



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

A kávéfőzésből származó speciális háztartási hulladék felhasználásának lehetőségei

- Diplomaterv -

Készítette:

Nagy Alexandra Dóra

Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Környezetmérnök MSc. 2. évfolyam

MSF7WB

Konzulensek:

Dr. Budai Péter, Adjunktus, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Dr. Kozma Zsolt, Adjunktus, Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

Budapest, 2015.

Összefoglaló

A kávé a modern ember mindennapjainak szerves része. Kávézunk otthon, a munkahelyen a kollégákkal, kávézóknál barátokkal. Az elkészítés során azonban jelentős mennyiségű forrázási maradék - hétköznapi nevén kávézacc - keletkezik. A KSH adatai szerint az egy főre jutó kávéfogyasztás éves szinten átlagosan 2,8 kg, ami a lakosság 70 %-ának esetében napi 2-3 csésze kávé jelent. Ebből hozzávetőlegesen 25500 tonna zacc keletkezik Magyarországon.

A kávézacc felhasználási lehetőségeinek tárháza igen széles, az egyszerű háztartási felhasználástól (pl. talajjavítóként vagy súrolószerként), a bonyolultabb technológiát igénylő alkalmazásokig. Dolgozatomban a kávézaccot, mint szerves adszorber vizsgáltam, autótutakról lefolyó, nehézfémekkel szennyezett csapadékvizek jövőbeni tisztítása esetében.

A vizsgálatok kiterjedtek mind a hidraulikai, mind pedig az adszorpciós kapacitás megfigyelésére. Mindkét említett terület erősen befolyásolja a kialakított adszorber további felhasználási módját. A kávézacc adszorberként való alkalmazásának előnyei között említhető, hogy olcsó, könnyen hozzáférhető és viszonylag hatékony különböző nehézfém-ionok vízből való eltávolítása esetén.

Az autótutakról lefolyó csapadékvizekben jellemzően hatféle nehézfém fordul elő: a cink (Zn), a réz (Cu), ólom (Pb), a króm (Cr), a nikkel (Ni) és a kadmium (Cd). Ezek forrása változatos, jellemzően a fékbetét és a gumiabroncs kopása. Vizsgálataimat ezek közül három fémre: cinkre, rézre és krómra végeztem el.

A kísérleteket a szakirodalomban elterjedt áztatásos kivitelezésen túl több, eltérő méretű oszlopban is elvégeztem. A mérések során a megfelelő hidraulikai tulajdonságok biztosítása érdekében a zaccot homokkal keverve alkalmaztam. A tisztítandó közeget ismert koncentrációjú modelloldatokkal helyettesítettem.

Az adszorpciós adottságok meghatározása után egy konkrét felhasználási forma megvalósíthatóságát részletesebben is megvizsgáltam. Az autótutakról lemosódó csapadékvíz kezelésének egyik lehetséges módja, a szikkasztókban történő tisztítás, hosszú tartózkodási idő mellett. Egy ilyen szikkasztó kialakítására tettem javaslatot úgy, hogy a tározó alsó szűrőrétege az általam tesztelt 20% t₉₀-os zacckeverék legyen. A szükséges anyagmennyiség meghatározása után pedig vizsgáltam a tényleges felhasználás gyakorlati kérdéseit, kitérve a biológiai degradáció hatására, a keletkező mennyiség valóban rendelkezésre álló hányadának becslésére és a gazdaságosságra.

Tartalomjegyzék

1. A kávéfeldolgozás és kávéfogyasztás hulladékai.....	1
1.1. A kávéról	1
1.2. A feldolgozás – szüreteléstől a zaccig	2
1.3. Keletkező melléktermékek	2
1.4. A keletkező hulladékok hasznosítási lehetőségei	3
1.5. A kávézacc fizikai-kémiai tulajdonságai	5
2. A kávézacc hasznosításának két fő iránya	8
2.1. Talajjavító adalékként való felhasználás	9
2.2. Adsorbensként való felhasználás	11
2.2.1. <i>Az adszorpció.....</i>	<i>12</i>
2.2.2. <i>Útról lefolyó csapadékvizek szennyezettsége</i>	<i>12</i>
2.2.3. <i>Adszorpciós csapadékvíz-kezelés</i>	<i>13</i>
3. Az alkalmazhatóság tanulmányozására végzett saját méréseim.....	14
3.1. Hidraulikai vizsgálatok.....	14
3.1.1. <i>Telepítési lehetőségek és követelményeik</i>	<i>14</i>
3.1.2. <i>Kísérletek</i>	<i>16</i>
3.1.3. <i>Eredmények.....</i>	<i>19</i>
3.1.4. <i>Tapasztalatok, további irányok.....</i>	<i>21</i>
3.2. Adszorpciós vizsgálatok	22
3.2.1. <i>Áztatásos poharas kísérletek.....</i>	<i>22</i>
3.2.1.1. <i>Eredmények</i>	<i>24</i>
3.2.2. <i>Átfolyásos oszlopos kísérletek.....</i>	<i>26</i>
3.2.2.1. <i>Eredmények</i>	<i>27</i>
3.2.3. <i>Tapasztalatok és további irányok</i>	<i>31</i>
4. Konkrét alkalmazás adsorbensként csapadékvíz szikkasztásnál.....	31
4.1. Szikkasztó tározók méretezési szempontjai	31
4.1.1. <i>Hidraulikai méretezés</i>	<i>32</i>
4.1.2. <i>Adszorpciós méretezés</i>	<i>34</i>
4.2. Szikkasztóárok méretezése – Nagykovácsi út.....	37
4.3. Hazai lehetőségek – „Zacckereslet és zacckínálat”	38
5. További megválaszolandó kérdések	40

5.1.	A töltet élettartama – Biológiai degradáció és kimerülés.....	40
5.1.1.	<i>A tölteten megfigyelhető biológiai változások</i>	<i>40</i>
5.1.2.	<i>Témakörben végzett előzetes vizsgálatok.....</i>	<i>42</i>
5.1.2.1.	<i>Eredmények</i>	<i>43</i>
5.2.	Használt töltet további sorsa.....	44
5.3.	A keletkezés területi eloszlása.....	45
5.4.	A megvalósítás gazdaságossága	47
5.5.	Kivitelezés és karbantarthatóság	48
6.	Összegzés, következtetések	50
	Források.....	51
	Függelék.....	55

1. A kávéfeldolgozás és kávéfogyasztás hulladékai

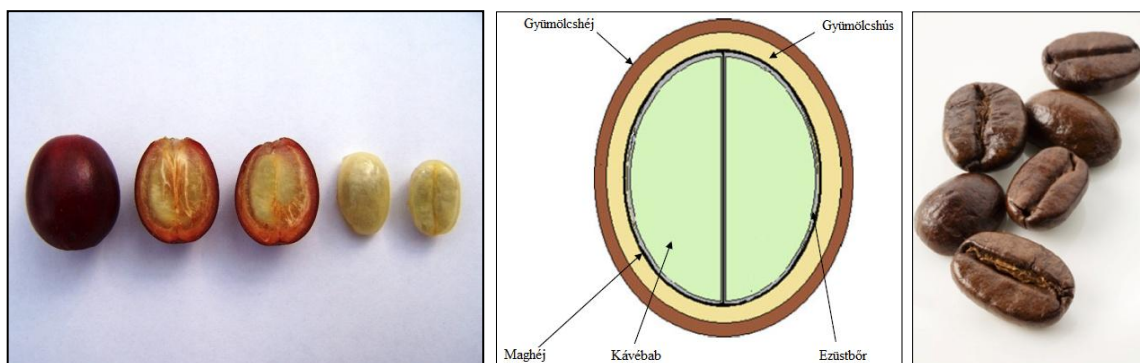
1.1. A kávéról

A kávéval leggyakrabban a boltok polcain találkozunk és nem is tudjuk pontosan, hogy a pörkölt kávébabok, vagy a csomagokban található őrölt kávé valójában hogyan is jut el a fogyasztókhoz. Történetéről, eredetéről, természetes megjelenéséről a csomagok nem árulnak el semmit és a világkereskedelemben elfoglalt fontos szerepe sem nyilvánvaló az egyszerű kávéfogyasztó számára.

Pedig a kávé már több mint 1000 éve fogyasztják világszerte. [8] A nyers kávébab napjaink egyik legnépszerűbb és legnagyobb mennyiségben forgalmazott árucikke (a kőolaj után a második). A globálisan megtermelt mennyiség éves szinten 7 millió tonnára tehető. A Nemzetközi Kávészervezet (ICO) adatai szerint 2011-12-ben az exportált kávé mennyisége 130 millió zsák volt (egy zsák súlya kb. 60 kg) és majdnem 2,25 milliárd csésze kávé fogyott világszerte naponta. [1]

A valóságban elfogyasztott mennyiségekről több forrásból is szerezhető adat. A kávéval kapcsolatos legtöbb nyilvánosan hozzáférhető statisztika a Nemzetközi Kávészervezet (International Coffee Organisation) honlapján található. Az itthoni viszonyokra alkalmazható adatok pedig a Központi Statisztikai Hivatal adatbázisában érhetők el.

A kávé 70 faja közül kettő termesztése terjedt el széles körben a világon, melyek különböző eredetűek. Az Arabica őshazája az etiópiai Kaffa, míg a Robusta feltehetőleg Közép-Afrika területéről származik. [1] Napjainkban intenzív termelése az egész világot behálózza, a legnagyobb termelők és exportőrök között megtalálható Mexikó, India, Etiópia, Kolumbia, a lista élén pedig évek óta Brazília áll. [8]



1. ábra A kávégyümölcs [8]

1.2. A feldolgozás – szüreteléstől a zaccig

A kávégyümölcsöket 5 évvel a fák elültetése után lehet először betakarítani. Felépítése az X. ábrán látható. A feldolgozás első lépése a zöld kávébabok kinyerése, ami a héj és a gyümölcshús eltávolításával történik, melynek két lehetséges módja a nedves vagy száraz eljárás. Az alkalmazott eljárás nagyban befolyásolja a kapott melléktermékek tulajdonságait.

A nedves eljárást Arabica fajta esetén alkalmazzák. Az eljárás terméke a mosott vagy pergamenhéjas kávébab. Általában kávébab hántoló gépet és fermentációt használnak. A véggél a pergament borító gyümölcshús és nyálkaréteg teljes eltávolítása. Túlfermentálást kerülni kell, nehogy dohos legyen a termék. A végső mosás történhet kézi vagy gépi úton. [1][8]

A száraz eljárás technológiája egyszerűbb. Leggyakrabban a Robusta esetében használják. A frissen leszedett kávécseresznyét kiterítve, 12-15 napig szárítják, és naponta keverik. A száraz cseresznyéket pedig zsákolva szállítják ügyelve arra, hogy ne találkozzon nedvességgel. [1][8]

A kinyert zöldkávé a feldolgozás első lépésétől függően két csoportba osztható: mosott vagy mosatlan. Egyaránt tartalmaz illékony és nem illékony komponenseket is. Főbb összetevői a szénhidrátok, fehérjék, lipidek és különböző ásványi anyagok.

A kávé, jellemző aromája és íze a pörkölés során lejátszódó reakcióknak köszönhető. A pörkölés három lépése: előmelegítés, pörkölés/pirolízis, hűtés. A második lépésben a természetesen előforduló polifenolok különböző reakciótermékekké alakulnak a Maillard reakció során.

A jól ismert ital elkészítésének utolsó lépése a forrázás. A főzet készítése többféle módon lehetséges, és a folyékony termék minősége a lágy főzettől az emulzióig bármilyen lehet. [1]

A feldolgozás több, mint 90%-a a fejlődő országokban történik, míg a fogyasztás jellemzően a fejlett országokban zajlik. [1]

1.3. Keletkező melléktermékek

A kávéfeldolgozás melléktermékei alatt általánosságban azt a szilád hulladékot értjük, ami az instant kávé előállítás extrakciós eljárásából, illetve a kávé otthoni, irodai vagy kávéházi lefőzéséből ered. [4] A keletkező hulladékok skálája azonban ennél sokkal színesebb, változatosabb. Vegyük sorra, mi távozik a teljes kávégyümölcsből, amíg végül a csésze a gőzölgő kávéval az asztalunkra kerül!

A *gyümölcshéj* jellemzően a száraz feldolgozási eljárás maradéka, ami száraz tömeg 12-18 %-át teszi ki. 1 tonna kávégyümölcs feldolgozásából 120-180 kg héj marad vissza. Összetételét tekintve fehérjéket, lipideket és szénhidrátokat (cellulóz, hemicellulóz, lignin) tartalmaz. [1]

A feldolgozásból származó második melléktermék a *gyümölcshús*, ami a száraz tömeg 30-50%-a. A nedves eljárás során minden 2 tonna kávébabra 0,6-1 tonna gyümölcshús jut. A gyümölcshús gazdag szénhidrátokban, fehérjékben és ásványi anyagokban, ezek mellett nagy mennyiségű tannint (csersavat), különböző polifenolokat és koffeint is tartalmaz. [1]

A *maghéj*, vagy más néven *ezüstbőr*, a kávébabot közvetlenül borító réteg, ami a pörkölési fázis mellékterméke. Nagy mennyiségű oldható étkezési rostot tartalmaz emellett nagy az antioxidás kapacitása (együttes szabadgyökfogó képessége), feltehetően a fenolos komponensek, illetve a pörkölés során lejátszódó Maillard reakcióból képződő egyéb komponensek miatt. Az ezüstbőr jellemzően cellulózt és hemicellulózt tartalmaz, de a monoszacharidok közül megtalálható a glükóz, galaktóz, mannóz és az arabinóz is. [1]

A *forrázási maradék*, vagy *kávézacc* – mint harmadlagos biomassza hulladék – nagy mennyiségben tartalmaz szerves összetevőket (pl.: zsírsavak, lignin, cellulóz, hemicellulóz és egyéb poliszacharidok), melyeknek köszönhetően hasznosításának lehetősége folyamatosan egyre népszerűbb. [2] Gazdag cukrokban (mannóz, galaktóz) és fehérjékben. Az összetétel azonban nagyban változhat ágról ágra és növényről növényre, amiben fontos szerepe van a termővidék elhelyezkedésének, a talaj minőségének és a klímának is. A fizikai-kémiai tulajdonságok pontos ismerete a jövőben vagy akár napjainkban is nagyban megkönnyítheti a kávézacc felhasználási lehetőségeinek kidolgozását. [1] A fizikai-kémiai tulajdonságokat bővebben az 1.5. fejezetben tárgyalom.

1.4. A keletkező hulladékok hasznosítási lehetőségei

Mivel a kávé világszerte igen népszerű, a feldolgozás során nagyon nagy mennyiségű mellékterméke keletkezik. A nagy kereskedelmi forgalomból adódóan, az egyre nagyon mennyiségben rendelkezésre álló hulladék anyagok újrahasznosítása környezetvédelmi és gazdasági szempontból is egyaránt nagyon fontos. [1]

A 1. táblázat a 1.3. fejezetben felsorolt melléktermékek potenciális felhasználási lehetőségeinek áttekintésére szolgál. Jól látható, hogy a felhasználási lehetőségek tárháza igen széles. Az egyszerű háztartási felhasználástól (pl. talajjavítóként vagy súrolószerként), az összetettebb technológiát igénylő alkalmazásokig sokféle lehet. Ezek nagy része napjainkban még kiaknázatlan és jórészt a kutatás fázisában van.

1. táblázat Melléktermékek nyersanyagként vagy adalékanyagként történő hasznosításának lehetőségei

Gyümölcshéj	Gyümölcshús	Kávézacc
- Gombatermesztés - Citromsav és gibberellin sav előállítás - Gilisztakomposzt - Enzimek és szekunder anyagcsere termékek előállítása - Biogáz előállítás - Étkezési rostok forrása - Táptalajként fermentáció után aromaanyagok kinyerése - Rostlemez előállítás - Állati takarmány - Nehézfémek kivonása vizes oldatból	- Gilisztakomposzt - Enzimek és szekunder anyagcsere termékek előállítása - Komposztálás - Antocianát alapú festékek kivonása - Dzsem, gyümölcsle, ízesítőanyag - Állati takarmány - Foszforsavas impregnálás és pirolízis után bioszorbens	- Gombatermesztés - Bioetanolgyártás - Kationos festékek, nehézfémek kivonása szennyvízből - Étkezési rostok forrása - Fermentációs szubsztrát - Üzemanyag, biodízel, pellet előállítás - Állati takarmány - Olajkinyerés utáni maradék kationos festékek megkötésére - Aktívszén előállítás $ZnCl_2$-os kezeléssel

[1] alapján saját szerkesztés

A továbbiakban a kávézaccra fókuszálva fontos megjegyezni, hogy a tudományos cikkeken túl, a világhálón böngészve vagy ismerősöket végigkérdezve sok hétköznapi praktikával és ötlettel is találkozhatunk a felhasználási lehetőségekkel kapcsolatban. Ebből néhányat az 2. táblázatban gyűjtöttem össze [17]-[20]:

2. táblázat Hétköznapi praktikák a kávézacc hasznosítására

Súrolószerként, tisztítószerként	- Ultra dermhez keverve kerékpárszerelés utáni olajos foltok eltüntetéséhez - Zsíros, rozsdás felületek tisztításához - Lefolyótisztításhoz
Szagsemlegesítőként	- Kellemetlen szagot átvett edények tisztításához vízzel keverve - Filtertásakba téve hűtőkbe, hűtőládákba
Szépségápolásban	- Narancsbőr ellen vagy bőrradírként olívaolajjal keverve
Kiskertekben	- Sárgarépa és retekmagokhoz keveréséhez az elvetést megelőzően - Rózsatövek, hortenzia, kamélia, azálea alá - Csigák ellen - Komposztáláshoz
Horgászat	- Giliszták életben tartása zaccal kevert földben
Házi kedvenceknél	- Bolha szőrzetből való kiűzéséhez, kutyáknál

A kis volumenű felhasználások mellett gyakorlatban megvalósult nagy léptékű megoldásokra is találunk példát. A világ legnagyobb svájci székhelyű élelmiszeripari vállalatának tulajdonában álló 32 gyár közül 20-ban a keletkező kávézacc egy részét energiatermelésre használják. Egy hazánkban is népszerű amerikai kávézólánc olyan enzimeket keres és vizsgál, melyekkel az élelmiszer- és kávé-feldolgozási hulladékokat olyan anyagokká lehet lebontani, melyekből számos anyag (többek között műanyagok) alapanyagát lehet nyerni. Míg egy skót lepárló cég a hulladékok lepárlásából hőt és energiát nyer, és állati takarmányt állít elő. [38]

A továbbiakban az előzetes kezelést nem igénylő, nagy mennyiséget hasznosítani képes lehetőségek két fő irányával foglalkozom. A *talajjavító-szerként való hasznosításról* szóló bővebb áttekintés keretében azt tárgyalom, hogy ez a megoldás miért is működik, és hatékonyságát milyen eredmények támasztják alá. Az *adszorbensként való felhasználásról* szóló fejezetben pedig az irodalomból kiinduló, majd tovább fejlesztett saját méréseimből kapott eredményeket mutatom be, autótutakról lefolyó csapadékvízből való nehézfém-eltávolítás esetében.

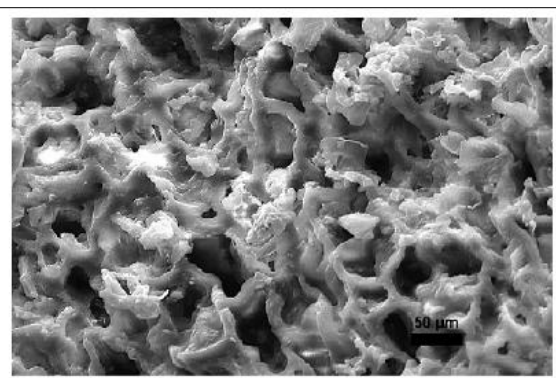
1.5. A kávézacc fizikai-kémiai tulajdonságai

Mielőtt elkezdenénk alkalmazni ezt a háztartási hulladékot, fontos megismerni annak fizikai és kémiai tulajdonságait. A fellelhető cikkekben több vizsgálatot is végeztek az alaptulajdonságok felderítésére, melyek a későbbi alkalmazást alapvetően meghatározzák.

A fizikai tulajdonságok vizsgálatában az első lépés a szerkezet feltérképezése. Szabad szemmel a kávézacc sötétbarna, liszthez hasonló finom szemcsés, porózus, jellegzetes szagú anyag (2. ábra). Ha behatóbban akarunk vizsgálni és a finomszerkezetet akarjuk láthatóvá tenni, speciális eszközökre van szükségünk. Adszorberként való alkalmazás előtti, fizikai vizsgálataik során SEM/EDX (Scanning Electromicroscope), módszert alkalmazva Azouaou et. al. képet is készítettek a zacc felépítéséről (3. ábra).



2. ábra A kávézacc megjelenése



3. ábra A kávézacc fizikai szerkezete

A szerkezetre vonatkozó röntgen fluoreszcens spektrometriás vizsgálatok alapján megállapított paramétereket az 3. táblázatban gyűjtöttem össze.

3. táblázat Kezeletlen kávézacc fizikai és kémiai tulajdonságai (Azouaou et. al., 2010; 2014)

		[6] szerint	[10] szerint
Átlagos részecske átmérő	[μm]	389,2	389,18
Nedvességtartalom	[%]	1,71	1,89
Szervesanyag tartalom	[%]	97,13	96,15
Ásványi anyag tartalom	[%]	1,16	1,96
Fajlagos felület	[m^2/g]	298,60	n.a.

[6] és [10] alapján saját szerkesztés

A kémiai jellemzők között első lépésben fontos áttekinteni a kávézaccban megtalálható nagyobb vegyületcsoportok tömegszázalékos megoszlását (4. táblázat).

4. táblázat Kávézacc tömeg%-os összetétele (Murthy et. al. 2012)

Hemicellulóz	36,7 $\pm$ 5,0	Összes polifenol	1,5 $\pm$ 1,0
Fehérje	13,6 $\pm$ 3,8	Lignin	0,05 $\pm$ 0,05
Cellulóz	8,6 $\pm$ 1,8	Koffein	0,02 $\pm$ 0,1
Összes cukor	8,5 $\pm$ 1,2	Tannin (csersav)	0,02 $\pm$ 0,1
Klorogén sav	2,3 $\pm$ 1,0	Pektin	0,01 $\pm$ 0,005
Összes rost és összes zsír	28,6 $\pm$ 13,9		

[1] alapján saját szerkesztés

Az 4. táblázatból jól látható, hogy a kávézacc nagy mennyiségben tartalmaz szerves összetevőket (cellulóz, lignin, hemicellulóz, poliszacharidok), hasznosításának felértékelődése nagyrészt ezeknek köszönhető. [2]

A felsorolt összetevők közül kis mennyiségük ellenére fontos kiemelni a polifenolokat és a tannint, mivel a tannin (pl.: csersav) tartalmú anyagok, mint a kávézacc tartalmaznak olyan poli-hidroxi és polifenol funkciós csoportokat, melyek kelátképzőként alkalmasak különböző nehézfémek megkötésére. (pl.: cink, réz, ólom) [11]

Pujol et al., részletesebben is tanulmányozták a kávézacc kémiai összetételét. A vizsgálatok során elvégezték a teljes elemanalízist, a savas karakterű funkciós csoportok, az elemi összetétel, a hamutartalom, az összes-polifenol tartalom (különös tekintettel a csersav) és a lipidek mennyiségének meghatározását a különböző folyékony extraktumokban. [2] Eredményeiket az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat Kávézacc elemi összetétele és atomarányai (Pujol et. al., 2013)

Elemi összetétel	[%]	Atomarány	
C	58,5	C/N	54,67
O	32,7	H/C	1,52
H	7,4	O/C	0,42
N	1,3	(O+N)/C	0,45

[2] alapján saját szerkesztés

A fő alkotó elemek tömegszázalékos mennyisége összhangban van más irodalmi adatokkal. [2][27] Az alacsony nitrogéntartalom és magas C/N arány miatt kevésbé alkalmas komposztálásra, de más nitrogéntartalmú anyagok bekeverésével javítható a komposzt minősége.

A H/C arány a zacc alifás karakterére utal. Az aromás karakter mutatószáma (H/C) és a polaritási együttható ((O+N)/C) egymással fordított arányban áll. A polaritási együttható értéke a zacc esetében közel esik a ligninhez, amelynek a kitinnel és cellulózzal szemben nagy az affinitása hidrofób szennyezők adszorpciójára. Ezek alapján a kávézacc hatékony adszorber lehet hidrofób szennyezők eltávolítására. A savas karakterű összetevők közül a fenol-csoportok találhatók meg legnagyobb mennyiségben, jellemzően ligninhez kapcsolódva.

A kávézacc viszonylag alacsony hamutartalma, magas szén és hidrogéntartalommal párosul, így energiaforrásként való alkalmazása is lehetséges. Fűtőértékét különböző számítások alapján 26 MJ/kg-ra becsülik. [2] Ez az érték közel van a fekete kőszén fűtőértékéhez, ami 29,3 MJ/kg és 33,5 MJ/kg közé tehető, típusától függően. [29]

Ásványi összetételre vonatkozó további adatokat mutatnak be a 6-8. táblázatok Pujol et. al., Azouaou et. al. és Chun et al. XRF-fel (X-ray Fluorescens Analysis) végzett mérései alapján. A pontos arány mintánként változó, nagyban függ a termesztésre használt területek talajának összetételétől, az alkalmazott trágyázástól és a termesztett kávéfajtától.

6. táblázat A kávézacc ásványi összetétele (Pujol et. al., 2013)

Elem	Mennyiség [g/kg]	Elem	Mennyiség [g/kg]
Ca	0,63	Fe	0,24
Mg	0,13	Cu	0,042
K	0,23	Zn	0,011
Na	0,48	Mn	0,031

[2] alapján saját szerkesztés

7. táblázat Kezeletlen kávézacc kémiai összetétele I. (Azouaou et. al., 2010; 2014)

Összetevő	K ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	SO ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Fe ₃ O ₃	Cl	Al ₂ O ₃	CuO
[m%]	33,98 34,40	22,98 23,21	15,32 15,89	12,51 12,62	3,98 4,27	3,22 3,54	2,92 3,09	1,76 1,84	0,89 0,98	0,82 0,95	0,18 0,19
Összetevő	Sr	Mn	Zn	Pb	Ti	Ni	Rb	Nb	Co	Cr	Ba
[m%]	0,016 0,011	0,06 0,08	0,058 0,084	0,03 0,05	0 0,03	0,02 0,04	0,024 0,03	0 0,01	-	0 0,0063	-

[6][10] alapján saját szerkesztés

8. táblázat Kezeletlen kávézacc kémiai összetétele II. (Chun et al., 2013)

Összetevő	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
[m%]	52,9	11,40	8,45	8,25	3,69	3,52
Összetevő	Cl	MgO	K ₂ O	ZnO	CuO	MoO ₃
[m%]	3,30	2,71	2,51	1,17	1,06	0,98

[7] alapján saját szerkesztés

Az ásványi/kémiai összetétel nagyan függ a feldolgozási eljárás típusától (nedves vagy száraz). Emiatt a két elemi összetételt tárgyaló táblázat adatai között nagyságrendi eltérések is megfigyelhetők.

2. A kávézacc hasznosításának két fő iránya

A dolgozat írása során számos, a mindennapokban alkalmazott praktikáról hallottam és olvastam. A keresőoldalak bármelyikén több tíz oldalnyi ötlet olvasható, melyek a legkülönbözőbb területeken, köztük a háztartásokban jól alkalmazhatók. [17]-[20] A fellelhető praktikák azonban jórészt csak a kis volumenű, egyedi felhasználást fedik le.

A keletkező mennyiség azonban ennél sokkal nagyobb, a világon összesen 6 millió tonnára becsülik az éves mennyiséget. [8] Ha csak Magyarországot vesszük alapul, a statisztikai adatok alapján évente 25500 tonna zacc termelődik országos szinten.[28] Ennek a mennyiségnek a kezelésében az egyedi megoldások csak egy kis hányadot képesek felhasználni. A maradék kávézacc hasznosítása azonban nagyobb léptékű megoldások segítségével valósulhatna meg.

A továbbiakban bővebben foglalkozom két olyan felhasználási iránnyal, melyek esetében érdemes megvizsgálni a nagyobb léptékű hasznosítás lehetőségeit, megvalósíthatóságát és költséghatékonyságát.

2.1. Talajjavító adalékként való felhasználás

A kávé lefőzéséből visszamaradó zacc még nagy mennyiségben tartalmaz szerves anyagot és ásványi anyagokat, melyek révén akár talajjavító anyagként is hasznosítható lehet.

A szervesetlen műtrágyák mezőgazdaságban történő intenzív használata napjainkban együtt jár több negatív változással is, melyeknek végső soron direkt hatása lehet az emberi egészségre is. Ezek között említhető a talaj termőképességének csökkenése, a térfogatsúly növekedése, a talaj és a talajvíz egyre nagyobb mértékű szennyeződése illetve a termelt zöldségek szennyezőanyag-tartalmának növekedése. Ezzel egy időben megfigyelhető az egészséges ételek iránti növekvő igény.

A műtrágyák megfelelő alternatívái lehetnek a különböző mezőgazdasági vagy élelmiszeripari hulladékok, mert segítségükkel elősegíthető a talaj eredeti szerkezetének visszanyerése és termőképességének további fenntartása. A kávézacc – mint élelmiszeripari vagy háztartási hulladék – ebből a szempontból értékes erőforrásként is értékelhető: merev mikroszerkezetének köszönhetően szerepe lehet a talajszerkezet visszaállításában, elősegítheti az átlegezőzést, növeli a víz- és tápanyag-visszatartást.

A lefőzés után megmaradó szerves komponensek növelhetik a talajban a szervesanyag-tartalmat, különös tekintettel a N-re, melynek nagy szerepe van termőképességben. [21] A tudományos bizonyítékok alapján vagy ezektől függetlenül, a kávézacc háztartási használatának gyakorlata egyre népszerűbb. [21] Erre több mód is adódik: kis mennyiségben rakható közvetlenül a talajra, keverhető a talajba vagy komposztba. Komposztálás után, lassan felszabaduló N-forrásként alkalmazható. [22]

A kémiai összetételt tekintve az ásványi anyagokon túl egyes biológiailag aktív komponenseknek, mint például a koffein vagy a klorogénsav, előnyök és hátrányok egyaránt tulajdoníthatók. Ezek az összetevők toxikusak lehetnek bizonyos mikroorganizmusok számára. Csökkenthetik a talaj N-felvevő képességét és számolni kell azzal, hogy a koffein felvételére képes fajok esetében járulékos fiziológiai változásokat okoz. Mindezek mellett természetes növényvédő-szerként is működhet, csökkentve a pótlólagos vegyszerfelhasználást. [21]

Cruz *et. al.* több cikkben is vizsgálták az alkalmazás létjogosultságát. Első kísérleteikben azt figyelték meg, hogy a bekeverés tf% aránya hogyan befolyásolja a saláta (*Lactuca sativa* L.) klorofill és karotin tartalmát. További kutatásaikban a zöldségek tápanyagháztartását és bioaktív tulajdonságait tanulmányozták komposztált és nem komposztált kávézacc esetén.

Eredményeik azt mutatták, hogy maximum 10 tf%-os arány mellett a zaccal kevert termőtalaj növeli a növény klorofill és karotin tartalmát a biomassza növekedésével együtt. Ezek mellett azonban megfigyelhető a levelek N-tartalmának csökkenése is. Ezt valamilyen tápanyag hiánya/megléte miatt kialakuló stresszhatás vagy bizonyos komponensek (pl.: koffein) toxikus hatása okozhatja. [21]

A komposztálás hatását vizsgálva megállapították, hogy a friss kávézaccal szemben, melyben a tápanyagok hozzáférhetősége kicsi és stresszt okozó komponensek vannak jelen (koffein), a komposztált forma már kis mennyiségben adagolva is nagymértékben emelte a levelek esszenciális makroelem-tartalmát (Ca, Mg, N, P, K, S, Fe), javítva ezzel a minőségüket.

Rávilágítottak arra is, hogy az élelmiszeripar szempontjából a kávézacc hasznosítása – mint egyszerű, olcsón alkalmazható talajjavítószer – vonzó lehetőséget kínál magas tápértékű termékek termelésére és előállítására. [22]

A megvalósításra már gyakorlati példa is van. Gunter Pauli: A kék gazdaság című könyvében – melyet a Római Klub 2009-ben hivatalos jelentéseként fogadott el – 14 fejezetben mutat be olyan innovatív ötleteket, amelyek lehetővé teszik a jelenlegi gazdasági modell fenntarthatóvá alakítását. Ezek működőképességét pedig 100 esettanulmány bemutatásával támasztja alá. A könyv 6. fejezetében olvashatunk különböző étkezési gombák kávézaccon történő termesztéséről.

Az ilyen irányú felhasználásnak több előnye is van. Egyrészt a gombatermesztés magas energiaráfordítással járó baktérium-ellenőrzést igényel. A kávéfőzéskor használt forró víz képes a megmaradó zacokban a baktériumok számát minimálisra csökkenteni, így lehetőség nyílik arra, hogy a gombák megemésszék a rostokat. Ebből kifolyólag a kávéen történő gombatermesztés energiafelhasználását tekintve 80 százalékkal hatékonyabb annál, mint amikor a gombatermesztéshez szükséges termőtalaj előállításának a teljes, folyamatához kell az energiaellátást biztosítanunk. [36]

Másrészt a minőségi trópusi gombákat általában keményfákon, mint pl. a tölgyfa, termesztik. A keményfákat kivágják, őrlik, majd mesterséges rönkökké alakítják. Akár 9 hónapra is szükség lehet, hogy szüretelni lehessen a shiitake vagy ganoderma fajtákat. A levágott gallyak és a kávézacc (vagy a kávébabhéj és a terméshús) maga is koffeint tartalmazó keményfának számít. Miközben a tehenek vagy a sertések rosszul reagálnak a koffeinre, ez az anyag a gombatermesztésben olyan hatásos, hogy a gombák a beoltás után 3 hónappal már kibújnak. [36]

Harmadrészt a gomba betakarítása után a visszamaradó zacc nagyon gazdag olyan esszenciális aminosavakban, mint például a lizin, amit hagyományosan cukornádból nyernek. Ennek köszönhetően egy értéktelen melléktermék a gazdaságokban első osztályú állati takarmánnyként, az otthonokban pedig háziállat-eleségként hasznosítható. [36]

Az alkalmazás további irányainak kutatása és válaszok keresése a felmerülő kérdésekre azonban költséges, összetett és jelentős időigényű mérések kivitelezésével lett volna lehetséges és a kapott eredmények vélhetően érdemben nem járultak volna hozzá az eddig is meglevő tudás pontosításához, gyarapításához. Emiatt kutatásom során a talajjavító-szerként való alkalmazás helyett a szerves adszorberként való felhasználást vizsgáltam részletesen.

2.2. Adszorbensként való felhasználás

A kávézacc, mint adszorbens, alkalmas különböző halmazállapotú anyagok felületen történő megkötésére. Ilyen például a házi praktikák között korábban említett felhasználás a kellemetlen szagok semlegesítésére (szárazon, tasakba töltve vagy vízben elkeverve).

Műszaki/mérnöki és gazdasági szempontból jóval meghatározóbb, hogy a zacc képes egyes szerves és szervetlen vegyületek vizes közegből való eltávolítására is, kezdve a különböző szerves komponensektől (reaktív festékek, peszticidek, herbicidek) [8], [23]-[25], egészen a nehézfémekig (Zn, Cu, Pb, Cr, Cd, Ni). [3]-[7]; [10]-[13]. A vízkezelési eljárásokban használható aktív szén alapanyagként, illetve eredeti formában vizes vagy savas mosás után vagy kezelés nélkül is. Ez az alkalmazási lehetőségek a talajjavító adalékként való hasznosítással ellentétben, napjainkban jellemzően még a kutatás fázisában vannak.

Kyzas et al. [23] és *Roh et. al.* [25] többszöri desztillált/ioncserélt vizes mosást követően textilipari szennyvizek kezelésében reaktív textilfestékek megkötésének esetében tanulmányozták a zaccot. *Pavlovic et. al.* [24] ugyanerre a vegyületcsoportra az adszorpcióért felelős polifenol komponensek extraktumát használták.

Kyzas et. al. [4],[12] a szerves komponensek mellett vizsgálták réz és króm adszorpcióját is. *Chun et. al.* [7] a cinkmegkötést a szennyezett, malajziai Pelepah folyó vizében tanulmányozták. *Seniunait et. al.* [3] és *Tokimoto et. al.* [5] ólomionok megkötését vizsgálta. *Azouaou et. al.* [6],[10] méréseiket ólom mellett kadmium eltávolítására is elvégezték. *Djati et. al.* [11] és *Utomo et. al.* [13] négyféle fémrel is kísérleteztek, melyek a cink, a réz, az ólom és a kadmium voltak. A felhasznált zacc előkezelésére az említett mérések mindegyikében csak vizes mosás alkalmaztak.

2.2.1. Az adszorpció

Az adszorpció alapvető eljárás a szennyezett folyékony és légnemű közegek fizikokémiai kezelésében. Az adszorpció egyfajta szeparációs eljárás, melynek során a folyékony/légnemű fázis egyes alkotói a szilárd adszorbens felületére kémiai vagy fizikai elven kötést létesítenek. Folyékony fázissal érintkező szilárd felület esetében megfigyelhető a folyékony főtömeg molekuláinak megkötődése vagy feldúsulása a szilárd felületen. Az elválasztás az eltérő molekulatömegnek, alaknak, vagy polaritásnak köszönhető. Az említett tulajdonságokból fakadóan egyes molekulák sokkal erősebben kötődnek meg a felületen mint mások, és a kis átmérőjű pórusokba a kisebb molekulák vagy ionok könnyebben bejutnak és megkötődnek, míg a nagyobbak nem. A folyamat eredményeképpen kialakuló egyensúly több tényezőtől függ, melyek közül legfontosabb a rendelkezésre álló tartózkodási idő.

Az adszorpciónak több típusa ismert, alapja a felület és a megkötendő vegyület között molekuláris szinten fellépő többféle vonzó kölcsönhatás.

- Fizikai adszorpció: fizikai kölcsönhatások, főként Van der Waals erők eredménye, reverzibilis jelenség, aktiválási energia nem szükséges hozzá
- Kémiai adszorpció/kemisorpció: kémiai kölcsönhatások eredménye, lehet exoterm vagy endoterm, kezdő lépése gyakran nagy aktiválási energia igényű [3]

Az adszorpciót számos területen alkalmazzák, ezek közül a továbbiakban a csapadékvíz-kezelés egyik lehetséges eszközeként tárgyalom.

2.2.2. Útról lefolyó csapadékvizek szennyezettsége

Ismert, hogy a káros tevékenységek közül az ipari termelés mellett környezetünkre nézve a közúti járműforgalom az egyik legjelentősebb szennyező forrás. [42] A növekvő közúti forgalom és mind sűrűbb úthálózatnak köszönhetően a gépjárművek üzemelésük közben jelentős mennyiségű gáznemű és szilárd szennyezőanyaggal – ezen belül káros nehézfémekkel – terhelik környezetünket. Az így keletkező nem légnemű terhelés forrása változatos és zömében nagy mennyiségben tartalmaz fémes összetevőket. [42]

Ezek forrása jellemzően a jármű alkatrészeinek kopásához, súrlódásához (fékbetét- és gumiabroncskopás) köthető. A megmaradó kisebb hányad több tényező együttesen felelős. Ezek között említhető a kipufogógázok emissziója, az útburkolat és felfestések kopása, az útbútorzat korróziója illetve az elcsöppögő motorolaj nehézfém tartalma. Az útfelületekről lefolyó csapadékvizek szennyezőanyag tartalmának további sorsa az oldott és szilárd formák megoszlásától függ. [14]

Az autóutakról lefolyó csapadékvizekben jellemzően hatféle nehézfémrel találkozzunk, melyek előfordulási gyakoriság szerint a következők: cink (Zn), réz (Cu), ólom (Pb), króm (Cr), nikkel (Ni) és kadmium (Cd). [14]

A lefolyó csapadékvíz a fent említett tevékenységek következtében olyan mértékű terhelésnek van kitéve, amelynek következményeként szennyezettsége esetenként meghaladhatja a kommunális szennyvizét. [41] Emiatt az utakról lefolyó csapadékvizek egyre nagyobb hányadban szorulnak valamilyen kezelésre, különösen abban az esetben, ha valamilyen nagy forgalmú autópályáról származnak. A kezelést célzó tervezett intézkedések esetenként magukban foglalhatják a légkörből kiváló, a felszínen akkumulálódó, ill. az elvezető rendszerben felgyülemelő szennyező anyagok figyelembevételével a csapadékvíz mennyiségi és minőségi kezelését is. [41]

A közlekedés által kibocsátott nehézfémek nem csak a vizeket veszélyeztetik. Mivel mindhárom környezeti elembe belekerülnek, összetett levegőtisztasági, vízminőségi és talajszennyeződési problémát jelentenek. Perzisztens mivoltuk miatt idővel felhalmozódnak; jellemzően a csapadékvizeket befogadó vizek üledékében, illetve a talajok felső rétegében, ezért hosszú távon mindenképp potenciális veszélyforrásként kell rájuk tekinteni. [14] A csapadékvizek kezelésével tehát érdemes részletesen is foglalkozni.

2.2.3. Adszorpció csapadékvíz-kezelés

Az adszorpciót a csapadékvíz-kezelésben sokféle alkalmazzák, melyhez többféle adszorbenst használnak. Bár a legelterjedtebb anyagok, mint az aktív szén, a kitozán, a zeolit, a szilikagél vagy az agyag nagy adszorpciós kapacitásuk miatt nagyon népszerűek, de ezzel együtt nagyon költségesek is. [12]

A fémadszorpciós csapadékvíz-kezelési eljárások esetén egyre nagyobb az igény valamilyen elegendően hatékony, olcsó és könnyen hozzáférhető alternatív adszorbens alkalmazására. Környezeti szempontból külön előnyös, ha ez valamilyen hulladék hasznosításával is együtt jár.

Ezért a kutatók figyelme az utóbbi években az olcsó adszorbensek felé fordult. [6] Ezek között említendőek tipikusan a növényi hulladékok, úgy mint a tealevél-maradék, a fűrészpor, a fakéreg, az olívaolaj maradéka, a narancslékészítés maradéka, a narancshéj, az algák, a szárított növények és az olívamag. [10] A kávéfeldolgozás melléktermékeinek lehetséges alkalmazásával foglalkozó szakirodalom ugyanakkor ma még korántsem nevezhető teljesnek.

A kávézacc adszorbensként való alkalmazásának előnyei között említhető, hogy olcsó, könnyen hozzáférhető és viszonylag hatékony különböző nehézfém-ionok vízből való eltávolítása céljára.

3. Az alkalmazhatóság tanulmányozására végzett saját méréseim

A kávézaccot, mint szerves adszorbenst autóutakról lefolyó, nehézfémekkel szennyezett csapadékvizek tisztításának lehetséges eszközeként laboratóriumi kísérletek segítségével tanulmányoztam.

A vizsgálatok kiterjedtek mind a hidraulikai, mind pedig az adszorpciós kapacitás megfigyelésére. Mindkét említett terület erősen befolyásolja a kialakított adszorber további felhasználási módját. A szűrőközeg útpályák menti telepítésére két lehetőséget vettem számba: a belterületi csatornaszemekben, illetve a belterületi szikkasztóárkokban és külterületi szikkasztó medencékben kialakított szűrőágyat. Vizsgálataimat a korábban említett hatféle nehézfémről háromra: cinkre, rézre és krómra végeztem el. Ólom, kadmium és nikkel mérésére mérés technikai akadályok miatt nem volt lehetőség. A tisztítandó közeget a mérésekben ismert koncentrációjú modelloldatokkal helyettesítettem.

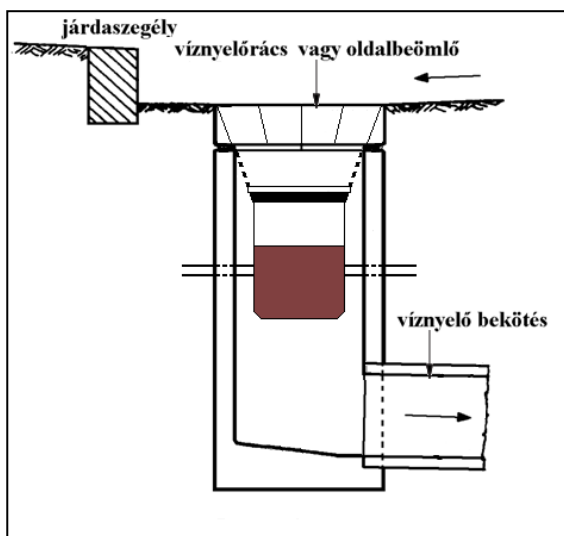
A szakirodalomban elterjedten alkalmazott áztatásos kísérletek mellett, átfolyásos kísérleteket is végeztem, különböző méretű töltött oszlopok segítségével eltérő tartózkodási idők biztosítása mellett. Mivel a szakirodalomban megtalálható eredmények zömét áztatásos mérések segítségével nyerték, az átfolyásos kialakítások esetében kevés volt a korábbi, mintául szolgáló gyakorlati megoldás. Emiatt kutatásom során az egymásra épülő kísérletekből nyert információk, tapasztalatok és következtetések felhasználása a módszer további javítása érdekében kulcsfontosságú volt.

3.1. Hidraulikai vizsgálatok

3.1.1. Telepítési lehetőségek és követelményeik

A hidraulikai vizsgálatok során arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a zaccal kevert homok töltet folyamatos átfolyású kialakításban milyen tulajdonságokkal rendelkezik és ebből következően milyen formában alkalmazható hatékonyan. A kísérletek során megfigyelt tulajdonságok a továbbiakban nagyban meghatározzák a két – fent említett – lehetséges útpálya menti kialakítás alkalmazhatóságát, megvalósíthatóságát.

A belterületi csatornaszemekbe való telepítés esetében (4. ábra) sok lehetőség adódik a beépítésre. Minden esetre igaz, hogy kis keresztmetszeten kell minél nagyobb átbecsátást biztosítani, hiszen az úttestek mentén telepített aknák feladata az útpályára hulló csapadék gyors elvezetése. Ha a töltet nem képes biztosítani az ehhez szükséges áramlási sebességet, akkor a lefolyó nem tudja betölteni elsődleges feladatát.



4. ábra Telepítés csatornaszembe

[4]-[6]

A belterületi szikkasztóárkokban vagy külterületi szikkasztó medencékben kialakított szűrőágyként való elhelyezés esetében az úttest víztelenítését szolgáló rendszerbe beékelődik egy puffertároló. Így az úttest gyors víztelenítése akkor is megoldható, ha a töltet által maximálisan biztosított térfogatáram kisebb, mint a közvetlenül vagy a surrantón érkező csapadékvíz térfogatárama (5. ábra).



5. ábra Telepítés szikkasztóárkba vagy szikkasztótározóba

[7]-[8]

A belterületi csatornaszemes alkalmazás megvalósíthatóságának vizsgálatakor kiindulásként a csatornaszem méretezésben alkalmazott elvárt terhelhetőségre kerestem adatokat, melyeket Sali Emil: *Csatornázás* című könyvében találtam meg (9. táblázat).

9. táblázat Különböző kiképzésű és méretű víznyelők vízelvezető képessége (Sali, 1990.)

Vízborítás a víznyelőórácson [cm]	Méret		
	32 x 32	48 x 48	30 x 10
	Függőleges beömlés [L/s]		Oldalbeömlés [L/s]
5	15,8	29,6	4,3
8	26,8	50,1	8,7

3.1.2. Kísérletek

Az elvárt kapacitás meghatározása után a zaccal kevert homoktöltetek viselkedését több eltérő keverési arány és szakaszos vízatengedés mellett töltött oszlopokban vizsgáltam. A méréseket a keverési százalékon túl aszerint is megkülönböztettem, hogy (i) szárazon betöltött, (ii) nedvesen betöltött, (iii) minimum egy napig víz alatt tartott vagy (iv) legalább 3 napig száradni hagyott töltetről volt-e szó. A mérések során a vízáteresztő-képesség javítása érdekében a zaccot homokkal keverve alkalmaztam, mivel a zacc önmagában finomszemcsés szerkezete miatt nagyfokú tömörödéssé képes, melynek következtében jelentősen lassul az áramlás.

A kísérleteket egy 8-cm átmérőjű, alul összeszűkülő üvegcsőben végeztem, amelybe minden alkalommal 1 liter térfogatú töltetet tettem. A töltet kimosódását szűrőpapírral akadályoztam meg. A töltött oszlopon minden méréskor 300 ml víz átfolyásának időtartamát jegyeztem fel.



6. ábra 8 cm átmérőjű oszlop

Az oszlopban (6. ábra) vizsgált zaccal kevert homok töltetek közül 0%-os tiszta homok, illetve 10%-os és 20%-os keverékek áteresztőképességét tanulmányoztam. Az oszlopba elsőként referencia gyanánt 0%-os keveréket, azaz homokot töltöttem és később ehhez viszonyítottam a 10 tf%, és 20 tf% keverékekre kapott eredményeket. 100 % homok

esetében a kedvező anyagi tulajdonságoknak köszönhetően az átnedvesedés egyenletességével nem volt probléma, csatornák nem képződtek, az oszlop megbontásakor a töltet a cső teljes keresztmetszetében nedves volt.

A 10%-os keverék tesztelésekor azonban gyakorlati problémák és megoldandó kérdések merültek fel, mivel már ebben a minimális keverési arányú esetben is biztosítani kell a keverék homogenitását, ami két eltérő sűrűségű és szerkezetű szilárd anyagról lévén szó nehezen megoldható.

A töltet szárazon történő betöltésekor jelentkezik valamilyen mértékű tömörödés. De, ha száraz állapotban történik a feltöltés, nem biztosítható a töltet teljes keresztmetszetben való átnedvesedése (7. ábra), mert a folyadék inkább a kisebb ellenállás felé fog áramlani. Ez a kisebb ellenállás a kis keresztmetszet miatt jellemzően a töltet szélén jelentkezik a falhatásból adódóan. Az átnedvesedés egyenletessége nedves betöltéssel javítható lehet, de így a tömörödés gátolt lesz, emiatt már kezdeti – áramlás nélküli – állapotban is csatornák és áramlási terek alakulhatnak ki.



7. ábra Szárazon betöltött keverék szétszedés után



8. ábra Szétváló fázisok

Ha mégis a nedves betöltést választjuk a töltet előnedvesítése önmagában problémát jelent. Egyrészt a kismértékű nedvesítés (pl.: permetezéssel) nehézkes és a gyakorlatban, későbbi terepi felhasználás során túl komplikált. Másrészt a pohárba vagy keverőedénybe töltött keverék egyszerű vízzel való felengedése nem megvalósítható, mert sűrűségkülönbség miatt a kisebb sűrűségű zacc szemcsék felúsznak a felszínre és a két fázis egyszerűen szétválík (8. ábra).

A fázisok ilyenformán történő szétválása viszont rávilágít arra a gyakorlati szempontból fontos lehetőségre, hogy a későbbiekben, a kimerült töltetekből a zacc jól elválasztható és a mosott homokot friss zaccal bekeverve újra fel lehet használni.

Többszöri vízátgondolás után a töltet szerkezetét tekintve bizonyos mértékű kolmatáció figyelhető meg, ami miatt az áteresztőképesség romlik, az áramlási sebesség pedig

lecsökken. Mivel a zacc szemcsék átmérője kisebb a homokénál, azok a tölteten belül el tudnak mozdulni és alsóbb részekben feldúsulnak. Ez az alsó részben való dúsulás szabad szemmel is jól látható volt.

Ezekből az észrevételekből okulva a továbbiakban az áramlási keresztmetszet növelése – a csatornaszemek méretét jobban megközelítve – és a falhatás mértékének csökkentése céljából a vizsgálatokat nagyobb, 17 cm átmérőjű csőben vizsgáltam (10. ábra), melyben a töltet térfogata már 3,5 l volt, az egyszeri átengedett víz mennyisége pedig 500 ml.

A töltettípusokat egy újabb keverési aránnyal egészítettem ki, így összesen négyféle töltetet vizsgáltam (0%, 10%, 20%, 30%). A töltet tetejére pedig Petri csészét raktam, ami gátolta az újbóli feltöltések hatására történő tölcserképződést.



9. ábra Homokkal feltöltött kúprész



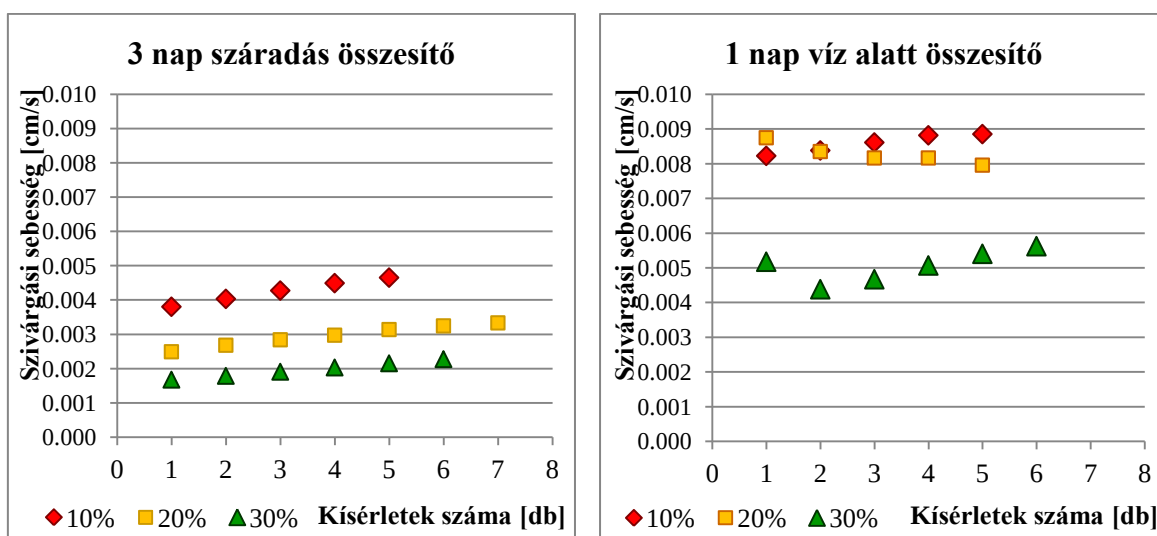
10. ábra 17 cm átmérőjű oszlop

A rendelkezésre álló oszlop geometriájából adódóan a berendezés alsó 25 cm magas, kúpos részét tiszta homokkal töltöttem fel, melynek a későbbiekben csak tartószerpe volt (9. ábra). Ez alá és fölé is elválasztó réteget helyeztem, hogy a töltet ne mosódjon ki, illetve a hengeres részben a töltet cseréje könnyebben kivitelezhető legyen. A méréseket a feltöltött kúpos rész külön vizsgálatával kezdtem.

A vízáteresztő-képességet a száraz betöltést követően minden töltet esetén 3x500ml víz átengedése után kezdtem mérni, minden alkalommal legalább 5 párhuzamost feljegyezve. Ezután a cső alját elzárva egy napra víz alatt hagytam a töltetet (későbbiekben *1 nap vízborítottság*), majd három nap száradás után (későbbiekben *3 nap száradás*) újramértem az időket. Az így kapott térfogatáramokból a keresztmetszet ismeretében pedig szivárgási sebességeket számoltam.

3.1.3. Eredmények

Az adott áteresztett vízmennyiségekhez tartozó időtartamokból a keresztmetszet ismeretében származtatott szivárgási sebességeket az 11. ábrapár szemlélteti.



11. ábra Hidraulikai mérések eredményei

Az adatokból jól látható, hogy a kiindulási átnedvesítést követő száradás után, az újbóli nedvesedés sokkal lassabb és a szivárgási sebesség kisebb, mint a jól átnedvesedett töltet esetén. A javulás azonban nem számottevő, nagyságrendileg még így is az ún. gyenge vízvezetőknél/vízfogóknál tapasztalt szivárgási tényezőkkel egyezik meg: 10^{-5} - 10^{-9} m/s (finom homok, iszap, lösz) [31].

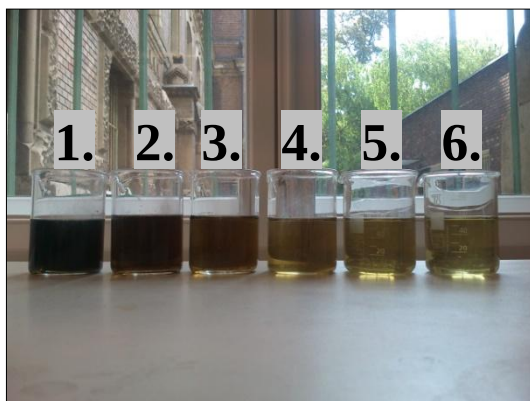
20% zacc mellett az egy napi ázást követően az eredmények közel egyezők voltak az ugyanilyen állapotú 10%-os keverékkel összehasonlítva. Emellett a 30%-os keverési arány a 20%-os töltethez képest nagyobb ellenállás-növekedést eredményezett, mint a 20%-os a 10%-oshoz hasonlítva. Ezért a későbbi gyakorlati megfontolások alapján a 30%-os töltetet a továbbiakban nem vizsgáltam.



12. ábra A 20%-os töltet nedvesedettsége 3 nap száradás utáni újbóli méréskor

A falhatás csökkentésére tett kísérlet sikeres volt, hiszen a töltet megbontásakor jól látszódott, hogy az átnedvesedés a teljes keresztmetszetében megtörtént, bár a falnál még mindig intenzívebb volt az áramlás. (12. ábra)

A hidraulikai mérések során az egynapos vízborítás után áteresztett 500 ml-es mintákból kapott mintasor színéből jól látszik, hogy egy nap víz alatt nagy mennyiségű szerves anyagot old ki a töltetből, ami azután gyorsan ki is mosódik. (13. ábra)



13. ábra 1 nap vízborítás után kifolyó minták sorozata

A fentiek szerint elvégzett hidraulikai vizsgálatokból kapott eredmények és az elvárt térfogatáram elvezetését kiszolgáló sebesség értékek párhuzamba állítását mutatja az 10. táblázat. A számított értékeimet Sali Emil fentebb tárgyalt táblázata (9. táblázat) alapján a 8 cm-es vízborításhoz tartozó adatokkal állítottam párhuzamba, mivel saját méréseim során a vízborítás átlagban 10 cm volt. A feltüntetett értékek a vizsgált változatok közül a legnagyobb szivárgási sebességet biztosító 10%-os, egy napos vízborítottság után mért töltetre vonatkoznak.

10. táblázat Az elvárt és a valóságban teljesített szivárgási sebességek összehasonlítása

	Méret		
	32x32 cm	48x48 cm	30x10 cm
	Függőleges beömlés sebessége [cm/s]		Oldalbeömlés sebessége [cm/s]
Irodalmi adat (Sali E. 1990)	26,2	21,7	29,0
Saját eredmények	$1,90 \cdot 10^{-3}$	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$6,49 \cdot 10^{-3}$

A táblázatból jól látható, hogy a legkisebb keverési arányú 10 %-os töltetre egy napos vízborítás után kapott legnagyobb, számított szivárgási sebesség sem elégítik ki az támasztott követelményeket. Ezek alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a töltet egyetlen tesztelt keverési arány mellett sem képes teljesíteni a csatornaszemektől elvárt terhelést. Tehát a folyamatos átfolyású kialakítás belterületi lefolyókba történő telepítése

nem megvalósítható. A továbbiakban ezt a lehetőséget elvetve a szikkasztókban való felhasználást vizsgálom részletesen.

A töltet állapotát tekintve gyakorlati szempontból az újranedvesedő töltet vizsgálatának van jelentősége, hiszen a tározók esetében a valóságban is nedves és száraz időszakok váltakozása figyelhető meg. A keverési arányt illetően a továbbiakban a 20%-os keverék vizsgálatával foglalkoztam, mert hidraulikai adatai hosszú tartózkodási idő biztosítását teszik lehetővé és viszonylag nagy az adszorbensként működő zacc adott térfogatra jutó mennyisége.

3.1.4. Tapasztalatok, további irányok

Az elvégzett kísérletek és a kapott eredmények alapján a tapasztalatok a következőképpen építhetők be a mérési módszer további javításába:

A hidraulikai méréseket a jövőben érdemes lenne nem összeszűkülő csőben is vizsgálni, hogy a keresztmetszet csökkenéséből és a töltetmagassággal összemérhető vastagságban betöltött – tartószerkezetként működő – homok hatásából adódó áramlási ellenállás kizárható legyen. Így lehetőség nyílna a töltet torzítás nélküli tulajdonságainak és ezzel együtt akár a k tényező meghatározására.

Érdemes lenne vizsgálni a töltetet nagyobb átmérőn vagy akár kis modellben is, mert itt azonos mennyiségű töltet nagyobb felületen oszolhatna el és kisebb lenne a töltetágy vastagsága.

Ki lehetne fejleszteni egy olyan módszert, melynek segítségével megoldható a folyadék teljes keresztmetszetben történő egyenletes eloszlása, csökkentve ezzel a csatornák kialakulásának esélyét, azaz az áramlási tér inhomogenitását.

Gyakorlati megfontolásból érdemes lenne hosszabb időn át ugyanazzal a töltettel dolgozva megvizsgálni, hogy a sorozatos nedvesedés-száradás folyamán hogyan változik a töltet morfológiája és ezzel együtt az áteresztőképessége.

Mivel az alkalmazott rendszer nem szabványosított, a jövőben lehetséges a zacc bekeverése más hordozóval vagy akár magával a talajjal. Ha más hordozóval együtt kerül felhasználásra a zacc, az új keverékre is fontos a hidraulikai tulajdonságok tanulmányozása.

Végül lehetne tesztelni olyan töltet kialakítást melyben a zacc és hordozója nem bekeverve, hanem rétegezetten helyezkedik el.

3.2. Adszorpciós vizsgálatok

A szakirodalomban található adszorpciós vizsgálatokat alapvetően két csoportba lehet sorolni: az áztatásos/poharas mérések és a ritkán alkalmazott átfolyásos/oszlopos kísérletek. Laborkísérleteim során mindkét módszert használtam a kávézacc tulajdonságainak tanulmányozására.

A kávézacc adszorbensként való használatát már sok tudományos cikk bizonyította, több kutatást végeztek többek között a kinetika és a megkötődés mechanizmusának megismerésére. A mérések megtervezését és kivitelezését az 11. táblázatban összefoglalt irodalmi eredményekre alapoztam.

11. táblázat Fémadszorpciós körülmények és eredmények kávézaccal (áztatásos kísérletek esetén)

Fém	Kontaktidő	Adszorber koncentráció	Fémoldat kezdeti koncentrációja	Eltávolítási hatásfok	Adszorpciós kapacitás	Forrás
	[h]	[g/l]	[mg/l]	[%]	[mg/g]	
Zn	1,5	0,1	0,1	86,14	0,087	[7]
	n.a.	3	13	80	3,76	[11]
	12	8,74	18,9	n.a.	0,57	[13]
Cu	1	0,5	3	92	0,55	[3]
	24	1	50	n.a.	70	[4]
	1,5	3	12,7	75	1,94	[11]
	12	8,74	18,9	n.a.	9,01	[13]
Pb	1	0,5	3	91,5	0,55	[3]
	24	0,1	0,3	61	n.a.	[5]
	n.a.	3	41,5	85	49,4	[11]
	12	8,74	18,9	n.a.	3,83	[13]
Cr	24	1	50	n.a.	45	[12]
Cd	3	9	100	n.a.	15,65	[10]
	n.a.	3	22,5	90	11,56	[11]
	12	8,74	18,9	n.a.	1,05	[13]

3.2.1. Áztatásos poharas kísérletek

Az átfolyás során várható adszorpciós tulajdonságok becslésére először tiszta homok, majd zaccal kevert homok töltetek felhasználásával áztatásos poharas kísérleteket végeztem (14-15. ábra). A kísérletek során a töltetekre a vizsgált fémek sójából készített modelloldatokból egy-egy sorozat került a rázógépre. Ezekből rendre 15, 30, 60 és 120 perc elteltével vettem mintát. Az utolsó mintavételi pontot az irodalomban olvasható kinetikai vizsgálatok alapján határoztam meg, melyek szerint az adszorpciós egyensúly beállása ehhez hasonló rendszerekben általában 120 perc alatt történik meg. [4][10][12]

Az előzetes mérések alapján meghatároztam a két anyag átlagos sűrűségét. Homokra ez az érték 1,51 g/ml, zaccra 0,35 g/ml volt. A zacc bekeverése a hidraulikai mérésekhez hasonlóan térfogatarányosan történt. A fenti értékekkel számolva a bemérés után minden lombikba 6,62 ml adszorbenst tettem. Tiszta homok esetén ez 10 g homokot, keverék esetén 8 g homokot és 0,5 g zaccot jelet. A lombikokba az adszorbens mellé 100 ml 10 mg/L koncentrációjú fémoldat került. A ráztatás összesen 120 percig zajlott, 125 rpm fordulatszám mellett.

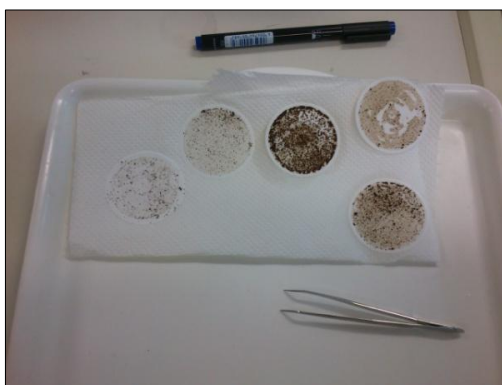


14. ábra Rázatás tiszta homokkal



15. ábra Rázatás homok-zacc keverékkel

A tiszta homokkal végzett kísérlet során a mintavétellel együtt megvalósult az adszorbens és az oldat elválasztása is, míg a zaccos mérések esetében ehhez külön le kellett szűrni minden mintát (16. ábra), lehetőleg a mintavétel után azonnal, hogy az érintkezési idő valóban csak 15, 30, 60 illetve 120 perc legyen. A szűrés az adszorpció megállítása mellett a további fotometriás mérések zavartalansága miatt is szükséges volt.



16. ábra Szűrés utáni maradék

A mintavétel után szükséges volt mintákat megfelelő arányú hígítása, hogy az így kapott koncentrációk fotometriás fémtesztek méréstartományába essenek (réz és cink esetén 10x, króm esetén 20x). A hígítások után a fémkoncentrációt fotometriásan mértem.

Készülék: Universalphotometer NANOCOLOR 400D

Universalphotometer NANOCOLOR 500D

Küvetthossz: 5 mm

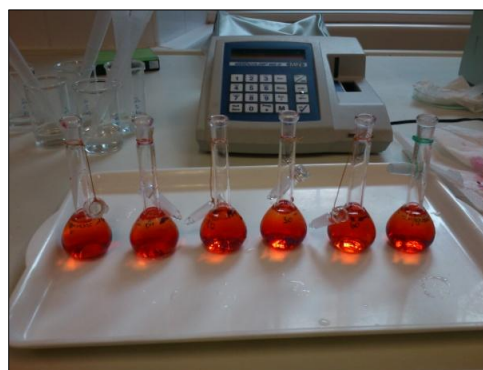
Módszer: Cink: Teszt 1-95 méréstartomány: 0,02-1,50 mg/L

Réz: Teszt 1-53 méréstartomány: 0,01-2,00 mg/L

Kromát: Teszt 1-25 méréstartomány: 0,01-0,45 mg/L Cr(VI)



17. ábra Réz mérése fotometrián



18. ábra Cink mérése fotometrián

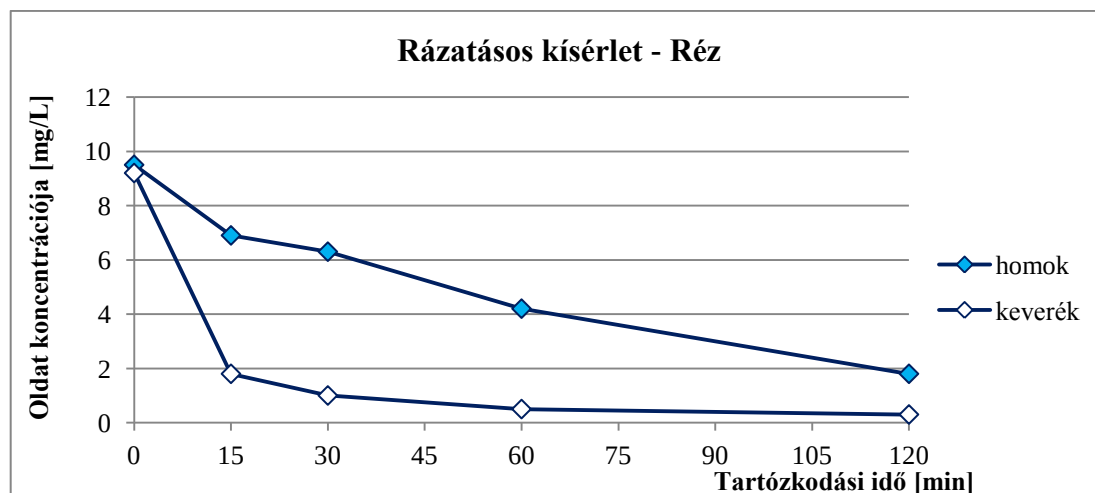


19. ábra Króm mérése fotometrián

3.2.1.1. Eredmények

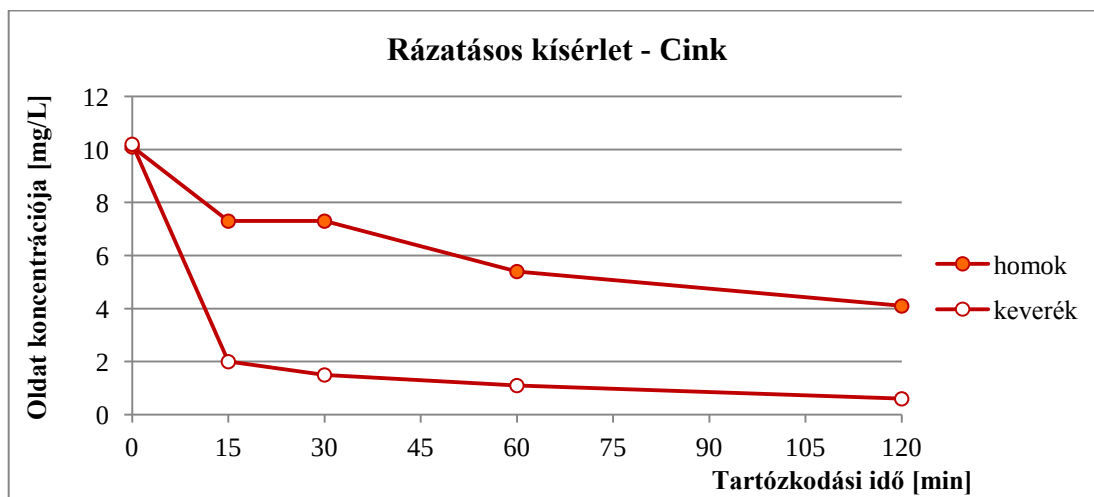
A ráztatásos kísérletek eredményeit az 20-22. ábrák szemléltetik.

20. ábra Rézadszorpció alakulásának összehasonlítása áztatásos kísérletekben



A réz-, és cinkionok feltehetőleg hasonló szerkezetűeknek és ebből fakadóan csersavval lejátszódó reakciójuk azonos mechanizmusának köszönhetően közel egyező adszorpciós viselkedést mutatnak. Réz esetében azonban rendre alacsonyabb eredményeket kaptam, ami nagyobb affinitásra utal, amit az irodalom is alátámaszt. [13] Konkrét számokban: 120 perc elteltével az oldatokban mért cinkkoncentráció 0,6 mg/L, a rézkoncentráció 0,3 mg/L volt.

21. ábra Cinkadszorpció alakulásának összehasonlítása áztatásos kísérletekben

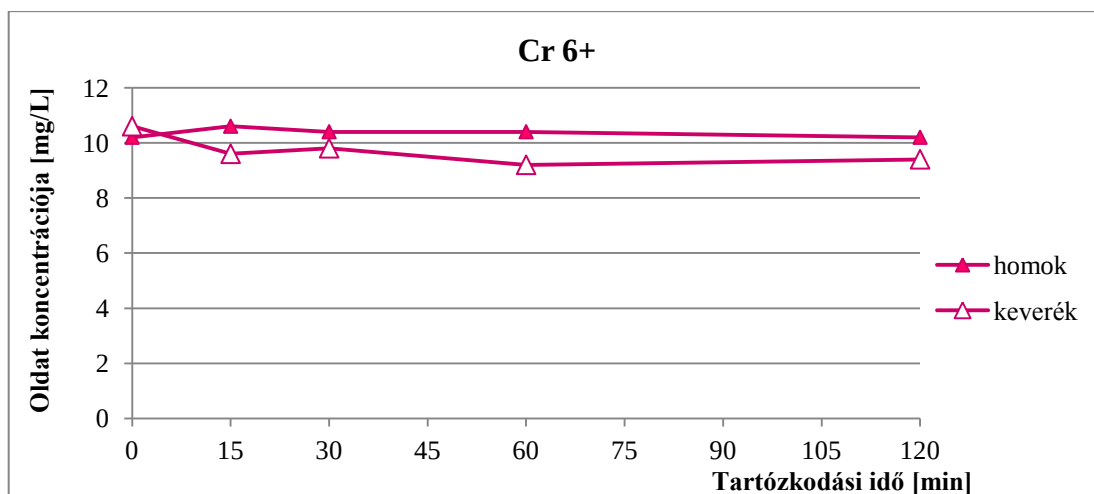


A krómionokat a réz-, és cinkionoktól eltérően már teljesen más reakciók mechanizmus jellemzi. Az adszorpció króm esetben két lépésben zajlik. Elsőként a Cr (VI) ionok Cr(III) ionokká redukálódnak, majd ezután a Cr (III) ionok szorbeálódnak a biomasszában. A polifenolok a Cr (VI) pillanatszerű redukációjában az elektrondonor szerepét töltik be. [39]

Mivel tiszta homok töltet esetén egyáltalán nem volt jelen a rendszerben elektrondonor a Cr (VI) nem tudott redukálódni és szilikátos szerkezetű homokhoz szinte egyáltalán nem kötődött.

Mivel a zacc tartalmaz csersavat – mint polifenol komponenst – képes a krómot megkötni, ezért arra számítottam, hogy keverék esetén a krómvisszatartás a homokhoz viszonyítva jobb lesz. Azonban a szakirodalmi adatokkal ellentétben a króm(VI) koncentráció még 20 tf% zaccarány mellett is szinte alig változott. Tehát méréseim nem támasztották alá az irodalomban található megfigyeléseket, adatokat. Feltételezésem szerint ez a króm – cinkhez és rézhez képest – eltérő tulajdonságaiból és a kísérleti körülményekből ered. Mivel a króm hatértékű fém kelátképzésre nem képes, és a rendszerben valószínűleg nem állt rendelkezésre elegendő polifenol a redukcióhoz vagy, ha redukció meg is történt nem maradt elegendő szabad kötőhely, ahová a Cr (III) ionok be tudtak volna kötni.

22. ábra KrómadSORPCIÓ alakulásának összehasonlítása áztatásos kísérletekben



Mivel a króm esetében jelen kísérletek során nem tapasztaltam számottevő visszatartást a zaccal kevert homok esetén sem, az átfolyásos kísérleteket a továbbiakban csak cinkre és rézre végeztem el.

A mérésekből kapott eredmények segítették a későbbiekben kivitelezett átfolyásos kísérletek megtervezését. A kapott adatok jó kiindulási alapot képeztek az adszorbensek (homok, homok-zacc) adszorpciós kapacitásának, az adszorpciós-görbék kiméréséhez szükséges átengedendő oldatok mennyiségének és koncentrációjának előzetes becsléséhez. Bár fontos kiemelni, hogy a két mérés az eltérő alapelv és a kivitelezési körülmények miatt nem hasonlítható össze, és a kapott információk átfolyásra történő alkalmazása is megfelelő körültekintést igényel.

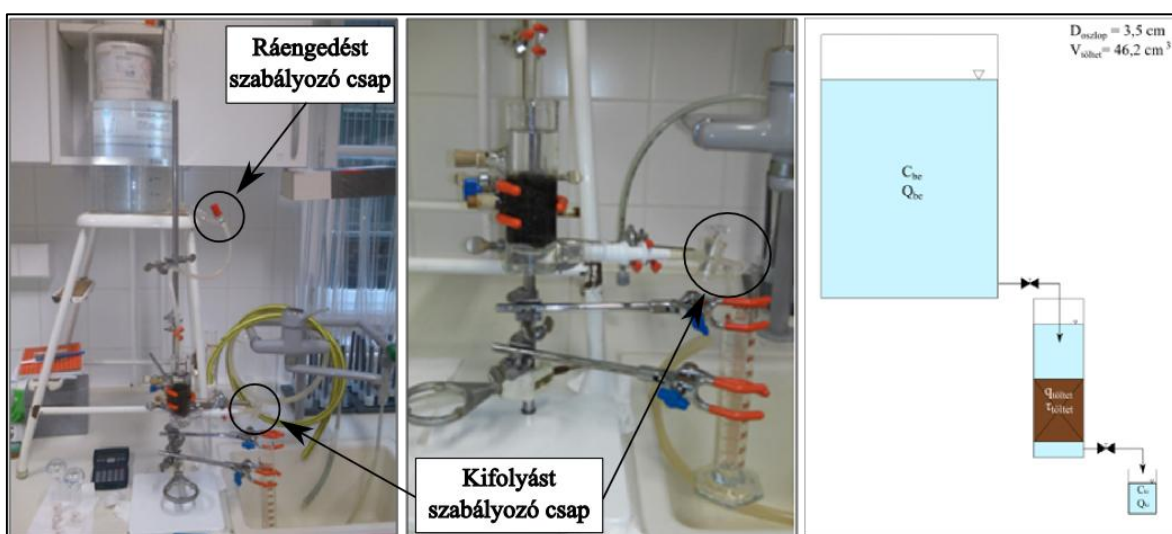
3.2.2. Átfolyásos oszlopos kísérletek

Adszorpciós méréseim másik nagy csoportját az oszlopos, folyamatos terhelésű mérések alkották. A töltött oszlopokon végzett átfolyásos kísérletek keretében arra a kérdésre kerestem a választ, hogy folyamatos terhelés esetén milyen a zaccal kevert homok adszorpciós teljesítőképessége. A méréseket a rázatáshoz hasonlóan itt is a tiszta homok adszorpciós tulajdonságainak vizsgálatával kezdtem. A kísérletek során 10 mg/L-es cinkoldat segítségével a tiszta homok töltetet 20 tf% zacc-homokkal hasonlítottam össze. A kis (46,2 ml) térfogatú tölteten a folyamatos terhelés melletti adszorpciós viselkedés és a telítődés kimérése volt a cél.

Első lépésben más adszorbensekkel korábban hasonló kialakításban elvégzett mérésekből kiindulva a modelloldat áramoltatását vízsugárszivattyúval segítettem annak érdekében, hogy fajlagosan minél több oldat juthasson át a tölteten és így a telítési görbe kimérhető legyen. A kényszerített áramoltatás eredményeképpen a tölteten a modelloldat

gyorsan haladt át és a tartózkodási idő kicsinek adódott ($\tau = 0,1$ perc). Eredményeim ennél a kialakításnál a várakozásokkal ellentétben – feltehetően a nem megfelelő hidraulikai körülmények biztosítása miatt – nem mutatták meg a zaccos töltet tiszta homokhoz viszonyított kedvezőbb adszorpciós képességét.

A kísérleteket ezután az átfolyásos kialakítást megtartva és módosítva megfelelő tartózkodási idő ($\tau = 15$ perc) biztosítása mellett is elvégeztem. A kísérleti berendezést és elvi felépítését az 23. ábra szemlélteti. A megfelelő tartózkodási idő és az áramlás folyamatosságának és egyenletességének biztosítása érdekében a mintaoldat ráengedését kezdetben csappal, később adagolószivattyúval szabályoztam, a kifolyást pedig mindkét esetben csappal fojtottam vissza.



23. ábra Átfolyásos kísérletek

A kísérlet során a nagyobb tartózkodási idő biztosításakor a mérés lassulása miatt adott idő alatt kevesebb oldatot tudtam áramoltatni a rendszeren, így a bevitt fém fajlagos mennyisége is csökkent.

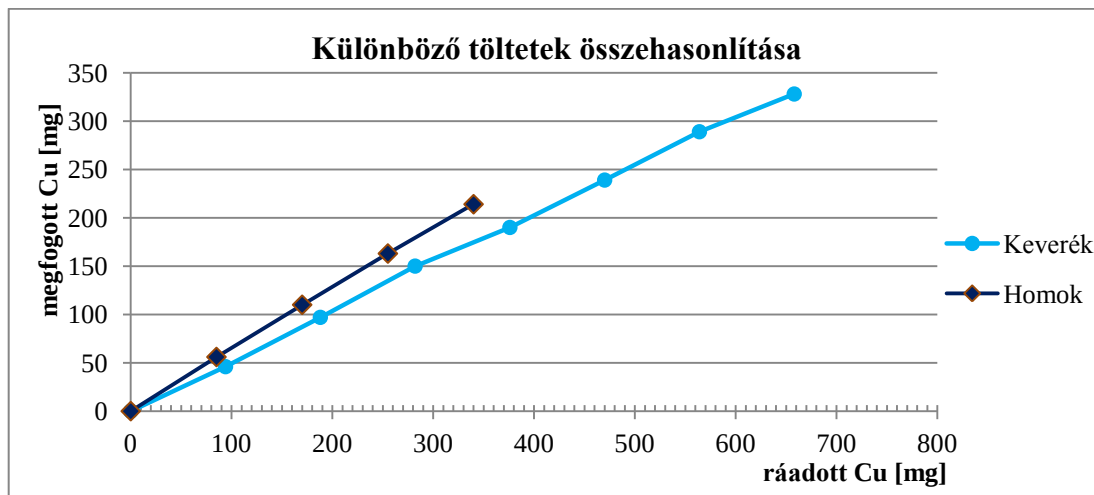
3.2.2.1. Eredmények

A nagy térfogatárammal (0,25 L/min) végzett átfolyásos kísérletek során a töltet kis térfogata miatti nagyon kicsi tartózkodási időből adódóan (0,1 perc) az eredmények nem mutattak nagy eltérést, a görbék egymáshoz közel haladnak a homok és a keverék esetén. (24-25. ábra)

Érdemes kiemelni, hogy réz esetében a homoktöltet – az előzetes várakozásokkal ellentétben – jobban teljesített, mint a zaccos keverék. Ez azonban az áztatásos mérések alapján lehetetlen. Az anomália feltételezésem szerint azzal magyarázható, hogy a gyors áramlás miatt az ionoknak nem állt rendelkezésre megfelelően hosszú tartózkodási idő a

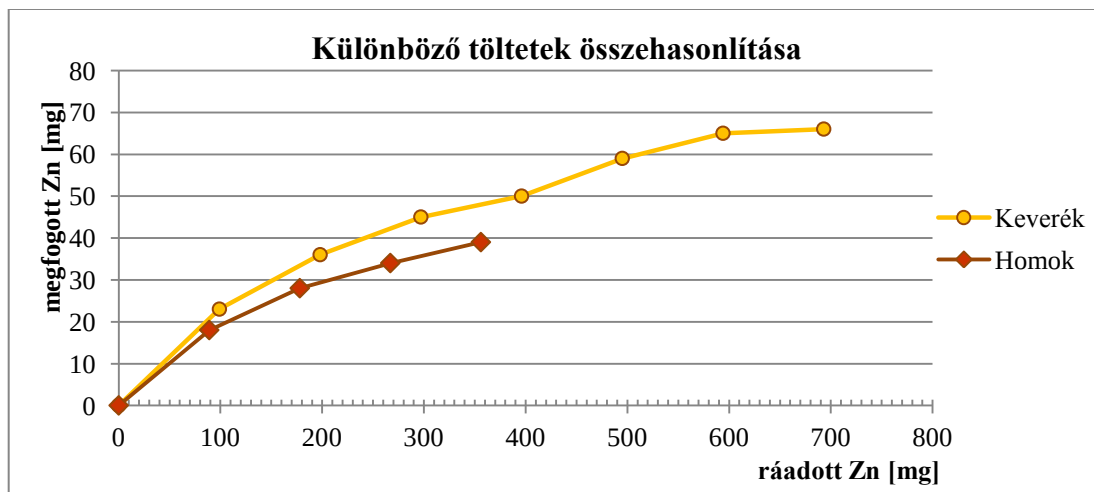
megkötődéshez. Az ionoknak az adszorbens felületén való megkötődéséhez ugyanis időre van szükség, amihez képest a 0,1 perc nagyságrendű tartózkodási idő valószínűleg kevésnek bizonyult.

24. ábra Gyors, átfolyásos kísérletek eredményei rézoldat esetén



A keverékkel rövid (0,1 perces) tartózkodási idő mellett végzett átfolyásos mérésnél is megjelent a réz esetén a korábbi áztatásos kísérletek során megfigyelt nagyobb affinitás. Míg a cinkoldatnál a ráadott 700 mg környékén már telítődéshez hasonlóan elhajlik a görbe, réznél vizsgálva ugyanezt a pontot a görbe még lineárisan halad felfelé, ami azt jelenti, hogy a mérés során nem sikerült elérni a telítődést, tehát még maradt rendelkezésre álló kapacitás az adszorbens felületén.

25. ábra Gyors, átfolyásos kísérletek eredményei cinkoldat esetén

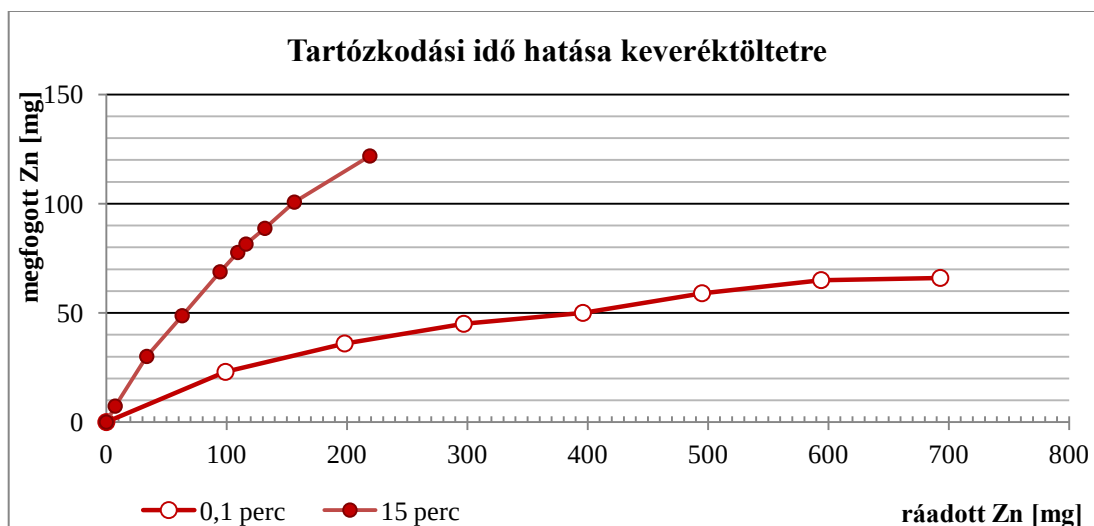


Az adott körülményeknek megfelelő maximálisan megköthető mennyiséget csak a cink esetében sikerült meghatározni. Bár a görbe láthatóan elhajlik, a kimért adszorpciós kapacitás nem egyezik meg a maximális adszorpciós kapacitással.

Mivel rövid tartózkodási idő mellett az eredmények nem szemléltették a kétféle töltet közötti – áztatás során korábban, egyértelműen tapasztalt – különbséget, a kísérleteket megnövelt, 15 perces tartózkodási idővel is elvégeztem 10 mg/L koncentrációjú cink illetve rézoldatot alkalmazva. A 15 percet ebben az esetben az áztatásos kísérletek első mintavételi pontja alapján határoztam meg.

Az 26. ábrán látható két görbét összehasonlítva szembevető az érintkeztetési idő hatása az adszorpcióra. A 0,1 perc esetén kimért összes megfogott fém mennyiségére kapott maximális 66 mg-nál 15 perc esetén már jóval nagyobb érték várható, hiszen a görbe még meredeken halad felfelé. A két eset között számottevő a különbség, hiszen a hosszabb időt biztosító mérést leíró görbén 220 mg ráadott fémhez már közel dupla annyi megkötött fém (121 mg) tartozik, mint a rövid idejű mérésnél 700 mg ráadott fémnél elért érték (66 mg). Ez az eltérés többféle megközelítésben is magyarázható és oka vélhetően többféle jelenség együttes hatására vezethető vissza.

26. ábra A tartózkodási idő hatása átfolyásos kísérletekben



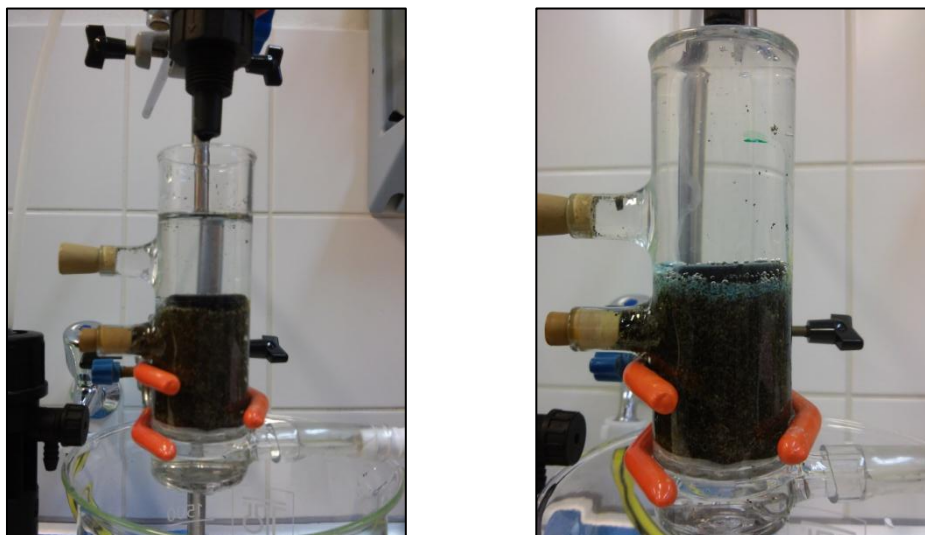
A különbséget értelmezhetjük egyrészt a hidraulika oldaláról. Eszerint gyors átfolyásnál a kialakuló nagy áramlási sebesség (0,25 L/min) miatt az áramlási tér heterogénné vált, és így a szivárgás bizonyos térrészekben (pl.: az üvegfal mentén) intenzívebb volt, míg máshol gyengébbé vált vagy akár meg is szűnhetett. Ennek következtében az oldat a töltetnek csak bizonyos részével érintkezett számottevően, és az adszorpciós-kapacitás jelentős része kihasználatlanul maradt.

Egy másik elképzelhető magyarázat inkább a kinetika felől közelíti meg a jelenséget. Eszerint a nagy tartózkodási idő lehetőséget ad az ionoknak olyan kötőhelyekre is eljutni, amelyek gyors áramlás esetén nem vagy csak nehezen hozzáférhetőek.

A hosszú tartózkodást biztosító kísérlet réz-szulfát oldattal történő elvégzése, azonban akadályokba ütközött. Az áramlás – gyors méréseknél korábban tapasztalt – kismértékű lassulása a tartózkodási idővel együtt nőtt. A kezdetben tiszta töltet felső 0,5 cm-ben a rézszulfát intenzív kikristályosodása volt tapasztalható. (27. ábrapár)

Ennek egyik elképzelhető magyarázata az lehet, hogy bizonyos kis tömegű növényi polifenolok, mint például a csersav képesek egyes fémionokkal csapadékot képezni. Az így létrejövő csapadék pedig nagymértékű aggregálódásra képes, ami kristályok képződését és ezzel együtt a töltet eltömődését is okozhatja. *McDonald et. al.* ezt a jelenséget réz és cink ionok esetében tanulmányozva megfigyelték, hogy a kicsapódás réz esetében intenzívebb, mint cink esetében és nagyban függ a kezdeti fém-polifenol aránytól és a pH-tól. [40]

A tapasztalt jelenség miatt a rézre vonatkozó 15 perces tartózkodás mellett elérhető adszorpciót nem vizsgáltam.



27. ábra Átfolyásnál kikristályosodó réz-szulfát

Az oszlopos kísérletek eredményeképpen meghatároztam a 20 tf%-os zaccos homoktöltet egyes fémekre vonatkoztatott adszorpciós kapacitását rövid és hosszú tartózkodási idő esetében is. Az így kapott eredmények a 12. táblázatban láthatók.

12. táblázat Átfolyások kivitelezésben kimért adszorpciós kapacitás cinkre és rézre

τ [perc]	Kapacitás [kg/t]	
	0,1	15
Zn	1,20	2,22
Cu	5,96	nincs mérve

A cink esetében kimért kétféle érték lehetőséget ad a későbbi felhasználás tervezésekor elvégzendő számításokban alsó és felső kapacitásra vonatkozó becslésekre.

3.2.3. Tapasztalatok és további irányok

A mérések során alkalmazott töltetekkel végzett áztatásos és átfolyásos kísérletek elvégzése során nyert tapasztalatok és az eredményekből levonható következtetések alapján a következő megállapítások tehetők a későbbi mérési módszer javítására:

Gyakorlati megfontolásból ebben az esetben is érdemes lenne hosszabb időn át ugyanazzal a töltettel dolgozva megvizsgálni, hogy egymás után többször nedvesített és száradni hagyott tölteten hogyan változik az adszorpció és a leengedett víz minősége.

Mint ahogy korábban is említettem, az alkalmazott rendszer nem egzakt, így a jövőben lehetséges a zacc beverése más hordozóval vagy akár magával a talajjal is. Ha más hordozóval együtt kerül felhasználásra a zacc, az új keverékre és azok különböző arányaira is fontos meghatározni az adszorpciós kapacitást, a kimerülés pontos becslése érdekében.

A konkrét alkalmazás előtt – vagy akár még a bekeverés előtt is – fontos áztatással kimérni a teljes izotermákat. A zaccra önmagában, a keverőanyagra önállóan illetve a különböző keverékekre (5-6 pont).

Mivel jelen munka – méréstechnikai okokból – csak a cink, réz és króm mérésére terjedt ki, a jövőben fontos lenne az adszorpció vizsgálata az utakról lefolyó csapadékvízben megtalálható további három nehézfémre is. (Ólom, Kadmium, Nikkel)

Végül – szerves anyagról lévén szó – szükséges tanulmányozni az adszorpció és a használat során lejátszódó biológiai degradációs folyamatok kapcsolatát.

4. Konkrét alkalmazás adszorbensként csapadékvíz szikkasztásnál

Az elvégzett hidraulikai és adszorpciós kísérletekből kapott eredmények segítségével már részletesen vizsgálható a csapadékvíz szikkasztására szolgáló folyamatos átfolyású töltetkialakítás megvalósíthatósága az általam tesztelt 20%-os töltet felhasználásával. A számításokat ebben a fejezetben elsőként egy autópálya mellé telepíthető szikkasztótározóra majd konkrét esetben a Budapest agglomerációjához tartozó, dinamikus növekvő, egyre nagyobb forgalmat generáló települést kiszolgáló főút, a Nagykovácsi út mentén kialakítható szikkasztóárookra végeztem el.

4.1. Szikkasztó tározók méretezési szempontjai

A hidraulikai vizsgálatokból kiderült, hogy a városi csatornaszemekbe helyezhető adszorber töltetként való alkalmazás nem valósítható meg, mivel a mértékadó csapadékból

származó vízhozamból adódó terhelést a zaccos töltet nem képes elvezetni. Emiatt a továbbiakban egy olyan lehetőséget ismertetek, ahol nem követelmény a beérkező víz gyors elvezetése, gyors tisztítása, és a hatékony adszorpcióhoz szükséges nagyobb tartózkodási idők is biztosíthatók.

Lakott területen kívül, főleg gyorsforgalmi utak, autópályák esetében illetve lakott területen belül, ahol erre van lehetőség, az úttest gyors vízmentesítésekor lefolyó csapadékvizet jellemzően tározzák, párologtatják, illetve szikkasztják. Erre általában megfelelő műtárgyakban vagy természetes/mesterséges árkokban kerül sor. [9] Ezekben a létesítményekben elegendően nagy tartózkodási idő biztosítható a zaccal történő nehézfém adszorpcióhoz.

A töltetággal ellátott szikkasztónak kettős célt kell szolgálnia, így a méretezésénél két szempontot kell szem előtt tartani:

1. a szikkasztóárok képes legyen tározni, az elhelyezett töltet pedig képes legyen elvezetni a beérkező mértékadó csapadékmennyiséget
2. a töltet megfelelő mennyiségű legyen a befolyó csapadékvíz megtisztításának hosszútávú (pl.: egy év) kiszolgálására.

Ezen két cél összehangolása – a szikkasztó méretezésekor – az alábbi négy paraméter ismeretében lehetséges:

1. a kezelendő csapadékvíz mennyisége
 - a. mértékadó/elvezetendő → érvényes műszaki irányelvek alapján
 - b. éves összes → meteorológiai adatokból
2. az összegyülekező csapadékvíz nehézfém-koncentrációja
3. az alkalmazandó töltet egyes nehézfémekre vonatkoztatott adszorpciós kapacitása
4. az elfolyó víz minőségére vonatkozó előírások

4.1.1. Hidraulikai méretezés

A mértékadó vízhozamon a vízgyűjtő összegyülekezési idejéhez (t) tartozó és a p valószínűségű modell-csapadékból keletkező elfolyás tetőző vízhozamát (árhullámcsúcs) értjük. A teljes lehatárolt vízgyűjtő területet részvízgyűjtőkre ajánlatos felosztani. Ezen részvízgyűjtők területe általában egy csatorna (árok) vagy csatornaszakasz torkolatához tartozó területtel azonos méretű. A terület jellemzői alapján próba hossz-szelvények készíthetők, melyekből kiszámítható a vizsgált szelvények összegyülekezési ideje és a mértékadó csapadék-intenzitás. [9]

A műszaki előírás által alkalmazott méretezési módszer a racionális módszer. Ez a számítás a vízgyűjtő jelleggörbájéről levont következtetésen alapul. Azt feltételezi, hogy egy vízfolyás szelvény méretezése szempontjából mértékadó vízmennyiség abból a csapadékból származik, amely annyi ideig tart, mint a szelvényhez tartozó vízgyűjtőterület teljes bekapcsolódásának ideje ($T = \tau$). [9]

A hidraulikai méretezésnél figyelembe veendő mértékadó csapadékvízből származó lefolyás megbecsüléséhez szikkasztó tározók esetében *Kállai* diplomadolgozatát vettem alapul.

A csapadék idejétől, intenzitásától és visszatérési idejétől függő együtthatók log-log ábrázolás mellett három különböző meredekségű egyenessel közelíthetők. Ezekhez az egyenesekhez tartozó meredekségekből, a visszatérési időből és a csapadék időtartamából számítható az egyes visszatérési idejű csapadékok intenzitása és mennyisége. [9]

A jelenleg érvényes műszaki irányelv (MI 10 167-1) szerint külterületen az útfelületre hulló csapadékból származó vízmennyiség számításához a *tízperces időtartamú és kétéves gyakoriságú* záporintenzitás értékét használják, ezekre a csapadékokra a fenti értékek: 73 mm/h és 12 mm. [9]

13. táblázat Tározandó csapadék mennyisége [m³]-ben egy fiktív útszakaszon (*Kállai*, 2013.)

Időtartam [min]	2 éves	4 éves	10 éves	20 éves
10	1490	1980	2575	3226
20	1822	2405	3247	3890
30	2050	2694	3638	4340
60	2506	3271	4417	5233
120	3064	3971	5363	6310
180	3446	4449	6008	7040
360	3748	4815	6382	7909
480	3981	5129	6818	8475
720	4335	5608	7485	9341
1080	4720	6131	8216	10296
1440	5014	6532	8778	11032

A számítás az intenzitás és a mennyiség felhasználásával egy átlagosan 50-80 cm mélységű szikkasztó tározóra vonatkozik. Alapja egy átlagosnak mondható fiktív autópálya szakasz, melynek hossza 5 km, teljes keresztmetszete pedig 35 m. Az egyszerűség kedvéért feltételezzük, hogy a domborzati viszonyokból adódóan a tározó csak a kisajátítási terület vizeit gyűjti, a külső területről származó vizeket nem. Átlagos

lefolyási tényezővel ($\alpha=0,7$) elvégezve a számítást az 13. táblázatban látható értékeket kapjuk. [9]

A fent említett 0,5-0,8 m-es mélységet feltételezve a mértékadó csapadékmennyiség alapján a tározó területet 5 km-ként telepítés mellett közel 3000 m²-nek (2980 m²) adódik.

A saját hidraulikai kísérleteimből nyert adatok alapján a szűrőréteg elhelyezése a szikkasztó tározó működését a következőképpen módosítja. Ha a fent említett 0,5 m-es vízborítást feltételezzük a tározó területe a mértékadó csapadékmennyiségből következően átlagosan közel 3000 m² (2980 m²). A szikkasztóba érkező csapadékvíz térfogatárama a mértékadó 1490 m³-es értéket 10 perccel osztva 2,48 m³/s. Ebből az értékből az átlagos szikkasztóterület segítségével, megkapjuk a szivárgási sebességet, ami $8,32 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Ezt összevetve az hidraulikai méréseknél legkisebb sebességet biztosító 20%-os, 3 napos száradás utáni töltetre vonatkozó $2,95 \cdot 10^{-5}$ m/s szivárgási sebességgel az a felső becslést kapjuk, hogy a tározóba érkező víz harmincszor lassabban fog elszivárogni, mint a beérkezési sebesség.

4.1.2. Adszorpció méretezés

Az éves tisztítandó mennyiség ugyanerre a feltételezett útszakaszra az egy év alatt lehulló csapadék mennyiségének ismeretében határozható meg. Magyarországon az éves átlagos csapadékmennyiség 500-750 mm. [33] Ebből egy évre vetítve $\alpha = 0,7$ lefolyási tényezővel számolva a kezelendő csapadékvíz mennyisége 61 250-91 875 m³ közé becsülhető, átlagosan 76 562 m³.

A közúti közlekedésből származó, csapadékvizekben megtalálható nehézfémek mennyiségére hazai viszonyok között számszerű adatok Budai doktori értekezésében találhatók. [14] A dolgozatban szereplő városi és közterületi utakról, illetve autópálya surrantókból vett vízminták adatai közül az utóbbiakat használtam fel.

14. táblázat Autópálya surrantón levezetett csapadékvíz lefolyás oldott nehézfém tartalma (Budai, 2011.)

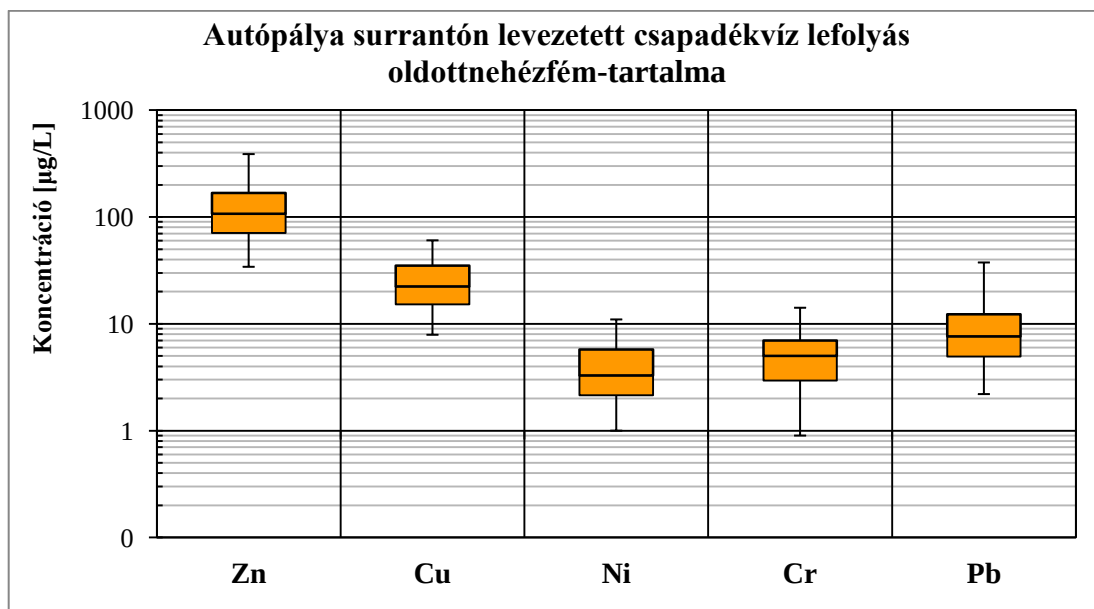
[µg/L]	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb
Minimum	34,20	7,90	1,00	0,90	2,20
25 %-os percentilis	70,68	15,18	2,15	2,95	4,93
Medián	100,10	20,45	3,10	4,05	7,40
75 %-os percentilis	160,63	33,13	5,55	6,05	12,00
Maximum	381,20	58,50	10,80	13,20	37,30

A hivatkozott irodalmi értékek esetében fontos kiemelni, hogy mérési eredmények csak teljes fémkoncentrációra voltak, ezekből – tapasztalatok alapján megállapított – 10%-os

oldott/összes megoszlási arányt feltételezve származtattam az oldott hányadra jellemző koncentrációkat. Ezeket az értékeket a

14. táblázat és a 28. ábra összegzi.

28. ábra Autópálya surrantón levezetett csapadékvíz lefolyás oldott nehézfém-tartalma



[14] alapján saját szerkesztés

A tározóba érkező lefolyó csapadékvíz koncentrációja azonban nem egyenletes, időben változó. Kezdetben – a beérkező teljes térfogat első kb. 10%-ában – nagyobb koncentrációértékek figyelhetők meg az ún. „First flush” jelenség miatt. A kezelés szempontjából ennek a csapadékvíz folyamatos utánpótlása esetén a koncentrációkiegyenlítés miatt nincs nagy hatása.

Az éves vízmennyiség és koncentráció adatokból a továbbiakban egy éves időszakban tapasztalható átlagos viszonyok feltételezése mellett a mediánnal számolva megkaphatjuk az összes megkötendő nehézfém mennyiséget kilogrammban (15. táblázat):

15. táblázat Megkötendő összes oldott fém mennyisége kilogrammban

[kg]	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb
Minimum	2,62	0,61	0,08	0,07	0,17
25 %-os percentilis	5,41	1,16	0,17	0,23	0,38
Medián	7,66	1,57	0,24	0,31	0,57
75 %-os percentilis	12,30	2,54	0,43	0,46	0,92
Maximum	29,19	4,48	0,83	1,01	2,86

Csapadékesemény idején a szikkasztó tározóba érkező csapadékvíz nem egyenletes sebességgel halad át a tölteten. A folyadék főtömege kezdetben gyorsabban majd – a csökkenő vízszlopmagasság miatt – egyre lassabban jut át a szűrőrétegen, emiatt a

tartózkodási időben a teljes mennyiséget tekintve nagy eltérések lehetnek. Ezért a csapadékvíz tisztításához szükséges töltetmennyiség meghatározására vonatkozó számításaimat, a rövid (0,1 perc) és hosszú (15 perc) tartózkodási időhöz tartozó kapacitásértékekkel egyaránt elvégeztem.

Az általam vizsgált töltet cinkre és rézre vonatkozó adszorpciós kapacitásának becsléséhez mérési adataimból indulok ki. A rövid és hosszú tartózkodási időhöz tartozó adatokat a kísérletek során maximálisan elért adszorbeált fém mennyiségek és a töltet tömegének ismeretében számítottam ki.

Az éves vízmennyiség, a koncentráció és a töltet egyes fémekre vonatkoztatott adszorpciós kapacitásának ismeretében becsülhető az a töltetmennyiség (17. táblázat), amely képes lesz az előírásoknak megfelelő mértékben kivonni a csapadékvízben megtalálható nehézfémeket.

A közúti csapadékvizek megengedhető szennyezettségére vonatkozóan jelenleg nincs hatályos jogszabály. A felszíni vizekre érvényes határértékeket „A felszíni víz vízszennyezettségi határértékeiről és azok alkalmazásának szabályairól” szóló **10/2010. (VIII. 18.) VM rendelet** 3. melléklete” tartalmazza (16. táblázat). A határértékek alapján az éves csapadékmennyiség ismeretében pedig meghatározható az a fémmennyiség, melynek jelenléte ellenére az elfolyó víz még megfelel az előírásoknak.

16. táblázat Egyéb specifikus szennyező anyagok környezetminőségi határértékei

	(90%-os tartósság)	Maradó fémmennyiség
	[µg/L]	[kg]
Oldott cink	75	5,74
Oldott réz	10	0,76
Oldott króm	20	1,53

17. táblázat Előírásoknak megfelelő fémmentesítéshez szükséges töltet mennyisége egy éves időszakra

	Teljes töltet tömege [t]			Töltetben a zacc tömege [kg]		
	Zn		Cu	Zn		Cu
τ [perc]	0,1	15	0,1	0,1	15	0,1
Medián	1,60	0,87	0,13	88	47	7
75 %-os percentilis	5,46	2,96	0,30	299	162	16
Maximum	19,54	10,57	0,62	1070	579	34

A 17. táblázatban a minimumra és 25%-os percentilire vonatkoztatott töltetmennyiséget nem tüntettem fel, mert ebben a két koncentrációtartományban a lefolyó

csapadékvíz minősége megfelel a jogszabályban rögzített normának, így tisztításra nincs szükség.

Végül a kiszámított anyagmennyiség ismeretében már készíthető irányadó javaslat a geometriai elrendezésre, azaz a szikkasztó tározó szűrőrétegének kialakítására. Mivel a számított töltetmennyiség fajlagosan az amúgy is legnagyobb koncentrációban előforduló cink eltávolítása esetén a legnagyobb, a kialakítás során a cinkre vonatkozó anyagmennyiséget veszem mértékadónak. Ha a tározó területét továbbra is 2980 m^2 -nek feltételezzük, ez a maximális értéket figyelembe véve a közel 20 tonnás töltetmennyiség kb. 5 cm-es rétegvastagsággal, mediánnal számolva 1,6 tonna pedig 0,5 cm-es rétegben teríthető ki a teljes felületre.

Mivel a kísérleteket az idő rövideje miatt csak cink és réz esetében végeztem el, a töltet további három nehézfémre (Ni, Cd, Pb) vonatkoztatott teljesítményének megállapítása a további kutatási feladatok között említhető.

4.2. Szikkasztóárok méretezése – Nagykovácsi út

Mivel az utóbbi években egyre többen döntenek úgy, hogy a városi levegőt inkább friss falusi levegőre cserélnék, a Budapesti agglomerációhoz tartozó települések nagy része – köztük Nagykovácsi is – dinamikus fejlődésnek indult. A kiköltözők számának növekedése maga után vonja a Nagykovácsi út forgalmának növekedését is, ami az ebből keletkező káros környezeti hatások erősödését eredményezi.

Mivel Nagykovácsi és környéke 2005. január 1-től a 219/2004. (VII.21.) Kormányrendelet 2. mellékletének értelmében végzett szennyeződés érzékenységi besorolás alapján 1. azaz a fokozottan érzékeny területek kategóriába tartozik [43], szükség lehet a forgalom növekedéséből – ezen belül a nehézfém-terhelésből – eredő hatások mérséklésére is. Erre a sokféle megoldás közül kínálhat egyet az út mentén kialakítható szikkasztóárok rendszer, az általam tesztelt szűrőággal ellátva.

A szikkasztótározó méretezésénél tárgyalt alapelvek mentén haladva erre az esetre is adható közelítő becslés a szükséges nyersanyagigényre vonatkozóan.

A szikkasztóároktól elvárható hidraulikai teljesítőképességet jellemző mértékadó csapadékmennyiséget Kállai diplomadolgozata alapján, az általa számított intenzitás adatokból határoztam meg, ismerve a teljes útszakasz hosszát és szélességét.

A Nagykovácsi út szikkasztóval ellátható szakaszának hossza összesen 6853 m. Ez a Nagyrét utca, a Szép Juhászné út és a Nagykovácsi út találkozásánál található

körforgalomtól Nagykovácsi főteréig, a Tisza István térig értendő. Az út mentén a vizsgált szakaszon az erdős, a művelés alatt álló és a lakott területek egyaránt előfordulnak.

Az útszakasz szélessége – kétszer egysávos útként – 6 m. Erre az útfelületre számítható 2 éves visszatérési idejű, 10 perces időtartamú, mértékadó csapadékmennyiség 502 m^3 .

Az éves kezelendő vízmennyiség: $18112,5 \text{ m}^3$. A lefolyó víz fémkoncentrációjának becsléséhez és a tisztítással szemben követelményként felállított határértékek meghatározásához a szikkasztó tározónál már használt adatokat vettem alapul.

Ezek alapján a teljes útfelületről egy év alatt lefolyó csapadék előírásoknak megfelelő tisztításához szükséges töltetmennyiség meghatározásához végzett számítások eredményeit az 18. táblázat mutatja.

18. táblázat Előírásoknak megfelelő fémmentesítéshez szükséges töltet mennyisége a Nagykovácsi úton

	Teljes töltet tömege [t]			Töltetben a zacc tömege [kg]		
	Zn		Cu	Zn		Cu
τ [perc]	0,1	15	0,1	0,1	15	0,1
Medián	0,38	0,20	0,03	21	11	2
75 %-os percentilis	1,29	0,70	0,07	71	38	4
Maximum	4,62	2,50	0,15	253	137	8

A szikkasztó tározóhoz hasonlóan a minimumra és 25%-os percentilisére vonatkoztatott töltetmennyiséget ebben az esetben sem tüntettem fel, mert az említett két koncentrációtartományban a lefolyó csapadékvíz minősége a jogszabályban rögzített határértékeknek megfelel, így nincs szükség a kezelésre.

4.3. Hazai lehetőségek – „Zacckereslet és zacckínálat”

Miután az előzőekben (4.1.2. fejezet) kiszámítottam az egy tározóban felhasználandó töltet mennyiségét - ezen belül a szükséges zacc tömegét – a teljes magyar gyorsforgalmi úthálózat hosszának ismeretében felső becslés adható az összes felhasználandó kávézacc mennyiségére vonatkozóan is. A hazai gyorsforgalmi úthálózat (autópályák, autóutak) hossza $1\,272,6 \text{ km}$. [34] Ha feltételezzük, hogy a csapadékvíz-kezelés szikkasztók segítségével történik a teljes útszakaszon, összesen 255 db szikkasztóra van szükség. Ha minden szikkasztóba a maximális koncentrációra meghatározott mennyiségű töltet kerül elhelyezésre összesen 4820,66 tonna homokra és 273,12 tonna zaccra van szükség évente, átlagos körülményeket feltételezve a töltetből elegendő lesz 385,65 tonna homok és 22,5 tonna zacc. Ez a maximális terhelést is kiszolgáló 273 tonna jelenti a teljes éves, hazai „kávézacc-kereslet” nagyságát. A kereslet kiszolgálásához azonban szükség van megfelelő nagyságú „kávézacc-kínálat”-ra is.

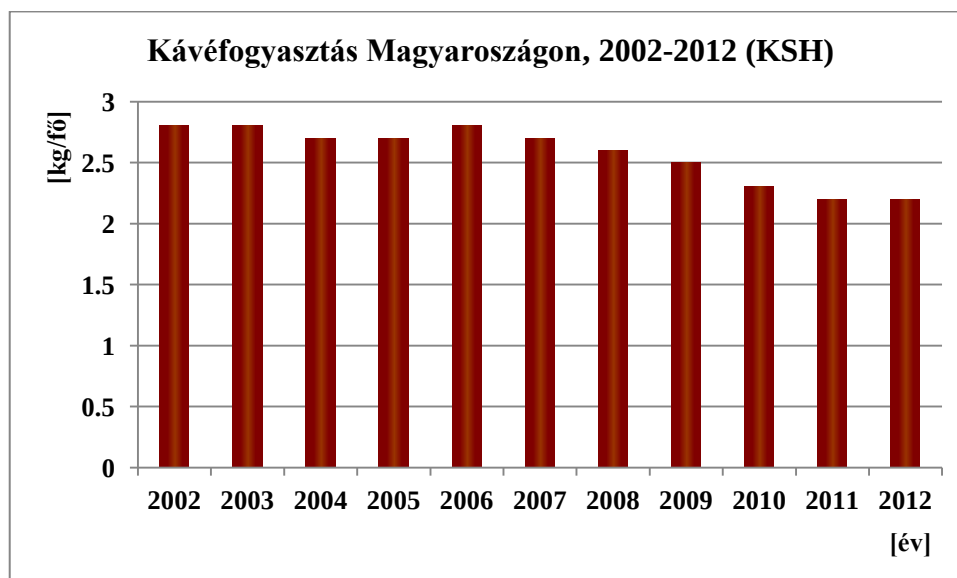
A kávézacc keletkezési mennyiségének becsléséhez először érdemes megnézni, hogy mennyi kávéat fogyasztanak Magyarországon, azaz mekkora az a kávé mennyiség, melynek lefőzéséből a felhasználható zacc keletkezik.

Fogyasztási adatok több forrásból állnak rendelkezésre. A KSH „Élelmiszer-fogyasztás alakulásáról”, ezen belül az „Égetett szeszes italok, kávé, tea, dohány fogyasztása, 1970–2012” címszó alatt közölt adatait, szűkítve a 2002 és 2012 közötti időszakra az éves fogyasztás a 29. ábrán látható.

Átlagos értéke 2,57 kg/fő-re tehető, ami a lakosság 70 %-ának esetében napi 2-3 csésze kávé jelent. Magyarország teljes lakossága 2014-ben 9 877 365 főre tehető. [30] Ennek megfelelően hozzávetőlegesen 25500 tonna zacc keletkezik évente.

Egy másik forrás a Nemzetközi Kávészervezet (International Coffee Organisation), amely az egész világra közöl fogyasztási adatokat, országonkénti lebontásban. Magyarország esetében azt látjuk, hogy a fogyasztás átlagosan 1,08 kg/fő volt 2011-es adatok alapján. Ha ezt vesszük alapul, a képződő zacc mennyisége éves szinten közel 10600 tonna.

29. ábra Kávéfogyasztás Magyarországon, 2002-2012



KSH adatai alapján, saját szerkesztés

A keresletet és kínálatot mérlegre téve megállapítható, hogy a megvalósításnak nyersanyaghiányból fakadó akadálya – még az alacsonyabb keletkező mennyiséget becsülő ICO adatok mellett – sincs. A kínálat (25500 tonna) mintegy harmincszorosan meghaladja a maximális keresleti igényeket (273,12 tonna).

Tovább haladva mérlegre téve a keresletet és a kínálatot Nagykovács útra tervezendő csapadékvíz-kezelő létesítmény esetében itt is hasonló megállapításra jutunk. Nagykovácsi

lakossága 2011-ben 7095 fő volt. [44] A KSH adataiból meghatározott egy főre jutó fogyasztás alapján a nagyközségben keletkező zacc mennyisége - feltételezve, hogy a keletkező mennyiség arányos a lakossággal – 18247 kg évente. Ezt összevetve a maximális keresletként jelentkező 253 kg-mal, a több nagyságrendnyi eltérés itt is szembetűnő és megállapítható, hogy nyersanyag ebben az esetben is bőségesen állna rendelkezésre.

A gyakorlatban megvalósítandó szűrőtöltetként történő tényleges felhasználás azonban még számos kérdést vet fel.

5. További megválaszolandó kérdések

5.1. A töltet élettartama – Biológiai degradáció és kimerülés

A tározó fenntartása szempontjából fontos kérdés, hogy mennyi idő után merül ki a töltet fémfeltevő-képessége, illetve hogy a nagy szervesanyag-tartalmú töltetben a sorozatos átnedvesedés-száradás nyomán milyen degradációs folyamatok indulnak el és ez hogyan hat a töltet és az elfolyó víz minőségére. A töltet cseréjének szükséges gyakoriságát e két jelenség fogja meghatározni, de egyelőre még nem tisztázott, hogy melyik lesz közülük a korlátozó tényező.

Kinetikai oldalról becsülve a töltet élettartamát, a számítás viszonylag könnyen elvégezhető, hiszen az adszorber kimerülésének becsült időpontja a kezelendő vízmennyiség, a szennyezőanyag-koncentráció és az egyes fémekre vonatkoztatott adszorpciós kapacitás ismeretében határozható meg, figyelembe véve a felszíni befogadókra vonatkozó hatályos jogszabályban szereplő határértékeket. A kapott eredmény jellemzően alsó, konzervatív becslés lesz, mivel feltételezi a csapadékvíz és a töltet közötti tökéletes érintkeztetést. A kimerülési pontot akkor érjük el, amikor az elszívárgó víz már nem felel meg a jogszabályban rögzített határértékeknek.

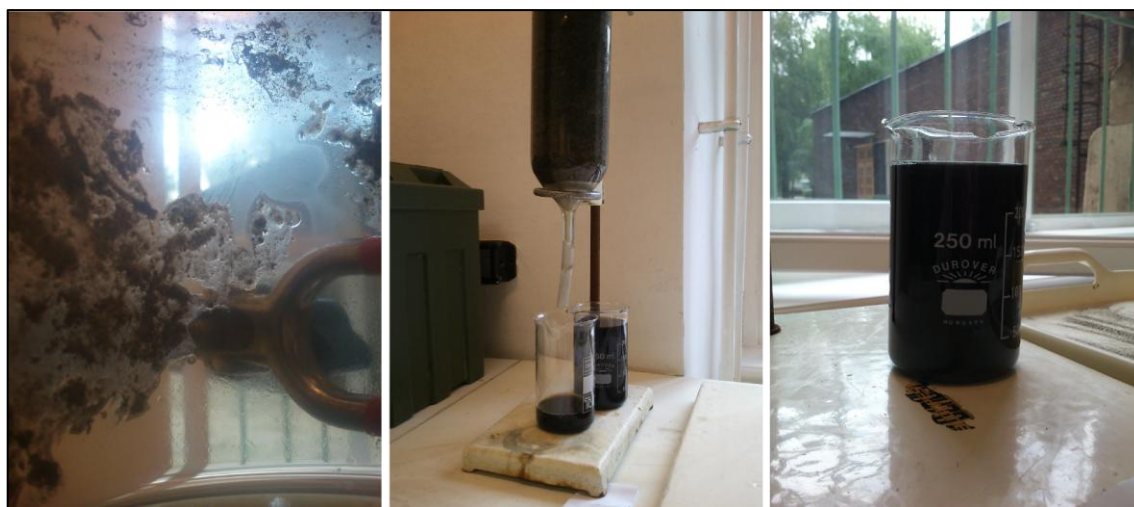
A biológia oldaláról vizsgálva a kérdést a töltetben lejátszódó bonyolult biológiai folyamatok miatt a becslés már nem olyan egyszerű.

5.1.1. A tölteten megfigyelhető biológiai változások

A kávézaccban – nagy szervesanyag tartalma miatt – a becslésben alkalmazott hosszabb időtávon bomlás indul meg. Ezt több – a mérések során tapasztalt – jelenség is alátámasztotta. A 8 cm átmérőjű csőben víz alatt, nedvesen hagyott töltet feletti vizes fázisban a cső falán pár héten belül zselészerű biofilm alakult ki, a töltet anyaga pedig berohadt, a leengedett víz pedig szaga és színe is aktív mikrobiális tevékenységre utalt.

(30. ábra) A teljes vízborítás a gyakorlati alkalmazás során azonban extrém körülménynek tekinthető, a viszonylag kis (5 cm) kiterítési rétegvastagság miatt, mivel ez a vastagság nem képez akkora ellenállást, amely előidézhetne 2-3 napnál hosszabb, tartós vízborítást.

A biológiai degradációból eredő hatások további vizsgálata több szempontból is szükséges lehet. Egyrészt fontos megismerni az adszorpciós tulajdonságok – biológiai folyamatokból eredő – változásának dinamikáját. Másrészt a működés leírásában lényeges az elfolyó szikkasztott víz nehézfém és szervesanyag terhelésének meghatározása. Végül pedig, ha azt is vizsgáljuk, hogy hogyan hat a mikroflóra aktivitására a nehézfémekkel szennyezett víz, az előző két paraméter változása is pontosabban becsülhető.



30. ábra Biológiai degradáció a töltetben

Extrém körülményeket modellezve, fémoldat alatt hagyva a töltetet, a biológiai folyamatok nem mutattak különbséget a csapvizetes kísérletekhez képest, a degradáció 10 mg/L-es és 100 mg/L-es koncentráció mellett is elindult 1 héten belül. Ezzel szemben a hosszú tartózkodási időt biztosító cinkoldatos mérések alkalmával – bár a mérés teljes időtartama 1,5 hét volt – a töltet a sorozatos nedvesedési-kiszáradási ciklusokban nem mutatott jelentős biológiai változást.

Abban az esetben, ha a töltetben mégis elindulnak a feltételezett biológiai folyamatok, ezek kizárólagosan negatív hatása a fémmegkötésre nem kezelhető tisztázott tényként. Számos mikroorganizmus képes megkötni és a szervezetében nagy mennyiségű toxikus fémeket akkumulálni, életfolyamataiban felhasználni vagy a sejtfelületén adszorbeálni, így élő vagy élettelen mikroorganizmusok használhatók nehézfémek eltávolítására szennyezett vízből. [45] Mivel a cink és a réz esszenciális fém, lehetséges, hogy a bekerülő fém serkentően hat a biofilmben megtelepedő mikroflórára, ami így végső soron segítheti a fémek megkötődését és kivonását.

Ennek részletes tanulmányozásához az adszorpciós méréseken túl szükség van a jövőben a mikrobiológiai mérések eszköztárának segítségül hívására is, meghatározott időközönként mérve például a töltetanyag biológiai aktivitását, sejtszámát.

A lejátszódó biológiai változások és következményeik ismeretében biztosabb megállapítások tehetők arra vonatkozóan, hogy érdemes-e önállóan alkalmazni ezt a fajta töltetet. Amennyiben pedig az önálló felhasználás nem bizonyul hatékonynak, a megszerzett ismeretek segítségével könnyebben behatárolhatók azok a – már jól működő – technológiák, amelyeknek megfelelő kiegészítője lehet.

5.1.2. Témakörben végzett előzetes vizsgálatok

A témát érintő előzetes vizsgálataim kísérleti elrendezését az 31. ábra mutatja. A kísérlet keretében arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a legkedvezőtlenebb esetet feltételezve (minimum 2 hét vízborítás alatt) milyen változások figyelhetők meg az elfolyó víz minőségében nehézfém és szervesanyag-tartalom vonatkozásában.

Két db 8 cm átmérőjű oszlopban vizsgáltam 200 ml 20tf%-os töltet (14 g zacc és 242 g homok). Elsőként mindkét töltet 1 liter 10 mg/L koncentrációjú cink oldattal öblítettem át és mintát vettem az elfolyó vízből.



31. ábra degradációs kísérlet

Ezután az egyik oszlopot 750 ml cinkoldattal a másik oszlopot ugyanekkora térfogatú csapvízzel öntöttem fel, biztosítva folyadékborítást a tölteten. Két hét után a töltetek feletti folyadékrészt pipettával, illetve az elfolyó vizet a csapok megnyitásával mintáztam. A mintákban mértem a cinkkoncentrációt az adszorpció megfigyelésére, illetve a KOI koncentrációt a degradációs folyamatok tanulmányozásához, utóbbi esetében.

A cinkkoncentrációt a korábbi mérésekhez hasonlóan fotometriásan határoztam meg. A KOI mérésekhez a dikromátos módszert alkalmaztam, a roncsoláshoz 0,25 normális kálium-dikromátot használtam, a titráláshoz pedig ennek megfelelően 0,25 normális Móhr-só oldatot.

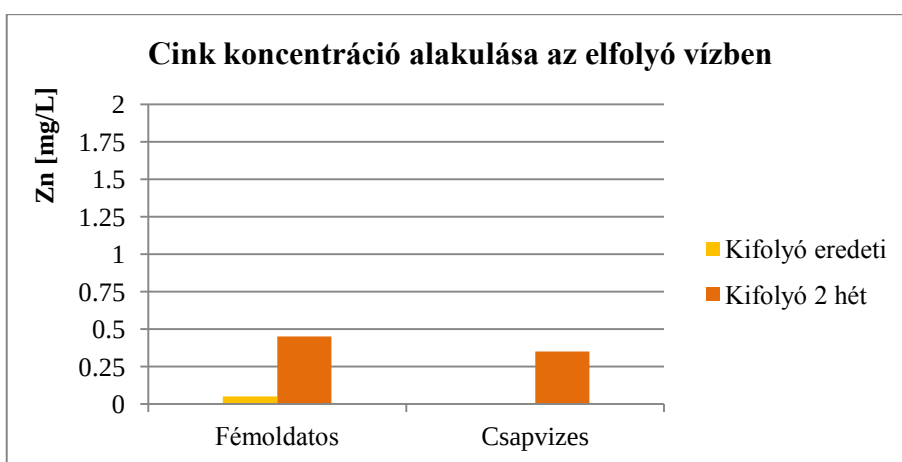
Mivel az elfolyó mintákban a szervesanyag tartalom igen magas volt, a kénsav hozzáadásakor a minta bezöldült, így ebben a két esetben 10x hígításban kellett mérnem.

5.1.2.1. Eredmények

A fémoldatos oszlopban két hét után a felülúszó folyadék részben jelentősen csökkent a fémkoncentráció, ami további adszorpcióra utal. Ezzel egybevetve a csapvízes oszlopban a kezdeti öblítés utáni ráengedett nulla bemenő koncentráció növekedett, tehát a megkötött fém egy része deszorbeálódott.

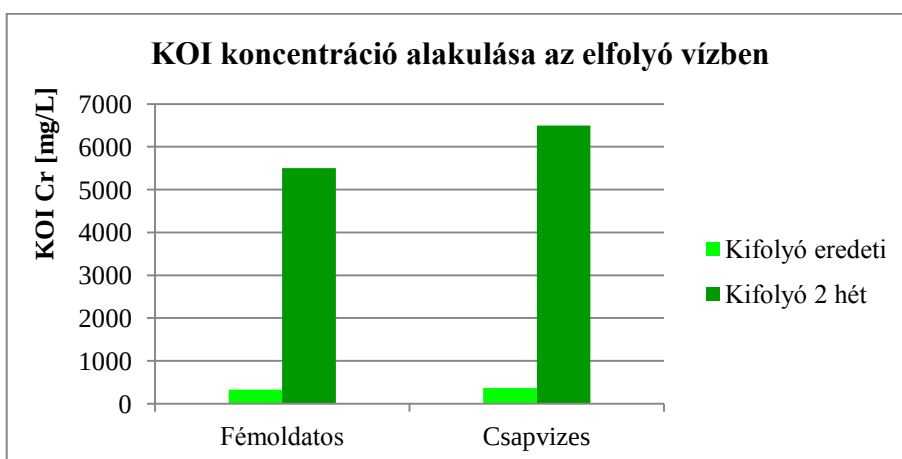
Az elfolyó víz fémkoncentrációja mindkét oszlop esetében nőtt, és a mért érték a jogszabályban foglaltak 4,5-, és 6-szorosa volt (32. ábra). A csapvízes esetben a növekmény kisebb volt. Ennek oka lehet a két hét alatt beálló szorpciós egyensúly deszorpcióból fakadó fémelvonó hatása.

32. ábra Degradációs kísérlet - Cink koncentráció alakulása



Az elfolyó víz KOI koncentrációjában drasztikus növekedést okozott a degradáció, ami feltehetően nagy mennyiségű szerves anyagot tett mobilissá a töltetben (33. ábra).

33. ábra Degradációs kísérlet - KOI koncentráció alakulása



Míg az első öblítésből származó minta KOI-ra nézve a nyers kommunális szennyvízhez volt hasonló a két hét után megvett minta már a szerves anyagokban rendkívül gazdag cukorgyári szennyvíz kategóriájába esett (19. táblázat).

19. táblázat Vízípusok KOI koncentrációja

KOICr	Ivóvíz	Kommunális szennyvíz			Ipari szennyvíz			Határérték
		Nyers	Ülepített	Tisztított	Cukorgyár	Papírgyár	Tejüzem	
[mg/L]	3-10	300-600	150-300	60-100	4000-6000	1500-3000	2000-4000	50-100

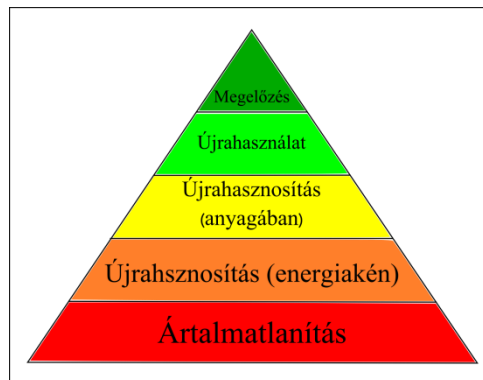
[48] alapján saját szerkesztés

A növekmény fémoldatos esetben 16-soros, csapvizet 18-szoros volt. Nagy kérdés tehát, hogy ezt a negatív következményt, hogyan lehet kiküszöbölni. Hogyan lehet esetlegesen a zaccot úgy előkezelni, hogy adszorpciós képessége megmaradjon, de a nehézfém-koncentráció csökkentéséből származó előnyöket ne árnyékolják be a szervesanyag-terhelésből adódó hátrányok.

5.2. Használt töltet további sorsa

A kimerült töltetet cserélni és kezelni kell. Fontos kiemelni, hogy ebbe az esetben a zacc a hétköznapi életben megszokott kommunális hulladék helyett már veszélyes hulladékok között említhető a felületén megfagott nehézfémek miatt.

Ha a hulladékgazdálkodási hierarchiát vesszük alapul, az egyéb beavatkozást nem igénylő kezelésre – azaz az ártalmatlanításra – két lehetőség adódik. [35] Egyik út lehet a lerakóra történő elszállítás vagy deponálás. Másik a termikus hasznosítás, de a töltet nagy homoktartalmának berendezés-károsító hatása miatt ez nem előnyös.



34. ábra Hulladékpiramis [35]

A „hulladékpiramisban” tovább haladva még jobb lehetőség a további hasznosítás részben vagy teljes egészében.

A tározó aljáról felszedett vagy annak felsőrétegébe részben bekevert töltet begyűjtés és elszállítás után bizonyos fokig regenerálható. Az adszorbensek regenerálhatósága a szemcseméret csökkenésével együtt csökken és csak nagyon értékes és nehezen hozzáférhető anyagok esetében érdemes megvalósítani.

A zaccos-homok töltet regenerálásra vagy az egyes alkotók szétválasztására és a további szeparált kezelésére megoldás lehet a sűrűségkülönbségből adódó – hidraulikánál már tárgyalt, előnedvesítésnél problémaként tapasztalt – megfigyelés. A töltetet vízzel felengedve, megfelelő keverés mellett, elegendő ülepedési időt hagyva a zacc felúszik a vízfelszínre, a homok pedig leülepedik. Ezt többször egymásután megismételve az egyes

mosási lépcsők után, a zacc a homok szemcsék közül eltávolítható, és a mosott homok a továbbiakban friss zaccal újra bekeverhető és visszahelyezhető a tározóba. Az újrahasználat ennek megfelelően csak részben valósítható meg

Az így kimosott zacc a megkötött nehézfémek miatt a továbbiakban veszélyes hulladéknak számít, így kezelésére két mód adódik. A fő cél mindkét esetben a zaccon kötött fémekből eredő környezeti hatások minimalizálása. Egyrészt megvalósítható a termikus hasznosítás, ügyelve a kibocsátásokban megjelenő nehézfémekre. Másrészt lehetséges veszélyeshulladék-lerakóba történő elszállítása, mivel a fémek gazdaságos visszanyerése ma még nem megvalósítható.

5.3. A keletkezés területi eloszlása

Ha az alkalmazás egyes technikai részleteit ki is dolgozzuk, kérdés lehet az, hogyan kivitelezhető a gyakorlatban a nyersanyag beszerzése.

A kereslet és kínálatról szóló fejezetben említett 25500 t éves keletkező mennyiség a valóságban korántsem egyezik meg a rendelkezésre álló mennyiséggel. Mivel az adatok átlagfogyasztásra vonatkoznak, és az ország lakosai közül nem kávézik mindenki rendszeresen, illetve a zacc sokféle forrásból eredhet a keletkezés területi eloszlását a begyűjtés, a tárolás és az újraelosztás – azaz a logisztikai háttér – pontos megszervezése érdekében részletesebben is érdemes megvizsgálni.

A zacc egy része a háztartásokban keletkezik, másik része pedig különböző vendéglátó ipari egységekben (kávézó, cukrászda, étterem), munkahelyeken (irodaházak, üzemek) és a nagyobb forgalmat lebonyolító közintézményekben (hivatalok, kórházak, oktatási intézmények), valamint az ezeket kiszolgáló kávéautomatákat üzemeltető cégek tevékenysége nyomán.

A területi eloszlás részletes vizsgálata azonban több szempontból is nehéz. Egyrészt a fent említett szektorok között nagy lehet az átfedés, így előfordulhat, hogy többször is számításba vesszük ugyanazt a hányadot. Másrészt nem állnak rendelkezésre háttéradatok a kellő részletességgel. A Központi Statisztikai Hivatal adatbázisában a kávéfogyasztásra vonatkozó csak általános érvényű – a teljes magyar lakosságra vonatkozó – adatokat találunk, amelybe egyaránt beleszámítanak a rendszeres kávézók és kávé nem fogyasztók.

Mindezeket figyelembe véve megállapítható, hogy mivel a kereslet és kínálat között 3 nagyságrendnyi eltérés van, így nem ez a terület képezi a megvalósítás szűk keresztmetszetét. A fellépő keresletet a koncentrált keletkezést biztosító termelők, mint például az éttermek, a kávézók (belterületi szikkasztó árkok esetén) vagy az autópályák

melletti benzinkutak/pihenők vendéglátóipari egységei képesek lesznek kiszolgálni, így első ütemben érdemes ezek gyakoriságát elhelyezkedését figyelembe venni.

A keletkezés azonban itt sem egyenletes. Ahogy a városokon belül vannak frekvenciátaltabb helyen lévő, nagyobb forgalmat bonyolító és kevésbé forgalmas vendéglátóhelyek, az autópályák mentén is megfigyelhető egyfajta változatosság. A forgalmasságot – és így a keletkező kávézacc mennyiségét – ebben az esetben általában az határozza meg, hogy az adott gyorsforgalmi út mely városokat köti össze (azok milyen messze fekszenek egymástól) illetve, hogy az adott – megállásra lehetőséget adó – pihenőhelyeknek milyen az infrastruktúra-ellátottsága. Az utazás megállásokkal történő szakaszolását az fogja befolyásolni, hogy milyen messzire akarunk eljutni, és a jármű vezetője mennyit tud kényelmesen egyben levezetni.

A fenti szempontok alapján a hazai autópályák mentén a népszerűbb megállóhelyek egyik nagy csoportját általában Budapesttől azonos hatótávolságban benzinkúttal és étteremmel rendelkező pihenők képezik. Példaként említhetők:

- **M1:** 64 km Remeteségi pihenő; 94 km Concó pihenő
- **M3:** 51 km Kerekharaszi pihenő; 82 km: Borsókúti pihenő
- **M5:** 67 km: Lajosmizsei pihenő; 91 km: Kecskeméti pihenő
- **M6:** 71 km: Újvárosi pihenő
- **M7:** 45 km: Velencei pihenő; 83 km: Lepsényi pihenő

Az itt található éttermek és a kávézók a kávézaccot (az üzletmenetet megkönnyítendő) jelenleg is elkülönítve gyűjtik, így feltételezhetően hajlandók ezt ingyen egy potenciális felhasználónak átadni, mivel az összegyűjtés számukra pluszkiadást nem jelent, ráadásul megkíméli őket a kávézacc hulladékként történő elszállítása esetén fizetendő díjtól. [37] Azonban a kávézacc összegyűjtése illetve a bekeverendő hordozóanyag beszerzése jelentős szállítási kiadást vonhat maga után.

Tehát kezdetben elegendő a vendéglátóhelyeken keletkező kávézaccot begyűjteni. Hosszútávon elképzelhető a munkahelyekről, háztartásokból történő begyűjtés is, azonban ehhez speciális tároló dobozokra, gyűjtést célzó programokra van szükség, amelyek jelenleg nem állnak rendelkezésre. [37] A jövőben megoldás lehetne például a fáradt olaj gyűjtéséhez hasonló rendszer, melynek keretében az egyes háztartásokban keletkező zaccot a fogyasztók gyűjtőpontokon adhatnák le. Ennek kivitelezése azonban technikai problémákat vet fel, mert a használt olajjal szemben a külön gyűjtött zacc megfelelő szárítás és kezelés nélkül hamar borothat, megpenészedik.

5.4. A megvalósítás gazdaságossága

A megoldás gazdaságosságának vizsgálata azonban még további kutatást igényel. Kitérve a keletkezés helyéről való elszállítás, az azt követő előkészítés, tárolás és újraelosztás, illetve az így kialakított szikkasztók fenntartásának költségvonzatára is.

Pauli korábban már említett, kék gazdaságról szóló könyvében bemutatott innovációk alacsonyabb költségek mellett biztosítják a társadalom szükségleteit, ugyanakkor nem termelnek hulladékot, még jövedelmezőek is és rövidtávon megtérülnek. [37]

A javasolt innovációk egyik tipikus csoportját képezik az olyan technológiai újítások, amelyek lehetővé teszik, hogy egy korábban hulladékként kezelt melléktermék képezze valamely más gazdasági tevékenység alapanyagát. Az ehhez hasonló technológiák megjelenése révén egyrészt alacsonyabb lesz a környezetszennyezés, a hulladék-kibocsátás, másrészt a természeti erőforrások iránti igény is csökken. A kék gazdasági innovációk következtében tehát alapvetően megváltozik a gazdaság szektorai közötti kapcsolat, ugyanis egy olyan anyag, amit korábban egyik szektor sem hasznosított, az innováció bevezetése után, valamely szektor alapanyagává válik. [37]

A kék gazdasági innovációban az adszorbens szerepét ebben az esetben a kávézacc veszi át, amely nem rendelkezik árral, ingyenesen áll rendelkezésre, azonban annak összegyűjtése költséggel jár. Ennek meghatározására a gombatermesztésben való hasznosítás példáján – a Dél-Dunántúlon, Pécs környékére – már végeztek közelítő számításokat. *Varga et. al.* feltételezték, hogy a zacc keletkezése földrajzi értelemben a népességgel arányos. A begyűjtés költsége pedig függ a zacc mennyiségétől, valamint a városok távolságától. [37] Ennek költségét a következőképpen becsülték meg:

$$Sz = \sum (Ti \cdot Ni) \cdot F \cdot \ddot{U} \cdot \acute{A} + B,$$

ahol Sz 100 kg zacc szállítási költsége,

Ti az adott város távolsága,

Ni az adott város népességének aránya,

F a km-re vetített üzemanyag-fogyasztás,

$\ddot{U}$ az üzemanyag ára,

$\acute{A}$ az árrés és az egyéb költségek,

B pedig a szállításhoz köthető munkabér.

Továbbgondolva azt is feltételezhetjük, hogy a termelődő mennyiség arányos az autópályák mellett fogyasztást generáló létesítmények forgalmával. A begyűjtés költsége pedig nagyban függ attól, hogy előkészítés esetén a töltetet kezelő telephelyek hol

helyezkednek el, vagy kezelés nélküli esetben éppen melyik szikkasztó tározóban kerül felhasználásra az adott pihenőhelyről begyűjtött mennyiség. A km-re vetített üzemanyag-fogyasztás és az üzemanyag aktuális ára a tervezés során meghatározza a szállítás módját, azaz a „kisebb járművekkel többször keveset”, vagy „nagyobb járművekkel ritkán többet” stratégia közötti döntést.

Ha az üzemeltetési költségek közül az anyagköltséget nézzük a zacc praktikusan ingyen áll rendelkezésre, de a hozzákevert hordozóanyagnak már van beszerzési ára is. A kísérletekben felhasznált térkőhomok ára általában 25-30 Ft/kg körül mozog, ez alapján a 20%-os töltet kilogrammonkénti ára 24-28 Ft. Így a gyorsforgalmi utak szikkasztótározóiba telepítendő teljes felhasznált töltetmennyiség ára maximális terhelésre méretezve 119,6-139,5 millió forintba becsülhető a teljes hazai gyorsforgalmi úthálózatra.

Ahhoz, hogy ezt az összeget értékelni tudjuk, érdemes összevetni azzal, hogy a költségek hogy alakulnának abban az esetben, ha a csapadékvíz fémmentesítését más – a gyakorlatban is gyakran alkalmazott – adszorbensekkel oldanánk meg, maximális terhelésre méretezve. Az eredményeket az 20. táblázat szemlélteti.

20. táblázat Összehasonlítás más adszorbensekkel

	Cink	Szükséges mennyiség	Piaci ár	Összköltség	Irodalom
	[mg/g]	[tonna]	[Ft]	[millió Ft]	
Saját töltet	2,22	4982,7	24-28	119,6-139,5	-
Zeolit	13	459	390	179,01	[46]
Aktív szén	5,22	1144,95	1400-1600	1602-1831	[47]

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a széleskörűen alkalmazott nehézfémek megkötésére képes adszorbensek adszorpciós kapacitása 2-6-szor nagyobb, mint az általam vizsgált töltet, így kevesebbre van szükség belőlük. Ennek ellenére magas beszerzési árak miatt felhasználásuk a csapadékvizek tisztítására nagyobb költséggel jár, mint a zaccos töltet, amiből a szükséges mennyiség akár egy nagyságrenddel is nagyobb lehet.

Tehát a jövőben a zacc felhasználásának – a környezetvédelmi és hulladékgazdálkodási vonatkozásokon túl – gazdasági szempontból is lehet létjogosultsága.

5.5. Kivitelezés és karbantarthatóság

A jelen kísérletekben alkalmazott rendszer felépítése nem képez megbonthatatlan egységet. Az nyilvánvaló volt, hogy a kávézacc – hidraulikai adottságokban is kielégítő adszorbens töltetként önmagában nem alkalmas az áteresztőképesség vizsgálatára. Megjelent tehát az igény valamilyen hordozó anyaggal történő keverésre, amely olcsó, nagy mennyiségben hozzáférhető és az adszorpció szempontjából inert. Ezeknek a

követelményeknek legjobban a homok felelt meg, mivel munkám fő célja a kávézacc – mint nagy hatékonyságú – adszorpcióra képes anyag vizsgálata volt.

A tényleges alkalmazás esetében azonban kérdéses hogy a homokkal történő 20 tf%-os bekeverés mellett melyek azok a lehetőségek, melyek segítségével a kávézacc kihelyezhető a szikkasztók aljára. A választott mód fogja meghatározni a karbantarthatóságot is.

Abban az esetben, ha a bekevert töltet kerül telepítésre, a szűrőréteget elegendő kiteríteni a szikkasztó aljában az előre meghatározott rétegvastagságban, ügyelve arra, hogy a beáramló víz ne hordhassa szét. A rögzítés történhet úgy, hogy a szűrőréteg tetejére valamilyen nagyobb sűrűségű és tehetetlenségű, jó vízáteresztő-képességű szemcsés anyag kerül, például szűrő homok vagy kavics. A felvázolt megoldás karbantartása egyszerűbb feladat, a töltet cseréje a felső réteg eltávolításával megvalósítható úgy, hogy közben az alatta lévő talajréteg nem sérül.

Ha csak önmagában a zaccot helyezzük ki, jó megoldás lehet a talajba forgatás, hiszen így nincs szükség külön hordozóanyagra és egyben a rögzítés is biztosított. Az előnyök mellett, azonban hátrányai is lehetnek ennek a módszernek, mert a bekeveréssel ellentétben így korlátozott a szikkasztó felületén a homogén elosztatás, és a karbantartás kulcselemét képező töltetcsere csak a talajréteg nagymértékű megzavarásával lehetséges. Emellett az is kérdéses, hogy mekkora talajréteget kell eltávolítani, hiszen a finom zaccszemcsék képesek elmozdulni a hézagokban és az adszorbens réteg mélységi kiterjedése a folyamatos átáramlás mellett idővel növekedhet.

A talajba történő beforgatás azt a kérdést is felveti, hogy a talaj mikroflóra vagy éppen a szikkasztó felszínén megjelenő növényzet milyen hatást gyakorol a zacc szerkezetére, adszorpciós tulajdonságaira.

A telepítési megoldások értékelése érdekében a jövőben szükség van nagyobb mennyiségű, akár több tíz liternyi töltet vizsgálatára is, nagyobb ráengedett csapadékvíz térfogatáramok mellett.

6. Összegzés, következtetések

Dolgozatom során arra a kérdésre kerestem a választ, hogy a kávéfogyasztás melléktermékének hasznosítása milyen formában lehetséges. A talajjavítás és az adszorpciós vízkezelés – mint a hasznosítás két főiránya – közül az utóbbit vizsgáltam részletesen, autóutakról származó csapadékvizek későbbi tisztításának esetében.

A folyamatos átfolyásos kialakítást megcélozva két lehetséges telepítési megoldást vizsgáltam: a belterületi csatornaszemekbe való telepítést, illetve a külterületi szikkasztó medencékben kialakított szűrőágyként való elhelyezést.

A hidraulikai vizsgálatok azt mutatták, hogy a töltet egyetlen keverési arány mellett sem képes kiszolgálni a belterületi csatornalefolyóktól elvárt terhelést. Ennek megfelelően ezt a lehetőséget kizárva a gyorsforgalmi utak csapadékvizének kezelésére alkalmazott szikkasztók szűrőágyaként való elhelyezést tanulmányoztam.

Áztatásos és átfolyásos adszorpciós kísérleteim alátámasztották, hogy a kávézacc alkalmas nehézfémek vízből való megkötésére. Az útpályáról lefolyó csapadékvízben jellemzően tanulmányozott hatféle nehézfém közül háromra végeztem méréseket (cink, réz és króm). A cink és a réz – mint kétértékű fémek – esetében az áztatás hasonló eredményeket hozott, bár az adszorbens tiszta homok és keverék alkalmazásakor is nagyobb affinitást mutatott rézre. A króm(VI) koncentráció azonban, az irodalmi adatokkal ellentétben nem változott érdemben.

Kísérleti eredményeimet és a szikkasztók méretezéséhez használt adatokat felhasználva meghatároztam az utakról lefolyó csapadékvíz fémmentesítéséhez szükséges töltet mennyiségét. Ehhez szükség volt a mértékadó csapadékból származó vízmennyiség, az elfolyó csapadékvizek fémkoncentrációjának, a töltet egyes fémekre vonatkozó adszorpciós kapacitására és a hatályos vízminőségi előírásokra.

A megvalósíthatóság tanulmányozásakor pedig fontos szempont volt a „kávézacc-kereslet” és „kávézacc-kínálat” feltérképezése után – amely a nyersanyaghiány lehetőségét kizárta – részletesebben is vizsgálni a tényleges felhasználás során felmerülő további kérdéseket. Ezek között említhető a biológiai degradáció hatása az adszorpcióra, az adszorpciós kapacitás kimerülésének várható időpontja, a gazdaságosság és a kivitelezést érintő kérdések.

Összességében elmondható, hogy a kávézacc alkalmazása ígéretes jövő elé nézhet, de a felhasználás részletes tanulmányozásának rögzös és buktatókkal teli útján saját méréseim csak a kezdő lépéseket jelentették.

Források

- [1] **P. S. Murthy, M. M. Naidu:** Sustainable management of coffee industry by-products and value addition – A review; *Resources, Conservation and Recycling* 66 (2012) 45–58
- [2] **D. Pujol, C. Liu, J. Gominho, M.A. Olivella, N. Fiol, I. Villaescusa, H. Pereira:** The chemical composition of exhausted coffee waste; *Industrial Crops and Products* 50 (2013) 423– 429
- [3] **J. Seniunait, R. Vaiškunait, V. Bolutien:** Coffee grounds as an adsorbent for copper and lead removal from aqueous solutions, The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING” 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania
SELECTED PAPERS eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9
- [4] **G. Z. Kyzas, D. N. Bikiaris, M. Kostoglou, N. K. Lazaridis:** Copper removal from aqueous systems with coffee wastes as low-cost materials, *E3S Web of Conferences* DOI: 10.1051/ Owned by the authors, published by EDP Sciences, 2013, /2013012500 1 e3sconf 25004 (2013)
- [5] **T. Tokimoto, N. Kawasaki, T. Nakamura, J. Akutagawa, S. Tanada:** Removal of lead ions in drinking water by coffee grounds as vegetable biomass, *Journal of Colloid and Interface Science* 281 (2005) 56–61
- [6] **N. Azouaou, Z. Sadaoui, H. Mokaddem:** Removal of Lead from Aqueous Solution onto Untreated Coffee Grounds: a Fixed-bed Column Study, *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS VOL. 38, 2014* ISBN 978-88-95608-29-7; ISSN 2283-9216
- [7] **H. Chun and A. B. A. Kadir:** Application of Coffee Waste in Removing Zinc of River Water, *International Journal of Zero Waste Generation Vol.1,Ooi: No.1, 2013;* ISSN 2289 4497
- [8] **S. I. Mussatto, E. M. S. Machado:** Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues, *Rewiev paper, Food Bioprocess Technol* (2011) 4:661–672
- [9] **Kállai K. G.:** Autópályáról származó vizek elhelyezésének problematikája belvíz-veszélyes területeken, *Záródolgozat, Széchenyi István Egyetem* (2013)

- [10] **N. Azouaou, Z. Sadaoui, A. Djaafri, H. Mokaddem:** Adsorption of cadmium from aqueous solution onto untreated coffee grounds: Equilibrium, kinetics and thermodynamics, *Journal of Hazardous Materials* 184 (2010) 126–134
- [11] **H. Djati Utomo, K. A. Hunter:** Adsorption of heavy metals by exhausted coffee grounds as a potential treatment method for waste waters, *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology* Vol. 4 (2006) 504-506
- [12] **George Z. Kyzas:** Commercial Coffee Wastes as Materials for Adsorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions, *Materials* (2012), 5, 1826-1840, ISSN 1996-1944 www.mdpi.com/journal/materials
- [13] **H. D. Utomo, K. A. Hunter:** Particle concentration effect: Adsorption of divalent metal ions on coffee grounds, *Bioresource Technology* 101 (2010) 1482–1486
- [14] **Budai P.:** A közúti közlekedés nehézfém kibocsátásainak hatása a csapadékvizek szennyezettségére, Doktori (PhD) értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar Víz- és környezetmérnöki alprogram, Budapest, 2011
- [15] <http://www.munkajog.hu/rovatok/munkahely/kevesen-tartanak-ebedszunetet> 2014.10.05.
- [16] http://drcoffee.hu/italautomata.html#a_daralos 2014.10.05.
- [17] <http://www.edenkert.hu/elet-mod/legjobb-otthon/hogyan-hasznositsuk-a-kavezaccot-/3145/> 2014.10.11.
- [18] http://blog.xfree.hu/myblog.tvn?n=lovaszmarika&pid=101878&blog_cim=A%20k%E1v%E9-zacc%20felhaszn%E1l%E1sa 2014.10.11.
- [19] <http://www.kiskegyed.hu/kiskegyed-otthona/kiskegyed-otthona/kavezacc-sikalhatsz-vele-es-megszepulhetsz-tole-105130> 2014.10.11.
- [20] <http://thesecretyumiverse.wonderhowto.com/how-to/11-amazing-ways-reuse-used-coffee-grounds-0139758/> 2014.10.11.
- [21] **R. Cruz, P. Baptista, S. Cunha, J. A. Pereira, S. Casal:** Carotenoids of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Grown on Soil Enriched with Spent Coffee Grounds, *Molecules* (2012) 17, 1535-1547; doi:10.3390/molecules17021535
- [22] **R. Cruz, S. Morais, E. Mendes, J. A. Pereira, P. Baptista, S. Casal:** Improvement of vegetables elemental quality by espresso coffee residues, *Food Chemistry* 148 (2014) 294–299

- [23] **G. Z. Kyzas:** A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters, *Materials* (2012), 5, 2069-2087; doi:10.3390/ma5112069
- [24] **M. D. Pavlovic, A.V. Buntic, K. R. Mihajlovski, S. S. Siler-Marinkovic, D. G. Antonovic, Z. Radovanovic, S. I. Dimitrijevic-Brankovic:** Rapid cationic dye adsorption on polyphenol-extracted coffee grounds—A response surface methodology approach, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 45, Issue 4, July 2014, Pages 1691–1699
- [25] **J. Roh, H. N. Umh, C. M. Yoo, S. Rengaraj, B. Lee, and Y. Kim:** Waste coffee-grounds as potential biosorbents for removal of acid dye44 from aqueous solution, *Korean J. Chem. Eng.*, 29(7), 903-907 (2012) DOI: 10.1007/s11814-011-0260-9
- [26] **Sali E.:** Csatornázás, tervezési segédlet, Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Kar, Műegyetemi kiadó, 1990. 79.o.
- [27] **Bizzo W.:** Generation, Distribution and Use of Steam [Geração, Distribuição e Utilização de Vapor] (in Portuguese), (2003) Apostila de Curso, UNICAMP, Brasil.
- [28] http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_hosszu/elm13.html 2014-10-15
- [29] <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/coalequivalent.htm>
- [30] <https://www.ksh.hu/interaktiv/korfak/orszag.html> 2014-10-19
- [31] <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/hidrogeologia/ch04s03.html> 2014-10-19
- [32] <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/gyor/fog/fog21408.pdf> 2014-10-19
- [33] http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/ 2014-10-19
- [34] http://internet.kozut.hu/szakmai/orszagok_kozutak_adatai/kozutakfojellemezoi/Lapok/default.aspx 2014-10-19
- [35] <http://humusz.hu/hgtnap> 2014-11-24
- [36] **Pauli G.:** The blue economy – 10 years, 100 innovations, 100 million jobs Report to the Club of Rome, (2010) Paradigm Publications, Taos, New Mexico.
- [37] **Dr. Varga A., Hau-Horváth O., Szabó N., Dr. Járosi P.:** A GMR–Európa-modell alkalmazása két gazdaság-típusú innovációk hatásvizsgálatára, *Területi Statisztika*, 2013, 53(5): 411–434.
- [38] <http://www.agroinform.com/kornyezetvedelem/mezogazdasagi-hulladekok-hasznositasuk-csoportositasuk-12290> 2014-11-29

- [39] **S. K. Prabhakaran, K. Vijayaraghavan, R. Balasubramanian**: Removal of Cr(VI) Ions by Spent Tea and Coffee Dusts: Reduction to Cr(III) and Biosorption, Industrial & Engineering Chemistry Research 2009, 48 (4), pp 2113–2117
- [40] **M. McDonald, I. Mila, A. Scalbert**: Precipitation of Metal Ions by Plant Polyphenols: Optimal Conditions and Origin of Precipitation, Journal of Agricultural and Food Chemistry, (1996) 44 (2), pp 599–606
- [41] **Gayer J.**: A települési csapadékvíz-elhelyezés az integrált vízgazdálkodás tükrében, Doktori értekezés tézisei, Budapesti Corvinus Egyetem, Budapest 2004.
- [42] **Nasr radi T.**: A közúti járműforgalom nehézfém-szennyező hatás az utak melletti talajra és növényzetre, Doktori (PhD) értekezés, Szent István Egyetem, 2007, Gödöllő
- [43] http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0400027.KVV 2014-12-11
- [44] http://nagykovacsi.hu/file/dokumentum/telepulesfejlesztes/nagykovacsi_vizsg_140804.pdf 2014-12-11
- [45] **Kőznigné Péter A.**: Nehézfém adszorpció jellemzése különböző bioszorbenseken, PhD értekezés, Pécsi Tudományegyetem, 2014.
- [46] **C. Gray, S. Burns, J. Griffith**: The use of natural zeolites as a sorbent for treatment of dissolved heavy metals in stormwater runoff, GeoCongress (2012) 3978-3987
- [47] **Yang Li**: Evaluation of adsorbents for road runoff treatment, Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, (2012)
- [48] <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/kornyezettechnika-eloszo/ch04s02.html> 2014-12-22

Képek

- [1] <http://www.indukcios.com/feltoltesek/kepek/kavezacc.jpg> 2014-10-11
- [2] <http://www.thecoffeebeanshop.com/images/CoffeeBeanCloseup6beansR.jpg> 2014-10-12
- [3] http://s1.hubimg.com/u/5279710_f260.jpg 2014-10-12
- [4] <http://slideplayer.hu/slide/2140298/> 2014-12-03
- [5] http://dugulaselharitomester.hu/wp-content/uploads/2013/08/udvari_vizelvezeto.png 2014-12-05
- [6] http://noplaza.hu/img/post/csatorna_lefolyo-20120524.jpg 2014-12-05
- [7] <http://majorutca.uw.hu/major3/DSCF0169.JPG> 2014-12-05
- [8] <http://www.stormwaterpartners.com/facilities/images/InfiltrationBasin1.jpg> 2014-12-05

Függelék

Hidraulikai mérések eredményei:

3 nap száradás után mért adatok (V=500 ml, D=17 cm)												
	10%				20%				30%			
	[mm:ss]	[s]	q [cm ³ /s]	v [cm/s]	[mm:ss]	[s]	q [m ³ /s]	v [m/s]	[mm:ss]	[s]	q [m ³ /s]	v [m/s]
1	09:40	580	8,62E-01	3,80E-03	14:46	886	5,64E-01	2,49E-03	21:57	1317	3,80E-01	1,67E-03
2	09:07	547	9,14E-01	4,03E-03	13:43	823	6,08E-01	2,68E-03	20:35	1235	4,05E-01	1,78E-03
3	08:36	516	9,69E-01	4,27E-03	12:57	777	6,44E-01	2,84E-03	19:17	1157	4,32E-01	1,90E-03
4	08:11	491	1,02E+00	4,49E-03	12:22	742	6,74E-01	2,97E-03	18:06	1086	4,60E-01	2,03E-03
5	07:54	474	1,05E+00	4,65E-03	11:43	703	7,11E-01	3,14E-03	17:05	1025	4,88E-01	2,15E-03
6					11:20	680	7,35E-01	3,24E-03	16:10	970	5,15E-01	2,27E-03
7					11:02	662	7,55E-01	3,33E-03				

1 napos vízborítás után mért adatok (V=500 ml, D=17 cm)												
	10%				20%				30%			
	[mm:ss]	[s]	q [cm ³ /s]	v [cm/s]	[mm:ss]	[s]	q [m ³ /s]	v [m/s]	[mm:ss]	[s]	q [m ³ /s]	v [m/s]
1	04:28	268	1,87E+00	8,22E-03	04:12	252	1,98E+00	8,75E-03	07:06	426	1,17E+00	5,17E-03
2	04:23	263	1,90E+00	8,38E-03	04:24	264	1,89E+00	8,35E-03	08:23	503	9,94E-01	4,38E-03
3	04:16	256	1,95E+00	8,61E-03	04:30	270	1,85E+00	8,16E-03	07:52	472	1,06E+00	4,67E-03
4	04:10	250	2,00E+00	8,82E-03	04:30	270	1,85E+00	8,16E-03	07:15	435	1,15E+00	5,07E-03
5	04:09	249	2,01E+00	8,85E-03	04:37	277	1,81E+00	7,96E-03	06:48	408	1,23E+00	5,40E-03
6									06:32	392	1,28E+00	5,62E-03

Adszorpciós mérések eredményei

Áztatásos kísérletek

Tiszta homok (C = 10mg/L; V = 100 ml)						
t [min]	0	15	30	60	120	megjegyzés
Cu [mg/L]	9,5	6,9	6,3	4,2	1,8	(10x hígítás)
Zn [mg/L]	10,1	7,3	7,3	5,4	4,1	(10x hígítás)
Cr [mg/L]	10,2	10,6	10,4	10,4	10,2	(20x hígítás)

Keverék (C = 10mg/L; V = 100 ml)						
t [min]	0	15	30	60	120	megjegyzés
Cu [mg/L]	9,2	1,8	1,0	0,5	0,3	(10x hígítás)
Zn [mg/L]	10,2	2,0	1,5	1,1	0,6	(10x hígítás)
Cr [mg/L]	10,6	9,6	9,8	9,2	9,4	(20x hígítás)

Átfolyásos kísérletek

Homok, Zn, Gyors ($\tau=0,1$ perc)						
V	Cbe	Cki	Ráadott	Ö ráadott	Megfogott	Ö megfogott
[L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg]			
0	0	0	0	0	0	0
10	8,9	7,1	89	89	18	18
10	8,9	7,9	89	178	10	28
10	8,9	8,3	89	267	6	34
10	8,9	8,4	89	356	5	39

Keverék, Zn, Gyors ($\tau=0,1$ perc)						
V	Cbe	Cki	Ráadott	Ö ráadott	Megfogott	Ö megfogott
[L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg]			
0	0	0	0	0	0	0
10	9,9	7,6	99	99	23	23
10	9,9	8,6	99	198	13	36
10	9,9	9,0	99	297	9	45
10	9,9	9,4	99	396	5	50
10	9,9	9,0	99	495	9	59
10	9,9	9,3	99	594	6	65
10	9,9	9,8	99	693	1	66

Homok, Cu, Gyors ($\tau=0,1$ perc)						
V	Cbe	Cki	Ráadott	Ö ráadott	Megfogott	Ö megfogott
[L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg]			
0	0	0	0	0	0	0
10	8,5	2,9	85	85	56	56
10	8,5	3,1	85	170	54	110
10	8,5	3,2	85	255	53	163
10	8,5	3,4	85	340	51	214

Keverék, Cu, Gyors ($\tau=0,1$ perc)						
V	Cbe	Cki	Ráadott	Ö ráadott	Megfogott	Ö megfogott
[L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg]			
0	0	0	0	0	0	0
10	9,4	4,8	94	94	46	46
10	9,4	4,3	94	188	51	97
10	9,4	4,1	94	282	53	150
10	9,4	5,4	94	376	40	190
10	9,4	4,5	94	470	49	239
10	9,4	4,4	94	564	50	289
10	9,4	5,5	94	658	39	328

Keverék, Zn, Lassú ($\tau=15$ perc)							
	Cbe	Cki	V ráadott	Ráadott	Megfogott	Ö ráadott	Ö megfogott
	[mg/L]	[mg/L]	[L]	[mg]			
0	0	0	0	0	0	0	0
1	10,5	0,04	0,7	7,35	7,32	7,35	7,32
2	10,5	1,4	2,5	26,25	22,75	33,6	30,07
3	10,5	3,85	2,8	29,4	18,62	63	48,69
4	10,5	3,8	3	31,5	20,10	94,5	68,79
5	9,8	3,9	1,5	14,7	8,85	109,2	77,64
6	9,8	4,3	0,7	6,86	3,85	116,06	81,49
7	9,8	5,3	1,6	15,68	7,20	131,74	88,69
8	9,8	5	2,5	24,5	12,00	156,24	100,69
9	9,8	6,5	6,4	62,72	21,12	218,96	121,81

Kávéfogyasztás Magyarországon

év	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	átlag
kg/fő/év	2,8	2,8	2,7	2,7	2,8	2,7	2,6	2,5	2,3	2,2	2,2	2,57

Degradációs oszlopos kísérletek – cinkmérés

	Első átöblítés	Első átöblítés kifolyója		Két hét áztatás után			
	Csapviz vagy csapvizes oldat	Fémoldatos oszlop	Csapvizes oszlop	Felső rész		Alsó rész	
				Fémoldatos	Csapvizes	Fémoldatos	Csapvizes
Roncsolás előtti hígítás	-	1x	1x	1x	1x	5x	5x
Roncsolás utáni hígítás	-	1x	1x	1x	1x	1x	1x
Hígítás mérés előtt	-	5x	5x	5x	5x	1x	1x
Mintakód	FoB1	FoK1	CsvK1	FoB2	CsvB2	FoK2	CsvK2
Zn [mg/L]	-	< 0,02	< 0,02	0.35	0.14	0.09	0.07
Abszorbancia	-	0.016	0.002	-	-	-	-
Koncentráció	10	< 0,1	< 0,1	1,75	0,7	0,45	0,35

Degradációs oszlopos kísérletek – KOI mérés

Vak fogyasztás 9.42 ml	Első átöblítés	Első átöblítés kifolyója		Két hét áztatás után			
	Csapviz vagy csapvizes oldat	Fémoldatos oszlop	Csapvizes oszlop	Felső rész		Alsó rész	
				Fémoldatos	Csapvizes	Fémoldatos	Csapvizes
Hígítás	1x	1x	1x	1x	1x	10x	10x
Mintakód	FoB1, CsvB1	FoK1	CsvK1	FoB2	CsvB2	FoK2	CsvK2
Fogyasztás [ml]	9,39	7,78	7,61	8,37	8,31	6,67	6,17
KOI [mg/l]	6	328	362	210	222	5500	6500