

Reológiai jellemzők vizsgálata a geotechnikában

Examination of rheological properties in geotechnics

Huszák Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnikai Tanszék, huszak@mail.bme.hu

Nagy Gábor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnikai Tanszék, nagy.gabor@mail.bme.hu

Nagy László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnikai Tanszék, lacinagy@mail.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A bentonit a geotechnika egyik gyakran alkalmazott anyaga. Mégis, a folyásával, a tixotróp viselkedésével viszonylag ritkán foglalkoznak. A cikkben bemutatásra kerül a bentonit folyási tulajdonságainak oka, és a tulajdonság vizsgálatához szükséges mérések, azok eredményeivel. A tixotróp viselkedés kimutatásához az anyag azonosítása, ásványi összetételének meghatározása és a viszkozitásának vizsgálata szükséges, melyek részletei láthatók a következőkben.

Kulcsszavak: reológia, ásványi összetétel, tixotrópia

ABSTRACT: Bentonite is a frequently used material in geotechnical engineering. Despite this fact, the flow characteristics and the thixotropic behavior of this material is rarely examined. In this paper we present the reasons of the flow by showing the measurement and the results which can prove the behavior. To demonstrate the thixotropic behavior of the bentonite, this paper shows the examination of the mineral composition and the viscosity.

Key words: rheology, mineral composition, thixotropy

1. BEVEZETÉS

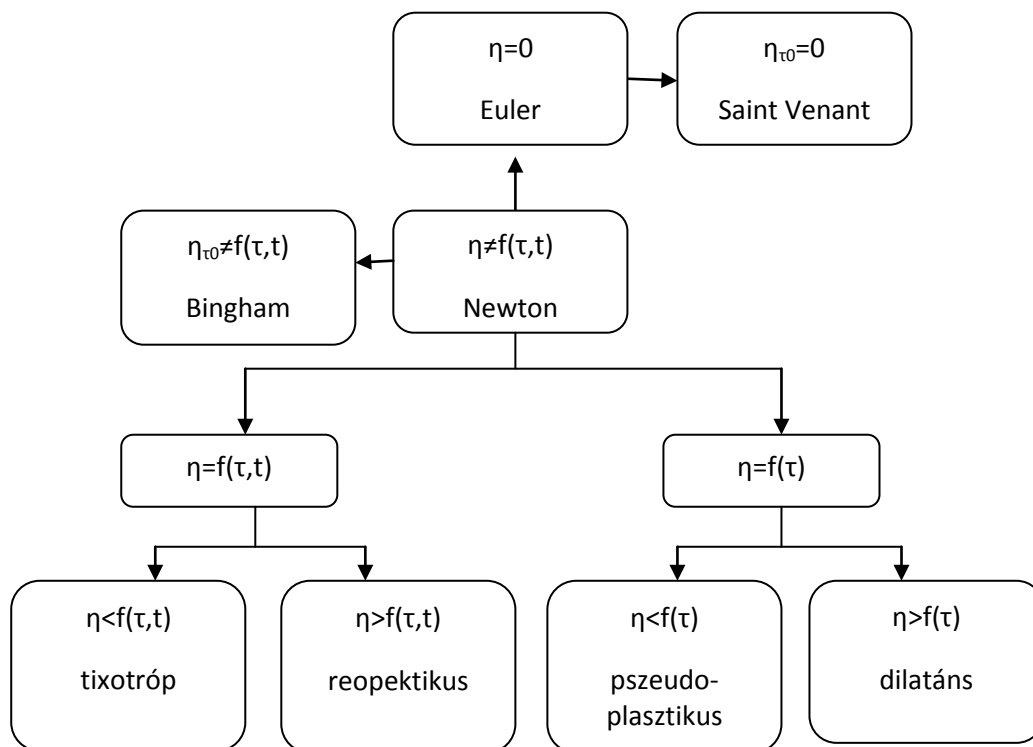
Az anyagok folyási tulajdonságaival, valamint ezen tulajdonságok időbeni változásával a reológia tudománya foglalkozik. A tixotróp viselkedés az anyag reológia jellemzőinek időben reverzibilis változását jelenti, melyet valamilyen külső mechanikai erőhatás vált ki. Jelen esetben a vizsgált reológiai jellemző az anyag viszkozitása, míg a külső mechanikai erőhatást nyírófeszültség fogja okozni. Számos tixotróp viselkedést mutató anyag található a környezetünkben, mint a ketchup, a festékek, a fogkrém, vagy néhány fajta méz, de a cikkben a geotechnikai szempontból lényeges anyag, a bentonit folyásának vizsgálatával foglalkozunk.

2. FOLYÁSI TULAJDONSÁGOK, TIXOTRÓPIA

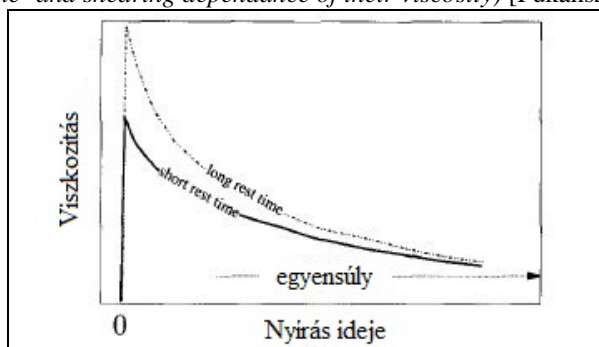
A geotechnikában alkalmazott anyagok esetén a folyási mechanizmus megindulását a szemcsék egymás felületén való elcsúszása válthatja ki, tehát ez a jelenség az anyagok víztartalmától, a szemcsék felületén megkötött vízmennyiségtől erősen függ.

A folyadékokat a viszkozitás nyírás- és időfüggése szerint csoportosíthatjuk, figyelembe véve a befolyásoló tényezők számát és a változás irányát. Az osztályozás kiindulási alapját a newtoni folyadékok jelentik. Ezen folyadékok viszkozitása független az időtől és a nyírófeszültségtől is.

Tixotróp viselkedés kimutatására szolgáló vizsgálat esetén az anyag viszkozitása nyírás során idővel csökken [Pukánszky & Varga, 2012]. Egy tixotróp viselkedésre hajlamos anyagot viszkoziméterbe helyezve, és állandó nyírási sebességgel vizsgálva (nyírásnak kitéve) a mért viszkozitás időben csökkenni fog, de egy konstans értékhez aszimptotikusan tartva. Ha megszüntetjük a nyíróhatást, és pihentetjük a mintát kiszáritás, vagy bármilyen hatás nélkül, ami szétesztályozódást okozhatna, majd újra nyírásnak tesszük ki, magasabb kezdeti viszkozitást mutat, de ugyanazon végértékhez fog tartani. A pihentetés hatása a visszaépülésben mutathat eltérést. A nyírással lerombolt szerkezet dilatáns vagy struktúrviszkózus anyagok esetén jóval hamarabb regenerálódik, mint tixotróp viselkedésű anyagoknál [Barnes, 1996].



1. ábra. A folyadékok osztályozása viszkozitásuk idő- és nyírásfüggése alapján (*Classification of the fluids based on the time- and shearing dependance of their viscosity*) [Pukánszky-Varga, 2012]



2. ábra. Tixotróp anyag viselkedése nyírás során (*The behavior of a thixotropic material under shear stress*) [Barnes, 1996]

A viselkedés igazolásának másik módja az úgynevezett "hiszterézis hurok" kimutatása. Viszkoziméterbe helyezve, lineárisan növekvő gradiens mellett, (egyes esetekben növekvő feszültség mellett) terhelés és tehermentesítés során vizsgálják a kialakuló hiszterézis hurkot a sebességgradiens-nyírófeszültség diagramon. A hurok által lehatárolt terület a tixotrópia mértéke. Lényegében tehát minél nagyobb a hurok területe, annál "tixotrópabb" az anyag viselkedése.

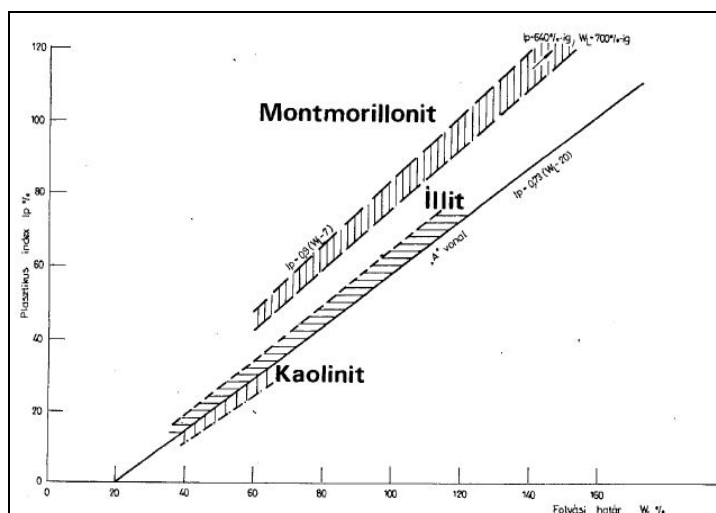
A folyás számos tényezőtől függ. Kialakulhat úgy, hogy az anyag rácspontjain olyan ionok helyezkednek el, melyek nagy mennyiségű vizet képesek megkötni felületükön. Ekkor ez a megkötött vízburok (ún. szolvátréteg) veszi körül a szemcséket. A tényleges érintkezés a részecskék között megszűnik, azok szolvátrétegükkel kapcsolódnak egymáshoz. Nyírás hatására ezek a burok-kapcsolatok nem fejtenek ki ellenállást, a szemcsék könnyen elcsúszhatnak egymáson. Így az anyag folyása megindul. Jellemzően ilyen anyagok az agyagásványok, melyek szerkezetében levő ionok nagy mennyiségű víz megkötésére képesek. Így alakul ki a talaj-víz kolloid rendszer.

Egy másik lehetőség a folyás kialakulására az, ha a talajoldatban található meg azok az ionok, melyek báziscserével az anyag rácspontjaira juthatnak, és képesek a szolvatációra (ez az anyag nagy fajlagos felületéből következi, mivel így szintén nagy vízmennyiség megkötésére alkalmasan képes a szemcséket körülvevő szolvátréteg kialakítására).

3. ÁSVÁNYI ÖSSZETÉTEL

A folyási tulajdonságok, a tixotróp viselkedés kimutatásához és megértéséhez szükséges ismerni az anyag ásványi összetételét. A vizsgálat tárgyát a bentonit képezte, amely valójában nem egyfajta anyagot, hanem egy anyagtypust jelent. Az ásványos összetétel alapján ugyanis többfajta bentonitot is megkülönböztetünk. Ezek az elemek általában az alumínium, kálium, kalcium és nátrium. A bentonit fontos tulajdonsága, hogy vízzel keveredve akár saját térfogatánál 15-20-szor nagyobb mennyiségű vizet képes megkötni. Leggyakrabban vulkáni hamu vízzel alkotott elegyből származik.

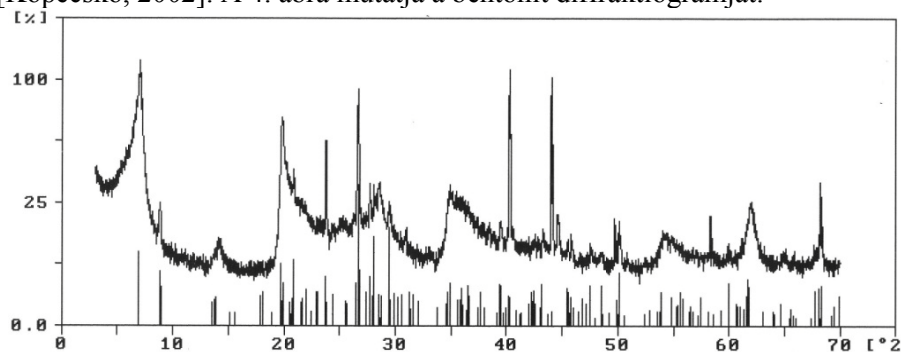
A *nátrium-bentonit* a bentonit egyik legelterjedtebb fajtája, mely térfogatának többszörösének megfelelő mennyiségű vizet képes megkötni. Elsősorban olajkutak fúrásánál ún. fúróiszapként, illetve részfalas alapozás esetén alkalmazzák. Ilyenkor a neve "résziszap", vízből és abban diszpergált bentonitból áll. A réselésnél alkalmazott zagy sűrűsége $\rho = 1,12 \text{ g/cm}^3$ [Farkas, 1994]. Segítségével az anyagok térfogatsűrűség különbségét kihasználva a kifűrt törmeléket hozzák a felszínre, valamint a fűrófej hűtését és kenését is ennek segítségével oldják meg. Duzzadó képessége miatt az atomreaktorokban használt, már kiégett radioaktív fűtóanyagok tárolásánál is alkalmazzák a vízszivárgás megakadályozására. Hasonló módon használják hulladéklerakók szigetelésére, mivel - vízszűrő réteggént - a hulladék alá terítve megakadályozza a káros anyagok talajvízbe szivárgását. Tekintve, hogy az agyagok szilárdsága számos tényezőtől függ, legfőképpen az adszorbeált kationok befolyásolhatják azt. Ennek oka feltehetően az ásványokban többségben jelen lévő Ca-ionok kicserélődése Na-ionokra, azonban további vizsgálatokat javasol a jelenség részletes megismeréséhez [Mitchell, 1976]. A 3. ábra a plazikus index és a folyási határ kapcsolatát mutatja az agyagásvány-tartalommal.



3. ábra. Agyagásványok elhelyezkedése a képlékenységi grafikonon (*Location of clay minerals on the ductility chart*) [Mitchell, 1976]

Ezt a bentonit esetében fázisanalitikai vizsgálatokkal lehet megtenni, jelen esetben röntgendiffrakciós (XRD) és differenciált termikus analízis (DTA) segítségével. A röntgendiffrakciós vizsgálat során a púder finomságúra őrölt mintára monokromatikus röntgennyalábot irányítanak, és az interferenciát detektálja, a mért intenzitás értékekből, valamint azok helyéből következtethetünk az

anyagösszetételre. Minden egyes ásványnak adott, és csak arra az ásványra jellemző kristályrác távolsága van. A porított minta, melyből nagyon kis mennyiség is elegendő, minden irányban elhelyezkedő ásványszemcséket tartalmaz, ezért a róla visszavert röntgensugarak is reprezentatívnek tekinthetők [Kopecskó, 2002]. A 4. ábra mutatja a bentonit diffraktogramját.

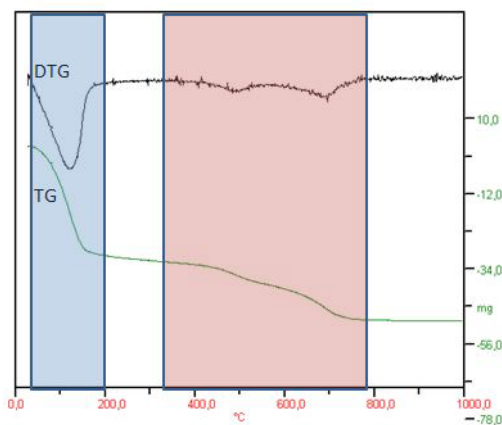


4. ábra. A bentonit diffraktogramja (*Diffractogram of the bentonite sample*)

A röntgendiffrakciós mérés egy roncsolásmentes vizsgálat, mivel az előkészített mintát nem károsítjuk, ezért a DTA vizsgálatot is végrehajthattuk ugyanezen mintákon. A differenciál termoanalízis - mint a nevében is benne van - két anyag termikus tulajdonságait hasonlítja össze. A két anyag közül az egyik a vizsgálat tárgyát képező minta, a másik az összehasonlítás céljából felhasznált, termikusan inaktív, ún. inert anyag (referencia minta, általában izzított kaolinit vagy örölt korund, Al_2O_3). A berendezés tulajdonképpen egy szabályozható módon fűthető kemencéből, és ebben elhelyezve két mintatartóból áll. Mindkét mintatartóban egy-egy termoelem található, melyek feszültségéből következtethetünk a mintatartók hőmérsékletére [Kopecskó, 2002]. A kemencét felfűtve, a mérendő mintában lejátszódnak az előbbieken említett fizikai és kémiai folyamatok, melyek hőt termelnek vagy vonnak el a mintából. Ez a minta hőmérsékletének a felfűtés sebességénél gyorsabb vagy lassabb emelkedését okozzák. A mérési tartomány általában szobahőmérséklettől $1000^\circ C$ -ig terjed. Az inert anyagban semmilyen változás nem tapasztalható a mérési tartományon belül. A vizsgálat során mérhető a mintában végbemenő tömegváltozást, valamint a hőmérsékletváltozást az inert anyaghoz viszonyítva. Az eredményeket négy görbe alapján határozhatjuk meg:

- T görbe: hőmérséklet,
- DTA görbe: differenciál termoanalízis,
- TG görbe: termogravimetria,
- DTG görbe: a TG görbe differenciálhányadosa (derivált termogravimetrikus görbe).

Az 5. ábra eredményeit táblázatosan összefoglalva láthatók az egyes hőmérséklettartományokon mért tömegveszteségek, melyeket összevetve az röntgendiffrakciós vizsgálat eredményével meghatározható az ásványi összetétel.



5. ábra. A bentonit DTG és TG görbéi (*DTG and TG curves of the bentonite sample*)

Az vizsgálat végrehajtása alapján a bentonit minta összetétele a következő:
klorit: 0-1 m%, illit: 9,4-6,1 m%, montmorillonit: 74,6-75,6 m%.

1. táblázat. A bentonit tömegvesztései (*Weight losses of the bentonite sample*)

A B jelű minta TG tömegvesztése [m%]	
Fizikailag kötött víz	10,58
Kémiaiilag kötött víz	5,62
Karbonátok	-
Izzítási veszteség	16,94

Összesen tehát 84,1-82,7 m% agyagásványt tartalmaz a minta, mely az OH és H₂O tömegváltozás alapján számítható. Emellett található még benne 2,7 m% CaCO₃, kalcit. A fennmaradó 13,2-14,6 m% olyan alkotókból áll, melyek nem szenvednek olyan átalakulást a mérési tartományon, mely tömegváltozást, vagy más jellegű hőreakciót okozna. Így a röntgendiffrakciós vizsgálat alapján ez a fennmaradó rész az alfa-kvarc, muszkovit, valamint földpátok jelenlétére utal. A DTG görbén látható, hogy 100-150°C hőmérséklet között tömegváltozással járó reakciót mutat, ez a fizikailag kötött víz, a rácscsokkok közti víz távozására utal. A 650-750 °C közötti csúcs az OH csoportok jelenléte miatti tömegváltozást mutatja.

4. REOLÓGIA JELLEMZŐK VIZSGÁLATA

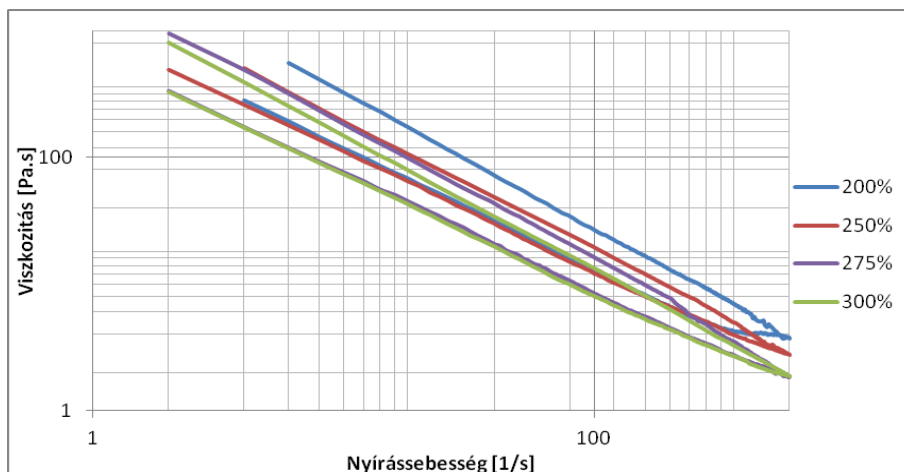
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karának Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszékének Műanyag- és Gumiipari Laboratóriumában végeztünk méréseket a vizsgált anyagok reológiai jellemzőivel kapcsolatban.

A viszkozimetriai mérések során az anyag viszkozitásának változását vizsgáltuk. A 6. ábra a hiszterézis hurok vizsgálatát mutatja. A viszkozitás-nyírássebesség diagram lebontó ága és a visszaépülő ága között eltérés van, hiszterézis tapasztalható. A vizsgált bentonit minta viszkozitásának időbeli változását mutatja be az 6. ábra. A mérést több különböző, állandó nyírássebességgel is elvégeztük. A diagramon jól látható, hogy a viszkozitás, és ezzel összhangban a mért nyírófeszültség csökkenő tendenciát mutat az idő függvényében, ami az anyag egyensúlyi, feszültségmentes állapotában kialakult szerkezetének lebomlásával magyarázható. A viszkozitás minden esetben egy, az alkalmazott nyírássebességtől függő határértékhez tart (lásd.1. fejezet). A csökkenés üteme szintén nem független a nyírási körülményektől: minél nagyobb nyírófeszültségnek tesszük ki az anyagot, annál gyorsabb a szerkezet lebomlása. A viszkozitási görbe lefutásának és a hurok területének jobb megjelenítésére kettős logaritmikus léptékben ábrázolva mutatjuk be az eredményeket.

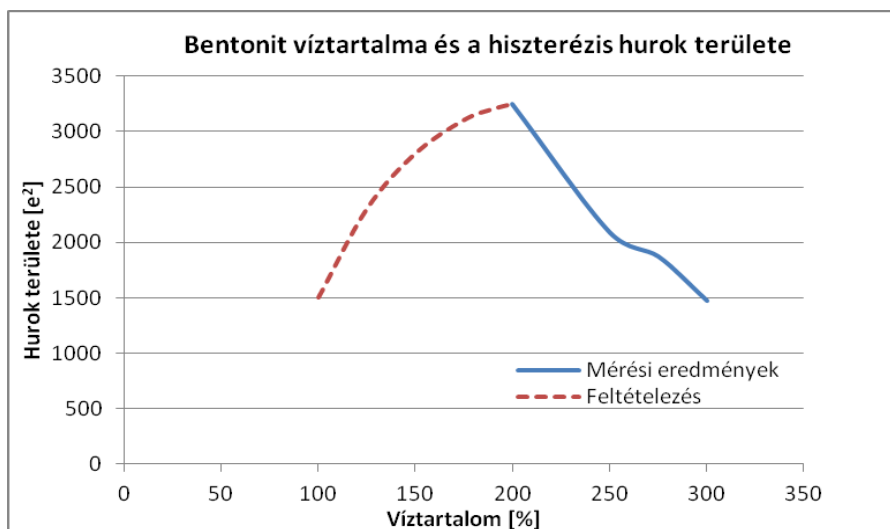
Mindhárom esetben azonos kialakítás mellett végeztük el a vizskometriai méréseket, ezzel kiküszöbölve a mérési körülmények hatását az eredményekre. Többször megismételve minden vizsgálatot biztosítható volt, hogy csak a minták víztartalma befolyásolja a mért viszkozitás értékeket. Mindegyik minta esetében megfigyelhető a tixotróp tulajdonság, vagyis a növekvő és csökkenő nyírási ágak közötti eltérés. A mérések során minden esetben tapasztalható volt egy kezdeti, kiugró viszkozitási érték, mely meghamisította volna az eredményeket, így a terület meghatározásánál a görbéket "levágtuk", hogy az eredmények összehasonlíthatók legyenek. Ez a rendkívül alacsony nyírási sebességnél tapasztalható viszkozitási csúcs a belső szerkezet kezdeti lebomlásának és átalakulásának kezdete.

A vizsgálati eredményekből jól látszik, hogy a víztartalom növelésével a viszkozitási értékek is csökkennek, vagyis a minták könnyebben folynak, ami a kötött talajok egyik fő tulajdonsága. A 6. ábrán az is megfigyelhető, hogy a viszkozitási görbék a víztartalom növelésével önmagukkal párhuzamosan eltolódnak, de meredekségük csak nagyon csekély mértékben változik.

A vizsgálatok során mért hiszterézis hurok területét a víztartalom függvényében ábrázolva a 7. ábrán található összefüggést kapjuk. A mérések során a 200%-300% víztartalmi tartományon vizsgáldtunk, viszont feltételezésünk szerint, a víztartalom és a hiszterézis hurok területének összefüggése a Proctor-görbéhez hasonlóan Gauss-görbe lefutást mutat. Ez valószínűsíthetőnek annak a következménye, hogy magas víztartalomnál az anyag viszkozitása csökken, a folyadék viselkedés válik dominánssá, így a szemcsék sokkal könnyebben tudnak a nyírési igénybevétel irányába rendeződni, visszarendeződni. Alacsony víztartalom mellett pedig a szemcsék mobilitása alacsony, mivel lényegében csak a szolvátburok van jelen a rendszerben.



6. ábra. A hiszterézis hurok kettős logaritmusos léptékben (*The hysteresis loop on a double logarithmic scale*)



7. ábra. Hiszterézis hurok kapcsolata a víztartalommal (*The relationship between the size of the hysteresis loop and the water content*)

5. TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

Az eddig elvégzett vizsgálatokat kiterjesztve alacsonyabb víztartalmi tartományba jobban vizsgálható a szemcsék felületén található szolvátburok hatása, magas víztartalom mellett ugyanis már inkább a szemcsék közötti víz hatása dominálja a viselkedést. Magasabb víztartalmi tartományba kiterjesztve a vizsgálatok a résfalás építkezések során alkalmazott bentonit zagy hidraulikus továbbításához, szivattyúzhatóságához nyerhetünk hasznos információkat.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Barnes, H. A. 1996. Thixotropy- a review, *Unilever Research Laboratory, Bebington, Merseyside L63 3JW, UK*, <http://www.dfi.uchile.cl/~rsoto/docencia/FluidosNoNewton2008/trixotropia.pdf>
- Barnes, H. A., Hutton, J. F., Walters, K. 1993. *Bevezetés a reológiába*, Elsevier Science Publisher B.V.
- Farkas J. 1994. *Alapozás* Budapest, Műegyetemi Kiadó, Azonosító: 95012
- Kopecskó K. 2002. Derivatográfia és Rtg-diffrakció mérnöki feladatok megoldásában. *ÉPKO 2002, Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Csíksomlyó, 135-141.
- Mitchell, J. K. 1976. *Fundamentals of Soil Behavior*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Nagy G., Huszák T., Nagy L., Kopecskó K. 2013. Vörösiszap tixotróp viselkedésének vizsgálata, *In: Nagy L, Takács A (szerk.) 3. Kézdi Konferencia kiadványa, Budapest: BME Geotechnikai Tanszék*, 119-128..
- Pukánszky B.; Varga J. 2012. *Bevezetés a műanyagok fizikájába*. Budapest, BME Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék,