

Budapesten létesített vízáteresztő burkolatok vízáteresztő képesség változásának vizsgálatára végzett mérésekkel

Strausz Tímea*, Ács Tamás*, Decsi Bence*, Varga Laura*

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék, 1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3. (E-mail: timea.strausz96@gmail.com)

DOI:10.59258/HK.11087



Kivonat

A vízáteresztő burkolatokat egyre gyakrabban alkalmazzák városi felületek burkolataként világszerte és hazánkban egyaránt, mivel a vízzáró felületek kiváltása hozzájárul az éghajlatváltozás okozta negatív hatások mérsékléséhez. A vízáteresztő burkolatok a csapadékvíz-gazdálkodást támogató kék-zöld infrastruktúra rendszerek egyik eszközeként segíthetnek a városi vízgyűjtőre lehullott csapadékvizek visszatartásában és a talajba való beszivárogatásában, csökkentve ezzel a lefolyó csapadékvíz mennyiségét és javítva a helyi mikroklímát.

A vízáteresztő burkolatok egyik legfontosabb tulajdonsága a felszíni vízáteresztő képességük, amely az idő előrehaladtával az őket érő szemes (szennyező)anyagok hatására csökkenhet. A kutatás során 18 budapesti helyszínen végeztünk in-situ beszivárgás méréseket 2020-ban és 2021-ben öntött gumi, valamint műgyantával stabilizált szőrt kavicsburkolatokon. A burkolatok kora és az áteresztő képességük között erős, exponenciális kapcsolatot találtunk, mely szerint a burkolatok vízáteresztő képessége évenként nagyjából megfelelő. Mivel a mérési módszer típusa is hatással lehet a terepi mérések eredményére, ezért a mérések során kétfajta infiltrációs tesztet hasonlítottunk össze, szimpla és dupla gyűrűset. A két módszerrel mért vízáteresztő képesség között nem találtunk egyértelmű különbséget, azonban az azonos módszerekkel végzett, ismételt vizsgálatok esetében több, a mérés megbízhatóságát befolyásoló jelenséget és hatást is vizsgáltunk, úgymint: eltömődés, kimosódás, oldalirányú elszívárgás, térbeli heterogenitás.

Kulcsszavak

Vízáteresztő burkolatok, eltömődés folyamata, vízáteresztő képesség, kék-zöld infrastruktúra, városi vízgazdálkodás.

Assessment of clogging of permeable pavements in Budapest using in-situ infiltration measurements

Abstract

Permeable pavements are increasingly being used as pavements for urban surfaces both in Hungary and around the world, as the replacement of impermeable surfaces contributes to mitigating the negative impacts of climate change. As a tool of blue-green infrastructure systems that support stormwater management, permeable pavements can help to retain and infiltrate urban storms, reducing runoff and improving the local microclimate.

One of the most important properties of permeable pavements is their surface permeability, which may decrease over time due to the impact of particulate (pollutant) matter they are exposed to. In this research, in-situ infiltration measurements were carried out at 18 sites in Budapest in 2020 and 2021 on resin bound gravel and crumb rubber pavements. A strong exponential relationship was found between the age of the pavements and their permeability, with the permeability of the pavements roughly halving per year. Since the type of measurement method can also affect the results of field measurements, we compared two types of infiltration tests, single and double ring. No clear difference was found between the permeability measured with the two methods, but for repeated tests with the same methods, several phenomena and effects affecting the reliability of the measurement were investigated, such as clogging, leaching, lateral leakage, spatial heterogeneity.

Keywords

Permeable pavements, clogging process, surface permeability, LID/GI, urban water management.

BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozás következtében egyre gyakoribbá válnak a szélsőséges időjárási jelenségek, többek között a nagy intenzitású csapadékok és az extrém magas hőmérsékletű napok. A nagy mennyiségű csapadék a városra hirtelen lezúdulva a csatornarendszerek túlterheléséhez vezethet, amelyek ennek következtében kiöntenek, számos káreseményt okozva (IPCC 2014). Az éghajlatváltozás mellett a városok területének nagymértékű, vízzáró felületekkel való burkolása a probléma másik forrása, hiszen a talajba történő beszivárgás és a párolgás csökkenésével párhuzamosan növekszik a lefolyó vizek mennyisége. Ezen kedvezőtlen folyamatokhoz és hatásokhoz való alkalmazkodás a konvencionális csapadékvíz-elvezető rendszerekkel csak korlátozottan lehetséges, többek között azért, mert a meglévő, nagy átmérőjű csövekből felépült hálózatok bővítésének gyakran fizikai és pénzügyi akadályai vannak.

A települési csapadékvíz-gazdálkodás – ellentétben a konvencionális, elvezetésen alapuló koncepcióval – a csapadékot hasznosítható erőforrásnak tekinti, és célja, hogy a település területének természetes, beépítés előtti állapot szerinti vízkörforgását közelítse a csapadékvíz lefolyásának késleltetésével, ideiglenes tározásával, párolgásának és a talajba való beszivárgásának elősegítésével (Buzás 2015). Ennek eszközei lehetnek a településen belüli zöldfelületek és az azokba ágyazódó vízfelületek közös rendszerei (kék-zöld infrastruktúra) (Csizmadia 2018), melyek gyakran nem önállóan, hanem a meglévő csapadékvíz elvezető hálózatot (szürke infrastruktúra) kiegészítve segítik hatékonyan a csapadékvíz eredetű problémák kezelését. Alkalmazásukkal csökkenthető a csatornahálózatba jutó és elvezetett víz mennyisége és mérsékelhető a csúcshozamok is, csökkentve ezzel az elöntések kockázatát, továbbá a szennyvíztisztító telepek túlterhelését. A kék-zöld infrastruktúrán alapuló megoldásoknak szennyezőanyag

eltávolító (*Csizmadia 2018*), illetve a helyi mikroklimát szabályozó szerepe is lehet (*Buzás 2015*).

A települési kék-zöld infrastruktúra egyik csoportját képviselik, egyben a csapadékvíz-gazdálkodás egyre nagyobb teret nyerő eszközei a vízáteresztő burkolatok. Kialakításuknak köszönhetően képesek felszínükön beszivároztatni a csapadékvizet, amely a szerkezeti rétegekbe (ágyazatba és típustól függően tároló rétegbe) jut, végül részben vagy egészben a talajba szívárog, vagy késleltetve a csapadékvíz-elvezető hálózatba kerül. Alkalmazásuk különösen akkor előnyös városi környezetben, amikor a kialakítandó felület megköveteli a burkolat meglétét, de vízáteresztő felületre van szükség és fizikai korlátok (pl. helyhiány) miatt egyéb zöld megoldások nem alkalmazhatóak, vagy alkalmazásukkal értékes területek használatát kellene korlátozni (*Csizmadia 2018*). Vízáteresztő burkolatokat általában alacsonyabb forgalmú utakon, parkolóknak, parkokban, favermek burkolataként, járda és kocsibehajtók, valamint játszótérek és sportpályák burkolataként alakítanak ki. Gyakran alkalmazott típusaik a porózus drénbeton, drénaszfalt, valamint a kiselemes (térkő) burkolatok. Hazánkban városi környezetben – így Budapesten is – három másik típus, az öntött gumi, az organikus kötőanyagú és a műgyantával stabilizált szórt kavicsburkolatok dinamikus tényezőre figyelhető meg az elmúlt években. Nagy rugalmasságuknak (ütéscsillapításuknak), változatosan alakítható megjelenésüknek, egyszerű építésüknek és tartósságuknak köszönhetően kiválóan alkalmasak játszótérek és sportpályák homok, gyöngykavics és gumilap burkolatainak kiváltására.

A vízáteresztő burkolatok hidrológiai hatékonyságának kézenfekvő indikátora a felszíni vízáteresztő képességük (*Chen és társai 2019*). A burkolat kialakításakor ez minden típusnál általában rendkívül nagy (*Boogaard és társai 2014a*). Drénbetonokra vonatkozó vizsgálatok áttekintése nyomán *Chandrappa és Biligiri (2016)* a beton összetételétől (adalékanyagok szemcsemérete) és pórus-tér fogatától függően a kezdeti vízáteresztő képességüket 2 736-12 6000 mm/h tartományban adta meg. *Bean és társai (2005)* 10^4 mm/h, *Pezzaniti és társai (2009)* 10^5 mm/h nagyságrendű áteresztőképességet mértek kiselemes térkő burkolatokon közvetlenül a beépítésüket követően. *Kabir és társai (2020)* kétéves porózus gumi burkolaton végzett vizsgálatukban átlagosan 30 836 mm/h beszivároztató képességet kaptak. Azonban a környezetükből ráfolyó vagy ráhordott szemcsés anyagok és szervesanyagok hatására a vízáteresztő burkolatok hézagrendszere eltömődik, áteresztő képességük csökken és ezáltal hidrológiai teljesítőképességük romlik. Drénbeton, beton térkő és porózus aszfalt burkolatokon végzett mérések alapján a telepítésüket követő első két évben vízáteresztő képességük jelentősen csökkent, a negyedik évre a kezdeti értéknél két nagyságrenddel kisebb lett (*Razzaghmanesh és Beecham 2018*). Kiselemes burkolatok esetén a kolmatáció okozta vízáteresztő képesség csökkenés már az első néhány évben elérheti a 70-90%-ot (*Eisenberg és társai 2015*), de a burkolat még hosszú idő elteltével sem válik vízzáróvá, hanem a vízáteresztő képessége egy, a kezdetinél lényegesen kisebb értéken állandósul. *Borgwardt (2006)* 80 helyszínre kiterjedő vizsgálata alapján a minimum a kezdeti érték 18%-a, míg *Pezzaniti és társai (2009)* kismintákon végzett

eltömődési kísérletei alapján a vízáteresztő képesség 35 év elteltével is az eredeti 25-41%-a maradt.

Az eltömődést és vízáteresztő képesség csökkenését vizsgáló (*Pezzaniti és társai 2009*) és a korábbi elemzéseket összefoglaló (*Boogaard és társai 2014a, Razzaghmanesh és Beecham 2018*) tanulmányok alapján a vízáteresztő képesség csökkenése időben nem lineáris folyamat, de a burkolatok kora és vízáteresztő képességük közötti kapcsolati függvények matematikai formuláját a dolgozataikban nem adták meg. Ráadásul a hivatkozott és a szakirodalomban még fellelhető kutatások és áttekintő tanulmányok fókuszában szinte kizárólag drénbetonok, drénaszfaltok és kiselemes burkolatok állnak, a rugalmas burkolatokra (öntött gumi és szórt kavics) vonatkozóan tudományos igényességű vizsgálatokról nem találtunk közleményeket. Ugyanakkor ezen burkolattípusok népszerűségének növekedésével fenntartói oldalról egyre inkább felmerül a kérdés, hogy milyen gyakorisággal és milyen módszerekkel kell tisztítani a burkolatokat (és ezzel legalábbis részben visszaállítani beszivároztató képességüket), és ennek megválaszolása csak a vízáteresztő képesség csökkenés folyamatának feltárásával és megértésével lehetséges. Részben az ismeretek hiánya miatt a vízáteresztő burkolatok tisztítása és karbantartása Magyarországon sok esetben elmarad, vagy nem megfelelő rendszerességgel és eszközökkel történik. A tisztítás hiánya olyan mértékű eltömődéshez is vezethet, amely a burkolat eredeti funkciójának betöltését és a tervezésnél megszabott csapadékvíz-elvezetési biztonságot veszélyezteti.

Fontos megemlíteni, hogy szerkezetét tekintve egy burkolat akkor nevezhető vízáteresztőnek, hogyha mind az alépítmény, mind a felépítmény képes a vizet megfelelő mértékben el(át)vezetni. A vízáteresztő rétegrend általános felépítése (alulról felfelé haladva) a következő: víztározó alapréteg, teherhordó réteg, fagymentesítő réteg (szükség esetén), kötőanyag nélküli alapréteg, geotextília, ágyazó réteg (burkolat típusától függően), kopóréteg. Rétegzett burkolatok esetében a vízáteresztő képesség értékét a legkisebb áteresztőképességű réteg fogja limitálni.

A burkolatok vízáteresztő képességének mérése a terepen többféle módszerrel is lehetséges (*Razzaghmanesh és Beecham 2018*): parcella módszerrel, szimpla vagy dupla gyűrűs (keretes) infiltrómméterrel, melynek *Beecham és társai (2009)* nem kör, hanem négyzet alakú változatát is alkalmazták kiselemes burkolatok mérésére, vagy a burkolati rétegbe beépíthető automata érzékelőkkel (*Razzaghmanesh és Borst 2018*). Az American Society for Testing and Materials (ASTM) a szimpla gyűrűs mérési módszert javasolja kiselemes vízáteresztő burkolatok (*ASTM C1781/C1781M 2015*) és porózus beton (*ASTM C1701/C1701M 2017*) burkolatok kezdeti vízáteresztő képességének méréséhez. Magyarországon jelenleg nincsen érvényben lévő előírás vízáteresztő burkolatok vízáteresztő képességének mérésére vonatkozóan. Ezt a várhatóan 2022 decemberében hatályba lépő Kiselemes Burkolatok Ütügyi Műszaki Előírásának (továbbiakban: ÚME) (*Magyar Közút Nonprofit Zrt. 2022*) előírásai részben pótolják majd. Az ÚME az ASTM javaslataihoz hasonlóan szimpla gyűrűs módszert ír elő. Általában, a szakirodalomban közölt vizsgálatok döntő részében szimpla vagy dupla gyűrűs módszert használtak vízáteresztő burkolatokra. A szimpla gyűrűs mérési módszer ismert hátránya a dupla

gyűrűssel szemben, hogy az oldalirányú elszivárgás miatt a függőleges vízáteresztő képességi együttható felülbecslésével járhat. Talajok esetében a tapasztalatok azt mutatják, hogy ez az eltérés akár 5-10-szeres is lehet (Braud és társai 2017). Ugyanakkor a rugalmas burkolatokra jellemző nagy vízáteresztő képességi együtthatók mellett ennek a hatásnak a mértéke nem ismert. Az ismerethiány jelentősége abban rejlik, hogy a szimpla gyűrűs infiltrációs próba előkészítése és végrehajtása lényegesen egyszerűbb, mint a dupla gyűrűs és egyéb infiltrációs méréseké.

Kutatásunkban Budapesten létesített öntött gumi- és műgyantával stabilizált szórt kavicsburkolatokon (továbbiakban: szórt kavicsburkolatok) végeztünk in-situ infiltrációs vizsgálatokat. A célunk az volt, hogy: i) feltárjuk, hogy a burkolatok korával hogyan változik a vízáteresztő képességük, ii) a kapcsolatot előrejelzésre is alkalmas matematikai formulával közelítsük és iii) megvizsgáljuk és értékeljük az infiltrációs méréseket és azok eredményeinek interpretációját befolyásoló legfontosabb tényezőket: a szimpla és dupla gyűrűs módszerrel mért vízáteresztő képességek eltéréseit és az egyes helyszínek vízáteresztő képességének térbeli heterogenitását.

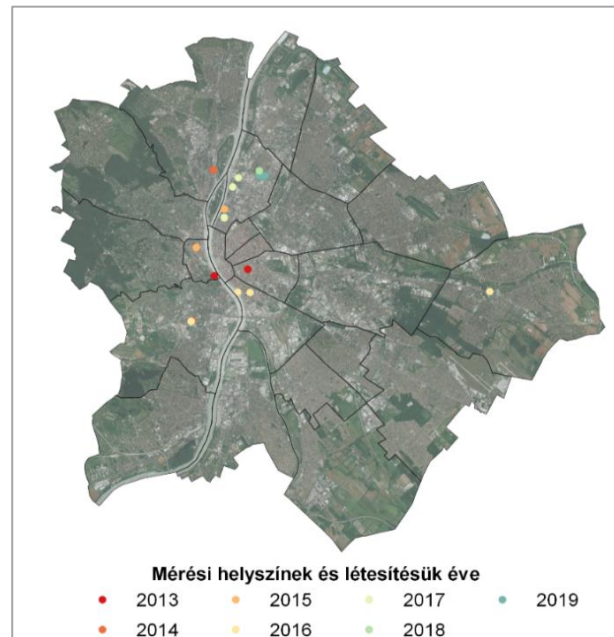
ANYAG ÉS MÓDSZER

Mérési helyszínek

A kiválasztott 18 fővárosi helyszín 50%-a öntött gumi, 50%-a szórt kavicsburkolatú. Egymáshoz viszonyított helyzetüket az 1. ábra mutatja a burkolatok létesítésének ideje (2013 és 2019 között) szerint eltérő színekkel ábrázolva.

A burkolatok többsége játszóterek felületét, szabad terrek járdáit, illetve favermek borítását alkotják (1. táblázat).

Helyszínenként több (2-5) mérési pontot jelöltünk ki, egyrészt annak érdekében, hogy a vízáteresztő képességet illetően minél reprezentatívabb képet kapjunk a burkolat egészére vonatkozóan, másrészt azért, hogy a térbeli eltéréseket értékelni tudjuk.



1. ábra. Beszivárgás mérések helyszínei Budapest közigazgatási területén

Figure 1. Locations of infiltration measurements in the administrative area of Budapest

1. táblázat. Beszivárgás mérési helyszínek és jellemzőik

Table 1. Infiltration measurement sites and their characteristics

Helyszín (kerület)	Burkolat típusa	Hasznosítás	Létesítés éve	Mérési pontok száma (2020, 2021)
Romkert (I.)	szórt kavics	járda	2013	2, 3
Rákóczi tér (VIII.)	szórt kavics	favermek	2013	2, 2
Bikás park (XI.)	szórt kavics	közösségi tér	2014	2, 5
Laktanya utca park (III.)	öntött gumi	futópálya	2014	2, 5
Duna játszótér (XIII.)	öntött gumi	játszótér burkolata	2015	2, 3
Budai vár oldala (I.)	szórt kavics	járda	2015	2, 3
Pesti út 124. (XVII.)	szórt kavics	favermek, járda	2016	3, 3
Kalóztenger játszótér (XI.)	öntött gumi	játszótér	2016	3, 4
Nehru part játszótér (IX.)	öntött gumi	játszótér	2016	3, 4
Ferenc tér (IX.)	öntött gumi	játszótér	2016	2, 3
Dagály sétány (XIII.)	szórt kavics	járda	2017	2, 3
Népfürdő utca 21. (XIII.)	szórt kavics	park	2017	2, 4
Wein János park (XIII.)	szórt kavics	járda	2017	4, 5
Wein János park játszótér (XIII.)	öntött gumi	játszótér	2017	2, 3
Hajós játszótér (XIII.)	öntött gumi	játszótér	2018	3, 5
Fiastyúk utca közpark (XIII.)	szórt kavics	járda, favermek	2019	2, 3
Hajdú utca sportpark (XIII.)	öntött gumi	futópálya	2019	4, 4
Hajdú utcai játszótér (XVIII.)	öntött gumi	játszótér	2019	3, 3

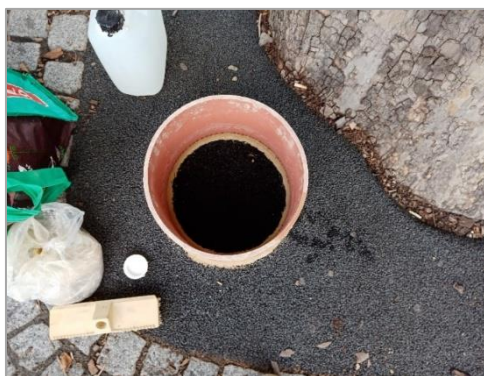
Az egyes helyszíneket eltérő környezet és különböző mértékű használat jellemzi. Az intenzívebben használt és burkolatlan felületekkel határolt helyszínek az eltömődés kockázatának jobban kitétek, ezért hipotézisünk szerint azonos idő alatt a kezdeti vízátteresztő képességük nagyobb mértékben csökkent, mint a szemcsés anyagokkal és törmelékkel kevésbé „szennyezett” burkolatok vagy burkolatrészek. Ezért az elemzéseinkben a szennyezésnek való kitettség alapján megkülönböztettünk szennyezett és mérsékelt szennyezett mérési pontokat. Egy helyszínen belüli pontok is jelentősen eltérő szennyezésnek vannak kitéve, ezért az elkülönítés nem helyszínenként, hanem mérési pontonként, helyszíni tapasztalatok alapján, szubjektív módon történt:

- Szennyezett mérési pontok azon mérési pontok, melyek közelében közvetlen szennyezőforrás volt megtalálható (pl. burkolatlan útfelület vagy játszótérek esetében homokozó), illetve a burkolat felszínén annak pórusai szemmel láthatóan nagy mértékben eltömődtek.
- Mérsékelt szennyezett mérési pontok azon mérési pontok, melyek környezetében nem található közvetlen szennyezőforrás, illetve a burkolat pórusai szemrevételezés alapján tiszták, eltömődés mentesek.

Infiltrációs próbák

A mérésekre 2020-ban és 2021-ben került sor a következő ütemezésben:

- 2020 február: szimpla gyűrűs próbamérések 4 helyszínen (Hajós játszótér, Fiastyúk utca közpark, valamint a Hajdú utcai sportpark és játszótér),



2.a. ábra. Szimpla gyűrűs beszivárgás mérés
Figure 2.a. Single ring method

A mérések megkezdése előtt az ÚME előírásai szerint előnedvesítettük a felületet. Ehhez 5 liter vizet töltöttünk a gyűrűbe (dupla gyűrűs mérésnél a belső gyűrűbe), és a mérést ennek elszivárgása után 2 percen belül kezdtük. Az előnedvesítés célja, hogy a méréssel a burkolat víztelített (mint mértékadó) állapothoz tartozó vízátteresztő képességét tudjuk meghatározni és a beszivárgás sebességének telítetlen, porózus közegekre

- 2020 június-augusztus: szimpla gyűrűs mérések mind a 18 helyszínen,
- 2021 június-augusztus: szimpla gyűrűs mérések mind a 18 helyszínen,
- 2021 október-november: szimpla és dupla gyűrűs módszerek összehasonlító mérései a Kalóztenger játszótéren (3 pontban) és a Népfürdő utcai közparkban (5 pontban).

A 2020. évben végzett beszivárgás mérések során helyszínenként legalább két ponton hajtottunk végre mérést. Ezt a 2021. évi mérések alkalmával – négy helyszín kivételével, ahol a 2020-as mérési kampány során legalább három ponton mértünk, illetve favermeknél helyhiány miatt – legalább egy ponttal bővítettük (1. táblázat). Tekintve, hogy vízátteresztő burkolatok vízátteresztő képességének mérésére nincs érvényes hazai szabvány vagy előírás, az infiltrációs próbák kivitelezésénél és kiértékelésénél a kis-elemes burkolatokra vonatkozó ÚME előírásait vettük figyelembe.

A szimpla gyűrűs mérésekhez 300 mm belső átmérőjű gyűrűt (KG PVC csődarabot) használtunk. A próba helyszínen az esetlegesen felszínen levő törmelékeket és port seprével eltávolítottuk. A gyűrű és a burkolat érintkezése mentén kívül és belül is agyagot kentünk, ezzel biztosítva, hogy a gyűrűbe töltött víz maradéktalanul a burkolatba szivároghjon (2.a. ábra). Az agyag előnye, hogy a mérést követően visszanyerhető és környezetbarát. A dupla gyűrűs mérés elrendezése annyiban tért el a szimpla gyűrűstől, hogy annak gyűrűje köré koncentrikusan 500 mm belső átmérőjű KG PVC gyűrűt helyeztünk (2.b. ábra), és azt a szimpla gyűrűsnél leírt módon szintén agyaggal szigeteltük.



2.b. ábra. Dupla gyűrűs beszivárgás mérés
Figure 2.b. Double ring method

jellemző – gyakran Horton görbével (Horton 1941) közelített – exponenciálisan csökkenő szakasza ne jelenjen meg a mérésben.

Az infiltrációs mérések állandó víznyomásos próbák voltak. Az előnedvesítéshez használt víz elszivárgásának időigénye (t_{en}) alapján az ÚME-ben rögzítettek szerint döntöttük el a méréshez felhasznált víz mennyiségét (V) (2. táblázat).

2. táblázat. A beszívárgás méréshez felhasznált víz mennyisége az előnedvesítés idejének függvényében
Table 2. The amount of water used for the infiltration test as a function of the pre-wetting time

Előnedvesítés időigénye (t_{en}) (s)	Méréshez felhasznált víz térfogata (V) (l)
<5	40
≥ 5 és < 10	25
≥ 10 és < 20	15
≥ 20 és < 30	10
≥ 30	5

A vizet az elszívárgásnak megfelelő ütemben töltöttük a 300 mm belső átmérőjű hengerbe úgy, hogy a vízszint a burkolat fölött mindenkor 1,0 és 1,5 cm között maradjon. Az alacsony vízszintek tartásával minimalizáltuk a hidraulikus gradiens túlnyomásból adódó növekedésének és ezzel a vízáteresztő képességi együttható felülbecslésének mértékét. A mérés időtartamát (t [s]) a víz betöltésének kezdete és a betöltött víz maradéktalan elszívárgása között rögzítettük. Minden pontban két mérést végeztünk, a mérések között maximum 5 percet várva.

A dupla gyűrűs elrendezésnél a külső gyűrűben a vízszintet folyamatos utántöltéssel a belső gyűrűben kialakuló vízszinttel megegyező szinten tartottuk annak érdekében, hogy a belső gyűrűből elszívárgó vizet a külső gyűrűből elszívárgó víz „megtámassza”, vagyis, hogy a belső gyűrűből elszívárgó víz sebesség-vektora függőleges legyen.

A szimpla és dupla gyűrűs módszer összehasonlítása céljából végzett mérések során a kijelölt mérési pontokon először dupla gyűrűs mérést végeztünk, majd a külső gyűrűt eltávolítottuk és szimpla gyűrűvel folytattuk a mérést. A mérések egy részét fordított sorrendben is elvégeztük (először szimpla gyűrűvel mértünk, majd a külső gyűrű felállításával dupla gyűrűvel folytattuk a mérést) a két mérési módszerrel kapott eredmények jobb összehasonlíthatóságának, valamint a méréseket befolyásoló folyamatok azonosíthatóságának érdekében.

Mérési eredmények kiértékelése

Az egymást követő két mérés eredményei alapján a burkolat adott pontját jellemző vízáteresztő képességi együtthatót az (1) összefüggéssel számítottuk.

$$k_b = \frac{4 \cdot 3,6 \cdot 10^9}{D^2 \cdot \pi} \cdot \min \left\{ \frac{V_1}{t_1}, \frac{V_2}{t_2} \right\} \quad (1)$$

ahol k_b [mm/h] a burkolat vízáteresztő képessége az adott mérési pontban; V_1 és V_2 [l] az 1. és 2. mérés során felhasznált víz térfogata; t_1 és t_2 [s] a víz elszívárgatásához szükséges idő az 1. és 2. mérés során; D [mm] a (belső) gyűrű belső átmérője (a mérések során konstans 300 mm). A $3,6 \cdot 10^9$ szorzó a l/s·mm² és a mm/h dimenziók közötti átváltás miatt jelenik meg. A vízáteresztő képességi együtthatót általában m/s, cm/s vagy m/d dimenzióban szokás megadni, de a csapadék intenzitásokkal való összehasonlíthatóság érdekében dolgozatunkban egységesen mm/h-ban adjuk meg.

Az (1) összefüggés alapján – az ÜME előírásaival összhangban – a két mérés közül mindig az alacsonyabb értékű vízáteresztő képességet fogadtuk el. A mérési helyszínek burkolatának átlagos vízáteresztő képességét a mérési pontokra kapott k_b értékek számtani átlagával jellemeztük.

Az eredmények értékelése kapcsán fontos megjegyezni, hogy az egyes helyszíneken csak a burkolatok felszínén volt lehetőségünk vízáteresztő képesség méréseket végezni, az egyes rétegek külön-külön történő vizsgálatára nem volt lehetőségünk, ezért azt az ideális és tervezésnél/kivitelezésnél követendő esetet feltételeztük, hogy a burkolat alsóbb rétegei legalább olyan vízáteresztő képességgel rendelkeznek, mint a legfelső réteg. Ezáltal a felszínen mért értékek a valóságban a teljes szerkezet vízáteresztő képességét jellemzik, amelynél a legrosszabb vízvezető réteg fogja limitálni a szerkezeten átfolyó víz sebességét. Ez a tervezési és kivitelezési bizonytalanság azonos burkolattípusok esetén nagymértékben eltérő felszíni vízáteresztő képesség értékeket eredményezhet, ezzel növelve a mért értékek esetleges szórását.

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A burkolat kora és vízáteresztő képessége közötti kapcsolat

Eredményeink alapján a burkolatok a létesítésükkor és az első néhány évben is rendkívül magas vízáteresztő képességgel rendelkeznek (3.a. és 3.b. ábrák). Öntött gumi burkolatok esetén a szennyezésnek kevésbé kitett pontokon 14 800 mm/h, míg a szennyezett pontokon 4 530 mm/h maximális vízáteresztő képességi együtthatót kaptunk, és mindkét csoportnál a maximumot a legkésőbb létesített (≤ 1 éves) pontokon mértük. A legfeljebb egy éves burkolatokon a minimum értékek nagyságrendileg nem maradnak el a maximumoktól, a szennyezett pontokon 2 046 mm/h, a kevésbé szennyezett pontokon 10 345 mm/h, ugyanakkor az eltérő terhelésből adódó különbség egyértelműen látszik és számottevő. Vagyis azokon a területeken, melyeknek a közelében burkolatlan felület, homokozó vagy egyéb, szemcsés szennyezőanyag forrás volt megtalálható, a vízáteresztő képesség értéke jóval kisebb, mint a mérsékelt szennyezett mérési pontok esetében. A külföldön végzett mérések alapján hasonló eredményre jutottak a szennyezetté váló kitétségi kérdésében, miszerint lényegesen kisebb beszívárgási értékeket mértek az olyan területeken, amelyek a közelében finom szemcsés talajú burkolatlan felületek voltak (Bean és társai 2004).

A szórt kavicsburkolatoknál csak a szennyezésnek kevésbé kitett pontok eredményeit közöljük, mert a szennyezésnek jobban kitett mérési pontokból nem állt rendelkezésünkre megfelelő mennyiségű információ ahhoz, hogy kellő bizonyossággal illeszthessünk leíró görbét rájuk. Általánosságban a k_b értékeit tekintve ennél a típusnál is hasonló képet látunk, mint az öntött gumi esetében, ugyanakkor a legnagyobb vízáteresztő képességet nem a legfiatalabb, hanem a 2020-ban 3-4, a 2021-es mérési kampány

alkalmával 4-5 éves burkolat (Dagály sétány) egyik pontján mértük. Ennek oka vélhetően az, hogy ebben a pontban a burkolatot tapasztalataink szerint elhanyagolható mértékben használják, és a környezetében burkolt felületek és cserjékkel sűrűn beültetett (tehát erózióra kevésbé érzékeny) burkolatlan felületek vannak, így a burkolatra kerülő szemcsés anyagok mennyisége valószínűleg elhanyagolható. Ezt a feltételezést erősíti, hogy a 2020-ban és a 2021-ben mért értékek szinte pontosan megegyeznek (16 702 mm/h és 16 820 mm/h), tehát nem történt érdemi eltömődés egy év leforgása alatt.

A kapott 10^3 - 10^4 mm/h nagyságrendű értékek két nagyságrenddel haladják meg az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által 2020 végén, 101 állomásra közreadott csapadékmaximum függvények 100 éves visszatérési idejű, 10 perces csapadékok intenzitását (jellemzően 100-150 mm/h), vagyis a vízáteresztő burkolatok új korukban a hazai extrém csapadékesemények maradéktalan beszívárogtatására is gond nélkül képesek. Sőt, az ábráról az is leolvasható, hogy ezeket a nagy intenzitású csapadékokat a vizsgált burkolatok 4-5 éves korukig képesek elszívárogtatni. A képet árnyalja, ha a vízáteresztő burkolat felszíni lefolyással szomszédos vízzáró felületekről többletterhelést kap, de a vizsgálatba bevont helyszínek esetén ilyen kapcsolt vízgűjtőket nem, vagy csak elhanyagolható területnagysággal azonosítottunk.

Az előzetes várakozásoknak megfelelően az idő előrehaladtával a burkolatok beszívárogtató képessége csökkent a használat, a kolmatáció és a nem megfelelő tisztítás és karbantartás következtében. Tapasztalataink alapján ez a csökkenés a kezdeti értékekhez képest 6-8 éven belül közel 100 százalékos is lehet, vagyis ezek a felületek akár közel vízzáróvá is válhatnak, ami lényeges különbség a kiselemes burkolatokhoz képest, amelyeknél a külföldi vizsgálatok (Borgwardt 2006, Pezzaniti és társai 2009) szerint sokéves burkolatok is megőrzik a kezdeti vízáteresztő képességük legalább 18%-át.

A burkolatok kora és a vízáteresztő képességük közötti kapcsolat mindkét burkolat típus esetében azonosítható (3.a.

és 3.b. ábrák). A csökkenés abszolút értékben az első években a legnagyobb mértékű. Ezt a külföldi tapasztalatok (Eisenberg és társai 2015, Woods és társai 2015) is megerősítik, melyek szerint pár év alatt a csökkenés mértéke akár a 70-90%-ot is elérheti. Az is leolvasható az ábráról, hogy a vízáteresztő képesség változása az idővel nem lineáris kapcsolatot mutat, ami összhangban van Razzaghmanesh és Beecham (2018) következtetéseivel. A relatív változásokat nézve azt látjuk, hogy a mérsékelt szennyezett mérési pontok esetében a vízáteresztő képesség minden évben az előző évnek kb. 40-50%-ára csökken, vagyis évenként nagyjából megfelelődik, és a két burkolat típus ebből a szempontból nézve is hasonlóan viselkedik. A szennyezésnek jobban kitett öntött gumi burkolatokon a csökkenés üteme valamivel mérsékeltőbb, de ezek a burkolatok is elveszítik a megelőző évben jellemző vízáteresztő képességük átlagosan ~40%-át (Pezzaniti és társai 2009, Boogaard és társai 2014b, Razzaghmanesh és Beecham 2018).

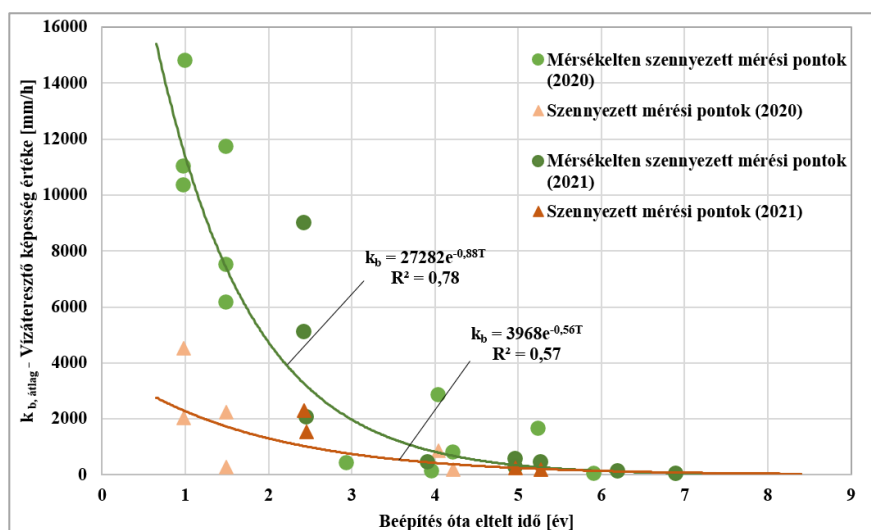
A mérési eredményeink alapján a vizsgált burkolatok vízáteresztő képessége együtthatójának időbeli csökkenése jó közelítéssel exponenciális függvénnyel írható le, ezért a burkolat kora és vízáteresztő képessége közötti kapcsolatot a (2) összefüggéssel közelítettük (3.a. és 3.b. ábrák).

$$k_b(T) = k_0 * e^{-d*T} \quad (2)$$

ahol k_0 [mm/h] a $T=0$ -hoz tartozó (az új burkolatot jellemző maximális) vízáteresztő képesség; d [1/év] alaki paraméter és T [év] a burkolat kora.

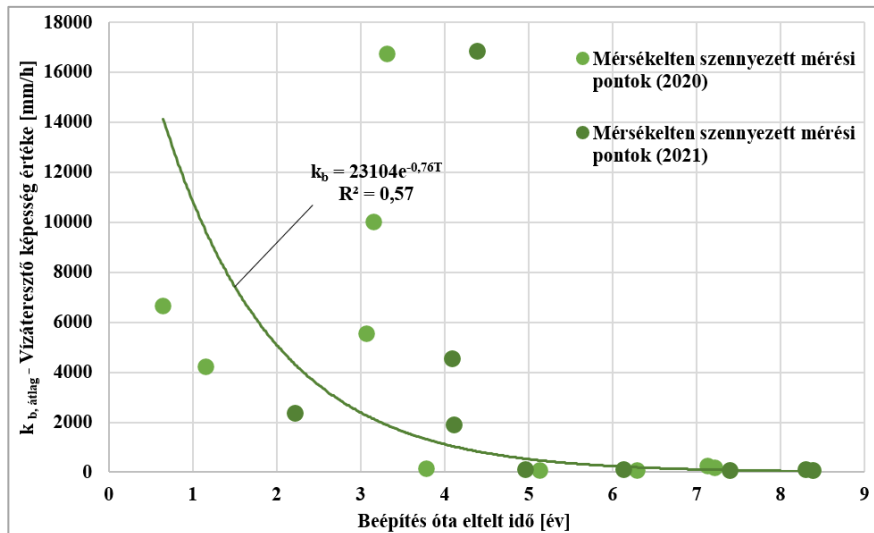
A görbék illeszkedése a mérési pontokra a determinációs együttható alapján jónak tekinthető, azonban fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy az egyes görbék értékei csak közelítő becslésnek tekinthetők. Az illeszkedést befolyásolja a mért értékek szórása, amely az adott pontokat érő eltérő mértékű szennyezőanyag terhelésnek és a burkolatok különböző mértékű használatának következménye.

A burkolatok eltömődési ütemének az ismeretében javaslatok tehetőek azok tisztítására és karbantartására vonatkozóan, melyek a későbbiekben segíthetnek az üzemeltetési és fenntartási munkákat.



3.a. ábra. Az öntött gumi burkolatok felszínének időbeli eltömődését leíró görbe szennyezett és mérsékelt szennyezett mérési pontjainak esetében

Figure 3.a. Descriptive curve of temporal clogging differentiated by the amount of pollution, in case of mold rubber surfaces

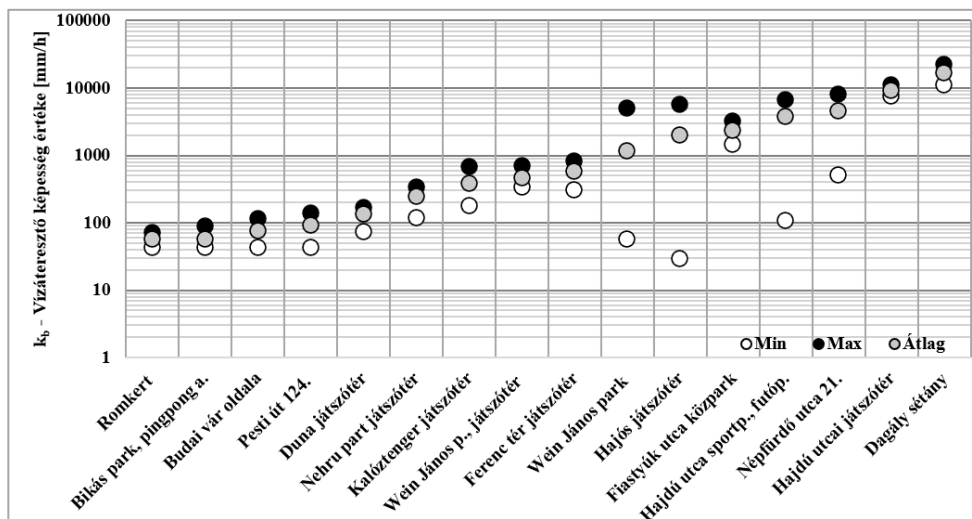


3.b. ábra. A szórt kavicsburkolatok felszínének időbeli eltömődését leíró görbe mérsékelt szennyezett mérési pontjainak esetében
 Figure 3.b. Descriptive curve of temporal clogging for resin bound gravel surfaces, in case of slightly polluted measurement points

A burkolatok vízáteresztő képességének térbeli inhomogenitása

A 2021-es szimpla gyűrűs infiltrációs tesztek eredményei alapján megvizsgáltuk a vízáteresztő képesség egyes

helyszíneken belüli területi változékonyságát. A 4. ábrán azon helyszínek vízáteresztő képességének minimum, maximum és átlag értékei láthatók, ahol legalább három különböző pontban történt beszívárgási teszt.



4. ábra. Az egyes helyszínek vízáteresztő képességének minimális, maximális és átlag értékei a 2021-ben végzett szimpla gyűrűs beszívárgási tesztek alapján

Figure 4. Minimum, maximum and average values of permeability at the measurement sites, based on single ring method tests in 2021

Az eredményeink alapján egy helyszínen belül is jelentős, akár nagyságrendbeli eltérések lehetnek a burkolat vízáteresztő képességében. Például a Wein János parkban és a Hajós játszótéren a mért vízáteresztő képesség minimum értéke 10^1 , maximum értéke pedig a 10^3 nagyságrendben volt mérhető. A két helyszín eltérő burkolattal rendelkezik, amelyből látható, hogy a térbeli heterogenitás mindkét burkolat típus esetében tetten érhető.

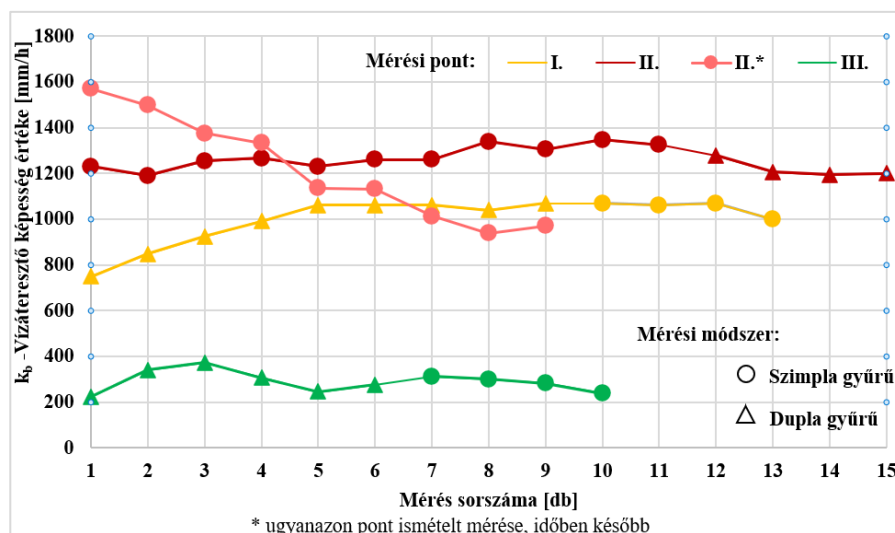
A terepen végzett mérések tapasztalata alapján ez a különbség a mért vízáteresztő képességi értékekben akár már néhány méteres távolságban is megfigyelhető volt. Az eltérések oka feltehetően az, hogy az egyes pontokat nem egyforma mértékű szemcsés (szennyező)anyag terhelés éri, a felületek használata sem azonos mértékű, valamint az egyes helyszíneknek eltérő a környezete. A tapasztalt területi változékonyság miatt merült fel korábban, hogy az

egyes mérési pontokat a szennyezésnek való kitettség alapján megkülönböztessük.

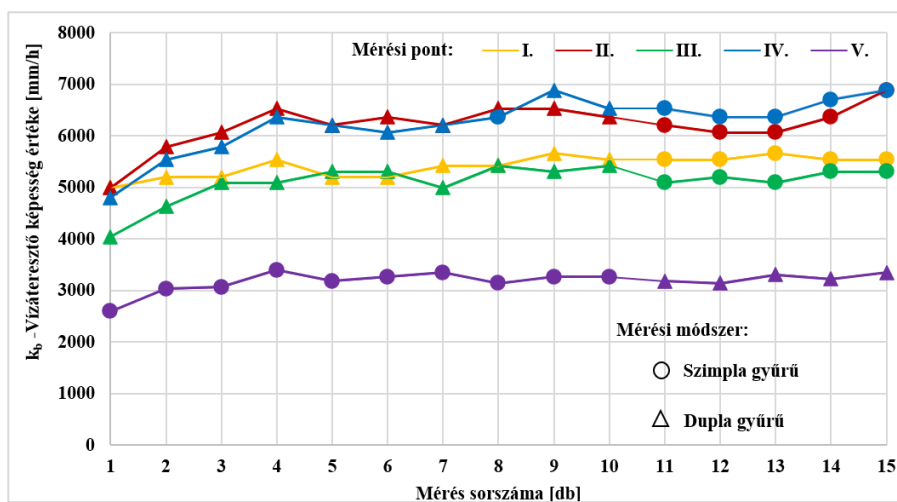
A vízáteresztő képesség térbeli változékonyságával kapcsolatban felmerülhet a kérdés, hogy nagyobb felületű burkolatok tetszőlegesen kiválasztott pontjain mért vízáteresztő képességek mennyire jellemzik a teljes terület átlagos vízáteresztő képességét. A kérdés megválaszolásához további vizsgálatokra és a megfelelő előírások kidolgozására (felülvizsgálatára) lehet szükség, pl. egy-egy burkolat állapotfelméréseinek kapcsán.

A szimpla és dupla gyűrűs módszer összehasonlítása

A szimpla és a dupla gyűrűs infiltrációs tesztek eredményeit az 5. ábra szemlélteti: a) az öntött gumival burkolt Kalóztenger játszótér és b) a szórt kavicsburkolatú Népfürdő utcai közpark esetében.



5.a. ábra. Szimpla és dupla gyűrűvel végzett mérések eredményei a Kalóztenger játszótér esetében
 Figure 5.a. Results of the single and double ring measurements at the Kalóztenger playground



5.b. ábra. Szimpla és dupla gyűrűvel végzett mérések eredményei a Népfürdő utcai közpark esetében
 Figure 5.b. Results of the single and double ring measurements at the Népfürdő street public park

A szimpla és a dupla gyűrűvel végzett mérések során több mérési sorozat elején is megfigyeltünk egyfajta „felfutó” szakaszt, ahol az adott pontban a vízáteresztő képesség értéke az egymást követő mérések során folyamatosan növekedett, majd beállt egy közel konstans értékre (lásd az 5.a. ábra I. számú és az 5.b. ábra I-V. számú mérési pontjainak görbéit). A növekedés oka feltehetően az, hogy az egymás után elvégzett méréseknek atmosférikus hatása lehet: a folyamatos vízzel való terhelés hatására a burkolatba korábban bemosódott szennyezőanyag szemcsék a burkolat alsóbb rétegei felé mozdulhatnak, ezáltal szabadabb utat engedve az átszivárgó víz számára, így felgyorsítva a szivárgás folyamatát.

Az előbbi folyamat ellentéte is megfigyelhető volt a mérések során, vagyis, hogy a vízáteresztő képesség csökkent az egymás után elvégzett mérések alatt az adott pontban (5.a. ábra II.* jelű mérési pont). Ebben az esetben a burkolatban található szennyezőanyag szemcsék vélhetően nem mosódnak ki a burkolatból, hanem annak belsejében „átrendeződnek”, amellyel a burkolat belső hézagrendszere megváltozik és a víz számára addig átjárható utovonalak elzáródnak. Az öntött gumi burkolaton folytatott

vizsgálatok során a II. számú pont (5.a. ábra) esetében ez a folyamat észlelhető volt, azonban a korábban elvégzett mérések során ezt a jelenséget nem tapasztaltuk az adott mérési pontban. A vízáteresztő képességben és az adott mérési pont viselkedésében bekövetkezett változás arra enged következtetni, hogy nem csak a területi változékonysággal kell számolni az adott burkolat vízáteresztő képességének jellemzésénél, hanem azzal is, hogy a burkolat egyes pontjainak a beszivárogtató képességében rövid idő elteltével is jelentős változás következhet be.

Az egyes mérési pontokban elvégzett mérési sorozatoknál általában, a mérési módszertől függetlenül azt tapasztaltuk, hogy miután a „felfutás” vagy „lefutás” lejátszódott, a mért vízáteresztő képességek értékei kis szórással egy állandó érték körül alakultak (az átlagértéktől való eltérés minimum és maximum értékeit százalékos formában a 3. táblázatban foglaltuk össze). Az átlagtól való pozitív eltérések maximuma 8%, a negatív irányúaké 6%, amely alapján arra következtethetünk, hogy a szabvány szerinti mérés (ÚME 2022) egy-egy mérési ponton belül kellő bizonyossággal jellemezheti a vízáteresztő képesség értékét.

3. táblázat. A szimpla és dupla gyűrűs beszivárgási mérési sorozatok állandósult szakaszának átlagtól való százalékos eltérése
Table 3. Deviation from the mean of the constant sections of the single and double ring infiltration measurement series

Mérés jele	Öntött gumi burkolat		Szórt kavicsburkolat				
	I.	II.	I.	II.	III.	IV.	V.
Konstans szakasz $k_{\text{átlag}}$ [mm/h]	1 055	1 260	5 475	6 345	5 249	6 464	3 244
Negatív irányú eltérések maximuma [%]	5%	6%	5%	4%	5%	6%	3%
Pozitív irányú eltérések maximuma [%]	1%	7%	3%	8%	3%	6%	3%

A két mérési módszer eredményei között feltételezett jelentős különbség a méréseink alapján nem igazolódott sem az öntött gumi, sem a szórt kavicsburkolatok esetében, mindkét módszer megfelelőnek bizonyult a vizsgált burkolatok vízáteresztő képességének mérésére. A szimpla gyűrűs mérési módszer kivitelezése azonban lényegesen egyszerűbb (egy személy által is megfelelően végrehajtható), ezért a külföldi előírásokkal és útmutatókkal összhangban (Chen és társai 2019) ennek a módszernek az alkalmazását javasoljuk a burkolatok bizonyos mértékű eltömődéséig (~150 mm/h feletti tartomány). Azonban megjegyezzük, hogy a burkolatok bizonyos mértékű eltömődése után (~150 mm/h alatti tartomány) célszerű lehet a dupla gyűrűs mérési módszer alkalmazása.

ÖSSZEFOGLALÁS

A vízáteresztő burkolatok a lehullott csapadékvizek vizsztatartásával és talajba szivárogtatásával hatékonyan járulhatnak hozzá a városok kedvezőbb vízgazdálkodásához. Azonban a beépítésükkor jellemző nagy felszíni vízáteresztő képességük az őket érő szennyezőanyag terhelések hatására idővel csökkenhet, akár olyan mértékben is, hogy nem tudják biztosítani a tervezésnél mértékadónak tekintett csapadék beszivárogtatását. Ez a folyamat a burkolatok megfelelő karbantartásával, rendszeres időközönként történő tisztításával megelőzhető lenne. Ezért fontos, hogy a burkolatok vízáteresztő képességének időbeli változását rendszeres mérésekkel nyomon kövessük, és a tisztítások gyakoriságát ezek alapján ütemezzük.

Magyarországon jelenleg a tisztításra és karbantartásra vonatkozó előírások nincsenek érvényben, mely következtében a burkolatok tisztítása sok esetben nem, vagy nem a megfelelő rendszerességgel, eszközökkel történik. Ezt a hiányosságot a 2022. decemberben hatályba lépő Kiselemezés Burkolatok Ütügyi Műszaki Előírása (Magyar Közút Nonprofit Zrt. 2022) részben pótolja majd. Jelen kutatásban az előírt mérések lehetséges bizonytalanságait mutatuk be, illetve egy módszert, hogy hogyan becsülhető egy adott területen a burkolatok eltömődésének üteme terepi mérések alapján.

A kutatás során öntött gumi és műgyantával stabilizált szórt kavicsburkolatú vízáteresztő burkolatok in-situ beszivárgás méréseit végeztük el 18 budapesti helyszínen 2020-ban és 2021-ben. A burkolatok 2013 és 2019 között létesültek, használatukat tekintve városi szabad terek járda felületeként, játszótérek burkolataként, illetve favermek borításaként találhatók meg a főváros számos kerületében. A két vizsgált burkolat típus mellett Magyarországon jellemzően még organikus kötőanyagú szórt burkolatokat alkalmaznak a közterületek felületein, de ezek nem

képezték a jelen kutatás részét. A jövőben tervezzük a mérések kiterjesztését ezen típusokra is.

A szimpla gyűrűs beszivárgási tesztheink eredményei alapján a burkolatok kora és az áteresztő képességük között exponenciális kapcsolatot adtunk meg, amely szerint a burkolatok áteresztő képessége minden évben közel 50%-kal csökken, de a csökkenés mértéke függ a burkolat szemcsés anyagoknak való kitettségétől és így a felületre kerülő szemcsés anyagok mennyiségétől. A burkolatok eltömődési ütemének ismeretében javaslatok tehetők a későbbiekben alkalmazható karbantartási, tisztítási útmutatók és előírások készítéséhez.

Megvizsgáltuk a szimpla és a dupla gyűrűs mérési módszer által kapott eredményeket két kiválasztott helyszín esetében, amelyek eltérő felszíni burkolati réteggel rendelkeztek. Az egyes mérési módszerek során számos bizonytalanság és folyamat játszódhat le egyidejűleg. A szimpla és a dupla gyűrűs mérési módszerek összehasonlításakor az egyes mérések során több folyamatot is azonosítottunk, úgymint a kimosódás, szemcse átrendeződés, valamint a mérési eredmények szórása. A kimosódás a mérések során a vízáteresztő képesség értékének növekedését okozhatja, melynek oka feltehetően az, hogy a burkolat belsejében található szennyezőanyag szemcsék a folyamatos vízzel való terhelés hatására kimosódnak a burkolat alsóbb rétegei felé. A szemcse átrendeződés során a burkolat belsejében található szennyezőanyag szemcsék pedig vélhetően „átrendeződnek”, melynek hatására a burkolatban található korábban szabad hézagrendszerek elzáródnak, ezáltal a víz kisebb felületen tud átszivárogni, melynek következtében a mért beszivárgás értéke kisebb lesz. A szemcsék feltételezett mozgása után közel konstans értékre álltak be a mért vízáteresztő képesség értékek, ezért kijelenthetjük, hogy a talajok beszivárgási mérésénél tapasztalt egy-fél nagyságrendnyi különbség a két módszer által mért eredményekben (Braud és társai 2017) a vizsgált burkolatok esetében nem igazolódott. Ezáltal mindkét módszer alkalmasnak tekinthető a burkolatok beszivárgási tesztheinek elvégzésére, azonban a szimpla gyűrűs mérési módszer használatát javasoljuk annak lényegesen egyszerűbb kivitelezése miatt, a külföldi előírásokhoz hasonlóan (Chen és társai 2019), a burkolatok bizonyos mértékig való eltömődéséig (~150 mm/h, azaz a természetes talajok szivárogtató képessége körüli tartomány és az általunk kimért értékek határa). Jelentősen eltömődött burkolatok esetén a dupla gyűrűs mérési módszer alkalmazása lehet ajánlott.

A 2021-ben végzett szimpla gyűrűs infiltrációs tesztek eredményei alapján megvizsgáltuk a burkolat vízáteresztő

képességének az egyes helyszíneken belüli változékonyságát. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a burkolatok vízáteresztő képessége akár egy helyszínen belül is nagymértékben eltérhet. Egy-egy mérési pont vízáteresztő képességének értéke között akár nagyságrendbeli különbségek is lehetnek az adott helyszínen belül. Emiatt a területi változékonyság miatt pedig felmerül a kérdés, hogy a burkolatok szabvány szerint (ÚME 2022) elvégzett mérése kellőképpen reprezentatív-e a burkolat teljes felületének átlagos vízáteresztő képességének tekintetében. A felmerült kérdés megválaszolása érdekében további vizsgálatok elvégzése szükséges.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közlemény az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-2 kódszámú, Új Nemzeti Kiválóság Programjának a szakmai támogatásával készült, melyet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap finanszírozott.

IRODALOMJEGYZÉK

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2015). C1781/C1781M Standard Test Method for Surface Infiltration Rate of Permeable Unit Paving. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

American Society for Testing and Materials (ASTM) (2017). C1701/C1701M Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete. ASTM: West Conshohocken, PA, USA. doi:10.1520/stp20120019

Bean E.Z., Hunt, W.F., Bidelspach, D.A. (2005). A Monitoring Field Study of Permeable Pavement Sites in North Carolina. In: Proceedings of the 8th Biennial Conference on Stormwater Research & Watershed Management, Southwest Florida Management District, Brooksville, Florida. pp. 57-66.

Bean, E.Z., Hunt, W.F., Bidelspach, D.A., Smith, J.T., (2004). Study on the Surface Infiltration Rate of Permeable Pavements, prepared for Interlocking Concrete Pavement Institute. Raleigh, N.C.: North Carolina State University Biological and Agricultural Engineering Department. doi:10.14796/jwmm.r223-22

Beecham, S., Pezzaniti, D., Myers, B., Shackel, B., Pearson, A. (2009). Experience in the application of permeable interlocking concrete paving in Australia, 9th International Conference on Concrete Block Paving, Buenos Aires, Argentina 2009.

Boogaard, F., Lucke, T., Beecham, S. (2014a). Effect of age of permeable pavements on their infiltration function. CLEAN–Soil Air Water, 42 (2). pp. 146-152. doi:10.1002/clen.201300113

Boogaard, F., Lucke, T., Van de Giesen, N., Van de Ven, F. (2014b). Evaluating the Infiltration Performance of Eight Dutch Permeable Pavements Using a New Full-Scale Infiltration Testing Method. Water, 6 (7). pp. 2070-208. doi:10.3390/w6072070

Borgwardt, S. (2006). Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement. In: Proc. of the eighth int. conf. on concrete block paving, San Francisco, California, USA.

Braud, I., Desprats, J.F., Ayral, P.A., Bouvier, C., Vandervaere, J.P. (2017). Mapping topsoil field-saturated hydraulic conductivity from point measurements using

different methods. J. Hydrol. Hydromech, 65 (3). pp. 264–275. doi:10.1515/johh-2017-0017

Buzás K. (2015). Víz a városban: alkalmazkodás a klímaváltozáshoz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék. p. 136. doi:10.15170/mg.2021.16.02.01

Chandrappa, A.K., Biligiri, K.P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. Constr. Build. Mater, 111. pp. 262–274. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054

Chen, L.M., Chen, J.W., Chen, T.H., Lecher, T., Davidson, C.P. (2019). Measurement of Permeability and Comparison of Pavements. Water, 11(3). p. 444. doi:10.3390/w11030444

Csizmadia D. (2018). Zöldinfrastruktúra füzetek 3.: Vízérzékeny tervezés a városi szabadtereken. Budapesti Fővárosi Főpolgármesteri Hivatal, Budapest, 2018.

Eisenberg, B., Lindow, K.C., Smith, D.R. (2015). Permeable Pavements. American Society of Civil Engineers (ASCE) 2015. 248. doi:10.1061/9780784413784

Horton, R.E. (1941). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. Soil Science Society of America Journal, 5. 399. doi:10.2136/sssaj1941.036159950005000C0075x

IPCC (2014). Annex II: Glossary [Mach, K.J., S. Planton and C. von Stechow (eds.)]. In: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 117-130
doi:10.1017/cbo9781107415416

Kabir, T., Oyeyi, A.G., Al-Bayati, H., Tighe, S. (2020). Performance evaluation of Porous Rubber Pavement (PRP) in the Canadian climate. Innovations in Pavement Management. Engineering and Technologies Session at the 2020 TAC Conference & Exhibition, Vancouver, B.C. doi:10.1007/978-981-19-1004-3_7

Pezzaniti, D., Beecham, S., Kandasamy, J. (2009). Influence of clogging on the effective life of permeable pavements. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management, 162(3). pp. 211–220. doi:10.1007/978-981-19-1004-3_7

Razzaghamanesh, M., Beecham, S. (2018). A Review of Permeable Pavement Clogging Investigations and Recommended Maintenance Regimes. Water, 10(3). p. 337. doi:10.3390/w10030337

Razzaghamanesh, M., Borst, M. (2018). Investigation clogging dynamic of permeable pavement systems using embedded sensors. Journal of Hydrology, 557. pp. 887-896. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.01.012

Magyar Közút Nonprofit Zrt. (2022). Ütügyi Műszaki Előírás. Kiselemes burkolatok. e-UT 06.03.43. (hatályba lépés: 2022. 12. 15.)

A SZERZŐK

STRAUSZ TÍMEA építőmérnöki oklevelet szerzett 2021-ben alapszakon, jelenleg infrastruktúra építőmérnöki mesterszakon folytatja tanulmányait a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Kutatási témája a vízáteresztő burkolatok felszíni vízáteresztő képességének vizsgálata.



ÁCS TAMÁS okleveles építőmérnök, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszékének külső óraadója. Kutatási területei közé tartoznak a felszín alatti vizek mennyiségi kérdései, a felszín alatti vizektől függő ökoszisztémák vízigényének meghatározása és a telített és telítetlen közegekben lejátszódó szivárgási folyamatok



DECSI BENCE okleveles infrastruktúra-építőmérnök, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszékének tudományos segédmunkatársa. Főbb kutatási témái a hidrológiai ökoszisztéma szolgáltatások térképezése, számszerűsítése, illetve a felszíni- és felszín alatti vizek kapcsolatának elemzése.



VARGA LAURA a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszékének tudományos segédmunkatársa, okleveles infrastruktúra-építőmérnök. Fő kutatási területei: városi csapadékvíz-gazdálkodás, kék-zöld infrastruktúra rendszerek, lefolyás és hidrodinamikai szimulációk, csapadék leskálázás.

**Ember és víz**

– Fejezetek a vízgazdálkodás történetéből –

Leonardo da Vinci hidraulikai modellkísérletei

Leonardo az elsők között volt, akik rendszeresen megfigyelték a folyómedrek alakulását. Megállapította, hogy az egyenes vonalú mederszakaszon a folyó közepén a vízmozgás sebessége nagyobb, mint a partoknál, ahol érvényesül a súrlódás hatása. Felismerte az esés jelentőségét a szabadfelszíni vízmozgások hidraulikájában, amikor így írt erről:

"Ha a folyó medrének nagy az esése, a víz gyorsabban folyik, a gyorsabban mozgó víz pedig kimélyíti a medret, így az abban mozgó ugyanaz a víztömeg kisebb helyet foglal el".

A folyók és csatornák vízmozgásának vizsgálatánál modelleket használt, amelyek vázlatrajzai és leírásai jegyzeteiben fennmaradtak. A rajzokból látható, hogy a laboratóriumi csatornák oldala a kedvezőbb megfigyelések érdekében üvegből volt. Alkalmazta a festési eljárást is a vízmozgás vizsgálatára. Az egyik modellen Leonardo azt vizsgálta, hogy hogyan rakódik le a hordalék a mederben egy vízfolyást gátló akadály mögött. Számos feljegyzése vonatkozik az öntözésre, a lecsapolásra és az árvizek szabályozására is.

SZL.