



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Tudományos Diákköri Konferencia

Építőmérnöki Kar – Geotechnikai Tanszék

Gátak vízoldali rézsűjének állékonyságvesztése hirtelen apadás hatására

Készítette: Pénzes Bálint, Geotechnikai szakirány, 2009. évf.
Szanyi Márton, Geotechnikai szakirány, 2009. évf.

Konzulens: Dr. Mahler András, adjunktus
Dr. Nagy László, egyetemi docens

Budapest
2012

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Gátak állékonysági problémái.....	5
2.1 Gátban található műtárgy okozta problémák	6
2.2 Árvízvédelmi gátak általaj problémái	7
2.2.1 Buzgárok	7
2.3 Árvízvédelmi gátak töltéstartásban megjelenő problémái	9
2.3.1 Mentett oldali állékonyságot befolyásoló árvízi jelenségek.....	10
2.3.2 Vízoldali állékonyságot befolyásoló árvízi jelenségek	13
2.4 Lehetséges tönkremeneteli mechanizmus	20
3. A tönkremeneteli folyamat leírása, elméleti magyarázata	22
3.1. Vízáramlás kialakulása.....	22
3.2. A közeg ellenállása.....	23
3.3. Terhelő hatások	25
3.4. Tönkremenetellel szembeni ellenállás	25
3.4.1. Telített talaj ellenállása:	25
3.4.2. Telítetlen talaj ellenállása:.....	28
3.5. Összefoglalás.....	33
4. Modellezés	34
4.1 Modell felvétel	35
4.1.1 Gát geometriája	35
4.1.2 Talajfizikai jellemzők.....	38
4.1.3 Anyagmodell	40
4.1.4 Apadási sebességek	40
4.2 Modell vizsgálat	43
4.2.1 Modell felvétel lépései	44
4.2.2 Számítási lépések	46
5. Eredmények és értékelés.....	49
5.1. Tönkremeneteli mechanizmus igazolása.....	50
5.1.1 Talajvízáramlás	50
5.1.2 Talajvízszint és pórusvíznyomás.....	52
5.1.3 Telítettség	54

5.1.4 Kapilláris szívás	56
5.1.5 Áramlási nyomás.....	58
5.2 Geometria hatása az állékonyságra	61
5.2.1 A gátmagasság hatása.....	61
5.2.2 A rézsűszög hatása	62
5.3 Hatékony belső súrlódási szög hatása	64
5.4. Az apadási sebesség hatása	65
5.5. Az áteresztőképességi együttható hatása.....	68
5.6 Modell eredmények statisztikai vizsgálata.....	71
5.7 Megoldási javaslatok az állékonyságvesztéssel szemben	72
6. Összefoglalás.....	73
Irodalomjegyzék.....	74
Melléletek	77
1. sz. melléklet: Modellvizsgálatokból nyert eredmények.....	77
2. sz. melléklet: Talajfizikai paraméterek	78
Köszönetnyilvánítás	79

1. Bevezetés

Magyarország gazdag felszíni és felszínalatti vizekben, melyek igen változatos képet mutatnak és jelentősen hozzájárulnak környezetünk alakításához. Ebben a környezetformáló rendszerben kiemelten fontos szerep jut folyóinknak, melyek állandó meder alakító, part-, építő és romboló hatásuk mellett, folyamatos áradásaikkal változtatják közvetlen környezetüket. Az áradások kontrollálására, megelőzésére, mára már körülbelül 4200 km hosszú árvízvédelmi gátrendszerünk épült ki, mely az elmúlt 160 év fejlesztéseinek eredménye.

Árvízvédelmi gátjainkat ma már az egyenlő biztonsági tényezőre való tervezéssel méretezik. Ennek során a gátak hidrológiai, hidraulikai és geotechnikai komplex, együttes vizsgálata szükséges. Mégis elmondható, hogy elsősorban a gátak mentett oldali biztonságára törekszünk, és általánosságban figyelmen kívül hagyjuk a vízoldali biztonságot.

Azonban több esetben is tapasztalható volt, hogy egy árvízvédelmi gát nem tetőzéskor, hanem az árhullám elvonulása során, apadáskor ment tönkre. Ilyenkor a vízoldali rézsú suvadása okozta a gát állékonyságvesztését. E dolgot ezzel a kevésbé vizsgált, de ezzel együtt jelenlévő gát állékonysági problémával foglalkozik; a vízoldali rézsú apadás hatására bekövetkező suvadásával.

Dolgozatunk keretei között először arra kerestük a választ, hogy mikor mértékadó ez az állékonyságvesztési mód. Melyek azok a gátat érő hatások, amik nyomán a mentett oldal tönkremenetele helyett, a vízoldal válik kritikussá.

Majd azt vizsgáltuk, hogy hogyan zajlik le maga a tönkremeneteli folyamat. A hirtelen apadásnak milyen terhelő hatása van a vízoldali rézsúra és ezzel szemben miből fakad a gát talajának teherbírása.

A további vizsgálatok során arra koncentráltunk, hogy meghatározzuk ezen állékonyságvesztési mód mechanizmusát befolyásoló tényezők egymáshoz, de főleg az állékonysági biztonsághoz való viszonyát. Illetve törekedtünk e paraméterek közötti különböző tendenciák kimutatására.

E problémák vizsgálatához a PLAXIS 2011 2D vége-selemes programot használtuk. Modelljeink elemzéseiből több olyan, általunk nem várt jelenségre derült fény, melyek segítségével a jövőben könnyebben kiszűrhetővé válhatnak ezen, állékonyságot veszélyeztető hatás szempontjából, kritikus gát szakaszok.

Modellvizsgálataink során kiemelt figyelmet fordítottunk a talaj, mint háromfázisú rendszer e tönkremenetel szempontjából fontos viselkedéseire.

2. Gátak állékonysági problémái

A gátak tönkremenetelét okozó mechanizmusok igen összetettek lehetnek, ezért az alábbiakban, a teljesség igénye nélkül, kitérünk az egyéb jellemző tönkremeneteli módokra is. Hiszen ahhoz, hogy a vízdoldali suvadást megfelelően el tudjuk helyezni a gátak geotechnikai problémái között, feltétlenül meg kell ismernünk ezen földművek más lehetséges tönkremeneteli, illetve károsodási folyamatait is.

Mindenekelőtt le kell szögezni, hogy nagy a különbség aközött, hogy egy gát tönkremegy, vagy, hogy „csupán” károsodik. Ezek a fogalmak gyakran keverednek mind a köztudatban, mind a mérnöki szóhasználatban.

A tönkremenetel minden esetben a gát átszakadását, illetve funkció vesztesét jelenti. Míg a károsodás, mint a gátat veszélyeztető mechanizmus, nem jár közvetlen tönkremenetellel, de ezzel együtt könnyen lehet egy későbbi tönkremeneteli folyamat része.

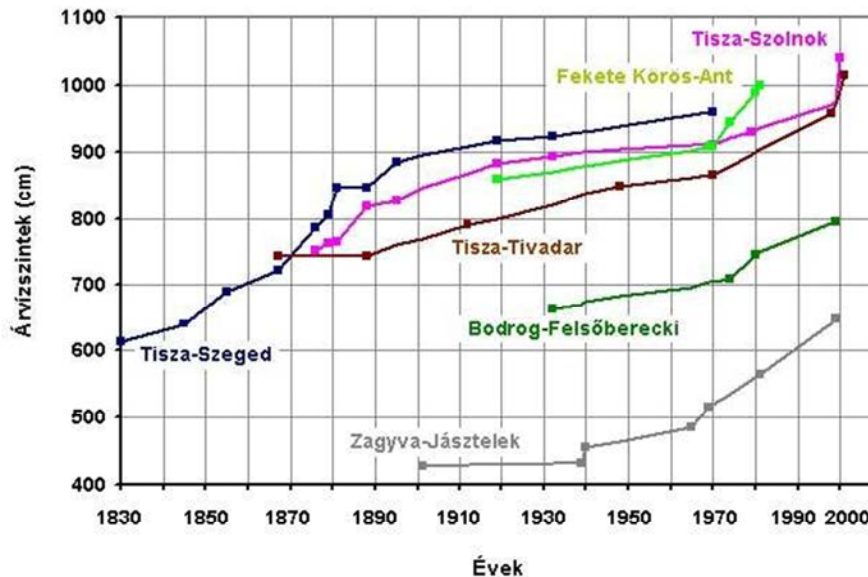
Árvízvédelmi gátak geotechnikai problémáit három nagy csoportba sorolhatjuk:

- a gátban található műtárgy okozta problémák,
- árvízvédelmi gátak általaj problémái,
- és az árvízvédelmi gátak töltésteiben megjelenő problémák.

Ezen állékonyságvesztési folyamatok igen kis hányada statikai eredetű, a legtöbb esetben a vízterhelésre, áramlásra, és- vagy a víz- töltés-altalaj kölcsönhatására vezethető vissza a tönkremenetel (Nagy L., 2000). Épp, ezért mind a vizsgálatok, mind a tervezés szempontjából különösen fontos, hogy figyelemmel kísérjük a hazai árvizek alakulását.

Az elmúlt évtizedekben a nagyarányú folyószabályozási és ártér beépítési munkálatok következtében egyre keskenyebb helyre „szorítottuk” folyóinkat. Mára alig érvényesül (különösen a folyók felső folyásán) az erdők víztartó képessége, azok lecsökkent területe miatt. Ugyanakkor a lefolyási és talajvízbe jutási idők egyre rövidülnek a nagyarányú beépítettség okán.

Ezen folyamatok eredményeként általánosan kijelenthető, hogy viszonylag gyorsan, egyre nagyobb árvizek fognak kialakulni (2-1. ábra), melyek hosszabb idejű tetőzésükkel egyre nagyobb mértékben telítik a gáttöltéseket.



(2-1. ábra): árvízszintek növekedése (Zákányi B., 2004)

Az ábrán jól látható, hogy Szolnokonál az 1880-as években észlelt árvízszint nagyjából 100 év alatt, közel 3 métert emelkedett.

A mentett oldali terhelés növekedése mellett fontos megállapítás, hogy a lefolyási viszonyok megváltozása és az egyre nagyobb arányú csatornázottság az apadási sebességek növekedésében is megmutatkozott.

Ezen következtetést támasztja alá a Tisza Kisköre alatti vízjárását vizsgáló, Laczay I., (1982) és Csikás S. (1984) által készített tanulmányok.

A terhelések illetően növekedése egyre több hidraulikus talajtörés, buzgárosodás és a töltés átázása okozta tönkremenetelek számának növekedését jelzi előre. (Nagy L., 2010) Ugyanakkor a fentiek alapján valószínűsíthető, hogy a vízföldi állékonysági problémák és suvadások is egyre gyakoribbá válnak.

2.1 Gátban található műtárgy okozta problémák

Mivel ezen probléma jó részt a keresztező műtárgytól függ, illetve az ehhez kapcsolódó mechanizmusok igen kiterjedt vizsgálatokat igényelnek, így jelen esetben csupán megemlítjük e témát.

Magyarország árvízvédelmi gátjaiban 1999-ben közel 2500 műtárgy volt (Bara S., 1999). Általános tapasztalat, hogy - kevés kivételtől eltekintve - a legtöbb műtárgy mellett jelentős szivárgást tapasztalhatunk, mely valószínűleg a talaj és a műtárgy közti kis mértékű együttműködés és eltérő összenyomódás tesz lehetővé.

Az ilyen fent említett kontúrszivárgások jelentős problémák forrásai lehetnek a későbbiekben, különösen a karbantartási munkálatok elmaradása esetén.

2.2 Árvízvédelmi gátak altalaj problémái

Minden árvízvédelmi vonalnak, ha úgy tetszik gátnak, szerves része annak altalaja. Mivel a földművek tervezéséhez, építéséhez csak körülbelül 40-50 éve készítenek altalaj vizsgálatot, illetve talajmechanikai szakvéleményt, ezért különösen fontos volt a magyarországi gátrendszer egészének altalaj felmérése, hiszen a töltések eredeti helyszínrajzi vonalvezetése során, az altalajt, mint jövőbeni állékonyság befolyásoló tényezőt nem vették figyelembe.

Ezen átfogó altalaj vizsgálatok az 1996-os évre, csaknem 12 év alatt fejeződtek be. Az eredményekből megállapítható, hogy a legtöbb helyen kötött, vagy gyengén kötött (ritkán átmeneti) talajréteg alatt egy bizonyos mélységig egyre durvább szemcséjű rétegek találhatók (Nagy L., 2000).

2.2.1 Buzgárok

Buzgárnak nevezzük azon árvízi jelenséget, mikor is a mentett oldalon bekövetkezett hidraulikus talajtörést követően a víz a felszínre tör, mely folyamat nagyarányú szemcse kimosódással jár.

Magát a talajtörést mind a talajmechanika, mind a hidraulika jól körülhatároltan, pontosan leírja. Gyakorlatilag a folyamat során megbomlik az egyes talajszemcsék egyensúlya a rájuk ható felfelé irányuló áramlási nyomás következtében, mely áramlási erőt a hidraulikus gradienssel lehet jellemezni. Mindezek ellenére nem tudjuk egyértelműen meghatározni, hogy hol és milyen vízállásnál kell ezzel a tönkremenetellel számolnunk (Nagy L., 2000).

Azonban a sok évtizedes tapasztalatokra és talajmechanikai tudásra alapozva sok esetben meg tudjuk határozni azokat a területeket, altalaj viszonyokat, melyek esetén a buzgárosodás nagy valószínűséggel előfordulhat. Ezen veszélyes rétegződésekre néhány példa (Nagy L., 2010; Törőcsik T., 2007):

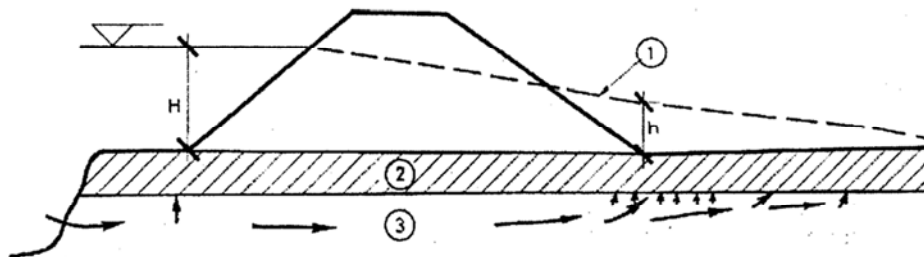
- vízáteresztő altalajon fekvő vékony vízzáró fedőréteg,
- laza, közel szemcsés altalaj a felszínhez közel (fedőréteg nélkül),
- ún. „három rétegű” altalaj (két közel vízzáró réteg közti, szemcsés, jó vízvezető képességű ér lokális beékelődése),
- szerves anyagú, tőzeges altalaj,
- diszperzív tulajdonságú altalaj (az egyes talajszemcsék kis áramlások esetén is könnyen kimosódnak),
- gátat keresztező, feltöltődött holtmeder jelenléte.

A buzgárokat alapvetően két részre bonthatjuk, a hagyományos vagy lassú, illetve a gyors buzgár.

A gyakoribb eset az ún. lassú buzgár, mely általában akkor jön létre, ha a töltés test viszonylag vékony, kötött fedőrétegen áll és alatta valamilyen szemcsés réteg húzódik (2-2. ábra). Hazai viszonyokat tekintve a kb. 3 méteres vastagságot meghaladó, felső kötött réteg esetén, nagy valószínűséggel altalaj töréssel már nem kell számolni (Törőcsik T., 2007).

Ha az áramló víz a mentet oldali fedőréteget áttörve a felszínre tud lépni a szemcsés rétegben meginduló szivárgás sebessége viszonylag nagy lehet. Ezen áttörések helye gyakorta valamilyen korhadt gyökér, vagy állat üregének környéke.

A felszínre törő víz áramlása, nagyarányú szemcseanyag kimosódással járhat, minek következtében az áramlás egyre gyorsul. Ily módon a járat a felvíz felé hátráló erózióval fejlődik tovább, az ekképpen rövidülő szivárgási úthosszal pedig a folyamat tovább gyorsul. A vízdalt elérve a fedőréteg beszakad és az így keletkezett üregbe áramló folyóvíz a gát gyors átszakadásához vezet.



1-elméleti szivárgási vonal; 2-vízzáró fedőréteg; 3- vízáteresztő réteg
(2-2. ábra): Vékony, vízzáró fedőréteg, vízáteresztő rétegen (Törőcsik T., 2007)

Az ún. gyors buzgár esetében a felső fedőréteg hirtelen felszakad és az alatta lévő vízvezető réteg - akár a teljes hosszába - megfolyik, és a felszínre tör. Ezzel párhuzamosan a gát megsüllyed, majd átszakad (2-1. kép). (Törőcsik T., 2007).



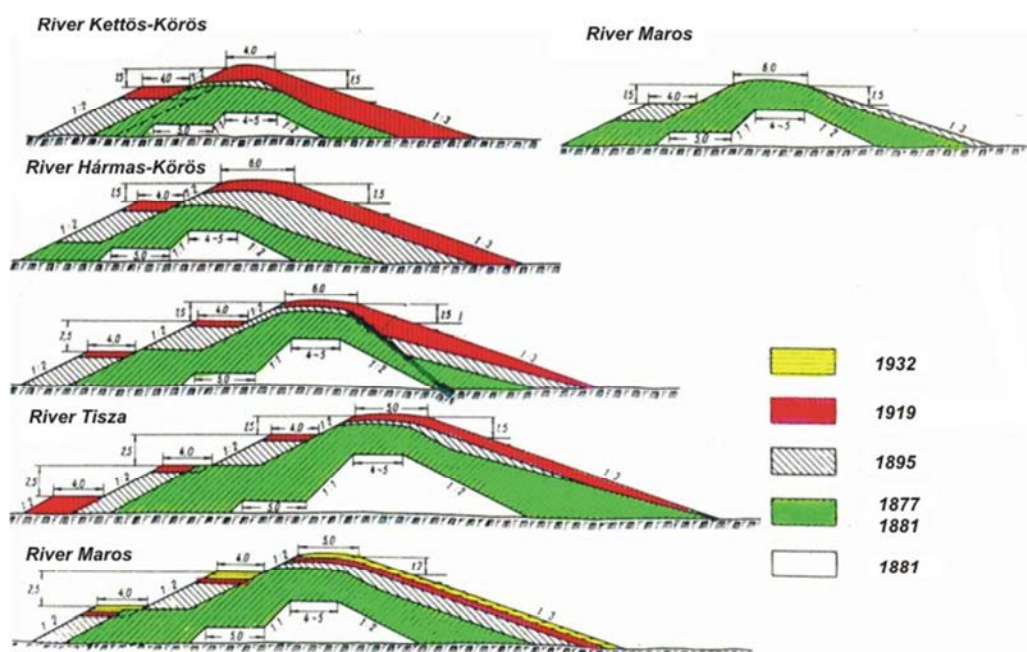
(2-1. kép): A Kettős-Körös jobb parti töltése Hosszúfoknál, néhány órával a töltésszakadás után (Nagy S., 2010)

2.3 Árvízvédelmi gátak töltéstartékban megjelenő problémái

A gáttöltések szerkezetéről, annak tulajdonságairól jóval kevesebbet tudunk, mint az altalajról.

Ezek meghatározása igen bonyolultabb feladat, egyrészt a töltés anyagának változása, az időjárás, növényzet fellazító hatása, a különböző tömörségű részek jelenléte, az állati járatok, vagy az utólagosan beépített szivárgók, illetve résfalak miatt.

Mindezekhez hozzájárul, hogy az elmúlt kb. 160 év alatt a legtöbb gátunkat többször átépítették, bővítették, ennek eredményeképp alakult ki a hazai töltésekre jellemző ún. hagyma-szerkezet (2-3. ábra).



(2-3. ábra): A töltés geometriájának alakulása (Szlávik L., 2000)

A különböző építési fázisokban készült rétegek anyagminőségét, illetve ezen töltés részek kapcsolatát igen nehéz meghatározni, mivel a tömörségen át, egészen az építés minőségéig számos tényezőtől függenek. Ugyanakkor a gátak eredeti talajszerkezetét, tulajdonságait számos egyéb tényező is befolyásolja, módosítja, mint például:

- az esővíz, talajvíz eltérő kémiai tulajdonsága,
- a kiszáradás, újranedvesedés folyamata,
- a hőmérsékleti ingadozások és fagyások,
- a különböző atmoszférikus hatások,
- a folyóvíz áztató, elhaboló képessége,
- az élővilág hatása.

Ezek eredményeképp a töltés felszínének kb.: 40-70 cm vastag rétegét egyfajta fellazult réteggént kell kezelni (Nagy L., 2000). Valamint fontos megjegyezni, hogy a fenti hatások nemcsak ezen fellazult rétegeknek, hanem a töltés egészének öregedéséért felelősek.

Öregedésen gyakorlatilag a földmű talajában lejátszódó olyan fizikai, kémiai és biológiai folyamatokat értjük, melyek hatására megváltozik a gát méretezése, vizsgálata szempontjából lényeges fizikai paraméterek. A későbbiek során erre még visszatérünk, mivel az a vízdoldali suvadás szervesen kapcsolódik e fogalomhoz.

A legtöbb esetben a káros, töltésben lejátszódó árvízi jelenségeknek csak azon fajtáit tárgyalják, melyek a mentett oldalon okoznak tönkremenetelt, hiszen ezen folyamatok esetén beszélhetünk közvetlen elöntés veszélyről. Mivel jelen dolgozatban a vízdoldali állékonyságvesztést vizsgáltuk, így e két esetet (mentett és vízdoldali állékonyság) a továbbiakban külön kezeljük.

2.3.1 Mentett oldali állékonyságot befolyásoló árvízi jelenségek

A következőkben röviden összefoglalom a mentett oldalt veszélyeztető jelenségeket, úgymint:

- repedezettség,
- csurgás,
- réteg- és talpszivárgás.

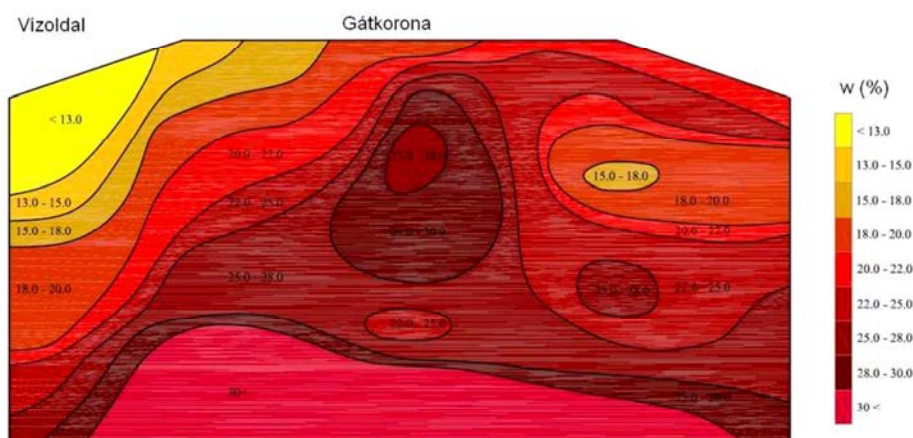
2.3.1.1 Repedezettség

A kilencvenes évek hosszú, száraz periódusa egy, a magyarországi éghajlat mellett addig kevésbé elképzelt problémára hívta fel a figyelmet: a töltésrepedésre. Ezen időszakban, több árvízmentes időszakot követően a töltéstest felső kétharmada jelentősen kiszáradt. Ennek a hosszú ideig tartó kiszáradási folyamatnak volt eredménye a jó részt hosszanti irányultságot mutató repedések kialakulása. (Nagy L., 2006; Szepessy J., 1991).

Általánosan elmondható, hogy a kötött talajok duzzadásra, illetve zsugorodásra hajlamosak. Amennyiben az adott talaj a víztartalomra különösen érzékeny (ún. duzzadó agyag, vagy magas szerves anyag tartalmú talaj) úgy igen jelentős alakváltozásokat lehet tapasztalni. Azonban ilyen talajokat viszonylag kis százalékban találunk meg a gátak töltésében, így tehát e repedések kialakulása - a hazai viszonyokat tekintve - sokkal inkább az időjáráshoz, illetve a vízjáráshoz köthető, mint a gát töltésanyagához.

A töltésrepedés keletkezésére jó példa a 2009. év kora őszében bekövetkezett tiszai eset.

Itt a töltés a 2006-ban levonult árvízét követően nem nedvesedett át újra. Mivel a 2009-es év nyári hónapjait alacsony vízállás és az átlagosnál melegebb, illetve szárazabb időjárás jellemezte, így a töltés külső része jelentősen kiszáradt a belső részekhez képest (2-4. ábra) (Nagy L., 2009).



(2-4. ábra): Víztartalom változása egy adott keresztmetszvény 5 méteres mélységéig (Nagy L., 2009)

Jól látható ugyanakkor, hogy a vízoldalon jóval nagyobb a kiszáradás mértéke, vagyis ezen oldalon több víz távozott a gát felső részéből. Így nem meglepő, tehát, hogy a vízoldalhoz közel jöttek létre a kb. 10 cm széles és több száz méter hosszú repedések.

Fontos megjegyezni, hogy a repedések mélysége meghaladhatja akár 2 métert is, vagyis ha a repedések kialakulását követő árvíz eléri ezt a mélységét, akkor minden további vízszint emelkedés rohamosan növeli a gát tönkremeneteli valószínűségét (Nagy L., 2009).

Ugyanakkor nemcsak az árvíz jelent komoly fenyegetést, hiszen nem egy példa van rá, hogy az ilyen repedések igen rövid idő alatt több köbméter vizet is elnyeltek felszínre szivárgás nélkül (Nagy L. 2000, 2009), ez pedig egy komolyabb zápor esetén igen jelentős többlet nyomást jelenthet a gáttestben, illetve a telítődést és a repedés mélyülését is elősegíti.

2.3.1.2 Csurgás

A csurgás gyakorlatilag a gátba bejutott víznek a mentett oldali rézsűben, altalajban vagy töltésköröm közelében való koncentrált kilépését jelenti. A csurgás ma már jó részt csak kisebb mellékvízfolyások kisebb méretű töltésein jelennek meg. Veszélyessé akkor válhat, ha a különböző csurgási járatok belső erózió útján túlfejlődnek és ezzel akár a gát tönkremeneteléhez is vezethetnek.

2.3.1.3 Réteg- és talpszivárgás

Árvíz idején a folyó megnövekedett vízszintjének hatására szivárgás indul meg a gát mentett oldala felé. A víz nyomás alatt tartja a vízdalt és mivel teljesen vízzáró talaj nincs, így a szivárgás a nyomás növekedésével egyre nagyobb vízterhelést jelent. (Nyíri G., 2011)

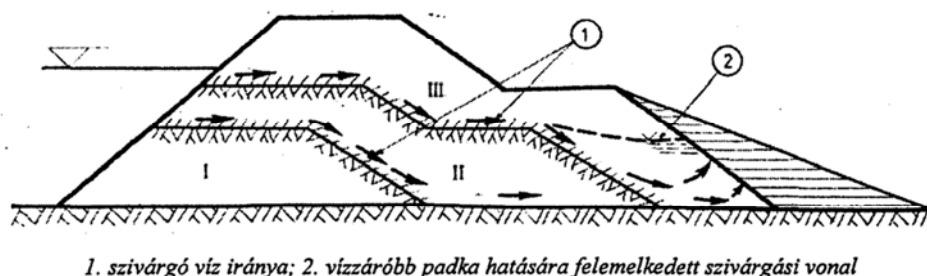
A rétegszivárgást a töltésben leginkább két dolog befolyásolja kellően tartós árvíz esetén:

- a töltés vízáteresztőképessége,
- és a töltés szerkezete, (annak inhomogenitása).

A vízáteresztőképesség jelen esetben elsősorban a töltés telítődése szempontjából fontos (minél kisebb annál gyorsabban telítődik). Az áteresztőképességgel bővebben a 3. fejezet foglalkozik.

A korábbiakban már említettem, hogy a folyamatos gátbővítések hatására a hazai gátakra az inhomogén belső szerkezet a jellemző (2-3. ábra). Mivel ezen töltés részek egymásra építése során sokszor nem távolították el a felső, általában jobb vízvezetőképességű 40-70 cm vastag réteget, így gyakorlatilag az egyes rétegek között sokszor egyfajta „beépített” szivárgó réteg található.

Ez különösen akkor veszélyes, ha mentett oldalon a rézsút kisebb vízáteresztő képességű talaj alkotja, vagy utólag épített vízzáró padka került kialakításra (2-5. ábra).



(2-5. ábra): Rétegszivárgás mentett oldali vízzáró padka esetén (Törőcsik T., 2007)

Ugyanis ebben az esetben a szivárgó víz könnyen visszaduzzadhat, egészen addig, míg az így megnövekedett víznyomás hatására a gát mentett oldala le nem suvad.

A talpszivárgás gyakorlatilag a rétegszivárgás egy speciális esete, azonban érdemes külön megemlíteni. Mivel a gát földműve és töltésalapja menti szivárgásról van szó, így a szivárgó víz igen kevés akadályba ütközik és a lehető legrövidebb szivárgási út mellett nyomómagassága elérheti az árvízi nyomás 60-70 %-át is.

Korántsem egyedülálló az az eset, mikor egy talpszivárgást buzgárként azonosítanak, és csak akkor veszik észre ezt a hibát, amikor az ellennyomó medence falával már rendkívüli, több méteres magasságnál járnak (Törőcsik T., 2007).

2.3.2 Vízoldali állékonyságot befolyásoló árvízi jelenségek

Az árvízvédelmi gyakorlatban általában három féle vízoldali károsodásról esik szó:

- a vízoldali elmosásról,
- a hullámverés okozta elhabolásról,
- és a vízoldali suvadásról.

2.3.2.1 Vízoldali elmosás

Maga a tönkremeneteli folyamat a nagy sebességgel áramló megáradt folyó eróziós hatása, melyről viszonylag kevés tapasztalattal rendelkezünk. Azt már mindenesetre tudjuk, hogy nagy vízsebességek mellett ($v > 4 \text{ m/s}$) alakulhat ki, különösen, ha a töltés laza állapotú. (Nagy L., 2010).

E tönkremenetelre jó példa az 1998-as Királyházán bekövetkezett árvíz okozta vízoldali elmosás (2-2. kép).



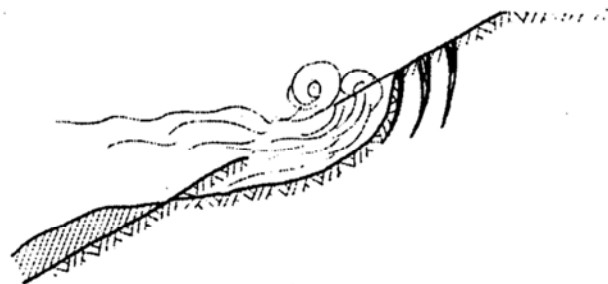
(2-2. kép): Vízoldali elmosás Királyházán (Nagy L..2010)

2.3.2.2 Elhabolás

Nagyobb, szabad vízfelületek esetén, már a legkisebb szellő is hullámzást okoz. Amennyiben megfelelő mélység és a szél irányába kellő meghajtási hossz áll rendelkezésre, úgy igen jelentős hullámzás alakulhat ki.

Ez elsősorban a Tisza széles árterein lehetséges, ahol erős szélben nem ritka a 0,6-0,8 méteres hullámverések előfordulása. Ha pedig számításba vesszük, hogy egy tipikus 1:3-as földrézsút már kb. 0,1 méteres hullámok is megbonthatnak, nyilvánvaló lesz a probléma jelentősége (Törőcsik T., 2007).

Az elhabolás mértéke jelentősen függ a rézsű borításától. Egy általános, gyepes borítású rézsűnek először csupán a fűcsomói közeit bontja meg a hullámzás, majd magukat a csomókat is kiborítva alakul ki az ilyenkor jellegzetes elhabolási kép (2-6. ábra).



(2-6. ábra): Elhabolási kép (Törőcsik T., 2007)

2.3.2.3 Vízoldali suvadás

Általában a gát rézsűjének csúszása, állékonyságvesztése a szivárgás hatására a mentett oldalon következik be. Azonban az árvíz tetőzését követő apadáskor, különösen, ha viszonylag gyors ütemben, hirtelen csökken a vízszint, a gáttestben meginduló áramlás könnyen megbonthatja az átázott vízoldali rézsűt. Ez elsősorban az apadás miatt kialakuló áramlás nyomása miatt következik be, mely destabilizáló erőként terheli a mentett oldali rézsűt.

Természetesen a folyó felé visszaszivárgó, visszaáramló vizek mellett a vízoldali állékonyságot egyéb tényezők is befolyásolják:

- a töltés talaja, nyírószilárdsága, vízvezető képessége,
- a töltés telítettsége, kiindulási víztartalma,
- a rézsű geometriája, belső szerkezete,
- a megnövekedett vízterhelés, pl. nagyobb apadási sebesség,
- apadást megelőző vízoldali elmosás és elhabolás,
- a gát kiindulási állapota, „múltja”, repedezettsége.

A különböző földmedrű csatornák és folyópartok esetében az apadó víz, illetve áramló víz hatására bekövetkező suadások igen gyakoriak (2-3, 2-4. kép).

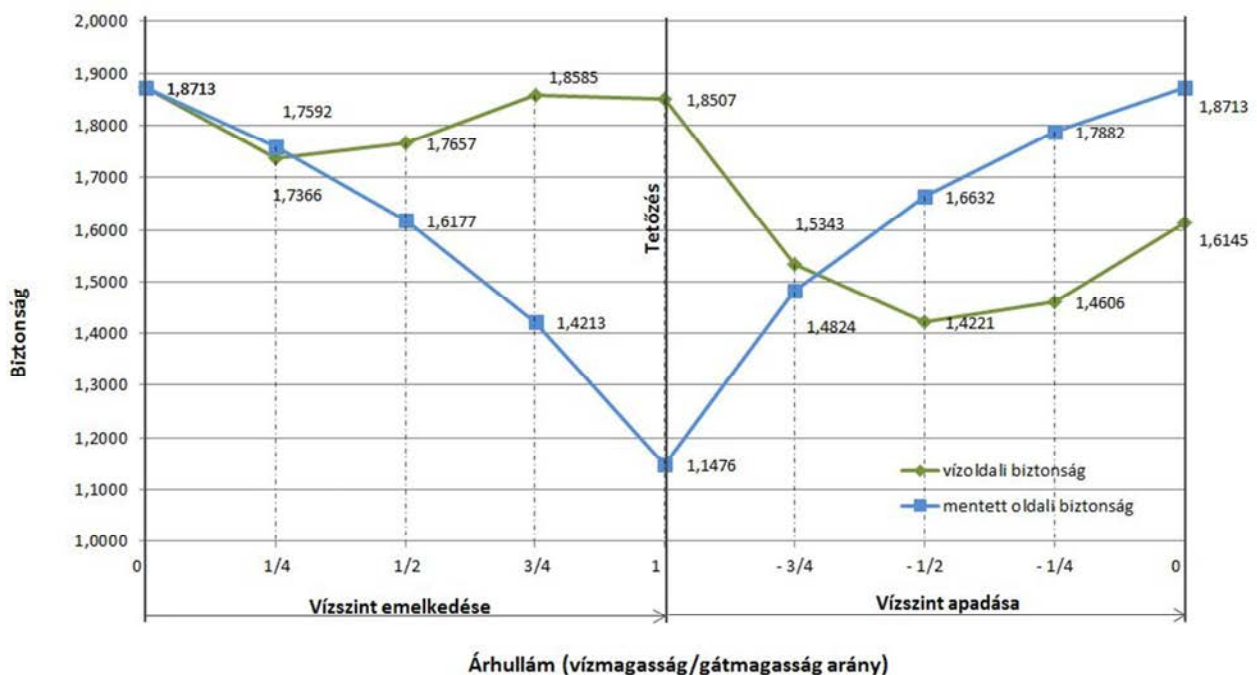


(2-3. kép, bal): Belfő-csatorna (Bacskai A., Dajka I., 2011)

(2-4. kép, jobb): Vármegyei csatorna (Bacskai A., Dajka I., 2011)

Azonban a gátaknál az efféle suadások már viszonylag ritkábban fordulnak elő, minek valószínűsíthető oka, hogy azok kialakítására, tömörítésére nagyobb hangsúlyt fektetnek a kivitelezés során.

Egy konkrét árhullám esetén a gát részüinek állékonysági biztonsága folyamatosan változik. Az árvíz emelkedésével megindul a szivárgás a gáton keresztül, a mentett oldal állékonysági biztonságát mind a talaj telítette válása, mind az áramlási nyomás csökkenti. Minél nagyobb a vízszintkülönbség annál kisebb az állékonysági biztonság. Az apadás során azonban a vízmozgás iránya változik, a nagyrészt telítetté vált gáttestből a meder felé áramlik a víz, így a vízmozgás ez esetben a vízdali részü állékonyságát csökkenti. Véges elemes vizsgálatot végeztünk és meghatároztuk a vízdali és mentett oldali részü állékonysági biztonságának változását az árhullám során (2-7. ábra).



A fenti ábra egy meghatározott árhullámhoz tartozó biztonsági értékek alakulását mutatja egy adott gáttöltés víz-, illetve mentett oldalán szétválasztva. A vízszintes tengely mentén látható az árhullám alakulása és hogy a gát magasságának hányad részénél áll a vízszint. Míg a függőleges tengely az egyes vízállásokhoz tartozó biztonsági tényezőket mutatja.

A vízszint emelkedésével szépen kirajzolódik a mentett oldal biztonságának folyamatos csökkenése, ami a tetőzéskor (vagyis amikor a vízszint a gátkoronánál található) éri el minimumát.

Ezzel „párhuzamosan” a vízoldali biztonságok rövid ideig szintén csökkenő tendenciát mutatnak, melyet követően a tetőzésig alig változnak, és átlagosan az 1,8-es biztonság körül stagnálnak. Ennek oka, hogy miután az árvízszint kezdeti emelkedése hatására a vízoldali rézsúláb környéki talaj (a potenciális csúszólap alsó része) telítetté válik, de a vízmozgás sebessége – és ezáltal az áramlási nyomás még kicsi. Amikor a vízszint a gátmagasság $\sim 1/4$ -ét eléri a további vízszintemelkedés már inkább stabilizáló hatású, mert az egyre jelentősebb vízmozgás okozta áramlási erő a talajt stabilizálja (a gát közepe felé mutat).

A tetőzést követő apadás során a vízoldali biztonság rohamosan csökken, a legkritikusabb periódus az apadás időtartamának közepe. Ezzel együttemben a mentett oldal biztonsága viszonylag meredeken növekszik, míg el nem éri a kiindulási biztonság értékét (vagyis amikor a víz a nulla szinten áll és mindkét oldalnak egyenlő a biztonsága).

A folyamatos apadás során tehát a vízoldali rézsú, áramlási nyomásból származó terhelése egyre nő, míg a mentett oldali terhelések ezzel egy időben (az áramlás irányának megváltozása miatt) csökkennek.

Ezen hatások következtében a gát magasságának $3/4$ -ét elhagyó apadás esetén (két görbe metszéspontját követően) a vízoldali rézsú válik kritikussá. Ezen metszéspont (vagy nevezzük a vízoldal állékonysága szempontjából kritikus pontnak) helyzete az adott árhullámtól, illetve gáttól függően a vízszintes tengely mentén változhat.

Egyúttal ezen kritikus pont azt is jelenti, hogy minden gát esetén létezik olyan apadás, mely során a vízoldali állékonyságvesztés válik kritikussá, épp ezért lényeges ezen árvízvédelmi jelenség részletes vizsgálata.

2.3.2.3.1 Gyakorlati példák

Szolnok, 1985

A fentiekre gyakorlati példaként szolgálhat, hogy az elmúlt évtizedekben Szolnok területén már több ízben bekövetkezett vízoldali rézsúcsúszás. A következőkben ezért, ezen esetek tapasztalatait fogjuk röviden megvizsgálni.

Az első ilyen rézsúcsúszás, 1985 júniusában a Zagyva jobb partján bekövetkezett károsodás volt. Mely során nagyjából 19 óra alatt a töltéskorona függőleges irányba közel 2 métert, vízszintesen pedig nagyjából 0,5 métert mozdult el (2-5.kép). Az elmozdulásokat ezután több hétig tartó lassú kúszás követte. (Nagy L., 1985).



(2-5. kép): A töltéskorona elmozdulásai (Nagy L., 1985)

A csúszólap egy viszonylag laza, kis nyírószilárdságú, magas víztartalmú ($w=20-60\%$) és nagy plasztikus indexű, 4,5 méter vastag agyag rétegben jött létre.

A suvadást közvetlen kiváltó okaként az igen tartós, magas vízállást, majd az ezt követő viszonylag nagy sebességű apadást jelölhetjük meg. A Zagyva vízszintje 7 nap alatt 3,6 métert süllyedt (ez átlagosan naponta 0,5 méteres apadást jelentett). A suvadáskor észlelt napi vízszint-csökkenések maximuma 0,7 és 0,8 méter körül mozogtak, ami lényegesen kevesebb mint az adott területen addig mért napi maximum (161 cm), de mindenképp nagyobbak tekinthető, mint a természetes apadási sebesség (Nagy L., 1985).

Ennek a megnövekedett átlag apadási sebességnek egyik oka a Kiskörei-vízlépcső és annak üzemrendje, melynek hatására az apadási sebességek jelentősen nagyobbak lettek; a 0,6 méteres napi apadást 50%-os valószínűséggel meghaladják (Laczay I., 1982; Csikás S., 1984). Többek közt ezen apadási sebességekből származik a térség vízdali problémáinak nagy száma.

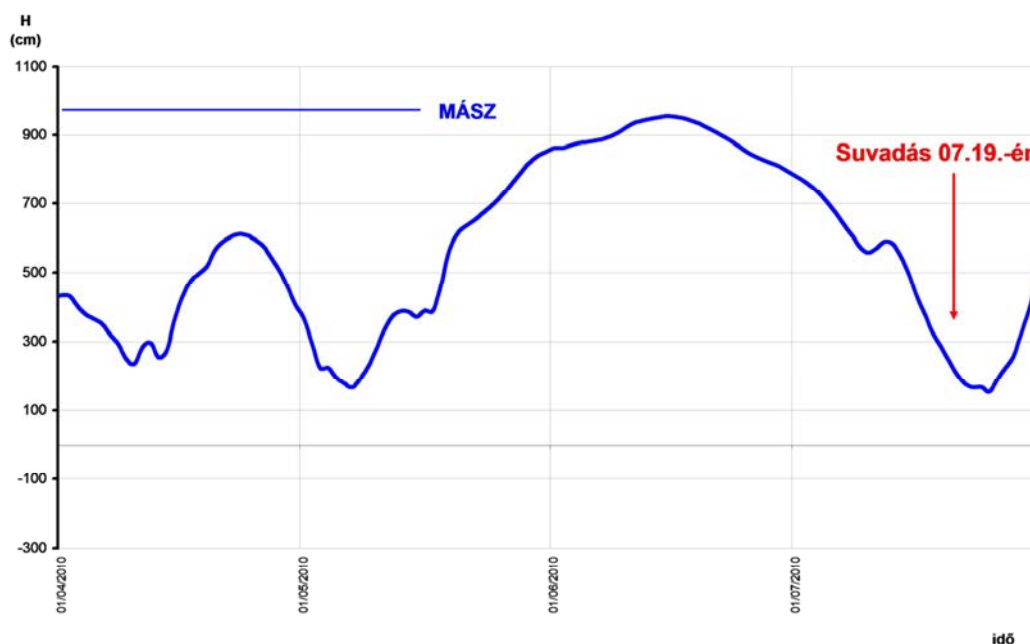
Szolnok, 2010

Az 1985-ös rézsűcsúszáshoz hasonló, 2010 júliusában a szolnoki Tisza parton bekövetkezett suvadást (2-6. kép).



(2-6. kép): 2010-es szolnoki suvadás (Nagy L., Takács A., 2010)

A suvadás 2010. július 19.-én történt, egy 70 napot is meghaladó tartósságú árhullámot követően (2-8. ábra). Ez egy igen jelentős árvízterhelést jelentett, azzal együtt, hogy az azt megelőző több mint 100 évben kb.: 5-6 olyan árhullám is volt, mely mind tartósságában, mind magasságában meghaladta a 2010. évit (Nagy L., Takács A., 2010).



(2-8. ábra): 2010-es szolnoki árhullám (Nagy L., Takács A., 2010)

Az árhullámképen jól látható, hogy a suvadás az apadó ág legmeredekebb részénél következett be, ekkor, vagyis a suvadás előtti, egy napi apadás maximuma 0,7 méter volt, mely összességében jelentős áramlási nyomás kialakulásával jár, de az 1985-ös suvadáshoz hasonlóan, jóval kisebb, mint a területen addig mért maximum. A teljes apadás nagyjából 8 napig tartott, mialatt a vízszint összesen 3,8 métert süllyedt, ez átlagosan napi 0,5 méteres apadást jelent.

A korábban tárgyalt, 1985-ös suvadáshoz képest, itt egészen más elmozdulások jöttek létre. A mozgás nagyjából 60 méter hosszon következett be, jelentős, néhol 4 méter közeli függőleges repedések mellett (2-7. kép). A vízszintes elmozdulás nem volt jelentős.



(2-7. kép): Suvadás teljes hossza (Nagy L., Takács A., 2010)

Az elmozdulások alakulásának valószínűsíthető oka a hullámtér nagyarányú feliszapolódása volt (néhány helyen meghaladta az 1,8 méteres vastagságot), mely egyúttal a gát vízoldali meredekségét is jelentősen növelte (közel 1:1-es rézsűhajlásúra). Ezen réteg áteresztőképessége együtthatója alacsonyabb volt, mint az alatta lévő rétegeké, ezért a telített gáttestből apadáskor meginduló talajvizet visszaduzzasztotta. Az így megnövekedett víznyomás vezetett végül ezen feliszapolódott réteg suvadásához (Nagy L., Takács A., 2010).

A fentiekből világosan látszik, hogy ezen két suvadási eset több hasonlóságot is mutat, és ha törvényszerűségeket nem is, de néhány általános érvényű következtetést már most levonhatunk.

- Az állékonyságvesztést minden esetben tartós és aránylag magas árvizek előzték meg, vagyis a töltésnek volt ideje kellően nagy mértékben telítődnie, átáznia.
- Minden esetben gyors apadásról beszélhettünk, ám ezek korántsem tekinthetők rendkívülinek az adott gát esetében. Tehát a sebesség, mint olyan, fontos tényező, de annak mértéke még nem jelent önmagában tetemesen nagyobb veszélyt

Az, hogy ugyanazon gát szakasz több, nagyobb sebességű apadás hatására nem mozdult meg, mutatja, hogy a gátak öregedése, az egyre több, tartós árvízi terhelés és belső szerkezetének inhomogenitása (progresszív törés kialakulásának nagyobb valószínűsége) jelentősen kedvez ezen tönkremenetelnek.

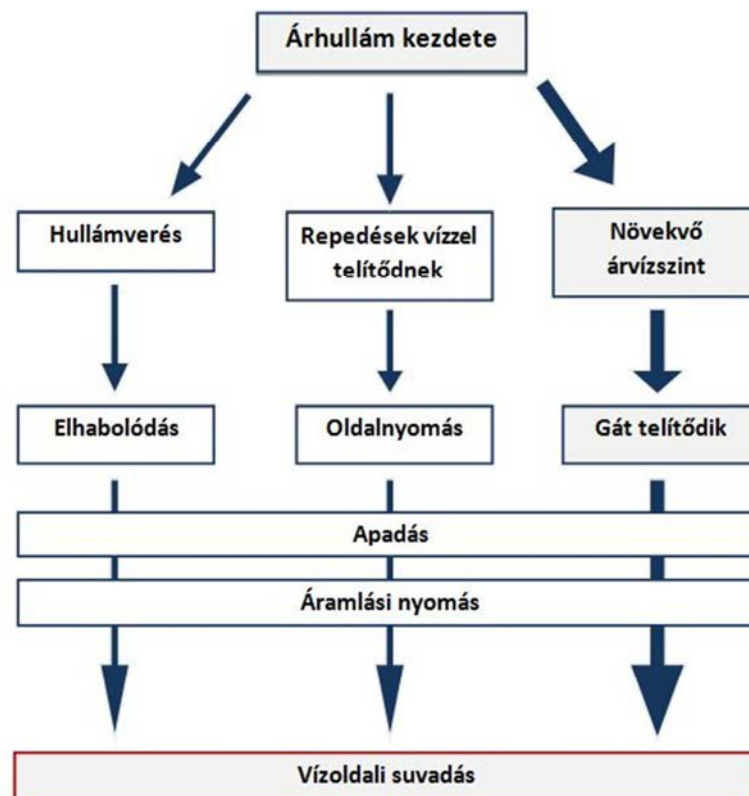
- Igen fontos tényező a gáttöltés talajának áteresztőképessége. A 2010-es szolnoki esetben már láthattunk erre példát. Ezen felül az áteresztőképességi együttható szabályozza a töltéstartóból kiáramló víz mennyiségét, ami a gyors apadásra vonatkozó tönkremenetelnél nagyon fontos tényező.

2.4 Lehetséges tönkremeneteli mechanizmus

Még a fejezet elején említettük, hogy a geotechnikai problémák nagy százaléka több esemény, illetve tönkremeneteli, károsodási folyamat eredménye. Épp ezért igen fontos a valószínűsíthető tönkremeneteli mechanizmusok meghatározása, hogy ezek alapján maga a tönkremeneteli valószínűség is becsülhető legyen. (Nagy L., 2010)

A tönkremeneteli mechanizmus sok esetben több esemény egymásutánja, ekképpen olyan eseményláncok szerkeszthetők, amelyek alapján a tönkremenetelig (vagy épp károsodásig) vezető körülmények kapcsolata, kronológiája jól kivehető.

Egy ilyen eseménylánc elvi sémáját láthatjuk a 2-9. ábrán is. Ahol egy átázást, gyors apadást már többször „megélt”, közepesen kötött talajú gátból indultunk ki. Egyúttal feltételezzük a gát öregedési folyamatának előrehaladottságát.



(2-9. ábra): Vízoldali suvadás egy lehetséges eseménylánca

Látható, hogy több hatás következménye lehet a vízoldali suvadás. De természetesen e hatások egymást erősítve is okozhatják a vízoldal illetén tönkremenetelét. Vegyünk, a fenti eseményláncolat alapján, egy olyan elméleti esetet, mikor e hatások együttesen alakítják az állékonyságvesztés folyamatát.

Tekintsünk egy hosszabb száraz időszakot, melyet követően néhány méter mély, hosszanti repedések jelennek meg a gáttöltés vízoldali rézsúje mentén (lásd: 2.3.1-es alfejezet). Ezen repedések az árhullám növekedésével folyamatosan megtelnek vízzel, ami jelentős oldalnyomást jelenthet (a repedés nagyságától függően) a rézsúben.

Továbbá az árvízszint emelkedése és tetőzése alatt folyamatos hullámverés volt tapasztalható, minek következtében a gyepesített vízoldali rézsú több ponton is megbomlik, elhabolódik.

Az árhullám tetőzését követően egy viszonylag gyors apadás kezdődik ($v=50-80$ cm/nap), melynek hatására a vízoldalon jelentős áramlási nyomás alakul ki.

Vagyis összegezve: a gáttest vízoldali ellenállása az elhabolódás következtében lecsökkent, hiszen a rézsú töltésanyaga kimosódott, illetve fellazult. Ezzel egy időben, az áramlási nyomás terhe mellett, jelentős oldalnyomás is hat a vízoldalra, mivel a grepedésekben felgyűlt víz nem képes a gyors apadás ütemében távozni. Ugyanakkor az apadás sebessége mellett, a gát anyagának áteresztőképességi együtthatójára vezethető vissza az a tény, hogy a gáttest nagy része –hirtelen apadás alatt- még telített, vagy közel telített állapotban van, minek következtében jóval nagyobb a vízoldali földtömeg önsúlya. Mindezen hatások együttesen a vízoldal kiterjedt suvadásához vezetnek.

A továbbiakban csak a telítődött gáttöltés apadás hatására bekövetkező állékonyságvesztési mechanizmusát (vastagabb nyilakkal jelzett eseménylánc) fogjuk vizsgálni és kitérni azokra a sarkalatos elméleti részekre, melyek által definiálhatóvá, illetve modellezhetővé vált e probléma.

3. A tönkremeneteli folyamat leírása, elméleti magyarázata

3.1. Vízáramlás kialakulása

A folyamat lényegében egy árhullám tartós tetőzésével kezdődik, mikor is a gáttest átázik, a talajszemcsék közül a levegő kiszorul és a pórusok vízzel telítődnek.

Ahogy elindul az apadás és a vízoldalon csökken a vízszint, a gáttestben lévő és a külső vízszint között magasság különbség, azaz potenciál különbség jön létre.

- Teljes potenciális energia általánosan: $z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = konstans = h$ (1)
- Talajban történő vízmozgások esetén a „v” elhanyagolhatóan kicsi, így egyszerűsödik az (1) egyenlet: $z + \frac{p}{\rho \cdot g} = h$ (2)

Ha két pont között potenciálkülönbség van, akkor áramlás indul meg a nagyobb potenciálú helyről a kisebb potenciálú hely felé. Azt a vonalat, amelyen a vízrészecske eközben végighalad, folyási vagy áramlási vonalnak nevezzük. Egy áramlási vonal mentén a hosszegységre jutó potenciálesés a hidraulikus gradiens (a potenciálfelület legnagyobb esésének iránya és nagysága):

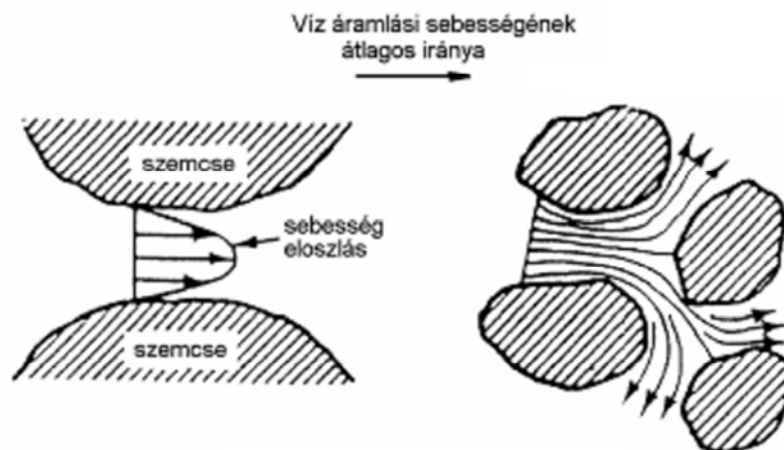
$$i = \frac{\Delta h}{\Delta s} \rightarrow \frac{-dh}{ds} = grad(-h) \quad (3)$$

Tehát a víz a kisebb potenciális energia (azaz a kisebb nyomásmagasság) felé fog áramlani. Ami esetünkben a vízoldal irányába történő vízmozgást jelenti.

Az áramlás laminárisan indul meg a talajszemcsék közti pórusokban, ami azt jelenti, hogy a sebességvektor iránya a folyadéktér minden pontjában azonos, és ez a közös irány a határoló síklapok falával párhuzamos. A porózus közegben végbemenő szivárgás az esetek többségében a viszonylag kis sebesség miatt párhuzamos-szálas vízmozgásnak tekinthető.

A síklapok között áramló víztestben a sebesség nagysága állandó, csupán iránya változhat, ilyenkor a pályák és az áramvonalak egybevágó görbe vonalak (Marton L., 2009). Ez a Darcy törvény érvényességi feltétele is.

Mivel a pórusok elhelyezkedése rendezetlen, a víz minden egyes – az útjába kerülő - szemcsénél kénytelen megváltoztatni az áramlási irányát (hidrodinamikai diszperzió), ami azzal jár, hogy a víz „neki ütközik az útjában lévő talajszemcsének” (3-1. ábra) és a szemcsékkel érintkezve a súrlódás hatására a talajszemcsék az áramlás irányába akarnak elmozdulni, vagyis az áramló víz, erőt fejt ki a talajszemcsékre.



(3-1. ábra): Vízáramlás a talajszemcsék között (Bear-Verruijt, 1987)

Nagyon fontos, hogy ez a nyomás a rendezetlen (geometriai irányítottság nélküli) szemcseszerkezet miatt következik be. Minél kisebb az ellenállás a víz útjában, az annál kevesebb irányváltoztatásra kényszerül, így kevesebb ütközésre kerül sor. Ezzel nemcsak a súrlódás, hanem ezáltal a szemcseszerkezetre kifejtett erő is kisebb lesz (azonos víznyomáskülönbség esetén).

3.2. A közeg ellenállása

A közegellenállást általánosítva, számszerűsítve a permeabilitással (talajmechanikai megnevezés szerint: abszolút áteresztőképességi együtthatóval) jellemezhetjük.

A permeabilitás a közegre (jelen esetben a talajra) jellemző belső tulajdonság, nem függ a folyadék fizikai tulajdonságaitól. Atényleges, valódi permeabilitást a következő paraméterek határozzák meg (Bear 1972):

$$k = n * B * T \quad [m^2] \quad (4)$$

n: hézagtérfogat (porozitás)

B: a porózus közeg járatának vezetőképessége egy bizonyos pontban (lamináris áramlás esetében egy egyenes henger alakú, r_0 sugarú cső tengelyétől mért r távolságban $B=(r_0^2-r^2)/4$, ezért általában a cső (járat) keresztmetszetétől, és a pont helyzetétől függ). Tehát a henger peremén az $r=r_0$ pontban a vezetőképesség $B=0$, tehát a közeg permeabilitása is $k=0$.

T: turtuozitás (kanyargósság), geometriai jellemző, mely a minta hosszának és az áramvonal hosszának viszonyszámaként értelmezhető: L/L_e . Mértéke szakirodalmi adatok szerint 0,56-0,80 között változik Bear (1972) szerint (Marton L., 2009).

Ez egybevág a fent említettekkel: mivel a „B” együttható egy egyenes csőben való áramlás esetén az energiavesztéseget jellemzi, vagyis a súrlódást, míg a „T” együttható a szemcseváz rendezetlenségét hivatott kifejezni. Tehát összefoglalva, a víz áramlása során az ellenállás, az egyes szemcséknek való ütközésekkor, illetve a szemcsék közötti áthaladáskor fellépő súrlódásból áll.

A víznyomáskülönbségből (piezometrikus emelkedés különbségéből) adódó hidraulikus gradiens hajtja át a vizet a talaj pórusain. Az áramló víznek ez a mozgási energiája viszkozus súrlódásban emésztődik fel, s mint minden súrlódásnál, itt is a mozgás irányába ható erő terheli a szemcsevázat. Ha a szivárgás egyenletes ez a $\Delta h * \gamma_v$ nagyságú erő egyenletesen oszlik meg a $h * 1$ térfogatú egységnyi alapterületű talajtömegben, és a térfogategységre ható erő:

$$\frac{\Delta h * \gamma_v}{h * 1} = i * \gamma_v \quad (5)$$

Ez a tömegerő az áramlási nyomás, melynek nagysága: $i * \gamma_v$, iránya izotróp anyagban az áramlás irányával azonos, támadáspontja pedig a vízzel érintkezésben lévő talajszemcsék felületén helyezkedik el. A terhelt talajszemcsék ezt az erőt átadják a mellettük álló szemcséknek, így kijelenthetjük, hogy az áramlási nyomás magát a szemcsevázat is terheli. Ez egy vektormennyiség, a súlyerővel vektoriálisan összeadható (Kézdi Á., 1969).

A fentiek alapján megállapítható, hogy a szivárgás során fellépő erők nagysága nem a szivárgás sebességétől, hanem a hidraulikus gradiens nagyságától függ (a nagyobb hidraulikus gradiens, egyúttal nagyobb áramlási sebességet¹ is jelent).

A mérnöki gyakorlatban a permeabilitás helyett az áteresztőképességi együtthatót szokták megadni talajtípusonként. Ezt az együtthatót Darcy vezette be ($v = K * i$), melynek permeabilitással való kapcsolatát a következő képlet szerint alakul:

$$K = k * \rho * \frac{g}{\mu} = k * \frac{g}{\nu} \quad (6)$$

K : szivárgási tényező²

k : közeg permeabilitása³

μ : folyadék dinamikai viszkozitása

ρ : folyadék sűrűsége

g : gravitációs gyorsulás

ν : folyadék kinematikai viszkozitása

Ezek után a Darcy-törvény a permeabilitással is felírható:

$$v = -k * \frac{g}{\nu} * grad(h) \quad (7)$$

Ezen értékek ismerete elengedhetetlen a felszín alatti vízáramlások vizsgálatánál, ugyanis az áteresztőképesség a talajnak lényegében egy ellenállási értéke a víz mozgásával szemben. Ezek a megállapítások telített talajra ($S=1$) vonatkoztak.

¹ A valódi áramlási sebesség, a Darcy egyenletéből kapott sebesség és az effektív porozitás hányadosa.

² Talajmechanikában az áteresztőképességi együttható a szokásos megnevezés.

³ Talajmechanikában az abszolút áteresztőképességi együttható a szokásos megnevezés.

3.3. Terhelő hatások

A tönkremeneteli folyamat lényegében két tényezőre vezethető vissza:

- az egyik a gyors apadás következtében kialakuló áramlási nyomás,
- a másik az apadás után visszamaradó pórusvíznyomás.

A pórusvíznyomás csökkenti a hatékony feszültséget, így kisebb normálerő ébred a talajszemcsék között, ezért a szemcsék közti súrlódás is lecsökken. Mivel az áramlási nyomás a szemcseszerkezetre az áramlás irányába fejt ki erőt, így a pórusvíznyomás miatt kevésbé leterhelt szemcsék az áramlás irányába mozdulnak el egymáson.

Ez a két destabilizáló hatás mind kapcsolatban áll az áteresztőképességi együtthatóval, hiszen ha a gáttestből kiáramló víz nem tudja követni az apadó vízszintet, akkor a kialakult vízszintkülönbségből nagy hidraulikus gradiens, míg a visszamaradó talajvízből jelentős pórusvíznyomás alakul ki.

Ezzel együtt, az apadással a vízoldali leterhelő víznyomás, mint stabilizáló erőhatás is megszűnik.

3.4. Tönkremenetellel szembeni ellenállás

Az ellenállást a talaj nyírószilárdsági paraméterei adják. Ezt alapvetően két részre kell bontanunk:

- a telítetlen talaj,
- és a telített talaj teherbírására.

A tönkremeneteli folyamat során mindkét esettel számolnunk kell.

A szemcsék közötti súrlódás hatása miatt ébred egy $tg(\varphi) * \bar{\sigma}$ ellenállás. Ez a talajszemcsék közötti súrlódási szögből és a szemcsék közötti hatékony feszültségből számítható. A súrlódási ellenállás a lentebb olvasható pontok szerint további tagokkal egészül ki.

3.4.1. Telített talaj ellenállása

A nyírószilárdsági paraméterekre jelentős hatással van a terhelési folyamat. Lényeges kérdés, hogy a talaj hogyan alkalmazkodik az adott terheléshez, vagyis hogy miképp változik a feszültségállapota, víztartalma, illetve, hogy végbe tud-e menni a konszolidáció. E szerint megkülönböztethetünk:

- zárt,
- nyílt rendszert.

Zárt rendszer esetében, a kezdetben terheletlen talajból a terhelés hatására a fölös pórusvíz nem tud eltávozni, a pórusvíznyomás nem képes lecsökkeni és a feszültségállapotnak lesz a függvénye, így a deviátor feszültség értéke független lesz attól, hogy a triaxiális nyomókísérlet alatt mekkora volt a hidrosztatikus feszültség. A talaj térfogatváltozása

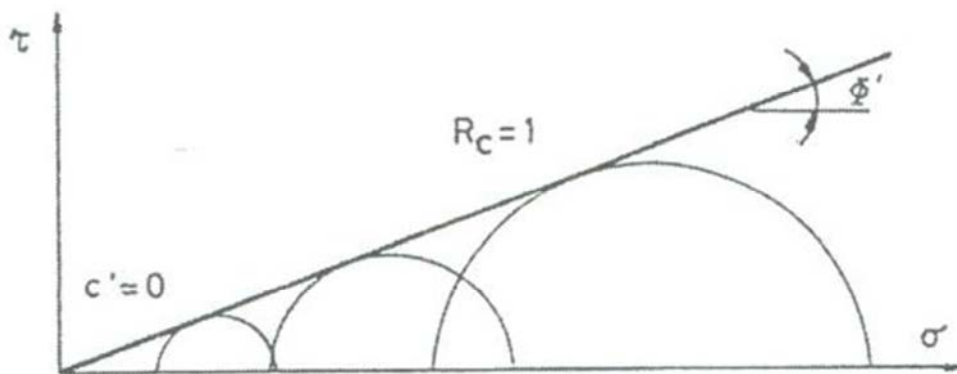
elenyésző, gyakorlatilag tökéletesen képlékeny anyagként viselkedik, melynek nyírószilárdsága konstans és független a teljes normál feszültségtől (a Mohr-Coulomb egyenes párhuzamos a σ -tengellyel).

Zárt rendszernél a nyírószilárdság alakulását az ún. U_U (konszolidálatlan minta törése zárt rendszerben, térfogatváltozás nélkül), illetve konszolidált talaj esetén pedig az ún. C_U (konszolidált minta törése zárt rendszerben, térfogatváltozás nélkül) triaxiális nyomókísérlettel lehet meghatározni.

Ezzel szemben **nyílt rendszer** esetén a pórusvíz képes eltávozni, vagyis a terhelés hatására kialakuló többlet pórusvíznyomás leépül, így a törési folyamatokban nem játszik jelentős szerepet. Ezen folyamat a relatíve nagy áteresztőképességű talajoknál igen gyorsan lejátszódik, míg kötött talajok esetén a rendszer csak akkor tekinthető nyíltnak, ha a terhelés jóval lassabban megy végbe, s a konszolidáció a feszültségváltozásokat követni tudja.

Ha egy folyási határállapotban lévő telített talajt hidrosztatikus feszültség (σ_3) alatt konszolidáltatunk, majd a deviátor feszültséget olyan ütemben növeljük, hogy mindeközben a pórusvíznyomás zérus ($u=0$, $\sigma_1=\sigma_1'$, $\sigma_3=\sigma_3'$), akkor a triaxiális nyomókísérlet során azonnal a hatékony feszültségek alapján rajzolhatók ki törési körök. Ebben az esetben, a normálisan konszolidált (előterheletlen, $R_c=1$), nem cementálódott agyagoknál a kohézió nulla (Kabai I., 2007).

A fenti vizsgálat az ún. C_D (konszolidált minta törése nyílt rendszerben, a teljes térfogatváltozások kiváráásával) triaxiális nyomókísérlet (3.2. ábra).



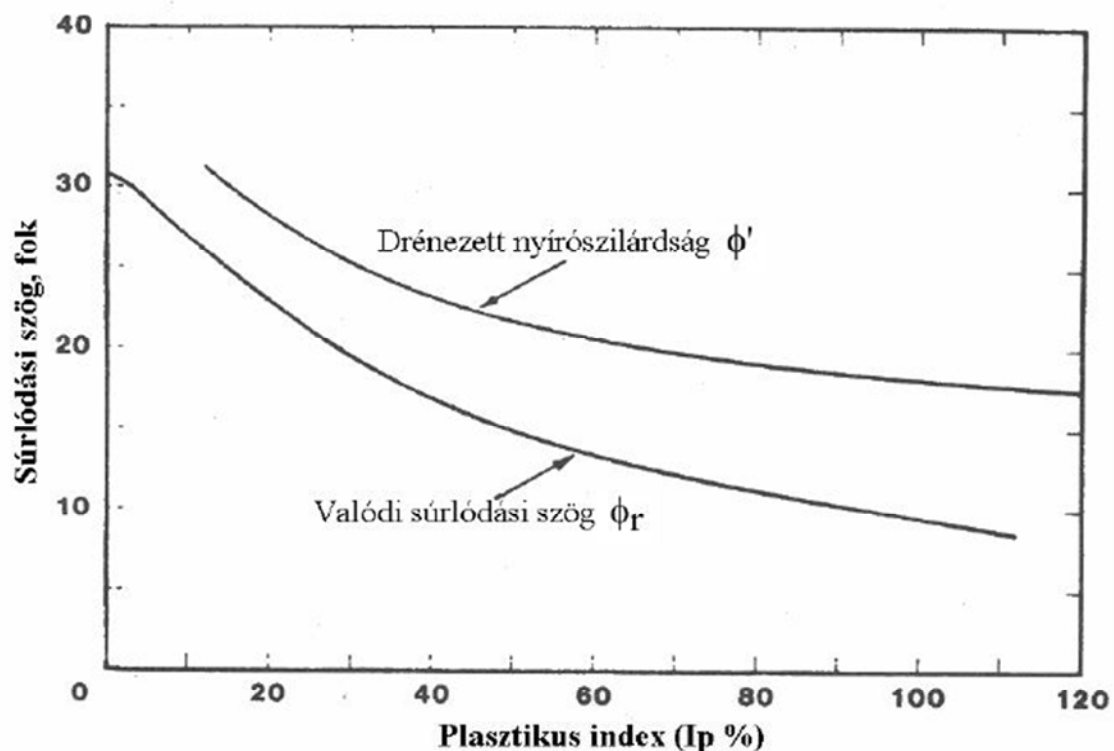
(3-2. ábra): Coulomb-egyenes - C_D vizsgálat (Kabai I., 2007)

Látható, hogy a teljes és hatékony feszültségek függvényében számított nyírószilárdsági paraméterek eltérnek egymástól. Ugyanilyen eltérés tapasztalható, ha fentiek során említett különböző vizsgálati módszereket alkalmazzuk. Ezen ellentmondás feloldása csakis a hatékony feszültségek szerint értelmezett törési vizsgálatokkal lehetséges. Így kijelenthető, hogy a talajok szilárdsági és stabilitási vizsgálatait mind a hatékony feszültségek alkalmazásával kell elvégezni (Kabai I., 2007).

A talajok hatékony ill. reziduális (valódi) súrlódási szöge a plaszticitásuk (agyagásvány-tartalmuk) függvénye (3-3. ábra). A kötött talajok látszólagos kohéziója pedig valójában a nyírési alakváltozás közben (amikor a talaj átgyúródik), annak hatására a pórusvízben fellépő szívás eredménye (Varga G., Czap Z., Mahler A., 2008).

Tehát egy kötött talaj nyírószilárdsági paraméterei a következők lehetnek:

- a hatékony belső súrlódási szög,
- a szívás okozta látszólagos kohézió,
- és amennyiben a talaj előterhelt volt, úgy az ebből eredő hatékony kohézió.



(3-3. ábra): Kötött talajok drénezett és valódi súrlódási szöge (Varga G., Czap Z., Mahler A., 2008)

A fenti ábrán látható a különböző plaszticitású kötött talajok hatékony, drénezett nyírószilárdsága (C_D vizsgálatból nyert hatékony belső súrlódási szög). Illetve az a valódi súrlódási szög, mely a talaj igen hosszú távú viselkedését határozza meg (gyakorlatilag a természetben megtalálható sok éves kötött talajú rézsűk hajlásszöge).

A tönkremeneteli mechanizmust gyors apadás esetén nyílt rendszerrel vizsgálhatjuk, ezt leginkább modellezésbeli okok miatt kell így tennünk (4.1.2.1 fejezet).

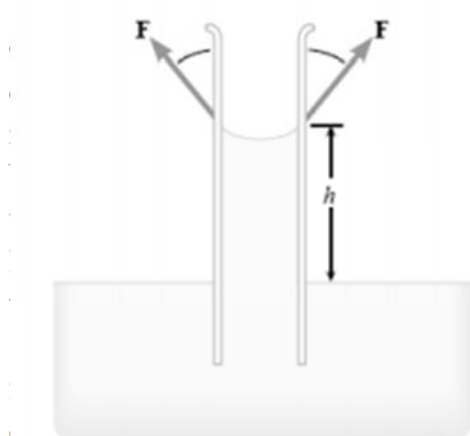
3.4.2. Telítetlen talaj ellenállása

Mint azt már említettük, a vízoldali apadás hatására a gáttestben lévő vízszint is csökkenni kezd, ami azt jelenti, hogy a gáttesten belül bizonyos vízzel telített területek telítetlenné válnak.

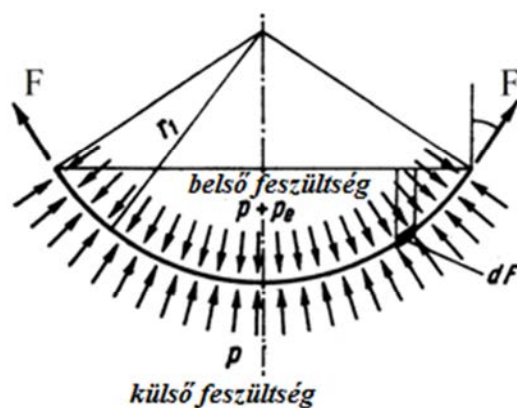
A telítetlen talajban is jelen van a pórusvíz, ez a kapilláris erőnek köszönhető. Ennek hatására a víztükör fölött is létre jön egy olyan zárt zóna ahol a pórusok vízzel telítettek, illetve e fölött egy olyan telítetlen nyílt zóna, ahol a pórusokban mind a víz, mind a levegő vegyesen előfordul.

A telítetlen nyílt zónában a víz a talajszemcsék felületét nedvesíti, ugyanis a víz és a levegő elhelyezkedési módját az adhéziós feszültség határozza meg. Az a közeg fog szorosabban kapcsolatba kerülni a szemcsével, melynek a kőzettel szemben nagyobb az adhéziós feszültsége. Ez talajoknál minden esetben a víz. Stabil helyzetben a víz arra „törekszik”, hogy a lehető legnagyobb közet felületet burkolja, ezzel szemben a levegő úgy helyezkedik el, hogy a szilárd részek határán a lehető legkisebb felületen érintkezzen a nedvesítő folyadékkal. (Kézdi Á., 1969)

Mivel a víz felszínén levő vízrészecskékre a folyadék belseje felől nagyobb erők hatnak, így azok befelé igyekeznek, emiatt a felszín a lehető legkisebb felületű lesz. Ez a talaj és a talajvíz esetében a szemcse és a víz közötti nagyobb az adhéziós erőt jelent, mint a két vízrészecske közötti kohéziós erő, ezért a meniszkusz (folyadék felszín) homorú lesz. Két talajszemcse közötti meniszkusz húzófeszültséggel rendelkezik, mely feszültség egyre közelebb vonja egymáshoz a vele érintkezésben lévő talajszemcséket (3-4. és 3-5. ábra).



(3-4. ábra): Kapilláris emelkedés (Berka M., 2010)

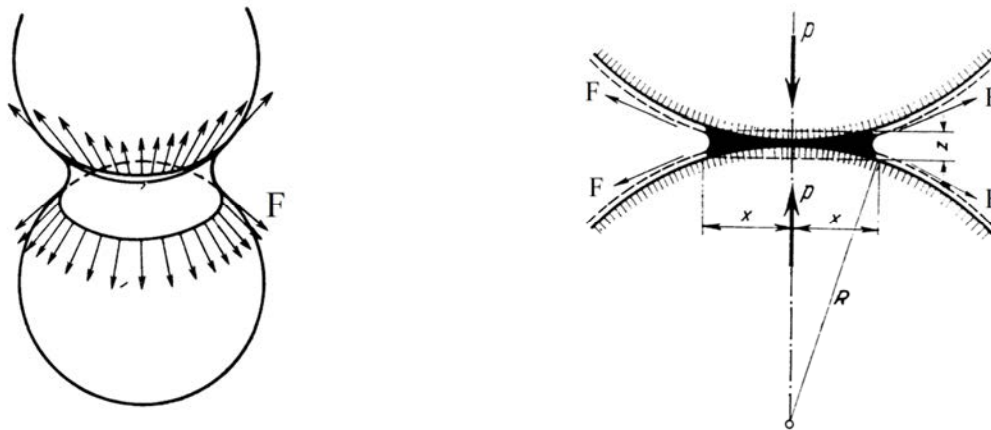


(3-5. ábra): Külső és belső nyomás alatt álló görbe felület (Kézdi Á., 1969)

Görbült felületnél a kétoldali nyomás különböző és mindig azon az oldalon nagyobb amerre görbül (tehát jelen esetben a vízoldalon).

Ezt a $\Delta p = (p + p_e) - p$ nyomáskülönbséget kompenzálja a felületi feszültség (F erő), ahogyan az 3-5. ábrán is látható.

Ez az erő (F) a 3-6. ábra szerint hat a szemcsékre, melynek eredője a P erőpár.



(3-6. ábra): A felületi feszültség hatása két gömb között (Kézdi Á., 1969)

A vízben fellépő kapilláris feszültség következménye a szemcséket összehúzó erő (P eredő erő, a fenti ábrán). Ezek összessége a kapilláris kohézió, mely értelemszerűen telítődés vagy kiszáradás esetén eltűnik.

A telítetlen talajok jellemzője, hogy a pórusvíznyomás és a póruslevegő-nyomás nem egyenlő. A két érték különbségét nevezzük szívásnak, mely két részre bontható:

- a kapilláris-,
- és az ozmotikus szívásra.

A mérnöki gyakorlatban csak a kapilláris szívással foglalkozunk, mivel ez függ össze a talajvíz áramlásával és a talaj víztartalmával.

A telítetlen talajban negyedik fázisként jelen van, a levegő és a víz határfelületén elhelyezkedő, néhány molekulányi vastagságú vízfilm. Ez a vízfilm kétirányú húzás alatt áll, és (a fentiek szerint) a húzófeszültséget a talajszemcséknek adja át. (Laufer I., 2005)

Telítetlen talajok esetén három mérhető feszültség van:

- a teljes feszültség (σ),
- a póruslégnnyomás (u_a)
- és a pórusvíznyomás (u_w).

Ezek nagyság szerinti sorrendje kötött:

$$\sigma \geq u_a \geq u_w$$

A póruslégnnyomás általában megegyezik a légköri nyomással, nem okoz (lényeges) alakváltozást sem a folyékony, sem a szilárd fázisban, és nincs nyírószilárdsága (Fredlund and Morgenstern, 1977).

Telítetlen talajoknál az általánosan használt feszültségi állapotváltozók a **nettó normálfeszültség** ($\sigma'' = \sigma - u_a$) és a **szívás** ($s = u_a - u_w$). Ezen állapotváltozók segítségével leírható a telítetlen talajok törési határállapota a Mohr-Coulomb törési feltétel szerint:

$$\tau = (\sigma - u_a) * tg(\varphi) + (u_a - u_w) * tg(\varphi^b) + c \quad (8)$$

$$\tau = \sigma'' * tg(\varphi) + s * tg(\varphi^b) + c \quad (9)$$

τ = nyírószilárdság

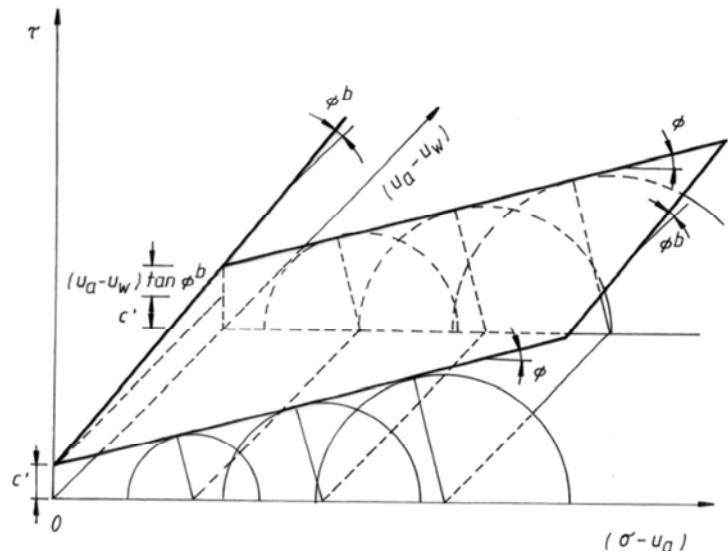
φ = belső súrlódási szög

φ^b = kapilláris szívástól függő
súrlódási szög

c = kohézió

$s = (u_a - u_w)$ szívás

$\sigma'' = (\sigma - u_a)$ nettó
normálfeszültség



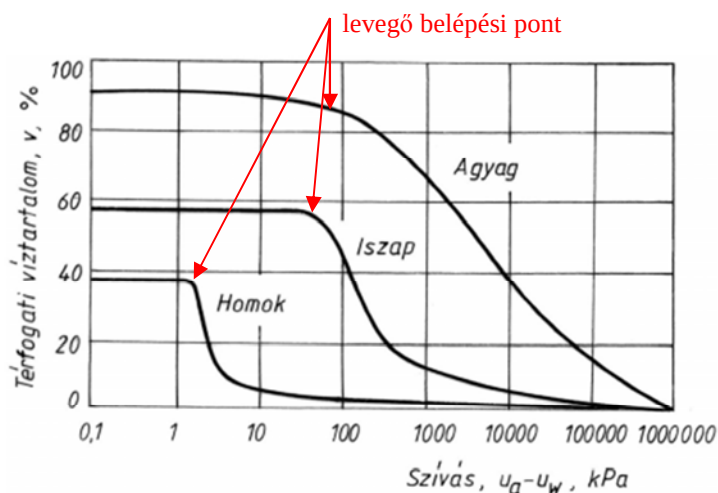
(3-7. ábra): Mohr-Coulomb törési feltétel telítetlen talaj esetében (Imre E., 2009)

A fenti képletből következik, hogy a „hagyományos” $\tau = \bar{\sigma} * tg(\varphi) + c$ összefüggés egy taggal ($s * tg(\varphi^b)$) a kapilláris kohézióval bővült, ami a szívásnak a nyírószilárdságra kifejtett hatását jelenti. Jól látható, hogy a tönkremenetelhez tartozó nyírószilárdsági értékek a szívással lineárisan nőnek (3-7. ábra).

A φ^b súrlódási szög a szívás függvényében változik. A változás három jól elkülöníthető szakaszra bontható:

1. A telített állapotban ($S_r=1$) a levegő belépési szívás eléréséig $\varphi^b = \varphi$.
2. Ha $S_r < 1$, és a szívás a levegő belépési szívás értékétől a reziduális (maradó) víztartalomhoz tartozó szívás eléréséig csökken a φ^b értéke φ -ről zérusra csökken.
3. Ha $S_r < 1$ és a szívás a reziduális víztartalomhoz tartozó szívás érték alatt van akkor $\varphi^b = 0$. (Imre E., 2009)

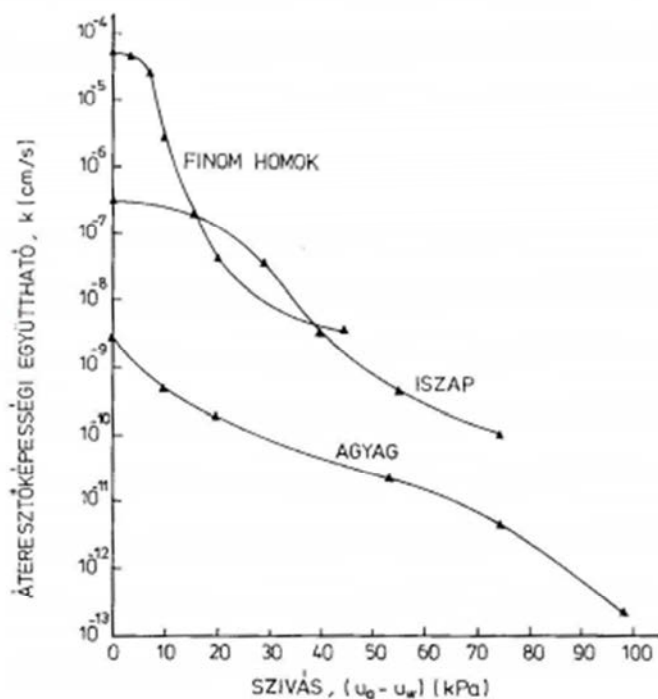
A szívásnak eme három szakasza jól elkülöníthető a víztartási görbén (3-8. ábrán), ezt a külföldi irodalmakban SWCC (Soil Water Characteristic Curve) görbének hívják. A víztartási görbe a víztartalom és a szívás közötti kapcsolatot írja le, nélkülözhetetlen a kapilláris kohézió számszerűsítéséhez, illetve az ebből számolandó nyírószilárdsághoz. (Laufer I., 2005)



(3-8. ábra): Különböző szemeloszlású talajok jellegzetes víztartási görbéje (Imre E., 2009)

Jól látható, hogy egyes talajoknál más-más szívási érték elérése után kezdődik a levegő belépés a szemcsék közé (durva szemcsés talajoknak kisebb a levegő belépési szívásuk, mint a finomszemcsés talajoknak).

Ha a szívás kisebb, mint a levegő belépési szívása, akkor a talajminta gyakorlatilag vízzel telített. A víztartalom nem változik, a görbe közel vízszintes. Ezután a szívás növekedésével a talaj eléri a levegő belépési pontot és telítetlenné válik, rohamosan csökken a víztartalom és nő a levegőtartalom, míg a reziduális szívás elérése után - a szívás növekedésével – már csak kis mértékben csökken a víztartalom. A görbe ellapul.



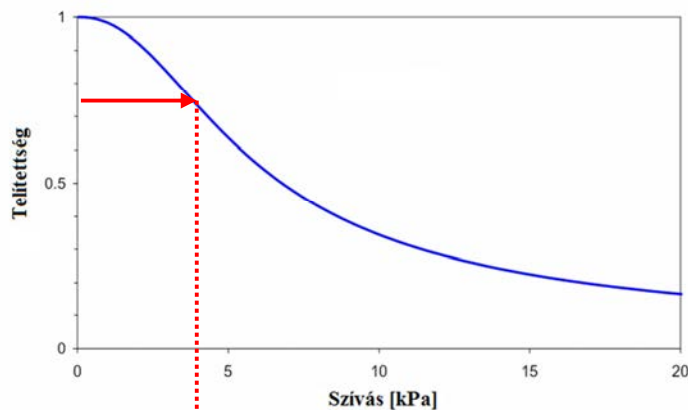
(3-9. ábra): Áteresztőképességi együttható és a szívás kapcsolata (Imre E., 2009)

A fentebb meghatározott áteresztőképességi együttható telített talaj esetére vonatkozott. Ha azonban az $S_r < 1$ (tehát telítetlen talajról van szó), akkor a szívás növekedésével az együttható csökkenni fog (3-9. ábra).

Az ábrán látható, hogy itt igen jelentős változásról van szó, az áteresztőképességi együttható több nagyságrenddel csökkenhet a szívás hatására telítetlen talajban.

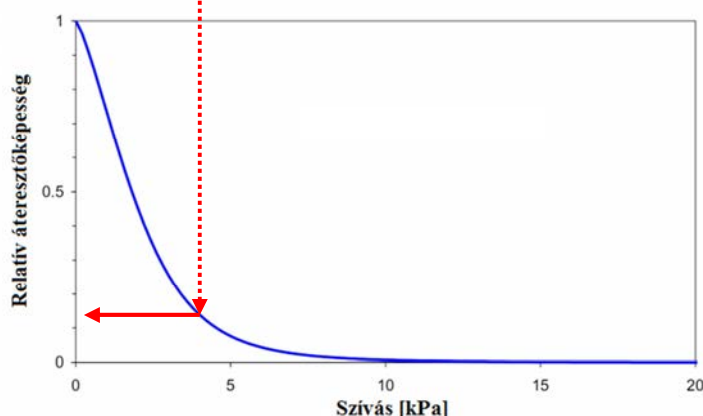
Ez azzal magyarázható, hogy „k” együttható kapcsolatban van a víztartalommal, ha pedig megnézzük a 3-8. ábrát, akkor látszik, hogy a szívással csökken a térfogati víztartalom, így ezzel együtt az áteresztőképességi együttható is.

A mérnöki gyakorlatban a Van Genuchten (1980) modellel számolhatjuk ezen összefüggést. Ezt a modellt használja a PLAXIS végelemes szoftver is, ennek segítségével számítható talajvíztükör alatti telítettség.



(3-10. ábra): Telítettség és a szívás kapcsolata (Plaxis 2011 Manual)

A talajparaméterektől függően kiválasztható a megfelelő görbe, majd innen a telítettség ismeretében meghatározható a szívás is.



(3-11. ábra): Áteresztőképesség és a szívás kapcsolata (Plaxis 2011 Manual)

A szívás ismeretében leolvasható a relatív áteresztőképességi együttható. Ez egy olyan szorzószám, amivel a telített talajra vonatkozó áteresztőképességi együtthatót megszorozva megkapjuk a telítetlen talajra vonatkozó együttható értékét.

A szívást a Plaxis program a Bishop-féle képlettel számolja:

$$\sigma = \sigma' + S_r * u \quad (10)$$

Ilyenkor a teljes feszültséget a hatékony feszültség és az $S_r * u$ szívást közelítő tag összegéből kapjuk. Tehát ha az $S_r=1$, akkor a talajvízszint alatti teljes feszültséget kapjuk, ha pedig $S_r=0$, akkor a teljesen száraz állapotra vonatkozó teljes feszültséget (ami ilyenkor egyenlő a hatékony feszültséggel). Mivel a teljes feszültség a talajban állandó a (10) képlet értelmében a kisebb telítettséghez (és ezzel a nagyobb szíváshoz) nagyobb hatékony feszültség tartozik.

A hatékony feszültség a következő térfogatsúllyal számolandó:

$$\gamma = (1 - S_r) * \gamma_{unsat} + S_r * \gamma_{sat} \quad (11)$$

A fenti (9) képlet levezetésére azért volt szükség, hogy a szívásból adódó többlet teherbírás definiálni tudjuk, a (10) képlet egy egyszerűsített eljárás, melyet maga a Plaxis program is használ.

Vízzáró gátak vizsgálatánál figyelembe kell vennünk, hogy a gáttest anyaga kis áteresztőképességű, ezért a talaj telítettsége $0,75 < S_r < 1$ körül fog alakulni.

Összességében a szívás hatásának figyelembe vétele fontos lehet hiszen, ha a vízapadás következtében egy területen telítetlen lesz a talaj, akkor ez a többlet teherbírás befolyásolhatja a teljes ellenállást.

3.5. Összefoglalás

A tönkremenetel gyors vízapadásnál alapvetően két szélsőséges példára (és egy ezek közötti átmeneti szakaszra) vezethető vissza. A két szélsőséges példa természetesen elméleti jellegű, de segít megérteni a valódi helyzetet leíró átmeneti szakaszt.

Az egyik véglet, amikor a talajhoz nagyon kicsi áteresztőképességi együtthatót rendelünk. Ezáltal a talajvíz nem tudja követni a vízoldali apadás mértékét és a gáttest telített marad. A vízoldal felé - az apadás miatt - (nagy) hidraulikus gradiens alakul ki, aminek következtében áramlás indul meg, mely áramlás a szemcseszerkezetet terheli. Ilyenkor nyílt rendszert feltételezve a talaj csak a súrlódási ellenállásból nyeri a teherbírását.

A másik véglet, amikor a talajhoz nagyon nagy áteresztőképességi együtthatót rendelünk. Ekkor a talajvíz képes követni a vízoldali apadás mértékét, így a gáttest az apadás lezajlásának ütemében telítetlenné válik. Az áramlási nyomás ekkor is fellép, de kisebb mértékű lesz, mert az áramló víz útjában maga az ellenállás is kisebb a nagy áteresztőképesség miatt. A teherbírást itt a súrlódási erő, valamint a telítetlen talajban a (szívás hatására létrejött) kapilláris kohézió adja.

A két véglet közötti átmeneti szakaszt modelleztük a Plaxis végeselemes program segítségével.

4. Modellezés

Kiindulásként, vettük a fentiekben kifejtett valós problémát és annak elméleti hátterét, melyet aztán egy ideális, vizsgálható modellre egyszerűsítettünk. Mindennek az volt a célja, hogy ezen a modellen már jóval könnyebben észrevehető, tetten érhető legyenek azok az összefüggések, tendenciák, melyek ezen állékonyságvesztés folyamatának egészét leírják.

A szükséges vizsgálatokhoz tartozó számítások során figyelembe kell venni a különböző jellemzők tér és időbeni változását, ehhez közelítő, numerikus eljárásokra van szükség.

Ezek lényege, hogy mind időben, mind térben szakaszolják a lezajló folyamatokat és a számításokat ezen szakaszokon végzik el. Eközben a szükséges peremfeltételeket, egyazon szakaszra vonatkozóan, állandónak tekintik. (Imre E., 2009)

A geotechnikai vizsgálatokhoz szükséges numerikus módszerek alapvetően négy különböző eljáráshoz tartoznak:

- a véges differenciák módszere,
- peremelemes eljárások,
- diszkrét elemes szimuláció,
- és a végelelemes módszer.

Jelen feladat esetén a problémánk vizsgálatához megfelelően illeszkedő végelelemes módszert alkalmaztuk, melynek számos előnye közül csak néhányat említenénk:

- A rugalmas, illetve nem rugalmas anyagi viselkedés kiterjeszhető az egész vizsgált tartományra.
- Időfüggő anyagi változások is jól modellezhetők.
- Különböző áramlástani feladatok is jól modellezhetők, mint például a talajvíz-áramlás, vagy az esetünkben vizsgált gyors apadásból létrejövő áramlás (Czap Z., 2012).
- Megfelelően kidolgozott, részletes input/output rendszerű szoftverek állnak rendelkezésre, melyeket a mérnöki gyakorlatban is nagy biztonsággal használnak.

A vizsgálatok a Plaxis 2D 2011 végelelemes programmal végeztük. Mivel e programban a számunkra lényeges kiindulási adatok (talajjellemzők, geometria), illetve az áramlással kapcsolatos időfüggések is könnyedén megadhatók.

4.1 Modell felvétel

Minden esetben kardinális kérdés maga a modell felvétel. Hiszen ezen bemenő adatokon múlik, hogy kijövő adatként mit kapunk vissza. Így a legkisebb adat, illetve modell hiba is komolyan befolyásolja a végeredményt. Általános érvényű, hogy minden felvett paramétert (a geometrián át, a talaj tulajdonságokig) a gyakorlatban alkalmazottak szerint vettünk fel, hogy a tendenciák szempontjából relevánsak és jól kimutathatók legyenek. Így az egyes paramétereket meghatározott rendben változtattuk, míg más tulajdonságokat állandónak tekintettünk.

Így gyakorlatilag 5 féle paramétert adtunk meg (φ -c együtt kezelendők) különböző értékekkel, és ezek kombinációból származó modell vizsgálatokból tudtunk következtetni azok egymáshoz, és a vízoldali állékonysághoz tartozó biztonság viszonyára.

Bemenő adatok						
	Geometriai adatok		Talajparaméterek			Apadási sebességek
	H [m]	ρ	k [m/s]	ϕ [°]	c [kPa]	v [cm/ nap]
1.	4,5	1:2	10^{-8}	28	5	75
2.	5,5	1:3	10^{-7}	-	-	50
3.	6,5	-	10^{-6}	-	-	25

(4-1. táblázat): Bemenő adatok

4.1.1 Gát geometriája

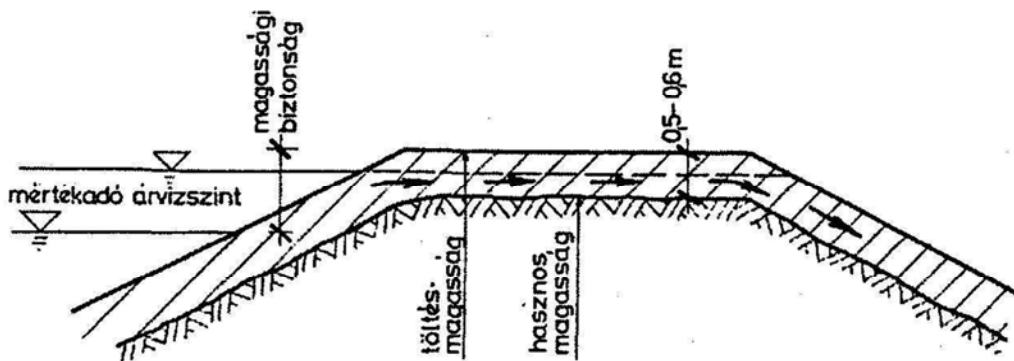
Az árvízvédelmi gátak keresztmetszetének geometriáját két lényeges adattal jellemezhetjük;

- a gát magasságával (H),
- illetve a rézsűk hajlásszögével (ρ).

4.1.1.1 A gát magassága

A védvonalak töltéskoronáját a mértékadó árvízszint felett meghatározott magasságúra kell építeni. Mely biztonsági magasság Magyarország elsőrendű árvízvédelmi művei esetén 1,0 és 1,5 m között változik (Stelczer K., 1985).

Ennek egyik oka a hullámverésre való védekezés, illetve a földmű felső 40-60 cm vastag fellazult rétegének figyelembe vétele. Mely réteg a többszöri átfagyás, külső erózió, és állati kártevők, növényi gyökerek okozta járatok miatt árvíz védekezési szempontból gyengébb résznek tekinthető (4-1. ábra).



(4-1. ábra): Földgátak fellazult felső rétege (Töröcsik T., 2007)

Vizsgálatainkhoz gátak magassági változásait 3 db járatos mérettel (4,5 m; 5,5 m; és 6,5 m) vettük figyelembe. Illetve egy 70 cm vastag fellazult réteget definiáltunk minden modell vizsgálat esetén.

A töltések minimális koronaszélességét elsősorban az azt használó járművek méretigényei határozzák meg (pl.: árvízvédekezésben részt vevő gépek). Magyarországon ez minimálisan 5 méter, így feladatunk során mi is ezt használtuk.

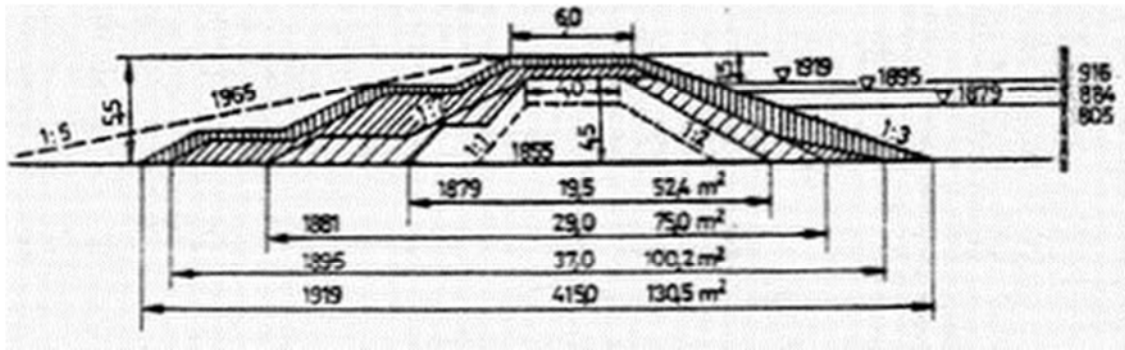
4.1.1.2 Rézsűhajlásszög felvétele

A legtöbb esetben a vízoldal és a mentett oldal rézsű kialakítása egymástól jelentősen eltér, ennek oka, hogy különböző hatások érik őket. A töltés vízfelőli oldalát elsősorban a hullámverés és elhabolás ellen méretezik, míg a mentett oldalon a permanens szivárgás határvonala határozza meg a rézsű kialakítását (Stelczer K., 1985).

Hazánkban jellemzően 1:3-as hajlást alkalmaznak a vízoldali rézsűk esetén, azonban ezzel a rézsű kialakítással nem mindenhol találkozhatunk egységesen. Vannak olyan gáttöltések, ahol még a jóval nagyobb hajlásszögű, korábban kialakított rézsű található, illetve a folyók lebegtetett hordalék lerakásából származó feliszapolódás sokszor igen meredek rézsűket hoz létre (lásd. 2.3.2.3 alfejezet).

Kellően tartós, magas árvízszint esetén, a gát fokozatos átázásával, vízzel telítődésével, megindul egy permanens szivárgás, melynek lehetséges felső határvonala nem szabad, hogy kilépjen a töltés keresztmetszetéből. A mentett oldali rézsűket elsősorban ezen korlátozásra méretezik, mivel ha ez mégis megtörténik, úgy a kilépési pont közelében az áramvonalak összesűrűsödnek, ezzel együtt a szivárgási sebesség megnövekszik és ez könnyen a rézsű károsodásához, töréséhez vezethet.

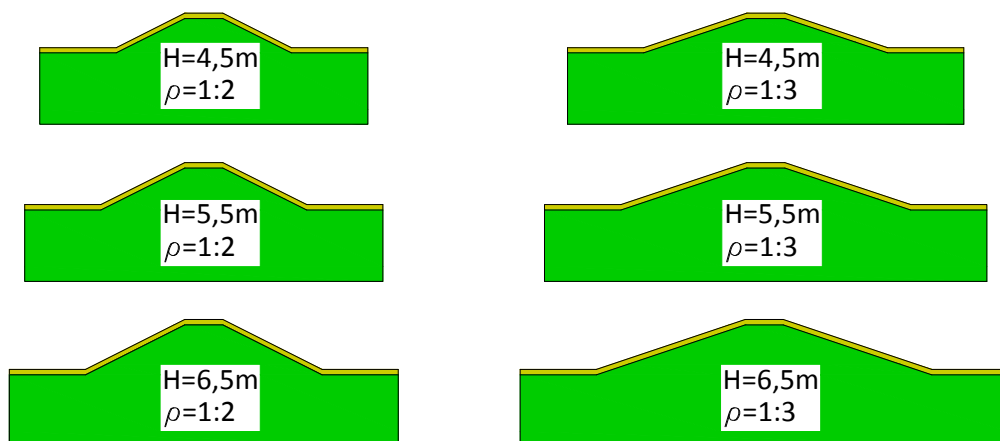
Ezért az említett határvonal felett a rézsű hajlása akár 1:2-es is lehet, alatta viszont lényegesen kisebb, 1:3-tól 1:5-ig tartó hajlást érdemes alkalmazni. Hazánkban régebben az LNV magasságában épített (néha az alatt is) kb. 4 m széles padkával akadályozták meg a szivárgási vonal kilépését, azóta inkább az 1:3-tól 1:5-ig hajlásszögű ún. törtrézsűt alkalmazzák (4-2. ábra).



(4-2. ábra): Többször erősített Tiszai gát keresztmetszete (Vízügyi hivatal, 2004)

Mivel a rézsűhajlás szerepének kimutatásához nem szükséges egy ilyen összetett gát keresztmetszet felvétele, ezért szimmetrikus esetekre végeztük vizsgálatainkat, ezzel még inkább kihangsúlyozva a rézsűhajlás károsodást befolyásoló szerepét.

A modellekben ezért 1:2-es és 1:3-as hajlású szimmetrikus rézsűket alakítottunk ki minden „H” magasság esetén (4-3. ábra).



(4-3. ábra): Alkalmazott gát keresztmetszetek

4.1.2 Talajfizikai jellemzők

Mielőtt rátérnénk, ezekre a tulajdonságokra előbb el kell döntenünk, hogy milyen legyen a modell esetén a gát belső szerkezete, illetve hogy jellegében milyen talajtípust vizsgáljunk.

Ahogy a korábbiakban már szó esett róla gátjaink jelentős része inhomogénnek tekinthető (2-2. és 4-2. ábra), ami általában számos probléma forrása (rétegszivárgás, gyengébb zónákban bekövetkező progresszív törés, réteghatárok menti belső erózió, stb.).

Mivel vizsgálataink során, elsősorban az apadás hatására bekövetkező vízdali áramlás folyamatát szerettük volna vizsgálni az általunk megadott paraméterek (4-1. táblázat) függvényében, ezért homogén gáttöltést feltételeztünk, ezzel kizárva az inhomogenitás okozta talajszilárdsági és áramlási anomáliákat.

A másik igen fontos kérdés a talaj, mint töltésanyag, megválasztása volt. Mivel az árvízvédelmi gátak anyaga kötött talaj, így egy átlagos (sovány) agyagnak megfelelő talajt választottunk (2. sz. melléklet).

4.1.2.1 Nyírószilárdsági jellemzők

Jól ismert tény, hogy a víztartalom és a vízmozgás lehetőségének függvényében más a talajok tönkremeneteli viselkedése (zárt/ nyílt rendszer esete), ennek elméleti részleteivel a 3. fejezetben már találkoztunk (3.4.1 fejezet).

A vizsgálathoz szükséges volt a valós, apadás szerinti pórusvíznyomás változások meghatározására, mivel így lehetővé vált a modellezés során;

- a vízáteresztőképességi együttható (k),
- a különböző apadási sebességek (v),
- és a szívás hatásának figyelembe vétele is.

Mindezen okok miatt nyílt rendszert alkalmaztunk, melyben az átlagos agyag talajunk hatékony, drénezett nyírószilárdsági paraméterei a következők voltak:

- $\varphi' = 28^\circ$ ($c' = 0$ kPa)

Mivel a modell megfelelő lefutásához szükséges volt egy kezdeti nyírószilárdsági növekmény megadására, így kohézióknak egy elhanyagolhatóan kicsiny:

- $c = 5$ kPa

nagyságú értéket adtunk meg.

Ahogy a 3-3. ábrán is láthatjuk, hogy egy átlagos kötött talaj esetén a hatékony nyírószilárdsági paraméter (φ') kicsiny szórással, csupán kis mértékben változik, ezért a vizsgálatok során ennek értékét nem változtattuk. Ehelyett - a modellezések végeztével – minden esetben meghatároztuk ezen hatékony belső súrlódási szög legkisebb, az az állékonysághoz még éppen szükséges nagyságát ($n=1,0$ biztonsági tényezőhöz tartozó értékét).

4.1.2.2 Áramlási paraméterek

Különösen lényeges tulajdonság a talaj vízáteresztő képessége. A hazai szakirodalom szerint töltés építéskor a földmű anyagának vízzárósága miatt az áteresztőképességi együtthatónak $k < 10^{-6}$ m/s - nak kell lennie, ezért mi is e szerint jártunk el.

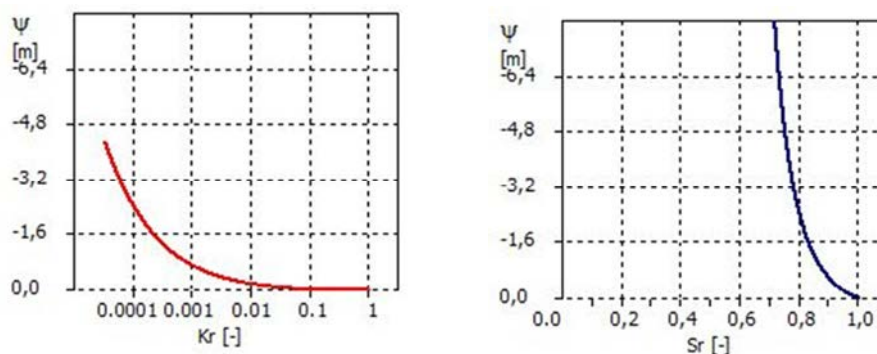
Fontos megjegyezni, hogy a 4-1. táblázatban foglalt értékek mellett, minden esetben egy nagyságrenddel nagyobb áteresztőképességű, 70 cm vastag réteget is definiáltunk adott gát modellre (Tehát pl.: $k = 10^{-8}$ m/s esetén, a külső rétegben $k = 10^{-7}$ m/s –ot vettünk fel). Ez a már említett felső, fellazult réteg miatt volt szükséges (4-1. ábra).

Lényeges egyszerűsítés, hogy mivel a „ k_x és k_y ” együtthatók értéke és különbözősége a gátak esetén is csak durva közelítéssel adható meg, így azokat, adott modell esetén, egyazon értékkel vettük figyelembe. Ekképpen homogén, izotróp gáttöltést feltételezhetünk, az áramlási nyomás iránya pedig e szerint alakul (3.2 fejezet).

A 3. fejezetben már kitértünk rá, hogy a különböző telítetlen agyag talajok esetén másképp változik az áteresztőképességi együttható, illetve a víztartalom a szívás függvényében (3-8. és 3-9. ábra). Ezt a PLAXIS program az alábbiak szerint veszi figyelembe.

Ezen grafikonokon láthatjuk, hogy az egyes talajok esetében a talajvízszint által meghatározott telített zónától való távolság függvényében (Ψ) hogyan változik a relatív áteresztőképességi együttható (K_r) illetve a relatív telítettség (S_r).

Az adott talaj telítetlen viselkedését leíró Van Genuchten-modell pedig e paraméterekkel számolja a szívás és a megváltozott áteresztőképességi együttható mértékét.

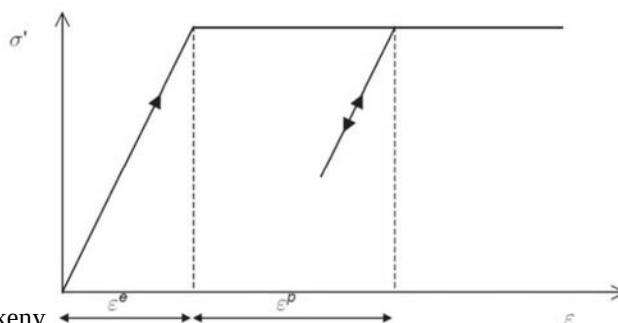


(4-5. ábra): Adott talajra jellemző relatív K_r és S_r függvényei

4.1.3 Anyagmodell

Mivel a rugalmas – tökéletesen képlékeny anyagmodell („Mohr-Coulomb” anyagmodell) az állékonyságvizsgálatok esetében pontos értékekkel szolgál, így a vízdoldali suvadás modellezése során ezt az anyagmodellt alkalmaztuk. E modell konstans merevséggel rendelkezik, ezért számítása igen gyors. Gyakorlatilag mindaddig rugalmasan viselkedik, míg a nyírósúlárdsága ki nem merül, attól kezdve pedig képlékenyen (Czap Z., 2012). Az alkalmazásához szükséges a talaj kezdeti feszültségállapotának ismerete, illetve az alább felsorolt jellemzőké:

- rugalmassági (összenyomódási modulus),
- Poisson-tényező,
- belső súrlódási szög,
- kohézió,
- és dilatációs szög.



(4-6. ábra): Rugalmas – tökéletesen képlékeny anyagmodell σ - ε diagramja

Mely paramétereket esetünkben konszolidált, drénezett triaxiális nyomókísérletből lehet meghatározni (3.4.1 fejezet).

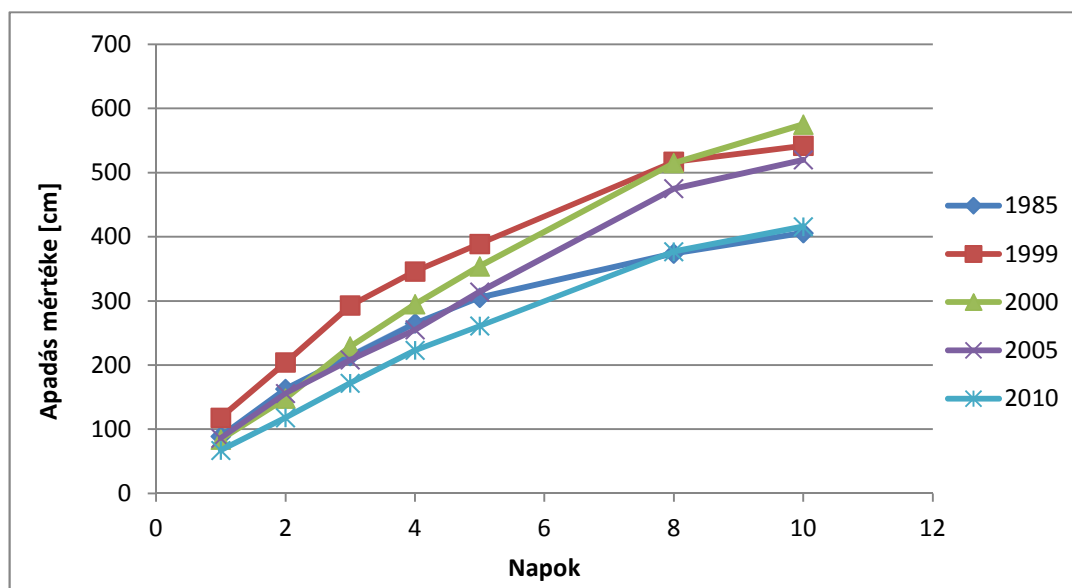
4.1.4 Apadási sebességek

Az apadási sebesség egy igen sarkalatos paraméter, így ennek felvétele gondos mérlegelést igényelt. Kiindulásként a Tisza szolnoki szelvényében vett apadási sebességeket tekintettük (4-2. táblázat).

Apadási sebesség [cm/nap]	1	2	3	4	5	8	10
	nap alatt						
1985	89	163	214	265	305	374	406
1999	118	204	293	346	389	517	542
2000	84	148	229	295	354	515	575
2005	86	156	208	255	314	475	520
2010	67	118	172	223	261	377	416
Maximum (1876-2010)	161	207	293	346	395	535	584

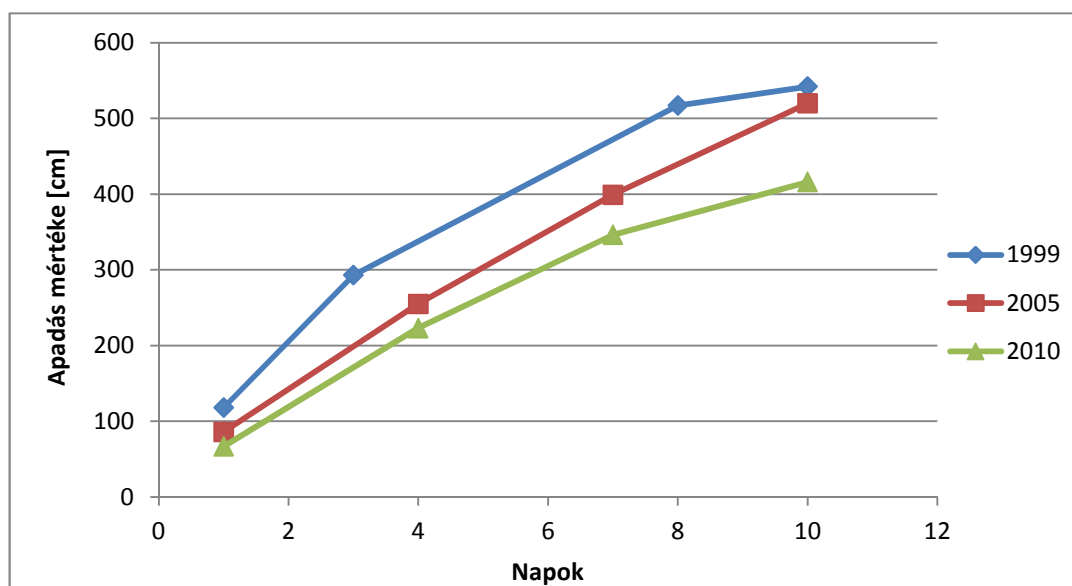
(4-2. táblázat): Apadási sebességek alakulása (Nagy L., Takács A., 2010)

A 4-2. táblázatban szereplő értékeket a napok függvényében ábrázolva a következők (4-5. ábra).



(4-6. ábra): Apadási sebességek

Az 1999-es és 2010-es évhez tartozó grafikonokat az adatsor „burkoló” görbéinek tekinthetjük, míg a 2005-ös évi apadások egyfajta átlagértékként jelennek meg. Ugyanakkor az is könnyen belátható, hogy az egyes görbéket három, közel lineáris szakaszra bonthatjuk, ezért az 1999-es, 2005-ös, és 2010-es grafikonokat külön, az 5. és 10. nap között linearizálva is megadtuk (4-7. ábra).



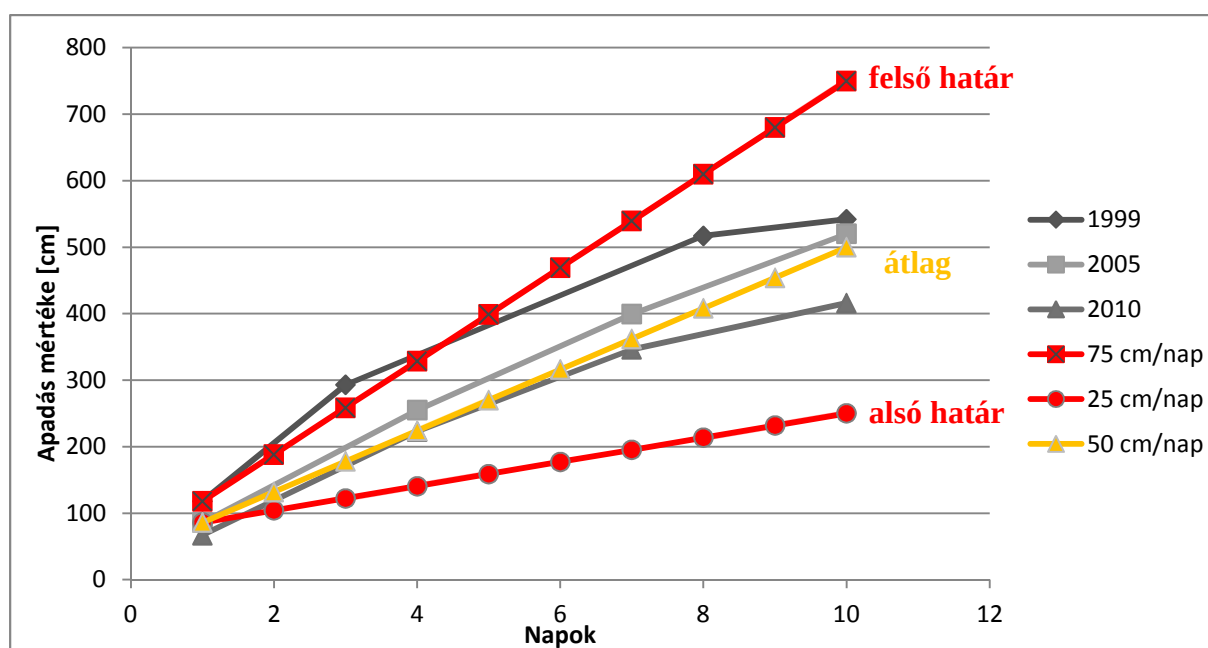
(4-7. ábra): Jellemző évek apadási sebességei

Erre a linearizálásra azért volt szükség, hogy jól láthatóvá és elkülöníthetővé váljanak az egyes görbék különböző esésű (sebességű) lineáris szakaszai. Ezen szakaszok értelmében egy

árhullám apadása, gyakorlatilag három ütemben lassuló folyamatot jelent. De mivel az egyes szakaszok esése jelentős mértékben nem tér el, így a különböző évekhez tartozó apadási görbék lineáris egyenessel jól közelíthetők.

Illetve ahogy a 2.5.3.1-es alfejezetben leírt két suvadás esetében is láttuk a kritikus sebességek átlagosan 50 és 80 cm/nap között mozogtak.

Mindezek együttes figyelembevételével három olyan lineáris apadási sebességet határoztunk meg melyek a 4-7. ábra grafikonjait megfelelően közrefogják, valamint az átlagosnak tekinthető 2005-ös apadást is jól közelítik (4-8. ábra): 70, 50, 25 cm/nap apadás (a lenti ábrán színessel jelölt lineáris vonalak).



(4-8. ábra): A modellekben alkalmazott lineáris apadási sebességek

4.2 Modell vizsgálat

Az eddigiek alapján a modell vizsgálatokhoz szükséges be-, és kimenő adatokat a 4-9. ábrában foglaltuk össze.

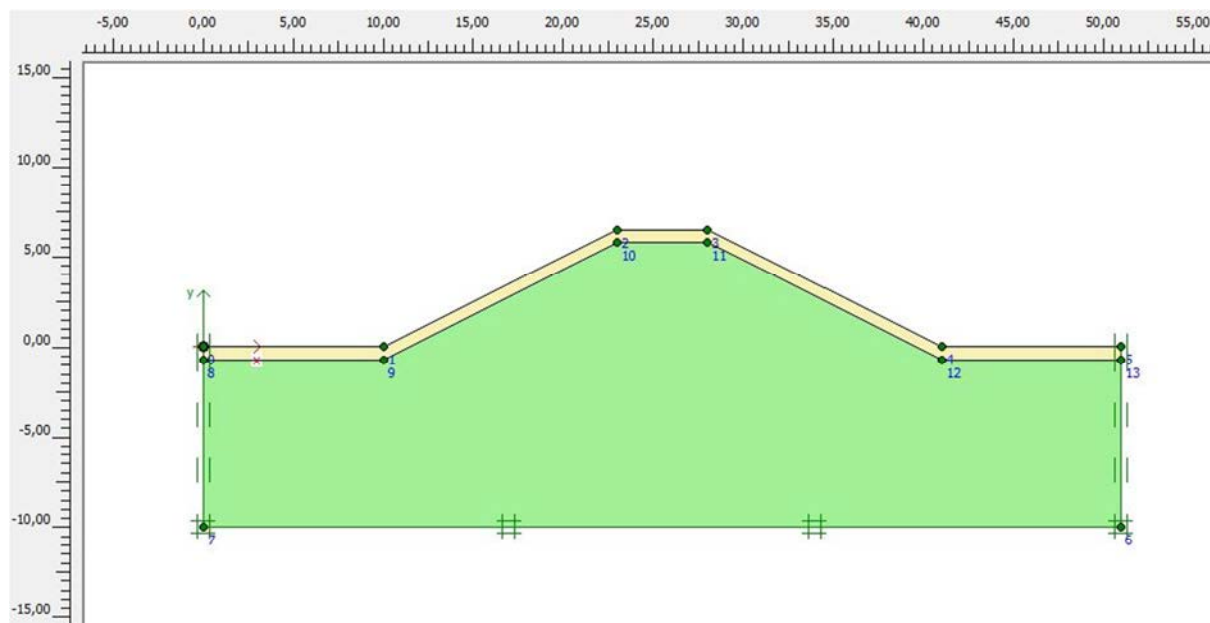


(4-9. ábra): Modell vizsgálatokhoz szükséges „input-output” paraméterek

Látható, hogy a legfontosabb kimenő adatnak az állékonyságra vonatkozó biztonsági tényezőt vettük, ezért a következőkben végig tekintjük, hogy hogyan is jutunk el magához a modellhez, illetve az egyes biztonsági tényezőkhöz.

4.2.1 Modell felvétel lépései

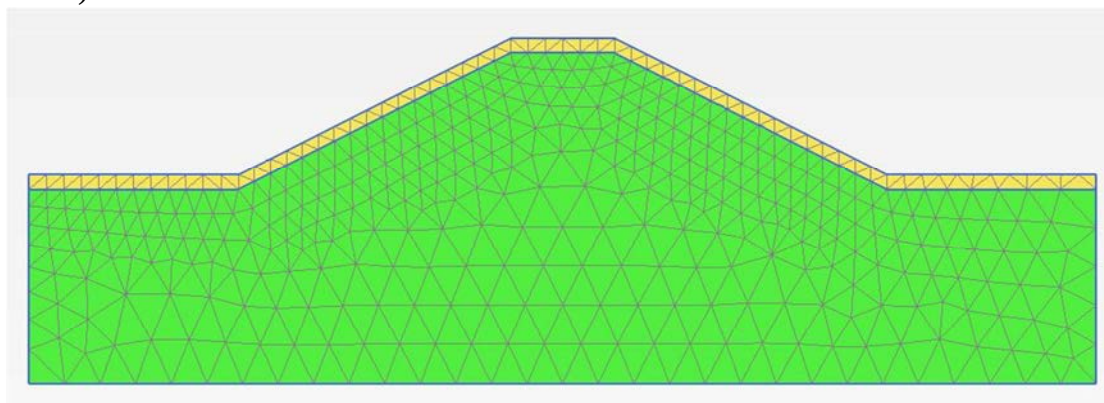
Első lépésként a 4-3. ábra szerint felvettük a gát geometriát, figyelve a 70 cm vastag fellazult réteg megadására is. Mivel az általunk definiált zárt modellezési tartomány egyik oldalába se metszhet bele a kialakuló csúszólap, ezért azt kellően nagyra választottuk. (4-10- ábra).



(4-10. ábra): 6,5 m magas, 1:2-es rézsűjű gát geometriája (PLAXIS program)

A geometria és a zárt tartomány felvételét követően a 2. sz. mellékletben foglaltak szerint megadtuk az egyes talajfizikai paramétereket, oly módon, hogy a 4-10. ábrán jelölt fellazult réteg (sárga) minden esetben a gáttöltést adó talajtól (zöld) csak az áteresztőképességi együtthatójában térjen el (lásd 4.1.2.2 alfejezet). Illetve ezen a ponton állítottuk be, a talaj drénezett viselkedését és az alkalmazott „Mohr-Coulomb” anyagmodell.

Mindezen lépések után viszonylag sűrű („fine mesh”) végeleemes hálót generáltunk, melyet a kellően pontos számítások érdekében a felső, fellazult réteg környékén tovább sűrítettünk (4-11. ábra).



(4-11. ábra): Végeleemes háló (PLAXIS program)

A hálógenerálást követően kezdődhet meg maga az állékonyság számítás a PLAXIS program számítási moduljának segítségével.

Itt különböző számítás módok állnak rendelkezésünkre:

- „Classical mode”,
- „Advanced mode”,
- és a „Flow mode

Számunkra az első két módozat közti különbségek az érdekesek.

A „Classical mode” a talajban létrejövő feszültségeket, Terzhagi nyomán, hatékony és semleges feszültségekre bontja.

$$\sigma = \sigma' + u \quad (12)$$

σ : teljes feszültség a talajban

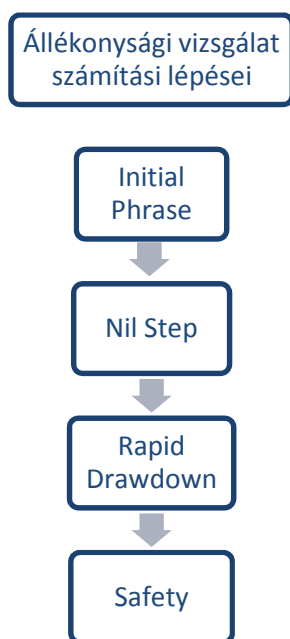
σ' : a hatékony feszültség értéke

u : semleges feszültség

Ezzel szemben az „Advanced mode” a Bishop féle feszültség analízist (10) alkalmazza. Tehát a teljes feszültséget a hatékony feszültség és a $S_r * u$ szírást közelítő tag összegéből kapjuk (3.4.2 fejezet).

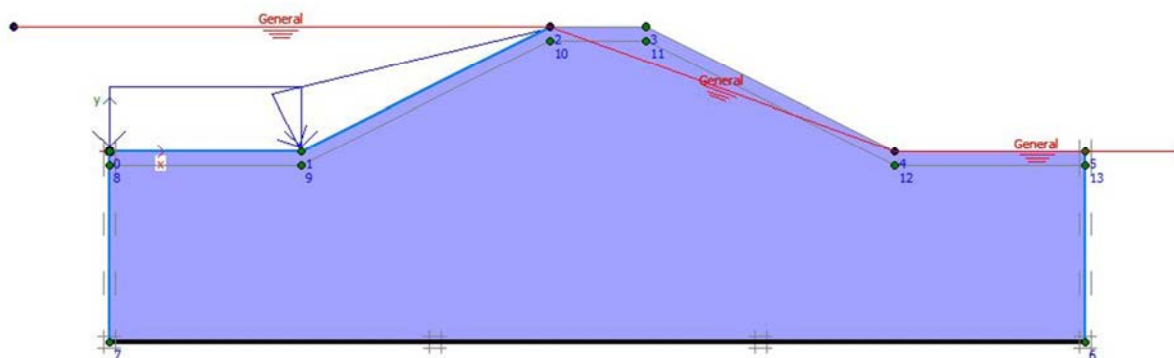
4.2.2 Számítási lépések

A modellezés során a 4-12. ábrának megfelelően számítási lépéseket hajtottuk végre.



(4-12. ábra): Számítási lépések

Az „**Initial Phrase**”, mint kiindulási lépés során, elsődleges feladat a vízszintek megadása, ezt minden esetben a 4-13. ábra szerint vettük fel.



(4-13. ábra): Vízszintek a modellben (PLAXIS program)

A vízszintek illetően megadásával egy tartósan magas vízállású árhullám tetőzését kívántuk reprezentálni. Ekkor a gát telítődése a fenti ábrával jól közelíthető.

A kezdeti feszültségek meghatározását a talaj térfogatsúlyán alapuló „Gravity loading” számítás szerint végeztük. Ez egy olyan képlékeny számítási eljárás, mely esetén a K_0 nyugalmi földnyomási tényező („Mohr-Coulomb” anyagmodell alkalmazásakor) a Poisson-tényezőtől adódik:

$$K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)} \quad (13)$$

Az ezt követő „**Nil step**” lépésnél csupán a számítás típusát kell megadni, mely jelen esetben a képlékeny drénezett módot jelenti. Mivel a „Gravity loading” egy olyan durvább, a talaj önsúlyát felhasználó számítás, mely során kiegyensúlyozatlan erők keletkeznek a kezdeti feszültségek meghatározásakor. Így szükséges egy közbenső képlékeny analízis, mely kiegyensúlyozza ezeket az erőket, ezzel elkerülve, hogy a későbbi számítások során numerikus problémák adódjanak, egyúttal a kezdeti feszültség mezőt is pontosítja.

Meg kell jegyezni, hogy mivel a kezdeti feszültségek során számított elmozdulásokat nem szabad a következő számítási lépésekre tovább vinni, így ennél a lépésnél a „Reset displacement to zero” funkciót alkalmaztuk.

A „**Rapid drawdown**”, mint gyors apadás jelen helyzetben maga a terhelés. A számítás, jellegét tekintve egy konszolidáció analízis („Consolidation TPP”). Ez a konszolidáció számításnak egy olyan általános módja, ami a konszolidáció során egyidejűleg figyelembe veszi a talajban az idő függvényében bekövetkezett deformációkat és talajvízáramlást is. Mivel mi egy ilyen, időben változó, tehát tranziens áramlást vizsgáltunk, így a fenti számítási típust alkalmaztuk.

Emellett a vízszint időbeni csökkenését (tehát az apadási sebességet) is ezen lépésben kellett beállítanunk. Hogy ezt modellenként egységesen tudjuk megtenni két kitételt fogalmaztunk meg;

1. a vízszint mindig a koronaszinttől a gát talppontjáig süllyedjen le (tehát adott gát esetén a teljes „H” magasság),
2. az apadási sebességek az időben lineárisan változnak (75, 50, 25 cm/nap).

Hogy ezek teljesüljenek a teljes apadási időt, az adott gát magasságának és az apadási sebességek hányadosaként adtuk meg (pl.: a 4,5 méter magas gát esetén, ha az apadási sebesség 75 cm/nap, akkor a teljes apadási ciklust 6 napra vehetjük fel).

Utolsó lépésként következett a „**Safety**”, mely a korábbi verziókból ismert „ φ -c redukció” módszerét alkalmazza:

$$\text{pl.: } tg\varphi_{reduced} = \frac{tg\varphi_{input}}{n} \quad (14)$$

Ahol az „n” tényezővel egészen addig csökkenti a nyírószilárdsági paramétereket (13), amíg a mozgások nem növekednek korlátlanul. Az „n” csökkentő tényező ezen végértéke, maximuma a biztonsági tényező (14).

$$n = \frac{tg\varphi_{input}}{tg\varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \frac{c_{u,input}}{c_{u,reduced}} \quad (15)$$

Ahol a;

- φ_{input} - belső súrlódási szöget,
- c_{input} - kohéziót,
- $c_{u, \text{input}}$ – drénezetlen nyírószilárdságot jelenti,

mely értékeket mi adhatunk meg kiindulási nyírószilárdsági paraméterekként.

Igen fontos kiemelni, hogy „ φ -c redukció” során a program már nem számol külön a szívás hatásával (Galavi, 2010). Illetve, hogy az ebből adódó többlet teherbírás nem a (9) képlet szerinti, kiterjesztett Mohr-Coulomb törési feltételből adódik.

Ehelyett a program, a szívás hatását, a Bishop-féle feszültséganalízisből származó hatékony feszültséggel (10) veszi figyelembe, vagyis minél kevésbé telített az adott gáttöltés, annál nagyobb a számított hatékony feszültség.

Mivel minden egyes gát esetén három különböző apadást vizsgáltunk, ezért modellenként három „Rapid drawdown” és három „Safety” számítási lépést vettünk fel. Ezzel nemcsak modellezéshez szükséges idő, hanem a modellek száma is jelentősen csökkent.

Összesen 18 db ilyen modell vizsgálatot végeztünk 3 féle apadási sebességgel, melyekből 54 db különböző biztonsági tényezőt kaptunk. Ezek mindegyikére meghatároztuk az $n=1,0$ biztonsághoz tartozó „ $\text{tg}\varphi$ ” értékeket, olya módon, hogy amennyiben ezen számított „ φ ” értékkel újrafuttatott modell biztonsági tényezője az $n=1,0$ -tól 5%-nál nagyobb mértékben nem tért el, akkor az abból végzett újabb „ $\text{tg}\varphi$ ” számítást már ténylegesen a egyes biztonsági tényezőhöz tartozó, hatékony belső súrlódási szögnek fogadtuk el.

Ezen felül további modelleket futtattunk az eredményeink kiegészítéséhez, ellenőrzéséhez, mindezzel együtt nagyjából 60 modell vizsgálatról beszélhetünk.

Ezen eredményeinket és a belőlük származó következtetéseket, illetve feltételezéseket az 5. fejezetben foglaltuk össze.

5. Eredmények és értékelés

Modellezéseink alapvető célja volt, hogy megismerjük a 3.5 fejezetben említett két végállapot közötti átmenetet.

Az alkalmazott 18 db modell esetén 5 féle bemeneti paramétert különböztettünk meg (ahogyan azt a 4.1.-es fejezetben részletesen kifejtettük): gát magassága (H), rézsűszöge (ρ), áteresztési együtthatója (k), nyírószilárdsági paraméterei (ϕ - c), vízapadás sebessége (v).

Arra voltunk kíváncsiak, hogy ezen paraméterek pontosan hogyan, milyen mértékben befolyásolják a teljes állékonysági biztonságot. Ennek a matematikailag korrekt vizsgálatához legalább 300 futtatást kellett volna végeznünk, véletlenszerűen fölvetett bemeneti adatokkal, hogy a statisztikai eloszlás megfelelő legyen. Ekkora mennyiségű modell futtatást azonban nem érdemes elvégezni, mivel egyrészt a végeselemes program futtatásának korlátaiba ütköznénk a véletlenszerűen fölvetett adatok miatt. Másrészt a matematikailag pontos megoldás, mérnöki szempontból nem feltétlenül jelent használható összefüggést.

Az analitikus, a paraméterek kapcsolatát leíró matematikai összefüggések keresése helyett inkább a tendenciák kimutatására koncentráltunk.

A gát tönkremenetelével kapcsolatba hozható - 3. fejezetben leírt - hatásokat és ellenállásokat a modellek igazolták. Így ezzel kezdenénk az eredményeink bemutatását, majd ezt követően egyesével meghatározzuk, hogy egy-egy paraméter milyen hatással van a tönkremeneteli folyamatra.

Eredményeink összefoglalásakor különös figyelmet fordítottunk arra, hogy kiemeljük a tönkremenetel szempontjából legfontosabb talajparamétereket. Valamint megoldási javaslatot tegyünk az esetleges tönkremenetel elkerüléséhez.

5.1. Tönkremeneteli mechanizmus igazolása

Jelen fejezetben (további alpontokban) végig a következő bemeneti adatokkal számoltunk:

Apadás	Geometria		Talajparaméter			Biztonság
v [cm/nap]	H [m]	ρ	ϕ [°]	c [kPa]	k [m/s]	$n_{1,2,3}$
75	5,5	1:2	28	5	10^{-8}	1,0135
					10^{-7}	1,2913
					10^{-6}	1,5855

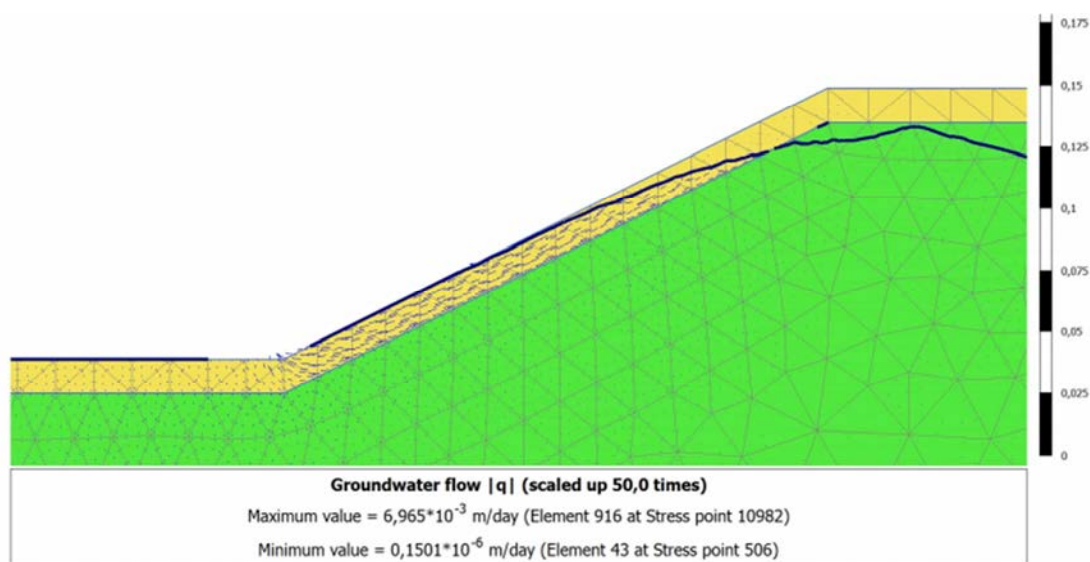
(5-1. táblázat) Bemenő adatok

Az apadási sebességből és a gát magasságából (ezen a szinten tetőzik az árvíz) számítható az apadási idő. $T = \frac{H}{v} = 7,33 \text{ nap}$.

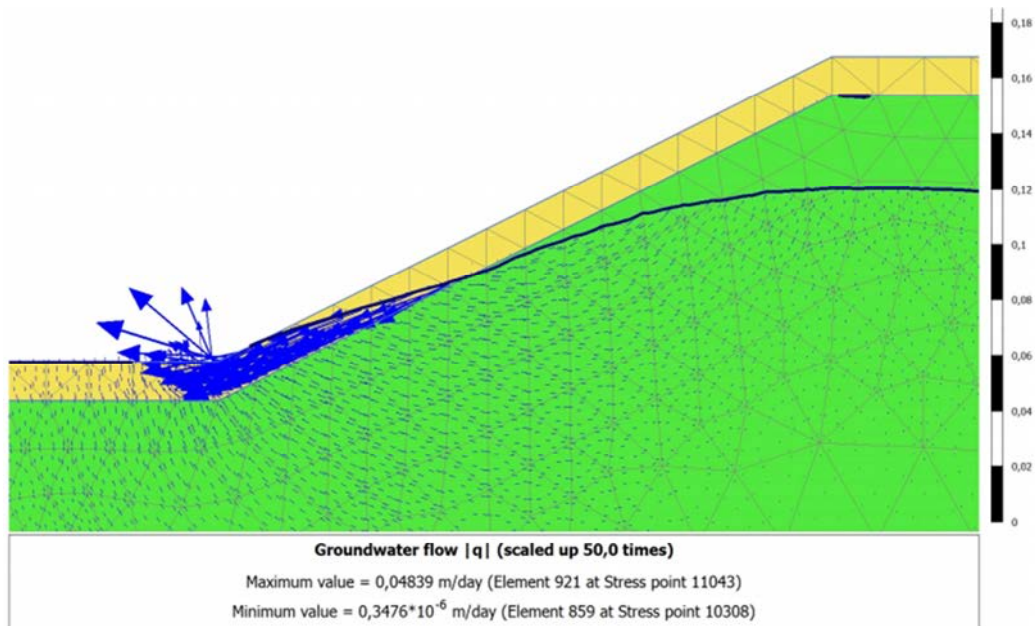
5.1.1 Talajvízáramlás

A vízdoldali apadás lezajlása után az alábbi ábrák szerint (5-1.-3. ábra) alakultak ki az talajvízáramlások különböző áteresztőképességi együtthatók esetén.

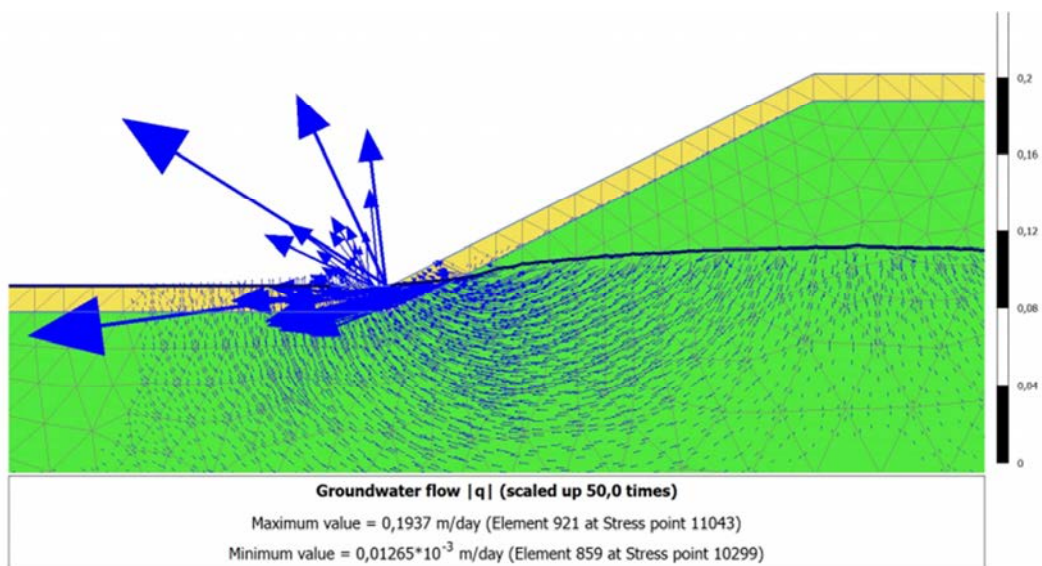
A sebességek az ábránként változó áteresztőképességi együttható miatt különböznek. Jól látható, hogy minél nagyobb a „k” értéke annál nagyobb lesz az áramló víz sebessége és annál könnyebben követi a talajvíz szintje a vízdoldali apadás mértékét.



(5-1. ábra) Talajvízáramlás, $k=10^{-8}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



(5-2. ábra) Talajvízáramlás, $k=10^{-7}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



(5-3. ábra) Talajvízáramlás, $k=10^{-6}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén

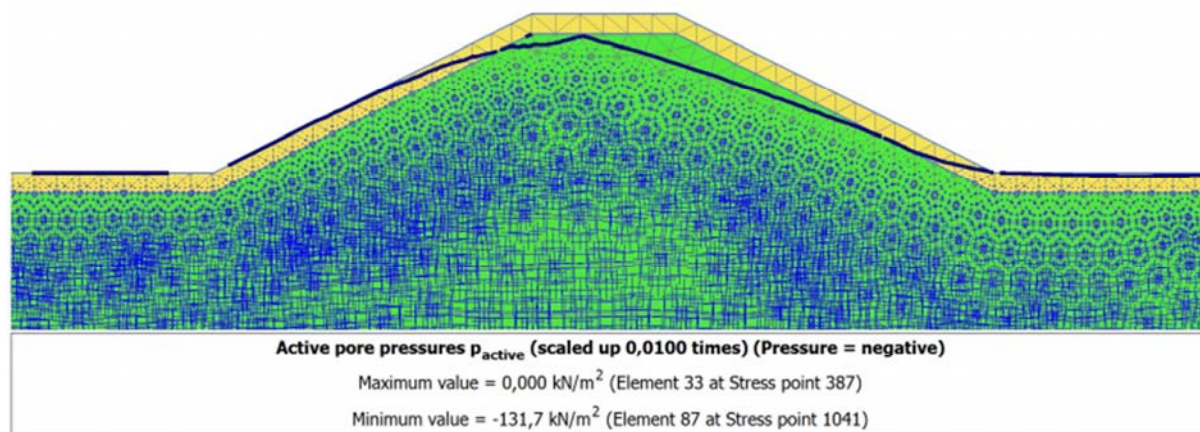
A nyilak a talajvíz kilépési irányát mutatják, a hosszuk pedig arányos a kilépési sebességgel (az értékeket [m/nap] mértékegységben a képek jobb szélén lévő léptékről lehet leolvasni).

Jól látható, hogy az 5-1. ábrán mennyivel kisebbek az áramlási vonalak hossza, mint az 5-3. ábrán, tehát a vízre - áramlása során - sokkal nagyobb ellenállás hat a kisebb áteresztőképességi együtthatók esetében (ez, az ábrák alatt lévő maximális sebesség értékekből is leolvasható (Maximum value)).

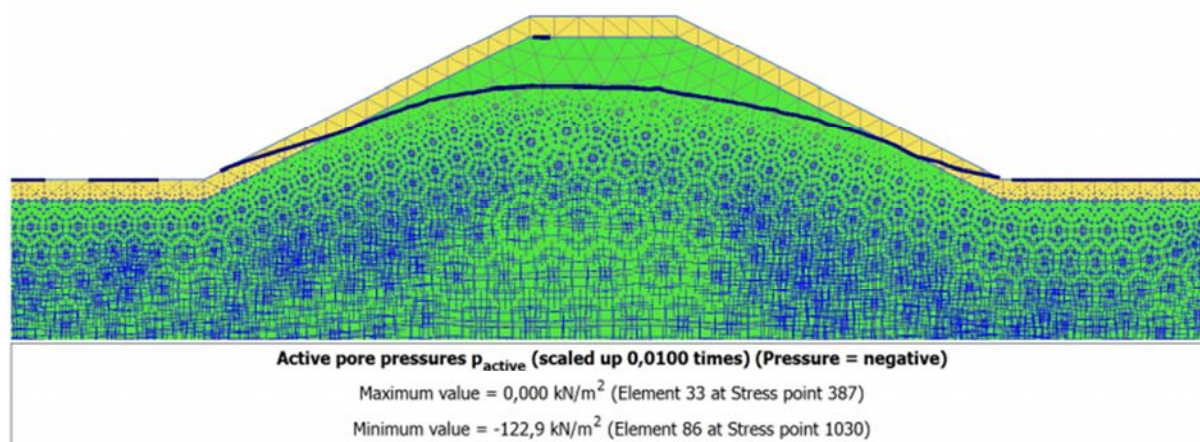
Ez igen fontos megállapítás, hiszen ha kisebbek a kilépési sebességek, akkor a víz mozgási energiáját áramlása során a viszkózus súrlódás nagyrészt felemésztette, azaz a súrlódás miatt a szemcseszerkezetet nagyobb erő (áramlási nyomás) terhelte.

5.1.2 Talajvízszint és pórusvíznyomás

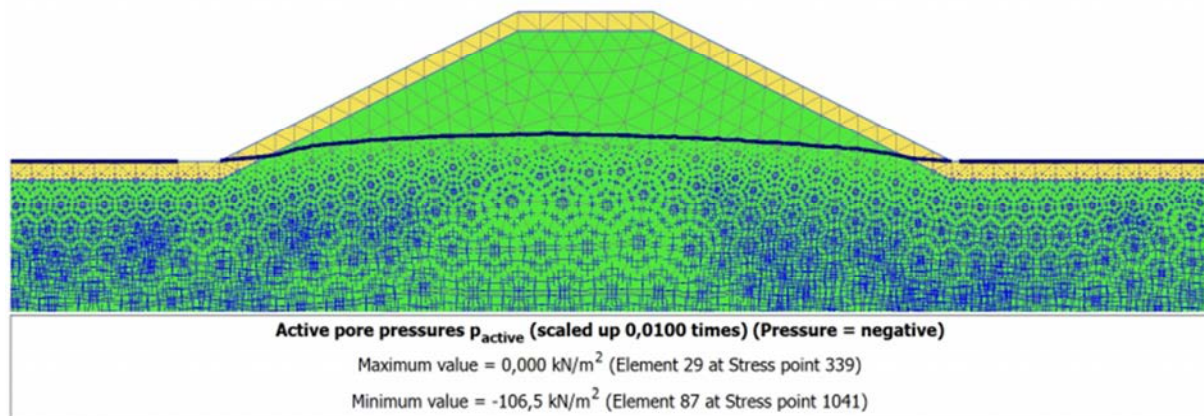
Az 5.1.1 -es pont szerint lezajlott talajvízáramlások a lentebb látható talajvízszinteket és ennek függvényében kialakult pórusvíznyomásokat hozták létre.



(5-4. ábra) Pórusvíznyomás, $k=10^{-8}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



(5-5. ábra) Pórusvíznyomás, $k=10^{-7}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



(5-6. ábra) Pórusvíznyomás, $k=10^{-6}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén

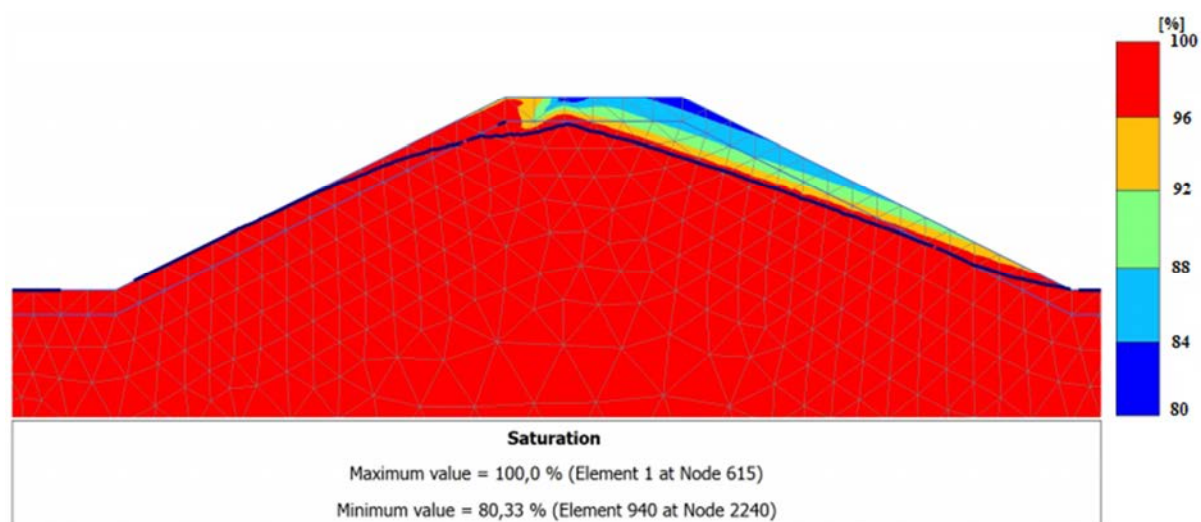
A fenti három ábrából jól látszik, hogy azonos gátak esetén az áteresztési együttható változtatásának milyen hatása van a gáttesten belüli pórusvizek alakulására. Az 5.1.1.-es fejezetben bemutatottak szerint minél nagyobb ez az együttható, a víz annál könnyebben áramlik át a talajszemcsék között, így adott idő alatt több víz képes kiáramlani, így nagyobb terület lesz telítetlen a gát keresztmetszetében. Ugyanakkor az is jól kivehető, hogy az áteresztőképességi együttható növekedésével a pórusvíznyomás egyre csökken (Minimum value). Ennek oka, hogy a nagyobb áteresztőképességi együttható mellett a talajvízszint képes követni az apadás mértékét, vagyis az apadás végén a talajvízszint alacsonyabb.

Az ábrákon látható kék kereszttek a pórusvíznyomást reprezentálják, száruk nagysága pedig egyenesen arányos a pórusvíznyomás értékével.

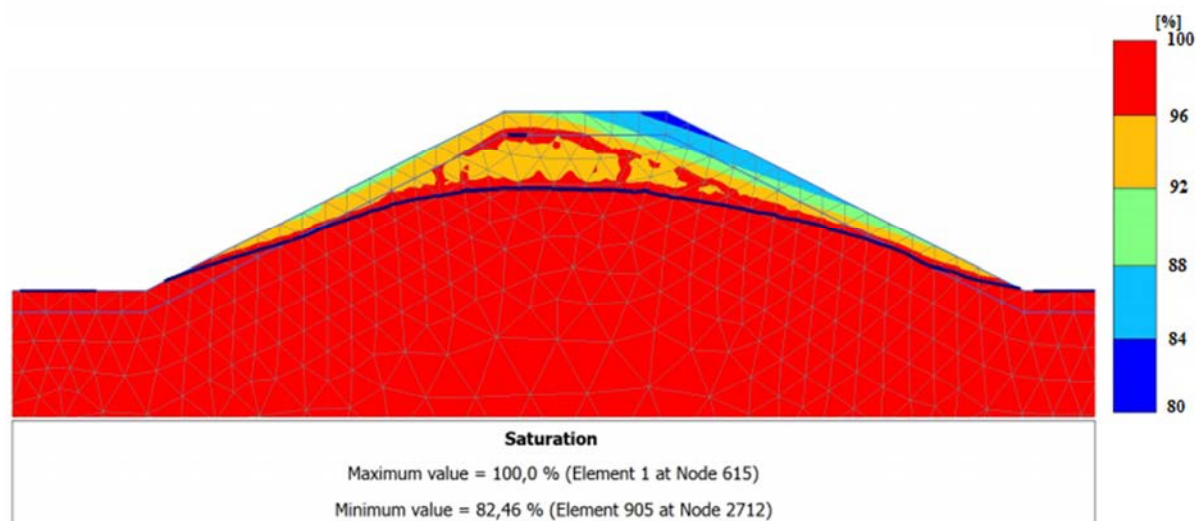
5.1.3 Telítettség

Az 5.1.1 és 5.1.2 fejezetben leírtak jól definiálják a talajvíz áramlását és az ennek következtében kialakult gáttesten belüli vízszintet. Tudjuk, hogy a talajvíz szintje alatt a pórusok vízzel telítettek, fölötte telítetlenek. Viszont a „telítetlenség mértéke” is fontos adat számunkra, ugyanis ennek függvényében tudjuk csak meghatározni a kapilláris szívás értékét.

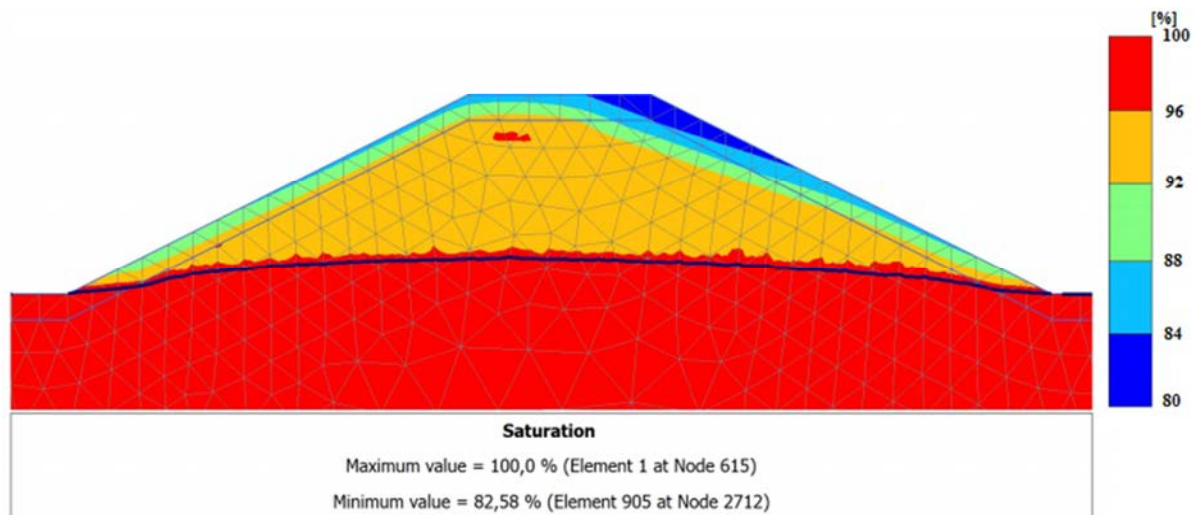
Ennek a mértékét az alábbi három ábra mutatja be.



(5-7. ábra) Telítettség, $k=10^{-8}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



(5-8. ábra) Telítettség, $k=10^{-7}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén



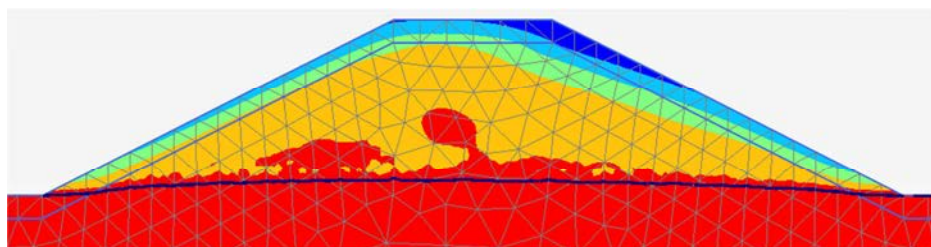
(5-9. ábra) Telítettség, $k=10^{-6}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén

A fenti ábrákon jól látható, hogy a gáttesten belül a pórusok milyen mértékben telítettek vízzel. Természetesen 100%-os a telítettség a talajvízszint alatt, de jól látható, hogy fölötté is 90%-nál nagyobb értékek a jellemzőek. Ez a megállapítás igaz mindhárom áteresztési együtthatójú gát esetére is.

Tehát annak ellenére, hogy az (5-9. ábrán) látható esetben a vízszint a gát talppontja körül van, - azaz a talajvíz jól tudta követni a vízdoldali apadást - a gáttest közel telített maradt. Ugyanis még ez a 10^{-6} [m/s]-os nagyságrendű áteresztőképességi együttható is elég kicsi ahhoz, hogy a pórusokból csupán a víz kb.: 10% legyen képes eltávozni.

Jól látszódik, hogy a gát keresztmetszetének külső 70 cm-es sávjában (ahol az áteresztőképesség egy nagyságrenddel nagyobb) átlagosan 5-10%-al kisebbek a telítettségi értékek. Ezen felül általánosan megállapítható, hogy a mentett oldal felső pontjaiban a legkisebb a telítettség (hiszen ez a rész nem is volt telítve a kiindulási állapotban).

Ezek szerint, hiába apad le a talajvíz a gáttestben, a kis áteresztőképesség miatt a víz nagy része a pórusokban fog maradni. Ez igaz a kisebb apadási sebességekre is (5-10. ábra).

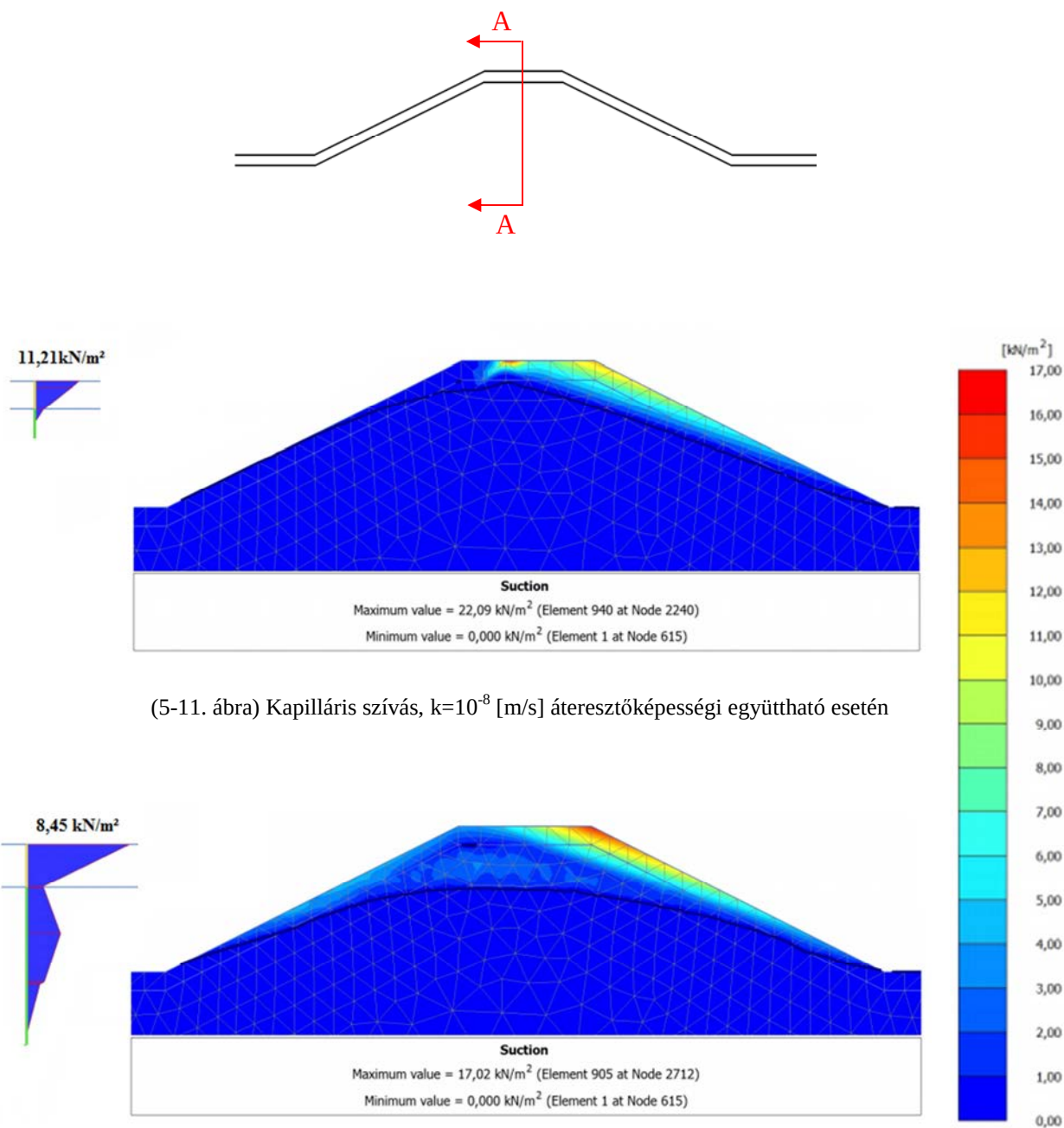


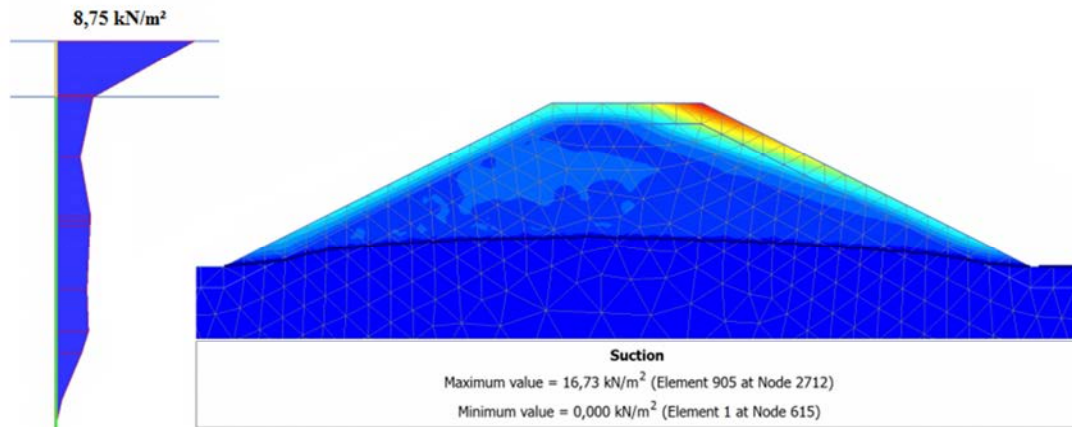
(5-10. ábra) Telítettség mértéke lassú apadást követően ($v=25$ cm/nap), $k=10^{-6}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén

5.1.4 Kapilláris szívás

A kapilláris szívást a program (4.1.2.2 fejezet szerint) a telítettségi értékekből számolja. Ezt a megállapítást igazolja, hogy az előző 5.1.3-as pontban bemutatottak illeszkednek a következő ábrákhoz (5-11.-13. ábra).

A gáttestek ábrái mellett látható a gáttest középvonalában felvett, A-A metszetben jelen lévő kapilláris szívás értéke (torzított méretarányban). A metszet két vízszintes vonala a gát koronaszintjéről lefelé mért 70 cm-es, nagyobb áteresztőképességű talajrész határait jelentik.



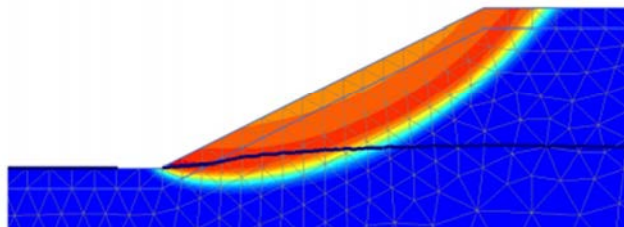


(5-13. ábra) Kapilláris szívás, $k=10^{-6}$ [m/s] áteresztőképességi együttható esetén

A kapilláris szívás maximális értékei: 16-22 kPa között mozogtak, ezek elég nagy értéket jelentenek, viszont észre kell vennünk, hogy az ekkora szívási értékek csak nagyon kis területen érvényesülnek, ráadásul elég messze a kritikus csúszólaptól (5-14. ábra). Ezen értékek gáttesten belüli eloszlása jól összevág a telítettségi ábrákon látható, 80% körüli telítettségű helyekkel.

Átlagosan 5-10 kPa nagyságú kapilláris szívás ébred a külső 70 cm-es rétegben, a gáttestben pedig ezek az értékek már kisebbek, mint 5 kPa. Ezekről a szívási értékekről elmondható, hogy viszonylag egyenletes eloszlásúak, de a kis értékek miatt nem sokat számítanak a gáttest állékonyságába. Erre magyarázatot adnak a viszonylag nagy (92-96%-os) telítettségi értékek az 5.1.3 fejezet ábráin, mert ha a pórusok telítettsége nagy, akkor a szívás értéke kicsi, ahogyan azt a 3.4.2 fejezetben ki is fejtettünk.

Így a telítetlen talaj kapilláris szívásból keletkező többlet teherbírását elhanyagolhatjuk a kis áteresztési együtthatójú gátak esetében. Viszont ugyanezt már nem tehetnénk meg nagyobb szemcséjű talajoknál, ahol a talaj szemcseszerkezete már nem képes olyan nagymértékben megtartani a vizet, mint egy agyagtalaj.

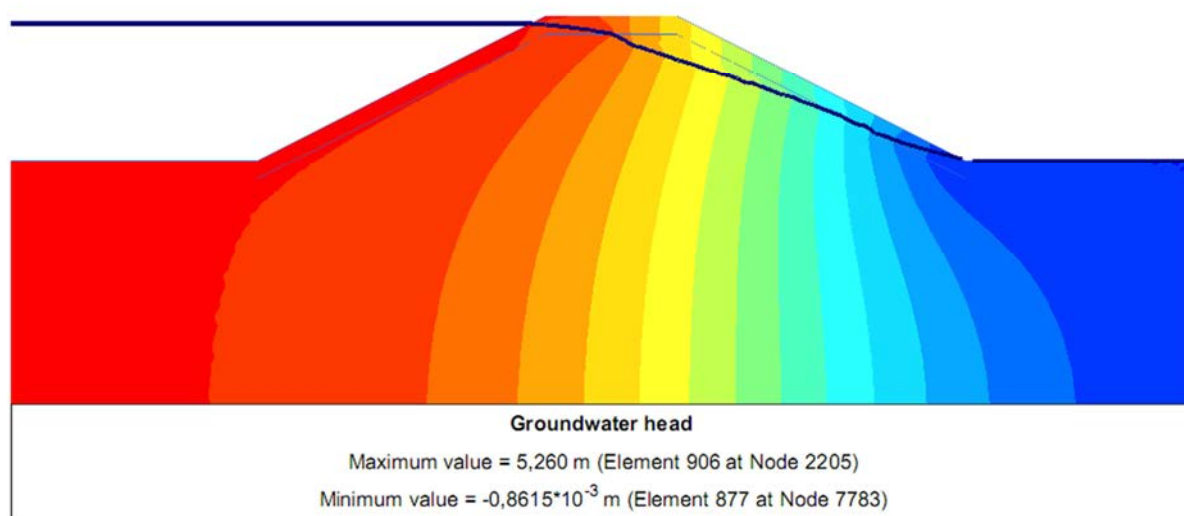


(5-14. ábra) Kritikus csúszólap helyzete

5.1.5 Áramlási nyomás

Az alábbi ábrákon (5-15.-17. ábra) a gáttestben kialakult piezometrikus nyomásmagasságok láthatóak (Groundwater head). Ha csak a színek közötti határvonalakat nézzük, akkor azok a talajvíz áramlás esetén kialakuló potenciál vonalakat jelentik. A potenciálvonalakra merőlegesek az áramvonalak.

A kezdeti állapotban, amikor a víz a gátkorona szintnél tetőzik a vízoldal és a mentett oldal közötti potenciálkülönbségek miatt az áramlás iránya a mentett oldal felé mutat. Vagyis ebben az esetben a talajvíz a mentett oldal felé áramlik.

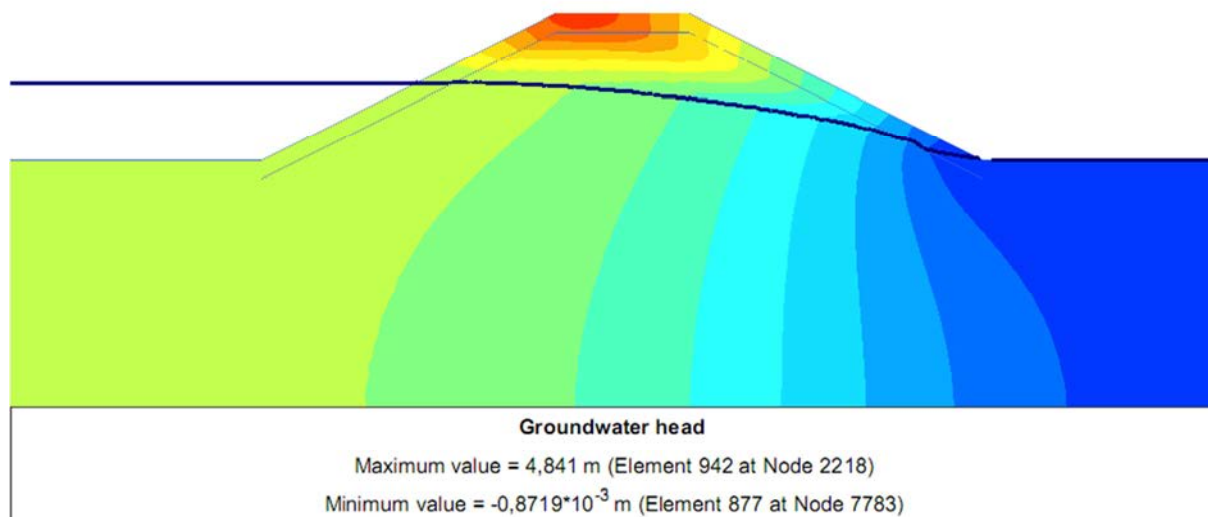


(5-15. ábra) Piezometrikus magasságok, magas vízszintnél (24 cm-es apadás után)

A piezometrikus magassági értékek a talajvízszint helyzetétől függenek, így az 5-15. ábra egyaránt jellemzi mindhárom áteresztési együtthatójú gátat.

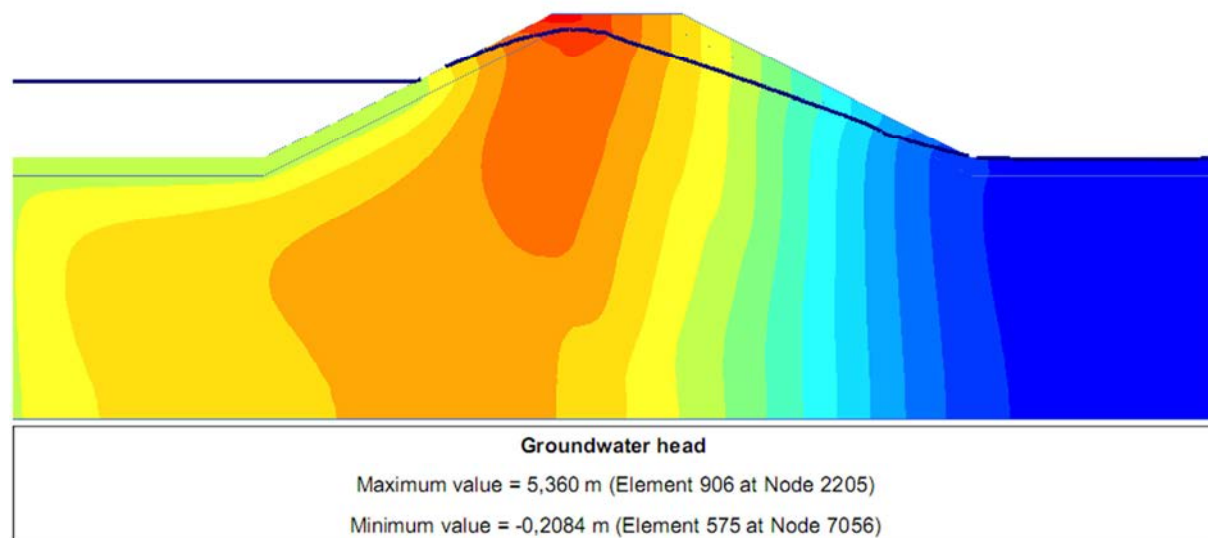
Ezekkel az ábrákkal szemléltethető az áramlási nyomás iránya, hiszen ahogy már említettük az áramlási vonalak merőlegesek a potenciálvonalakra. Az áramlás irányát igen fontos ismernünk, mert - ahogyan a 3. fejezetben is írtuk - a tönkremenetel fő oka az áramlási nyomásban keresendő, mely nyomás az iránya miatt hat destabilizáló erőként, hiszen a talajszemcséket a gáttesten kívülre akarja mozdítani.

Nagy áteresztési együttható esetén (pl. $k=10^{-6}$ [m/s]) a talajvízszint jól követi az apadást (5-6. ábra). Ezért nem is alakul ki a vízoldal felé talajvízáramlás, ugyanis potenciálesés sincsen ebbe az irányba (5-16. ábra). A potenciál értékek a mentett oldal felé csökkennek, a víz abba az irányba áramlik. Ez egy apadás közbeni köztes állapotot jelent, azonban az apadás végállapotában, mikor a víz a töltés körömpontjánál van, már a vízoldal felé mutat az áramlás iránya és ezen oldalon is következik be az állékonyságvesztés.



(5-16. ábra) Piezoetrikus magasságok, ha a vízszint a gátmagasság felénél áll; $k=10^{-6}$ [m/s]

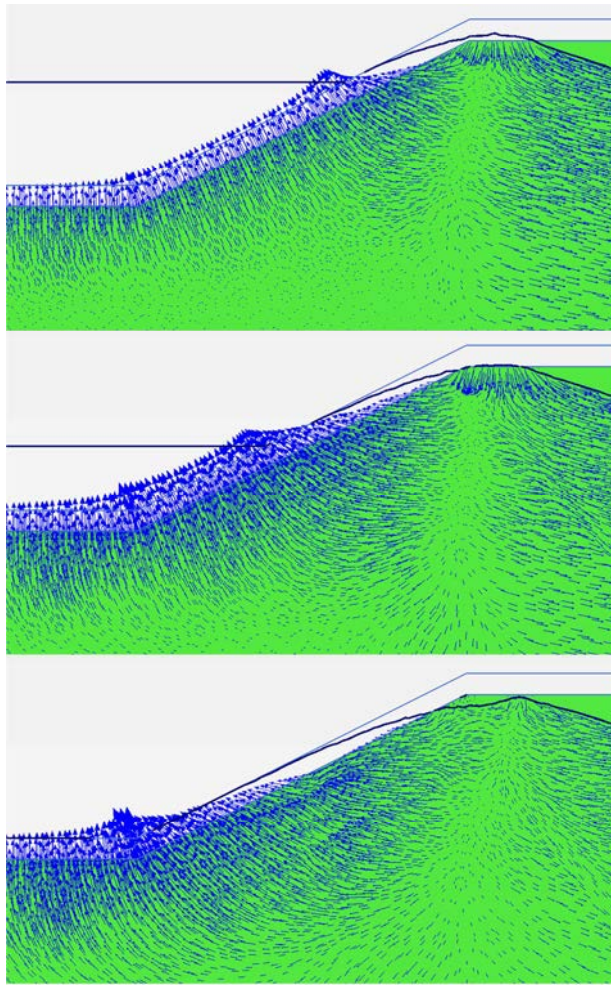
Az állékonyság szempontjából legkedvezőtlenebb potenciál vonalakat (és ezzel együtt áramlási irányokat) a legkisebb biztonsági tényezőjű gátnál ($k=10^{-8}$ m/s) lehet jól szemléltetni.



(5-17. ábra) Piezometrikus magasságok, ha a vízszint a gátmagasság felénél áll; $k=10^{-8}$ [m/s]

Látható, hogy mivel a talajvízszint nem tudta követni a vízóldali apadás mértékét, ezért jelentős vízszintkülönbség alakul ki. Így a hidraulikus gradiens vektor a vízóldal felé mutat, tehát a talajvíz is erre fog áramlani. Az áramlási nyomás jelentős destabilizáló erőként van jelen a rendszerben.

Az áramlási irányok különböző vízszintek esetén a következőképpen alakulnak:



(5-18. ábra): Áramlási irányok a különböző vízszintek esetén, $k=10^{-8}$ [m/s]

Mindezekből jól látszik, hogy az áramlási nyomás - iránya folytán - destabilizáló erőként terheli a csúszólapot (5-18. ábra).

Az első ábrán az áramlás mindkét oldal felé jelentős mértékű, de ahogy csökken a vízszint, úgy nő a hidraulikus gradiens a vízdalon és ezzel együtt az áramlási nyomás nagysága is.

Végül az utolsó ábrán már jól látható, hogy a vízdal felé nagyobb az áramlás, vagyis erre az oldalra hat leginkább az áramlási nyomás. Ezzel együtt egyre jobban kirajzolódik a csúszólap vonala is.

Az ábrákon csak a „belső gáttestet” mutattuk (zöld), ugyanis a külső fellazult 70 cm vastagságú rétegben az áramlás sebessége egy nagyságrenddel nagyobb (a kisebb ellenállás és kisebb áteresztőképességi együttható miatt), ez az ábrákat jelentősen eltorzította volna.

5.2 Geometria hatása az állékonyságra

5.2.1 A gátmagasság hatása

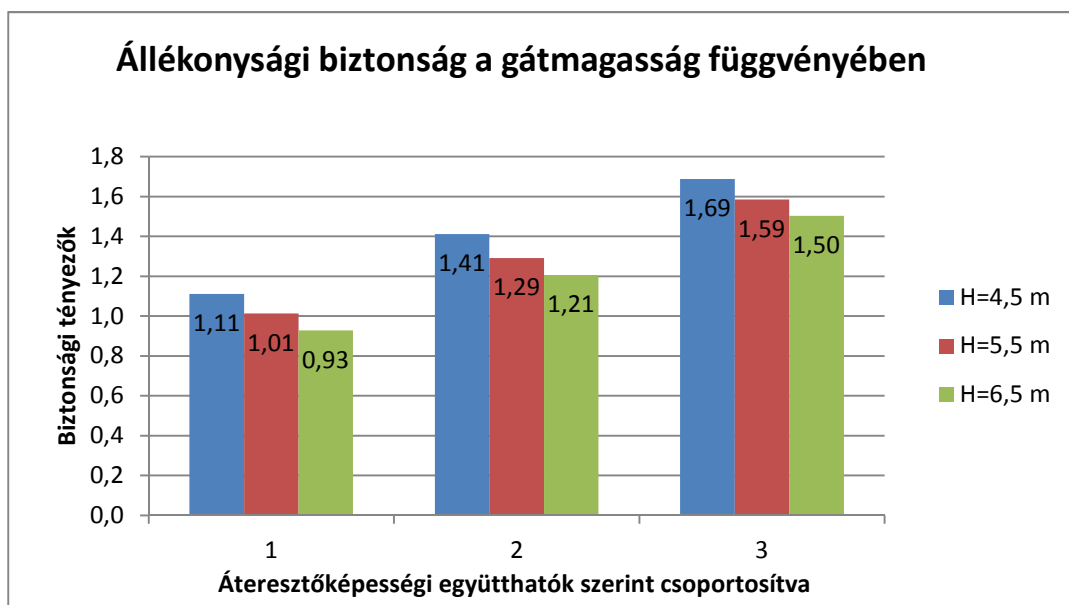
Különböző gátmagasságok vizsgálata esetén az állékonysági biztonságra vonatkozó eredményeink az alábbiak szerint alakultak (5-2. táblázat). A gát rézsűszöge egységesen $\rho=1:2$, de ezen tendenciák 1:3-as rézsűszög esetén is érvényesek, a teljes táblázatot az 1. sz. melléklet tartalmazza.

	H [m]	Bizt. Tény.	Relatív
k=10 ⁻⁸	4,5	1,11	-
	5,5	1,01	9,8%
	6,5	0,93	18,3%
k=10 ⁻⁷	4,5	1,41	-
	5,5	1,29	12,1%
	6,5	1,21	20,6%
k=10 ⁻⁶	4,5	1,69	-
	5,5	1,59	10,3%
	6,5	1,50	18,4%

(5-2. táblázat): Az állékonysági biztonság alakulása különböző gátmagasságok esetén

A

„Relatív” oszlopban lévő cellák az adott magassághoz tartozó biztonsági tényező és a 4,5 m – magas gáthoz tartozó biztonsági tényező százalékos arányát adják meg. Jól látható, hogy a gátmagasság egy, ill. két méterrel való növelése esetén az állékonysági biztonság 10, ill. 18%-al csökken.



(5-19. ábra): Az állékonysági biztonság gátmagasság szerinti alakulása

Egy átlagos rézsű esetén is igaz az a megállapítás, hogy a rézsű magasságának növelésével a biztonság csökken (pl. Taylor féle állékonysági tényező: $N_c = \frac{c}{h \cdot \gamma}$; tehát a biztonság fordítottan arányos a rézsű „h” magasságával). Ez ebben az esetben is érvényes. Az állékonyság csökkenésének hatásához még hozzájárul az is hogy a vizsgálataink során a vízszint is „H” magasságot csökkent, tehát ha nagyobb volt a magasság, akkor nagyobb hidraulikus gradiens alakult ki.

5.2.2 A rézsűszög hatása

Különböző rézsűszögek vizsgálata esetén az állékonysági biztonságra vonatkozó eredményeink az alábbiak szerint alakultak (5-3. táblázat). A gát magassága egységesen $H=5,5$ m, de ezen tendenciák a 4,5 és a 6,5 méteres gátmagasság esetén is érvényesek, a teljes táblázatot az 1. sz. melléklet tartalmazza.

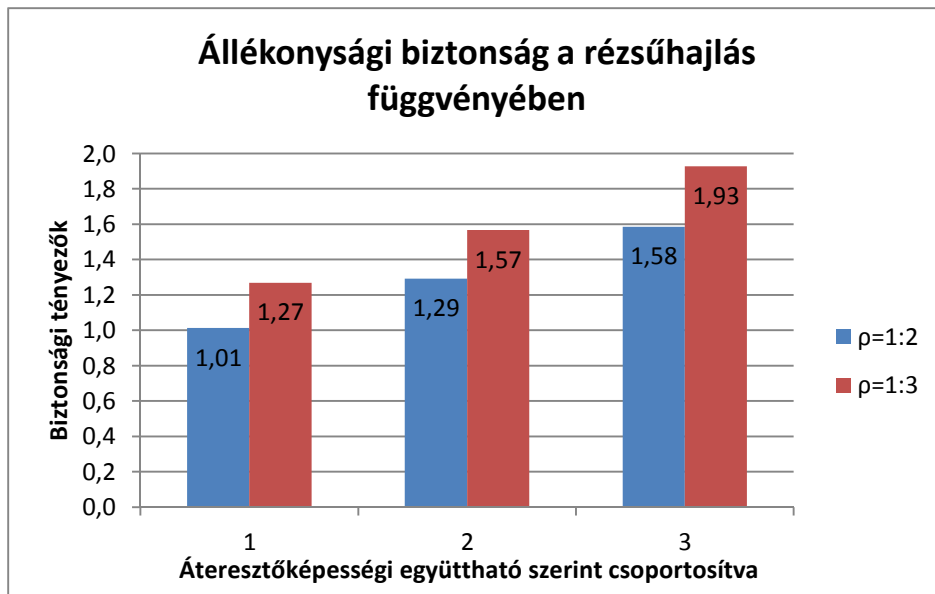
	ρ	Bizt. tény.	Relatív
$k=10^{-8}$	1:2	1,01	-
	1:3	1,27	20%
$k=10^{-7}$	1:2	1,29	-
	1:3	1,57	18%
$k=10^{-6}$	1:2	1,59	-
	1:3	1,93	18%

(5-3. táblázat): Az állékonysági biztonság alakulása különböző rézsűhajlások esetén

A

„Relatív” oszlopban lévő értékek az 1:2 –es rézsűhöz viszonyított biztonságot adják. Azaz, ha a rézsű szöge 1:2 –esről 1:3 –asra változik, akkor a biztonság 20, ill. 18% -al nő.

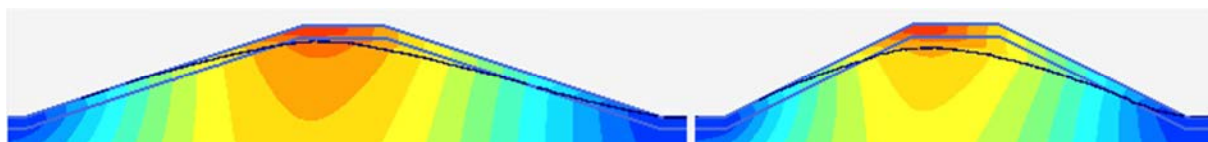
Összességében kijelenthető, hogy meredekebb a rézsűhöz, kisebb állékonysági biztonság tartozik. Általánosan az 1:2-es rézsűszögről 1:3-asra való rézsű laposítás (8° -os szögváltozás) 0,3-et növel az állékonysági biztonság értékén, ami igen jelentős állékonysági növekményt jelent.



(5-20. ábra): Az állékonysági biztonság alakulása különböző rézsűhajlások esetén

A rézsűszög biztonsági tényezőt növelő hatásának egyik oka, hogy jelentősen növeli a szivárgási utat, ezzel csökkentve a hidraulikus gradienst. Így két ugyanolyan magas, de eltérő rézsűszögű gát esetén a laposabb rézsűhajlás mellett (jelen esetben 1:3-as lejtés) kisebb áramlási nyomásról, tehát kisebb terhelésről beszélhetünk (5-21. ábra). Hiszen ebben az esetben, ugyan a talajvízszintek és a leszívási görbék közel megegyeznek, de a szivárgási út hosszában jelentős különbségek mutatkoznak.

Alapvetően megállapítható, hogy a gáttest geometriája nagy hatással van az állékonyságára, de ez főként a „hagyományos” rézsűstabilitási vizsgálatokkal igazolható (pl.: Taylor grafikon, különböző súrlódási körös eljárások, stb.).



(5-21. ábra): Gáttestben található talajvízszint az 1:3-es és 1:2-es rézsűjű geometria esetén

5.3 Hatékony belső súrlódási szög hatása

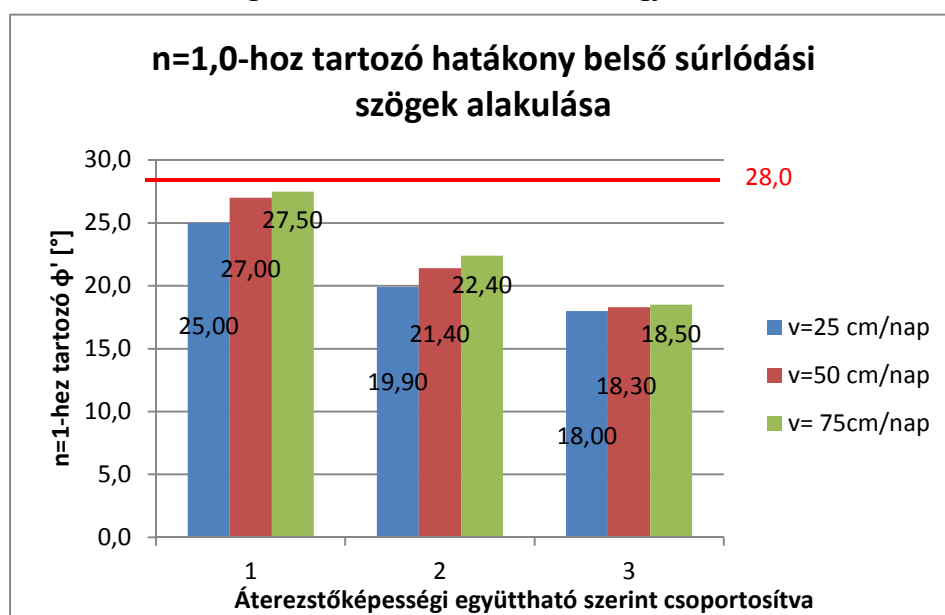
A 4. fejezetben már kitértünk a hatékony belső súrlódási szög, mint nyírószilárdsági paraméter felvételének mikéntjére, illetve arra, hogy általános agyagtalajok esetén a plasztikus index függvényében viszonylag kis szórással változik, ezért ennek értékét nem változtattuk.

Ezen nyírószilárdsági paraméter hatását az $n=1,0$ -hoz tartozó, stabilitáshoz szükséges, minimális hatékony belső súrlódási szögek meghatározásával kívántuk reprezentálni. Az 5-4. táblázatban látható értékek $H=5,5$ m-es 1:2 rézsűszögű gát esetére vonatkoznak, de a különböző geometriák esetén is ezek a tendenciák mutatkoztak. A teljes táblázatot az 1. sz. melléklet tartalmazza.

	Apadás $v[m/nap]$	$n=1$ esetén ϕ [°]
$k=10^{-8}$	75	27,50
	50	27,00
	25	25,00
$k=10^{-7}$	75	22,40
	50	21,40
	25	19,90
$k=10^{-6}$	75	18,50
	50	18,30
	25	18,00

(5-4. táblázat): $n=1,0$ -hoz tartozó hatékony belső súrlódási szög alakulása

A fenti táblázatból is jól látható, hogy az általunk vizsgált állékonyság szempontjából a leginkább kritikus 10^{-8} m/s áteresztőképességi együtthatónál szükséges a legnagyobb hatékony belső súrlódási szög, hiszen ebben az esetben a legjelentősebb az áramlási nyomás.



(5-22. ábra): Hatékony belső súrlódási szögek változása $n=1,0$ biztonsági tényező esetén

Ugyanakkor az 5-22. ábrán látszik, hogy az egyre kisebb áteresztőképességi együttható esetén (3. oszlop csoport) a különböző apadási sebességek már csak csekély mértékben változtatják, a még éppen stabil állapothoz tartozó hatékony belső súrlódási szöget.

A hatékony belső súrlódási szög megjelenik a konszolidált, drénezett Mohr-Coulomb törési feltételbe, mint az egyetlen nyírószilárdsági paraméter (3-2. ábra), tehát a talaj ellenállását tekintve meghatározó. Így evidens azon megállapításunk, hogy a nagyobb hatékony belső súrlódási szög, nagyobb ellenállást, ezáltal nagyobb állékonysági biztonságot is jelent, mely kijelentés visszavezethető az $n=1,0$ biztonsághoz tartozó értékekből (1. sz. melléklet).

5.4. Az apadási sebesség hatása

Az alábbi táblázat (5-5. táblázat) tartalmazza az állékonysági biztonság értékeit, az apadási sebesség függvényében (75, 50, 25 cm/nap), ha a gát $H=5,5$ m magas és $\rho=1:2$ –es rézsűszögű. Ez a tendencia jellemzi a többi esetet is (a teljes táblázat az 1. sz. mellékletben található).

	Apadás [m/nap]	Bizt. tény.	Relatív
$k=10^{-8}$	75	1,01	-
	50	1,03	1,5%
	25	1,13	10,1%
$k=10^{-7}$	75	1,29	-
	50	1,36	5,0%
	25	1,47	11,9%
$k=10^{-6}$	75	1,59	-
	50	1,61	1,6%
	25	1,64	3,1%

(5-5. táblázat): $n=1,0$ -hoz tartozó hatékony belső súrlódási szög alakulása

A „Relatív” oszlopban található százalékok a 75 cm/nap-os apadáshoz tartozó biztonsági tényezőhöz viszonyított eltéréseket mutatja. Tehát ha 75 cm/nap helyett csak 25 cm/nap az apadás sebessége, úgy 10%-al nagyobb állékonyságot kapunk.

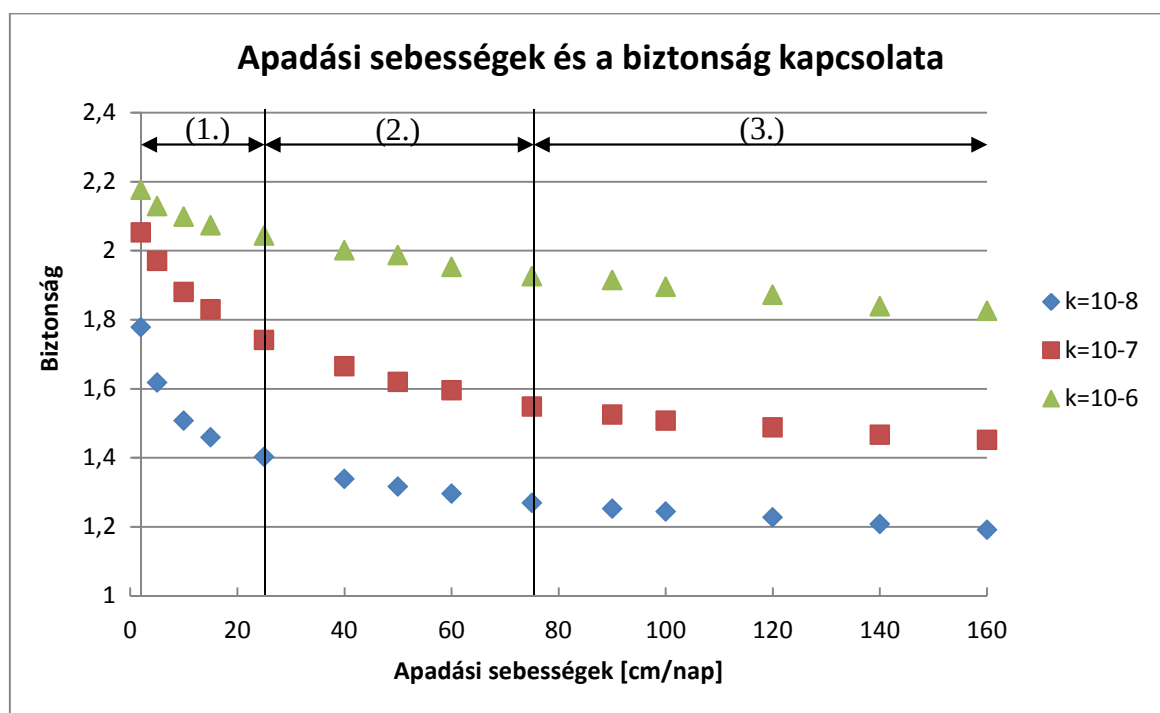
Ezek szerint az apadási sebesség 50 cm/nap-al való növelése átlagosan 9-10%-os állékonyság csökkenést jelentett. Ez a vártnál kisebb jelentőséget tulajdonít az apadási sebességnek.

Eredményeink vizsgálata során kijelenthető, hogy nem az apadás sebessége, hanem magának az apadási folyamatnak a jelenléte a fontos. Ugyanis a jellemző tönkremenetel a nagy áramlási nyomásnak tudható be, ennek kialakulásához pedig nagy hidraulikus gradiens szükséges. Vizsgálataink szerint ennek a kialakulását az áteresztőképességi együttható nagyobb mértékben befolyásolja, mint az apadási sebesség.

Ugyanis, ha kicsi a talaj áteresztőképessége, akkor kevésbé számít, hogy a víz 25 vagy 75 cm/nap -os sebességgel apad le, mivel mindkét esetben a gátestben közel ugyanakkora lesz a talajvízszint (5-24. és 5-25. ábra). A talajvízszint a gátest víztartó képessége miatt nem fog jelentősen lejjebb apadni, még ha a gáton kívüli vízszint gyorsan csökken is.

Ellenkező esetben, ha a talajnak nagy az áteresztőképessége együtthatója, akkor a vízföldi apadás mértékét a talajvízszint jól tudja követni, mert csekély a talaj ellenállása a vízáramlással szemben, ezért nem fog kialakulni nagy potenciálkülönbség a gátestben.

Hogy az áteresztőképesség és apadási sebességek együttes, állékonysági biztonságra gyakorolt hatását jobban megérthessük, azt is megvizsgáltuk, hogy milyen különbséget mutat az állékonysági biztonságban a nagyon gyors (160 cm/nap) és a nagyon lassú (2 cm/nap) apadás, hogy ezen kétszélű példával is igazolni tudjuk a fenti állításainkat. Ezt egy 5,5 m magas és $\rho=1:3$ -as rézsűvel rendelkező gátnál mutatjuk be (5-23. ábra), de a tendenciák a többi geometria esetén sem változtak.

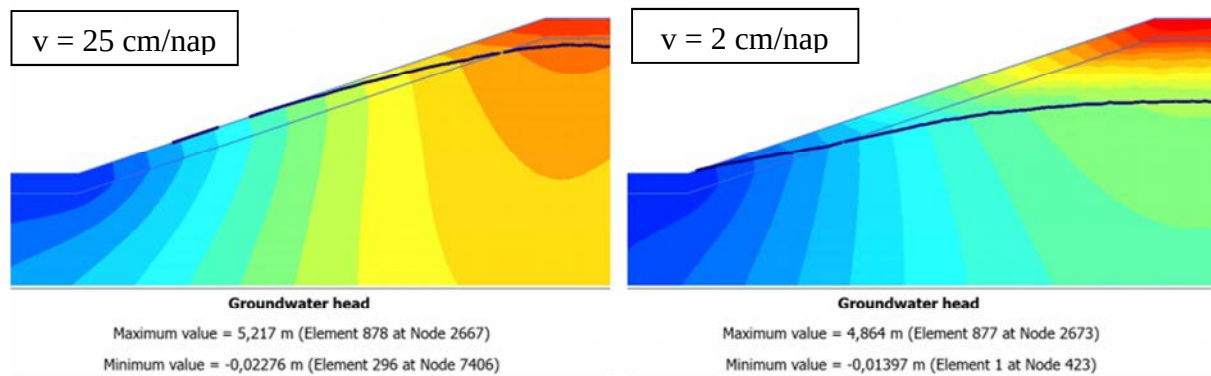


(5-23. ábra): Apadási sebességek és a biztonság kapcsolata különböző áteresztőképességi együtthatók esetén

Jól látható, hogy a legjelentősebb biztonság különbségek az első szakaszban mutatkoznak. A második és harmadik szakaszban az apadás hatása már nem annyira jelentős. Kivált, ha figyelembe vesszük, hogy a harmadik szakaszba sorolt apadási értékek tartósan nem jellemzőek a hazai folyóinkra, ilyen nagy sebességű vízszint csökkenés egy, maximum két napig áll fent, majd az apadás mértéke csökken (4-2. táblázat).

Mindez azért van, mert a nagyon kis apadási értékeknél (2 cm/nap) a talajvízszint még jól tudja követni a vízföldi apadás mértékét mindhárom áteresztőképesség esetén, illetve a kialakuló áramlás iránya közel párhuzamos a rézsűvel. De például a 25 cm/nap -os apadásnál már jobban érvényesül a talaj ellenállása az áramlással szemben, így a talajvízszint jóval

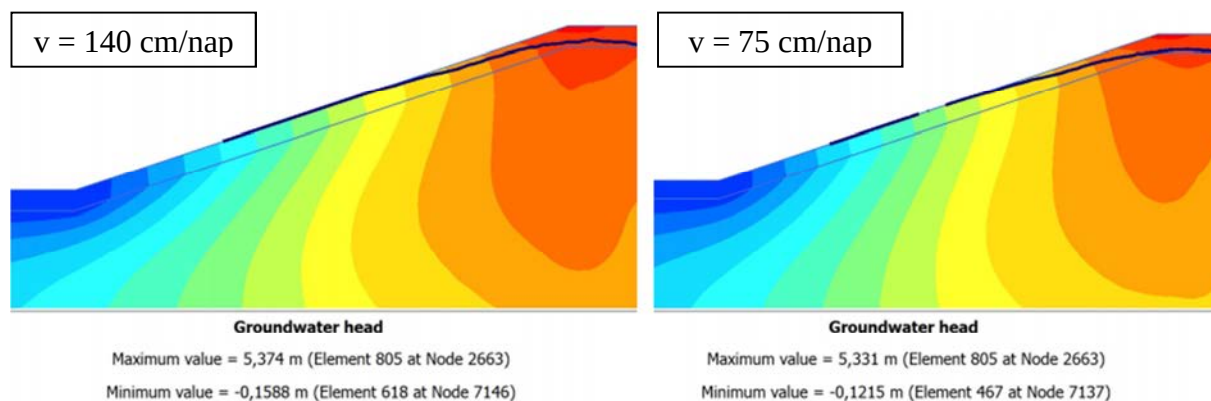
magasabban marad, mint az előző esetben. Ez a nagyobb vízszintkülönbség miatt, nagyobb áramlási nyomást okoz (5-24. ábra), mely terhelés növekedése a biztonság csökkenését vonja maga után.



(5-24. ábra): Piezometrikus nyomásmagasságok alakulása, ha az apadás mértéke 25, illetve 2 cm/nap

A második szakaszt azért volt fontos külön megemlítenünk, mert ezt a tartományt vizsgáltuk részletesebben a modellezés során. A gyakorlati példák szerint ebben a tartományban lévő apadási sebességek hatására történt gát tönkremenetele, illetve jól látható, hogy ebben a szakaszban az apadási sebességek változása nagyobb hatással van az állékonyságra (ezen eredmények meredekebb egyenessel közelíthetők), mint például a harmadik szakaszban.

A második és harmadik szakaszra vonatkozóan: egy bizonyos apadási sebességen túl már nem csökken jelentősen a biztonság. Ennek oka, hogy innentől már nem számít, hogy milyen ütemben csökken a vízszint, mert a vízdali csökkenés mértékének növekedése már nem változtatja jelentősen a talajvízszintet. Így gyakorlatilag csupán annyi történik, hogy a nagyobb apadási sebességek miatt hamarabb tűnik el a víz a részü mellől, és hamarabb alakul ki a nagy áramlási nyomás. A modell eredményeink alapján a biztonság kis mértékben ezen a szakaszok esetén is változik, a néhány centiméteres talajvízszint különbségek miatt. (5-25. ábra).



(5-25. ábra): Piezometrikus nyomásmagasságok alakulása, ha az apadás mértéke 140, illetve 75 cm/nap

Megfigyelhető még, hogy a nagyobb áteresztőképességi együtthatójú gáttestre kisebb hatással volt az apadási sebességek növelése, hiszen - ahogy azt már többször említettük - ebben az esetben a talajvíz jobban követni tudja a vízdali apadás mértékét. Tehát minél nagyobb egy gát áteresztőképessége annál kevésbé befolyásolja állékonyságát a vízdali apadás sebessége.

5.5. Az áteresztőképességi együttható hatása

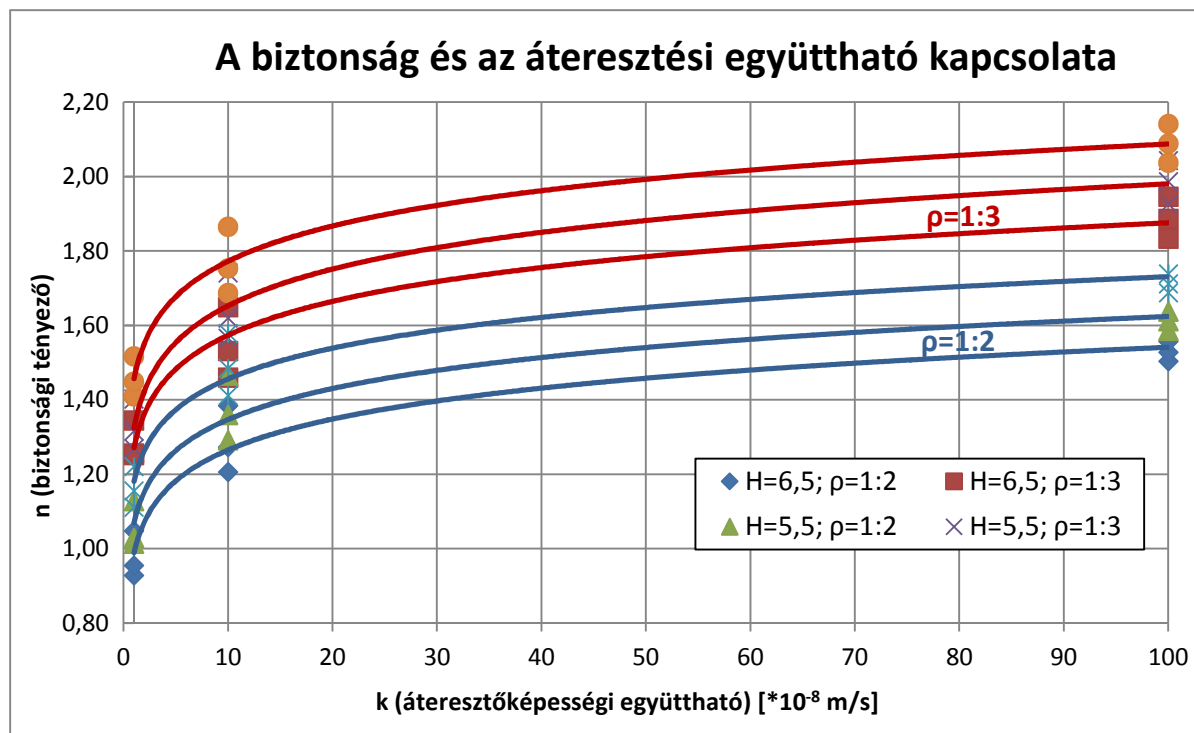
Az alábbi táblázat tartalmazza az állékonysági biztonság értékeket áteresztőképességi együtthatók szerint csoportosítva. Ez $v=75$ cm/nap –os apadásra és $\rho=1:2$ -es rézsűszögre vonatkozik, de a többi érték (apadási sebesség, rézsűszög) esetén is hasonló a tendencia (a teljes táblázatot az 1. sz.: melléklet tartalmazza).

	k [m/s]	Bizt. tény.	Relatív
H=4,5 m	10^{-8}	1,11	-
	10^{-7}	1,41	21,3%
	10^{-6}	1,69	34,1%
H=5,5 m	10^{-8}	1,01	-
	10^{-7}	1,29	21,5%
	10^{-6}	1,59	36,1%
H=6,5 m	10^{-8}	0,93	-
	10^{-7}	1,21	23,0%
	10^{-6}	1,50	38,3%

(5-6. táblázat): Az áteresztőképességi együttható függvényében az állékonysági biztonság alakulása

A „Relatív” oszlopban található értékek a $k=10^{-8}$ m/s áteresztőképességi együtthatóhoz tartozó biztonsághoz viszonyított eltéréseket mutatja. Tehát ha „k” értéke 10^{-8} -ról 10^{-6} -ra változik, akkor közel 35%-os állékonysági biztonság javulást kapunk.

Jól látszódik, hogy az áteresztőképességi együtthatók változása jelentősen befolyásolja a biztonsági tényező értékét. Ugyanis az áteresztőképesség a talaj ellenállását adja meg a vízáramlással szemben, ami pedig visszahat a talajvízszint magasságára, így a kialakult áramlási nyomás nagyságára is. Tehát minél kisebb a gáttest áteresztőképessége, annál kisebb lesz a biztonsági tényező is.



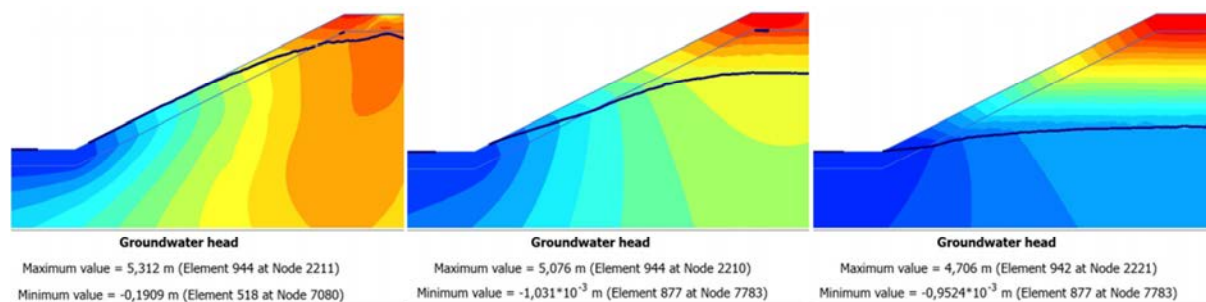
(5-26. ábra): Az állékonysági biztonság és az áteresztési együttható kapcsolata

A fenti grafikon a különböző bemeneti paraméterek esetén mutatja a biztonsági tényező alakulását (5-26. ábra). A vízszintes tengelyről a vízáteresztési együtthatót lehet leolvasni. Az ábrán látható pontokra logaritmikus görbéket illesztettünk. Egy görbe összesen kilenc pontra illeszkedik, mert minden gátnál három apadási sebességet vizsgáltunk ($v=75, 50, 25$ cm/nap).

A pontokra illesztett trendvonal (görbe) akkor a legmegbízhatóbb, ha az R^2 értéke 1-et vesz fel vagy megközelíti azt. Jelen esetben az $0,94 < R^2 < 0,96$ közötti értékeket vett föl, ami azt jelenti, hogy a görbék jól illeszkednek a modellezés során kapott pontokra. Így a vízapadás hatása alatti suvadás esetén a biztonság jól becsülhető.

Jól látszik, hogy a görbék közel párhuzamosak és jól csoportosíthatóak rézsűszög szerint (piros színűek az 1:3-as, kék színűek az 1:2-es rézsűk), illetve ezen belül felülről lefelé az alábbi gátmagasságokat jelentik $H=4,5; 5,5; 6,5$ m, mindkét szín esetén. A geometria hatását a biztonságra már az előző fejezetben ismertettük (5.2 fejezet). Itt viszont megállapítható, hogy az állékonysági biztonság logaritmikusan függ a vízáteresztőképességi együtthatótól.

Ha ugyanolyan geometriájú gátaknál különböző áteresztőképességeket adunk meg, akkor összehasonlíthatjuk a gáttesten belüli talajvíz viszonyokat és ezek hatását az állékonyságra (5-27. ábra).



(5-27. ábra): A vízszint alakulása különböző áteresztőképességű együtthatók esetén

Ekkor azt kapjuk, hogy a különböző talajvízszintek nagyon eltérőek lesznek. Emiatt a potenciálvonalak is megváltoznak, minél magasabban marad a talajvízszint annál nagyobb lesz a potenciálkülönbség a talajvízszint és a körömpont között, a víz annál nagyobb erőt fog áramlása során a talajszemcsékre kifejteni. Valamint az áramlási irány is kedvezőtlenebb lesz. A két véglet között 3,65 m-es potenciálkülönbség van. Így a biztonsági tényező változása (szintén a két szélső ábrák között) 0,58, ami igen jelentős mértékű állékonysági biztonság változást jelent.

Ugyanakkor a telítettségi értékek közel ugyanakkorák a talajvíz fölött (5-7.-9. ábra). Tehát még a $k=10^{-6}$ m/s nagyságrendű áteresztőképességi együttható is elég kicsi ahhoz, hogy a telítetlen talajzóna képes legyen a víz nagy részét a pórusokban tartani. Ezáltal a szívás hatása szinte jelentéktelen. Megemlítenénk, hogy a hazai szakirodalom szerint az árvízvédelmi gátakat ennél ($k=10^{-6}$ m/s) kisebb áteresztőképességű talajból kell építeni.

Tehát minél nagyobb az áteresztőképessége a talajnak, annál nagyobb lesz a gáttest állékonysága a vízdoldali suvadás esetében. Ennek vizsgálatára különösen nagy hangsúlyt kell fordítani, hiszen árvízvédelmi gátjainkat annál jobb minőségűnek tekintjük, minél vízzáróbbak. Azonban ha a gáttest telített lesz, akkor az apadás során a víz (a viszonylag nagy vízzáróság miatt) nem tud kijutni a szemcsék közül, a talajvízszint magasan marad az apadás ellenére és az áramlási nyomás a vízdoldali rézsű tönkremenetelét okozhatja. Ilyenkor a nagy vízzáróság már a gát állékonysága ellen dolgozik.

5.6 Modell eredmények statisztikai vizsgálata

A modellezéseink során beadott bemeneti (H , ρ , k , v) és a kapott kimeneti adatunkat ($n=1,0$ biztonságához tartozó $tg\phi$) statisztikai módszerekkel is megvizsgáltuk. Ehhez az IBM SPSS Statistics 20 program regresszió-analízis funkcióját használtuk.

A regresszió-analízis során egy adott célváltozót: Y ($n=1,0$ -s biztonságához tartozó $tg\phi$ értékét) közelítettünk az általunk megadott független változók (bemeneti paraméterek) egy analitikus függvényével: Y' . A közelítés során a program törekszik rá, hogy az Y és Y' közelítés négyzetes eltéréseinek várható értéke a legkisebb legyen.

Ezen analízis egyik főbb módszere a nemlineáris regresszió. Ezt a módszert főként olyan műszaki alkalmazásokban használják, ahol a lineáris regresszió nem közelíti jól a célfüggvényt. Ilyenkor a paraméterekre nem lineáris egyenletrendszer, hanem általában transzcendens egyenletrendszer (pl. trigonometrikus, exponenciális, stb.) adódik. A program a Levenberg-Marquardt algoritmust használja, mely egy súlyozott gradiens módszer. Kezdetben nagyokat lép, az optimum közelében lelassul, és kisebb elmozdulásokat végez (Ketskeméty L., 2011).

Tehát a bemeneti paramétereinket egy általunk választott transzcendens egyenletbe illesztettük be. Az együtthatókat a program határozta meg a fent említett algoritmus alkalmazásával. A be- és kimeneti adataink alapján 54 esetet tudtunk megadni (ugyanis 54 modelleredmény állt rendelkezésünkre), és a program ez alapján alkotta meg az egyenletet (pontosabban az általunk megadott egyenlet együtthatóit számolta ki). A kapott egyenletet új bemeneti adatokon teszteltük és vizsgáltuk, hogy az így kapott kimeneti értékek mennyiben térnek el a modellezés során kapott értéktől.

Az eltérések viszonylag nagyok voltak (25%-os pontossággal tudtuk megbecsülni az $n=1,0$ -hoz tartozó $tg\phi$ értékét). Ezt a kevés megadott esettel (54 modelleredmény), valamint a „kimerevített adatsorokkal” magyaráztuk. Ha matematikailag korrekt adatsort akartunk volna a programnak megadni, akkor körülbelül 3-400 futtatást kellett volna végeznünk véletlenszerűen megadott bemeneti értékekkel. Így a program pontosabban „betanulta volna” az egyes bemeneti értékek hatását a kimeneti értékre, az ezáltal megalkotott egyenlet kisebb eltérésekkel közelítette volna a modell futtatások alapján számított $n=1,0$ -hoz tartozó $tg\phi$ -t.

A fenti módszer egy olyan tapasztalati képletre vezet, mely az $n=1$ -es biztonságához tartozó $tg\phi$ értékére adhat kellően pontos becslést. Azonban egy ilyen képlet mindenképpen tájékoztató jellegű, mivel a nagy mennyiségű statisztikai adatból általánosított összefüggéseken alapszik. Az állékonyságvesztés pedig minden esetben a leggyengébb gátkeresztmetszetben következik be, így ezen kritikus részek külön állékonyság vizsgálatát, modellezését nem helyettesíti.

5.7 Megoldási javaslatok az állékonyságvesztéssel szemben

Az ezen fejezetben ismertetett eredmények alapján arra jutottunk, hogy a vízdali állékonyságvesztéssel szemben a hatékony védekezést érdemben, a következők biztosítása segíti:

- a) a gát ne telítődjön, azaz ne jusson be a víz a gáttestbe,
- b) illetve, ha már bejutott, akkor apadáskor könnyen ki is jusson onnan.

Az **a)** esetet nem tudjuk garantálni földgátak esetén, csupán annak mértékét lehet befolyásolni különböző burkolatok alkalmazásával. Azonban az ilyen burkolatok mögött a gátba bejutó víz könnyen felduzzad, ami jelentős oldalnyomást eredményezhet. Többek közt ezen okból kifolyólag Magyarországon a gyepesített részü az általános.

A **b)** esetre legjobb megoldásnak a gát szerkezeti változtatása látszik, ugyanis egy agyagmaggal ellátott szemcsés talajból épített gáttest esetén, a külső szemcsés réteg hamar telítődne, azonban a jó vízzáróságú agyagmag meggátolná a víz átszivárgását a mentett oldalra. Ekkor az agyagmag körüli gát rész tulajdonképpen egy támasztó testnek fogható fel, melynek elsődleges szerepe az agyagmag védelme és helyzetének rögzítése.

Az apadás bekövetkezésekor az agyagmag körüli gáttest kis ellenállást fejtene ki a kiáramló talajvízre, így a talajvízszint követni tudná a vízdali apadást, tehát nem alakulna ki nagy potenciálkülönbség, ezzel pedig az áramlási nyomás értéke is jelentősen csökkenne. Ekkor a talajvízszint fölötti a talajréteg telítettsége is kisebb lenne, ami nagyobb kapilláris szívó hatást eredményezne, ami nagyobb állékonysági biztonságot vonna maga után (3.4.2 fejezet).

Látható, hogy a vízdali állékonyságvesztéssel szemben a legjobb megoldás, ha már a gát tervezésekor figyelembe vesszük a kialakulásához szükséges –fent részletezett- paramétereket és ezek hatását.

Tény, hogy a Magyarországi gátak többsége nem a fent említett agyagmagos szerkezettel épült, hanem a korábbi gátkeresztmetszetek bővítéseként. Ebben az esetben a vízdali részü ellaposítása, lábazati kő megtámasztás, illetve szivárgó együttes, vagy külön-külön való alkalmazásával érhetünk el megfelelő állékonysági biztonságot.

Eredményeink nyomán a további vizsgálatok indokoltak. Különös tekintettel az előbb említett hazai gátakra jellemző inhomogén gát szerkezetre, illetve fontos lehet az áradások nyomán jelentkező vízdali feliszapolódás hatásának vizsgálata.

6. Összefoglalás

Dolgozatunkban az árvízvédelmi gátak gyors apadás következtében létrejövő állékonyságvesztés okait vizsgáltuk.

Modellezéseink során igazolni tudtuk a harmadik fejezetben kifejtett tönkremeneteli mechanizmust. E szerint a gáttest vízoldali rézsűje az apadás következtében kialakult áramlási nyomás miatt megy tönkre, ennek jele a suvadás.

Az apadás következtében a vízoldali és a gátban lévő talajvízszint között különbség jön létre, ezért a talajvíz a vízoldal felé áramlik. A talajtömeg kis áteresztőképessége miatt az áramlással szemben nagy ellenállást fejt ki, így a víz nem tud gyorsan és akadály nélkül kiáramlani a szemcsék közül. Emiatt a szivárgás során a víz nagy erővel terheli a szemcsevázat és a talajvízszint, a rendszer tehetetlensége következtében magasan marad a gáttesten belül. Az így létrejött áramlási nyomás a hidraulikus gradienssel arányos. Az áramlás, irányából kifolyólag destabilizáló erőként hat a gáttestre, mire az egy csúszólap mentén lesuvad. Ezen terhelő hatásra a háromfázisú rendszerben megjelenő teherbírás többlet (kapilláris szívás) nincs jelentős hatással.

A tönkremeneteli folyamatra leginkább a vízáteresztési együttható van hatással, ugyanis ez jellemzi a talajtömeg ellenállását az áramló vízzel szemben. Így kijelenthetjük, hogy minél kisebb ez az együttható, annál nagyobb lesz a hidraulikus gradiens és emiatt az áramlási nyomás is. Tehát a magyar szakirodalomban fellelhető, földgátak áteresztőképességi együtthatójára vonatkozó követelmény ($k < 10^{-6}$ m/s), mely árvízvédekezés esetén kedvező, kifejezetten hátrányos ezen állékonyságvesztés szempontjából.

Vizsgálati eredményeink szerint, az apadási sebesség nem befolyásolja ilyen jelentős mértékben a folyamatot, ugyanis hiába a nagy apadási sebesség, ha a talaj jó vízzárósági tulajdonságokkal rendelkezik. Mivel ekkor a talajvízszint egyszerűen nem tudja az apadás sebességét követni.

A fentiek értelmében kijelenthető, hogy ahol ezen paraméterek (úgy mint kis áteresztőképességi együttható, árvíz során telített gáttest, viszonylag gyors apadási sebességek) jelen vannak, ott a gátat vízoldali suvadásra ellenőrizni kell.

Ezen tönkremeneteli móddal szemben az agyagmagos gátszerkezet kialakítása hatékony megoldás lehet. Mivel így a gátmagon kívüli töltésanyag nagy áteresztőképessége folytán kis ellenállást fejtene ki a kiáramló talajvízre, így a talajvízszint követni tudná a vízoldali apadást. A már meglévő gátak esetén a vízoldali rézsű ellaposításával, a lábazat kőszórással való megtámasztásával, vagy szivárgó építésével érhetjük el a megfelelő állékonysági biztonságot.

Kutatási munkánk folytatásaként a modellfuttatásaink számának növelésével, meghatároznánk egy olyan tapasztalati képletet mellyel a gáttest vízapadás hatására bekövetkező állékonyságvesztésének biztonságát becsülni tudnánk. Illetve további modellvizsgálatok útján igazolnánk a fent említett megoldási javaslatok helytállóságát.

Irodalomjegyzék

- Bacscai A. - Dajka I.: Suvadások/ földcsuszamlások okai és védekezésük módszerei. XXIX. Magyar Hidrológiai Társaság (továbbiakban MHT) Vándorgyűlés, Eger, 2011.
- Bear, J - Verruijt, A: Modeling Groundwater Flow and Pollution, 1987.
- Brinkgreve, R. B. J. - Swolfs, W. M. - Engin, E.: PLAXIS 2D Manual. PLAXIS company, Hollandia, 2011. pp. 179-189.
- Czap Z.: Geotechnikai numerikus módszerek. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, egyetemi jegyzet, 2012. pp. 34-43.
- Csikász S.: Folyószabályozás a Közép-Tiszán. Vízügyi Közlemények LXVI. évi 3. füzet, 1985.
- Fredlund, D.G. - Morgenstern, N.R. - Widger, R.A.: The shear strength of unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, 1997.
- Galavi, V.: Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analysis in PLAXIS 2D and 3D. Internal report, 2010. pp. 220-238.
- Imre E.: Az árvízvédelmi gátakban lejátszódó vízáramlás modellezése. Hidrológiai közlöny, 89. évf. 2. szám, 2009.
- Imre E. - Rajkai K. - Firgi T. - Czap Z. - Telekes G.: Telítetlen talajmechanika. Egyetemi jegyzet, 2009. pp. 48-63.
- Kabai I.: Geotechnika I. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2007. pp. 217-232.
- Ketskemény L., - Izsó L., - Könyves T. E.: Bevezetés az IBM SPSS Statistics programrendszerbe, Artéria Stúdió, Budapest, 2011. pp. 174-206.
- Kézdi Á.: Talajmechanika I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1969. pp. 112-145, 270-306.
- Környezetvédelmi- és Vízügyi Minisztérium, Vízügyi Hivatala: Árvízvédekezés a gyakorlatban. 2004. pp. 105-111.
- Lacza I.: A Kiskörei tározó és hatásainak vizsgálata. VITUKI tanulmány, 1982.
- Lacza I.: A Kisköre-Csongrád közötti Tisza-szakasz mederalakulásának vizsgálata. VITUKI tanulmány, 1982
- Laufer I.: Gravitációs elven működő víztartási görbémérő berendezés felépítésének dokumentációja. Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat, Geotechnikai Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2005. pp. 2-13.
- Marton L.: Alkalmazott hidrogeológia. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2009. pp. 146-153, 197-207.

- Nagy L.: A Zagyva jobbpart 1+324-1+350 szelvények közötti töltéskárosodás vizsgálata. VITUKI jelentés, 1985.
- Nagy L.: Az árvízvédelmi gátak geotechnikai problémái, Vízügyi Közlemények. LXXXII. évfolyam, 1. füzet, 2000. pp. 121-146.
- Nagy L.: Vízoldali rézsű csúszása a zagyva jobb partján, Vízügyi Közlemények. LXXXV. évfolyam, 4. füzet, 2003. pp. 631-649.
- Nagy L.: Árvízvédelmi földművek száradási repedése. Mélyépítő Tükörkép Magazin, 2006. pp. 12-13.
- Nagy L.: Hogyan is mennek tönkre az árvízvédelmi gátak? XXVIII. MHT Vándorgyűlés, Sopron, 3. szekció, 22. cikk, 2010.
- Nagy L.: 2009. évi töltésrepedések a Közép-Tisza gátjainál. XXVIII. MHT Vándorgyűlés, Sopron, 3. szekció, 23. cikk, 2010.
- Nagy L.: Buzgárok. XXVIII. MHT Vándorgyűlés, Sopron, 3. szekció, 24. cikk, 2010.
- Nagy L. - Takács A.: A 2010 július 19-i szolnoki partmozgás vizsgálata. XXIX. MHT Vándorgyűlés, Eger, 2011.
- Nagy S.: Az 1980. évi hosszúfoki töltésszakadás és annak máig tartó következményei a Kőrös-Vidéki környezetvédelmi és vízügyi igazgatóságnál. XXVIII. MHT Vándorgyűlés, Sopron, 15. szekció, 2010.
- Nyiri G.: Árvízvédelmi- és völgyzáró-gátak szivárgáshidraulikai modellezése SEEP2D modul alkalmazásával. Szakdolgozat, Geokörnyezetmérnöki szakirány, Műszaki Földtudományi Kar, Miskolci Egyetem, 2011.
- Stelczer K.: Árvízmentesítés, árvízvédekezés. Palotás László - Mérnöki kézikönyv III., Műszaki könyvkiadó, 1985. pp. 4-12, 208-212.
- Szepessy J.: Árvízvédelmi gátak töltésének repedései - kúszási repedés, Hidrológiai Közlöny, 71. évf. 6. szám, 1991. pp. 321-331.
- Szlávik L.: Magyarország árvízvédelmének fejlesztési politikája. VITUKI tanulmány, 2000.
- Töröcsik T.: Árvízvédelem 1. Az árvízi jelenségek és ellenük való védekezés. Önkormányzati és Területfejlesztési Minisztérium Esélyegyenlőségi és Civilkapcsolati Főosztályának a „Civil Partnerség 2007” elnevezésű pályázatra benyújtott oktatási segédlete, 2007. pp. 11-31.
- Varga G. - Czap Z. - Mahler A.: Bevágási rézsűk tartós stabilitása. Dr. Kézdi Árpád emlékkonferencia, BME Geotechnikai Tanszék, Budapest, 2008. pp. 122-132.

Zákányi B.: Gáttesten átszivárgó vízhozam számítási módszereinek összehasonlítása.
Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat, Természettudományi Kar, Eötvös
Lóránd Tudományegyetem, Budapest, 2005.

Mellékletek

1. sz. melléklet: Modellvizsgálatokból nyert eredmények

Biztonsági tényezők megállapítása										n=1-es biztonsághoz tartozó talajparaméterek					
Geometria adatok		Talajparaméterek		Biztonsági tényezők [cm/nap] apadás szerint						75 cm/nap		50 cm/nap		25 cm/nap	
H [m]	ρ	k [m/s]	ϕ [°]	c [kPa]	75	50	25	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]	ϕ [°]	c [kPa]
1.	4,5	1:3	10^{-8}	28	5	1,4094	1,4492	1,5164	21,4	3,6	20,8	3,5	20,4	3,1	3,1
2.	4,5	1:2	10^{-8}	28	5	1,1117	1,1556	1,2211	25,6	4,4	25,0	4,3	24,0	4,0	4,0
3.	4,5	1:3	10^{-7}	28	5	1,6870	1,7535	1,8650	18,0	3,0	17,2	2,9	16,1	2,6	2,6
4.	4,5	1:2	10^{-7}	28	5	1,4119	1,4845	1,5790	20,6	3,5	19,7	3,4	18,6	3,2	3,2
5.	4,5	1:3	10^{-6}	28	5	2,0376	2,0886	2,1413	14,6	2,4	14,3	2,4	14,0	2,3	2,3
6.	4,5	1:2	10^{-6}	28	5	1,6880	1,7117	1,7389	17,5	3,0	17,3	2,9	17,0	2,9	2,9
7.	5,5	1:3	10^{-8}	28	5	1,2690	1,3164	1,4025	23,0	4,0	22,4	3,9	21,2	3,6	3,6
8.	5,5	1:2	10^{-8}	28	5	1,0135	1,0292	1,1278	27,5	4,9	27,0	4,8	25,3	4,5	4,5
9.	5,5	1:3	10^{-7}	28	5	1,5662	1,6198	1,7411	18,8	3,2	18,2	3,1	17,0	2,9	2,9
10.	5,5	1:2	10^{-7}	28	5	1,2913	1,3597	1,4655	22,4	3,9	21,4	3,7	19,9	3,4	3,4
11.	5,5	1:3	10^{-6}	28	5	1,9264	1,9868	2,0433	15,4	2,6	15,0	2,5	14,6	2,4	2,4
12.	5,5	1:2	10^{-6}	28	5	1,5855	1,6113	1,6370	18,5	3,2	18,3	3,1	18,0	3,1	3,1
13.	6,5	1:3	10^{-8}	28	5	1,2561	1,2520	1,3444	25,2	4,0	24,2	4,0	22,8	3,8	3,8
14.	6,5	1:2	10^{-8}	28	5	0,9284	0,9552	1,0480	29,8	5,4	29,1	5,3	26,9	5,0	5,0
15.	6,5	1:3	10^{-7}	28	5	1,4597	1,5317	1,6491	20,3	3,6	19,4	3,4	17,9	3,1	3,1
16.	6,5	1:2	10^{-7}	28	5	1,2061	1,2735	1,3841	23,9	4,0	23,0	3,8	21,5	3,5	3,5
17.	6,5	1:3	10^{-6}	28	5	1,8336	1,8868	1,9463	16,2	2,7	15,7	2,6	15,3	2,6	2,6
18.	6,5	1:2	10^{-6}	28	5	1,5038	1,5281	1,5571	19,5	3,3	19,2	3,3	18,8	3,2	3,2

2. sz. melléklet: Talajfizikai paraméterek

Konzisztencia index ¹	0,76-1,0
Folyási határ ¹	35-40%
Sodrési határ ¹	21-25%
Plasztikus index ¹	15-20%
Nedves térfogatsúly ⁴	20 kPa
Telített térfogatsúly ²	21 kPa
Összenyomódási modulus ²	12,8 MPa
Poisson-tényező ²	0,35
Áteresztőképességi együttható ²	10^{-8} - 10^{-6} m/s
Súrlódási szög ²	28°
Kohézió ⁵	5 kPa

1 Ezeket az értékeket laboratóriumban határozzák meg, a modellezés során nem kell külön megadni, így a fenti adatok egy átlagos természetes állapotú sovány agyagra vonatkoznak.

4 Ezen adatok pontos értékükkel szerepelnek, mivel a modellezéskor mi adtuk meg őket.

5 Ahogy a 4.1.2.1-es fejezetben részleteztük, CD triaxiális nyomókísérletből származó nyírószilárdsági paraméterekkel számoltunk, így ezen kohézió 0-tól különböző értéke csupán a modell megfelelő lefutásához volt szükséges.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megragadni az alkalmat, hogy köszönetet mondjunk konzulenseinknek; Dr Mahler András adjunktus és Dr. Nagy László egyetemi docens uraknak a dolgozat során nyújtott segítségükért, illetve Czap Zoltán mestertanárnak a modellezésben adott útmutatásáért.

Külön szeretnénk még megköszönni Dr. Imre Emőkének a telítetlen talajmechanika megismerésében nyújtott segítségét és Kói Tamás doktorandusznak a statisztikai eredmények feldolgozásában tett javaslataiért.