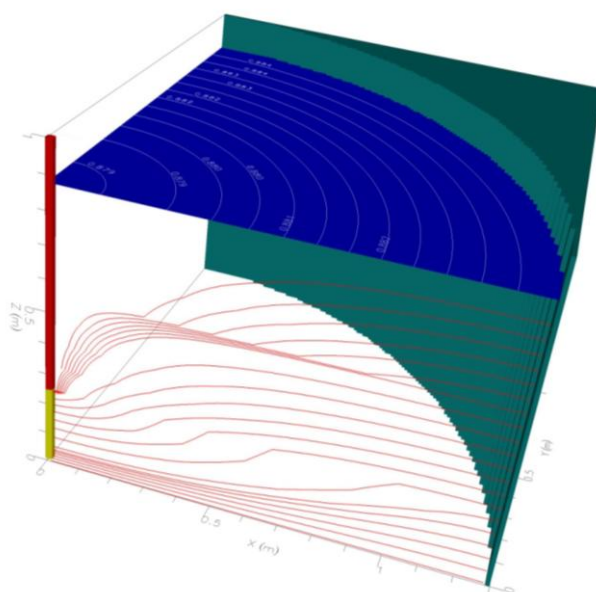


Országos Tudományos Diákköri Konferencia
Műszaki tudományi szekció

Kismintamodell használhatóságának kérdései a szivárgási tényező meghatározásánál

2012. november



Készítette: Barta Eszter

(BME, Építőmérnök hallgató)

Konzulens: Dr. Hajnal Géza (egyetemi docens, BME)

Dr. Vasvári Vilmos (ügyvezető igazgató, Kultech Kft.)

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	3
2	A kismintamodell ismertetése, méretei	3
2.1	A modell leírása, konkrét paraméterek.....	4
2.2	A modellben használt talajtípusok jellemzői.....	6
3	Mérések menete, eredmények feldolgozása	7
4	Vizsgálatok hat rétegben beépített talajjal.....	8
4.1	Kiértékelési módszerek	10
4.1.1	Permanens állapot (Dupuit-módszer).....	10
4.1.2	Nempermanens állapot.....	11
	Theis módszer	11
	Cooper-Jacob módszer	12
4.1.3	AQTESOLV.....	13
5	Vizsgálatok három rétegben beépített talajjal	15
5.1	Az egyes talajtípusok pontos hízagtényezőjének megállapítása.....	16
5.2	Az anyakút szűrőzési helyének változtatása és hatása a leszívás jelenségére	20
6	Hidrodinamikai modellezés.....	22
6.1	A szivárgás alapegyenlete	23
6.1.1	Telített közegbeli permanens szivárgás.....	23
6.2	Modflow	25
6.2.1	Modflow környezet	25
6.2.2	Véges differencia módszer	29
7	Modflow eredmények.....	32
7.1	Az anyakút az alsó homokrétegben szűrőzött	35
7.2	Az anyakút a teljes hosszán szűrőzött	37
7.3	Az anyakút a kavicsrétegben szűrőzött	38
8	Kiértékelés.....	40
9	Összefoglalás.....	46
10	Köszönetnyilvánítás	48
11	Felhasznált irodalom	49
11.1	Alkalmazott szoftverek	50

1 Bevezetés

A talajfelszín alatti rétegek szivárgási tényezőjének reprezentatív becslésére napjainkban egyre nagyobb igény mutatkozik, hiszen ennek hiánya az építőmérnöki gyakorlat számos területén – mint például munkagödör optimális víztelenítési módja, kitermelhető vízkészlet megállapítása –, okoz problémát.

Dolgozatomban a már korábban megépített, vizsgált és igazolt fizikai kismintamodell eredményeinek (Barta, Veczán, 2011) további pontosítását, és a fizikai modellben a beépítés nehézségei miatt bizonytalanná vált esetek ellenőrzését, a modell érzékenységeinek vizsgálatát és az összetettebb, bonyolultabb esetek (rétegzettség, szűrőzés helyének változtatása) modellben való megoldhatóságát tűztem ki célul.

2 A kismintamodell ismertetése, méretei

A kismintavizsgálatok gazdaságosságának fokozására, a vizsgálatokhoz szükséges időtartam rövidítésére törekedve egyre kisebb méretű kismintákat igyekeznek építeni a kutatók. Azonban a tapasztalatok azt mutatják, hogy ha a kisminták geometriai méreteinek kicsinyítési mértékét egy bizonyos határon túl fokozzák, akkor a laboratóriumban megvalósított vízmozgási folyamat hidraulikai jellege rendszerint eltér a nagyméretű jelenség jellegétől. Ezt a jelenséget, főképpen az angol nyelvű irodalom művelői, méretarányhatásnak (scale effect-nek) nevezték el. Így a magyar nyelvben a méretarány szakkifejezés egyáltalán nem jellemző arra a fogalomra, amit jelöl. Nyilvánvaló, hogy nem a geometriai méretek aránya az oka annak, hogy bizonyos körülmények között a laboratóriumban egészen más hidraulikai jellegű vízmozgás keletkezik, mint a természetbeli megfelelő esetén. Már csak azért sem, mert a méretarányhatás létrejöhet a nélkül is, hogy a méretarány megváltozna. Ugyanis a folyamatot jellemző mennyiségek bármelyikének változtatásával elérhetünk egy olyan határhoz, amelyen túl a jelenség hidraulikai jellege megváltozik, vagyis a jellemző mennyiségek száma növekedik, vagy csökken, vagy pedig egyes jellemzők értelmezése megváltozik. A fentieknek megfelelően helyesebb lenne a méretarányhatás helyett jelenségmódosulásról beszélni, ahogy azt a továbbiakban használni fogom (Ivicsis L., 1968)

Természetesen, kutatásom megkezdése előtt, a modell méreteinek felvételekor figyeltünk arra, hogy a jelenségmódosulás hatását kiküszöböljük, így a kisminta

paramétereinek és alakjának meghatározásánál segítségünkre voltak a szivárgás jelenségét leíró képletek (pl. a hengerszimmetria miatt) illetve a természetben tapasztalt jelenség ismerete (pl. a távolhatás miatt).

A kisminta kialakításánál a geometriai méreteket a valóságban szokványos kútátmérő, és a leszívás mértéke határozta meg elsődlegesen. A szivattyúzás távolhatása a terepi vizsgálatoknál sem határozható meg pontosan, ennek részint technikai, részint elméleti okai vannak. Modellünket éppúgy használni kívánjuk szemcsés, mint kötött anyagok vizsgálatára, melyekben a távolhatás mértéke akár két nagyságrendnyit is eltérhet. A depressziós tölcser ellapulását a szűrőfallal kialakított víztérrel és a beállított bukószinttel elő tudjuk állítani. Így a geometriai méretarányt végül alapvetően a kútátmérő határozta meg. Úgy számoltunk, hogy 1 méter magas modellt választva a valóságban szokványos leszívásokat és kútmélységeket (8-12 méter) minden esetben kezelni tudjuk.

A próbaszivattyúzások hengerszimmetrikus szivárgási folyamatokat okoznak, így kör alapterületű modellt kellett építenünk. Azonban a fenti méretekkal akkora modellt kaptunk volna, melyben másik két fontos gyakorlati szempont szenvedett volna csorbát: a kísérleti anyagok cseréje, valamint a kisminta teherbírása. Ezért teljes kör helyett negyed kör alaprajzú modellt építettünk.

2.1 A modell leírása, konkrét paraméterek

A modell 90 fokos körcikk alaprajzú, további méretei:

Magassága: 1 m

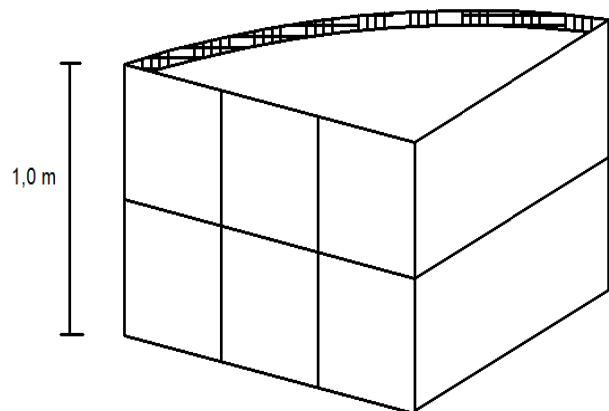
Sugara a víztérig: 128 cm

Teljes sugara: 133,5 cm

Térfogata: 1,4 m³

Tömege: 100 kg

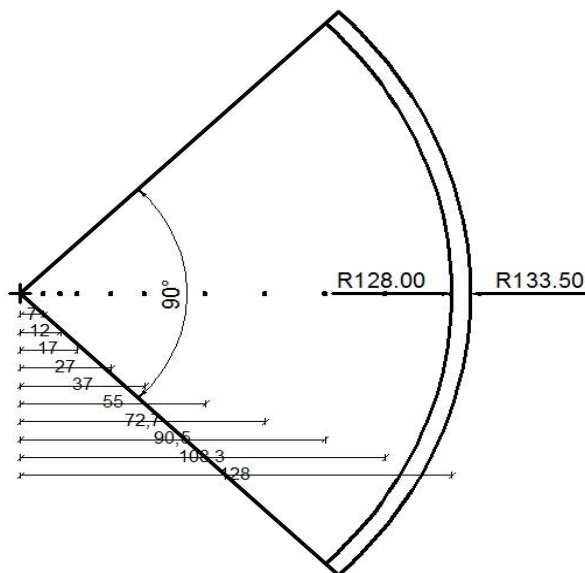
Az **anyagút átmérője** 17 mm



2.1. kép A modell axonometrikus rajza

Az észlelőkutak távolsága az anyakúttól:

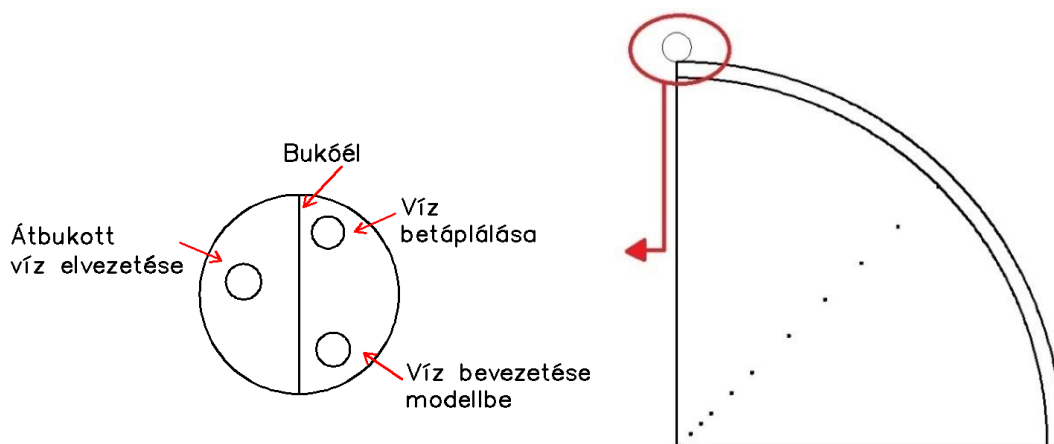
1-es kút: 70 mm	6-os kút: 550 mm
2-es kút: 120 mm	7-es kút: 727 mm
3-mas kút: 170 mm	8-as kút: 905 mm
4-es kút: 270 mm	9-es kút: 1083 mm
5-ös kút: 370 mm	10-es kút: 1280mm



Víz betáplálása:

2.2. kép Modell felülnézeti rajza, jellemző méretekkel

A víz bevezetése az alábbi ábrán látható elrendezés szerint történik. A vízszint szabályozására bukót használtam, melynek segítségével pontosan beállítható a kívánt vízszintmagasság.

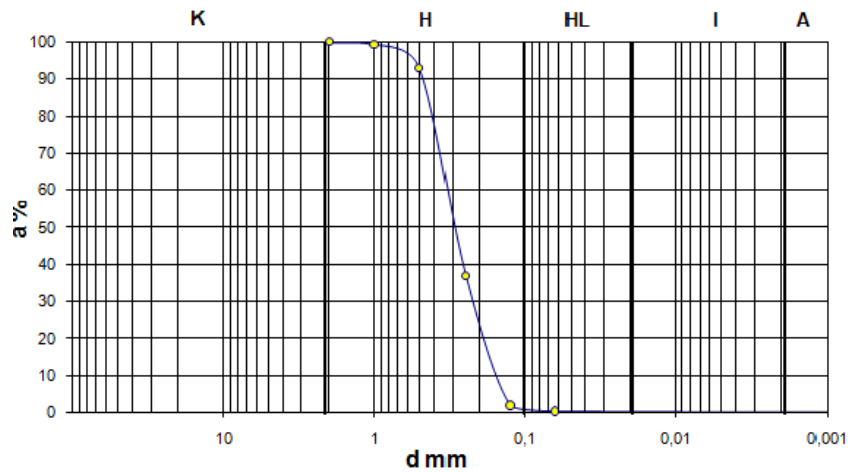


2.3. kép A bukó sematikus rajza

A vízteret geotextíliával burkolt rács választja el a talajjal megtöltött résztől. A fémrács a fizikai elhatárolást biztosítja, a geotextília az apró szemcsék szűrésére szolgál, hogy azok ne mosódjanak a víztérbe.

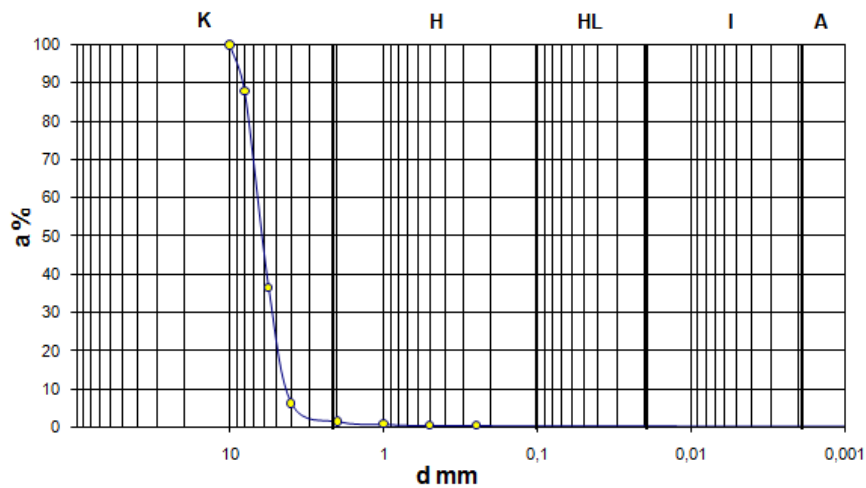
2.2 A modellben használt talajtípusok jellemzői

Az első talajtípus, amit vizsgáltam (Csáki, 2011), közepes homok, továbbiakban homok. Legnagyobb szemnagysága 1 mm, a legnagyobb mennyiségben előforduló szemnagyság pedig 0.25 mm.



2.1. diagram Közepes homok szemeloszlási diagramja

A másik talajtípus, amit vizsgáltunk az apró kavics, továbbiakban kavics. A legnagyobb szemnagyság itt 8 mm, a mértékadó szemnagyság pedig 5.6 mm.



2.2. diagram Apró kavics szemeloszlási diagramja

3 Mérések menete, eredmények feldolgozása

A felvételek készítése 1392×1040 pixel felbontású monokróm CCD (Charge-Coupled Device) kamerával történt. A kamera harminc képet rögzít másodpercenként, ami kellő pontosságot biztosított a pár másodperc alatt lezajló leszívások rögzítéséhez. A kamera által felvett képkockákat számítógépen rögzítettem. Az adatok átvitele a kamera és a számítógép között hálózati kábel segítségével valósult meg.



3.1. kép Mérésekhez használt kamera

Az adatok feldolgozásakor két képet értékeltem ki a másodpercenkénti harmincből, ez már pontos, de még kezelhető adatmennyiséget jelentett.



3.2. kép Kamera által rögzített kép és az értékek leolvasásának módja

4 Vizsgálatok hat rétegben beépített talajjal

Korábbi méréseink során (Barta, Hajnal, Veczán 2011, 2012 a,b) egyszerre csak egy fajta, homogén anyagot építettünk be, azonban ilyen eset a valóságban nagyon ritkán fordul elő. A természetes állapot közelítése érdekében rétegzetten építettük be a 2. fejezetben ismertetett anyagokat (közepes homok és apró kavics).



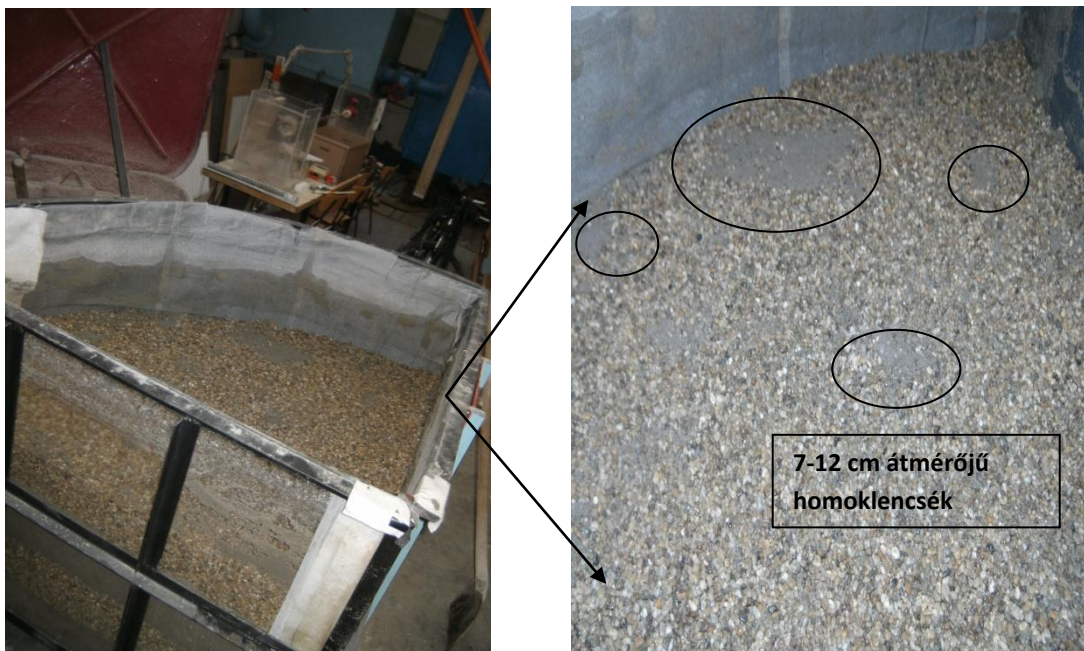
4.1. kép Kismintamodell oldalnézetből, hat rétegben beépített anyaggal

A szakirodalmi adatok igazolják a korábbi modellel végzett kísérletek során kapott szivárgási tényezők eredményeit (Barta, Veczán 2011, 2012 a,b). Az apró kavics szivárgási tényezője két nagyságrenddel (10^{-2} m/s) nagyobb a közepes homok szivárgási tényezőjénél (10^{-4} m/s).

A rétegzett mintával végzett kísérleteinktől azt vártam, hogy a leszívás a homokban a kavicshoz képest szignifikánsan gyorsabban történjen – mint ahogy az egyrétegű mintánknál is ezt tapasztaltam – és ez a rétegek közötti sebességváltás a depressziós görbe törésével (meredekségének változásával) mutatható ki.

A várt különbségek azonban a fizikai kismintamodellben nem mutatkoztak. Elkezdtem keresni ennek az okát. Első feltételezésünk a rétegek összemosódása és ez által a réteghatárok eltűnése volt.

A rétegek közötti összemosódás mértékének megállapításához szükségem volt a modell rétegenkénti visszabontásához.



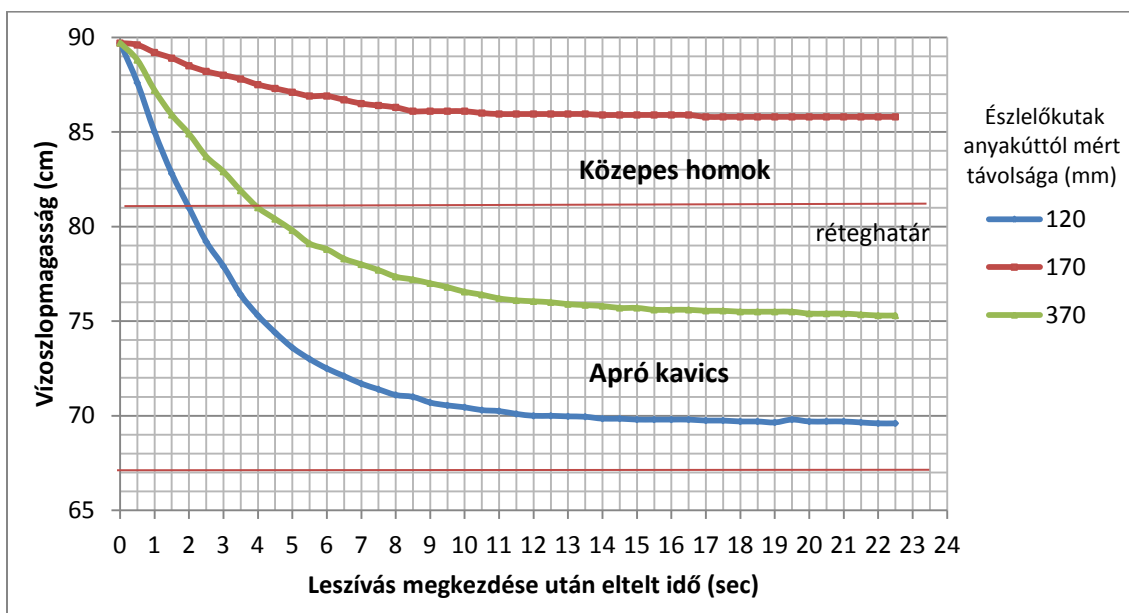
4.2. kép Réteg összemosódások vizsgálata – felül homok, alul kavics esetén



4.3. kép Réteg összemosódások felül kavics, alul homok esetén

Visszabontáskor minden réteghatárnál, függetlenül attól, hogy a réteg milyen mélyen helyezkedik el a modellben, 5-12 cm-es homok illetve kavicslencsákat láthattunk, de ezek is csupán 2-2,5 cm mélyen épültek be az alatta lévő rétegbe. Az összemosódás mértéke elhanyagolhatóan kicsi, így kizárhattam ennek jelenségmódosító hatását.

A következő feltételezésünk a két talaj közel azonos fizikai tulajdonságaiból és paramétereiből adódott. A szivárgási tényezők viszonylag kis eltérése miatt a szivárgási sebességének olyan kis mértékben változnak, hogy az törésként nem jelentkezik a leszívás-idő diagramokon.



4.1. diagram Hatrétegű minta, leszívás $Q=16$ l/perc-es hozammal

4.1 Kiértékelési módszerek

4.1.1 Permanens állapot (Dupuit-módszer)

Mivel a modell hengerszimmetrikus, benne a talaj laza szemcsés szerkezetű, jól alkalmazható Dupuit szomszédos megfigyelő kutak leszívási adataira vonatkoztatott kútképlete (Kovács Gy., 1972).

$$k = \frac{Q}{\pi} \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{y_1^2 - y_2^2}, \quad (4.1)$$

ahol x_1 távolabbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],

- x_2 közelebbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],
- y_1 távolabbi figyelőkútban a leszívást követő vízszlopmagasság [m],
- y_2 közelebbi figyelőkútban a leszívást követő vízszlopmagasság [m].
- Q vízhozam [m^3/s].

Dupuit minden pontban vízszintes szivárgást feltételezett és nem vette figyelembe a kútpaláston kialakuló szivárgási felületet. Méréskor a kút belsejében létrejövő vízszinteket mérjük, ám ez általában nem egyezik meg a kútpalást külső felén létrejövő vízszinttel, hiszen erre csak hosszantartó szivattyúzás és nagy áteresztőképesség esetén van lehetőség. A valós és a Dupuit-féle leszívási görbe alakja közötti eltérés a szivattyúzott vízhozam növelésével nő, és főleg a kút közelében, tehát azon a szakaszon jelentős, ahol a permanens szivárgás kialakulására lehet számítani (Ubell, 1958).

4.1.2 Nempermanens állapot

Theis módszer

A legtöbb olyan módszert, ami a szivattyúzás nempermanens vízmozgással jellemezhető szakaszának kiértékelésére szolgál, Theis (1935) összefüggéseiből indul ki

Módszerének alapfeltevései a következők:

- a víztartó kiterjedése végtelen,
- a víztartó homogén, izotróp, állandó vastagságú,
- a szivattyúzott kút teljes vagy lebegő,
- teljes kút esetén 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 tározás elhanyagolható legyen.

A Dupuit-egyenlet levezetése során feltételezett permanencia hiányából adódó eltérés kiküszöbölésére megoldásként azoknak a kúthidraulikai összefüggéseknek az alkalmazása kínálkozik, amelyek a nempermanens tengelyszimmetrikus áramlás leírására szolgálnak (Kovács, 1972).

Theis egyenlete a szivattyúzás hatására kialakuló vízszintsüllyedésre (Kruseman – de Ridder 1994):

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u), \quad (4.2)$$

ahol Q szivattyúzott hozam [m^3/s],
 t szivattyúzás kezdetétől eltelt idő [s],
 S tározási tényező [-],
 T transzmisszivitás [m^2/s],

$$W(u) \text{ Theis-féle kútfüggvény, ahol } u = \frac{r^2 S}{4Tt}. \quad (4.3)$$

A számítási módszer nyílt víztartó esetén annyiban módosul, hogy a leszívás értékeket korrigáljuk a telített réteg vastagságának függvényében:

$$s' = s - (s^2 / 2H), \quad (4.4)$$

ahol s' a korrigált leszívás [m],
 s észlelt leszívás [m],
 H telített zóna vastagsága [m].

A Theis módszer alkalmazható visszatöltődés vizsgálatra a szuperpozíció elvének alkalmazásával, a Cooper-Jacob-féle közelítés felhasználásával.

Cooper-Jacob módszer

Cooper és Jacob 1946-ban publikált módszere a Theis-féle megoldás egyszerűsítéséből született.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln \frac{r^2 S}{4Tt}) \quad (4.5)$$

képlettel, ahol a hiba $u = 0,03$ esetén már kisebb, mint 1% (Kruseman - de Ridder 1994). A képletet átírva tízes alapú logaritmusra

$$s = \frac{2,30Q}{4\pi T} \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (4.6)$$

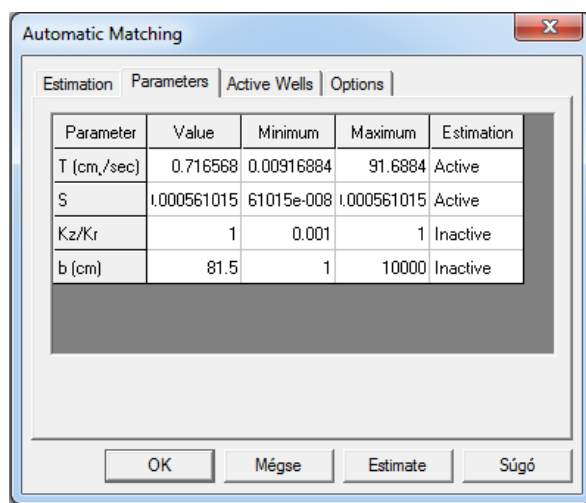
forma használható.

Ábrázolva a leszívást (s) az idő logaritmusának ($\log t$) függvényében a pontok egy egyenesre illeszkednek. A transzmisszivitás kifejezéséhez az egyenes meredekségét használjuk fel.

4.1.3 AQTESOLV

A mérések kiértékeléshez az AQTESOLV szoftver is rendelkezésemre állt. Az AQTESOLV for Windows 3.5-ös verziója a nemzetközi gyakorlatban széles körben elterjedt szoftver, mely a víztartóban szivattyúzás következtében kialakuló nempermanens vagy nyeletés következtében kialakuló permanens vagy nempermanens áramlás elemzésére, előrejelzésére használható. Az adatok bevitele egyszerű, a varázsló használatával gyorsan eljuthatunk a megoldási módszer kiválasztásáig. Ha valamilyen adat hiányzik, vagy nem felel meg a választott megoldási módszernek, az „error log” nézetben kapunk róla tájékoztatást. A futtatás előtt beállíthatjuk az iterációs lépések számát, a konvergencia kritériumot, a paraméterek szélsőértékeit, kezdeti értékeit, illetve fixálhatunk értékeket (Duffield, 2002).

Az 4.4. kép a Cooper- Jacob módszerben szereplő paramétereket láthatjuk a program által automatikusan állított határokkal. Látszik, hogy a bemenő adatként szereplő anizotrópia mértéke, és a telített zóna vastagsága nem aktív paraméterként szerepel.

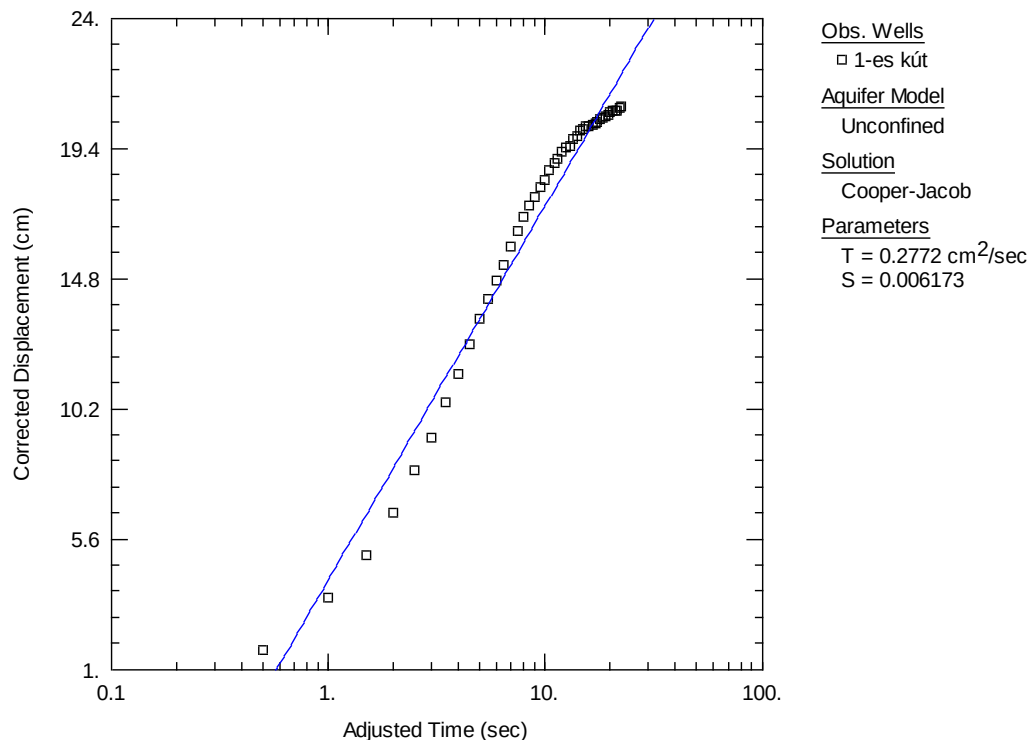


4.4. kép Paraméter beállítási lehetőségek az AQTESOLV-ban

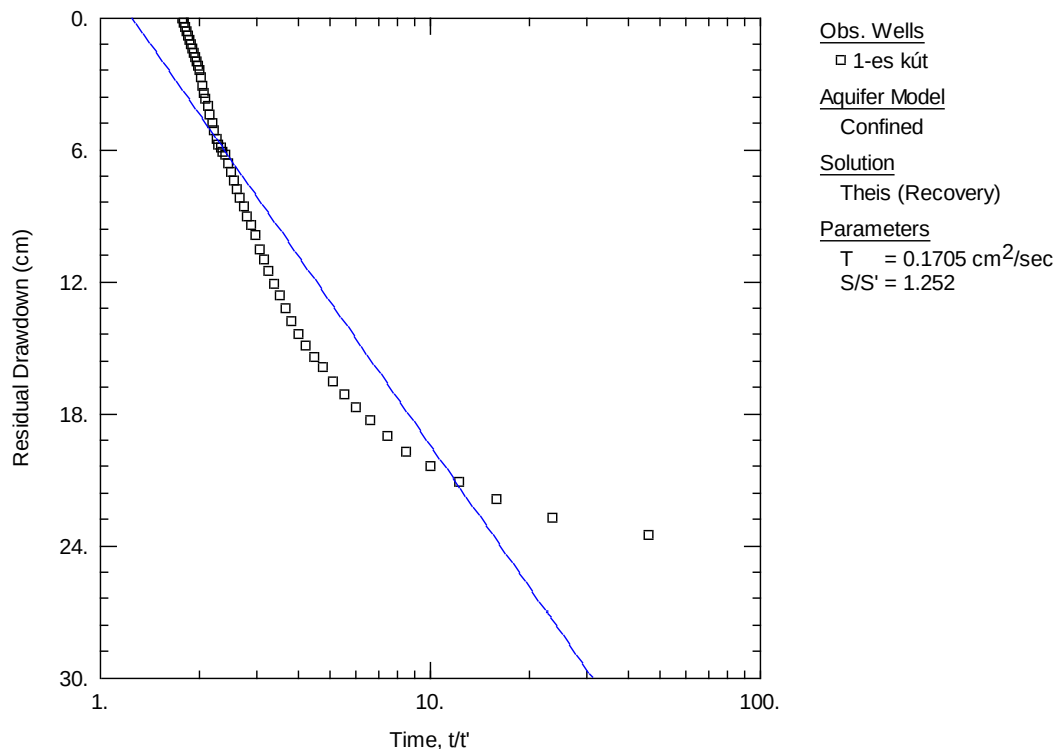
A görbék manuális illesztésére is van lehetőség. Ha a számításból ki akarunk szűrni kilógó értékeket, vagy a vizsgálat egy meghatározott szakaszát, akkor az észlelt adatokat tartalmazó táblázatban a megfelelő soroknál a súlyt 0-ra állíthatjuk. Ekkor az ábrán láthatóak maradnak ezek a pontok is. A leszívás-idő ábrán kívül még számos ábrázolási mód áll rendelkezésre, melyek segíthetik a kiértékelést, annak eldöntését, hogy a választott módszer feltételei megfeleltethetők-e a valós helyzetnek.

A negyed körre szűkített modell használhatóságát korábbi méréseink során bizonyítottuk (Barta, Veczán 2011, 2012 a,b) illetve egy párhuzamosan folyó,

ugyanazzal a kismintával foglalkozó diplomadolgozat eredményei (Szabó G., 2012) a laboratóriumi méréseinket numerikusan is alátámasztják.



4.2. diagram A hatrétegű minta leszívása, Aqtesolv szoftverrel, $Q=16\text{l/perc-es}$ hozammal



4.3. diagram A hatrétegű minta visszatöltődése, Aqtesolv szoftverrel

A fenti kiértékelésekből egyértelműen látszik, hogy a leolvasott és programba bevitt adatok közelítően sem illeszkednek az elméleti egyenesre.

5 Vizsgálatok három rétegben beépített talajjal

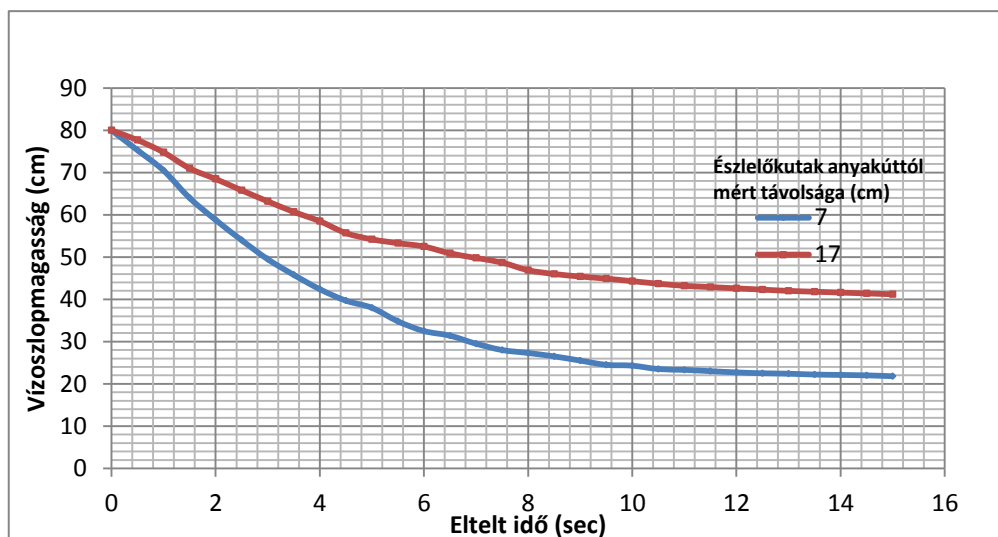
Mivel a hatrétegű modellel végzett kísérleteink nem vezettek a várt eredményre, elkezdtuk az esetleges hibák feltérképezését.



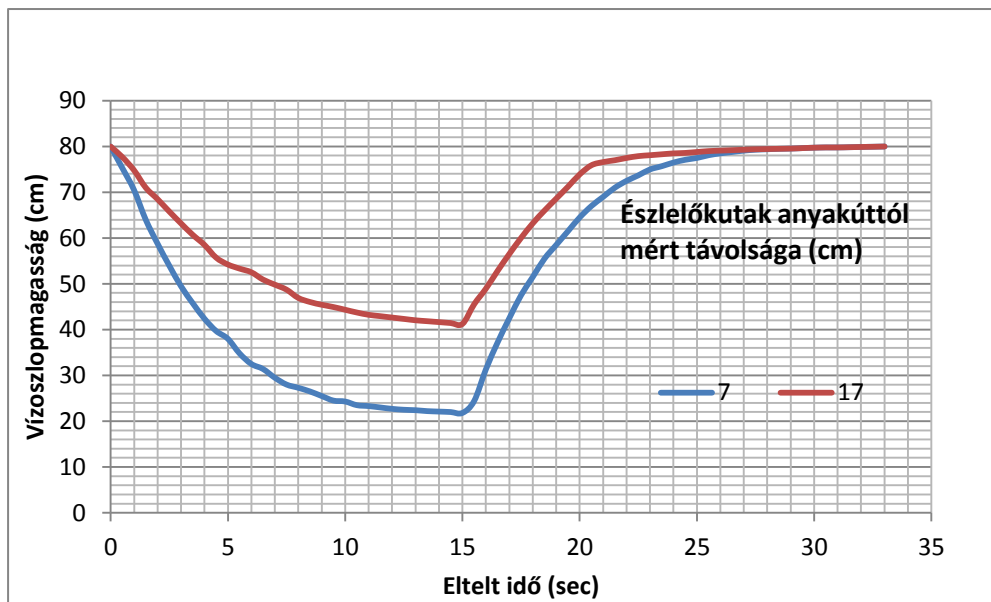
A további mérések során azonban a biztonság kedvéért és a legkisebb réteg összerosódást is megelőzve a rétegeket geotextíliával választottuk el egymástól.



5.1. kép Geotextília beépítés a rétegek közé



5.1 $Q=19$ /perc-es hozam esetén a leszívási diagram az anyakúthoz legközelebb eső piezocsöveken leolvasott értékek alapján



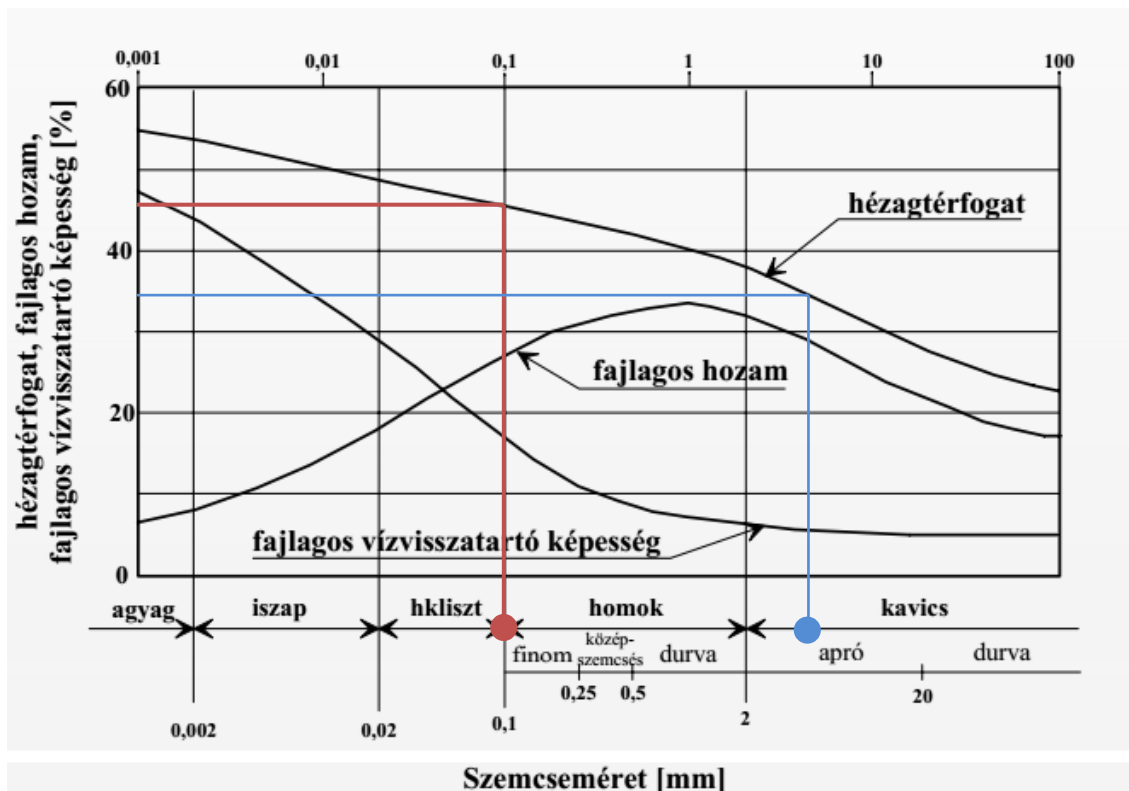
5.2 Leszívás visszatöltődés – vízszlopmagasság – idő skálán ábrázolva

A fenti (5.1 és 5.2 ábrákon) diagramokon sem észlelhető a várt törés.

5.1 Az egyes talajtípusok pontos hézagtenyezőjének megállapítása

A különböző szakirodalmi adatok nagyon tág intervallumban határozzák meg a homok illetve a kavics hézagtenyezőjét és hézagterfogatóját, azonban ezek pontos ismeretének hiánya, jelentősen torzíthatja a mérési eredményeink értékelése során kapott adatokat.

A kísérletek elvégzése előtt a modellteret többször feltöltöttem vízzel, majd leeresztettem a talajok tömörítése érdekében, ezzel is közelítve a valóságban előforduló homok és kavicsrétegek tömörségéhez. A harmadik-negyedik töltés-leeresztés megismétlése után rétegenként töltve a modellt megmértük, hogy az egyes rétegek mennyi idő alatt telítődnek vízzel, majd ebből számoltam az egyes rétegek vízfelvevő képességét és tényleges hézagtenyezőjét.



5.3. diagram A hézagterfogat, a fajlagos hozam és a képződmények vízviszartartó képességének kapcsolata (Kovács B. 2004)

$$t = \frac{n \cdot V}{Q} \quad (5.1)$$

t – egy réteg vízzel való megtöltéséhez szükséges idő (sec)

n – hézagterfogat (%)

V – adott réteg térfogata (cm³)

Q – vízhozam (cm³/sec)

5-1. táblázat Számított és szakirodalomban szereplő hézagterfogatok összehasonlítása

Talaj típus	Rétegvastagság (cm)	Feltöltéshez szükséges idő (sec)	Számított hézagterfogat	Szakirodalomban szereplő hézagterfogat
Homok	26,5	847	0,14	0,45
Kavics	30,8	2587	0,41	0,38
Homok	25,2	756	0,13	0,45

Az 5.1. táblázatban is jól látszik, hogy míg a kavicsnál közel azonos értéket kaptam, a homok számított hézagterfogata jelentősen eltér a szakirodalomban meghatározott adatoktól.

Ennek az eltérésnek keresve a magyarázatát a kismintába beépített homokból egy a térfogatát pontosan meghatározható tárolóedénynyi mintát különítettem el. Az edényből a víz leereszthető volt az alján található lyukakon keresztül.

Az alább ismertetett talajfizikai jellemzők mérési menete jól ismert, csak nagyon röviden ismertetem, az eredményekre térek ki részletesen.

A méréseket az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában végeztem el, mert ott álltak rendelkezésemre a szükséges eszközök.

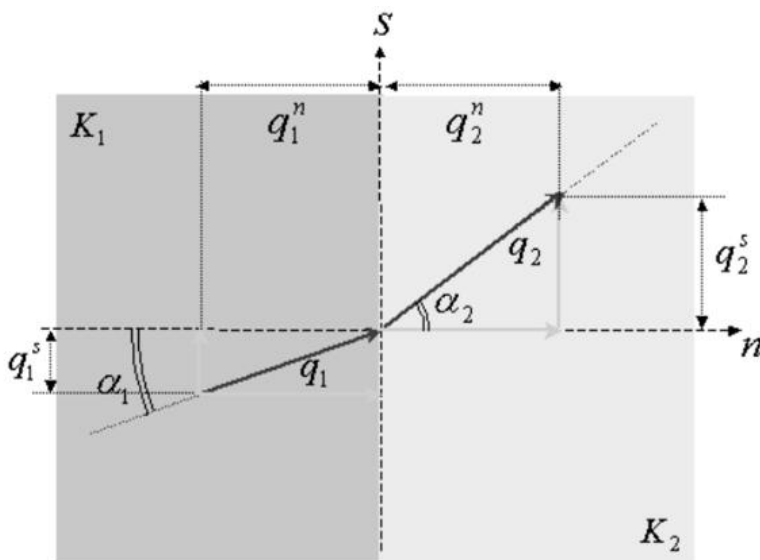
A V térfogatú mintát kiszárítunk (36 órán keresztül 105°C -on) és ehhez a száraz állapothoz tartozó M_0 tömegét lemérjük. Feltételezve, hogy a szemcsék sűrűsége ρ_s a hézagtérfogat és a hézagtenyező számítható:

$$e = \frac{V - \frac{M_0}{\rho_s}}{\frac{M_0}{\rho_s}}, \quad n = \frac{V - \frac{M_0}{\rho_s}}{V}, \quad (5.2)$$

A minta szárítása után az anyagot vízzel telítettem (72 órás áztatás) majd száraz és a vízzel telített minta tömegarányaiból a vízfelvétel volt mérhető.

Ezekből a laboratóriumi mérésekből szintén olyan eredményeket kaptam, melyek eddig kapott értékeinket nem támasztották alá.

Az eltérések okát tovább kutattam és közben választ kerestem arra, hogy leszíváskor a réteghatáron miért nem tapasztalható törés. Ennek hátterét röviden az alábbiakban ismertetem.



5.1. ábra Törés fizikai magyarázata különböző K tényezőjű réteghatárok esetén

1. réteghatárok mentén (s tengely) q folytonos, igaz, hogy $q_1^n = q_2^n$

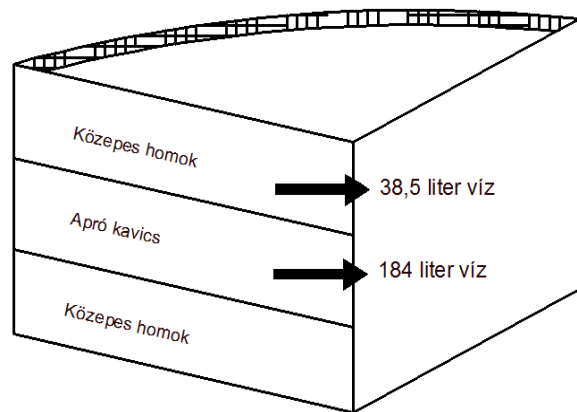
2. rétegeken keresztül (n tengely) q nem folytonos, de a nyomás igen, ezért: $\frac{\partial \varphi}{\partial s} \Big|_1 = \frac{\partial \varphi}{\partial s} \Big|_2$

3. mivel $q^s = -K \frac{\partial \varphi}{\partial s}$, ezért $\frac{q_1^s}{K_1} = \frac{q_2^s}{K_2}$

4. az 1. és a 3. egyenletekből következik, hogy: $\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{K_1}{K_2}$

Következő mérés a feltöltött modellből a rétegenkénti vízleeresztés volt, mérve ezzel az egyes rétegekben tározódó víz térfogatát az anyag rétegenkénti térfogatához képest. A mérés utáni számításokból, a következő eredményeket kaptuk:

homok rétegnek a 10,5 % víz a kavicsrétegnek pedig 50,56% víz, tehát számottevően nagy különbség van az egyes rétegek vízmennyisége között.



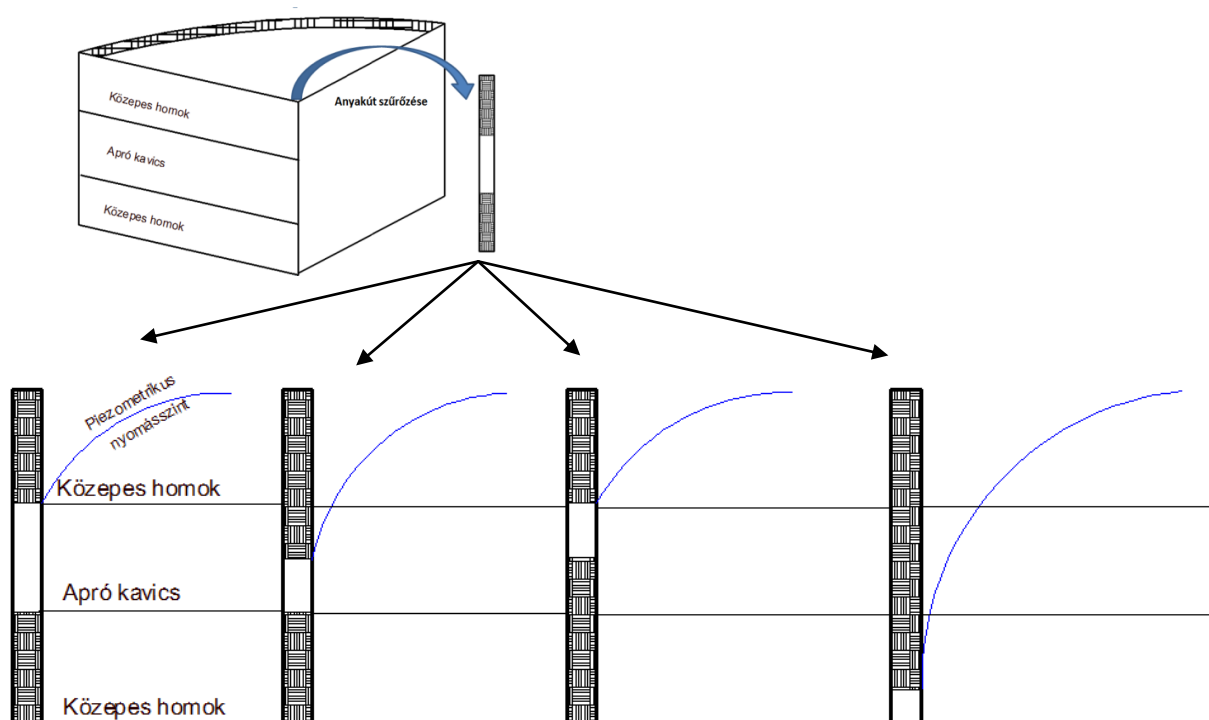
5.2. kép Az egyes rétegekből kiengedett vízmennyiség

Megállapítható, hogy a kavics közel az irodalmi adatoknak megfelelő vizet képes felvenni, míg a homok a többszöri víz föl-le engedések következtében jelentősen tömörödött így kevesebb vizet tud felvenni, mint a szakirodalmak által becsült érték. Ez azonban nem jelent természetellenes állapotot, mert a valóságban is a talajvíz periodikus járása és a talajrétegek tömörödhetnek. A tömörebb homokrétegekben felerősödhet a kapilláris-hatás, melyre Németh Endre (Németh, 1963) mutat néhány példát.

5.2 Az anyagút szűrőzési helyének változtatása és hatása a leszívás jelenségére

Az anyagút különböző szakaszait szűrőzve a kismintamodell újabb, technikai okokból adódó hibáját fedeztük fel, ami az eddigi mérések során (mivel az szűrőzés helyét nem változtattuk) nem ütközött ki.

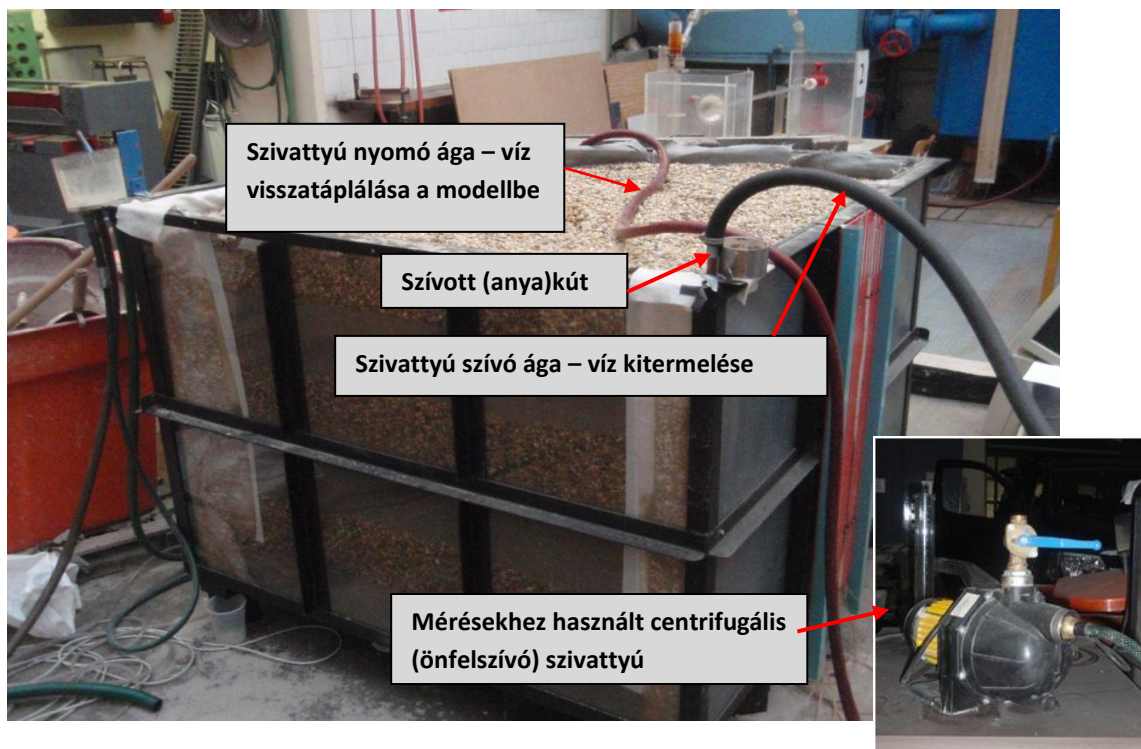
Több méréssorozatot elvégezve az alábbi jelenséget észleltem (5.3. kép):



5.3. kép A kút eltakart (sötét) illetve szűrőzött (fehér) szakaszok helye a különböző mérések során

Látható, hogy a szivattyúzás során a depresszió mindig a szűrőzött szakasz felső részéhez tart, és soha nem vág bele a szűrőzött szakaszba, ilyen módon használhatatlanná teszi a kismintamodellt ennek a jelenségnek a szimulációjára.

A valóságban a kutakból a vízkitermelés bűvárszivattyúval történik, amely a vizet nem szívja, hanem nyomja. Esetünkben azonban tényleges szívás történik, ugyanis a vízkitermelést a szívott kút felső részéhez kapcsolt szivattyúval tudtuk megoldani.



5.4. kép Vízkitermelés gépészeti megoldása a kismintamodellben

A konferenciáig rendelkezésre álló idő illetve technikai, anyagi források hiányossága miatt a modell átépítésére nem került sor. E hiba orvoslásával és további mérések végzésével a jövőben tervezünk foglalkozni.

A fent ismertetett gépészeti hiba azonban nem ad magyarázatot a dolgozat első felében feltárt kérdésekre, azonban a technikai akadályok nem teszik lehetővé a jelenség további vizsgálatát a kismintában.

Az egyre szélesebb körben használt numerikus modellezés segítségével folytattuk a kutatást.

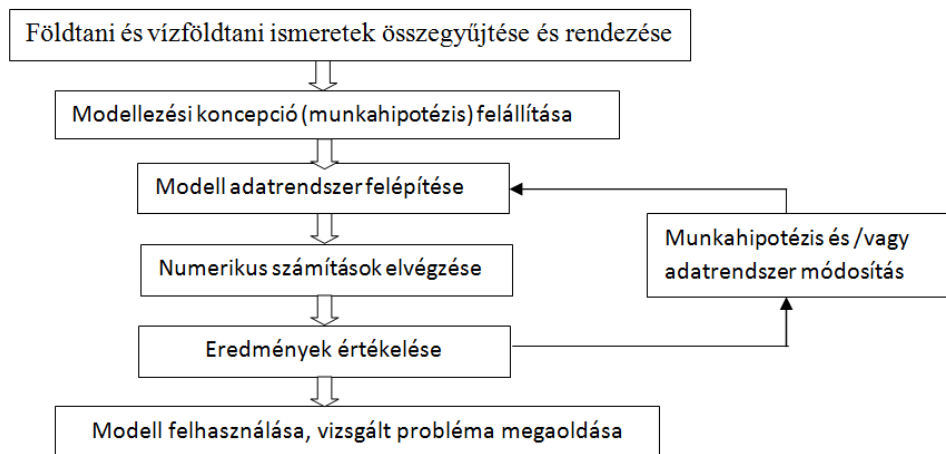
6 Hidrodinamikai modellezés

A hidrodinamikai modellezés, melyet a továbbiakban egyszerűen modellezésnek fogunk hívni, a valóságban a felszín alatt lejátszódó vízmigrációs folyamatok szimulációja, követése számításokkal. Amennyiben a felállított modellel elvégzett számítások már bekövetkeztek, azaz ismert folyamatokat jól követnek, akkor várhatóan alkalmasak feltételezett hatásokra bekövetkező vízmozgások szimulációjára is.

A modellezés három legfontosabb feladata tehát:

- a valóságot jól követő modellek felállítása, és ezáltal a valóságos környezet- és vízföldtani rendszerek működésének megismerése,
- feltételezett helyzetekben (pl. havária-esetek) bekövetkező események szimulációja, a hatások által érintett térségek feltérképezése,
- valós helyzetekben lezajló tér- és időbeli változások előrejelzése.

A hidrodinamikai és transzportmodellezés egy fontos sajátossága, hogy előzetes munkahipotézisen, azaz egy prekonceptción alapul, a számítások első feladata a munkahipotézisnek megfelelő modell felépítése, és amennyiben azzal a valós folyamatok követése megvalósítható, akkor a prekonceptciót az adott feladat megoldása szempontjából elfogadhatjuk. Amennyiben a valóságos folyamatok szimulációja nem vagy nem megfelelő szinten végezhető el, úgy az egyébként a terület korábbi vizsgálatain alapuló munkahipotézist módosítani kell, illetve a megváltoztatott munkahipotézisre vonatkozó (azt megerősítő vagy cáfoló) szakmai ismereteket összegyűjteni szükséges (6.1.ábra). A munkahipotézis fejlesztését mindaddig szükséges folytatni, amíg az egyfelől a szimulációs feladat megoldásához megfelelővé nem válik, másfelől összhangba nem kerül valamennyi korábbi földtani és vízföldtani ismerettel.



6.1. ábra Modellezési munkafolyamat (Kovács B. 2004)

A fenti ábrát és folyamatot követve sikerült felállítani egy a kismintánkat jól reprezentáló számítógépes modellt.

6.1 A szivárgás alapegyenlete

A szivárgás alapegyenlete matematikai formában írja le a vízmozgás törvényszerűségeit. A szivárgást leíró alapvető összefüggés a Darcy-törvény és ezt a porózus közegben áramló folyadékok tömegmegmaradásának kontinuitási egyenletével összeillesztve a szivárgás alapegyenletét kapjuk meg.

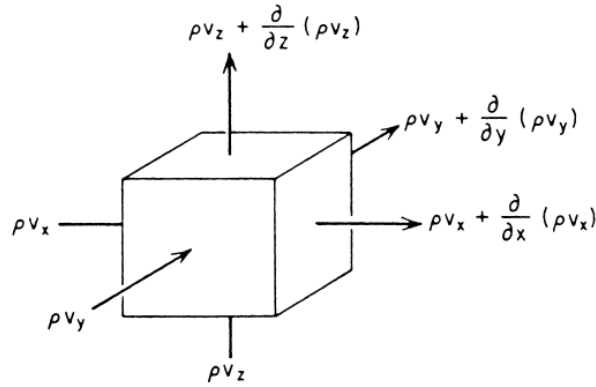
Az eredményként kapott parciális differenciál-egyenlet egymástól alig eltérő formában írható fel a permanens és nem permanens, telített közegbeli áramlás esetére, sőt kiterjeszthető a telítetlen közegbeli szivárgásokra is. Mindhárom esetre vonatkozóan megállapítható, hogy a kapott parciális differenciálegyenlet a matematikusok számára nagyon ismert, ezért megoldásukra vonatkozóan számos eljárást dolgoztak ki.

6.1.1 Telített közegbeli permanens szivárgás

Tekintsük a porózus közeg egységnyi térfogatú részét a 6.2. ábra szerint. permanens esetre, telített közegre felírt tömegmegmaradási-egyenlet megköveteli, hogy a vizsgált térrészbe be- és kilépő vízhozamok egyenlők legyenek. A 6.2. ábra alapján felírt összefüggés szerint tehát:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (6.1)$$

ahol ρ az áramló folyadék sűrűsége és v_x, v_y és v_z a szivárgási sebességvektor komponensei.



6.2. ábra Az áramlási közeg infinitezimálisan kicsiny része a be- és kiáramló fajlagos hozamokkal (Németh E. 1963)

Amennyiben a folyadék összenyomhatatlan, akkor $\rho = \text{konstans}$, ezért az egyenletből elhagyható. Amennyiben a folyadékot összenyomhatónak tekintjük, akkor $\rho \neq \text{konstans}$, de kimutatható, hogy a lánc-szabály szerint képzett $\rho \frac{\partial(v_x)}{\partial x}$ kifejezés sokkal nagyobb, mint a $v_x \frac{\partial \rho}{\partial x}$ kifejezés, ezért mind összenyomható, mind összenyomhatatlan folyadék esetére felírható, hogy

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (6.2)$$

Amennyiben az egyenletben a szivárgási sebességvektor komponensei helyére beírjuk a Darcy-féle összefüggést, akkor a szivárgás alapegyenletét kapjuk anizotróp, porózus, telített közeg esetére permanens helyzetet feltételezve (esetünkben erről a jelenségről van szó):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.3.)$$

ahol k_x, k_y és k_z a szivárgási-tényező tenzor főátlójának elemei, h pedig a piezometrikus nyomásszint.

Ez az egyenlet a matematikában jól ismert Laplace-egyenlet, melynek megoldása mutatja meg a piezometrikus szint nagyságát bárhol egy háromdimenziós áramlási térben (Németh, 1963).

6.2 Modflow

6.2.1 Modflow környezet

A Modflow véges differencia elvén működő, hidrogeológiai modellező szoftver (Waterloo Hydrogeologic Inc., 1999). Képes a talajvízmozgásokon túl a talajvízben végbemenő anyagtranszportot is számolni, de erre nem térünk ki részletesen.

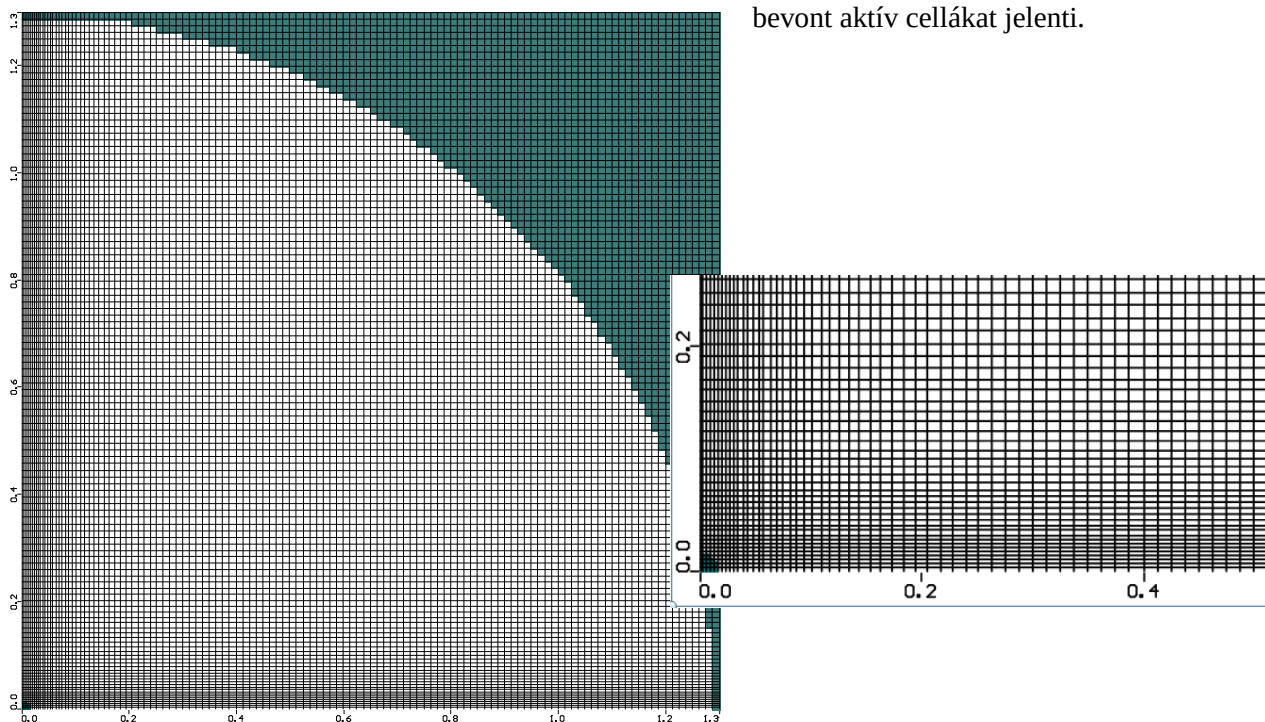
A program több modulból tevődik össze, ezeket közös grafikus felület köti össze, de egyik modulból a másikba átlépve mindig automatikus adatmentés történik.

Input modul (szivárgási probléma definiálása)

- definiálhatjuk a geometriát és a rasztert,
- kutakat helyezhetünk el,
- beállíthatjuk a talaj és talajvíz tulajdonságokat,
- megadhatjuk a peremfeltételeket,
- és részecskekövetés segítségével áramvonalakat rajzoltathatunk ki tetszés szerinti helyekről.

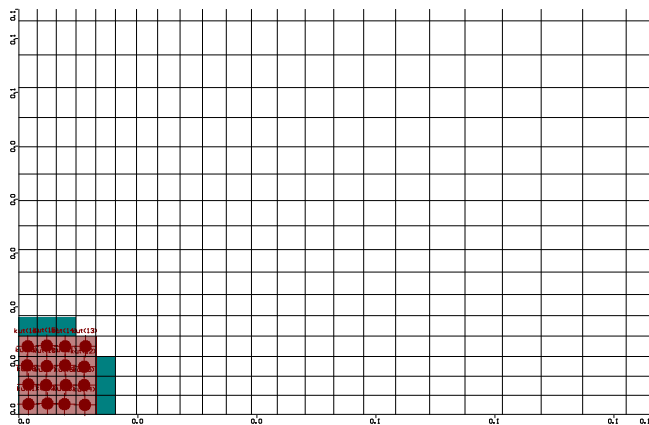
A geometria megadásánál segítségemre volt háttérkép, melyet dwg formátumban tudtam betölteni. A 6.1. képen látható, a modelltér minden esetben négyzet alakú, a modellezni kívánt alakzat az egyes cellák inaktívvá tételével lehetséges; esetünkben a kisminta alakjának és méreteinek megfelelően a zöld cellák az inaktív cellákat jelzik, a fehér szín a számításba

bevonott aktív cellákat jelenti.



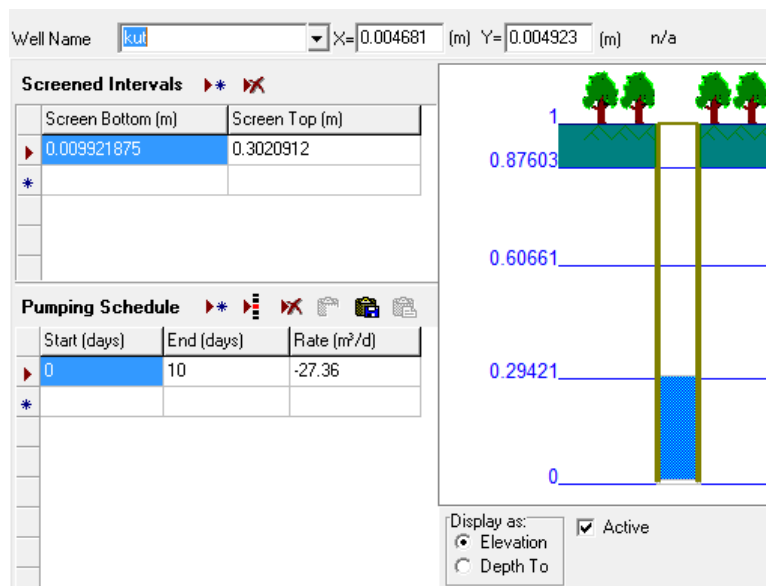
6.1. kép Modflow rácsháló

A 6.1. képen szintén megfigyelhető a kút közelében (mivel ott nagy gradiensek várhatók a leszívásból következően) létrehozott rácsháló sűrítés. A sűrítés mértékének meghatározásakor figyelembe vettem, hogy a szomszédos cellaméretetek között nagy méretkülönbség adódik, akkor a numerikus hiba növekedhet. Ennek elkerülése érdekében az átmenet nem egy, hanem hat lépésben, fokozatosan megy végbe; a sűrítésnél arra is tekintettel voltam, hogy a modell pereme felé közelítve kialakuló téglalap alakú cellák oldalainak aránya ne legyen kisebb 1:2-nél (Modflow 2.8.2 verzióban rácshálót sűríteni lokálisan nem lehet, csak sorokat és oszlopokat tudunk hozzáadni).



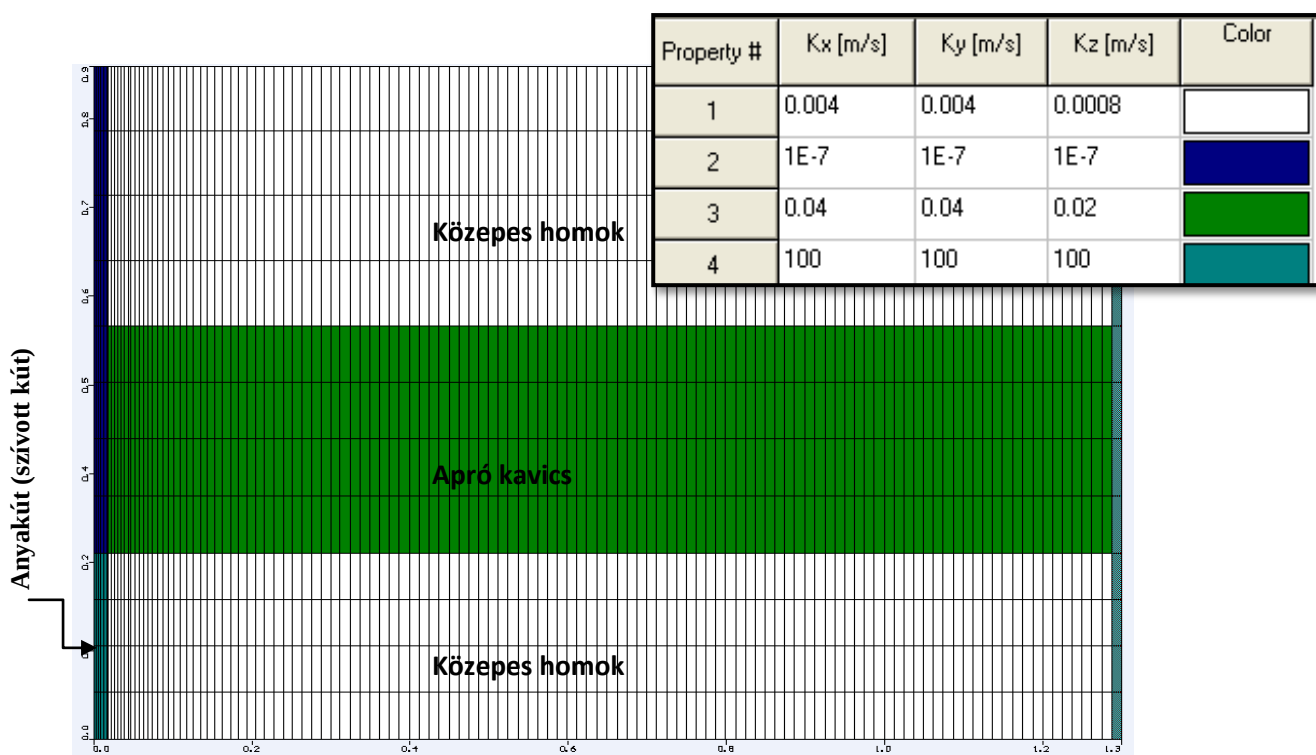
6.2. kép Anyakút a Modflow-ban

A kút magassági szűrőzésének helyét a modell rétegeinek felbontása alapján tudtam beállítani. Fontos tudni, hogy amennyiben a leszívás mértéke akkora, hogy a kút egy szűrőzött szakasza szárazra kerül, akkor a kiemelt víz mennyisége megváltozik a számítás szerint. Ebből kifolyólag amennyiben a kiemelt víz mennyiségének állandónak kell lennie, erre is tekintettel kell lennünk és adott esetben iteratív módon kell beállítani a kút szűrőzésének helyét.



6.3. ábra A kút szűrőzésének definiálása

A fizikai kismintába épített anyagokat a numerikus modellben az egyes talajtípusok szivárgási tényezőjének megadásával definiálhatjuk.



6.4. ábra Szivárgási tényezők definiálása a modellben

Az anyakút a fenti (6.4 ábra) esetben az alsó homokrétegben szűrőzött. A perforáció nélküli csőszakaszt, mint a rétegek megcsapolásában nem hatékony részt, a kútban lévő cellák szivárgási tényezőjének megadásával tudjuk beállítani. A sötétkék részt, melynek szivárgási tényezője nagyságrendekkel alacsonyabb a környezeténél, tulajdonképpen vízzárónak tekintjük. A szívó ág alsó egyharmadában, amit a világoskék szín jelöl, történik a vízkitermelés.

A közeget anizotrópnek feltételeztük, így a $k_x = k_y \neq k_z$. A z irányú szivárgási tényező értékét az x,y irányúhoz képest a szakirodalomban publikált, tapasztalati értékek alapján vettük fel (Kinzelbach & Rausch, 1995).

A kavicsnál az x,y irányú érték felére, tehát 0.02 m/s-ra, a homoknál pedig az ötödére, azaz 0.0008 m/s-ra.

Run modul (itt a szimuláció beállításaira majd futtatására kerül sor)

- be kell állítanunk a szimuláció módját (permanens, nempermanens),
- ki kell válasszuk a szimuláció motorját (egyenletrendszer megoldó eljárás),
- beállíthatjuk a konvergencia kritériumokat,
- rewetting funkciót paraméterezhetjük.

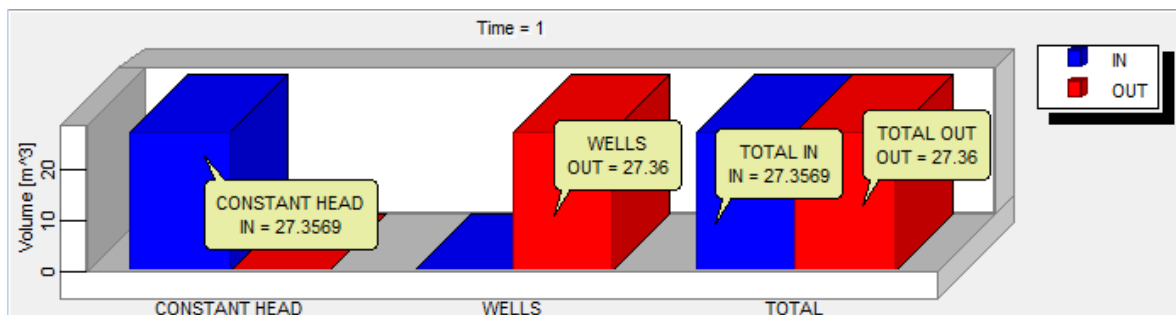
Háromdimenziós esetben előfordulhat, hogy az iteráció divergenciához vezet, ekkor érdemes a konvergencia kritériumokat variálni vagy másik motor mellett dönteni.

A rewetting (újrandedvesítés) funkció nagyon érzékeny pontja az egész modellnek. A cellák újrandedvesítésének akkor van jelentősége, ha az iterációk során egy cella „kiszárad” vagyis a közelítésként elért vízszint a cella alsó éle alá kerül, ez a rewetting funkció nélkül nem venne újra részt a számításban. Egy paramétrezhető algoritmus alapján kerülhetnek újra vissza ezek a cellák a számításba.

Output modul (szimuláció eredményeinek kiértékelése)

- kialakult piezometrikus nyomásszintek ábrázolása többféle módon,
- sebességvektorok ábrázolása,
- áramvonalak kirajzolása a definiált részecskék helye alapján,
- vízmérleg adatok elemzése,
- statisztikai csomag definiált észlelőkút adatok alapján (kalibrációban nyújt segítséget.

Az áramlási tér ábrázolása programon belül felülnézetben és sor, illetve oszlop irányú metszetekkel lehetséges, adatexportálás ASCII vagy dat formátumban megvalósítható. A vízmérleg vizsgálata minden szimuláció után fontos, amennyiben jelentős eltérés van a beáramlott és eltávozott vízmennyiségek között, az numerikus instabilitásra utal. Ebben az esetben vissza kell térni a konvergencia kritériumokhoz. A 6.5 ábra a szimuláció vízmérlegét szemlélteti, a kék oszlop a modellbe bejutott vízmennyiséget szemlélteti, míg a piros a kimenetet mutatja. A modellterbe az állandó vízszintű külső peremen keresztül (constant head) áramlik be víz, melyet a szívott kút (wells) szív ki.



6.5. ábra Vízmérleg ellenőrzése

6.2.2 Véges differencia módszer

A Modflow szoftver a talajvízmozgást leíró differenciál-egyenlet numerikus megoldására a véges differencia módszert alkalmazza.

A módszer alapgondolata, hogy a modellezett teret egymással hézagmentesen érintkező négyyszög alapú hasábokra osztjuk. A szivárgás alapegyenletét differencia-egyenletté alakítjuk; meghatározzuk a szomszédos cellák közötti vízhozamokat a Darcy-törvény és a kontinuitási egyenlet segítségével. Számításba vesszük a peremfeltételek és modellelemek következtében történt vízmozgásokat, betáplálásokat, kiszivattyúzott hozamokat. Ezek után összegezzük minden egyes hasábelemre a vízméreg-elemeket, majd ezek összegzéséből meghatározzuk a modellezett tér vízforgalmát; ez egy lineáris egyenletrendszer, amit numerikus eljárásokkal meg kell oldani.

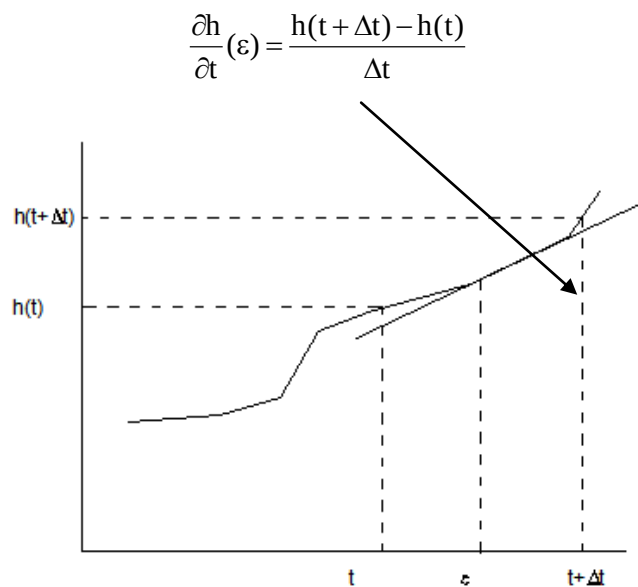
A módszer használatának legnagyobb előnye, hogy differenciáloperátort differencia operátorral helyettesítjük és így a megoldás során megmarad az eredeti differenciálegyenlet összefüggés. Ennek következtében a számítás részeredményei valós fizikai tartalommal bírnak, ami a számítás folyamatának követését elősegíti. Az egyes hasábelemekre felírt vízmérleg-elemek időbeli változása jól követhető, ezért nagyon szemléletes. Előny továbbá a többé-kevésbe szabályos elemkiosztás miatt a modell alapadat-rendszere részben függvények és geostatistikai módszerek használatával generálható, ami tekintettel az alapadat-rendszer méretére – számottevő gyakorlati könnyebbég (Kovács B. 2004).

A módszer alapja tehát:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \rightarrow \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (6.4.)$$

A differenciaképzés módja alapvetően befolyásolja a numerikus hiba előfordulását.

Tételezzük fel, hogy a h nyomásszintek a 6.6 ábra alapján alakulnak. Az átlagérték tétele alapján tudjuk, hogy a $h=h(t)$ függvény időszerinti deriváltját kiszámíthatjuk egy a $[t, t+\Delta t]$ időintervallumon belül található e időpillanatban az időintervallum két végpontjában észlelt $h(t)$ és $h(t+\Delta t)$ értékek alapján. Sajnos az e helyét a $[t, t+\Delta t]$ intervallumon belül nem ismerjük, ezért különböző feltételezésekkel élhetünk, melyek alapján az időbeli differenciaképzés különböző módszerei alakultak ki (Kovács B. 2004).



6.6. ábra: Időbeli differenciaképzés (Istok, 1989)

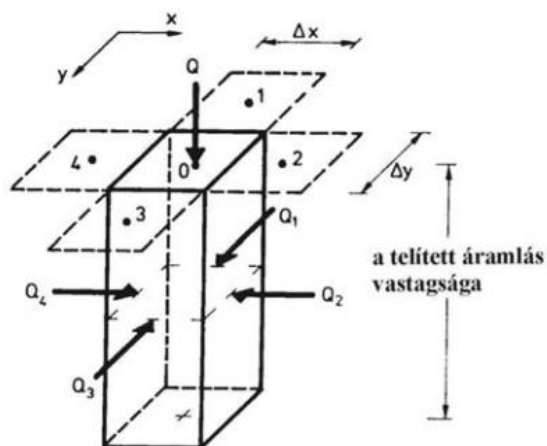
$H(\varepsilon)$ nyomásszintet a $h(t)$ segítségével kifejezhetjük:

$$h(\varepsilon) = h(t) + (\varepsilon - t) \frac{\partial h}{\partial t}(\varepsilon) \quad (6.5)$$

és ezek után, vezessük be az $\omega = \frac{\varepsilon - t}{\Delta t}$ változót. (6.6)

A fenti változó segítségével felírhatjuk a $h(\varepsilon) = (1 - \omega) \cdot h(t) + \omega \cdot h(t + \Delta t)$ differencia egyenletet. (6.7)

Most lássuk az egyes cellákra a szivárgás alapegyenletét véges differencia módszerrel felírva.



6.7. ábra: Vizsgált hasáb és szomszédos elemei (Kinzelbach, 1986)

A vizsgált elem sorszáma legyen 0, a körülötte lévő elemeké 1, 2, 3, 4. Az elemek közti vízforgalom Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , és a vizsgált elembe betáplált/kiemelt vízhozam Q_0 . Ezek ismeretében Δt időintervallumra felírhatjuk a vízmérleg változását: $\Delta q = \Delta t \cdot \sum Q_i$. Ez a vízmérleg-megváltozás okozza a nyomásszint megváltozását a cellában. A fenti vízmérleg megváltozást kifejtve és a Darcy-törvényt felhasználva a következő alakot kapjuk:

$$\Delta q = \Delta x \cdot T_{10} \frac{h_1(t_i) - h_0(t_i)}{\Delta y} + \Delta y \cdot T_{20} \frac{h_2(t_i) - h_0(t_i)}{\Delta x} + \Delta x \cdot T_{30} \frac{h_3(t_i) - h_0(t_i)}{\Delta y} + \Delta y \cdot T_{40} \frac{h_4(t_i) - h_0(t_i)}{\Delta x} \quad (6.8)$$

$\Delta x, \Delta y$: hasáb mérete (6.7 ábra),

$T_{i,0}$: figyelembe vett transzmisszivitás a szomszédos elemek közt.

A tárolási tényezőt felhasználva az egyenlet a következőképpen alakul:

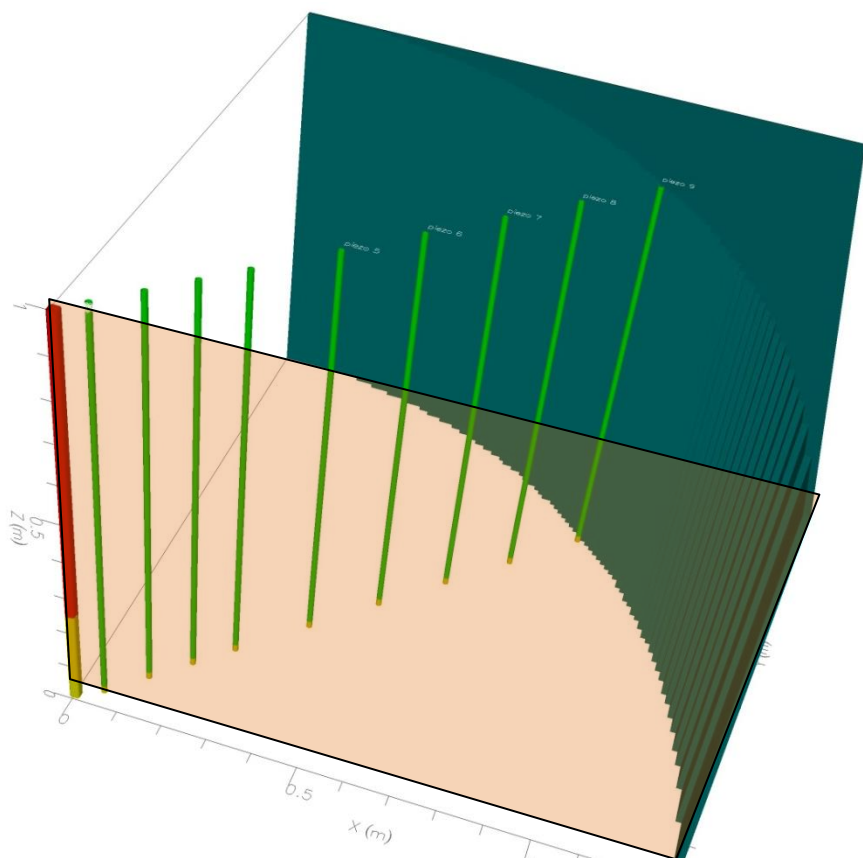
$$\Delta q = \frac{(h_0(t_i + \Delta t) - h_0(t_i)) \cdot S \cdot \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (6.9)$$

A felírt egyenletekben csak a $h(t)$ nyomásszint ismeretlen, kezdeti és peremfeltételek segítségével megoldható.

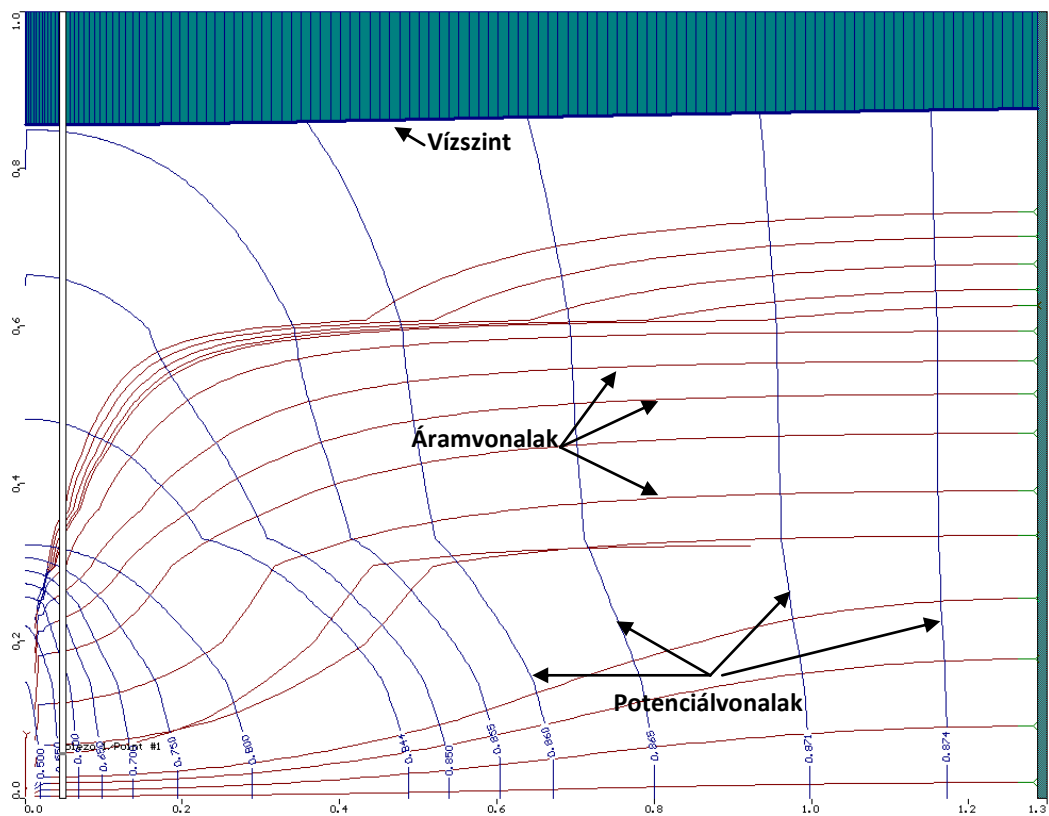
7 Modflow eredmények

Az eredmények értékelése előtt fontos tisztázni, hogy (mint azt már említettem) például tetszőleges sugárirányú, vagy a modell oldaléleivel bármilyen α szöget bezáró metszetet nem állíthatunk elő, csak a rácsháló sorai és oszlopai mentén kérhetünk le metszeteket.

Esetünkben a piezocsövek kivezetései sugárirányban helyezkednek el. Az egész jelenség hengersizmetrikus, így mégis adódik a modellünknek két olyan metszete, amely sugárirányú, tehát beláthatjuk, hogy a 7.1. ábrán jelzett metszeten bemutatott eredmények, megfelelnek bármely sugárirányú metszetnek.



7.1. ábra Az eredmények ábrázolásának metszete

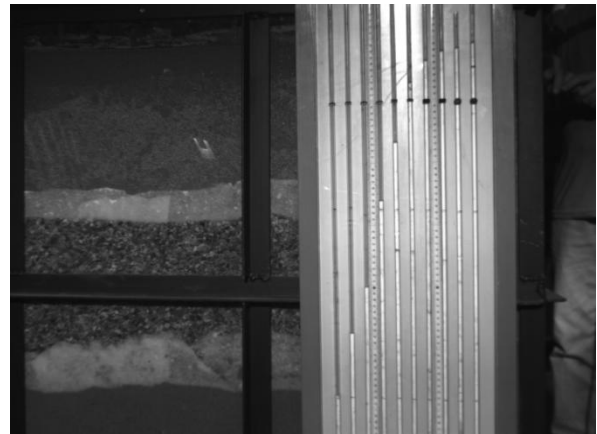


A 7.2. ábrán az áramvonalak és az ekvipotenciális vonalak merőleges hálózataát látjuk, amit együttesen áramképnek nevezünk. Az áramvonalak a folyadékrészecskék pályáit is jelentik (az időben állandósult áramképen), az ekvipotenciális vonalak pedig azonos nyomásmagassággal rendelkező pontokat jelölnek (mert az áramlás sebességmagassága elhanyagolható). Ezen izobárok pedig jó közelítéssel a pizometrikus nyomásszinteket jelentik.

A fenti ábrán egy a kismintakísérletünkhöz hasonló, de fizikai paramétereiben nem teljesen azonos futtatás eredménye látható. Esetünkben a (teljes mélységében még feltárásra váró technikai vagy egyéb okok miatt) függőleges mozgás annyira dominánssá válik (az izobárok görbülésének megfelelően), hogy bármilyen vízszintes síkban zajló áramlást feltételező modell (permanens állapot esetén a Dupuit-képlet, nempermanens állapotnál a Theis-, Cooper-Jacob-módszer, stb.) sem használható. Ennek következtében az Aqutesolv szoftver használata sem elfogadható az ilyen problémák megoldására (de fontos megemlíteni, hogy a gyakorlat mégis használja). Ezzel a felismeréssel magyarázatot kapunk az eredmények elméleti görbétől való eltérésére.

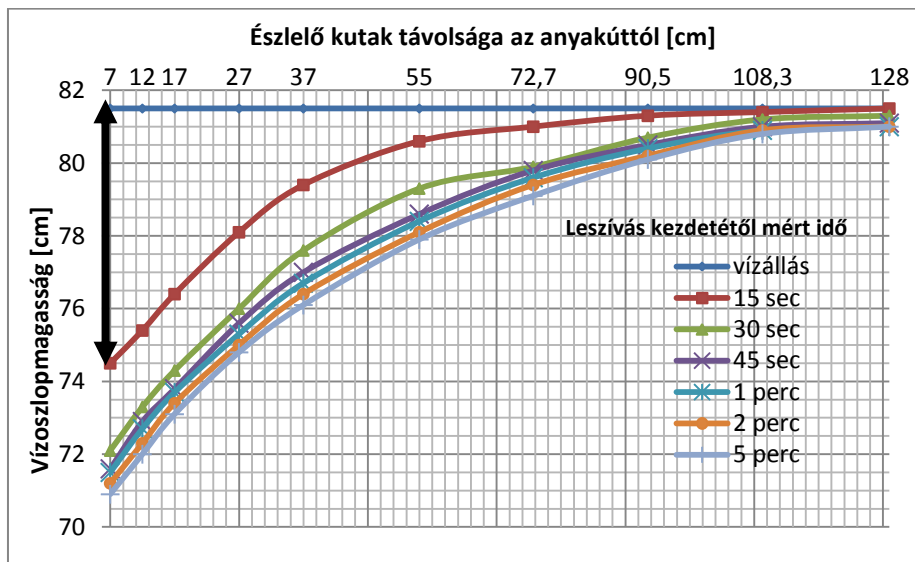
A 7.2. ábrán továbbá jól látható, hogy a réteghatároknál az áramvonalak és a potenciál vonalak is törnek, ahogy ez vizsgálataink elején vártuk. Ugyanakkor a vízszint csak minimálisan csökkent, (kb. 0,5 cm-t), míg a kísérleteknél a piezokivezetéseken több tíz centiméteres nagyságrendű depressziót tapasztaltunk. Világossá vált, hogy a piezónyomások és a vízszintek nem egyeznek meg egymással.

Ennek ellenőrzésére egy 35 cm hosszú perforált hengert építettünk a modellbe. A 7.1. képeken is látható, hogy a piezókön pár másodperc után, leszíváskor létrejön a depresszió (7.1., jobb oldali kép), míg a talajban nem következik be a vízszintváltozás (7.1., bal oldali kép).



7.1. kép Ellenőrzőhenger beépítése után végzett kísérletek

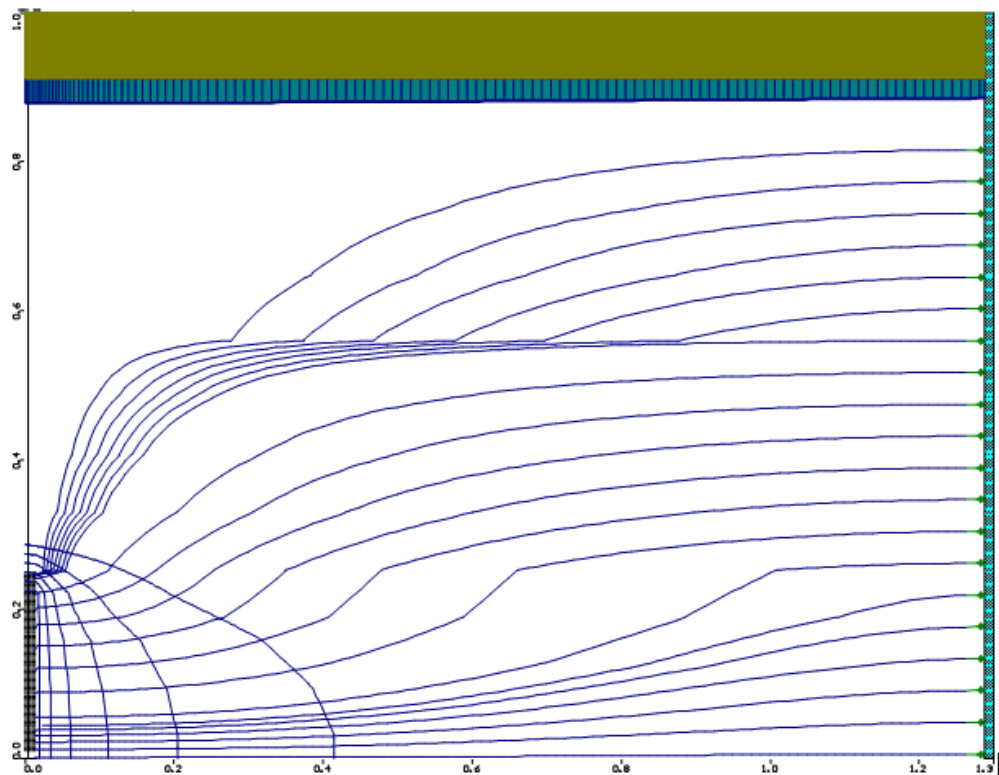
Utólag könnyű belátni, hogy a korábban végzett homogén talajú kísérleteknél is fennállt ez a jelenség, mivel 15 másodperc alatt nem történhetett 7 cm-es vízszintváltozás a modellben (7.1. diagram).



7.1. diagram Homogén talajban a leszívásokkor regisztrált, piezocsöveken leolvasott értékek, $Q=4,5$ l/perc (Barta, Veczán 2011)

7.1 Az anyakút az alsó homokrétegben szűrőzött

Potenciál- és áramvonalak



7.3. ábra – Áram- és potenciálvonalak

A 7.3. ábra áramképén világosan látszik a piezoszintek és vízszintek eltérésének oka. Az eltérés az anyakúthoz közelítve egyre markánsabb, ahogy az izobárok egyre inkább

elkanyarodnak a függőleges helyzettől. Ez egyben az áramvonalak vízszintestől való egyre nagyobb eltérését jelenti, vagyis az anyakúthoz közel egyre jelentősebb függőleges irányú áramlás mutatkozik, ahogy a sebességvektor-mezőn (7.4. ábra) is látszik.

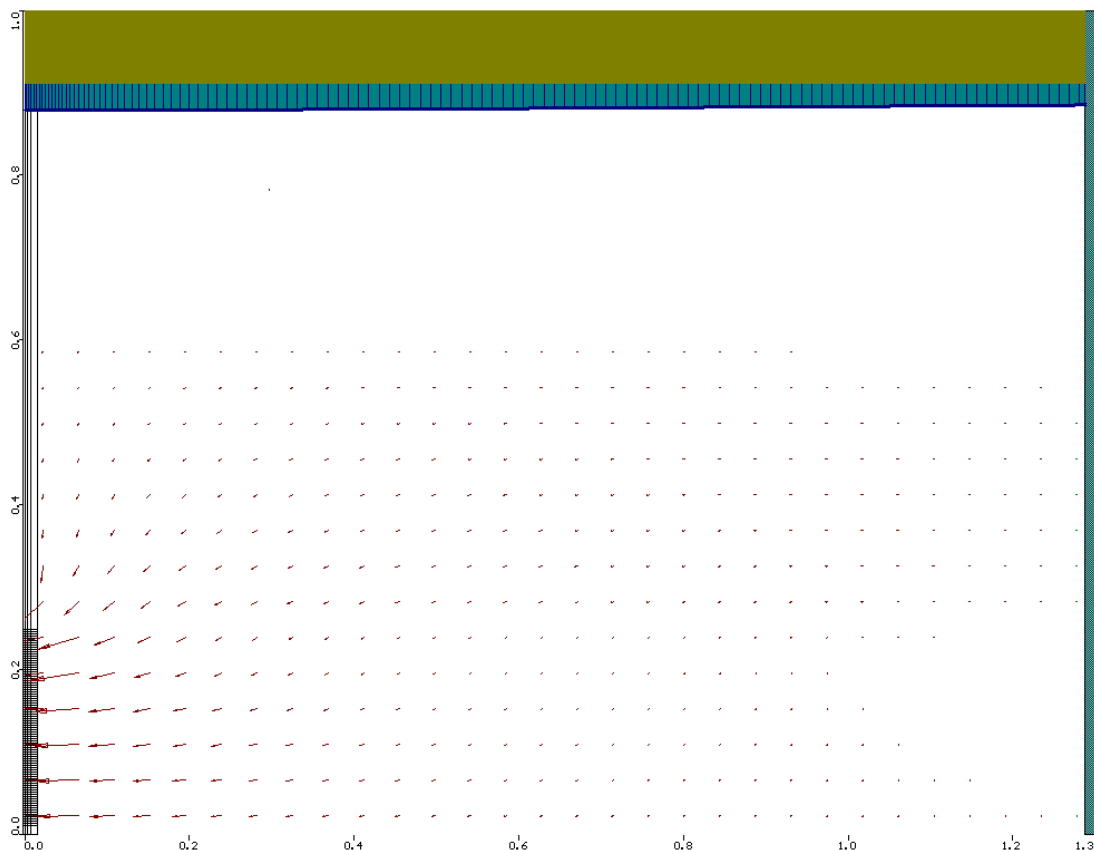
Itt is jól látszanak a réteghatárokon a törések.

A szinte konstans vízszintek mellett a bal felső sarokban egy "áramlási holttér" figyelhető meg.

Sebességmező - sebességek nagysága és iránya

A 7.4 ábráról egyértelműen leolvasható, hogy a sebességek a szűrőzött rész közelében, de csak a közvetlen közelében jelentősen megnőnek és megfigyelhető, hogy drasztikusan csökken a sebesség a kúttól távolodva. A felső homokrétben már olyan minimális a sebesség, hogy tulajdonképpen már nem is érzékelhető.

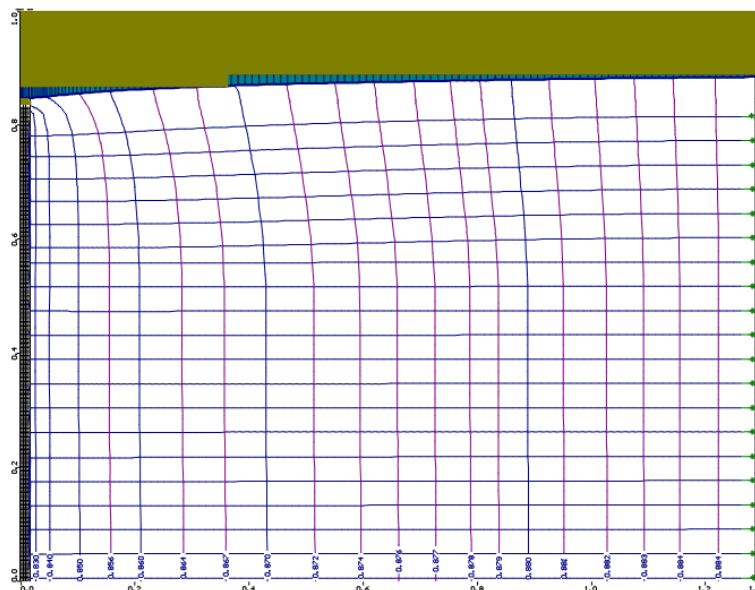
Ebben az esetben kialakult legnagyobb sebesség $v_{\max} = 0,16 - 0,17$ m/s.



7.4. ábra Sebességmező

7.2 Az anyagút a teljes hosszán szűrőzött

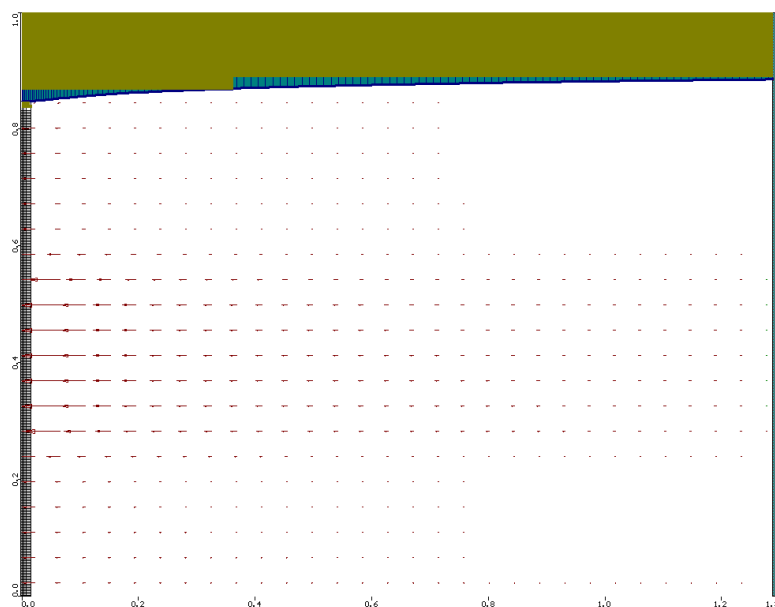
Potenciál- és áramvonalak



7.5. ábra Áram- és potenciálvonalak, ha az anyagút a teljes hosszán szűrőzött

Ebben az esetben alakulnak ki kiegyenlített viszonyok, a depressziós görbére emlékeztető vízszint, elhanyagolható függőleges mozgás. Ilyen áramkép mellett használhatóak a Dupuit-féle módszerek. A laboratóriumban ehhez hasonló áramképet akkor tudnánk előállítani, ha a vizsgált két talajtípus közötti szemeloszlású anyaggal, az anyagutat végig szűrőzve szivattyúznánk egy alulról szívó szivattyúval. Itt a piezometrikus nyomás és a vízszint közel megegyezik egymással.

Sebességmező - sebességek iránya és nagysága



7.6. ábra Sebességek nagysága és iránya, ha az anyagút teljes hosszán szűrőzött

A 7.6. ábrán látható, hogy a sebességek a középső rétegben (kavicsban) egy nagyságrenddel nagyobbak mint a homokban. Értékeik a következők:

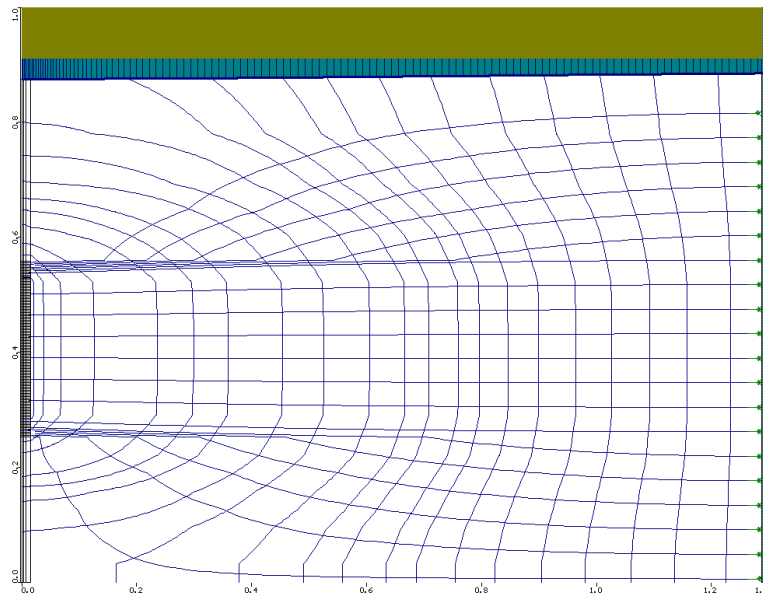
$v_{\max} = 0,012 - 0,013$ m/s (homokban felül)

$v_{\max} = 0,11 - 0,13$ m/s (kavicsban középen)

$v_{\max} = 0,010 - 0,011$ m/s (homokban alul)

7.3 Az anyagút a kavicsrétegben szűrőzött

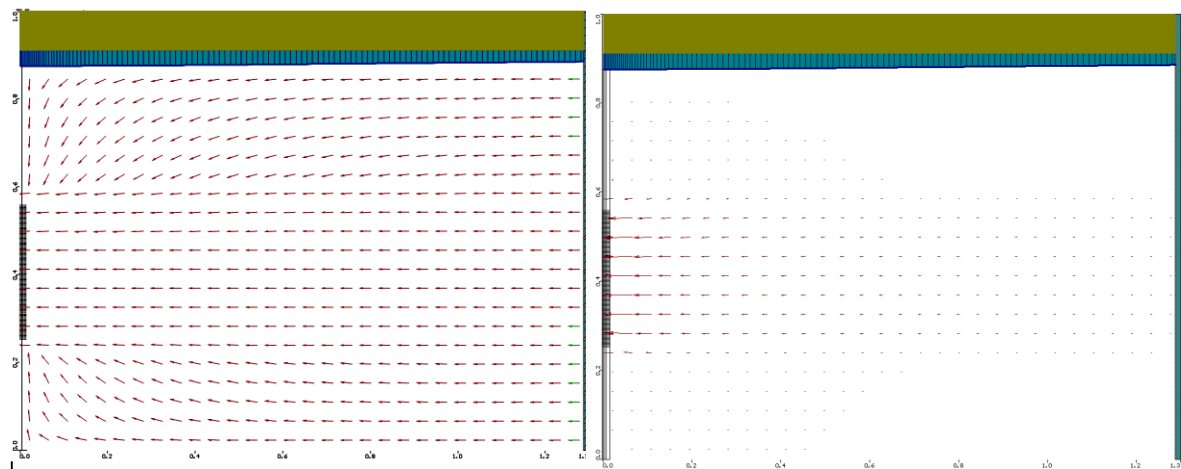
Potenciál- és áramvonalak



7.7. ábra Kavicsban szűrőzött anyagút esetében az áram- és a potenciálvonalak

Az anyagút középső harmadának szűrőzésekor jól látható, hogy a várt módon középső szakasz felé áramlik a víz minden réteg felől, és a réteghatárokon létrejön a törés.

Sebességmező - sebességek iránya és nagysága



7.8. ábra – Sebesség irányok és nagyságok

A 7.8 ábrán együtt mutatom be a sebességek irányát és nagyságát. Ebből az a tanulságos következtetés vonható le, hogy a két paramétert érdemes együtt vizsgálni, mivel csupán a sebességek nagyságát szemlélve, azt látnánk, hogy a modell sarkaiban „pangó vízterek” jönnének létre, holott ott is egyértelmű a kút felé áramlás.

A maximális sebesség ebben az esetben: $v_{\max} = 0,15 - 0,17 \text{ m/s}$

8 Kiértékelés

A korábbiakban megállapítottam, hogy a fizikai modellben végbemenő folyamatok nem írhatók le a hengerszimmetrikus szivárgási jelenségekkel, mert egy térbeli folyamat játszódik le. A piezométer csöveken leolvasott értékek (piezometrikus nyomásmagasságok) és a vízszintek nem egyeznek meg.

Tekintsük át a lehetséges okokat.

1. Rétegzettség

A jelenséget rétegzett talajok beépítésénél figyeltük meg, de utólag beláttuk, hogy homogén talajoknál is fennáll részleges szűrőzés mellett, tehát a rétegzettség önmagában nem okoz torzulást az áramlépen, csak esetleg felerősíti a függőleges komponens meglétét. (Érdekes lenne más rétegrendeket is kipróbálni, például a kavics - homok- kavics rétegződést.)

2. Méretarány

A kisminta méretarányának megválasztása is okozhatja a jelenségmódosulást. A modellt eredetileg $M = 1:16$ -osra terveztük, amit az anyakút átmérőjéhez igazítottunk. A valóságban 16 cm átmérőjű kutakat használnak, technikai okokból a modellünkbe pedig nem tudtunk 1 cm-nél kisebb átmérőjű kutat beépíteni. Később a nagyobb hozam biztosítása érdekében áttértünk 1,7 cm átmérőjű anyakútra (Barta, Veczán 2011), melynek következtében modellünk méretarányt váltott ($M \approx 1:9$). Így a legközelebbi piezokivezetés távolsága fél méteren belülre került (valóságos méretekre átszámolva), a legtávolabbi pedig tíz méter körüli. Ezek a valóságban túl kicsi távolságok, ilyen szemösszetételű talajoknál az anyakúthoz legközelebbi ellenőrző kutat tíz méternél távolabb szokás elhelyezni. (Esetleg agyagnál jöhet szóba kisebb távolság.) A Dupuit-módszer használatnál olyan egyszerűsítésekkel élünk, amelyekből a kismintamodellben létrejövő (az áramképeken látható) torzulások miatt nem tekinthetünk el.

3. Időlépték

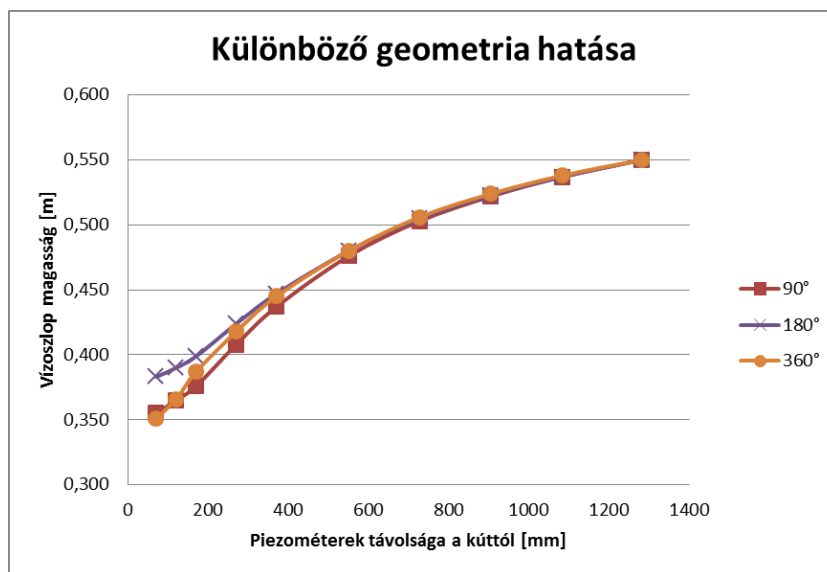
Ennél a kísérletsorozathoz végig $Q = 19$ l/perc-es hozammal szivattyúztunk, amely úgy okozott leszívást az anyakútban, hogy az még nem száradt ki. A vízhozam ebben az esetben az időléptéket is jelenti egyben, ennek a pontosítása további vizsgálatot igényel.

4. Geometria (negyedkörtírk modell)

A korábban végzett numerikus modellezések, illetve a kismintán meghatározott szivárgási tényezők alapján, nem tartjuk valószínűnek, hogy a negyedkörtírk alak okozza a torzulást.

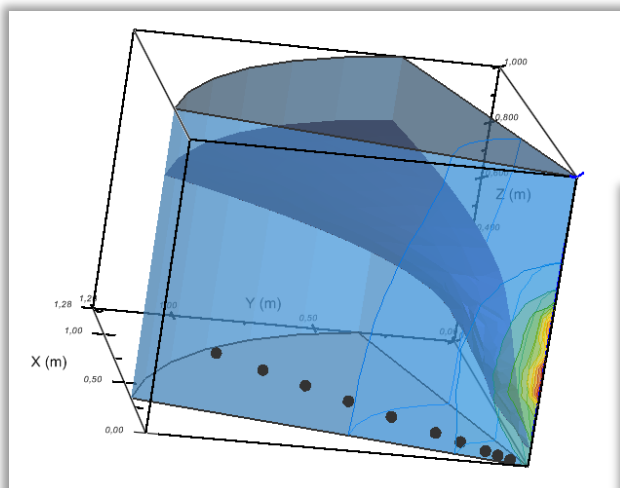
A numerikus modellkísérletek eredményei a következők voltak:

SVFlux 3D

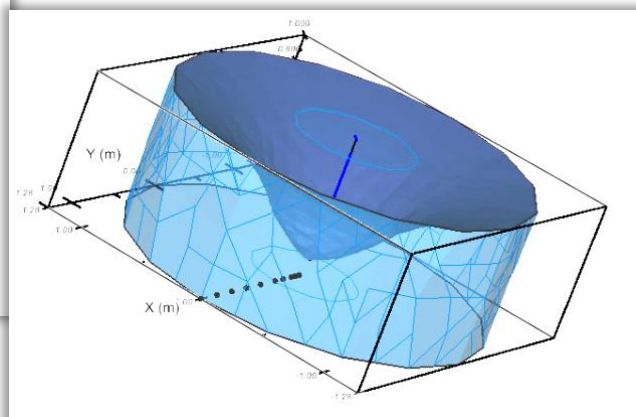


8.1. diagram Geometriai változások hatása a szivárgás jelenségére (Csáki, 2011)

A laboratóriumban felépített modellnek elkészült a numerikus közelítése is SVFlux 3D-s végeselemes szivárgáshidraulikai szoftver diákverziójával (Csáki, 2011). Az így elkészült modellen a különböző paraméter változtatásának hatásának vizsgálata is sorra került. A geometria változtatásával – azaz azzal, hogy negyed, fél vagy teljes kört vizsgálunk –, az eredményül kapott leszívási görbék a kút közvetlen környezetét kivéve teljesen egybe estek, vagyis a geometria változtatásának nem volt jelentős hatása az eredményekre. A kút környezetében az eltérés oka valószínűleg a végeselemes hálózat felbontása, ugyanis a program hallgatói verziójában nem volt lehetőség megfelelő sűrűségű rácspontok létrehozására.

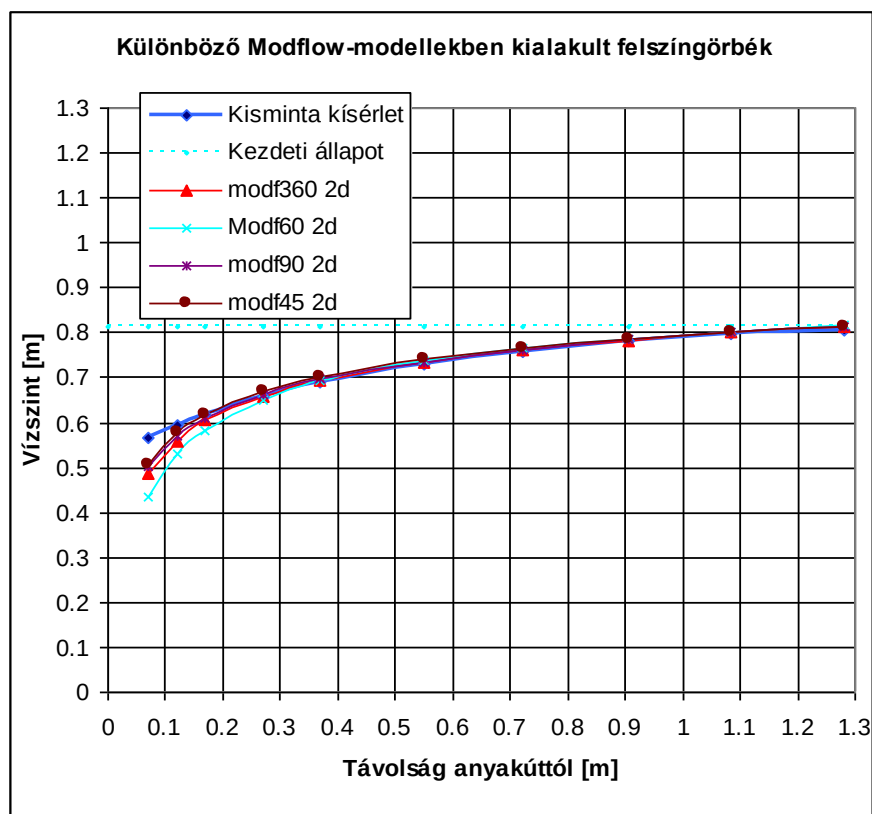


8.1. ábra SVFlux 3D szoftverrel ábrázolt, leszívás során kialakult vízfelszínek, 60°-os (fent) és 360°-os (jobbra) modelltér esetén (Csáki, 2011)



A 8.1 ábrán látható leszívások a modell szerint a vízoszlopmagasságokat jelölik (nem a piezónyomásokat!), egyértelműen látható, hogy a szűkítés nem befolyásolja az eredményt.

Modflow

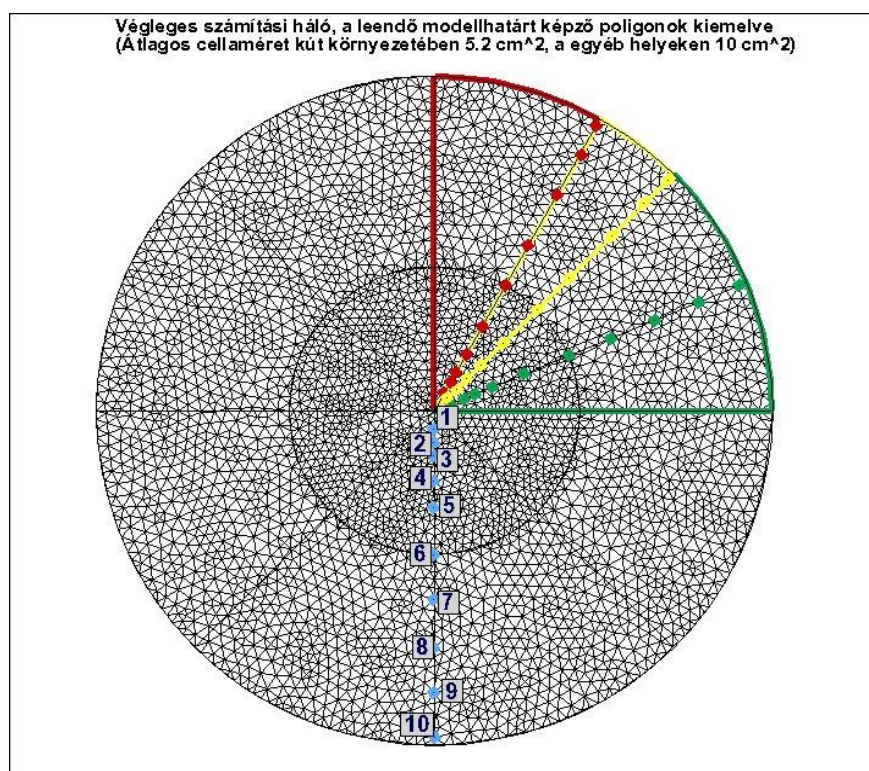


8.2. diagram Központi szög módosításának hatása a Modflow modellek szerint (Szabó G., 2012)

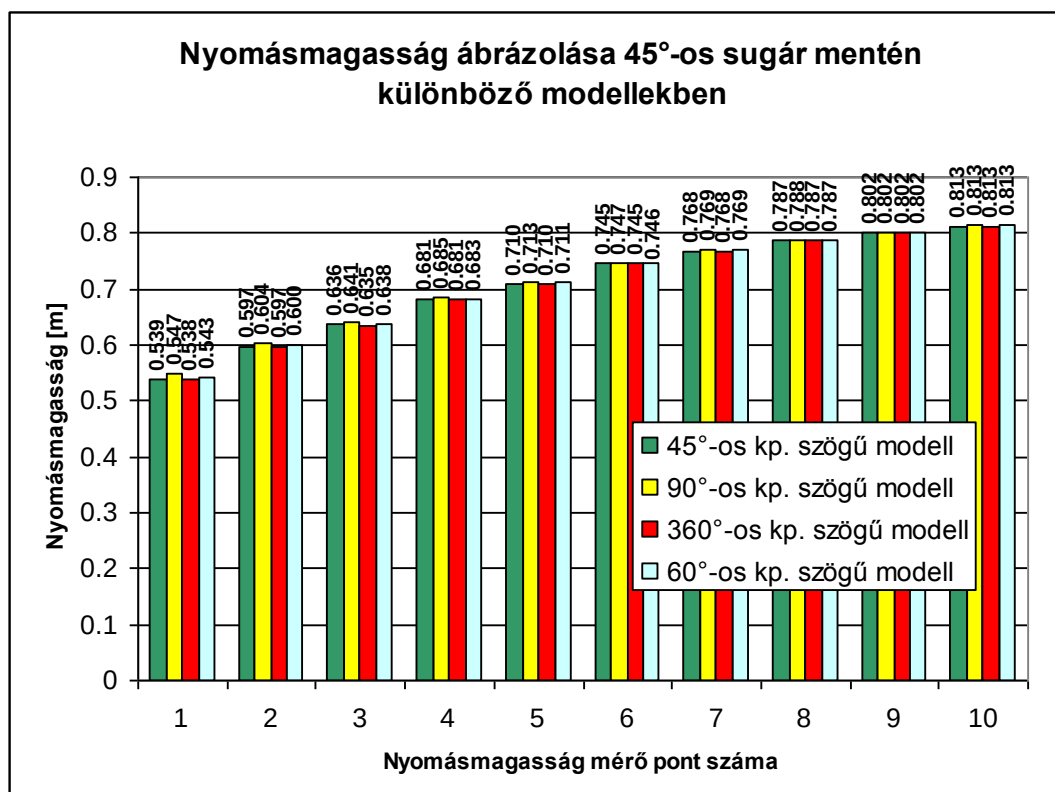
A 8.2 ábra grafikonján láthatjuk, hogy jelentős változások nem adódtak a különböző modellek eredményei között. Mivel az eltérésekben nem fedezhető fel rendszer, ezért a numerikus hiba eredményének tulajdoníthatjuk (Szabó G., 2012).

Feflow

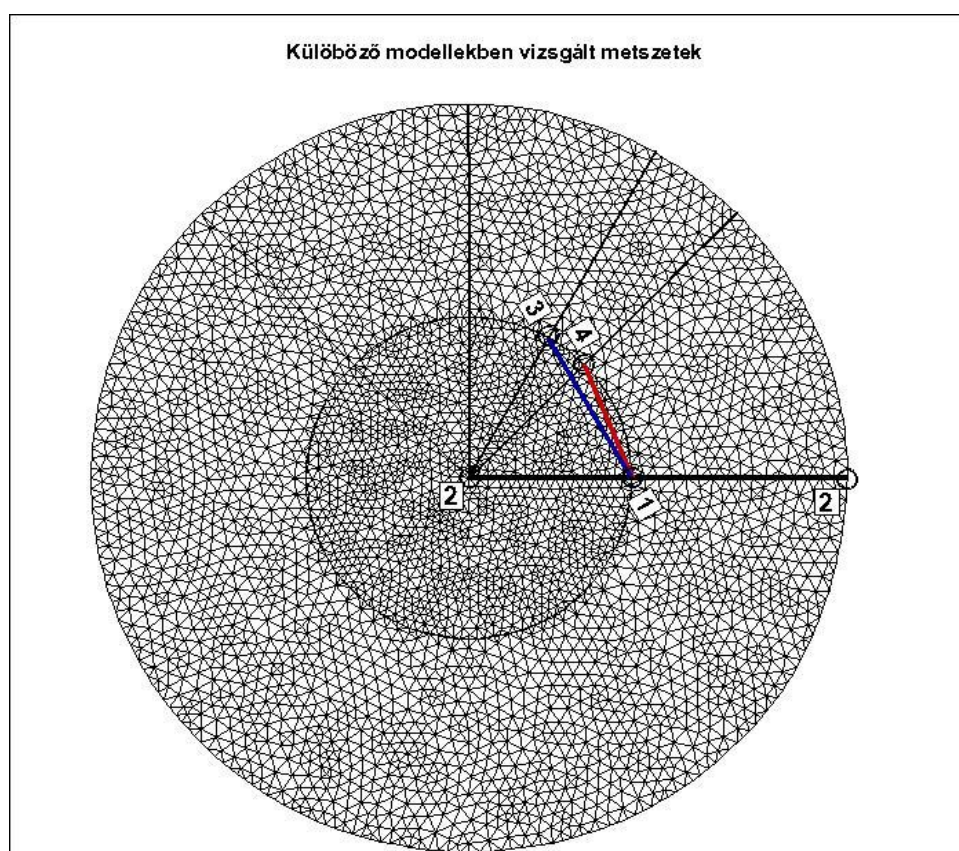
A következőkben a Feflow (végeselemes-módszert használó) szivárgáshidraulikai modellező szoftverrel kapott eredményeket (Szabó G., 2012) ismertetem, melyek szintén azt a feltevésünket támasztották alá, miszerint a modell szűkítésének nincs hatása a szivárgáshidraulikai jelenségre.



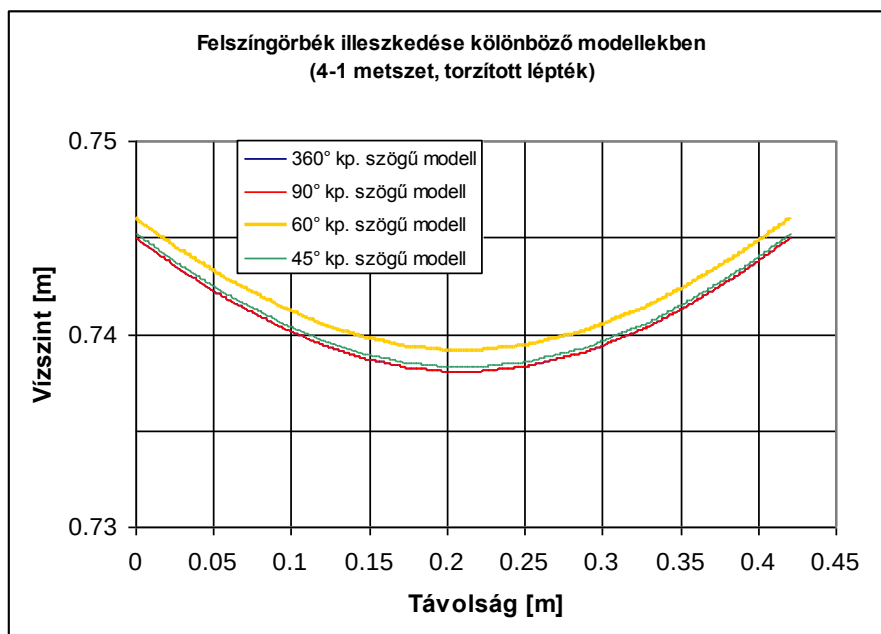
8.2. ábra Feflow számítási háló, a háló egységeit (ami tulajdonképpen a különböző központi szögekhez tartozó modelltér) színessel jelölt poligonok jelentik, a pontok pedig az észlelőkutak helyét (Szabó G., 2012)



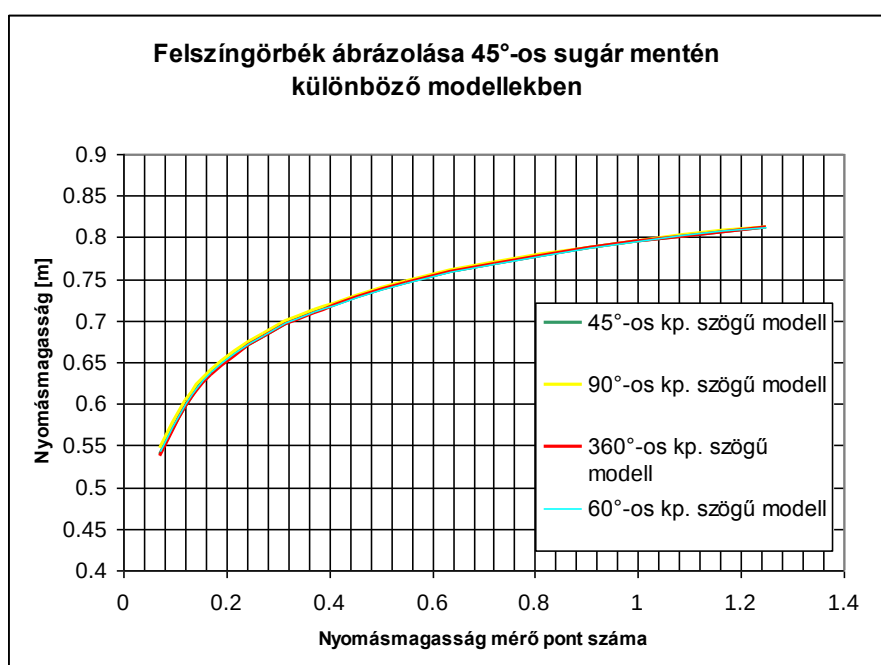
8.3. diagram 22.5°-os sugár mentén futó észlelő kutak vízszintjeinek összehasonlítása a vizsgált modellváltozatokban (Szabó G., 2012)



8.3. ábra Vizsgált metszetek elhelyezkedése (Szabó G., 2012)



8.4. diagram Felszíngörbe metszeteinek összehasonlítása (8.3. ábra, 4-1 irányban) (Szabó G., 2012)



8.5. diagram 2-2 Metszet alakulása különböző modellekben, gyakorlatilag teljes illeszkedés figyelhető meg (Szabó G., 2012)

A fenti vizsgálat eredményei tehát azt támasztották alá, hogy a numerikus modellek szerint a középponti szög szűkítésének, a modelltérbe bekerül falaknak nincs hatása a számítás végeredményére, amíg hengerszimmetrikus áramlásról van szó a fenti példákban megfelelően. A szoftverek számítási mechanizmusa ismeretében el tudtuk fogadni ezt az eredményt. Ezzel együtt nem tartjuk kizártnak, hogy az oldalfalaknak van módosító hatása az áramképre.

9 Összefoglalás

A tavaly elvégzett méréssorozatok után (Barta, Veczán 2011), igazoltuk, hogy a modell alkalmas szivárgási tényező meghatározására, ugyanis a kapott értékek megfelelnek a szakirodalmi adatoknak.

Ezzel a következtetéssel a hátunk mögött, folytattuk kutatásunkat és összetettebb jelenségek vizsgálatába kezdtünk (rétegzett anyagmodell, anyakút szűrőzött részének változtatása).

Kezdetben hatrétegű modellen végeztük a méréseket, majd ezeket háromrétegű mintán is megismételtük. A szakirodalmak elméletei és a gyakorlati tapasztalatok alapján, a réteghatárokon a leszívási görbe törését vártuk, azonban ez nem következett be. Ennek feltételezett okaira kerestünk magyarázatokat és végeztünk el további (pl. talajmechanikai) vizsgálatokat.

Az anyakút szűrőzésének a helyét változtatva és a méréssorozat eredményeket összehasonlítva egy a szivattyúzás módja miatti hibát vettünk észre.

A kismintamoddellel párhuzamosan numerikus modellt is felállítottunk, melynek eredményei kezdetben nem egyeztek a fizikai modellel kapott eredményekkel. A numerikus modell további kalibrálása és többszöri futtatása sem vezetett újabb és pontosabb eredményre. Ekkor – feltételezésünket, miszerint a kismintamodell eredményeink jók, de a numerikus modell nem a fizikai modellben lejátszódó folyamatokat szimulálja – megfordítottuk és elkezdtük a numerikus modell alapján ellenőrizni a kismintát. Ekkor került beépítésre az ellenőrző henger, amely rögtön az első méréseinknél igazolta a numerikus modell eredményeit, miszerint a piezocsöveken leolvasott értékek nem felelnek meg a fölöttük lévő vízoszlop magasságoknak, tehát piezoértékek még közelítően sem adják meg a vízfelszínt.

Ezeknél a kísérleteknél a talajvízáramlás már nem felel meg a Dupuit féle feltételezéseknek, nem elhanyagolható függőleges irányú sebességkomponensek is fellépnek, az áramlás többé nem hengerszimmetrikus, hanem háromdimenziós.

A szűrőzött kút nem tekinthető vonalmenti nyelőnek, hanem a geometriai arányok függvényében (teljes vastagság – szűrőhossz) átmenetet képez a vonalmenti és a pontszerű nyelő között.

Így tehát az eddigi kiértékelési módszerek nem használhatóak. Egyedüli megoldásnak az tűnik, hogy a piezoértékek és vízszint között valamilyen állandó, minden esetben használható összefüggést keresünk.

10 Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok tanszéki konzulensemnek, **Dr. Hajnal Gézának**, aki végigkísérte munkámat és segítségemre volt a TDK munka végleges kialakításában.

Köszönet továbbá **Dr. Vasvári Vilmosnak** konzultációkért, modellező szoftverek kezelésében nyújtott segítségéért.

Továbbá szeretném megköszönni **Sándor Baláznak és Torma Péternek** hogy konzultációs lehetőséget biztosítottak és ötleteket adtak a kutatás jövőbeni irányához.

11 Felhasznált irodalom

1. **Kovács Gy. (1972):** *A szivárgás hidraulikája*, Akadémiai Kiadó, 535 old.
2. **Kovács B. (2004):** *Hidrodinamikai és transzportmodellezés I.* (Processing Modflow környezetben), Szegedi Tudományegyetem – Miskolci Egyetem – GÁMA – GEO, Szeged-Miskolc, 189 old.
3. **Németh Endre (1963):** *Hidromechanika*, Tankönyvkiadó Budapest, 883. old
4. **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.
5. **Kinzelbach, (1986):** *Groundwater Modeling, An Introduction with Sample Programs in Basis*, Elsevier, New York, 331 p.
6. **Istok J. (1989):** *Groundwater modeling by the finite element method.* Water resources Monograph, 13, Washington, DC, American Geophysical Union, 495 p.
7. **Bear J. (1979):** *Hydraulics of Groundwater.* McGraw-Hill International Book Co., New York, 567 p.
8. **Ubell K. (1958):** *Az elméleti kúthidraulika módszereinek gyakorlati alkalmazása*, Vízügyi Közlemények, 1958. (3), 306-333 old.
9. **Ivicsics L. (1968):** *Hidromechanikai Modellkísérletek*, Műszaki könyvkiadó, Budapest
10. **Haszpra O. (1994):** *Physical modellig*, Technical University of Budapest
11. **Barta E., Veczán É. TDK munka (2011):** *Szivárgási tényező kísérleti meghatározása különféle talajoknál.* TDK dolgozat, BME Vízépítőmérnöki Szekció, 60 old.
12. **Barta E., Hajnal G., Veczán É., (2012a):** *Szivárgási tényező meghatározása kisminta kísérlettel* Mérnökgeológia-Közetmechanika Kiskönyvtár 12, Hantken Kiadó, Bp, 394 old.
13. **Barta E., Hajnal G., Vasvári V., Veczán É., (2012b):** *Bestimmung des Durchlassigkeitsbeiwertes mithilfe von Modellversuchen.* In: G. Zenz (Hrsg.): Wasserbau Symposium 2012, Tagungsband, Graz University of Technology, S. 307-314.
14. **Szabó Gábor (2012):** *Szivárgási tényező meghatározása numerikus modellezéssel*, Msc diplomamunka, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék.
15. **Duffield G. M. (2002):** *Aqtesolv for Windows, User's Guide.* Hydrosolv Inc., Reston, 185 p
16. **Waterloo Hydrogeologic Inc., (1999):** *User's Manual for Visual MODFLOW.* Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Canada, 280 p.
17. **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*, Vol. 16, pp. 519-524
18. **Kinzelbach, W., R. Rausch (1995):** *Grundwassermodellierung - Eine Einführung mit Beispielen.* Borntraeger Verlag Stuttgart, S. 283.

19. Csáki Noémi TDK munka (2011): *Szivárgási tényező meghatározása laboratóriumi vizsgálatokkal és numerikus modellezéssel.* TDK dolgozat, BME Vízépítőmérnöki szekció, 47 old.

11.1 Alkalmazott szoftverek

1. AQTESOLV for Windows Pro 3.5
2. Visual Modflow Version: 2.8.2.22 (2000)
3. Autocad 2010
4. Ms Excel