Szent István Egyetem

Műtárggyal befolyásolt talajvízáramlás hidrodinamikai modellezése

Doktori (Ph.D.) értekezés

Keszeyné Say Emma

Budapest
2011

A doktori iskola

megnevezése: **Műszaki Tudományi Doktori Iskola**

tudományága: **Agrárműszaki Tudomány**

vezetője: **Dr. Farkas István**
Egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar
Gödöllő

témavezető: **Dr. Telekes Gábor PhD**
Főiskolai tanár
Szent István Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Budapest

……...
Az iskolavezető jóváhagyása

……..……
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK 5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK 7
1.1. Probléma felvetés 8
1.2. A téma időszerűsége, jelentősége 8
1.2.1. Mezőgazdasági területet érintő beavatkozások 8
1.2.1.1. Autópálya, vasút építés 8
1.2.1.2. Közműhálózatok 9
1.2.1.3. Zöldmezős beruházások 9
1.2.2. A nagyvárosok területét érintő beavatkozások 9
1.2.2.1. Metróépítés 9
1.2.2.2. Mélygarázs program 10
1.3. Célkitűzések 11
1.3.1. Általános célkitűzések 11
1.3.2. Szűkebb kutatási célkitűzések 12
1.3.3. Elméleti kérdések 12
1.4. Megoldandó feladatok 13
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS 15
2.1. Kísérleti és elméleti modellek 15
2.2. Számítógépes (technikai) modellek 19
3. MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK 23
3.1. Kutatási program, modellalkotás 23
3.2. Hidrodinamikai modellezés 25
3.3. Numerikus megoldási módszerek 27
3.3.1. Véges differencia módszer 27
3.3.2. Végeselem módszer 28
3.3.3. Alkalmazott számítógépi programok 28
3.3.3.1. PMWIN programrendszer jellemzése 28
3.3.3.2. FEFLOW programrendszer jellemzése 30
3.4. Kísérleti módszerek 31
3.4.1. Pest területének vizsgálata 31
3.4.2. A valós probléma 31
3.4.2.1. A vizsgált terület jellemzése 32
3.4.2.2. Talajvízszint észlelő kutak telepítése 34
3.4.2.3. A talajvízszint mérés módszere 36
3.4.2.4. Dunai vízszintek és kiértékelésük 37
3.4.2.5. Talajvízszintek meghatározása 41
3.5. Modellek felépítésének gyakorlati lépései 42
4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK 49
4.1. Természetes állapotban az áramlási terek lehatárolása 49
4.2. Műtárgyak befolyásoló hatása 52
4.2.1. Általános vizsgálat 52

4.2.2. Létesítmény hatásának vizsgálata 53
4.2.2.1. Az áramlási irány változásának hatása..... 58
4.2.2.2. A szabad hézagtérfogat változásának hatása 59
4.2.2.3. A hidraulikus gradiens, szivárgási sebesség változásának hatása..... 60
4.2.2.4. A szivárgási tényező változásának hatása..... 62
4.2.2.5. Az áramló talajvíz vastagság változásának hatása..... 64
4.2.2.6. Az akadály (műtárgy) méret változásának hatása..... 70
4.2.2.7. A k tényező – talajvízvastagság– műtárgyméret változás együttes hatása 73
4.2.2.8. A talajvíz szintjéhez képest a műtárgy magassági helyzetének áramlást befolyásoló hatása 76
4.2.3. Távolhatás 77
4.2.4. A műtárgyak hatásának egymásra halmozódása..... 81
4.2.5 A kutakban mért vízszint adatok kiértékelése..... 85
4.3. Eredmények összegzése 90
4.4. Új tudományos eredmények..... 101
5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK..... 105
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....107
SUMMARY..... 108
7. MELLÉKLETEK 109
8. FÜGGELÉK 119
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS..... 139

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK

Jel	Megnevezés	Mértékegység
v	szivárgási sebesség	m/s
v_k	középsebesség	m/s
v_{kr}	kritikus sebesség	m/s
k	szivárgási tényező, k tényező, vizáteresztőképességi együttható	m/s
k_x, k_y, k_z	szivárgási tényező tenzor	m/s
ρ	folyadék sűrűsége	g/cm^3
S_s	fajlagos tárolási tényező	-
ψ	nyomómagasság	m
Θ	térfogati vízhozam	m^3/s
I	hidraulikus gradiens	-
I_0	küszöb gradiens	-
Q	vízhozam	m^3/s
A	keresztmetszeti terület	m^2
d_h	hatékony szemcseátmérő	mm
ν	kinematikai viszkozitás	m^2/s
e	hézagtényező	-
n	hézagtérfogat	-
n_0	szabad hézagtérfogat	-
R_e	Reynolds-szám	-
R	távolhatás	m
λ	súrlódási tényező	-
β	szemcse alaki tényezője	-

vv	talajvíz vastagság	m
vsz	talajvízszint	mBf
„v”	víztartó réteg vastagság	m
mm	műtárgy, (akadály) mérete	m
t	műtárgyak közti távolság,	m
	idő	s
ái	áramlási irány	-
mfp	megfigyelőpont	-
x	aktuálisan vizsgált paraméter,	-
	független változó	
D	visszaduzzasztás	cm
A	apadás	cm
LKV	legkisebb víz	cm; mBf
LNV	legnagyobb víz	cm; mBf

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. Probléma felvetés

Az utóbbi időben a városok belterületének felértékelődésével, a beépítetlen területek csökkenésével, különös jelentőséget kapnak a modern városépítésben a *földalatti nagyszelvényű létesítmények.* Ahogy egyre magasabb építményeket terveznek, úgy a földalatti tereket is egyre mélyebben alakítják ki.

A sűrűn lakott nagy városokban az ellehetetlenülő parkolási problémák megoldása érdekében, *mélygarázsok* létesülnek, melyek már jellemzően 3-5 szint mélységűek.

A földalatti városiasodás intenzív fejlődésével további nagyméretű *raktárak, tárolók, kereskedelmi központok,* stb. épülnek a terep szintje alá.

A környezetvédelmi szempontok előtérbe kerülésével egyre több közlekedési létesítményt helyeznek a térszín alá (közúti, vasúti alagút, mélyvezetésű gyorsvasút, stb.). Ezzel biztosítható a felszín minél kisebb zavarása, a meglévő építmények biztonságának megőrzése.

A *metróépítés* kapcsán, felszínről épülő nagy mélységű állomások és zárt építési technológiájú alagutak készülnek.

A mélyépítési beruházások növekvő előretörését még segíti a felszín alatti munkák műszaki színvonalának fejlődése, a gépesítés, a kivitelezés tökéletesedése.

Az Európai Uniós elvárások Magyarországot számtalan nagyléptékű *infrastrukturális fejlesztésre* késztetik. Ennek keretében kiemelt fontosságú feladatokká váltak az *autópálya építések*, valamint a vidéki városokban a *közműfejlesztések.* Ezen létesítmények nyomvonala főleg mezőgazdasági területeken, illetve azok határán halad.

Az ipari vállalkozások előretörésével egyre több *zöldmezős beruházás* készül a kapcsolódó infrastruktúrával, az addig érintetlen mezőgazdasági környezetben.

Jelenleg és a közeli jövőben is Magyarországon tehát, számos olyan műszaki nagyberuházás valósul meg, mely a térszín alatt áramlási akadályt jelent és így, a felszín alatti vizek szivárgáshidraulikai folyamataira befolyással bír, azokat esetleg nagymértékben megváltoztatja.

Belátható, hogy a talajvíz szintjének, áramlási irányának a megváltozása, jelentős kihatással lehet a mezőgazdasági kultúrák termőképességének alakulására, az építmények stabilitására, használhatóságára.

A munkáim kapcsán, valamint a szakirodalmi kutatásaim során kiderült, hogy e témakörben még számos feltáratlan kérdés, probléma vár megoldásra.

Ezért választottam disszertációm tárgyának a fentiekben vázolt jelenség vizsgálatának hidrodinamikai modellezését és az ebből levonható – a gyakorlat, a műszaki - agrárműszaki tervezés számára használható – következtetések kidolgozását.

Az adott téma egyrészről feltételezi a geotechnikai, a hidrogeológiai, a szivárgáshidraulikai, a matematikai tudományterületek ismeretét, másrészről magas szintű számítógépes technikai tudást követel meg, tehát megoldása egy multidiszciplináris szemléletet igényel.

1.2. A téma időszerűsége, jelentősége

Az alábbiakban a talajvizek áramlását jelentős mértékben megváltoztató, kiemelten fontos tényezők bemutatásával támasztom alá a téma ***több oldalról is aktuális*** voltát.

1.2.1. Mezőgazdasági területet érintő beavatkozások

1.2.1.1. Autópálya, vasút építés

Az elmúlt évtizedben az infrastruktúra fejlesztés egyik kiemelt fontosságú feladata az autópálya építési program.
Az autópályák, vasutak nyomvonala zömében művelésből kivont mezőgazdasági területeken halad keresztül.

A vonalvezetés kialakításakor keletkező töltések, bevágások, az azokhoz kapcsolódó műtárgyak és árokrendszerek, nagymértékben hatással vannak a környezet áramlási folyamataira.

A pályaszerkezetből átadódó többletterhelések a nyomvonal alatti talajban méteres nagyságrendű feltömörödő zónát hoznak létre, amelynek következtében átalakulnak annak szivárgási paraméterei.

Ha az autópálya, vasút nyomvonalában a rossz teherbírású talajok miatt (új M6-os és M7-es autópályák egyes szakaszai), talajszilárdítási módszerekkel – talajcsere, injektálás, meszezés, geocellák beépítése, stb. –szükséges a megfelelő teherbírást biztosítani, akkor e technológiák által akár több méter vastagságban megváltozik az eredeti talajrétegződés és ezzel a szivárgás is.

Az így kialakult áramlás elől elzárt, illetve az áramlást akadályozó terek mögött megfelelő műszaki védelem hiányában, a talajvíz visszaduzzad és szintje elérheti a mezőgazdasági kultúra gyökérzónáját. Ez hatással lehet a terület termőképességére.

1.2.1.2. Közműhálózatok

Az Európai Uniós követelmények miatt a vidéki városokban kiemelt jelentőséggel bírnak a közműfejlesztések (vízellátó és csatornahálózatok kiépítése).

Az ország energia ellátásának kibővítése érdekében, várhatóan a közeli jövőben nagy átmérőjű földgázvezeték hálózat épül ki.

E jelentős hosszúságú vonalas, nagyszelvényű vezetékek, valamint az egyéb kapcsolódó pontszerű beépítések már önmagukban is akadályt jelentenek a talajvíz áramlásában. Munkaárkaiknak, illetve munkagödreiknek földvisszatöltése pedig, több méter vastagságban az eredeti talajrétegződéstől eltérő talajokból készül, a környezeténél tömörebb állapotba betömörítve.

Így e létesítmények helyén jelentősen megváltoznak az addigi talaj és ezzel együtt a szivárgási viszonyok.

1.2.1.3. Zöldmezős beruházások

A zöldmezős beruházások együttesen hordozzák magukban, a fent felvetet problémákat.

A beruházás olyan ipari vállalkozást jelent, amely korábban mezőgazdasági művelés alatt álló területeken jön létre. A mezőgazdasági környezetben, a szigetet alkotó, művelés alól kivont részeken, a felszín alatti létesítmények, valamint a hozzájuk kapcsolódó infrastruktúra, (utak, közművek, stb.), az előző pontokban említett hatások miatt, nagymértékben megzavarják a mezőgazdasági környezet vízháztartását, szivárgási viszonyait. Ezzel hatást gyakorolva annak termőképességére.

1.2.2. A nagyvárosok területét érintő beavatkozások

1.2.2.1. Metróépítés

A fővárosban épül a 4-es metró első szakasza. Tervezés alatt áll a második szakasz, valamint már dolgoznak az 5-ös metró vonalvezetésén.

A tervezett földalatti alagút hálózat eltérő szivárgási tulajdonságokkal bíró geológiai rétegeken halad keresztül, harántólja azokat. A több tíz km hosszú, nagy szelvényű, gyakorlatilag vízzáró vonalas alagutak, valamint a hozzájuk kapcsolódó pontszerű, de nagy kiterjedésű állomási szakaszok, szellőzőaknák, mozgólépcső-lejtaknák, stb. – „falat” képezve – jelentős mértékben megváltoztatják az érintett területek addigi áramlási viszonyait. A műtárgyak környezetében visszaduzzadás, illetve apadás jön létre.

1.2.2.2. Mélygarázs program

Különösen Budapest belvárosában az ellehetetlenülő parkolási problémák megoldása érdekében Kormány Rendelet rögzíti az építmények rendeltetésszerű használatához kapcsolódó személygépkocsik számát, melyek elhelyezését telken belül kell megoldani.

Ennek megfelelően – leginkább a sűrűn lakott belvárosban – nagy kitörésű szelvénnyel készülő többszintes mélygarázsok építése vált, illetve válik szükségessé, mind az új, mind pedig a meglévő és üzemelő létesítmények alá.

A közel vízzáró betonból készülő résfalas, vagy cölöpfalas oldalhatárolású földalatti létesítmények jelentős akadályt képeznek a talajvíz áramlásának útjában. E jelenség még inkább fokozódhat az által, hogy kihasználva speciális geológiai adottságokat, az oldalhatárolások bekötnek a vízzáró rétegekbe. Így nagy felületen teljesen lezáródik a szivárgás útja.

Mind Budapesten, mind a vidéki városokban az épülő földalatti létesítmények akadályt képeznek az áramló víz útjába és ezzel visszaduzzasztást, illetve apadást eredményeznek.

Ennek következtében, egyrészt a megemelkedő talajvíz elöntheti a létesítmények környezetében lévő épületek pincéit vagy egyéb földalatti műtárgyakat. Különös gondot okoz ez azoknál az épületeknél, amelyeket víznyomásra nem szigetelték, vagy életkoruk miatt egyáltalán nem szigeteltek, illetve szigetelésük már tönkrement. Másrészről a talaj állékonysága a víz hatására jelentősen romolhat, amely probléma az épületek süllyedéséhez vezethet.

A talajvízszint apadásának hatására a talaj önsúlyfeszültsége a víz felhajtóerejének megszűnése miatt jelentősen megnövekedhet, mely többletsüllyedéseket indukálhat és a felszínen károsodásokat eredményezhet.

Az általam teljesség igénye nélkül kiemelt jelentősebb esetekből kitűnik, hogy Magyarországon a közeljövőben számos olyan műszaki létesítménnyel kell számolni, mely a térszín alatt akadályt képezve nagymértékben befolyással bír a talajvizek, illetve rétegvizek szivárgási viszonyaira.

A fő kérdés ezzel kapcsolatban az, hogy hol van a felszín alatti beavatkozásoknak az a határa, mely már jelentős változást eredményez a környezet talajvízszintjének alakulásában. *Mezőgazdasági környezetben* a vízszintváltozások hogyan hatnak a növény kultúrák termőképességére? A *beépített területeken* pedig, az épületekre ható víz- és földnyomás változások vezetnek-e épületsüllyedésekhez? Ezzel összefüggésben milyen műszaki intézkedések válnak szükségessé a fentiek elkerülése érdekében?

1.3. Célkitűzések

Az eddigi szakmai munkáim során kiderült, hogy a jelenlegi mérnöki gyakorlatban az áramló talajvíz útjába helyezett létesítmények, akadályok visszaduzzasztó, apasztó hatásának vizsgálatára – kevés kivételtől eltekintve – nincs megbízható hidrodinamikai modell kidolgozva. A számítások általában közelítő módszerekkel, jelentős elméleti egyszerűsítésekkel történnek.

E téren viszonylag kevés eredmény, illetve tapasztalat áll rendelkezésre. A lejátszódó folyamatok kiértékelése, következtetések levonása nem elterjedt. A gyakorlati tervezés számára használható elméletek fölállítása még nem történt meg.

1.3.1. Általános célkitűzések

Kutatási céljaim a következők:

Speciálisan magyarországi földtani és vízföldtani viszonyok között épülő nagyléptékű mérnöki létesítmények felszín alatti vízmozgásokra gyakorolt hatásának vizsgálata.

- Az egyedi adottságokat és specifikumokat leginkább figyelembevevő, a valóságot legjobban közelítő *hidrodinamikai modell felállítása*.(M. Csizmadia 2003)
- Valós mérések végzése, és az eredmények segítségével a létrehozott modell érvényességének igazolása.
- A téma kapcsán – a felszín alatt lejátszódó szivárgáshidraulikai folyamatok követése – konkrét *elméleti kérdések vizsgálata és azok megválaszolása,* a problémát legjobban szimuláló programrendszer segítségével.

A kapott vizsgálati eredmények segítségével – reményeim szerint – a gyakorlati műszaki – agrárműszaki tervezések során lehetőség nyílik:

- a felszín alatti akadályok várható hatásának feltárására,
- a szivárgáshidraulikai folyamatok előrejelzésére,
- az esetleg keletkező károk megakadályozására, illetve mértékük csökkentésére,
- ezek tudatában a döntéselőkészítéseknél az optimális műszaki és gazdasági megoldás kialakítására.

1.3.2. Szűkebb kutatási célkitűzések

A hidrodinamikai modellek megalkotásakor a mélyépítési létesítmények által érintett földtani, vízföldtani környezet bonyolultsági és feltártsági szintje alapvetően meghatározza az alapadat rendszert és így a modell jóságát (rubish in - rubish out). Ezért kutatásom során e kérdésre nagy hangsúlyt kívánok fektetni.

A modellen belüli geotechnikai modell elem sajátos alulhatározottsága több problémát vet fel, melyeket paraméterérzékenység vizsgálatok és optimumkeresés által szándékozom feloldani, illetve megválaszolni.

A paraméter hatáselemzéssel és az optimum keresés által lehetővé válik a mértékadó modell-adatrendszer kialakítása és a feladat szempontjából „jó" modell felállítása (M. Csizmadia 2003).

E tekintetben tehát kutatásom során, az alábbi kérdésekre keresek választ:

- A földtani képződmény geometriáját illetően – kiterjedés és mélység tekintetében – mekkora területrészt szükséges vizsgálat alá vonni?
- Az eltérő geológiai képződmények anyagi tulajdonságai közül melyek fogadhatók el homogénnek. Milyen mértékű összevonásuk vezet a legjobb eredményre?
- A feltárt kőzet, illetve talajrétegződés milyen szintű egyszerűsítése engedhető meg?
- Mely, kiemelten fontos paraméterek megadása és milyen pontossággal szükséges ahhoz, hogy a legmegbízhatóbb számítási eredményeket lehessen elérni?
- Az érintett vízföldtani környezetben a felszíni és felszín alatti vizek adatsorainak időbeni változását milyen mértékig célszerű figyelembe venni?
- A kutatási eredmények milyen mértékig terjeszthetők ki?

1.3.3. Elméleti kérdések

A doktori témám kapcsán vizsgálni kívánom még és választ szándékozok adni az alábbi elméleti kérdésekre.

- Milyen összefüggés adható meg a szivárgás szempontjából, a talajt jellemző különböző tulajdonságok megváltozása és a visszaduzzasztás, apadás értékei között?
- Az akadályok áramlást befolyásoló hatását hogyan módosítja a hidraulikus gradiens változása?
- Milyen összefüggés állapítható meg adott áramlási térbe helyezett létesítménynek az áramlás irányával bezárt szöge és a visszaduzzasztás,

apadás mértéke között? Lehatárolható-e, ha igen, hol van az a szög, illetve szögtartomány, mely esetén a talajvízszint változás már károsan hat a környezetre, azaz a visszaduzzasztás mértéke meghaladja az addigi mértékadó talajvízszintet, illetve az apadás a minimális vízszintet?

- A talajvíz vastagság változása milyen hatással van a visszaduzzasztásra, apadásra?
- A felszín alatti műtárgyak hatásában, milyen módosulás jön létre a két szélsőértékű talajvízszint esetén (LKV, LNV)?
- Adott földtani és vízföldtani környezetben, milyen kapcsolat áll fenn az épülő műszaki létesítmény geometriája és a talajvíz visszaduzzasztásának, apadásának mértéke között? Hol van az a méret határ, mely már olyan nagyságrendű vízszintnövekedést illetve süllyedést eredményez, mely a talajvíz ingadozási zónáján kívül kerül és így károsítja a környezetet?
- Két, vagy több közeli létesítmény esetén, milyen összefüggés áll fenn azok távolsága és a vízszintek, nyomásszintek megváltozása között? Okoz–e, és milyen mértékű egymásra halmozódást a talajvízszint növekedésében a műszaki létesítmények közelsége?
- Az egymásra halmozódás okozhat-e az áramlási csatornában olyan mértékű sebesség növekedést, mely már a talaj szerkezetének megbomlásához vezet?
- Az egymás melletti felszín alatti pontszerű létesítmények között, mekkora az a távolság, mely esetén már szivárgás szempontjából vonalas létesítményről beszélünk?

1.4. Megoldandó feladatok

- A talajvízáramlás útjába helyezett létesítmények (akadályok) *visszaduzzasztó, apasztó hatásának vizsgálata, különböző földtani-, vízföldtani adottságok és műtárgy jellemzők függvényében*.
- *Alap-adatrendszer felépítése* (adatgyűjtés, kutatás).
- Az egyedi adottságokat és specifikumokat leginkább figyelembevevő, a valóságot legjobban közelítő *modell felállítása.*
- A problémát legjobban szimuláló, mai nemzetközi gyakorlatban e tudományterületre alkalmazott *programrendszer kiválasztása.*
- *Paraméterérzékenység vizsgálat* végzése.
- *Végső következtetések levonása* a gyakorlat számára, speciálisan magyarországi földtani és vízföldtani viszonyok közötti konkrét mérnöki feladatokhoz.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A doktori témámhoz kapcsolódó szakirodalmakat, műszaki szakértéseket, vonatkozó terveket áttekintettem, amelyek alapján az eredményeket az alábbiak szerint csoportosítottam:

2.1. Kísérleti és elméleti modellek

A porózus közegben gravitációsan szivárgó víz kutatása több mint 300 évre nyúlik vissza. Eleinte a kutatók a sebesség okozta ellenállás általános esetével foglalkoztak. Az első ilyen vizsgálatot 1687-ben NEWTON végezte, aki az ellenállási erő (E) képletét így állította föl:

$$E=bv^2+C \tag{2.1.}$$

ahol v a vízmozgás sebessége, b és C állandók.

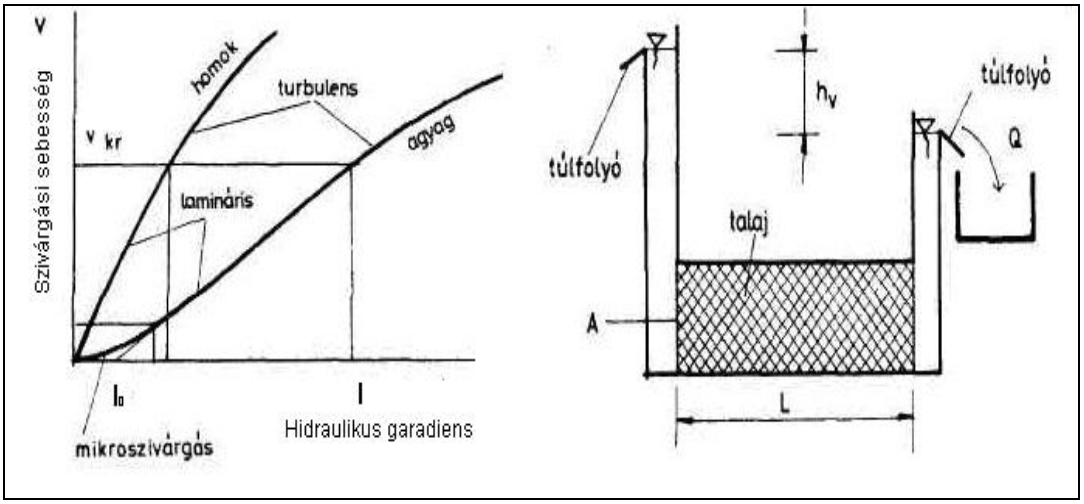
Majd további fontos elméleti összefüggések születtek (Bernoulli, Coulomb, Navier, Hagen, Poiseuille, Stokes,).

1856-ban DARCY elsőként ***kísérleti úton*** igazolta a szivárgás törvényszerűségeit és az eredmények alapján írta le a szivárgás alap összefüggését:

$$v=\frac{Q}{A}=kI=k\frac{dh}{dl} \tag{2.2.}$$

ahol Q az áramlási irányra merőleges A teljes keresztmetszeten átszivárgó vízhozam; k a szivárgási tényező; I a hidraulikus gradiens; dh a dl hosszon bekövetkező vízszint esés.

A sebesség nem valós, hanem fiktív, hiszen a víz csak a hézagokban áramlik, nem a teljes keresztmetszeten.



2.1. ábra Darcy szivárgási kísérlete (Szepesházi 2008)

Darcy a *v* és *I* kapcsolatáról megállapította, (2.1. ábra) hogy:

- finom szemcsés talajokban van egy mikroszivárgási tartomány, melyben a hidraulikus gradiens növekedésével a sebesség hatványfüggvény szerint nő.

$$v=k\,I^n \qquad (2.3.)$$

- a gyakorlatban leginkább előforduló gradiens, illetve sebesség tartományban a kapcsolat lineáris, ami a lamináris mozgásra jellemző.

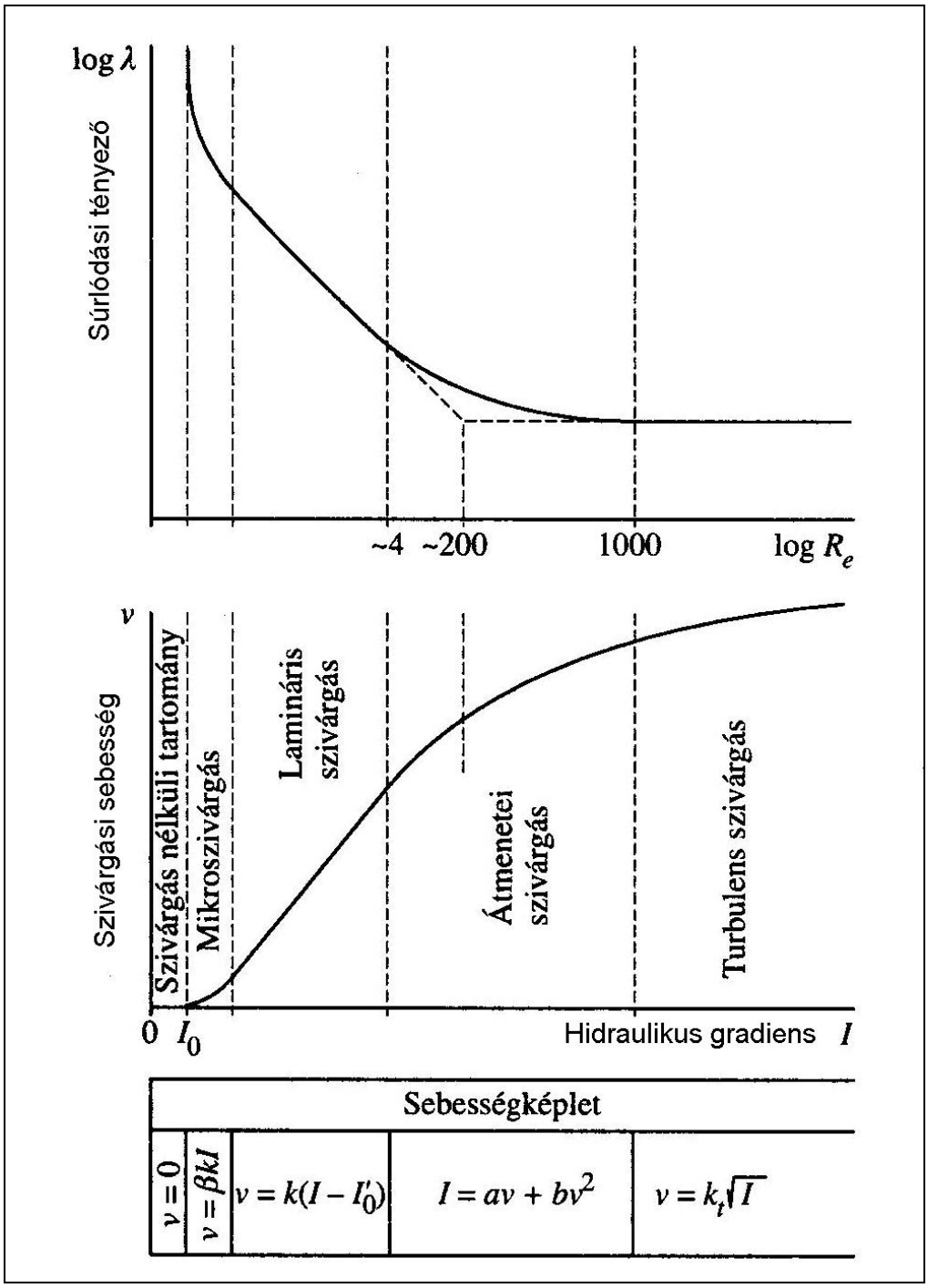
$$v=k\,(I - I_0) \qquad (2.4.)$$

  ahol I_0 a küszöb gradiens
- egy bizonyos kritikus sebességnél v_{kr}, illetve határ gradiensnél I_h az áramlás turbulenssé válik.

A Darcy-törvény azóta is alapját képezi a porózus közegben történő vízmozgást leíró számításoknak, fizikai és matematikai modelleknek.

A későbbi tudományos kutatások finomították, meghatározták érvényességi körét, alkalmazhatóságának feltételét. E kutatások eredményei felhívják a figyelmet arra, hogy a vizsgálatok során több szivárgási tartományt kell elkülöníteni (2.2. ábra). A tartományok legáltalánosabban a finom szemű kötött talajoknál jelennek meg.

Az egyes szivárgási tartományok kijelölését kísérleti eredmények alapján a modelltörvények felhasználásával szokás megtenni, azonban ma még csak igen kevés ilyen vizsgálatunk van (Juhász 2002).



2.2. ábra Szivárgási tartományok (Juhász 2002)

KOŽENY ***elméleti úton*** egy ún. csőkötegmodellt fogalmazott meg, melyben a talaj valamely *A* keresztmetszetének változó hézagrendszerét N db D_0 átmérőjű csővel modellezte. Az L hosszúságú csövek D_0 átmérőjét abból a két feltételből határozta meg, hogy

- a csövek (belső) össztérfogata legyen azonos az A·L talajtér hézagainak térfogatával, hogy ezzel a víz áramlási tere azonos legyen,
- a csövek belső palástfelülete legyen azonos e talajzóna szemcséinek összfelületével, hogy így az áramlást akadályozó súrlódás azonos lehessen.

Koženy e feltevésekből érdekes eredményekre jutott a talaj szivárgási tényezőjével kapcsolatban:

$$k = C_3 \frac{g}{\nu} \frac{e^3}{1+e} d_h^2 \qquad (2.5.)$$

amely összefüggésben a C_3 konstans a szemcsealakot és a talaj szemszerkezetet fejezi ki, és legjellemzőbb értéke 10^{-2}-re vehető.

A képlet jelzi, hogy a szivárgási tényező függ:

- nem csak a talajtól, hanem az áramló közegtől is, hiszen a képletben ν a kinematikai viszkozitás, mely hőmérséklet függő is,
- a tömörségtől, ezen keresztül az *e* hézagtényezőtől, és
- döntően a talajfajtától, a d_h hatékony szemcseátmérőtől; ennek lehetséges 4-5 nagyságrendbeli változása (a kavics és az agyag között) magyarázza *k* óriási különbségeit.

A talaj szivárgási tényezőjét laboratóriumban, helyszíni - terepi mérésekkel és közelítő elméleti vagy tapasztalati képletekkel lehet meghatározni.
A laboratóriumi kísérletek pontosságát jelentős mértékben meghatározza a mintavételezés milyensége.
A helyszíni meghatározás előnye, hogy a réteg települési viszonyait, a talaj struktúráját, a pórus tartalmát is figyelembe veszi. Hátránya viszonylag nagy költsége.
A számos elmélet és empirikus összefüggés szolgáltatta számítási eredmények nagy szórást mutatnak, így legfeljebb nagyságrendi becslésre szolgálhatnak.

EULER alkalmazta az 1700-as évek közepén először az anyag- (tömeg-) megmaradás elvét áramló gázokra és folyadékokra, és megadta az áramlás paramétereivel kifejezhető úgynevezett kontinuitási egyenletet.
Valamely cső egy-egy szelvényében az áramlást vizsgálva, három szelvényjellemzőt kell értelmezni:

- *Q* vízhozam, a szelvényben egységnyi idő alatt átáramló vízmennyiség,
- *A* keresztmetszeti terület az áramlásra merőlegesen,
- v_k középsebesség.

A három jellemző között fennálló összefüggés:

$$Q=v_k A \qquad (2.6.)$$

A természetben e jellemzők időben általában változnak, de hosszabb-rövidebb ideig állandóak is maradhatnak, vagy jó közelítéssel annak tekinthetők. Egy állandó vízhozamú áramlási szakaszon tehát a permanens szelvények sorozatára igaz, hogy állandó hozam esetén

$$v_{ki} A_i=constans \qquad (2.7.)$$

mely egyenlet fejezi ki a kontinuitás törvényét.

A szivárgás alapegyenletének, - amely a szivárgást írja le telített vagy telítetlen közegben, permanens vagy nem permanens esetben **– alapja a Darcy-féle alapösszefüggés és a folyadékok tömegmegmaradása (kontinuitása).**

2.2. Számítógépes (technikai) modellek

A témámhoz kapcsolódóan, az áramlások *számítógépes modellezésével* az 1930-as években kezdődtek kutatások, de a kódok még nagyon egyszerűek voltak, csak 2 dimenziós geometriákat tudtak kezelni. Az első 3D-s kutatások megjelenésével kidolgoztak egy metódust, amely a megoldásokhoz egyszerűsített egyenletrendszert alkalmazott, de ez is elég nagy számítási kapacitást foglalt le. Ezt követően kezdődött el a különböző algoritmusok és kódok fejlesztése. Az 1970-es években megjelentek az első kereskedelmi szoftverek, melyeket különböző egyetemeken fejlesztettek ki, elsősorban Amerikában és Angliában. Ma már a világ szinte minden fejlett országában elterjedtek.

Egyre inkább előtérbe kerülnek az áramlástan azon numerikus módszerei, amelyek segítségével, számokkal helyettesíthetők a kiindulási egyenletek állapotváltozói és egy megfelelően választott eljárás [véges differencia módszer (FDM), végeselem módszer (FEM), véges térfogatok módszere (FVM)] segítségével meghatározhatók a keresett áramlástani paraméterek. A numerikus megoldás részét képezik a peremfeltételek és kezdeti értékek. Ezeket kiegészítve igen jó közelítést kaphatunk a valós áramlásra vonatkozóan.

A pontos közelítés feltételei a geometriai diszkretizáció, mely egyértelműen kijelöli az áramlási tér geometriai határait, és amelynek eredményeként egy numerikus hálót kapunk. Ezt követi a differenciálegyenletek folytonosról diszkrét alakra hozása, ez jelenti a megfelelő módszer megválasztását – FDM, FEM, FVM.
Az egyenletek megoldását tranziens folyamatoknál explicit időléptetéses módszerrel célszerű előállítani, míg stacionér problémák esetén inkább az implicit megoldás alkalmazása a célravezető.
A fentiek alapján elmondható, hogy az áramlástan numerikus módszerének fejlődése igen gyors és eredményei számos területen hasznosíthatók.

- A modellalkotás kérdésével, elméletének és gyakorlati alkalmazásának kidolgozásával foglalkozó szakirodalom megalkotása, a közelmúltban kezdett csak a hazai mérnöki gyakorlatban általánosabbá válni. (M. Csizmadia et al. 2003, Kovács B. 2004)

- A hidrodinamikai, valamint transzportmodellezéssel foglalkozó elméleti munkák elsősorban a tradicionális szellemi központokból kerülnek ki, úgymint Miskolci Egyetem, BME, SZIE, Szegedi Tudományegyetem. (Filip et al. 2002, Kovács B. 2003, Kovács B. 2004)

- A transzportmodellezés Magyarországon már több tíz éves múltra tekint vissza, nemcsak elméletileg megalapozott, hanem számtalan konkrét gyakorlati alkalmazására is sor került. (Kovács B. et al. 1995, Szabó 1995)

- A hidrodinamikai modellezésnek – mely disszertációm témája – a hazai gyakorlati alkalmazása csak a közelmúltban kezdett a mérnöki létesítmények építése kapcsán elterjedni (GEOHIDRO 2003-2009).

- Áttekintve az utóbbi időkben modellezés témakörében megrendezett nemzetközi konferenciák előadásait megállapítottam, hogy kevés tanulmány foglalkozik és azok is csak érintőlegesen ***geotechnikai vonatkozású hidrodinamikai modellezéssel*** (Application 1998, Geotechnikal 1998, International 2005).

- A hidrodinamikai modellezési feladatok megoldásához általam használandó Processing MODFLOW for Windows és a Finite Element Simulation Sistem for Subsurface Flow (FEFLOW) programrendszerek nemzetközileg elfogadottak és fejlesztésük folyamatos. Így a számításokhoz rendelkezésemre álló „technikai háttér adott.

- A magyarországi speciális földtani és vízföldtani környezetben épülő nagylétesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának numerikus módszerekkel történő hidrodinamikai modellezése még nem elterjedt.

- Jelenleg is még általános, a jelentős elméleti egyszerűsítésekkel és közelítő számításokkal végzett analitikus megoldások alkalmazása ilyen jellegű feladatokhoz. Kevés szakértő, tervező cég, alkalmazza konkrét geotechnikai tervezési munkákhoz a numerikus hidrodinamikai modellezési eljárásokat.

Összefoglalva elmondható:

- A disszertációm elméletéhez szükséges alaptudományok nemzetközi és hazai szakirodalmi lefedettsége teljes.

- A modellezéshez alkalmazandó véges differencia módszer-FDM, végeselem módszer-FEM, elméletének megfelelő szakirodalmi háttere van.

- A rendelkezésre álló nemzetközileg elfogadott számítógépes programrendszerek (PMWIN, FEFLOW) fejlettek, kiemelve, hogy alkalmazhatósági területük folyamatosan bővül.

- A hidrodinamikai modellezésekből kapható eredményeknek a **geotechnikai műszaki – agrárműszaki gyakorlatba** történő kiterjesztése mind külföldön, mind Magyarországon még gyerekcipőben jár.

- Csak néhány, hidrodinamikai modellezéssel készült terv, illetve számítási tapasztalat szolgál, esettanulmány formájában irodalmi adatként arra nézve, hogy milyen hatással vannak a műszaki beavatkozások a talajvízáramlásra, a talajvíz szintjének alakulására, az esetleges káros folyamatok kialakulására.

- Így a hazai speciális földtani, hidrogeológiai adottságokra vonatkozó modellalkotási eredmények, illetve tapasztalatok kiértékelése, az azokból levonható következtetések és az elméleti alátámasztások még váratnak magukra.

Doktori dolgozatommal e területen lévő hiányt szeretném részben pótolni.

A folyamatban lévő és a közeljövőben megvalósuló, általánossá váló földalatti nagy beruházások teszik tehát szükségessé a hidrodinamikai modellezés konkrét gyakorlati alkalmazásának elterjesztését.

A mérnöki <u>gyakorlat számára</u> olyan műszaki és gazdasági szempontból hasznos numerikus hidrodinamikai modellezési eljárást szándékozom kidolgozni, amely eredményei által

- konkrét tervezési feladatokat tudományosan megalapozottan leegyszerűsíti,
- előzményként szolgálhat más munkafázisok részére,
- segítséget nyújt a döntéselőkészítésekben.

3. MÓDSZEREK ÉS ESZKÖZÖK

Ebben a fejezetben foglalkozom a modellalkotás kérdésével. Megadom a hidrodinamikai modellszámítás alapját képező szivárgás alapegyenletét. Annak számos megoldási módszere közül a numerikus megoldást alkalmazom. Valós problémán keresztül bemutatom a kísérleti módszereket, melyhez feltárom a vizsgált terület földtan, vízföldtani jellemzőit. Részletesen kitérek a modellek felépítésének ismertetésére.

3.1. Kutatási program, modellalkotás

A modellezés által – a természeti törvények felhasználásával – a valóságos környezet, (esetemben a hidrogeológiai rendszerek) működése megismerhető, illetve a róluk alkotott ismeretek bővíthetők (M. Csizmadia 2003).

A vizsgált jelenség és ezen belül a meghatározott cél szempontjából a valósághoz hasonlóan viselkedő modell felépítésénél - Kovács B. (2004) rendszerét alapul véve - a következő általános lépéseket határoztam meg:

- *A feladat megfogalmazása, előkészítés*

  - a feladat meghatározása, az elvégzendő számítási folyamat körvonalazása;
  - a modellezés várható eredményeinek és az elérendő célnak az összevetése;
  - a modell szerkezetének, fokszámának előzetes meghatározása;
  - a modellezendő tér előzetes lehatárolása;
  - a matematikai számítási eljárás, megoldási módszer kiválasztása.

- *A számítási alap-adatrendszer felállítása, a modell paramétereinek megadása*

  - földtani, vízföldtani ismeretek összegyűjtése és rendszerezése;
  - esetleg kutatás révén új ismeretek gyűjtése;
  - a paraméterek és az azokra hatással lévő faktorok kiválasztása (intuitív feladat);
  - kezdeti feltételek és peremfeltételek meghatározása.

- *Első számítási szakasz, matematikai modellalkotás, szimuláció*

  – egyenlet vagy egyenletrendszer felírása;
  – numerikus számítások elvégzése;
  – a rendelkezésre álló adatok értékelése;
  – adathiányok feltárása és pótlása;
  – felmerülő ellentmondások kiszűrése, feloldása;
  – adatrendszer módosítása;
  – a modell megengedhető hibájának meghatározása.

- *A modell „jóságának" ellenőrzése, kalibrálása*

  – eredmények értékelése, a számítási eredményeknek a valós eredményekkel való összevetése, annak megválaszolása, hogy a matematikai modell leírja – e a valóságot és milyen pontossággal teszi azt;
  – amennyiben az ellenőrzés során kiderül, hogy a feltételezett modell nem teljesíti az adott mérnöki probléma kapcsán megkövetelt pontosságot, iterációs feladatot kell megoldani az alap-adatrendszer szisztematikus változásával;
  – a számítási variánsok és azok tapasztalatai alapján modellfejlesztés végzése;
  – paraméterérzékenység vizsgálat.

- *Második számítási szakasz, a modell felhasználása a vizsgálandó műszaki probléma megoldására*

  – a már jól működő modell felhasználása új problémák vizsgálatára;
  – optimumkeresés;
  – előrejelzés.

- *Eredmények végső kiértékelése*

  – eredmények összegezése, grafikus megjelenítése;
  – a számítás korlátjainak, alkalmazhatósági határainak megadása;
  – az egyszerűsítésekből adódó elkerülhetetlen modell hibák és azok eredményre gyakorolt hatásának rögzítése;
  – a hidrodinamikai modell teljes és részletes dokumentálása.

3.2. Hidrodinamikai modellezés

A hidrodinamikai modellezés célja, hogy bonyolult felépítésű rendszerben a felszín alatti víz szivárgási sebességét és irányát kijelölje, a víz nyomásszintjét meghatározza. Fentiek ismeretében lehetővé válik a konkrét helyzetekben lezajló tér- és időbeni változások előrejelzése.
A hidrodinamikai modellezés során a vízmozgás alapegyenletének megoldását keressük permanens és nem permanens állapotban, illetve telített vagy telítetlen közegben. A Laplace- és Richards szivárgás alapegyenleteinek levezetését a felszín alatti szivárgásokkal foglalkozó hidraulika könyvek (Bear-Verrujit 1987, Juhász 2002, Haszpra 2005) részletesen ismertetik.

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

Az eredményként kapott parciális differenciálegyenlet egymástól alig eltérő formában felírható a permanens és nem permanens, telített közegbeli áramlás esetére, de kiterjeszthető a telítetlen közegbeli szivárgásokra is.

A természetben a legtöbb áramlás nem permanens jellegű, mert a mozgást kiváltó energia is változik. A nem permanens vízmozgások matematikai kezelése azonban általában nagyon bonyolult. Ezért legtöbbször úgy járunk el, hogy egy-egy időtartamra permanensnek tekintve vizsgáljuk őket, kiválasztva azokat az időpontokat és peremfeltételeket, melyek a vizsgált probléma szempontjából mértékadók, kritikusak lehetnek. Csak különösen nagy jelentőségű feladatokat oldunk meg nem permanens modellekkel.

Telített közegben a permanens vízmozgást a Laplace egyenlet írja le:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0. \tag{3.1}$$

Megoldása megmutatja egy háromdimenziós áramlási tér bármely részén a h piezometrikus szint nagyságát.

A szivárgás alapegyenlete anizotrop, porózus, telített közeg esetére, permanens állapotot feltételezve:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=0, \tag{3.2}$$

ahol k_x, k_y *és* k_z a szivárgási tényező tenzor főátlójának elemei

Telített közegbeli nem permanens szivárgás alapegyenlete

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)=\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \tag{3.3}$$

ahol, ρ a folyadék sűrűsége, S_S a fajlagos tárolási tényező.

Telítetlen közeg esetén a szivárgás alapegyenletének szokásos formája (Richards egyenlet):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k(\psi)\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k(\psi)\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k(\psi)\frac{\partial h}{\partial z}\right)=\frac{\partial \Theta}{\partial t}. \tag{3.4}$$

ahol ψ a nyomómagasság, Θ a térfogati víztartalom

A szivárgás alapegyenletének megoldási módjai:

A szivárgás alapegyenletének számos analitikus és numerikus megoldási lehetőségei állnak rendelkezésünkre.

Az *analitikus megoldásokat* az egyenlet integrálással történő megoldásával kapjuk meg. Az eredménye matematikailag általában egzakt. Jellemzője, hogy az eredmény egy explicit összefüggéssel meghatározható.

Ismertebb analitikus megoldások:

-Valódi analitikus megoldás

- Dupuit-Thiem megoldás

-Szemi-analitikus megoldások

- Theis-Jacob megoldás
- Hantush-féle megoldás
- Neumann-féle megoldás
- Tóth-féle megoldás, stb.

A *numerikus megoldások* ezzel szemben matematikai szempontból közelítő megoldások. Lehetővé teszik, hogy a környezet jellemzőinek tér és időbeli változásait figyelembe vegyük a megoldásoknál. Általános alakú létesítmények mentén meghatározhatók a nyomásszintek, illetve a szivárgás sebességvektorának komponensei.

Ismertebb numerikus megoldások:

-Szemi-numerikus megoldások

- Analitikus elemek módszere
- Halász-Szőke-féle rétegzett tároló modell, stb.

-Valódi numerikus megoldások

- Véges differencia-módszer
- Végeselem módszer
- Véges térfogatok módszere
- Peremelem-módszer

Belátható, hogy sok megoldási lehetőség van. Dolgozatomban, a hidrodinamikai modellezés során a szivárgás alapegyenletét numerikus úton, végeselem módszerrel, illetve ellenőrzésként véges differencia módszerrel oldom meg. Ez biztosít lehetőséget nagymennyiségű számítás elvégzésére, amelyből általános következtetések levonhatók. Továbbá a probléma vizsgálatára magas szintű számítógépes programrendszerek állnak rendelkezésre.

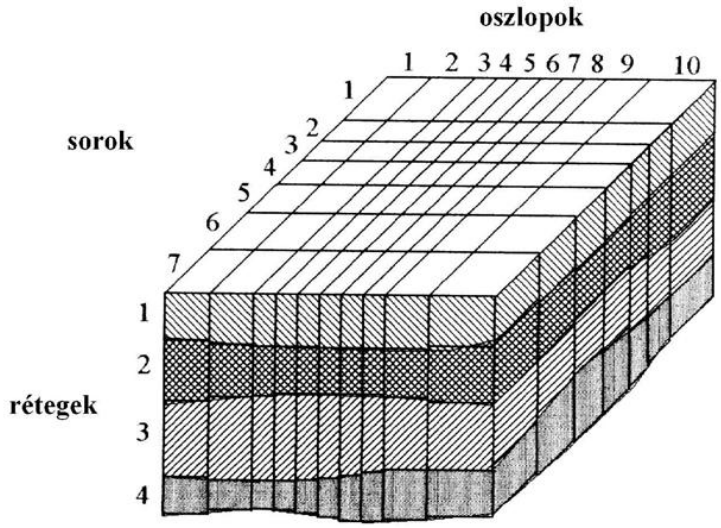
3.3. Numerikus megoldási módszerek

A numerikus megoldások úgy közelítik a lejátszódó valós folyamatot, hogy mind időben, mind térben szakaszolják azokat. Az egyes szakaszokon belül a számításhoz szükséges paramétereket állandónak vesszük. Időbeni szakaszolásnál az időben változó tényezőket, térben az egyes jellemzőket tekintjük állandónak A megoldás ezzel válik lehetővé.
A szakaszolásnak van egy optimuma. A tér és időbeli szakaszolás növelésével egyes numerikus hibák is nőnek és a számítás igénye is exponenciálisan növekszik. (Csorba 1998, Kovács B. 2004)

3.3.1. Véges differencia módszer

A módszer alapgondolata a szivárgás parciális differenciálegyenletének, differencia egyenletté történő alakítása.

A modellezett teret egymással hézagmentesen érintkező téglatest alakú elemekre bontjuk, egyenletes vagy változó osztású rácsháló segítségével. (3.1. ábra)
Meghatározzuk az egyes hasábelemek és az azokkal közvetlenül érintkező elemek közötti vízhozamokat a Darcy-törvény és a kontinuitási tétel felhasználásával.
Összegezzük minden egyes elemre a vízmérleg-elemeit.
Felállítjuk a modellezett tér vízforgalmát az adott időlépcsőben leíró lineáris egyenletrendszert.
Az egyes hasábelemekre felírt vízmérleg alapján meghatározzuk az elemekben bekövetkező vízszint (nyílt tükrű rendszer), vagy nyomásszint (zárt tükrű rendszer) változásokat.

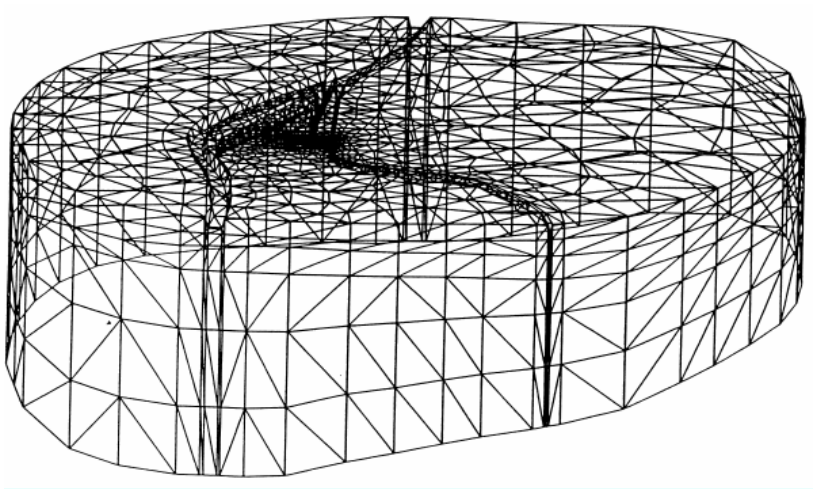


3.1. ábra Négy rétegből álló rendszer véges differencia elemekre bontása (Chiang et al. 2001)

3.3.2. Végeselem módszer

A módszer alapgondolata a lokális közelítés elve, ami azt jelenti, hogy a szivárgási sebességet, a nyomásszintet előre felvett paramétereket tartalmazó függvényekkel közelítjük.
A szivárgáshidraulikai egyenlet végeselem módszerrel történő megoldása során a modellezett teret felosztjuk meghatározott számú csomópont és az azokat összekötő vonalak által határolt elemekre (3.2. ábra). Így az elemkiosztást a rendelkezésre álló információkhoz rugalmasan hozzá lehet igazítani (Kovács B 2004).
Az elemek alakja tetszőleges, de matematikailag leírható. Egy rendszeren belül eltérő dimenziószámú elemek lehetnek.
A lokális (elemi) közelítő függvényeket a szomszédos elemek határai mentén illesztjük. Fokozatosan a teljes vizsgálandó tartományra előállítjuk az approximációs mezőt az incidencia mátrix segítségével.

Ebben az esetben nem az elemek, hanem a csomópontok vízmérlegét írjuk fel és a csomóponti nyomás szinteket számítjuk.



3.2. ábra Egy modellezésnél alkalmazott végeselem háló (Vogt 1993)

3.3.3. Alkalmazott számítógépi programok

Vizsgálatomhoz a végeselem módszert alkalmazó FEFLOW (Finite Element Simulation System for Subsurface Flow) programrendszert használtam fel, illetve a véges differencia módszeren alapuló PMWIN (Processing MODFLOW for Windows) programrendszert.

3.3.3.1. PMWIN programrendszer jellemzése

A Processing MODFLOW olyan szoftver, mely egy teljes háromdimenziós közegben talajvíz áramlási és transzport-modellezési feladatok megoldására alkalmas. A program *véges differencia módszert* alkalmazó modell, mely számos modellezési eszközt tartalmaz. Professzionális grafikus megjelenítéssel rendelkezik, ezáltal kényelmes modellezési környezetet biztosít. Az áramlási egyenleteket a program által felkínált megoldási algoritmusokkal lehet megoldani. Alkalmas izovonalas és/vagy színskálázott térképek készítésére, mind a bemeneti adatokból, mind a számítási eredményekből. Animációra is ad lehetőséget. A részecske követő modul segítségével, a hidrodinamikai modellel számított eredmények - depressziók, piezometrikus szintek, áramvonalak térbeli képe, stb – megjeleníthetők (Kovács B 2004).

3.3.3.2. FEFLOW programrendszer jellemzése

A *FEFLOW* a hazai és nemzetközi gyakorlatban elfogadott számítási rendszer a hidrodinamikai és transzport-modellezési feladatok elvégzéséhez. A program a szivárgás alapegyenletének megoldásához a *Galerkin végeselem módszert* alkalmazza, mely sok beépített numerikus megoldó algoritmussal rendelkezik. A FEFLOW olyan teljes körű modellező szoftver, mely sikeresen egyesíti az erőteljes grafikus képességeket a modern ellenőrző–optimalizáló elemzési eszközökkel (GEOHIDRO 2003).

A program legfontosabb komponensei:

- ✓ A végeselem háló létrehozását, a paraméterzónák meghatározását és a peremfeltételek megadását lehetővé tevő komplex, átfogó grafikus eszközkészlet.
- ✓ Adat importálás és interpolációs algoritmus.
- ✓ Megbízható numerikus algoritmusok és megoldási módszerek.
- ✓ Valósidejű adatértékelés.
- ✓ Magas szintű 3D megjelenítés.

3.4. Kísérleti módszerek

A kutatásomhoz méréseket végeztem egy valós létesítmény környezetében annak érdekében, hogy a kísérleti eredmények összevethetők legyenek a modellszámításokkal. Feltártam a geológiai, hidrogeológiai adottságokat, valamint a műtárgy jellemzőket. Meghatároztam az alkalmazott mérés eszközét, módszerét és időtartamát.

3.4.1. Pest területének vizsgálata

A célkitűzéseknél feltett kérdések megválaszolásához a részletes vizsgálataimat Budapesten, leszűkítetten, a pesti oldalon, a Duna - mint nagyvízfolyás – mellett végeztem, az alábbi megfontolásokból.

- A pesti terület – földtani és vízföldtani tekintetben – nagy kiterjedésű, összefüggő, tipikusan egy vízvezetős rétegű, nyílt felszínű lamináris mozgással jellemezhető, így kedvező a modellezése.
- Pesten a nagy számban megépült és jelenleg is épülő földalatti létesítmények – melyek akadályként jelentkeznek a természetes talajvíz mozgásában – lehetőséget adnak a valós jelenségek vizsgálatára.
- A nagy vízfolyások, melyek jelentős vízszint fluktuációval rendelkeznek, meghatározó befolyással bírnak a környező talajvízszintek és áramlási irányok alakulására. Így a vízmozgások törvényszerűségei jól szemmel követhetők.
- Kutatásom számára, a Duna parton, a Millenniumi Városközpont súlypontjában, egy jelenleg folyamatban lévő beruházásnál, két talajvízszint észlelő kutat telepítettek. Ezzel biztosítottá vált számomra, a hatások - vízszint változások – vizsgálata, a valós problémák megfigyelése és mérése.
  Így a kapott eredmények - összevetve a modellezés szolgáltatta értékekkel - alkalmasak az elméletek, valamint a felállított modell helyességének igazolására és ez által a következtetések általános kiterjesztésére.

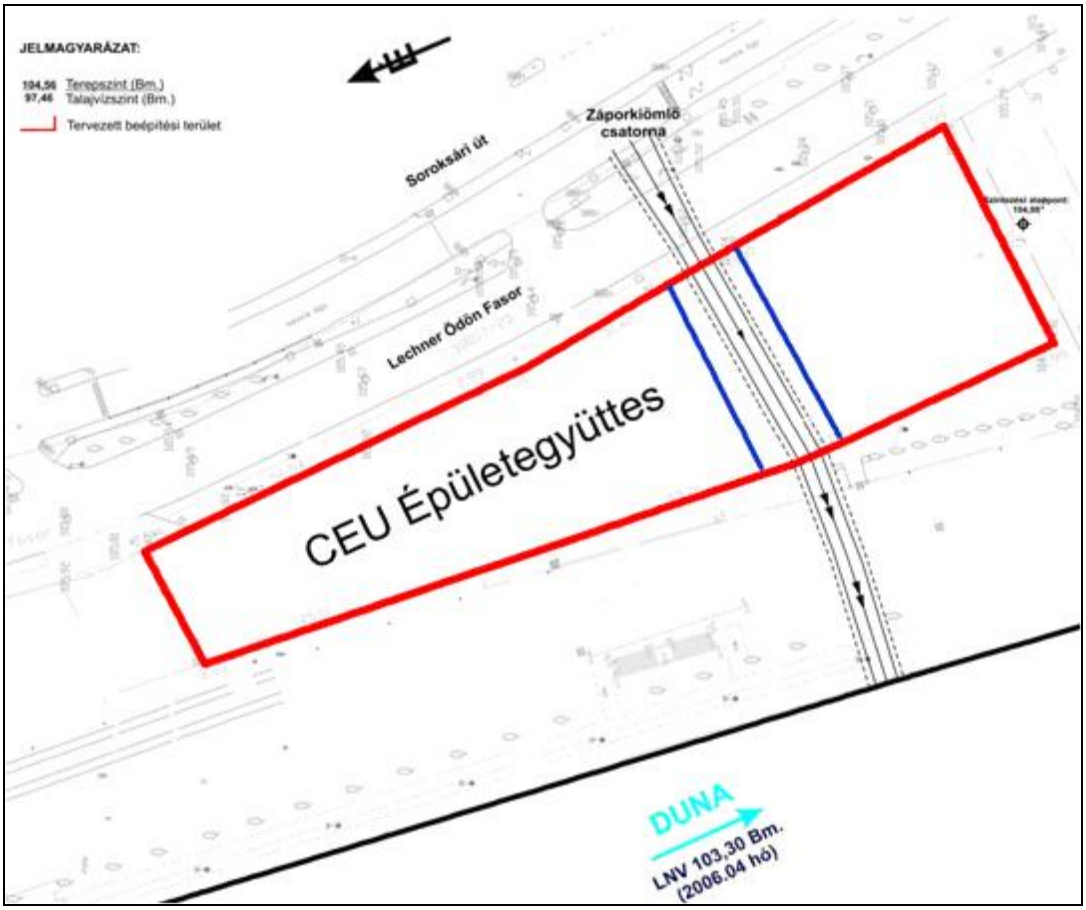
3.4.2. A valós probléma

A kutatásom során lehetőségem volt egy konkrét példán keresztül a vizsgálatok bemutatására.
Budapest IX. kerületében épül a CEU – Közép-Európai Egyetem és Bérirodaház – épületegyüttes. Méréseim számára a létesítmény mélygarázsának munkagödre mellett két talajvízszint észlelő kutat telepítettek.

Így párhuzamosan tudtam szimulálni a létesítmény mélygarázsának természetes talajvízáramlásra gyakorolt hatását, valamint mérni, a tényleges vízállás adatokat az észlelő kutakban.
A számítások és mérések alapján a befolyásolt vízmigrációs folyamatokat tudtam követni és törvényszerűségeket meghatározni.

3.4.2.1. A vizsgált terület jellemzése

A vizsgált terület a Pesti Duna parton, a Petőfi és Lágymányosi híd által közrefogott Millenniumi városközpont súlypontjában, a Haller utca tengelyében van. A folyótól a legközelebbi távolsága 40 m. A két tömbből álló épületegyüttes 3 szintes mélygarázzsal készül. A ~110*40 m alapterületű munkatér résfalas határolással épül. A résfal az oligocén agyag fekübe köt be. Így „falként" mesterséges akadályt képezve lezárja 110 m hosszban a talajvíz útját. A két tömb közötti kb. 8 m széles sávban a Dunáig kifutó zápor csatorna húzódik (3.3. ábra).



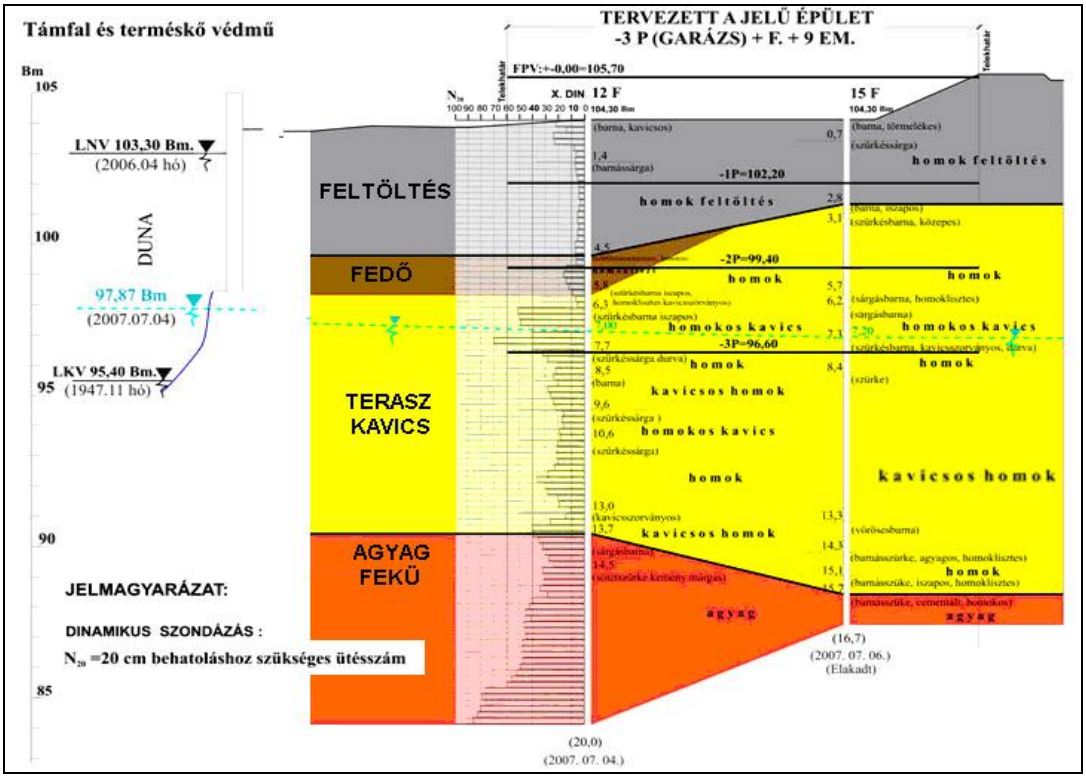
3.3. ábra Haller-kapu, helyszínrajz (FTV 2007)

3.4. ábra Résfalas munkatér határolás

A városközpont, melynek része e létesítmény is, a Csepeli HÉV és a Lechner Ödön fasor között terül el. É-i és D-i része az elmúlt években épült be, szintén résfalas oldalhatárolású, több szintes mélygarázsos háztömbökkel. A jelenleg épülő és a már több száz méter hosszban meglévő létesítmények között csupán ~ 15-20 m beépítetlen területsáv marad ki, ahol a talajvíz mozgása nincs korlátozva. A többi részen a résfalak összefüggő „falat" képezve meggátolják a víz áramlását.

A terület *morfológiailag* a Pesti síksághoz tartozik, annak is azon részéhez, amely eredetileg a Duna közép- és árvízi medre volt. Több lépcsőben végzett folyószabályozási, tereprendezési munkálatokkal vált árvízmentessé. A Duna partján mészkőből kialakított partfal épült, majd a múlt század elején kezdődött el a partfal mögötti terület feltöltése.
A területet tehát mesterségesen, feltöltéssel választották le a folyótól és tették beépítésre alkalmassá.

Földtani szempontból az építkezések által érintett mélységig a területet és környezetét jellegzetes rétegsor jellemzi. A **fekű** az oligocén korú agyag rétegösszlet, melynek felszíne a terep alatt 13-15 m-en helyezkedik el. Az agyag réteg közé változatos elrendezésű és kiterjedésű iszapos homok, homok talajok települtek.
Az agyag feküt átlagosan 10 m vastagságú pleisztocén korú dunai **teraszkavics** fedi, melyet durva szemcsés, kavicsos homok, homokos kavics talajok alkotnak.
E rétegösszlet **fedőjét** jellemzően holocén finom szemcsés homok, homokliszt talajok képezik, melyre a folyótól távolodva, vékonyodó feltöltés került (3.5. ábra).



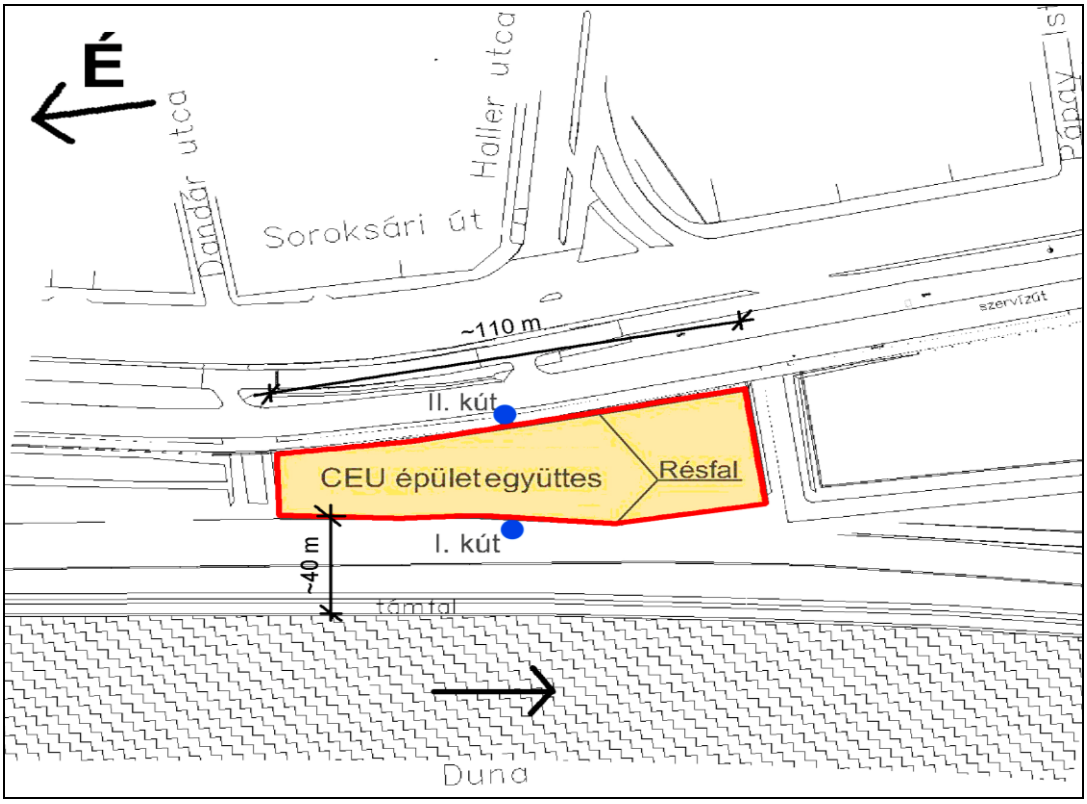
3.5. ábra Rétegszelvény (FTV 2007)

A terület v*ízföldtani jellemzői*:

A terület, szivárgáshidraulikai szempontból a ~40 m távolságban lévő Duna közvetlen hatásövezetén belül fekszik, ahol a talajvíz ingadozását a folyó mindenkori vízállás változásai vezérlik. A folyó közelsége miatt igen dinamikus talajvízszint emelkedés és süllyedés, valamint áramlási iránymódosulások zajlanak. A talajvízszint ingadozás nagyságrendje a több métert is meghaladhatja, szélső esetben elérheti a 8,0 m-t is.

3.4.2.2. Talajvízszint észlelő kutak telepítése

Kutatásomhoz, a vasbeton résfalas munkatérhatárolás várható hatásának méréséhez, - mint már a 3.4.2. fejezetben említettem - a vizsgált területen 2007. decemberében 2 db talajvízszint észlelő kút épült ki a Dunára merőlegesen, az 1643.700 fkm szelvényben.
A munkatér Duna felöli oldalán az I. jelű, a Lechner Ödön fasor felöli oldalán pedig a II. jelű kút készült el, a 3.6.a. és b ábrákon feltüntetett helyen.
A II. jelű kút telepítése nehézségbe ütközött, mivel nagyszámú közművezeték húzódik közvetlenül a munkagödör széle mellett. Így kivitelezése a résfal elkészülte után, annak lavírsíkjáról történt
A kutak az agyag fekü felszínéig épültek ki. Adataikat a I. táblázatban adom meg.



3.6.a. ábra Talajvízszint észlelő kutak helyszínrajzi elrendezése

3.6.b. ábra Talajvízszint észlelő kutak helye

I. táblázat Talajvízszint észlelő kutak adatai

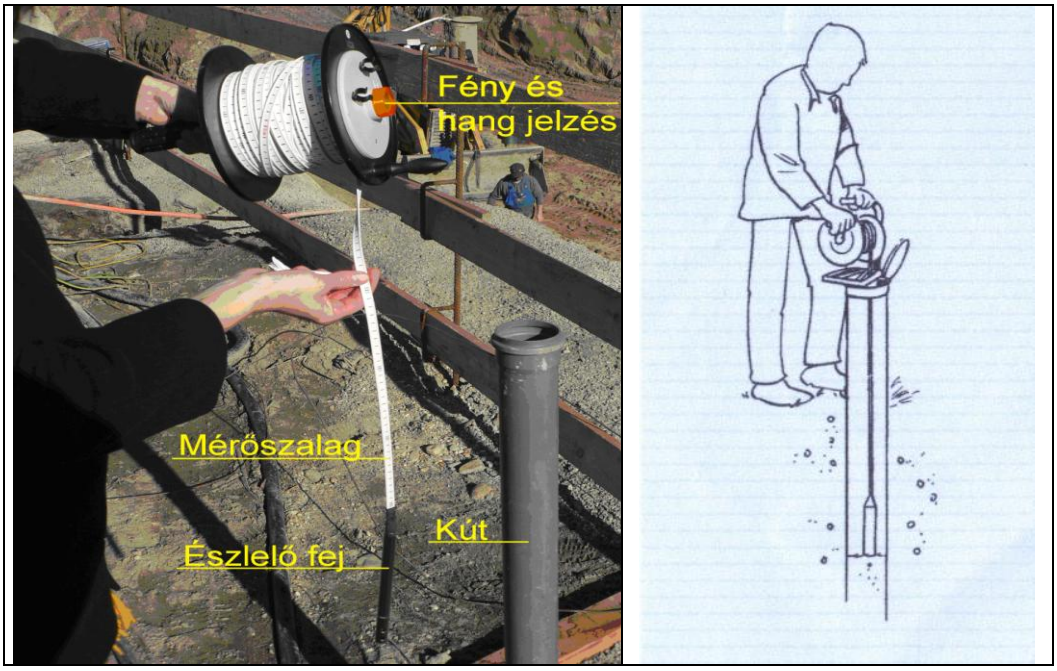
Kútadatok	I kút	II kút
Anyag	PVC	acél
Átmérő (mm)	60	40
Perem magasság (mBf)	105,43	102,63
Terepszint (mBf)	104,46	101,81

3.4.2.3. A talajvízszint mérés módszere

A kutakban a vízszintek mérését Eijkelkamp Agrisearch Equipment műszerrel végeztem heti rendszerességgel.

A mérőműszer működési elve: (3.7. ábra)

A talajvízszint észlelő műszer egy megszakított áramkör elvén működik. Az áramkör két pólusa között az áramátbocsájtás akkor biztosított, amikor a kútba engedett műszer szondája eléri a talajvíz felszínét. Vízzel érintkezve az áramkör záródik. A keletkező impulzus a jelzőberendezésen fény és hang kibocsájtást indukál. A mérést végző személy többszöri finom próbálgatással állítja be azt a helyzetet, amelynél a fény éppen felvillan és a hangjelzés éppen megszólal. Ekkor a kút peremétől mérve, az aktuális vízszint cm pontossággal leolvasható.



3.7. ábra Talajvízszintmérő műszer

3.4.2.4. Dunai vízszintek és kiértékelésük

Miután a talajvízszint mélységi elhelyezkedését és ingadozásának nagyságrendjét a vizsgált területen a Duna mindenkori vízállása határozza meg, ezért áttekintettem a folyóra jellemző vízjárási törvényszerűségeket is.

Legközelebb a vizsgált területhez, a Vízrajzi Szolgálat a Vigadó téren található *Budapesti vízmércét*, mint felszíni vízrajzi törzsállomást üzemelteti.
A vízmérce főbb adatait a II. táblázatban foglalom össze. Elhelyezkedését a Dunai Hajózási Térkép (www.kdvvizig.hu) 20. lapja tartalmazza.

II. táblázat Vízmérce adatok

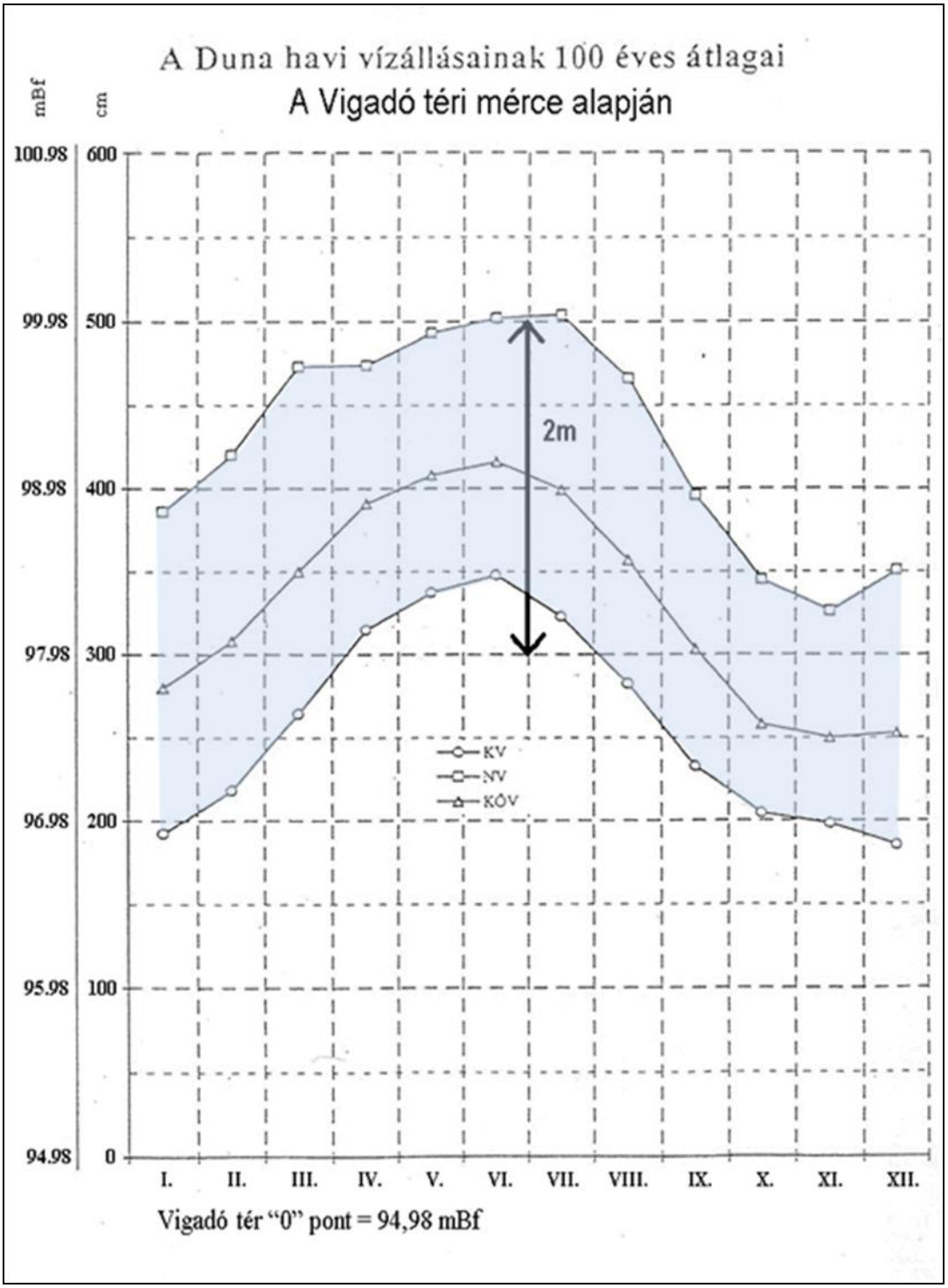
Neve:	**Budapest**
EOV X [m]	239000
EOV Y [m]	650000
Helye [fkm]:	1646.500
„0” pont [mBf]	94.970
Észlelés kezdete:	1817
LKV [cm]	51 (1947.11. hó)
LNV [cm]	860 (2006.04. hó)

A Vízrajzi Évkönyv, a Hydroinfo, valamint a Vízügyi Adatbank adatbázisa alapján állapítottam meg a dunai vízszinteket a fenti vízmércénél.
A vízmérce adatok segítségével a Duna esését figyelembe véve a vizsgált 1643,7 fkm szelvényben a Duna vízszintjei meghatározhatók.
Az általam vizsgált másféléves időszak - 2007 decemberétől-2009 augusztusáig - a teljes vízszint ingadozás tartományát átfogja (F.6. melléklet).

A vízmérce adatok alapján a következő vízjárási törvényszerűségeket állapítottam meg:

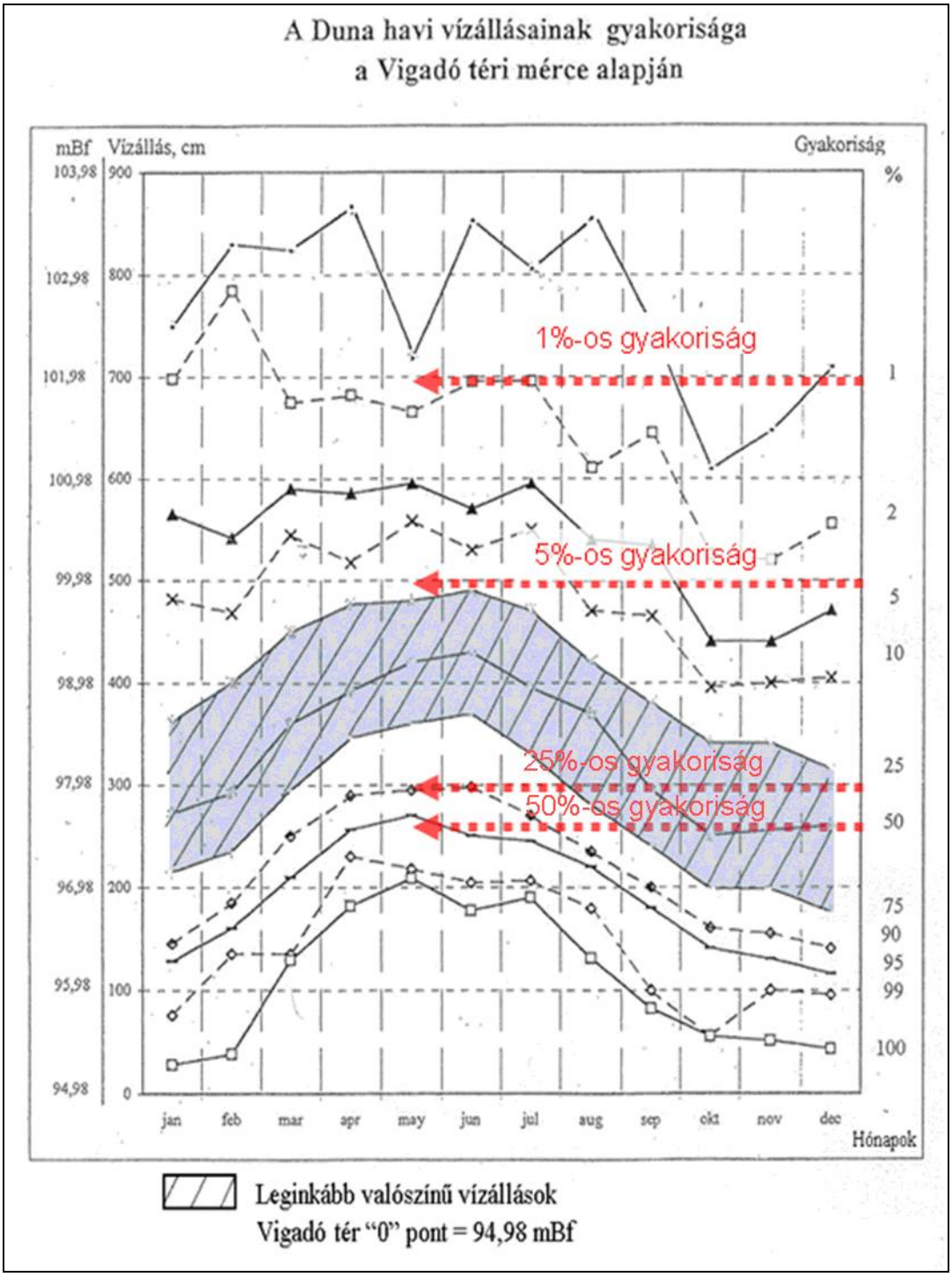
- A 3.8. ábráról a Duna vízállásainak 100 éves átlagai olvashatók le havi bontásban a (KV) kis-, (KÖV) közepes-, és (NV) nagyvizekre vonatkozóan.

  Az ábráról megállapítható, hogy a dunai nagyvizek (NV) leggyakrabban a tavaszi és a nyári hónapokban fordulnak elő. A legmagasabb vízszint leggyakrabban május, június, július hónapokban alakul ki. Az alacsony vízállások pedig, az őszi és a téli hónapokra (október, november, december) esnek.
  Ebből eredően a talajvíz magas vízszintjei is a tavaszi- nyári hónapokra valószínűsíthetők, míg a kisvizek az őszi - téli hónapokban alakulnak ki.



3.8. ábra Dunai vízállások (FTV 2007)

- A 3.9. ábra megadja a Duna havi vízállásainak gyakoriságát. Ebből megállapítható, hogy a folyónál milyen százalékos megoszlásban fordulnak elő egy adott hónapban a vízállások.
  Az 1 %-os (700 cm feletti) nagyvizek majdnem minden hónapban előfordulnak, kivételt csak az október és november képez.
  Az 5 % a valószínűsége annak, hogy a Duna vízállása 540 cm-nél magasabb lesz, valamint 10 %-os valószínűség esetén a folyó vízállása meghaladja a 470 cm-t.
  Az ábráról az is leolvasható, hogy augusztusban 50 % a valószínűsége annak, hogy a Duna vízállás 280 - 430 cm között fog ingadozni és 25 %-os annak a valószínűsége, hogy 430 - 850 cm között változik a magas vízállás. Továbbá 25 %-os annak az előfordulási valószínűsége, hogy 280 cm-nél kisebb vízállások jönnek létre. Az ábrára az abszolút értékeket is megadja.



3.9. ábra Gyakorisági ábra (FTV 2007)

3.4.2.5. Talajvízszintek meghatározása

Az áramlási viszonyokat megváltoztató beavatkozások előtt a területen, a vizsgált szelvényben nem volt mód talajvízszint észlelő kutak telepítésére és mérésére. Így csak a vizsgált szelvényhez közeli IX/2 és IX/3 jelű kutak adatsorát tudtam figyelembe venni, melyekben a vízszint mérést 2006 -ban megszüntették. A kutakban több évtizede észlelt vízszintek az eredeti, befolyásoltság nélküli áramlási viszonyokat tükrözik (F.1. ábra).

A kiértékelések alapján meghatároztam a területen a talajvízszinteket természetes állapotban, melyek az alábbiak:

- becsült minimális talajvízszint: 96,00 m Bf,
- átlagos talajvízszint: 97,80 m Bf,
- becsült maximális talajvízszint: 102,70 m Bf,
- mértékadó talajvízszint: 103,20 m Bf.

Feltárva a folyó vízjárásának jellemzőit, valamint a talajvízszint észlelő kutak adatsorait, megállapítottam a Duna vízállásait követő talajvízmozgás törvényszerűségeit:

Tartósan alacsony, valamint 97,8 m Balti szint alatti folyó vízállás esetén a talajvíz a folyó felé áramlik és kialakul a folyó és a talajvíz között egy ideiglenes egyensúlyi állapot. Ez a helyzet azonnal megváltozik, ha a folyó árad. Ekkor a folyó megcsapoló szerepe megszűnik és megindul a folyó felől a beáramlás a víztartó rétegbe. Így az áradásból eredően a Duna vízállása 1-1,5 m-el magasabb, mint a környezet talajvízszintje, mivel a talajvíz csak késleltetve, a folyótól való távolság függvényében és csak bizonyos idő eltelte után követi a folyónál bekövetkezett vízszint-emelkedést. A vizsgált területre vonatkoztatva a késleltetési időt 1 napban lehet meghatározni.

A fenti folyamat addig tart, míg a folyó árad és a víztartó réteg telítődik. Amennyiben megindul a folyónál az apadás, a rendszer eddig leírt feltöltődése megszűnik és elkezdődik a réteg leürülése, szintén késleltetve. Ebből adódóan a part közelében a talajvíz szintje és a Duna vízállása között 1-1,5 m-es szintkülönbség alakul ki időlegesen a talajvíz javára.

Ez a késleltetett dinamikus vízszintmozgás oda és vissza, azaz a folyó és a talajvíz között a területen állandóan ható folyamat, a vízjáték, állandóan ható tényező.

Az előzőeknek megfelelően a területen akkor alakul ki magas vízállás, ha a folyón jelentős nagyságú árhullám vonul le. A megadott becsült maximális talajvízszint kialakulása akkor várható, ha a Dunán az 1965 és 2006 évi árvizeket megközelítő, vagy azt elérő árhullám alakul ki és vonul le. Meg kell jegyezni, hogy a kiépült partfal kis mértékben, de befolyásolja a folyó és a talajvíz közötti kapcsolatot azzal, hogy növeli a késleltetési időt.

A talajvíz alacsony és átlagos vízszintek idején csak a kavicsos rétegekben helyezkedik el. Magas vízállások alkalmával már felemelkedik a fedő rétegbe, illetve feltöltésbe is, és abban tárózódik, míg a Duna árhulláma le nem vonul.

3.5. A modellek felépítésének gyakorlati lépései

Kutatásaim során a hidrodinamikai modellezéshez a *FEFLOW Finite Element Simulation System for Subsurface Flow* (WASY FEFLOW 5.3. 3D) programrendszert használtam. A kapott eredményeket – egyszerűsített formában – a PMWIN (Processing MODFLOW for Windows) programmal ellenőriztem.

A modellezés folyamán, az egyes modellek megalkotásánál a 3.1.1. fejezetben részletesen leírt alábbi általános irányelveket követtem.

- *Előkészítés*
- F*öldtani és vízföldtani adatgyűjtés*
- *Első számítási lépcső*
- *A modell kalibrálása és paraméterérzékenységi vizsgálat*
- *Második számítási lépcső*
- *Az eredmények kiértékelése*

A modellalkotás főbb lépései a következők voltak:

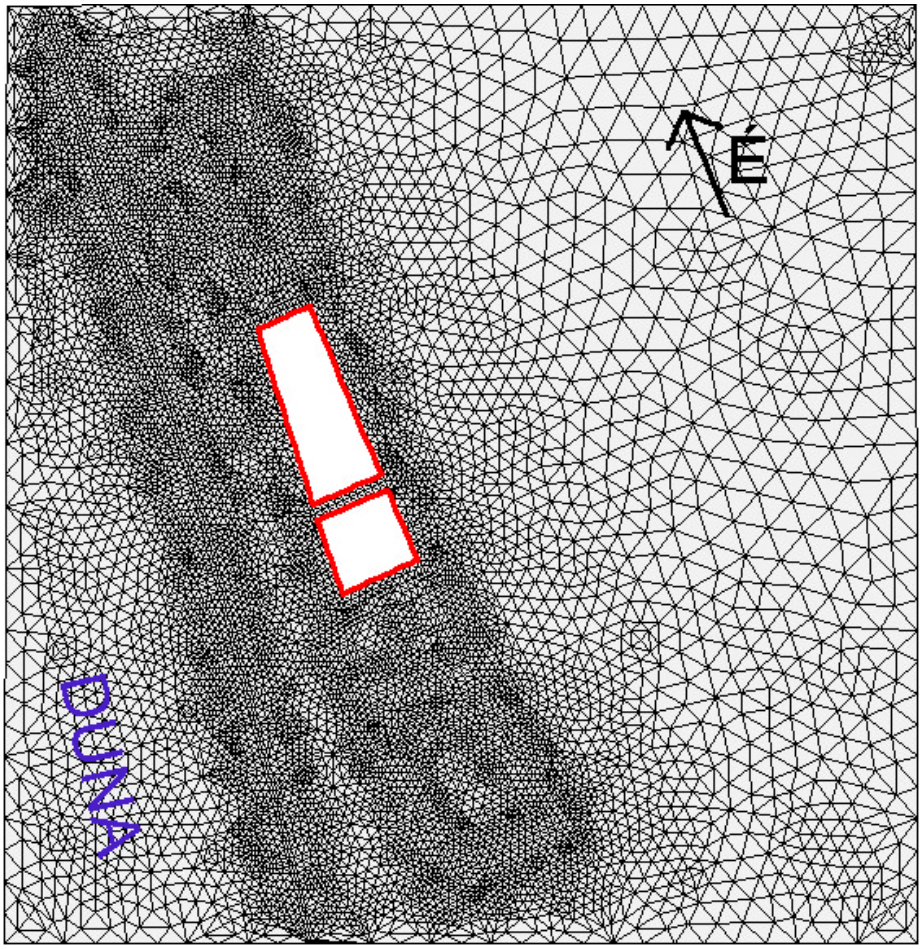
- A modellezett terület alaptérképének előállítása. A modellezett térrész felvétele.
- Alapháló létrehozása. A háló finomításának elvégzése (sűrítés)
- Az összes modelljellemző megadása
  - földtani séma
  - modelltulajdonságok
    - kezdeti feltételek
    - perem feltételek
    - anyagjellemzők
- A modell lefuttatása, kalibráció, végső futtatás
- A modellezés eredményének megjelenítése

A modellek felépítése:

1. A *FEFLOW*-ban a modellezett terület meghatározása egymásra helyezett térképek segítségével történik. Az *AutoCAD 2002* programot használtam az alaptérképek, helyszínrajzok szerkesztésére, és ezeket a rajzokat *dxf* formátumban elmentve tudtam behívni a *FEFLOW*-ba. A modellezett térrészt téglalap alakúnak vettem fel. Az alaptérkép behívásával adott a vizsgálandó térrész, melyeknek külső határai egyben a külső peremek is. A *FEFLOW* végeselem hálója lehetővé teszi a lokális finomítást azokon a helyeken, ahol erre a leginkább szükség van (pl. határok kontúrjai). Így elkerülhető a fölösleges elemek létrehozása. Amint meghatároztam a külső peremeket és a belső kontúrokat, a megadott elemszám függvényében a *FEFLOW* automatikusan létrehozta a végeselem hálót. A *FEFLOW 3D* modulban 8 és 20 csomópontos négyoldalú, valamint 6 és 15 csomópontos háromoldalú prizmák

állnak rendelkezésre. Jelen esetben *6 csomópontos háromoldalú prizmákat* alkalmaztam hálóelemként.

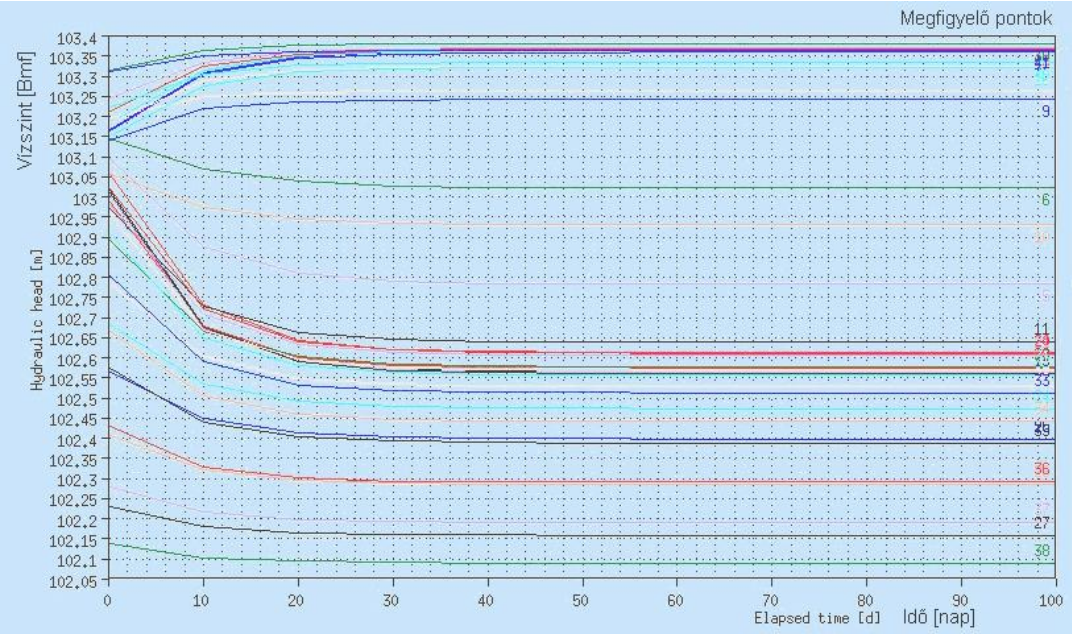
2. Miután létrehoztam az alaphálót, a hálószerkesztő segítségével elvégezhető a hálófinomítás. Az alapháló 63136 számú elemből épült fel, mely elemeket a belső kontúrokon, ahol a későbbiek során pontosabb számítási eredményeket várok, a legmagasabb elemsűrítési lehetőséggel generáltam. Az alapháló létrehozása után egyszeri, teljes térrészre kiterjesztett elemsűrítést végeztem (3.10. ábra)



3.10. ábra Alkalmazott végeselem háló

3. Az összegyűjtött földtani – hidrogeológiai adatok ismeretében *nyílt tükrű* (szabadfelszínű) rendszerrel dolgoztam. Megállapítható volt, hogy a teraszkavics réteg feletti fedő elegendő permeabilitással rendelkezik ahhoz, hogy a talajvíz ingadozását ne akadályozza.

4. Az időparaméterek felvételénél alapfeltételként, permanens állapotra modelleztem. Tehát a műtárgyak megépülése utáni állapot hidrogeológiai változásait számítottam. A permanens állapotot azonban 10 lépcsős, egyenként 10 napos időperiódusokkal értem el. Ezt a 10 időlépcső – 10 nap/lépcső időtartományt az előmodellezések során határoztam meg, mely elegendően hosszú idő a permanens állapot kialakulására. Ennek oka az volt, hogy így jobban követhetők a megfigyelési pontokon a talajvízszintek kezdeti értékei és a modellezés folyamán megváltozó talajvízszint-értékek közötti módosulások, tendenciák (3.11. ábra).



3.11. ábra Időparaméterek felvétele – időlépcső

5. A következő lépés a földtani modell felépítése. A vertikális elemekre bontáshoz a vizsgált térrészben egyszerűsített földtani modell alapján *feltöltés, fedő, víztartó teraszkavics és agyag fekü rétegeket* tételeztem fel. A modell felépítésekor a réteghatárokat, az adatgyűjtések során létrehozott adatbázisból importálhattam be, melyeket az összegyűjtött talajmechanikai feltárások adatai alapján (F.2. melléklet) SURFER-rel hoztam létre. A réteghatárokat síkokkal közelítve építettem be a modellbe az alábbi földtani séma szerint (3.12. ábra). A földtani modellben létrehozott 4 különböző rétegnek megadtam a geometriai adatait és a talajfizikai paraméterit.

3.12. ábra Egyszerűsített földtani modell

6. *FEFLOW*-ban lévő felosztás szerint a modelltulajdonságok három nagy kategóriára oszthatók, amelyek meghatározzák a szivárgáshidraulikai modell jellemzőit és peremfeltételeit. A *modelltulajdonságok* közül az alábbiakat adtam meg a programban:
   - *Kezdeti feltételek*: *kezdeti nyomásszint (talajvízszint)*
   - *Peremfeltételek*: *állandó nyomásszint*,
   - *Anyagjellemzők*: *szivárgási tényező* (k_x, k_y, k_z), *szabad hézagtérfogat* (n_0)

A ***kezdeti feltételeknél*** a talajvízszinteket, a dunai vízszintek és talajvízszint észlelő kutak begyűjtött és mért adatsorai alapján vettem fel. Ezekből SURFER-ben készítettem az adott területre vonatkozó talajvíztérképet.
A vizsgálatok során a *minimális* és a *becsült maximális talajvízszint* volt a kiindulási vízállás.
Peremfeltételként a vizsgált térrészek határvonalainál *állandónak* feltételeztem a talajvízszinteket, ezzel biztosítva a gyakorlatilag korlátlan oldal irányú utánpótolódást. A vizsgált térrész nagyságát 350*360 m-re választottam meg, mellyel el lehetett érni, hogy a depressziók (akár pozitív, akár negatív) ne nyúljanak ki a határokig, ezáltal az állandónak feltételezett nyomásszint ne módosuljon.
Az ***anyagjellemzők*** közül a *szivárgási tényező* (k) értékét minden rétegre külön határoztam meg. A rétegek közül a feltöltést, a fedőréteget és a feküt izotrópnak feltételeztem, vagy is az „x”, „y” és „z” irányú szivárgási tényezők megegyeznek egymással. E feltételezés - tekintve a relatíve egyszerű

vízföldtani helyzetet és a víztartó minőségét – nem befolyásolja jelentősen a végeredményt, technikailag viszont igen nagy könnyítést jelent. A teraszkavics esetében – annak litológiai és ülepedési jellege miatt – a k_z irányú szivárgási tényezőt az k_x és k_y irányú 1/3-ának vettem és így adtam meg a modellben. A *szabad hézagtérfogatot* (n_0) – a szivárgási tényezőhöz hasonlóan – minden rétegre, szakirodalmi adatok alapján, (Juhász 2002) külön határoztam meg. Az alkalmazott anyagjellemzőket az III. táblázatban foglalom össze.

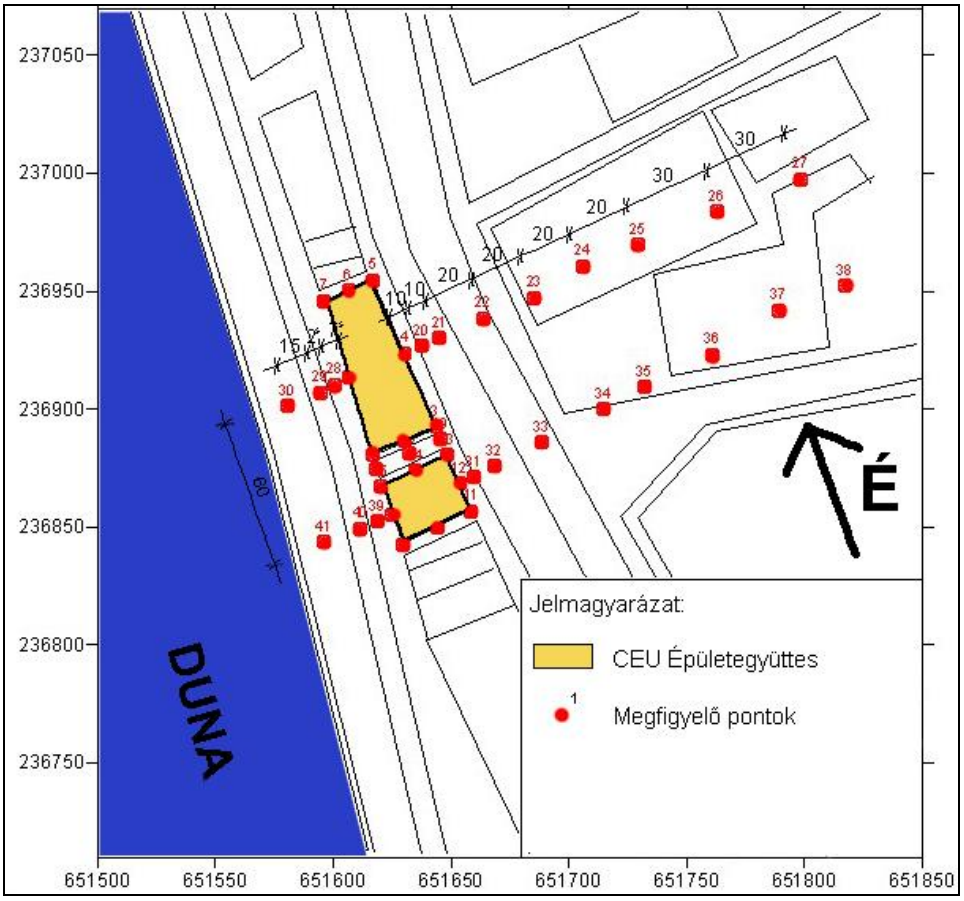
III. táblázat Talajfizikai jellemzők

Réteg	Szivárgási tényező (m/s)			Szabad hézagtérfogat n0 (-)
	k_x	k_y	k_z	
feltöltés	$8 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	0.20
fedő (homok, iszapos homok)	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0.12
víztartó (teraszkavics)	10^{-3}	10^{-3}	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	0.30
fekü (kiscelli, tardi, miocén agyag)	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	0,01

A modellszámítások során a nyomásszintek időbeli változásának gyorsaságára, illetve a vízmérleg-hiba okozta nyomásszint-változások mértékét meghatározó paraméterek (*piezzovezető-képesség, nyomásszint-vezető képesség, tárolási tényező*) meghatározására nincs szükség, hiszen nyílt tükrű a rendszer.
A Duna jellemző vízállásait a modellben úgy vettem figyelembe, hogy megkötöttem a szinteket az adott magasságokon.

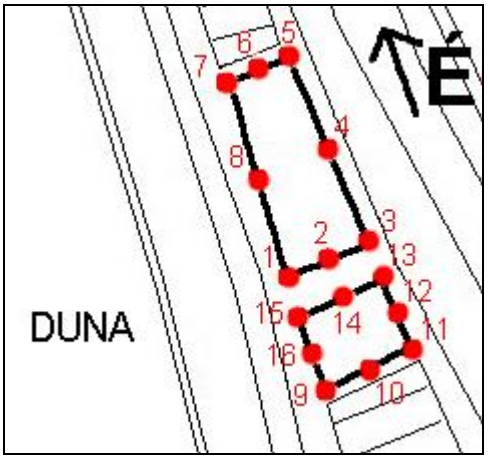
7. Az így felépített modellek minden jellemzője, paramétere adott, a modell futtatásra alkalmas. A bevitt talajvízszinteket a modell némileg módosítja, a valós viszonyoknak megfelelően „kisimítja”. Az így kapott eredményeket kiexportáltam a SURFER-be újra generáltam az adatállományt és újra beépítettem a modellbe.

8. A kiindulási és a megváltozott viszonyok hatására módosuló talajvízszintek rögzítése érdekében a létesítmények jellemző helyeire megfigyelőpontokat tettem. E pontokban a leolvasások az eredmények diagramos megjelenítéséhez nyújtanak segítséget (3.13. ábra).



3.13. ábra Megfigyelőpontok helye

A pontok műtárgy körüli elhelyezkedését a 3.14. ábrán adom meg. E helyszínrajz alapján értelmezhetők a további grafikonok.



3.14. ábra Műtárgy körüli megfigyelőpontok elhelyezkedése

9. A vízzárónak tekinthető műtárgyakat úgy jelöltem, hogy az elemhálóban a kérdéses helyen töröltem (inaktívvá tettem) az elemeket. Ezt azért lehetett megtenni, mert a talajvíz nem képes átáramolni a munkatérhatároláson (résfalon). E térrész úgy viselkedik, mintha a vízvezető rétegsornak nem lenne része.

10. A program futtatásához felépített modellek általános jellemzőit az alábbiakban foglalom össze:
    - Dimenzió: 3D
    - Típus: telített
    - Rétegek száma: 4
    - Vízadó típusa: nyílt tükrű
    - Időperiódus: kvázi permanens
    - Időlépcső: 10 lépcső, lépcsőnként 10 nap
    - Számítási mód: végeselem módszer
    - Elem típus: 6 csomópontos háromoldalú prizma

11. A FEFLOW programrendszer modern ábrázolási lehetőségekkel rendelkezik: kerítésdiagramok, részecskeútvonalak, izofelületek, tetszőleges kivágások, izochronok, modell elforgatása, áramlási vektorok.
    A modellezési eredmények megjelenítéséhez az alábbi szemléletes megjelenítési módszereket választottam ki.
    - a hálóelemeknek megfelelően a talajvízáramlás irányát és nagyságát ábrázoló vektoros megjelenítés (a részecskevektorok léptékhelyesen valós információt hordoznak az áramlás irányáról és sebességéről) F.3. melléklet.
    - valós idejű izovonalas megjelenítés F.4. melléklet.
    - szegmens megjelenítés (adott vonal mentén felvett depresszió értékét adja meg) F.5. melléklet.

Tehát kutatásom során a felszín alatti akadályok hatására módosuló áramlási folyamatokat hidrodinamikai modellezéssel szimuláltam. Alkalmaztam a véges differencia és végeselem numerikus módszereken alapuló magas szintű számítógépes programrendszereket.

Méréssorozatot végeztem egy valós létesítmény környezetében. Vizsgálataim számára telepített kutakban másfél éven keresztül észleltem a talajvízszint változásokat és a hozzákapcsolódó dunai vízállásokat.
Ezzel lehetőségem nyílt a számított és mért adatok összehasonlítására.

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

A felállított ***hidrodinamikai modellek*** segítségével, amelyeket a végeselem módszerre épülő FEFLOW programrendszerrel oldottam meg, Pest területén számos szimulációt készítettem a talajvíz áramlásának vizsgálatára.
Először meghatároztam természetes állapotban az áramlási viszonyokat. Majd akadályokat fölvéve, azok befolyásoló hatását figyelembevéve végeztem a szimulációkat.
A továbbiakban a valós létesítmény környezetére szűkítettem a vizsgálataimat. Meghatároztam a jelenséget leíró paramétereket. A célkitűzéseket szem előtt tartva, paraméter hatáselemzéseket végeztem.
Összehasonlítottam a felszín alatti létesítmények talajvíz áramlásra gyakorolt hatásának modellezett és mért értékeit. Következtetéseket vontam le és megfogalmaztam új tudományos eredményeimet.

4.1. Természetes állapotban az áramlási terek lehatárolása

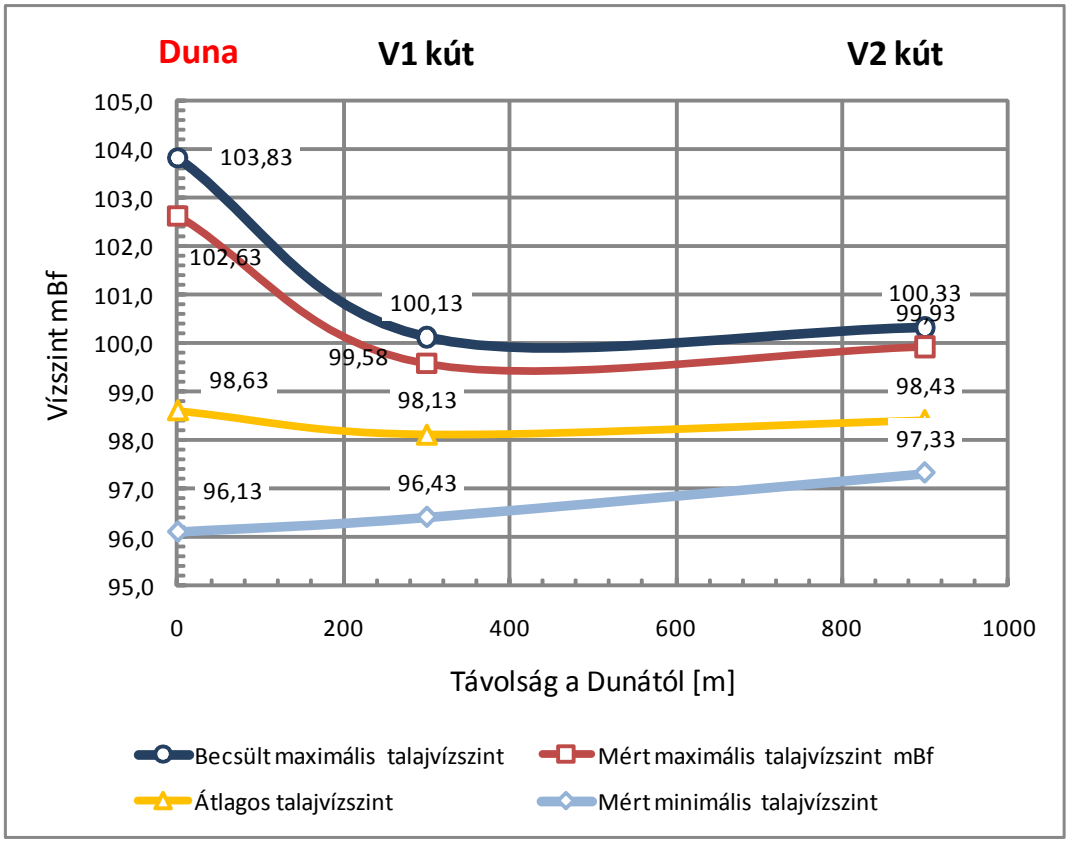
A pesti oldal talajvízének eredete és mozgása tekintetében, természetes állapotban a műtárgyak nélküli előmodellezések alapján jellegzetes zónákat különítettem el a Dunával párhuzamosan Nyugatról Kelet felé haladva (Keszeyné 2008, 2009).
A lehatárolások helyességét igazolják, a főváros területén működő nagyszámú talajvízszint észlelő kutak több évtizedes megfigyelési adatsorai is (FŐMTERV, VITUKI), valamint szakirodalmi adatok (Horváth 2004).

- 1. zóna - A Duna mindenkori vízállása által befolyásolt terület
- 2. zóna - Közbenső, völgy rész
- 3. zóna – Háttérterület

1. zóna (4.1. ábra)

- A Duna mellett, a folyó vízállás változása befolyásolja döntően a talajvíz járását és áramlási irányát.
- A fővárosi tapasztalatok, a numerikus számítások eredményei és az Altovszkij féle számítások egyaránt azt mutatják, hogy a Duna eddigi legnagyobb és legtartósabb árvize a főváros teraszában közelítőleg *1 km*-re hat el.
- A parttól 1 km-ig tehát a talajvíz szintek alakulásában egyértelműen a Duna vízjátékának a hatása a meghatározó.
- A talajvíz áramlási iránya a dunai vízszintek függvényében alakul.
  Nagy vízmagasságok esetén a Duna táplál be a talajvízbe, kisvizek esetén a Duna felé, mint eróziós bázis felé történik az áramlás.

- Az éves talajvízszint változás több méter, több éves viszonylatban elérheti a nyolc métert.
- A Dunától távolodva a vízfolyás vízszintjének változása már egyre csillapítottabban jelentkezik a talajvíz szintjében.
- Az áramlási felület meredek, a hidraulikus gradiens százalékos nagyságrendű.
- A folyó szélsőértékű vízállásainál, közvetlen a Duna mellett, a legnagyobb gradiensű áramlási zóna alakul ki.
- A Duna vízszintjeinek gyakorisági eloszlása nem szimmetrikus, a magasabb vízállási értékek irányába elnyújtott, azaz, az alacsonyabb vízállások a dominánsak. Mérnöki szempontból azonban a kisebb gyakorisággal jelentkező nagyobb vízszintek hatása, valamint azok tartóssága a mértékadó a talajvízre nézve. (Mecsi 2007)
- A vízvezető réteg viszonylag vastagabb és durvább volta miatt a szivárgási tényező (k tényező) értéke nagy, így a távolhatás (R) is nagyobb mértékű.



4.1. ábra A talajvízállás összefüggése a Duna vízszintjével (Mecsi 2007)

2. zóna

- A völgy rész, a Duna vízszintváltozása által kiváltott hatások és a háttérterület felől érkező természetes talajvíz találkozásánál alakul ki.
- Az 1. zónától K felé haladva, mintegy 2-2,5 km széles sáv tartozik e területrészhez.
- A talajvíznek a folyó mindenkori vízállásával való kapcsolata csak igen kismértékű, gyakorlatilag a középvízzel (KÖV) korrelál.
- A Duna hatása teljesen lecsökken. A légtéri vízkészlettel a kapcsolat minimális. A mesterséges hatások felerősödése a jellemző e területen.
- A talajvíz szintek döntően a
  -vizes közművekből eredő exfiltráció,
  -vízkivételek, betáplálások,
  -meglévő térszín alatti létesítmények, stb függvényében alakulnak.
- Amikor az 1. zónában a folyó felé történik az áramlik, e sávban a talajvíz felszínének inflexiója van. A kismértékű áramlás K-ről NY-ra irányul.
- Abban az esetben, amikor az 1. zónában a talajba történik betáplálás, e területen áramlás tekintetében gyakorlatilag pangó zóna alakul ki.
- Összességében az áramlási felület lapos, zérustól alig különböző esésű. A hidraulikus gradiens értéke ezrelékes nagyságrenddel jellemezhető.

3 .zóna

- A 2. zónától a Gödöllői dombságig terjedő területrészt sorolom ide.
- A talajvízszint alakulásában egyértelműen a természetes infiltráció a meghatározó, amely
  -csapadékvizekből,
  -élővízfolyások hozzáfolyásából,
  -lejtésviszonyokból fakadó oldalirányú utánpótlásból, stb. táplálkozik.
- Az áramlás fő iránya K-ről Ny-i irányú, azonban lokálisan anomáliák előfordulnak.
- A nyomásesés 3-5 m közötti, így viszonylag meredek áramlási felület alakul ki.
- A vízvezető réteg vékonyabb, finomabb szemszerkezetű melynek következtében a távolhatás (R) lecsökken.

4.2. Műtárgyak befolyásoló hatása

4.2.1. Általános vizsgálat

Az általam lehatárolt, különböző szivárgáshidraulikai jellemzőkkel rendelkező, zónákban ugyanazon paraméterekkel bíró akadályokat (műtárgyakat) vettem fel és végeztem modellezéseket. Felhasználtam, továbbá korábbi hidrogeológiai szakvélemények adatait is (GEOHIDRO 2003-2009, Petik és Társai 2001-2002, VFV 2000).

Mindezek a következő általános eredményre vezettek:
- A várakozásnak megfelelően, a számítások igazolták, hogy a térszín alá épített műtárgyak megváltoztatják az áramlási viszonyokat. Iránymódosulások, valamint visszaduzzasztás és apadás jön létre.
- A műtárgyak által kiváltott hatások relatíve kismértékűek voltak. A létesítményeknek az egyes zónákon belüli elhelyezkedése jelentősen befolyásolja a visszaduzzasztás–apadás mértékét.

1. zónában nagyvizek esetén a talajba történő betáplálásnál, méteres nagyságrendet is megközelítő hatások keletkeztek.
2. zónában a duzzasztás, illetve apadás mértéke deciméteren belüli.
3. zónában átlagosan néhány deciméteres nagyságrendek adódtak.

A kapott eredmények az alábbiakkal magyarázhatók:

- Az egyes zónákban a hidraulikus gradiens értékének különbözősége – a Darcy képletből ($v = k \cdot I$) adódóan – okozza a zónák közötti több dm-es nagyságrendű eltérést.
- A víztartó réteg jó vízáteresztő képessége, nagy szivárgási tényezője folytonos és nagy sebességű áramlást tesz lehetővé. Emiatt a kialakult nyomáskülönbségek, zónánként változva, de hamar kiegyenlítődnek.
- Az áramlás lamináris, ezért van ideje a visszaduzzadó víznek az akadály melletti elfolyásra.
- A terület geológiai felépítéséből adódóan a vízvezető réteg gyakorlatilag összefüggő. Nagy vastagsága és kiterjedése miatt a vizsgált műtárgyak mérete a földtani területhez képest pont- és vonalszerűnek tekinthető. Ezért a szivárgáshidraulikai alapegyenletből következően (v_k A = konstans) a sebesség csak kis mértékben változik a létesítmények hatására.

4.2.2. Létesítmény hatásának vizsgálata

A földalatti akadályok talajvízáramlásra gyakorolt hatásának mértéke döntően

- a geológiai (talaj) adottságoktól,
- a hidrogeológiai jellemzőktől és
- az akadály milyenségétől függ.

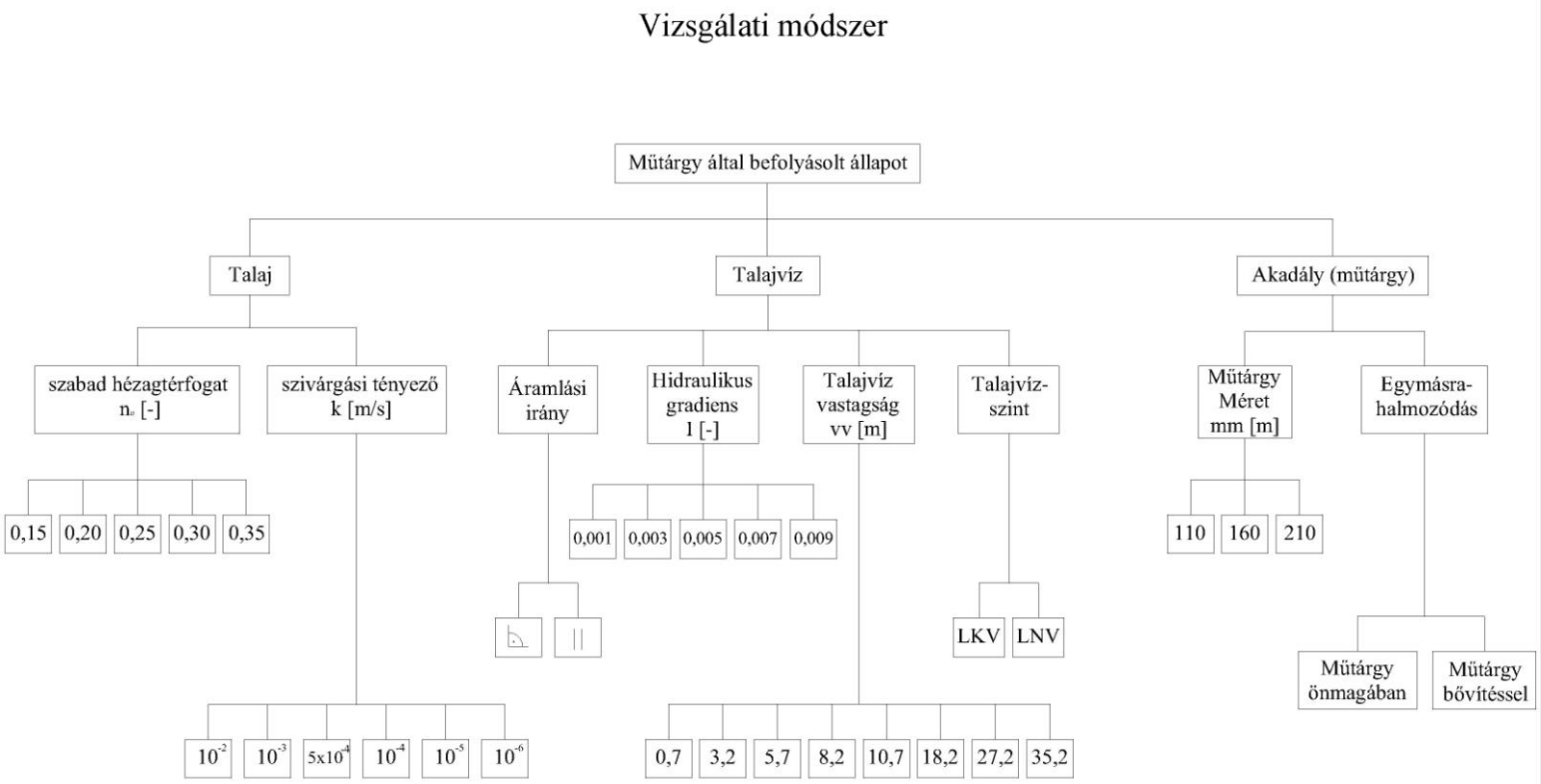
Ezért a modellezéseket e három fő területre terjesztettem ki.

Ezen belül részletesen vizsgáltam, hogy a visszaduzzasztás (D) és az apadás (A) milyen módon és mértékben függ:

- talaj oldalról
  -a szabad hézagtérfogat (n_0) és
  -a szivárgási tényező (k) változásának hatásától;
- talajvíz oldalról
  -a talajvíz áramlási irányának (ái),
  -a hidraulikus gradiensnek (I),
  -a víztartó rétegben a talajvíz vastagságának (vv) és
  -a talajvíz szintjének változásától (vsz),
- akadály (műtárgy) oldalról
  -a méret (mm) változásnak hatásától és
  -több műtárgy esetén a hatások szuperponálódásától.

$$D, A = f\,(n_0, k, ái, I, vv, vsz, mm, szup.)$$

Az így kialakított modellezési módszerre elkészítettem egy szemléltető ábrát, amely bemutatja a többirányú vizsgálatot a különböző paraméterekkel és tartományokkal (4.2. ábra).



4.2. ábra Vizsgálati módszer

Modellezési módszer, paraméter hatáselemzés

Kutatásomhoz kialakítottam egy *modellezési elképzelést, (hipotézist)*. A jelenségre befolyással bíró paraméterek változásának következményét elemeztem a rendszer kimenetelére vonatkozóan.

Vizsgálati tartományokat vettem fel. melyeken belül a paramétereket meghatározott lépcsőkben változtattam. A tartományok szélső értékeit aszerint állapítottam meg, hogy figyelembe vettem a gyakorlati szivárgáshidraulikai feladatoknál előforduló határokat (kisebb, vagy nagyobb szélső értékekkel történő számítás elméleti, matematikai jelentőséggel bír). *A kutatási eredmények a felvett tartományokon belül érvényesek.*

A vizsgálat alá vont paraméterek és tartományok szivárgási szempontból tág határok között mozognak, ezért nagyszámú variációra adnak lehetőséget. Így *a modellezési eredmények széles körben kiterjeszthetők és alkalmazhatók* más geológiai és hidrogeológiai viszonyok esetére is.

A modellszámításnál azt az elvet követtem, hogy a paraméterek közül egyet, kettőt, illetve hármat egyszerre kiemelve és változtatva, a többit állandó értéken tartva, szimuláltam azok vízmigrációs folyamatokra gyakorolt hatását.
A folyamat végkimenetelében a legnagyobb hatást (visszaduzzasztás, apadás) kiváltó, illetve a jelentős különbséget eredményező paraméter összeállás (variáns) vonalán folytattam tovább a vizsgálatot. Hiszen ez jellemzi legerőteljesebben a változás milyenségét, tendenciáját.
A szimulációk során kapott eredményhalmazok egyes esetekben egyértelművé tették, hogy a modellezést abba az irányba – az elérendő, kitűzött cél szempontjából - nem érdemes tovább folytatni.

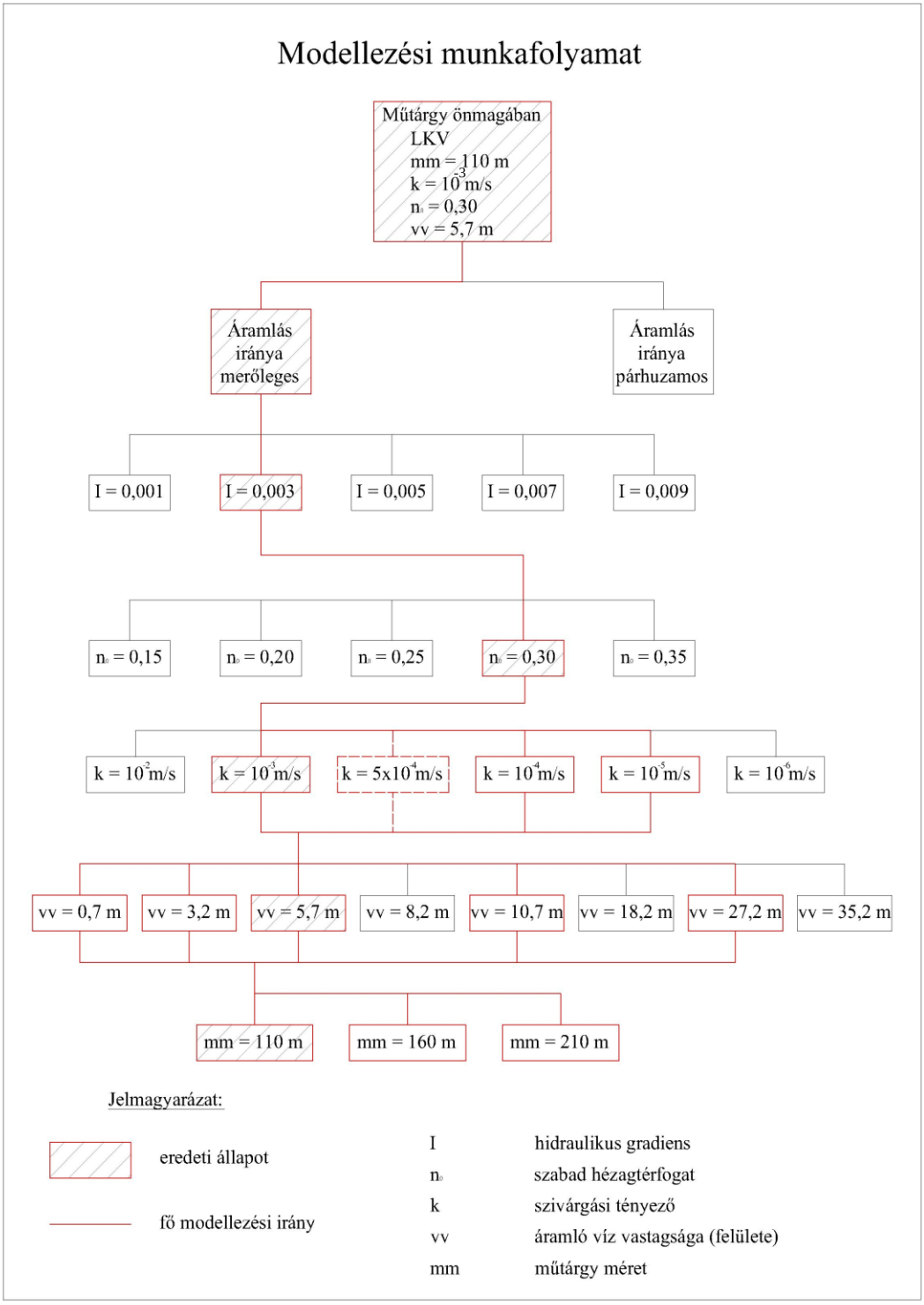
A Haller-kapu létesítmény eredeti adottságainak (földtani, vízföldtani, műtárgy méret) figyelembevételével is készítettem szimulációkat. Ez adott alapot a *számítások és a mérések összevetésére.*

A kialakult modellezési munkafolyamatot a 4.3. ábra szemlélteti. Feltüntettem a vizsgálat alá vont paramétereket és tartományokat, a modellezés fő irányát, valamint a Haller-kapu műtárgy eredeti értékeit.

Kutatásom során a paraméterek kölcsönhatásával ellenőrzés szintjén foglalkoztam. Megvizsgáltam, hogy a kapott modellezési eredmények nem kerültek-e ellentmondásba a szivárgáshidraulika alapegyenletével (Darcy-törvény: v = k I), illetve empirikus közelítő összefüggésekkel ($n_0 = \frac{\sqrt[7]{k}}{2}$; R = 3000 s $\sqrt{k}$).

A modell pontosságával szemben támasztott követelmény:

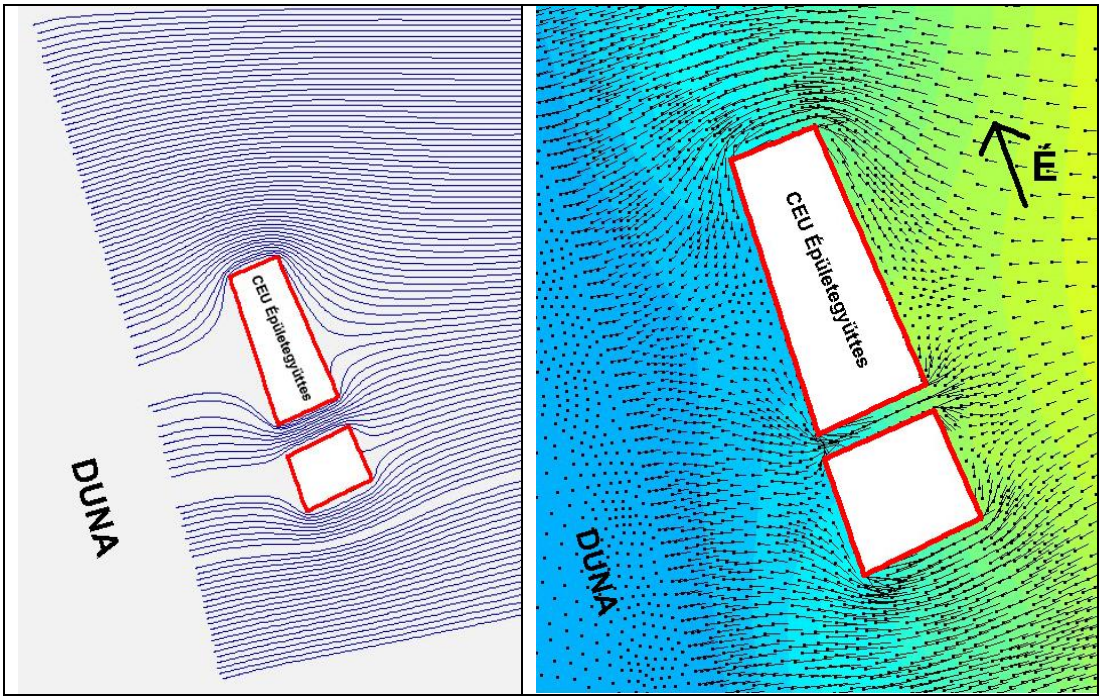
A vizsgált mérnöki probléma esetében a talajvízszint változás (visszaduzzasztás, apadás) mértékének ismerete, *deciméteren belüli pontossággal várható el.* E pontosság elegendő ahhoz, hogy a műszaki beavatkozások szükségessége és milyensége eldönthető legyen.
A kutatási témám földtani, vízföldtani rendszereket érint. Ezek ismertségi szintje alulhatározott, hiszen a térbeli képződmények tulajdonságait pontokban, esetleg vonalmentén ismerjük.
A modellben a felvett paraméterek meghatározottsági szintje is jelentősen eltérhet egymástól. Értékeiket helyszíni, vagy laboratóriumi vizsgálatok alapján, illetve tapasztalati képetek segítségével állapíthatjuk meg. Így a különböző módon kapott adatok heterogének.
Az alapadat-rendszer reprezentativitását nem haladhatja meg a modellezési eredmények reprezentativitása.
Ezért, a fent leírtak figyelembe vételével, a modelltől nem várok el nagyobb pontosságot, mint amit e probléma kapcsán a mérnöki gyakorlat megkövetel.



4.3. ábra Modellezési munkafolyamat

4.2.2.1. Az áramlási irány változásának hatása
[D, A = f(ái)]

A Pest területén végzett általános modellezések során vizsgáltam a műtárgy tengelyének az áramlás irányával bezárt szöge változásának a hatását.
Az eredmények szemléletesen mutatják az áramlással különböző szöget bezáró akadályok vízmigrációs folyamatokra gyakorolt hatását (4.4. ábra).



4.4. ábra Áramlási képek (2D) és vektoros eredmény megjelenítése

A műtárgy tengelyére *merőleges áramlásnál* az áramlási viszonyok horizontálisan jelentősen megváltoznak a műtárgy közvetlen környezetében, azonban nagyobb területre nem terjednek ki.

A háttér felől érkező áramvonalak az akadálynak ütközve, szétnyílnak, a műtárgy szélein erősen besűrűsödnek, majd az átellenes oldalon csak hosszú úton állnak vissza eredeti helyzetükbe. A részecskék egy része az ütközéskor megreked, helyben marad, melynek következményeként alakul ki a viszonylag nagyobb visszaduzzadás. Az ellentétes oldalon a lassan visszarendeződő áramvonalak között jön létre az apadás. Abban az esetben, ha a megcsapoló közeg (Duna) néhány 10 m-en belül van, már nem tudnak az áramvonalak összezárni eredeti állapotukba.

A műtárggyal p*árhuzamos áramlásnál* a háttér felől érkező áramvonalak kikerülési útvonala, alig torzul. Nem alakul ki jelentősebb áramvonal módosulás. Az akadálynál enyhén szétnyílnak, szélein sűrűsödnek és gyorsan visszarendeződnek eredeti helyzetükbe. A helyben maradó vízrészecskék elenyészően kisszámúak, gyakorlatilag elhanyagolhatóak, így a visszaduzzadás mértéke is kicsiny. A gyorsan visszaálló áramvonalak miatt az ellentétes oldalon minimális apadás keletkezik.

A *vektoros eredmény megjelenítés*, amely a talajvíz áramlás irányát és nagyságát mutatja meg, más oldalról világít rá az akadályok által kiváltott hatásokra.

Az érkező talajvíz sebessége a műtárgynak ütközve lecsökken, az áramlási vektorok nagysága egyre kisebb lesz. A megrekedt részecskéket jelző vektorok ponttá zsugorodnak, a sebesség zérusra csökken, duzzadás jön létre. A széleken, ahol utat talál magának az áramló víz, ott sebessége felgyorsul, a vektorok megnőnek. Hasonló jelenség játszódik le az áramlással átellenes oldalon az apadás zónájában, ahol szintén lelassul az áramlás, a vektorok nagysága lecsökken.

Az elvégzett modellezések egyértelművé tették, hogy a legnagyobb hatást – visszaduzzasztást, apadást – a műtárgy tengelyére merőleges áramlás okozza. Így a további modellezéseknél a műtárgyra közel merőleges áramlási irány állandósítása mellett változtattam a további, vizsgálandó paramétereket.

4.2.2.2. A szabad hézagtérfogat változásának hatása [D, A = f(n_0)]

A víztartó réteg n_0 szabad hézagtérfogatának hatását n_0=0,15-0,35 tartományon belül, 5%-os lépcsőkben változtatva vizsgáltam. E tartomány lefedi a teljes víztartó (iszapos finom homok és a kavics frakciók közötti) talajspektrumot.

A szimulációkat a legnagyobb visszaduzzasztást, illetve apadást eredményező, a műtárgy tengelyére közel merőleges áramlásnál végeztem. Eredményeként csupán század nagyságrendű eltérések jelentkeztek a hatásokban (visszaduzzasztás, apadás).

Megállapítottam, hogy a felszín alatti akadályok áramlást módosító hatásának tekintetében a szabad hézagtérfogat elhanyagolható hatással bír. Ezért a szabad hézagtérfogat függvényében a visszaduzzasztást és apadást nem vizsgáltam tovább, ezt a modellezési irányt lezártnak tekintettem. A továbbiakban a víztartó teraszkavics rétegre a szakirodalom által megadott (Juhász 2002) átlagértékkel számoltam n_0=0,30 (30%).

4.2.2.3. A hidraulikus gradiens, szivárgási sebesség változásának hatása [D, A = f(I, v)]

A hidraulikus gradiens változásának végeredményre gyakorolt hatását I=0,001-0,009 szélső értékek között vizsgáltam. A szimulációk során e paramétert azonos mértékben, 0,002-es lépcsőkben növeltem. A szivárgási tényezőt $k=10^{-3}$ m/s, a műtárgyméretet mm=110 m, a talajvíz vastagságot vv=5,7 m értékeken kötöttem meg.

A *visszaduzzasztás* azonos mértékben, deciméteres nagyságrendekkel növekedett. A növekmények közötti különbség közel megegyező, 5 cm-en belüli (4.5. ábra).

Az *apadás* hasonlóképpen alakult, itt a növekmény különbségek 5 és10 cm közöttiek (4.6. ábra).

A szimulációk eredményeként tehát megállapítható, hogy a hidraulikus gradiens és a műtárgy (akadály) okozta hatások között *lineáris függvény kapcsolat* áll fönn a vizsgált I=0,001-0,009 tartományban.

A hidraulikus gradiens függvényében a visszaduzzasztás és apadás változását több megfigyelőpont adatsorára fektetett átlag görbével írtam le (F.7. és F.8. ábrák), melynek lefutását negyedfokú polinomokkal közelítettem. A képletben x az aktuálisan vizsgált paraméter, melynek függvényében nézem a jelenség változását.

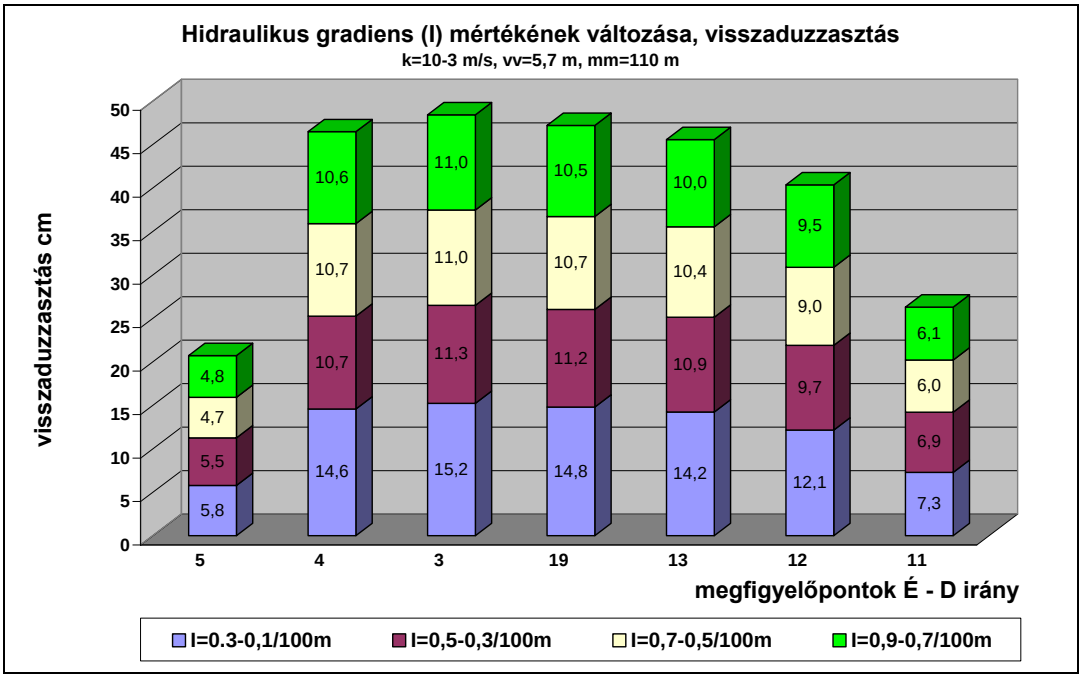
Visszaduzzasztás

$$\left[\frac{1}{4}\left(-19{,}8414+49{,}0896x-7{,}22552x^2+0{,}810417x^3+0{,}0330729x^4\right)\right] \qquad (4.1.)$$

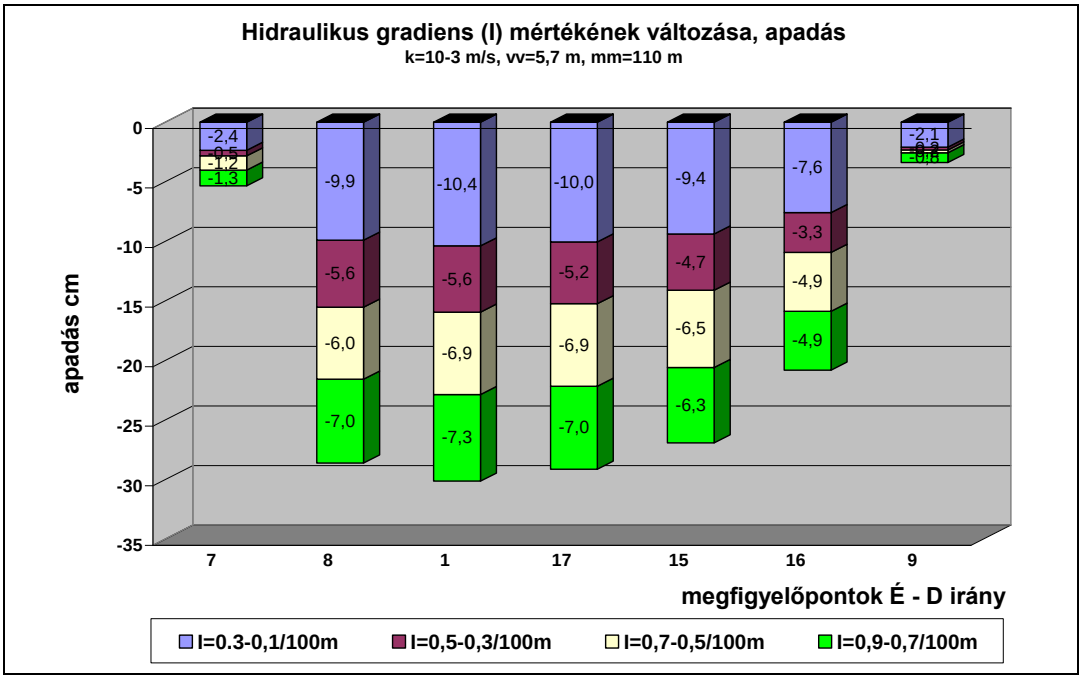
Apadás

$$\left[\frac{1}{4}\left(-29{,}8133+54{,}1813x-13{,}4109x^2+1{,}71875x^3+0{,}0757813x^4\right)\right] \qquad (4.2.)$$

A további modellezéseket a Haller-kapu létesítmény környezetében kialakult I=0,0003 gradiens értékkel folytattam, annak érdekében, hogy a modellezési eredmények a mért, valós állapottal összevethetők legyenek.



4.5. ábra Hidraulikus gradiens változás – visszaduzzasztás, a növekmények különbsége



4.6. ábra Hidraulikus gradiens változás – apadás, a növekmények különbsége

A kutatás tárgyát képező szivárgási kérdések elemzésében lamináris áramlást vettem figyelembe, hiszen a talajban fellépő gravitációs vízmozgás sebessége jóval alatta marad a kritikus (v_k) értéknek.
Ennek megfelelően a hidraulikus gradiens és a szivárgási sebesség között a kapcsolat lineáris, a Darcy-törvény (v = k I) érvényes.
Így az áramlási sebesség *hatásának a jellege,* a visszaduzzasztás – apadás tekintetében, *megegyező* lesz a hidraulikus gradiens változására bekövetkező hatásokkal.

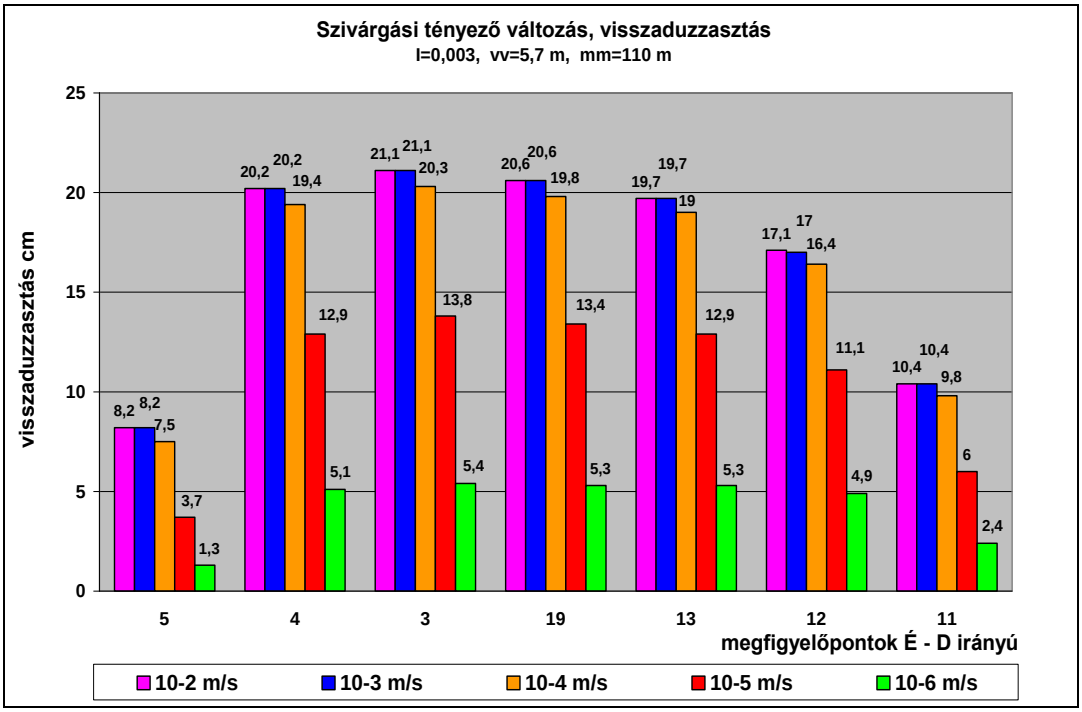
4.2.2.4. A szivárgási tényező változásának hatása
[D, A = f(k)]

A *k* tényező hatását a 10^{-2} – 10^{-6} m/s-os értékek közötti tartományban vizsgáltam.

Eddigi szakmai tapasztalataim szerint, e tartomány felöleli a talajspektrum azon részét (kavics frakciótól az iszapos finom homok frakcióig), amely a kutatásom tárgya tekintetében, a gyakorlati szivárgáshidraulikai feladatoknál előfordulhat.

Első lépésben a Haller-kapu területének eredeti adottságait (4.3. ábra) figyelembe véve, azokat állandó értéken tartva végeztem a szimulációkat. Ennek eredményeként, – amelyet a 4.7. és 4.8. ábrákon adok meg - a következőket lehetett megállapítani:

Visszaduzzasztás



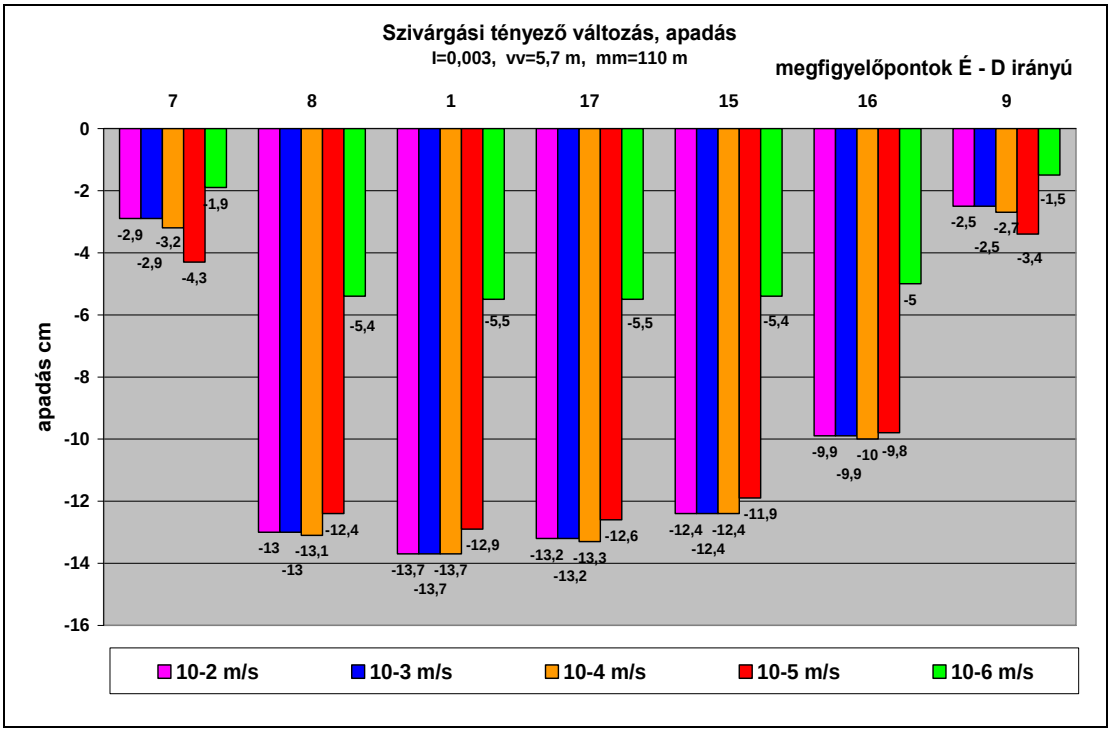
4.7. ábra Szivárgási tényező változás - visszaduzzasztás

- A **k=10^{-2} – 10^{-3} – 10^{-4} m/s**-os tartományban a szivárgási tényező egy (illetve fél) nagyságrenddel történő csökkentése közel megegyező hatást vált ki. A visszaduzzasztás értékének változása a különböző k tényezők függvényében 5 cm-en belüli, mely a mérnök gyakorlat szempontjából elhanyagolhatóan kicsi.
  A kialakult legnagyobb visszaduzzasztás a vizsgált paraméter összeállás esetén 20-25 cm közötti.
- A **k=10^{-4}–ről 10^{-5}-re és 10^{-6} m/s**-ra történő szivárgási tényező csökkenés már dm –es és egyre növekvő különbségű hatást eredményez a visszaduzzasztásban.
- A **k=10^{-6} m/s**-os szivárgási tényező esetén a visszaduzzasztás érték 10 cm–nél kisebb. Tekintettel a geotechnikai alapadat-rendszer alulhatározottságára a további szimulációknál e minimális hatást kiváltó *k* tényezővel már csak részben dolgoztam tovább.

A szivárgási tényező függvényében a visszaduzzasztás változását több megfigyelőpont adatsorára fektetett átlag görbével írtam le, melynek lefutását egy negyedfokú polinommal közelítettem. Az x független változó a vizsgált paraméter.

$$\left[\frac{1}{4}\left(326+302{,}392x+131{,}829x^2+23{,}8083x^3+1{,}47083x^4\right)\right] \qquad (4.3.)$$

Apadás



4.8. ábra Szivárgási tényező változás - apadás

- A **k=10^{-2} – 10^{-3} – 10^{-4} – 10^{-5}m/s**-os tartományban a szivárgási tényező egy (illetve fél) nagyságrenddel történő csökkentése gyakorlatilag megegyező hatást vált ki. Az apadás értékek közötti különbség 5 cm-en belül változik.
- **A 10^{-5}-ről 10^{-6} m/s**-ra történő szivárgási tényező csökkenés 5-10 cm közötti apadás különbséget eredményez.

Az apadás nagyságrendje a különböző k tényezők esetén a visszaduzzadáshoz képest – a vastagságtól függően ~30 %-kal kisebb. Nagysága nem éri el a 15 cm-t, a vizsgált paraméter összeállás esetén.

Az apadás értékeire fektetett átlag görbét szintén negyedfokú polinommal közelítettem. Az x az aktuálisan vizsgált szivárgási tényező.

$$\left[\frac{1}{4}\left(31{,}2+109{,}908x+52{,}3458x^2+10{,}7417x^3+0{,}804167x^4\right)\right] \qquad (4.4.)$$

A kapott eredmények alapján a további modellezési munkafolyamatban nagyrészt már csak a markánsan elkülönülő k=10^{-3} –10^{-4} – 10^{-5} m/s-os szivárgási tényezőket vettem figyelembe. A talajvíz áramlásánál ezek az értékek jellemzik a valóságban leginkább szerepet játszó rétegösszleteket és képezik leggyakrabban a vizsgálati tervezési feladatok tárgyát.

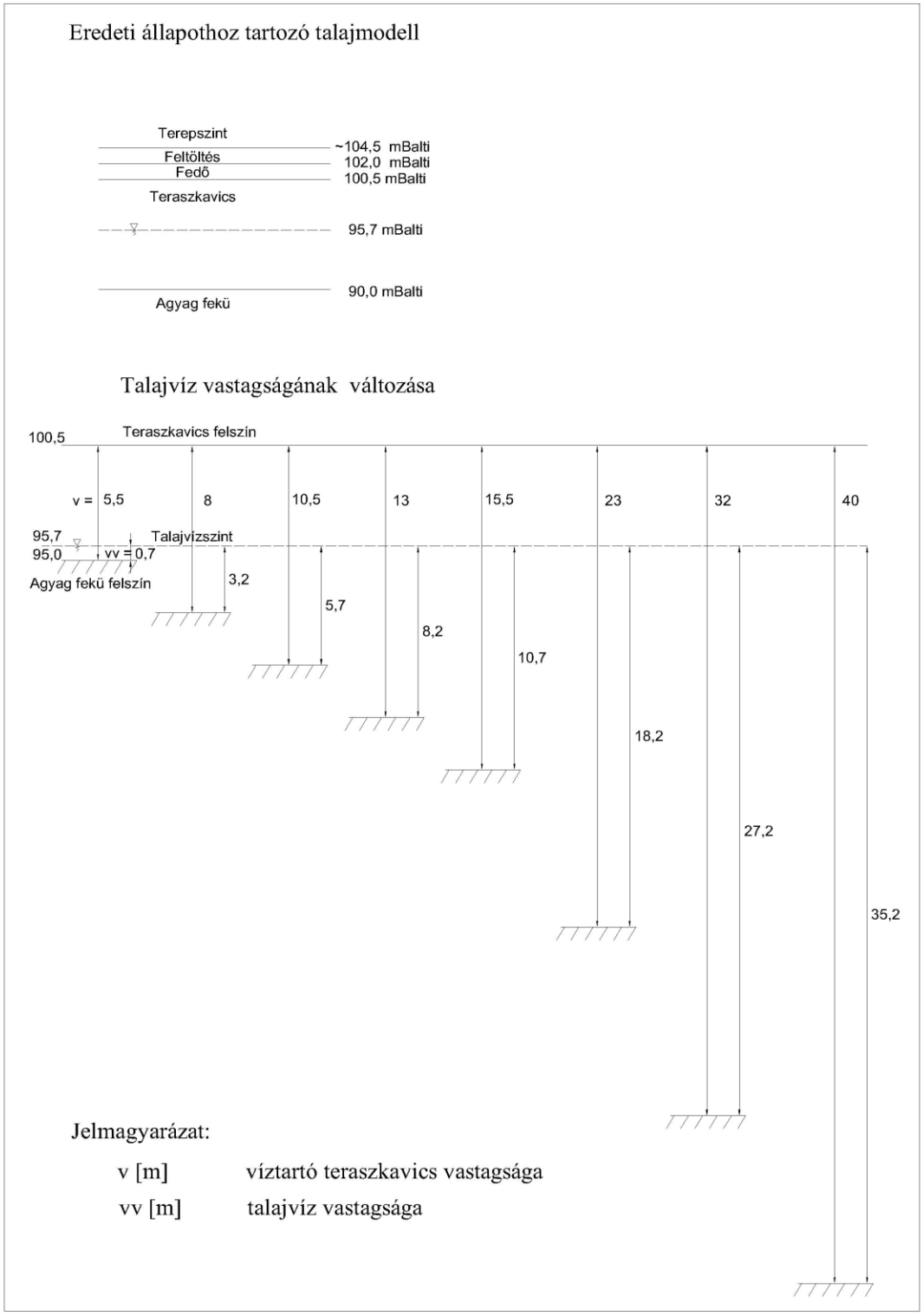
A szivárgási tényező értéke a vízvezető közeg tömörségétől is függ, lásd 2.1. fejezet. Ilyen módon, a különböző tömörségű talajok hatását a visszaduzzasztásra, apadásra, a *k* tényező hatásának vizsgálatán keresztül vettem figyelembe. A tömörséget jellemző hézagtérfogat (n) reális szélsőértékeit felvéve, a szivárgási tényezőben ~ 2,5 nagyságrendi változás keletkezik, Ez beletartozik a *k* tényezőnél, a szimulációknál figyelembe vett öt nagyságrendnyi változás szélesebb tartományába.

4.2.2.5. Az áramló talajvíz vastagság változásának hatása [D, A = f(vv)]

Az áramló talajvíz vastagságát 0,7 – 35 m között változtattam a víztartó rétegben (4.9. ábra).

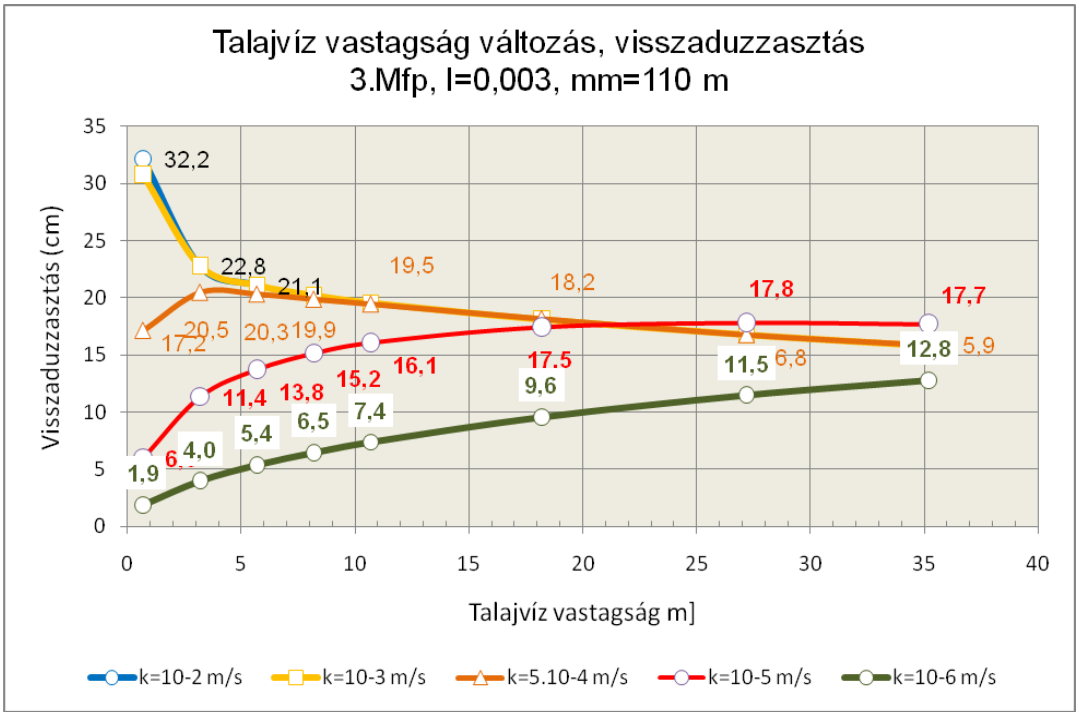
Tapasztalataim szerint a műszaki-agrárműszaki gyakorlatban a legtöbb vizsgálat e határok között történik. Ennél kisebb, vagy nagyobb vízvastagságok csak elvi, matematikai jelentőséggel bírnak és a hatások nem térnek el jellegükben a vizsgált intervallum eredményétől.

E paraméter hatáselemzésnél modelleztem a visszaduzzasztásban és apadásban bekövetkező változásokat, k=10^{-2} – 10^{-6} m/s közötti szivárgási tényezők esetén. A hidraulikus gradienst I=0,003, a műtárgyméretet mm=110 m értékeken vettem figyelembe. A szimulációk eredménye alapján, amelyet a 4.10.a.b. és 4.11.a.b. ábrák hivatottak szemléltetni, jól lehatárolható tartományokat tudtam kijelölni mind a *hatások tendenciáját*, mind pedig annak *mértékét* tekintve.

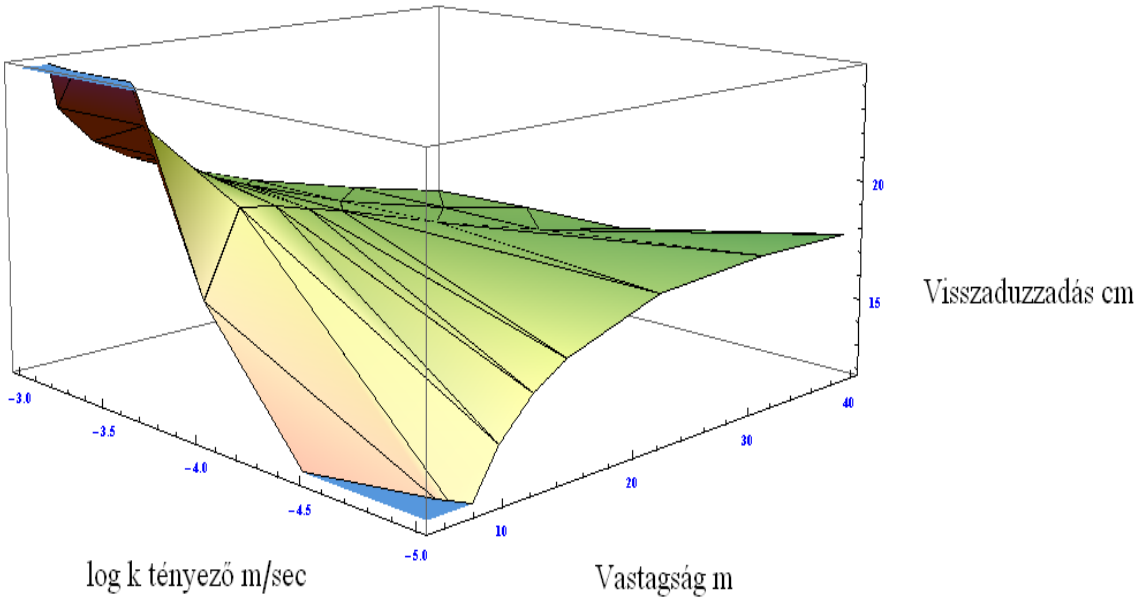


4.9. ábra Vastagság változás

Visszaduzzasztás



4.10.a. ábra A talajvíz vastagságának változása – visszaduzzasztás



4.10.b. ábra A talajvíz vastagságának változása - visszaduzzasztás, felületábra

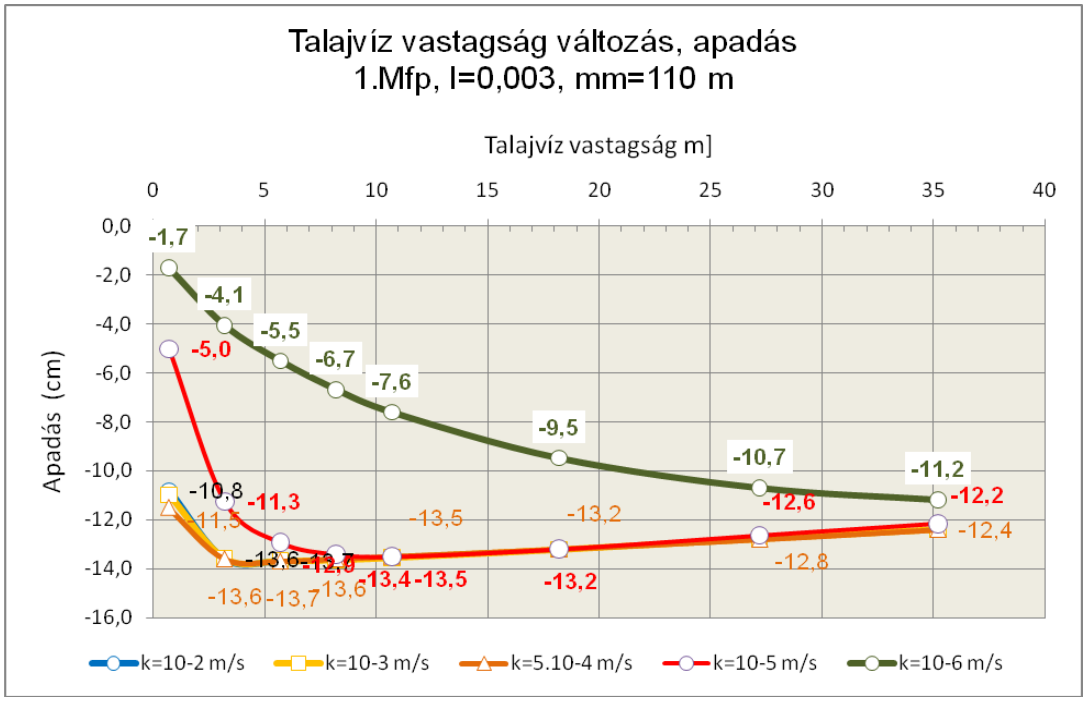
A visszaduzzasztás tendenciája:

- **10^{-2} > k > 2-3*10^{-4} m/s** tartományban a visszaduzzasztás értéke a talajvíz vastagságának növekedésével fokozatosan csökken.
- **2-3*10^{-4} > k > 7*10^{-5} m/s** tartományban egy adott víz vastagságig nő, majd fokozatosan csökken.
- **7*10^{-5} > k > 10^{-5} m/s** tartományban a víz vastagságának növekedésével fokozatosan nő.
- **10^{-6} m/s** k tényező esetén minimális visszaduzzasztások mellett a tendencia megegyező az előző tartományéval.

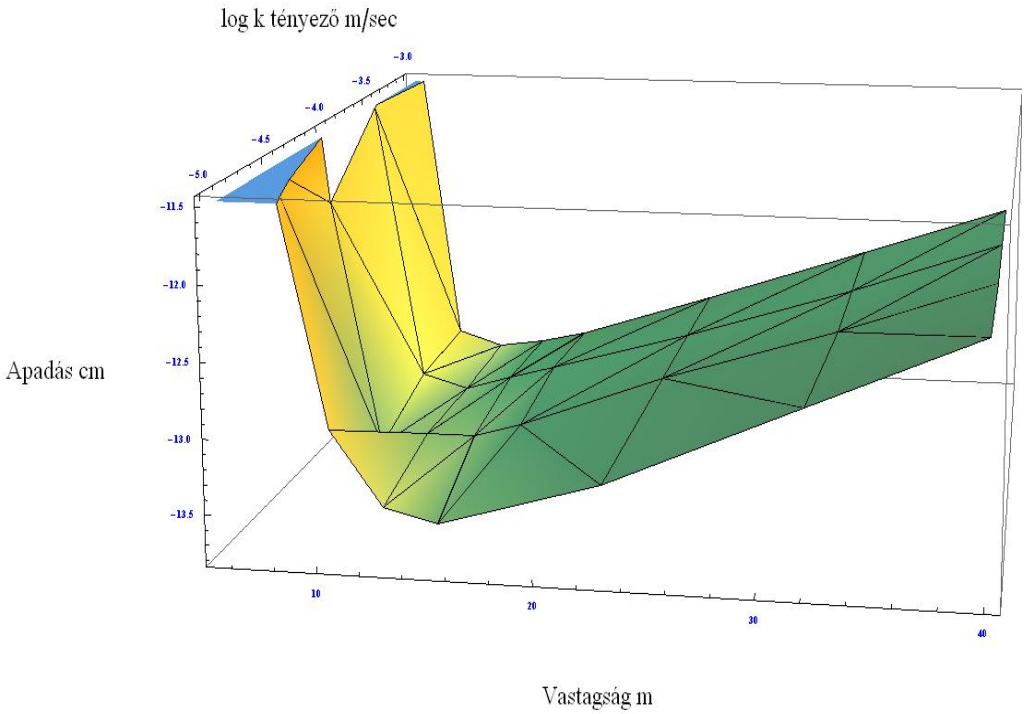
A visszaduzzasztás mértéke:

A különböző k tényezők függvényében a legkisebb vízvastagság esetén a legnagyobb a különbség (több dm) a visszaduzzasztás értékekben.
A növekvő vízvastagsággal csökken a kiváltott hatások különbsége az egyes szivárgási tényezőknél.
Egy bizonyos vízvastagság elérése után (jelen paraméter összeállás esetén vv=~20 m) 5 cm-es eltérésen belül megegyeznek a visszaduzzasztás értékek, így gyakorlatilag az nem függ attól, hogy a talaj milyenségétől.
A visszaduzzasztás ~5-35 cm értékek között változik, mm=110 m műtárgy méret mellett.

Apadás



4.11.a. ábra A talajvíz vastagságának változása - apadás



4.11.b. ábra A talajvíz vastagságának változása - apadás,felületábra

Az apadás tendenciája:

- **A k=10^{-2} - 10^{-4} m/s** közötti tartományban **a ~3–9 m-es vízvastagságok között**, gyakorlatilag megegyező apadási értékekkel, a legnagyobb az apadás. Ettől kisebb, illetve nagyobb vastagság esetén nagysága csökken.
- **A k=10^{-5} m/s-os** szivárgási tényező esetén, **a ~0,7-5 m között** viszonylag meredeken nő az apadás, majd a vastagság növekedésével fokozatosan csökken.
- **A k=10^{-6} m/s-os** k tényezőnél viszonylag egyenletes növekedés mutatkozik minimális apadási értékek mellett.

Az apadás mértéke:

A legkisebb vízvastagság mellett adódnak a nagyobb (10 cm-en belüli) különbségek az apadás értékében a különböző k tényezőnél.
Jelen paraméter összeállás esetén, az értékek a vv=~5 m-es vízvastagságtól gyakorlatilag cm-en belül megegyeznek, így az apadás e tartományban a szivárgási tényezőtől nem függ.
Az apadás 15 cm–nél kisebb mértékű, mm=110 m műtárgy méret mellett.

A különböző szivárgási tényezőknél a vízvastagság változás függvényében kiadódott visszaduzzasztás és apadás értékekre illesztett görbék lefutását hetedfokú polinomokkal közelítettem (F.10. - F.14. ábrák). Az x független változó, az aktuálisan vizsgált paraméter.

Visszaduzzadás

$k=10^{-3}$ *m/s* (4.5)

$$\left[\frac{1}{4}\left(787{,}863-301{,}691x+54{,}3213x^2-5{,}28009x^3+0{,}296191x^4-0{,}00954049x^5+1{,}62924*10^{-4}x^6-1{,}137*10^{-6}x^7\right)\right]$$

$k=10^{-4}$ *m/s* (4.6.)

$$\left[\frac{1}{4}\left(-297{,}126+169{,}817x-31{,}45x^2+3{,}10104x^3-0{,}175774x^4+0{,}00570675x^5-9{,}80465*10^{-5}x^6+6{,}87422*10^{-7}x^7\right)\right]$$

$k=10^{-5}$ *m/s* (4.7.)

$$\left[\frac{1}{4}\left(-205{,}391+93{,}4392x-15{,}1535x^2+1{,}39222x^3-0{,}0754681x^4+0{,}00237617x^5-3{,}99392*10^{-5}x^6+2{,}75572*10^{-7}x^7\right)\right]$$

Apadás

$k=10^{-3}$ *m/s* (4.8.)

$$\left[\frac{1}{3}\left(186{,}093-101{,}541x+18{,}8143x^2-1{,}85893x^3+0{,}105447x^4-0{,}00342304x^5+5{,}87775*10^{-5}x^6-4{,}11801*10^{-7}x^7\right)\right]$$

$k=10^{-4}$ *m/s* (4.9.)

$$\left[\frac{1}{4}\left(195{,}877-116{,}04x+22{,}2023x^2-2{,}25232x^3+0{,}130541x^4-0{,}00431131x^5+7{,}50403*10^{-5}x^6-5{,}31311*10^{-7}x^7\right)\right]$$

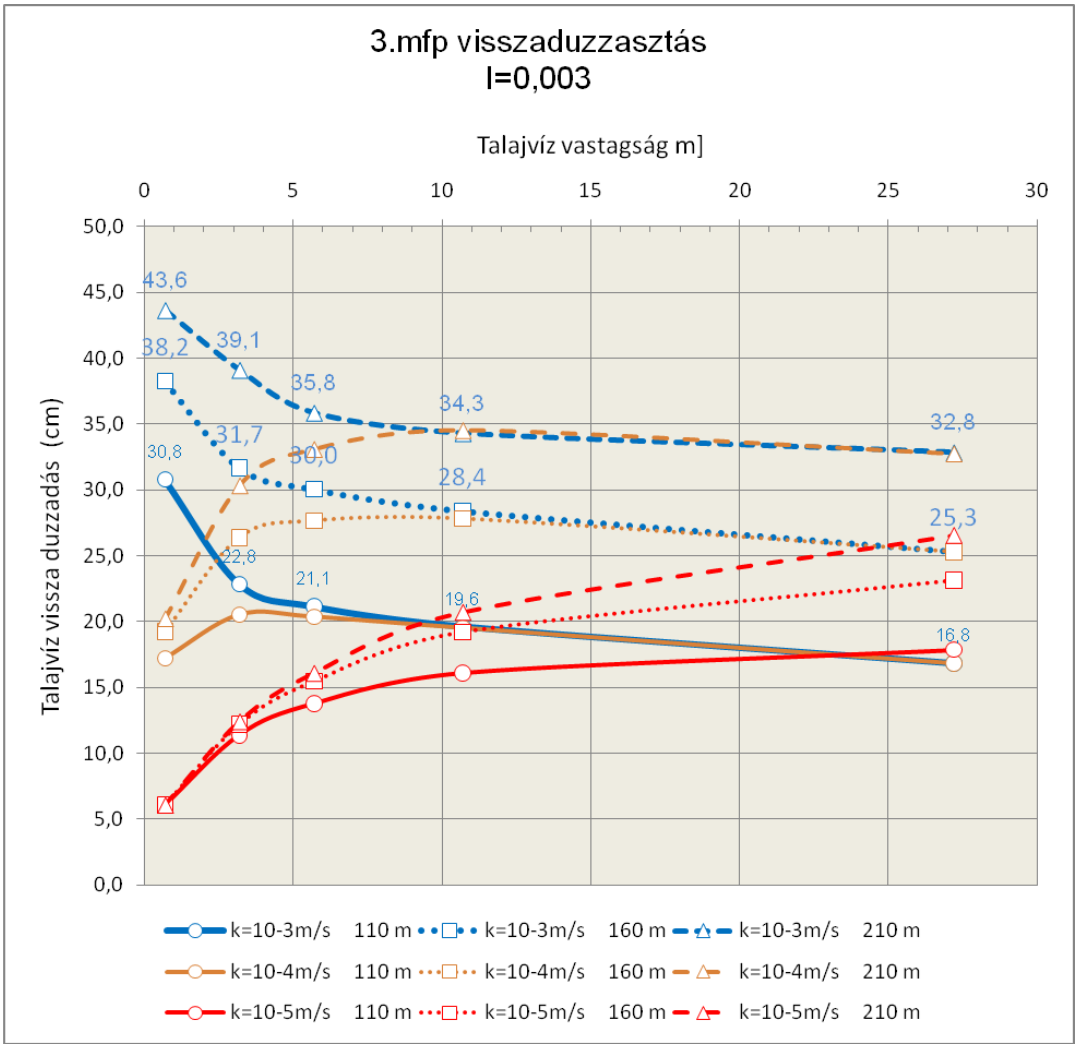
$k=10^{-5}$ *m/s* (4.10.)

$$\left[\frac{1}{3}\left(251{,}491-112{,}475x+18{,}7216x^2-1{,}71512x^3+0{,}0922078x^4-0{,}00288044x^5+4{,}81076*10^{-5}x^6-3{,}30304*10^{-7}x^7\right)\right]$$

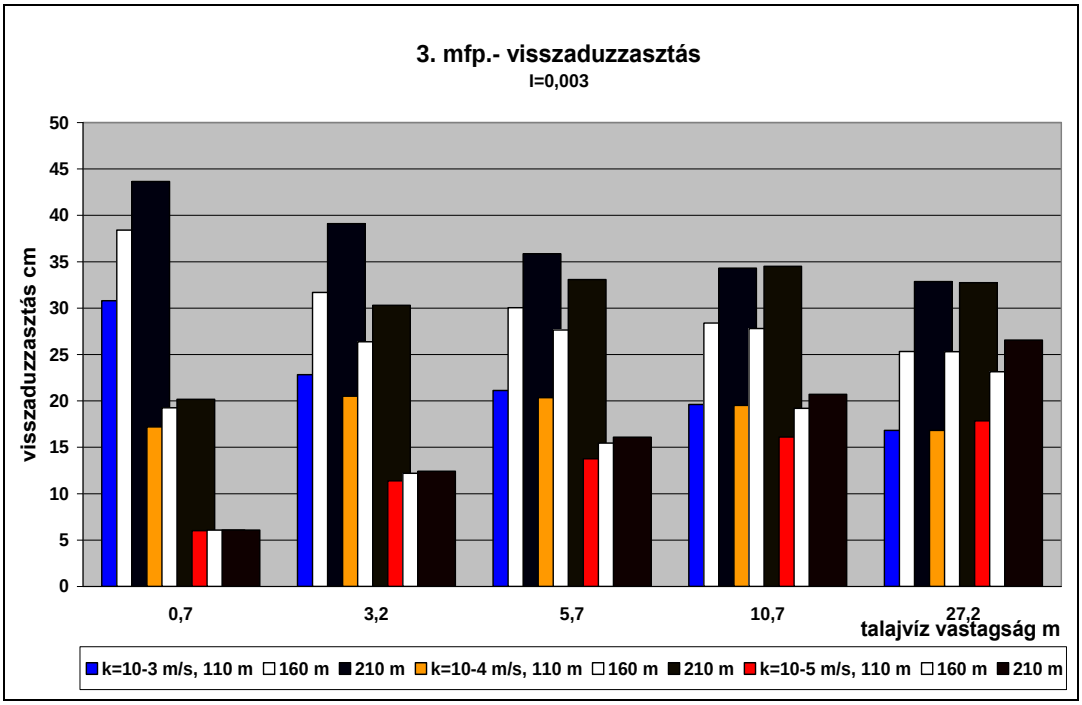
4.2.2.6. Az akadály (műtárgy) méret változásának hatása
[D, A = f(mm)]

Visszaduzzasztás

A modellezett és mért érékek összevethetősége érdekében a műtárgy hosszát a Haller-kapu létesítmény méretéből kiindulva mm=110 m-re vettem fel. Ezt az értéket növeltem 50 és 100 m-rel. A visszaduzzasztás változását, k=10^{-3}–10^{-4}–10^{-5} m/s-os szivárgási tényezők és a vv=0,7-35 m közötti vízvastagságok esetében a 4.12.a. és b ábrák szemléltetik.



4.12.a. ábra Műtárgy méret változás – visszaduzzasztás, grafikon



4.12.b. ábra Műtárgy méret változás – visszaduzzasztás

A **k=10^{-3} m/s**-os szivárgási tényezőnél a visszaduzzasztás növekménye a vastagságtól függetlenül közel állandó értékű. A vastagság növekedésével a visszaduzzasztás nagysága kismértékben, de fokozatosan csökken.

Nagyságrendjét tekintve az eredeti méret 50 m-rel történő megemelésénél (mm=160 m) a növekmény értéke 10 cm-en belüli. A 100 m-rel történő növelésnél (mm=210 m) 10-20 cm közötti a visszaduzzadás növekménye.

A **k=10^{-4} m/s** esetén a legkisebb vízfelületnél 5 cm-en belüli a különbség a méret változások okozta visszaduzzasztások között. A vastagság növekedésével a különbségek nőnek.

Nagyságrendje hasonlóan alakul, mint a 10^{-3} m/s-os k tényezőnél.

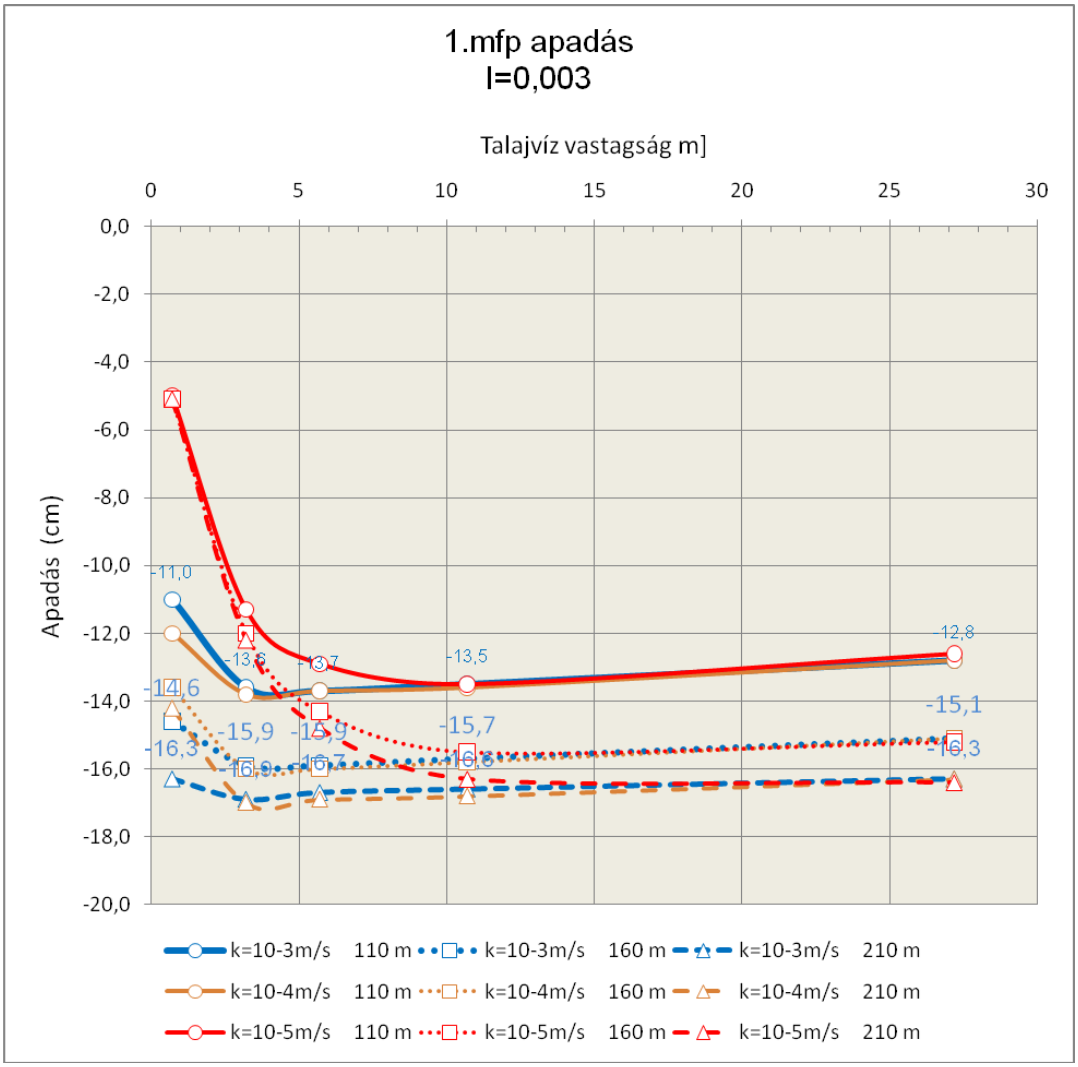
A **k=10^{-5} m/s**-os szivárgási tényezőnél kis vízvastagság esetén a visszaduzzasztást gyakorlatilag nem befolyásolja a méret növekedés. A vastagság növekedésével a visszaduzzasztás értéke és a különbségek is 10 cm-en belül maradnak.

Tekintettel e kismértékű változásra, gyakorlatilag kimondható, hogy a 10^{-5} m/s-os szivárgási tényezőnél a műtárgy méretváltozása elhanyagolható szerepet játszik a visszaduzzasztásban.

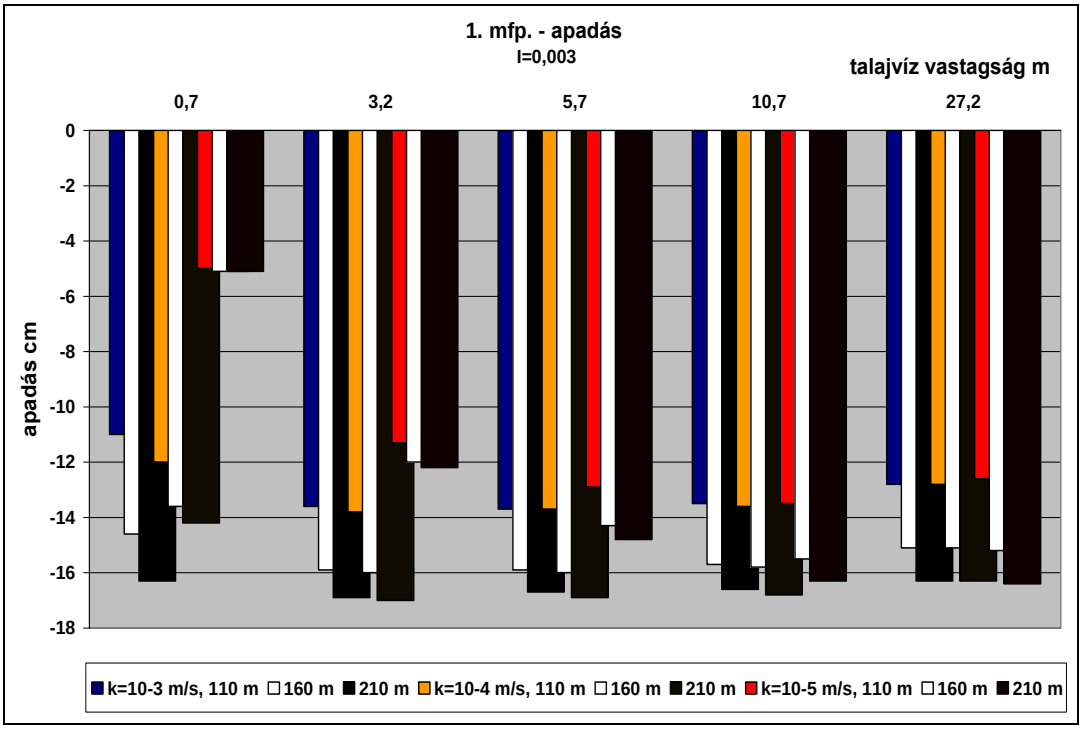
Ahogy nő a műtárgy méret, úgy tolódik ki az a vízvastagság, amelynél az egy nagyságrendű *k* tényező különbségek ellenére a visszaduzzasztás értéke minden szivárgási tényezőnél közel megegyező.

Apadás

Az 50, illetve 100 m-rel megnövelt műtárgy méret, az apadás értékében deciméteren belüli változásokat eredményez. A relatíve nagyobb különbségek a kis vízvastagságok mellett adódnak. A közel 10 m-es vízvastagságtól az apadások értéke - függetlenül a szivárgási tényezőtől - megegyezik. Nagyságrendjük 5-17 cm közötti (4.13.a. és b. ábrák).



4.13.a. ábra Műtárgyméret változás – apadás, grafikon



4.13.b. ábra Műtárgyméret változás – apadás

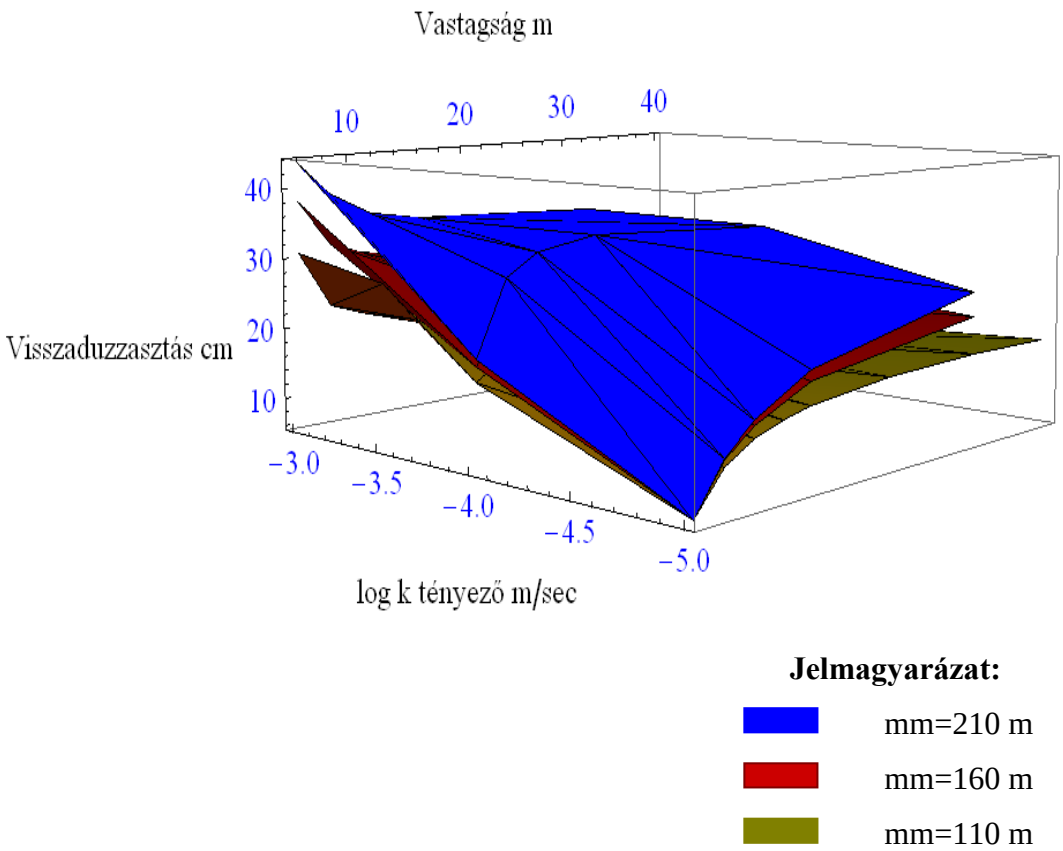
A **k=10^{-3}-10^{-4} m/s**-os k tényezőnél a növekmény értékek különbsége a vastagság növekedése mellett, közel állandó.

A **k=10^{-5} m/s**-os szivárgási tényezőnél – hasonlóan a visszaduzzadáshoz - a vastagság növekedésével nyílnak az apadás különbségek a különböző műtárgy méreteknél.

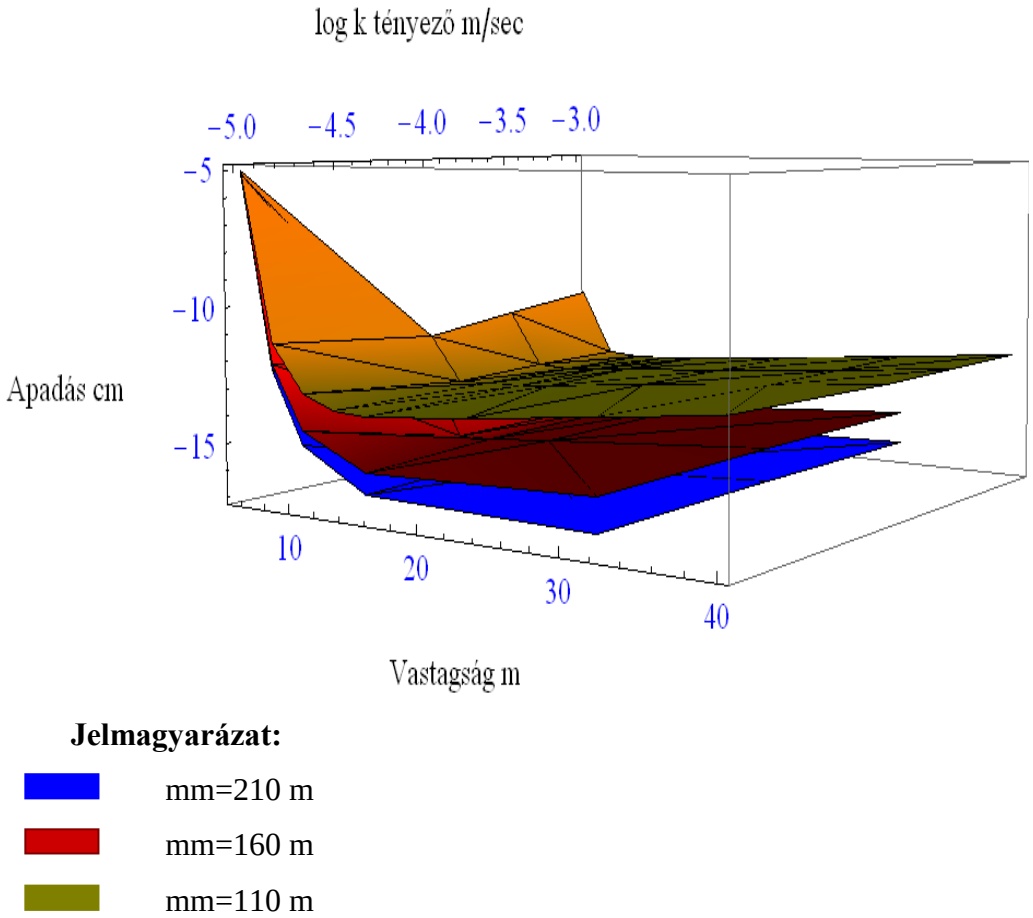
4.2.2.7. A *k* tényező – talajvízvastagság – műtárgyméret változás együttes hatása [D, A = f(k, vv, mm)]

Megvizsgáltam együttesen is a szivárgási tényező, az áramló talajvíz vastagsága és a műtárgy méret változásának hatását a visszaduzzasztásra és az apadásra.

A paraméterek függvényében elkészítettem egy 3 dimenziós felületábrát. Ennek segítségével, adott k tényező, vízvastagság, műtárgyméret esetén, a visszaduzzadás értéke egyszerűen leolvasható. Ugyanezt az apadásra is előállítottam. Az eredményeket a 4.14. -4.15. és F.15. – F.16. ábrák tartalmazzák.



4.14. ábra Felületábra 3D - visszaduzzasztás



4.15. ábra Felületábra 3D - apadás

E felületábrák nagymértékben megkönnyítik a térszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának előrebecslését, betervezését.

A számításokat közel merőleges áramlásnál, I=0,003 hidraulikus gradiens értékkel végeztem. Más paraméter összeállás esetén, az ott megállapított törvényszerűségek figyelembe vételével lehet az ábrákból leolvasható hatásokat módosítani.

A felületábrák k=10^{-3} – 10^{-4} – 10^{-5} m/s szivárgási tényezők esetén,
vv=0,7 – 35 m talajvíz vastagságok között,
mm=110 – 160 – 210 m műtárgyméretnél alkalmazhatók.

De ettől eltérő (nagyobb, illetve kisebb) értékekre is kidolgozható. Mint arra már az előzőekben kitértem, a gyakorlat szempontjából általában e paraméter tartományok között történő áramlás a jellemző.

A felületábrákat a *Wolfram Mathematica 7.0* programrendszer alkalmazásával készítettem.
A program kétváltozós függvény segítségével a szimulációkból kapott adathalmaz pontjaira Lagrange féle interpolációval felületet illesztett.
Az ábrákon a *k* tényező koordinátáját logaritmikus léptékben, a talajvízvastagság és a visszaduzzadás, illetve apadás léptékét normál beosztásban vettem fel.
A felületábra az alapadatként megadott pontokra teljesen azonos értéket szolgáltatott, (a hibaérték 0%).
Kontroll (köztes) pontok felvételével igazoltam, hogy az ábra 1%-on belüli hibaértékkel dolgozik, mely a vizsgált folyamat szempontjából elhanyagolhatóan kis nagyságrendű.
Az előállított felületeken egy új ponthoz - k tényező, vízvastagság, műtárgyméret - tartozó ismeretlen visszaduzzadás, illetve apadás érték interpolációval meghatározható.

4.2.2.8. A talajvíz szintjéhez képest a műtárgy magassági helyzetének áramlást befolyásoló hatása

Kutatásom során e terület vizsgálatára nem tértem ki, annak szerteágazó, több kérdést fölvető volta miatt.

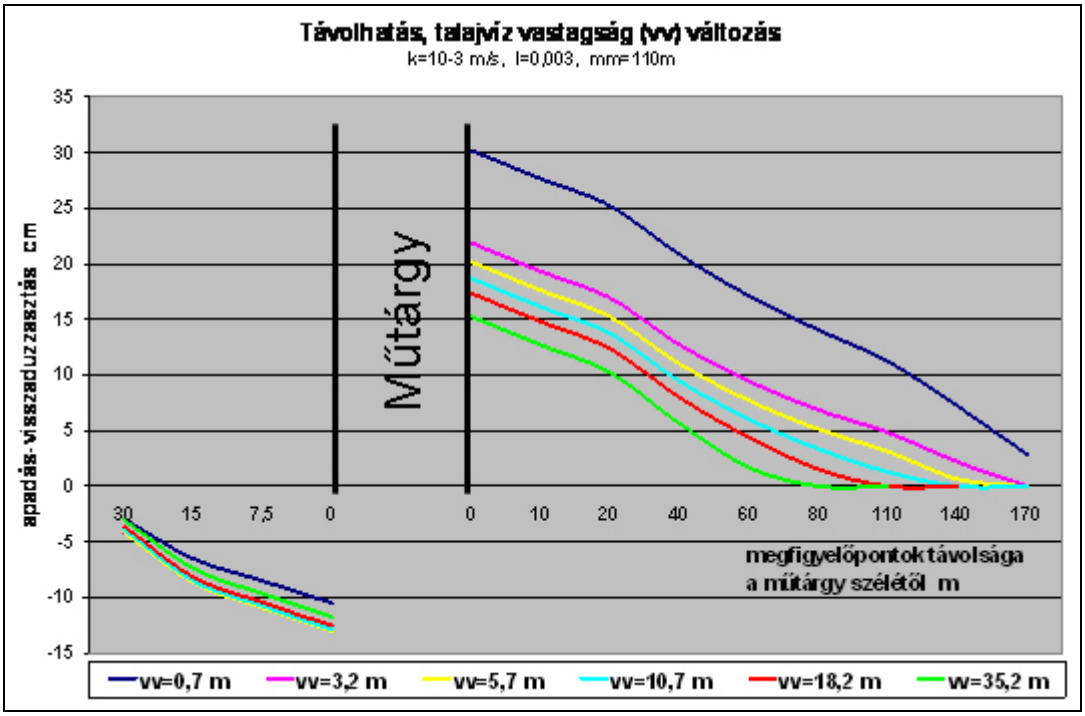
A létesítmények magassági elhelyezkedése tekintetében alapvető különbség adódik a pontszerű és a vonal menti kiterjedésű építmények között.

A **pontszerű létesítmények** (mélygarázsok, aknák, állomások, stb.) általában a felszínről vízzáró oldalfalas határolású technológiával, - a pesti terület geológiai adottságát kihasználva, - az agyag fekübe bekötve épülnek.
Így függőleges értelemben a térszinttől a vízzárónak tekinthető feküig egy beton „fal” keletkezik, mely lezárja a talajvíz áramlásának útját teljes magasságban.
A talajvíz nekiütközve az akadálynak megreked és csak vízszintes szivárgás útján a műtárgyat oldalról megkerülve, tud tovább haladni. A széleken az áramló víz sebessége felgyorsul, az áramvonalak erősen besűrűsödnek.

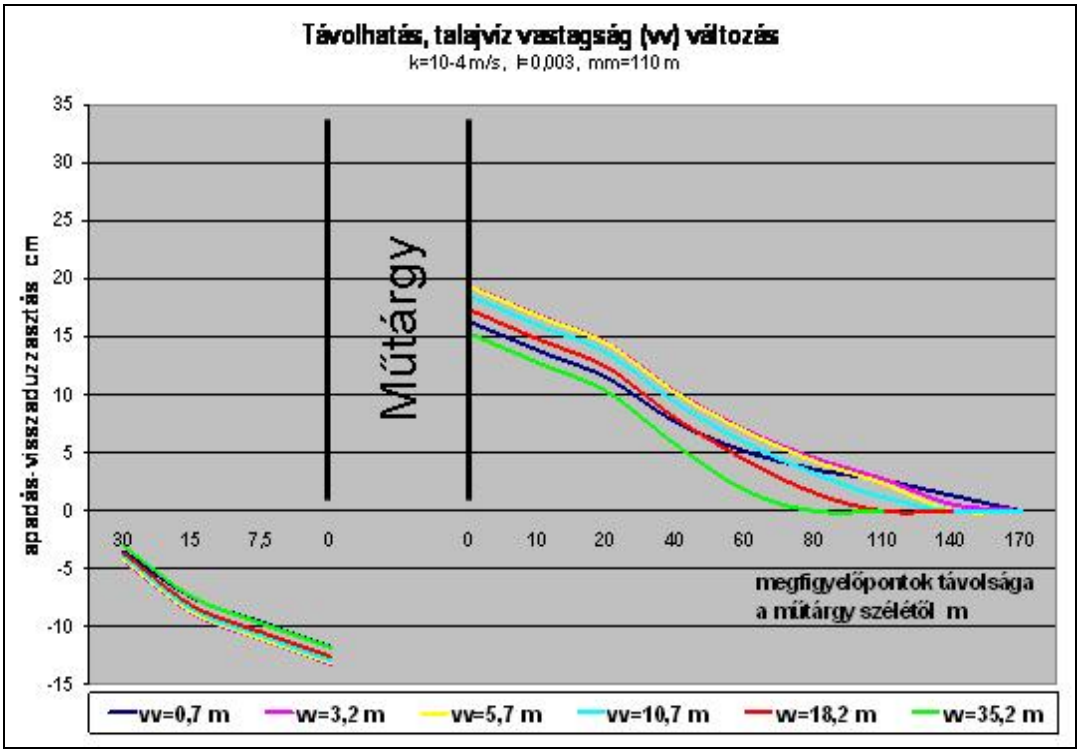
A **vonalas létesítmények** (metró-, közműalagutak, stb.) magassági vonalvezetésnél a probléma sokrétűségét az okozza, hogy a létesítmények nyomvonala, több, esetleg jelentős nagyságrendi különbségű talajfizikai, szivárgáshidraulikai jellemzőkkel rendelkező rétegen halad keresztül, vagy a réteghatárral szöget bezáró az áramlás. A talajvíz függőleges értelemben a műtárgy fölött és alatt is tud áramolni. Így e kérdés vizsgálata igen összetett. A modellszámítási eredmények általánosítására kicsi a lehetőség.

4.2.3. Távolhatás

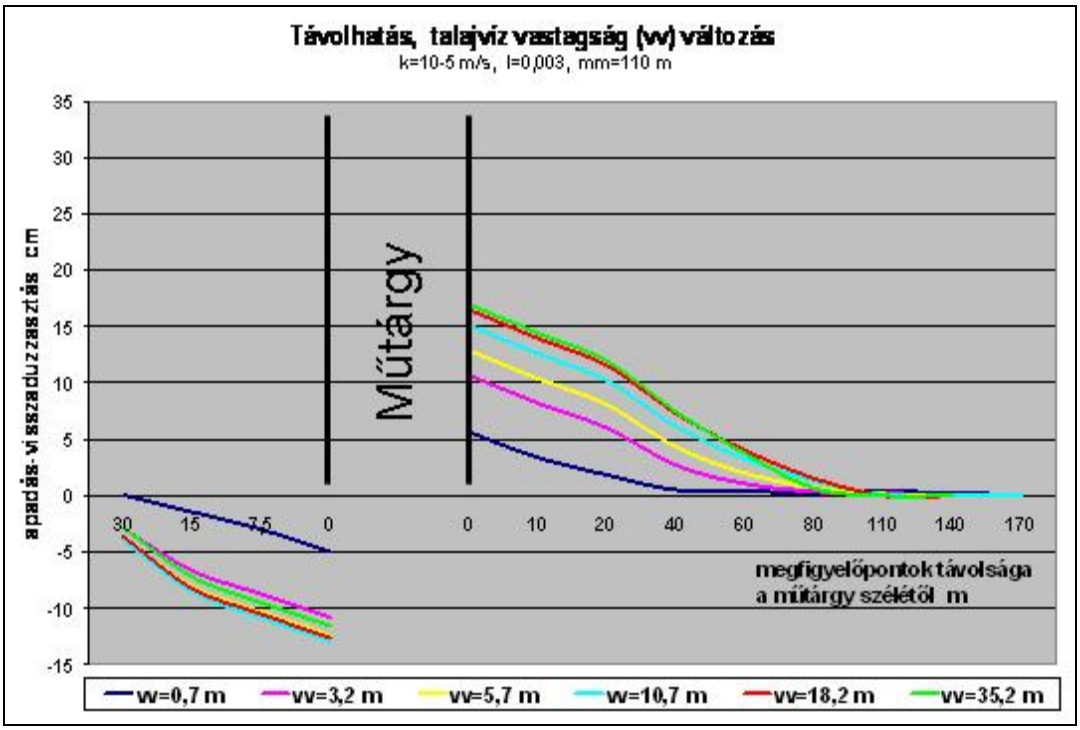
A szimulációk eredményeként egyértelművé vált, hogy a visszaduzzasztásra és apadásra megállapított szivárgási tartományok, tendenciák és összefüggések fennállnak a távolhatások esetében is, még összetettebb formában.
A kiváltott hatások a műtárgytól távolodva, a műtárgy mellett kialakuló változásokkal megegyező jelleggel csökkennek, majd fokozatosan megszűnnek (4.16.a,b,c. és F.17. ábrák).
A távolhatás vizsgálata érdekében, a módosuló talajvízszinteket (visszaduzzasztás, apadás), a műtárgyra merőlegesen elhelyezett megfigyelőpontokban rögzítettem. A pontok az akadály közelében sűrűbben, 10 m, távolodva 20 m, majd 30 m-enként kerültek kiosztásra (3.13. ábra).



4.16.a. ábra Távolhatás, k=10^{-3} m/s



4,16.b. ábra Távolhatás, k=10^{-4} m/s



4.16.c. ábra Távolhatás, k=10-5 m/s

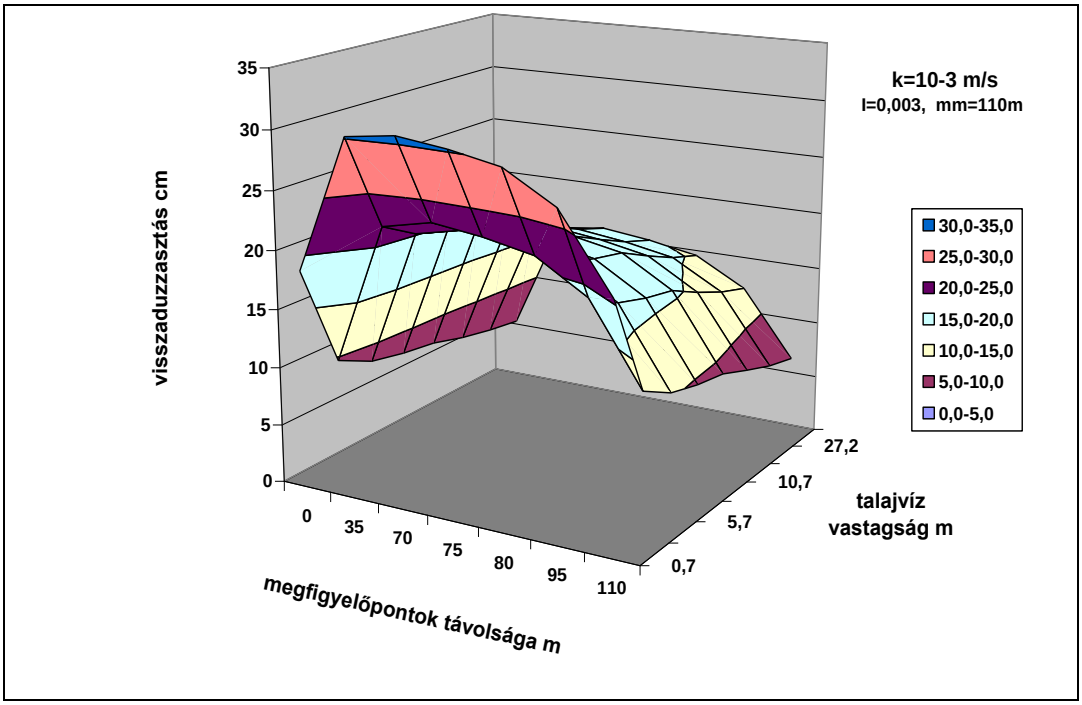
Visszaduzzasztás

- **10^{-2} > k > 2-3*10^{-4} m/s** tartományban - az 5.2.2.4. pontban leírtak alapján – ahogy nő a talajvíz vastagsága, úgy csökken a visszaduzzasztás. A csökkenő visszaduzzasztás kisebb távolhatást eredményez. Azaz minél nagyobb a talajvíz vastagsága, annál kisebb a távolhatás.
  Nagysága a meghatározó paraméterek összeállása, variációja függvényében változik.
- **2-3*10^{-4} > k > 7*10^{-5} m/s** tartományban a visszaduzzasztás egy adott víz vastagságig nő, majd fokozatosan csökken. Így a változások a két szélső tartományban létrejövő hatások között alakulnak.
- **7*10^{-5} > k > 10^{-5} m/s** tartományban a visszaduzzasztás tendenciája fordított, a vastagság növekedésével fokozatosan ellapulva nő az értéke. Ezért a nagyobb vastagságnál nagyobb a távolhatás mértéke.
  Nagyságrendjét tekintve, azonban kisebb, mint a k=10^{-2} > k > 7*10^{-5} m/s szivárgási tényezők közötti tartományokban.

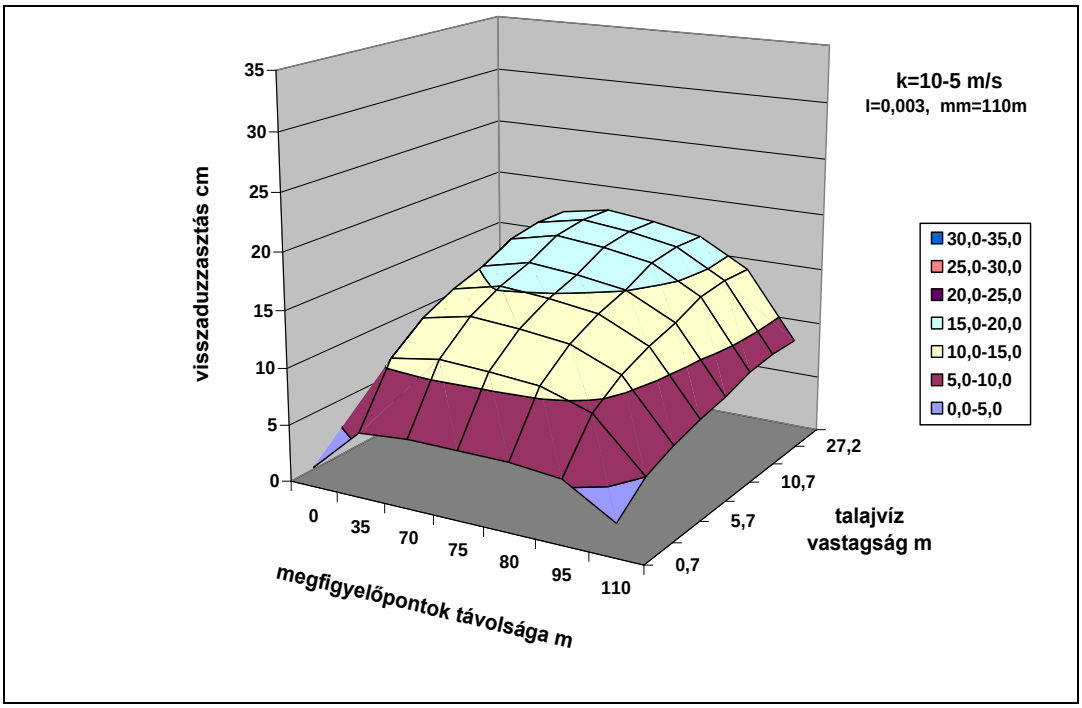
Apadás

Az apadás értékek 5 cm-en belüli különbséggel teljesen megegyező tendenciával, fokozatosan csökkennek.
A számított legnagyobb apadás, az eredeti adottságok mellett, még a mm=210 m-es műtárgy méret esetén sem éri el a 20 cm-t.
A Duna közelsége miatt, a vizsgált ~40 m-es távolságon belül az apadás értékek a k=10^{-5} m/s, vv=0,7 m eset kivéve, nem futnak ki nullára

Mindkét hatás tekintetében megállapítható, hogy a visszaduzzadt, illetve leapadt talajvíz, közvetlen az akadály mellett, azzal párhuzamosan középről két irányba áramlik. Értéke fokozatosan csökken, melynek tendenciáját a 4.17. a és b ábrák szemléltetik.



4.17.a. ábra A műtárgy frontján kialakuló visszaduzzasztás, k=10^{-3} m/s



4.17.b. ábra A műtárgy frontján kialakuló visszaduzzasztás, k=10^{-5} m/s

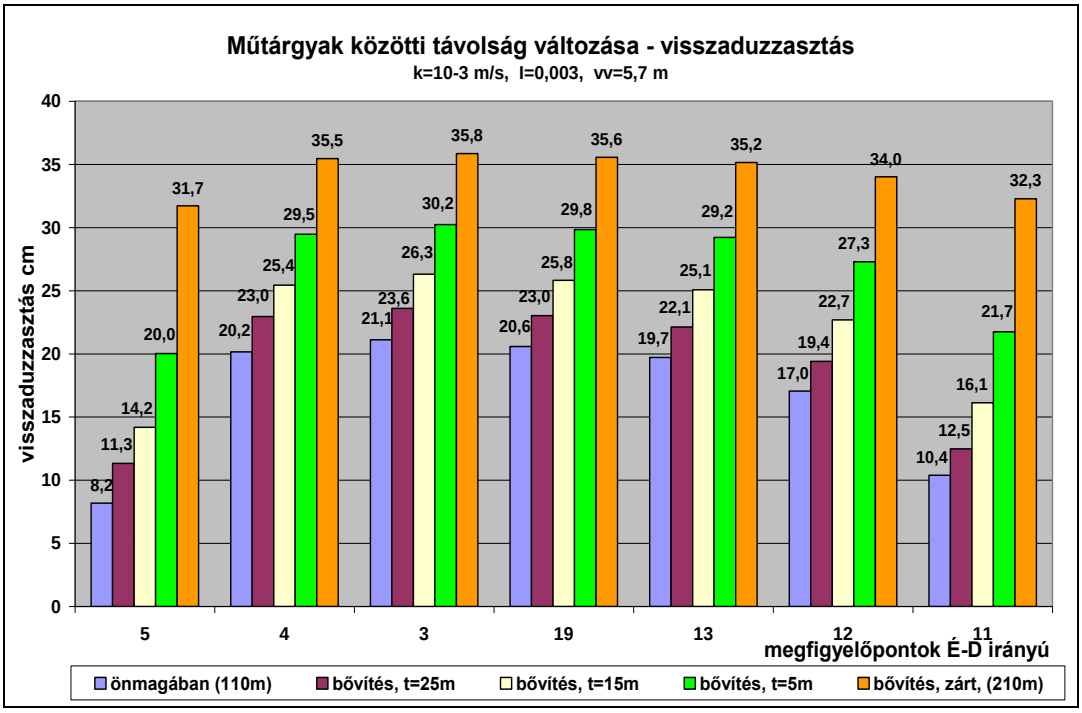
A vízszint emelkedés és csökkenés következtében a műtárgy mellett az eredeti hidraulikus gradiens értéke is megváltozik. A változás mértékének meghatározása jelen kutatás tárgyát nem képezi.

4.2.4. A műtárgyak hatásának egymásra halmozódása

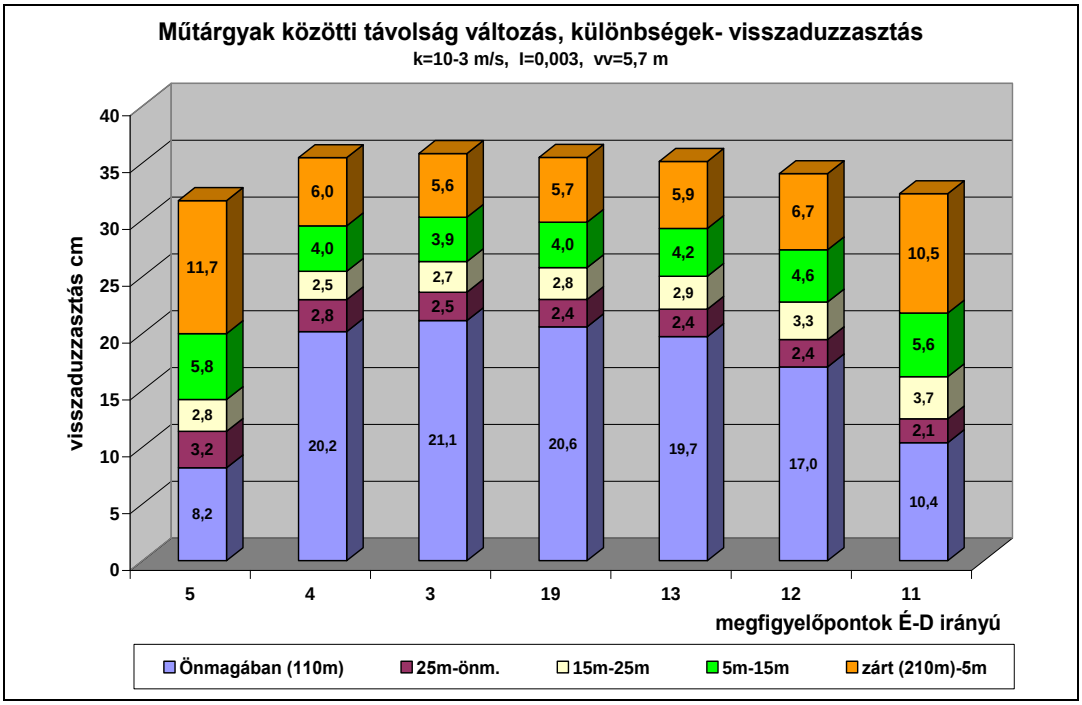
Kutatásom során vizsgáltam még azt a kérdést is, hogy a műtárgyak (akadályok) közötti távolság változása, milyen hatással van a talajvízáramlásra. Mekkora az a méret a két létesítmény között, amely esetén már az zárt, folyamatos *„falként”* viselkedik.
Modelleztem az eredeti műtárgy hatását önmagában (mm=110 m), majd a létesítménytől 25, 15, 5 és 0 m távolságban lévő akadállyal együtt az eredeti adottságok mellett (4.18.-4.19. ábrák).

Visszaduzzasztás

A szomszéd műtárgyak hatása, a műtárgy méretétől függően, annak közepén a 25 m-es távolság esetén 10-15 %-os visszaduzzasztás növekedést eredményez, 5 m-es távolságnál már 40-65 %-os a növekmény.
A növekmények különbségéből megállapítható, hogy a szomszédos akadályok szélein kialakuló hatások szuperponálódásából létrejövő visszaduzzasztások nagyságrendje kisebb mértékű, mint az akadály által, annak közepén okozott duzzasztás.



4.18.a. ábra Egymásra halmozódás – visszaduzzasztás



4.18. ábra Egymásra halmozódás - visszaduzzasztás, a növekmények különbsége

Az eredeti környezeti adottságok mellett – I=0,003, k=10^{-3} m/s, vv=5,7 m – a visszaduzzasztás értékének növekményére fektetett görbe lefutását egy negyedfokú polinommal tudtam jellemezni (F.14. ábra).

$$35{,}8 - 1{,}55457x + 0{,}102193x^2 - 0{,}00322438x^3 + 0{,}000033727x^4 \qquad (4.11.)$$

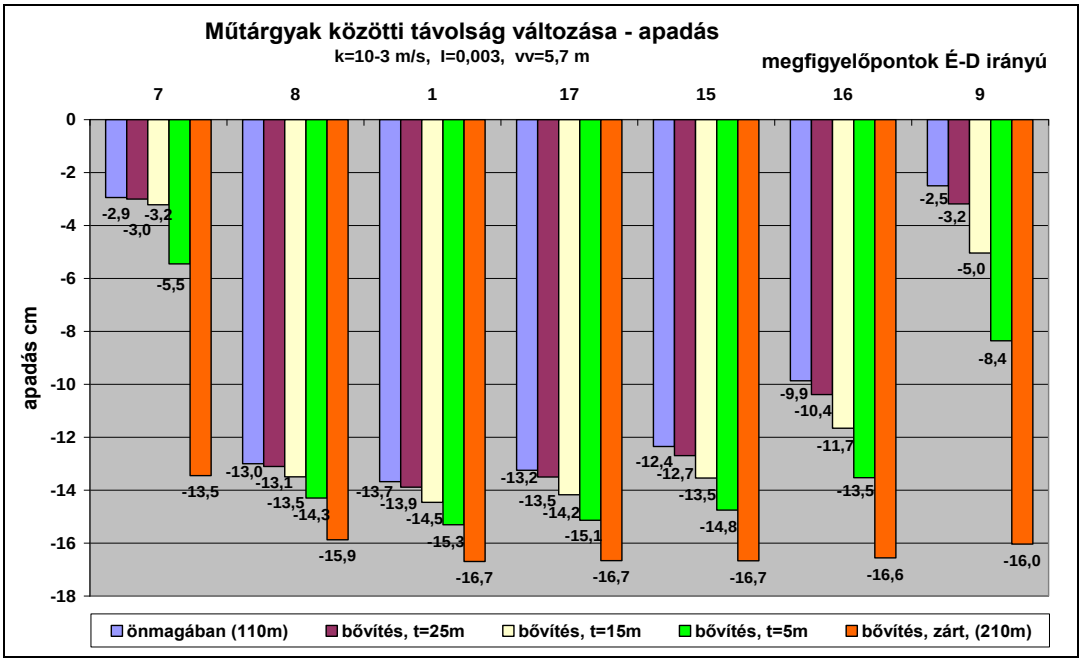
Apadás

Apadás esetén a szomszéd műtárgyak hatása, a műtárgy méretétől függően, annak közepén a 25 m-es távolság esetén 2-5 %-os növekedést eredményez, 5 m-es távolságnál 25-30 %-os a növekmény.
A hatások egymásra halmozódása tekintetében a visszaduzzasztásnál megállapítottak érvényesek.

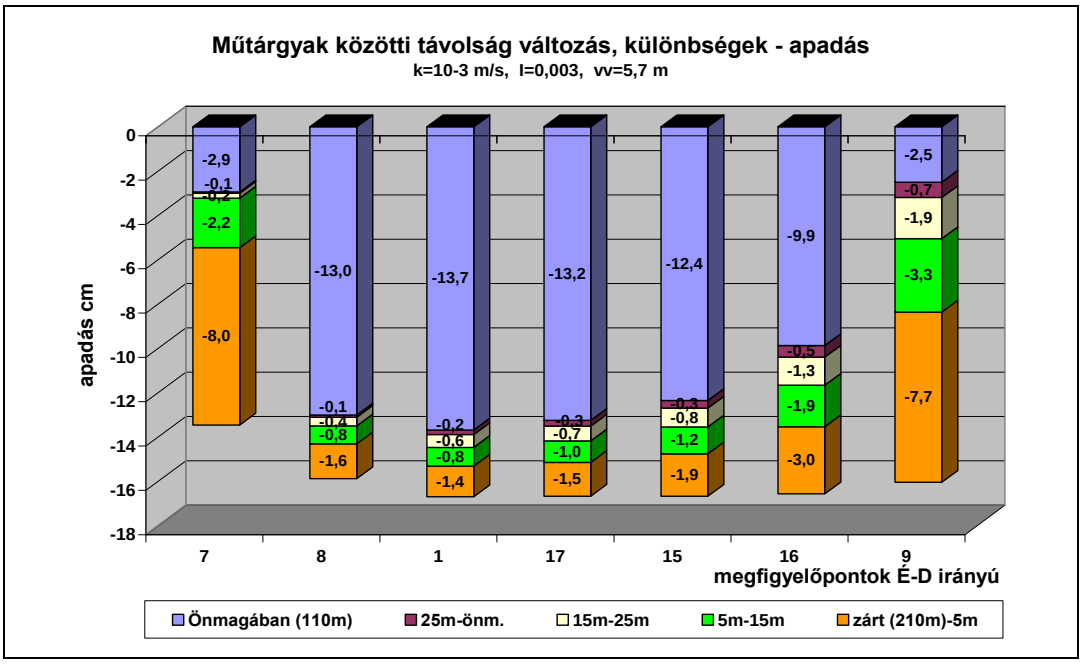
Az apadás értékeire fektetett átlag görbét (F.15. ábra), szintén negyedfokú polinom írja le.

$$16{,}7 - 0{,}402571x + 0{,}0289975x^2 - 0{,}000947048x^3 + 0{,}0000100825x^4 \qquad (4.12.)$$

Az akadályok közötti szabad áramlási csatornában az egymásra halmozódás nem okoz olyan mértékű sebesség (gradiens) növekedést, amely a talaj szerkezetének megbomlásához vezethet. A megnövekedett hidraulikus gradiens nem éri el a kritikus értéket.

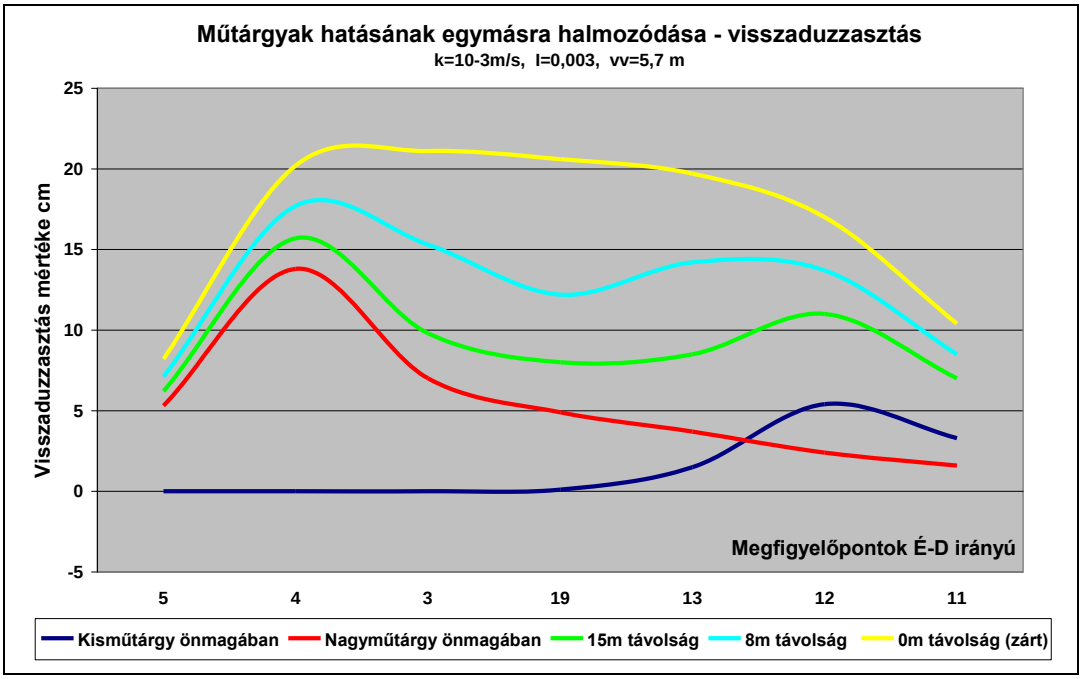


4.19.a. ábra Egymásra halmozódás – apadás

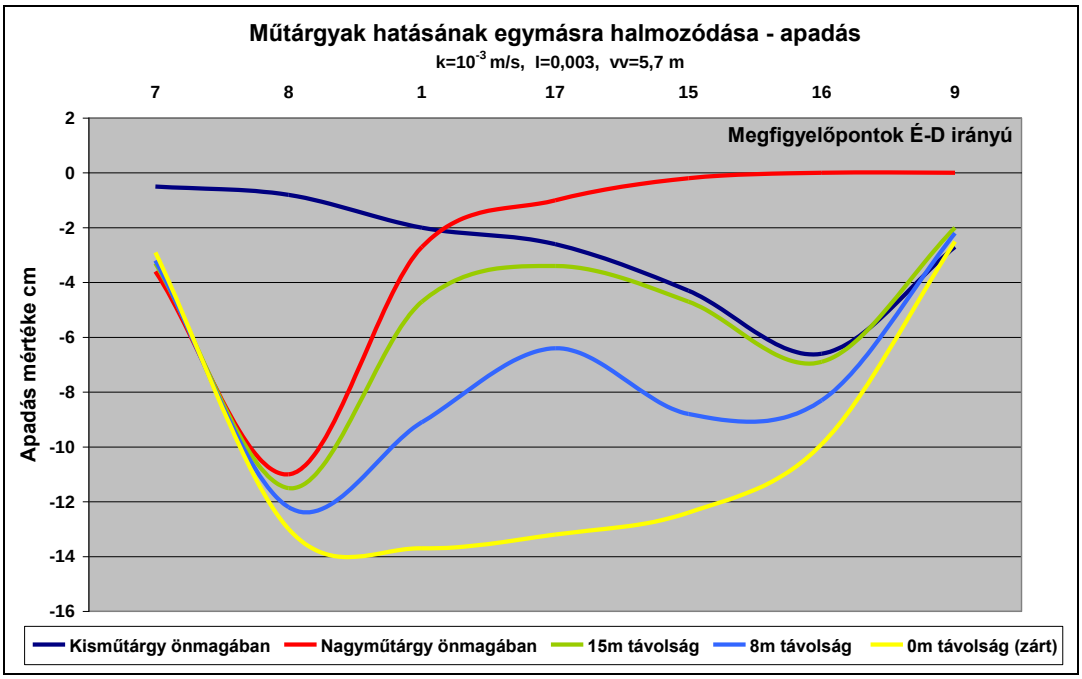


4.19.b. ábra Egymásra halmozódás - apadás, a növekmények különbsége

A 4.20. és 4.21. ábrák két különböző méretű és eltérő távolságokban elhelyezett műtárgy hatásának szuperponálódását jól szemléltetik, és egyben igazolják a modellszámítás helyességét is.



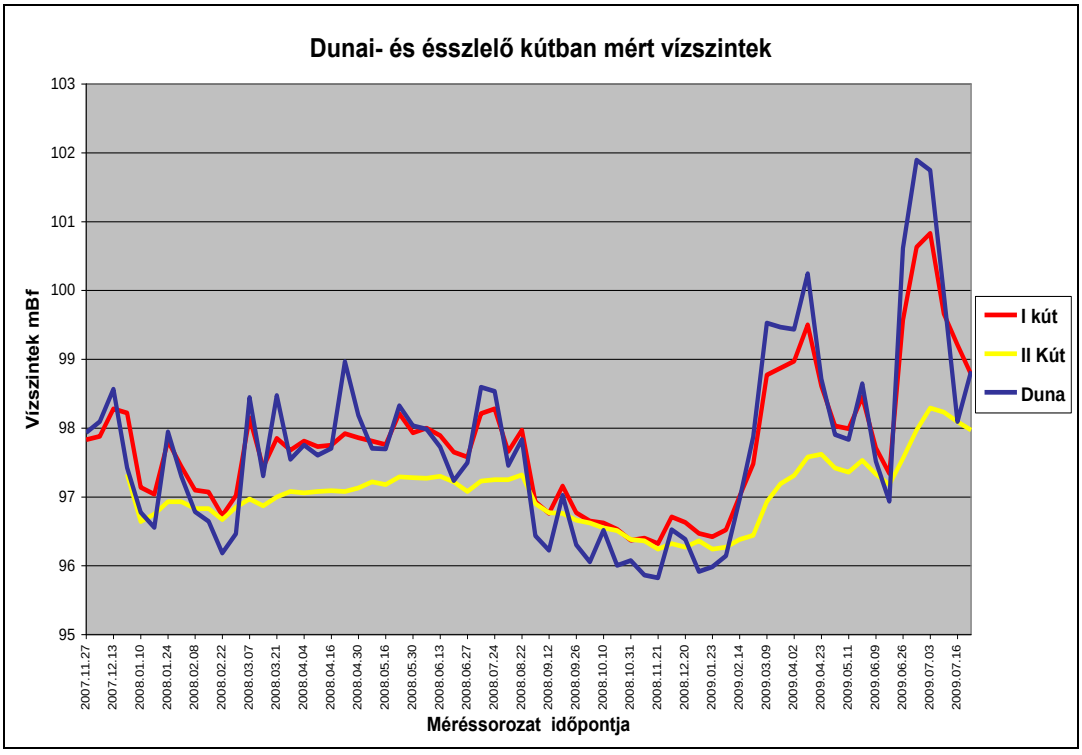
4.20. ábra A hatások szuperponálódása - visszaduzzasztás



4.21. ábra A hatások szuperponálódása - apadás

4.2.5.A kutakban mért vízszint adatok kiértékelése

Kutatásom számára a Haller-kapu létesítmény mellett két talajvízszint észlelő kutat telepítettek (3.4.2.2. fejezet). Így lehetőségem volt egy valós földtan, vízföldtani környezetben mérések végzésére.
A másfél éves talajvízszint észlelés, valamint a dunai vízszint adatok elemzése eredményeként, egyértelműen kiadódott a felszín alatti akadályok (résfalak) talajvízáramlást módosító hatása (F.6. ábra).
Az agyag fekübe bekötő, vízzárónak tekinthető résfalak mindössze egymástól 40 m távolságban vannak. A műtárgy két oldalán a résfalak hatására kialakult vízszint különbségek, teljes mértékben igazolják a probléma felvetésének jogosságát és a megváltozott körülmények, hatások elemzésének szükségességét. A grafikonról még leolvasható a Duna és a hozzá közeli I. kút vízszintjeinek nagyfokú korrelációja (4.22. ábra).
A kutak helyszínrajzi elhelyezkedését a 3.6.a és b. ábrákon mutattam be.



4.22. ábra Vízszint adatok

A mért eredmények alapján a vizsgált időszakban három eset különíthető el, melyet a 4.23. ábrán szemléltetek.

1. ***Dunai kisvizes időszak, 95,8-96,3 m Balti***

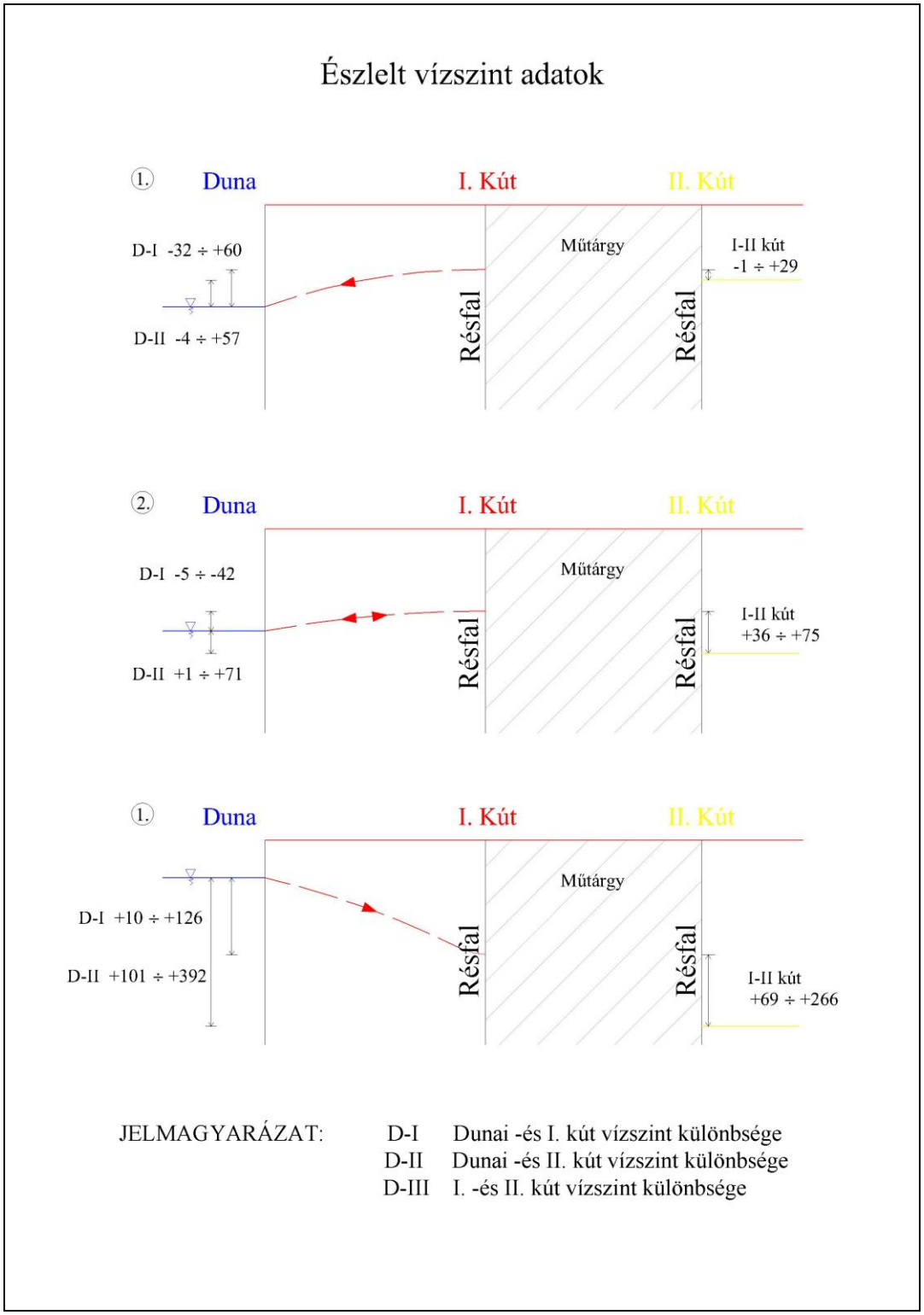
A talajvízáramlás a Duna felé történik, a folyó galériaként gyűjti magába a vizet.
Mindkét kútban a vízszint magasabb a Duna vízszintjénél 4-60 cm-rel.
A két kút közötti vízszint különbség 30 cm-es intervallumon belül mozog, döntően az folyó felöli I. jelű kútban magasabbak a vízszintek.
A modellezés szerint az eredeti adottságokat figyelembe véve, a műtárgy, (akadály) két oldalán a két kút vízszintje között 45 cm-es vízszint különbség adódott a II. jelű kút javára.

2. ***96,3-97,8 m Balti folyó vízállás között***

A folyó megcsapoló szerepe fokozatosan csökken, a talajvíz közel pangó állapotba kerül.
Az I. kút vízszintje a Duna vízszintjénél 5-42 cm-rel magasabb, a II. kúté 1-71 cm-rel alacsonyabb.
A két kút mért értékei között megnő a különbség, az I. kútban 36-75 cm-rel magasabb vízszintek adódtak.
Megjegyzendő, hogy a mérések nem igazolják a szakirodalom azon állítását, mely az átlagos dunai vízszintekhez (97,8 mBf) köti e pangó talajvízállás kialakulását.

3. ***A folyó vízállása 97,8 m Balti fölötti, illetve nagyvizes időszak***

Az áradásból eredően a Duna már a víztartó teraszkavics rétegbe táplál be.
A folyó vízszintje az I. kútnál 10-126 cm-rel, a II. kútnál 101-392 cm-rel magasabban van.
Az egymástól ~40 m-re lévő I és II. jelű kutak között a vízszint különbség 65-266 cm-re nő az I. kút javára.
A modellezés szerint a műtárgy két oldalán a két kút vízszintje között 115 cm a vízszint különbség az I. jelű kút javára.



4.23. ábra Dunai vízszintek és talajvízszintek kapcsolata

A mérési és a modellezési eredmények elemzése:

Összehasonlítottam a valós létesítmény hatására létrejövő áramlás módosulások- és talajvízszint változások mért és a modellezett értékeit.

A kutakban mért vízszint adatok és a modellszámítási eredmények a jelenség *tendenciáját tekintve* teljes egyezőséget mutatnak.

A szimulációkat a két szélső dunai vízállásnál, LKV, LNV végeztem el. A számítások igazolták a Duna és a talajvíz közötti oda – vissza ható dinamikus vízmozgást. Kisvizes időszakban a Duna megcsapoló hatása érvényesül. Ekkor a kutak vízszintje magasabb a folyó vízszintjénél. Visszaduzzasztás a II. kútban alakul ki. Nagyvizes időszakban a Duna a talajvízbe táplál be. A kutak vízszintje alacsonyabb a folyóénál. A visszaduzzasztás az I. kútban jön létre.

A *nagyságrendben* kialakult különbségek a valós helyzet nagyfokú összetettségét mutatják az egyszerűsített modellel szemben.

A kutatás során a felszín alatti létesítmények áramlást módosító hatását nem egy analóg célgéppel mértem, hanem helyszíni, 1:1-es nagyminta kísérlettel, amely terhelve van a környezet számtalan bizonytalansági elemével.

Azonban a mérési eredményekről leemelve a ráhalmozódott módosító értékeket, a feladat kívánta deciméteres pontosságon belül, a modellezésnél kapott eredményekhez, jutunk.

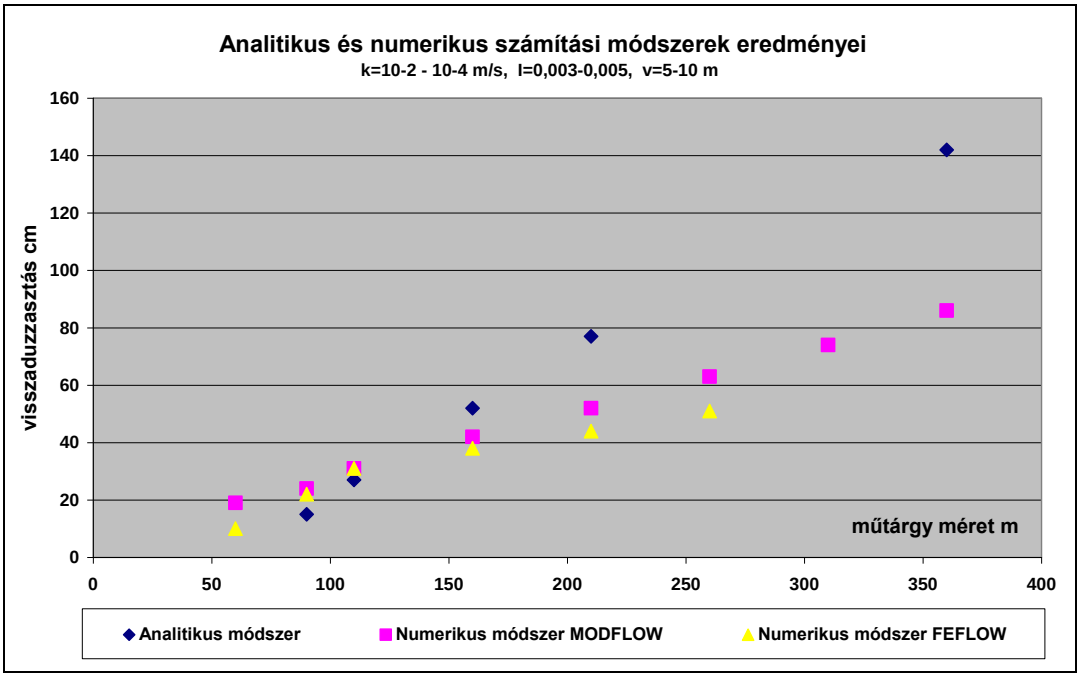
***Az eltéréseket okozó módosító hatások*:**

- Az eredmények közötti különbséget egyrészről a dunai vízállások tartósságának a nagymértékű befolyásoló szerepe okozza. Ezzel összefüggésben további módosító tényező a víztartó rétegben a víz tárózódásának ideje, valamint a tartósan magas vagy alacsony vízállásokat követő vízszintek milyensége.
- Befolyással bír az eredményre, hogy a Duna közvetlen közelében az áramvonalak meredeken kötnek be a vízfolyásba.
- A folyó és a résfal között relatíve kicsi a távolság (40 m).
- A Duna partján a folyó szabályozásakor kiépített több méter mély partfal húzódik.
- A vizsgált műtárgy mellett a Dunával párhuzamosan több kilométer hosszban, szintén résfalas kialakítású létesítmények futnak, melyek között csupán 10-20 m-es sáv áll rendelkezésre a szabad áramlásra.

Mindezek következtében a létesítmények és a Duna közötti keskeny sávba beszorul a talajvíz (a partfal és a résfalak között csapdába kerül). Hosszabb ideig tárózódik ott, szintje jelentősen megemelkedik. A dunai vízállás tartósságától e jelenség még fokozódik. Ezen okok következtében, módosul a helyszínen mért duzzasztási – apadási hatás a modellszámítás során kiadódó értékekhez képest.

Látható tehát, hogy a nagyvízfolyás közelsége (a Dunától ~ 40 m), egyfelől lehetőséget nyújt többféle áramlási kérdés vizsgálatára, ugyanakkor azonban az egyértelmű megfeleltetést megnehezíti a mért és a modellezési értékek között.

A modellszámítás szolgáltatta eredmények helyességét más oldalról is igazoltam. Egyrészt a korábbiakban a vizsgálati terület környezetében készült hidrogeológiai szakértések (VFV 2000, Petik 2001-2002, FTV 2007) analitikus eredményeit vetettem össze a modellezési értékeimmel. Másrészt a véges differencia módszeren alapuló MODFLOW programrendszerrel egyszerűsített formában numerikusan ellenőriztem az eredményeimet. A három féle módszer értékeit a 4.24. ábra foglalja össze.



4.24. ábra Eredmények összehasonlítása

A különböző számítási módszerek eredményeinek összehasonlítása csak tágabb paraméter tartományok között volt lehetséges, tekintettel az analitikus számításokra. A kutatási területen és környezetében (Millenniumi Városközpont) készült hidrogeológiai szakértések valamint a két numerikus modellszámítás (MODFLOW, FEFLOW) alapadat-rendszerét összehangolva végeztem a vizsgálatot.
A grafikon alapján elmondható, hogy a numerikus módszerek értékei deciméteren belüli különbségekkel közel megegyezőek. Az analitikus közelítő számításokból átvett eredmények is, a ~200 m-es műtárgy méretig, deciméteren belüli eltérést mutatnak a modell nyújtotta visszaduzzasztásokhoz képest.

4.3. Eredmények összegzése

Részben a helyszíni mérések, részben pedig analitikus és numerikus módszerek alapján végzett számítások igazolták, hogy a felállított hidrodinamikai modell alkalmas a felszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának szimulálására (meghatározott érvényességi határok között, a feladat igényelte pontossággal).
A kutatásom során a szimulációk segítségével a célkitűzéseknél felvetett kérdésekre választ kaptam. *A kutatási eredmények a vizsgált tartományokon belül érvényesek.*

- ***A földtani képződmény geometriáját illetően, mekkora területrészt szükséges vizsgálat alá vonni?***

  Vízszintes kiterjedés tekintetében a modellezett térrész felvételének elsődleges szempontja, hogy a műtárgyak (akadályok) okozta áramlásmódosulások következtében kialakuló depressziók ne lépjenek ki a határokon.
  E kérdésre a távolhatás vizsgálata ad választ. A modellezések eredményeként megállapítható, hogy a távolhatás mértékének kialakulásában és ezzel együtt a modellezett térrész nagyságának felvételénél, a szivárgási tényezőn kívül, a vizsgálat alá vont műtárgy mérete és az áramló talajvíz vastagsága a meghatározó.
  A modellezett térrész méretének a megállapításánál, mindenképpen figyelembe kell venni a természetes határokat (lásd: Duna vonala), valamint azt a tényt hogy a térrész szélein a modellezéskor torzulások jönnek létre a valós állapothoz képest.
  Mélység tekintetében a vizsgálatba 5,5–40 m vastagságú víztartó réteget vontam be. Ezzel együtt az áramló talajvíz vastagságát 0,7-35 m között változtattam (4.2.2.5. fejezet).
  Visszaduzzasztásnál megállapítható, hogy a vastagság növekedésével talaj fajtától függően, ($k=10^{-2} – 10^{-5}$ m/s közötti tartományt figyelembe véve) az akadályok okozta hatások különböző tendenciával változnak. Műtárgy mérettől függően azonban, 20-30 m-es vízvastagságtól kialakul egy „határmélység”, amely fölött a különböző talajokban a kiváltott hatások egy értékhez közelítenek. A visszaduzzasztások gyakorlatilag függetlenné válnak a talaj fajtájától, a köztük lévő különbségek eliminálódnak, értékük állandósul.
  Apadásnál a vastagság növekedésével az apadás tendenciája talajtól függetlenül megegyező. A határmélység ~10 m-re mérséklődik, ahol a hatások talajtól függetlenül közel megegyező értékűvé válnak.
  Általánosítva: vízzáró fekü hiányában, a modellezésnél figyelembe veendő minimális víztartóréteg vastagság 25-35 m, illetve 20-30 m a talajvíz vastagság.

- ***Az eltérő geológiai képződmények anyagi tulajdonságai közül melyek fogadhatók el homogénnek. Milyen mértékű összevonásuk vezet a legjobb eredményre?***

A *k tényező szempontjából* a különböző anyagi tulajdonságú talajok vizsgálata a következő eredményre vezetett (4.2.2.4. fejezet).
Visszaduzzasztásnál a felszín alatti létesítmények hatása tekintetében a 10^{-2}, 10^{-3} és 10^{-4} m/s-os szivárgási tényezőjű talajok homogénnek vehetők, egy rétegként összevonhatók. A modellezett visszaduzzasztások értékei 5 cm-en belül változnak, gyakorlatilag megegyezőek. Ezen kismértékű különbség a műszaki-agrárműszaki tervezési feladatok szempontjából elhanyagolható.
Apadás vizsgálatánál fenti homogénnek tekinthető tartomány kibővül a 10^{-5} m/s-os k tényezőjű talajok körével is.
A szabad hézagtérfogat tekintetében a fenti összevont talaj tartományokban a szakirodalmi értékektől való 5-10 %-os eltérés lefelé, illetve fölfelé, a hatásokban (visszaduzzasztás, apadás) csak század nagyságrendű változásokat eredményez.
Így leszögezhető, hogy adott talaj, illetve összevont talajfrakciók esetén, az n_0 szabad hézagtérfogat szakirodalmi átlag értékének alkalmazása megfelelő, jó eredményt szolgáltat a tervezés számára.

A feltárt kőzet, illetve talajrétegződés milyen szintű egyszerűsítése engedhető meg?

A réteghatárok, illetve a rétegszámok megállapításánál - a 4.2.2.4. pontban leírtak alapján – a vizsgálandó visszaduzzasztás szempontjából a 10^{-2}, 10^{-3} és 10^{-4} m/s, apadás szempontjából a 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4} és 10^{-5} m/s szivárgási tényezőjű talajok egy rétegként kezelhetők.
Az, hogy a földtani modellben a réteghatárokat vízszintes vonalként felvehetjük-e, az elsősorban a víztartó rétegben áramló talajvíz vastagságától függ. Kisebb, ~0,5-5 m-es víz vastagság esetén, nagyobb mértékű különbségek adódnak az akadályok által kiváltott hatásokban. Ezért e tartományban a pontosabb eredmény érdekében célszerű figyelembe venni a réteg dőlését, ferdeségét.
Az 5 m-nél vastagabbnál jó közelítés a vízszintes réteghatár felvétel.
A vizsgált földtani környezet feltárása azonban gyakorlatilag pontokban (fúrások, szondázások) esetleg vonal mentén történik, így a talajrétegződés megadása eleve interpoláció eredménye. Ezért a modellezéshez szükséges alapadat-rendszer nem teszi szükségessé 1-2 m-es nagyságrenden belül a szintkülönbségek figyelembe vételét.

- ***Mely, kiemelten fontos paraméterek megadása és milyen pontossággal szükséges ahhoz, hogy a célnak megfelelő számítási eredményeket lehessen elérni*?**

Kutatásom során egyértelművé váltak a felszín alatti műtárgyak talajvízáramlásra gyakorolt hatása szempontjából a meghatározó paraméterek, amelyek az alábbiak:

- a talaj szivárgási tényezője,
- hidraulikus gradiens,
- az áramló talajvíz vastagsága (felülete)
- áramlás iránya,
- a műtárgy (akadály) mérete.

Az egyes paraméterek megadásakor a *k tényező* egy nagyságrenden belüli pontosítása a visszaduzzasztásnál 10^{-2} és 10^{-4} m/s, az apadásnál 10^{-2} és 10^{-5} m/s tartományokban nem vezet megbízhatóbb eredményhez a mérnöki gyakorlat szempontjából. E határok között a hatások különbsége 5 centiméteren belüli.
A modellezések eredményeként leszögezhető, hogy a *hidraulikus gradiens* változása és az akadályok okozta áramlásmódosulások között I=0,001-0,009 tartományban lineáris kapcsolat áll fönn. A kiváltott hatások nagyságrendjét tekintve (4.2.2.3. fejezet), a gradiens értékét elegendő 10 cm/100 m-es pontossággal megadni és ilyen mértékű lépcsőkben változtatni ahhoz, hogy megfelelő eredményeket kapjunk.
A vízvezető réteg, illetve az *áramló talajvíz vastagságának* hatásánál a 0,5-10 m talajvíz vastagságok között a 2-3 méterenkénti lépcsőkben történő vizsgálat vezet a keletkezett visszaduzzasztások, apadások mértékének, tendenciájának megnyugtató szemmel követéséhez. A 10 m-es vízvastagság fölött elegendő 10 méterenként a változások nyomon követése.
A modellezések egyértelműen igazolták, hogy az akadályra merőleges *áramlási irány* eredményezi a legnagyobb áramlásmódosulást. A tervezésnél célszerű, egy a műtárgy frontjával 0-10°-os szöget bezáró szögtartománnyal figyelembe venni az áramlás eredőjét, a tényleges hidrogeológiai környezet feltártsági szintje miatt.
A *műtárgy méret* változtatására a nagy vízáteresztő képességű talajok (k=10^{-2}, 10^{-3} m/s) érzékenyebben reagálnak. E talajoknál a pontos számítás 10 m-es lépcsőkben történő változtatást igényel. A k=10^{-5}-10^{-6} m/s szivárgási tényezőjű talajoknál csak kismértékű (deciméteren belüli) a műtárgy méret változásának duzzasztó-apasztó hatása. Itt elegendő 50 méterenként vizsgálni a méretváltozás okozta hatásokat.
A paraméterekre, a fentiekben megadott és behatárolt ismertségi szintek szükségesek és elégségesek a feladat követelte pontossághoz (4.2.2. fejezet).

- ***Az érintett vízföldtani környezetben a felszíni és felszín alatti vizek adatsorainak időbeni változását milyen mértékig célszerű figyelembe venni?***

  Vizsgálatomhoz a dunai vízszint adatok, a Vízügyi Adatbank adatbázisából, napi (azon belül óránkénti) lebontásban rendelkezésre álltak.
  A kiépített két talajvízszint észlelő kútban a vízszintmérést heti (másfél heti) rendszerességgel másfél éven keresztül végeztem.
  Megállapítható (4.2.5. fejezet), hogy a dunai vízszintek tartóssága, valamint a tartós vízállásokat követő vízszintek milyensége jelentősen befolyásolja a nagyvízfolyás melletti műtárgyak által kiváltott hatásokat (visszaduzzasztás, apadás).
  Ezért a kapott eredmények tükrében kijelenthető, hogy nagyvízfolyás közelében, ahhoz, hogy a mért vízszint adatok és a modellezési értékek között a feladat szempontjából korrekt összefüggést lehessen felállítani, feltétlen szükséges a talajvízszintek mérésének heti rendszeressége. A mérés időtartamát pedig úgy kell meghatározni, hogy az adott vízfolyás vízállás tartományának nagy része megjelenjen a mérési időszakban.

- ***A kutatási eredmények milyen mértékig terjeszthetők ki?***

  Kutatásom egyik célja volt, megvizsgálni, hogy a kapott eredmények, milyen mértékig adaptálhatók más területekre.

  Az eredmények széles körben történő kiterjesztését az alábbiak teszik lehetővé:
  - Több különböző paraméter, több irányú (talaj, talajvíz és műtárgy szempontból) vizsgálatát végeztem el.
  - A felvett vizsgálati tartományok a talajmechanika és a szivárgáshidraulika tárgykörében széles skálát fednek le. (A kutatásom a kavics frakciótól az iszapos homok, iszap frakcióig terjedt ki).
  - A tartományok és a különböző paraméterek egymás közötti variálási lehetősége nagyszámú. Az ismétlés nélküli kombináció a vizsgált paraméterek figyelembevételével:
    $$C = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} = 4 * \left(\frac{5!}{1!(5-1)!}\right) * \left(\frac{3!}{1!(3-1)!}\right) = 5 * 5 * 5 * 5 * 3 = 1875$$
  - A széleskörű felhasználás érdekében függvénykapcsolatokat állítottam föl, amelyeket közelítő polinomokkal írtam le, illetve
  - Felületábrákat dolgoztam ki visszaduzzasztás és apadás esetére.

  Az akadályok okozta visszaduzzasztások, apadások meghatározhatók *a hatások* tendenciáját leíró *polinomok* és a *felületábrák segítségével* (szükség szerint interpolálással). A polinomok és a felületábrák alkalmasak adott paraméter összeállás (variáns) esetén, a megadott tartományok között, ismeretlen, köztes pontok közelítő értékének megadására. Alkalmazásukkal, különböző geológiai, hidrogeológiai adottságú területeken, illetve műtárgy jellemzők esetén megfelelő eredményekhez juthatunk a feladat követelte pontossággal.

Kutatásom fő célja az volt, hogy föltárva a térszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának törvényszerűségeit, azok ismeretében, a műszaki - agrárműszaki területen egy általánosan használható**,** a mindennapi **gyakorlati tervezést is segítő tudományos anyagot hozzak létre.**

Segítségével összetett, nagy munkával járó hidrodinamikai modellezések elvégzése előtt lehetőség nyílik a felszín alatti akadályok várható hatásának feltárására, előrejelzésére, nagyságrendjének becslésére és a további munkafázisok szükségességének eldöntésére. Ennek jegyében:

- ***Meghatároztam a műtárggyal befolyásolt talajvízáramlást leíró vizsgálati paramétereket.***
  Megállapítottam a jelenség szempontjából meghatározó és elhanyagolható paramétereket. (*meghatározó paraméterek*: a talaj szivárgási tényezője; hidraulikus gradiens; az áramló talajvíz vastagsága; az áramlás iránya a műtárgyhoz viszonyítva; a műtárgy (akadály) mérete, *elhanyagolható paraméterek*:szabad hézagtérfogat).

  Behatároltam a felhasználási cél, illetve a feladat kívánta pontossághoz a paraméterek szükséges és elégséges ismeretségi szintjét (lásd fenti pontban).

- ***A hidrodinamikai modellszámítás nagy munkát kívánó és hosszú időt igénybevevő alapadat- és modelladat-rendszere fölállításának elősegítése és megkönnyítése érdekében:***
  - ***Kijelöltem azt a határmélységet és ezzel együtt - vízzáró fekü hiányában - azt a minimális talajvíz vastagságot, amely szintig az akadályok okozta hatások, a közeg szivárgási tényezője függvényében, különböző tendenciával változnak. E szint alatt a hatások egy értékhez közelítenek, gyakorlatilag függetlenné válnak a talaj fajtájától.***
    Visszaduzzasztásnál a határmélység műtárgy mérettől függően, ~20-30 m, amely a*padásnál* ~10 m-re mérséklődik,
    A modellezésnél figyelembe veendő minimális víztartó réteg vastagság 25-35 m, illetve 20-30 m a talajvíz vastagságnál.
    Ezzel megadtam mélység tekintetében, a vizsgálat alá vonandó földtani képződmény szükséges nagyságát.
  - ***Meghatároztam tartományokat, amelyek között a különböző anyagi tulajdonságú – szivárgási tényezőjű - talajok a vizsgált probléma szempontjából közel megegyezően viselkednek.***
    Visszaduzzasztásnál e tartomány 10^{-2} - 10^{-4} m/s közötti, mely a*padásnál* kibővül a 10^{-5} m/s-os *k* tényezőjű talajok körével.
    Ennek alapján e közegek homogénnek vehetők, összevonhatók egy rétegként, így a talajrétegződés jelentősen egyszerűsíthető, a földtani modell könnyen felépíthető.

- ***Rámutattam, hogy mely vízvastagság tartományok között szükséges a réteghatárok dőlését figyelembe venni.***
  A ~0,5-5 m-es vízvastagság esetén a pontosabb eredmény érdekében célszerű a réteg dőlését, ferdeségét megadni, azonban a modellezéshez nem szükséges 1-2 m-es nagyságrenden belül a szintkülönbségek figyelembe vétele.
  Az 5 m-es vastagság fölött a réteghatárok vízszintes vonalként felvehetők.

A kapott eredmények jelentősége, hogy a gyakorlati tervezésben a modellezést nagymértékben meggyorsítják, leegyszerűsítik.

- ***Kutatásom eredményeként a különböző vastagságú áramló talajvíz és az útjába helyezett akadály okozta hatások között összefüggést tártam fel, amelyet grafikus formában dolgoztam ki és mutatok be.***

A grafikonok jelentősége, hogy a víztartó közeg szivárgási tényezője ismeretében a visszaduzzasztások és apadások tendenciája azonnal és egyértelműen megadható. Mértéke pedig – a meghatározó paraméter összeállás figyelembevételével – jó közelítéssel, gyorsan megbecsülhető.
A grafikonok érvényességi tartománya: 0,7 m és 35 m közötti talajvíz vastagság. (4.10.a. és 4.11.a. ábrák)

A visszaduzzasztás tendenciája:

- **10^{-2} > k > 2-3*10^{-4} m/s** tartományban a visszaduzzasztás értéke a talajvíz vastagságának növekedésével fokozatosan csökken.
- **2-3*10^{-4} > k > 7*10^{-5} m/s** tartományban a visszaduzzasztás értéke egy adott víz vastagságig nő, majd fokozatosan csökken.
- **7*10^{-5} > k > 10^{-5} m/s** tartományban a visszaduzzasztás értéke a víz vastagságának növekedésével fokozatosan nő.
- **10^{-6} m/s** *k* tényező esetén minimális visszaduzzasztások mellett a tendencia megegyező az előző tartományéval.

A visszaduzzasztás mértéke:

A különböző *k* tényezők függvényében a legkisebb vízfelület esetén a legnagyobb a különbség (több dm) a visszaduzzasztás értékekben.
A növekvő vízfelülettel csökken a kiváltott hatások különbsége az egyes szivárgási tényezőknél.
Paraméter összeállástól függően, 20-30 m-es vízvastagság elérése után 5 cm-es eltérésen belül megegyeznek a visszaduzzasztás értékek, így gyakorlatilag a visszaduzzasztás nem függ attól, hogy a talaj milyen vízáteresztő képességű.

Az apadás tendenciája:

- **A k=10^{-2} - 10^{-4} m/s** közötti tartományban **a 3–9 m-es vízvastagságok között**, gyakorlatilag megegyező apadási értékekkel, a legnagyobb az apadás. Ettől kisebb, illetve nagyobb vastagság esetén nagysága csökken.
- **A k=10^{-5} m/s-os** szivárgási tényező esetén, **a 0,7-5 m között** viszonylag meredeken nő az apadás, majd a vastagság növekedésével fokozatosan csökken.
- **A k=10^{-6} m/s-os** *k* tényezőnél viszonylag egyenletes növekedés mutatkozik minimális apadási értékek mellett.

Az apadás mértéke:

A legkisebb vízvastagság mellett adódnak a nagyobb (10 cm-en belüli) különbségek az apadás értékében a különböző *k* tényezőknél.
A paraméterek összeállása függvényében az értékek 10 - 15 m-es vízvastagság fölött gyakorlatilag cm-en belül megegyeznek, az apadás e határtól a szivárgási tényezőtől nem függ.

- ***A szivárgási tényező, az áramló talajvíz vastagsága és az akadály mérete kapcsolati rendszerének jellemzőit 3D felületábrán mutatom be. Ennek segítségével, adott k tényező, vízvastagság, műtárgyméret esetén, a visszaduzzasztás értéke egyszerűen leolvasható. Ugyanezt az apadásra is kidolgoztam.***

E felületábrák megalkotásának jelentősége, hogy hozzásegítenek a térszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának gyors előrebecsléséhez és ezzel a további munkafázisok szükségességének eldöntéséhez, betervezéséhez. (4.14. és 4.15. ábrák)

A számításokat közel merőleges áramlásnál, I=0,003 hidraulikus gradiens értékkel végeztem. Más paraméter összeállás esetén, az ott megállapított törvényszerűségek figyelembe vételével lehet az ábrákból leolvasható hatásokat módosítani.

A felületábrák k=10^{-3} – 10^{-4} – 10^{-5} m/s szivárgási tényezők esetén,
vv=0,7 – 35 m talajvíz vastagságok között,
mm=110 – 160 – 210 m műtárgyméretnél alkalmazható.

Az ábrák ettől eltérő (nagyobb, illetve kisebb) értékekre is kidolgozhatók, érvényességi körük tágítható. Azonban a gyakorlati tervezés szempontjából általában e paraméter tartományok között történő áramlás a legjellemzőbb.

- ***Táblázatot dolgoztam ki, amelyben összesítettem az elvégzett szimulációk eredményét. A táblázat a talajvíz áramlás útjába helyezett felszín alatti akadályok visszaduzzasztó és apasztó hatását adja meg a vizsgált paraméterek függvényében.***

Segítségével a hatások tendenciája egyértelműen meghatározható, nagyságrendje bizonyos határok között jól becsülhető.A táblázat szolgáltatta eredmények a felsorolt paraméterek esetén, az azokra megadott vizsgálati tartományok között érvényesek. (IV. táblázat)

IV. Táblázat Paraméter analízis eredménye

<table>
<tr><th rowspan="2">Paraméterek, modellezési tartományok</th><th colspan="5">Hatások tendenciája és nagyságrendje</th></tr>
<tr><th colspan="3">Visszaduzzasztás</th><th colspan="2">Apadás</th></tr>
<tr><td>Áramlás irányának a műtárgy tengelyével bezárt szöge párhuzamos-derékszögű</td><td colspan="3">növekszik</td><td colspan="2">növekszik</td></tr>
<tr><td>Hidraulikus gradiens I=0,001-0,009</td><td colspan="3">növekszik
a növekedés lineáris</td><td colspan="2">növekszik</td></tr>
<tr><td>Szabad hézagtérfogat n_0=0,15-0,35</td><td colspan="3">közel megegyező
század nagyságrendű a változás</td><td colspan="2">közel megegyező
század nagyságrendű a változás</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Szivárgási tényező k=10^{-2}-10^{-6} m/s</td><td colspan="2">10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-5}</td><td>10^{-6}</td></tr>
<tr><td colspan="2">közel megegyező
5 cm-en belüli a változás vv=3-35 m között</td><td>csökken</td><td>közel megegyező
5 cm-en belüli a változás</td><td>csökken</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Áramló talajvíz vastagsága vv=0,7-35,2 m</td><td>10^{-2}-
2-3 10^{-4}</td><td>2-3 10^{-4}-
7 10^{-5-}</td><td>7 10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-5}</td><td>10^{-6}</td></tr>
<tr><td>csökken</td><td>nő, majd csökken</td><td>növekszik</td><td>nő, majd csökken</td><td>fokozatosan növekszik</td></tr>
<tr><td colspan="3">egy értékhez tart</td><td colspan="2">egy értékhez tart</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Műtárgy (akadály) mérete mm=110-160-210 m</td><td colspan="2">10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td></tr>
<tr><td colspan="2">növekszik</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td></tr>
</table>

- ***Függvénykapcsolatot állítottam föl a különböző paraméterek változása és az áramló talajvíz útjába helyezett akadályok hatására kialakuló visszaduzzasztások, illetve apadások között. A kapcsolatot közelítő polinomok segítségével írtam le.***

  A polinomok alkalmasak adott paraméter összeállás esetén, a megadott tartományok között, ismeretlen, köztes pontok közelítő értékének meghatározására. (V. és VI. táblázatok)

  A polinomok segítségével, a számított hatások közelítő nagyságrendjének ismeretében, - figyelembe véve a vizsgált probléma jelentőségét és fontosságát, - eldönthető, hogy szükség van-e, illetve érdemes-e további részletes hidrodinamikai modellszámítást elkészíteni.

  A képletben szereplő x érték az aktuálisan vizsgált paraméter, független változó, amelynek függvényében nézem a vizsgált jelenség (visszaduzzasztás, apadás) változását.

V. Táblázat Polinomok - visszaduzzasztás

Változó paraméterek	Állandósított paraméterek		Visszaduzzasztás
Hidraulikus gradiens I [-]	k=10^{-3} m/s vv=5,7 m mm=110 m		$\left[\frac{1}{4}\left(-19{,}8414+49{,}0896x-7{,}22552x^2+0{,}810417x^3+0{,}0330729x^4\right)\right]$
Szivárgási tényező k [m/s]	I=0,003 vv=5,7 m mm=110 m		$\left[\frac{1}{4}\left(326+302{,}392x+131{,}829x^2+23{,}8083x^3+1{,}47083x^4\right)\right]$
Talajvíz vastagság vv [m]	I=0,003 mm=110	k=10^{-3} m/s	$\left[\frac{1}{4}\left(787{,}863-301{,}691x+54{,}3213x^2-5{,}28009x^3+0{,}296191x^4-0{,}00954049x^5+1{,}62924*10^{-4}x^6-1{,}137*10^{-6}x^7\right)\right]$
		k=10^{-4} m/s	$\left[\frac{1}{4}\left(-297{,}126+169{,}817x-31{,}45x^2+3{,}10104x^3-0{,}175774x^4+0{,}00570675x^5-9{,}80465*10^{-5}x^6+6{,}87422*10^{-7}x^7\right)\right]$
		k=10^{-5} m/s	$\left[\frac{1}{4}\left(-205{,}391+93{,}4392x-15{,}1535x^2+1{,}39222x^3-0{,}0754681x^4+0{,}00237617x^5-3{,}99392*10^{-5}x^6+2{,}75572*10^{-7}x^7\right)\right]$
Műtárgyak közti távolság t [m]	I=0,003 k=10^{-3} m/s vv=5,7 m mm=110 m		$35{,}8-1{,}55457x+0{,}102193x^2-0{,}00322438x^3+0{,}000033727x^4$

VI. Táblázat Polinomok - apadás

Változó paraméterek	Állandósított paraméterek		Apadás
Hidraulikus gradiens I [-]	$k=10^{-3}$ m/s vv=5,7 m mm=110 m		$\left[\frac{1}{4}\left(-29{,}8133+54{,}1813x-13{,}4109x^2+1{,}71875x^3+0{,}0757813x^4\right)\right]$
Szivárgási tényező k [m/s]	I=0,003 vv=5,7 m mm=110 m		$\left[\frac{1}{4}\left(31{,}2+109{,}908x+52{,}3458x^2+10{,}7417x^3+0{,}804167x^4\right)\right]$
Talajvíz vastagság vv [m]	I=0,003 mm=110	$k=10^{-3}$ m/s	$\left[\frac{1}{3}\left(186{,}093-101{,}541x+18{,}8143x^2-1{,}85893x^3+0{,}105447x^4-0{,}00342304x^5+5{,}87775*10^{-5}x^6-4{,}11801*10^{-7}x^7\right)\right]$
		$k=10^{-4}$ m/s	$\left[\frac{1}{4}\left(195{,}877-116{,}04x+22{,}2023x^2-2{,}25232x^3+0{,}130541x^4-0{,}00431131x^5+7{,}50403*10^{-5}x^6-5{,}31311*10^{-7}x^7\right)\right]$
		$k=10^{-5}$ m/s	$\left[\frac{1}{3}\left(251{,}491-112{,}475x+18{,}7216x^2-1{,}71512x^3+0{,}0922078x^4-0{,}00288044x^5+4{,}81076*10^{-5}x^6-3{,}30304*10^{-7}x^7\right)\right]$
Műtárgyak közti távolság t [m]	I=0,003 $k=10^{-3}$ m/s vv=5,7 m mm=110 m		$16{,}7-0{,}402571x+0{,}0289975x^2-0{,}000947048x^3+0{,}0000100825x^4$

4.4. Új tudományos eredmények

1.) Meghatározó és elhanyagolható paraméterek és azok ismertségi szintje

Meghatároztam a műtárggyal befolyásolt talajvízáramlást leíró vizsgálati paramétereket. Megállapítottam a jelenség (visszaduzzasztás, apadás) szempontjából meghatározó és elhanyagolható paramétereket. (*meghatározó paraméterek*: a talaj szivárgási tényezője; a hidraulikus gradiens; az áramló talajvíz vastagsága; az áramlás iránya a műtárgyhoz viszonyítva; a műtárgy (akadály) mérete, *elhanyagolható paraméterek*:szabad hézagtérfogat).
Behatároltam a felhasználási cél, illetve a feladat kívánta pontossághoz a paraméterek szükséges és elégséges ismertségi szintjét.

- A *szivárgási tényező* egy nagyságrenden belüli pontosítása a visszaduzzasztásnál 10^{-2} és 10^{-4} m/s, az apadásnál 10^{-2} és 10^{-5} m/s tartományokban nem vezet megbízhatóbb eredményhez.
- A *hidraulikus gradiens* értékét elegendő 10 cm/100 m-es pontossággal megadni
- Az *áramló talajvíz vastagságát* a 0,5-10 m vízvastagságok között a 2-3 méterenként szükséges vizsgálni, 10 m fölött elegendő 10 méterenként a változások nyomon követése.
- A műtárgyra merőleges *áramlási irány* eredményezi a legnagyobb áramlásmódosulást.
- A $k=10^{-2}$, 10^{-3} m/s szivárgási tényezőjű talajoknál a *műtárgy méret* 10 m-es lépcsőkben történő változtatást igényel. A $k=10^{-5}$-10^{-6} m/s talajoknál elegendő 50 méterenként vizsgálni a méretváltozás okozta hatásokat.

2.) A hidrodinamikai modellszámítás adat-rendszerének fölállítása

Kijelöltem azt a határmélységet, és ezzel együtt azt a minimális talajvíz vastagságot, amely szintig az akadályok okozta hatások (a közeg szivárgási tényezője függvényében) különböző tendenciával változnak. E szint alatt a hatások egy értékhez közelítenek, gyakorlatilag függetlenné válnak a talaj fajtájától.

Visszaduzzasztásnál a határmélység 20-30 m, a*padásnál* 10 m.

A figyelembe veendő minimális víztartó réteg vastagság 25-35 m, illetve a talajvíz vastagságánál 20-30 m.

Meghatároztam tartományokat, amelyek között a különböző anyagi tulajdonságú talajok a vizsgált probléma szempontjából közel megegyezően viselkednek.

Visszaduzzasztásnál e tartomány 10^{-2} - 10^{-4} m/s közötti, a*padásnál* kibővül a 10^{-5} m/s-os *k* tényezőjű talajok körével.

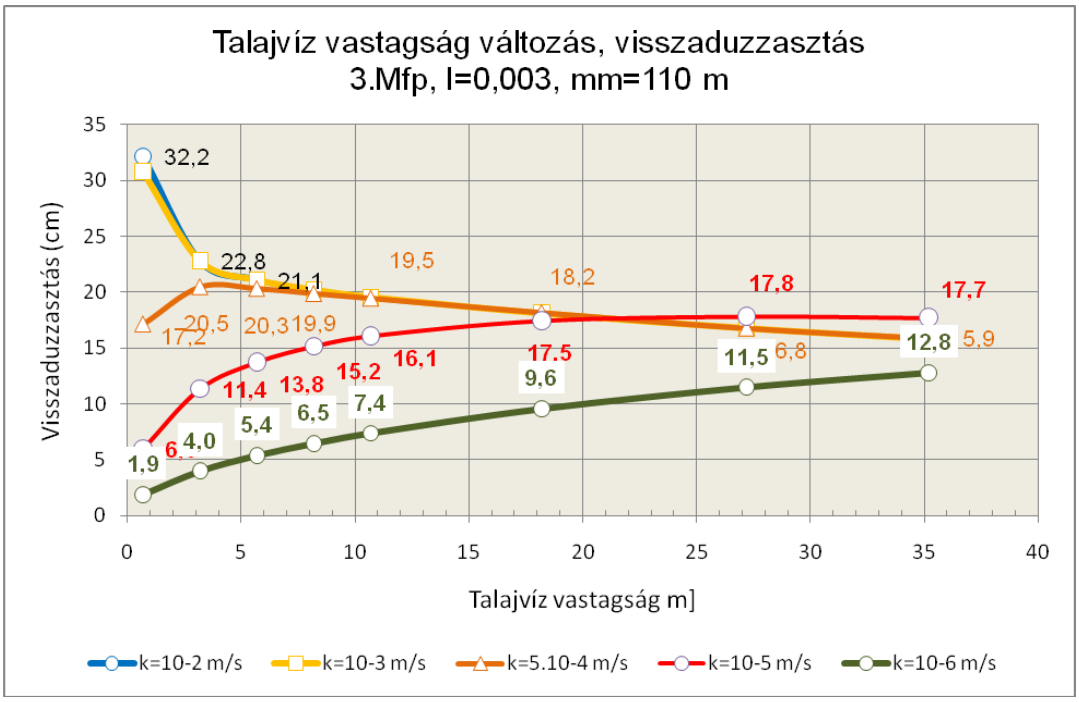
Rámutattam, hogy mely vízvastagság tartományok között szükséges a réteghatárok dőlését figyelembe venni.

A ~0,5-5 m-es vízvastagság esetén célszerű a rétegek dőlését megadni, azonban 1-2 m-es nagyságrendű szintkülönbségeket nem szükséges figyelembe venni.

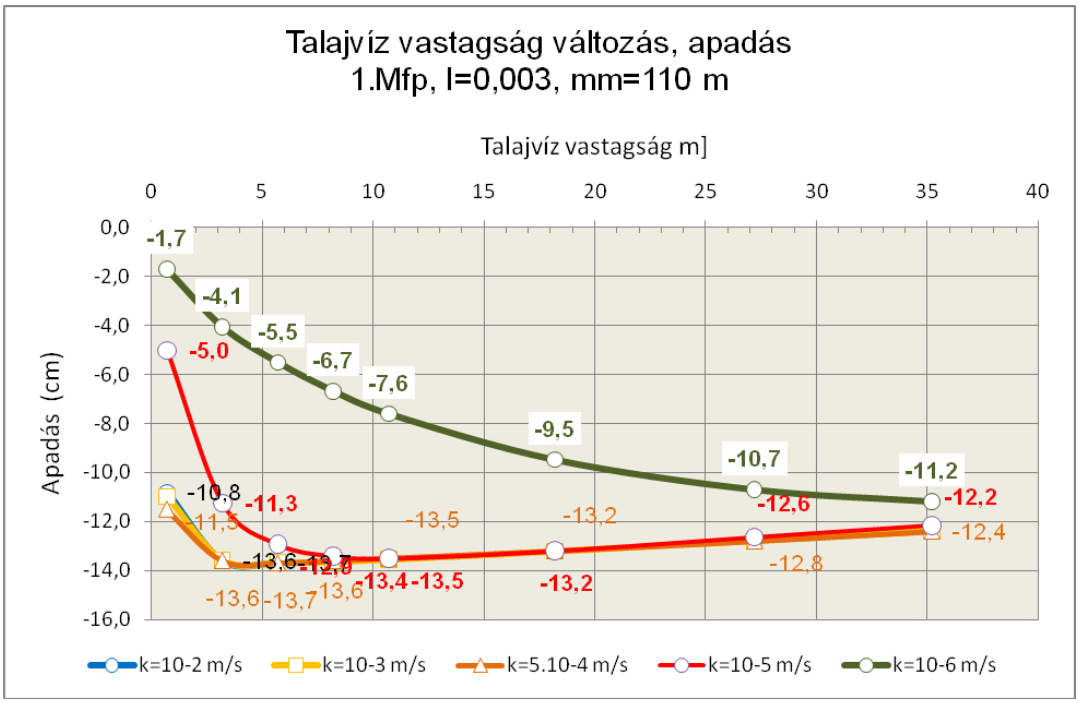
Az 5 m-es vastagság fölött a réteghatárok vízszintes vonalként felvehetők.

3.) Visszaduzzasztás, apadás meghatározására szolgáló grafikonok

Összefüggést tártam fel a különböző vastagságú áramló talajvíz és az útjába helyezett akadály okozta hatások között, amelyet grafikus formában dolgoztam ki.



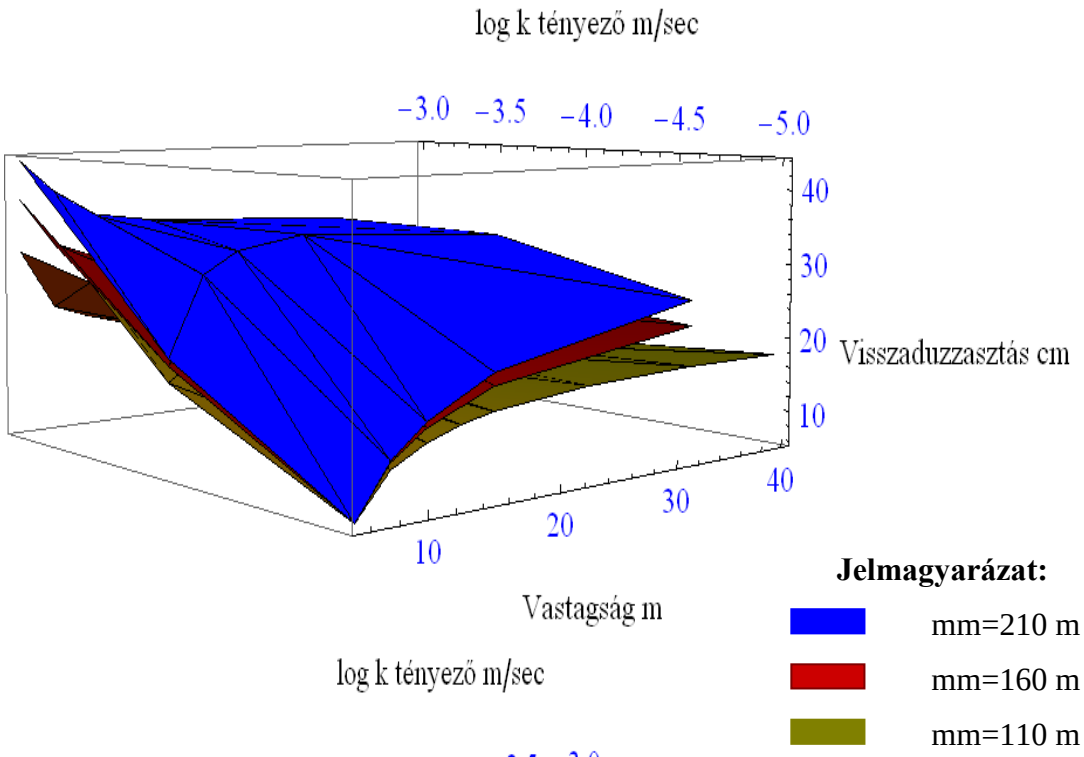
4.25. ábra Visszaduzzasztás - grafikon

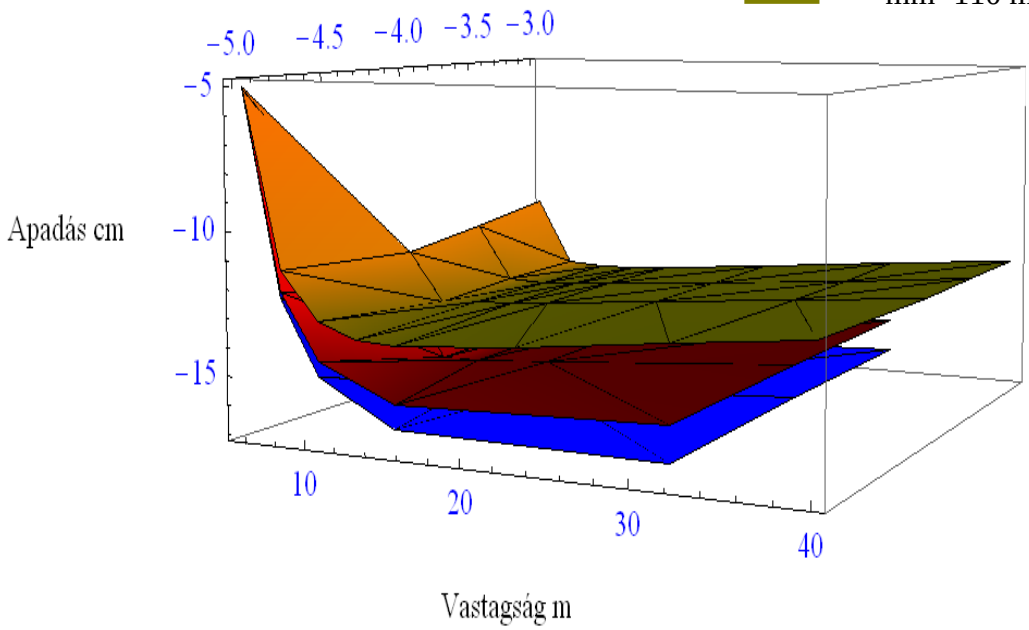


4.26. ábra Apadás - grafikon

4.) Visszaduzzasztás, apadás meghatározására szolgáló felületábrák

3D felületábrán jelenítettem meg a szivárgási tényező, az áramló talajvíz vastagsága és az akadály mérete kapcsolati rendszerének jellemzőit. Az ábrák segítségével (adott *k* tényező, vízvastagság, műtárgyméret esetén) a visszaduzzasztás és az apadás értéke meghatározható.





4.27, 4.28. ábra Felületábra 3D – Visszaduzzasztás, apadás

5.) Visszaduzzasztás, apadás meghatározására szolgáló táblázat

Táblázatot dolgoztam ki, amely a vizsgált paraméterek függvényében, a talajvízáramlás útjába helyezett akadályok visszaduzzasztó és apasztó hatását adja meg. A hatások tendenciája egyértelműen meghatározható, nagyságrendje jól becsülhető.

IV. Táblázat Paraméter analízis eredménye

<table>
<tr><th rowspan="2">Paraméterek, modellezési tartományok</th><th colspan="5">Hatások tendenciája és nagyságrendje</th></tr>
<tr><th colspan="3">Visszaduzzasztás</th><th colspan="2">Apadás</th></tr>
<tr><td>Áramlás irányának a műtárgy tengelyével bezárt szöge párhuzamos-derékszögű</td><td colspan="3">növekszik</td><td colspan="2">növekszik</td></tr>
<tr><td>Hidraulikus gradiens I=0,001-0,009</td><td colspan="3">növekszik
a növekedés lineáris</td><td colspan="2">növekszik</td></tr>
<tr><td>Szabad hézagtérfogat n_0=0,15-0,35</td><td colspan="3">közel megegyező
század nagyságrendű a változás</td><td colspan="2">közel megegyező
század nagyságrendű a változás</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Szivárgási tényező k=10^{-2}-10^{-6} m/s</td><td colspan="2">10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-5}</td><td>10^{-6}</td></tr>
<tr><td colspan="2">közel megegyező
5 cm-en belüli a változás vv=3-35 m között</td><td>csökken</td><td>közel megegyező
5 cm-en belüli a változás</td><td>csökken</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Áramló talajvíz vastagsága vv=0,7-35,2 m</td><td>10^{-2}-
2-3 10^{-4}</td><td>2-3 10^{-4}-
7 10^{-5-}</td><td>7 10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-5}</td><td>10^{-6}</td></tr>
<tr><td>csökken</td><td>nő, majd csökken</td><td>növekszik</td><td>nő, majd csökken</td><td>fokozatosan növekszik</td></tr>
<tr><td colspan="3">egy értékhez tart</td><td colspan="2">egy értékhez tart</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Műtárgy (akadály) mérete mm=110-160-210 m</td><td colspan="2">10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td><td>10^{-2}-10^{-4}</td><td>10^{-5}-10^{-6}</td></tr>
<tr><td colspan="2">növekszik</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td><td>közel megegyező
dm-en belüli a változás</td></tr>
</table>

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

A felszín alatti létesítmények hatására kialakuló visszaduzzasztások, apadások elsősorban akkor jelentenek problémát a környező műszaki létesítmények, vagy a mezőgazdasági kultúra számára, ha a tartósan megváltozott vízszintek az addigi legnagyobb talajvízszint fölé emelkednek, illetve legkisebb alá süllyednek, vagy ha a keletkező távolhatás eléri a veszélyeztetett zóna határát.

Amennyiben az áramló talajvíz útjába helyezett akadályok okozta hatások a talajvíz jellemző ingadozási zónáján belül növelik, illetve csökkentik a víz szintjét, akkor tartósságuk által is jelenthetnek veszélyt a környezetükre.

A károsodás vizsgálat egyik iránya tehát a vízszint emelkedés, illetve csökkenés *mértékének, nagyságrendjének* a meghatározása. A másik, ezen hatások *tartósságának*, esetleges állandósulásának a megállapítása. Abban, hogy a károsodás létrejön-e, nagyobb szerepe van a tartósságnak (időtényező), mint a visszaduzzasztás, apadás mértékének.

Az addigi vízjárástól eltérő magas és hosszantartó vízállás hatására:

- a mezőgazdasági területeken a növényzet termőképessége megváltozhat, esetleg a gyökérzet károsodása a teljes növénykultúra kipusztulásához vezethet;
- beépített környezetben felszín alatti terek elöntése jöhet létre;
- a talaj állékonysága jelentősen romolhat, mely az épületek süllyedéséhez vezethet.

Tartósan alacsony vízállás következtében:

- a mezőgazdasági kultúra termőképessége lecsökkenhet, esetleg a növényzet teljesen kiszáradhat;
- városias területen a geosztatikus feszültség növekedése következtében többletsüllyedések keletkezhetnek, mely épületkárosodásokat eredményezhet.

A disszertációmban felvetett és kutatott problémákon felül, a jövőben további vizsgálat tárgyát képezheti:
A felszín alatti beavatkozások következtében kialakuló káros hatások csökkentésére, illetve a hatások kialakulásának megakadályozására irányuló műszaki intézkedések szükségességének és módszerének feltárása, meghatározása. (Keszeyné 2009 b)

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatási munkám során, az áttekintett szakirodalom ismertetését követően a kitűzött célok megvalósítását végeztem el.

A felszín alatti akadályok hatására módosuló áramlási folyamatokat hidrodinamikai modellezéssel szimuláltam. Vizsgálatomhoz a végeselemes numerikus módszert alkalmazó a *FEFLOW Finite Element Simulation System for Subsurface Flow* (WASY FEFLOW 5.3. 3D) programrendszert használtam.

Kutatásomhoz kialakítottam egy *modellezési elképzelést, (hipotézist)*. A jelenséget meghatározó paraméterek hatásának következményét elemeztem a rendszer kimenetelére vonatkozóan. Azt az elvet követtem, hogy a valós adatokból kiindulva, a paraméterek közül egyet, illetve kettőt, hármat kiemelve és változtatva, a többit állandó értéken tartva, szimuláltam azok vízmigrációs folyamatokra gyakorolt hatását. A folyamat végkimenetelében a legnagyobb visszaduzzasztást, apadást kiváltó, illetve a jelentős különbséget eredményező paraméter összeállás vonalán folytattam tovább a vizsgálatot, hiszen ez jellemzi legerőteljesebben a változás milyenségét, tendenciáját.

A hidrodinamikai modellezési eredményeket egy valós ipari munkánál telepített két talajvízszint észlelő kút mérési adatsorával tudtam összevetni és a modellek érvényességét, ellenőrizni.

A helyszíni mérések, részben pedig analitikus és numerikus módszerek alapján végzett számítások igazolták, hogy a felállított modell alkalmas a felszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának szimulálására.

A kutatásom során a szimulációk segítségével a célkitűzéseknél felvetett kérdésekre választ kaptam, melyek alapján megfogalmaztam új kutatási eredményeimet.

Kutatásom **fő célja** az volt, hogy föltárva a térszín alatti létesítmények talajvízáramlásra gyakorolt hatásának törvényszerűségeit, azok ismeretében, a műszaki - agrárműszaki területen egy általánosan használható**,** a mindennapi **gyakorlati tervezést is segítő** tudományos anyagot hozzak létre.

Tudományos eredményeim segítségével összetett, nagy munkával járó hidrodinamikai modellezések elvégzése előtt lehetőség nyílik:

- a szivárgáshidraulikai folyamatok előrejelzésére,
- a felszín alatti akadályok várható hatásának feltárására,
- a visszaduzzasztások, apadások tendenciájának egyértelmű meghatározására,
- nagyságrendjük becslésére és
- a további munkafázisok szükségességének eldöntésére.

A mérési és modellezési eredmények igazolták tehát a probléma felvetésének jogosságát, a megváltozott vízmigrációs folyamatok elemzésének szükségességét.

SUMMARY

During my work of research I performed the realization of the aims after the review of the technical literature.

I simulated the flowing courses modifying by the effect of the obstacles under the surface with hydrodynamic modeling. I used for my examination FEFLOW Finite Element Simulation System for Subsurface Flow (WASY FEFLOW 5.3. 3D) program system.

For my research I elaborated a modeling idea, a hypothesis. I analyzed the results of the parameters – which determine the occurrence – relating to the consequence of the system. I follow the principle that – by setting out from the real data, picking and changing one, two or three from the parameters, and holding the others on standard value – I simulated their effect on the water-migration processes. I continued the examination on the line of the parameter

I made the examination on the way of that joint state of parameter, which produces the largest effect (back-swelling, subsidence) or results a significant difference, because this describes mostly the nature and tendency of the change.

I could compare the results of the hydrodynamic modeling with measurements of two groundwater level observing wells of the site of a real industrial work and hereby I could verify the validity of the models.

The local measuring, and partly the calculations made on the basis of the analytic and numerical methods verified that the model is suitable for simulating the effect of the underground establishments on the groundwater flow.

During my research with the help of the simulations I got answers to the questions made at the aims, on the basis of these I drafted my new researching results.

The main aim of my research was – exploring the principles of the underground establishment's effect on the groundwater flow, with the full knowledge of them – to create a scientific material, which helps the everyday practical designing and generally usable on the technical – agrotechnical field.

With the help of my scientific results, before preparing a complex, laboursome hydrodynamic modeling an opportunity presents itself:

- to forecast the infiltration hydraulic processes,
- to explore the expectable effect of the underground obstacles,
- to determine unambiguously the tendency of the back-swellings, subsidences,
- to estimate their order of magnitude and
- to decide the necessity of the further working phases.

So the results of the measuring and modeling verified the lawfulness of raising the problem, and the necessity of the analysis of the changed water-migration processes.

7. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems. (1998): Documentation of IV. European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engeneering, Udine, Italy, October 14-16. 1998. Wien, NewYork: Springer.
2. Bear J., Verruijt A. (1987): Modelling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publ. Co. 153-158, 225-284 pp.
3. Bojtár I., Gáspár Zs. (2003): Végeselem módszer építőmérnököknek. Budapest: Terc Kft. 185-198, 339 pp.
4. Bojtár I., Molnár Gy., Nagy T. (1988): A végeselem módszer alkalmazása síkbeli feladatokra. Budapest: Műszaki Könyvkiadó. 81-140 pp.
5. Chiang, W. H., Kinzelbach W., Rausch R. (1998): Aquifer Simulation Model for Windows – Groundwater Flow and Transport Modelling, an Integrated Program. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger.
6. Chiang W. H., Kinzelbach W. (2001): 3D Groundwater Modeling with PMWIN. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag. 346 p.
7. Csoma R., Gálos M. (2008): A Duna vízjárásának hatása a talajvízviszonyokra az Infópark-Budapest térségében. 49-60 pp. In: Török Á., Vásárhelyi B. (szerk.): *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2008.* Budapest: Műegyetem Kiadó.
8. Csorba L. (Szerk.) (1998): Bevezetés a Kutatásba (Módszerek, etika, publikáció). Gödöllő: GATE, MGK tudományos Diákköri Tanács kiadványa. 12-88 pp.
9. Farkas I. (Szerk.) (1999): Számítógépes szimuláció. Gödöllő: Tankönyvkiadó. 7-94pp.
10. Fenske J. P., Leake S. A., Prudic D. E. (1996): Documentation of a Computer Program (RESI) to Simulate Leakage from Reservoirs using the Modular Finite–difference Groundwater Flow Model (MODFLOW). U. S. Geological Survey. Open–File Report. 96-364 pp.
11. Filip Gy., Kovács B., Madarász T., Lakatos J., Szabó I. (2002): Szennyezett területek kármentesítése. Miskolc: Miskolci Egyetem Kiadó.
    A hidrodinamikai és transzportmodellezés elmélete. 309-410 pp.
    Gyakorlati hidrodinamikai és transzportmodellezés. 410-475 pp.
12. Galántay A., Jeney A. (2000): Numerikus módszerek. Miskolc: Miskolci Egyetem Kiadó.
13. Gallagher, R.H., Oden, J. T. (1985): Finite Elements in Fluids, Vol.1, Viscons Flow and Hydrodynamics. (s.l.)
14. Gálos M., Kertész P. (1998): Mérnökgeológia. Budapest: Műegyetemi Kiadó. 12-85 p.

15. Hajnal G. (2005): Talajvíz és Közmű, Természetes és mesterséges hatások a talajvíz járásra Budapest területén. *Mélyépítés*, 2005 (július, szeptember). Budapest: Springer Media Kiadó. 16-21 pp.
16. Hamvas F. (1995): Munkaterek víztelenítése. Budapest: Műegyetemi Kiadó. 20-32 pp.
17. Haszpra O. (2005): Hidraulika I. Budapest: Műegyetem Kiadó.
18. Horusitzky H. (1935): Budapest, Duna-balparti részének talajvize és altalajának geológiai vázlata. *Hidrológiai Közlöny,* XV. 164 p.
19. Horváth T. (2004): Mérnökgeológiai és hidrogeológiai adottságok a Budapest 4. metró vonalán, Alagút- és Mélyépítő Szakmai Napok, Győr. 85-90 pp.
20. Hsieh, Freckleton.(1993): Documentation of a Computer Program to Simulate Horizontal – flow Barreers using the U S. Geological Survey's Modular Threedimensional Finite–difference Groundwater Flow Model. U.S. Geologicsal Survey. Open–File Report. 92-477 pp.
21. International Congress on Fracture. (2005): Documentation of XI. International Conference on Fracture. Turin, Italy, March 20-24. 2005. Politecnico di Torino.
22. Istok J.(1989): Groundwater Modeling by the Finite Element Method. American Geophysical Union. Water Resources Monograph Vol. 13.
23. Juhász J. (1981): Áramlástan – Hidrogeológia. Budapest: Tankönyvkiadó. 113-114 pp.
24. Juhász J. (1986): A budapesti metró hatása a talajvízre. 367-383 pp. *A bányamérnöki kar kutatási eredményei 1983-1986 .I.kötet*. Miskolc. Kézirat.
25. Juhász J. (2002): Hidrogeológia. Budapest: Akadémiai Kiadó. 193-196, 234, 632-640 pp.
26. Kertész I., Paál T., Prajcer A. (1990): Goundwater-flow across METRO-structures. Proc. of 9th Danube-Europien Conference on Soil Mechanics Found. Engineering, Budapest 331-336 pp.
27. Keszeyné Say E., Reisinger K., Telekes G. (2007): Hydrodynamic modelling of underground constructions in Budapest. Szent István University, Ybl Miklós School of Engineering, Annual News 2007. 91-97 pp.
28. Keszeyné S. E. (2008):Áramlási terek Pest területén. Tudományos Közlemények 2008. Budapest, SZIE YMÉTK, V. évfolyam I. szám. 18-21 pp.
29. Keszeyné S. E. (2009): Hidrodinamikai viszonyok megtartása érdekében alkalmazott korszerű technológiák. ÉTE 2009 Építésszervezés és Építéstechnológia Konferencia, Innovatív módszerek és technológiák. Konferencia kiadvány, Budapest: Terc Kft. 57-63 pp.
30. Keszeyné S. E. Telekes G. (2009): Geotechnikai szerkezetek és a talajvíz kölcsönhatása. Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, *Gép*, LX. Évfolyam, 8.szám. 14-18 pp.

31. Kézdi Á. (1975): Fázis mozgások szemcsés halmazokban. Budapest. Kézirat. 9-14 pp.
32. Kézdi Á. (1977): Talajmechanika. Budapest: Tankönyvkiadó. 214-267 pp.
33. Kinzelbach, W., Schäfer, W., Herzer,J. (1991): Numerical Modeling of Natural and Enhanced Denificazion Process in Aquiles. Water Resourcer Reserch, vol. 27. No. 6. 1123-1135 pp.
34. Kovács B., Szabó I. (1995): The Use-of contaminant transport models in decision maing in Hungary, Proc. of. X. Danube Europen Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mamaia. Mamaia, Románia. 855-860 pp.
35. Kovács B. (2003): Hidrodinamikai modellezés elméleti alapjai és gyakorlata a Processing MODFLOW for Windows (PMWIN) környezetben. Miskolc. Kézirat.
36. Kovács B. (2004): Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. (Processing MODFLOW környezetben). Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék: GÁMA-GEO Kft. 4-28, 83-102 pp.
37. Kovács B., Szanyi J. (2005): Hidrodinamikai és transzportmodellezés II (Processing MODFLOW és Surfer for Windows környezetben). Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Kar, Szegedi Tudományegyetem, Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék: GÁMA-GEO Kft. 7-24 pp.
38. Kovács B., Csicsák J., Szél T. (2008): A budapesti 4-es metróvonal létesítéséhez kapcsolódó felszín alatti vizeket megfigyelő monitoring és riasztási rendszer. Földtani Közlöny, 138 (3).213-228 pp.
39. Kovács GY. (1972): A szivárgás hidraulikája. Budapest: Akadémiai Kiadó. 25-31, 103-130 pp.
40. M. Csizmadia B., Koppány I. (1981): Mérés és modellezés. Tankönyvkiadó.
41. M. Csizmadia B., Nándori E. (Szerk.) (2003): Mechanika mérnököknek, Modellalkotás. A mechanikai modellalkotás. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó. 17-64 pp.
42. Mecsi J. (2007): A talajvíz szintjének hatása a nagykiterjedésű építmények süllyedésére. Geotechnika 2007 Konferencia. Ráckeve: Konferencia kiadvány.
43. Mecsi J. (2007): A Duna vízszintjének és a környező területek talajvízszintjeinek kapcsolata. 153-160 pp. In: Török Á., Vásárhelyi B. (Szerk.): *Mérnökgeológia – Kőzetmechanika 2007.* Budapest: Műegyetemi Kiadó.
44. Páczelt I. (1999): Végeselem módszer a mérnöki gyakorlatban I. Miskolc: Miskolci Egyetemi Kiadó.
45. Paál T., Prajczer A. (1975): Kéreg alatti METRO-vonal hatása a talajvízre, Metróépítési Konferencia, Budapest-Balatonfüred. 547-560 pp.
46. Rátkay I. (1987): Hidraulika III. Numerikus-módszerek alkalmazása a hidraulikában. Budapest: Tankönyvkiadó.

47. Reisinger K. (2004): Hidrodinamikai modellezés. Geotechnika 2004 Konferencia. Ráckeve. Konferencia kiadvány. 34-37 pp.
48. Rétháti L. (1974): Talajvíz a mélyépítésben. Budapest: Akadémiai Kiadó. 301-318, 448-450 pp.
49. Sitkei Gy. (Szerk.) (1997): Gyakorlati áramlástan. 12. fejezet. Áramlások a talajban. Mezőgazdasági Kiadó. 450-484 pp.
50. Szabó I., Kovács B. (1994): Numerikus modellszámítás a Gyöngyös–Atkári Vízmű védőidomának meghatározásához. Szakvélemény. Kézirat.
51. Szabó I., Kovács B. (1995): Hulladékelhelyezés IV. A szennyezőanyagok terjedése. A modellezés elmélete és gyakorlata. 270 p.
52. Szabó I.,Kovács B. (1995): The adaptation of complex geological conditionsfor groundwater flow and contaminant transport models, Proc. of the UNESCO/IAEG. Expert Workshop on Waste Disposal Management. Mátraháza. 251-256 pp.
53. Tamás J., Kovács B., Bíró T. (2004): Vízkészlet–Modellezés. Debreceni Egyetem. 200 p.
54. Telekes G., Mályusz L., Bartók M. (1998): Az új Nemzeti Színház alapozásával kapcsolatos hidrológiai hatásvizsgálat. TU-TI-Napok Balatonaliga. Konferencia kiadvány. 20-22 pp.
55. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. (2000): The finite element method I-III. Fifth edition. Butterworth–Heinemann. Oxford.
56. Water Science and Technology Board of the National Research Cuncil: Ground Water Models. (1990) Washington D.C.: National Academy Press. 303 p.

A dolgozat elkészítéséhez felhasznált szakvélemények, térképi anyagok és észlelési adatsorok:

57. DBR-Metró – GEOVIL Kft. A 4-es metró nyomvonala. Mérnökgeológiai kutatások. http://www.metro4.hu/nyomvonal_kornyezet_mernok.php (2011.03.17
58. FTV Rt. (2001): Hidrológiai hatásvizsgálati szakvélemény a Budapest IX. Millenniumi Városközpont 2 és 3. sz. telkek beépítésének tervezéséhez Kézirat.
59. FTV Zrt. (2007): Részletes geotechnikai szakvélemény, Hidrogeológiai hatásvizsgálati szakvélemény, Budapest, IX. Lechner Ödön fasor 4-5. CEU–Középeurópai Egyetem és Bérirodaház–épületegyüttesének tervezéséhez. Kézirat.
60. GEOHIDRO Geotechnikai Kft. (2003–2009): Budapest területén hidrodinamikai modellezések, geotechnikai és hidrogeológiai szakvélemények. Kézirat.
61. GEOVIL Kft. (2005): Budapest 4. metróvonal I. szakasz, összefoglaló mérnökgeológiai, hidrogeológiai és geotechnikai szakvélemény. Kézirat.

62. Petik és Társai Kft. (2001-2002): Hidrogeológiai szakvélemény a Bp. IX. Duna sétány Millenniumi Városközpont 6, 7, 8, 10, 11. sz. ingatlanaira. Kézirat.
63. VFV Terv Bt. (2000): Hidrogeológiai hatásvizsgálati szakvélemény a Nemzeti Színházhoz. Kézirat.
64. FTV (1988): Budapest Építéshidrológiai Atlasza.
65. MÁFI (1984): Budapest területének földtani-, vízföldtani-, és építés-alkalmassági térképei.
66. MÁFI (1984-85): Budapest Építésföldtani térképsorozata: Gellért hegy (13. sz.) és Kőbánya (14. sz.) alapadat gyűjtemény.
67. FŐMTERV. Fővárosi Talajvízszintészlelő Kutak–észlelési adatok.
68. HYDROINFO. Országos Vízjelző Szolgálat. www.hydrinfo.hu
69. VITUKI. A Duna vízállásainak részletes adatsora. http://www.hydroinfo.hu/vituki (2011.03.17).
70. Vízügyi Adatbank. Vízügyi Honlap. www.vizugy.hu (2011.03.17)

M2. A témakörhöz kapcsolódó publikációk

Lektorált cikk világnyelven

Zs. Keszey, Z., Kovács, **E. Keszeyné Say** (2000)
Geotechnical and Movement Investigation for Determining the Reasons of the Damage of a building and for Defining the Possibilities if Interfering.
Szent István University, Ybl Miklós School of Engineering Annual News 2000. 4-10. pp.

E. Keszeyné Say, K. Reisinger (2007)
Hydrodynamic modelling of underground constructions in Budapest.
Szent István University, Ybl Miklós School of Engineering Annual News 2007. 91-97 pp

A. Benedek, **E. Keszeyné Say** (2011)
PLAXIS analysis of a circular slurry trench wall consrtruction pit enclosure at Budapest.
Plaxis Bulletin, Amsterdam NL (megjelenés alatt)

E. Imre, S. Fityus, **E. Keszeyné Say**, T. Schanz (2011)
A comment ont he ratio of the maximum and minimum dry density for sands
SEAGJ (Southest Asian Geotechnical Society) Jurnal
(szerkesztés alatt)

Lektorált cikk magyar nyelven

Keszey Zs., Kovács Z., **Keszeyné Say E.** (1999)
Geotechnikai és mozgásmérési vizsgálatok egy épületkárosodás okainak és a beavatkozás lehetőségeinek megállapítására.
Építési Piac, XXXIII. évfolyam 22. szám, 22-25. pp.

Kovács Z., Keszey Zs., **Keszeyné Say E.** (2001)
Az Államigazgatási Főiskola főépületének és környezetének geodéziai és geotechnikai vizsgálata, az épületkárosodás okainak és a beavatkozás lehetőségeinek megállapítására.
Geodézia és Kartográfia 2001/10. 53. évfolyam, 21-27. pp.

Görög P., **Keszeyné Say E.** (2003)
A pécsi zagytározók hidraulikai védelme.
Mélyépítés, 2003. Február, 15-19. pp.

Keszeyné Say E. (2008)
Áramlási terek Pest területén.
Tudományos Közlemények 2008. Budapest, SZIE YMÉTK, V. Évfolyam I. szám, 18-21. pp.

Keszeyné Say E., Telekes G., (2009)
Geotechnikai szerkezetek és a talajvíz kölcsönhatása.
Gépipari Tudományos Egyesület, Budapest, *Gép*, LX. Évfolyam, 8. szám, 14-18. pp.

Keszeyné Say E. (2011)
Műtárggyal befolyásolt talajvízáramlás hidrodinamikai modellezése.
Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Kolozsvár, *Műszaki Szemle*, 53/2011 szám (megjelenés alatt)

M3. Ábrák és táblázatok jegyzéke

ÁBRÁK

2.1. ábra Darcy szivárgási kísérlete
2.2. ábra Szivárgási tartományok
3.1. ábra Négy rétegből álló rendszer véges differencia elemekre bontása
3.2. ábra Egy modellezésnél alkalmazott végeselem háló
3.3. ábra Haller-kapu, helyszínrajz
3.4. ábra Résfalas munkatér határolás
3.5. ábra Rétegszelvény
3.6.a. ábra Talajvízszint észlelő kutak helyszínrajzi elrendezése
3.6.b. ábra Talajvízszint észlelő kutak helye
3.7. ábra Talajvízszintmérő műszer
3.8. ábra Dunai vízállások
3.9. ábra Gyakorisági ábra
3.10. ábra Alkalmazott végeselem háló
3.11. ábra Időparaméterek felvétele - időlépcső
3.12. ábra Egyszerűsített földtani modell
3.13. ábra Megfigyelőpontok helye
3.14. ábra Műtárgy körüli megfigyelőpontok elhelyezkedése
4.1. ábra A talajvízállás összefüggése a Duna vízszintjével
4.2. ábra Vizsgálati módszer
4.3. ábra Modellezési munkafolyamat
4.4. ábra Áramlási képek (2D) és vektoros eredmény megjelenítés
4.5. ábra Hidraulikus gradiens változás – visszaduzzasztás, a növekmények különbsége
4.6. ábra Hidraulikus gradiens változás – apadás, a növekmények különbsége
4.7. ábra Szivárgási tényező változás - visszaduzzasztás
4.8. ábra Szivárgási tényező változás - apadás
4.9. ábra Vastagság változás
4.10.a. ábra A talajvíz vastagságának változása – visszaduzzasztás
4.10.b. ábra A talajvíz vastagságának változása – visszaduzzasztás, felületábra
4.11.a. ábra A talajvíz vastagságának változása - apadás
4.11.b. ábra A talajvíz vastagságának változása – apadás, felületábra
4.12.a. ábra Műtárgy méret változás – visszaduzzasztás, grafikon
4.12.b. ábra Műtárgy méret változás, visszaduzzadás
4.13.a. ábra Műtárgyméret változás - apadás, grafikon
4.13.b. ábra Műtárgyméret változás - apadás
4.14. ábra Felületábra 3D - visszaduzzasztás
4.15. ábra Felületábra 3D - apadás
4.16.a. ábra Távolhatás, $k=10^{-3}$ m/s
4.16.b. ábra Távolhatás, $k=10^{-4}$ m/s

4.16.c. ábra Távolhatás, $k=10^{-5}$ m/s
4.17.a. ábra A műtárgy frontján kialakuló visszaduzzasztás $k=10^{-3}$ m/s
4.17.b. ábra A műtárgy frontján kialakuló visszaduzzasztás $k=10^{-5}$ m/s
4.18.a. ábra Egymásra halmozódás - visszaduzzasztás
4.18.b. ábra Egymásra halmozódás - visszaduzzasztás, a növekmények különbsége
4.19.a. ábra Egymásra halmozódás - apadás
4.19.b. ábra Egymásra halmozódás -apadás, a növekmények különbsége
4.20. ábra A hatások szuperponálódása - visszaduzzasztás
4.21. ábra A hatások szuperponálódása - apadás
4.22. ábra Vízszint adatok
4.23. ábra Dunai vízszintek és talajvízszintek kapcsolata
4.24. ábra Eredmények összehasonlítása
4.25. ábra Visszaduzzasztás - grafikon
4.26. ábra Apadás - grafikon
4.27. ábra Felületábra 3D - visszaduzzasztás
4.28. ábra Felületábra 3D – apadás

TÁBLÁZATOK

I. Talajvízszint észlelő kutak adatai
II. Vízmérce adatok
III. Talajfizikai jellemzők
IV. Paraméter analízis eredménye
V. Polinomok – visszaduzzasztás
VI. Polinomok – apadás

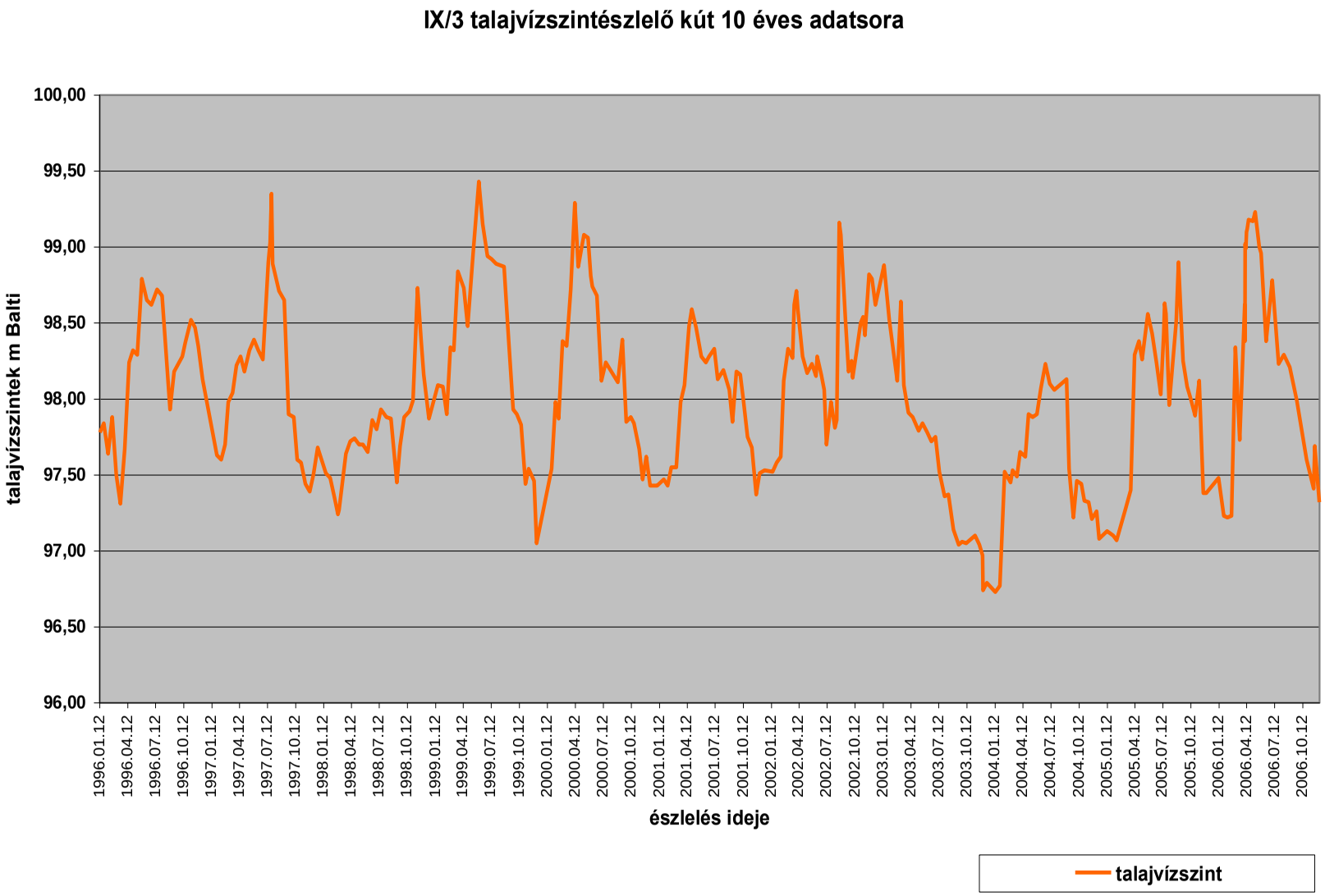
8. FÜGGELÉK

F.1. IX.3 kút 10 éves adatsora
F.2. Alapadatként szolgáló fúrások jegyzéke
F.3. Vektoros eredmény megjelenítés
F.4. Izovonalas ábrázolás
F.5. Szegmens megjelenítés
F.6. Dunai vízszint- és mért talajvízszint adatok

Mathematica szoftverrel készül számítások:

F.7. Hidraulikus gradiens változás - visszaduzzasztás
F.8. Hidraulikus gradiens változás – apadás
F.9. Vastagság változás – visszaduzzasztás, $k=10^{-3}$ m/s
F.10. Vastagság változás – visszaduzzasztás, $k=10^{-4}$ m/s
F.11. Vastagság változás – visszaduzzasztás, $k=10^{-5}$ m/s
F.12. Vastagság változás – apadás, $k=10^{-3}$ m/s
F.13. Vastagság változás – apadás, $k=10^{-4}$ m/s
F.14. Vastagság változás – apadás, $k=10^{-5}$ m/s
F.15. Szivárgási tényező – vastagság – műtárgyméret változás 3D - visszaduzzasztás
F.16. Szivárgási tényező – vastagság – műtárgyméret változás 3D - apadás
F.17. Műtárgyak közötti távolság változás – visszaduzzasztás, apadás

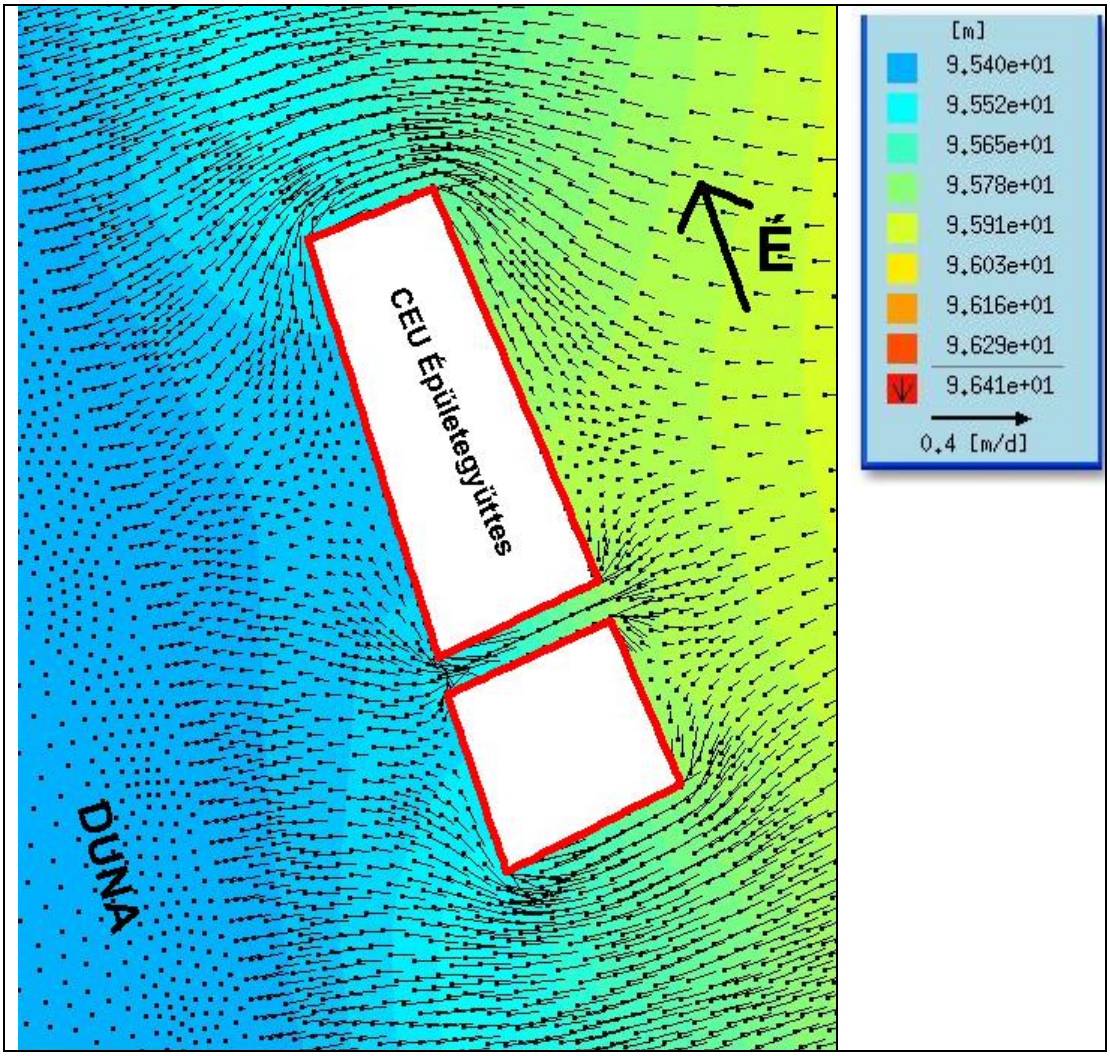
F.1. IX 3. jelű kút 10 éves adatsora



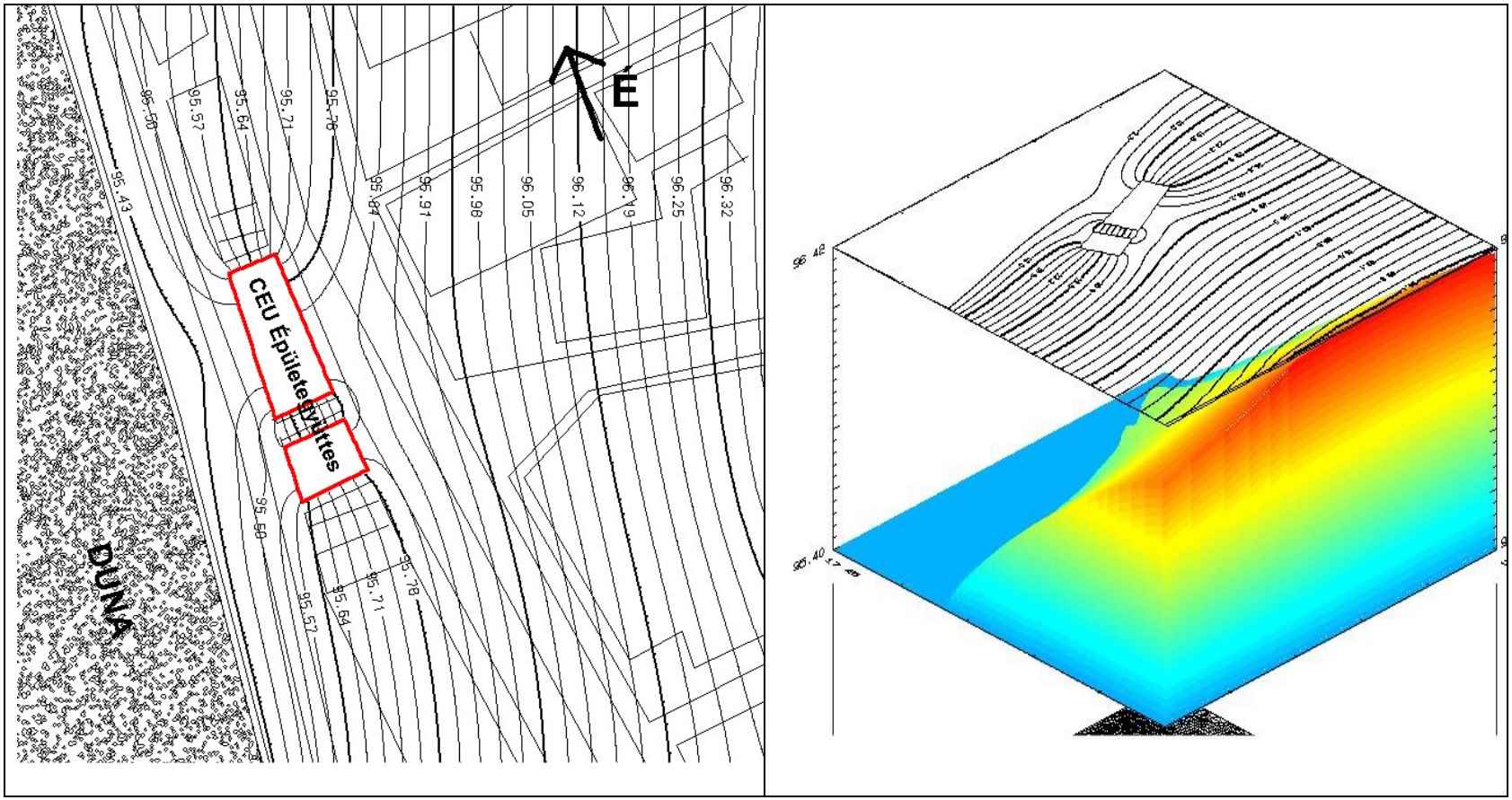
F.2. Alapadatként szolgáló fúrások jegyzéke

Millenniumi városközpont - fúrások							
Fúrás száma	**Fúrás magassága**	**Feltöltés alja**		**Terasz kavics teteje**		**Fekü teteje**	
	mBalti	m	mBalti	m	mBalti	m	mBalti
F2	103,99	6,80	97,19	6,80	97,19	13,70	90,29
F3	104,72	1,70	103,02	8,30	96,42	13,80	90,92
IV/24	105,25	3,00	102,25	8,00	97,25	14,60	90,65
I	105,92	5,40	100,52	7,40	98,52		
5	105,50	2,60	102,90	6,70	98,80	14,00	91,50
21	105,62	6,90	98,72	7,80	97,82	14,70	90,92
23	105,75	7,80	97,95	7,80	97,95	14,40	91,35
4	104,70	2,00	102,70	8,00	96,70		
1	104,12	5,10	99,02	5,60	98,52	18,00	86,12
7	104,75	2,60	102,15	7,30	97,45		
6	104,46	1,20	103,26				
I'	105,57	1,80	103,77	8,20	97,37		
F11'	105,08	2,10	102,98	4,80	100,28	13,00	92,08
1'	104,81	3,30	101,51	3,30	101,51	15,20	89,61
10	104,56	3,00	101,56	3,00	101,56	14,60	89,96
11	104,45	5,20	99,25	5,20	99,25	14,30	90,15
12	104,34	4,50	99,84	4,50	99,84	13,70	90,64
13	104,54	5,80	98,74	5,80	98,74	14,10	90,44
14	104,30	3,00	101,30	3,00	101,30	13,30	91,00
15	104,63	2,80	101,83	2,80	101,83	15,70	88,93
16	104,78	3,10	101,68	3,10	101,68	16,50	88,28
100	104,35	2,80	101,55	2,80	101,55	13,50	90,85
103	104,15	3,10	101,05	3,70	100,45	13,20	90,95
105	104,41	3,30	101,11	4,60	99,81	13,50	90,91
108	104,36	2,70	101,66	6,50	97,86	13,50	90,86
110	104,38	2,70	101,68	6,60	97,78	13,80	90,58
117	104,42	3,10	101,32	4,60	99,82	15,70	88,72
2	104,59	3,30	101,29	4,80	99,79	15,70	88,89
1"	104,81	3,30	101,51	5,70	99,11	15,20	89,61
119	104,22	0,70	103,52	6,30	97,92	15,60	88,62
120	104,08	6,10	97,98	6,10	97,98	14,80	89,28
121	104,05	1,60	102,45	6,40	97,65	13,60	90,45
122	104,72	6,40	98,32	6,40	98,32	15,30	89,42

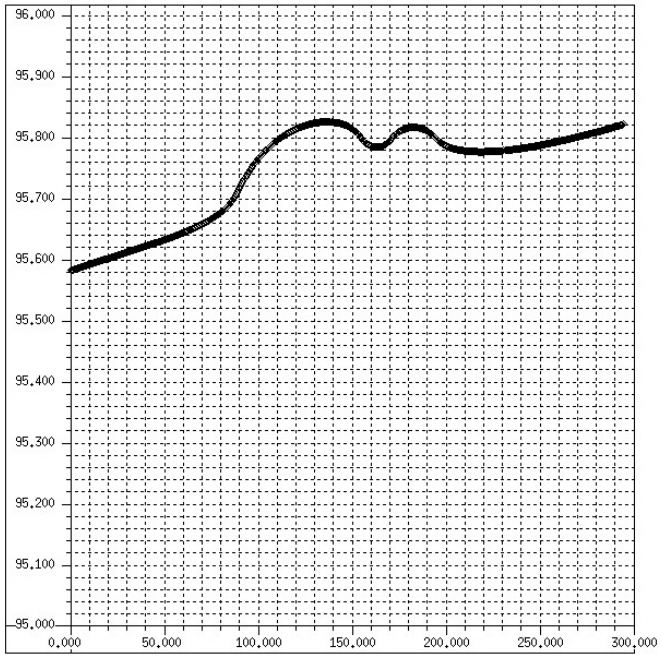
F.3. Vektoros eredmény megjelenítés

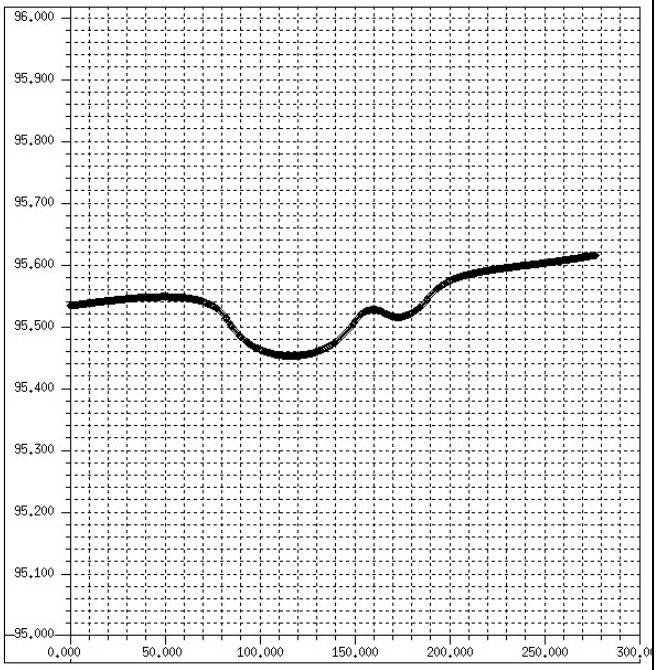


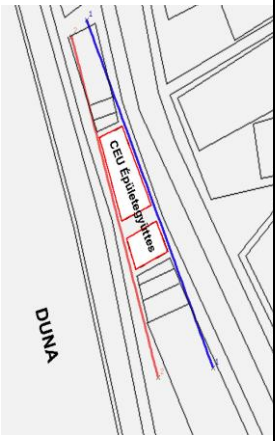
F.4. Izovonalas ábrázolás



F.5. Szegmens megjelenítés







F.6. Dunai vízszint- és mért talajvízszint adatok

Időpont	I. kút 105,43 mBf		II. kút 102,63 mBf		Duna vízszint a vizsgált szelvényben mBf	Vízmérce Vigadó 94,970 mBf		I. - II. kút cm	Duna - I. kút cm	Duna - II. kút cm
2007.11.27	7,60	97,83			97,93	3,20	98,17		10	
2007.12.06	7,55	97,88			98,09	3,36	98,33		21	
2007.12.13	7,15	98,28			98,56	3,83	98,80		28	
2007.12.20	7,21	98,22	5,30	97,33	97,42	2,69	97,66	89	- 80	9
2008.01.10	8,29	97,14	5,99	96,64	96,77	2,04	97,01	50	- 37	13
2008.01.16	8,39	97,04	5,88	96,75	96,55	1,82	96,79	29	- 49	- 20
2008.01.24	7,62	97,81	5,70	96,93	97,94	3,21	98,18	88	13	101
2008.02.01	7,99	97,44	5,70	96,93	97,29	2,56	97,53	51	- 15	36
2008.02.08	8,33	97,10	5,80	96,83	96,78	2,05	97,02	27	- 32	- 5
2008.02.13	8,36	97,07	5,80	96,83	96,64	1,91	96,88	24	- 43	- 19
2008.02.22	8,70	96,73	5,96	96,67	96,18	1,45	96,42	6	- 55	- 49
2008.02.29	8,41	97,02	5,78	96,85	96,46	1,73	96,70	17	- 56	- 39
2008.03.07	7,28	98,15	5,66	96,97	98,44	3,71	98,68	118	29	147
2008.03.14	8,00	97,43	5,76	96,87	97,30	2,57	97,54	56	- 13	43
2008.03.21	7,58	97,85	5,63	97,00	98,47	3,74	98,71	85	62	147
2008.03.27	7,75	97,68	5,55	97,08	97,54	2,81	97,78	60	- 14	46
2008.04.04	7,62	97,81	5,57	97,06	97,75	3,02	97,99	75	- 6	69
2008.04.11	7,70	97,73	5,55	97,08	97,60	2,87	97,84	65	- 13	52
2008.04.16	7,68	97,75	5,54	97,09	97,70	2,97	97,94	66	- 5	61
2008.04.23	7,51	97,92	5,55	97,08	98,96	4,23	99,20	84	104	188
2008.04.30	7,57	97,86	5,50	97,13	98,18	3,45	98,42	73	32	105
2008.05.07	7,62	97,81	5,41	97,22	97,70	2,97	97,94	59	- 11	48
2008.05.16	7,67	97,76	5,45	97,18	97,69	2,96	97,93	58	- 7	51
2008.05.23	7,22	98,21	5,34	97,29	98,32	3,59	98,56	92	11	103
2008.05.30	7,50	97,93	5,35	97,28	98,03	3,30	98,27	65	10	75
2008.06.06	7,43	98,00	5,36	97,27	97,98	3,25	98,22	73	- 2	71
2008.06.13	7,54	97,89	5,33	97,30	97,72	2,99	97,96	59	- 17	42
2008.06.20	7,78	97,65	5,41	97,22	97,23	2,50	97,47	43	- 42	1
2008.06.27	7,85	97,58	5,55	97,08	97,49	2,76	97,73	50	- 9	41
2008.07.18	7,22	98,21	5,40	97,23	98,59	3,86	98,83	98	38	136
2008.07.24	7,15	98,28	5,38	97,25	98,53	3,80	98,77	103	25	128
2008.08.04	7,77	97,66	5,38	97,25	97,45	2,72	97,69	41	- 21	20

2008.08.22	7,46	97,97	5,31	97,32	97,83	3,10	98,07	65	- 14	51
2008.09.05	8,50	96,93	5,73	96,90	96,43	1,70	96,67	3	- 50	- 47
2008.09.12	8,67	96,76	5,86	96,77	96,22	1,49	96,46	- 1	- 54	- 55
2008.09.19	8,27	97,16	5,87	96,76	97,02	2,29	97,26	40	- 14	26
2008.09.26	8,66	96,77	5,97	96,66	96,30	1,57	96,54	11	- 47	- 36
2008.10.03	8,78	96,65	6,01	96,62	96,05	1,32	96,29	3	- 60	- 57
2008.10.10	8,8	96,62	6,1	96,55	96,51	1,78	96,75	7	- 11	- 4
2008.10.17	8,90	96,53	6,12	96,51	96,00	1,27	96,24	2	- 53	- 51
2008.10.31	9,06	96,37	6,3	96,38	96,07	1,34	96,31	- 1	- 30	- 31
2008.11.07	9,03	96,40	6,27	96,36	95,86	1,1	96,10	4	- 54	- 50
2008.11.21	9,11	96,32	6,4	96,24	95,82	1,1	96,06	8	- 50	- 42
2008.12.05	8,72	96,71	6,31	96,32	96,52	1,8	96,76	39	- 19	20
2008.12.20	8,80	96,63	6,4	96,27	96,38	1,7	96,62	36	- 25	11
2009.01.10	8.96	96,47	6,3	96,36	95,91	1,2	96,15	11	- 56	- 45
2009.01.23	9,01	96,42	6,4	96,24	95,98	1,3	96,22	18	- 44	- 26
2009.02.07	8,91	96,52	6,4	96,27	96,14	1,4	96,38	25	- 38	- 13
2009.02.14	8,42	97,01	6,3	96,38	96,96	2,2	97,20	63	- 5	58
2009.03.02	7,95	97,48	6,2	96,44	97,87	3,1	98,11	104	39	143
2009.03.09	6,66	98,77	5,70	96,93	99,52	4,8	99,76	184	75	259
2009.03.16	6,56	98,87	5,4	97,19	99,46	4,7	99,70	168	59	227
2009.04.02	6,46	98,97	5,3	97,31	99,43	4,70	99,67	166	46	212
2009.04.08	5,93	99,50	5,1	97,58	100,24	5,5	100,48	192	74	266
2009.04.23	6,82	98,61	5	97,62	98,71	4	98,95	99	10	109
2009.05.04	7,40	98,03	5,2	97,42	97,90	3,2	98,14	61	- 13	48
2009.05.11	7,44	97,99	5,3	97,36	97,83	3,10	98,07	63	- 16	47
2009.06.02	6,98	98,45	5,10	97,53	98,64	3,9	98,88	92	19	111
2009.06.09	7,72	97,71	5,30	97,33	97,51	2,8	97,75	38	- 20	18
2009.06.17	8,09	97,34	5,5	97,18	96,93	2,20	97,17	16	- 41	- 25
2009.06.26	5,86	99,57	5,1	97,56	99,91	5,2	100,15	201	34	235
2009.06.29	4,80	100,63	4,7	97,97	101,89	7,2	102,13	266	126	392
2009.07.03.	4,60	100,83	4,3	98,29	101,50	7	101,74	254	67	321
2009.07.08.	5,77	99,66	4,40	98,23	99,70	5,2	99,94	143	4	147
2009.07.16.	6,2	99,21	4,5	98,09	97,85	3,4	98,09	112	- 136	- 24
2009.07.24.	6,65	98,78	4,7	97,97	98,58	4,1	98,82	81	- 20	61

Mathematica szoftverrel készül számítások:

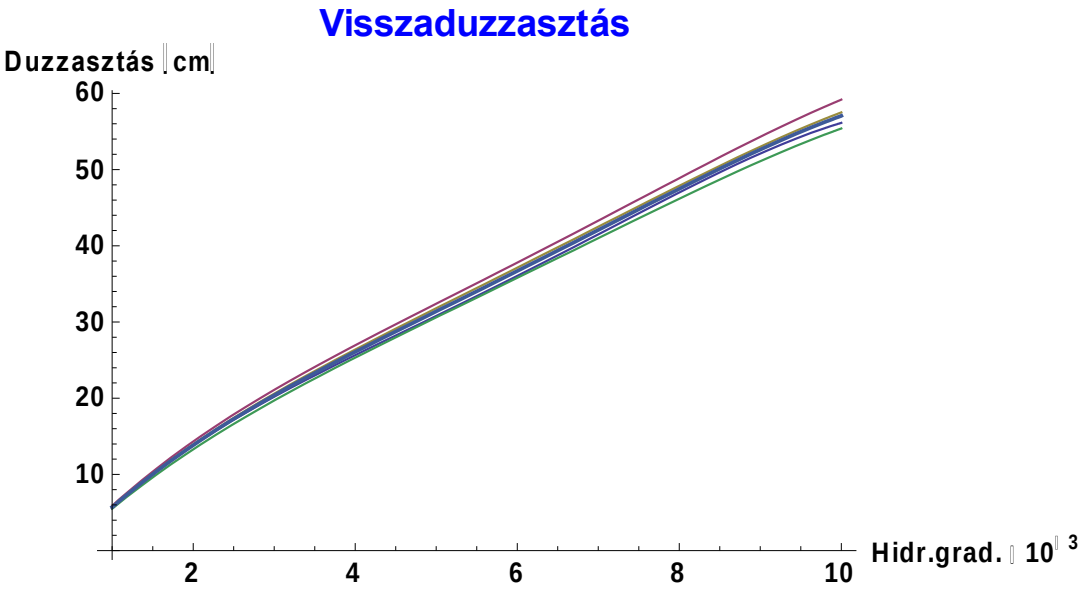
F.7. Hidraulikus gradiens változás - visszaduzzasztás

atlagosszD1[x_]=MovingAverage[{pol4D[x],pol3D[x],pol19D[x],pol13D[x]},4]

$-5.65703+13.2354\,x-2.23177\,x^2+0.264583\,x^3-0.0111979\,x^4$
$-5.07656+12.6021\,x-1.81563\,x^2+0.197917\,x^3-0.0078125\,x^4$
$-4.68438+11.9688\,x-1.65833\,x^2+0.18125\,x^3-0.00729167\,x^4$
$-4.42344+11.2833\,x-1.51979\,x^2+0.166667\,x^3-0.00677083\,x^4$

{1/4 $(-19.8414+49.0896\,x-7.22552\,x^2+0.810417\,x^3-0.0330729\,x^4)$}

AxesLabel→{"Hidr.grad. *10^{-3}","Duzzasztás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



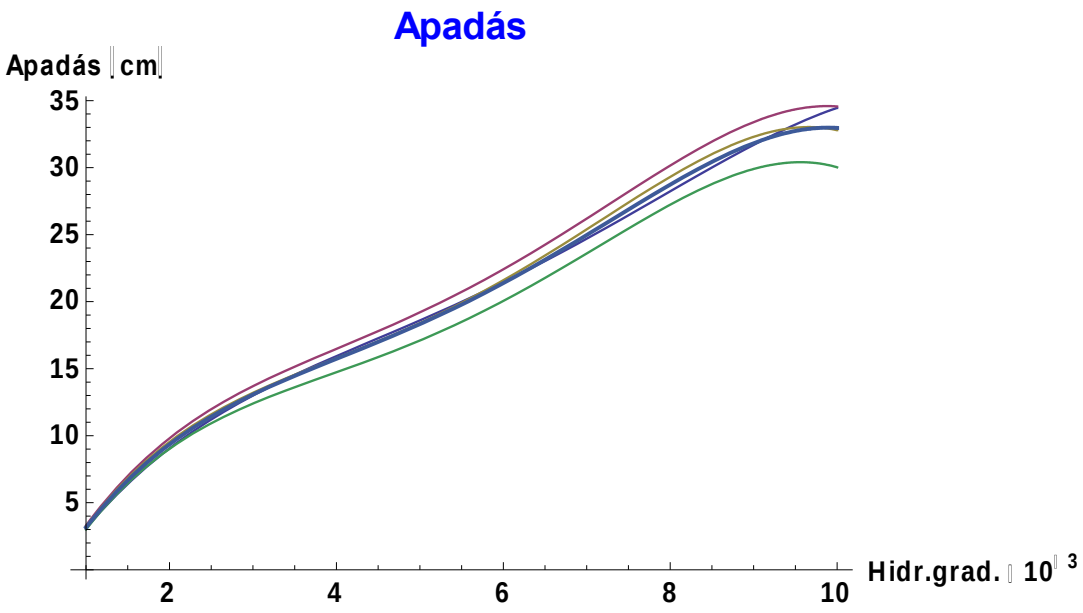
F.8. Hidraulikus gradiens változás - apadás

atlagosszA1[x_]=MovingAverage[{pol8A[x],pol1A[x],pol17A[x],pol15A[x]},4]

$-6.16562+11.4167\,x-2.42292\,x^2+0.283333\,x^3-0.0114583\,x^4$
$-7.84297+14.2458\,x-3.53698\,x^2+0.454167\,x^3-0.0200521\,x^4$
$-7.98672+14.4583\,x-3.74115\,x^2+0.491667\,x^3-0.0221354\,x^4$
$-7.81797+14.0604\,x-3.7099\,x^2+0.489583\,x^3-0.0221354\,x^4$

{1/4 $(-29.8133+54.1813\,x-13.4109\,x^2+1.71875\,x^3-0.0757813\,x^4)$}

AxesLabel→{"Hidr.grad. *10^{-3}","Apadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



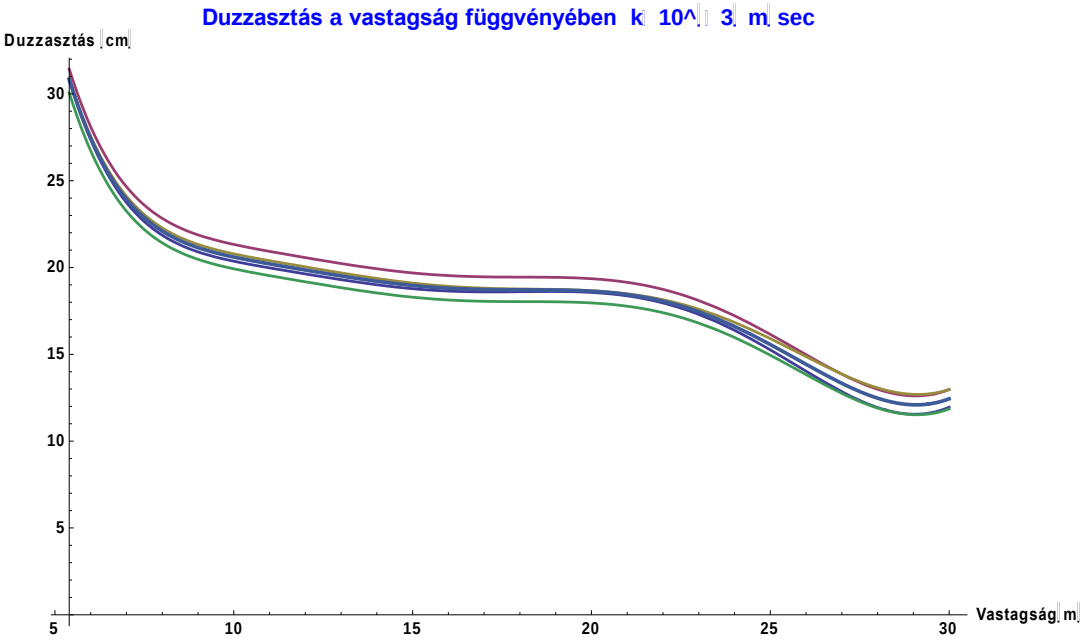
F.9. Vastagság változás – visszaduzzasztás, k=10^{-3} m/s

atlagossz[x_]=MovingAverage[{pol4[x],pol3[x],pol19[x],pol13[x],pol12[x],pol11[x],pol5[x]},7]
atlagresz[x_]=MovingAverage[{pol4[x],pol3[x],pol19[x],pol13[x]},4]

{1/7 (1420.82 -560.283 x+101.329 x^2-9.88418 x^3+0.556348 x^4-0.0179823 x^5+0.000308191 x^6-2.15865×10^{-6} x^7)}

{1/4 (787.863 -301.691 x+54.3213 x^2-5.28009 x^3+0.296191 x^4-0.00954049 x^5+0.000162924 x^6-1.137×10^{-6} x^7)}

["Duzzasztás a vastagság függvényében k=10^{-3} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Duzzasztás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]

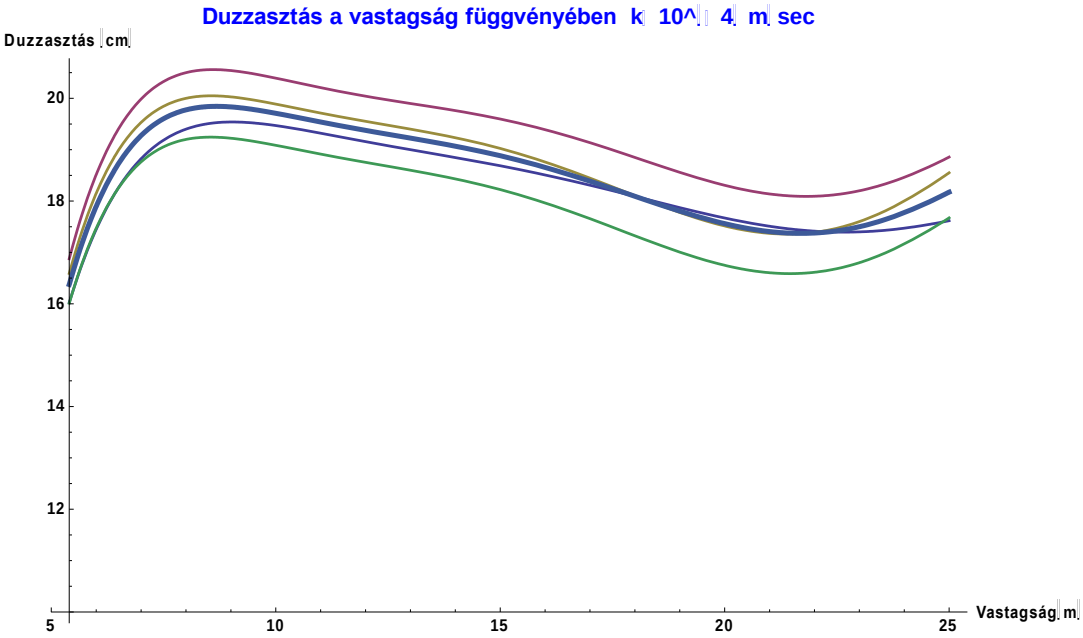


F.10. Vastagság változás – visszaduzzasztás, k=10^{-4} m/s

atlag2[x_]=MovingAverage[{pol4[x],pol3[x],pol19[x],pol13[x]},4]

{1/4 (-297.126+169.815 x-31.45 x^2+3.10104 x^3-0.175774 x^4+0.00570675 x^5-0.0000980465 x^6+6.87422×10^{-7} x^7)}

["Duzzasztás a vastagság függvényében k=10^{-4} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Duzzasztás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



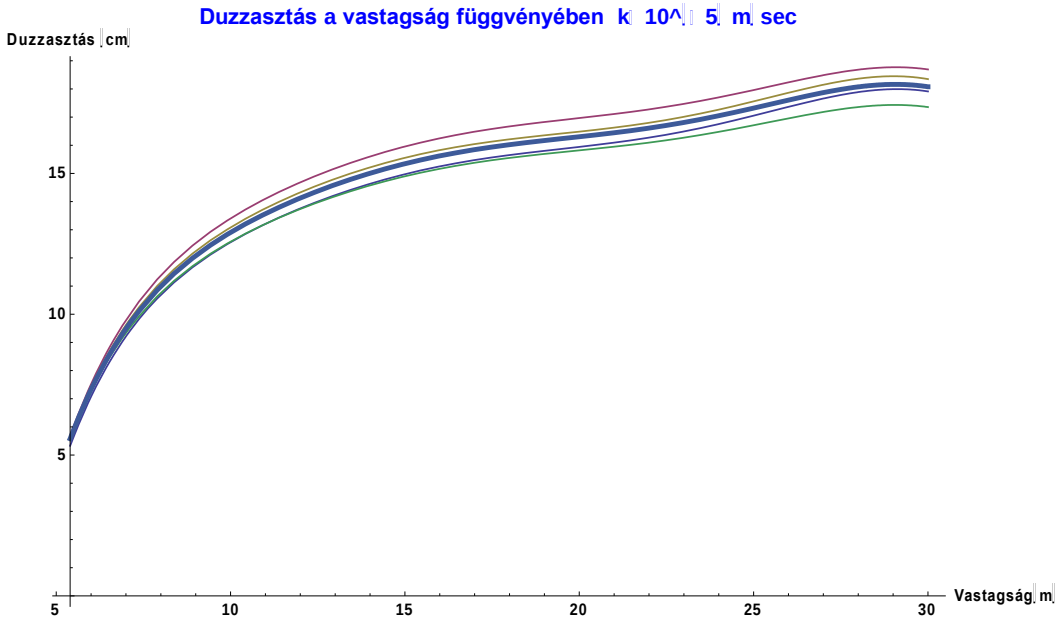
F.11. Vastagság változás – visszaduzzasztás $k=10^{-5}$ m/s

atlag[x_]=MovingAverage[{pol4[x],pol3[x],pol19[x],pol13[x],pol12[x]},5]
atlag2[x_]=MovingAverage[{pol4[x],pol3[x],pol19[x],pol13[x]},4]

$\{1/5\ (-242.796+110.968\ x-18.0031\ x^2+1.65493\ x^3-0.0897504\ x^4+0.00282682\ x^5-0.0000475259\ x^6+3.27979\times10^{-7}\ x^7)\}$

$\{1/4\ (-205.391+93.4392\ x-15.1535\ x^2+1.39222\ x^3-0.0754681\ x^4+0.00237617\ x^5-0.0000399392\ x^6+2.75572\times10^{-7}\ x^7)\}$

["Duzzasztás a vastagság függvényében k=10^{-5} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Duzzasztás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



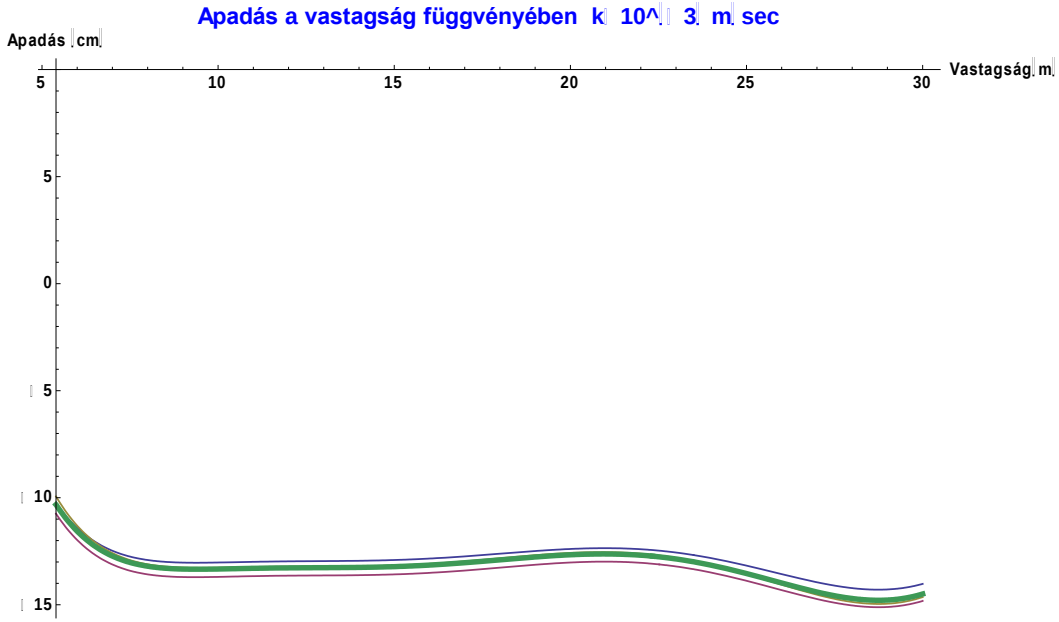
F.12. Vastagság változás – apadás k=10^{-3} m/s

atlag[x_]=MovingAverage[{pol7[x],pol8[x],pol1[x],pol17[x],pol15[x],pol16[x],pol9[x]},7]
atlag2[x_]=MovingAverage[{pol8[x],pol1[x],pol17[x]},3]

{1/7 (770.416 -374.475 x+69.2704 x^2-6.84451 x^3+0.388441 x^4-0.0126178 x^5+0.000216804 x^6-1.51986×10^{-6} x^7)}

{1/3 (186.093 -101.541 x+18.8143 x^2-1.85893 x^3+0.105447 x^4-0.00342304 x^5+0.0000587775 x^6-4.11801×10^{-7} x^7)}

["Apadás a vastagság függvényében k=10^{-3} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Apadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]

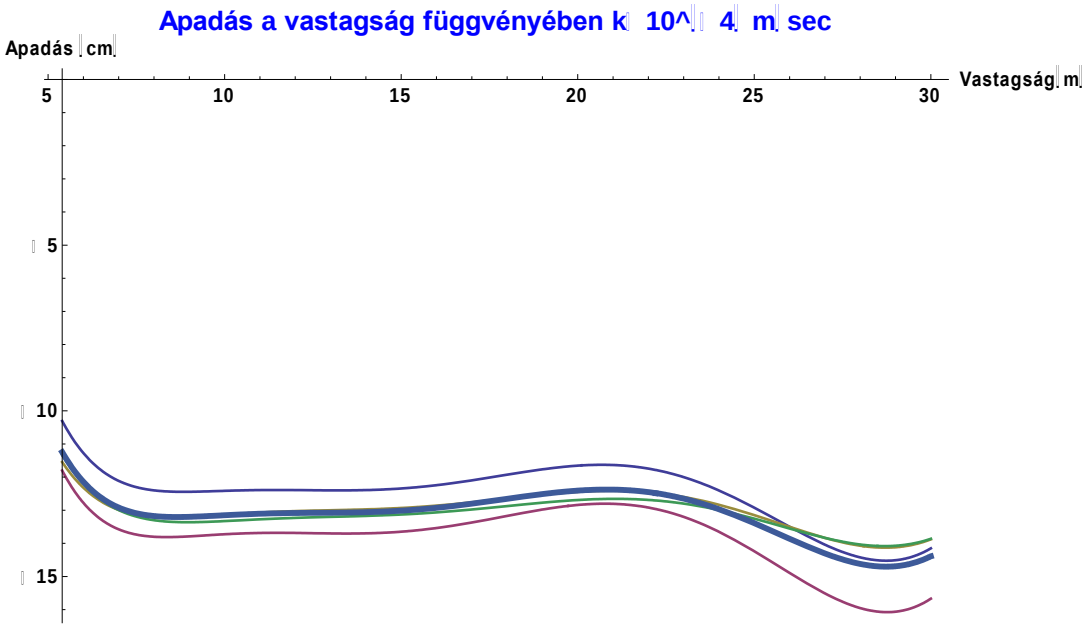


F.13. Vastagság változás – apadás k=10^{-4} m/s

atlag2[x_]=MovingAverage[{pol15[x],pol1[x],pol8[x],pol17[x]},4]

{1/4 (195.877 -116.04 x+22.2023 x^2-2.25232 x^3+0.130541 x^4-0.00431131 x^5+0.0000750403 x^6-5.31311×10^{-7} x^7)}

["Apadás a vastagság függvényében k=10^{-4} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Apadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



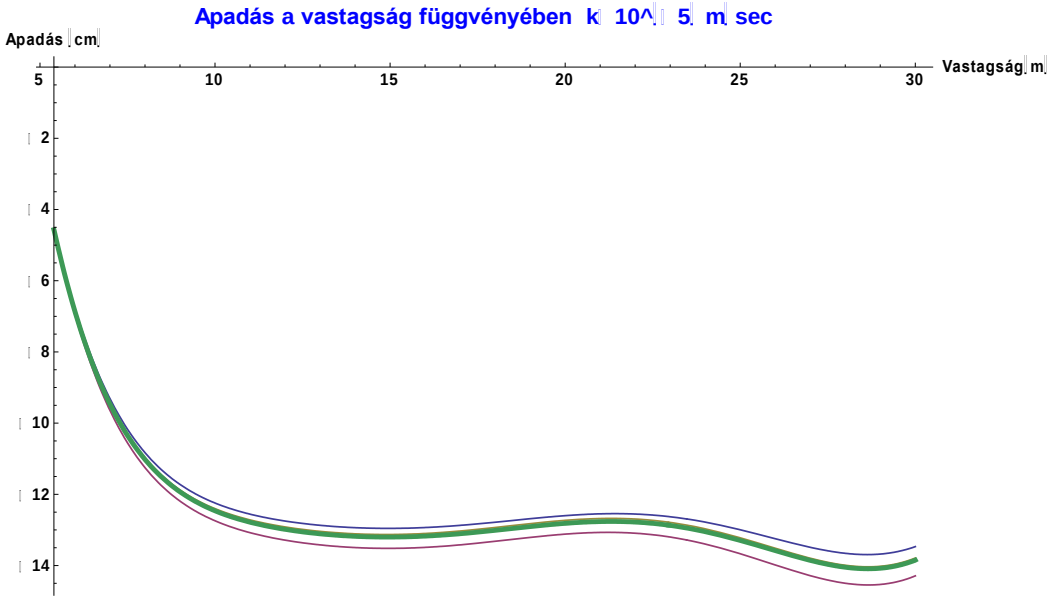
F.14. Vastagság változás – apadás k=10^{-5} m/s

atlag[x_]=MovingAverage[{pol7[x],pol8[x],pol1[x],pol17[x],pol15[x],pol16[x],pol9[x]},7]
atlag2[x_]=MovingAverage[{pol8[x],pol1[x],pol17[x]},3]

{1/7 (427.227 -190.504 x+31.4334 x^2-2.85855 x^3+0.152841 x^4-0.0047553 x^5+0.0000791835 x^6-5.42469×10^{-7} x^7)}

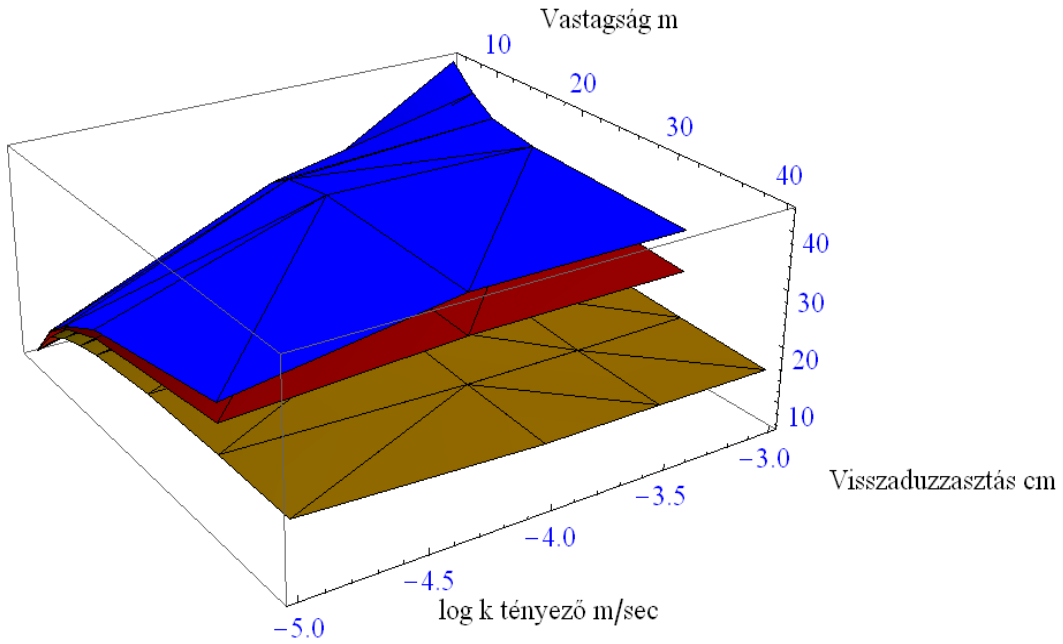
{1/3 (251.491 -112.475 x+18.7216 x^2-1.71512 x^3+0.0922078 x^4-0.00288044 x^5+0.0000481076 x^6-3.30309×10^{-7} x^7)}

["Apadás a vastagság függvényében k=10^{-5} m/sec",Blue,20],AxesLabel→{"Vastagság(m)","Apadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]



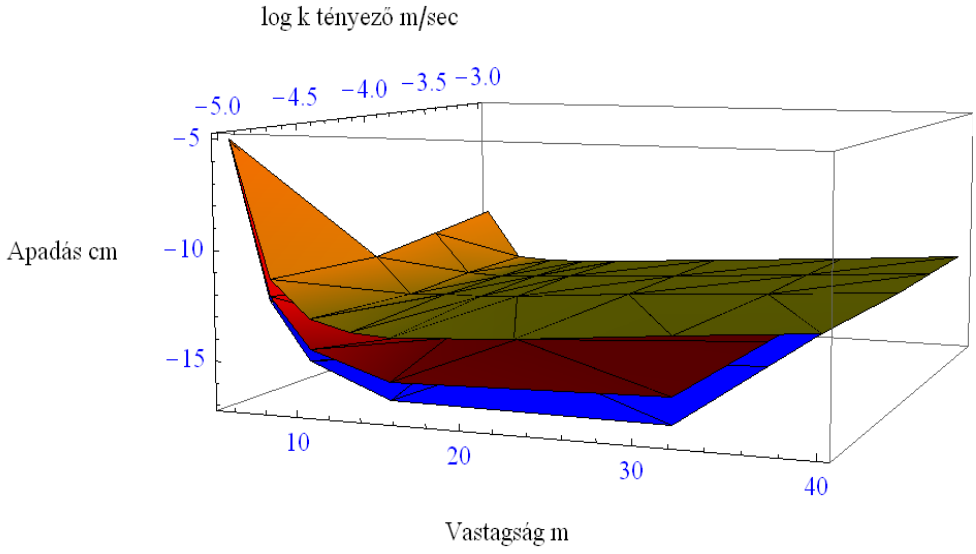
F.15 Szivárgási tényező – vastagság – műtárgyméret változás 3D - visszaduzzasztás

```
label1=Graphics[{Text["Vastagság m",{-5,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];
label3=Graphics[{Text["Visszaduzzasztás cm",{0,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];
label2=Graphics[{Text["log k tényező m/sec",{-5,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];


ListPlot3D[{adat110,adat160,adat210},Mesh→All,InterpolationOrder→3,PlotStyl
e→{Orange,Red,Blue,Specularity[Orange,0.01]},AxesLabel→{
label1,label2,label3},LabelStyle→Directive[Blue,Large]]
```



F.16 Szivárgási tényező – vastagság – műtárgyméret változás 3D - apadás

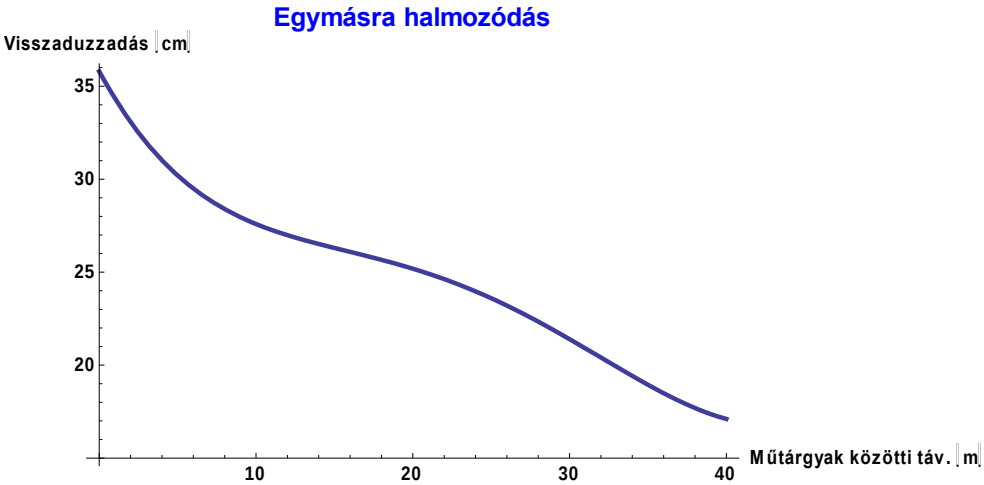
```
label1=Graphics[{Text["Vastagság m",{-5,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];
label3=Graphics[{Text["Apadás cm",{0,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];
label2=Graphics[{Text["log k tényező m/sec",{-5,-
2}]},ImageSize→200,TextStyle→Directive[Black,Large]];


ListPlot3D[{apad110,apad160,apad210},Mesh→All,InterpolationOrder→3,PlotSty
le→{Orange,Red,Blue},AxesLabel→{
label1,label2,label3},LabelStyle→Directive[Blue,Large]]
```



F.17. Műtárgyak közötti távolság változás – visszaduzzasztás, apadás

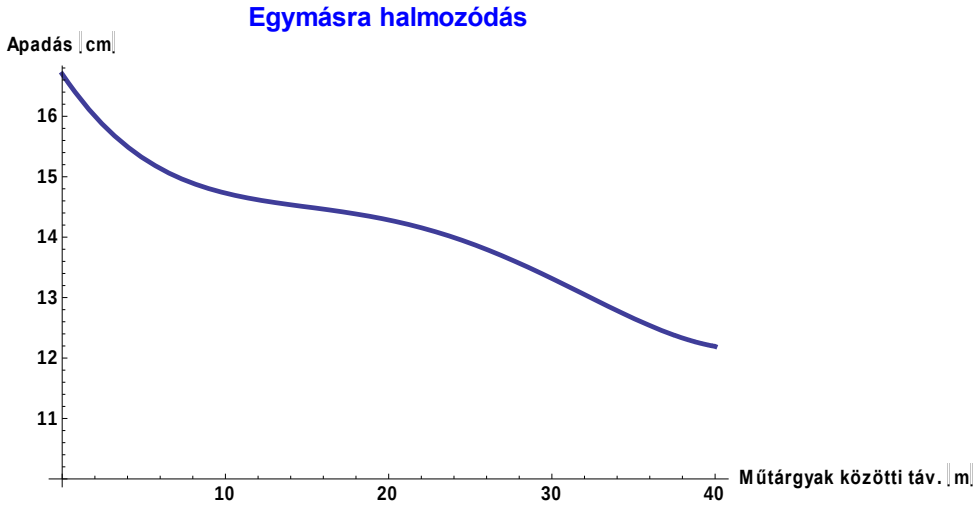
```
duzpol[x_]=Expand[InterpolatingPolynomial[{{50,21.3},{25,23.6},{15,26.3},{5,30.2},{0,35.8}},x]]
Plot[duzpol[x],{x,0,40},AxesOrigin→{0,15},PlotStyle→Thickness[0.007],PlotLabel→Style["Egymásra halmozódás",Blue,20],AxesLabel→{"Műtárgyak közötti táv. (m)","Visszaduzzadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]]
```

35.8 -1.55457 x+0.102193 x^2-0.00322438 x^3+0.000033727 x^4




```
appol[x_]=Expand[InterpolatingPolynomial[{{50,13.7},{25,13.9},{15,14.5},{5,15.3},{0,16.7}},x]]
Plot[appol[x],{x,0,40},AxesOrigin→{0,10},PlotStyle→Thickness[0.007],PlotLabel→Style["Egymásra halmozódás",Blue,20],AxesLabel→{"Műtárgyak közötti táv. (m)","Apadás (cm)"},LabelStyle→Directive[Bold,15,FontFamily→"Helvetica"]]
```

16.7 -0.402571 x+0.0289975 x^2-0.000947048 x^3+0.0000100825 x^4



9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Legelőször szeretnék köszönetet mondani férjemnek, aki szakmailag irányított, és kitartó türelemmel és odaadással támogatott a dolgozat elkészítése során. Továbbá fiaimnak, akik hittek bennem és végig mellettem álltak.

Köszönet illeti témavezetőmet, Dr Telekes Gábort, aki belém fektette bizalmát, munkámban vezetett, és állandó bíztatással, nagy ráhatással késztetett a disszertáció megírására.

Külön köszönettel tartozom Reizinger Krisztiánnak, és Várdainé Kollár Juditnak, akik a számítógépes programrendszerek alkalmazásánál nyújtottak nagy segítséget, valamint Dr Kovács Balázsnak, Dr Mecsi Józsefnek és Dr M. Csizmadia Bélának, akik dolgozatom elkészítése során hasznos szakmai észrevételekkel és tanácsokkal láttak el.

Köszönettel tartozom még Makkos Gábornak és Bognár Balázsnak, akik lehetőséget teremtettek a helyszíni mérések végzésére és segítségemre voltak az adatgyűjtésekben.

Köszönet illeti még azt a sok nem nevesített kollégát is, akik különböző formában járultak hozzá a disszertációm elkészítéséhez.