

<https://doi.org/10.33112/ije.25.5>

Áhrif loftlagsbreytinga á vatnsveitur og vatnsgæði á Íslandi – áhættuþættir og aðgerðir

María J. Gunnarsdóttir^a, Sigurður Magnús Garðarsson^a,
Hrund Ó. Andradóttir^a, Alfreð Schiöth^b

^aVatnaverkfræðistofa, Umhverfis- og byggingarverkfræði, Háskóli Íslands,
Hjarðarhaga 6, 107 Reykjavík.

^bHeilbrigðiseftirlit Norðurlands eystra.

Fyrirspurnir // Correspondance

María J. Gunnarsdóttir

mariag@hi.is

Greinin barst 12. september 2019.

Samþykkt til birtingar 18. desember 2019.

Ágrip

Loftlagsbreytingar munu hafa áhrif á vatnsveitur og vatnsgæði með ýmsum hætti. Það eru fyrst og fremst þrjú veðurtengdir þættir sem hafa áhrif: hærri lofthiti; hækkun á sjávarstöðu; og svæðisbundnar árstíðarbundnar breytingar á úrkomu í bæði magni og ákafa. Í þessari rannsókn voru rýndar erlendar og íslenskar greinar og skýrslur um áhrif loftslagsbreytinga á vatnsauðlindina með áherslu á norðurlóðir. Gerð var greining á ýmsum áhættuþáttum er varðar gæði neysluvatns með greiningu á gögnum úr reglulegu eftirliti heilbrigðiseftirlita landsins með vatnsveitum og vatnsgæðum. Einnig var gert gróft hættumat á að skriðuföll eða flóð eyðilegðu vatnsból á eftirlitssvæði Heilbrigðiseftirlits Norðurlands eystra. Helstu niðurstöðurnar eru þær að loftlagsbreytingar auka hættu á truflun á rekstri vatnsveitna og á mengun neysluvatns. Á eftirlitssvæði Norðurlands eystra eru meira en helmingur vatnsbóla í hættu á skemmdum vegna skriðufalla og á 5% vatnsbóla er skriðuhættan mikil, en flóðahætta er lítil á öllu svæðinu. Hættan er mjög mismunandi eftir landssvæðum og er almennt séð meiri hjá minni vatnsveitum. Í lokin eru settar fram tillögur byggðar á greiningunni um nauðsynlegar aðgerðir til að bregðast við áhættuþáttunum.

Lykilorð: Loftlagsbreytingar, vatnsveitur, neysluvatnsgæði, skriðuhætta, áhættugreining.

Abstract

Climate change is expected to have impact on water supply and drinking water quality in Iceland. Foremost there are three influential weather-related factors; increase in temperature; rise in sea level; and seasonal and regional change in precipitation in both quantity and intensity. In this study international and local reports and articles were analyzed for expected impact on the water resource with emphasis on the northern and the arctic region. Water quality risk factors were analyzed based on surveillance data of the water supplies from the Local Competent Authorities. Preliminary risk

assessment of landslides and flooding was performed in one surveillance area in northern Iceland. The results show that climate change has impact on water supply and drinking water quality and in one surveillance area more than half of water intakes are in risk of landslides and thereof 5% severe risk, but few had a risk of flooding. The risk is different between areas in Iceland and the risk is also generally higher at small water supplies. Finally, some preventive actions based on the analysis are set forth.

Keywords: *Climate change, water supply, drinking water quality, landslides, risk assessment.*

Inngangur

Hitastig á jörðinni hefur hækkað um 1°C síðan fyrir iðnbyltinguna og mun líklega ná 1.5°C hækkun 2030 til 2052 ef loftslagsbreytingar halda áfram á sama hraða samkvæmt niðurstöðum Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsmál (IPCC, 2018). Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á lýðheilsu með ýmsum hætti, m.a. valdið aukingu á vatnsbornum hópsýkingum (IPCC 2014, IPCC 2018, Roffey o.fl., 2014). Hreint neysluvatn er undirstaða góðrar lýðheilsu. Sameinuðu þjóðirnar samþykktu árið 2010 að rétturinn til aðgengis að heilnæmu og nægu vatni væru mannréttindi og hreint vatn væri forsenda þess að geta lifað mannsæmandi lífi (Resolution/64/292). Eitt af af sautján heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna frá 2015, markmið nr. 6, segir að tryggja eigi aðgengi allra að hreinu vatni fyrir árið 2030 (Resolution/71/313). Mörg önnur markmið varða heilnæmi vatns eins og nr. 3 um heilsu og vellíðan þar sem fækka á veikindum m.a. vegna mengaðs vatns. Tilskipun Evrópusambandsins um neysluvatn frá 1998 er nú til endurskoðunar m.a. til að uppfylla heimsmarkmiðin. Til að minnka kolefnisfótspor neysluvatns, og sporna við loftslagsbreytingum, er m.a. stefnt að því að minnka notkun flöskuvatns og bæta orðspor og aðgengi að kranavatni.

Þrív veðurtengdir þættir hafa áhrif á forða og gæði vatnsauðlindarinnar: Hærrí lofthiti, hækkun á sjávarstöðu og svæðisbundnar breytingar á úrkomu bæði í magni og ákafa (IPCC, 2014; Jiménez Cisneros o.fl., 2014). Hækkun hitastigs mun leiða til þess að óvenjulegt veðurfar verður algengara, svo sem meiri úrkoma á sumum svæðum sem eykur vatnsforða á meðan á öðrum verða meiri þurrkar og þar með vatnsskortur (IPCCA, 2018; Taylor o.fl., 2012). Veðuröfgar hafa aukist síðan 1950 og það eykur hættu á flóðum og hækkandi hiti minnkar sífrera sem eykur líkur á skriðuföllum í fjalllendi, sem geta m.a. valdið skemmdum á vatnsbólum og mannvirkjum vatnsveitna (Seneviate o.fl., 2012; Kellerer-Pirklbauer o.fl., 2012). Á norðlægum slóðum er spáð aukinni úrkomu á ársgrundvelli (IPCC, 2018). Í Noregi hefur meðalúrcoma t.a.m. aukist um 20% á síðustu hundrað árum, og ákafir rigningaskúrir og skriðuföll hafa aukist umtalsvert (Hanssen-Bauer o.fl., 2009). Loftslagsbreytingar í norður Finnlandi eru taldar valda minni snjóalögum, bráðnun á sífrera og aukingu í flóðum á vetrum sem er talið geta rýrt vatnsgæði í viðkvæmum vatnshlotum (Okkonen o.fl. 2010).

Íslenska reglugerðin um neysluvatns, sem var sett árið 2001 (nr. 536/2001) í samræmi við nógildandi EB tilskipun, er nú til endurskoðunar á vegum Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytisins. Í dag er lítil þekking innanlands á áhrifum loftslagsbreytinga á vatnsból og veitur. Markmið þessarar rannsóknar var að greina helstu áhættuþætti íslenskra vatnsveitna vegna hnattrænna loftslagsbreytinga og gera tillögur um aðgerðir til að stuðla að áframhaldandi afhendingu heilnæms neysluvatns.

Aðferðarfræði

Þessi grein byggir á rýni á skýrslum og greinum um áhrif loftslagsbreytinga. Rýndar voru erlendar greinar um áhrif loftslagsbreytinga á vatnsauðlindina, með áherslu á norðurslóðir þar sem loftslag, aðstæður, tækni og lagaumhverfi er svipað og hér á landi m.a. norrænar skýrslur um áhrif loftslagsbreytinga á vatnsveitur, gæði neysluvatns og aukna hættu á hópsýkingum vegna þeirra. Jafnframt eru rýndar íslenskar skýrslur og greinar. Þær upplýsingar eru heimfærðar upp á rekstur og nýtingu neysluvatns hér á landi.

Gögn frá heilbrigðiseftirlitunum tíu, sem framkvæma reglubundna úttektir og taka sýni í samræmi við kröfur neysluvatnsreglugerðarinnar (nr. 536/2001), voru greind. Þar er skráð hvort vatnið er tekið úr borholu, uppsprettu/lind, gröfnum brunni eða er yfirborðsvatn. Einnig er skráð hvort vatnið sé geislað og ástand vatnsbólís er metið sem gott, sæmilegt eða lélegt. Heilbrigðiseftirlitin hafa ekki samræmdar leiðbeiningar um það mat sem gerir niðurstöður ónákvæmar. Örverugreiningar á sýnum eru gerðar hjá rannsóknastofunum Matís ohf, ProMat Akureyri ehf og Sýni ehf. Í samræmi við kröfur reglugerðarinnar er mældur heildargerlafjöldi við 22°C og eru leyfð mörk 100 í ml, kólígerlar og *E.coli* og þar eru mörkin 0 í 100 ml. Greinist *E.coli* í sýni er það öruggt merki um saurmengun.

Til að fá gróft mat á umfang áhrifanna var gagna aflað frá Heilbrigðiseftirliti Norðurlands eystra (HNE) þar sem vatnsból eru mörg hver í fjallshlíð og sérstaklega í skriðuhættu vegna hárra fjalla á Tröllaskaga, í Dalsmynni, Fnjóskadal, Ljósavatnsskarði og Köldukinn. Skriðuhætta og flóðahætta var metin gróflaga sem lítil, meðal eða mikil eftir aðstæðum; hæð og halla fjalla, jarðvegsþekju, nálægðar við straumvötn og sögu. Tafla 1 sýnir fjölda vatnsveitna, vatnsbóla og fjölda sýna.

Tafla 1. Fjöldi vatnsveitna, vatnsbóla og sýna í úrtaki.

Stærð		Fjöldi vatnsveitna	Fjöldi vatnsbóla*	Fjöldi sýna
Úrtak fyrir áhættuþætti	Fleiri en 500 íbúar	48	68	2396
	Færri en 500 íbúar	748	770	2091
	Samtals	796	838	7787
Úrtak HNE fyrir áhættuþætti	Fleiri en 500 íbúar	3	6	152
	Færri en 500 íbúar	169	173	454
	Samtals	172	179	606

*Eitt vatnsból er öll vatnstaka sömu gerðar á vatnstökusvæðinu

Út frá þessum gögnum eru dregnir fram helstu áhættuþættir vatnsveitna sem geta orðið fyrir áhrifum frá loftslagsbreytingum og mögulegar afleiðingar greindar. Að lokum voru gerðar tillögur um hvernig stjórnvöld og vatnsveitur geta brugðist við þessum áskorunum til að tryggja vatnsafhengingu og vatnsgæði.

Niðurstöður og umræður Vatnsveitur á Íslandi

Hér á landi eru um 800 eftirlitsskyldar¹ vatnsveitur á skrá 2012, 48 þjóna fleirum en 500 manns en hinar eru minni og litlar vatnsveitar sem þjóna fáum með fasta búsetu en oft þjóna þær mörgum ferðamönnum og/eða stórum sumarhúsasvæðum (Gunnarsdóttir o.fl., 2015a; 2015b). Vatnsveitur sem þjóna fleirum en 500 eru flestar í eigu sveitarfélaga meðan þær minni eru í einkaeigu. Að lokum eru ótaldar litlar einkavatnsveitur sem ekki eru eftirlitsskyldar og þjóna fáum húsum eða sumarhúsum, en vatnsgæði og fjöldi þeirra er óþekktur.

Neysluvatn er skilgreint sem matvæli í íslenskum lögum og vatnsveitur því sem matvælafyrirtæki (lög um matvæli nr. 93/1995). Það þarf hreint vatn í flesta starfsemi, þar með talið matvælaframleiðslu, og því eru vatnsveitur mikilvægustu matvælafyrirtæki á hverjum stað. Neysluvatn á Íslandi er að stærstum hluta grunnvatn, eða um 95%, en fátítt er að hafa svo góðan aðgang að grunnvatni. Á Norðurlöndum eru það aðeins Danir og Íslendingar sem geta nýtt sér nær eingöngu grunnvatn sem neysluvatn (Klöve o.fl., 2017). Talið er að meðalafrennsli á láglendi á Íslandi sé um 400 m³/s og vatnsveitur nýta einungis örfá prósent af þeim forða (Sigurðsson o.fl., 1998; Egilsson og Stefánsdóttir, 2014) og eru Íslendingar með vatnsríkustu þjóðum í heimi miðað við höfðatölu skv. samantekt UNESCO (UNESCO-WWAP, 2003).

Á nokkrum svæðum á Íslandi þarf að nota yfirborðsvatn, eða áhrifa frá yfirborðsvatni gætir í leysingum eða við mikla úrkomu þar sem jarðlög eru gropin og jarðvegslög þunn. Hið fyrra er aðallega á tertíer svæðunum á Austurlandi og Vestfjörðum og hið síðara er á virku svæðunum frá nútíma (hólósen), þar sem stærstu grunnvatnsgeymar landsins eru. Yfirborðsvatn er meðhöndlað, oftast síað og geislað, en grunnvatn er sjaldan meðhöndlað nema þegar hætta er á áhrifum frá yfirborðsvatni.

Loftslagsbreytingar á Íslandi

Vísindanefnd um loftslagsbreytingar hefur gefið út skýrslur um áhrif loftslagsbreytinga á Íslandi (Björnsson o.fl., 2008; Björnsson o.fl., 2018) auk þess sem Egilsson og Stefánsdóttir (2014) skoðuðu álagsþætti á grunnvatn. Talið er líklegt að hér hlýni um 1.3-2.3°C fram að miðbiki aldarinnar og að hlýnunin verði meiri að vetri en að sumri (Björnsson o.fl., 2018). Vísbendingar eru um að hlýnunin verði meiri norðanlands en sunnan og vetrarúrkoma oftar í formi regnskúra en snjókomu sem eykur snjóaleysingar. Með bráðnun jökla eykst afrennsli og sjávarstaða hækkar. Landris vegna breytinga á þyngdarsviði næst jöklum dregur úr hækkun sjávar. Langtímahækkun á sjávarstöðu hér á landi er talin verða um 30-40% af hnattrænni meðalhækkun, minnst á Suðausturlandi þar sem landris er mest. Hækkandi sjávarborð eykur hættuna á sjávarflóðum, en þar sem mælingum á sjávarstöðu er ábótavant á Íslandi liggur ekki fyrir hversu mikil slík flóð geta orðið (Björnsson o.fl., 2018). Einnig eru vísbendingar hér á landi um að úrkomuákefð aukist og þrátt fyrir það geti þurrkadögum einnig fjölgað. Nú þegar hefur dregið úr vorflóðum þar sem árstíðarsveiflan er breytt. Á Íslandi má gera ráð fyrir að grunnvatnsgeymar, sérstaklega á gropnum og lekum svæðum, muni stækka vegna aukinnar úrkomu og leysinga jökla. Sífreri er víða í fjalllendi á Íslandi ofan 800 til 900 m.y.s. og slík fjallasvæði eru um 8% af landinu (Etzelmüller o.fl., 2007). Helstu svæðin nálægt byggð eru norðanlands og austan, á t.d. Tröllaskaga, Flateyjarskaga og Smjörfjöllum og víða eru vatnsból í hlíðum fjalla á þessum svæðum. Einnig eru vatnsból víða í fjallshlíðum í öðrum landshlutum s.s. Vestfjörðum og

¹ Eftirlitsskyld vatnsveita skv. neysluvatnsreglugerð er vatnsveita sem þjónar 50 manns eða fleirum, eða 20 heimilum/sumarbústöðum, eða þjónar matvælafyrirtækjum.

Austfjörðum. Rekja má skriðuföll til bráðunar á sífrera í íslensku fjalllendi (Sæmundsson o.fl., 2018; Morina o.fl., 2019).

Greining á áhættuþáttum

Veðurfarsbreytingar hafa áhrif á vatnsgæði, áreiðanleika vatnsafhendingar og rekstrarkostnað vatnsveitna. Þær valda breytingu á úrkomumynstri og úrkomuákafa en ákafari rigningaskúrir auka þörf fyrir hreinsun og eftirlit með vatnsgæðum og auka álag á vatnstökumannvirki og tæknibúnað. Miklir rigningaskúrir samfara snjóbráðnun geta valdið flóðum og skriðuföllum í fjalllendi, sem getur leitt til þess að yfirborðsvatn kemst í vatnsból og valdi mengun, sérstaklega ef frágangi vatnsbóla er ábótavant. Og þó vatnsból séu langt frá mannabyggð er alltaf hættu á að fuglar og önnur dýr séu á svæðinu og að saur frá þeim berist í vatnsból, sérstaklega þar sem jarðvegur er gropinn og ef stutt er niður á grunnvatnsborð eins og er víða hér á landi. Sumstaðar eru vatnsbólín í farvegum skriða sem geta þá eyðilaggt vatnsbólið.

Hér að neðan eru helstu áhættuþættir loftslagsbreytinga á vatnsveitur greindir og fjallað stuttlega um einkenni þeirra:

Flóð og hærri sjávarstaða. Aukin tíðni flóða, sérstaklega á láglandi, mun valda því að vatnsból fara oftar á kaf vegna flóða. Hækkandi sjávarstaða mun að sama skapi ógna vatnsgæðum í vatnsbólum sem eru nálægt sjó. Þetta á við t.d. á Reykjanesi þar sem grunnvatnslinsa flýtur ofan á sjó (Egilsson og Stefánsdóttir, 2014). Í Svíþjóð er gert ráð fyrir að um 6% vatnsbóla séu í hættu að fara undir vatn (Ojala o.fl., 2007). Mikil flóð geta einnig skolað burt brúm sem vatnsleiðslur eru hengdar í og þá hefur það áhrif á vatnsafhendingu.

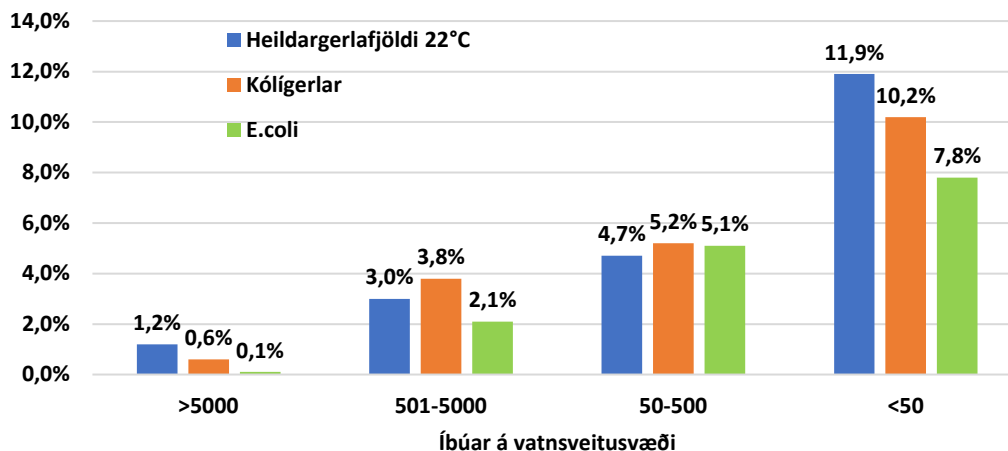
Skriðuföll. Aukin úrkoma og þiðnun sífrera leiðir til meiri hættu á skriðuföllum. Skriðuföll geta eyðilaggt vatnsból en slíkir atburðir hafa nú þegar átt sér stað á Íslandi. Sem dæmi má nefna vatnsból Vatnsveitu Djúpavogs í Búlandsdal og vatnsból Vatnsveitu Árskógssands og Hauganes. Í byrjun júlí 2010 urðu mikil skriðuföll í Búlandsdal sem eyðulögðu inntaksmannvirki Vatnsveitu Djúpavogs. Í kjölfarið greindust saurgerlar og kampýlóbakter í neysluvatni. Í lok júní 2014 féll skriða á tvö vatnsból Vatnsveitu Árskógssandi og Hauganesi og yfirborðsvatn blandaðist neysluvatninu. Í kjölfarið greindust saurkóligerlar í öðru vatnsbólínu. Íbúar þurftu sumir að sjóða vatnið í nokkrar vikur. Í sama óveðri féllu aurskriður með miklum aurburði úr fjalli ofan við bæinn að Völlum í Svarfaðardal og eyðilagði vatnsból bæjarins. Leirinn fyllti einnig eldistjörn á bænum og drap allan silunginn sem í henni var (Norðurslóð 38. árgangur 7. tölublað. 2 júlí 2014). Þá skall hurð nær hælum hjá Vatnsveitu Siglufjarðar um svipað leyti og á Árskógssandi þegar stór aurskriða féll um 100 metra frá vatnsbólínu í Hólsdal (RUV 9.7.2014).

Yfirfullar skólplagnir. Aukning ákafra rigningaskúra og flóða valda því að frárennislagnir fyllast. Það skapar mengunarhættu, sérstaklega í einföldum frárennisliskerfum, þ.e. þegar skólp og regnvatn er í sömu lögnum. Minni hættu er þar sem er tvöfalt frárennisliskerfi þar sem skólp og regnvatn er í sitt hvorri pípunni. Alvanalegt er að lagnir leki og sérstaklega á það við þegar vatnslagnir eru orðnar gamlar og lélegar. Hættu skapast þegar þrýstingur fellur í lekum lögnum þá getur mengað vatn úr skólpi komist inn í neysluvatnslagnirnar, og er þetta sérstaklega hættulegt þar sem neysluvatnslagnir og fráveitulagnir eru í sama skurði.

Norðmenn hafa metið þessa áhættu í hæsta flokk í áhættumati á áhrifum loftslagsbreytinga á heilnæmi neysluvatns (Helsedirektorated, 2010). Áhættan þar er metin út frá þremur þáttum, aukningu á atburðum eða aðstæðum sem valda hættu, áhrif á heilsu og hversu auðvelt er að fyrirbyggja mengun. Í Noregi eru stærstur hluti dreifikerfis neysluvatns og skólplagna í sama skurði,

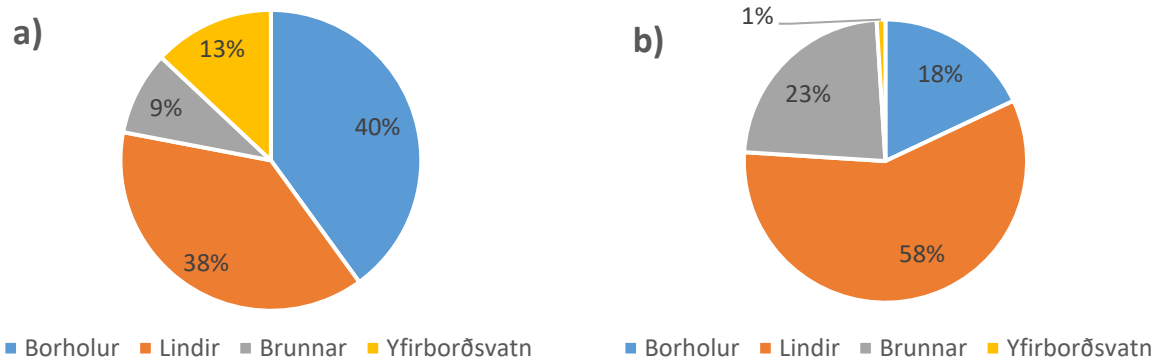
eins og hér á landi, sem eykur mjög áhættuna. Svipaðar aðstæður eru einnig í Svíþjóð þar sem yfir 80% af slíkum lögnum eru í sama skurði (Roffley o.fl., 2014). Í Noregi er auk þess talin töluverð hætta á að gæði vatnsauðlindarinnar versni en þar vegur upp á móti að talið er auðvelt að fyrirbyggja það með hreinsun á vatni. Í Noregi fær um 90% íbúa neysluvatn úr yfirborðsvatni sem er í meiri hættu að mengast við breytt veðurfar en grunnvatn.

Örverur í neysluvatni. Efnamengun er sjaldgæf í íslenskum vatnsveitum (Gunnarsdóttir o.fl., 2016a; 2016b) en örverumengun er algengari, en fyrst og fremst í minni vatnsveitum (mynd 1). Saurmengun mælist í um 5 til 8% sýna frá minni vatnsveitunum í reglubundnu eftirliti. Hærra hlutfall af saurmengun í sýnum hjá minni vatnsveitum skýrist að einhverju leyti af því að minni vatnsveitur fá sjaldnar vatn úr borholum en þær stærri og einnig er viðhaldi frekar ábótavant hjá þeim minni. Almennt er talið að grunnvatn úr borholum sé betur varið fyrir yfirborðsmengun en þar sem vatnið er tekið úr uppsprettum eða gröfnum brunnum. Að öðru óbreyttu þá má búast við að örverur muni aukast í neysluvatni vegna áhrifa loftslagsbreytinga.



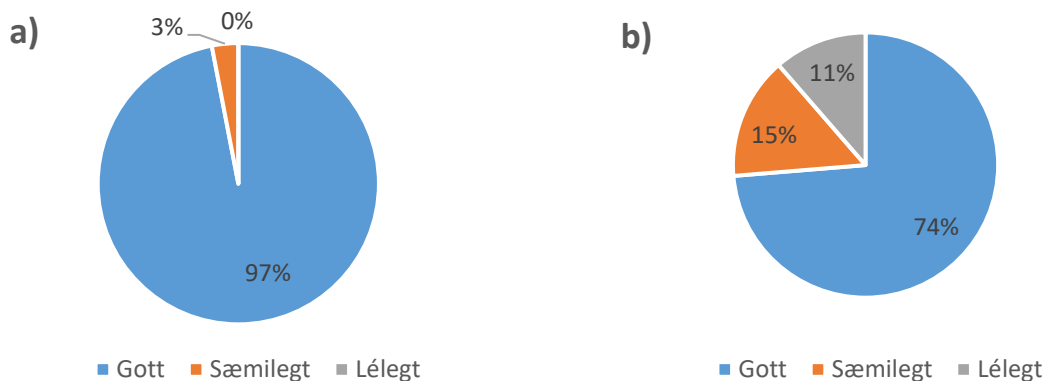
Mynd 1. Hlutfall vatnssýna sem uppfylla ekki neysluvatnsreglugerð í fjölda örvera í reglubundnu eftirliti hjá eftirlitsskyldum vatnsveitum á Íslandi 2010-2014 (Gunnarsdóttir o.fl., 2017).

Tegund og ástand vatnsból. Áhætta vegna loftslagsbreytinga er mismunandi eftir tegund og ástandi vatnsból. Búast má við því að vatnsból sem reiða sig á yfirborðsvatn, lindarvatn eða brunnavatn séu viðkvæmari fyrir áhrifum vegna loftslagsbreytinga en borholur. Meiri hluti vatnsból á Íslandi reiða sig á vatn sem er viðkvæmt fyrir loftslagsbreytingum, nánar tiltekið 60% vatnsból hjá stærri vatnsveitum og 82% hjá minni vatnsveitum (mynd 2). Flest vatnsból hjá minni vatnsveitum eru virkjaðar lindir (58%) og eru um 450 eftirlitsskyldar minni vatnsveitur með slík vatnsból á landinu öllu á meðan lindarsvæði hjá stærri veitum eru 27 talsins.



Mynd 2. Tegund vatnsbóla hjá a) 48 stórum vatnsveitum (>500 íbúar) og b) 748 minni vatnsveitum (<500 íbúar).

Ástand vatnsbóla er einnig mikilvægur áhættuþáttur þar sem léleg vatnsból mega við minna álagi. Í mati heilbrigðiseftirlita á ástandi 199 vatnsbóla árið 2012 kemur fram að í 11% tilfella eru vatnsból minni vatnsveitna metin léleg á meðan vatnsból stærri vatnsveitna er aldrei metið sem slíkt (mynd 3). Þó er vert að benda á að samræmdar leiðbeiningar eru ekki til fyrir heilbrigðiseftirlitin til að gera slíkt mat og því eru þetta aðeins vísbendingar.



Mynd 3. Ástand vatnsbóla árið 2012 hjá a) 33 stórum vatnsveitum (>500 íbúar), og b) 166 minni vatnsveitum (<500 íbúar).

Reglubundnu eftirliti og viðhaldi á geislatækjum Loftslagsbreytingar munu setja meira álag bæði á inntaks og hreinsunarinnviði eins og fram hefur komið. Í lok árs 2017 voru a.m.k. 60 vatnsveitur sem geisla hluta eða allt neysluvatn sem frá þeim fer skv. skráningu heilbrigðiseftirlita. Líklega eru fleiri vatnsveitur með geislun þó það sé ekki skráð hjá viðkomandi heilbrigðiseftirliti. Flestar eftirlitsskyldar vatnsveitur með geislun eru á Vestfjörðum (27), Austurlandi (11), Vesturlandi (8), Norðurlandi vestra (7) og Norðurland eystra (6). Löng reynsla hér á landi af slíkum tækjum er sú að frávik hafi verið algeng þrátt fyrir geislun. Saurmenguð sýni hafa fundist í fjórðungi vatnsveitna sem geisla neysluvatn (þ.e. 15 af 60) á fimm ára tímabili (2010-2014). Þetta gefur til kynna að viðhald og umhirða tækjanna hefur ekki verið sem skyldi. Mikilvægt er að sía vatnið áður en það er geislað þar

sem geislun virkar ekki ef vatnið er ekki alveg tært og til að fylgjast með því þarf að mæla grugg. Einnig þurfa tækin reglulegt viðhald og skipta þarf um perur a.m.k. einu sinni á ári. Reglulegt viðhald og eftirlit tækjanna á að vera hluti af innra eftirliti vatnsveitna. Því er enn mikilvægara en áður að vatnsveitur séu með innra eftirlit til að tryggja rétt viðhald kerfanna og fyrirbyggja mengun í öllu kerfinu.

Hópsýkingar. Í tengslum við mikla úrkomu og flóð eykst hættan á vatnsbornum hópsýkingum. Sýnt hefur verið fram á aukna hættu á saurmengun með aukningu á úrkomu og einnig er fylgni á milli aukinnar úrkomu og vatnsborinna hópsýkinga (Curriero o.fl., 2001, Jean o.fl., 2006; Taylor o.fl., 2009; Tetzlaff o.fl., 2010). Jafnframt hefur verið sýnt fram á aukna tíðni niðurgangstilfella við hækkandi hitastig en meiri rannsóknar er þörf til að greina smitleiðir (Mellor o.fl., 2016). Í rannsókn á 87 vatnsbornum hópsýkingum víða um heim voru 55% í kjölfar mikillar úrkomu (Cann o.fl., 2013).

Sænska varnamálastofnunin (Swedish Defence Research Agency) gaf út skýrslu um hættu á örverumengun í neysluvatni vegna loftslagsbreytinga (Roffey o.fl. 2014). Þar segir að búast megi við aukinni úrkomu sem hafi neikvæð áhrif á gæði neysluvatns. Búist er við að aukning verði í vatnsbornum hópsýkingum fyrst og fremst af völdum vírusa og cryptosporidium. Slíkir atburðir hafa t.d. átt sér stað í Svíþjóð eins og árið 2008 yfirfylltist frárennisliskerfið í kjölfar mikilla rigninga og rann út í á þar sem vatnið er tekið fyrir bæinn Lilla Edets. Um 19% af 13 þúsund íbúum bæjarins veiktust, m.a. af nóróveiru (Roffey o.fl., 2014; Ekvall, 2010).

Næringar- og varnarefnamengun í neysluvatni. Hitastigshækkun hefur áhrif á örverugróður og eykur hættu á ofauðgun og þörungagróðri. Sýnt hefur verið fram á í Danmörku að miklir regnskúrir auka magn varnarefna í grunnvatni, aðallega Glyphosat (Rosenbom o.fl., 2010). Hækkandi hitastig lengir ræktunartímabil og breytir landbúnaði sem eykur áburðarnotkun og því verður meiri hætta á að næringaefni og varnarefni leki niður í grunnvatnsgeyminn (Staben o.fl., 2015). Þetta á þá helst við hér á landi á landbúnaðarsvæðunum t.d. á Suðurlandi. Styrkur þessara efna í grunnvatni er ekki vel þekktur á þessum svæðum og fáar mælingar á varnarefnum í grunnvatni hafa verið gerðar hér á landi jafnvel þó að mæling á varnarefnum séu ein af þeim mælingum sem á að gera skv. neysluvatnsreglugerð (Gunnarsdóttir o.fl., 2016a; Egilsson og Stefánsdóttir, 2014). Í skýrslu Umhverfis- og auðlindaráðuneytisins (2016) kemur fram að ekki sé notað mikið af varnarefnum í landbúnaði á Íslandi sem er væntanlega skýringin á því að þau eru ekki mæld.

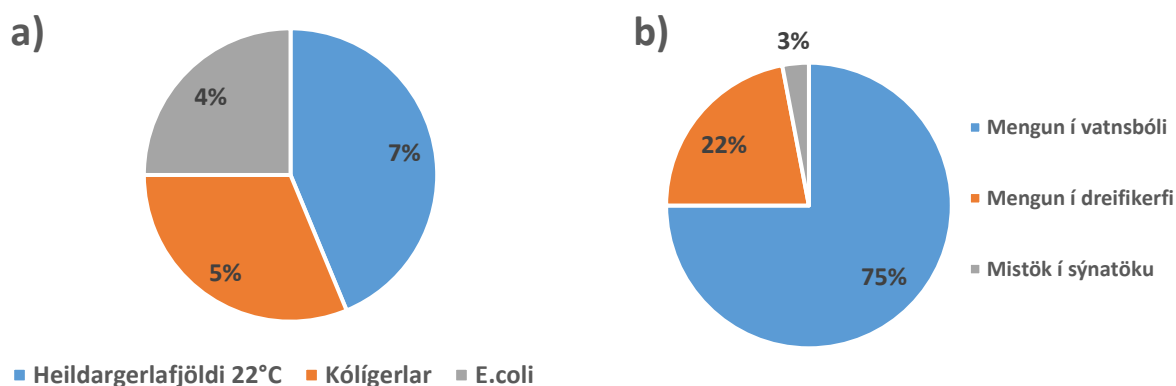
Greining á umfangi áhrifa á Norðurlandi eystra

Til að meta mögulegt umfang áhrifa loftslagsbreytinga þá voru gögn frá Heilbrigðiseftirlitssvæði Norðurlands eystra (HNE) greind. Á svæði HNE eru 172 eftirlitsskyldar vatnsveitur með 179 vatnsbólsvæði sem þjóna nær 28 þúsund íbúum svæðisins og á því svæði eru a.m.k. 411 eftirlitsskyld matvælafyrirtæki þ.e. framleiðslufyrirtæki, veitingahús, mótuneyti, mjólkurbú og gistipjónusta. Vatnsbólín eru fyrst og fremst lindarsvæði (85%).

Á eftirlitssvæði HNE voru tekin 606 sýni í reglubundnu eftirlit með vatnsveitum á tímabilinu 2010 til 2014. Frávik í örverum voru 65 talsins og voru hjá 46 vatnsveitum. Flest frávikin (7%) voru í heildargerlafjölda 22°C sem er vísbending um að yfirborðsvatn hafi komist í vatnsból eða óhreinindi í kerfinu (mynd 4a). Hlutfallið er svipað og á landinu öllu eins og kemur fram á mynd 1. Kólígerlar og *E. Coli* mældust í 31 og 25 sýnum á þessu tímabili. Þeir eru vísbending á saurmengun og þá fyrst og fremst *E.coli*. Saurmengun mældist hjá 16 vatnsveitum á þessum fimm árum.

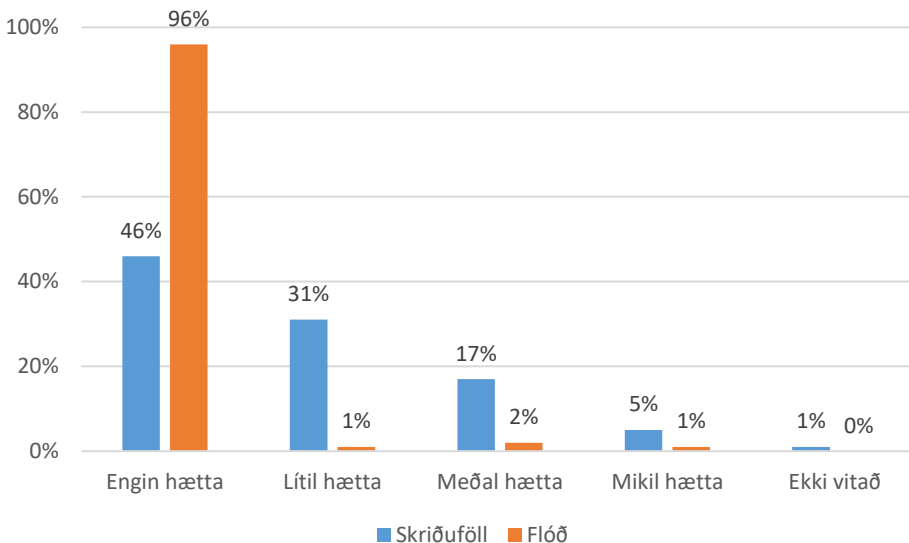
Þegar orsök frávikanna eru skoðuð kemur í ljós að stærstur hluti þeirra er mengun í vatnsbóli (75%) en mun færri í dreifkerfi (22%), sjá mynd 4b. Af þessum 49 frávikum vegna mengunar í vatnsbólum urðu

16 vegna þess að yfirborðsvatn barst í vatnsból í kjölfar mikilla rigninga. Auk þess féllu þrjú sýni í öllum þremur eftirlitsþáttum tekin í dreifikerfi hjá Vatnsveitu Árskógssands eftir að skriða eyðilagði vatnsbólið. Í helming tilfella valda þessir veðuratburðir saurmengun í sýnum. Það má leiða að því líkum að þeir staðir sem hafa þessi frávik hafi nú þegar orðið fyrir áhrifum vegna loftslagsbreytinga eða að minnsta kosti muni áhætta í rekstri þessara vatnsveitna aukast að óbreyttu í náinni framtíð.



Mynd 4. a) Frávik í örverum hjá vatnsveitum á svæði Heilbrigðiseftirlits Norðurlands eystra 2010-2014, og b) og orsök fráviks (b).

Hætta á að skriða eða flóð skemmi vatnsból var metin sérstaklega á svæði HNE fyrir einstök vatnsból til að fá gróft mat á umfangi áhættunnar. Á sumum svæðum eru vatnsból hátt í fjallshlíðum til að fá sjálfrennsli á bæina og spara þannig rafmagn. Aðgengi að slíkum vatnsbólum er oft erfitt sem gerir viðhald einnig erfitt. Stundum er illmögulegt að koma fyrir girðingum í kringum þau og ef það gert þá eru þær fljótar að falla undan snjóalögum. Vatnsból í fjallshlíðum eru sjaldan skoðuð af heilbrigðiseftirliti og sýni oftast tekin í dreifikerfi. Greining á skriðu- og flóðahættu á svæði HNE leiðir í ljós að skriðuhætta (mikil, meðal eða lítil) er við 53% vatnsbóla eða ríflega helming vatnsbóla og á 5% vatnsbóla er skriðuhættan mikil, en flóðahætta er óveruleg ógn á öllu svæðinu.



Mynd 5 Áhættugreining á að skriðuföll og flóð spilli vatnsbólum á eftirlitssvæði Heilbrigðiseftirlits Norðurlands eystra

Nauðsynlegar aðgerðir til að tryggja gæði neysluvatns

Greiningin hér að ofan sýnir að nauðsynlegt er að grípa til aðgerða til að halda neikvæðum áhrifum vegna loftslagsbreytinga á gæði neysluvatns í lágmarki. Flokka má aðgerðirnar annarsvegar á ábyrgð ríkis eða sveitarfélaga og hinsvegar á verksviði vatnsveitna. Það er á ábyrgð vatnsveitna að afhenda heilnæmt neysluvatn en ríkið og sveitarfélög hafa skyldur til að innleiða í lög og reglur og hafa stefnu sem hefur það að markmiði að vernda vatnið og heilnæmi þess, jafnframt því að sjá til að ytra eftirlit sé til staðar.

Ríki og sveitarfélög

Aðlögun að loftslagsbreytingum. Stjórnvöld þurfa að marka stefnuna og gera aðlögunaráætlun um hvernig eigi að bregðast við breyttum aðstæðum á öllum sviðum, m.a. því sem snýr að neysluvatni og vatnsveitum og taka þá stefnumörkun inn í ákvarðanatöku. Til að styrkja stefnumörkun er nauðsynlegt að auka ýmsar rannsóknir t.d. á flóðahættu, hættu á skriðuföllum, sjávarstöðu og öðrum áhrifum loftslagsbreytinga á vatnsauðlindina, á neysluvatn og gæði þess.

Viðbragðsáætlun. Sveitarfélögin, sem bera ábyrgð á eftirliti með neysluvatnsgæðum og vatnsvernd, þurfa að gera áætlun um hvernig vatnsafhengingu skuli háttáð á sínu svæði við breyttar aðstæður og gera áhættugreiningu vegna loftslagsbreytinga. Í þeirri áhættugreiningu þarf að meta hættu á saurmengun, skriðuföllum, flóðum og mengun vegna nálægðar við sjó. Almannaþing sveitarfélaga gera síðan viðbragðsáætlun um hvernig skuli bregðast við slíkum atburðum ásamt því að tryggja aðgengi að varavatnsbólum. Heilbrigðiseftirlit sveitarfélaga á að tryggja að búið sé að skilgreina vatnsverndarsvæði fyrir vatnsból og þar sem það hefur verið gert þarf að endurskoða þau m.t.t. loftslagsbreytinga.

Vatnsveitur

Fyrirbyggjandi innra eftirlit. Veiturnar þurfa að meta hættur af völdum loftslagsbreytinga og skipuleggja mótvægisáðgerðir til að vera í stakk búnar til að takast á við slíka atburði. Þetta mat á að

vera hluti af kerfisbundnu fyrirbyggjandi innra eftirliti vatnsveitna. Innra eftirlit gerir ráð fyrir áhættugreiningu, sem byggir á líkindum og alvarleika atburða, og síðan úrbótaáætlun til að fyrirbyggja mengun. Í nýrri EB tilskipun um neysluvatn verður að öllum líkindum gerð krafa um, í fyrsta lagi áhættuúttektir á vatnsbólum hjá öllum eftirlitsskyldum vatnsveitum, og í öðru lagi á innra eftirliti hjá þeim vatnsveitum sem þjóna fleirum en 500 íbúum. Slíkt fyrirbyggjandi eftirlit hefur sýnt sig að bæta gæði neysluvatns og rekstur vatnsveitna (Gunnarsdóttir ofl., 2012a, 2012b).

Sem fyrirbyggjandi aðgerðir er rétt að skoða hættur á vatnstökusvæðum og bæta þar frágang og hækka inntök ef hætta er á flóði. Skoða staðsetningu dælustöðva og annarra mannvirkja m.t.t. til flóðahættu. Ef grunnvatnsgeymir er illa varinn fyrir ákafri úrkomu þá er nauðsynlegt að auka mælingar á gruggi og örverum. Í áðurnefndri tillögu að nýrri EB tilskipun er gert ráð fyrir reglubundnum mælingum á gruggi hjá öllum eftirlitsskyldum vatnsveitum.

Endurskoða þarf innra eftirlit þar sem það er til staðar m.t.t. áhrifa veðurfarsbreytinga og jafnframt gera átak í að koma því á þar sem það hefur ekki verið gert. Nú þegar hafa nær 40% vatnsveitna á Íslandi sem þjóna fleirum en 500 manns sett upp innra eftirlit og þær þjóna um 80% af landsmönnum. En ennþá eru um 770 minni eftirlitsskyldar vatnsveitur þar sem áhættamat á mengun hefur ekki verið framkvæmt og áhættan á vatnsbólunni er eingöngu metin sem gott, sæmilegt eða lélegt ástand vatnsbóls.

Áhættuúttekir fyrir minni vatnsból. Vatnaverkræðistofa Háskóla Íslands í samvinnu við Háskólann í Surrey á Englandi og þrjú heilbrigðiseftirlit, Heilbrigðiseftirlit Kjósasvæðis, Heilbrigðiseftirlit Norðurlands vestra og Heilbrigðiseftirlit Suðurlands, er að vinna að áhættumatsformi fyrir minni vatnsveitur. Það byggir á formi sem hefur verið þróað af Alþjóða heilbrigðismálastofnuninni en er aðlagð að íslenskum aðstæðum. Áhættuúttektir eiga að meta ástand vatnsbóls og hættur á mengun á vatninu. Það byggir á að meta hönnun, viðhald vatnstökumannvirkja og mengunarhættu í nágrenni vatnsbóls.

Mælingar á vatnsgæðum. Mikilvægt er að fylgjast vel með gæðum neysluvatns, sérstaklega þar sem hætta er á yfirborðsmengun og þá helst með raunmælingum. Veitur ohf hafa komið upp raunmælingu á örverum á vatni frá nokkrum borholum á Heiðmerkursvæðinu (Guðmundsson, 2019). Það er svonefndur Flow cytometry mælir sem greinir allar örverur í vatni og gefur niðurstöður á 30 mínútna fresti. Aðferðin greinir ekki hverskonar örverur, þ.e. sjúkdómsvaldandi eða skaðlausar er um að ræða en segir til hvort gerlamagn er að aukast í vatninu. Bætt tækni og fljótvirkari mælingar á vatnsgæðum er ein af leiðunum sem stefnt er að í nýrri EB tilskipun. Þörf er á fljótvirkari og nákvæmari greiningu á sjúkdómsvaldandi örverum til að auka öryggi og fyrirbyggja hópsýkingar. DNA tækni hefur verið að fleygja fram og möguleikar á að mæla samtímis margar tegundir af sjúkdómsvaldandi örverum eru að koma fram á sjónarsviðið (Gunnarsdóttir et. al, 2019). Mikilvægt er fyrir vatnsveitur að fylgjast vel með á þessu sviði.

Viðhald og vatnshreinsun. Nauðsynlegt er því að huga vel að öllum frágangi og viðhaldi vatnstökumannvirkja. Þar sem hætta er á blöndun frá yfirborðsvatni getur verið nauðsynlegt að koma fyrir búnaði til hreinsunar og þegar neysluvatn er síað og geislað þarf að tryggja kerfisbundið viðhald. Nú þegar er löng reynsla hér á landi af slíkum tækjum og eins og áður sagði hafa a.m.k. nær 60 vatnsveitur sett upp geislatæki. En þrátt fyrir það hafa frávík verið algeng þar sem slík tæki eru til staðar. Það þýðir væntanlega að viðhald og umhirða þeirra hefur ekki verið sem skyldi. Það er heldur ekki nægjanlegt að koma sér upp geislun án þess að ráðast að rótum vandans og lagfæra vatnsbólið eða það sem hefur valdið mengun.

Varavatsnból. Þar sem vatnsból eru í hættu vegna flóða eða skriðufalla þarf að tryggja aðgengi að varavatsnbóli sem ekki er í slíkri hættu ásamt því að hafa viðbragðsáætlun hvernig megi dreifa vatni í flöskum til að brúa tímabundna stöðvun á öruggri afhendingu. Jafnframt þarf að kortleggja hvar eru viðkvæmir notendur á svæði vatnsveitunnar, t.d. sjúkrastofnanir, skólar og barnaheimili.

Endurbætur í dreifikerfi. Í dreifikerfinu getur skapast töluverð hætta við mikið úrhelli þegar frárennislagnir og vatnslagnir eru í sama skurði, eins og algengt er hér á landi. Vatnsveitur þurfa að þekkja hvar þessi hætta er mest og endurnýja gamlar og lekar lagnir og aðskilja frá skolplögnum á skipulagðan hátt. Samhliða þessu eru fráveitur að vinna að blágrænum ofanvatnslausnum þar sem ofanvatni í þéttbýli er veitt í viðtaka sem veitir vatninu niður í jarðveginn á náttúrulega hátt í stað þess að flóðavatnið fari allt í fráveitulagnir (Ráðgjafastofan Alta, 2016). Sú lausn eykur öryggi neysluvatns og styrkir sjálfbæran vatnabúskap.

Samantekt

Greining á áhættuþáttum í rekstri vatnsveitna sýna að loftslagsbreytingar munu auka hættu í rekstri þeirra og geta leitt til neikvæðra áhrifa á gæði neysluvatns. Heilbrigðiseftirlitin, sem hafa eftirlit með vatnsveitum og neysluvatnsgæðum, hafa metið að ástand 11% vatnsbóla sé lélegt. Algengast er að minni vatnsveitur virki lindir við öflun neysluvatns og eru a.m.k. um 480 lindarsvæði í notkun hjá eftirlitsskyldum vatnsveitum. Á sumum svæðum, þar sem aðstæður leyfa, er algengt að virkja lindir upp í fjallshlíð til að fá sjálfrennsli og spara þannig rafmagn. Það skapar ákveðna hættu á að vatnsbólín eyðileggist af völdum skriðufalla. Líklegt er talið að skriðuföll muni aukast hér á landi vegna loftslagsbreytinga og má eiga von á aukningu á slíkum atburðum í kjölfar mikillar úrkomu. Við gróft mat á einu heilbrigðiseftirlitssvæði, Heilbrigðiseftirlit Norðurlands eystra, þar sem háir fjallgarðar og djúpir dalir einkenna vatnstökusvæðin, kom í ljós að yfir helmingur vatnsbóla voru lindir í fjallshlíð þar sem hætta á skriðuföllum var metin lítil til mikil. Hinsvegar voru fá vatnsból á því svæði þar sem talin er hætta á að flóð spilli vatnsbólínu. Þessi hætta er hins vegar mjög mismunandi eftir landsvæðum.

Draga má saman nauðsynlegar aðgerðir ríkis, sveitarfélaga og vatnsveitna vegna nýrra og aukinna ógna vegna loftslagsbreytinga í eftirfarandi atriði:

Ríki og sveitarfélög

- Marka stefnu um hvernig eigi að tryggja neysluvatn og vatnsgæði m.t.t. nýrra áskoranna vegna loftslagsbreytinga.
- Auka vöktun og rannsóknir á vatnsauðlindinni.
- Hvert sveitarfélag metur áhrif loftslagsbreytinga á vatnsafhendingu í sínu sveitarfélagi.
- Almannaþing sveitarfélaga taki möguleg áhrif af loftslagsbreytingum á neysluvatnsafhendingu inn í sína viðbragðsáætlun.
- Heilbrigðiseftirlitin fylgi því eftir að stærri vatnsveitur setji upp innra eftirlit þar sem það hefur ekki verið gert og jafnframt verði gerðar reglulega ytri úttektir.
- Heilbrigðiseftirlitin sjái til þess að gerð verði áhættuúttekt á öllum vatnsbólum og taki þar sérstaklega tillit til hættu á skriðuföllum og flóðum.

Vatnsveitur

- Endurskoða innra eftirlit m.t.t. loftslagsbreytinga og ef það er ekki til staðar þá koma því á.

- Gera áhættuúttektir á öllum vatnsbólum í samvinnu við viðkomandi heilbrigðiseftirlit með tilliti til mengunarhættu og taka þar með í mat á áhrifum frá loftslagsbreytingum s.s. flóðum og skriðuföllum.
- Gera endurbætur á vatnsbólum í samræmi við niðurstöður áhættumats.
- Hafa reglulegt eftirlit og viðhald á öllum mannvirkjum vatnsveitunnar, s.s. geislunartækjum.
- Bæta mælingar og auka rauntímamælingar á vatnsgæðum, sérstaklega þar sem hætta er á yfirborðsmengun.
- Mæla notkun á vatni, fylgjast með lekum og endurnýja gamlar lagnir.
- Vinna að endurbótum á dreifikerfi og þekkja hvar er brýnust þörf á að endurnýja lagnir, t.d. þar sem lagnir eru í sama skurði og fráveitulagnir.
- Huga að sameiningu minni vatnsveitna eins og hagkvæmt þykir og aðstæður leyfa. Það gefur möguleika á að bora eftir neysluvatni sem eykur öryggi.

Þakkir

Þessi rannsókn var styrkt af Rannsóknasjóði Háskóla Íslands. Höfundar vilja þakka þeim sem veittu aðstoð við að afla upplýsinga og sérstaklega Steini Oddgeiri Sigurjónssyni heilbrigðisfulltrúa á matvælasviði hjá Heilbrigðiseftirliti Norðurlands eystra. Einnig þakka höfundar ritrýnum fyrir góðar ábendingar.

Heimildir

Björnsson, H., Sigurðsson, B.D., Davíðsdóttir, B., Ólafsson, J., Ástþórsson, Ó.S., Ólafsdóttir, S., Baldursson, T. & Jónsson, T. (2018). Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018. Veðurstofa Íslands.

Björnsson, H., Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Daníelsdóttir, A.K., Snorrason, Á., Sigurðsson, B.D., Sveinsbjörnsson, E., Viggósson, G., Sigurjónsson, J., Baldursson, S., Þorvaldsdóttir, S., Jónsson, T. (2008). Hnatrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar.

Cann, K.f., Thomas D.R., Salmoni, R.L., Wyn-Jones, A.B., Kay D. (2013). Extreme water-related weather events and waterborne disease. *Epidemiol. Infect.* Vol. 671-686.

Curriero, F., Patz, J., Rose, J. and Lele, S. (2001). The Association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948-1994. *American Journal of Public Health*, 91(8), 1194-1199.

Egilsson, D. & Stefánsdóttir, G. (2014). Álagsþættir á grunnvatn. Veðurstofa Íslands- Greinagerð DE/GST/2014-01.

Ekvall, A. (2010). Utbrott av calicivirus i Lilla Edet – Händelseförlopp och lärdomar, Svenskt Vatten utveckling, Rapport Nr. 2010-2013.

Etzelmüller, B., Farbrot, H., Guðmundsson, Á., Humlum, O., Tveito, O.E. and Björnsson, H. (2007). The Regional Distribution of Mountain Permafrost in Iceland. *Permafr. Periglac. Process.* 18, 185-199. <https://doi.org/10.1002/ppp.583>.

Guðmundsson, S. (2019). Tilraunir með nýja tækni. Erindi flutt Vísindadegi OR 4. Apríl 2019. <https://www.veitur.is/frettir-af-okkur>

Gunnarsdóttir, M.J., Gardarsson, S.M., Figueras, M.J., Puigdoménech, C., Juárez, R., Saucedo, G., Arnedo, M.J., Santos, R., Monteiro, S., Avery, L., Pagaling, E., Allan, R., Abel, C., Eglitis, J., Hamsch, B., Hüglar, M., Rajkovic, A.,

- Smigic, N., Udovicki, B., Albrechtsen, H.-J., López-Avilés, A. and Hunter, P. (2019). Water safety plan enhancements with improved drinking water quality detection techniques. *Sci. Total Environ.* (In press).
- Gunnarsdóttir, M.J., Persson, K.M., Andradóttir, H.O. and Gardarsson, S.M. (2017). Status of small water supplies in the Nordic countries: Characteristics, water quality and challenges. *International Journal of Hygiene and Environmental Health.* 220 (8), 1309-1317.
- Gunnarsdóttir, M.J., Gardarsson, S.M., Jonsson, G.J. and Bartram J. (2016a). Chemical Quality and Regulatory Compliance of Drinking Water in Iceland. *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 219 (2016) 724-733.
- Gunnarsdóttir, M.J., Garðarsson, S.M., Ólafsdóttir, S. (2016b). Íslenskt neysluvatn: Yfirlit og staða gæða. *Verktækni* 2016/22.
- Gunnarsdóttir, M.J. & Gardarsson, S.M. (2015a). Gæði neysluvatns á Íslandi 2002-2012. Skýrsla unnin fyrir Matvælastofnun.
- Gunnarsdóttir, M.J. & Gardarsson, S.M. (2015b). Gæði neysluvatns í ferðapjónustu á Íslandi. *The Icelandic Journal of Engineering* 21 (01):17-20.
- Gunnarsdóttir, M.J., Gardarsson, S.M., Elliott, M., Sigmundsdóttir, G., Bartram, J. (2012a). Benefits of Water Safety Plans: Microbiology, Compliance and Public Health. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (14), 7782-7789. (Open access: <http://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es300372h>)
- Gunnarsdóttir, M.J., Gardarsson, S.M., Bartram, J. (2012b). Icelandic Experience with Water Safety Plans. *Water Science & Technology* 65 (2), 277-288
- Hanssen-Bauer, I., H. Drange, E.J. Førland, L.A. Roald, K.Y. Børsheim, H. Hisdal, D. Lawrence, A. Nesje, S. Sandven, A. Sorteberg, S. Sundby, K. Vasskog og B. Ådlandsvik (2009): Klima i Norge 2100. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing, Norsk klimasenter, september 2009, Oslo
- Helsedirektoratet Norge (2010). Riskiko- og sårbarhetsanalyse. In: Helsekonsekvenser av klimaendringer i Norge – Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassning. (Ottesens P. eds). Nasjonalt folkehelseinstitutt.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). Global Warming of 1.5°C . Summary ofr Policymakers. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC (2014). Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
- Jean, J.S., Guo, R., Chen, S.H., Liu, C.C. Chang, W.T., Yang, Y.J., and Huang M.C. (2006). The association between rainfall rate and occurrence of an enterovirus epidemic due to a contaminated well. *Journal of Applied Microbiology*, 101 (6), 1224-1231.
- Jiménez Cisneros, B.E., Oki, T., Arnell, N.W., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., and Mwakalila, S.S., (2014). Freshwater resources. In: climate change 2014: Impact, Adaption, and Vulnerability. Part: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229-269.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb G.K., Avian M. and Carrivick J. (2012). Climate change and rock fall events in high mountain areas: Numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. *Geografiska Annalar: Series A, Physical Geography*, 94:1, 59-78, DOI: 10.1111/j.1468-0459.2011.00449.X
- Klöve, B., Kvitsand, H.M.L., Pitkänen, T., Gunnarsdóttir, M.J., Gaut, S., Gardarsson, S.M., Rossi, P.M., Miettinen, I. (2017). Overview of groundwater sources and water-supply systems, and associated microbial pollution, in Finland, Norway and Iceland. *Hydrogeol J.* 25(4) pp 1033-1044. DOI 10.1007/s10040-017-1552-x
- Mellor, J.E., Levy, K., Zimmerman, J., Elliott, M., Bartram, J., Carlton, E., Clasen, T., Dillingham, R., Eisenberg, J., Guerrant, R., Lantagne, D., Mihelcic, J., Nelson, K. (2016). Planning for climate change: The need for mechanistic

systems-based approaches to study climate change impacts on diarrheal diseases. *Science of the Total Environment* 548-549, 82-92.

Morino, C., Conway, S.J., Sæmundsson, Th., Helgason, J.K., Hillier, J., Butcher, F.E.G., Balme, M.R., Jordan, C. and Argles, T. (2019). Molards as an indicator of permafrost degradation and landslide processes. *Earth and Planetary Science Letters* 516, 136-147.

Ojala L., Thunholm B., Maxe L., Persson G. & Bergmark M. (2007) Kan grundvattenmålet klaras vid ändrade klimatförhållanden? – underlag för analys. SGU-rapport 2007:9.
http://www.sgu.se/dokument/service_sgu_publ/SGU-rapport_2007-9.pdf

Okkonen, J. Jyrkama, M. & Klöve, B. (2010). A conceptual approach for assessing the impact of climate change on groundwater and related surface waters in cold regions (Finland). *Hydrogeology Journal*, 18: 429-439.

Ráðgjafafyrirtækið Alta (2016). Blágrænar ofanvatnslausnir. Innleiðing við íslenskar aðstæður. Skýrsla unnin fyrir Rannsóknar- og þróunarsjóður Skipulagsstofnunar og SAMORKA, samtök orku- og veitufyrirtækja á Íslandi
http://www.skipulag.is/media/attachments/blagraenar_ofanvatnslausnir.pdf

Roffey, R., Jonsson, P., Sonnek, K.M., Forsman, M., Karlsson, L. & Sjödin A. (2014). Mikrobiologiska risker för dricksvatten: Framtida klimatpåverkan och säkerhet. FOI-R—3831—SE.

Rosenbom, A.E., Brüsich, W., Juhler, R.K., Ernsten, V., Gudmundsson, L., Kjær, J. Paluborg, F., Grant, R., Nyegaard, P. and Olsen P. (2010). The Danish Pesticide Leaching Assessment Program. Monitoring results May 1999-2009. Geological Survey of Denmark and Greenland. <http://pesticidvarsling.dk/xpdf/vap-results-99-09.pdf>

Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanea, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichsten, M., Sorteberg, A., Vera, C., & Zhang, X. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Mangaging the risks of Extreme Events and Disasters to Advance climate change Adaptation. A special Report of Working Groups I and II of the IPCC.* Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. Pp.109-230.

Sigurðsson, F., Hjartarson, Á. & Hafstað, Þ. (1998). *Vatnsveituhandbók Samorku.*

Staben, N., Nahrstedt, A. & Merkel, W. (2015). Securing safe drinking water supply under climate condition. *Water Science & Technology* 15.6.

Sæmundsson, TH., Morino, C., Helgason, J.K., Conway, S.J. and Pétursson, H.G.(2018). The triggering factors of the Móafellshyrna debris slide in northern Iceland: Intense precipitation, earthquake activity and thawing of mountain permafrost. *Science of the Total Environment* 621, 1163-1175

Taylor R.G. (2012). Ground water and climate change. *Nature climate change*. DOI: 10.1038/ NCLIMATE1744.

Taylor, R., Miret-Gaspa, M., Turnwine, J., Mileham, L., Flynn, G., Howard, G., and Kulabako, R. (2009). Increased risk of diarrhoeal diseases from climate change: evidence from communities supplied by groundwater in Uganda. In *Groundwater and Climate in Africa. Proceedings of the Kampala Conference, 24-28 June 2008*, International Association of Hydrological Science (IAHS), IAHS Publication No334, IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 15-19.

Tetzlaff, D., Soulsby, C., and Birkel, C. (2010). Hydrological connectivity and micropbiological fluxes in monatan catchments: the role of seasonality and climatic variability. *Hydrological Processes*, 24(9), 1231-1235.

Umhverfis- og auðlindaráðuneytið (2016). *Aðgerðaráætlun um notkun varnarefna 2016-2031.*

UNESCO-WWAP (2003). *Water for People Water for Life. The United Nations World Water Development Report (Table 4.2)* <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000129556>