

Hönnun og virkni léttra gróðurþaka við íslenskar aðstæður

Halla Einarsdóttir^{1,3}, Ágúst Elí Ágústsson^{1,4}, Hrund Ólöf Andradóttir¹, Magnús Bjarklind² og Reynir Sævarsson²

¹ Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands ² Efla Verkfræðistofa

³ Nú við Umhverfisstofnun ⁴ Nú við Verkís Verkfræðistofu

Fyrirspurnir:

Hrund Ólöf Andradóttir
hrund@hi.is

Greinin barst 28. maí 2018
Samþykkt til birtingar 3. desember 2018

ÁGRIP

Gróðurþök hafa verið sett upp í vaxandi mæli víða í borgum í Evrópu sem hluti af blágrænum ofanvatnslausnum. Markmið þessarar rannsóknar var að greina vatnafræðilega virkni mismunandi útfærslna af létum gróðurþökum við íslenskar aðstæður og koma með tillögur að farsælli hönnun gróðurþaka á Íslandi. Rýnt var í erlendar heimildir og hönnunarleiðbeiningar. Jafnframt voru byggð tilraunaþök og afrennsli mælt yfir 11 mánuði samhliða mælingum á snjóþekju, rigningu, vindi, og lofthita. Meðalvatnsheldni þakanna mældist mest 85% í júní og júlí í samræmi við erlendar rannsóknir í köldu loftslagi. Vatnsheldnin mældist þó heldur lægri á veturna á Íslandi (<20%). Marktæk seinkun á massamiðju afrennslis og lækkun afrennslistoppa mældist af öllum gróðurþökunum nema helst í stærstu úrkomu- atburðunum. Vatnsheldni innan hvers atburðar var mest háð lofthitastigi, uppsafnaðri úrkomu, úrkomu 14 daga fyrir atburð og vindhraða 7 daga fyrir atburð. Þök með mosavaxinn úthaga virkuðu vel vatnafræðilega, litu vel út, og þurftu lítið viðhald. Grasþök voru með hærri vatnsheldni en á móti báru þau vott um þurrk, og litu illa út sér í lagi fyrri hluta sumars. Ályktað er að villtur þurrkapolinn gróður eins og úthagi reynist betur en fódurgras sem hefur meiri vatnsþörf og vex hraðar.

ABSTRACT

Green roofs are increasingly being installed cities in Europe as a part of sustainable stormwater systems. The goal of this research was to assess the hydrological efficiency of different configurations of extensive green roofs in Iceland and present suggestions for successful design of such roofs based on local materials and weather conditions. International literature and best design practices were reviewed. Runoff from five test roofs was monitored for 11 months, in conjunction with snowdepth, rainfall, wind and air temperature. Green roof water retention measured highest 85% in June and July in accordance with other studies in cold climates. Water retention measured, however, somewhat lower during the winter (<20%). Significant delay of runoff's center of mass and lowering of peak runoff was measured in all green roofs except during the largest runoff events. Average event water retention was correlated to air temperature, cumulative rain, rain 14 days before event and wind speed 7 days before event. Roofs with moss and sedum turf demonstrated good hydrological efficiency, good appearance and needed little maintenance. Grass turf roofs retained slightly more water, but were less drought resistant and looked poorly during early summer. Wild, water resistant plants like moss and sedum performed better overall.

1 Inngangur

Þéttlingur byggðar rýfur hina náttúrulega hringrás vatns. Flest öll borgar- mannvirki eru byggð úr vatnsþéttum efniviði sem leiðir til þess að úrkoma á ekki lengur greiða leið í jarðveginn og safnast á yfirborði. Hin hefðbundna lausn er að safna ofanvatni saman í neðanjarðar lagnakerfi sem flytur það frá mannvirkjum í næsta viðtaka, sjó, stöðuvötn eða ár. Í eldri borgum eru fráveitulagnir bæði komnar til ára sinna og ekki nægjanlega stórar til þess að taka við öllu ofanvatni. Með hnattrænni hlýnun er spáð breyttu úrkomumynstri og meiri aftakarigningu, sem leiðir til tíðari flóða í borgarumhverfinu með tilheyrandi tjóni og hættu á sjúkdómum, þegar ofanvatn er í sömu lögn og skólp. Endurbygging neðan- jarðarfráveitukerfa er dýr og veldur einnig miklum óþægindum fyrir borgarbúa. Því eru fráveituverkfræðingar farnir í ríkara mæli að horfa til svokallaðra blágrænna ofanvatnslausna sem meðhöndla ofanvatn á yfir- borðinu (Alta ehf. 2016; Eyrún Pétursdóttir 2016). Blágrænar lausnir erum meðal annars gróðurdældir, svelgir, tjarnir, gegndræpt malbik og gróðurþök sem öll hafa getu til þess að hægja á streymi og geyma ofan- vatn tímabundið eða varanlega.

Gróðurþök eru skilgreind sem flöt eða hallandi þök með gróðri, sem auka græna ásýnd í þéttbýli og miðla magni og efnasamsetningu ofan- vatns (Magill o.fl. 2011). Þökin eru flokkuð sem létt (e. extensive) eða þung (e. intensive) eftir þyngd eða þykkt jarðlaga. Gróðarleg aukning varð á gróðurþökum upp úr tíunda áratug síðustu aldar í t.d. Austurríki, Sviss og Þýskalandi (Locatelli o.fl. 2014) í kjölfar markvissra aðgerða í stefnumörkun, skipulagsferlum, lagasetningum og styrkjum (Magill o.fl. 2011). Samhliða þessari framþróun hefur farið fram vörupróun og rann- sóknir. Gefin hafa verið út leiðbeiningarrit, eins og t.d. „Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landsshchaftsbau e. V. (FLL, 2014)“ sem fjallar um skipulag, uppbyggingu, og viðhald gróður- þaka.

Kostir gróðurþaka eru margir. Frá verkfræðilegu sjónarmiði, þá minnka gróðurþök magn ofanvatns, og seinka tímasetningu flóðtoppa, sem dregur úr flóðahættu í þéttbýli (Getter og Rowe 2006). Sérvalinn jarð- vegur og gróður hreinsa ofanvatn með því að sía mengunarefni

(Berndtsson o.fl. 2006). Gróðurþök virka sem auka hitaeinangrun í köldu loftslagi og bægja hita frá í heitu loftslagi (Magill o.fl. 2011). Með minni hitasveiflum þá þenjast (og dragast) byggingarefni minna saman, springa síður og skemmast. Þannig geta gróðurþök enst lengur en hefð- bundin þök (RRPDC, 2012). Uppsetningarkostnaður gróðurþaka er almennt hærri en hefðbundinna þaka. En sé litið á lengri líftíma gróður- þakanna, lækkun hitunarkostnaðar vegna meiri einangrunar, og minnkun álags á frárennsliskerfin þá eru gróðurþök talin hagstæðari en hefðbundin. Fermetraverð á gróðurþökum er mjög breytilegt eftir aðgengi og verði hráefna. Helstu munar þar um kostnað við jarðvegslag- ið (Magill o.fl. 2011). Frá vistfræðilegu sjónarmiði, þá laðar gróðurinn að sér skordýr og fugla svo gróðurþök stuðla að líffræðilegum fjöl- breytileika í borgarumhverfinu (Bengtsson o.fl. 2005). Frá velferðar- sjónarmiði, gefa kannanir til kynna neikvæð viðhorf gagnvart köldu viðmóti þéttbýlis. Borgarbúar sækja í græn svæði þar sem að náttúran fær að njóta sín. Gróðurinn og hreint vatn minnir á heilbrigða náttúru og hefur róandi og jákvæð áhrif á mannfélkið (Dunnett 2006).

Rannsókn þessi beinist að létum gróðurþökum sem einkennast af 3- 15 cm þykku jarðvegslagi (Uhl og Schiedt 2008) og gróðri sem þarfnast lítillar sem engrar umhirðu. Þessum létu þökum svipar til torfþaka sem er gömul byggingarhefð á Norðurlöndum. Þrátt fyrir áralanga notkun, þá hafa ekki verið gerðar rannsóknir á gróðurþökum miðað við íslenskar aðstæður. Einnig liggja ekki fyrir innlendar leiðbeiningar um hönnun og rekstur léttra gróðurþaka. Á norðurlöndum tíðkast að nota torf á hvolfi í stað jarðvegs. Er slík útfærsla verri en t.d. að setja jarðveg, eins og mælt er með í erlendum hönnunarleiðbeiningum (t.d. FLL 2014). Einnig er spurning um hversu vel innlendur gróður og jarðvegur breyti vatnsbúskap við íslenskar aðstæður.

Markmið þessarar rannsóknar var að koma með nýtt innlegg í hönnun léttra gróðurþaka á Íslandi. Rýnt var í heimildir og vatnafræðileg virkni gróðurþaka metin. Þessi grein er byggð á tveimur meistara verkefnum í umhverfisverkfræði við Háskóla Íslands. Lesendum er bent á að frekari upplýsingar og fróðleik megi finna í ritgerðunum (sjá Ágúst Elí Ágústsson 2015; Halla Einarsdóttir 2018). Hafa skal í huga að framsetning niður- staða á árstíðabundinni vatnsheldni er að nokkuð ólík en í ritgerðunum.

2 Hönnun og fræðin

Í þessum kafla er gerð grein fyrir helstu hönnunarforsendum sem hafa áhrif á líftíma og vatnafræðilegri virkni gróðurþaka, byggt á heimildarýni í erlendar rannsóknir.

2.1 Þakhalli og vatnspéttni

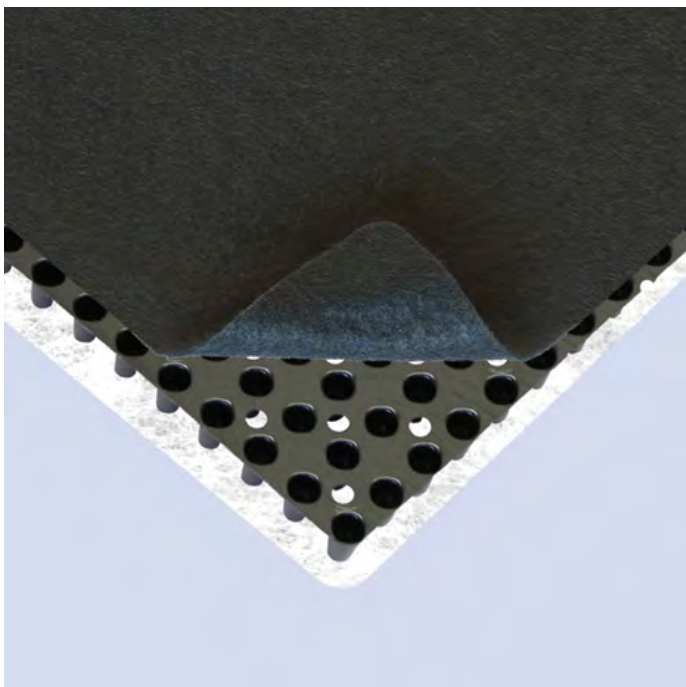
Þakhalli stjórnar flæði vatns um þakið. Annars vegar má hallinn ekki vera svo mikill að rætur gróðursins slitni og hann renni til á þakinu. Talið er að gróðurþök séu stöðug og þurfi ekki viðbótar jarðvegsstyrkingu ef halli þeirra er < 36%. Hins vegar verður hallinn að vera nægur svo vatn sem fellur á þakið renni frá þakinu en safnist ekki fyrir í dældum sem leiði til leka (FLL 2014). Mælt er með að hallinn sé >2% til að tryggja frjálsa framræslu í þakinu. Ef hallinn er < 2% er nauðsynlegt að hafa drenlag sem flytur vatn frá þakinu (Fassman o.fl. 2010). Neðsta lagið á þakinu verður að vera vatnspétt til að fyrirbyggja leka (FLL 2014). Það má t.d. vera þakpappi. Yfirleitt er lagður rótheldur hlífðardúkur yfir til þess að fyrirbyggja skemmdir á vatnspétta laginu.

2.2 Dren- og hlífðarlag

Til að tryggja framræslu á vatni um botn þakanna niður að ræsi eða þakrennu sem flytur vatnið frá byggingunni er lagt drenlag, sem er oftast sérhannaður drendúkur eða gróf mól. Drendúkarnir eru vanalega gerðir úr plastefni. Mynd 1 sýnir dæmi um einn slíkan dúk, sem notaður hefur verið á Íslandi. Annars vegar er dúkurinn með hólf eða bolla, sem geyma aukaforða af vatni og hjálpa þannig gróðri í gegnum þurrkatímabil. Hins vegar eru göt þar sem vatnið rennur í gegnum þegar bollarnir fyllast (FLL 2014). Ofan á drendúkinn er settur hlífðardúkur sem er notaður til að koma í veg fyrir að jarðvegslagið skolist í burtu og/eða stífla drenlagið. Einnig til að fyrirbyggja að rætur vaxi niður í drenlögin og stífla. Jarðvegslúkar á gróðurþökum eru vanalega gerðir úr óófnu (e. non-woven) trefjaefni (FLL 2014).

2.3 Jarðvegslag

Megin markmið jarðvegslags er að búa til hagstætt rótarlag fyrir gróðurþekju þar sem loft-, vatns- og efnainnihald er fullnægjandi. Jarðvegslagið þarf að hafa gott jafnvægi á milli loftunar, framræslu (e.



Mynd 1 Sérhannaður drendúkur fyrir gróðurþök frá Nophadrain.com.

drainage) og rakaheldni. Framræsla er mikilvæg til að varna því að jarðvegurinn verði vatnsmettaður, sem takmarkar loftinnihald jarð-

vegsins og getur valdið því að rætur gróðursins rotni. Góð loftun í jarðveginum stuðlar að heilbrigðum gróðurvexti. Rakaheldni jarðvegsins er mikilvæg til viðhalda plöntum. Jarðvegurinn þarf einnig að uppfylla næringarþörf gróðurlagsins ásamt því að hafa fullnægjandi styrkleika fyrir stöðugleika jarðvegsins (FLL 2014).

Alengt er að nota einhver af eftirfarandi steinefnum í jarðveginum: vikur, unninn leirstein, sand, leir, endurunna múrsteina eða hellur. Steinefnunum er síðan blandað við næringarrík efni eins og moltu. Hlutföll þessara efna fara eftir gróðrinum sem á að nota á þakinu, hvornig gróðurþak er verið að byggja (létt eða þungt), aðgengi að efnum og kostnaður (Ampim ofl. 2010). Mikilvægt er að ekki sé of hátt hlutfall af fínefnum í jarðveginum því það getur orðið til þess að hann skolist út í miklum rigningum. Jafnframt þarf að tryggja að hæfilegt magn af lífrænum efnum sé í jarðveginum svo hann haldist næringarríkur fyrir gróðurlagið svo gróðurinn drepist ekki (FLL 2014).

2.4 Gróðurlag

Helsta hlutverk gróðurlags er að binda jarðvegin saman og styrkja hann ásamt því að vernda jarðvegin gegn veðri og ágangi dýra. Þar að auki er gróðurlagið notað til að draga úr neikvæðum sjónrænum áhrifum bygginga með því að veita byggingum umhverfisvænni ásýnd. Fyrir létt gróðurþök þá skiptir máli að gróðurinn þurfi lítið viðhald eins og vökvun, áburðargjöf eða slátt. Það getur verið kostnaðarsamt að viðhalda gróðrinum ásamt því að aðgengi að þökum er oft misgott sem gerir viðhald erfitt. Önnur skilyrði sem plönturnar þurfa að uppfylla eru að þola þurrkatímabil, frost, snjóálag og mikla vinda (Fassman o.fl. 2010). Erlendis er algengt að nota þurrkþolna fjölæringa, t.d. hnoðra (e. sedum) til þess að ná fram þessum eiginleikum. Gróðurlagi er yfirleitt komið á fót með sáningu, stiklingum eða útplöntun í jarðveginum. Einnig eru til fyrirtæki erlendis sem rækta sérstakar gróðurmottur og gróðureiningar sem eru sérhannaðar fyrir gróðurþök (FLL, 2014).

2.5 Vatnafræðileg virkni

Úrkoma sem fellur á yfirborð gróðurþaka sígur að hluta til í gegnum jarðvegin og skilar sér sem afrennsli. Hraði ísigs vatns í jarðvegi (e. infiltration) er háður eiginleikum jarðvegarins s.s. holrýmd, hlutfalli lífrænna efna í jarðveginum, gróðurgerð, veðurfari og landslagi (Berglind Orradóttir o.fl. 2006). Mettun (e. field capacity) er náð þegar öll holrými í jarðveginum hafa fyllst, og við það hefst afrennsli. Vatnið sem skilar sér ekki sem afrennsli frá þakinu gufar ýmist upp í andrúmsloftið (uppgufun, e.evaporation) eða er tekið upp í rætur gróðursins (útgufun, e.transpiration; Raes o.fl. 1998).

Helsti mælikvarði á vatnafræðilegri virkni er vatnsheldni, þ.e. hversu mikið vatn skilar sér ekki sem afrennsli vegna raungufunar (e. evapotranspiration). Vatnsheldni er háð veðri og gróðri og getur því verið mjög breytileg bæði í tíma og rúmi (Bengtsson o.fl. 2005). Tafla 1 tekur saman vatnsheldni á ársgrundvelli af mismunandi útfærslum á léttum gróðurþökum. Þökin eru flest með sérhönnuðu, manngerðu drenlagi. Gróðurinn samanstendur af hnoðrum sem eru annaðhvort lagðir á þakið í mottum, bökkum eða plantað beint í jarðveg. Þökin voru annað hvort úr tilraunaverkefnum eða gróðurþök af byggingum og yfirleitt minna en 5 ára gömul. Getter ofl. (2007) færðu rök fyrir því að vatnsheldni tvöfaldaðist með tíma, þar sem þórnar urðu stærri og fínefni skoluðust út. Almennt sýndu rannsóknirnar að ráðandi hönnunarbreyta fyrir vatnsheldni er þykkt jarðvegs- og drenlaga (sjá t.d. Uhl og Schiedt 2008). Aukinn þakhalli dregur úr vatnsheldni (Getter ofl. 2007).

3 Aðferðir

3.1 Tilraunaþök

Fimm tilraunaþök voru byggð haustið 2014 í samstarfi við Þorkel

Tafla 1. Meðalvatnsheldni léttra gróðurþaka á ársgrundvelli mtt. hönnunarþátta

Staðsetning	Vatnsheldni (%)	Þakhalli (%)	Þakflötur (m ²)	Jarðvegsþykkt	Heimild
Malmö, Svíþjóð	50	2,6	4 x 1,25	3 cm	Bengtsson o.fl. 2005
New York, Bandaríkin	36, 47, 61	<2	310-940	3-10 cm	Marasco o.fl. 2013
Óðinsvé, Danmörk	47	E.G.	3 x 3	4 cm	Locatelli o.fl. 2014
Detroit, Bandaríkin	86, 76	2, 25	2,4 x 2,4	6 cm	Getter o.fl. 2007
Reykjavík, Ísland	35, 39	8	2,05 x 1,2	5 cm torf , 7 cm jarðvegur	Þessi rannsókn (úthagi)
Sheffield, Bretland	61*	E.G.	3 x 1	8 cm	Stovin o.fl. 2012
Skotland	61-77	0-26,8	12-25	5-15 cm	Uhl og Schiedt 2008
Norður Karólína, Bandaríkin	64	3	70, 27	7,5 og 10 cm	Hathaway o.fl. 2005

* Úrkomuþurðir stærri en 2 mm; E.G. = ekki gefið upp í grein.

Gunnarsson, garðyrkjustjóra Háskóla Íslands, Kristinn Kristinsson húsasmiðameistara og Þóri Arngrímsson húsasmið hjá Háskóla Íslands. Þökin voru 2,05 m löng og 1,20 m breið úr gagnvarinni furu og vatnsvörðum krossviði. 8% kjörhalli var valinn til að tryggja fullnægjandi framræslu (FLL 2014) og vatnsheldni (Getter o.fl. 2007). Tilraunaþökin voru staðsett ofan á áhaldaskúr á lóð Háskóla Íslands sem er í u.þ.b. 2-3 metra hæð frá jörðu til að koma í veg fyrir skemmdarverk og óþarfa umgang sem gæti truflað rannsóknina. 8 m háar byggingar eru í u.þ.b. 4 m og 10 m fjarlægð frá áhaldaskúrnum, og fella því skugga yfir tilraunaþökin þegar sólin er lágt á lofti. Einnig geta myndast staðbundin vindskilyrði þar sem úrkoma, vindátt og vindhraði mælist annar en ríkjandi vindátt og vindhraði vegna legu og hæð bygginga, sjá mynd 2. Þessar aðstæður voru taldar lýsa vel breytileika í borgarumhverfinu.

Við hönnun var haft að leiðarljósi halda kostnaði hæfilegum og að efnid væri auðfengið hér á landi. Þökin samanstanda af fjórum lögum:



Mynd 2 Yfirlitsmynd af tilraunaþökum á lóð Háskóla Íslands. Frá hægr: (1) Úthagi + torf; (2) Úthagi + jarðvegur; (3) Bárújárn; (4) Gras + torf; (2) Gras + jarðvegur;

Vatnsþétt lag. Neðsta lagið var vatnsvarinn krossviður.

Dren- og hlífðarlag. Sérhannaðir drendúkar fyrir gróðurþök fengust ekki hér á landi á þeim tíma þegar tilraunaþökin voru byggð. Því var útbúinn sambærilegur plastdúkur úr Plastrofoil 8 sökkuldúki með dren-götum sem voru boruð handvirkt með 4 mm breiðu skrúfjárn. Um 0,6 L af vatni geta safnast fyrir í hólf sökkuldúksins í hverju þaki (um 0,24 /m²) samkvæmt upplýsingum frá framleiðanda (Plastroform GmbH, Stuttgart, Þýskaland). Götin voru gerð á milli hólfanna, á u.þ.b. 3,3 cm millibili, þ.e. um 2260 göt/þak. Jarðvegsdúkur af gerðinni Fibertex F-20 (Fibertex Nonwovens, Álaborg, Danmörk) var lagður yfir sökkuldúknum til að fyrirbyggja útskolun á jarðveginum eða stíflun gatanna í sökkuldúknum.

Jarðvegsлаг. Annars vegar var notast við sérstaklega hannaða jarðvegsblöndu fyrir rannsóknina með vikri (45%), gjallsandi (45%) og moltu (10%). Vikurinn var fenginn frá fyrirtækinu Jarðefnaiðnaður ehf, og er upprunninn úr Heklu. Hann var valinn í blönduna til að auka rakadrægni og loftun og lágmarka þyngd hennar. Gjallsandurinn og moltan voru fengin frá fyrirtækinu Gæðamold ehf. Gjallsandurinn kemur úr fjórum á Eyrarbakka. Samkvæmt rannsóknnum sem gerðar voru á samskonar gjallsandi er kornstærðadreifing góð og lektar og vatnsheldnieiginleikar hæfilegir fyrir vaxtarlag grass (Verkfræðistofan Efla, 2009). Moltan er unnin úr grasi (50%), trjákurli (30%) og hrossaskít (20%) (Verkfræðistofan Efla, 2014). Jarðvegurinn var lagður í 7 cm, sem samsvarar meðaldýpi í erlendum rannsóknum (sjá töflu 1). Hins vegar var notast við eitt torflag á hvolfi (3 og 5 cm að þykkt, sjá lýsingu að neðan), sem vísar í gamlar hefðir á norðurlöndum.

Gróðurlag. Tvær gerðir af torfi voru fengnar frá Túnverk ehf. Úthagatorf var valið þar sem það inniheldur vanalega harðgerðar plöntur sem eru þurrkþolnar og þurfa lítið af næringarefnum. Þar að auki þarf yfirleitt ekki að slá úthagann þar sem hann inniheldur lág-vaxnar plöntur. Úthagatorfið var tekið úr landi Selalæks í Rangárþingi og eru þökurnar þykkari en grastorfið eða um 5 ± 0,5 cm. Upphaflega var sáð í landsvæðið að Selalæk þar sem að úthagatorfið var tekið um árið 1983. Jarðvegurinn á þessum slóðum er í raun ræktað land en ber þó einkenni mólendis þar sem að náttúrulegar íslenskar plöntur og mosi hafa tekið sér þar bólfestu (Gylfi Jónsson, 2015). Til samanburðar var valið sérræktað grastorf sem er bæði algengt hér á Íslandi og er einnig ódyrt og auðfengið. Grastorfið var fengið úr landi Garðsauka við Hvolsvöll, ræktað árið 2006 úr grasblöndu af vallarsveifargrasi



Mynd 3. Afrennslisöfnun af tilraunaþökum með 220L tunnum (t.v.) og 2 m háum 250x6 mm PE100 plaströrum (t.h.).

(sobra) (60%) og fjölæru rýrgresi (40%). Grastorfið er um $3 \pm 0,5$ cm þykkt með rótarlagi.

3.2 Afrennslisöfnun

Þakrennur og $\varnothing 5,0$ cm Skolan-dB plaströr leiddu afrennslisvatnið í söfnunartanka. Fyrri hluta árs tóku 220 L tunnur úr HDPE (e. High Density Polyethylene) plasti (Pit Plastics, Almelo, Holland) við vatninu. Um mitt sumar 2015 tunnur skipt út fyrir $\varnothing 250$ mm, 2 m há plaströr úr PE plastefni útbúin með áföstum botni frá Set ehf. á Selfossi, sjá mynd 3. Kranar voru settir í botninn svo unnt væri að tæma tankana eftir þörfum. Innra þvermál röranna er 238 mm, og mesta rúmtak 94 L. Með grennri söfnunarrörum minnkaði mælinákvæmni í vatnshæð afrennslisóvissu en á móti kom að minna rúmmál varð takmarkandi í stærstu úrkomuatburðunum.

3.3 Vatnshæðarmælingar

Í botni söfnunartunna/pípna var komið fyrir þrýstings- og hitamælum af gerð Levellogger Edge 3001 (Solinst, Ontario, Canada). Mælarnir voru hengdir í band þannig að þeir næmu við botn tankanna og bandið fest í áskrúfanlegt lok sem fylgdi mælunum á toppi tankanna. Til að halda mælunum stöðugum við botninn var sett 200 g þyngingarsökka á hvern mæli. Loftþrýstings- og hita mælir af gerð Barologger Edge 3001 var hengdur efst í einn tankinn. Vatnshæð var reiknuð með því að leiðrétta fyrir loftþrýstingi og hitastigsmuni í lofti og vatni með forritinu Levellogger 4.0 frá Solinst. Mælinákvæmni þessarar aðferðar

Tafla 2. Mæli- og raunskekkjur í afrennslismagni

Tímabil	Uppsetning	Innra flatarmál söfnunartanka	Mælióvissa þrýstingsmæla skv framleiðanda	Áætluð óvissa í afrennslisrúmmáli	Mestar mældar sveiflur	Raun-óvissa
Feb-Jún	220 L tunnur	2597 cm ²	$\pm 0,1$ cm	0,3 L	$\pm 2,2$ cm	< 5,8 L
Júl-Des	94 L plaströr	445 cm ²	$\pm 0,1$ cm	0,04 L	$\pm 1,5$ cm	0,7 L

er gefin sem á $\pm 0,1$ cm vatnshæð (fyrir hitastig 0°C til 50°C) frá framleiðanda. Þetta skilar sér í mismunandi óvissu eftir stærð söfnunartankanna (sjá töflu 2).

Talsverðar dægursveiflur mældust í vatnsyfirborði (sjá töflu 2). Sveiflurnar virtust tengjast hitastigi, en ekki fékkst einhlítt samband þannig að hægt væri að leiðrétta fyrir sveiflunum. Mestar sveiflur mældust um 2 cm í fyrri uppsetningunni, en að meðaltali um 1 cm.

3.4 Veður- og snjósmælingar

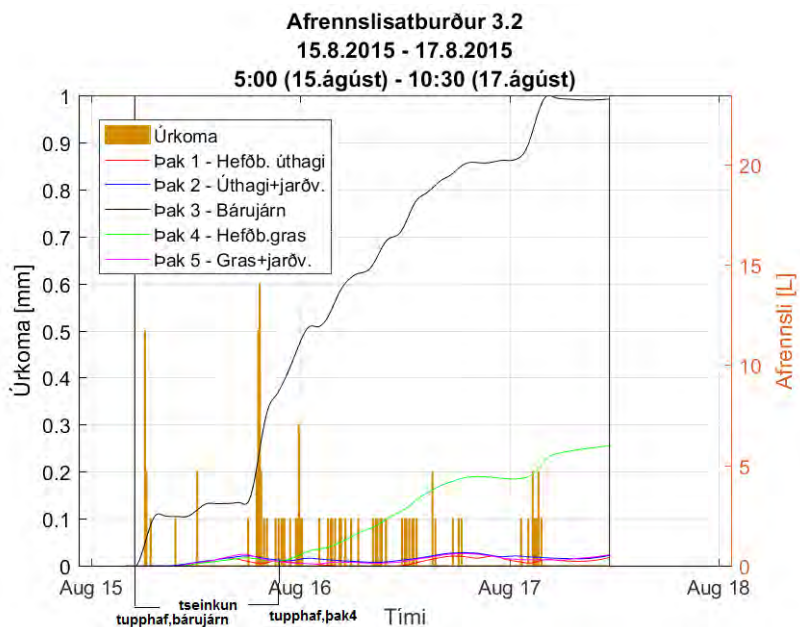
Stuðst var við tvenns konar veður- og snjósmælingar. Í fyrsta lagi var sett upp veðurstöð við tilraunaþökin (sjá mynd 1). Fyrsta stöðin var af gerðinni HOBO U30-NRC-SYS-B (Onset Computer Corporation, Massachusetts, Bandaríkjunum). Vindmælirinn skemmdist í ofsastormi þann 26. janúar 2015. Ný veðurstöð var sett upp við tilraunaþökin, 25. júní 2015, í leigu frá fyrirtækinu M&T ehf. Veðurstöðin er sjálfvirk og samanstendur af Young vindmæli, Lambrecht úrkomumæli með innbyggðu snjóbræðslutæki og Campbell CS500 loftraka og hitastigs og loftþrýstingsmæli. Til viðmiðunar, voru 10 mínútna veðurgögn fengin af Veðurstofu Íslands úr sjálfvirkri veðurstöð sem staðsett er við Bústaðaveg 7 - 9 í Reykjavík.

Á norðurslóðum getur mikið afrennslis myndast í snjóbráð eða þegar rignir á snjó. Því var snjódýpi mælt í upphafi mælitímabils á sex stöðum á hverju þaki fyrir sig og meðal snjódýpt metin út frá því. Sjónrænt mat var lagt á hve stór hluti þakanna var þakinn snjó í upphafi mælitímabilsins. Áætla má að mælinákvæmni í snjódýptinni sé upp á $\pm 0,5$

Tafla 3. Mæld dýpt (D) og áætlað hlutfall snjóþekju (H).

Mælitímabil	Aths.	Þak1: Úthagi + torf		Þak2: Úthagi + jarðv.		Þak3: Bárujárn		Þak4: Gras + torf		Þak5: Gras+jarðv.	
		D [cm]	H [%]	D [cm]	H [%]	D [cm]	H [%]	D [cm]	H [%]	D [cm]	H [%]
A2*	Í upphafi	5	100	5	100	5	100	5	100	5	100
A3	Í upphafi	4	80	4	75	3	60	4	50	3	30
A4	Í upphafi	8	100	7	100	7	100	8	100	6	100
H14	Í lok	0,2	100	0,3	100	0,2	100	0,2	100	0,3	100
H15	Í lok	29	100	30	100	27	100	28	100	29	100
H16	Í upphafi	0,1	100	0,1	100	0,3	100	0,2	100	0,1	100

Skýringar: * Metið út frá mæligögnum (ekki mælt). A(nr) = Ágúst Elí Ágústsson (2015); H(nr) = Halla Einarsdóttir (2018).



Mynd 4. Dæmi um mælingar á afrennslis af gróðurþökum (15.-17. ágúst 2015)

cm. Alls voru 6 mælitímabil með snjóþekju, þar af 4 með markverðum snjó (sjá töflu 3).

3.5 Plöntugreining

Plöntugreining var gerð á torfinu 25. október 2015 af Ágústu Helgadóttur líffræðingi og Hlyni Bárðarsyni doktor í líffræði frá Háskóla Íslands. Notast var við mælireiti af stærð 50x50 cm og gróðurþekjan metin út frá tíðni/þekju hverrar plöntugundar innan mælireitsins. Samkvæmt greiningu þeirra samanstóð úthagatorfið í þökunum fyrst og fremst af mosa (70-90%) og lítið eitt af háplöntum, þá aðallega vallarsveifgrasi (2-5%) og blávingli (4-5%). Í grastorfinu greindust hins vegar í 85-95% vallarsveifgras auk mosa í litlu magni (2-10%). Gróðurþekjan var mikil og lítið um bera mold, bæði á grasþökunum og úthagunum.

3.6 Skilgreining afrennslisatburða

Rúmmál afrennslis (V) var reiknað sem margfeldi vatnshæðarbreytingu og innra flatarmáls röranna (Ar). Hátíðni flökt í mældri vatnshæð var síað með fallinu loess í Matlab miðað við þröskuld 0,7. Rúmmál úrkomu var reiknað sem margfeldi mældrar úrkomu (P) og flatarmáli þakanna ($A_p = 2,46 \text{ m}^2$). Tímaraðir af uppsöfnuðu afrennslisrúmmáli, $V(t)$, frá mismunandi þökum yfir sama úrkomuatburð eru sýndar á mynd 4. Súlnar gefa til kynna mælda 10 mín úrkomu.

Afrennslis var skilgreint ef vatnsyfirborð í rörinum eftir síun hækkaði um 0,1 cm/klst, sem samsvarar mælinákvæmni þrýstingsmæla (sjá töflu 2). Þegar lítið afrennslis var mælt af þökum og þá fóru mæliskekkiur að skipta meiri máli. Með eldri uppsetningunni (220 L tunnur) voru atburðir þar sem að afrennslis af bárujárninu (sjá töflu 2) mældist undir 6 L ekki teknir með en eftir að uppsetningunni var miðað við 1 L í afrennslis af bárujárninu. Alls verða kynntar niðurstöður frá 52 atburðum yfir tímabilið febrúar til desember 2015.

3.7 Mat á vatnafræðilegri virkni

3.7.1 Vatnsheldni

Varanleg vatnsheldni (e. water retention) er það hlutfall heildarákomu (regn og snjór) sem skilar sér ekki sem afrennsli, reiknuð fyrir hvern atburð sem (Hathaway o.fl. 2008).

$$VH [\%] = \left[1 - \frac{V[L]}{P[L]} \right] \times 100 \quad (1)$$

Á mynd 4 sést að afrennsli af bárujárnsþaki (svört lína) helst vel í hendur við úrkomu. Þess vegna var vatnsheldni reiknuð líka sem hlutfall afrennsli af gróður- og ógegndræpu bárujárnsþaki. Þar sem var snjóeiginleikar voru nokkuð jafnir yfir þökin (sjá töflu 3) var hægt að sleppa leiðréttingum vegna snjóbráðunar (þ.e.a.s. snjódýpi og eðlis-massa snjós). Gott samræmi fékkst á milli vatnsheldni reiknaða sem hlutfall af ákomu og vatnsheldni í hlutfalli við afrennsli af bárujárnsþaki yfir lengri tímabil. Hins vegar gat verið töluverður munur í einstaka atburðum með miklum vindi. Í þessari grein eru eingöngu sýndar niðurstöður á vatnsheldni sem hlutfall af afrennsli af bárujárnsþaki, því það mat er talið nákvæmara. Vegna óútskýrða sveiflna í gömlu uppsetningunni (sjá töflu 2) var vatnsheldni einstaka atburða einungis reiknuð í nákvæmari uppsetningunni.

3.7.2 Seinkun afrennslis

Auk varanlegrar vatnsheldni myndast *tímabundin vatnsheldni* (e. detention) í upphafi atburða þar til jarðvegurinn nær metnun og afrennsli hefst. Seinkunin ræðst af hversu ákøf úrkoman er (e. rainfall intensity distribution) og eðliseiginleikum þaksins s.s. þykkt, halla, stærð holrýma í jarðvegi ofl. (Locatelli, o.fl., 2014). Mælikvarði á tímabundinni vatnsheldni er upphafsseinkun ($t_{seinkun}$) skilgreind sem tíminn sem liður frá því að úrkoma hefst (t_{upphaf}), þangað til að regn skilar sér sem afrennsli af þaki ($t_{upphaf,þakX}$ sjá mynd 4), þ.e.

$$t_{seinkun,þakX} = t_{upphaf,þakX} - t_{upphaf} \quad (2)$$

Einnig var reiknuð seinkun á massamiðju afrennslis af gróðurþökum í samanburði við bárujárnsþak. Massamiðja afrennslis t_{cm} er skilgreind sem sú tímasetning þegar 50% heildarafrennslisins sem mælist í hverjum afrennslisatburði hefur runnið af þökunum, þ.e.

$$t_{cm} = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{\sum Q_i} \quad (3)$$

Q_i stendur fyrir rúmmál afrennslis í hverju tímaskrefi í L/mín, og t_i er tímasetning á hverju tímaskrefi.

3.7.3 Lækkun afrennslistoppa

Að lokum, til þess að leggja mat á álag á fráveitukerfin og minnkun flóða, þá er notast við *lækkun afrennslistoppa stuðul* K_p sem er skilgreindur sem hlutfall hámarksútlæði [$Q_{max} = L/mín$] tiltekens gróðurþaks X (e. peak effluent) af hámarksinnflæði (e. peak influent)

$$K_p = 1 - \frac{Q_{max,þakX}}{Q_{max,innflæði}} \quad (4)$$

Í þessari rannsókn var miðað við 10 mínútna hámrörk, sem samsvarar stysta samrennslistíma í hönnun fráveitukerfa á Íslandi og mestu upplausn í úrkomumælingum. Í stað innrennslis var notast við afrennsli af bárujárnsþaki, sem lýsir þá hversu mikið gróðurþak miðlar flóðtoppum í samræmi við hefðbundin ógegndræp þök.

4 Niðurstöður og umræður

4.1 Árstíðabundin vatnsheldni

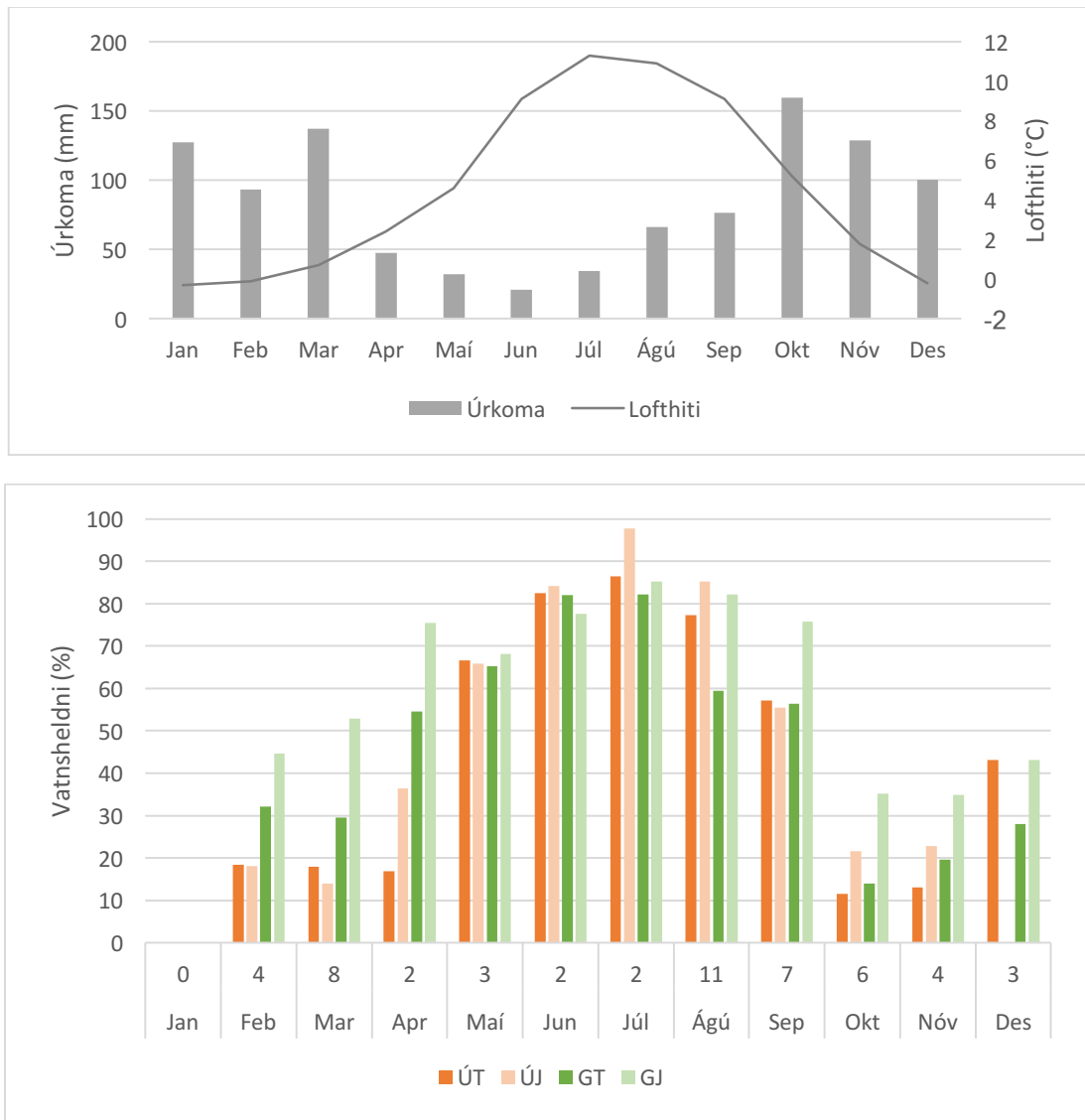
Á rannsóknatímabilinu febrúar til desember 2015 reyndist kleift að greina 52 staka afrennslisatburði. Vatnsheldni hvers mánaðar ársins 2015 var reiknuð út frá samanlögðu afrennsli af gróðurþökum frá öllum atburðum innan hvers mánaðar í hlutfalli við samanlagt afrennsli frá bárujárnsþaki. Mynd 5 sýnir mánaðarmeðaltölin samhliða mælingum á lofthita og úrkomu á frá Veðurstofu Íslands. Vetrarmánuðirnir framan af á árinu voru umhleyplingsamir, og einkenndust af miklum stormum með snjókomu og vindi. Mánuðirnir maí til júlí voru hins vegar þurrir. Vatnsheldnin fylgdi öfugri árstíðasveiflu miðað við úrkomu og lofthita. Mest vatnsheldni mældist í þurrasta og heitasta tímabilinu, eða að meðaltali 85% fyrir öll þökin í júní og júlí. Haustið var úrkomusamt, sér í lagi október mánuður þar sem rigndi alla daga nema einn og heildarúrkoman var 86% meiri en meðal októbermánaðar samkvæmt Veðurstofu Íslands. Í þessum mánuði var vatnsheldnin milli 12-35%, og hélt nokkuð óbreytt fram í desember.

Á ársgrundvelli héldu íslensku gróðurþökum um 35-39% af heildarákomu (regn og snjór) í mældum afrennslisatburðum. Þetta virðist vera í lægri kantinum miðað við erlendar rannsóknir með 5-8 cm þykku jarðvegslagi (sjá töflu 1). Hluti af þessum mun getur legið í mæliaðferðum, þar sem vatnsheldni var einungis reiknuð fyrir markverða úrkomuatburði í þessari rannsókn meðan aðrar rannsóknir mæla samfelt yfir allt mælitímabilið, og innihalda þannig úrkomu sem gefa ekki af sér afrennsli.

Til þess að skilja betur þennan mun á vatnsheldni, þá skoðum við betur árstíðasveiflur í vatnsheldni á úthagapökunum við 6 kassa- og þríhyrningslaga hnoðraþök með 5-8 cm þykku jarðvegslagi og 0-26,8% halla í Skotlandi (Uhl og Schiedt 2008). Lækkun afrennslis þessara sex þaka var mun hærri en í okkar rannsókn, eða 61-69% á ársgrundvelli, en var mjög breytileg allt frá 0 - 100% eftir atburðum (tafla 4). Vatnsheldnin á sumrin var mjög sambærileg í báðum löndum, en vatnsheldnin á veturna mældist töluvert lægri á Íslandi. Sama niðurstaða fæst ef borið er saman við danska rannsókn af hnoðra þaki með 4 cm þykkum jarðvegi (Locatelli o.fl. 2014), þar mældist 35% vatnsheldni yfir vetrartímamann (nóvember til mars) sem er hærri en mældist í okkar rannsókn, meðan hún var sambærileg, í kringum 53%, að sumri (apríl til október).

4.2 Breytileiki milli atburða

Meðan sterk árstíðasveifla greindist í mælingum, var dreifni vatnsheldni fyrir hvern og einn afrennslisatburð mikil. Rannsóknir sýna að vatnsheldni gróðurþaka hverju sinni er háð úrkomumagni, rakastigi jarðvegsins fyrir úrkomuatburð og jarðvegsgerð (þykkt jarðlaga, halla, jarðvegs og gróðurefni ofl.). Hraði raungufunar ræðst meðal annars af því hversu langt þurrkatímabil hefur verið fyrir úrkomuatburðinn (e. antecedent dry weather period), hitastigmuni á jarðvegi og andrúmslofti og vindhraða (Stovin o.fl. 2012). Línuleg aðfallsgreining var framkvæmd við margvíslega veðurþætti í aðdraganda og á meðan á atburði stóð. Marktæk ($R^2 > 0,3$; $p < 0,05$) línuleg vensl greindust milli vatnsheldni og nokkurra veðurþátta sem samræmdust fræðunum (sjá töflu 5). Minni vatnsheldni greindist eftir því sem úrkoman yfir atburð og 14 daga fyrir atburð var meiri. Hærri lofthiti og meiri vindhraði stuðluðu að meiri vatnsheldni, sem samræmist meiri raungufun. Með margvíðri línulegri greiningu þessara veðurþátta og vatnsheldni var dreifnin sambærileg og í einvíðri línulegri aðfallsgreiningunni sem gefur til kynna að aðrir þættir en þeir veðurþættir sem voru til skoðunar hafi áhrif á vatnsheldnina eða að venslin séu ekki línuleg.



Mynd 5: a) Mánaðarlofthiti, regn (gögn frá Veðurstofu Íslands) og b) vatnsheldni árið 2015. Tölur á lárétta ás merkja fjölda greindra afrennslisatburða innan hvers mánuðar.

4.3 Áhrif gróðurs og undirlags á vatnsheldni

Í þessari rannsókn voru tvær gróðurþekjur prófaðar, annars vegar gras og hins vegar mosavaxinn úthag. Við fyrstu sýn virðist ysta grasþakið með jarðvegsundirlagi (Þak 5) vera með mestu vatnsheldnina (sjá GJ mynd 5b). Síðari mælingar á rigningu við hvert þak leiddu í ljós að í miklum vindi þá féll 10-20% minna regn á þetta ysta þak, sem skýrir að hluta þennan mun.

Að meðaltali mældist svipuð vatnsheldni hjá báðum þökum með úthaga gróðri (sjá mynd 5). Því má álykta að 7 cm sérhannað jarðvegslag gefi sambærilega (eða örlítið hærri) vatnsheldni á fyrsta rekstrarári og 5 cm úthaga torf á hvolfi. Að sama skapi virðist vatnsheldni beggja grasþakanna vera sambærileg ef leiðrétt er fyrir minni úrkomu á ysta þakinu. Nánari athugun á vatnsheldni minni úrkomuatburða leiðir hins vegar í ljós að grasþak með 3 cm torfi á hvolfi hefur minni vatnsrýmd en 7 cm þykkt jarðvegslag (sjá mynd 4): Um miðjan ágúst mældist um 2 mm afrennslis af grasþaki með torfi undir í 8 mm úrkomu. Vatnsrýmd þaksins var þá um 6 mm. Á meðan mældist ekkert afrennslis af hinum gróðurþökunum, þannig að vatnsrýmd þeirri var meiri en úrkoman, eða >8 mm.

Þrátt fyrir minni vatnsrýmd hins 3 cm þykka grastorflags á hvolfi, mældist samsvarandi vatnsheldni milli gras og úthaga (sjá GJ, mynd 5b). Í byrjun vaxtartímabilsins í apríl var vatnsheldni beggja grasþakanna mun hærri en úthagans. Báðar þessar athuganir styðja því við tilgátuna að venjulegt nytjagras dragi í sig meira vatn en úthaginn, sem

samanstóð að mestu leyti af mosa. Mosi hefur ekki eiginlegar rætur, ólíkt grösom og öðrum háplöntum, heldur eingöngu svokallaða rætinga og upptaka vatns því að nær öllu leyti af yfirborðinu.

Sú aðferð að leggja torf á hvolfi, sem undirlag/rótarlag gróðurþekju, er nokkuð algeng, m.a. þar sem torfið er yfirleitt auðfengið og ódýrara en sérblandaður jarðvegur. Hins vegar fylgja yfirleitt ýmsir ókostir notkun torfs sem rótarlags, m.a. minna álagsþol, heilbrigði, þurrkþol og þ.a.l. styttri endingartími, eins og verður rætt betur síðar.

4.4 Seinkun afrennslis

Seinkun afrennslis var metin fyrir atburði í nýju, og nákvæmari uppsetningunni (sjá töflu 6). Niðurstöður gefa til kynna 1-3 klst seinkun á upphafi og massamiðju afrennslis gróðurþaka í samanburði við bárujárnþak. Seinkunin fór lækkanði þegar líða tók á haustið. Í desember byrjaði afrennslis af gróðurþökum á undan bárujárni og skilaði sér fyrr ($t_{\text{upphaf}} - t_{\text{cm}} < 0$). Mögulegt er að snjóþekja hafi runnið fram af bárujárnþaki og þannig ekki skilað sér í þakrennu. Upphafs- og massamiðju seinkun í þessari rannsókn mældist á stærðargráðu klukkutíma (sjá töflu 6), sem er töluvert lengra en hálf tíma upphafseinkun í öðrum rannsóknum af léttum gróðurþökum (Hathaway ofl. 2005; Stovin ofl. 2014). Þessi munur má skýra að einhverju leyti með tímabreytileika úrkomu á Íslandi, en hér rignir vægt og lengi. Þannig tekur lengri tíma að fylla pórurnar í jarðveginum, til þess að afrennslis hefist.



Mynd 6: Gróðurþekja 4. október 2015: a) Úthagi með jarðvegsblöndu í undirlagi (þak 2), b) gras með torfi í undirlagi (þak 4) og c) gras með jarðvegsblöndu í undirlagi (þak 5).

4.5 Lækkun afrennslistoppa

Lækkun hámarks 10 mínútna afrennslis gróðurþaka í hverjum atburði er veruleg í samanburði við bárujárn (sjá töflu 7), eða að meðaltali 0,7 yfir allt tímabilið fyrir þök með torfi sem undirlag, og aðeins hærrí eða 0,8 fyrir þök með jarðvegsundirlagi. Þessar niðurstöður eru í góðu samræmi við Hathaway ofl. (2005) sem mældu um 75% lækkun. Niðurstöðurnar gefa til kynna að gróðurþökin draga úr álagstoppum í, en í stærstu úrkomuatburðinum lækka topparnir lítið. Það er því varlegt að treysta á að gróðurþök minnki álag á frárennsliskerfin í stórum úrkomuatburðum.

4.6 Ásýnd gróðurs

Eins og kom fram í inngangi greinarinnar, þá skiptir náttúruleg ásýnd máli fyrir vellíðan borgarbúa. Fólk líður vel með fallegan gróður í kringum sig. Bæði úthagapökkin litu vel út allt árið um kring, voru með jafnri áferð, og engum sjáanlegum skemmdum (mynd 6a). Grasþökin, hins vegar, litu mjög illa út eftir þurrka vorsins (í apríl – júní) og var gróðurinn lengi að taka við sér. Sér í lagi drapst mikið af gróðri í grasþakinu með 3 cm þykku torfi í undirlagi. Jafnvel eftir sumarið og aukna

úrkomu, þá voru stórir þurrkablettir og gróðurinn mjög misleitur í því þaki (mynd 6b). Um veturinn leit þetta þak illa út, og pollar mynduðust í dældum í grassverðinum. Grasið yfir 7 cm þykku jarðvegslagi (mynd 6c) var mun jafnara en þó ekki eins þétt eins og mosi úthagatorfsins. Af þessu er ályktað að gras sé ekki eins gott hvað varðar ásýnd gróðurþaka og úthaginn.

Það tíðkast stundum að setja tvöfalt lag af grastorfi á hvolfi sem undirlag á Íslandi. Meðan það myndi tvöfalda vatnsrýmdina, og þar með stuðla að meiri vatnsheldni, þá eykur það ekki rými rótarkerfis. Yfirleitt er þéttleiki torflags það mikill að hann hamlar rótarvöxt og fær eða engar rætur vaxa í gegnum fyrri torflagið. Þurrkþol grassins er þar af leiðandi álíka takmarkað og þegar um eitt torflag er að ræða. Á þeim forsendum er ekki mælt með slíkri lausn.

4.7 Rekstur og viðhald

Þættir sem geta leitt til þess að þak leki með tíma eru t.d. gallar í frágangi vatnsþéttlagins, lélegt viðhald niðurfalla og heft afrennslis t.d. með háum þakkanti. Hægt er að fylgjast með heifðbundnum þökum og þar verða vandamálin oft sýnilegri, sem einfaldar viðhaldsðgerðir.

Tafla 4. Samanburður á rannsóknum á árstíðabundinni vatnsheldni léttu gróðurþaka.

Árstíð	Skosk hnoðrapök		Reykvísk úthagapök *	
	VH (%)	P (mm)	VH (%)	P (mm)
Sumar (maí-september)	70-76	405±38	72-75	166
Vor og haust (15. mars – apríl; október – 15. nóvember)	49-64	150±35	12-20	194
Vetur (15. nóvember – 15. mars)	43-56	137±6	22-17	111

* Atburðir sem gáfu af sér > 1 mm afrennslis. VH = vatnsheldni, P = heildarúrcoma tímabils.

Tafla 5. Fylgni og marktæknistuðlar fyrir einvíða aðfallsgreiningu vatnsheldni og veðurþátta

Veðurþáttur	Júní til desember		Allt mælitímabilið	
	R ²	p	R ²	p
Úrkoma innan atburðar	-0,5 til -0,3	< 0,06	-0,4 til -0,3	< 0,03
Lofthiti (fyrir og) innan atburðar	0,5 til 0,8	0,00	0,5 til 0,8	0,00
Úrkoma 14 daga fyrir atburð	-0,5 til -0,4	< 0,02	-0,5 til -0,3	< 0,11
Vindhraði 7 daga fyrir atburð	-0,5 til -0,3	< 0,05	-0,5 til -0,3*	< 0,02

* mv. veðurstöð VÍ

Tafla 6. Seinkun á upphafi og massamiðju afrennslis.

	Δt_{upphaf} (klst)				Δt_{cm} (klst)			
	Þak2: Úthagi+jarðv.		Þak5: Gras+jarðv.		Þak2: Úthagi+jarðv.		Þak5: Gras+jarðv.	
	M	Std	M	Std	M	Std	M	Std
Ágúst	3	4	2	2	3	1	1	4
Sept	3	3	2	2	3	4	4	7
Okt	3	4	2	1	2	2	2	2
Nóv	2	3	1	1	1	1	1	1
Des			-2	1			-1	1

Skýring: M = meðaltal; STD = staðalfrávik

En með gróðurþök getur gallinn verið falinn undir gróðurþekjunni sem leiðir til að fjarlægja þarf stærra hluta þaks ef vandamál kemur upp. Því er mikilvægt að huga sérstaklega vel að frágangi og rekstri gróðurþaka, og einkum þegar þakhalli er lítill og vatn getur legið lengi í dældum.

Pýskar leiðbeiningar um uppsetningu og umhirðu gróðurþaka (FLL 2014) ráðleggja að slá grasþök til að lágmarka eldhættu. Tekin var ákvörðun að slá grasið ekki á meðan á þessari rannsókn stóð. Hins vegar er ljóst að minni þörf hefði verið að slá úthagatorfið því það var með færri háplöntur en grastorfið (sjá mynd 6). Að sama skapi var engin þörf á að vökva úthagapökina sem litu vel út allt árið um kring. Grasþökin hefðu þurft að fá vökvun sérstaklega í þurrkatímabilinu um vorið til að fyrirbyggja að grasið dræpist sbr. kaflann að framan. Meðan það er hægt að koma fyrir léttum vökvunarþúnaði, er betra að komast hjá því. Út frá sjónarmiðum sláttar og vökvunar, þá kom úthaginn betur út en grasið í þessari rannsókn.

Áburður er stundum borinn á þök til að viðhalda gróðurvexti, en þó ekki oft en tvisvar sinnum á ári (FLL 2014). Engin áburður var borinn á þökin í þessari rannsókn. Hafa skal í huga að bera spart af næringarefnum sérstaklega á létt gróðurþök, því þau síast hratt í gegnum jarðveginn og endaða stórum hluta í næsta viðtaka. Næringarefnauaðgun í viðtaka er áhyggjuefni í mörgum nágrennalöndum Íslands.

5 Lokaorð

Í þessari rannsókn var lagt mat á vatnafræðilega virkni á fjórum útfærslum af léttum gróðurþökum á Íslandi, með tveimur tegundum af torfi (mosavöxnum úthaga og grastorfi) og tvenns konar undirlagi (jarðvegsblöndu og torfi á hvolfi). Almenn samræmdust niðurstöður erlendum rannsóknum. Hæst vatnsheldni mældist í mesta þurrkatímabilinu um hásumar, og var hún þá um 85%. Vatnsheldnin var lægri í köldum vetrarmánuðum (<20%) sem virðist vera í lægri kantinum miðað við sambærileg þök í Skotlandi og Danmörku. Gróðurþök seinkuðu að meðaltali afrennslu um rúman klukkutíma, og lækkuðu 10 mín

Tafla 7. Lækkun afrennslistoppa Kp ($Q_{max,10min}$).

	Þak1: Úthagi + torf		Þak2: Úthagi +jarðv		Þak4: Gras + torf		Þak5: Gras+jarðv.	
	M	Std	M	Std	M	Std	M	Std
Ágúst	0,85	0,15	0,92	0,07	0,79	0,27	0,91	0,10
Sept	0,59	0,19	0,68	0,15	0,67	0,13	0,70	0,28
Okt	0,31	0,27	0,50	0,27	0,19	0,42	0,40	0,38
Nóv	0,55	0,21	0,64	0,21	0,58	0,16	0,73	0,15
Des	0,42	0,01	-	-	0,52	0,05	0,60	0,10

Skýring: M = meðaltal; STD = staðalfrávik

hámarksafrennsli um að meðaltali 70% í samanburði við hefðbundin bárujárnsþök. Því er ekki önnur ástæða að ætla að ef gróðurþök eru vel byggð og reglulega viðhaldið að þau muni sýna sambærilega vatnafræðilega virkni og erlendis, nema kannski á veturnar. Frekari rannsóknir á vetrarvirkni eru nauðsynlegar.

Erlendis er lögð áhersla á að halli sé nægjanlegur og að drenlag sé til staðar til að koma í veg fyrir að jarðvegurinn verði vatnsósa sem skemmi gróðurinn. Að sama skapi má halli ekki vera svo mikill að gróðurinn losni og renni af þakinu. Þykkt jarðvegslags er að jafnaði sá hönnunarþáttur sem ákvarðar mest vatnafræðilega virkni léttra gróðurþaka. Mosagróinn úthagi með 5-7 cm þykku undirlagi stóð sig vel bæði vatna- og fagurfræðilega allt árið um kring án nokkurs viðhalds í þessari rannsókn. Hins vegar fleytti 3 cm þykkt lag af torfi á hvolfi ekki grasi í gegnum 2-3 vikna þurrkatímabil í Reykjavík, grassvörðurinn skemmdist og leit lengi illa út. Af þessu er dregin sú ályktun að 3 cm jarðvegslag sé of lítið fyrir Ísland, mælt er með amk. 7 cm. Einnig er mikilvægt að velja þurrkþolnar gróðurtegundir, t.d. villtan gróður af vel drenandi jarðvegi. Einnig mætti nýta sérræktaðar þurrkþolnar tegundir, m.a. gras- og blómplöntur. Fordast beri grófgerðar og hávaxnar tegundir sem hafa lítið þurrkþol, og krefjast meiri vatnsgeymslu eða vökvunar. Létt gróðurþök eru skilgreind sem

Meðan rannsóknin gaf til kynna að notkun torfs á hvolfi sem rótarlag leiði til sambærilegrar vatnsheldni og jafn þykkur jarðvegur, þá vege minnkað álagþol, heilbrigði, þurrkþol og þ.a.l. styttri endingartími á móti. Þessi rannsókn náði yfir eitt gróðurþak eitt eftir að þakið var byggt. Ekki er hægt að álykta þannig um langvarandi virkni sem ræðst af mörgum þáttum, bæði gæði upprunalegu hönnunar og uppsetningu, svo og viðhalds þakanna.

Að lokum, létt gróðurþök eru þunn og hafa því takmarkaða vatnsrymd í samanburði við aðrar blágrænar ofanvatnslausnir. Rannsóknin leiddi í ljós að vatnsheldni og lækkun úrkomutopps innan hvers atburðar sé mest háð úrkomumagni, þeim mun meiri sem úrkomar er bæði innan atburðar og fyrir atburð, þeim mun lægri virkni. Því er ekki hægt að treysta á létt gróðurþök ein og sér til þess að minnka flóðavanda í þéttbýli, til þarf mismunandi lausnir með mismunandi eiginleika. En gróðurþök þjóna mikilvægu hlutverki að dreifa álagi og tímasetningum á minni flóðtoppum.

Þakkir

Verkefnið hlaut fjárhagslegan stuðning frá Rannsóknasjóði Háskóla Íslands. Byggingardeild Háskóla Íslands byggði tilraunaaðstöðuna undir handleiðslu Þorkels Gunnarssonar garðyrkjustjóra. Vilhjálmur Ívar Sigurjónsson tækniamaður hjá verkfræði og náttúruvísindasviði Háskóla Íslands veitti ráðgjöf og hjálpaði við mælingar. Hlyni Bárðarsyni doktor í líffræði og Ágústu Helgadóttur líffræðingi er þakkað fyrir að mæla gróður þakanna. MogT og Veðurstofa Íslands fá þakki fyrir hjálp við öflun veðurgagna. Halldóra Hreggviðsdóttir, framkvæmdastjóri Alta ehf. fær þakki fyrir endurgjöf á inntak rannsóknarinnar, en hún var prófdómari á báðum meistarverkefnum sem greinin byggir á.

Heimildir

- Ágúst Elí Ágústsson (2015). Græn þök á Íslandi. MS ritgerð. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Alta ehf (2016). Blágrænar ofanvatnslausnir - inleiðing við íslenskar aðstæður. Reykjavík: Alta.
- Ampim, P. A., Sloan, J. J., Cabrera, R. I., Harp, D. A., og Jaber, F. H. (2010). Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties. *Journal of Environmental Horticulture*, 28(4), 244-252.
- Bengtsson, L., Grahn, L., og Olsson, J. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology*, 36(3), 259-268.
- Berglind Orradóttir, Ólafur Arnalds og Jóhann Þórsson. (2006). Ísig vatns í jarðveg: Áhrif gróðurs og frosts. Reykjavík: Fræðingur landbúnaðarins.
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., og Bengtsson, L. (2006). The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355, 48-63.
- FLL (2014). Guidelines for the planning, Construction, and Maintenance of Green Roofing. Green Roofing Guideline. Germany.
- Dunnett, N. (2006). Roofs for Biodiversity: Reconciling Aesthetics with. *Fourth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*, Boston 11-12 maí 2006.
- Eyrún Pétursdóttir (2016). Key Factors for the Implementation of Sustainable Drainage Systems in Iceland. MS ritgerð. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., og Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological engineering*, 31, 225-231.
- Halla Einarsdóttir (2018). Árstíðabundin virkni grænna þaka á Íslandi. MS ritgerð. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Hathaway, A. M., Hunt, W. F., & Jennings, G. D. (2008). A Field Study of Green Roof Hydrologic and Water Quality Performance. *Transactions of the*

- ASABE. 51(1), 37-44. doi:10.13031/2013.24225
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P., K.Arnberg-Nielsen, Jensen, M. B., og Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications. *Journal of Hydrology*, 519, 3237-3248. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.10.030
- Magill, J. D., Midden, K., Groninger, J., og Therrell, M. (2011). A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future research. Illinois: Southern Illinois University Carbondale. Sótt frá <http://opensiuc.lib.siu.edu/gsrp/91>
- Raes, D., Pereira, L. S., Smith, M., og Allen, G. R. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Houle, J. J., Avellaneda, P., Briggs, J., Fowler, G., og Wildey, R. (2009). Seasonal Performance Variations for Storm-Water Management Systems in Cold Climate Conditions. *J. Environ Engineer*, 135(3), 128-137. doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128)
- RRPDC. (2012). Richmond Regional Planning District Commission / Richmond Area. Sótt frá http://www.richmondregional.org/planning/Stormwater/green_roof.htm
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.022
- Uhl, M., og Schiedt, L. (2008). Green Roof Storm Water Retention - Monitoring Results. *11th International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh.
- Verkfræðistofan Efla (2009). Kornastærðardreifing: Sýni 1 (Eyrarbakki). Óútgefin Skýrsla.
- Verkfræðistofan Efla (2014). Molta - efniseiginleikar. Óútgefin Skýrsla

