



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Építőmérnöki Kar
Geotechnikai Tanszék

Betonok áteresztőképességi együtthatójának meghatározása

Determination of permeability of concrete

Tudományos Diákköri Dolgozat

2013

Készítette:

Pap Miklós

I. évfolyamos MSc hallgató

Konzulens:

Dr. Mahler András
adjunktus
BME Geotechnikai Tanszék

Dr. Nehme Salem Georges
egyetemi docens
BME Építőanyagok és Mérnökgeológiai
Tanszék

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	4
1.1. A dolgozat célja	4
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
2.1. Telített és telítetlen talajokban történő vízmozgások	5
2.1.1. Darcy törvénye	5
2.1.2. A telítetlen talaj definíciója és jellemzői	7
2.1.3. Kapilláris jelenségek	9
2.1.4. Telített és telítetlen talajok feszültségi állapotváltozói	12
2.1.5. Telített és telítetlen talajok nyírószilárdsága	14
2.1.6. A víztartási görbe	16
2.1.7. Az áteresztő-képesség meghatározása	19
2.1.8. A víztartási görbe és az áteresztőképesség kapcsolata	21
2.2. Betonok vízzárósága	22
2.2.1. Betonok porozitása	22
2.2.2. Betonok vízzáróság vizsgálata az MSZ EN 12390-8:2009 szabvány szerint	23
3. KÍSÉRLETI TERV	27
3.1. A kísérleti vizsgálatok célja	27
3.1.1. A betonra vonatkozó kísérleti paraméterek	27
3.1.2. A laboratóriumi mérésekre vonatkozó kísérleti paraméterek	28
3.2. Alkalmazott betonösszetételek	29
3.3. Próbatestek és vizsgálati minták	33
3.4. Kísérleti vizsgálatok	36
3.4.1. Vízzáróság vizsgálat	36
3.4.2. Geotechnikai laboratóriumi vizsgálatok	36
4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK	41
4.1. A vízzáróság vizsgálat eredményei	41
4.2. A laboratóriumi vizsgálatok eredményei	41
4.2.1. Az áteresztőképesség vizsgálat eredményei	41
4.2.2. A víztartási görbe vizsgálat eredményei	47
5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE	48
5.1. Az áteresztőképesség vizsgálat kiértékelése	48

5.1.1.	Darcy törvényének igazolása betonokra.....	48
5.1.2.	Az áteresztőképesség és vízzáróság vizsgálat összehasonlítása	52
5.2.	A víztartási görbék kiértékelése.....	56
5.2.1.	A beton és a talajok víztartási görbéinek összehasonlítása	56
5.2.2.	A víztartási görbe illesztése és a telítetlen áteresztőképesség meghatározása ...	57
6.	MEGÁLLAPÍTÁSOK.....	62
7.	JÖVŐBENI KUTATÁSOK	63
8.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	64
9.	IRODALOMJEGYZÉK	65
10.	MELLÉKLETEK	68
	„A” melléklet – Alkalmazott betonreceptúrák	68
	„B” melléklet – Vízzáróság vizsgálat	70
	„C” melléklet – A vizsgálati minták v-i diagramjai	73
	„D” melléklet – Víztartási görbék meghatározása.....	85
	„E” melléklet – Telítetlen áteresztőképesség számítása	87

1. BEVEZETÉS

A mélyépítési munkálatok folyamán szinte elkerülhetetlen a víz jelenléte. A földalatti műtárgyak építése során leggyakrabban használt építőanyag, a beton ki van téve a víz nyomásának és egyéb hatásainak. A víz a betonban található pórusrendszeren keresztül képes mozogni, szivárogni.

A geotechnikában gyakori feladat a betonokban történő vízmozgásokhoz hasonló felszín alatti vízmozgások vizsgálata, modellezése. A mozgást leíró elméletek lehetővé teszik a porózus közegben történő vízmozgások számítását, így akár a betonban történő vízmozgás számítását, modellezését is.

1.1. A dolgozat célja

A dolgozat célja annak a vizsgálata, hogy a talajmechanikában használatos fogalmak és számítási módszerek milyen megbízhatósággal alkalmazhatóak a betonokban történő vízmozgások számításához és modellezéséhez.

A cél teljesítéséhez elengedhetetlen a telített és telítetlen talajokban történő vízmozgások, talajjellemzők elméleti áttekintése és gyakorlati meghatározásuk ismerete, ezek mellett a beton porozitásának és szabvány szerinti vízzáróság vizsgálatának áttekintése.

A vízmozgás modellezése és jellemzőinek meghatározása nehézkes, és nagy pontatlansággal végezhető feladat. A víz mozgását számos tényező befolyásolhatja, ebből kifolyólag a betonmintákat tág tulajdonság tartományban célszerű vizsgálni. Három különböző víz-cement tényezővel és két cementfajta felszánálásával készülő próbakockák és vizsgálati minták előállítására lett kitéve célul.

A kísérletsorozat a beton vízzáróságának, a telített beton áteresztőképességének és a víztartási görbe felhasználásával a telítetlen beton áteresztőképességének meghatározására irányult. A beton vízzáróság vizsgálata a szabványos betonvizsgálat lépései alapján történt. Az áteresztőképesség mérésére triaxiális mérőberendezés szolgált segítségül, míg a víztartási görbe meghatározását nyomásmembrános és gravitációs mérőműszerben hajtottam végre.

Az előzőekben vázolt vizsgálatokat a BSc diplomamunkám keretein belül végeztem el. A célom az eredmények részletesebb kiértékelése, a talajoknál alkalmazott elméletek, modellek vizsgálata betonban történő vízmozgás esetén a további modellezés céljából, illetve a szabványos beton vízzáróság vizsgálat összevetése a geotechnikai laboratóriumi mérések során kapott eredményekkel.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Telített és telítetlen talajokban történő vízmozgások

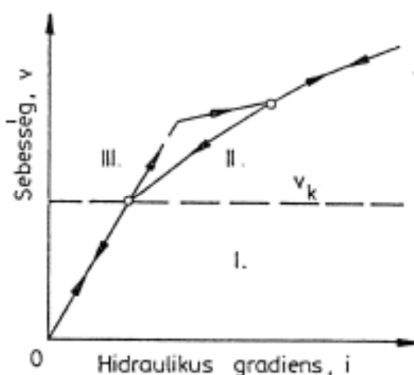
2.1.1. Darcy törvénye

A talajokban történő vízmozgások egyik legfontosabb talaj jellemzője a **vízáteresztő-képesség**. A vízáteresztő-képesség megmutatja, hogy a talaj pórusaiban könnyen vagy nehezen tud-e mozogni a víz.

A telített talajok esetén a mozgást a gravitációs erő hozza létre. Feltételezzük, hogy a talajt alkotó szilárd szemcsék a vízmozgás közben nem mozdulnak el. A vízmozgásnak kétféle fajtája lehet:

- lamináris áramlás esetén a részecskék pályája meghatározott, nem keresztezik egymást,
- turbulens áramlás esetén a részecskepályák szabálytalanok, keresztezik egymást.

Osborne Reynolds, angol fizikus kísérleteket végzett, hogy meghatározza a turbulens és a lamináris áramlás törvényszerűségeit. A kísérletek alapján megállapította, hogy a sebesség és az egységnyi hosszra eső nyomásvesztés összefüggése között különböző szakaszok különíthetők el, attól függően, hogy növeljük vagy csökkentjük a sebességet (**2-1. ábra**).



2-1. ábra: A hidraulikus gradiens és sebesség összefüggése - I. lamináris mozgás, II-III. átmeneti, illetve tiszta turbulens mozgás (Kabai)

A vízáramlás lamináris és turbulens szakaszát a kritikus sebesség (v_k) határoolja el. A kritikus sebességnél kisebb áramlási sebesség esetén lamináris áramlásról, nagyobb sebesség esetén turbulens áramlásról beszélünk. *Reynolds* bizonyította, hogy a talajban történő vízmozgások sebessége a kritikus érték alatt marad, így minden esetben lamináris áramlást feltételezhetünk.

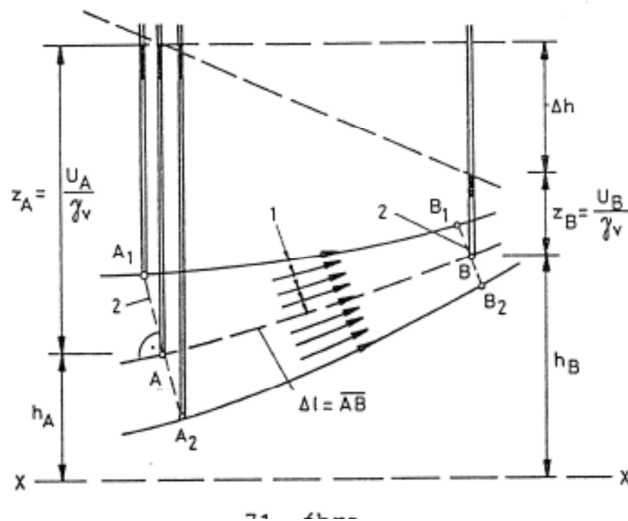
Az áramlást létrehozó egységnyi hosszra eső potenciálkülönbséget hidraulikus gradiensnek nevezzük. Jele: i , dimenziója: m/m .

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Az i vektormennyiség a legnagyobb potenciál esés irányát és nagyságát mutatja meg.

Két pont között a potenciálkülönbség hatására a víz $\Delta h \cdot \gamma_v$ energiája viszkózus súrlódás révén emésződik fel, és a talajszerkezetre adódik át, így definiálható az egységnyi térfogatra jutó áramlási erő (2-2. ábra):

$$i_p = \frac{\Delta h}{\Delta l} \cdot \gamma_v = i \cdot \gamma_v$$



2-2. ábra: Szivárgás folyamata (Kabai)

A vízmozgás sebességének nevezzük az áramvonalakra merőleges egységnyi keresztmetszeten időegység alatt átáramló vízmennyiséget. Jele: v , dimenziója: m/s . A talajban a vízáramlását a pórusok, hézagok teszik lehetővé. A szilárd részek és a pórusok arányát a hézagtérfogattal (e), a pórusok és teljes térfogat arányát hézagtérfogattal (n) fejezzük ki. A vizsgált mintába beszoruló levegőbuborékok az áramlás szempontjából szilárd szemcsékként viselkednek. A talaj porózus tulajdonsága végett két sebességet különböztetünk meg:

- a teljes vizsgált keresztmetszetre vonatkozó sebességet (v),
- a pórusokban mozgó víz sebességét, a szivárgási sebességet ($v_s = v/n$).

Ha a víz a talajban úgy áramlik, hogy a talajszerkezetet nem bontja meg, akkor a sebesség jó közelítéssel kifejezhető a következő egyenlettel:

$$v = \frac{K}{\eta} \cdot i_p = \frac{K \cdot \gamma_v}{\eta} \cdot i$$

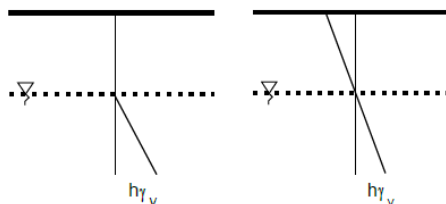
Ahol K , a talajra jellemző empirikus állandó; γ_v , a víz térfogatsúlya; η , a víz viszkozitása. A mérnöki gyakorlatban általában állandó hőmérsékletű talajvízzel foglalkozunk, így a víz térfogatsúlya és viszkozitása állandónak tekinthető. Ebből adódóan a $K \cdot \gamma_v / \eta$ mennyiség állandónak tekinthető, és k betűvel jelöljük. Az egyenletből a k tényező felhasználásával **Darcy törvényét (1854)** kapjuk:

$$v = k \cdot i$$

Ahol k , az átteresztőképességi együtttható; i , a hidraulikus gradiens. (Kabai, 2005)

2.1.2. A telítetlen talaj definíciója és jellemzői

A talajmechanikában a talajvíz tükörszintje feletti talajt **telítetlen talajnak** nevezzük. Ilyen talajok esetében a pórusvíznyomás eloszlása lineárisan folytatódik a talajvíztükör felett, és negatív értéket vesz fel az atmoszférikus nyomáshoz képest, amennyiben a talaj felszínén sem párolgás, sem beszívargás nem lép fel, azaz nem jön létre vízáramlás (2-3. ábra). A talajok telítettség alapján történő felosztása látható a 2-1. táblázatban.

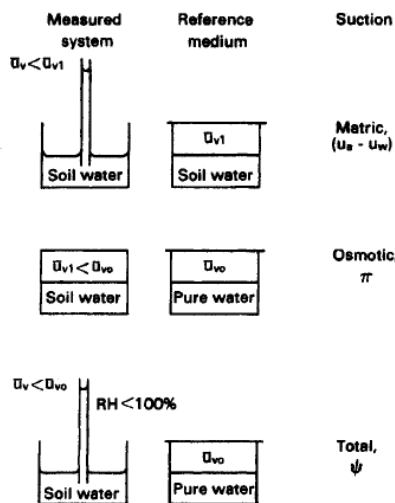


2-3. ábra: A hagyományos és a pontosabb talajmechanikai modell (Dr. Imre Emőke)

2-1. táblázat: A talajok felosztása (Dr. Imre Emőke)

Vízzel telített ($u_w \geq 0$)	Telítetlen ($u_w < 0$)
a talajvíztükör alatt található, természetes állapotban esetleg légbuborékot tartalmazó talaj	(1) a talajvíztükör felett található, részben vagy teljesen kiszáradt talaj (2) a tömörített talajok

A telítetlen talajok legfontosabb jellemzője, hogy bennük a pórusvíznyomás a póruslevegő-nyomásnál kisebb. A póruslevegő-nyomás és a pórusvíznyomás különbségét **szívásnak** nevezzük, mely két komponens, a **kapilláris szívás** és az **ozmotikus szívás** összege.



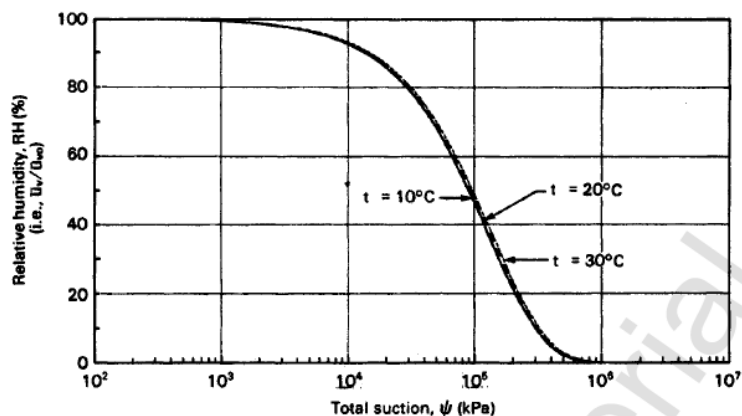
2-4. ábra: A teljes szívás és komponensei, a kapilláris és az ozmotikus szívás (D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A kapilláris szívás a levegő nyomása és a talajvízzel azonos sótartalmú víz feszültségének, az ozmotikus szívás a talajvízzel megegyező sótartalmú víz és a kémiaailag tiszta víz feszültségének különbsége. A két szívás összegét **teljes szívásnak** nevezzük (2-4. ábra).

$$\Psi = (u_a - u_w) + \Pi$$

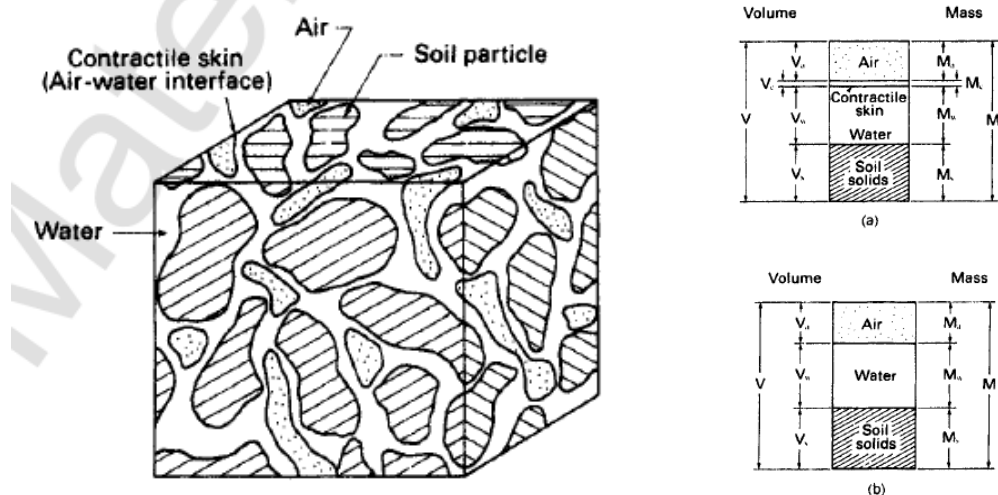
Ahol Ψ , a teljes szívás; $(u_a - u_w)$, a kapilláris szívás és Π , az ozmotikus szívás.

A kapilláris szívás az ozmotikus szívással ellentétben függ a talaj víztartalmától (2-5. ábra). A mérnöki nyelvzetben a szíváson általában a kapilláris szívást értjük, mivel a víztartalom változása során csak a szívás kapilláris komponense változik lényegesen.



2-5. ábra: A relatív nedvességtartalom és a teljes szívás kapcsolata (D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A telítetlen talaj három fázisa mellett megkülönböztethetünk egy **negyedik fázist** is. A víz és a levegő határfelületén megjelenik egy néhány molekula vastagságú átmeneti réteg, melyet **hártyának** (contractile skin) nevezünk (2-6. ábra). A hártya kapilláris erőt ad át a szilárd szemcsékre, mely a talaj térfogatváltozását okozza kiszáradás és nedvesedés során.



2-6. ábra: A telítetlen talaj elemi hasábjá, a pontosabb (a) és az egyszerű (b) fázismodell (D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A hártya több fizikai jellemzője lényegesen eltér a víz fizikai jellemzőitől, és léteznek határfelületei is, hiszen bizonyos élőlények képesek járni az alsó és felső felületén. A kérdés az, hogy kielégítik-e a hártya tulajdonságai a fázis definícióját. Ahhoz, hogy egy keverék egy részét fázisnak tekintsük, szükséges, hogy:

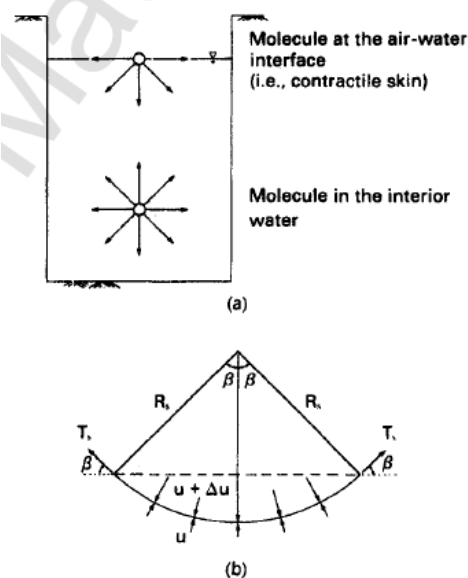
- tulajdonságai eltérjenek a vele érintkező részekétől,
- létezzenek határfelületei.

Az előbbiekből következik, hogy a hártya fizikai jellemzői teljes mértékben kielégítik a fázis fogalmát. (Fredlund, Rahardjo, 1993; Imre, 2009)

2.1.3. Kapilláris jelenségek

A folyadékok szilárd illetve légnemű testekkel közös határán molekuláris szemlélettel magyarázható jelenségek észlelhetők. Ilyenek a kohézió, az adhézió, a felületi feszültség és a kapilláris szívás jelensége.

A levegő és víz határfelületén jelentkező hártya egy érdekes tulajdonsággal rendelkezik, melyet **felületi feszültségnek** nevezünk. A jelenség a hártyában fellépő molekuláris erők hatására jön létre. A víztömeg belsejében a molekulákra ható erők minden irányban megegyeznek, így nincs kiegyensúlyozatlan erő, azonban a vízfelszínen lévő molekulákra a víz belsejébe mutató kiegyensúlyozatlan erő hat. Ennek érdekében, hogy az egyensúly létrejöhessen a hártyán húzó erőnek kell fellépni, melyet felületi feszültségnek nevezünk (2-7. ábra). A felületi feszültség érintő irányú a hártya felszínére és értéke a hőmérséklet emelkedésével nagyságrendileg csökken.



2-7. ábra: A felületi feszültség a víz-levegő határfelületen (a),
 és a molekulák közti erők a víz felszínén (b)
 (D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

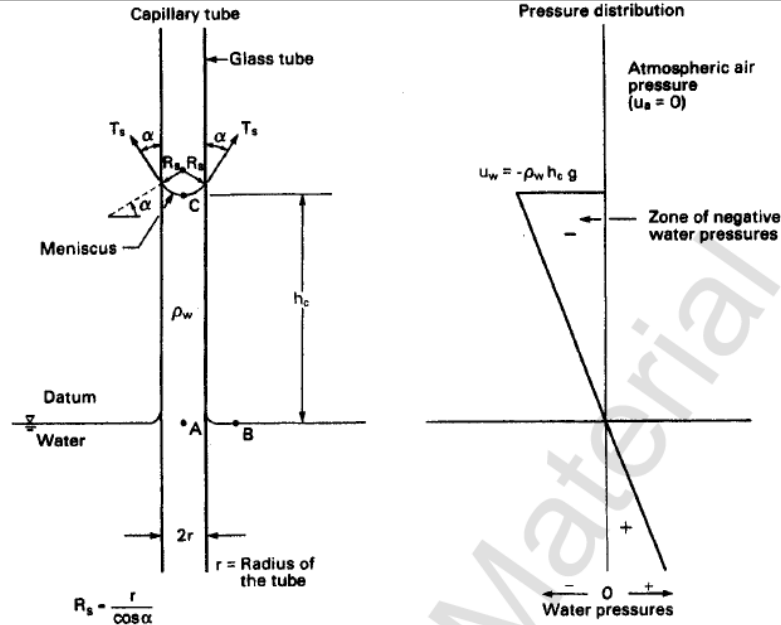
A kapilláris szívás korábban említett teljes szívás egyik komponense. A kapilláris jelenség a víz felületi feszültségének következménye. A kapillárisvíz magasságának emelkedése és a görbületi sugara közvetlen hatással bír a víztartalom és a szívás kapcsolatára (víztartási görbe). A nedvesedő és száradó víztartási görbe közötti eltérés a kapilláris modellel magyarázható.

Egy vékony üveg cső atmoszférikus körülmények között vízzel teli edénybe kerül illesztésre. A felületi feszültség következtében a víz felemelkedik a csőben. Az erő a meniszkusz kerülete mentén lép fel, és α szöget zár be a függőleges iránnyal. Az α szöget érintkezési szögnek nevezzük, és nagysága a molekulák közti adhéziótól és a cső anyagi összetételétől függ.

A kapilláris vízben fellépő függőleges erők egyensúlyát a 2-8. ábra mutatja. A felületi feszültség függőleges vetülete tart egyensúlyt a h_c magasságú vízoszloppal. A vetületi egyensúlyi egyenlet a következő:

$$2\pi r T_s \cos \alpha = \pi r^2 h_c \rho_w g$$

Ahol r , a kapilláris cső sugara; T_s , a víz felületi feszültsége; α , az érintkezési szög; h_c , a kapilláris víz magassága; ρ_w , a víz sűrűsége és g , a gravitációs gyorsulás értéke.



2-8. ábra: A kapillaris jelenség modellje
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

Az egyenletet átrendezve megkapjuk a kapillaris csöben fellépő vízoszlop maximális magasságát:

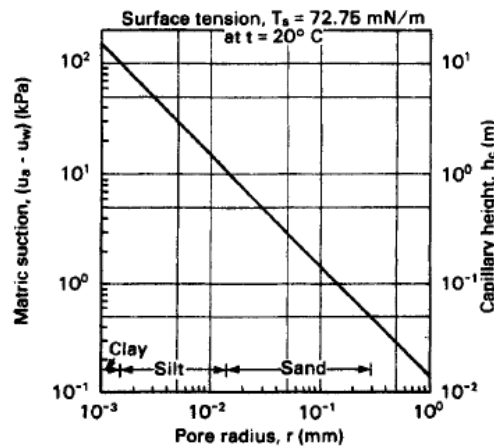
$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g R_s}$$

Ahol R_s , a meniszkusz görbületi sugara ($r/\cos\alpha$).

Az érintkezési szög a desztillált víz és a tiszta üveg cső között $\alpha=0^\circ$. Ha az érintkezési szög nulla, akkor a görbületi sugár nagysága megegyezik a cső sugarával. Tehát a kapillaris emelkedése a desztillált víznek tiszta üveg esetén a következő:

$$h_c = \frac{2T_s}{\rho_w g r}$$

A kapillaris cső mérete mintázza a talajban található pórusok méreteit. Az egyenletből jól látszik, hogy a kisebb pórusokhoz nagyobb kapillaris emelkedés tartozik. A 2-9. ábra mutatja az összefüggést a kapillarisemelkedés, a pórusméret és a kapillaris szívás között.



2-9. ábra: A kapillaris emelkedés, szívás és a pórus méret kapcsolata
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A kapilláris csőben a vízszinttől h_c magassáig felemelkedő vízoszlopnak negatív nyomása van, azaz a csőben lévő vízre húzóerő hat. A víznyomás a kapilláris víz tetőpontján az alábbi képlettel számolható:

$$u_w = -\rho_w g h_c$$

Ahol u_w , a víznyomás.

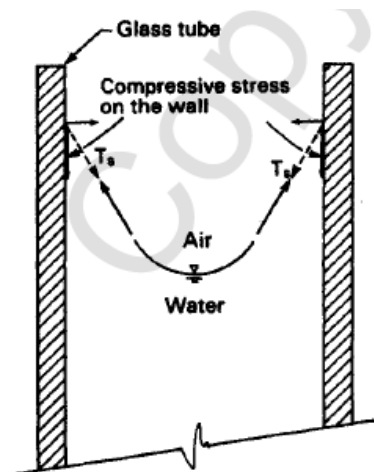
A tetőponton a légnyomás a külső atmoszférikus nyomással egyezik meg ($u_a = 0$). A levegőnyomás és a víznyomás közti különbség a kapilláris szívás értékét ($u_a - u_w$) adja, mely a következő összefüggéssel számolható:

$$(u_a - u_w) = \rho_w g h_c$$

A függőleges vetületi erők egyenletének segítségével a kapilláris szívás nagyságát ki tudjuk fejezni a felületi feszültség értékével:

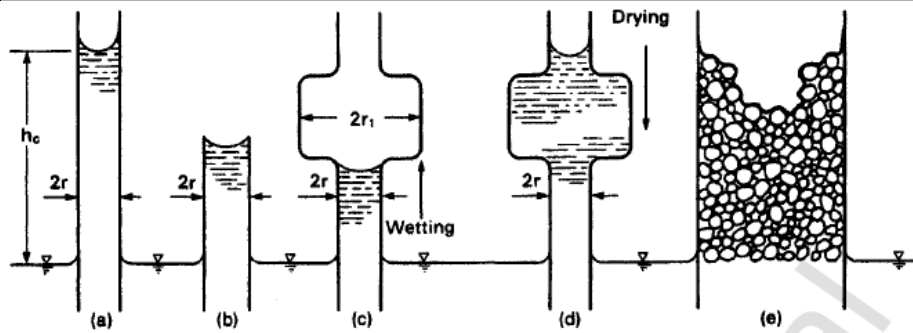
$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s}$$

Az összefüggésből következik, hogy minél kisebb a pórusok mérete, annál nagyobb szívás lép fel a telítetlen talajban. A fenti magyarázat konstatálja, hogy a felületi feszültség segíti a vízoszlop emelkedését a kapilláris csőben. A fellépő húzóerő a cső falában reakcióerőt ébreszt, melynek függőleges komponense nyomófeszültséget generál. Azaz a vízoszlop súlya a hártyán keresztül a cső falára nehezedik (2-10. ábra). Abban a talajban, melyben kapilláris rendszer található a hártya a talajszerkezetét tömörebbé teszi, tehát a kapilláris szívás jelenléte a telítetlen talajban a nyírószilárdság növekedését eredményezi.



2-10. ábra: A kapilláris cső falára ható erők
 (D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A felületi feszültségnek köszönhetően tiszta vékony csőben a desztillált víz képes a maximális vízoszlop magassáig felemelkedni (2-11./a ábra), azonban a cső hossza befolyásolja az emelkedés nagyságát (2-11./b ábra). A kapilláris cső szélesedése is jelentős hatással bír a víz emelkedésére. Az első esetben a vízbe helyezett csőben a szélesedés meggátolta, hogy a maximális magassáig emelkedjen a kapilláris víz (2-11./c ábra). A második esetben, a vízszint alá merítve a csövet a vízszint nagyobb szélességű szakasz fölé tudott emelkedni (2-11./d ábra).



2-11. ábra: A magasság és a sugár hatása a kapillaris emelkedésre
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

Az előbbi kapillaris cső modell alkalmazható a természetben előforduló talajviszonyok leírására. A talaj egyenetlen pórus eloszlása ad magyarázatot a víztartási görbe hiszterézisére. Egy adott szívás értéken a száradási és nedvesedési víztartalom eltérő, ahogy az előbbi példa mutatja. Továbbá az érintkezési szög is különböző a nedvesedési és a száradási folyamat során. A fenti tényezők, valamint a talajba zárt levegő jelenléte a fő okozója a víztartási görbénél tapasztalható hiszterézisnek. (Fredlund, Rahardjo, 1993)

2.1.4. Telített és telítetlen talajok feszültségi állapotváltozói

A telített talajok viselkedésének értelmezésében Terzaghi nagyon fontos szerepet játszott. A harmincas évek közepén az általa bevezetett hatékony feszültségnek köszönhetően a telített talajok talajmechanikája egységes, kontinuummechanikai megközelítéssel tárgyalhatóvá vált. A telítetlen talajokkal kapcsolatos mérnöki problémákat azonban egyedi esetként, félig tapasztalati módszerekkel tudták csak megoldani megfelelő feszültségi állapotváltozó hiányában. A telítetlen talajok feszültségi állapotváltozóinak meghatározására irányuló vizsgálatok az ötvenes években kezdődtek, és a mai napig is folynak kísérletek a témával kapcsolatban.

Az 1936-ban rendezett első *Talajmechanikai és Alapozási Világkonferencián* állt elő Terzaghi a **hatékony feszültség** definíciójával, mely így szól:

"A talaj adott pontjának adott síkjára ható feszültség a főfeszültségekből számítható. Ha a hézagok vízzel telítettek, és a víz u nyomással jellemezhető, a teljes feszültség két részből áll. Az egyik rész u , a vízben és a szilárd részben minden irányban, azonos nagyságban hat. Ez a semleges feszültség. A semleges feszültség feletti $\sigma_1' = \sigma_1 - u$, $\sigma_2' = \sigma_2 - u$, $\sigma_3' = \sigma_3 - u$ többletet - a hatékony feszültséget - kizárólag a talaj szilárd része viseli. A feszültség-változás minden olyan mérhető hatása, mint a kompresszió, nyíródás és a nyírószilárdság csökkenése a hatékony feszültség változásának eredményeképpen jön létre." (Terzaghi, 1936)

Kontinuummechanikai értelmezés szerint az állapotváltozók a rendszer állapotát az anyagjellemzőktől függetlenül jellemzik. A közöttük lévő kapcsolatot kifejező alapegyenletek általában egyértelműek. A teljes feszültség, a víz és a levegő feszültsége sem jellemzi egyértelműen a talajt, tehát a telítetlen talajok vizsgálatához egy megfelelő feszültségi állapotváltozó szükséges.

Egy kézenfekvő lehetőség volt a hatékony feszültség fogalmának kiterjesztése a telítetlen talajokra. Ebben az irányban számos elmélet, próbálkozás készült, azonban az egyenletek mindegyik különböző anyagjellemzőt is tartalmazott, így nem lehetett feszültségi állapotváltozó definíciója.

A korábban említett elméletek azért sem vezethettek eredményre, mert a telítetlen talaj több fázist tartalmaz, mint a telített talaj, így több feszültségi állapotváltozóra is szükség van. Ebbe az irányba folytatott kutatásokban a legnagyobb eredményt Fredlund és Morgenstern érték el. Kritériumokat dolgoztak ki a feszültségi állapotváltozók megállapítására, igazolták, hogy Terzaghi által definiált hatékony feszültség állapotváltozó, és javaslatot tettek a telítetlen talajok feszültségi állapotváltozóira. Csak azok a mennyiségek tekinthetők feszültségi állapotváltozónak, melyek gyakorlati célból kedvezőek, elmélettel alátámaszthatóak és egyértelmű fizikai egyenletet biztosítanak, melyek kísérletileg igazolhatóak.

A gyakorlat és a használhatóság szempontjából a leglényegesebb, hogy mérhető feszültségek függvényében legyen megadva az állapotváltozó. Talajok esetén három feszültség létezik, mely ebbe a kategóriába tartozik. Mérhető feszültség telítetlen talajok esetén (nagyságrendi sorrendben) a teljes feszültség (σ), a pórslégnyomás (u_a) és a pórsvíznyomás (u_w).

$$\sigma \geq u_a \geq u_w$$

Feszültségi határállapotról beszélünk, ha valamely feszültségek között nem egyenlőtlenség, hanem egyenlőség lép fel. Ilyen határállapot a telített és a telítetlen talaj közötti átmenet, amikor is a pórslégnyomás megegyezik a pórsvíznyomással.

$$u_a = u_w$$

A feszültségi állapotváltozók száma nem lehet nagyobb, mint a mérhető feszültségek száma, és célszerű a lehető legkisebb értékre korlátozni. Ezt úgy lehet a legkönnyebben elérni, ha a felsorolt mérhető feszültségek közül kiválasztunk egyet kiinduló értéknek, és képezzük a többi feszültségnek a kiinduló értékkel való különbségét. Más-más értéket választva referenciaváltozónak végigvizsgáljuk az összes lehetséges kombinációt. Azt a kombinációt fogadjuk el, melyben a referenciaváltozó szerepe elhanyagolható.

Telített talajok esetén a teljes feszültség és a pórsvíznyomás választható kiinduló értéknek. Az utóbbi értékekkel képzett lehetséges kombinációk:

$$\begin{aligned} &(\sigma - u_w), u_w \\ &(\sigma - u_w), \sigma \end{aligned}$$

Ahol $(\sigma - u_w)$, a hatékony feszültség

Az u_w szerepe általában elhanyagolható, mivel a víz kompresszibilitása kicsi és nincs nyírószilárdsága, így a fenti két variáció közül a $(\sigma - u_w)$ és az u_w két független feszültségi állapotváltozó használata elfogadott. Tehát a telített talaj feszültségi állapotváltozójaként a **hatékony feszültség** a legmegfelelőbb.

Telítetlen talajok esetén a mérhető feszültségek száma eggyel több, így a választható három referencia érték a teljes feszültség, a pórslégnyomás és a pórsvíznyomás. A három feszültségértékekkel képzett kombináció:

$$\begin{aligned} &(\sigma - u_a), (u_a - u_w), u_a \\ &(\sigma - u_w), (u_a - u_w), u_w \\ &(\sigma - u_a), (\sigma - u_w), \sigma \end{aligned}$$

Ahol $(\sigma - u_a)$, a redukált vagy nettó feszültség; $(u_a - u_w)$, a szívás.

Határesetben ($u_a = u_w$) a telítetlen talaj kombinációi a telített talaj kombinációira vezetnek vissza. A három eset közül az első a legelfogadottabb a talajmechanika berkeiben, mivel u_a sok esetben állandó, megegyezik az atmoszférikus nyomással. Ebből következik, hogy a két legmegfelelőbb feszültségi állapotváltozó a telítetlen talajok leírására a **redukált feszültség** és a **szívás**. (Imre, 2009)

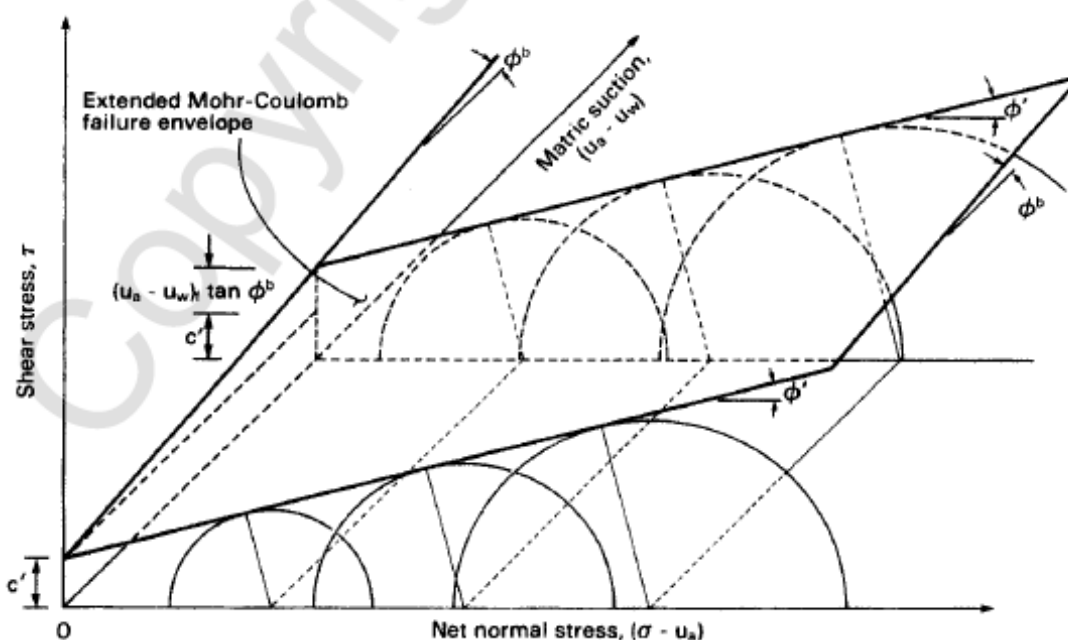
2.1.5. Telített és telítetlen talajok nyírószilárdsága

A *Mohr-Coulomb törési feltétel* telítetlen talajok esetén a telített talajoknál megszokottól eltérő. Mivel a telítetlen talajok szilárdságát két független feszültségi állapotváltozó – a redukált feszültség és a szívás – határozza meg, a törési egyenes egy **törési felületté** alakul. A kapilláris szívás által okozott tömörödésnek köszönhetően a törési egyenlet egy értékkel bővül, melyet **kapilláris kohézió**nak neveznek a magyar szakirodalomban.

A telítetlen talajok törési egyenlete:

$$\tau = (\sigma - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \tan \varphi^b + c$$

Ahol τ , a nyírószilárdság; c , a kohézió; $(\sigma - u_a)$, a nettó vagy redukált feszültség (σ''); $(u_a - u_w)$, a szívás (s); φ , a súrlódási szög σ'' szerint; φ^b , a súrlódási szög a szívás alapján.



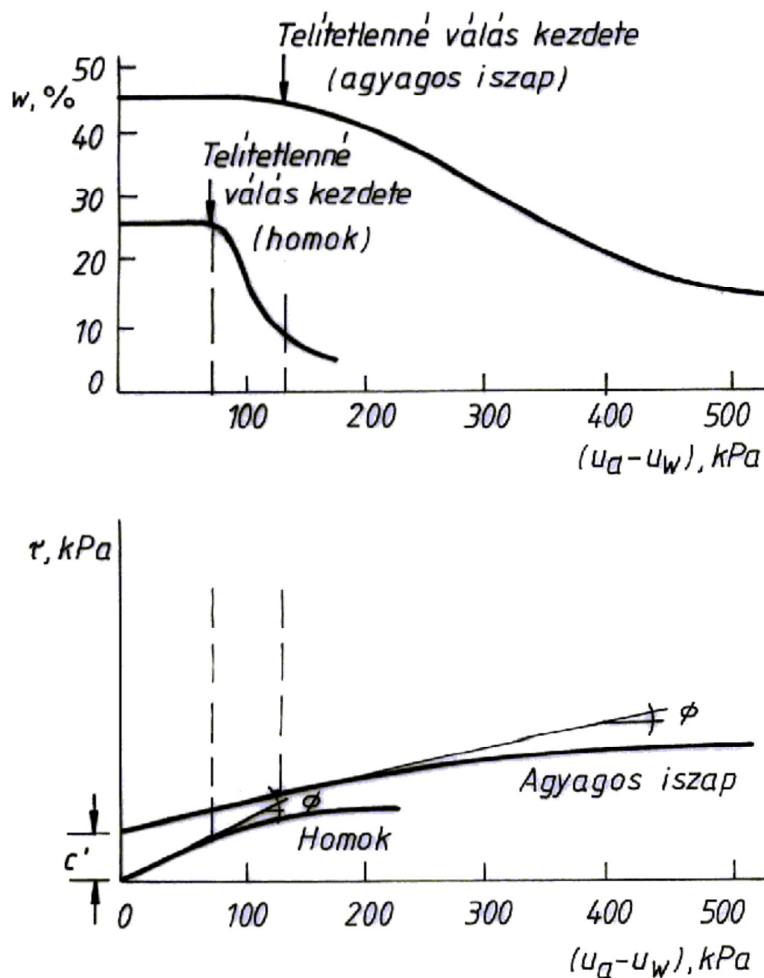
2-12. ábra: A Mohr-Coulomb törési feltétel
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

A 2-12. ábra a telítetlen talaj törési felületét mutatja. A felületnek két jellemző metszete látható, ahol a redukált normálfeszültség nulla, és ahol szívás értéke zérus. A szívás zérus értékénél található a telített állapot síkja, ahol a felület Mohr-Coulomb egyenessé egyszerűsödik ($u_a = u_w$):

$$\tau = (\sigma - u_w) \tan \varphi + c$$

A fenti képlet alkalmazhatóságának nehézségét az adja, hogy a pórusvíznyomás ismerete szükséges, mely ebben az esetben negatív, így mérése nem egyszerű feladat.

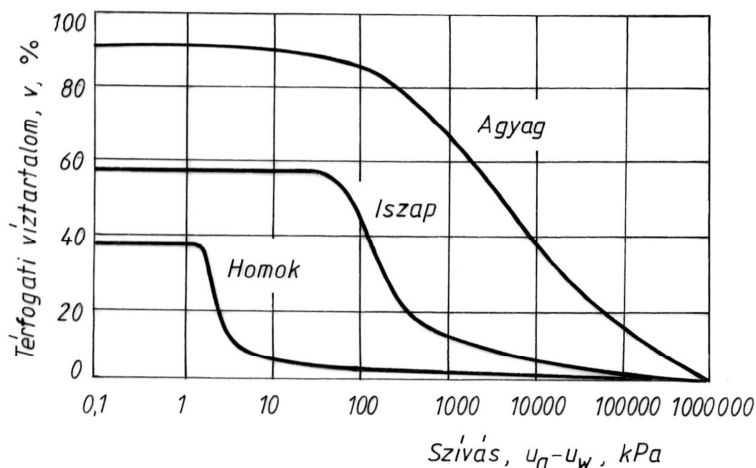
A kísérleti tapasztalatok szerint a ϕ^b értéke nem állandó, a törési feltétel nem lineáris, a szívás függvényében változik. A változásnak három jól elkülöníthető szakasza van (2-13. ábra). A levegő belépési szívás eléréséig telített állapotban ϕ^b értéke megegyezik ϕ értékével. Ha telítettségi fok értéke egy alá esik, és a szívás a levegő belépési szívás értékétől a reziduális víztartalom elérésig nő, akkor ϕ^b értéke ϕ -ról nullára csökken. Amennyiben a telítettségi fok továbbra is egy alatt van, és a szívás a reziduális víztartalomhoz tartozó szívás érték fölött van, akkor ϕ^b értéke zérus. (Fredlund, Rahardjo, 1993; Imre, 2009)



2-13. ábra: A víztartási görbe és a ϕ^b kapcsolata
(Dr. Imre Emőke)

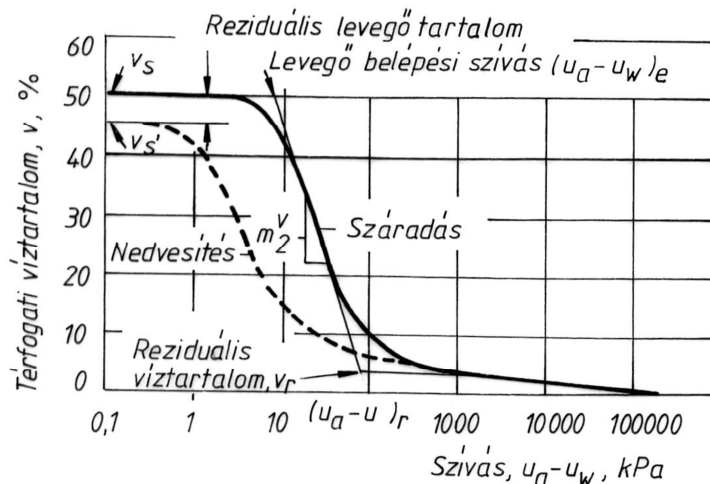
2.1.6. A víztartási görbe

A víztartási görbe a legfontosabb telítetlen talaj függvény, mely a talaj víztartalmát ábrázolja a szívás függvényében logaritmikus koordinátarendszerben. A víztartási görbe jelentősen függ a talajok szemeloszlásától. A **2-14. ábrán** három különböző talaj víztartási görbéje látható, melyek jellege hasonló, a különbözősége a talajok eltérő póruseloslása ad magyarázatot.



2-14. ábra: Három különböző talaj jellegzetes víztartási görbéje
(Dr. Imre Emőke)

A víztartási görbe három jól elkülöníthető szakaszra bontható (**2-15. ábra**). Az első tartomány, amikor a szívás értéke kisebb, mint a levegő belépési szívás, ilyenkor a talaj gyakorlatilag telített állapotú, és a szakasz közel vízszintes. A második tartományon a szívás értéke fokozatosan nő a levegő belépési szívás értéke fölött, a víztartalom pedig nagymértékben csökken, miközben a levegőtartalom nő. Az utolsó szakaszon a görbe ellapul, azaz a reziduális szívás érték felett a víztartalom csak kismértékben csökken.



2-15. ábra: A víztartási görbe három elkülöníthető szakasza és histerézise
(Dr. Imre Emőke)

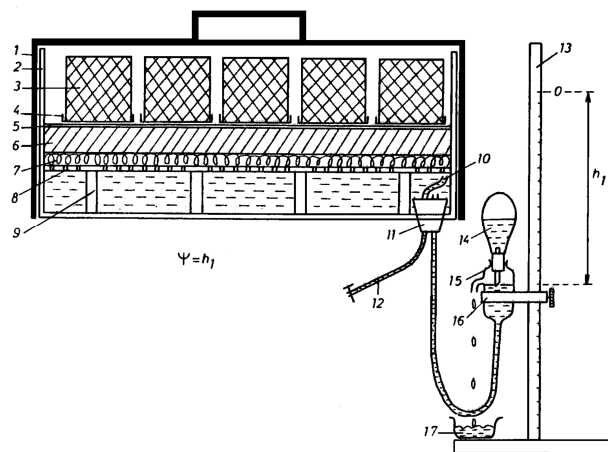
A víztartási görbe különböző görbületen fut nedvesedési és szárítási kísérletnél (**2-15. ábra**). Ennek oka, hogy a talaj hézagrendszere nem állandó átmérőjű, hanem szűkülő és táguló kapillárisrendszert alkot. A **2.1.3. fejezetben** már említett változó kapilláris csőméret példája fizikai magyarázatot ad a víztartási görbe histerézisére: nem állandó átmérőjű csőben

a vízoszlop két egyensúlyi helyzetben is állandósulhat, attól függően, hogy az egyensúly hogyan jött létre. Ahogy láthattuk korábban, a száradási egyensúlyi magasság nagyobb lesz, mint a nedvesedési egyensúlyi vízoszlop magasság, tehát a nedvesedési víztartási görbe a száradási víztartási görbe alatt fut.

A víztartási görbe meghatározása történhet laboratóriumi mérésekkel és közelítő számítással is. A laboratóriumban végzett mérés általában időigényes és költséges, ezért alakultak ki a szemeloszlás görbe felhasználásával történő közelítő meghatározások.

A laboratóriumi mérés során vizsgált mintát különböző nagyságú szívás értéknek tesszük ki, és mérjük a minta víztartalmát, azaz mennyi vizet képes magában tartani adott szívás mellett. Az adott szívás nagysághoz tartozó víztartalom értékeket egy logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázoljuk, melynek a horizontális tengelyén a kapilláris szívás, a vertikális tengelyén a víztartalom található. A mért pontokat összekötve kapjuk a víztartási görbét. A laboratóriumi mérések során a víztartalmat mérjük, míg a mintára ható szívás értékét szabályozzuk.

A laboratóriumi mérések elvégzésére többféle módszer és berendezés áll rendelkezésre. A **gravitációs vagy vákuumos módszer** esetén vízfázisra ható szívást hozunk létre úgy, hogy a szívás értékét meghatározó szabad vízfelszínnek a mintához viszonyított helyzetét szabályozzuk, azaz a mintát alulról határoló membránhoz hajlékony csővel egy kapcsolódó mérőtartályt függőlegesen mozgatunk (**2-16. ábra**). A méréshez gyűrűben elhelyezett telített mintát használunk, melynek víztartalom-változását tömegméréssel állapítjuk meg. A leírt elvek alapján működik a homoklapos berendezés, mely $pF\ 0 - pF\ 2,0$ és a kaolinlapos berendezés, mely $pF\ 2,0 - pF\ 2,7$ tenziótartományban alkalmas a nedvességpotenciál meghatározására.



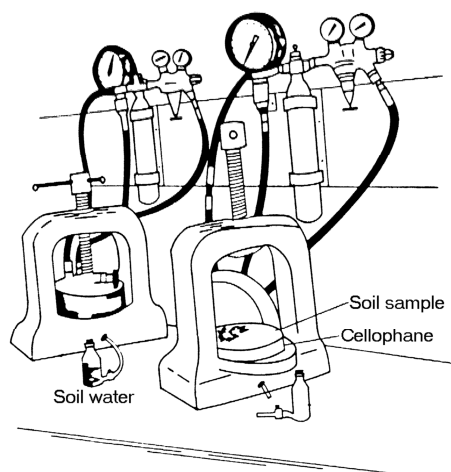
1. Átlátszatlan PVC fedél
2. Plexi kád
3. Réz hengerekben elhelyezett minta
4. Szítaszövet, szorító gumikarikával
5. Szítaszövet a szűrőlap felszínén
6. Töltőanyag
7. Azbesztgyapot
8. Plexiből készült perforált tartólap
9. Tartólap lábazata
10. Üvegcső a légbuborékok eltávolítására
11. Kétfuratú gumidugó
12. Légbuborék mentesítő cső kivezetése
13. Acélállvány
14. Nívópalack
15. Állandó vízszintet biztosító edény
16. Rögzíthető fémkonzol
17. Vízugyűjtő edény

2-16. ábra: A gravitációs berendezés felépítése
 (Dr. Imre Emőke)

A berendezés egyik legfontosabb része a membrán, mely a szívást a csőben lévő víztől a mintához továbbítja. Olyan tulajdonságú anyagnak kell lennie, hogy a szívástartományon belül a vizet átengedje, a levegőt azonban nem. Ellenkező esetben az összegyűlő levegő megszakítja a vízszálat, mely a szívást fejt ki. A membrán anyagának megválasztása függ a kifejtett szívás nagyságától. A durvább szemcséjű anyagok (homok) nagy szívás értéken átengedik a levegőt is, a finomabb szemcséjű anyagoknak azonban (kaolin) kis szívás értéken a vízáteresztő-képességük nagyon kicsi. Így a $10\ kPa$ alatti szívás tartományban homoklapos, $10\ kPa$ és $100\ kPa$ közötti tartományban pedig kaolinlapos berendezést használunk.

Nagyobb szívás értéknél ($100 \text{ kPa} - 1600 \text{ kPa}$) **tengely eltolási technikát** alkalmazunk **nyomásmembrános készülékkel (2-17. ábra)** vagy feszültségkamrás eljárással. Lényege, hogy levegő túlnyomást hozunk létre a vizsgáló térben, miközben a víznyomást szabályozzuk ($u_w=0$). A légnyomás növelésével együtt változik a teljes feszültség, a pórusvíznyomás és a póruslégnomás, miközben a nettó normálfeszültség és a szívás állandó marad. A tengelyeltolási technika azért szükséges, mert a pórusvíznyomás a fellépő kavitáció miatt nem csökkenthető az adott hőmérsékletnek megfelelő telítettgőz-nyomás alá.

A nyomásmembrános készülék vastag acélból készült $20\text{-}30 \text{ cm}$ átmérőjű kamra, melyet vastag falú fedél zár le. A kamra aljára helyezett celofán két részre osztja a vizsgálati teret. A felső, nyomás alatt álló légtérbe a celofánra kerülnek a talajminták. A mintákból kiperéselt víz a celofánon keresztül a túlnyomásmentes alsó légtérbe jut, és a nyíláson keresztül távozik a készülékből. A vizsgálat során telített talajmintából indulunk ki. A légnyomást kompresszor vagy levegőpalack segítségével hozzuk létre, majd az egyensúlyi állapot eléréshez szükséges idő elteltével tömegméréssel meghatározzuk a minták víztartalmát.



2-17. ábra: A nyomásmembrános készülék vázlatrajza (Dr. Imre Emőke)

Léteznek még kémiai módszerek, melyeket nagy szívásérték tartományban alkalmazunk (40000 kPa szívás értékig). A kémiai módszerek két nagy csoportra bonthatóak. Az első csoport, ahol relatív páratartalmat szabályozzuk, a másik csoport, ahol ozmózisra alapuló kémiai módszerrel (1500 kPa szívás értékig) szabályozzuk a szívást. A páratartalom szabályozás alkalmazásának alapelve, hogy mindig egyensúlyi állapot alakul ki a minta víztartalma és a körülvevő légtér páratartalma között.

A víztartási görbe meghatározására a szemeloszlási görbe segítségével is lehetőségünk van. Kapilláris elméleti megfontolások alapján a szemeloszlási görbét a talaj pórus és hézag eloszlásának megállapítására lehet felhasználni, mely a legjobban befolyásolja a víztartási görbét. Különböző elméleteket dolgoztak ki a pórustér modellezésére adott szemeloszlás esetén, így lehetőség nyílt a víztartási görbe számítással történő meghatározására.

A szemeloszlási görbéből adatbázis segítségével is meghatározható a víztartási görbe. A laboratóriumi mérések eredményeiből adatbázist hoztak létre, így a szemeloszlási görbe és az adatbázis felhasználásával becsülni lehet a víztartási görbét.

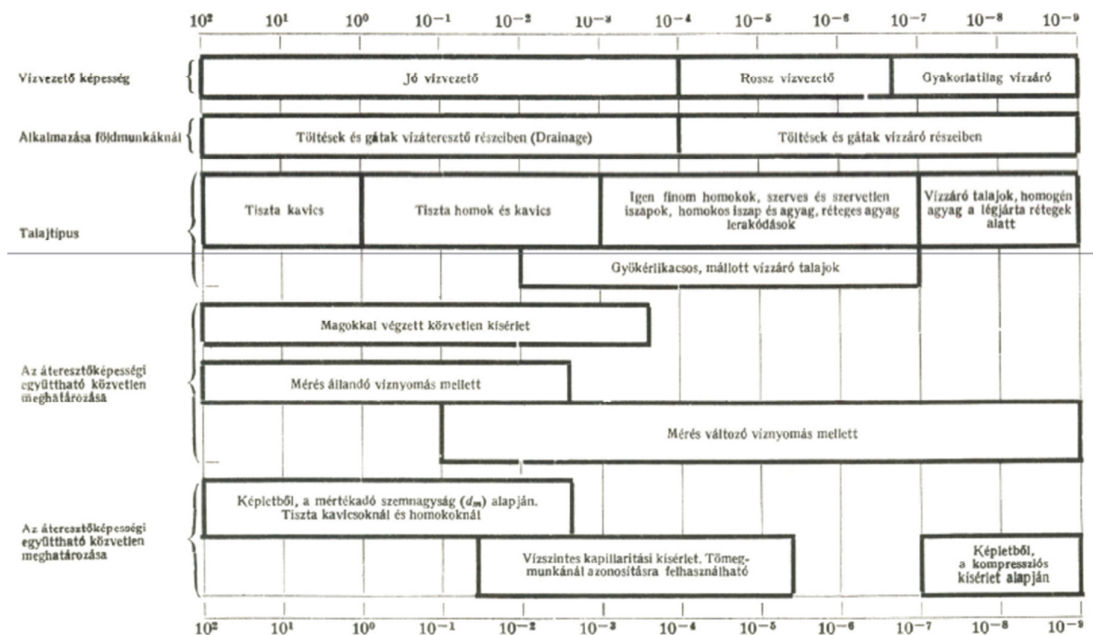
A szemeloszlási entrópia alapján is meghatározható a víztartási görbe. Néhány gondosan kiválasztott esetben megmérték a szemeloszlási görbéhez tartozó víztartási görbét. A többi esetben a szemeloszlási görbét a mért görbék közé interpolálva kapjuk meg az eredményt. (Imre, 2009)

2.1.7. Az áteresztő-képesség meghatározása

A vízáteresztő-képesség meghatározására nem létezik általánosan elfogadott módszer. Az áteresztőképesség értéke széles határok között változik, különböző talajoknál tíz nagyságrendnyi eltérés is tapasztalható, de adott talajnál is mutathat nagyságrendnyi különbséget. Az áteresztőképesség nem állandó sem térben, sem időben még homogén közeg esetén sem. Számos körülmény befolyással bír a k értékére: a talajban felléphet kolmatáció, szuffózió, és változhat az esetleges szerves anyag tartalom is. A talaj állapota nagymértékben befolyásolja az együtttható értékét. Az áteresztőképesség nagysága függ:

- a hézagtenyezőztől,
- a másodlagos pórusoktól,
- a szemcsék alakjától, átmérőjétől,
- a hidraulikus körülményektől (Reynolds-szám, szívás),
- a víztartalomtól,
- az áramló víz tulajdonságaitól,
- a szemcsék ki- és bemosódásától,
- és az áramlás irányától is.

A gyakorlatban a tervezők gyakran táblázatokból vesznek fel adatot a talaj áteresztőképességének értékére, azonban ez az érték nagyságrendileg is eltérhet a valódi, mért értéktől, mely hibás számításhoz és komoly gondokhoz vezethet. Az áteresztőképesség meghatározására számos eljárás készült, ezek azonban csak meghatározott tartományokban alkalmazhatóak (2-18. ábra). A mérések mellett különböző számítási módszerek is kialakultak a kompressziós görbe és a szemeloszlási görbe felhasználásával. (Kabai, 2005; Nagy, 2008)



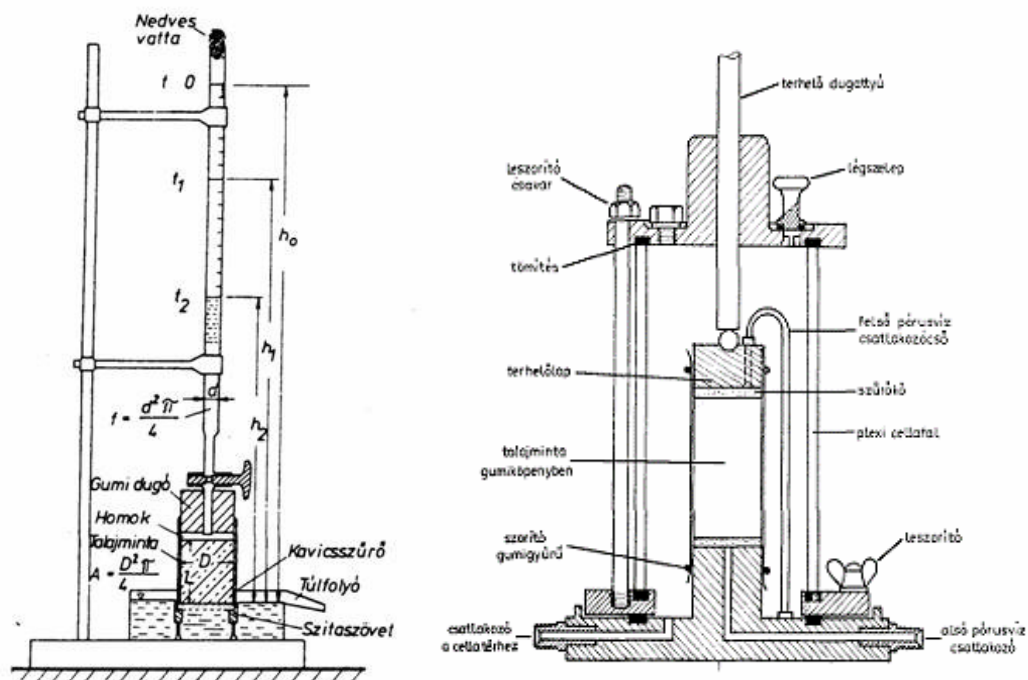
2-18. ábra: Az áteresztőképességi együtttható számértékei (cm/s) és meghatározási módja (Kézdi, Casagrande)

Az áteresztőképesség mérése történhet közvetlen méréssel és kombinált módszerrel. A közvetlen mérések lehetnek laboratóriumi vagy helyszínen végzett mérések, ezeken belül megkülönböztetünk állandó és változó víznyomású méréseket.

A kombinált módszer esetén az áteresztőképesség értékeket – a szívás függvényében – a víztartási görbe vagy a szemeloszlási görbe alapján számoljuk, csupán egyetlen egy áteresztőképességi együtthatóra van szükség, mely lehet a telített állapotú is.

A telítetlen talajok áteresztő-képességi együtthatója tranziens vagy permanens áramlási kísérletekből határozható meg. A mérések során nehézséget jelent, hogy szabályozni kell az időegység alatt átszivárgó vízmennyiséget, a víztartalmat és a szívást is. A telítetlen talajok közvetlen mérése ezért nehézkes, költséges és időigényes, így a vizsgálatukat célszerűbb kombinált módszerrel meghatározni. Az elméleti görbék illesztéséhez szükséges egy víztartalom illetve szívás értékhez tartozó áteresztőképesség értéke, mely a korábban említettek alapján lehet a telített érték is.

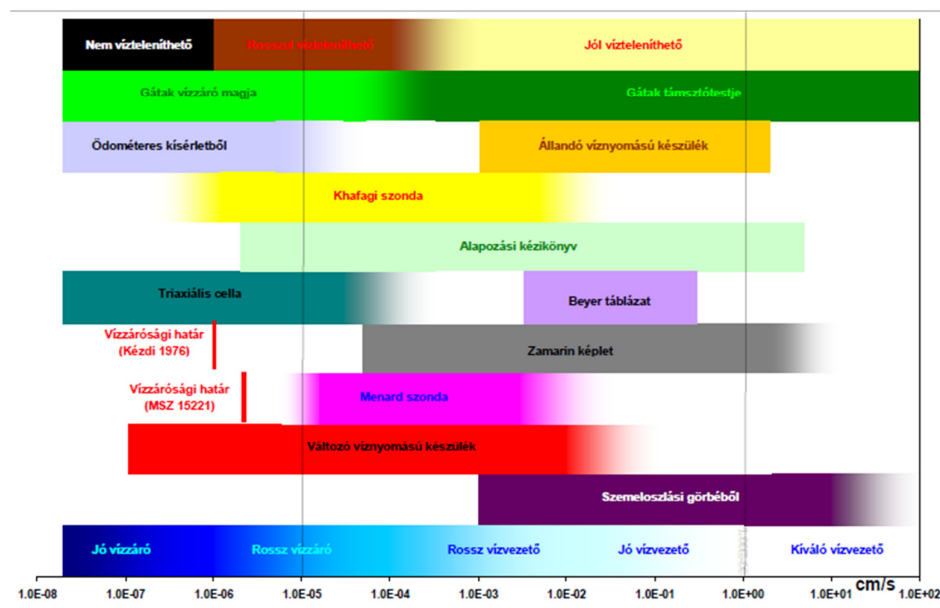
A telített talajok laboratóriumi vizsgálata változó és állandó víznyomás mellett is végezhető. **Változó víznyomású készülék** általában kis áteresztőképességű talajok esetén alkalmazunk. A vizsgálat során az in situ feszültségállapot csak **triaxiális cellában** vagy ödométerben modellezhető. A nagyméretű minták vizsgálatára az átalakított triaxiális cella a legjobb megoldás. További előnye, hogy Darcy törvénye alkalmazható a vizsgálatra. Az előbbieket mellett még állandó víznyomású készülék is használható a vizsgálat elvégzésére. A **2-19. ábrán** a változó víznyomású készülék és triaxiális cella vázlatrajza látható. (Fredlund, Rahardjo, 1993; Imre, 2009)



2-19. ábra: A változó víznyomású készülék (Dr. Nagy László) és a triaxiális cella (Faur Krisztina Beáta, Szabó Imre, 2011)

Az áteresztőképesség helyszíni mérésére is számos megoldást fejlesztettek ki. Ilyen helyszíni vizsgálatok a szondás mérések (Khafagi-szonda, Menard-szonda, CPTu-szonda), a szivattyúzás és a víznyeletés, a nyomjelzős módszerek és a Lugeon vizsgálat.

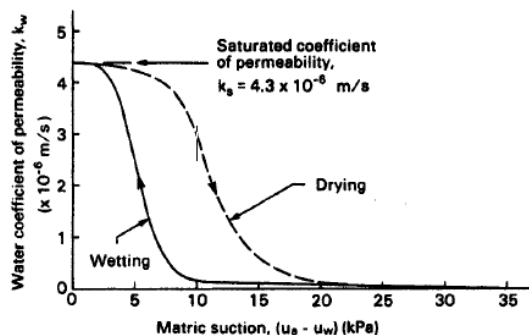
A talajokon végzett mérési eredmények és a szakirodalom alapján a mérések és a számítások érvényességi tartományait a 2-20. ábra mutatja, a vízvezető és víztelenítési tulajdonsággal egyetemben.



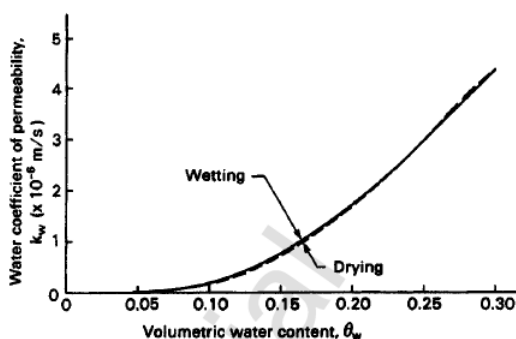
2-20. ábra: A talajok vízvezető tulajdonságai és az átteresztőképességi együtttható meghatározásának tartományai (Dr. Nagy László)

2.1.8. A víztartási görbe és az átteresztőképesség kapcsolata

Darcy törvénye a telítetlen talajok esetén nem lineáris, tehát a vízáteresztési (k_w) és az átbecsátási együtttható (k_a) értéke nem állandó. Az áramlás csak folytonos közeg esetén jöhet létre, így a levegő- és vízfázis változása befolyásolja az átteresztőképesség és az átbecsátó képesség értékét. A víztartási görbén jelentkező hiszterézis így csak a vízáteresztés és szívás diagramon keletkezik (2-21. ábra), a vízáteresztés és víztartalom függvényen nem (2-22. ábra). (Fredlund, Rahardjo, 1993; Imre, 2009)



2-21. ábra: Az átteresztőképesség és szívás kapcsolata
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)



2-22. ábra: Az átteresztőképesség és víztartalom kapcsolata
(D. G. Fredlund, H. Rahardjo, 1993)

2.2. Betonok vízzárósága

2.2.1. Betonok porozitása

A beton vízzáróságát sajátos módon kell értelmezni, hiszen porózus építőanyagról beszélünk (2-23. ábra). A tökéletesen tömörített beton sem folytonosan tölti ki a teret, hanem a szemcsék közt és a cementkő belsejében is pórusok találhatóak. Ezek a pórusok kapcsolatban állhatnak egymással, ekkor kapilláris rendszerről, hanem állnak kapcsolatban, akkor zárt pórusokról beszélünk. Teljesen vízzáró beton nem létezik, „porszárazság” csak szigeteléssel érhető el. Egy átlagosan tömörített beton pórustérfogata kb. 15 %.



2-23. ábra: Porózus betonfelület

A víz mozgása egyrészt a betonban kialakuló repedéseken, másrészt a beton kapilláris rendszerén keresztül történik. Mértéke és hatása nagymértékben függ a pórusstruktúrától, a repedezettségtől és a betonfelület jellemzőitől. A víz és cement között kémiai kötés alakul ki, ezért a cement kémiai összetételének is nagy a jelentősége a pórusok kialakulásában, de nem hanyagolhatóak el az adalékanyag tulajdonságai sem. A pórusok méretük szerint három csoportba sorolhatóak:

- makropórusok,
- mezopórusok,
- mikropórusok.

A tizedmilliméternél nagyobb méretű üregeket és járatokat **makropórusoknak** nevezzük. A beton helyi tömörítetlenségének következtében alakulnak ki, számuk figyelmes vibrálással minimálisra csökkenthető. A makropórusokon keresztül gravitációs úton képes mozogni a víz, a közlekedő edények mintájára és törvényei szerint.

A néhány mikrométer tágasságú üregeket, járatokat **mezopórusoknak** nevezzük. Létrejöttük oka nem tömörítetlenség, így vibrálással nem szüntethetőek meg. A beton szemszerkezetének ideálistól való eltérése hozza létre a mezopórusokat. A szemeloszlási görbén minél nagyobb ugrások jelennek meg, annál nagyobb a mezopórusok száma a betonban. Az ilyen járatokban víz mozgása a felületi feszültség hatására jön létre.

A **mikropórusok** vagy **gélpórusok** általában tized-, illetve századmikrométer méretű üregek. A cementpép szilárdulási folyamata során keletkeznek. Méretüket és mennyiségüket a víz és cement mennyiségének aránya és a felhasznált cement tulajdonságai határozzák meg. A mikrométer nagyságrend alatti pórusok felületi energiája megköti a vizet, amely így csak diffúzióval képes mozogni. A diffúzió kis anyagi részecskék helytől változó koncentrációja hatására létrejövő áramlás. A részecskék mozgása mindig a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb koncentrációjú hely felé történik. (Orosz, 2012; Nehme, 2004)

2-2. táblázat: Pórusok csoportosítása méretük szerint

Póruscsoport	Átmérő (µm)	Vízmozgás
Mikropórusok	< 0,2	diffúzió
Mezopórusok	0,2 - 10	kapilláris mozgás
Makropórusok	50 - 1000	kapilláris - gravitációs mozgás
Repedések	1000 <	gravitációs mozgás

2.2.2. Betonok vízzáróság vizsgálata az MSZ EN 12390-8:2009 szabvány szerint

Az **MSZ 4798-1:2004** szabvány érvénybe lépésével a beton vízzáróságának régi, MSZ 4719:1982 szerinti fogalmát és MSZ 4715-3:1972 szerinti vizsgálati módszerét felváltotta a vízzáróság új, MSZ 4798-1:2004 szabvány szerinti értelmezése, és az **MSZ EN 12390-8:2009** szerinti vízzáróság vizsgálati módszer. (Kausay)

A beton vízzáróságot az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerint, legalább kizsaluzástól végig víz alatt tartott próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar ($0,5 \pm 0,05 \text{ N/mm}^2$) állandó víznyomáson kell vizsgálni. A próbatest víznyomásra merőleges, tehát vizsgált oldalának hossza vagy átmérője legalább 150 mm, magassága legalább 100 mm legyen, következtetésképpen a vizsgálatot a Magyarországon szokásos $200 \times 200 \times 120 \text{ mm}$ méretű próbatesten is el szabad végezni, de ugyanígy alkalmas a 150 mm élhosszúságú szabványos próbakocka is (2-24. ábra). Ilyen esetekben a körfelület méretének megválasztására ügyelni kell.

Ha a próbatest mérete $200 \times 200 \times 120 \text{ mm}$, akkor 100 mm átmérőjű körfelületen is szabad az 5 bar víznyomást alkalmazni, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a próbatest méretét és a vízzel nyomott körfelület átmérőjét is meg kell adni. A próbatest víznyomásnak kitett felületét közvetlenül a kizsaluzás utána drótkéfével fel kell érdesíteni, hogy a felület rejtett hibái előkerüljenek.



2-24. ábra: A vízzáróság vizsgálat MSZ-EN 12390-8:2009 szerinti elrendezése

Az MSZ 4798-1:2004 szerint Magyarországon szabad a vízzáróság vizsgálat próbatesteit vegyesen, azaz a kizsaluzástól 7 napos korig víz alatt, utána laborlevegőn tárolni – ha ebben előzetesen írásban megállapodás születik –, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a tárolás módját (vegyesen tárolva) is meg kell adni. A végig víz alatt tárolt próbatesteken – a vegyesen tároltakéhoz képest – a jobb hidratáció és a kisebb zsugorodás folytán kisebb vízbehatolási mélység várható. Ha a beton homogén cementnél lassabban szilárduló heterogén cementtel készül (CEM II), akkor a végig víz alatt tárolt próbatestek vizsgálati eredményeit ajánlott mértékadónak tekinteni.

A vizsgálóberendezésbe a próbatesteket a víznyomásnak kitett felülettel lefelé érdemes elhelyezni, mert így jól látható, ha a felső felületen megjelenik a víz. A vizsgálat végén a berendezésből kivett próbatesteket le kell itatni, és függőlegesen ketté kell hasítani a víznyomásnak kitett felületre fektetve. A legnagyobb vízbehatolás mélységet *mm* pontossággal kell meghatározni, a vízbehatolás rajzolatát pedig fel kell jegyezni (2-25. ábra).



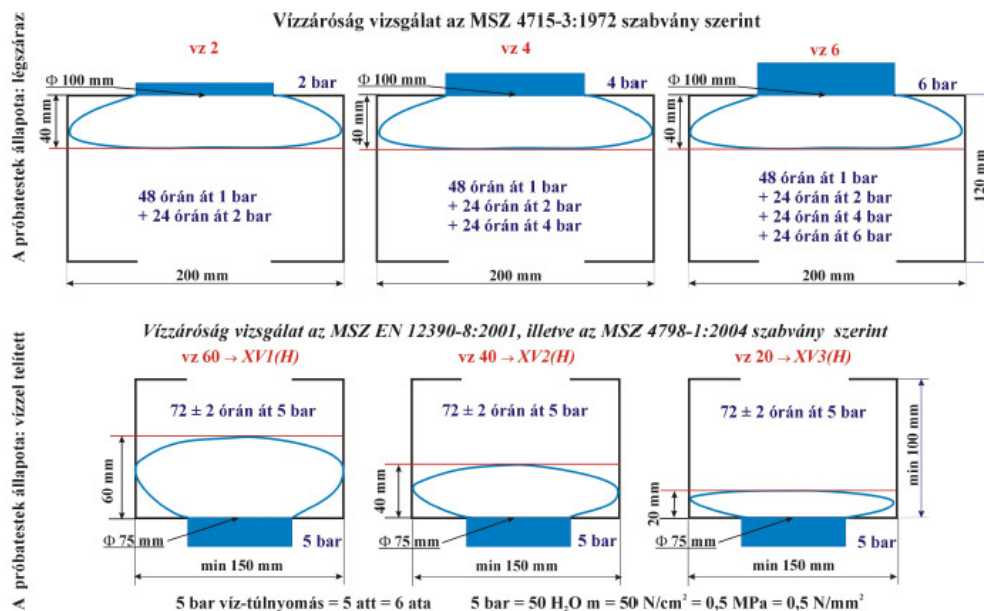
2-25. ábra: A vízbehatolás rajza

A vízzáróság vizsgálatához 100 m^3 beton-térfogatonként legalább 1 db, de tételenként 3 db próbatestet kell készíteni.

A beton vízzárósága a tárolási módtól függetlenül akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden egyes próbatesten a vízbehatolás mélysége:

- **XV1(H)** környezeti osztály esetén legfeljebb **60 mm** (vz 60)
- **XV2(H)** környezeti osztály esetén legfeljebb **40 mm** (vz 40)
- **XV3(H)** környezeti osztály esetén legfeljebb **20 mm** (vz 20)

A vízzáróság fogalmának és vizsgálatának régi és új értelmezését szemlélteti a 2-26. ábra. (Kausay, Balázs, 2010)



2-26. ábra: A vízzáróság vizsgálat régi és új értelmezése (Kausay)

2-3. táblázat: A környezeti osztályokhoz tartozó betonszerkezeti követelmények (Kausay)

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomószilárdsági osztálya legalább	Beton cementtartalma legalább kg/m ³	Beton víz-cement tényezője legfeljebb
Vízzáró beton és vasbeton szerkezetek				
Vízzáró beton	XV1(H)	C25/30	300	0,60
Fokozottan vízzáró beton	XV2(H)	C30/37	300	0,55
Igen vízzáró beton	XV3(H)	C30/37	300	0,50

2-4. táblázat: Környezeti osztályok víznyomás-igénybevételek hatására (Kausay)

A környezeti osztály jele	A környezeti hatás leírása	Tájékoztató példák a környezeti osztályok előfordulására
8. Igénybevétel víznyomás hatására		
Amikor a beton ki van téve víznyomás hatásának, akkor az igénybevételt a következők szerint kell osztályozni.		
XV1(H)	Kis üzemi víznyomásnak kitett, legalább 300 mm vastag beton, amelynek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,4 l/m ² víz szivárog át.	Pincefal, csatorna, legfeljebb 1 m magas víztároló medence, áteresztő csapadék csatorna, záportároló, esővíz gyűjtőakna.
XV2(H)	Kis üzemi víznyomásnak kitett, legfeljebb 300 mm vastag beton, vagy nagy üzemi víznyomásnak kitett, legalább 300 mm vastag beton, amelynek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,2 l/m ² víz szivárog át.	Vízépítési szerkezetek, gátak, partfalak, > 1 m magas víztároló medence, föld alatti garázsok, aluljárók külső határoló szerkezetei külön szigetelőréteg nélkül.
XV3(H)	Nagy üzemi víznyomásnak kitett, legfeljebb 300 mm vastag beton, amelynek felületén 24 óra alatt legfeljebb 0,1 l/m ² víz szivárog át.	Vasbeton mélygarázsok, alagutak külső határoló szerkezetei külön szigetelőréteg nélkül.

Gyakorlati szempontból a szerkezet vízzárósága a 24 óra alatt 1 m² betonfelületen átszivárgó víz mennyiségével is jellemezhető¹:

- mérsékelten vízzáró: **0,4 l/m²/24óra**
- vízzáró: **0,2 l/m²/24óra**
- különlegesen vízzáró: **0,1 l/m²/24óra**

Az első esetben koncentrált folyás nem engedhető meg, felületi lecsapódás kialakulhat. Vízzáró beton esetén a felületen víz nem jelenhet meg, elszíneződés és mészkivirágzás még megengedhető. Különlegesen vízzáró beton felületén a víz nyom nélkül eltűnik, szellőzés mellett tartós elszíneződés nem jelenhet meg.

A módszer hátránya, hogy csak akkor alkalmazható, ha jól meghatározható a vízzel érintkező felület és az átszivárgott vízmennyisége. (Orosz, 2012)

¹ ME-19-63:1964 műszaki előírás alapján

3. KÍSÉRLETI TERV

3.1. A kísérleti vizsgálatok célja

A betonok porozitásának ténye, a talajokhoz hasonló szerkezete jogosan veti fel a kérdést, hogy lehet-e a betonban történő vízmozgásokat geotechnikai laboratóriumi módszerekkel vizsgálni, modellezni, ha lehet, milyen pontossággal, igazak-e a betonra a talajoknál alkalmazott elméletek. A kísérletek célja az előbbieken említett kérdések megválaszolása, továbbá a szabványos vízzáróság vizsgálat összehasonlítása a laboratóriumi mérések eredményeivel.

A vizsgálat a telített beton vízáteresztési-együttthatójának és a száradási víztartási görbéjének meghatározására irányult. A laboratóriumi kísérleteket a *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszék* laboratóriumában és a *Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézetében* végeztem. A próbatesteket és a vizsgálati mintákat az *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék* laboratóriumában készítettem el.

A keverések hat betonreceptúra alapján történtek a köztük lévő különbséget a cementfajta és a cement adagolása jelentette. A próbakockák és a vizsgálati minták szilárdulása után, 28 napos korban kerültek elvégzésre a vízzáróság vizsgálatok és a laboratóriumi mérések. A szabvány szerinti betonkísérleteket az *Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék* laboratóriumában végeztem el.

3.1.1. A betonra vonatkozó kísérleti paraméterek

A beton összetételére vonatkozó kísérleti állandók:

- az adalékanyagok **szemeloszlási görbéje**
- **víztartalom:** $v = 177 \text{ liter/m}^3$

A **3-1. táblázat** alapján a kísérleti változók a beton összetételére vonatkozóan az egyes keverések esetén:

- a cement adagolása: **300 kg/m^3 ; 360 kg/m^3 ; 420 kg/m^3**
- a cement fajtája: **CEM II A-S 42,5 N; CEM I 42,5 N-S**

3-1. táblázat: Betonösszetételre vonatkozó kísérleti változók

Betonösszetétel	Cement mennyisége, kg/m ³	Cement fajtája	Víz-cement tényező ²
1. betonreceptúra (B jelű)	300	CEM II A-S 42,5 N	0,59
2. betonreceptúra (Ö jelű)	360	CEM II A-S 42,5 N	0,49
3. betonreceptúra (H jelű)	420	CEM II A-S 42,5 N	0,42
4. betonreceptúra (J jelű)	300	CEM I 42,5 N-S	0,59
5. betonreceptúra (K jelű)	360	CEM I 42,5 N-S	0,49
6. betonreceptúra (L jelű)	420	CEM I 42,5 N-S	0,42

A tárolás módjára vonatkozó paraméterek:

- **vegyesen tárolt** próbatestek (7 napig vízben, majd levegőn tárolva)

3.1.2. A laboratóriumi mérésekre vonatkozó kísérleti paraméterek

Mindegyik laboratóriumi vizsgálat esetén **telített betonmintából** indulunk ki.

A **vízáteresztési tényező** vizsgálata közben **szabályozásra** kerül:

- a víznyomás állandó értéken: **100 kPa; 200 kPa; 300 kPa**
- a víznyomás változó értéken: **5-10 kPa**

A **vízáteresztési tényező** vizsgálata során **mérésre** kerül:

- az átszivárgott vízmennyiség

A **száradási víztartási görbe** meghatározása közben **szabályozásra** kerül:

- a szívás nagysága: **pF 0; pF 0,4; pF 1; pF 1,5; pF 2,0; pF 3,4³**

A **száradási víztartási görbe** meghatározása során **mérésre** kerül:

- a víztartalom (a minták tömegének mérésével)

² A beton keverése során felhasznált víz és cement mennyiségének aránya.

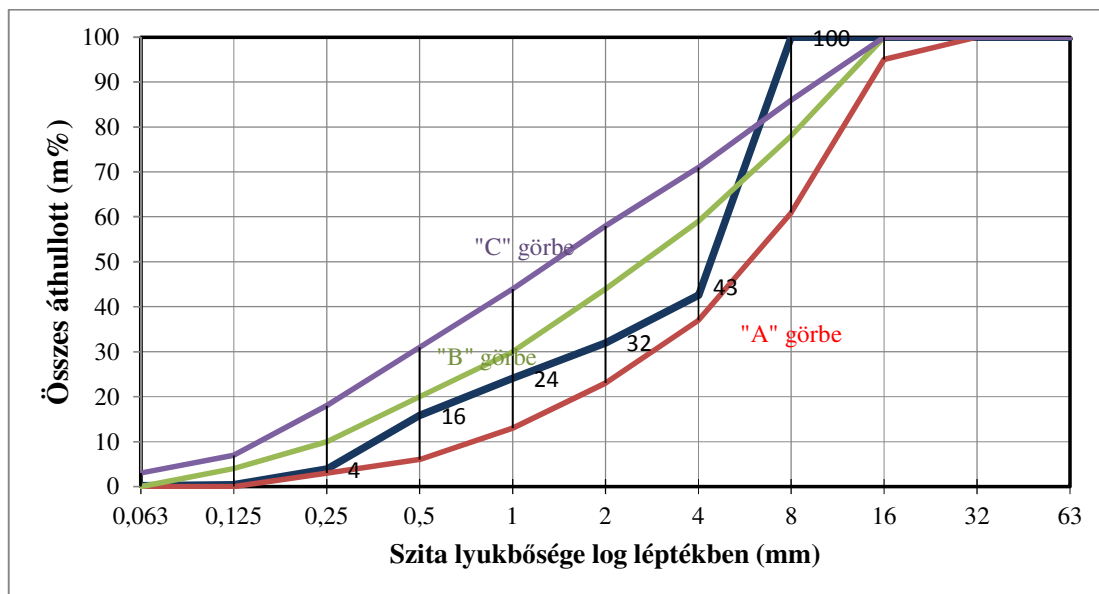
³ A víztartási görbe vizsgálata során használt pF jelölések a szívás értékeknek centiméteres vízoszlop magasságban kifejezett 10-es alapú logaritmusának hatványát jelölik. (pl.: pF0 – 10⁰ cm vízoszlop magasságnak megfelelő szívásérték)

3.2. Alkalmazott betonösszetételek

Adalékanyagként mosott, osztályozott és szárított homokot és kavicsot alkalmaztam. Az adalékanyagot két frakcióból megfelelő arányban kevertem. A finomabb frakció szemcseátmérője, a 0,063-4 mm közötti az adalékanyag 45%-át, a durvább frakció, a 4-8 mm közötti pedig az adalékanyag 55%-át képezi. Az adalékanyag szemeloszlási görbéjét szitavizsgálattal határoztam meg (3-2. táblázat; 3-1. ábra). A finomrész tartalom ($d \leq 0,125$ mm) 3 m%-ra adódott. Általában az adalékanyag frakciói között szerepel még 8-16 mm-es frakció is, azonban a laboratóriumi vizsgálatok által igényelt minták kis mérete miatt ennek alkalmazása az eredmények realitását veszélyeztetné. A kísérletsorozat során alkalmazott részletes betonösszetételeket az „A” melléklet táblázatai tartalmazzák.

3-2. táblázat: A szitavizsgálat eredménye

Φ [mm]	Fennmaradt tömeg [g]	Fennmaradt tömegszázalék [m%]	Összes fennmaradt tömegszázalék [m%]	Összes áthullott tömegszázalék [m%]	Határgörbék		
					A	B	C
63	0	0	0	100	100	100	100
32	0	0	0	100	100	100	100
16	0	0	0	100	95	100	100
8	364,32	9	0	100	61	78	86
4	1929,45	48	57	43	37	59	71
2	420,87	11	68	32	23	44	58
1	315,73	8	76	24	13	30	44
0,5	329,12	8	84	16	6	20	31
0,25	476,24	12	96	4	3	10	18
0,125	138,85	3	100	0	0	4	7
0,063	8,90	0	100	0	0	0	3
tálca	8,24	0	100	0	0	0	0
Σ	3991,73	100	-	-	-	-	-



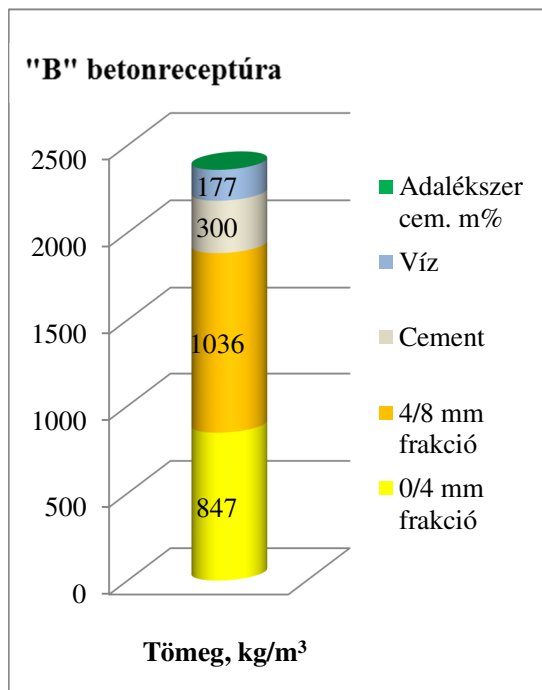
3-1. ábra: Az adalékanyag szemeloszlási görbéje

Kötőanyagként két fajta cementtípust alkalmaztam. Az első három keverés esetén **CEM II A-S 42,5 N** típusú cement került használatra, mely összetett heterogén portlandcement. Ez a kohósalak portlandcement 80-94 %-ban klinkerásványt, 6-20 %-ban kohósalakot tartalmaz. A kohósalak tartalmú cementek kedvező tulajdonsága a nagy utószilárdulás, a mérsékelt hőfejlesztés, kis repedésérzékenység és kiváló szulfát- és korrózióállóság. A kiegészítőanyag ezeken kívül javítja a beton bedolgozhatóságát. A „J”, „K”, „L” jelű keverésnél **CEM I 42,5 N-S** szolgált kötőanyagként, mely kedvező kezdő- és végszilárdságú, kis hőfejlesztésű szulfátálló cement. Ez a homogén portlandcement 95-100 %-ban klinkerásványt tartalmaz. (Zsigovics et al., 2008; Holcim Hungaria Zrt.)

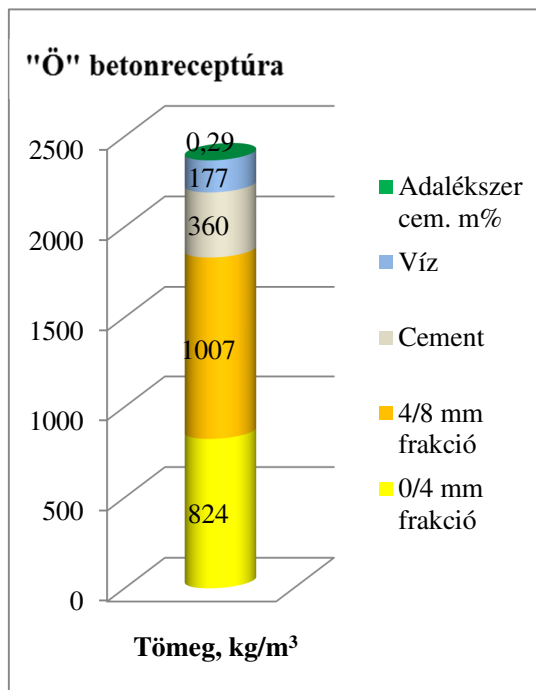
A megfelelő konzisztencia elérése érdekében **Mapei Dynamon SR3** nagyteljesítményű adalékszert alkalmaztam. A Mapei terméke módosított akrilát alapú szuperfolyósító adalékszer alacsony víz-cement tényezővel készített, igen magas szilárdságú és képlékenységet sokáig megőrző transzportbetonhoz. A Dynamon SR3 egyfajta vizes oldat, mely 30 %-ban tartalmaz (formaldehid-mentes) akril polimereket a cementrészecskék hatékony diszpergálásának és a cement hidratációs termékeinek lassú kialakulása érdekében. A termék kisebb higrometrikus zsugorodással, kisebb viszkózus deformációval és alacsonyabb hidratációs hőképződéssel fejt ki jótékony hatását. (Mapei Hungaria Kft.)

A különböző tervezett betonreceptúrák összetételét a **3-2. ábra**, a **3-3. ábra**, a **3-4. ábra**, a **3-5. ábra**, a **3-6. ábra** és a **3-7. ábra** szemlélteti. A már korábban említettek szerint a keverések hat betonreceptúra alapján készültek, melyek között a különbséget a cement adagolása és a cementfajtája jelentette. Az első három keverésnél **CEM II A-S 42,5 N**, a második háromnál pedig **CEM I 42,5 N-S** használtam. A „B” és „J” jelű keveréseknél **300 kg/m³**, a „Ö” és „K” jelű keveréseknél **360 kg/m³**, a „H” és „L” jelű keveréseknél **420 kg/m³** cementet használtam fel.

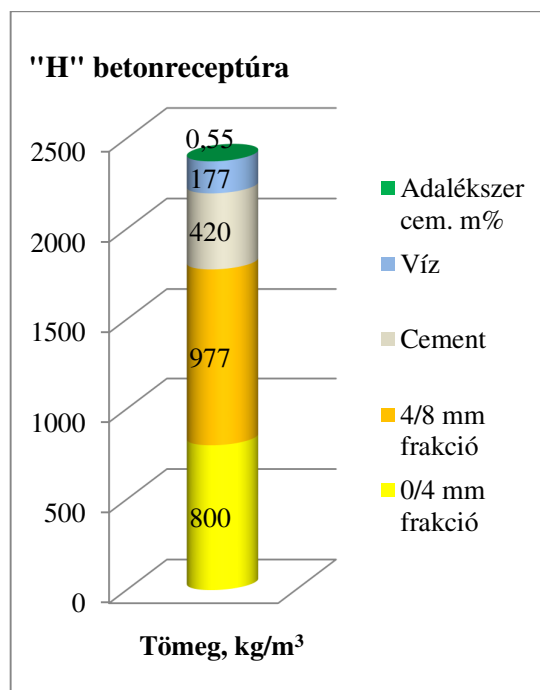
CEM II A-S 42,5 N felhasználásával készült betonreceptúrák



3-2. ábra: „B” jelű betonreceptúra

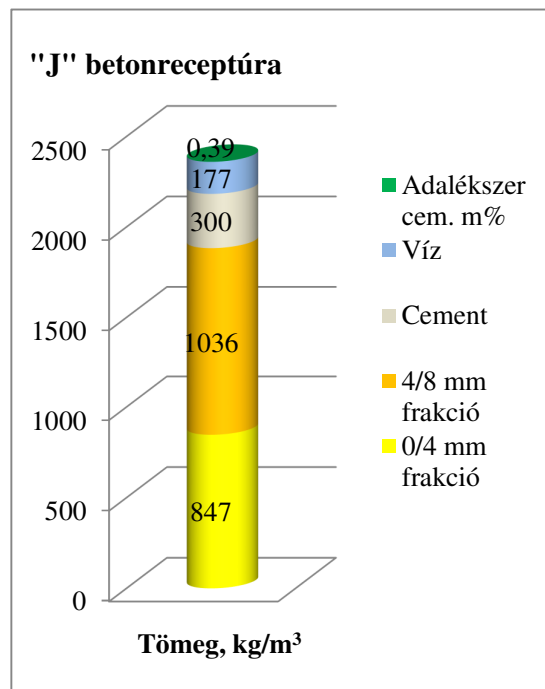


3-3. ábra: „Ö” jelű betonreceptúra

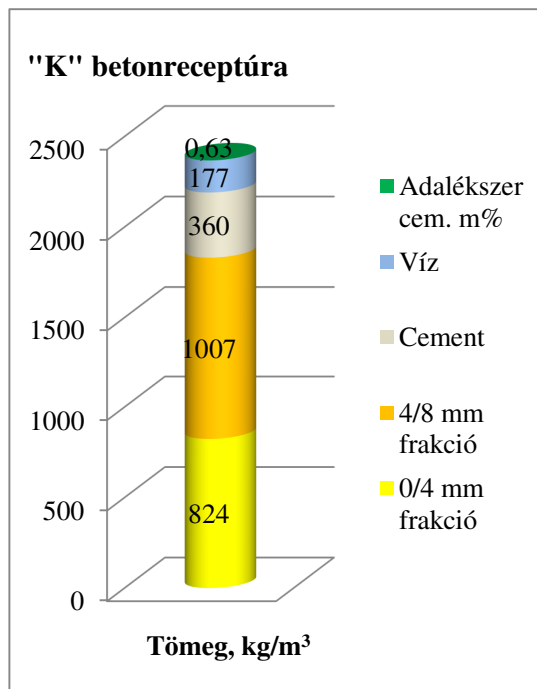


3-4. ábra: „H” jelű betonreceptúra

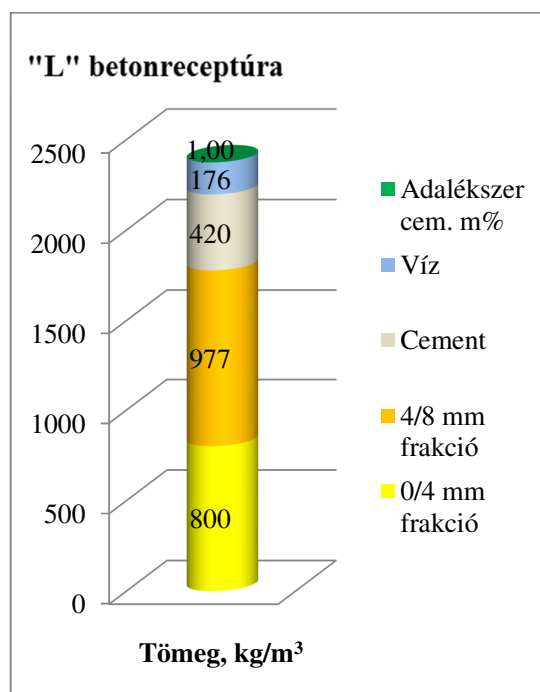
CEM I 42,5 N-S felhasználásával készült betonreceptúrák



3-5. ábra: „J” jelű betonreceptúra



3-6. ábra: „K” jelű betonreceptúra

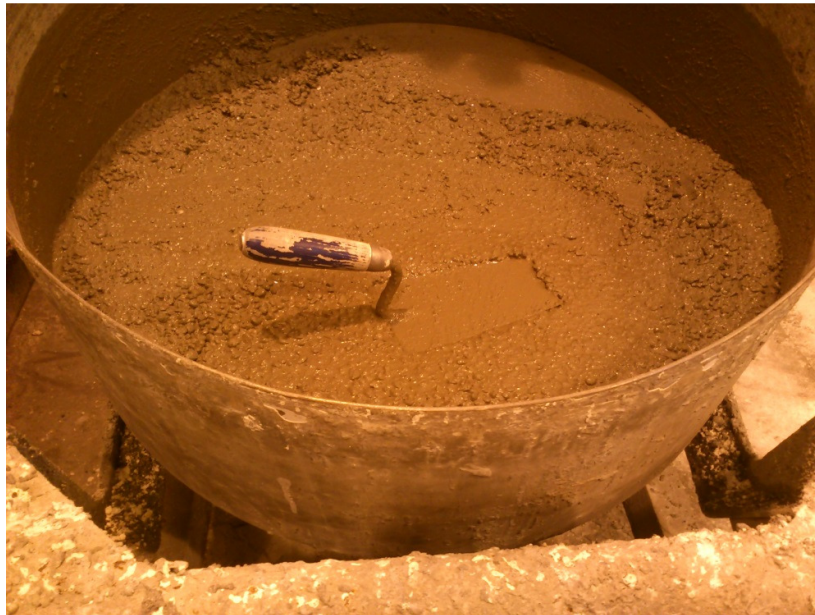


3-7. ábra: „L” jelű betonreceptúra

3.3. Próbatestek és vizsgálati minták

Mind a hat különböző betonösszetételből egyenként 3 db $150 \times 150 \times 150$ mm méretű **próbakockát** készítettem a szabványos vízzáróság vizsgálatokhoz, és 8 db 20 mm magas, 38 mm átmérőjű **hengert** a laboratóriumi mérésekhez.

A keveréseket pontosan betartott ütemterv szerint kellett végrehajtanom (**3-8. ábra**). A keverékek elkészítésére csak 2-4 nap eltolással volt lehetőségem. Ennek oka, hogy az MSZ EN 12390-3:2009 szerint a beton készítésétől számított 28. nap éri el a vizsgálati kort, így az általam készített mintákat is 28 napos korban vagy annak közelében kellett vizsgálat alávetni, azonban a laboratóriumi kísérletek időigénye és a mérőberendezések kapacitásbeli végessége több napos vizsgálatot igényelt.



3-8. ábra: Beton keverése

A próbakockákat acélzsaluzatba dolgoztam be, a tömörítést merülő vibrátorral, több rétegben oldottam meg (**3-9. ábra**). A hengermintákat 38 mm belsőátmérőjű, 20 mm magas rézgyűrűbe öntve készítettem (**3-10. ábra**). A légtelenítés a minták kis mérete miatt nehézségeket jelentett, nem lehetett merülő vibrátort alkalmazni, így ezeket a mintákat vibroasztal segítségével tömörítettem. A minták kis mérete miatt a kellőmértékű tömörítés nem biztos, hogy minden esetben tökéletesen megvalósult. A hengerminták a bedolgozást követően végig a zsaluzatként szolgáló rézgyűrűben maradtak, mivel a rézgyűrű biztosítja a laboratóriumi vizsgálatoknál szükséges oldalirányú vízszivárgás megakadályozását.

A vízzáróság vizsgálatra készült próbakockákat a szabvány által megengedett vegyes tárolással, azaz 7 napig víz alatt utána laborhőmérsékleten tároltam (**3-11. ábra**). A hengereket 28 napos korig végig víz alatt tároltam, hogy a minták telítettek legyenek, és a zsugorodás mértékét a lehető legkisebbre korlátozzam (**3-12. ábra**).



3-9. ábra: Beton tömörítése



3-10. ábra: Vizsgálati minták készítése



3-11. ábra: Próbatetek tárolása laborhőmérsékleten



3-12. ábra: Próbatetek és vizsgálati minták tárolása víz alatt

3.4. Kísérleti vizsgálatok

3.4.1. Vízjáróság vizsgálat

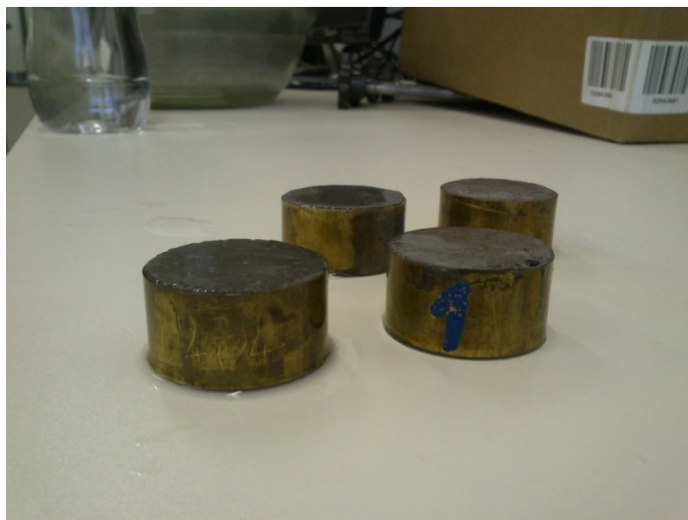
A vízjáróság vizsgálatokat (3-13. ábra) az MSZ EN 4798-1:2004 szabvány alapján megengedett vegyesen tárolt, $150 \times 150 \times 150$ mm méretű próbatesteken végeztem. A MSZ EN 12390-8:2009 előírás szerint 5 bar víznyomásnak 72 ± 2 órán kitett próbatest legnagyobb vízbehatolási mélységét kell vizsgálni, és ez alapján osztályba sorolni. A nyomásnak kitett betonfelületet vizsgálat előtt érdesítettem, és a folyamat során figyelemmel kísértem, hogy a próbatest felületén átnedvesedés ne alakuljon ki.



3-13. ábra: Vízjáróság vizsgálat az MSZ EN 12390-8:2009 szerint

3.4.2. Geotechnikai laboratóriumi vizsgálatok

A laboratóriumi vizsgálatok célja a betonminták vízáteresztési tényezőinek és víztartási görbéinek meghatározása. Mindegyik vizsgálat telített mintát igényel (3-14. ábra). A vízáteresztés vizsgálat esetén 24 db víz alatt szilárdult mintát vizsgáltam, melyek – később kiderült – nem voltak teljesen telített állapotban, ami a kapott értékekre hatással lehet. A jövőbeni vizsgálatok során a minták telítése nagyobb odafigyelést igényel. A víztartási görbe vizsgálatnál alkalmazott 24 db minta telítése kapilláris vízfelszívás útján történt.

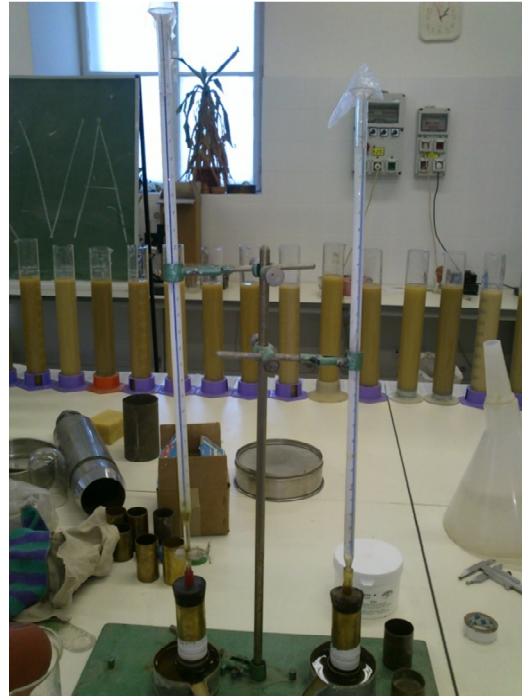


3-14. ábra: A laboratóriumi méréseknél alkalmazott vizsgálati minták

Az **áteresztőképesség mérése** átalakított triaxiális cellában és változó víznyomású készülékben történt. Mindegyik mintát először **100 kPa**, majd **300 kPa** nyomáson vizsgáltam. A „J” jelű betonreceptúra alapján kevert négy mintát változó víznyomású készüléken **5-10 kPa**, azaz alacsony nyomáson is vizsgáltam. A kapott eredmények függvényében szükséges pótméréseket **200 kPa** nyomáson folytattam le. A több nyomáson való mérés célja az eredmények ellenőrzése mellett *Darcy törvényének* igazolása, a *v-i diagramok* megalkotása és kezdeti szakaszuk vizsgálata.



3-15. ábra: Triaxiális vizsgálóberendezés



3-16. ábra: Változó víznyomású készülék

A minta triaxiális berendezésbe (3-15. ábra; 3-17. ábra; 3-18. ábra) való készítése a cella alsó elemének és a szűrőkőnek benedvesítésével kezdődik. A szűrőkőre kerül a vizsgálandó minta, mely az én esetemben a talajoknál megszokott magasságnál kisebb, **20 mm** névleges magasságú. Hogy a víz csak a mintán keresztül áramoljon, gumimembránt helyeztem a henger köré, és alul felül gumigyűrűkkel tömítettem el. Következő lépésben elhelyeztem a cella felső elemét, és feltöltöttem desztillált vízzel a minta körüli teret. A nyomást higanyoszlop-magassággal állítottam elő. A higany nagyobb sűrűségének köszönhetően kisebb magasságon is a kívánt értékre (**10 m**, **20 m**, **30 m** vízoszlopmagasság) tudtam állítani a nyomás nagyságát. Az átszivárgott víz mennyiségét piezométer cső segítségével olvastam le. Minden mintánál, minden nyomáson **öt-öt** leolvasást végeztem, **100 kPa** és **200 kPa** nyomáson **15** percenként, **300 kPa** nyomáson **10** percenként.

A változó víznyomású készülék összeszerelése nagyobb nehézségeket jelentett. A végső megoldás a 3-16. ábrán látható. A szűrőn álló mintára egy **7 cm** magas rézhengert helyeztem, majd szigetelőszalaggal szorosan, minél simább ragasztással összeillesztettem. A rézhengert desztillált vízzel feltöltöttem és gumidugóval csatlakoztattam a piezométer csövet, melyet először desztillált vízzel feltöltöttem, majd fóliával zártam le a vízpárolgás csökkentése céljából. Az alsó edényt a minta aljáig szintén desztillált vízzel kellett feltölteni. A készülék segítségével sikerült **50-100 cm** változó víznyomás magasságot létrehozni. Ennél a vizsgálatnál is mintánként **öt** leolvasást végeztem, melyek a kis nyomásérték miatt **24 óránként** történtek.



3-17. ábra: Átalakított triaxiális mérőberendezés



3-18. ábra: Vízáteresztő-képesség mérése triaxiális berendezéssel

A beton minták **száradási víztartási görbéjének** meghatározását gravitációs módszerrel és nyomás membrános készülékkel végeztem el. A gravitációs módszer segítségével a pF 0 és pF 2,0 közötti szívás tartományon, összesen öt szívás értéken (pF 0; pF 0,4; pF 1,0; pF 1,5; pF 2,0) vizsgáltam a minták víztartalmát. A nyomásmembrános készülékkel a tengely eltolási technikát alkalmazva nagyobb szívás értékeket is létre tudtam hozni. A készülékkel a pF 3,4 értékhez tartozó víztartalmat határoztam meg. A pF jelölés hétköznapi nyelvre lefordítva centiméteres vízoszlop magasságban jellemzett szívás értéket jelent (**3-3. táblázat**).

3-3. táblázat: A pF értékek értelmezése

Szívás jelölése	Vízoszlop magasság [cm]	Szívás értéke [kPa]
pF 0	1,0	0,10
pF 0,4	2,5	0,25
pF 1,0	10,0	1,00
pF 1,5	31,6	3,16
pF 2,0	100,0	10,00
pF 3,4	2511,9	251,19

A **gravitációs módszer** (**3-19. ábra**) lényege, hogy a vizsgálati térben a minták légköri nyomáson helyezkednek el, és az oldalt elhelyezkedő tartály függőleges lefele és felfele történő mozgatásával szabályozzuk a szívást. A mérőberendezés pontos felépítését és működését a **2.1.6. fejezet** részletesen tárgyalja.

Mielőtt a mintákat a mérőberendezésbe helyeznénk, elő kell készíteni őket. Az aljukra szitaszövetet kell rögzíteni, hogy a vizsgált anyagból szemcsék ne kerüljenek a berendezésbe. A minták tetejét műanyag kupakkal le kell zárni, hogy párolgás mértéke minimális legyen.

A gravitációs módszerrel *12 db* mintát vizsgáltam. A pontos kísérlet alapján minden szívás értéken *2-3 naponta* tömegmérést kell végezni, és a tömegállandóság elérésekor a víztartalmát tömegméréssel meghatározni. Az idő rövideje miatt *3-4 naponta* tömegállandóság vizsgálata nélkül állapítottam meg a víztartalmakat, azonban ez az „egyszerűsítés” a kapott eredményeket lényegesen nem befolyásolta.



3-19. ábra: Víztartási görbe meghatározása gravitációs módszerrel

A **nyomásmembrános készülék** (3-20. ábra) működésének lényege, hogy a vizsgálóterben elhelyezett minták körül a légkörinél nagyobb nyomást hozunk létre, így a mintákból „kivételjük” a vizet. Az alkalmazott módszert tengely eltolási technikának nevezik, és nagyobb szívás értékeknél használják. A 2.1.6. fejezet részletesen bemutatja a műszer működését.

A minták a nyomásmembrános rendszerrel nem igényelnek különösebb előkészítést, a vizsgáló berendezés annál inkább. A minták alatt fekvő speciális celofánt a vizsgálat előtt desztilláltvízben be kell áztatni, és két rétegben kell elhelyezni úgy, hogy a két réteg száliránya egymásra merőleges legyen. A mintákat a celofánra símított szitaszövetre kell állítani, és a vizsgáló berendezés tetejét légmentesen rögzíteni.

A vizsgálatot a nyomásmembrános berendezésnél is 12 db mintán végeztem el, és 3-4 nap elteltével mértem le a minták tömegét. A kísérletsorozatok befejeztével mind a 48 db vizsgált mintát szárítógépben kiszáritottam. A betonok szárítási hőmérséklete egységesen 60 ± 5 °C, mivel ennél nagyobb hőmérsékleten ettringit képződés indulhat be, ami duzzadással jár, és roncsolja a beton szerkezetét.



3-20. ábra: A nyomásmembrános készülék

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

4.1. A vízzáróság vizsgálat eredményei

A vízzáróság vizsgálatot a **2.2.2. fejezetben** részletesen ismertetett MSZ EN 12390-8:2009 szabvány szerint végeztem. A részletes jegyzőkönyvek a „**B**” **mellékletben** találhatóak. Betonreceptúránként 3 db próbakockán ellenőrizni kell a vízbehatolás legnagyobb értékét, és mindegyiknek a vízzáróság osztályhoz tartozó érték alatt kell lennie, hogy a vizsgált keverék az adott minősítést kapja. Emlékeztetőül a **4-1. táblázat** a vízzáróság osztályokhoz tartozó követelményeket tartalmazza.

4-1. táblázat: Vízzáróság osztályok az MSZ EN 12390-8:2009 szerint

Vízzáróság osztály	Behatolás maximális értéke, mm
XV1(H)	60
XV2(H)	40
XV3(H)	20

A vizsgált próbatestek esetén a behatolás rajzát is el kell készíteni vagy más módon rögzíteni, annak érdekében, hogy az esetleges helyi hibák okozta vízbehatolást figyelmen kívül lehessen hagyni, illetve ez alapján is következtetéseket tudjak levonni a vízzárósággal kapcsolatban. A szabványos vízzáróság vizsgálat eredményét a **4-2. táblázat** foglalja össze.

4-2 táblázat: Vízzáróság vizsgálat eredménye

Receptúra száma	Behatolás maximális értéke, mm	Vízzárósági osztály
1. betonreceptúra	56,0	XV1(H)
2. betonreceptúra	38,2	XV2(H)
3. betonreceptúra	30,1	XV2(H)
4. betonreceptúra	46,1	XV1(H)
5. betonreceptúra	32,8	XV2(H)
6. betonreceptúra	19,3	XV3(H)

4.2. A laboratóriumi vizsgálatok eredményei

4.2.1. Az áteresztőképesség vizsgálat eredményei

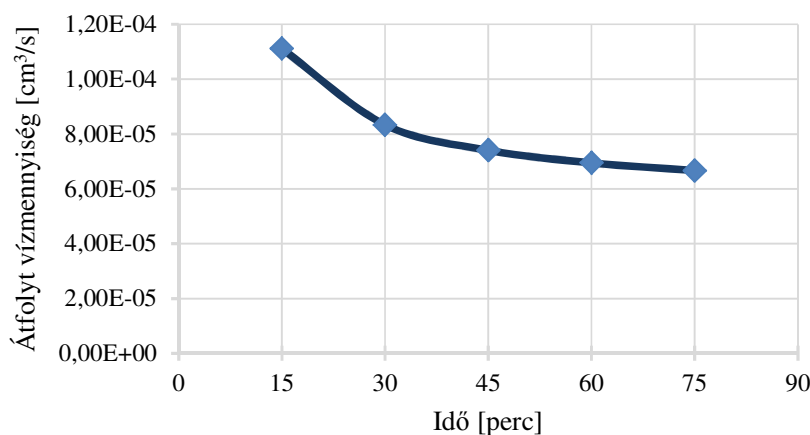
Az áteresztőképesség meghatározása az egyik legnehezebb feladat és a legpontosabban meghatározható talajjellemző a talajmechanikában. Az egész vizsgálat különlegességét fokozza, hogy a betonminták esetén nem létezik olyan korábbi vizsgálati eredmény, amivel összehasonlíthatóak lennének a kapott értékek. Mivel a beton felépítésében az agyaghoz áll a legközelebb, így az áteresztőképesség értékére 10^{-10} - 10^{-12} nagyságrendű eredményt vártam.

A kísérletsorozat folyamán Darcy törvényének érvényességét feltételeztem a betonminták esetén, így vizsgálat során állandó víznyomáson mért, átfolyt vízmennyiségekből az alábbi egyenlettel számítottam a k tényezőt:

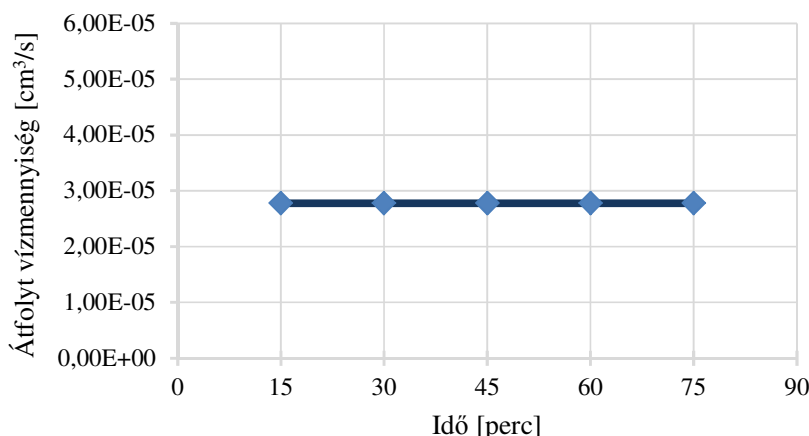
$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h \cdot t}$$

Ahol k , az átteresztőképességi együttható; Q , az átfolyt vízmennyiség; l , a szivárgási hossz (minta magassága); A , a minta keresztmetszeti területe; h , a nyomásmagasság értéke; t , a szivárgási idő.

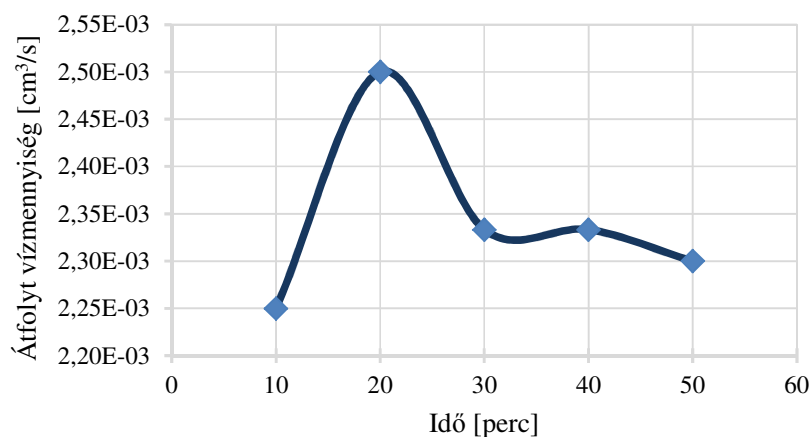
A mérés során feljegyzett vízmennyiségekből kiszámítottam a leolvasási időközök és a leolvasási időpontok átteresztőképességi tényezőjét. Az átfolyt víz mennyisége a legtöbb esetben az idő elteltével folyamatos csökkenést mutatott, és egy konstans értékre állt be (**4-1. ábra**). Előfordultak, olyan esetek, hogy végig konstans mennyiség áramlott át a betonmintán keresztül (**4-2. ábra**). Egyes minták esetén, azonban anomáliákat tapasztaltam a szivárgási folyamatban (**4-3. ábra**). Az átfolyt vízmennyiségek időbeni változását diagramokon ábrázoltam. Az ábrák segítségével szolgáltak a számítás során felhasznált vízmennyiségek definiálásában. Ha az első eset és a második eset állt fent, akkor az utolsó vízmennyiség értékkel, ha a harmadik eset, akkor az eredmények mérlegelése, elemzése után vagy a vízmennyiségek átlagával, vagy egy jellemző értékkel végeztem a kalkulációm.



4-1. ábra: Folyamatos vízmennyiség csökkenést mutató áramlás



4-2. ábra: Konstans vízmennyiségű áramlás



4-3. ábra: Szabálytalan vízmennyiség áramlás

Változó víznyomás esetén Darcy törvénye egy kicsit átalakul, hiszen figyelembe kell venni a nyomás csökkenését. Az alkalmazott képlet a következő:

$$k = \frac{A_0 \cdot l}{A} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Ahol k , az áteresztőképességi tényező; A_0 , a cső keresztmetszeti területe; l , a szivárgási hossz (minta magassága), A , a vizsgált minta keresztmetszeti területe; $t_2 - t_1$, a két leolvasás közti időkülönbség; h_1 , a t_1 időpontban leolvasott vízmagasság; h_2 , a t_2 időpontban leolvasott vízmagasság. Ebben az esetben is a korábbiakhoz hasonló elv alapján a számított tényezők utolsó értékét, a kapott értékek átlagát, vagy egy jellemző értéket vettem az adott vizsgálati minta áteresztőképességi együtthatójának.

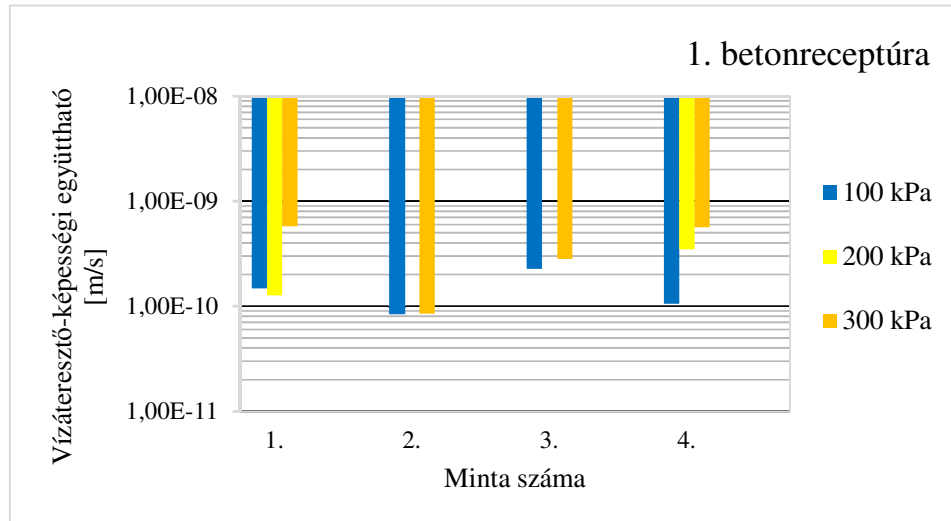
A 4-3. táblázatban a kapott áteresztőképesség értékek összefoglalása látható. A narancssárga szín hibás mérési eredményeket jelöl. A 2.4 és 3.1 jelű minta esetén a beton és a rézgyűrű közötti szivárgás vagy gyenge tömörítés feltételezhető, mivel a többi eredményhez képest nagy áteresztőképesség értékeket kaptam, így ezeket az értékelés során figyelmen kívül hagyom. A jónak értékelt eredmények keverésenkénti átlagolásával kaptam az utolsó oszlop áteresztőképességi együtthatóit.

4-3. táblázat: Az átteresztőképességi együttható értékei

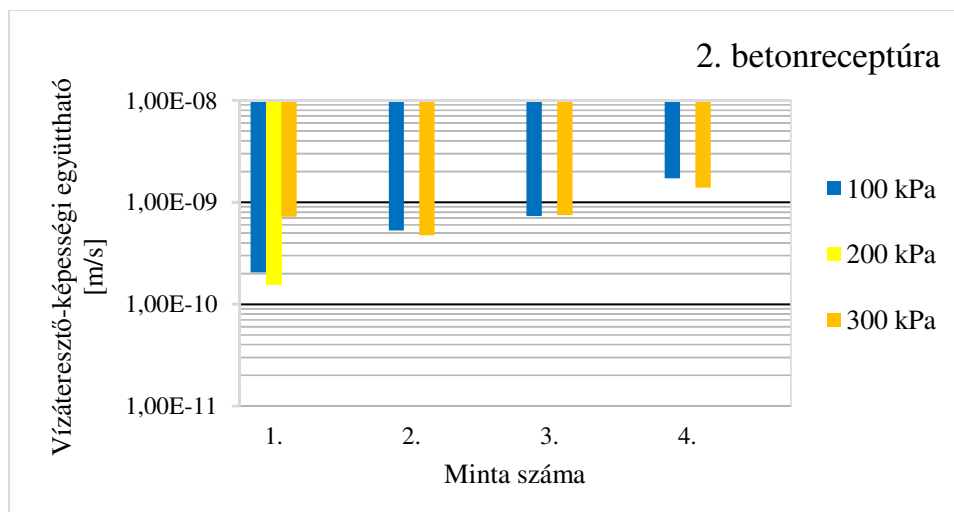
Minta száma	Vízátteresztő-képességi együttható [m/s]				Átlag
	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa	
1.1	-	1,48E-10	1,27E-10	5,77E-10	1,79E-10
1.2	-	8,48E-11	-	8,48E-11	
1.3	-	2,27E-10	-	2,82E-10	
1.4	-	1,27E-10	3,49E-10	7,91E-10	
2.1	-	2,05E-10	1,54E-10	7,18E-10	4,73E-10
2.2	-	5,26E-10	-	4,73E-10	
2.3	-	7,30E-10	-	7,51E-10	
3.2	-	1,03E-10	1,03E-10	8,24E-11	3,56E-10
3.3	-	8,32E-10	-	4,68E-10	
3.4	-	3,15E-10	-	3,15E-10	
4.1	1,26E-10	1,05E-09	2,11E-10	5,27E-10	1,96E-10
4.2	2,67E-10	1,41E-09	3,84E-10	5,33E-10	
4.3	4,64E-11	5,37E-11	-	5,37E-11	
4.4	4,36E-11	5,18E-11	-	5,18E-11	
5.1	-	4,66E-10	-	2,12E-10	3,47E-10
5.2	-	2,12E-10	1,06E-10	5,31E-11	
5.3	-	8,38E-10	-	5,24E-10	
5.4	-	2,09E-10	-	2,09E-10	
6.1	-	3,16E-10	1,05E-10	1,05E-10	1,33E-10
6.2	-	3,11E-10	-	1,45E-10	
6.3	-	1,05E-10	-	1,05E-10	
6.4.m	-	1,04E-10	-	8,31E-11	

A kísérletsorozat végeredményét keverésenként csoportosítva a **4-4. ábra** – **4-9. ábra** mutatja logaritmikus ábrázolásban. A grafikonok a pótmérések eredményeit is tartalmazza. A logaritmikus ábrázolás célja, hogy a nagyságrendi különbségek észrevehetőek, és a mintákhoz tartozó átteresztőképességi tényezők összehasonlíthatóak legyenek. Az ábrázolási mód sajátossága, hogy a nagyobb oszlop méret kisebb k értéket jelent. Darcy törvényét feltételezve az eltérő nyomáson mért tényezőknek azonosnak kell lenniük.

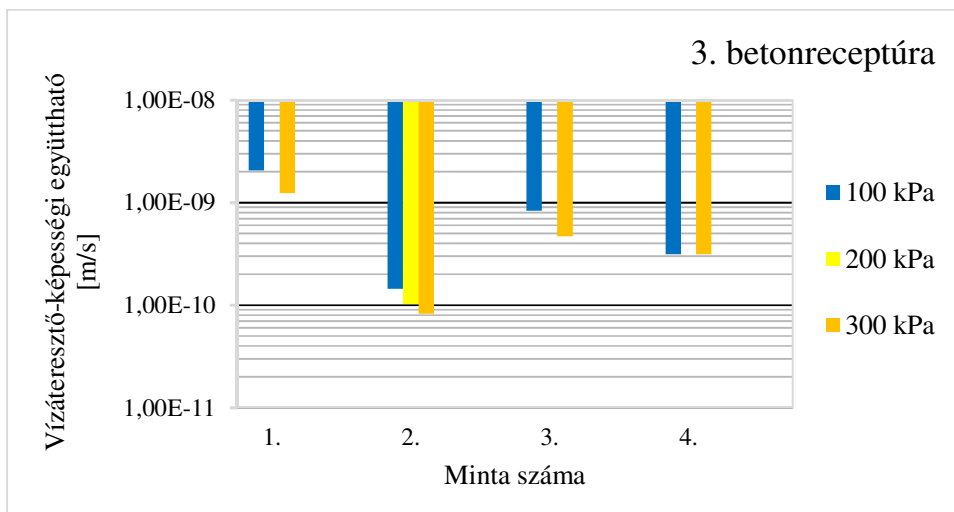
A táblázat és az ábrák is jól mutatják, hogy az átteresztőképesség még azonos betonfaja mellett is eltéréseket, nagy szórást mutat. Ennek egyik lehetséges oka, hogy a minták kicsi mérete miatt a betonfajta sajátosságai kisebb mértékben mutatkoznak meg, illetve a korábban említett tömörítési nehézségek is szerepet játszanak. A telített beton átteresztőképességi együtthatójának $4,36 \cdot 10^{-11}$ – $8,38 \cdot 10^{-10}$ m/s közötti értékeket kaptam, mely egy szűk tartomány figyelembe véve, hogy a betonfajta tág tartományban kerültek vizsgálat alá. Mindegyik betonkeverék az átteresztőképesség értéke szerint a **jó vízzáró** kategóriába tartozik. Az átteresztőképesség további részletes kiértékelése és összehasonlítása az **5.1. fejezetben** olvasható.



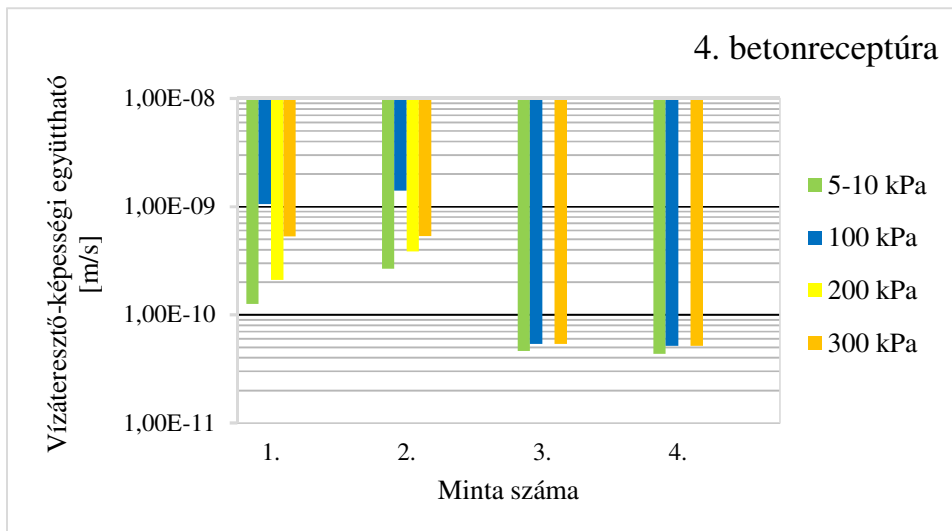
4-4. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 1. betonreceptúra



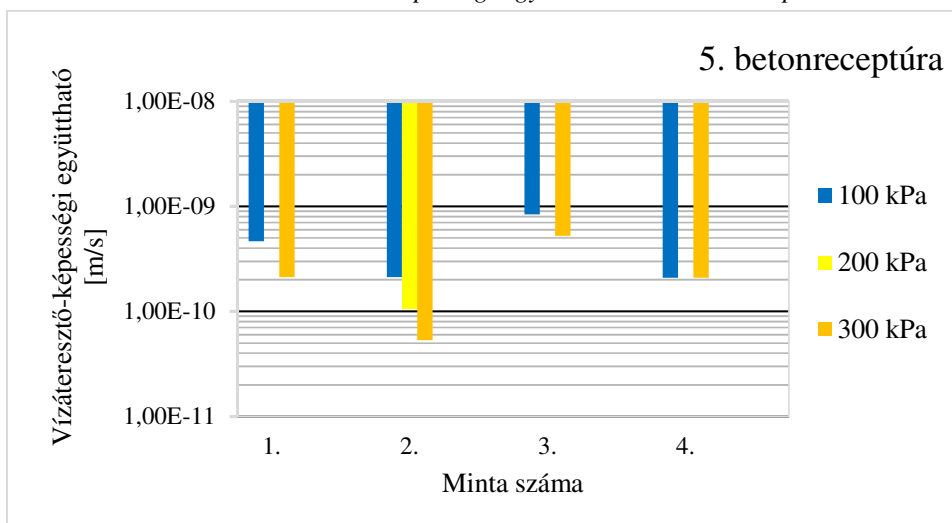
4-5. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 2. betonreceptúra



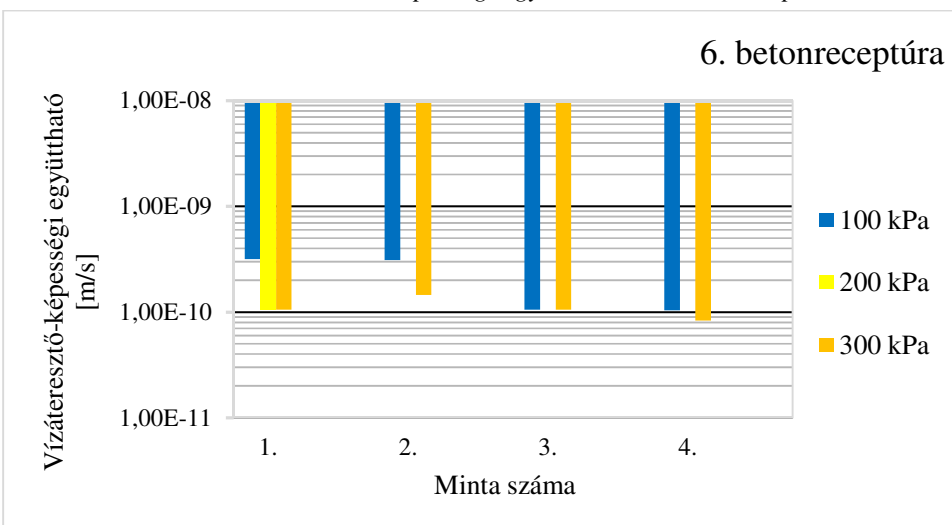
4-6. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 3. betonreceptúra



4-7. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 4. betonreceptúra



4-8. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 5. betonreceptúra

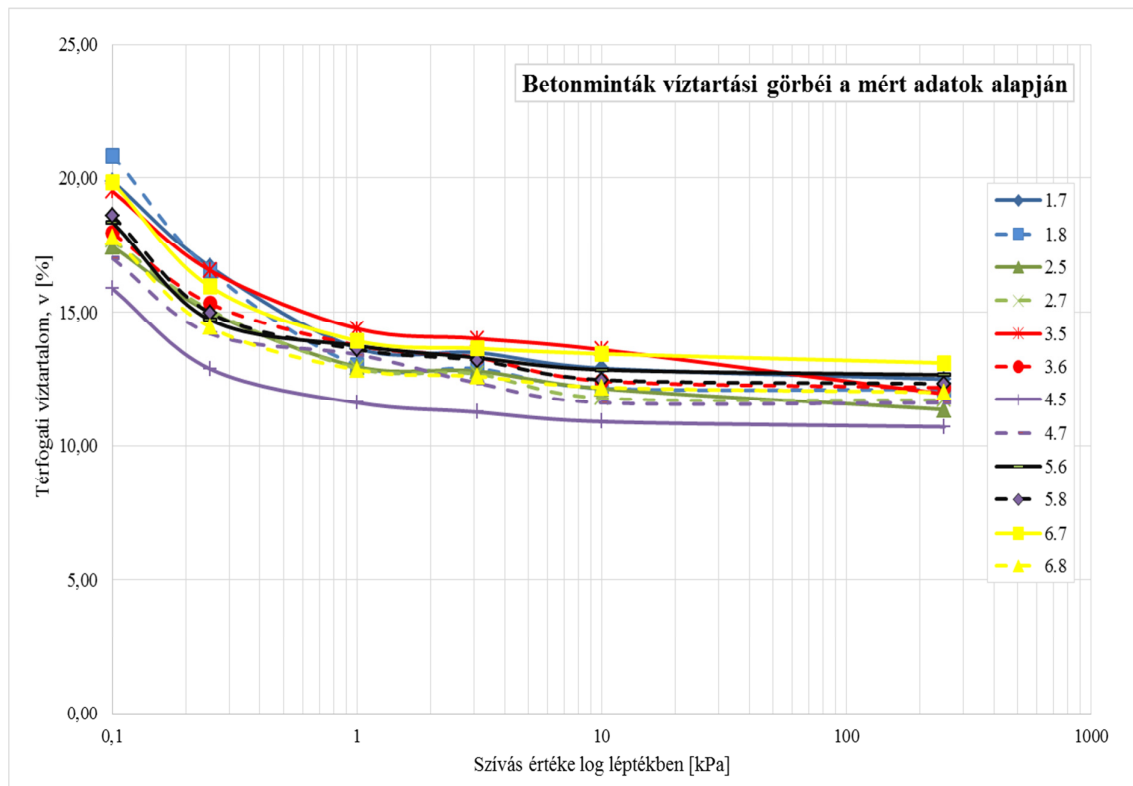


4-9. ábra: Vízáteresztő-képességi együttható – 6. betonreceptúra

4.2.2. A víztartási görbe vizsgálat eredményei

A víztartási görbe egyik legfontosabb telítetlen talaj függvény, a talaj vízvisszatartó hatását jellemzi. A betonminták vizsgálata során a nehézséget az jelentette, hogy csak elképzeléseim, voltak arról, hogy miként viselkedhet a beton, pontos, kézzel fogható eredmény nem volt a birtokomban. A kiinduló tézis az volt, hogy a beton – mivel nem rendelkezik nagy fajlagos kolloid felülettel – a vizet gyorsan fogja leadni. A mérési eredményeket a „D” melléklet táblázata ismerteti.

A térfogati víztartalomértékeket a szívás függvényében szemilogaritmus koordinátarendszerben a **4-10. ábra** szemlélteti. A víztartási görbék egy ábrán történő ábrázolása jól mutatja a görbék hasonlóságát, a köztük lévő különbségek kis mértékét. A minták kapilláris rendszerétől függően különböző víztartalom értéknél érik el a telített, kiinduló állapotot. A víztartalom 1 kPa szívás értékig meredeken csökken, utána csak minimálisan, közel konstans víztartalom értékre áll be betonfajtától függetlenül a mérési eredmények alapján.



4-10. ábra: Víztartási görbék

Az eredmények kiértékelése és a víztartási görbéhez kapcsolódó számítások az **5.2. fejezetben** találhatóak.

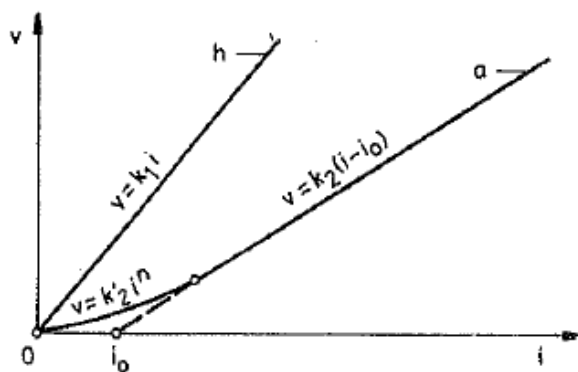
5. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

5.1. Az áteresztőképesség vizsgálat kiértékelése

5.1.1. Darcy törvényének igazolása betonokra

Az áteresztőképesség kiértékelésének egyik legfontosabb része annak vizsgálata, hogy Darcy törvénye érvényes-e betonok esetén. Ezzel a feltételezéssel élve végeztem kísérleteimet a betonmintákon, azonban az eredményeknek alá kell támasztania ezt a feltételezést. A több nyomáson végzett kísérletek lehetővé tették a $v = k \cdot i$ egyenlet felhasználásával a sebesség – hidraulikus gradiens összefüggésének vizsgálatát. A kis nyomáson történő áteresztőképesség meghatározás az agyagoknál ismeretes v - i diagram kezdeti szakaszának lineáristól való eltérése indokolta, mivel a beton felépítését leginkább a kötött talajokéhoz hasonlíthatjuk.

Kötött talajok esetén a szemcsék felszínén található kötött víz az átfolyási keresztmetszetet csökkenti és csak a küszöb gradiens (i_0) érték fölött indul meg a vízmozgás (5-1. ábra). Kis gradiens érték esetén hatvány függvény adja meg a sebességet. A határ gradiens iszapoknál 0,2 - 0,5, kövér agyagokban 12 - 18 értéket is elérhet. (Kabai, 2005)

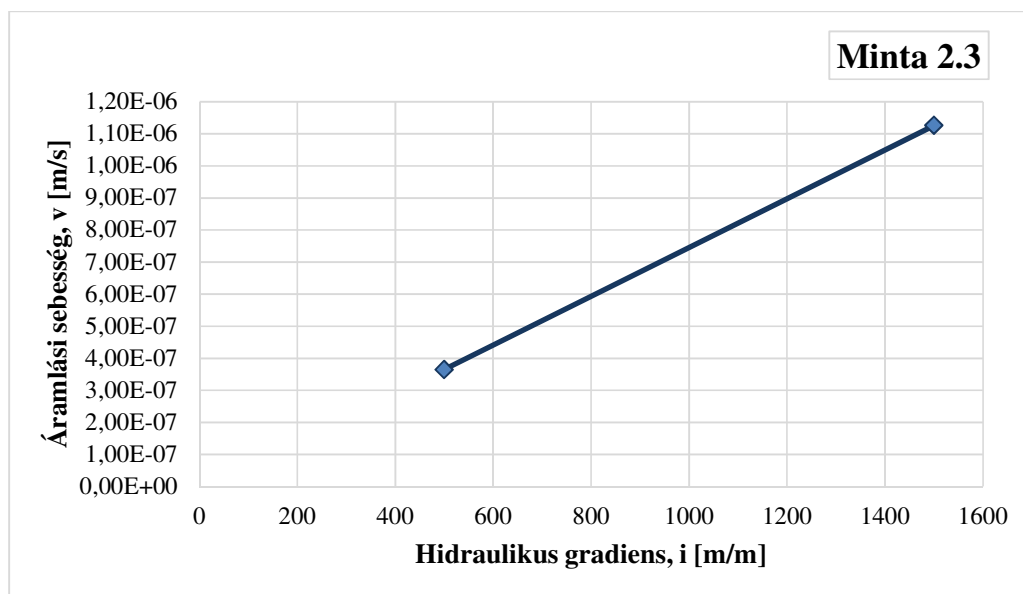


5-1. ábra: Darcy-törvény agyagok (a) és homokok (h) esetén (Kabai)

A vizsgált minták mindegyikére elkészítettem a sebesség – hidraulikus gradiens függvény ábráit. Az eredmények összehasonlítása során észrevettem, hogy az áteresztőképesség értéke a legtöbb minta esetén mindegyik vizsgált nyomáson közel azonos (5-1. táblázat), vagy tökéletesen megegyezik (5-2. táblázat). Ebből az a következtetés vonható le, hogy a v - i diagram betonok esetén lineáris, az az érvényes Darcy törvénye. (5-2. ábra; 5-3. ábra).

5-1. táblázat: A v - i diagram meghatározása – 2. receptúra 3. minta

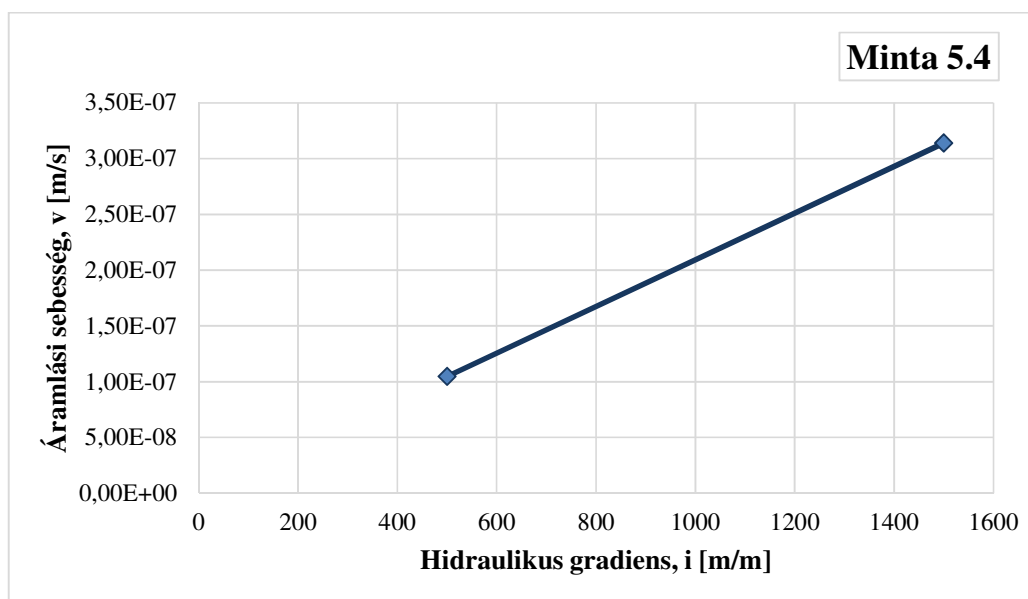
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma:	2.	Minta magassága	L	2,0 cm
	Minta száma:	3.	Minta átmérője	d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa	
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	7,30E-10	-		7,51E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-		1500
Áramlási sebesség, v [m/s]	-	3,65E-07	-		1,13E-06



5-2. ábra: A második receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

5-2. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 4. minta

v-i diagram meghatározása	Receptúra száma:	5.	Minta magassága	L	2,0 cm
	Minta száma:	4.	Minta átmérője	d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa	
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,09E-10	-	2,09E-10	
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500	
Áramlási sebesség, v [m/s]	-	1,05E-07	-	3,14E-07	



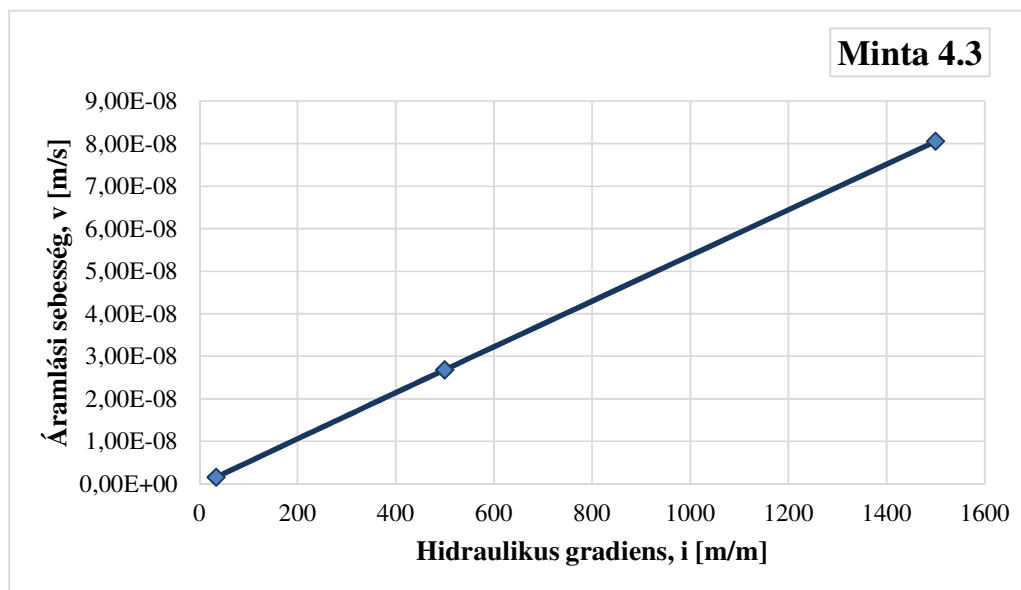
5-3. ábra: Az ötödik receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

A legtöbb minta vizsgálata során kapott eredmények mindegyikére az összefüggés lineárisra, vagy közel lineárisra adódott, azonban néhány esetben nagyobb eltéréseket is tapasztaltam, melyek a mérési pontatlanság számlájára írhatóak. Az elvégzett pótmérések során az előzőekben valamely nyomáson mért eredményhez közeli vagy azonos eredményt kaptam. A kapacitásbeli korlátosság azonban nem tette lehetővé, hogy minden hibásnak vélt mérés helyett új vizsgálatot végezzek, de az első körben végzett mérések és az utólag végrehajtott pótmérések eredményessége is Darcy törvényének érvényességét és használhatóságát bizonyítja betonok esetén.

A 4. betonreceptúra esetén kisnyomáson végzett vizsgálat is Darcy törvényének érvényességét támasztja alá. Emellett még megállapítható, hogy a kötött talajoknál tapasztalható kezdeti nem lineáris szakasz a betonok esetén nem alakul ki, mivel a beton nem rendelkezik nagy fajlagos kolloid felülettel, így a vizet nem képes megkötni, mint a kötött talajok szemcséi. A vizsgálat során annyira kicsi hidraulikus gradiens előállítása nem történt meg, mely a kezdeti szakaszt tökéletesen jellemezné, azonban a fenti szakasz meredeksége ennek megvalósulását nem teszi lehetővé (5-3. táblázat; 5-4. ábra).

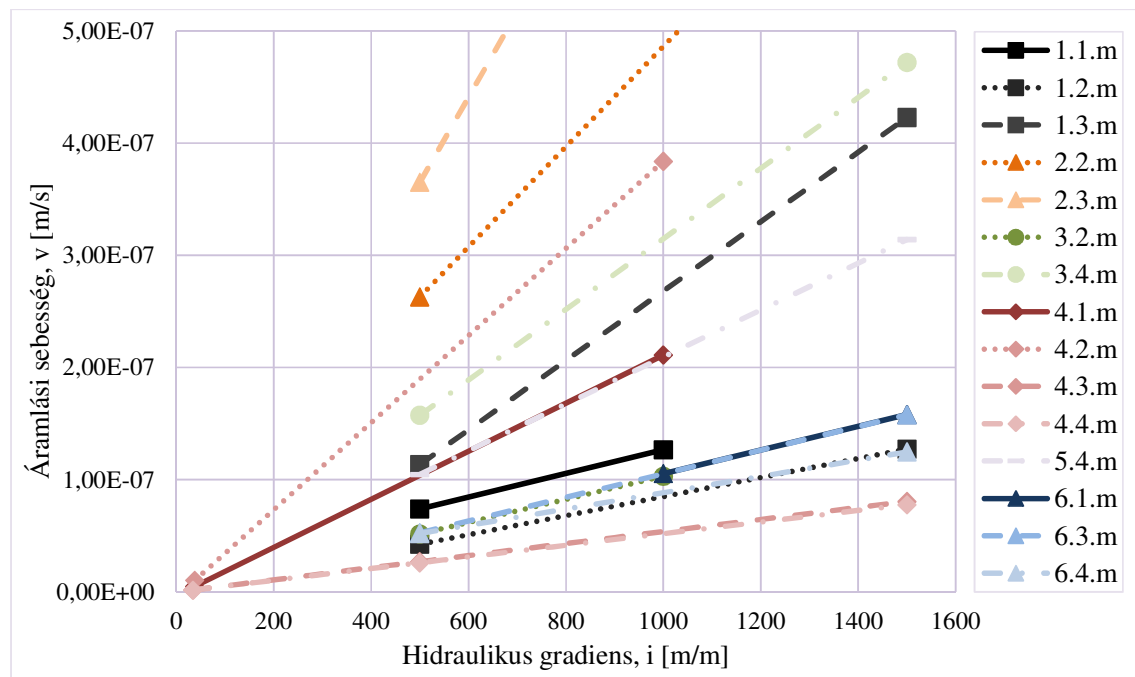
5-3. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 4. minta

v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 4.	Minta magassága	L	2,0 cm
	Minta száma: 3.	Minta átmérője	d	3,8 cm
Víznyomásérték:	6,9 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együtttható, k [m/s]	4,64E-11	5,37E-11	-	5,37E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	34,5	500	-	1500
Áramlási sebesség, v [m/s]	1,60E-09	2,68E-08	-	8,05E-08



5-4. ábra: A negyedik receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

Az **5-5. ábra** a lineárisan origóba tartó v - i diagramokat ábrázolja. Az összegző diagram is jól mutatja, hogy a különböző meredekségű, azaz különböző k értékkel rendelkező mintákon keresztül Darcy törvénye szerint áramlik a víz. A kezdeti nem lineáris szakasz az egyenesek meredekségének következtében nem alakulhat ki, melyet szintén szépen elénk tár az ábra.



5-5. ábra: A v - i diagramok

Mind a 24 db vizsgálati mintán elvégzett kísérletből kapott v - i diagram megtalálható a „C” mellékletben.

5.1.2. Az áteresztőképesség és vízzáróság vizsgálat összehasonlítása

A vizsgálat sorozat kiértékelésének fontos lépése a szabványos beton vízzáróság vizsgálat és az áteresztőképesség összehasonlítása. A két vizsgálat legjobb összehasonlítási alapja a behatolás mélység és az áteresztőképesség kapcsolatának vizsgálata. A behatolás mélységekhez hozzárendeltem az adott betonreceptúra esetén mért áteresztőképességi együtttható értékeket. A többi összevetéssel ellentétben itt nem átlagértékekkel számoltam, melynek oka, hogy ebben az esetben az egyedi értékek jobban jellemzik az adott keverékből készült próbakocka és minta közötti összefüggést, emellett az értékek nagyobb száma következtében pontosabb képet kaphatok. Az **5-4. táblázat** foglalja össze a kapott érték párokat.

5-4. táblázat: A behatolás mélység és az áteresztőképesség összehasonlítása

Keverés száma	Vevő által adott jel	Behatolás mélysége [mm]	Áteresztőképességi együtttható [m/s]
1.	02	31,1	1,48E-10
1.	59	56,0	3,49E-10
1.	460	41,1	2,82E-10
2.	006	38,2	7,30E-10
2.	005	30,7	5,26E-10
2.	BP	27,8	2,05E-10
3.	946	27,4	4,68E-10
3.	506	25,2	1,03E-10
3.	53	30,1	8,38E-10
4.	258	43,9	5,37E-11
4.	577	46,1	3,84E-10
4.	938	55,1	5,27E-10
5.	924	31,4	4,66E-10
5.	904	30,0	2,12E-10
5.	59	32,8	8,38E-10
6.	917	18,5	1,05E-10
6.	902	19,3	1,45E-10
6.	949	18,0	8,31E-11

A kiértékelés során azt tapasztaltam, hogy az első és a negyedik keverés esetén a behatolás függvényében vizsgált áteresztőképesség értékek a többi keveréstől nagymértékben eltérő eredményt mutatnak. A hiba oka egy összetett probléma, melynek alappillére a vizsgálati minták kis mérete.

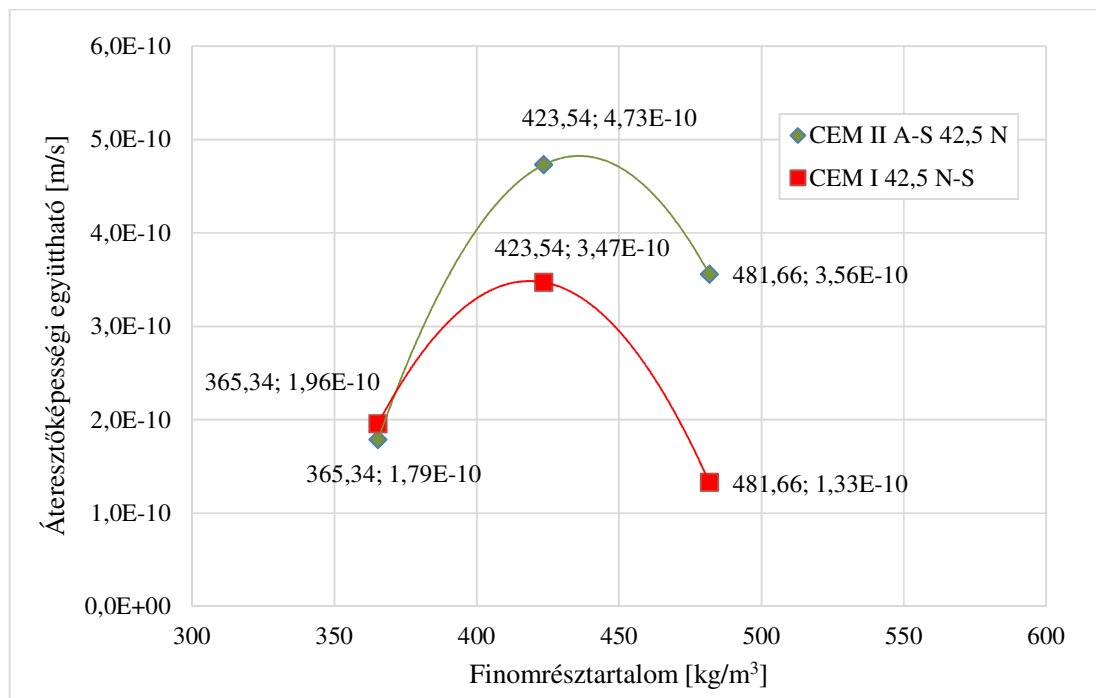
A betonkészítése során három fajta szilárdság előállítása volt a cél, így a betonkeverékek három fajta víz-cement tényező alapján készültek. A víz és cement arányából következik, hogy a különböző receptúrák alapján eltérő finomrésztartalommal rendelkező beton próbatesteket állítottam elő. A felhasznált víz és finomrésztartalom, azaz a pértartalom mennyisége nagy hatással van a minták tulajdonságaira.

A víz- cement tényező az első és negyedik betonreceptúra esetén megegyezik, mintahogyan a finomrésztartalom is. A próbakockák ebben az esetben a legkisebb vízzáróságot mutatnak, mivel ekkora mennyiségű víz a beton kötése során felesleges, így elpárolog, és kapilláris rendszert hagy maga után, melyben a víz szabadon áramolhat. Azonban vizsgálati minták esetén a kis méret és a kevés péptartalom miatt nagyobb adalékanyag szemek kerültek a rézgyűrűkbe, melyeken keresztül a víz nem tud áramolni – hiába a cementkőben kialakuló kapilláris rendszer –, így az első és negyedik keverés esetén a vizsgálati minták vízzáróbbak lettek, mint a nagyobb méretű próbakockák.

Az **5-5. táblázat** és az **5-6. ábra** a finomrésztartalom és az áteresztőképesség összefüggését, míg az **5-6. táblázat** és az **5-7. ábra** víz-cement tényező és az áteresztőképesség kapcsolatát szemlélteti. Ezekből is látszanak az előző bekezdésben tárgyaltak, hogy kevés finomrésztartalom és sok víz mellett kisebb a minták áteresztőképességi együttthatóinak értéke, ugyanakkor a nagyobb finomrésztartalom és a kevesebb mennyiségű víz esetén az áteresztőképesség értékek megint kisebbek a tömörebb, kevesebb kapillárisal rendelkező szerkezet miatt.

5-5. táblázat: Finomrésztartalom mennyiségéhez tartozó áteresztőképességi együttthatók

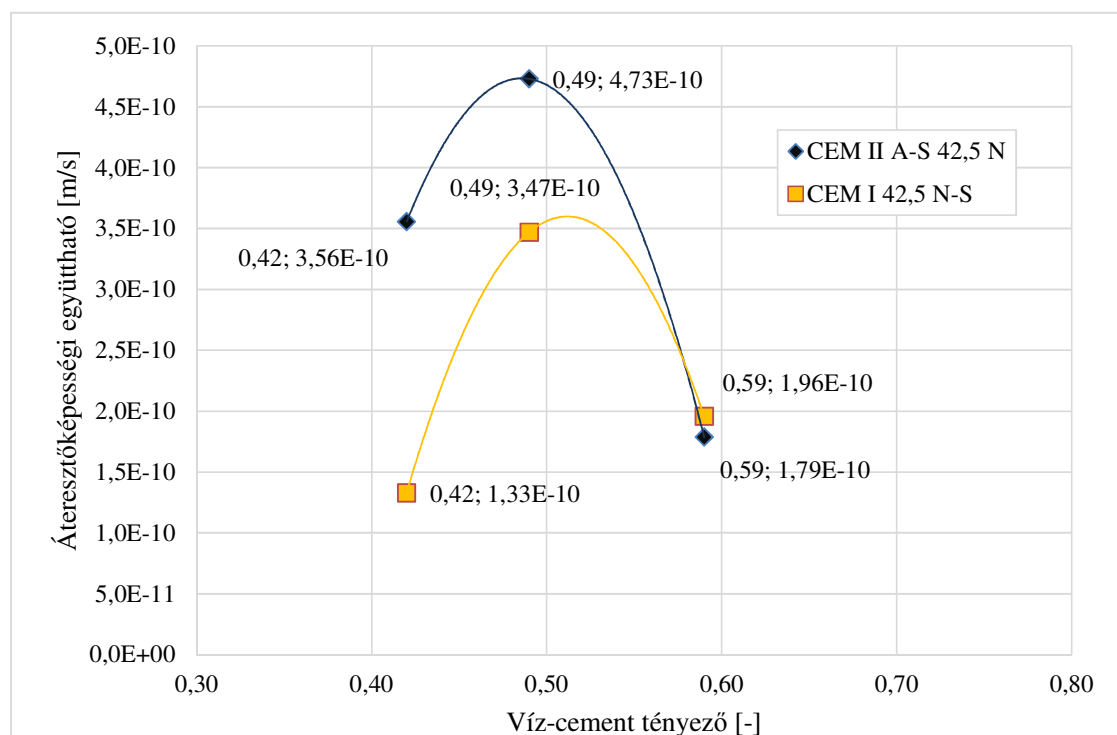
Keverés száma	Finomrésztartalom [kg/m ³]	Áteresztőképességi együtttható [m/s]
1. keverés	365,34	1,79E-10
2. keverés	423,54	4,73E-10
3. keverés	481,66	3,56E-10
4. keverés	365,34	1,96E-10
5. keverés	423,54	3,47E-10
6. keverés	481,66	1,33E-10



5-6. ábra: Az áteresztőképesség és a finomrésztartalom kapcsolata

5-6. táblázat: A víz-cement tényezőkhöz tartozó áteresztőképesség értékek

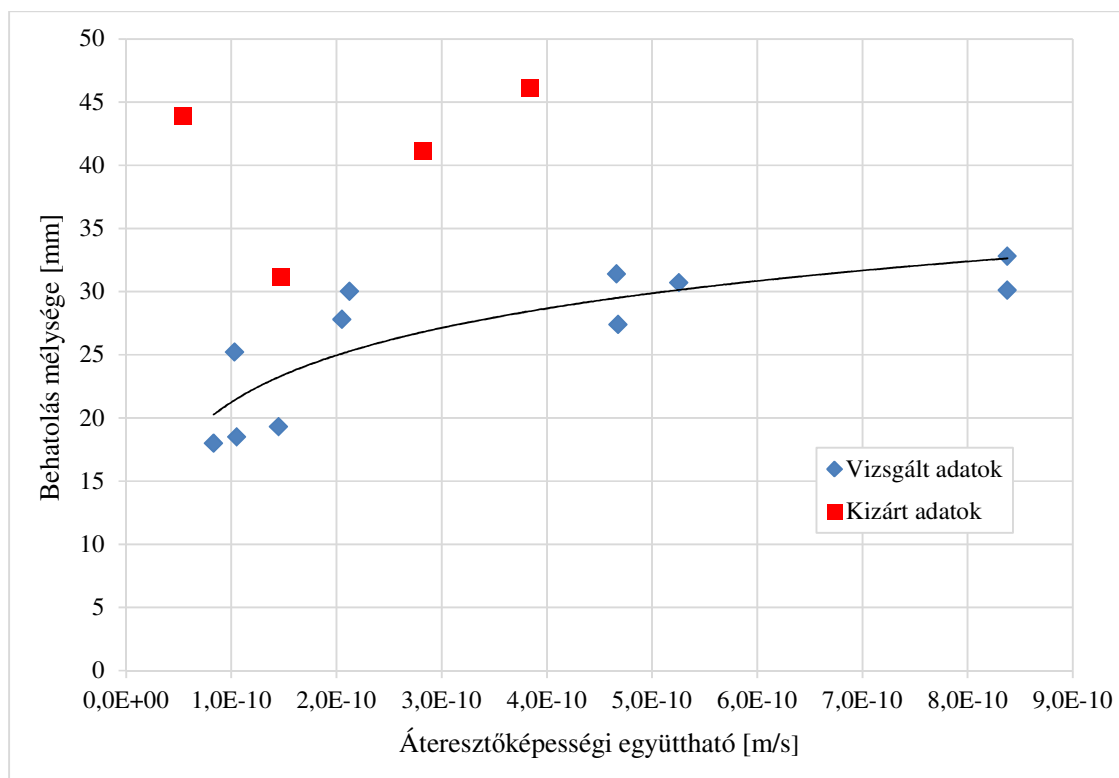
Keverés száma	Víz-cement tényező	Áteresztőképességi együtttható [m/s]
1. keverés	0,59	1,79E-10
2. keverés	0,49	4,73E-10
3. keverés	0,42	3,56E-10
4. keverés	0,59	1,96E-10
5. keverés	0,49	3,47E-10
6. keverés	0,42	1,33E-10



5-7. ábra: Az áteresztőképesség és a víz-cement tényező kapcsolata

Az 5-6. ábrán és az 5-7. ábrán nagyon jól látható a cementfajta hatása is az áteresztőképesség értékeire. A tiszta portlandcementtel készült beton esetén kisebb áteresztőképesség értékeket kaptam 28 napos korban, azaz vízzáróbb betont sikerült előállítani, azonban a CEM II A-S 42,5 N cementtel készült beton szerkezete a kohósalaknak köszönhetően idővel nagyobb tömörséget ér el, és vízzáróbb struktúrát alkot.

Az első és negyedik keverésen mért eredményeket a vízzáróság vizsgálat és áteresztőképesség összehasonlításánál nem vettem figyelembe, hiszen nem a valós tulajdonságát tükrözik a keveréknek. Az 5-8. ábra mutatja a behatolás mélység és az áteresztőképesség közti összefüggést. Az ábrán piros négyzettel az első és negyedik betonreceptúra alapján készült minták eredményét jelöltem, míg kék rombuszal a kiértékelés során figyelembe vett eredmények láthatóak.



5-8. ábra: A behatolás mélység és az áteresztőképesség kapcsolata

Az ábrán a nagy szórás ellenére is látható, hogy a nagyobb vízbehatolás mélységhez, nagyobb áteresztőképességi együttható tartozik. A pontok egy görbe mentén helyezkednek el, mely az 5 bar⁴ nyomásérték melletti vízbehatolás mélységhez tartoznak. A szórás mértékét az áteresztőképességek meghatározásának pontatlansága okozza. A jövőbeni kutatások céljaként szeretném a vizsgálati minták számának és a mérések pontosságának növelésével egy görbe létrehozását, mely alapján a beton áteresztőképességi együtthatója becsülhető a vízzáróság vizsgálat eredményeiből az áteresztőképesség mérése nélkül. Emellett további célom a betonminták áteresztőképességi együtthatói alapján a vízzáróság osztályok lehatárolása.

Mivel mindegyik vizsgált betonminőség a talajok áteresztőképesség alapján történő kategóriába sorolás szerint a jó vízzáró osztályba tartozik, így ezt az osztályozási módot és a beton vízzáróság osztályozási módjával érdemileg nem lehet összekapcsolni.

Az eredmények tekintetében figyelemre méltó, hogy a beton vízzáróság vizsgálat sokkal jobban kiemelte a különbségeket a különböző betonminőségek között, így megfontolandó egy hasonló vizsgálati rendszer kiépítése a kis áteresztőképességű talajok vizsgálata esetén.

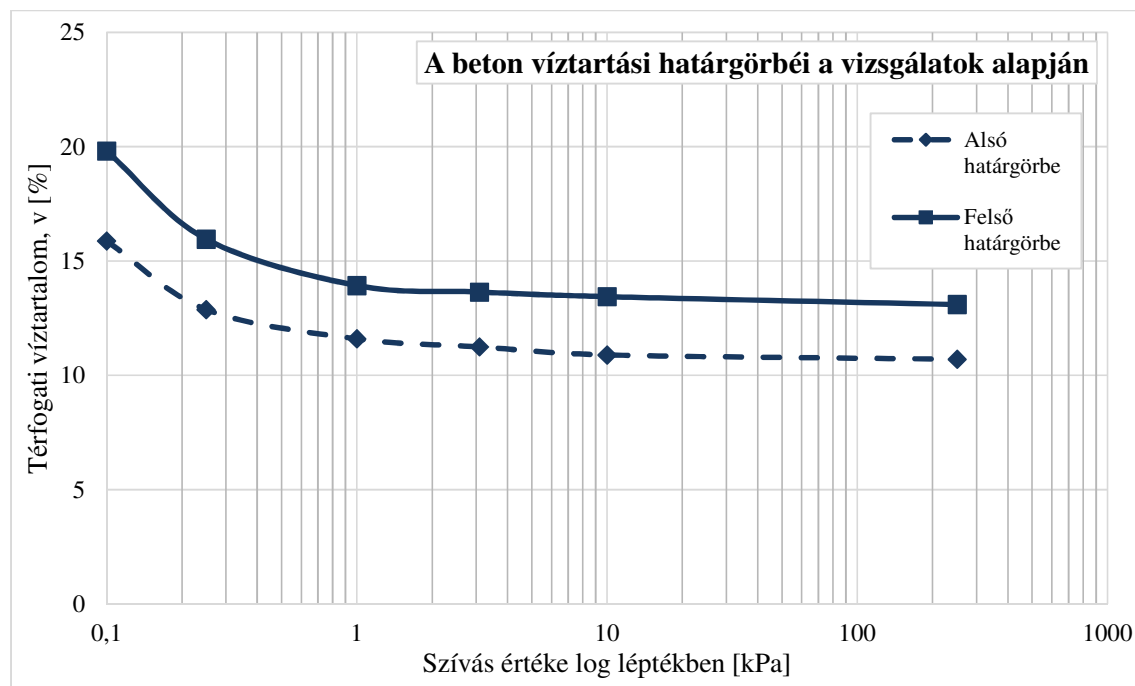
⁴ A szabványos beton vízzáróság vizsgálatához tartozó nyomásérték.

5.2. A víztartási görbék kiértékelése

5.2.1. A beton és a talajok víztartási görbéinek összehasonlítása

A víztartási görbének számos gyakorlati felhasználása létezik talajok esetén. A víztartási görbe felhasználható áramlási kérdések elemzésénél, térfogat-változási problémák vizsgálatánál, nyírószilárdság számításánál a kapilláris kohézió számszerűsítésére. A betonok esetén ez a terület leszűkül az áramlási kérdések vizsgálatára és a vízmozgások modellezésére.

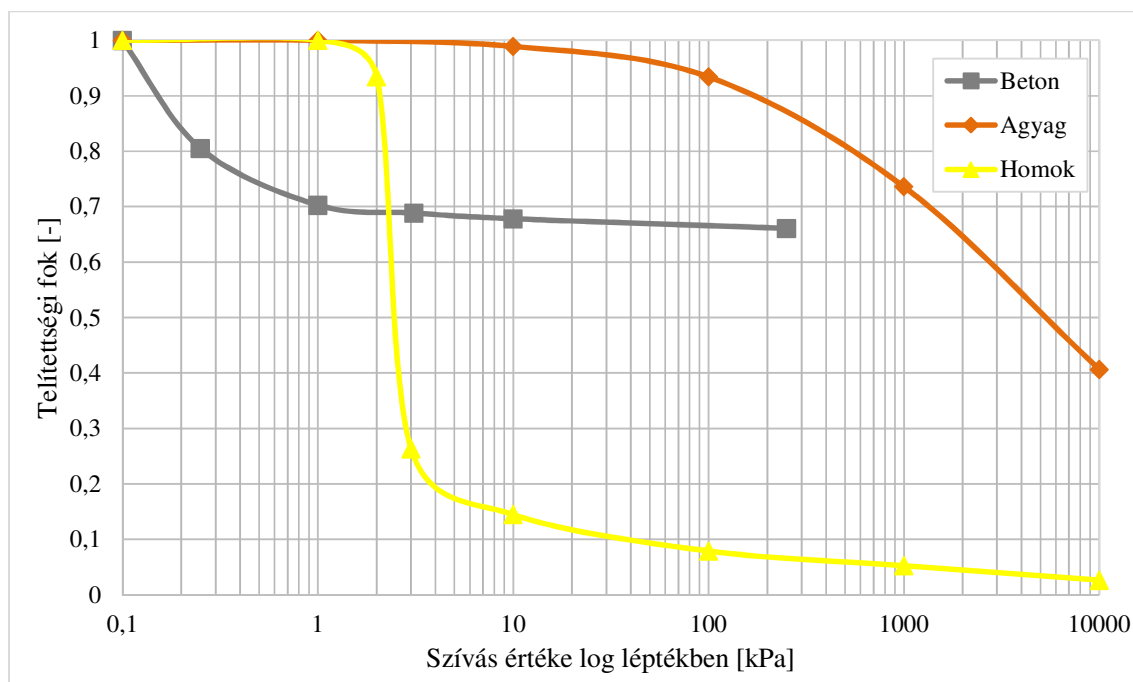
Az **5-9. ábra** a beton vizsgálatok alapján kapott víztartási alsó és felső határgörbéjét mutatja. Jól látható, hogy a kiinduló telített állapotú víztartalomban nagy eltérés mutatkozik a minták között. A beton tervezett levegőtartalma 15 V%, mely a zárt pórusokat is tartalmazza. Az ábrán felismerhető, hogy a vizsgálati minták ennél nagyobb víztartalom értéket értek el telített állapotban, azaz a levegőtartalom a tervezettnél nagyobb lett. Feltehetően a betonminták tömörítésének nehézségei okozták ezt az eltérést. Hogy a beton víztartási görbéjének lefutását megértsük érdemes összehasonlítani a különböző talajtípusokkal.



5-9. ábra: A beton víztartási határgörbéi a vizsgálatok alapján

Az **5-10. ábra** a beton, az agyag és a homok jellegzetes víztartási görbéjét ábrázolja, melyen látható, hogy betonok esetén a víztartási görbe nagyban eltér a homok és az agyag jellemző görbéjétől. Az összehasonlítás megkönnyítése érdekében a szokásostól eltérően nem a víztartalom szerepel a vertikális tengelyen, hanem a telítettségi fok. A szívás növekedésével a beton nagy mennyiségű vizet ad le 1 kPa szívás értékig, majd végül közel konstans víztartalom értékre áll be 250 kPa szívásig. A jelenség a beton „klasszikus” kapilláris rendszerével magyarázható. A betonban található makropórusokból – melyek a tömörítetlenség következtében jöttek létre – a víz kis szívás hatására is gyorsan távozik, mivel a makropórusokban gravitáció hatására jön létre a vízmozgás és a beton nem rendelkezik nagy

fajlagos kolloid felülettel, hogy a vizet meg tudja kötni. A beton szilárdulása során elpárolgó víz mikropórusokból álló kapilláris rendszert hoz létre, melyben fellépő felületi feszültség nagysága akadályozza, hogy a víz távozzon a beton szerkezetéből egy a felületi feszültség nagyságától függő szívás értékig. Az agyagokban található kapilláris rendszerben fellépő felületi feszültség nagysága nem éri el a betonban fellépőjét, de az agyagszemcsék kolloid felületének köszönhetően képesek megkötni a vizet, így a vizet csak egy adott szívás érték elérése után kezdi leadni, mikor a szívás értéke meghaladja az adszorpciós energia értékét.



5-10. ábra: A beton, az agyag és a homok jellemző víztartási görbéjének összehasonlítása

5.2.2. A víztartási görbe illesztése és a telítetlen áteresztőképesség meghatározása

A 2.1.7 fejezetben már tárgyaltuk, hogy a telítetlen áteresztőképesség meghatározása nehéz és hosszadalmas feladat. Ebből az okból alakultak ki a közelítő eljárások, melyeket kombinált módszereknek nevezünk. Ezek a módszerek a víztartási görbe vagy a szemeloszlási görbe alapján számítják az áteresztőképességet, csupán egy mért adat szükséges, mely lehet a telített állapotú áteresztőképességi együtttható is.

A számítások elvégzésére számos modell alakult ki az évek során, melyek a víztartási görbe felhasználásával határozzák meg a telítetlen áteresztőképességet. A modellek lényege, hogy paraméterek segítségével a mért pontokra illesztik a víztartási görbe függvényét. A modellek közül a számítások során **van Genuchten (1980)** és **Fredlund et al. (1994)** modelljét alkalmaztuk.

A *van Genuchten* illesztési modell a következő:

$$v = v_r + \frac{v_s - v_r}{[1 + (as)^n]^m}$$

Ahol v , a térfogati víztartalom; s , a szívás; v_s , v_r , a , n , m , illesztési paraméterek. A fenti egyenlet illesztése a során az ismeretlen paraméterek száma kevesebb vagy egyenlő lehet, mint a víztartási görbe mért pontjainak száma.

Az illesztés során természetesen a paraméterek nem vehetnek fel bármilyen értéket, így a szakirodalom és saját megfontolások alapján bizonyos kikötéseket kell tenni velük szemben:

- $0,1 \leq v_s \leq 0,5$
- $v_r \leq 0,01$
- $0 \leq a \leq 500$
- $1 \leq n$
- $m = 1 - \frac{1}{n}$

Az m paraméter értékét az n paraméterből származtatjuk ezzel is csökkentve a független változók számát. Az a paraméter talajok esetén 1-5 közötti értéket vesz fel, azonban a betonok víztartási görbéje nagyban eltér a talajokétól, így nagyobb határérték megadása szükséges, hogy pontosabb illesztést kapjunk.

Az illesztett víztartási görbe felhasználásával a telítetlen áteresztőképesség meghatározható kapilláris elméleti megfontolások alapján. A víztartási görbe függvénye alapján következtetni lehet a vizsgált minta pórus eloszlására, a pórusstruktúra alapján pedig a telítetlen áteresztőképességet közelíteni lehet. A gyakorlatban talajok esetén jól használható *van Genuchten* modell a fenti paraméterek felhasználásával számítja a telítetlen áteresztőképességet. A számításokat és az illesztéseket numerikus illesztő program segítségével végeztem el. A telítetlen áteresztőképesség számítása az alábbi **van Genuchten** (1980) modell alkalmazásával történt:

$$k_r = \frac{\{1 - (as)^{n-1} [1 + (as)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (as)^n]^{m/2}}$$

A számítások során megkaptuk a normált áteresztőképességi együttható értékeket, melyeket a telített k értékkel beszorozva a szívás értékhez tartozó áteresztőképességi együtthatókat kaptuk eredményül. A számítás során kapott paramétereket az **5-7. táblázat** tartalmazza.

5-7. táblázat: A van Genuchten (1980) modell paramétereit és az illesztési hibát

Minta	v_s	v_r	a	n	m	illesztési hiba
1.7	0,23596	0,01	500	1,06710	0,06288	0,00131
1.8	0,27540	0,01	500	1,08794	0,08083	0,00199
2.5	0,21617	0,01	500	1,06017	0,05676	0,00054
2.7	0,21814	0,01	500	1,06309	0,05935	0,00070
3.5	0,24691	0,01	500	1,06856	0,06416	0,00051
3.6	0,21622	0,01	500	1,05578	0,05283	0,00056
4.5	0,19778	0,01	500	1,05525	0,05236	0,00079
4.7	0,21976	0,01	500	1,06019	0,05677	0,00050
5.6	0,21395	0,01	500	1,05008	0,04769	0,00090
5.8	0,22298	0,01	500	1,05631	0,05331	0,00102
6.7	0,23596	0,01	500	1,05666	0,05362	0,00139
6.8	0,20816	0,01	500	1,05421	0,05142	0,00095

A másik alkalmazott illesztési modell **Fredlund és Xing (1994)** által bevezetett egyenlet segítségével valósult meg, mely egy adott anyag – nem feltétlenül talaj – vízvisszatartó hatását jellemzi:

$$\theta = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln(1 + (s/h_r))}{\ln(1 + (10^6/h_r))} \right] \cdot \frac{1}{\left[\ln(e + (s/\alpha_f)^{n_f}) \right]^{m_f}}$$

Ahol θ_s , a telített térfogati víztartalom; s , a szívás; h_r , egy konstans, mely a reziduális víztartalomhoz tartozó szívás értéket jelenti (általában 10^6 kPa az értéke); n_f , m_f , illesztési paraméterek.

Az illesztett víztartási görbe segítségével **Fredlund et al. (1994)** integrációs formulájának felhasználásával számítható a telítetlen áteresztőképesség normált értéke:

$$k_r(s) = \frac{\int_{\ln(s)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(s)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(s_{aev})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy}$$

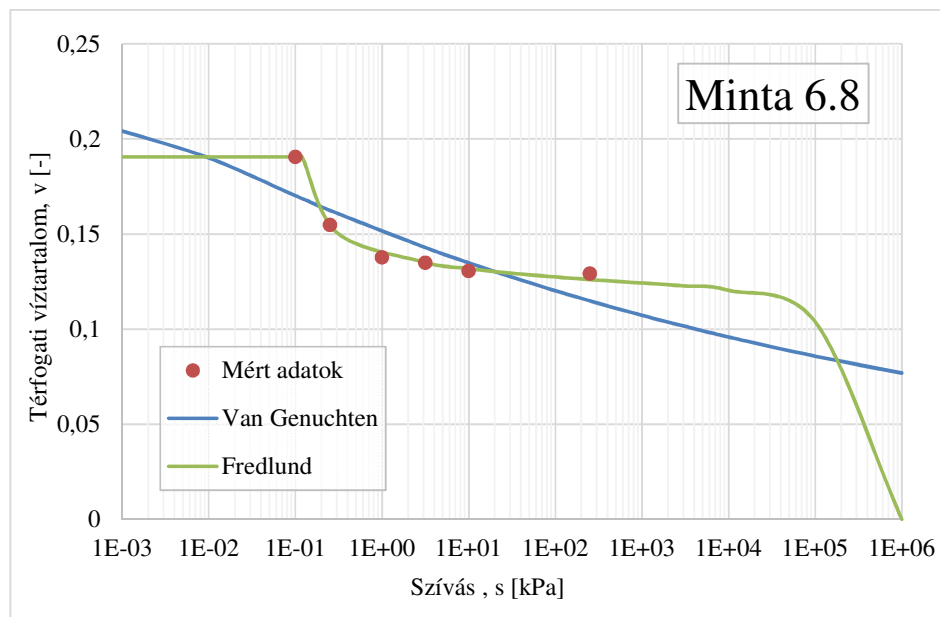
Ahol b , egy konstans, melynek az értéke $\ln(10^6)$; y , egy integrálási változó, mely a negatív pórus víznyomás logaritmusát jellemzi; s_{aev} , a kiinduló szívás érték.

A kapott értékeket a telített áteresztőképesség értékével beszorozva megkapjuk az adott szívás nagysághoz tartozó telítetlen áteresztőképesség értékeket. A számítás során kapott paramétereket az **5-8. táblázat** tartalmazza.

5-8. táblázat: A Fredlund és Xing (1994) modelljének paraméterei és az illesztési hiba

Minta	θ_s	a_f	n_f	m_f	h_r	illesztési hiba
1.7	0,20923	0,20551	42,48900	0,08180	1000000	0,0000378
1.8	0,22302	0,19080	37,24764	0,10477	1000000	0,0000608
2.5	0,18686	0,16536	12,50491	0,09126	1000000	0,0000107
2.7	0,18763	0,18308	19,33728	0,08729	1000000	0,0000211
3.5	0,20533	0,13300	5,62868	0,12179	1000000	0,0000587
3.6	0,19085	0,13662	8,87598	0,09455	1000000	0,0000172
4.5	0,17985	0,12969	22,71440	0,07971	1000000	0,0000075
4.7	0,18995	0,15973	19,33746	0,08000	1000000	0,0000784
5.6	0,19835	0,12557	37,18872	0,06762	1000000	0,0000040
5.8	0,20187	0,13059	22,79970	0,08123	1000000	0,0000207
6.7	0,21510	0,14055	25,35697	0,08301	1000000	0,0000400
6.8	0,19053	0,13611	23,99730	0,07942	1000000	0,0000186

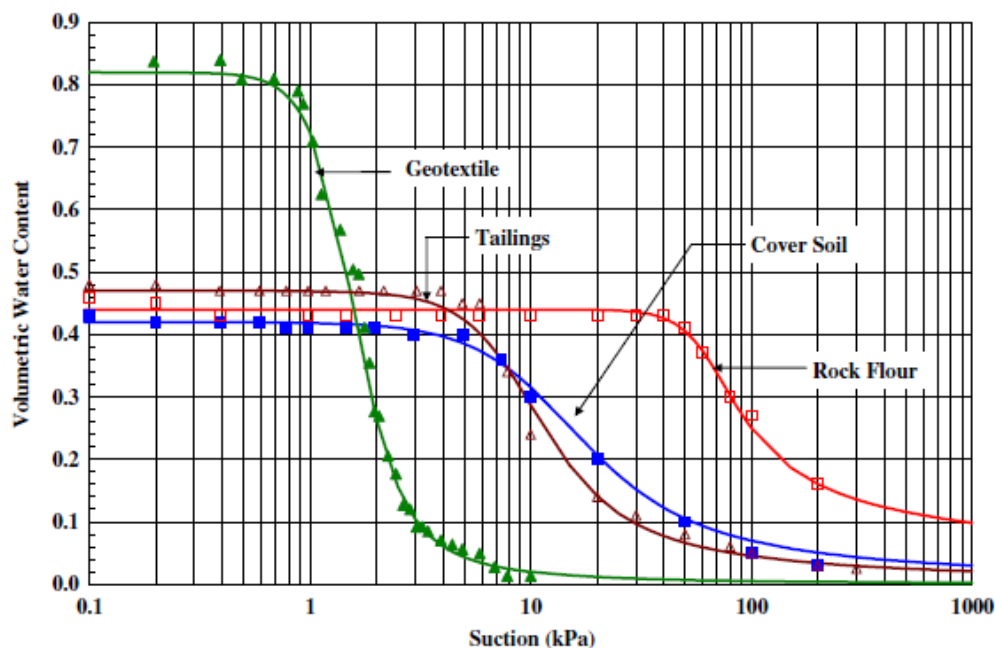
Már az illesztési hibákon is jól látható, hogy a *Fredlund* modell nagyságrenddel pontosabb közelítést ad a víztartási görbére, mint a *van Genuchten* modell. Az **5-11. ábra** a 6.8 jelű minta két modell alapján illesztett víztartási görbáját mutatja.



5-11. ábra: A 6.8 jelű minta illesztett víztartási görbéi

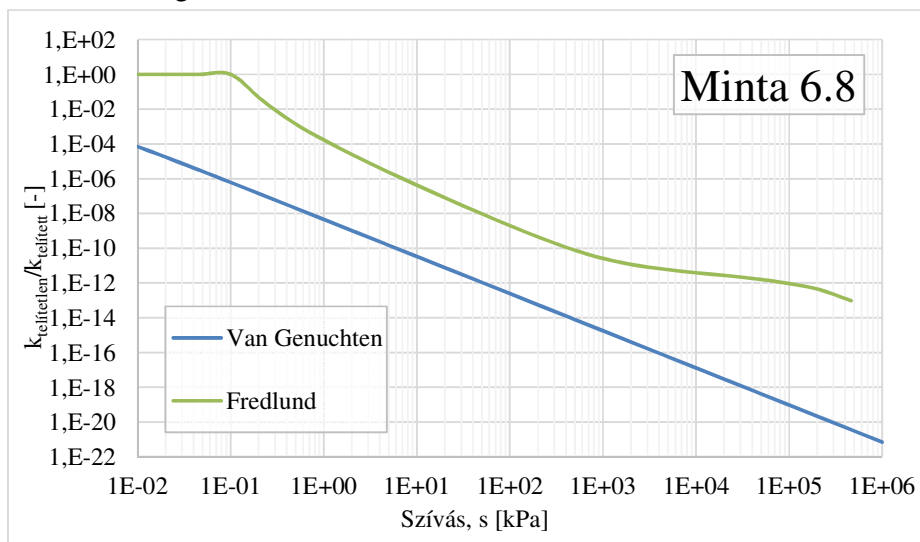
Az ábra alapján belátható, hogy a *Fredlund* modell használatával sokkal jobban közelíthetőek a mért adatok. A *van Genuchten* modellel generálható görbék alakja nem egyezik a tapasztalt adatokkal. Ez annak valószínűsíthető, hogy a vizsgálatok során kapott görbék nagymértékben eltérnek a talajokétól, és a *van Genuchten* modell kifejezetten talajok esetén ad jó közelítést.

A *Fredlund* modell más esetben, nem talajok (pl. geotextília) vizsgálatánál is jól használható (5-12. ábra), ennek köszönhetően betonok esetén megfelelőnek bizonyult, jobb közelítést adott, mint a *van Genuchten* modell.



5-12. ábra: „Nem talajok” víztartási görbéi

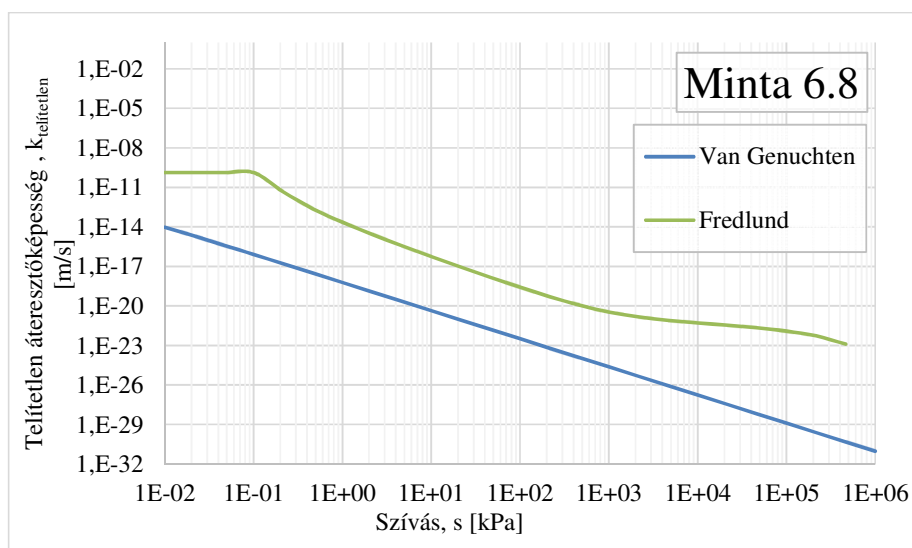
A modellezés során kapott normált függvény értékeit (5-13. ábra) a korábban említett módon, a telített áteresztőképesség értékkel beszorozva kapjuk a telítetlen áteresztőképességet a szívás függvényében (5-14. ábra). A két modell eltérő lefutása természetesen itt is megmutatkozik.



5-13. ábra: A normált áteresztőképesség értékek a szívás függvényében – Minta 6.8

Az 5-14. ábrán látható, hogy van Genuchten modell irreálisan alacsonynak tűnő értékeket ad a telítetlen áteresztőképességre. Valószínűleg a meghatározott illesztési paraméterek kívül esnek azon a tartományon, ahol jól használható. Például a fejezet elején említett a paraméter 1-5 közötti érték helyett 500 értéket vesz fel.

A Fredlund modell a látottak alapján jó közelítésnek tűnik. Érdekes megjegyezni, hogy a szívás kis növekedése, azaz a víztartalom kis csökkenése is jelentős áteresztőképesség csökkenést eredményez.



5-14. ábra: A 6.8 jelű minta áteresztőképesség – szívás függvénye

A számítások során kapott illesztett víztartási görbék és a telítetlen áteresztőképesség függvények megtalálhatóak az „E” mellékletben.

6. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A kísérleteim során a betonban történő vízmozgásokat geotechnikai laboratóriumi módszerekkel vizsgáltam. A kapott eredményeket összehasonlítottam a szabványos vízzáróság vizsgálatból kapott értékekkel és elvégeztem a vízmozgás modellezéséhez szükséges illesztéseket, számításokat.

A beton keverések során két fajta cementminőséget (*CEM II A-S 42,5 N*; *CEM I 42,5 N-S*) és három különböző víz-cement tényezőt (*0,59*; *0,49*; *0,42*) alkalmaztam, így hat különböző minőségű betonon végeztem a vizsgálatokat.

A vizsgálatok eredményeire tett megállapításaimat az alábbi pontok foglalják össze:

- a széles tartományban vizsgált betonkeverékek az áteresztőképesség értékére egy szűk $4,36 \cdot 10^{-11} - 8,38 \cdot 10^{-10} m/s$ közötti tartományt adtak,
- a vizsgált betonkeverékek alapján a betonokra érvényes *Darcy* törvénye, mely végig lineáris a *0* és *1500* közötti gradiens tartományban,
- a laboratóriumi áteresztőképesség meghatározás és a szabványos beton vízzáróság vizsgálat eredményei között összefüggés tapasztalható: a nagyobb vízbehatolás mélységű betonokhoz nagyobb áteresztőképességi együtttható tartozik, azonban a vízzáróság vizsgálat sokkal látványosabban kirajzolódta a betonfajták közötti különbségeket, mint az áteresztőképességek összehasonlításánál,
- a beton az áteresztőképesség értékelése alapján a jó vízzáró kategóriába tartozik,
- a beton víztartási görbéje közvetlenül nem függ a betonösszetételétől csak a kialakult kapilláris rendszertől,
- a beton víztartási görbéje jelentősen eltér a talajoknál megszokottaktól: kis szívás hatására már sok vizet ad le, azonban utána a víztartalom közel konstans értékre áll be kb. *250 kPa* szívás értékig,
- a víztartási görbék illesztése és a telítetlen áteresztőképességi együttthatók meghatározása során alkalmazott modellek közül a *Fredlund et al. (1994)* modell pontosabb, jobb közelítést adott, mint a *van Genuchten (1980)* modell,
- az áteresztőképesség már kis víztartalom csökkenés esetén is jelentős csökkenést mutat.

A vizsgálatok módjára, menetére és a vizsgálati mintákra tett megállapításaimat a következő pontok foglalják össze:

- a vizsgálati minták tökéletes telítése nagyobb odafigyelést igényel (a víz alatt szilárduló beton nem lesz teljesen telített állapotú),
- a betonminták méretük miatt nem tükrözik teljes mértékben a beton valós tulajdonságait (jövőben nagyobb minta vizsgálata),
- a vizsgálatok során alkalmazott desztillált víz nem teljesen levegőmentes,
- az áteresztőképesség vizsgálat során a rézgyűrű és a betonminta közötti szivárgás előfordulhat (jövőben esetleg fűrt minta vizsgálata).

7. JÖVŐBENI KUTATÁSOK

A betonban történő vízmozgások geotechnikai szempontból történő vizsgálata és modellezése újdonságnak számít a mérnöki kutatásokban. A témával kapcsolatos kísérleteimet, kutatásaimat mindenképpen folytatni szeretném.

A jövőbeli célok közé tartozik a beton nedvesedési víztartási görbéjének becslése talajokra vonatkozó szakirodalmi adatok alapján, összehasonlítása a talajok víztartási görbéivel és a beton száradási víztartási görbéjével, és az áteresztőképesség meghatározása nagyobb minták segítségével, hogy a betonfajták sajátosságai jobban megmutatkozzanak.

A jövőben szeretném a kapott eredmények alapján a vízzárósági vizsgálatot modellezni, és szeretnék minden apró kiegészítést, javítást elvégezni a vizsgálat menetében és berendezéseiben, melyekkel a kapott eredmények és a modellezés pontosabbá tehető.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Mahler András egyetemi adjunktusnak és Dr. Nehme Salem Georges egyetemi docensnek a kiváló témavezetésért, szakmai tanácsokért és a rendületlen biztatásért. A Velük végzett közös munka során nagyon sok új ismeretre tettem szert, amiért nagyon hálás vagyok.

Nagy köszönettel tartozom Eipl Andrásnak és Molnár Péternek a fáradtságot és időt nem kímélő támogatásért, a betonkeverések és vizsgálatok során nyújtott segítségért, hasznos észrevételekért. Nélkülük aligha készülhetett volna el ez a dolgozat.

Szeretném megköszönni Hídvégi Emilnek és Némethy Ferencnek a laboratóriumban végzett mérések során nyújtott támogatást, a műszerek használatában nyújtott segítséget és hasznos ötleteket, melyek segítettek a dolgozat finomításában.

Szeretnék köszönetet mondani Dr. Rajkai Kálmán biológusnak, az MTA doktorának és Bányász Ágnesnek a víztartási görbe mérések és a modellezés során nyújtott segítségért, a mérőberendezések használatának bemutatásáért és a hasznos tanácsokért, melyekkel mindig elhalmoztak.

Köszönettel tartozom a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnikai Tanszékének, az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének és a Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézetének, hogy a rendelkezésemre álló körülményeket és anyagokat biztosították a kísérleteim során.

9. IRODALOMJEGYZÉK

Felhasznált irodalom:

- [1] **Dr. Imre Emőke:** „Telítetlen talajmechanika”, egyetemi jegyzet. Bp. 2009
- [2] **D. G. Fredlund, H. Rahardjo:** „Soil Mechanics for Unsaturated Soils”. 1993
- [3] **HEFOP/2004/3.3.1/0001.01:** „Talajmechanika”. 2004. 40-42.p.
- [4] **Dr. Kabai Imre:** „Geotechnika I.”. Műegyetem Kiadó. Bp. 2005
- [5] **Faur Krisztina Beáta, Szabó Imre:** „Geotechnika”, internetes jegyzet. 2011
Internetes elérhetőség:
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033_SCORM_MFKHT6504SI/co_01_04.htm
- [6] **Dr. Nagy László:** „Áteresztőképességi együtttható”. Vízépítési földművek című tárgy, előadás fólia.
Internetes elérhetőség:
<http://www.gtt.bme.hu/gtt/oktatas/feltoltesek/BMEEOGTMIT5/ateresztokepesseg.pdf>
- [7] **Dr. Nagy László:** „Áteresztőképességi együtttható összehasonlító vizsgálata”. In: Dr. Kézdi Árpád Emlékkonferencia. Szerk.: Dr. Nagy László. Bp. 2008. 97-106.p.
- [8] **Dr. Pusztai József, Rémai Zsolt:** „Talajmechanika, gyakorlati útmutató”. Budapest. 2001
- [9] **Dr. Orosz Árpád:** „Vízáró beton”. Mélyépítési vasbeton szerkezetek című tárgy, előadás fólia. 2012
Internetes elérhetőség:
http://www.hsz.bme.hu/hsz/oktatas/feltoltesek/BMEEOHSASC3/beton_nemlim_ala_kvalt2.pdf
- [10] **Kovács József:** „Cement - Beton Zsebkönyv”. Duna-Dráva Cement Kft. 2007
- [11] **Dr. Balázs L. György, Dr. Kausay Tibor:** „Vízáró beton és vizsgálata”. In: Vasbetonépítés. 2010/2. 47-57.p.
- [12] **Dr. Kausay Tibor:** „Vízáróság, vízáróság vizsgálat”, internetes publikáció.
Internetes elérhetőség:
<http://www.betonopus.hu/notesz/kutyanyelv/vizarosag/vizarosag.pdf>
- [13] **Szegőné Kertész Éva, Dr. Zsigovics István, Forgács Szilárd, Pluzsik Tamás, Szilágyi János:** „Cement-beton Kisokos”. 2008

- [14] **Holcim Hungária Zrt.:** „CEM I 42,5 N-S - Szulfátálló portlandcement”, termékismertető.

Internetes elérhetőség:

<http://www.holcim.hu/termekek-es-szolgalatasok/termekek/cement/cem-i-425-n-s-szulfatallo-portlandcement.html>

- [15] **Holcim Hungária Zrt.:** „CEM II/A-S 42,5 N – Kohósalak-portlandcement”, termékismertető.

Internetes elérhetőség:

<http://www.holcim.hu/termekek-es-szolgalatasok/termekek/cement/cem-ii-a-s-425-n-kohosalak-portlandcement.html>

- [16] **MAPEI Hungária Kft.:** „Folyósító adalékszerek”, termékismertető.

Internetes elérhetőség:

[http://down.archicentrum.hu/19/tadatlapok/dynamon_sr3.pdf?f \[cegid\]=19](http://down.archicentrum.hu/19/tadatlapok/dynamon_sr3.pdf?f [cegid]=19)

- [17] **Dr. Nehme Salem Georges:** „A beton porozitása”. PhD értekezés. 2004

- [18] **Dr. Micskeiné Dr. Csubák Mária:** „A talajok vízgazdálkodása”. Előadás fólia. 2011

Internetes elérhetőség:

http://www.agr.unideb.hu/~csubak/Agrartermeles_III/vizgazdalkodas.pdf

- [19] **M. T. Van Genuchten:** “A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”. 1980. Soil Sc. Soc. Am J. 44:892-898.

- [20] **Kevin D. Park, Ian R. Fleming:** „Evaluation of a geosynthetic capillary barrier”. In: Geotextiles and Geomembranes. 2006. 64-71.p.

Hivatkozott szabványok:

MSZ 4715-3:1972	Megszilárdult beton vizsgálata. Hidrotechnikai tulajdonságok
MSZ 4719:1982	Betonok
MSZ EN 12390-8:2009	A megszilárdult beton vizsgálata. 8. rész: A vízzáróság vizsgálata
ME-19-63:1964	Műszaki előírás beton és vasbeton készítésére
MSZ EN 12620:2006	Kőanyaghalmozok (adalékanyagok) betonhoz
MSZ EN 1997-2:2008	Geotechnikai tervezés. 2 rész: Talajfeltárás és talajvizsgálatok
MSZ EN 206-1:2002:	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés
MSZ 4798-1:2004:	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelés, valamint az MSZ EN 206-1 alkalmazási feltételei Magyarországon
MSZ EN 1992-2:2006 EC 2:	Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok

10. MELLÉKLETEK

„A” melléklet – Alkalmazott betonreceptúrák

10-1. táblázat: 1. keverés – „B” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	847	320	33,870
	4/8 mm frakció	55%	1036	391	41,400
	Összesen	100%	1883	711	75,270
Cement	CEM II A-S 42,5 S		300	97	12,000
Víz	$m_w/m_c=$	59,0%	177	177	7,070
Adalékszer cem. m%		0,0%	0	0	0,000
Levegő			-	15	
Összesen			2360	1000	

10-2. táblázat: 2. keverés – „Ö” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	824	311	32,930
	4/8 mm frakció	55%	1007	380	40,270
	Összesen	100%	1831	691	73,200
Cement	CEM II A-S 42,5 S		360	116	14,400
Víz	$m_w/m_c=$	49,0%	177	177	7,056
Adalékszer cem. m%		0,08%	0,29	0,29	0,018
Levegő			-	15	
Összesen			2368	1000	

10-3. táblázat: 3. keverés – „H” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	800	302	32,000
	4/8 mm frakció	55%	977	369	39,070
	Összesen	100%	1777	671	71,070
Cement	CEM II A-S 42,5 S		420	135	16,800
Víz	$m_w/m_c=$	42,0%	177	177	7,070
Adalékszer cem. m%		0,13%	0,55	0,55	0,021
Levegő			-	15	
Összesen			2375	1000	

10-4. táblázat: 4. keverés – „J” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	847	320	33,870
	4/8 mm frakció	55%	1036	391	41,400
	Összesen	100%	1883	711	75,270
Cement	CEM I 42,5 N S		300	97	12,000
Víz	m _w /m _c =	59,0%	177	177	7,070
Adalékszer cem. m%		0,13%	0,39	0,39	0,015
Levegő			-	15	
Összesen			2360	1000	

10-5. táblázat: 5. keverés – „K” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	824	311	32,930
	4/8 mm frakció	55%	1007	380	40,270
	Összesen	100%	1831	691	73,200
Cement	CEM II A-S 42,5 S		360	116	14,400
Víz	m _w /m _c =	49,0%	177	177	7,056
Adalékszer cem. m%		0,17%	0,63	0,63	0,025
Levegő			-	15	
Összesen			2369	1000	

10-6. táblázat: 6. keverés – „L” jelű betonreceptúra

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg, kg/m ³	Térfogat, l/m ³	40 liter
Adalékanyag	0/4 mm frakció	45%	800	302	32,000
	4/8 mm frakció	55%	977	369	39,070
	Összesen	100%	1777	671	71,070
Cement	CEM II A-S 42,5 S		420	135	16,800
Víz	m _w /m _c =	42,0%	176	176	7,070
Adalékszer cem. m%		0,24%	1,00	1,00	0,040
Levegő			-	15	
Összesen			2374	1000	

„B” melléklet – Vízáróság vizsgálat

10-7. táblázat: 1. keverés – Vízáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	1. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nem nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.08
Vizsgálat vége:	2013.04.11
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

Próbatest jele:	Behatolás mélysége:	Vízárósági osztály:
02	31,1 mm	XV1(H)
59	56,0 mm	
460	41,1 mm	

10-8. táblázat: 2. keverés – Vízáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	2. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nem nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.12
Vizsgálat vége:	2013.04.15
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

Próbatest jele:	Behatolás mélysége:	Vízárósági osztály:
006	38,2 mm	XV2(H)
005	30,7 mm	
BP	27,8 mm	

10-9. táblázat: 3. keverés – Vízzáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízzáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	3. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nem nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.12
Vizsgálat vége:	2013.04.15
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

<i>Próbatest jele:</i>	<i>Behatolás mélysége:</i>	<i>Vízzárósági osztály:</i>
946	27,4 mm	XV2(H)
506	25,2 mm	
53	30,1 mm	

10-10. táblázat: 4. keverés – Vízzáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízzáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	4. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.19
Vizsgálat vége:	2013.04.22
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

<i>Próbatest jele:</i>	<i>Behatolás mélysége:</i>	<i>Vízzárósági osztály:</i>
258	43,9 mm	XV1(H)
577	46,1 mm	
938	55,1 mm	

10-11. táblázat: 5. keverés – Vízáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	5. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nem nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.19
Vizsgálat vége:	2013.04.22
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

<i>Próbatest jele:</i>	<i>Behatolás mélysége:</i>	<i>Vízárósági osztály:</i>
904	30,0 mm	XV2(H)
59	32,8 mm	
924	31,4 mm	

10-12. táblázat: 6. keverés – Vízáróság vizsgálat jegyzőkönyv

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Beton vízáróság vizsgálata
MSZ EN 12390-8:2001

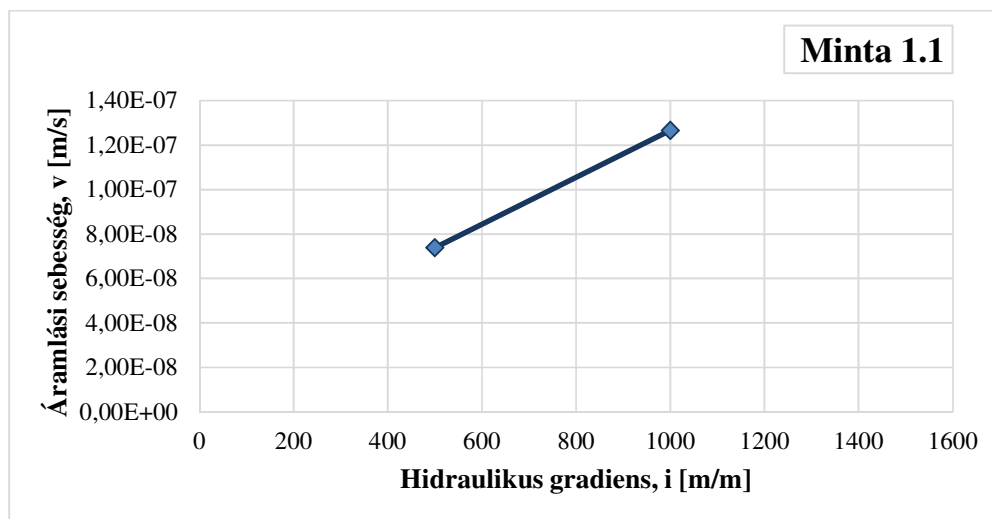
Vizsgálatot végző:	Pap Miklós
Minta jele:	6. keverés
Minta felületének előkészítése:	érdesített
Minta felülete vizsgálatkor:	nem nedves
Víznyomás iránya a bedolgozási felülethez képest:	merőleges
Vizsgálat kezdete:	2013.04.22
Vizsgálat vége:	2013.04.25
Próbatest névleges mérete:	150x150x150
Nyomás fokozat:	5 bar

<i>Próbatest jele:</i>	<i>Behatolás mélysége:</i>	<i>Vízárósági osztály:</i>
917	18,5 mm	XV3(H)
902	19,3 mm	
949	18,0 mm	

„C” melléklet – A vizsgálati minták v-i diagramjai

10-13. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 1. receptúra 1. minta

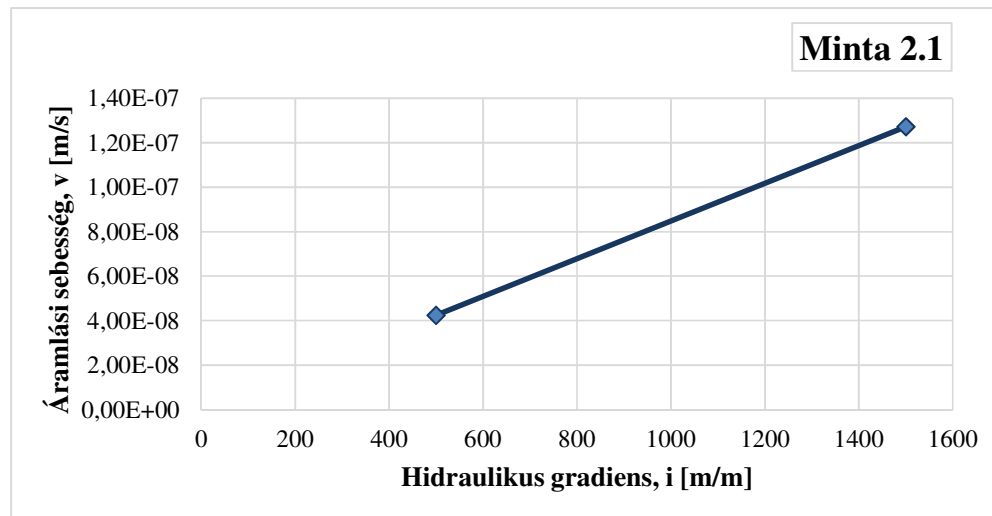
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 1.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,48E-10	1,27E-10	5,77E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség, v [m/s]	-	7,39E-08	1,27E-07	8,65E-07



10-1. ábra: Az első receptúra első mintájának v-i diagramja

10-14. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 1. receptúra 2. minta

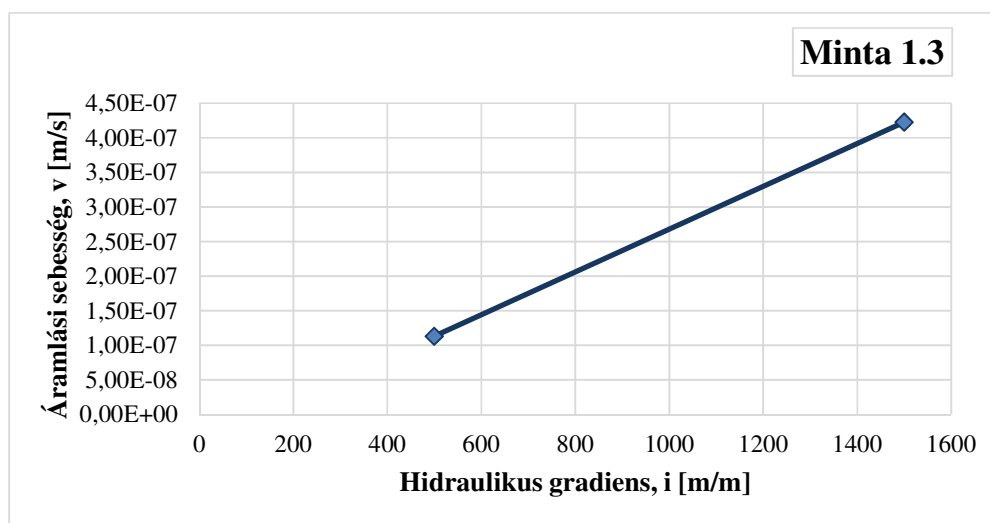
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 1.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	8,48E-11	-	8,48E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség, v [m/s]	-	4,24E-08	-	1,27E-07



10-2. ábra: Az első receptúra második mintájának v-i diagramja

10-15. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 1. receptúra 3. minta

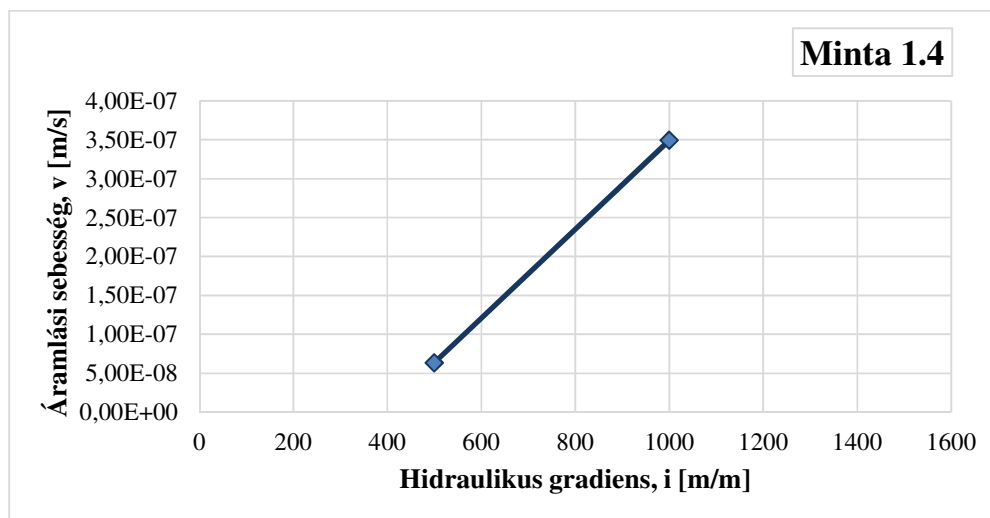
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 1.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,27E-10	-	2,82E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,13E-07	-	4,23E-07



10-3. ábra: Az első receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-16. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 1. receptúra 4. minta

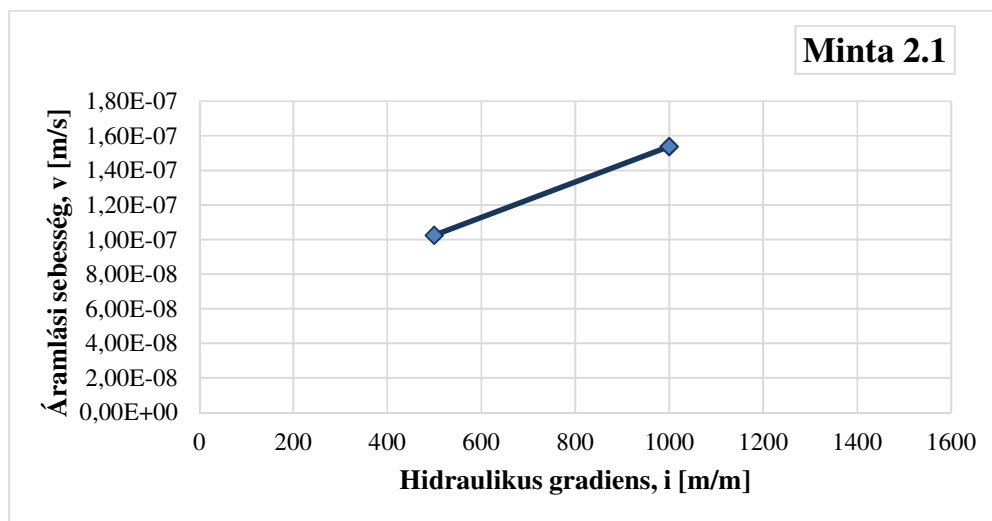
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 1.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,27E-10	3,49E-10	7,91E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	6,35E-08	3,49E-07	1,19E-06



10-4. ábra: Az első receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

10-17. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 2. receptúra 1. minta

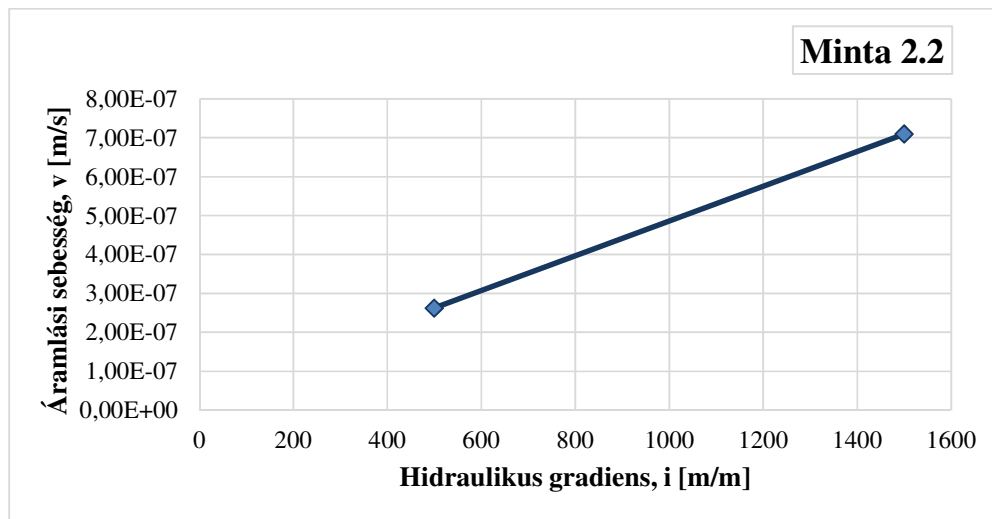
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 2.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,05E-10	1,54E-10	7,18E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,03E-07	1,54E-07	1,08E-06



10-5. ábra: A második receptúra első mintájának v-i diagramja

10-18. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 2. receptúra 2. minta

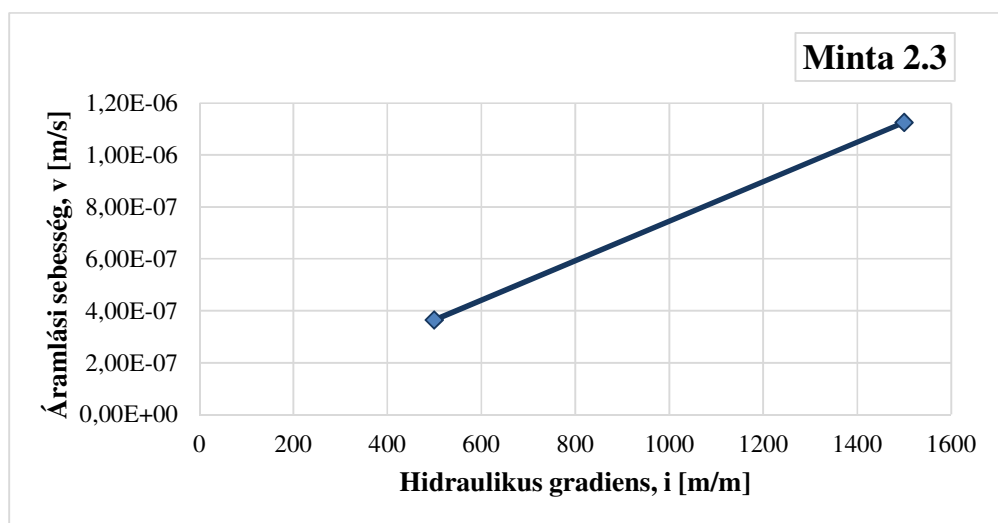
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 2.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	5,26E-10	-	4,73E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	2,63E-07	-	7,10E-07



10-6. ábra: A második receptúra második mintájának v-i diagramja

10-19. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 2. receptúra 3. minta

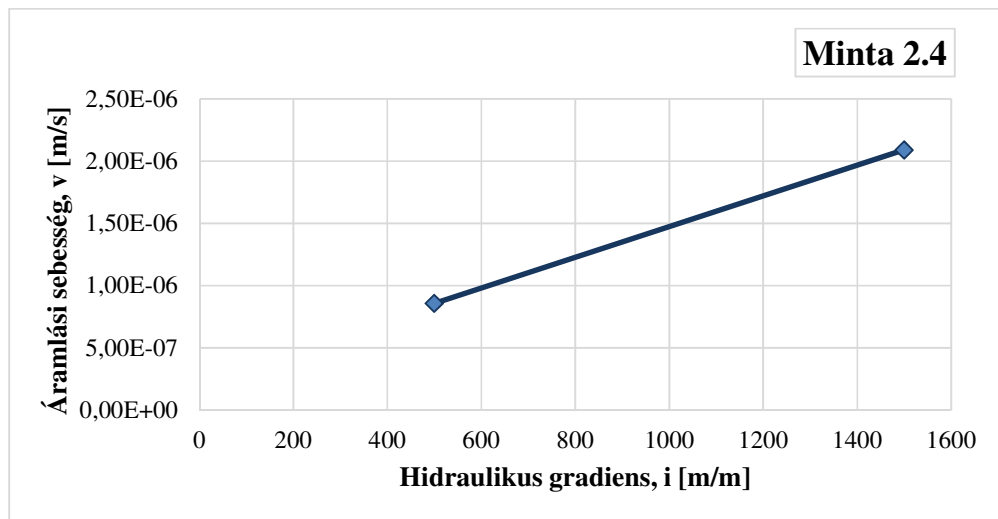
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 2.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	7,30E-10	-	7,51E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	3,65E-07	-	1,13E-06



10-7. ábra: A második receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-20. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 2. receptúra 4. minta

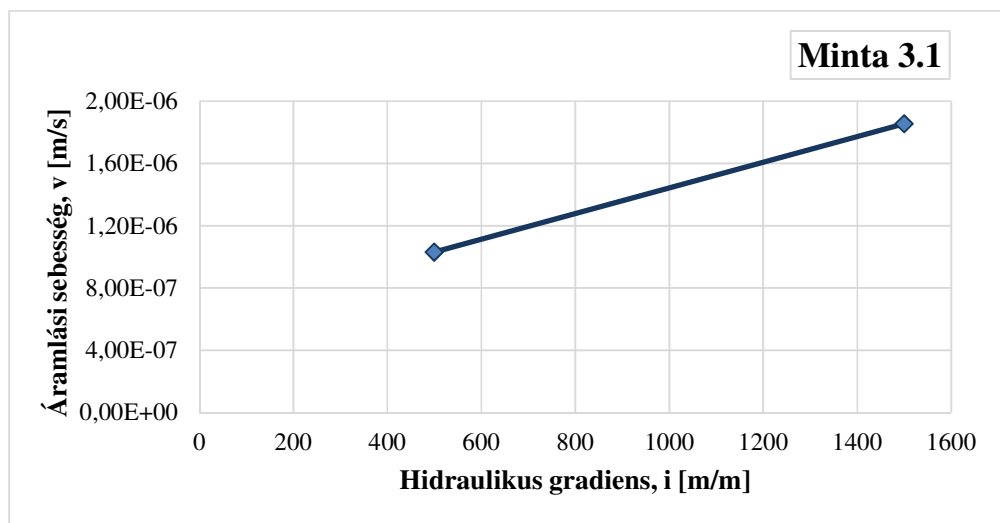
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 2.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,72E-09	-	1,39E-09
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	8,58E-07	-	2,09E-06



10-8. ábra: A második receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

10-21. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 3. receptúra 1. minta

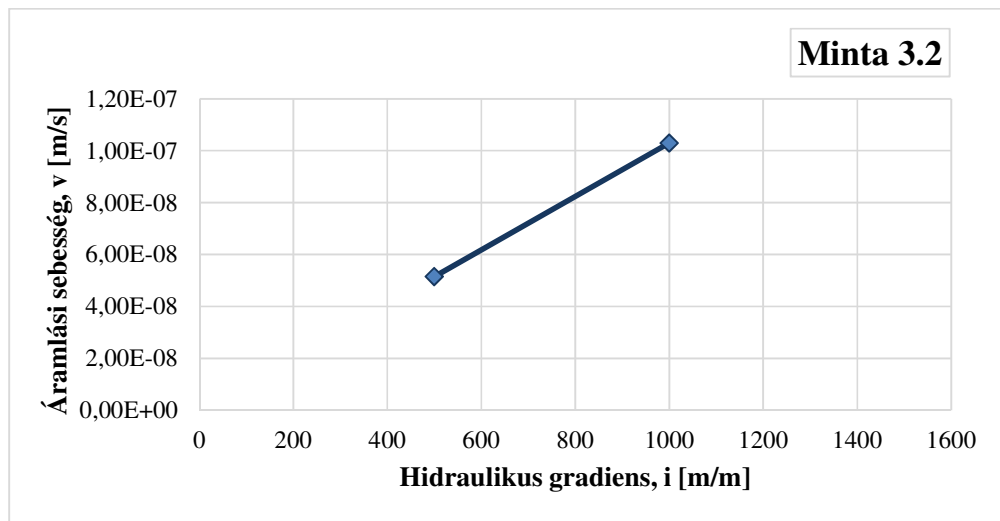
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 3.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,06E-09	-	1,24E-09
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,03E-06	-	1,86E-06



10-9. ábra: A harmadik receptúra első mintájának v-i diagramja

10-22. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 3. receptúra 2. minta

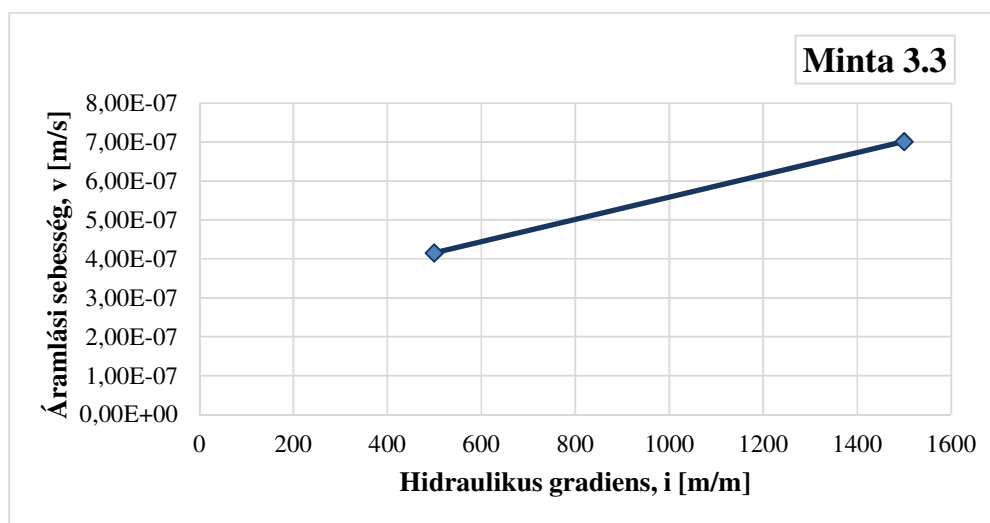
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 3.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,03E-10	1,03E-10	8,24E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	5,15E-08	1,03E-07	1,24E-07



10-10. ábra: A harmadik receptúra második mintájának v-i diagramja

10-23. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 3. receptúra 3. minta

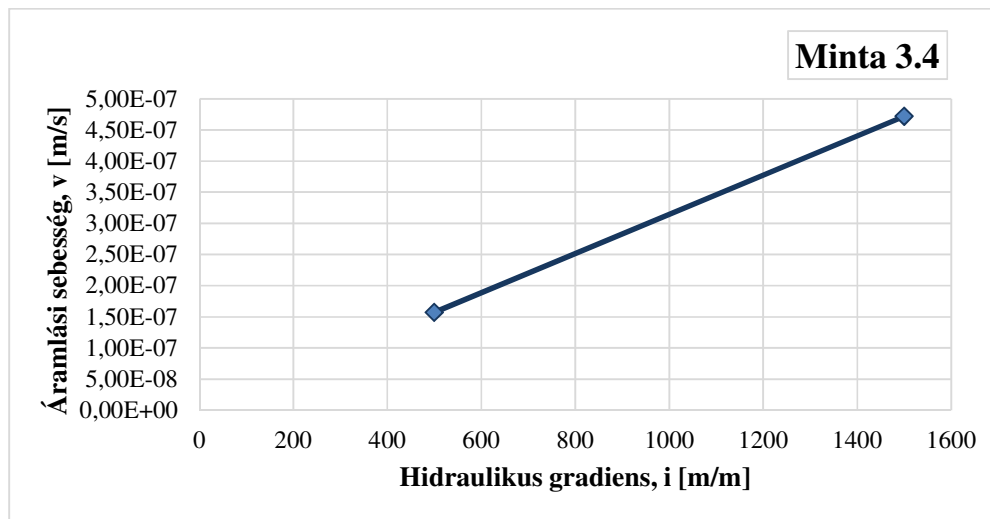
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 3.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	8,32E-10	-	4,68E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	4,16E-07	-	7,02E-07



10-11. ábra: A harmadik receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-24. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 3. receptúra 4. minta

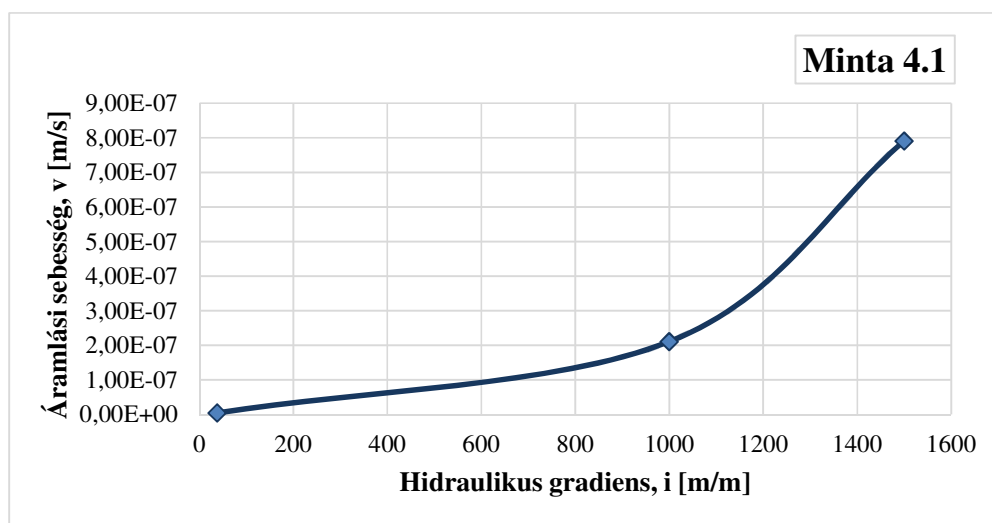
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 3.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	3,15E-10	-	3,15E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,57E-07	-	4,72E-07



10-12. ábra: A harmadik receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

10-25. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 4. receptúra 1. minta

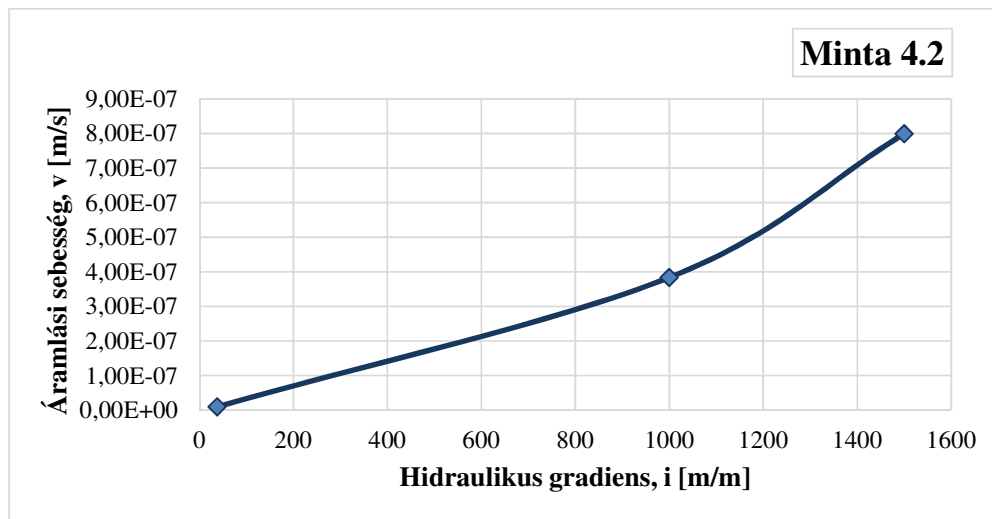
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 4.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	7,6 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	1,26E-10	1,05E-09	2,11E-10	5,27E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	38	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	4,80E-09	5,27E-07	2,11E-07	7,91E-07



10-13. ábra: A negyedik receptúra első mintájának v-i diagramja

10-26. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 4. receptúra 2. minta

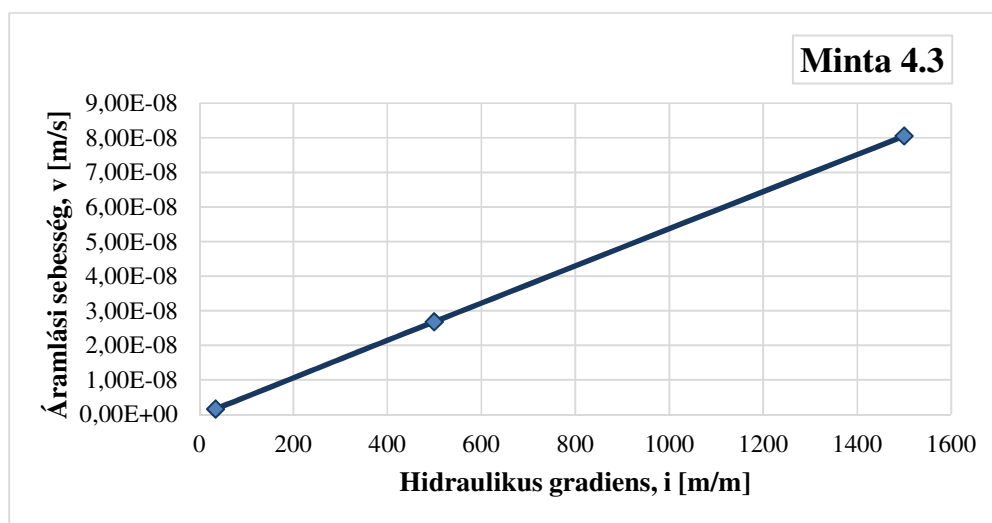
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 4.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	7,6 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	2,67E-10	1,41E-09	3,84E-10	5,33E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	38	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	1,01E-08	7,04E-07	3,84E-07	7,99E-07



10-14. ábra: A negyedik receptúra második mintájának v-i diagramja

10-27. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 4. receptúra 3. minta

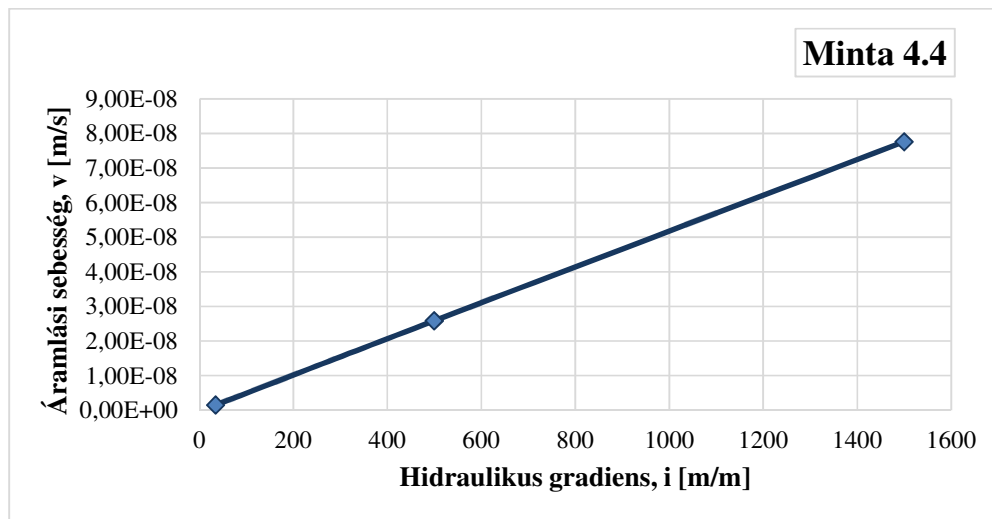
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 4.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	6,9 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	4,64E-11	5,37E-11	-	5,37E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	34,5	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	1,60E-09	2,68E-08	-	8,05E-08



10-15. ábra: A negyedik receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-28. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 4. receptúra 4. minta

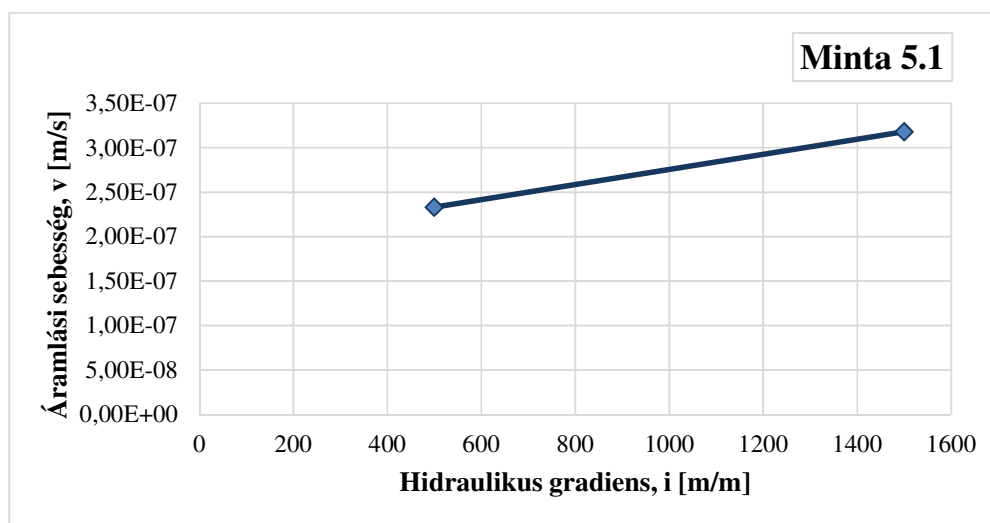
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 4.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	6,9 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	4,36E-11	5,18E-11	-	5,18E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	34,5	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	1,50E-09	2,59E-08	-	7,76E-08



10-16. ábra: A negyedik receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

10-29. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 1. minta

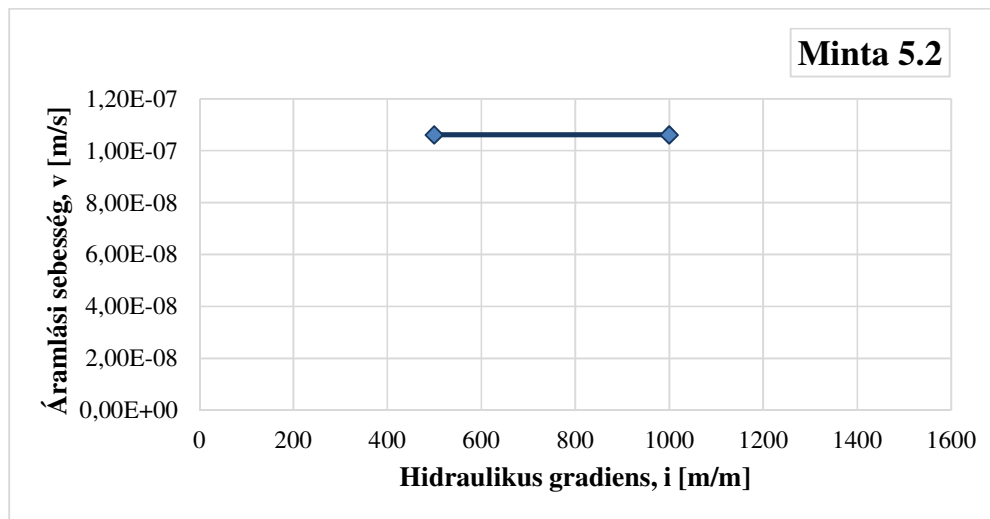
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 5.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	4,66E-10	-	2,12E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	2,33E-07	-	3,18E-07



10-17. ábra: Az ötödik receptúra első mintájának v-i diagramja

10-30. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 2. minta

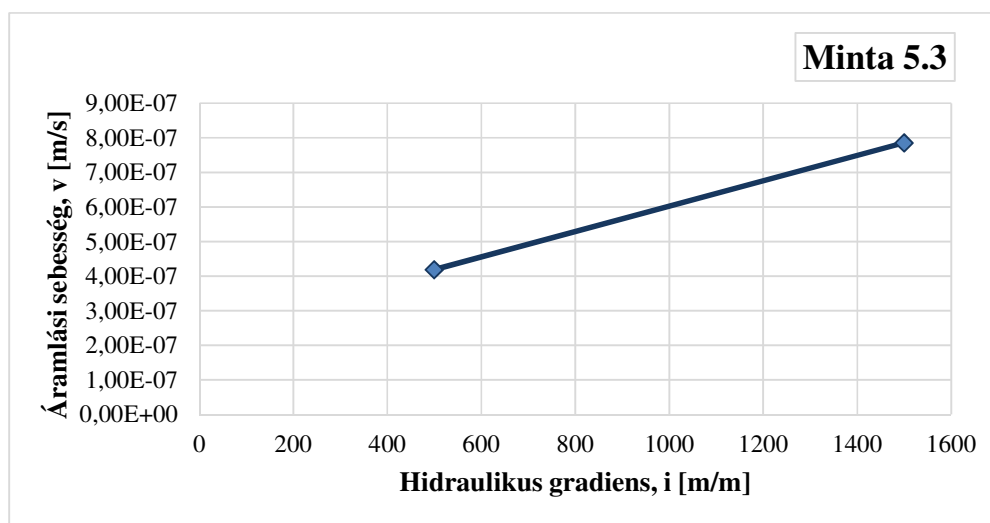
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 5.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,12E-10	1,06E-10	5,31E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,06E-07	1,06E-07	7,96E-08



10-18. ábra: Az ötödik receptúra második mintájának v-i diagramja

10-31. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 3. minta

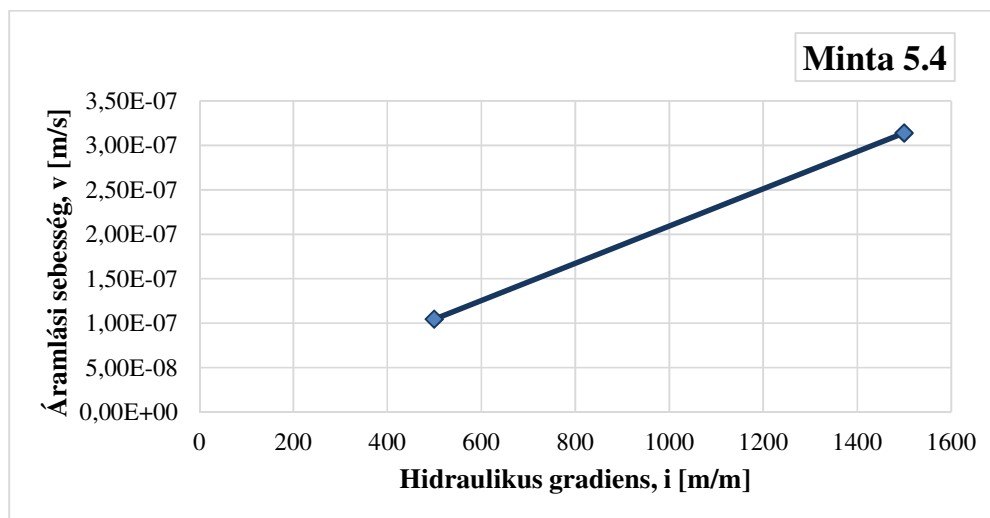
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 5.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	8,38E-10	-	5,24E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	4,19E-07	-	7,85E-07



10-19. ábra: Az ötödik receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-32. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 5. receptúra 4. minta

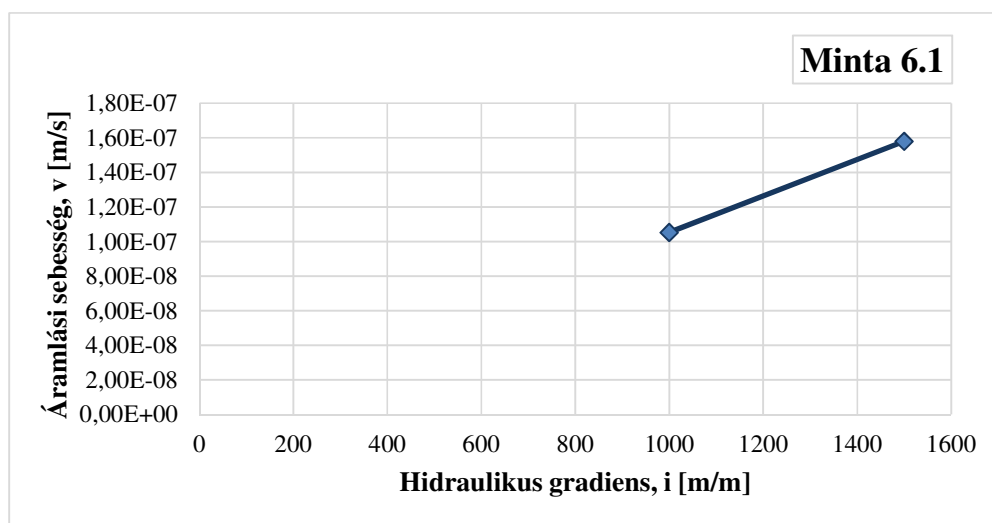
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 5.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	2,09E-10	-	2,09E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,05E-07	-	3,14E-07



10-20. ábra: Az ötödik receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

10-33. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 6. receptúra 1. minta

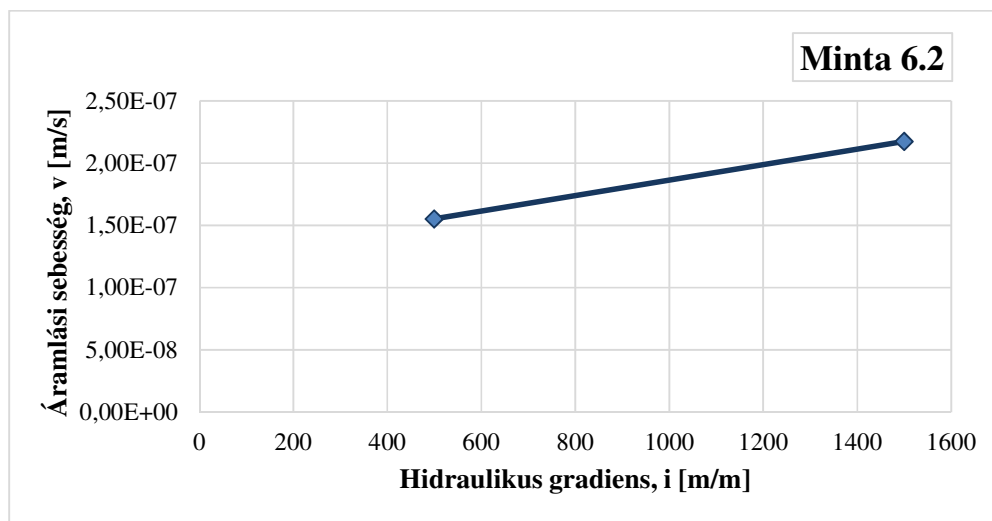
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 6.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 1.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	3,16E-10	1,05E-10	1,05E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	1000	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,58E-07	1,05E-07	1,58E-07



10-21. ábra: A hatodik receptúra első mintájának v-i diagramja

10-34. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 6. receptúra 2. minta

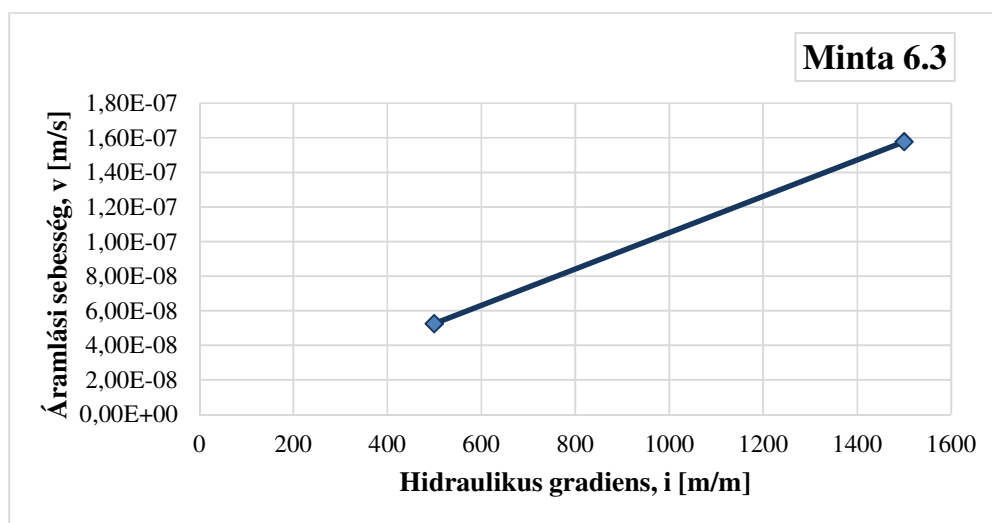
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 6.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 2.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	3,11E-10	-	1,45E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	1,55E-07	-	2,17E-07



10-22. ábra: A hatodik receptúra második mintájának v-i diagramja

10-35. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 6. receptúra 3. minta

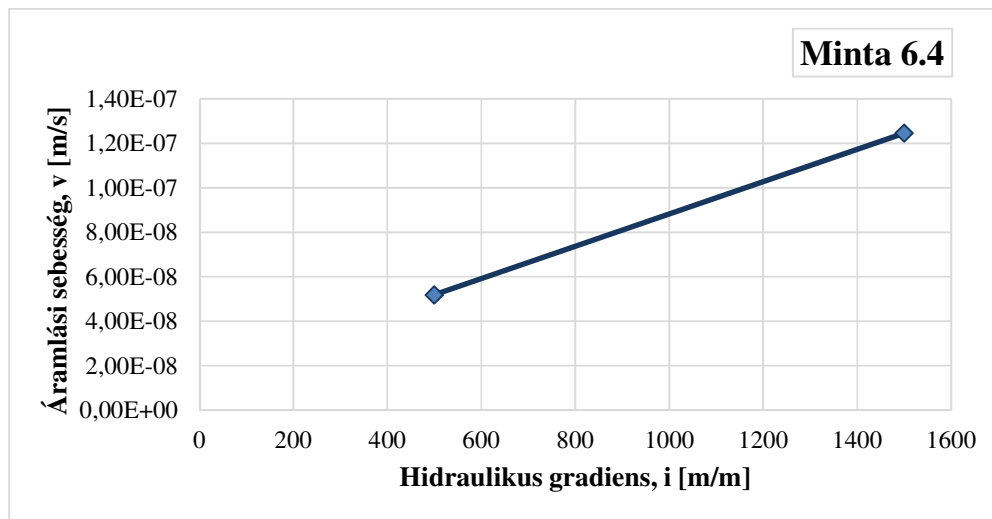
v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 6.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 3.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,05E-10	-	1,05E-10
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	5,26E-08	-	1,58E-07



10-23. ábra: A hatodik receptúra harmadik mintájának v-i diagramja

10-36. táblázat: A v-i diagram meghatározása – 6. receptúra 4. minta

v-i diagram meghatározása	Receptúra száma: 6.		Minta magassága L	2,0 cm
	Minta száma: 4.		Minta átmérője d	3,8 cm
Víznyomásérték:	5-10 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa
Vízáteresztő-képességi együttható, k [m/s]	-	1,04E-10	-	8,31E-11
Hidraulikus gradiens, i [m/m]	-	500	-	1500
Áramlási sebesség [m/s]	-	5,19E-08	-	1,25E-07

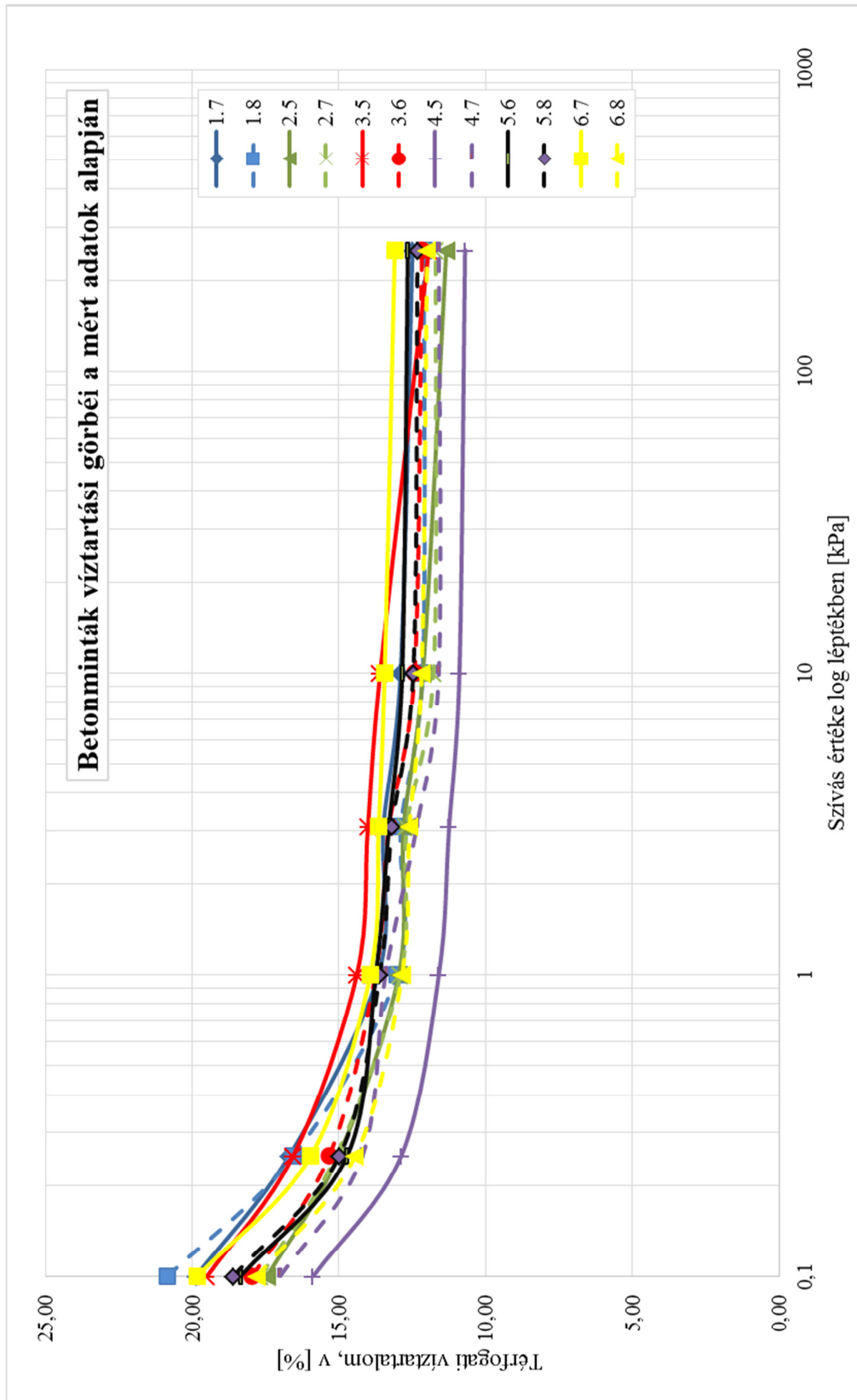


10-24. ábra: A hatodik receptúra negyedik mintájának v-i diagramja

„D” melléklet – Víztartási görbék meghatározása

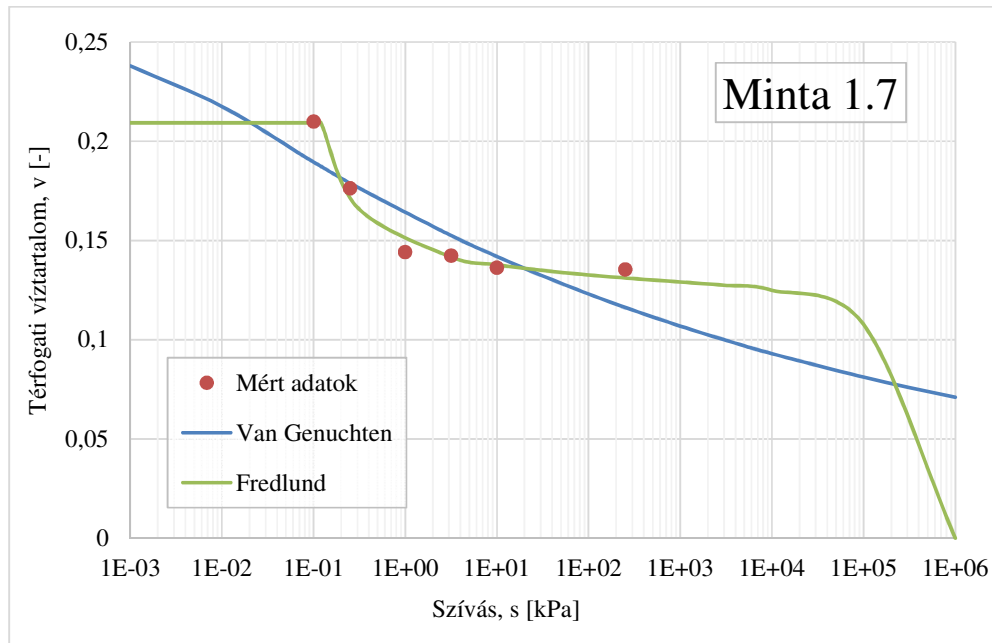
10-37. táblázat: Víztartási görbe vizsgálat eredményei

Minta száma	pF 0		pF 0,4		pF 1,0		pF 1,5		pF 2,0		pF 3,4		Száraz tömeg [g]	Térfogat [cm ³]	Test-sűrűség [kg/m ³]
	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]	Tömeg [g]	Víztartalom [m%]			
1.7	58,11	8,92	57,35	7,50	56,62	6,13	56,58	6,05	56,44	5,79	56,44	-	53,35	23,95	2227,32
1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56,74	53,77	23,77	2262,00
1.8	59,66	9,27	58,62	7,36	57,76	5,79	57,73	5,73	57,55	5,40	57,55	-	54,60	24,28	2248,63
1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,10	54,18	24,12	2246,02
2.5	59,00	7,74	58,41	6,67	57,91	5,75	57,87	5,68	57,71	5,39	57,71	-	54,76	24,30	2253,12
2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59,47	56,68	24,60	2304,16
2.7	59,43	7,72	58,81	6,60	58,28	5,64	58,23	5,55	58,01	5,15	58,01	-	55,17	24,11	2288,14
2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56,74	53,94	23,93	2254,09
3.5	58,37	8,68	57,67	7,37	57,15	6,40	57,06	6,24	56,96	6,05	56,96	-	53,71	23,91	2246,61
3.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,04	54,21	23,70	2287,05
3.6	58,94	7,91	58,31	6,76	57,93	6,06	57,82	5,86	57,61	5,47	57,61	-	54,62	24,07	2269,60
3.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,44	55,50	24,16	2297,50
4.5	62,74	6,96	61,97	5,64	61,64	5,08	61,55	4,93	61,46	4,77	61,46	-	58,66	25,70	2282,58
4.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,27	55,62	24,76	2246,57
4.7	62,62	7,39	61,91	6,17	61,71	5,83	61,44	5,37	61,25	5,04	61,25	-	58,31	25,35	2300,43
4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,74	55,91	24,41	2290,82
5.6	60,45	8,04	59,56	6,45	59,32	6,02	59,21	5,83	59,10	5,63	59,10	-	55,95	24,52	2281,85
6.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	57,56	54,52	24,03	2268,65
5.8	61,31	8,07	60,42	6,50	60,08	5,91	59,98	5,73	59,80	5,41	59,80	-	56,73	24,62	2304,07
5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,80	55,78	24,51	2275,97
6.7	61,00	8,70	60,05	7,00	59,55	6,11	59,48	5,99	59,43	5,90	59,43	-	56,12	24,62	2279,30
6.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,97	55,72	24,81	2245,47
6.8	60,10	7,74	59,29	6,29	58,90	5,59	58,84	5,49	58,74	5,31	58,74	-	55,78	24,29	2296,16
6.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,85	55,92	24,43	2289,10

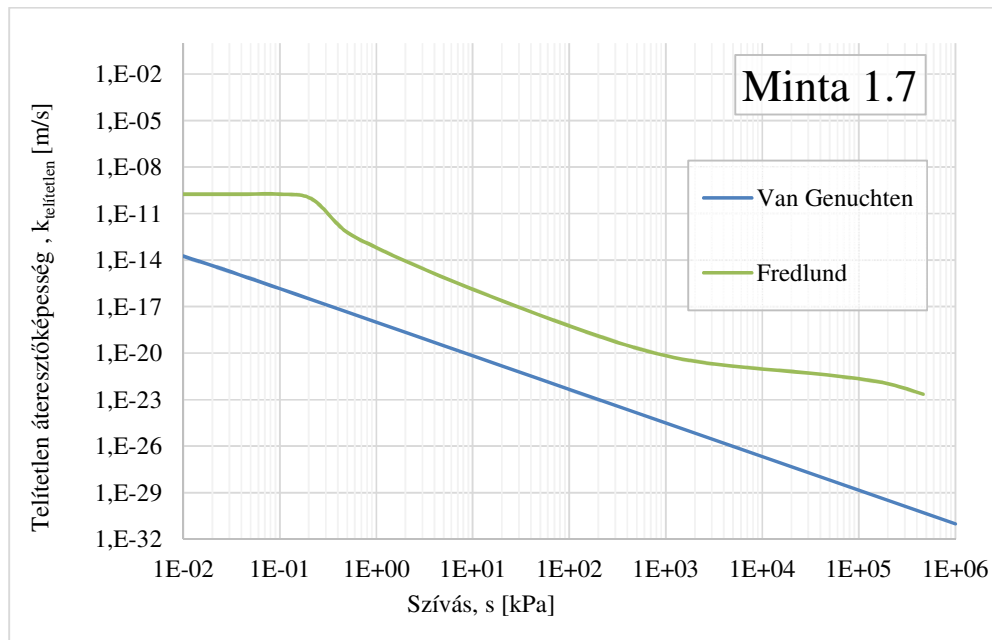


10-25. ábra: Víztartási görbék

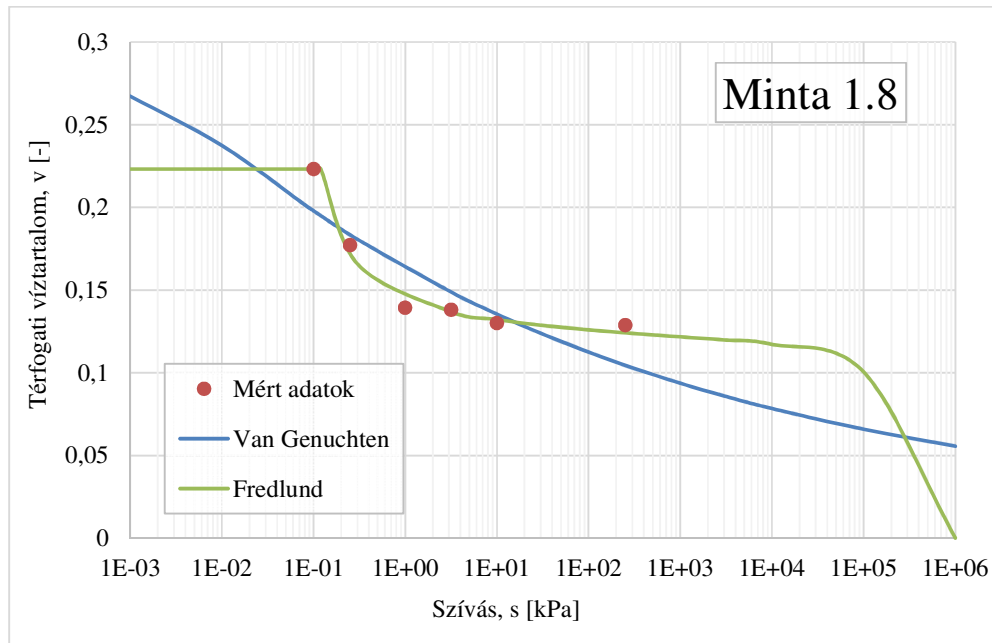
„E” melléklet – Telítetlen áteresztőképesség számítása



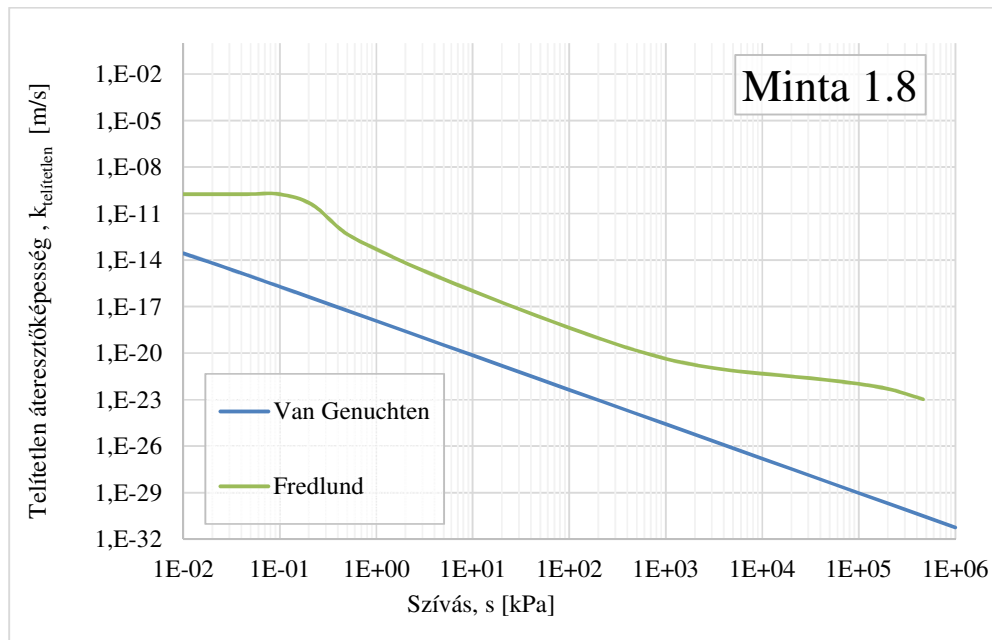
10-26. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 1.7



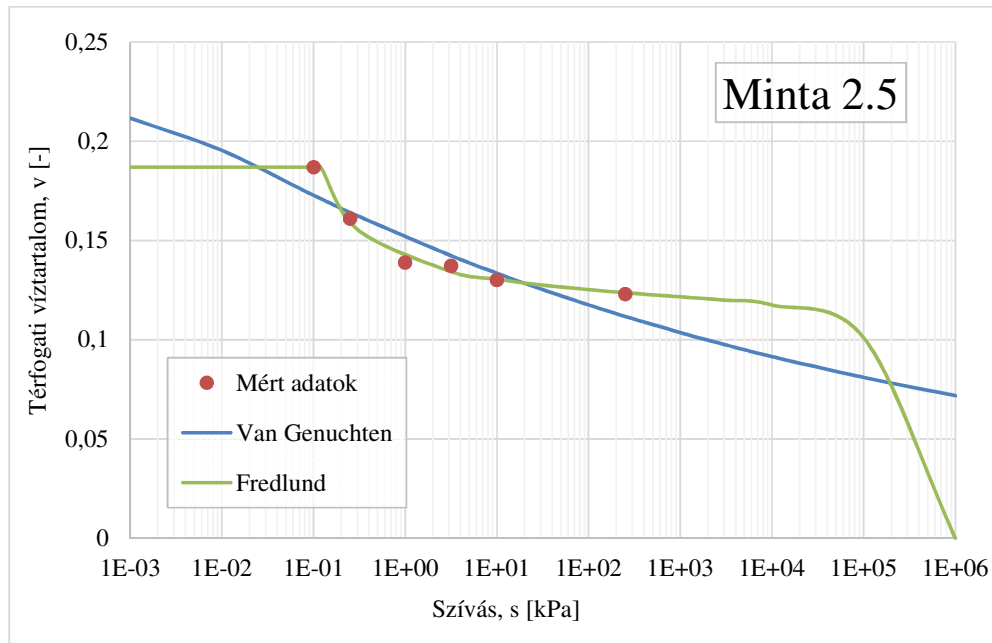
10-27. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 1.7



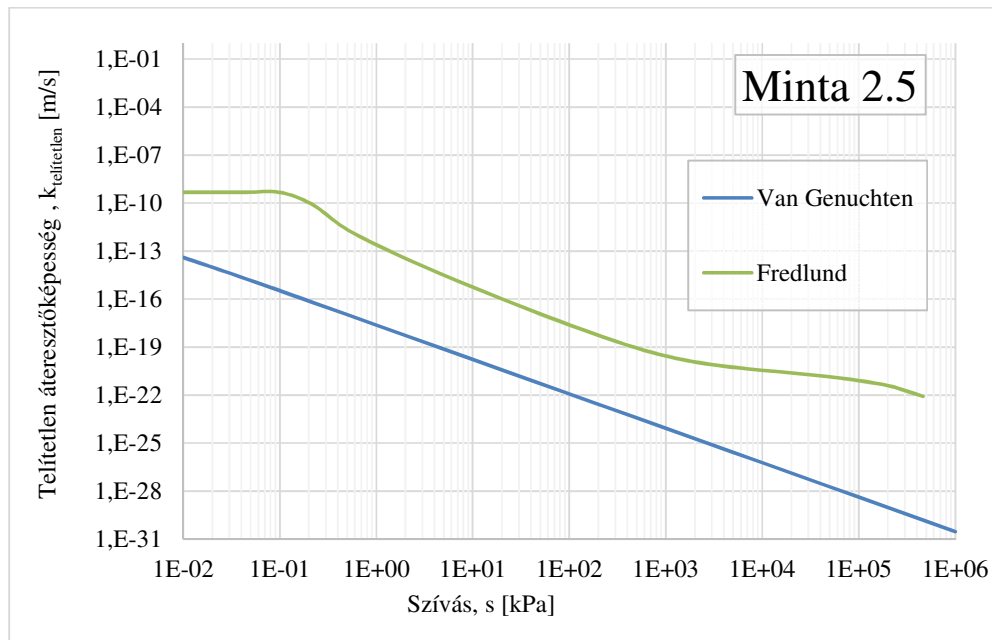
10-28. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 1.8



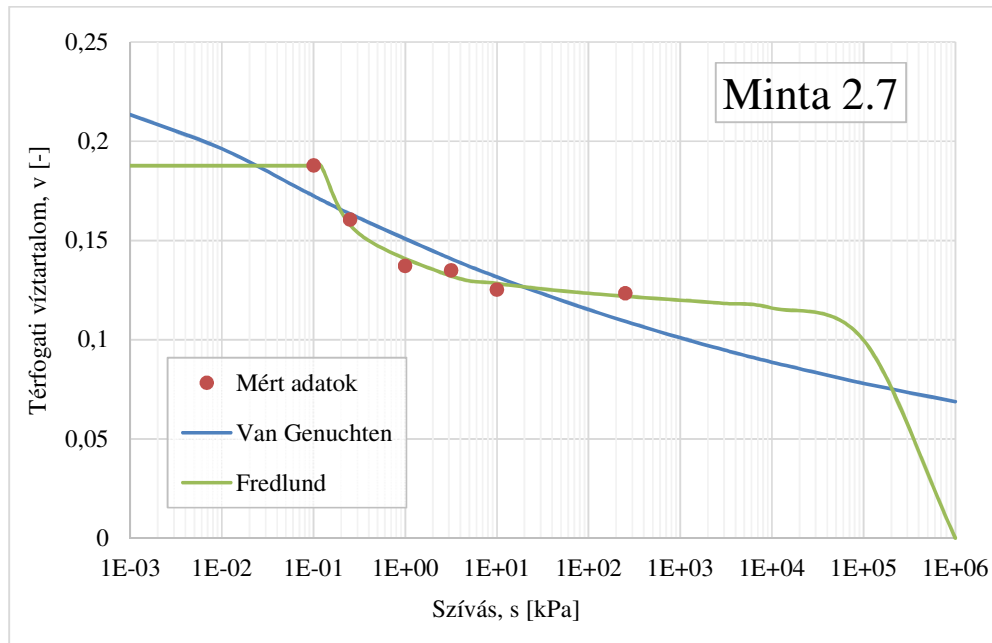
10-29. ábra: Telítetlen átteresztőképesség – szívás függvény – Minta 1.8



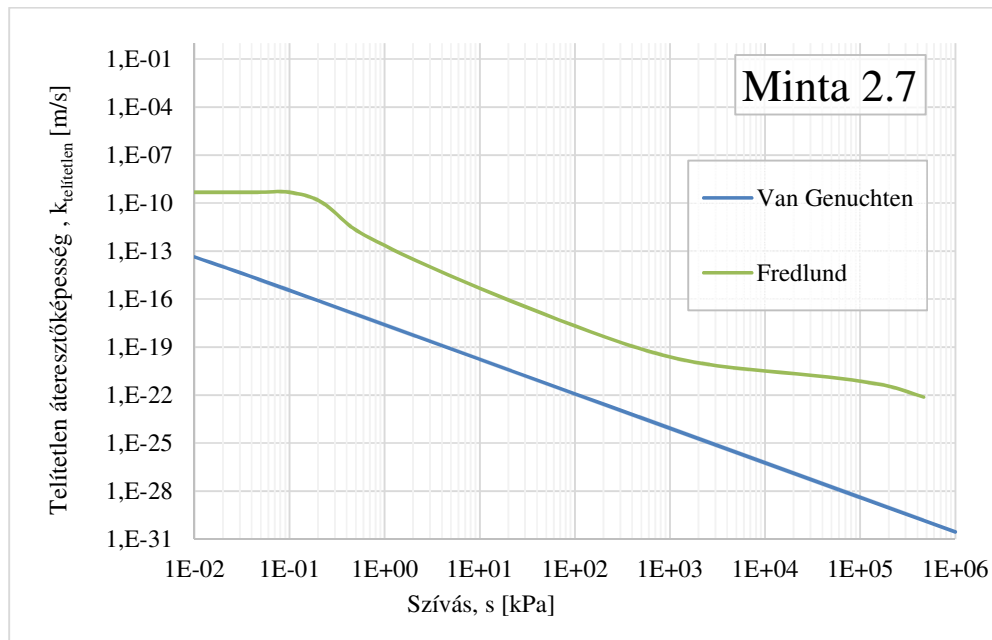
10-30. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 2.5



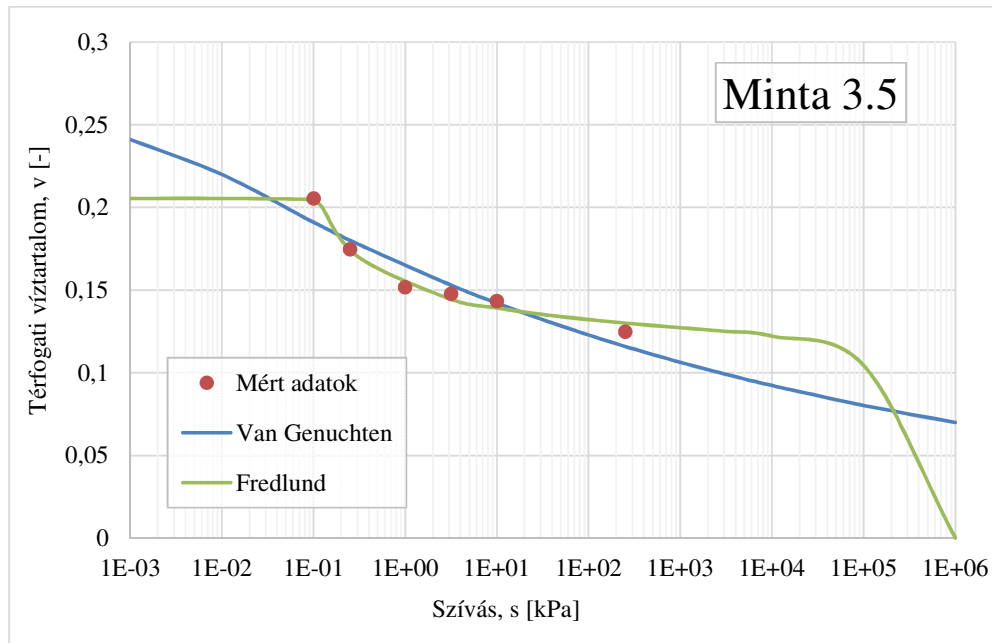
10-31. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 2.5



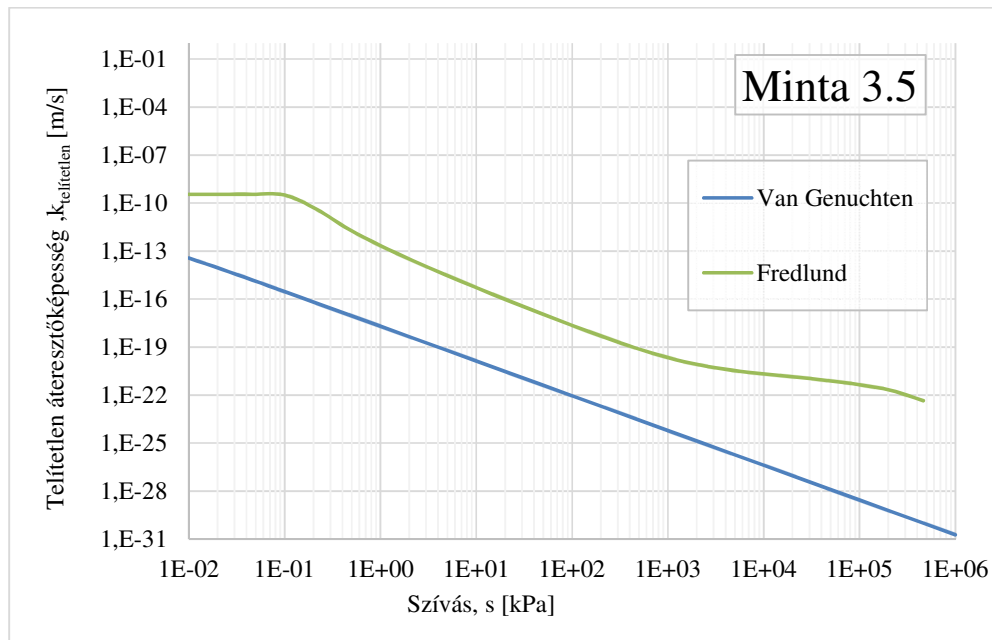
10-32. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 2.7



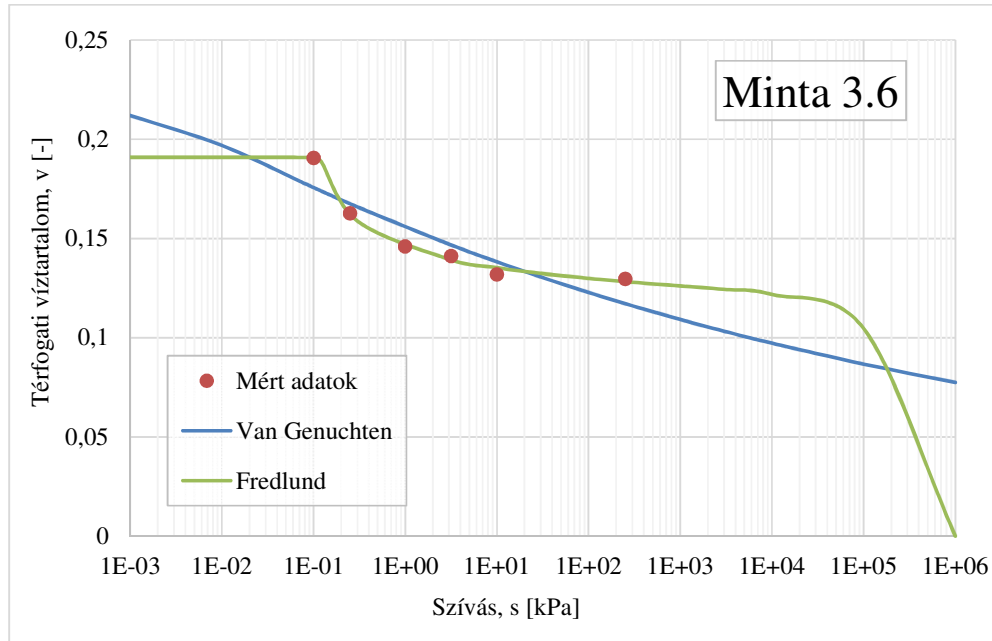
10-33. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 2.7



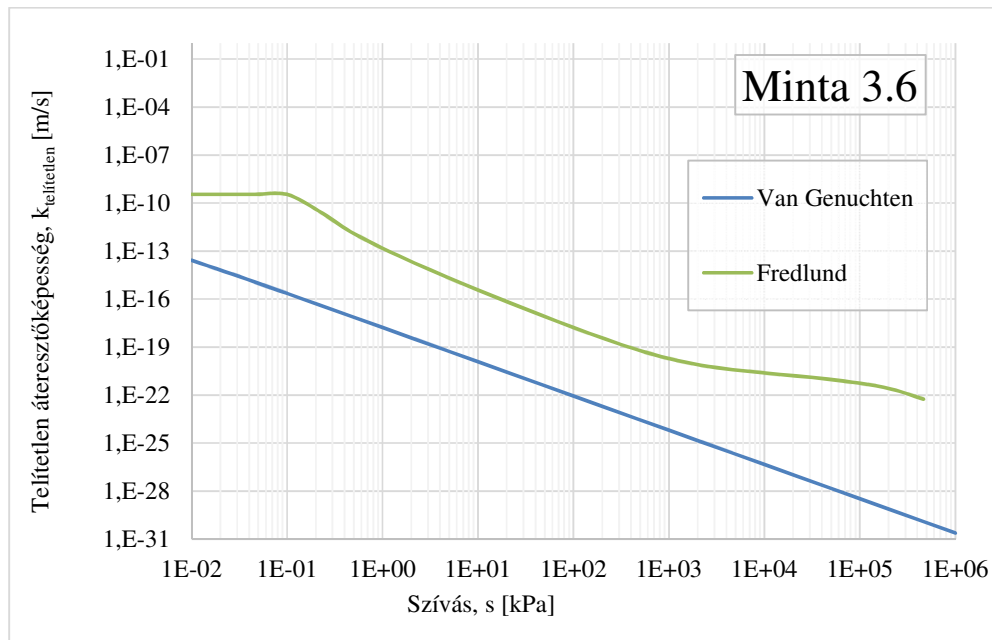
10-34. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 3.5



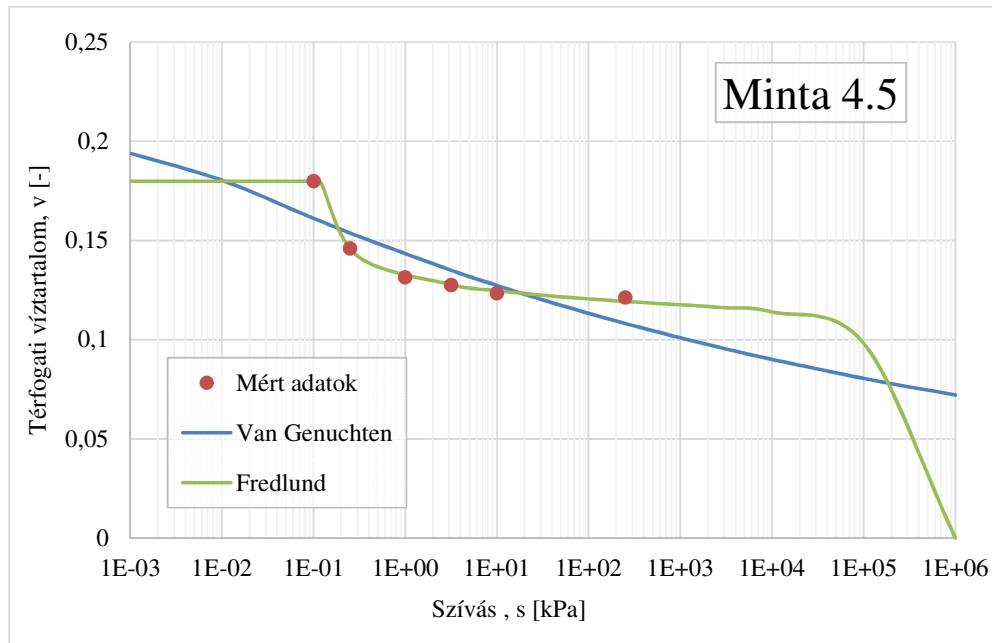
10-35. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 3.5



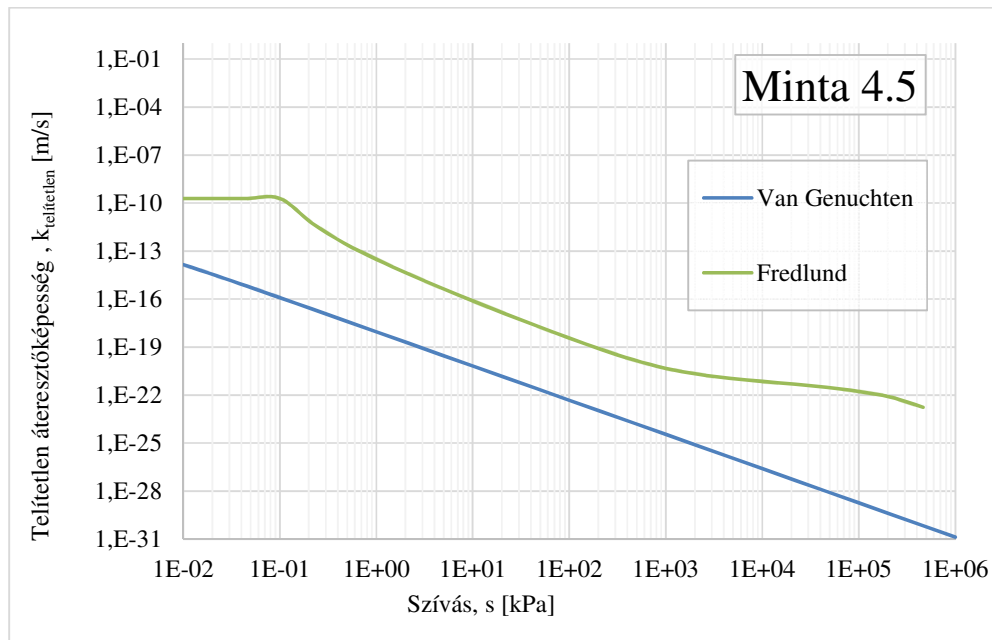
10-36. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 3.6



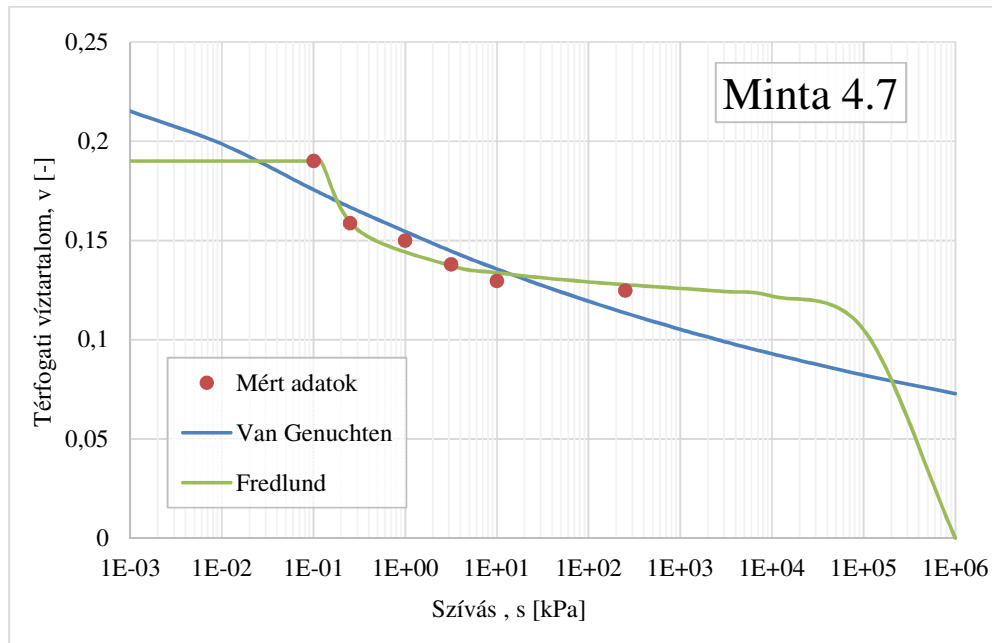
10-37. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 3.6



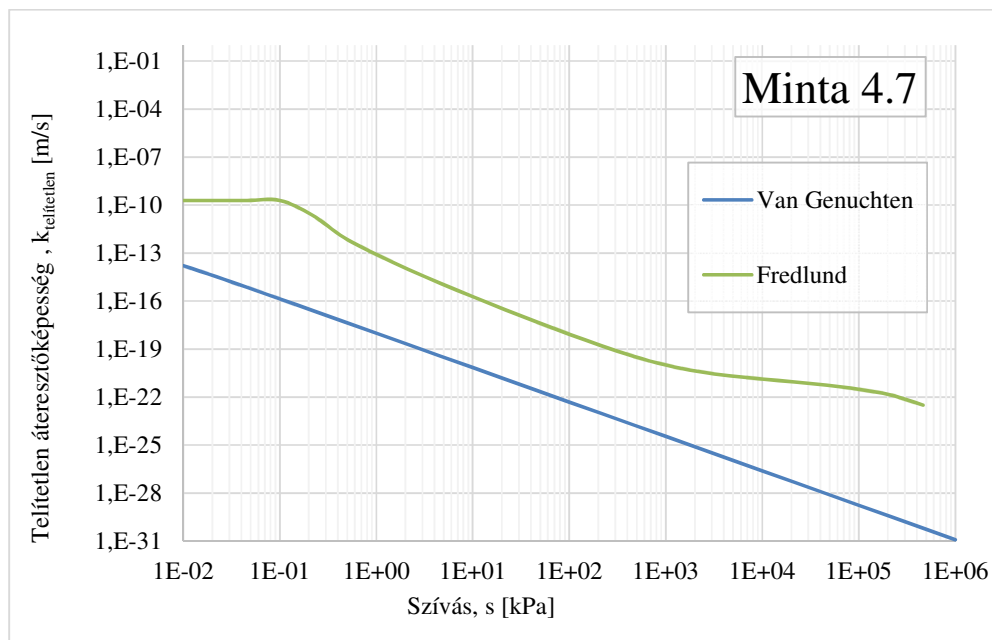
10-38. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 4.5



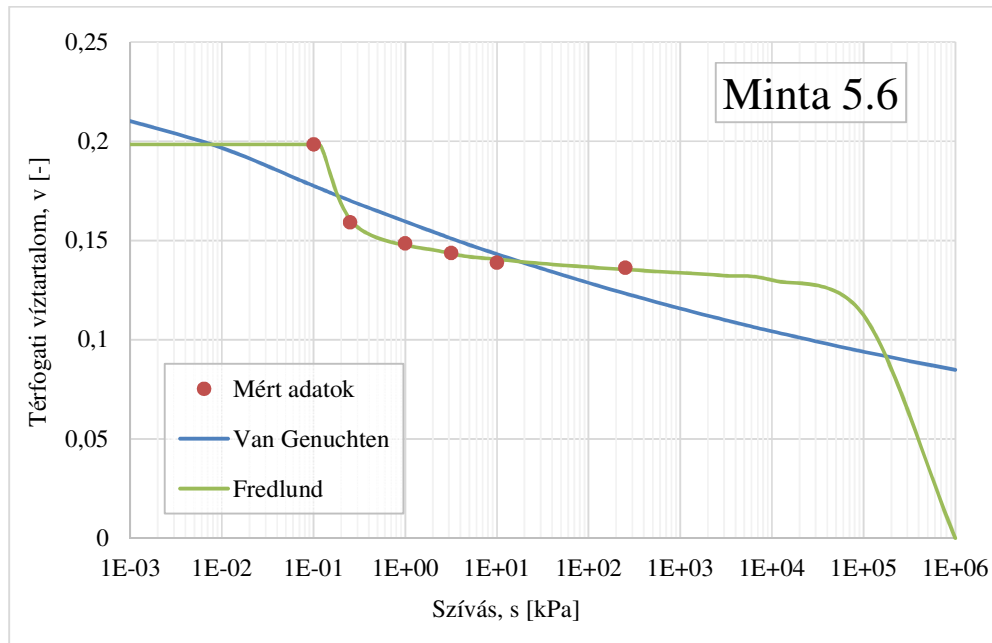
10-39. ábra: Telítetlen átteresztőképesség – szívás függvény – Minta 4.5



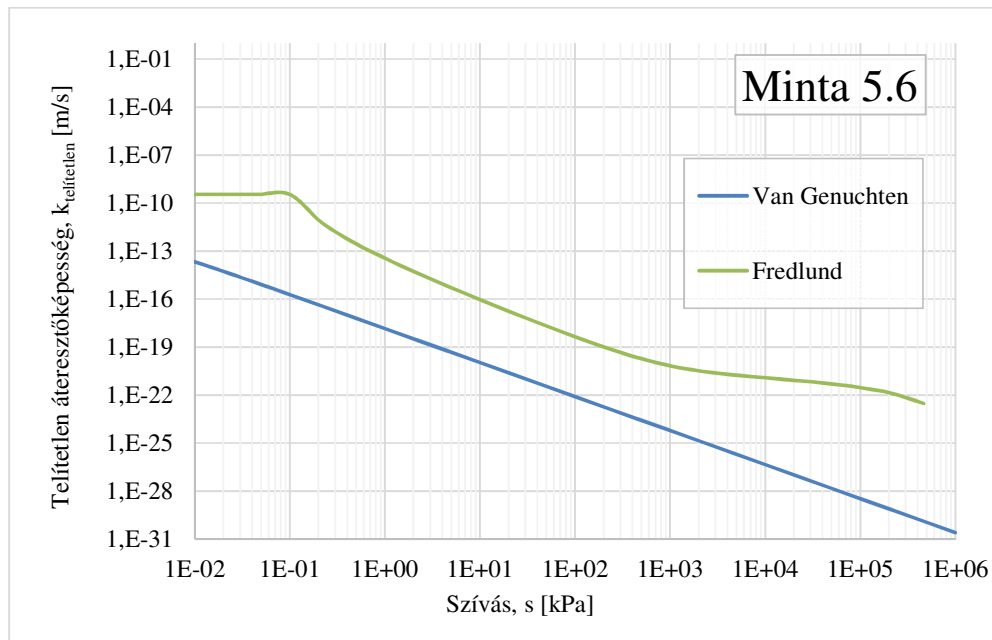
10-40. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 4.7



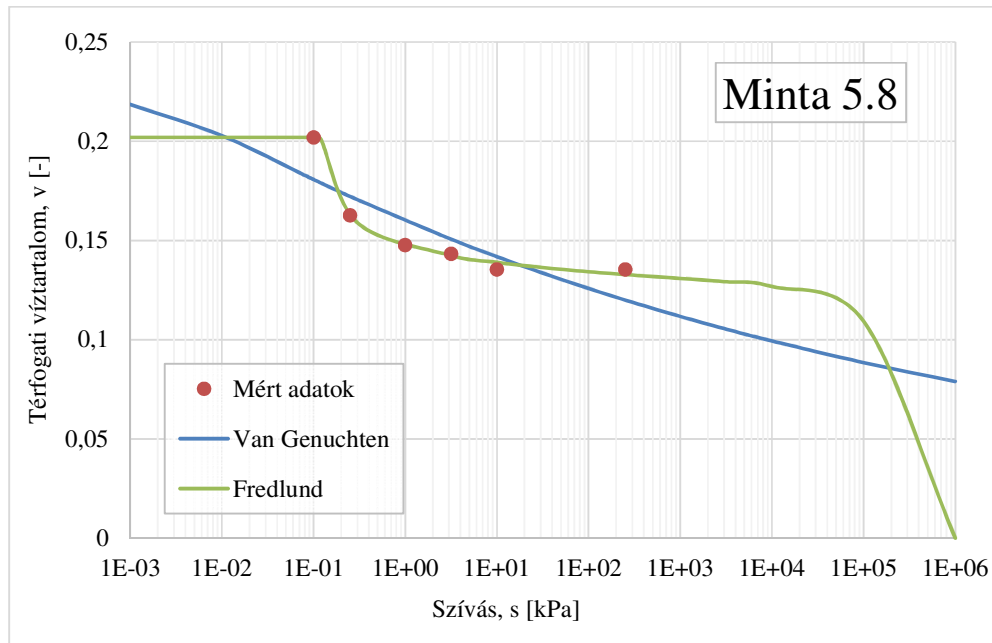
10-41. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 4.7



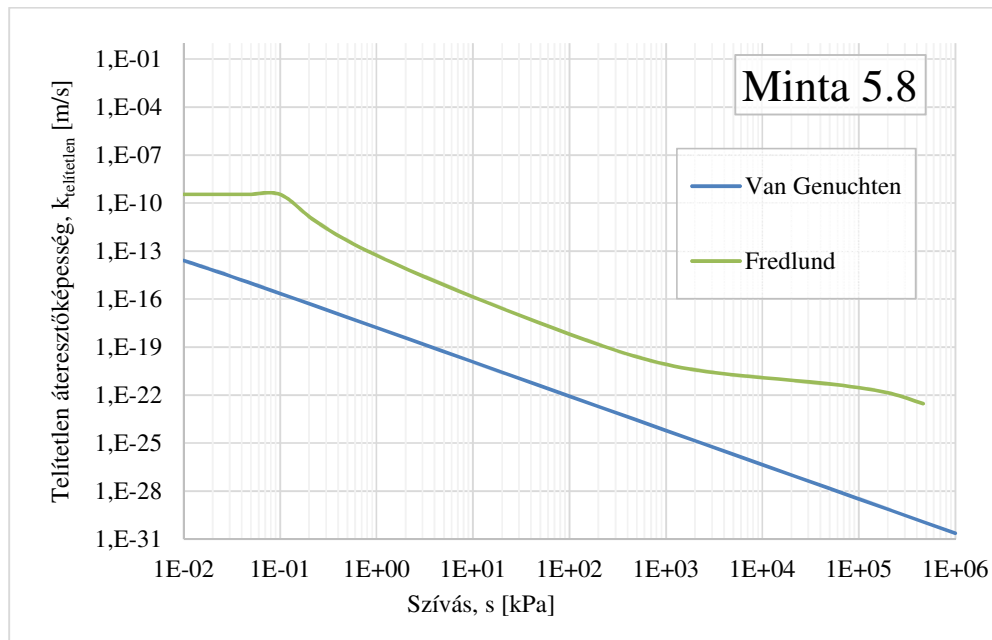
10-42. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 5.6



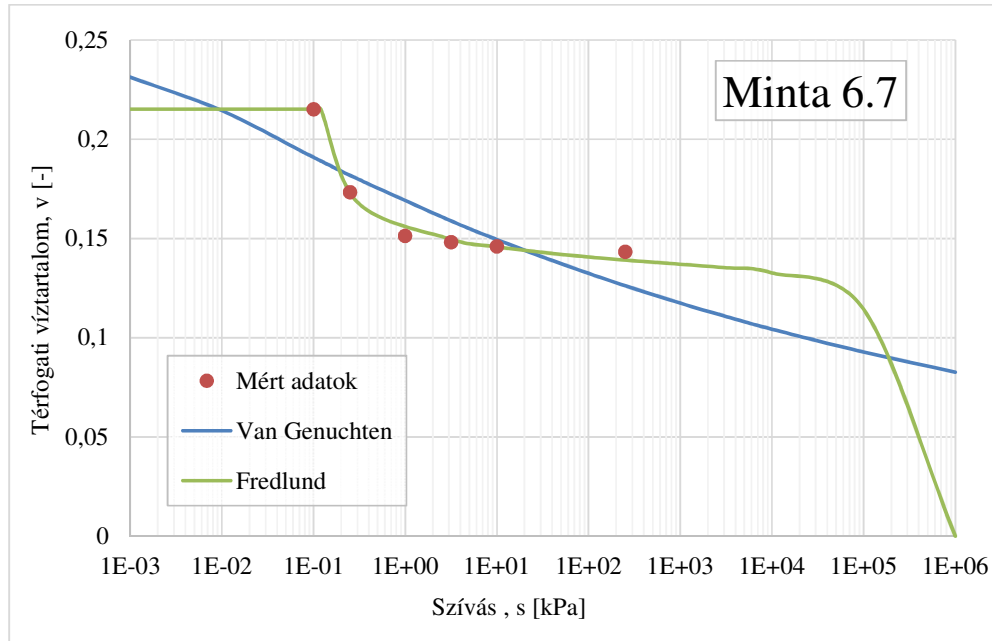
10-43. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 5.6



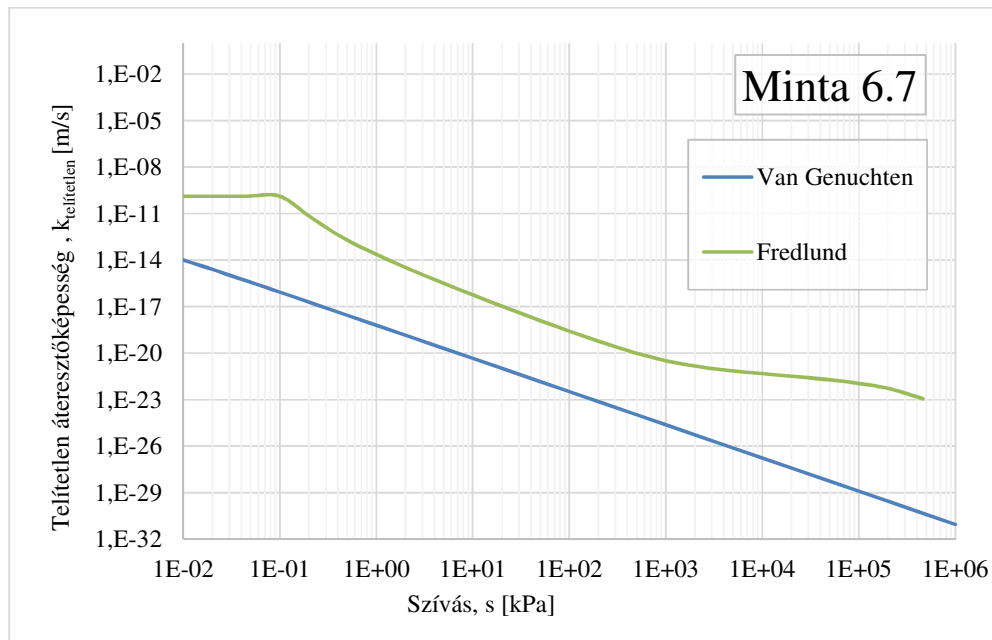
10-44. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 5.8



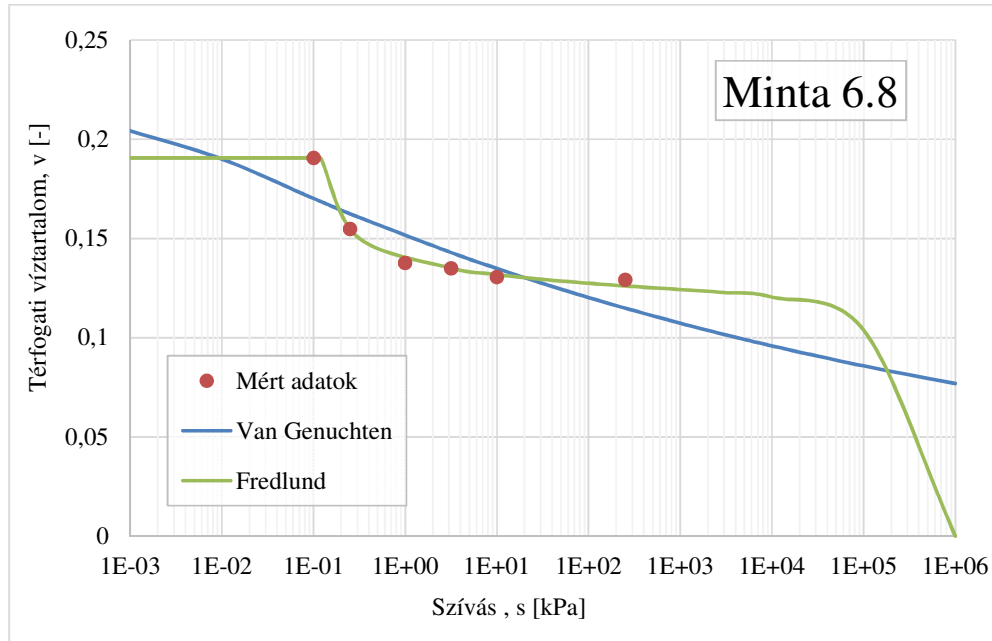
10-45. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 5.8



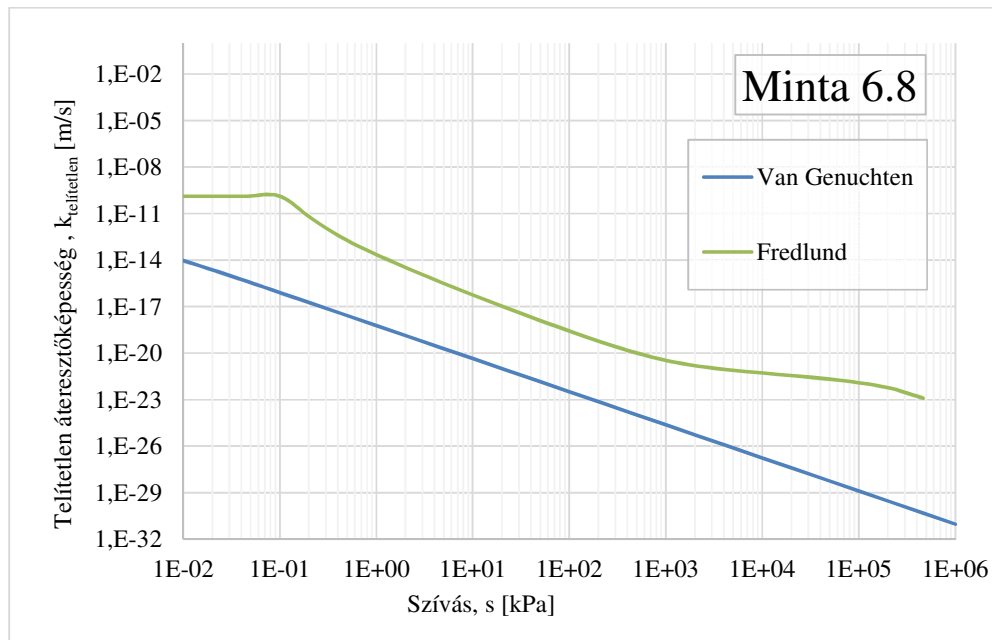
10-46. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 6.7



10-47. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 6.7



10-48. ábra: Illesztett víztartási görbe – Minta 6.8



10-49. ábra: Telítetlen áteresztőképesség – szívás függvény – Minta 6.8