



MŰEGYETEM 1782

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
Építőmérnöki kar

**TDK**

(Tudományos Diákköri Konferencia 2014)

**Geotechnikai Tanszék**

**Talaj- pernye keverékek vizsgálata**

*2014/2015 Őszi félév*

*Készítette: Nagy Roland*

*Kelt: 2014. augusztus*



*Nagy Roland, 2014*  
*Építőmérnök (MSc) hallgató*

*A dolgozat 59 db számozott oldalt és 10 db mellékletet tartalmaz.*

**Tanszék elérhetősége:**

***Cím:***

*1111 Budapest, Műegyetem rkp. 1.  
„K” Épület magasföldszint 10.  
Geotechnikai Tanszék*

*Honlap: <http://www.gtt.bme.hu>*

**Tanszéki konzulensek:**

*Dr. Nagy László, Egyetemi docens*

*E-mail cím: [nagy.laszlo@epito.bme.hu](mailto:nagy.laszlo@epito.bme.hu)*

*Nagy Gábor, doktorandusz*

*E-mail cím: [nagy.gabor@epito.bme.hu](mailto:nagy.gabor@epito.bme.hu)*

**Készítette:**

***Nagy Roland***

*E-mail cím: [nagy.roland006@gmail.com](mailto:nagy.roland006@gmail.com)*

Neptun-kód: WW2UE5



*Nagy Roland*

## ***Talaj- pernye keverékek vizsgálata***

### **ÖSSZEFOGLALÓ**

TDK dolgozatom alapja az előző félévben készített diplomamunkám, melynek témája agyag - pernye keverékek vizsgálata volt. A nagy darabszámú próbatesteket és laboratóriumi vizsgálatokat igénylő kutatás befejezésére diplomafélévemben már nem kerülhetett sor az idő rövidege miatt. Ekkor határoztam el, hogy a kutatást mindenképpen szeretném teljesebbé, tenni azzal, hogy a vizsgálati tartományt szinte teljesen lefedje a pontos eredmények által kapott felület. Nyáron konzulenseim segítségével kiválasztottuk az újabb vizsgálandó pontok helyeit, melyek szorosán kapcsolódtak a már elkészült kutatáshoz. Ennek megfelelően a már mért 400 próbatesten túl 135 újabbat készítettem annak reményében, hogy az általuk biztosított eredmények igazolják korábbi feltevéseinket.

A talaj stabilizációjához felhasznált kötőanyag kohósalak-pernye alapú volt, mely hasonló a CEM III hidraulikus kohósalak cementhez. A kutatásból nyert adatok egy árvízvédelmi gátban létesülő résfal összetevőinek meghatározásához szolgálnak iránymutatással, ahol nagyon fontos az áteresztőképességi együttható. Fő célként tűztük ki, hogy megtaláljam a kritériumoknak leginkább megfelelő és leghasznosabb felhasználást lehetővé tevő keveréket. Ennek megfelelően közel 550 próbatestet készítettem, fokozatosan csökkentve a kötőanyag mennyiségének adagolását. Változtattam továbbá a másik két fázis, azaz a víz- és a talaj mennyiségét is. A megszilárdult próbatesteken minden esetben mértem az áteresztőképesség és a nyomószilárdság értékét, utóbbit 7 és 28 napos korban is. A próbatestek készítése közben a különböző arányú keverékek területét is mértem. Az eredményeket a tökéletesebb szemléltetésként 3D-s diagramokon is ábrázoltam, melyekről könnyen leolvashatóak az optimális keverék összetevőire szükséges adatok.

Diplomafélévem végén már látszódtott, hogy a vizsgált tartomány azon része fog kiemelt jelentőséggel bírni, ahol relatívan kevés kötőanyag felhasználással biztosíthatóak a kritériumok. Azonban a kutatás elején nem álltak rendelkezésre szakirodalmi adatok, mely alapján lehetőség lett volna a javított talaj paramétereinek felvételére. Részben azért, mert a legtöbb esetben kötött talajokat mésszel, nem pedig pernye alapú kötőanyaggal stabilizálnak. Az első sorozat próbaestjeinek laboratóriumi eredményei rávilágítottak a helyes irányra, így egy újabb sorozatot gyártottam le. Azonban még ez a receptúra sem váltotta be teljesen a hozzá fűzött reményeket, ezért, hogy átfogó képet kaphassak az egész kutatásról egy harmadik sorozatot is készítettem. Erre már csak TDK keretein belül maradt idő, hiszen egy vizsgálati periódus minimum 28 nap volt. Az összesített eredmények alapján már biztonsággal állítható, hogy a vizsgálati tartomány lekorlátolható határokkal rendelkezik, valamint egyértelműen mutatja az áteresztőképesség, nyomószilárdság, összenyomódás változásának irányát. Mindez az újonnan kapott eredményeknek köszönhető, hiszen a 3D-s diagram be lett sűrítve. Így már csak kis mértékben szükséges interpolálni, ami csökkenti a hiba lehetőségét, ezáltal megbízhatóbb felhasználást nyújt.

Feladatom a laboratóriumi munka és annak eredményeinek értékelésén túl kiterjedt irodalomkutatásra is. Ennek során rá kellett mutatnom a különböző módszerekre és szerkezeti megoldásokra, melyekkel vízzáró szerkezetek megoldhatóak, kiemelt figyelmet fordítva az árvízvédelmi gátak kivitelezésénél felmerülő kérdésekre. Foglalkoztam továbbá a talajjavítás további lehetséges módjaival, az árvízvédelmi gátak tönkremeneteli lehetőségeivel és anyagfelhasználásával. Végül levonom munkámból a következtetéseket, értékelem mit, vagy melyik munkafázist lehetett volna másként kivitelezni.



*Roland Nagy*

## ***Investigation of soil- fly ash mashes***

### **ABSTRACT**

My TDK dissertation is based on my Bachelor thesis, that I wrote in my previous semester. At that time I researched in a laboratory, the theme of which was examination of mashes clay and binder. Unfortunately, I could not finish the research because of the short time and the high number of samples, that I had to examine. At this time I decided, I would like to make my research to a better stage. I hoped, that the test range has almost covered by the surface, which comes from the exact results. During summer I choosed with my consultants new items. They were very connected to research, which I had already done before. I wanted to verify our previous supposition, therefore I made plus 135 samples. (I had examined 400 samples before.)

The binder, that I used for the stabilization, based on slag and fly ash, is similar to CEM III hydraulic slag cement. The main aim with the colleagues of Department of Geotechnics in Budapest University of Technology and Economics and my external consultant, was to find the mash, which is the mostly appropriate for the criterions and also allows the most useful utilization. The research was also necessary, because they would like to use this stabilized soil mash in a dike as diaphragm wall. In this case coefficient of permeability is very important. Accordingly, I made nearly 550 soil samples, gradually reducing the dosage quantity of binder. Moreover, I changed the other two phase, namely quantities of soil and water. All of the cases I measured coefficient of permeability and uniaxial strenght at the mashes too. These samples were investigated at 7 and also at 28 days of ages. During making samples, I also measured the flow on different kind of mashes. After all, I can conclude from results for the energy, which is need and degree of workability. These standpoints are important at the implementation. The results were illustrated in 3D diagrams because of best illustration. These shows the necessary datas for the optimum component of mashes.

At the end of my previous semester we just realized, which parts are important of the 3D diagram. These parts of the diagram have special high priority, because there we can provides low dosage quantity of binder. At the beginning of the research I didn't have the chance to use the parameters of improved soil. Partly because in most cases cohesive soils, like clays with high plasticity, are satibilized earlier with lime. I worked with a rarerly used binder called fly ash for the intervention. The first series's samples pointed the right direction, therefore I made a new series. However, this recipe didn't achieve it's expectations, so I made a final, third series. For this, I have only time within a TDK, because a period of series were 28 days long. Overall, I can say, that the test range has border, moreover all of results show directions of alteration. (coefficient of permeability, uniaxial strenght, flow, compression) All of these based on the new exact results. Now we dont't have to interpolate, which reduces the possibility of error and make me more reliable usage.

Moreover, my task was also expanded to the concerning, available literature, beside laboratory work and the evaluation of it's results. Meanwhile I had to explore different kinds of methods and structural solutions which solve the problem of watertight structure. I gave special attention to the implementation of the dikes, and to some problems which can arise. I deal with all the possible methods of the soil stabilization, failure options of dams and substance usage. Finally, I make some deduction from my task, appreciate which session of work should have done otherwise.



# **TARTALOMJEGYZÉK**

## **- Talaj- Pernye keverékek vizsgálata -**

<b>I. Bevezetés</b> .....	<b>1</b>
I.1. TDK ismertetése.....	1
<b>II. Alkalmazott technológiák</b> .....	<b>3</b>
II.1. Vízáró munkatérhatárolás kialakítási lehetőségei és építési módszerei.....	3
II.2. Alkalmazási lehetőségek a technológiák függvényében.....	5
II.3. Talajjavítás módszerei .....	6
<b>III. Felhasználható anyagok</b> .....	<b>12</b>
III.1. Gyakorlatban alkalmazott vízáró anyagok .....	12
III.2. Talajtípusok és kötőanyagok kombinálása .....	14
<b>IV. Kapcsolódó laborvizsgálatok</b> .....	<b>15</b>
IV.1. Áteresztőképességi együtthatóról általában .....	15
IV.2. Anyagok víz-áteresztőképességének mérése.....	16
IV.2.1. Laboratóriumi vizsgálatok .....	16
IV.2.2. Összegzés.....	19
IV.3. Egyirányú nyomószilárdság, konzisztencia, bedolgozhatóság mérése .....	19
IV.3.1. Egyirányú nyomószilárdság vizsgálata .....	20
IV.3.2. Konzisztencia mérése .....	20
<b>V. Mérési eredményeim</b> .....	<b>22</b>
V.1. Elvégzett kutatás ismertetése .....	22
V.2. Vizsgálatokhoz felhasznált anyagok ismertetése.....	23
V.2.1. Kötőanyag paramétereinek jellemzői .....	23
V.2.2. Talaj paramétereinek jellemzői.....	24
V.3. Eredmények bemutatása .....	26
V.4. Elvégzett laboratóriumi vizsgálatok .....	38
V.4.1. Áteresztőképességi együttható .....	38
V.4.2. Egyirányú nyomószilárdság mérése .....	43
V.4.3. Egyéb laboratóriumi vizsgálatok .....	52
<b>VI. Összefoglalás</b> .....	<b>56</b>
VI.1. Konklúzió .....	56
<b>VII. Köszönetnyilvánítás</b> .....	-
<b>VIII. Felhasznált irodalom</b> .....	-
<b>IX. Mellékletek</b> .....	-



## **I. Bevezetés**

### **KULCSSZAVAK**

*Talajjavítás, Réstfal, Cölöpfal, Vízáró falak, Talajkeverés, Pernye, Árvízvédelmi gátak, Áteresztőképességi együttható, Laboratóriumi vizsgálatok, Egyirányú nyomószilárdság, Konzisztencia, Víztartalom, Plasztikus- és Konzisztencia index, Zsugorodás*

### **KEYWORDS**

*Soil improving, Slurry wall, Diaphragm wall, Watertight walls, Soil mixing, Fly ash, Dikes from soils, Coefficient of permeability, Laboratory tests, Uniaxial strength, Consistency, Water content, Plasticity- and Liquidity index, Shrinkage*

### **I.1 TDK ismertetése**

TDK dolgozatom a BSc-s diplomamunkámban végzett kutatás kiterjesztése. Az akkori félévben az idő hiánya miatt már nem tudtam a kutatást lezárni, amire akkor hivatkoztam is. További vizsgálatokat, illetve a vizsgálatok bizonyos módosítását javasoltam egy esetleges későbbi kutatáshoz, a már rendelkezésre álló tapasztalattal a hátam mögött. Így a mostani munkámmal válik a kutatás teljessé. Jelen dolgozatomban csak röviden, a diplomamunkámban megtalálható főbb témakörökből, irodalomkutatásból csak a legfontosabbakat emelem ki. A fő hangsúlyt az új mérési eredményeimre helyeztem.

Feladatom az anyagok különféle keverési arányának vizsgálata volt. Munkám során talaj- pernye különböző arányú keverékeit vizsgáltam a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai tanszékének laboratóriumában. Témám szorosan kapcsolódik a kötött talaj paramétereinek meghatározásához, azonban feladatom nem egyszerűen egy adott talaj elemzése, hanem egy három fázisból álló keverék vizsgálata volt. A több mint öt hónapos munkám eredményeképpen mindenképpen szerettem volna egy, a gyakorlatban alkalmazható technológiával, könnyen és gazdaságosan kivitelezhető, talajkeveréket előállítani. A kutatás során több szempont alapján a legmegfelelőbbnek megítélt talaj-pernye keverék fontos paramétereire jutottam hozzá, ami alapján tervezéshez elengedhetlen adatokat lehet biztosítani egy esetleges későbbi felhasználóhoz. A kísérletek eredményei megmutatták, hogy miként változnak a keverékek víz-áteresztőképességi, illetve nyomószilárdsági mutatói a víz/kötőanyag és a kötőanyag adagolás függvényében. Felület diagramon ábrázolva az értékeket könnyen ki lehet választani a megfelelő arányú keveréket. Itt nem mellékes szempont volt a gazdaságosság, hiszen kivitelezés során a talajhoz keverik a kötőanyagot, aminek rendelési, vételi, szállítási, valamint helyszíni munkálatokkal kapcsolatos költségei mind a kivitelező vállalatot terhelik. Ennek megfelelően a próbatetek receptúráit a fenti szempontok alapján kell figyelembe venni. A diplomafélévem során felhasznált anyagok leírását, tulajdonságainak jellemzését, kapcsolódó laborvizsgálatok bemutatását, illetve azok eredményeinek összegzését és kiértékelését későbbi fejezetekben írom le.

Ahhoz, hogy teljes egészében átlássam, megértsem és következtetéseket tudjak levonni a témából, elengedhetetlen volt az eddigi felsőfokú tanulmányaim ismeretanyagának mennél teljesebb elsajátításán túl az irodalomkutatás. Munkám ezen részét főként diplomafélévemben végeztem, mely során fel kellett tárnom a különböző módszereket és szerkezeti megoldásokat, melyekkel vízzáró szerkezetek megoldhatóak, kiemelt figyelmet fordítva az árvízvédelmi gátak kivitelezésénél felmerülő kérdésekre. Ezt a témakört TDK munkámban már nem tárgyalom.



Nagyobb hangsúlyt fordítottam a talajjavítás témakörére, hiszen ez az a módszer mellyel döntően befolyásolni tudjuk a talajok paramétereit. Az utóbbi évtizedekben azon eljárások fejlődése volt a legmarkánsabb, melyek révén képesek vagyunk véglegesen vagy ideiglenesen megjavítani a talajok tulajdonságait, általánosabban a talajviszonyokat. Eddig szükség volt valamilyen külső, mesterséges, a talajkörnyeztbe nem oda illő anyag bevonását eszközölni. Egyszerű példa lehet a különböző technológiával, eljárással kialakított szigetelő lemezek, vagy egy vasbeton anyagú szádfal. Ez új lehetőségeket teremtett, új gondolkodásmódot tett lehetővé. A talajjavítási technológiákkal szinte minden feladat megoldható, az optimum a talajjavítás és a javított talajhoz kapcsolódó szerkezet együttesében kereshető. A talajjavítási technológiák sokszor nehezen határolhatók el egyéb mélyépítési műveletektől. Újabban például ide soroljuk a víztelenítési technológiákat is, egy talajfagyasztásos aknamélyítés lehet hőkezeléses talajjavítási technológiának is tekinteni, de speciális bányászati feladatként is ismert az eljárás. Hasonló a helyzet egy kavicscölöppel, amit különböző céllal több területen is alkalmazhatunk/alkalmazunk.

A gyakorlatban felhasznált anyagok és összetételek ismertetése alapján meghatároztam azokat az irányokat, amelyek a feladat végrehajtásához szükségesek. Foglalkoztam a különböző keverékek beépítési módszereivel, a kutatás tervezéséhez kapcsolódó laboratóriumi vizsgálatok leírásával és azok szerepével. Laboratóriumi mérési eredményeim alapján a *Mérési eredményeim* című fejezetben összegzem azokat a tapasztalatokat, melyek már a gyakorlatban alkalmazott megoldásokkal összevetve hasznos beépítési keveréket adnak. A kutatás során elsődleges szempont volt, hogy minél kisebb víz-áteresztőképességű mintát tudjak előállítani. Másodlagos igény volt a talajkeverék nyomószilárdsága, és a korábban részletezett gazdaságossági szempont. A sikeresen előállított vízzáró talajkeveréket így vízzáró munkatérhatárolási feladatoknál, illetve kötőanyaggal történő talajjavítások esetében is alkalmazni tudják a későbbiekben, hiszen a tervezéshez szükséges bemenő adatok már biztosíthatóak. Fontos azonban, hogy mindezt csak egy adott talajhoz lett kikísérletezve, más plaszticitású talajok esetében a később részletezett tulajdonságok változnának.

Az itt ismertetett adatokat fokozott óvatossággal használhatjuk, mert az eredmények csak laboratóriumban mértek. Az építőmérnöki gyakorlatban tapasztaltak alapján valószínűsíthető, hogy eltérés jelentkezne egy megvalósult szerkezet helyszíni vizsgálatánál kapott adatok és a laboreredmények között. Ezért elengedhetetlen, hogy egy már kivitelezett szerkezet esetében helyszíni mérésekkel igazoljuk azt, hogy a tervezés során felvett értékek kellő mértékben fedik a valóságot. Egyszerű példa lehet az utóbbi mondatra a visszaduzzasztás mértékének igazolása egy árvízvédelmi gát esetében: az általam meghatározott szivárgási tényező ismeretében megtervezett vízzáró fal nem, vagy nem a kívánt hatás szerint látja el funkcióját. Ennek oka lehet a talajkörnyezet változatossága, tervezési hiba/figyelmetlenség (szivárgás a vízzáró falat alulról megkerülve alakul ki, azaz elégtelenül határozzák meg a szerkezet vízzáró talajrétegbe történő befogását), vagy a kivitelezés gondatlansága.



## II. Alkalmazott technológiák

### **II.1 Vízáró munkatérhatárolás kialakítási lehetőségei és építési módszerei**

A fejezet ezen része a vízáró falak két fő típusával foglalkozik. A kutatás során előállított keveréket is hasonló formában szeretnék felhasználni, egy árvízvédelmi gátban, vízáró résfal formájában. A téma részletes kifejtését, a vízáró munkatérhatárolás különféle kialakítási- és építési módszerei diplomamunkám taglalja.

#### Vízáró falak

A vízáró falak két fő típusa:

- ✓ hagyományos kialakítású résfal
- ✓ keskeny résfal (függönyfal). - Gátak kialakítási lehetőségeinél alkalmazott módszer.

#### Hagyományos kialakítású vízáró résfalak

Acélbetéttel, vagy betét nélkül készült beton fal, amelyet az altalajba mélyített résben alakítanak ki folyadékmegtámasztás védelmében. A betont töltőcsövön keresztül juttatják a megnyitott résbe alulról felfelé (általában a víz alatti betonozás előírásai szerint). A külön egységenként bebetonozott szerkezetek (rés tábla) között a vízáró szakaszoló-elemek (szakaszolócsi, szakaszoló panel-hézagzáró szalaggal) biztosítják.

Ezen típusú vízáró falak kialakítása hasonló a beton/vasbeton résfalakéval, a különbség a rés kitöltő anyagban van. Tekintettel arra, hogy itt a cél a vízáró és a szennyezőanyag visszatartás, a rés kitöltéshez egy szilárduló-képes, agyagásványban (nagy Na-montmorillonit tartalmú bentonit) gazdag, duzzadó képes anyagot használnak. A kialakítása lehet egyfázisú és kétfázisú.



**2.1 fénykép:** Résfalas munkatérhatárolás  
[BAUER Magyarország fényképe webről]

*Alkalmazásának egyik fő indoka:*

A belvárosok területínsége, az építési igények növekedése (maximális terület-kihasználás), továbbá a hatósági előírások szigorodása miatt a nagy mélységű térszín alatti terek kialakítása elengedhetlenné vált a városi környezetben.





### Építés módszere:

Helyszínen készített beton résfal acélbetéttel, vagy a nélkül: A betont töltőcsövön keresztül juttatják megtámasztó folyadékkal stabilizált falú részbe. (víz alatti betonozás szabályai szerint) A következőkben az építési módszerhez tartozó legfontosabb fogalmakat írom le, melyeket az építés során a szükséges használni. (Farkas, 1994)

- ✓ Réstábla: Egy egységként betonozott résfal szakasz. Alaprajza általában egyenes, T-alakú, L-alakú, de speciális esetben lehet egyéb alakzat is.
- ✓ Résvezető gerenda: Kismélységű ideiglenes jellegű gerenda-pár a leendő résfal nyomvonalára mentén, amely vezeti a fejtőeszközt, és megtámasztja a gödör falát a támasztó folyadék, váltakozó szintjének környezetében.
- ✓ Betonozó cső: A megtámasztó folyadék szintje alá elhelyezendő beton bejuttatására szolgáló cső, a beton szétosztályozódásának és szennyeződésének megakadályozására.
- ✓ Támasztó folyadék: A rés kiemelésé közben a rés falának megtámasztására alkalmazott folyadék. Többnyire bentonit szuszpenzió, vagy önszilárduló résiszap.

Helyben betonozott résfal esetén, a támasztó folyadék védelmében készített résfal kivitelezési fázisainak alapvető sorrendje a következő: (Farkas, 1994)

- ✓ Munkaterület kialakítása
- ✓ Résvezető gerendapár elkészítése
- ✓ Föld kiemelés bentonit szuszpenzió védelme mellett. (résiszap keverése, földkiemelés-táblaméret, agyagfelszín ellenőrzése, szomszédos tábla szilárdulása, folyadék szökése)
- ✓ Rés kitisztítása, zagycsere. (csatlakozások kialakítása)
- ✓ Acélbetétek (armatúra) beépítése.
- ✓ Betonozás. (víz alatti betonozás szabályai, betonemelkedés)
- ✓ Réshatároló szerkezet (résvezető gerenda, vagy gerendapár) lefejtése, kiemelése.
- ✓ Visszabontás, azaz a zavart/szennyezett rész visszavésése.

### Függönyfal, (keskeny résfal)

A keskeny résfal előállításához a kívánt helyen I profilú acélgerendát vagy szárnyas végű csövet vibrálnak a talajba. A gerendához egy, a végén fűvókával ellátott csővezeték van erősítve. A megkívánt mélységet elérve a gerenda visszahúzásával egyidejűleg, nagy nyomással bepréselik a tömítőiszap szuszpenziót, ami a rendelkezésre álló teret kitölti. A tömítőiszap szuszpenzió bejuttatása történhet már a gerenda lejuttatása és kihúzása során is. A teljes kihúzás és térkitöltés után a tartó berendezés a következő helyre áll át, és megfelelő átfedéssel ismételtén lejuttatja a gerendát. Az előzőekben leírt műveletet ismételve összefüggő vízzáró fal alakítható ki.

Vízzáró keskeny résfal kialakítható az ún. jet-grouting technológiával is, amikor a rudazat visszahúzásakor azt nem forgatják, és így egymásba metsző lamellákból kialakítható a keskeny résfal.



## II.2 Alkalmazási lehetőségek a technológiák függvényében

*Ez a rész az előzőre épül, itt a korábban bemutatott kapcsolódó fő vízzáró szerkezetek gyakorlati alkalmazásaira mutatok példákat, illetve azok technológiai megoldások alkalmazásáról lesz szó. Kitérek röviden a technológia kiválasztásának okaira, gazdaságossági szempontjaira is.*

A mélyépítés alkalmazásának céljai:

- ✓ alapozás
- ✓ alap-megerősítés
- ✓ lehatárolás, földmegtámasztás
- ✓ ki- lehorgonyzás
- ✓ talajjavítás

Mélyépítés alkalmazás módjai:

- ✓ markolás
- ✓ fúrás
- ✓ lehajtás
- ✓ injektálás/talajhabosítás

Technológia kiválasztása függ: (Bohn, 2008)

A tervezett építmény, műtárgy funkciójától (térszín alatti terek kialakítása, különleges vízzárósi követelmények), adottságaitól (alaprajzi méret, mélységi viszonyok); munkakörnyezettől; geotechnikai és hidrológiai adottságoktól.

### Résfalak:

- ✓ nagy, illetve kis mélységű térszín alatti terek (foghíjtelkek, metróállomások) beépítése
- ✓ környezetvédelmi létesítmények építésénél (szennyvíztárolók lehatárolása)

A munkatérhatárolási módszerek közül a résfalas munkatérhatárolás a legkedvezőbb műszaki és gazdaságossági megoldást nyújthatja a kedvezőtlen, szűk területek (foghíjtelkek) beépítésére, kedvezőtlen altalajviszonyok és jellemzően igen magas talajvízállás esetén, tekintettel arra, hogy a résfal gyakorlatilag minden funkciója kihasználható válhat az építés során, hiszen: (Bohn, 2008)

- ✓ lehetővé teszi a körbezárt földtömeg kiemelését a szomszédos épületek állékonyságának veszélyeztetése nélkül,
- ✓ megkönnyíti a vízkizárást és a víztelenítést, mivel csak a bezárt víztömeget kell eltávolítani,
- ✓ kedvező teherbírási tulajdonsága miatt a határoló falak alaptesteként szolgálhat,
- ✓ a mélyszintek funkciójától függően egyúttal pincefalaként is használható,
- ✓ nagy mélységű térszín alatti terek kialakítását teszi lehetővé.

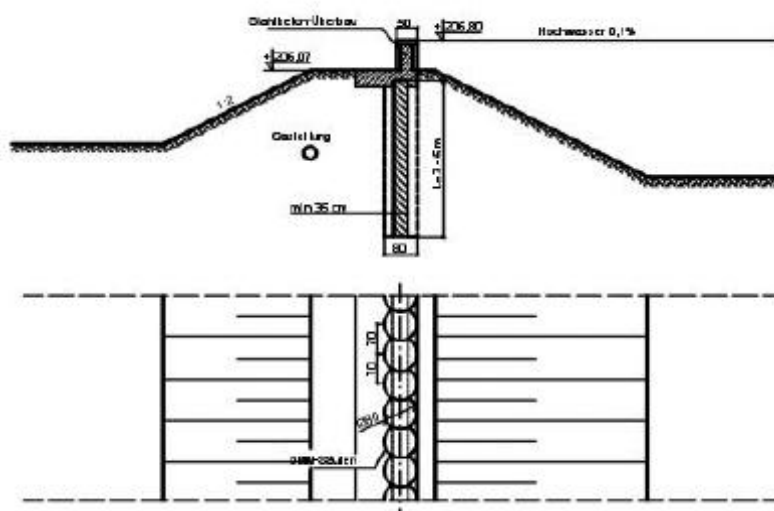
### Vízzáró tömítő falak (Bohn, 2008)

Az utóbbi években egyre növekednek a hulladéktároló- és hulladékkezelő helyeken keletkező, a szennyezőanyagoknak a talajba történő szivárgása által okozott, környezetvédelemmel kapcsolatos gondok. Az ipari tevékenység következtében és tárolótartályok szivárgása által is nagyon sok helyen következik be talajszennyezés. Lehetőség van ugyan a szennyezett talaj



megtisztítására (biológiai úton történő lebontás, égetés stb.) de a szennyezett talaj kezelése igen költséges művelet, ami a gazdaságossági szempontok miatt nem mindig kivitelezhető. A lepraktikusabb megoldásnak mutatkozik ilyen esetekben a szennyezett térség lezárása.

A résfalak alkalmazásának egy speciális, de az elmúlt két évtizedben rohamosan fejlődő területe a szennyezett területek körbezárása, izolálása. Sok esetben a szennyezett terület kármentesítésének, a szennyezés továbbterjedésének a leggazdaságosabb, a legkevésbé kockázatos megoldása a körbezárás. Alkalmazásának a feltétele, hogy gazdaságos, technológiailag kivitelezhető mélységben legyen egy olyan vízzáró réteg, amibe a résfal beköthető. A körbezárással és alsó bekötéssel gyakorlatilag egy önálló vízgazdálkodású tömböt hozunk létre. A vízzáró tömítőfalak másik jelentős alkalmazási területe a gátakon, töltéseken való átszivárgás megakadályozása. A két alkalmazás technológiájában nem tér egymástól, csupán a résfal anyagának megválasztásánál kell figyelembe venni, hogy a szennyezőanyagok hatással vannak a résfal anyagának a vízzáróságára, szennyezőanyag-visszatartó képességére (általában rontják azt), ezért a szennyezőanyagnak és a résfal anyagának kompatibilisnek (összeférhetőnek) kell lennie.



2.1 ábra: Gátakon történő átszivárgás megakadályozása  
[Békés Drén Kft biztosította]

### II.3 Talajjavítás módszerei

A talajjavítás és talajerősítés egyik fő célja az altalaj talajfizikai tulajdonságainak javítása. Ez alatt a talajszilárdság javítását, az összenyomhatóságának csökkentését, annak vízzáróságának javítását, valamint a felszínmozgások, illetve beszakadások elleni védelmét értjük. Röviden megválaszolom a talajjavítás fő kérdéseit, tervezési részletek szempontjait, vázolólok a tervezési folyamat menetét. Kitérek arra a módszerre, amivel az előállított keveréket a helyszínen esetlegesen a leghatékonyabban be lehet építeni.

A talaj szemcséinek összekötésével nagyobb kohéziót érhetünk el, továbbá növelni tudjuk a belső súrlódási szöveget a talaj tömörségének növelése révén és ezek által talaj teherbírását is. A szemcsék összekötésével nem csak a szilárdság javítható, hanem az összenyomhatóság is csökkenthető, hiszen ezzel a beavatkozással a talajban levő hézagok száma csökken. (kitöltés és tömörítés révén). Az utóbbi intézkedésekkel a vízzáróság is javítható, hiszen a víz a tömör talajszerkezeten lassabban tud átszivárogni, azaz csökkentjük a víz-áteresztőképességét a talajnak. A talajt érő terhelések következtében előálló alakváltozások (pl.: süllyedések)



csökkentését soroljuk még a talajjavítás fő céljai közé. Az elmozdulásokat meg kell előzni, illetve a már meg levő mozgásokat mérsékelni, kompenzálni kell. Ezekre az intézkedésekre jellemzően a műtárgyak (hidak) háttöltéseinél, valamint az útépitési földműveknél az időben elhúzódó süllyedéseknél (altalaj konszolidációja) kerül sor. A következőkben említésre kerülő technológiák bemutatják a kötőanyaggal, illetve kötőanyag nélküli talajjavítás lehetséges fő megoldásait, és elméleti, gyakorlati kivitelezési lehetőségeit.

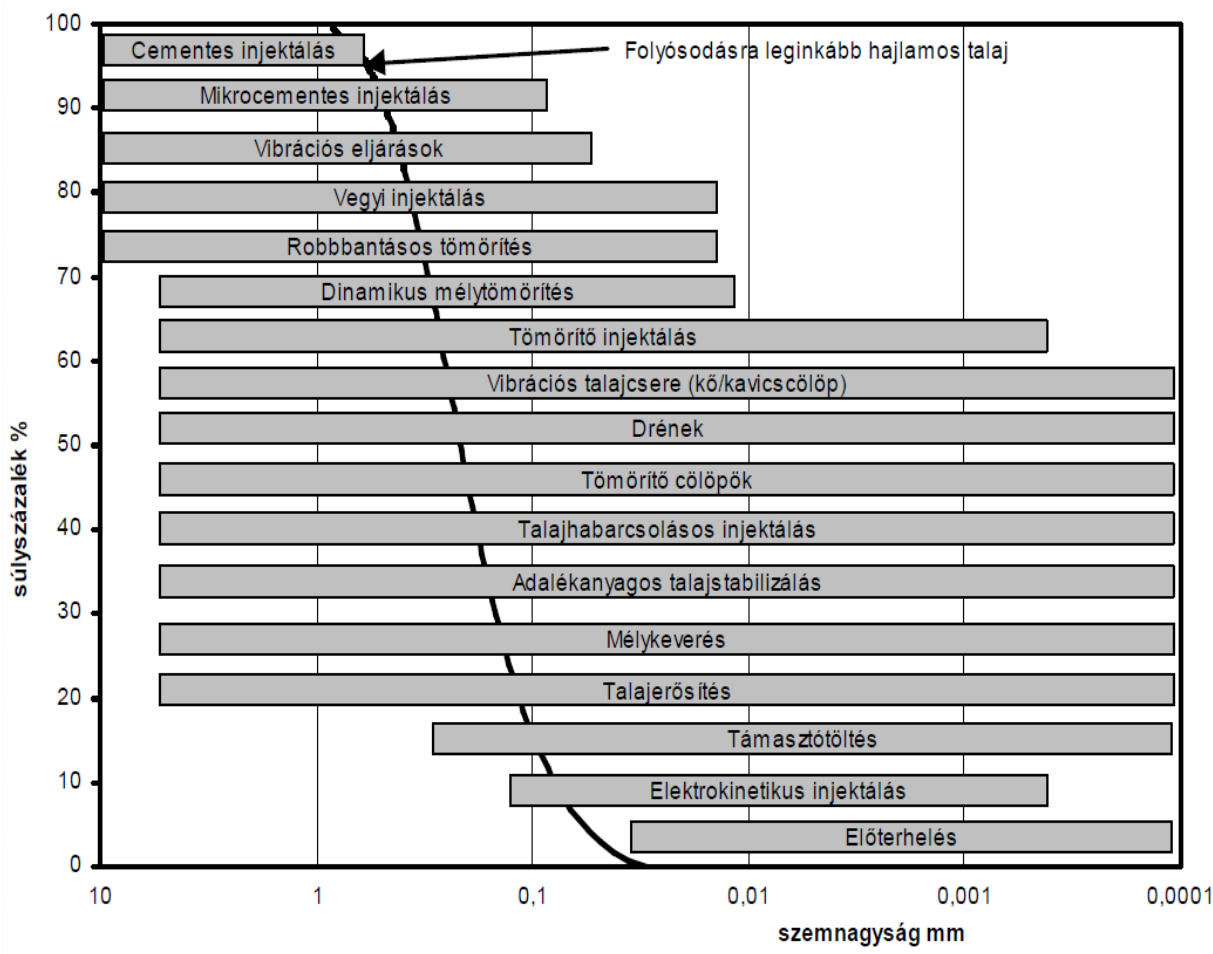
*A talajjavítás tervezésének fő kérdései az alábbiak:*

A problémát csak talajjavítással lehet-e megoldani, ha igen, akkor lehetséges-e a talajjavítás. Kérdés továbbá, hogy milyen mértékű javítás indokolt. Mérlegelnünk kell, hogy milyen eredményeket várunk a különböző módszerektől, illetve rá kell, hogy mutassunk mekkora a javítás térbeli kiterjedése, illetve milyen legyen a kezelt tartomány alakja. Ha ezeket a kérdéseket gondosan elemeztük és végrehajtottuk a talajjavítást belátásunk szerinti lehető legmegfelelőbbben - a fent leírt pontok alapján -, még szükséges ellenőriznünk a kezelés eredményességét is.

*Tervezési részletek, szempontok:*

- ✓ tervezési követelményeknek való megfelelés, célok feltérképezése
- ✓ helyszín adottságai
- ✓ térszín alatti körülmények
- ✓ építési ütemterv
- ✓ költségek és a lehetséges kivitelező

A talajjavítás kérdései közé soroljuk a megfelelő eljárás, módszer megfelelő kiválasztását is, hiszen ennek fényében tudjuk a következő lépéseket tervezni. A 2.2 ábrán az alkalmazható technológia látható a talaj szemnagyságának a függvényében. Szemcsés talajok esetében injektálások különböző módszerei, tömörítések, vibrációs eljárások jöhetnek szóba. Kötött talajoknál főként az előterhelés lehet hatásos módszer. A többi eljárást az ábra mutatja részletesen.



2.2 ábra: Talajjavítási eljárások a szemnagyság függvényében [Szepesházi, 2008]

### Mélykeverés (helyben keverés)

Hazánkban még ritkán alkalmazott talajjavítási, talajszilárdítási módszer, a magyar mélyépítési gyakorlatban az ezredforduló környékén jelent meg.

Az angol név (Mixed In Place, MIP) pontosan utal az eljárás lényegére, ami az alkalmazás helyszínén meglévő talaj összekeverése a bejuttatott kötőanyaggal/tömítőanyaggal. A keverés a megszilárdítandó talaj fúrása mellett történik, a fúróspirálok üreges belsején keresztüli kötőanyag-bevitellel, amelynek eredményeképpen a talaj fellazított hézagai megtelnek kötőanyaggal, a talaj szerkezete és összetétele megváltozik. A módszer eredménye a fúróegység alakját követő, szilárd talajréteg. A befecskenyelt kötőanyag- szuszpenzió mennyiségének egyenlőnek kell lennie a talajréteg pórustérfogatával. A tökéletes keverés, azaz a teljes homogenizálás elérése érdekében a fúrás három, egymáshoz közel lévő, de nem összekapcsolódó fúróspirállal kell elvégezni, amelyek közül bármelyik spirál forgatási iránya a fúrás közben tetszőlegesen megváltoztatható, és gépkezelő ezzel egyidejűleg függőleges irányú mozgatást, függőleges irányú keverést is végez, meg is emeli, majd le is süllyeszti a szánt a gémen. Így készül el az első, úgynevezett primer MIP-cölöp. A MIP kivitelezése szakaszos, az úgynevezett „dupla vándor-lépés” eljárási sorrendnek felel meg.

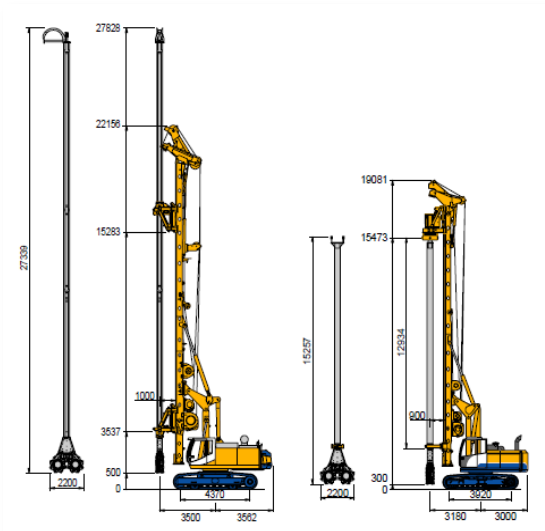
Ezek szerint első lépésnek a fúróspirált egy adott mélységig lefúrjuk a szuszpenzió folyamatos hozzáadása mellett. Ezután, kihasználva, hogy a fúróspirál mindkét irányba forgatható, fel- és leemelésekkel és emellett a forgásirány változtatásával történik a talaj és a kötőanyag összekeverése, homogenizálása. Végül ezzel az eljárással elkészülnek a cölöpök. A



cölöpök sorrendje pedig az, hogy az első primer cölöp megépítését követi a második primer cölöp, majd a kettő közé, bemetszéssel készül – azonos fúrési technológiával – az úgynevezett szekunder cölöp. Ezek után pedig már a két átkeverő táblát helyezzük. Az egyes fogások átfedésben lévő szakaszait, pedig ismételten megkeverjük. Ennek a folyamatnak a végén pedig kialakul a MIP-fal, amely összemetsző vízzáró fal.



2.2 fénykép: Hármas fúróspirálok



2.3 ábra: Kivitelezéshez használható gépek  
(itt marófejjel)

[Békés Drén Kft biztosította]

Mixed-in-place technológia költsége függ:

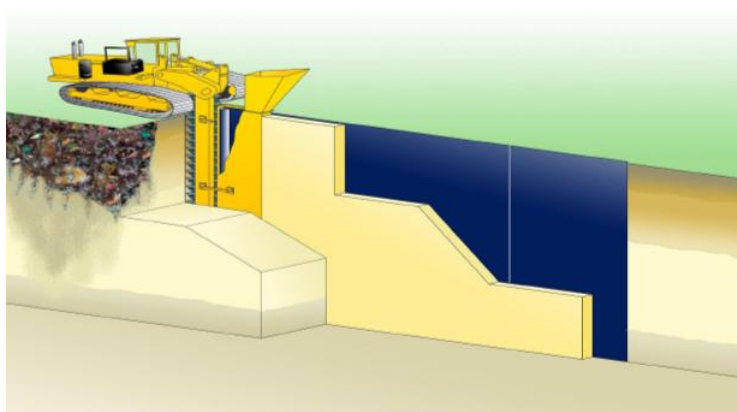
- Keverés energiaigényétől
- Kötőanyag típusától
- Kötőanyag mennyiségétől

A MIP cölöpözési eljárás előnyei között megemlíthető, hogy a technológia talajkiemelés nélkül történik, nem kell talajszállítással foglalkozni, a cölöpözés a hármas fúróspirálnak köszönhetően rendkívül gyorsan történik, összehasonlítva akár a résfalaz akár a hagyományos cölöpözési technológiákkal, a mobilis gépeknek köszönhetően széles körben felhasználható, készíthetők rendkívül jó vízzáróságú illetve jó szilárdságú falak is és az eljárás mindig alkalmazkodik a talajminőséghez, ezért gazdaságos.

Hátrányai között megemlíthető, hogy a jelenlegi gépekkel maximálisan 16,5 m mély cölöpfal készíthető, megjegyezve, hogy ez tulajdonképp növelhető nagyobb fúróspirálok készítésével.

Felhasználható bármilyen vízzárási feladatban, akár munkatér-határolásról van szó, akár gátak vízzáróságának megerősítéséről. Emellett természetesen használható a mélyépítésben a hagyományos cölöpözési feladatokban is. Ezzel a talajszilárdítási módszerrel az eredeti talaj elveszti biológiai tulajdonságát és a szerkezetét a kötőanyag beinjektálása miatt.

*Békési szendvics rés*



**2.3 fénykép:** *Békési szendvics rés*  
*[Békés Drén Kft biztosította]*

Ennél a résfal-építési technológiánál a helyszínen található termett talaj, illetve a töltéstest anyaga – a részbeni kiemelés mellett - kerül összekeverésre a vízzárást biztosító kötőanyaggal. A felhasznált kötőanyag egy kohósalak tartalmú ellenőrzött késztermék, folyamatos minőségellenőrzés alatt álló bevizsgált ásványi kötőanyagokból. Az összetétele igazodik a vízzáró falak helyszíni keveréssel történő előállítási eljárásához.

A gép kaparólánca folyamatosan bontja meg és keveri össze a kötőanyag zaggyal a töltésanyagot és a termett talajt a terv szerinti vastagságban. A kaparóláncon található kapák a résből részben kiemelik a talajt, amely közvetlenül a kiemelés után visszahullik, illetve a kiemelt rész egy speciális megkerülő csatornával visszavezetésre kerül a résbe. A kötőanyag zagy által kiszorított talajmennyiséget a szállítószalag a töltés koronán helyezi el, mely a későbbiekben elszállításra kerül, vagy a töltéskorona rendezésére használható fel. A zagy adagolását és a gép előrehaladását úgy kell megválasztani, hogy a talaj részbeni kiemelése és átkeverése után, egy a HDPE lemez fogadására alkalmas talaj-zagy szuszpenzió jöjjön létre.



A talajjavítás és talajerősítés módszereinek összefoglalása

A bevezetőben leírtak alapján a talajjavítás és talajerősítés fő célja a mechanikai tulajdonságok- és a hidraulikai viszonyok javítása. A mechanikai tulajdonságok alatt főként az összenyomhatóság csökkentését és a nyírószilárdság növelését értjük. Ezeknek a paramétereknek a növelését tömörítéssel, hézagkitöltéssel, szemcsék közötti kötéssel, a víztartalom és/vagy a víznyomás csökkentésével, illetve a félmerev elemekkel történő erősítéssel érhetjük el. A hidraulikai viszonyok javítása alatt a vízkizárást, a vízáramlási sebesség csökkentését, a talajvíz szintjének-, illetve nyomásának csökkentését, továbbá a talaj konszolidációjának gyorsítását (a süllyedés gyorsítására) értjük. A előbb felsorolt intézkedések többek között a talaj átteresztőképességének csökkentésével, az áramlást gátló vízzáró elemek beépítésével, kutakkal, szivárgókkal, vízszintes furatokkal és függőleges drénekekkel érhetőek el.

A talajjavítási eljárások rendszerezése			
hatás- mechanizmus	módszer	talajfajta	
		szemcsés talaj	kötött talaj
mechanikai hatás	statikus előterhelés	előterhelő töltés	többlettöltés
	döngölés	dinamikus konszolidáció	dinamikus talajcsere
	mélyvibráció	mélyvibrációs tömörítés	vibrált kőoszlop
	robbantás	robbantásos tömörítés	
kötőanyag- bevitel	injektálás	átítatásos injektálás	tömörítő injektálás
	jethabarcosítás	cementált talajoszlop	cementált talajoszlop
	mélykeverés	cementált talajtömb	meszes kötésű talajtömb
betétes erősítés	geoműanyagos erősítés	töltéserősítés	töltésalapozás
	acélelemes erősítés	erősített talajtámfal	szegezett fal
szivárgás- szabályozás	drénezés	vízszintes furatok	szalagdrénezés
	talajvízszint-süllyesztés	szűrőkutak, szivárgók	vákuumkutak, szivárgók
	vízkizárás	fagyasztás, légnymás	

2.4 ábra: Talajjavítási eljárások rendszerezése [Szepesházi, 2008]

A talajjavítás és talajerősítés módszerei alatt főként az idegen anyag bevitelét, illetve annak használatának mellőzését értjük. Az utóbbi esethez tartoznak a mechanikai módszerek, tömörítések, víztelenítések és hőkezelések. A statikus előterhelés, döngölés (dinamikus konszolidáció) mélytömörítés a mechanikai módszerekhez; a vízkizárás, talajvízszint süllyesztés (kutak, szivárgók, furatok), függőleges drénezés a víztelenítésekhez; a talajégetés és talajfagyasztás pedig a hőkezelésekhez tartoznak. Idegen anyaggal történő módszerek a talajszilárdítás kötőanyag-bevitellel, talajerősítés geoműanyagokkal (geotextíliák, szalagok, georácsok, lemezek, fóliák, membránok, matracok) és a talajcsere (vízszintesen teljes mélységig, illetve részlegesen, vagy függőleges oszlopokkal).





### **III. Felhasználható anyagok**

#### **III.1 Gyakorlatban alkalmazott vízzáró anyagok**

*Ez a rövid rész a gyakorlatban alkalmazható vízzáró anyagokkal, azok anyagfelhasználásával foglalkozik a technológia függvényében. Célirányosan, csak a vízzáró tömítő falakról írok, hiszen ez az, ami meghatározza a talaj- és szerkezet kölcsönhatását. A diplomamunkámban, ebben a fejezetben kitérek egyéb anyagokra, melyekkel vízzáró szerkezetek megoldathatóak, mint például a vízzáró beton tervezésének és készítésének menetére. Továbbá útmutatást adok egyes anyagok környezetvédelmi célú felhasználására is, ami a jelenben igen fontos környezetföldtanilag is.*

#### Vízzáró tömítő falak anyagfelhasználása

##### *Hagyományos kialakítású vízzáró résfalak*

Az előző fejezetben leírtak alapján az ezen típusú vízzáró falak kialakítása hasonló a beton/vasbeton résfalakéval, a különbség a réskitöltő anyagban van. Tekintettel arra, hogy itt a cél a vízzárás illetve a szennyezőanyag visszatartás, a réskitöltéshez egy szilárdulóképes, agyagásványban (nagy Na- montmorillonit tartalmú bentonit) gazdag, duzzadóképes anyagot használnak. A kialakítása lehet egyfázisú és kétfázisú.

- ✓ Az egyfázisú tömítőfalak kialakítása egy lépcsőben történik, a réskitöltő anyag önszilárduló. Na-bentonit - cement - víz keveréke, átlagos térfogatsűrűsége  $1,25 \text{ g/cm}^3$ . Előnye a gyorsabb kivitelezés és gazdaságosabb. Hátránya az önszilárdulásból adódó időbeli korlát a kivitelezésnél és a kisebb szilárdság
- ✓ A kétfázisú tömítőfalak kiemelésé bentonitos zagy védelmében történik és a rés kialakítása után a résiszapot, éppúgy, mint a hagyományos résfalaknál a betonozáskor, lecserélik a vízzárást, szennyezőanyag visszatartást biztosító anyagra. Ez Na-bentonit - cement - ásványi töltőanyag (pl. mészköliszt) - víz keveréke, átlagos térfogatsűrűsége  $1,80 \text{ g/cm}^3$ . Szilárdsága többszöröse az egyfázisú falénak.

Önmagában az egy- ill. kétfázisú tömítőfal csak vízzárásra alkalmas, amire egyszerűbb és olcsóbb megoldások is léteznek. A környezetvédelmi alkalmazásuknál a cél többnyire a szennyezőanyag visszatartás, ezért a réskitöltő ásványi anyagú tömítőmasszát kombinálják egy mesterséges anyagú elemmel, a geomembránnal (régebben acél szádpallókkal), amit kombinált résfalaknak nevezünk. A kivitelezésük gyakorlatilag megegyezik a hagyományos résfalakéval, a vasalás helyett itt a geomembrán lemez kerül a résbe, beton helyett értelemeszerűen a már említett tömítőmassza. Ezzel a megoldással gyakorlatilag teljes szigetelés érhető el, amennyiben a geomembrán lemezek csatlakoztatása is kifogástalan.

Sokféle kötőanyag létezik, melyekkel stabilizálni tudjuk a különféle talajokat. Ezeket kategóriákba bontva bemutatom felhasználásukat annak a technológiának függvényében, mellyel a leghatékonyabban kivitelezhető a vízzáró résfal egy árvízvédelmi földtöltésben.

#### *Cementalapú anyagok:*

Erről az anyagról azért írok, mert a kutatás során felhasznált kötőanyag is cement alapú volt, azonban fontosnak tartom megjegyezni, hogy kötött talajhoz lett hozzákeverve. Az így szerzett tapasztalataimat a későbbiekben részletezem.



Elsődlegesen a szilárdság növelésére alkalmazzák. 7-10 bar nyomáson sajtolják le a cementtejet vagy cement+adalékanyagot tartalmazó habarcsot.

A módszerrel csak 0,8-1 mm átmérőnél durvább szemcséjű homok, illetve üreges, repedezett kötött talaj szilárdítható. Az injektálás során alkalmazhatnak adalékanyagokat is részben a költségcsökkentés részben valamelyik paraméter javíthatósága érdekében.

Lehetséges adalékanyagok:

- ✓ költségcsökkentés céljából salak, mészköliszt, pertye
- ✓ injektálhatóság javítására különböző plasztifikátorok
- ✓ kötési idő szabályozására kötésslassítók, vagy kötésgyorsítók

### Mélykeverés

Kötőanyag választást meghatározó szempontok: (Szepesházi, 2008)

- ✓ A talaj nyomószilárdsága
- ✓ Talaj nyíró és húzóigény-szilárdsága
- ✓ Talaj rugalmassági modulusa
- ✓ Talaj áteresztőképessége
- ✓ Talaj sűrűsége

Általánosságban elmondható, hogy a leggyakrabban alkalmazott kötőanyag a cement és/vagy mész, vízzárás esetében bentonit szuszpenzió. Előfordul gipsszel, kohósalakkal és pertyével történő kombinálás is. Az alkalmazható kötőanyag talajtípusonként változó: Szemcsés talajhoz: cementet

- ✓ Agyagtalajhoz: meszet vagy mész/cementet
- ✓ Szerves agyaghoz: mész/cementet, cement/ granulált kohósalakot, mész/gipszet
- ✓ Tőzeghez: cementet, cement/ granulált kohósalakot, mész/gipsz/cementet
- ✓ Iszaphoz: cementet, mész/cementet
- ✓ Szulfátos talajhoz: cementet, cement/granulált kohósalakot
- ✓ Egyes felhasználási területeken (pl. támszerkezetek) a fal statikai teherbírására is szükség van, ekkor a frissen kevert talajba vibrálással vagy nyomással "H" alakú merev acélbetétet, vagy összeszerelt betonacél-armatúrát helyeznek el

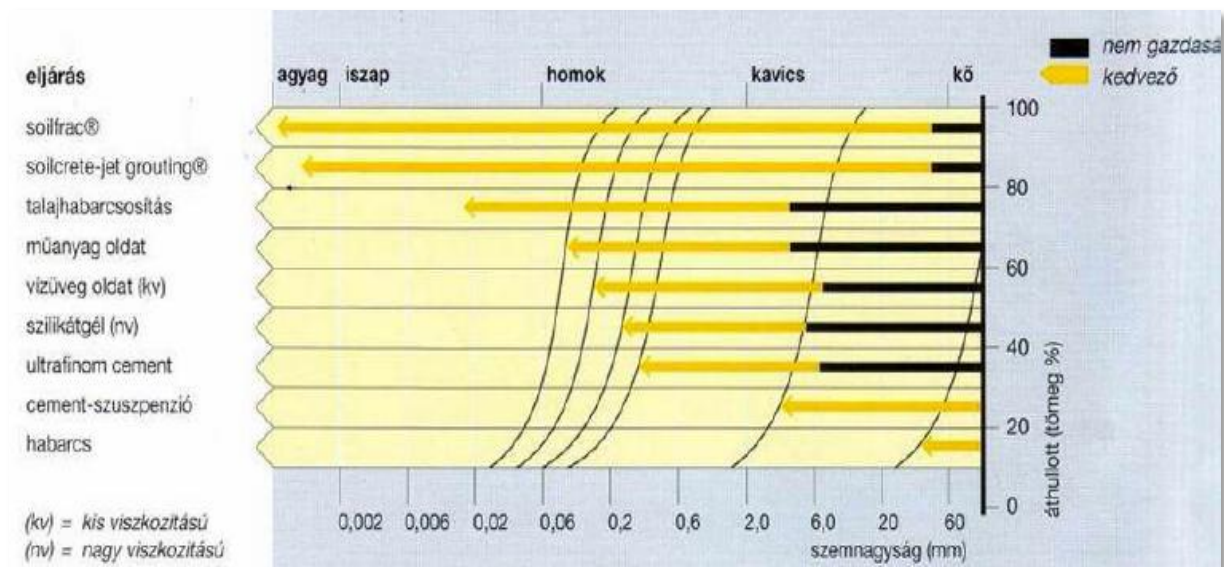


**3.1 fénykép:** Talajkeverés  
[Kivitelező cég katalógusa]



### III.2 Talajtípusok és kötőanyagok kombinálása (táblázatos összefoglalás)

A 3.1-es ábra szemlélteti a felhasználható kötőanyagokat ismételtelen a talajtípusok függvényében, figyelembe véve a gazdaságossági szempontokat is. Szemcsés talajokban, főként homokban és kavicsban alkalmazható a leggazdaságosabb a finom cement. A jet grouting eljárás pedig csak a 40 mm-nél nagyobb szemmagyság esetében nem valósítható meg. Ezt az ábrát érdemes összehasonlítani a 2.2-os ábrával: a két szóba eső ábra között az a lényegi különbség, hogy ott az alkalmazható technológia van részletezve, a 3.1. ábrán pedig a felhasználható anyagok. Információt nyújt a két ábra arról, hogy egy bizonyos technológiát, mely anyagokkal lehet esetlegesen kombinálni.



3.1 ábra: Hézagkitöltő, átítatásos injektálás anyagának megválasztása [Szepesházi, 2008]



## IV. Kapcsolódó vizsgálatok

### IV.1 Áteresztőképességi együtthatóról általában

A gravitáció hatására a talajban végbemenő vízmozgás közelítő jellemzésére a talajmechanikában csaknem kizárólag a *Darcy-féle törvényt* (1856) használjuk, mely szerint a talajban mozgó víz átfolyási sebessége az alábbi összefüggéssel, vektoregyenlettel jellemezhető.

$$v = ki = k \frac{h}{l}$$

Az áteresztőképességi együttható a szemcsés közegen (talajon) laminárisan áthaladó folyadék (víz) sebessége és a mozgást kiváltó (fenntartó) viszonyított energia-szintkülönbség (dh/dl) közötti lineáris arányosságot megadó, sebesség dimenziójú mennyiség. A leírt összefüggést fejezi ki a Darcy-törvény. A képletben  $h$  egy adott áramlási vonal két pontja közötti hidraulikus nyomáskülönbség,  $l$  az áramlási vonal hossza,  $i$  a hidraulikus gradiens,  $k$  a talaj áteresztőképességi együtthatója.  $k$  értéke a talaj tulajdonságain – szemcsenagyság, szemcsealak, tömörség, telítettség, kémiai hatások stb. – kívül az áramló folyadék viszkozitásától és fajsúlyától, tehát a hőmérséklettől is függ (Kézdi 1964).

A talaj áteresztőképességének ismerete nagyon sok problémában döntő fontosságú: gátakon át és gátak alatt való szivárgás, munkagödrök víztelenítése, talajvízszint-süllyesztés, talajok összennyomódása és annak időbeli lefolyása stb. Gyakran a talaj szilárdsága is az áteresztőképesség függvénye (Kézdi 1964).

Általánosságban elmondható, hogy az áteresztőképességi együttható a legszélesebb határok között változó talajmechanikai jellemző, értéke több, mint tíz nagyságrendet ölel fel. Az áteresztőképességi együttható változását a szemcseméret alapján a 4.1 ábra mutatja.

k (m/s)	10 <sup>0</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>
vízvezetés	nagyon jó			jó						rossz		vízzáró	
Talaj megnevezése	görgötteg	kavics	homokos kavics	kavicsos homok	homok	iszapos homok	iszapos homok	iszapos finom homok	iszap	agyag			

**4.1 ábra:** Az áteresztőképességi együttható értékei [Nagy, 2011]

A vizet tartó földművek, így az árvízvédelmi gátak állékonysági méretezésében nagy jelentősége van a talajok vízáteresztő képességét meghatározó *Darcy-féle* (1856)  $k$  (m/s) tényező ismeretének. Az altalaj különböző rétegeit és a töltéstest egyes részeit (vagy egészét) jellemző áteresztőképességi együtthatók egymáshoz viszonyított arányai szabják meg a gátban kialakuló szivárgási áramképet, a terhelést adó, illetve a teherbírást csökkentő víznyomásokat, stb. Az átszivárgó víz mennyisége a  $k$  tényező ( $k$ ) abszolút értékétől függ, amelynek értékére a gátba épített szivárgó és vízvezető rendszert méretezni kell.



Az áteresztőképességi együttható értékét befolyásoló jelentősebb tényezők (nem fontossági sorrendben) a következők:

- ✓ szemcseátmérő,
- ✓ szemcsék alakja,
- ✓ szemcsék irányultsága,
- ✓ hézagok mennyisége, eloszlása,
- ✓ másodlagos hézagok,
- ✓ telítettségi viszonyok,
- ✓ szivárgó folyadék tulajdonságai,
- ✓ a hidraulikai körülmények (ún. hidraulikus esés, küszöbgradiens, Reynolds-szám, szívás),
- ✓ tranziens jelenségek (szemcsék vándorlása, ki- és bemosódása) stb.

Heterogén (rétegzett) rendszerben a felsoroltakon kívül a  $k$  tényező értéke függ:

- ✓ az egyes rétegektől külön-külön,
- ✓ ezek esetleges anomáliáitól,
- ✓ az áramlás irányától, illetve
- ✓ az áramlás irányának a rétegekhez viszonyított helyzetétől.

A kötött talajok áteresztőképességének meghatározása a legnehezebb. Egyetlen gombostű fejméretű hiba, kontinuitás béli hiba, másodlagos szerkezet több nagyságrenddel megváltoztatja az áteresztőképességi együttható értékét. Óvatosan, nagy körültekintéssel szabad csak a kötött talajok vízáteresztő képességét vizsgálni.

A  $k$  áteresztőképességi együtthatót, más néven szivárgási tényezőt helyszíni, laboratóriumi és közvetett módszerekkel, illetve vizsgálatokkal és empirikus képletekkel is meg lehet határozni, melyekre Magyar Szabvány, vagy Műszaki Irányelv nincs. Az áteresztőképességi együttható abban különbözik a szivárgási tényezőtől, hogy van mértékegysége [m/s], a gyakorlatban viszont szinonim fogalmakként használjuk őket.

A számítással kapott eredmények helyességének ellenőrzése történhet különböző helyszíni és laboratóriumi mérésekkel. A múltban többen eltérő megközelítéseket alkalmaztak a „ $k$ ” tényező meghatározására:

Kézdí(1976)	laboratóriumi vizsgálat
Kovács (1972)	szemeloszlási vizsgálat
Rózsa (1977)	próbaszivattyúzás
Eurocode 7	számítás ödométeres vizsgálatból (MSZE CEN ISO/TS 17892-5:2010) szemeloszláson alapuló empirikus korrelációval (szabvány S3 pontja) próbatetek laboratóriumi vizsgálatával (MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010) próbaszivattyúzással (ISO/TS 22282)

## IV.2 Anyagok víz-áteresztőképességének mérése

### IV.2.1 Laboratóriumi vizsgálatok

A kötött, kis-áteresztőképességű talajok szivárgási tényezője meghatározásának leggyakrabban alkalmazott módja a laboratóriumi kísérlet. Mellette szól az „in situ” vizsgálatokkal szembeni viszonylagos olcsósága, s ennek megfelelően a nagyobb minta darabszám.



Az áteresztőképességi együttható meghatározásánál Kézdi (1976) előnyben részesíti a laboratóriumi vizsgálatokat, a "k" tényező laboratóriumi meghatározása a következő módszerekkel lehetséges:

- ✓ állandó víznyomás mellett,
- ✓ változó víznyomás mellett,
- ✓ ödométeres készülék és triaxiális vizsgálat.

*Változó víznyomású készülékkel* a várhatóan kis-áteresztőképességű mintákat lehet vizsgálni. Fontos, hogy a vizsgált talajminta telített legyen, hogy a szivárgás azonnal megindulhasson. Erőszakosabb vizsgálat, mint a változó víznyomású készülék.

Az eljárás közepesen kötött iszapos homokliszt, iszap, sovány agyag áteresztőképességének meghatározására alkalmas. (Kövér agyagok áteresztőképességét célszerűbb konsolidációs kísérlettel meghatározni.) A vizsgálat elvégzéséhez szintén zavartalan mintára van szükség. A vizsgálat előkészítése a következőképpen alakul: a minta bekészítése és a készülék összeszerelése kapcsán fokozottan kell ügyelni arra, hogy légbuborékok a mintában, vagy a készüléknek különböző részein ne maradjanak. Célszerű a mintát kapilláris úton telíteni (a talajtörést mindenképpen el kell kerülni). Az előkészítés után a vizsgálat végrehajtása következik: a beosztásos nyomócsövet a kezdőbeosztás magasságáig feltöltjük desztillált, légtelenített vízzel és ennek időpontját feljegyezzük. A cső végét – a párolgási veszteség minimalizálása miatt – nedves vattával lezárjuk, majd rögzítjük a kezdő szint és az alsó vízszint különbségét ( $h_1$ ). A vízszivárgás megindulása után az ( $A_0$ ) keresztmetszetű csőben a vízszint és ezzel együtt a nyomása fokozatosan csökken. A csőből eltávozó víz azonban az ( $l$ ) hosszúságú, ( $A$ ) keresztmetszetű mintán szivárog át. Az ( $A_0$ ) keresztmetszetű csőben ( $t_1$ ) időpontban ( $h_1$ ) és ( $t_2$ ) időpontban ( $h_2$ ) nyomást mérhetünk. Egy tetszőleges közbenső ( $t$ ) időhöz tartozó ( $h$ ) nyomásmagasság ( $d_t$ ) idő alatt ( $d_h$ ) értékkel változik meg.

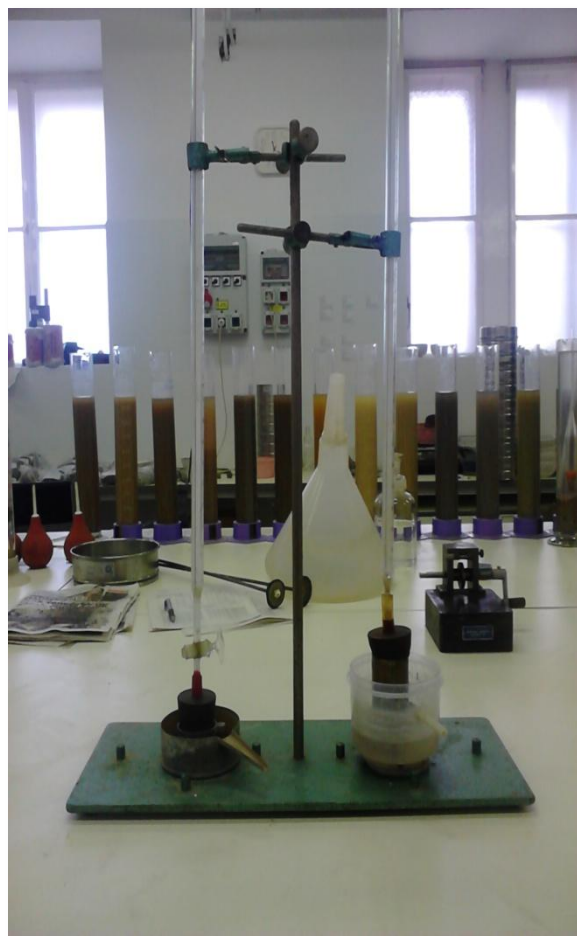
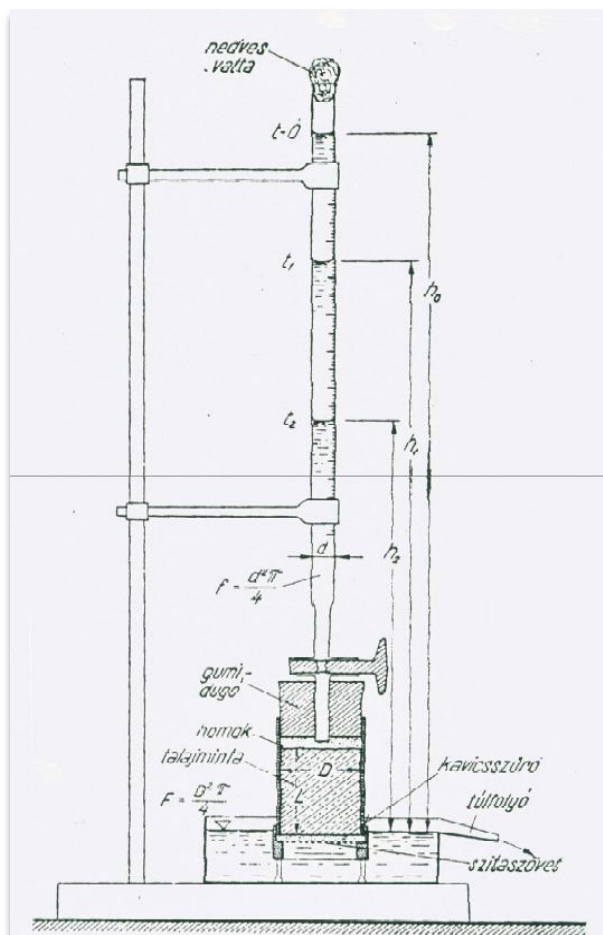
A következőben a laboratóriumi kutatáshoz felhasznált jegyzőkönyv egy rövid részletét mutatom be.

*A számításhoz felhasznált képlet*

*változó víznyomás esetén*

$$k = \frac{f \cdot l}{F \cdot l} \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \frac{h_0}{h_i} \quad , \text{ ahol}$$

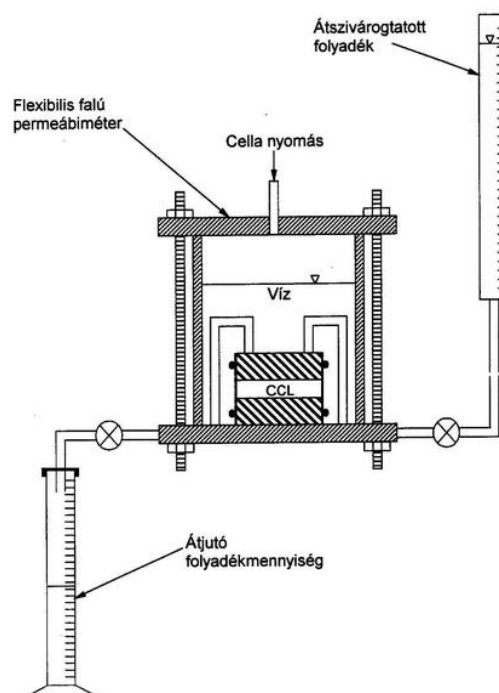
$k$	Áteresztőképességi együttható [m/s]
$f$	Üvegcső keresztmetszeti területe [m <sup>2</sup> ]
$F$	Talajminta keresztmetszeti területe [m <sup>2</sup> ]
$l$	Szivárgási hossz, / talajminta magassága [m]
$\Delta t$	Két leolvasás között eltelt idő [s]
$h_0$	$t_0$ időponthoz tartozó vízoszlop magassága
$h_i$	$t_i$ időponthoz tartozó vízoszlop magassága



4.2 ábrák: Változó víznyomású készülék

### Triaxiális vizsgálat

Ennél a kísérleti módszernél vagy közvetlenül a nyírószilárdsági vizsgálatokhoz használt triaxiális cellát, vagy annak módosított változatát használják, amelynél a mintát a cellában a triaxiális vizsgálatoknál is használt gumimembrán veszi körül, s egy folyadékkal (többnyire desztillált vízzel) biztosított cellanyomással a gumimembránt nekinyomják a mintának. A triaxiális cella úgynevezett in situ feszültségállapotot hoz létre, hasonlóan az ödométeres vizsgálatához. A nagyméretű minták vizsgálatára az átalakított triaxiális cella a legjobb megoldás. További előnye, hogy Darcy törvénye alkalmazható a vizsgálatra. Az 5.6 fényképen látható egy triaxiális cellába helyezett próbatest, átteresztőképesség vizsgálat közben.



4.3 ábra: Triaxiális cella



A flexibilis falú készülékek alkalmazásának számos előnye van a merev falúakkal szemben:

- ✓ megfelelő oldalfalnyomás mellett megakadályozható a minta és a készülék fala jelen esetben a gumimembrán - közötti szivárgás;
- ✓ megvalósítható az a követelmény, hogy a permeabilitás vizsgálatokat a tényleges értékeknek megfelelő feszültségviszonyok mellett végezzük;
- ✓ az ún. "back pressure" technikával biztosítható a minta telítettsége, ami a kísérletek alapvető követelménye.

#### IV.2.2 Összegzés

Összefoglalóan megállapítható, hogy az áteresztőképesség és a hozzátartozó fogalmak a talajmechanikában és a vízépítésben jól ismertek, azonban az áteresztőképességi együttható meghatározására nincs általánosan elfogadott módszer. A „k” tényező mérésének pontosítása azért szükséges, mert a számítások, feldolgozások, geometriai méretek stb. relatív hibája nagyságrenddel kisebb, mint amit az áteresztőképességi együtthatóra meghatározhatunk. A bizonytalan méretezésből ugyanis egyszer indokolatlan túlméretezés, másszor feleslegesen nagy veszély vállalása következik. Ennek elkerülésére nagy jelentősége van a valódi „k” tényező ismeretének.

A mérési eredmények értékelésénél szem előtt kell tartani, hogy nincs tökéletes mérés, minden mérési módszernek van hibája, mindegyiknél valamilyen módon károsodik a mért érték. A helyszíni méréseknél a talaj szerkezetét a fúrás (vagy a szonda lesajtolása) teheti tönkre. A fúrásnál folyós homokban vagy homoklisztben a vízártöltést tiszta vízzel mindenkor alkalmazni kell, a fúrót pedig olyan lassan kell kihúzni, hogy a kihúzáskor fellépő dugattyúhatás miatt a talaj ne törjön be a fúrólyukba. Zavartalan mintán történő laboratóriumi mérésnél a vizsgálat során veszélyes hibaforrás, a csorbult mintavevő hengerrel való mintavétel, ekkor a palást mentén átfolyó vizet mérjük. A mérési eredmények értékelésénél további figyelemmel kell lenni arra, hogy a mérés hibája milyen irányba befolyásolja a végeredményt. A kicsorbult mintavevő miatt nagyobb áteresztőképességet, a szonda által tömörített talaj miatt kisebbet fogunk mérni. A mérés hibája ne befolyásolja a végeredményt a biztonság kárára! Ugyanis egy a valóságosnál kisebbnek mért áteresztőképességi együttható alatti szivárgásnál a fedőréteg esetén rontja a biztonságot, vízvezető rétegnél pedig a biztonság javára szolgál.

#### **IV.3 Egyirányú nyomószilárdság, konzisztencia, bedolgozhatóság mérése**

Az összes talajjavítási eljárás gyenge pontja annak igazolása, hogy valóban sikerült-e elérni a kívánt eredményt. A talajjavítás elvárt eredményességének tanúsítása nehéz, ám rendkívül fontos feladat. A minőség biztosítása és ellenőrzése két fázist jelent: megfigyelést a kivitelezés közben, majd annak befejeztével az eredményességet igazoló geotechnikai vizsgálatok végzését. A konzisztencia, bedolgozhatóság és egyirányú nyomószilárdság paramétereinek meghatározása jellemzően mind laboratóriumban történnek. Ez az egyik módszer egy szóban forgó talaj kezelési lehetőségeinek elemzésére és a mélykeverés eredményének ellenőrzésére. A laboratóriumban kevert minták nyújtanak lehetőséget annak vizsgálatára, hogy milyen kötőanyag mennyiség, milyen fajta kötőanyag, vagy a kötőanyag és az adalékszer milyen kombinációja, milyen hézagtürengző és milyen víz/kötőanyag arány szükséges a talaj előírt minőségű stabilizálására.





### IV.3.1 Egyirányú nyomószilárdság vizsgálata

A vizsgálat menete:

A zavartalan kötött talajmintát nyomjuk ki a kiszúróhengerből és tegyük nyomógépbe. A minta magasságának és átmérőjének aránya lehetőleg  $h/d = 1,5$  legyen. Terheljük a mintát lassan és egyenletesen, szabványosan, közben mérőórával mérjük a talajminta terheléértékeit és az összenyomódását. Egy bizonyos terheléértéknél a próbatest rideg, vagy plasztikus töréssel, folyással tönkremegy. A töréshez tartozó feszültségértéket egyirányú nyomószilárdságnak nevezzük. A törésképek elemzésére a *Mérési eredményeim* című fejezetben térek ki. (V. fejezet)

Az egyirányú nyomószilárdság a talajminta összetételétől, nedvességtartalmától, tömörségétől függ, ezért a talajrétegek állapotának jellemzésére használjuk. A vizsgálat során függőleges irányú összenyomódás mellett, az oldalkitérést nem akadályozzuk meg, ellentétben a triaxiális nyomókísérlettel. Ha a vizsgálatot gyorsabb terheléssel végezzük, a vizsgált talajminta nagyobb terhelés hatására törik el.

A henger alakú talajminta vizsgálata során egyirányú nyomó-igénybevételt gyakoroltunk a próbatestre. Ez a vizsgálat csak kötött talajmintákkal végezhető el.

A mérhető adatok a következők:

F – a talajmintára ható függőleges erő nagysága [kN]

A – a talajminta keresztmetszeti területe [m<sup>2</sup>]

h – a talajminta eredeti magassága [mm]

$\Delta h$  – a talajminta összenyomódása [mm]

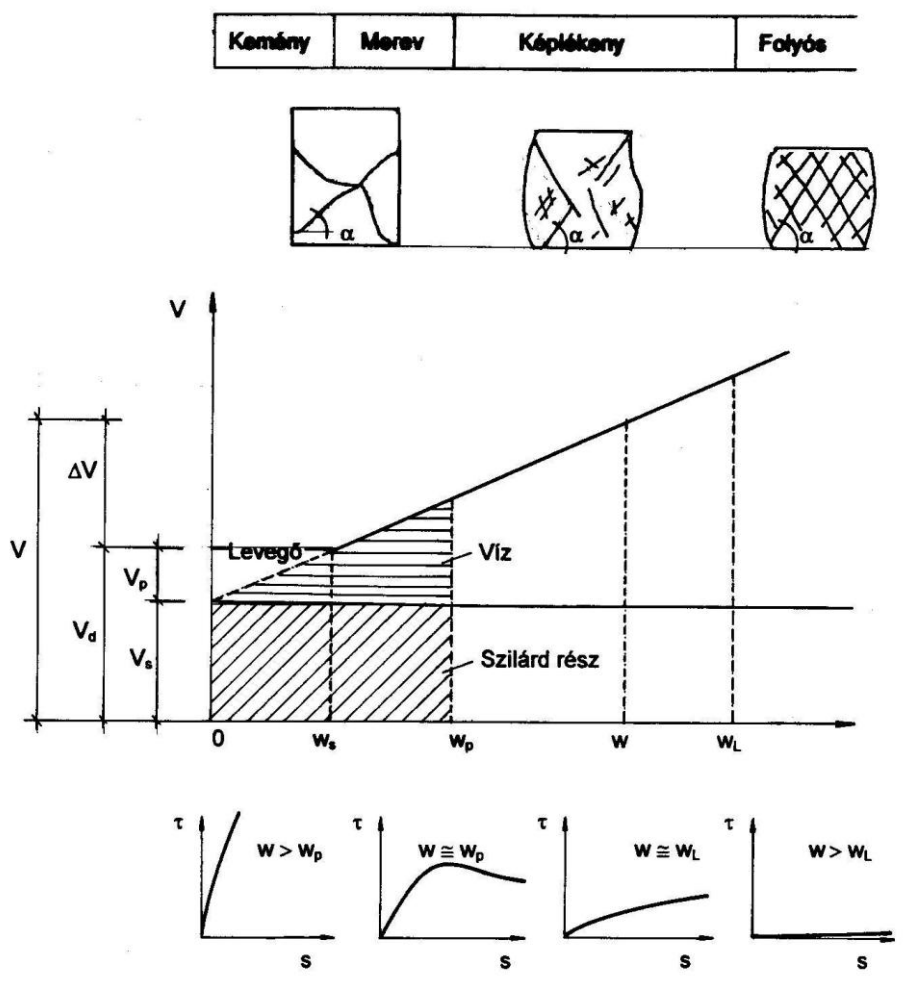
A nyomófeszültség értéke:

$$q_u = F/A \quad [\text{kN/m}^2]$$

### IV.3.2 Konzisztencia mérése

A vizsgálatokat személyesen is elvégeztem, melyekhez felhasznált eszközök ismertetését és a munka menetét, célját a következő fejezetben írom le. Fontos, hogy nem csak egyszerű talajra vizsgáltuk a bedolgozhatóság mértékét, hanem talaj-pernye keverékekre is.

Az agyagásványokat tartalmazó talajokban a víztartalommal változik a szemcsék kapcsolatának erőssége. Ennek következtében ezek a talajok az agyagásványos (mennyiségi és minőségi) összetételeitől függően a víztartalom változásával eltérő módon viselkednek. A talajok vízzel érintkezve megváltoztatják eredeti állapotukat. Nagyobb vízmennyiség a talajt folyóssá teszi, amely lassan száradva gyúrhatóvá alakul, és végül kemény, térfogat állandóságú lesz. Ezek az átmentek folyamatosak. Konzisztencia határoknak nevezzük azokat a víztartalmi állapotokat, aminél a talaj meghatározott tulajdonságot mutat. A határokat minden esetben telített, átgyúrt állapotú, zavart mintával határozzuk meg. Meghatározásuk nemzetközi szabványban rögzített kísérleti eszközökkel és módszerekkel történik.



4.4 ábra: Térfogat változása a víztartalom függvényében



## **V. Mérési eredményeim**

A már elkészült kutatás körülbelül 400 próbatestet foglalt magában. Ahhoz, hogy a vizsgálati tartományt lefedjék a méréssel kapott adatok még 135 darab próbatestet kellett készíteni. Ezekkel az eredményekkel a vizsgálati tartományt főként sűrítettem, illetve kitoltam a már meglévő eredmények határait. Ezáltal biztosan állítható, hogy korlátos tartományokkal rendelkezik a kutatás. Az új minták készítése és vizsgálata során nem tapasztaltam olyan különlegességet, ami miatt változtatni kellett volna a mérési módszereken, vagy a kiértékelés módján. Ez annak köszönhető, hogy a korábbi laborvizsgálatok felhívták a figyelmemet a felmerülő problémákra, a kötőanyag és talaj sajátosságaira. Így már gördülékenyebben tudtam legyártani, vizsgálni és kiértékelni a kapott eredményeket. Példa erre, a felhasznált kövér agyag nagymértékű zsugorodása, vagy a magas víz-kötőanyag tartalommal készített keverékek, melyek inkább szuszpenzióhoz hasonló állagúak voltak. Megemlítem, hogy a kutatás első részében annak a konzisztenciának a vizsgálatát már elvégeztem, ahol gyakorlatilag porszárak maradtak a próbatestek a rendkívül kis mennyiségű víz hozzáadása miatt. Ebben a második részben a próbatestek nagyobb része inkább a folyós konzisztenciához állt közel. Az elvégzett kutatás ismertetése után részletezem a kibővített kutatás eredményeit, írok a vizsgálatokhoz felhasznált anyagokról, jellemzem azokat.

### **V.1 Elvégzett kutatás ismertetése**

A félév során a mellékletekben bemutatott táblázatoknak (2., 3., 4. *melléklet*) megfelelően kevertem össze a talaj, kötőanyag és víz kombinációját, vizsgálva azt, hogy melyik arány adja a leghasznosabb beépítési keveréket. A keverést 10 literes habarcskeverő géppel végeztem, mely az 5.1 fényképen látható.



#### **5.1 fénykép: Keverőgép**

A laboratóriumban kevert minták nyújtanak segítséget annak vizsgálatára, hogy milyen kötőanyag mennyiség, milyen fajta kötőanyag, vagy a kötőanyag, a töltőanyag és az esetlegesen hozzáadagolt adalékszer milyen kombinációja, mekkora kötőanyag adagolás és milyen víz/kötőanyag tényező szükséges a talaj előírányzott minőségű stabilizálására.

3 sorozat készült a teljes kutatás során, az egyes sorozatokon belül 9-9-9 db próbatesttel. Minden vizsgálatához 3-3-3 db próbatest készült, az esetleges gyártási hibák kiszűrése végett. Végül az egyes mérések adatainak átlagait vettük alapul. Ennek részletes indoklását lásd a *Mérési*

*eredményeim* című V. fejezetben és az 1. mellékleten.

Diplomamunkámban a vizsgálat tárgyát agyag és pertye alapú kötőanyag képezte. A két anyag kombinációja szokatlan, új megoldásnak minősül, hiszen kötött talajokat általában meszes cementtel szokták stabilizálni. Korábbi laborvizsgálatok eredményeire nem támaszkodhattunk, mert a keverékek tulajdonságait igen érzékenyen befolyásolja a talaj fizikai jellemzői. (esetemben az agyag plasztikus- és konzisztencia indexe) Ezért kötött talajok esetében az ehhez hasonló megoldásokat mind meg kell vizsgálni laboratóriumban, ellentétben egy szemcsés talajjal, hiszen itt az alkalmazás lehetősége sokkal szélesebb, ráadásul korábbról jóval, több tapasztalattal tud szolgálni a szakirodalom is.



## V.2 Vizsgálatokhoz felhasznált anyagok ismertetése

Diplomamunkámban talaj-pernye keverékekkel foglalkoztam, melyeknek meg kellett felelniük a kívánt követelményeknek. Vizsgálataim során agyaggal és pernye alapú kötőanyaggal dolgoztam, melyeket előre meghatározott receptúra szerint különböző arányban kevertem össze. A keverési receptúrákat az 2, 3 és 4 mellékletekben mutatom be. A kísérletek során nem csak a keverékek jellemző tulajdonságait, hanem a felhasznált anyagokét is vizsgáltam, melyekről a következő pontban írok bővebben.

Az alkalmazott technológia a kivitelezés során keverés a helyszínen eljárás, mely során általában szemcsés talajt szoktak stabilizálni cementpéppel. Féléves munkám során azt kutattam, hogy miként változik meg az agyag tulajdonsága, ha ahhoz kohósalak bázisú kötőanyagot adagolok. Előre nem tudtuk megállapítani, hogy a két anyag szokatlan kombinációja miként befolyásolja a paramétereket.

### V.2.1 Kötőanyag paramétereinek jellemzői

Az injektálási kötőanyag kohósalak tartalmú minőségileg ellenőrzött késztermék, folyamatos minőség ellenőrzés alatt álló bevizsgált ásványi kötőanyagokból. Az összetétele igazodik a szigetelőfalak előállításának gyakorlati követelményeihez a keverés a helyszínen eljárással. Az alapanyag összetételéből adódóan magas ellenálló képességgel rendelkezik a kémiai behatások ellen (például szulfátos talajvíz) és megfelel az alacsony korai szilárdság követelményeinek.

A felhasznált kötőanyag szuszpenzió aránya, azaz a víz/kötőanyag tényezője 1,0 volt a kutatás elején, azonban ez az arány a későbbi laboratóriumi vizsgálatok során magasnak bizonyult. Ennek tükrében megpróbáltam a lehetséges mértékben csökkenteni ezt a tényezőt, amivel kötőanyagot lehet megspórolni. Természetesen az anyagmegtakarítás nem vonhatta maga után a követelmények be nem tartását, így a kutatás további fázisaiban próbáltam az elvett kötőanyag mennyiségét agyaggal pótolni.

A felhasznált kötőanyagból készült szuszpenzió nyomószilárdsági értékeit a félév során nem vizsgáltuk, csak a víz-áteresztőképességüket. A következő táblázatban láthatjuk a megszilárdult tömítőanyag nyomószilárdsági értékeit a kitüntetett időpontokban. Továbbá fel van tüntetve a áteresztőképességi együttható is, azonban ezt különböző arányú szuszpenziókkal vizsgáltuk laborban, melynek értékeit az *Elvégzett laboratóriumi vizsgálatok és eredményeik* című részben foglalom össze. (V.4 fejezet)

A megszilárdult faltömítőanyag tulajdonságai**		
Nyomószilárdság		
3 napos	MPa	≥1,0
7 napos	MPa	≥2,0
28 napos	MPa	≥7,0
Vízáteresztő képesség ***	m/s	≤1*10 <sup>-8</sup>

5.1 ábra: Felhasznált kötőanyag paramétereit



A kötőanyag gyakorlatilag a CEM III tulajdonságaival egyezik meg, melynek jellemző tulajdonságait röviden összefoglalom.

- ✓ Mérsékelt szulfátálló kohósalakciment fő alkotórészként a portlandklinkeren kívül 36-65% salakot, max. 5% mellékalkotórészt, valamint kötőszabályozó anyagot tartalmaz. (CEM III/A 32,5 R-MSR)
- ✓ mérsékelt kezdőszilárdságú, közepes hőfejlesztésű cement,
- ✓ a klinkeren kívüli főalkotórészek javítják a beton bedolgozhatóságát,
- ✓ +5 és +25 °C közötti környezeti hőmérsékleten korlátozás nélkül használható,
- ✓ meleg, nyári időben történő betonozásra alkalmas.

Saját tapasztalat alapján a kísérletekhez felhasznált kötőanyag nagy őrlési finomsággal, nagy fajlagos felülettel rendelkezett, melynek következtében a hozzáadott vizet azonnal felvette. Tárolása csak műanyag zsákban történt, lezárva, hogy ne tudja felvenni a környezetéből/levegőből a nedvességet. Agyaggal történő keverés után látható volt, hogy a finom kötőanyag szemcsék azonnal feltapadtak a kövér talaj felületére, egyfajta bevonatot képezve azon. Az eltört mintákon megfigyelhető volt, hogy egyenesen vette körbe a szuszpenzió az agyagreszeléket.

### V.2.2 Talaj paramétereinek jellemzői

Munkám során egy tisztántúli anyagnyerőhelyről a laboratóriumba beszállított mintán végeztem vizsgálatokat. A talaj fóliazsákban érkezett, melybe mélyásó szerelékkel egy kotró belehelyezte a talajt, tehát nem beszélhetünk zavartalan, természetes állapotú mintáról. Ugyan a talaj szerkezete megváltozott, azonban víztartalma az eredeti, hiszen fóliazsákban tárolták, amit meg is mértünk. Ennek eredményét az *Egyéb laboratóriumi vizsgálatoknál* ismertetem. (V.4.3 fejezet)

A vizsgált talaj főbb tulajdonságait már az osztályba sorolásával fel kellett térképeznem, felhasználva az egyes talajcsoportokról összegyűlt korábbi tapasztalatokat. A talaj megnevezését a kötött talajokra vonatkozó előírások alapján határoztam meg. (MSZ EN ISO 14688-1 és MSZ EN ISO 14688-2 alapján)

Ezek alapján a vizsgált talaj *nagy vízfelvevő képességű, duzzadásra is hajlamos nagy plaszticitású kövér agyag.*

A folyási és sodrási határhoz tartozó víztartalmi értékek meghatározásának módját szintén az *Egyéb laboratóriumi vizsgálatoknál* mutatom be.



### **5.2 fénykép:** Kutatáshoz felhasznált lereszelt kövér agyag

*Munka közben megfigyelt tulajdonságok:*

A vizsgált mintának nagy volt a kohéziós ellenállása és kicsi víz-áteresztőképességgel bírt. Kiszáradt állapotban nagy szilárdsága volt, nem porlott. Megvágva fényes felületű, csak nedvesen volt könnyen sodorható, vízbe helyezve sem esett szét. A kézre és munkaeszközökre a sodrási határon túl levő víztartalom mellett erősen tapadt, megvizezve a felületét fénylett.



*A bevizsgált talaj pontos megnevezése:*

Sötétbarna színű, kissé szerves, nagy plaszticitású és duzzadásra hajlamos puha, kövér agyag.

*Felhasználás*

A kísérlet érdemi része előtt az agyagot le kellett reszelni, hogy homogénebb, illetve csomó- és rögmentes legyen. Ezután már felhasználható volt a kötőanyaggal és vízzel való összekeverésre és próbatesteket is tudunk belőle készíteni.

Gyakorlatban, ha a vízzáróságot nézzük, akkor a minél nagyobb agyagásvány-tartalmú, a különösen nagy montmorillonit tartalmú, tehát a nagy plasztikus indexű ( $I_p$ ) agyagok jönnek számításba. Ugyanakkor az is ismert, hogy minél nagyobb az  $I_p$  értéke, annál nehezebben tömöríthető a talaj, valamint annál inkább hajlamos a víztartalom változás hatására bekövetkező zsugorodásra. Belátható, az optimális megoldást a kis- és közepes plaszticitású, de megfelelő agyagásványtartalmú és adszorpció kapacitású iszap-agyag talajok adják.

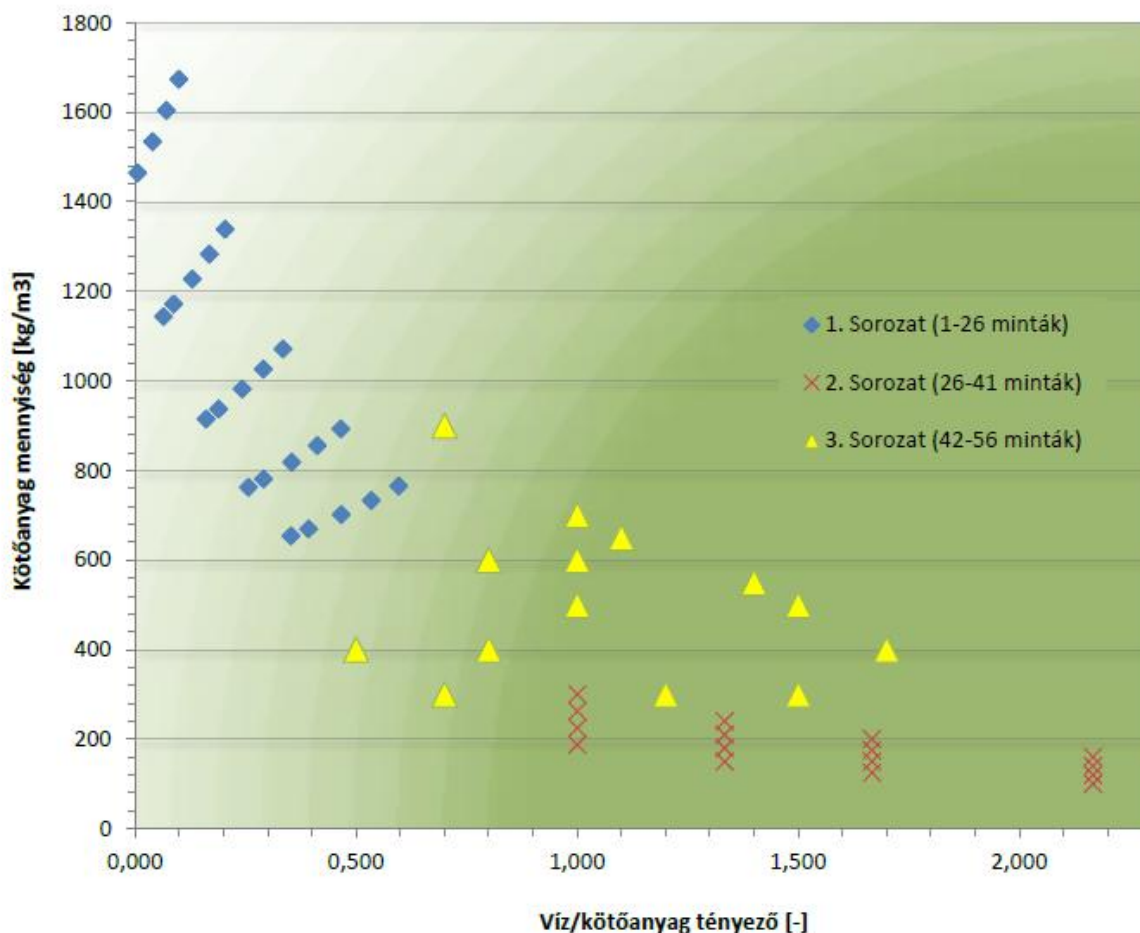
- ✓ Földművek, gátak és védművek építésénél nagy tömegben alkalmazzák, de itt kismértékű szennyezettség (agyagtól eltérő frakció) is megengedhető.
- ✓ Mélyalapozásnál, pontosabban cölöpalapozásnál a fűrt cölöp talajfalának megtámasztására szolgál (úgynevezett fűróiszapnak használják). Hasonlóan az előbbi esethez, résfalak készítésénél is alkalmazzák résiszapként.
- ✓ Kis mennyiségben (2-3%-ban) betonadalékanyagként a cementszemcsék közötti porozitás kitöltésére és ezek által a vízzáróság fokozására használják.



### V.3 Eredmények bemutatása

A laboratóriumi vizsgálatok során 504 próbatestet készítettem. A három sorozat rendre 225+144+135 próbatestet tartalmaztak.

#### Keverési arányok



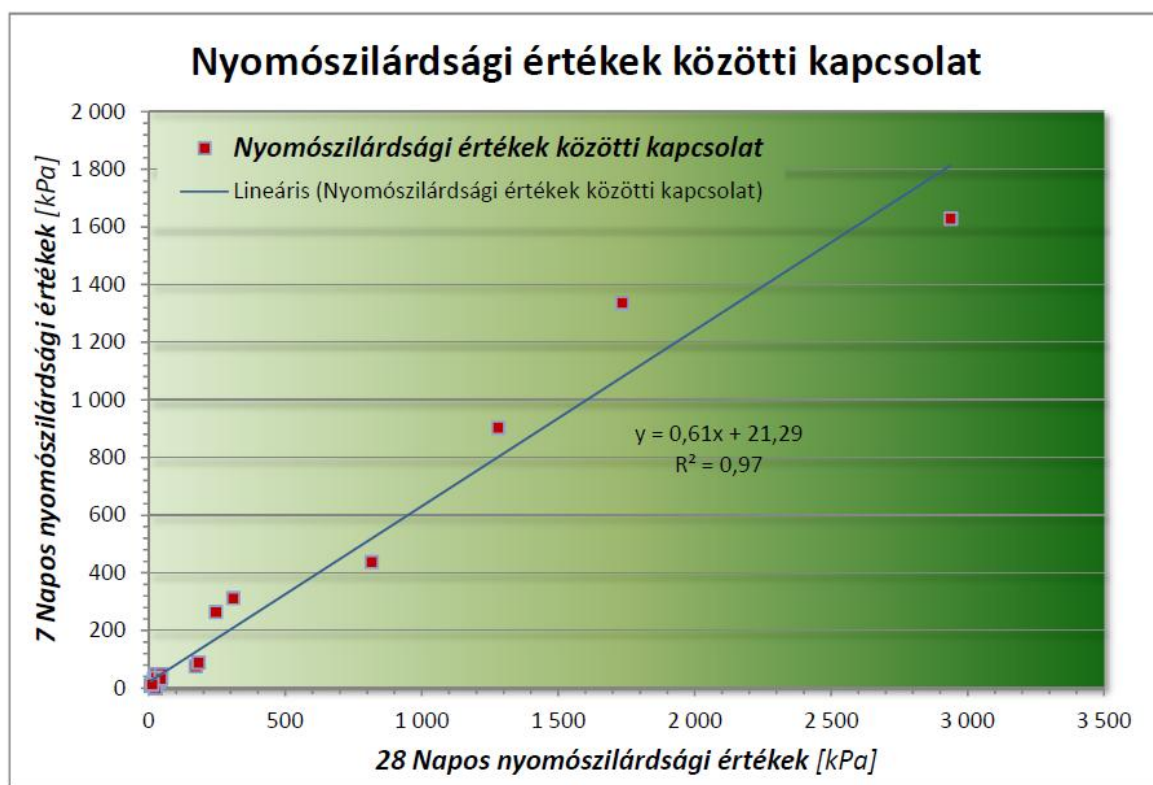
5.2 ábra: Keverési arányok

Az 5.2. ábra mutatja az egyes keverési arányokat. Ez volt az a táblázat melyből kiindultunk a harmadik sorozat készítésének a kezdetén. TDK dolgozatom célja az volt, hogy ezzel a harmadik sorozattal lefedjem azt a területet, ami az első és második sorozat között helyezkedett el. Ezzel bizonyítva azokat a feltételezéseket, melyekkel éltam diplomamunkámban. Az eredmények nem okoztak meglepedést, átmenetet képeztek a két sorozat között. A kutatás ilyen szempontból, ezzel a sorozat elkészültével lezártnak tekinthető, hiszen a fenti táblázatban szerepel az összes előállítható arány, mely a minták fázisos összetételét veszi alapul. (azok, melyek nincsenek se túl távol, se túl közel a másikhoz) Megfigyelhető, hogy ezek a vizsgált pontok lehatárolnak egy enyhén görbült sávot. (egy másik szemléltető ábra: 6.1. ábra a VI. Fejezetben) Ennek a területnek a szélső pontjainak eredményei kiválóan mutatják a terület, az áteresztőképesség és nyomószilárdság változását.



A következőkben bemutatom az egyes keverékek sorszámainak összetevőit, gyártási receptúráit. A továbbiakban ezen azonosítók alapján hivatkozom a próbatestekre. A receptúra megtalálható a mellékletek között. *Receptúra (1-25 Minták)* Magyarázatra szorul a víz adagolása: konzulenseimmel úgy döntöttünk, hogy a természetes talajkörnyezetnek megfelelő víztartalommal csökkentjük a hozzáadott víz mennyiségét. A laboratóriumba beszállított agyagon végzett mérések alapján a talaj víztartalma közelítőleg 39% volt. Ezek a receptúrák gazdaságtalannak bizonyultak a nagy kötőanyag felhasználás miatt, így újabb 16 keveréket készítettem, melyeknek drága kötőanyag adagolásuk gyakorlatilag minimális. Ebben az esetben viszont már nem alkalmaztam a víz mennyiségének csökkenését: a két sorozat gyártása között több mint egy hónap telt el, így már voltak eredmények és tapasztalatok az első 25 keverésekből. Ezek alapján született meg ez az elhatározás. Az 1 sorszámú keverék esetében 2. *mellékleten* látható, hogy negatívra adódott a vízadagolás, tehát gyakorlatilag még szárítani is kellett volna az agyagot, hogy teljesítsem a receptúra előírását. Ennyi vízmennyiség azonban nem elegendő a kötőanyag megfelelő kötéséhez és szilárdulásához: a minták gyakorlatilag porszárazak maradtak, a kötőanyag az agyagban levő nedvességet tudta csak felvenni, ami nagyon kis nyomószilárdsági értékeket eredményezett. Az egyes próbatestek jellemzését a *Mérési eredményeim* című V. fejezetben később foglalom össze. Eddig nem esett szó a 7, illetve 28 napos nyomószilárdsági értékek összehasonlításáról. Észrevehető, hogy a két különböző időpontban végzett vizsgálat értékei között kapcsolat áll fenn: azaz a két változó érték (nyomószilárdság) között korreláció van. A változók közötti kapcsolat szorosságát a lineáris korrelációs együttható jellemzi (R). Esetemben az R értéke 0,965 lett, ami rendkívül szoros kapcsolatra utal. A nyomószilárdsági értékek közötti korrelációs kapcsolatot szemléltető diagram az 5.3. ábrán található meg.

### Korreláció



5.3 ábra: Korreláció (1-25 Minták)



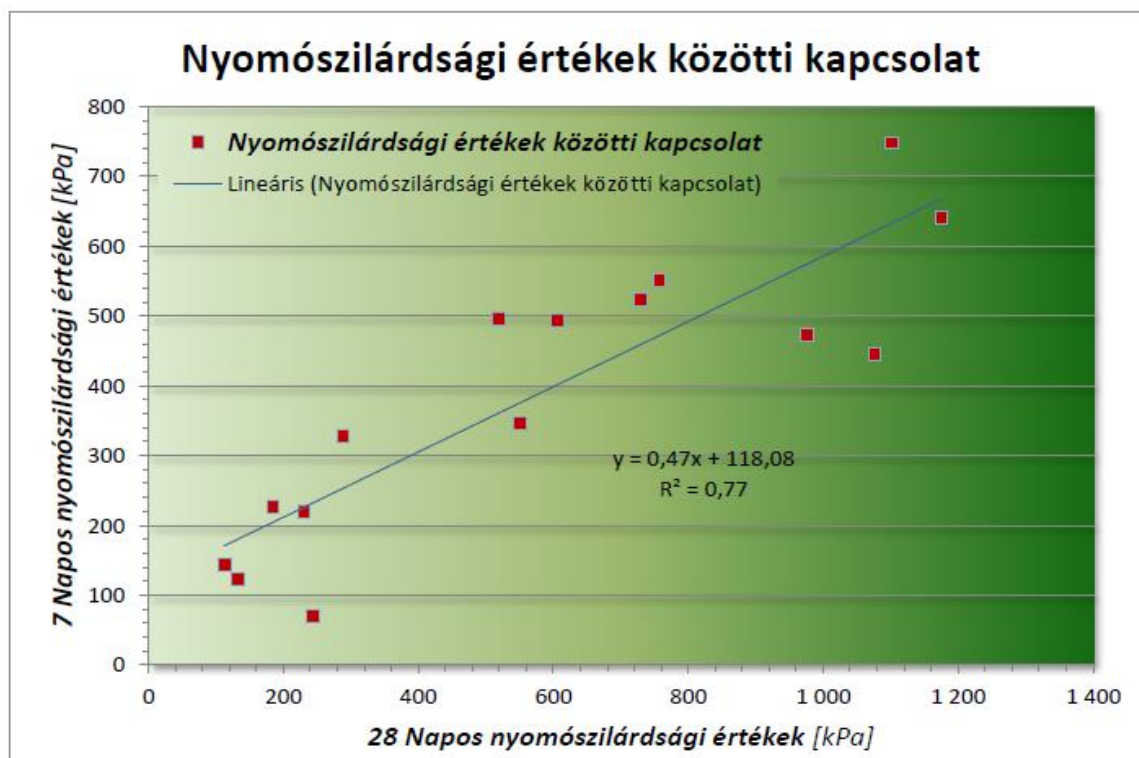


A 3. melléklet táblázata mutatja a második sorozat receptúráját. *Receptúra (26-41 Minták)* A keverékek logikájának könnyebb nyomon követhetőségének érdekében az 5.1 ábrán ábrázoltam a két fázis, azaz a kötőanyag mennyisége és a víz/kötőanyag között fennálló kapcsolatot. Első ránézésre is már szembevető a két egymástól függetlenül készült sorozat között a különbség:

Az első sorozatban, - melyek kék színnel vannak jelölve - a szuszpenzió aránya alig néhány esetben haladja meg a 0,50-es értéket, azaz nagy a kötőanyag felhasználása a keverékeknek. Észrevehető továbbá, hogy az első sorozat csoportjain belül az egyes pontok nem egymás felett, azaz nem egy függőleges egyenesen helyezkednek el, mint a második sorozat esetében. Ennek magyarázata, hogy csak az első 25 keveréknél, a víz/kötőanyag tényezőben vettem figyelembe az eredeti 39%-os víztartalmát az agyagnak. Az okot az előző oldal tetején levő bekezdésben írtam le. Ennek következtében gyakorlatilag a minták sorszámai közül minden 5-tel maradék nélkül oszthatóak azok, melyek még elfogadható konzisztenciájúak voltak és megfelelő eredményekkel szolgáltak mind áteresztőképességre, mind pedig egyirányú nyomószilárdságra nézve. A többi próbatest nem váltotta be a hozzájuk fűzött reményeket.

A második, piros színnel jelölt sorozat esetében viszont minden 5. sorszámú keverék az, amelyiknek a víz/kötőanyag tényezője megegyezik és szembevetően kevesebb kötőanyag felhasználással rendelkezik. Ennek következménye, hogy a harmadik fázis, vagyis az agyag mennyisége az, ami döntően kipótolja a hiányzó részt. Ennek megfelelően a minták itt már nem egy erősen cementált talajkeverék tulajdonságait mutatták, hanem egy plasztikusan viselkedő kötött talajét. Munkám végleges célja az volt, hogy megtaláljam a több szempontok közül is a legmegfelelőbbnek megítélt és egy későbbi kivitelezés során felhasználható receptet. Ez ebből, a 2. sorozat alatt gyártott mintákból került kiválasztásra.

A harmadik sorozat (sárga színnel jelöltem az 5.2 ábrán) receptúra táblázatának a fent leírtaknak megfelelően nincs logikai alapja, ezért csak a vizsgált pontok bemenő paraméterei szerepelnek benne. Ezt láthatjuk a 4. mellékletben: *Receptúra (42-56 Minták)*



5.4 ábra: Korreláció (42-56 Minták)



Ez a fenti táblázat az utolsó sorozat 7 és 28 napos nyomószilárdság értékei között fennálló kapcsolatot mutatja, melyet érdekességként mutatok be. A korábban készített (az első sorozat mérése után) korrelációs diagram nagy összhangot mutatott ki, ez itt már nem mondható el. Ha belegondolunk ismét bizonyítható, hogy ez a harmadik sorozat az első és harmadik között helyezkedik el: a 26-41 mintáknál azért nem volt megfigyelhető az összhang, mert a nagy víztartalom miatt fiatal korban a minták még képlékenyek voltak, kis nyomószilárdsággal rendelkeztek. 28 napos korra viszont kiszáradtak, merevvé váltak és ezáltal megugrott a szilárdságuk is. A 42-56 mintáknál a receptúra szerint mind kisebb mind nagyobb kezdeti víztartalom megtalálható a próbatestekben, ezért van a nagyobb szórás.

Mielőtt bemutatom a kutatás végeredményéül szolgáló 3D-s diagramokat, s értékelem azokat, röviden összefoglalom mik voltak azok a minimum követelmények, melyeknek mindenképpen teljesülniük kell ahhoz, hogy egy árvízvédelmi gátba kialakítható vízzáró falat építhessünk.

A vízzáró fal építésének az a célja, hogy a szivárgás útját megszakítsa, meghosszabbítsa. Vízzáró falak esetében elsődleges szempont a folytonosság és a vízzáróképesség. A keverék ezért nagyon gondos tervezést igényel. Különösen fontos a függőlegesség és az elemek kapcsolódásának ellenőrzése, ha a falak egytengelyű fűróval, nagy mélységben épülnek. Az oszlopok, vagy panelek egy vízáteresztő rétegen keresztül hatolva ideális esetben egy vízzáró rétegbe, agyagtalajba vagy alapkőzetbe 0,5-1,0 métert bekötve szoktak épülni. A kezelendő talajok általában nagy áteresztőképességű durvaszemcséjű üledékek vagy rétegesen települt durva és finom szemcséjű talajok, hiszen ebben az esetben van igény a talajjavításra.

TDK-m választ ad arra, hogy mennyiben tudjuk befolyásolni a már önmagukban is megfelelőnek mondható kötött talajok paramétereit, ha azokhoz pertye alapú kötőanyagot adagolunk előre megtervezett módon. Az eredményeket a *Surfer*, illetve *Grapher* nevű programmal készült szemléltető ábrákon mutatom be.

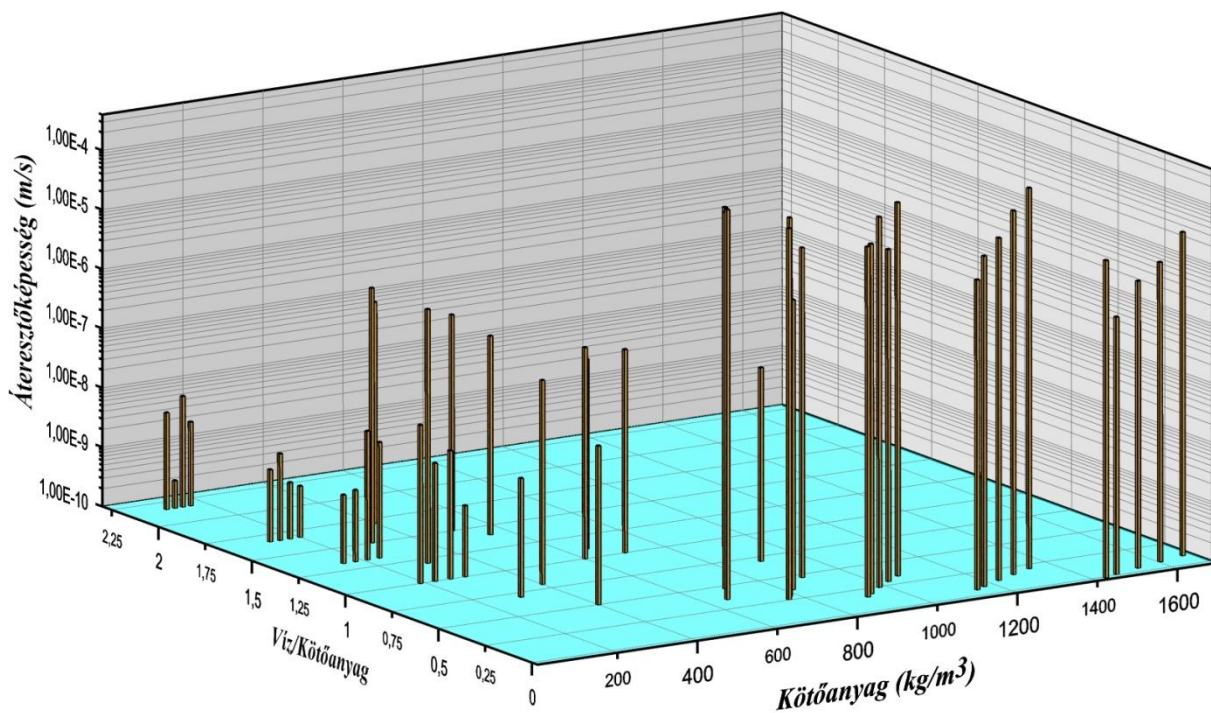
#### Az ábrák jellemzése a következők:

Minden ábrán, diagramon az alapfelületet befoglaló két tengely a kötőanyag ( $\text{kg/m}^3$ ) és a víz/kötőanyag (-). A két mérési sorozat eredményeit egy ábrán belül is szemléltetem, a könnyebb összehasonlíthatóság miatt. (a második sorozat esetében a kötőanyag tartalmát ennek megfelelően át kellett számítani  $\text{kg/m}^3$  dimenzióra.) Így egyszerűbben és gyorsabban össze lehet hasonlítani a két különböző alapelveken nyugvó keverést. A *Grapher* programmal készült 3D-s diagramok közül az áteresztőképességre vonatkozó függőleges tengely logaritmikus skálázást kapott.

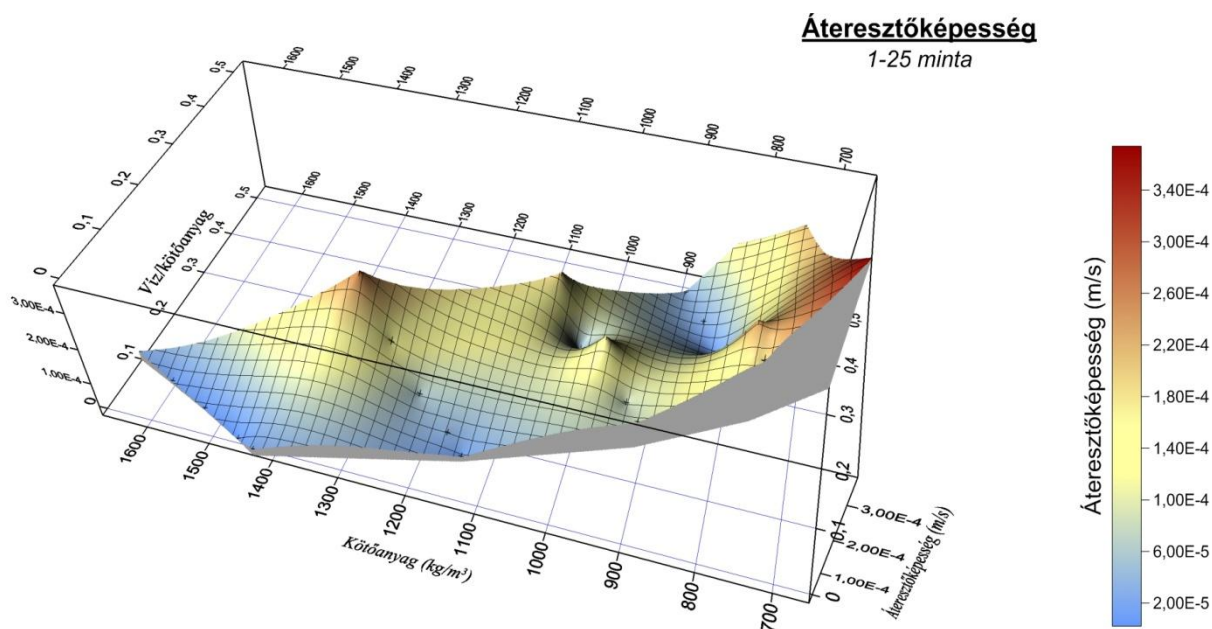


### Áteresztőképesség

1-56 minta



5.5 ábra: Áteresztőképesség

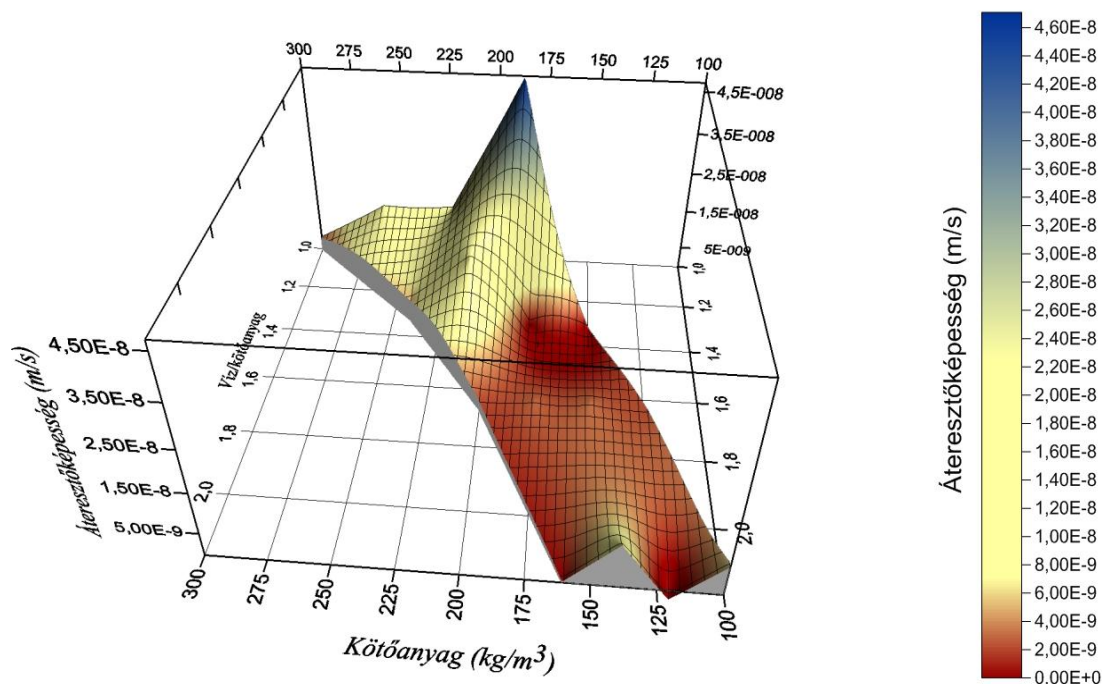


5.6 ábra: Áteresztőképesség (1-25)



### Áteresztőképesség

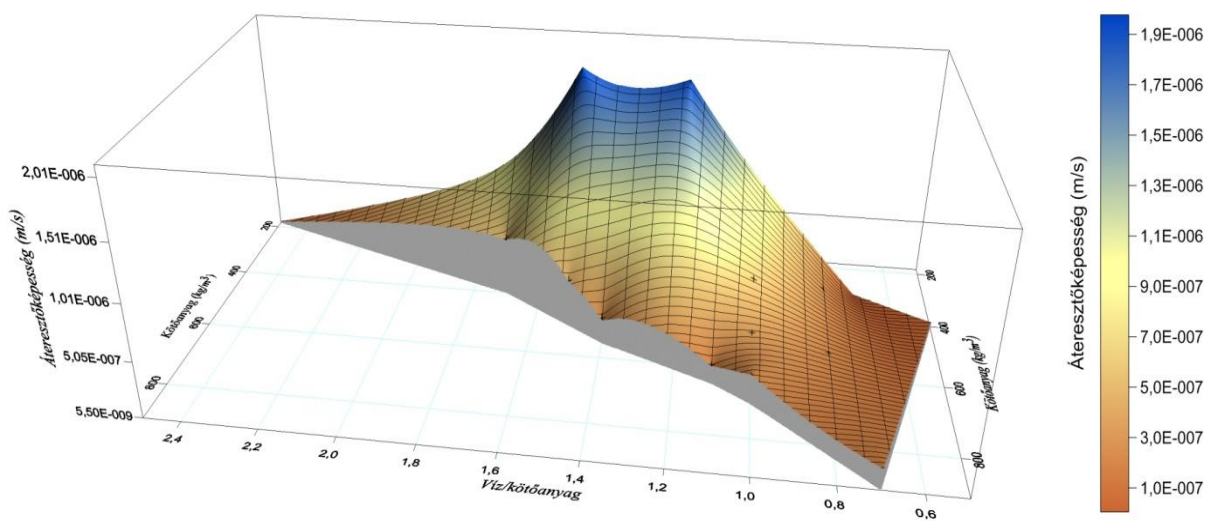
26-41 minta



5.7 ábra: Áteresztőképesség (26-41)

### Áteresztőképesség

42-56 minta



5.8 ábra: Áteresztőképesség (42-56)

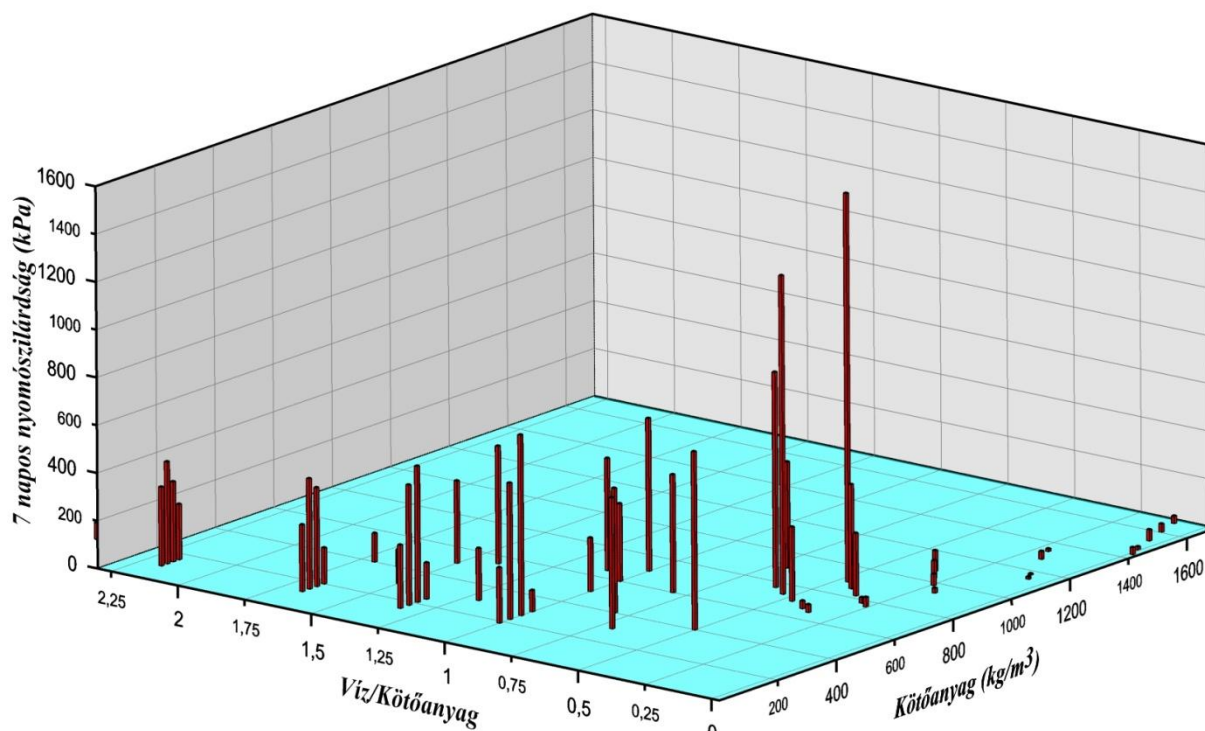


A legtöbb esetben egyértelműen kivehető a diagramokról a „z” tengelyen levő mennyiség (pl. nyomószilárdság) változása és a minimum, maximum helyek is. Ezekből a diagramokból látható az a terület, mely teljesíti a kritériumokat: (gazdaságosság, 600-800 kPa nyomószilárdság,  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s átteresztőképesség). Ha maximum  $300 \text{ kg/m}^3$  kötőanyag mennyiséget és legalább 1,00 arányú víz/kötőanyag tényezőt alkalmazunk, előállítható a megfelelő keverék.

Éles változás figyelhető meg a 7 és 28 napos nyomószilárdságokat tartalmazó ábrákon (5.9; 5.10; 5.11; 5.12; 5.13; 5.14; 5.15; 5.16 ábrák), különösen azok esetében, ahol a próbatestek, kevés kötőanyag mennyiséggel készültek (26-41 minták): a legmagasabb víz/kötőanyag tényezőjű minták rendelkeznek a legalacsonyabb 7 napos szilárdsággal, azonban 28 napos korra már a legmagasabb értékeket veszik fel, miközben a többi próbatestnek is folyamatosan növekedtek a szilárdsági értékeik az idő múlásával. Ennek feltételezhető oka, hogy nagyobb víztartalom kezdetekben kisebb nyomószilárdságot eredményez. (7 naposan plasztikusabb a keverék még, mint az ugyanakkor alacsonyabb tényezővel kevert minták.) Később a víz nagy részének eltávozása (szobahőmérsékleten, száradás útján) után 28 napos korra megugrik a szilárdsága. Fel kell hívnom a figyelmet arra, hogy a keverékek a valóságban nem száradhatnak ki ennyire, hiszen egy vízzáró résfal a talajba van beépítve, így az legalább földnedves körülmények közötti víztartalommal fog rendelkezni. Ennek megfelelően a 28 napos nyomószilárdsági adatok csak laboratóriumi eredmények.

### 7 napos nyomószilárdság

1-56 minta

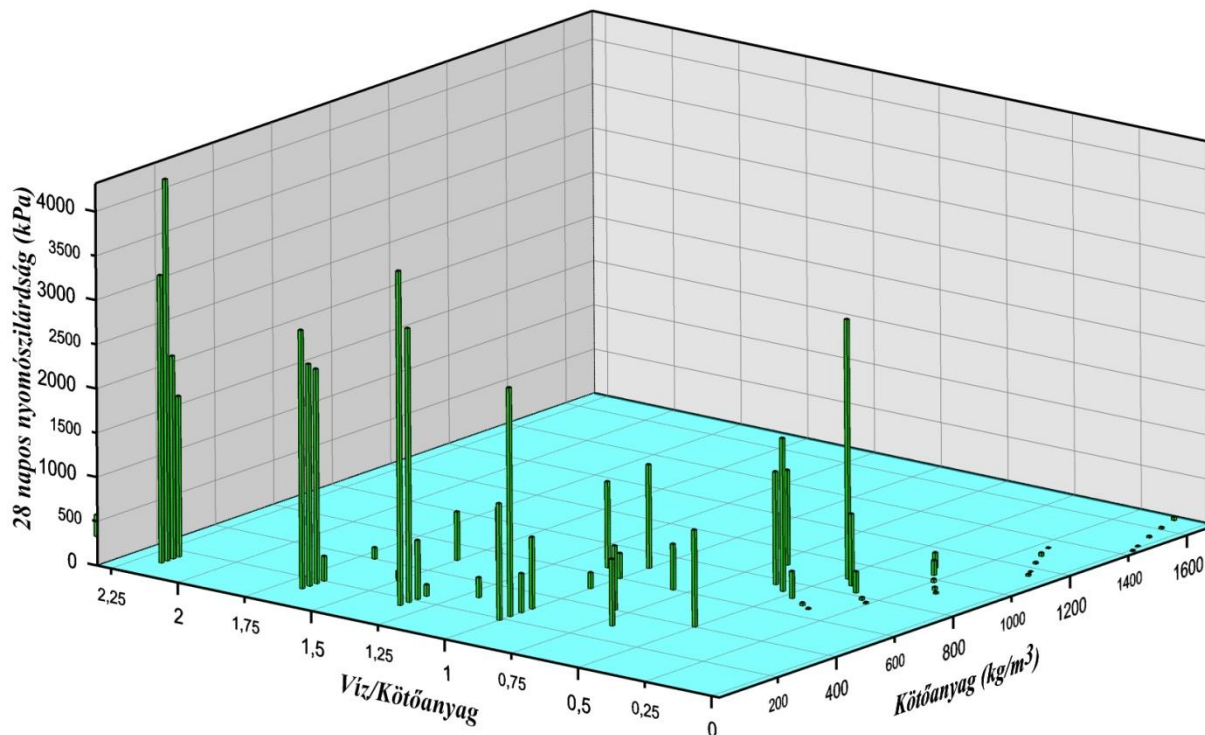


5.9 ábra: 7 napos nyomószilárdság



**28 napos nyomószilárdság**

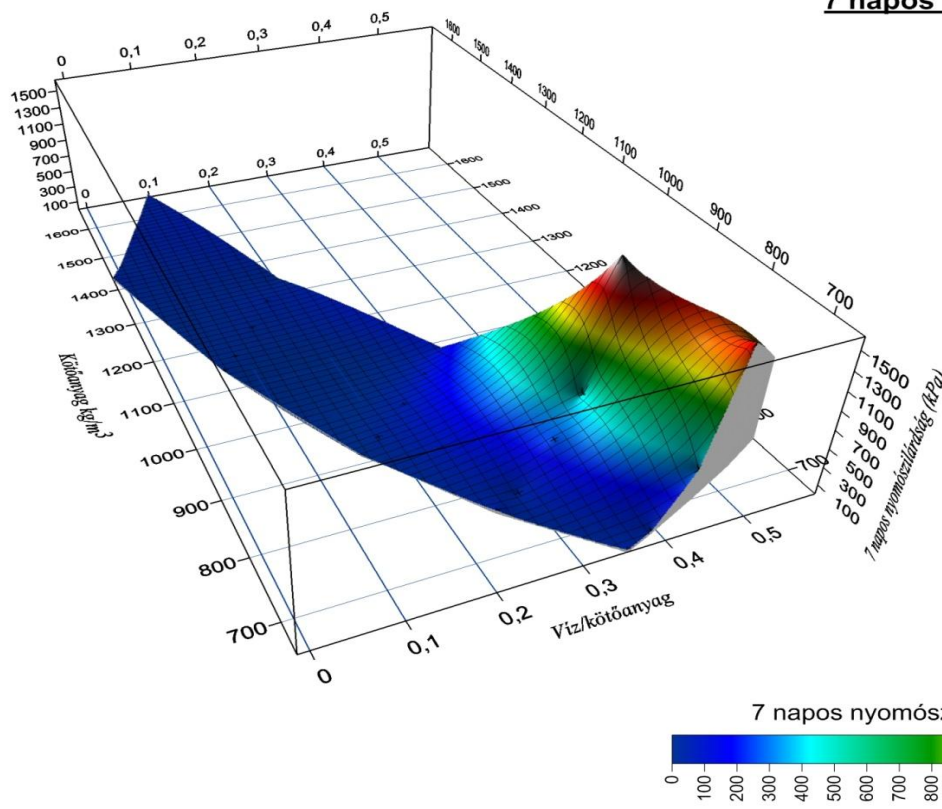
1-56 minta



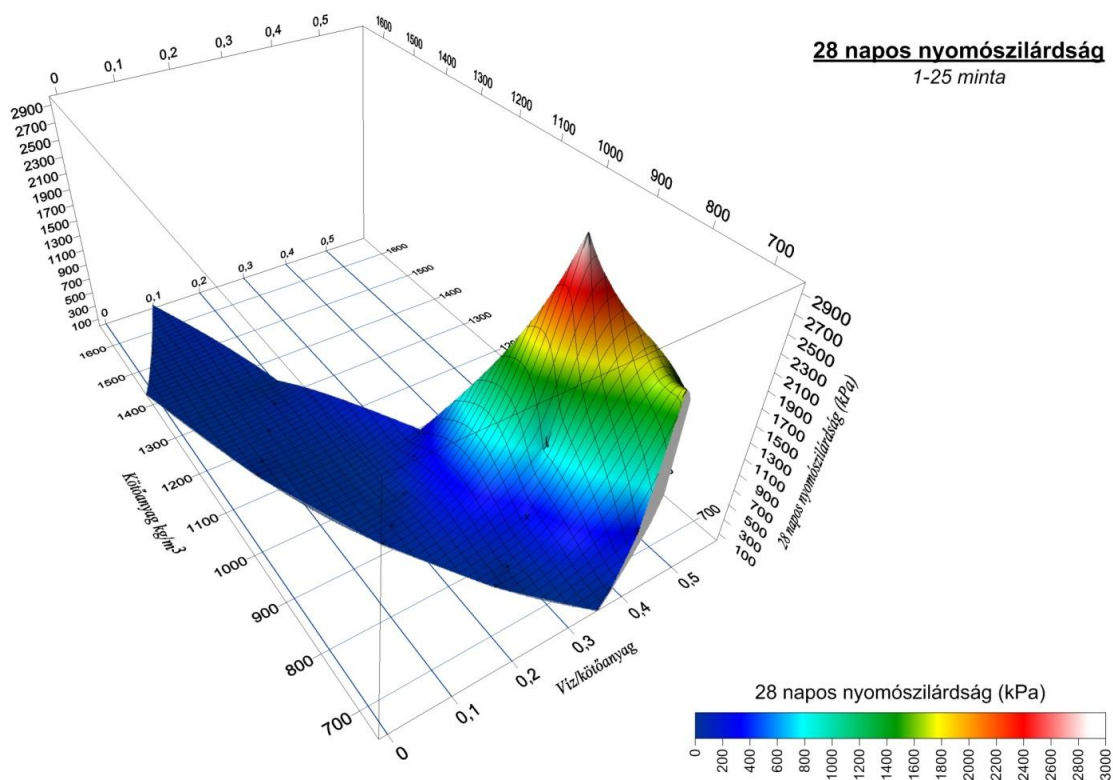
5.10 ábra: 28 napos nyomószilárdság

**7 napos nyomószilárdság**

1-25 minta

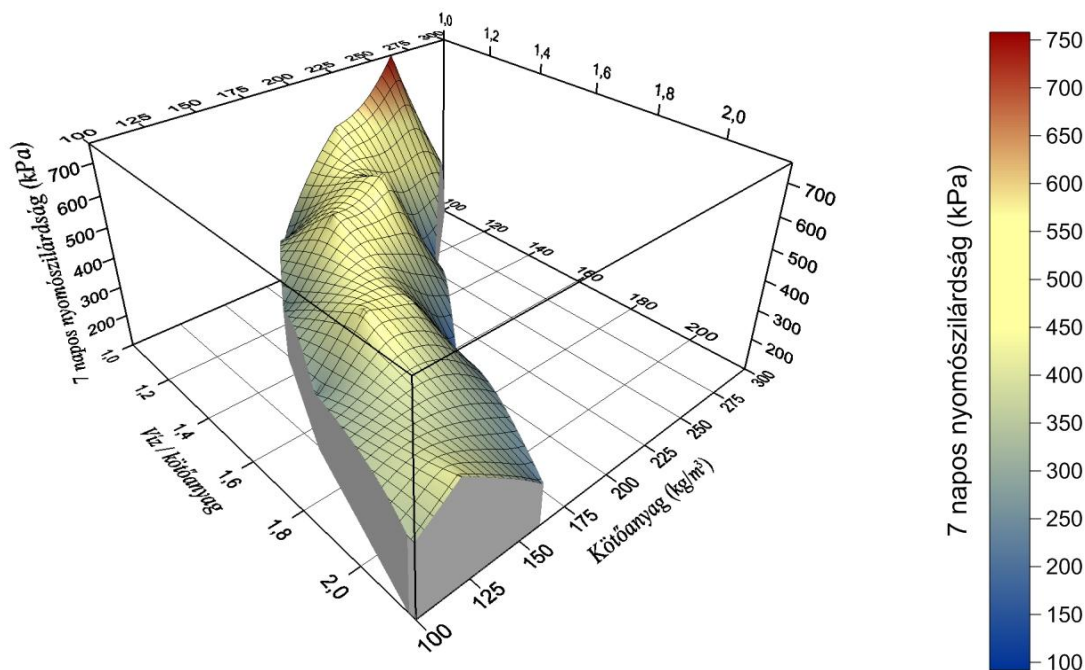


5.11 ábra: 7 napos nyomószilárdság (1-25)



5.12 ábra: 28 napos nyomószilárdság (1-25)

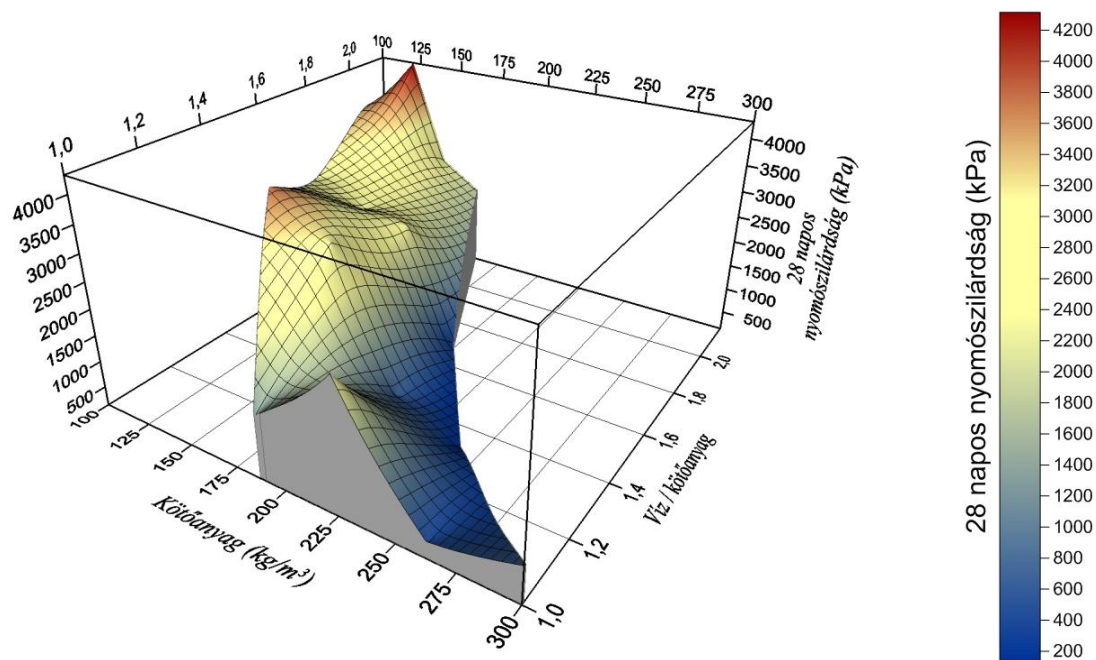
**7 napos nyomószilárdság**  
26-41 minta



5.13 ábra: 7 napos nyomószilárdság (26-41)

### 28 napos nyomószilárdság

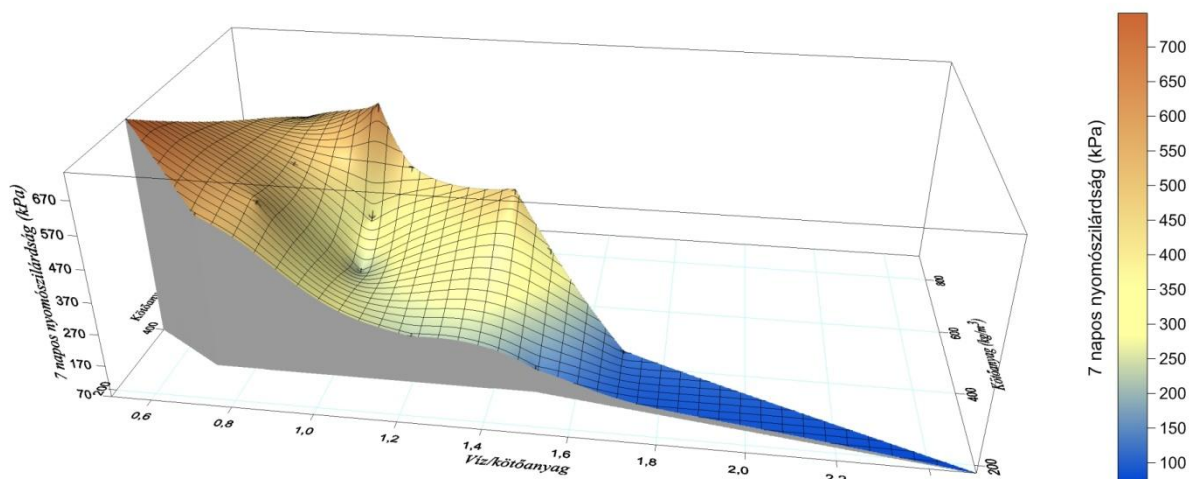
26-41 minta



5.14 ábra: 28 napos nyomószilárdság (26-41)

### 7 napos nyomószilárdság

42-56 minta

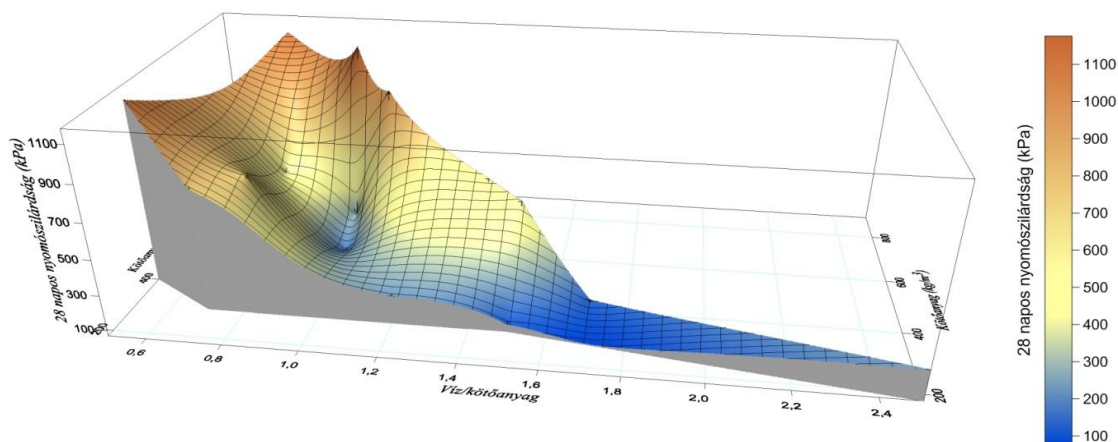


5.15 ábra: 7 napos nyomószilárdság (42-56)



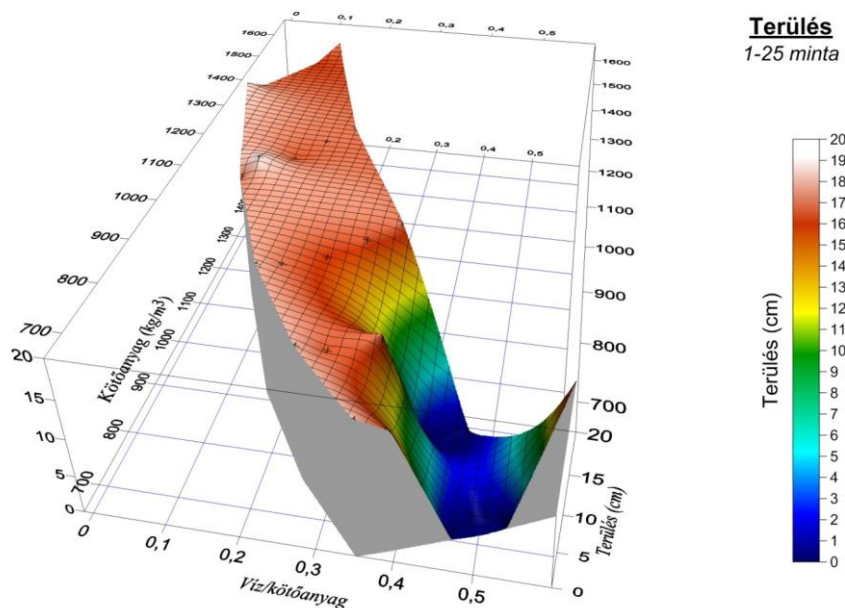


**28 napos nyomószilárdság**  
42-56 minta



5.16 ábra: 28 napos nyomószilárdság (42-56)

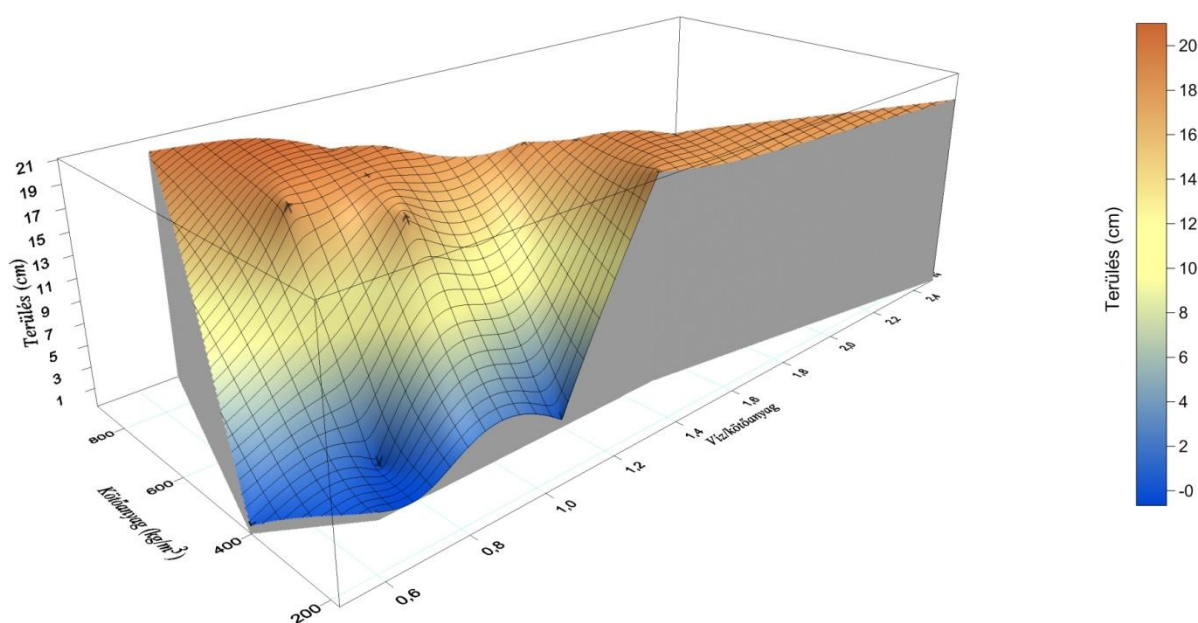
Nagyon jól szemlélteti a területi ábra (5.17 ábra) a keverékek konzisztenciáját. Az ehhez hasonló 3D-s felületeket a Surfer nevű programmal készítettem el. Látható, hogy az alacsony víz/kötőanyag tartalommal kevert minták bírnak a legnagyobb területi értékekkel (~18 cm), hiszen gyakorlatilag porszáraz konzisztenciájuk voltak, nem volt meg a finom szemcsék között megfelelő mértékű, mértékadó kohézió. Körülbelül ugyanennyi az eredmény, ha a receptúra nagyobb vízmennyiséget írt elő. Ekkor viszont már túlságosan képlékeny volt a bedolgozandó keverék, ami az ejtések közben egyre jobban szétterült. Van viszont egy keskeny sáv, ahol az eredmények zérusok, vagy közel zérusok lettek. Ezek a 0,50 víz/kötőanyag tényezőhöz tartozó próbatestek. Itt pont akkora volt a kohézió értéke, ami egyben tartotta a csonka kúp alakú próbatestet a 12 ütés végeztével is. Az előzőekben leírtakat az 5. fejezetben (Mérési eredményeim), az V.4.3 bekezdés 5.12 fényképével tudom alátámasztani. Ezen az ábrán kivételesen, csak az első 25 keverék eredményei találhatóak meg, mert a második sorozat esetében nem tartottuk szükségesnek a terület mérését. (lényegében ott a kövér agyag volt a 3 fázis közül a mértékadó, így annak nagy kohéziója egybetartotta az egész keveréket, nem lehetett ilyesfajta vizsgálatot elvégezni.)



5.17 ábra: Terület (1-25)

A harmadik (42-56) sorozathoz ismét készítettem területési ábrát, bár itt kevésbé mutatkoznak meg azok a tipikus sajátosságok, melyek az első sorozat esetében. Láthatóan elenyésző olyan próbatest volt, mely hatalmas kohézióval rendelkezett és sok olyan keverék készült, mely nagy területessel bírt. Ezek teljes mértékben hígak voltak, készítés során kétségbe vontam, hogy mérhető lesz ezeken a próbatesteken a 7 napos nyomószilárdság. Végül ugyan sikerrel zárultak a mérések, a nagyobb gondot a híg próbatestek rézhengerben tartása okozta, míg meg nem szilárdultak. Volt néhány közülük, melyekből alul, a rézhenger pereme mentén elszivárgott a receptúra által előírt víz egy része. Azt tapasztaltam, hogy ez a jelenség – a várttal ellentétben - nem folyósította be a végeredményeket. Feltehetően azért, mert a kötéshez szükséges vízmennyiség megmaradt.

**Területés**  
42-56 minta



**5.18 ábra:** Területés (42-56)

A *Surfer* nem csak a bevitt pontok helyén adja vissza az eredményeket, hanem azok között is, interpolálással végzett számítások alapján. Viszont ezek az értékek (függőleges tengelyen), csak közelítőek, így fokozott óvatossággal használhatóak megbízhatóan.

Az áteresztőképességet az 5.5; 5.6; 5.7; 5.8 ábrák szemléltetik. Látjuk, hogy a legkedvezőbb esetben is maximum  $1 \cdot 10^{-10}$ (m/s) nagyságrendű eredményt tudott szolgáltatni a kövér agyag stabilizációja pernye-keveréssel, miközben önmagában a kutatáshoz felhasznált talaj  $1 \cdot 10^{-11}$ (m/s) áteresztőképességgel rendelkezett. Ugyanakkor a kötőanyag hozzáadása az egyirányú nyomószilárdságot már kedvezően befolyásolta, abban az esetben, ha az nem haladta meg a  $400 \text{ kg/m}^3$  adagolást.

Az optimális felhasználást lehetővé tevő területet jól szemléltetik a 6.1; 6.2 és 6.17 ábrák a VI. Fejezetben.



## V.4 Elvégzett laboratóriumi vizsgálatok

### V.4.1 Áteresztőképességi együttható

Mindenekelőtt szeretnénk volna tudni azt, hogy a keverékekhez felhasznált kövér agyag, milyen áteresztőképességi együtthatóval bír. Ennek megfelelően triaxiális készülékben (5.6 fénykép) megmértük „k” értékét, mely  $4,24 \cdot 10^{-11}$  m/s-ra adódott.

Fontosnak tartottuk megmérni, hogyan viselkedik csak a kötőanyag és víz alkotta szuszpenzió különböző keverési arányok mellett, mert erre nem volt megbízhatóan használható forrásunk. Az áteresztőképességet 28 napos korban vizsgáltuk. A próbatestek méretei minden esetben különbözőek voltak, azonban a számításához felhasznált képletben ezt figyelembe vettük.



#### 5.3. fénykép:

Kísérletekhez felhasznált rézhengerek.

Szabványos méretei a következők:

Magasság (H) = 7,50 cm

Átmérő (D<sub>k</sub>) = 4,00 cm

Ennek okai a következők: a szuszpenzió sok esetben nagyon híg volt, gyakorlatilag a 0,6-os arány felettiék folyadékként viselkedtek. Ennek köszönhetően a rézhengerek aljának pereme mentén a víz elszivárgott a mintákból és majdnem használhatatlanná váltak azok. Megoldásként a rézhengereket a triaxiális vizsgálathoz használt gumimembránra helyeztük, a hengerek peremét szilikonzsírral kikentük. Hasonlóan jártunk el a hengerek belső palástjánál is. Ezzel az intézkedéssel sikerült elérni, hogy ne szökessen meg a folyadék a hengerekből és használható maradjon a minta a mérésekhez. 3 darab azonos próbatest készült minden méréshez, hogy az esetleges hibák ne befolyásolhassák az eredményeket. Sajnos volt, hogy még így sem tudtuk megmérni az áteresztőképességet, mert valótlán adatokkal tudtunk volna csak szolgálni. Az okok főként a már említett hibákon túl, hogy a szuszpenzió minimális mértékben ugyan, de zsugorodott, ezért a rézhenger palástja mentén indult meg a szivárgás. Ezt a hibát kiszűrtük a hengerek zsírral történő kikentésével. Voltak esetek, amikor a mérést az hiúsította meg, hogy a szuszpenziók kapilláris úton nem vették fel a vizet, nem telítődtek. Ekkor a változó víznyomású készülékkel nem mérhető az áteresztőképesség, ezért a mintát nyomás alatt kellett telíteni és triaxiális készülékben mérni a vízáteresztés mértékét. Erre a szuszpenzióknál csak a 0,6 arányú esetében volt egyszer szükség. Megfigyelés alapján megállapíthatom, hogy a szuszpenziók próbahengerekbe történő öntésének napja és a 28 napos kor közti időtartamban szemmel megfigyelhető térfogatváltozáson menetek keresztül. Ez a megállapítás fokozottan igaz volt a nagy víz/kötőanyag tényezővel készült mintákra. A kiöntést követő napokban látható volt, hogy a kötőanyag kicsi részecskéi leülepedtek a hengerek aljára, tehát különváltak a víztől. Egyértelműen megállapítható, hogy a kötéshez jóval kevesebb víz is elegendő, hiszen a maradék mennyiség nem vesz részt a folyamatban, csak elpárologott. Az elkészült 28 napos próbatestek porózusak voltak és kis térfogatsúllyal rendelkeztek.



A munka érdemi részét a 3 fázisú keverékek adták. Tulajdonságaikra már gyártásuk közben lehetett következtetni. Bemutatok két képet, amit a keverések közben készítettem: 5.4 fénykép.

A baloldalon látható keverékben főleg a kötőanyag dominál és érezhetően kevés a vízadagolása. Az eredmény egy, a csomós porszárak mintához hasonló próbatest, amit a kötőanyag nem tud egybetartani, hiszen nincs meg a kötéshez elegendő víz. Áteresztőképességét vizsgálva szinte használhatatlan beépítési keveréket ad, mert az összeállt csomók miatt nagy a próbatest hézagterfogata, ennek köszönhetően pedig nagy a víz-áteresztőképessége is.

A jobboldali keverékben kövér agyagból van a legtöbb, minimális kötőanyag- és vízadagolással. Látható, hogy feltapadt a keverőedény szélére, tehát nagy kohézióval rendelkezik. Tömöríthetősége igen körülményes, viszont már a próbahengerekbe töltés közben meg voltam arról győződve, hogy vízzáró lesz az eredmény. A keverék, ahogyan kezdte elveszíteni víztartalmát, úgy lett egyre nagyobb a szilárdsága és a zsugorodás mértéke is fokozódott. Így körülbelül egy 2 mm-es rés keletkezett a henger palástja és a talajkeverék között, ami miatt nem lehetett a változó víznyomású készülékkel vizsgálni bizonyos sorszámú mintákat.



**5.4 fénykép:** Két különböző konzisztenciájú keverék

A megoldást kétkomponensű önthető szilikon gumi jelentette. A hézagot ezzel az anyaggal kiinjektáltam, ami 24 óra múlva teljesen megkötött, és vízzáróvá vált. A talajminta így hézagmentesen hozzátapadt a szilikonhoz, mérhetővé téve az áteresztőképességet. A következő fényképen – 5.5 fénykép - az injektálás előtti és utáni állapot látható. A próbatestek felszínéről a mérés előtt a szilikon gumi el lett távolítva.



**5.5 fénykép:** Minták hézagkitöltés előtti és utáni állapotban

A vizsgálatokat az első sorozat (1-25 minták) esetében a már korábban bemutatott változó víznyomású készülékkel végeztem el. A második sorozatot (26-41 minták) a kis vízáteresztő képesség miatt csak triaxiális készülékben lehetett vizsgálni (5.6 fénykép), melynek jegyzőkönyveit röviden bemutatom a változó víznyomású készülék által szolgáltatott eredményekkel együtt.



**5.6 fénykép:** Áteresztőképesség mérése triaxiális készülékben



A számításához felhasznált képlet  
változó víznyomás esetén

$$k = f \cdot l / F \cdot 1 / \Delta t \cdot \ln(h_0 / h_i) \quad , \text{ ahol}$$

$k$	Áteresztőképességi együttható [m/s]			
$f$	Üvegcső keresztmetszeti területe [m <sup>2</sup> ]	$f$	1	cm <sup>2</sup>
$F$	Talajminta keresztmetszeti területe [m <sup>2</sup> ]	$F$	12,56	cm <sup>2</sup>
$l$	Szivárgási hossz, / talajminta magassága [m]	$l$	változó	cm
$\Delta t$	Két leolvasás között eltelt idő [s]	$\Delta t$	változó	s
$h_0$	$t_0$ időponthoz tartozó vízoszlop magassága	$h_0$	változó	cm
$h_i$	$t_i$ időponthoz tartozó vízoszlop magassága	$h_i$	változó	cm

A vízoszlop süllyedéséhez tartozó időértékek [s]

Minta jele	Leolvasások $h_0$ értékéhez viszonyítva (abszolútértékben) [cm]					
	10	20	30	40	$h_0$ [cm]	$l$ [cm]
A	41	90	162	232	74,00	6,30
B	56	119	198	302	67,00	6,50
C	47	103	180	290	60,70	6,00

Az egyes minták vízáteresztőképességi együtthatója [m/s]

Minta jele	Leolvasások $h_0$ értékéhez viszonyítva (abszolútértékben) [cm]					
	10	20	30	40	$h_0$ [cm]	$l$ [cm]
A	1,78E-05	1,76E-05	1,61E-05	1,68E-05	74,00	6,30
B	1,49E-05	1,54E-05	1,55E-05	1,56E-05	67,00	6,50
C	1,83E-05	1,85E-05	1,81E-05	1,77E-05	60,70	6,00

5.19 ábra: Változó víznyomású készülék jegyzőkönyv minta

A bemutatott példának megfelelően végeztem el a számítást az összes többi esetben is. Az eredmények kiértékelése a következőképpen történt: az áteresztőképesség esetében az összes mért eredményt felhasználtuk a végeredmények meghatározásához. Úgy ítéltük meg, hogy az egy nagyságrend béli eltérések itt megengedhetők, főként áteresztőképesség meghatározásánál. Különböző módon jártunk viszont el az egyirányú nyomószilárdság eredményeinek kiértékelésében: ebben az esetben nem tudtunk egyértelmű döntést hozni, melyik mérési eredményt lehetne elhagyni, ezért a kiugró értékeket statisztikai módszerrel vizsgáltuk. (Grubbs módszer, 1969) Az eredmények alapján végül nem volt szükséges törölni egyetlen mérési eredményt sem. A harmadik sorozat esetében már nem került sor erre, hiszen az eredmények között kisebb szórást tapasztaltam, mint az első két sorozat esetében. Értelemszerűen így itt sem kellett volna egyetlen eredményt sem elhagyni. A módszert az 1 mellékleten szemléltetem. A végső táblázatba, melyet az 5.20 ábra mutat, csak a végleges eredmények kerültek bele. Minden mérésből a tervek szerint 3 darab volt, ezeknek a számtani átlagát képeztem.



Vízáteresztőképességi eredmények  $k$  [m/s]

Keverékek

Szuszpenzió

Minta jele	Átlag	Minta jele	Átlag	Arányok Víz/Kötőanyag	Átlag
1	2,26E-05	26	4,72E-08	0,6	2,96E-05
2	1,69E-05	27	1,44E-09	1,0	2,88E-07
3	8,05E-05	28	1,66E-09	1,5 eredeti	8,96E-08
4	1,81E-04	29	4,28E-09	1,5 utókeverés	1,51E-07
5	3,74E-04	30	9,89E-09	2,0 eredeti	1,88E-05
6	2,21E-06	31	1,62E-09	2,0 utókeverés	1,51E-07
7	3,73E-05	32	2,91E-09	2,5	3,82E-06
8	7,92E-05	33	2,94E-10		
9	2,40E-04	34	1,47E-08		
10	-	35	1,49E-08		
11	6,91E-06	36	8,98E-10		
12	5,95E-05	37	7,42E-09		
13	1,76E-04	38	1,60E-09		
14	7,74E-06	39	9,01E-09		
15	2,24E-04	40	7,40E-10		
16	1,13E-05	41	2,61E-09		
17	1,36E-04	42	4,80E-08		
18	3,97E-05	43	2,78E-07		
19	-	44	-		
20	2,12E-04	45	2,70E-07		
21	2,86E-05	46	1,85E-07		
22	2,62E-04	47	1,61E-07		
23	1,97E-04	48	4,41E-07		
24	3,64E-05	49	5,37E-07		
25	-	50	1,54E-08		
		51	2,25E-07		
		52	3,67E-07		
		53	-		
		54	1,98E-06		
		55	1,92E-06		
		56	1,02E-08		

5.20 ábra: Áteresztőképességi eredmények összefoglalva

Jelen táblázat csak a konkrét eredményeket mutatja, a keverékek összetétele viszont nem derül ki belőle. A sorszámok ismeretében viszont a 9. fejezet 2; 3; 4 mellékleteiben megtalálható táblázatokból kiolvashatóak az összetételek receptúrái is. A könnyebb átláthatóság érdekében 3D-s diagramok szolgálnak a legtöbb információval, melyet szintén a fent megjelölt fejezetekben találhatunk meg.

Ha a szuszpenziók átlagát elemezzük, egyértelműen kiderül, hogy a 1,50 arány a megfelelő, azaz több vízre van szükség az előállítás során, mint kötőanyagból. A  $\sim 10^{-8}$  nagyságrend már rossz vízvezetőnek minősíthető, ami – ha csak önmagában a szuszpenziót néznénk – már bizalomra adhatna okot a további kutatásra. Viszont hasonló víz/kötőanyag arány mellett, miután hozzákevertünk kövér agyagot, sajnos ugyanez már nem mondható el, hiszen az 5.20



ábra táblázatából kitűnik, hogy az értékek legalább 2 nagyságrendű esést produkáltak. A kötőanyag gyártó vállalat termékismertetőjében  $1 \cdot 10^{-8}$  [m/s] vízáteresztő képességet garantálnak meghatározott feltételek mellett, amit a termék valóban teljesít.

A további eredmények alapján az első 25 minta jó vízvezetőnek mondható, tehát nem felelnek meg a kívánt kritériumoknak. Kitűnik, hogy az eredmények átlaga  $\sim 10^{-5}$  nagyságrendű, rendkívül kiugró eredmény nem született, annak ellenére, hogy mind különböző receptúrával készült. Érdekesebb eredmények mutatkoznak a nyomószilárdsági értékekben, melyeket hamarosan ismertetek.

A következő sorozatból (26-41) látható, hogy el tudunk érni megfelelő áteresztőképességi együtthatót, csak jól kell meghatározni hozzá az agyag, kötőanyag és víz kombinációját. Megállapítható, ha relatívan nagy mennyiségű kötőanyagot alkalmazunk, és azt keverjük az agyaghoz (ez látható a receptúrákból), akkor a stabilizáció negatív következményekkel jár. Viszont, ha az agyag mennyisége a számottevő a három fázis közül, akkor sikeres a beavatkozás.

Az utolsó sorozat esetében (42-56) láthatjuk, hogy a fenti két sorozat értékei között helyezkedik el az adatsor. Ez nem meglepő, hiszen a receptúra úgy lett megválasztva, hogy lefedje a még nem vizsgált tartományt. Az eredmények pedig a vártaknak megfelelően alakultak, azok az első és második sorozat értéktartománya között helyezkednek el. Elmondható róluk, hogy a kötőanyag függvényében egyértelmű tendencia figyelhető meg.

Ezek a következtetések kizárólag a korábban megnevezett kövér agyaggal és kötőanyaggal történő felhasználásra érvényesek a már ismertetett követelményekkel együtt!

Fontos felhívni a figyelmet, hogy a már eddig felsorolt tényezőknél túl a víz áteresztőképességet befolyásolhatják az alábbiak is:

- ✓ A nedves eljárás esetén általában jobb, homogén állandó szerkezetű talajt szolgáltat, mert hosszabb a keverési idő, jobb a cement előzetes hidratációja és a szuszpenzió fal körüli eloszlása.
- ✓ A kötőanyag bentonittal vagy agyaggal történő helyettesítése javítja a nagy víz/kötőanyag tartalmú kötött talajok stabilitását, azonban rontja azok áteresztőképességét.
- ✓ Száraz keverés esetén a vízáteresztő-képesség nagyobb lehet, mint a környező talajé, s így a vízzáró fal meggyorsíthatja a konszolidációs folyamatot.

#### V.4.2 Egyirányú nyomószilárdság mérése

A szilárdulás nyomon követhetősége érdekében a próbatesteket 7 és 28 napos korban vizsgáltuk. Voltak olyan minták, melyeket nem lehetett épségben kivenni a rézhengerekből kiszúróhenger segítségével sem. Ezek az esetek az első 25-ös sorozatnál fordultak csak elő. Ennek okai, hogy a próbatestek már a keverést követően is hasonló állaggal rendelkeztek, mint egy kissé nedves kötőanyag. Így nem volt esélye összetartani a részecskéket a kötőanyagnak, 28 naposan is minimális szilárdsággal bírtak. Közülük sok már önsúlyra szétporlott, vagy a terhelő berendezésbe történő behelyezés közben semmisült meg. Ahol sikerült mérni nyomószilárdsági értékeket, azok nem mondhatóak szabványos méréseknek. Tudjuk, hogy a nyomószilárdság vizsgálatakor nagyon fontos, hogy a minták véglapjai párhuzamos síkok legyenek. Számos módszerrel és eszközzel el lehet ezt érni, (készel, kőzetvágó fűrésszel stb.) de hiába próbálkoztunk, a legapróbb beavatkozásra szétesett a próbatest.





5.7 fénykép: Vizsgálatok során használt törőgépj

Ezek az esetek csak az első 25-ös sorozatból kikerülő minimális vízmennyiséggel kevert próbatestekre vonatkoznak. A többi esetben gond nélkül kivehetőek voltak a minták a szilikonzsírnak köszönhetően, vagy zsugorodásukból kifolyólag. Bemutatok két fényképet azokról a próbatestekről, melyek minimális szilárdsággal rendelkeztek.



5.8 fénykép: Kis szilárdságú próbatestek nyomószilárdság mérés előtt

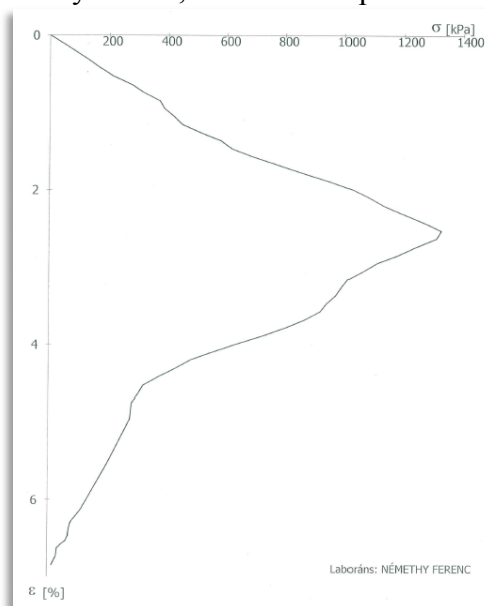
*Az egyirányú nyomószilárdság vizsgálatának menete a következő volt:*

- ✓ Elsőnek a mintát helyeztem be a nyomóberendezésbe és rátettem arra a teherátadó fejet
- ✓ A mérőberendezést beállítottam, hogy a mérés indítása után azonnal biztosíthassa a teherátadást.

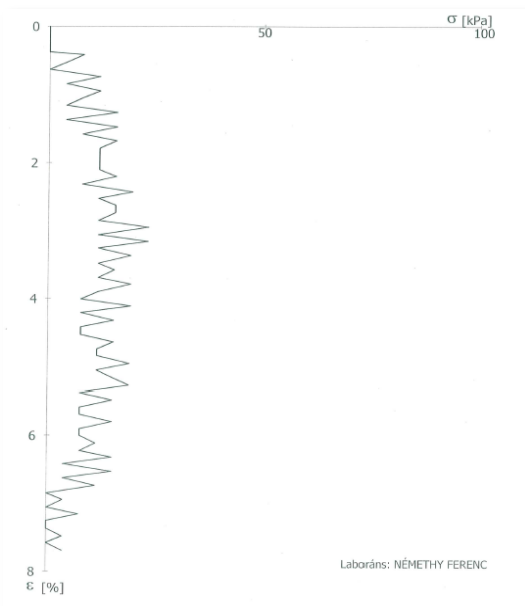


- ✓ Az elmozdulásmérő órát kinulláztam.
- ✓ A számítógépen futtatott programon a mérést elindítottam, majd végül a terhelést is.
- ✓ Állandó sebesség mellett, azaz 1 mm/perc sebességgel történt a terhelés, ami a szabványnak így eleget tett. Az alakváltozás a törésig tartott. Ezzel egy időben, de különböző időpontokban mértük az elmozdulást és az erő nagyságát.
- ✓ Az eltört próbatestekről fényképet készítettem és egyes esetekben mértem a csúszólap hajlásának szögét is.
- ✓ Mérési eredményeket feldolgoztam

Az egyirányú nyomókísérlet jegyzőkönyvei alapján is egyértelműen meghatározhatóak azok a próbatestek melyek rideg töréssel mentek tönkre, és amelyeknek nem volt kifejezett csúcspontjuk. Minden esetben a maximális értékeket vettem figyelembe, de fontos kiemelni, hogy a kis szilárdságú minták esetében a teherelosztólapnak csak egy kis pontján került a teher közvetítésre. Így a próbatestnek egy-egy lokális kis környezetében jóval nagyobb feszültségek ébredhettek valójában, mint a mért értékek. A következő két ábrán (5.21 és 5.22 ábrák) látható bemutató diagram megmutatja a mért feszültségeket a fajlagos alakváltozás függvényében. Amelyik diagramon hosszan elnyúló, kiemelkedő csúcspont nélküli görbe található, annak részben a fent részletezett probléma az oka. Ehhez a függvényhez tartozik az 5.8. fényképen látható próbatestek egyike is. A próbatest lassú tönkremenetelére érthetőbb magyarázat lehet, hogy az éppen kis területen érintkező részekben feszültség koncentráció jött létre, és ahogy elérték ellenállásukat, szétporladtak. Ezt követően mivel nem volt sík a próbatest felülete, a folyamat sokszor ismételte önmagát. További követelménye a szabványos mérésnek, hogy a minta magasságának és átmérőjének aránya  $h/d = 1,5$  legyen legalább. A problémás esetekben ez a követelmény sem teljesült. Ezek a hibák azonban a végleges döntést nem befolyásolták, hiszen a receptúra kiválasztása nem e minták közül történt.



5.21 ábra



5.22. ábra

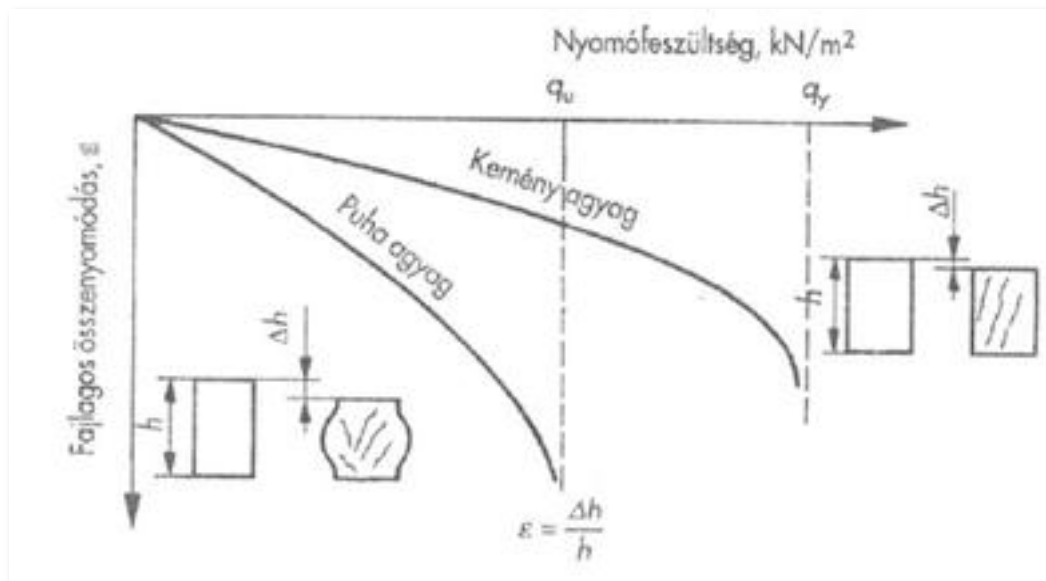
Egyirányú nyomószilárdság jegyzőkönyv minták

5.21 ábra: Merev stabilizált talajminta hirtelen töréssel megy tönkre és törésképét határozott törésvonalak alkotják. A törőfeszültség egyértelműen meghatározható.

5.22 ábra: Lassú elhúzódo tönkremenetel, éles csúszólap nélküli törés jellemzi.

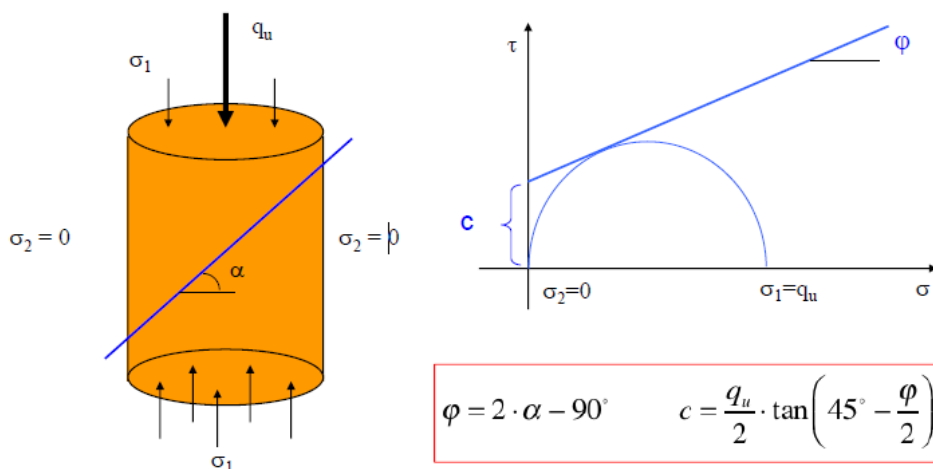
Amikor a töréseket a második sorozat mintákon végeztük, azok az első sorozathoz képest puhábbak voltak az agyagtartalom növelése miatt, főleg 7 napos korban. (nedvességtartalom is befolyásolja a nyomószilárdságot, ahogyan azt a kapcsolódó laborvizsgálatok részben írtam) A vizsgálat eredménye az, hogy a minta összenyomódása nagyobb, és kisebb erő hatására plasztikus folyással ment tönkre. A minta kihasadott, a felületén sok szabályos alakú finom csúszólap volt látható. A törőerő ebben az esetben nehezen értelmezhető. Ezért ilyen esetben a 20% fajlagos összenyomódáshoz tartozó terhelési értéket nevezzük törőerőnek.

A leírtakat a könnyebb megértés miatt egy ábrával és a laboratóriumi vizsgálatok során készített fényképekkel is alátámasztom.



5.23 ábra: Puha- és kemény agyag alakváltozási görbéi az egyirányú nyomóvizsgálat során [Rémai, 2009]

Az előző ábrán látható függvények helyességét teljes egészében alátámasztja a laboratóriumi kísérletekből kapott nyomószilárdsági diagramok és törésképek is. A laboratóriumi jegyzőkönyvekből többet itt nem mutatok be, viszont a törésképekre kicsit bővebben kitérek.



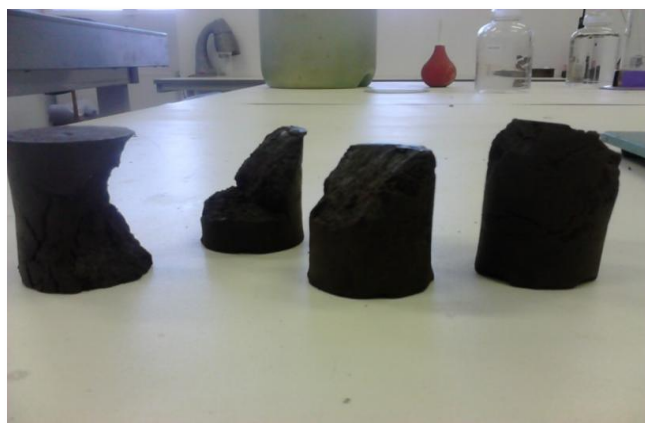
5.24 ábra: A talajmintákon látható repedések a belső súrlódási szöggel való összefüggése

Az ábrán a Coulomb-féle egyenest láthatjuk. Ennek az egyenesnek a függőleges tengelyén lévő metszéke megadja a talajminta kohézióját ( $c$ ,  $\text{kN/m}^2$ ), a vízszintessel bezárt hajlásszöge ( $\varphi$ ) pedig a talaj belső súrlódási szögét)



5.9 fénykép: Stabilizált talaj, különböző törésképei

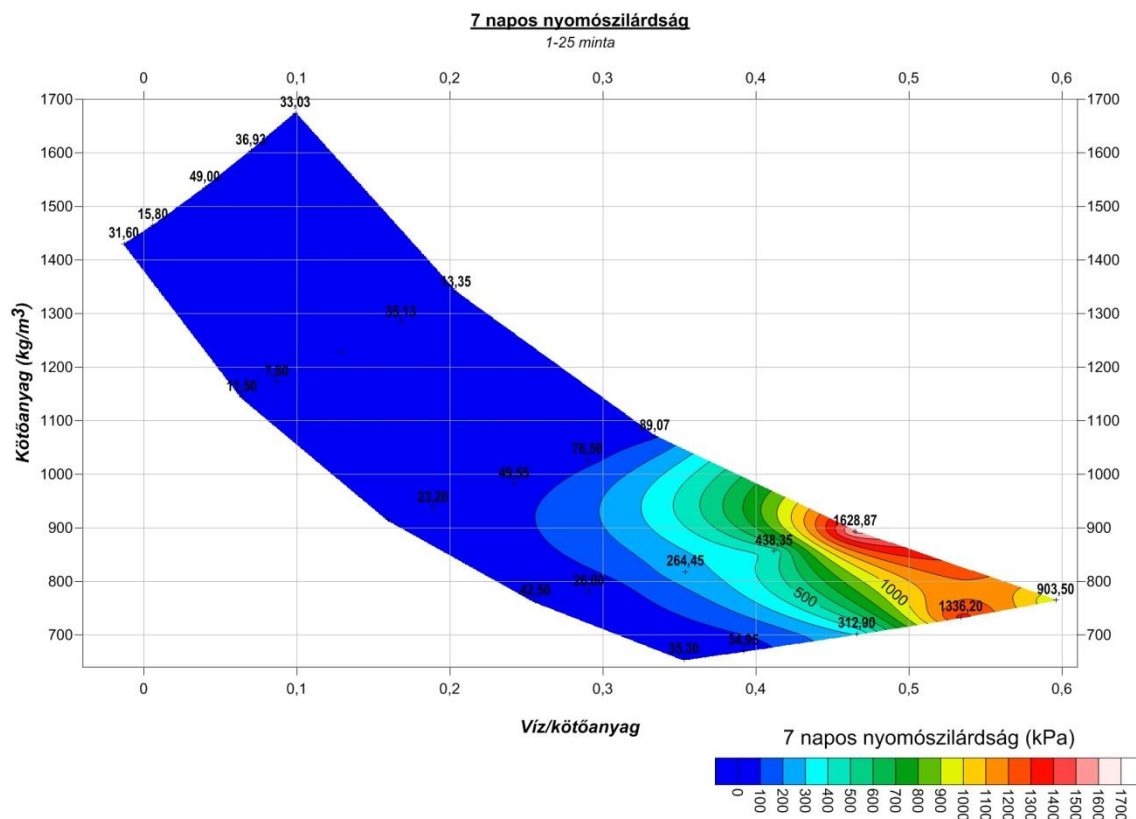
A fenti két fényképen egyértelműen kivehető a csúszólap és annak szöge. Érdekeség, hogy voltak olyan próbatestek is, melyek a betonkocka törésénél megfigyelhető jellegzetes homokóra alakban törtek. Ennek oka feltehetően az, hogy ezek a minták a túlzott kötőanyag adagolás miatt a nagy szilárdságot érték el, mely  $1500\text{-}2000$   $\text{kPa}$  körüli a képen látható esetekben. A laboratóriumi mérések alapján a belső súrlódási szög  $\varphi = 45^\circ$  körülire adódott ezekre a próbatestekre.



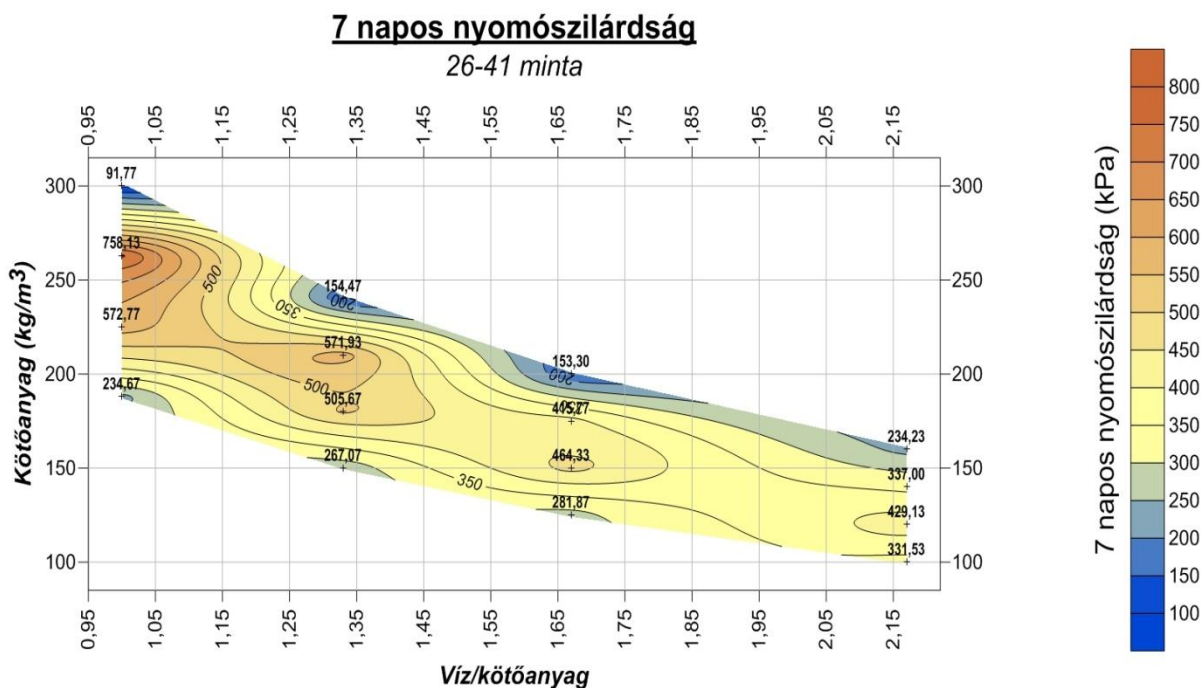
5.10 fénykép: Puhább, alacsonyabb szilárdságú kövér agyagok törésképei

A fenti két fénykép jól mutatja a keverékek összetételének a változását.

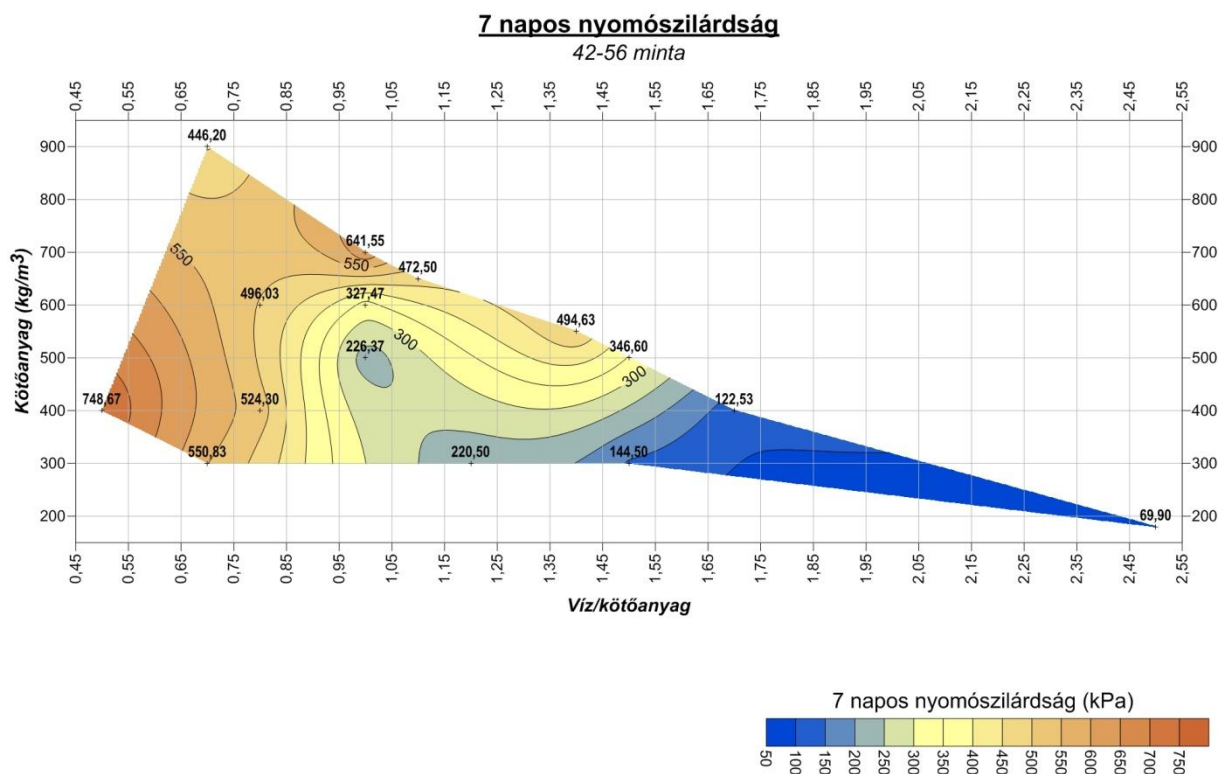
A következő ábrákon összefoglalom az egyirányú nyomószilárdság eredményeit, ismételten csak sorszám alapján azonosíthatóak az egyes keverékek. Az összefoglalásban részletesen elemzem, mi az oka az egyre növekvő értékeknek.



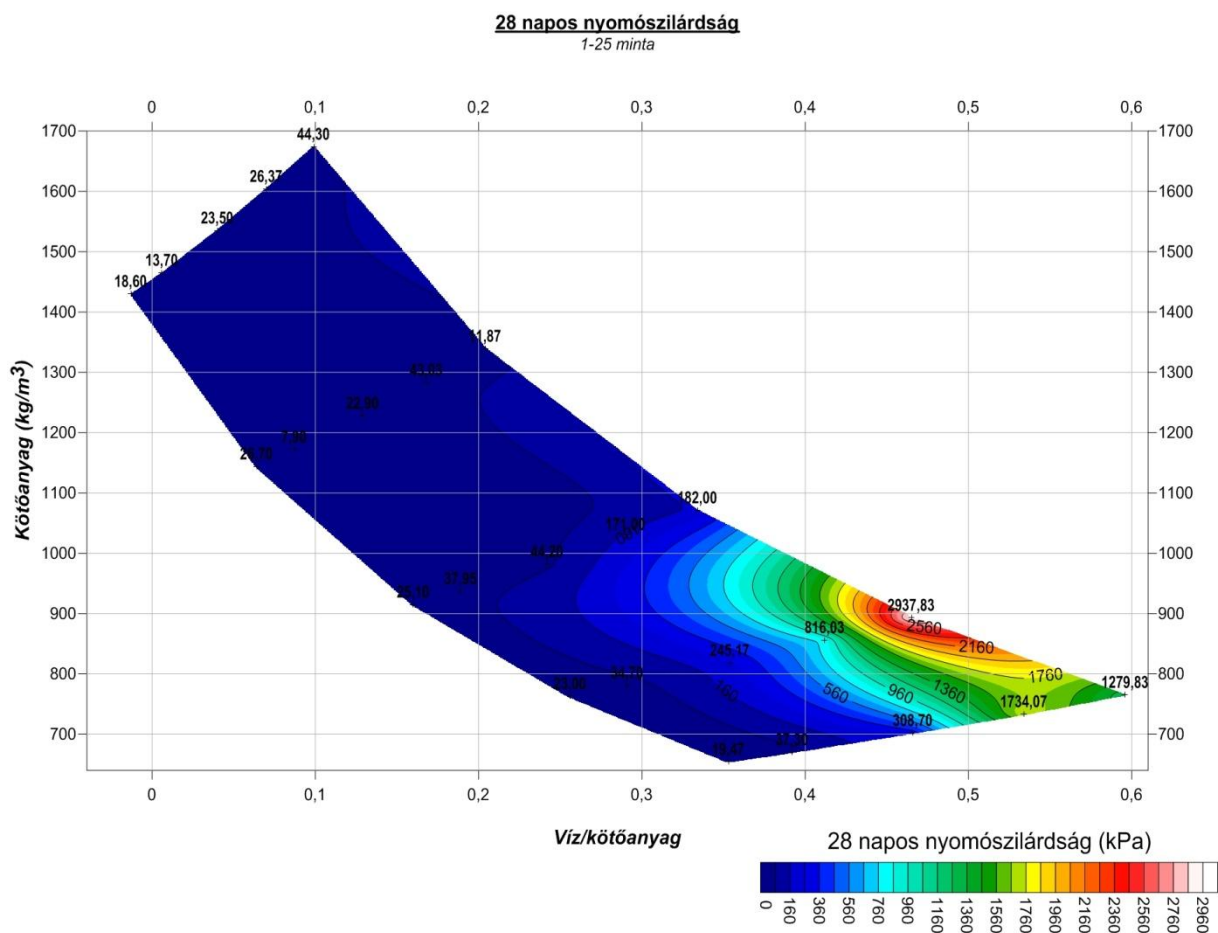
5.25 ábra: Stabilizált talaj 7. Napos nyomószilárdsági értékei (1-25)



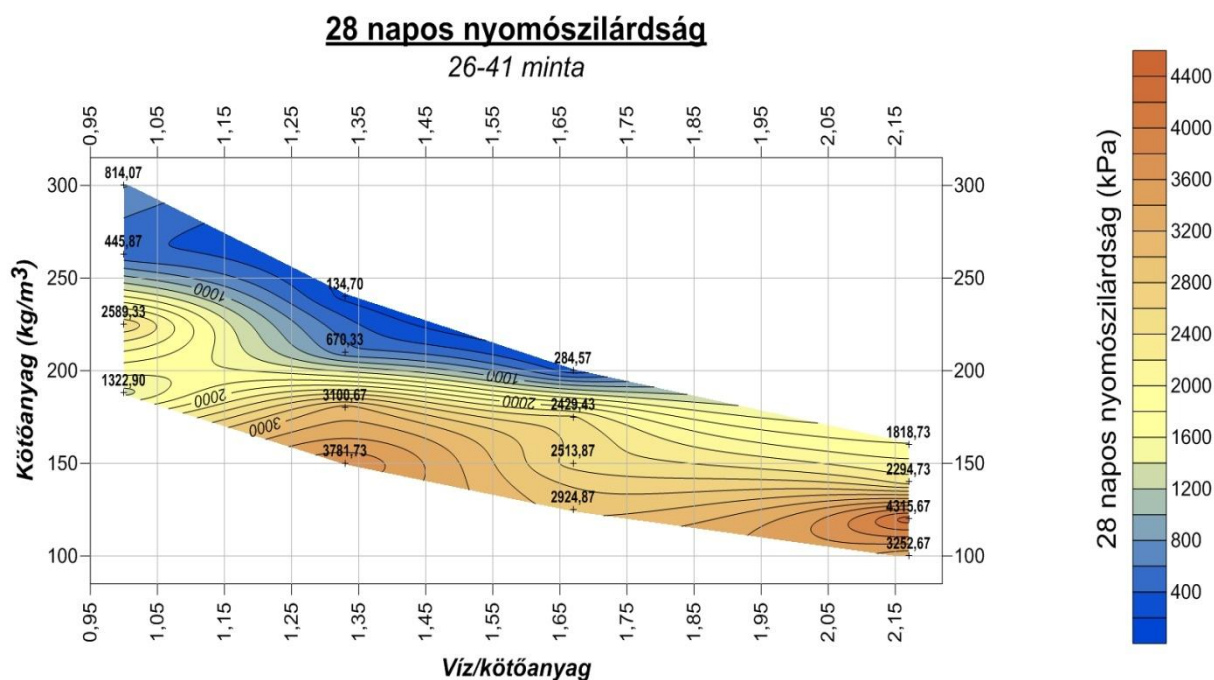
5.26 ábra: Stabilizált talaj 7. Napos nyomószilárdsági értékei (26-41)



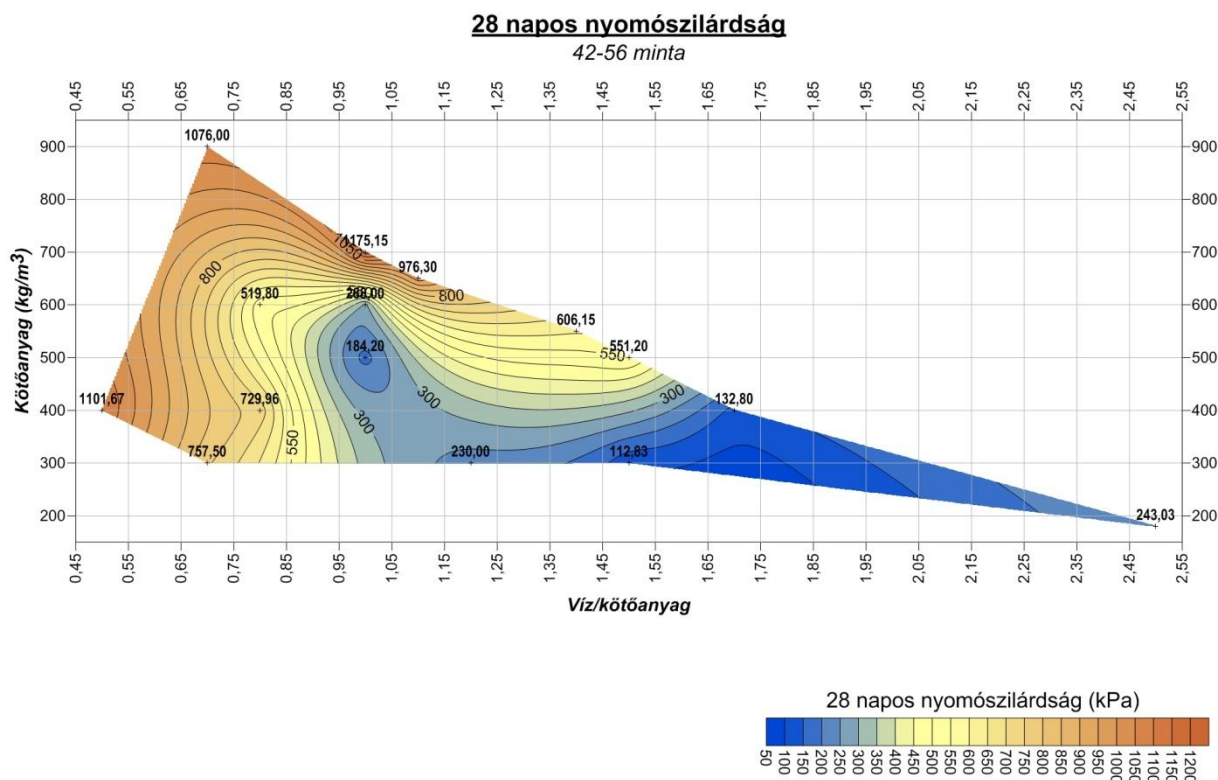
5.27 ábra: Stabilizált talaj 7. Napos nyomószilárdsági értékei (42-52)



5.28 ábra: Stabilizált talaj 28. Napos nyomószilárdsági értékei (1-25)



5.29 ábra: Stabilizált talaj 28. Napos nyomószilárdsági értékei (26-41)



5.30 ábra: Stabilizált talaj 7. Napos nyomószilárdsági értékei (42-56)

A folyamatosan növekedő tendencia megfigyelhető a diagramokon, kivéve a 25. sorszámú mintát, ahol már a túl magas víz/kötőanyag tényező miatt szilárdságromlást tapasztaltam. Az első sorozat próbaestjei valójában már nem egy kötött talaj viselkedésének tulajdonságait mutatták a túlzott kötőanyag felhasználás miatt, hanem egy erősen stabilizált, cementált talajét. A második sorozat eredményeiből látható, hogy van egy csúcs az értékek



között, ez a 33. sorszámú minta. Ennél sikerült megtalálni a három fázis egyensúlyát, hiszen az ezt megelőző és követő próbatestek receptúrái nem képesek ezt a szilárdsági értéket hozni. A harmadik sorozat eredményei nyomószilárdsági értelemben szintén illeszthetők az első, második sorozat értékei közé, hasonlóan az áteresztőképességnél tapasztaltakhoz.

*A nyomószilárdsági értékeket befolyásolják továbbá az alábbiak is: (Koch, 2013)*

- ✓ A keverést nagy energiával kell végezni, mivel ennek előnye az is, hogy csökkenti a minták jellemzőinek szórását. Kérdéses, hogy a keverési idő hogyan hat a nyomószilárdságra. (ezt nem vizsgáltuk)
- ✓ A felesleges víz, a nagy víz/kötőanyag tényező rontja a nyomószilárdságot, mint ahogyan az már ismert a betonvizsgálatokból. A szilárdság lineárisan csökken a növekvő víztartalommal, így az áramló talajvíz cementkimosódást okozhat.
- ✓ A nagyon magas víztartalmú talajokat kivéve nagyobb szilárdságot kapunk nedves eljárással.
- ✓ Az agyagos talaj - ellentétben a szemcsés talajjal -, csökkenti a szilárdságot, ezért nagyobb kötőanyag-mennyiséget igényel, mint például a homok. Lassú kezdeti szilárdulás jellemzi, puccolán reakció és szilárdságnövekedés lép fel az idő múlásával, az apró szemcsés kötött talaj gátolja az alkotók egyenletes eloszlását és csökkenti a kezelt talaj alacsony áteresztőképességét.
- ✓ A szerves anyag tartalma a talajnak negatívan befolyásolja a szilárdságot; 6% szerves anyag tartalom feletti és pH<5 talaj már nehezen javítható.
- ✓ A kötőanyag tulajdonsága is befolyásolja az anyag hosszútávú szilárdságát: a kohósalak tartalmú kötőanyag választása a célszerűbb.
- ✓ Víz/kötőanyag tényező: növelésével jobban nő a szilárdság, mint egyszerűen csak a kötőanyag tartalom növelésével. A magas tényező késlelteti a hidratációs szilárdságnövekedést és kisebb a 28 napon túli utószilárdulás is, viszont segíti a keverést. Az alacsony arány minimalizálja a többletvizet.
- ✓ Az anyagba kerülő légzárványok miatt kisebb lesz a szilárdság, de a fagyással-olvadással szemben nagyobb ellenállás lehet, mint betonok esetében.
- ✓ Időtényező: lényeges kérdés a hosszútávú szilárdságnövekedés. Irodalomkutatás alapján azt lehet mondani, hogy a szilárdság 2-3-szorosára nő a kezelés utáni 10-20 évben. Száraz eljárás esetén nagyobb növekedést figyeltek meg, miközben a növekvő víz/kötőanyag tényező mérsékli a hosszútávú szilárdságnövekedést. Megfigyelések szerint és a kezelt talaj térfogatűrűségének és nedvességtartalmának az időbeli változása nem jelentős. Azonban a tervezési gyakorlatban a 90 napon túli szilárdságnövekedésre már nem számítunk.
- ✓ Lényeges kérdés a különböző környezeti hatásoknak kitett stabilizált talaj hosszú távú romlása például édes/sós víz, vagy szennyeződés miatt. Irodalomkutatás alapján laboratóriumi és terepi megfigyelések szerint a romlás az idő logaritmusával közel egyenesen arányos és a nagyobb kötőanyag-tényezőjű talajokban kisebb a romlás mélysége.





### V.4.3 Egyéb laboratóriumi mérések



A plasztikus, illetve a folyási határhoz tartozó víztartalmat gravimetrikus módon határoztam meg:

Ez egy szárítószekrényes, tömegmérésen alapuló vizsgálati módszer. A nedves talajt tömegmérés után szárítószekrényben 105 fokon tömegállandóságig szárítottam, majd a minták száraz tömegét újra megmértem.

A kapott nedvességkülönbség alapján a talaj nedvességtartalmát a száraz talaj tömegéhez viszonyított tömeg %-ban fejezzük ki, mely alább látható.

**5.11 fénykép:** Talaj folyási határhoz tartozó víztartalom

$$N_{t\%} = \frac{G_n - G_{sz}}{G_{sz}} * 100$$

ahol:

$N_{t\%}$  = nedvességtartalom tömeg %-ban

$G_n$  = nedves talajminta tömege

$G_{sz}$  = száraz talajminta tömege

Az V.3.2 fejezetben (Talaj paramétereinek jellemzői) leírtaknak megfelelően számítottam a konzisztencia- és plasztikus indexet. Értékei a következők:

Plasztikus index:  $I_p = 80,56 \%$

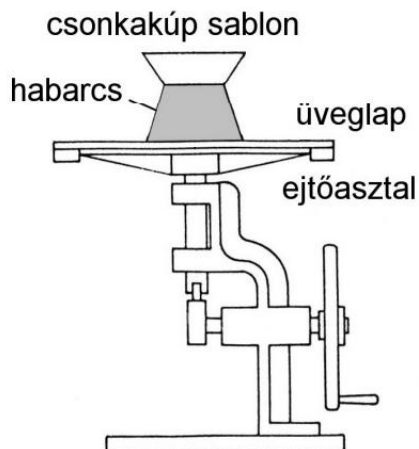
Konzisztencia index:  $I_c = 1,00$

*Terület mérés*

A keverékek gyártása során a bedolgozhatóság miatt mértem a területi értékeket is. A keverési energia minimalizálása érdekében fontos, hogy a lehető legkönnyebb bedolgozhatóságot biztosíthassuk, úgy, hogy az anyag megfelel a feltételeknek.



A legtöbb esetben nem nevezhetjük a méréseimet szabványosnak a konzisztencia miatt. A vizsgálatot a habarcssterülés-méréshez használatos Haegermann ejtőasztalal oldottam meg.



5.31 ábra: Haegermann ejtőasztal

Az ejtőasztalt 15 másodperc alatt kellett 15-ször ejteni, miután a csónkakúp alakú sablont eltávolítottam. (Előzetesen a sablonba az anyagot tömörítve kellett elhelyezni.) A keverékek terülését mérőszalaggal megmértem mind a két irányban, majd átlagoltam, végül ezeket az eredményeket táblázatba foglaltam.

**Területi értékek [cm]**

Próbatest jele	Terület [cm]
1	18,50
2	17,00
3	18,00
4	18,00
5	18,00
6	17,00
7	19,00
8	17,00
9	16,50
10	16,00
11	16,50
12	16,50
13	16,00
14	17,00
15	0,00
16	16,00
17	17,00
18	16,50
19	0,00
20	0,00
21	17,00
22	17,00
23	17,00
24	0,00
25	18,00

Megfigyelhető, hogy vannak olyan esetek, ahol a terület nulla. (A nulla azt jelenti, hogy a keverék nem terült, ez alatt minden esetben a csónkakúp sablon aljának névleges átmérőjét értem.) A második sorozat keverékeinek gyártása közben az az elhatározás született, hogy nincs értelme mérni területet, mert egyértelműen nulla lenne az eredmény.

**Területi értékek [cm]**

Próbatest jele	Terület [cm]
42	0,00
43	0,00
44	18,50
45	20,00
46	20,00
47	20,00
48	19,00
49	19,00
50	18,50
51	19,00
52	19,00
53	17,00
54	18,50
55	0,00
56	0,00

Az agyag már önmagában is nagy kohézióval rendelkezett, így tömörítés és ejtés után is megtartotta a csónkakúpba betöltött alakját. Arra következtethetünk belőle, hogy a bedolgozhatóság nehéz és nagy energiaigényű lesz.

5.32 ábra: Területi értékek



5.12 fénykép: Kis- és nagy kohézióval rendelkező minták



5.13 fénykép: Az első sorozat legmagasabb víz/kötőanyag arányú keveréke

A fenti két kép (5.12; 5.13 fénykép) mutatja a jellegzetes eredményeket. A baloldalon a porszáraz minta ejtés utáni állapotát láthatjuk. Tömöríthetősége jó, (vízzáró résfalba az anyagnak öntömörödőnek is kell lennie) A jobboldali kép a nagyobb vízadagolás melletti konzisztenciájú keveréket szemlélteti. Itt már a nagy belső összetartó erő miatt az anyag nem esett szét az ejtés hatására. A hasonló állagú anyag próbatestekbe töltés közben erősen rátapadt az ujjakra és a szerszámokra. Próbahengerekbe töltés és tömörítés közben oldalirányba próbált kitérni, körülményes volt dolgozni vele.

Az alsó 5.13. fénykép 2,50-es hozzáadott víz/kötőanyag aránnyal készült. Nagy a kötőanyag felhasználása, így gazdaságtalan, viszont a bedolgozhatósága kedvező és nyomószilárdsága az egyik legjelentősebb.

#### Zsugorodás mérése

Minden különböző sorszámú próbatest más-más mértékben zsugorodott. Ennek mértékére a receptúra adataiból már következtetni lehet: legmarkánsabban a nagy agyagtartalommal rendelkező minták zsugorodtak, (26-41 minták) minimálisan pedig azok, melyeknek fő összetevője a pernye alapú kötőanyag volt. (1-25 minták) A zsugorodás mértékét jól szemlélteti a már korábban bemutatott 5.5 fénykép.

A zsugorodás pontos mértéke minden próbatest esetében különbözött, hiszen ennek mértékét befolyásolja a kezdeti víztartalom és az utókezelés mértéke. A próbatestek vizsgálatukig szobahőmérsékleten voltak tárolva levegőn, a keveréskori víztartalom a fő befolyásoló tényező. Ennek megfelelően, csak a zsugorodás átlagos mértékét tudom ismertetni.



A zsugorodás mértékét meg tudjuk határozni higanyos térfogatméréssel, vagy egy tolómérő segítségével. Ezt az utóbbi módszert használtam, azonban ez egyben pontatlanabb is. Megmértem a talajminta átmérőjét és magasságát, amiből számítani tudtam annak térfogatát. A próbahengerbe betöltött kezdeti mennyiség ismeretében %-osan meg tudjuk mondani a zsugorodás mértékét.

A talaj-keverékek átlagos zsugorodásának mértéke: 40,4 %



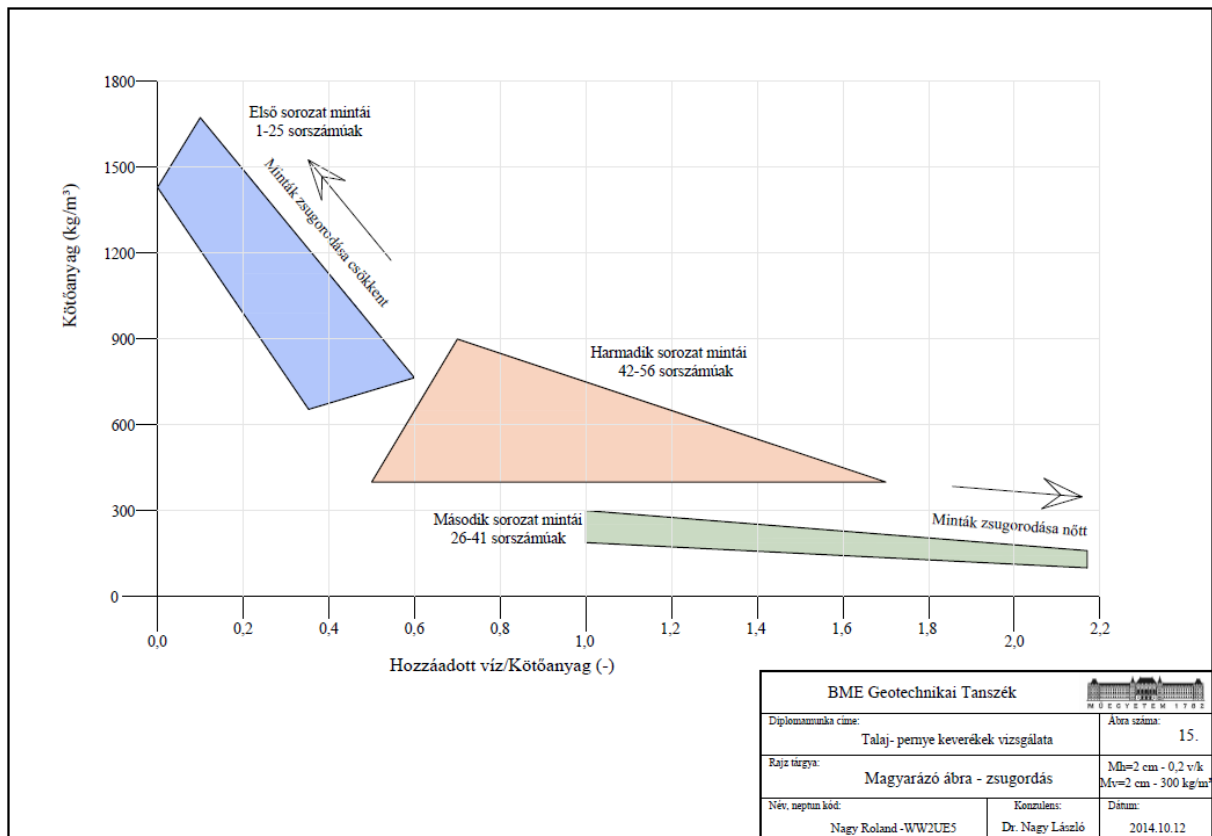
## **VI. Összefoglalás**

Összefoglalva az eddigiekben leírtakat, fel kellett tárnom a különféle módszereket és szerkezeti megoldásokat, melyekkel vízzáró szerkezetek megoldhatóak. Ehhez kapcsolódóan kikísérleteztem egy olyan arányú 3 fázisú keveréket, melyet a gyakorlatban alkalmazni lehet árvízvédelmi földtöltésekben. A kutatás speciálisan egy, a laboratóriumban bevizsgált és részletesen jellemzett talajtípusról és talajstabilizációról szólt, melyből diplomamunkám is készült. Ezt a témát továbbfejlesztve készült el TDK dolgozatom, mely az új keverési arányok vizsgálatáról szól. Ebből bizonyítható már mindaz a feltételezés, melyekkel diplomamunkámban éltem. Az a tartomány, melyet a keverékek lehetséges receptúrái lefednek, már mind rendelkezik eredménnyel. Ezáltal csökkent a hiba lehetősége, hiszen nem szükséges interpolálni, melyre szükség lett volna, ha ez a munka nem készül el. Így már nagyobb biztonsággal ki lehet választani a kívánt felhasználandó receptúrát.

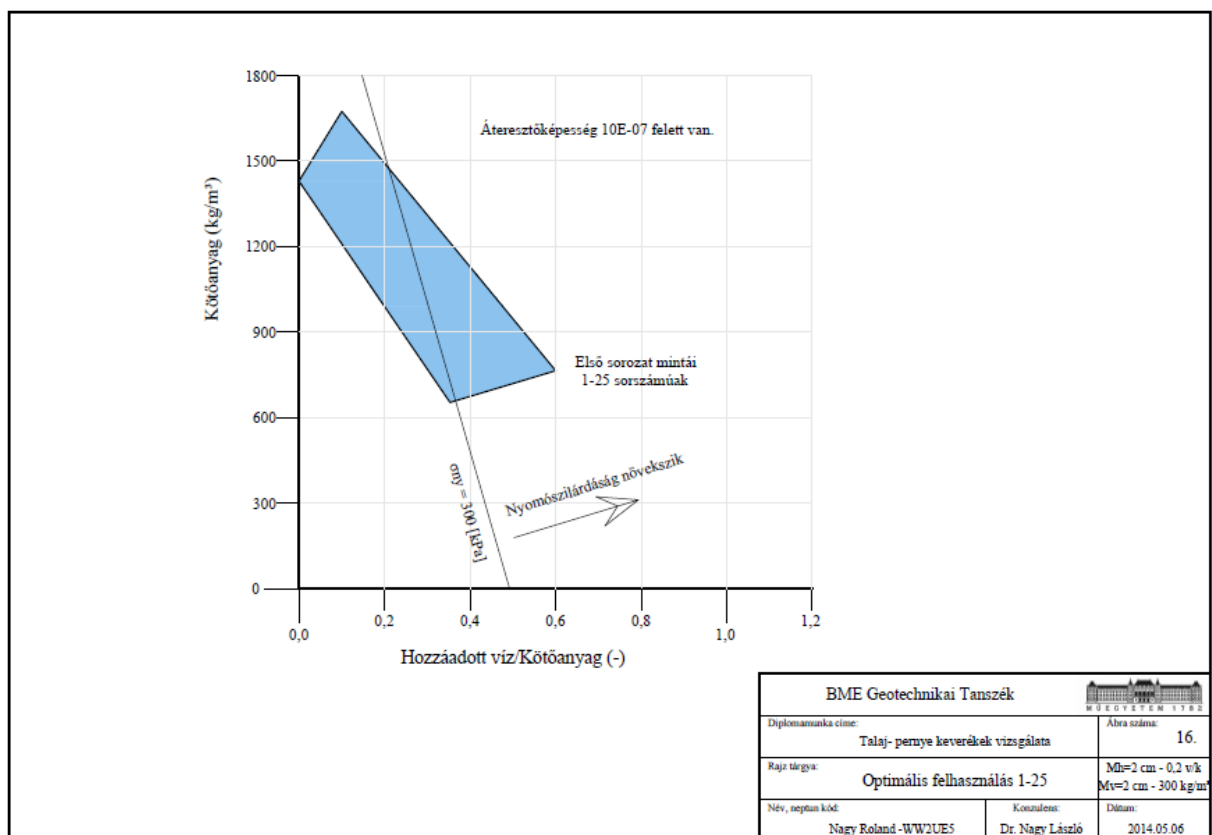
### **VI.1 Konklúzió**

Nagy darabszámú mintán végzett vizsgálatok alapján látható, hogy a három komponensből álló keverék szilárdsági és áteresztőképességi tulajdonságai mind széles skálán mozoghatnak. Ezen skála szűkítését segítették a vizsgálatok eredményei.

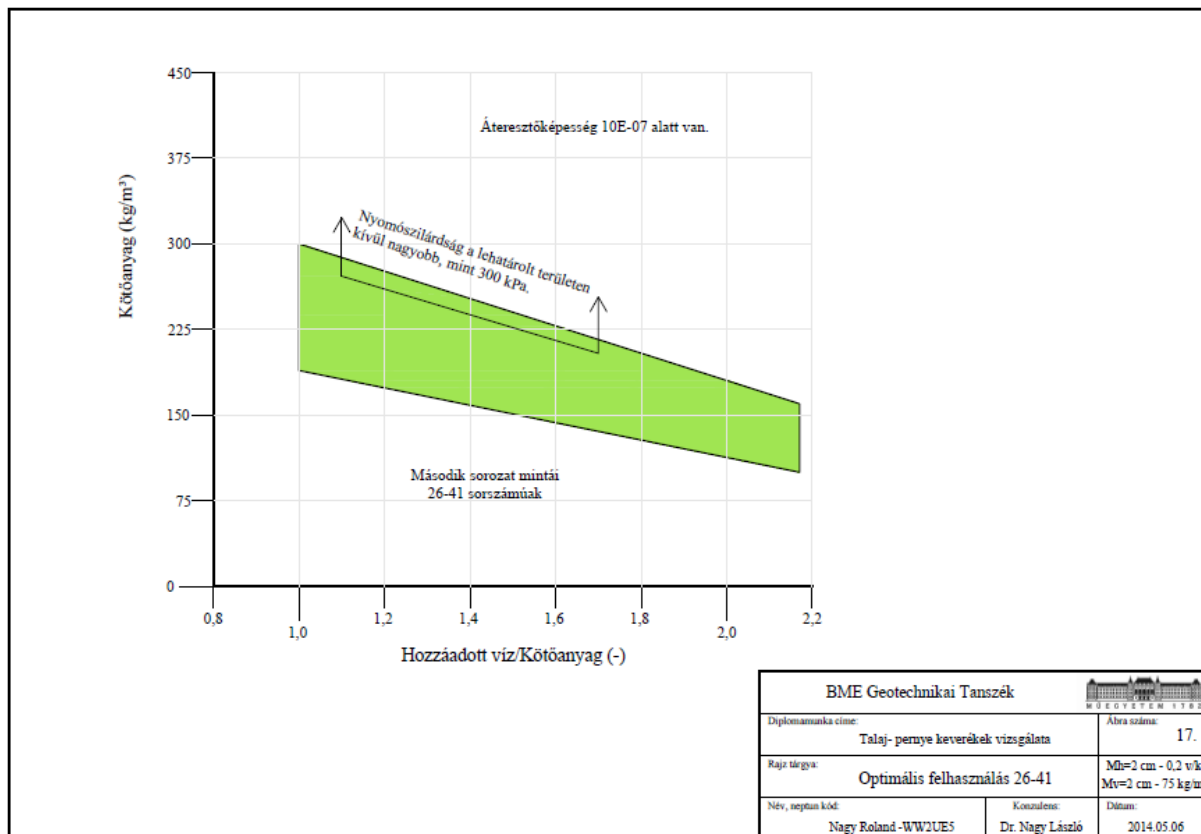
Az MSZ 15221 alapján a talajokra a vízzáróságot  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s érték körülire korlátozhatjuk, ennek a követelménynek pedig a vizsgált keverékek közül 20 megfelelt. Ezért a felhasználás helyén célszerű ezen minták közül kiválasztani a felhasználandó keveréket. A kapott agyag talaj áteresztőképességét sikerült oly mértékben változtatni, hogy az jelentős szilárdsággal is rendelkezzen. Az árvízvédelmi gát hajlékony szerkezet, mely vízterhelés hatására mozog. A vizsgált keverékek inkább ridegek, mint hajlékonyak voltak nagy nyomószilárdság mellett. Ezen megfontolás alapján fontos tisztázni, hogy a töltés milyen fajta és milyen mértékű mozgásokat szenvedhet. Amennyiben ugyanis ezen mozgások nem haladják meg az 5%-os fajlagos alakváltozás határát, úgy a második keverési sorozatból számos összetétel megfelelhet, nagyobb hajlékonysági igény esetén a 38. sorszámú keverék a megfelelőbb. A mért fajlagos alakváltozás értékek a talaj és szerkezet kölcsönhatásának lényeges része. (A fajlagos összenyomódások értékei az 5-9 mellékletben találhatóak meg.) A mérés során tapasztalható volt, hogy a minták száradás következtében zsugorodtak. Ezen zsugorodás az, amely nem kellően hajlékony szerkezet esetén repedések kialakulását eredményezheti, melynek következménye a vízzáróság megszűnése, szivárgás megindulása. Az elvégzett mérések eredményei alapján az összetételek diagramjának kiegészítése történt meg. A 6.1. ábra a laboratóriumi munkám során összegyűlt tapasztalatokat mutatja, az összetételek változásával együtt tekintve. A minták zsugorodása a kötőanyag mennyiség növelésével, valamint a víz/kötőanyag tényező csökkentésével növekedett. A mérési eredményekből levont következtetések alapján történt meg a kötőanyag mennyiségé és a víz/kötőanyag tényező diagramjának felosztása. (6.2 és 6.3. ábrák) Az áteresztőképességi együttható értéke egy egyenessel közelíthető vonal mentén elkülöníthető, az ábrán jelzett vonal alatti keverési arányok így a kialakított szempontok alapján optimálisnak mondhatók. A nyomószilárdság értékét a 300 kPa-os vonal mutatja, mely kimetsz egy kis szeletet a második mérési sorozatból. Ezzel kizárva azokat a próbatesteket, melyek megfelelnek áteresztőképességre.



6.1 ábra: Zsugorodás szeléletetése (1-25)



6.2 ábra: Optimális felhasználás



6.3 ábra: Optimális felhasználás

A törési kísérletek során tapasztalható volt, hogy a megszilárdult minta már kevésbé viselkedett a kötött talajokra jellemző módon, plasztikus képet csak a nagyon magas agyagmennyiség adagolása mellett mutatott, a minták nagy részénél a rideg viselkedés volt jellemző. A felületdiagramokon ábrázolt eredmények jól mutatják, hogy jelentős szilárdság volt tapasztalható számos esetben, a 300 kPa - mely a puha közet-kemény talaj határának tekinthető - jelentősen meghaladható a kötőanyag hozzáadásával.

A vizsgálatok során igyekeztem minél jobban közelíteni azt a technológiát, melyet a kivitelezéskor a helyszínen feltételezhetően használni szeretnének. Ettől azonban több esetben is eltérés történt. Az egyik, a talaj lereszelése. Erre a kötőanyag és víz megfelelő hozzáadhatósága miatt volt szükség. Ez a fajta megoldás jóval finomabb mértékű keverést tett lehetővé, mint azt a felhasználási helyen várhatóan működő kotróval el lehet érni. Emellett fontos, hogy a helyszíni tömörítés ezen technológiák esetében nem jellemző, így a laboratóriumi vizsgálatok során a hengerbe való bekészítés is a lehető legkisebb energia befektetésével történt. A tömörítés csak kézzel zajlott, csak azokban az esetekben, amikor a keverék önmagától nem töltötte volna ki a hengert. Ezen tények indokolják azt a javaslatot, mely a helyszíni ellenőrzés fontosságára irányul. Elengedhetetlen a folyamatos minőség-ellenőrzés, hogy a laboratóriumban kimutatott értékek a tényleges felhasználás helyén is elérhetőek legyenek.

A vizsgálat során ki kellett volna térni a szívás vizsgálatára is. Mivel levegőn kötött mintákkal dolgoztam, így a szívás hatásának figyelembe vételére nem volt lehetőség. Ugyan diplomamunkámban hivatkoztam arra, hogy későbbi vizsgálatok során vízben történő kötés után javasolt a keverékek vizsgálata, viszont ha a mostani munkámban így történt volna, akkor az eredményeket nem lehetne ténylegesen összevetni a korábbiakkal. Nem elhanyagolható az a tény, hogy a felhasználás helyén milyen szívás alakulhat ki, azaz a kötés alatt a helyszínen a keverék kiszáradhat, vagy sem. Ezt egyrészt a felhasznált és környező talajkörnyezet befolyásolhatja.



Érdekes, akár kedvezőbb eredményekkel szolgálhat a kutatás, ha a kövér agyagot iszappal, illetve sovány agyaggal helyettesítjük. Amit a kutatás során kimértem eredmények, azok mind erre az agyagra javasolt keverési arányok, más talaj esetén optimális esetben mindezt ismét végig kellene csinálni. Ezek után remélhetőleg lehetne olyan receptet adni, ami esetlegesen figyelembe veszi például a plasztikus index értékét is.

Mindenképpen kiemelnem azt, hogy a kutatásban megállapított értékek helyszíni mérésekkel és folyamatos ellenőrzés mellett érhetőek csak el. A technológiai fegyelem igen hangsúlyos, és a helyszíni vizsgálatok és ellenőrzések gyakorisága úgy szintén.

*Kelt.: Budapest, 2014 augusztus*

**Készítette:** .....

*Nagy Roland*  
*Építőmérnök (MSc) hallgató*





## **VII. Köszönetnyilvánítás**

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, név szerint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszék vezetőjének Dr. Nagy Lászlónak, illetve Nagy Gábor doktorandusznak építő jellegű tanácsaikat, kritikáikat és véleményüket, mellyel elősegítették TDK-m elkészültét. Köszönöm segítőkész támogatásukat és szakdolgozatom alapos és kritikus átnézését.

Szeretném megköszönni a KBFI-Triász Kft. ügyvezetőjének, Kovács Andrásnak és a Kft. munkatársának Begidsán Annának segítőkész munkáját, melyet a 3D-s diagramok elkészítése során nyújtott.

Hálás vagyok a Geotechnikai tanszék talajmechanikai laboratórium két munkatársának, Hídvégi Emilnek és Némethy Ferencnek, akiktől a méréseim során rengeteg segítséget és hasznos információt kaptam. Köszönöm továbbá a kutatói munka során felvetődött gyakorlati problémák megoldásában nyújtott hasznos szakmai jellegű segítségüket is.

Köszönöm az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laborvezetőjének Dr. Nehme Salem Georges-nak és tanszéki munkatársainak, hogy lehetővé tették a Tanszék laboratóriumának használatát és felkészítettek a szükséges berendezések biztonságos használatára.



## **VIII. Felhasznált irodalom**

- ✓ BOHN K. (2008): Speciális mélyépítés, előadásdiák
  - ✓ CSÁKI N. (2011): TDK dolgozat - Szivárgási tényező meghatározása laboratóriumi vizsgálatokkal és numerikus modellezéssel
  - ✓ FARKAS J. (1994): Alapozás, p. 209, Műegyetemi kiadó, Budapest
  - ✓ FAUR K., SZABÓ I. (2011): Geotechnika, Miskolci Egyetem, Internetes tananyag
  - ✓ KOCH E. (2013): Befogott szerkezetek, előadásdiák
  - ✓ KOCH E. (2013): Talajjavítás c. előadása
  - ✓ NAGY L. (2011): BME, Infrastruktúra földművek jegyzet, Tárgykód: BMEEOGTMIT5, pp. 3-24., pp. 47-56.
  - ✓ NAGY R. (2013): Árvízvédelmi töltések geotechnikája, Évközi dolgozat - Geotechnika BSc tantárgyból. (Tárgykód: BMEEOGTASC1)
  - ✓ NAGY R. (2014): Talaj- pernye keverékek vizsgálata, Diplomamunka BSc
  - ✓ NEHME, S. G. (2012): Szigetelés- és Betontechnológia (BSc) tárgy előadásvázlata Tárgykód: BMEEOEMASC4
  - ✓ OROSZ Á.: Munkatér határolás módszerei, Kézirat
  - ✓ RÉTHÁTI L. (1985): Valószínűségelméleti megoldások a geotechnikában, p. 394, Akadémiai Kiadó, Budapest
  - ✓ SZEPESHÁZI R. (2008): Geotechnika. 3. bővített, átdolgozott kiadás. SZIF-Universitas, Győr
  - ✓ SZEPESY J. (1991): Árvízvédelmi gátak töltéseinek repedései-kúszási repedések, p. 331, Hidrológiai Közlöny
  - ✓ Az alkalmazott technológiákhoz tartozó ismeretanyagot a Békés Drén Környezetvédelmi, Víz- és Mélyépítési Kft. termelési főmérnöke biztosította.
  - ✓ További forrásanyagokat és az árvízvédelmi nyilvántartási tervekbe történő betekintést a Közép-dunántúli Vízügyi Igazgatóság Székesfehérvár biztosította.
  - ✓ A laboratóriumi munka ideje alatt általam készített fényképek
- MÉRSÉKELTEN SZULFÁTÁLLÓ KOHÓSZALAKCEMENT
- ✓ <http://www.holcim.hu/termekek-es-szolgalatasok/termekek/cement/cem-iiia-325-r-msr-mersekelten-szulfatallo-kohosalakcement.html>
- ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIÁK
- ✓ <http://www.bauerhungary.hu/hu/competences/technologies/environmentaltechnologies/>





2 számú melléklet (Receptúra, 1-25 Minták)

Sz.	Agyag menny. [kg/m <sup>3</sup> ]	Víz/ Kötőanyag [-]	Víz [cm <sup>3</sup> ]	Kötő- anyag [cm <sup>3</sup> ]	Agyag [cm <sup>3</sup> ]	Víz + Kötő + Agyag [cm <sup>3</sup> ]	Javitott Vízzel [cm <sup>3</sup> ]	Víz [g]	Kötő- anyag [g]	Agyag [g]	Összes Vízzel (3x3)x1,5 [g]	Összes Kötő (3x3)x1,5 [g]	Összes Agyag (3x3)x1,5 [g]	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kötő- anyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Agyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Víz/ Kötőanyag [-]
1	750	0,60	25,88	43,13	25,25	94,25	27,57	-1,69	134,77	70,69	-22,85	1819,40	954,28	-17,96	1429,92	750,00	-0,013
2	750	1,00	34,50	34,50	25,25	94,25	27,57	6,93	107,82	70,69	93,60	1455,52	954,28	73,56	1143,94	750,00	0,064
3	750	1,50	41,40	27,60	25,25	94,25	27,57	13,83	86,25	70,69	186,75	1164,41	954,28	146,77	915,15	750,00	0,160
4	750	2,00	46,00	23,00	25,25	94,25	27,57	18,43	71,88	70,69	248,85	970,34	954,28	195,58	762,62	750,00	0,256
5	750	2,50	49,29	19,71	25,25	94,25	27,57	21,72	61,61	70,69	293,21	831,72	954,28	230,44	653,68	750,00	0,353
6	700	0,60	26,51	44,18	23,56	94,25	25,73	0,78	138,06	65,97	10,49	1863,77	890,66	8,24	1464,80	700,00	0,006
7	700	1,00	35,34	35,34	23,56	94,25	25,73	9,61	110,45	65,97	129,77	1491,02	890,66	101,99	1171,84	700,00	0,087
8	700	1,50	42,41	28,27	23,56	94,25	25,73	16,68	88,36	65,97	225,19	1192,81	890,66	176,99	937,47	700,00	0,189
9	700	2,00	47,12	23,56	23,56	94,25	25,73	21,39	73,63	65,97	288,81	994,01	890,66	226,98	781,23	700,00	0,291
10	700	2,50	50,49	20,20	23,56	94,25	25,73	24,76	63,11	65,97	334,25	852,01	890,66	262,70	669,62	700,00	0,392
11	600	0,60	27,77	46,28	20,20	94,25	22,05	5,71	144,63	56,55	77,15	1952,53	763,42	60,63	1534,55	600,00	0,040
12	600	1,00	37,03	37,03	20,20	94,25	22,05	14,97	115,71	56,55	202,11	1562,02	763,42	158,85	1227,64	600,00	0,129
13	600	1,50	44,43	29,62	20,20	94,25	22,05	22,38	92,56	56,55	302,08	1249,62	763,42	237,41	982,11	600,00	0,242
14	600	2,00	49,37	24,68	20,20	94,25	22,05	27,31	77,14	56,55	368,73	1041,35	763,42	289,79	818,43	600,00	0,354
15	600	2,50	52,89	21,16	20,20	94,25	22,05	30,84	66,12	56,55	416,33	892,58	763,42	327,21	701,51	600,00	0,466
16	500	0,60	29,03	48,39	16,83	94,25	18,38	10,65	151,21	47,12	143,81	2041,28	636,19	113,03	1604,31	500,00	0,070
17	500	1,00	38,71	38,71	16,83	94,25	18,38	20,33	120,96	47,12	274,45	1633,02	636,19	215,70	1283,45	500,00	0,168
18	500	1,50	46,45	30,97	16,83	94,25	18,38	28,07	96,77	47,12	378,97	1306,42	636,19	297,84	1026,76	500,00	0,290
19	500	2,00	51,61	25,81	16,83	94,25	18,38	33,23	80,64	47,12	448,64	1088,68	636,19	352,60	855,63	500,00	0,412
20	500	2,50	55,30	22,12	16,83	94,25	18,38	36,92	69,12	47,12	498,41	933,16	636,19	391,72	733,40	500,00	0,534
21	400	0,60	30,29	50,49	13,46	94,25	14,70	15,59	157,78	37,70	210,48	2130,03	508,95	165,42	1674,06	400,00	0,099
22	400	1,00	40,39	40,39	13,46	94,25	14,70	25,69	126,22	37,70	346,80	1704,03	508,95	272,56	1339,25	400,00	0,204
23	400	1,50	48,47	32,31	13,46	94,25	14,70	33,77	100,98	37,70	455,86	1363,22	508,95	358,27	1071,40	400,00	0,334
24	400	2,00	53,86	26,93	13,46	94,25	14,70	39,15	84,15	37,70	528,56	1136,02	508,95	415,41	892,83	400,00	0,465
25	400	2,50	57,70	23,08	13,46	94,25	14,70	43,00	72,13	37,70	580,49	973,73	508,95	456,23	765,29	400,00	0,596
Σ											7020,93	33642,70	18767,53				



3 számú melléklet (Receptúra, 26-41 Minták)

Sorszám	Agyag aránya 1 m <sup>3</sup> -ben	Szuszpenzió aránya 1 m <sup>3</sup> -ben	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kötőanyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kötőanyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Agyag [kg/m <sup>3</sup> ]	viz/kötőanyag [-]	Alkotók térfogata [m <sup>3</sup> ]	Víz [g/9 henger]	Kötőanyag [g/9 henger]	Agyag [g/9 henger]
26	0,75	0,25	750	750	188	188	2100	1,00	1	159,05	159,05	1781,34
27	0,75	0,25	800	600	200	150	2100	1,33	1	169,65	127,24	1781,34
28	0,75	0,25	833	500	208	125	2100	1,67	1	176,72	106,03	1781,34
29	0,75	0,25	867	400	217	100	2100	2,17	1	183,79	84,83	1781,34
30	0,70	0,30	750	750	225	225	1960	1,00	1	190,86	190,86	1662,58
31	0,70	0,30	800	600	240	180	1960	1,33	1	203,58	152,69	1662,58
32	0,70	0,30	833	500	250	150	1960	1,67	1	212,06	127,24	1662,58
33	0,70	0,30	867	400	260	120	1960	2,17	1	220,55	101,79	1662,58
34	0,65	0,35	750	750	263	263	1820	1,00	1	222,67	222,67	1543,83
35	0,65	0,35	800	600	280	210	1820	1,33	1	237,51	178,13	1543,83
36	0,65	0,35	833	500	292	175	1820	1,67	1	247,41	148,44	1543,83
37	0,65	0,35	867	400	303	140	1820	2,17	1	257,30	118,76	1543,83
38	0,60	0,40	750	750	300	300	1680	1,00	1	254,48	254,48	1425,07
39	0,60	0,40	800	600	320	240	1680	1,33	1	271,44	203,58	1425,07
40	0,60	0,40	833	500	333	200	1680	1,67	1	282,75	169,65	1425,07
41	0,60	0,40	867	400	347	160	1680	2,17	1	294,06	135,72	1425,07
<b>Σ</b>										<b>3583,88</b>	<b>2481,15</b>	<b>25651,27</b>

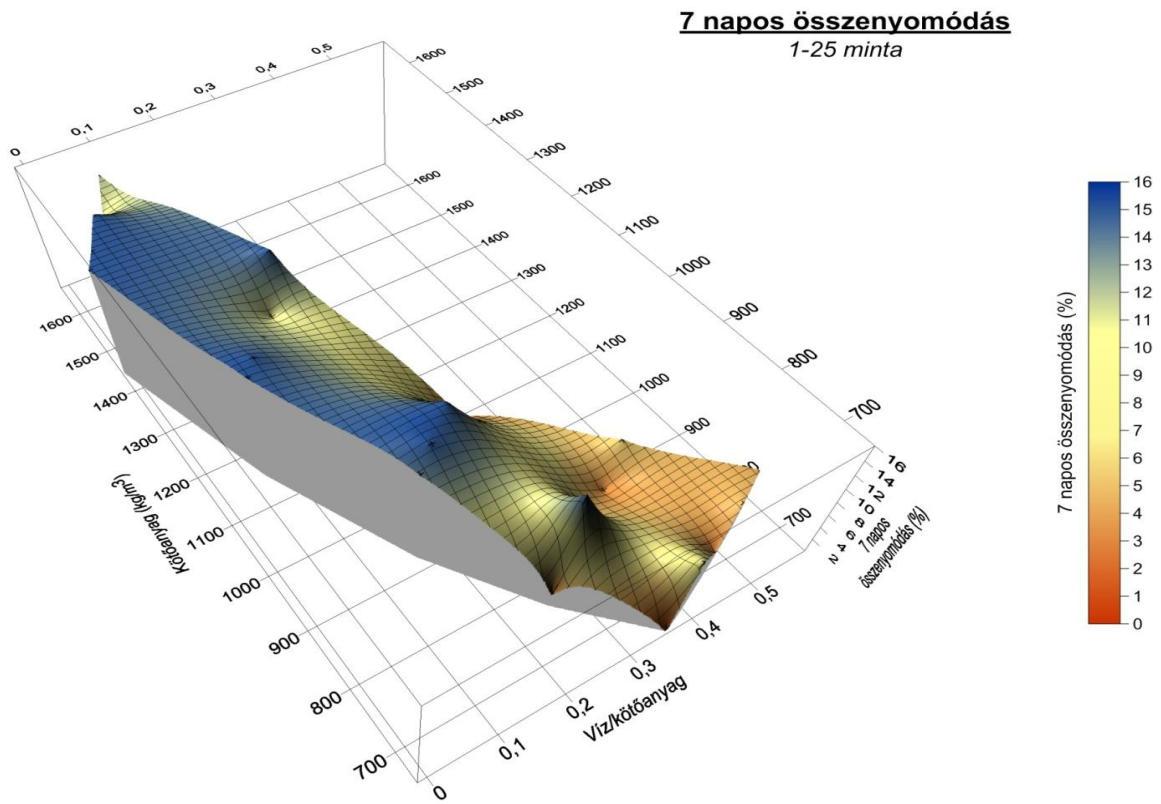


4 számú melléklet (Receptúra, 42-56 Minták)

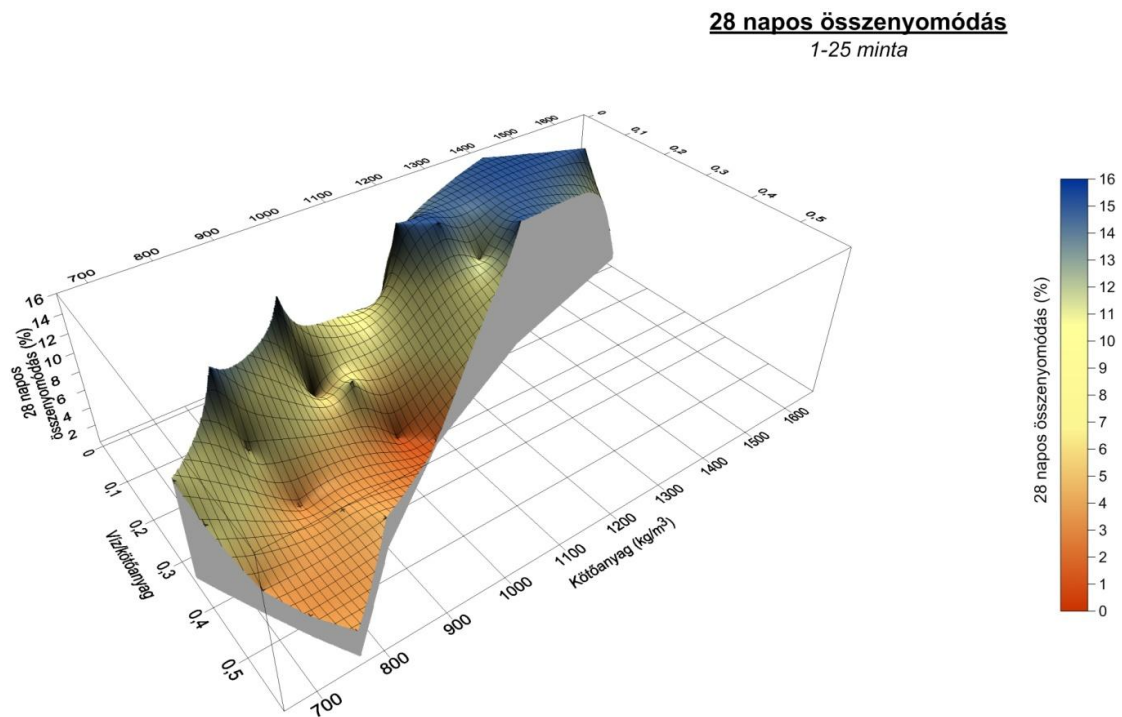
Sorszám	Agyag aránya 1 m <sup>3</sup> -ben	Szuszpenzió aránya 1 m <sup>3</sup> -ben	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kötőanyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Víz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kötőanyag [kg/m <sup>3</sup> ]	Agyag [kg/m <sup>3</sup> ]	víz/kötőanyag [-]	Alkoték térfogata [m <sup>3</sup> ]	Víz [g/9 henger]	Kötőanyag [g/9 henger]	Agyag [g/9 henger]
42			200	400	1867	0,50	1	169,65	339,30	1583,41		
43			320	400	1531	0,80	1	271,44	339,30	1298,40		
44			480	600	896	0,80	1	407,16	508,95	760,04		
45			700	700	187	1,00	1	593,78	593,78	158,34		
46			630	900	196	0,70	1	534,40	763,43	166,26		
47			715	650	191	1,10	1	606,50	551,37	162,30		
48			750	500	233	1,50	1	636,19	424,13	197,93		
49			680	400	523	1,70	1	576,81	339,30	443,36		
50			450	180	1372	2,50	1	381,72	152,69	1163,81		
51			770	550	131	1,40	1	653,16	466,54	110,84		
52			600	600	560	1,00	1	508,95	508,95	475,02		
53			500	500	933	1,00	1	424,13	424,13	791,71		
54			450	300	1260	1,50	1	381,72	254,48	1068,80		
55			360	300	1512	1,20	1	305,37	254,48	1282,56		
56			210	300	1932	0,70	1	178,13	254,48	1638,83		
<b>Σ</b>								<b>6629,12</b>	<b>6175,31</b>	<b>11301,60</b>		



5 számú melléklet (7 Napos összenyomódás 1-25)



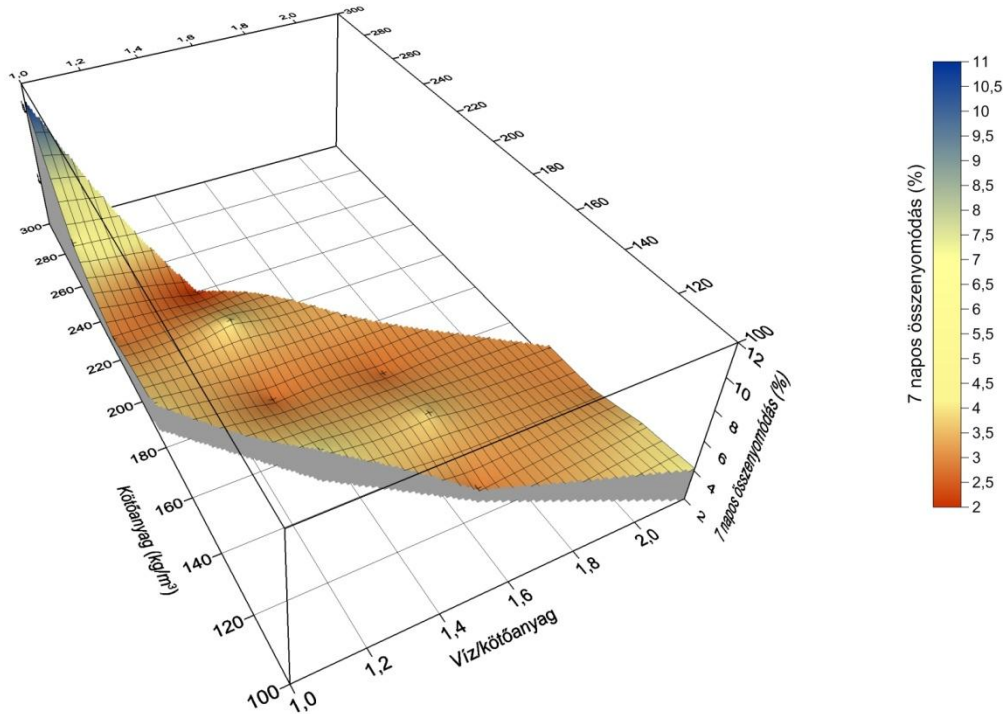
6 számú melléklet (28 Napos összenyomódás 1-25)





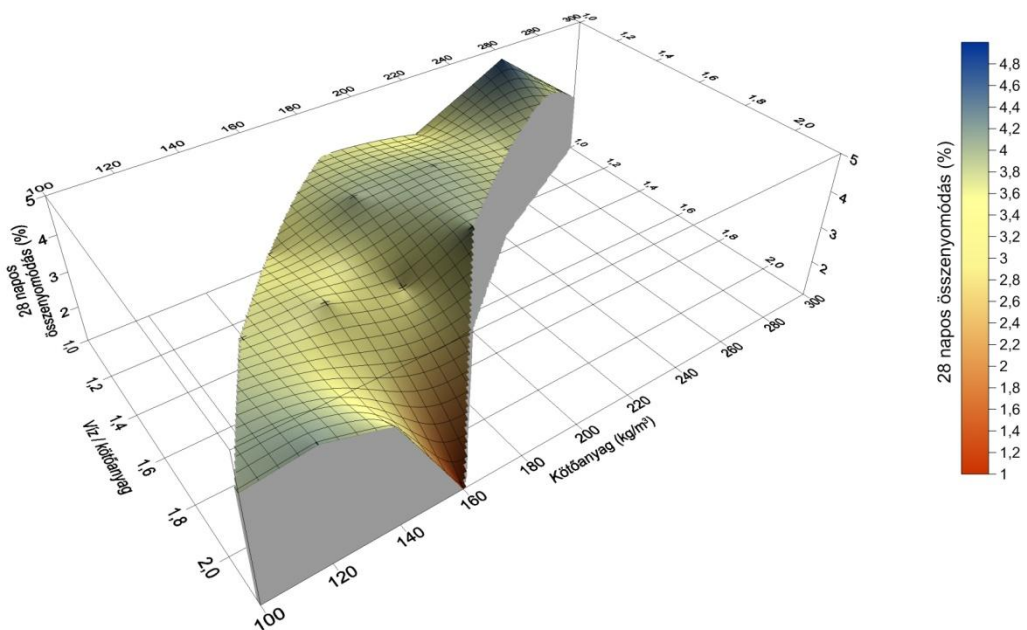
7 számú melléklet (7 Napos összenyomódás 26-41)

**7 napos összenyomódás**  
26-41 minta



8 számú melléklet (28 Napos összenyomódás 26-41)

**28 napos összenyomódás**  
26-41 minta

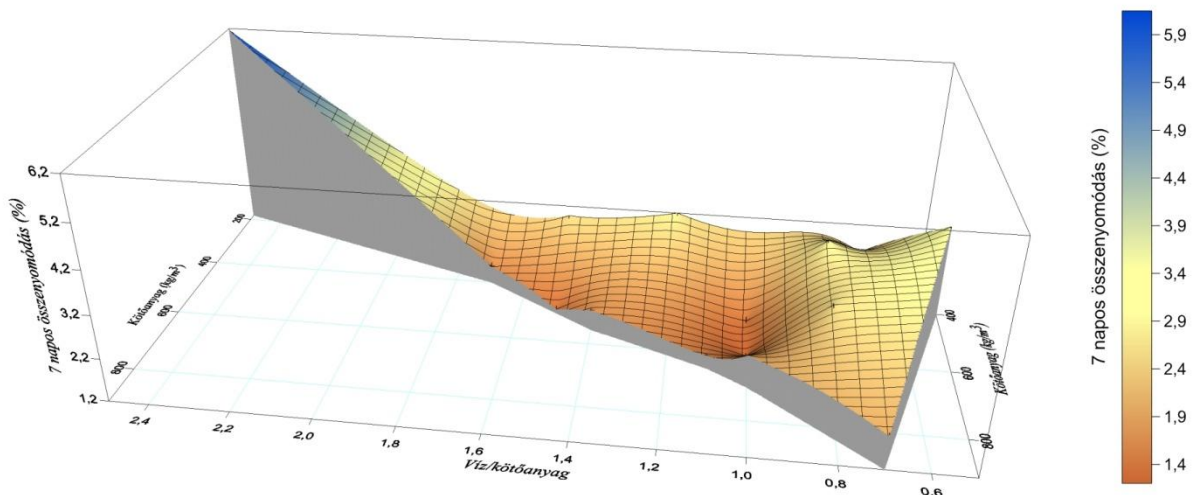






9 számú melléklet (7 Napos összesenyomódás 42-56)

**7 napos összesenyomódás**  
42-56 minta



10 számú melléklet (28 Napos összesenyomódás 42-56)

**28 napos összesenyomódás**  
42-56 minta

