

MOGUĆNOSTI PRIMENE PRIRODOM INSPIRISANIH REŠENJA ZA URBANO ODVODNJAVANJE U SRBIJI

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF NATURE-BASED SOLUTIONS FOR URBAN DRAINAGE IN SERBIA

ALEKSANDAR ĐUKIĆ¹

BRANISLAVA LEKIĆ²

BRANISLAV BABIĆ³

OGNJEN GOVEDARICA⁴

VLADANA RAJAKOVIĆ OGNJANOVIĆ⁵

Pregledni naučni rad
DOI: 10.5937/VIK24329D

Rezime: U radu je dat osvrt na aktuelne probleme urbanog odvodnjavanja sa aspekta pogoršanja hidrološkog režima usled urbanizacije. Istaknuta je potreba za smanjenjem negativnih uticaja urbanizacije na količine i kvalitet urbanog oticaja. Prikazane su inovativne metode urbanog odvodnjavanja i opšte preporuke za njihovu primenu, kao i zahtevi iz predloga nove direktive EU o gradskim otpadnim vodama koje se odnose na integrisano upravljanje otpadnim i kišnim vodama u gradovima.

Ključne reči: urbani oticaj, kišne vode, zagađenje, kvalitet vode, integrisano upravljanje

Abstract: The paper presents challenges that urban drainage has to solve under altering hydrological regime due to urbanization. The need for reducing the negative impacts of urbanization on the quantity and quality of urban runoff is emphasized. Innovative methods of urban drainage have been presented, together with general recommendations for their application. The requirements from the proposal of the new EU Directive on urban wastewater

¹ Aleksandar Đukić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, djukic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3548-989X

² Branislava Lekić, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, branaj@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-3360-2118

³ Branislav Babić, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, babic@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-1224-6297

⁴ Ognjen Govedarica, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, ogovedarica@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-4995-3932

⁵ Vladana Rajaković Ognjanović, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, vladana@grf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-4895-7007

related to the integrated management of urban wastewater, including rainwater, are presented in more detail.

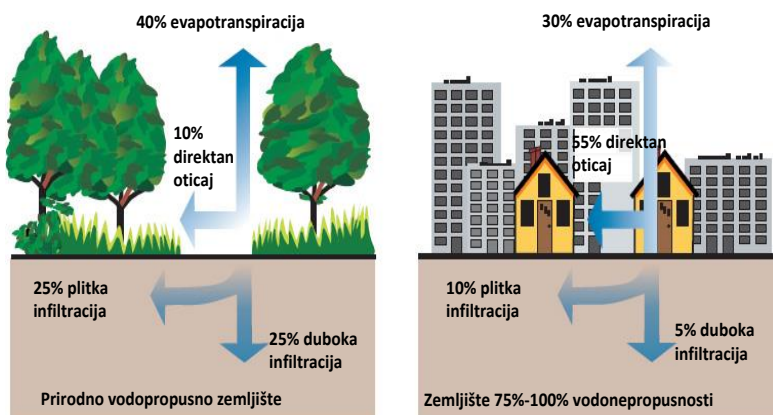
Key Words: urban runoff, rain water, pollution, water quality, integrated management

1. Uvod

Tradicionalni način urbanizacije menja hidrološke karakteristike sliva tako što povećava udeo nepropusnih površina, što znatno povećava koeficijent oticaja sliva, odnosno povećava zapreminu i protok kišnog oticaja, a smanjuje infiltraciju u zemljište i evapotranspiraciju – slika 1 [1]. U isto vreme površinski oticaj se ubrzava tako da se maksimalni protoci površinskog oticaja javljaju ranije u odnosu na oticanje sa površina pre urbanizacije [2].

Na urbanim površinama se talože i akumuliraju materije iz atmosfere, materije donete sa okolnih površina, materije koje potiču od korišćenja motornih vozila i iz drugih izvora [2]. Deo materija se zadržava na površini, deo biva odnešen vetrom ili saobraćajem na drugo mesto, a deo pretrpi transformaciju ili degradaciju. Usled zagađivanja atmosfere izduvnim gasovima iz vozila, emisijom iz kotlova i industrije, materije koje se akumuliraju na urbanim površinama sadrže i produkte sagorevanja, materije nastale habanjem delova vozila, produkte industrijskog zagađenja i drugo. Tokom kiše ove materije bivaju odvojene od podloge i transportovane površinskim oticajem, pri čemu one mogu prolaziti kroz niz transformacija. Ove materije mogu znatno narušiti kvalitet oticaja i ugroziti prirodne vode u koje se izlivaju [2].

Kod urbanih slivova, dominantan udeo oticaja i zagađenja potiče sa nepropusnih površina, kao što su saobraćajnice, trotoari, parkinzi ili krovovi [3].



Slika 1. Uticaji urbanizacije na hidrološki ciklus u gradovima [1]

Figure 1. Impacts of urbanization on hydrological cycle [1]

2. Akumulisanje i spiranje zagađenja sa urbanih površina

Akumulacija zagađenja na nepropusnim površinama odvija se u periodima bez padavina, kada se materije prirodnog i antropogenog porekla sakupljaju na površinama. Akumulacija materija se usporava tokom vremena, tako da se masa zagađenja po jedinici površine asimptotski približava nekom maksimumu, koji zavisi od niza lokalnih faktora kao što su atmosfersko zagađenje, položaj površine u odnosu na izvore zagađenja, karakteristike površine, način korišćenja površine, intenzitet saobraćaja i drugo [4].

Pokretanje zagađenja sa površine je složen proces koji zavisi od niza faktora, uključujući tip i osobine zagađujućih materija, intenzitet kiše i dr. Akumulisanje i spiranje zagađenja opisuju se empirijskim relacijama [2].

Istraživanja ukazuju da oticaj sa urbanih površina može sadržati niz zagađujućih materija antropogenog porekla [1], [2], [4]:

- sadržaj hemijske potrošnje kiseonika (HPK), ukupnog organskog ugljenika (TOC) ili petodnevene biohemijske potrošnje kiseonika (BPK5) imaju niske ili umerene vrednosti, i uglavnom vode poreklo sa zemljišta i zelenih površina;
- suspendovane materije su prisutne u značajnim koncentracijama i imaju tendenciju udruživanja sa drugim zagađenjima teški metali, PAH i dr;
- teški metali su prisutni pretežno u nerastvornom obliku [5] i mogu biti prisutni u kišnom oticaju u širokom opsegu koncentracija, u zavisnosti od načina korišćenja zemljišta, intenziteta saobraćaja i industrijskog zagađenja;
- ulja, masti i naftni ugljovodonici su prisutni u kišnom oticaju u slučaju akcidentnih zagađenja (udes, curenje ulja i goriva iz motornih vozila, spiranje ulja sa površina u industrijskim postrojenjima);
- jedinjenja azota i fosfora su prisutna u oticaju u visokim koncentracijama ako postoji veće spiranje sa zelenih površina ili specifična aerozagađenja;
- druge specifične zagađujuće materije (PAH, mikropolutanti i dr.) mogu se javiti u površinskom oticaju u zavisnosti lokalnih uslova.

Istraživanja ukazuju na veliku varijabilnost po prostoru i vremenu parametara zagađenja [2], i velike razlike između različitih lokacija. Na primer, istraživanja u južnim i istočnim primorskim područjima SAD ukazuju da namena zemljišta ima značajnu ulogu: zelene površine i industrija generišu veće količine sedimenata (suspendovanih materija), zelene i površine niske gustine stanovanja generišu veće količine fosfora, a saobraćajne i industrijske površine generišu veće količine azota od proseka [6]. Na osnovu obimnih istraživanja sprovedenih u SAD, u tabeli 1 su date tipične vrednosti godišnjih opterećenja zagađenjem od oticaja sa različitih tipova površina [2].

Tabela 1. Godišnja opterećenja zagađenjem oticaja sa različitih površina, kg/ha.god
Table 1. Annual runoff pollution loads from various surfaces, expressed in kg /ha.year

Parametar	Tip površine - način korišćenja zemljišta						
	Komercijalna	Stanovanje (velika gustina)	Stanovanje (srednja gustina)	Stanovanje (niska gustina)	Industrija	Putevi	Parkirališta
TSS	1100	450	270	10	550	1000	450
TP	1,7	1,1	0,4	0,05	1,5	1,0	0,8
TKN	7,5	4,7	2,8	0,3	3,7	8,9	5,7
BPK ₅	70	30	15	1	-	-	53
HPK	470	190	60	10	230	-	300
Pb	3,0	0,9	0,06	0,01	0,2	5,0	0,9
Zn	2,3	0,8	0,1	0,05	0,4	2,3	0,9
Cu	0,4	0,03	0,03	0,01	0,1	0,4	0,07

Poseban izazov predstavljaće klimatske promene. Najnovija istraživanja ukazuju da će se projektanti sistema za sakupljanje i tretman kišnih voda suočavati sa sve većim neizvesnostima u pogledu prostorne i vremenske dinamike kišnih i sušnih perioda u budućnosti. Rezultati pokazuju da globalno zagrevanje od 1,5 do 2°C može uticati na povećanje opterećenja teškim metalima u urbanom kišnom oticaju za skoro 50% [7].

3. Inovativne metode kontrole količine i kvaliteta urbanog oticaja

Svetska iskustva ukazuju da su problemi nastali usled urbanizacije i prekomerne izgradnje nepropusnih površina doveli do učestalih poplava unutrašnjim vodama urbanih područja. Ovo dovodi do uvećanih šteta od poplava, ugrožavanja imovine i života, pri čemu se znatno uvećavaju potrebne investicije za sisteme kišne kanalizacije koji treba da prihvate sve veće količine kišnog oticaja kako bi održali zadati nivo zaštite od poplava unutrašnjim vodama.

Ovo je postepeno dovelo do promena u načinu koncipiranja, izgradnje i rada sistema urbanog odvodnjavanja (kišne kanalizacije) i uvođenja inovativnih metoda u razvijenim zemljama. Inovativni sistemi odvođenja kišnih voda iz urbanih sredina teže ka odvođenju kišnih voda imitirajući prirodne procese.

Za razliku od konvencionalnih sistema, gde se kišna voda sprovodi sistemom vodopropusnih kanala i cevovoda najbržim putem do recipijenta, ovde se teži [8]:

- Smanjenju količina otekle vode sa urbanih površina,

- Povećanju infiltracije - prihranjivanja podzemnih voda (ako je to moguće i prihvatljivo na konkretnoj lokaciji),
- Povećanju evapotranspiracije,
- Poboljšanju kvaliteta kišnog oticaja smanjenjem koncentracije prisutnih zagađujućih materija,
- Ublažavanju uticaja na životnu sredinu i recipijent pri akcidentnim izlivanjima zagađujućih materija,
- Opštem poboljšanju kvaliteta životne sredine i unapređenju estetske i materijalne vrednosti urbanog područja i
- Formiranju prirodnih staništa za divlji svet u urbanim sredinama.

Da bi se uspešno oponašali prirodni procesi pri oticanju i upijanju vode, obično se primenjuju metode zasnovane na nizu podsistema, čime se se dobijaju efikasnija rešenja, jer se koristi niz objekata koji zajedno utiču na smanjenje zapremine otekle vode, vršnog proticaja i koncentracije zagađujućih materija [8].

Na primer, dobri rezultati u kontroli količina i kvaliteta kišnog oticaja sa urbanih površina se mogu postići simultanom primenom niza metoda (npr. zeleni krovovi, vodopropusne površine kolovoza i trotoara, propusni otvoreni kanali, retenzije, biofilteri, infiltracioni rovovi i dr.). Sve ove metode treba inkorporirati pri uređenju i građenju naselja i urbane infrastrukture tako da smanjuju plavljenje kišnim vodama, smanjuju površinski oticaj i uklanjanju deo zagađujućih materija iz kišnog oticaja blizu mesta nastanka čime se unapređuje kvalitet života i životna sredina u naseljima.

Kako ovi sistemi zahtevaju prostor, njihova primena podrazumeva velike promene u koncipiranju urbanističkog razvoja naselja i infrastrukture, gde je osnovni cilj smanjenje ili eliminisanje promena režima voda nastalih usled urbanizacije (kako promena hidrološkog ciklusa voda tako i promena kvaliteta voda).

Ovi inovativni koncepti urbanog odvodnjavanja se različito nazivaju u različitim delovima sveta: „razvoj sa malim uticajima“ u SAD (eng. Low Impact Development – LID), „održivi urbani drenažni sistemi“ u Ujedinjenom Kraljevstvu (eng. Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS), „prirodom inspirisana rešenja“ u EU (eng. Nature Based Solutions - NBS), „gradovi osetljivi na vodu“ u Australiji (eng. Water Sensitive Cities) i „gradovi sunderi“ u Kini (eng. Sponge Cities). Svaki od njih ima svoje specifičnosti, ali zajednički im je integrisani pristup upravljanju urbanim vodama, inkorporiranje ciljeva upravljanja kišnim oticajem u pravila uređenja i građenja naselja i zahtev za unapređenjem životne sredine [2].

Pojedine metode za kontrolu količina i kvaliteta oticaja su navedene u naredim poglavljima. S obzirom da rezultati istraživanja ukazuju da emisija zagađenja pr-

venstveno zavisi od visine kiše [9], mere i tehnička rešenja moraju biti usmerena ka smanjenju (kontroli) oticaja i kontroli kvaliteta oticaja od kiše određene ukupne visine padavina, najčešće od 12,5 do 25 mm [10].

U skladu sa navedenim, istraživanja pokazuju da zahvatanje i prečišćavanje manjih kiša koje se češće javljaju može dati dobre ukupne efekte zaštite voda i zemljišta od zagađenja, uz niže investicije, npr. kiše koje se javljaju nekoliko puta godišnje [2].

3.1. Kontrola količina otekle vode

Postoji niz procesa koji se mogu upotrebiti za kontrolu oticaja. Svaka od opcija upravljanja oteklih količina voda ima svoje prednosti, mane i ograničenja. U zavisnosti od traženih kriterijuma, može se postići kontrola otekle vode, umanjeње rizika od poplava, zadržavanje vode i/ili prihranjivanje podzemnih voda kroz [8]:

a) Infiltraciju - očeđivanje vode kroz zemlju. U slučaju da postoju rizik od zagađenja podzemnih voda, treba pribеći drugim rešenjima.

b) Zadržavanje vode - prihvatanje ili usporavanje toka vode (povremeno plavne površine, lagune ili podzemne retenzije). Ovom metodom se postiže smanjenje pika poplavnog talasa, ali se ne smanjuju količine otekle vode.

c) Transport vode koji se se može izvesti površinskim kanalima, ukopanim cevima ili rovovima. U cilju smanjenja količina otekle vode kanali za odvod vode mogu se predvideti sa propusnim dnom (npr zatravnjeni kanali).

d) Korišćenje kišnih voda - kada je to moguće i opravdano kišne vode se mogu koristiti za navodnjavanje, pranje ulica ili u druge svrhe, u zavisnosti od lokalnih uslova. Neophodno je dimenzionisati prostor za zadržavanje ove vode sa malom verovatnoćom da će doći do preliivanja.

Prevenција je potencijalno efikasna, s tim da je potrebno pravilno planiranje i implemetnacija rešenja koja se zasnivaju na primeni nekoliko jednostavnih osnovnih pravila koje treba primenjivati za odvodnjavanje gradova:

- Minimizirati gradnju nepropusnih površina (pločnici, asfalt);
- Oticaj usmeravati, gde je moguće, na travnjake i propusne površine;
- Ako plavljenje nije moguće izbeći, identifikovati površine koje će se kontrolisano plaviti pri jakim kišama, propisno ih označiti i održavati;
- Primенiti zelene krovove gde je to opravdano.

3.2. Kontrola kvaliteta otekle vode

Postoji niz metoda koje se koriste za prečišćavanje kišne vode. Metode se mogu i kombinovati na različite načine, a najčešće korišćene metode su [8]: taloženje,

filtracija, biofiltracija, adsorpcija, biodegradacija, isparavanje, precipitacija, upijanje biljkama, nitrifikacija, fotoliza i dr.

Primena pojedinih metoda prečišćavanja je uslovljena nizom faktora, kao što su efikasnost i ekonomičnost. Za unapređenje kvaliteta kišnog oticaja u gradovima neophodno je je primeniti i sledeće mere prevencije nastajanja zagađenja:

- Identifikovati moguće izvore zagađenja i sprečiti izlivanje zagađenja na mestu njegovog potencijanog nastanka;
- Čišćenje ulica potrebno je izvoditi mehaničkim putem (usisavanje/sakupljanje materija), a ne ispiranjem vodom, čime se izbegava povećano i ubrzano odnošenje zagađujućih materija u vodoprijemnike;
- Sprovoditi aktivnosti usmerene ka smanjenju erozije zelenih površina;
- Unapređivati kvalitet vazduha (dugoročni cilj).

3.3. Prednosti i nedostaci inovativnih metoda kontrole oticaja

Iskustva u primeni navedenih sistema u našim gradovima još uvek ne postoje, a na osnovu iskustava u gradovima Evrope, Severne Amerike i Dalekog istoka, mogu se sažeti prednosti primene ovih metoda:

- Efikasna zaštita od plavljenja unutrašnjim vodama;
- Smanjenje investicija i operativnih troškova nizvodnih sistema za kanalisanje kišnih voda;
- Kontrola kvaliteta kišnog oticaja;
- Smanjenje efekata „toplotnih ostrva“ u gradovima;
- Poboljšanje stepena zaštite okoline i recipijenta u slučaju redovnih i akcidentnih izlivanja zagađenja;
- Prihranjivanje podzemnih akvifera (gde god je moguće i poželjno);
- Poboljšanje ekoloških uslova povećanjem udela zelenih površina, otvorenih vodenih površina i formiranjem staništa za biljni i životinjski svet;
- Uvećanje cene okolnog zemljišta i nekretnina.

Savremena istraživanja ukazuju da nove metode za kontrolu oticaja, kada su dobro projektovane, izvedene i održavane, pored efekata na smanjenje oticaja imaju i pozitivne efekte na kvalitet vode.

Iako su ove metode prvenstveno fokusirane na uklanjanje suspendovanih materija iz oticaja, paralelno se odvija i niz hemijskih i bioloških reakcija koje poboljšavaju kvalitet vode. Potrebna su dalja istraživanja za puno razumevanje ovih dodatnih mehanizama prečišćavanja i kvantifikaciju njihovih efekata [11].

Međutim, primena inovativnih sistema ima i svoje nedostatke, koji se prvenstveno ogledaju u višim investicionim ulaganjima u poređenju sa konvencionalnim sistemima kišne kanalizacije, složenije aktivnosti i više cene održavanja, veći zahtevi za prostorom, a otvorene vodene površine kod retenzija i laguna za kišnicu nose sa sobom rizik od utapanja.

Korisna upotreba kišnog oticaja sa urbanih površina kao tehničke vode je uspešno demonstrirana u nizu država u svetu, ali u pogledu upotrebe vode za piće postoji nedostatak regulatornog okvira i neizvesnosti u pogledu kvaliteta kišnih voda, posebno u pogledu patogenih i specifičnih polutanata od značaja za snabdevanje vodom za piće [12].

4. Zaključna razmatranja

Velika prostorna i vremenska promenljivost svih parametara površinskog oticaja, kao i činjenica da većina zagađenja koje se spira oticajem potiče iz rasutih izvora zagađenja, predstavlja teškoću u uspostavljanju pravila i zahteva u pogledu kontrole i smanjenja zagađenja od urbanog oticaja. Stoga, uvođenje graničnih vrednosti emisije, odnosno maksimalnih dozvoljenih koncentracija parametara u kišnom oticaju koji se ispušta u vodoprijemnike, ne deluje kao opravdano i praktično primenjivo u praksi.

Pristup ovoj problematici u zakonodavstvu EU, a delom i u Srbiji, je da sva ispuštanja u vode budu takva da ne naruše dobar status vodnih tela. Ovo ukazuje da je krajnji cilj smanjenje negativnih uticaja od ljudskih aktivnosti, što podrazumeva da se u prvom koraku moraju odrediti hidrološki i ekološki uslovi na slivu bez urbanizacije, a zatim primenom odgovarajućih mera se negativni uticaji urbanizacije i drugih ljudskih aktivnosti kontrolišu.

Rezultati niza sprovedenih istraživanja u svetu i kod nas ukazuju da emisija zagađenja oticajem sa urbanih slivova prvenstveno zavisi od visine kiše, tako da mere i tehnička rešenja moraju biti usmerene ka smanjenju (kontroli) oticaja i kontroli kvaliteta oticaja od kiše određene ukupne visine padavina, određene prema specifičnostima konkretnog sliva i karakteristikama vodoprijemnika.

Od tehničkih rešenja, koja bi doprinela ostvarenju ovakvih ciljeva, nameću se sistemi za simultanu kontrolu količina i kvaliteta oticaja, jer se upravo na taj način smanjuju izmene prirodnog hidrološkog režima usled urbanizacije. Primena ovih mera u našim uslovima zahtevaće radikalne promene koncepta upravljanja kišnim vodama u naseljima.

Ovo će zahtevati ne samo izgradnju kišne kanalizacije već i primenu zelene infrastrukture, intenzivan monitoring kanalizacije i prirodnih voda i primenu inovativnih metoda za upravljanje oticajem u urbanim sredinama.

Takođe, biće neophodne i velike promene u urbanističkom planiranju i uređenju prostora u naseljima zbog izraženih prostornih zahteva inovativnih sistema i potrebe da oni budu pravilno inkorporirani u infrastrukturu naselja. Sve ovo će zahtevati usvajanje novih znanja i veština svih učesnika u procesu urbanističkog planiranja i projektovanja urbane hidrotehničke infrastrukture.

5. Zahvalnica

Istraživanje je finansijski podržano od strane Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, broj ugovora 451-03-65/2024-03/200092.

6. Literatura

- [1] Federal Interagency Stream Restoration Working Group. Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices, 1998.
- [2] Hvitved-Jacobsen T, Vollertsen J, Nielsen A. *Urban and Highway Stormwater Pollution-concepts and Engineering*. CRC Press. Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2010.
- [3] Revitt D. M, Lundy L, Coulon F, Fairley M. The sources, impact and management of car park runoff pollution: a review. *Journal of Environmental Management* , 146, 552e567, 2014.
- [4] James W, Rossman L. A, James W. R. C. *User's guide to SWMM 5*, 13th Edition, Published by CHI, Guelph, Ontario, Canada. 2010.
- [5] Đukić A, Lekić B, Rajaković-Ognjanović V, Veljović Đ, Vulić T, Đolić M, Naunović Z, Despotović J, Prodanović D, Further Insight into the Mechanism of Heavy Metals Partitioning in Stormwater Runoff, *Journal of Environmental Management*, 168, 104-110, 2016b
- [6] Yazdi M. N, Sample D. J, Scott D, Wang X, Ketabchy M. The effects of land use characteristics on urban stormwater quality and watershed pollutant loads. *Science of the Total Environment* 773 (2021) 145358. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.-145358, 2021.
- [7] Wijesiri B, Liu A, Goonetilleke A. Impact of global warming on urban stormwater quality: From the perspective of an alternative water resource. *Journal of Cleaner Production* 262 (2020) 121330. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121330, 2020.
- [8] Woods-Ballard, B, Kellagher, R, Martin, P, Jefferies, C, Bray, R, Shaffer, P. *The SUDS manual*, CIRIA C697, 2007.
- [9] Đukić A. *Modeliranje emisije zagađenja sa urbanih slivova*, doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Beograd, 2016.
- [10] U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 22, Second Edition, *Urban Drainage Design Manual*, 2001.

- [11] Gavrić S, Leonhardt G, Marsalek J, Viklander M. Processes improving urban stormwater quality in grass swales and filter strips: A review of research findings. *Science of the Total Environment* 669 (2019) 431–447. DOI: 10.1016/j.scitotenv.-2019.03.072, 2019.
- [12] Luthy R. G, Sharvelle S, Dillon P. Urban Stormwater to Enhance Water Supply. *Environ. Sci. Technol.* 2019, 53, 5534–5542, DOI: 10.1021/acs.est.8b05913, 2019.