



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
VÁSÁRHELYI PÁL ÉPÍTŐMÉRNÖKI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Betonokban történő vízmozgás laboratóriumi és numerikus vizsgálata

PhD értekezés tézisei

Pap Miklós

okleveles építőmérnök

Tudományos vezető:

Dr. Mahler András

egyetemi docens

Budapest, 2025

1 BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedek telítetlen talajokon végzett vizsgálatai rámutattak arra, hogy már a telítettség csekély mértékű csökkenése is jelentősen mérsékelheti a talaj áteresztőképességi együtthatóját (Fredlund, et al., 2012). Hasonló tendenciát figyeltek meg más porózus anyagok – például geotextíliák és aszfaltok – esetében is (Park & Fleming, 2006; Renken, et al., 2016; Törzs, et al., 2019; Fleming, et al., 2023). E mellett számos publikáció igazolja, hogy a porózus közegek, mint például kőzetek és talajok víztartalmának változása jelentős hatással van az anyag mechanikai tulajdonságaira (Pezowicz & Choma-Moryl, 2015; Vásárhelyi & Davarpanah, 2018; Zhang, et al., 2023; Ma, et al., 2023). Korábbi beton próbatesteken végzett vizsgálatok arra utalnak, hogy a beton esetében is hasonló összefüggés figyelhető meg a vízáteresztőképesség tekintetében. Ennek megfelelően feltételezhető, hogy a telítetlen közegekre kidolgozott talajmechanikai modellek más porózus anyagok – így például beton – vízmozgásának leírására is kiterjeszthetők (Leech, et al., 2003; Major, et al., 2010; Major & Wittmann, 2011; Vilasboas, et al., 2016; Pap, et al., 2018; Liu, et al., 2020).

A téma aktualitását adja, hogy a mélyépítési munkálatok során a víz jelenléte szinte elkerülhetetlen. Részfals munkatérhatárolások építésekor kiemelten fontos, hogy a lehető legnagyobb vízzáróságú betonszerkezetet hozzunk létre, ugyanakkor teljesen vízzáró beton előállítása gyakorlatilag nem lehetséges. Hosszabb ideig nyitott munkagödör esetén az áteresztőképesség-függvény ismerete különösen lényeges, hiszen ez alapján becsülhető a szerkezeten átjutó vízmennyiség, illetve bizonyítható, hogy meghatározott időtartamon belül nem szivárog át víz.

A hulladékártatók – különösen a veszélyes vagy radioaktív hulladékot tároló létesítmények – esetében az áteresztőképesség telítettségfüggő értékeinek ismerete még fontosabb (Carme & Saaltink, 2016). Ilyen szerkezeteknél alapvető követelmény, hogy a víz ne tudjon sem bejutni, sem kijutni a rendszerből. Az áteresztőképesség-függvény segítségével lehetőség nyílik a tárolóbetonban lejátszódó vízmozgások numerikus modellezésére is.

Mindezekén túl a betonon belüli vízmozgás elemzése hozzájárulhat a beton és betonacél korróziójának vizsgálatához, valamint a korróziós folyamatok hosszú távú értékeléséhez is. Az áteresztőképesség és a telítettség változásának figyelembevételével pontosabban becsülhető a korróziós folyamatok kezdete és sebessége, ami alapvető fontosságú a tartós betonszerkezetek tervezésében.

2 AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

Korábbi alap- és mesterképzésem során készített diplomamunkáimban, valamint TDK dolgozatomban a betonban történő vízmozgás laboratóriumi vizsgálati módszereit, illetve a vízszivárgás végelelemes analízissel történő modellezési lehetőségeit elemeztem és értékeltem. A mérések és modellezések során elért ígéretes eredmények megalapozták a vizsgálatok további, mélyebb szintű folytatásának szükségességét.

Az előbbieket fényében a jelen doktori téma célkitűzése, hogy a betonokban kialakuló vízmozgás vizsgálati és modellezési lehetőségeit átfogóan vizsgálja. A korábbi tapasztalatokra építve a legfontosabb kitűzött célokat az alábbi pontokban foglalom össze:

- a) A betonok száradási és nedvesedési víztartási görbéjének laboratóriumi mérése.
- b) A száradási és nedvesedési ág hiszterézisének vizsgálata.
- c) A laboratóriumi peremfeltételek, a minta típusa és mérethatása, valamint a víztartalommérés bizonytalanságának elemzése.
- d) A víztartási görbék alapján a teljes szívásspektrumhoz tartozó áteresztőképesség-függvény számítása.
- e) A betonok telített áteresztőképességi együtthatójának mérése.
- f) A mérési eredmények validálása a szabványos beton vízzárósági vizsgálat végelelemes szimulációjával.
- g) A beton víztartási karakterisztikájának vizsgálata a pórusrendszer elemzésével.
- h) A szabványos vízzárósági vizsgálat eredményeinek, valamint a beton porozitásának és hidraulikai tulajdonságainak elemzése.
- i) Javaslat megfogalmazása a betonokban történő vízmozgás számításához alkalmazható modellek, paraméterek és peremfeltételek használatára.

3 VIZSGÁLATI MÓDSZERTAN

A laboratóriumi vizsgálatok célja a betonban történő vízmozgás elemzéséhez szükséges adatok, és a modellezéshez nélkülözhetetlen bemenő paraméterek előállítása. A fejezet első lépéseként bemutatom a vizsgált betonösszetételeket, amelyek megválasztásánál igazodtam a mélyépítési gyakorlatban alkalmazott betonreceptúrákhoz.

Az elvégzett vizsgálatokat két nagy csoportra osztottam: (i) a hidraulikai tulajdonságok meghatározására irányuló mérésekre, valamint (ii) a porozitás és pórusméret-eloszlás vizsgálatára.

Az alábbiakban ismertetem a vizsgálatok során alkalmazott mérési módszertant, beleértve a mérési technikák rövid leírását, a beállított peremfeltételeket, a betonminták tárolási körülményeit, valamint a vizsgált minták legfontosabb adatait.

3.1 Betonösszetételek

Kísérleteim során a vizsgált betonösszetételeket a receptúrákra vonatkozó *állandó* és *változó* paraméterek alapján *két* csoportra osztottam. A receptúrák kiválasztásánál célom volt, hogy az elemzés a mélyépítésben gyakran alkalmazott betonkeverékekre terjedjen ki. Emellett törekedtem arra is, hogy a vizsgált összetételek a betonjellemzők lehető legszélesebb spektrumát lefedjék.

3.1.1 Első vizsgálati csoport (M1–M18)

Az első vizsgálati csoportba azok a betonkeverékek tartoznak, amelyeket Lombos Mónika diplomamunkája keretében állítottak elő (Lombos, 2016). A receptúrák kiválasztásakor célul tűztem ki, hogy a mélyépítésben gyakran alkalmazott betonkeverékek kerüljenek vizsgálat alá. E keverékek mindegyikéhez *CEM II A-S 42,5 R* típusú cementet használtak. A víz-cement tényező (0,40; 0,45; 0,50) és a cementadagolás módosítása (360 kg/m³; 400 kg/m³) mellett egyes esetekben szálerősítést (acél- vagy műanyagszál), illetve vízzáróságot növelő adalékszert (*Penetron ADMIX*) is alkalmaztak. Az adalékanyag legnagyobb szemcsemérete $d_{\max}=16$ mm volt. A keverési paraméterek különböző kombinációi összesen 18 eltérő betonösszetételt eredményeztek a vizsgálatokhoz, amelyek legfontosabb jellemzőit és változóit az *1. táblázat* foglalja össze.

1. táblázat – Első vizsgálati csoport betonreceptúráinak legfontosabb változó paraméterei

Receptúra	Cement-mennyiség [kg/m ³]	v/c [-]	Szálerősítés típusa	Száltartalom [kg/m ³]	Penetron [1 m%]	Jelölés
M1	360	0,50	-	-	-	36-50
M2	360	0,45	-	-	-	36-45
M3	360	0,40	acél (Humix 50)	30	-	36-40-A
M4	400	0,50	acél (Humix 50)	30	-	40-50-A
M5	400	0,45	műanyag (Concrix)	3,5	-	40-45-M
M6	400	0,40	műanyag (Concrix)	3,5	-	40-40-M
M7	360	0,50	-	-	■	36-50-P
M8	360	0,45	-	-	■	36-45-P
M9	360	0,40	acél (Humix 50)	30	■	36-40-A-P
M10	400	0,50	acél (Humix 50)	30	■	40-50-A-P
M11	400	0,45	műanyag (Concrix)	3,5	■	40-45-M-P
M12	400	0,40	műanyag (Concrix)	3,5	■	40-40-M-P
M13	360	0,40	-	-	-	36-40
M14	360	0,40	-	-	■	36-40-P
M15	400	0,50	műanyag (Concrix)	3,5	-	40-50-M
M16	400	0,50	műanyag (Concrix)	3,5	■	40-50-M-P
M17	400	0,45	-	-	-	40-45
M18	400	0,45	-	-	■	40-45-P

3.1.2 Második vizsgálati csoport (M19–M24)

A második vizsgálati csoportba a korábbi kutatásaim során vizsgált betonminőségek tartoznak. Összesen hat különböző betonösszetétel állt rendelkezésre, amelyek két cementtípust (*CEM II A-S 42,5 N*; *CEM I 42,5 N-SR0*), három különböző cementadagolást (300 kg/m^3 ; 360 kg/m^3 ; 420 kg/m^3), valamint három eltérő víz-cement tényezőt (0,42; 0,49; 0,59) foglaltak magukba. A vizsgált keverékek nem tartalmaztak sem szálerősítést, sem vízzáróságot fokozó adalékszert. Az adalékanyag legnagyobb szemcsemérete $d_{\max}=8 \text{ mm}$ volt. A második csoportba tartozó betonösszetételek legfontosabb változó paramétereit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat – Második vizsgálati csoport betonösszetételeinek legfontosabb változó paramétereit

Receptúra	Cement- mennyiség [kg/m^3]	Cement fajtája	v/c [-]	Jelölés
M19	300	CEM II A-S 42,5 N	0,59	30-59-II
M20	360	CEM II A-S 42,5 N	0,49	36-49-II
M21	420	CEM II A-S 42,5 N	0,42	42-42-II
M22	300	CEM I 42,5 N-SR0	0,59	30-59-I
M23	360	CEM I 42,5 N-SR0	0,49	36-49-I
M24	420	CEM I 42,5 N-SR0	0,42	42-42-I

3.1.3 Tárolási körülmények

A betonpróbatesteket minden esetben *vegyesen* tároltam: a kizsaluzást követően 7 napos korig $20\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű meszes vízben tartottam őket, ezt követően pedig a vizsgálatok megkezdéséig laboratóriumi hőmérsékleten (évszaktól függően $22\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), valamint legalább 55%-os relatív páratartalmat biztosító laboratóriumi környezetben tároltam a mintákat.

Az elvégzendő hidraulikai vizsgálatok potenciálisan több héten, sőt akár hónapokon keresztül is eltarthatnak, ezért a próbatesteken minden esetben kizárólag a 100 napos kor elérését követően kezdtem meg a méréseket.

3.1.4 Próbatestek és vizsgálati minták

Mindkét vizsgálati csoport betonkeverékeiből $150\times 150\times 150 \text{ mm}$ élhosszúságú betonkockák kerültek előállításra. Az első vizsgálati csoport esetében a próbakockákból $\text{Ø}50 \text{ mm}$ névleges átmérőjű hengeres mintákat készítettem gyémánt koronafúróval végzett magfúrással. Tekintettel arra, hogy a különböző vizsgálati módszerek eltérő mintamagasságot igényelnek, a magmintákból betonvágó berendezés segítségével 20–50 mm közötti magasságú vizsgálati mintákat készítettem (1. ábra). Egyes mérésekhez (WP4C, MIP, SEM) azonban az előbbieknél kisebb, speciális geometriájú és méretű minták előállítása is szükségessé vált.



1. ábra – Hengeres vizsgálati minták

A második vizsgálati csoport esetében a hengeres próbatesteket $\varnothing 38$ mm belső átmérőjű és 20 mm névleges magasságú rézhengerekbe történő betonozással készítettem, a tömörítést vibroasztal segítségével végeztem. A bedolgozást követően a minták végig a zsaluzatként szolgáló rézgyűrűkben maradtak, és ebben a formában kerültek vizsgálatra.

3.2 Laboratóriumi kísérletek

3.2.1 Hidraulikai tulajdonságok meghatározása

A száradási víztartási görbe meghatározásához három különböző mérési módszert alkalmaztam, hogy a betonkeverékek teljes szívásspektrumát lefedjem. A vizsgálatok során a szívás értékét szabályoztam, míg a víztartalmat tömegméréssel határoztam meg. A gravitációs módszerhez használt homok és homok/kaolin dobozokkal a pF 0–2,7 közötti tartományt (Stakman, et al., 1969; Várallyay, 1973), a nyomásmembrános berendezéssel a pF 3,0–4,2 közötti (Klute, 1986; Imre, et al., 2008), míg az exszikkátoros vizsgálattal a pF 4,79–6,21 közötti szívástartományt fedtem le (Buzás, et al., 1993; Ng & Menzies, 2007). A vizsgálatokhoz szükséges telített állapotot minden esetben kapilláris telítés útján állítottam elő, majd minden mérési ponton a tömegállandóság eléréséig heti, kétheti vagy havi gyakorisággal végeztem tömegméréseket századgramm pontosságú laboratóriumi mérleggel. A vizsgálatokat az *MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézetében*, valamint a *BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén* hajtottam végre.

A beton víztartási görbéjén a száradási és nedvesedési folyamat között fellépő hiszterézis vizsgálatára WP4C-készüléket alkalmaztam, mely hűtött tükörrel működő harmatponti technikával határozza meg a minta vízpotenciálját (METER Group Inc., 2024). A mérés során a minták víztartalmát fokozatosan növeltem (nedvesedési ág), majd csökkentettem (száradási ág), és minden víztartalom-változtatást követően a mérések között a próbatesteket 24 órára zárt térben helyeztem el az egyensúlyi állapot elérésének biztosítása érdekében. A tömegmérésekhez 0,1 mg pontosságú *Sartorius Entris 121i-1S* típusú analitikai mérleget használtam. A kísérleteket a *BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén* végeztem el. A fenti vizsgálatokat az *MSZ-08-0205:1978*, valamint az *ASTM D6836-*

16:2016 szabványokhoz igazodva hajtottam végre. A méréssorozatok végén minden mintát 60 ± 5 °C-on szárítottam ki, elkerülve a beton szerkezetét roncsoló kémiai folyamatokat.

A telített vízáteresztő-képesség meghatározását állandó víznyomású módszerrel, *Wykeham Farrance* típusú triaxiális mérőberendezéssel végeztem. A vizsgálatokhoz a gumimembránnal körülvett mintákat vízzel feltöltött mérőcellába helyeztem. A háttérnyomást kompresszor segítségével állítottam be, míg a cellanyomást a háttérnyomásnál magasabb szinten tartottam annak érdekében, hogy elkerüljem a minta és a membrán közötti szivárgást. Az áteresztőképességi együttható számítása a Darcy-törvény alapján történt. A méréseket 10–600 kPa közötti nyomásértékeken végeztem el az *MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010* szabvány szerint, a *BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén*.

A mérési eredmények későbbi validálásához felhasználtam a szabványos beton vízzárósági vizsgálatok eredményeit, amelyeket az *MSZ EN 12390-8:2009* szabvány szerint végeztem el vegyesen tárolt próbatesteken. A szabványos eljárás során 150 mm élhosszúságú próbakockák víznyomásnak kitett felületére 72 órán keresztül 5 bar (500 kPa) állandó víznyomást alkalmaztam. A vizsgálatot követően a próbatesteket kettéhasítottam, és a maximális vízbehatolási mélységet milliméter pontossággal mértem. A mérések során rögzítettem a vízbehatolás alakját is, hogy a lokális hibák kiszűrhetők legyenek. A vízzárósági vizsgálatokat a *BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék* laboratóriumában végeztem, és az eredmények értékelése az *MSZ 4798:2016/2M:2018* szabványban meghatározott határértékek figyelembevételével történt.

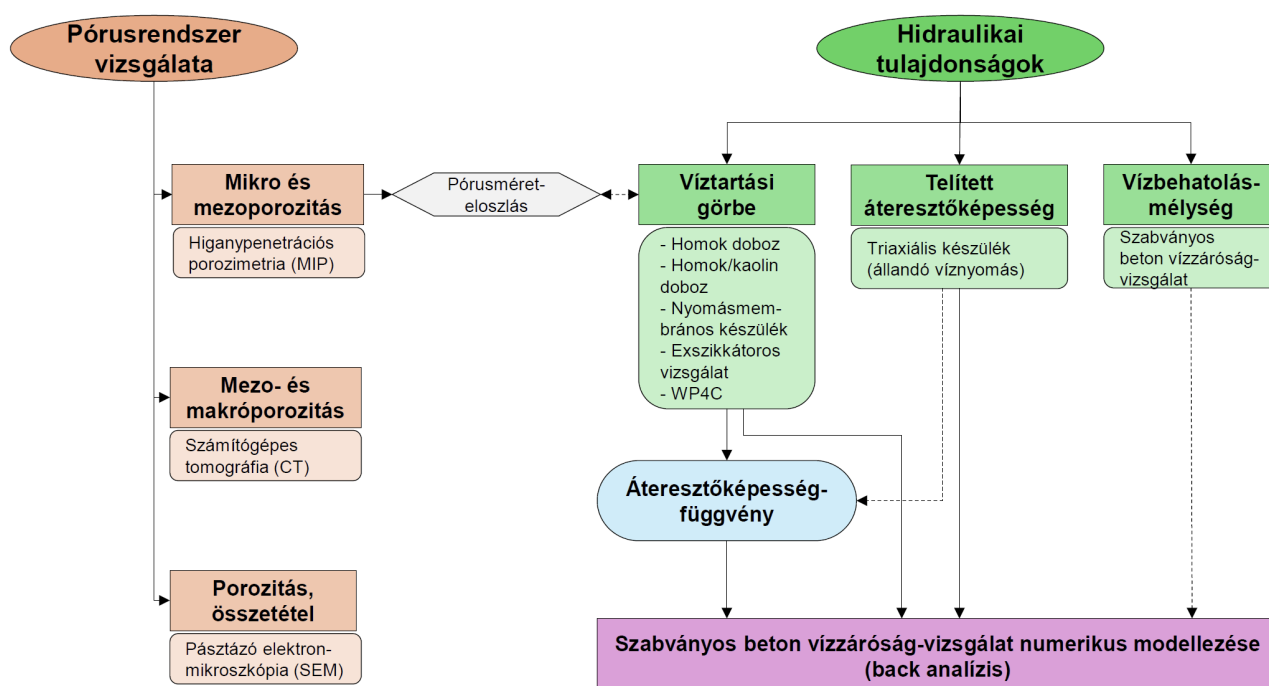
3.2.2 Pórusrendszer vizsgálata

A számítógépes tomográfia (CT) lehetőséget nyújt az anyagok belső szerkezetének roncsolásmentes vizsgálatára, így repedések, üregek és pórusok térbeli elemzésére is, ami különösen fontos az építőanyagok tartósságának és vízmozgásának értékeléséhez (Földes, 2006; Majorosné Lublós, et al., 2018; Csorba, et al., 2024). A CT-berendezés röntgensugárral különböző irányokból világítja át a mintát, a detektor pedig a sugárgyengítési jellemzők alapján intenzitásprofilokat rögzít, amelyekből a számítógép rétegenként rekonstruálja a vizsgált objektum háromdimenziós képét (Kak & Slaney, 2001). A vizsgálatokat a *PTE Orvosi Képképző Klinikáján* végezték *Siemens Somatom Perspective* típusú készülékkel, $0,08 \times 0,08 \times 0,60$ mm voxelméretű felbontással, amely lehetővé tette a $80 \mu\text{m}$ -nél nagyobb pórusok detektálását. A vizsgálat célja a beton pórusméretének és -eloszlásának feltérképezése volt, amelyhez a nyers adatokat az *ImageJ* nyílt forráskódú szoftverrel dolgoztam fel. A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatot *BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék* laboratóriumában *Thermo Fischer Phenom XL G2* készülékkel hajtottam végre. Az aranybevonattal ellátott (Goldstein, et al., 2018), töréssel előkészített mintákon a mikroszerkezet, pórusok és repedések elemzését végeztem el.

A higanypenetrációs porozimetria (MIP) egy elterjedt laboratóriumi módszer a porózus anyagok, így a beton pórusszerkezetének vizsgálatára. A mérési elv a higany nem nedvesítő tulajdonságán és a Washburn-egyenleten alapul (Diamond, 2000). A vizsgálat során a mintába növekvő nyomással bejuttatott higany térfogatából meghatározható a pórusméret-eloszlás, a teljes pórustérfogat, valamint egyéb szerkezeti jellemzők, néhány nanométertől akár több száz mikrométerig. A módszer gyors és pontos, azonban a nagy nyomás okozta mintaösszenyomódás, illetve a nagyobb pórusok mérésében fellépő pontatlanságok korlátot jelenthetnek (Lawrence, 1978; Thommes, et al., 2015). A vizsgálatokat a SZIKKTI Labor Szilikátkémiai Anyagvizsgáló – Kutató Kft. laboratóriumában végezték *Quantachrome POREMASTER 60 GT* készülékkel, 140° nedvesítési szöget és $0,484 \text{ N/m}$ felületi feszültséget figyelembe véve. A minták előzetes kiszárítása $60 \pm 5^\circ\text{C}$ -on történt, az anyagsűrűség méréséhez pedig *Anton-Paar UltraPyc 5000* típusú gázpiknométert alkalmaztak.

3.3 Módszertani összefoglaló

A 2. ábra a betonok pórusrendszerének és hidraulikai tulajdonságainak vizsgálati módszereit, valamint az ezekből származó adatok felhasználási lehetőségeit szemlélteti. A pórusméret-eloszlás és a víztartási görbe között közvetlen kvantitatív összefüggés áll fenn, mely lehetővé teszi egyik függvény másikból történő számítását (Rajkai, et al., 2015). A víztartási görbe és a telített áteresztőképességi együttható ismeretében meghatározható az áteresztőképesség-függvény, amely – a korábban említett paraméterek mellett – alapvető bemeneti adatként szolgál a vízzárósági vizsgálat numerikus szimulációjához. Az alkalmazott vizsgálati és értékelési eljárások elsődleges célja a betonon belüli víztranszport-folyamatok részletesebb és pontosabb leírása, valamint a mérési eredmények numerikus modellezéssel történő validálása.



2. ábra – Vizsgálati és adatfelhasználási folyamat

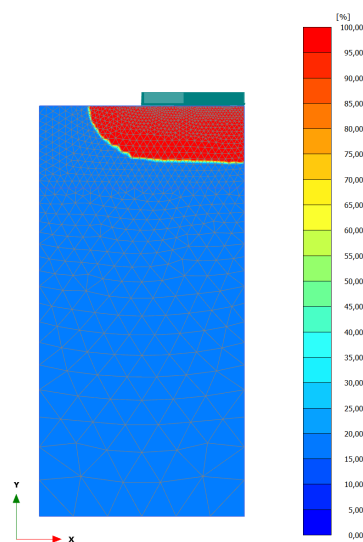
A vizsgálati módszerekre és körülményekre, valamint a vizsgált betonmintákra vonatkozó legfontosabb adatokat a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat – Kísérleti mátrix

Vizsgált tulajdonságok	Mért paraméter/ jellemző	Vizsgálati eszköz/ módszer	Vizsgálati szabvány	Vizsgált betonösszetételek	Vizsgált minták/próbatestek		Tárolási körülmények	Vizsgálati hőm.	
					db	Mintaméret (átmérő, magasság, élhossz)			
Hidraulikai tulajdonságok	Száradási víztartási görbe	Homok és homok/kaolin doboz (gravitációs módszer)	MSZ-08-0205:1978	M1–M18	36	Ø50±1 mm h=50±3 mm	kb. 150–300	21–23 °C	
		Nyomásmembrános készülék (tengelyeltolási technika)	ASTM D6836-16:2016	M1, M2, M5, M6, M7, M13, M15, M17	8	Ø50±1 mm h=24±4 mm	kb. 300–320	21–23 °C	
		Exszikkátoros vizsgálat (gőzegyensúlyi módszer)		M1–M18	18	Ø50±1 mm h=30±1 mm	kb. 400–1000	21–23 °C	
Hidraulikai tulajdonságok	Hiszterézis vizsgálata (nedvvesztés-száradás)	WP4C-készülék (hűtött tükrös harmatponti módszer)	ASTM D6836-16:2016	M1, M2, M13, M17	8	Ø35±1 mm h=5±1 mm	kb. 2000–2500	vegyes tárolás (kizsaluzást követően 7 napos korrig víz alatt, majd a vizsgálatig laboratóriumi körülmények között)	
		Triaxiális készülék (állandó víznyomás)	MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010	M1–M24	37	Ø50±1 mm h=50±3 mm Ø38 mm h=20±2 mm	kb. 150–300 kb. 100–150	22–24°C	
		Vízbehatolás mélysége	Szabványos beton vízzárósági vizsgálat	MSZ EN 12390-8:2009	M1–M24	72	150 × 150 × 150 mm	kb. 100–200	20–22°C
Pórusrendszer vizsgálata	Mezo- és makroporozitás	Számítógépes tomográfia (CT)	EN 16016-2:2013	M1–M18	36	Ø50±1 mm h=50±3 mm	kb. 2100–2200	20–22°C	
		Mikro- és mezoporozitás	Higanypenetrációs porozimetria (MIP)	ISO 15901-1:2005	M1, M2, M13, M17	4	kb. 1 cm ³	kb. 2100–2200	21–23 °C
		Porozitás, összetétel	Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)	ASTM E1508-12:2019	M1–M18	18	Ø0,5–1,0 cm	kb. 2100–2200	20–22 °C

4 VÍZMOZGÁS NUMERIKUS MODELLEZÉSE

A kutatásom során meghatározott anyagjellemzők alkalmazhatóságának vizsgálata, valamint azok részletesebb értékelése céljából a mért telített áteresztőképességi együtthatókat, az illesztett nedvesedési víztartási görbéket, valamint az utóbbiakból számított áteresztőképesség-függvényeket a szabványos beton vízzárósági vizsgálat numerikus modellezésével validáltam. A modellezés verifikálásához felhasználtam a vízzárósági vizsgálatból meghatározott maximális vízbehatolás mélységek átlagértékeit. A numerikus modellezést *Plaxis 2D Ultimate* végeselemes szoftverrel végeztem.



3. ábra – Betonminta végeselemes modellje

A geometria felépítése során a számítási igények csökkentése érdekében a betonpróbatest alakját a szimmetriaviszonyok kihasználásával egyszerűsítettem, ennek megfelelően a modellt a próbatest felére korlátoztam (3. ábra). A végeselemes háló generálásához háromszög alakú síkbeli végeselemeket alkalmaztam. A hálósűrűséget a vízbehatolás várható zónájában – egy 30 mm vastag rétegben – 0,2-es hálósűrűségi faktorialább tovább finomítottam a nagyobb számítási pontosság érdekében. A finomítás mértékét érzékenységvizsgálattal optimalizáltam.

A szivárgás elemzéséhez a vízmozgást befolyásoló anyagparaméterekre és állapotjellemzőkre van szükség, ideértve a telített áteresztőképességi együtthatót, a kezdeti szivásértéket, valamint a betonra jellemző függvényeket, azaz a víztartási görbét és az áteresztőképesség-függvényt.

A modell kezdeti szivásértékének érzékenységét különböző kiinduló relatív páratartalom mellett vizsgáltam, a laboratóriumi környezetben jellemző relatív páratartalom-tartományt alapul véve. A kezdeti szivásértékeket 30%, 40%, 50%, 60% és 70% relatív páratartalomnak megfelelően állítottam be.

A modellben peremfeltételként 5 bar (500 kPa) értékű víznyomást adtam meg a vizsgálati elrendezésnek és a szimmetria viszonyoknak megfelelően. A szimmetriatengelyhez zárt szivárgási peremfeltételt rendeltem. A betonon belüli szivárgást tranziens áramlásként számítottam, amelyhez előre meghatározott időintervallumokat alkalmaztam. Mivel a szabványos vízzárósági vizsgálat időtartama 72 ± 2 óra, a teljes folyamat nyomon követhetősége érdekében általános esetben három időlépcsőt határoztam meg: 24 óra, 48 óra és 72 óra.

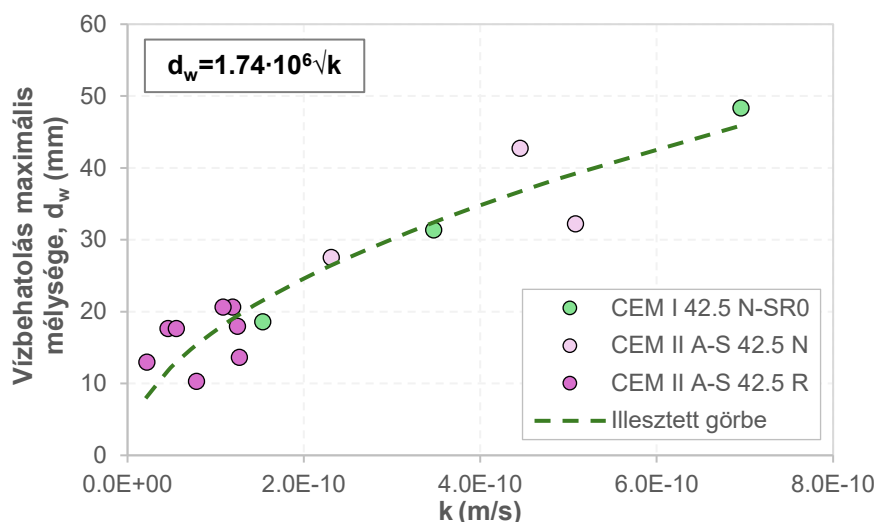
5 TÉZISEK

1. TÉZIS

A mérések alapján összefüggést állapítottam meg a szabványos beton vízzárósági vizsgálat során mért maximális vízbehatolási mélység és a telített áteresztőképességi együttható között, a 0,40–0,59 közötti víz-cement tényezőjű, kohósalak-portlandcementtel vagy szulfátálló portlandcementtel készített, legalább 100 napos korú, a kizsaluzást követően 7 napos korig 20 ± 2 °C hőmérsékletű meszes vízben, ezt követően pedig a vizsgálatok megkezdéséig laboratóriumi körülmények között (22 ± 2 °C, $RH \geq 55\%$) tárolt betonminták esetében. Az így meghatározott összefüggés az alábbi alakban adható meg:

$$d_w = 1,74 \cdot 10^6 \sqrt{k} \quad (1)$$

ahol k a telített áteresztőképességi együttható [m/s], d_w vízbehatolás maximális mélysége [mm].



4. ábra – Telített vízáteresztő-képesség és a szabványos vízzárósági vizsgálatból meghatározott maximális vízbehatolási mélységek kapcsolata

Az (1) összefüggés alkalmazásaként meghatároztam a vizsgált betonminőségek esetén az MSZ 4798:2016 és MSZ 4798:2016/2M:2018 szabványok szerinti vízzárósági osztályokhoz tartozó telített áteresztőképességi együtthatók határértékeit (4. táblázat).

4. táblázat – Vízzárósági osztályok a kapcsolódó áteresztőképességi együtthatók határértékeivel

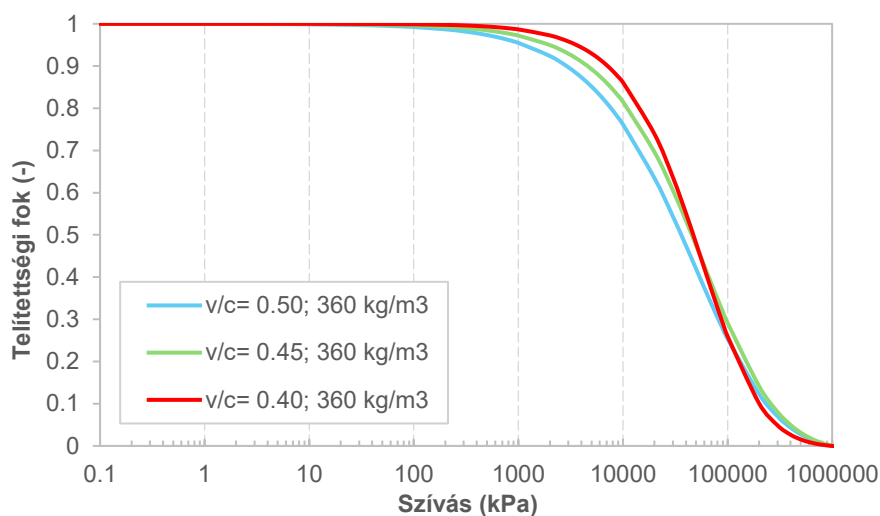
Vízzárósági osztály	Vízbehatolás határmélysége [mm]	Áteresztőképességi együttható határértéke [m/s]
XV1(H)	50	$8,26 \cdot 10^{-10}$
XV2(H)	35	$4,05 \cdot 10^{-10}$
XV3(H)	20	$1,32 \cdot 10^{-10}$

Az 1. tézishez kapcsolódó publikációk: Pap et al. (2014); Pap et al. (2017)

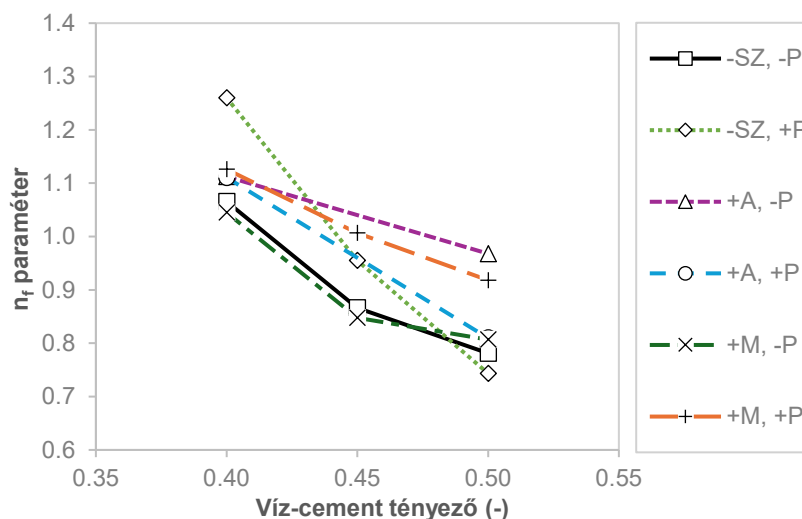
2. TÉZIS

A mért száradási víztartási görbéket van Genuchten (1980), valamint Fredlund & Xing (1994) modellel is illesztettem, amelyek közül utóbbi – az összegzett hibanégyzetek alapján – pontosabbnak bizonyult, vagyis a beton víztartási karakterisztikáját precízebben követi.

A mérések alapján megállapítottam, hogy a 0,40–0,50 közötti víz-cement tényezővel, valamint CEM II A-S 42,5 R típusú cementtel készült betonok száradási víztartási görbéinek meredeksége az átmeneti zónában a víz-cement tényező növekedésével csökken. Fredlund & Xing (1994) modellel illesztett görbék esetén a meredekséget szabályozó, a pórusméreteloszlással kapcsolatos n_f paraméter értéke csökken a víz-cement tényező növekedésével.



5. ábra – Szálerősítés és Penetron hozzáadása nélkül készült betonkeverékek víztartási görbéi



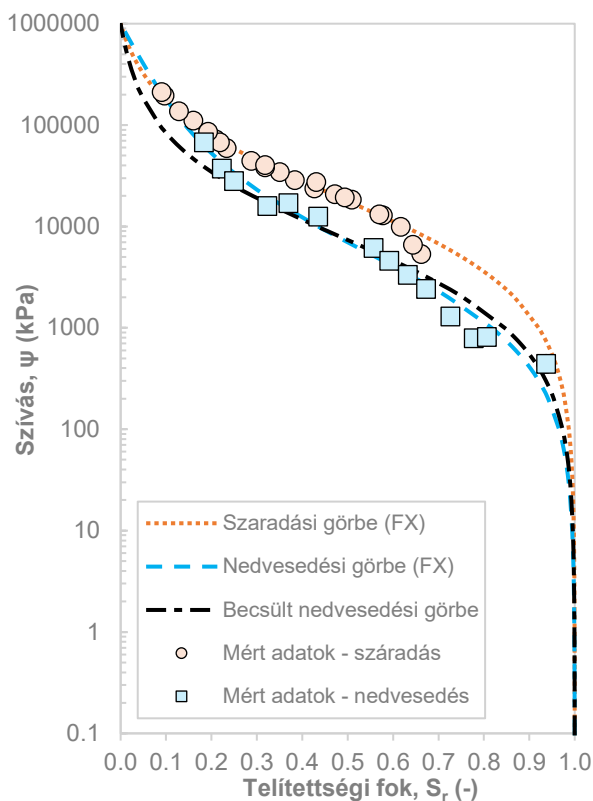
6. ábra – Az n_f paraméter változása a víz-cement tényező függvényében (SZ: szálerősítés, A: acél, M: műanyag, P: Penetron)

A 2. tézishez kapcsolódó publikációk: Pap et al. (2018b); Pap et al. (2019b); Pap & Mahler (2025)

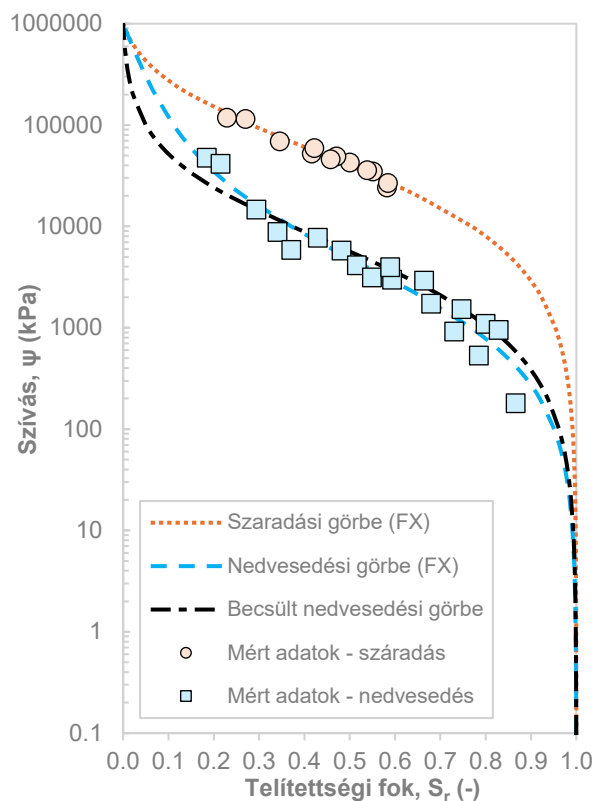
3. TÉZIS

Az oldalirányú eltolás elméletét gyakran alkalmazzák a nedvesedési víztartási görbe száradási ágból történő becslésére. Az eljárás nemcsak a görbe közelítését teszi lehetővé, hanem alkalmas a száradási és nedvesedési folyamat között fellépő hiszterézis számszerűsítésére is.

A mérések alapján megállapítottam, hogy a 0,40–0,50 közötti víz-cement tényezővel, valamint CEM II A-S 42,5 R típusú cementtel készült betonok esetén a víztartási görbe nedvesedési és száradási ága közötti hiszterézis – a görbék inflexiós pontjában, oldalirányú eltolás értékével kifejezve – 40–90% között változik. A száradási ág oldalirányú eltolásával becsült nedvesedési görbék 20000 kPa alatti szívástartományban jól közelítik a mért nedvesedési ágakat, azonban magasabb szívásértékek mellett olyan eltérések jelentkeznek, amelyek számottevő hatással vannak a száraz beton nedvesedési viselkedésének számítására.



7. ábra – M1 betonkeverék ($w/c=0,50$; 360 kg/m^3) Fredlund & Xing (1994) modellel illesztett víztartási görbéi



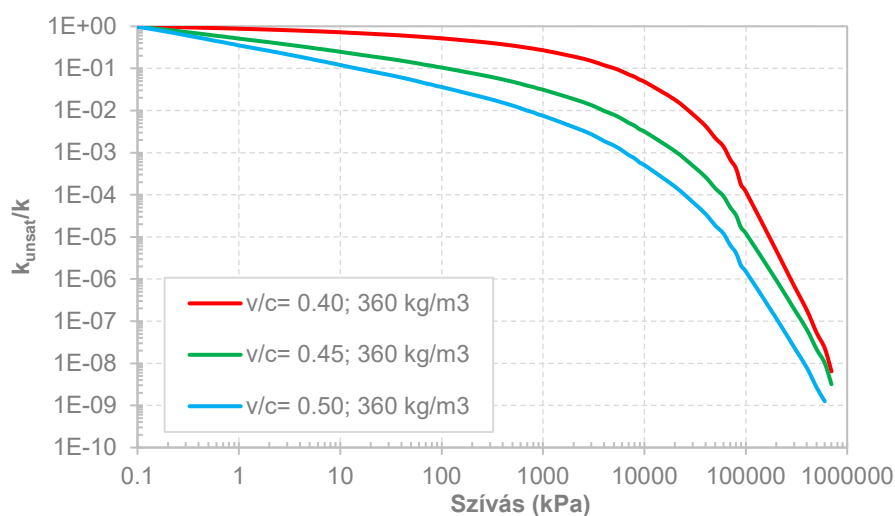
8. ábra – M2 betonkeverék ($w/c=0,45$; 360 kg/m^3) Fredlund & Xing (1994) modellel illesztett víztartási görbéi

4. TÉZIS

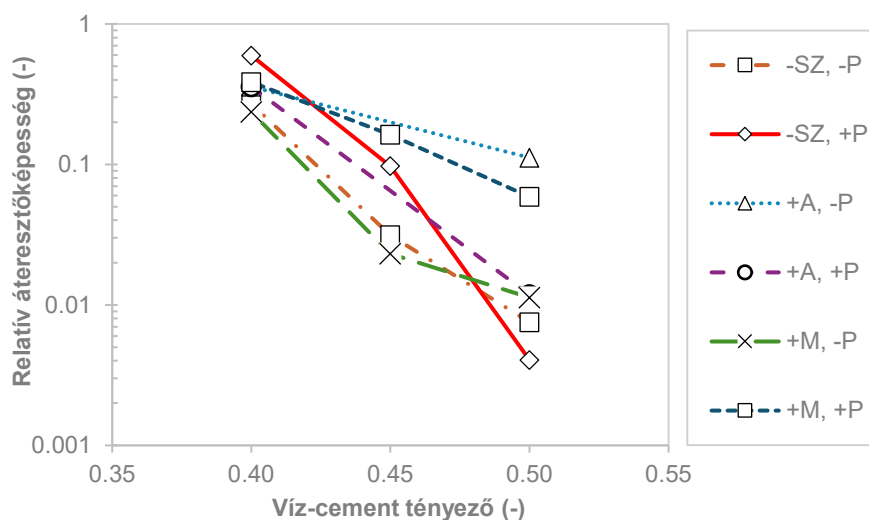
Numerikus analízis segítségével igazoltam, hogy betonok esetén a mért, majd illesztett víztartási görbék alapján az áteresztőképesség-függvény számítása Fredlund et al. (1994) modell alkalmazásával megbízható eredményre vezet.

A mért adatokra illesztett víztartási görbék numerikus integrálásának eredményei alapján megállapítottam, hogy a 0,40–0,50 közötti víz-cement tényezővel, valamint CEM II A-S 42,5 R típusú cementtel készült betonok esetén a víz-cement tényező növekedésével a relatív áteresztőképesség értéke – azonos szívásértéken – csökken.

A csökkenés mértéke a betonösszetételtől függően egytől három nagyságrendig is terjedhet.



9. ábra - Szálerősítés és Penetron hozzáadása nélkül készült betonkeverékek áteresztőképesség-függvényei



10. ábra – A relatív áteresztőképességi együttható változása a víz-cement tényező függvényében
1000 kPa szívásértéken
(SZ: szálerősítés, A: acél, M: műanyag, P: Penetron)

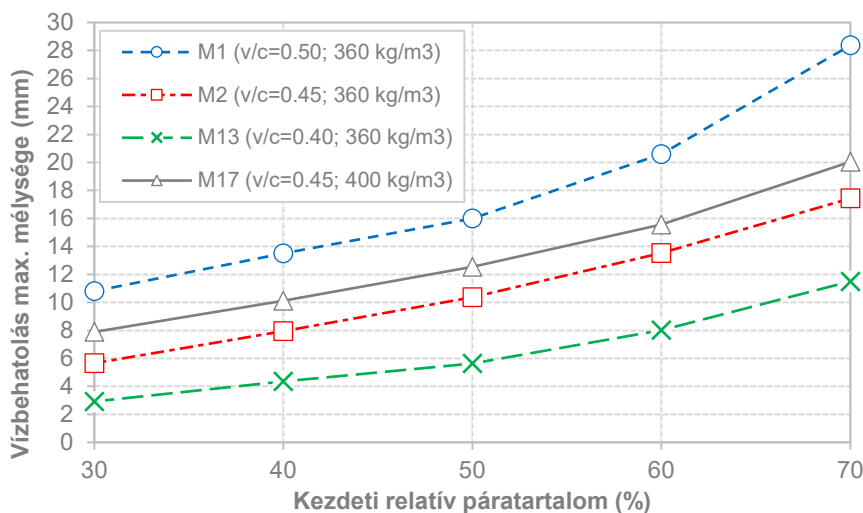
A 4. tézishez kapcsolódó publikációk: Pap et al. (2018c); Pap et al. (2019b)

5. TÉZIS

Numerikus analízissel *Plaxis 2D Ultimate* szoftverben modelleztem a szabványos beton vízzárósági vizsgálatot a mért telített áteresztőképességi együtthatók, Fredlund & Xing (1994) modellel illesztett nedvesedési víztartási görbék, valamint Fredlund, et al. (1994) modellel számított áteresztőképesség-függvény alkalmazásával. A szimulációt öt eltérő kiinduló szivásérték (relatív páratartalom) mellett végeztem el. A kapott eredmények és a laboratóriumi vízzárósági vizsgálatok összehasonlítása alátámasztotta, hogy a víztartási görbéből származtatott áteresztőképesség-függvények megbízhatóan alkalmazhatók a betonban történő vízmozgás modellezésére.

A mérések alapján meghatározott paraméterekkel végzett numerikus modellezés eredményei alapján megállapítottam, hogy a kiinduló relatív páratartalom növekedése – a 30–70% közötti tartományban – a maximális vízbehatolás értékének növekedését eredményezi, tehát a betonminták tárolási körülményei és a vizsgálatkori relatív páratartalom befolyásolhatja a maximális vízbehatolás értékét.

A relatív páratartalom 10%-os emelkedése a vízbehatolás legnagyobb mélységének 19–49%-os emelkedését is okozhatja betontípustól függően.



11. ábra – Vízbehatolás maximális értéke a kezdeti relatív páratartalom függvényében

Vizsgálataim alapján javasolt lenne pontosabb előírás kidolgozása arra vonatkozóan, hogy:

- a vízből való kivétel után mennyi időn belül szükséges a vizsgálatot elvégezni, illetve
- vegyesen tárolt próbatestek esetén milyen hőmérsékleten és relatív páratartalom mellett történjen a tárolás, valamint a vizsgálat.

Az 5. tézishez kapcsolódó publikációk: Pap et al. (2018a); Pap et al. (2018c); Pap et al. (2024); Pap & Mahler (2025)

6 EREDMÉNYEK ALKALMAZHATÓSÁGA

A laboratóriumi vizsgálatok során meghatároztam a betonban lezajló vízmozgás numerikus modellezéséhez szükséges paramétereket, melyek alkalmazhatóságát számítógépes szimulációkkal igazoltam. A kutatás hozzájárul a laboratóriumi mérések pontosságának növeléséhez, valamint a víztranszport folyamatainak megbízható modellezéséhez. A vizsgálati és értékelési módszertan feltárta a betonösszetétel, valamint a víztartási, vízzárósági és áteresztőképességi jellemzők közötti összefüggéseket.

Az eredmények lehetőséget nyújtanak a radioaktív hulladéktárolók vízmozgásának szimulációjára, igazolva a külső és belső vízmozgások kizárását a teljes élettartam során. Hasonló módon elősegítik földalatti betonszerkezetekben (pl. alagutak, résfalak) történő vízmozgás számítását is. A kutatás alapot ad a betonösszetételek vízzárósági és víztranszport szempontú optimalizálásához, támogatva a tartós, fenntartható és gazdaságos betonszerkezetek tervezését.

7 JÖVŐBENI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

A kutatás során feltárt összefüggések további vizsgálatok alapjául szolgálhatnak. Kiemelt figyelmet érdemel a víztartási görbén megfigyelhető hiszterézis részletes elemzése, amely a nedvesedési és száradási folyamatok közötti különbségek mélyebb megértését segítheti elő. További kutatási irányt jelent a pórusméret-eloszlás és a víztartási görbék közötti kapcsolat vizsgálata, amely hozzájárulhat a beton pórusszerkezetének és vízmegtartó képességének pontosabb jellemzéséhez, valamint a víztartási görbék pórusadatokon alapuló becsléséhez.

A fentiek mellett indokolt a telített áteresztőképességi együttható, a betonösszetétel és porozitás, valamint az áteresztőképességi anizotrópia és a vízbehatolási alak közötti összefüggések feltárása is. A porozitásvizsgálati módszerek – különösen a CT- és MIP-technikák – együttes alkalmazása ígéretes lehet a teljes pórusméret-eloszlás meghatározására, pontosítva ezzel a víztartási jellemzőket és a vízmozgás modellezéséhez szükséges paramétereket.

A numerikus modellezés eredményei alapján a kiinduló relatív páratartalom növekedésével a vízbehatolás mélysége is nő. Ennek kvantitatív értelmezése további laboratóriumi vizsgálatokat igényel különböző kezdeti páratartalom mellett, amelyek hozzájárulhatnak a vízmozgás és vízzáróság pontosabb és átfogóbb meghatározásához, valamint a szabványos vizsgálati módszerek továbbfejlesztéséhez.

8 TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2014. Betonok áteresztőképességi együtthatójának meghatározása. In: Z. Tompai, A. Mahler, A. Takács & G. Varga, szerk. *Geotechnika 2014 Konferencia*. Budapest: Konferencia Iroda Bt, p. 23.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2015. A betonokban történő vízmozgás vizsgálata és modellezése. *VASBETONÉPÍTÉS*, 17(3), pp. 56-63.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2016. Szabványos beton vízzáróság vizsgálat numerikus modellezése. In: G. Köllő, szerk. *XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia: ÉPKO 2016 - 20th International conference on civil engineering and architecture*. Kolozsvár, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp. 205-208.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2017. Betonszerkezetek vízzárósága és áteresztőképessége. *MŰSZAKI ELLENŐR*, 6(5), pp. 35-38.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2018a. Finite element modelling of seepage in concrete. In: *XVI DECGE 2018 Proceedings of the 16th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering*. Berlin, Németország: Ernst und Sohn, pp. 737-742.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2018b. Measurement of water retention curve for different concrete mixtures. In: *The 7th International Conference on Unsaturated Soils*. Hongkong: UNSAT2018, pp. 363-367.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2018c. Analysis and Finite Element Modelling of Water Flow in Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4), pp. 1052-1059.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2019a. Betonok telítetlen áteresztőképesség-függvényének meghatározása. In: T. Huszák, szerk. *5. Kézdi Konferencia*. Pécs, Magyarország: Magyar Geotechnikai Egyesület, pp. 307-316.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2019b. Estimation of permeability function for concrete. In: H. Sigursteinsson, S. Erlingsson & B. Bessason, szerk. *XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering - Reykjavík, Iceland: 1-6 of September 2019 : Geotechnical Engineering, foundation of the future: Conference proceedings*. Reykjavík, Izland: Icelandic Geotechnical Society, p. 7.
- Pap, M., Mahler, A., 2019c. Comparison of different empirical correlations to estimate permeability coefficient of Quaternary Danube soils. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1), pp. 25-29.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2020. Laboratory testing of seepage in concrete. *E3S Web of Conferences*, 195(-), p. 03030.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2022. Laboratory testing of water flow in building materials. In: M. Rahman & M. Jaksa, szerk. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney, Australia: Australian Geomechanics Society, pp. 191-195.

Pap, M., Mahler, A., Illés, Z. & Nehme, S. G., 2024. Laboratory testing and numerical modelling of seepage in building materials. In: N. Guerra, és mtsai. szerk. *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society: Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024*. Lisbon: CRC Press, pp. 3206-3211.

Pap, M. & Mahler, A., 2025. Víztartási görbe hiszterézisének vizsgálata különböző betonok esetén. In: Á. Török, B. Vásárhelyi & P. Görög, szerk. *Mérnökgeológia-Közetmechanika 2025*. Budapest: BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, pp. -. (megjelenés alatt)

9 HIVATKOZOTT SZABVÁNYOK

ASTM D6836-16:2016	Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge
MSZ 4798:2016	Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon
MSZ 4798:2016/2M:2018	Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon (Az MSZ 4798:2016 módosítása)
MSZ EN 12390-8:2009	A megszilárdult beton vizsgálata. 8. rész: A vízzáróság vizsgálata
MSZ-08-0205:1978	A talaj fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak vizsgálata
MSZE CEN ISO/TS 17892-11:2010	Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 11. rész: A vízáteresztő-képesség meghatározása állandó és változó víznyomással

10 IRODALOMJEGYZÉK

Buzás, I. és mtsai., 1993. *Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszertan I.* Budapest: INDA 4231 Kiadó.

Carme, M. C. & Saaltink, M. W., 2016. Water, vapour and heat transport in concrete cells for storing radioactive waste. *Advances in Water Resources*, 94(-), pp. 120-130.

Csorba, K. és mtsai., 2024. Monitoring of historical structural materials with computed tomography. *Structural Concrete*.

Darcy, H., 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris: s.n.

Diamond, S., 2000. Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 30(10), pp. 1517-1525.

Fleming, I. R., Andree, M. G. & Fourmont, S., 2023. Efficacy of Nonwoven Based Geosynthetic Drainage Product for Pore Pressure Reduction in Moderately Fine Soils or Tailings. *Geosynthetics Conference*, 1(-), pp. 277-287.

- Földes, T., 2006. Röntgen computer tomográf (CT) mérések alkalmazási lehetőségei a közetvizsgálatokban. *Mérnökgeológia-Közetmechanika*.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H. & Fredlund, M. D., 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc..
- Fredlund, D. G. & Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), pp. 521-532.
- Fredlund, D. G., Xing, A. & Huang, S., 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), pp. 533-546.
- Goldstein, J. I. és mtsai., 2018. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Boston: Springer.
- Imre, E. és mtsai., 2008. A homokfrakciók és homokkeverékek víztartási görbéje közötti kapcsolat. *Hidrológiai Közöny*, 88(5), pp. 52-56.
- Kak, A. C. & Slaney, M., 2001. *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. -: IEEE Press.
- Klute, A., 1986. Water Retention: Laboratory Methods. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 635-662.
- Lawrence, G. P., 1978. Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. *Journal of Soil Science*, 29(3), pp. 299-304.
- Leech, C., Lockington, D. & Dux, P., 2003. Unsaturated diffusivity functions for concrete derived from NMR images. *Materials and Structures*, 36(-), pp. 413-418.
- Leech, C. A., 2003. *Water Movement in Unsaturated Concrete: Theory, Experiments, Models*. Queensland: Department of Civil Engineering The University of Queensland.
- Liu, Z., Zhang, P., Bao, J. & Hu, Y., 2020. Numerical Simulation of Water Transport in Unsaturated Recycled Aggregate Concrete. *Frontiers in Materials*, 7(-), pp. -.
- Lombos, M., 2016. *Penetron hatása a vízzáróságra (BSc diplomamunka)*. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar.
- Major, J. & Wittmann, F. H., 2011. Zwei-Phasen Strömung in Zement gebundenen Werkstoffen. *Restoration of Buildings and Monuments*, 17(2), pp. 111-116.
- Major, J., Wittmann, F. H. & Sadouki, H., 2010. Drying and Hygral Diffusion Coefficient of Concrete. *Restoration of Buildings and Monuments*, 16(1), pp. 39-46.
- Majorosné Lublós, É. E. és mtsai., 2018. CT alkalmazási lehetőségei az építőanyagok vizsgálatánál. *Vasbetonépítés*, 20(4), pp. 89-93.
- Ma, S., Yao, Y., Bao, P. & Guo, C., 2023. Effects of moisture content on strength and compression properties of foundation soils of cultural relics in areas flooded by the Yellow River. *Frontiers in Materials*, 10(-), pp. -.
- METER Group Inc., 2024. *WP4C Dew Point PotentiaMeter Operator's Manual*. Pullman, USA: METER Group Inc.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), pp. 513-522.

- Ng, C. W. W. & Menzies, B., 2007. *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. London, and New York: Taylor and Francis.
- Pap, M., Mahler, A. & Nehme, S. G., 2018. Analysis and Finite Element Modelling of Water Flow in Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4), pp. 1052-1059.
- Park, K. & Fleming, I., 2006. Evaluation of a geosynthetic capillary barrier. *Geotextiles and Geomembranes*, 24(1), pp. 64-71.
- Pezowicz, P. & Choma-Moryl, K., 2015. Moisture Content Impact on Mechanical Properties of Selected Cohesive Soils from the Wielkopolskie Voivodeship Southern Part. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 37(4), pp. 37-46.
- Rajkai, K. és mtsai., 2015. Particle-size and organic matter effects on structure and water retention of soils. *Biologia*, 70(11), pp. 1456-1461.
- Renken, L., Oeser, M., Milatz, M. & Grabe, J., 2016. Measurement of hydraulic properties of unsaturated permeable polyurethane bound asphalt materials. In: *Unsaturated Soil Mechanics - from Theory to Practice: Proceedings of the 6th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils*. Guilin, China: CRC Press, pp. 407-412.
- Stakman, W. P., Valk, G. A. & van der Harst, G. G., 1969. *Determination of soil moisture retention curves I.* Wageningen: Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding.
- Thommes, M. és mtsai., 2015. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 87(9-10), pp. 1051-1069.
- Törzs, T. és mtsai., 2019. Hydraulic properties of polyurethane-bound permeable pavement materials considering unsaturated flow. *Construction and Building Materials*, 212(-), pp. 422-430.
- van Genuchten, M. T., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), pp. 892-898.
- Várallyay, G., 1973. A talajok nedvességpotenciálja és új berendezés annak meghatározására az alacsony (atmoszféra alatti) tenziótartományban. *Agrokémia és Talajtan*, 22. kötet, pp. 1-22.
- Vásárhelyi, B. & Davarpanah, M., 2018. Influence of Water Content on the Mechanical Parameters of the Intact Rock and Rock Mass. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4), pp. 1060-1066.
- Vilasboas, J. M. L., Machado, S. L. & Pinto, S. A., 2016. Filter paper method to determine the water retention curves for mortar and cement samples. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9(4), pp. 525-533.
- Washburn, E. W., 1921. The Dynamics of Capillary Flow. *Physical Review*, 17(3), pp. 273-283.
- Zhang, Q. és mtsai., 2023. Study on the Effects of Different Water Content Rates on the Strength and Brittle Plasticity of Limestone. *Applied Sciences*, 13(8), p. 4685.