismintamodell eredményeinek átszámolása valós méretre, illetve igazolása terepi vizsgálatokkal	67
6.5.1. A kisminta és a Mázsa tér méréseinek összevetése	67
6.5.2. A kisminta és a Könyves Kálmás körút méréseinek összevetése	68
7. A KUTATÁS SORÁN ELÉRT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE.....	70
7.1. EN ISO 22282-4 (EC) szabvány felülvizsgálata.....	70
7.1.1. Az EC előírásainak kiegészítési és módosítási javaslatai	70
7.1.2. Az EC-ban nem szereplő ajánlások Magyarországra vonatkozó kiegészítése.....	74
7.2. Szivárgási tényezőre vonatkozó eredmények kifejtése	76
7.2.1. A szivárgási tényező változása az idő függvényében	76
7.2.2. Különböző módszerekkel számított szivárgási tényező értékek összehasonlítása.....	77
7.3. Kúthidraulikai vizsgálatok eredményeinek értelmezése	78
7.3.1. Kútellenállás kimutatása laboratóriumi mérésekkel	78
7.3.2. A szabad szivárgási felület vizsgálata a leszívás függvényében.....	79
7.4. Nemlineáris áramlás vizsgálata a kismintamodellben	80
7.5. Numerikus modellezés eredményeinek értelmezése.....	81
7.5.1. Modellváltozatok validálása, a modellek használhatóságának korlátai	81
7.5.2. A numerikus modell és a kismintakísérletek eredményeinek értelmezése valós méretekre	81
7.6. Kismintamodell eredményeinek átszámolása valós méretre, illetve igazolása terepi vizsgálatokkal.....	83
8. ÖSSZEFOGLALÁS	84
9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	85
AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK	94
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	96
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	98
IRODALOMJEGYZÉK.....	99

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: Szivárgási viszonyok határértékei porózus közegben.....	17
2. táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámái vizsgált kismintamodell esetében (Mosonyi és Kovács 1952, Farkas és társai 2019a)	22
3. táblázat: A talajminta besorolása szemcseméret-eloszlás szerint.....	35
4. táblázat: Szemeloszlási vizsgálatból meghatározott paraméterek (Farkas és társai 2019b).....	36
5. táblázat: A mérések során alkalmazott vízszintmérések gyakorisága	37
6. táblázat: Szakirodalmi ajánlások a 20. egyenlet alkalmazhatóságával kapcsolatban.....	39
7. táblázat: A 2015-ös teljes kúttal végzett kismintamérések kiértékelése Dupuit-módszerrel.....	45
8. táblázat: A nem permanens mérések Theis-módszerrel feldolgozott eredményei (Farkas és társai 2019b).....	49
9. táblázat: A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényező értékek.....	50
10. táblázat: A 9. egyenlet érzékenységvizsgálata a USBR-módszer alapján.....	51
11. táblázat: A három különböző lyukmérettel perforált anyakút h_b/H értékei az elméleti egyenestől való eltérés függvényében.....	54
12. táblázat: A modellváltozatokban alkalmazott szivárgási tényezők eloszlása.....	62
13. táblázat: Az „FA” modellverzió kalibrált és validált eredményei.....	65
14. táblázat: Az „FB” modellverzió kalibrált és validált eredményei	66
15. táblázat: A kismintában és a Mázsa téren végzett próbaszivattyúzások összehasonlító számításainak eredményei (Farkas 2021)	68
16. táblázat: A próbaszivattyúzás előtt a nyugalmi vízszint mérésének ajánlott időtartama.....	71
17. táblázat: Lépcsős hozamú próbaszivattyúzás ajánlott paraméterei	71
18. táblázat: Javaslat az EC bővítésére: vizsgálandó, a próbaszivattyúzás folyamatát befolyásoló tényezők	75
19. táblázat: Szemeloszlási görbéket felhasználó módszerek használhatósága közepes homok talajminta esetén	78
20. táblázat: Kismintakísérletek és numerikus modellezés eredményei átszámítva valós méretekre (Farkas és társai 2019a)	82
21. táblázat: A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényező értékek.....	85
22. táblázat: Szemeloszlási görbéket felhasználó módszerek megbízhatósága közepes homok talajminta esetén	86
23. táblázat: A három különböző lyukmérettel perforált anyakút h_b/H értékei az elméleti egyenestől való eltérés függvényében.....	87
24. táblázat: Az „FA” modellverzió kalibrált és validált eredményei.....	92
25. táblázat: Az „FB” modellverzió kalibrált és validált eredményei	92
27. táblázat: A kismintában és a Mázsa téren végzett próbaszivattyúzások összehasonlító számításainak eredményei	93

ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra: Klauder és társai (2009, 2010) vizsgálataihoz felhasznált szűrőcsövei.....	20
2. ábra: Az Öllös féle kismintamodell axonometrikus ábrája (Öllös 1956)	21
3. ábra: Az Öllös féle kismintamodell oldal- és felülnézeti ábrája (Öllös 1956)	21
4. ábra: Teljes kút körül kialakuló potenciálvonalak (Vig 2016)	23
5. ábra: Potenciálvonalak alakja a kúttalptól számított 10-20 cm és 30-40 cm közötti vízkivételi esetben (Vig 2016)	23
6. ábra: A depressziós görbe teljes henger modellalakot feltételezve (Csáki 2011).....	25
7. ábra: Depressziós görbe geometriája negyedhenger modellalak esetén (Szabó és társai 2012)	25
8. ábra: Fizikai modellezés alapján készített áramkép alakja valós méretre kiterjesztve (Barta és társai 2013).....	25
9. ábra: A numerikus modell szivárgási tényezőjének eloszlása (Vig és társai 2016)	25
10. ábra: Terepi mérések helyszínei (piros nyíl: Mázsa tér, fekete nyíl Könyves Kálmán körút)	26
11. ábra: Rétegszelvény a kőbányai „2NF” kút környezetében (Hajnal és társai 2009)	27
12. ábra: Mázsa téri kutak helyszínrajzi elhelyezkedése (Jobbágy 2009)	28
13. ábra: Kőbányán végzett szivattyúzás leszívási görbéje az anyakútban és három megfigyelőkútban (Hajnal és társai 2009)	28
14. ábra: Rétegszelvény a Könyves Kálmán körút vizsgált kútsorához (Hajnal 2003).....	29
15. ábra: Könyves Kálmán körúti kutak helyszínrajzi elhelyezkedése (Jobbágy 2009).....	30
16. ábra: Könyves Kálmán körút leszívási-visszatöltődési időszora a vizsgált kútsorra vonatkozóan (Hajnal 2003)	30
17. ábra: A kismintamodell felépítése a 2015-ös átalakítás után	33
18. ábra: A kismintamodell felépítése a 2018-as átalakítás után.....	34
19. ábra: A vizsgálat talajminta szemeloszlási görbéje (Farkas és társai 2019b).....	35
20. ábra: Nempermanens eredmények előállításának folyamata.....	38
21. ábra: Az FA modell zónáinak kiterjedése.....	42
22. ábra: Az FB modell zónáinak kiterjedése.....	43
23. ábra: A teljes modellterre számított átlagos szivárgási tényező értékek változása az idő függvényében (Hegedűs 2019, Farkas és társai 2021).....	46
24. ábra: Az első megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel a teljes mérési időre (Farkas és társai 2019b)	48
25. ábra: Az első megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel az első egy percre vonatkozóan (Farkas és társai 2019b)	48
26. ábra: A kilencedik megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel (Farkas és társai 2019b)	48
27. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0 mm lyukátmérőjű kút mérősorai alapján.....	52
28. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 2,5 mm lyukátmérőjű kút mérősorai alapján.....	52
29. ábra: A három különböző lyukmérettel perforált anyakút palástján belüli és kívüli vízszintekben (h_b , h_k) kialakuló szakadás folyamata (Farkas és társai 2021)	54
30. ábra: 1,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019) ..	55
31. ábra: 2,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019) ..	56
32. ábra: 2,5 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019) ..	56
33. ábra: Az áramlást jellemző Re-számok alakulása az 1-10. megfigyelőkutak közötti modellterben	58
34. ábra: A különböző anyakutakkal mért Reynolds-számok a hidraulikus gradiens függvényében (Farkas és társai 2021)	59
35. ábra: A különböző anyakutakkal mért belépési sebességek a kúttellenállás függvényében (Farkas és társai 2021)	60

36. ábra: A kalibráció eredménye a kismintamérések alapján kapott átlagos szivárgási tényezőt alkalmazva (Farkas és társai 2019a)	61
37. ábra: A kalibráció eredménye az FA modellváltozat esetén (Farkas és társai 2019a)	62
38. ábra: A kalibráció eredménye az FB modellváltozat esetén (Farkas és társai 2019a).....	63
39. ábra: „FA” modellváltozatban kialakult vízszintek és potenciálvonalak (Farkas és társai 2019a) .	64
40. ábra: „FB” modellváltozatban kialakult vízszintek és potenciálvonalak (Farkas és társai 2019a)..	64
41. ábra: Kút körüli potenciálvonalak az „FA” modellnél	65
42. ábra: Kút körüli potenciálvonalak az „FB” modellnél	65
43. ábra: Kismintamérések leszívás és kitermelt hozam adatai átszámítva valós méretre $C=9,71$ értéket felhasználva (Farkas 2021)	69
44. ábra: A Klotz (1971) által leírt szivárgási tényező változásának kimutatása saját laboratóriumi mérésekkel.....	76
45. ábra: A kismintakísérletekkel kimutatott kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadás összevetése Öllös (1958) eredményeivel (Farkas és társai 2021).....	79
46. ábra: A három különböző lyukmérettel perforált anyakút palástján belüli és kívüli vízszintekben (h_b , h_k) kialakuló vízszint-elszakadás folyamata (Farkas és társai 2021).....	86
47. ábra: 1,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C -ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019) ..	87
48. ábra: 2,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C -ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019).....	88
49. ábra: 2,5 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C -ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019).....	88
50. ábra: A kútpaláston kialakuló veszteséget jellemző görbék a leszívás függvényében	89
51. ábra: Az áramlást jellemző Re-számok értékei az 1-10. megfigyelőkutak közötti modell térben. ...	90
52. ábra: A különböző anyakutakkal mért Reynolds-számok a hidraulikus gradiens függvényében ...	90
53. ábra: A különböző anyakutakkal mért belépési sebességek a kútellenállás függvényében	91

KÉPEK JEGYZÉKE

1. kép: A kismintamodell anyaggal való feltöltése (2015).....	31
2. kép: Az alsó peremfeltételként szolgáló bukó (2015)	31
3. kép: Az oldalfali piezométerek, az anyakút és a megfigyelőkutak elhelyezkedése a modell belsejéből szemlélve (2015).....	32
4. kép: Az oldalfali piezométerek bekötött állapotban a piezométertáblába (2015)	32
5. kép: Piezométertábla eredeti színekben.....	38
6. kép: Festett vizű piezométertábla	38

KIVONAT

Mélyépítési mérnöki munkák elvégzéséhez nélkülözhetetlen az adott területre jellemző geológiai viszonyok és talajfizikai paraméterek értékeinek, mint például a szivárgási tényezőnek az ismerete. A próbaszivattyúzás a mérnöki gyakorlatban széles körben elterjedt terepi vizsgálat, mellyel a vízádórétegről, illetve a tesztelt kútról egyaránt számos információt nyerhetünk, viszont kivitelezése idő-, felszerelés- és költségigényes. A próbaszivattyúzás elvégzése annál gazdaságosabb, minél több ismeret áll rendelkezésre a vizsgált területről. Ez a valóságban ritkán teljesül, a költségek csökkentéséhez szükség volna a gyakorlati mérnöki munka számára olyan irányelvekre, melyek segítséget tudnak nyújtani méretezési és víztelenítési problémákkal kapcsolatban. Egy ilyen átfogó ajánlás elkészítéséhez rengeteg mérést kellene elvégezni, melyre a kismintamodellezés kitűnő alternatívát nyújthat. Doktori kutatásom alatt egy olyan laboratóriumi kismintamodell fejlesztését valósítottam meg, melyben próbaszivattyúzásokat szimulálva szivárgás- és kúthidraulikai paraméterek határozhatók meg oly módon, hogy azok eredményei valós méretre kiterjeszthetők legyenek.

Laboratóriumi kismintavizsgálataim adatsoraiból szivárgási tényező értékeket határoztam meg a Dupuit-, és a Theis-összefüggéseket felhasználva és az eredményeket összevetettem szemeloszlási görbékből számoló elméleti módszerekkel, melyeket ez alapján használhatóságuk szerint rangsoroltam.

Kúthidraulikai vizsgálataimmal számszerűsítettem a termelőkút mentén kialakuló szabad szivárgási felületet a kutak perforációja, illetve a leszívás és a kitermelt hozam függvényében. A kút körüli áramlási viszonyokat vizsgálva kritikus Reynolds-számot és kritikus belépési sebességet határoztam meg, melyek alapján megállapítottam, hogy a termelőkút környezetében kialakult a nemlineáris áramlás.

A kifejlesztett kismintamoddellel kapott eredmények helyességét numerikus modellezéssel és terepi mérésekkel igazoltam. A FEFLOW 7.0. numerikus szoftverrel megállapítottam egy alkalmazhatósági határt, melyen belül a laboratóriumi mérések eredményei kiterjeszthetők valós méretre. Terepi vizsgálatok példáján keresztül bemutattam, hogy a teljes hasonlóság mellett a kismintában mért leszívás- és vízhozamértékek jól megfeleltethetők a valós méretű próbaszivattyúzások eredményeivel.

ABSTRACT

Information about the geology and soil physical properties of an area, such as hydraulic conductivity is essential for underground construction. These parameters can be determined by field or laboratory measurements. The pumping test is one of the most widely used field tests by hydrogeologists and civil engineers. It provides valuable information about the aquifer and the tested well, but their implementation is time-, equipment- and cost-intensive. The required resources can be decreased if the quantity of information about the studied area is increased, so there is an enormous need of guidelines for engineers that could help plan and carry out the pumping tests. These guidelines can be produced by taken many measurements. Using scale models can provide an option to complement field measurements because it is easier and cheaper to examine various types of aquifers and well designs than field tests. The main goal of my doctoral research was to develop a laboratory model, which is capable of examining seepage and well hydraulic parameters simulating by pumping test, and the laboratory-scale results can be extended to real size.

The hydraulic conductivity values were determined from the data of the measurements made on the laboratory scale model. The data were analyzed with Dupuit and Theis methods; the results were compared with results of theoretical methods calculated from grain distribution curves. Afterwards, these theoretical methods were got ranked according to their efficiency.

The well screen loss was quantified as a function of the diameter of the slots, drawdown, and discharge. In addition, flow conditions were examined nearby the pumping well. Critical Reynolds number and critical entrance velocity were determined; thus, the nonlinear flow was detected in the near-well zone.

The observed results by the physical model were verified by numerical modeling and field measurements. With use of the FEFLOW 7.0. numerical software an applicability limit was established where the results of laboratory measurements could be extended to real size. The application of results of field tests, converting the laboratory-scale measurements to real-size data was presented. The pumped well's drawdown and discharge values were matched if the similarity condition was fulfilled.

1. BEVEZETÉS

Mélyépítési mérnöki munkák elvégzéséhez nélkülözhetetlen az adott területre jellemző talajfizikai paraméterek értékeinek, mint például a szivárgási tényezőnek az ismerete, melyet terepi mérésekkel vagy laboratóriumi vizsgálattal határozhatunk meg.

A talajmintákon végzett laboratóriumi kísérletek főbb típusai az ödométeres, triaxiális vagy szemeloszlási vizsgálatok. Ezek előnye, hogy segítségével egyszerűen és olcsón meg tudjuk határozni a talaj áteresztőképességét, hátrányuk, hogy a mintavétel pontszerű, emiatt a vizsgálat csak egy kisebb területről nyújt releváns információt, illetve zavart, ami tovább torzíthatja a vizsgált talajra meghatározott értékét. A terepi mérések nagy előnye a laborvizsgálatokkal szemben, hogy in situ állapotban vizsgálhatók a talajfizikai paraméterek, így pontosabb eredményeket szolgáltatnak, végrehajtásuk azonban idő-, felszerelés- és költségigényesebb. Ezek egyike a mérnöki gyakorlatban széles körben elterjedt próbaszivattyúzás-vizsgálat. A BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Laboratóriumában 2011-ben kezdődött meg a próbaszivattyúzások során lezajló folyamatok kismintamoddal való vizsgálata, mely 2015-től a doktori kutatási témám alapját képezte. A kismintamoddal megépítését több terepi mérés tapasztalata vezérelte, melyek során körvonalazódott, hogy a próbaszivattyúzások elvégzéséhez kevés kiinduló adat esetén szükség volna a gyakorlati mérnöki munka számára olyan irányelvekre, melyek segítséget tudnak nyújtani méretezési és víztelenítési problémákkal kapcsolatban. A hazánkra vonatkozó EN ISO 22282-4 szabvány csak keretet ad a vizsgálatok elvégzéséhez, mely sok esetben nem szolgál kellő mértékű iránymutatással ahhoz, hogy a mérésekből gazdaságos módon garantáltan értékes információkat nyerhessünk. Minden terület más, ezért több paraméterre sem lehet olyan általános érvényű kijelentést tenni, ami mindenhol alkalmazható, ezért ezeket szűkíteni, pontosítani kell. Ilyen például: a megfigyelőkutak minimális száma és optimális elhelyezése a területen, a vizsgálat időtartama, a szivattyúzendő hozam becsült nagysága, a szivattyúzás hatására kialakuló becsült leszívás, stb. Hosszútávon a kismintamoddellezés egy olyan alternatívát nyújthat a terepi mérésekkel szemben, ahol könnyebben és olcsóbban lehet többféle víztartót, illetve kút kialakítást vizsgálni. A laboratóriumi mérési tapasztalatok jó alapot adhatnak egy átfogó, több eshetőségre is kiterő dokumentum vagy adatbázis létrehozására, mely hasonló kérdésekre ad választ a gyakorló mérnökök számára. Ehhez nagyszámú mérésre lenne szükség egy megbízható kialakítású kismintamoddellel, amivel a próbaszivattyúzásokból a lehető legtöbb információ megtudható az anyakútról, illetve a víztartóról egyaránt.

Mérési eredményekből felépített adatbázis elkészítésének első lépését képezte doktori kutatásom, ahol egy olyan laboratóriumi kismintamodellel fejlesztésén dolgoztam, mellyel végzett kísérletek eredményei igazolható módon vonatkoztathatók valós, terepi körülményekre.

2. CÉLKITŰZÉSEK

A doktori kutatásom alatt egy olyan laboratóriumi kismintamodell kialakítására törekedtem, melyben próbaszivattyúzásokat szimulálva szivárgás- és kúthidraulikai paraméterek határozhatók meg oly módon, hogy azok eredményei valós méretre kiterjeszthetők. A mérésekkel szerzett tapasztalatok a hazai és nemzetközi mérnöki gyakorlatban egyaránt hasznosíthatók lehetnek.

Kutatásom kezdetén széleskörű irodalomkutatásra, a próbaszivattyúzás előírásainak megismerésére, majd egy mérésekre alkalmas fizikai kismintamodell kialakítására volt szükség. Ezt követően fogalmaztam meg disszertációm fő irányait, melyek kiterjedtek a laboratóriumi vizsgálatokra, adatfeldolgozásra, a vizsgálatok eredményeinek igazolására szolgáló numerikus modellezésre és terepi példákkal való összehasonlításra egyaránt. Dolgozatom célkitűzései az alábbi pontokban foglalhatók össze:

- A kismintamoddellel permanens és időben változó méréseket terveztem meg, melyek kiértékeléséből szivárgási tényező értékek számíthatók ki. Célul tűztem ki az eredmények összevetését szemeloszlási görbét felhasználó, szivárgási tényező meghatározására alkalmas elméleti módszerekkel, melyekre így megbízhatóságuk szerinti ajánlások állapíthatók meg.
- Céljaim között szerepelt laboratóriumi próbaszivattyúzásokkal kúthidraulikai mérések folytatása több különböző perforációjú anyagúttal, amiből a kútellenállás értéke meghatározható az alkalmazott lyukátmérő, illetve a kútban előállított leszívás függvényében.
- Ellenőrizni kívántam a talajmintában, illetve a kút közvetlen környezetében fellépő áramlási viszonyokat, illetve a nemlineáris áramlás kialakulásának lehetőségének. Céлом volt a kúttervezés szempontjából fontos paraméterek, mint a kritikus belépési sebesség (v_{crit}) és a kritikus Reynolds-szám (Re_{crit}) meghatározása laboratóriumi körülmények között.
- A kismintamoddellel végzett méréseket numerikus modellezéssel kívánom ellenőrizni, így laboratóriumi léptékben igazolhatóvá válhatnak a vizsgálatokból nyert leszívás, vízhozam és szivárgási tényező eredmények. A numerikus modellezés alkalmas lehet a kismintamodell alkalmazási korlátainak meghatározására.
- Terepi próbaszivattyúzások adataival igazolni kívánom a kismintamodell-mérésekkel kapott eredmények helyességét, így nemcsak laboratóriumi, hanem valós léptékben is megállapítható a kismintamodell alkalmazhatósága.

3. ELMÉLETI MÓDSZEREK ÉS KORÁBBI MÉRÉSEK

3.1. PRÓBASZIVATTYÚZÁS ELMÉLETI HÁTTERE

A próbaszivattyúzás egy ellenőrzött terepi kísérlet, melynél egy vagy több kútból vizet termelünk ki. A kútban, illetve a megfigyelőkutakban fellépő vízszintváltozásokból, valamint a szivattyúzott víz állapotából, hőmérsékletéből geohidraulikai-, vízkémiai- és a kútra vonatkozó üzemi információk nyerhetők. Célja leggyakrabban a kút teljesítőképességének, a vízvezető talajréteg szivárgáshidraulikai paramétereinek, valamint a talajvíz kémiai-fizikai tulajdonságainak meghatározása (Krusemann és de Ridder 1994, Vasvári 2001). Dolgozatomban a próbaszivattyúzást, mint mélyépítési feladatoknak, munkaterék víztelenítésének tervezését támogató mérési módszert vizsgáltam. A vízbázislétesítés céljából végzendő szivattyús kísérleteket és azok szabályozását nem taglaltam. Ebben a fejezetben röviden bemutatom az elméleti módszerek fejlődéstörténetét, felsorolom a legfontosabb kiértékelési módszereket, valamint kitérek a jövőben megoldásra váró feladatokra is.

3.1.1. Darcy-törvény

A porózus közegben történő vízáramlás kvantitív tanulmányozása Henry Darcy francia hadmérnök kísérleteivel kezdődött. Ezen kísérletek eredményét 1856-ban publikálta, melyet ma már Darcy-törvényként ismerünk (Darcy 1856).

Darcy megállapítása szerint a szivárgás sebessége egyenesen arányos a hidraulikus gradienssel.

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

Ahol:

- v a szivárgás sebessége [m/s],
- k szivárgási tényező¹, áteresztőképességi együttható [m/s],
- $\frac{dh}{dr}$ mozgást létrehozó vízszintkülönbségek és szivárgási hossz hányadosa [-],
- I hidraulikus gradiens [-] (Darcy 1856 alapján Kovács 1972).

¹ A paraméternek több megnevezése is használatos, szabatosan áteresztőképességi együtthatónak hívják. Disszertáciomban a mérnöki gyakorlatban elterjedtebb szivárgási tényező kifejezést fogom alkalmazni.

3.1.2. Nyomás alatti vízádókban végzett időben állandósult próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek

Dupuit 1857-ben publikálta időben állandósult áramlásokban végzett próbaszivattyúzások kiértékelésére alkalmazott összefüggését, melyet Darcy (1856) egyenlete (1. egyenlet) alapján alkotott meg. Dupuit minden pontban vízszintes szivárgást feltételezett és nem vette figyelembe a kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadást. A szivárgási tényezőre rendezve a Dupuit-módszert az alábbi egyenlettel írhatjuk fel:

$$k = \frac{Q}{2\pi m} \cdot \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{(y_1 - y_2)} \quad [2]$$

Ahol:

- Q a szivattyúzás során állandósult vízhozam,
- m a szivattyúzott réteg vastagsága,
- x_1 távolabbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m],
- x_2 közelebbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m],
- y_1 távolabbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlopnyomás [m],
- y_2 közelebbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlopnyomás [m].

A Dupuit-féle egyenlet a következő geometriai-, áramlási- és határfeltételek figyelembevételével alkalmazható szabad felszínű víztartóra:

- az áramlási tér homogén, izotróp, állandó vastagságú,
- a kút távolhatása ismert R sugarú körrel jellemezhető, így a kút táplálása minden oldalról egyenletes és sugárirányú,
- a kút a teljes vízmélység mentén szűrőzve van,
- a szivárgó vízmozgás az áramlási tér minden pontjában a Darcy-törvény érvényességi határán belül marad, szivattyúzás megkezdéséig a víztartóban lévő víz nyugalomban van,
- a víztartó nyomás alatti,
- a vízmozgás permanens,
- a kitermelt vízhozam állandó,
- Dupuit feltétel: a kúttengellyel koncentrikus minden hengerfelület potenciálfelület. A sebesség egy-egy ilyen henger mentén állandó és arányos a hengerfelület függőlegesében kialakuló felszíni eséssel. Ezek alapján Dupuit feltételezi, hogy az áramvonalak jó közelítésként vízszintesnek tekinthetők, a sebességvektorok függőleges összetevője elhanyagolható (Dupuit 1863, Kovács 1972, Kruseman és de Ridder 1994).

Az összefüggés nagy leszívások esetén érvényét veszítheti, főként a kút közvetlen környezetében, ahol az áramlás függőleges irányú komponense már nullától különbözhet (Ubell 1958). A valós és a Dupuit-féle leszívási görbe alakja közötti eltérés főként a termelőkút közelében annál nagyobb, minél jobban növekszik a szivattyúzott vízhozam és a leszívás, ekkor ugyanis a kút belsejében mért és a kútpalást külső felén létrejövő vízszint közötti különbség egyre nagyobb lesz. A leszívás hatástávolságának számítására leggyakrabban a Sichardt-, Kusakin- és Weber-féle összefüggések használhatók (Sichardt 1928, Weber 1928, Aravin és Numerov 1953, Kruseman és de Ridder 1994, Mishra és Kuhlman 2013).

Az időben állandósult áramlást vizsgáló módszerek továbbfejlesztésében jelentős lépés volt az a megfigyelés, hogy a Laplace-egyenlet jól leírja a nyomás alatti víztartóban a permanens kétdimenziós vízmozgást, így analóg folyamatoknak tekinthető a felszín alatti víz áramlása és permanens állapotú hőterjedés (Forchheimer 1886). Slichter (1898) szintén a Laplace-egyenletet alkalmazta felszínalatti áramlás leírására, elsőként ő számol be függőleges áramlási komponens meglétéről számításai során.

Thiem (1906) volt az első, aki szivárgási tényezőt határozott meg permanens próbaszivattyúzás adatsorokból több megfigyelőkút használatával. Muskat (1932) permanens áramlaskor kialakult folyamatok leírásával foglalkozott lebegőkutak esetében (Mishra és Kuhlman 2013).

3.1.3. Nyomás alatti vízadókban végzett időben változó próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek

Mivel a Dupuit-módszernél feltételezett időben állandósult áramlás valós vízadók esetén nagyon ritkán érhető el, így szükség volt olyan összefüggés kidolgozásra, ami lehetővé teszi nempermanens próbaszivattyúzási eredmények talajfizikai paraméterek számítására való felhasználását. Forchheimer (1898) megalkotta a szabad felszínű, nem permanens áramlásra vonatkozó differenciálegyenletet, majd Boussinesq (1904) a nyomás alatti víztartók időben változó áramlási viszonyait jellemezte összefüggésével (Mishra és Kuhlman 2013).

A felszín alatti víz áramlása és a hővezetés közötti hasonlóságot Theis (1935) is felhasználta, mely alapján megalkotott egy analitikus megoldást a probaszivattyúzás hatására nyomás alatti rétegekben kialakult, időben változó áramlási viszonyok leírására. Az összefüggést később kiterjesztette szabad felszínű víztartóra is. A közismert és igen széles körben használt Theis-egyenlet a szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedésre a következő (Theis 1935, Kruseman és de Ridder 1994):

$$s(r, t_t) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} \cdot W(u) \quad [3]$$

- s szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedés a kútban [m],
- t_i szivattyúzás kezdetétől eltelt idő [s],
- S tárolási tényező [-],
- T transzmisszivitás [m^2/s],
- $W(u)$ Theis-féle kútfüggvény, ahol: $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$.

Az exponenciális integrál kifejezhető az alábbi sorozatból:

$$\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = W(u) = -0,577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - + \dots \quad [4]$$

Az ismeretlenek kifejezésére analitikus megoldás nem írható fel, így ehelyett grafikus kiértékelés alkalmazható. A Theis-féle típusgörbe a $\log u - \log W(u)$ értékpárokból rajzolható meg. A mérési adatokból „ $\log r^2/t - \log s$ ” görbét rajzolhatunk. A típusgörbe és a mért adatokból származtatott ábra között alakra megegyező szakaszt kell keresni. Az egyezés szakaszába eső pontokra a keresett ismeretlenek meghatározhatók (Jacob 1940, Kruseman és de Ridder 1994). Módszerének alapfeltevései a következők):

- a víztartó kiterjedése végtelen,
- a víztartó homogén, izotróp, állandó vastagságú,
- a szivattyúzott kút teljes, a hozam konstans,
- az áramlás vízszintes,
- a víztartó nyomás alatti,
- az áramlás nempermanens,
- a víz azonnal felszabadul a tározott készletből, amint csökken a piezometrikus nyomásszint,
- a szivattyúzott kút átmérője elég kicsiny ahhoz, hogy a kútbeli tározódás elhanyagolható legyen (Theis 1935, Kovács 1972, Kruseman és de Ridder 1994).

A legtöbb próbaszivattyúzást értékelő módszer, amely nempermanens vízmozgással jellemezhető szakaszt vizsgál a Theis-összefüggésből indul ki. Ilyen például:

- Jacob (1940) módszere, mely összenyomható, rugalmas nyomás alatti víztartókban történő áramlást ír le;
- Cooper és Jacob (1946) közelítő összefüggése Theis (1935) egyenletére, mely segítségével az integrálást nem kell elvégeznünk abban az esetben, ha a próbaszivattyúzás időtartama kellően hosszú;
- Hantush (1961) lebegőkutakra kiterjesztett módszere (Mishra és Kuhlman 2013).

3.1.4. Nyílt felszínű vízádókban végzett próbaszivattyúzásokra vonatkozó értékelési módszerek

A klasszikus módszereket eredetileg homogén, nyomás alatti víztartóra dolgozták ki. Dupuit permanens állapotra felírt összefüggését 1863-ban kiterjesztette szabad felszínű rétegekre is. Az 5. egyenlet a következőképpen módosul:

$$k = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{y_1^2 - y_2^2} \quad [5]$$

A nyomás alatti vízádóknál megfogalmazott feltételek kis mértékben módosulnak, szabadfelszínű próbaszivattyúzás vizsgálatokor a vízvezető réteg egyenletes rétegvastagságú, alulról vízszintes síkkal határolt, felülről nyílt, azonban beszivárgás vagy párolgás a fedetlen felszínen át sem következik be.

A módosításra nempermanens áramlások esetén is szükség volt. Az úgynevezett Jacob-féle korrekció lehetővé teszi a Theis-görbe illesztését a korrigált leszívás-idő értékpárookra. Ez alapján a Theis-képletbe a mért leszívás helyett egy korrigált leszívást helyettesítünk be, amelyet a következőképpen számolhatunk:

$$s' = s - s^2/2H \quad [6]$$

- s' korrigált vízszintsüllyedés értéke [m],
- H vízvezető telített rétegvastagsága [m] (Jacob 1944, Kruseman és de Ridder 1994).

Boulton (1954a) új megközelítésében a vízszintet egy mozgó peremfeltétellel definiálta és feltételezte, hogy utánpótlás nélkül a vízszint egy véges számú részecskehalmoz, mely egy kinematikus peremfeltételhez vezet, ami az összenyomhatatlan folyadék tömegmegmaradásából következik. Összefüggését Dagan (1967) kiterjesztette lebegőkutak vizsgálatára (Mishra és Kuhlman 2013).

Boulton (1954b) kiterjesztette Theis (1935) elméletét a késleltetett hozam jelenségével a szabad felszínű víztartókban kialakuló vízszintek pontosabb leírására. Új formulája azt feltételezte, hogy a leszívás hatására a tározódó víz fokozatosan és nem azonnal lép ki a talajszemcsék közül, mint ahogy azt más egyenletek leírták (Boulton 1954a, Dagan 1967, Mishra és Kuhlman 2013).

Streltsova (1972) közelítő megoldást nyújtott lebegőkutakban és megfigyelőkutakban kialakuló leszívások meghatározására (Mishra és Kuhlman 2013).

Neuman (1972) bemutatott egy olyan fizikai alapokon nyugvó matematikai modellt, mely a szabad felszínű rétegeket összenyomhatóként, a vízszintet mozgó peremfeltételként definiálta. Megközelítésében a késleltetett válasz folyamata a vízszint változásából eredt, ezért

a késleltetett hozam kifejezést késleltetett vízszintváltozásra cserélte (Mishra és Kuhlman 2013).

Kroszynski és Dagan (1975) alkotta meg az első analitikus megoldást szabad felszínű víztartóra, mely figyelembe veszi a telítetlen zóna hatását a leszívás értékére. A telítetlen zónában történő áramlás leírására a Richards-egyenletet használták (Mishra és Kuhlman 2013). Tartakovsky és Neuman (2007) bemutatta, hogy a telítetlen zónában az áramlás nem teljesen vertikális, ehhez kapcsolódóan Moench (2008) numerikus szimulációkkal bemutatta, hogy a kapilláris vízmozgás nagyobb mértékben horizontális, mint vertikális irányú (Mishra és Kuhlman 2013).

Mishra és Neuman (2010) új általánosított formáját alkotta meg a Tartakovsky és Neuman (2007) összefüggésnek, melyet numerikus modellezéssel, terepi- (Moench és társai 2001) és laboreredményekkel Mace és társai 1998) is igazoltak (Mishra és Kuhlman 2013).

3.2. PRÓBASZIVATTYÚZÁS-VIZSGÁLATOKHOZ ALKALMAZOTT ELŐÍRÁSOK

3.2.1. Szakirodalmi áttekintés módszere

Az irodalmak áttekintése előtt megfogalmaztam egy összesen negyvenöt alpontot, paramétert vizsgáló szempontrendszert, melynek célja a rendelkezésemre álló ismeretanyag összehasonlítása és rendszerezése volt. Mivel a próbaszivattyúzás és a hozzá kapcsolódó összes szivárgás- és kúthidraulikával, kúttervezéssel és telepítéssel kapcsolatos részterület áttekintése hatalmas feladat lett volna, ezért kutatómunkám során csupán egy meglévő, egykutas rendszer vizsgálatához gyűjtöttem részletes információkat. Több területtel, mint például a kúttelepítési módokkal vagy kúttervezési paraméterekkel nem vagy csak érintőlegesen foglalkoztam. Végeredményben a próbaszivattyúzás folyamatát logikailag három fő részre osztottam fel: tervezési, mérési és kiértékelési szakasz. Az egyes szakaszokon belül részletesen foglalkoztam az alábbi témákkal:

Tervezési szakasz:

- Vizsgálat céljának megfogalmazása;
- A felszínnel, a víztartóval és kútkialakítással kapcsolatos információk gyűjtése;
- Vizsgálatot megelőző terepi teendők elvégzése;
- Mérést befolyásoló terepi tényezők felmérése;
- Mérések felszerelésigényének megállapítása;
- Megfigyelőkutak kiosztásának megtervezése;
- Próbaszivattyúzás hozamának becslése lépcsős hozamú szivattyúzással.

Mérési szakasz:

- Vízszintméréssel kapcsolatos irányelvek;
- Hozamméréssel kapcsolatos irányelvek;
- Kitermelt víz elvezetésének módjai;
- A vizsgálatot befolyásoló tényezők, feljegyzendő események;
- Visszatöltődés vizsgálata.

Kiértékelési szakasz:

- Adatok korrigálásának elvégzése;
- Gyakorlatban használt kiértékelési módszerek.

Az itt felsorolt témákkal részletesebben a Melléklet 1. fejezete foglalkozik. A Melléklet ezen részében összevettem az EC-t más előírásokkal, melynek eredményeit a 7.1-es fejezetben fogom bemutatni.

3.2.2. Hazai szabványok

A próbaszivattyúzások kiértékelésének elméleti, számítási ismerete mellett igen fontos, hogy annak terepi kivitelezése előtt a területről előtanulmányokat folytassunk és a vizsgálat során a lehető legnagyobb gondossággal járjunk el. Minden vizsgálandó terület és az az alatt húzódó víztartó bizonyos szempontból egyedi. Minél kisebb léptékben tekintünk a vízadóra és környezetére, annál inkább igazgá válhat, hogy az egyes rétegek települése, vastagsága, anizotrópiája, heterogenitása stb. kisebb-nagyobb mértékű változatosságot mutathat. Éppen ezért nem létezik egy nagyon részletes, minden eshetőségre választ adó univerzális formula a próbaszivattyúzások elvégzésére, viszont megfogalmazhatók olyan mérés előtti lépések, irányszámok, méréstechnikai- és adatfeldolgozási lehetőségek, melyek alkalmazása általános érvényű lehet. Ezen felül lehetőségünk van a víztartókat csoportosítani egyes tulajdonságaik alapján (pl. nyomásviszonyok, rétegvastagság, szivárgási tényező, stb.), így szűkíthetők, specifikusabbá tehetők a próbaszivattyúzás elvégzésére vonatkozó ajánlások, ezzel hatékonyabbá válhatnak a vizsgálatokkal járó munkafolyamatok. Jó megoldást jelentene egy olyan adatbázis létrehozása, amelyben nagy részletességgel és minél objektívebb módon lehetne összegyűjteni különböző területeken végzett valós terepi vizsgálatok tapasztalatait. Nagy adatmennyiség esetén valószínűsíthetően jól kirajzolódna olyan törvényszerűségek, melyek jó iránymutatást adhatnának a jövőben végzett próbaszivattyúzások elvégzéséhez. Mivel tudtommal ilyen adatbázis hazánkban nem áll a mérnökök rendelkezésére, ezért áttekintettem a számomra elérhető szakirodalmakat annak érdekében, hogy fel tudjam tárn

a próbaszivattyúzás elvégzésére vonatkozó nemzetközi irányelveket, melyeket összevettem a hazánkra is érvényes EC szabvánnyal. Az irodalomkutatás részleteit a Melléklet 1. fejezete tartalmazza, a levont következtetéseket és javaslataimat az 7.1. fejezetben ismertetem.

A vizsgálatra vonatkozó hazai szabványok

A világ jelentős részén a próbaszivattyúzás elvégzését állami, illetve önkormányzati szintű előírások szabályozzák. Léteznek olyan esetek, mikor több államra vagy országra azonos szabványok, műszaki előírások, ajánlások tartoznak. Ilyen például az USA vagy az Európai Unió, melynek hazánk is tagja, így Magyarország területére is az Európai Szabvány érvényes. A geotechnikai, azon belül a geohidraulikai vizsgálatokra összesen az alábbi hat szabvány vonatkozik:

- 1. rész: Általános szabályok (MSZ EN ISO 22282-1:2012).
- 2. rész: A vízáteresztő képesség vizsgálata furatban, nyitott rendszerben (MSZ EN ISO 22282-2:2012).
- 3. rész: Víznyomásos vizsgálatok kőzetben (MSZ EN ISO 22282-3:2012).
- 4. rész: Próbaszivattyúzás (MSZ EN ISO 22282-4:2012).
- 5. rész: Infiltrométeres vizsgálat (MSZ EN ISO 22282-5:2012).
- 6. rész: A vízáteresztő képesség vizsgálata furatban, zárt rendszerben (MSZ EN ISO 22282-6:2012).

A szabványok a Magyar Szabványügyi Testülettől megvásárolhatók angol nyelven, magyar verzió nem elérhető. Látható, hogy az „MSZ EN ISO 22282-4:2012 Próbaszivattyúzás” (későbbiekben EC) foglalkozik kifejezetten geotechnikai szemszögből a vizsgált talajrétegekre vonatkozó szivárgáshidraulikai paraméterek meghatározásával, így disszertációmban ezzel a szabvánnyal foglalkoztam részletesen. Az EC előtt a próbaszivattyúzással Magyarországon az „MSZ 15003-1989: Tervezési előírások a munkagödörök határolására, megtámasztására és víztelenítésére” műszaki irányelv foglalkozott munkatérvíztelenítési szempontból, mely csupán körülbelül egy oldalt szentelt a vizsgálat ismertetésére. A műszaki irányelv lényegi tartalmát a Melléklet 1.1. fejezetében foglaltam össze (MSZ 15003-1989, 1989).

3.3. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA SZEMELOSZLÁSI GÖRBÉK ALAPJÁN

A 3.1. fejezetben bemutattam, hogyan lehet próbaszivattyúzással meghatározni egy talaj szivárgási tényezőjét időben állandó és változó leszívások esetén. A próbaszivattyúzás anyagi- és időszükséglete miatt a szivárgási tényező meghatározására különféle módszereket kezdtek kidolgozni, melynek egyikét a szemeloszlási görbén alapuló kiértékelés jelentette. Mivel

a szivárgási tényező és a szemcseméret között hamar felfedezték a korrelációt – mely kavicsméretű tartománynál erősnek, míg az agyagnál gyengének bizonyult –, így napjainkra már nagyszámú összefüggés született.

Seelheim (1880) összefüggése volt az első, mely szemcseméret alapján határoz meg szivárgási tényezőt (Fuchs 2010). A 7. egyenletben szereplő „A” dimenziómentes paramétert Seelheim 0,0037-re vette fel. Ezen paraméterre Hagen (1869) 0,0036, Jáky (1944) 0,01, Kröber (in Éliás és Juhász, 1966) 0,0041 értéket határoztak meg saját kutatásaik alapján. Jordan és Weder (1995) javasolták, hogy az összefüggést csak $U < 5$ egyenlőtlenségi mutatóval rendelkező talajmintáknál alkalmazzák.

$$k[m/s] = A \cdot d_{50}^2[mm] \quad [7]$$

ahol:

- A Seelheim-egyenlet paramétere [-],
- d_{50} átesett tömegmennyiség 50%-ához tartozó szemcseátmérő (mértékadó szemcseátmérő) [mm].

Hazen (1892) eredetileg vízkezelésnél használt homokszűrők töltetanyagát vizsgálta. Az általa felírt összefüggés (8. egyenlet) sajátossága, hogy a C_d dimenzió nélküli konstans függ az egyenlőtlenségi együtthatótól ($C_d = 0,0139$, ha $1,0 < U < 3,0$, és $C_d = 0,0116$ ha $3,0 < U < 5,0$).

$$k[m/s] = C_d \cdot d_{10}^2[mm] \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T_{GW}[^{\circ}C]) \quad [8]$$

ahol:

- d_{10} átesett tömegmennyiség 10%-ához tartozó szemcseátmérő (hatékony szemcseátmérő) [mm],
- T_{GW} a felszín alatti víz hőmérséklete ($^{\circ}C$),
- C_d egyenlőtlenségi mutatótól függő konstans [-] (Skaballanowitsch 1954).

A „U.S.-Bureau of Soil Classification” (USBR) által javasolt, szivárgási tényező meghatározására alkalmas egyenletet több szerző is idézi (Lee 1938, Mallet és Pacquant 1951, Richter 1966, Białas és Kleczkowski 1970). Az egyenlet a szemeloszlási görbe alapján kapott 20%-os valószínűséghez tartozó értéket használja fel (d_{20}), $10^{\circ}C$ -os víz áramlására lett megfogalmazva (9. egyenlet).

$$k[m/s] = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot d_{20}^{2,3}[mm] \quad [9]$$

Ezt az összefüggést (10. egyenlet) Justin és társai (1945) munkája nyomán Urumović és társai (2020) továbbfejlesztették valós mérési adatok alapján az alábbi, USCRO-nak elnevezett formában:

$$k[m/s] = 1,17 \cdot 10^{-2} \cdot d_{20}^{2,32} [mm] \quad [10]$$

Devlin (2015) közzétett egy ingyenesen elérhető, „HydrogeoSieveXL” nevű, Excel környezetben megírt programot, mely tizenöt különféle módszerrel tudja kiszámítani egy talajminta szivárgási tényezőjét szemeloszlási görbe adatok alapján. Programjának alapját a Vukovic és Soro (1992) által publikált kötet képezte. Az egyes elméleti módszereket a Darcy-Weissbach egyenlet alapján a következőképp általánosította:

$$k = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot N \cdot \varphi(n) \cdot d_e^2 \quad [11]$$

ahol

- ρ víz sűrűsége [kg/m^3],
- g nehézségi gyorsulás [m/s^2],
- N talajszemcsék alaki tényezője [-],
- n porozitás [-],
- $\varphi(n)$ porozitástól függő tag [-],
- d_e a szemcseátmérőre vonatkozó szemeloszlási görbétől függő változó [mm].

Devlin (2015) a programjába a 11. egyenlet formájában az alábbi módszereket építette be: Hazen (1892), Slichter (1898), Krüger (1919), Terzaghi (1943), Zamarin (1954), Zunker (1930), Sauerbrei (1932), Krumbein és Monk (1942), Kozeny (1953), Beyer (1964), USBR (in Białas 1966), Alyamani és Sen (1993), Barr (2001), Chapuis (2004). Az egyes módszereknél a szerzők megadtak alkalmazhatósági határokat, melyek általában az egyenlőtlenlégi mutatóhoz (U), a szemeloszlási görbe egyes értékeihez vagy a porozitáshoz (n) köthetők. A porozitást Vukovic és Soro (1992) empirikus összefüggése (12. egyenlet) alapján számítja ki Devlin (2015) megoldója:

$$n = 0,255 \cdot (1 + 0,83^U) \quad [12]$$

3.4. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK

A próbaszivattyúzás vizsgálat amellet, hogy a szivárgási tényező adott területre vett értékének meghatározására alkalmas, jól használható a termelésbe befogott kutak jellemzőinek vizsgálatára. Az anyagútról nyert információk közvetlenül hasznosíthatóak termelési, üzemeltetési feladatoknál. Ebben a fejezetben az ezzel kapcsolatos elméletet mutatom be.

3.4.1. Szabad szivárgási felület vizsgálata

A szabad szivárgási felület kialakulásakor a leszívási görbe a kútpalástot a kútban lévő vízszintnél magasabban metszi, így a kút közvetlen környezetében összetetté válnak a szivárgási folyamatok (Öllös 1970). A kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadás gyakori

jelenség szabad felszínű víztartókban létesített és működtetett kutak esetén. Kialakulásának oka, hogy az áramlás irányában a kút fal közvetlen környezetében a szivárgási tényező hirtelen megnő (Houben 2015a).

A kúton belüli és a kút paláston kívüli vízszintek különbségének kialakulását elsőként Sichardt (1928) írta le, fizikai kismintamodellekkel Hall (1955), Öllös (1958, 1957), Gefell és társai (1994), Simpson és társai (2003) és Rubbert és Wohnlich (2006) igazolták a jelenség létezését. A kiértékelésre általam is használt Dupuit-módszer nem számol a kút paláston lévő szakadással, ezért az összefüggéssel kapott vízszintértékek a kút közelében kisebbek. A jelenség kialakulása nyomán a kitermelt hozam kevesebb, mint amit a Dupuit-módszer alapján várunk (Rushton 2006). A valós és az elméleti módszer közötti eltérést körülbelül a kút középpontjától számított $1,5 \cdot H$ (víztartó rétegvastagsága) távolságtól elhanyagolhatónak tekinthetjük (Houben 2015a). A szakadást időben állandónak feltételezve Boulton (1951), Kozeny (1953), Hall (1955), Boreli (1955), Schneebeli (1956), Heinrich (1964), Nahrgang (1965), Brauns (1981) és Kresic (1997) dolgozott ki közelítő módszereket.

A $H - h_b$ nyomáskülönbség a leszívási tölcser tartományában, a kavics szűrőben, a kút szűrőnyílásaiban és a kúton belüli nyomásvesztésekből tevődik össze:

$$H - h_b = h_t + h_l + h_h + h_{sz} + h_k + h_{cs} + h_a \quad [13]$$

ahol:

- h_b kútban mért vízszint [m],
- h_t a turbulens tartományba eső veszteség [m],
- h_l a lamináris tartományba eső veszteség [m],
- h_h a rétegenállásból származó veszteség [m],
- h_{sz} a szűrőréteg és a víztartó határán fellépő rétegenállás [m],
- h_k a kavics szűrőben fellépő veszteség [m],
- h_{cs} a szűrőcsövön átáramló víz energiavesztesége [m],
- h_a a kút paláston belüli térben fellépő nyomásveszteség [m] (Öllös 1970).

A 13. egyenlet jól érzékelteti, hogy a szivattyúzott rendszerben fellépő nyomásvesztéskomponensek hidraulikai szempontból egymástól meglehetősen eltérő mozgásfolyamatok eredményeként lépnek fel. A különböző rétegekben – vízáadó réteg, kavics szűrőréteg, stb. – más a vízmozgás jellege (Öllös 1970).

3.4.2. Szűrővesztés meghatározása

A kutak szűrőzött szakaszainak három fő feltételnek kell megfelelniük: a szűrőréteg és a víztartó anyaga ne mosódjon be a kútba, stabilizálja a furatot, valamint minimális nyomásvesztést okozzon. Az utóbbit a minél nagyobb áteresztő felülettel lehet elérni, viszont akkor nagyobb az esélye, hogy a másik két szempont sérül (Houben 2015b). Barker és Herbert (1992a) arra mutattak rá, hogy a rozsdamentes acél nagyobb érdességgel rendelkezik, mint a műanyag csövek, viszont az utóbbiaknál nagyobb falvastagságot kell alkalmazni a teherbírás biztosítása érdekében, ami szintén megnövekedett nyomásvesztést generálhat. A kútellenállás meghatározására több elméleti összefüggés is született, az egyes szerzők különféle megközelítésekkel éltek. Hamill (2001) a folytonossági- és Bernoulli-egyenleteket használta fel. A kútfal áteresztőképességi együtthatója meghatározásának egyszerűbb módja, ha az áramlást laminárisnak feltételezzük, ezen alapuló módszereket Klotz (1990), Barrash és társai (2006), Houben és Hauschild (2011) és Klammler és társai (2014) dolgoztak ki. Szerzők egy másik csoportja az áramlást a kút környezetében turbulensnek feltételezte: Clark és Turner (1983), Singh és Shakya (1989), Barker és Herbert (1992a, 1992b), Parsons (1994), így alkották meg összefüggéseiket.

3.5. KISMINTAVIZSGÁLATOK ELMÉLETE

3.5.1. Hasonlóságok

A hidromechanikai kismintavizsgálatok elméletének alapfogalma a hasonlóság, melynek a két különböző léptékben vizsgált rendszerek, folyamatok, jelenségek között kell teljesülnie. Hasonlónak nevezük 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).

Geometriai hasonlóság

A geometriai hasonlóság legegyszerűbb esete, ahol a vizsgált rendszerben pontnak pont, egyenesnek egyenes felel meg oly módon, hogy a megfelelő távolságok aránya állandó. Az egymásnak megfelelő pontok távolságának viszonyát (C) geometriai méretszorzónak nevezük, melynek értékét elviekben zérus és végtelen határok között tetszőlegesen felvehetjük, kivéve a két határértéket. Ennek értelmében a meghatározott geometriai rendszernek tetszőleges méretarányban nagyított vagy kicsinyített megfelelőjét vizsgálhatjuk (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Kinematikai hasonlóság

Mozgó, időfüggő rendszerek vizsgálatánál kérdés a kinematikai hasonlóság teljesülése. A rendszerek kinematikailag hasonlóak, ha a lezajló mozgási folyamatok egymásnak megfelelő időtartamai kielégítik a $\frac{t'}{t} = C_t$ egyenletet, ahol C_t a kinematikai hasonlóságot leíró arányszám. A geometriai arányszám ismertetésénél bemutatott módon a C_t értéke is szabadon választható. Amennyiben a C és C_t értékeit kijelöltük, úgy a hosszúság és idő dimenziójú mennyiségek viszonya már nem állapítható meg önkényesen, csak a két mennyiségből származtatott érték lehet (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Dinamikai hasonlóság

Az összehasonlított rendszerek erőtanai, dinamikai szempontból is hasonlóak lehetnek, ha teljesül a $\frac{P'}{P} = C_F$ arány állandósága, ahol C_F a dinamikai hasonlóság arányszáma. Értéke szabadon választható, mint a C és a C_t értékeké, viszont ezzel már meghatározzuk mindazoknak a mennyiségeknek a viszonzszámát, amelyek a hosszúság, idő, erő (vagy tömeg) alapidimenziókból származtathatók (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

Kapcsolat a hasonlóságok között

A C , C_F , C_t paraméterek dimenziója 1, hiszen mindhárom azonos dimenziójú mennyiségek viszonyaként értelmezzük. Ennek eredményeképpen bármely mértékegységben is fejezzük ki a C , a C_F és a C_t viszonyaként leírt mennyiségeket, ha mind a számlálóban, mind a nevezőben ugyanazon dimenziójú mennyiségek szerepelnek, a törtek értéke változatlan marad. Akár a kismintára, akár a valós méretű jelenségre vonatkozó mennyiségeket helyettesítjük a számlálóba és a nevezőbe a C , a C_F és a C_t értékei változatlanok maradnak. Ezeket a mennyiségeket invariánsoknak nevezzük. Invariánsokat nemcsak két, hanem több mennyiségből is alkothatunk, feltételezve, hogy behelyettesítésekkor ugyanazok az alapl mértékegységek szerepelnek. A mennyiségek számértékének invarianciája lehetővé teszi azt, hogy a különböző méretekben lejátszódó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti kapcsolatot matematikailag egyértelműen kifejezhessük. Ezért gyakran kismintatörvényeknek is nevezik ezeket a mennyiségcsoportokat (Mosonyi és Kovács 1952, Mosonyi 1955, Mosonyi és Kovács 1956, Palotás 1961, Ivicsics 1968).

3.5.2. Mosonyi-Kovács modelltörvény

A porózus közegben áramló, szivárgó víz mozgását elősegítő és fékező erők befolyásolják. Legáltalánosabb elősegítő hatás a gravitáció, ezzel szemben fékező hatást fejt ki a súrlódási és a nehézségi erő (Kovács 1972, Juhász 2002). A szivárgó vízmozgás csoportosítását elsősorban a mozgást létrehozó erők alapján végezzük. A szivárgási tartományokat a domináns és elhanyagolható fékező erők szerint rendszerezük:

- turbulens áramlásról beszélünk, ha a fékező erők közül csak a tehetetlenséget vesszük számításba,
- ha a tehetetlenség mellett a súrlódással is számolunk, akkor az átmeneti szivárgás tartományában járunk,
- lamináris szivárgás esetén csak a súrlódást tekintjük fékezőerőnek,
- mikroszivárgás esetén már szerepet kapnak a molekuláris erőhatások is (Kovács 1972).

A különböző szivárgási tartományokat dimenzió nélküli számokkal jellemezzük. A turbulens áramlás esetén fellépő fékező és segítő erők hányadosa, azaz a nehézségi és a gravitációs erő a Froude-számot adja meg. Az átmeneti tartomány határait a tehetetlenség és súrlódás hányadosával állapíthatjuk meg, melyet a Reynolds-szám fejez ki (Juhász 2002).

A 1. táblázatban bemutatok néhány ajánlást a szivárgó mozgás határértékeire lamináris, átmeneti és turbulens áramlási viszonyokra vonatkozóan. Az egyes szerzők által javasolt határok széles skálán mozognak. A szórás az átmeneti és turbulens áramlás közötti határértékek megállapításában tekintélyes.

1. táblázat: Szivárgási viszonyok határértékei porózus közegben

Szerző(k)	Áramlást jellemző tartományok a Reynolds-szám függvényében		
	Lamináris	Átmeneti	Turbulens
Bear (1972)	$1 < Re < 10$	$Re < 100$	$Re > 100$
Dybbs és Edwards (1984)	$Re < 1$	$5 < Re < 80$	$Re > 120$
Williams (1985)	$Re < 18$	$18 < Re < 50$	$Re < 50$
Fand és társai (1987)	$Re < 2,3$	$5 < Re < 80$	$Re > 120$
Trussell és Chang (1999)	$Re < 1$	$1 < Re < 100$	$Re > 800$
Juhász (2002)	$Re=4$	$200 < Re < 1000$ $4 < Re < 200$	$Re > 1000$
Hlushkou és Tallarek (2006)	$Re < 1$	$1 < Re < 500$	$Re > 500$

Mosonyi és Kovács (1952) az átszámítási tényezők meghatározása során a nehézségi és belső súrlódásból származó erők egyenlőségéből indult ki és a nagyméretű szivárgási folyamat (14. egyenlet), valamint kicsinyített megfelelője (15. egyenlet) esetére az

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [14]$$

és az

$$I'' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [15]$$

egyenleteket írták fel, ahol:

- γ a víz térfogatsúlya [N/m^3],
- l a szivárgási hossz [m],
- z a geodéziai magasság, hengerkoordináta [m],
- $\frac{dv}{dz}$ a szivárgási sebesség hely szerinti megváltozása, sebességgradiens [-]
- η a dinamikai viszkozitás [Ns/m^2].

Ebből levezethető a következő egyenlet:

$$\frac{v'}{v''} = 1 \quad [16]$$

A Darcy-törvény érvényességi határain belül felírható a

$$k' I' = k'' I'' \quad [17]$$

összefüggés. Feltételezve, hogy a kismintavizsgálatok esetén ugyanolyan a talaj, mint amelyben a nagyméretű szivárgási folyamat lejátszódik, és így

$$k' = k'' \quad [18]$$

végeredményül az

$$I' = I'' \quad [19]$$

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

A hasonlóság feltételezése miatt a talaj szemcsenagyságát is az arányszámnak (C) megfelelően kicsinyíteni kellene. Mivel ekkor a vizsgált talaj szemcsenagysága is hasonló mértékben csökkent, mint minden más geometriai arányszámmal jellemezhető paraméter, így ebben az esetben torzítatlan modelltől beszélhetünk (2. táblázat). Azonban – ahogy azt a Mosonyi-Kovács törvény kimondja –, mivel a modellben és a valóságban lezajló folyamatokat úgy tekintjük hasonlóknak, hogy feltételezzük a Darcy-törvény érvényességét, így ugyanazon szivárgási tényezővel jellemezhető talaj alkalmazása esetén a vízmozgás során a két léptékben megegyező hidraulikus gradiensek és szivárgási sebességek fognak kialakulni. Ebből következik, hogy ha a modellben és a valós méretben alkalmazott talaj szivárgási tényezői megegyeznek (torzított eset), akkor a talajjellemezők és a szemcseméret közötti összefüggés miatt a két léptékben a szemcseméret is egyenlő lesz (Mosonyi 1955).

4. KISMINTÁVAL ÉS TEREPEN VÉGZETT KORÁBBI SZIVÁRGÁS- ÉS KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK

A kutatás elején ismerttetett célkitűzéseim megfogalmazásához fontos volt feltárnom, hogy más szerzők milyen vizsgálatokat végeztek el laboratóriumi kismintamodelleken, illetve meg kellett ismerni a rendelkezésemre álló modellhez kapcsolódó korábbi méréseket, hogy így világosan ki tudjam jelölni a jelentősebb kutatási irányokat. A kutatásom fontos részét képezte a valós méretre való átszámolhatóság igazolása, ennek vizsgálatához két terepi próbaszivattyúzás eredményeit fogom felhasználni. Az ezekkel kapcsolatos előtanulmányokat mutatja be az alábbi fejezet.

4.1. SZAKIRODALOMBAN SZEREPLŐ EGYÉB KISMINTAMODELLEK GEOMETRIÁJA

A kismintamodellek szivárgás- és kúthidraulikai alkalmazására több példát is találhatunk a hazai (Öllös 1956, 1958) és nemzetközi szakirodalomban (Klotz 1971, Clark és Turner 1983, Williams 1985, Gefell és társai 1994, Wendling és társai 1997, Simpson és társai 2003, Klauder és társai 2009, Klauder 2010) is. A Melléklet 17. oldalának 1. ábráján (M17/1. ábra) Klotz (1971) szivárgáshidraulikai kismintamodelljének egyszerű rajzát közöltem, aki a szivárgási tényező időbeli változását mérte vizsgált talajmintáján.

Az itt bemutatott külföldi szerzők mindegyike 1:1 méretarányú szűrőcsöveket használt vizsgálataihoz, tehát a valós átmérővel dolgoztak, így kismintatörvényeket nem alkalmaztak az eredmények teljes méretre történő átszámításához.

A Melléklet 17. oldalának 2. ábráján (M17/2. ábra) Clark és Turner (1983) 45°-os középponti szöggel kialakított, 0,2 m magasságú és 1,2 m hosszú szegmens alakú modelljének sematikus rajzát láthatjuk. Clark és Turner (1983) tisztán kúthidraulikai vizsgálatokat folytattak, melyek során rozsdamentes acél (6 db), műanyag (1 db) és üvegszál (1 db) erősítésű 250 mm átmérőjű szűrőcsöveket vizsgált. A szűrőcsövek többféle kialakítással és áteresztő felülettel készültek, viszont a perforáció átmérője egy kivételével (0,5 mm) mind 1,0 mm volt.

Az M17/3. ábrán a Williams (1985) által használt 60°-os szegmens alakú kismintamodell látható a főbb méretek feltüntetésével. Vizsgálatai tisztán kútervezési szempontúak voltak, melyet 250 mm átmérőjű, hat különböző szűrőcsővel és kétféle talajmintával végzett el.

Gefell és társai (1994) egy 137 cm hosszú, 69 cm széles és 46 cm magas keretben helyezték el 61 cm sugarú, félhenger alakú modellterületet (M18/4. ábra). Vizsgálataik során a maximálisan kitermelhető vízhozam értékét keresték szabad felszínű víztartónál, majd eredményeit összehasonlították a Kozeny (1953) elméleti módszerével kapott adatokkal. A modellben kétféle anyakutat alkalmaztak: 5,1 cm átmérőjű, 0,25 mm kör alakú perforációval ellátott PVC,

valamint 10,9 cm 0,025 mm-es lyukátmérővel rendelkező rozsdamentes acél szűrőcsövet. Emellett modelljük hat megfigyelőkutat és hat piezométert is tartalmazott a vízszintek megfigyelésére.

Wendling és társai (1997) 45°-os középponti szöggel készült fizikai modellt használtak méréseiknél, mely 14 cm magasságú talajmintát tartalmazott (M18/5. ábra). A kúttelepítés során kialakult „skin”-t vizsgálták nyomás alatti kismintamodelljükkel, melyben összesen 22 db elektromos nyomásmérőt használtak a nyomásértékek regisztrálására.

Simpson és társai (2003) fizikai modellje 100 cm magassággal és 130 cm hosszúsággal készült el. Alakját tekintve egy 15°-os középponti szöggel rendelkező hengercikk (M19/6. ábra). Laboratóriumi és numerikus modellezést is végeztek a kút közelében kialakuló sebességek és a szabad áramlási felület vizsgálatára. Anyakútként egy 20 cm-es belső átmérőjű, 15°-os csőcikket használtak, e kútpalást mentén mérték a kút körüli vízszint-elszakadásának hosszát. Ezen felül vizsgálataik során a talajminta öt magasságában vízfestést hajtottak végre, majd a terjedést megfigyelve MODFLOW környezetben numerikusan modellezték a kapott eredményeket.

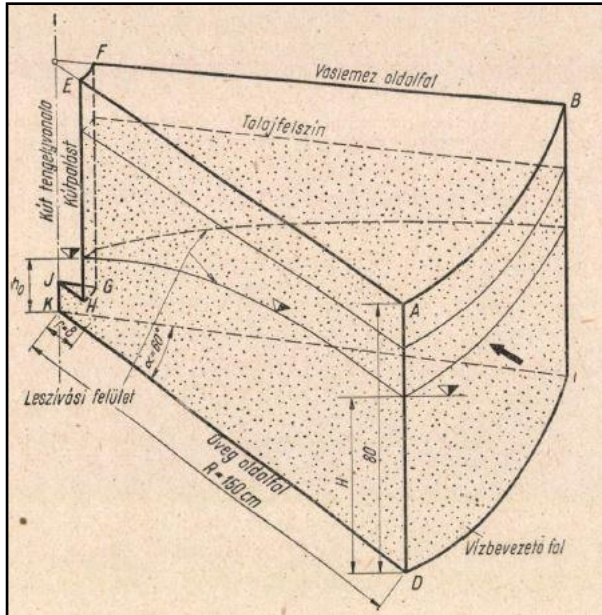
A Klauder és társai (2009), és Klauder (2010) által publikált 0,5 m magas, 1,75 m átmérőjű teljes henger alakú modellt mutatja be a (M19/7. ábra). Ők az 1. ábrán látható 300 és 400 mm átmérőjű szűrőcsövekkel végeztek kúthidraulikai vizsgálatokat. Egyes csövek műgyantával ragasztott szűrőréteggel készültek, de ezen felül alkalmaztak kavics szűrőréteget is. A víztartóként vizsgált talajmintát egy garzweiler-i lignitbányából nyerték.



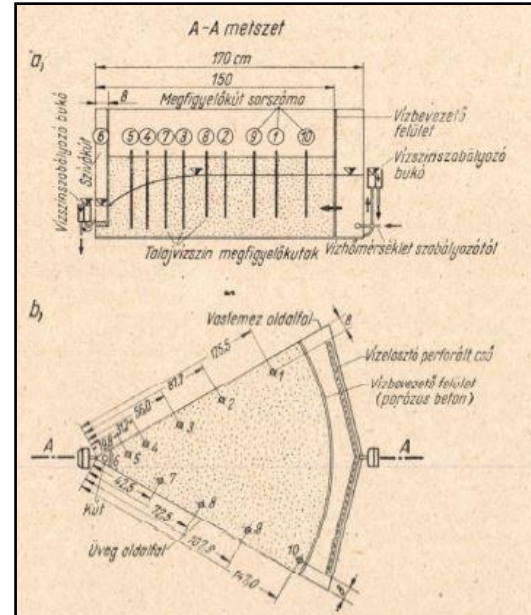
1. ábra: Klauder és társai (2009, 2010) vizsgálataihoz felhasznált szűrőcsövei.

Laboratóriumi kismintaméréseket Magyarországon is végeztek, Öllös több cikket, valamint könyvet is publikált szivárgás- és kúthidraulika témában (Öllös 1956, 1957, 1958, 1970). Többek között foglalkozott a kútpaláston belüli- és kívüli vízszint egymástól való elszakadásának folyamatával, melyet különböző sugarú, porózus beton anyagból készült kutak esetében vizsgált kismintamodell segítségével. Modellje 150 cm sugarú körcikk alaprajzú, 60°-os középponti szöggel készült (2. ábra). A vízszintek észlelését megfigyelőkutakkal végezte

el, melyekben a vízszinteket elektromos mérőtűkkel tudták leolvasni. A termelőkkak porózus betonból készültek, a kúthidraulikai vizsgálatokhoz különböző átmérőkkel végezték. Öllös a felső és alsó peremfeltételt jelentő vízszinteket körbukók segítségével oldotta meg (3. ábra).



2. ábra: Az Öllös féle kismintamodell axonometrikus ábrája (Öllös 1956)



3. ábra: Az Öllös féle kismintamodell oldal- és felülnézeti ábrája (Öllös 1956)

4.2. A KISMINTÁVAL VÉGZETT KORÁBBI LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK EREDMÉNYEI

4.2.1. Laboratóriumi mérések

A szakirodalmi összefoglaló után bemutatnám az általam használt kismintát, és az azon elvégzett korábbi méréseket, ahhoz kapcsolódó számításokat.

A fizikai modell Dr. Hajnal Géza és Tolnai Sándor tervei szerint készült el és 2011-ben helyezték üzembe a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének laboratóriumában. A kismintamodell megépítésére számos terepi mérés elvégzését követően merült fel az igény, mely jó eszközzel szolgálhatott a próbaszivattyúzás folyamatának tanulmányozására, a valós méretű vizsgálatok laboratóriumi szimulálására. A fizikai modellel végzett kutatásból több TDK dolgozat, diplomamunka és szakkikk született, melyek főbb tapasztalatait ebben a fejezetben ismertetem.

A 2. táblázatban modellben alkalmazott arányszorzókat tüntettem fel, ahol a geometriai arányszám átszámítását a valóságban (160 mm) és a kismintában (17 mm) alkalmazott anyakutak átmérőinek hányadosa adta.

2. táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámai vizsgált kismintamodell esetében (Mosonyi és Kovács 1952, Farkas és társai 2019a)

Fizikai mennyiség	Mosonyi-Kovács törvény arányszorzói			
	Torzítatlan		Torzított	
Hossz	C	9,41	C	9,41
Terület	C ²	88,5	C ²	88,5
Térfogat	C ³	833	C ³	833
Idő	C ⁻¹	0,106	C	9,41
Sebesség	C ²	88,5	C ⁰	1,00
Gyorsulás	C ³	833	C ⁻¹	0,106
Hozam	C ⁴	7840	C ²	88,5

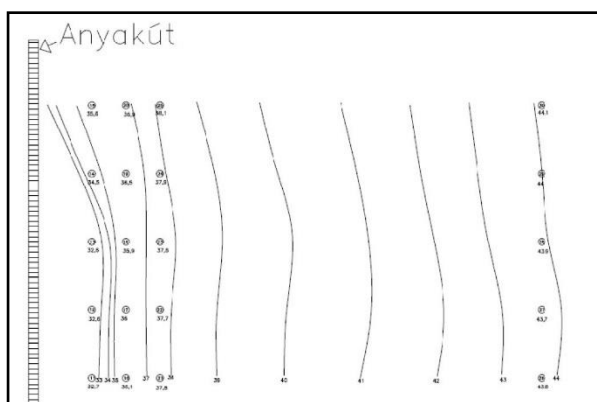
Homogén víztartóban a próbaszivattyúzások hengersizmetrikus leszívási folyamatot eredményeznek, így a kismintamodell esetében megengedett a negyed körcikk alakú modell használata. Annak tényét, hogy a vizsgálatok eredményeit a modell alakja nem torzítja, fizikai és numerikus modellezéssel igazolták (Barta és társai 2012, Szabó és társai 2012). Ezen felül a kismintamodellt Barta és társai (2012) alkalmasnak találta a modellterben vizsgált talaj szivárgási tényezőjének meghatározására, ugyanis a kapott értékek megfeleltethetők voltak a szakirodalmi adatoknak. A vízkitermelés hatására létrejött leszívási görbék lefutását a modell fenéklemezén kialakított 10 darab piezométerrel mérték. A kismintába bevezetett víz a víztéren keresztül jutott a modellterbe, melynek mennyiségét bukóval szabályozták. A vízkitermelés szivattyúval zajlott. A vízteret geotextíliával burkolt fémrács határolta el a talajjal feltöltött modellterétől. A rács és a geotextília együttes használata biztosította, hogy a finomabb szemcsék se mosódjanak be a víztérbe.

Barta és társai (2013) eredményei több kismintamodell-kialakítással és mérési módszertannal összefüggésbe hozható problémára is rámutattak. Első méréseikkor 10 mm átmérőjű anyagukat alkalmazták, viszont ezzel nem tudtak kellő mértékű leszívást előállítani, így egy nagyobb, 17 mm-es átmérőjűre cserélték. A kút 90 fokban volt szűrőzött a kút teljes hosszán annak érdekében, hogy a szívás ne csak egy adott ponton alakuljon ki. A mérések során nemcsak a felső peremet, hanem az anyagukat is geotextíliával vonták be, hogy a kútba ne mosódjon be finom frakció a modellteréből. Méréseik tapasztalataiból megállapították, hogy a vízkitermeléskor kialakult leszívási vízfelszín, valamint a nyomásszintek nem egyeztek meg egymással annak ellenére, hogy szabad felszínű víztartót vizsgált. Ennek valószínűsíthető oka, hogy a szivattyúval végzett méréseknél az egyenletes és hosszabb időtartamú vizsgálatokat nem tudták elvégezni, így valós permanens állapot nem tudtak kialakulni. Ez nagymértékben befolyásolhatta a permanens kiértékelési módszerekkel előállított eredményeik pontosságát.

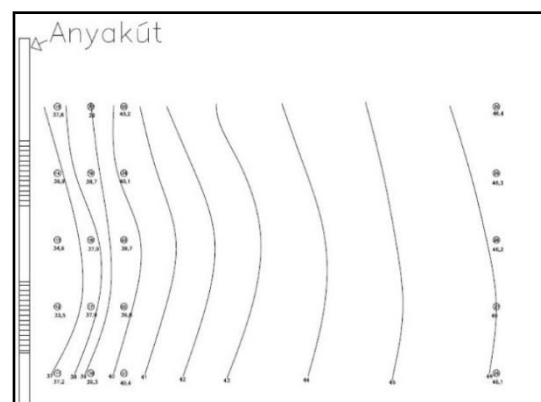
2015-től végzek méréseket a korábbi kutatási tapasztalatok alapján átalakított modellen. Ebben az évben összesen 116 darab mérést végeztem el, melyek fő célja a kút közelében létesített függőleges piezométerekkel a kút körül kialakuló áramlási viszonyok tanulmányozása, valamint a bukóval történő vízkitermelés működésének tesztelése volt. Ezt a mérés csoportot tesztjellege miatt részben a korábbi vizsgálatokhoz sorolom annak ellenére, hogy én végeztem el. Az anyagutat különböző szűrőzési hosszal láttam el annak érdekében, hogy az áramképben kialakuló átalakulásokat, torzulásokat ki tudjam mutatni. Az alkalmazott szűrőzési kialakítások a következők voltak (a magassági értékeket a kúttalptól számítva kell értelmezni, a 0 cm-es szint ezt a síkot jelöli):

1. Vízkivétel csak a kúttalptól számított 10-50 cm-es hosszban történik (14 db).
2. Áteresztő felület csak a felső 35-50 cm között van (18 db).
3. Szabad felület a kúttalptól 25-40 cm között van (11 db).
4. Vízkivétel csak az alsó 0-10 cm és a felső 40-50 cm között történik (14 db).
5. Vízkivétel két szakaszon 10-20 cm és 30-40 cm között lehetséges (15 db).
6. Áteresztő felület csak az alsó 0-10 cm szakaszon van (26 db).
7. Teljes kút kialakítás (18 db).

Látható, hogy az 1-2. pontokban gyakorlatilag lebegőkútnak megfelelő vizsgálatok történtek, ezt követően azonos rétegben, de különböző mélységekben szűrőzött kúttal történtek mérések (előző felsorolás 3-6. pontjai). Ez nem szokványos a gyakorlatban, viszont a cél az áramképben történő változások kimutatása volt, nem pedig egy adott létező kialakítás ellenőrzése. Végül teljes kúttal történő kialakítással végeztem méréseket. Az adatokat Vig (2016) dolgozta fel és készített potenciálvonalakat, melyre két példát láthatunk a 4-5. ábrákon.



4. ábra: Teljes kút körül kialakuló potenciálvonalak (Vig 2016)

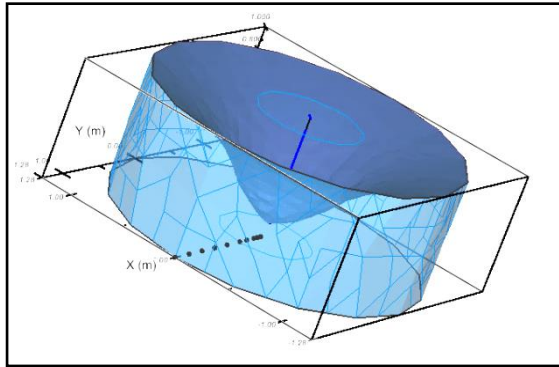


5. ábra: Potenciálvonalak alakja a kúttalptól számított 10-20 cm és 30-40 cm közötti vízkivételi esetben (Vig 2016)

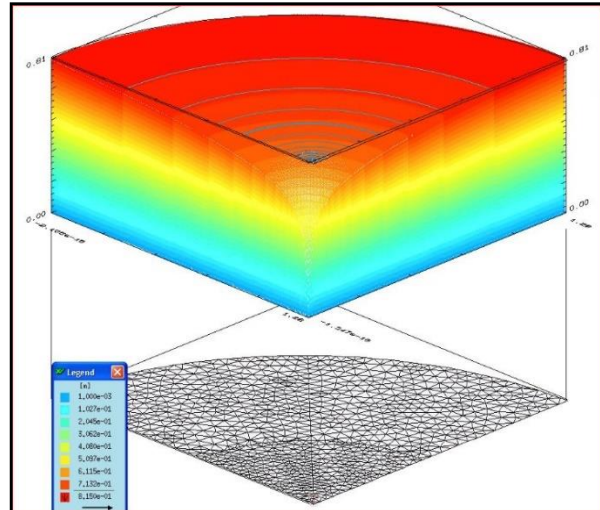
A teljes kúttal történő mérések alkalmasak voltak arra, hogy belőlük szivárgási tényezőt számoljak, így a 2015-ös vizsgálatoknak ezt a részét az itt bemutatottaktól elkülönítve, a 2018-2019-es szivárgási tényező meghatározására irányuló mérésekkel együtt mutatom be.

4.2.2. A kismintát leképező korábbi numerikus modellek

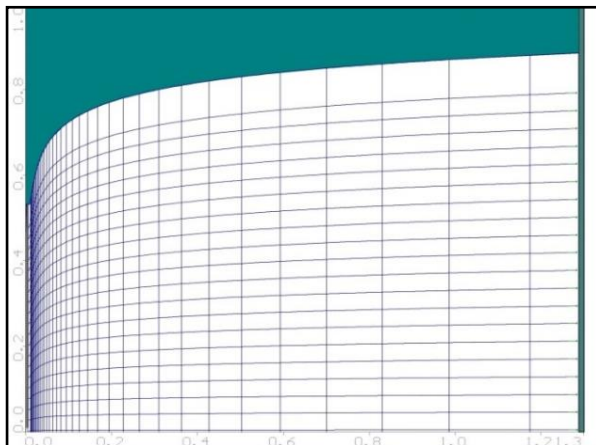
A fizikai modelltől készült első numerikus modellt Csáki (2011) készítette Soil Vision Office vége-selemes szoftverben (6. ábra), amellyel vizsgálta, hogy a 360°-os kialakításhoz képest a 90°-os geometria milyen hatással van a vízszintekre. Emellett érzékenységvizsgálatot végzett a szivárgási tényező és porozitás paraméterek leszívási vízfelszint befolyásoló hatásaira. Bemenő adatoknak a 2011-ben elvégzett kismintamérések eredményeit használta fel. A kapott eredményei nem teljesen elfogadhatók, mivel a 4.2.1. fejezetben már kifejtettem, hogy az akkori mérések nem a valós permanens állapotot tükrözték. Szabó és társai (2012) szintén a hengeralak különböző mértékű csonkolásának hatását vizsgálta vége-selemes FEFLOW 5.0 és véges differencia Visual MODFLOW 2.8.2.2 modellekkel (7. ábra). Barta és társai (2013) áramkép előállítására törekedtek szintén MODFLOW környezetben (8. ábra).



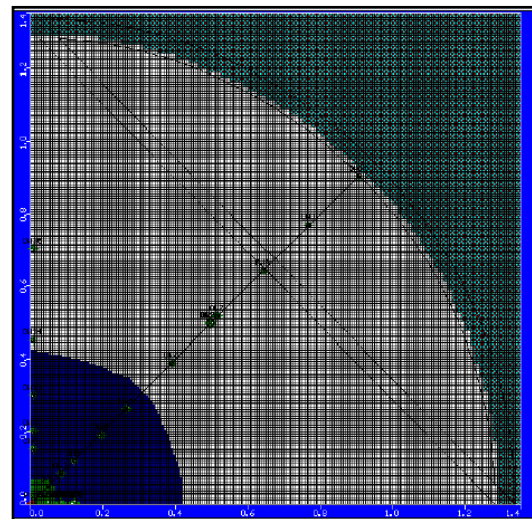
6. ábra: A depressziós görbe teljes henger modellalakat feltételezve (Csáki 2011)



7. ábra: Depressziós görbe geometriája negyedhenger modellalak esetén (Szabó és társai 2012)



8. ábra: Fizikai modellezés alapján készített áramkép alakja valós méretre kiterjesztve (Barta és társai 2013)



9. ábra: A numerikus modell szivárgási tényezőjének eloszlása (Vig és társai 2016)

Vig és társai (2016) már az általam mért 2015-ös adatsort dolgozták fel Visual MODFLOW Classic szoftverrel. A modell kalibrálásának folyamata során szembesültek azzal a ténnyel, hogy a kút közelében fekvő piezométerek értékei nagyobb hibával terheltek homogén talajmintát feltételezve. A szivárgási tényező függőleges komponensét több nagyságrenddel megváltoztatva kaptak csak elfogadható eredményeket a nyomásszintekre, viszont ez nem felelt meg a valóságban kialakult tényleges állapotnak. Végül két modellváltozatot alkottak meg:

- Az első verziónál három különböző szivárgási tényezőjű zónára osztották a modellteret, így sikerült elérniük, hogy a vízszintek a mért adatokkal jól egyezzenek, viszont a vízmérleget nagy hiba terhelte. Az eltérő szivárgási tényezőjű zónákat a 9. ábrán zöld

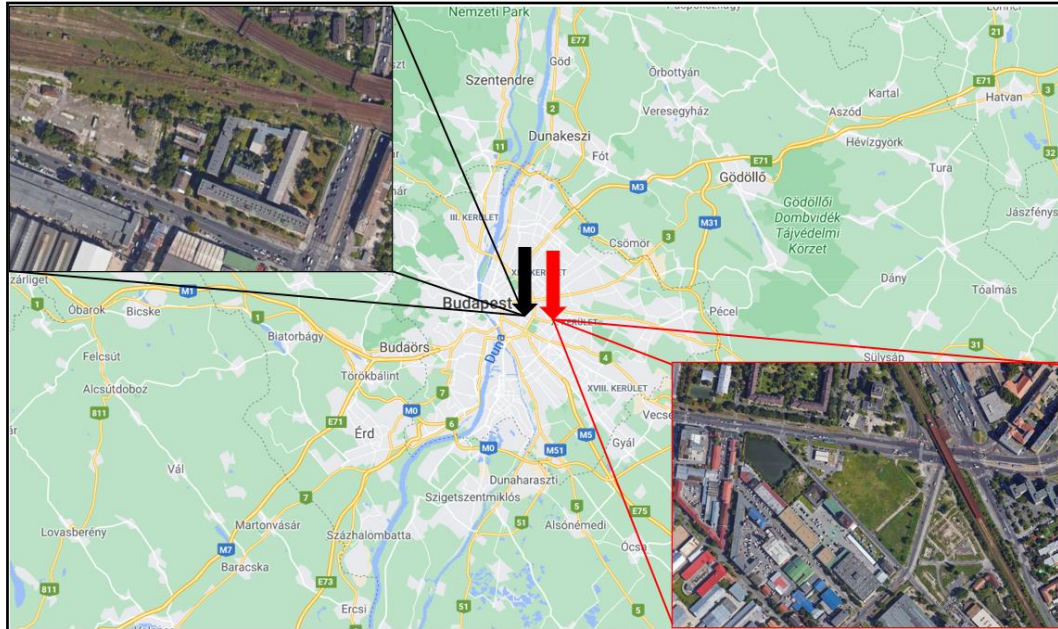
(a kút közvetlen környezete), kék (a kút középpontjától 40 cm-es sugáron belüli térrész) és fehér (modelltér egyéb, a számításban résztvevő aktív cellái) színnel jelölve láthatjuk.

- A második verziónál sikerült a vízmérleget és a szinteket is elfogadható mértékben közelíteni a valós értékekhez, viszont csak olyan áron, hogy a szivárgási tényezők értékei két nagyságrenddel eltértek a kézi számításhoz képest (Dupuit-módszer).

Második modelljének igazolását elvégezte, viszont a szivárgási tényező értékek nem voltak megfelelőek, így a modellezés során felmerült ellentmondásokat nem sikerült feloldania.

4.2.3. Mintaterületeken végzett terepi próbaszivattyúzások ismertetése

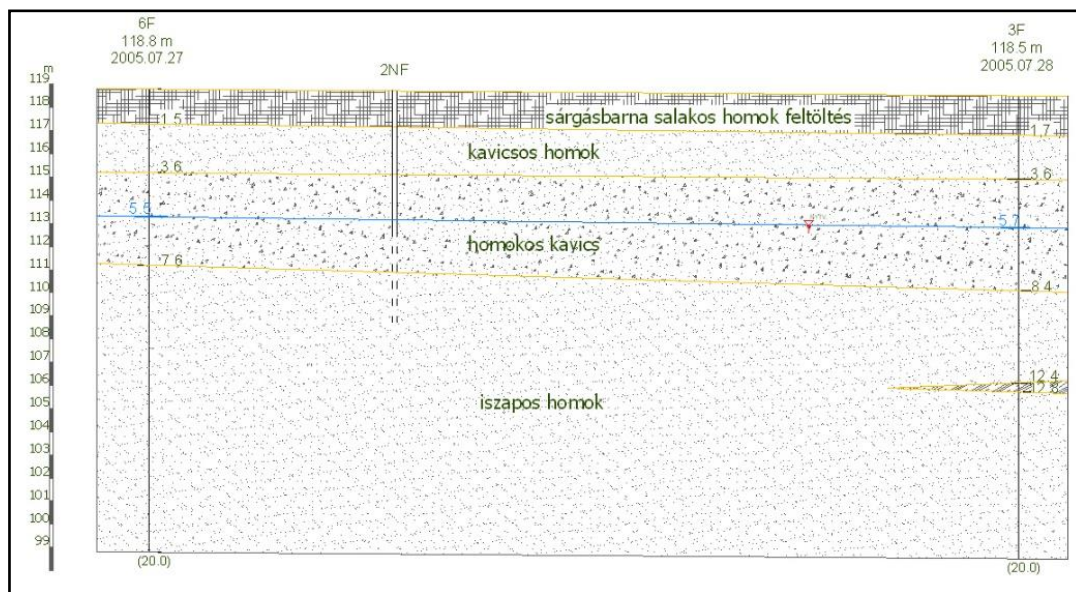
A 2. fejezetben felsorolt célkitűzésekben szerepel, hogy vizsgálataimat valós terepi példákkal kívánom igazolni. Ebben a fejezetben a korábban elvégzett és kutatásomhoz felhasznált próbaszivattyúzások helyszíni bemutatását, valamint a terepi vizsgálatok eredményeit ismertetem. A 10. ábrán piros nyíllal az első mintaterületet jelentő Mázsa teret, feketével a második vizsgálati helyszínt, a Könyves Kálmán körutat jelöltem. A következőkben részletesen ismertetem a két területet leíró azon jellemzőket és eredményeket, melyek a vizsgálataim elvégzéséhez voltak szükségesek. (A vizsgálati helyszínek pontosabb beazonosítása ipari titokra hivatkozva nem áll módomban.)



10. ábra: Terepi mérések helyszínei (piros nyíl: Mázsa tér, fekete nyíl Könyves Kálmán körút)

Első mintaterület helyszínének bemutatása: Mázsa tér, Budapest

A területen 2005 nyarán mélyítették talajmechanikai feltáró fúrásokat, majd a kivitelezés megkezdésekor a munkatér víztelenítésének meghatározása érdekében próbaszivattyúzásokat végeztek 2008 márciusában. A talajmechanikai feltárás során a 20 méteres furatok aljaig homokos, kavicsos rétegeket azonosítottak (jelük 6F és 3F) (11. ábra). Az építési terület nyugati oldalán 10 méter mély anyakúttá képzett fúrás (jele: 2NF) közelében két, egymásra merőleges irányban 3-3 darab megfigyelőkutat helyeztek el (12. ábra). A 160 mm átmérőjű anyakút szűrőzött szakasza a kúttalptól számítva körülbelül 4 méter hosszúságban volt kialakítva, a szűrőcső kialakításáról nem állt rendelkezésre információ. Az iszapos homokrég kevésbé áteresztő közegnek bizonyult, mint a felette lévő homokos kavicsréteg, viszont vízzáró funkciót nem látott el. Mivel pontosan nem lehetett megállapítani a vízzáró réteg felső síkjának szintjét, így az adatok kiértékelésekor több értéket is társítottak ehhez a paraméterhez (Petik és társai 2005, Hajnal és társai 2009).

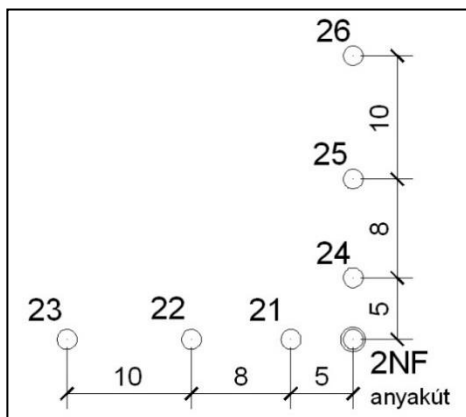


11. ábra. Rétegszelvény a kőbányai „2NF” kút környezetében (Hajnal és társai 2009)

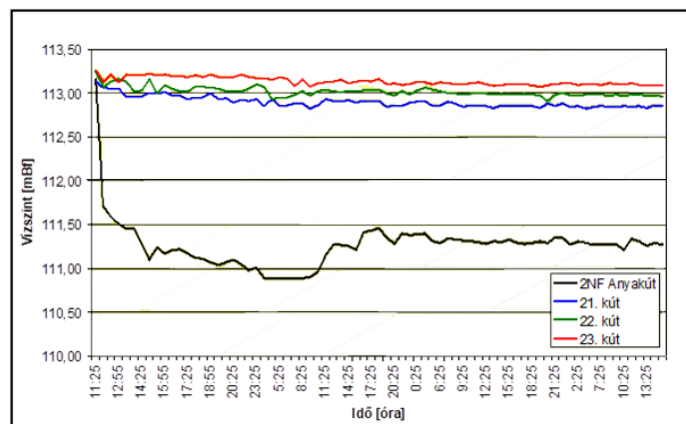
Mázsa téri terepi vizsgálat eredményei

Az anyakutat 130 l/min hozammal szivattyúzták 75,5 órán keresztül (13. ábra). A leszívás az anyakútban 2,0 m körüli (kvázi-permanensnek tekinthető szakaszon 1,89 m) vízszintcsökkenést eredményezett, a megfigyelőkutakban 0,1-0,4 m közötti süllyedés jelentkezett. A szivárgási tényező meghatározásához használt Dupuit-módszer egyik feltétele a vízzáró fekvésének ismerete. A talajfeltáró fúrások nem azonosítottak ilyen réteget, ezért a helyzetét három különböző mélységben feltételezték a számítások elvégzésekor:

az anyakút talpsíkján, az anyakút talpsíkja alatt két méterrel, illetve a geológiai feltárás alsó határán, mely nyolc méterrel fekszik mélyebben, mint a kút talpsíkja. A szivárgási tényező számításakor a homokos kavicsnak megfelelő homogén közeget és a feltételezett feküszintig mélyített teljes kutat vették figyelembe. A kitermelt hozamból, illetve az anyakútban és megfigyelőkutakban mért leszívásokból Dupuit-módszerrel számították a vízvezető átlagos szivárgási tényezőjét. A szivárgási tényező annál nagyobb értéket vett fel, minél kisebb rétegvastagságot feltételeztek az iszapos homok esetében. Ha a szivárgásban résztvevő teljes rétegvastagság 5 m, akkor a szivárgási tényező értéke $4,55 \cdot 10^{-4}$ m/s. 7 m-es rétegvastagság mellett $2,43 \cdot 10^{-4}$ m/s, 13 m-es értéknél $1,63 \cdot 10^{-4}$ értékre csökkent a szivárgási tényező átlag értéke (Hajnal és társai 2009, Jobbágy 2009).



12. ábra: Mázsa téri kutak helyszínrajzi elhelyezkedése (Jobbágy 2009)



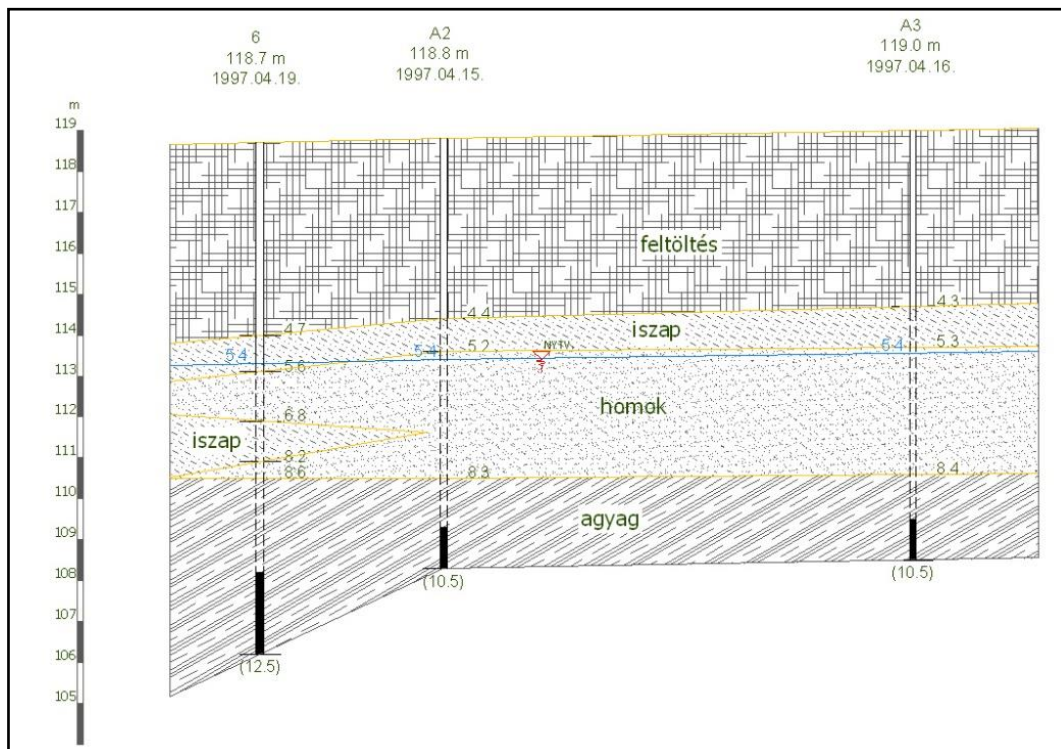
13. ábra: Kőbányán végzett szivattyúzás leszívási görbéje az anyakútban és három megfigyelőkútban (Hajnal és társai 2009)

Második mintaterület helyszínének bemutatása: Könyves Kálmán körút, Budapest

A Könyves Kálmán körút fejlesztéséhez kapcsolódóan 1997-ben készítettek talajmechanikai szakvéleményt, melynek részét képezte egy próbaszivattyúzás vizsgálat is a kivitelezési munkálatok során szükséges víztelenítési kérdések megoldására (FŐMTERV 1997a, 1997b). A kútcsoport az anyakútból (jele: 6) és 3-3 darab, egymásra merőlegesen elhelyezett megfigyelőkútból állt, melyek közül többre készült talajmechanikai vizsgálat. Az anyakút átmérője 165 mm, melyet egy 244 mm-es furatba helyeztek, talpmélysége 12,5 m. A talp fölött 2,0 m vastag iszapzsák készült, ezt egy 5 m-es szűrőzött szakasz követte. A résezt szűrő és a lyukfal közötti rést 2-3 mm-es gyöngykavicssal töltötték ki. A megfigyelőkutakat 203 mm-es furatba helyezték el, átmérőjük 125 mm, talpmélységük 10,5 m, szűrőzött szakaszuk szintén 5,0 m-es, az iszapzsák 1 m vastagságú. A szűrőzött szakasz alja mindegyik kútnál belenyúlik az agyagba, tehát a vizsgálatok során teljes kútként kezelhetők. A szűrőzött rész teteje döntően

a nyugalmi talajvízszint fölött található, így teljes hosszában szűrőzöttnek tekinthetjük a kutakat (Hajnal és társai 2009).

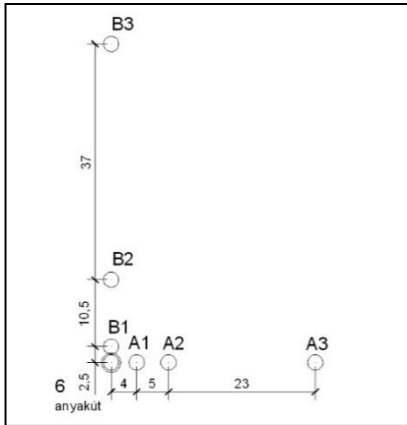
A vizsgált terület rétegsoráról (14. ábra) leolvasható, hogy a felszíntől számítva körülbelül 4,5 m vastag homok anyagú feltöltés található, ami alatt egy 1,0 m vastag iszapréteg húzódik. Ez egy 3,0 m vastag homokrétegre települt, mely helyenként kavicsszórványos, máshol iszapos jelleget vesz fel. A vízzáró fekélye jól behatárolható, mintegy 8,5 m-es mélységben található szürke kövér agyag alkotja (Hajnal és társai 2009).



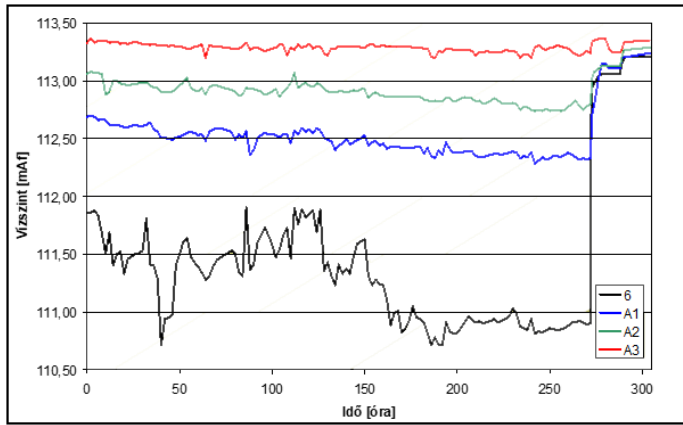
14. ábra. Rétegszelvény a Könyves Kálmán körút vizsgált kútsorához (Hajnal 2003)

Könyves Kálmán körúti terepi vizsgálat eredményei

Az anyakút, valamint a megfigyelőkutak elrendezése a 15. ábrán látható. A szivattyúzást 1997. április 23-tól május 5-ig, 264 órán keresztül végezték, majd két órás időközönként 28 órán át mérték a visszatöltődést (16. ábra). A szivattyúzás hozama átlagosan 6,5 l/min volt, amely mellett az anyakút utánpótlódása még elegendő volt a vizsgálat folyamatos fenntartásához. A nem egyenletes hozammal történt vízkitermelés miatt a szivattyúzás hatására az anyakútban kialakult leszívás 0-1 m közötti értékeket vett fel. A 16. ábrán a kvázi-permanensnek tekinthető 163-264 óra közötti időszak átlagos leszívás értéke 0,97 m volt. A megfigyelőkutakban a távolságtól függően 0,1-0,6 m depresszió alakult ki. A Dupuit-módszerrel végzett számítások az átlagos szivárgási tényezőt $1,70 \cdot 10^{-5}$ m/s-ban határozták meg (Hajnal 2003).



15. ábra. Könyves Kálmán körüti kutak helyszínrajzi elhelyezkedése (Jobbágy 2009)



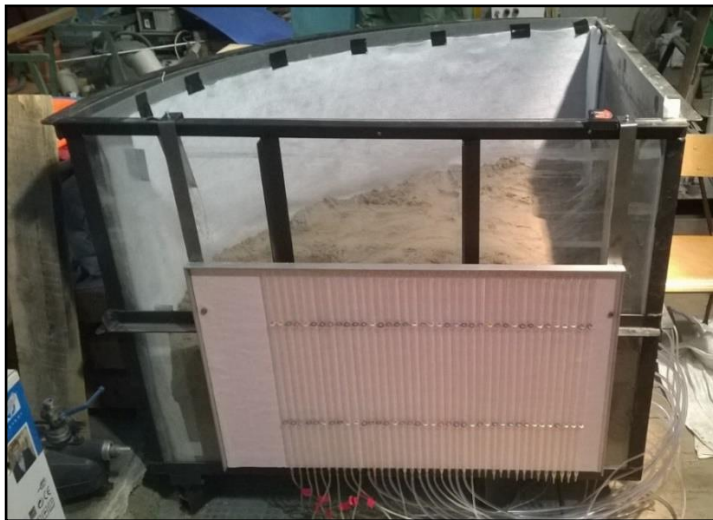
16. ábra. Könyves Kálmán körút leszívási-visszatöltődési időszora a vizsgált kútsorra vonatkozóan (Hajnal 2003)

5. MÉRÉSI ÉS SZÁMÍTÁSI MÓDSZERTAN

A mérési metodika kialakításához, valamint az adatok feldolgozásához alkalmazott módszerek megismeréséhez nagymértékben hozzájárultak korábbi, terepi próbaszivattyúzások elvégzésével nyert tapasztalataim (Hajnal és Farkas 2010, 2011, Farkas és Hajnal 2011, Hajnal és társai 2012a, 2012b). Az itt megszerzett ismereteimet sikeresen alkalmaztam laboratóriumi körülmények között is, főként, a talajminta szivárgási tényezőjének meghatározásánál.

5.1. KISMINTAMODELL PARAMÉTEREINEK ISMERTETÉSE

Saját méréseimet Dr. Hajnal Géza témavezetőm irányításával 2015-ben kezdtem, ekkor 116 db adatsort állítottam elő, majd 2018-2019 között újabb 453 db mérést hajtottam végre. A modell körcikk alaprajzú, a két oldalfal által közbezárt szög 90° (1. kép). A modell teljes sugara a kút tengelyvonalától 133,5 cm-re helyezkedik el. A teljes víztérig tartó hossz, azaz a modelltér sugara 128 cm. A modell magassága 100 cm, tömege körülbelül 100 kg, térfogata $1,4 \text{ m}^3$.



1. kép: A kismintamodellel való feltöltése (2015)



2. kép: Az alsó peremfeltételként szolgáló bukó (2015)



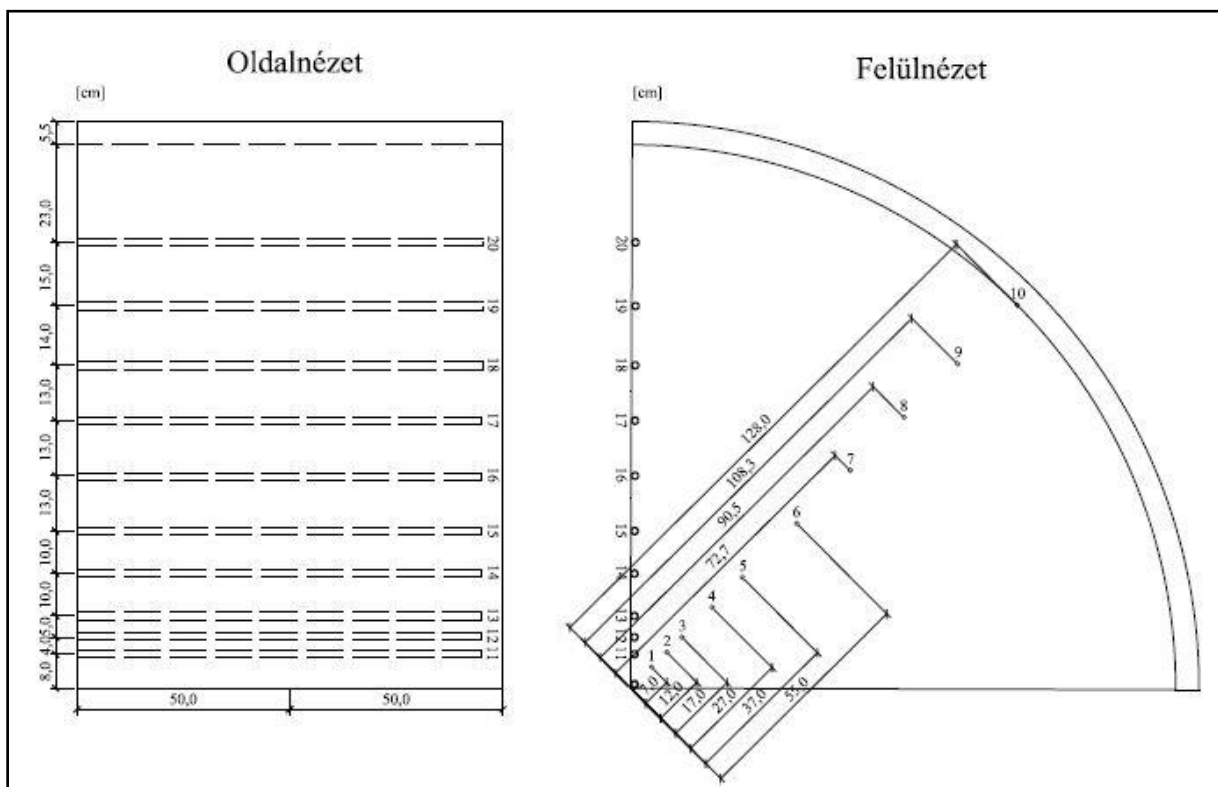
3. kép: Az oldalfali piezométerek, az anyakút és a megfigyelőkutak elhelyezkedése a modell belsejéből szemlélve (2015)



4. kép: Az oldalfali piezométerek bekötött állapotban a piezométertáblába (2015)

A 2011 óta gyűjtött mérési tapasztalatok áttekintése után úgy döntöttem, hogy 2015-ös vizsgálataim elkezdése előtt a kismintamodellen átalakításokat végzek. A stabil és jól szabályozható vízkitermelés érdekében az anyakútnál is a vízbevezetésnél használt bukót alkalmaztam (2. kép). A piezométer-kivezetések számát megnöveltem annak érdekében, hogy a modellterben kialakuló nyomásszintekről több információt nyerjek. A fenéklemezen végigfutó tíz piezométeren felül még húsz darabbal egészítettem ki a kismintát, ezzel összesen harminc mérési pontom lett. Az új piezométerek közül tizenötöt az anyakút közelében három függőleges oszlopban, egymástól 5 cm-re helyeztem el, a további öt darabot az anyakúttól 73 centiméteres távolságra, flexibilis csővel a modell szimmetriatengelyéig bevezetve helyeztem el (3. és 4. képek). Az anyakútban kialakuló vízszint méréséhez szintén flexibilis piezocsövet használtam. A vízszintek méréséhez öt darab megfigyelőkutat helyeztem el a modell áttetsző üvegfalán az anyakúttól 15, 20, 30, 45 és 70 centiméteres távolságban. Az észlelőkutak perforált csövek, melyeket szintén geotextíliával burkoltam, hogy megelőzzem a szilárd szemcsék bemosódását. A teljes modellkialakítást a 17. ábrán metszeteken, valamint axonometrikus módon is ábrázoltam.

piezométersorok az új méréseimhez nem szolgáltatnak nélkülözhetetlen információkat. Annak érdekében, hogy a kisminta alkalmassá váljon kúthidraulikai vizsgálatokra a termelőkút palástján három piezométert helyeztem el a kúttalptól 5, 15 és 25 cm-es magasságokban. Közvetlen a kút környezetében létesítettem egy negyedik piezométert is, mely a talajréteg és a kút körülvevő geotextíliaborítás között kapott helyet a kúttalptól 5 cm-es távolságban. Ezen és a kútpaláston fekvő piezométer segítségével nyomon tudtam követni a geotextília által okozott nyomásvesztést és annak esetleges időbeli változását is. A leszívást továbbra is a két bukó generálta, melyekbe egy-egy laborhőmérő került annak érdekében, hogy a modellbe be- és kilépő víz hőmérsékletét regisztrálni tudjam. A fizikai modellről készült 2018-as állapotot tükröző oldal- és felülnézeti ábrát a 18. ábrán közöltem.



18. ábra: A kismintamodell felépítése a 2018-as átalakítás után

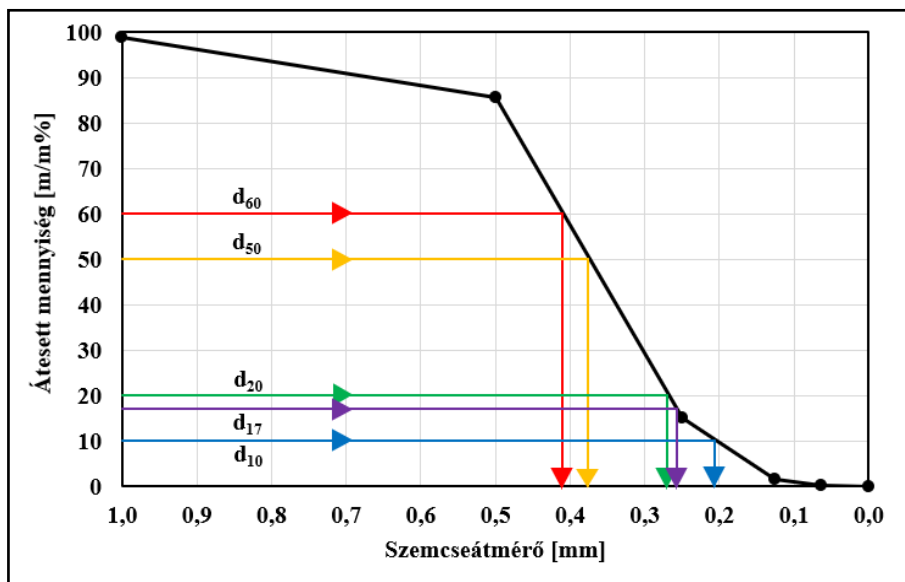
5.2. A VIZSGÁLT TALAJ JELLEMZŐI

A próbaszivattyúzás folyamatának és a kismintamodell használhatóságának vizsgálatához elsőként egy lehetőleg teljesen homogén, minél jobban tömörített talajra volt szükség, így kisebb valószínűséggel áll fenn az in situ talajmintákban előforduló heterogenitások „zavaró”, mérési eredményeket befolyásoló hatása.

A modellbe beépített talajminta 50 cm-es vastagsággal rendelkezett. A talaj tömörítését kézi erővel és eszközökkel végeztem, ügyelve az egyenletességre, viszont tökéletesen homogén

mintát közel lehetetlen előállítani. A minta telítését többször elvégeztem, törekedve a talajmintában maradó légbuborékok mennyiségének minimalizálására, teljes eltávolítására. Klotz (1971) cikkében bemutatta, hogy a légfázis jelenléte a szivárgási tényezőben körülbelül 30%-os eltérést okozhat. Kísérleti eredményei alapján hozzávetőlegesen 1,5 hónap alatt állandósultak a vízáteresztőképességre kapott értékek, tehát feltételezte, hogy ezen időtartam elegendő volt a levegő fázis távozásához a vizsgált talajszelvényből.

A kismintamodellbe 0-1-es szemátmérőjű osztályozott talajt építettem be, melyből mintát vettem és szabványos szitasorral kiértékeltem. A minta alapján előállított szemeloszlási görbe az 19. ábrán látható. A szemeloszlási görbe alapján leolvastam és kiszámítottam a legfontosabb jellemző értékeket, melyeket a 3. és 4. táblázatokban foglaltam össze, ahol d_{60} az átesett tömegmennyiség 60%-ához tartozó szemcseátmérő [mm].



19. ábra: A vizsgálat talajminta szemeloszlási görbéje (Farkas és társai 2019b)

A szemeloszlási görbe alapján a talajminta közepes homoknak sorolható be.

3. táblázat: A talajminta besorolása szemcseméret-eloszlás szerint

Szemcseátmérő tartomány [mm]	Besorolás szemcseátmérő alapján	Talajminta mennyisége [%]
0,5-2,0	Durva homok	14,5
0,25-0,5	Közepes homok	70,5
0,063-0,25	Finom homok	14,8
0-0,063	Iszap/agyag	0,2

4. táblázat: Szemeloszlási vizsgálatból meghatározott paraméterek (Farkas és társai 2019b)

Paraméter	Érték
d_{60} [mm]	0,410
d_{50} [mm]	0,374
d_{20} [mm]	0,268
d_{17} [mm]	0,257
d_{10} [mm]	0,204
U [-]	2,01

5.3. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

5.3.1. *Permanens mérések kivitelezése*

A kismintán végzett permanens mérések során az anyakútban különböző mértékű leszívást hoztam létre az alsó bukó szintjének, és így a kitermelt hozamnak a változtatásával. A felső peremfeltétel és az anyakútban kialakult vízszint közötti nyomáskülönbséget 3 cm-es lépcsőnként változtattam. A bukók alkalmazása biztosította a felső és alsó peremfeltételek között az időben állandó nyomáskülönbséget, ennél fogva a kitermelt vízhozam időben nem változott. A különböző peremfeltételek hatására kialakuló leszívási görbéket a piezométerekben és a megfigyelőkutakban kialakult nyomásszintek alapján rögzítettem milliméteres pontossággal. Adott peremfeltételek mellett elvégzett vizsgálatot abban az esetben tekintettem időben állandónak, ha két egymás után regisztrált mérés során ugyanazon értékeket kaptam a nyomásszintek tekintetében. Kis leszívások esetén a permanens állapotot körülbelül fél óra alatt el lehetett érni, nagyobb szintkülönbségekkel ehhez esetenként néhány nap volt szükséges.

A vízszintek észlelése után az anyakút vízhozamát mértem meg köbözéssel, melyhez egy stopperórát és egy mérőhengert használtam. A vízhozammérést egymás után háromszor végeztem el, majd ezeket átlagoltam, hogy minél pontosabb értéket kapjak.

A mérési eredmények kiértékelésénél Dupuit szabad felszínű víztartókra érvényes összefüggését alkalmaztam (5. egyenlet). Dupuit-módszer segítségével a kismintában elvégzett egyes mérések mindegyikénél kútpárokat alkottam a megfigyelőkutakból, majd az adatokból szivárgási tényezőket számítottam, így a 2015-ös méréseknél 10 darab, a 2018-19-es méréseknél 45 darab szivárgási tényezőt állítottam elő. Ezen értékeket átlagolva egy-egy mérésre kiszámoltam az átlagos szivárgási tényezőt, mely a teljes modellteret jellemezte. A 2015-ös méréssor alatt 116 darab, a 2018-2019-es méréssor alatt 453 darab permanens vizsgálat történt.

5.3.2. Nempermanens mérések kivitelezése

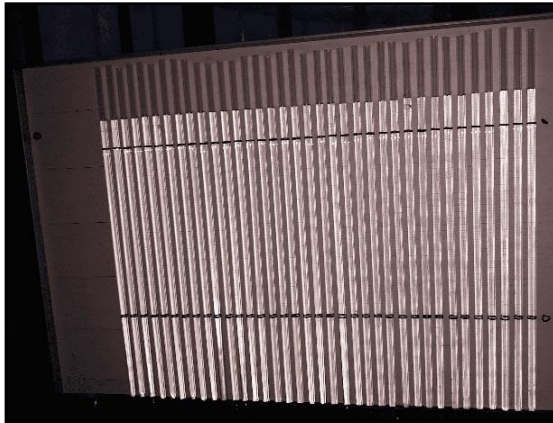
Az időben állandósult szintekkel elvégzett vizsgálatokon túl nem permanens méréseket is végeztem, amely során megfigyeltem, hogy adott leszívásnál az idő függvényében hogyan változnak a modelltér egyes pontjaiban a nyomásszintek. A mérésekhez egyidejű leolvasások szükségesek mindegyik megfigyelőkútról, ezért szükségesnek láttam kép- vagy videórögzítő eszköz alkalmazását. Az FI9903P IP típusú kamera egy állványhoz lett erősítve annak érdekében, hogy felvétel közben a kamera mozdulatlan maradjon, majd a piezométertábla elé helyeztem és az egyes méréseket internetes kapcsolaton keresztül számítógépen, valós időben követhettem nyomon.

A mérés kezdeti időpontját a vízkitermelés elindítása jelentette, tehát az alsó peremet szabályozó bukó előre meghatározott nyomásszintre történő beállítása. Az alsó perem beállításával a piezotáblán láthatóvá váltak az anyakútban, valamint a megfigyelőkutakban bekövetkező nyomásszint-változások. A vízkitermeléstől eltelt időtartamtól függő sűrűségben felvételeket készítettem az időben változó vízszintekről. Ezeket a lépések között több szakirodalom és műszaki irányelv is tárgyalja, viszont helyenként nagy eltérések figyelhetők meg az ajánlott értékekben. A szakirodalmak által javasolt időközöket az M5/2. táblázatban láthatjuk. Az időtartamokat összevetve és a kismintamodellzés méretcsökkentő hatását is figyelembe véve meghatároztam az általam alkalmazandó időlépéseket, amivel a lehető legpontosabban és leghatékonyabban ki lehet mutatni a nyomásszintek időbeli változását. Az M5/2. táblázatban megadott értékeket a kisminta méretei miatt C geometriai arányszámmal osztani kell, így jutunk el az ajánlások modellben alkalmazható időlépéseikhez (5. táblázat).

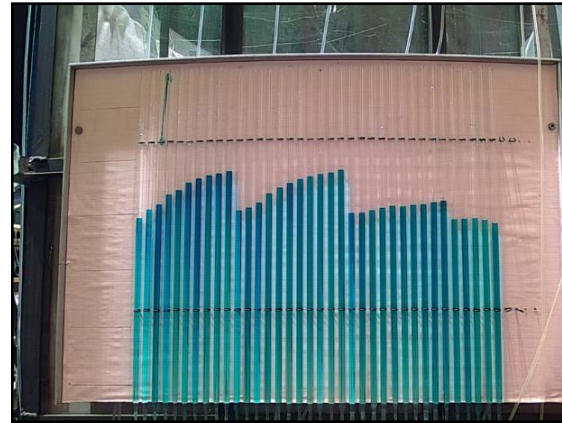
5. táblázat: A mérések során alkalmazott vízszintmérések gyakorisága

Szivattyúzás kezdete óta eltelt idő [min]	Vízszintmérés gyakorisága [min]
0-1	1/60
1-5	1/12
5-10	1/6
10-20	1/3
20-30	1/2
30-60	1

Az eredmények szoftveres feldolgozása során akadályt jelentett, hogy a fényképeken nem lehetett tisztán kivenni az egyes csövekben beálló pontos vízszintet (5. kép), ezt a további mérések elvégzésénél a víz megfestésével lehetett orvosolni (6. kép).

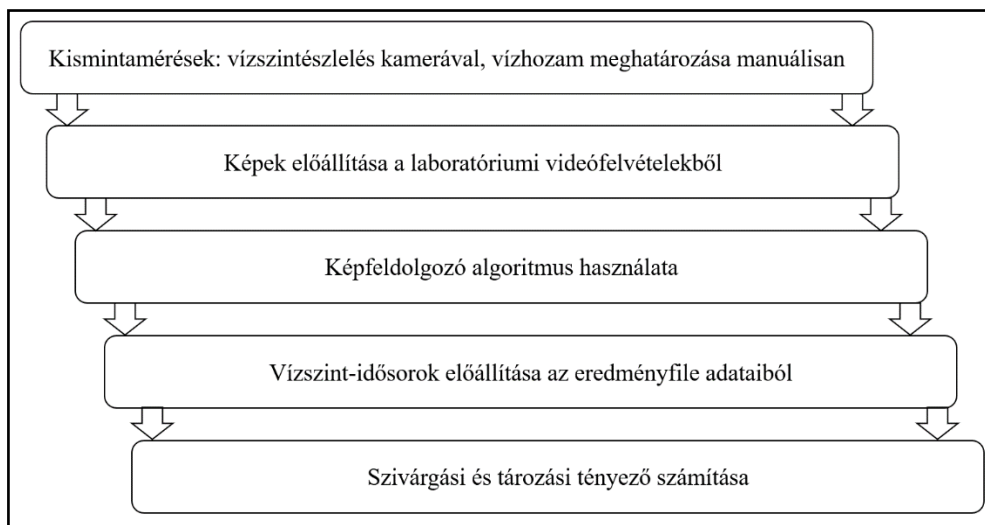


5. kép: Piezométertábla eredeti színekben



6. kép: Festett vízű piezométertábla

A szoftveres kiértékelés eredményeként egy olyan file állt elő, mely tartalmazta az anyagút, a piezométerek és a megfigyelőkutak idősorait pixelekből kifejezve, amit a képarány és a piezotáblán szereplő skálázás alapján átszámítottam valós méretekre. (A kiértékelés algoritmusát Dr. Havasi-Tóth Balázs készítette.) A szabadfelszínű vízadóra módosított Theis-képlet segítségével előállítottam a tíz darab megfigyelőkút adatsoraira vonatkozó görbéket.



20. ábra: Nempermanens eredmények előállításának folyamata

5.4. NEMLINEÁRIS ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA

A próbaszivattyúzás-vizsgálatok, kutakból történő termelés esetén a lehető legkisebb talajbeli és kútkörüli veszteségekre kell törekedni, ugyanis az elméleti összefüggések többsége lamináris áramlást feltételez, továbbá ezzel a termelés hatékonysága is növelhető. A modelltér áramlási viszonyainak megállapítására a 20. egyenletet használtam fel, melyet a szakirodalomban alkalmasnak találtak a kismintába beépített talajmintához hasonló mértékadó szemcsenagyságú ($d_{50}=0,38$ mm) porózus közegekben a Reynolds-szám meghatározására (1. táblázat).

$$Re = \frac{v \cdot d_{50}}{\nu} \quad [20]$$

Ahol:

- Re Reynolds-szám [-]
- ν kinematikai viszkozitás [m^2/s]

Számításaim során a kinematikai viszkozitást mindig az aktuális méréskor regisztrált vízhőmérséklet alapján vettem figyelembe. Az áramlási sebességet az anyakút tengelyétől tetszőleges sugárban a kitermelt hozam és az áramlási felület hányadosaként kaptam meg. Az áramlás a kismintamodellben sugárirányú és hengersizmetrikus. Ebből az következik, hogy a termelőkúttól tetszőleges távolságban lévő ponthoz tartozó áramlási felület is hengerfelület, melynek magassága az ott uralkodó vízszintnek felel meg. A modelltér áramlási viszonyainak leírásához a megfigyelőkutak által kirajzolt leszívási vízfelszínzt használtam fel. A kisminta negyedhenger alakjából kifolyólag az áramlási felületek sem teljes hengereknek feleltek meg, csupán a negyedüket kellett figyelembe venni.

6. táblázat: Szakirodalmi ajánlások a 20. egyenlet alkalmazhatóságával kapcsolatban

Szerző(k)	Re_{crit} [-]	Szemcseátmérő [mm]
Nagy és Karadi (1961)	5	0,15 – 12,00
Williams (1985)	30	0,15 – 5,43

Laboratóriumi eredményeimre vonatkozó Re_{crit} meghatározásában a Williams (1985) által bemutatott módszert alkalmaztam, ahol a mérésekből származó Reynolds-számokat a hidraulikus gradiens függvényében, logaritmikus skálán ábrázoltam.

5.5. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK

A szivárgási tényező vizsgálata mellett az általam használt kismintamodell alkalmasnak bizonyult kúthidraulikai jelenségek megfigyelésére is. Az alábbiakban ennek módszertanát mutatom be.

A kismintamodellen végzett méréseim során a kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadásra irányuló vizsgálataimnál a 13. egyenlet h_{cs} tagját tudtam kimutatni, ezért a továbbiakban ezzel a komponenssel fogok részletesebben foglalkozni. A kúthidraulikai vizsgálatokat három különböző anyakúttal végeztem. A teljes henger alakú termelőkutakat csupán a palástok azon negyedében (90° -ban) perforáltam, mely a modelltér felé néz, ezzel biztosítva azt, hogy az áramlást a kúttól távolodva a modelltér minden pontjában hengersizmetrikusnak lehessen

feltételezni. Az anyakutak egyaránt 5%-os áteresztőfelülettel készültek el, tehát a perforált terület csupán 5%-a volt a figyelembe vett palástszakasznak. A kutak közötti különbséget a perforáció átmérője adta: 1,0 mm, 2,0 mm és 2,5 mm-es kör alakú lyukakkal került kialakításra a nyílt felület, így az 1,0 mm-es kúton jóval több lyukat kellett kialakítani, hogy ugyanazt az áteresztő felületet tudjam biztosítani (M20/11. táblázat). A perforációt 60 cm hosszban végeztem el a kúttalptól, a lyukak kiosztását centiméterenként egyenletesen osztottam el. Ezek a feltételek azért voltak szükségesek, hogy az 50 cm vastagságú talajréteg minden pontjában, minden leszívás esetén biztosítva legyen az a feltételezés, hogy az anyakút teljes kút. Az M20/8. és M20/9. ábrákon az anyakutak perforálásáról készült képeket láthatjuk.

A kismintamodellezés során figyelmet kell fordítani a hőmérsékletfüggő folyamatokra, mivel a viszkozitás befolyásolhatja a szivárgás- és kúthidraulikai vizsgálatok eredményeit. Öllős (1958) és Klotz (1971) vizsgálataik során szabályozták a modelljükbe táplált víz hőmérsékletét. A hőmérsékletváltozást nemcsak a fizikai méréseknél, hanem numerikus modellezés során is figyelembe kell vennünk, főként a kúttellenállás vizsgálatával kapcsolatosan (Székely 2011). Vizsgálataim alatt nem tudtam a betáplált víz hőmérsékletét állítani, viszont minden méréskor feljegyeztem az értékét a felső és alsó peremben elhelyezett hőmérő alapján. A mérések közötti hőmérsékletkülönbségek a víz viszkozitásának megváltozása miatt torzíthatták a laboratóriumi eredményeimet, ezért az anyakút leszívás értékeit úgy arányosítottam, mintha a vizsgálatokat állandó hőmérsékleten végeztem volna el. Ehhez a víz viszkozitását és hőmérsékletét leíró függvényre volt szükségem, melyet az M21/10. ábrán láthatunk. Szakirodalmi adatok alapján a leszívás adatok normálását 10°C-ra számítottam át, mivel ez az érték talajvizeknél ez egy általánosan elfogadott értéket képvisel (Klauder 2010).

5.6. KISMINTAMODELL VIZSGÁLATA NUMERIKUS MODELLEZÉSEL

A numerikus modellváltozatokat a FEFLOW 7.0 végeses elemes szoftverrel készítettem el a kisminta 2015-ös állapotát és mérési adatait leképezve. A célom az volt, hogy egy olyan numerikus modellt építsek, mely a lehető legjobban közelíti a fizikai kismintában mért víznyomásértékeket, a leszívási vízfelszínt. A modell kalibrálása során megállapítható a talajminta szivárgási tényezője. A további, független adatsorokkal történő modelligazolás alapján pedig meghatározható egy érvényességi tartomány, melynél a numerikus modell kellő pontossággal adja vissza a megkívánt értékeket. A numerikus modellel kiszűrhetők a fizikai modelltől olyan folyamatok, melyek befolyásolták az eredményeket, viszont nem számoltam velük.

5.6.1. Modellépítés

A FEFLOW szoftver segítségével háromdimenziós modellt hoztam létre a laboratóriumi kísérletek igazolására. A kisminta negyed kör alaprajzú, melyet a végeselem módszer által alkalmazott háromszöghálós rácskiosztás tökéletesen le tud követni.

Az elemek oldalhossza kb. 2 cm volt, ezt a termelőkút, a megfigyelőpontok és a peremek közelében sűrítettem. A vertikálisan elhelyezkedő piezométerek közötti távolság 10 centiméter a kismintamodellben. A numerikus modell vertikális rácssűrűségét ennek a távolságnak a felére választottam, így tíz rétegre osztottam fel, melyek egyenként 5 cm-es vastagsággal rendelkeznek.

A numerikus modellbe beépítettem a 30 darab piezométert, valamint az 5 darab megfigyelőkutat is. A vízbevezetésnél a bukószintnek megegyező, az adott méréshez tartozó fix potenciál típusú peremfeltételt hoztam létre a modell hengerpalástjának felületén. Az anyakutat nem termelőkútként helyeztem el a modellben, hanem itt is egy fix potenciál peremfeltételt adtam meg, melynek szintje megegyezett a kútban mért vízzszinttel az egyes mérések permanens állapotának beállta után.

A kalibrálást az abszolút hiba tekintetében 1 mm pontossággal kívántam elvégezni, mivel ilyen pontossággal történtek a leolvasások a fizikai modell mérései alatt.

5.6.2. Modellváltozatok összefoglalása

Laboratóriumi szivárgási tényezővel végzett modellváltozat

A numerikus vizsgálatok során három különböző modellt készítettem el. Az elsőben a szivárgási tényező az egész modellterületre a 2015-ös labormérésekből meghatározott érték volt.

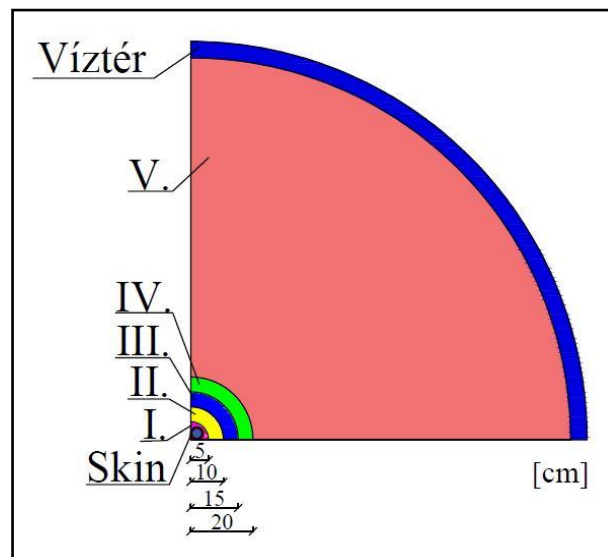
Az elvárt minél pontosabb kalibráció szükségessé tette az alkalmazott szivárgási tényező nagyságának és eloszlásának a módosítását, mivel feltételezhető, hogy vertikális és horizontális értelemben is bizonyos fokú inhomogenitás jellemezheti a vizsgált talajmintát, melynek mértéke a termelő kút környezetében fokozottabban jelentkezhett.

A mérésekkel való legpontosabb egyezés vizsgálata – FA modell

Az FA modell célja a numerikus modell oly módú kalibrálása volt, hogy a lehető legkisebb abszolút hibát érjem el, ehhez a modellteret több különböző szivárgási tényezőjű területre osztottam fel. A zónák határainak kiválasztásánál az volt a fő szempont, hogy az egyes piezométerek egymástól független térrészeket kapjanak, ezen kívül az anyakút körül kialakult, finomanyag kimosódással feltehetőleg nagyobb mértékben terhelt zónát a piezométerektől

függetlenül kezeljem. Az itt felsorolt szempontok alapján kialakítottam egy zónarendszert, melynek részletes paraméterei a következők (21. ábra):

- Az 1,7 cm átmérőjű anyakút celláit külön zónaként kezeltem. A zóna az „Anyakút” elnevezést kapta.
- Az anyakút körül létrehoztam egy „Skin” nevezetű zónát, melynek vastagsága 4 mm a kút körül. Ez körülbelül megegyezik a kút fal és a geotextília vastagságával, mely körülvette az anyakutat. A „Skin” zóna vertikális értelemben körülveszi a teljes modellvastagságban a termelőkutat.
- I. zóna: Felülnézeti (x-y sík) értelemben a modell sarokpontjától („0” pontjától) 5 centiméteres sugarú térrészt ölel fel, viszont az „Anyakút” és a „Skin” zónákat értelemszerűen nem tartalmazza. Függőleges értelemben végigfut a teljes modellen. Nem tartalmaz piezométereket.
- II. zóna: A modell sarokpontjától számított 5-10 cm közötti sugarú hengercikk tartozik ide. A 17. ábra alapján leolvashatjuk, hogy az 1., valamint a 11-15. közötti sorszámú piezométerek tartoznak ide.
- IV. zóna: A sarokponttól 10-15 cm közötti sugarú hengercikket jelöli. A 2. és a 16-20. közötti piezométerek esnek ide.
- IV. zóna: A sarokponttól 15-20 cm közötti sugarú hengercikket jelöli. A 3. és a 21-25. közötti piezométerek esnek ide.
- V. zóna: A sarokponttól 20-128 cm közötti sugarú hengercikket jelöli.



21. ábra: Az FA modell zónáinak kiterjedése

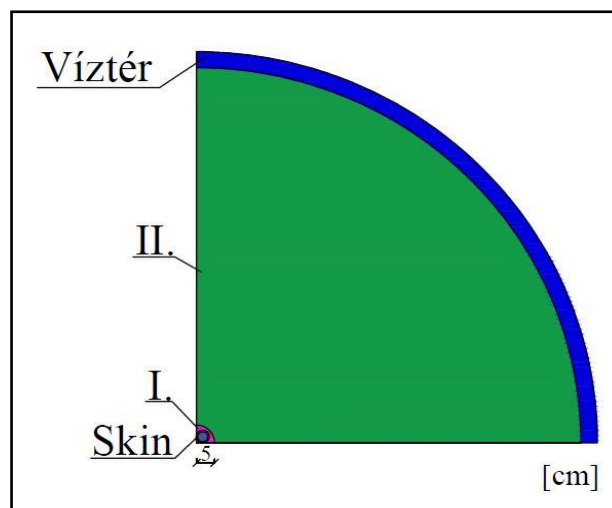
A II-V. zónákat vertikális értelemben tíz egyenlő rétegre osztottam fel, ez megegyezik az 5.6.1. fejezetben bemutatott felbontással.

A felsorolásból kiderül, hogy a modellt 43 darab külön zónára osztottam fel. Ez a szám nagyon soknak tűnhet, viszont hozzá kell tenni, hogy a 43 darab zónából 33 darab a modell térfogatának csupán 2,5%-át teszi ki (a modell sarokpontjától maximálisan 20 cm-es sugárban levő pontok összessége). A kút körüli nagy felbontást szükségesnek tartottam annak érdekében, hogy a próbaszivattyúzás során kialakuló vízfelszín és a szivárgási tényező eloszlást lehetőségemhez mérten pontosan közelítsem.

A leszívás távolhatásának vizsgálata – FB modell

A kismintamodell egyik lehetséges felhasználási területe a különböző talajokban kialakított kutak távolhatásának vizsgálata, melyhez a leszívási vízfelszín minél pontosabb mérésére van szükség. Egy erre alkalmas numerikus modellváltozat felállításához csak a kismintamodell alján található 10 darab piezométert vettem figyelembe, mivel ebben az esetben nem céлом a kút közvetlen környezetének részletes vizsgálata, így tehát elegendőnek ítéltam egy jóval kevesebb paraméterből álló numerikus modell alkalmazását.

Összesen 3 darab zónát alakítottam ki horizontális értelemben, melyek mind a 10 rétegen keresztül futnak a modellben. Az anyakút körül meghagytam a „Skin” és az I. területeket. A harmadik zónát a modell többi része alkotja (a korábbi II-V. zónák összessége), mely a teljes modellterület 99,8%-át teszi ki. Ez tehát egy elég egyszerű, jóval homogénebb modellváltozat, mint az „FA” jelű (22. ábra).



22. ábra: Az FB modell zónáinak kiterjedése

5.7. KISMINTAMODELL IGAZOLÁSA TEREPI MÉRÉSEKKEL

A kismintával kapott eredmények valós körülmények közötti használhatóságát a leghatékonyabban úgy ellenőrizhetjük, ha rendelkezésre áll olyan terepi, valós méretben elvégzett próbaszivattyúzás, mely részben vagy egészben megfeleltethető a laboratóriumban észleltekhöz. A laboratóriumi mérések átszámítása valós méretre a 3.5.2. fejezetben ismertetett Mosonyi-Kovács-modelltörvény szerint történt, a részletes levezetést ott ismertettem.

A geometriai arányszámot a valós és a laborban alkalmazott anyagutak átmérői alapján számítottam ki. A kinematikai hasonlóságot leíró arányszám (C_l) azonos C -vel, a szivattyúzás hatására kialakuló leszívási értékek átszámítása C szerint, a vízhozamoké C^2 szerint történik. A valós (Q_v), valamint kisminta léptékben (Q_m) kialakuló vízhozamokat az 21. és 22. egyenlet írja le, ahol k_v és k_m a szivárgási tényező, I_v és I_m a hidraulikai gradiens, A_v és A_m szivárgási felület a két különböző méretben.

$$Q_v = k_v \cdot I_v \cdot A_v \quad [21]$$

$$Q_m = k_m \cdot I_m \cdot A_m \quad [22]$$

A két egyenlet hányadosából kapjuk a 23. egyenletet, ahol a geometriai hasonlóság következtében $\frac{l_v}{l_m} = 1$, emellett C_k a szivárgási tényezők hányadosából képzett arányszám:

$$Q_v = Q_m \cdot C_k \cdot C^2 \quad [23]$$

Amennyiben ugyanazon minőségű talajmintákat vizsgálunk, ahol $C_v = C_m$, úgy $C_k = 1$ értéket vesz fel (Farkas 2021).

6. EREDMÉNYEK

6.1. TALAJMINTA SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐJÉNEK MEGHATÁROZÁSA

A 2015-ös évben, valamint 2018-2019-es időszakban permanens és nempermanens méréseket végeztem, melyeknek célja a próbaszivattyúzás folyamatának jobb megismerése, valamint a minta talajfizikai paramétereinek meghatározása (szivárgási tényező, tárolási tényező). A vizsgálatok eredményeit ebben a fejezetben ismertetem.

6.1.1. A 2015-ös permanens mérések eredményei

Az 5.1-es fejezetben bemutattam, hogy 2015-ben kezdtem meg a méréseimet, melyek ekkor elsősorban a további vizsgálati irányok kijelölését célozták meg. Az ekkori eredmények közül a teljes kút esetében végzett méréseket a Dupuit-módszer segítségével ki lehetett értékelni, így meg lehetett határozni a talajminta szivárgási tényezőjét. A számítások a megfigyelőkutak adatai alapján történtek (5. egyenlet). Egyes kútkialakítások esetén előfordultak hibás vagy zavart mérési eredmények, melyek például a laboratórium vízrendszerében történő nyomásesés miatt következhetek be (az oktatási célú egyéb mérések megnövekedett vízigénnyel jártak, ez okozta a nyomásingadozást). A hibásnak vélt vizsgálatokat nem értékeltem ki, így a teljes kút esetében 15 darab mérést lehetett feldolgozni, ezt mutatja be a 7. táblázat. Az itt kiszámított átlagos szivárgási tényező értékét a numerikus modellezés során, mint kezdeti bemenő adatot használtam fel.

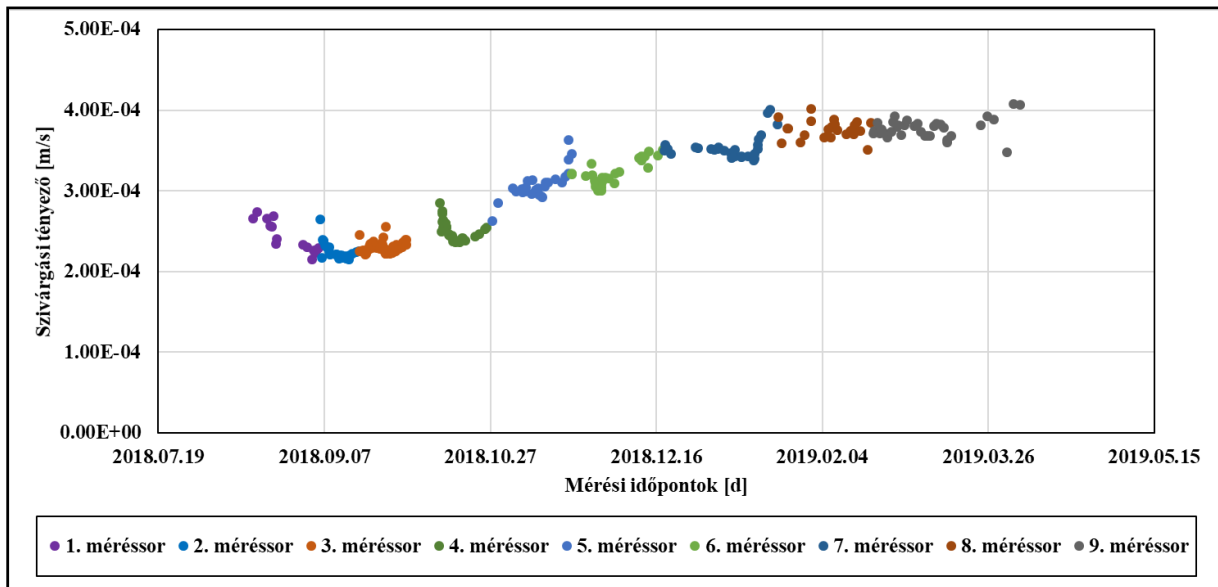
7. táblázat: A 2015-ös teljes kúttal végzett kismintamérések kiértékelése Dupuit-módszerrel.

Sorszám	1	2	3	4	5
k [m/s]	2,79E-04	2,75E-04	2,74E-04	2,75E-04	2,46E-04
Sorszám	6	7	8	9	10
k [m/s]	3,02E-04	3,38E-04	3,26E-04	3,36E-04	3,24E-04
Sorszám	11	12	13	14	15
k [m/s]	2,74E-04	2,71E-04	2,78E-04	2,90E-04	3,12E-04
Átlag	2,93E-04				
Minimum	2,46E-04				
Maximum	3,38E-04				
Szórás	2,79E-05				

6.1.2. A 2018-19-es permanens mérések eredményei

A 2018-2019-es mérésorozatot alatt a 2015-öshöz képest igen nagyszámú permanens adatsort állítottam elő, így ezeknek a kiértékelését – noha a módszer azonos volt – külön tárgyalom. Ezen mérések alatt kimutathatóvá vált az időbeli változás a számított szivárgási tényezők értékében. Ezt a 23. ábrán mutattam be. A különböző színnel jelölt pontthalmazok a különböző

mérősorokat jelölik. A mérősorok hossza két hét és két hónap között változott, viszont ez nem befolyásolta az adatok pontosságát, csupán az egyes mérések között eltelt időtartamok nőttek meg. Az 1-3. mérősorok az 1,0 mm, a 4-9. adatsorok a második beépített termelőkúttal végzett mérések, azaz a 2,5 mm perforációjú anyakúttal kapott eredményeket ábrázolják.



23. ábra: A teljes modellterre számított átlagos szivárgási tényező értékek változása az idő függvényében (Hegedűs 2019, Farkas és társai 2021)

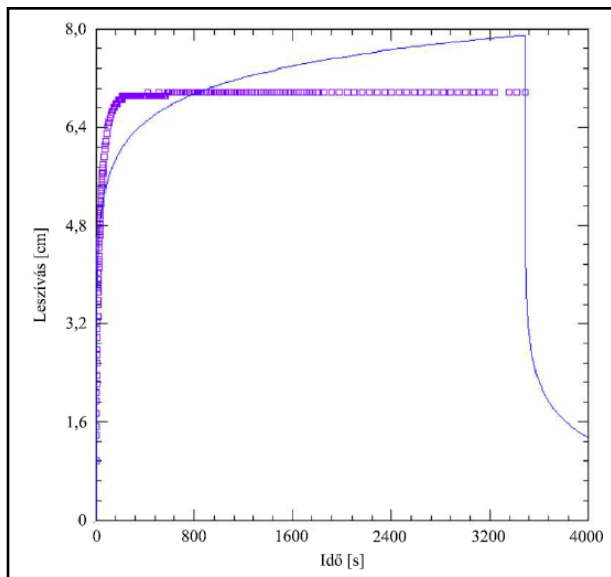
A 23. ábrára tekintve láthatjuk, hogy kezdetben az 1. és 2. mérősoron csökkenő tendencia figyelhető meg a szivárgási tényező értékekben. A talajminta telítését követő mérések során főként az anyakút, a hozzá közeli megfigyelőkutak és piezométerek flexibilis csöveinek falán nagy mennyiségben felhalmozódott légbuborékok voltak megfigyelhetők, így feltételeztem, hogy a szivárgási tényező csökkenését a talajmintából távozó légfázis okozhatta (M22/11. ábra). Emellett valószínűsítettem a talajszemcsét szivárgás hatására meginduló átrendeződését is, amely idővel szintén lecsengő folyamatnak tekinthető. A csökkenő szakasz után a közel állandósultnak tekinthető 2. adatsor 27 darab mérésére (M23/12. táblázat) kiszámítottam egy időben átlagolt szivárgási tényező értéket, mely $2,25 \cdot 10^{-4}$ m/s-ra adódott (szórás $1,05 \cdot 10^{-5}$). Erre az értékre a későbbiekben „Dupuit 2018-2019”-ként fogok hivatkozni. A 2018-2019-es mérősort azért ez az érték képviseli, mert időben ez van legközelebb a 2015-ös adatsorhoz, amely alapján analitikus kiértékelés és a numerikus modellezés is készült, valamint a nempermanens vizsgálatokat is ezen intervallumon végeztem (6.1.3. fejezet). Így feltételezhető, hogy a szivárgási tényező időbeli változása nem fog hibát okozni az egyes módszerek eredményeinek összehasonlításánál.

A 23. ábra 3. mérőssorát követően megtörtént az anyakút cseréje (M22/12. ábra) a kismintában, melyet követően a minta telítését újból el kellett végezni. A 4. mérőssor lefutásán láthatjuk, hogy a szivárgási tényező értékekben az 1. mérőssorhoz hasonló csökkenés következett be, viszont a változás sokkal hamarabb végbement. A csökkenő szakasz megjelenése a talajminta ismételt telítési folyamatával magyarázható. Az időtartam különbözőségének valószínűsíthető oka, hogy a talajszemcsék átrendeződése csak a kúthoz közeli tartományban következett be, a modelltér nagy részén ez a folyamat már lezajlott és a kútcseré nem befolyásolta a kialakult talajszerkezetet. A modelltérre számított átlagos szivárgási tényező körülbelül két hónapig folyamatosan nőtt (5-6. mérőssorok), amit okozhatott a kút környezetében levő talaj konszolidálódása, valamint a kisebb átmérőjű szemcsék elmozdulása, esetleges kimosódása az új anyakút nagyobb perforációmérete következtében. A talajminta szivárgási tényezője 2019. január közepétől közel állandónak tekinthető, az adatsorban jelentős trend nem mutatható ki. A már állandósult szakasz (8-9. mérőssorok) átlagos szivárgási tényező értéke $3,77 \cdot 10^{-4}$ m/s (szórás $1,15 \cdot 10^{-5}$). Az adatsorokban helyenként megfigyelhető néhány kiugró érték, mint például az 5. vagy a 7. mérőssor végén. Ezek nagyon kis leszívásoknál kapott átlagos szivárgási tényező értékek, melyekkel kapcsolatban felmerülő problémákra a numerikus modellezéssel foglalkozó 6.5.1. fejezetben fogok kitérni. A teljes idősorokat is átlagoltam egy-egy kútnál: az 1,0 mm-es perforációjú anyakúttal végzett 1-3. mérőssorokra kapott időben átlagolt szivárgási tényező $2,31 \cdot 10^{-4}$ m/s (szórás $1,29 \cdot 10^{-5}$), a 2,5 mm-es perforációjú anyakúttal végzett 4-9. mérőssorokra pedig $3,31 \cdot 10^{-4}$ m/s (szórás $4,77 \cdot 10^{-5}$).

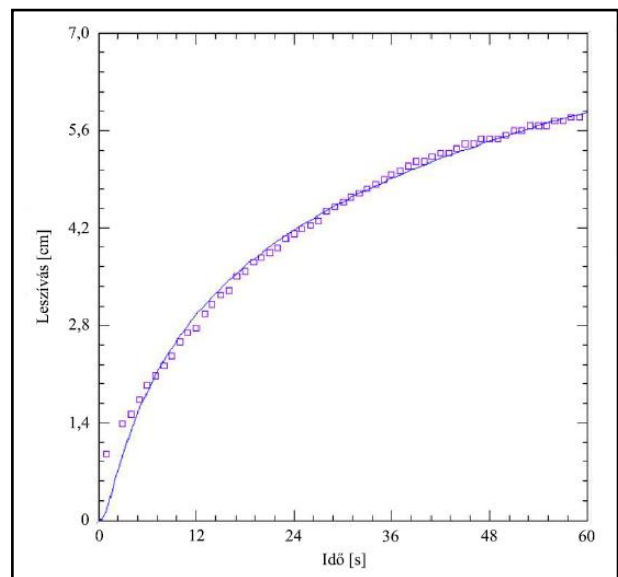
6.1.3. Nempermanens mérések eredményei

Az időben állandósult mérések mellett a leszívás kezdeti szakaszán megfigyelhető nempermanens adatsort szabadfelszínű vízádóra módosított Theis-képlet segítségével vizsgáltam. A módszer segítségével előállítottam a tíz darab megfigyelőkút adatsoraira vonatkozó, legkisebb négyzetes hibát okozó görbéket. A modelltérben kialakult vízszintek a mérés kezdete után egy perccel elérték a kvázi-permanens állapotot, mikor is a megfigyelőkutakban mért vízszintek csökkentek, viszont az egymáshoz viszonyított szintváltozásuk zérus volt. Körülbelül még egy perc elteltével a leszívási görbe permanens állapotot vett fel. A teljes, egy órán át mért leszívás adatsorra nem kaptam jó illeszkedést (24. ábra), mivel a Theis-módszer a tisztán nem permanens leszívási periódusokra alkalmazható, így a kiértékeléshez csak a vizsgálatok első egy percét vettem figyelembe. A 25. ábrán az 1. megfigyelőkút példáján látható, hogy a leszívás-idősorok nem permanens szakaszára az elméleti Theis-görbe jól illeszkedett (Farkas és társai 2019b).

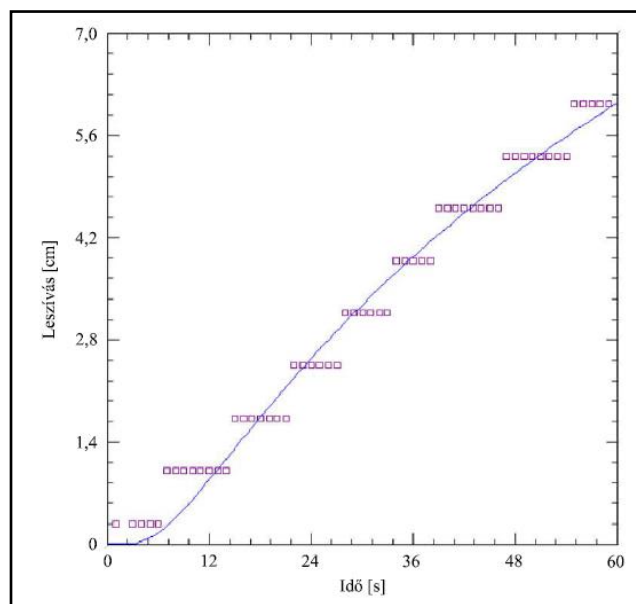
A 9-10. megfigyelőkutak vízszintjei az idő függvényében a termeléshez közelebbi kutak szintjeihez képest lassan változtak. Ez az anyagúttól való nagyobb távolsággal, valamint a felső peremfeltétel közelségével magyarázható. A 26. ábrán a 9. megfigyelőkút leszívás-idősora látható, mely szemlélteti az időben lefolyó lassabb változást. Mivel a 9. és 10. megfigyelőkutak adatsoraira kevésbé illeszkedtek jól az elméleti görbék, ezért az átlagos szivárgási tényező és tározási tényező számításánál az ezekből a kutakból származó eredményeket nem vettem figyelembe. A többi megfigyelőkútra illesztett görbét a M24/13., M24/14., M24/15., M24/16., M25/17., M25/18., M25/19., M25/20. ábrákon láthatjuk (Farkas és társai 2019b).



24. ábra: Az első megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel a teljes mérési időre (Farkas és társai 2019b)



25. ábra: Az első megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel az első egy percre vonatkozóan (Farkas és társai 2019b)



26. ábra: A kilencedik megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel (Farkas és társai 2019b)

A mérés technikai nehézségek miatt négy nempermanens vizsgálat készült különböző leszívási- és hozamértékekkel. Ezek Theis-módszerrel történő kiértékeléséből – megfigyelőkutanként – szivárgási tényező és tárolási tényező értékeket kaptam. Az egyes megfigyelőkutakra kapott értékeket mérésenként átlagoltam. Az eredményeket a 8. táblázatban foglaltam össze.

8. táblázat: A nem permanens mérések Theis-módszerrel feldolgozott eredményei (Farkas és társai 2019b)

Megfigyelőkút száma	1. mérés (s=7,2 cm; Q=0,76 l/min)		2. mérés (s=10,0 cm; Q=1,00 l/min)		3. mérés (s=14,8 cm; Q=1,40 l/min)		4. mérés (s=21,5 cm; Q=1,80 l/min)	
	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Tárolási tényező [-]
1.	9,98E-05	1,15E-01	1,44E-04	6,40E-02	1,12E-04	1,04E-01	8,37E-05	1,57E-01
2.	8,62E-05	7,57E-02	1,14E-04	5,52E-02	9,25E-05	7,57E-02	7,23E-05	9,71E-02
3.	8,01E-05	4,98E-02	1,14E-04	3,65E-02	9,95E-05	4,69E-02	7,78E-05	6,02E-02
4.	9,80E-05	3,28E-02	1,19E-04	2,77E-02	1,07E-04	3,28E-02	9,01E-05	3,96E-02
5.	9,27E-05	2,58E-02	1,44E-04	2,20E-02	1,24E-04	2,58E-02	1,04E-04	2,94E-02
6.	1,67E-04	2,16E-02	1,89E-04	1,67E-02	1,44E-04	2,03E-02	1,40E-04	2,31E-02
7.	1,67E-04	2,03E-02	2,28E-04	1,59E-02	1,79E-04	1,80E-02	1,74E-04	2,18E-02
8.	3,00E-04	1,91E-02	3,00E-04	1,59E-02	2,99E-04	1,70E-02	2,34E-04	1,93E-02
Átlag	1,36E-04	3,99E-02	1,69E-04	2,89E-02	1,45E-04	3,77E-02	1,22E-04	4,89E-02

A 8. táblázatban feltüntetett négy nem permanens mérés eredményeit átlagolva a szivárgási tényezőre $1,43 \cdot 10^{-4}$ m/s, a tárolási tényezőre $4,38 \cdot 10^{-2}$ [-] érték adódott. Az adatsorok szórása a szivárgási tényezőre $1,05 \cdot 10^{-5}$ m/s, ami megfelel az elvárható pontosságnak. A tárolási tényező szórása $3,33 \cdot 10^{-2}$ [-], mely egy nagyságrendben van magával a paraméter értékével, ezért a pontossága nem kielégítő. A tárolási tényező pontosítására vagy a paraméter számításának nagyfokú bizonytalanságának leírására további vizsgálatok szükségesek (Hegedűs 2018, Farkas-Karay és társai 2018, Farkas és társai 2019b).

6.1.4. Szemeloszlási görbe alapján számított szivárgási tényező értékek összehasonlítása

A bemutatott laboratóriumi modellezés során a vizsgált talajra kis szórású átlagos szivárgási tényező értékeket tudtam meghatározni. A homokminta általam előállított szemeloszlási görbéjéből különböző szakirodalmak (3.3. fejezet) segítségével további számításokat végeztem a szivárgási tényező meghatározására.

A permanens és időben változó kismintakísérletekből, a validált numerikus modellekből, illetve a szemeloszlási görbét felhasználó módszerekből számított szivárgási tényező értékeket a 9. táblázatban foglaltam össze. Az adatokat csoportosítva növekvő sorrendbe helyeztem annak érdekében, hogy az eredmények könnyen áttekinthetővé váljanak. A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényezőket összevettem egymással. A 2018-2019-es adatsorból származó, Dupuit-módszerrel előállított átlagértéket tekintettem a legelfogadhatóbb

eredménynek, mivel ez a kismintamodell végleges verziójával készült, nagy számú labormérésen alapul, így feltehetően ez közelíti legjobban a tényleges értéket is. A 9. táblázat utolsó oszlopában látható, hogy az alapértéknek választott adathoz képest a többi módszer hány százalékkal tér el.

A módszerek használhatóságának értékelését a 7.2.2. fejezetben mutatom be.

9. táblázat: A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényező értékek

Vizsgálat fajtája	Kiértékelés módszere	Szivárgási tényező [m/s]	Eltérés a Dupuit (2018-2019) értékhez képest [%]
Szemeloszlási görbe	USBR	2,30E-04	2
	Slichter	2,73E-04	21
	Barr	3,25E-04	44
	Alyamani and Sen	4,13E-04	84
	Krumbein and Monk	4,14E-04	84
	Beyer	5,14E-04	128
	Seelheim	5,16E-04	129
	Hagen	5,20E-04	131
	Kröber	5,92E-04	163
	Sauerbrei	6,37E-04	183
	Chapius	7,25E-04	222
	USCRO	7,43E-04	230
	Hazen	7,97E-04	254
	Jáky	1,44E-03	540
Kismintakísérlet	Theis (2018-2019)	1,43E-04	36
	Dupuit (2018-2019)	2,25E-04	-
	Dupuit (2015)	2,93E-04	30
Numerikus modellezés	„FA” modell	2,34E-04	4
	„FB” modell	2,46E-04	9

Megvizsgáltam a Devlin (2015) által elkészített „HydrogeoSieveXL” nevű program egyes elméleti módszereknél használt általános kiértékelési egyenletet (11. egyenlet) is. Ennek az érzékenységvizsgálatát az USBR összefüggés (Białas és Kleczkowski 1970) alapján végeztem el (9. egyenlet). A 10. táblázatra tekintve láthatjuk, hogy a hőmérséklet megváltoztatása pozitív, illetve negatív irányba is ugyanolyan mértékű eltéréseket okoz. A d_e paraméter ezzel szemben nem szimmetrikus, ez a hatványra emeléssel magyarázható. Általánosságban elmondható, hogy a szemcseátmérő értékére a Darcy-Weissbach egyenletből általánosított összefüggés sokkal érzékenyebb, mint a hőmérsékletre (akár egy nagyságrenddel is nagyobb eltérések alakulnak ki).

10. táblázat: A 9. egyenlet érzékenységvizsgálata a USBR-módszer alapján.

Kiindulási adat megváltoztatásának aránya [%]	d_e értékei [mm]	Szivárgási tényező [m/s]	Eltérés [%]	Hőmérséklet [C]	ρ^*g/μ értékei [-]	Szivárgási tényező [m/s]	Eltérés [%]
-50	0,306	6,24E-04	166	10,0	75169	1,78E-04	24
-20	0,245	3,73E-04	59	16,0	89327	2,11E-04	10
-10	0,224	3,06E-04	30	18,0	94288	2,23E-04	5
-5	0,214	2,75E-04	17	19,0	96800	2,29E-04	3
-1	0,206	2,51E-04	7	19,8	98821	2,33E-04	1
0	0,204	2,35E-04	-	20,0	99327	2,35E-04	-
1	0,202	2,40E-04	2	20,2	99834	2,36E-04	1
5	0,194	2,18E-04	8	21,0	101866	2,41E-04	3
10	0,183	1,93E-04	22	22,0	104413	2,47E-04	5
20	0,163	1,47E-04	60	24,0	109516	2,59E-04	10
50	0,102	4,98E-05	371	30,0	124646	2,94E-04	25

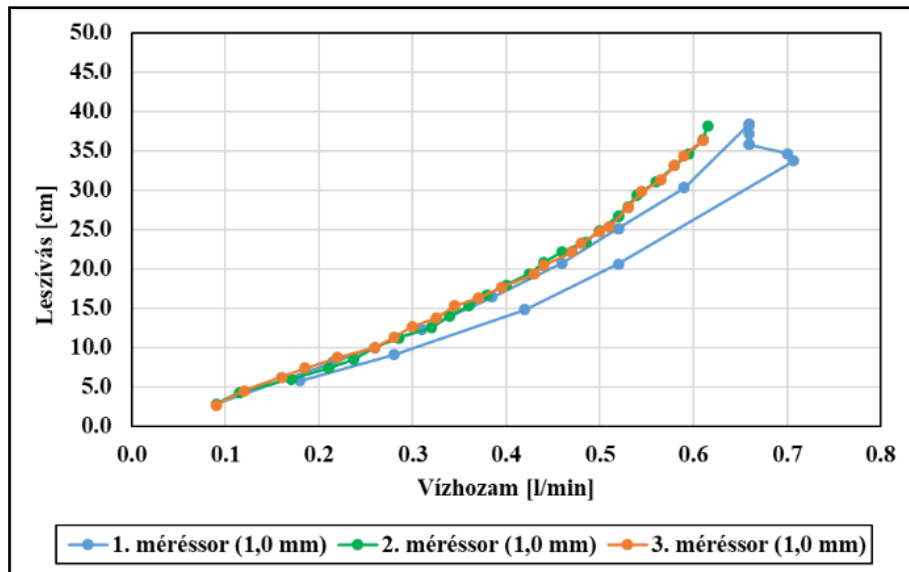
6.2. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

A 3.4-es fejezetben már említettem, hogy a próbaszivattyázásokkal kapcsolatban a kúthidraulikai vizsgálatoknak komoly jelentősége lehet. Ebben a fejezetben bemutatom, hogy a kismintamodellzés segítségével milyen vizsgálati eredményeket értem el a témában.

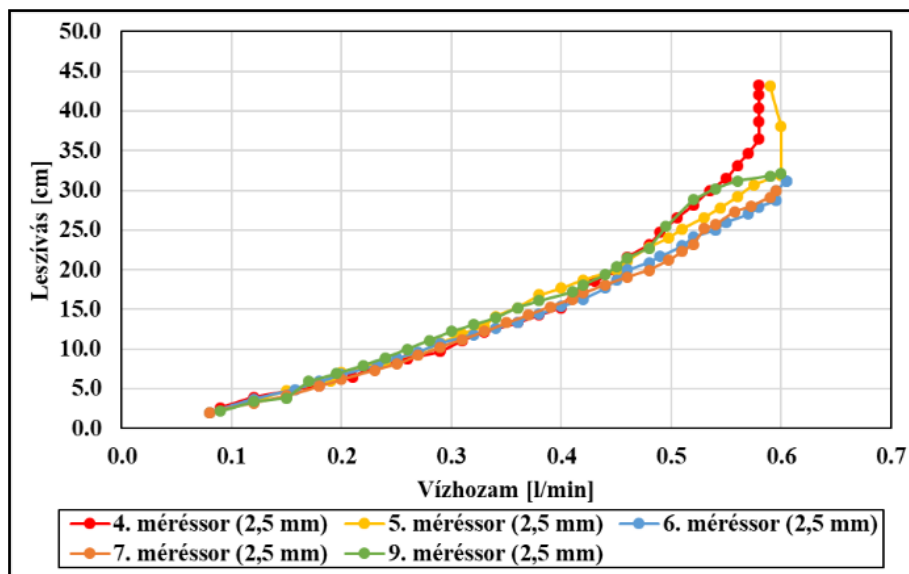
6.2.1. Az anyagutak teljesítőképessége

Az egyes kutak teljesítőképességét a leszívás- és vízhozam görbékkel jellemezhetjük. A 27. ábrán az 1,0 mm-es perforációval kialakított kúttal elvégzett három méréssort láthatjuk. Egy méréssor a legkisebbtől a legnagyobb előállítható leszívásig tart vagy fordítva, a legnagyobb leszívástól mértem a legkisebbig. Ez alól kivétel az 1. méréssor, mivel ott a leszívásokat tekintve „oda-vissza” irányú próbavizsgálatot végeztem el. Látható, hogy a méréssor hurokgörbe alakú, ami azt jelenti, hogy kezdetben a leszívás növelésével kisebb leszívási értékeket kaptam ugyanahhoz a vízhozamértékekhez, mint amikor a peremfeltételt folyamatosan csökkentettem. Ideális esetben az 1. méréssort alkotó adatpontoknak egy egyenesre kellett volna esniük. A 2. és 3. méréssorra tekintve láthatjuk, hogy ott a két adatsor szinte teljesen fedi egymást. Az 1. méréssor közvetlenül a minta telítése után lett regisztrálva, így a hurokgörbeszerű lefutás jele lehet a talajban lejátszódó változásoknak (levegőfázis távozása, szemcsék átrendeződése), a kút környezetében megnövekedett nyomásvesztésnek, valamint esetleges nemlineáris áramlás kialakulása is befolyásolhatta az eredményeket. A talajban lejátszódó folyamatokat alátámaszthatja a 6.1.2. fejezetben bemutatott szivárgási tényezők időbeli változása, ami az 1. méréssor alatt jelentkezett. A 2. és 3. adatsoroknál a szivárgási tényező időbeli változása szinte elenyésző volt, ami a leszívás-vízhozam görbék egybevágóságát is eredményezhette. A Darcy-törvény értelmében a leszívás és a vízhozam

közötti kapcsolat lineáris, viszont ez egyik adatsor esetében sem teljesül. Ez a tény tovább erősítheti azt az feltételezést, hogy a kút környezetében kialakulhatott nemlineáris áramlás, amit a Darcy-törvény nem tud teljes mértékben leírni.



27. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0 mm lyukátmérőjű kút mérőssorai alapján



28. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 2,5 mm lyukátmérőjű kút mérőssorai alapján

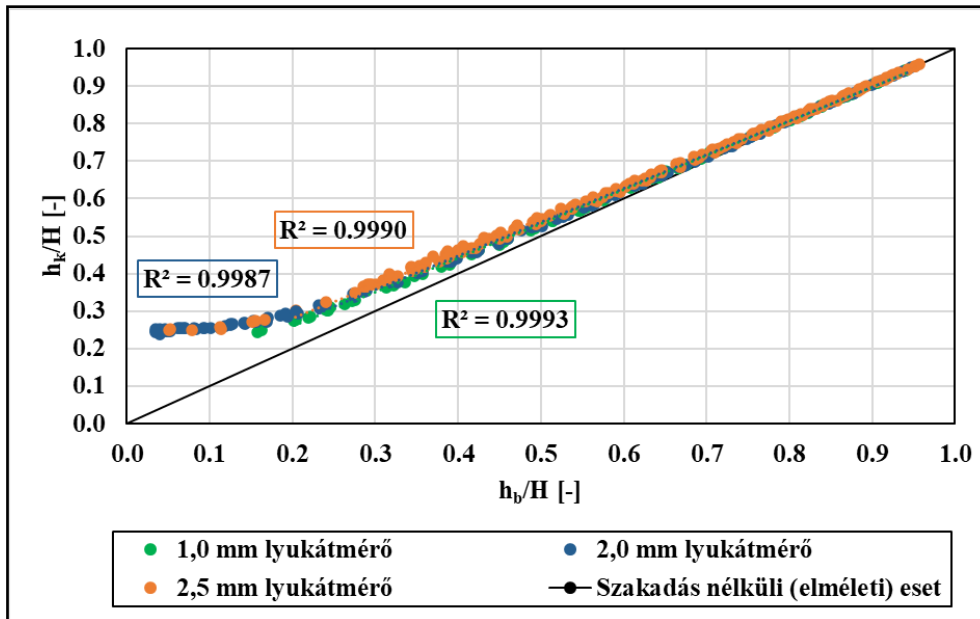
A 2,5 mm-es kút esetében nagyobb leszívásokat tudtam elérni a piezométertábla áthelyezésével, az adatsorokat a 28. ábrán mutatom be. Szembetűnő, hogy a kútcserét követő 4. és 5. mérőssor az 1. mérőssorhoz hasonló hurokgörbét formáznak, ami a talajban végbemenő változásokkal indokolható, ez a változás szintén kimutatható volt a szivárgási tényezők időbeni változásában is (6.1.2. fejezet). Mindkét mérőssornál kialakult a görbék egy olyan szakasza, amikor a leszívás növelésével a hozam már nem változott, tehát a kút vízádóképesége elérte

határait, viszont a kút körül kialakuló nyomásveszteségek tovább nőttek. A 4. méréssornál körülbelül 36 cm-es leszívást követően a vízhozam közel állandó maradt. A 6. és 7. méréssor a 2-hoz és 3-hoz hasonlóan szinte teljesen fedik egymást. Meredekségük jó egyezést mutat körülbelül a 0,4 l/min hozamértékig az 5. méréssoréval. A 8. méréssort a vizsgálatokat zavaró technikai problémák miatt teljesen elvettem, a 9. adatsorban a nagy leszívások esetén jelentkező eltérések még ezen torzító tényezők utóhatásait viselik, viszont körülbelül 23 cm-es leszívástól ezek megszűnnek. Ennél kisebb leszívások esetén a görbe felveszi a 6. és 7. méréssor meredekségét, azonban a vízhozam értékeiben még kisebb eltérések látszanak. A vízhozamban érzékelhető eltérés a különböző méréssorozatoknál az 5 cm-es leszívás alatt mért adatok alapján nullára csökken.

A leszívás és vízhozam kapcsolatát leíró eredmények alapján kijelenthető, hogy a 2,5 mm-es perforációjú anyakúthoz nagyobb leszívások tartoznak ugyanazon hozamoknál. A különböző perforációjú kutaknál a leszívásokban jelentkező eltérés a kis vízhozamoknál még elhanyagolható, viszont a jelentős leszívásoknál a differencia eléri az 5 cm-t is. Megállapítható, hogy ugyanakkora áteresztő felület esetén (5%) érdemesebb több kisebb lyukkal ellátott szűrőcsövet alkalmazni, mivel ez kisebb nyomásveszteséget eredményezett.

6.2.2. Kútellenállás kimutatása laboratóriumi mérésekkel

Ebben a fejezetben ismertetem a három különböző perforációjú termelőkútra vonatkozó laboratóriumi méréseimet, melyekkel meghatároztam a kútellenállás okozta nyomásveszteség értékeit. A mérési eredményeket a 29. ábrán közöltem, ahol az egyes pontok az anyakút palástjának külső és belső felületein mért vízszint-adatpárokat jelölik, melyeket a nyugalmi vízszinthez tartozó telített rétegvastagsággal osztottam el (h_b/H , h_k/H). Ebből kifolyólag az ábrázolt adatok 0-1 közötti intervallumon vehetnek fel értékeket, ahol „0” a legnagyobb, míg „1” a maximális leszívást jelenti. A mérési eredményeim mellett feltüntettem a Dupuit-elmélet szerinti $x=y$ egyenest, ahol a kútpalást külső és belső oldalán nem alakul ki vízszintkülönbség.



29. ábra: A három különböző lyukmérettel perforált anyagút palástján belüli és kívüli vízszintekben (h_b , h_k) kialakuló szakadás folyamata (Farkas és társai 2021)

A 29. ábrán látható, hogy kis leszívásoknál mindhárom kút adatai jól közelítik a Dupuit-elmélet egyenesét. A leszívás növelésével az anyagutak külső és belső felületén mért vízszintek különbsége már nem elhanyagolható. A 11. táblázatban a h_b/H értékein keresztül bemutatom, hogy a kútpalást külső és belső felületén kialakult vízszintkülönbségek miatt a mért adatsorok milyen ütemben távolodtak el az elméleti egyenestől. Mindhárom kútnál $h_b/H=0,8$ értékre teljesült, hogy 1%-os eltérést mutattak a Dupuit-egyenestől, így eddig a pontig a három kút adatsorát egybevágónak tekinthetjük. Az 5%-os differencia a különböző lyukátmérővel kiképzett kutakban már eltérő h_b/H eredményeknél figyelhető meg. Ez a megállapítás teljesül a 10, 25, és 50%-os eltéréseknél megfigyelt eredményekre is.

11. táblázat: A három különböző lyukmérettel perforált anyagút h_b/H értékei az elméleti egyenestől való eltérés függvényében.

Perforáció átmérője [mm]	h_b/H értéke az elméleti egyenestől való %-os eltérések függvényében				
	1%	5%	10%	25%	50%
1,0	0,80	0,51	0,38	0,25	0,16
2,0	0,80	0,55	0,42	0,28	0,19
2,5	0,80	0,60	0,47	0,32	0,21

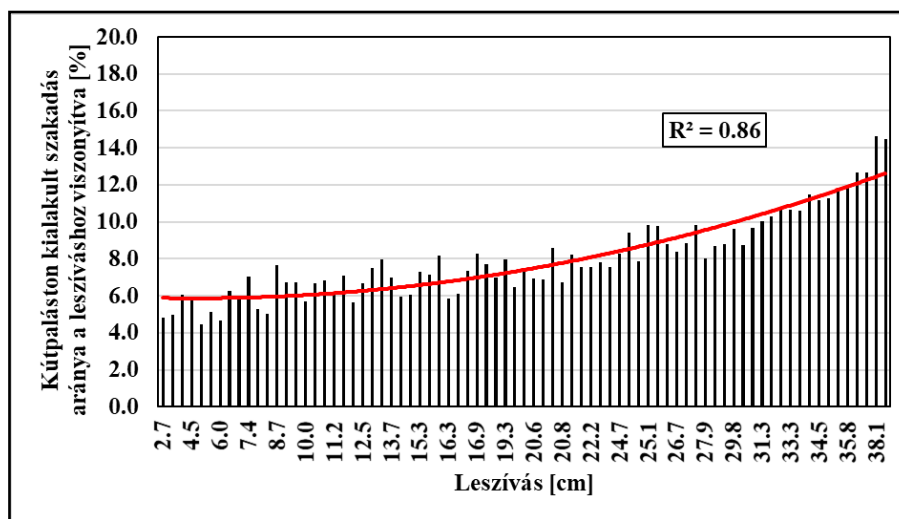
A különböző perforációjú kutak adatpontjaira tekintve láthatjuk, hogy az elméleti egyenestől való eltérés az 1,0 mm-es esetben a legkisebb, ezt követi a 2,0 mm-es, majd a legnagyobb különbség a 2,5 mm-es kútnál volt mérhető. A kutak közötti eltérések nem látványosak, viszont a viselkedésükben megfigyelhető eltérések kimutathatók. Meg kell említenem, hogy a 2,0 mm és a 2,5 mm perforációjú kutaknál a $h_b/H=0,10$ alatti értékeknél megfigyelhető, hogy a leszívás

növelésével a kúton belül mért vízszintek csökkentek, viszont a külső szintek közel konstans értéket vettek fel. Ez analóg az előző fejezetben tett megfigyeléssel, ahol nagy leszívásoknál a leszívás értékét növelve a hozam már nem növekedett.

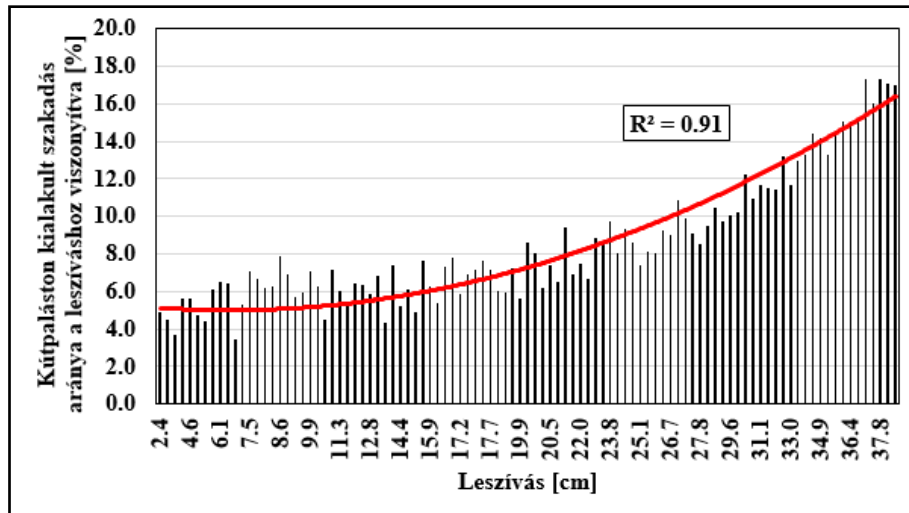
A Dupuit-módszer szerinti egyenestől eltérő, nagy leszívásoknál jelentkező görbült szakasz az 1,0 mm-es kútnál nem volt megfigyelhető, mivel ott mérés-technikai okokból csak kisebb leszívásokat tudtam előállítani. Feltételezhető, hogy ennél a kútnál is kialakulhatott volna egy ilyen kép.

6.2.3. A szabad szivárgási felület vizsgálata a leszívás függvényében

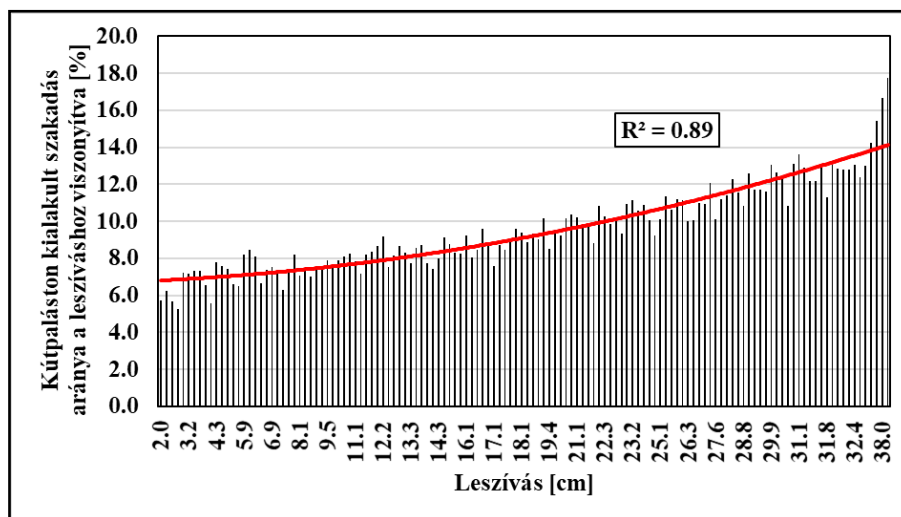
A kútban mért vízszint és a kútpaláston mért vízszint különbözősége az úgynevezett szabad szivárgási felület, melynek meglétét az előző fejezetben bizonyítottam. Ebben a fejezetben a két vízszint közötti különbséget a leszívás függvényében mutatom be. A 30-32. ábrákon az 5.5. fejezetben bemutatott módon 10°C-ra normált leszívásokat tüntettem fel a kútpaláston kialakult szakadás leszíváshoz viszonyított százalékos aránynak függvényében. A 30-32. ábrákról leolvashatjuk, hogy a teljes leszívás hány százaléka alakult ki közvetlenül a kút környezetében a kútfal okozta ellenállás miatt. Az adatsorokra illesztett burkológörbék determinációs együtthatói 86-91% között vettek fel értékeket.



30. ábra: 1,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)



31. ábra: 2,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)



32. ábra: 2,5 mm-es lyukátmérővel perforált anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)

Méréstechnikai okokból az 1,0 mm lyukátmérőjű kúttal kisebb leszívásokat tudtam elvégezni, mint a másik két anyakúttal.

A 30-32. ábrákon láthatjuk, hogy az adatsorokat néhol kiugró értékek tarkítják, melyeket a kút közelében kialakuló időfüggő folyamatok vagy leolvasási hibák magyarázhatnak. Összehasonlítva a legkisebb értékeket mindegyik kút esetén körülbelül 5%-os értéket kaptam, tehát a teljes leszíváshoz viszonyítva legalább ekkora arányú a kútfa okozta nyomásvesztés. A maximum értéken láthatjuk, hogy a körülbelül 38 cm-es leszíváshoz az 1,0 mm-es kút esetében 15%-os, a 2,0 mm-esnél 17%-os és a 2,5 mm-esnél 18%-os érték adódott. Az előző fejezetben szereplő 29. ábrán már bemutattam, hogy a kútpaláston kialakuló ellenállás függ a perforáció átmérőjétől, így várható volt, hogy a legkisebb lyukátmérőhöz tartozó veszteségérték adódik a legkisebbre.

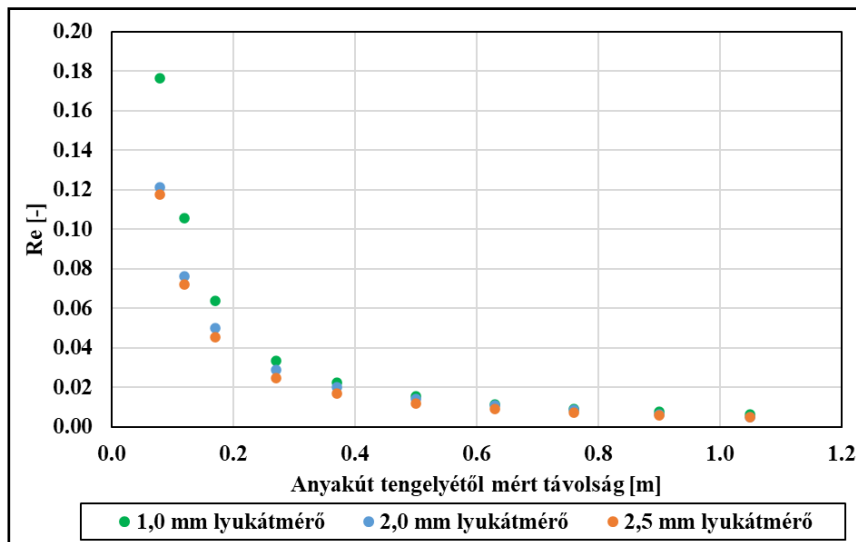
Az adatsorokra illesztett burkológörbék kezdeti szakaszaiban alaki eltérés figyelhető meg. Az 1,0 mm-es és 2,0 mm-es anyakútnál a görbe kezdeti érintője nullának tekinthető, míg a 2,5 mm-esé pozitív érintővel indul. Ezt indokolhatja, hogy a piezométerek leolvasási pontosságából eredő kerekítési hibák a kis leszívásoknál fajlagosan nagyobb hatást gyakorolnak, mint a nagyobbaknál. A kis leszívásoknál jeletkező problémákra a numerikus modellezéssel foglalkozó 6.4.5. fejezetben fogok részletesen kitérni.

6.3. NEMLINEÁRIS ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA A KISMINTAMODELLBEN

Az anyakutak teljesítőképességének és a kút belsején és külsején kialakuló leszívások vizsgálata előrevetítette, hogy a kismintában nemlineáris áramlás feltételezhető. Vizsgáltam, hogy ez a nemlinearitás megfigyelhető-e a termelőkúttól távolabb, illetve a termelőkút környezetében. Az ezzel kapcsolatos eredményeket az alábbiakban mutatom be.

6.3.1. Nemlineáris áramlás a modelltérben

Ahhoz, hogy a talajmintában kialakuló áramlások esetleges nemlinearitását vizsgálni tudjam, a megfigyelőkutakban rögzített vízszintek segítségével meghatároztam azokat a hengerfelületeket, melyeken keresztül a mért hozam átszivárog. A folytonossági egyenlet segítségével ebből a két értékből áramlási sebesség számítható. A három különböző perforációjú anyakúttal végzett vizsgálategyüttesből kiválasztottam a legnagyobb előállított leszívásokat, mivel ezekhez tartoznak a legnagyobb áramlási sebességek, majd az 20. egyenlet segítségével kiszámítottam a Re -számokat az egyes megfigyelőkutaknál. A 33. ábráról leolvasható, hogy az anyakúthoz legközelebbi megfigyelőkútnál a maximális $Re=0,18$ érték alatt maradt. Az 1. táblázat értékeivel összevetve láthatjuk, hogy a lamináris és átmeneti áramlás határaként a legkisebb érték $Re=1,0$. Ebből kifolyólag nagy biztonsággal kijelenthető, hogy az 1. megfigyelőkútnál és attól távolabbi pontokban nem alakult ki egyik mérés során sem lamináristól eltérő áramlás a modelltérben.



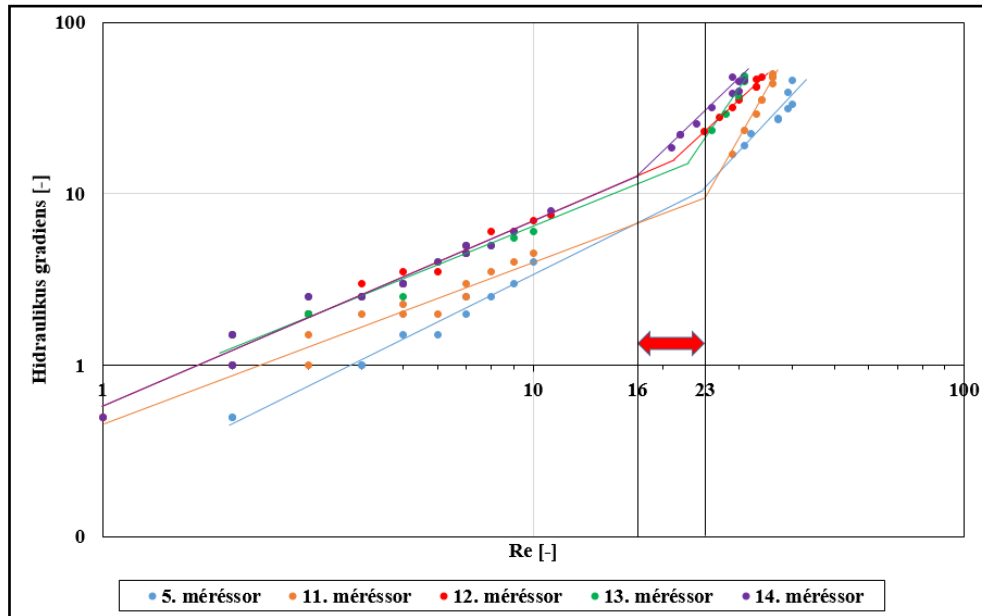
33. ábra: Az áramlást jellemző Re-számok alakulása az 1-10. megfigyelőkutak közötti modellterben

6.3.2. Nemlineáris áramlás a termelőkút közelében

A korábbi (6.2.1. és 6.2.2. fejezetek) eredményekből kiderült, hogy a feltételezett nemlineáris áramlást a termelőkút közvetlen környezetében kell keresni. A kútkörüli nemlineáris áramlás jelentősen befolyásolhatja a kutak teljesítőképességét, a szivattyúzás hatékonyságát. Ennek elkerülésére a szakirodalmak számos javaslatot tesznek, az általuk meghatározott belépési sebességek (v_{crit}) és Reynolds-számok (Re_{crit}) kritikus értékeinek figyelembevételével minimalizálni tudjuk a kút körül kialakuló nyomásveszteségeket és a víztartó talajszemcséinek kútba történő bemosódásának esélyét, mivel az áramlás ezen kritikus értékek alatt a lamináris tartományban marad. A kismintamodellben ki lehetett mutatni a kútkörüli nemlineáris áramlást és a mérések segítségével meg tudtam határozni a belépési sebesség és a Reynolds-szám kritikus értékeit, mely alatt az áramlás biztosan nem válik nemlineárisá.

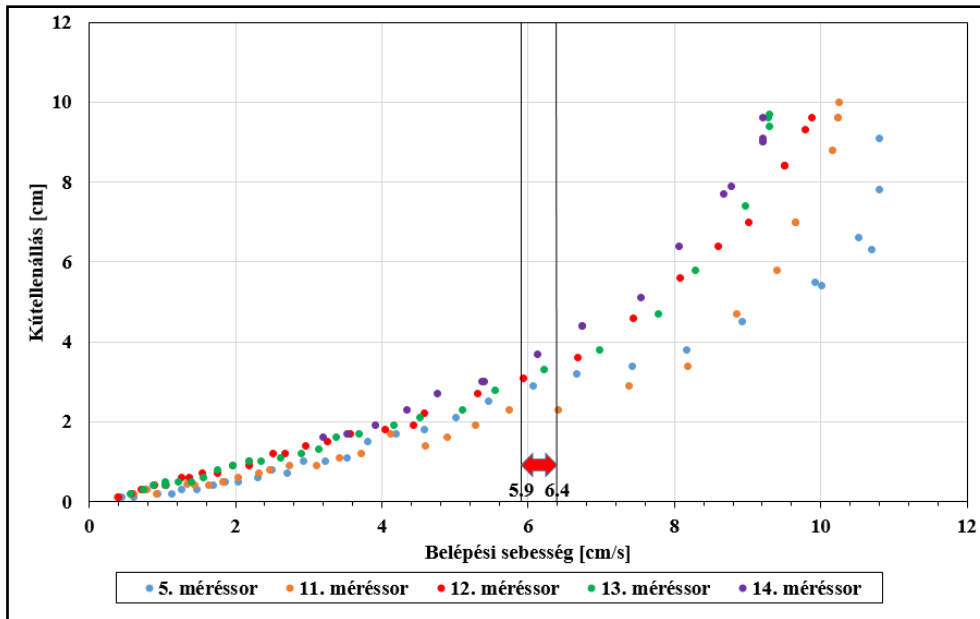
A vizsgálataim során előállított adatokból számított Reynolds-számokat a hidraulikus gradiensek (34. ábra), míg a számított belépési sebességeket a kútellenállás függvényeként (35. ábra) ábrázoltam. A diagramokon öt méréssort ábrázoltam, melyek összesen 150 mérést tartalmaznak. Az 34. ábrán a méréssorok azon tartományait tüntettem fel, melyek szakirodalmi adatok alapján a tisztán laminárisnak, valamint a tisztán turbulensnek tekinthető tartományba tartozhattak. Az adatsorok lamináris, illetve turbulens szakaszaira külön-külön hatványfüggvényt illesztettem, melyek a tengelyek logaritmikus skálája miatt egyenesként jelennek meg. Az egyenesek metszéspontjai egy Reynolds-szám intervallumot határoztak meg, mely az áramlás szempontjából egy átmeneti tartományt képez. Az ábráról leolvasható, hogy az intervallum határértékei szerint az átmeneti tartomány 16 és 23 között helyezkedik el.

A kritikus Reynolds-számnak az értéktartomány alsó határát, $Re_{crit}=16$ -t választottam, mivel így feltételezhető a legnagyobb biztonsággal, hogy az ennél kisebb értékek esetén az áramlás a lamináris tartományban marad.



34. ábra: A különböző anyagutakkal mért Reynolds-számok a hidraulikus gradiens függvényében (Farkas és társai 2021)

A 35. ábrán bemutatott Reynolds-szám intervallumot képző eredményekhez párosíthatók belépési sebesség értékek, mely ugyancsak egy átmeneti áramlási állapothoz tartozó értéktartományt jelent. Az átmeneti tartományhoz rendelhető belépési sebesség értékek 5,9 és 6,4 cm/s közöttiek. A kritikus belépési sebességet a kritikus Reynolds-számhoz hasonlóan a tartomány alsó határát jelentő értékkel, $v_{crit}=5,9$ cm/s-mal azonosítom.



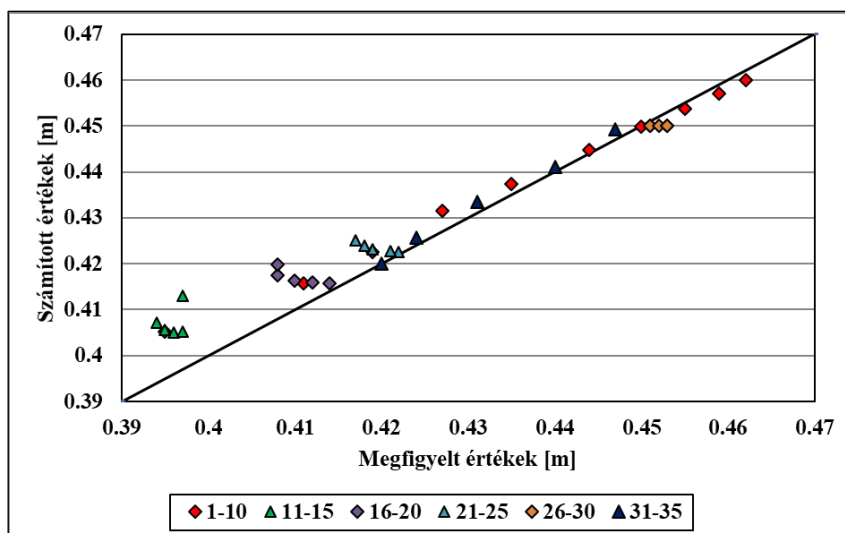
35. ábra: A különböző anyagutakkal mért belépési sebességek a kútellenállás függvényében (Farkas és társai 2021)

6.4. NUMERIKUS MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

A célkitűzéseimben fontosnak tartottam, hogy a laboratóriumi modellezések valós léptékre való használhatóságát numerikus és terepi vizsgálatokkal igazolni tudjam. A FEFLOW szoftver segítségével elvégzett numerikus modellezés során az 5.6.2. fejezetben összefoglalt három változatot vizsgáltam meg.

6.4.1. Laboratóriumi szivárgási tényezővel végzett modellváltozat

Az első modellben, ahol a szivárgási tényező homogén volt, az abszolút hiba 4,55 mm volt. A modell méreteihez viszonyítva az anyagútban számottevő leszívás jött létre, tehát Dupuit elmélete, amely akkor alkalmazható, ha a leszívás teljes telített rétegvastagsághoz képest nem jelentős, a kút közvetlen környezetében már nem érvényes (ezt támasztják alá a mérési eredmények is, lásd 6.2.1 - 6.2.3. fejezetek). A 36. ábrán látható, hogy a kúttól távolodva, ahol a leszívás mértéke már elhanyagolható a modell méreteihez képest, a pontok jobban illeszkedtek a megfigyelt és modellezett eredmények egyenlőségét leíró egyenesre. A modellben lévő piezométerek nyomásértékei által meghatározott egyenes és a kalibrációs egyenes közötti szögeltérés azonos maradt és nagyobb eltérés a kút felé közeledve jelentkezett. Ez véleményem szerint alátámasztja azt a feltételezést, hogy a termelőkút környezetében és a kúttól távolodva a homok szivárgási tényezője különböző, vagyis sugárirányú inhomogenitást mutat a vizsgált talaj (6.1.2. fejezet).



36. ábra: A kalibráció eredménye a kismintamérések alapján kapott átlagos szivárgási tényezőt alkalmazva (Farkas és társai 2019a)

A 36. ábráról azt is leolvashatjuk, hogy a kismintamodellben egymás alatt elhelyezkedő piezométerek értékei egymás mellett, közel vízszintesen helyezkednek el (például a 16-20. sorszámú piezométerek). A felsőbb rétegek felé haladva tehát nő a modell által számított és a fizikai mérések során megfigyelt értékek közötti különbség. Ez alapján arra következtettem, hogy nem csak sugárirányban (x-y síkban) történt differenciálódás, hanem x-z vagy y-z (a sugárirányú szimmetria miatt megegyeznek) síkban is, így függőleges értelemben vett rétegzettség is kialakulhatott.

Az itt taglaltak arra utalnak, hogy a homogénnek feltételezett talajmintában a szivárgási tényező eloszlása nem egyenletes. Ez eredhet a beépítésből származó egyenetlenségekből, esetlegesen fennmaradó gáztartalomtól, illetve legnagyobb valószínűséggel a vízkivétel hatására bekövetkező szemcséátrendeződésből, mely végbement a modelltérben. Ekkor a szivárgó víz hatására a finomabb szemcsék az áramvonalak mentén elvándorolhattak. E szemcseszerkezet-átrendeződés mértéke függhetett a kúttól való távolságtól, vagyis a kúthoz közelebbi zónákban jelentősebb lehetett. Az anyagútba történő belépésből származó nyomásvesztés mérésére a fizikai modell 2015-ben még nem volt alkalmas, viszont valószínűsíthetően ez is egy olyan tényező volt a mérések során, mely a 36. ábrán látható eltérésekhez vezetett. Mindezek alapján kijelenthető, hogy a laboratóriumi idealizációkkal megépített numerikus modell nem alkalmas a kismintában mért eredmények pontos visszaadására, és indokolt a szivárgási tényező értékének és eloszlásának módosítása, amit azt az FA és FB modellekben megtettem (5.6.2. fejezet).

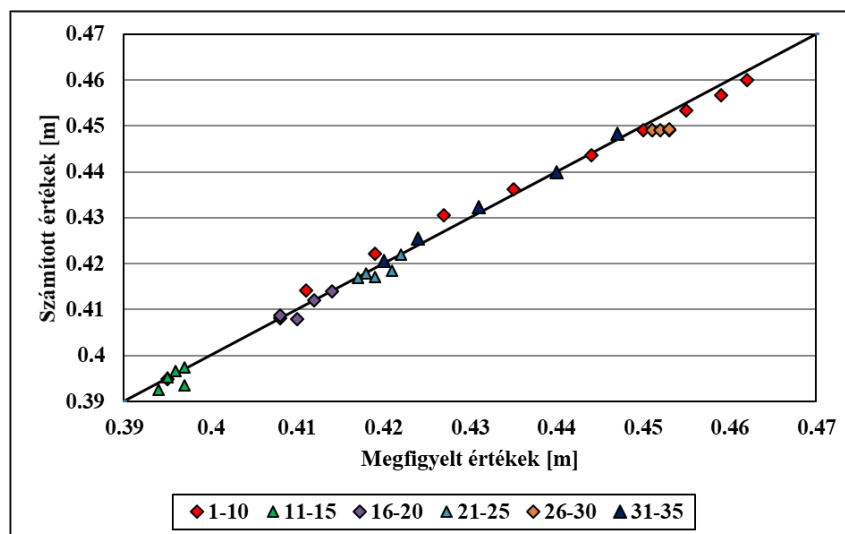
6.4.2. A mérésekkel való legpontosabb egyezés vizsgálata – FA modell

Az 5.6.2. fejezetben bemutatott FA modell kalibrációja során kapott szivárgási tényező-értékeit a 12. táblázatban tüntettem fel. Feltételeztem, hogy mivel az I. zóna esik legközelebb az anyakúthoz, így a finom szemcsék kimosódása itt jelentkezett a legerősebben. Ebből kifolyólag azt a megkötést alkalmaztam, hogy az I. zóna szivárgási tényezője minden esetben nagyobb, mint a kúttól távolabbi zónáké, az innen kimosódott talajszemcsék a geotextiliára kerülve annak áteresztőképességét csökkentik. A zónák szivárgási tényezőinek ismertetésénél az „S” utótag a „Slice” szót jelöli. Az ez utáni szám jelöli, hogy hányadik rétegre vonatkozik. A 10. réteg a modell fenéklemezével határos. A modell átlagos szivárgási tényező értéke $2.34 \cdot 10^{-4}$ m/s.

12. táblázat: A modellváltozatokban alkalmazott szivárgási tényezők eloszlása

FA modell zónáinak szivárgási tényezői									
II.-S1	8.77E-05	III.-S1	6.24E-05	IV.-S1	6.29E-05	V.-S1	6.29E-05		
I.	2.92E-03	II.-S2	1.95E-03	III.-S2	1.17E-03	IV.-S2	1.89E-04	V.-S2	2.05E-04
		II.-S3	2.73E-04	III.-S3	6.29E-05	IV.-S3	1.89E-04	V.-S3	1.85E-04
		II.-S4	1.85E-04	III.-S4	1.56E-04	IV.-S4	4.29E-04	V.-S4	1.89E-04
		II.-S5	9.75E-06	III.-S5	5.66E-05	IV.-S5	5.66E-05	V.-S5	5.66E-05
		II.-S6	1.17E-04	III.-S6	9.75E-05	IV.-S6	1.95E-04	V.-S6	5.66E-05
		II.-S7	1.95E-04	III.-S7	2.92E-04	IV.-S7	6.29E-05	V.-S7	3.15E-04
		II.-S8	3.80E-04	III.-S8	1.95E-03	IV.-S8	1.89E-04	V.-S8	3.15E-04
		II.-S9	6.82E-05	III.-S9	1.95E-03	IV.-S9	4.87E-04	V.-S9	3.15E-04
		II.-S10	6.24E-05	III.-S10	7.31E-05	IV.-S10	3.15E-04	V.-S10	5.66E-04
FB modell zónáinak szivárgási tényezői									
		Skin	I.	II.	IV.	IV.	V.		
		6.07E-04	4.05E-04	2.45E-04	2.45E-04	2.45E-04	2.45E-04		

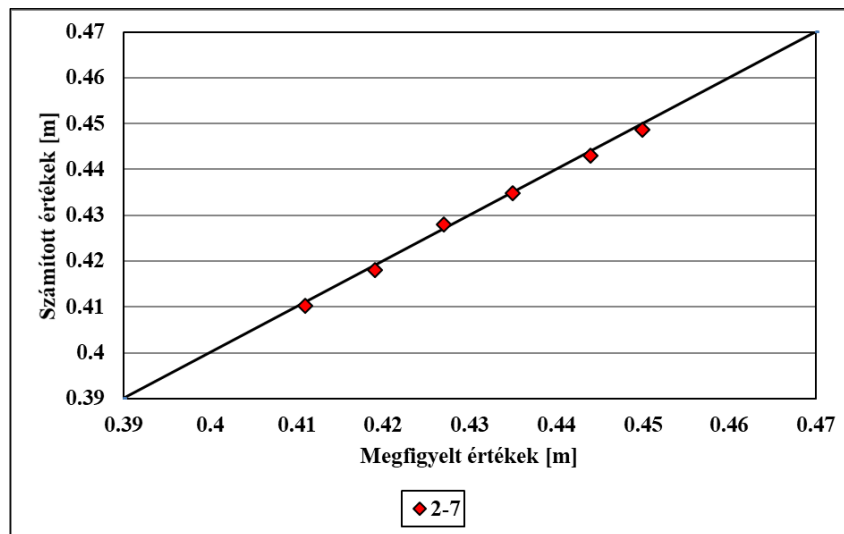
A modell kalibrálása során az abszolút hibát 1,4 mm-re redukáltam (37. ábra).



37. ábra: A kalibráció eredménye az FA modellváltozat esetén (Farkas és társai 2019a)

6.4.3. A leszívás távolhatásának vizsgálata – FB modell

Az FA-modellben is látható anyakúthoz közeli, valamint perem melletti szakaszok eltértek az elméleti görbétől (a jelenségről írnak még Barta és társai (2012)), ezért ebben a modellváltozatban a kalibráció fő fókuszát a 2-7. piezométerek alkották. A végleges, általam elfogadott modell esetében 0,65 mm pontosságot tudtam elérni a teljes hibát tekintve (38. ábra). Az így meghatározott szivárgási tényezőket szintén a 12. táblázat mutatja be. A modell átlagos szivárgási tényezője $2,46 \cdot 10^{-4}$ m/s.



38. ábra: A kalibráció eredménye az FB modellváltozat esetén (Farkas és társai 2019a)

6.4.4. Az FA és FB modellek összehasonlítása

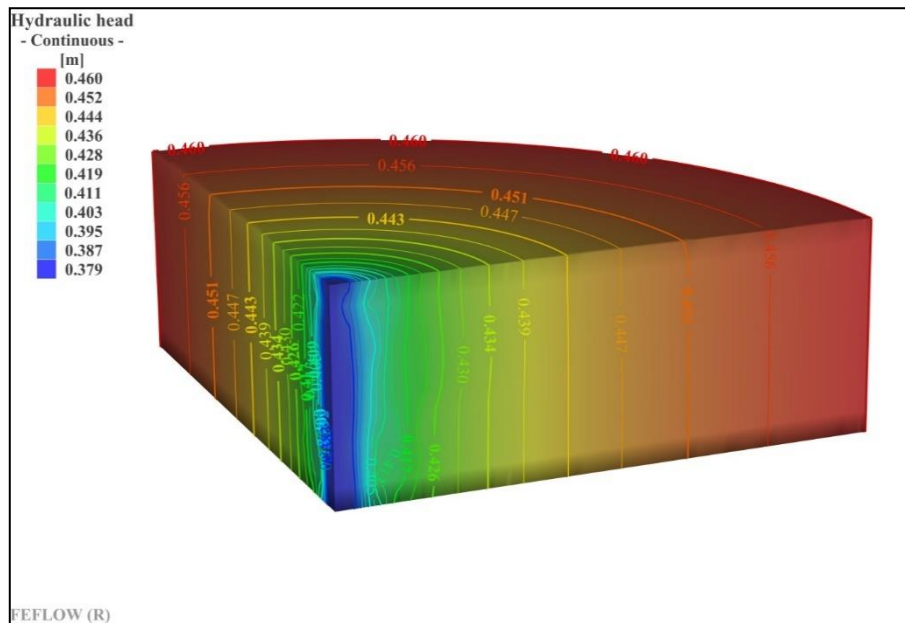
A két inhomogén numerikus modellel kapott eredmények összehasonlításával további értékes eredményekhez juthatunk.

Az átlagos szivárgási tényezők között minimális az eltérés annak ellenére, hogy a paraméterszámuk jelentősen különbözik. Az „FA” modell nagyobb paraméterszámmal pontosabban leképezte a vízfelszint, valamint a kút környezetében kialakuló, lokálisan jelentkező inhomogenitásokat az áteresztőképesség értékekben. Mindemellett nagyfokú egyezés adódott az „FA” és „FB” verzióknál kapott teljes modellterre vonatkozó szivárgási tényezők értékére, annak ellenére, hogy az „FB” modell nagyobb léptékben vizsgálja a próbaszivattyúzás jelenségét.

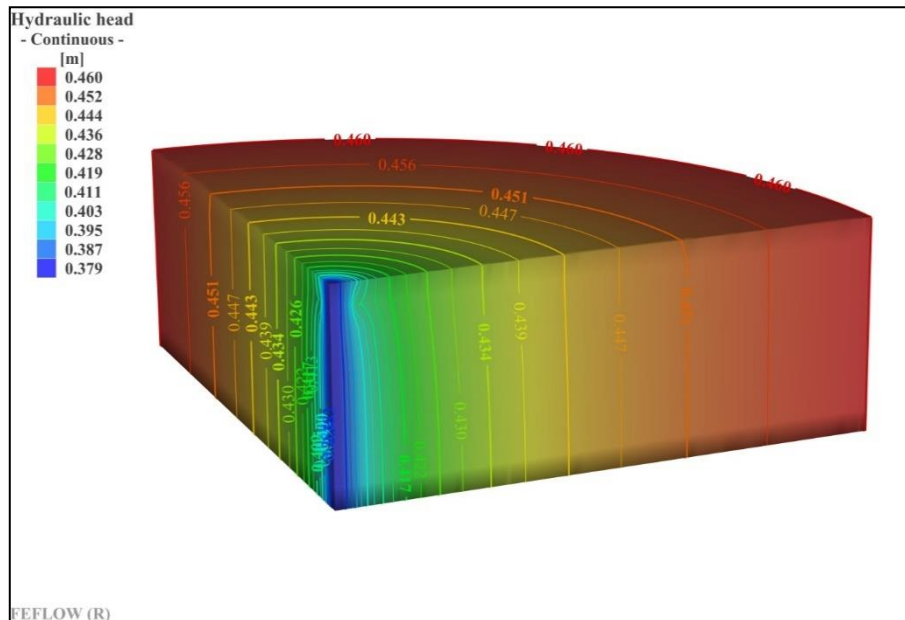
Az 39. és 40. ábrák a két modellváltozatban kialakuló vízszinteket és potenciálvonalakat mutatják be.

Az FA modellben potenciálvonalak a modell peremén hengersizmetrikusak, viszont a kúthoz közeledve egyre jobban torzulnak (39. ábra). Ennek oka, hogy a kúthoz közelebb egyre

sűrűbben helyezkednek el a különböző szivárgási tényezőjű zónák – ahogy azt a 12. táblázatban bemutattam –, valamint a kút által kifejtett leszívó hatás – így az áramlás függőleges komponensének – érvényesülése itt számottevő. A 40. ábrán az „FB” modellváltozatban kialakult vízszinteket és potenciálvonalakat láthatjuk.

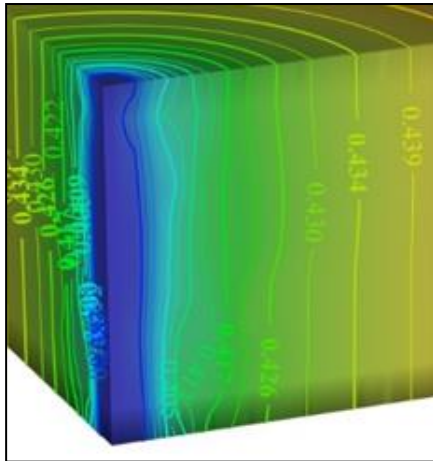


39. ábra: „FA” modellváltozatban kialakult vízszintek és potenciálvonalak (Farkas és társai 2019a)

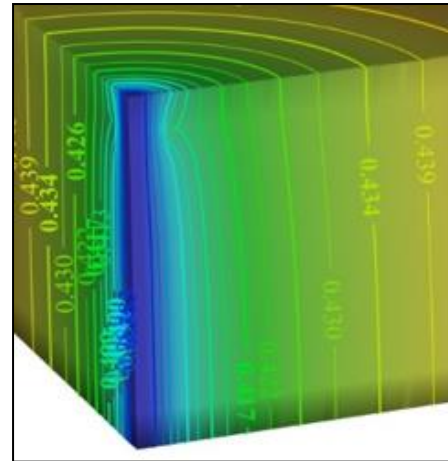


40. ábra: „FB” modellváltozatban kialakult vízszintek és potenciálvonalak (Farkas és társai 2019a)

A 39. ábrával összehasonlítva szembeűnő, hogy a potenciálvonalak szinte az egész modellben függőlegesnek tekinthetők, kivéve a kút közvetlen környezetét (41. és 42. ábrák). Ennek oka, hogy ez a modellváltozat jóval homogénebb, mint az „FA” verzió és csak a kút közelében van változás a szivárgási tényező értékében.



41. ábra: Kút körüli potenciálvonalak az „FA” modellnél



42. ábra: Kút körüli potenciálvonalak az „FB” modellnél

6.4.5. Modellváltozatok validálása, a modellek használhatóságának korlátai

Mind az „FA”, mind az „FB” modellváltozatoknál tizennégy további mérés adatait használtam fel, hogy igazoljam a kalibráció helyességét. A 13. táblázatban az „FA”, a 14. táblázatban az „FB” verzióhoz tartozó validálások eredményei láthatóak. A táblázatokban feltüntettem a figyelembe vett piezométerek számát és a szinteknél kapott abszolút hibát, valamint a fizikai és numerikus modellezés során mért hozamértékeket és a kettő közötti eltérést, ezeken kívül a peremfeltételek értékeit, a kialakult depressziót, valamint a leszívás és a teljes hiba arányát.

13. táblázat: Az „FA” modellverzió kalibrált és validált eredményei

Mérés jele	Leszívás értéke [mm]	Peremfeltételek [mm]		P1-P35 teljes hibája [mm]	Piezok hibája és leszívás aránya [%]	Hozam [l/min]		Hozamok eltérése [%]
		Anyakút	Víz-bevezetés			Számított	Mért	
FA	81	379	460	1.4	1.7	0.21	0.21	0.0
FA-V1	181	299	480	3.8	2.1	0.42	0.40	5.2
FA-V2	162	318	480	3.2	2.0	0.39	0.37	4.1
FA-V3	142	338	480	2.9	2.0	0.35	0.34	1.9
FA-V4	138	322	460	3.1	2.2	0.32	0.31	4.3
FA-V5	124	356	480	2.9	2.4	0.31	0.30	3.3
FA-V6	123	337	460	2.5	2.0	0.29	0.28	4.5
FA-V7	104	376	480	2.6	2.5	0.27	0.26	5.2
FA-V8	79	381	460	1.8	2.3	0.20	0.20	2.6
FA-V9	67	413	480	3.0	4.4	0.19	0.19	1.2
FA-V10	59	401	460	2.4	4.0	0.16	0.15	4.6
FA-V11	46	434	480	3.3	7.1	0.13	0.15	12.4
FA-V12	38	422	460	2.7	7.2	0.11	0.12	13.0
FA-V13	25	455	480	2.8	11.3	0.07	0.10	28.3
FA-V14	14	446	460	2.4	17.0	0.04	0.07	58.8

14. táblázat: Az „FB” modellverzió kalibrált és validált eredményei

Mérés jele	Leszívás értéke [mm]	Peremfeltételek [mm]		P2-P7 teljes hibája [mm]	Piezok hibája és leszívás aránya [%]	Hozam [l/min]		Hozamok eltérése [%]
		Anyakút	Víz-bevezetés			Számított	Mért	
FB	81	379	460	0.6	0.8	0.21	0.21	0.0
FB-V1	181	299	480	2.1	1.1	0.43	0.40	6.4
FB-V2	162	318	480	2.0	1.2	0.39	0.37	5.6
FB-V3	142	338	480	2.3	1.6	0.35	0.34	3.3
FB-V4	138	322	460	1.4	1.0	0.33	0.31	5.1
FB-V5	124	356	480	2.3	1.8	0.31	0.30	4.4
FB-V6	123	337	460	1.5	1.3	0.30	0.28	5.6
FB-V7	104	376	480	1.9	1.8	0.27	0.26	5.1
FB-V8	79	381	460	1.2	1.5	0.20	0.20	2.8
FB-V9	67	413	480	2.1	3.2	0.18	0.19	2.6
FB-V10	59	401	460	1.1	1.9	0.15	0.15	2.0
FB-V11	46	434	480	1.5	3.3	0.13	0.15	18.4
FB-V12	38	422	460	1.4	3.8	0.10	0.12	19.0
FB-V13	25	455	480	1.5	5.8	0.07	0.10	35.0
FB-V14	14	446	460	1.2	8.3	0.04	0.07	70.1

A validálás helyességének mértékét három mérőszám szerint értékelhetjük. Tekinthejtük a piezométereknél kapott teljes hibát, a hozambeli eltérést, valamint az összhiba és a depresszió arányát. Erre azért van szükség, hogy megállapítsuk a kismintamodell – a leszívások tekintetében – milyen intervallumon ad megbízható eredményeket. A piezométerek teljes hibájának maximum értéke a 13. táblázatban 3,8 mm, míg a 14. táblázatban 2,3 mm. Viszont a leszívási értékekre pillantva láthatjuk, hogy az összhibák maximumához nagyobb arányú depresszió társul, ebből következően a teljes hiba önmagában nem alkalmas az eredmények kiértékelésére. A piezométerek hibáját és a leszívást arányosító szám sokkal megbízhatóbb információt nyújt az adott validálás pontosságáról. Ez az érték ugyanazon értékű leszívásnál akkor kisebb, ha az abszolút hiba értéke kisebb, valamint két azonos abszolút hiba esetén a nagyobb mértékű depresszióval kapunk alacsonyabb értéket. A fizikai kísérletek során mért, valamint a numerikus modellezés során számított hozamok különbsége szintén fontos szempontot nyújt a futtatások kiértékelésében. Az imént említett adatokat minden validált modell esetében kiszámítottam. Ezeket felhasználva megállapítható, hogy a kismintamodell mely tartományokon szolgáltat megbízható eredményeket. A 13. táblázat adatait kiértékelve két kategóriát határoztam meg az alapján, hogy a „piezok hibája és leszívás aránya”, valamint a „hozamok eltérése” milyen értékeket vett fel. Minden kategóriához hozzárendeltem egy leszívási intervallumot, ahol érvényesnek tartottam az itt tett megállapításokat. Amennyiben a vízszintek és hozamok pontosságát jelző két mérőszám kerekített értéke mindkét verzió esetében meghaladta az 5%-ot, úgy azon a leszívási tartományon nem tartom a numerikus modell által igazoltnak a kisminta által szolgáltatott eredményeket. A 13. táblázatból az „FA-

V11”, „FA-V12”, „FA-V13”, „FA-V14” mérésekre, a 14. táblázatból az „FB-V11”, „FB-V12”, „FB-V13”, „FB-V14” validálásokra igaz ezen kritérium. Tehát elmondható, hogy amennyiben a leszívás 50 mm alatt maradt, az eredmények numerikus modellel nem igazoltak. (A 13. és 14. táblázatokban ezen méréseket szürkével jelöltem.) A nagyobb eltérések az alábbi okokból eredhetnek:

- A kismintamoddellel történő laborméréseket valamilyen kicsi, de állandó értékű hiba terheli, amely a kisebb leszívás- és hozamértékeknél markánsabban jelentkezhethet.
- Elképzelhető, hogy a mérethatás következtében ilyen kis potenciálkülönbségnél sérülhetnek a vizsgált folyamat hasonlóságát biztosító feltételek.
- A kút környezetében tapasztalt nagyobb fokú nyomásszintkülönbségek a kútpalást által kifejtett ellenállásnak is tulajdoníthatóak.

A 13. és a 14. táblázat adataira pillantva láthatjuk, hogy a kismintamoddellünk 50 mm, illetve az általam 2015-ben előállított 181 mm-es legnagyobb leszívási értékek közötti intervallum esetén igazolhatóan megfelelő pontosságú adatokat szolgáltat.

6.5. KISMINTAMODELL EREDMÉNYEINEK ÁTSZÁMOLÁSA VALÓS MÉRETRE, ILLETVE IGAZOLÁSA TEREPI VIZSGÁLATOKKAL

Az 4.2.3. fejezetben bemutatam két terepi mérést, melyekkel azt kívántam megvizsgálni, hogy a laboratóriumi mérések átszámíthatóak-e valós, terepi mérések eredményeire. Ez lehetővé tenné, hogy kismintamoddellezés segítségével terepi mérések eredményeit előrejelezzük, illetve részben helyettesítsük is.

6.5.1. A kisminta és a Mázsa tér méréseinek összevetése

A 4.2.2. fejezetben részletesen ismertettem a Mázsa téren végzett próbaszivattyúzás eredményeit, valamint a terület geológiai adottságait. Ahhoz, hogy a laborban nyert adatokat valós méretre kiterjesszem és összevegysem a terepen kapott értékekkel szükség volt a 3.5.1. fejezetben tárgyalt hasonlóságok megállapítására.

A Mázsa tér esetében a fizikai modellre vonatkozó geometriai arányszám $C=9,41$ volt. A geometriai hasonlóságot leíró számot a valós (160 mm) és a kisminta (17 mm) anyakútátmérőinek hányadosából számítottam ki. Ezzel a szorzóval a laboratóriumban vizsgált talajréteg, illetve anyakút méretei átszámíthatók valós méretre. A vízvezető teljes rétegvastagsága 4,7 m, telített rétegvastagsága 4,3 m, az anyakút a talajminta teljes vastagságában szűrőzött. A modelltörvény értelmében a sebesség dimenziójú értékek megegyeznek valós és kicsinyített méretben is, így itt átszámításra nem volt szükség.

A kisminta, valamint a Mázsa téri termelőkutak szűrőzött hosszát összevetve látható, hogy ez a paraméter 7%-kal nagyobb volt a laboratóriumi kísérlet esetében. A szűrőzött hosszban fennálló különbség nem tekinthető jelentősnek, így a kútra vonatkozó geometriai hasonlóság teljesül. Az 5.7. fejezetben bemutattam, hogy a szivárgási tényező számítását több feltételezett feküszinttel is elvégezték, melyek közül az 5,0 m-es vízadó rétegvastagság teljesíti a vizsgált talajrétegre vonatkozó geometriai hasonlóságot (a laboratóriumi és valós értékek közötti eltérés 6% volt).

A két méretben lezajlott folyamatok közötti kinematikai hasonlóság feltétele, hogy a laboratóriumban és terepen megfigyelt leszívás és vízhozam értékpárból számított szivárgási tényezők kellően közeli értékekkel rendelkezzenek. A laboratóriumban mért, a terepi eredményhez legjobban illeszkedő szivárgási tényező $4,44 \cdot 10^{-4}$ m/s volt, mely csupán 2%-kal tér el a terepi vizsgálatból számított $4,55 \cdot 10^{-4}$ m/s-hoz képest. A kismintamodellben az említett szivárgási tényező számítása $s=0,205$ m leszívás és $Q=0,36$ l/min vízhozam mérési eredmények mellett történt. Az átszámítás után a valós méretre vonatkoztatott leszívás $s=1,93$ m, míg a vízhozam $Q=127,5$ l/min volt. A terepi próbaszivattyúzás 1,89 m-es leszívása és 130 l/min-es hozama, valamint a valós méretre átszámított laboratóriumi leszívás- és vízhozam értékek között egyaránt 2-2% eltérés jelentkezett (15. táblázat) (Farkas 2021).

15. táblázat: A kismintában és a Mázsa téren végzett próbaszivattyúzások összehasonlító számításainak eredményei (Farkas 2021)

Paraméterek	Kisminta értékek	Átszámított értékek	Terepi mért értékek	Különbségek [%]
Leszívás [m]	0,205	1,93	1,89	2
Vízhozam [l/min]	0,36	127,2	130,0	2

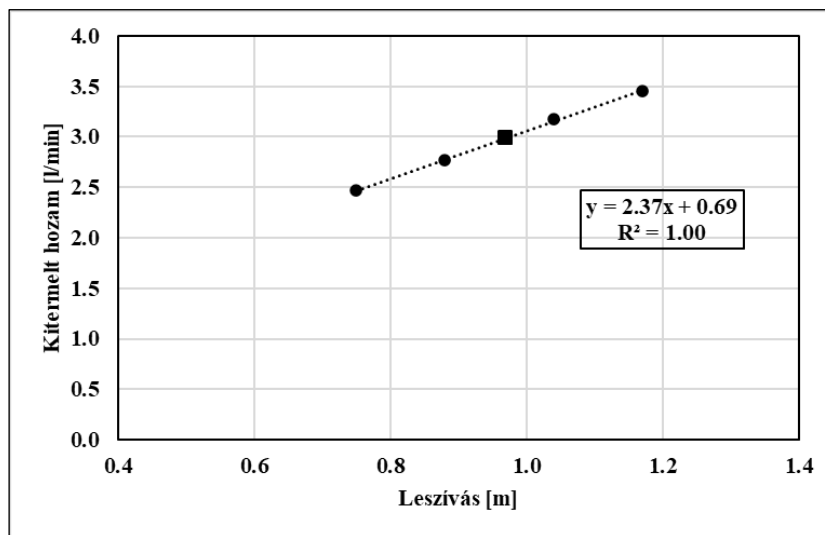
6.5.2. A kisminta és a Könyves Kálmás körút méréseinek összevetése

A laboratóriumi modell, valamint a Könyves Kálmán körúti mintaterület közötti geometriai arányszám $C=9,71$, mely ezúttal is az alkalmazott kútátmérők (terepi 165 mm, laboratóriumi 17 mm) hányadosa. A Könyves Kálmán körúti szivattyúzott kút teljes szűrőzött hossza 6%-kal nagyobb, mint a kismintamodellé, mely különbség elhanyagolható mértékű. A vízzáró fekü jól behatárolható, a vízvezető telített rétegvastagságok közötti különbség 7%-ot tesz ki, így a kisminta és a terepi próbaszivattyúzás közötti geometriai hasonlóság teljesül.

A kinematikai hasonlóság feltétele, hogy az időfüggő paraméterek is megfelelő egyezést mutassanak a két méretarányban lezajló folyamatok között. A laboratóriumi, illetve a terepi adatokból számított szivárgási tényező értékek egy nagyságrenddel eltértek egymástól, ezért a

kisminta és a valóság szivárgási jelenségeit nem lehetett kinematikailag hasonlóknak tekinteni. A kinematikai hasonlóság érvénytelensége ellenére megkíséréltem az összetartozó leszívás és vízhozam értékek átszámítását. A leszívás átszámítási tényezője C -vel egyenlő, a vízhozam valós méretét a 23. egyenlettel határoztam meg. Ebben az esetben a $C_k = 0,038$, mely a terepi ($1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s) és a már igazolt Mázsa téri példánál bemutatott laboratóriumi méréshez tartozó szivárgási tényező ($4,44 \cdot 10^{-4}$ m/s) hányadosa.

Az átszámított laboratóriumi mérések között nem fordult elő olyan, melynél a szivárgási tényező megközelítette a Mázsa téri példánál igazolt értéket, emellett a leszívás 0,97 m-t vett volna fel. Ebből kifolyólag a rendelkezésre álló mérésekből kiválasztott négy adatpár felhasználásával határoztam meg a valóságra transzformált leszívás-vízhozam görbét (43. ábra).



43. ábra: Kismintamérések leszívás és kitermelt hozam adatai átszámítva valós méretre $C=9,71$ értéket felhasználva (Farkas 2021)

A valós leszíváshoz ($s=0,97$ m) tartozó átszámított vízhozam értékét a 43. ábrán látható függvényről olvastam le. Az így meghatározott vízhozam értéke 3,0 l/min, melyet négyzet alakú jelölővel tüntettem fel. Összevetve a terepi kitermelt hozam 6,5 l/min-es értékével láthatjuk, hogy az eltérés 46%-ot tesz ki, ami jelentősnek tekinthető. Ebből azt a következtetést vontam le, hogy a kinematikai hasonlóság hiánya miatt (amely a terepi és laboratóriumi adatokból számított szivárgási tényezők különbözőségéből fakad) nem feleltethetők meg sikeresen egymásnak a valós, illetve kicsinyített méretben elvégzett próbaszivattyúzások (Farkas 2021).

7. A KUTATÁS SORÁN ELÉRT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az 5-6. fejezetben bemutattam a 2015-2020. között elvégzett irodalomkutatásomat, laboratóriumi méréseimet és számításaimat, az ehhez kapcsolódó numerikus modelletem és a laboratóriumi eredmények valós léptékre, tényleges próbaszivattyúzásokra való átszámíthatóságát. Az alábbi fejezetben a vizsgálataimat szakirodalmi kontextusba ágyazva bemutatom és elemzem annak eredményeit és az ezzel kapcsolatosan megfogalmazható ajánlásokat.

7.1. EN ISO 22282-4 (EC) SZABVÁNY FELÜLVIZSGÁLATA

Több olyan javaslatot, ajánlást találtam az irodalomkutatás alatt, melyek véleményem szerint jól hasznosíthatóak lennének hazai körülmények között is. A következő 7.1.1. fejezetben azon EC-ban is szereplő előírásokat, valamint számszerűsített paramétereket fogom röviden bemutatni, melyek más előírásokkal összhangban vannak vagy esetleg módosításuk, kiegészítésük javasolható. Az ezt követő 7.1.2. fejezetben olyan hazai viszonylatban is releváns szempontokra, vizsgálati lépésekre hozott javaslatokat ismertetek néhány mondatban, amiket az EC nem taglal.

7.1.1. Az EC előírásainak kiegészítési és módosítási javaslatai

Nyugalmi vízszint mérésének időtartama

A szakirodalmi áttekintés alapján javaslom, hogy a nyugalmi vízszint mérésének ajánlott időtartama a szivattyúzás előtt minimum hét nap legyen (lásd: Osborne (1993), Kruseman és de Ridder (1994), SERAS (1994), USA EPA (1994), Kovalevsky és társai (2004), Maine EPA (2005), North Carolina (2007), Susquehanna (2007), Washington State (2009), ICRC (2011), EN ISO 22282-4 (2012), Leonhardt és társai (2012), Pattle Delamore (2013), New York DEC (2015), Balasubramanian (2017), Waikato (2019) irodalmak). A legalább egy héten keresztül végzett napi mérésekkel valószínűsíthetően biztosítható a kellő adatmennyiség, viszont felső határ hiányában a vizsgálatot végző személy rugalmasan dönthet a mérések további folytatásáról. A 16. táblázatban első két sorában az ajánlásokban előforduló legkisebb és legnagyobb intervallumokat tüntettem fel, majd az EC előírását és az általam ajánlott irányszámot.

16. táblázat: A próbaszivattyúzás előtt a nyugalmi vízszint mérésének ajánlott időtartama

Forrás	Nyugalmi vízszint mérésének ajánlott időtartama a szivattyúzás előtt
Balasubramanian (2017), Osborne (1993)	Meg kell határozni mérés előtt.
Leonhardt és társai (2012)	11-25 nap
EN ISO 22282-4 (2012)	1-10 nap
Farkas (2021)	Minimum 7 nap

Lépcsős hozamú próbaszivattyúzás szükségessége

Az általam elvégzett tanulmány alapján négy különböző hozammal elvégzett szivattyúzást javaslok, mivel ez volt a leggyakrabban említett érték az irodalmakban. A vizsgálati lépcsők időtartamánál minimum 60 percet ajánlok, az alkalmazott hozamokat az üzemi 50, 75, 100 és 125%-ának határoztam meg, mivel az előírások közül ez volt a legnagyobb vizsgálati skálát képviselő tartomány. A 17. táblázat a releváns szakirodalmak saját javaslataimmal való összehasonlítását mutatja be.

17. táblázat: Lépcsős hozamú próbaszivattyúzás ajánlott paraméterei

Forrás	Lépcsők száma	Lépcsők időtartama [min]	Vizsgálati hozamok
OHIO EPA (2006)	3	min. 60	-
Washington State (2009)	4-8	min. 60	Megkívánt hozam 50, 75, 100 és 125%-a.
ICRC (2011)	4-5	60-120	Utolsó lépcsőben legalább akkora legyen a hozam, mint a megkívánt (üzemi), de akár 125-150%-ra is növelhető.
Farkas (2021)	4	min. 60	Megkívánt hozam 50, 75, 100 és 125%-a.

Vízszintek észlelési ideje, pontossága és eszközei

A vízszintek leolvasása során véleményem szerint kézi műszer használatával a centiméterre kerekítés kellően szigorú feltétel, viszont az automata műszerek rendszerint ennél nagyobb pontosságot tudnak biztosítani. Ezzel kapcsolatban az EC centiméter pontosságot ír elő (EN ISO 22282-4 2012, ezzel szemben találkozhatunk 3 mm-es (Brown és társai 1972, North Carolina 2007) és 2,5 mm-es (Maine EPA 2005) megkívánt pontosság előírásával.

A vízszintek észlelési időközeinek mértékére változatos ajánlásokat találhatunk (M5/2. táblázat, M6/3. táblázat, M7/4. táblázat). Tapasztalataim azt mutatják, hogy a sűrű, egyenletes észlelési idő (pl. másodpercenként egy adat) a leszívás kezdeti szakaszán nagyon hasznos lehet, viszont a későbbi szakaszokban rengeteg „felesleges” adatot kell kezelnünk,

mivel a vízszintekben bekövetkező változás időben nagyobb léptéket követ. Amennyiben a műszer képes rá, úgy alkalmazzunk egyes időintervallumokon más-más adatnyerési sűrűséget. Véleményem szerint kézi és automata eszközökkel is érdemes minimum az EC által előírt sűrűséget alkalmazni, viszont körülményekhez mérten ennél végezhetünk gyakoribb vízszintészleléseket is, főként a szivattyúzás kezdeti szakaszában (North Carolina 2007, EN ISO 22282-4 2012, British Columbia 2019). Automata műszer használata mellett érdemes kézi műszerrel néhány ellenőrzőmérést végezni annak érdekében, hogy a műszer elmozdulásából, beállítási hibából vagy meghibásodásból adódóan ellenőrizni tudjuk az adatokat.

Hozammérés eszközei, mérésének gyakorisága és megengedett ingadozása

Véleményem szerint az EC a legrugalmasabban alkalmazható előírás, így nem szorul változtatásra. Ez a szabvány az egyetlen, mely nem a vizsgálat kezdete óta eltelt időhöz viszonyított fix mérési időközöket ad meg, hanem a hozam stabilitásához köti az elvégzendő mérések számát (EN ISO 22282-4 2012). Az ezen túl elérhető hivatalos ajánlások a kitermelt hozamra vonatkozó mérésszámban nagy szórást mutatnak, az első egy órára vonatkozó előírások 1-12 darab között változnak (Brown és társai 1972, Osborne 1993, OHIO EPA 2006, Powers és társai 2007, Susquehanna 2007, Washington State 2009, Newfoundland 2010, ICRC 2011, Leonhardt és társai 2012, Tang és társai 2017, Balasubramanian 2017, British Columbia 2019).

A kitermelt hozam stabilizálása nehéz feladat lehet, főként a vizsgálat kezdeti szakaszán. Itt is az EC-dal összhangban, 5%-os eltérést tartok elfogadhatónak. A lesgigorúbb előírás szerint a maximális ingadozás 2% lehet, míg a legmegengedőbbek 10%-ot említenek (Brown és társai 1972, Powers és társai 2007, Newfoundland 2010, New York DEC 2015). A legtöbb előírás, köztük az EC is 5%-os hozameltérést engedélyez (Osborne 1993, USBR 1995, OHIO EPA 2006, Susquehanna 2007, EN ISO 22282-4 2012, Tang és társai 2017, Waikato 2019, British Columbia 2019) (M8/5. táblázat).

Szivattyúzás időtartama

A szivattyúzás szükséges időtartamára vonatkozó javaslatom, hogy a nyomás alatti rétegeknél minimum 24 óra, a szabad felszínű rétegeknél legalább 72 óra legyen az előírt vizsgálati időtartam, hangsúlyozva ezzel a két eset közötti különbséget. Állandó hozamú próbaszivattyúzás esetén a szakirodalomban ajánlott legrövidebb vizsgálati idő 2 óra, míg a leghosszabb 3 hét USBR (1995). Általánosan kijelenthető, hogy a vizsgálati idő nyomás alatti

rétegeknél rövidebb, szabad felszínű víztartók esetén tág határok között mozoghat, mivel több időt vehet igénybe a stabilnak tekinthető leszívási vízfelszín kialakulása. Nyomás alatti víztartók esetén 24 óra, nyílt felszínűnél 3-7 nap között mozog a vizsgálat ideje, a leggyakrabban ajánlott időtartamok 24-72 óra közé esnek (Osborne 1993, Kruseman és de Ridder 1994, SERAS 1994, USA EPA 1994, Maine EPA 2005, BurVal 2006, North Carolina 2007, Powers és társai 2007, Susquehanna 2007, Washington State 2009, Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2011, EN ISO 22282-4 2012, Pattle Delamore 2013, New York DEC 2015, Waikato 2019, British Columbia 2019). Az EC minimum 24 órás szivattyúzási időt ír elő, mely nagy szabadságot enged a vizsgálatot végző mérnököknek (EN ISO 22282-4 2012).

Kitermelt víz elvezetése

A próbaszivattyúzás során a kút vízáradékosságától és a vizsgálat időtartamától függően nagymennyiségű vizet kell kitermelni, melynek elvezetésére nyomás alatti vízáradó réteg esetén minimum 100 m-es, szabad felszínűnél legalább 200 m-es távolságot ajánlok, karbonátos kőzet esetén akár a 600 m betartása is indokolt lehet (Ferris és társai 1962, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Susquehanna 2007, British Columbia 2019). Javasolnám, hogy a próbaszivattyúzás előtt az alkalmazandó hozam alapján becsüljék meg a kút távolhatását, majd az eredmények alapján mérlegeljék a vizsgálatot tervezők. Az elvezetés távolságánál figyelembe kell venni, hogy lehetőleg a vizet ne vezessük ki az anyakút és valamelyik megfigyelőkút közé (Washington State 2009).

Az elvezetett víz tározásával, felszíni befogadóba való bocsájtásával kapcsolatban az EC nem fogalmaz meg szabályokat, de véleményem szerint ez igen fontos lenne. A tárolást mindenképpen javasolom előírni abban az esetben, ha a víz környezetre vagy emberi egészségre káros anyaggal terhelt. Felszíni befogadóba történő elvezetésre a helyi előírások betartása mellett lehetőséget nyújtanak egyes nemzetközi példák (OHIO EPA 2006, Susquehanna 2007, British Columbia 2019), ezek alkalmazását javasolom.

A talajerózió elleni védekezéshez, melyet a vizsgálati terület eredeti állapotának megőrzése érdekében lehet szükség, a Pattle Delamore (2011) és Waikato (2019) előírások használatát ajánlom.

Visszatöltődés vizsgálata

A visszatöltődés vizsgálatát a szakirodalmak ajánlásával egyetértésben én is javaslom (lásd: Osborne (1993), SERAS (1994), USA EPA (1994), USBR (1995), OHIO EPA (2006), North Carolina (2007), Susquehanna (2007), Washington State (2009), Newfoundland (2010), ICRC (2011), EN ISO 22282-4 (2012), New York DEC (2015), Waikato (2019) irodalmak).

A visszatöltődés időtartamának meghatározásánál az EC előírását tartom a leginkább alkalmazhatónak kis és nagy áteresztőképességű talajok esetén is, amely szerint, ha három egymást követő óras leolvasás után is 1 cm-en belül van a vízszint, akkor a vízádo visszatöltődöttnek tekinthető. A többi előírás vagy az eredeti nyugalmi vízszint bizonyos százalékának eléréséhez vagy a szivattyúzás időtartamához kötik a visszatöltődés-vizsgálat időtartamát, melyek gyakorlati alkalmazása esetén előfordulhat, hogy a mérés túl rövid, vagy éppen irreálisan hosszú lesz (M10/6. táblázat).

Kiértékelési módok

Az EC igen szűk választékot nyújt a kiértékelési módszerekkel kapcsolatban – időben állandó esetre a Dupuit/Thiem-módszert, míg időben változó esetre a Theis és a Cooper-Jacob módszereket ajánlja (EN ISO 22282-4 2012). Javasolnám, hogy az M12/7. táblázat, M13/8. táblázat, M13/9. táblázat, M14/10. táblázat jelenjenek meg az EC mellékletében, mint lehetséges kiértékelési módokat felsoroló táblázatok.

7.1.2. Az EC-ban nem szereplő ajánlások Magyarországra vonatkozó kiegészítése

Az alábbiakban összefoglalom azokat az ajánlásokat, melyekkel kapcsolatban a Magyarországra vonatkozó EC szabvány nem ad iránymutatást, ezért ezt fontosnak tartom azt a nemzetközi szakirodalmak alapján kiegészíteni.

Vizsgálat időpontjának kiválasztása

A próbaszivattyúzás időpontját úgy kell megválasztani, hogy az eredmények minél jobban a víztartó valós állapotát tükrözzék. Ezzel kapcsolatosan a következő megállapítások figyelembevételét javaslom:

- Megfelelő évszakban végezzük el a vizsgálatot, mivel a téli és kora tavaszi időpontokban a hóolvadás következtében nagyon megnőhet a beszivárgás mértéke (Maine EPA 2005, ICRC 2011, New York DEC 2015, Balasubramanian 2017).

- Az évszakos változások szabad felszínű homok vagy kavics víztartókat érzékenyen érinthetik, viszont nyomás alatti rétegekben, illetve kőzetekben az évszakos jelenségek kevésbé befolyásolják az eredményeket (New York DEC 2015, British Columbia 2019).
- A vizsgálat száraz időszakban történjen, de öntözésből létesített kutak ne befolyásolják az adatokat, főként kis hozamú repedezett kőzetek esetén (ICRC 2011, Pattle Delamore 2011, Balasubramanian 2017).

A tervezési és mérési szakaszban vizsgálandó vagy feljegyzendő környezeti hatások

A természetes vagy antropogén eredetű befolyásoló hatások, jelenségek többségének mérésének elkezdését már a vizsgálat megkezdése előtt fontosnak tartom. A megelőző mérések megkönnyítik, hogy az adatsorokat torzító hatásukkal a kiértékelés szakaszában számolni tudjunk (lásd még: Osborne 1993, Kruseman és de Ridder 1994, USBR 1995, BurVal 2006, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Susquehanna 2007, Washington State 2009, Pattle Delamore 2011, Pattle Delamore 2013, New York DEC 2015, Balasubramanian 2017, Waikato 2019, Newfoundland 2010, British Columbia 2019). Táblázatos formában felsoroltam a próbaszivattyúzást érintő befolyásoló tényezőket (18. táblázat), melyet indokoltnak tartok az EC mellékletében is feltüntetni, mivel a szabvány csak a felszíni vizek monitoringjának fontosságát említi.

18. táblázat: Javaslat az EC bővítésére: vizsgálandó, a próbaszivattyúzás folyamatát befolyásoló tényezők.

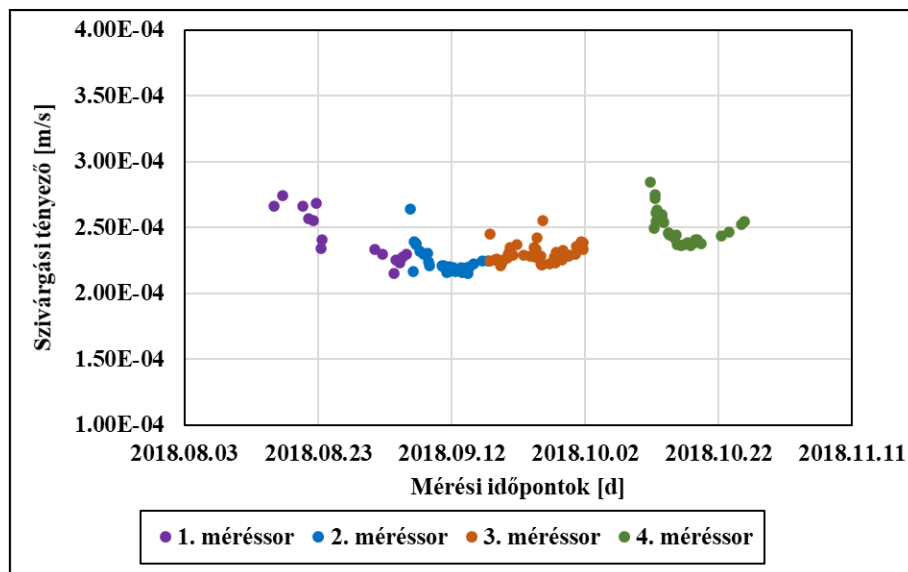
Tervezési szakaszban mérendő	Mérési szakaszban mérendő	Mérési szakaszban feljegyzendő esemény
<ul style="list-style-type: none"> – légköri nyomásváltozás – közelben fekvő felszíni víztestek szintjei – beszivárgás – építmények és más termelőkutak körül kialakult módosult vízfelszín – egyéb 	<ul style="list-style-type: none"> – csapadék, hóolvadás – léghőmérséklet-változás – peremfeltételek hatásai – árapály jelenség – repedezett kőzetek esetén – közlekedésből fakadó zavaró hatások 	<ul style="list-style-type: none"> – kitermelt hozam változása – ciklikus változások – személyzet cseréje – felszerelés cseréje – víztartó anyagának – megjelenése a kútban – szaghatás a kútból (pl. H₂S) – hozam vagy vízszint – lépcsőzetes változása – egyéb

7.2. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐRE VONATKOZÓ EREDMÉNYEK KIFEJTÉSE

A 2015-ös, valamint a 2018-2019-es időszakban permanens és nempermanens méréseket végeztem, melyek célja a próbaszivattyúzás folyamatának jobb megismerése, valamint a minta talajfizikai paramétereinek meghatározása (szivárgási tényező, tárolási tényező). A különféle vizsgálatok egymással és a szakirodalommal való összevetését, a levonható konklúziókat ebben a fejezetben ismertetem.

7.2.1. A szivárgási tényező változása az idő függvényében

A 6.1.2. fejezetben bemutattam, hogy a permanens mérésekből származó adatsorból számított szivárgási tényezők időben nem állandóak. A szivárgási tényező időbeli változásának kimutatását Klotz (1971) közel egy évig tartó vizsgálatai alapján mutatta ki. Az általa vizsgált talajmintára megállapított szivárgási tényező a mérés kezdetétől számítva körülbelül 1,5 hónapig csökkent, majd közel állandóvá vált. A jelenséget azzal magyarázta, hogy a talajban maradó levegőfázis apró légbuborékokat alkot, melyek csak folyamatos áramlás hatására tudnak távozni a talajmintából. A kezdeti és az állandósult szakaszok szivárgási tényezői közötti eltérés körülbelül 30% volt.



44. ábra: A Klotz (1971) által leírt szivárgási tényező változásának kimutatása saját laboratóriumi mérésekkel

A 44. ábrán látható, hogy kezdetben az 1-3., valamint a kútcserét követő 4. mérőssornál megfigyelhető a Klotz (1971) által is kimutatott csökkenő tendencia a szivárgási tényező értékekben, vagyis a levegőfázis távozásának hatása bizonyíthatóan kimutatható az általam végzett vizsgálatokból. Ezt az állítást a laboratóriumi mérések során megjelenő levegőbuborékok megléte (6.1.2. fejezet) is alátámasztja.

A későbbi mérésorokon megfigyelhető számított szivárgási tényező-növekedés ettől a jelenségtől független, feltehetőleg a nagyobb perforációméret miatti szemcseátrendeződés okozza. A kétféle perforációjú anyagútnál számított értékek alapján valószínűsíthető, hogy a szivárgási tényező számolt értékét nem lehet függetlenül kezelni a kútkialakítástól: az 1,0 mm-es perforációjú anyagút esetén $2,31 \cdot 10^{-4}$ m/s, a 2,5 mm-es anyagút esetén $3,31 \cdot 10^{-4}$ m/s lett.

7.2.2. Különböző módszerekkel számított szivárgási tényező értékek összehasonlítása

A 2015-ben történt mérésekből a szivárgási tényezőre kapott érték $2,93 \cdot 10^{-4}$ m/s, ez körülbelül 30%-kal eltér a 2018-2019-estől ($2,31 \cdot 10^{-4}$ m/s és $3,31 \cdot 10^{-4}$ m/s). Ennek oka lehet a szivárgási tényező számított értékének időbeli változása, viszont valószínűbb, hogy a 2015-ös és 2018-as kismintakialakítás közötti különbség okozhatta ezt az eltérést: 2015-ben kevesebb, nagyobb átmérőjű megfigyelőkút volt beépítve. A nempermanens mérésekből származó Theis-módszerrel $1,43 \cdot 10^{-4}$ m/s értéket kaptam, ez körülbelül hasonló pontossággal (36%), de alulbecsülte a 2018-2019-es mérésekből számolt szivárgási tényező értékét. A numerikus modellezés során kapott eredményeknél a teljes modellterre kalibrált, nagy paraméterszámú „FA” modell $2,34 \cdot 10^{-4}$ m/s értéke 4%, míg a kevesebb paraméterrel rendelkező „FB” változat $2,46 \cdot 10^{-4}$ m/s értéke 9%-os eltérést adott az 2018-2019 mérés adataihoz képest. A szemeloszlási görbékből származó eredmények jóval nagyobb szórással rendelkeznek, 2-540% közötti különbségeket számítottam. A kisminta- és numerikus elemzések alapján leszűkíthető a becslő módszerek azon köre, amelyet jelen talajtípusnál használni ajánlok.

A numerikus modellezésnél, illetve a kismintakísérleteknél is megfigyelhető, hogy a szivárgási tényező meghatározása mennyire érzékeny lehet akár a kisminta vizsgálatoknál használt megfigyelőkút nem megfelelő átmérőjére vagy különböző módszerekkel való számítására. A kismintakísérleteknél kapott 30%, valamint 36%-os eltérés a referenciának választott értéktől soknak tűnhet, viszont a gyakorlatban ez az eltérés nagyon kicsinek mondható, ezért a kismintával, illetve a numerikus modellekkel számított eredményeket megbízhatónak tekintem. Véleményem szerint a körülbelül ezt a pontosságot képviselő, tehát az 50%-os hiba alatti szemeloszlási görbékből számító módszerek megbízhatónak tekinthetők. Ezek az USBR – mely nemcsak a szemeloszlási, hanem más módszerek közül is a legjobb eredményt adta –, Slichter és Barr módszerek. Az 50-100%-os eltérést adó Alyamani és Sen és Krumbein és Monk módszerek eredményeit még elfogadhatónak tartom. Ennek oka, hogy a kismintakísérletekkel vizsgált talajminta szivárgási tényezőjének időbeli változásának legnagyobb értéke is ezen az intervallumon értelmezhető (a minimumot $2,15 \cdot 10^{-4}$ m/s, a maximumot $4,08 \cdot 10^{-4}$ m/s

jelentette). A 100-200% közötti módszereket jó becslésként, a 200-300% közöttieket gyenge becslésként lehet alkalmazni. 300%-os eltérés felett a módszer pontossága erősen megkérdőjelezhető. A 19. táblázatban összefoglaltam a felhasznált módszerek alkalmazhatóság szerinti besorolását közepes homok víztartóra vonatkoztatva. Fontos kiemelni, hogy az itt tett megállapításaim a vizsgált talajmintával megegyező szemeloszlási görbével rendelkező víztartókra vonatkoznak.

19. táblázat: Szemeloszlási görbéket felhasználó módszerek használhatósága közepes homok talajminta esetén

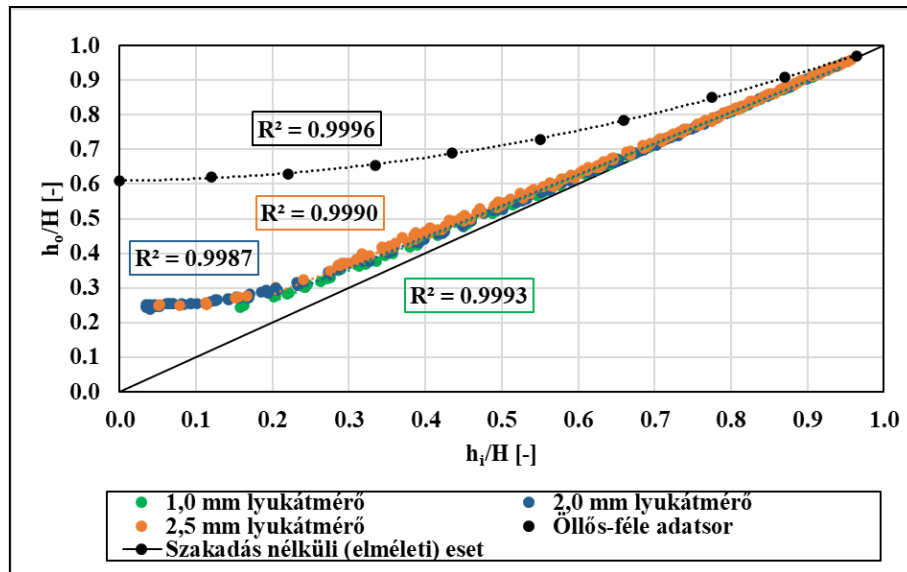
Referenciaértéktől való eltérés	Módszerek	Alkalmazhatóság
0-50%	USBR, Slichter, Barr	Megbízható
50-100%	Alyamani és Sen, Krumbein és Monk	Elfogadható
100-200%	Beyer, Seelheim, Hagen, Kröber, Sauerbrei	Jó becslés
200-300%	Chapius, USCRO, Hazen	Gyenge becslés
300%-	Jáky	Megkérdőjelezhető

Kérdéses, hogy ilyen nagy skálán mekkora hibát fogadhatunk el. Ez véleményem szerint attól függ, hogy az adott módszerrel kapott szivárgási tényező értékét milyen célra szeretnénk felhasználni. Amennyiben egy kisebb jelentőségű építmény víztelenítési munkájához szükséges, úgy elfogadhatóbb a nagyobb hibával terhelt, de gyors becslést adó eredmény, viszont egy kiemelt jelentőségű projektnél megkívánt a nagyobb pontosság, mivel a kitermelt víz mennyiségének néhány százalékos eltérése is komoly többletköltséget vonhat maga után.

7.3. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEINEK ÉRTELMEZÉSE

7.3.1. Kútellenállás kimutatása laboratóriumi mérésekkel

Az általam elvégzett és az 6.2.2. fejezetben bemutatott, kútellenállással kapcsolatos méréseket egy szakirodalmi példával vettem össze (Öllös 1958). Az Öllös általa meghatározott adatsor szintén kismintamodell alkalmazásával készült, viszont 1,5 cm belső sugarú porózus beton anyakutat használt méréseihez. A saját vizsgálataim grafikonját (29. ábra) kibővítettem az Öllös-féle mérés eredményeivel, hogy így a különböző kútkialakítások egymással összevethetőek legyenek.



45. ábra: A kismintakísérletekkel kimutatott kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadás összevetése Öllös (1958) eredményeivel (Farkas és társai 2021)

Az Öllös-féle adatsorról elmondható, hogy az elméleti egyenesre már a kezdeti szakasz elején sem illeszkedik, a leszívás növelésével a két függvény közötti eltérés egyre nagyobb ütemben nő. Az adatsort másodfokú polinommal közelítve nagyfokú egyezést lehetett elérni a determinációs együttható tekintetében.

A 45. ábra alapján megállapítható, hogy az egyes anyagutak különböző átmérőjű perforációja hatással van a kútpaláston kialakuló szakadás mértékére. A vízszint-elszakadás mértéke az 1,0 mm-es perforációjú kút esetén volt a legkisebb. Az Öllös és az általam regisztrált adatsorok közötti különbség a kút kialakításban, valamint a valamelyest eltérő kútátmérőben keresendő. A kísérleteimnél használt kutak különböző perforációval kialakított PVC csövek voltak, míg Öllös porózus beton kútjait nem látták el lyukakkal, a víz a betonon keresztül szivárgott be a kút belsejébe. Ezen felül a beton, illetve a PVC-csövek érdessége között akár két-három nagyságrendnyi különbség is lehet (M26/13. táblázat), ami befolyásolja a felületükön elszenvedett súrlódási veszteséget (Menon 2014). A 45. ábra alapján megállapítható, hogy a perforált PVC-csövek körül kisebb nyomásvesztés alakul ki vízkitermelés során, mint a közel ugyanolyan átmérőjű porózus beton kutak használatával (Farkas és társai 2021).

7.3.2. A szabad szivárgási felület vizsgálata a leszívás függvényében

A kútellenállásokat vizsgáló 6.2.2. és 7.3.1. fejezetben már bemutattam, hogy a kútpaláston kialakuló ellenállás függ a perforáció átmérőjétől, így a szakadásnak a leszívás függvényében való vizsgálatánál is várható volt, hogy a legkisebb lyukátmérőhöz tartozó veszteségérték adódik a legkisebbre. Számszerűsítve ez az 1,0 mm-es kút esetében 15%-os, a 2,0 mm-esnél 17%-os és a 2,5 mm-esnél 18%-os érték lett a maximális, a körülbelül 38 cm-es leszívás esetén.

7.4. NEMLINEÁRIS ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA A KISMINTAMODELLBEN

A 6.3.1. és 6.3.2. fejezetben bemutattam, hogy a kismintában nemlineáris áramlás csak közvetlenül az anyagút környezetében mutatható ki, a megfigyelőkutaknál a számított Reynolds-számok jóval alacsonyabbak a szakirodalomban megfogalmazott kritikus értékeknél. Látható volt azonban, hogy a kút körül megjeleni a nemlineáris áramlás, melynek vizsgálatának fontosságát a nemzetközi szakirodalom is alátámasztja.

A kismintaméréseimből kirajzolódó, átmeneti áramlást leíró Reynolds-szám tartomány $16 < Re < 23$ közötti. A Re_{crit} kúttervezési paraméterre, amely a lineáris és átmeneti tartomány közötti értéket jelöli, a szakirodalomban szereplő ajánlások széles skálán mozognak, ezen felül több szerző nem egy konkrét határértéket, hanem egy tartományt ad meg a kritikus állapotra vonatkozóan. Wendling és társai (1997) a kritikus Reynolds-szám értéket $Re < 10$ alatti tartományban javasolja. Truelsen (1958) és Vukovic és Soro (1992) a megkívánt értéket a $6 < Re < 60$ között értelmezi. Williams (1985), valamint Roscoe Moss (1990) a $15 < Re < 50$ tartomány „átlagaként” a $Re_{crit} = 30$ említi. Ezek, valamint a saját méréseim alapján a $Re_{crit} = 16$ határértéket javaslom, mely alatt az áramlás lamináris marad.

A laboratóriumi mérésekből az átmeneti áramlási tartományhoz 5,9-6,4 cm/s belépési sebesség intervallumot határoztam meg. A kritikus belépési sebesség esetében a leggyakrabban idézett érték $v_{crit} = 3,0$ cm/s (Walton 1962, Kruseman és de Ridder 1994, Driscoll 1986, Sterrett 2007). Kismintakísérletek alapján Wendling és társai (1997) $v_{crit} = 3,0-6,0$ cm/s belépési sebességet javasolnak, viszont olyan megkötéssel, hogy a Reynolds-szám 10 alatti. Szerzők egy másik csoportja jóval nagyobb, 0,6-1,2 m/s közötti sebességeket javasol megengedni a kútpaláston (Williams 1985, Parsons 1994, Roscoe Moss 1990). Az „American Water Works Association” által kiadott szabványban a megengedhető sebességet 0,46 m/s-ban határozta meg (AWWA 2006). Todd és Mays (2005) a víztartó szivárgási tényezője alapján adott meg kritikus belépési sebesség értékeket.

Az általam mért tartománynak itt is az alsó határértékét, a $v_{crit} = 5,9$ cm/s-t javaslom a lamináris-átmeneti tartomány közötti határ meghatározására. A szakirodalmi adatokkal összevetve látható, hogy ez inkább a kisebb sebességeket ajánló szerzők eredményeihez közelít. Wendling és társai (1997) méréseiből származó kritikus belépési sebesség tartományának felső határa szinte megegyezik a kismintamérésekből származtatott eredményemmel.

A 6.1.2. fejezetben említettem, hogy a talajminta szivárgási tényezője $2,15 \cdot 10^{-4}$ m/s és $4,08 \cdot 10^{-4}$ m/s között vett fel értékeket. Walton (1962) illetve Todd és Mays (2005) megállapította, hogy egyes szivárgási tényezőknél mi az optimális belépési sebesség. Ez alapján

a modellben vizsgált homoktalajnál az optimális belépési sebesség körülbelül 1,5-2,0 cm/s között van. Amennyiben elfogadjuk, hogy a modellben mért szivárgási tényezőkhöz rendelhető ajánlott belépési sebességek maximális értéke 2 cm/s, úgy kijelenthető, hogy a mérésorok kezdeti, lineáris szakaszán nagy biztonsággal lamináris maradhatott az áramlás (35. ábra). Az 5,9 cm/s feletti belépési sebességek már meghaladják az itt ajánlott értéket, így e felett nagyobb eséllyel léphetett át az áramlás az átmeneti tartományba, mely egyre növekvő nyomásvesztést okozott, illetve befolyásolhatta a víztartót alkotó talajszemcsék stabilitását is.

7.5. NUMERIKUS MODELLEZÉS EREDMÉNYEINEK ÉRTELMEZÉSE

7.5.1. Modellváltozatok validálása, a modellek használhatóságának korlátai

A numerikus modellezés során a 2015-ös méréseim alkalmával kapott értékeket használtam fel. Az eredetileg a laboratóriumi eredményekből számított szivárgási tényező értékét a megfelelő illeszkedés érdekében térben változónak vettem fel, ennek részleteit és eredményeit az 6.4.4 és 6.4.5. fejezet mutatja be.

A numerikus modellezéskori kismintamodell még nem volt alkalmas a kútkörüli áramlási viszonyok mérésére, ám a 2018-2019-es kúthidraulikai vizsgálatokkal kimutathattam, hogy a kútfalon elszenvedett veszteség nagy leszívások esetén nem elhanyagolható mértékű. Szakirodalmi adatok alapján a 3 cm/s alatti belépési sebesség esetén a kútfalon elszenvedett súrlódási veszteség értéke minimális, akár el is hanyagolható (Driscoll 1986, Kruseman és de Ridder 1994, Sterrett 2007). Ez a belépési sebesség a kismintamodellben körülbelül a 170 mm-nél kisebb leszívások tartományába esik, mely majdnem a 2015-ös mérésor maximális leszívásával egyenlő. Ezt a leszívást összevetve a 2018-2019-es mérések során ugyanezzel a paraméterekkel rendelkező anyakútnál megfigyelhető szabad szivárgási felület-függvénnyel (30. ábra) megállapítható, hogy a numerikus modellezés során előállt legnagyobb leszíváshoz (181 mm) tartozó érték körülbelül 7% volt.

7.5.2. A numerikus modell és a kismintakísérletek eredményeinek értelmezése valós méretekre

A laboratóriumi mérések valamint megfelelően kalibrált és validált numerikus modellek eredményeit a $C=9,41$ méretszorzó használatával átszámítottam valós, terepi mérésekre vonatkoztatott értékekre. A 20. táblázatban összefoglaltam a kisminta és a numerikus modellekből származó adatokat, valamint az ezekből valós méretekre átszámolt értékeket. Az anyakútban mért leszívást, továbbá a kitermelt hozamot a kismintatörvények alapján határoztam meg.

Az adott numerikus modell piezométereinek teljes hibáját C-vel megszoroztam, így előállítottam a valós méretre kialakuló vízszintek pontosságának értékét. A hozamok pontosságát úgy kaptam meg, hogy a valós méretekre vonatkozó adatokat megszoroztam az egyes numerikus modelleknél kapott eltérések értékével. Természetesen a vízszintek és a hozamok pontossága pozitív és negatív előjelű is lehet, tehát a kisminta túl- vagy alábecsül azon értékekkel, melyeket a táblázatban közöltem. Meg kell jegyezni, hogy sem a hozamok, sem pedig a vízszintek pontosságára nem igaz, hogy a leszívás értékétől függene. Tehát ha nő a leszívás mértéke, nem törvényszerű, hogy a vízszintek vagy a hozamok hibái is nőnek. Mivel az „FA” modell részletesebben és nagyobb pontossággal írja le a kialakult vízfelszín, valamint a szivárgásitényező-eloszlást, így a vele kapott vízhozamértékek pontosabbnak mondhatók (20. táblázat).

20. táblázat: Kismintakísérletek és numerikus modellezés eredményei átszámítva valós méretekre (Farkas és társai 2019a)

Mérés jele	Kismintában mért értékek		Numerikus modellezésből számolt értékek				Valós méretekre átszámolt értékek					
	Leszívás [mm]	Hozam [l/min]	Piezok teljes hibája [mm]		Hozamok eltérése [%]		Leszívás [mm]	Hozam [l/min]	Vízszintek pontossága [mm]		Hozam pontossága [l/min]	
			FA	FB	FA	FB			FA	FB	FA	FB
FA	81	0.21	1.4	-	0.0	-	762	74	13.3	-	0.0	-
FB	81	0.21	-	0.6	-	0.0	762	74	-	6.1	-	0.0
V1	181	0.40	3.8	2.1	5.2	6.4	1703	142	36.0	19.3	7.4	9.1
V2	162	0.37	3.2	2.0	4.1	5.6	1524	131	30.0	18.6	5.4	7.3
V3	142	0.34	2.9	2.3	1.9	3.3	1336	120	27.3	21.4	2.3	4.0
V4	138	0.31	3.1	1.4	4.3	5.1	1299	110	28.9	13.3	4.7	5.6
V5	124	0.30	2.9	2.3	3.3	4.4	1167	106	27.6	21.3	3.5	4.7
V6	123	0.28	2.5	1.5	4.5	5.6	1157	99	23.2	14.6	4.5	5.6
V7	104	0.26	2.6	1.9	5.2	5.1	979	92	24.2	17.8	4.8	4.7
V8	79	0.20	1.8	1.2	2.6	2.8	743	71	17.4	11.0	1.8	2.0
V9	67	0.19	3.0	2.1	1.2	2.6	630	67	27.8	20.1	0.8	1.7
V10	59	0.15	2.4	1.1	4.6	2.0	555	53	22.4	10.4	2.4	1.1

A 6.4.5. fejezetben bemutatott 13. és 14. táblázat alapján megállapítottam, a fizikai modell nem adott a numerikus modell által igazolt eredményt, ha a kismintában a leszívás értéke 50 mm alatti volt. Ezt az értéket a C-vel megszorozva 470 mm-t kapunk. A numerikus modell alapján kijelenthető, hogy a gyakorlatban körülbelül 0,5 m-t meghaladó leszívásokra érdemes használni a laboratóriumi modellt (Farkas és társai 2019a).

7.6. KISMINTAMODELL EREDMÉNYEINEK ÁTSZÁMOLÁSA VALÓS MÉRETRE, ILLETVE IGAZOLÁSA TEREPI VIZSGÁLATOKKAL

Az 6.5. fejezetben bemutattam, hogy a kismintamodell terepi mérések laboratóriumi leképezésében, valós léptékű próbaszivattyúzások tervezésében a geometriai és kinematikai hasonlóság esetén jól használható. A bemutatott vizsgálati eredmények rámutattak arra, hogy a kismintakísérletek valós példával történő igazolásánál a fő nehézséget a terepi mérések és a laboratóriumi körülmények közötti hasonlóság biztosítása jelenti. Ezt az is bizonyítja, hogy az általam feldolgozott irodalmak alapján próbaszivattyúzással foglalkozó kismintakísérletek során eddig sem hazai, sem nemzetközi szinten nem publikáltak olyan eredményt, melynél bármely mértékű hasonlóság teljesítése mellett valós méretre jól átszámítható volt a kicsinyített méretű anyakútban kialakult leszívás és a kitermelt hozam.

A kismintamodellen végzett vizsgálatok igazolásához két mintaterületen végzett próbaszivattyúzás adatait használtam fel. A kismintamodell és a Mázsa téren végzett vizsgálatok között a geometriai és kinematikai hasonlóság is fennállt, emellett volt olyan laboratóriumi mérés, melynek leszívás-, vízhozam- és szivárgásitényező értékei egyaránt 2%-os eltéréssel közelítették a terepen megfigyelteteket. Ezzel a kismintamodell használhatóságát egy valós körülmények között elvégzett próbaszivattyúzással sikerült igazolni.

A Könyves Kálmán körüti terepi vizsgálat esetében a geometriai hasonlóság teljesült, viszont a mintaterület és a laboratóriumi modell szivárgási tényezőiben tapasztalt eltérés következtében kinematikai hasonlóságot nem lehetett megállapítani. A kinematikai hasonlóság hiányát olyan átszámítással kíséreltem meg áthidalni, amelyben a leszívás azonosságának feltételezése mellett a szivárgási tényezők arányát is beépítettem a vízhozamokra vonatkozó átszámítási tényezőbe. Az átszámított értékek azonban 46%-kal meghaladták a terepi vízhozamot, mely túllépte az elfogadható hiba mértékét. Ebből azt a következtetést lehet levonni, hogy a geometriai hasonlóság teljesülése, de a kinematikai hasonlóság érvénytelensége (eltérő szivárgási tényezők a kismintában és a valóságban) esetén a kismintában mért leszívás-vízhozamértékpárok nem számíthatók át megfelelő pontossággal a valóságra, a kinematikai hasonlóság hiányát a szivárgási tényezők arányán alapuló átszámítással nem lehet áthidalni (Farkas 2021).

8. ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori kutatásom alatt laboratóriumi körülmények között foglalkoztam a felszín alatti vízádórétegek és kutak jellemzésére szolgáló vizsgálati módszerrel, a próbaszivattyúzással. Ehhez egy olyan kismintamodellt fejlesztettem, melyet széleskörű irodalomkutatás és saját mérési tapasztalatok alapján szivárgás- és kúthidraulikai jelenségek megfigyelésére, valamint a vízádót és az anyakutat jellemző, mérnöki szempontból fontos paraméterek meghatározására egyaránt alkalmassá tettem.

A többszáz elvégzett mérésből kiszámítottam a vizsgált talajminta szivárgási tényezőjét a Dupuit-, és a Theis-összefüggéseket felhasználva. Az eredményeket összevettem szemeloszlási görbékből számoló elméleti módszerekkel, melyeket ez alapján használhatóságuk szerint rangsoroltam.

Kúthidraulikai vizsgálataimat három különböző átmérőjű perforációval, de azonos áteresztő felülettel kialakított anyakúttal végeztem el. A modellben sikeresen kimutathatóvá vált, hogy az anyakutak mentén kialakuló szabad szivárgási felület, a kútpalást belső és külső felületén kialakuló vízszint-elszakadás értéke függ a termelőkutak perforációjától, illetve a leszívás és a kitermelt hozam mértékétől.

Vizsgáltam, hogy a próbaszivattyúzás hatására felléphet-e nemlineáris áramlás a modelltérben, ennek megállapítására a termelőkutak tervezése szempontjából is nélkülözhetetlen kritikus Reynolds-számot és kritikus belépési sebességet határoztam meg. Eredményeim alapján megállapítottam, hogy a termelőkút környezetében nagyobb leszívások esetén kialakult a nemlineáris áramlás.

A laboratóriumi mérések helyességét numerikus modellezéssel és terepi mérésekkel igazoltam. A FEFLOW 7.0. numerikus szoftverben felépített kalibrált és validált modellváltozataim segítségével megállapítottam egy alkalmazhatósági határt, melyen belül a laboratóriumi mérések eredményei kiterjeszthetők valós méretre. Terepi vizsgálatok példáján keresztül bemutattam, hogy a teljes hasonlóság mellett a kismintában mért leszívás- és vízhozamértékek jól megfeleltethetők a valós méretű próbaszivattyúzások eredményeivel.

A doktori kutatásom kezdetén állított célokat teljesíteni tudtam, viszont fény derült arra, hogy a kifejlesztett laboratóriumi kismintamodell további kutatási potenciállal, új vizsgálati irányokkal is szolgálhat.

9. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az alábbi fejezetben a kutatásom alapján megfogalmazott új tudományos eredményeket közlöm. Vizsgálataim eredményeit összesen öt tézisbe csoportosítom, melyek közül a 2. és 3. tézis altéziseket is tartalmaz.

1. tézis: Rangsort állítottam fel különböző, szemeloszlási görbéket alkalmazó elméleti módszer között, melyekkel szivárgási tényező értékek határozhatók meg.

A permanens kismintakísérletekből Dupuit-módszerrel számított szivárgási tényezőket a FEFLOW 7.0 numerikus szoftverben felépített modellváltozatokkal igazoltam, a fizikai és numerikus modellek közötti eltérések nem haladták meg a 9%-ot. A Theis-módszerrel értékelt nempermanens laboratóriumi méréseket összevettem a permanens vizsgálatok eredményeivel, melyek között 36%-os eltérés adódott. Tizennégy különböző szemeloszlási görbét felhasználó elméleti módszerrel és a referenciaértéknek tekintett Dupuit-módszerrel kapott szivárgási tényezők közötti eltérések 2-540% között mozogtak, mely intervallum felső határa kiugrónak tekinthető (21. táblázat). Ezeket az elméleti módszereket a referenciaértéktől való eltéréseik alapján megbízhatóságuk szerint öt különböző csoportba soroltam (22. táblázat).

21. táblázat: A különböző módszerekkel kapott szivárgási tényező értékek

Vizsgálat fajtája	Kiértékelés módszere	Szivárgási tényező [m/s]	Eltérés a Dupuit (2018-2019) értékhez képest [%]
Szemeloszlási görbe	USBR	2,30E-04	2
	Slichter	2,73E-04	21
	Barr	3,25E-04	44
	Alyamani és Sen	4,13E-04	84
	Krumbein és Monk	4,14E-04	84
	Beyer	5,14E-04	128
	Seelheim	5,16E-04	129
	Hagen	5,20E-04	131
	Kröber	5,92E-04	163
	Sauerbrei	6,37E-04	183
	Chapius	7,25E-04	222
	USCRO	7,43E-04	230
	Hazen	7,97E-04	254
Jáky	1,44E-03	540	
Kismintakísérlet	Theis (2018-2019)	1,43E-04	36
	Dupuit (2018-2019)	2,25E-04	-
	Dupuit (2015)	2,93E-04	30
Numerikus modellezés	„FA” modell	2,34E-04	4
	„FB” modell	2,46E-04	9

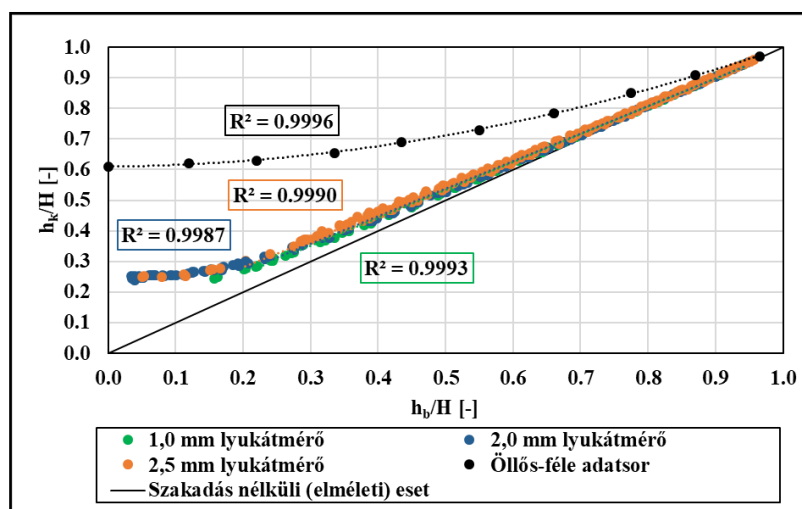
22. táblázat: Szemeloszlási görbéket felhasználó módszerek megbízhatósága közepes homok talajminta esetén

Referenciaértéktől való eltérés	Módszerek	Alkalmazhatóság
0-50%	USBR, Slichter, Barr	Megbízható
50-100%	Alyamani és Sen, Krumbein és Monk	Elfogadható
100-200%	Beyer, Seelheim, Hagen, Kröber, Sauerbrei	Jó becslés
200-300%	Chapius, USCRO, Hazen	Gyenge becslés
300%-	Jáky	Megkérdőjelezhető

Hivatkozások: Hajnal és Farkas (2011), Vig és társai (2016), Farkas és társai (2019a), Farkas és társai (2019b)

2. tézis: Mérési eredményekkel kimutattam, hogy a termelőkutak perforációja hatást gyakorol a kútellenállás mértékére, illetve a leszívási görbe geometriájára.

2.1. A különböző lyukátmérővel, de azonos áteresztőfelülettel készült PVC anyagú anyakutak palástján kialakul a szabad szivárgási felület, melynek mértéke függ a kutak perforációjának átmérőjétől (46. ábra). A vízszintekben kialakuló eltérés a szakadásmentes elméleti esettől annál jelentősebb volt, minél nagyobb átmérőjű perforációt alkalmaztam az anyakutaknál. A leszívás növelésével a különböző kútkialakításoknál eltérő ütemben, de minden esetben nőtt a kúton belül mért vízszint és a vízáadó telített rétegvastagságának hányadosa (h_b/H), valamint a Dupuit-elmélet egyenese közötti különbség (23. táblázat). Eredményeimet összevettem egy közel azonos átmérőjű porózus beton anyakúttal végzett vizsgálattal és megállapítottam, hogy a perforált PVC kutaknál kisebb a kútpaláston kialakuló vízszint-elszakadás mértéke.

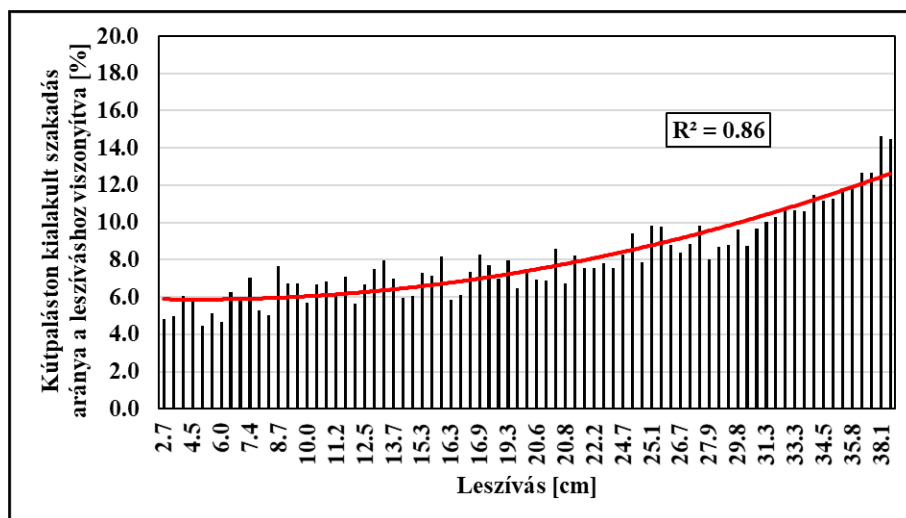


46. ábra: A három különböző lyukmérettel perforált anyakút palástján belüli és kívüli vízszintekben (h_b , h_k) kialakuló vízszint-elszakadás folyamata (Farkas és társai 2021)

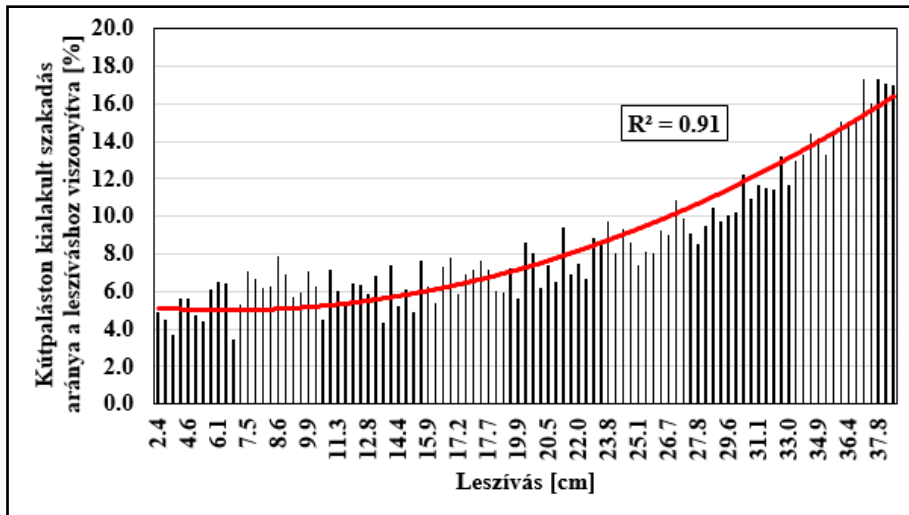
23. táblázat: A három különböző lyukmérettel perforált anyagút h_b/H értékei az elméleti egyenestől való eltérés függvényében.

Perforáció átmérője [mm]	h_b/H értéke az elméleti egyenestől való %-os eltérések függvényében				
	1%	5%	10%	25%	50%
1,0	0,80	0,51	0,38	0,25	0,16
2,0	0,80	0,55	0,42	0,28	0,19
2,5	0,80	0,60	0,47	0,32	0,21

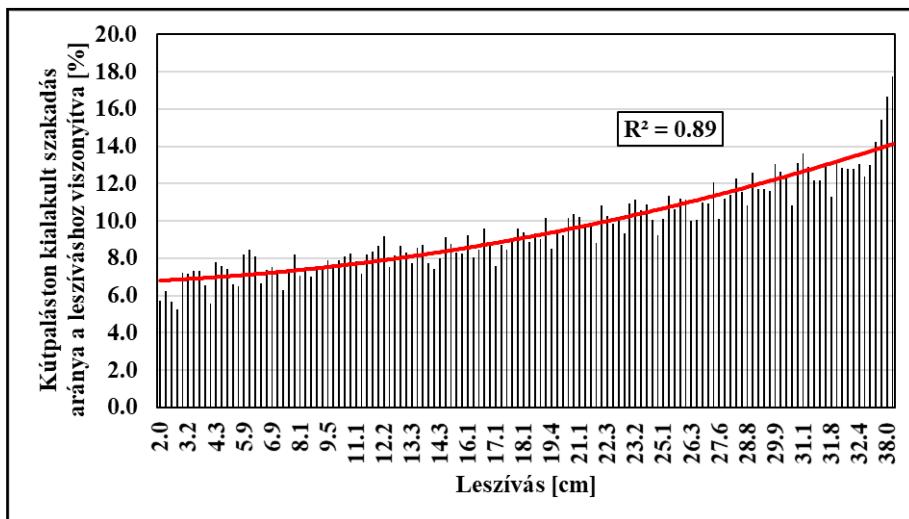
2.2. A kismintamodellben mérésekkel meghatároztam, hogy a különböző lyukátmérővel készült anyagutak palástján kialakuló vízszint-elszakadás milyen arányban áll a hozzá tartozó leszívási értékhez viszonyítva. Ezzel számszerűsítettem, hogy a teljes leszívás hány százaléka alakul ki közvetlenül a kútpaláston adott perforáció alkalmazása mellett. A legkisebb leszívásnál a kútpaláston kialakult szakadás körülbelül 5%-át teszi ki a teljes leszívás értékének mindhárom kút esetében. A maximális leszíváshoz az 1,0 mm-es perforációjú kút esetében 14%-os, a 2,0 mm-esnél 17%-os és a 2,5 mm-esnél 18%-os érték adódott. (47-49. ábrák). A mért adatsorokra jól illeszkedő burkológörbék egyenleteit felhasználva a tetszőleges leszívásra kiszámítható a kütellenállás értéke a különböző perforációval kialakított kutaknál (50. ábra).



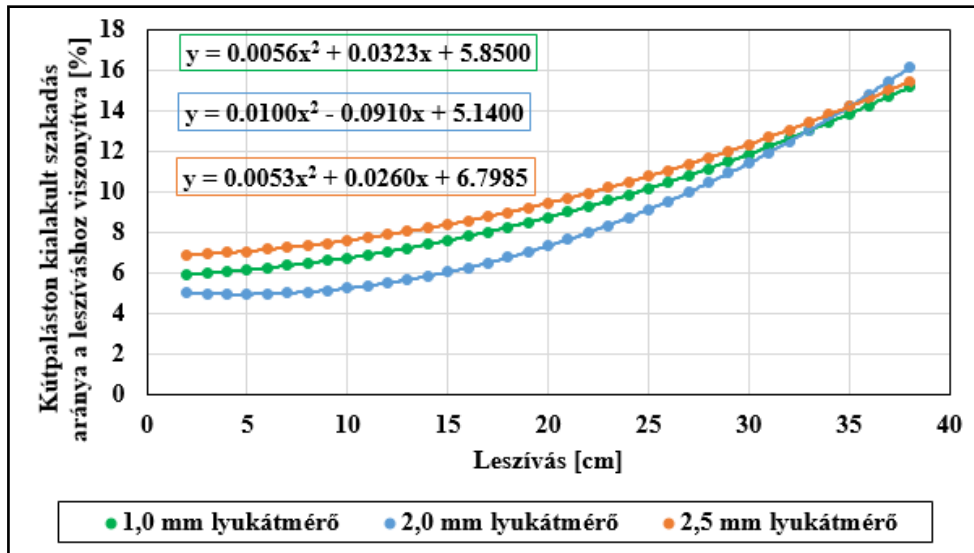
47. ábra: 1,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyagút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)



48. ábra: 2,0 mm-es lyukátmérővel perforált anyagút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)



49. ábra: 2,5 mm-es lyukátmérővel perforált anyagút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) (Hegedűs és társai 2019)



50. ábra: A kútpaláston kialakuló veszteséget jellemző görbék a leszívás függvényében

Hivatkozások: Hegedűs és társai (2019), Farkas és társai (2021)

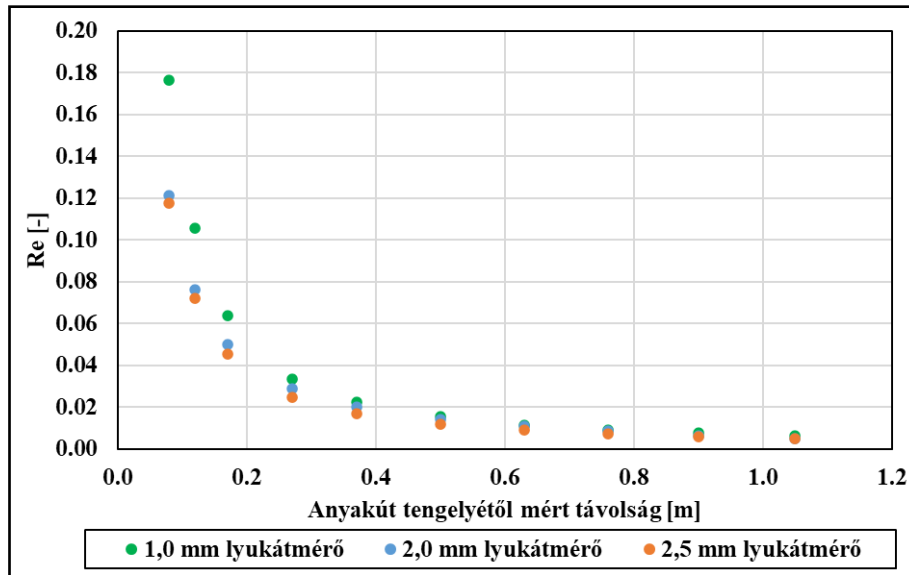
3. tézis: Laboratóriumi vizsgálataimmal kimutattam, hogy a kismintamodellben nemlineáris áramlás alakult ki.

A 24. egyenlet felhasználásával a megfigyelőkutak, valamint az anyakút környezetében Reynolds-számokat határoztam meg, mellyel jellemeztem a modell térben kialakuló áramlási viszonyokat.

$$Re = \frac{v \cdot d_{50}}{\nu} \quad [24]$$

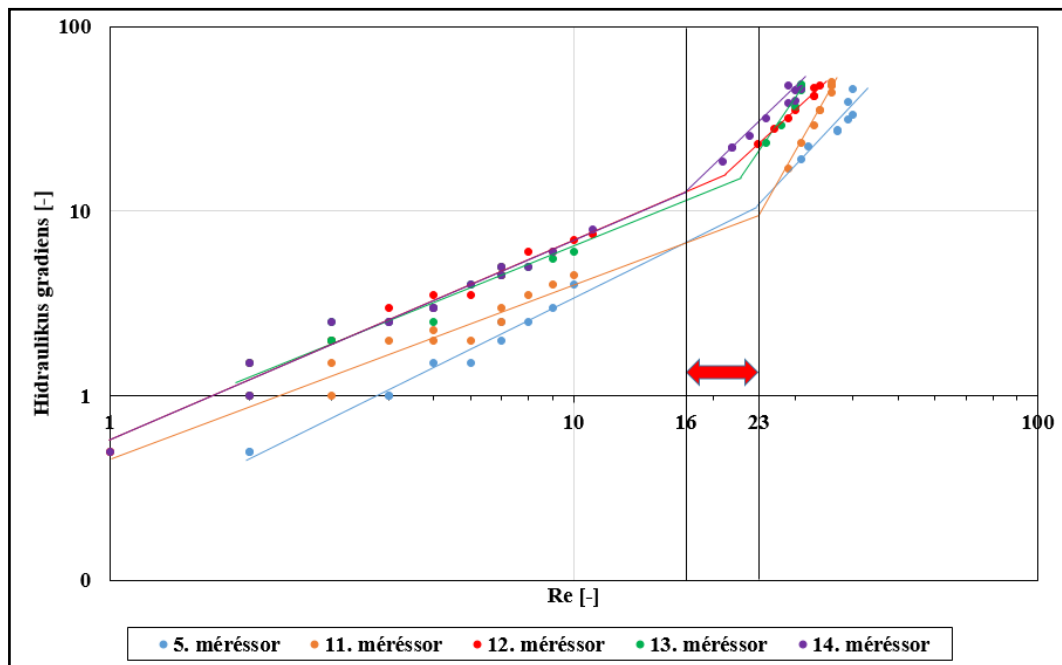
Paraméterek: Re a Reynolds-szám [-], v a szivárgás sebessége [m/s], d_{50} a mértékadó szemcseátmérő [m], ν a kinematikai viszkozitás [m²/s].

3.1. Számításokkal bizonyítottam, hogy lamináristól eltérő állapot nem lép fel a kismintamodell 1. megfigyelőkútja és felső pereme között. A három különböző perforációjú anyakútnál kialakult legnagyobb leszívásoknál az egyes megfigyelőkutak környezetében a Reynolds-számok nem haladták meg a 0,18-at, így az áramlás a modell tér ezen részén nagy biztonsággal laminárisnak tekinthető (51. ábra).



51. ábra: Az áramlást jellemző Re-számok értékei az 1-10. megfigyelőkutak közötti modell térben.

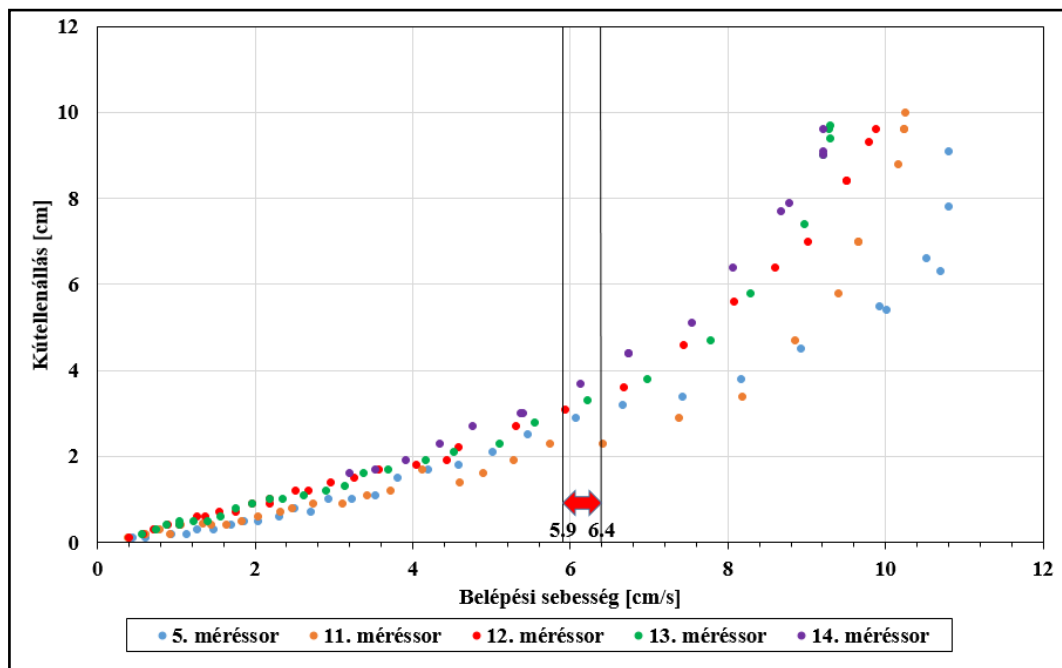
3.2. A mérési eredmények alapján meghatároztam egy kritikus Reynolds-számot ($Re_{crit}=16$), mely felett az anyakút palástján nemlineáris áramlás alakult ki. A termelőkút palástján a lamináris és a turbulens áramlás közötti átmeneti szakasz a mérési eredmények alapján $16 < Re < 23$ Reynolds-szám tartománnyal jellemezhető, a kritikus Reynolds-számot (Re_{crit}) ennek a tartománynak az alsó határával ($Re_{crit}=16$) azonosítottam (52. ábra). A megállapított $Re_{crit}=16$ érték korábbi szakirodalmi eredményekkel jól összeegyeztethető.



52. ábra: A különböző anyakutakkal mért Reynolds-számok a hidraulikus gradiens függvényében

3.3. A nemlineáris áramlás határának megválasztott kritikus Reynolds-számhoz ($Re_{crit}=16$) kritikus belépési sebességet ($v_{crit}=5,9$ m/s) rendeltem, mely felett az áramlás nemlineáris, a súrlódási veszteség nem elhanyagolható.

Az átmeneti áramlást jellemző Reynolds-szám tartományhoz (3.2. tézis) rendelhető belépési sebesség intervalluma $5,9 < v < 6,4$ m/s között jellemezhető. A kritikus belépési sebességet a kritikus Reynolds-számhoz hasonlóan a tartomány alsó értékével, $v_{crit}=5,9$ m/s-mal azonosítottam (53. ábra), mely jól illeszkedik a szakirodalomban ismertett korábbi kutatások eredményeihez.



53. ábra: A különböző anyagutakkal mért belépési sebességek a kúttellenállás függvényében

Hivatkozások: Farkas és társai (2021)

4. tézis: Numerikus modellek felhasználásával megállapítottam a termelőkútra egy olyan leszívási értéktartományt, amelyen a kismintamodellben végzett vizsgálatok kiterjeszthetők valós méretekre.

A FEFLOW 7.0 numerikus szoftverrel sikeresen kalibráltam és validáltam a kismintamodell leképező első olyan modellváltozatokat, melyek megfelelő pontossággal adják vissza a laboratóriumban mért értékeket. A kalibrált modellváltozatokat nem tekintettem igazoltnak abban az esetben, ha a piezométerek leszívással arányosított értékeinek teljes hibája, valamint a hozamokban észlelt eltérések egyaránt meghaladták az 5%-ot (24. és 25. táblázatok). Ebből következik, hogy a numerikus modellek csak az 50 mm feletti leszívással rendelkező független mérések laboratóriumi eredményeit képesek jól szimulálni.

24. táblázat: Az „FA” modellverzió kalibrált és validált eredményei

Mérés jele	Leszívás értéke [mm]	Peremfeltételek [mm]		P1-P35 teljes hibája [mm]	Piezok hibája és leszívás aránya [%]	Hozam [l/min]		Hozamok eltérése [%]
		Anyakút	Vízbevezetés			Számított	Mért	
FA	81	379	460	1,4	1,7	0,21	0,21	0,0
FA-V1	181	299	480	3,8	2,1	0,42	0,40	5,2
FA-V2	162	318	480	3,2	2,0	0,39	0,37	4,1
FA-V3	142	338	480	2,9	2,0	0,35	0,34	1,9
FA-V4	138	322	460	3,1	2,2	0,32	0,31	4,3
FA-V5	124	356	480	2,9	2,4	0,31	0,30	3,3
FA-V6	123	337	460	2,5	2,0	0,29	0,28	4,5
FA-V7	104	376	480	2,6	2,5	0,27	0,26	5,2
FA-V8	79	381	460	1,8	2,3	0,20	0,20	2,6
FA-V9	67	413	480	3,0	4,4	0,19	0,19	1,2
FA-V10	59	401	460	2,4	4,0	0,16	0,15	4,6
FA-V11	46	434	480	3,3	7,1	0,13	0,15	12,4
FA-V12	38	422	460	2,7	7,2	0,11	0,12	13,0
FA-V13	25	455	480	2,8	11,3	0,07	0,10	28,3
FA-V14	14	446	460	2,4	17,0	0,04	0,07	58,8

25. táblázat: Az „FB” modellverzió kalibrált és validált eredményei

Mérés jele	Leszívás értéke [mm]	Peremfeltételek [mm]		P2-P7 teljes hibája [mm]	Piezok hibája és leszívás aránya [%]	Hozam [l/min]		Hozamok eltérése [%]
		Anyakút	Vízbevezetés			Számított	Mért	
FB	81	379	460	0,6	0,8	0,21	0,21	0,0
FB-V1	181	299	480	2,1	1,1	0,43	0,40	6,4
FB-V2	162	318	480	2,0	1,2	0,39	0,37	5,6
FB-V3	142	338	480	2,3	1,6	0,35	0,34	3,3
FB-V4	138	322	460	1,4	1,0	0,33	0,31	5,1
FB-V5	124	356	480	2,3	1,8	0,31	0,30	4,4
FB-V6	123	337	460	1,5	1,3	0,30	0,28	5,6
FB-V7	104	376	480	1,9	1,8	0,27	0,26	5,1
FB-V8	79	381	460	1,2	1,5	0,20	0,20	2,8
FB-V9	67	413	480	2,1	3,2	0,18	0,19	2,6
FB-V10	59	401	460	1,1	1,9	0,15	0,15	2,0
FB-V11	46	434	480	1,5	3,3	0,13	0,15	18,4
FB-V12	38	422	460	1,4	3,8	0,10	0,12	19,0
FB-V13	25	455	480	1,5	5,8	0,07	0,10	35,0
FB-V14	14	446	460	1,2	8,3	0,04	0,07	70,1

A numerikus modellezéssel igazolt adatsorok értékeit átszámítottam valós méretekre a Mosonyi-Kovács kismintatörvény felhasználásával. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a fizikai modellel meghatározható egy termelőként hozama közepes homok környezetben, ha a leszívás valós értéke 0,5-1,7 m között marad (26. táblázat).

26. táblázat: Kismintakísérletek és numerikus modellezés eredményei átszámítva valós méretekre

Mérés jele	Kismintában mért értékek		Numerikus modellezésből számolt értékek				Valós méretekre átszámolt értékek					
	Leszívás [mm]	Hozam [l/min]	Piezok teljes hibája [mm]		Hozamok eltérése [%]		Leszívás [mm]	Hozam [l/min]	Vízszintek pontossága [mm]		Hozam pontossága [l/min]	
			FA	FB	FA	FB			FA	FB	FA	FB
FA	81	0,21	1,4	-	0,0	-	762	74	13,3	-	0,0	-
FB	81	0,21	-	0,6	-	0,0	762	74	-	6,1	-	0,0
V1	181	0,40	3,8	2,1	5,2	6,4	1703	142	36,0	19,3	7,4	9,1
V2	162	0,37	3,2	2,0	4,1	5,6	1524	131	30,0	18,6	5,4	7,3
V3	142	0,34	2,9	2,3	1,9	3,3	1336	120	27,3	21,4	2,3	4,0
V4	138	0,31	3,1	1,4	4,3	5,1	1299	110	28,9	13,3	4,7	5,6
V5	124	0,30	2,9	2,3	3,3	4,4	1167	106	27,6	21,3	3,5	4,7
V6	123	0,28	2,5	1,5	4,5	5,6	1157	99	23,2	14,6	4,5	5,6
V7	104	0,26	2,6	1,9	5,2	5,1	979	92	24,2	17,8	4,8	4,7
V8	79	0,20	1,8	1,2	2,6	2,8	743	71	17,4	11,0	1,8	2,0
V9	67	0,19	3,0	2,1	1,2	2,6	630	67	27,8	20,1	0,8	1,7
V10	59	0,15	2,4	1,1	4,6	2,0	555	53	22,4	10,4	2,4	1,1

Hivatkozások: Farkas és társai (2019a)

5. tézis: Terepi mérések példáján keresztül bemutattam, hogy a kismintamodellben alkalmazott geometriai arányszám használatával a termelőkútban kialakuló leszívás, valamint a kitermelt hozam értéke megfelelő pontossággal kiterjeszhető valós méretre, amennyiben a két különböző méretben elvégzett próbaszivattyúzás között a geometriai és kinematikai hasonlóság is teljesül.

A geometriai arányszámot a terepen és a laboratóriumban alkalmazott kutak hányadosa jelentette, mely a Mázsa téri mintaterületnél $C=9,41$, a Könyves Kálmán körútnál $C=9,71$ volt. A kismintában mért értékek valós méretre kiterjesztése a geometriai méretszorzó felhasználásával történt: a leszívást C -vel, a vízhozamot C^2 -tel kellett megszorozni a Mosonyi-Kovács kismintatörvény értelmében. A kismintamodell és a Mázsa téren végzett vizsgálatok között a geometriai és kinematikai hasonlóság is fennállt, emellett volt olyan laboratóriumi mérés, melynek leszívás-, vízhozam- és szivárgási tényező értékei egyaránt 2%-os eltéréssel közelítették a terepen megfigyelteket (27. táblázat).

27. táblázat: A kismintában és a Mázsa téren végzett próbaszivattyúzások összehasonlító számításainak eredményei

Paraméterek	Kisminta értékek	Átszámított értékek	Terepi mért értékek	Különbségek [%]
Leszívás [m]	0,205	1,93	1,89	2
Vízhozam [l/min]	1,44	127,2	130,0	2

A Könyves Kálmán körúti mintaterületen a kinematikai hasonlóság érvénytelensége ellenére megkísérletem az átszámítást az 25. egyenlet felhasználásával, ahol Q_v a vízhozam valós

méretben, Q_m a vízhozam kismintamodell méretben, C_k a két lépték szivárgási tényezőjének arányszáma, C a geometriai arányszám.

$$Q_v = Q_m \cdot C_k \cdot C^2 \quad [25]$$

A vízhozamértékek között 46%-os eltérés mutatkozott, mely meghaladta az elfogadható mértéket, így kijelenthető, hogy csak a geometriai hasonlóság teljesülése nem elegendő feltétel a valós és kicsinyített léptékben elvégzett vizsgálatok közötti átszámíthatóság megteremtésére.

Hivatkozások: Farkas (2021)

A TÉZISEKBEN HIVATKOZOTT PUBLIKÁCIÓK

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. (2019b). Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kismintamodell felhasználásával. *Hidrológiai Közlöny* 99(4) pp 42-51.

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. (2021). Szivárgáshidraulikai kismintamodell igazolása terepi mérésekkel, *Hidrológiai Közlöny*, ELFOGADVA

Hajnal, G., Farkas D. (2011). Hydrogeologische Untersuchungen des Höhlensystem der Budaer Burg. *Beiträge zur Hydrogeologie*, Jahrgang 2011.; Joanneum Research, pp. 27-52. ISSN 0376-4826

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

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 – Kőzetmechanika*, Budapest, Magyarország, Hantken Kiadó, pp 43-54.

A TÉMÁBAN MEGJELENT EGYÉB PUBLIKÁCIÓK

Farkas, D.; Hajnal, G. (2011). *Hidrogeológiai vizsgálatok a Várhegyen*, Magyar Hidrológiai Társaság, Hidrogeológiai Szakosztály, 2011. 04. 19.

Farkas D., Hajnal G., Szieberth D. (2015). Vízkémiai vizsgálatok a Molnár János-barlangban, *Magyar Építőipar* 65: pp. 57-62.

Farkas D., Hajnal G., Szieberth D., Rehák A. (2015). A Molnár János-barlang térségének hidrológiai vizsgálata, *Mérnökgeológia - Kőzetmechanika 2015*. 458 p. Budapest: Hantken Kiadó, pp. 61-74. ISBN:978-615-5086-09-0

Farkas-Karay Gy., Farkas D., Imre E., Bálint Á., Adildorj K., Boldbataar T., Dang T. Q. H., Lopez Lamas L. G. (2020). Laboratory Test for Sand Boil Formation Near a Flood Protection Dike, *11th International Annual Conference on Sustainable Environmental Protection & Waste Management Responsibility*, ICEEE 2020: Proceedings Book, Budapest, Magyarország 2020.11.19-11.20. (Óbudai Egyetem), pp 252-259

Hajnal, G., Farkas, D. (2010). Hidrogeológiai vizsgálatok a budavári barlangrendszerben, *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2010*, Műegyetemi Kiadó, pp. 13-28. ISBN 978-963-313-001-8

Hajnal G., Farkas D., Vasvári V. (2012). Hidrogeológiai vizsgálatok, in: Farkas D., Görög P, Hajnal G., Karay Gy., Kőszely Á., Török Á., Vasvári V.: *Mérnöki kutatások a budai Várhegyen (5. fejezet)* Hantgen Kiadó, pp. 99-134. ISBN 978-615-5086-05-2

Hajnal, G ; Farkas, D ; Vasvári, V (2012). Hydrogeological investigations of the Buda Castle hill, *Groundwater in Fractured Rocks (IAH)*, Prague, 21-24 May 2012

Hajnal, G., Farkas, D., Máté, Sz., Mészáros, Z, Póth, Z. (2009). A budavári barlang hidrológiai vizsgálata, *Mélyépítés folyóirat*, VII. évfolyam 2009/02. szám, pp. 16-21.; D-Plus Kft. ISSN 1589-4355

Szloboda, Zs, Farkas, D., Hajnal, G., Vasvári, V. (2015). Árvízvédelmi töltések szivárgásvizsgálata, *Magyar Építőipar* 2015: 4 pp. 143-148., 6 p.

JELÖLÉSJEGYZÉK

A	Seelheim-egyenlet paramétere [-]
A_m	szivárgási felület modell méretben [m ²]
A_v	szivárgási felület valós méretben [m ²]
C	geometriai arányszám [-]
C_k	szivárgási tényezők hányadosából képzett arányszám [-]
C_d	egyenlőtlenségi mutatótól függő konstans [-]
d_{10}	átesett tömegmennyiség 10 %-ához tartozó szemcseátmérő (hatékony szemcseátmérő) [mm],
d_{20}	átesett tömegmennyiség 20 %-ához tartozó szemcseátmérő [mm]
d_{50}	átesett tömegmennyiség 50 %-ához tartozó szemcseátmérő (mértékadó 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]
H	vízvezető telített rétegvastagsága [m]
h_a	a kútpaláston belüli térben fellépő nyomásveszteség [m]
h_b	kútban mért vízszint [m]
h_{cs}	a szűrőcsövön átáramló víz energiaveszteség [m]
h_h	a rétegellenállásból származó veszteség [m],
h_k	a kavicszűrőben fellépő veszteség [m]
h_l	a lamináris tartományba eső veszteség [m]
h_{sz}	a szűrőréteg és a víztartó határán fellépő rétegellenállás [m]
h_t	a turbulens tartományba eső veszteség [m]
I	hidraulikus gradiens [-]
I_m	hidraulikus gradiens modell méretben [-]
I_v	hidraulikus gradiens valós méretben [-]
k	szivárgási tényező, áteresztőképességi együttható [m/s]
k_m	szivárgási tényező modell méretben [m/s]
k_v	szivárgási tényező valós méretben [m/s]
l	szivárgási hossz [m]

m	a szivattyúzott réteg vastagsága [m]
N	talajszemcsék alakai tényezője [-]
n	porozitás [-]
Q	a szivattyúzás során állandósult vízhozam [m^3/s]
Q_m	a szivattyúzás során állandósult vízhozam modell méretben [m^3/s]
Q_v	a szivattyúzás során állandósult vízhozam valós méretben [m^3/s]
Re	Reynolds-szám [-]
Re_{crit}	kritikus Reynolds-szám [-]
s	szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedés a kútban [m]
S	tárolási tényező [-]
s'	korrigált vízszintsüllyedés értéke [m]
T	transzmisszivitás [m^2/s]
T_{GW}	a felszín alatti víz hőmérséklete ($^{\circ}\text{C}$)
t_t	szivattyúzás kezdetétől eltelt idő [s]
U	egyenlőtlenségi mutató [-]
v	a szivárgás sebessége [m/s]
v_{crit}	kritikus belépési sebesség [m/s]
$W(u)$	Theis-féle kútfüggvény, ahol: $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$
x_1	távolabbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m]
x_2	közelebbi megfigyelőkút távolsága a szivott kúttól [m]
y_1	távolabbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlop magasság [m]
y_2	közelebbi megfigyelőkútban a leszívást követő vízszlop magasság [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]

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Hajnal Gézának a belém fektetett rengeteg energiát és bizalmat. 2008-ban felkeltette érdeklődésemet a felszín alatti vizek, majd később az oktatás iránt. Munkánk kezdetén, 2008-ban nem gondoltam, hogy egykor lehetőségem lesz a Tanszék kötelékéhez tartozni, hálás vagyok, hogy azt csinálhatom, amit igazán szeretek.

Köszönöm Dr. Farkas-Karay Gyöngyi irántam tanusított testvéri szeretetét, téma- és kurzusvezetői kapcsolatunkban mutatott lelkesedését és együttműködését. Szerkezetes múltjából fakadó tudása és látásmódja nagyban segítette doktori kutatásomat és közös munkánkat egyaránt.

Köszönöm Dr. Vasvári Vilmosnak a numerikus modellezéshez nyújtott segítségét, végtelen türelmét és alapos, hosszú magyarázatokkal teli leveleit.

Köszönöm Tolnai Sándornak, hogy alapos munkával elkészítette a vizsgálataim színteréül szolgáló kismintamodellt.

Köszönöm Hegedűs Noéminek, hogy első témavezetőként több éve is kitartóan részt vesz a kutatásomhoz kapcsolódó munkában.

Köszönöm Dr. Török Ákosnak és Dr. Szűcs Péternek az alapos bírálatukat, amit a házi védésemre benyújtott dokumentumomról készítettek, és meglátásaikkal hozzájárultak a dolgozatom jelenlegi formájához.

Köszönöm Dr. Csoma Rózsának és Szabó Zsoltnak a laboratóriumi modellezéssel kapcsolatos tanácsaikat és a tetemes szakirodalom rendelkezésemre bocsátását.

Köszönöm Dr. Havasi-Tóth Balázsnak a nempermanens eredmények kiértékelésénél nyújtott segítségét.

Köszönöm Pozsgai Istvánnak, Rehák Andrásnak és Galgóczy Istvánnak a kismintamodell karbantartásában nyújtott segítségüket.

Köszönöm a DHI Hungary Kft.-nek, hogy a FEFLOW 7.0. szoftver licenzét hallgatói kedvezményük keretében használhattam.

Köszönöm feleségemnek, Farkas-Tóth Orsolyának a méréseknél nyújtott fizikai, valamint a kutatás nehézségei alatt gyakorolt lelki segítségét, mérhetetlen türelmét és támogatását. A legtöbbet neki köszönhetem!

Köszönöm édesanyámnak, Zemenszky Ritának, hogy minden nehézség ellenére megadta számomra a kezdőlökést, melyet egy sor korrekciós manőver követett annak érdekében, hogy ott kössek ki, ahol most vagyok!

Köszönöm továbbá kollégáimnak, barátaimnak, rokonaimnak és mindenkinek, aki kicsit is hozzájárult dolgozatom elkészültéhez!

IRODALOMJEGYZÉK

Alyamani, M. S., Sen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. *Ground Water* 31(4):551–555

Aravin, V. I., Numerov, S. N. (1953). *Theory of Motion of Liquids and Gases in Undeformable Porous Media*. Gostekhizdat, Moscow, Russia.

AWWA (2006) AWWA (American Water Works Association) (2006). *Standard A100-06, water wells*. AWWA, Denver, CO.

Balasubramanian A. (2017). *Procedure for Conducting Pumping Tests*, 11 p. (2018.07.25.) https://www.researchgate.net/publication/315662924_Procedure_for_Conducting_Pumping_Tests

Barker, J. A., Herbert, R. (1992a). Hydraulic tests on well screens. *Applied Hydrogeology* 0/92:7–19

Barker, J. A., Herbert, R. (1992b). A simple theory for estimating well losses: with application to test wells in Bangladesh. *Applied Hydrogeology* 0/92:20–31

Barr, D. W. (2001). Coefficient of permeability determined by measurable parameters. *Ground Water* 39(3):356–361

Barrash, W., Clemo, T., Fox, J. J., Johnson, T. C. (2006). Field, laboratory, and modeling investigation of the skin effect at wells with slotted casing, Boise Hydrogeophysical Research Site. *Journal of Hydrology* 326:181–198

Barta, E., Hajnal, G., Veczán, É., Vasvári, V. (2012). Bestimmung des durchlässigkeitsbeiwertes 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)

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](#))

Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: Dover. – ISBN 0-486-65675-6. 784 p.

Beyer, W. (1964). Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. *Wasserwirtschaft, Wassertechnik* 14(6):165–168

Białas, Z. (1966). *O usrednieniu współczynników filtracji z zastosowaniem elektronicznej cyfrowej maszyny matematycznej* [Averaging filter coefficients using digital electronic mathematical machines]. Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu, Warsaw, Poland, 47 p.

Białas, Z., Kleczkowski, A. S. (1970). O przydatności niektórych wzorów empirycznych dla określenia współczynnika filtracji k. *Archiwum Hydrotechniki* 17(3), 405–417, Warsaw.

Boreli, M. (1955). Free-surface flow towards partially penetrating wells. *Transactions of the American Geophysical Union* 36(4):664–672

- Boulton, N. S. (1951). The flow pattern near a gravity well in a uniform water bearing medium. *Journal of the Institution of Civil Engineers* 36(10):534–550
- Boulton, N. S. (1954a). The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation. *Proceedings Institution of Civil Engineers*, 3(4):564–579
- Boulton, N. S. (1954b). Unsteady radial flow to a pumped well allowing for delayed yield from storage. *Int. Ass. Sci. Hydrol*, Assemblée Générale de Rome, Publication number 37:472–477
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *J. Mathématiques Pures Appliquées*, 10(5-78):363-394
- Brauns, J. (1981). Drawdown capacity of groundwater wells. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol 1, Stockholm, June 1981, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 391–396
- British Columbia Ministry of Environment, (2019). *Guide to Conducting Well Pumping Tests*, ISBN 978-0-7726-7033-5, 9 p. (2019.10.21.) https://www.edspumps.com/_docs/BCGWA%20-%20GUIDE%20TO%20CONDUCTION%20WELL%20PUMPING%20TESTS%20-%202001.pdf
- Brown, R. H., Konoplyantsev, A. A., Ineson, J., Kovalevsky, V. S. (1972). *Ground-water studies - An international guide for hydrogeological investigations*, Published by UNESCO, Printed by NICI, Gent, pp. 6.1.6 - 6.1.17.
- BurVal Working Group (2006). *Groundwater Resources in Buried Valleys, A Challenge for Geosciences*, Leibniz Institute for Applied Geosciences (GGA-Institut), Hannover, Germany, pp. 157-160. (2018.07.24) https://www.liag-hannover.de/fileadmin/user_upload/dokumente/grundwassersysteme/burval/buch/i-x.pdf?fbclid=IwAR1QQ3HoYu76lM2OsX9ZYM8Kh_bJGU3eehcgK-EUAmbo9Jogzn2DtpYD6sk
- 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
- Clark, L., Turner, P. A. (1983). Experiments to assess the hydraulic efficiency of well screens. *Ground Water* 21(3):270–281
- Cooper, H., Jacob, C. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Transactions of the American Geophysical Union*, 27(4):526-534
- Csáki, N. (2011). *Szivárgási tényező meghatározása laboratóriumi vizsgálatokkal és numerikus modellezéssel*, TDK dolgozat, BME Vízépítőmérnöki Szekció, 63 p.
- Dagan, G. (1967). A method of determining the permeability and effective porosity of unconfined anisotropic aquifers. *Water Resources Research*, 3(4):1059–1071
- 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

- Driscoll, F. G. (1986). *Ground Water and Wells*, 2nd Edition. Johnson Division, St. Paul, MN, 1089 p.
- Dupuit, J. (1857). Mouvement de l'eau a travers le terrains permeables. C. R. Hebd. *Seances Acad. Sci.*, 45:92-96.
- 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.
- Dybbs, A., Edwards, R. V. (1984). A New Look at Porous Media Fluid Mechanics - Darcy to turbulent. In: Bear J., Corapcioglu M.Y. (eds) *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. NATO ASI Series (Series E: Applied Sciences), vol 82. Springer, Dordrecht (ISBN 978-94-009-6175-3)
- Éliás, E., Juhász, J. (1966). *Az anizotrópia tényező meghatározása*, MTA Szivárgási és Kúthidraulikai Ankét, Budapest, I.A.-5
- EN ISO 22282-4 (2012). Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Geohydraulische Versuche, Teil 4: *Pumpversuche*, 34 p.
- Fand, R. M., Kim, B. Y. K., Lam, A. C. C., Phan, R. T. (1987). Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres. *Journal of Fluids Engineering – Transactions of the ASME* 109(3): 268-274. (ISSN 0098-2202)
- Farkas-Karay, Gy., Hajnal, G., Birk, S., Vasvári, V. (2018). Nemlineáris áramlás próbaszivattyúzásokban jelentkező hatásának numerikus vizsgálata, *Hidrológiai Közöny* 98. évf. 1. szám, pp. 40-49.
- Farkas, D.; Hajnal, G. (2011). *Hidrogeológiai vizsgálatok a Várhegyen*, Magyar Hidrológiai Társaság, Hidrogeológiai Szakosztály, 2011. 04. 19.
- 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. (2019b). Szivárgási tényező laboratóriumi meghatározása szemeloszlási görbe és kismintamodell felhasználásával. *Hidrológiai Közöny* 99(4) pp 42-51.
- Farkas, D. (2021). *Szivárgáshidraulikai kismintamodell igazolása terepi mérésekkel*, Hidrológiai Közöny, ELFOGADVA
- 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.
- Ferris, J. G., Knowles, D. B., Brown R. H., Stallman, R. W. (1962). Theory of Aquifer Test. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* 1536-E, pp 69-174.
- Forchheimer, P. (1886). Ueber die Ergiebigkeit von Brunnen-Analgen und Sickerschlitzten. *Z. Architekt. Ing. Ver.*, Hannover, 32:539-563.
- Forchheimer, P. (1898). Grundwasserspiegel bei brunnenanlagen. *Z. Osterreich-hissheingenieur Architecten Ver.*, 44:629-635

- FŐMTERV Rt. (1997a). *Talajmechanikai szakvélemény Könyves Kálmán körút fejlesztése, Salgótarjáni út – Kismaraton u. közötti III. szakasz, Könyves Kálmán körúti vasúti híd*. Szakvélemény, Budapest.
- FŐMTERV Rt. (1997b). *Talajmechanikai szakvélemény a Könyves Kálmán körút vasúti híd déli részén végzett próbaszivattyúzás kiértékeléséről*. Szakvélemény, Budapest.
- Fuchs, S., (2010). Deterministische k_f – Wert-Schätzung nach petrographischer Bohrgutansprache, *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* (2010) 15: 177–189, DOI 10.1007/s00767-010-0143-8
- Gefell, M. J., Thomas, G. M., Rossello, S. J. (1994). Maximum water-table drawdown at a fully penetrating pumping well. *Ground Water* 32(3):411–419
- Hagen, G. (1869). *Handbook of Hydraulics Structures* (in German), Berlin.
- Hajnal, G. (2003). Könyves Kálmán körúti vasúti híd térségének hidrogeológiai vizsgálata. In: Török, Á (szerk.) *Mérnökgeológiai Jubileumi Konferencia*, Budapest, Magyarország. Műegyetemi Kiadó, p. 255
- Hajnal, G., Jobbágy, R., Vasvári, V. (2009). Próbaszivattyúzások kiértékelésének összehasonlítása *MÉLYÉPÍTÉS* 03/2009: 2009/03 pp. 20-25.
- Hajnal, G., Farkas, D. (2010). Hidrogeológiai vizsgálatok a budavári barlangrendszerben, *Mérnökgeológia-Közetmechanika 2010*, Műegyetemi Kiadó, pp. 13-28. ISBN 978-963-313-001-8
- Hajnal, G., Farkas D. (2011). Hydrogeologische Untersuchungen des Höhlensystem der Budaer Burg. *Beiträge zur Hydrogeologie*, Jahrgang 2011.; Joanneum Research, pp. 27-52. ISSN 0376-4826
- Hajnal G., Farkas D., Vasvári V. (2012a). Hidrogeológiai vizsgálatok, in: Farkas D., Görög P, Hajnal G., Karay Gy., Kőszely Á., Török Á., Vasvári V.: *Mérnöki kutatások a budai Várhegyen (5. fejezet)* Hantgen Kiadó, pp. 99-134. ISBN 978-615-5086-05-2
- Hajnal, G ; Farkas, D ; Vasvári, V (2012b). Hydrogeological investigations of the Buda Castle hill, *Groundwater in Fractured Rocks (IAH)*, Prague, 21-24 May 2012
- Hall, H. P. (1955). An investigation of steady flow toward a gravity well. *La Houille Blanche* 10(1):8–35
- Hamill, L. (2001). *Understanding Hydraulics*. 2nd Edition. Palgrave, Basingstoke, UK. 640 p.
- Hantush, M. S. (1961). Drawdown around a partially penetrating well. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 87:83-98
- 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., 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
- Heinrich, G. (1964). Eine Näherung für die freie Spiegelfläche beim vollkommenen Brunnen. *Österreichische Wasserwirtschaft* 16(12):15–20
- Hlushkou, D., Tallarek, U. (2006). Transition from creeping via viscous-inertial to turbulent flow in fixed beds. *Journal of Chromatography* 1126(1-2): 70-85. – ISSN 0021-9673
- Houben, G. J. (2015a). Review: Hydraulics of water wells—flow laws and influence of geometry. *Hydrogeology Journal* 23, 1633–1657 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1312-8>
- Houben, G. J. (2015b). Review: Hydraulics of water wells – head losses of individual components. *Hydrogeology Journal* 23, 1659–1675 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1313-7>
- Houben, G., Hauschild, S. (2011). Numerical modelling of the near-field hydraulics of water wells. *Ground Water* 49(4):570–575
- ICRC (2011). *Technical Review, Practical Guidelines for Test Pumping in Water Wells*, Geneva, Switzerland, 104 p. (2018.08.01.) <https://www.icrc.org/en/publication/4033-technical-review-practical-guidelines-test-pumping-water-wells>
- Ivicsics, L. (1968). *Hidromechanikai Modellkísérletek*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, pp. 1-30.
- Jacob, C. E. (1940). On the flow of water in an elastic artesian aquifer. *Transactions of American Geophysical Union*, 21(2):574-586
- Jacob, C. E. (1944). *Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions*, Kutatási jelentés. U.S. Geological Survey, Virginia, 25 p.
- Jáky, J. (1944). *Talajmechanika*, Egyetemi Nyomda, Budapest.
- Jobbágy, R. (2009). *Szivárgási tényező meghatározása terepi mérésekkel*. Bsc. Diplomamunka, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék.
- 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.
- Justin, J. D., Hinds, J., Creager, W. P. (1945). *Earth, rock-fill, steel and timber dams*. In: Creager WP, Justin JD, Hinds J (eds) *Engineering for dams*, vol III. Wiley, New York, pp 619–650.
- Klammler, H., Nemer, B., Hatfield, K. (2014). Effect of injection screen slot geometry on hydraulic conductivity tests. *Journal of Hydrology* 511:190–198
- Klauder, W. (2010). *Experimentelle Untersuchung der Anströmung von Vertikalfilterbrunnen*. PhD Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany. 220 p.

- Klauder, W., Roger, S., Adenau, W., Müller, C.; Schüttrumpf, H. (2009). Durchführung von Filterversuchen - Wissenschaftliche Untersuchung zur Optimierung der Brunnenfilter. *Bbr: Fachmagazin für Brunnen- und Leitungsbau* 60(6), pp 40-46.
- Klotz, D. (1971). Untersuchung von Grundwasserströmungen Durch Modellversuche im Maßstab 1:1. In: *Geologica Bavarica* 64: 75-119.
- Klotz, D. (1990). *Berechnete Durchlässigkeiten handelsüblicher Brunnenfilterrohre und Kunststoff-Kiesbelagfilter*. Neuherberg. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. GSF-Bericht 35/90. 55 p.
- Kovács, Gy. (1972). *A szivárgás hidraulikája*, Akadémiai Kiadó, Budapest. 535 p.
- Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P., Rushton, K. R. (2004). Groundwater studies – An international guide for hydrogeological investigations, Published and printed by UNESCO, pp 221-222. (2018. 07. 25.) <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000134432>
- Kozeny, J. (1953). *Hydraulik: Ihre Grundlagen und Praktische Anwendung* [Hydraulics: fundamentals and practical application]. Springer, Vienna. 588 p.
- Kresic, N. (1997). *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*. Boca Raton, Fla. CRC Lewis Publishers. 461 p.
- Kroszynski, U., and G. Dagan. (1975). Well pumping in unconfined aquifers: The influence of the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 421(3):479–490
- 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
- Kruseman, G. P., de Ridder N. A. (1994). Evaluation and Analysis of Pumping Test Data. (2nd ed.), ILRI Publication 47, Wageningen, The Netherlands, 370 p.
- Krüger, E. (1919). Die Grundwasserbewegung [Groundwater flow]. *Int Mitt Bodenkd* 8:105–122
- Lee, C.H. (1938). Selection of materials for rolled-filled earth dams. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 103, 12–61.
- Leonhardt, Andrä und Partner (2012). *Queensferry cutting, Constant rate pumping test* (2018.09.13.), <https://www.transport.gov.scot/media/2270/a4335535.pdf>
- Mace, A., Rudolph, D., Kachanoski, R. (1998). Suitability of parametric models to describe the hydraulic properties of an unsaturated coarse sand and gravel. *Ground Water*, 36(3):465–475
- Maine EPA (2005). *Pump Test and Delineation Plan Guidance New Well Sources for Large (>250 served) Community Water Systems*. 5 p. (2018.07.30.), <https://www.maine.gov/dhhs/mecdc/environmentalhealth/dwp/fit/documents/PumpTestDelineationPlanGuidance.pdf>

- Malama, B., Kuhlman, K. L., Revil, A. (2009). Theory of transient streaming potentials associated with axial-symmetric flow in unconfined aquifers. *Geophysical Journal International*, 179(2):990–1003
- Mallet, C., Pacquant, J. (1951). *Erdstaudämme*. Orig. Titel: Les Barrages en Terre. Übersetzt aus dem Franz.: H. Ferchland. VEB Verlag Technik, Berlin.
- Menon, E. S. (2014). *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*, Chapter Five: Fluid Flow in Pipes. 1st Edition, Gulf Professional Publishing, 596 p. ISBN 9781856178303
- Mishra P.K., Kuhlman K.L. (2013). Unconfined Aquifer Flow Theory: From Dupuit to Present. In: Mishra P., Kuhlman K. (eds) *Advances in Hydrogeology*. Springer, New York, NY. 19 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-6479-2_9
- Mishra, P. K., Neuman, S. P. (2010). Improved forward and inverse analyses of saturated-unsaturated flow toward a well in a compressible unconfined aquifer. *Water Resources Research*, 46(7):W07508
- Moench, A. F. (2008). Analytical and numerical analyses of an unconfined aquifer test considering unsaturated zone characteristics. *Water Resources Research*, 44(6):W06409
- Moench, A. F., Garabedian, S. P., LeBlanc, D. (2001). Estimation of hydraulic parameters from an unconfined aquifer test conducted in a glacial outwash deposit, Cape Cod, Massachusetts. *US Geological Survey Professional Paper 1629*. pp 69., 140 p.
- 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 súrlódóerő 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.
- MSZ 15003-1989 (1989). *Tervezési előírások a munkagödör határolására, megtámasztására és víztelenítésére*, 19 p.
- Muskat, M. (1932). Potential distributions in large cylindrical disks with partially penetrating electrodes. *Physics*, 2(5):329-364
- Nagy, I. V., Karadi, G. (1961). Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy. *Österreichische Wasserwirtschaft*, OeWW 13(12): 281-287. – ISSN 0029-9588
- Nahrgang, G. (1965). Über die Bemessung von Schutzzonen bei Grundwasserfassungsanlagen. *Bohrtechn Brunnenb Rohrlb*. 16:102–107
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4):1031–1045
- New York DEC (2015). *Pumping test procedures for water withdrawal applications* (2018.09.24.), 10 p. https://www.dec.ny.gov/docs/water_pdf/pumptest.pdf

Newfoundland & Labrador DEC (2010). *Aquifer Testing Guidelines*, (2018.09.20.), 16 p. https://www.mae.gov.nl.ca/waterres/regulations/appforms/Aquifer_Testing_Final.pdf

North Carolina Department of Environmental and Natural Resources, Division of Water Quality (2007). *Performance and Analysis of Aquifer Slug Tests and Pumping Tests Policy*, 12 p. (2018.07.24) <https://files.nc.gov/ncdeq/Water%20Quality/Aquifer%20Protection/APS%20Policies/AquiferTestingPolicy-20070531.pdf>

OHIO EPA (2006). *Technical guidance manual for ground water investigations*, Chapter 4 – Pumping and Slug Tests, (2018.08.14.), 45 p. https://www.epa.state.oh.us/Portals/28/documents/TGM-04_final1206W.pdf

Osborne, P. S., USA EPA (1993). Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests, 23 p. (2018.07.25.) <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/sopaqu.pdf>

Öllös, G. (1956). A talaj rétegződés hatása a kutakkal kapcsolatos talaj vízmozgásra, *Hidrológiai Közlöny*, 36(4) pp. 274-285.

Öllös, G. (1957). A kútpaláston kialakuló vízmozgásnak és a kút vízhozamának vizsgálata, *Hidrológiai Közlöny*, 37. évf. 1957. 1. sz. pp. 26-33

Öllös, G. (1958). A kútpalást melletti hidraulikai viszonyok részletes vizsgálata. *Hidrológiai Közlöny*, 38(1) pp 1-20.

Öllös, G. (1970). *Kúthidraulika*, Tankönyvkiadó, Budapest, 209 p.

Palotás, L. (1961). *Mérnöki Kézikönyv, IV. kötet*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. 1428 p. pp 68-73.

Parsons, S. B. (1994). A re-evaluation of well design procedures. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 27:S31–S40

Pattle Delamore Partners LTD, Greater Wellington Regional Council (2011). *Aquifer test guidelines for the Greater Wellington region*, Christchurch, New Zealand, 63 p. (2018.08.01.) <http://www.gw.govt.nz/assets/Resource-Consents/Pumping-test-guideline-from-PDP-August-2011.pdf>

Pattle Delamore Partners LTD (2013). *Pumping Test Guidelines for Horizons Regional Council*, Christchurch, New Zealand, 40 p. (2018.07.25.) https://www.horizons.govt.nz/HRC/media/Media/Water/Pumping-Test-Guidelines-for-Horizons-RegionalCouncil_PDP.pdf?ext=.pdf

Petik és Társai Mérnöki Szolgáltató Kft. (2005). *Részletes talajmechanikai szakvélemény a Budapest, Mázsza téren épülő bevásárlóközpont és lakóházak „A”, „B” és „C” tömbjének tervezéséhez*. Szakvélemény, Budapest.

Powers, J. P., Corwin, A. B., Schmall, P. C., Kaeck, W. E. (2007). *Construction dewatering and groundwater control* (3rd ed.) John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 623 p.

Richter, L. (1966). Aufgaben der hydrogeologischen Erkundung und Nacherkundung in der Braunkohlenindustrie. *Zeitschrift für Angewandte Geologie*. 12(6), 288–297.

- Roscoe Moss Company (1990). *Handbook of ground water development*. Wiley, New York, 493. p.
- Rubbert, T., Wohnlich, S. (2006). Visualisierung von Brunneneintrittsverlusten am physikalischen Pumpversuchsmodell. *Bohrtechn Brunnenb Rohrlb* 57(6):46–52
- Rushton, K. R. (2006). Significance of a seepage face on flows to wells in unconfined aquifers, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* v.39; pp 323-331., doi: 10.1144/1470-9236/06-004
- Sauerbrei, I. I. (1932). Сауэрбрей И. И. (1932) *К вопросу о коэффициенте фильтрации грунтов и методике его исследования*, Известия ВНИИГ
- Schneebeli, G. (1956). Sur l'hydraulique des puits. *International Association of Scientific Hydrology, Symposia Darcy Publication* 41(2), Association internationale d'hydrologie Gentbrugge, Dijon, France, pp 10–27
- Seelheim, F., (1880). Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. *Zeitschrift für analytische Chemie*. 19, 387–418
- SERAS (1994). *Standard Operating Procedures, Control Pumping Test*, 10 p. (2018.10.20.) <https://clu-in.org/download/ert/2045-R00.pdf>
- Sichardt, W. (1928). *Das Fassungsvermögen von Rohrbrunnen und seine Bedeutung für die Grundwasserabsenkung, insbesondere für größere Absenkungstiefen*. Springer, Berlin. 89 p.
- Simpson, M. J., Clement, T. P., Gallop, T. A. (2003). Laboratory and numerical investigation of flow and transport near a seepage-face boundary. *Ground Water* 41(5):690–700
- Singh, S. R., Shakya, S. K. (1989). A nonlinear equation for groundwater entry into well screens. *Journal of Hydrology* 109:95–114
- Skaballanowitsch, J. A. (1954). Hydrogeologische Berechnungen über die Dynamik des Unterirdischen Wassers. Vlg. UgleTechIsdat, Moskau
- 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.
- Sterrett, R. J. (2007). *Groundwater and Wells*, 3rd Edition. Johnson Screens, New Brighton, MN. 812 p.
- Streltsova, T. (1972). Unconfined aquifer and slow drainage. *Journal of Hydrology*, 16(2):117–134
- Susquehanna River Basin Commission (2007). *Aquifer Testing Guidance*, 25 p. (2018.08.01.) <https://www.srbc.net/regulatory/policies-guidance/docs/aquifer-testing-guidance-policy-2007-01.pdf>
- 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)

Székely, F. (2011). *Szivattyúzási és injektálási tesztek modellezése függőleges kutakban és fúrásokban*, Kúthidraulikai modellezés és adatelemzés 1/3. Előadás, ELTE, Budapest, 2011.12.01., pp. 2.

Tang, Y., Zhou, J., Yang, P., Yan, J., Zhou, N. (2017). Hydrogeological Parameters Calculation, *Groundwater Engineering*, pp. 35-111., ISBN: 978-3-662-48579-8

Tartakovsky, G. D., Neuman, S. P. (2007). Three-dimensional saturated-unsaturated flow with axial symmetry to a partially penetrating well in a compressible unconfined aquifer. *Water Resources Research*, 43(1):W01410

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley, New York, London. 510 p.

Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 16(1):519-524

Thiem, G. (1906). *Hydrologische Methoden*, Gebhardt, Leipzig, 56 p.

Todd, D. K., Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology*. 3rd Edition, Printed: John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, pp. 225., 656. p.

Truelsen, C. (1958). Bohrbrunnen-Dimensionierung zur Verhinderung ihrer Verockerung und Verkrustung. *GWF Wasser Abwasser* 99(8): 185–188.

Trussell, R. R., Chang, M. (1999). Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters. *Journal of Environmental Engineering* 125 (11): 998-1006. – ISSN 0733-9372

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>

USA EPA (1994). *Controlled pumping test*, 7 p. (2018.07.25.) <http://www.dem.ri.gov/pubs/sops/wmsr2045.pdf>

USBR, U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (1995). *Ground Water Manual*, 2nd Edition, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402, 695 p. (2018. 07. 24) <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/GndWater.pdf>

Vasvári, V. (2001). *Geohydraulische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen in geklüfteten Grundwasserleitern*, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, TU Graz, 110 p. ISBN-3-901351-51-5.

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.

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

Waikato Regional Council (2019). *Aquifer pumping test guidelines* (2019.10.21.) <https://www.waikatoregion.govt.nz/Environment/Natural-resources/Water/Groundwater/Aquifer-pumping-test-guidelines/>

Walton, W. C., (1962). *Selected Analytical Methods for Well and Aquifer Evaluations*. Illinois State Water Survey Bulletin 49, Urbana, IL, 81 p.

Washington State Department of Health, Division of Environmental Health, Office of Drinking Water (2009). *Water System Design Manual*, pp. 229-252. (2019.04.27.) <https://www.integra-water.com/images/pdfs/Washington-State-Guidlines.pdf>

Weber, H. (1928). *Die Reichweite von Grundwasserabsenkungen mittels Rohrbrunnen*. Springer-Verlag, Berlin. 58 p.

Wendling, G., Chapuis, R. P., Gill, D. E. (1997). Quantifying the effects of well development in unconsolidated material. *Ground Water* 35(3):387–393

Williams, D. E. (1985). Modern techniques in well design. *Journal of American Water Works Associate* 77(9):68–74

Zamarin, I. A. (1954). *Projektirovaniye gidrotechniceszkih szooruzseniyj*. Moszkva.

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

MELLÉKLETBEN SZEREPLŐ HIVATKOZÁSOK

Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, New York, 569 p.

Bentall, R. (1963). Shortcuts and Special Problems in Aquifer Tests, *U.S. Geological Survey Water Supply Paper* 1545-C 117 p.

Christchurch City Council (2016). *Dewatering Guideline*, 49 p. (2018. 07. 25) <https://ccc.govt.nz/assets/Documents/Consents-and-Licences/construction-requirements/approved-contractors/Dewatering-Guideline-3-November-2016.pdf>

Dawson, K. and Istok, J. D. (1991). *Aquifer Testing, Design and Analysis of Pumping and Slug Tests*. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan. 280 p. Genetier, B. (1984). *La pratique des pompages d'essai an hydrogéologie*. Bur. Rech. Géol. Min., Manuels et méthodes, No. 9, 132 pp.

Hamvas F., (2000): *Munkaterek víztelenítése*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 184 p.

Huisman, L. (1972). *Groundwater Recovery*. Winchester, New York, 336 p.

Karácsonyi, S. (1976). *Vízszerezés*. Tankönyvkiadó, Budapest, 284 p.

- King, H. W. (1982). *Handbook of Hydraulics*. McGraw-Hill Book Co., New York, 197 p.
- Schafer, D. C. (1978). Casing Storage Can Effect Pumping Test Data. *The Johnson Drillers Journal*, pp. 1-5.
- Sevee, J. (2006). Methods and Procedures for Defining Aquifer Parameters. In: D. M. Nielsen (editor), *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, Fl. pp. 913-958.
- Stallman, R. W. (1983). *Aquifer-Test Design, Observation and Data Analysis: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resource Investigations*, Book 3, Chapter B1. United States Government Printing Office. Washington, D. C.
- The City of New York Department of Environmental Protection Division of Permitting and Connections (2004). *Approval to Temporarily Discharge Groundwater into Sewers, Dewatering Permit Guidelines*, 3 p. (2018.07.26.) <https://www1.nyc.gov/assets/dep/downloads/pdf/about/water-and-sewer-forms/approval-discharge-groundwater-into-sewers.pdf>
- U.S Department of Energy (2009). *Field Test Report: Preliminary Aquifer Test Characterization Results for Well 299-W15-225: Supporting Phase I of the 200-ZP-1 Groundwater Operable Unit Remedial Design*, Pacific Northwest, National Laboratory, Richland, Wahington, 113 p. (2018.07.25.) <https://pdfs.semanticscholar.org/7726/f681b91aad258a399586002826fbc133caa5.pdf>
- Walton, W. C., (1970). *Ground Water Resource Evaluation*. McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 664 p.
- Walton, W. C. (1987). *Groundwater Pumping Tests, Design and Analysis*. Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Michigan. 201 p.

MELLÉKLET

TARTALOMJEGYZÉK

1. A PRÓBASZIVATTYÚZÁSRA VONATKOZÓ ELŐÍRÁSOK	1
1.1. RÉGI MAGYAR SZABVÁNY RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA	1
1.2. A VIZSGÁLAT CÉLJA	1
1.3. A VIZSGÁLATOT MEGELŐZŐ TEREPI TEENDŐK	2
1.4. NYUGALMI VÍZSZINT MÉRÉSÉNEK IDŐTARTAMA.....	2
1.5. LÉPCSŐS HOZAMÚ PRÓBASZIVATTYÚZÁS SZÜKSÉGESSÉGE.....	3
1.6. MEGFIGYELŐKUTAK, PIEZOMÉTEREK SZÁMA ÉS KIOSZTÁSA	3
1.7. VÍZSZINTEK ÉSZLELÉSI IDEJE, PONTOSSÁGA ÉS ESZKÖZEI.....	4
1.8. HOZAMMÉRÉS ESZKÖZEI, MÉRÉSÉNEK GYAKORISÁGA ÉS MEGENGEDETT INGADOZÁSA	8
1.9. KITERMELT VÍZ ELVEZETÉSE	9
1.10. VISSZATÖLTŐDÉS VIZSGÁLATA	9
1.11. KIÉRTÉKELÉSI MÓDOK	11
1.12. VIZSGÁLAT IDŐPONTJÁNAK KIVÁLASZTÁSA	14
1.13. A TERVEZÉSI ÉS MÉRÉSI SZAKASZBAN VIZSGÁLANDÓ VAGY FELJEGYZENDŐ KÖRNYEZETI HATÁSOK	15
2. SZAKIRODALOMBAN SZEREPLŐ KISMINTAMODELLEK	17
3. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK	20
4. A 2018-19-ES PERMANENS MÉRÉSEK EREDMÉNYEI	22
5. NEMPERMANENS MÉRÉSEK EREDMÉNYEI	24
6. KÚTELLENÁLLÁS KIMUTATÁSA LABORATÓRIUMI MÉRÉSEKKEL	26

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

Melléklet 1. táblázat: A próbaszivattyúzás vizsgálatának céljai hidrogeológiai vonatkozásban	2
Melléklet 2. táblázat: Szivattyúzott kút vízszintészlelésének gyakorisága	5
Melléklet 3. táblázat: Visszatöltődés vízszintmérésének gyakorisága az anyakútban	6
Melléklet 4. táblázat: Vízszintészlelés gyakorisága a megfigyelőkutakban szivattyúzás és visszatöltődés mérésekor	7
Melléklet 5. táblázat: A próbaszivattyúzás időtartama és a hozam megengedett ingadozása	8
Melléklet 6. táblázat: A visszatöltődés vizsgálatára vonatkozó irányszámok	10
Melléklet 7. táblázat: Egy kúttal végzett vizsgálatra ajánlott kiértékelési módszerek (OHIO EPA 2006)	12
Melléklet 8. táblázat: Lépcsős hozamú vizsgálatra ajánlott kiértékelési módszerek (OHIO EPA 2006)	13
Melléklet 9. táblázat: Leggyakoribb kiértékelési módszerek visszatöltődés vizsgálati eredményeire (OHIO EPA 2006)	13
Melléklet 10. táblázat: Ajánlott kiértékelési módszerek speciális esetekre (OHIO EPA 2006).....	14
Melléklet 11. táblázat: Az anyakutak perforációjához szükséges lyukszámok	20
Melléklet 12. táblázat: A 2. mérőszor szivárgási tényezőinek értékei	23
Melléklet 13. táblázat: Különböző anyagból készült csövek érdessége Menon (2014)	26

ÁBRÁK JEGYZÉKE

Melléklet 1. ábra: Klotz (1971) szivárgáshidraulikai modelljének felépítése	17
Melléklet 2. ábra: Clark és Turner (1983) által használt kismintamodell sematikus rajza.....	17
Melléklet 3. ábra: Williams (1985) által használt kismintamodell sematikus rajza	17
Melléklet 4. ábra: Gefell és társai (1994) fizikai modelljének váza	18
Melléklet 5. ábra: Wendling és társai (1997) fizikai modelljéről készült oldal- és felülnézeti ábra	18
Melléklet 6. ábra: Simpson és társai (2003) kismintamodelljének perspektivikus képe	19
Melléklet 7. ábra: Klauder (2010) kismintamodelljének felépítése	19
Melléklet 8. ábra: Kút perforálása kézi fúrógéppel	20
Melléklet 9. ábra: Kút perforálása a laborbeli fúrógéppel.....	20
Melléklet 10. ábra: A víz kinematikai viszkozitásának értékei a hőmérséklet függvényében	21
Melléklet 11. ábra: A kút melletti piezométerekben felgyülemlett levegőbuborékok	22
Melléklet 12. ábra: Kútcseré folyamat.....	22
Melléklet 13. ábra: 2. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	24
Melléklet 14. ábra: 3. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	24
Melléklet 15. ábra: 4. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	24
Melléklet 16. ábra: 5. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	24
Melléklet 17. ábra: 6. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	25
Melléklet 18. ábra: 7. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	25
Melléklet 19. ábra: 8. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	25
Melléklet 20. ábra: 10. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel.....	25

1. A PRÓBASZIVATTYÚZÁSRA VONATKOZÓ ELŐÍRÁSOK

Az alábbi fejezetben összefoglalom a szakirodalmi kutatásom azon részét, mely a próbaszivattyúzást szabályzó előírások, ajánlások és szakirodalmak tartalmának összevetését célozta az EN ISO 22282-4 2012 szabvánnyal. A Melléklet ezen fejezetéből származó eredményeket tömören a disszertációm 7.1. fejezetében ismertettem.

1.1. RÉGI MAGYAR SZABVÁNY RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA

Az MSZ 15003-1989 tervezői előírások a munkagödrök határolására, megtámasztására és víztelenítésére az a dokumentum, amiben a régi magyar szabványok közül a munkagödrök víztelenítésének témakörében egy oldalt szenteltek a próbaszivattyúzás leírására. A dokumentum szerint a szivattyúzást 14 napig kell folyamatosan végezni vagy addig, amíg az anyakúttól számított 100 m-es távolságban 24 óra alatt maximum 1 cm-t változott a vízszint. Észlelőkutak telepítését ajánlja a talajvíz feltételezett áramlási irányába vagy erre az irányra és rá merőlegesen is, esetleg egymással 120^o-os szöget bezáró három irányba. A vízszintészlelések gyakoriságát a próbaszivattyúzás vezetőjének kell meghatározni, de javasolt kezdetben sűrűbben, később ritkábban: 3-6-12-24 óránként.

1.2. A VIZSGÁLAT CÉLJA

A feltárt irodalmak többsége a kút vízhozamának meghatározását említi a próbaszivattyúzás céljaként. A Melléklet 1. táblázatában összefoglaltam, hogy az EC milyen esetekben javasolja a vizsgálat elvégzését, valamint más ajánlások milyen lehetőségekre mutatnak rá. A hidrogeológiai (a vízvezető réteget vagy a kutat vizsgálva) vonatkozásokon túl fúrás közbeni, tisztító és hosszú idejű (vízadóképesség, környezeti-ökológiai hatások) próbaszivattyúzást is kiviteleznek a mérnöki gyakorlatban. Látható, hogy az EC döntően a kúttal kapcsolatos paraméterek meghatározására fókuszál, viszont más előírásokban több víztartóra vonatkozó célkitűzés szerepel (USBR 1995, Vasvári 2001, BurVal 2006, North Carolina 2007, Powers és társai 2007, Susquehanna 2007, Washington State 2009, Newfoundland 2010, ICRC 2011, EN ISO 22282-4 2012, Pattle Delamore 2013, Tang és társai 2017, Balasubramanian 2017, Waikato 2019, British Columbia 2019).

Melléklet 1. táblázat: A próbaszivattyúzás vizsgálatának céljai hidrogeológiai vonatkozásban

EC-ben megemlített		EC-ben nem szerepel	
Víztartóval kapcsolatos paraméterek	Kúttal kapcsolatos paraméterek	Víztartóval kapcsolatos paraméterek	Kúttal kapcsolatos paraméterek
Szivárgási tényező.	Kút hozama; teljesítőképesség, hatékonyság; skin meghatározása; kútbeli tározódás; távolhatás.	Transzmisszivitás; tárolási tényező; fajlagos hozam; peremfeltételek feltárása; kapcsolat felszíni vizekkel; víztartó kiterjedése.	Szomszédos kutakra gyakorolt hatás; vízminőség.

1.3. A VIZSGÁLATOT MEGELŐZŐ TEREPI TEENDŐK

A próbaszivattyúzás előtt ajánlatos kipróbálni a felszerelést, mely során ellenőrizni kell a vízszint- és hozammérőket, szerelvényeket (pl. tolózár) és a szivattyút. Erre az EC is felhívja a figyelmet, az előzetes vizsgálat hosszát 15 perc és 2 óra között állapítja meg. Ezen felül a terület geológiájáról, földtani szelvényeiről és talajvízszint adatairól is információkat kell gyűjtenünk meglévő anyagok vagy új mintavételek, mérések eredményeként (EN ISO 22282-4 2012). Az EC a következő lépésekre nem tér ki: a kutat jellemző adatok beszerzésére, a terület felszíni jellegzetességeinek és adatainak gyűjtésére, valamint a tájékoztatási kötelezettségre az esetlegesen érintett más kúttulajdonosokra vonatkozóan (USA EPA 1994, SERAS 1994, Maine EPA 2005, ICRC 2011, Pattle Delamore 2011, Pattle Delamore 2013, Balasubramanian 2017, British Columbia 2019).

1.4. NYUGALMI VÍZSZINT MÉRÉSÉNEK IDŐTARTAMA

A szivattyúzás előtt mérendő vízszintidőszak hossza az egyes szakirodalmak alapján 1-25 nap között is változhat és a mérések elvégzésének gyakorisága is tág határokat vehet fel (Osborne 1993, Kruseman és de Ridder 1994, USA EPA 1994, SERAS 1994, Kovalevsky és társai 2004, Maine EPA 2005, North Carolina 2007, Susquehanna 2007, Washington State 2009, Newfoundland 2010, ICRC 2011, EN ISO 22282-4 2012, Leonhardt és társai 2012, Pattle Delamore 2013, New York DEC 2015, Balasubramanian 2017, Waikato 2019). Az OHIO EPA (2006) kiemeli, hogy a próbaszivattyúzást akkor lehet elkezdni, ha az előzetes mérések alapján a vízszintekben bekövetkező változás nem lesz lineárisnál magasabb fokú. Ezt akkor tudjuk megállapítani, ha minél több mérés áll rendelkezésünkre. Stallman (1983) szerint az előzetes vízszintészlelések időtartamának legalább kétszer olyan hosszban kell megtörténnie, mint a próbaszivattyúzás vizsgálati ideje, melyet a későbbiekben láthatunk, hogy szabad felszínű víztartó esetén a javasolt időtartam minimum 3 napban lett megállapítva.

1.5. LÉPCSŐS HOZAMÚ PRÓBASZIVATTYÚZÁS SZÜKSÉGESSÉGE

A vizsgálat fő célja az állandó hozamú próbaszivattyúzás során kitermelendő legnagyobb fenttartható hozamának becslése (USA EPA 1994, SERAS 1994, USBR 1995, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Powers és társai 2007, Susquehanna 2007, USDE 2009, Washington State 2009, Newfoundland 2010, ICRC 2011, Pattle Delamore 2011, Pattle Delamore 2013, British Columbia 2019). Ezen felül a kúttelepítés sikeressége (Osborne 1993) és kútellenállás (Todd és Mays 2005) is meghatározható. Az EC ajánlja alkalmazását, viszont a vizsgálat elvégzésére vonatkozó iránymutatásokat nem ad (EN ISO 22282-4 2012).

1.6. MEGFIGYELŐKUTAK, PIEZOMÉTEREK SZÁMA ÉS KIOSZTÁSA

A próbaszivattyúzást el lehet végezni csak az anyakút adatainak mérésével, viszont megfigyelőkutak alkalmazásával a víztartóról nyert adatok mennyisége és pontossága nő. Ennek hátránya, hogy telepítésük növeli a vizsgálat költségeit, így jó állapotban lévő meglévő kutak is hasznosíthatók a területen ilyen célból (Osborne 1993, Washington State 2009, Newfoundland 2010). A megfigyelőkutak számára az egyes előírások más-más értékeket adnak meg. Az EC EN ISO 22282-4 (2012), valamint a Susquehanna (2007), Newfoundland (2010), British Columbia (2019), Waikato (2019) előírások javasolják az észlelőkutak alkalmazását, de nem adnak irányszámot. Ezen felül találunk ajánlásokat minimum egy (Osborne 1993, Pattle Delamore 2011, Pattle Delamore 2013, Tang és társai 2017) kettő (North Carolina 2007) vagy három (Karácsonyi 1976, Kruseman és de Ridder 1994, Hamvas 2000, Maine EPA 2005, OHIO EPA 2006, New York DEC 2015) megfigyelőkút használatára.

A megfigyelőkutak és a piezométerek ideális távolsága az anyakúttól több tényezőtől is függ: a víztartó kiterjedésétől, nyomásviszonyaitól, szivárgási tényezőjétől, a szivattyúzás időtartamától és hozamától, a szűrőzés hosszától, stb. (Kruseman és de Ridder 1994). Az előírások alapján az észlelőkutak kiosztásáról általánosan kijelenthetők a következők:

- Szabad felszínű réteg esetén erősen ajánlott megfigyelőkút használata.
- Nyomás alatti rétegek vizsgálatánál a monitoringkutak távolsága nagyobb lehet, mint szabad felszínű víztartóknál.
- Nagyobb áteresztőképességű talajok esetén a leszívási görbe gradiense kisebb, a kút távolhatása nagyobb, mint kötöttebb, kis szivárgási tényezőjű víztartóknál.
- Egy észlelőkút esetén az anyakúttól vett telepítési távolsága 15-100 m között ajánlott, (Osborne 1993, Pattle Delamore 2013). Két megfigyelőkutat alkalmazva az elsőt 10-100 m-re (nyomás alatti rétegnél több is lehet), a másodikat a távolhatáson kívülre kell

elhelyezni (Kruseman és de Ridder 1994, OHIO EPA 2006). Három monitoringkút esetén az elsőt 0,6-10 m-en belül, a másodikat 10-230 m között, a harmadikat pedig a távolhatáson túl érdemes telepíteni (Maine EPA 2005, New York DEC 2015).

- Repedezett kőzetek esetén több megfigyelőkutat érdemes alkalmazni (Washington State 2009).
- Felszíni víztestek közelében végzett vizsgálatoknál ajánlatos megfigyelőkutakat úgy elhelyezni, hogy ha a felszíni és felszín alatti vizek között van kapcsolat, akkor kimutathatóvá váljon (Powers és társai 2007).
- A vízáadó anizotrópiája, illetve heterogenitása esetén több észlelőkutat érdemes alkalmazni. Amennyiben a víztartó bizonyítottan anizotróp, úgy kettő, ha csak feltételezett, akkor három kútra van szükség (Ferris és társai 1962, Walton 1962, Bentall 1963, Walton 1970, Dawson és Istok 1991, Maine EPA 2005, North Carolina 2007).
- Peremfeltételek hatásának kimutatására nem használhatunk két megfigyelőkútnál kevesebbet (Tang és társai 2017). Érdemes a peremfeltétellel párhuzamosan és arra merőlegesen is megfigyelőkútsorokat elhelyezni (Walton 1987, OHIO EPA 2006, Sevee 2006).

1.7. VÍZSZINTEK ÉSZLELÉSI IDEJE, PONTOSSÁGA ÉS ESZKÖZEI

A vízszintek regisztrálása kézi és automata műszerekkel végezhető. Leggyakrabban alkalmazott kézi mérőeszköz a hang- és fényjelzéssel ellátott mérőszalag (Kruseman és de Ridder 1994, USBR 1995, Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2011, Waikato 2019). Automata eszközök között nyomásmérőt (Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2011, EN ISO 22282-4 2012) és elektromos vízszintmérőt említene az előírások és szakirodalmak (Kruseman és de Ridder 1994, USA EPA 1994, SERAS 1994, USBR 1995, Pattle Delamore 2011, EN ISO 22282-4 2012, Balasubramanian 2017, Waikato 2019). Az EC vízszintmérésre alkalmas monitoringrendszert ír elő a kutakban és piezométerekben egyaránt, mely automata rendszer alkalmazásával oldható meg. Szakirodalmak, illetve egyes országokban érvényes állami és önkormányzati előírások különböző észlelési időtartamokat javasolnak (Melléklet 2-4. táblázat).

Melléklet 2. táblázat: Szivattyúzott kút vízszintészlelésének gyakorisága

Forrás	1	2	2,5	3	4	5	8	9	10	15	20	30	40	50	60	80	90	100	120	180	200	240	300	360	500	600	1000	1440	2000	2880	4320	5000	5000-
Osborne (1993)	1/2		1					5					10					30					240		1440								
USA EPA (1994)	1/2									1	5					30					60					480							
Kruseman és de Ridder (1994)	1/2			5												20					60												
SERAS (1994)	1/2									1	5					30					60					480							
USBR (1995)	1/2	3/4	1	1,5	2	5			10	15	20	60-120																					
Kovalevsky és társai (2004)	1/2			5								20					60																
BurVal (2006)	Kezdeti időszakában rövid időközönként kell megmérni (például: 1, 10, 20, 30, 60, 90 másodperc). Később a vízszintet elég ötperces időközökben regisztrálni.																																
OHIO EPA (2006)	1/2			5								20					60																
North Carolina (2007)	1/6	1/3		1/2		1	5																										
Susquehanna (2007)	Első 15 percben legalább minden percben egyszer le kell olvasni a vízszinteket.																																
Washington State (2009)	1					5					30					60					120		-										
ICRC (2011)	1/2									1	5					30-60																	
Pattle Delamore (2011)	1/6	1/2		1			2			5					15																		
Leonhardt és társai (2012)	1/2					1	2	5	10			20	60																				
Leonhardt és társai (2012)	1																																
EN ISO 22282-4 (2012)	1/2			1			5	10	30					60																			
New York DEC (2015)	1					5					10					30					60		240					-					
Tang és társai (2017)	A szivattyúzás kezdetén 5-10 percnként kell mérni a szinteket, majd 15-30 percnként.																																
Balasubramanian (2017)	1/2			5								20					60																
Waikato (2019)	1			2	3	5	10	30					60					120		180													
Newfoundland (2010)	1					2	5			10	20	30			60					120		240	-	-									
British Columbia (2019)	1					2	5			10			20		50			100		200		500			1440								
Maine EPA (2005)	1					5								30										60									

Melléklet 3. táblázat: Visszatöltődés vízszintmérésének gyakorisága az anyakútban

Forrás	1	2	2,5	3	4	5	8	9	10	15	20	30	40	50	60	80	90	100	120	180	200	240	300	360	500	600	1000	1440	2000	2880	4320	5000	5000-
Kruseman és de Ridder (1994)	1/2		5					20			60																						
USBR (1995)	1/2	3/4	1	1,5	2	5	10	15	20	60-120																							
Kovalevsky és társai (2004)	1/2		5					20			60																						
BurVal (2006)	Kezdeti időszakában rövid időközönként kell megmérni (például: 1, 10, 20, 30, 60, 90 másodperc). Később a vízszintet elég ötperces időközökben regisztrálni.																																
OHIO EPA (2006)	1/2		5					20			60																						
North Carolina (2007)	1/6	1/3		1/2		1	5																										
Susquehanna (2007)	Első 15 percben legalább minden percben egyszer le kell olvasni a vízszinteket.																																
Washington State (2009)	1					5					30					60			120		-												
ICRC (2011)	1/2					1	5					30-60																					
EN ISO 22282-4 (2012)	1/2		1			5	10	30					60																				
New York DEC (2015)	1					5			10			30					60		240			-											
Waikato (2019)	1			2	3	5	10	30					60			120		180															
Newfoundland (2010)	1					2	5			10	20	30		60					120		240	-	-										
British Columbia (2019)	1					2	5			10			20		50			100		200		500		1440									
Maine EPA (2005)	1					5					30					60																	

Melléklet 4. táblázat: Vízszintészlelés gyakorisága a megfigyelőkutakban szivattyúzás és visszatöltődés mérésekor

Forrás	1	2	2,5	3	4	5	8	9	10	15	20	30	40	50	60	80	90	100	120	180	200	240	300	360	500	600	1000	1440	2000	2880	4320	5000	8640	8640-
Osborne (1993)	1/2		1			5			10			30			240			1440																
USA EPA (1994)	2						5			10			30			60			480															
Kruseman és de Ridder (1994)	1/6	1/2		1			5			10			30			60			480			1440												
SERAS (1994)	2						5			10			30			60			480															
USBR (1995)	1/2		3/4		1	1,5	2	5		10		15		20		60-120																		
Kovalevsky és társai (2004)	1/6	1/2		1			5			10			30			60			480															
BurVal (2006)	Kezdeti időszakában rövid időközönként kell megmérni (például: 1, 10, 20, 30, 60, 90 másodperc). Később a vízszintet elég ötperces időközökben regisztrálni.																																	
OHIO EPA (2006)	1/6	1/2		1			5			10			30			60			480			1440												
North Carolina (2007)	1/6	1/2		1			5			10			30			60			480			1440												
Susquehanna (2007)	Első 15 percben legalább minden percben egyszer le kell olvasni a vízszinteket, majd 10 percenként.																																	
Washington State (2009)	1						5			30			60			120			-															
Pattle Delamore (2011)	1/6	1/2		1			2			5			15																					
Leonhardt és társai (2012)	1/2						1	2	5	10			20		60																			
Leonhardt és társai (2012)	1																																	
EN ISO 22282-4 (2012)	1/2		1			5	10		30			60																						
New York DEC (2015)	1						5			10			30			60			240			-												
Tang és társai (2017)	A szivattyúzás kezdetén 5-10 percenként kell mérni a szinteket, majd 15-30 percenként.																																	
Balasubramanian (2017)	1/2		1			5			10			30			60			480																
Newfoundland (2010)	1						2	5		10	20	30		60			120			240	-													
British Columbia (2019)	10									50						100			500			1440												
Maine EPA (2005)	1						5			30			60																					

1.8. HOZAMMÉRÉS ESZKÖZEI, MÉRÉSÉNEK GYAKORISÁGA ÉS MEGENGEDETT INGADOZÁSA

A kitermelt hozam mérésére az EC kalibrált áramlásmérőt, illetve vízmennyiségmérőt ír elő EN ISO 22282-4 (2012). Más ajánlásokban ezen felül akusztikus áramlásmérőt, mérőbukót, mérőperemet, Pitot-csövet, illetve vödörrel vagy tartállyal végzett köbözést említenek mint lehetséges megoldásokat (Osborne 1993, Kruseman és de Ridder 1994, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Pattle Delamore 2011, Pattle Delamore 2013, Tang és társai 2017, Waikato 2019, British Columbia 2019). A szivattyúzás időtartamára, valamint a hozam megengedett ingadozására vonatkozó irányszámokat a Melléklet 5. táblázatában foglaltam össze.

Melléklet 5. táblázat: A próbaszivattyúzás időtartama és a hozam megengedett ingadozása

Hivatkozás	Szivattyúzás időtartama	Hozam megengedett ingadozása
Brown és társai (1972)	-	≤10%
Osborne (1993)	24 óra vagy stabil vízfelszín elérése	≤5%
USA EPA (1994)	24-72 óra	-
Kruseman és de Ridder (1994)	Általában 24-72 óra	-
SERAS (1994)	24-72 óra	-
USBR (1995)	2 óra-3 hét, de általában 48 óra.	≤5%
BurVal (2006)	Min. 24 óra.	-
OHIO EPA (2006)	5-120 óra, de átlagosan 15-20 óra.	≤5%
North Carolina (2007)	Min. 24 óra.	-
Powers és társai (2007)	Min. 24 óra.	≤10%
Susquehanna (2007)	72 óra.	≤5%
Washington State (2009)	24-36 óra	≤10%
ICRC (2011)	1 nap-2 hét vagy stabil vízfelszín elérése	≤10%
Pattle Delamore (2011)	48-72 óra.	-
EN ISO 22282-4 (2012)	Min. 24 óra.	≤5%
Pattle Delamore (2013)	24-72 óra.	-
New York DEC (2015)	Min. 72 óra.	<10%
Christchurch (2016)	24-168 óra.	-
Tang és társai (2017)	Min. 4 óra, de általában 48-72 óra.	≤5%
Balasubramanian (2017)	A vizsgálat céljától függ.	-
Waikato (2019)	Min. 24 óra.	≤5%
Newfoundland (2010)	6-72 óra.	≤2%
British Columbia (2019)	24-72 óra.	≤5%, nagyobb hozamoknál 2-3%
Maine EPA (2005)	24 óra vagy stabil vízfelszín elérése	-

1.9. KITERMELT VÍZ ELVEZETÉSE

Amennyiben a vizsgálatot épített környezetben végezzük, úgy az EC lehetőséget biztosít arra, hogy a helyi előírásokat betartva a szennyvíz vagy csapadékvízvezetékbe vezessük a vizet (EN ISO 22282-4 2012). Erre más nemzetközi példákat is találhatunk (British Columbia 2019, New York 2004).

Több előírás is egyetért abban, hogy a kitermelt vizet olyan távolságra kell elvezetni a kúttól, hogy az ne legyen hatással a próbaszivattyúzás eredményeire (Osborne 1993, BurVal 2006, North Carolina 2007, ICRC 2011, Pattle Delamore 2011, EN ISO 22282-4 2012, Pattle Delamore 2013, Balasubramanian 2017, Waikato 2019), köztük az EC is, viszont utóbbi nem ad konkrét ajánlást minimális távolságok betartásáról. Az ajánlott távolságok nagyban függenek:

- a víztartó nyomásviszonyaitól (nyomás alatti esetben kisebb a megkívánt távolság)
- bizonyítottan nem szivárog vissza a vizsgálat időtartama alatt a víz a víztartóba (a szivattyúzás rövid időtartama vagy a talaj kicsi áteresztőképessége miatt)
- vagy a nyugalmi vízszint mélyen helyezkedik el (Washington State 2009, New York DEC 2015, British Columbia 2019).

1.10. VISSZATÖLTŐDÉS VIZSGÁLATA

A próbaszivattyúzást közvetlenül követő visszatöltődés folyamatának vizsgálatát több szakirodalom és előírás is javasolja. Ennek okai:

- Könnyen szerezhető plusz információ a víztartóról.
- Jól behatárolható a mérés kezdete.
- Visszatöltődéskor több, a szivattyúzás során jelen lévő zavaró tényező megszűnik, például a turbulens veszteség és a kútmenti veszteség.
- A vízszintek leolvasásának pontossága jobb lehet a turbulens folyamatok zavaró hatásának kizárása miatt.
- Todd és Mays (2005) a furat hatékonyságának megállapítását is a visszatöltődésből tette. Ha a szivattyút egy óra után leállítjuk és a vízszint 90%-a visszatöltődött 5 perc alatt, akkor a furat nem hatékony, mert túl nagy a turbulens veszteség (ICRC 2011).

A visszatöltődés teljes mértékben akkor megy végbe, ha a víztartóban a módosult vízfelszín újra eléri a nyugalmi vízszint 80-100%-át. Ennek időtartama sokkal hosszabb is lehet, mint az azt megelőző szivattyúzásé. A javasolt időtartamokat a Melléklet 6. táblázata mutatja be. Látható, hogy a legtöbb esetben a vizsgálat legkisebb időtartamát a szivattyúzás hosszában határozzák meg, ezen felül konkrét intervallumokat is megadnak.

Melléklet 6. táblázat: A visszatöltődés vizsgálatára vonatkozó irányszámok

Sorszám	Visszatöltődött szint mértéke a nyugalmi vízszinthez képest	Visszatöltődés mérésének időtartama
Osborne (1993)	-	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt.
USA EPA (1994)	-	24-72 óra.
SERAS (1994)	-	24-72 óra.
USBR (1995)	Nincs konkrét ajánlás, de javasolja a mérést.	
OHIO EPA (2006)	95%	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt vagy a nyugalmi vízszint 95 %-ának elérése.
North Carolina (2007)	-	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt.
Susquehanna (2007)	90%	Minimum 24 óra vagy a visszatöltődés 90%-a.
Washington State (2009)	95%	-
ICRC (2011)	100%	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt vagy a nyugalmi vízszint 100%-ának elérése.
EN ISO 22282-4 (2012)	-	Ha három egymást követő órás leolvasás után is 1 cm-en belül van a vízszint, akkor visszatöltődöttnek tekinthető.
New York DEC (2015)	-	12 óra.
Balasubramanian (2017)	95%	-
Waikato (2019)	Nincs konkrét ajánlás, de javasolja a mérést.	
Newfoundland (2010)	80%	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt.
British Columbia (2019)	90%	-
Maine EPA (2005)	-	Minimum annyi, mint a próbaszivattyúzása volt.

Előfordulhat, hogy a visszatöltődés nem megy végbe teljesen, ennek több oka is lehet:

- A víztartó véges kiterjedésű, nem áll rendelkezésre utánpótlás.
- A víztartó nem teljesen rugalmas, így más lehet a visszatöltődés, mint a szivattyúzás folyamata.
- Nyílt felszínű víztartónál elképzelhető, hogy légbuborékok töltik ki a tér egy részét.

Ha a nyugalmi szint 90-95%-a egy hét vagy annál több idő alatt áll vissza, akkor a víztartó vízádóképesége nem alkalmas a próbaszivattyúzás hozamának stabil kitermelésére, ezért új vizsgálatra van szükség a fenntartható hozam megállapítása érdekében (British Columbia 2019).

1.11. KIÉRTÉKELÉSI MÓDOK

A megfelelő kiértékelési módszer megválasztásában fontos szempont a víztartó fajtája, a terület geológiai adatai és a peremfeltételek ismerete (Bear 1979). A legtöbb formula a Theis-módszeren alapul.

A Melléklet 7. táblázatában összefoglaltam az egykutas adatsorra használható gyakran alkalmazott kiértékelési módokat (Dawson és Istok 1991, Kruseman és de Ridder 1994). Speciális esetekre vonatkozó módszerek a Melléklet 10. táblázatában láthatók. Többkutas vizsgálatok kiértékelési módjaira is van lehetőség, de ezeket jelen értekezésemben nem taglalom.

A Melléklet 8. táblázatában a Kruseman és de Ridder (1994) által javasolt lépcsős kiértékelési méréshez használható kiértékelési módszereket mutatom be Pattle Delamore (2013), OHIO EPA (2006).

A visszatöltődés-vizsgálatra leggyakrabban alkalmazott módszereket a Melléklet 9. táblázatában mutatom be.

Melléklet 7. táblázat: Egy kúttal végzett vizsgálatra ajánlott kiértékelési módszerek (OHIO EPA 2006)

Módszer	Alkalmazható		Megjegyzések
	Vízadó típusa szerint	Áramlás típusa	
Papadopulos and Cooper (1967)	Nyomás alatti	Nempermanens	A kezdeti adatok nem a víztartó jellemzőit tükrözik. Nehéz lehet a mérési adatsort típusgörbéhez kapcsolni, mivel a görbék eléggé hasonlóak egymáshoz. Konstans hozam. Az egyenletek figyelembe veszik a kút tárolókapacitását is.
Rushton and Singh (1983)	Nyomás alatti	Nempermanens	Görbeillesztés szempontjából még érzékenyebb, mint a Papadopulos and Cooper módszer. Konstans hozam.
Birsoy and Summers (1980)	Nyomás alatti	Nempermanens	Változó hozam (lépcsős hozamú vizsgálat vagy konstans hozamú megszakításokkal).
Hurr-Worthington (Worthington, 1981)	Nyomás alatti/ félíg áteresztő	Nempermanens	Konstans hozam. Módosított Theis-egyenlet.
Jacob-féle egyenes módszer (Straight Line Method)	Nyomás alatti/ félíg áteresztő	Nempermanens	Érzékeny a kisebb hozambeli változásokra. Alkalmazható nem teljes kút vizsgálatára is hosszúidejű adatsor esetén. Konstans hozam.
Hantush (1959b)	Félíg áteresztő/ mélységi (artézi)	Nempermanens	A vízzáró rétegen keresztül az áramlás vertikális. Változó hozam.
Jacob and Lohman (1952)	Nyomás alatti/ mélységi (artézi)	Nempermanens	Ha a hatékony sugár nem ismert, akkor a tárolási tényező nem számítható. Változó hozam (leszívás konstans).

Melléklet 8. táblázat: Lépcsős hozamú vizsgálatra ajánlott kiértékelési módszerek (OHIO EPA 2006)

Módszer	Alkalmazhatóság	Feltételezések, közelítések, egyszerűsítések	Megjegyzések
Birsoy and Summers (1980)	Nyomás alatti: Időben változó Lépcsőzetes változó hozamokkal vagy megszakításokkal szivattyúzva	Általános feltételezések nyomás alatti víztartó esetére	Hosszas folyamat
Aron and Scott (1965)	Nyomás alatti: Időben változó Hozam folyamatosan csökken	Általános feltételezések nyomás alatti víztartó esetére Közvetlenül a szivattyúzás megkezdése után a hozam csökken	Analóg a Jacob-módszerrel
Hantush (1964)	Nyomás alatti: Időben változó	Általános feltételezések nyomás alatti víztartó esetére A vizsgálat kezdetén a kút vízszintje azonnal lecsökken. Ezt követően hosszú vizsgálati idő után a leszívás állandóvá válik, viszont a hozam változik.	
Hantush-De Glee Method (Hantush, 1959b)	Félig-áteresztő réteg: Időben változó Teljes kút	Általános feltételezések nyomás alatti víztartó esetére A vizsgálat kezdetén a kút vízszintje azonnal lecsökken. Ezt követően hosszú vizsgálati idő után a leszívás állandóvá válik, viszont a hozam változik.	

Melléklet 9. táblázat: Leggyakoribb kiértékelési módszerek visszatöltődés vizsgálati eredményeire (OHIO EPA 2006)

Módszer	Alkalmazás	Forrás
Theis-módszer visszatöltődésre	Nyomás alatti réteg Nem permanens áramlás Állandó hozamot követő visszatöltődés	Theis (1935)
	Félig-áteresztő réteg Nem permanens áramlás Állandó hozamot követő visszatöltődés	Vandenberg (1975) Hantush (1964)
	Szabad felszínű réteg Visszatöltődés kései szakaszából származó adatok Állandó hozamot követő visszatöltődés	Neuman (1975)
	Szabad felszínű réteg Állandó hozamot követő visszatöltődés	Rushton and Rathod (1980)
Birsoy and Summers	Szabad felszínű réteg Állandó hozamot követő visszatöltődés	Birsoy and Summers (1980)

Melléklet 10. táblázat: Ajánlott kiértékelési módszerek speciális esetekre (OHIO EPA 2006)

Felszín alatti zóna jellegzetessége	Áramlás	Vízadó típusa	Módszerek
Egy vagy több tápláló/hozzáfolyási peremfeltétel	Permanens	Nyomás alatti vagy szabad felszínű	Dietz (1943)
Egy vagy több közvetlen tápláló/hozzáfolyási peremfeltétel	Nem permanens	Nyomás alatti vagy szabad felszínű	Stallman (in Ferris et al., 1962)
Egy tápláló/hozzáfolyási peremfeltétel	Nem permanens	Nyomás alatti vagy szabad felszínű	Hantush (1959a)
Teljes rétegvastagságban jelenlévő két peremfeltétel	Nem permanens	Félig-áteresztő vagy nyomás alatti	Vandenberg (1976, 1977)
Ék alakú víztartó zónák	Nem permanens	Nyomás alatti	Hantush (1962)
Vízszintessel szöget bezáró vízfelszín	Permanens	Szabad felszínű	Huisman (1972)
	Nem permanens	Szabad felszínű	Hantush (1964)
Két rétegű víztartó, korlátlan keresztáramlással, lebegőkutas kialakítással.	Nem permanens	Nyomás alatti	Javandel-Witherspoon (1983)
Félig-áteresztő két rétegű víztartó, elkülönülve a vízzáró rétegtől, melyen keresztül áramlás történik.	Permanens	Félig-áteresztő	Bruggeman (1966)
Nagy átmérőjű kút.	Nem permanens	Nyomás alatti	Papadopulos (1967), Papadopulos and Cooper (1967)
Nagy átmérőjű kút.	Nem permanens	Szabad felszínű	Boulton and Strelsova (1966)

1.12. VIZSGÁLAT IDŐPONTJÁNAK KIVÁLASZTÁSA

A próbaszivattyúzás egyik fő célja, hogy használható információkat szerezzünk a víztartóról. Fontos, hogy a vizsgálat elvégzésének ideje úgy legyen megválasztva, hogy minél jobban tükrözze a víztartó valós állapotát (Pattle Delamore 2013). Ennél fogva a szivattyúzást a megfelelő évszakban (ICRC 2011, Balasubramanian 2017) száraz időszakban kell elvégezni, főleg kis hozammal rendelkező repedezett kőzetek, alapkőzetek esetén (British Columbia 2019). A vizsgálat idejét ne tervezzük télre/ kora tavaszra, mivel az esetleges hóolvadásból származó beszivárgás befolyásolhatja az eredményeket (Maine EPA 2005).

1.13. A TERVEZÉSI ÉS MÉRÉSI SZAKASZBAN VIZSGÁLANDÓ VAGY FELJEGYZENDŐ KÖRNYEZETI HATÁSOK

A zavarást okozó hatások pontos ismerete segíthet abban, hogy a kiértékelés folyamán korrigálni tudjuk az eredményeket. Összegyűjtöttem azokat a paramétereket, melyek vizsgálatára a szakirodalom szerint nagy hangsúlyt kell fektetni.

Meteorológiai jellemzők

A légnyomásváltozás hozamváltozást okozhat és befolyásolhatja a kialakuló vízszinteket, ezért azt rendszeresen mérni kell (Schafer 1978, King 1982, USBR 1995, Pattle Delamore 2013).

A próbaszivattyúzás alatt hullott csapadék mennyiségét (Kruseman és de Ridder 1994, 2005, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Susquehanna 2007, Pattle Delamore 2011, Maine EPA New York DEC 2015, British Columbia 2019) és a léghőmérsékletet is mérni kell (USBR 1995, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Balasubramanian 2017, British Columbia 2019).

A felszínről történő beszivárgás befolyásolhatja a víztartóról szerzett információkat (North Carolina 2007, Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2011). Sekély vízadóknál mindenképp mérni kell a beszivárgást, mivel azok még érzékenyebbek erre a jelenségre (Maine EPA 2005).

Felszíni vizek

A felszíni vizek monitoringja információt szolgáltat arról, hogy a kút szivattyúzásával járó vízkitermelés mekkora hatással van a felszínen lévő víztestekre. Ebből következtethetünk a felszíni és felszín alatti vizek kapcsolatára és a kút távolhatásának értékére is. A megfigyelésekre különös gondot kell fordítani, ha a kút környezetében érzékeny vizes élőhelyet találunk, illetve figyelni kell a források, kisebb vízfolyások és állóvizek hozamát, vízszintjeit (OHIO EPA 2006, Washington State 2009, Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2011, EN ISO 22282-4 2012, Balasubramanian 2017, British Columbia 2019). Egyes javaslatok különféle számokban határozzák meg a felszíni víztestek vizsgálatának sugarát: ez lehet a kúttól körülbelül 170 m-en belül (New York DEC 2015), vagy akár körülbelül 300 m-es körzetet is érinthet (Susquehanna 2007).

Meglévő kutak monitoringja

A területen meglévő kutak szintjeit a próbaszivattyúzás alatt folyamatosan mérni kell (Kruseman és de Ridder 1994, Maine EPA 2005, Newfoundland 2010, Pattle Delamore 2013, Waikato 2019, British Columbia 2019). A többi vízkivételt végző kútnak a próbaszivattyúzás alatt is működnie kell, hogy az új kút hozamát ezek zavartalan működéséhez lehessen igazítani (Washington State 2009).

Peremfeltételek figyelembevétele

A próbaszivattyúzást nagyban befolyásolhatják különböző peremfeltételek, például felszíni vagy felszín alatti víztestekből való hozzáfolyás (North Carolina 2007, Susquehanna 2007, Pattle Delamore 2011). A próbaszivattyúzás elvégzése közben a kapott adatokat ábrázolva észrevehetünk olyan újabb peremfeltételeket, melyekről korábban nem tudtunk (Kruseman és de Ridder 1994, OHIO EPA 2006).

Árapály jelenség

Ahol releváns, figyelembe kell venni az árapály jelenség vízszintekre gyakorolt hatásait (Kruseman és de Ridder 1994, OHIO EPA 2006, North Carolina 2007, Washington State 2009, Pattle Delamore 2013, British Columbia 2019).

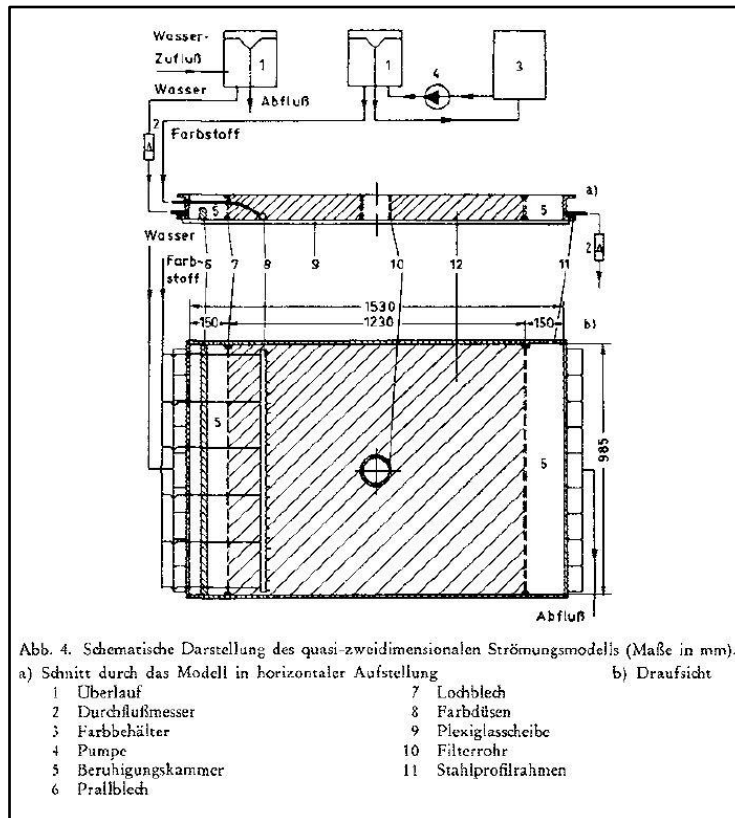
Köz- és vasútvonalak közelsége

A kút lehetőség szerint ne legyen olyan közel út- és vasútvonalakhoz, hogy a mért vízszintekben a közlekedésből származó rezgések okozta zavarások megjelenjenek (Huisman 1972, Osborne 1993, North Carolina 2007, Balasubramanian 2017).

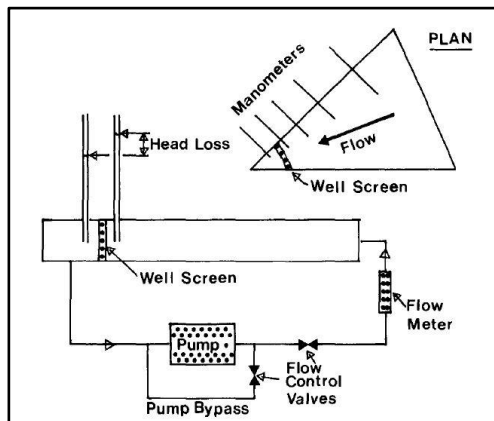
Speciális körülmények

A helyi jellegzetességekről függően különböző speciális körülményekkel is számolnunk kell, ilyen lehet a sós vízű víztestek, tengerpartok közelsége (British Columbia 2019).

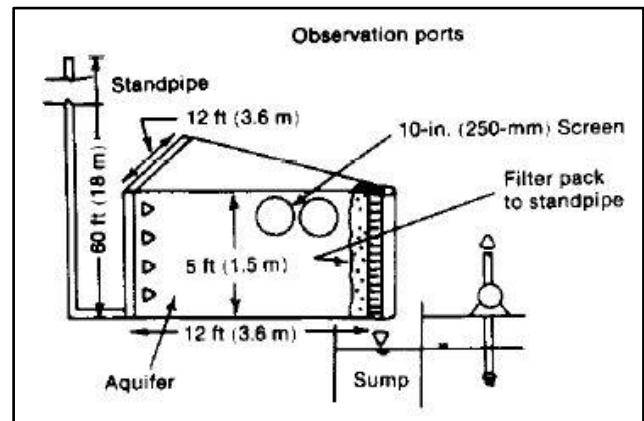
2. SZAKIRODALOMBAN SZEREPLŐ KISMINTAMODELLEK



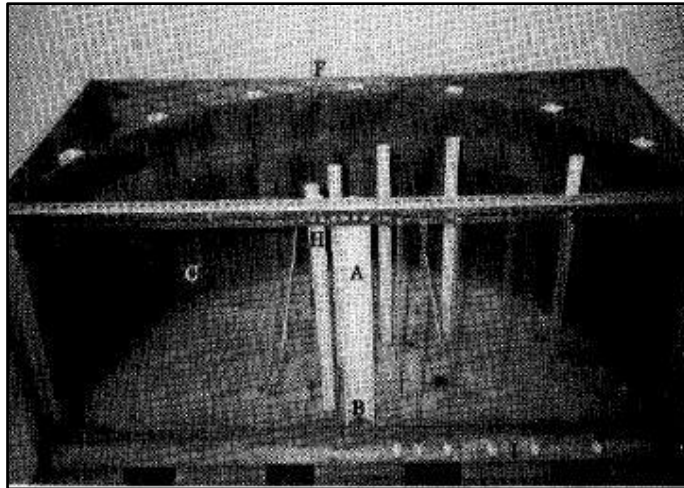
Melléklet 1. ábra: Klotz (1971) szivárgáshidraulikai modelljének felépítése



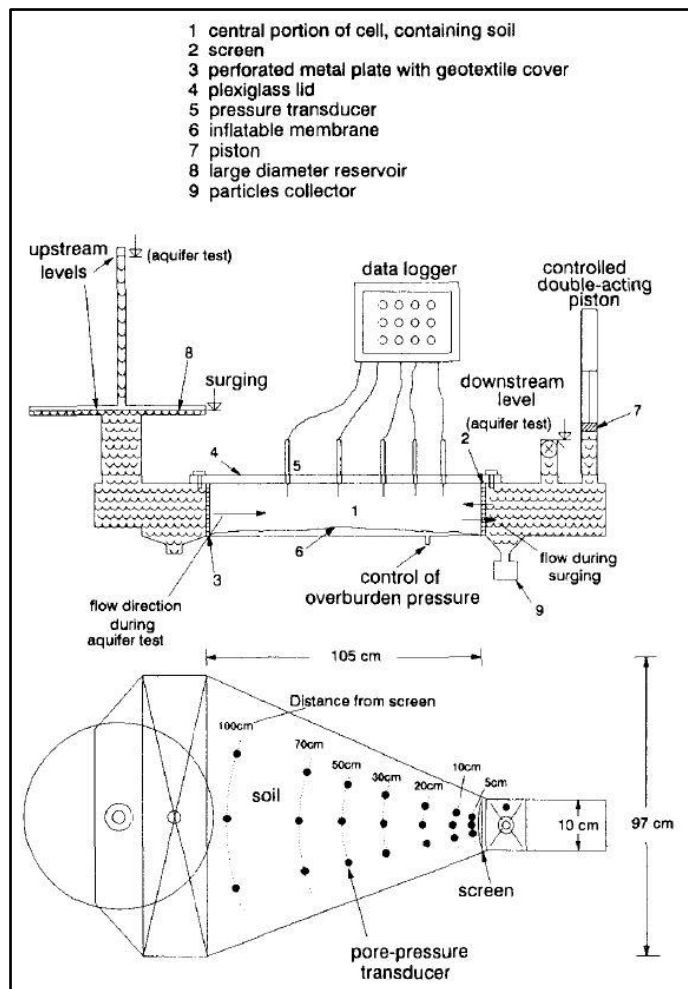
Melléklet 2. ábra: Clark és Turner (1983) által használt kismintamodell sematikus rajza



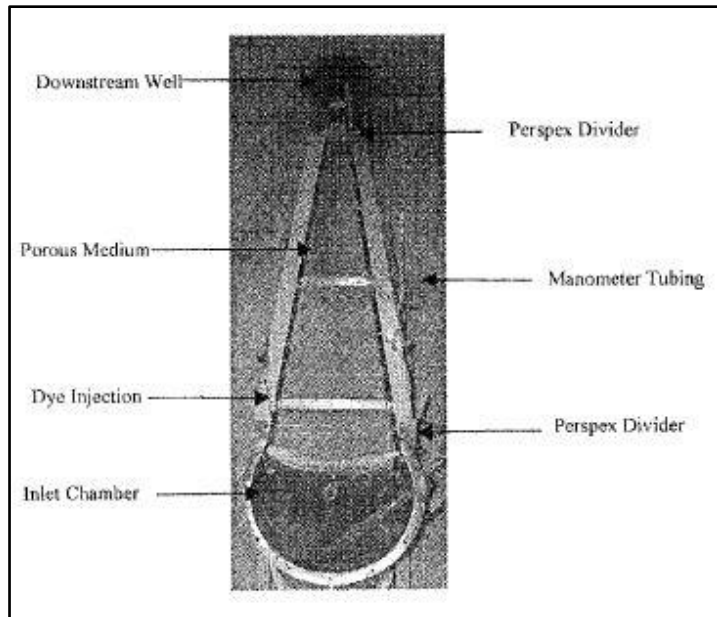
Melléklet 3. ábra: Williams (1985) által használt kismintamodell sematikus rajza



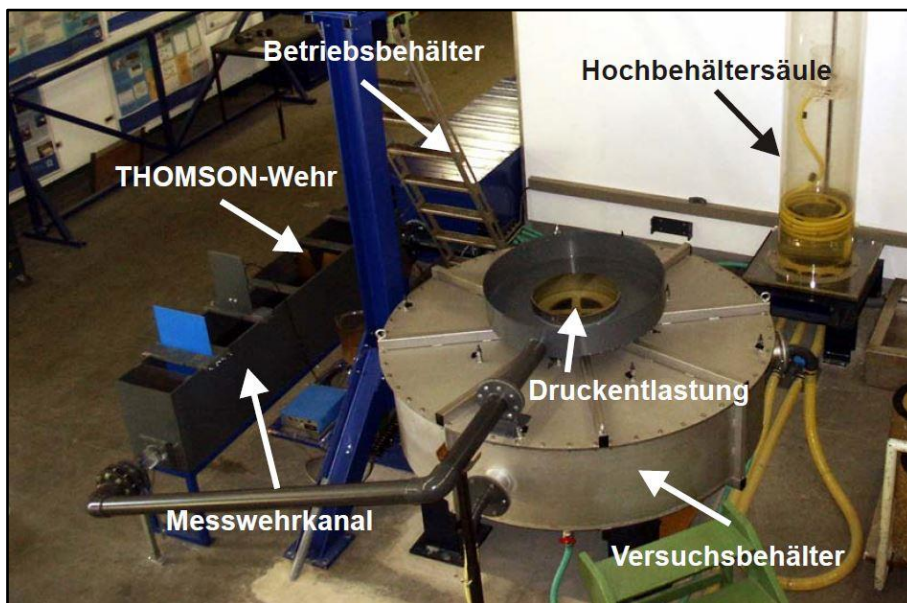
Melléklet 4. ábra: Gefell és társai (1994) fizikai modelljének váza



Melléklet 5. ábra: Wendling és társai (1997) fizikai modelljéről készült oldal- és felülnézeti ábra



Melléklet 6. ábra: Simpson és társai (2003) kismintamodelljének perspektivikus képe



Melléklet 7. ábra: Klauder (2010) kismintamodelljének felépítése

3. KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK

Melléklet 11. táblázat: Az anyagutak perforációjához szükséges lyukszámok

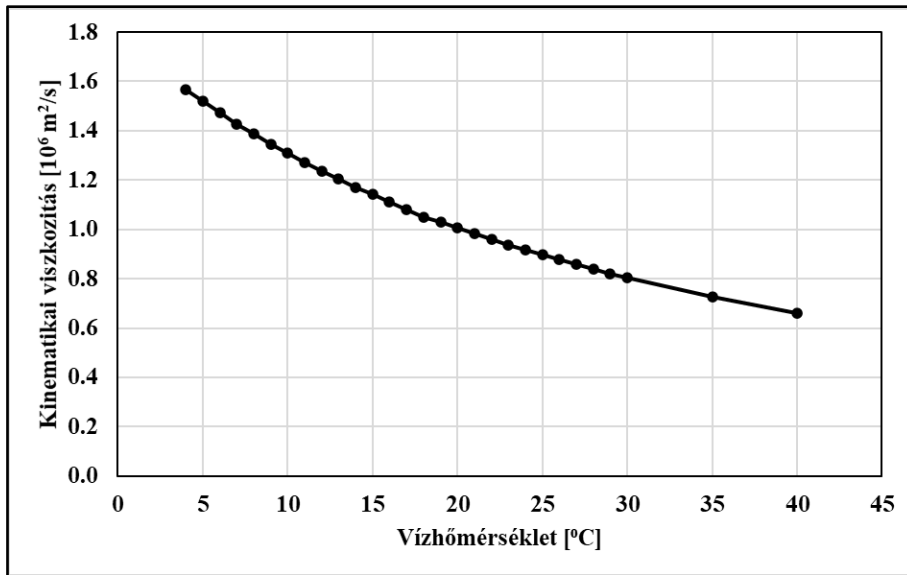
Perforálandó felület [mm ²]	Áteresztő felület [%]	Lyukátmérő [mm]	Egy lyuk felülete [mm ²]	Lyukszám [db]
9425	5%	1,0	0,79	600
9425	5%	2,0	3,14	150
9425	5%	2,5	4,91	96



Melléklet 8. ábra: Kút perforálása kézi fúrógéppel



Melléklet 9. ábra: Kút perforálása a laborbeli fúrógéppel



Melléklet 10. ábra: A víz kinematikai viszkozitásának értékei a hőmérséklet függvényében

4. A 2018-19-ES PERMANENS MÉRÉSEK EREDMÉNYEI



Melléklet 11. ábra: A kút melletti piezométerekben felgyülemlt levegőbuborékok

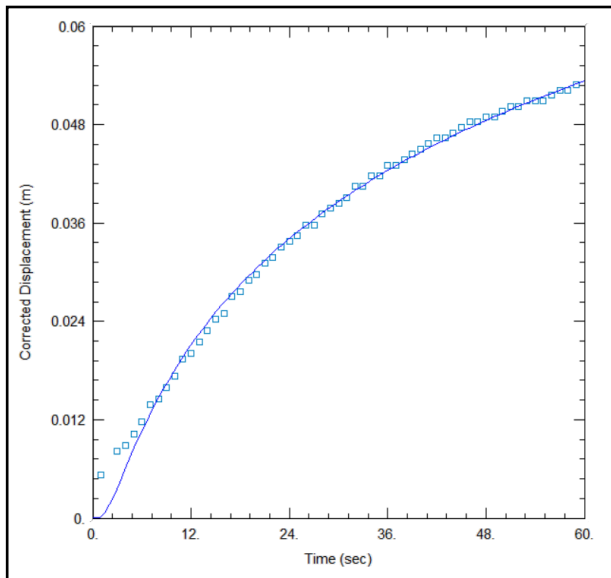


Melléklet 12. ábra: Kútcseré folyamata

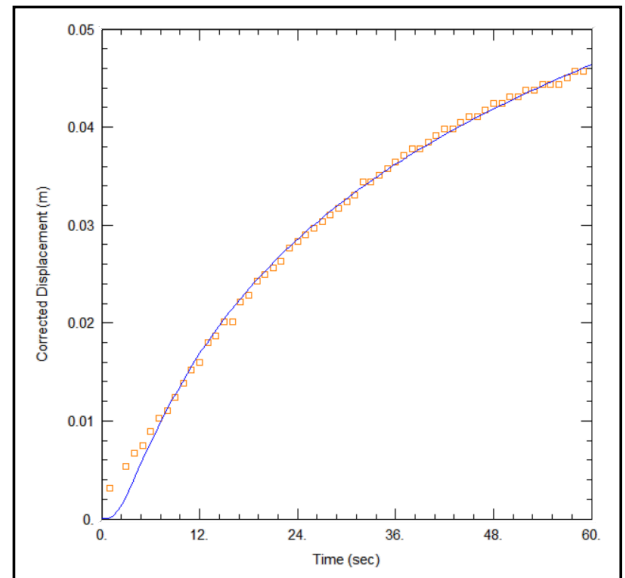
Melléklet 12. táblázat: A 2. mérésor szivárgási tényezőinek értékei

Mérés sorszáma	Leszívás [m]	Hozam [l/min]	Szivárgási tényező [m/s]
2/1.	0.03	0.36	2.64E-04
2/2.	0.04	0.46	2.17E-04
2/3.	0.06	0.68	2.39E-04
2/4.	0.07	0.84	2.37E-04
2/5.	0.09	0.95	2.38E-04
2/6.	0.10	1.04	2.32E-04
2/7.	0.11	1.14	2.30E-04
2/8.	0.13	1.28	2.31E-04
2/9.	0.14	1.36	2.24E-04
2/10.	0.15	1.44	2.21E-04
2/11.	0.17	1.52	2.21E-04
2/12.	0.18	1.60	2.21E-04
2/13.	0.19	1.70	2.21E-04
2/14.	0.21	1.76	2.16E-04
2/15.	0.22	1.84	2.19E-04
2/16.	0.22	1.84	2.17E-04
2/17.	0.23	1.94	2.20E-04
2/18.	0.25	2.00	2.20E-04
2/19.	0.27	2.08	2.17E-04
2/20.	0.28	2.12	2.19E-04
2/21.	0.29	2.16	2.16E-04
2/22.	0.31	2.24	2.19E-04
2/23.	0.33	2.28	2.15E-04
2/24.	0.33	2.32	2.20E-04
2/25.	0.35	2.38	2.22E-04
2/26.	0.36	2.44	2.25E-04
2/27.	0.38	2.46	2.25E-04

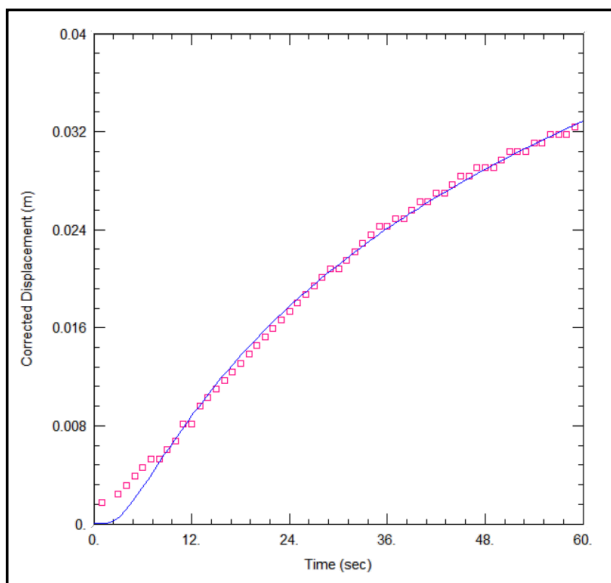
5. NEMPERMANENS MÉRÉSEK EREDMÉNYEI



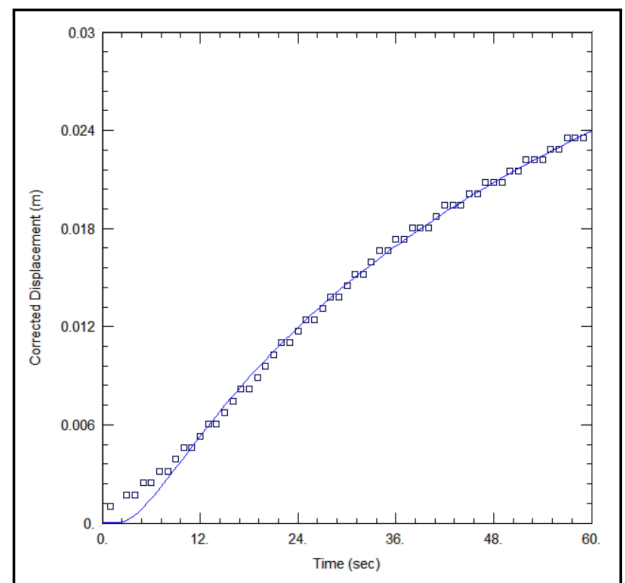
Melléklet 13. ábra: 2. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



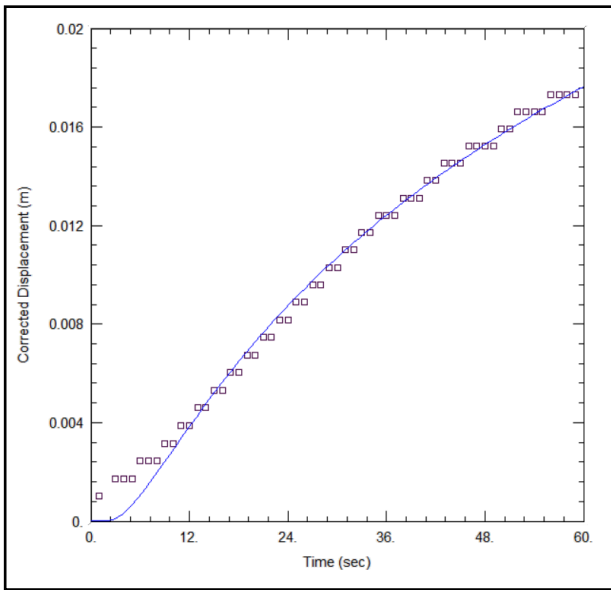
Melléklet 14. ábra: 3. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



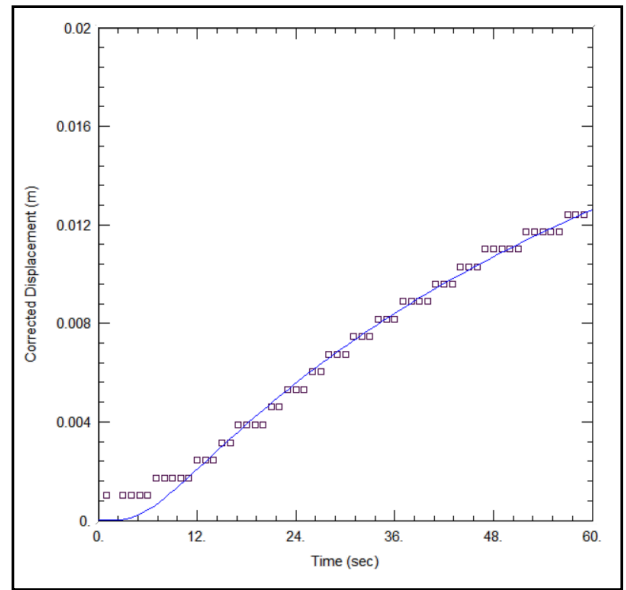
Melléklet 15. ábra: 4. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



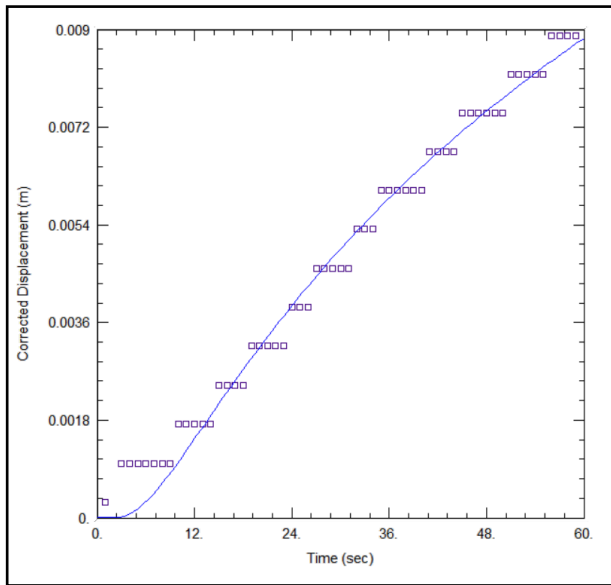
Melléklet 16. ábra: 5. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



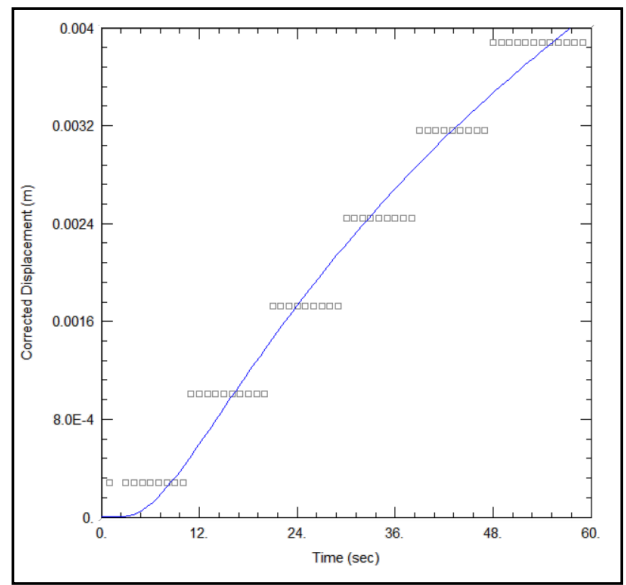
Melléklet 17. ábra: 6. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



Melléklet 18. ábra: 7. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



Melléklet 19. ábra: 8. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel



Melléklet 20. ábra: 10. megfigyelőkút kiértékelése Theis-módszerrel

6. KÚTELLENÁLLÁS KIMUTATÁSA LABORATÓRIUMI MÉRÉSEKKEL

Melléklet 13. táblázat: Különböző anyagból készült csövek érdessége Menon (2014)

Cső anyaga	Érdesség [mm]
Szegecselt acél	0.9–9.0
Beton	0.3–3.0
Hegesztett acél	0.045
Öntöttvas	0.26
Galvanizált fém	0.15
Kovácsolt vas	0.045
PVC, húzott cső, üveg	0.0015