

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem**

Építőmérnöki Kar

Geotechnika szekció

Tudományos Diákköri Konferencia

2013

Zagytározó gátjának végeselemes modellezése

Szerző: Turai Péter

Konzulensek: Dr. Takács Attila

Dr. Nagy László



TARTALOMJEGYZÉK

Összefoglalás.....	3
Summary.....	4
1. Bevezetés.....	5
2. Zagytározók tervezése és építése Magyarországon.....	6
2.1 Zagytározók fogalma és működése.....	6
2.2 Zagytározók tervezése.....	7
2.3 Zagygátak építése.....	8
3. A kolontári vörösiszap katasztrófa.....	9
3.1 A zagytározó története.....	9
3.2 A terület geotechnikai viszonyai.....	11
3.3 A gát tönkremenetele.....	12
4. Töltések alatti agyagtalajok teherbírása.....	14
5. Végeselemes modellezés.....	15
5.1 Geometriai modell.....	15
5.2 Anyagjellemzők.....	17
5.2.1 Pernyezag.....	17
5.2.2 Vörösiszap.....	19
5.2.3 Gáttest alatti agyagréteg.....	20
5.3 Anyagmodellek.....	21
5.3.1 Mohr - Coulomb modell.....	21
5.3.2 HS small modell.....	23
5.4 Számítási lépések.....	26
6. Eredmények.....	29
6.1 Elmozdulások.....	30
6.2 Pórusvíznyomás.....	36
6.3 Állékonyság-vizsgálat.....	47
7. Összegzés.....	50
8. Köszönetnyilvánítás.....	52
9. Irodalomjegyzék.....	53



ÖSSZEFOGLALÁS

A Kolontári vörösiszap katasztrófa kapcsán a zagytározók és zagygátak biztonságának kérdése a figyelem középpontjába került. Az eddigi, tapasztalati úton történő méretezés miatt a zagygátak lényegesen kisebb odafigyeléssel épülnek, mint például a hasonló méretekkal bíró nagygátak, azonban a tönkremenetelük következményei még jóval nagyobbak lehetnek, a kifolyó veszélyes anyagok miatt.

A zagytározók tervezésénél és építésénél a műszaki problémák halmozottan jelentkeznek. A zagygát anyagául szolgáló ipari melléktermékek fizikai, kémiai tulajdonságai különleges odafigyelést igényelnek. Ráadásul gyakran előfordul, hogy a tározókat valamilyen mezőgazdasági tevékenységre alkalmatlan, puha, kötött agyag talajon létesülnek.

Puha agyag altalajra épített töltések esetén minden esetben nagy hangsúlyt kell fektetni az alaptörés veszélyének vizsgálatára. Ez különösen igaz zagygátak esetében, ahol a tározók gazdasági megfontolások alapján hatalmas geometriai méretekkel épülnek, olyan méretekkel, amelyek az építőmérnöki gyakorlat során nem fordulnak elő a mindennapokban.

Munkám során a PLAXIS 2D nevű geotechnikai végelelemes program segítségével vizsgáltam egy zagytározó gátjának az puha, kötött altalajra gyakorolt hatását. A dolgozat újszerűsége, hogy a szoftver segítségével egy közel 20 éves periódust modelleztem, amely a töltésépítéstől a zagytározó teljes feltöltéséig tart.

A modellezett szerkezet geometriai méreteit és építési ütemezését a hazai gyakorlathoz hasonlóan választottam meg. Az alkalmazott anyagjellemzőket irodalmi ajánlások vagy saját kísérleti eredmények alapján határoztam meg. A gáttest anyagául szolgáló megszilárdult pernyezagy anyagjellemzőinek megismeréséhez laboratóriumi kísérleteket végeztem.

Az építés ütemezését állandóra választottam. Ebből kifolyólag a teherviselő agyagréteg teherbírása a lejátszódó konszolidáció ütemétől függ, vagyis, hogy tud-e a nyírószilárdság olyan ütemben nőni, hogy elviselje a töltésből származó igénybevételt. A konszolidáció idejét a talaj áteresztőképessége nagymértékben befolyásolja. Az agyag altalaj vizsgálatához három féle áteresztőképességi együtthatót használtam, $k = 10^{-8} - 10^{-10}$ m/s értékben. Így a kapott értékekből meghatározhatóvá vált a szerkezet érzékenysége a paraméter változására.

A globális biztonságon túl a süllyedéseket, vízszintes elmozdulást, többlet pórusvíznyomást és konszolidációt vizsgáltam. A dolgozat fontos része a két általam alkalmazott anyagmodell eredményeinek összehasonlítása, az alkalmazhatóságuk vizsgálata.

A kapott eredmények alapján következtetéseket vontam le a szerkezet viselkedéséről, valamint a szerkezet és altalaj kölcsönhatásáról. A modellkísérletekben tapasztaltak alapján megfogalmaztam a témával kapcsolatos további kutatási lehetőségeket.



SUMMARY

In Hungary on 4th October 2010 Ajka Tailings Dam Accident occurred and led to a major environmental disaster. This event has again highlighted the topic of safety placing of different slurries and tailings. To avoid similar accidents, we must expand the exact knowledge of similar embankments.

In my study I've used the finite element method which is considered to be suitable for modeling the complex geometry and the material properties of tailings dams. I used PLAXIS software, which is a finite element program for analyses of stability and deformation of geotechnical structures.

I used a new approach in my study. The raising of the dam and the charging of the magazine was simulated in several stages. I analyzed the stresses, deformations, pore pressure in function of time. I used the finite element method to describe the stress strain behaviour of soils.

In the design of embankments on soft soils using stage construction, soil properties must be determined accurately before construction. The soil parameters of soft soils depend on the size of the loading area and loading intensity so I fixed the schedule of construction. It follows that, the time of consolidation depends on compressibility and permeability parameters. I used different permeability coefficient values, these were $k = 10^{-8} - 10^{-10}$ m/s.

The numerical analyses of the cohesive layers, which was the main focus of the analyses, were performed using the Mohr-Coulomb model and the HS small model. Latter is frequently used in the analysis of geotechnical problems that involve soft soils such as the pannon clay.

An advantage of the finite element method is that once a finite element model is developed it can be easily modified; for example to include future raisings of a tailings dam. It is hoped that, in the future, the finite element method will be used more frequently for the analyses of various geotechnical structures, including tailings dams.



1. BEVEZETÉS

Három éve (2010. október 4-én) történt Magyarország történetének egyik legnagyobb ipari katasztrófája: a MAL Zrt. ajkai vörösiszap-tároló X. kazettájának gátszakadása.

Ez az esemény rávilágított arra, hogy a hasonló szerkezetek viselkedését nem ismerjük kellő mértékig és a monitoring rendszer kiépítettsége sokkal kisebb a szerkezetben rejlő kockázat miatt szükséges szintnél. A jövőbeni műtárgyak biztonságosabbá tételéhez elengedhetetlen, hogy minél pontosabban modellezni tudjuk a zagytározók sajátos jellemzőit.

A zagytározók tervezésénél és építésénél a műszaki problémák halmozottan jelentkeznek. A zagygát anyagául szolgáló ipari melléktermékek fizikai tulajdonságai idegenül hatnak a természetes talajokkal dolgozó mérnökök számára. Emellett a tározott anyagok kémiai tulajdonságai is veszélyforrást jelentenek. Ezek a létesítmények az iparterületekhez közel, minél „értéktelenebb” területen épülnek meg. Gyakran előfordul, hogy valamilyen mezőgazdasági tevékenységre alkalmatlan, puha, kötött agyag talajon létesülnek.

A puha altalajon történő töltésepítés során kétféle földstatikai problémát kell megoldani. Egyrészt a puha altalaj kompresszibilitása, alacsony áteresztőképessége, kúszási hajlama nagymértékű, egyenlőtlen süllyedéseket okoz, ezzel fenyegetve a szerkezet globális állékonyosságát. Másrészt a puha altalaj amúgy is gyenge szilárdsága a süllyedések miatt kialakuló többlet pórusvíznyomás hatására tovább romlik és talajtöréssel fenyeget. (Koch 2012)

Az egyre szigorodó környezetvédelmi szabályok és a közelmúlt eseményei még inkább megkövetelik, hogy kellő biztonsággal tervezzünk meg az épített és természeti környezetre is veszélyes ipari hulladékaink elhelyezésének műtárgyait. Ehhez a jelenkor leggyorsabban fejlődő tervezési módszere, végelemes modellezés lehet segítségünkre. Az eddig alkalmazott, tapasztalati úton történő tervezés gyakran túlméretezéshez, vagy éppen a megfelelő háttérismeret hiánya miatt szerkezeti tönkremenetelhez vezetett.

A következőkben röviden bemutatom a zagygák általános tulajdonságait, tervezési sajátosságukat, továbbá a hazai gyakorlatban is alkalmazott építési módszereket. (2. fejezet) Ezután a szakértői véleményt alapul véve ismertetem a Kolontári vörösiszap katasztrófát (3. fejezet) kitérve az építés folyamatára, az egyedi körülményekre és a tönkremenetel okaira, következményeire. (4. fejezet)

A TDK dolgozat második részében az általam végzett végelemes modellezés-sorozat paramétereit és eredményeit ismertetem. Egy zagytározó gátjának modellezése komplex mérnöki feladat, a valóságnak megfelelő eredmények eléréséhez körültekintően kell eljárni. Az alkalmazott geometria és anyagmodellek nagyban befolyásolhatják a végeredményt, az építéshez használt pernyezagy és a tározott anyagok különlegessége miatt az anyagjellemzők helyes megadása is komoly problémát okoz

Munkám során célul tűztem ki, hogy a zagygák és a puha altalaj kölcsönhatását minél pontosabban modellezem és a kapott eredményekkel kiindulási alapot tudjak nyújtani a zagygákkal kapcsolatos, jövőben felmerülő modellezési, tervezési és kivitelezési kérdések megoldásához.



2. ZAGYTÁROZÓK TERVEZÉSE ÉS ÉPÍTÉSE MAGYARORSZÁGON

2.1 ZAGYTÁROZÓK FOGALMA ÉS MŰKÖDÉSE

A zagytározó gátak, vagy más néven hidraulikus hányók olyan műtárgyak, amelyek ipari hulladékok lerakására és tárolására szolgálnak. Ezekbe a szilárd hulladékokat megadott arányban, vízzel keverve csővezetékeken, hidraulikusan szállítják ki. A szilárd hulladék leülepedik, a szállító vizet pedig újrahasznosítják, vagy semlegesítik.

A kiszállított hulladékok alapján megkülönböztetett tározók:

- salak-pernye tározó
- vörösiszap tározó
- homokmeddő tározó
- bányameddő tározó
- szennyvíziszap tározó
- más ipari hulladék tározói

A zagytározók hét fő részből állnak: a zagyt helyszínre szállító berendezésből, a zagyszeret határoló töltésből, a természetes vízfolyásokat elvezető létesítményből, a beérkező zagyt lerakó, a visszamaradó víz elvezetését szolgáló berendezésből és a különböző mérőeszközökből.

Zagytározók működése során, a csővezetéken odavezetett és kiömlő zagynak (szilárd anyag-folyadék keverék) a csővezeték végén meglévő mozgási energiája hasznosul. Az anyag a tározó pereme mentén jut be a zagytérre, ahol szétterülve a tározó belsejében kialakuló ülepítő tó felé áramlik. A tározó pereme mentén a durvább szemcsék, míg befelé haladva mind kisebb és finomabb szemcsék rakódnak le, ahogyan az áramló zagy sebessége és így a hordalékmozgató erő is csökken. A beömlők alatt, a szilárd anyag szemösszetételétől függően, kis hajlásszögű hordalékkúpok képződnek, amelyek kazetta mentén kialakuló sora a töltésre támaszkodó, befelé igen enyhén lejtős rézsút eredményez. A rézsú hajlásszögét a szétterült folyadék áramlási, illetve a szilárd szemcsék mérettől függő ülepedési sebessége határozza meg. Rövid üzemi állapot után egyensúlyi állapot jön létre. Az üzemelés során a tározott anyag felszíne az egyensúlyi rézsú folyamatos tartásával, önmagával párhuzamosan állandóan emelkedik. (Bán – Turai 2011)

A nagyobb méretű zagyátak száma jelenleg Magyarországon meghaladja a húszat. Ezek egy részének magassága akkora, hogy kiszorítja a nagyátakat a tíz legmagasabb hazai gát listájából. (Nagy L. 2010)

Ezzel ellentétben a zagyátak lényegesen kisebb odafigyeléssel épülnek, mint a nagyátak, azonban a tönkremenetelük következményei még nagyobbak lehetnek, a kifolyó veszélyes anyagok miatt.



2.2 ZAGYTÁROZÓK TERVEZÉSE

A zagygátak a bányászati vagy erőművek közelében kerülnek kialakításra.

Gondos alapozással, előrelátó pontos tervezéssel a zagygátak hosszú időn keresztül biztonságosan üzemeltethetők. A zagygátak tervezésével kapcsolatban számos előírás és jogszabály betartása fontos, de ezek mellett nagy szerepe van a gyakorlati ismereteknek, melyek a tározók kialakításával kapcsolatban felhalmozódtak. (Nagy L. 2011)

Elvárások a biztonságosan működő tározó létesítésével kapcsolatban, hogy olyan módszerek, eljárások alapján történjen a tervezés, mely tartalmazza a következőket (Nagy G. 2011):

Tervezés:

- Lehetséges területek értékelése, a megfelelő kiválasztása geológiai, környezeti, szeizmitási, vízgyűjtő területi stb. szempontok alapján.
- kockázatelemzés, esőzések, árvizek, földrengések lehetőségének figyelembe vétele.
- A gát lehetséges tönkremeneteli mechanizmusainak kialakulását elősegítő körülmények feltárása.
- Gáttípus kiválasztása.
- A zagygát magasíthatóságának megoldása.

Kivitelezés:

- megfelelő minőségű alapanyagok és megbízható technológia alkalmazása az ellenőrzött építés során.

Felügyelet:

- Monitoring rendszer, a szivárgási vonal és a gáttest mozgásainak vizsgálata,
- Környezetvédelmi szempontok betartása.

Nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy egy gondosan megtervezett gát esetében is fennáll a hosszú távú tönkremenetel lehetősége. A rendeltetésszerű használat esetén kialakuló szivárgások és esetleges elmozdulások folyamatos elhárítást, kezelést igényelnek. Mivel a zagytározókban tárolt veszélyes anyagok csak nagyon hosszú idő után semlegesednek, a már meglévő gátak felülvizsgálata és állékonyságuk javítása állandó és hosszú távú feladat.



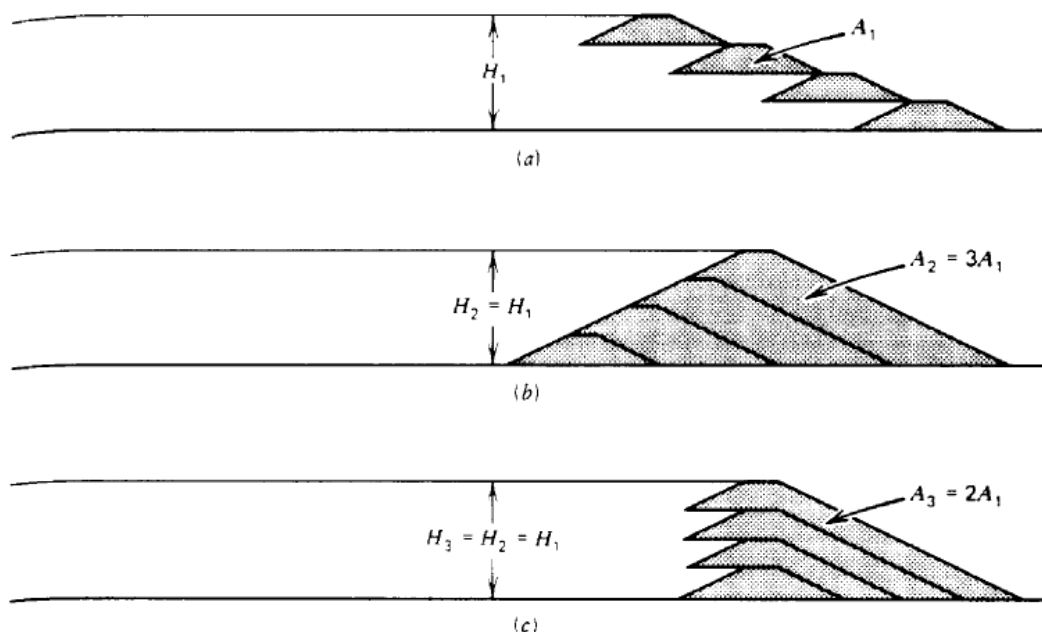
2.3 ZAGYGÁTAK ÉPÍTÉSE

A zagytározókat kialakításuk alapján síkvidéki tározók, domb- és hegyvidéki tározók kategóriába sorolhatjuk.

Síkvidéki tározóknál rendszerint az egész területet körbekerítik és a tározó magasításával párhuzamosan építik a peremét. A domb- és főleg a hegyvidéki tározóval összehasonlítva a tárolt zagy mennyisége alacsony a határoló töltéshez felhasznált anyag mennyiségéhez képest. A Magyarországon létesített tározók többsége ilyen kialakítású.

A zagygátak építési műveletei két nagyobb csoportra bonthatók, az előkészítő munkálatokra és magára a tározóépítési műveletekre. Az előkészítés során a szilárd anyagot vízzel összekeverik, azaz zagynosítanak, majd ezt csővezetéseken az építés helyszínére szállítják. A sűrűzagynos technológia alkalmazása során a szilárd anyag és víz keverési aránya 1:1 körül mozog. A zagy sűrűsége átlagosan $1,25 - 1,70 \text{ g/cm}^3$. A szilárdanyag csővezetéken belüli leülepedésének elkerülése érdekében minimálisan $1,2 - 1,5 \text{ m/s}$ szállítási sebességet kell betartani (www.ccp.e-apbe.ru). Nemzetközi minta alapján az 1980-as években vezették be Magyarországon ezt a technológiát.

Az építés során a zagygátat általában 3 – 5 méteres szakaszokban magasítják és a 20 – 30 méteres magasságot is elérhetik. A gátmagasításra világszerte három módszer terjedt el: a mentett oldali, a középpontos és a zagyoldali magasítás.



1. ÁBRA: ZAGYGÁTAK MAGASÍTÁSÁNAK MÓDSZEREI (VICK 1990)
(A, ZAGY OLDALI; B, MENTETT OLDALI; C, KÖZÉPPONTOS MAGASÍTÁS)



3. A KOLONTÁRI VÖRÖSISZAP KATASZTRÓFA

2010. október 04-én 12.30-kor a Magyar Alumínium ZRt. területén az iszaptároló X. kazetta É-i gátja az ÉNy-i saroknál átszakadt. A gátszakadás következtében 600-700 ezer m³ vörösiszap és víz elegye a Torna patakon keresztül elöntötte Kolontár, Devecser és Somlóvásárhely települések mélyebben fekvő részeit. Az iszap néhol 1,5-2,5-m magasságban borította be a településeket. (2. ábra)

Az iszapár Kolontáron 2 utcában 40 lakóingatlant és 2 önkormányzati épületet, Devecserben 19 utcában 244 lakóingatlant, Somlóvásárhelyen 14 lakóingatlan érintett.

Az üzemi káresemény során 10 ember életét veszítette, és 123 fő szorult kórházi ápolásra.

A kormány 2010. október 6-án *veszélyhelyzetet* hirdetett ki, amelyet később meghosszabbított, Veszprém megyére vonatkozóan 2011. június végéig volt érvényben. A katasztrófát követően közvetlenül az emberi életek mentése, az emberek biztonságba helyezése volt a legsürgetőbb feladat, ezt követte a települések biztonságának garantálása, a gátak megerősítése. Három hónapon belül kiépültek a települések védelmét szolgáló ideiglenes védművek és befejeződött a teljes körű védelmet biztosító létesítmények megépítése.



2. ÁBRA: MŰHOLDPELVÉTEL A KATASZTRÓFA HELYSZÍNÉRŐL (WWW.KATASZTROFAVEDELEM.HU)

3.1 A ZAGYTÁROZÓ TÖRTÉNETE

A magyar bauxitbányászat és a hozzákapcsolódó ipar a XX. század első felében jutott nagy szerephez Magyarországon. Bauxitot először 1920-as években találtak, a harmincas években már timföldgyár és több alumíniumkohó is üzemelt az országban. Az ágazat két nagy földrajzi területre, a Közép-Dunántúlra és a Duna-parti térségre koncentrált.



Az ajkai timföldgyárat 1942-ben helyezték üzembe. A 80-as évek elején évi hárommillió tonna bauxitot termeltek ki az országban. A kibányászott bauxit alumíniummá való feldolgozásának fázisa a timföldgyártás. Magyarországon három timföldgyár volt (a legnagyobb kapacitású Ajka mellett Almásfüzitőn és Mosonmagyaróváron), ebből ma már csak az Ajka melletti működik. Bár a timföldgyártás mára jelentősen, nagyjából évi háromezer tonnára csökkent – az almásfüzitői gyárat el is bontották –, a zagytározók mindenhol megmaradtak.

A tönkrement X. kazetta építésének gondolata már az 1970-es években felmerült.

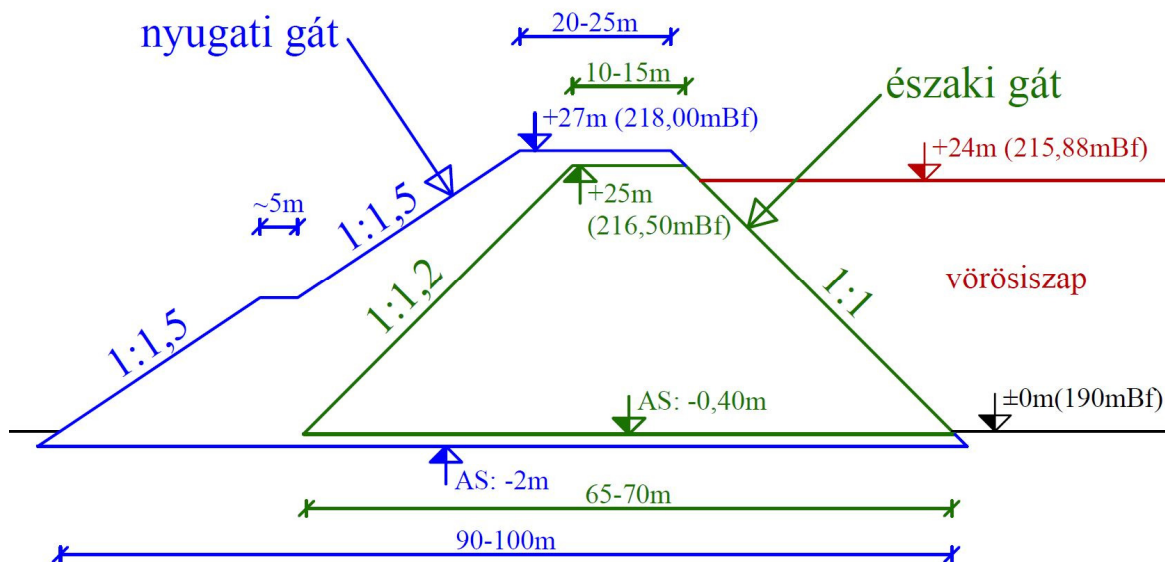
A zagytározó engedélyezési tervét 1984 áprilisában készítették. Mivel a területet az elvégzett telepítési – mérnökgeológiai vizsgálatok, domborzati, talaj-mechanikai (és nem utolsósorban üzemi) szempontból kedvezőtlennek ítélték vörösiszap elhelyezésére, ezért 1983 márciusában a Megyei Tanács állásfoglalása értelmében az üzem a további előmunkálatokat felfüggesztette, azonban a szakmai hatóság kitartott álláspontja mellett, amit szakvéleményekkel támasztott alá. (Farkas – Nagy – Dudás 2013)

Ezután több módosítás is történt a terveken, egy 1985-ös terven már 41,5 – 43,5 méter magas salak-pernye gát megépítése szerepel. A tározóban ebben az esetben mintegy 42 méter magasságban állt volna a vörösiszap. Habár az építést két fázisban tervezték, az eltúlzott gátméretekből következik, hogy az altalajra óriási talpfeszültségek adódtak volna át.

Ezeket a terveket elvetették és az 1990-ben megjelent tervben már újra egy 25 méter magas, 1:1 rézsúhajlású gát szerepelt. Vizsgálták a tározó alatti altalaj szigetelés elkészítésének lehetőségét de a kivitelezéskor nem készült alsó lezárás.

A gátépítést még 1993-ban kezdték a korábbi kazettáknál alkalmazott technológiával. Az első építési ütem 1995-ben fejeződött be a 205 mBf gátkorona szint elérésével. A töltések talpszélessége a terepviszonyoktól és a rézsúhajlástól függően 65 – 70 m között változott (3. ábra). A tároló alapterülete kb. 18 – 19 ha, kapacitása az engedélyezett 216 mBf feltöltési szintig 4,2 – 4,5 millió m³. A gátkorona szintje: 216,5 – 218,5 mBf között változott, a gát magassága 20,2 – 25,7 m, a legmagasabb folyadékszint a gátszakadás napján 215,88 mBf volt. Végül az északi és nyugati gát eltérő keresztmetszettel készült (2. ábra). Az északi gát alapozásának idején a műszaki szándék szerint az csak a kazettákat elválasztó gát lett volna, mert tőle északra új kazetta építését tervezték.

A gyár privatizációja az előző évezred végén volt, utána még jelentős állami környezetvédelmi támogatást kapott a MAL Zrt. a tározókat körbevevő vízzáró fal befejezésére. 1987 – 2001 között 7 szakaszban, mintegy 7400 m hosszban készült vízzáró fal a VI.-X. és X/A kazetták köré. 2010 nyarán a kazetta vízszintjének emelkedésével nyilvánvalóvá vált, hogy az északi gát nyugati vége alacsonyabb, mintegy 400 m hosszon rá kellett tölteni a gátra. A rátöltési vastagsága 0,3 – 1,4 m volt, hogy az eredetileg tervezett magasságot elérjék. 2010. június 30. és augusztus 15. között 5277 m³ anyagot épített be a gát tetejére, gyakorlatilag a később elmozdult gáttest szakaszán. (Farkas – Nagy – Dudás 2013)



3. ÁBRA: ÉSZAKI ÉS NYUGATI GÁT KERESZTMETSZETE (FARKAS – NAGY – DUDÁS 2013)

3.2 A TERÜLET GEOTECHNIKAI VISZONYAI

A katasztrófa után a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem felkért szakértői vizsgálták a területről származó talajmintákat. Az altalaj rétegződésének megismeréséhez a gát környezetében több nagyátmérőjű fúrást készítettek, folytonos magminta vétellel.

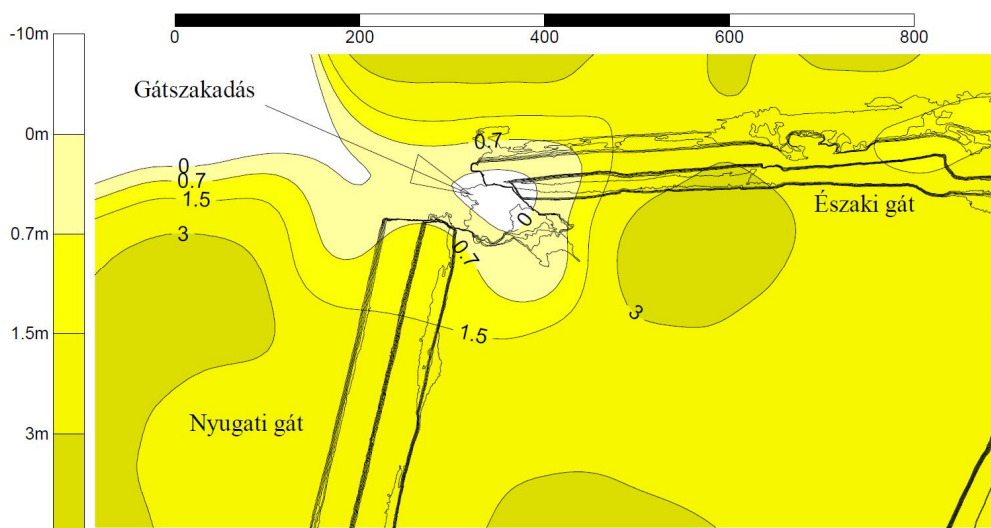
A X. kazetta helyszíne az építés előtt síkvidéki jellegű volt és mezőgazdasági művelés alatt állt. A terepszint 190,5 – 197,5 mBf között változott, 5 – 8 ‰-t Ny-felé lejtett. A X. kazetta területét a Torna-patak keresztezte, így építés előtt a patakot át kellett helyezni.

A terület alapkőzete triász időszakos dolomit, amely 400 – 500 m mélységben található. Erre kréta korú üledék települt, ekkor keletkezett a bauxit és – az időszak vége felé – felette a barnakőszén üledéksor. A tektonikai hatások igen erősek voltak, ÉK – DNY-i csapásirányú törésvonalak szabdalják fel a régiót, ekkor alakultak ki az ún. devecseri árok, amelyekben a Torna-patak is halad. A felszín közelében pannon rétegek vannak, ennek egyik masszívan megjelenő rétege az a kéesszürke (helyenként zöldesszürke) agyag, amelynek fontos szerepe volt a gátszakadás kialakulásában. Erre negyedidőszaki képződmények, többnyire vékony, fiatal, völgytalpi üledék települtek. (Farkas – Nagy – Dudás 2013)

A tározó alatt a kéesszürke agyagrétegre változó vastagságban (0,4-9,4m) szemcsés üledék rakódott. Három jól elkülöníthető réteg figyelhető meg, amelyek a Torna-patak üledékéből származnak. Ezek homokos-iszap, durva homok, homokos-görgeteges kavics, különböző vastagságban. A szemcsés üledék a legnagyobb vastagságát a Torna-patak völgyében éri el.



Ez a szemcsés üledék a tározó egész területe alatt összefüggően megtalálható volt, azonban eltérő vastagságban. A X. kazetta É-i és Ny-i gátjának találkozásánál a sarok alatt – ahol a gátszakadás történt – csupán 30 – 50 cm volt az agyag feletti szemcsés réteg. Ezt a réteget a gát alapozásakor szinte teljesen el is távolították, így a tönkremenetel helyén a gáttest közvetlenül a kékecsszürke agyagra épült. (4. ábra)



**4. ÁBRA: A SZEMCSÉS ÜLEDÉK VASTAGSÁGA A KÉKESSZÜRKE AGYAGRÉTEG FELETT
(FARKAS –NAGY –DUDÁS 2013)**

3.3 A GÁT TÖNKREMENTELE

Mivel a rideg anyagú salak-pernye töltés merev testként viselkedett csak minimális húzó igénybevétel felvételére volt képes, ezért a töltés több helyen eltört. A rideg anyag nem bírta ki a csavarási igénybevételt az elmozdult gáttest két végén repedések alakultak ki. (5. ábra) A gát alatti statikus talajtörés bekövetkezését egyértelműen bizonyítja a sérült gátszakasz előtti „agyagkinyomódás”, felpúposodás is. A külső gátláb vonala előtti terepszint mintegy 8 – 10 m szélességben összerepedezett, és 1,5 – 2,3 m-rel magasabbra került. Ez egyértelműen a gát alatti kékecsszürke agyag „kinyomódására” utal. (Farkas –Nagy –Dudás 2013)

A katasztrófa okát több tényező egyidejű jelenléte okozta. Fontos megemlíteni, hogy a tározott vörösiszapból szivárgó nátronlúg hatására az agyag altalajban ioncsere jött létre, amely hatására nagymértékben tovább romlott az altalaj amúgy is gyenge nyírószilárdsága.



5. ÁBRA: AZ ELMOZDULT ÉSZAKI GÁTSZAKASZ (FOTÓ: TAKÁCS ATTILA)

Farkas és társai (2013) a gátszakadás fő okaként a gát alatti kövér agyagban létrejövő nyírószilárdság csökkenést, illetve a nyírófeszültség – tárolt zagy szintjének emelkedése miatti – megnövekedését, a gát alatti talajtörés bekövetkezését, a gát alatti talaj kifelé mozgását, a gátláb előtti talajfelszín megemelkedését, ezzel egyidejűleg a gát belső részének a süllyedését, a csak minimális húzóigénybevétel felvételére képes, az ÉNy-i saroknál jelentős igénybevételeket elszenvedő gátanyag megrepedését jelölték meg. (5. ábra)

A nyírószilárdságot csökkentő semleges feszültségek már a gátépítéskor keletkeztek. A problémát az jelentette, hogy a gáttest tömegéből fakadóan nagy talpfeszültségek adódtak át az altalajra, amelyben a kékesszürke agyag alacsony áteresztőképessége miatt a konszolidáció csak lassan játszódhatott le. A konszolidáció csak kis mértékben következett be, amikor megkezdték a tározó feltöltését. A vörösiszap hidrosztatikus nyomásának hatására a pórusvíz mozgása a gát belső oldalán akadályozva lett és csak a külső – mentett – oldal irányában távozhatott. Ezzel megnőtt az áramlási úthossz és a konszolidációs idő. A pórusvíznyomás jelenléte nagyban csökkent a talaj nyírószilárdságát, így fontos szerepet játszott a gát állékonyságában. Ez különösen igaz a tönkremenetel helyére, ahol – az előzőekben leírt módon – a gátsarok alatt hiányzott a szemcsés fedőréteg, amely a pórusvíznyomás „leépülését” elősegíthette volna.



4. TÖLTÉSEK ALATTI AGYAGTALAJOK TEHERBÍRÁSA

Puha agyag altalajra épített töltések esetén minden esetben nagy hangsúlyt kell fektetni az alaptörés veszélyének vizsgálatára. Ez különösen igaz zagygátak esetében, ahol a tározók gazdasági megfontolások alapján hatalmas geometriai méretekkel épülnek, olyan méretekkel, amelyek az építőmérnöki gyakorlat során nem fordulnak elő a mindennapokban.

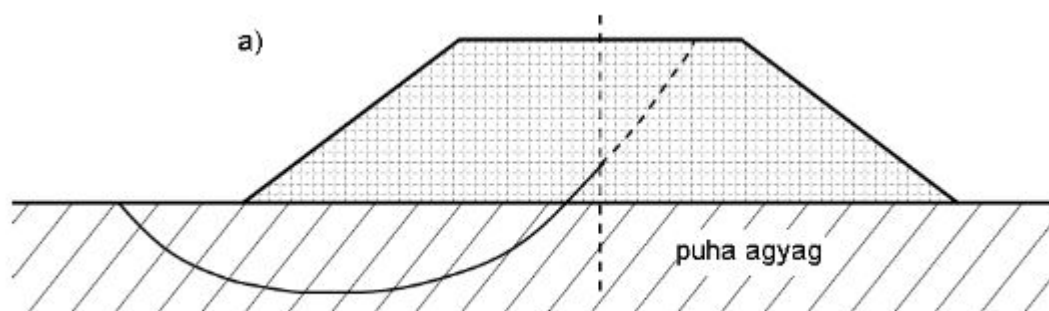
Az alaptörés oka, hogy a kedvezőtlen altalaj kitér a gyorsan felhordott terhelés alól, mivel az építés előtt meglévő nyírószilárdsága nem elegendő a töltésből származó terhelés elviselésére és a nyírószilárdság időbeli növekedése (ami a konszolidáció gyorsaságától függ) lassúbb, mint a nyírófeszültség növekedése (ami az építés ütemének gyorsaságától függ). Meg kell jegyezni, hogy a konszolidációs feszültség nagysága is befolyásolja, ez által a nyírószilárdság növekedési ütemére az építés üteme is hat. (Rémai 2012)

$$c_{u,0} + \Delta c_u(t) = c_u(t)$$

Ahol $c_{u,0}$ a kezdeti drénezetlen nyírószilárdság, $\Delta c_u(t)$ a nyírószilárdság időbeli növekménye, $c_u(t)$ a nyírófeszültség időbeli növekedése.

A telített agyag talajon épült nagyméretű töltés esetén az altalaj gyenge szilárdsága stabilitásvesztéssel: talajtöréssel, elcsúszással, kipréselődéssel fenyeget.

A kialakuló talajtörés típusa, vagyis a csúszólap formája az altalaj rétegződésétől függ. Homogén agyag talaj esetén ez általában kör alak, mélyreható, a rézsúláb előtt kimetsződő (alámetsző) csúszólap jön létre. Ez az terhelés miatt létrejövő pórusvíznyomás hatására alakul ki, amely a talaj nyírószilárdságát tovább csökkenti. (6. ábra) (Varga 1986)



6. ÁBRA: PUHA, HOMOGÉN ALTALAJBAN LÉTREJÖVŐ NAGYMÉLYSÉGŰ CSÚSZÓLAP (FARKAS 2006)



5. VÉGESELEMES MODELLEZÉS

Az utóbbi évtizedek egyik leglátványosabban terjedő, nagy hatékonyságú számítástechnikai módszere az úgynevezett végeselemes modellezés. Napjainkban a mérnöki tervező munka szinte elképzelhetetlen az alkalmazása nélkül, a tapasztalati úton történő méretezést hatékonysága miatt szinte teljesen kiszorította a gyakorlatból. A számítástechnikában beálló gyors fejlődés hatására, a számítási kapacitás növekedésével, korábban kivitelezhetetlen bonyolultságúnak tűnő mérnöki feladatok is megoldhatóvá váltak.

A geotechnikai tervezésben is előtérbe került a módszer alkalmazása és a grafikai felületen történő modellezés egyszerűsödése, valamint az egyre pontosabb anyagmodellek megjelenése lehetővé tette a geotechnikai végeselemes módszert alkalmazó programok elterjedését.

Munkám során a PLAXIS 2D nevű geotechnikai végeselemes program 2011-es verzióját használtam. A szoftver segítségével egy, az ajkai tározóhoz hasonló műtárgy modelljét készítettem el. A program nagy előnye, a klasszikus számításokhoz képest, hogy a modellen belül tudjuk kezelni a teherbírási és a használhatósági határállapotokat is. Mindezt úgy, hogy közben figyelembe vesszük az építési fázisokat, konszolidációt, elmozdulásokat, terhelésnövekedést, esetleges tehermentesítést és minden fázisra vonatkozóan meghatározhatjuk az állékonysági biztonság értékét.

A modell elkészítésének nem a 2010-es katasztrófa reprodukálása volt a célja, hanem egy hasonlóan nagy méretekkel bíró zagygát és az általa kölcsönhatásának megismerése. A mérnöki tervezés fontos alapköve, hogy a múltbeli hibáinkból tanulva megelőzzük a hasonló események bekövetkezését.

5.1 GEOMETRIAI MODELL

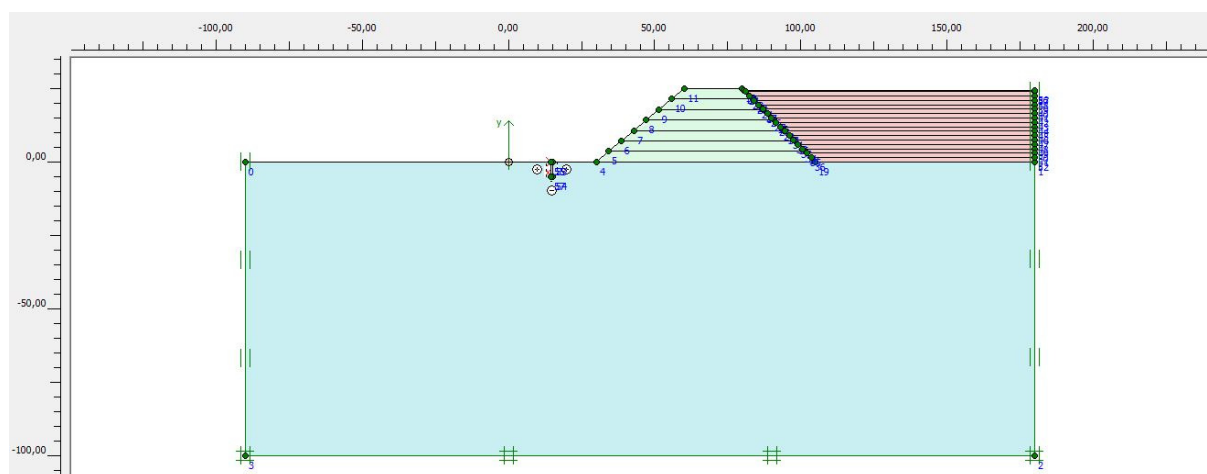
A geotechnikában használt végeselemes programok általában vonalas létesítmények egy-egy szelvényének modellezésére alkalmasak (síkbeli 2D modell). Természetesen ma már lehetőség van térbeli, 3D modell elkészítésére is.

Az általam és a tervezők többsége által is használt 2D modell akkor ad helyes eredményt, ha a modellezett szelvény jellemzői a lényeges méreteinek 4-5-szörösével azonos hosszban változatlanok (Koch 2012). Egy zagygát esetében ez általában teljesül.

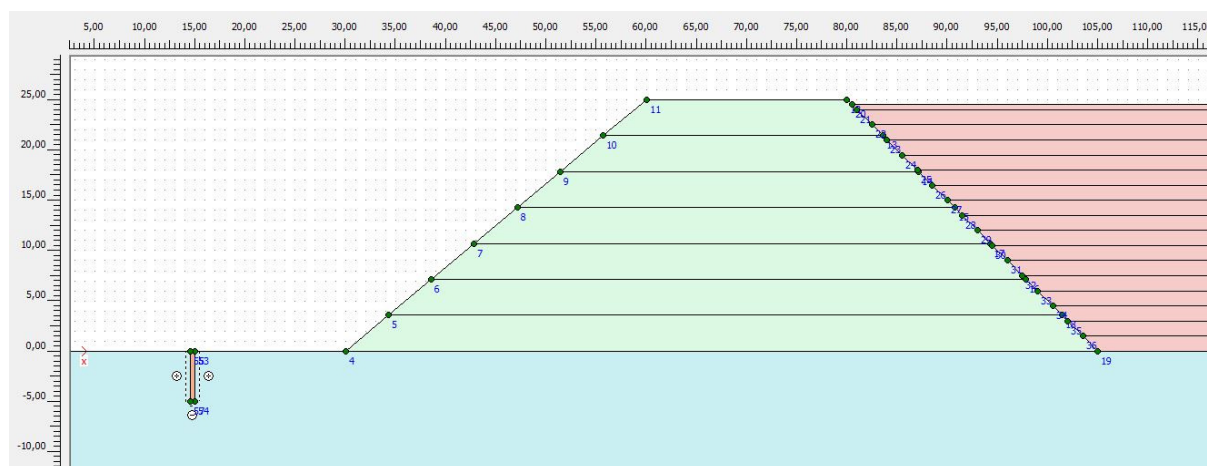
Végtelen féltér helyett, egy zárt tartományt vizsgálunk. Az általa modellezésénél a tartományok felvételét (határoló doboz nagyságát) úgy kell elvégezni, hogy a töltés alatt létrejövő folyamatok szabadon lejátszódhassanak, azokat ne befolyásolják a modell határai. Ez az úgynevezett peremzavar minimalizálása. Természetes lehatárolást jelenthet egy merev réteg – alapkőzet jelenléte.



Az általam alkalmazott geometriai modellt a 7. ábra és 8. ábraán látható.



7. ÁBRA: TELJES GEOMETRIAI MODELL



8. ÁBRA: A GÁTTEST KERESZTMETSZETE A VÍZZÁRÓ FALLAL

A modellben elhelyezett gáttest magassága 25 méter, a zagydali rézsű hajlásszöge 1:1, míg a mentett oldali rézsű 1:1,2 arányú. A gát talpszélessége 70 m. Ezek a méretek megfelelnek egy hazai zagygát átlagos adatainak.

A gáttest – a valóságnak megfelelően – nem egyszerre épül fel, az építési fázist 7 részre bontottam, melyek egy-egy évnek felelnek meg. A vörösiszap feltöltése szintén részletekben történik a gátépítés megkezdése után, azonban még annak befejezése előtt.

A „doboz modell” határait – a peremzavarok minimalizálásának érdekében – a gáttesttől messze, a mentett oldalon 120, a zagytér oldalán 80 méterre állapítottam meg. A modelltér mélysége - 100 méter. Ezek az értékek elsőre eltűzottnak tűnhetnek, azonban figyelembe véve a gáttest 70 méteres talpszélességét, indokoltá válnak.

A mentett oldalon a gát talpától 15 méter távolságban, 5 méter mélységig egy vízzáró fal került elhelyezésre.



5.2 ANYAGJELLEMZŐK

A végeselemes modellel meghatározott végeredmény pontosságát szinte teljes mértékben a bemenő adatok befolyásolják. A gyakorlatban azonban sokszor nincs lehetőség megfelelő laborkísérletek elvégzésére, amelyekből a szükséges talajparaméterek – anyagjellemzők rendelkezésre állnának.

Ez kiváltképp igaz olyan különleges anyagok esetén, mint a gáttest anyagául szolgáló pernyezagy, vagy a tározott vörösiszap. Az általam készített modellben, a talajparamétereket laboratóriumi vizsgálatok eredményei, valamint irodalmi ajánlás alapján vettem fel.

5.2.1 PERNYEZAGY

Szén égetésekor szilárd és gáz halmazállapotú hulladékok keletkeznek. A tüztér alján gyűlik össze a hamu és a salak, míg a pernyét a kazánok füstgázaiból a porszerű részecskék elektrosztatikus vagy mechanikus leválasztásával nyerik. Általában szürke színű, koptató, tűzálló és többnyire lúgos anyag.

A száraz pernye szemcsés anyagnak tekinthető. Így tulajdonságait elsősorban a szemcsés talajokkal (homok, homokliszt) lehet párhuzamba állítani. Depóniába való lerakása után azonban a bázikus jellegű zagy megszilárdul, és ezáltal jelentősen megváltozik az anyag szerkezete. Minél magasabb a zagy szabad mésztartalma annál erősebb kötés alakul ki a szemcsék között.

A zagy szilárdulása kémiai és ásványtanilag is komplex folyamat. A nagy fajlagos felületű pernyéből a vízzel való keveredés során a szabad kalcium-oxid komponens kalcium-hidroxiddá ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) alakul, amely a pernye szilícium- és alumíniumtartalmú ásványi anyagaival reakcióba lépve kalcium-szilikát-hidrát, illetve kalcium-alumínát-hidrát ásványfázisokat alkot.

A Budapesti Műszaki Egyetem 1995-ben vizsgálta a Mátrai Erőmű pernyéjét. Az anyag tömörségének vizsgálatához olyan keveréket állítottak elő, amellyel a hidraulikus szállítás folyik, és az így keletkezett szuszpenziót ülepítették. Terhelés nélkül az anyag hézagtenyezője $e = 1,8$ -ra adódott, míg 200 kPa terhelés esetén a hézagtenyező $e = 0,94$ -re csökkent. Érdemes megemlíteni, hogy az $e = 1,8$ hézagtenyező mintegy 69%-os tömörségi foknak felel meg, míg az említett terhelés hatására további 25%-os tömörségi fok javulás érhető el. Ezek az eredmények arra vezettek, hogy a zagy ülepítése során minden külső beavatkozás nélkül, mintegy 70%-os tömörségi fok áll elő, míg viszonylag nagy statikus terhelés hatására további 25%-os javulásra lehet számítani (Bán – Turai 2011).

Hazai viszonylatban az Ajkai és az Inotai Hőerőműben keletkezett salak-pernye tartalmaz nagy mennyiségű szabad CaO-t, amely hidraulikus kötő tulajdonságokat kölcsönöz az anyagnak. Ennek megfelelően ezen anyagnak amellett, hogy nagyjából azonos fizikai jellemzőkkel rendelkezik, mint a többi hőerőműben keletkező anyag, hidraulikus kötőképesége folytán igen jelentősen megnő a nyírószilárdsága. Belső súrlódási szöge a 40° -ot is elérheti, kohéziója pedig 50 kPa is lehet. Összenyomódási modulusa pedig az 50 MPa-t is elérheti. (MÉLYÉPTERV 1984).

Munkám során laboratóriumi kísérleteket végezve vizsgáltam a megszilárdult pernyezagy szilárdsági és talajfizikai jellemzőit. A rendelkezésemre álló magminták egy zagolt technológiával, nagyjából 20 évvel ezelőtt épült gáttestből származtak. A próbatesteken egyirányú nyomó, közvetett húzó (brazil) vizsgálatot, víztartalom, térfogatsűrűség és anyagsűrűség mérést végeztem. (9. ábra)



9. ÁBRA: MEGSZILÁRDULT PERNYEZAGY PRÓBATESTEK (FOTÓ: TURAI PÉTER)

A mérési eredmények igen széles spektrumon mozogtak. Az átlagos nyomószilárdságára 177 kPa, míg az átlagos húzószilárdságra 67 kPa adódott. A Mohr-köröket megrajzolva az anyag paraméterei: $\varphi = 26^\circ$, $c = 54$ kPa-ra adódtak (29 próbatesten elvégzett kísérlet alapján)

A próbatestek nedves térfogatsűrűsége átlagosan $1,45 \text{ g/cm}^3$ lett, az érték az anyagsűrűség esetén átlagosan $\rho_s = 2,37 \text{ g/cm}^3$.

A zagytározók állékonysága szoros összefüggésben van az őket alkotó zagyok tulajdonságaival. Ezek közül is kiemelkednek a szilárdsági jellemzők, amelyek döntő jelentőséggel bírnak a stabilitási kérdésekben. Bár a talajok és kőzetek közti határ meghúzására nem létezik egyértelmű mérőszám, a szilárdság alapján történő osztályozás alapján a pernyezagy a kemény talajok kategóriájába sorolható.



5.2.2 VÖRÖSISZAP

A vörösiszap az alumínium előállítás során használt eljárás (timföldgyártás) mellékterméke. Amikor a nyersanyagból, a bauxitból lúggal kivonják az alumíniumtartalmú anyagokat, az ekkor visszamaradó maradék a nátronlúg oldattal alkotja az úgynevezett vörösiszapot. A nevét az iszapszerű állagáról és a színéről kapta, amit a bauxitban jelenlevő vas-oxid okoz.

A vörösiszap átlagosan 24-45 százaléka vas-oxid, de egyéb fémvegyületeket (alumínium-oxidot, titán-dioxidot, szilícium-dioxidot, nátrium-oxidot és kalcium-oxidot is tartalmaz. Egy százalék alatti mennyiségben gallium-, vanádium- és ritkaföldfém-oxidok is találhatóak benne. Ezen kívül maró hatású nátrium-hidroxidot tartalmaz az iszap. A vörösiszap nehézfém-tartalma hétszerese az átlagos talajoknak. A vörösiszap nem mérgező, de a benne levő maradék nátronlúgtartalom miatt veszélyes anyag. A veszélyes jelleget a feldolgozás során belekerülő nátrium-hidroxid (nátronlúg) okozza. Az Ajkán tárolt vörösiszapok jellemzően 5-8% nátronlúgot tartalmaznak. (www.vorosizsap.bm.hu)

A magyar vörösiszap nagyon kis szemcseátmérőjű anyag, 70%-a kisebb 5 μm -nél. Fajlagos felülete 15-30 m^2/g , sűrűsége 3,0-3,5 g/cm^3 .

A vörösiszapot 100 – 150 g/l szárazanyag tartalmú iszapra hígítva híg zagyként, hidraulikus szállítással, zárt csővezetékben juttatják a tárolás helyszínére. Ezen tulajdonsága miatt kézen fogható lenne a sűrű folyadékként való modellezése. Erre a PLAXIS programban nincs lehetőségünk, de nincs is szükség, mivel a modellben a vörösiszap mint terhelő tömeg foglal el fontos szerepet, mind a gát, mind az altalaj irányában.



10. ÁBRA: KISZÁRADT VÖRÖSISZAP (FOTÓ: TAKÁCS ATTILA)



5.2.3 GÁTTEST ALATTI AGYAGRÉTEG

Összességében elmondható, hogy a puha altalaj kompresszibilitása, csekély áteresztőképessége, kúszási hajlama nagymértékű, időben akár évtizedekig elhúzódó süllyedéseket okozhat, gyenge szilárdsága pedig stabilitásvesztéssel fenyeget. (Koch 2012)

Magyarországon a pannon agyag széles körben megtalálható a felszín alatt. Keletkezése a Pannon-tó medrében, körülbelül 6 millió éven át tartott, 5,4 millió évvel ezelőttig. (Császár 2005) Ez a talajtípus már tapintás útján is könnyen felismerhető. Az agyagok azonosítására használt plasztikus indexének átlagos értéke $I_p = 43\%$, ami a kövér agyagok osztályába sorolja ($I_p > 30\%$). Az agyag víztartalma nagyban változhat, de általában 25-30% körüli, nedves térfogatsűrűsége átlagosan $1,9 - 2,1 \text{ g/cm}^3$.

A gátszakadás helyén feltárt kéesszürke agyag a plasztikus indexe alapján közepes és kövér agyagnak minősíthető ($I_p = 34-54 \%$). Felső része könnyen sodorható; mélyebben merev állapotú. Helyenként meszes, mészkőtörmeléket, ritkán kavicsbetelepülést tartalmaz. A függőleges vízáramlás szempontjából vízzárónak tekinthető. A kéesszürke agyagban a CPT szondaellenállás $q_c = 0,1 - 3,0 \text{ MPa}$ közötti értékű a terepszint alatti 14,8 m-es mélységig; meglehetősen alacsony érték, ami a mélységgel szinte nem is változott. Ennek megfelelően a nyírószilárdsági paraméterek és az összenyomódási modulus is alacsony volt. (Farkas-Nagy-Dudás 2013)

Az agyagtalajok tulajdonságait döntő mértékben befolyásolja az áteresztő képesség (k) értéke. Ez hazai viszonylatban $k = 10^{-8} - 10^{-12} \text{ m/s}$ lehet agyagok esetében. Ez nagyban függ az agyagszemcsék átmérőjétől, alakjától, irányultságától, a hézagok mennyiségétől és a telítettségi viszonyoktól.

1. TÁBLÁZAT: HAZAI TALAJOK ÁTERESZTŐKÉPESSÉGE (NAGY 2011)

k [m/s]	10 ⁻⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
Vízvezetés	nagyon jó				jó				rossz			vízzáró	
Talaj megnevezés	görgeteg	kavics	kavicsos homok	kavicsos homok – homok – homokliszt – iszapos homok				iszap	agyag				

Elmondható, hogy a $k = 10^{-11} \text{ m/s}$ áteresztőképességgel rendelkező kötött talajok már vízzárónak tekinthetők.

A modell elkészítésénél az áteresztési tényező értékét kiemelten fontosnak kezeltem, hiszen ez befolyásolja a pórusvíznyomás többlet leépülésének gyorsaságát. Ez a talajjellemző döntően befolyásolja egy, az ajkaihoz hasonló, közvetlenül agyagra épült töltés tönkremenetelét.

A „ k ” értékével, bemenő input adatként kezelve érzékenység vizsgálatot végeztem, a töltés állékonyság és a pórusvíznyomás értékeinek függvényében.



5.3 ANYAGMODELLEK

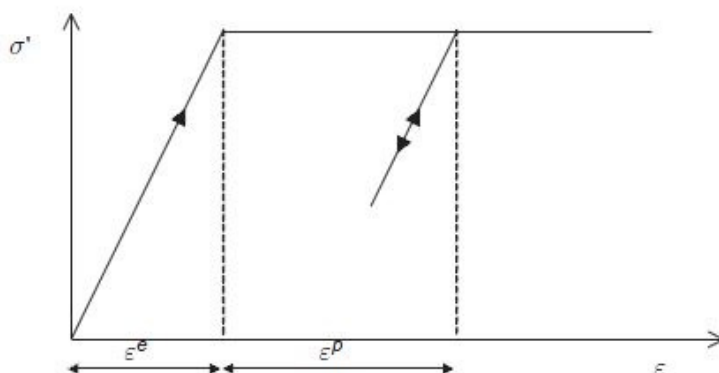
A geotechnikai végeselemes programok többféle anyagmodellt tartalmaznak, amelyek közül több is megfelelő a töltések alatti puha talajok vizsgálatára.

A leggyakoribb anyagmodellek:

- Rugalmas modell
- Mohr – Coulomb modell
- Puha (Cam-Clay) modell
- Felkeményedő (Hardening) és HS small modell

5.3.1 MOHR - COULOMB MODEL

Ez a modell a hagyományos számításokból is alkalmazott, lineárisan rugalmas, tökéletesen képlékeny viselkedést leíró anyagmodell, melyben a képlékenységi feltétel a Coulomb törvény.



11. ÁBRA: LINEÁRISAN RUGALMAS, TÖKÉLETESEN KÉPLÉKENY ANYAGMODELL (PLAXIS 2011)

A Mohr-Coulomb az egyik legegyszerűbb talajmodell, a talaj feszültség-alakváltozás görbét lineáris összefüggésként kezeli, azaz a talaj alakváltozási tulajdonságait – a feszültség szinttől függetlenül a rugalmassági modulussal és a Poisson tényezővel írja le. (Brinkgreve 2011)

A valóságban a talaj rugalmassági modulusa függ a feszültség szinttől, vagyis a nő az értéke a mélység függvényében. Alakváltozások tekintetében azzal javítható a modell, hogy mélységgel változó rugalmassági modulus adható meg, egy rugalmassági növelő tényező segítségével (E'_{inc}).

$$E(y) = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{inc} \quad (y < y_{ref})$$

Ahol E_{ref} az y_{ref} referencia mélységhez tartozó rugalmassági modulus értéke.

Az MC-modell egyik legnagyobb gyengéje az, hogy a folyási feltételként is a Coulomb-féle feltételt használja, azaz úgy tekinti, hogy míg a feszültségek nem elérik ki a Coulomb-féle feltételt, addig a talaj rugalmasan viselkedik, illetve a feltétel teljesülése után képlékeny alakváltozásokat szenved. Valójában a talajok viselkedésére ezek a feltevések nem helyesek.



A tapasztalat szerint a modell mégis jó eredményeket ad monoton tehernövekedések esetén, ha jól választjuk meg a terhelési tartományhoz tartozó ödométeres modulusokat.

A modell legnagyobb előnye – ellentétben az összetettebb számításokkal – hogy a szükséges input paraméterek a széles körben elterjedt, egyszerű talajmechanikai vizsgálatokkal megkaphatóak. A számításhoz szükséges öt paraméter:

E – Rugalmassági vagy Young modulus [kPa]

ν – Poisson tényező [-]

c – Kohézió [kPa]

φ – Súrlódási szög [°]

ψ – Dilatációs szög [°]

Amennyiben ödométeres vizsgálati eredmények állnak rendelkezésre, a merevség megadására szolgáló rugalmassági modulus helyett használható még – a már korábban említett – E_{oed} – összenyomódási modulus, amelyből a program az E – rugalmassági modulus értékét a következő képen számítja:

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}$$

A TDK dolgozathoz készült számításban a pernyezagy gáttest és a vörösiszap modellezéséhez is Mohr-Coulomb anyagmodellt használtam.

Az agyag altalaj elkészítéséhez két különböző anyagmodellt alkalmaztam, hogy még pontosabban meghatározhatóak legyenek az elmozdulások és a pórusvíznyomás értéke. Az MC modellben alkalmazott bemenő adatokat a 12. ábra tartalmazza:

Stiffness		
E'_{inc}	kN/m ² /m	200,0
γ_{ref}	m	0,000
Property	Unit	Value
Material set		
Identification	Agyag	
Material model	Mohr-Coulomb	
Drainage type	Undrained (A)	
Colour	RGB 120, 214, 222	
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	21,00

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	2333
$\nu' (nu)$		0,4000
Alternatives		
G	kN/m ²	833,3
E_{oed}	kN/m ²	5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	50,00
$\varphi' (phi)$	°	8,000
$\psi (psi)$	°	0,000
Velocities		
V_s	m/s	20,21
V_p	m/s	49,50

12. ÁBRA: AGYAG ALTALAJ BEMENŐ ADATAI MOHR-COULOMB MODELLBEN



5.3.2 HS SMALL MODEL

A HS small modell a felkeményedő talajmodellt azzal egészíti ki, hogy nagyon kis alakváltozások tartományában merevebb talajviselkedést vesz figyelembe. (De Vos 2006)

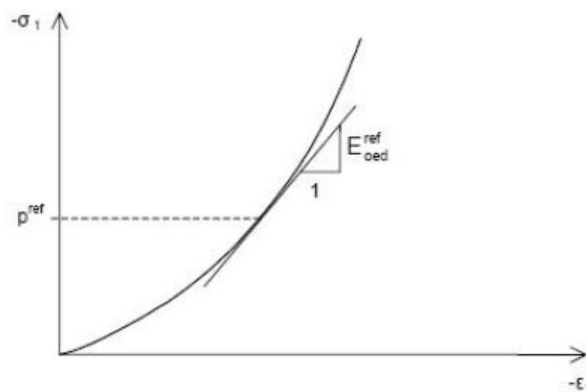
A modell alapvető jellemzője, hogy hatványfüggvényekkel veszi figyelembe a feszültségnek a talajmerevségre gyakorolt hatását. (13. ábra) Ezt a modell az

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \cdot \left(\frac{c \cdot ctg\varphi - \sigma'_1}{c \cdot ctg\varphi + p^{ref}} \right)^m$$

összefüggéssel (Plaxis Manual 2011) írja le, ahol:

E_{oed}^{ref} a referencia feszültséghez tartozó összenyomódási modulus,

m kitevő a merevségnek a σ'_1 feszültségtől való függést írja le.



Az ödométeres vizsgálattal nyerhető kompressziós görbék feszültség tengely felé való görbülése, tehát az összenyomódási modulus feszültséggel való növekedése, lényegében felkeményedést jelent.

13. ÁBRA: TALAJ VISELKEDÉSE ÖDOMETRIKUS TERHELÉS HATÁSÁRA (PLAXIS 2011)

A modellhez szükséges bemenő paraméterek:

E_{oed}^{ref} – Referencia feszültséghez tartozó összenyomódási modulus [kPa]

m – a kompressziós görbét leíró hatványfüggvény kitevője [-]

E_{50}^{ref} – Drénezett triaxiális vizsgálatnál a deviátor feszültség 50%-hoz tartozó modulus [kPa]

E_{ur}^{ref} – Tehermentesítés-újraterhelés folyamatához tartozó modulus [kPa]

G_0 – Kezdeti nyírási modulus nagyon kis alakváltozásnál [kPa]

$\gamma_{0,7}$ – Fajlagos nyírási alakváltozás $G=0,7G_0$ esetén [-]

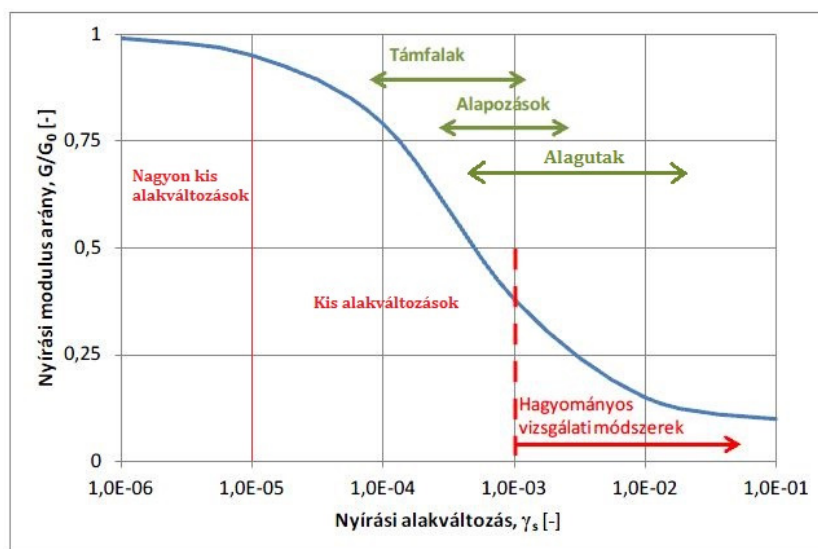
A Plaxis fejlesztőinek ajánlása szerint vizsgálat adat híján elfogadható az $E_{50}^{ref} \approx E_{oed}^{ref}$ és az $E_{ur}^{ref} \approx (3 \div 5) \cdot E_{oed}^{ref}$ közelítés.

A kis alakváltozások tartományára vonatkozó paraméterek hagyományos labor módszerekkel nem mérhetőek, ezek meghatározására az utóbbi időben az egyre nagyobb számban rendelkezésre álló monitoring eredmények alapján kapott tapasztalati összefüggések szolgálnak. Mayne és Rix (1993) a G_0 meghatározásához a következő összefüggést javasolja:

$$G_0 = 49,4 \cdot q_t^{0,695} \cdot e^{-1,13}$$

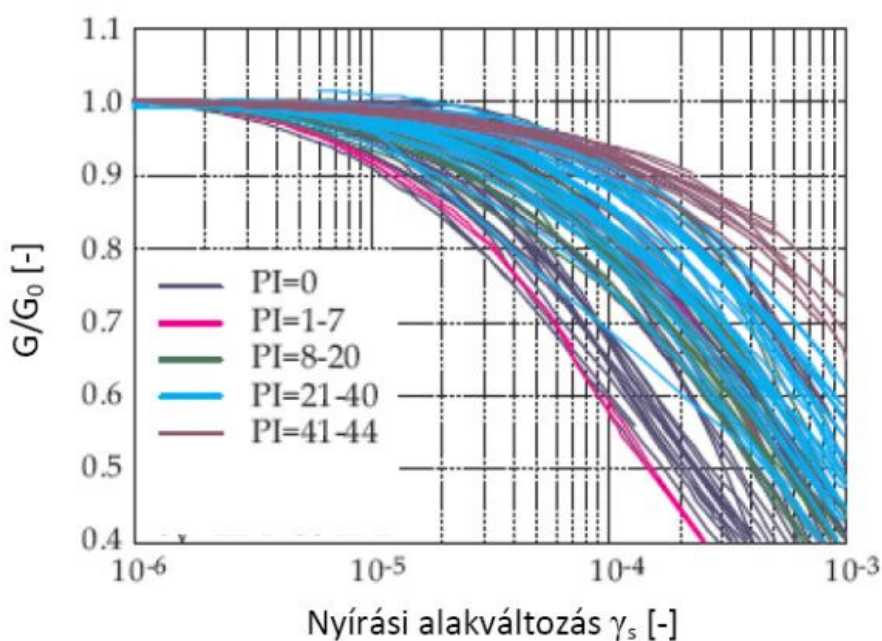
Az összefüggésben szereplő q_t a CPT szonda csúcscellenállását az e pedig a vizsgált talaj hézagtenyezőjét jelöli.

Az általam is modellezett agyagtalajok esetében – a CPT szonda használhatósága miatt – ezek az adatok általában rendelkezésre állnak.



14. ÁBRA: MEREVSÉGVÁLTOZÁST LEÍRÓ GÖRBE A SZERKEZETEK MÉRETEZÉSI TARTOMÁNYAIVAL (RÉMAI 2012 ALAPJÁN)

A nagyon kis alakváltozásokhoz tartozó nyírási modulus mellett a merevség változását leíró függvény (degradációs görbe (14. ábra) alakját meghatározó $\gamma_{0,7}$ paraméter szükséges még az alakváltozási tulajdonságok definiálásához. Amennyiben nem áll rendelkezésre konkrét mérési adat ehhez a paraméterhez is számos tapasztalati összefüggés ismert, amely mindennapos vizsgálatok függvényében adja meg a paraméter értékét. Puha agyagoknál elsősorban a plaszticitási index határozza meg a degradációs görbe alakját. (15. ábra) (Benz 2007)



15. ÁBRA: KÖTÖTT TALAJOK NYÍRÁSI MODULUSÁNAK DEGRADÁCIÓS GÖRBÉI (BENZ 2007)



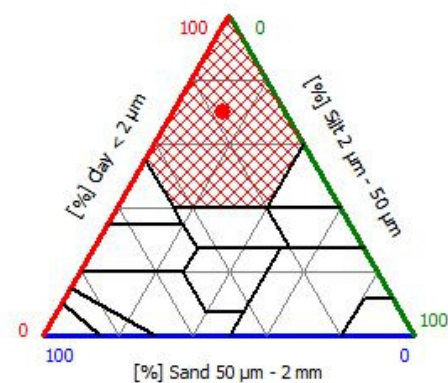
A HS small anyagmodellben használt talajparamétereket a 16. ábra és 17. ábra mutatja.

Property	Unit	Value
Material set		
Identification		Agyag
Material model		HS small
Drainage type		Undrained (A)
Colour		RGB 120, 214, 222
Comments		
General properties		
γ_{unsat}	kN/m ³	20,00
γ_{sat}	kN/m ³	21,00

Property	Unit	Value
Stiffness		
E_{50}^{ref}	kN/m ²	5000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	5000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²	15,00E3
power (m)		0,5000
Alternatives		
Use alternatives		☐
C_c		0,06900
C_s		0,02070
e_{init}		0,5000
Strength		
c'_{ref}	kN/m ²	50,00
$\phi' \text{ (phi)}$	°	8,000
$\psi \text{ (psi)}$	°	0,000

16. ÁBRA: A HS SMALL ANYAGMODELLBEN AZ AGYAG TALAJHOZ ALKALMAZOTT TALAJPARAMÉTEREK

Property	Unit	Value
Model		
Data set		USDA
Model		Van Genuchten
Soil		
Type		Clay
< 2 μm	%	70,00
2 μm - 50 μm	%	13,00
50 μm - 2 mm	%	17,00
Parameters		
Set to default values		☐
k_x	m/day	8,640E-6
k_y	m/day	8,640E-6
$-\psi_{\text{unsat}}$	m	10,00E3
e_{init}		0,5000
Change of permeability		
c_k		0,2000



17. ÁBRA: AZ AGYAG TALAJ SZEMCSEÖSSZETÉTELE ÉS AZ ÁTERESZTŐKÉPESSÉGI EGYÜTTARTÓK ÉRTÉKE $k=10^{-9}$ M/S ESETÉN



5.4 SZÁMÍTÁSI LÉPÉSEK

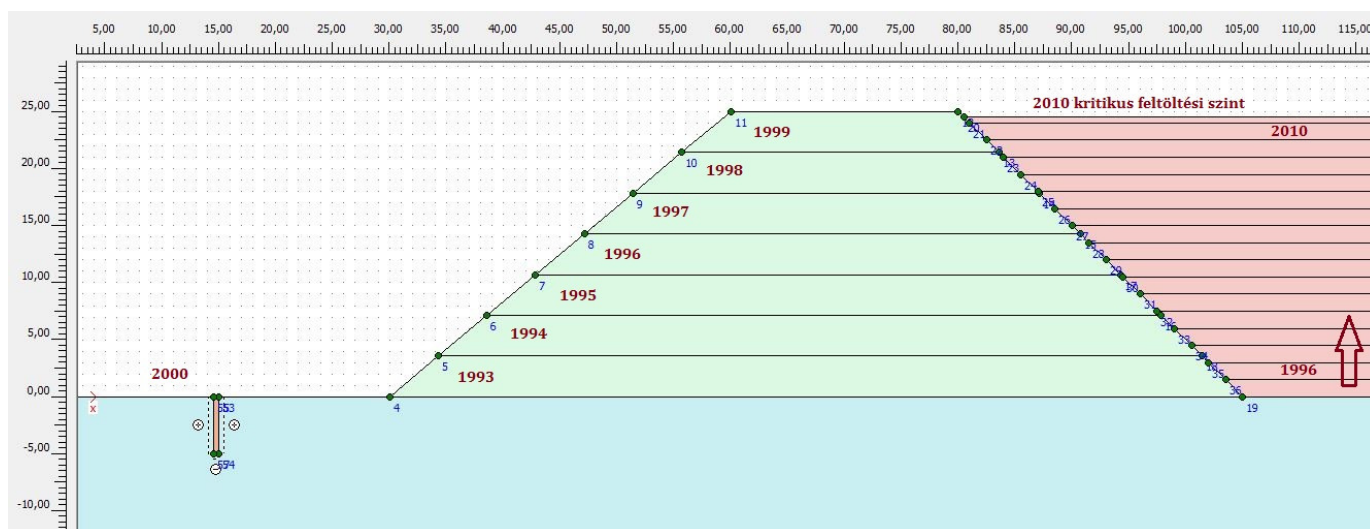
A zagyolt gátépítés technológiájából kifolyólag, a zagyártározók gátjának építési ideje években mérhető. Ellentétben egy autópálya töltéssel, vagy egy árvízvédelmi gáttal, ahol napos esetleg hónapos építési fázissal lehet számolni, a zagyagátak esetében az építés és a tározó feltöltése több tízéves periódust ölel fel. Kötött, telített altalajon épülő töltés esetén, a talpfeszültség miatt keletkező többlet pórusvíznyomás leépülésének ideje is években mérhető.

Éppen ezért, önálló, független állékonysági vizsgálatok elvégzése nem ad megfelelő eredményt, az altalajban lejátszódó folyamatok vizsgálatához egy összetett számításra van szükség.

A Plaxis szoftverben erre lehetőségünk van, TDK dolgozatomban egy közel 20 éves periódust modelleztem, amelyben süllyedés és konszolidációanalízist, valamint stabilitási vizsgálatot végeztem.

A modellezéskor a következő építési – terhelési – számítási fázisokat vizsgáltam:

- Kezdeti feszültségi állapotok meghatározása (K_0 procedure)
- Töltésépítés 7 részben 365 napos periódusokban (Consolidation)
- Tározó feltöltés 15 részletben 365 napos periódusokban (Consolidation)
- Víz záró fal építése 30 nap alatt (Consolidation)
- Kritikus feltöltöttségi szint 30 nap alatt – ez a teljes feltöltés után egy 50 cm-es csapadékvíz réteget jelenti (Consolidation)
- Állékonyságvizsgálat minden évben (Phi-c reduction)



18. ÁBRA: AZ ÉPÍTÉSI ÉS FELTÖLTÉSI FÁZISOK ÉVES PERIÓDUSAI



2. TÁBLÁZAT: SZÁMÍTÁSI LÉPÉSEK

Számítási lépések	Lépés szám	Megelőző lépés	Számítási fázis	Terhelési eset	Idő [nap]
Kezdeti állapot	0	N/A	K0 procedure	Unassigned	0,00 day
1993	1	0	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1993 bizt	21	1	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1994	2	1	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1994 bizt	22	2	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1995	3	2	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1995 bizt	23	3	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1996	4	3	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1996 bizt	24	4	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1997	5	4	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1997 bizt	25	5	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1998	6	5	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1998 bizt	26	6	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
1999	7	6	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
1999 bizt	27	7	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2000 fal építés	40	7	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	30,00 day
2000	8	40	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	335,00 day
2000 bizt	28	8	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2001	9	8	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2001 bizt	29	9	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2002	10	9	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2002 bizt	30	10	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2003	11	10	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2003 bizt	31	11	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2004	12	11	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2004 bizt	32	12	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2005	13	12	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2005 bizt	33	13	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2006	14	13	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2006 bizt	34	14	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2007	15	14	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2007 bizt	35	15	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2008	16	15	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2008 bizt	36	16	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2009	17	16	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	365,00 day
2009 bizt	37	17	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2010	18	17	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	300,00 day
2010 bizt	38	18	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day
2010 kritikus	19	18	Consolidation (EPP) (UM+)	Staged construction	30,00 day
2010 krt. bizt	39	19	Safety (UM+)	Incremental multipliers	0,00 day



Az egyes építési fázisokhoz igazodva lehetőségünk van a felületek, elemek aktiválására vagy deaktiválására, anyagtulajdonságok változtatására vagy a talajvízszint tulajdonságainak átállítására.

A kezdeti állapotban a töltés még nincsen jelen, itt a program a nyugalmi vízszintes és függőleges feszültségeket határozza meg. Itt lehetőségünk nyílna előterhelés megadására. A talajvízszint és az áramlási feltételek megadásával a szoftver elvégzi a hatékony és semleges feszültségek számítását.

A konszolidációs lépésben – consolidation analysis – az idő paraméter kerül bevezetésre a számításban. Az időintervallum helyes megválasztása fontos a számítási lépések valós eredményeihez. A szoftverfejlesztők kifejezetten kötött talajokban lejátszódó pórusvíznyomás változások vizsgálatához készítették az analízis típust.

Az állékonyság vizsgálatnál a program ϕ -c redukció módszerét alkalmazza: A biztonságot a tényleges és a stabilitáshoz legalább szükséges belső súrlódási szög tangense, illetve a tényleges és a stabilitáshoz legkevesebb szükséges kohézió hányadosaként értelmezik:

$$F = \frac{tg\varphi}{tg\varphi_r} = \frac{c}{c_r}$$

A fentiek szerinti csökkentő tényezővel (F) mindaddig változtatja a program a modellben szereplő talajok nyírószilárdságát, amíg a mozgások nem növekednek korlátlanul. A csökkentő tényező végértéke, lehetséges maximuma adja az állékonysági biztonság értékét, amelynek meg kell haladnia a globális állékonysági biztonság előírt parciális tényező értékét. (Brinkgreve et. al. 2011)



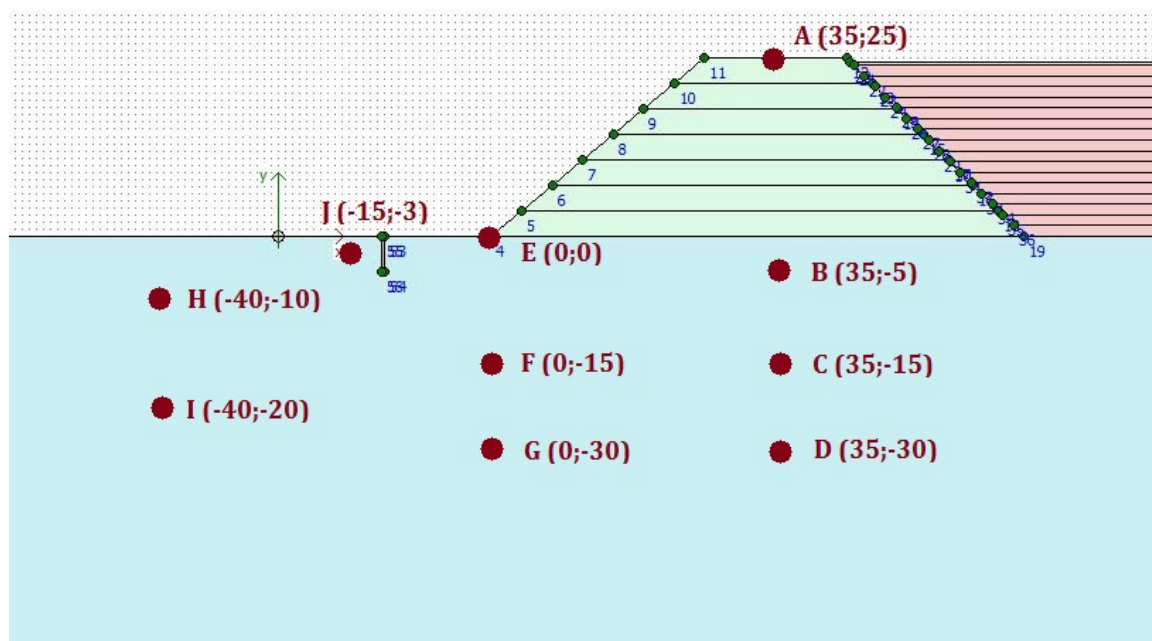
6. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az általam készített modellekből kapott eredményeket összegzem. A modellek geometriai felépítése megegyező, az eltéréseket az alkalmazott anyagmodellek (Mohr-Coulomb, HS small) és a bemenő talajparaméterek jelentik.

Az építés ütemezését állandóra választottam. Ebből kifolyólag a teherviselő agyagréteg teherbírása a lejátszódó konszolidáció ütemétől függ, vagyis, hogy tud-e a nyírószilárdság olyan ütemben nőni, hogy elviselje a töltésből származó igénybevételt. Az eredmények alapján beláthatóvá vált, hogy azonos talajmechanikai tulajdonságokkal (φ , c , E_{oed}), de eltérő áteresztőképességgel bíró talajok esetében az állékonyság komoly eltéréseket mutat.

Az agyag altalaj vizsgálatához három féle áteresztőképességi együtthatót használtam, $k = 10^{-8} - 10^{-10}$ m/s értékben. Így a kapott értékekből meghatározhatóvá vált a szerkezet érzékenysége a paraméter változására. A globális biztonságon túl a süllyedéseket, vízszintes elmozdulást, többlet pórusvíznyomást és konszolidációt vizsgáltam.

Az eredmények kiértékeléséhez, a modell jellegzetes pontjain mérőpontokat határoztam meg, amelyek a 19. ábraábrán láthatóak.



19. ÁBRA: VIZSGÁLATI PONTOK A MODELLBEN

A süllyedések vizsgálatához a gátkorona felezőpontjában lévő „A” pontot, a vízszintes elmozdulások megfigyeléséhez a töltésláb „E” pontját választottam ki. A többlet pórusvíznyomás alakulásának megfigyelésére a töltés szimmetriatengelyén és a töltésláb függőlegesében felvett „B-G” pontok állnak rendelkezésre. A „H” és „I” pontokban, a talajban, a talpfeszültség miatt létrejövő, mentett oldal felé irányuló vízmozgás figyelhető meg.

A „J” pont szerepe a vizsgálatban arra irányult, hogy a vízzáró fal építése, befolyásolta-e a talajban létrejövő pórusvíznyomás leépülésének értékét. Ennek megfigyelésére elkészítettem a modell vízzáró fal nélküli változatát is.



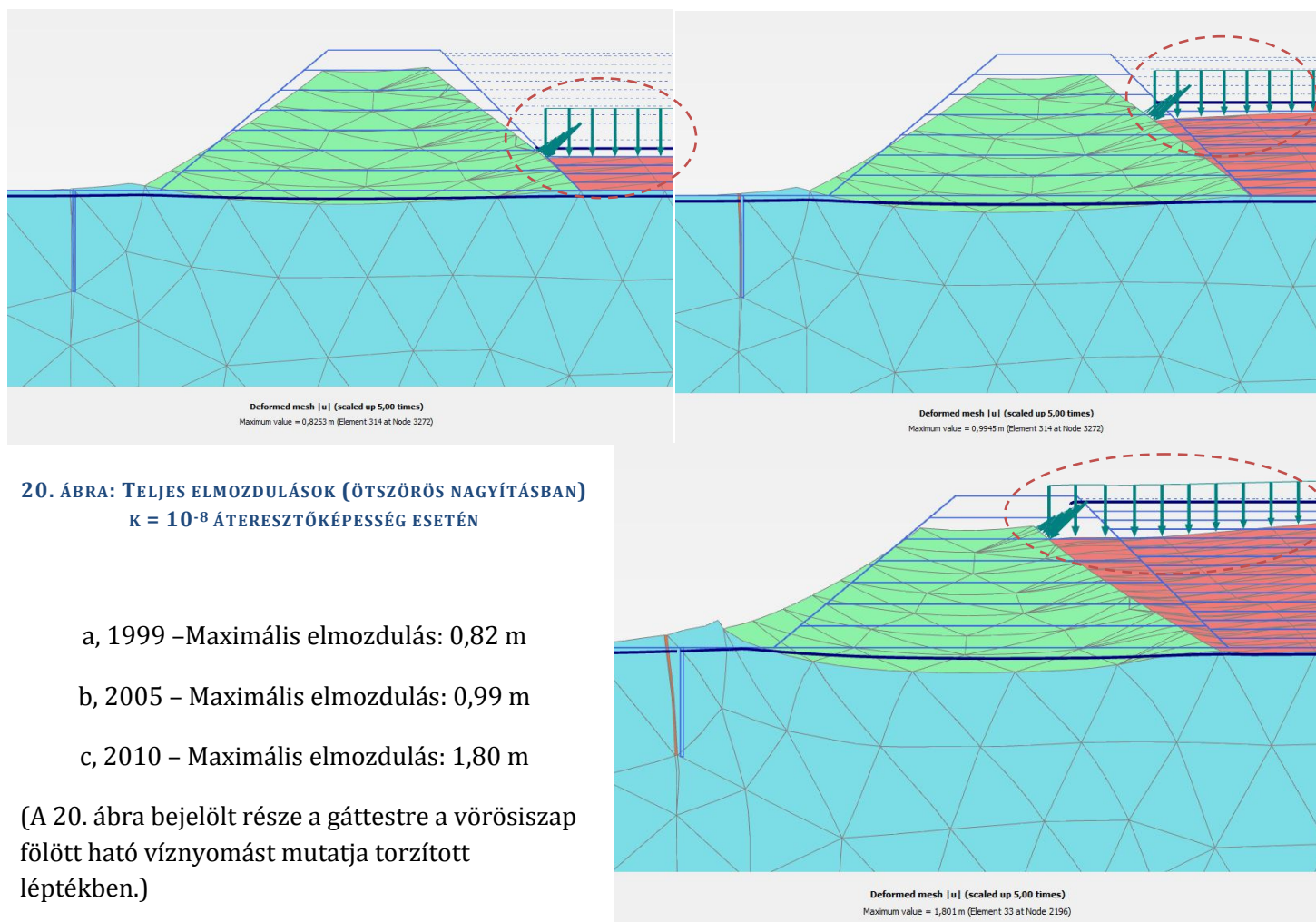
6.1 ELMOZDULÁSOK

A 4. fejezetben bemutatott tönkremeneteli mechanizmus, azaz a puha altalajban létrejövő talajtörés minden esetben a gáttest elmozdulásával jár. Számos múltbéli példán jól megfigyelhető, hogy a gátkorona süllyedése mellett, a gáttalp melletti talaj „felpúposodik”, kipréselődik. Az elmozdulások mértékétől függően, már a talajtörés bekövetkezése előtt a töltés merev testszerű viselkedése miatt olyan károsodások, repedések jöhetnek létre a gáttestben, amelyek katasztrófával fenyegetnek.

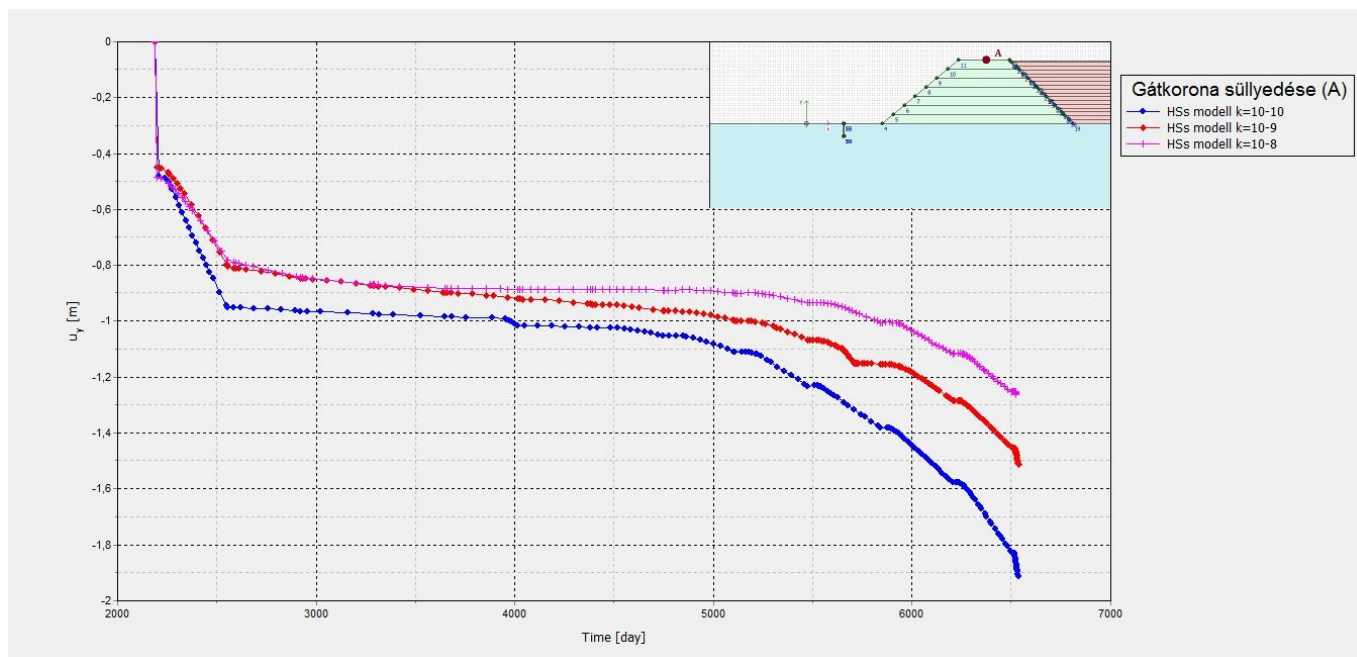
A tervezési fázisban elvégzett végelelemes számítás esetén, az elmozdulások nagysága már előre becsülhető, így megfelelően ütemezhető az építés, kivárható a talajban létrejövő süllyedések lejátszódása. Megfelelő monitoring rendszer kiépítése mellett, folyamatosan követhetők a süllyedések, vízszintes elmozdulások értékei, amelyek a modellből kapott értékekkel összehasonlíthatók.

A süllyedések pontos meghatározására a puha, telített agyagtalajok nemlineáris viselkedésének kezelése miatt a HS small modell alkalmas. (5.3.2 fejezet) Fontos, hogy ebben a modellben az összenyomódó réteg vastagsága nem befolyásolja a számítást.

A PLAXIS szoftverben lehetőségünk van a süllyedések számszerű kiértékelésén túl az elmozdult geometriát is vizsgálni. (20. ábra)



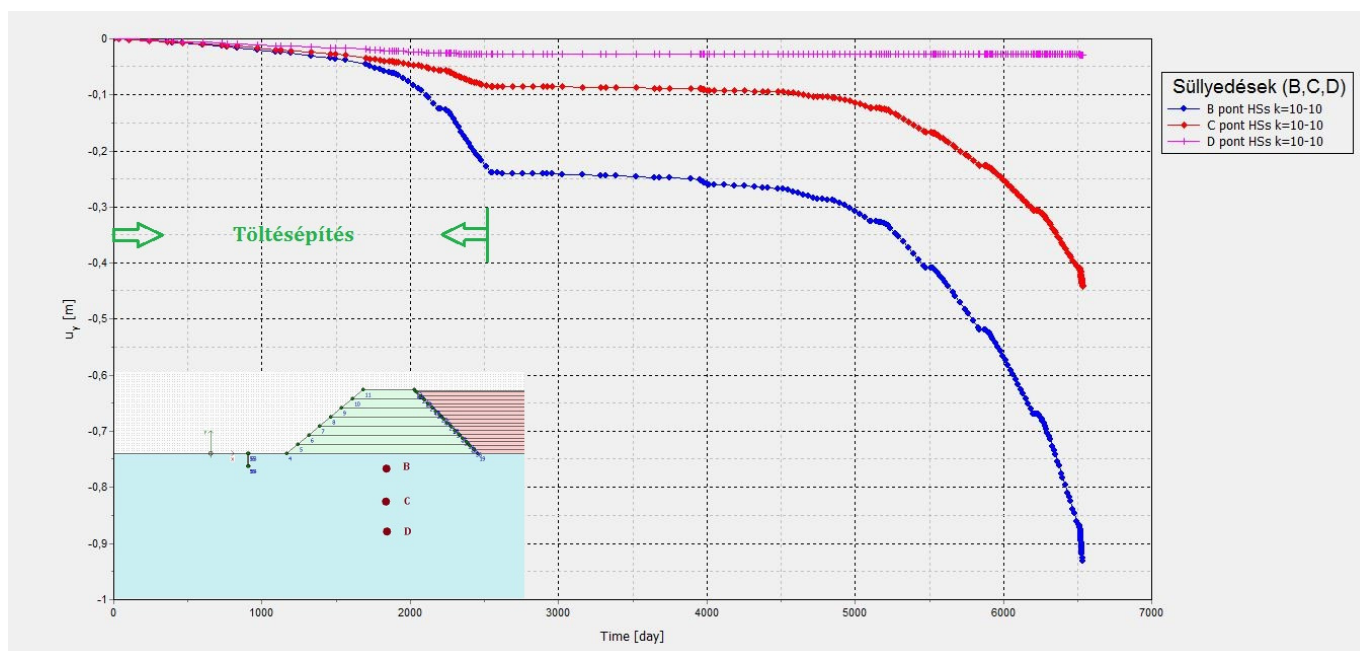
Az ábrán jól látható, hogy már a töltés befejezésének idején (1999) is keletkeztek süllyedések. A gátkorona szintje a tervezett magasság alatt van. A valóságban az építés közben lejátszódó süllyedéseket a maximális magasság eléréséig nem vennék figyelembe, azaz több anyag kerülne a gáttestbe, amíg az előírt magasságot el nem éri. Viszont a süllyedésből következik, hogy már az építés alatt és közvetlenül az építés befejezése után is semleges feszültségek keletkeznek. Ráadásul a gyengébb áteresztőképességgel rendelkező puha, telített talajok esetén a süllyedés mértéke nagyobb lesz, ezzel is növelve a pórusvíznyomás értékét és rontva az állékonyságot. (21. ábra)



21. ÁBRA: A GÁTKORONA SÜLLYEDÉSE AZ ÁTERESZTŐKÉPESSÉGEK FÜGGVÉNYÉBEN

A 21. ábraán megfigyelhető kezdeti ugrás az építés befejezésekor megjelenő, tervezett és valóságos koronaszint közötti különbséget mutatja. Jól látható, hogy mindhárom esetben közel félméteres süllyedésről van szó. A maximális süllyedési érték $k = 10^{-9}$ m/s áteresztőképesség esetén meghaladta az 1,5 métert, $k = 10^{-10}$ m/s esetén az 1,9 métert (X. kazetta 2010-ben szükséges rátöltési magasság 0,3-1,4 m volt).

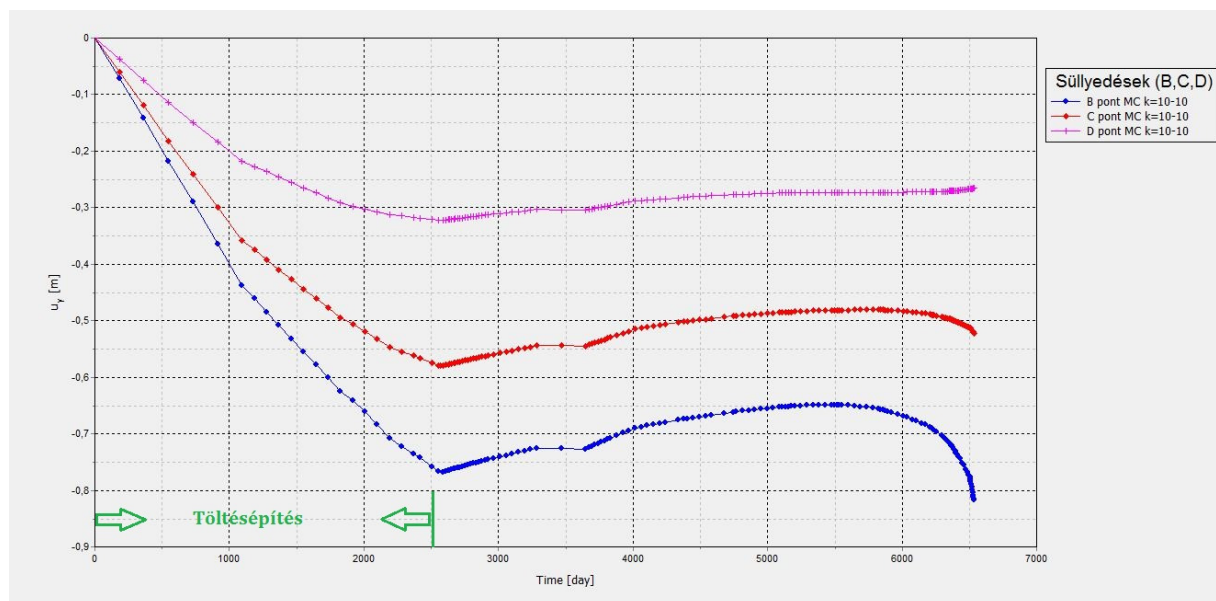
Homogén talajrétegre épített töltés okozta süllyedések esetén a talaj viselkedéséből és a terhelés módjából adódóan a fajlagos talaj-összenyomódás a mélység növekedésével csökken. (22. ábra) Ennek oka, hogy a terepszintet átadódó feszültség a talajban szétterjed, másrészt a mélyebben fekvő talajokon eredetileg nagyobb normálfeszültség működött, és a nagyobb normálfeszültségek tartományában az összenyomódási modulus nagyobb. (Rémai 2012)



22. ÁBRA: ALTALAJ VIZSGÁLT PONTJAINAK SÜLLYEDÉSE AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN (HSS MODELL) ($k = 10^{-10}$ m/s)

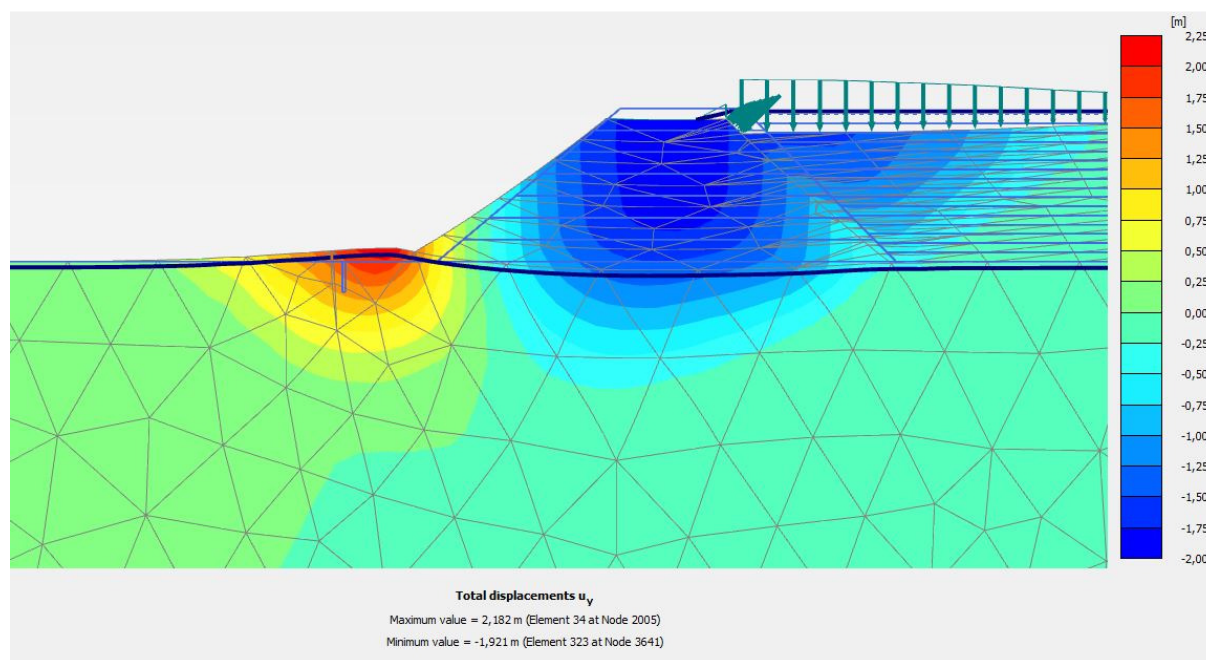
Az 5.3 fejezetben már kifejtettem, hogy a Mohr-Coulomb modell nem veszi figyelembe, hogy a talajok alakváltozási jellemzői nem lineárisak. Elmondható, hogy a MC modellel végzett számítás során a süllyedések értéke közel lineárisan növekszik a modellben figyelembe vett mélységgel.

A 22. ábraát – HS small anyagmodellel, kis alakváltozások figyelembevételével számított süllyedési értékek – összevetve a 23. ábraával, jól látható, hogy a mélység függvényében a Mohr-Coulomb modell egyre pontatlanabban határozza meg az alakváltozásokat. A „B” pont – amelyet az eredeti felszín alatt 5 méterrel vettem fel – süllyedési értékei még megfelelnek a valóságnak, de például a 30 méter mélységben lévő „D” pont esetén már komoly, hat-hétszeres eltérés mutatkozik.



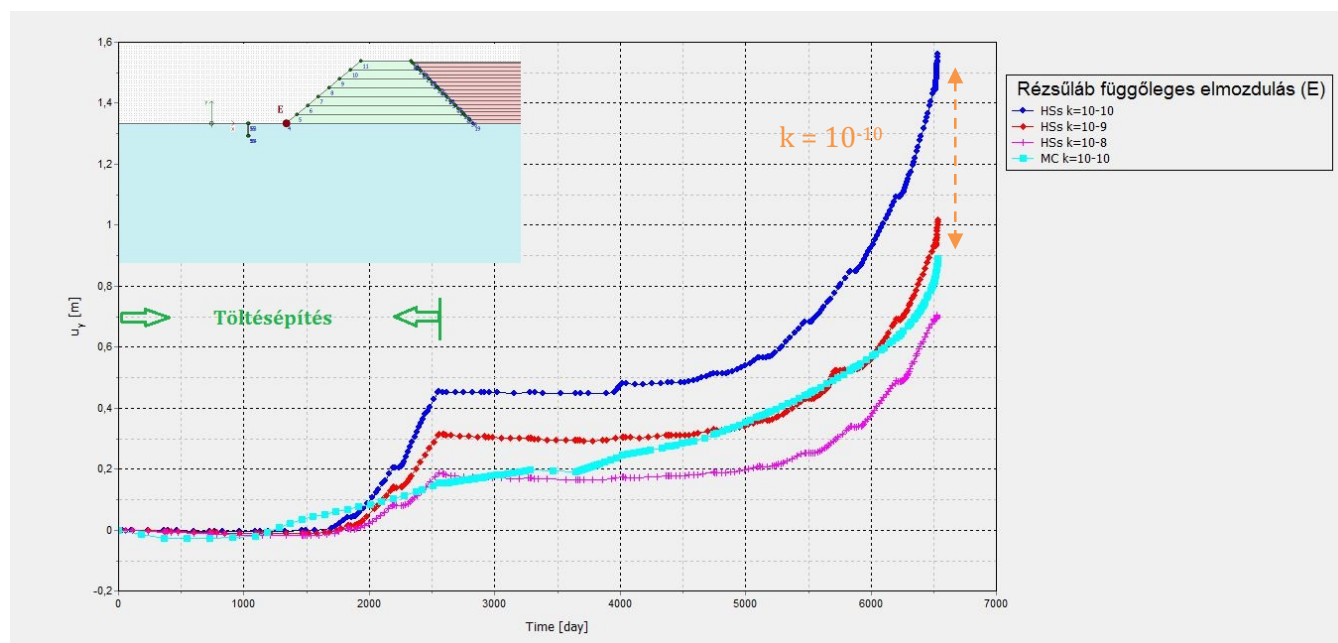
23. ÁBRA: ALTALAJ VIZSGÁLT PONTJAINAK SÜLLYEDÉSE AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN (MC MODELL) ($K = 10^{-10}$ m/s)

A negatív elmozdulások – süllyedések – mellett a talpfeszültség miatt kitérő talajszemcsék „agyagkinyomódást”, vagyis pozitív irányú elmozdulást is létrehozhatnak a mentett oldalon, a rézsúláb környezetében (24. ábra). Farkas és szerzőtársai a kolontári sérült gátszakadás környezetében a gátláb vonalában a felszín 1,5-2,3 méteres megemelkedését jegyezték fel. (3.3 fejezet)



24. ÁBRA: TALAJKINYOMÓDÁS A RÉZSÚLÁB KÖRNYEZETÉBEN (HSs MODELL) ($k = 10^{-10}$ M/S)

Ahogy az egész gáttest megcsúszik, elfordul a kialakuló csúszó lap mentén, maga a rézsúláb is megemelkedik. Ez a gáttest merevtest szerű viselkedéséből következik, azonban nagymértékű elmozdulások hatására, olyan húzó igénybevételek keletkeznek, amelyet a zagyát anyaga nem képes elviselni. (25. ábra)



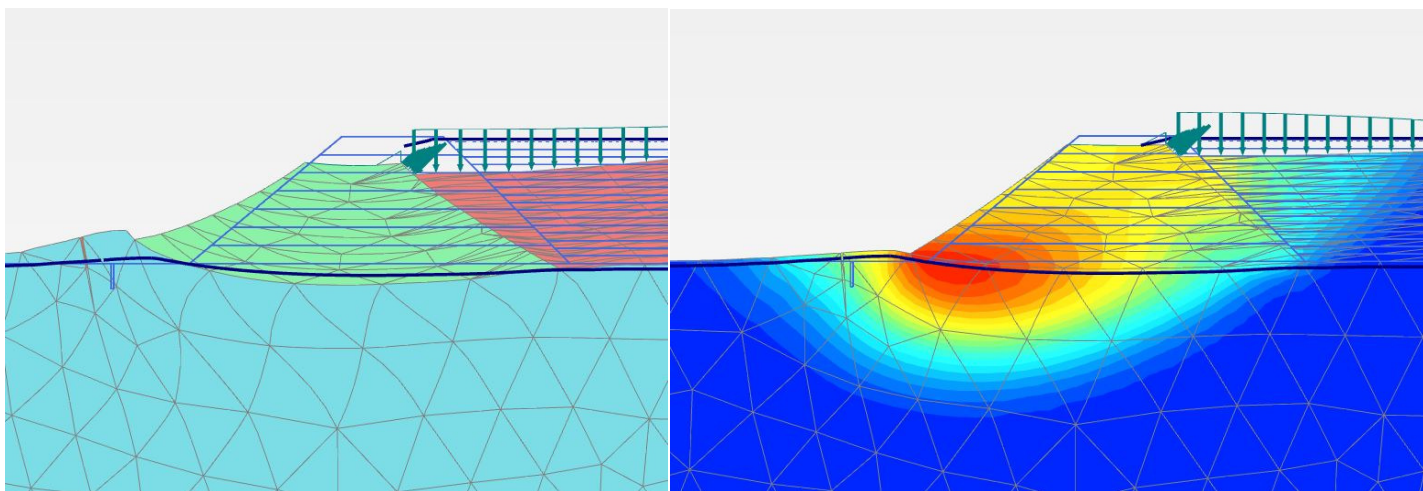
25. ÁBRA: RÉZSÚLÁB FÜGGŐLEGES ELMOZDULÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN

A hagyományos süllyedés- és konszolidációs számítás szerint a töltés teljes s_t süllyedése három részből tevődik össze: (Tomlinson 2001)

$$s_t = s_a + s_c + s_m$$

ahol. s_t az azonnali vagy kezdeti süllyedés, s_c a konszolidáció miatti süllyedést, s_m a másodlagos összenyomódást vagy kúszást jelenti.

A teljes elmozdulásokban azonban nem csak a függőleges elmozdulások, hanem a vízszintes eltolódások is beletartoznak. Az 26. ábra jól szemlélteti a gáttest, feltöltés hatására keletkező vízszintes kúszását.



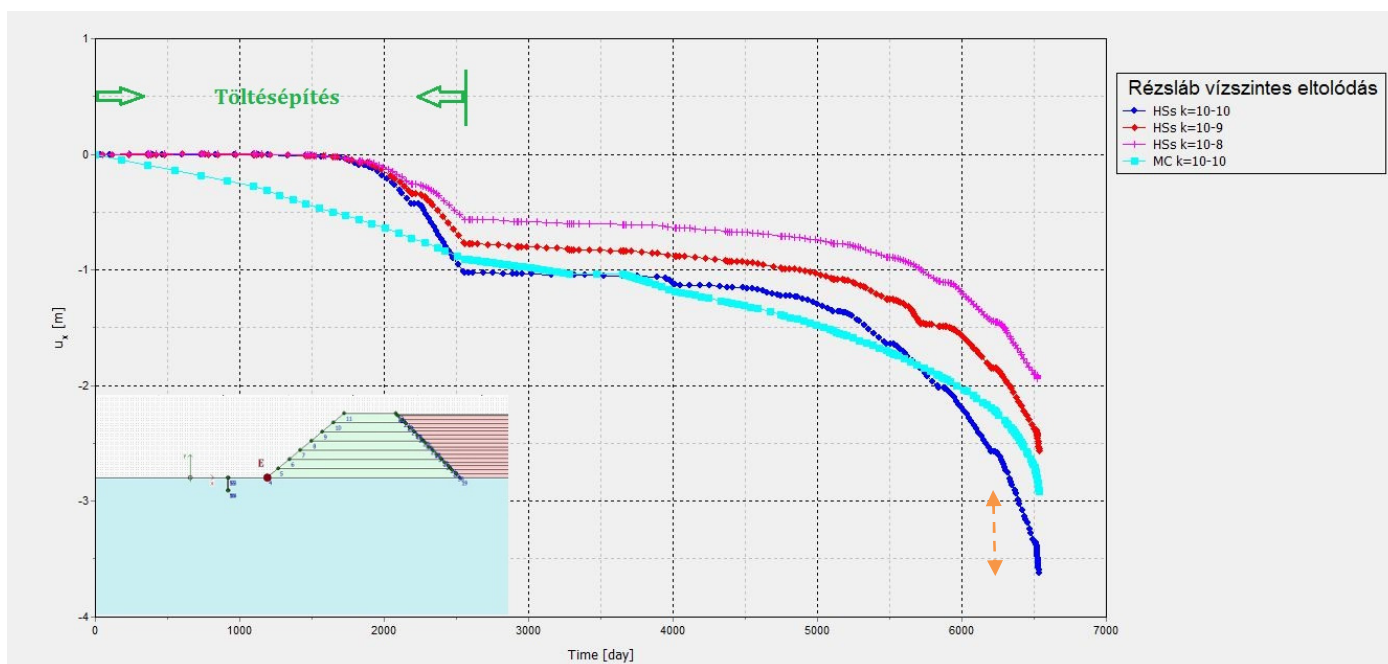
**26. ÁBRA: TELJES ELMOZDULÁSOK HÁROMSZOROS NAGYÍTÁSBAN
ÉS A VÍZSZINTES ELTOLÓDÁS MÉRTEKE A GÁTTESTBEN (HSs MODELL) ($k = 10^{-10}$ M/S)**

A közelmúltban megjelent szakirodalomban (Farkas 2005) már megjelenik az a gondolat, mely szerint az altalaj terhelés hatására történő oldalirányú plasztikus kitéréséből származó függőleges elmozdulás a negyedik süllyedési összetevő. Elméleti alapon levezetett módszer nem ismert, de helyszíni mérések alapján a következő összefüggést használják:

$$s_k = \frac{s_a + s_c + s_m}{2 \cdot \gamma_{RE}}$$

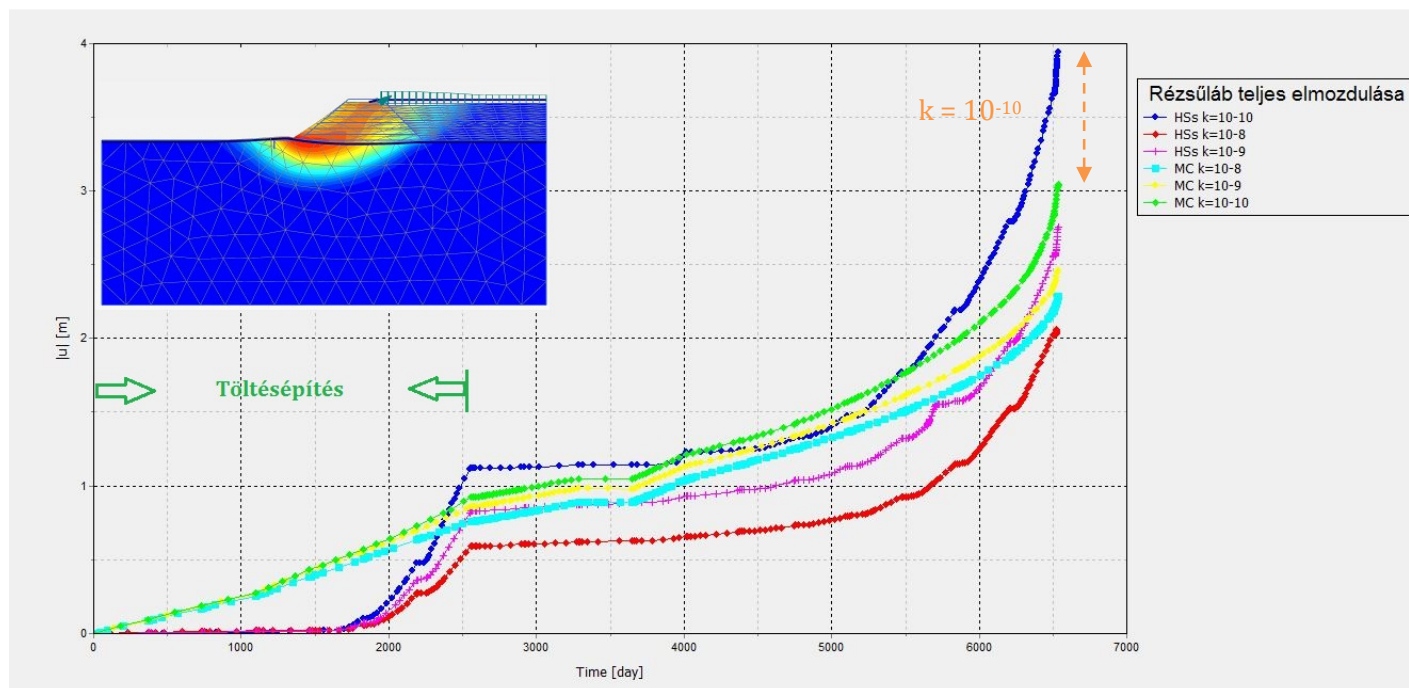
ahol, γ_{RE} a talajtöréssel szembeni globális biztonság.

A dolgozat keretében vizsgáltam a gáttest oldalirányú elmozdulását is az altalaj áteresztőképességi paramétereinek függvényében. Megállapítható, hogy a függőleges elmozdulásokkal ellentétben, a Mohr-Coulomb modell itt elfogadható közelítést ad a vízszintes kúszás értékére, viszont lineárishoz hasonló függvényalakokkal. (27. ábra)



27. ÁBRA: RÉZSÚLÁB VÍZSZINTES ELMOZDULÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN

A teljes elmozdulások vizsgálatánál arra a megállapításra jutottam, hogy a töltéstalp mentett oldali sarkánál (E pont – rézsú láb) található vonalon alakul ki a legnagyobb elmozdulás értéke. A legkisebb áteresztőképesség esetében ez megközelíti a 4 métert! (28. ábra). Jól láthatóan az 5.3.1 pontban leírtak alapján az elmozdulásokat a Mohr-Coulomb modell lineárisan közelíti. A diagram bal felső sarkában lévő elmozdulás ábrán jól megfigyelhető a mélyre metsző csúszólap kialakulásának vonala. (4. fejezet)



28. ÁBRA: RÉZSÚLÁB TELJES ELMOZDULÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN



Összességében elmondható, hogy a kis alakváltozások tartományában nagyobb talajmerevséget figyelembevevő HS small anyagmodell segítségével, a zagyákhoz hasonló komplex szerkezetek elmozdulásai és várható süllyedések is jó megbízhatósággal meghatározhatók.

A számítás elvégzését az 5.3.2 fejezetben említett, ritkán rendelkezésre álló input paraméterek hiánya nehezíti. Ez a probléma egy jövőbeni irányított tervezéssel, tudatosan megválasztott helyszíni és laboratóriumi vizsgálatokkal kiküszöbölhető.

6.2 PÓRUSVÍZNYOMÁS

A pórusvíznyomás kialakulásának oka, hogy a puha, telített talajban található vízfázis kevésbé összenyomható, mint a szilárd váz, így a töltésről átadódó terhelést először az veszi fel. Az idő előrehaladtával az értéke „leépül”, azaz a többletterhelés hatására a pórusokból víz nyomódik ki mindaddig, amíg a kezdeti állapotnak megfelelő pórusvíznyomás értéke újra beáll. A folyamat közben csökken a talaj pórusainak térfogata, térfogatának aránya, a talaj konszolidálódik.

A felszín alatti vizek szivárgási sebességének törvényszerűségét Darcy (1854) fogalmazta meg:

$$v = -k \cdot \frac{dh}{dl} = k \cdot i$$

ahol, v a szivárgási sebesség, k az áteresztőképességi együttható vagy szivárgási tényező és i a hidraulikus gradiens.

A törvény egyszerűségéből kifolyólag természetesen korlátokkal bír és ilyen formában nem alkalmazható, de az áteresztőképességi együttható kötött talajok esetén fontos talajparaméter a várható konszolidációs idő becsléséhez.

Munkám során a már előzőekben említett (5.2.3 fejezet) módon, három különböző áteresztőképességi együttható hatását vizsgáltam, az építés és tározás hatására létrejövő pórusvíznyomások meghatározására.

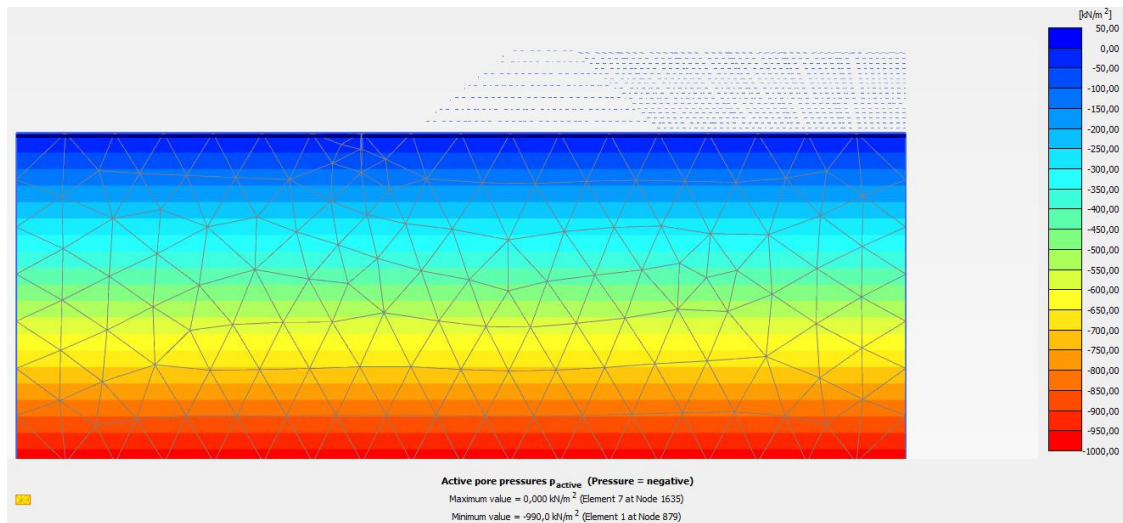
A számítási eredmények kiértékeléséhez fontos tisztázni, hogy különbséget kell tennünk állandó-, aktív- és többlet pórusvíznyomás között:

- Az állandó pórusvíznyomás a telített talajokban mindig jelen van, értéke a talajvízviszonyoktól és a mélységtől függ
- A többlet pórusvíznyomás a felszíni terhelés és a terhelés okozta süllyedések miatt kialakuló víznyomás többlet a pórusokban
- Az aktív pórusvíznyomás az előző kettő összege.

Az aktív pórusvíznyomás értékek hatására létrejövő semleges feszültségek okozzák a tönkremenetelhez vezető nyírószilárdság csökkenést, azonban a többlet pórusvíznyomás növeli meg az aktív értékeket a kritikus szintre, így e feszültség alakulásának vizsgálata fontos a tervezés szempontjából.

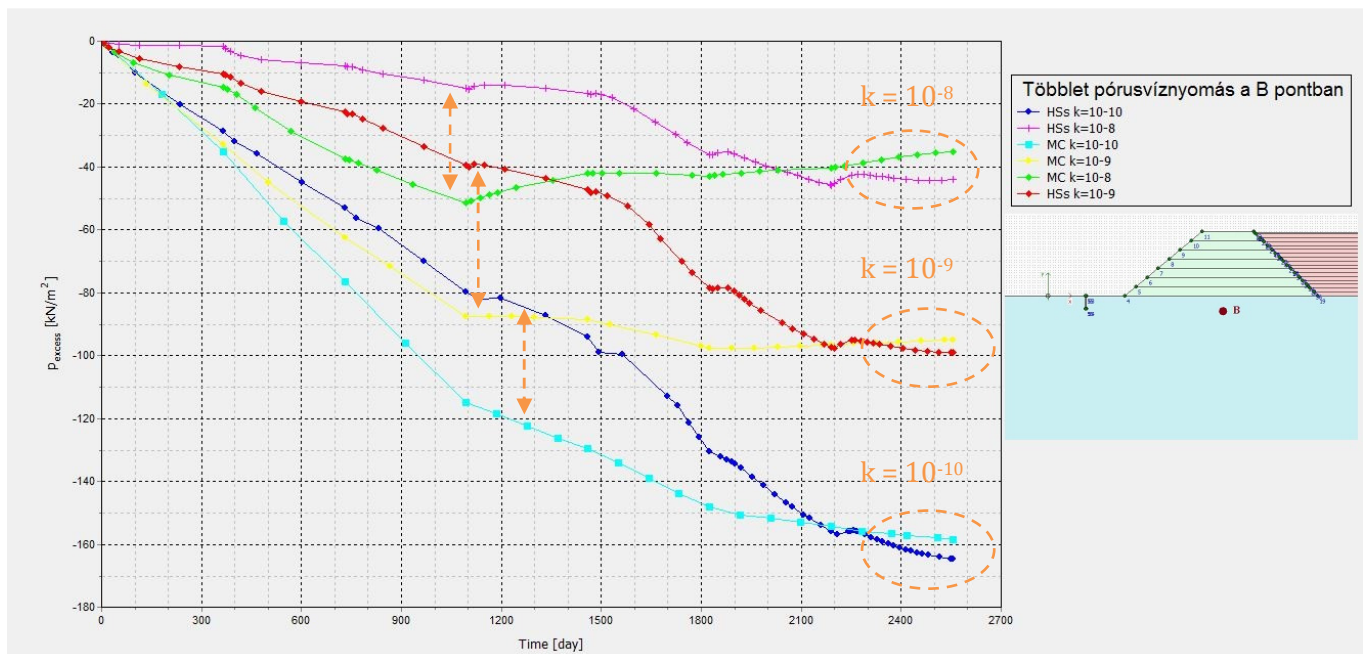


A kezdeti állapotban, amikor még nem kezdődött meg a töltésépítés, az állandó pórusvíznyomás és az aktív pórusvíznyomás értéke megegyező. Mivel a talajvízszint a térszín alatt 1 méterrel lett megállapítva, ezért a modellter alján (-100 m) a pórusvíznyomás értéke 990 kPa (29. ábra)



29. ÁBRA: AKTÍV PÓRUSVÍZNYOMÁS ÉRTÉKE A KEZDETI ÁLLAPOTBAN.

Az építés megkezdése után a többlet pórusvíznyomás értéke erőteljesen növekszik a töltés alatt. A folyamatos építés miatt nincs ideje a talajnak konszolidálódni. A negyedik építési fázis (1996) idején megkezdődik az első feltöltési ütem, ezzel a töltés alatti pórusokban ragadt víz a zagy oldal felé már nem, csak a mentett oldal felé tud távozni. Ezzel megnő a víz áramlási úthossza így a többlet pórusvíznyomás leépülésének az ideje is. A feltöltés megkezdésének idejében a talajvíz szintjét megváltoztatva a terepszinten határoztam meg. A töltésépítés alatt létrejövő többlet pórusvíznyomás mértékét a különböző talajok esetében a 30. ábra mutatja.



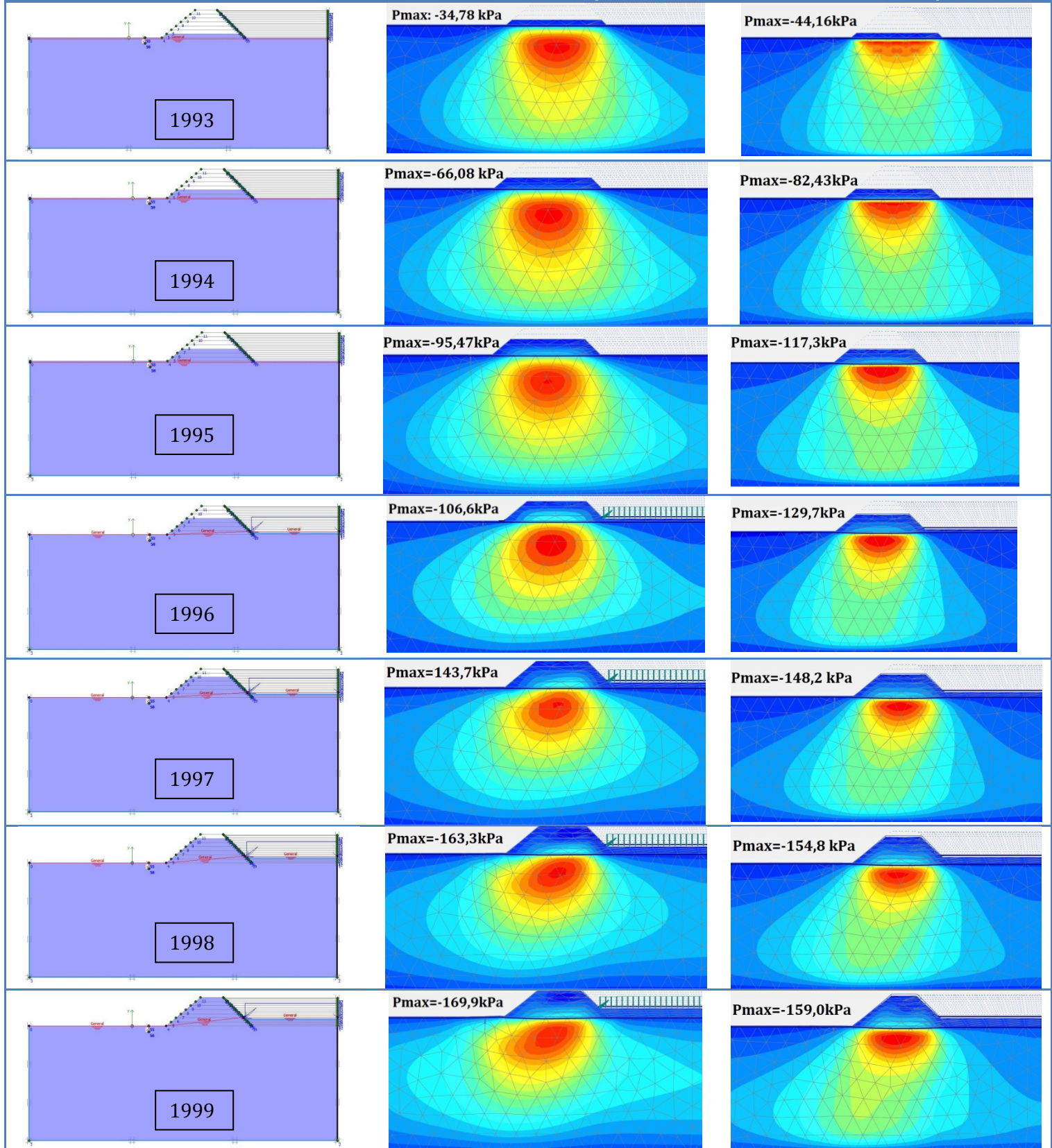
30. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ÉRTÉKE A TÖLTÉS ALATT 5 MÉTER MÉLYSÉGBEN 1999-IG



Építési fázis a talajvízszinttel

HSs modell,
 $k = 10^{-10} \text{ m/s}$

Mohr-Coulomb modell,
 $k = 10^{-10} \text{ m/s}$



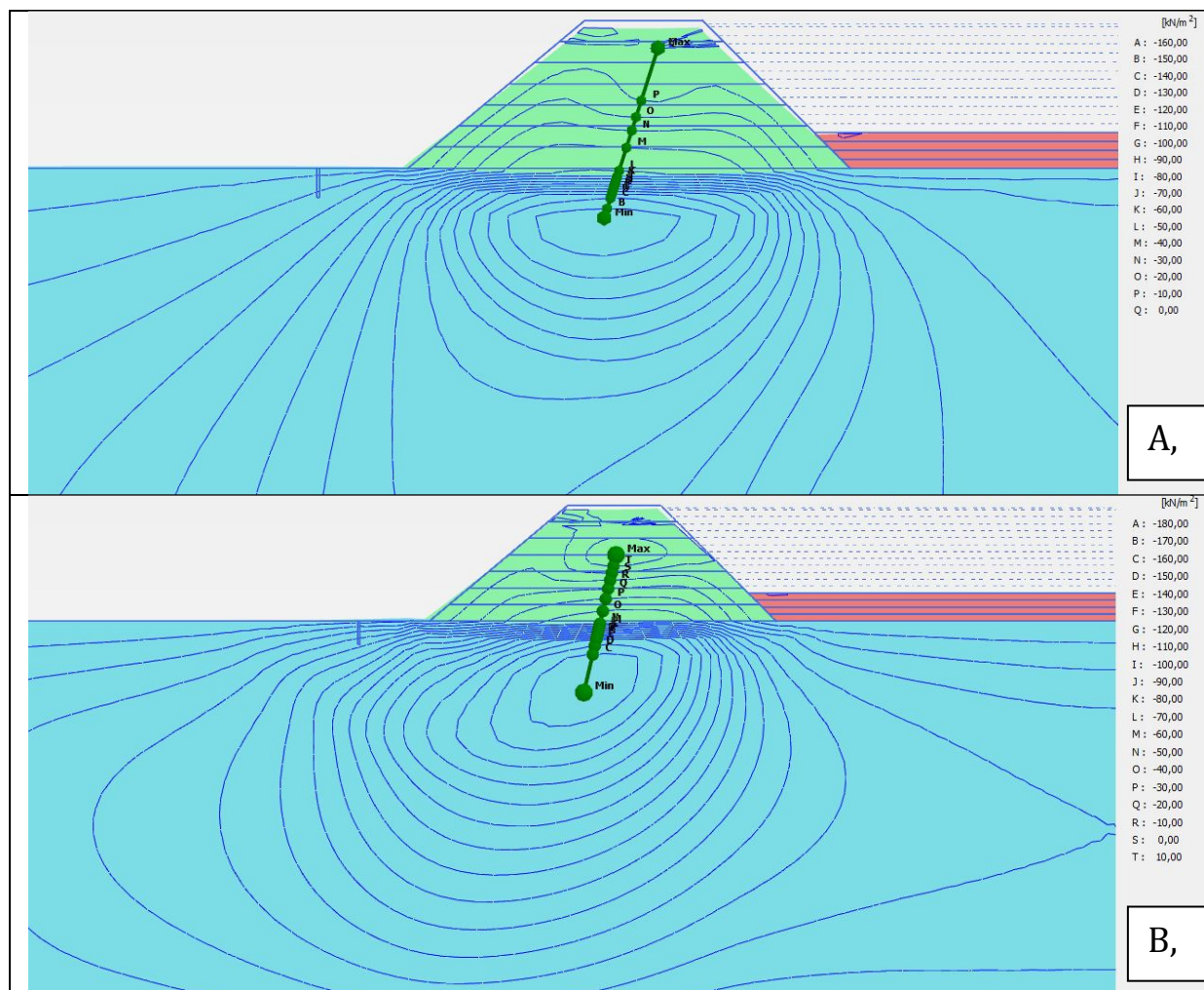
31. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁSOK ELOSZLÁSA AZ ÉPÍTÉS ALATT (HSs ÉS MC MODELL) ($k = 10^{-10} \text{ m/s}$)



A 30. ábra alapján látható, hogy a kétféle anyagmodellel számított többlet pórusvíznyomás értékek a töltés alatti felsőbb talajrétegben (B. pont) az építés befejezésének idejében közel megegyezők. Azonban a megegyező áteresztőképességi együttható miatt összetartozó függvénypárokat (lila-zöld, piros-sárga, kék-türkiz) vizsgálva jól látható, hogy az idő függvényében jelentős eltérések jelentkeznek.

A 31. ábraát vizsgálva az is megállapítható, hogy az eltérő anyagmodellekhez tartozó többlet pórusvíznyomás értékek eloszlása eltérést mutat. Az eltérés azzal magyarázható, hogy a kezdeti építési ütemek hatására a Mohr-Coulomb modellben létrejövő süllyedések jóval nagyobbak, mint a HSs modell esetén. (6.1 fejezet, 22. ábra, 23. ábra).

Mivel a két modell a mélységgel változó talajmerevséget eltérően veszi figyelembe, ezért a többlet pórusvíznyomás nagysága eltérően változik a mélység függvényében. A gáttest középvezonájában, a térszíntől 30 mélységben lévő „D” pont esetében az MC - modellből számított – töltésépítés végéig létrejövő – süllyedés körülbelül 30 cm. A HSs modell esetében ez az érték 3 cm körüli, tehát mintegy tízszeres eltérés mutatkozik. Azonban ez a többlet pórusvíznyomás értékében nem mutatkozik meg, mivel mindkét modell esetében körülbelül ebben a mélységben van a maximum. (32. ábra)

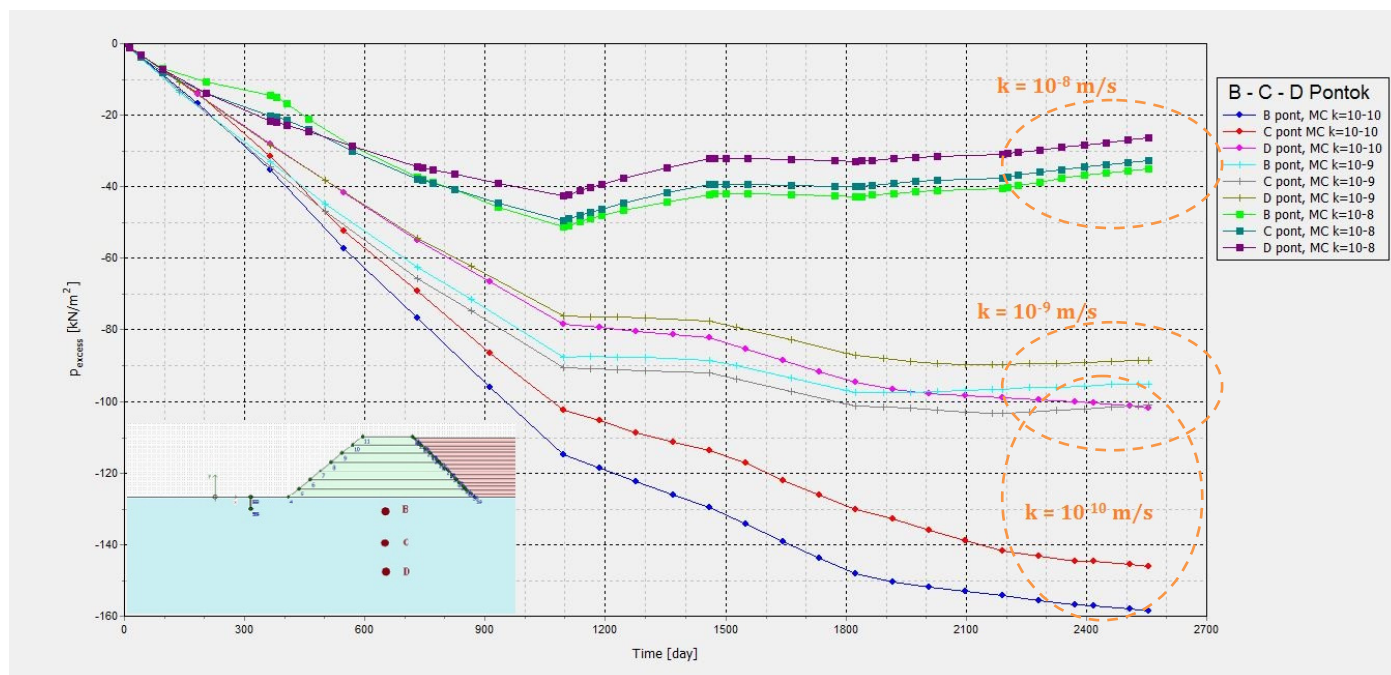


32. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ALAKULÁSA A TÖLTÉSÉPÍTÉS BEFEJEZÉSEKOR

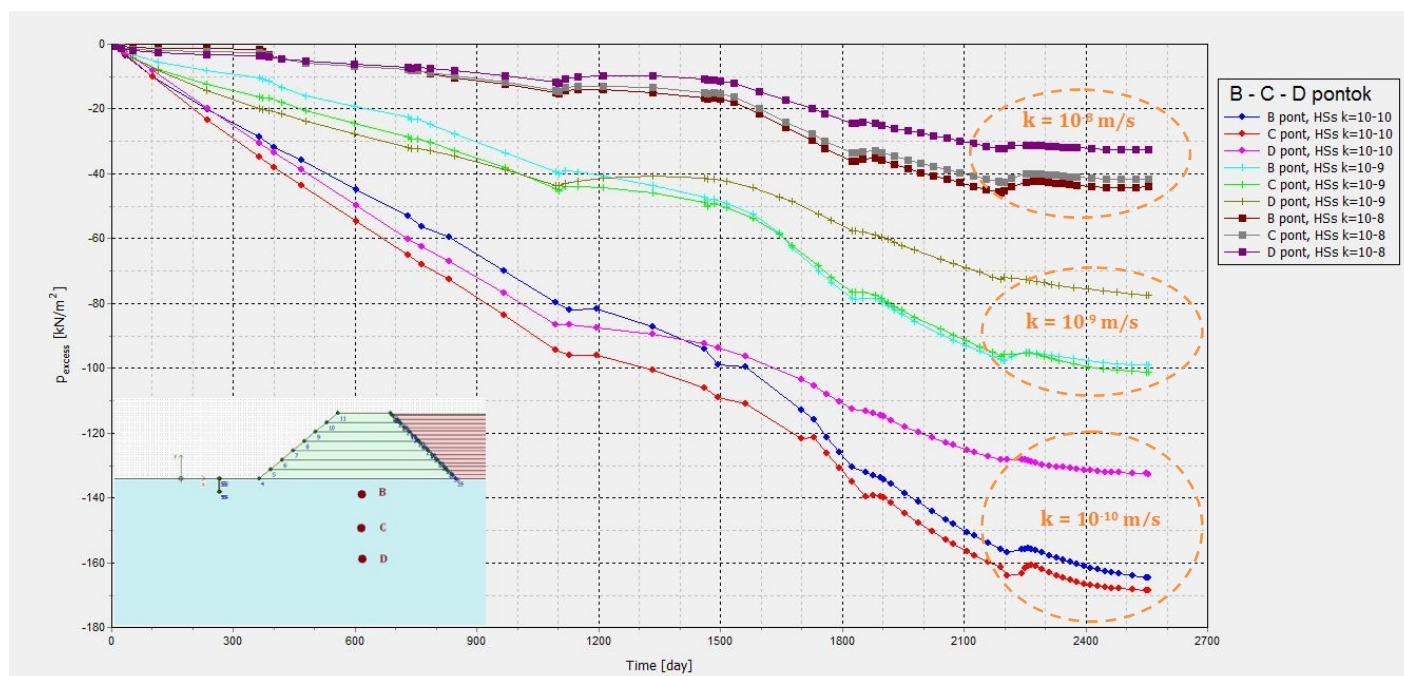
A, MOHR-COULOMB MODELL, ($k = 10^{-10}$ M/S)

B, HS SMALL MODELL ($k = 10^{-10}$ M/S)

Munkám során vizsgáltam, hogy a töltésépítés ideje alatt létrejövő többlet pórusvíznyomások nagyságára, és a leépülés gyorsaságára milyen hatással van az áteresztőképességi együttható értéke. (33. ábra; 34. ábra)



33. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ÉRTÉKEK AZ ALTALAJBAN ELTÉRŐ ÁTERESZTŐKÉPESSÉGI EGYÜTTTHATÓ ESETÉN (MOHR-COULOMB MODELL)



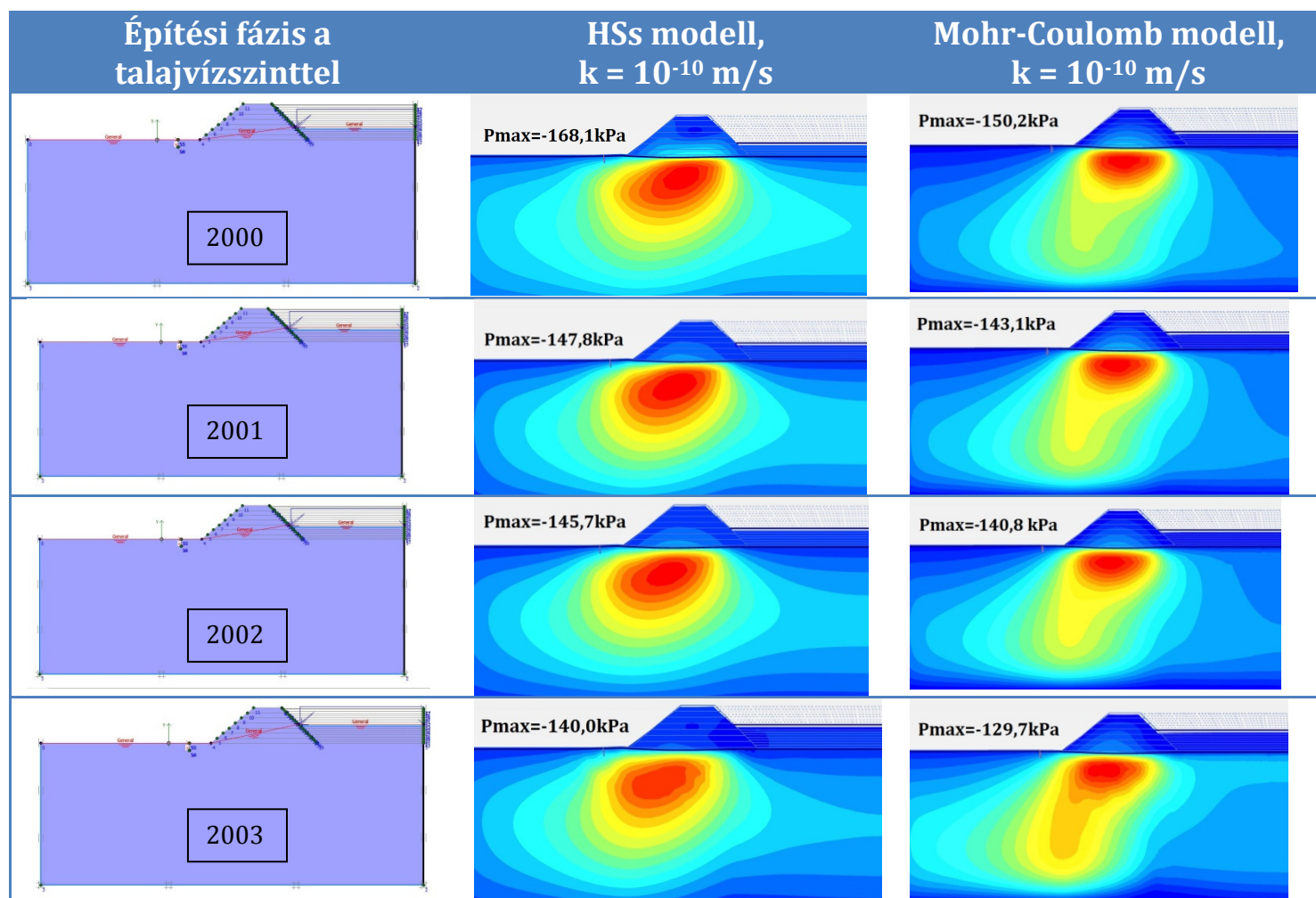
34. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ÉRTÉKEK AZ ALTALAJBAN ELTÉRŐ ÁTERESZTŐKÉPESSÉGI EGYÜTTTHATÓ ESETÉN (HS SMALL MODELL)

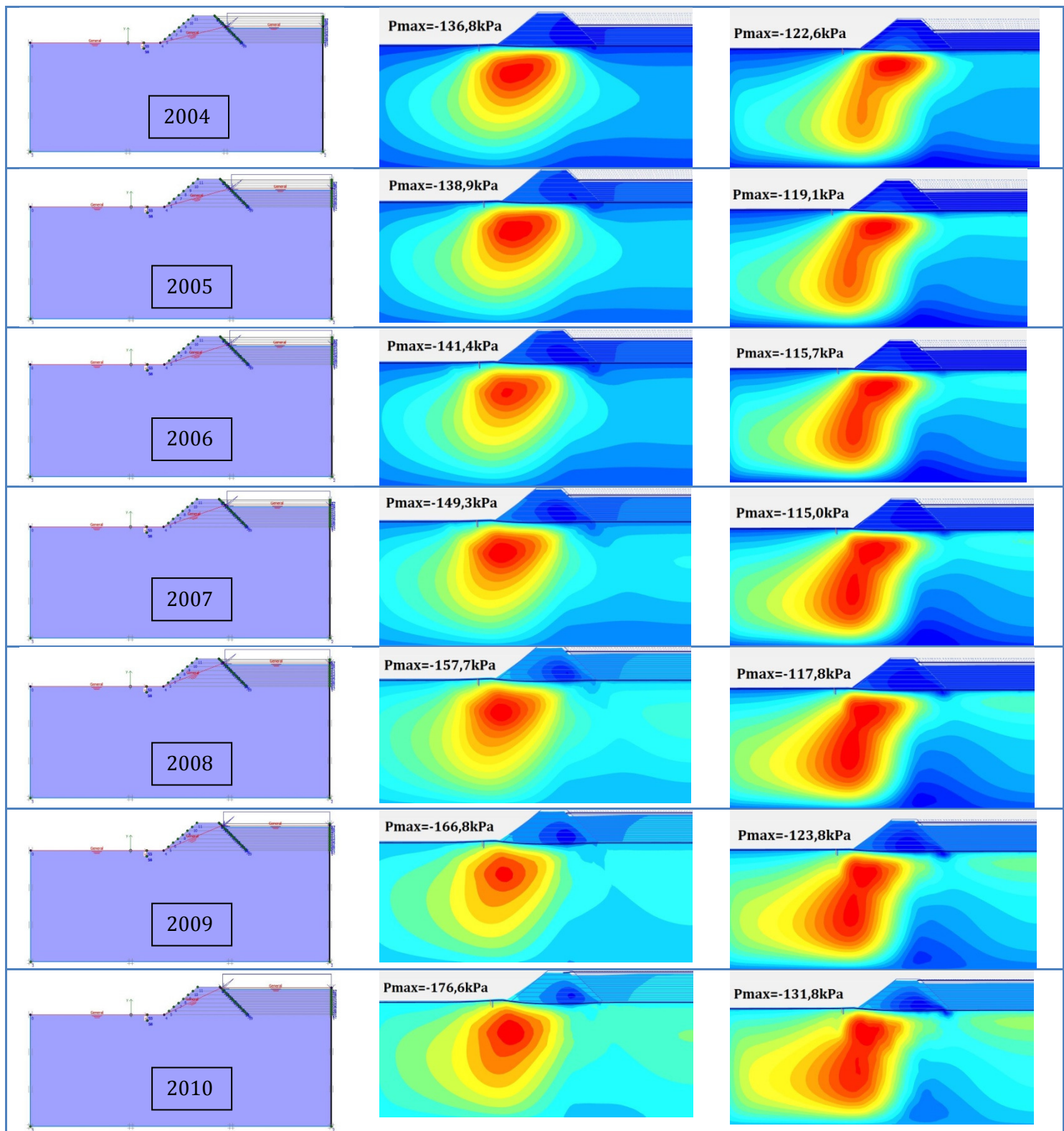
Mindkét anyagmodell eredményei azt mutatják, hogy az áteresztőképességi együttható egy nagyságrendbeli változása esetén ($k = 10^{-8}$ m/s-ról $k = 10^{-9}$ m/s-ra ; $k = 10^{-9}$ m/s $\rightarrow k = 10^{-10}$ m/s) közel kétszeresére, két nagyságrendbeli változása ($k = 10^{-8}$ m/s $\rightarrow k = 10^{-10}$ m/s) esetén négyeszeresére nő a gátépítés idején kialakuló többlet pórusvíznyomás nagysága a gáttest alatt.

A modellkísérleteim azt mutatják, hogy telített, puha agyagok esetén, folyamatos töltésepítés mellett, a többlet pórusvíznyomás nagysága négyzetesen függ az áteresztőképességtől.

Az 33. ábra és 34. ábra ábrákon megfigyelhető törés 1100 nap magasságában a tározó feltöltésének megkezdését jelenti. Ekkor a zagyardal felé megszűnik a talajban szivárgó víz útja, így a pórusokban rekedt víz a mentett oldal felé kezd kinyomódni. Ezzel megnő az áramlási úthossz és a konszolidáció ideje, így a nyírószilárdságot csökkentő többlet pórusvíznyomás tovább van jelen a töltés alatt, ezzel is csökkentve annak állékonysági biztonságát.

A 35. ábra a töltésepítés utáni konszolidáció folyamatát ábrázolja megegyező áteresztőképességű talajok esetén, eltérő anyagmodelleket alkalmazva.





35. ÁBRA: TÖLTÉSÉPÍTÉS UTÁNI KONSZOLIDÁCIÓ FOLYAMATÁBRÁJA (HSS ÉS MC MODELL) ($\kappa = 10^{-10}$ M/S)

Fontos megjegyezni, hogy az ábrán csak a többlet pórusvíznyomás értékek vannak megjelenítve, a valóságban teljes pórusvíznyomások az altalajban ettől eltérő képet mutatnak.

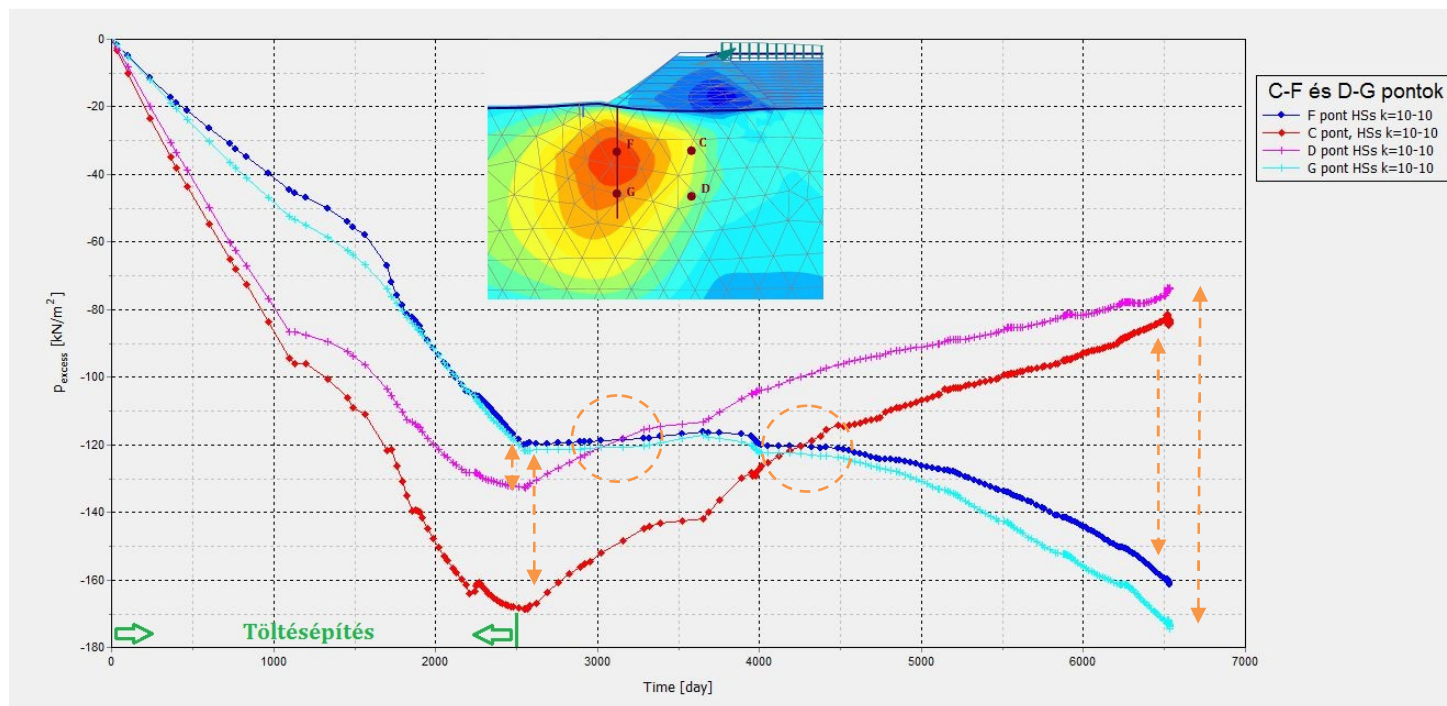


A 35. ábra alapján megállapítható, hogy a két különböző anyagmodell a töltésépítés befejezése után lejátszódó konszolidáció folyamatában már jelentős eltérést mutat. Mivel a mélységgel változó talajmerevséget eltérően veszik figyelembe, ezért a többlet pórusvíznyomás nagysága itt már szemmel láthatóan különbözik.

A Mohr-Coulomb modellben az összenyomódó mélyebb talajrétegek hatására mélyen keletkező pórusvíznyomás, már nem felel meg a valóságnak. A konszolidáció ezen fázisában a felkeményedő talajviselkedést figyelembevevő HS small modell már megbízhatóbb eredményeket szolgáltat.

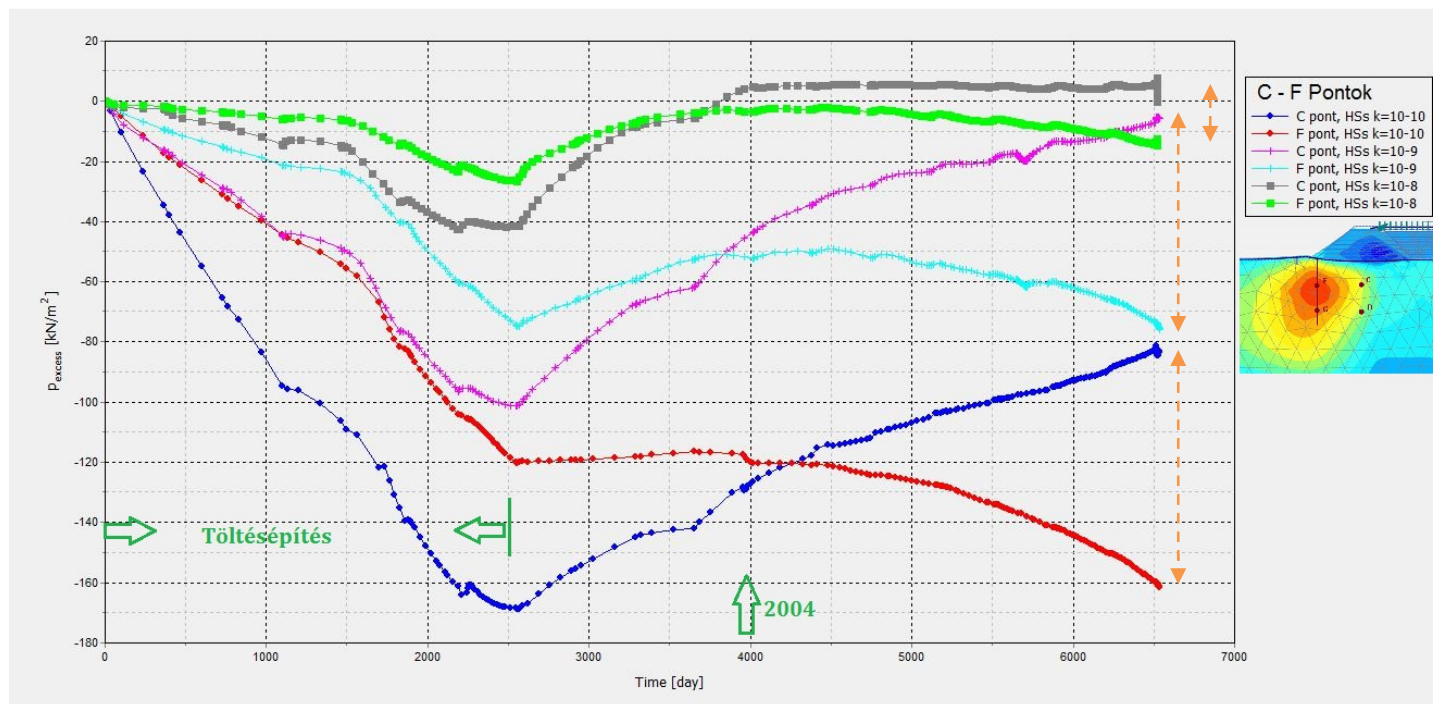
Érdemes megfigyelni, hogy az előzetesen várt folyamatokkal ellentétben, a többlet pórusvíznyomás nagysága nem csökken folyamatosan, hanem egy bizonyos idejű csökkenés után, újra növekedést mutat. A jelenség magyarázat a gáttest mozgásával van összefüggésben. A 6.1 fejezetben leírtak alapján a gáttest jelentős nagyságú süllyedést és – a mentett oldal felét – vízszintes elmozdulást szenved. Hasonló jelisséggel a mindennapos gyakorlatban előforduló töltésépítésnél (pl. autópálya töltés) nem találkozhatunk, ez a jelenség tározók gátjánál egyedi, hiszen a vízszintes irányú elmozdulást a tározótér irányából érkező nyomás idézi elő.

A tározó feltöltés utolsó ütemében a többlet pórusvíznyomás maximális értékei a töltésláb függőlegesében felvett „F-G” pontok környezetében találhatóak. Az építés megkezdésekor, a gáttest szimmetriatengelyében kialakult többlet pórusvíznyomás láthatóan a mentett oldal irányába mozog. (36. ábra)



36. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ALAKULÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN (HSs MODELL) ($k = 10^{-10}$ m/s)

A pórusvíznyomás vízszintes irányú mozgását az áteresztőképességi együttható értéke nagyban befolyásolja. (37. ábra)

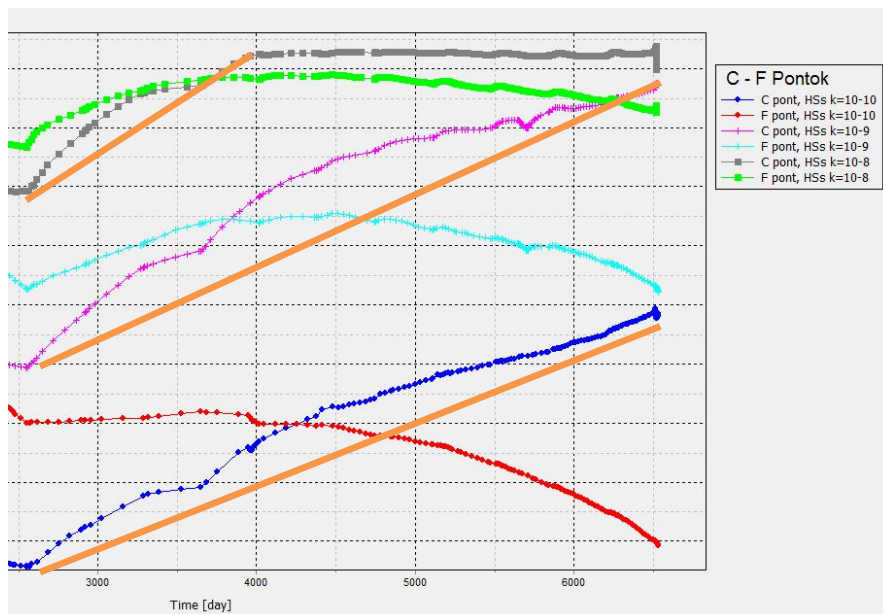


37. ÁBRA: A KONSZOLIDÁCIÓ FOLYAMATA A TEREPSZINT ALATT 15 MÉTERES MÉLYSÉGBEN (HSS MODELL)

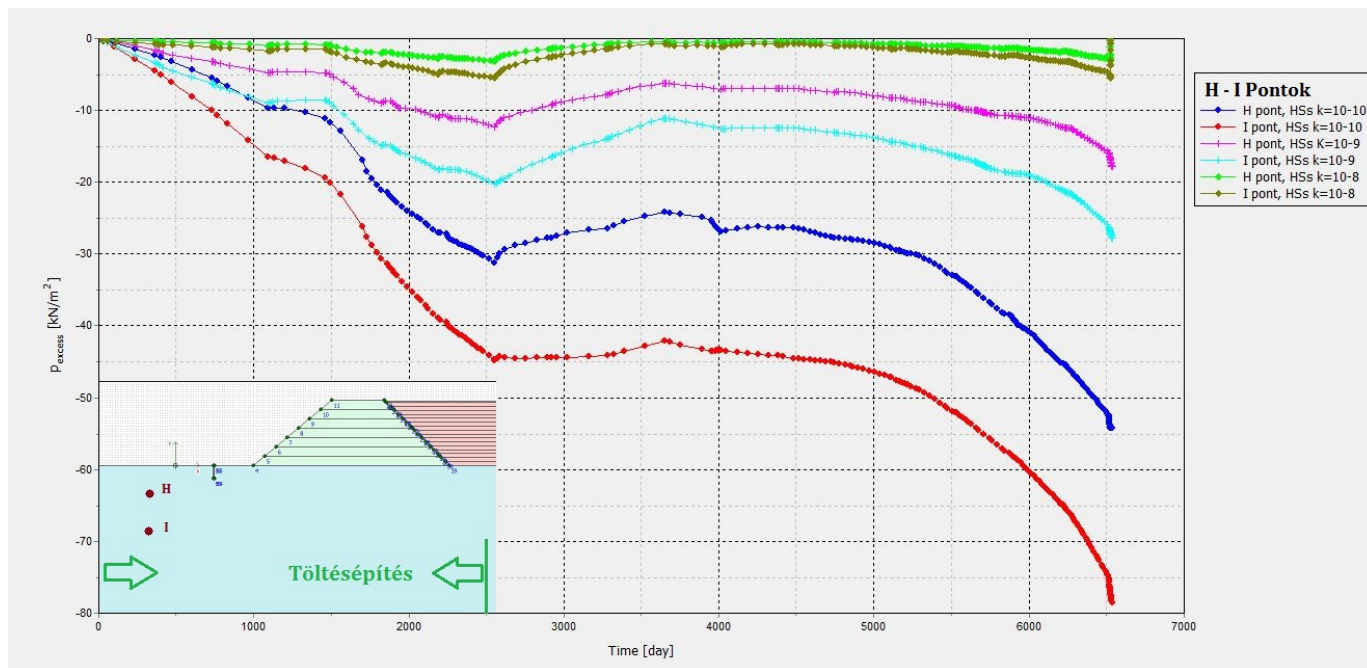
$k = 10^{-8}$ m/s nagyságú áteresztőképességi együttható esetén, a telített agyagtalajban, a gáttest alatt körülbelül 11 év alatt, 2004-re lejátszódik a konszolidáció. Ilyen paraméter mellett a rézsúláb vonalában sem számottevő a többlet pórusvíznyomás értéke a teljes feltöltési szint elérésénél. Az egy nagyságrenddel kisebb tényező esetén a konszolidáció a gáttest alatt körülbelül 2010-re játszódik le, azonban a rézsúláb vonalában még jelentős többlet mutatkozik. A legkisebb áteresztőképesség esetében a konszolidáció lejátszódásához még mindkét esetben hosszú időre van szükség.

A 37. ábra töltésépítés utáni részét kinagyítva beláthatjuk, hogy a függvények meredeksége alapján következtethetünk a várható konszolidációs időre.

38. ÁBRA:
KONSZOLIDÁCIÓ LEJÁTSZÓDÁSÁNAK
SEBESSÉGE AZ ÁTERESZTŐKÉPESSÉG
FÜGGVÉNYÉBEN (HSS MODELL)



A rézsúlábtól 40 méter távolságra lévő pontok vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy $k = 10^{-8}$ m/s nagyságú áteresztőképességi együtthatóval rendelkező agyagok esetén a töltésépítésnek ilyen távolságban már egyáltalán nincsen hatása. Az építési fázis miatt kialakuló nagyon kicsi pórusvíznyomás többlet gyorsan leépül. Ezzel szemben $k = 10^{-8}$ m/s áteresztőképességű talajok esetén még ilyen távolságban is 50-80 kPa nagyságú többlet pórusvíznyomás alakul ki, mélységtől függően. (39. ábra)

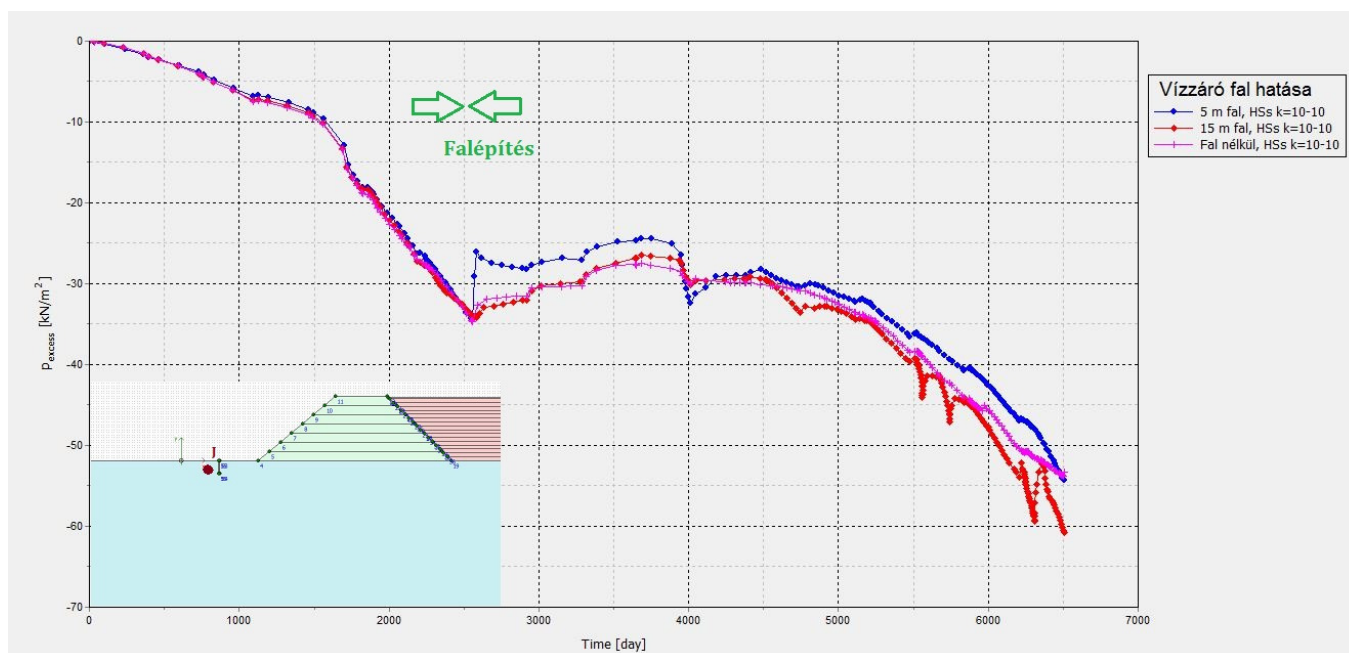


39. ÁBRA: A KONZOLIDÁCIÓ FOLYAMATA A GÁTTESTTŐL TÁVOL ESŐ PONTOKBAN AZ ÁTERESZTŐKÉPESSÉG FÜGGVÉNYÉBEN (HSS MODELL)

A zagytározók körül létesített vízzáró falak feladata, hogy esetlegesen a tározóból szivárgó szennyező anyagok továbbterjedését megakadályozzák, óvják az épített és természetes környezetet. Ezek a környezetvédelmi falak általában valamilyen vízzáró anyagból, gazdasági megfontolásból többnyire agyagból készülnek.

TDK dolgozatomban elkészítésének keretében vizsgáltam, hogy egy, a tározó körül létesített vízzáró fal hatással lehet-e az altalajban kialakuló többlet pórusvíznyomás leépülésére. A zagygát modellek elkészítésénél a rézsúlábtól 15 méterre elhelyezett, teljesen vízzáró (pórusmentes) 5 méteres, agyag anyagú környezetvédelmi falat alkalmaztam. Az eredmények összehasonlításához elkészítettem a modellek vízzáró fal nélküli és 15 méteres vízzáró fallal épített változatát is.

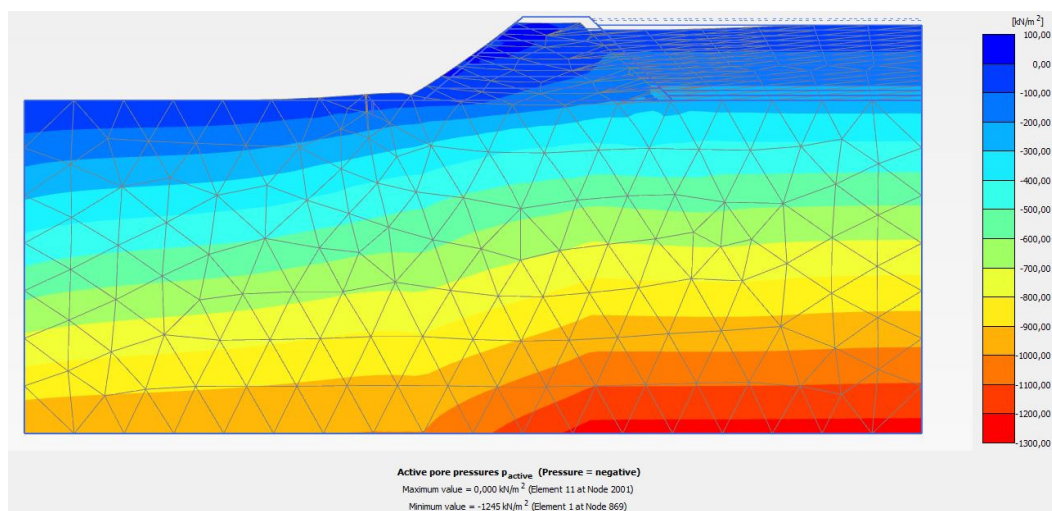
Az 40. ábra alapján belátható, hogy a környezetvédelmi fal pórusvíz „visszaduzzasztó” hatása szinte nulla a felszín közelében. (A vizsgált J pont 3 méterre van a terepszint alatt)



40. ÁBRA: TÖBBLET PÓRUSVÍZNYOMÁS ALAKULÁSA A VÍZZÁRÓ FALAK HATÁSÁRA (HSs MODELL) ($k = 10^{-10}$ m/s)

Összességében elmondható, hogy a zagygátak tervezésénél figyelembe kell venni a hatalmas tömegű töltés hatására keletkező többlet pórusvíznyomások értékét. A semleges feszültségek miatt a nyírószilárdság akár a töltés megépülése után több évtizeddel is a tönkremenetelt okozó érték alá csökkenhet. A konszolidáció lejátszódásának idejét az áteresztőképesség nagyban befolyásolja, ezen felül is külön figyelmet érdemel a szerkezetre jellemző sajátos viselkedés (többséves építés, vízszintes kúszás).

A puha, kötött talajra épülő zagygátak esetében minden esetben mérlegelni kell a megfelelő töltésalapozás elkészítését. A szerkezethez illő alapozási módszerrel befolyásolható a végbemenő süllyedések gyorsasága és csökkenthető a többlet pórusvíznyomás értéke. A szerkezethez tervezett alapozás, drénezés méretezéséhez a megfelelő végelelemes modell elkészítése elengedhetetlen. (41. ábra)



41. ÁBRA: TELJES PÓRUSVÍZNYOMÁS ÁBRA TELJESEN FELTÖLTÖTT TÁROZÓ ESETÉN (HSs MODELL) ($k = 10^{-10}$ m/s)



6.3 ÁLLÉKONYSÁG-VIZSGÁLAT

A stabilitás a kivitelezés közben, illetve a végén kritikus, mivel a puha talaj kicsi áteresztőképessége miatt az építés idő alatt nincs számottevő konszolidáció. Az építés végére a töltésteherből származó nyírófeszültségek már teljes egészükben működnek, a nyírási ellenállásnak a konszolidáció által képződő növekménye viszont még kevés lehet az állékonysághoz. (Koch 2012)

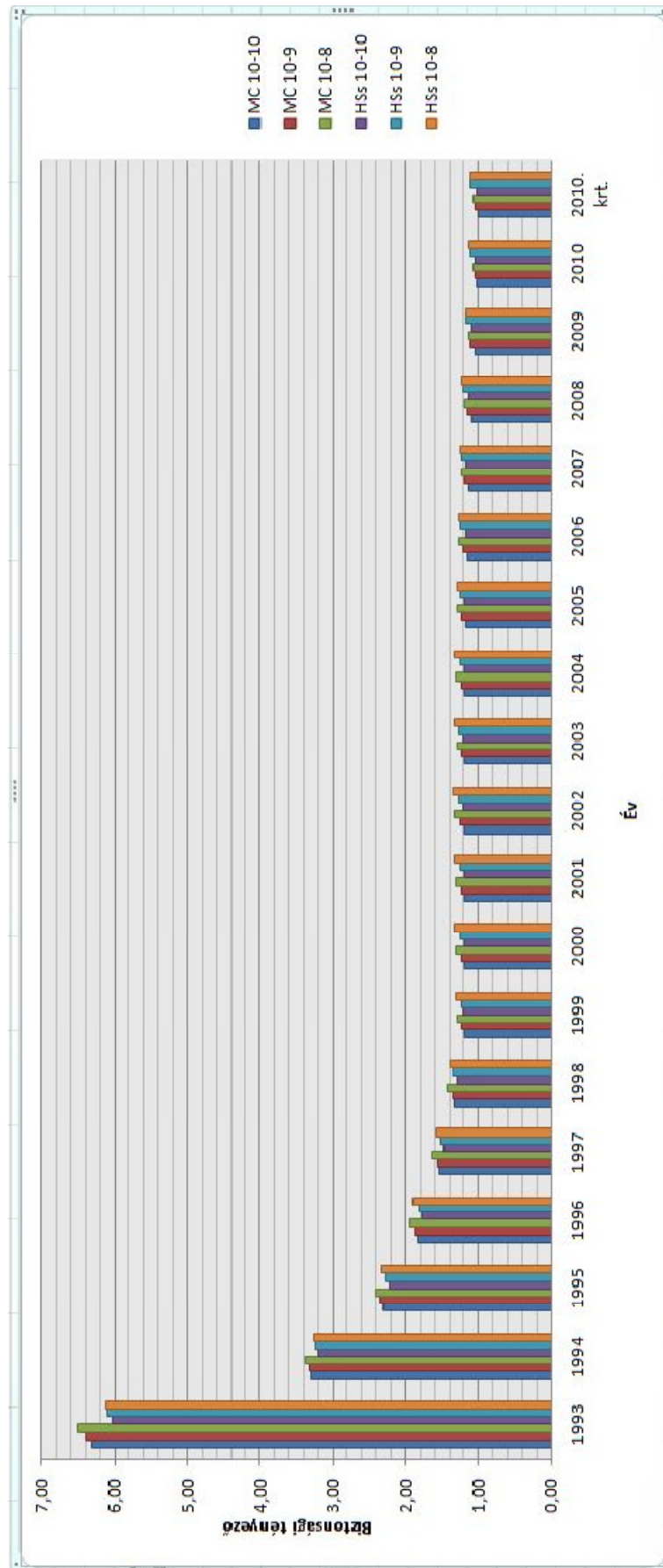
A jelenlegi európai gyakorlatban az Eurocode 7 bevezetése óta a tervezéskor a teherbírási és használhatósági határállapotot vizsgáljuk. A teherbírási határállapotot jelentő stabilitást valamilyen rézsűállékonysági módszerrel elemezzük, a használhatósági határállapotot a szokványos süllyedésszámítással értékeljük. (MSZ EN 1997:2006)

Munkám során Plaxis szoftverrel végeztem állékonyságvizsgálatot. A számítás során nem vettem figyelembe biztonsági tényezőket, a tönkremenetelhez tartozó globális biztonság értéke: 1,0.

A 3. táblázatban szereplő globális biztonsági értékeket azonos geometria, anyagjellemzők, építési ütemezés és talajvízviszonyok eredményezték. A különbség az alkalmazott anyagmodellekben és az áteresztőképességi együttható értékeiben van.

3. TÁBLÁZAT: STABILITÁSVIZSGÁLAT - BIZTONSÁGI TÉNYEZŐK

Évszám	Anyagmodell, (Áteresztőképességi tényező)					
-	Mohr-Coulomb ($k = 10^{-10}$)	Mohr-Coulomb ($k = 10^{-9}$)	Mohr-Coulomb ($k = 10^{-8}$)	HS small ($k = 10^{-10}$)	HS small ($k = 10^{-9}$)	HS small ($k = 10^{-8}$)
1993	6,32	6,40	6,50	6,04	6,09	6,11
1994	3,29	3,32	3,37	3,19	3,23	3,25
1995	2,30	2,34	2,40	2,23	2,28	2,32
1996	1,84	1,87	1,93	1,77	1,82	1,90
1997	1,53	1,56	1,63	1,47	1,52	1,57
1998	1,32	1,36	1,43	1,29	1,34	1,40
1999	1,19	1,22	1,29	1,20	1,23	1,30
2000	1,19	1,23	1,30	1,19	1,24	1,32
2001	1,19	1,23	1,31	1,20	1,25	1,33
2002	1,20	1,24	1,32	1,20	1,26	1,34
2003	1,19	1,23	1,28	1,20	1,26	1,33
2004	1,18	1,23	1,31	1,19	1,25	1,32
2005	1,17	1,22	1,28	1,18	1,24	1,29
2006	1,16	1,21	1,27	1,17	1,24	1,27
2007	1,13	1,19	1,24	1,16	1,22	1,25
2008	1,09	1,15	1,19	1,13	1,20	1,22
2009	1,05	1,10	1,13	1,09	1,16	1,17
2010	1,02	1,05	1,07	1,03	1,11	1,12
2010. krt.	1,00	1,04	1,06	1,00	1,08	1,11



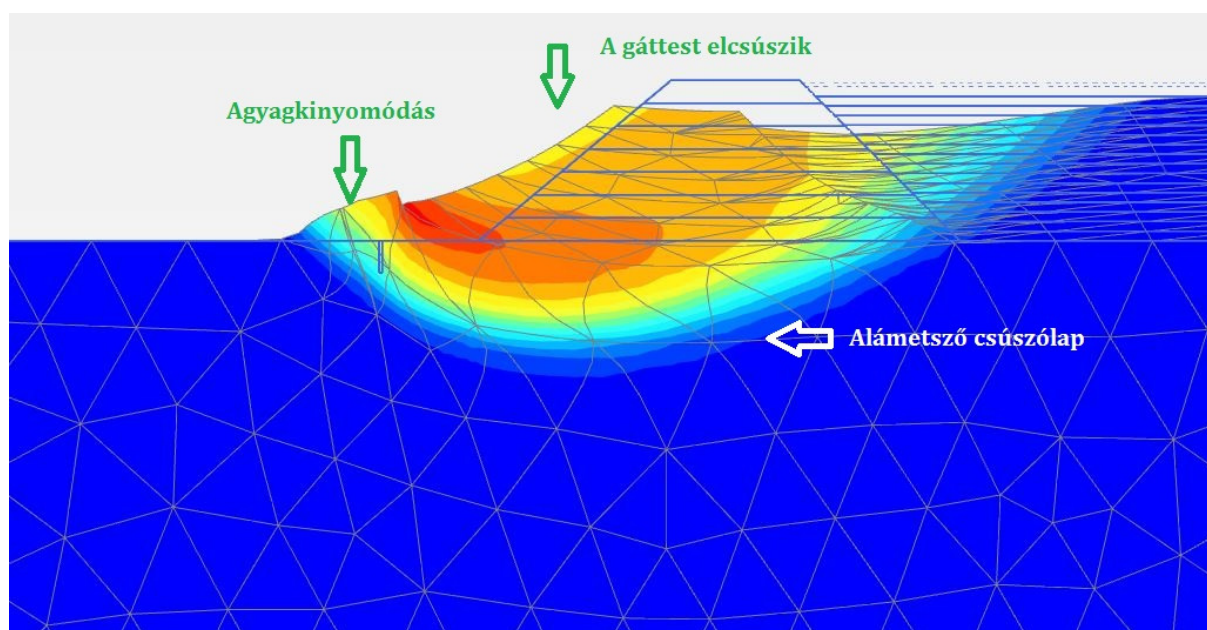
42. ÁBRA: A BIZTONSÁG ALAKULÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN

A 42. ábra alapján jól látható, hogy az építés megkezdése után gyorsan csökken a biztonság. A folyamatosan növekvő terhelés hatására, a töltés alatt létrejövő többlet pórusvíznyomás nagyon kedvezőtlenül befolyásolja az állékonyságot.

Az áteresztőképességi együttható a HS small modellben nagyobb mértékben befolyásolja a biztonságot, mint a Mohr-Coulomb modell esetében. Jól látható módon, még $k = 10^{-8}$ m/s esetén sem kielégítő a biztonság értéke, a geotechnikai tervezésnél alkalmazott $\gamma = 1,35$ biztonsági tényezőt már a töltésépítés befejezésekor sem érik el a kapott értékek.

A kivitelezés közbeni gyors biztonság csökkenés után, az építés befejezését követő években stagnálás tapasztalható, sőt a konszolidáció hatására a nyírószilárdság növekedésével nő a biztonság értéke (2000-2004.). Ezután a gáttest további süllyedése és a tározótér feltöltéséből származó nyomásnövekedés miatt a hatékony feszültség újra növekszik, ezzel rontva a biztonság értékét.

A végső állapotban a szerkezet tönkremenetelekor a legnagyobb többlet pórusvíznyomás vonalán alámetsző csúszólap alakul ki, talajtörés következik be.



43. ÁBRA: TÖNKREMENTETELI MECHANIZMUS

Az állékonyság növelésének érdekében töltésalapozásra van szükség, és biztosítani kell a vízelvezetést az altalajból, ezzel gyorsítva a konszolidáció lejátszódását.



7. ÖSSZEGRÖZÉS

A TDK dolgozatomban keretében puha, telített agyag talajra épült zagytározó gátját modelleztem. A zagytolt gátépítés technológiájából kifolyólag, a zagytározók gátjának építési ideje években, a terhelés hatására keletkező többlet pórusvíznyomás leépülésének ideje évtizedekben mérhető.

Munkám során a PLAXIS 2D nevű geotechnikai végelemes program 2011-es verzióját használtam. A dolgozat újszerűsége, hogy a szoftver segítségével egy közel 20 éves periódust modelleztem, amely a töltésépítéstől a zagytározó teljes feltöltéséig tart, közben végig vizsgálva a szerkezet és az altalaj kölcsönhatását.

A modellezett szerkezet geometriai méreteit és építési ütemezését a hazai gyakorlathoz hasonlóan választottam meg. Az alkalmazott anyagjellemzőket irodalmi ajánlások vagy saját kísérleti eredmények alapján határoztam meg.

Az agyag altalaj vizsgálatához három féle áteresztőképességi együtthatót használtam, $k = 10^{-8} - 10^{-10}$ m/s értékben. Így a kapott értékekből meghatározhatóvá vált a szerkezet érzékenysége a paraméter változására. A globális biztonságon túl a süllyedéseket, vízszintes elmozdulást, többlet pórusvíznyomást és konszolidációt vizsgáltam.

A süllyedések és elmozdulások vizsgálata alapján megállapítottam, hogy:

- A süllyedések pontos meghatározására a puha, telített agyagtalajok nemlineáris viselkedésének kezelése miatt a HS small modell alkalmas. Ebben a modellben az összenyomódó réteg vastagsága nem befolyásolja a számítást.
- A töltésépítés befejezésekor már jelentős süllyedések keletkeznek. A gátkorona szintje a tervezett magasság alatt van. A zagytározó gátak végelemes modellezésénél a gát magasságát célszerű a várható süllyedésekkel növelt értékkel figyelembe venni. Így a süllyedések kialakulása után a gátkorona a tervezett magasságra kerül.
- Homogén talajrétegre épített töltés okozta süllyedések esetén a talaj viselkedéséből és a terhelés módjából adódóan a fajlagos talaj-összenyomódás a mélység növekedésével csökken.
- Gyengébb áteresztőképességgel rendelkező puha, telített talajok esetén a süllyedés mértéke nagyobb lesz, ezzel is növelve a pórusvíznyomás értékét és rontva az állékonyságot.
- A rézsúlábnál a süllyedés okozta anyagkinyomódás tapasztalható, valamint a teljes töltés vízszintes irányú elcsúszása. A Mohr-Coulomb modell elfogadható közelítést ad a vízszintes kúszás értékére.

A gáttest egyes pontjainak elmozdulása $k = 10^{-10}$ m/s áteresztőképességi együtthatójú agyag altalaj esetén megközelítették a 4 métert. A rézsúláb környezetében a talaj 1,5 – 2,0 m magasságban felpúposodik. A szerkezetben létrejövő egyenlőtlen süllyedések a gáttest szilárdságát veszélyeztetik.



A töltés altalajra átadódó talpfeszültsége miatt létrejövő többlet pórusvíznyomás értékek vizsgálata során megfigyeltem, hogy:

- Az építés megkezdése után a többlet pórusvíznyomás értéke erőteljesen növekszik a töltés alatt. A folyamatos építés miatt nincs ideje a talajnak konszolidálódni. A tározó feltöltésének megkezdése után a töltés alatti pórusokban ragadt víz a zagy oldal felé már nem, csak a mentett oldal felé tud távozni. Ezzel megnő a víz áramlási úthossza így a többlet pórusvíznyomás leépülésének az ideje is.
- Mindkét anyagmodell eredményei azt mutatják, hogy az áteresztőképességi együttható egy nagyságrendbeli változása esetén ($k = 10^{-8}$ m/s-ról $k = 10^{-9}$ m/s-ra ; $k = 10^{-9}$ m/s $\rightarrow k = 10^{-10}$ m/s) közel kétszeresére, két nagyságrendbeli változása ($k = 10^{-8}$ m/s $\rightarrow k = 10^{-10}$ m/s) esetén négyszeresére nő a gátépítés idején kialakuló többlet pórusvíznyomás nagysága a gáttest alatt.
- A különböző anyagmodell a töltésépítés befejezése után lejátszódó konszolidáció folyamatában jelentős eltérést mutat. A Mohr-Coulomb modellben az összenyomódó mélyebb talajrétegek hatására mélyen keletkező pórusvíznyomás jelenléte nem felel meg a valóságnak. A konszolidáció ezen fázisában a felkeményedő talajviselkedést figyelembevevő HS small modell megbízhatóbb eredményeket szolgáltat.
- Az áteresztőképességi együttható nagysága jelentősen befolyásolja a gáttest alatti többlet pórusvíznyomás leépülésének idejét. $k = 10^{-10}$ m/s érték esetén ez több évtizedes lehet.
- A rézsúlábtól 40 méter távolságra lévő pontok vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy $k = 10^{-8}$ m/s nagyságú áteresztőképességi együtthatóval rendelkező agyagok esetén a töltésépítésnek ilyen távolságban már egyáltalán nincsen hatása. Az építési fázis miatt kialakuló nagyon kismértékű pórusvíznyomás többlet gyorsan leépül. Ezzel szemben $k = 10^{-8}$ m/s áteresztőképességű talajok esetén még ilyen távolságban is 50-80 kPa nagyságú többlet pórusvíznyomás alakul ki, mélységtől függően.
- A zagyártározó körül létesített környezetvédelmi, vízzáró falnak az építési mélysége miatt nincsen pórusvíz „visszaduzzasztó” hatása.

Az állékonyságvizsgálat elvégzésekor azt tapasztaltam, hogy a megjelenő többlet pórusvíznyomás nagyban rontja az stabilitási biztonság értékét. A tönkremenetelhez tartozó biztonsági tényező értéke 1,0. A vázolt modell esetében – a $k = 10^{-10}$ m/s áteresztőképességű agyag esetén a gát állékonysága nem felel meg.

A dolgozat elkészítése közben számos kérdés és fejlesztési lehetőség merült fel. A jövőben célok a kutatási téma továbbfejlesztése. A szerkezetben és a talajban keletkező vízáramlás modellezésével pontosabban meghatározhatóvá válhatnak a pórusvíznyomás értékek. Érdekes lehet vizsgálni továbbá az egyenlőtlen süllyedések miatt kialakuló húzó igénybevételeket a gáttestben, összevetve azt a húzószilárdsággal. Valamint hazai tapasztalatokból kiindulva a tározott anyag hatására, a töltés alatti agyagban kialakuló ioncsere hatását a nyírószilárdságra.



8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek, Dr. Takács Attilának és Dr. Nagy Lászlónak, hogy értékes észrevételeikkel és tanácsaikkal segítették munkámat.

Köszönöm Huszák Tamásnak, hogy lehetővé tette a szoftver használatát illetve Bán Zoltánnak a vizsgálatoknál nyújtott segítségét. Köszönöm továbbá a Geotechnikai Tanszék oktatóinak, hogy rendelkezésemre bocsájtották a dolgozat elkészüléséhez elengedhetetlen szakirodalmat.

Budapest, 2013.10.25.

Turai Péter

.....



9. IRODALOMJEGYZÉK

Alonso E. E. és társai (2004): Dynamics of Dam Sliding: Aznalcóllar Dam, Spain. Geomechanics of Failiures, Advanced Topics, 2004.

Bán Z.; Turai P. (2011): A pernyezagy anyagának szilárdsági vizsgálata, BME Építőmérnöki kar, TDK dolgozat

Benz T. (1997): Small strains stiffness of soils and its numerical consequences, ISBN: 9783921837559

Brinkgreve R.B.J.; Vermeer P.A. (2011): PLAXIS-Finite element code for soil and rock analyses, Plaxis 2D. Manuals, Delft University of Technology & Plaxis bv, The Netherlands

Császár G. (2005): Magyarország és környezetének regionális földtana I. ELTE Eötvös Kiadó, ISBN: 9634637442

De Vos M.; Whenham V. (2006): Innovative design methods in geotechnical engineering, GeoTechNet – European Geotechnical Thematic Network, pp. 6-9.

Farkas J. (2005): Tőzeges talaj összenyomódásának gyorsítása, MÉLYÉPÍTŐ TÜKÖRKÉP 4:(1) pp. 8-10.

Farkas J. (2006): A földmű-alapozás elméleti háttere az M7 autópálya Ordacsehi és Balatonkeresztúr közötti szakaszán, Közúti és Mélyépítési szemle 1:(10) pp. 28-37.

Farkas J.; Nagy L.; Dudás Zs. (2013): A Kolontári vörösiszap katasztrófa geotechnikai tanulságai, 3. Kézdi Konferencia kiadványa, Budapest, BME Geotechnikai Tanszék, 2013. pp. 27-38. ISBN: 978-963-313-081-0

Farkas J.; Rémai Zs. (2009): Alakváltozási jellemzők meghatározása: Puha, szerves és kötött talajok vizsgálata. MÉLYÉPÍTŐ TÜKÖRKÉP VIII:(5) pp. 4-6. (2009)

Huszák T., Nagy L., Czap Z. (2011): Zagygátek tönkremenetele, Innotéka, május, pp. 44-47.

Kézdi Á. (1977): Talajmechanika I., Tankönyvkiadó, Budapest, ISBN 963 17 2256 2

Koch E. (2012): Töltésalapozási eljárások modellezése, Doktori disszertáció, Széchenyi István Egyetem, MTK Szerkezetépítési és Geotechnikai Tanszék

MÉLYÉPÍTERV (1984): Irányelvek hidraulikus tározók tervezéséhez, Budapest

Nagy G. (2011): Zagygátek tervezése, BME Építőmérnöki kar, Diplomamunka

Nagy L. (2011): Zagygátek biztonsága. El ne öntsön a méreg. Mérnökújság, január, pp. 16-17.

Paál T. (1974): Talajfizikai jellemzők vizsgálata, Mélyépítéstudományi Szemle, 24. évf, 8. szám, pp. 379-387



Rémai Zs. (2012): Töltések alatti, vízzel telített agyagok vizsgálata, Doktori disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnikai Tanszék

Sukro O. és társai (2007): Staged Construction and Settlement of a Dam Founded on Soft Clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007.

Szilvágyi Zs. (2009): Új fejlődési irány a véges elemes geotechnikai számításokban, Közlekedésépítési Szemle, 60. évf. 3. szám, pp. 31-32.

Török Á. (2007): Geológia mérnököknek, Műegyetemi Kiadó, Budapest, ISBN 9789634209348

Varga G.; Czap Z.; Mahler A. (2009): Bevágási rézsűk tartós stabilitása, Közlekedésépítési szemle, 59. évf., 3. szám, pp. 17-21.

Varga L. (1986): Geotechnika III, Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 35-40.

Vick, S.G. (1990): Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishers Ltd.