

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője:
Prof. Dr. Dobróka Mihály
egyetemi tanár



**TOMOGRÁFIÁS KÉPDIAGNOSZTIKAI VIZSGÁLATOK HIDRO-ÉS MÉRNÖKGEOLÓGIAI
CÉLÚ ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI**

Doktori értekezés tézisei

Készítette:
Mikita Viktória
okleveles környezetmérnök

Tudományos vezető:
Dr. Kovács Balázs
egyetemi docens

*Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Környezetgazdálkodási Intézet*

Miskolc, 2013.

1 BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

1.1 A téma aktualitása, innovatív mérési lehetőségek

Az anyagok belső szerkezetének megismerésére irányuló kutatások az utóbbi néhány évtizedben ugrásszerűen növekedtek. Több tudományterületen (anyagtudományok, földtudományok) felismerték a jelentőségét a humán diagnosztikában alkalmazott roncsolásmentes mérési módszerekben rejlő lehetőségnek.

A talaj polidiszperz, rendkívül heterogén, anizotróp anyag (Szendrei, 1998). Jellemzőinek vizsgálata során a hagyományos hidrogeológiai és talajmechanikai mérési metódusok egy mintatest egészére vonatkozó átlagos jellemzőket határoznak meg, a szerkezeti inhomogenitások figyelembevétele nélkül, homogén, izotróp térbeli anyagjellemzőket feltételezve. A valóságos állapotokat jobban közelítő paraméterek születhetnek, ha egyazon mintán végzünk el több egymást követő vizsgálatot. Ez a hagyományos laboratóriumi vizsgálatok alkalmazásának körében kivitelezhetetlen feladat a mérések roncsolásos volta miatt. Megoldást kínálnak a non-destruktív mérési módszerek, melyek után ugyanaz a vizsgált anyag egyéb hagyományos, roncsolásos vizsgálatnak is alávethető, de a primer állapotú minta belső szerkezeti jellemzőinek információtartalma nem vesz el.

Az elérhető vizsgálati technikák, eszközök és szoftveres háttér fejlődésével a talajokban lejátszódó jelenségek feltárásához és a korábbi nézetek felülvizsgálatához nyújt megbízható támogatást a non-destruktív módszerek mérési metodikába történő integrálása. A computer tomográf roncsolásmentes és háromdimenziós képalkotó jellege által új távlatokat nyithat a földtudományi kutatások területén.

1.2 Célkitűzések

Az értekezésemben foglalt kutatómunka célja laza, eltérő viselkedésű (kohézió nélküli homogén és másodlagos szerkezettel rendelkező heterogén) talajtípusok együttes vizsgálata által a computer tomográf, mint roncsolásmentes mérési módszer alkalmazhatóságának bemutatása a hidro-és mérnökgeológiai gyakorlatban felmerülő egyszerűsített esetek vizsgálatára. A mérési metodika kidolgozásánál mindig a lehető legáltalánosabb problémák megoldása a cél, lehetőséget teremtve a nem specifikus, általános érvényű összefüggések és tendenciák bemutatására.

A statikus és dinamikus roncsolásmentes vizsgálatok eredményeképpen kapott adatmátrixok nagymennyiségű információt tárolnak. Az adatok grafikus és numerikus feldolgozásához és értelmezéséhez metodika kidolgozása szükséges, amely lépések elvégzése után az alábbi területekkel foglalkozom:

-
- a homogén, kohézió nélküli és heterogén, másodlagos szerkezettel rendelkező, mintatestekben statikus terhelések hatására kialakuló deformációs tér jellemzése;
 - laboratóriumi, tömörítéssel mértések során a merev hengerfal és a mintaanyag közötti súrlódásból származó ún. falhatás hatókörének vizsgálata;
 - direkt nyíróvizsgálatok alatt a nyíródobozban kialakuló tömörségváltozások kimutatása;
 - a beszivárgás folyamatának időbeli és térbeli lehatárolása eltérő mértékben konszolidált heterogén mintatestekben;
 - terepi szimpla falú és kettős falú infiltróméteres vizsgálatok laboratóriumi modellezése és computer tomográfus mérések segítségével komparatív értékelésük;
 - porózus közegben lejátszódó diszperzív transzportfolyamatok jellemzőinek meghatározása.

A non-destruktív vizsgálatokból származó eredmények helytállóságát numerikus úton, mechanikai végeses elemes modellek illetve kétfázisú szivárgáshidraulikai modellek alkalmazásával, valamint laboratóriumi mérések segítségével kívánom validálni.

2 ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK ÖSSZEFOGLALÁSA

A felszínhez közeli mélységtartományból származó, kohézió nélküli modellanyag (homok) és másodlagos szerkezettel rendelkező mezőgazdasági talajok felhasználásával, összesen 141 db mintatest non-destruktív computer tomográfus (CT) vizsgálatával kapott eredményeket elemeztem. A CT felvételek nagy felbontással készültek, a 0,6 mm vastagságú szeletek információit 512 x 512 pixel méretű 16 bit/pixel mélységű mátrix tárolja, amelyben minden egyes pixel értéke az adott voxel relatív lineáris sugárgyengítését mutatja. Ezen értékeket a képrekonstrukció során a számítógép egy fix pontokkal rendelkező (víz értéke: 0; levegő értéke: -1000) skálához rendeli, melynek egysége a Hounsfield érték (HU).

2.1 Metodikai vizsgálatok

2.1.1 A talaj térfogatsűrűsége és a CT denzitás (Hounsfield értékek (HU)) közötti korreláció kimutatása

A vizsgált talajminták HU és sűrűség értékeinek összevetése során korrelációt mutattam ki a teljes mintatestre vonatkoztatott átlagos HU értékek (\overline{HU}) és a talaj nedves térfogatsűrűsége ($\overline{\rho}_n^{minia}$) között. A mért értékekre 0,996 értékű korrelációs együtthatóval rendelkező lineáris kapcsolatot állítottam fel, amely összefüggés az alábbi:

$$\bar{\rho}_n^{minima} \left[\frac{g}{cm^3} \right] = \frac{\overline{HU} + 893,9}{1177,7} \quad (1)$$

A korrelációt és a mért értékek relatív átlagszórását laza és igen tömör talajok térfogatsűrűség tartományát (1,25-2 g/cm³) vizsgálva határoztam meg, s bár a linearitás ebben a tartományban fennáll, a tendencia nem terjeszthető ki lényegesen alacsonyabb és nagyobb térfogatsűrűség tartományok felé. Figyelembe véve, hogy a HU skála fix pontjai a levegő (-1000) és a víz (0) HU értéke, illetve maximuma 3000 HU körüli érték, ezért egyértelmű, hogy a linearitás csak adott szakaszokon állhat fenn. Tekintve, hogy a természetben és a mérnöki gyakorlatban az általam vizsgált térfogatsűrűség tartomány reális, ezért a (1) összefüggés lehetővé teszi a heterogén talajmodellek térfogatsűrűségének CT mérésekkel történő meghatározását.

2.1.2 Az optimális kontrasztanyag-koncentráció meghatározása heterogén rendszerekben

Talajminták vizsgálata esetében az áramlási terek és diffúziós folyamatok vizualizációját kontrasztanyagok alkalmazásával lehet növelni. A röntgendiagnosztikában gyakran jó-d-alapú vegyületekkel növelik a kontrasztot, a kálium-jodid (KI) a szivárgási jellemzők meghatározásánál is jól alkalmazható vegyület, mert a talajmátrixban kevésbé adszorbeálódik, valamint a jó-d K-héja 33,2 KeV, ami lehetővé teszi, hogy jelentős sugárelnyelést hozzon létre (Sato, 2013).

KI-oldatokkal telített különböző talajmátrixok metodikai tesztje során meghatároztam a heterogén talajmintákhoz alkalmazható, 100-120 kV csőfeszültség melletti optimális oldat-koncentráció tartományát (1. táblázat és 1. ábra).

KI-oldat koncentráció [mol/l]	MÉRT ÁTLAG HU (\overline{HU}) ÉRTÉKEK		
	KI-oldat tiszta fázis	KI-oldat modellanyag mátrixban	KI-oldat MA talajmátrixban
0	17	1715	890
0,25	888	1936	1515
0,5	1714	2212	1900
0,75	2482	2412	2350
1	2981	2628	2638
1,25	3071	2853	3028
1,5	3071	3020	3071
1,75	3071	3071	3071
2	3071	3071	3071
2,25	3071	3071	3071
2,5	3071	3071	3071

(A sárga mezők a komparatív értékeléshez nem elégséges HU értékeket, a szürke mezők a mérési tartományon kívül eső maximális HU értékeket jelölik)

1. táblázat: A kontrasztanyag optimális koncentrációtartományának meghatározásához végzett metodikai vizsgálat eredményei

A marker-oldat koncentrációk és az egyes mátrixokban mért átlagos HU (\overline{HU}) értékek növekedése között a tendencia nem lineáris, az oldat koncentráció emelésének hatása a röntgenadszorpcióra annál kisebb lesz, minél jobban közelítjük az elérhető maximumot, mely a HU skála 3000 körüli értéke. A kapcsolatot nagy pontossággal közelítik a „telítődést” leíró Mitscherlich függvények (2)

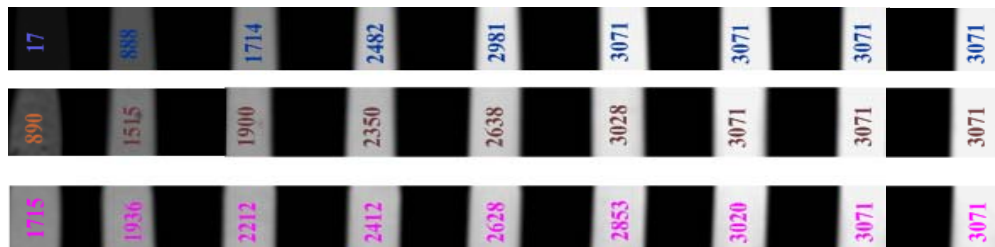
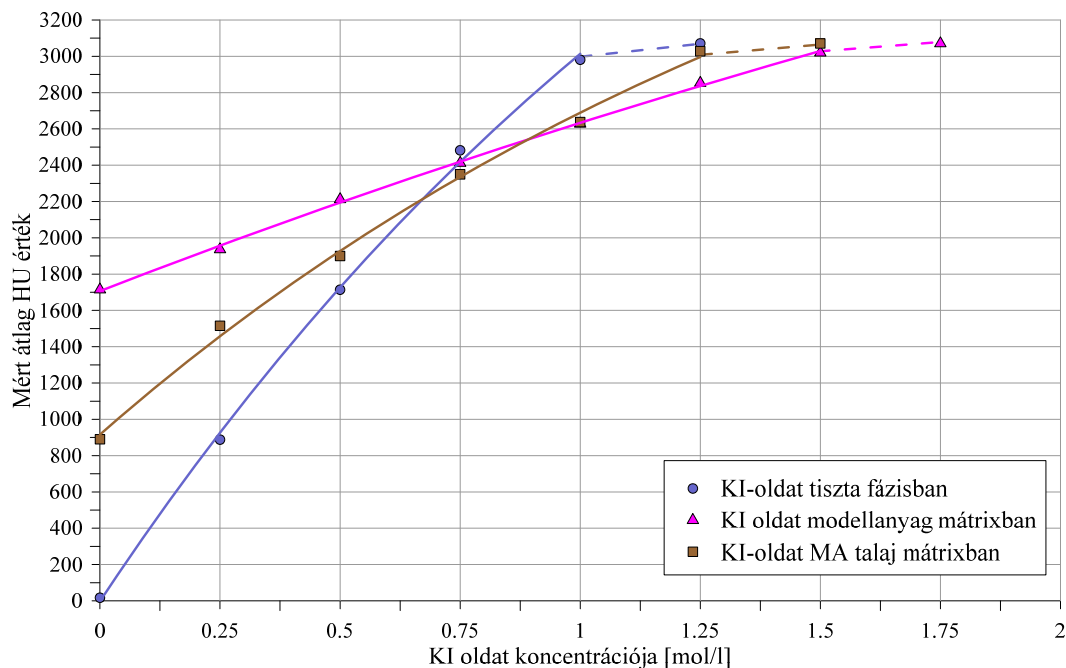
$$\overline{HU} = k_1 \cdot (1 - e^{(-k_2 \cdot C)}) + b \quad (2)$$

az illesztések paramétereit a 2. táblázat tartalmazza. A függvény a „telítettséghez” közeledve egyre lassabban növekvő jelleget mutat, amely növekedés mértékét k_2 írja le. A C paraméter az oldat-koncentrációt [mol/l], míg az additív b tag a vízben mért talajmátrixok átlag HU (\overline{HU}) értékét jelöli. A k_1 paraméter a teoretikus „telítettségi szint” a nagy koncentrációval rendelkező ($C > 1,75$ mol/l) KI-oldatok átlag HU (\overline{HU}) értékeit mutatja meg, amelyeket abban az esetben kapnánk, ha a HU skála nem rendelkezne maximummal.

Paraméter	KI-oldat tiszta fázis	KI-oldat modelanyag mátrix	KI-oldat MA mátrix
k_1 [HU]	6774,8	4882,2	4092,9
k_2 [-]	0,589	0,211	0,568
b [HU]	0	1706,462	915,642
R^2	0,998	0,999	0,997

2. táblázat: A Mitscherlich függvények illesztési paramétereit

Az 1. táblázat és az 1. ábra alapján megállapítható, hogy a kálium-jodid oldat már a 1,25–1,75 mol/l közötti koncentrációtartományban mindhárom vizsgált anyag esetében elérte a mérési skála maximumát, nagyobb töménységű oldat alkalmazása nem eredményezett nagyobb sugárelnyelést, viszont a koncentráció növelése jelentős műtermék képződést okozott. 0,5 mol/l töménységű tiszta KI-oldat sugárelnyelése közel azonos a nagy sűrűségű nedves homokminta röntgenadszorpciójával, ezért heterogén vagy rétegzett talajok esetében a mért HU értékek eltérése nem szignifikáns az adatelemzések elvégzéséhez, tehát a metodikai vizsgálat alapján (100-120 kV csőfeszültség mellett) az optimális kontrasztanyag-koncentráció a 0,5-1,75 mol/l tartományban választandó meg.



1. ábra: A kontrasztanyag optimális koncentrációtartományának meghatározásához végzett metodikai vizsgálat eredményei (a CT felvételen látható számok \overline{HU} értékek)

2.1.3 Hibaelemzés, referencia értékek

A CT felvételek nagy mennyiségű adatot tárolnak, értékelésük során a reprezentatív mérési eredmények elérése a cél, ezért szükséges volt a mért HU eloszlások hibáinak feltárása és számszerűsítése.

A hengeres mintatest kör alakú keresztmetszeti képein a talajok tömörségi állapota a kör átlói mentén felvett HU eloszlás profilokkal jellemezhető. Laza talajmintába merev test benyomását követően a talaj két élesen körülhatárolható zónára osztható: a terhelőlap alatti tömör részre és a terhelőlap mellett kialakult laza zónára.

A tömörség-eloszlás sugárirányú változásának reprezentatív leírásához egy megterhelt homokos-vályog talajminta egyik képszeletén végeztem elemzéseket. 4, 8, 16 és 32 félátló mentén felvett HU eloszlás profilok átlagértékeit és azok relatív átlagszórását („hibáját”) határoztam meg.

A félátlók száma (n) és a relatív átlagszórás ($\bar{\sigma}$) közötti kapcsolatot a

$$\bar{\sigma} = \frac{a}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

alakú függvények írják le.

Az összefüggés megadta az egy félátló HU eloszlás értékeiből származó relatív átlagszórást, amely a mérés maximális hibáját (a) mutatja meg, míg végtelen számú félátló alkalmazása mellett a relatív átlagszórás zérushoz tart. A mért értékekből következik, hogy az átlók számának növelése csökkentette a relatív átlagszórást, illetve a tömör zóna pontosabban mérhető, viszont a lazult talajrészek jelentősen növelték a mérés hibáját (3. táblázat).

RELATÍV ÁTLAGSZÓRÁS ($\bar{\sigma}$)					
Félátlók száma (n)	1	4	8	16	32
<i>Teljes minta</i>	0.0644	0.0328	0.0222	0.0156	0.0109
<i>Laza mintazóna</i>	0.9963	0.0513	0.0340	0.0238	0.0167
<i>Tömör mintazóna</i>	0.0316	0.0157	0.0113	0.0080	0.0056

A normál mezők a mért értékeket, a sárgított mezők a számított relatív átlagszórást jelölik.

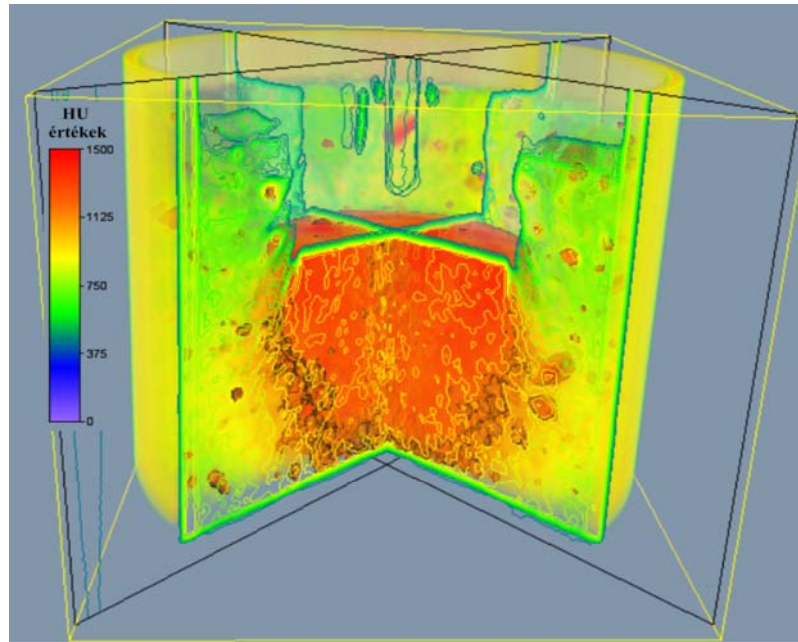
3. táblázat: A relatív átlagszórás értékei a félátlók számának és a mintazónák függvényében

A hibaelemzés alapján, a teljes mintára vonatkoztatva az egy félátló felvétele eredményezte maximális hibához (6,4%) viszonyítva a 8 félátló eloszlásából származó relatív átlagszórás a maximális hiba 35%-ára csökken.

2.2 Talajdeformációk elemzése térben és időben

2.2.1 A talaj tömörségének változásai

A talajminták eltérő teherviselő jellemzőinek meghatározása, valamint a mintatestekben létrejövő tömörség-eloszlások megismerése érdekében hengeres terhelőfej benyomása segítségével (2. ábra) statikus jellegű tömörítési kísérletsorozatot végeztem el.



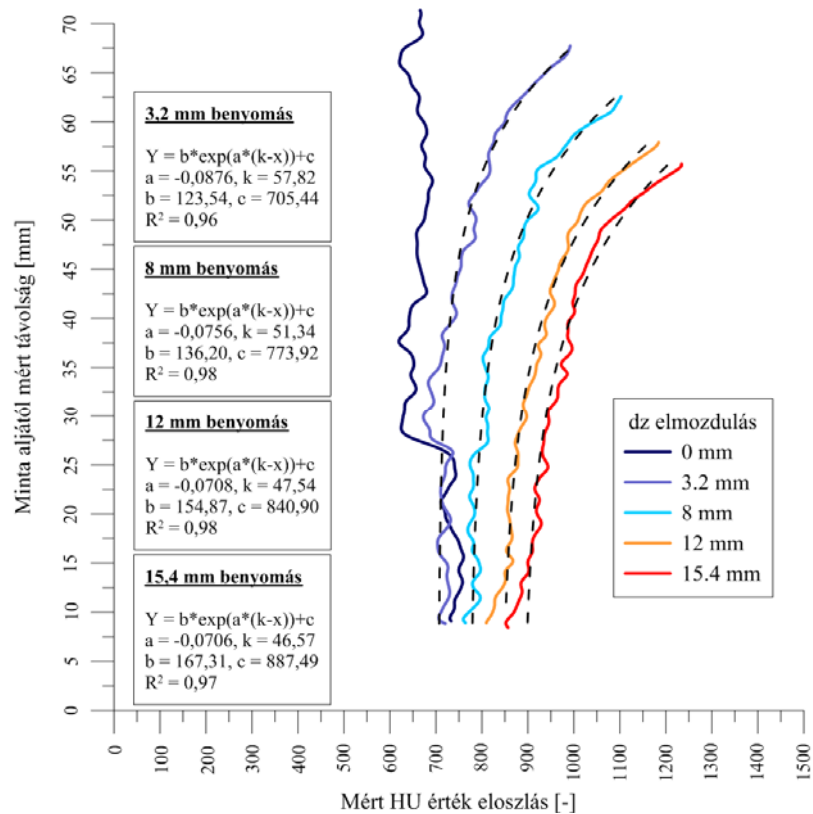
2. ábra: A nyomófej alatt kialakult nyomáshagyma egy közepesen nedves ($w=17,5\%$) mezőgazdasági talajminta rekonstruált térbeli modelljén

A tömörítési kísérleteket követően, számszerűsítve a CT adatmátrixok értékeit, exponenciális közelítéssel (4) írtam le a felszín közeli közegben lejátszódó gyors tömörödési folyamatok során a sűrűséggel arányos HU érték eloszlás-mélység kapcsolatát (3. ábra).

$$\overline{HU} = b \cdot e^{(a_{HU} (x_0 - x))} + c \quad (4)$$

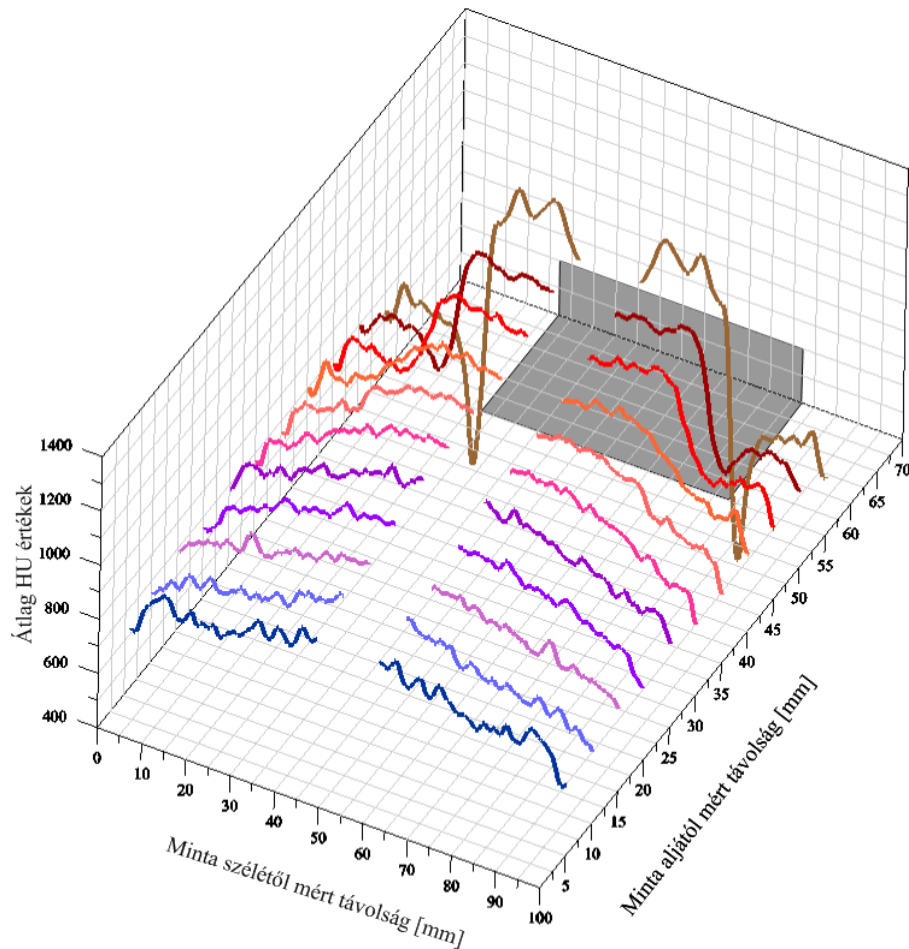
A képletben az a_{HU} paraméter a HU változási együttható [-], amely HU értékek változásának mértékét írja le a mélység függvényében. A b paraméter a változások abszolút nagyságával arányos, míg a c tényező a kezdeti tömörségi állapothoz tartozó HU érték.

A másodlagos szerkezettel rendelkező mezőgazdasági talajminták esetében a terhelő felület alatt közvetlenül egy nagyobb tömörséggel jellemezhető zóna alakul ki, amely a terhelés síkjától távolodva a mélység felé tendenciózusan csökken, míg végül közelíti vagy eléri az in-situ állapothoz tartozó tömörséget.



3. ábra: Közepesen nedves (w=12,3 %) mezőgazdasági homokos talaj mintatestben a terhelő felület alatt kialakuló HU eloszlások mélység szerinti változása az egyes benyomódásokat (dz) követően

A tömörítési kísérletek eredményeit felhasználva a benyomófelület alatt kialakult tömörség mélység szerinti változásán túl meghatároztam a teljes mintatestekben létrejött tömörség-eloszlást a sugárirányú távolság függvényében. A hengeres talajminták kör alakú keresztmetszeti képszeletein 16 félétlő mentén felvett HU eloszlás profilok átlagértékei segítségével elemeztem a kialakult deformációs teret (4. ábra).

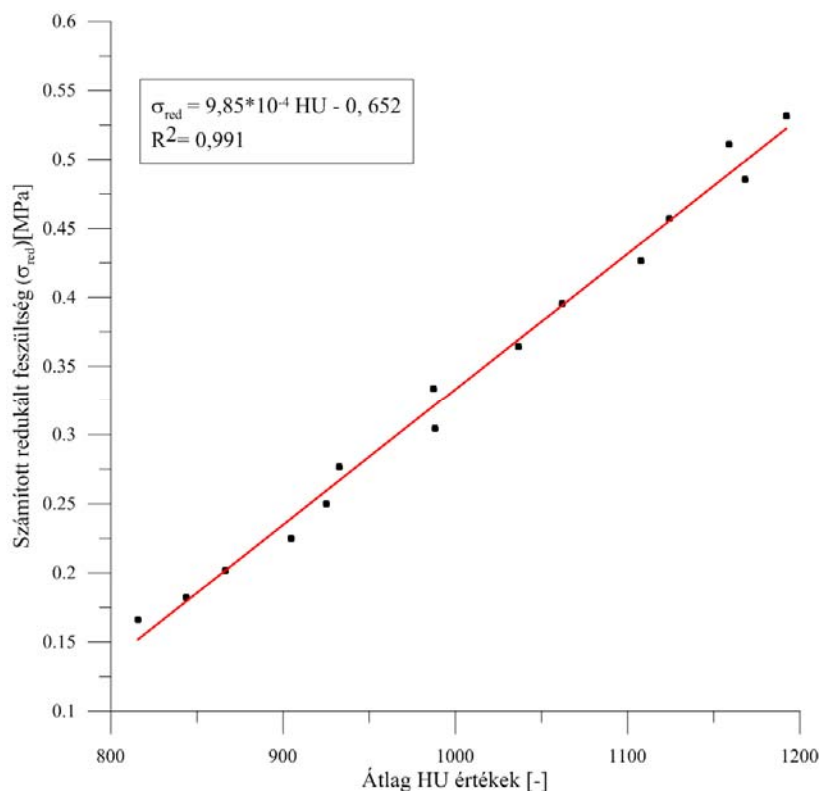


4. ábra: Közepesen nedves (víztartalom 17.5 %) homokos vályog minta HU eloszlás profiljai a mintatestben 15 mm benyomást követően

A computer tomográfus eredmények validálása céljából a talaj terhelés hatására létrejött deformációit egy folytonos és nemfolytonos Galerkin módszer és több anyagmodell (Módosított Cam-Clay, Drucker-Prager) kombinációját alkalmazó, miskolci szakértők által kifejlesztett 3D forgásszimmetrikus végesesemes szoftver segítségével rekonstruáltam.

A computer tomográfal mért HU értékek és a redukált (deviátoros) feszültség (σ_{red}) között lineáris korreláció áll fenn (5. ábra).

Számításaimat a minta középpontjától mért 10-48 mm közötti tartományban végeztem el, elkerülve a numerikus modell tengelyvonalaiban kialakult szinguláris élhez tartozó feszültség értékek és a CT felvételeken fellépett műtermékekből származó inkorrekt HU értékekből levonható téves konzekvenciák lehetőségét.



5. ábra: A számított redukált feszültségek (σ_{red}) és az átlagos HU értékek közötti kapcsolat

2.2.2 Peremfeltételek hatásvizsgálata

A geotechnikai mérési gyakorlatban a mintageometria megválasztása jelentős hatással lehet a mérési eredményekre. Tömörítéssel vizsgálatok esetében a merev falú henger palástján a normál irányú terhelés hatására a súrlódás következtében nyírófeszültségek ébrednek, melyek a függőleges deformációt gátolják. Ez a jelenség az ún. „falhatás”. A falhatás nagysága közvetlenül a henger palástja mentén számszerűsíthető, de a hatásterületének meghatározási módja nem kidolgozott.

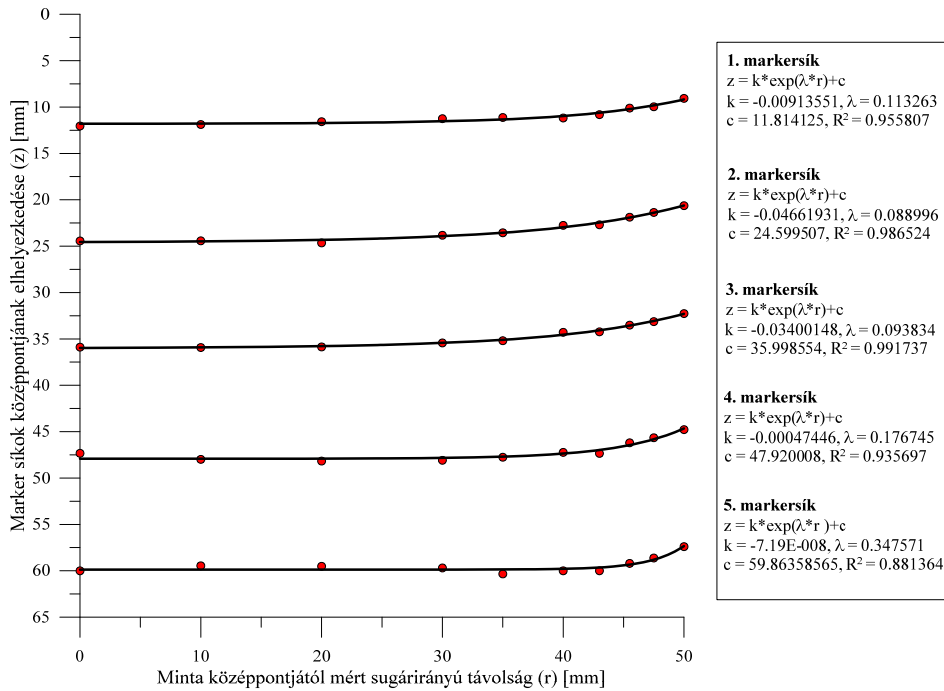
Statikus tömörítési kísérletek során bárium-szulfát ($BaSO_4$) jelzőanyag és eltérő nedvességtartalmú talajok alkalmazása által meghatároztam a hengeres talajtestekben ébredő falhatás hatókörét. A mintatestek axiális metszetein felvett hosszanti HU eloszlás profilok megadták a marker síkok közelítő helyét a térben, majd az eloszlásra öt pontos Gauss-függvényt illesztve, a kapott maximum helyek kijelölték a marker síkok sugárirányú elhelyezkedését a mintatestben (6. ábra). Az ábrán látható, hogy a falhatás nagysága és hatótávolsága között fordított arányosság áll fenn.

A marker-pontok sugárirányú elhelyezkedése az (5) összefüggéssel írható le (korrelációs együttható: 0,86-0,98).

$$z = k \cdot e^{\lambda(r_0-r)} + c \quad (5)$$

A képletben r a sugarat, r_0 a minta sugarát, a marker függőleges irányú pozícióját bármely helyen z , a minta középpontjában c jelöli, k az exponenciális szorzótényező, valamint a λ paraméter az R „felezési távolsággal” összefüggő jellemző, amely az alábbi módon (6) számítható.

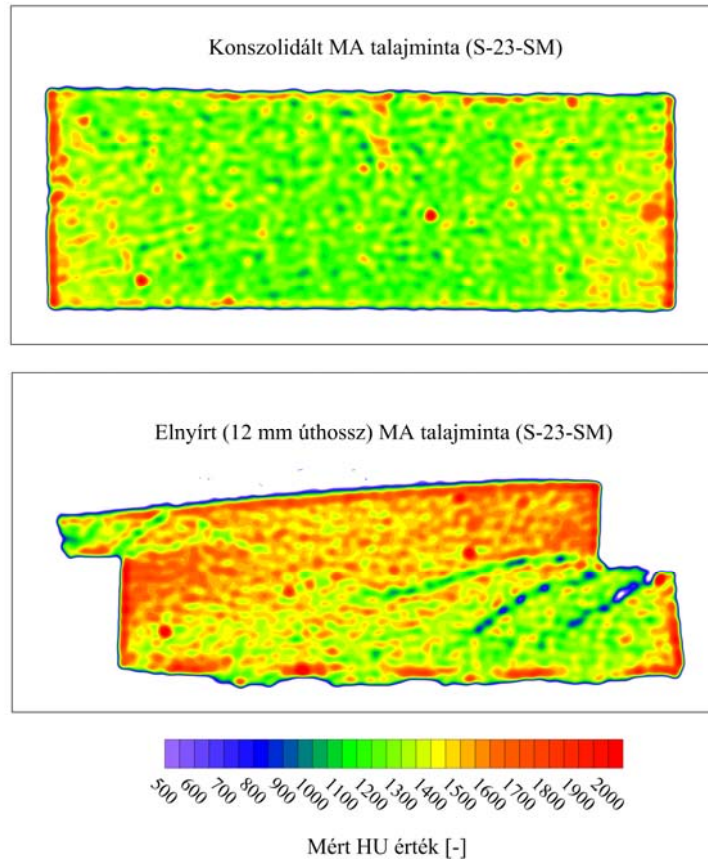
$$R = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (6)$$



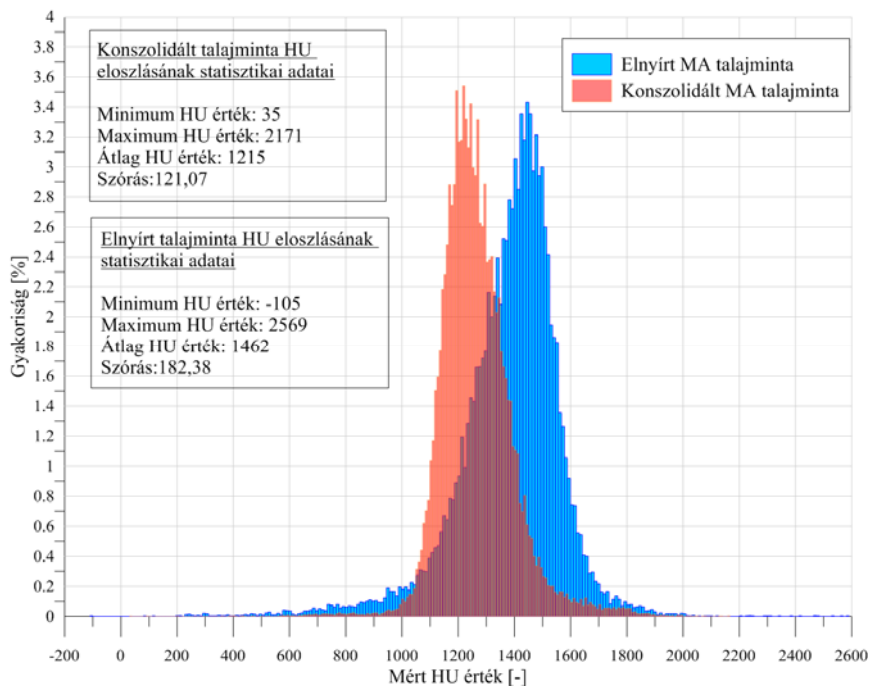
6. ábra: A marker síkok sugárirányú elhelyezkedése közepesen nedves ($w=17,5\%$) homokos vályog talajmintán végzett statikus tömörítési kísérlet után

2.3 Direkt nyíróvizsgálatok értékelése

Direkt nyíróvizsgálatok folyamatainak roncsolásmentes megismerése céljából, a vizsgált talajmintatestek konszolidációt követő, kezdeti állapotában készült felvételeinek és a direkt nyírás után készült CT mérések adatmátrixából előállított izovonalas HU-térképeket elemeztem (7. ábra). Összevetve a két állapotban készült keresztmetszelvények HU értékeinek gyakoriság eloszlását, jellemezhető a mintatest tömörségeloszlás változása a direkt nyírást követően (8. ábra).



7. ábra: Direkt nyírásnak alávetett homokos vályog talajminta kezdeti állapota és a nyírást követő mért HU mátrixok izovonalas térképe (5 bar konszolidáció, 12 mm nyírási úthossz, nyírósík)



8. ábra: A kezdeti állapothoz tartozó konszolidált és az elnyírt homokos vályog mintatestek HU értékeinek hisztogramjai (5 bar konszolidáció, 12 mm nyírási úthossz, nyírósíkkal elnyírva)

A direkt nyírási tesztet követően (12 mm nyírási úthossz) az irányított nyírási síktól fentebb elhelyezkedő talajzóna HU értékei jelentősen ($\overline{\Delta HU} = 20\%$) megnövekedtek, miközben a nyírási kényszerfelület mentén, a mintatest széleiről kiindulva laza tönkremeneteli zónák alakultak ki és jól lehatárolható repedések keletkeztek a talajban.

2.4 Beszivárgási kísérletek

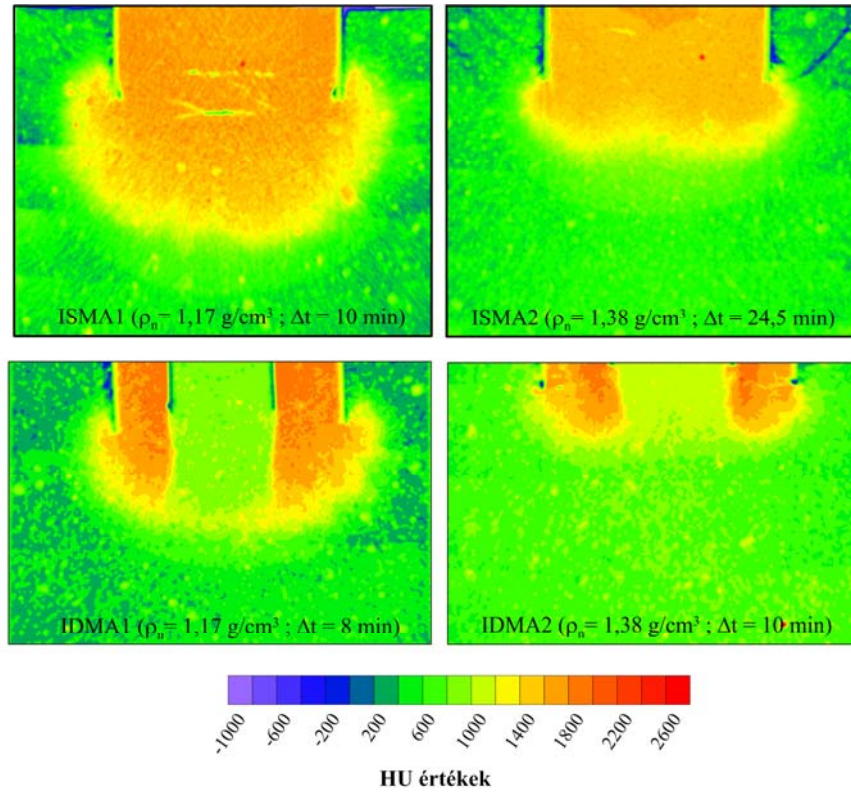
2.4.1 Beszivárgás hatókörének és időbeliségének követése

A talaj telítetlen zónájában végbemenő vertikális vízmozgást alapvetően két erő határozza meg: a gravitáció és a kapilláris erők.

Kísérleteim célja a felszín közeli talaj permeabilitásának meghatározására szolgáló terepi infiltróméteres vizsgálatok modellezése volt, illetve roncsolásmentes technikával a különböző tömörségű talajminták esetén a hagyományos (szimpla falú) és a dupla falú infiltróméterek alkalmazásával kialakuló beszivárgási tér közötti különbségek feltárása.

Megfigyelhető (9. ábra), hogy a beszivárgási folyamatok igen érzékenyek a talajminta kezdeti tömörség-eloszlására. Már a közel 20 %-os térfogatsűrűség differencia is jelentős különbségeket okoz az áramlási frontok időbeli alakulására.

Mind a laza, mind a tömörebb talajminta felvételei alapján megállapítható, hogy a jelentős oldalirányú és felfelé történő szivárgás miatt a szimpla falú infiltróméterrel a vertikális szivárgási jellemzők nem határozhatóak meg a hagyományos úton. A kettős falú infiltróméter modell kísérleti eredményei lényegesen jobban közelítik a teoretikus beszivárgási jelleget, a belső gyűrűben mérhető vízszintváltozás a talajminta vertikális szivárgási tényezőjével arányos érték.



9. ábra: Az eltérő tömörségű mintatestek közel azonos beszivárgási idejéhez ($\Delta t = 10 \text{ min}$)* tartozó áramlási frontok (*kivéve ISMA2)

A hengeres mintatestek vertikális keresztmetszeti CT felvételen meghatározható a vertikális szivárgási sebesség (K_{vCT}) (7).

$$K_{vCT} = \frac{l_{inf}}{\Delta t} \quad (7)$$

A beszivárgás folyamatát és a transzportfolyamatok alakulását numerikus úton a VS2DTI 1.3 véges differencia megközelítésen alapuló programmal és a hozzá kapcsolt preproceszorral modelleztem. A mérések és a numerikus szimulációk kombinált alkalmazása biztosítja a mérési eredmények validációját, illetve numerikus modellek útján lehetővé teszi az összefüggések kiterjesztését más talajtípusokra és talajállapotokra.

Elemezve a CT felvételeken mért és a numerikusan számított beszivárgási frontok előrehaladását (l_{inf}) a kísérlet kezdetétől eltelt idő (Δt) függvényében, a korlátozott mintaméret és így a kísérlet rövid időtartama miatt az értékekre

$$l_{inf} = A \cdot \Delta t^b \quad (8)$$

alakú hatványfüggvények illesztésével számszerűsítettem a beszivárgási frontok időbeni alakulását, lehetővé téve a tendenciák extrapolálását hosszabb vizsgálati idők esetére.

A (8) összefüggésben az A paraméter az egységnyi időre vonatkoztatott beszivárgás mennyiségével arányos érték, illetve a b kitevő megadja a csökkenő ütemben emelkedő görbe növekedésének mértékét.

A szivárgási front előrehaladásának (l_{inf}) mért és számított értékei között lineáris korreláció áll fenn (9) ($R^2=0,999$).

$$l_{inf}(számított) = l_{inf}(mért) * 0,9781 \quad (9)$$

A fentiek alapján megállapítható, hogy laboratóriumi léptékű mintatest esetében a kísérleti eredmények rekonstruálhatóak numerikus modellekkel és így a modellezés input paraméterei is pontosíthatóak a vizsgált mintatestre vonatkozóan.

2.4.2 Diszperzió állandó meghatározása

A szimpla falú infiltrációs kísérletek során készített CT felvételek egyben lehetővé tették az anyagtranszport szempontjából lényeges diszperzió folyamatának közelítését. A laza ($\rho_n=1,17 \text{ g/cm}^3$) és a tömörebb ($\rho_n=1,38 \text{ g/cm}^3$) mintatestekhez tartozó CT képek elemzésével vizsgáltam a kálium-jodid (KI) oldat, mint „szennyezőanyag” szóródását a talajban.

Pórozus, heterogén rendszerben a hidrodinamikai (mechanikai) diszperziót az áramlási sebesség irányának és nagyságának lokális változásai okozzák (Kovács, 2004).

Az oszlopkísérletek analógiáján az infiltrációs modellben a KI oldat koncentráció változása egydimenziós transzportfolyamattal közelíthető. A nem bomló és nem adszorbeálódó szennyezőanyag koncentrációjának meghatározását a t időpontban Ogata és Banks (1961) összefüggése (10) írja le.

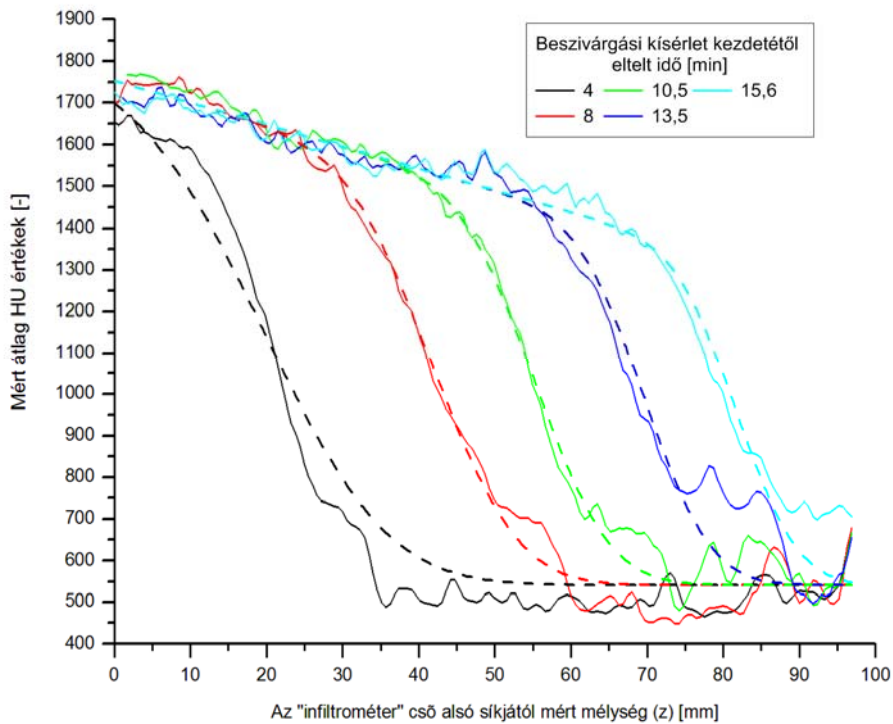
$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{v}_x t}{2\sqrt{\alpha_L \bar{v}_x t}} \right) \quad (10)$$

Az egyes CT mérési időpontokhoz tartozó keresztmetszeti képeken felvett átlag HU (\overline{HU}) eloszlás profilokat az infiltróméter cső alsó peremétől mért távolság függvényében ábrázoltam. A tömörebb talajminta (ISMA2, $\rho_n=1,38 \text{ g/cm}^3$) eloszlás profiljaira (10) alapján (11) alakú függvényt illesztettem (korreláció mértéke: $R^2=0,986$) (10. ábra), amely egy additív taggal (b) bővült az alapösszefüggéshez képest. A b paraméter a talaj nedves térfogatsűrűségéhez tartozó átlag HU (\overline{HU}) értéke.

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \bar{v}_x t}{2\sqrt{\alpha_L \bar{v}_x t}}\right) + b \quad (10)$$

A laza talajminta ($\rho_n=1,17 \text{ g/cm}^3$) esetében a (11) összefüggéshez hozzájárult a nagymértékű oldalirányú szivárgásból származó és abból számítható lineáris hígulási együttható (d). Ekkor (11) az alábbiak szerint módosult (korreláció mértéke: $R^2=0,986$) (12).

$$C(x,t) = (1 - dx) \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \bar{v}_x t}{2\sqrt{\alpha_L \bar{v}_x t}}\right) + b \quad (12)$$



10. ábra: A laza homokos vályog talajminta átlagos HU (\overline{HU}) eloszlás értékei a mintamélység függvényében és a módosított Ogata-Banks összefüggések

A diszperzió állandó (D_x) egydimenziós esetben a longitudinális diszperzivitás (α_L) és az átlagos pórusbeli szivárgási tényező (\bar{v}_x) felhasználásával a következő, (13) formában adható meg.

$$D_x = \alpha_L \bar{v}_x \quad (13)$$

Mivel a diszperzió arányos a pórusokban kialakuló átlagos szivárgási sebességgel, ezért a diszperzió állandó a tömörebb minta esetében alacsonyabb értékkel jellemezhető. Az illesztések

paramétereit alapján a számított diszperzió állandók a következők: laza minta (ISMA1) $D_x = 5,29 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 / \text{s}$; tömörebb minta (ISMA2) $D_x = 5,05 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 / \text{s}$.

A fenti eredmények alapján megállapítható, hogy a CT mérések és analitikus megoldások együttes alkalmazásával jellemezhető a szennyezőanyag szóródás folyamata, valamint közelíthető a diszperzió állandó értéke.

3 ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TÉZISEK

Az értekezésben bemutatott vizsgálati eredményekkel bemutattam a hidro- és mérnökgeológiai gyakorlatban felmerülő néhány kiválasztott esetben a computer tomográf (CT) történő roncsolásmentes elemzések alkalmazásának előnyeit. Figyelembe véve az igen kiterjedt nemzetközi szakirodalmat, azokra a területekre szűkítettem kutatásaimat, amelyeket korábban csak részben érintettek vagy további kérdések merültek fel az eredmények kapcsán.

A felszín közeli mélységtartományból származó, eltérő jellegű - másodlagos szerkezettel rendelkező heterogén és homogén kohézió nélküli laza talajok felhasználásával – döntő többségben laboratóriumi körülmények között előállított talajminták vizsgálatán keresztül mutattam be talajok és modellanyagok viselkedésének törvényszerűségeit.

Céлом egyrészt általános érvényű összefüggések és tendenciák feltárása volt, másrészt metodikai vizsgálatokat is elvégeztem, a jövőben végzendő CT vizsgálatok megkönnyítésére.

Első vizsgálataim között a talajok viselkedésének jellemzésére szolgáló statikus talajfizikai paraméterek és a talajok ásványos karakterének meghatározása szerepelt. Az eredmények alapján választottam meg a computer tomográf mérésekhez előállított mintatestek tulajdonságait, mint például az optimális víztartalmat.

A kezdeti computer tomográf mérések metodikai céllal készültek, az eredmények segítségével a mintatestek átlagos nedves testsűrűsége és átlagos HU értékeinek korrelációját, valamint az optimális kontrasztanyag koncentráció megválasztását érintő, a további értelmezéseket segítő összefüggést írtam le.

Statikus tömörítési kísérletek és markeranyagok kombinált alkalmazásával a laza, hengeres mintatestekben a merev hengerpalást mentén ébredő súrlódás hatókörét meghatároztam, bevezetve a felezési úthossz fogalmát.

A laza talajminták teherviselő tulajdonságainak számszerűsítésére több terhelési lépésben vizsgáltam a terhelőfej alatt és mellett kialakuló HU értékek eloszlását - a benyomófejtől távolodva - a mélység függvényében, majd numerikus végesesemes szimulációkkal támasztottam alá computer tomográf mérési eredményeimet.

Nyíróvizsgálatok során a nyíródobozban létrejött tömörség-inhomogenitások és törési síkok kimutatására eltérő paraméterekkel direkt nyíróvizsgálatokat végeztem.

Telítetlen, heterogén közegben a beszivárgási frontok időbeli alakulásának megismerése végett, valamint a szimpla falú és kettős falú infiltróméteres vizsgálat komparatív értékelése céljából infiltrációs vizsgálatokat végeztem hengeres mintatesteken. A CT felvételeken mért beszivárgási folyamatokat véges differencia elven működő, telítetlen közegre kidolgozott szivárgáshidraulikai modellel validáltam.

Az infiltrációs tesztek során alkalmazott kálium-jodid markeranyag lehetővé tette az anyagtranszport szempontjából igen lényeges folyamat, a diszperzivitás paramétereinek mérését, mely paraméter meghatározására megoldást dolgoztam ki.

Az értekezés címében és bevezetésében foglalt célok elérését a mérési eredményeimmel támasztom alá, amelyek elemzése során az alábbi újszerű tudományos eredményeket és téziseket fogalmaztam meg:

1. Bizonyítottam, hogy a CT mérések során meghatározott Hounsfield egységek (HU) értékei a talajvizsgálatok során releváns mérési tartományban arányosak a talaj nedves állapotra vonatkoztatott testsűrűségével, valamint annak tömörséggel való közvetlen kapcsolatából következően a talajban ébredő átlagos hatékony feszültségekkel.

1.1. Módszert dolgoztam ki az $\frac{1}{\sqrt{x}}$ alakú függvény alkalmazásával a sugárirányú változások

hibájának számítására hengersizmetrikus esetben. A módszerrel egy megadott, megengedhető maximális relatív átlagszórás érték esetén egyértelműen meghatározható a minimálisan vizsgálandó félátlók száma a reprezentatív eredmények elérése érdekében.

1.2. A HU eloszlásprofilok segítségével meghatározható a mintatest hengersizmetrikus tömörség-eloszlása a mélység és a sugárirányú távolság függvényében.

1.3. Igazoltam a HU értékek és a numerikus modellekkel számított feszültség- és tömörségi állapotjellemzők szoros kapcsolatát.

2. Hengeres test benyomásának vizsgálata alapján bizonyítottam a CT alkalmazásának hatékonyságát, a természetes kohézió nélküli homok, illetve a kohéziós homokos vályog és vályogtalajok eltérő teherviselő mechanizmusának bemutatására.

3. A markerek okozta HU értékek maximumhelyeinek Gauss féle eloszlásfüggvénnyel való közelítésével kidolgoztam a mintán belüli elmozdulások pontos meghatározásának metodikáját. Az eredmények felhasználásával kompressziós kísérlet során megvizsgáltam a

hengeres mintán belül a fal mellett ébredő súrlódás tömörségtorzító hatását. Bevezettem a falsúrlódásra jellemző felezési távolság fogalmát.

4. Metodikai vizsgálattal igazoltam, hogy a kálium-jodid (KI) vizes oldata megfelelő kontrasztanyag a talajmechanikai célú CT vizsgálatok esetén. Megállapítottam, hogy a heterogén talajok vizsgálatára alkalmas (100-120 keV csőfeszültség és optimális áramerősség) CT mérés esetén 1,75 mol/l feletti koncentrációval rendelkező markeroldat alkalmazása a képi értelmezést - a mesterséges zaj növekedése miatt - akadályozza. Kis töménységű <math><0,5\text{ mol/l}</math> oldatok esetén a röntgen-adszorbancia változása nem elégséges a mérések kvantitatív értékeléséhez.
5. Nyíróvizsgálatok CT elemzésével roncsolásmentes módon kimutattam, hogy
 - 5.1. az alsó és felső befogólap fogazottsága irányított tönkremeneteli felület kialakulását eredményezi, egy vastagabb tönkremeneteli zóna alakul ki. A tönkremeneteli zónában a tömörség növekedése és diszkontinuitások kialakulása jellemző.
 - 5.2. a direkt nyírás során a nyírási sík feletti és alatti térrészben a tömörségeloszlás eltérő, amivel cáfoltam a korábban feltételezett, az optimális geometriájú mintában kialakuló tömörség eloszlási szimmetria tényét.
6. Numerikus számításokkal igazoltam, hogy talajok esetében a CT alkalmas az infiltrációs áramlási tér vizsgálatára. A képdiagnosztikai vizsgálatokkal egyértelműen követhetők a beszivárgási folyamatok, amelyek rámutattak, hogy a tényleges áramlási tér esetenként eltérhet a feltételezettől. Ennek oka a nyomáskülönbség és a kapilláris erők hatására fellépő horizontális és vertikálisan felfelé történő vízmozgás.
7. A CT felvételeken meghatározott beszivárgási frontok analitikai elemzése által bizonyítottam, hogy a computer tomográf és kontrasztanyag együttes alkalmazásával megbecsülhetőek a diszperzió folyamatát jellemző paraméterek (longitudinális diszperzivitás és diszperziós együttható).

Az értekezésben jellemző tendenciákat foglaltam össze néhány talajállapokra vonatkozóan, így a továbbiakban a kutatási eredmények több méréssel és változó peremfeltételekkel pontosíthatóak egy-egy kiemelt területre. A vizsgált objektum és annak jellemzőinek, valamint a computer tomográf mérési paramétereinek változtatásával számtalan mérési kombinációra van lehetőség az anyagok belső szerkezetének és a bennük lejárló folyamatok non destruktív feltárására.

A computer tomográf potenciális eszköznek bizonyult a hidro-és mérnökgeológia kutatási területén, az eszköz folyamatos fejlesztése által tovább növekszik a képfelbontás, jobban

elkülöníthetőek lesznek a kis sűrűségkülönbséggel rendelkező alkotók, illetve vizsgálati idő csökkenése által a gyorsan végbemenő dinamikus folyamatokat „real-time” követhetjük. Az eszköz elérhetőségét tekintve, a computer tomográfok ára az elmúlt években drámaian csökkent, így egyre több kutatási területen alkalmazhatóvá válik a technika.

4 SUMMARY

I have presented a short review of the X-ray computer tomography (CT) applications for hydro-and geotechnical engineering studies of cohesionless sand and heterogenous agricultural soil types.

For the detailed understanding of the spatial distribution of deformation fields and the process of infiltration in soils, static compression tests, direct shearing tests and infiltration measurements were performed on 2 different agricultural soils (NYT sandy soil and MA sandy loam) and on a cohesionless, „model-material” (finesand) and the samples were investigated with X-ray computed tomography (CT). The traditional geotechnical soil testing methods are often destructive, the CT has demonstrated high potential for examining the internal structure and the infiltration processes of different soil samples by non-destructive way.

Based on the results described in this work, I have gained the following experiences.

1. The average HU values are related to the average wet bulk density values (in the range 1,2-2 g/cm³) of the soil samples, therefore they are related to the average effective stresses occurred during the preconsolidation history.

- 1.1. I have developed a method with the use of $\frac{1}{\sqrt{x}}$ function for the determination of radial average HU distribution errors in case of cylindrical soil samples. For a given maximum relative standard deviation, minimum number of sampled half-diagonals definitely can be determined with this method to reach representative results.
- 1.2. The HU distribution profiles show the cylindrical compaction-distribution as a function of radial distance and depth in soil samples.
- 1.3. The comparison of the numerical simulation results and the measured CT data, proved that the HU values (therefore also the wet bulk density) are correlated with the calculated stress values.

-
2. Based on the results of static compression tests with cylinder shape indenter, I state that the CT is an effective equipment for the investigation of differences in the bearing capacity of the homogeneous, cohesionless sand and cohesion sandy loam and loam soils.
 3. I have developed a technique - with the use of contrast agent and Gauss function - to determine the vertical displacements in cylindrical soil samples. Static compression tests applied to characterize the field of side-wall friction between the rigid tube wall and the soil. I have introduced the definition of half-distance parameter of sidewall friction.
 4. I have certified with methodological investigations, that the potassium-iodide (KI) solution is a proper contrast agent in soil mechanical CT tests. I have concluded that for heterogeneous soils (CT measuring parameters: 100-120 keV and optimal current) the use of 0,5-1,75 mol/l concentration of KI solution is adequate.
 5. I have showed by non-destructive way with the combined application of direct shearing tests and CT measurements, that
 - 5.1. the roughness of the top and bottom filter plate of the shearing box results an oriented failure surface, and in the near vicinity of this surface a thick failure zone is formed. The failure zone can be characterized by the increase of the level of compaction and the occurrence of failures.
 - 5.2. the void ratio distribution and therefore also the level of compaction is different above and below the shear surface at direct shear tests, so the symmetric compaction of samples of optimal geometry has been confuted.
 6. Using numerical simulations I have validated the applicability of CT for the investigation of infiltration field. With the detailed evaluation of CT pictures, the infiltration processes definitely can be followed in the soil samples. The results showed that some cases the flow field is different as it was assumed, because of pressure differences and the capillary forces.
 7. By the analytical evaluation of the evolution of infiltration fields on CT pictures, I proved that with the combined application of CT and contrast solution (KI) the parameters of dispersion (longitudinal dispersivity and dispersion coefficient) can be determined.

A kutatás a Miskolci Egyetemen működő Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ TÁMOP 4.2.2/A-11-/1-KONV-2012-0049 jelű “KÚTFŐ” hozzájárulásával valósult meg, amely az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

5 TÉZISFÜZETBEN SZERPLŐ HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

Kovács, B. (2004): Hidrodinamikai és transzportmodellezés I. Gáma-Geo Kft., Szekszárd. pp:50-81.

Ogata, A. – Banks, R.B. (1961): A Solution of Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, US Geological Survey Professional Paper, 411–A., US. Government Printing Office, Washington

Sato, A. (2013): Analysis of the Tracer Diffusion Phenomena through Cracks in the Porous Media by Means of X-Ray CT. Materials Sciences and Applications, 4. pp. 18-31.

Szendrei, G. (2000): Talajtan. ELTE Eötvös Kiadó, pp: 18-28.

6 AZ ÉRTEZEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

Kovács, B. – Sárközi, L. – Kriston, S. – Mikita, V. – Kántor, T. (2007): Soil mechanical behaviour of soft unconsolidated soils. IV. Nemzetközi Tudományos Konferencia a Kárpát-medence ásványvizeiről, Miskolci Egyetem közleménye A. sorozat. 72. kötet, Miskolc, Egyetemi Kiadó, pp: 195-207.

Kovács, B. – Mikita, V. – Sárközi, L. – Földes, T. – Tokai, R. – Kriston, S. (2007): Nem konszolidált talajok triaxiális vizsgálata során végbemenő folyamatok követése computer tomográffal (CT). Geotechnika 2007 Konferencia Kiadványa, Ráckeve, 2007. október 16-17.

Kovács, B. – Mikita, V. – Kriston, S. – Kántor, T. – Földes, T. (2008): CT investigation of loose soils during geotechnical tests. XII. Geomatematikai ankét, Mórahalom 2008. május 29-31., Internetes publikáció

Kovács, B.- Mikita, V.- Kántor, T., Kriston, S. (2009): Compaction behaviour of loose, agricultural soils of different clay content. 2009 Advanceclay 2 Intensive summer School, Budapest-Pécs, IP 2009. pp:17.

Kriston, S. – Kántor, T. – Mikita, V. – Kovács, B. (2009): Evolution of Stress Fields During Standard Geotechnical Tests in Loose Agricultural Soils. Proc. of XXIII: MicroCAD Int. Sci. Conf. Section A: Waste Disposal., Site remediation and Risk Assessment, 2009 III. 19-20. Miskolc, pp: 25-30.

Mikita, V. – Kovács, B. – Kriston, S. – Czinkota, I. (2009): Evaluation of loose, agricultural soil samples with computer tomography. XIII. Geomatematikai ankét, Mórahalom 2009.május 21-23. Abstract book, pp: 15.

Mikita, V. – Kovács, B. – Földes, T. (2009): The use of computer tomography for evaluation of the compaction of loose agricultural soils. *Cereal Research Communications*, Vol 37. Suppl 1., Akadémiai Kiadó, pp: 543-546.

Mikita, V. (2009): Laza, mezőgazdasági talajtestek deformációinak vizsgálata CT segítségével. XV. Nemzetközi Környezetvédelmi és Vidékfejlesztési Diákkonferencia Kiadványa, 2009 Mezőtúr. pp: 16.

Mikita, V. – Kristály, F. – Kántor, T. (2010): The effect of different climates on the soil mechanical properties of agricultural soils. *Növénytermelés* Vol 59. Suppl 1., Akadémiai Kiadó pp: 165-168.

Mikita, V. – Kántor, T. (2010): Investigation of soil compaction using image diagnostical tools. XXIV MicroCAD 2010. Int. Sci. Conf. Section B: Waste Processing and Recycling, pp:7-12.

Kántor, T.– Mikita, V. (2010): Investigation of unconsolidated soft soils with innovated large scale shearing machine. Springwind 2010. konferencia kötet, pp: 216-223.

Mikita, V. – Kriston, S. (2011): Determination of soil compaction and saturation distribution under different vertical loads in loose agricultural soils. Proc. of XXV. MicroCAD 2011 Int. Sci. Conf. Section A: Environmental and Energy Management, pp:69-74.

Mikita, V. – Kriston, S. Kántor, T. – Kovács, B.- Dobos, E. (2011): Modelling of soil compaction and saturation distribution of loose agricultural soils by penetrometer. *Növénytermelés* Vol 60. Suppl 1., Akadémiai Kiadó, pp: 203-206.

Mikita, V. – Kovács, B. – Sárközi, L. (2011): The moisture content dependency of some soil-physical properties of agricultural soils. 2011. VIII. Kárpát-medence Ásvány- és Gyógyvizei konferencia, *Geotudományok Miskolci Egyetem Közleménye A. sorozat* 81. kötet, Miskolc, Egyetemi Kiadó, pp: 363-368.