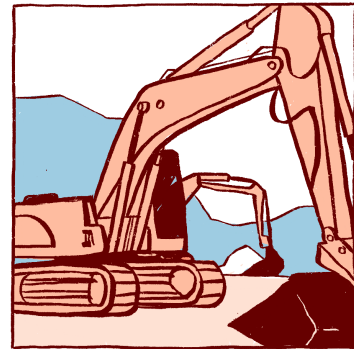
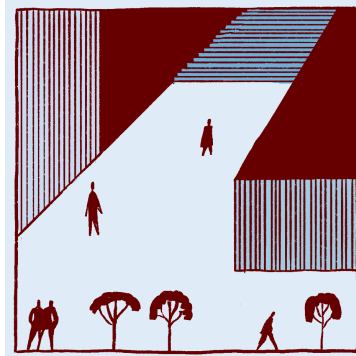
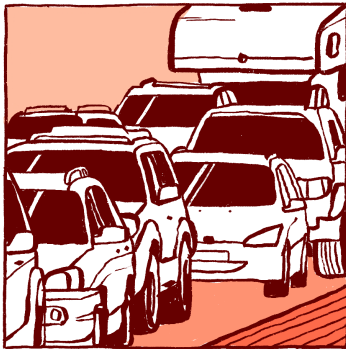


KAFLI

9

BYGGÐIR INNVIÐIR



Efnisyfirlit kafla

9.1	Inngangur	276
9.2	Innviðir vatnsmiðlunar	276
9.2.1	Forði, vatnsöflun og dreifikerfi	276
9.2.2	Ástand og tegundir vatnsbóla	279
9.2.3	Fráveita	280
9.3	Orkukerfi	283
9.3.1	Framleiðsla	283
9.3.2	Eftirspurn	288
9.3.3	Miðlun orku	290
9.4	Samgöngur	293
9.4.1	Vegasamgöngur	293
9.4.2	Flugvellir og flug	295
9.4.3	Samgöngur á sjó	296

Samantekt

1. Loftslagsbreytingar eru nú þegar farnar að hafa áhrif á ýmsa byggða innviði, sem hefur kallað á viðbrögð.
2. Áhrif loftslagsbreytinga, s.s. þurrkar, aukin ákefð úrkomu, umhleyplingar, flóð og hækkuð sjávarstaða geta haft áhrif á forða, vatnsöflun og dreifikerfi vatnsveitna. Meðal áhrifa eru hætta á örveru- eða seltumengun vatnsbóla og breytt grunnvatnsstaða.
3. Fyrir fráveitur geta sömu þættir aukið flóðahættu, t.d. ef niðurföll fyllast, hættu á bakflæði í lögnum og að það flæði upp úr niðurföllum. Fyrir blönduð fráveitukerfi geta áhrifin verið verri en í aðgreindum kerfum, þar sem ofanvatn og skólþ er ekki í sömu lögnum.
4. Flóðaatburðir hér á landi eru oftast vegna rigningar sem fellur á frosna jörð eða á snjó. Rannsóknir sýna að rigning á snjó er vaxandi vandamál fyrir fráveitukerfi.
5. Blágrænar ofanvatnslausnir hafa reynst mikilvægar til að draga úr flóðahættu samfara aftakarigningu.
6. Bráðnun jökla vegna loftslagsbreytinga hefur mikil áhrif á vatnsaflsframleiðslu á Íslandi. Sú aukning, sem þegar hefur átt sér stað, hefur verið nýtt í núverandi kerfi vatnsaflsvirkjana og miðlana þeirra, m.a. með stækkun Búrfellsvirkjunar. Tímaþróun áframhaldandi aukningar er óviss en nýting hennar er háð uppbyggingu í samræmi við þróun auðlindarinnar.
7. Þurrkar og breyting á úrkomudreifingu innan ársins, auk breytinga á hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu, munu hafa áhrif á rekstur miðlana og vatnsaflsframleiðslu.
8. Breytingar á hvassviðratíðni getur haft áhrif á rekstraröryggi vindorkuvera, en sumarhlýnun getur aukið möguleika á framleiðslu á orkublöndum.
9. Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á rekstraröryggi raforkukerfis, t.d. með tilfærslu þeirra svæða þar sem ísingar gætir helst, vegna verri hvassviðra, ofanflóða og annarrar loftslagstengdrar náttúruvár.
10. Hlýnun getur dregið úr eftirspurn eftir orku til húshitunar, en þrátt fyrir minnkun í meðalnotkun geta sveiflur í veðurfari aukið tímabundna álagstoppa. Mikilvægt er að greina áhrif fólksfjölgunar og loftslagsbreytinga á allar vatnsveitur landsins.
11. Loftslagsbreytingar geta aukið eftirspurn eftir raforku til kælimiðla, en ljóst er að orkuskipti muni auka orkuþörf.
12. Ólíkar forsendur um hagvöxt, uppbyggingu, útflutning og þarfir efnahagslífsins, auk tækniþróunar og orkunýtni, gerir það að verkum að mismunandi sviðsmyndir um orkuþörf vegna orkuskipta ná frá engri þörf á viðbótarraforku til ríflega tvöföldunar á raforkuframleiðslu. Mikilvægt er að orkuskipti byggi á vandaðri ákvarðanatöku og miði að því að ná sem víðtækastri samfélagssátt.
13. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á vegasamgöngur, m.a. vegna hlýnunar, hitabylgna, þurrka og tíðari hitasveiflna umhverfis frostmark. Áhrifin eru m.a. blæðingar í yfirborði vega, skemmdir á burðarlagi og styttri líftími slitlags. Sambærileg áhrif á flugbrautir geta einnig haft neikvæð áhrif á flugsamgöngur.
14. Loftslagsbreytingar geta dregið úr þörf á snjómokstri, en á svæðum þar sem hitasveiflur um frostmark aukast verður meiri viðhaldsþörf slitlags. Breytt grunnvatnsstaða getur haft áhrif á burðarþol og aukinn vindur valdið tjóni á slitlagi.

15. Sjávarstöðubreytingar hafa einnig áhrif á rof og flóðahættu á vegum á strandsvæðum, en á fjallvegum gæti minna frost í jörðu haft áhrif á stöðugleika undirlags.
16. Aukin skriðuföll og óstöðugleiki jarðlaga getur einnig valdið tjóni á innviðum.
17. Hærrí sjávarstaða kann að auka viðhaldsþörf á hafnarsvæðum og rof og ágangur sjávar að valda skemmdum.
18. Hafís á siglingaleið nærri Íslandi hefur dregist saman á undanförunum áratugum. Líklegt er að sú þróun haldi áfram, en hafís getur þó truflað siglingar hluta ársins. Borgarísjaka frá Grænlandi mun áfram reka á siglingaleið og gætu mögulega orðið meira vandamál ef íshellur á Grænlandi brotna upp.
19. Verði hnattræn hlýnun á bilinu 1,5–2,0 °C er líklegt að sumarhafís hverfi að mestu af Íshafinu sum ár, en hlýni meira 3 °C þá muni það gerast flest ár.
20. Dragist hafís verulega saman opnast nýjar siglingaleiðir um Íshafið. Greiningar á ábata Íslands af opnun siglingaleiða um Íshafið bendir ekki til þess að staðsetning landsins gefi okkur umtalsvert samkeppnisforskot, nema í tilviki svokallaðrar Miðleiðar.
21. Öryggismál tengd siglingum, hafís, borgarís og lagnaðarís eru mjög mikilvæg og mikilvægt að vöktun sé sinnt. Alþjóðleg samvinna um eftirlit, vöktun og miðlun hafísupplýsinga hefur reynst árangursrík og mikilvægt að henni sé haldið áfram.

9.1 Inngangur

Nauðsynlegir innviðir samfélaga eru af mörgum toga, allt frá byggðum innviðum tengdum vatni, orku og samgöngum til félagslegra innviða. Loftslagsbreytingar eru nú þegar farnar að hafa áhrif á byggða innviði og hefur það kallað á viðbrögð. Sem dæmi má nefna aukningu í framleiðslugetu Búrfellsvirkjunar, breyttar hönnunarforsendur hjá Vegagerðinni og áhersla á blágrænar ofanvatnslausnir í borgarumhverfinu.

Þessi kafi fjallar um áhrif loftslagsbreytinga á byggða innviði. Fyrst verður fjallað um áhrif á innviði sem tengjast miðlun neysluvatns og fráveitu auk efnahagsstarfsemi. Því næst er fjallað um áhrif á orkukerfið, frá framleiðslu til breytinga í eftirspurn og að lokum verður fjallað um áhrif á samgöngur á landi, hafi og í lofti.

9.2 Innviðir vatnsmiðlunar

Áhrif loftslagsbreytinga á vatnstengda innviði skiptast í áhrif á vatnsból, vatnsöflun og dreifikerfi, áhrif á fráveitu- og ofanvatnskerfi og áhrif á eftirspurn eftir vatni. Tafla 9.1 sýnir þessa flokka, innviði sem þeim tengjast, einstaka álagþætti vegna loftslagsbreytinga og helstu áhrif þeirra.

9.2.1 Forði, vatnsöflun og dreifikerfi

Neysluvatn á Íslandi er að stærstum hluta grunnvatn, eða um 95%. Á nokkrum svæðum, aðallega á Austurlandi og Vestfjörðum, þarf þó að nota yfirborðsvatn til neyslu (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

Loftslagsbreytingar, svo sem hærrí lofthiti, breytingar í ákefð og magni úrkomu, skriðuföll og hækkun á sjávarstöðu, geta haft margs konar áhrif á vatnsveitur og vatnsgæði og þar með á neysluvatn. Líklegt er að grunnvatnsfordinn muni aukast við aukna úrkomu, en með hlýnun er líklegt að úrkoma á norðurslóðum aukist auk þess sem hún leiðir til massataps jökla sem fæða grunnvatnsgeyma.

Í V2018 var ályktað að úrkomubreytingar væru líklegar til að hafa áhrif á forða og gæði vatnsbóla. Þar koma auk þess fram að ef þurrkar verða algengari hér á landi getur það haft áhrif á aukna eftirspurn eftir vatni á sama tíma og staða vatnsbóla yrði erfiðari.

Síðan V2018 kom út hafa rannsóknir verið gerðar á áhrifum loftslagsbreytinga á vatnsveitur og vatnsgæði á mismunandi landssvæðum. Flokka má áhrif og áhættu vegna loftslagsbreytinga á vatnsgæði og vatnsveitur í 4 flokka; (1) Breytingar í úrkomu, flóð og hærri sjávarstaða, (2) skriðuföll, (3) yfirfullar skólplagnir og (4) örverur í neysluvatni (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Þá er aukin hættu af gróðureldum og verður sá þáttur ræddur hér ásamt hinum fjórum.

Tafla 9.1: Helstu áhrif loftslagsbreytinga á innviði sem tengjast vatns- og fráveitum

Flokkar	Innviðir	Einstaka þættir loftslagsbreytinga	Áhrif
Forði, vatnsöflun, dreifikerfi	Vatnsból.	Aukin úrkomuákefð, hláka, ofsaflóð, leysingar, skriðuföll,	Aukið magn ofanvatns, mengun í vatnsbólum.
	Vatnsöflun.	Breytingar í úrkomumynstri, þurrkar.	Breytt grunnvatnsstaða, vatnsforði í hættu.
	Dreifikerfi.	Hærri sjávarstaða. Aukning gróðurelda.	Selta ógnar vatnsbólum við sjó. Mengun grunnvatns.
Eftirspurn	Vatnsból. vatnsöflun.	Hitastigssveiflur.	Sveiflur (aukning) í eftirspurn eftir köldu vatni.
Fráveita	Ofanvatnskerfi almennt	Aukin úrkomuákefð, leysingar Hækkun sjávarborðs.	Aukið magn ofanvatns, flóðahætta. Aukið viðnám viðtaka, flóðahætta, bakflæði.
	Blönduð ofanvatns og skólperfi (einföld kerfi).	Aukin úrkomuákefð, leysingar	Aukið magn ofanvatns, flóðahætta, skólp á yfirfall, bakflæði, mengunarhætta.
	Skólperfi.	Hækkun sjávarborðs.	Aukið viðnáms viðtaka, flóðahætta, bakflæði

9.2.1.1 Breytingar í úrkomu, flóð og hærri sjávarstaða

Aukin úrkoma og leysingar geta haft áhrif á neysluvatn, bæði þar sem notað er yfirborðsvatn og þar sem grunnvatn er meginuppistaða vatnsforða. Sérstök hættu er á mengun ef vatnsból eru í slæmi ástandi. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á aukna tíðni flóða, sem getur aukið líkur á að vatnsból fari á kaf. Aukin hættu er á að yfirborðsvatn komist í grunnvatn í mikilli úrkomu eða við asahláku og leysingar, en yfirborðsvatn getur mengað grunnvatn. Meiri hættu er á ferðum þar sem jarðlög eru gropin og jarðvegslög þunn, en þar eru áhrif yfirborðsvatns á neysluvatn meiri. Við mikla úrkomu eða asahláku getur yfirborðsvatn einnig borist í grunnvatnsgeyma nálægt vatnstökuholum. Hægt er að vinna gegn mögulegri mengun með því að meðhöndla grunnvatn, t.d. með síun og geislum (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019), og er það meðal annars gert á sumum vatnstökusvæðum Veitna.

Hærri sjávarstaða getur valdið saltmengun í grunnvatni þar sem vatnsból eru nálægt sjó, m.a. á Reykjanesi. Flóð geta einnig haft áhrif á afhendingu vatns, t.d. vegna áhrifa á vatnsleiðslur

sem hengdar eru á brýr. Miklir þurrkar geta einnig valdið því að grunnvatnsborð lækkar (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.2 Örverur í neysluvatni

Mögulegt er að áhrif loftslagsbreytinga muni auka magn örvera í neysluvatni. Almennt er þó talið að grunnvatn úr borholum sé betur varið fyrir slíkri yfirborðsmengun en þar sem vatnið er tekið úr uppsprettum eða gröfnum brunnnum. Rannsóknir sýna að saurgerlamengun mælist oftast í minni vatnsveitum, eða í um 5–8% tilvika, og skýrist það að einhverju leyti af því að minni vatnsveitur fá sjaldan vatn úr borholum (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.3 Skriðuföll

Tíðni skriðufalla getur aukist með úrkomu-ákefð með neikvæðum áhrifum á gæði neysluvatns. Dæmi um slíkan atburð á Íslandi voru afleiðingar skriðufalla í Búlandsdal í júlí 2010. Þá eyðilögðust inntaksmannvirki vatnsveitu Djúpavogs og í kjölfarið greindust örverur í vatnssýnum teknum úr neysluvatni (sjá mynd 9.1) (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).



Mynd 9.1: Vatnsból hjá Vatnsveitu Djúpavogs menguðust vegna skriðufalla í Búlandsdal í júlí 2010 (mynd: Dúpivogur (2010), birt með leyfi).

Annað dæmi er frá júní 2014, þegar skriða féll á tvö vatnsból hjá vatnsveitu á Árskógasandi og Hauganesi, sem leiddi til blöndunar yfirborðsvatns og neysluvatns (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Afleiðingarnar slíkra atburða eru þær að íbúar verða að sjóða neysluvatn í töluverðan tíma í kjölfarið og ef neysluvatn á viðkomandi stað er notað í matvælaframleiðslu, svo sem í frystihúsum, þarf að stöðva framleiðslu með tilheyrandi tjóni.

Ef rýnt er í tilkynningar vegna fráviks í gæðum neysluvatns sést að á tuttugu ára tímabili (1998-2017) (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2020) voru:

- 15 vatnsbornar hópsýkingar hjá 12 vatnsveitum skráðar hjá embætti landslæknis – 516 skráð veikindatilfelli og 8 þúsund manns á áhrifasvæði.
- 37 suðutilmæli birt í fjölmiðlum hjá 28 vatnsveitum og um 19 þúsund manns á áhrifasvæði.

Greining sýndi að frávik og endurtekin frávik finnast oftast hjá minni vatnsveitum, en eins og áður sagði nýta þær sjaldnar vatn úr borholum. Ekki er hægt að tengja öll þessu tilvik við áhrif loftslagsbreytinga, en a.m.k. 9 af 37 suðutilkynningum komu í kjölfar mikillar úrkomu eða skriðufalla (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2020).

9.2.1.4 Yfirfullar skólplagnir

Frárennsliskerfi, sem taka við yfirborðsvatni, yfirfyllast ef úrkoma er nógu ákøf til að álagið á þau sé umfram afköst þeirra. Við aukna tíðni ákafrar úrkomu er hætt á að frárennsliskerfi yfirfyllist oftast en þau gera í dag, með tilheyrandi mengunarhættu. Á þeim stöðum, þar sem frárennslid rennur í sjó, dregur hækkun sjávarborðs enn frekar úr virkni frárennsliskerfanna. Það stafar af því að minni hæðarmunur er til að knýja sjálfrennslu skólpsins frá byggðinni, jafnvel þannig að rennslid verður ekkert án dælinga. Í verstu tilvikum ræður frárennsliskerfið ekki við álagið og getur það leitt til bakflæðis, innandyra sem utan, með aukinni mengunar- og smithættu. Sérstök hættu er þar sem einfalt frárennsliskerfi er til staðar, það er þar sem skólp og yfirborðsvatn er í sömu pípunni. Einnig skapast mengunarhætta ef vatnslagnir leka og þrýstingur fellur. Þá getur

skólþvatn blandast í neysluvatn ef neysluvatnslagnir og fráveitulagnir liggja í sama skurði (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.5 Gróðureldar og breytt ræktunarskilyrði

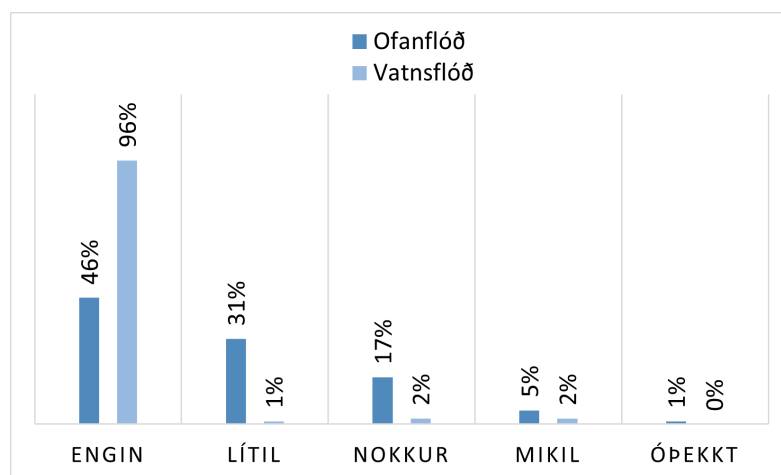
Gróðureldar geta haft neikvæð áhrif á grunnvatn. Gropin, þunn eldfjallajarðlög, þar sem lítið vatn er á yfirborði, þorna fljótt upp í þurrkum. Skapar það hættu á gróðureldum á sumrin auk hættu á sinueldum á vorin og veturna, þegar gróður er í dvala (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Mengunarhætta getur falist í gróðureldum og baráttu við þá. Þannig þurfti að gæta sérstaklega að mengunarhættu þegar barist var við gróðurelda við vatnsverndarsvæðið í Heiðmörk í maí 2021, en sérstaklega þarf að fylgjast með vatnsgæðum í kjölfar slíkra atburða (Veitur, 2021).

Hækkandi hitastig lengir ræktunartímabil og getur breytt ræktun í landbúnaði þannig að efnanotkun, svo sem áburðarnotkun, eykst. Vegna þessa getur orðið meiri hætta á að næringar- og varnarefni leki niður í grunnvatnsgeyminn. Þessi hætta á helst við á landbúnaðarsvæðum, svo sem á Suðurlandi (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.2 Ástand og tegundir vatnsbóla

Eins og áður sagði, er hætta vegna loftslagsbreytinga meiri fyrir vatnsból með yfirborðsvatni, lindarvatni eða brunnvatni en minni þar sem notaðar eru borholur.

Greining á ástandi vatnsbóla hjá vatnsveitum sem þjóna færri en 500 íbúum sýndi að í 11% tilvika er ástand talið lélegt, 15% sæmilegt en gott í 74% tilvika. Meðal stærri vatnsveitna er ástand vatnsbóla almennt talið gott eða um 97% (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Rannsóknir á orsökum frávíka í neysluvatnsgæðum og hvort loftslagsbreytingar skapi hættu fyrir afhendingu á hreinu neysluvatni benda til þess að um fjórðungur frávíka í neysluvatnsgæðum sé vegna mikillar úrkomu og að truflanir í vatnsafhendingu séu vegna þurrka. Haghafar telja líklegustu áhættuþættina vegna loftslagsbreytinga vera flóð eða skriðuföll í kjölfar mikillar úrkomu (Gunnarsdóttir o.fl., 2017; Gunnarsdóttir o.fl., 2020).



Mynd 9.2: Hlutfall (%) vatnsbóla á Norðausturlandi í hættu vegna flóða eða skriðufalla (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019)

vegna loftslagstengdra atburða, muni búa áfram við óbreytta eða aukna áhættu (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

Mynd 9.2 sýnir dæmi um þessar niðurstöður. Sértek greining að á svæði heilbrigðis- eftirlits Norðurlands eystra fundust frávík í örverum tengd mengun frá yfirborðsvatni í 65 sýnum af 606. Í einu tilfella hafði skriða eyðilagt vatnsbólið (á Árskógssandi). Áhættugreining á skemmdum vatnsbóla vegna skriðufalla og flóða á Norðausturlandi sýndi að 53% vatnsbóla eru í einhverri hættu vegna skriðufalla en 5% í mikilli hættu. Aðeins 4% vatnsbóla eru í hættu vegna flóða (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

Gera má ráð fyrir að þeir staðir, sem þegar hafa orðið fyrir frávíki í gæðum neysluvatns

9.2.2.1 Eftirspurn

Rannsóknnum á mögulegum breytingum á eftirspurn eftir köldu vatni er ábótavant. Þó hafa Veitur borið saman gögn frá 2018, þegar vatnsforði var góður, við þurrkaárin 2010, 2012 og 2019. Niðurstöður sýna að í þurrum árum var aukin eftirspurn samhliða lágmarksstöðu á virkjuðum vatnsforða (Sædís Ólafsdóttir, 2021; Sverrir Guðmundsson, 2023). Í miklum sumarþurrkum hefur komið upp sú staða að vatnsvinnsla nálgast núverandi þolmörk á einstaka vatnstökusvæðum Veitna, líkt og gerðist á vatnstökusvæðum á Akranesi og í Grábrókarhrauni sumarið 2019 (Sædís Ólafsdóttir, 2021, kafli 4). Í kafla fjögur í Sædís Ólafsdóttir (2021) er dregin sú ályktun að þessi sumur kunni að endurspeglar áhrif öfga í veðurfari líkt og þær sem talið er að geti orðið algengari við breytt loftslag í framtíðinni. Veitur hafa nýtt þessar greiningar til að i) áætla framtíðareftirspurn eftir köldu vatni að teknu tilliti til aukningar vegna mögulegs loftslagsálags og ii) meta lágmarksstöðu forða í þurrkum samhliða aukinni eftirspurn og útfæra tilsvareandi áætlanir um aukna forðaöflun, þar sem þess gerist þörf (Sverrir Guðmundsson, 2023).

9.2.3 Fráveita

9.2.3.1 Skólp- og ofanvatnskerfi

Samkvæmt íslenskum lögum telst til fráveitna allt lagnakerfi sem flytur frárennsli frá heimilum, stofnunum, atvinnufyrirtækjum, götum, gönguleiðum, lóðum og opnum svæðum, svo sem tengingar við einstakar fasteignir, niðurföll, svelgir, brunnar, safnkerfi, tengiræsi, sniðræsi, stofnlagnir, yfirföll og útræsi. Til fráveitu teljast einnig öll mannvirki sem reist eru til meðhöndlunar eða flutnings á frárennsli, svo sem hreinsivirki, dælu- og hreinsistöðvar og set- og miðlunartjarnir (Alþingi, 2009). Ábyrgð á ólíkum hlutum fráveitukerfa liggur ýmist hjá sveitarfélögum, sérstökum fráveitufélögum, lóðahöfum eða félögum í þeirra eigu, veghöldurum o.s.frv.

Fráveita flytur fráveituvatn frá uppsprettu til viðtaka. Fráveituvatn getur verið vatn af yfirborði, **ofanvatn** eða **skólp**. Fráveituvatn á sér því ólíkar uppsprettur. Með orðinu **viðtaki** er átt við það svæði sem tekur við mengun og þynnir hana eða eyðir. Í tilviki Íslands er sjórinn iðulega skilgreindur sem viðtaki. Fráveitan safnar og hreinsar bæði skólp og ofanvatn og skiptist því í skólpkerfi og ofanvatnskerfi. Eins og útskýrt var í V2018 eru fráveitukerfi á Íslandi, blönduð eða aðgreind, einnig nefnd einföld eða tvöföld. Blandkerfi (einföld kerfi) taka við bæði ofanvatni og skólpi, en í aðgreindum (tvöföldum) kerfum er skólp og ofanvatn aðskilið í lögnum. Blandkerfi eru viðkvæmari fyrir áhrifum loftslagsbreytinga þar sem mikil úrkoma getur leitt til þess að skólpblandað regnvatn flæðir upp í kerfið og á yfirfalli til viðtaka. Þegar sjórinn er viðtaki hefur hækkun yfirborðs sjávar þau áhrif að fallhæð minnkar í lagnakerfunum sem dregur úr rennsli og flutningsgetu kerfanna. Mikilvægt er að skilja skólp frá öðru fráveituvatni til að draga úr slíkum atburðum.

Eins og fjallað var um í V2018, hafa úrkomubreytingar, auknar sveiflur í veðurfari, fjölgun hlákudaga og hækkandi grunnvatns- og sjávarstaða áhrif á virkni fráveitukerfa. Hver þessara þátta hefur áhrif auk þess sem um **samverkandi áhrif** getur verið að ræða. Dæmi slíkt eru samverkan hærrí sjávarstöðu og aukinnar úrkomuákefðar. Aukin úrkomuákefð eykur álag á fráveitukerfin og áhrifanna gætir ekki síst á einföld kerfi. Eins og minnst var á að ofan minnkar hækkun sjávarstaða hæðarmun (fallhæð) í lagnakerfum og því hægist á rennsli um lagnakerfin. Það getur leitt til þess að flutningsgeta kerfanna minnkar sem aftur getur leitt til þess að það flæði upp úr kerfinum, sérstaklega ef úrkomuákefð eykst. Hækkun sjávarstaða getur einnig leitt til hærrí grunnvatnsstöðu sem þýðir að meira grunnvatn rennur inn í kerfið.

Í greinum 2.1.3.1 og 3.2.3 er fjallað um þróun aftakaúrkomu. Er niðurstaðan sú að tíðni ákafrar úrkomu er líkleg til að aukast en í því felst einnig, ef miðað er við tiltekinn endurkomutíma (t.d. 10 ára úrkomu), aukið úrkomumagn. Þetta tengist svo öðrum álagsþáttum.

9.2.3.2 Ofanvatnskerfi, skólperfi og blandkerfi

Vatnsmagn sem fer um ofanvatnskerfin ræðst af veðri og öðrum umhverfisþáttum og því hefur aukin úrkomuákefð áhrif á ofanvatnskerfi. Telja má allt manngert yfirborð í þéttbýli til fráveitu ofanvatns. Ofanvatnskerfi taka við allri úrkomu, sem og öllu öðru yfirborðsvatni (OR, 2020). Ofanvatnskerfið flytur vatnið til viðtaka um yfirborðsfarvegi eða lagnir. Að auki eru til dæmis notaðar settjarnir til að draga úr mengun, svo sem þungmálmamengun. Ofanvatnskerfin hafa því það hlutverk að safna, flytja og losa ofanvatn úr byggðu umhverfi. Hönnunarforsendur ofanvatnskerfa eiga að koma í veg fyrir að þau yfirfyllist. Þessar forsendur þurfa að taka tillit til þess að úrkomutíðni aukist, því annars er hætt á að frárennsliskerfi yfirfyllist oftar en þau gera í dag, með tilheyrandi mengunarhættu.

Stærsta fráveitukerfi landsins er rekið af Veitum (OR, 2020). Það skiptist í:

- Skólperfi, sem tekur við menguðu frárennslí frá heimilum og atvinnustarfsemi um tengingar við lóðir.
- Ofanvatnskerfi, sem tekur við fráveituvatni sem ekki er skólperfi, svo sem regnvatni og leysingavatni.

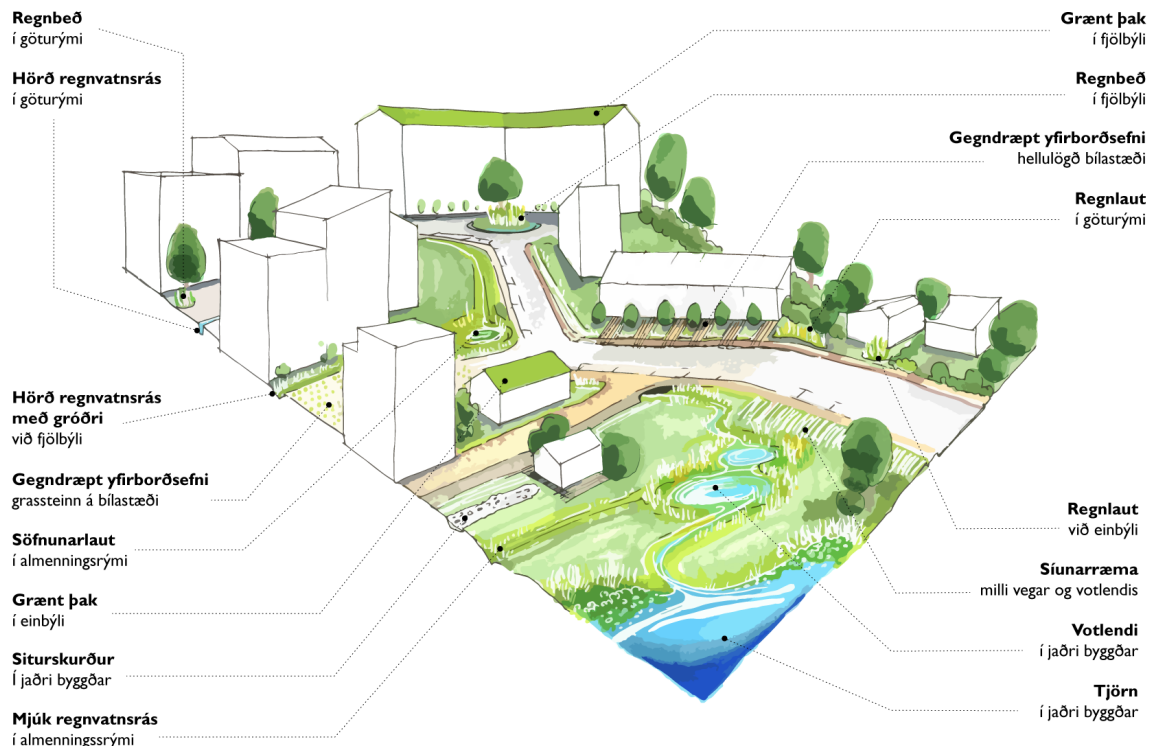
Þriðjungur fráveitukerfis Veitna eru einföld blandkerfi.

Í dag eru hönnunarforsendur á svæði Veitna þær að hámarkslíkur á flóði, uppúr lögnum sem flytja ofanvatn, skuli vera frá 2–20% á hverju ári, sem þýðir 5–50 ára endurkomutíma (OR, 2020). Líkur á yfirálagi á lagnakerfi ráðast af líkindadreifingu úrkomuákefðar. Líkur á aukinni úrkomuákefð aukast vegna loftslagsbreytinga og því þarf annað hvort að auka afköst ofanvatnskerfanna eða breyta meðhöndlun ofanvatns, svo sem með **blágrænum ofanvatnslausnum**, til að skilyrði hönnunarforsenda verði uppfyllt.

Óljóst er hvort fráveitukerfi uppfylli skilyrði hönnunarforsenda og óskýrt er hver er ábyrgur fyrir að stýra yfirborðsrennslí í flóðaviðburðum og hafa frumkvæði að og leiða samvinnnaða hönnun hefðbundinna fráveitukerfa og yfirborðs í tengslum við slíka atburði (OR, 2020). Í tilfelli fráveitna er mikilvægt að meta hvort hönnunarforsendur ráði við loftslagsbreytingar og að ábyrgð rekstraradila sé skýr hvað varðar stýringu á yfirborðsrennslí (OR, 2020).

Lítið er um birtar rannsóknir um áhrif loftslagsbreytinga á flóðahættu og fráveitukerfin á Íslandi. Aðeins var fjallað um tvær rannsóknir í V2018 (Grétar Mar Hreggviðsson, 2010; Hlödversdóttir o.fl., 2015). Benda þær báðar til þess að fráveita í hluta Reykjavíkur sé ekki í stakk búin til að mæta hækkunum á sjávarborði eða aukinni úrkomuákefð.

Síðan V2018 kom út hafa líkur á flóðaatburðum á höfuðborgarsvæðinu eftir árstíðum verið skaðar. Ólíkt flóðaatburðum erlendis, sem eiga sér stað aðallega stað á sumrin, eru vetrarflóð mun algengari á Íslandi. Hrund Andradóttir og félagar skoðuðu tíðni slíkra atburða á höfuðborgarsvæðinu út frá gögnum frá íslenskum tryggingafélögum um flóðaatburði þar sem tjón voru tilkynnt á árunum 2006–2018 2021. Niðurstöður sýna að tveir atburðir af tíu gátu flokkast sem ákafar sumarrigningar. Aðrir atburðir voru allt vetraratburðir þar sem tilkynningar um tjón fyrir hvern atburð voru mun fleiri en í tilfelli sumarrigninga. Í flestum tilvikum var um að ræða rigningu, annars vegar á frosna jörð og hins vegar á snjó og frosna jörð. Í þessum tilfellum voru tjónatilkynningar þrefalt fleiri en fyrir sumarvatn. Ástæða þessa er að ís á yfirborði kemur í veg fyrir að jarðvegur sé virkur sem geymsla fyrir vatn eða krapi stíflar niðurföll. Einnig kom í ljós að vatnstjón eru útbreidd á vörum, hvorki með marktækum mun á milli hverfa né á milli einfaldr og tvöfaldr kerfa (H. Andradóttir o.fl., 2021). Leitað var vísbindinga um hvort flóðatengdir vetraratburðir séu að stækka, en gögn frá 1949–2018 staðfesta að svo sé. Á síðustu 70 árum hefur marktæk aukning orðið á dægurmagni regns á snjó, bæði hvað varðar stærð meðalatburðar á ári og stækkun á stærsta atburði á ári (H. Andradóttir o.fl., 2021). Þar sem flóðaatburðir á vörum tengjast frosti í jörð beittu Zaqout, Andradóttir og Sorensen tölfræðilegu spálíkani til að spá fyrir um frost í jörðu 2023. Niðurstöður benda til að frosttímabilið sé að stytta og þjappast saman á það tímabil þegar mestar líkur eru á að fá stóra regnatburði. Því



Mynd 9.3: Blágrænar ofanvatnslausnir (Heimild: BGO Reykjavík, 2021, birt með leyfi).

eru vísbendingar um að verstu rigningar muni eiga sér stað á sama tíma og jörð er frosin eða snævi þakin sem gæti aukið flóðahættu í nálægri framtíð.

9.2.3.3 Blágrænar ofanvatnslausnir

Blágrænar ofanvatnslausnir, svo sem græn þök, regnbeð, gróðurrásir og settjarnir, eru nýttar til að hafa áhrif á afköst ofanvatnskerfa á umhverfisvænan hátt, þar sem hermt er eftir náttúrulegri hringrás vatns.

Blágrænar ofanvatnslausnir eiga að hægja á og draga úr för ofanvatns með því að veita ofanvatni um jarðveg og gróður á leið um byggt umhverfi og koma þannig í veg fyrir að það fari beint í ofanvatns- eða blandkerfi. Tilgangurinn er að draga úr áhrifum sveiflna í vatnsmagni, svo sem vegna aukinnar ofankomu eða aukinnar úrkomuákefðar og draga þannig úr flóðahættu. Blágrænar ofanvatnslausnir eiga einnig að hafa jákvæð áhrif á loftgæði, græn svæði og líffræðilegan fjölbreytileika.

Í ljósi þess að flóðahætta í byggðu umhverfi á Ísland virðist vera meiri á veturnum er mikilvægt að gera sér grein fyrir virkni blágrænna lausna í köldu loftslagi. Í því samhengi hefur Urriðaholt verið notað sem lifandi tilraunastofa fyrir blágrænar lausnir í samstarfsverkefni HÍ, Vedurstofunnar, Gardabæjar og Urriðaholts ehf. þar sem meðal annars hefur verið mæld virkni gróðurása.

Rannsóknirnar sýna að íslenskur jarðvegur er óvanalega vatnsheldinn og vatnsgleypinn og drenast því hægt (Tareq Zaqout og H. Ó. Andradóttir, 2021). Hvað varðar virkni gróðurása sýna niðurstöður að þær virka allt árið, en þó minnkar frost virkni þeirra. Plöntur með þéttum rótum draga úr áhrifum frosts og þýðu þar sem rôtarkerfi skipta miklu máli (Tarek Zaqout o.fl., 2022). Því þarf að huga að vali á plöntum þegar verið er að skipuleggja notkun blágrænna lausna til að draga úr flóðahættu, til dæmis með því að velja gras með þéttum rótum ásamt plöntum með dýpri rætur. Einnig má draga úr frostmyndum, viðhalda og tryggja vatnsleiðni og

auðvelda drenun með því að varast þjöppun jarðvegs, blanda sandi við hann eða bæta drenlagi undir blágræna innviði. Virkni settjarna við að fanga þungmálma hefur einnig verið rannsökuð og staðfest að hún helst nokkuð jöfn yfir árið (Vollertsen o.fl., 2009).

9.3 Orkukerfi

Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á orkukerfi um allan heim. Til dæmis er búist við að tjón vegna áhrifa loftslagsbreytinga á orkuinnviði innan Evrópusambandsins aukist um meira en 1600% til ársins 2080, allt frá 0,5 milljörðum evra á ári (Forzieri o.fl., 2018).

Orkukerfi Íslands er nokkuð ólíkt orkukerfum annars staðar í heiminum hvað varðar orkugjafa, en árið 2021 voru 70,4% af raforku framleidd með vatnsaflsvirkjunum, 25,8% með jarðvarma-virkjunum, 0,06% með vindorkuverum og 2,5% með jarðefnaeldsneyti. Tæplega 90% af notkun orku til húshitunar kemur frá jarðvarma, um 7% frá raforku og um 3% frá kyntum veitum (Orkustofnun, 2022).

Áhrif loftslagsbreytinga á orkukerfi Íslands og innviði sem tengjast því skiptast í áhrif á framleiðslu, flutning og eftirspurn eftir hita og rafmagni og eru áhrif á þessa hluta samtvinnuð. Tafla 9.2 sýnir samantekt á helstu áhrifum og er uppfærð frá V2018.

9.3.1 Framleiðsla

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á tvær af þremur auðlindum sem í dag eru nýttar til að framleiða rafmagn á Íslandi, það er vatnsafl og vindorku (Clarke o.fl., 2022). Auk þess geta loftslagsbreytingar haft áhrif á möguleika í framleiðslu á orkuplöntum. Jarðvarmi er hvorki talinn háður loftslagi né veðurfari, hvort sem um ræðir framleiðslu rafmagns eða hita (Goldstein o.fl., 2011).

9.3.1.1 Vatnsafl

Í V2008 og V2018 var fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á framleiðslu raforku með vatnsafl. Niðurstöður bentu til að rúmmál jökla muni rýrna verulega á þessari öld og afrennsli aukast til miðbiks aldarinnar. Um miðbik aldarinnar myndi hægja á masstapi og afrennsli minnka. Búist var við að aukið afrennsli til miðbiks aldarinnar myndi leiða til aukningar í nýtanlegu vatnsafl. Að auki var lögð áhersla á að líta þyrfti til breytinga á flóðaháttum og veðurfari á virkjanasvæðum.

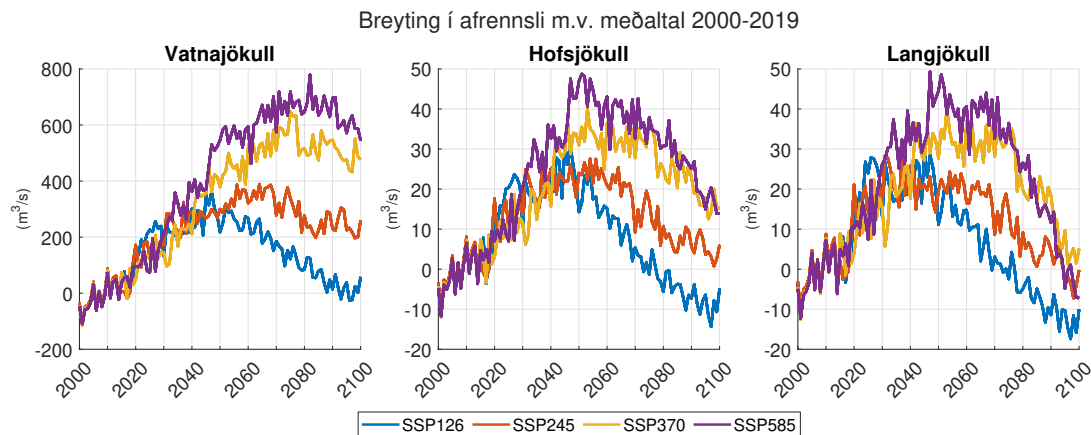
V2008 byggði að verulegu leiti á *Climate and Energy* (CE) verkefninu (Fenger, 2007) og íslenska systurverkefni þess *Veður og orka* (VO) (Jóhannesson o.fl., 2007). Að auki lýsti V2018 niðurstöðum frá *Climate and Energy Systems* (CES) verkefninu (Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012) auk íslenska systurverkefnisins *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á orkukerfi og samfélag* (2011). Niðurstöður síðarnefndu verkefnanna sýndu að spár um rennsli til 2050 gáfu til kynna að rennsli í íslenskum jökulám gæti aukist frá 27-84% til 2050. Byggt á þessari niðurstöðu var sú ályktun dregin að nýtanlegt vatnsafl gæti aukist um 20% á tímabilinu 2010–2050, en þáverandi orkukerfi gat aðeins ráðið við 38% af þeirri aukningu. Fram kom að aðlaga þyrfti orkukerfið þessum breytingum og hefur Landvirkjun þegar brugðist við, m.a. með því að stækka Búrfellsvirkjun með byggingu Búrfellsvirkjunar II og vinna að breyttri hönnun annarra virkjana á Þjórsársvæðinu.

Landvirkjun framleiðir yfir 90% af uppsettu afli vatnsaflsvirkjana á Íslandi og hefur framleiðslugetu sem nemur um 13,8 TWh á ári. Síðan V2018 kom út hefur verið unnið að auka skilning á áhrifum breytinga á rennslisorku vegna leysinga jökla annars vegar og ártíðabundinna breytinga á snjómagni hins vegar. Í meðalvatnsári verða yfir 50% af rennslisorku Landvirkjunar vegna leysinga jökla og um 15% vegna árstíðabundins snævar. Breytileiki í þessum rennslispáttum, milli ára og innan árstíða, hefur veruleg áhrif á nýtanlegt vatnsafl.

Hönnunarforsendur nýrra vatnsaflsvirkjana, forsendur aflaukningar í núverandi virkjunum og uppfærslur á eldri virkjunum miða við rennslisráðir sem taka tillit til líklegra hitabreytinga

Tafla 9.2: Áhrif loftslagsbreytinga á þætti orkukerfisins

Hluti orkukerfis	Innviðir	Álagsþættir	Áhrif
Framleiðsla	Vatnsafl	Aukið jökulrennsli vegna bráðmunar jökla	Aukin framleiðslugeta til skemmri eða meðallangs tíma (ár, áratugir) Breytt framleiðslugeta til lengri tíma
		Minna jökulrennsli eftir að hámarki er náð	Breytt framleiðslugeta til lengri tíma
	Vatnsafl	Tíðni þurrka og þurra tímabila eykst	Breytt rennslishegðun
		Breytingar á úrkomudreifingu innan árs	Breytt rekstrarmynstur miðlanna
		Breytingar á hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu	Breytt framleiðslugeta
Vindorkuver	Aukin hvassviðratíðni	Truflun á framleiðslu	
Lífmassi	Aukinn sumarhiti	Aukin framleiðslugeta á orkumlöntum	
Flutningur	Raffínur	Aukin ísing, seltuálag, vindálag	Auknar líkur á flutningstruflunum
	Flutningskerfi varma	Aukin úrkoma, hærri hiti	Auknar líkur á flutningstruflunum
	Flutningsleiðir jarðefnaeldsneytis		Truflanir á milliríkjavíðskiptum
Eftirspurn	Framleiðsla hita	Aukinn sumarhiti	Minnkun á eftirspurn eftir orku til húshitunar Aukning á eftirspurn eftir orku til loftkælingar
	Framleiðsla og flutningskerfi raforku	Hvatar til að draga úr notkun jarðefnaeldsneytis	Aukning í eftirspurn eftir rafmagni



Mynd 9.4: Afrennslisbreyting frá þremur íslenskum jöklum frá meðaltali árána 2000 - 2019, samkvæmt fjórum SSP sviðsmyndum. Myndin sýnir meðaltal afrennslisbreytingar hvers jökuls fram til ársins 2100. (Mynd: Andri Gunnarsson Landsvirkjun, Byggt á Rounce ofl. 2023 og uppfærir mynd 5.8 í V2018 sem byggir á mynd 5.7 í Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson (2012)).

á öldinni. Vatnafarslíkön eru kvörðuð með sögulegum athugunum á veðri og vatni og keyrð með endurgreiningu á veðri á öllum starfssvæðum Landsvirkjunar. Líkönin eru nýtt til að meta áhrif breytinga á hitastigi og úrkomu á afrennsli til miðlana og lóna í náinni framtíð með því að breyta inntaki þeirra og nýta líklegar sviðsmyndir fyrir breytt veðurfar fyrir mismunandi tímabil í framtíð. Tekið er tillit til líklegrar þróunar á lögum jökla í framtíð, en hún getur haft mikil áhrif á afrennsliseiginleika þeirra. Forsendur og sviðsmyndir vatnafarslíkana eru uppfærðar á fimm ára fresti til að fá betra mat á líklegri þróun auðlindarinnar. Sviðsmyndirnar eru nýttar til að meta áhrif á daglegan rekstur og viðhald, framleiðslugetu kerfisins innan árstíða og í náinni framtíð en líka til þess að þróa og uppfæra virkjanir til lengri tíma.

Hvað varðar líklega þróun á afrennsli frá jöklum varpar mynd 2.19 í grein 2.3 ljósi á samband sjávarhita og afkomu Vatnajökuls. Nýleg grein (Noël o.fl., 2022) reiknaði líklega þróun fyrir afkomu og afrennsli íslenskra jökla fram til 2100 og byggðust þeir útreikningar á þróun loftslags við losunarsviðsmynd SSP5-8.5 í loftslagslíkaninu CESM2. Í þeirri sviðsmynd var hlýnun á Norður-Atlantshafi mjög skrykkjótt á öldinni í CESM2 líkaninu. Fyrir miðja öldina kólnaði í líkaninu, en á síðasta fjórðungi aldarinnar varð ákóf hlýnun. Niðurstaðan var því sú að afrennsli frá jöklum á Íslandi náði tímabundnu hámarki á fyrsta aldarfjórðungi (2000-2025), dróst svo saman í nokkra áratugi (2025-2050) en jókst ört aftur frá 2050 til 2100 hið minnsta. Eins og fram kom í grein 3.3.2 sýna mörg líkön dæmi um tímabundin kólnunarskeið á öldinni. Þeim ber þó ekki saman um tímasetningu eða umfang kólnunarinnar. Að meðaltali sýna loftslagslíkön hlýnun en gera verður ráð fyrir tímabundnum breytileika á Norður-Atlantshafssvæðinu á öldinni, sem mun væntanlega hafa áhrif á afkomu íslenskra jökla.

Í CES verkefninu og í V2018 voru rannsóknir á líklegri þróun afrennslis jökla kynntar og byggðust þær á niðurstöðum margra loftslagslíkana (Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012). Nýleg hnattræn úttekt notaði niðurstöður frá 82 ólíkum keyrslum loftslagslíkana (CMIP5 líkön með RCP sviðsmyndum og CMIP6 með SSP sviðsmyndum) til að herma þróun jökla á öldinni (Rounce o.fl., 2023). Mynd 9.4 sýnir niðurstöður SSP sviðsmyndanna fyrir Vatnajökul, Langjökul og Hofsjökul og tafla 9.3 dregur saman helstu upplýsingar um þróun afrennslis frá jöklunum.

Rétt eins og í fyrri greiningum (Jóhannesson o.fl., 2007; Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012) eykst afrennsli frá jöklunum og nær hámarki á öldinni. Tímasetning hámarksins fer eftir stærð jökulsins og því hversu mikið hlýnar. Fyrir Langjökul, sem stendur lægst þeirra jökla sem eru í töflu 9.3, nær aukning rennslis jafnvægi fyrir lok aldarinnar. Fyrir hina jöklana

heldur aukningin áfram ef hnattræn hlýnun verður meiri en 2–3 °C. Kólnun í hafi í nokkra áratugi getur seinkað hámarkinu (Noël o.fl., 2022).

Tafla 9.3: Tímasetning hámarks í afrennsli frá þremur jöklum fyrir mismikla hnattræna hlýnun (byggt á Rounce ofl. 2023)

Hlýnunar	Vatnajökull	Hofsjökull	Langjökull
1.5 °C	2040 – 2050	2035 – 2055	2020 – 2050
2.0 °C	2050 – 2080	2030 – 2060	2030 – 2050
3.0 °C	2070 – 2085	2045 – 2060	2050 – 2080
4.5 °C	2070 – 2095	2045 – 2060	2050 – 2070
Aukning rennslis í lok aldarinnar	Enn til staðar hlýni um 2 °C eða meira	Enn til staðar hlýni um 3 °C eða meira	Nær jafnvægi

Framtíðarsviðsmyndir vatnafarslíkans Landsvirkjunar sýna að aukin hlýnun og breytingar á lögun jökla munu skila verulegri aukningu í jökulrennsli. Eins og fram kom í V2018 mun þetta hafa áhrif á nýtanlegt vatnsafl, auk þess sem setsöfnun lóna mun breytast með auknu jökulrennsli. Aurburður getur aukist með afrennsli frá jöklum og skerðir það nýtanlega rýmd lóna til lengri tíma. Þó má þess vænta að jökullón og vötn, sem myndast fyrir framan jökla samhliða hopi þeirra, taki við hluta aurburðar. Þá má gera ráð fyrir að tímasetning hámarksaukningar afrennslis verði fyrr á litlum ísasviðum hulin jökli en stórum. Þannig má gera ráð fyrir auknu afrennsli til Hálslóns vel fram yfir miðbik aldarinnar, en rennsli frá minni vatnasviðum, svo sem Tungná, mun ná hámarki mun fyrr og dragast svo saman á næstu áratugum. Þá er einnig líklegt að breyting verði á árstíðasveiflu afrennslis, samanber umfjöllun í grein 2.2. Mynd 9.5 sýnir áætlaðar breytingar á árstíðasveiflu afrennslis Þjórsár við fossinn Dynk og fyrir innrennsli í Hálslón, fram að miðbiki aldarinnar. Hvað Þjórsá varðar er gert ráð fyrir aukinni jökulbráð síðsumars á komandi áratugum og eykur hún heildarrennslið. Fyrir innrennsli í Hálslón munu tímasetningar ekki breytast mikið, en magn aukast verulega.

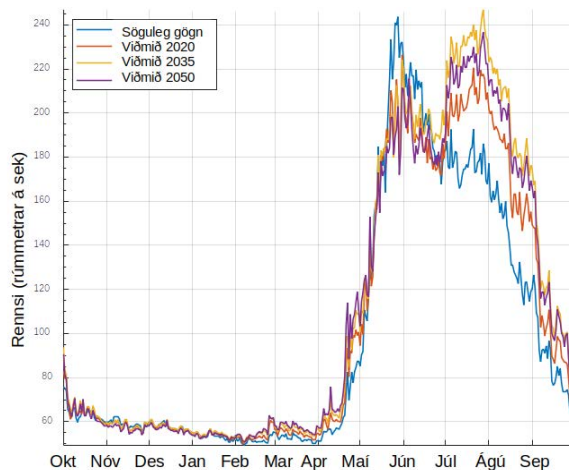
Sú aukning rennslis, sem þegar hefur átt sér stað undanfarin 25 ár, hefur að stórum hluta verið nýtt í núverandi kerfi vatnsaflsvirkjana og miðlana þeirra. Uppfærðar spár, með nýjum gögnum IPCC, benda til þess að aukning afrennslis geti verið meiri fyrir viss vatnasvið á næstu árum og áratugum en í eldra mati. Þó er ljóst að óvissa varðandi tímasetningar er nokkuð mikil. Nýting þessarar rennslisaukningar er háð því að virkjana- og flutningskerfi landsins verði byggð upp í samræmi við þróun auðlindarinnar.

9.3.1.2 Jarðvarmi

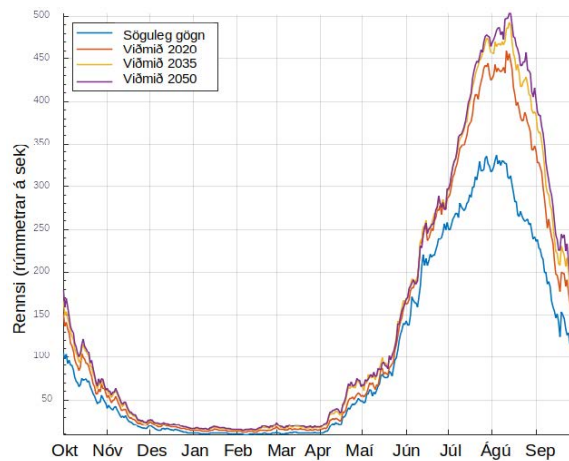
Eins og kom fram hér að framan er framleiðsla raforku með jarðvarma ekki talin háð veðri eða loftslagi. Því eru bein loftslagstengd áhrif á núverandi framleiðslugetu frá jarðvarmavirkjunum hverfandi, að undanskildum mögulegum breytingum á nýtingarmöguleikum við hop jökla. Áhrifin geta þó verið óbein, svo sem vegna áhrifa á innri samkeppnishæfni mismunandi orkukosta. Ef loftslagsbreytingar hafa þau áhrif að framleiðslukostnaður rafmagns með vatnsaflsverum lækkar, getur það skaðað samkeppnishæfni raforku frá jarðvarmaverum og vindorkuverum. Viðleitni til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda mun þó að öllum líkindum auka eftirspurn eftir orkukostum sem geta gefið stöðugt rafmagn og eru ekki háðir veðri.

9.3.1.3 Vindorka

Framleiðsla rafmagns í vindorkuverum, á landi eða í sjó, er yfirleitt vænlegri eftir því sem meðalvindhraði er meiri. Í ICEWIND verkefninu var mat lagt á vindorkuauðlindina á Íslandi og



(a) Rennsli við Dynk í Þjórsá



(b) Innrennsli í Hálslón

Mynd 9.5: Breytingar á árstíðasveiflu rennslis (m^3/s) fyrir Þjórsá við fossinn Dynk og fyrir innflæði í Hálslón. Myndirnar sýna meðalrennsli á vatnsársgrunni fyrir söguleg gögn (1960–2018) og þrjár sviðsmyndir þar sem tekið er tillit til hlýnunar og breytinga á hæðardreifingu jökla innan vatnasviðanna fyrir mismunandi framtíðartímabil, 2020, 2035 og 2050. (Mynd: Andri Gunnarsson, gögn frá Landsvirkjun).

nærleggjandi hafsvæðum (Nawri o.fl., 2014; Hasager o.fl., 2015). Í alþjóðlegum samanburði er vindorka á Íslandi tiltölulega mikil þó vindhviður, illviðri og ísingar dragi úr rekstraröryggi. Eins og rætt er í grein 4.5.1 í V2018 sýna niðurstöður CORDEX verkefnisins að líklega mun draga úr vindi á Íslandi. Breytingar á aftakaveðrum eru ræddar í 10.4.2, en ekki er ástæða til að gera ráð fyrir færri hvassviðrum. Í rannsókn, sem notaði niðurstöður CORDEX verkefnisins til þess að skoða áhrif loftslagsbreytinga á vindorku hér á landi (Helgadóttir, 2014), kom fram að líklega myndu öfgavindar aukast en að sama skapi myndi draga úr meðalvindhraða. Loftslagsbreytingar geta því haft neikvæð áhrif á framleiðslugetu og öryggi innviða tengdum vindorkuverum (Osman o.fl., 2022).

Þróun á sviði vindorku er mikil (Enevoldsen og Xydis, 2019) og vindorkuver hafa orðið stærri og sterkbyggðari á liðnum árum. Tvær nýlegar skýrslur ræða nýtingu vindorku á landi (Hilmur Gunnlaugsson o.fl., 2023) og á hafi (Skýrsla starfshóps, 2023). Bein áhrif loftslagsbreytinga á þróun auðlindarinnar eru ekki rædd í skýrslunum en mikilvægt er að hugað sé að líklegum áhrifum loftslagsbreytinga við staðsetningu vindorkuvera.

9.3.1.4 Lífmassi

Mögulegt er að rækta lífmassa (orkuplöntur), svo sem vetrarrepju og nepju, til að framleiða innlent eldsneyti (lífólíu) og hefur Landbúnaðarháskóli Íslands, í samvinnu við bændur og Samgöngustofu, metið þessa möguleika (Ingveldur Sæmundsdóttir og Jón Bernóðusson, 2021). Auk þess er hægt að nýta ýmis konar ónýttan lífmassa (Hólmgeir Björnsson, 2007) eða þörunga til framleiðslu lífólíu. Gerð hefur verið greining á möguleikum og landrými til aukinnar lífmassaframleiðslu á Suður- og Norðausturlandi (Hólmgeir Björnsson, 2007). Líklegt er að loftslagsbreytingar muni hafa jákvæð áhrif á ræktunarmöguleika ýmissa orkuplantna á Íslandi. Í þessu samhengi var í sérgrein 4B fjallað um líklegar breytingar á mögulegu ræktunarsvæði vetrarrepju og nepju út öldina. Hnattraent fer eftirspurn eftir lífildsneyti vaxandi (OECD-FAO, 2021) og viðbrögð við loftslagsbreytingum munu líklega auka á hana. Í þessu samhengi ber þó að hafa í huga áhrif aukinnar ræktunar orkuplantna á samkeppni um landsvæði, áhrif á líffjölbreytileika og áhrif á losun gróðuhúsalofttegunda, ekki síst vegna framræslu votlendis.

9.3.2 Eftirspurn

9.3.2.1 Raforka

Eins og fjallað var um í V2018 eru breytingar á eftirspurn eftir rafmagni, sem tengja má við loftslagsbreytingar, af tvennum toga. Annars vegar getur hlýnun aukið notkun kælimiðla og loftkælingar og hins vegar eykst eftirspurn eftir rafmagni eða rafeldsneyti vegna orkuskipta.

Margvíslegar sviðsmyndir hafa verið settar fram fyrir breytingar í eftirspurn eftir raforku. Munur sviðsmynda varðandi viðbótarafli og aukna raforkuframleiðslu sem þarf til orkuskipta hverfist um umfang orkuskipta á Íslandi, allt frá einkabílum til fullra orkuskipta, svo sem í flugi og siglingum, hlutfalls rafmagns/rafeldsneytis sem framleitt er á Íslandi og hlutar aukins orkusparnaðar og orkunýtni. Ef miðað er við full orkuskipti þarf að skipta út um 910 þúsund tonnum af olíu, miðað er við olíunotkun ársins 2019 (*Orkumál* 2019). Það ár voru samgöngur á landi rúm 35% af heildarsamgöngum, siglingar tæp 27% (þ.m.t fiskveiðiflotinn, innanlands- og millilandasiglingar) og flug rúm 34% (þar af 1% innanlandsflug).

Starfshópur á vegum umhverfis-, orku- og loftslagsráðherra setti fram fyrsta mat á heildarþörf raforkuframleiðslu til ársins 2040 á grundvelli fullra orkuskipta, byggt á mismunandi sviðsmyndum (Vilhjálmur Egilsson o.fl., 2022). Niðurstöður starfshópsins (sjá töflu 9.4) benda til þess að ef full orkuskipti eiga sér stað gæti það kallað á allt að 125% aukningu í raforkuframleiðslu. Í því tilfalli er miðað við að engin áhersla sé lögð á aukinn orkusparnað eða orkunýtni, allt rafeldsneyti sé framleitt á Íslandi og grænn iðnaður byggður upp. Þörf fyrir aukna raforkuframleiðslu stigminnkar eftir því sem innflutningur á rafeldsneyti eykst, auk þess sem áhersla á orkunýtni og orkusparnað minnkar þörfina. Orkuþörf einnar sviðsmyndanna (Landverndar og Náttúruverndarsamtakanna) var ekki magngreind (sjá töflu 9.4) en sú greining var birt síðar (Ágústa Þóra Jónsdóttir, 2022). Greining Landverndar sýndi að ef full orkuskipti eiga sér stað og mikil áhersla lögð á aukna orkunýtni og orkusparnað, auk breytinga í hópi stórnotenda raforku, krefjast full orkuskipti ekki aukinnar raforkuframleiðslu.

Hér er ekki lagt mat á ólíkar sviðsmyndir en þessar tvær gjörólíku niðurstöður sýna glögg breytilega vegferð orkuskipta. Niðurstöður starfshópsins og Landverndar eru háðar afar ólíkum forsendum varðandi hagvöxt, uppbyggingu og þarfir efnahagslífs og samfélags, tækniþróun og breytingar á milliríkjavíðskiptum (sjá töflu 9.4). Mikilvægt er að fylgst verði með allri þróun á þessu sviði og dregið úr óvissu eins og kostur er. Ákvarðanatataka verður að vera upplýst og tryggt að ekki verði minni hagsmunum fórnað fyrir meiri. Auk þess þarf að miða að því að ná samfélagssátt um þá vegferð sem frammundan er, samanber umfjöllun í grein 6.5.

Ekki liggja fyrir rannsóknir á væntri aukningu í eftirspurn eftir rafmagni á Íslandi vegna aukinnar notkunar kælimiðla, en búast má við einhverri slíkri aukningu (Després og Adamovic, 2020).

9.3.2.2 Hiti

Eftirspurn eftir heitu vatni á Íslandi er háð hita og veðurfari. Líklegt er að loftslagsbreytingar hafi áhrif á eftirspurn eftir heitu vatni. Eins og fram kom í V2018 sýna rannsóknir á vegum Orkuveitu Reykjavíkur (OR) að eftirspurn eftir heitu vatni gæti dregist saman um 5,3% ef hitastig hækkar um 1 °C. Líklegt er að eftirspurn minnki meira að vetri en sumri. Samverkandi áhrif eru á milli hitaveitu og fráveitu á höfuðborgarsvæðinu, þar sem mikil úrkomuákefð dregur úr getu fráveitukerfa til að taka við bakvatni frá hitaveitu (OR, 2020).

Veitur, dótturfyrirtæki OR, hafa unnið 100 ára framtíðarsýn í forðamálum fyrir höfuðborgarsvæðið og Rangárveitur, þar sem tekin er til greina líkleg fólksfjölgun og möguleg áhrif loftslagsbreytinga. Þrátt fyrir að meðalnotkun heits vatns gæti minnkað vegna hlýnunar er mikilvægt er að gera slíkar greiningar fyrir allar hitaveitur landsins. Veitur búast til dæmis við jafnari notkun heits vatns yfir árið, sem hefur þau áhrif að lágheitsvæði ná að safna minni forða yfir sumartímum (OR, 2020).

Tafla 9.4: Forsendur sviðsmynda starfshóps um stöðu og áskoranir í orkumálum (Vilhjálmur Egilsson o.fl., 2022). Grænar kúlur vísa til þess sem er í hverri sviðsmynd og rauðar vísa til þess sem er undanskilið.

Orkuskipti (full í einstaka flokkum)					
Aðili	Fólksbílar	Þung ökutæki	Innanlands- flug	Millilanda- flug	Haf
Grunnspá OS	●	●	●	●	●
„Græn framtíð“ OS	●	●	●	●	●
Vetnisvegvisir	●	●	●	●	●
Samorka I	●	●	●	●	●
Samorka II	●	●	●	●	●
Landvernd/ Náttúru- verndar- samtökin	●	●	●	●	●

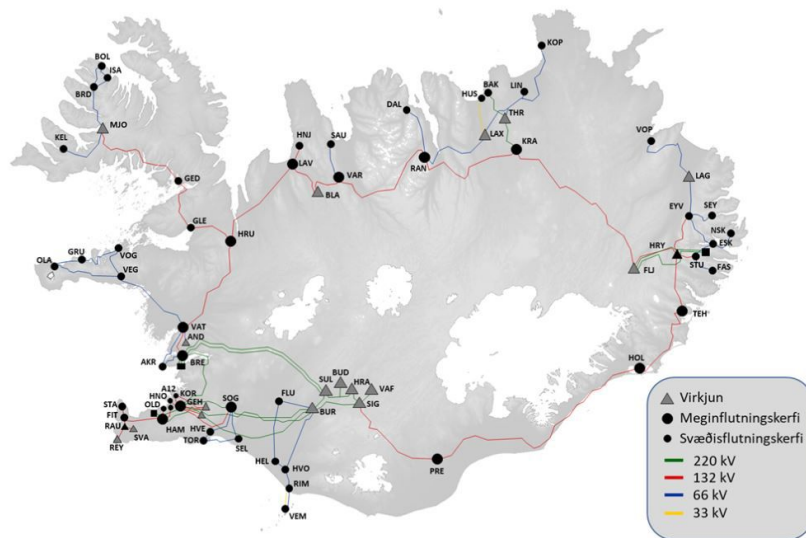
Aðili	Loftslags- markmið stjórnvalda	Orkuþörf almenns markaðar	Vöxtur útflutn- ings	Orkuþörf sviðs- myndar
Aðili	Full orkuskipti, kolefnishlutleysi	Samfélag og almenn notkun		GWh til 2040 (% aukning)
Grunnspá OS	●	●	●	9%
„Græn framtíð“ OS	●	●	●	14%
Vetnisvegvisir	●	●	●	68-125% (2050)
Samorka I	●	●	●	82%
Samorka II	●	●	●	124%
Landvernd/ Náttúruverndar- samtökin	●	●	●	Ekki greint.

Samkvæmt Veitum er mikilvægt að huga að eftirfarandi atriðum svo hægt sé að taka tillit til áhrifa loftslagsbreytinga við nauðsynlega uppbyggingu hitaveitu: i) setja upp og viðhalda spálíkönunum um varmaþörf til framtíðar. ii) greina viðbragðsgetu lághitasvæða við öfgakenndari sveiflum vatnsborðs í tengslum við veðuratburði, minni söfnun á sumrin og jafnari notkun yfir árið. iii) meta áhrif hitaveitunnar á aðrar grunnstöðir samfélagsins á meðan þær bregðast við loftslagsbreytingum (OR, 2020).

9.3.3 Miðlun orku

9.3.3.1 Flutningskerfi raforku

Landsnet á og rekur flutningskerfi raforku á Íslandi. Það er byggt upp af sterku 220 kV kerfi á SV-horninu, auk 220 kV kerfis á Austurlandi. Byggðalína, 132 kV hringtenging, tengir saman allt landið. Unnið er að byggingu nýrrar byggðalínu með 220 kV spennu og hefur verið lokið við línur milli Fljótisdals og Kröflu og Kröflu og Rangárvalla á Akureyri (sjá mynd 9.6). Svæðisbundin kerfi tengjast meginkerfinu og eru þau á 66 kV spennu og flytja orkuna til dreifiveitna (Orkubú Vestfjarða, Rarik, Veitur, Norðurorka og HS Veitur) sem miðla því til notenda.

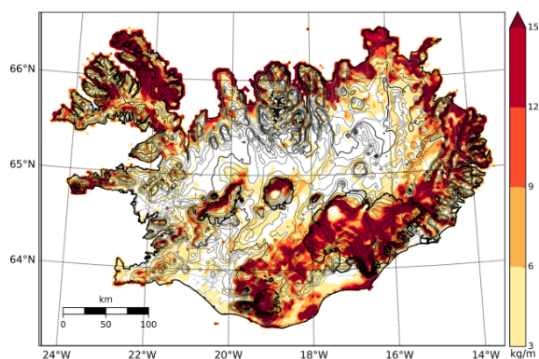


Mynd 9.6: Flutningskerfi Landsnets 2022. (Birt með leyfi).

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á áskoranir Landsnets hvað varðar þróun og rekstur flutningskerfisins. Áskoruninum má skipta í fimm þætti: (1) ísingu, (2) vind, (3) seltu, (4) snjóflóð/skriðu-föll/rof og (5) jarðhræringar. Loftslagsbreytingar hafa bein áhrif á suma þessara þátta en geta haft óbein áhrif á aðra. Stuttlega er fjallað um þessa þætti hér að neðan.

Ísing. Ísingu á raflínum má skipta í skýjaísingu og slydduísingu. Sú fyrri á sér stað þegar þoka eða ský leggst á rafmagnslínur og þær ísast en sú síðari gerist þegar blaut úrkoma frýs á línunum. Skýjaísing á sér aðallega stað þar sem línur fara yfir hálendi en sú síðari getur einnig átt sér stað á láglandi. Ísing á línunum (sjá mynd 9.7) getur orðið tugir sentímetra í þvermál og sligar auðveldlega þann búnað sem hún leggst á. Þetta getur valdið miklu tjóni. Landsnet hefur stundað kerfisbundnar mælingar á ísálagi frá 1977 og ná sum gögn allt aftur til ársins 1930. Greiningar byggðar á þessum gögnum hafa leitt af sér landfræðilegt spálíkan og eru niðurstöðurnar sýndar á korti með staðsetningum á landinu þar sem vænta má mikillar og öfgakenndrar ísingar á flutningslínunum, (sjá mynd 9.7).

Kortið hefur verið borið saman við raunmælingar. Rannsóknir sýna að loftslagsbreytingar þurfa ekki að hafa neikvæð áhrif hvað ísingu varðar. Hins vegar gætu loftslagsbreytingar leitt til



Mynd 9.7: Hægri: Ísing á rafmagnslínu (Ljósm. Landsnet, birt með leyfi). Vinstri: Líkanreikningar af hámarki ísingarálags (km/m) nærri yfirborði (Ágústsson, 2015).

Þess að svæði, sem eru í ísingarhættu í dag, verði í minni hættu í framtíðinni og áhættan færst á önnur svæði. Ísing og mögulegar breytingar á henni eru mikilvægar forsendur við hönnun og skipulag línustæða.

Vindur. Álag vegna vinds á flutningskerfi raforku hefur gegnum tíðina verið mikið og valdið truflunum. Mun algengara er að áhrifa gæti á tréstaurlana sem notaðir eru fyrir 132 kV og 66 kV línur og getur vindálag brotið slíka staura. Oft er um samverkandi áhrif vinds og ísingar að ræða og eru þá auknar líkur á flutningsrofi. Eins og rakið er í grein 10.4.2 kann að draga úr meðalhraða vinds þó ekki sé jafnljóst að dragi úr hámarksálagi vegna vinds (Helgadóttir, 2014). Til framtíðar skiptir því máli að efla styrk flutningskerfisins og draga úr áhættu vegna vindálags.

Selta frá sjó getur borist langt inn á land, jafnvel upp á hálandið. Seltan sest á háspennubúnað og getur myndað leiðandi rás til jarðar og valdið útslætti. Unnið hefur verið að uppsetningu seltumæla til að fylgjast með seltu og í dag er byggt yfir öll ný tengivirki til að verjast ísingum og seltu. Seltuburður frá sjó gerist helst í hvassviðri, og eins og rakið er í grein 10.4.2 er ekki ástæða til að ætla að þeim fækki.



Mynd 9.8: Skemmdir á rafmagnslínum vegna vindálags (Ljósm. Landsnet, birt með leyfi)

Snjóflóð/skriðuföll/rof. Þegar byggja á flutningslínur/flutningsmannvirki þarf að þekkja til sögu snjóflóða og skriðufalla og greina áhættu til framtíðar. Hægt að bregðast við með því

að hnika til mannvirkjum og að reisa innviði, t.d. möstur, sem eiga að að geta klofið snjóflóð. Sjávarrof getur einnig haft áhrif og þegar hefur þurft að færa línur til vegna sjávarrofs.



Mynd 9.9: Lína sem liggur nærri sjávarkambi á Breiðarmerkursandi. (Ljós. Landsnet, birt með leyfi)

Samverkandi áhrif. Við hönnun lína er tekið mið af þeirri þekkingu sem er til staðar, svo sem áhrifum náttúruvár og samspils ísingar og vinds. Notaðir eru opinberir vindstuðlar til að hanna flutningsmannvirki og ef þeir stuðlar breytast, vegna væntra áhrifa loftslagsbreytinga, verður tekið tilliti til þess í hönnun flutningskerfisins.

Uppbygging flutningskerfis miðar að því að auka öryggi. Í dag eru nýjar línur byggðar með tilliti til aukins veðurálags en áður. Auk þess eru nýjar línur gerðar úr þess háttar efni sem eykur rekstraröryggi. Möskvun kerfisins hefur einnig aukist, en það á að draga úr hættu á rofi á þjónustu og tapi í flutningskerfinu. Flutningskerfið sjálft er því nokkuð vel í stakk búið til að standast áhlaup vegna loftslagsbreytinga. Þó þarf að styrkja kerfið svo unnt sé að flytja

raforku milli svæða. Það er ekki síst mikilvægt vegna væntinga um aukna eftirspurn eftir raforku.

Nokkuð hefur verið fjallað um að leggja loftlínur í jörð. Slíkt getur dregið úr líkum á tjóni vegna náttúruvár og er því ein leið til að mæta auknu álagi vegna loftslagsbreytinga. Á móti kemur að launafl í jarðstrengjum er margfalt á við loftlínur. Launaafli eykst eftir því sem spennan er meiri og takmarkar það lengd jarðstrengja (Hjörtur Jóhannsson, 2019). Þetta þýðir að jarðstrengir eru í raun takmörkuð auðlind. Svigrúm til jarðstrengslagna er misjafnt milli landsvæða og mest er það á lægri spennum. Nálægð við stærri virkjanir og möskvun kerfisins eru þættir sem hafa mikla þýðingu fyrir þetta svigrúm.

9.3.3.2 Dreifiveitur

Eins og áður sagði flytja dreifiveitur landsins orkuna til endanlegs notanda. Samkvæmt greiningum Veitna er líklegt að dreifikerfi rafmagns verði ekki fyrir verulegum áhrifum af loftslagsbreytingum. Þó getur aukin tíðni aftakaveðra, aukin úrkomuákefð, leysingar og skriðuföll haft áhrif. Aukinn veðurofsi mun ekki hafa áhrif á dreifikerfi sem eru neðanjarðar en sá hluti raforkukerfisins sem er ofanjarðar gæti orðið fyrir áhrifum (OR, 2020).

Líklegt er að hækkandi hitastig hafi lítil áhrif á rekstraröryggi og óveruleg áhrif á varmaleiðni. Tíðari þurrkar geta þó haft áhrif á varmaleiðni. Jarðstrengir hitna og þurr jarðvegur hefur minni varmaleiðni en rakur jarðvegur. Hægt er að verjast slíku með því að setja viðeigandi jarðveg í kringum strengi (OR, 2020).

Til viðbótar við áhrif á dreifikerfið er líklegt að aukin úrkoma auki líkur á flóðum inn í veitumannvirki. Mikilvægt er að tryggja að veitustöðvar séu varðar gegn slíkum atburðum og varast skal að staðsetja þær í kjöllum húsa þar sem flóðaatburðir geta átt sér stað (OR, 2020).

Mikilvægt er að gera ráð fyrir dreifistöðvum í skipulagsgerð, en líklegt er að aukin notkun rafbíla muni hafa áhrif á aftoppa dreifikerfisins. Rannsókn á vegum HÍ og HR skoðaði áhrif á flutnings- og dreifikerfi raforku vegna rafbílavæðingar. Niðurstöður benda til kerfistengdra veikleika í íslenska raforkukerfinu hvað þetta varðar og kalla þeir á aðgerðir svo hægt sé að bregðast við auknu álagi. Fleiri álagspunkta er að finna á höfuðborgarsvæðinu en annars staðar á landinu. Auk þess má greina vandamál tengd framleiðslu á Reykjanesi og Austurlandi, þar sem aukin flutningsgeta á þessum svæðum er lítil sem engin (K. J. Dillman o.fl., 2021; K. Dillman o.fl., 2021). Frekari rannsókna er þó þörf.

9.3.3.3 Flutningskerfi jarðefnaeldsneytis

Samkvæmt IPCC hefur framleiðsla og flutningskerfi jarðefnaeldsneytis svipað tjónnæmi á heimsvísu og innviðir raforkukerfa. Þó eru sum áhrif sértæk, svo sem áhrif þiðunar sífrera. Að auki geta átök, svo sem vegna loftslagsbreytinga, haft áhrif á flutning jarðefnaeldsneytis milli landa (IPCC, 2023). Slík áhætta hefur ekki verið metin fyrir íslenskt samfélag, sjá nánar umfjöllun um flókna áhættu og aðfangakeðjur í grein 10.3.2.



9.4 Samgöngur

Samgöngur skiptast í vegasamgöngur, siglingar og flugsamgöngur og skiptast helstu innviðir samgangna í vegakerfi, hafnir og flugvelli. Í V2018 var birt yfirlit yfir möguleg áhrif loftslagsbreytinga á innviði samgangna og hefur það verið uppfært í töflum 9.5, 9.6 og 9.8, byggt á skýrslu Ástu Þorleifsdóttur ofl. (2021).

Mynd 9.10: Holumyndun í bundnu slitlagi (Ljós. Páll Kolka, Vegagerðin, birt með leyfi)

Í heild sýna töflurnar að helstu áskoranir í samgöngum vegna loftslagsbreytinga eru tengdar hlýnandi veðri, breytti ofankomu, aukinni illveðratíðni, breytingum á sjávarstöðu og hærri ölduhæð og áhlaðanda. Hætta á sjávarflóðum eykst með hækkandi sjávarstöðu, samanber umfjöllun í greinum 2.5 og 10.4.4. Búast má við því við að tjón af völdum sjávarflóða muni aukast, bæði vegna tjóna á byggingum á áhrifasvæðum og áhrifa á margs konar nauðsynlega innviði. Hér verður stuttlega farið yfir líkleg áhrif loftslagsbreytinga á þá innviði sem tilheyra hverjum samgöngumáta.

Helstu áhrifum loftslagsbreytinga á vegasamgöngur og vegagerð er skipt í fimm flokka, til viðbótar við áhrif á strandsvæði vegna breytinga á sjávarstöðu og ölduhæð.

9.4.1 Vegasamgöngur

Áhrifum loftslagsbreytinga á vegasamgöngur voru gerð skil í V2018 og í skýrslu 2021. Niðurstöður, sem raktar eru í þessum skýrslum, byggja að hluta til á greiningum sem unnar voru fyrir Rannsóknasjóð Vegagerðarinnar og eru meginatriðin rifjuð upp hér að neðan.

9.4.1.1 Áhrif á vetrarþjónustu

Búast má við hækkandi meðalhita og að þörf fyrir snjósmokstur minnki. Meiri þörf verður á hálkuvörnum þar sem sveiflur við frostmark verða algengari.

9.4.1.2 Áhrif á burðarþol vega og endingu slitlags

Þegar sveiflur við frostmark verða tíðari eykur það hættu á skemmdum á slitlagi vega og holumyndun. Skemmdirnar verða vegna niðurbrots steinefna og vatns sem frýs í burðarlagi. Áhrifin eru hvað mest í miklum umferðarþunga, á vorin og í umhleyplingum þegar efstu lög vega þiðna.



Mynd 9.11: Skriða á Siglufjarðarvegi í ágúst 2015. (Ljós. Páll Valdimar Kolka Jónsson, Vegagerðin, birt með leyfi)

Frostþíðusveiflur í hæð valda aukinni skriðumyndun og grjóthruni á vegi. Vaxandi vindstyrkur getur einnig leitt til þess að bundið slitlag flettist af vegum, en dæmi um slíkt má finna í Örafum. Breytingar á grunnvatnsstöðu vegna breytinga á meðalrennsli eða ársúrkomu geta einnig haft áhrif á burðarþol vega.

Tafla 9.5: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á vegasamgöngur. Byggt á (Ásta Þorleifsdóttir, 2021)

Innviðir	Álagsþættir	Áhrif á innviði
Vegir	Hærrí meðalhiti, hitabylgjur, tíðari frost/þíðuferli, þurrkar	Blæðingar og frostverkun í yfirborði vega Holur og skemmdir í burðarlagi Stytttri líftími slitlags, malbiks og brúa Minni snjósmökstur og meiri hálkuvarnir Aukin hætta á gróðureldum Gróður skerðir útsýni frá vegum
	Aukin/breytt ofankoma og flóð	Skemmdir á vegum Flóð á vegum Flóð í ræsakerfum Skriðuföll og grjóthrun Óstöðugleiki undirlags
	Aukin tíðni óveðra	Skemmdir á samgöngumannvirkjum Trjágróður getur teppt umferð
	Almenn áhrif	Lægri ferðahraði Lokanir vega Truflun á flutningskerfum Hærrí viðgerðar og viðhaldskostnaður
Vegir á strandsvæðum	Hækkandi sjávarstaða Aukin tíðni aftakaveðra Aukin úrkoma, samverkandi þættir, ölduhæð, áhlaðandi, sjávarrof/sjógangur	Flóðahætta á lágsvæðum Rof í vegum vegna ágangs sjávar Aukin hætta á skriðuföllum í bröttum hlíðum
Fjallvegir	Minna frost í jörðu	Minni stöðugleiki undirlags Skriðuföll m.a. vegna þiðnandi sífrera

9.4.1.3 Áhrif á stöðugleika jarðlaga

Hlýnun og breytingar á úrkomumynstri, auk afleiddra afleiðinga svo sem breytinga á snjóþekju og gróðurfari, geta hraðað bráðnun sífrera. Slík bráðnun getur valdið aurskriðum og grjóthruni sem getur truflað vegasamgöngur og valdið tjóni á innviðum (sjá mynd 9.11). Aukin úrkomuákefð getur einnig aukið tíðni skriðufalla. Nýlegt dæmi um það eru skriðuföllin á Seyðisfirði.

9.4.1.4 Áhrif á ræsi og brýr.

Veðurtengd áhrif á ræsi og brýr tengjast einkum rennslistoppum, en loftslagsbreytingar hafa áhrif á ýmsa þætti sem ákvarða stærð þeirra, s.s. úrkomuákefð, snjóalög (sem geta leitt til

flóða í asahláku) og dreypni (sem er m.a. háð gróðurfari og því hvort jörð er frosin eða þiðin). Breytingar á úrkomuákefð, tegund úrkomu og hitasveiflur geta því haft áhrif á ræsi og brýr. Slíkt þarf þó að meta í hverju tilviki fyrir sig og greiningar hingað til hafa ekki gefið tilefni til þess að endurskoða hönnunarforsendur. Dæmi eru um að breytingar á vatnafari, vegna bráðununar jökla, hafi haft áhrif á notkun og notagildi innviða, svo sem þegar Skeiðará breytti um farveg og færðist yfir í farveg Gígju.

9.4.1.5 Aðrir áhrifaþættir

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á aðra þætti sem hafa afleiðingar fyrir vegakerfið. Sem dæmi má nefna aukinn vöxt gróðurs sem getur skapað hættu á gróður-/skógareldum og kallað á breytingar á vegatengdum innviðum, svo sem vegna kröfu um flóttaleiðir. Aukinn vöxtur gróðurs getur einnig byrgt sýn við vegamannvirki og kallað á aukið viðhald.

9.4.2 Flugvellir og flug

Helstu árhif loftslagsbreytinga á innviði flugsamgangna eru tekin saman í töflu 9.6. Áhrif á flugvelli eru svipuð og á innviði vegasamgangna. Að auki geta truflanir á einum samgöngumáta haft áhrif á hinn, t.d. gæti rof á vegasamgöngum haft áhrif á aðkomu að flugvelli.

Tafla 9.6: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á flugvelli og flugsamgöngur.

Álagsþættir	Áhrif á innviði
Hærrí meðalhiti, hitabylgjur, tíðari frost/þíðuferli, þurrkar	Farmur getur þarfnast kælingar á flugvelli Skemmri líftími flugbrauta Blæðingar og skemmdir á flugbrautum Lengra flugtak, lengri flugbrautir eða minni þyngd Breyttar vindáttir og notagildi flugbrauta
Aukin ofankoma og flóð	Flóðahætta og hætta á skemmdum á flugbrautum
Auknir tíðni óveðra	Vindskemmdir á flugbrautum, aðreinum og byggingum
Hækkandi sjávarstaða ölduhæð, áhlaðandi, sjávarrof/sjógangur	Aukin hætta á sjógangi og flóðum Sjávarrof vegna ágangs
Fleiri aftakaveður, samverkandi þættir	Hætta á hálfu á flugbrautum
Almenn áhrif	Lokun flugvalla Hærrí viðhaldskostnaður Tafir á samgöngum

Afbrigði í veðri hafa þegar haft áhrif á flugvelli, t.d. hefur úrkomuákefð og asahláka valdið flóðum á flugvöllum, bæði á Egilsstöðum og Siglufirði. Þar að auki er hluti innviða Ísafjarðarflugvallar á snjóflóðasvæði Kirkjubólshlíðar (Ásta Þorleifsdóttir, 2021). Flóðahætta er til staðar á fleiri flugvöllum, til dæmis gæti Akureyrarflugvöllur bæði orðið fyrir áhrifum af vatnsflóðum vegna vorleysinga í Eyjafjarðará og vegna sjávarflóða. Tafla 9.7 sýnir flugvelli á lágsvæðum, eða í minna en fimm metra hæð yfir sjávarmáli.

Tafla 9.7: Flugvellir í AIP hæð undir fimm metrum (Ásta Þorleifsdóttir, 2021)

Millilandflugvellir	
Akureyri	1.5
Flugvellir innanlands	
Bíldudalur	3.4
Hornafjörður	2.1
Ísafjörður	2.3
Sauðárkrókur	2.4
Vopnafjörður	2.4
Lendingarstaðir	
Djúpivogur	1.5
Norfjörður	1.5

Áhrif á Keflavíkurflugvöll geta orðið vegna þoku og breytinga á vindáttum og vindstyrk. Þetta á líka við um aðra flugvelli, þó sérstaklega þar sem aðflug er krappt (Ásta Þorleifsdóttir, 2021).

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á flug og flugtak. Vegna þess að hlýtt loft er léttara en kalt getur hlýnun haft áhrif á mögulega flugtaksþyngd eða nauðsynlega lengd flugbrauta (Ásta Þorleifsdóttir, 2021; Wang o.fl., 2023). Einnig er mögulegt að loftslagsbreytingar geti haft áhrif á háloftastrauma og orsakað breytingar á vindmynstri og aukið ókyrrð í lofti. Slíkar breytingar geta haft áhrif á flugleiðir, ferðatíma og eldsneytisnotkun (Ásta Þorleifsdóttir, 2021).

9.4.3 Samgöngur á sjó

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á siglingar á sjó, sem og hafnir og önnur mannvirki sem þeim tengjast. Áhrifin tengjast helst breytingum á tíðni óveðra, auknum öldugangi og breytingum á úrbreiðslu hafíss, þá sérstaklega ísjaka. Tafla 9.8 dregur saman helstu áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur í sjó (Ásta Þorleifsdóttir, 2021) en helstu þættir eru ræddir frekar hér að neðan. Fyrst verður fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á hafnarmannvirki og sjávarstöðuhækkun á lágsvæðum og síðan verður fjallað um breytingar á siglingaleiðum.

9.4.3.1 Áhrif á strandvarnir, lágsvæði og hafnarmannvirki

Fjallað var um áhrif loftslagsbreytinga á lágsvæði og strandvarnir í V2018. Helstu áhættuþættir eru flóðahætta og skemmdir vegna hækkunar sjávarstöðu og aukinnar tíðni illviðra með áhlaðanda. Landsig (sjá umfjöllun í greinum 2.5 og 10.4.4) eykur á vandann, en jafnvel þar sem land rís vegna massataps jökla, eins og í Hornafjarðarhöfn, verða vandamál vegna setmyndunar í höfn og innsiglingu.

Viðbrögð við þessum áhættuþáttum fela í sér uppbyggingu sjóvarna á lágsvæðum og uppbyggingu og lagfæringu á höfnum. Vegagerðin fer með framkvæmd laga um sjóvarnir og felur hluti samgönguáætlunar í sér áætlanir um sjóvarnir, bæði hvað varðar strandvarnir á lágsvæðum og hafnarmannvirkjum. Þá er einnig tekið tillit til sjóvarna fyrir vegakerfið þar sem áhrif loftslagsbreytinga á vegakerfið gætu orðið nokkur, m.a. á strandvegi og vegfyllingar við sjó, t.d. þar sem firðir hafa verið þveraðir. Sveitarfélög sækja um framlag til Vegagerðarinnar vegna sjóvarna og er nauðsyn framkvæmda metin með hliðsjón af hættu á sjávarflóðum, landbroti og kostnaði og þeim forgangsraðað. Vegagerðin er einnig umsagnaraðili um skipulag á lágsvæðum en í dag er stuðst við endurskodaðar viðmiðunarreglur frá 2018 (Sigurður Sigurðarsson, 2018).

Hækkun sjávarborðs, aukin úrkomuákefð, illviðri, aukin ölduhæð og samverkan þessara þátta geta haft áhrif á innviði vegasamgangna vegna aukinnar hættu á flóðum og strandrofi. Strandrof

Tafla 9.8: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur á sjó, hafnir og önnur mannvirki á lágsvæðum

Innviðir	Álagsþættir	Áhrif á innviði
Hafnir og mannvirki á lágsvæðum	Hærri sjávarstaða	Skemmdir á höfnum vegna rofs og ágangs sjávar
	Flóð/skriðuföll Aukin illviðratíðni	Flóðahætta Álag á ofanvatnskerfi Skemmdir vegna vatnsaga
	Almenn áhrif	Truflun á flutningskerfum, tafir og lokanir. Aukinn viðhalds- og framkvæmdakostnaður.
Flutningur á hafi	Breytingar á sjávarstöðu	Siglingaleiðir kunna að verða fyrir áhrifum vegna breytinga á setmyndun við grynningar
	Breytingar á skilyrðum í hafi	Aukin illviðri og ölduhæð hefur áhrif á skip og siglingar
	Ólík hlýnun lofts og sjávar	Hætta á skemmdum á farmi, breytingar á þokutíðni
	Færri dagar undir frostmarki	Minni vandamál vegna ísingar
	Minni hafís og ísmyndun	Nýjar siglingaleiðir, lengra siglingatímabil

getur síðan aukið líkur á grjóthruni og skriðuföllum. Samkvæmt skýrslu Ástu Þorleifsdóttur o.fl. (2021) þarf sérstaklega að huga að stöðum þar sem lágar brýr þvera firði, svo sem við Breiðafjörð og Breiðdalsvík, og þar sem hætta er á ofanflóðum eða skriðuföllum, svo sem í Kambanesskriðum, Almenninum og Eyrarhlíð.

Jarðskorpuhreyfingar hafa einnig áhrif á breytingar á hæð sjávarborðs en landsig hefur til dæmis átt sér stað á Reykjanesi, Reykjavík, Siglufirði og Ísafirði. Landris hefur orðið á Suðausturlandi, t.d. við Höfn í Hornafirði þar sem landris er viðvarandi (sjá umfjöllun í grein 2.5.3 og töflu 2.9).

Fjallað var um sjávarstöðubreytingar í V2018 (sjá árgrip í töflu 5.8 í V2018) og uppfært mat á þeim er gefið í grein 2.5. Í niðurstöðum V2018 var metið að líkleg hækkun eiginlegrar sjávarstöðu héraendis væri um 20-40% af hnattrænni sjávarstöðubreytingu auk þess sem taka þyrfti tillit til jarðskorpuhreyfinga. Í töflu 5.8 í V2018 voru skoðuð þrjú ólík tilvik um hnattræna hækkun (50, 75 og 100 cm) og að teknu tilliti til landhæðarbreytinga var lagt mat á afstæðar sjávarstöðubreytingar (þ.e. staðbundnar breytingar) fyrir ólíka landshluta. Þessar niðurstöður hafa verið notaðar í útreikningum á líklegri sjávarstöðuhækkun, en til að mæta óvissu um massatap ísbreiðunnar á Suðurskautlandi hefur að auki verið bætt við 35 cm óvissuálagi á niðurstöður V2018.

Þessar tölur eru uppfærðar í grein 2.5 og þar er meðal annars tekið tillit til niðurstaðna IPCC um að þó líkleg hækkun sé á bilinu 0.5–1 m sé ekki hægt að útiloka meiri hækkun. Í greininni kemur fram að ekki er stórvægilegur munur á sjávarstöðubreytingum í hlýjustu sviðsmyndum í AR5 og AR6 en í síðari skýrslunni er einnig skoðuð sviðsmynd sem *lítil víska* er fyrir og þá skoðaði IPCC ((Fox-Kemper o.fl., 2021, sjá töflu 9.8)) árið 2150. Það ár er ekki það fjarri í tíma að gera má ráð fyrir að mannvirki sem nú eru byggð geti enn verið til staðar þá. Í versta tilvikinu sem AR6 skoðaði verður langtímahækkunin 5 m til ársins 2150 og enn meiri árið 2300 (Fox-Kemper o.fl., 2021). Því má segja að þó ekki muni miklu um hækkun í hlýjustu sviðsmyndum frá AR5

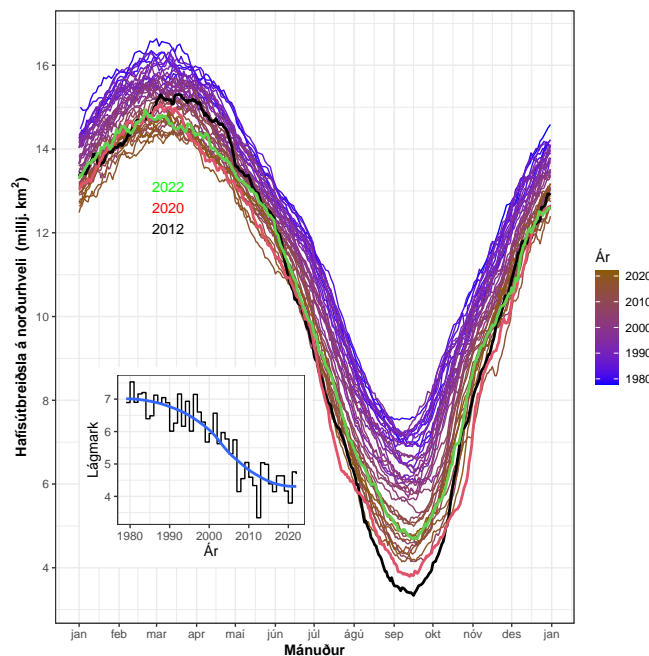


Mynd 9.12: Flóð í höfninni á Patreksfirði (Ljós. Smári Gestsson, birt með leyfi).

til AR6 hafi óvissan aukist verulega. Það gæti gefið til kynna að núverandi útreikningar á sjávarstöðubreytingum í V2018 séu vanmat, jafnvel með 35 cm öryggismörkum. Þetta er rætt frekar í grein 10.4.4.

Til að meta samlegðaráhrif þeirra þátta sem hafa áhrif á sjávarflóð notar Vegagerðin spálíkan (Tryggvadóttir, 2020) fyrir samlíkur á hárrí sjávarstöðu, áhlaðanda, háum öldum og vindi. Líkanið er notað til að skýra líkur á ágjöf sjávar yfir sjóvarnarmannvirki eða náttúrulegan sjávarkamb. Nú þegar hefur verið ráðist í hækkun sjóvarna við Saudárkrók byggt á þessari aðferðafræði (Ásta Þorleifsdóttir, 2021) auk þess sem greiningar hafa verið unnar fyrir nokkra staði á landinu, svo sem Ægisbraut á Akranesi.

9.4.3.2 Þróun hafisþekju og áhrif á siglingar



Mynd 9.13: Útbreiðsla hafíss (millj km²) frá 1979 til 2022 (15% þéttleiki eða meiri). Árstíðasveiflan fyrstu árin er sýnd með blálituðum línunum en síðustu árin eru brúnlituð. Árin 2012, 2020 og 2022 eru merkt sérstaklega. Litla myndin sýnir þróun lágmarks hvers árs og bláa línan sýnir útjafnaðan feril. (Uppfærð mynd 4.28 í V2018).

Fjallað var um hafis á norðurslóðum í grein 4B í V2018 og bent á að hann hafi dregist verulega saman á síðustu áratugum. Mynd 9.13 sýnir þróun hafisþekju á norðurslóðum frá 1979. Myndin sýnir að útbreiðsla hafíss hefur dregist saman í öllum mánuðum, en mestur er samdrátturinn þó að sumri og hausti. Litla myndin sýnir þróun árslágmarksins. Það dróst mjög hratt saman á fyrsta áratug þessarar aldar en á síðustu árum hefur hægt á samdrættinum. Þó var lágmarksútbreiðslan árið 2020 sú önnur lægsta í mæliröðinni, en sú lægsta var 2012.

Myndin endurspeglar breytingar fyrir allan hafis á Norðurheimskautssvæðinu. Á íslensku hafsvæði er hafis helst í og við Austur-Grænlandsstrauminn, sem er kaldur hafstraumur sem streymir til suðurs, meðfram austurstönd Grænlands. Á þessu svæði hefur samdráttur ekki verið jafn ákafur og fyrir norðurslóðir í heild sinni. Eftir sem áður hefur ísinn þynnst og hlutfall fjölærs hafíss minnkað. Myndin byggir á gervitunglagögnum (NSIDC, 2023) sem greina aðeins íspéttleika yfir

15% af flatarmáli. Mjög gisinn ís er því vanmetinn og dregur það úr mati á hafís á jaðarsvæðum, t.d. á íslenskum hafsvæðum.

Í V2018 var farið yfir niðurstöður AR5 um horfur á áframhaldandi samdrætti hafíss og í AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er lagt mat á hversu mikið þurfi að hlýna svo að lágmark hafísþekjunnar fari undir eina milljón km². Við þau mörk má gera ráð fyrir að Íshafið verði að jafnaði nánast íslaust að sumri, að minnsta kosti hvað siglingar varðar. Niðurstaðan er sú að við 3 °C hnattræna hlýnun má gera ráð fyrir að Íshafið verði nánast íslaust að sumri, en hækki hnattrænn hiti um 1,5 - 2 °C gerist slíkt einungis í sumum árum. Þó gögn sýni umtalsverðan breytileika milli ára bendir flest til þess að samdráttur hafísþekju haldi áfram og því eru minni líkur á langvarandi harðindatímabilum og hafísárum með vítækum áhrifum á fiskveiðar, siglingar og afkomu.

Áskoranir vegna minni hafísþekju eru margvíslegar. Hafís mun enn verða til staðar, að minnsta kosti hluta úr ári og hann getur truflað siglingar og valdið hættu og tjóni. Það sama gildir um lagnaðarís á fjörðum. Mögulegt er að borgarísjakar gætu orðið stærra vandamál í framtíðinni, einkum ef íshellur á norðausturhluta Grænlands brotna upp í auknum mæli. Erfitt er að spá fyrir um rek borgaríss en hann ristir dýpra en annar hafís og verður fyrir meiri áhrifum strauma. Dæmi eru um mikinn skaða á norðurslóðum vegna óhappa af völdum hafíss og borgaríss, svo sem skipaskaðar, olíumengun og tjón sjókvía, sem getur bæði verið fjárhagslegt og vistfræðilegt.

Öryggismál tengd tengd hafís, borgarís og lagnaðarís skipta miklu máli og mikilvægt að vöktun sé sinnt. Alþjóðleg samvinna um eftirlit, vöktun og miðlun hafísupplýsinga (IICWG, 2023) hefur frá árinu 1999 unnið að samþættingu vinnubragða og miðlunar aðila sem sinna hafíseftirliti. Þáttaka Íslands í slíku samstarfi hefur reynst árangursrík og mikilvægt að henni sé haldið áfram.

9.4.3.3 Breytingar á siglingaleiðum

Vegna samdráttar á hafís á norðurslóðum er búist við að nýjar skipaleiðir opnast og leiði til aukinna skipaferða fjarri mikilvægum innviðum. Það á til dæmis við í tengslum við ferðamennsku, farmsiglingar og aukna auðlindanýtingu á hafsvæðum sem verða aðgengileg.

Mynd 9.16 sýnir siglingar inn á norðurslóðir frá 2013 til 2019. Slíkar siglingar skiptast í tvo flokka, annars vegar siglingar innan norðurslóða (*e. Inter-Arctic*) og hins vegar siglingar yfir Íshafið (*e. Trans-Arctic*), milli Norður-Atlantshafs og Kyrrahafs. Væntingar eru um að aukning verði í báðum flokkum vegna vinnslu auðlinda og flutninga á sjó. Flutningsleiðir geta styst umtalsvert með tilheyrandi lækkun eldsneytiskostnaðar þó óvíst sé um tímasparnað (Elíasson,



Mynd 9.14: Hafíseftirlit (Ljós. Landhelgisgæslan, birt með heimild).

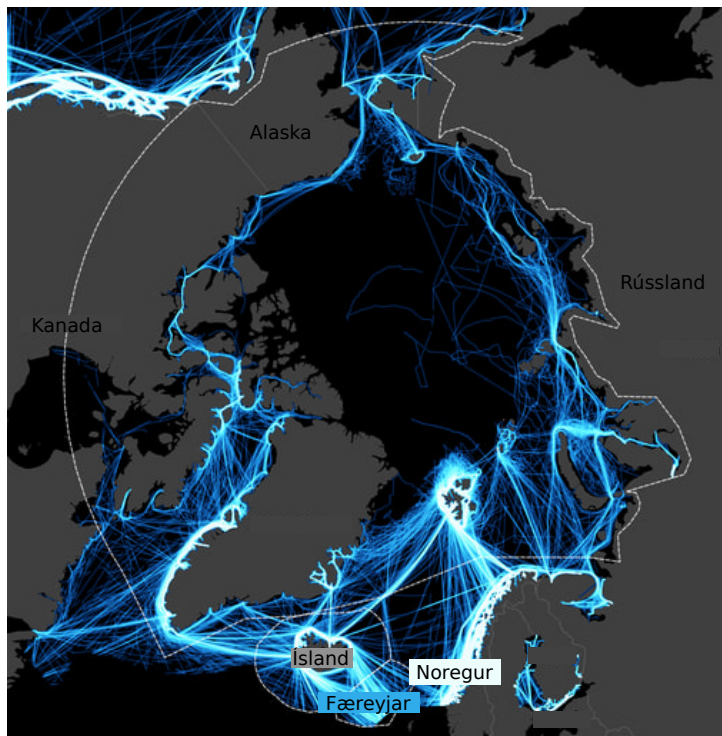


Mynd 9.15: Hafís á Siglingaleið (Ljós. Svanhildur Egilsdóttir, Haf og Vatn, birt með leyfi).

2014). Siglingar um Norðurhafið hafa þegar aukist og á tímabilinu 2013-2019 jókst fjöldi skipa um 25% og sigld vegalengd um 75%. Fiskiskip eru algengust á þessu svæði en að auki er nokkuð um ísbrjóta og rannsóknaskip. Ferðamennska á svæðinu hefur einnig aukist og árið 2019 sigldu 73 skemmtiferðaskip inn á svæðið (PAME, 2020).

Þrjár nýja siglingaleiðir yfir Íshafið eru taldar líklegastar. Norðvesturleiðin, sem liggur að mestu við strendur Kanada; Miðleiðin yfir Norðrúpólinn og Norðausturleiðin, sem liggur við strendur Rússlands. Norðausturleiðin er þegar opin fyrir siglingar síðsumars og hafa verið reistir innviðir í Rússlandi vegna þessa. Eins og rakið er í V2018 fo' r sérhannað vöruflutningaskip Norðvesturleiðina 2013, en sú leið er enn lokuð flest ár. Væntanlega munu ár eða áratugir líða uns Miðleiðin opnast fyrir flutninga (Ráðherranefnd um málefni norðurslóða, 2015) en hún er talin líklegust til að gagnast Íslandi best (Hagfræðistofnun, 2019).

Í V2018 var bent á að spár geri ráð fyrir að á Norður-Íshafi haffis að mestu á sumrin. Þó sé mikil óvissa varðandi hversu mikil áhrif auknar siglingar á norðurslóðum muni hafa á Ísland. Tengdist það meðal annars hvort flutningsaðilar telji hagstætt að hafa viðkomu á Íslandi, en slíkt myndi kalla á uppbyggingu videigandi innviða í landinu. Hagfræðistofnun Háskóla Íslands lagði mat á hvort það gæti orðið hagstætt fyrir flutningsaðila að nota Ísland sem uppskipunarhöfn (Hagfræðistofnun, 2019).



Mynd 9.16: Siglingar inn á norðurslóðir á tímabilinu 2013 til 2019. (PAME 2021 birt með leyfi).

um gerð skipa, siglingar og rekstur skipa á norðurslóðum og tekur til öryggis- og umhverfisþátta. Þrátt fyrir að þetta regluverk sé til bóta eru þeir óvissuættir sem taldir eru upp í greiningu Ástu Þorleifsdóttur o.fl. (2021) enn til staðar:

- Óvissa vegna öryggismála.
- Óvissa um skilyrði til siglinga, svo sem vegna ísjaka og myrkurs.
- Óvissa um kostnað vegna smíði og reksturs sérútbúinna skipa sem og tryggingar.

Niðurstöður Hagfræðistofnunar benda til að í engri þeirra sviðsmynda sem metnar voru fyrir norðaustur og Norðvesturleiðirnar kom Ísland út sem hagstæðasti kosturinn. Á þessum leiðum þyrfti því að veita verulegan afslátt af umskipunargjaldi og jafnvel dygði slíkur afsláttur ekki til. Hins vegar sýna niðurstöðurnar að á Miðleiðinni gæti Ísland haft samkeppnisforskot, m.a. vegna mögulegs hafnarstæðis í Finnafirði. Uppbygging uppskipunarhafnar þar gæti haft jákvæð efnahagsleg áhrif, m.a. með beinum og afleiddum störfum (Hagfræðistofnun, 2019).

Árið 2017 gekk í gildi alþjólegt regluverk sem kallað er Pólkóðinn (IMO, 2017), en það er lögboðið alþjóðlegt regluverk á vegum Alþjóðasiglingamálastofnunarinnar. Tilgangur þess er að auka öryggi skipa á norðurslóðum og draga úr neikvæðum áhrifum siglinga um svæðið á íbúa og viðkvæmt umhverfi hafsvæða og stranda. Pólkóðinn setur reglur

- Óvissa vegna mögulegra áhrifa á lífríki norðurslóða, sem er afar viðkvæmt öllu áreiti. Helstu áhyggjuefnin eru mengun frá útblæstri skipa, losun skólps, sorps og skaðlegra efna, mengunarslys vegna olíu, tilfærsla ágengra lífvera, hávaði og árekstrar.

Mikilvægt er fyrir Íslendinga að fylgjast vel með þróun siglinga á norðurslóðum og stuðla að því að þeim sé stýrt skynsamlega, með öryggi og lágmörkun umhverfisáhrifa í huga.

Heimildir

- Alþingi (2009). *Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna, nr. 9/2009, með síðari breytingum*. Alþingi. URL: <https://www.althingi.is/lagas/nuna/2009009.html>.
- Andradóttir, H.Ó., A.R. Arnardóttir og T. Zaqout (2021). „Rain on snow induced urban floods in cold maritime climate: Risk, indicators and trends“. Í: *Hydrol. Proc.*, bls. 14298.
- Ágústa Þóra Jónsdóttir (2022). *Sviðsmyndir Landverndar um raforkunotkun 2040*. Tæknileg skýrsla. Landvernd.
- Ágústsson, Hálfán (2015). „Mesoscale aspects of atmospheric flow in complex orography“. Dissertation submitted in partial fulfillment of a Philosophiae Doctor degree in Physics. Philosophiae Doctor dissertation. University of Iceland. URL: <https://rafhladan.is/handle/10802/10532>.
- Ásta Þorleifsdóttir (2021). *Áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur: forsendur aðlögunar*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytið.
- BGO Reykjavík (2021). *Blágrænar ofanvatnslausnir í Reykjavík*. URL: <https://www.bgoreykjavik.com/>.
- Björnsson, Hólmgeir (2007). *Framleiðsla lífmassa á Suðurlandi og Norðausturlandi—Skýrslur til Íslenska lífmassafélagsins*. Fjölrit Lbhi nr. 13. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: http://www.lbhi.is/sites/lbhi.is/files/gogn/vidhengi/thjonusta/utgefid_efni/RitLbhi/Rit_Lbhi_nr_13.pdf.
- Clarke, L., Y.-M. Wei, A. De La Vega Navarro, A. Garg, A.N. Hahmann, S. Khennas, I.M.L. Azevedo, A. Löschel, A.K. Singh, L. Steg, G. Strbac og K. Wada (2022). „Energy Systems“. Í: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.008.
- Després, J. og M. Adamovic (2020). *Seasonal impacts of climate change on electricity production*. Tæknileg skýrsla. European Commission Joint Research Centre, bls. 36. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/900c6f8e-9652-11ea-aac4-01aa75ed71a1/language-en>.
- Dillman, Kevin, Michał Czepkiewicz, Jukka Heinonen, Reza Fazeli, Áróra Árnadóttir, Brynhildur Davíðsdóttir og Ehsan Shafiei (2021). „Decarbonization scenarios for Reykjavík’s passenger transport: The combined effects of behavioural changes and technological developments“. Í: *Sustainable Cities and Society* 65, bls. 102614.
- Dillman, Kevin Joseph, Reza Fazeli, Ehsan Shafiei, Jón Örvar G Jónsson, Hákon Valur Haraldsson og Brynhildur Davíðsdóttir (2021). „Spatiotemporal analysis of the impact of electric vehicle integration on Reykjavík’s electrical system at the city and distribution system level“. Í: *Utilities Policy* 68, bls. 101145.
- Dúpivogur (2010). *Vatnslaust á Djúpavogi*. Sveitarfélagið Djúpivogur (nú Múlaþing). URL: <https://djupivogur.is/Frettit/Adalvefur/Vatnslaust-a-Djupavogi---Nyjar-myndir>.
- Eliasson, Kjartan (2014). „Mapping Evaluation of the Future Arctic, Implications for Iceland“. Submitted in partial fulfillment of a Magister Scientiarum degree in Environmental Engineering. Master’s thesis. Reykjavík, Iceland: University of Iceland.
- Enevoldsen, Peter og George Xydis (2019). „Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components“. Í: *Energy for Sustainable Development* 50, bls. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.003>.
- Fenger, Jes (2007). „Impacts of climate change on renewable energy sources. Their role in the Nordic energy system“. Í.

- Forzieri, Giovanni, Alessandra Bianchi, Filipe Batista e Silva, Mario A. Marin Herrera, Antoine Leblois, Carlo Lavalle, Jeroen C.J.H. Aerts og Luc Feyen (2018). „Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe“. Í: *Global Environmental Change* 48, bls. 97–107. ISSN: 0959-3780. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378017304077>.
- Fox-Kemper, B, H T Hewitt, C Xiao, G Aðalgeirsdóttir, S S Drijfhout, T L Edwards, N R Golledge, M Hemer, R E Kopp, G Krinner, A Mix, D Notz, S Nowicki, I S Nurhati, L Ruiz, J.-B. Sallée, A B A Slangen og Y Yu (2021). „Ocean, Cryosphere and Sea Level Change“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 1211–1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011.
- Goldstein, Barry, Gerardo Hiriart, Ruggero Bertani, Charles Bromley, Luis Gutiérrez-Negrí, Ernst Huenges, Hirofumi Muraoka, Arni Ragnarsson, Jefferson Tester og Vincenzo Zui (2011). „Geothermal Energy“. Í: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Grétar Mar Hreggviðsson (2010). „Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi“. BSc ritgerð. Háskólinn í Reykjavík.
- Gunnarsdóttir, María J., Sigurdur M. Gardarsson, Anna Charlotte Schultz, Hans-Jörgen Albrechtsen, Lisbeth Truelstrup Hansen, Kim Steve Gerlach Bergkvist, Pekka M. Rossi, Björn Klöve, Mette Myrmel, Kenneth M. Persson, Magnus Eriksson og Jamie Bartram (2020). „Status of risk-based approach and national framework for safe drinking water in small water supplies of the Nordic water sector“. Í: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113627>.
- Gunnarsdóttir, María J., Kenneth M. Persson, Hrunð O. Andradóttir og Sigurdur M. Gardarsson (2017). „Status of small water supplies in the Nordic countries: Characteristics, water quality and challenges“. Í: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 220.8, bls. 1309–1317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.08.006>.
- Hagfræðistofnun (2019). *Siglingar á norðurlóðum – Ísland í brennidepli*. Tæknileg skýrsla C19:06. Háskóli Íslands.
- Hasager, Charlotte Bay, Merete Badger, Nikolai Nawri, Birgitte Rugaard Furevik, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Niels-Erik Clausen (2015). „Mapping offshore winds around Iceland using satellite Synthetic Aperture Radar and mesoscale model simulations“. Í: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8.12, bls. 5541–5552.
- Helgadóttir, Birta Kristín (2014). „Possible impacts of climate change on the wind energy potential in Búrfell“. M.Sc. thesis. Faculty of Civil og Environmental Engineering, University of Iceland.
- Hilmar Gunnlaugsson, Björt Ólafsdóttir og Kolbeinn Óttarson Proppe (2023). *Vindorka Valkostir og greining - Skýrsla starfshóps um vindorku*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið.
- Hjörtur Jóhannsson (2019). *Jarðstrengir í flutningskerfi raforku - Takmarkanir og áhrif notkunar jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku*. Tæknileg skýrsla. Samráðsgátt.
- Hlöðversdóttir, Ásta Ósk, Brynjólfur Björnsson, Hrunð Ólöf Andradóttir, Jónas Eliásson og Philippe Crochet (2015). „Impacts of climate change on combined sewer systems in Reykjavík“. Í: *Water Science and Technology* 71.10, bls. 1471–1477. DOI: 10.2166/wst.2015.119.
- IICWG (2023). *International Ice Charting Working Group*. National Snow og Ice Data Center, University of Colorado Boulder. URL: <https://nsidc.org/> (skoðað 2023).

- Osman, A. I., L. Chen, M. Yang og et al. (2022). „Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review“. Í: *Environmental Chemistry Letters*. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-0.
- PAME (2020). *The Increase in Arctic Shipping 2013-2019*. Tæknileg skýrsla. Arctic Shipping Status Report (ASSR).
- (2021). *Arctic Marine Tourism*. URL: <https://pame.is/projects-new/arctic-shipping/pame-shipping-highlights/415-arctic-marine-tourism>.
- Ráðherranefnd um málefni norðurslóða (2015). *Hagsmunir Íslands á norðurslóðum: Tækifæri og viðsjár- Drög*. Tæknileg skýrsla. Stjórnarráð Íslands. URL: <https://www.stjornarradid.is/media/forsaetisraduneyti-media/media/frettir2/hagsmunir-nordurslod-drog.pdf>.
- Rounce, David R, Regine Hock, Fabien Maussion, Romain Hugonnet, William Kochtitzky, Matthias Huss, Etienne Berthier, Douglas Brinkerhoff, Loris Compagno, Luke Copland, Daniel Farinotti, Brian Menounos og Robert W McNabb (2023). „Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters“. Í: *Science* 379.6627, bls. 78–83. DOI: 10.1126/science.abo1324.
- Sigurður Sigurðarsson (2018). „Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð“. Í: *Vegagerðin*.
- Skýrsla starfshóps (2023). *Vindorka á hafni*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Umhverfis-, orku og loftslagsráðuneytið.
- Sverrir Guðmundsson María J. Gunnarsdóttir, Sigrún Tómasdóttir (2023). *Vatnsveitur: Loftslagsáhættur og aðlögun að loftslagsbreytingum*. Kynning á málstofu um Vinnustofa um vatn og fráveitu vegna landsáætlunar um aðlögun.
- Sædis Ólafsdóttir Kári Helgason, Hólmfríður Sigurðardóttir Hólmfríður Bjarnadóttir Hildigunnur H. Thorsteinsson Hlödver S. Þorgeirsson Sverrir Guðmundsson Sigrún Tómasdóttir Arna Pálsdóttir Egill Maron Þorbergsson (2021). *Aðlögun OR samstæðunnar að loftslagsbreytingum Fyrsti áfangi í átt að auknum viðnámsþrótti*. Orkuveita Reykjavíkur. URL: https://arsskyrsla2020.or.is/documents/565/A%C3%B0%C3%B6gun_OR_samst%C3%A6%C3%B0unnar_a%C3%B0_loftslagsbreytingum__Fyrsti_%C3%A1fangi_%C3%AD_%C3%A1tt_a%C3%B0_auknum_ACUE986.pdf.
- Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson (2012). *Climate Change and Energy Systems*. Nordic Council of Ministers.
- Tryggvadóttir, Bryndís (2020). „Adaption of Multivariate Extreme Value Modeling for Extreme Coastal Flood Events“. Master's thesis. University of Iceland.
- Veitur (2021). *Gróðureldar á vatnsverndarsvæðinu í Heiðmörk*. URL: <https://samorka.is/grodureldar-a-vatnsverndarsvaedinu-i-heidmork>.
- Vilhjálmur Egilsson, Ari Trausti Guðmundsson og Sigríður Mogensen (2022). *Staða og áskoranir Íslands í orkumálum*. Tæknileg skýrsla. Starfshópur um áskoranir Íslands í orkumálum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- orku og loftslagsráðuneytið. URL: <https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/St%C3%B6%C3%B0usk%C3%BDrsla%20%C3%A1skoranir%20%C3%AD%20orkum%C3%A1llum%2008032022.pdf>.
- Vollertsen, G.E., H.Ó. Andradóttir og H. Ingvarsdóttir (2009). „Removal of heavy metals in a wet detention pond“. Í: *Proceedings of the 11th Nordiske/NORDIWA Wastewater Conference*. Odense, Denmark.
- Wang, Kun, Xianghua Peng, Bo Dan, Haiwen Liu, Shanjun Cheng, Ning Fu, Hongli Fu og Cong Liu (2023). „Decreased Aircraft Takeoff Performance under Global Warming“. Í: *Atmosphere* 14.1. DOI: 10.3390/atmos14010106.
- Zaqout, Tarek, Halla Ólafsdóttir Andradóttir og Ólafur Arnalds (2022). „Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on Sustainable Urban Drainage Systems“. Í: *Journal of Hydrology* 607, bls. 127495. DOI: 10.1016/j.jhydro.2022.127495.

- Zaqout, Tarek, Hrunn Ólöf Andradóttir og Johanna Sörensen (2023). „Trends in soil frost formation in a warming maritime climate and the impacts on urban flood risk“. Í: *Journal of Hydrology* 617, bls. 128978. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128978>.
- Zaqout, Tareq og Halla Ólafsdóttir Andradóttir (2021). „Hydrologic performance of grass swales in cold maritime climates: Impacts of frost, rain-on-snow and snow cover on flow and volume reduction“. Í: *Journal of Hydrology*, bls. 126159. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126159](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126159).