

Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem

*Építőmérnöki kar
Geotechnikai Tanszék*

A pernyezagy anyagának szilárdsági vizsgálata



Szerzők: Bán Zoltán és Turai Péter

*Konzulensek: Dr. Nagy László
Dr. Török Ákos*

Tartalomjegyzék

Összefoglalás	2
Summary	3
1. Bevezetés	4
2. A pernyezagy keletkezése, anyaga, összetétele és jellemzői.....	4
2.1. A szenek típusai és szerepük Magyarország energiatermelésében.....	4
2.2. Pernye és salak keletkezése.....	6
2.3. A pernye összetétele.....	7
2.4. Pernye és salak jellemzői	8
2.5. Pernyezagy deponálása	10
2.6. A lerakott zagy jellemzői	11
2.7. Pécsi, inotai, tatabányai, mátrai és ajkai pernye összehasonlítása	14
3. Zagyolt gátépítés módszere	16
3.1. Zagy tározók fogalma, működése	16
3.2. Zagy tározók építése, építési módszerei	16
3.2.1. Zagy tározók típusai.....	16
3.2.2. Földgáttal határolt zagy tározók.....	18
3.2.3. Saját anyagból épülő tározók	18
3.2.4. Tározóépítés kombinált módszerrel	18
4. Pernye szilárdsági vizsgálati módszerei	19
4.1. Tömegösszetételi tulajdonságok meghatározása	19
4.1.1. Víz tartalom mérés	19
4.1.2. Piknométeres vizsgálat.....	20
4.2. Szilárdsági és alakváltozási vizsgálatok	22
4.2.1. Egyirányú nyomószilárdság	22
4.2.2. Közvetett húzó- (brazil) szilárdság	23
5. Mérési eredmények	24
5.1. Megszilárdult pernyezagy vizsgálati eredményei.....	24
5.1.1. A magminták vizsgálati eredményei.....	24
5.1.2. Az „ÚJ” minta vizsgálati eredményei.....	29
5.2. Agyagok vizsgálati eredményei	30
5.2.1. Pannon agyag.....	30
5.2.2. Kiscelli agyag	31
6. Mérési eredmények értékelése műszaki szempontból.....	32
6.1. Talaj és kőzet közötti átmenet.....	32
6.2. A pernye szilárdági-alakváltozási jellemzői.....	34
6.3. Mohr-Coulomb modell alkalmazása	42
6.4. Fizikai jellemzőkkel kapcsolatos összefüggések	47
7. Következtetések	53
8. Köszönetnyilvánítás	55
9. Irodalomjegyzék	56
MELLÉKLETEK.....	58
I. Melléklet. Táblázatok	58
II. Melléklet. Jegyzőkönyvek.....	62
III. Melléklet. Véges elemes számítás	98

Összefoglalás

Az ajkai vörösiszap katasztrófa kapcsán a zagytározók állékonysága és biztonságága a figyelem középpontjába került. Az egyik legleterjedtebb zagy a széntüzelésű erőművekben keletkező pernyezagy, mivel a szén évszázadok óta az egyik legfontosabb energiahordozónak számítanak. A pernyezagy tulajdonságait döntő mértékben befolyásolja a kiindulási anyag szabad mésztartalma. Minél magasabb a pernye szabad CaO tartalma, annál nagyobb hidraulikus kötőkéesség jellemzi, így a megszilárdult anyag annál nagyobb kohézióval fog rendelkezni.

Tanulmányunk keretében laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk megszilárdult pernyezagy mintákon. A minták egy 20 évvel ezelőtt épült gáttesten készített fúrásokból származtak.

Vizsgálataink során tömegösszetételi, illetve szilárdsági méréseket végeztünk. A két fúrásból összesen 29 darab, 30 cm névleges magasságú magminta állt rendelkezésünkre. Ebből 7 darab nem volt vizsgálható állapotban, mivel a fúrás és a szétdarabolás során – gyenge kohéziójuknak köszönhetően – széttöredeztek és szétmorzsolódtak. A könnyen töredező, réteges szerkezetnek köszönhetően nem lehetett triaxiális vizsgálatokhoz alkalmas méretű próbatesteket kialakítani az épen maradt mintákból sem. Így a maradék 22 magmintából kialakított 29 próbatesten egyirányú nyomó-, illetve közvetett húzókísérleteket hajtottunk végre. A szilárdsági vizsgálatok mellett víztartalom mérést, illetve 10 próbatest esetén anyagsűrűség mérést is készítettünk. Ezek, illetve a nedves térfogatsűrűség alapján kiszámíthatóvá vált a többi talajfizikai paraméter. Mivel a különböző zagyok ritkán fordulnak elő a mérnöki munka során, ezért a kapott eredményeket összehasonlítottuk a Budapest környékén gyakran előforduló talajok értékeivel. Ennek érdekében elvégeztünk pár szilárdsági vizsgálatot kiscelli és pannon agyagon is.

A szilárdsági vizsgálatok eredményeit jelentősen befolyásolta a megszilárdult pernyezagy réteges, heterogén szerkezete, amely a zagypótlás technológiájára és az alkalmazott tüzelőanyag változatosságára vezethető vissza. A kapott eredmények alapján a megszilárdult pernyezagy nyomószilárdsága igen tág határok, 80 kPa és 2700 kPa között változott. Míg a minták húzószilárdsága főleg 20 és 50 kPa között mozgott. Ezek alapján a vizsgált pernyezagy a kiscelli agyag szilárdsági jellemzőivel mutat hasonlóságot, amely átmenetet képez a talajok és kőzetek között.

A víztartalom és a szilárdság között egyértelmű összefüggés mutatkozott. Amint az a talajok esetében is szokványos, minél nagyobb volt a minta víztartalma, annál kisebb lett a szilárdság értéke. A víztartalom és a σ - ϵ ábrák alapján két csoportra lehetett bontani a mintákat. A kétféle pernyezagyra ezután a Mohr-Coulomb törési feltétel segítségével meghatároztuk a nyírószilárdsági paramétereket. Majd ezekkel egy rövid állékonysági számítást is végeztünk a Plaxis véges elemes programmal, amely alapján a kétféle anyag – ami a gáttest két különböző rétegének tekinthető – biztonsági tényezője között kétszeres különbség adódott.

A tömegösszetételi vizsgálatok alapján a megszilárdult zagy magas, akár 2,00 feletti hízagtényezővel, alacsony anyagsűrűséggel ($\gamma_{s, \text{átlag}} = 2,37 \text{ g/cm}^3$) és alacsony nedves térfogatsűrűséggel ($\gamma_{n, \text{átlag}} = 1,45 \text{ g/cm}^3$) rendelkezik. Utóbbi tulajdonságot a pernye tagolt felülete és a szemcsék belsejében található apró lég- és gázzárványok okozzák. A TDK dolgozatunk utolsó részében a talajfizikai jellemzők és a szilárdság közötti összefüggéseket vizsgáltuk.

Summary

The red mud disaster at Ajka has again highlighted the topic of safety placing of different slurries and tailings. Due to tailings dam technology the confining embankments of the disposed material are often made from tailings. So to avoid similar accidents, the exact knowledge of these material's strength and deformation properties is very important.

The fly ash slurry producing by coal-fired power plants is one of the most prevalent tailings slurries, since coal has been one of the most important energy source for centuries. The properties of slurry is strongly influenced by the free lime content of the fly ash. The more is the free lime content, the more is the hydraulic binding strength, the more will be the cohesion of the solidified material.

In our study we've done laboratory tests on solidified fly ash slurry samples. The samples were from drillings of a tailings dam built 20 years ago.

During our work we did mass composition and strength measures. From the two drillings we had altogether 29 samples, all with 30 cm nominal height. From these 7 samples weren't in investigable state, because during the drilling and cutting – due to its low cohesion – they had broken and friabled into small pieces. Thanks to its friable and laminated structure it wasn't possible to fabricate appropriate specimens for triaxial compression tests neither from the intact samples. Thus we have made unconfined compressive tests and indirect tensile tests on the 29 specimens what were made from the 22 remained samples. Beside the strength tests we have made moisture content measurements and on 10 samples we determined the densities of solids. From these and the bulk densities the other mass-volume parameters had become computable. Since slurries are quite rare in engineering problems, we compared the results with prevalent soils of Hungary. Therefore we made some strength tests on Kiscell and Pannon Clay too.

The results of strength tests was significantly influenced by the heterogeneous and laminated structure of solidified fly ash slurry, what originates in the tailings dam technology and in the diversity of applied fuels. By the results the strength of the solidified fly ash slurry is very similar to the strength of soft rocks and hard soils. Based on this the material is the closest to the yellow Kiscell Clay, but it's much more stiff.

There was a definite correlation between strength and moisture content. As it is common for soils, the more was the moisture content of the samples, the less was their strength. The samples could be divided into 2 groups by the moisture content and stress-strain diagrams. To the two different fly ash slurry groups we determined the value of the angle of friction and cohesion. Then we made a short stability calculation with them by a finite element program called Plaxis. The results showed that there is double difference between the safety factors of the two types of material, that can be considered as two different layers of the dam.

Based on the mass composition tests the solidified fly ash slurry has high void ratio, low wet bulk density and low density of solids. These properties is caused by the articulated surface of the fly ash grains and the small air and gas bubbles contained by the grains. In the last part of our study we analyzed the connection between the mass composition and strength properties.

1. Bevezetés

Az ajkai vörösiszap katasztrófa ismételten rávilágított arra, hogy a különböző bányászati, illetve ipari tevékenységekből származó zagyok mekkora veszélyt jelenthetnek a környezetre. Az elmúlt évtizedekben több – nem egy a magyarországinál súlyosabb következményekkel járó – hasonló katasztrófa is bekövetkezett világszerte, bizonyítván, hogy az ajkai gátszakadás nem tekinthető elszigetelt esetnek. Ezek az események újból és újból rávilágítanak arra, hogy mennyire fontos a zagy tározók geotechnikai jellemzőinek minél pontosabb megismerése.

A zagy tározók állékonysága szoros összefüggésben van az őket alkotó zagyok tulajdonságaival. Ezek közül is kiemelkednek a szilárdsági jellemzők, amelyek döntő jelentőséggel bírnak a stabilitási kérdésekben. Az általunk vizsgált pernyezagy az egyik legelterjedtebb ilyen jellegű anyag, lévén a széntüzelésű erőműveknek még mindig jelentős szerepe van a világ energiatermelésében. A környezetvédelmi törekvéseknek köszönhetően az utóbbi évtizedekben egyre jobban előtérbe került a pernye újrafelhasználása, azonban még így is nagy mennyiségben kerül deponálásra.

A TDK dolgozat célja a pernyezagy szilárdsági vizsgálata, valamint az eredmények értékelése volt. A vizsgálatok segítségével nemcsak az anyag teherbírásáról, hanem alakváltozásáról és tönkremeneteli mechanizmusáról is képet alkothattunk. Mivel az anyag szilárdságát tekintve a talajok és a kőzetek határán fekszik, ezért igyekeztünk mind a talaj-, mind a kőzetmechanikai szemléletet magunk előtt tartani. Továbbá a talajfizikai jellemzők felhasználásával igyekeztünk további összefüggésekre is rámutatni, amelyek elősegíthetik az anyag tulajdonságainak jobb megértését. Mivel a mérnöki munka során ritkán találkozunk zagyokkal, ezért a kapott eredményeket párhuzamba állítottuk a természetben előforduló talajokkal, kiemelve a köztük lévő különbségeket és a hasonlóságokat. Az általunk vizsgált magminták egy zagyolt technológiával épült gáttestből származtak.

A bevezetést követő második fejezetben a szénfésüléséről szóló kis ismertető után a pernye keletkezését, összetételét, jellemzőit és depóniába helyezését mutatjuk be. A pernye tulajdonságai nagymértékben befolyásolják a belőle készülő zagy tulajdonságait, így ennek ismerete elengedhetetlen a kapott eredmények értelmezéséhez. A harmadik fejezetben a zagyolt gátépítés technológiáját mutatjuk be röviden. A következő fejezetben a vizsgálati módszerek leírása következik, ahol az általunk elvégzett mérések szabványt követő leírásai találhatók. Az ötödik fejezetben a pernyezagy és a mellette vizsgált kiscelli, illetve pannon agyag minták mérési eredményeinek összefoglalása szerepel táblázatos formában. Az egyes próbatestek részletes jegyzőkönyveit a melléklet tartalmazza.

A hatodik fejezetben a mérési eredmények értékelése kerül bemutatásra. Ennek során a kapott eredményeket összehasonlítottuk a szakirodalomban található értékekkel. A szilárdsági vizsgálatok alapján meghatároztuk az anyagra jellemző nyírószilárdsági paramétereket, amelyekkel egy egyszerű lejtő állékonysági számítást is elvégeztük. Az utolsó alfejezetben pedig a talajfizikai jellemzők és a szilárdsági paraméterek közötti összefüggéseket vizsgáltuk.

2. A pernyezagy keletkezése, anyaga, összetétele és jellemzői

2.1. A szenek típusai és szerepük Magyarország energiatermelésében

A világ villamosenergia-termelésében az ipari forradalom óta jelentős szerepet játszanak a szénfésések. A szén alapú energiatermelés egészen a XX. század közepéig végéig egyeduralkodónak számított. Ugyan a szénhidrogének, az atomenergia és újabban a megújuló erőforrások előtérbe kerülésével veszített jelentőségéből, de még így is az egyik legjelentősebb energiahordozónak számít.

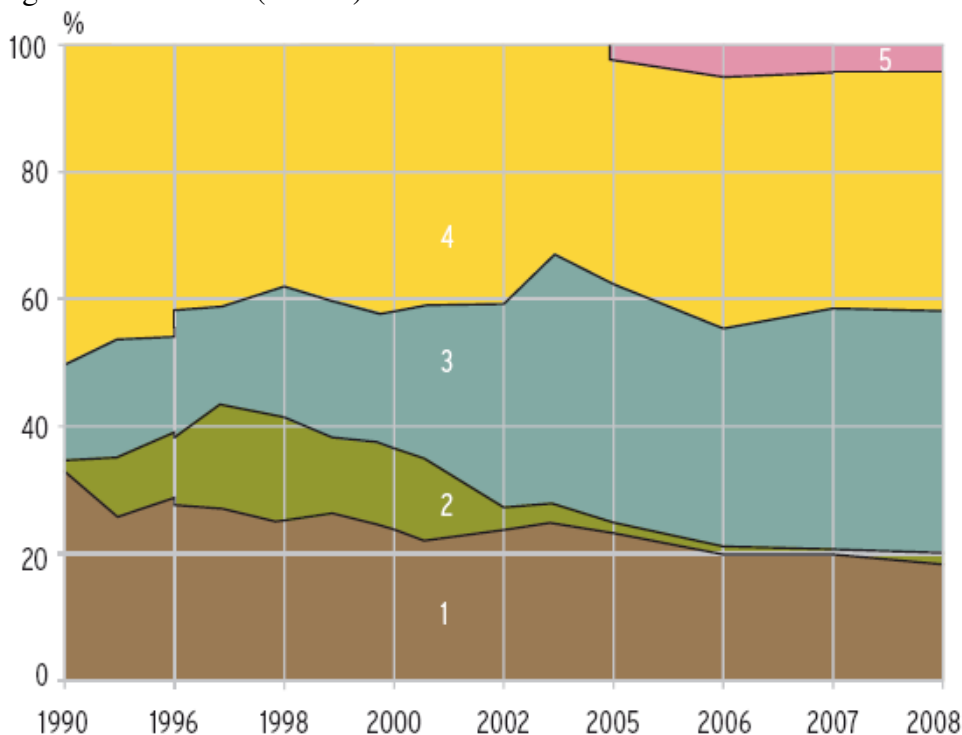
A kőszén keletkezése évmillióig is eltartó szerves kémiai folyamat eredménye. Ennek során dús vegetációjú lápokban felhalmozott, a nagy szervesanyag-tartalom miatt redukív környezetben eltemetett növényi maradványokból alakulnak át. Képződési folyamatát szénülésnek nevezik. Ennek termékei a folyamat előrehaladtával: tőzeg, lignit, barnakőszén, feketekőszén, antracit (1. ábra).



1. ábra. Fekete-, barnakőszén és lignit (www.blathypalyazat.atw.hu, www.invitel.hu/kormos5)

A világhoz hasonlóan Európa villamosenergia-termelésében is jól megfigyelhető a szén csökkenő szerepe. Az elmúlt 20 esztendőben a szénalapú energiatermelés egyre vesztett jelentőségéből, míg a földgáz és a megújuló erőforrások használata növekvő tendenciát mutatott. Az Európában megfigyelhető tendenciák Magyarországra is érvényesek. 2008-ban hazánk villamosenergia-termelésének 17,3%-át adták a széntüzelésű erőművek, melynek döntő többsége lignittüzeléssel működött.

A széntüzelés az 1950-es, 60-as években élte fénykorát, amikor is az energiatermelésünk több, mint 60%-át adta. Azóta gazdasági szempontból, valamint a környezetvédelmi törekvések előtérbe kerülésének is köszönhetően, visszaszorult a szénfélésegek felhasználása (2. ábra).



2. ábra. A villamosenergia megoszlása energiahordozók szerint 1990 és 2008 között Magyarországon (www.mvm.hu)

1 – szénből, 2 – fűtőolajból, 3 – földgázból, 4 – atomenergiából, 5 – megújuló erőforrások

Magyarországon feketekőszén egyedül a Mecsekben található, barnakőszénben és lignitben viszont már jóval gazdagabb az ország. Ajka környékén, a Dunántúli-középhegység ÉK-i részén (Tatabánya, Balinka, Oroszlány) és a nógrádi-borsodi területeken található a legjelentősebb telepek. Lignit előfordulások Várpalota, Mátraalja, Bükkalja és Szombathely környékén ismertek.

A magyarországi szén energetikai szempontból meglehetősen gyenge minőségűek. Általánosságban 40% körüli hamutartalom jellemző rájuk, így az évi 8-10 millió tonnás szénfogyasztásnak köszönhetően, mintegy 3-4 millió tonna salak és pernye keletkezik.

2.2. Pernye és salak keletkezése

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.

Definíció szerint (Haidekker 1994):

Salak: Kőszén elégetésekor visszamaradó (olvadás és az azt követő megszilárdulás folytán összetapadó) rögök, amelyek a szénhez keveredett, nem égő ásványi anyagokból állnak.

Hamu: Szerves anyagok teljes elégetése után visszamaradó (többnyire por alakú, esetleg nagyobb darabokká összeolvadt) anyag, amely az oxidáció nem illékony termékeiből, szervesetlen sókból, oxidokból áll.

Pernye: A szén hamutartalmának az a finomszemcsés része, amely a füstjáratokon, a füstgázokkal együtt távozik a kazánból (3. ábra).



3. ábra. Pernye (www.themoderngreen.com)

A pernye leválasztására régebben széleskörűen alkalmazták a centrifugális erőt kiaknázó ciklonokat. A porleválasztással szemben támasztott egyre szigorúbb előírások hívták életre a modernebb elektrosztatikus pernyeleválasztókat. A 90-es években egyre több szénportüzelésű erőmű tért át fluid ágyas tüzelésű kazánok használatára. A technológia népszerűségének egyik oka, hogy a különböző helyekről származó szén mellett egyéb tüzelőanyagokkal való együttégetésre is alkalmas, így lehetőség nyílik az egyre elterjedtebb biomassza égetésére is. Az új létesítmények környezetre ártalmas SO_x kibocsátását a fluid ágyba történő mészsadalással csökkentik. Ez megnöveli a pernyék mésztartalmát, valamint megváltoztatja a pernyezag viszkozitását és kristályosodását.

2.3. A pernye összetétele

A pernye összetételét és tulajdonságait számtalan tényező befolyásolja, amelyek közül a legfontosabbak:

- a tüzelési technológia és az ehhez tartozó kiörlési finomság,
- a szénben lévő ásványi zárványok tartalma,
- a szén minősége, hamutartalma,
- a hamu összetétele.

A pernye 1 és 150 µm közötti átmérőjű, főleg Si- és Al- tartalmú gömb alakú szemcsékből áll (Mehta 1989). Emellett kisebb mennyiségben más elemeket: vasat (Fe), nátriumot (Na), kalciumot (Ca), káliumot (K), foszfort (P), és kenet (S) is tartalmaz. Fő komponensei a szilícium-dioxid (SiO_2) – amely két változatban is előfordul: kerek, sima amorf, illetve hegyes, kristályos formában – a kalcium-oxid (CaO) és az alumínium-oxid (Al_2O_3). Ezeken kívül különböző ásványokat, pl. mullitot, hematitot, magnetitet, anhidritet és földpátokat is tartalmazhat. Az 1. táblázatban a hazai erőművek pernyéinek kémiai összetétele látható.

1. táblázat. Hazai erőművek pernyéinek részletes kémiai összetétele százalékban kifejezve (Gáspár 2005)

Erőmű	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Iv.
Gyöngyösvisontai	55-60	16-18	8-12	5-7	1,4-2,5	1,5-6,5	1-2	2,6-6
Tiszapalkonyai	55-60	25-28	5-7	3-7	-	-	-	1-2
Pécsi	50-56	24-34	8-12	1-4	1-2	0,5-1,0	0-0,5	3-6
Borsodi	49-55	21-28	7-12	5-10	1,5-3	1-3	1,0-2,2	1-3
Tatabányai	45-51	24-32	7-15	2-8	2-8	1-7	1-2	1-3
Mátravidéki	45-52	16-20	11-14	8-12	2-4	2-4	0,5-1,5	0,5-3
Oroszlányi	18-41	25-28	9-17	7-11	2-4	3-3	0,5-1,5	1-2
Ajkai	19-25	15-26	7-16	35-43	3-5	4-10	-	0-2
Inotai	18-30	6-11	8-11	32-34	3-6	4-8	1,3-1,6	0,5-3

Mérési adatok szerint a fluid ágyas és szénportüzeléses kazánoknál is az a jellemző, hogy az SiO_2 tartalom döntő része a salakban távozik – a salak SiO_2 tartalma 60-90% -, a pernyében csak kisebb része marad (a pernye SiO_2 tartalma 20-50%). Ugyanakkor a Fe_2O_3 (vas-oxid), Al_2O_3 , és a $\text{CaO} + \text{MgO}$ tartalom nagyobb részben a pernyében jelenik meg. A táblázat alapján megállapítható, hogy a legnagyobb CaO tartalommal az inotai és ajkai pernyék rendelkeznek.

A salak és pernye fizikai és kémiai jellemzői a hőerőművekben feltételezett azonos keletkezés mellett is attól függenek, hogy milyen szénből keletkeznek. A különböző szenek pernyéinek összetételében jelentős különbségek mutakozhatnak (2. táblázat). Továbbá a barnaszénből és lignitből keletkező pernyéken belül is nagy minőségi ingadozások jelentkezhetnek, emiatt az építőipari hasznosítás terén jelentős a lemaradása feketeszen pernyéhez képest.

2. táblázat. Fekete-, barnaszén és lignit pernyéjének összehasonlítása (ASTM)

Komponens (%)	Feketeszen	Barnaszén	Lignit
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	20-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
Iv.	0-15	0-3	0-15

A nemzetközi szakirodalomban (az ASTM C618 alapján) kémiai összetételük alapján kétféle pernyét különböztetünk meg. Az F típusú pernye főleg öregebb feketeszenek és antracitok elégetésekor keletkezik. Általában 20%-nál kevesebb meszet (CaO) tartalmaz. Erősen puccolán tulajdonságú, azaz katalizátor anyag (portland cement, szabad mész) szükséges ahhoz, hogy víz jelenlétében meginduljon a szilárdulási folyamat.

A C típusú pernye főleg barnaszenek és lignit tüzelésével keletkezik. Szintén puccolános tulajdonságú, azonban amíg az F típusú pernye legalább 70%-ban tartalmaz puccolán összetevőket (SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3), addig a C típusú pernye csak 50 és 70% között. Általában 20%-nál több meszet tartalmaz, ennek köszönhetően víz jelenlétében idővel megkeményedik és megszilárdul. Ez a tulajdonsága eredményezi, hogy ezek a pernyék alkalmasak zagy tározók építésére. Magyarországon kis közelítéssel az F típusú pernyéket savanyú, míg a C típust bázikus pernyeként azonosítják. A hazánkban található pernyetározók javarészt savanyú pernyét tartalmaznak, és mindössze két helyen, Ajkán és Inotán található bázikus pernye. Az ajkai és az inotai pernye tehát – hozzáadott anyag nélkül is – alkalmas töltések, gáttestek kialakítására.

2.4. Pernye és salak jellemzői

Az erőművekben keletkező salak és pernye (továbbiakban salak-pernye) szemcsés anyagnak tekinthető, kohézióval nem rendelkezik. Mint szemcsés anyag nagymértékben különbözik a természetben előforduló szemcsés talajoktól. Ez a különbség éppen a hidraulikus szállítással és tározóképzéssel kapcsolatosan a leglényegesebb.

A legfontosabb eltérések egyike, hogy a salak-pernye jóval kisebb anyagsűrűséggel rendelkezik, mint a természetes szemcsés talajok. Ez az egyik oka az anyag kis térfogatsűrűségének. Ezt csaknem kizárólag az okozza, hogy a keletkezés körülményei miatt a salakban, illetve a pernyében szabad szemmel nem látható, de mikroszkopikusan jól kimutatható lég-, illetve gázzárványok vannak.

A másik fő különbség a salak-pernye szemcsék rendkívül tagolt felülete, ami részben az áteresztőképességi együttható nagyságában mutatkozik meg. Ez a fizikai jellemző a salaknál, pernyénél egy nagyságrenddel kisebb, mint az azonos mértékadó szem nagyságú és szemeloszlású homoknál, homoklisztnél tapasztalható. Ez az alacsony térfogatsúly, illetve annak okának tükrében bizonyos fokig ellentmondásos jelenségnek tűnik. A magyarázat abban rejlik, hogy a kis fajsúly miatt a szemcsék – elsősorban a kisebb méretűek – már kis sebességű vízáramlás hatására is mozgásba jönnek. A vízben lebegő kis szemcsék leszűkítik a szabad áramlási keresztmetszetet, és így kisebb áteresztőképességet eredményeznek.

A felületet tagoltságát a fajlagos felülettel (1 gramm anyagmennyiségben jelenlévő szemcsék összfelülete) lehet a legjobban jellemezni. Összehasonlítva ezen anyagok fajlagos felületét a természetes szemcsés talajok fajlagos felületével, azt kapjuk, hogy a salak-pernyék fajlagos felülete ennek mintegy 5-8-szorosa. A tagolt szemcsefelület másik következménye az alacsony anyagsűrűséghez viszonyított kis térfogatsűrűség, laza szerkezet.

A fent említett eltéréseknek a hidraulikus szállítás és lerakás szempontjából, valamint a stabilitás szempontjából is igen nagy jelentősége van. A kis anyagsűrűség igen előnyös a zagykészítés és szállítás szempontjából, ugyanis az anyag áramló víz hatására könnyebben mozgásba hozható. Ugyanakkor stabilitás szempontjából és kimosódás szempontjából rendkívül kedvezőtlen, mivel a hatékony feszültség kisebb a természetes talajokénál, és víz hatására könnyen megfolyósodik, tehát rendkívül erózió érzékeny.

A rendkívül tagolt felület a gyakorlatban igen nagy hézagterfogatot eredményez. Ez azt jelenti, hogy az alacsony anyagsűrűség miatt kedvezőtlen tulajdonságok tovább romlanak. Ezt fokozza még az áteresztőképesség természetes talajokéhoz viszonyított egy nagyságrenddel kisebb értéke is.

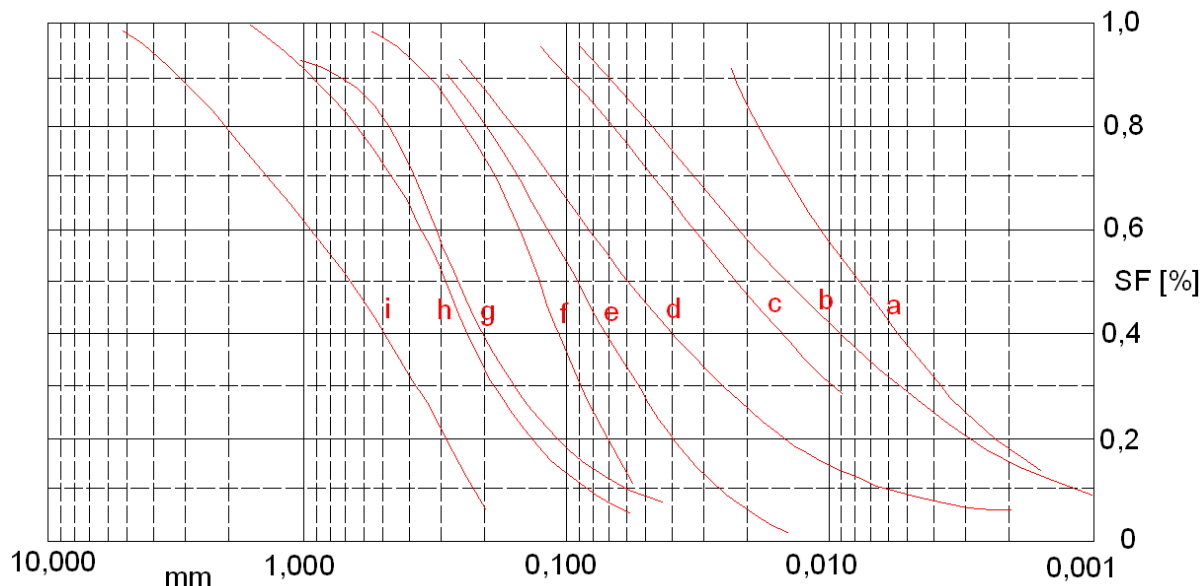
A felsorolt tulajdonságokat számszerűen a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat. Salak-pernye talajfizikai jellemzői (MÉLYÉPTERV 1984)

Hazai hőerőművi salak-pernye		
Mértékadó szemnagyság	D_m (mm)	0,15
Egyenlőtlenégi együttható	C_U (-)	5
10%-hoz tartozó szemnagyság	D_{10} (mm)	0,04
Anyagsűrűség	ρ_s (g/cm ³)	2,1
Nedves testsűrűség	ρ_n (g/cm ³)	1,4
Áteresztőképességi együttható	k (cm/s)	10^{-4}
Belső súrlódási szög	φ (°)	24
Kohézió	c (kPa)	-
Hézagtenyező	e (-)	1,2
Összenyomódási modulus	E_s (MPa)	1

A fentiekben vázolt és a stabilitás szempontjából előnytelen tulajdonságokhoz járul, hogy az anyag terhelés szempontjából makroporozus anyagként viselkedik, ami azt jelenti, hogy különböző terhelések hatására nagymértékben összenyomható. Ez az összenyomódás annak következménye, hogy a terhelés hatására a szemcséken mutatkozó kisebb-nagyobb dudorok letöredeznek, vagyis tulajdonképpen a terhelés hatására egy új anyag jön létre.

A salak és pernye szemeloszlása igen változatos képet mutat (4. ábra). Ez nagyban hozzájárul a különböző helyekről származó anyagok különböző tulajdonságaihoz. Példaképp a Mátrai Erőműből származó pernye szemnagysága a kőzetliszt-apróhomok kategóriában mozog.



4. ábra. A különböző területek pernye és salak anyagainak szemeloszlási függvényei (Kovács 2001)

a – VEAG feketeszén, b – rajnai pernye (átlag), c – inotai pernye, d – Braunsch. Pernye, e – Visonta pernye (átlag), f – német salak (alsó határ), g – inotai salak, h – rajnai salak (átlag), i – német salak (felső határ)

Az F típusú pernyék – és kisebb mértékben a C típusúak is – puccolános tulajdonsággal rendelkeznek, elsősorban a reakcióképes SiO_2 magas arányának köszönhetően. A puccolános aktivitással rendelkező anyagok azok, melyek vízzel összekeverve önmagában nem, de oldott kalcium-hidroxid ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$) jelenlétében megkötnek, gyakorlatilag vízben

oldhatatlan reakcióterméket képezve. A pernyék puccolános aktivitása szempontjából az ún. reakcióképes SiO_2 és Al_2O_3 mennyisége a mérvadó, mely nem azonos az összes SiO_2 és Al_2O_3 tartalommal. Minél nagyobb az adott pernyében a reakcióképes SiO_2 és Al_2O_3 tartalom, annál nagyobb a pernye puccolános aktivitása.

A C típusú pernyék a magas szabad CaO tartalmuknak köszönhetően hidraulikus kötőképeséssel rendelkeznek. A hidraulikus kötőképeséget elsősorban az anyag kémiai- és szemnagyság-összetétele határozza meg. A megkívánt szemcsenagyság felső határa 0,03-0,05 mm, azaz a pernye minél nagyobb tömegszázalékban tartalmaz 50 μm -nél kisebb szemnagyságot, annál kedvezőbb hidraulikai tulajdonsággal rendelkezik. Az inotai pernyéknél ez az arány 70%, Visontán a Mátrai Erőműnél viszont csak a pernye tömegének 10-30%-a esik ebbe a tartományba. Az alacsony $\text{CaO}+\text{MgO}$ tartalom mellett az utóbbi adottság okozza, hogy a visontai depónia anyaga nem szilárdul meg (Kovács 2001).

2.5. Pernyezagy deponálása

A más célra fel nem használt salak-pernyét depóniákban és zagytereken tárolják. 2008-ban az EU-15-ök tagállamaiban 2,2 millió tonnányi pernye került lerakásra depóniákban és zagytereken, ez a hatalmas mennyiség azonban mindössze a keletkezett pernye 6%-a, míg 92%-a hasznosításra került (ECOPA 2008). Ezzel szemben az Egyesült Államokban 58% a lerakásra kerülő pernye részaránya, ami több mint 42 millió tonna anyagot jelent (ACAA 2008). Világszerte jelentkező tendencia, hogy minél több pernyét igyekeznek felhasználni, így csökkentve az értékes területeket elfoglaló meddőtározók számát. A pernye hasznosítását olyan termékek előállításával igyekeznek fokozni, amelyek másodnyersanyagként jöhetnek szóba, így felhasználják betonadalékként, cementalapanyagként, vagy az útépítésben.

Az egyéb célra fel nem használt pernyét ellenőrzött körülmények között rendszerint nedvesen tárolják pernyetározókon (nedvességtartalom 10-20%) vagy vízzel keverve zagytereken (nedvességtartalom 50%).

Habár a pernye szárazon keletkezik az erőművekben, mind műszaki, gazdasági és környezetvédelmi szempontból is kedvezőbb, ha vízzel keverve, csővezetéken szállítják a deponálásra kijelölt területre (5. ábra). Az így épülő létesítményt zagy tározónak nevezzük.

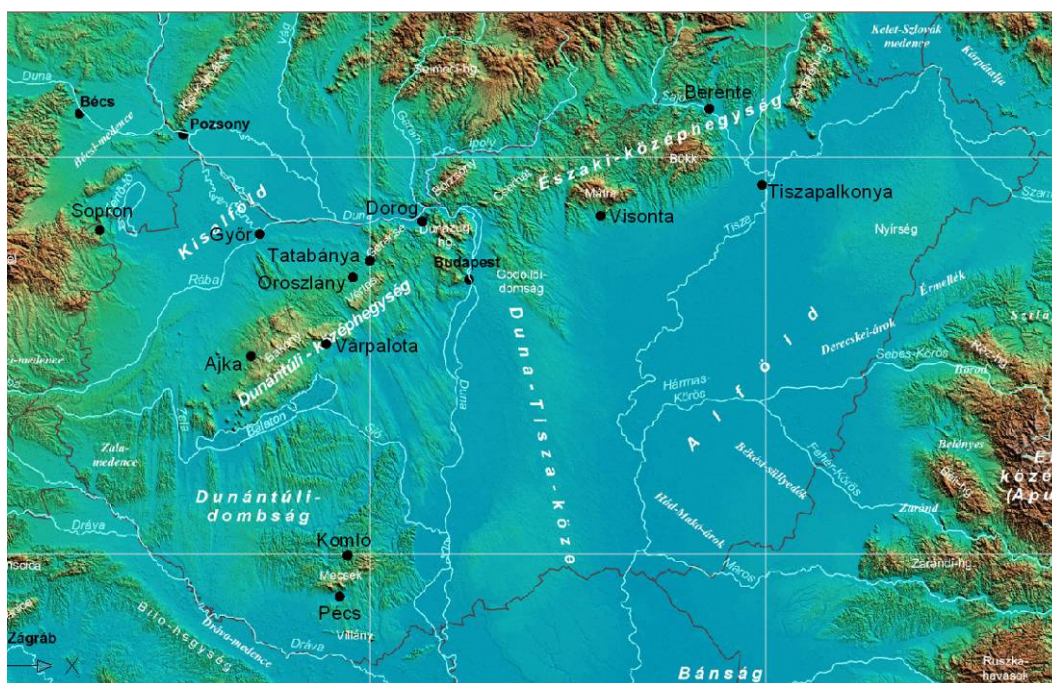


5. ábra. Pernyezagy lerakása zagytéren (India) (www.his.com/~mesas/)

A széntüzelésű erőművek pernyéjét és a salakját leggyakrabban hidromechanizációval távolítják el. Az így keletkező zagyot, amely szilárd anyagnak és víznek mozgásban lévő keveréke, egy arra alkalmas területen leülepítik, és tárolják, ahol abból a víz túlnyomó többsége eltávozik. Az eljárás során a salak-pernyét 1:5-1:10-es szilárdanyag:víz keverési arány mellett szállítják a zagyterekre. A világ egyes részein a keverési arány akár az 1:20-at is elérheti szemnagyságtól függően. Ez a hízagyos deponálás a nagy mennyiségű víz miatt többlet energiát valamint nagy területű zagyteret igényel. Habár a szállítót vizet visszaforgatják és újrafelhasználják, gyakran érintkezésbe kerül a természetes vizekkel, így károsítva a környezetet. Ezek elkerülésére kísérletezték ki a sűrűzagyos szállítási technológiát.

A sűrűzagyos 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 m/s szállítási sebességet kell betartani (www.ccp.e-apbe.ru). Nemzetközi minta alapján az 1980-as években vezették be Magyarországon ezt a technológiát.

Magyarországon jelenleg több mint 10 helyen található pernyetározó (6. ábra), amelyek összesen 184 millió m^3 anyagot tárolnak.

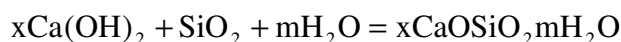


6. ábra. Pernyetározók Magyarországon (Csöke és szerzőtársai alapján)

2.6. A lerakott zagy jellemzői

A száraz pernye, mint a 2.4.-es fejezet elején szó volt róla, 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.

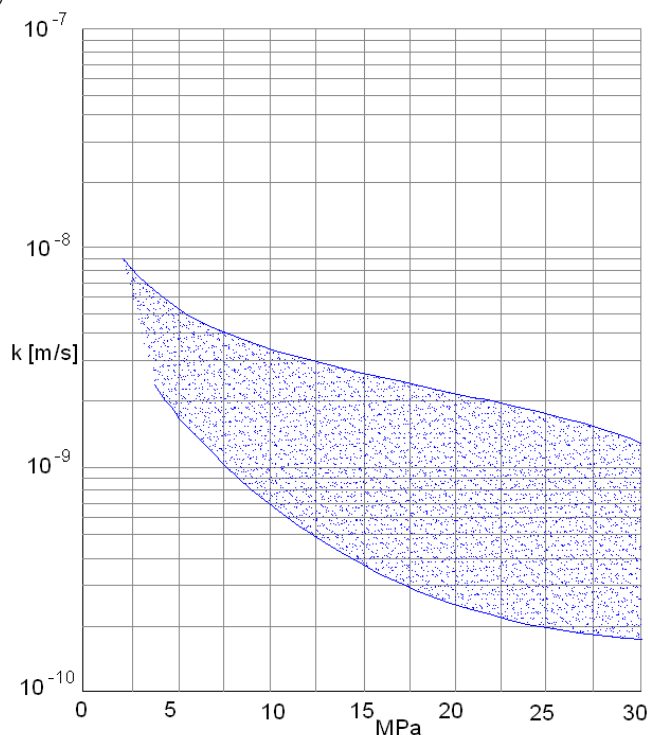


Az ilyen módon elhelyezett, leülepedett meddő általában nagy víztartalommal, nagy-közepes összenyomhatósággal, kis képlékenységgel, alacsony-közepes áteresztőképességgel és nyírószilárdsággal rendelkezik (ICOLD 1982).

Hazai viszonylatban, amint azt az előző alfejezetekben is bemutattuk, 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 amellet, hogy nagyjából azonos fizikai jellemzőkkel rendelkezik, mint a többi hőerőműben keletkező anyag, hidraulikus kötőképessége 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. Ezek a tulajdonságai tározóképzés, illetve stabilitás szempontjából kiemelkedően kedvezőek (MÉLYÉPTERV 1984).

Az áteresztőképességi együttható száraz anyagnál $10^{-4} - 10^{-5}$ m/s körül mozog, míg tömörödés után akár a $7 \cdot 10^{-5} - 10^{-6}$ m/s érték is jelentkezhethet. Az áteresztőképesség meghatározása során az eredmények azt mutatták, hogy a klorid- és a szulfáttartalom növekedése csökkenti a k tényező értékét.

A 7. ábra rajnai adatok alapján a tározóanyag nyomószilárdsága függvényében adja meg a szivárgási tényező változását.

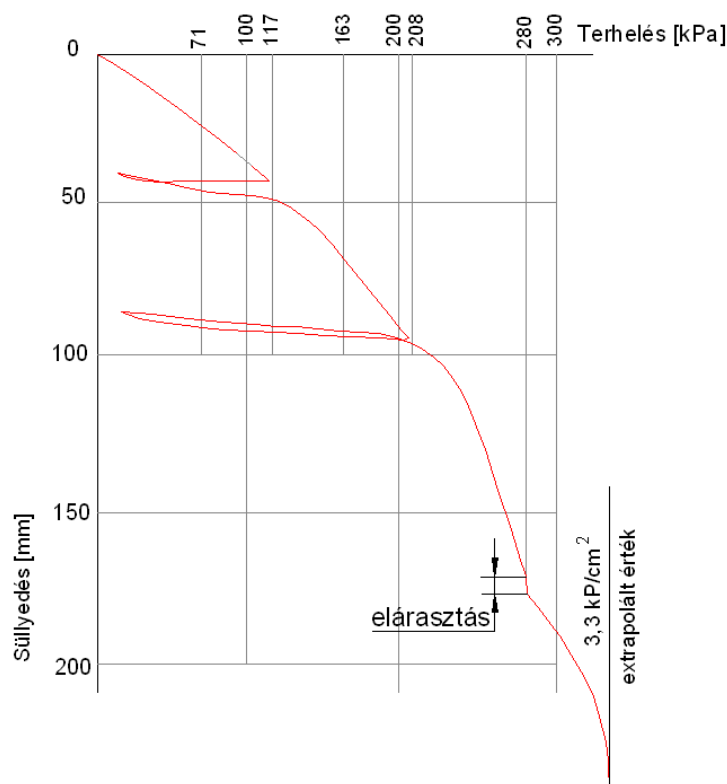


7. ábra. A szivárgási tényező változása a nyomószilárdság függvényében (Rajnai barnaszénterület) (Kovács 2001)

1972-ben próbaterhelési vizsgálatokat végeztek a visontai Mátrai Erőmű (akkor Gagarin Hőerőmű) salak-pernye tározóján. A próbaterhelést 5 m vastagságú, teljesen víztelenedett anyagon végezték el. Fontos kiemelni, hogy ez a salak-pernye nem tartalmaz hidraulikus kötőanyagot, emiatt a viselkedése a szemcsés talajokéhoz hasonlít.

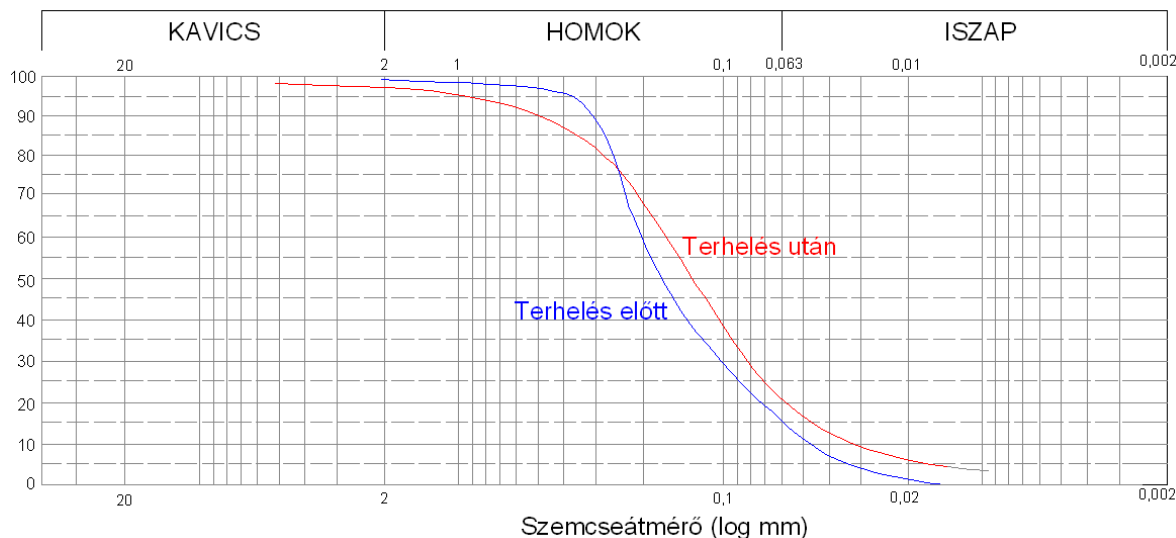
A vizsgálat végrehajtása során 280 kPa maximális terhelést alkalmaztak. A terhelés-süllyedési görbe lefutásából megállapítható, hogy az arányossági határ 110 kPa terhelés körül van, de mintegy 200 kPa terhelésig közelítőleg lineáris volt a süllyedés és a terhelés kapcsolata (8. ábra). E felett azonban a görbe lefutása jóval meredekebb, az azonos terhelésnövekményhez tartozó süllyedésnövekmény lényegesen nagyobb.

A próbaterhelés megerősítette a salak-pernye szemcsés anyagként való viselkedését, ugyanis az egyes terhelési lépcsőknél a konszolidáció igen gyorsan lejátszódott. Mérések szerint 5 perc alatt 70-90%-os konszolidáció zajlott le, míg a 100%-os állapot bekövetkezéséhez 15-75 perc kellett.



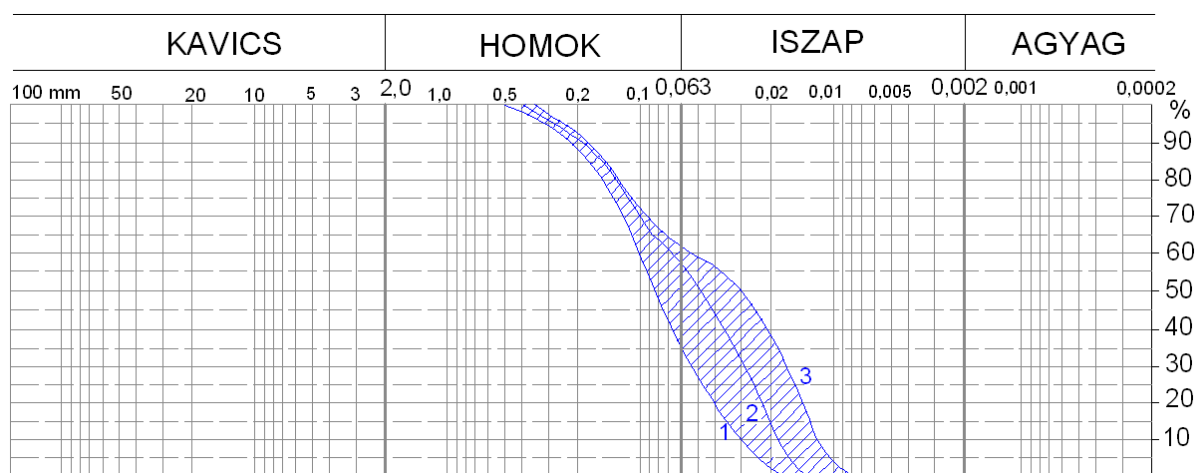
8. ábra. A terhelés-süllyedési görbe (Juhász, Molnár 1974)

A próbaterhelés során megvizsgálták az anyag roszakadó képességét is. Megállapították, hogy, az anyag a szokásos értelemben nem minősíthető ugyan roszakadónak, de a szemcsék terhelés alatti összetöredezése folytán az anyag bizonyos terhelés hatására megváltoztatja szerkezetét. A szerkezetátrendeződés tényét igazolja a terhelés utáni szemeloszlási görbe is, amely több finomszemcsét mutat, mint terhelés előtt (9. ábra).



9. ábra. Terhelés előtti és utáni szemeloszlási görbe EC 7 szerinti frakció határokkal (Juhász, Molnár 1974)

A Budapesti Műszaki Egyetem 20 évvel később, 1995-ben ugyancsak vizsgálta a Mátrai Erőmű pernyéjét. Ekkor a megszilárdult sűrűzagyot 6 hónapos korában vizsgálták, és a szemmegoszlás a 10. ábrán látható képet mutatta.



10. ábra. A Mátrai Erőmű pernyéjéből előállított 6 hónapos, megszilárdult sűrűzagy szemmegoszlása EC 7 szerinti frakció határokkal (Kleb 1995)

(1 – szitálás, 2 – hidrometrálás, 3 – hidrometrálás pelyhesedést gátló trisó adagolással)

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. Érdeemes 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 (a 200 kPa kb. 15 m vastag rétegnek felel meg) további 25%-os javulásra lehet számítani.

A belső súrlódási szög Meyerhof módszerrel $\varphi = 35,5^\circ$ -ra adódott, míg az akkori magyar szabvány (MSZ 15004-64) alapján $\varphi = 34^\circ$ lett (Juhász, Molnár 1974).

2.7. Pécsi, inotai, tatabányai, mátrai és ajkai pernye összehasonlítása

Az 1990-es évek második felében a Budapesti Műszaki Egyetem Mérnökgeológia Tanszéke egy vizsgálatsorozatot folytatott le, amelynek keretében az ország különböző erőműiben keletkezett perneyzagokat vizsgálta. Összesen 5 erőmű égéstermékeit tanulmányozták: a Pécsi Erőművét, a Tatabányai Erőművét, a Mátrai Erőművét, az Inotai Erőművét és az Ajkai Erőművét. A pécsi, mátrai és inotai pernyék összetételét a 4. táblázat tartalmazza.

A pécsi mintában az erőműben alkalmazott sűrűzagyos technológiának köszönhetően a víz és a szilárdanyag tartalmának aránya megközelítőleg 1:1 volt. A minta 70%-ban tartalmazott filterpernyét, 20%-ban ágyhamut és 10%-ban ciklonpernyét. Az uralkodó filterpernye a hazai pernyék között közepes mészes és alacsony kén- és szulfidtartalmú típust képviselt, lényegében megegyezett a Tatabányai Erőmű anyagával. Az egyharmad részarányban felhasznált ágyhamu és ciklonpernye magasabb kén- és aktív, szabad CaO-tartalommal volt jellemezhető. A kémiai összetétel alapján az ülepített, megszilárdult sűrűzagy ásványos összetétele szegényesebb volt az ajkai, inotai, mátrai zagyoknál tapasztaltaknál.

4. táblázat. A Pécsi, a Mátrai és az Inotai Erőműből kikerülő pernyék ásványi összetétele (Kleb 1995, 1996, Kopecskó, Kleb 1998)

Kémiai alkotók	Pécsi Erőmű			Mátrai Erőmű (m%)	Inotai Erőmű (m%)
	filterpernye (m%)	ciklonpernye (m%)	ágyhamu (m%)		
Izzítási veszteség	14,61	6,67	0,63	3,08	9,71
SiO ₂	30,38	36,56	39,51	46,97	30,37
CaO	16,27	19,15	20,49	9,54	22,23
MgO	2,74	3,33	3,69	5,18	4,67
Al ₂ O ₃	16,08	16,38	16,73	18,48	14,48
Fe ₂ O ₃	16,78	5,33	5,54	8,82	4,38
SO ₃ -ban kifejezett összes kéntartalom	2,74	8,88	10,02	6,33	12,47
CaO szabad	1,48	3,54	2,88	-	-

A Tatabányáról és Pécsről származó sűrűzagy minták közepes mész-, illetve alacsony szulfittartalom jellemezte. A Mátrai Erőmű mintái a tatabányaihoz hasonlóan közepes mésztartalommal rendelkeztek, ugyanakkor magasabb volt a szulfittartalma, mint az előzőekben említett két erőmű égéstermékének.

A Pécsről, illetve Tatabányáról származó minták kapcsán tömegösszetételi és szilárdsági vizsgálatok is készültek. A pécsi minták méréseit 4 hónapos érettségű sűrűzagon végezték el, míg a tatabányai zagyot – különböző víztartalom mellett – 1-2 hetes, valamint 2 hónapos érettségű állapotban vizsgálták. A vizsgálatokhoz 5,4 cm névleges átmérőjű magfúróval alakítottak ki szabályos próbatesteket. A mérések eredményei az 5. táblázatban láthatók.

5. táblázat. A sűrűzagy tömegösszetétele és szilárdsága (Kopecskó, Kleb 1998)

Vizsgált sűrűzagy		Testsűrűség (kg/m ³)	Víztartalom (%)	Nyomószilárdság (MPa)
helye	sűrűsége			
Pécs	4 hónapos	1069	9,9	8,51
		1417	56,2	2,96
Tatabánya	1 hetes	1635	56,4	1,34
		1137	10,1	2,35
	2 hetes	1186	17,5	2,44
		1069	8,0	2,48
	2 hónapos	1129	11,5	2,09
		1265	24,5	2,27

A táblázatból jól látható, hogy bár a pécsi pernye sűrűzagy összetétele a tatabányaihoz áll legközelebb, szilárdsági tulajdonsága jóval kedvezőbb.

A tatabányai próbatestek víztartalma a vizsgálat időszakában tág határok – 7,8-57,1% – között változott. A kőzetekhez hasonlóan itt is természetes, hogy a nagy víztartalom a szilárdság csökkenését eredményezi. A vizsgált összetételű és érettségi állapotban nyomószilárdság szempontjából a 10-20% körüli víztartalom az optimális. Az 1-2 hetes állapothoz képest a 2 hónapos érettség nem eredményezett érdemi szilárdság javulást.

3. Zagyolt gátépítés módszere

3.1. Zagytározók fogalma, működése

A zagytározó („tailings dam”) olyan – meddőanyag lerakására, tárolására szolgáló – létesítmény, amelyre a különböző szilárd hulladékokat hidraulikusan, vízzel keverve, zagy formájában szállítják ki. A tározón a szilárd hulladék kiüledik, a szállítótíz jelentős része pedig visszanyerhető ismételt felhasználás céljából.

A magyarországi zagytározókat a kiszállított hulladék fajtái alapján az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

- salak-pernye tározók,
- vörösiszap tározók,
- homokmeddő tározók,
- kavics tározók,
- szennyvíziszap tározók,
- különböző ipari hulladékok tározói, stb.

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 üledési 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.

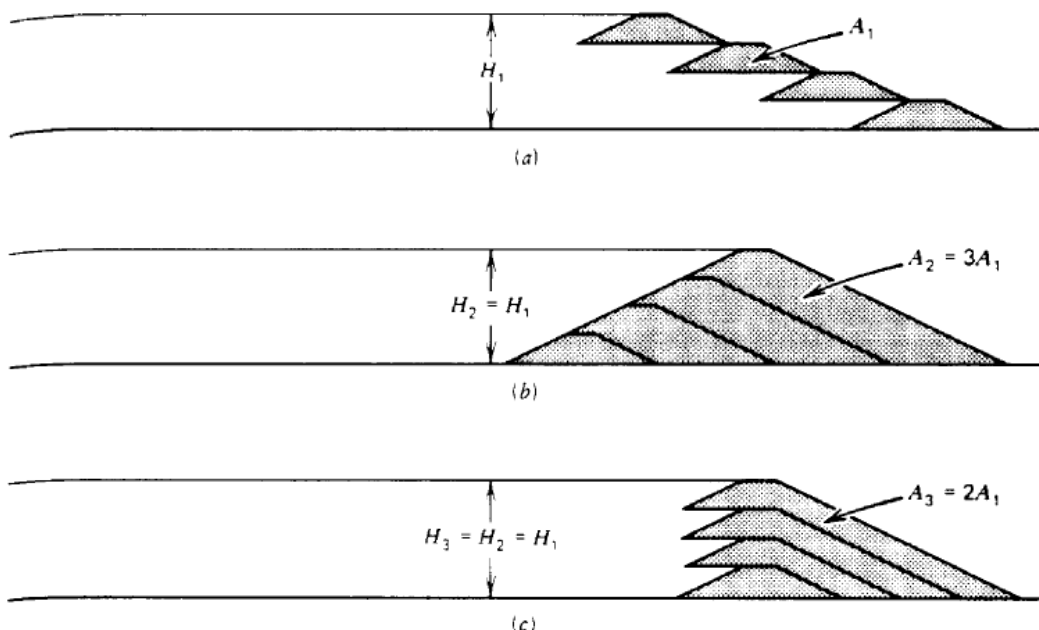
Az így kialakult, a tározó területére támaszkodó lapos kúpfelület legmélyebb részén, hazai tározók nagy részénél a kazetta közepén álló víztömeg képződik. A tó mélységét és a víztükör nagyságát a kazetta közepén telepített nyelő műtárgy vízvezetési (bukási) szintje határozza meg. Ez az álló víztömeg biztosítja, hogy a szállító vízből a mozgás teljes megszűnése következtében a finomabb szemcsék is kiüledjenek. A víztükör széle és a töltéstest között kialakuló száraz zagytér (angol szakirodalomban: beach) kiemelkedő szerepet játszik a saját anyagú tározóépítésnél. Emiatt – elsősorban az említett módszer esetében – célszerű minél hosszabb száraz zagytér kialakítani.

3.2. Zagytározók építése, építési módszerei

A zagytározók 7 fő részből állnak: a zagyot helyszínre szállító berendezésből, a zagytér határoló töltésből, a természetes vízfolyásokat elvezető létesítményből, a beérkező zagyot lerakó, a visszamaradó víz elvezetését szolgáló berendezésből és a különböző mérőeszközökből.

3.2.1. Zagytározók típusai

A zagytározók gyakran 20-30 m-t is elérő töltéseit a legtöbb esetben az üzemelés alatt 3-5 méteres szakaszokban magasítják. Erre három módszer terjedt el világszerte: a zagy oldali (upstream), a mentett oldali (downstream) és a középpontos (centerline) magasítás (11. ábra).



11. ábra. Zagyátak építési módszerei: a: zagy oldali, b: mentett oldali, c: középpontos magasztás (Vick 1990)

Zagy oldali magasztás során a határoló töltést az előző töltés zagyter felőli oldalán alakítják ki. Ha a zagy és a tározótér megfelelő tulajdonságokkal rendelkezik, szinte minden esetben ezt a módszert alkalmazzák a gazdaságossága miatt, ugyanis ez az eljárás jár a legkevesebb anyagköltséggel. Azonban a módszer számtalan hátrányos tulajdonsággal is rendelkezik. A legkritikusabb tényező ezek közül a töltés alapjául szolgáló leülepitett zagy nyírószilárdsága, amelynek elegendőnek kell lennie a rá nehezedő teher elviselésére.

Mentett oldali töltésépítésnél, amikor a tározóba lerakott zagy eléri a töltés magasságát, azt a mentett oldalra deponált anyaggal magasztják meg. Ezt a zagy oldalival ellentétben az üzem felfüggesztése nélkül végbe lehet vinni. Azonban a felhasznált anyag mennyisége minden egyes magasztással exponenciálisan nő, ami gazdasági szempontból kifejezetten hátrányos. Ezt a magasztást akkor alkalmazzák, ha a tárolt meddő rendkívül gyenge teherbírású, ahol nagy víznyomásra számítanak vagy ahol a különböző éghajlati, szeizmológiai vagy toxikológiai viszonyok ezt szükségessé teszik.

Középpontos töltés magasztásnál a gát középvonala nem változik. Ez a módszer az előző két eljárás közötti kompromisszum. Az építendő töltés részben a deponált anyagra, részben a mentett oldali rézsűre támaszkodik. Kevesebb földmunkával jár, mint a mentett oldali, stabilitási szempontból pedig kedvezőbb a zagy oldali magasztásnál. Az utóbbinál alkalmazható szemcséknél kisebb méretűek is felhasználhatók, emiatt esetenként kiegészítő kőbordákkal lehet csak elérni a kívánt stabilitást. A központos építés elsősorban nyitott művelésű bányáknál elterjedt, ahol a kitermelt kőzetanyag alkalmas a bordák kialakítására.

A felsorolt három fő módszeren kívül még számtalan egyéb zagyát építési eljárást ismerünk, amelyek a fentiek kombinációjából tevődnek össze. Ezeket vegyes töltésépítésnek nevezzük.

A zagy szilárd részének tulajdonságaitól függően két fő tározóépítési módszert különböztetünk meg: idegen anyagból (földből vagy más zagyból) és saját anyagból épülő tározókat.

3.2.2. Földgáttal határolt zagytározók

Ha a zagy szilárd része olyan frakciókból áll, melyek nem alkalmasak gátépítésre, a határoló töltést idegen anyagból, legtöbbször földből kell elkészíteni.

A timföldgyárakban keletkező vörösiszap és néhány más meddőanyag olyan fizikai tulajdonságokkal rendelkezik, hogy belőle határoló töltés nem építhető. Ez esetben a zagytározó határoló töltését földanyagból előre meg kell építeni a vörösiszap tervezett maximális tárolási szintjéig. Ezután vezethető be a vörösiszap a földtöltések mögé. A gáttestet vízzáró maggal is el lehet látni, amelynek több változata is létezik, akár csak a hagyományos vizet tározó töltések esetében. Ilyen töltéseket akkor célszerű építeni, ha nagyobb mennyiségben vagy hosszán tartó ideig víz van jelen a zagytéren, ha a kiszivárgó víz mennyiségét jelentősen csökkenteni akarjuk, vagy ha a tározó elhagyatott helyen található. Hátrányként említhető a többi módszerhez képest a magas kezdeti beruházási költség.

Bizonyos fizikai tulajdonságú anyagoknál megoldható, hogy csak a kezdőtöltés készüljön földből. Első ütemben a kezdőtöltés szintjéig töltik fel a tározót. Ezután földanyagból új határoló töltést építenek. Ezt a módszert tovább folytatják egészen az elhelyezendő szilárd anyag tervezett maximális feltöltési szintjéig. Ezzel az eljárással szétosztható a kezdeti költség az üzemelés idejére.

3.2.3. Saját anyagból épülő tározók

Ha a zagy szilárd része olyan frakciókból áll, amelyek alkalmasak gátépítésre, a zagytározó magasítható a lerakott hulladék anyagból. Ez akkor lehetséges, ha a szemcsék jó része 60 mikronnál nagyobb átmérőjű és nincsenek olyan fizikai-kémiai tulajdonságaik, amelyek kedvezőtlenek tározóépítési szempontból. Ilyen hulladéknak tekinthető a hőerőművekben tüzelési maradékként keletkező salak-pernye. A folyamatosan épülő tározók esetében magától értetődik, mégis fontos kiemelni az üzemelés ideje alatt folyamatosan ellenőrizni kell a külső rézsű magasságát, nehogy a zagytér anyaga meghágja azt.

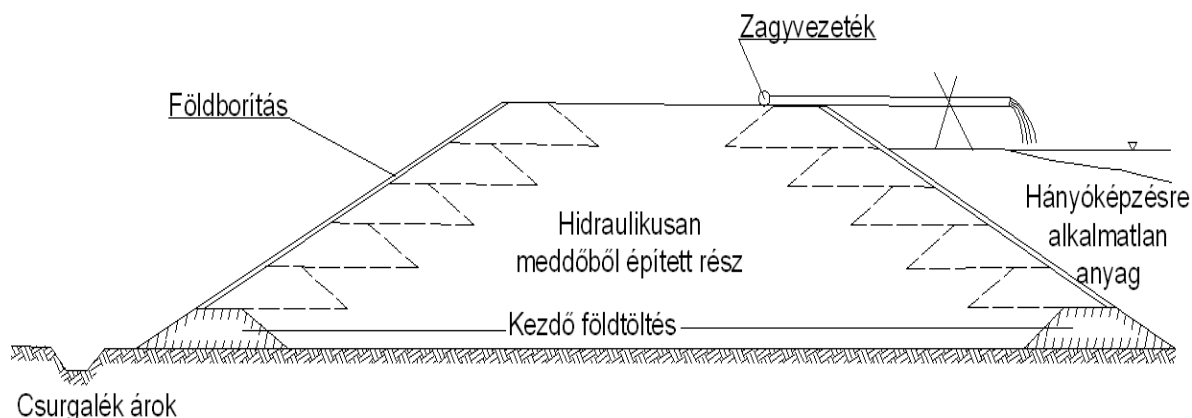
A hagyományos zagyolt gátépítési módszereket zagykertészkedésnek nevezik. Az anyag szétosztályozódását a beömlő nyílások végénél kialakuló hordalékkúpok segítségével érik el. A legelterjedtebb – a nemzetközi szakirodalomban „spigot method”-nak nevezett – eljárásnál több kiömlőnyílás található a tározó kerülete mentén. Akkor alkalmazzák ezt a módszert, ha lehetőség van egy száraz, átmeneti zóna kialakítására a finom és a durva frakciók között a tározón.

Sajátanyagú tározóépítés végezhető finomabb szemcse-összetételű anyag esetén is, ha hidrociklonnal szétválasztjuk a frakciókat és a durvább frakciót a tározó peremén helyezzük el.

3.2.4. Tározóépítés kombinált módszerrel

Timföldgyáraknál előfordul, hogy egymás mellett kétféle anyag keletkezik. Az egyik fele megfelelő tározóképzési módszerrel alkalmas a határoló töltés kialakítására. Ebből az anyagból készített körtöltések mögött helyezhető el a másik, töltésképzésre nem alkalmas anyag (12. ábra).

A módszer megvalósítása a következő: először földből két – egymással párhuzamos – kezdőtöltést kell építeni. Ezután a két töltés közé vezethető a durva anyagból képezett zagy, a belső töltés mögé a finom anyag. A kezdőtöltések szintjének elérése után a lerakott durva szemcsékből magasító töltések készíthetők és az iszapolás tovább folytatható. Lényeges a kétféle anyag aránya, hogy a töltés szintje mindig „megelőzze” a finom iszap szintjét.



12. ábra. Kombinált tározási mód (MÉLYÉPTERV 1984)

4. Pernye szilárdsági vizsgálati módszerei

Az általunk vizsgált pernyezagy viselkedését tekintve átmenetet képez a kőzetek és talajok között, így akár puha kőzetként, akár kemény talajként is kezelhető.

A zagyolt gátépítés technológiájából és az alkalmazott sokféle tüzelőanyagból adódóan a megszilárdult pernyezagyot kisebb-nagyobb vastagságú rétegek építik fel. Laminált szerkezetének köszönhetően sokszor kis erőhatásra is elválí a rétegek mentén és emiatt nagyon nehéz próbatestet kialakítani belőle. Így az anyag nem alkalmas arra, hogy a talajmechanikában szokásos triaxiális vizsgálatot végre lehessen hajtani rajta. Ennek köszönhetően kőzetmechanikai oldalról közelítettük meg az anyag szilárdsági jellemzőit. Ugyanakkor a pernye talajfizikai jellemzőinek vizsgálatával a talajmechanikai megközelítést is igyekeztünk szem előtt tartani.

Laboratóriumi vizsgálataink során tömegösszetételi, illetve szilárdsági és alakváltozási méréseket végeztünk. Az előbbi csoportba tartozik a sűrűségi, tömörségi és víztartalmi tulajdonságok meghatározása, míg utóbbi vizsgálatok közül egyirányú nyomó és közvetett húzó (brazil) kísérleteket végeztünk.

Mivel mind a természetes építőkövekre vonatkozó, mind a geotechnikai vizsgálatokra vonatkozó szabványok háromfázisú anyagmodellt vesznek figyelembe, így lehetőség volt a kétféle szabványcsalád együttes használatára (Gálos, Kertész 1981).

A magmintákat a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában vizsgáltuk. A labor a NAT által akkreditált, akkreditációs száma: NAT-1-1258/2011.

4.1. Tömegösszetételi tulajdonságok meghatározása

4.1.1. Víztartalom mérés

Talajok víztartalmának meghatározásra az MSZE CEN ISO/TS 17982-1:2006 jelű előszabvány ad útmutatást. A mérés a nedves és a kiszáritott állapotú minta tömegének, azaz az elpárolgott vízmennyiség tömegének mérésén alapszik. A szárítást szabvány szerint $105 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten szárítószekrényben kell elvégezni (13. ábra), és egészen addig kell folytatni, amíg a minta a tömegállandóságot el nem éri. E vizsgálati módszer megegyezik a kőzetmechanikában szokásos víztartalom méréssel.

A talaj víztartalmát az alábbi képlet szerint kell meghatározni:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100$$

ahol:

- w: víztartalom (nedvességtartalom) (%),
- m₁: a tároló és a nedves minta tömege (g),
- m₂: a tároló és a száraz minta tömege (g),
- m_c: a tároló tömege (g),
- m_w: a víz tömege (g),
- m_d: a száraz minta tömege (g).



13. ábra. Víztartalom mérése

4.1.2. Piknométeres vizsgálat

Az anyagsűrűség meghatározását az MSZ EN 1936:2007 és az MSZE CEN ISO/TS 17892-3:2006 szabvány tartalmazza.

A vizsgálandó anyagot meg kell őrölni, majd a porrá tört közetanyagból 25 g-nyi, legalább 0,001 g pontossággal lemért adagot egy üveg piknométerbe kell tölteni. Ezt követően a piknométert félig feltöltjük az ellenőrző folyadékkal, majd addig kevergetjük, amíg az őrleményt fel nem veszi. Ezután teljesen feltöltve vákuum ($2 \pm 0,7$ kPa) alatt az egészet állni hagyjuk. Az őrléssel elvileg azt érjük el, hogy az anyag olyan kis szemcsékre esik szét, amelyben már nincsenek pórusok. A folyadékkal színültig feltöltött és a benne lévő port is tartalmazó piknométer súlyát lemérve és ezt követően a kiszáritott és üres piknométer súlyát is lemérve a tömegkülönbségekből és a por által kiszorított folyadék térfogatából, valamint a folyadék sűrűségéből kiszámítható az anyag sűrűsége.

A szemcsék sűrűségét az alábbi képlettel lehet meghatározni:

$$\rho_s = \rho_w \cdot \frac{m_2 - m_0}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)}$$

ahol:

- ρ_s : szemcsék sűrűsége (g/cm³),
- m_0 : száraz piknométer tömege (g),
- m_1 : ellenőrző folyadékkal teljesen feltöltött piknométer tömege (g),
- m_2 : a száraz piknométer és a száraz minta együttes tömege (g),
- m_3 : a piknométer tömege teljesen feltöltve a telített mintával és az ellenőrző folyadékkal (g),
- ρ_w : ellenőrző folyadék sűrűsége (g/cm³).

Vizsgálatunk során triklór-etilént és ionmentes vizet használtunk ellenőrző folyadékként (14. ábra), így az anyagsűrűség képlete az alábbiak szerint módosul:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_0}{\frac{m_1 - m_0}{\rho_{w,1}} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{w,2}}}$$

ahol:

- $\rho_{w,1}$: víz sűrűsége (g/cm³) (I. Melléklet I.6. táblázat),
- $\rho_{w,2}$: triklór-etilén sűrűsége (g/cm³).



14. ábra. Piknométeres vizsgálat

A tiszta triklór-etilén elméleti sűrűsége 20°C-on 1,46 g/cm³. A rendelkezésemre álló triklór-etilén pillanatnyi sűrűségét mindennap külön piknométeres vizsgálattal határoztuk meg négy tizedes jegy pontossággal (I. Melléklet I.2. táblázat).

A víztartalom méréshez és a piknométeres vizsgálathoz is kiszárított anyag szükséges. Ehhez a közetvizsgáló laborban található akkreditált NÜVE KD-200 (gyári szám: 06-0163) márkájú szárítóberendezést használtuk.

4.2. Szilárdsági és alakváltozási vizsgálatok

4.2.1. Egyirányú nyomószilárdság

Szilárdsági és alakváltozási vizsgálatok közül az egyirányú nyomószilárdság meghatározását az MSZ EN 1926:2007 számú „Természetes építőkövek vizsgálata. Az egyirányú nyomószilárdság meghatározása” című szabvány írja le.

Egyirányú nyomókísérletnél a kocka lapját vagy a henger alkotóját nyomógéppel fokozatosan növekvő terhelésnek tesszük ki. A nyomószilárdság a következő képletből számolható ki:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

ahol:

σ_c : az egyirányú nyomószilárdság (MPa),
F: a nyomóerő (N),
A: a nyomott felület (mm²).

Henger alakú próbatesteknél – amilyenek a pernye próbatestek is voltak – a képlet az alábbiak szerint alakul:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}}$$

ahol:

d: a próbatest átmérője (mm).

Amennyiben a próbatest alakváltozását is mérjük, akkor a feszültség (σ) alakváltozási (ϵ) görbéből, illetve annak lineáris szakaszából kiszámíthatjuk a közet rugalmassági, más néven Young modulusát (E):

$$E = \frac{\delta\sigma}{\delta\epsilon}$$

A nyomószilárdsági vizsgálatoknál a feszültség-alakváltozási görbének, közetekre vonatkoztatva három szakasza van, a tömörödési, a lineáris, ahol a nyomóerő és az alakváltozás arányos, valamint a tönkremeneteli szakasz (Kertész 1985). Az alakváltozási görbe arányos szakaszából kiszámítható a rugalmassági modulus az alábbi képlettel:

$$E = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\epsilon_b - \epsilon_a}$$

A nyomószilárdság értékeit és ezáltal az eredmények összehasonlíthatóságát befolyásolja a vizsgált próbatestek mérete. E hatás elkerülésére az eredményeket 2:1 magasság – átmérő arányú és 50 mm átmérőjű próbatestekre vonatkoztattuk. Az összefüggés segítségével bármilyen arányú próbatesten mért egyirányú nyomószilárdság átszámolható 2:1 arányú, 50 mm átmérőjűre (Gálos, Vásárhelyi 2006):

$$\sigma_{c(2:1);(50)} = \frac{\sigma_c \cdot d^{0,18}}{1,78 + 0,485 \cdot \frac{d}{h}}$$

A fenti összefüggésben „ σ_c ” a mért nyomószilárdság, „d” (mm) a próbatest átmérője, „h” (mm) pedig a magassága.

4.2.2. Közvetett húzó- (brazil) szilárdság

A közvetett húzóvizsgálatnál, ismert nevén brazil vizsgálatnál (visszavont MSZ 18282/2:1989) hengeres próbatestet használunk. Az általában 1:1 átmérő:magasság arányú próbatestet két szemközti alkotója mentén, párhuzamos nyomólapok között terheljük úgy, hogy a nyomóterhelést folyamatosan növelve törésig fokozzuk. A próbatest a terhelő erő irányával megegyező átmérője mentén, a húzószilárdság hatására törik szét.

A húzószilárdság nagyságát az alábbi képlet adja meg:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F}{d \cdot h \cdot \pi}$$

ahol:

- σ_t : a közvetett húzószilárdság (MPa),
- F: a nyomóerő (N),
- d: a próbatest átmérője (mm),
- h: a próbatest magassága (mm).

Az egyirányú nyomó- és közvetett húzókérdéseket is az anyagvizsgáló laboratóriumban található WPM márkájú (gyári szám: 121/6023) akkreditált törőberendezéssel hajtottuk végre (15. ábra).



15. ábra. A WPM típusú akkreditált törőgép

5. Mérési eredmények

5.1. Megszilárdult pernyezagy vizsgálati eredményei

Laboratóriumi vizsgálatainkhoz egy pernyéből és salakból, kombinált módszerrel épült zagyát magmintái, valamint egy másik – közel húsz évvel később épült – zagyából származó a szabadlevegőn már előzetesen kiszáradt minta állt rendelkezésünkre.

5.1.1. A magminták vizsgálati eredményei

Az összesen 29 darab magminta két fúrásból származott. Az A jelű fúrás 2010.12.11-én készült és 21,9 m-es mélységig harántolta a gátest anyagát. Ebből a fúrásból 16 magmintát nyílt lehetőségünk vizsgálni, amelyek kisebb hézagokkal méterenként követték egymást. A B jelű fúrás 2010.12.14-17 között készült, pár száz méterre az A jelű fúrástól. Itt csak 19,5 m-es mélységig találkoztunk pernyével, alatta a termett talaj található. Innen valamivel kevesebb, 13 minta állt rendelkezésünkre hasonló eloszlásban, mint a másik fúrás esetén.

A henger alakú magminták névleges hossza ugyan 30 cm volt, azonban a valóságban 20 cm körül mozgott ez az érték. A hiány elsősorban az anyag könnyen töredező tulajdonságára vezethető vissza. Valószínűleg a fúrómag kiemelésekor, illetve feldarabolásakor törhettek le ezek a részek. A fúrások 120 mm-es névleges átmérővel készültek, a minták tényleges átmérője ennél egy pár mm-rel kisebb.

Mivel a tapasztalatok alapján az anyag nagyon gyorsan kiszárad szabad levegőn, ezért a műanyag védőburokban lévő mintákat nejlonzacskóba rakással óvtuk meg nedvessége elvesztésétől. Ezért az egyes darabok kicsomagolása után igyekeztünk minél gyorsabban mintát venni róluk a víztartalom méréséhez. A minták származási mélysége és a víztartalomra kapott eredményei a 6. táblázatban láthatók, míg a részletes mérési eredmények az I. Melléklet I.1. táblázatában szerepelnek.

6. táblázat. Az egyes magminták mélysége és víztartalma

A jelű fúrás (m)	víztartalom (%)	B jelű fúrás (m)	víztartalom (%)
0,7-1,0	61,42	0,7-1,0	79,92
1,7-2,0	71,44	1,7-2,0	87,55
3,7-4,0	74,74	2,7-3,0	100,15
5,7-6,0	80,31	4,7-5,0	86,98
6,7-7,0	70,17	5,7-6,0	116,84
7,7-8,0	72,96	7,7-8,0	71,91
8,7-9,0	91,44	8,7-9,0	50,69
10,7-11,0	64,16	10,7-11,0	64,12
12,7-13,0	75,66	12,7-13,0	83,87
13,7-14,0	103,17	14,7-15,0	56,19
15,7-16,0	42,57	15,7-16,0	57,09
16,7-17,0	111,77	17,7-18,0	59,85
17,7-18,0	60,10	18,7-19,0	76,67
18,7-19,0	85,68		
20,7-21,0	79,49		
21,7-22,0	115,24		

A szilárdsági kísérletekhez használt próbatestek kialakításánál némely magmintából két (egy esetben három) próbatestet is sikerült kialakítani. Az ugyanazon magmintából származó próbatesteket zárójelbe tett számmal különböztettük meg egymástól. Az egyes próbatestek részletes mérési eredményeit a II. Melléklet. Jegyzőkönyvek fejezet tartalmazza.

Az A jelű fúrás felső 6 mintája (8 m mélységig) és a B jelű fúrás legfelső mintája (0,7-1,0 m) teljesen széttöredezett, szétmorzsolódott. Emiatt ezeket nem lehetett törési vizsgálatoknak alávetni. A minták mésztartalma valószínűleg alacsony volt, így nem alakult ki folyamatos kötés a szemcsék között.

A próbatestek kialakítása után levettük a hengerek méreteit és tömegét, amiből a nedves térfogatsúly (ρ_n) kiszámíthatóvá vált (7. táblázat).

7. táblázat. Összefoglaló táblázat a próbatestek méreteiről, tömegéről és nedves térfogatsűrűségéről

A jelű fúrás				
Mélység	H _{átlag} (mm)	D _{átlag} (mm)	Tömeg (g)	ρ_n (g/cm ³)
0,7-1,0	Nem értékelhető			
1,7-2,0	Nem értékelhető			
3,7-4,0	Nem értékelhető			
5,7-6,0	Nem értékelhető			
6,7-7,0	Nem értékelhető			
7,7-8,0	Nem értékelhető			
8,7-9,0	78,13	117,66	1263,41	1,49
10,7-11,0 (1)	51,24	119,10	766,32	1,34
10,7-11,0 (2)	108,50	118,92	1723,66	1,43
12,7-13,0	62,49	117,55	923,95	1,36
13,7-14,0 (1)	112,02	117,78	1769,41	1,45
13,7-14,0 (2)	52,03	117,25	804,86	1,43
15,7-16,0	152,05	118,57	2607,95	1,55
16,7-17,0	75,18	118,50	1100,39	1,33
17,7-18,0 (1)	131,27	117,39	2345,72	1,65
17,7-18,0(2)	58,62	105,35	772,97	1,51
18,7-19,0	83,29	118,49	1334,81	1,45
20,7-21,0	146,12	117,89	2430,2	1,52
21,7-22,0 (1)	93,49	117,40	1398,27	1,38
21,7-22,0 (2)	64,33	118,43	927,63	1,31

B jelű fúrás				
Mélység	H _{átlag} (mm)	D _{átlag} (mm)	Tömeg (g)	ρ_n (g/cm ³)
0,7-1,0	Nem értékelhető			
1,7-2,0	96,13	116,13	1369,6	1,35
2,7-3,0 (1)	64,04	116,05	1055,1	1,56
2,7-3,0 (2)	74,13	117,33	1073,6	1,34
4,7-5,0	126,68	116,75	1941,2	1,43
5,7-6,0	125,00	118,10	-	-
7,7-8,0	81,45	117,43	1287,8	1,46
8,7-9,0 (1)	97,65	117,45	1610,5	1,52
8,7-9,0 (2)	38,73	118,33	636,4	1,50
8,7-9,0(3)	37,65	-	-	-
10,7-11,0	118,85	115,90	1941,5	1,55
12,7-13,0	136,43	119,00	2045,4	1,35
14,7-15,0	56,73	118,88	923,8	1,47
15,7-16,0	147,40	118,98	2561,3	1,56
17,7-18,0	121,98	118,53	1963,5	1,46
18,7-19,0	126,93	119,30	2045,6	1,44

A B jelű fúrásnál az 5,5-6,0 és a 8,7-9,0 (3) próbatestek alakja annyira deformálódott és szabálytalan volt, hogy nem volt értelme minden adatukat vizsgálni, mivel nagyon pontatlanok lettek volna a mérési eredmények.

A lemért próbatesteket egyirányú nyomó, illetve közvetett húzó (brazil) vizsgálatoknak vetettük alá (16. ábra). Igyekeztünk úgy szétosztani a mintákat a két mérés között, hogy a leírás alapján hasonlóakból jusson mindkettőre. Összesen 29 törési vizsgálatot végeztünk az anyaggal, ebből 12 volt egyirányú nyomó és 17 közvetett húzóvizsgálat (8. táblázat). A nyomókísérleteknek alávetett minták törőfeszültségei már az 50 mm átmérőre és 2:1 magasság:átmérő arányra átszámított értékkel szerepelnek a táblázatban, valamint a σ - ε diagramjaik alapján meghatároztuk a hozzájuk tartozó rugalmassági modulust is.

8. táblázat. Szilárdsági vizsgálatok eredményei

A jelű fúrás				
Mélység	Törőteher (kN)	Törőfeszültség (kPa)	Nyomó/Húzó	Rugalmassági modulus (MPa)
8,7-9,0	4,91	340,2	Húzó	-
10,7-11,0 (1)	0,33	34,4	Húzó	-
10,7-11,0 (2)	7,90	727,6	Nyomó	34,4
12,7-13,0	0,10	8,7	Húzó	-
13,7-14,0 (1)	2,88	272,5	Nyomó	6,8
13,7-14,0 (2)	0,10	10,4	Húzó	-
15,7-16,0	4,55	451,2	Nyomó	23,3
16,7-17,0	0,18	12,9	Húzó	-
17,7-18,0 (1)	5,27	519,0	Nyomó	35,9
17,7-18,0(2)	5,61	578,7	Húzó	-
18,7-19,0	0,54	34,9	Húzó	-
20,7-21,0	2,21	220,1	Nyomó	21,4
21,7-22,0 (1)	0,44	25,5	Húzó	-
21,7-22,0 (2)	0,21	17,6	Húzó	-

B jelű fúrás				
Mélység	Törőteher (kN)	Törőfeszültség (kPa)	Nyomó/Húzó	Rugalmassági modulus (MPa)
1,7-2,0	0,70	65,8	Nyomó	2,1
2,7-3,0 (1)	0,24	20,6	Húzó	-
2,7-3,0 (2)	0,24	17,6	Húzó	-
4,7-5,0	2,45	242,2	Nyomó	5,3
5,7-6,0	1,42	136,8	Nyomó	1,4
7,7-8,0	0,53	35,3	Húzó	-
8,7-9,0 (1)	1,54	85,5	Húzó	-
8,7-9,0 (2)	0,42	58,4	Húzó	-
8,7-9,0(3)	2,79	-	Húzó	-
10,7-11,0	27,60	2733,1	Nyomó	107,9
12,7-13,0	1,72	166,0	Nyomó	6,6
14,7-15,0	0,18	17,0	Húzó	-
15,7-16,0	6,53	639,7	Nyomó	16,5
17,7-18,0	4,68	206,2	Húzó	-
18,7-19,0	4,51	426,9	Nyomó	27,3

Az anyagsűrűség meghatározásakor minden egyes vizsgált próbatestből 2 piknométeres mérést készítettünk és amennyiben a különbség nem volt túl nagy, akkor a két érték számtani átlaga szolgált eredményül (I. Melléklet I.3. táblázat). Az ily módon meghatározott anyagsűrűségben jelentős különbségek mutatkoznak, ami a pernye heterogenitásával magyarázható. Mivel egy mintán belül akár több, eltérő szerkezetű és vastagságú réteg található, ezért ezek az eredmények csak egy közelítő képet adnak a szemcsék sűrűségéről.

Az anyagsűrűség (ρ_s), a víztartalom (w) és a nedves térfogatsűrűség (ρ_n) ismeretében több talajfizikai paraméter is meghatározható, így a fázis összetétel ($s/v/l$), a száraz (ρ_d) és telített térfogatsűrűség (ρ_t), a telítettség (S_r), a hézagtérfogat (e) és a hézagterfogat (n). Az anyagsűrűség és a felsorolt jellemzők értékeit (a víztartalommal és a nedves térfogatsűrűséggel kiegészítve) a 9. táblázat tartalmazza.

Az egyes paraméterek az alábbi képletek segítségével számolhatók ki:

- s : szilárd rész térfogatszázaléka (%): $s = \frac{\rho_n}{\rho_s \cdot (1 + w)} \cdot 100$,
- v : víz térfogatszázaléka (%): $v = \frac{\rho_n - \rho_s \cdot s}{\rho_w} \cdot 100$,
- l : levegő térfogatszázaléka (%): $l = (1 - s - v) \cdot 100$,
- ρ_d : száraz térfogatsűrűség (g/cm^3): $\rho_d = \rho_s \cdot s$,
- ρ_t : telített térfogatsűrűség (g/cm^3): $\rho_t = s \cdot (\rho_s - \rho_w) + \rho_w$,
- S_r : telítettség (%): $S_r = \left(\frac{v}{1 - s} \right) \cdot 100$,
- e : hézagtérfogat (-): $e = \frac{1 - s}{s}$,
- n : hézagterfogat (%): $n = (1 - s) \cdot 100$.



16. ábra. Húzó- és nyomóvizsgálat

9. táblázat. Talajfizikai paraméterek

A jelű fúrás											
Próbatest	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	w (%)	s (%)	v (%)	l (%)	S _r (%)	e (-)	n (%)
0,7-1,0	-	-	-	-	61,42	-	-	-	-	-	-
1,7-2,0	-	-	-	-	71,44	-	-	-	-	-	-
3,7-4,0	-	-	-	-	74,74	-	-	-	-	-	-
5,7-6,0	-	-	-	-	80,31	-	-	-	-	-	-
6,7-7,0	-	-	-	-	70,17	-	-	-	-	-	-
7,7-8,0	-	-	-	-	72,96	-	-	-	-	-	-
8,7-9,0	-	1,49	-	-	91,44	-	-	-	-	-	-
10,7-11,0 (1)	-	1,34	-	-	64,16	-	-	-	-	-	-
10,7-11,0 (2)	-	1,43	-	-	64,16	-	-	-	-	-	-
12,7-13,0	-	1,36	-	-	75,66	-	-	-	-	-	-
13,7-14,0 (1)	-	1,45	-	-	103,17	-	-	-	-	-	-
13,7-14,0 (2)	-	1,43	-	-	103,17	-	-	-	-	-	-
15,7-16,0	2,33	1,55	1,09	1,62	42,57	46,8	46,4	6,8	87	1,14	53,2
16,7-17,0	-	1,33	-	-	111,77	-	-	-	-	-	-
17,7-18,0 (1)	-	1,65	-	-	60,10	-	-	-	-	-	-
17,7-18,0(2)	-	1,51	-	-	60,10	-	-	-	-	-	-
18,7-19,0	-	1,45	-	-	85,68	-	-	-	-	-	-
20,7-21,0	-	1,52	-	-	79,49	-	-	-	-	-	-
21,7-22,0 (1)	-	1,38	-	-	115,24	-	-	-	-	-	-
21,7-22,0 (2)	-	1,31	-	-	115,24	-	-	-	-	-	-

B jelű fúrás											
Próbatest	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	w (%)	s (%)	v (%)	l (%)	S _r (%)	e (-)	n (%)
0,7-1,0	-	-	-	-	79,92	-	-	-	-	-	-
1,7-2,0	-	1,35	-	-	87,55	-	-	-	-	-	-
2,7-3,0 (1)	-	1,56	-	-	100,15	-	-	-	-	-	-
2,7-3,0 (2)	-	1,34	-	-	100,15	-	-	-	-	-	-
4,7-5,0	-	1,43	-	-	86,98	-	-	-	-	-	-
5,7-6,0	-	-	-	-	116,84	-	-	-	-	-	-
7,7-8,0	2,32	1,46	0,85	1,48	71,91	36,6	61,1	2,3	96	1,73	63,37
8,7-9,0 (1)	2,68	1,52	1,01	1,63	50,69	37,7	51,2	11,1	82	1,65	62,29
8,7-9,0 (2)	2,46	1,50	0,99	1,59	50,69	40,3	50,3	9,4	84	1,48	59,66
8,7-9,0(3)	-	-	-	-	50,69	-	-	-	-	-	-
10,7-11,0	2,15	1,55	0,94	1,55	64,12	43,9	56,1	0,0	100	1,28	56,10
12,7-13,0	2,30	1,35	0,73	1,41	83,87	31,9	61,5	6,6	90	2,14	68,11
14,7-15,0	2,26	1,47	0,94	1,52	56,19	41,6	52,8	5,6	90	1,40	58,41
15,7-16,0	2,27	1,56	1,00	1,56	57,09	43,9	56,1	0,0	100	1,28	56,15
17,7-18,0	2,51	1,46	0,91	1,55	59,85	36,4	54,7	9,0	86	1,75	63,62
18,7-19,0	2,42	1,44	0,82	1,48	76,67	33,7	62,6	3,7	94	1,96	66,26

5.1.2. Az „ÚJ” minta vizsgálati eredményei

Pár hónappal az előző mérések után lehetőségünk nyílt, egy ugyanilyen technológiával, kb. 10 évvel később épült zagygából származó minta vizsgálatára is.

Ez a minta az előzőektől eltérően nem fűrásból származó magminta volt, hanem kézzel történt a mintavétele és csak kis mennyiségben állt a rendelkezésünkre. A mintát szabad levegőn kiszáradt állapotban kaptuk kézhez, így víztartalom mérésre már nem volt lehetőségünk, valamint a szilárdsági vizsgálatokat is a kiszáradt mintán végeztük el. A mintából 3 hengeres próbatestet sikerült fúróval kialakítani (17. ábra), amelyeken egyirányú nyomó vizsgálatot, hajtottunk végre.

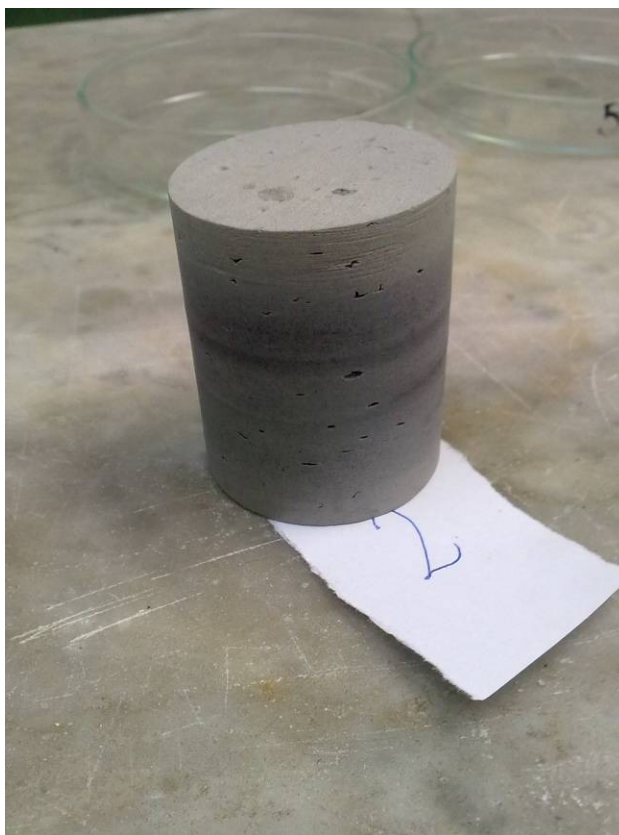
A vizsgálati eredményeket a 10. táblázat tartalmazza.

10. táblázat. Az „Új” jelű minták vizsgálati eredményei és talajfizikai jellemzői

Minta	H _{átlag} [mm]	D _{átlag} [mm]	Száraz tömeg [g]	Hézag- ényező [-]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	ρ_t [g/cm ³]	s (%)	I (%)	Törőte- her [kN]	Törőfesz- ültség [kPa]	E [MPa]
ÚJ1	46,43	37,68	33,02	2,78	0,64	2,41	1,37	0,26	0,74	2,77	2197,4	263,2
ÚJ2	47,78	37,73	33,41	2,85	0,63	2,41	1,37	0,26	0,74	2,42	1924,5	350,2
ÚJ3	48,92	37,54	34,44	2,79	0,64	2,41	1,37	0,26	0,74	0,91	734,0	86,4

Az „ÚJ3” jelű próbatest már a vizsgálatok előtt szemmel láthatóan repedezett volt, így ezen a próbatesten végzet vizsgálatok eredményei nem tekinthetők reprezentatívnak.

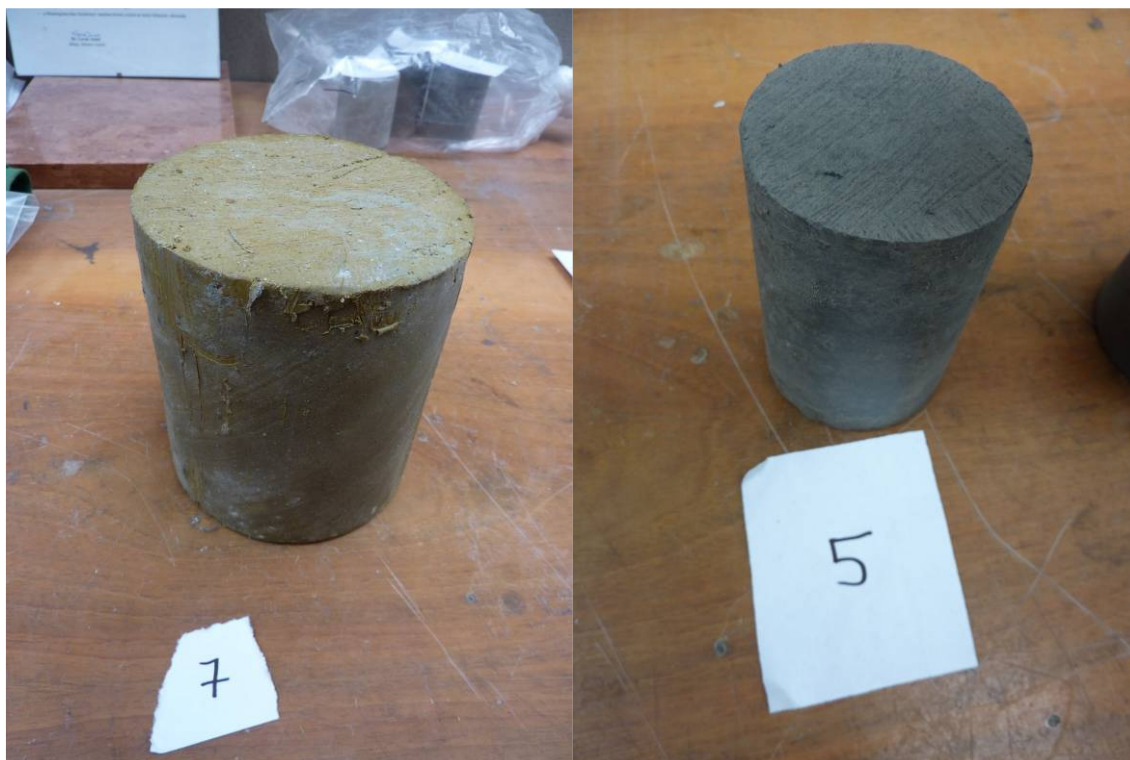
A táblázatban található törőfeszültségek, már az 50 mm átmérőjű és 2:1 arányú próbatestre átszámolt értékek.



17. ábra. „ÚJ2” jelű hengeres próbatest

5.2. Agyagok vizsgálati eredményei

A megszilárdult pernyezagy egyedi szilárdsági jellemzői felvetik a kérdést, hogy mennyiben hasonlóak és eltérőek ezek a tulajdonságai a kemény agyagokéhoz képest. Ennek kiderítésére a pernye mellett kétféle agyagmintát (pannon és kiscelli agyag) is megvizsgáltunk (18. ábra).



18. ábra. Pannon és kiscelli agyag minták

5.2.1. Pannon agyag

A vizsgált pannon agyag ránézés és tapintás alapján is könnyen felismerhető nagy plaszticitású kövér agyag. Ezt az agyagok azonosítására használt plasztikus index is alátámasztja (átlagos értéke 43%), ugyanis a kövér agyagok 30%-nál nagyobb plasztikus indexszel rendelkeznek. A talaj állapotát a relatív konzisztencia indexe (I_c) alapján határozhatjuk meg, eszerint a fúrásból származó agyag a sodorható és a kemény állapot határán mozog. A pannon agyag talajfizikai jellemzőit a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat. A vizsgált pannon agyag talajfizikai jellemzői (Nagy L. közlése alapján)

I_p (%)	I_c (-)	Víztartalom (%)	s (%)	v (%)	l (%)	ρ_n (g/cm ³)
34 - 57	0,95 - 1,05	23-27	54	41	5	1,93 - 2,03

A rendelkezésünkre álló 2 magmintából 4 darab próbatestet alakítottunk ki, amelyeket közvetett húzóvizsgálatoknak vetettük alá. A vizsgálatok célja elsősorban nem a húzószilárdság egzakt meghatározása volt, mivel az, az agyag állapotának köszönhetően gyakorlatilag értelmetlen feladat. A kísérlet célja, annak a megfigyelése volt, hogy a (kövér) agyag hogyan viselkedik a brazil vizsgálat során alkalmazott teherre és értelmezhető-e a kőzeteknél megszokott húzószilárdság.

A pannon agyag vizsgálati eredményeit a 12. táblázat tartalmazza.

12. táblázat. A pannon agyag vizsgálati eredményei

Minta	H _{át} lag (mm)	D _{át} lag (mm)	Tömeg (g)	Törőteher (kN)	Húzás/Nyomás	Törőfeszültség (MPa)	ρ_n (g/cm ³)
7/1	59,91	104,82	1034,84	1,60	Húzás	0,25	2,00
7/2	61,93	105,67	1065,89	1,20	Húzás	0,18	1,96
8	85,69	104,41	1480,99	1,18	Húzás	0,13	2,02
9	81,87	104,43	1420,31	1,42	Húzás	0,17	2,03

A kísérletekből egyértelműen kiderült, hogy a pannon agyag pontos húzószilárdsága ilyen módszerrel nem vizsgálható. Az élmenti terhelés fokozatos növelésével ugyanis a próbatest megtámasztott alkotói szép lassan benyomódtak, így a kör alakú keresztmetszett helyett egy belapult, alma formájú keresztmetszet alakult ki. Itt a feszültségállapot már nem tiszta húzás volt, hanem felléptek nyomófeszültségek is, így egy összetett feszültségállapot alakult ki, ahol a tönkremenetelnél már nem értelmezhető a tiszta húzószilárdság. A tönkremeneteli kép is jól mintázta ezt a feszültségállapot változást, ugyanis a terhelőlap alatt egy háromszög alakú nyomási zóna alakult ki, amely belenyomódott a henger belső részébe.

5.2.2. Kiscelli agyag

A kiscelli agyag oligocén korú tengeri képződmény. A típusos kiscelli agyag üde állapotban szürke, gyengén zöldesszürke, szárazon kemény, kagylós törésű, fő tömegében alig vagy nem rétegzett. Legtöbb esetben nedvesítve plasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. Szemeloszlás alapján 40-50% agyagfrakció, 50-60% aleurit alkotja, homokot csupán 6-7%-ban tartalmaz. A kiscelli agyag mésztartalma 10-35% közötti, ezért is gyakran „márgás” megjelenésű (Báldi 1983).

A kiscelli agyag alapvetően három zónára bontható: a felső sárga mállott zónára, egy szürke üde állapotú, de töredezett és egy szintén szürke, de úgymond eredeti állapotú zónára.

A kiscelli agyagmintákat 2011. április 12-én vettük a Solymáron található agyagbányából. Az elhozott agyagtömbökből 6 próbatestet sikerült kifúrni, amelyekből 3 húzó- és 3 nyomókísérlet készült. A vizsgálati eredményeket a 13. táblázat tartalmazza.

13. táblázat. A Solymárról származó kiscelli agyag vizsgálati eredményei

Minta	H _{át} lag (mm)	D _{át} lag (mm)	Tömeg (g)	Törőteher (kN)	Húzás/Nyomás	Törőfeszültség (kPa)	E (MPa)	ρ_n (g/cm ³)
1	63,30	53,70	327,52	1,78	Húzás	334	-	2,29
2	42,94	53,31	216,47	1,01	Húzás	281	-	2,26
3	61,36	53,56	316,45	1,07	Húzás	207	-	2,29
4	68,56	53,61	355,84	1,78	Nyomás	748	44,7	2,30
5	77,91	53,83	409,44	5,58	Nyomás	2377	97,0	2,31
6	62,01	53,62	327,17	5,20	Nyomás	2145	260,4	2,34

Az agyag víztartalmára 13,98% adódott.

A 4-es jelű minta többinél kisebb nyomószilárdságát valószínűleg részben (vagy teljesen) a mintavétel módja eredményezte. A kiscelli agyag ugyanis, bár szemmel alig láthatóan, de laminált, réteges szerkezetű. A bányából hozott agyagrögökből a közetmechanikai laboratóriumban lettek kialakítva a próbatestek. És míg az 5-ös, és a 6-ös próbatest ugyanazon a rögből, egymás mellől lettek kifúrva, addig a 4-es jelű egy másik tömbből. Ennek köszönhetően a rétegzettségük eltérő szöget zárt be a terhelés síkjával, ami a szilárdságbeli különbséget eredményezte.

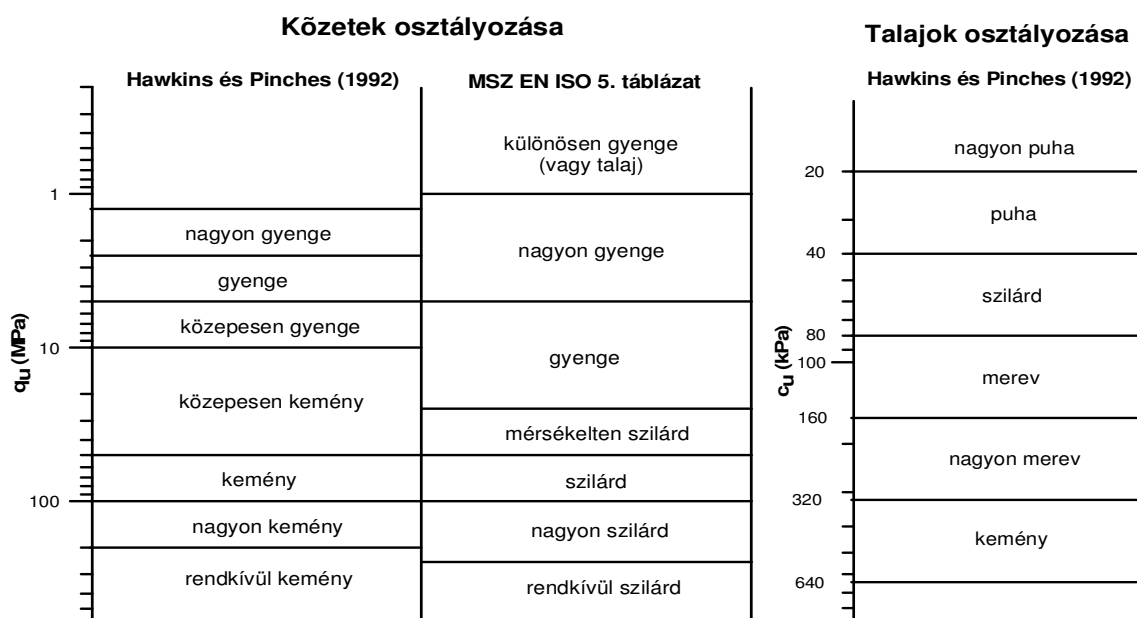
6. Mérési eredmények értékelése műszaki szempontból

Fontos kiemelnünk, hogy a vizsgált mintáink döntő többsége egy nagyjából 20 éve, pernyezagyból készült gáttestből származtak. A gát építéséhez bázikus, nagy kötőképességgel rendelkező (C típusú) pernyét használtak fel, aminek tulajdonságai jelentősen eltérhetnek a savanyú pernyéétől. Továbbá az anyag tulajdonságait döntő mértékben befolyásolja annak heterogenitása és rétegzettsége, ezért a mérési eredmények következőekben leírt értékelésénél ezeket mindenképp szem előtt kell tartani. A gyakorlatban megvalósult zagygátak többsége ilyen heterogén összetételű, ezért a stabilitási és teherbírási kérdésekre csak a tényleges szerkezet vizsgálatával adhatunk választ. Homogén minták vizsgálata teljesen más eredményeket szolgáltathatnak. Emiatt a dolgozatban szereplő megállapítások csak a hasonló heterogén, laminált szerkezetű gáttestek vizsgálatához szolgálhatnak alapul.

6.1. Talaj és kőzet közötti átmenet

Mivel a Föld felszínén, s annak közelében előforduló talajok a szilárd kőzetek aprózódása és mállása útján jönnek létre, ezért a talaj és a kőzet határának meghúzása sokszor önkényes alapon történik. Nem létezik olyan egyértelmű, objektív mérőszám, amely kijelölné ezt a határt. Ezért ezeket az átmeneti anyagokat tekinthetjük akár puha kőzeteknek, akár kemény talajoknak.

Mivel a talajok és a kőzetek közti határ meghúzására nem létezik egyértelmű mérőszám, ezért több szerző is szilárdságuk alapján próbálta kategorizálni ezeket az anyagokat. Hawkins és Pinches (1992) a talajokat drénezetlen nyírószilárdságuk, míg a kőzeteket egyirányú nyomószilárdságuk alapján osztályozta. Eszerint azokat az anyagokat, amelyek nyírószilárdsága (c_u) meghaladja a 640 kPa-t, egyirányú nyomószilárdságuk alapján kőzetként kell besorolni. Míg az 1,25 MPa alatti nyomószilárdságú (q_u) mintákat nyírószilárdságuk alapján kell talajként kategorizálni (19. ábra).



19. ábra. Szilárdság alapján való kategorizálás Hawkins és Pinches (1992) valamint az Eurocode alapján

Nyomószilárdsága alapján a megszilárdult pernyezagy a kemény talajokhoz áll közelebb, semmint a gyenge kőzetekhez. Ugyanis egyedül a kiugró szilárdságú, illetve az ÚJ1 és ÚJ2 jelű minták érték el a gyenge kőzetek intervallumát. Ugyanakkor Hawkins és Pinches táblázata nem ad útmutatást arra az esetre, ha a minta drénezetlen nyírószilárdsága meghaladja a 640 kPa-t, az egyirányú nyomószilárdsága viszont nem éri el az 1,25 MPa-t. Ezzel szemben az Eurocode a 340 kPa-nál nagyobb nyírószilárdságú anyagokat javasolja gyenge kőzetnek tekinteni. A különböző szerzők különböző osztályozási rendszere is rávilágít arra, hogy ezen átmeneti anyagok leírása mekkora bizonytalanságot rejt magában.

Próbatestek kialakítása sokkal nehezebb puha kőzetekből, mint keményebb társaikból, ugyanis a puha kőzetek általában könnyen morzsolódnak, így kisebb-nagyobb részek törhetnek le róla. Ezt a tulajdonságot mi is tapasztaltuk a pernyezagy próbatestek kialakításánál. Így az irodalomban szereplő ajánláshoz (Akai 1997) hasonlóan nekünk is kézi szerszámok: fűrész és csiszolópapír használatára kellett szorítkoznunk (20. ábra).



20. ábra. Próbatestek kialakítása

Talajok esetében a feszültség – alakváltozás görbe meredeksége az összenyomódási modulussal, míg kőzetek esetén a rugalmassági modulussal jellemezhető. Habár az összefüggések, amelyek alapján értelmezzük őket, azonos alakúak, ez a két tényező mégsem azonos. Amíg a talajok összenyomódásának vizsgálatánál az oldalkitérést meggátoljuk ($\epsilon_x = 0$, $\epsilon_y = 0$), addig a kőzetek egyirányú nyomókísérleténél – a nevéből is láthatóan – megengedjük az oldalirányú alakváltozásokat. Tehát a rugalmassági modulus a lineáris feszültségállapot, az összenyomódási modulus viszont a lineáris alakváltozási állapot lineáris tényezője, tehát más a tartalmuk. Alkalmazva ϵ_z -re az általános Hooke-törvényt, levezethető, hogy a két modulus közti összefüggés:

$$E_s = E \cdot \frac{1 - \mu}{1 - \mu - 2 \cdot \mu^2}$$

ahol:

- E_s : Összenyomódási modulus (MPa)
- E : Rugalmassági modulus (MPa)
- μ : Poisson-tényező (-)

A természetben leggyakrabban előforduló, kőzetek és talajok határán elhelyezkedő anyag az agyag – márga átmenet tagjai.

A márga átmenetet képez a vegyi üledékes és a törmelékes üledékes kőzetek között. Összetétele alapján mészkő és agyag keveréke, a felépítő anyagok százalékos arányában különböző elnevezést kapott és ennek függvényében különböző viselkedést is mutat. A földtanban Bárdossy (1961) osztályozását használják (14. táblázat). A nagy mésztartalmú márgát kőzetszerű viselkedése és fizikai jellemzői alapján a szilárd kőzetekhez sorolják, míg a teljesen mállott márga agyagszerű. A márga a tömött mészkőnél lágyabb és nagyobb hézagterfogatú, az agyagnál jóval kötöttebb.

114. táblázat. Márga csoportosítása mész- és agyagtartalom alapján (Bárdossy 1961)

CaCO ₃ (%)	Agyag (%)	Kőzetnév
>80%	<20%	mészkő
80-60	20-40	mészmárga
60-40	40-60	márga
40-20	60-80	agyagmárga
<20%	>80%	agyag

A megszilárdult pernye laminált szerkezete miatt sok hasonlóságot mutat a márgával. Ez elsősorban a fúrásból származó magmintákon elvégezhető vizsgálatokra van kihatással. Ugyanis a pernyéhez hasonlóan a márgából is nehéz próbatestet kialakítani. Mindamellet talajmechanikai vizsgálata is csak nehezen oldható meg, ugyanis zavartalan mintát általában nem lehet kiszűni belőle, továbbá ha sikerül is meghatározni a plasztikus indexét vagy a szemeloszlási görbéjét (legtöbb esetben víz hatására szétmállik), ezen eredmények alapján nem határozható meg biztonsággal a fizikai paraméterei. A kevesebb mészkő tartalmú agyagmárga azonban már közelebb áll a talajokhoz, így talajmechanikai vizsgálatokkal jellemezhető (Görög 2008).

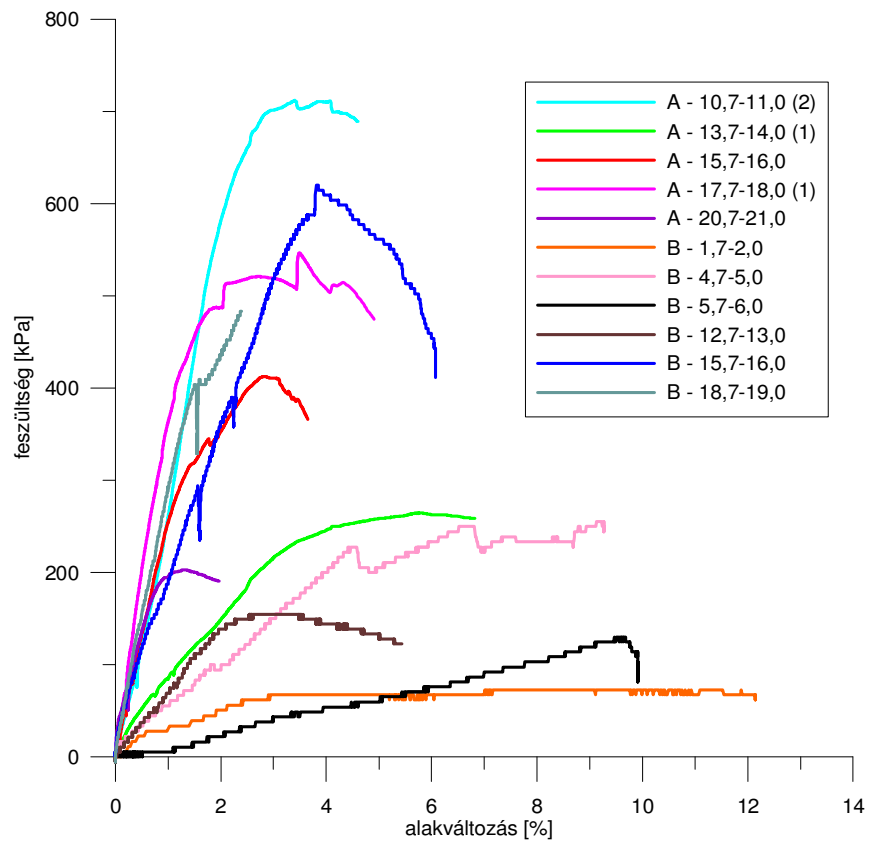
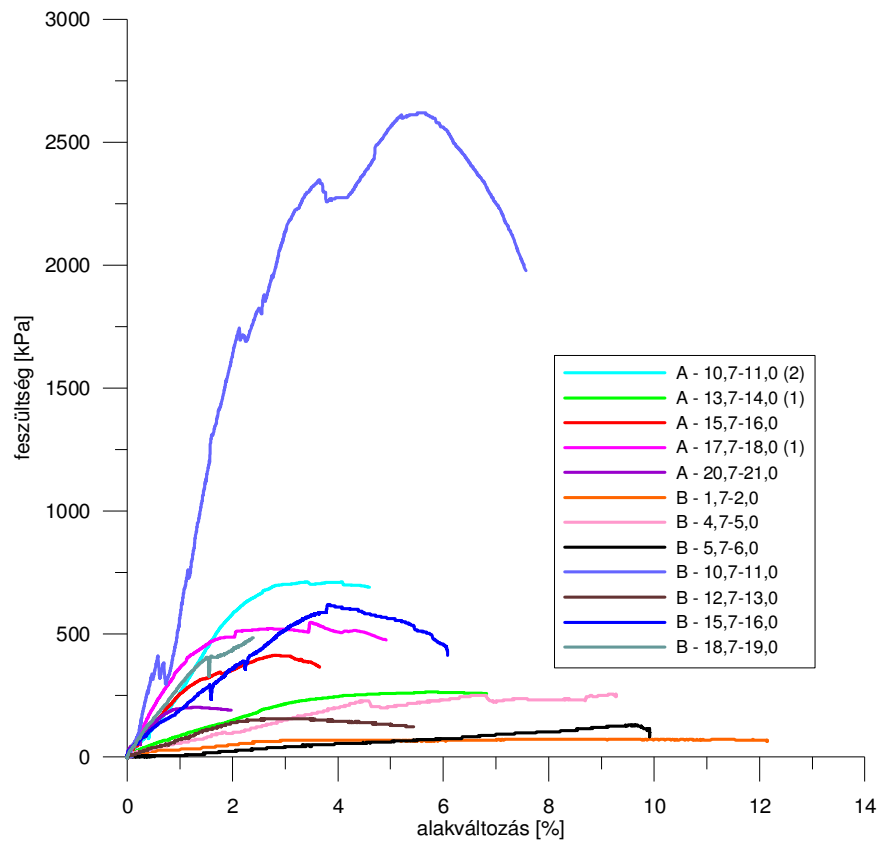
A Budán igen gyakori kiscelli agyag a legtöbb esetben talajként kezelhető, ritkán pedig gyenge szilárdságú kőzetként. Kőzetzfizikai tulajdonságai a budai márgához hasonlóan széles intervallumban mozognak, azonban a budai márgához képest a legtöbb esetben gyengébb szilárdságú (Görög 2008). A szilárdabb már inkább kiscelli agyagmárgának nevezhető, kőzetnek tekinthető anyagból általában rugalmassági modulus értéket is meghatároztak, az agyagosabb jellegű kiscelli agyagból csak összenyomódási modulus.

A megszilárdult pernyezagynál – az agyag-márga átmenet tagjaihoz hasonlóan – annál szilárdabb anyagot kapunk minél nagyobb volt a pernye szabad mésztartalma, és ezáltal a hidraulikus kötőképesége.

6.2. A pernye szilárdági-alakváltozási jellemzői

Egyirányú nyomókísérleteknél a nyomó erő, a terhelt felület nagysága valamint az összenyomódás ismeretében megrajzolhatók az egyes próbatestek feszültség – alakváltozás ($\sigma - \epsilon$) ábrái. A 12 darab megszilárdult pernyezagy minta $\sigma - \epsilon$ grafikonjai a 21. ábrán láthatók.

Amint az ábrán is látható a B jelű fúrás 10,7-11,0-es jelű próbatest szilárdsága jelentősen kiemelkedik a többi közül. Míg ennél a mintánál 2733 kPa-os nyomásnál következett be a tönkremenetel, addig a második legszilárdabb próbatest ennek kevesebb, mint negyedét 728 kPa-t ért el. A kiugró érték a többi mintáénál lényegesen magasabb mésztartalmának köszönhető. A többi görbe jobb átláthatósága kedvéért a következő ábrán a kiemelkedő eredmény nélkül szerepelnek a grafikonok (22. ábra).



A görbék rugalmas szakaszán látható kisebb-nagyobb visszaesések repedések megjelenéséhez, illetve a fúrás során kialakult pár mm-es zavart kéreg leválásához köthetők.

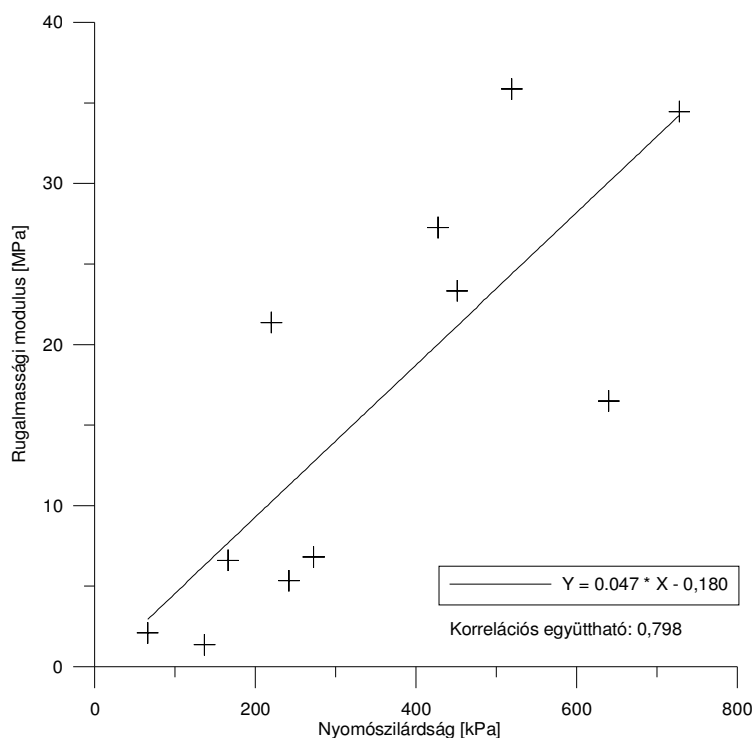
A görbék alapján a minták két csoportra bonthatók. Az első csoportba tartoznak a nagyobb rugalmassági modulusú és törőterhű, míg a második csoportba a kisebb rugalmassági modulusú és törőterhű minták.

Az első csoport nyomószilárdsága 400 és 730 kPa között mozog. Rugalmassági modulusuk pedig meghaladja a 10 MPa-t, átlagosan 20-30 MPa. A próbatestek helyét tekintve a gáttest mélyebb (10 m-nél mélyebb) részéből származnak.

A második csoportba tartozó minták nyomószilárdsága ezzel szemben sehol sem érte el a 300 kPa-t. Rugalmassági modulusuk pedig 10 MPa alatt marad. Ezek a próbatestek – egy-két kivételtől eltekintve – főleg a fúrások felsőbb részeiről származnak.

Az A-20,7-21,0 jelű minta átmenetet képez a két csoport között. Ugyanis míg nyomószilárdsága 200 kPa körüli, addig a rugalmassági modulusa alapján (21 MPa) az első csoport tagjaival mutat hasonlóságot.

A minták nyomószilárdsága és a rugalmassági modulusa közti összefüggést a 23. ábra mutatja be. Ez alapján a két érték között lineáris összefüggés figyelhető meg, ami a $\sigma - \varepsilon$ görbék alapján levont következtetésnek megfelelően várható volt.



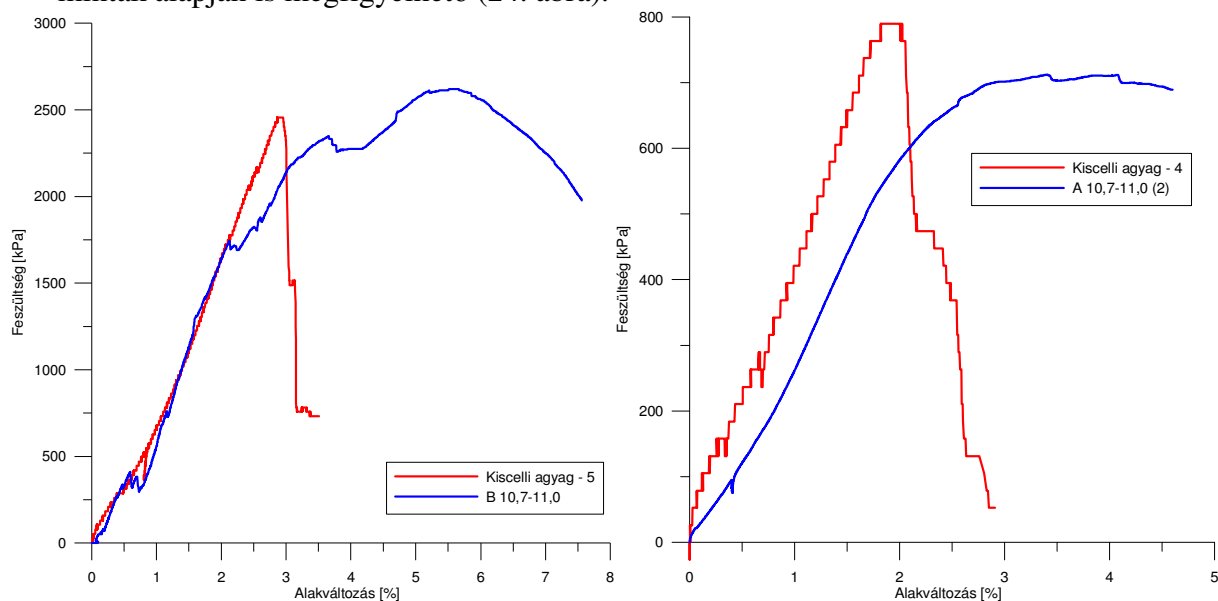
23. ábra. A nyomószilárdság és a rugalmassági modulus közti kapcsolat

A megszilárdult pernye nyomószilárdsága alapján a budai sárga kiscelli agyaghoz áll legközelebb, melynek átlagos egyirányú nyomószilárdsága 200 kPa (Görög 2008). Ez alapján az első csoportba tartozó minták a szilárdabb, míg a második csoportba tartozó próbatestek közepes, illetve gyengébb szilárdságú agyaggal állíthatók párhuzamba. A B-10,7-11,0 jelű minta szilárdsága viszont már eléri, sőt meg is haladja a Budáról származó szürke kiscelli agyagok átlagos szilárdságát.

A vizsgált minták rugalmassági modulusa alapján is hasonló következtetéseket lehet levonni. Míg a mállott, sárga esetben a talajszerű viselkedés miatt nincs is értelme a rugalmassági modulusnak (helyette inkább a talajmechanikában használt összenyomódási modulussal jellemezhető), addig a szürke kiscelli agyag rugalmassági modulusa jól értékelhető, átlagos értéke 198,5 MPa (Görög 2008). Ez ugyan majd egy nagyságrenddel

nagyobb a pernyénél tapasztaltnál, azonban 20-30 MPa-os értékek is előfordulnak az agyagnál. A második csoportba tartozó, alacsonyabb szilárdságú próbatestek rugalmassági modulusa viszont már az agyagnál mért legalacsonyabb értékek alatt maradnak.

A fentiek alapján a pernyezagy szilárdsági jellemzői (rugalmassági modulus, nyomószilárdság) a kiscelli agyaggal mutatnak szoros rokonságot, amint az a Solymáron vett minták alapján is megfigyelhető (24. ábra).



24. ábra. A B-10,7-11,0 jelű és az 5-ös jelű kiscelli agyag, illetve az A-10,7-11,0 (2) jelű és a 4-es jelű kiscelli agyag próbatest feszültség – alakváltozás grafikonja

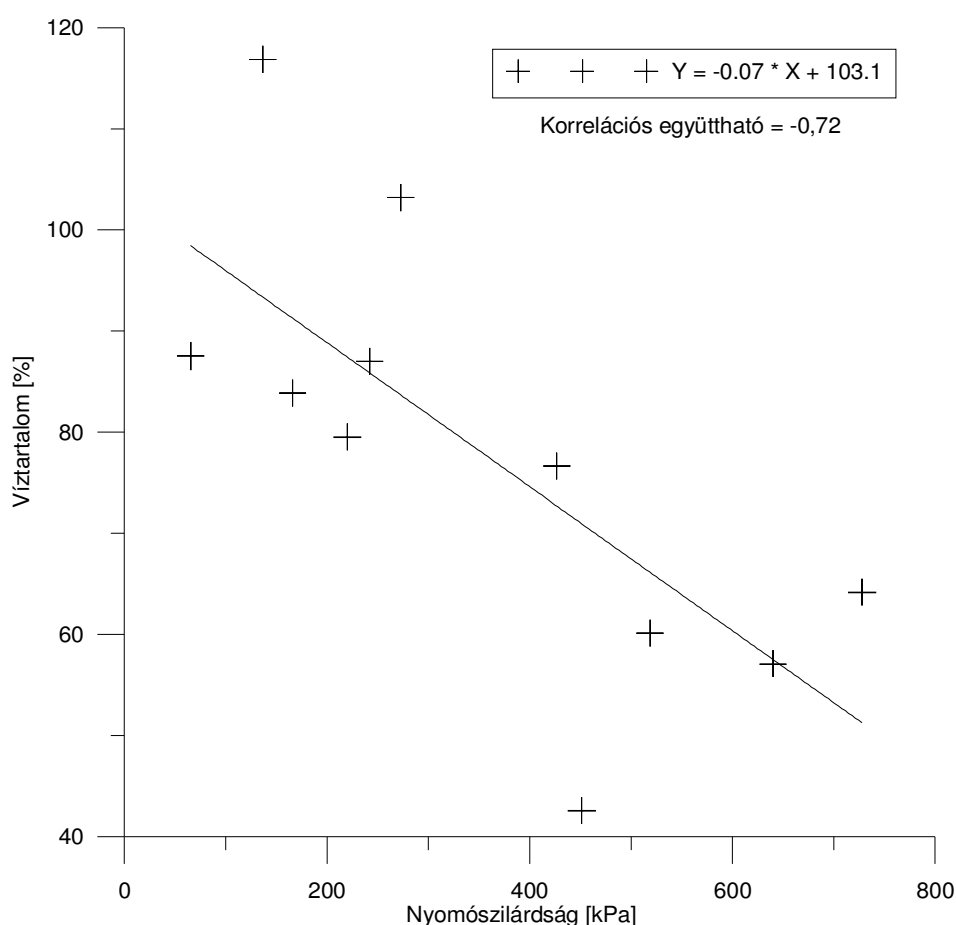
Lényeges eltérés mutatkozik azonban a kétféle anyag tönkremeneteli mechanizmusa között. Az ábrán látható görbék futása is jól szemlélteti, hogy míg a kiscelli agyagnál rideg törés – ez az agyag szárazabb mivoltának köszönhető –, addig a pernyénél a tönkremenetel fokozatosan, plasztikus töréssel következik be. Ezt a következtetést a minták törésképe is alátámasztja (25. ábra)



25. ábra. Pernye és megszilárdult szürke kiscelli agyag törésképe

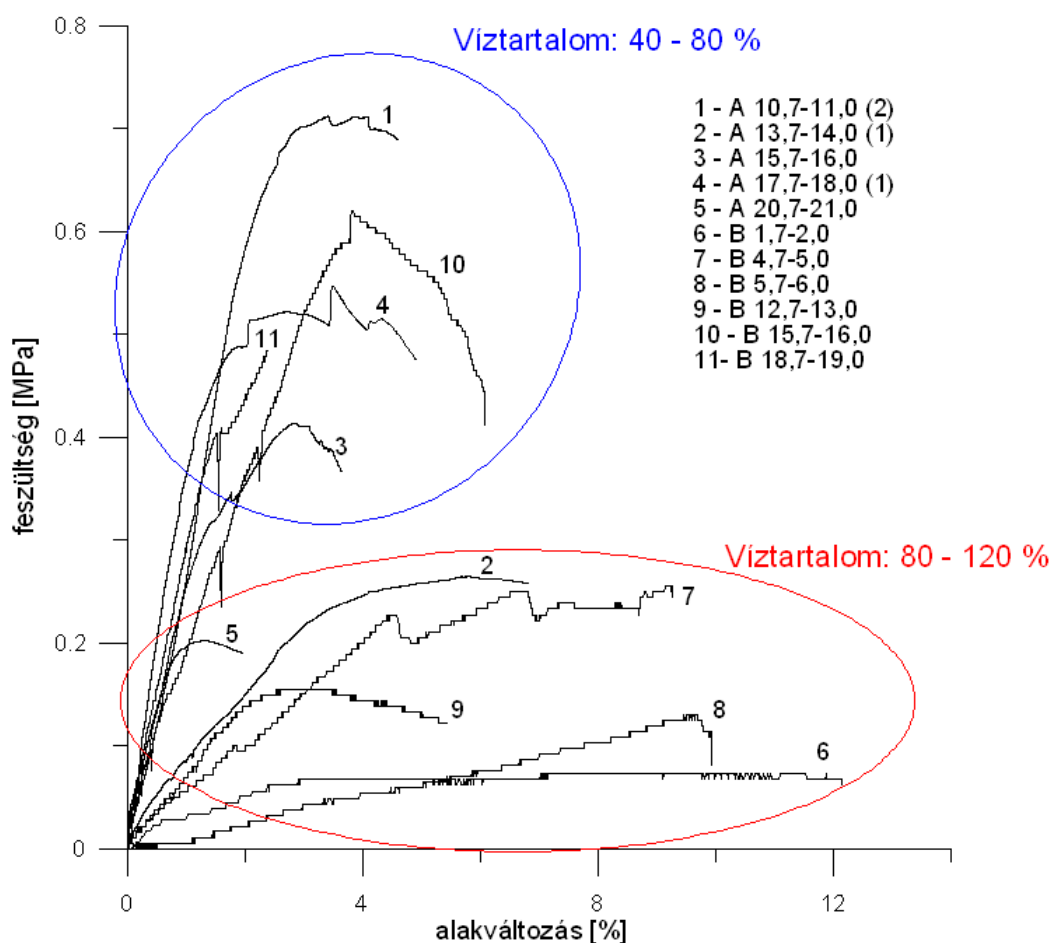
A töréshez tartozó alakváltozás merev, rideg konzisztenciájú agyagok esetében $\varepsilon_t = 3-8 \%$, félig merev agyagok esetében $\varepsilon_t = 8-14 \%$, plasztikus konzisztenciájú agyagoknál $\varepsilon_t = 14-20 \%$ (Kézdi 1977). Az első csoport mintái, bár töréshez tartozó alakváltozásuk alapján merev viselkedés lenne várható, $\sigma - \varepsilon$ görbéik és törésképeik alapján mégis félig merev anyagként viselkednek és tönkremenetelük a merev törés és plasztikus törés határán helyezkedik el. A második csoport tagjaira viszont már egyértelműen plasztikus törés jellemző. A pernye törési alakváltozása, a két legkisebb szilárdságú (B-1,7-2,0-es és B-5,7-6,0-os jelű próbatest) kivételével azonban egyszer sem érte el a 8% -ot. Ez alapján megállapítható, hogy perneyzag esetén a plasztikus állapot eléréséhez kisebb alakváltozás elegendő, mint agyagoknál.

A nyomószilárdságot a víztartalom függvényében ábrázolva jól megfigyelhető tendencia rajzolódik ki (26. ábra). Az ábra nem tartalmazza a B-10,7-11,0-s jelű próbatestet, amelynek szilárdsága 2700 kPa, víztartalma pedig 60%.



26. ábra. A próbatestek nyomószilárdsága a víztartalom függvényében

Az ábrán látható, hogy az alacsonyabb víztartalommal rendelkező minták nagyobb szilárdsággal rendelkeznek, mint a magas víztartalmú minták. Ez az összefüggés a természetes talajok esetén is jól ismert. A próbatestek $\sigma - \varepsilon$ diagramjaival összevetve a víztartalom értékei jól hozzárendelhetők a két csoporthoz (27. ábra).



27. ábra. A feszültség - alakváltozás grafikonok kapcsolata a víztartalommal

Amíg az első csoportba tartozó nagyobb szilárdságú minták víztartalma 40-80 % között változik, elsősorban 60 % körül, addig a második csoportba tartozó, alacsony szilárdsággal rendelkező minták 80 % és 120 % közötti víztartalommal jellemezhetők. Mivel a víztartalom és a minták telítettsége között nem figyelhető meg összefüggés – a telítettség minden esetben 90-100 % körüli, azaz a minták kvázi-telítettek – ezért a víztartalom és a nyomószilárdság közötti összefüggés az anyag heterogenitására, illetve tömörségére vezethető vissza. Eszerint a két csoportot alkotó magminták egymástól eltérő tulajdonságú vagy tömörségű pernyéből épülnek fel.

A húzókísérletek eredményei is változatos képet mutatnak, ugyanis a húzószilárdságok 8,7 kPa-tól egészen az 579 kPa-ig terjednek. Átlagos értékük 94,0 kPa, ugyanakkor ez csalóka képet adhat, mivel az eredmények mediánja 34,4 kPa. Azaz az értékek nagy része 10-50 kPa körül mozog, míg van egy-két kiugró adat, amelyek a 100 kPa-t is meghaladják.

Míg a kiscelli agyagnál húzás esetén is rideg törés figyelhető meg, addig a pannon agyag már annyira képlékeny, hogy brazil kísérlettel nem is határozható meg pontosan a húzószilárdsága. A pernye viselkedése alapján a két anyag között helyezkedik el, ugyanis törése alapján a kiscelli agyagnál plasztikusabb viselkedést mutat, ugyanakkor koránt sincs akkora alakváltozása, mint a pannon agyagnak (28. ábra). Érdekes megfigyelni, hogy bár a képlékenysége miatt utóbbi húzószilárdsága nem volt egyértelműen mérhető, a közelítően számított értékek (átlagosan 117 kPa) így is meghaladják a pernyénél mért legtöbb eredményt. A kiscelli agyag átlagos húzószilárdságát (274 kPa), csak a pernyénél mért két legmagasabb érték érte el (A jelű fúrás 17,7-18,0 (2)-es és 8,7-9,0-s jelű minta), valamint csak ezeknél a mintáknál volt megfigyelhető a ridegszerű törés is.

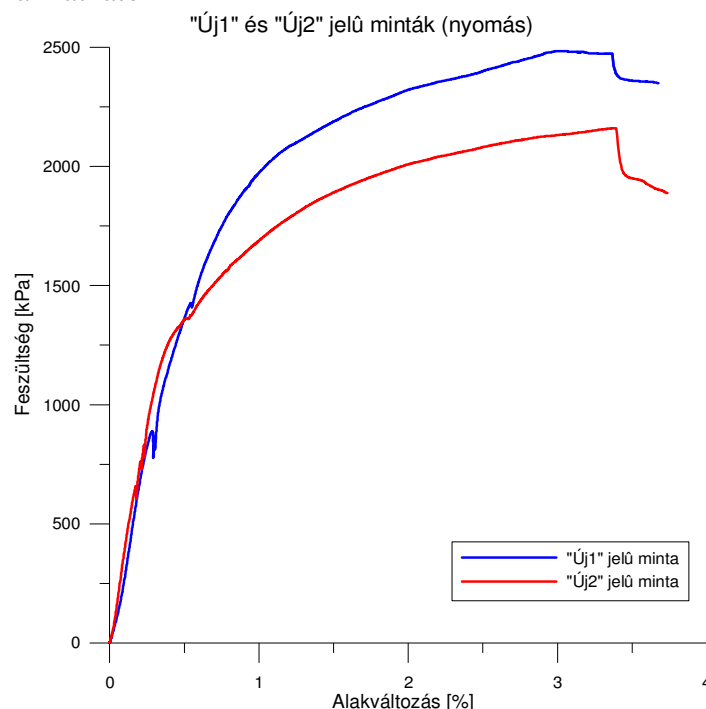


28. ábra. Kiscelli agyag, pernyezag (nagy víztartalmú) és pannon agyag törésképe

A B-1,7-2,0 és főleg a B-5,7-6,0-s jelű minta nagy mennyiségben tartalmazott fekete, valószínűleg el nem égett szénből visszamaradt szerves anyagot. A szerves anyag jelenléte magas víztartalmat eredményezett, és jelentősen csökkentette a nyomószilárdságot és a rugalmassági modulust. Ennek elkerülésére fontos, hogy a tüzelőanyag tökéletesen elégjen és a zagyba csak olyan égési maradékok kerüljenek, amelyek nem tartalmaznak szerves anyagot.

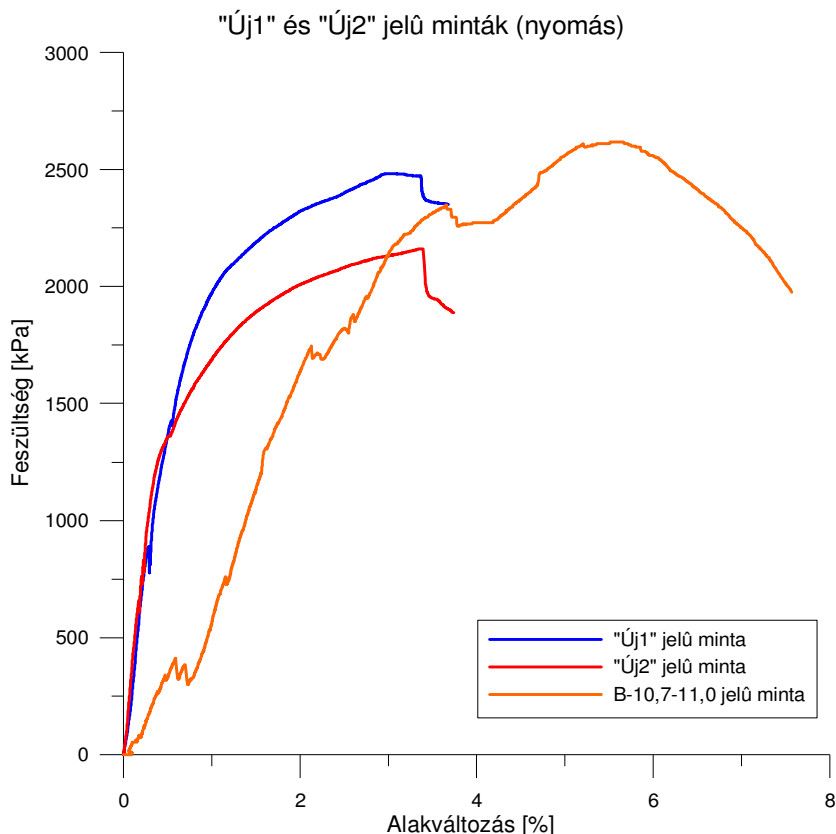
Az előző mintáktól az új pernyezag mintát mindenképpen elkülönítve kell kezelnünk. Ez a minta ugyanarról a helyről, de másik gáttestből származik, amely közel tíz évvel az előző után épült. Ezen kívül a minta már előzetesen szabadlevegőn kiszáradt, így a nedvességtartalma nem tekinthető a gáttestben lévő anyagéval egyenértékűnek. Ezen kívül csak kis mennyiségű minta állt rendelkezésünkre, amelyből csak három próbatestet tudtunk kialakítani.

Az ÚJ3 jelű minta már előzetesen sérült és berepedezett a próbatest kialakítása közben, így annak nyomószilárdsági értéke nem reprezentatív érték. A másik két minta $\sigma - \epsilon$ grafikonjai a 29. ábrán láthatók



29. ábra. Az ÚJ1 és ÚJ2 próbatestek $\sigma - \epsilon$ diagramjai

Az új minták szilárdsága az előzőek közül a legerősebbel, a B-10,7-11,0 jelű minta kiugró értékével közel azonos (30. ábra). Az új próbatestek kialakításánál jól látható volt, hogy a minta jóval homogénebb szerkezetű, mint az előzőekben vizsgáltak. Részben ennek is köszönhető a viszonylag nagyobb szilárdság. Ugyanakkor érdekes megfigyelni, hogy a hézagtenyező mindhárom új próbatest esetében 3 körüli értéket mutat, ami magas értéknek számít. Ebből következik, hogy a kiindulási pernye minősége és homogenitása sokkal jobban befolyásolja a szilárdság alakulását, mint a hézagtenyező értéke.



30. ábra. A B-10,7-11,0 és az ÚJ1, ÚJ2 jelű próbatestek $\sigma - \varepsilon$ diagramjai

A 30. ábrán jól megfigyelhető, hogy a két új minta görbéi és a B-10,7-11,0 minta görbéje jelentős eltérést mutat. Az új, homogén mintáknak gyakorlatilag törések nélküli, „szépen” emelkedő szigma-epszilon görbéje van, addig a heterogén B-10,7-11,0 minta görbéjében lépcsők és törések fordulnak elő. Látható, hogy a heterogén anyag tönkremeneteléhez tartozó alakváltozás jóval nagyobb a homogén mintákénál. Ez részben a görbén lévő ugrásoknak köszönhető, amely a repedések kialakulásának és a belső szerkezeti átrendeződésnek a jelei.

Fontos kiemelni, hogy a 36. ábrán látható két homogén minta görbéje viszonylag azonos futású. Ebből következően az anyag viselkedése jóval kisebb intervallumban mozog, kisebb az eredmények szórása. Így a tervezéshez szükséges paraméterek jóval kisebb szórással, jóval pontosabban meghatározhatók egy adott anyagnál. Így az ilyen homogén anyagból készülő rézsű tervezését sokkal jobban lehetne szabályozni és szabványosítani, ami által növelhető lenne a biztonság mértéke.

Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy az új mintából csak kisszámú próbatestet sikerült vizsgálnunk, így ezeket a megállapításokat fenntartásokkal kell kezelni, az igazolásukra több kísérletre lenne szükség. Ezt figyelembe véve az eredmények kiértékelésénél – ha nem említjük külön – az A és B magmintából származó eredményeket vettük döntően számításba.

6.3. Mohr-Coulomb modell alkalmazása

Amint az előző fejezetben leírtakból is látszik a megszilárdult pernyezagy szilárdsági tulajdonságai alapján az agyagokkal állítható párhuzamba

Az agyagok mérnöki szempontból három legfontosabb talajfizikai jellemzője a plasztikus index (I_p), a kohézió (c) és a belső súrlódási szög (φ). Tapasztalataink alapján plasztikus index meghatározása nem lehetséges, ugyanis – amint az a vizsgálati eredményekből is látható – a minták kvázi-telítettek légnedves állapotban is. Mivel a pernye ilyen állapotban is kemény, így a víztartalom változtatásával nem érhető el a plasztikus index meghatározásához szükséges sodorható, illetve folyási állapot. Víz alá helyezve azt tapasztaltuk, hogy az anyag elveszíti szilárdságát és idővel szétmállik, szétesik.

A geotechnika tudományterületén a törési elméletek közül a Mohr-Coulomb elmélet a legelterjedtebb. Eszerint az anyag törését az idézi elő, hogy az anyag részecskéi között fennálló belső súrlódást és kohéziót a nyírófeszültség túllépi. Törés esetén valamely AB felületelemen működő normális (σ) és nyírófeszültség (τ) között lineáris kapcsolat áll fenn:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c$$

Azt a felületet, amelynek minden egyes pontjában a fellépő normál- és nyírófeszültség kielégíti a fenti összefüggést, csúszólapnak nevezzük. Grafikus ábrázolás alapján a Mohr-Coulomb-féle törési feltétel azt jelenti, hogy a talajtömegben a törés akkor következik be, ha a feszültségi állapotot jellemző Mohr-féle kör a Coulomb-féle egyenest érinti.

Ahogy a Mohr-Coulomb modellre, úgy a számítógépes programokban használt többi talajmodellre is igaz, hogy legfontosabb input paraméterük a φ és c értéke. Ezek meghatározására a triaxiális vizsgálat a legelterjedtebb módszer. Ehhez általában egy 75 mm magas és 38 mm átmérőjű minta szükséges. A pernye erősen laminált, heterogén szerkezete miatt azonban lehetetlen ilyen kis átmérőjű minta kifúrása vagy kiszúrása, ugyanis a művelet közben teljesen összetöredezik az anyag. Egyirányú nyomóvizsgálattal is lehetőség van a belső súrlódási szög meghatározására. Ez a vizsgálat gyakorlatilag a triaxiális cella egyszerűsített változatának is tekinthető, azzal a különbséggel, hogy itt nincs oldalirányú nyomás. A belső súrlódási szöget a törési sík hajlásszögét lemérve lehet becsülni, a kohézió ebből és a mért q_u nyomószilárdságból számítható. A Mohr-Coulomb törési feltételt alkalmazva fennáll, hogy:

$$q_u = 2 \cdot c_u \cdot \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi_u}{2} \right).$$

A q_u érték és a vázolt módon számolt φ_u és c_u paraméterek azonban így is csak tájékoztató adatként értékelhetők. A pernye tönkremenetele során az anyag teljesen összetöredezett és a törésképe nem rajzolt ki semmilyen egyértelmű törési felületet, szemben a kiscelli agyaggal. Így ez esetben ilyen módszerrel sem lehetett a belső súrlódási szögre következtetni.

Nyíródobozzal végrehajtott kísérlet is lehetőséget nyújt bizonyos modellező jellegű vizsgálatokra. Azonban az erősen réteges, heterogén szerkezet miatt ezzel a módszerrel sem lehetne teljes biztonsággal megállapítani a nyírószilárdsági paramétereket.

A minták ilyen mértékű heterogén, laminált szerkezetének legfőbb oka a zagyolt gátépítés technológiája. A réteges szerkezetet a csővezetéken keresztül történő ülepítés eredményezi, amit csak felerősít, hogy a létesítmények többsége az üzemelés alatt folyamatosan épülve, hosszú évek alatt érik el végleges magasságukat. Ennyi idő alatt a zagyot szolgáltató erőmű tüzelőanyaga igen nagymértékben és többször is megváltozhat. Ezt több tényező is eredményezheti: pl. a hazai szénről import szénre, vagy szénről biomasszára való áttérés, de akár az egy bányából, de eltérő mélységből és rétegből származó szenek is. Ez a változékonyság okozza elsősorban a heterogenitást, mivel a különböző szén, illetve egyéb tüzelőanyagok pernyéi mind más-más összetétellel és tulajdonságokkal rendelkeznek.

Továbbá a hazai erőművekben leggyakrabban tüzelt barnakőszén pernyéjének igen nagy a minőségbeli ingadozása, ami szintén hozzájárul a pernyezagy rétegenkénti eltérő összetételéhez (31. ábra).



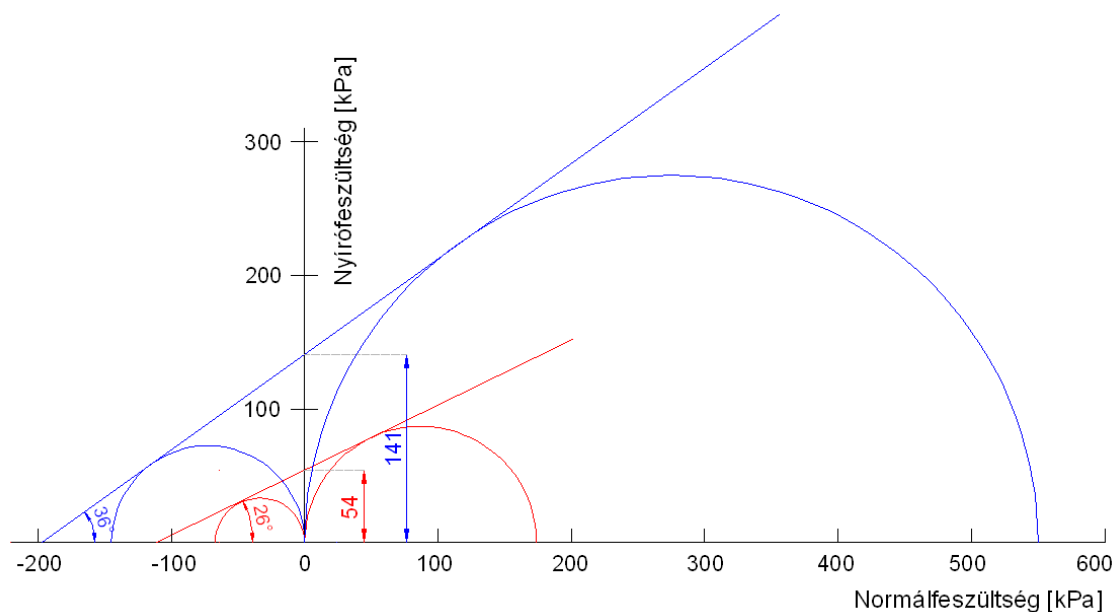
181. ábra. A pernyezagy réteges szerkezete

A nyírószilárdsági paraméterek meghatározása nyomó- és húzóvizsgálatok segítségével is lehetséges. Ugyanis ha ugyanazon talajból egyirányú nyomókísérletet és közvetett húzókísérletet is készítünk, akkor a töréshez tartozó Mohr-féle feszültségi köröket megrajzolva, a közös érintő megadja a Coulomb féle egyenest, illetve a kohéziót és a súrlódási szöget. A két érték a nyomó- és húzószilárdságból számítással is egyszerűen megkapható (Nagyváti 1958):

$$\operatorname{tg}\left(45 - \frac{\phi}{2}\right) = \sqrt{\frac{\sigma_h}{\sigma_{ny} - 3 \cdot \sigma_h}}$$

$$c = \frac{\sigma_{ny}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_h}{\sigma_{ny} - 3 \cdot \sigma_h}}$$

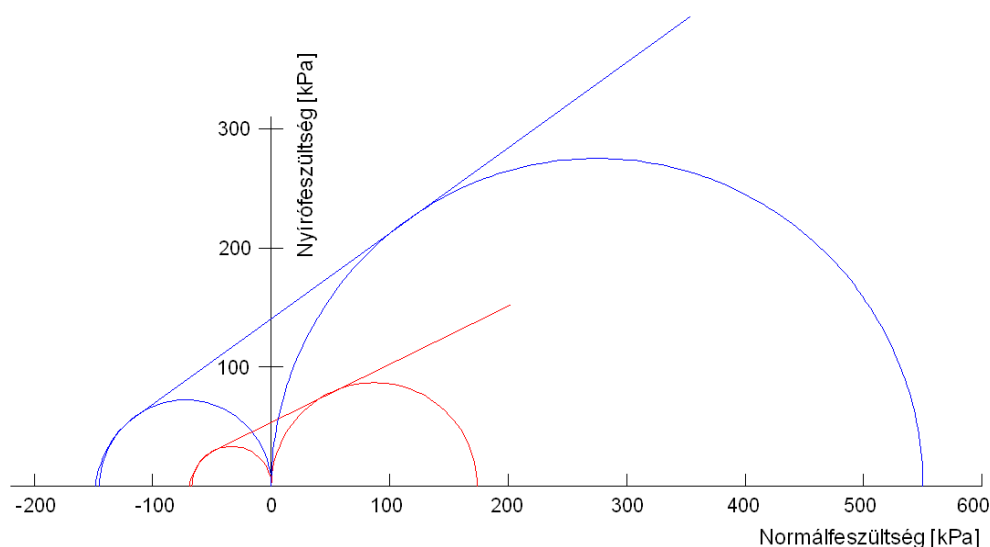
A húzásra és nyomásra vizsgált próbatestekből, a minták nagy szórása miatt nem lehetett egyértelműen párokat kijelölni. Ezért a víztartalom és a nyomószilárdság alapján jól elkülöníthető 2 csoportot vettük alapul. Mivel a húzószilárdság és a víztartalom között nem fedezhető fel ilyen egyértelmű kapcsolat, emiatt a húzásra tesztelt mintákat a víztartalmuk alapján rendeltük hozzá a $\sigma - \varepsilon$ görbék alapján megkülönböztetett két csoporthoz. Majd mindkét csoportra számoltunk egy átlagos nyomó- és húzószilárdsági értéket, amelyre az alábbi eredmények adódtak: első csoport: σ_{ny} : 552 kPa, σ_h : 145 kPa; második csoport: σ_{ny} : 177 kPa, σ_h : 67 kPa. Ez alapján az alacsonyabb víztartalmú első csoportba tartozó minták kétszer nagyobb húzószilárdsággal rendelkeznek, mint a nagyobb víztartalmú második csoportba tartozók. Ugyan Nagyváti képlete nem ad értelmezhető nyírószilárdsági paramétereket, a Mohr-körök felrajzolásával mégis meghatározható a ϕ és c értéke (32. ábra).



192. ábra. Pernyezagy Mohr-körei (kék színnel az első, piros színnel a második csoport)

A Mohr-körök alapján az első csoport nyírószilárdsági paraméterei az alábbiak szerint alakultak: súrlódási szög: 36° , kohézió: 141 kPa, míg a második csoport súrlódási szögére 26° , kohéziójára 54 kPa adódott. Egy korábbi tanulmány 40° -os súrlódási szöget és 108 kPa-os kohéziót határozott meg 28 napos leüleptített bázikus salak-pernyezagyra (Bakó 1993). A Mátrai Erőmű hidraulikus kötőképeséggel nem rendelkező tározóján végzett kísérletek pedig $35,5^\circ$ és 34° -os értékeket adtak (Juhász, Molnár 1974). Az első csoport ϕ értéke kisebbre adódott a Bakó-féle tanulmányban szereplőnél, viszont megegyezik a Mátrai Erőműnél mérttel, míg a c értéke valamivel meghaladja Bakó értékét. A második csoport paraméterei ezzel szemben alatta maradnak a két szakvéleményben meghatározott értékeknek.

A Coulomb-egyenes lineáris kapcsolatot tételez fel a nyírófeszültségek és a normálfeszültségek között. Azonban jól ismert, hogy húzásra a talajok hamarabb elérik a törési állapotukat, mint az a Mohr-Coulomb feltétel alapján várható lenne (Kézdi, Horváth 1973). A szakirodalom számtalan alternatívát javasol az egyenes görbével való kiváltására a húzófeszültségek tartományában. Ezek közül Kézdi és Horváth alapján a 33. ábrán látható a legalkalmasabb gyakorlati használatra.



33. ábra. Húzási oldalon a gyakorlati tapasztalatok alapján korrigált Mohr-Coulomb egyenes

Ahhoz, hogy a gáttestből vett magmintán triaxiális vizsgálattal lehessen belső sűrűdési szöget és kohéziót számolni, az anyag homogenitására lenne szükség. Ezt a tüzelőanyag állandósításával és a gátépítés egy ütemben való kivitelezésével lehetne elérni. Ezek ellentmondanak a gazdasági szempontoknak és részben a hazai geológiai adottságoknak is. Ilyen gáttestből vett magmintánál lenne esély triaxiális vizsgálat elvégzésére, amelyből a nyírószilárdsági paraméterek meghatározhatók lennének. Mivel azonban a hazai tározók többsége a fent leírt módon készül, ezért ez a lehetőség csupán elméleti úton létezik.

Egy másik lehetőség, hogy közvetlenül a hőerőműből, a pernyeleválasztás után veszünk mintát. Majd a technológiának megfelelő részarányban vízzel összekeverjük, és a zagyot hordóban vagy egyéb tárolóeszközben leülepítjük. A megszilárdulás után elkészíthetők a próbatestek a különböző vizsgálatokhoz. Az így kapott eredményeket akkor lehetne stabilitási számításokhoz érdemlegesen felhasználni, ha a töltés teljes tömege ebből az anyagból épülne. Azonban az így vizsgált zagy legtöbb esetben csak egy homogén réteget jelent a gát szerkezetének. Emiatt ilyen vizsgálatok eredményeiből nem következtethetünk a gáttest szilárdsági, stabilitási viszonyaira.

A nyírószilárdsági paraméterek különböző helyszíni szondázások segítségével is számolhatók. Ennek eredményességére helyszíni kísérletek adhatnak választ.

Mivel a talaj nyírószilárdsági paramétereit a Mohr-Columb egyenes alapján határoztuk meg, ezért célszerű a számítógépes modellezés során is ezt a modellt alkalmazni. A belső sűrűdési szög és a kohézió mellett a modell fontos input paraméterei közé tartozik a Poisson tényező, az összenyomódási modulus, illetve a nedves és telített térfogatsűrűség.

A Poisson tényező a keresztirányú és hosszirányú alakváltozás hányadosát adja meg. Az általunk vizsgált mintáknál nem volt értelme a keresztirányú alakváltozások mérésének, ugyanis a fúrás során a henger alakú magminták palástja mentén egy néhány milliméteres átgyúrt kéreg alakult ki, amelyet a fúróspirál „megforgatott”. Ez a kéreg pedig a terhelés során gyakran levált és letöredezett, így lehetetlenné téve az oldalirányú alakváltozás hiteles mérését. Ezért a tényező értékének a Mátrai Erőmű salak-pernye tározóján végzett próbaterhelés alapján 0,3-at vettünk fel. Azonban fontos kiemelni, hogy a Mátrai Erőmű tározója igen alacsony hidraulikus kötőképesége miatt nem szilárdul meg, hanem szemcsés anyagként viselkedik. Emiatt ez a 0,3-as érték csak erős közelítésként használható a cementálódott pernyére. A szürke kiscelli agyag átlagos Poisson tényezője ennél valamivel kisebb: 0,23 (Görög 2008).

A rugalmassági modulus és a Poisson tényező ismeretében lehetőség van az összenyomódási modulus (E_s) elméleti úton való meghatározására. A Hooke-törvény alapján levezethető, hogy:

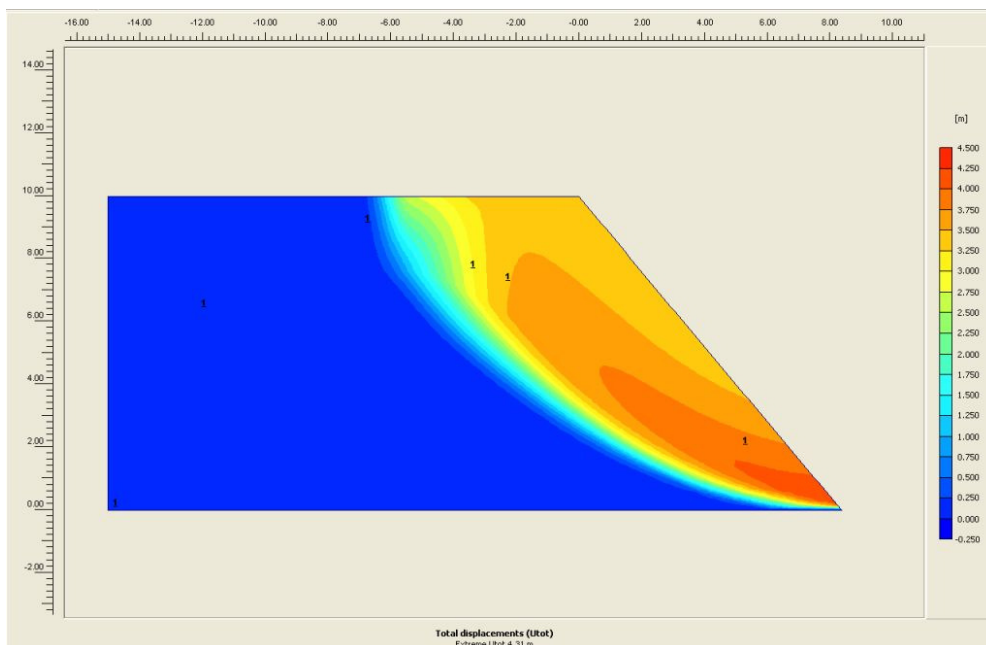
$$E_s = E \cdot \frac{1 - \mu}{1 - \mu - 2 \cdot \mu^2}$$

Az első csoportba tartozó próbatestek átlagos rugalmassági modulusa 27,5 MPa, ami alapján az összenyomás modulusra $E_s = 37,0$ MPa adódik. Ezzel szemben a második csoport átlagos rugalmassági modulusa 4,4 MPa, ami $E_s = 6,0$ MPa-os összenyomódási modulus eredményez. A hidraulikus kötőanyagot nem tartalmazó visontai pernyetározó összenyomódási modulusa ezzel szemben mindössze 1,0 MPa (Juhász, Molnár 1974)

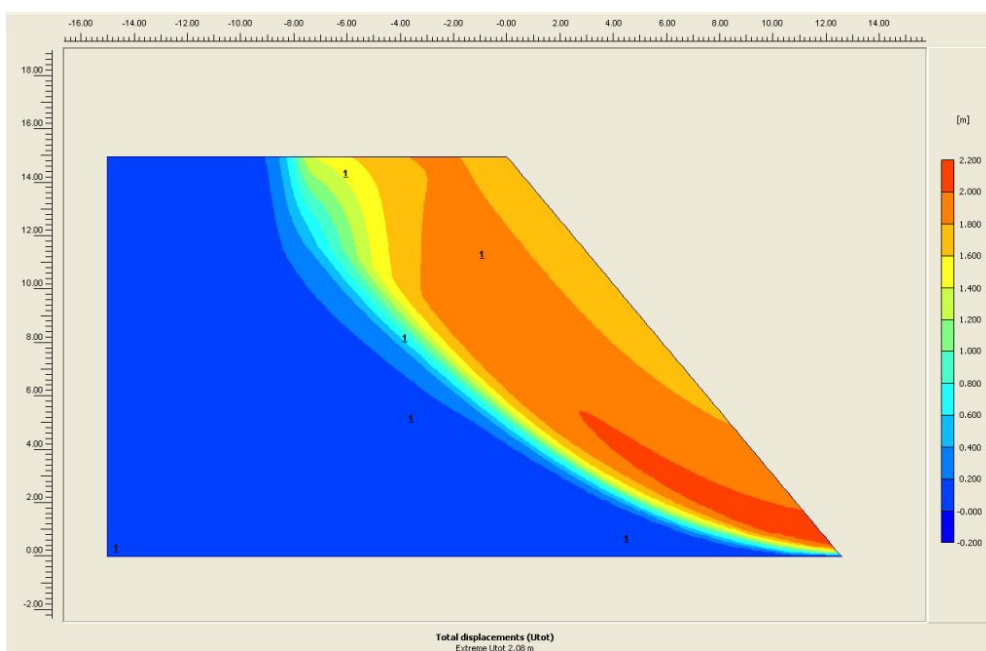
A modell létrehozásához szükséges továbbá a nedves és telített térfogatsűrűségek adatai is. Mivel a telített érték – esetünkben – csak az anyagsűrűség ismeretében adható meg, ezért itt kénytelenek voltunk csak azon mintákat figyelembe venni, amelyeknek elkészült a piknométeres vizsgálata. Ezek alapján az első csoport átlagos értékei: $\gamma_n = 1,49$ g/cm³, $\gamma_t = 1,55$ g/cm³, míg a második csoport értékei: $\gamma_n = 1,39$ g/cm³, $\gamma_t = 1,41$ g/cm³.

A kétféle pernyével egy fiktív rézsű alapján állékonysági vizsgálatokat készítettünk véges elemes módszerrel. A véges elemes modellezést a Plaxis 8 nevű program diákverziójával készítettük el. A vizsgálatokhoz egy 10 m és egy 15 m magas rézsűt vettünk

fel, és hajlásszögük függvényében vizsgáltuk stabilitásuk biztonsági tényezőjét a kétféle anyag esetében (34. és 35. ábra). A számításaink során a valósághoz közelebb álló drénezett állapotot tételeztük fel, a talajvízszintet pedig a rézsű alatt vettük fel.

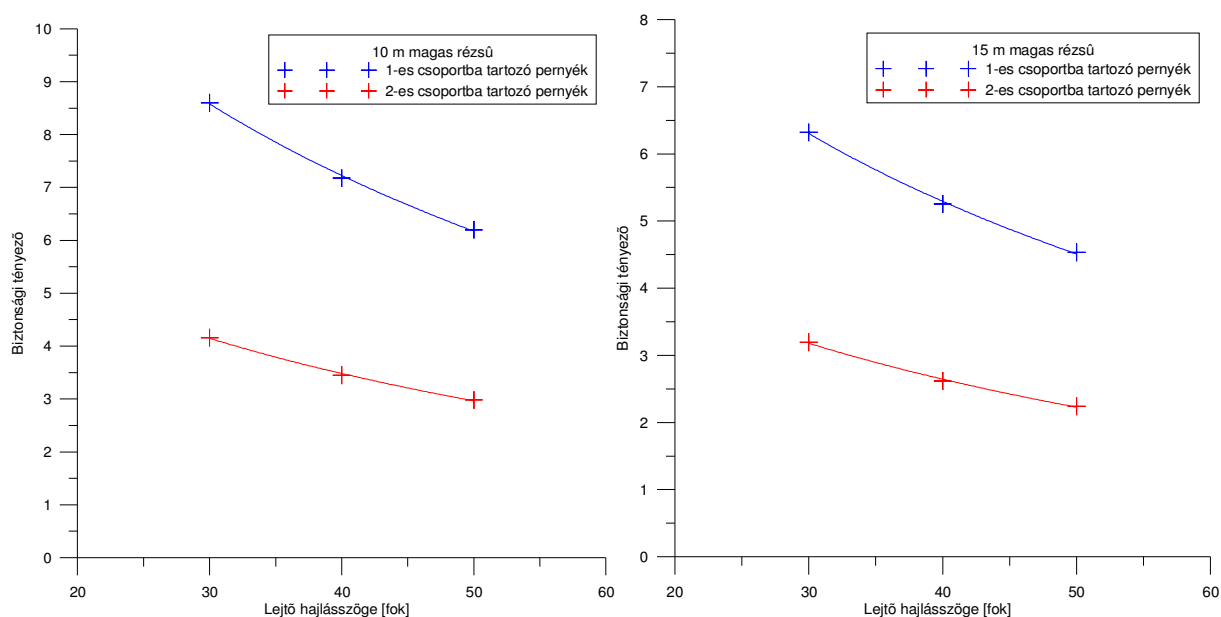


34. ábra. 10 m magas, 50 fokos rézsű esetén a kialakuló csúszólap biztonsági tényező: 2,97 (2-es jelű pernyezagy)



35. ábra. 15 m magas, 50 fokos rézsű esetén a kialakuló csúszólap biztonsági tényező: 2,24 (2-es jelű pernyezagy)

Az állékonysági számítások eredményeinek összefoglalását a 36. ábra tartalmazza.



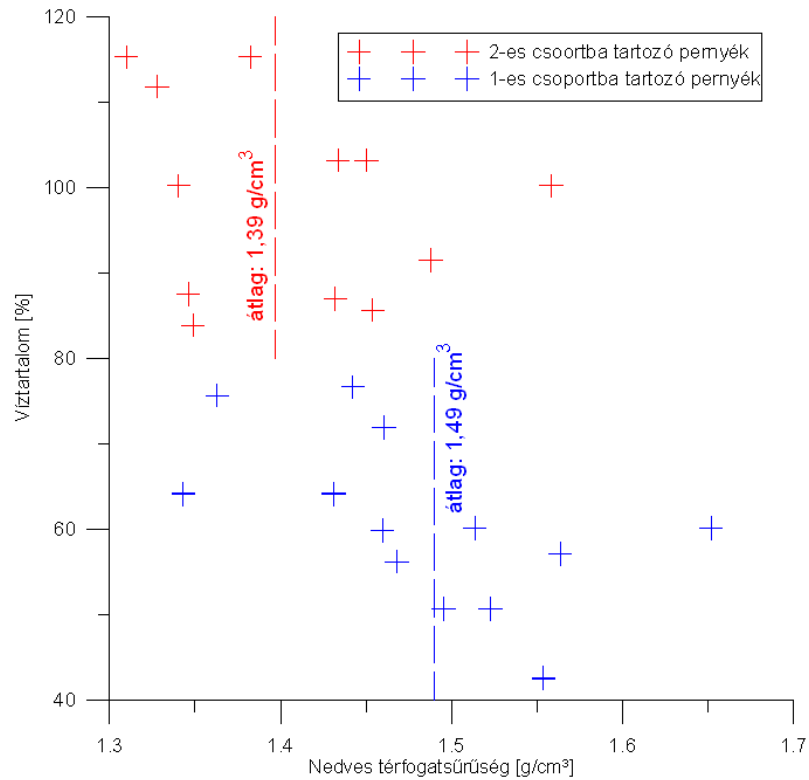
36. ábra. 10 m, illetve 15 m magas rézsú biztonsági tényezői a rézsú hajlásszögének függvényében

A kapott biztonsági tényezők nem tekinthetők mérvadónak egyetlen rézsú állékonysági feladatnál sem, hiszen sem a felszíni terhek, sem a talajvízszint, sem az építési fázisok, sem az esetlegesen tárolt zagy nyomása nem került számításba, továbbá a biztonsági tényezőket is figyelmen kívül hagytuk. Az eredmények így csak a két anyag összehasonlítását teszik lehetővé, amelyből kiderül, hogy az első csoport anyagából épült rézsúk kétszer nagyobb biztonsággal rendelkeznek, mint a második csoport anyagából épültek. Továbbá minél magasabb a rézsú, a két érték aránya, ha csak századokban is mérhető módon, de egyre kisebb lesz.

6.4. Fizikai jellemzőkkel kapcsolatos összefüggések

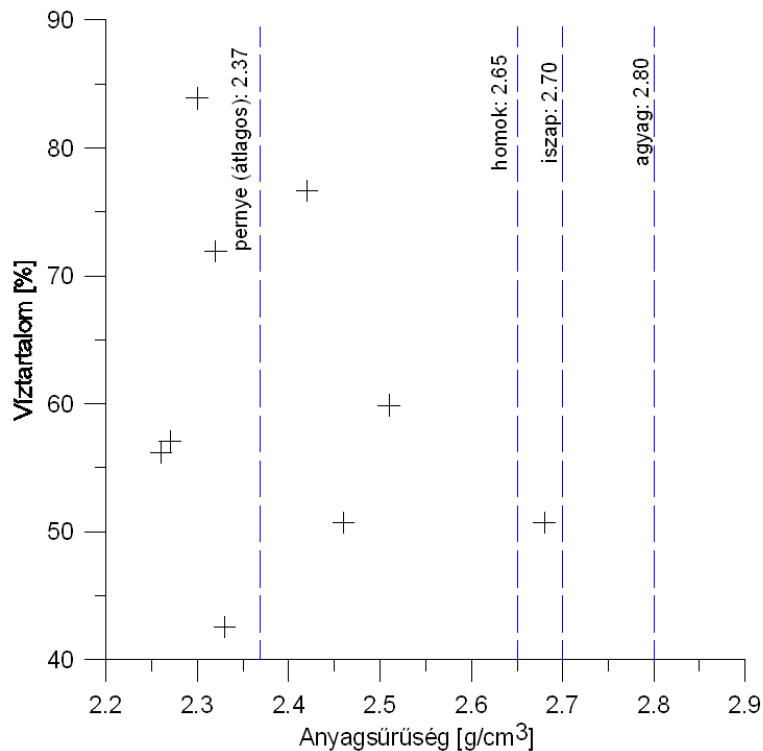
A megszilárdult pernyezagy próbatestek átlagos nedves térfogatsűrűsége $1,45 \text{ g/cm}^3$ lett. Ezzel szemben az agyakok mind magasabb értékkel rendelkeznek. A szürke kiscelli agyag átlagos értéke $2,19 \text{ g/cm}^3$ – a Solymáron vett mintáink ennél egytizeddel nagyobb térfogatsűrűséget adtak –, míg a sárga kiscelli agyag ennél kisebb, $1,94 \text{ g/cm}^3$ -s átlagértékkel rendelkezik (Görög 2008). A pannon agyag vizsgálatokor pedig $2,00 \text{ g/cm}^3$ körüli értékek születtek. A pernyezagy alacsony térfogatsűrűsége a szemcsék összetételére vezethető vissza. Ugyanis a szemcsék anyaga a talajokhoz képest alacsonyabb sűrűségű és jóval tagoltabb felületű. A gyakrabban előforduló hazai talajok közül a lösz rendelkezik a legalacsonyabb sűrűséggel – $1,5\text{-}1,8 \text{ g/cm}^3$ – azonban ez is felette van a pernyezagy értékénél.

A víztartalom függvényében vizsgálva a nedves térfogatsűrűséget, megállapítható, hogy a magas víztartalommal rendelkező minták átlagosan egy tizeddel kisebb térfogatsűrűséggel ($1,39 \text{ g/cm}^3$) rendelkeznek, mint az alacsonyabb víztartalommal rendelkezők ($1,49 \text{ g/cm}^3$) (37. ábra).



37. ábra. A víztartalom és a nedves térfogatsűrűség közötti kapcsolat

A pertyezaggy átlagos anyagsűrűségére $\rho_s = 2,37 \text{ g/cm}^3$ adódott. Ez jóval kisebb a természetben előforduló természetes talajok sűrűségénél, ugyanis a homok $2,65 \text{ g/cm}^3$, az iszap $2,70 \text{ g/cm}^3$, míg az agyag $2,80 \text{ g/cm}^3$ -s értékekkel rendelkezik. A 10 megvizsgált minta eredményei közül mindössze egy érte el a homok sűrűségét (38. ábra).



38. ábra. A víztartalom és az anyagsűrűség közötti kapcsolat

A 38. ábra alapján megállapítható, hogy a nagyobb anyagsűrűségű ($\sim 2,5\text{-}2,6 \text{ g/cm}^3$) mintákhoz kisebb víztartalom tartozik. Ezzel szemben a kisebb anyagsűrűségű ($\sim 2,3 \text{ g/cm}^3$) minták víztartalma igen nagy szórást mutat.

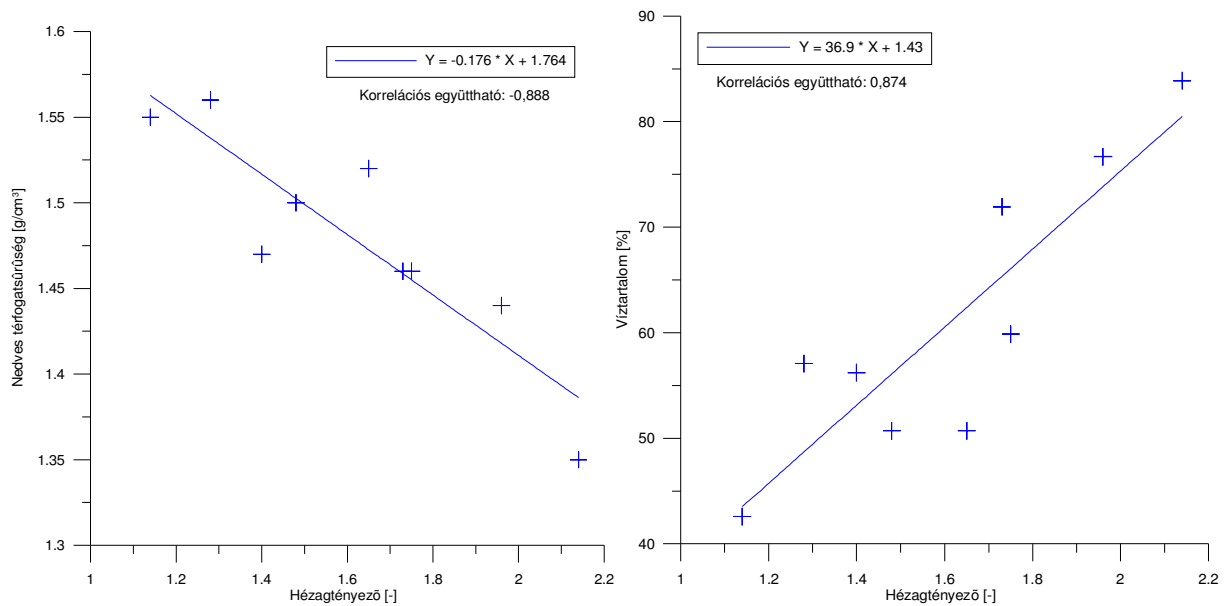
A különböző agyagokkal összevetve jelentős eltérés tapasztalható a hézagtenyező (e) értékében is. Az általunk vizsgált pannon agyagminták hézagtenyezője $e = 0,85$, míg a szürke és a sárga kiscelli agyag átlagos hézagtenyezője ennél valamivel kisebb $0,54$, és $0,62$ (Paál 1974). Ezzel szemben a pernyezagy átlagos értéke $-1,58$ – kétszerese, illetve háromszorosa az agyagoknál tapasztaltnál. Ráadásul a piknométeres vizsgálatok főleg az alacsonyabb víztartalmú mintákból készültek, így ez az átlagérték nem tartalmazza a magas víztartalmú, és ez által magas hézagtenyezőjű minták értékeit.

A visontai pernyével összevetve megállapítható, hogy a több hidraulikus kötőanyagot tartalmazó zagy ülepedése során hasonló nagyságú hézagtenyező alakul ki, mint a hidraulikus kötőanyagot nem tartalmazó zagynál. A magas hézagtenyező magyarázata a pernye szemcsék rendkívül tagolt felületében keresendő, mivel a cementálódás során összetapadó szemcsék között nagymennyiségű pórus és légbuborék marad. A $2,00$ feletti hézagtenyezőjű próbatestek főleg az alacsonyabb szilárdságú minták közül kerültek ki, amit a lazább szerkezet eredményezhet.

Mivel gyakorlatilag az összes minta kvázi-telített, ezért a hézagtenyező és a víztartalom között lineáris kapcsolat mutatkozik, ugyanis minél több a nyitott pórus, annál több helyet tud kitölteni a víz. A természetben előforduló puha kőzetek és kemény talajok esetében is megfigyelhető az a jelenség, hogy a víztartalom növekedésével csökken a szilárdság. Ez a víztartalom és szilárdság közötti összefüggés a pernyezagynál is megfigyelhető. A 90-es évek elején a Mérnökgeológia Tanszéken végzett vizsgálatok alapján szilárdság szempontjából az optimális víztartalom $10\text{-}20\%$ körül van. Ez igen messze áll az általunk vizsgált minták jobb esetben is 60% -os víztartalmától.

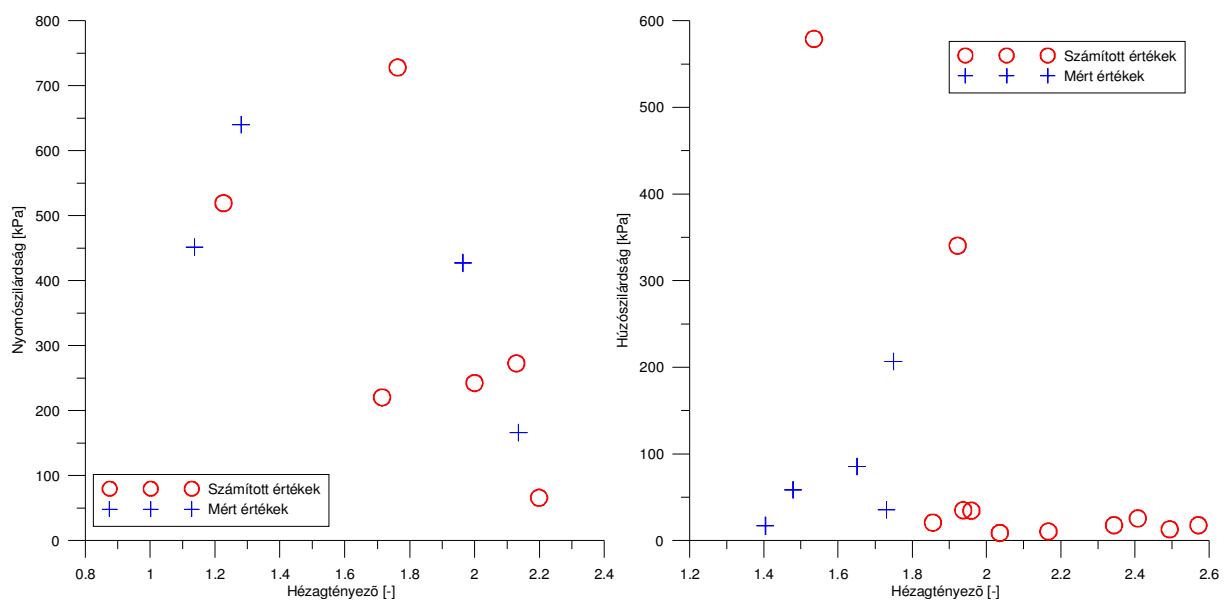
A víztartalom csökkentésére és ezáltal a szilárdság növelésére két lehetőség nyílt. Egyrészt ha megakadályozzuk, hogy a gáttest anyaga telítődjön vízzel. Ez a tározóképzés technológiájából adódóan műszaki és gazdasági szempontból is nehezen kivitelezhető. Másik lehetőség a hézagtenyező csökkentése, ami az anyag gondos tömörítésével érhető el. A visontai zagyterén végzett vizsgálatok is kimutatták, hogy terhelés hatására jelentős tömörödés érhető el.

A hézagtenyező és a nedves térfogatsűrűség, illetve a víztartalom között az ábrákon látható módon közelítőleg lineáris kapcsolat áll fenn (39. ábra). A pontalmazókra illeszthető regressziós egyenesek az $e = -4,474 \cdot \rho_n + 8,231$, illetve az $e = 0,021 \cdot w + 0,350$ képletekkel írhatók le. A képletek segítségével lehetőség nyílik a hézagtenyező, és ezáltal a többi talajfizikai paraméter kiszámítására azoknál a mintáknál is, amelyekből nem készült piknométeres vizsgálat. A két képlet alapján minden mintára meghatároztunk két hézagtenyezőt, majd az értékek átlagát vettük végleges eredményként. Ezután a kapott hézagtenyezőből kiindulva kiszámoltuk a többi, eddig ismeretlen paramétert. A kapott eredmények az I. Melléklet I.5.-es táblázatában láthatók. Ezek az értékek azonban csak egy közelítő képet adnak, ugyanis a két kiindulási regressziós egyenes nem illeszkedik – nem illeszkedhet – tökéletesen a pontokra, emiatt az ebből származtatott érték is kisebb-nagyobb eltérést mutatnak a valósághoz képest.



39. ábra. A hézagtérfogató és a nedves térfogatsűrűség valamint a hézagtérfogató és a víztartalom közötti összefüggés

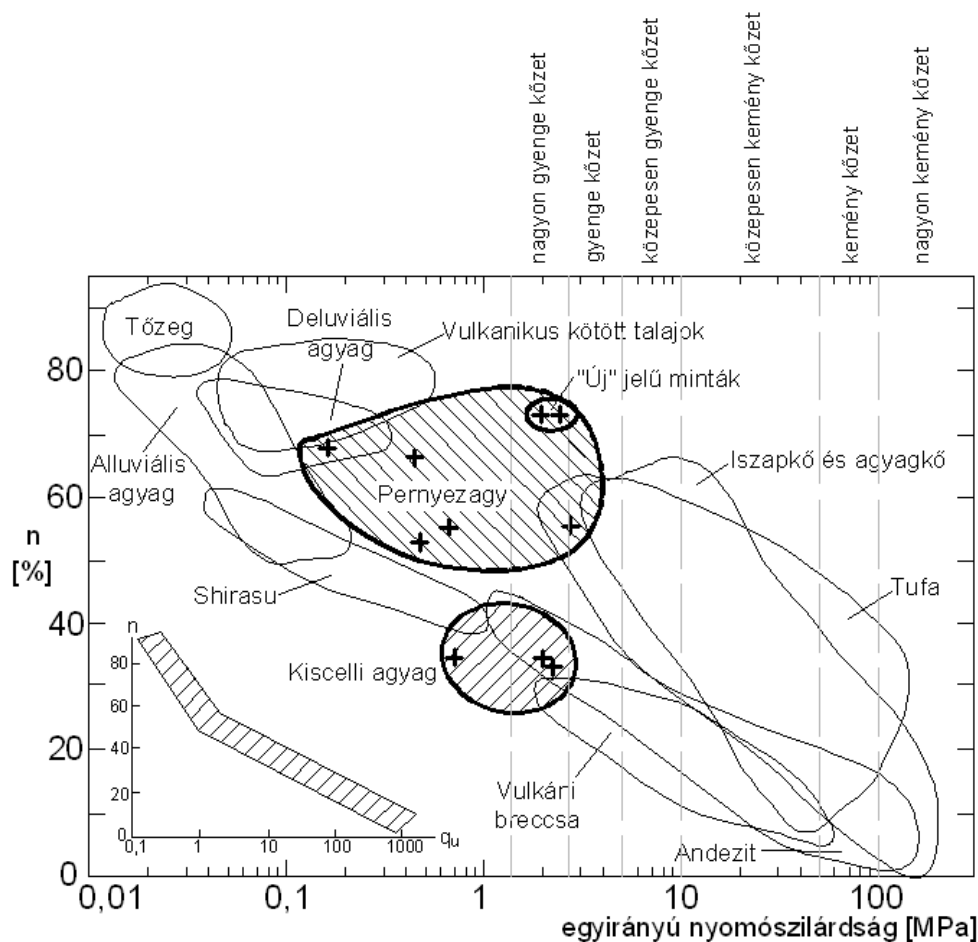
A kibővített hézagtérfogató és a nyomó-, illetve húzószilárdsági eredmények kapcsolatát a 40. ábra mutatja be.



40. ábra. A hézagtérfogató és a nyomó- valamint húzószilárdság összefüggése

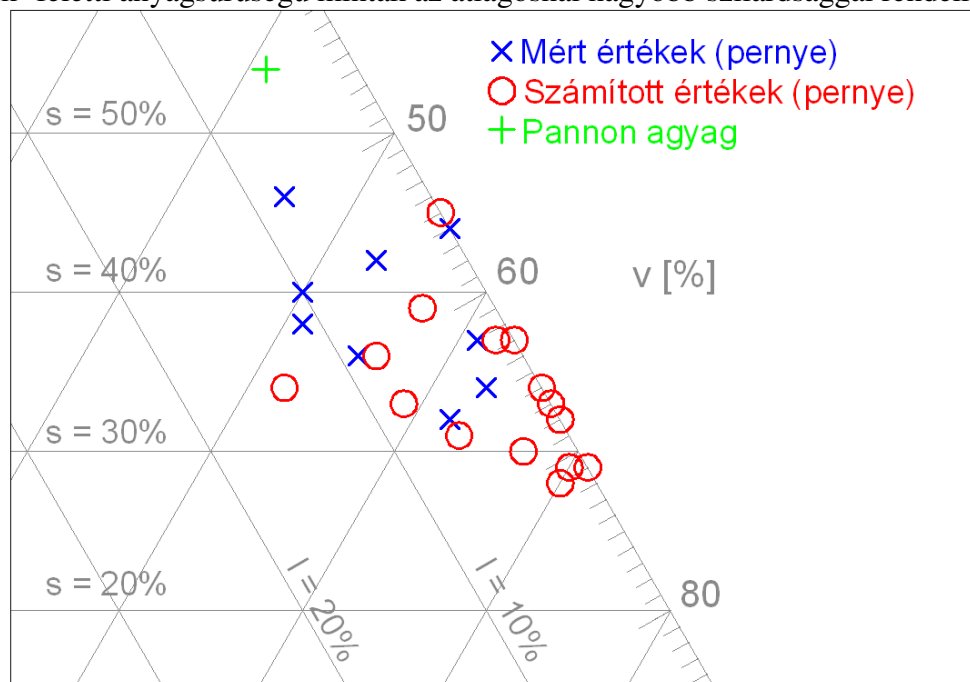
Az ábrák alapján nem figyelhető meg egyértelmű kapcsolat a két érték között, ugyanakkor bizonyos összefüggések így is kirajzolódnak. Így például a 2,00 feletti hézagtérfogatójú mintákhoz alacsony szilárdság tartozik, míg nagyobb szilárdság főleg az 1,80 alatti hézagtérfogatójú mintáknál fordult elő.

A hézagtérfogat és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolatot Ogawa vizsgálta (41. ábra). Eredményei alapján a vizsgált talajok és kőzetek többsége egy jól körülhatárolható zónába tartozik, ahol a hézagtérfogat növekedésével csökken a szilárdság. Ebbe a zónába beilleszkedik a megszilárdult pernyezagy is. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy a hasonló hézagtérfogatóval rendelkező agyagok kisebb szilárdsággal rendelkeznek, mint a pernyezagy.



41. ábra: A hézagterfogat és az egyirányú nyomószilárdság közötti kapcsolat Ogawa (1986) alapján, kiegészítve a Hawkins és Pinches (1992) által meghatározott kőzetosztályozás intervallumaival

A hézagtérfogathoz hasonlóan az anyagsűrűség és a szilárdság között sem figyelhető meg függvénnyel leírható kapcsolat. Annyi azonban megállapítható a grafikonokról, hogy a $2,40 \text{ g/cm}^3$ feletti anyagsűrűségű minták az átlagosnál nagyobb szilárdsággal rendelkeznek.



202. ábra. A minták elhelyezése s, v, l koordinátarendszerben

A talajt alkotó három fázis (szilárd rész, víz, levegő) mennyiségének összege az egyes mennyiségek változásától függetlenül mindig állandó, ezért a három adat háromszögdiagramon ábrázolható. Ha ismerjük egy adott talajállapothoz tartozó (s, v, l) értéket, akkor az a háromszög-diagramon egy pontként ábrázolható. Mivel a diagram nagy része üresen marad, ezért a jobb áttekinthetőség érdekében gyakran csak egy részét szokás ábrázolni. A pernye s, v, l értékei a 42. ábrán látható háromszögdiagram ábrázolja

Az ábra alapján megállapítható, hogy a pernyezagy átlagosan 30-40 térfogatszázalék szilárdrészt tartalmaz, ennek köszönhetően a hézagterfogat 60-70% körül mozog. Jól látható az ábrán a pannon agyagot és a pernyezagyot alkotó fázisok közötti különbség, amit a hézagtérfogató értéke is jól tükröz.

7. Következtetések

A TDK dolgoztunk keretében a megszilárdult pernyezagy szilárdsági jellemzőit vizsgáltuk. A rendelkezésünkre álló magminták egy zagyolt technológiával épült gáttestből származtak. A mintákból kialakított próbatesteken egyirányú nyomó-, illetve közvetett (brazil) húzókísérletek mellett talajfizikai vizsgálatokat is végeztünk.

A minták névleges hossza ugyan 30 cm volt, azonban az anyag könnyen töredező állapotának köszönhetően sehol sem haladta meg a 20 cm-t. A próbatestek palástja mentén pedig egy pár mm-es kéreg alakult ki, amelyet a fúró fúrás közben „megforgatott”, így a minták nem voltak teljesen zavartalannak tekinthetőek. Ez a kéreg terhelés hatására gyakran levált és lerepedezett. A megszilárdult zagy könnyen töredező, réteges tulajdonságának köszönhetően nem lehetett triaxiális vizsgálathoz szükséges méretű mintákat kifúrni belőle, így a próbatestek kialakítása csak kézi módszerrel volt lehetséges. A laminált és heterogén szerkezet a zagyolt gátépítés technológiájára és a tüzelőanyag változásaira vezethető vissza.

A 29 magmintából 7 minta teljesen szétesett, szétmorzsolódott így ezeket nem tudtuk szilárdsági kísérleteknek alá vetni. Mivel a zagy hidraulikus kötőképessege a pernye szabad CaO tartalmától függ, ezért ennek oka az alacsony mésztartalomban keresendő.

A kialakított próbatesteken összesen 12 nyomó-, illetve 17 húzóvizsgálatot hajtottunk végre. A mérési eredmények igen széles spektrumon mozogtak, ugyanis a nyomószilárdság 80 kPa-tól, egészen 2700 kPa-ig terjedt, míg a rugalmassági modulus 1 MPa-tól 110 MPa-ig. A legmagasabb érték azonban nagyon kiugrónak bizonyult, mivel a második legnagyobb szilárdságot elérő minta 710 kPa-ig jutott. 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, egyedül a kiugró szilárdságú minta éri el a gyenge kőzetek intervallumát. A magmintákon kívül egy másik gáttestből származó 3 homogénebb szerkezetű mintát is vizsgáltunk, amelyek azonban már előzetesen szabad levegőn kiszáradtak, így a kapott szilárdsági értékek nem vonhatóak szoros párhuzamba az előzőekkel.

A minták víztartalma amellet, hogy igen magas volt szintén nagy szórást mutatott, ugyanis 43%-tól egészen 115%-ig terjedtek az eredmények. A terhelés közben mért feszültség-alakváltozás (σ - ϵ) görbék és a víztartalom között megfigyelhető, hogy a nagyobb szilárdságú és rugalmassági modulusú minták 40-80% közötti víztartalommal, míg az alacsonyabb szilárdságú és rugalmassági modulusú minták 80-120% közötti víztartalommal rendelkeznek. Szilárdsági értékei alapján a pernyezagy a sárga kiscelli agyaggal, míg rugalmassági modulusa alapján a szürke kiscelli agyag gyengébb tagjaival állítható párhuzamba. A kiugró teherbírású próbatest ezzel szemben mind szilárdságilag mind rugalmassági modulusával egyenértékű a szürke kiscelli agyag értékeivel. A minták húzószilárdsága is széles skálán változott: a 9 kPa-tól egészen az 579 kPa-ig.

Két próbatesten is megfigyelhető volt fekete, valószínűleg el nem égett szén szemcsék jelenléte. A szerves anyag igen kedvezőtlenül befolyásolta a minták szilárdságát és rugalmassági modulusát, ugyanis ez a két minta rendelkezett a legalacsonyabb értékekkel.

A törési elméletek közül a talajmechanika a Mohr-Coulomb féle törési feltételt alkalmazza legszélesebb körben. Az elmélet legfontosabb paraméterei a belső súrlódási szög (φ) és a kohézió (c). E tényezők meghatározására a triaxiális vizsgálat a legelterjedtebb, az anyag állapota azonban nem tette lehetővé a vizsgálat elvégzését. Ugyanazon talajon végzett egyirányú nyomó- és húzóvizsgálatok esetén a Mohr-féle feszültségi körök megrajzolásával azonban lehetőség nyílik a nyírószilárdsági paraméterek meghatározására. A nagy szórás miatt a σ - ϵ görbéknél tapasztalt összefüggés alapján két csoportra bontottuk a mintákat, két egymástól lényegesen eltérő anyagként kezelve. Az első csoport átlagos nyomószilárdságára 550 kPa, míg átlagos húzószilárdságára 150 kPa adódott, míg a második csoportnál ezek az

értékek közel 180 kPa és 70 kPa. A Mohr-köröket megrajzolva az egyes jelű anyag paraméterei: $\varphi = 34^\circ$, $c = 137$ kPa voltak, míg a második jelű anyagé: $\varphi = 26^\circ$, $c = 54$ kPa. Egy korábbi tanulmány $\varphi = 40^\circ$, $c = 108$ kPa-os nyírószilárdsági paramétereket határozott meg erre az anyagra.

A kapott eredmények alapján egy egyszerű lejtő állékonysági vizsgálatot készítettünk a Plaxis 8 nevű véges elemes szoftver diákverziójával. A számításokat két – egy 10 m és egy 15 m magas – rézsűn futattuk le különböző hajlásszögeket használva. A kapott biztonsági tényezők alapján megállapítható, hogy a kétféle pernye, amely gyakorlatilag két eltérő rétegnek tekinthető a gáttesten belül, biztonsági tényezője között kétszeres különbség mutatkozik.

Szilárdsági vizsgálatok mellett talajfizikai méréseket is végeztek. A már említett víztartalom mérés mellett meghatároztuk a próbatestek nedves térfogatsűrűségét és 10 mintánál az anyagsűrűséget is. Utóbbi két érték mind alatta marad a homokoknál és agyagoknál megfigyelhető értékeknek, ezt a tagolt felület, illetve a pernyében szabad szemmel nem látható, de mikroszkopikusan jól kimutatható lég- és gáz zárványok okozzák. A felsorolt 3 paraméterből pedig a többi talajfizikai adat is kiszámíthatóvá vált (s , v , l , száraz és telített térfogatsűrűség, hézagtenyező, telítettség). A magas hézagtenyező – akár 2,00 feletti – a magas víztartalom alapján várható volt. Ezt a laza szerkezet és a már említett tagolt felület okozza.

Mivel a talajvízszint a fúrások helyén magasan állt, ezért a minták kvázi-telítettek ($w > 85\%$). Ennek köszönhetően a hézagtenyező és a víztartalom, illetve a nedves térfogatsűrűség kapcsolatát egy lineáris regressziós egyenes írja le. A regressziós egyenes képlete alapján a hézagtenyező értékét kiterjesztettük az összes piknométerrel nem vizsgált mintára. A szilárdsággal összevetve nem rajzolható fel semmilyen regressziós görbe, azonban megállapítható, hogy a 2,00 feletti értékkel rendelkező minták mind alacsony szilárdsággal rendelkeznek. Ogawa (1986) alapján a hasonló hézagterfogatú agyagok kisebb szilárdsággal rendelkeznek, mint a megszilárdult pernyezagy. Regressziós kapcsolat az anyagsűrűség és a szilárdság között sem fedezhető fel, azonban a $2,40 \text{ g/cm}^3$ feletti értékű minták mind az átlagosnál nagyobb nyomó- és húzószilárdsággal rendelkeznek.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet mondani konzulenseiknek dr. Nagy Lászlónak és dr. Török Ákosnak, akik észrevételeikkel és javaslataikkal segítették a TDK dolgozat elkészülését.

Köszönjük Kőszegi Lászlónak, hogy munkánk során értékes tanácsokkal és irodalommal látott el.

Köszönjük Rózsa Lászlónak a vizsgálatok során nyújtott segítségét.

Továbbá szeretnénk köszönetet mondani dr. Kopecskó Katalinnak a tőle kapott hasznos anyagokért, Rónaky Viktóriának a piknométeres vizsgálatok során nyújtott segítségéért, valamint az anyagvizsgáló labor többi dolgozójának, akik segítették munkánkat.

9. Irodalomjegyzék

- Agustawijaya, D. S. (2007): The uniaxial compressive strength of soft rock, Civil Engineering Dimension, Vol 9, No. 1, pp. 9-14
- Akai, K. (1997): Testing methods for indurated soils and soft rocks – Interim report, Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, Anagnostopoulos et al., Balkema, pp. 1707-1736
- Arpaia, G., Saiello, S. and De Simone, P. (1998): The Gaudio culture: Prehistoric tombs in soft rocks, The Geotechnics of Hard Soils – Soft Rocks, Evangelista and Picarelli (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 018 3
- Báldi T. (1983): Magyarországi oligocén és alsómiocén formációk, Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 293
- Bárdossy Gy. (1961): Üledékes kőzeteink nevezéktanának kérdései, Földtani Közlöny, 91, 1, pp. 44-64
- Bieniawski, Z. T. (1973): Engineering classification of jointed rock masses, Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15, pp. 335-344
- Design and evaluation of tailings dams (1994), Technical report, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste,
- Észak-magyarországi Stratégiai Füzetek (2006): III. évf, 2. szám, ISSN 1786-1594, pp. 90-94
- Gandhi, S. R. (2005): Design and maintenance of ash pond for fly ash disposal, IGC-2005, 17-19 December 2005, Ahmedabad, India
- Gálos M., Kertész P. (1981): A mérnöki munkák környezetének modellezése – a mérnökgeológiai kőzetmodell, Mélyépítéstudományi Szemle, 31, 12, pp. 540-545
- Gálos M., Vásárhelyi B. (2006): Kőzettestek osztályozása a mérnöki gyakorlatban, Műegyetemi Kiadó, Budapest, p. 144
- Görög P. (2008): Budai eocén és oligocén korú agyagtartalmú kőzetek mérnökgeológiai értékelése, Ph.D. értekezés, Budapest
- Haidekker B. (2004.): Hulladékok és másodnyersanyagok hasznosítása, Hamu és pernye mint másodnyersanyag, , Műszaki Információ, 2004/2
- Hawkins, A. B. and Pinches G. M. (1992): Engineering descriptions of mudrocks, Quarterly Journal of Engineering Geology 25, pp. 17-30
- ICOLD (1982): Manual on Tailings Dams and Dumps, ICOLD Bulletin 45
- ICOLD (1989): Tailings Dam Safety, ICOLD Bulletin 74
- ICOLD (1994): Tailings Dams, Design of Drainage, ICOLD Bulletin 97
- ICOLD (1995): Tailings Dams. Transport, Placement and Decantation, ICOLD Bulletin 101
- ICOLD (1996): A Guide to Tailings Dams and Impoundments, ICOLD Bulletin 106
- Juhász I., Molnár Gy. (1974): Erőművi salak-pernye próbaterhelése, Műszaki Tervezés, 14. évf. 2. sz., pp. 43-47
- Kertész P. (1985): Mérnökgeológia. In: Palotás L. (szerk.): Mérnöki kézikönyv 3. Műszaki Kiadó, Budapest, pp. 325-347
- Kézdi Á. (1977): Talajmechanika I., Tankönyvkiadó, Budapest, ISBN 963 17 2256 2
- Kézdi Á., Horváth Gy. (1973): Tensile and flexural strength of cohesive soils, Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae, Tomus 74 (1-2), pp. 43-61
- Kleb B. (1995): A Mátrai Erőmű pernyéjéből előállított sűrűzagy ásványos összetételének és az összetétel változásának vizsgálata, Budapest
- Kleb B. (1996): Az Inotai Erőmű pernyéjéből előállított sűrűzagy ásványos összetételének és az összetétel változásának vizsgálata, Budapest
- Kleb B., Kopecskó K., Gál-Solymos K. (1999):, Investigating the mineralogical composition of flying ash pulps from the aspect of waste quality, Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng. Vol. 43, No. 2, pp. 219-232

- Kopceskó K., Kleb B. (1998): A Pécsi Erőmű pernyéjéből előállított sűrűzaggy ásványos összetételének és az összetétel változásának vizsgálata, Budapest
- Kopceskó K., Kleb B. (1997): A Tatabányai/Bánhidai Erőmű pernyéjéből előállított sűrűzaggy ásványi összetételének vizsgálata ipari hulladék minősítés céljából, Budapest
- Kovács F. (2001):, A barnaszén erőművek salak-pernye anyagai, jellemzőik és hasznosításuk, A Miskolci Egyetem Közleménye A sorozat, Bányászat, 55. kötet, pp. 67-76
- Környezetfizika I. 7 (2007-08): Széntermelés, felhasználás fizikája, Pécs, Fizikai Intézet;
- Mehta P. K. (1989): Pozzolanic and Cementitious By-Products in Concrete - Another Look. Proceedings of the Third International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, V.M. Malhotra, Ed., ACI Special Publication No. SP-114, 1-43.
- MÉLYÉPTERV (1984): Irányelvek hidraulikus tározók tervezéséhez, Budapest
- MSZE CEN ISO/TS 17982-1:2006, Magyar Előszabvány, 2006.
- MSZE CEN ISO/TS 17982-3:2006, Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata, 3. rész: A szemcsék sűrűségének meghatározása. Piknométeres módszer, Magyar Előszabvány, 2006.
- Ogawa, Y. (1986): Geology – Ishikawa, No. 40. Ishigawa Soil Investigators Incorporated Association: 22-23.
- Opoczky L. (2001): A pernyék szilikátkémiai tulajdonságai, Építőanyag 53. évf. 4. szám, pp. 105-108
- Paál T. (1974): Talajfizikai jellemzők vizsgálata, Mélyépítéstudományi Szemle, 24. évf, 8. szám, pp. 379-387
- Rákos Z. (1969): Az Ajkai Erőmű salak-pernye tározása, Műszaki Tervezés, 1969, 9. évf., 3. szám, pp. 1-5
- Safe Tailings Dam Construction, Technical papers, Gallivare, 20-21 September 2001
- Szepesházi R. (2008): Geotechnika, egyetemi jegyzet, Győr
- Szivák A., Pásztor D., Illés K. (1981.): Széntüzelésű hőerőművek salak-pernye elhelyezése, a hidraulikus salak-pernye tározók építése, Műszaki Tervezés, 21. évf. 9. sz., pp. 39-44
- Török Á. (2007): Geológia mérnököknek, Műegyetemi Kiadó, Budapest, ISBN 978-963-420-934-8
- Vick, S.G. (1990): Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. BiTech Publishers Ltd.
- Vukadin, V. (2007): Modeling of the stress-strain behavior in hard soils and soft rocks, Acta Geotechnica, Slovenica, 2007/2, pp. 5-14
- www1: http://www.meszinfo.hu/view_post.php?RID=25
- www2: <http://www.mert.hu/hu/zagyelhelyezes>
- www3: www.mvm.hu
- www4: <http://energiapedia.hu/koszen-es-lelohelyei-magyarorszagon>
- www5: <http://www.boralmti.com/pages/faq.html#FAQ3>

MELLÉKLETEK

I. Melléklet. Táblázatok

I.1. táblázat. A minták víztartalmának meghatározása

A jelű fúrás				
	m _c (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	w (%)
0,7-1,0	57,11	123,50	98,24	61,42
1,7-2,0	54,66	160,32	116,29	71,44
3,7-4,0	55,10	134,10	100,31	74,74
5,7-6,0	54,96	150,63	108,02	80,31
6,7-7,0	56,18	145,91	108,91	70,17
7,7-8,0	55,18	142,89	105,89	72,96
8,7-9,0	55,44	128,84	93,78	91,44
10,7-11,0	57,13	146,89	111,81	64,16
12,7-13,0	55,85	136,90	101,99	75,66
13,7-14,0	51,45	127,68	88,97	103,17
15,7-16,0	55,61	128,19	106,52	42,57
16,7-17,0	55,89	128,40	90,13	111,77
17,7-18,0	55,22	134,02	104,44	60,10
18,7-19,0	55,13	144,85	103,45	85,68
20,7-21,0	56,24	151,89	109,53	79,49
21,7-22,0	55,71	102,46	77,43	115,24
B jelű fúrás				
	m _c (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	w (%)
0,7-1,0	55,93	138,35	101,74	79,92
1,7-2,0	55,60	138,87	100,00	87,55
2,7-3,0	55,41	136,87	96,11	100,15
4,7-5,0	51,48	132,63	94,88	86,98
5,7-6,0	55,07	111,73	81,20	116,84
7,7-8,0	55,26	156,84	114,35	71,91
8,7-9,0	54,99	108,83	90,72	50,69
10,7-11,0	55,00	119,58	94,35	64,12
12,7-13,0	51,80	140,50	100,04	83,87
14,7-15,0	55,98	147,79	114,76	56,19
15,7-16,0	50,03	160,56	120,39	57,09
17,7-18,0	56,38	128,25	101,34	59,85
18,7-19,0	57,09	133,36	100,26	76,67

I.2. táblázat. Triklór-etilén sűrűségének meghatározása

Vizsgálat napja	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	ρ _{w,1} (g/cm ³)	ρ _{w,2} (g/cm ³)	ρ _{w,2} átlag (g/cm ³)
2011.03.25	42,7895	77,2568	66,6555	0,9979	1,4412	1,4508
	30,7345	71,2334	58,4053	0,9979	1,4605	
2011.03.29	34,6998	79,6104	65,6359	0,9978	1,4485	1,4492
	33,0915	74,1292	61,3318	0,9978	1,4500	
2011.03.30	30,7342	71,0236	58,4021	0,9980	1,4533	1,4535
	34,7004	79,7235	65,6109	0,9980	1,4537	

$$\rho_{w,2} = \frac{m_0 - m_1}{m_0 - m_2} \cdot \rho_{w,1}$$

ahol: m₀ = az üres piknométer tömege
m₁ = triklór-etilénnel töltött piknométer tömege
m₂ = desztillált vízzel töltött piknométer tömege
ρ_{w,1} = desztillált víz sűrűsége
ρ_{w,2} = triklór-etilén sűrűsége

I.3. táblázat. A minták

piknométeres vizsgálatának részeredményei

Próbatest	m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	ρ _{w,1} (g/cm ³)	ρ _{w,2} (g/cm ³)	ρ _s (g/cm ³)	ρ _s átlag (g/cm ³)
B-7,7-8,0	47,1032	100,4469	50,7160	126,1028	0,9981	1,4535	2,29	2,32
	50,4893	106,3232	53,6934	133,0265	0,9980	1,4535	2,35	
B-8,7-9,0 (1)	43,8110	74,0101	46,1912	88,7436	0,9980	1,4492	2,65	2,68
	45,9619	72,8190	47,5820	85,7121	0,9980	1,4492	2,70	
B-8,7-9,0 (2)	43,3875	67,1989	46,2460	79,2451	0,9981	1,4535	2,48	2,46
	33,1450	61,3976	35,1377	75,0912	0,9981	1,4535	2,43	
B-10,7-11,0	47,2815	101,0695	51,9643	127,0028	0,9980	1,4508	2,13	2,15
	51,9202	106,1417	56,7812	132,3825	0,9980	1,4508	2,18	
B-12,7-13,0	48,4672	105,4025	52,8751	132,7671	0,9978	1,4492	2,28	2,30
	47,2894	101,1450	49,6996	126,4188	0,9978	1,4492	2,33	
B-14,7-15,0	50,4789	106,3553	55,9620	133,6348	0,9978	1,4508	2,23	2,26
	48,4665	105,3272	55,0785	133,5595	0,9978	1,4508	2,29	
B-15,7-16,0	43,9318	97,6990	48,1354	123,6362	0,9979	1,4508	2,29	2,27
	50,9265	102,4906	54,8457	127,2832	0,9978	1,4508	2,24	
B-17,7-18,0	48,5852	105,3280	52,5353	132,7750	0,9978	1,4508	2,53	2,51
	47,1006	100,3967	51,3500	126,3443	0,9979	1,4508	2,48	
B-18,7-19,0	43,9295	97,6940	47,4694	123,4019	0,9981	1,4492	2,41	2,42
	51,9220	106,1740	55,1832	132,0381	0,9978	1,4492	2,44	
A-15,7-16,0	43,8135	74,0702	46,6334	88,9480	0,9981	1,4535	2,35	2,33
	45,9625	72,8766	49,0774	86,3120	0,9981	1,4535	2,31	

I.4. táblázat. A légtelenített víz sűrűsége különböző hőmérsékleteken a levegő felhajtóerejével korrigálva

Hőmérséklet (°C)	Sűrűség ρ_w (g/cm ³)
10	0,9997
11	0,9996
12	0,9995
13	0,9994
14	0,9993
15	0,9991
16	0,9990
17	0,9989
18	0,9986
19	0,9984
20	0,9982
21	0,9980
22	0,9978
23	0,9976
24	0,9973
25	0,9971
26	0,9968
27	0,9965
28	0,9963
29	0,9960
30	0,9957

I.5. táblázat. Kibővített talajfizikai paraméterek (világoszöld színnel a mért, sárga színnel a regressziós egyenesekből meghatározott adatsorok)

A jelű fúrás											
Próbatest	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	w (%)	s (%)	v (%)	l (%)	Sr (%)	e (-)	n (%)
0,7-1,0	-	-	-	-	61,4	-	-	-	-	-	-
1,7-2,0	-	-	-	-	71,4	-	-	-	-	-	-
3,7-4,0	-	-	-	-	74,7	-	-	-	-	-	-
5,7-6,0	-	-	-	-	80,3	-	-	-	-	-	-
6,7-7,0	-	-	-	-	70,2	-	-	-	-	-	-
7,7-8,0	-	-	-	-	73,0	-	-	-	-	-	-
8,7-9,0	2,27	1,49	0,78	1,49	91,4	34	66	0	100	1,92	65,78
10,7-11,0 (1)	2,42	1,34	0,82	1,48	64,2	34	52	14	79	1,96	66,21
10,7-11,0 (2)	2,41	1,43	0,87	1,51	64,2	36	56	8	88	1,76	63,80
12,7-13,0	2,36	1,36	0,78	1,45	75,7	33	59	8	88	2,04	67,06
13,7-14,0 (1)	2,23	1,45	0,71	1,45	103,2	32	68	0	100	2,13	68,04
13,7-14,0 (2)	2,23	1,43	0,71	1,43	103,2	32	68	0	100	2,17	68,42
15,7-16,0	2,33	1,55	1,09	1,62	42,6	47	46	7	87	1,14	53,22
16,7-17,0	2,19	1,33	0,63	1,34	111,8	29	70	1	98	2,49	71,38
17,7-18,0 (1)	2,30	1,65	1,03	1,65	60,1	45	55	0	100	1,23	55,07
17,7-18,0(2)	2,40	1,51	0,95	1,55	60,1	39	57	4	94	1,54	60,56
18,7-19,0	2,30	1,45	0,78	1,45	85,7	34	66	0	100	1,94	65,95
20,7-21,0	2,31	1,52	0,85	1,52	79,5	37	63	0	100	1,72	63,17
21,7-22,0 (1)	2,19	1,38	0,64	1,38	115,2	29	71	0	100	2,41	70,66
21,7-22,0 (2)	2,17	1,31	0,61	1,33	115,2	28	70	2	97	2,57	72,00

B jelű fúrás											
Próbatest	ρ_s (g/cm ³)	ρ_n (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	w (%)	s (%)	v (%)	l (%)	Sr (%)	e (-)	n (%)
0,7-1,0	-	-	-	-	79,9	-	-	-	-	-	-
1,7-2,0	2,30	1,35	0,72	1,41	87,5	31	63	6	91	2,20	68,74
2,7-3,0 (1)	2,22	1,56	0,78	1,56	100,1	35	65	0	100	1,86	64,98
2,7-3,0 (2)	2,24	1,34	0,67	1,37	100,1	30	67	3	96	2,34	70,09
4,7-5,0	2,30	1,43	0,77	1,43	87,0	33	67	0	100	2,00	66,67
5,7-6,0	-	-	-	-	116,8	-	-	-	-	-	-
7,7-8,0	2,32	1,46	0,85	1,48	71,9	37	61	2	96	1,73	63,37
8,7-9,0 (1)	2,68	1,52	1,01	1,63	50,7	38	51	11	82	1,65	62,29
8,7-9,0 (2)	2,46	1,50	0,99	1,59	50,7	40	50	9	84	1,48	59,66
8,7-9,0(3)	-	-	-	-	50,7	-	-	-	-	-	-
10,7-11,0	2,15	1,55	0,94	1,55	64,1	44	56	0	100	1,28	56,10
12,7-13,0	2,30	1,35	0,73	1,41	83,9	32	62	7	90	2,14	68,11
14,7-15,0	2,26	1,47	0,94	1,52	56,2	42	53	6	90	1,40	58,41
15,7-16,0	2,27	1,56	1,00	1,56	57,1	44	56	0	100	1,28	56,15
17,7-18,0	2,51	1,46	0,91	1,55	59,9	36	55	9	86	1,75	63,62
18,7-19,0	2,42	1,44	0,82	1,48	76,7	34	63	4	94	1,96	66,26

II. Melléklet. Jegyzőkönyvek

Próbatest jele: A-8,7-9,0 (Húzás)

Víztartalom: $w = 91,44 \%$

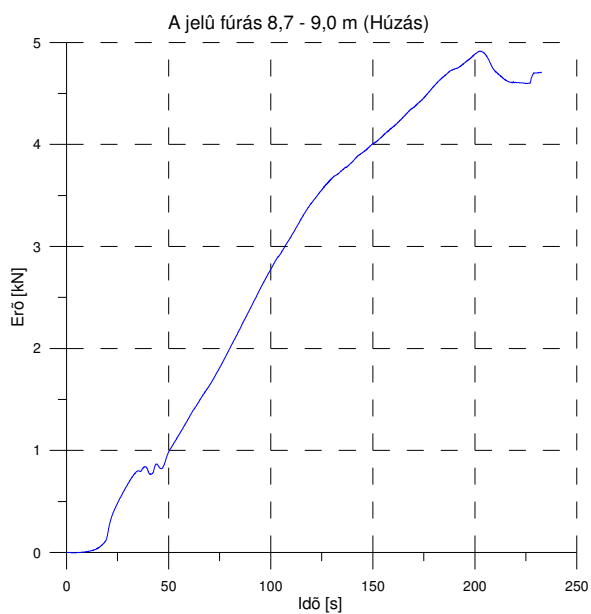
Tömeg: $m = 1263,41 \text{ g}$

Méretek: magasság:
 $h_1 = 76,94 \text{ mm}$
 $h_2 = 78,88 \text{ mm}$
 $h_3 = 79,57 \text{ mm}$
 $h_4 = 77,14 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 78,13 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,06 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,23 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,35 \text{ mm}$
 $d_4 = 115,00 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,66 \text{ mm}$

Törőteher: $4,91 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 340,2 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,49 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-10,7-11,0 (1) (Húzás)

Víztartalom: $w = 64,16 \%$

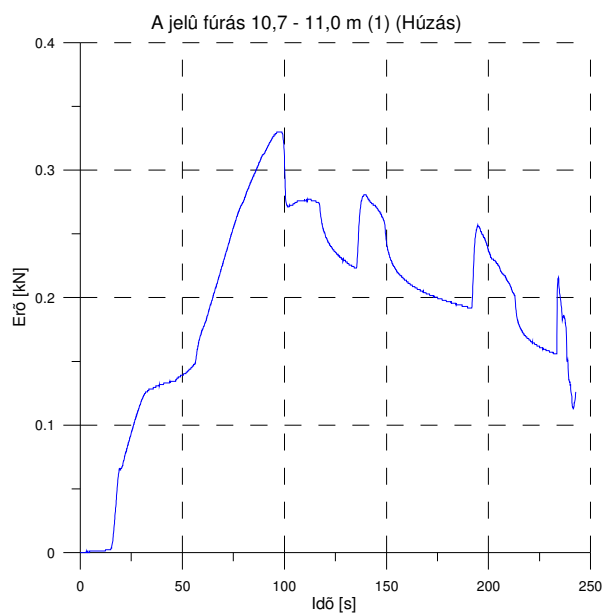
Tömeg: $m = 766,32 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 51,64 \text{ mm}$
 $h_2 = 51,53 \text{ mm}$
 $h_3 = 48,67 \text{ mm}$
 $h_4 = 53,12 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 51,24 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,79 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,96 \text{ mm}$
 $d_3 = 119,55 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,08 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 119,10 \text{ mm}$

Törőteher: $0,33 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 34,4 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,34 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-10,7-11,0 (2) (Nyomás)

Víztartalom: $w = 64,16 \%$

Tömeg: $m = 1723,66 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 107,56 \text{ mm}$
 $h_2 = 110,21 \text{ mm}$
 $h_3 = 109,43 \text{ mm}$
 $h_4 = 106,80 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 108,50 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,18 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,53 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,88 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,07 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,92 \text{ mm}$

Törőteher: $7,90 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 711,7 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 727,6 \text{ kPa}$

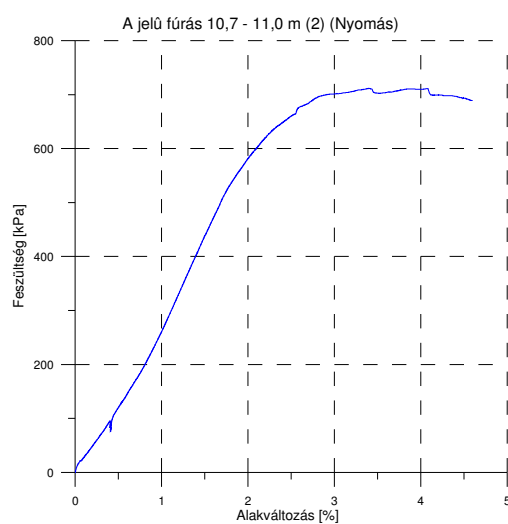
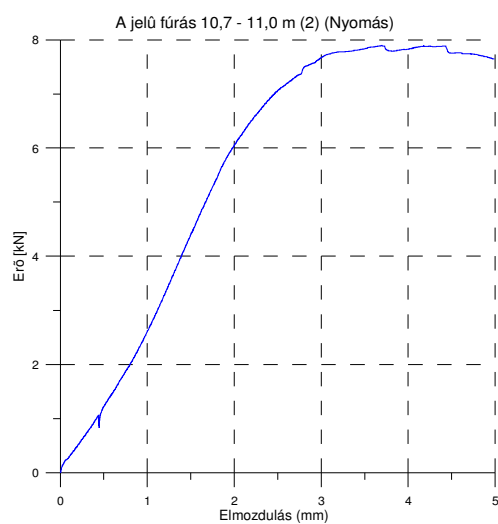
Rugalmassági modulus: $E = 34,4 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,21 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,83\%$

$\sigma_b = 0,52 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 1,73\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,43 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-12,7-13,0 (Húzás)

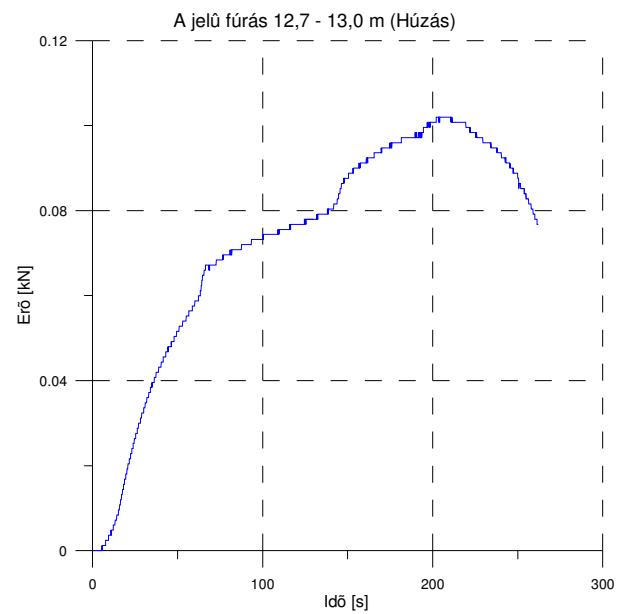
Víztartalom: $w = 75,66 \%$

Tömeg: $m = 923,95 \text{ g}$

Méretetek:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 58,18 \text{ mm}$	$d_1 = 118,40 \text{ mm}$
	$h_2 = 57,46 \text{ mm}$	$d_2 = 116,70 \text{ mm}$
	$h_3 = 64,10 \text{ mm}$	$d_3 = -$
	$h_4 = 70,23 \text{ mm}$	$d_4 = -$
	$h_{\text{átlag}} = 62,49 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 117,55 \text{ mm}$

Törőteher: $0,10 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 8,7 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,36 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-13,7-14,0 (1) (Nyomás)

Víztartalom: $w = 103,17 \%$

Tömeg: $m = 1769,41 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 110,79 \text{ mm}$
 $h_2 = 112,26 \text{ mm}$
 $h_3 = 113,12 \text{ mm}$
 $h_4 = 111,92 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 112,02 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,25 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,57 \text{ mm}$
 $d_3 = 117,12 \text{ mm}$
 $d_4 = 117,18 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,78 \text{ mm}$

Törőteher: $2,88 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 264,5 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 272,5 \text{ kPa}$

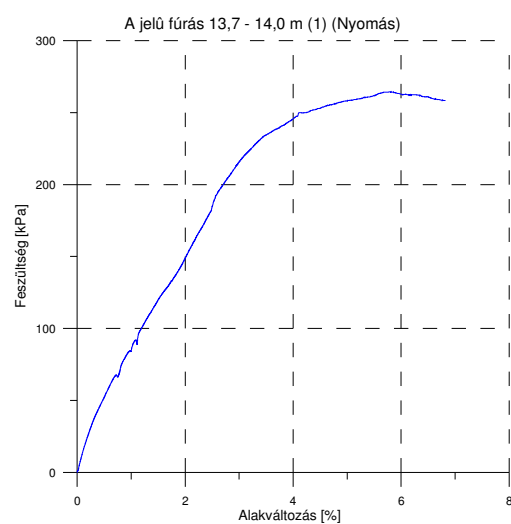
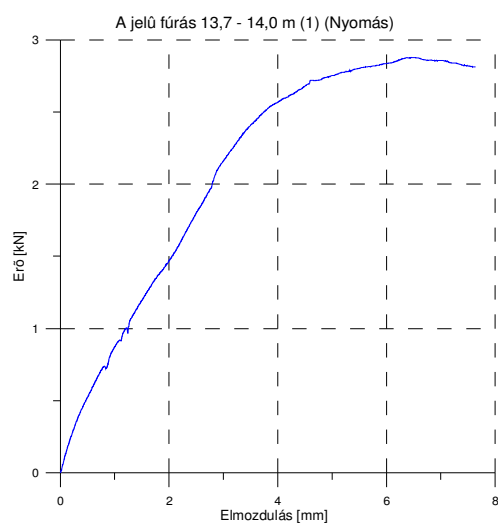
Rugalmassági modulus: $E = 6,8 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,08 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,96\%$

$\sigma_b = 0,18 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 2,43\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,45 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-13,7-14,0 (2) (Húzás)

Víztartalom: $w = 103,17 \%$

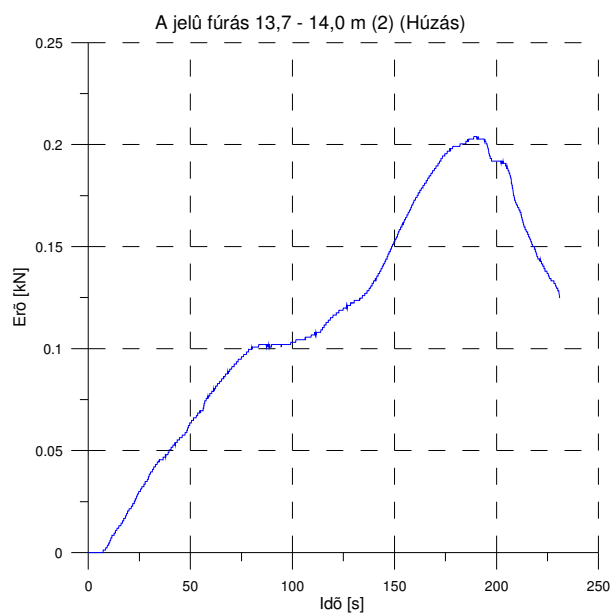
Tömeg: $m = 804,86 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 52,86 \text{ mm}$
 $h_2 = 52,78 \text{ mm}$
 $h_3 = 51,16 \text{ mm}$
 $h_4 = 51,31 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 52,03 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,65 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,67 \text{ mm}$
 $d_3 = 116,01 \text{ mm}$
 $d_4 = 116,65 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,25 \text{ mm}$

Törőteher: $0,10 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 10,4 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,43 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-15,7-16,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 103,17 \%$

Tömeg: $m = 2607,95 \text{ g}$

Méretek: magasság:
 $h_1 = 152,50 \text{ mm}$
 $h_2 = 153,57 \text{ mm}$
 $h_3 = 151,90 \text{ mm}$
 $h_4 = 150,23 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 152,05 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,52 \text{ mm}$
 $d_2 = 119,22 \text{ mm}$
 $d_3 = 117,37 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,18 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,57 \text{ mm}$

Törőteher: $4,55 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 412,3 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 451,2 \text{ kPa}$

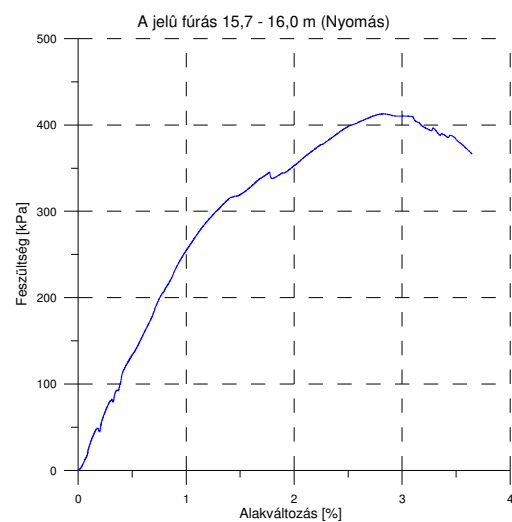
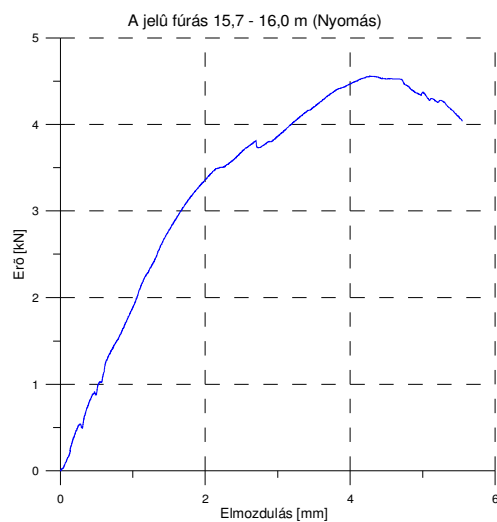
Rugalmassági modulus: $E = 23,3 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,13 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,49\%$

$\sigma_b = 0,27 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 1,09\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,55 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 1,09 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,62 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,33 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 87\%$

Hézagtérfogat: $e = 1,14$

Hézagterfogat: $n = 53,2\%$

S/v/l: 47/46/7%

Próbatest jele: A-16,7-17,0 (Húzás)

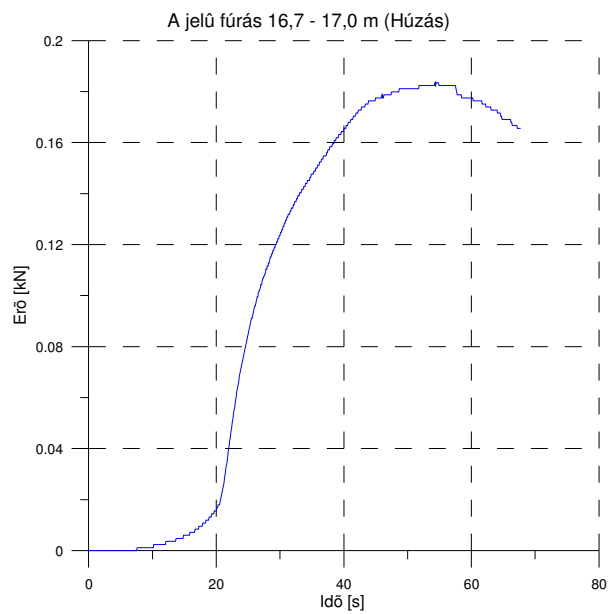
Víztartalom: $w = 111,77 \%$

Tömeg: $m = 1100,39 \text{ g}$

Méretek:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 76 \text{ mm}$	$d_1 = 118 \text{ mm}$
	$h_2 = 67,5 \text{ mm}$	$d_2 = 119 \text{ mm}$
	$h_3 = 77,2 \text{ mm}$	$d_3 = 118 \text{ mm}$
	$h_4 = 80 \text{ mm}$	$d_4 = 119 \text{ mm}$
	$h_{\text{átlag}} = 75,18 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 118,50 \text{ mm}$

Törőteher: $0,18 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 12,9 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,33 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-17,7-18,0 (1) (Nyomás)

Víztartalom: $w = 60,10 \%$

Tömeg: $m = 2345,72 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 130,55 \text{ mm}$
 $h_2 = 130,67 \text{ mm}$
 $h_3 = 132,35 \text{ mm}$
 $h_4 = 131,50 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 131,27 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,81 \text{ mm}$
 $d_2 = 117,30 \text{ mm}$
 $d_3 = 117,23 \text{ mm}$
 $d_4 = 117,20 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,39 \text{ mm}$

Törőteher: $5,27 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 487,2 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 519,0 \text{ kPa}$

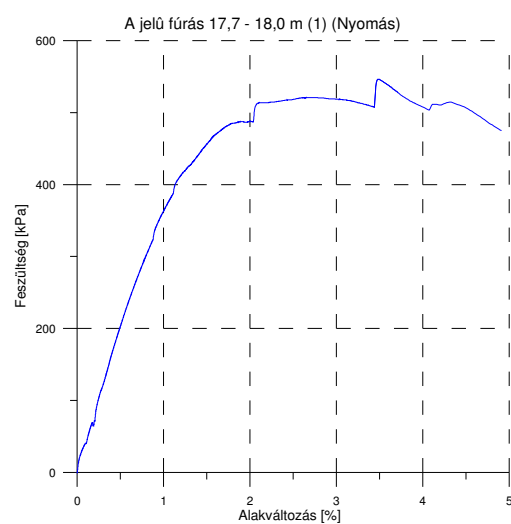
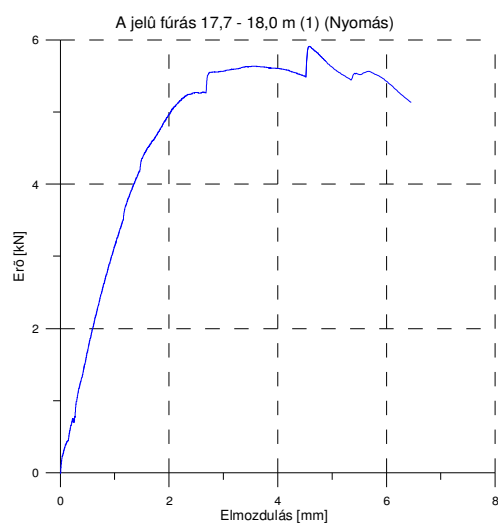
Rugalmassági modulus: $E = 35,9 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,13 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,32\%$

$\sigma_b = 0,32 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 0,85\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,65 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-17,7-18,0 (2) (Húzás)

Víztartalom: $w = 60,10 \%$

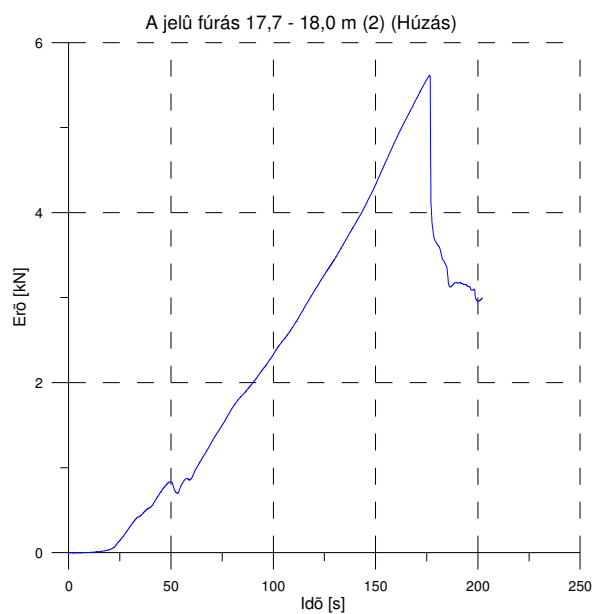
Tömeg: $m = 772,97 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 59,72 \text{ mm}$
 $h_2 = 58,16 \text{ mm}$
 $h_3 = 58,52 \text{ mm}$
 $h_4 = 58,06 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 58,62 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 103,18 \text{ mm}$
 $d_2 = 104,01 \text{ mm}$
 $d_3 = 106,49 \text{ mm}$
 $d_4 = 107,70 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 105,35 \text{ mm}$

Törőteher: $5,61 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 578,7 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,51 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-18,7-19,0 (Húzás)

Víztartalom: $w = 85,68 \%$

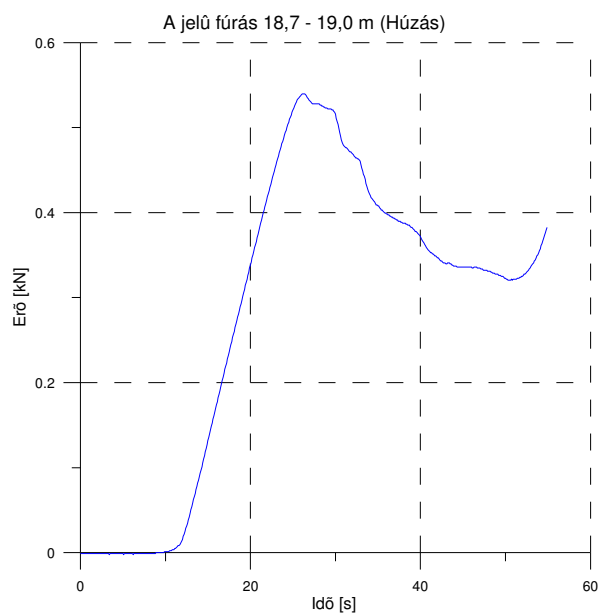
Tömeg: $m = 1334,81 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 79,73 \text{ mm}$
 $h_2 = 85,41 \text{ mm}$
 $h_3 = 85,66 \text{ mm}$
 $h_4 = 82,37 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 83,29 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,70 \text{ mm}$
 $d_2 = 119,11 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,43 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,71 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,49 \text{ mm}$

Törőteher: $0,54 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 34,9 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,45 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-20,7-21,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 79,49 \%$

Tömeg: $m = 2430,20 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 146,00 \text{ mm}$
 $h_2 = 146,36 \text{ mm}$
 $h_3 = 146,87 \text{ mm}$
 $h_4 = 145,23 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 146,12 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,99 \text{ mm}$
 $d_2 = 117,03 \text{ mm}$
 $d_3 = 117,93 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,62 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,89 \text{ mm}$

Törőteher: $2,21 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 202,6 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 220,1 \text{ kPa}$

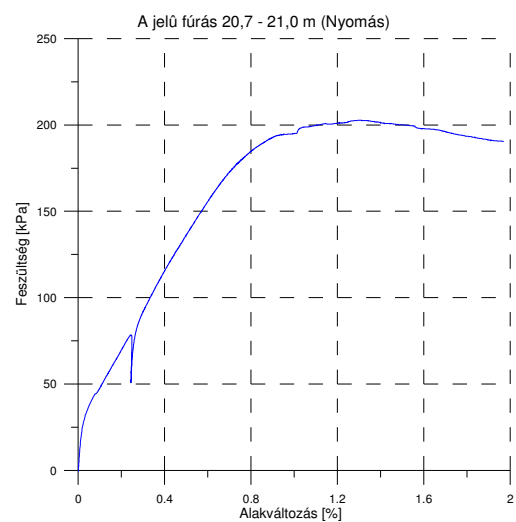
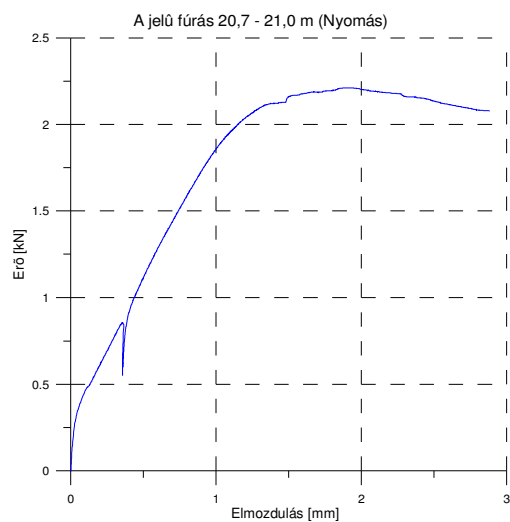
Rugalmassági modulus: $E = 21,4 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,054 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,127\%$

$\sigma_b = 0,158 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 0,614\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,52 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-21,7-22,0 (1) (Húzás)

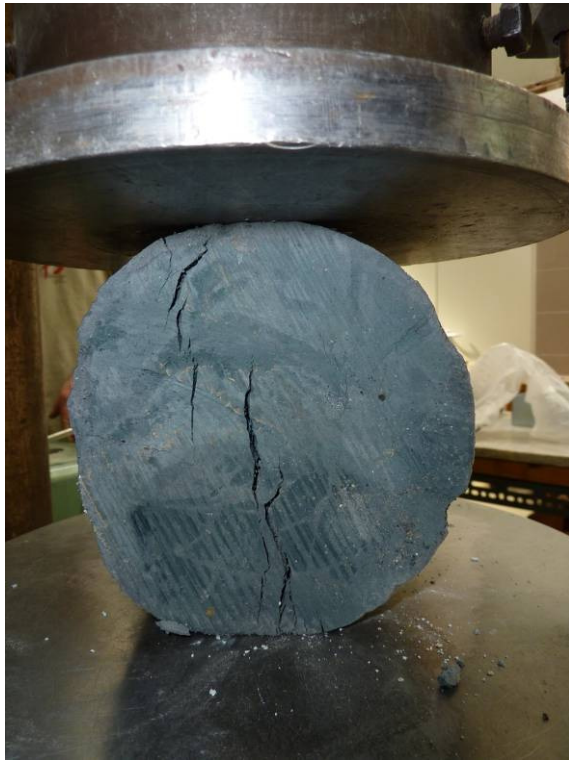
Víztartalom: $w = 115,24 \%$

Tömeg: $m = 1398,27 \text{ g}$

Méreték:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 93,30 \text{ mm}$	$d_1 = 115,21 \text{ mm}$
	$h_2 = 92,75 \text{ mm}$	$d_2 = 119,43 \text{ mm}$
	$h_3 = 94,57 \text{ mm}$	$d_3 = 118,11 \text{ mm}$
	$h_4 = 93,33 \text{ mm}$	$d_4 = 116,83 \text{ mm}$
	$h_{\text{átlag}} = 93,49 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 117,40 \text{ mm}$

Törőteher: $0,44 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 25,5 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,38 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: A-21,7-22,0 (2) (Húzás)

Víztartalom: $w = 115,24 \%$

Tömeg: $m = 927,63 \text{ g}$

Méreték:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 66,09 \text{ mm}$	$d_1 = 119,71 \text{ mm}$
	$h_2 = 66,64 \text{ mm}$	$d_2 = 119,10 \text{ mm}$
	$h_3 = 61,09 \text{ mm}$	$d_3 = 118,30 \text{ mm}$
	$h_4 = 63,51 \text{ mm}$	$d_4 = 116,61 \text{ mm}$
	$h_{\text{átlag}} = 64,33 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 118,43 \text{ mm}$

Törőteher: $0,21 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 17,6 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,31 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: B-1,7-2,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 87,55 \%$

Tömeg: $m = 1369,6 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 99,1 \text{ mm}$
 $h_2 = 96,9 \text{ mm}$
 $h_3 = 94,0 \text{ mm}$
 $h_4 = 94,5 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 96,13 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 116,2 \text{ mm}$
 $d_2 = 115,8 \text{ mm}$
 $d_3 = 114,4 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,1 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 116,13 \text{ mm}$

Törőteher: $0,70 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 66,1 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 65,8 \text{ kPa}$

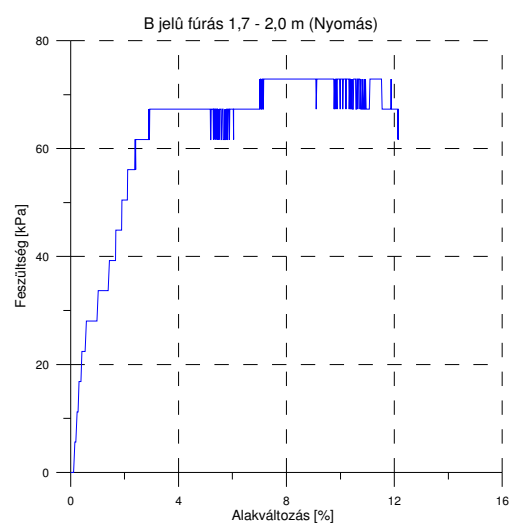
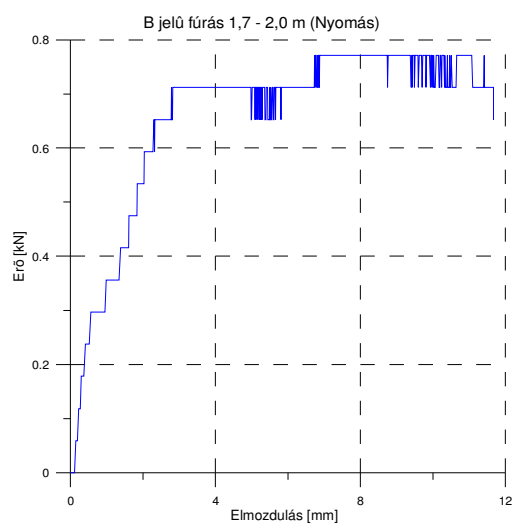
Rugalmassági modulus: $E = 2,1 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,011 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,274\%$

$\sigma_b = 0,056 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 2,410\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,35 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: B-2,7-3,0 (1) (Húzás)

Víztartalom: $w = 100,15 \%$

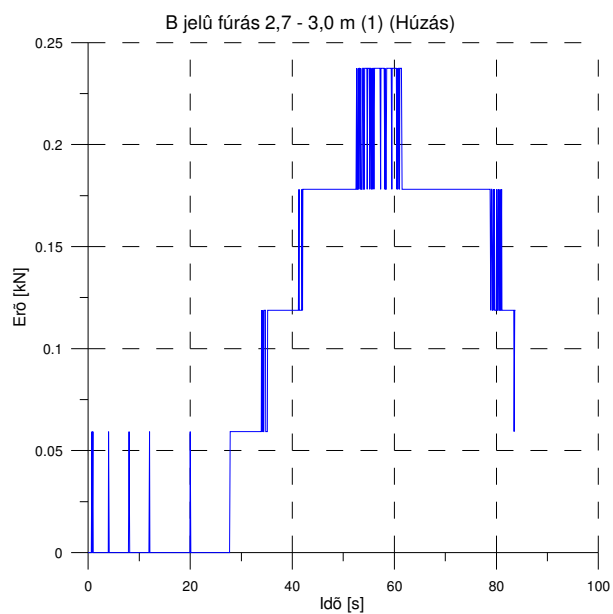
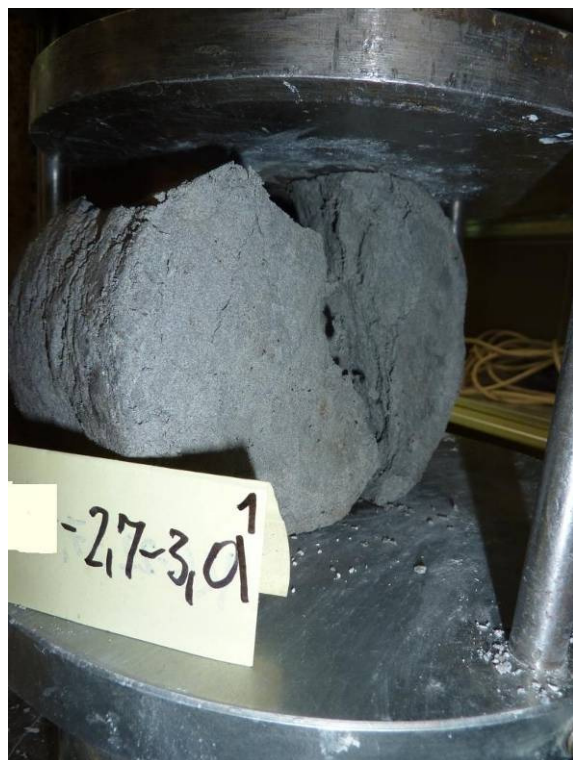
Tömeg: $m = 1055,1 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 63,17 \text{ mm}$
 $h_2 = 64,20 \text{ mm}$
 $h_3 = 66,17 \text{ mm}$
 $h_4 = 62,60 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 64,04 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 115,7 \text{ mm}$
 $d_2 = 116,0 \text{ mm}$
 $d_3 = 114,2 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,3 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 116,05 \text{ mm}$

Törőteher: $0,24 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 20,6 \text{ kPa}$



Nedves térfogsűrűség: $\rho_n = 1,56 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: B-2,7-3,0 (2) (Húzás)

Víztartalom: $w = 100,15 \%$

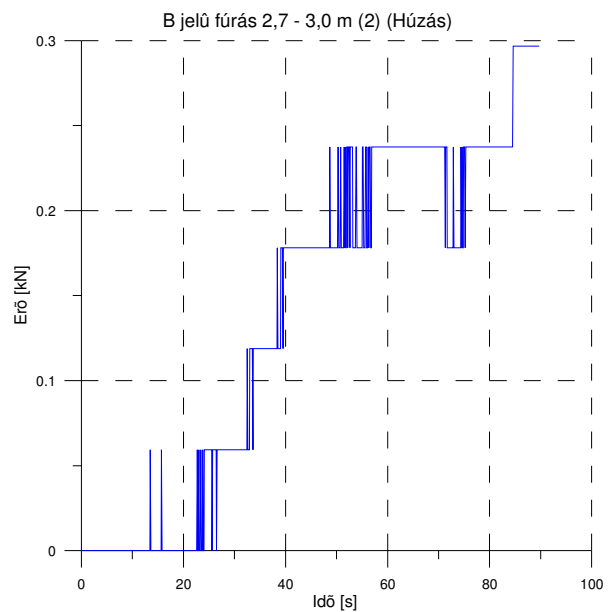
Tömeg: $m = 1073,6 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 73,3 \text{ mm}$
 $h_2 = 73,9 \text{ mm}$
 $h_3 = 74,3 \text{ mm}$
 $h_4 = 75,0 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 74,13 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,7 \text{ mm}$
 $d_2 = 116,6 \text{ mm}$
 $d_3 = 117,2 \text{ mm}$
 $d_4 = 117,8 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,33 \text{ mm}$

Törőteher: $0,24 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 17,6 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,34 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: B-4,7-5,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 86,98 \%$

Tömeg: $m = 1941,2 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 125,4 \text{ mm}$
 $h_2 = 130,1 \text{ mm}$
 $h_3 = 126,4 \text{ mm}$
 $h_4 = 124,8 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 126,68 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 115,5 \text{ mm}$
 $d_2 = 116,1 \text{ mm}$
 $d_3 = 116,7 \text{ mm}$
 $d_4 = 118,7 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 116,75 \text{ mm}$

Törőteher: $2,45 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 229,0 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 242,2 \text{ kPa}$

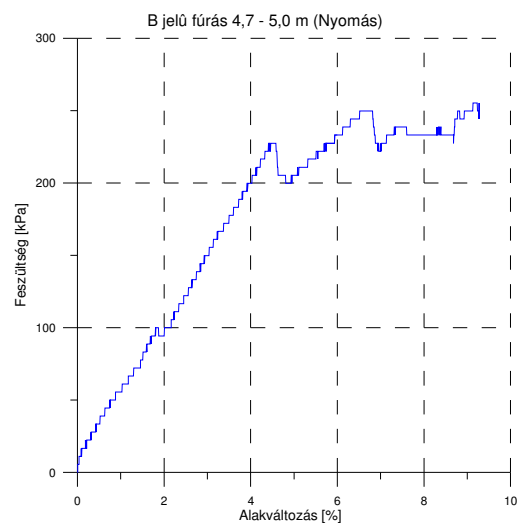
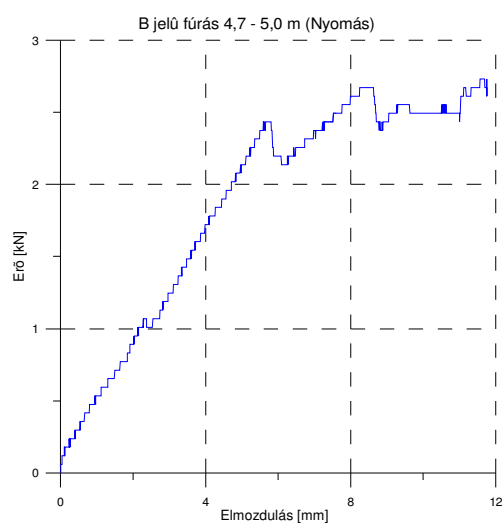
Rugalmassági modulus: $E = 5,3 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,11 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 2,34\%$

$\sigma_b = 0,21 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 4,22\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,43 \text{ g/cm}^3$

Próbatest jele: B-5,7-6,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 116,84 \%$

Tömeg: $m = -$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 125,0 \text{ mm}$
 $h_2 = -$
 $h_3 = -$
 $h_4 = -$
 $h_{\text{átlag}} = 125,0 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,1 \text{ mm}$
 $d_2 = -$
 $d_3 = -$
 $d_4 = -$
 $d_{\text{átlag}} = 118,1 \text{ mm}$

Törőteher: $1,42 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 129,7 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 136,8 \text{ kPa}$

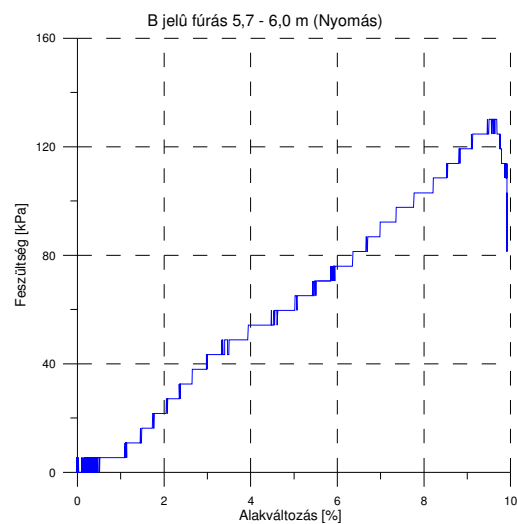
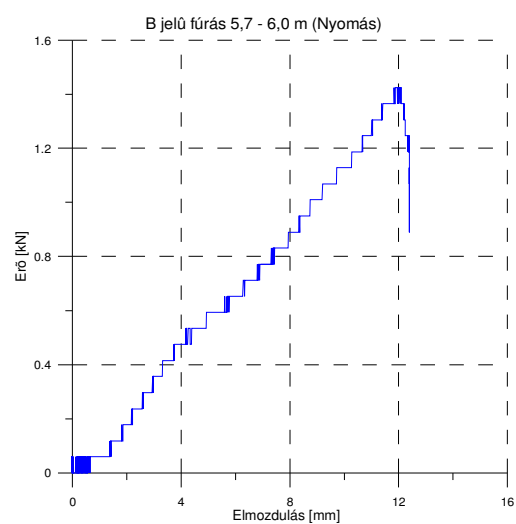
Rugalmassági modulus: $E = 1,4 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,02 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 1,67\%$

$\sigma_b = 0,11 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 8,54\%$



Nedves térfogsűrűség: $\rho_n = -$

Próbatest jele: B-7,7-8,0 (Húzás)

Víztartalom: $w = 71,91 \%$

Tömeg: $m = 1287,8 \text{ g}$

Méreték:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 84,1 \text{ mm}$	$d_1 = 116,7 \text{ mm}$
	$h_2 = 83,5 \text{ mm}$	$d_2 = 116,7 \text{ mm}$
	$h_3 = 79,8 \text{ mm}$	$d_3 = 119,0 \text{ mm}$
	$h_4 = 78,4 \text{ mm}$	$d_4 = 117,3 \text{ mm}$
	$h_{\text{átlag}} = 81,45 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 117,43 \text{ mm}$

Törőteher: $0,53 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 35,3 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,46 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,85 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,48 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,32 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 96\%$

Hézagtenyező: $e = 1,73$

Hézagterfogat: $n = 63,4\%$

S/v/l: 37/61/2%

Próbatest jele: B-8,7-9,0 (1) (Húzás)

Víztartalom: $w = 50,69 \%$

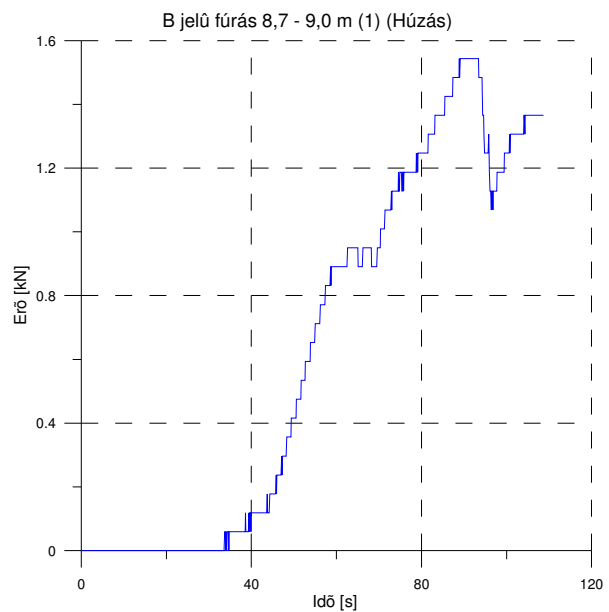
Tömeg: $m = 1610,5 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 96,4 \text{ mm}$
 $h_2 = 98,1 \text{ mm}$
 $h_3 = 96,8 \text{ mm}$
 $h_4 = 99,3 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 97,65 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 117,6 \text{ mm}$
 $d_2 = 116,1 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,2 \text{ mm}$
 $d_4 = 117,9 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 117,45 \text{ mm}$

Törőteher: $1,54 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 85,5 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,52 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 1,01 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,63 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,68 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 0,82\%$

Hézagtérfogat: $e = 1,65$

Hézagterfogat: $n = 62,3\%$

S/v/l: 38/51/11%

Próbatest jele: B-8,7-9,0 (2) (Húzás)

Víztartalom: $w = 50,69 \%$

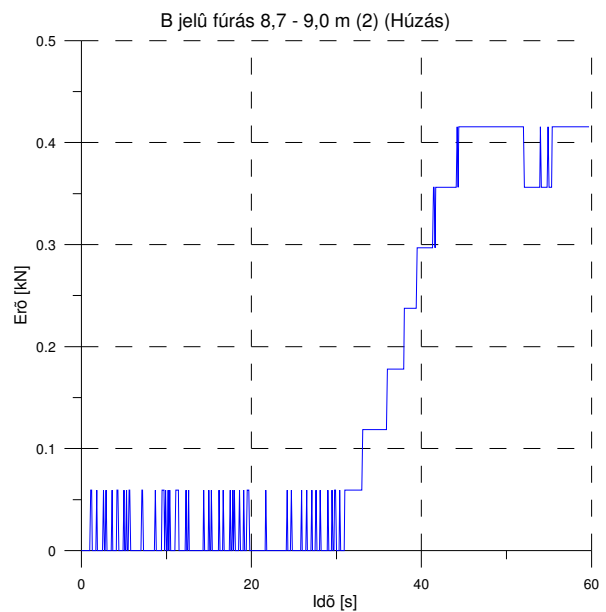
Tömeg: $m = 636,4 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 32,0 \text{ mm}$
 $h_2 = 42,6 \text{ mm}$
 $h_3 = 44,0 \text{ mm}$
 $h_4 = 36,3 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 38,73 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,3 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,3 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,8 \text{ mm}$
 $d_4 = 117,9 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,33 \text{ mm}$

Törőteher: $0,42 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 58,4 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,50 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,99 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,59 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,46 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 84\%$

Hézagtényező: $e = 1,48$

Hézagterfogat: $n = 59,7\%$

S/v/l: 40/50/10%

Próbatest jele: B-8,7-9,0 (3) (Húzás)

Víztartalom: $w = 50,69 \%$

Tömeg: $m = -$

Méreték:	magasság:	átmérő:
	$h_1 = 37,6 \text{ mm}$	$d_1 = -$
	$h_2 = 40,1 \text{ mm}$	$d_2 = -$
	$h_3 = 35,5 \text{ mm}$	$d_3 = -$
	$h_4 = 37,4 \text{ mm}$	$d_4 = -$
	$h_{\text{átlag}} = 37,65 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = -$

Törőteher: 2,79 kN

Törőfeszültség: $\sigma_t = -$

Nedves térfogsűrűség: $\rho_n = -$

Próbatest jele: B-10,7-11,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 64,12 \%$

Tömeg: $m = 1941,5 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 118,9 \text{ mm}$
 $h_2 = 119,8 \text{ mm}$
 $h_3 = 119,7 \text{ mm}$
 $h_4 = 117,0 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 118,85 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,5 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,3 \text{ mm}$
 $d_3 = 113,7 \text{ mm}$
 $d_4 = 113,1 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 115,90 \text{ mm}$

Törőteher: $27,6 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 2617,4 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 2733,1 \text{ kPa}$

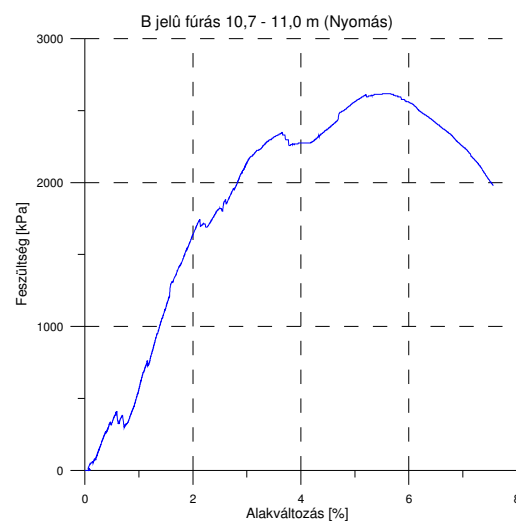
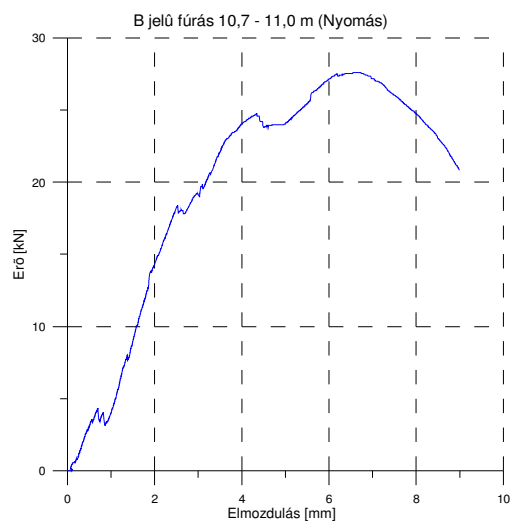
Rugalmassági modulus: $E = 107,9 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,51 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,96\%$

$\sigma_b = 1,65 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 2,02\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,55 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,94 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,55 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,15 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 100\%$

Hézagtenyező: $e = 1,28$

Hézagterfogat: $n = 56,1\%$

S/v/l: 44/56/0%

Próbatest jele: B-12,7-13,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 83,87 \%$

Tömeg: $m = 2045,4 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 138,2 \text{ mm}$
 $h_2 = 136,3 \text{ mm}$
 $h_3 = 133,1 \text{ mm}$
 $h_4 = 138,1 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 136,43 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,2 \text{ mm}$
 $d_2 = 119,2 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,6 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,0 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 119,00 \text{ mm}$

Törőteher: $1,72 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 154,7 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 166,0 \text{ kPa}$

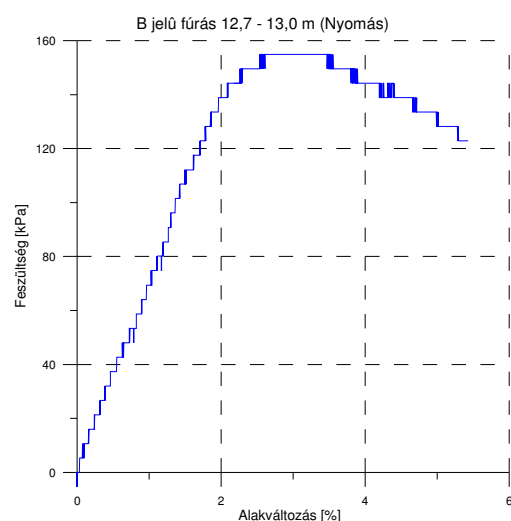
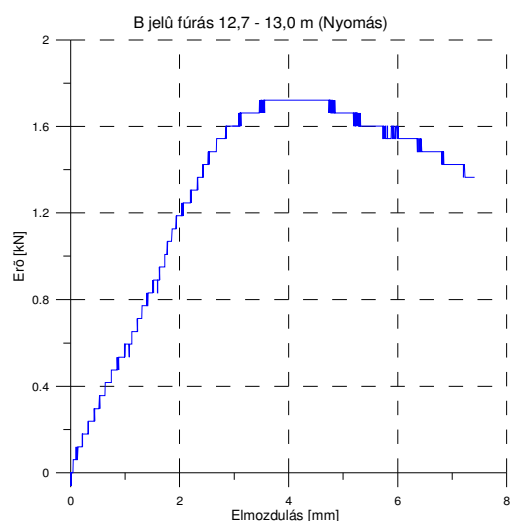
Rugalmassági modulus: $E = 6,6 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,03 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,39\%$

$\sigma_b = 0,13 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 1,95\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,35 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,73 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,41 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,30 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 90\%$

Hézagtenyező: $e = 2,14$

Hézagterfogat: $n = 68,1\%$

S/v/l: 32/62/6%

Próbatest jele: B-14,7-15,0 (Húzás)

Víztartalom: $w = 56,19 \%$

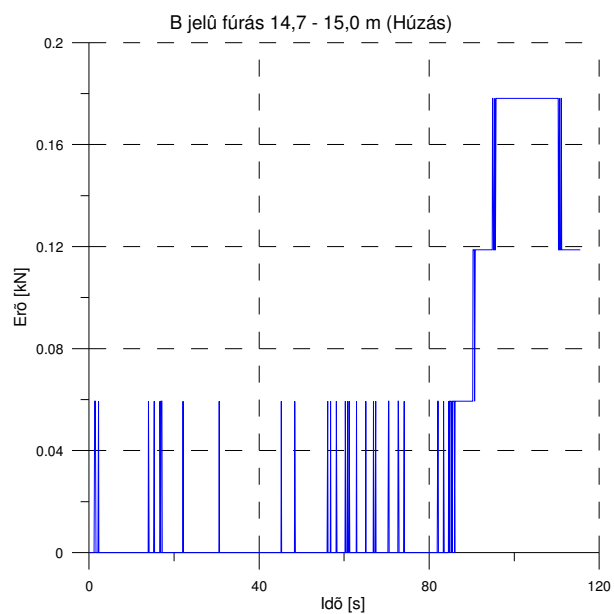
Tömeg: $m = 923,8 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 55,6 \text{ mm}$
 $h_2 = 55,9 \text{ mm}$
 $h_3 = 58,7 \text{ mm}$
 $h_4 = 56,7 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 56,73 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,5 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,5 \text{ mm}$
 $d_3 = 119,3 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,2 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,88 \text{ mm}$

Törőteher: $0,18 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 17,0 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,47 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,94 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,52 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,26 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 90\%$

Hézagtenyező: $e = 1,40$

Hézagterfogat: $n = 58,4\%$

S/v/l: 42/53/5%

Próbatest jele: B-15,7-16,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 57,09 \%$

Tömeg: $m = 2561,3 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 149,1 \text{ mm}$
 $h_2 = 148,5 \text{ mm}$
 $h_3 = 146,8 \text{ mm}$
 $h_4 = 145,2 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 147,40 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,2 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,6 \text{ mm}$
 $d_3 = 119,0 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,1 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,98 \text{ mm}$

Törőteher: $6,53 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 587,7 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 639,7 \text{ kPa}$

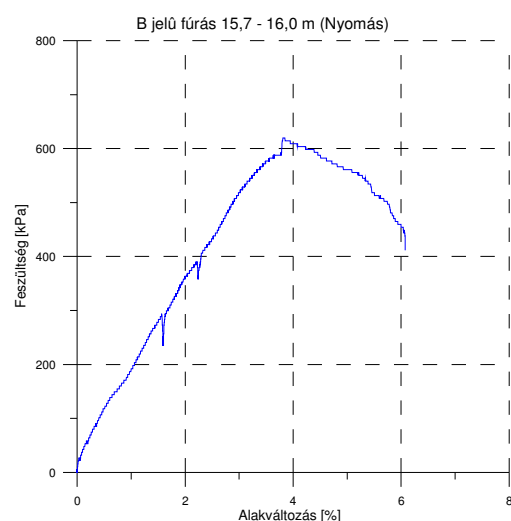
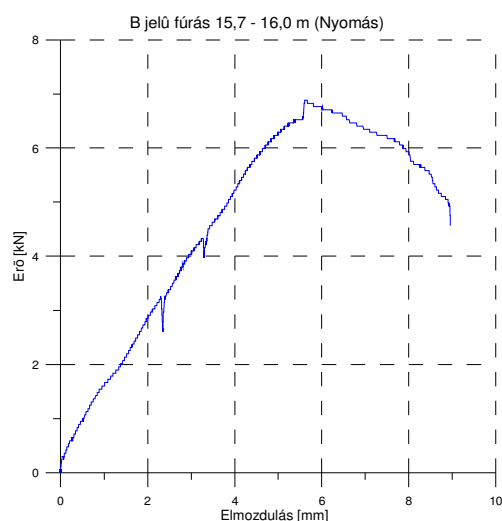
Rugalmassági modulus: $E = 16,5 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,20 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 1,09\%$

$\sigma_b = 0,49 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 2,85\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,56 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 1,00 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,56 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,27 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 100\%$

Hézagtenyező: $e = 1,28$

Hézagterfogat: $n = 56,2\%$

S/v/l: 44/56/0%

Próbatest jele: B-17,7-18,0 (Húzás)

Víztartalom: $w = 59,85 \%$

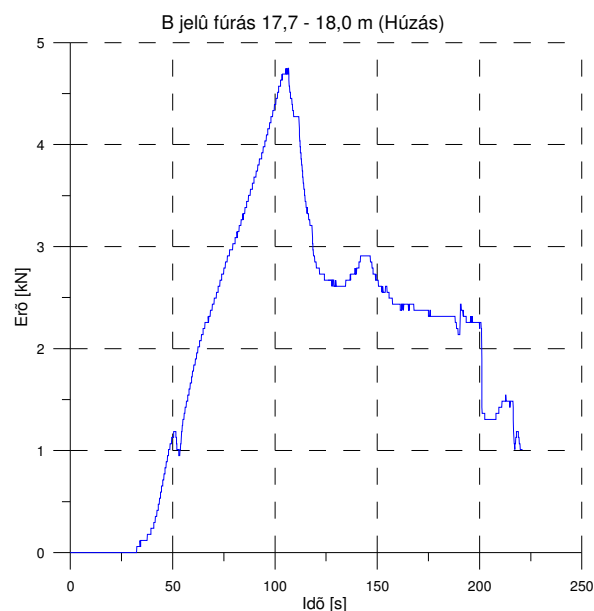
Tömeg: $m = 1963,5 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 121,9 \text{ mm}$
 $h_2 = 122,9 \text{ mm}$
 $h_3 = 121,8 \text{ mm}$
 $h_4 = 121,3 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 121,98 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 118,8 \text{ mm}$
 $d_2 = 118,1 \text{ mm}$
 $d_3 = 118,1 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,1 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 118,53 \text{ mm}$

Törőteher: $4,68 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 206,2 \text{ kPa}$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,46 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,91 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,55 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,51 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 86\%$

Hézagtenyező: $e = 1,75$

Hézagterfogat: $n = 63,6\%$

S/v/l: 36/55/9%

Próbatest jele: B-18,7-19,0 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 76,67 \%$

Tömeg: $m = 2045,6 \text{ g}$

Méretek: magasság:
 $h_1 = 127,9 \text{ mm}$
 $h_2 = 126,7 \text{ mm}$
 $h_3 = 125,2 \text{ mm}$
 $h_4 = 127,9 \text{ mm}$
 $h_{\text{átlag}} = 126,93 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 119,2 \text{ mm}$
 $d_2 = 119,3 \text{ mm}$
 $d_3 = 119,4 \text{ mm}$
 $d_4 = 119,3 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 119,30 \text{ mm}$

Törőteher: $4,51 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 403,7 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 426,9 \text{ kPa}$

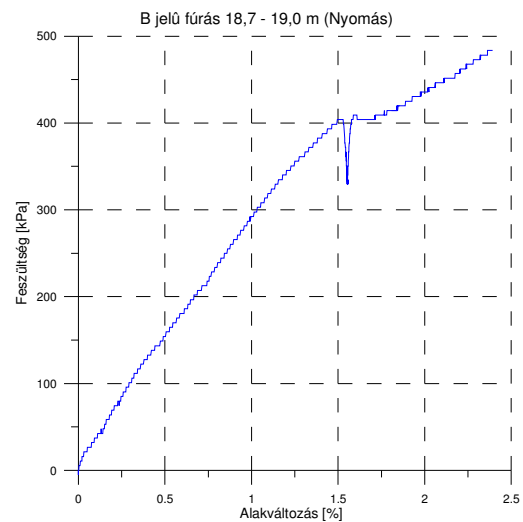
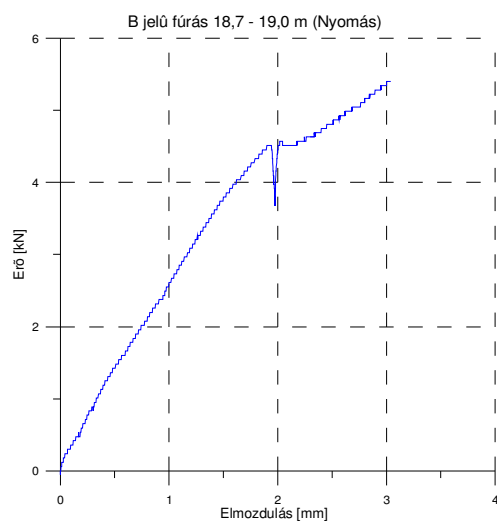
Rugalmassági modulus: $E = 27,3 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,11 \text{ MPa}$

$\varepsilon_a = 0,34\%$

$\sigma_b = 0,32 \text{ MPa}$

$\varepsilon_b = 1,11\%$



Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,44 \text{ g/cm}^3$

Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,82 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,48 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,42 \text{ g/cm}^3$

Telítettség: $S_r = 94\%$

Hézagtérfogat: $e = 1,96$

Hézagterfogat: $n = 66,2\%$

S/v/l: 34/63/3%

Pannon Agyag

7/1-es jelű minta (húzás)

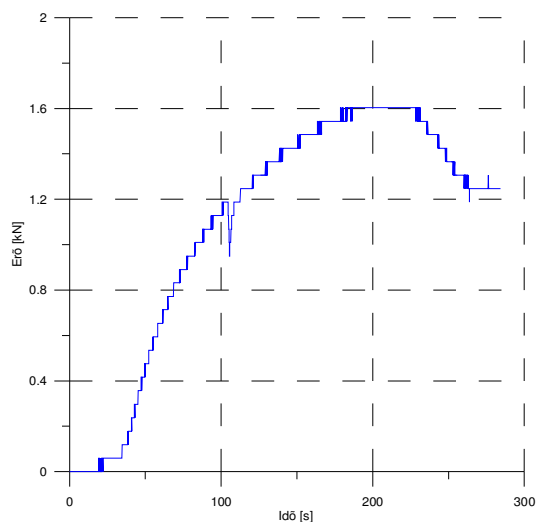
Tömeg: $m = 1034,8 \text{ g}$

Magasság:	Átmérő:
$h_1 = 63,56 \text{ mm}$	$d_1 = 104,82 \text{ mm}$
$h_2 = 59,32 \text{ mm}$	$d_2 = 105,64 \text{ mm}$
$h_3 = 56,86 \text{ mm}$	$d_3 = 104,00 \text{ mm}$
$h_4 = -$	$d_4 = -$
$h_{\text{átlag}} = 59,91 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 104,82 \text{ mm}$

Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 2,00 \text{ g/cm}^3$

Törőteher: $1,60 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 162 \text{ kPa}$



7/2-es jelű minta (húzás)

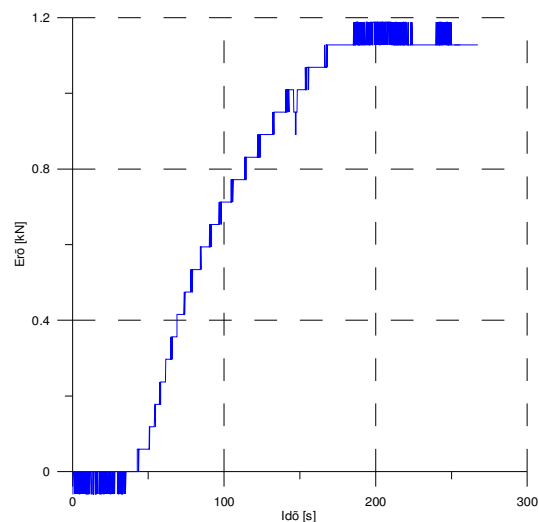
Tömeg: $m = 1065,9 \text{ g}$

Magasság:	Átmérő:
$h_1 = 64,18 \text{ mm}$	$d_1 = 105,39 \text{ mm}$
$h_2 = 62,72 \text{ mm}$	$d_2 = 105,11 \text{ mm}$
$h_3 = 58,88 \text{ mm}$	$d_3 = 105,98 \text{ mm}$
$h_4 = -$	$d_4 = 106,18 \text{ mm}$
$h_{\text{átlag}} = 61,93 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 105,67 \text{ mm}$

Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 1,96 \text{ g/cm}^3$

Törőteher: $1,20 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 117 \text{ kPa}$



8-as jelű minta (húzás)

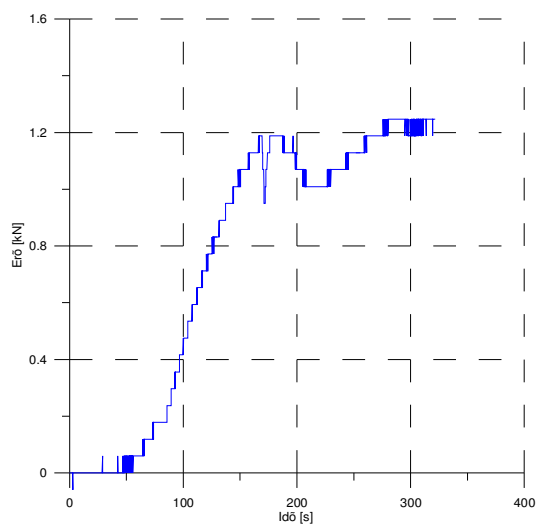
Tömeg: $m = 1481,0 \text{ g}$

Magasság:	Átmérő:
$h_1 = 85,11 \text{ mm}$	$d_1 = 104,18 \text{ mm}$
$h_2 = 87,75 \text{ mm}$	$d_2 = 105,17 \text{ mm}$
$h_3 = 84,22 \text{ mm}$	$d_3 = 103,89 \text{ mm}$
$h_4 = -$	$d_4 = -$
$h_{\text{átlag}} = 85,69 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 104,41 \text{ mm}$

Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 2,02 \text{ g/cm}^3$

Törőteher: $1,18 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 84 \text{ kPa}$



9-es jelű minta (húzás)

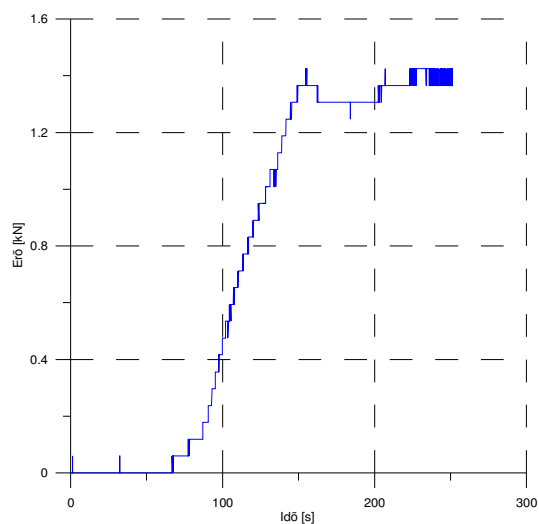
Tömeg: $m = 1420,3 \text{ g}$

Magasság:	Átmérő:
$h_1 = 79,82 \text{ mm}$	$d_1 = 103,99 \text{ mm}$
$h_2 = 79,57 \text{ mm}$	$d_2 = 103,95 \text{ mm}$
$h_3 = 83,58 \text{ mm}$	$d_3 = 105,35 \text{ mm}$
$h_4 = 84,52 \text{ mm}$	$d_4 = -$
$h_{\text{átlag}} = 81,87 \text{ mm}$	$d_{\text{átlag}} = 104,43 \text{ mm}$

Nedves térfogatsűrűség: $\rho_n = 2,03 \text{ g/cm}^3$

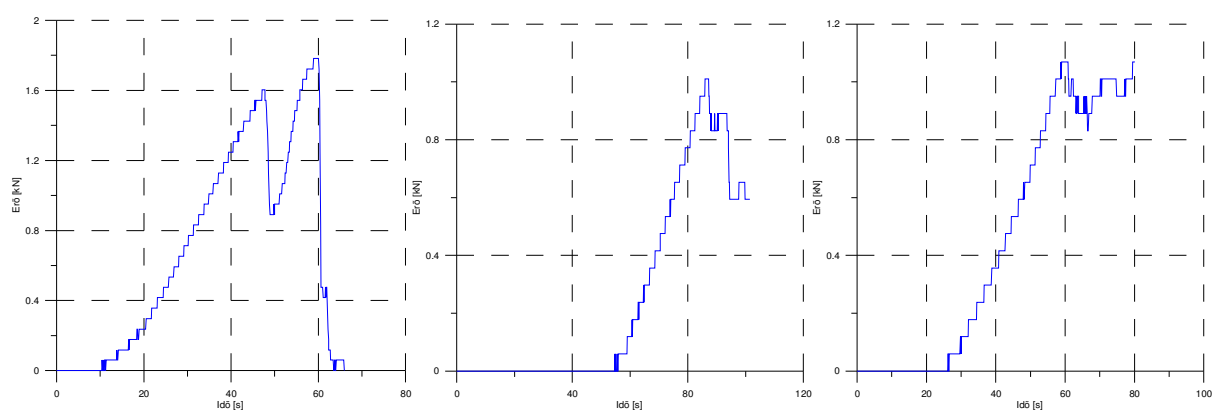
Törőteher: $1,42 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_t = 106 \text{ kPa}$



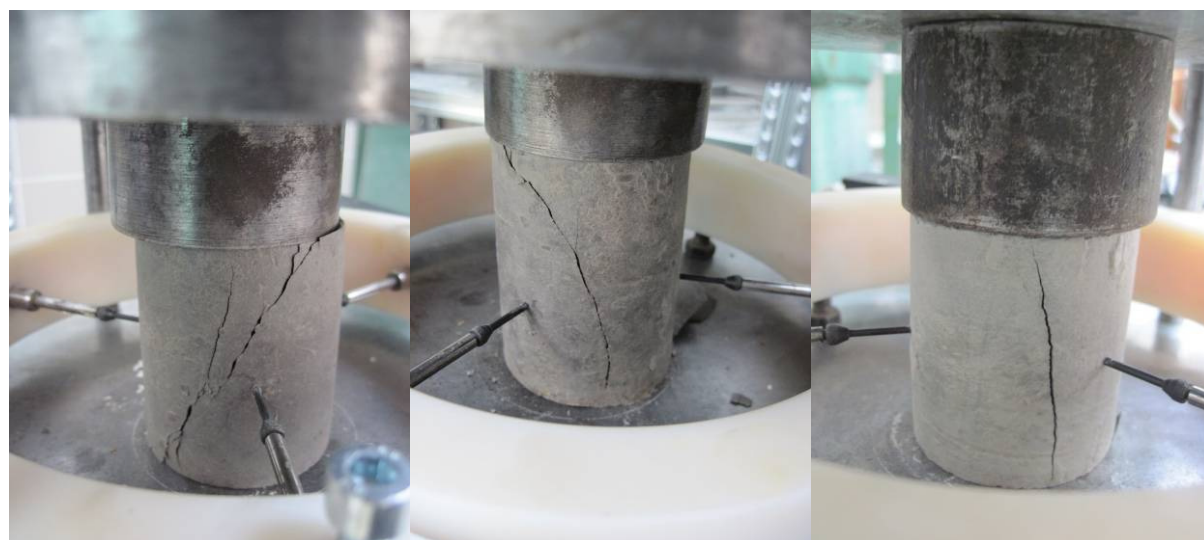
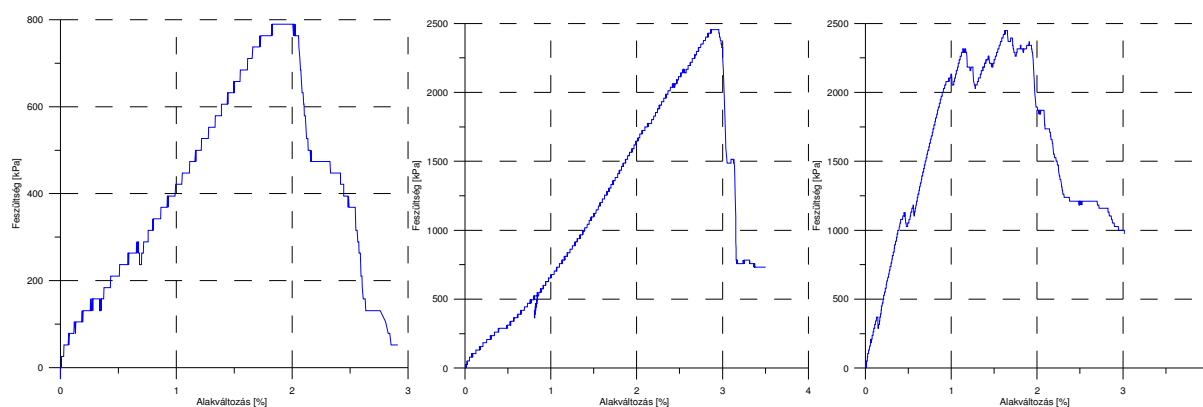
Kiscelli agyag (húzás)

	<u>1-es jelű minta</u>	<u>2-es jelű minta</u>	<u>3-as jelű minta</u>
Tömeg:	$m = 327,5 \text{ g}$	$m = 216,5 \text{ g}$	$m = 316,5 \text{ g}$
Magasság:	$h_1 = 63,89 \text{ mm}$ $h_2 = 62,83 \text{ mm}$ $h_3 = 63,17 \text{ mm}$ $h_4 = -$ $h_{\text{átlag}} = 63,30 \text{ mm}$	$h_1 = 43,14 \text{ mm}$ $h_2 = 41,98 \text{ mm}$ $h_3 = 43,69 \text{ mm}$ $h_4 = -$ $h_{\text{átlag}} = 42,94 \text{ mm}$	$h_1 = 61,54 \text{ mm}$ $h_2 = 61,57 \text{ mm}$ $h_3 = 61,06 \text{ mm}$ $h_4 = -$ $h_{\text{átlag}} = 61,36 \text{ mm}$
Átmérő:	$d_1 = 53,67 \text{ mm}$ $d_2 = 53,72 \text{ mm}$ $d_3 = -$ $d_4 = -$ $d_{\text{átlag}} = 53,70 \text{ mm}$	$d_1 = 53,28 \text{ mm}$ $d_2 = 53,23 \text{ mm}$ $d_3 = 53,43 \text{ mm}$ $d_4 = -$ $d_{\text{átlag}} = 53,31 \text{ mm}$	$d_1 = 53,56 \text{ mm}$ $d_2 = 53,55 \text{ mm}$ $d_3 = -$ $d_4 = -$ $d_{\text{átlag}} = 53,56 \text{ mm}$
Nedves térfogatsűrűség:	$\rho_n = 2,29 \text{ g/cm}^3$	$\rho_n = 2,26 \text{ g/cm}^3$	$\rho_n = 2,29 \text{ g/cm}^3$
Törőteher:	1,78 kN	1,01 kN	1,07 kN
Törőfeszültség:	$\sigma_t = 334 \text{ kPa}$	$\sigma_t = 281 \text{ kPa}$	$\sigma_t = 207 \text{ kPa}$



Kiscelli agyag (nyomás)

	<u>4-es jelű minta</u>	<u>5-ös jelű minta</u>	<u>6-os jelű minta</u>
Tömeg:	$m = 355,8 \text{ g}$	$m = 409,4 \text{ g}$	$m = 327,2 \text{ g}$
Magasság:	$h_1 = 68,22 \text{ mm}$ $h_2 = 68,90 \text{ mm}$ $h_{\text{átlag}} = 68,56 \text{ mm}$	$h_1 = 78,00 \text{ mm}$ $h_2 = 77,81 \text{ mm}$ $h_{\text{átlag}} = 77,91 \text{ mm}$	$h_1 = 61,84 \text{ mm}$ $h_2 = 62,18 \text{ mm}$ $h_{\text{átlag}} = 62,01 \text{ mm}$
Átmérő:	$d_1 = 53,65 \text{ mm}$ $d_2 = 53,57 \text{ mm}$ $d_{\text{átlag}} = 53,61 \text{ mm}$	$d_1 = 53,96 \text{ mm}$ $d_2 = 53,69 \text{ mm}$ $d_{\text{átlag}} = 53,83 \text{ mm}$	$d_1 = 53,57 \text{ mm}$ $d_2 = 53,67 \text{ mm}$ $d_{\text{átlag}} = 53,62 \text{ mm}$
Nedves térfogatsűrűség:	$\rho_n = 2,30 \text{ g/cm}^3$	$\rho_n = 2,31 \text{ g/cm}^3$	$\rho_n = 2,34 \text{ g/cm}^3$
Törőteher:	1,78 kN	5,58 kN	5,20 kN
Törőfeszültség:	$\sigma_{c(2:1);(50)} = 748 \text{ kPa}$	$\sigma_{c(2:1);(50)} = 2377 \text{ kPa}$	$\sigma_{c(2:1);(50)} = 2145 \text{ kPa}$
Rugalmassági modulus:	$E = 44,7 \text{ MPa}$	$E = 97,0 \text{ MPa}$	$E = 260,4 \text{ MPa}$



Próbatest jele: Új1 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 0 \%$

Száraz tömeg: $m_d = 33,02 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 46,34 \text{ mm}$
 $h_2 = 46,52 \text{ mm}$

 $h_{\text{átlag}} = 46,43 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 37,72 \text{ mm}$
 $d_2 = 37,64 \text{ mm}$
 $d_3 = 37,74 \text{ mm}$
 $d_4 = 37,60 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 37,68 \text{ mm}$

Törőteher: $2,77 \text{ kN}$

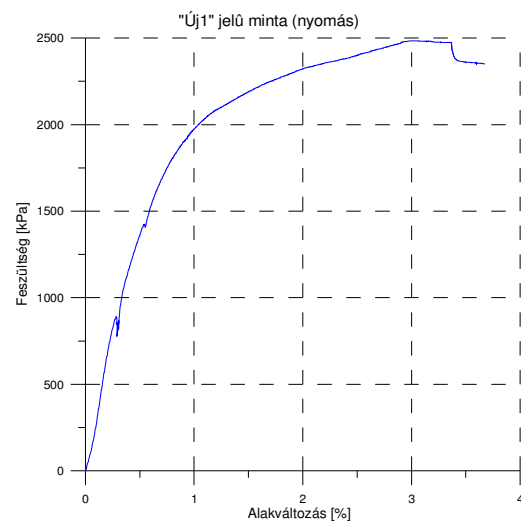
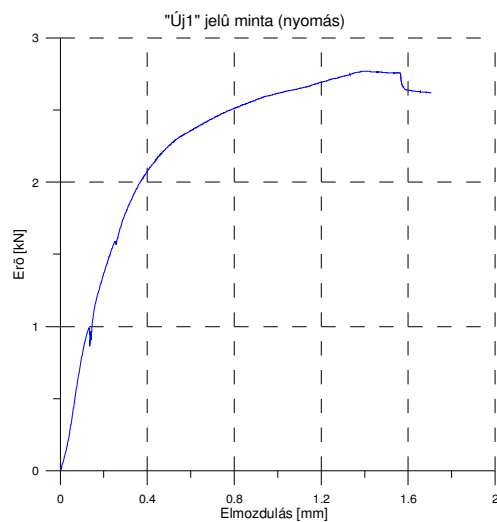
Törőfeszültség: $\sigma_c = 2485,4 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 2197,4 \text{ kPa}$

Rugalmassági modulus: $E = 263,2 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,456 \text{ MPa}$ $\varepsilon_a = 0,144\%$

$\sigma_b = 1,285 \text{ MPa}$ $\varepsilon_b = 0,456\%$



Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,64 \text{ g/cm}^3$

Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,37 \text{ g/cm}^3$

Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,41 \text{ g/cm}^3$

Hézagtérfogat: $e = 2,78$

Hézagterfogat: $n = 73,5\%$

s: $26,5\%$

Próbatest jele: Új2 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 0 \%$

Száraz tömeg: $m_d = 33,41 \text{ g}$

Méretetek: magasság:
 $h_1 = 47,51 \text{ mm}$
 $h_2 = 48,04 \text{ mm}$

 $h_{\text{átlag}} = 47,78 \text{ mm}$

átmérő:
 $d_1 = 37,68 \text{ mm}$
 $d_2 = 37,81 \text{ mm}$
 $d_3 = 37,73 \text{ mm}$
 $d_4 = 37,71 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 37,73 \text{ mm}$

Törőteher: $2,42 \text{ kN}$

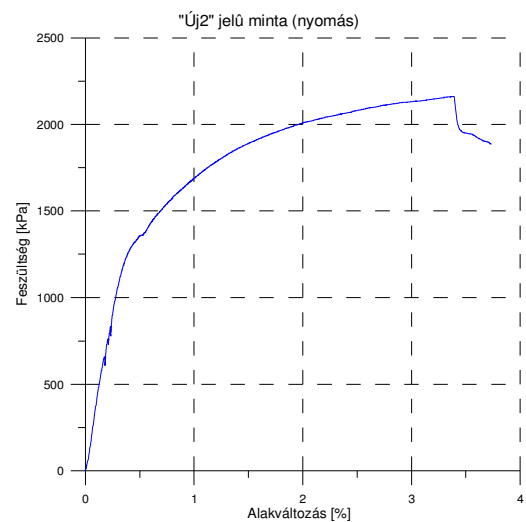
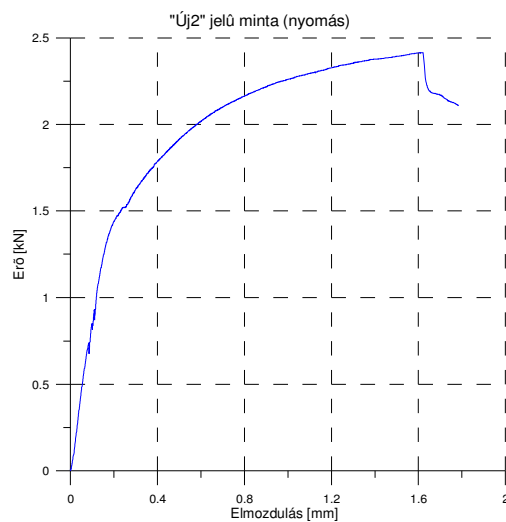
Törőfeszültség: $\sigma_c = 2165,6 \text{ kPa}$

Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 1924,5 \text{ kPa}$

Rugalmassági modulus: $E = 350,2 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,248 \text{ MPa}$ $\varepsilon_a = 0,068\%$

$\sigma_b = 1,087 \text{ MPa}$ $\varepsilon_b = 0,307\%$



Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,63 \text{ g/cm}^3$
Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,37 \text{ g/cm}^3$
Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,41 \text{ g/cm}^3$
Hézagtérfogató: $e = 2,85$
Hézagterfogat: $n = 74,0\%$
 $s: 26,0\%$

Próbatest jele: Új3 (Nyomás)

Víztartalom: $w = 0 \%$

Száraz tömeg: $m_d = 33,44 \text{ g}$

Méreték: magasság:
 $h_1 = 49,04 \text{ mm}$
 $h_2 = 48,76 \text{ mm}$

 $h_{\text{átlag}} = 48,92 \text{ mm}$

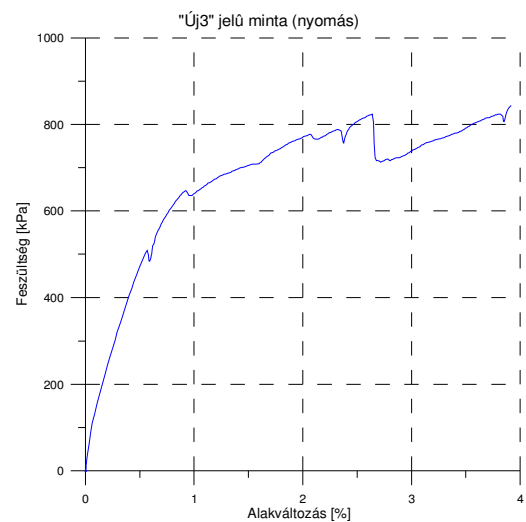
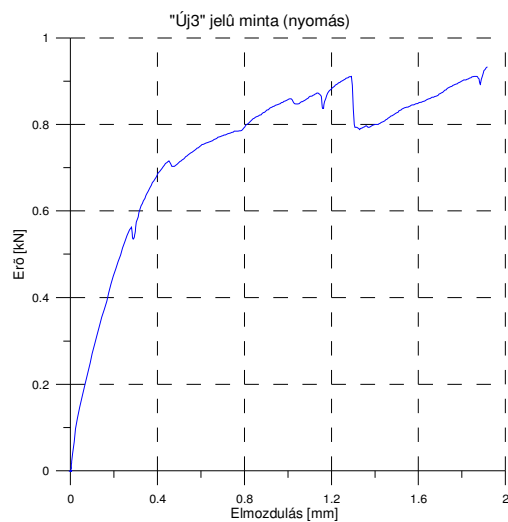
átmérő:
 $d_1 = 37,70 \text{ mm}$
 $d_2 = 37,72 \text{ mm}$
 $d_3 = 37,42 \text{ mm}$
 $d_4 = 37,30 \text{ mm}$
 $d_{\text{átlag}} = 37,54 \text{ mm}$

Törőteher: $0,91 \text{ kN}$

Törőfeszültség: $\sigma_c = 822,6 \text{ kPa}$
Átszámolt törőfeszültség: $\sigma_{c(2:1);(50)} = 734,0 \text{ kPa}$

Rugalmassági modulus: $E = 86,4 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 0,132 \text{ MPa}$ $\varepsilon_a = 0,085\%$
 $\sigma_b = 0,407 \text{ MPa}$ $\varepsilon_b = 0,403\%$



Száraz térfogatsűrűség: $\rho_d = 0,64 \text{ g/cm}^3$
Telített térfogatsűrűség: $\rho_t = 1,37 \text{ g/cm}^3$
Anyagsűrűség: $\rho_s = 2,41 \text{ g/cm}^3$
Hézagtényező: $e = 2,79$
Hézagterfogat: $n = 73,6\%$
 $s: 26,4\%$

III. Melléklet. Végeselemes számítás

Talajmodellek

Mohr-Coulomb - 1-es jelű pernyezagy

General Parameters Interfaces

Material Set

Identification: 1-es jelű pernyezagy

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 14,900 kN/m³

γ_{sat} : 15,500 kN/m³

Permeability

k_x : 0,010 m/day

k_y : 0,010 m/day

Comments

Advanced...

Stiffness

E_{ref} : 2,749E+04 kN/m²

ν (nu): 0,300

Strength

c_{ref} : 141,000 kN/m²

ϕ (phi): 36,000 °

ψ (psi): 0,000 °

Alternatives

G_{ref} : 1,057E+04 kN/m²

E_{oed} : 3,700E+04 kN/m²

Advanced...

Next Ok Cancel Help

III.1. ábra. 1-es jelű pernyezagy talajmodellje

Mohr-Coulomb - 2-es jelű pernyezagy

General Parameters Interfaces

Material Set

Identification: 2-es jelű pernyezagy

Material model: Mohr-Coulomb

Material type: Drained

General properties

γ_{unsat} : 13,900 kN/m³

γ_{sat} : 14,100 kN/m³

Permeability

k_x : 0,010 m/day

k_y : 0,010 m/day

Comments

Advanced...

Stiffness

E_{ref} : 4457,000 kN/m²

ν (nu): 0,300

Strength

c_{ref} : 54,000 kN/m²

ϕ (phi): 26,000 °

ψ (psi): 0,000 °

Alternatives

G_{ref} : 1714,286 kN/m²

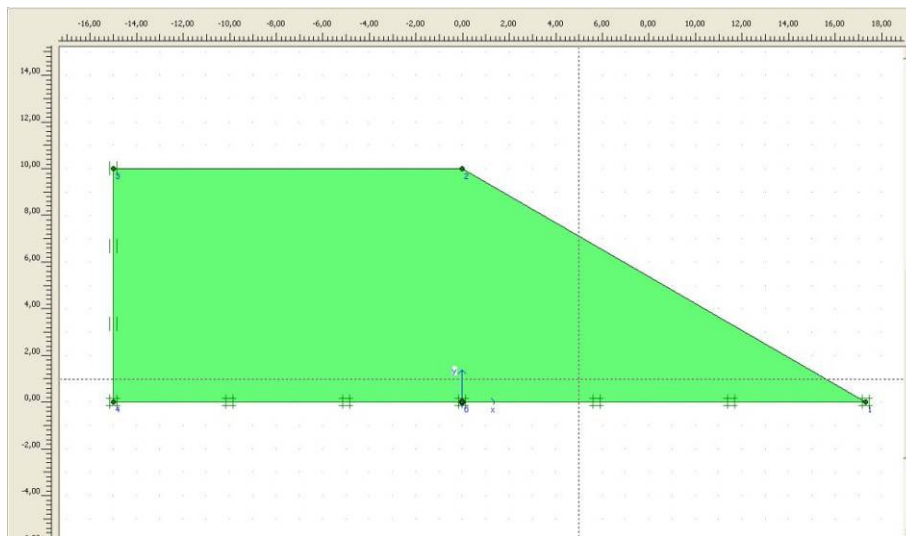
E_{oed} : 6000,000 kN/m²

Advanced...

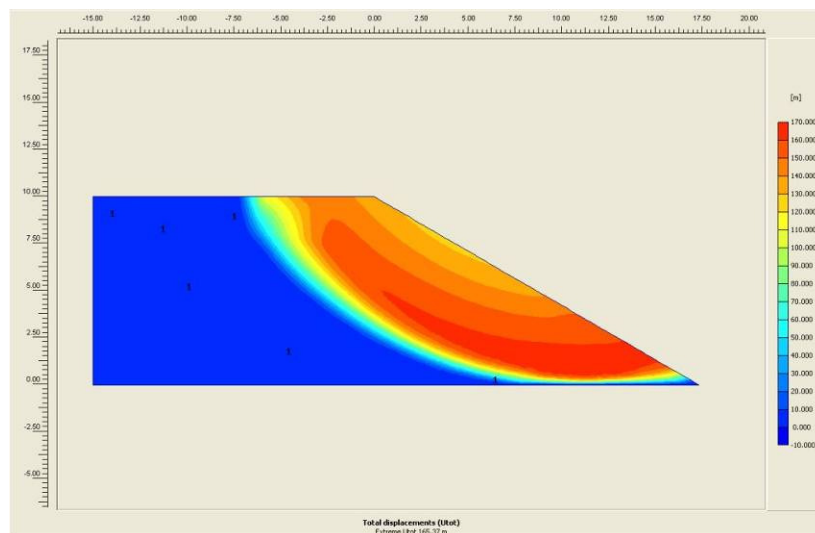
Next Ok Cancel Help

III.2. ábra. 2-es jelű pernyezagy talajmodellje

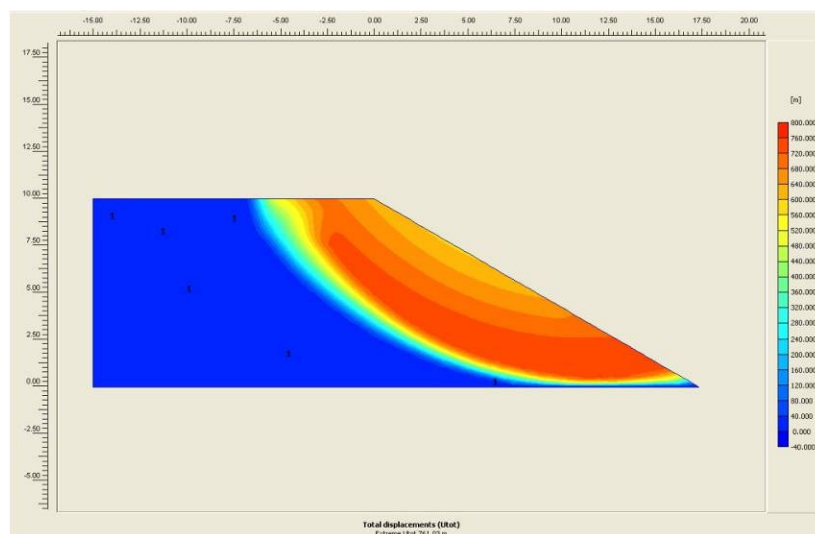
10 m magas – 30°-os rézsú



III.3. ábra. Geometria

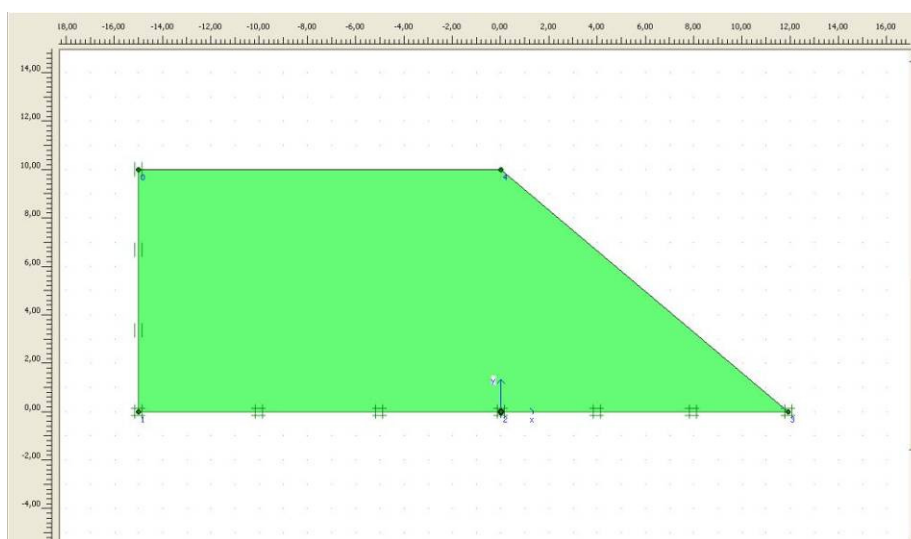


III.4. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 8,67 (1-es jelű pernyezagy)

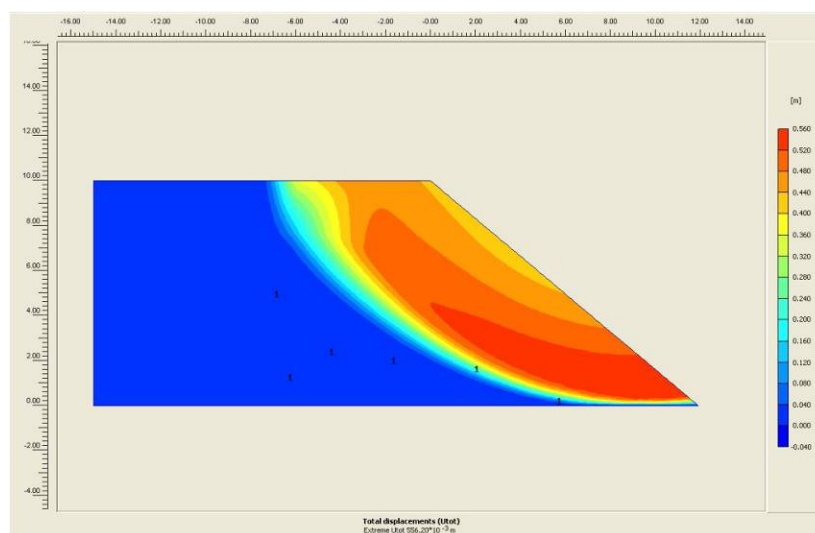


III.5. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 4,18 (2-es jelű pernyezagy)

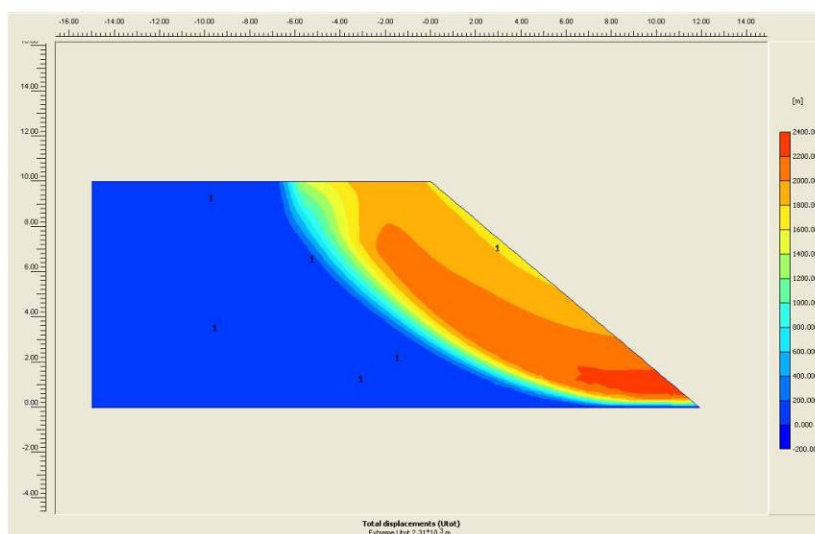
10 m magas – 40°-os rézsú



III.6. ábra. Geometria

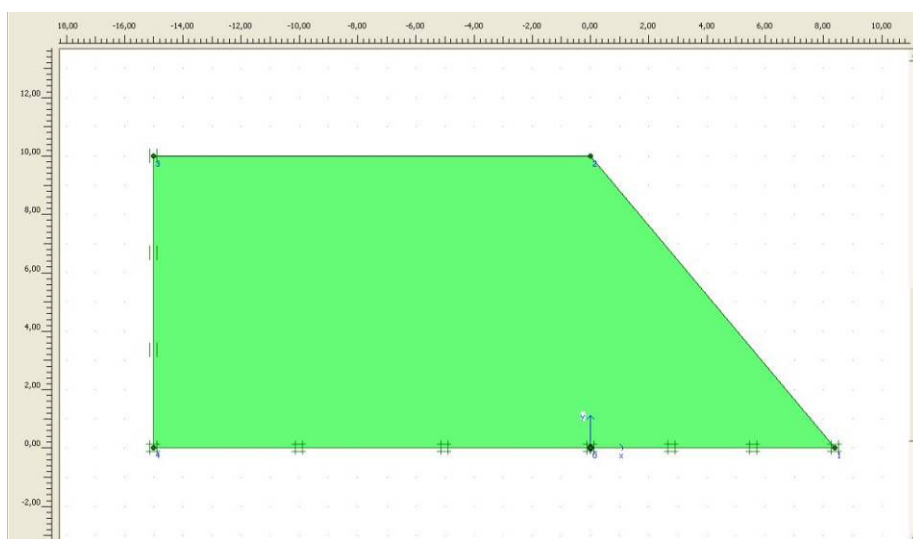


III.7. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 7,45 (1-es jelű pernyezagy)

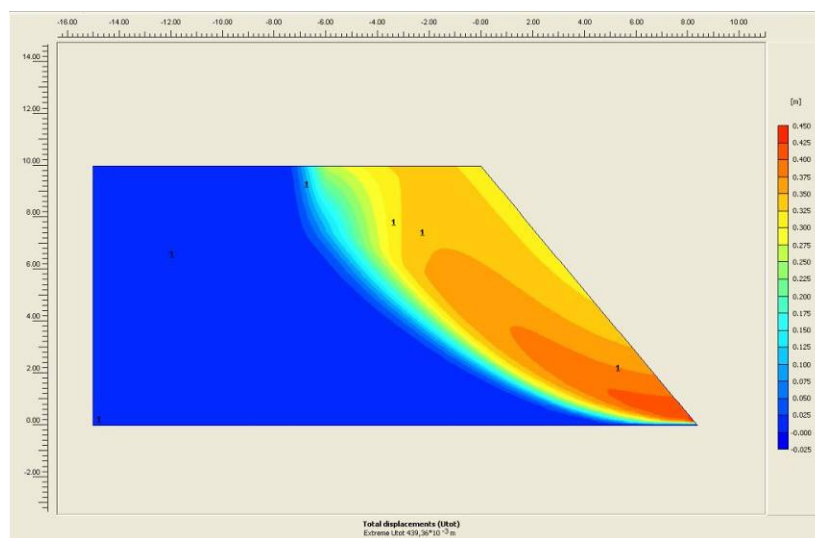


III.8. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 3,47 (2-es jelű pernyezagy)

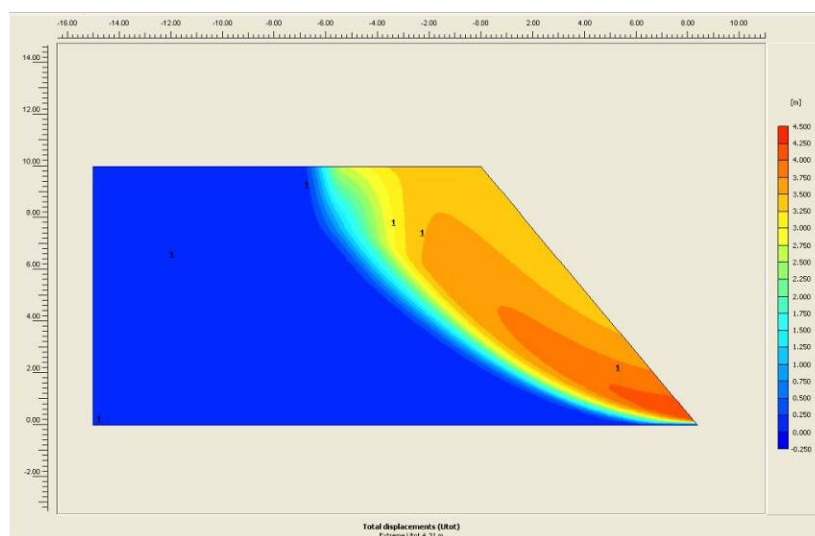
10 m magas – 50°-os rézsú



III.9. ábra. Geometria



III.10. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 6,43 (1-es jelű pernyezagy)

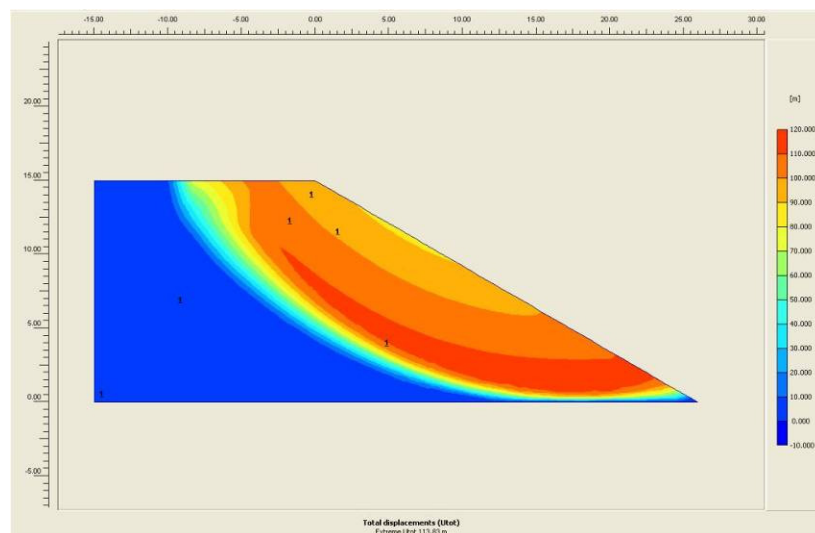


III.11. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 2,97 (2-es jelű pernyezagy)

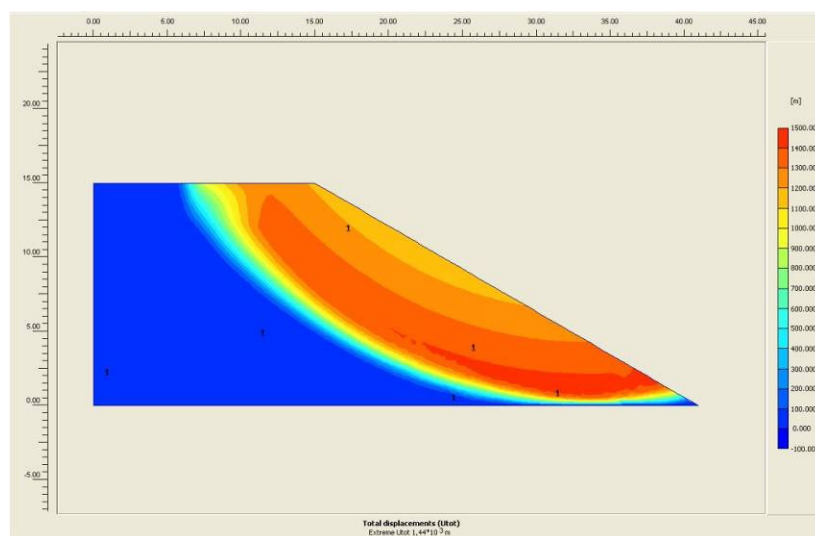
15 m magas – 30°-os rézsú



III.12. ábra. Geometria

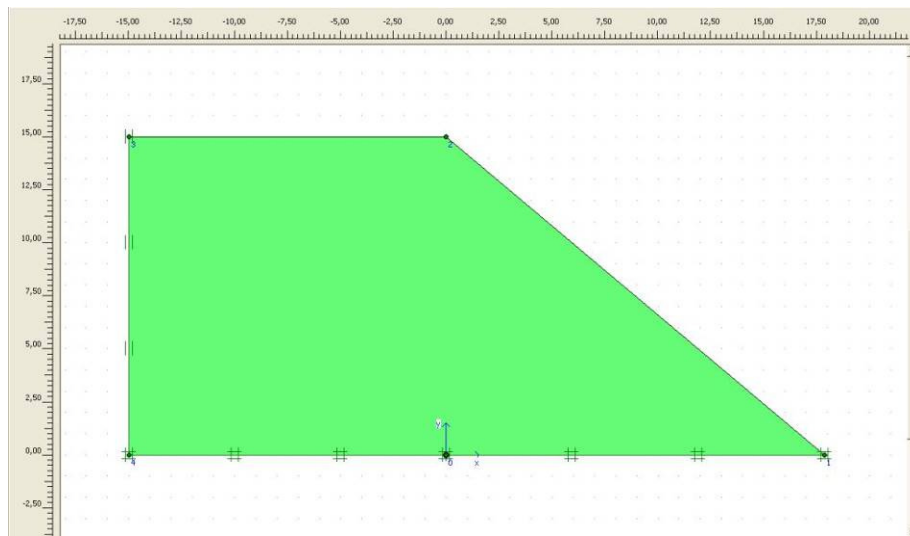


III.13. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 6,32 (1-es jelű pernyezagy)

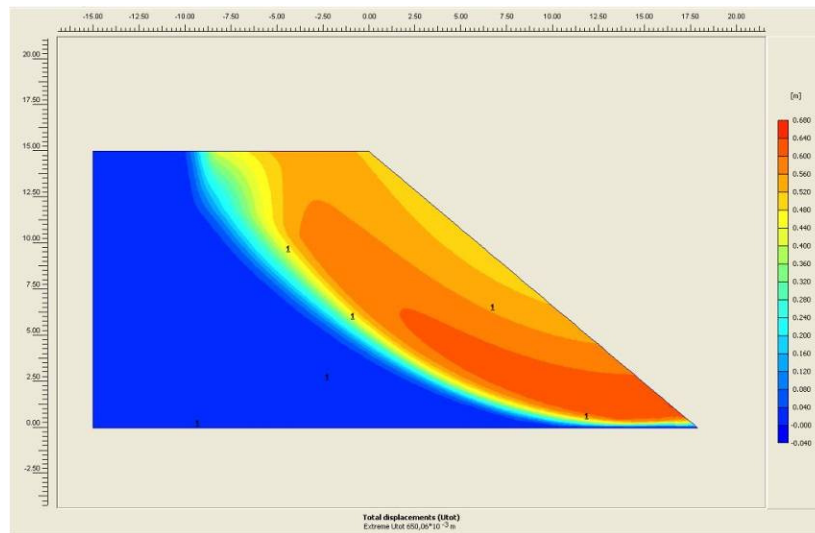


III.14. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 3,19 (2-es jelű pernyezagy)

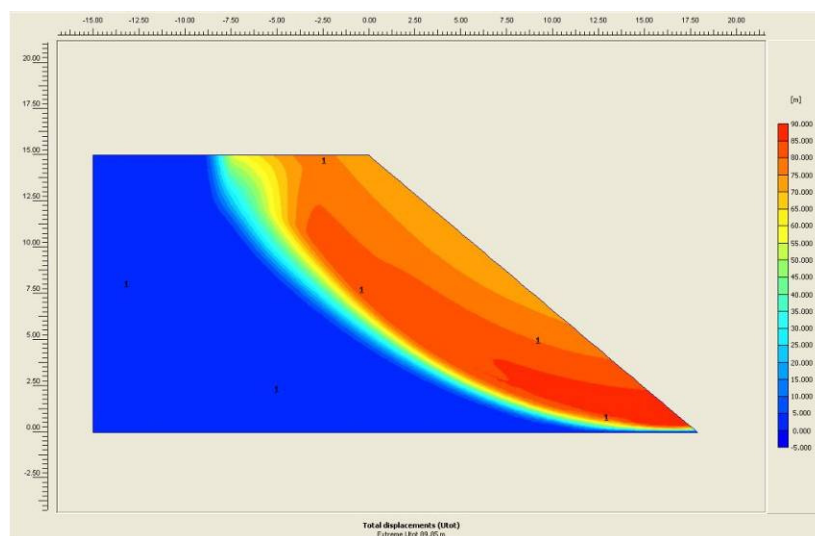
15 m magas – 40°-os rézsú



III.15. ábra. Geometria

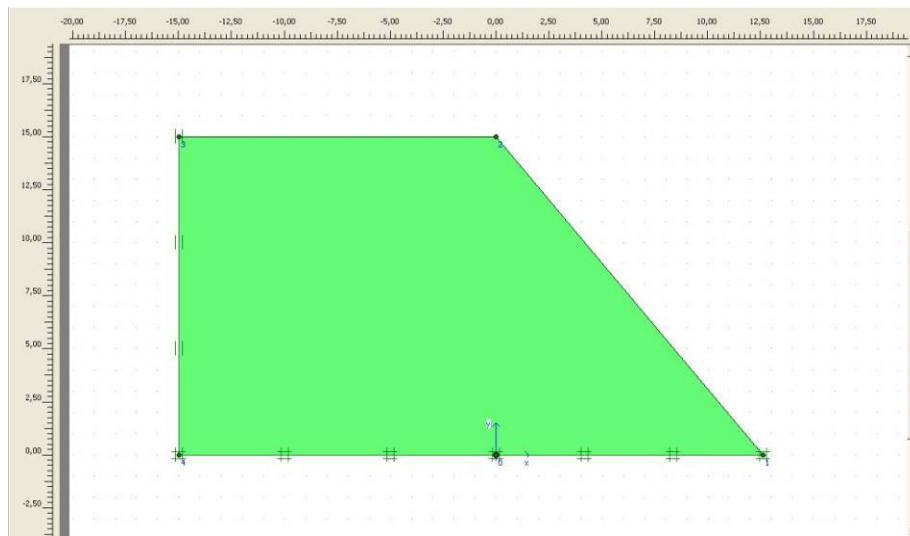


III.16. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 5,47 (1-es jelű pernyezagy)

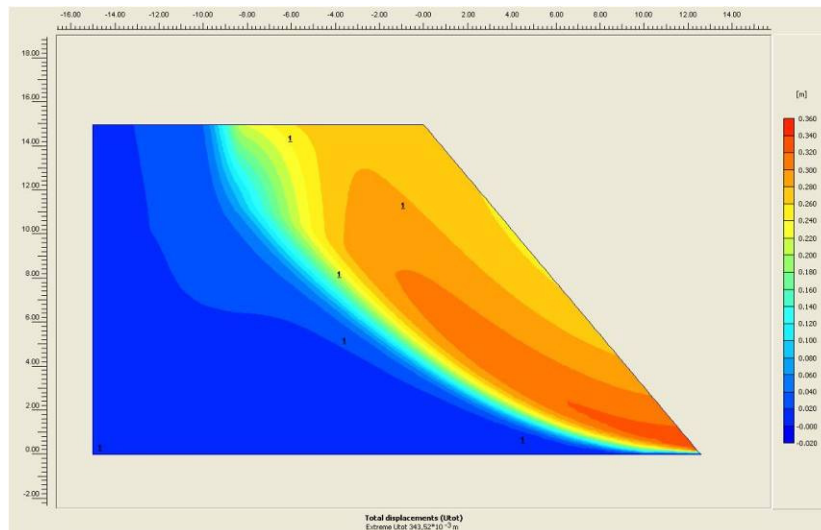


III.17. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 2,62 (2-es jelű pernyezagy)

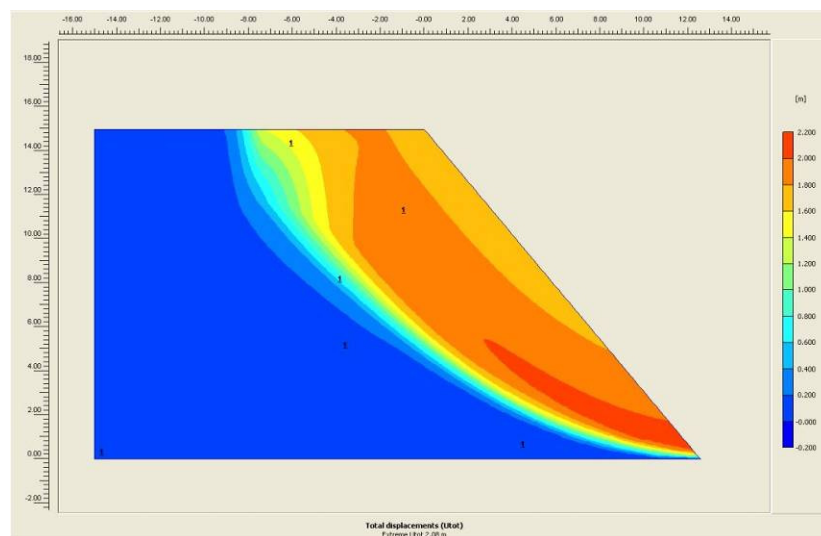
15 m magas – 50°-os rézsú



III.18. ábra. Geometria



III.19. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 4,70 (1-es jelű pernyezagy)



III.20. ábra. Csúszólap, biztonsági tényező: 2,24 (2-es jelű pernyezagy)