



Vöktun á loftbornum flúor í gróðri

Samantekt á niðurstöðum flúormælinga í gróðri umhverfis
álverið í Straumsvík frá 1968 til 2017.

Sigrún Hrönn Halldórsdóttir



**Jarðvísindadeild
Háskóli Íslands
2019**

Vöktun á loftbornum flúor í gróðri

Samantekt á niðurstöðum flúormælinga í gróðri umhverfis
álverið í Straumsvík frá 1968 til 2017.

Sigrún Hrönn Halldórsdóttir

60 eininga ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í umhverfis- og auðlindafræði

Leiðbeinendur
Þröstur Þorsteinsson
Einar Sveinbjörnsson

Prófdómari
Þorsteinn Jóhannsson

Jarðvísindadeild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, maí 2019

Vöktun á loftbornum flúor í gróðri.

Samantekt á niðurstöðum flúormælinga í gróðri umhverfis álverið í Straumsvík frá 1968 til 2017.

60 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í umhverfis- og auðlindafræði

Höfundarréttur © 2019 Sigrún Hrönn Halldórsdóttir

Öll réttindi áskilin

Jarðvísindadeild

Verkfræði- og náttúruvísindasvið

Háskóli Íslands

Sturlugata 7

101 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Sigrún Hrönn Halldórsdóttir, 2019, *Vöktun á loftbornum flúor í gróðri*.

Samantekt á niðurstöðum flúormælinga í gróðri umhverfis álverið í Straumsvík frá 1968 til 2017, meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 79 bls.

Prentun: Háskólaprent

Reykjavík, maí 2019

Útdráttur

Mælingar á flúorstyrk í gróðri í umhverfi álversins í Straumsvík hafa verið framkvæmdar í 50 ár eða frá árinu 1968 í tengslum við umhverfismælingar á mengunarefnum frá verksmiðjunni. Niðurstöður mælinga hafa þó aldrei verið teknar saman á heildstæðan hátt og rýndar. Meginmarkmið þessa verkefnis var að taka saman allar mælingar árána 1968-2017 í samræmdan gagnagrunn og greina niðurstöður þeirra. Uppsöfnun flúors í gróðri var sett í samhengi við þróun framleiðsluaukningar, bættar mengunarvarnir og þær upplýsingar sem liggja fyrir í erlendum rannsóknum á efninu. Tekin voru saman veðurgögn til þess að leggja mat á hvernig mengun getur dreifst út frá Straumsvík og athugað hvort einhverjir sýnatökustaðir séu úttsettari fyrir mengun en aðrir. Framkvæmd vöktunar á flúor í gróðri hefur verið nánast óbreytt frá upphafi. Sýni hafa verið tekin af barr-, lauftrjám og grasi á föstum sýnatökustöðum sem dreifðir eru um höfuðborgarsvæðið. Einnig hafa verið tekin sýni í Skorradal í Borgarfirði og niðurstöðurnar þaðan notaðar sem bakgrunnsgildi. Helstu niðurstöður rannsóknarverkefnisins sýndu að flúorstyrkur gróðurs fellur eftir því sem dregið hefur úr útblæstri álversins vegna bættra mengunarvarna. Niðurstöður sýndu jafnframt að flúor safnast upp í plöntuvef á vaxtartíma plöntunnar. Sérstaklega er mikil fylgni á flúorstyrk í eins og tveggja ára barrnálum ($R^2=0,86$). Mælingar sýna að hár styrkur flúors hefur mælt í birkitrjám á Garðaholti í Garðabæ. Einnig eru Hellisgerði og Hvaleyrarvatn í Hafnarfirði undir meira álagi en aðrir sýnatökustaðir þar sem birki hefur verið rannsakað. Niðurstöður verkefnisins og greining á framkvæmd flúorvöktunar í gróðri síðustu 50 ár geta verið nýttar til þess að bæta mengunarvöktunaráætlun álversins. Tillögur til betrubóta eru m.a. fjölgun sýnatökustaða á þeim svæðum sem sýnt hafa að eru undir meira álagi og endurskoðað verði val á sýnategundum.

Abstract

For the last 50 years fluorine contents in vegetation have been monitored near the aluminum smelter in Straumsvík, Hafnarfjörður. The results from the field sampling have been analyzed from one year to the next but long-term changes have not been assessed in a broader perspective. The main objective of this study was to create database and assess the monitoring results from 1968-2017. Changes and development of fluorine content in plants were evaluated with regards to increased production and better techniques to reduce emission from the smelter. In addition, weather conditions are considered to assess how airborne fluorine from the smelter distributes and whether some sampling points are more exposed to pollution than others. The official monitoring program has not changed much since the beginning of the monitoring in 1968. The samples are from needles, leaves, and grass taken at various sampling points that are spread over the capital area and having one sampling zero-point at Skorradalur in Borgarfjörður, that is assumed to be free of any fluorine contamination from the smelter. The results from the investigation show that fluorine content in the vegetation decreases with decreased fluorine emission from the smelter. Fluorine does accumulate in vegetation with time and there is an especially strong correlation ($R^2=0,86$) between one and two-year-old needles. Leaves in Garðaholt, Hellisgerði and Hvarleyrarvatn show more stress than others. Hopefully, the results from this study can be used to improve the official sampling program and reorganize the monitoring, especially at places that show more stress than others.

Efnisyfirlit

Myndir	xi
Töflur	xv
1 Inngangur	17
1.1 Álfraðleiðsla í Straumsvík.....	17
1.2 Umhverfissvöktun.....	19
1.3 Rannsóknir á flúoruppsöfnun í gróðri	23
1.3.1 Flutningur flúors í andrúmslofti.....	24
1.3.2 Flúorupptaka gróðurs	24
1.3.3 Árif úrkomu (skolvatn)	25
1.3.4 Þolmörk.....	26
1.3.5 Sýnataka gróðursýna.....	28
1.4 Markmið	28
2 Gögn og aðferðir	29
2.1 Skráning gagna.....	29
2.2 Rannsóknarsvæðið.....	30
2.3 Úrvinnsla gagna.....	33
3 Niðurstöður.....	36
3.1 Tímalína.....	36
3.2 Uppsöfnun mengunar í plöntuvef.....	39
3.2.1 Uppsöfnun milli ára	39
3.2.2 Uppsöfnun yfir vaxtartíma	40
3.2.3 Upptökuhraði	43
3.3 Samband flúorstyrks í vef og á yfirborði plöntu	46
3.4 Veðurfar og dreifing mengunar um landsvæðið.....	50
3.4.1 Veðurfar	50
3.4.2 Flúor á yfirborði plantna og í plöntuvef eftir stöðum	51
3.4.3 Grasmælingar	56
3.4.4 Bakgrunnsgildi í Skorradal	57
3.4.5 Dreifing gagna og ályktanir um meðaltöl	58
4 Umræða.....	59
4.1 Tímalína.....	59
4.2 Uppsöfnun mengunar í plöntuvef.....	60
4.2.1 Uppsöfnun milli ára	60
4.2.2 Uppsöfnun yfir vaxtartímann	60
4.2.3 Upptökuhraði	61
4.3 Samband flúorstyrks í vef og á yfirborði plöntu	61
4.4 Veðurfar og dreifing mengunar um landsvæðið.....	62
4.4.1 Veðurfar	62
4.4.2 Flúor á yfirborði plantna og í plöntuvef eftir stöðum	62

4.5	Tillögur til úrbóta	63
4.5.1	Grasmælingar.....	63
4.5.2	Dreifing sýntökustaða.....	64
4.5.3	Bakgrunnsgildi í Skorradal.....	64
5	Lokaorð	67
	Heimildir	69
	Viðauki A	73
	Viðauki B.....	77

Myndir

Mynd 1.1. Helstu áfangar í uppbyggingu og framleiðslu álversins í Straumsvík og uppsetningu mengunarvarnarbúnaðar.	18
Mynd 1.2. Þróun á framleiðslumagni álversins ásamt flúorútlosun á árunum 1980-2017.	20
Mynd 2.1. Sýnatökustaðir sem notaðir eru í núverandi vöktunaráætlun álversins í Straumsvík (rauðir) og skilgreind svæði vegna flúorvöktunar í gróðri. Mynd fengin frá Nýsköpunarmiðstöð en lítillega breytt (Hermann Þórðarson, 2016).	30
Mynd 2.2. Dreifing sýnatökustaða umhverfis álverið í Straumsvík. Sýnatökustaðir eru táknaðir með rauðum merkjum ásamt númeri. Staðsetning álversins er táknuð með appelsínugulu merki.	33
Mynd 3.1. Allar flúormælingar (ppm) í birkigróðri (rauðir punktar) á sýnatökustöðum utan Skorradals, frá 1980-2017. Miðgildi flúors í vef fyrir hvert ár fyrir sig (rauð lína). Flúormælingar í Garðaholti eru táknaðar með grænum kassa. Flúorútblástur álversins (blá lína) í losuðum tonnum á ári.	36
Mynd 3.2. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 0 (þynningarsvæði) frá 1980-2017. Flúorútblástur álversins (blár) í losuðum tonnum á ári.	37
Mynd 3.3. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 1 frá 1980-2017. Miðgildi mælinga á flúorstyrk í greni hvert ár er táknað með rauðri línu. Flúorútblástur álversins (blár) í losuðum tonnum á ári.	38
Mynd 3.4. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 2 og 3 á árunum 1980-2017. Miðgildi mælinga á flúorstyrk í greni hvert ár er táknað með rauðri línu. Flúorútblástur álversins (blár) í losuðum tonnum á ári.	38
Mynd 3.5. Flúorstyrkur (ppm) í tveggja ára furunálum sem fall af flúorstyrk í eins árs furunálum.	39
Mynd 3.6. Flúorstyrkur (ppm) í tveggja ára greninálum sem fall af flúorstyrk í eins árs greninálum.	40
Mynd 3.7. Flúorstyrkur (ppm) í birkivef að hausti sem fall af vori.	41
Mynd 3.8. Flúorstyrkur (ppm) í reynivef að hausti sem fall af flúorstyrk í reynivef að vori.	41
Mynd 3.9. Flúorstyrkur (ppm) í grasvef að hausti sem fall af vori. Óáborið gras (t.v.) og áborið gras (t.h.).	42

<i>Mynd 3.10. Birkimælingar í Hellisgerði að vori (blár) og hausti (rauður) sem fall af tíma.</i>	43
<i>Mynd 3.11. Upptökuhraði (ppm/mán) flúors í greni við Straumsgirðingu, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).</i>	44
<i>Mynd 3.12. Upptökuhraði (ppm/mán) flúors í greniplöntum á svæði 1, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).</i>	44
<i>Mynd 3.13. Upptökuhraði flúors (ppm/mán) í birki í Hellisgerði, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).</i>	45
<i>Mynd 3.14. Upptökuhraði flúors (ppm/mán) í birki á Vífilsstöðum, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).</i>	45
<i>Mynd 3.15. Samband flúorstyrks (ppm) á yfirborði og í vef birkiplöntu (t.v.) og reyniplöntu (t.h.).</i>	47
<i>Mynd 3.16. Samband flúorstyrks (ppm) á yfirborði og í vef af ábornu grasi (t.v.) og óábornu grasi (t.h.).</i>	48
<i>Mynd 3.17. Samband flúorstyrks í skoli og plöntuvef greni (t.v.) og furu (t.h.).</i>	48
<i>Mynd 3.18. Samanburður á niðurstöðum flúormælinga sem gerðar hafa verið á skolvatni af yfirborði mismunandi tegunda á öllum sýnatökustöðum.</i>	49
<i>Mynd 3.19. Vindrós fyrir meðalvind þegar þurrt var í Straumsvík yfir sumartímann (maí-ágúst) frá árinu 2001-2017. Vindrósin er lögð ofan á kort af sýnatökusvæðinu. Sýnatökustaðirnir eru merktir inn á kortið með rauðum merkjum og númeri hvers sýnatökustaðar.</i>	50
<i>Mynd 3.20. Vindrós fyrir meðalvind þegar úrkoma mældist meiri en 0 mm/klst. í Straumsvík yfir sumartímann (maí-ágúst) frá árinu 2001-2017. Vindrósin er lögð ofan á kort af sýnatökusvæðinu. Sýnatökustaðir eru merktir inn á kortið með rauðum merkjum og númeri hvers sýnatökustaðar.</i>	51
<i>Mynd 3.21. Flúor (ppm) á yfirborði (mælt í skolvatni) birkiplantna á helstu sýnatökustöðum. Mælingarnar eru frá árunum 2007-2017.</i>	52
<i>Mynd 3.22. Flúor (ppm) í vef birkiplantna á helstu sýnatökustöðum. Mælingarnar eru frá árunum 2007-2017.</i>	54
<i>Mynd 3.23. Flúorstyrkur (ppm) í vef grenitrjáa á sýnatökustöðum sem verða fyrir ríkjandi, þurru norðan og norðvestlægum vindáttum.</i>	55
<i>Mynd 3.24. Flúorstyrkur (ppm) í vef af ábornu (rauður) og óábornu grasi (blár) að Dysjum (t.v.) og á Sviðholti (t.h.).</i>	56
<i>Mynd 3.25. Allar mælingar á flúorstyrk (ppm) í gróðri (rauðir punktar) á viðmiðunarsvæðinu í Skorradal frá 1980-2017. Flúorútblastur álversins</i>	

*(blá lína) í losuðum tonnum á ári. Rauða línan sýnir miðgildi flúorstyrks
í vefplantna. 57*

*Mynd 3.26. Dreifing allra flúormælinga í birki (t.v.) og dreifing sömu gagna eftir log
umbreytingu (t.h.). Rauða línan sýnir meðaltal hvorrar dreifingar fyrir
sig og svarta línan sýnir miðgildi dreifinganna. 58*

Töflur

<i>Tafla 1.1. Losunarmörk fyrir tiltekin mengunarefni frá álverinu í Straumsvík m.v. framleiðslu upp að 330 þúsund tonnum á ári (Umhverfisstofnun, 2005).</i>	20
<i>Tafla 2.1. Helstu sýnatökustaðir eftir svæðaskiptingu (Hermann Þórðarson, 2016).</i>	31
<i>Tafla 2.2. Gróðurtegundir eftir sýnatökustöðum (númer sýnatökustaða).</i>	32
<i>Tafla 3.1. Niðurstöður Games - Howell prófs sem ber saman flúormagn (ppm) á yfirborði birkiplantna (í skolvatni) á mismunandi sýnatökustöðum. Skyggðu línurnar tákna marktækan mun á tilteknum stöðum.</i>	53
<i>Tafla 3.2. Niðurstöður Games - Howell prófs sem bara saman flúormagn (ppm) í vef birkiplantna á mismunandi sýnatökustöðum. Skyggðu svæðin tákna marktækan mun á þeim tilteknu stöðum.</i>	54

1 Inngangur

Flúor (F) er eitt af frumefnum jarðar og er mjög hvarfgjarn og gaskenndur halógen. Flúor hefur mesta rafdrægni frumefnanna og þess vegna er flúoríð (F^-) gjarnt á að mynda stöðug efnasambönd með því að draga til sín rafeindir annarra efna. Stöðugasta sameind flúors í andrúmslofti er vetnisflúoríð (HF), en flúor finnst yfirleitt í umhverfi okkar í efnasamböndum sem flúoríð. Flúor er allt um kring í okkar náttúrulega umhverfi og er með algengari efnum sem bundin eru í steinefnum jarðar. Flúor losnar í andrúmsloft með veðrun steinefna á yfirborði jarðar eða í hafi, í eldgosum og frá sprungum og jarðhitakerfum í nágrenni þeirra. Flúor losnar einnig í andrúmsloftið af völdum manna m.a. með kolabruna og losun frá stáliðnaði, s.s. ál-, kopar- og nikkeliðnaði, gler-, keramik-, múr-, áburðar-, lím- og bensínframleiðslu (WHO, 2002).

Hár styrkur flúors getur haft skaðleg og jafnvel banvæn áhrif á menn, dýr og plöntur. Gögn sýna að þar sem menn verða fyrir ofneyslu flúors með vatni eða fæðu, getur inntaka á 14 mg flúoríðs á dag valdið aukinni beinvefsmyndum (e. *skeletal fluorosis*) og öðrum einkennum flúoreitrunar, t.d. vansköpun. Í vægari tilfellum geta komið fram einkenni eins og liðverkir og áhrif á hjarta- og æðakerfi. Á stórum svæðum víða í heiminum er umhverfið og grunnvatn mjög ríkt af flúor af náttúrulegum ástæðum. Þessi vandamál eru þekkt í ákveðnum hlutum Afriku, Indlands og Kína þar sem inntaka flúors með vatni eða matvælum er helsti orsakavaldurinn (WHO, 2002).

Af dýrum verða grasbítar fyrir mestum áhrifum flúors úr umhverfinu. Á Íslandi er eitrunum í búfé fyrst lýst í annálum frá 1694 í tengslum við Heklugosið 1693, sem tannskemmdum í sauðfé, nautgripum og hrossum. Í dag eru einkenni flúoreitrunar í búfé, mönnum kunnug sem gaddur, sem gjarnan kemur fram í sauðfé eftir eldgos (Helena Stefánsdóttir, 2016). Í plöntum koma einkenni flúoráhrifa fram sem skemmdir á vef plöntunnar ásamt því að flúor getur haft áhrif á vöxt plantna og dregið úr honum (WHO, 2002).

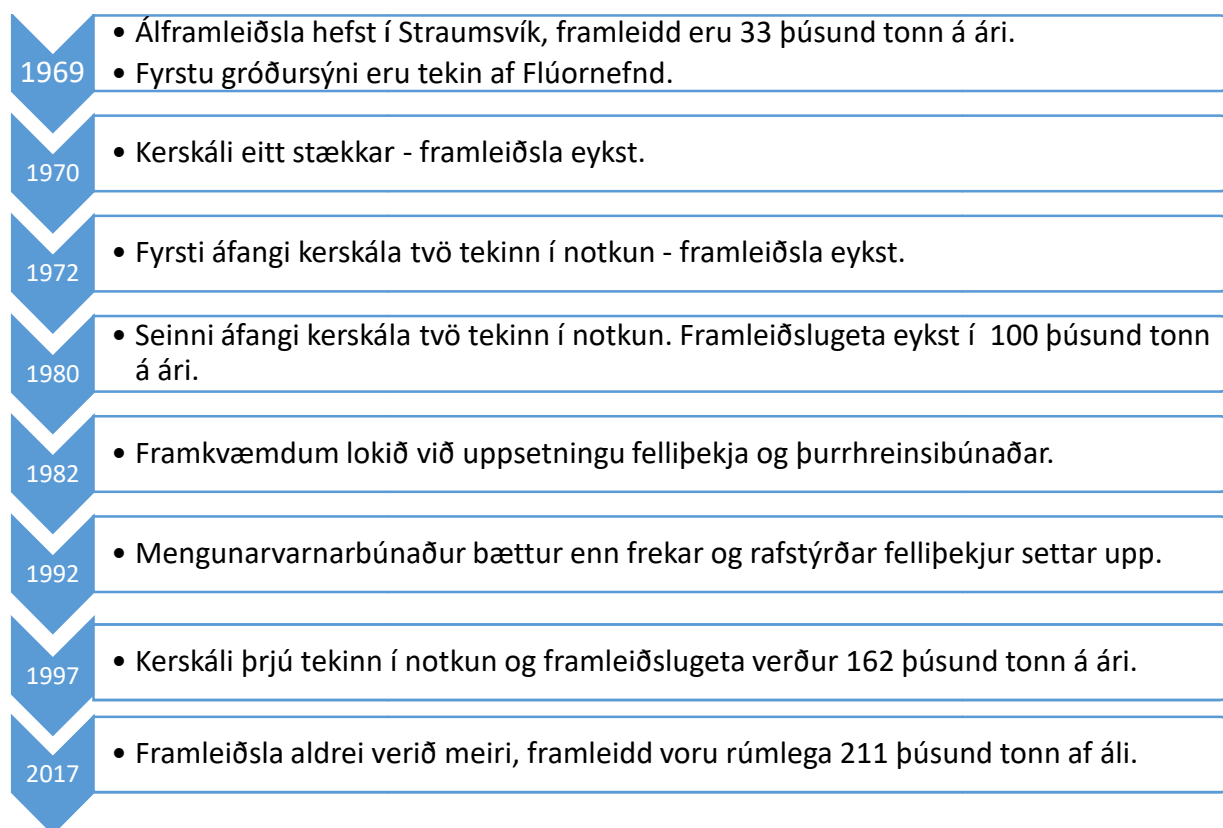
Á Íslandi hafa helstu uppsprettur flúors verið frá eldgosum og útblæstri álvera. Vöktun flúors í umhverfi hér á landi hefur farið fram í tengslum við eldgos og í kringum álverin. Frá því að álverið í Straumsvík hóf rekstur árið 1969 hefur flúostyrkur í gróðri í umhverfi þess verið vaktaður til þess að meta umhverfisáhrif flúorútlosunar í álframleiðslunni. Í þessu rannsóknarverkefni verður fjallað um flúormælingar í umhverfi álversins í Straumsvík og mælingar sem framkvæmdar hafa verið á árunum 1968-2017 teknar saman og rýndar.

1.1 Álframleiðsla í Straumsvík

Ýmis mengunarefni myndast við framleiðslu áls, en þar má m.a. nefna koltvíoxíð (CO_2), brennisteinstvíoxíð (SO_2), kolmónoxíð (CO), nituroxíð (NO_x), PAH- efni og ekki síst flúorsambönd s.s. vetnisflúoríð (HF), flúorgas og ryk. Flúor hefur lengi verið talið með hættulegri mengunarefnum í framleiðsluferlinu og því hefur verið lögð áhersla á vöktun þess í umhverfi álvera (Þór Tómasson o.fl., 1998).

Losun mengunarefna frá álverum hefur dregist verulega saman síðustu áratugi vegna þróunar á hreinsibúnaði og bættum verkferlum við framleiðsluna (Þór Tómasson o.fl., 1998). Meðal þess má nefna notkun forbakaðra rafskauta til þess að lágmarka losun PAH efna, notkun lokaðra kerja og takmörkun á opnunartíma þeirra ásamt fleiri umbótaverkferlum í framleiðsluferlinu. Þurrhreinsun er tækni sem hefur verið þróuð til þess að takmarka útblástur flúoríðs og ryks. Þurrhreinsibúnaður hreinsar þó ekki brennisteinstvíoxíð (SO₂) (Þór Tómasson og Hörður Þormar, 1998).

Álverið í Straumsvík (nú Rio Tinto á Íslandi hf.) hóf framleiðslu sína árið 1969 en var formlega vígt árið 1970. Framleiðslan hefur síðan þá aukist með stækkun og fjölgun kerskála. Framleiðslan var fyrst um sinn 33 þúsund tonn á ári. Árið 1970 var fyrsti kerskálinn stækkaður og jókst þá framleiðslan. Árið 1972 var fyrsti áfangi kerskála tvö tekinn í notkun en seinni áfanginn hans var tekinn í notkun árið 1980, rúmlega tíu árum eftir að framleiðsla hófst. Þá var framleiðslugetan komin í 100 þúsund tonn á ári. Árið 1995 hófust framkvæmdir við byggingu kerskála þrjú sem svo var tekinn í notkun seint á árinu 1997, var þá framleiðslugeta orðin 162 þúsund tonn á ári (mynd 1.1 og mynd 1.2) (Rio Tinto á Íslandi, ódags.). Í dag hefur álverið í Straumsvík starfsleyfi frá Umhverfisstofnun til þess að framleiða allt að 460 þúsund tonn af áli á ári (Umhverfisstofnun, 2005). Þegar starfsleyfið var endurnýjað árið 2005 voru áætlanir um stækkun álversins í 460 þúsund tonna framleiðslugetu. Tillaga að breyttu deiliskipulagi vegna stækkunarinnar var hins vegar felld í íbúakosningu í Hafnarfirði í mars 2007 (Fréttablaðið, 2007:1). Framleiðsla hefur því aldrei orðið svo mikil. Árið 2017 hafði aldrei verið framleitt meira en þá voru framleidd 211.534 tonn af áli (Rio Tinto á Íslandi, 2017).



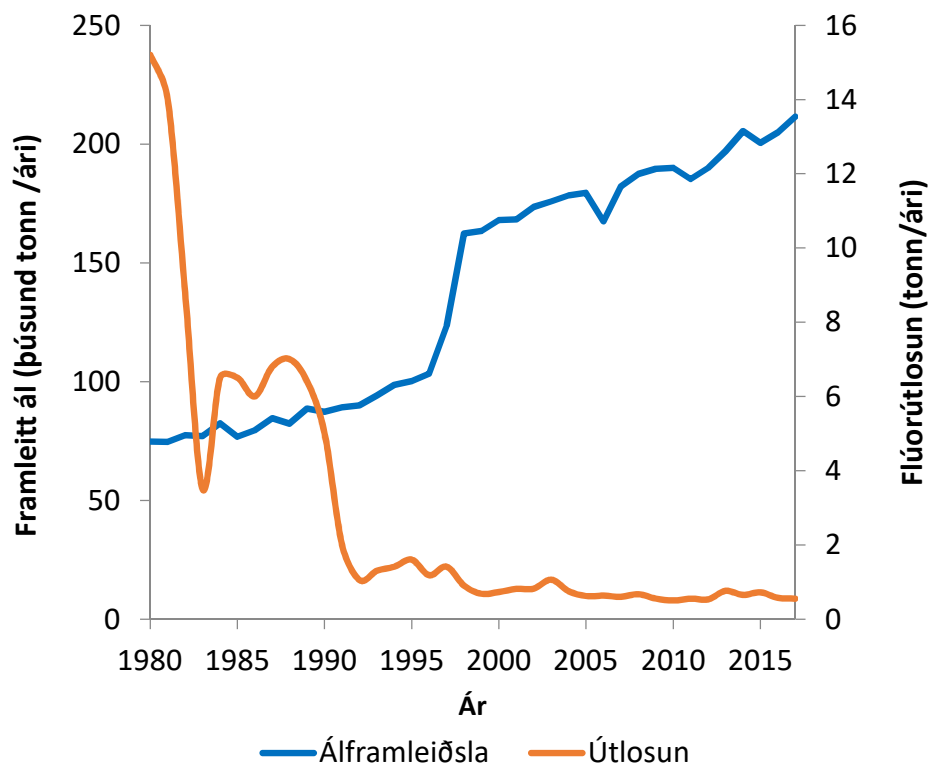
Mynd 1.1. Helstu áfangar í uppbyggingu og framleiðslu álversins í Straumsvík og uppsetningu mengunarvarnarbúnaðar.

Fyrstu ár starfseminnar var mengunarvarnarbúnaður ekki til staðar svo öll mengun af framleiðslunni slapp óhindrað út í umhverfið. Mæling mengunarefna í útblæstri fór fyrst fram árið 1977 en slíkar mælingar urðu ekki reglubundnar fyrr en eftir 1980. Undir lok áttunda áratugarins var hafist handa við að setja upp þurrhreinsibúnað við verksmiðjuna og þá voru settar þekjur, eins konar lok, á kerin til þess að fanga reykinn í gegnum þurrhreinsibúnaðinn. Framkvæmdum þessum var lokið 1982. Árið 1992 voru komnar upp rafstýrðar fellipækjur á öll ker auk þess sem verkferlar voru bættir (mynd 1.1 og mynd 1.2) (Þór Tómasson og Hörður Þormar, 1998).

1.2 Umhverfissvöktun

Flúor hefur í háum styrk, eða til lengri tíma, haft áhrif á menn, dýr og plöntur. Hér á landi er helsta uppspretta flúors frá eldgosum og stóriðju. Í sumum eldgosum getur mikill flúor sloppið út en flúorstyrkur í gróðursýnum úr Kerlingafjöllum mældist um 1000 ppm eftir eldgoðið í Heklu árið 1980 (Helena Marta Stefánsdóttir, 2016). Gróðurverndarviðmið flúors sem notað er í umhverfissvöktun álversins í Straumsvík er 30 ppm (Hermann Þórðarson, 2016). Flúoráhrif eldgosa geta varið í skamman tíma eftir að gosi lýkur vegna þess hver hratt flúor getur þynnst úr umhverfinu með úrkomu og vindi (Sigurður Sigurðsson, ódags.; Cheng, 2018; Helena Marta Stefánsdóttir, 2016). Flúorútlosun frá stóriðju er ekki í gríðarlegu miklu magni eins og við sum eldgos en losunin frá stóriðju er stöðug yfir starfstímann og því getur uppsöfnun í umhverfinu verið nokkur. Flúormælingar eru reglulega framkvæmdar í tengslum við eldgos og flúormengun hefur verið vöktuð við stóriðju í Straumsvík, við Grundartanga og á Reyðarfirði. Fyrstu heimildir um flúormælingar á Íslandi eru af mælingum í ösku, vatni og gróðri í kjölfar Heklugoss árið 1947 (Helena Stefánsdóttir, 2016). Í tengslum við rekstur stóriðju hefur flúor verið vaktaður í: andrúmslofti, gróðri, heyi, ferskvatni, regnvatni, grasbítum, flæðigryfjum í sjó, kræklingi, set- og botndýrum, jarðvegi og jarðvegsvatni (Flúornefnd, 1975; EFLA, 2017; ALCOA Fjarðarál, 2013). Flúorvöktun álveranna þriggja Rio Tinto í Straumsvík, Norðuráls á Grundartanga og Fjarðaráls á Reyðarfirði fer fram samkvæmt umhverfissvöktunaráætlun hvers álvers fyrir sig, sem kveðið er á um í starfsleyfum álveranna. Vöktunarbættir geta því verið breytilegir fyrir hvert álver fyrir sig.

Umhverfisstofnun veitir starfsleyfi fyrir starfsemi álvera samanber ákvæði laga nr. 7/1998 um hollustuhætti og mengunarvarnir (Alþingi, 1998) ásamt reglugerð nr. 550/2018 um losun frá atvinnurekstri og mengunarvarnaeftirlit (Reglugerðarsafn, 2018). Núgildandi starfsleyfi álversins í Straumsvík (Umhverfisstofnun, 2005) er útgefið þann 7. nóvember 2005 og gildir til 15 ára eða til 1. nóvember 2020. Heimild er til framleiðslu á allt að 460 þúsund tonnnum af áli á ári, en eins og áður segir var álframleiðsla árið 2017 rúmlega 211 þúsund tonn (mynd 1.2).



Mynd 1.2. Þróun á framleiðslumagni álversins ásamt flúorútlosun á árunum 1980-2017.

Losun á flúoríði og ryki frá álverinu er mæld í strompum þurrhreinistöðva og rjáfri kerskála (Rio Tinto, 2017). Í starfsleyfinu koma fram losunarmörk (kg/framleitt tonn af áli) fyrir valin mengunarefni; heildarflúoríð, ryk og brennisteinstvíoxíð (SO_2), fyrir álframleiðslu upp að 330 þúsund tonnum af áli á ári (tafla 1.1). Fari framleiðsla yfir 330 þúsund tonn herðast losunarmörk fyrir heildarflúoríð og brennisteinstvíoxíð (SO_2).

Tafla 1.1. Losunarmörk fyrir tiltekin mengunarefni frá álverinu í Straumsvík m.v. framleiðslu upp að 330 þúsund tonnum á ári (Umhverfisstofnun, 2005).

Mengunarefni	Ársmeðaltal kg/tonn Al	Skammtíameðaltal kg/tonn Al
Heildarflúoríð	0,65	1,0
Ryk	1,2	2,0
Brennisteinstvíoxíð	18	18

Í starfsleyfinu eru ákvæði um að rekstraraðili kosti og ábyrgist framkvæmd mælinga á þeim mengunarefnum sem losunarmörk eru sett samkvæmt starfsleyfinu. Rekstraraðili ber því ábyrgð á að leggja fram vöktunaráætlun, sem Umhverfisstofnun samþykkir, og fylgja henni eftir. Samkvæmt starfsleyfi skal Rio Tinto framkvæma reglubundnar mælingar á styrk brennisteinstvíoxíðs, flúoríðs og vetnisflúoríðs í andrúmslofti, ásamt árlegum mælingum á flúor í vatni og gróðri (grasi, laufi og barri). Niðurstöður umhverfisvöktunar eru lagðar fyrir Umhverfisstofnum (2005) og skýrslur með niðurstöðum umhverfisvöktunar eru gefnar út árlega.

Í núverandi umhverfisvöktunaráætlun Rio Tinto Alcan á Íslandi hf. fyrir álverið í Straumsvík 2014-2020 er skilgreind vöktun á: loftgæðum, veðurfari, ástandi gróðurs og vatns, ásamt lífríki sjávar (Rio Tinto á Íslandi, 2014).

Loftgæðavöktun Rio Tinto Alcan felst í því að staðsett er loftgæðamælistöð á bílastæði golfklúbbsins Keilis við Hvaleyrarholt í Hafnarfirði og þar er mældur styrkur brennisteinstvíoxíð (SO_2), vetnisflúor (HF) og flúoríð í ryki (F), ásamt brennisteinsvetni (H_2S). Flúor er safnað á ryk- og gassíur yfir vaxtartímabil gróðurs eða frá miðjum apríl fram í miðjan nóvember. Í sömu loftgæðastöð annast Umhverfisstofnun mælingar á svifryki (PM10 og PM2,5) og nituroxíð (NO , NO_2 , NO_x). Veðurstöð er staðsett við Straumsvíkurhöfn og mælir allt árið um kring vindátt, vindhraða, hitastig, rakastig og loftþrýsting (Rio Tinto á Íslandi, 2014). Vatnssýni er tekið árlega að hausti úr Kaldá við Kaldárbotna. Sýnatökur á kræklingi við flæðigryfjur í Straumsvík fara fram á fimm ára fresti þar sem metinn er kræklingavöxtur, magn PAH efna og ólífrænna snefilefna í vef kræklingsins.

Nokkur munur er á umhverfisvöktunaráætlunum þeirra þriggja álvera sem starfrækt eru á Íslandi. Til að mynda eru flúormælingar gerðar í vef fléttna og mosum auk annarra plantna við álverin á Grundartanga og á Reyðarfirði. Þar fer svo fram sjónræn skoðun þar sem ástand gróðurs, breytingar á þekju og tegundafjölbreytni eru vaktaðar. Vöktun á heyi og ástandi grasbíta fer einnig fram við Grundartanga og í Reyðarfirði. Á Reyðarfirði er umfram umhverfisáætlunir hinna álveranna tekin sýni af bláberjalyngi, rabarbara, kartöflum blá- og krækiberjum til mælinga á styrk flúors, trjávöxtur metinn, botndýralíf sjávar er vaktað og jarðvegsvatnssýni eru tekin til mælinga á mengunarefnum, þ.m.t. flúors (Alcoa Fjarðarál, 2013). Á Grundartanga fara fram umfram vöktun annarra álvera sjósýnataka úr flæðigryfju ásamt því að mælingar á PAH í sjávarseti eru framkvæmdar (Norðurál, 2018).

Þessir ofantaldir þættir sem vaktaðir eru við Grundartanga og á Reyðarfirði eru ekki vaktaðir við álverið í Straumsvík (Rio Tinto, 2014). Að einhverju leyti skýrist þessi munur á vöktunaráætlunum af mismunandi umhverfi álveranna. Í nágrenni Straumsvíkur er búskapur margfalt minni en á Grundartanga og við Reyðarfjörð svo ekki er eins rík þörf á vöktun grasbíta í umhverfisvöktun álversins í Straumsvík.

Álverið í Straumsvík hefur verið lengst í rekstri af álverunum þremur. Áður en starfsemin hófst var skipuð svokölluð Flúornefnd sem hafði það hlutverk að fara með eftirlit með flúoráhrifum álversins. Nefndin setti upp vöktunaráætlun og sá til þess að henni væri framfylgt. Í upphafi fólst umhverfisvöktun flúors í mælingum á gróðri, í jarðvegi og í regnvatni (Flúornefndin, 1972). Gróðursýnum til mælinga á flúorstyrk í nágrenni álversins í Straumsvík var fyrst safnað árið 1968, ári áður en framleiðsla hófst árið 1969. Flúor í gróðri hefur verið vaktaður alla tíð síðan og ná því mælingarnar nú yfir 50 ára langt tímabil sem allar hafa verið teknar saman í þessu verkefni (Viðauki A). Gróðursýnum er safnað á 14 stöðum í nágrenni Straumsvíkur ásamt því að sýni til viðmiðunar eru tekin í Skorradal í Borgarfirði. Sýni úr Skorradal eru notuð til þess að fá bakgrunnsgildi fyrir vöktunina. Niðurstöður flúormælinga í gróðri í Skorradal segja til um hver sé flúorstyrkur í plöntum sem ekki verða fyrir áhrifum frá álverinu. Gras og laufsýni eru tekin á öllum sýnatökustöðum tvisvar á ári, að vori og hausti en barrsýni eru tekin árlega af eins og tveggja ára barrnálmum (Rio Tinto á Íslandi, 2014). Hætt var að safna sýnum af heyi í umhverfisvöktun álversins í Straumsvík árið 2000 og vöktun á grasbítum þar sem kannaður er styrkur flúors í kjálkabeinum var hætt árið 1992. Fram kemur í umhverfisvöktunaráætlun Rio Tinto að sýnatöku af ábornu grasi hafi verið hætt árið 2007 (Rio Tinto, 2014), en rétt er að sýni eru ennþá tekin af ábornu grasi á Dysjum og Sviðholti (Kristmann Gíslason, 2019). Einhverjar breytingar hafa verið á tilhögun

vöktunarinnar til dagsins í dag þar sem sýnatökustöðum hefur verið breytt vegna breytinga á byggðarlagi en breytingarnar eru það litlar að samanburður niðurstaðna í gegnum mæliröðina er vel mögulegur (Viðauki B). Aðferðir og söfnun gagna hefur lítið breyst svo og framsetning gagna og töluleg úrvinnsla. Þó hefur tæknileg þróun gert það að verkum að greining sýna og mælingar á flúor hefur orðið nákvæmari. Í skýrslu flúornefndarinnar frá 1970 (Flúornefndin, 1970) kemur fram að reynsla erlendis frá sýni að skýr mynd af áhrifum álvers fáið eingöngu með því að skoða meðaltöl nokkurra sýna sem tekin eru innan stærra svæðis. Svæðin sem mynduð voru í umhverfisvöktun álversins í Straumsvík voru sett upp í radíus eftir fjarlægð frá álverinu (mynd 2.1). Niðurstöður hafa því frá upphafi verið settar fram sem meðaltöl allra mælinga á svæðum 1, 2 og 3. Nýsköpunarmiðstöð Íslands hefur tekið að sér að framkvæma sýnatökur og mælingar fyrir álverið síðustu ár og gefur árlega út skýrslu með niðurstöðunum. Bent hefur verið á í skýrslum Nýsköpunarmiðstöðvar að gögnin séu ekki normaldreifð og því verði að taka framsetningu niðurstaðna með ákveðnum fyrirvara þegar reiknuð eru einföld meðaltöl eins og gert er (Hermann Þórðarson, 2016).

Teknar voru saman niðurstöður flúorvöktunar í gróðri við Straumsvík árið 1998 og þar kemur fram að flúorstyrkur í grasi hafi verið u.þ.b. sá sami árið 1996 og hann var þegar mælingar hófust 1968 vegna bættra mengunarvarna álversins og samdrætti í útblæstri. Þannig var sýnt fram á fylgni milli útblásturs álversins og flúormengunar í gróðursýnum (Þór Tómasson og Hörður Þormar, 1998). Einnig kemur fram að hvergi hafi verið hægt að benda á skemmdir á grasi eða blöðum lauftrjáa á sýnatökusvæðinu frá upphafi mælinga. Aðra sögu er að segja frá barri, en deilt hefur verið um hvort skemmdir sem fundist hafa á barrtrám séu vegna flúormengunar eða af öðrum orsökum; t.d. samlegðaráhrifum vegna særoks og flúormengunar (Þór Tómasson og Hörður Þormar, 1998). Einnig voru teknar saman gróðurskemmdir og breytingar á þekju og tegundafjölbreytni mosa og fléttna í námunda við álverið í Straumsvík, sem teljast viðkvæmar tegundir á meðan að krækilyng og fleiri tegundir virðast þola sama umhverfi betur (Hörður Kristinsson, 1998). Fléttur og mosi hafa ekki rætur og taka því eingöngu vatn og næringarefni úr andrúmsloftinu. Jafnframt safna þessar tegundir upp mengunarefnunum í vef sínum frá ári til árs. Niðurstöður greiningarinnar við álverið sýndu að verulegar skemmdir af völdum loftborinnar mengunar frá álverinu komu fram á fléttum og mosa í nágrenni álversins. Skemmdir á gróðri komu helst fram á hæðum í landslaginu, t.d. klettum og þá þeirri hlið klettanna sem snýr að, og er áveðurs vindátt frá, álverinu (Hörður Kristinsson, 1998).

Fyrstu mælingar á loftgæðum í andrúmslofti á Hvaleyrarholti við Hafnarfjörð voru framkvæmdar árið 1990 af frumkvæði Heilbrigðiseftirlits Hafnarfjarðar. Þá (1990) var mælt brennisteinstvíoxíð (SO_2), loftkenndur flúor (HF) og flúor í ryki. Niðurstöður mælinganna gáfu til kynna að mengun af völdum brennisteinstvíoxíðs skapaði ekki hættu fyrir lýðheilsu manna eða vöxt gróðurs. Dregnar voru svipaðar ályktanir af niðurstöðum flúormælinga og talið var ólíklegt að mengunin hefði áhrif á vöxt gróðurs á mælitímabilinu. Hins vegar var gert ráð fyrir því að miðað við magn flúors í útblæstri álversins og með tilliti til niðurstaðna flúormælinga í grasi á Hvaleyrarholti á þessum tíma, að í óhagstæðu árferði gæti dreifing flúors farið yfir viðmiðunarmörk gróðurs (Eyjólfur Sæmundsson o.fl., 1991). Niðurstöður loftgæðamælinganna sýndu einnig að styrkur flúors og brennisteinstvíoxíðs fylgdi vindstefnu frá álverinu að mælistöðinni. Hins vegar var ekki fylgni á milli vindstefnu að mælistöðinni og svifryks. Þegar mengunarvarnarbúnaður álversins var tekinn í notkun gátu niðurstöður loftgæðamælinganna staðfest afköst hans (Þór Tómasson, 1998). Að mati heilbrigðiseftirlits Hafnarfjarðar var árið 1990 talið nauðsynlegt að taka upp reglubundnar mælingar á brennisteinstvíoxíð (SO_2), loftkenndum flúor (HF) og flúor í ryki og jafnframt setja upp veðurstöð til þess að greina hvaðan tiltekin mengun berst, ef t.d. frá öðrum atvinnufyrirtækjum eða samgöngum (Eyjólfur Sæmundsson o.fl., 1991).

Veðurstöð var sett upp árið 1995 í Straumsvíkurhöfn og er í dag notast við þau veðurgögn þegar niðurstöður loftgæðamælinga á Hvaleyrarholti eru greindar (Hermann Þórðarson, 2016). Samfelldar loftgæðamælingar hafa verið framkvæmdar á Hvaleyrarholti frá árinu 1994. Árið 2007 var sett upp loftgæðamælistöð sem rekin er af Rio Tinto og Umhverfisstofnun þar sem mælt er: svifryk (PM10 og PM2,5), nitroxíð (NO, NO₂, NO_x), brennisteinstvíoxíð (SO₂), brennisteinsvetni (H₂S) og flúoríð í gasi og ryki (Rio Tinto á Íslandi hf., 2014). Meðaltöl ársins 2016 yfir vaxtartímabil gróðurs á Hvaleyrarholti voru um 0,01 µg/m³ fyrir rykkenndan flúor og 0,02 µg/m³ fyrir gaskenndan flúor og er því heildarflúor reiknaður sem 0,03 µg/m³. Hæsta mæligildi yfir árið mældist á fimm daga tímabil 0,20 µg F/m³ að meðaltali. Gróðurviðmið fyrir flúor í andrúmslofti sem notast er við í umhverfisvöktun á Hvaleyrarholti er 0,3 µg/m³ fyrir heildarflúor, þ.e. alls flúor í ryki og gaskenndan flúor (HF) (Hermann Þórðarson, 2017 og Rio Tinto, 2017). Talið er að plöntur sem viðkvæmastar eru fyrir flúor sýni merki um flúoreitrun við flúorstyrk um 0,8 µg/m³ eftir 1-3 daga, en að þær geti haft langtímapól í kringum 0,25-0,30 µg/m³. Við lengri tímabil og aukinn styrk komi hins vegar einkenni fram af meiri krafti og hraðar (Weinstein o.fl., 2003).

1.3 Rannsóknir á flúoruppsöfnun í gróðri

Ef rétt er að farið getur gróður verið mjög góð vöktunarlífvera þegar vakta á umhverfisáhrif og nota má vöktun á gróðri í ýmsum tilgangi. Rannsóknir hafa sýnt að gróður getur verið heppileg lífvera til þess að fylgjast með útlosun mengunarefna í nágrenni plöntunnar. Plöntur eru rótfastar og gefa því mynd af staðbundnum umhverfisáhrifum mengunar. Vöktun á dýrum, t.d. sauðfé, gefur ekki eins góða vísbendingu um staðbundin áhrif; ef sauðféð fer á stóran afrétt eða fær fæðu af mismunandi uppruna. Slíkt vaktar þó áhrifin á dýrin sjálf sem einnig er mikilvægt í heildarmyndinni þegar umhverfisáhrif eru metin. Kræklingur er dæmi um dýrategund sem hefur gefið góða reynslu í vöktun umhverfisáhrifa á vistkerfi sjávar í nálægð við álver hér á landi. Honum er þá gjarnan komið fyrir í þar til gerðum búrum þar sem leggja á mat á umhverfisáhrif. Kræklingur sýar í gegnum sig sjó til þess að fá næringu og safnar mengunarefnum í mjúkvæf og skel sína í gegnum lífsferil sinn (Guðjón Atli Auðunsson, 2014). Plöntur og kræklingur hafa það sameiginlegt að geta gefið nákvæma mynd af mengunaráhrifum hverju sinni. Kræklingi getur verið komið fyrir í búrum í sjó yfir það tímabil sem á að vakta. Hjá plöntum er hægt að skoða sveiflur í útblæstri flúors með vöktun á flúorstyrk plantna vegna þess að þær missa laufið á haustin og flúorupptaka í laufi hefst frá byrjun næsta vor. Barrtré fá árlega nýjar barrnalar og oft eru tekin sýni af nýjum barrnálum, eða barrnálum frá árinu áður en vel er hægt að sjóngreina mun á þessum barrnálum fram á haust vegna litarmuns. Hægt er að fylgjast með sveiflum á milli ára með því að taka sýni árlega af plöntum en einnig má vakta uppsöfnun í plöntuvef yfir vaxtartímann með því að taka sýni oftar, t.d. tvisvar á ári. Í vöktun barrtrjáa er hægt að vakta uppsöfnun á milli ára sem ekki er hægt hjá laufplöntum, eins og gefur að skilja. (Vike, 1995).

Þegar áætlun um umhverfisvöktun er sett af stað er því mjög mikilvægt að ákveðið sé fyrirfram hvaða áhrif á að vakta, hvar, frá hvaða uppsprettu og vegna hvers, svo þess að hægt sé að ákvarða hvernig best sé að haga slíkri vöktun.

1.3.1 Flutningur flúors í andrúmslofti

Eftir að flúor losnar út í andrúmsloftið er ljóst að veðurfar spilar stórt hlutverk í afdrifum flúorsins. Flúor sem losnar í andrúmsloftið er mjög hvarfgjarn og hvarfast í vetnisflúoríð (HF) sem er mun stöðugra efnasamband (Walna o.fl., 2013). Dreifing flúors í andrúmslofti fer eftir útblástursmagni, kornastærð, hvarfgirni, veðurþáttum s.s. hitastigi, vindátt og úrkomu (Walna o.fl., 2013). Því lengur sem flúoríð (F_2) er í andrúmslofti, því lengra frá uppsprettu sinni getur hún borist með vindi. Ríkjandi vindáttir gefa okkur hugmyndir um hvert efnið berst og vindstyrkur gefur okkur hugmyndir um hve langt það berst frá uppsprettu. Að sama skapi hefur vindhraði mjög mikið að segja um þynningu mengunar í andrúmslofti, þar sem þynning er mun meiri í sterkum vindi en hægum. Rannsókn á flutningi flúoríðs í andrúmslofti sýndi að styrkur flúoríðs minnkaði 2500 falt á 10 kílómetrum frá útstreymi eldfjalls (Cheng, 2018). Mengun í andrúmslofti dreifist ekki jafnt eftir radius frá mengunaruppsprettu. Rannsóknir hafa sýnt að flúorstyrkur plantna minnkar með fjarlægð frá mengunaruppsprettu en geti þó einnig verið misjafn eftir ríkjandi vindáttum. Flúorstyrkur plantna fylgir ríkjandi vindáttum frá mengunaruppsprettu og er hærri í þeim plöntum sem vaxa eftir þeim geira þar sem vindar blása frá uppsprettunni, en í plöntum sem staðsettar eru þar sem vindur ber ekki mengunarefni að (Havas, 1971).

Rannsóknir hafa einnig sýnt að landslag hefur mikil áhrif á dreifingu loftmengunar. Firðir og dalir gera það oft að verkum að loftmengunin er lengur að þynnast og dreifast frá uppsprettunni en ella og álag loftmengunar getur því orðið meira í slíku landslagi (Hornvedt, 1995).

Talið er að líftími flúoríðsameindar í andrúmslofti sé ekki lengri en fjórir dagar og að brotthvarf hennar sé að mestu leyti með rigningu, þoku, eða snjókomu (*e. wet deposition*) og útfellingu þurrefnis (*e. dry deposition*), þ.e. þegar þurr sameind einfaldlega fellur til jarðar eða sest á yfirborð jarðar, gróðurs, húsvegg o.s.frv. Í rannsókn á hegðun vetnisflúoríðs (HF) í andrúmslofti (Cheng, 2018) er því haldið fram að útskolun (*e. wet deposition*) sé ekki mikilvirkur ferli. Flúoríð er vatnsleysanleg sameind og ætti því að geta fallið úr andrúmslofti með regndropa en það er háð sýrustigi vatnsdropanna. Það er vitað að vetnisflúoríð (HF) er mjög vatnsleysanleg sameind og úði hefur reynst vel til þess að minnka útlosun mengunarefna í iðnaði, eins og t.d. á vetnisflúoríð (HF). Sýnt hefur verið fram á 25 - 90% árangur með því að nota vatn til þess að skola HF úr lofti. Ljóst er að nokkuð vatnsmagn getur þurft til, eða vatnshlutföll frá 6:1 til 40:1 á móti HF í vökvaformi. Hversu vel ferlið gengur fer eftir stærð vatnsdropa og ástandi vetnisflúoríðs (HF). Útskolunarferli sem notuð eru í iðnaði eru þó talin mjög frábrugðin þeim ferlum sem eiga sér stað milli vetnisflúoríðs og úrkomu í andrúmsloftinu. Hér er því gengið út frá því að útfelling þurrefnis sé helsta leið flúoríða úr andrúmsloftinu þó svo að útskolun eigi sér einnig stað (Cheng, 2018).

1.3.2 Flúorupptaka gróðurs

Ýmsar rannsóknir hafa verið gerðar á flúorupptöku gróðurs. Í námunda við álver í Noregi hafa farið fram sambærilegar mælingar í gróðri og hér á landi auk þess sem Norðmenn hafa sett upp vettvangsrannsóknir af ýmsu tagi til þess að skoða hvaða umhverfispættir hafa áhrif á slíkar vöktunarmælingar. Komið hefur í ljós við flúorvöktun í barrtrjám í námunda við álver í Noregi og áburðarverksmiðju í Finnlandi, að mikil fylgni er á milli flúorútblasturs álvera og uppsöfnunar á flúor í barnálunum (Hornvedt, 1995; Mikhailova, 2011). Einnig, að landslag skiptir þarna gríðarlegu máli og getur tiltekið útblástursmagn í þröngum dal eða firði valdið vefjaskemmdum á barrnálum á meðan að sami styrkur útblástur hefur ekki jafn mikil áhrif ef

landslagið er t.d. slétt og meiri líkur á að flúorútblastur geti dreifst og þynnst betur út. Einnig kom fram að plantan svaraði strax í lægri gildum flúorstyrks í nýjum barnálum þegar útblástur minnkaði, óháð því hve lengi álverið hafði verið starfrækt (Hornvedt, 1995). Flúorupptaka gróðurs á sér aðallega stað á gasformi í gegnum loftaugu. Lítill hluti af flúor á rykformi getur komist inn í plöntuna í gegnum yfirhúð laufblaða. Plöntur geta einnig tekið upp flúor í gegnum rætur sínar, en sú upptaka er ekki mikil miðað við upptöku gegnum loftaugu blaða. Flúorupptaka í gegnum rætur er háð því að flúor sé á aðgengilegu formi fyrir plöntur en einnig er upptaka róta mismikil eftir tegundum (WHO, 2002). Laufplöntur taka flúor upp yfir vaxtartíma sinn svo gera má ráð fyrir því að flúormagn blaðanna sé hærra að hausti en að vori (Vike, 1995). Einnig hefur verið sýnt fram á að flúor safnist upp í barnálum barrtrjáa. Flúor sem tekinn er upp af plöntu í vef, lauf eða barnálar safnast þar upp þar sem sáralítill flutningur á efninu á sér stað um í plöntunni eftir upptöku (Havas, 1971). Þegar flúor hefur verið tekinn upp í barnál flyst hann ekki um plöntuvefinn heldur helst í þeirri barnál þar sem hann var tekinn upp. Þess vegna hafa eldri barnálar á trjám meiri styrk flúors en nýjar. Samanburðarrannsókn var gerð í Finnlandi á flúorstyrk eins og tveggja ára barnála og kom í ljós að tveggja ára nálar höfðu meiri styrk flúors en munurinn var á bilinu 22-51% aukning á milli ára (Havas, 1971). Mikill breytileiki í flúormagni plantna fer jafnframt eftir tegund og arfgerð, hæð yfir sjávarmáli, skjóli, úrkomumagni á svæðinu og aldri gróðurvefs sem rannsakaður er.

Veðurfar er helsti áhrifavaldur flúorupptöku plantna enn veður hefur mikil áhrif á opnum loftaugna og stjórnar þannig hversu móttækilegar plönturnar eru fyrir því að taka upp efni úr andrúmsloftinu. Því lengur sem loftaugun eru opin, því meiri verður upptakan og þar með aukinn upptökuhraði. Veðurþættirnir sem hvetja til opunar loftaugna eru hitastig, úrkoma, raki, og ljós (Vike, 2005). Vegna þessa getur verið munur á flúormagni gróðurvefs eftir því hvar sýni er tekið af plöntunni. Niðurstaða flúormælinga á birkihekki í grennd við álver í norður Noregi sýndi að flúormagn laufblaða var 25 % hærra á vindlægu hlið hekkisins og laufskaðinn var einnig helmingi meiri á þeirri hlið (Vike, 1995). Jafnframt getur verið munur á upptöku flúors á milli laufblaða á sama tré, hvort það er neðarlega eða ofarlega, nálægt stofni eða á yfirborði laufkrúnu eða hvort það er á hlið trés sem snýr að ríkjandi vindátt eða frá. Þessi munur getur þó verið misjafn milli tegunda (Vike, 1995). Dæmi eru um að skemmdir hafi fundist á barrtrjám eingöngu á aðlægri hlið að mengunaruppsprettu og einnig hafa fundist skemmdir á ystu greinum barrtrjáa en ekki á þeim greinum sem voru í skjóli af þeim. Skýringin er sú að greinar sem standa utar á trénu, eða á vindlægri hlið, geta orðið fyrir meiri áhrifum af veðrum og eru móttækilegri fyrir upptöku efna með opnun loftaugna.

Þó svo að úrkoma og raki hafi jákvæð áhrif á opnun loftaugna hafa rannsóknir og mælingar einnig sýnt fram á að úrkoma getur dregið úr flúorupptöku plantna. Áhrif úrkomunnar eru þó mismikil eftir plöntutegundum. Ástæðan er sú að úrkoma getur skolað flúorefnum sem sest hafa á yfirborð plöntunnar, af henni (Vike, 2005).

1.3.3 Árif úrkomu (skolvatn)

Rannsóknir á skóláhrifum á flúorupptöku plantna sýna að úrkoma hefur langtímaáhrif á heildarmagn flúors í blaðvef plantna. Úrkoma hefur þau áhrif á yfirborð plantna að flúor sem sest hefur á blöð er skolað af og fækkar því flúorögnum og ryki á blöðum eða barnálum og minnkar þar af leiðandi upptöku plöntunnar á efninu (Havas, 1971). Talað er um regnvatnið sem hreinsar plönturnar sem skol (*e. wash-off*). Þegar rannsóknir eru gerðar á flúorstyrk plantna er plöntuvefurinn gjarnan skolaður fyrst uppúr hreinu vatni og svo gerðar

flúormælingar á skolvatninu. Gerð var norsk vettvangsrannsókn þar sem plöntutegundir voru annars vegar ræktaðar undir ábreiðu og urðu því ekki fyrir úrkomu og hins vegar plöntur sem uxu undir berum himni. Niðurstöðurnar sýndu að í öllum tilfellum voru plöntur ræktaðar undir ábreiðu og urðu ekki fyrir úrkomu, með meira magn flúors í blaðvef sínum (Vike, 2005). Niðurstaða þessarar rannsóknar sýndi einnig að flúormagn í skolvatni var mismikið eftir plöntutegundum. Harðviður, s.s. birki- og víðitegundir sýndu að 60% af heildarflúormagni á og í blöðum kom frá skolvatni. Aðrar tegundir með t.d. loðið eða hrjúft yfirborð laufblaða, s.s. kastaníutegundir og aðrar skrúðtrjátegundir, eins og *Cornus sibirica* og *Caragana arborescens*, voru eingöngu með 25% heildarflúorsins í skolvatni sem sýndi fram á að úrkoma skolar flúor betur af plöntuyfirborði, því sléttara sem það er (Vike, 2005).

Þegar rætt er um áhrif skols er ekki hjá því komist að leiða hugann að því hvert flúorinn skolast og hvað verður um hann. Þegar flúor skolast af blöðum plantna skolast hann niður í jarðveg. Vitað er að magn flúors sem plöntur taka upp úr jarðvegi með rótum sínum er ekki eins mikil og upptaka plantna í gegnum blaðvef nema að þeim mun meira sé af magni flúors í jarðveginum. Þó hefur verið sýnt fram á það að hæfni plantna til flúorupptöku úr jarðvegi er mismikil eftir tegundum (Vike, 2005). Í barrtrjám er magn flúors sem tekinn er upp af rótum ekki teljandi (Havas, 1971). Flúor er að finna í flestum tegundum af jarðvegi í styrk frá 200-1000 mg/kg (WHO, 2002). Sýrustig hefur einnig áhrif á upptöku plöntunnar því með lækkanði sýrustigi í jarðvegi verða flúorsambönd aðgengilegri til upptöku (Helena Marta Stefánsdóttir, 2016).

Ástæða þess að flúorupptaka í jarðvegi er takmörkuð er sú að flúor verður fljótt óaðgengilegur í jarðvegi þar sem hann myndar efnasambönd við önnur efni (WHO, 2002). Flókin efnasambönd og stærri sameindir eiga ekki jafn greiðan aðgang inn í rætur plantna vegna stærðar sinnar. Til dæmis má nefna tilraun sem gerð var á upptöku kríólíts (Na_3AlF_6) inni vef plantna og niðurstöður sýndu að plöntur þola hærri styrk af kríólíti en flúorvetni (HF) í jarðvegi. Óvirkni kríólítsins var skýrð með stærð sameindarinnar sem kom í veg fyrir að flúorinn geti smogið inni rætur plöntunnar (Vike, 2005).

1.3.4 Þolmörk

Þónokkuð hefur verið skrifað um þolmörk manna, dýra og plantna. Margar breytur geta haft áhrif á hversu vel plöntur þola flúor svo ekki hafa allir verið sammála um einstök þolmörk tiltekinna lífvera. Þau geta farið eftir tegundum dýra og plantna, næringar- og heilsufarsástandi einstaklings, aldri, hvort spendýr beri fóstur, hve lengi styrkur flúors varir o.fl. Eins og fram hefur komið hefur Alþjóðaheilbrigðismálastofnun staðfest að alvarleg einkenni flúoreitrunar hjá mönnum komi fram við 14 mg inntöku á dag en sýnt hefur verið fram á að inntaka flúors niður í allt 6 mg á dag getur haft skaðleg áhrif á menn (WHO, 2002).

Þolmörk grasbíta og plantna eru nátengd umfjöllunarefni þar sem grasbítar lifa á plöntunum. Þegar dýr veikjast í tengslum við eldgos er það yfirleitt vegna þess að dýrin taka upp flúor úr drykkjarvatni eða flúor sem sest hefur á eða í vef plantna. Hjá dýrum eru dæmi um að fôður með 250 ppm (mg F/kg) flúorinnihaldi valdi bráðri eitrun eftir skamman tíma í neyslu. Eftir því sem styrkurinn er lægri tekur lengri tíma fyrir einkenni að koma fram sé neyslan stöðug. Flúormörk í fôðri nautgripa hafa verið sett við 25-30 ppm en þó er talið að styrkur meiri en 20 ppm í lengri tíma dragi úr framleiðslu mjólkurkúa (Sigurður Sigurðsson, ódags.).

Í reglugerð um eftirlit með fóðri nr. 340/2001, með síðari breytingum, eru sett mörk fyrir m.a. flúorinnihald í fóðri. Í heilfóðri með 12% raka fyrir mjólkandi kýr, ær og huðnur skal flúor ekki vera meiri en 50 ppm (mgF/kg) en í heilfóðri fyrir aðra nautgripi, sauðfé og geitfé 30 ppm (Reglugerðarsafn, 2001). Þolmörk mjólkandi dýra eru hærri vegna þess að dýrið losar sig við hluta efnanna með mjólkinni. Gróðurverndarviðmið flúors sem farið er eftir í vöktunaráætlun álversins í Straumsvík er 30 ppm en samkvæmt mörkum reglugerðarinnar er gróður sem fer upp fyrir þau mörk óneysluhæfur sem fóður. Þetta viðmið er því algjört lágmark fyrir gróðurverndarmörk ef t.d. gras sem ræktað er á svæðinu á að vera öruggt til neyslu grasbíta eða til söfnunar í hey.

Þekkt dæmi þar sem tekist hefur verið á um skaðsemi og þolmörk búfænaðar gagnvart flúor er lögsókn bónda á Kúludalsá í Hvalfirði gegn Norðuráli á Grundartanga. Í málinu var deilt um hvort veikindi hrossa þar á bæ væru af völdum flúormengunar frá álverinu eða af öðrum ástæðum, en bóndinn hélt því fram að heilsu dýranna hefði hrakað eftir að flúor í grasi fór upp fyrir þolmörk grasbíta árið 2006. Að beiðni Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytisins var unnin skýrsla árið 2011 af tveimur dýralæknum um veikindi hrossanna og komust dýrlæknarnir að þeirri niðurstöðu að í beinum hrossa frá bænum væri styrkur flúors u.þ.b. fjórfaldur á við það sem mældist í hrossum á ómengduðum svæðum. Héraðsdómur Reykjavíkur sýknaði Norðurál af ákærunni árið 2018 á þeim grundvelli að annars vegar væru áhrif flúormengunar á hross lítið rannsökuð og því ekki sönnun fyrir því að einkenni dýranna stöfuðu af flúormagni í beinum þeirra og að ekki höfðu aðrir bændur á nágrannabæjum kvartað undan slíkum veikindum í dýrum sínum á starfsferli álversins (Sighvatur Arnmundsson, 2018).

Flúor er til staðar af náttúrulegum ástæðum í laufblöðum flestra plantna í styrk á bilinu 0,1- 15 ppm (WHO, 2002). Náttúrulegur flúorstyrkur í furum er talinn á bilinu 1-10 ppm (Havas, 1971). Líkt og hjá mönnum og dýrum getur flúor í of miklum styrk haft skaðleg áhrif á plöntur og komið fram í flúoreitrun sem einkennist af því að verulega getur dregið úr vexti laufs og barrs. Einnig koma fram vefjaskemmdir á laufblöðum eða barnálum. Alþjóðaheilbrigðismálastofnunin telur að slíkar skemmdir séu líklegastar til þess að koma fram í nýjum og hratt vaxandi vef laufblaða og barrnála (WHO, 2002). Hins vegar kemur fram í finnskri rannsókn að flúorskemmdir komi fyrr fram í eldri barnálum sem safnað hafi meiri flúor í vef sinn (Havas, 1971). Barrtré, mosar og fléttur eru með lægri þolmörk fyrir flúor en flest lauftré (Vike, 1995; Mikhailova, 2011). Misjafnt þol plantna gagnvart flúorstyrk felst ekki í því hversu mikinn flúor plantan tekur upp heldur þeim styrk flúors í vef sem hún þolir þangað til hún byrjar að sýna hnignun (Vike, 1995). Fléttur sýna skemmdir við 25-80 ppm flúors í vef (Weinstein, 2003). Í norskri rannsókn sýndu furutré merki um skemmdir við 50-100 ppm flúors í vef og vefjaskemmdir fundust á lauftrjám s.s. birki (*Betula pubescens*), selju (*Salix caprea*) og reynivið (*Sorbus aucuparia*) við 100-170 ppm flúors í vef plantna (Vike, 1995). Eins og sjá má á þessum tölum geta vefjaskemmdir komið fram við breytt bil af flúorstyrk, eins og hefur komið fram í sambandi við þolmörk manna og dýra. Þetta skýrist af því að þol plantna fyrir flúor í andrúmslofti getur verið háð öðrum umhverfisþáttum og er t.d. breytilegt eftir loftslagi, hæð yfir sjávarmáli, fjarlægð frá hafi og vaxtarskilyrðum, s.s. ljósi, raka, hitastigi og úrkomu. Góð vaxtarskilyrði hraða sprettu plöntunnar svo styrkur flúors í plöntuvef þynnist frekar (Helena Marta Stefánsdóttir, 2016). Aðrir þættir hafa svo áhrif á upptökuhraða plantna en þeir geta farið eftir tegund og arfgerð plöntunnar, hæð yfir sjávarmáli, skjóli frá vindi, úrkomumagni á svæðinu og aldri gróðurvefs sem rannsakaður er. Þá hefur einnig komið í ljós að snjóbreiða yfir barrtrjám á veturna getur skýlt trjámum fyrir mengun og minnkað upptökuhraða barrtrjáa yfir veturinn (Havas, 1971).

1.3.5 Sýnataka gróðursýna

Til þess að fá sem besta umhverfisvöktun þarf við sýnatöku að taka tillit til allra þátta sem fjallað hefur verið um hér að ofan. Í því felst að tekið sé tillit til þess að skol hefur mismunandi áhrif á plöntutegundir, staðsetning plantnanna hafi áhrif, t.d. hvað varðar ríkjandi vindátt og einnig hafi aldur blaða mikil áhrif, og sýnatökutími, þ.e. hvenær á vaxtartímabili plöntunnar sýnið er tekið. Því hefur verið haldið fram að taka þurfi sýni í nokkur ár í röð til þess að meta raunveruleg áhrif útlosunar mengunarefna á umhverfið (Hornvedt, 1995). Jafnframt sé mikilvægt að þegar sýni séu tekin af mismunandi stöðum sem bera á saman, séu laufblöð jafnt langt gengin á sitt vaxtarskeið og jafn þroskuð. Einnig þarf að hafa í huga við söfnun sýna hvar á trénu þau eru staðsett, innst eða yst á krónunni og á hvaða hlið, vindlægri eða skjóllægri hlið frá mengunaruppsprettu (Vike, 1995). Í umhverfisvöktun skiptir einnig öllu máli hvaða tegundir plantna verða fyrir valinu þar sem þær eru mismóttækilegar fyrir upptöku og hafi mismikið þol fyrir menguninni. Barrtré sýna almennt lægri styrk flúors í vef enda minni upptaka í gegnum barnálar þeirra en laufblöð. Barrtré eru hins vegar með lægra þol en laufplöntur (Havas, 1971). Af lauftrjám voru reynir og víðitegundir taldar heppilegar í vöktun flúors í andrúmslofti við norskar aðstæður þar sem þær eru millipólnar og verða ekki fyrir eins miklum áhrifum af breytilegri úrkomu eins og t.d. birkitegundir (Vike, 1995; 2005). Millipólnar tegundir eru jafnframt taldar heppilegastar til umhverfisvöktunar vegna þess að skemmdur plöntuvefur tekur upp meira magn af flúor og því getur það skekkt niðurstöður rannsókna (Weinstein og Davison, 2003). Taka þarf mið af umhverfisaðstæðum hverju sinni þegar plöntur eru valdar til umhverfisvöktunar þar sem að ein tegund getur verið viðkvæm á einum stað en talist heldur þolin á öðrum stað (Weinstein o.fl., 2003).

1.4 Markmið

Eftir fimmtíu ára vöktun á flúorstyrk í plöntum í umhverfi álversins í Straumsvík er nauðsynlegt að staldrað sé við og farið yfir farinn veg. Gagnasafnið sem liggur fyrir hefur gríðarlegt magn upplýsinga að geyma. Hingað til hefur gagnasafnið ekki verið tekið saman á heildstæðan hátt og rýnt enda ekki mögulegt vegna þess að meginhluti gagnanna hefur eingöngu verið til á skriflegu formi. Meginmarkmið verkefnisins var að taka saman allar flúormælingar sem gerðar hafa verið á plöntum í umhverfisvöktun álversins í Straumsvík, í rafrænan gagnagrunn. Gagnagrunnurinn samræmir gögnin svo hægt sé að bera saman gögn allra fimm áratuganna.

Það er mikilvægt á tímamótum sem þessum, að farið sé yfir niðurstöður á heildstæðan hátt og þau rýnd með þeim hætti að hægt sé að meta hvort þörf sé á að bæta vöktunaráætlanir með einhverjum hætti. Markmið verkefnisins var því jafnframt að greina gögnin og skoða þróun þeirra í gegnum áratugina. Niðurstöður mælinga settar í sögulegt samhengi hvað varðar þróun á tæknibúnaði s.s. hreinsibúnaði og mengunarvörnum ásamt aukinni álframleiðslu. Ásamt því var lagt mat á líklega dreifingu mengunarefna frá álverinu með tilliti til veðurfræðilegra þátta. Niðurstöður samantektar á gögnunum voru settar í samhengi við fyrirbyggjandi niðurstöður erlendra rannsókna á efninu.

Niðurstöður rannsóknarverkefnisins og greiningar á gagnasafninu voru notaðar til þess að meta hvort tilefni sé til þess að bæta núverandi vöktunaráætlun álversins í Straumsvík á flúor í gróðri, með einhverjum hætti.

2 Gögn og aðferðir

2.1 Skráning gagna

Niðurstöður flúormælinga í gróðri í nágrenni álversins í Straumsvík hafa verið gefnar út í skýrslum fyrir hvert ár frá því mælingar hófust árið 1968. Vegna þess hve gamlar fyrstu mælingar eru og mikil tækniþróun hefur átt sér stað yfir tímabilið hefur stærstur hluti gagnanna ekki verið aðgengilegur á tölvutæku formi hingað til; eingöngu á prenti. Nýsköpunarmiðstöð Íslands hefur annast sýnatökur og mælingar síðustu ár og þar fékkst aðgangur að tölvutækum niðurstöðum mælinga frá árinu 1996. Niðurstöður frá árunum 1968 - 1995 voru eingöngu til á prenti í fyrirnefndum skýrslum. Skýrslunum ásamt gagnaskrár fyrir hvert ár var safnað saman en þær voru ekki sérlega aðgengilegar. Skýrslurnar fundust allar að lokum og fengust að láni frá Nýsköpunarmiðstöð Íslands og Heilbrigðiseftirliti Hafnarfjarðar- og Kópavogssvæðis. Gagnaskrá fyrir skýrslu ársins 1990 fannst ekki hjá opinberum stofnunum en afrit af gagnaskránni fékkst þegar leitað var til álversins í Straumsvík. Allar gróðurmælingar úr skýrslunum (Viðauki A) voru skráðar í þar til gerðan gagnagrunn sem unninn var í Microsoft Excel. Mælingarnar frá 1996 sem þegar voru til á rafrænu formi þurfti að samræma og færa inn í gagnagrunninn. Gagnagrunnurinn nær því yfir árabilið 1968-2017 og er fjöldi flúormælinga í gróðursýnum yfir tímabilið eru 4250 talsins.

Nákvæmni skráninga er nokkuð breytileg í skýrslum á milli árabila og því óvissa í mælingum misjöfn á milli sýna í gegnum tímaröðina. Niðurstöður frá árunum 1981-1991 hafa verið skráðar á þann veg að þær eru námundaðar að hálfum en niðurstöður frá 1992-1995 hafa verið skráðar án aukastafa og því námundað að heilli tölu. Gagnagrunnurinn sem settur var upp í þessu verkefni byggist því á þeim gildum sem skráð voru í skýrslurnar, hafi verið innsláttar villur eða mismunandi óvissa í skráðum niðurstöðum skýrslanna kemur það einnig fram í gagnagrunninum. Einnig þarf að hafa í huga að tækniþróun hefur einnig átt sér stað yfir tímabilið í aðferðum við greiningu sýna og því hafa breytingar átt sér stað á greiningarmörkum við rannsóknirnar.

Gróðurgerðir sem vaktaðar hafa verið og eru skráðar í gagnagrunninn eru: áborið gras, óáborið gras, gras (óskilgreint), birki, reynir, gullregn, fura og greni. Furu og greni mælingarnar hafa verið gerðar á bæði eins árs og tveggja ára barnálum. Í elstu gögnum má finna óskilgreindar furu, greni og gras mælingar en þær voru ekki notaðar í úrvinnslu verkefnisins. Vegna þess að hey og gullregn eru ekki lengur í vöktunaráætlun álversins var ekki lögð áhersla á skoðun þeirra mælinga (Viðauki B).

Gögnum yfir flúorútlosun og framleiðslu álversins var einnig safnað og þau skráð í gagnagrunninn. Gögnin voru sótt í útgefið „Grænt bókhald“ álversins sem birt er á heimasíðu álversins (Rio Tinto á Íslandi, 2017), en fyrir þau ár sem grænt bókhald var ekki á vefnum veitti álverið skriflegar upplýsingar um útblástur og framleiðslu tiltekinna ára. Upplýsingar um útblástursgögn 1980-1996 lágu fyrir í tímaritsgrein í Náttúrufræðingnum (Þór Tómasson

og Hörður Þormar, 1998). Útblástursgögnin ná yfir árabilið 1980-2017 en ekki liggja fyrir upplýsingar um útblástursmagn flúors fyrir 1980 þar sem útblástur var ekki mældur fyrir.

Veðurgögn fengust frá Veðurstofu Íslands svo hægt væri að skoða mögulegan þátt veðurs í dreifingu flúors frá álverinu en megináhersla var lögð á að skoða úrkomu, vindstyrk og vindátt. Veðurgögnum var safnað frá Straumsvík (sjálfvirk stöð nr. 1473), Reykjanesbraut (sjálfvirk stöð nr. 31363), Keflavíkurflugvelli (mönnuð stöð nr. 990), Reykjavíkurflugvelli (sjálfvirk stöð nr. 1477) og frá Bústaðavegi í Reykjavík (mönnuð nr. 1 og sjálfvirk stöð nr. 1475).

2.2 Rannsóknarsvæðið

Gróðursýnin hafa verið tekin á svipuðum stöðum frá árinu 1968 þegar sýnatökur hófust (Viðauki B). Alls hafa verið skráðir 42 sýnatökustaðir víðs vegar um höfuðborgarsvæðið og Borgarfjörð en þar hafa sýni verið tekin til viðmiðunar þar sem talið er að ekki gæti áhrifa mengunar frá álverinu á því svæði (Iðnaðarráðuneytið, 1970). Sýnatökustaðir hafa breyst lítillega í gegnum áratugina vegna breyttrar landnotkunar. Helstu breytingar á sýnatökustöðum hafa falist í því að sýnatökustaðir hafa dottið út og í sumum tilfellum hafa nýir sýnatökustaðir komið inn í staðinn. Einnig eru dæmi um að vöktun á stöðum breytist m.t.t. gróðurgerða, þ.e. að tekin séu sýni af fleiri eða færri gróðurtegundum á tilteknum stað. Vegna þess hve sýnatökustaðir hafa breyst lítillega í gegnum tíðina er samanburðarhæfni mælinganna í tímaseriunni mikil.



Mynd 2.1. Sýnatökustaðir sem notaðir eru í núverandi vöktunaráætlun álversins í Straumsvík (rauðir) og skilgreind svæði vegna flúorvöktunar í gróðri. Mynd fengin frá Nýsköpunarmiðstöð en lítillega breytt (Hermann Þórðarson, 2016).

Frá upphafi mælinga hefur sýnatökusvæðinu verið deilt upp í fjögur svæði eftir fjarlægð frá álverinu (mynd 2.1). Svæði 0 er þynningarsvæði sem skilgreint er sem það svæði þar sem þynning mengunar fer fram og á því svæði má mengun fara yfir gæðamarkmið eða umhverfismörk skv. skilgreiningu í reglugerð nr. 941/2002 um hollustuhætti (Reglugerðarsafn, 2002). Svæði 1 er svæði innan við 4,5 km rás frá álverinu en utan þynningarsvæðis, svæði 2 nær yfir 4,5-6,5 km rás út frá álverinu, svæði 3 nær frá 6,5-15 km rás, svæði 3a markast af svæði með rás í 15-50 km fjarlægð frá álverinu og svæði 4 er utan 50 km rás frá álverinu (Hermann Þórðarson, 2016). Í töflu 3.1 sést hvaða sýnatökustaðir eru notaðar í dag og lega þeirra sést á mynd 2.2. en myndin nær ekki yfir svæði 3a og 4. Á svæði 4 eru eingöngu tekin sýni af gróðri í Skorradal. Sýnatökur fara ekki lengur fram á svæði 3a en þeir sýnatökustaðir sem áður voru notaðir á því svæði voru á Reykjanesi (tafla 2.1).

Tafla 2.1. Helstu sýnatökustaðir eftir svæðaskiptingu (Hermann Þórðarson, 2016).

Svæði	Sýnatökustaðir
0	Straumur, Gerði
1	Dysjar, Hellisgerði, Straumsgirðing
2	Sviðholt, Garðaholt, Hvaleyrvatn, Hvassahraun
3	Öskjuhlíð, Vífilsstaðir, Vífilsstaðahlíð, Sléttuhlíð
4	Skorradalur

Í töflu 2.2 sést af hvaða gróðurtegundum sýni eru tekin á sýnatökustöðunum sem merktir eru á mynd 2.2. Ekki hafa verið tekin sýni af öllum gróðurgerðum á hverjum stað, líklega vegna þess að ekki er jafn mikið af hverri tegund að finna á öllum stöðum (Viðauki B).

Tafla 2.2. Gróðurtegundir eftir sýnatökustöðum (númer sýnatökustaða).

Sýnatökustaðir	Gróðurtegundir						
	Óáborið gras	Áborið gras	Birki	Reynir	Greni	Fura	Samtals
Straumur (1)	✓						1
Gerði (31)					✓		1
Dysjar (9)	✓	✓					2
Hellisgerði (6)	✓		✓	✓	✓		4
Straumsgirðing (32)					✓	✓	2
Sviðholt (8)	✓	✓					2
Garðaholt (37)	✓		✓		✓	✓	4
Hvaleyraryvatn (34)	✓		✓	✓	✓	✓	5
Hvassahraun (27)	✓						1
Öskjuhlíð (41)			✓		✓	✓	3
Vífilsstaðir (10)	✓		✓				2
Vífilsstaðahlíð (7)	✓		✓				2
Sléttuhlíð (38)					✓		1
Skorradalur	✓		✓	✓	✓	✓	5
Samtals	10	2	7	3	8	5	35

Algengustu gróðurtegundir sem tekin eru sýni af eru óáborið gras, birki og greni. Í Skorradal í Borgarfirði eru tekin sýni af flestum gróðurtegundum miðað við aðra sýnatökustaði en niðurstöður rannsókna í Skorradal eru notaðar sem viðmiðunargildi í umhverfisvöktun álversins í Straumsvík.

Sýnum er safnað með þeim hætti að sýni af nokkrum trjám af handahófi á hverjum sýnatökustað er safnað. Sýni af grasi og lauftrjám eru tekin tvisvar á ári, í byrjun og lok vaxtartíma plöntunnar, þ.e. að vori og hausti. Árlega eru tekin sýni af eins og tveggja ára barrnálum í lok vaxtartíma þeirra, seint að hausti.



Mynd 2.2. Dreifing sýnatökustaða umhverfis álverið í Straumsvík. Sýnatökustaðir eru táknaðir með rauðum merkjum ásamt númeri. Staðsetning álversins er táknuð með appelsínugulu merki.

Sýnatökustaðirnir virðast í fyrstu nokkuð vel dreifðir yfir svæðið og í allflestar áttir út frá álverinu (mynd 2.2). Hvað varðar dreifingu í fjarlægð eru ekki sýnatökustaðir sunnan megin við álverið aðrir en Gerði, sem er mjög nálægt. Á mörgum sýnatökustöðunum eru tekin sýni af fáum gróðurtegundum (tafla 2.2). Í Straumi (sýnatökustaður nr. 1), Hvassahrauni (sýnatökustaður nr. 27), Sviðholti (sýnatökustaður nr. 8) og Dysjum (sýnatökustaður nr. 5) eru eingöngu tekin sýni af grasi en þetta eru allt sýnatökustaðir sem ná frá suðvestri til norðurs af álverinu, fyrir utan Garðaholt þar sem fleiri gróðurtegundir eru vaktaðar.

2.3 Úrvinnsla gagna

Vindrósir voru útbúnar til þess að vinna úr veðurgögnum og vindrósir frá veðurstöðvum bornar saman til þess að fá sem bestar upplýsingar um vindafar. Ekki hafa allar veðurstöðvarnar sem notaðar eru verið virkar yfir allt tímabilið. Vindgögn úr öðrum veðurstöðvum eru hafðar til hliðsjónar vegna þess að talið er að veðurstöðin í Straumsvík (nr. 1473) gefi ekki nægjanlega skýra mynd af austanáttum vegna staðsetningar hennar nærri byggingum. Vindrósir úr veðurstöðvunum sem taldar voru upp í kafla 2.1 voru útbúnar og þær metnar og bornar saman. Samanburður leiddi í ljós að vindur í Straumsvík var álíka

öðrum veðurstöðvum sem talðar eru sambærilegar, úr öllum áttum öðrum en austanátt. Vegna þess að austanáttin blæs að mestu á haf út og hefur ekki áhrif á sýnatökustaði aðra en Straum (sjá mynd 2.1 og töflu 2.2) þar sem eingöngu eru tekin sýni af óábornu grasi var ákveðið að notuð yrðu vindgögn úr veðurstöðinni í Straumsvík og úrkomugögn úr sjálfvirkri veðurstöð á Bústaðavegi (nr. 1475). Úrkomumælingar eru ekki framkvæmdar í veðurstöð Vegagerðarinnar á Reykjanesbraut (nr. 31363) og við söfnun gagna varaði Veðurstofa Íslands við notkun úrkomugagna úr veðurstöðinni í Straumsvík vegna óáreiðanleika þeirra.

Vindrósir voru gerðar með vindgögnum úr Straumsvík og úrkomumælingum frá Reykjavík. Notuð voru klukkustundargildi. Vindrós var gerð fyrir þurrt veður (mynd 3.19) þegar úrkoma var 0 mm/klst. Önnur vindrós var gerð þegar úrkoma mældist meiri en 0 mm/klst. (mynd 3.20). Vindáttir í tilvikum 2 m/sek eða minna voru ekki teknar með í vindrósirnar því þá má ætla að dreifing mengunarefna frá Straumsvík sé oftast tilviljanakennd.

Flúorútblástursgögn álversins eru uppgefin í einingunni heildarflúoríð kg/tonn af áli. Þessi gildi voru margfölduð með framleiðslu hvers árs og einingin útlosuð heildarflúoríð tonn/ári er notuð við vinnslu verkefnisins (sjá nánar mynd 1.2).

Til þess að meta uppsöfnun flúormengunar í plöntuvef var notað einfalt línulegt aðhvarf (*e. simple linear regression*) og jafna bestu beinu línu til þess að leggja mat á sambandið á milli breytanna þar sem flúorstyrkur á fyrri hluta lífskeiðs plöntunnar (lauf og gras að vori / eins árs barnál) er skýribreyta en flúorstyrkur á seinni hluta lífskeiðs (lauf og gras að hausti / tveggja ára barnál) er svarbreyta. Þegar sambandið er skoðað fæst skýringarhlutfallið (R^2) sem segir til um hversu mörg % af breytileika í svarbreytu er skýrður með gildi skýribreytunnar (McDonald, 2014).

Upptökuhraði C_F (ppm/mán) plantna er reiknaður sem :

$$C_F = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{t_2 - t_1}$$

Hjá laufplöntum og grasi er upptökuhraði reiknaður sem flúorstyrkur í plöntu á tilteknum sýnatökustað um vor dreginn frá mældum flúorstyrk um haust og því svo deilt með mánuðum vaxtartímans (3) sem eru júní, júlí og ágúst. Hjá barrtrjám er sama aðferð notuð en þá er styrkur flúors í eins árs barnálum dreginn frá styrk í tveggja ára barnálum, á tilteknum sýnatökustað og því svo deilt með heilu ári eða 12 mánuðum.

Flúorstyrkur í plöntutegundum er borinn saman á sýnatökustöðum til þess að skoða hvaða tegundir taka meira upp en aðrar en einnig eru bornir saman sýnatökustaðir til þess að komast að því hvort ákveðnir staðir séu útsettari fyrir mengun en aðrir. Í fyrra tilfellinu er hver og ein plöntutegund einn hópur og í því seinna er hver og einn sýnatökustaður kallaður hópur. Til þess að bera saman þessa mismunandi hópa og skoða hvort það sé munur á þeim er notuð einhliða fervikagreining (*e. one-way ANOVA*). Þar sem fervikagreining segir eingöngu til um hvort munur sé á meðaltali milli hópa eða ekki, er notað Tukeys post hoc próf í kjölfar fervikagreiningar þegar bornir eru saman fleiri en tveir hópar til þess að sjá hvaða hópar það eru sem skera sig úr. Dreifing mælinga í hverjum hóp er yfirleitt ekki normaldreifð, hafa ekki sama staðalfrávik og hafa ekki alltaf sama fjölda mælinga, svo erfitt er að beita prófi á gögnin sem hentar algjörlega. Einhliða fervikagreining gerir ráð fyrir að dreifing sé normaldreifð en er þó ekki viðkvæm fyrir frávikum þar á. Einhliða fervikagreining gerir einnig ráð fyrir að gögnin hafi sama staðalfrávik en er þó ekki viðkvæm fyrir frávikum á því að því gefnu að hópastærðirnar séu svipaðar. Þegar hópar eru ekki af svipaðri stærð og hafa ekki sama

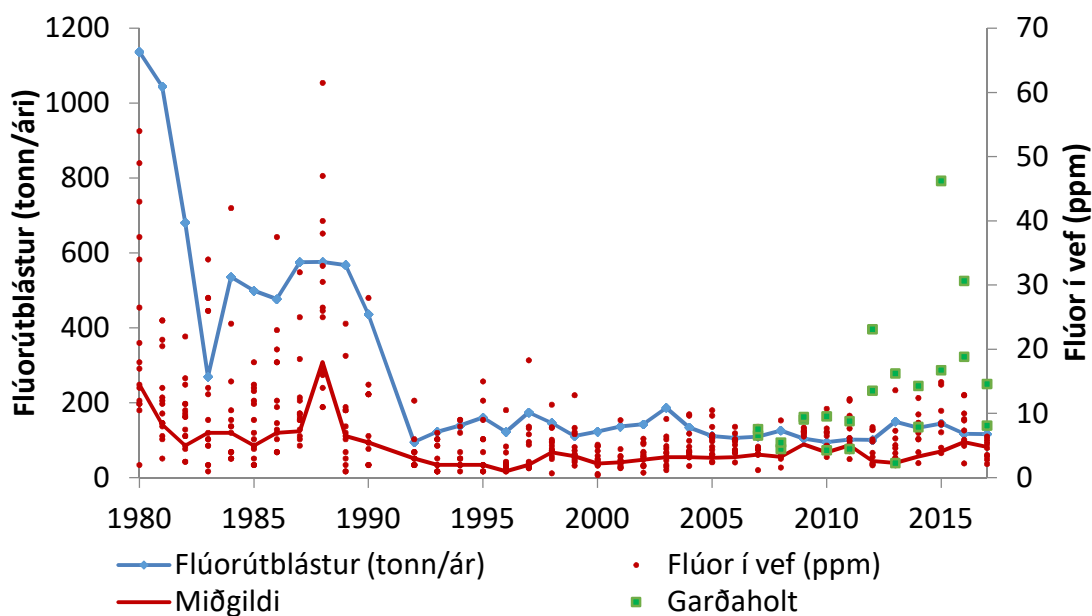
staðalfrávik er hægt að nota Welch's fervikagreiningu (e. *Welch's anova*) sem er almennt ekki jafn sterk og einhliða fervikagreining (e. *One-way anova*) en getur verið mun sterkari í tilvikum sem þessum (McDonald, 2014). Vegna þess að það er ekkert próf sem hentar gögnunum að fullu var ákveðið að nota einhliða fervikagreiningu en Welch's fervikagreiningu þar sem hún átti við - hópastærðir misstórar og staðalfrávik ekki það sama. Til þess að prófa hvort staðalfrávik hópa var sama var notað Bartlett próf (McDonald, 2014). Games-Howell post hoc próf var notað til þess að skoða mun á milli hópa í kjölfar Welch's fervikagreiningar.

Fervikagreining var einnig notuð til þess að bera saman skolmælingar tegunda og sýnatökustaða. Þegar hópar eru bornir saman eru notuð kassarit til þess að sýna gögnin á myndrænan hátt. Kassarit sýna miðgildi allra mælinga hvers hóps og er miðgildið merkt sem miðlínan í kassanum. Efri og neðri mörk kassana merkja neðri og efri fjórðungsmörk, þ.e. að 25% allra mælinga í hópum eru lægri en neðri brún kassans, 75% mælinga hópsins eru lægri en efri brún kassans. Línurnar sem ná út fyrir kassana eru oft kallaðar skegg en neðra skeggið nær að lægsta gildi mælinganna og efra skeggið nær að hæsta gildi mælinganna og því hluti af dreifingu gagnanna. Útlagar eru merktir með punktum fyrir utan skeggin (Anna H. Jónsdóttir og Sigrún H. Lund, 2015). Í boxritunum hefur einnig verið settur rauður tígull fyrir meðaltal. Tölfræðiúrvinnsla verkefnisins, vindrósir og ýmsar myndir voru unnar í RStudio (Rx64, útgáfa 3.5.2, 2018). Einnig var notast við Microsoft Excel við gerð og úrvinnslu á ýmsum gröfum. Landakort var sótt á vef Google map og unnið nánar í Paint 3D.

3 Niðurstöður

3.1 Tímalína

Gögn um flúorútlosun álversins frá árunum 1968-1979 eru ekki til svo borin eru saman útlosunargögn og flúormælingar frá 1980-2017 á samanburðargrafi tímalínu (mynd 3.1). Bakgrunnsgildi úr Skorradal eru ekki notuð í samanburðinn þar sem að þau eiga ekki að vera í neinu sambandi við flúorútblástur álversins. Myndin sýnir að flúorútlosun fellur mjög hratt á milli árunna 1980-1983 en eykst svo aftur til ársins 1989 þegar dregur úr útlosun að nýju. Minni sveiflur hafa verið í útlosun til ársins 2017. Flúormælingar í birkiplöntum af svæðum 1, 2 og 3 (mynd 2.1) og breytingar á útblæstri sýna að sveiflur í mældum styrk flúors í plöntuvef hefur mjög ákveðna fylgni við flúorútblástur hverju sinni.



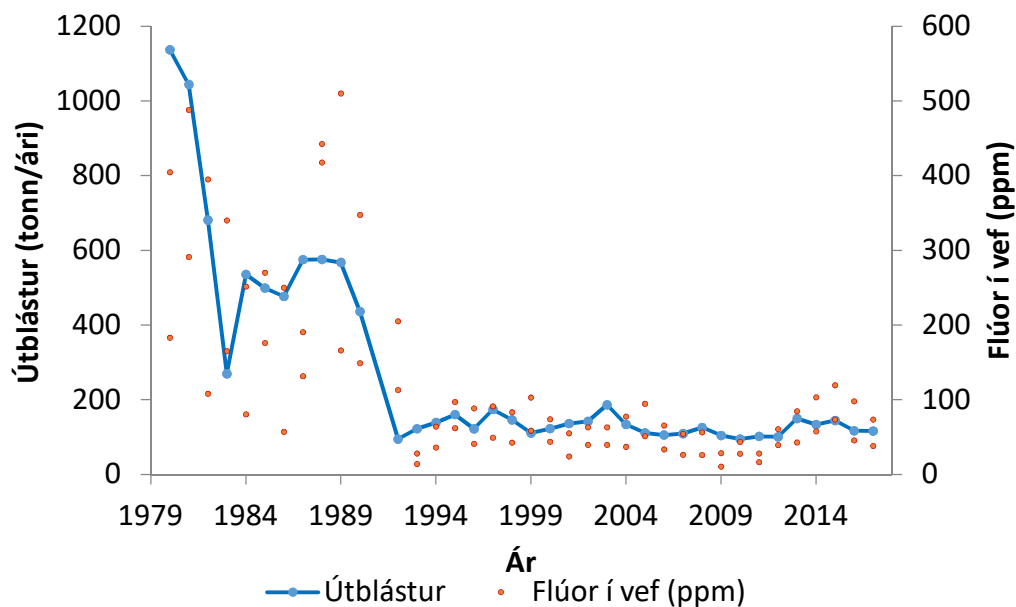
Mynd 3.1. Allar flúormælingar (ppm) í birkigróðri (rauðir punktar) á sýnatökustöðum utan Skorradals, frá 1980-2017. Miðgildi flúors í vef fyrir hvert ár fyrir sig (rauð lína). Flúormælingar í Garðaholti eru táknaðar með grænum kassa. Flúorútblástur álversins (blá lína) í losuðum tonnum á ári.

Á mynd 3.1 sést hvernig flúorútblástur fellur frá árinu 1981 til ársins 1983 eftir að felliþekjur og þurrhreinsibúnaður er settur upp árið 1982 (mynd 1.1). Útblásturinn eykst þá aftur á næstu árum en eftir að rafstýrðar felliþekjur eru settar upp árið 1992 næst mikill árangur í því að minnka útblásturinn. Árið 1997 er kerskáli 3 tekinn í notkun og framleiðsla aukin og virðist þá koma örlítill toppur sem aftur leitar niður. Frá 1998 hefur útblástur verið nokkuð jafn en þó

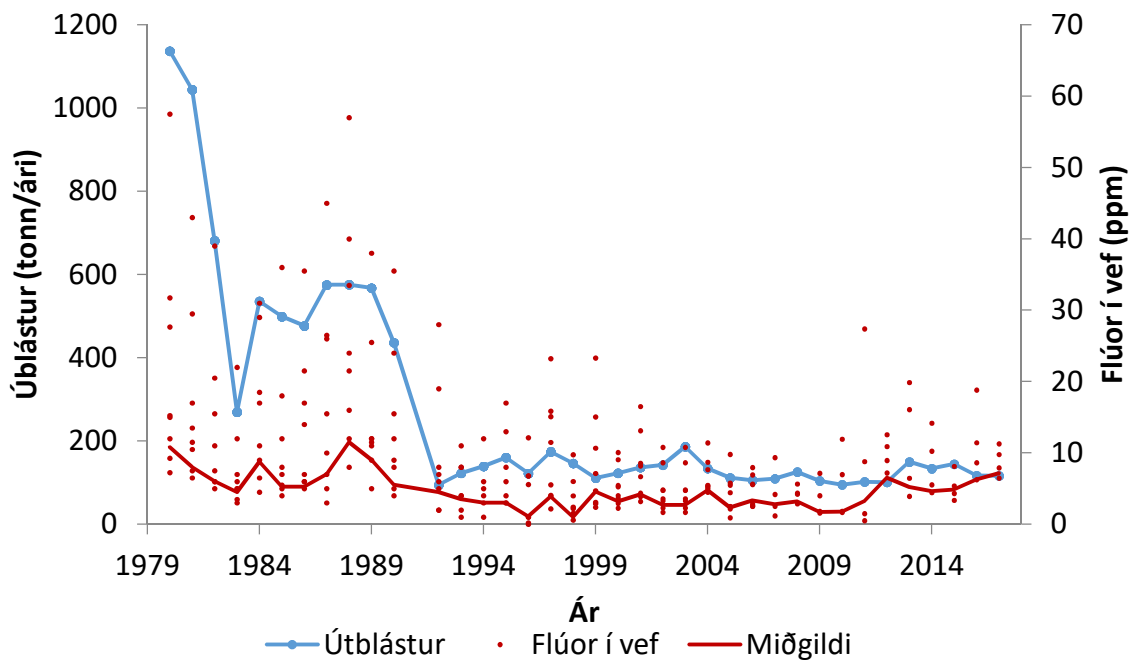
með sveiflum. Þegar lína fyrir miðgildi flúorstyrks í birkivef er borin saman við útblástur er nokkur fylgni á milli þeirra og styrkur í gróðri lækkar þegar útblástur dregst saman en hækkar sömuleiðis þegar útblástur eykst.

Frá árinu 2013 hefur miðgildi flúorstyrks í birkivef farið hækkandi þrátt fyrir að dregið hafi úr útlosun. Flúormælingar í birkiplöntum eru margar undir 10 ppm yfir allt tímabilið, en þó eru mörg einstök gildi sem ná miklu hærra. Þessi hágildi (yfir 15 ppm) voru mun fleiri á árunum fyrir 1990 en þau eru í dag. Hágildi eru ekki sjáanleg á árunum 2000-2010 en síðan þá hefur þeim farið fjölgandi. Flúormælingar hófust á Garðaholti árið 2007 en öll gildi yfir 15 ppm frá árinu 2010 eru í birki á Garðaholti.

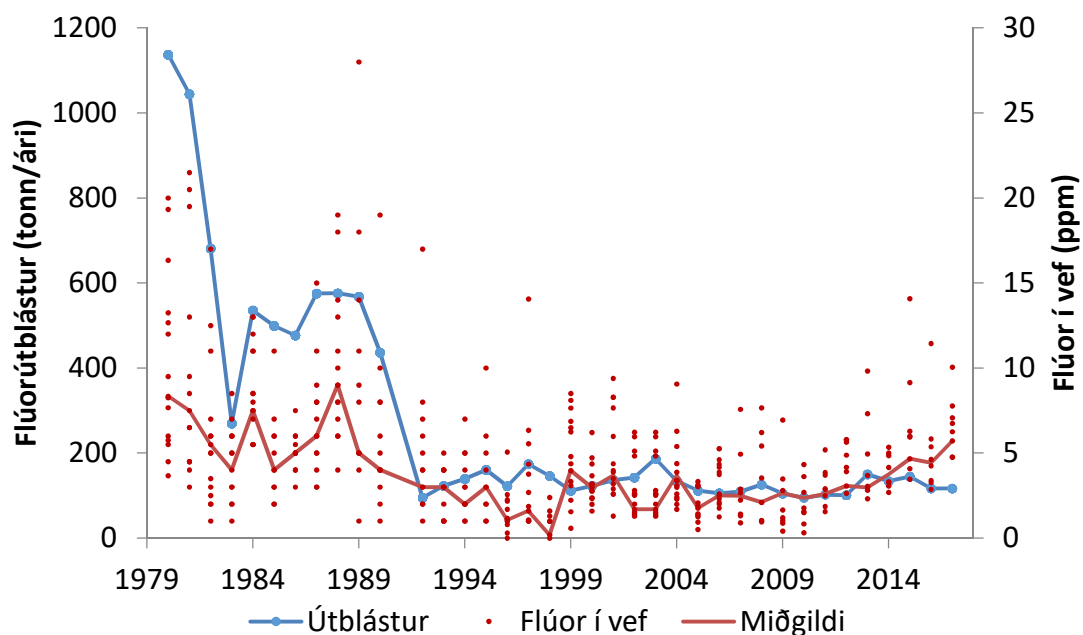
Samskonar yfirlit fyrir grenitré (mynd 3.2) þar sem mælingar innan sýnatökusvæðanna (sjá mynd 2.1) eru skoðuð út af fyrir sig; svæði 0 (mynd 3.2) og 1 (mynd 3.3) eru aðgreind en svæði 2 og 3 eru saman (mynd 3.4).



Mynd 3.2. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 0 (þynningarsvæði) frá 1980-2017. Flúorútbلاstur álversins (blár) í losuðum tonnnum á ári.



Mynd 3.3. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 1 frá 1980-2017. Miðgildi mælinga á flúorstyrk í greni hvert ár er táknað með rauðri línu. Flúorútblastur álversins (blár) í losuðum tonnnum á ári.



Mynd 3.4. Flúorstyrkur (ppm) í greniplöntum (rauður) á svæði 2 og 3 á árunum 1980-2017. Miðgildi mælinga á flúorstyrk í greni hvert ár er táknað með rauðri línu. Flúorútblastur álversins (blár) í losuðum tonnnum á ári.

Flúorstyrkur (ppm) í greni er mjög frábrugðinn á milli svæða. Á svæði 0, sem er þynningarsvæði álversins, hafa sýni mælst upp undir 100 ppm flúor í plöntuvef síðustu ár og miðgildi því á milli 50 og 100 ppm (mynd 3.2). Á þynningarsvæði er aðeins einn sýnatökustaður fyrir greni, það er Gerði. Á svæði 1 er hefur miðgildi flúormælinga farið hækkandi frá árinu 2014 og nálgast nú 10 ppm (mynd 3.3). Á svæðum 2 og 3 hefur miðgildið

verið allt upp undir 5 ppm. Það vekur athygli á svæðum 2 og 3 að miðgildi hækkar frá árinu 2014 þó svo að flúorútblastur sé að lækka (mynd 3.4).

Útblásturslína og miðgildislína á mynd 3.4 fylgjast vel að til ársins 1992 þar sem flúorstyrkur fellur sýnilega þegar dregur úr útblæstri og hækkar aftur á móti þegar útblástur eykst. Sambærilegt mynstur má sjá á svæði 0 (mynd 3.2) þar sem gott samband er á milli útblásturs og flúorstyrks í grenivef.

Sama mynstur virðist koma fram hjá greni (mynd 3.2, 3.3 og 3.4) og hjá birkitrjám (mynd 3.1) þegar háum gildum fer hækkandi frá árinu 2010 þrátt fyrir að flúorútblastur álversins fari minnkandi.

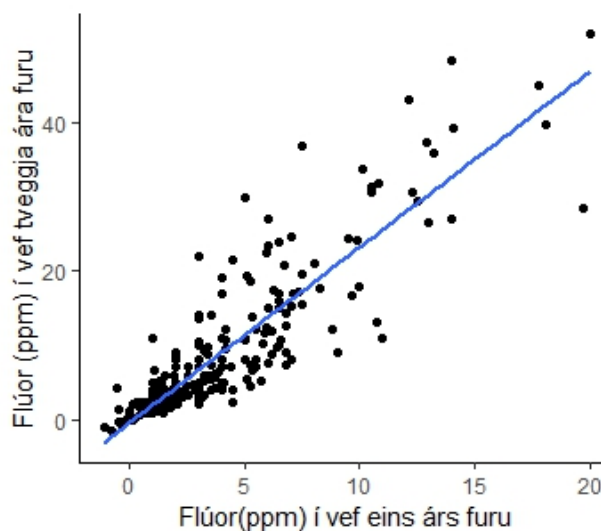
3.2 Uppsöfnun mengunar í plöntuvef

Flúor safnast fyrir í plöntuvef yfir vaxtartíma plöntunnar. Mælingar á barrtrjám eru gerðar árlega og þá bornar saman eins og tveggja ára gamlar barrnálar og uppsöfnun þá mæld yfir allt árið. Í lauf- og grasplöntum eru tekin sýni að vori og hausti og uppsöfnun í þeim plöntum því metin yfir sumartímann.

3.2.1 Uppsöfnun milli ára

Fura

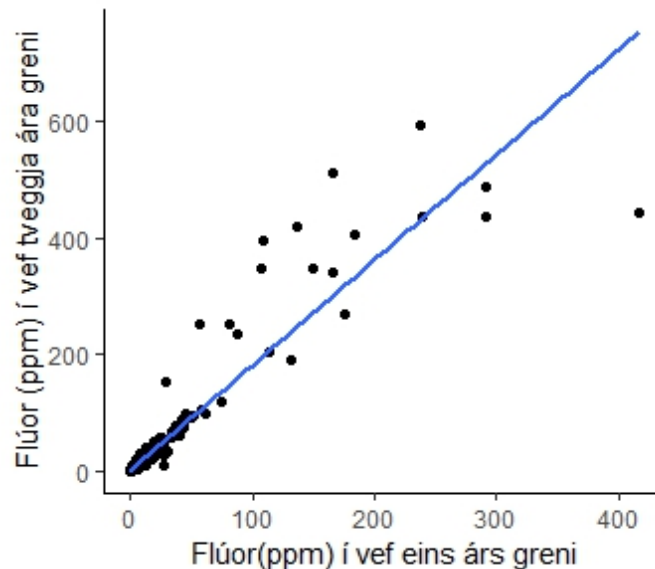
Marktæk jákvæð fylgni er milli flúorstyrks í vef eins og tveggja ára gamalla furunála (mynd 3.5). Skýringarhlutfall á flúorstyrk í tveggja ára furunálum eru tæp 79% ($R^2=0,7861$). Jafna bestu beinu línu er $Y = -0,4254 + 2,3675x$ ($p < 2,2e-16$). P- gildið er niðurstaða z-prófs sem prófar hvort hallatalan sé jafnt og núll. Hér er p- gildið miklu lægra en 0,05 og því eru 95% líkur á því að hallatalan sé ekki núll. Hallatala sem fæst úr aðhvarfslínu er 2,37 svo flúoruppsöfnun í furunál rúmlega tvöfaldast frá fyrsta ári til þess næsta eða eykst um tæp 140%.



Mynd 3.5. Flúorstyrkur (ppm) í tveggja ára furunálum sem fall af flúorstyrk í eins árs furunálum.

Greni

Jákvæð fylgni er einnig á milli flúorstyrks í eins og tveggja ára gömlum greninálum (mynd 3.6). Skýringarhlutfall á flúorstyrk í tveggja ára furunálum eru um 86% ($R^2=0,8626$). Jafna bestu beinu línu er $Y = 1,37 + 1,8x$ ($p < 2,2e-16$). Hallatalan er 1,8 sem gefur að flúorstyrkur í greninál eykst um 80% frá fyrsta vaxtarári til þess næsta.



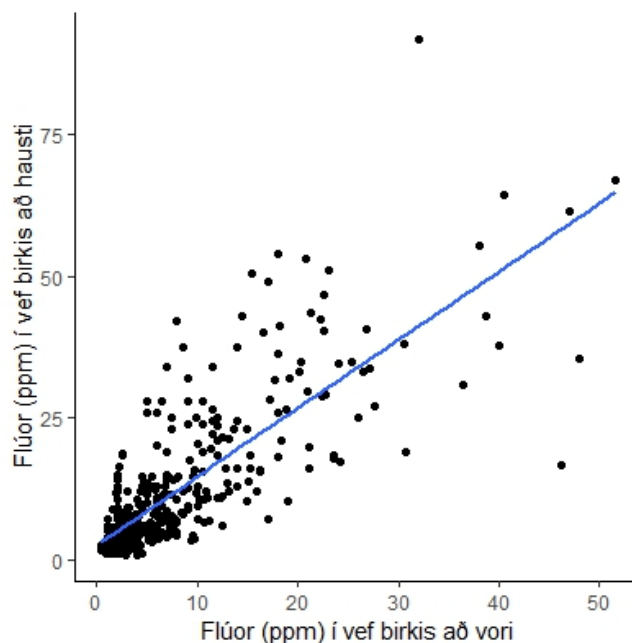
Mynd 3.6. Flúorstyrkur (ppm) í tveggja ára greninálum sem fall af flúorstyrk í eins árs greninálum.

3.2.2 Uppsöfnun yfir vaxtartíma

Flúorstyrkur plantnanna sem borinn var saman að hausti og vori var úr plöntuvef. Það er sá flúor sem hefur verið tekinn upp af plöntunni. Ekki var notast við flúorstyrk sem mælt hefur á yfirborði, eða úr skolvatni af plöntuvefnum.

Birki

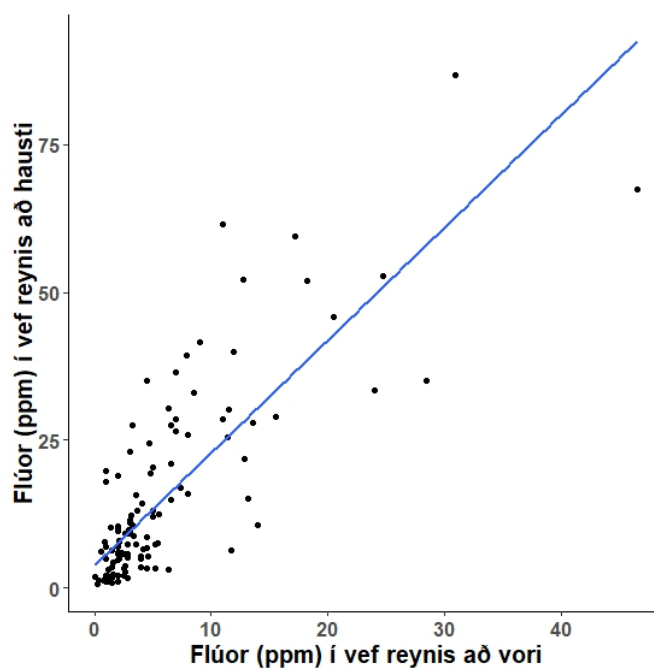
Í tilfelli birkitrjáa eykst flúorstyrkur laufsins frá vori til hausti (mynd 3.7). Um 62% ($R^2=0,617$) af flúorstyrk að hausti er skýrður af flúorstyrk í plöntunni um vorið. Jafna bestu beinu línu er $Y = 2,57 + 1,20x$ ($p < 2,2e-16$). Hallatalan 1,2 gefur að flúoruppsöfnun í birkilaufi eykst um 20% á tímabilinu milli þess sem sýni eru tekin að vori og hausti.



Mynd 3.7. Flúorstyrkur (ppm) í birkivef að hausti sem fall af vori.

Reynir

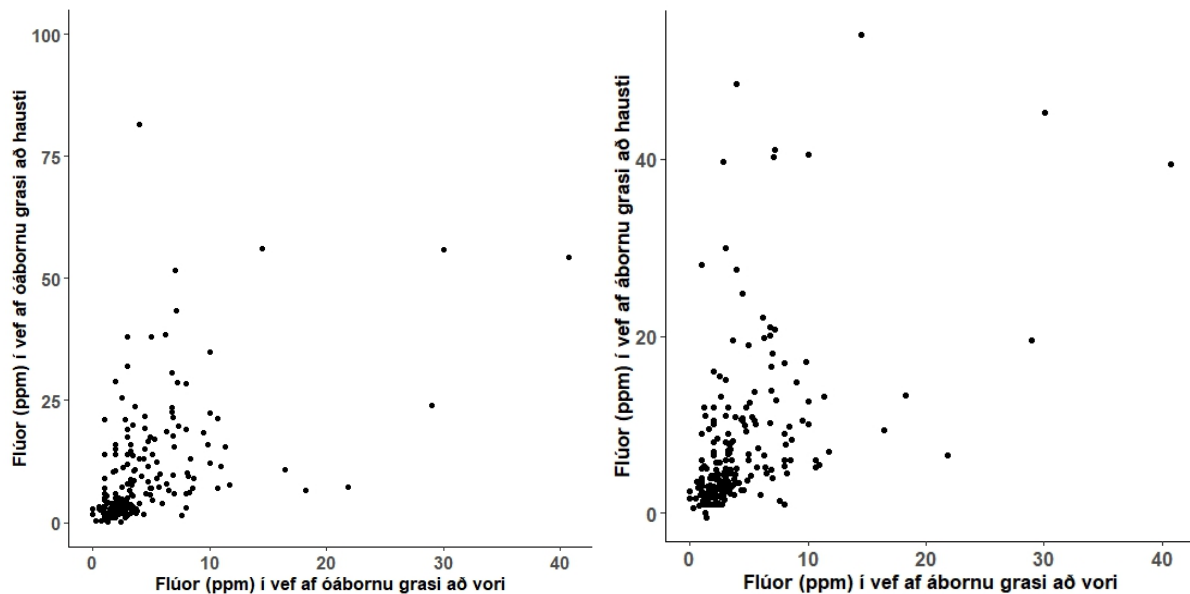
Flúorstyrkur reynitrijáa frá vori til hausts sýnir einnig jákvæða fylgni (mynd 3.8). Um 65% ($R^2 = 0,6488$) af flúorstyrk að hausti er skýrður af flúorstyrk plöntunnar um vorið. Jafna bestu beinu línu er $Y = 3,84 + 1,90x$ ($p < 2,2e-16$). Hallatalan er 1,9 svo flúormagn í reynitrijám tæplega tvöfaldast, eykst um 90%, yfir sumartímann.



Mynd 3.8. Flúorstyrkur (ppm) í reynivef að hausti sem fall af flúorstyrk í reynivef að vori.

Gras

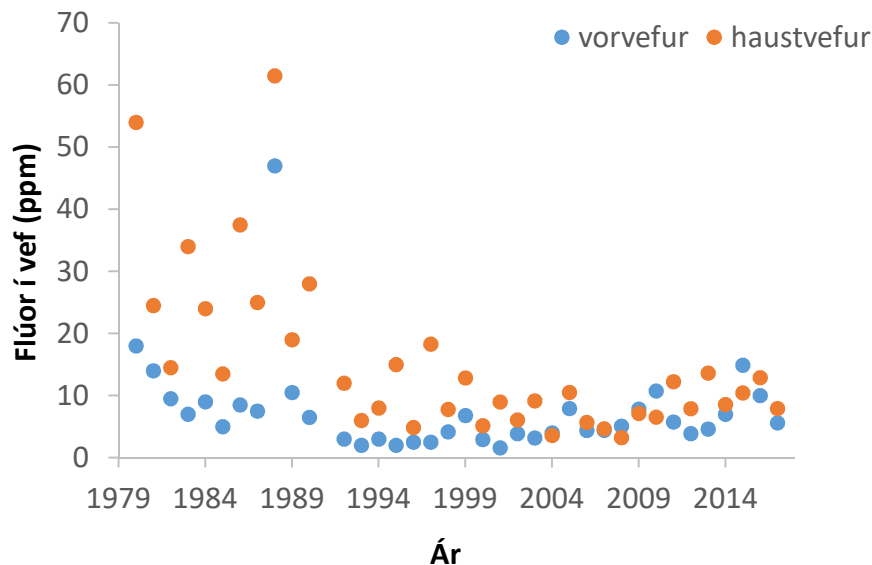
Flúorstyrkur í vef grass (mynd 3.9) eykst ekki jafn mikið yfir vaxtartímann og flúorstyrkur trjáa. Í flestum tilfellum eykst flúorstyrkur yfir vaxtartímann en í mörgum tilfellum er flúorstyrkur að vori hærri en að hausti sem gefur til kynna að ekki sé verið að taka sýni af sama grasi. Ef til vill hefur grasið verið bitið af grasbítum eða slegið.



Mynd 3.9. Flúorstyrkur (ppm) í grasvef að hausti sem fall af vori. Óáborið gras (t.v.) og áborið gras (t.h.).

Flúoruppsöfnun yfir vaxtartíma í ábornu grasi (mynd 3.9 t.h.) fylgir óreglulegra sambandi en í óábornu grasi (mynd 3.9 t.v.). Að jafnaði eykst styrkurinn frá vori til hausti en einnig eru mörg dæmi um að flúorstyrkur sé lægri að hausti en vori í ábornu grasi. Skýringin á því er væntanlega sú að um haustið er tekið sýni af slegnu grasi þar sem áborið gras er nánast undantekningarlaust slegið á einhverjum tímapunkti. Meiri líkur eru á aukningu á flúorstyrk í óábornu grasi yfir vaxtartímann enda meiri líkur á að það gras sé ekki slegið eða bitið.

Á mynd 3.10 er borinn saman flúorstyrkur í birkiplöntum í Hellisgerði að vori og hausti.



Mynd 3.10. Birkimælingar í Hellisgerði að vori (blár) og hausti (rauður) sem fall af tíma.

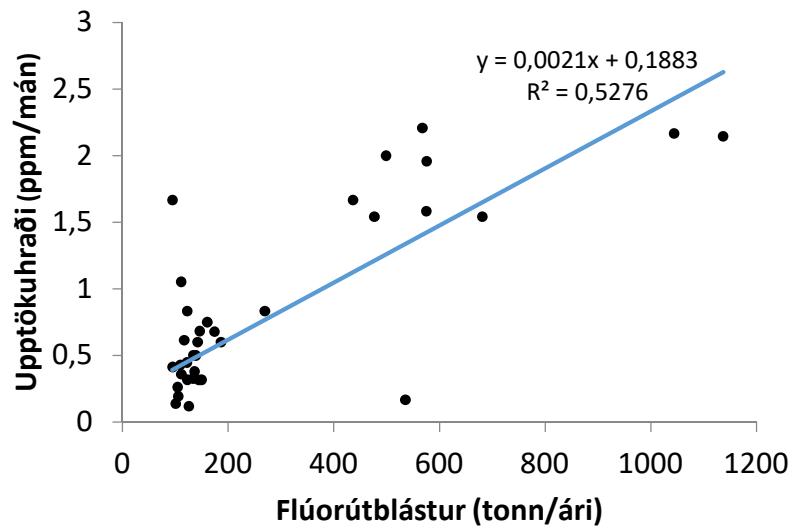
Mælingar á vorin eru lægri en á haustin í birki í Hellisgerði fram til ársins 2008. Frá og með árinu 2008 hækka mörg vorgildanna og stök vorgildi eru hærri en haustgildi sama árs. Þessi tilfelli koma fram árið 2008-2010 og aftur árið 2015.

Hægt væri að leita skýring á þessu en e.t.v. eru þær veðurfarslegar, t.d. einstakleg mikil spretta í gróðri þessi ár. Hugsanlega gætu einhverjar sýkingar hafa herjað á gróður þessi ár og ollið gróðurskemmdum.

3.2.3 Upptökuhraði

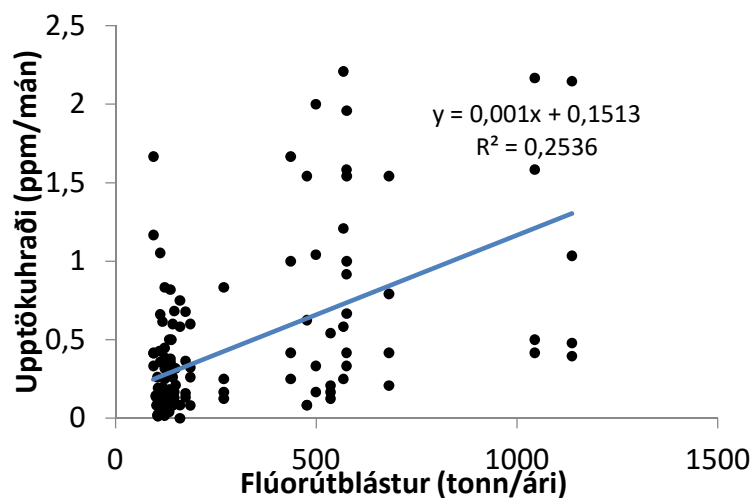
Upptökuhraði plantna var reiknaður skv. jöfnu í kafla 2.3. Skoðað var samband upptökuhraða og útblásturs álversins þar sem upptökuhraði plantna var skoðaður sem fall af útblæstri. Fall var gert fyrir greni við Straumsgirðingu (mynd 3.11) sem staðsett er á sýnatökusvæði 1 og annað fall fyrir alla sýnatökustaði á svæði 1 (mynd 3.12). Upptökuhraði birkis var skoðaður sem fall af útblæstri í Hellisgerði (mynd 3.13) og við Vífilsstaði (3.14). Gera má ráð fyrir meiri upptökuhraða eftir því sem meiri flúor er í umhverfinu (Hornvedt, 1995). Aðrir þættir sem hraða upptöku plantna á flúor eru þeir sem hafa jákvæð áhrif á opnun loftaugna s.s. hitastig, ljós og úrkoma (Vike, 1995). Rétt er að benda á að munurinn á reiknuðum upptökuhraða grenis og birkis er sá að upptökuhraði grenis er reiknaður yfir heilt ár en upptökuhraði birkis er reiknaður frá vori til hausts.

Greni



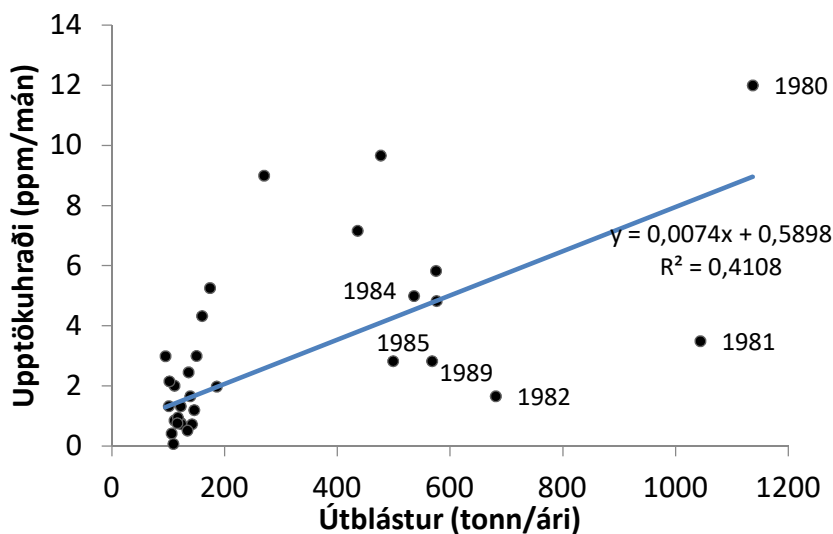
Mynd 3.11. Upptökuhraði (ppm/mán) flúors í greni við Straumsgirðingu, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).

Nokkuð sterkt samband er við Straumsgirðingu (mynd 3.11) á upptökuhraða og útblæstri þar sem upptökuhraði eykst við aukið magn útblásturs. Ein undantekning er þó á á þar sem ein mæling sýnir mun lægri upptökuhraða en aðrar við útblástur á bilinu 400-650 tonn/ári. Þetta tilfelli kemur fram árið 1984. Upptökuhraðinn er reiknaður sem aukning á milli nýrra nála (eins árs) sumarið 1984 og tveggja ára nála frá árinu 1983. Upptökuhraði reiknaður árið 1984 var ekki jafn mikill og önnur ár þegar útblástur var jafn mikill. Ef til vill skýrist þetta af einhverjum hluta af því að á árunum frá 1983 eykst flúorútblastur úr 270 tonn/ári í 536 tonn/ári 1984. Líklega hefur lægri útblástur 1983 áhrif og veldur því að barnálar sem vaxa upp á því ári (sem verða tveggja ára 1984) tóku upp minni flúor og ekki verði eins mikill munur á flúorstyrk eins og tveggja ára barnálum árið 1984, borið saman við önnur ár með sama útblástur og 1984.



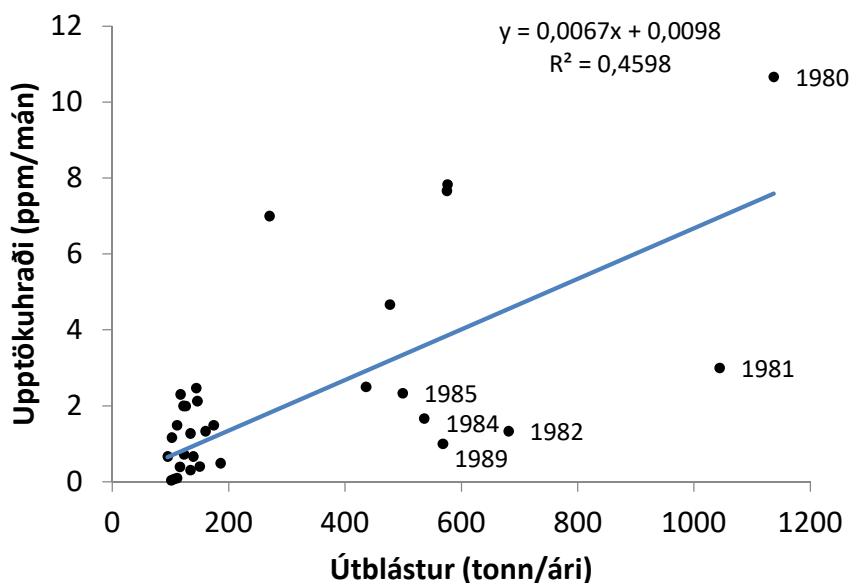
Mynd 3.12. Upptökuhraði (ppm/mán) flúors í greniplöntum á svæði 1, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).

Á mynd 3.12 sést hve breytilegur upptökuhraði innan svæðis 1 er. Við sama magn af útblæstri raðast upptökuhraði yfir mjög breytt bil.



Mynd 3.13. Upptökuhraði flúors (ppm/mán) í birki í Hellisgerði, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).

Upptökuhraði birkis í Hellisgerði (mynd 3.13) er breytilegur eftir útblæstri og á milli ára. Við útblástur frá 1000-1200 tonn/ári er upptökuhraði mjög hár árið 1980 en mun lægri árið 1981. Árin 1982, 1989 og 1985 eru einnig lág miðað við aðrar mælingar við svipað útblástursmagn.



Mynd 3.14. Upptökuhraði flúors (ppm/mán) í birki á Vífilsstöðum, sem fall af útblástursmagni álversins (tonn/ári).

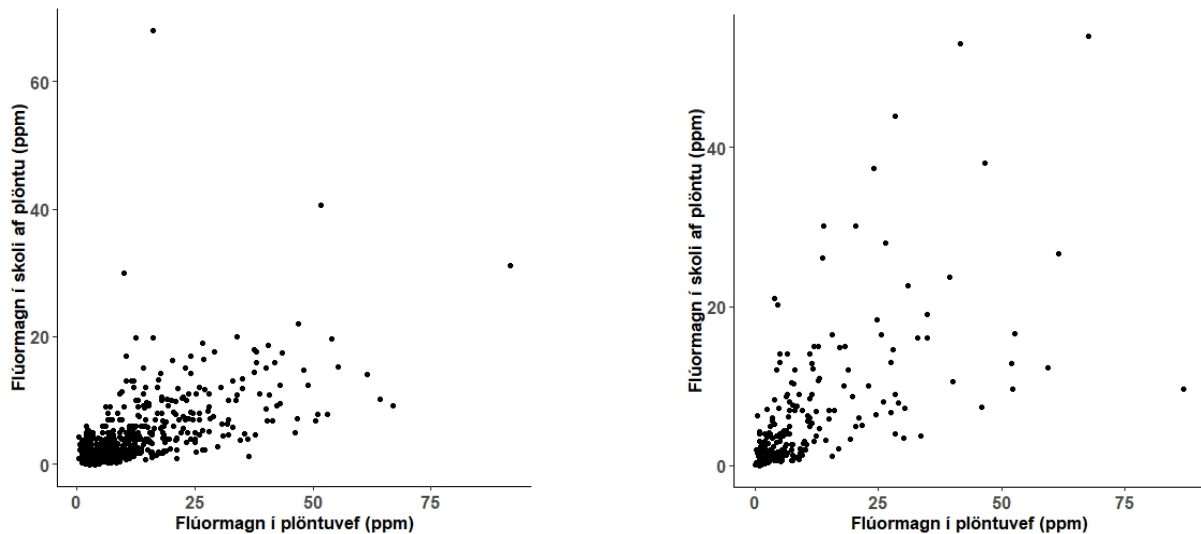
Í sýnum frá Vífilstöðum (mynd 3.14) er svipað uppi á teningnum varðandi samband upptökuhraða og útblásturs og sást í Hellisgerði. Jafnframt er ekki mikill munur á hallatölu og skýringarhlutfalli aðhvarfslínanna tveggja fyrir Hellisgerði og Vífilstaði. Hár upptökuhraði árið 1980 og hægur upptökuhraði árið 1981 kemur bæði fram í birki í Hellisgerði og á Vífilstöðum. Árin 1982 og 1989 eru með sérstaklega lágan upptökuhraða á báðum stöðum. Í Hellisgerði var upptökuhraði árið 1985 minni en árið 1984 en því er akkúrat öfugt farið á Vífilstöðum. Skoðuð voru meðaltalsgögn fyrir ýmsa veðurþætti þessi ár til þess að leita skýringa á miklum mun á upptökuhraða árin 1980 og 1981 við svipað útblástursmagn. Ekkert í þeim gögnum, úrkoma, hitastig, rakastig og sólarstundir gefur til kynna að mikill munur sé á milli áranna. Greinilegt er að skýring á þessum breytileika er ekki einföld og hægt væri að rannsaka enn frekar.

3.3 Samband flúorstyrks í vef og á yfirborði plöntu

Úrkoma hefur mikil áhrif á flúorupptöku plantna (Vike, 2005; Havas, 1971). Úrkoma hreinsar flúor af blöðum og barrnálmum og plöntur sem ekki verða fyrir úrkomu taka meira upp og styrkur flúors mælist hærri í vef þeirra (Vike, 2005). Upptaka í plöntuvef fylgir styrk mengunarefna í umhverfinu (Mikhailova, 2011). Í þessu verkefni er styrkur flúors á yfirborði plantna notaður til þess að fá hugmynd um það flúorálags sem plantan verður fyrir. Flúor á yfirborði plantna er mældur í skolvatni af plöntusýnunum. Vegna þess hve breytileg úrkoma getur verið er talsverður munur á niðurstöðum flúormælinga í skolvatni eftir því hvernig veður var dögnum fyrir sýnatöku og rannsóknir hafa sýnt að flúor á yfirborði plantna skolast auðveldlega af (Vike, 2005). Ef rignt hefur fyrir sýnatöku mælist minni flúor í skolvatninu en ef þurrt hefur verið.

Flúor í vef plantna eykst eftir því sem að plantan verður fyrir minni úrkomu vegna þessa að minni flúor skolast þar af leiðandi af yfirborði hennar og meiri flúor er til staðar á plöntunni (Vike, 2005). Búist er við línulegu jákvæðu sambandi á milli flúorálags á plöntu og upptöku hennar í vef. Vegna þess hve skolmælingar geta verið misjafnar vegna úrkomu stuttu fyrir sýnatöku eða mikilla rigningarsumra er búist við að lággildi séu til staðar í skolmælingum. Aðhvarf þar sem flúormagn í vef plöntu er skýribreyta og flúormagn í skolvatni af plöntunni er svarbreyta sýndi að samband þessara tveggja breyta er nokkuð misjafnt milli tegunda.

Laufré

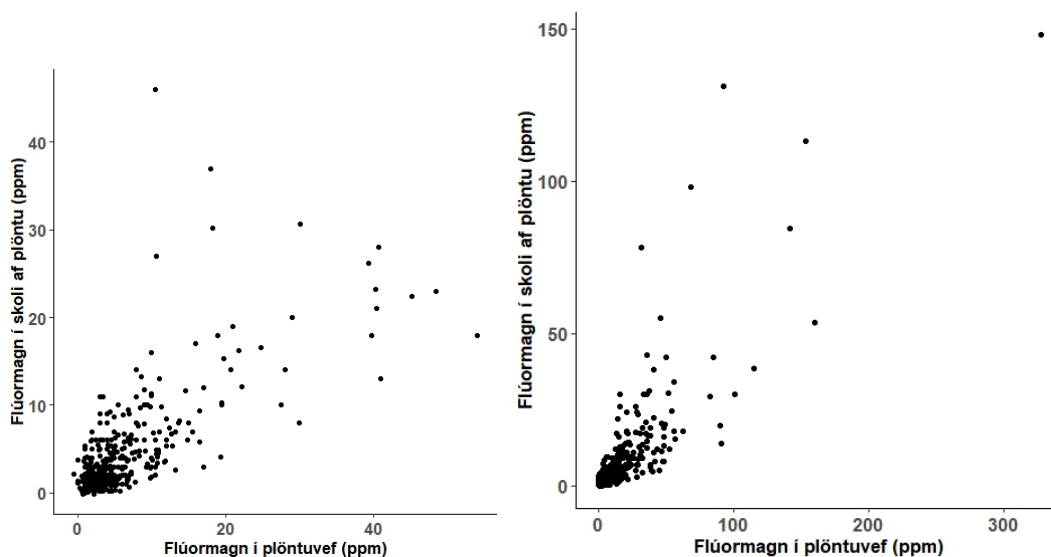


Mynd 3.15. Samband flúorstyrks (ppm) á yfirborði og í vef birkiplöntu (t.v.) og reyniplöntu (t.h.).

Samband flúorstyrks í vef og á yfirborði birkis (mynd 3.15 t.v.) er ekki jafn óreglulegt og hjá reyni (mynd 3.15 t.h.). Hjá reyni eru mun fleiri hágildi þar sem að flúorstyrkur í skoli er hærri en 20 ppm. Flúorstyrkur í skolvatni er mjög óreglulegur og oft mjög lár en stundum hár sem skýrist af breytileika milli ára af úrkomudögum fyrir sýnatökuna eða hvort tiltekið sumar hafi verið óvenjulega úrkomusamt. Niðurstöðurnar gefa til kynna að styrkur í vef plöntu hækki með auknum styrk flúors á yfirborði plöntuvefsins.

Gras

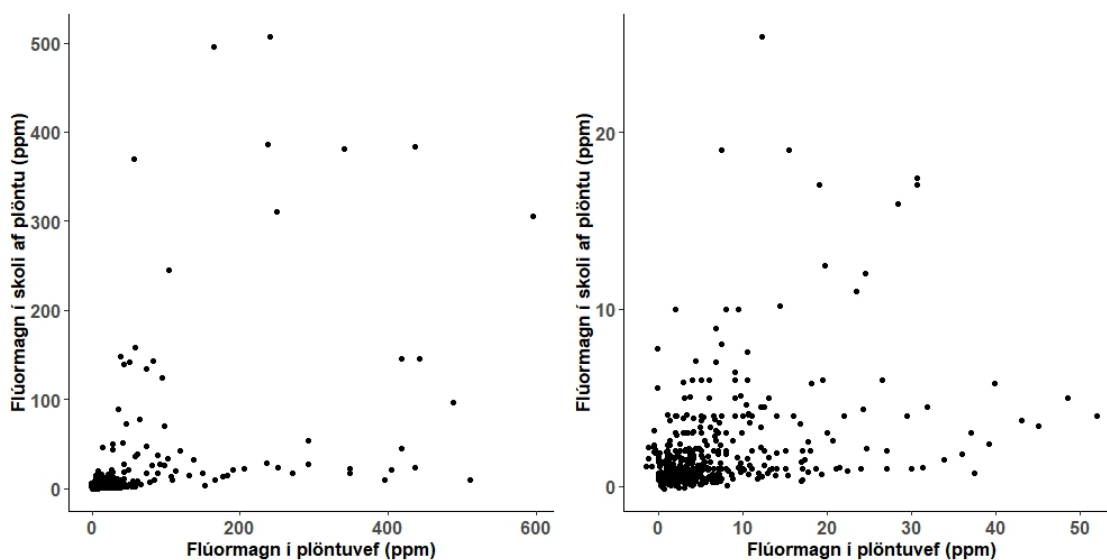
Samband flúorstyrks (ppm) á yfirborði og í vef af grasi (mynd 3.16) er ekki jafn sterkt og hjá lauftrjám en nokkur munur er jafnframt á þessu sambandi í ábornu (t.v.) og óábornu (t.h.) grasi.



Mynd 3.16. Samband flúorstyrks (ppm) á yfirborði og í vef af ábornu grasi (t.v.) og óábornu grasi (t.h.).

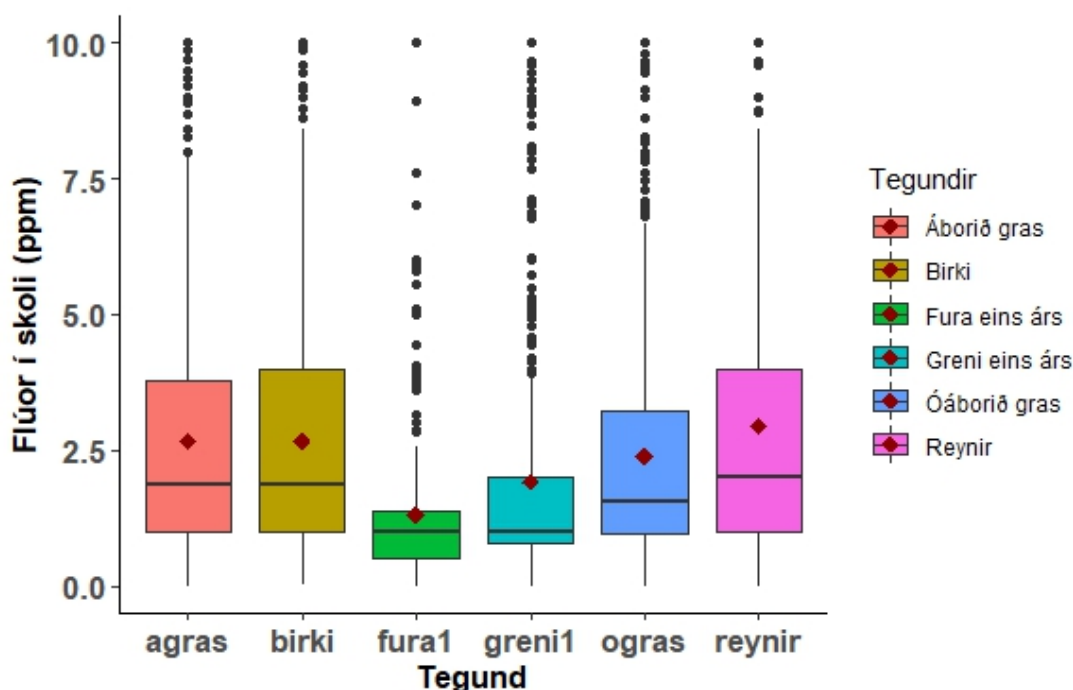
Nokkuð gott samband er á milli flúorstyrks í plöntuvef og á yfirborði í grasi og algengt virðist vera að það séu stök gildi með háum flúorstyrk í skolvatni en búist var við stökum gildum með lágan flúorstyrk vegna áhrifa úrkomu.

Barrtré



Mynd 3.17. Samband flúorstyrks í skoli og plöntuvef greni (t.v.) og furu (t.h.).

Varla er hægt að tala um samband í flúorstyrk í plöntuvef og skolvatni af barrtrjám (mynd 3.17) þar sem að mælingar falla mjög óreglulega, ólíkt grasi og lauftrjám. Munur getur verið á milli tegunda á því hve sterklega mengunarefni geta loðið við yfirborð þeirra (Vike, 2005). Meiri líkur eru á að flúor sitji á hrjúfu yfirborði en sléttu. Miðað við niðurstöður að ofan (myndir 3.15, 3.16 og 3.17) er við því að búast að barrtré hafi minnstan flúorstyrk í skolvatni sínu og lauftré og gras hafi hærri styrk en barrtré. Samanburður flúormælinga í skolvatni af þessum tegundum (mynd 3.18) leiðir í ljós að barrtré eru með lægsta meðaltalið, þá óáborið gras og loks eru reynir, birki og áborið gras með hæstu meðaltölin.



Mynd 3.18. Samanburður á niðurstöðum flúormælinga sem gerðar hafa verið á skolvatni af yfirborði mismunandi tegunda á öllum sýnatökustöðum.

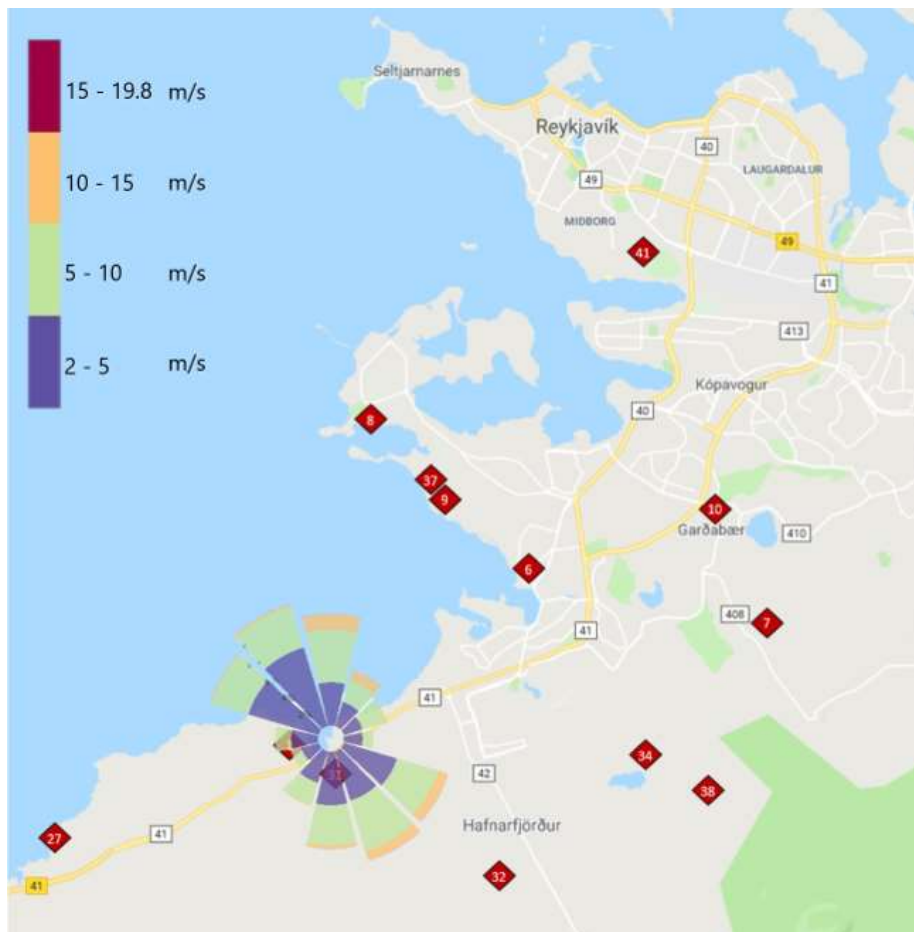
Boxritin sýna miðgildi og fjórðungsmörk mælinga á flúor í skolvatni birkis ásamt útgildum á hverjum stað. Rauði tígullinn sýnir hvar meðaltalið liggur. Samkvæmt ferkagregningu er marktækur munur á milli meðaltals hópanna ($F_{5,2986} = 6,76$, $p = 2.8e-06$). Samkvæmt niðurstöðum Tukey post hoc prófs er marktækur munur á meðaltali: grenis og áborins grass ($p < 0,05$), grenis og birkis ($p < 0,05$), greni og furu ($p < 0,05$), greni og óáborins grass ($p < 0,05$), furu og reynis ($p < 0,05$), furu og óáborins grass ($p < 0,05$). Það er því marktækur munur á flúorstyrk á yfirborð barrtrjáa og annarra plantna en einnig munur á furu og greni sem vekur athygli þar sem ekki er um ólík yfirborð að ræða á barnálum þeirra. Greinilegt er að flúor skolast því vel af sléttu yfirborði barrtrjáa eins og búist var við miðað við lítið samband skols og upptöku í vef (mynd 3.17).

3.4 Veðurfar og dreifing mengunar um landsvæðið

3.4.1 Veðurfar

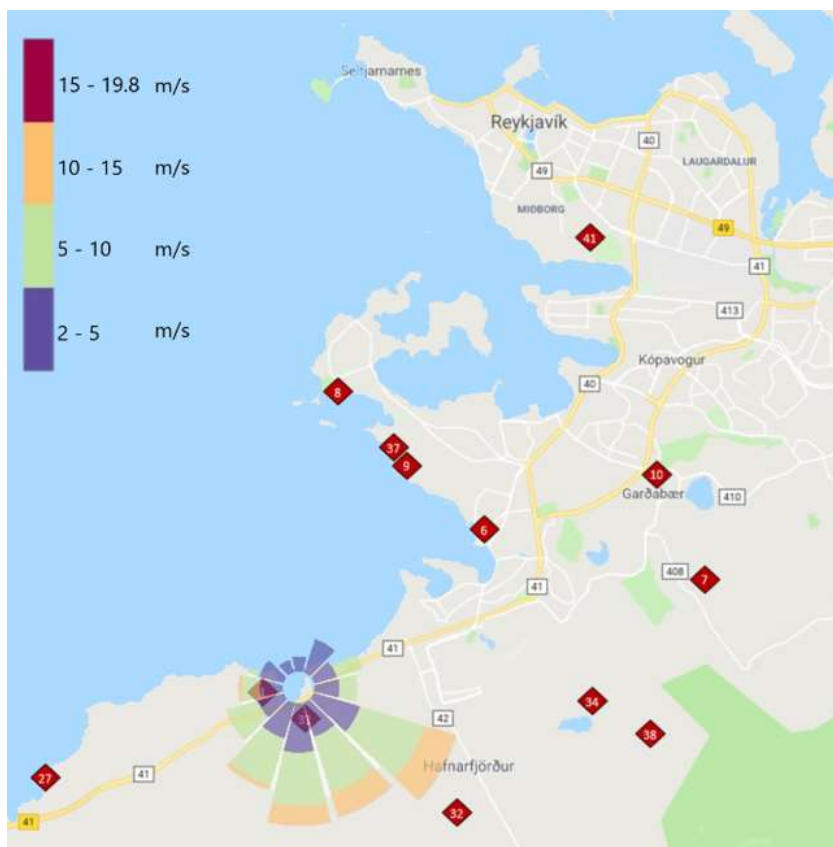
Vindrósir úr veðurgögnum í Straumsvík sýna hvert mengunarefnið sem losna út í andrúmsloftið dreifast. Vindrósir hafa verið lagðar ofan á kort af sýnatökusvæðinu til þess að fá mynd af því hvaða sýnatökustaðir eru helst útsettir fyrir menguninni. Tvær vindrósir voru útbúnar eftir því hvort úrkoma mælist (>0 mm/klst.) í Reykjavík (mynd 3.19) eða þá ekki ($=0$ mm/klst.) (mynd 3.20).

Þurra vindrósin sýnir ríkjandi vindáttir sem suðaustlægar og norðvestlægar. Á myndinni sést að austanáttin er fátíð, en hún er annars nokkuð ríkjandi almennt suðvestanlands en reikna má með skekkju í vindmælingum austanáttarinnar vegna staðsetningar bygginga austan við veðurstöðina eins og rakið var í kafla 2.3.



Mynd 3.19. Vindrós fyrir meðalvind þegar þurrt var í Straumsvík yfir sumartímann (maí-ágúst) frá árinu 2001-2017. Vindrósin er lögð ofan á kort af sýnatökusvæðinu. Sýnatökustaðirnir eru merktir inn á kortið með rauðum merkjum og númeri hvers sýnatökustaðar.

Ríkjandi vindar í þurru veðri (mynd 3.19) sem blása úr suð- og suðaustri fara yfir Álftanes og út á sjó. Norðan og norðvestan áttirnar blása yfir Gerði (sýnatökustaður nr. 31), Straumsgirðingu (sýnatökustaður nr. 32) og e.t.v. gætu náð yfir Hvaleyrarvatn (sýnatökustaður nr. 34) og Sléttuhlíð (sýnatökustaður nr. 38).



Mynd 3.20. Vindrós fyrir meðalvind þegar úrkoma mældist meiri en 0 mm/klst. í Straumsvík yfir sumartímann (maí-ágúst) frá árinu 2001-2017. Vindrósin er lögð ofan á kort af sýnatökusvæðinu. Sýnatökustaðir eru merktir inn á kortið með rauðum merkjum og númeri hvers sýnatökustaðar.

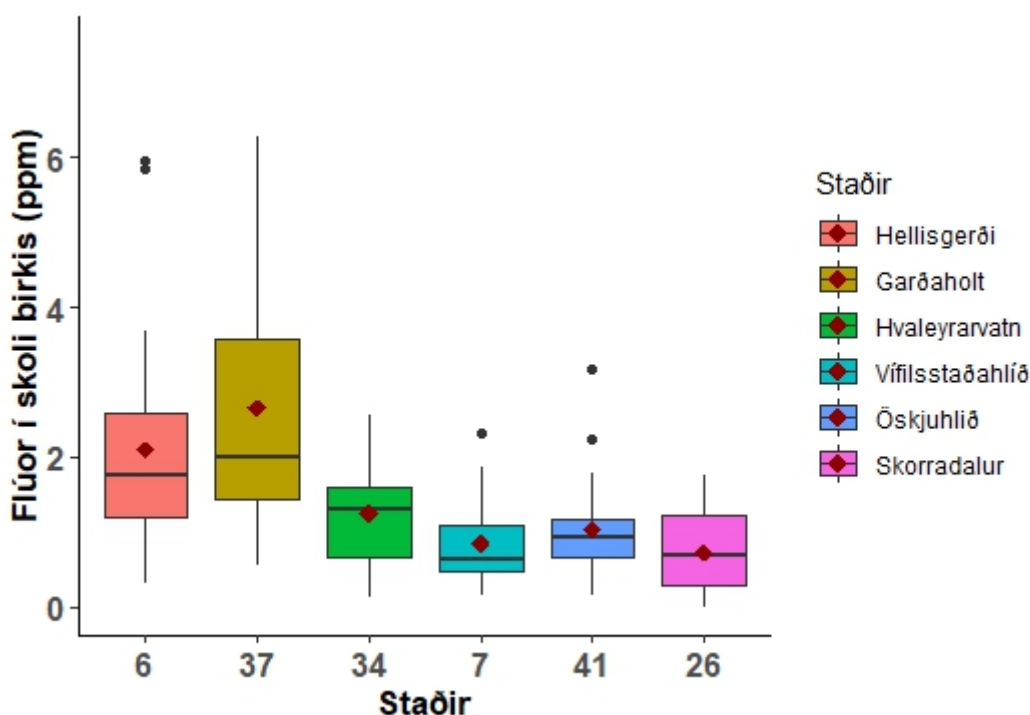
Vindrós í rigningu er mjög frábrugðin vindrós fyrir þurrt veður að því leiti að norðan- og norðvestan áttir verða mun sjaldgæfari. Algengustu vindáttir þegar rignir í Straumsvík eru suð- og suðaustan áttir og það á við hvort sem þær eru hæggar eða sterkar. Stór hluti þessara ríkjandi vindátta í rigningu fara á haf út, þ.e. suðaustan áttirnar. Sunnanáttin og suðvestan berast yfir hafið og lenda á Garðaholti, í Hafnarfirði og geta svo farið lengra og þá til Öskjuhlíðar.

3.4.2 Flúor á yfirborði plantna og í plöntuvef eftir stöðum

Miðað við rannsóknir á dreifingu mengunar í andrúmslofti í mismunandi vindáttum og -styrk (Þröstur Þorsteinsson o.fl., 2013) má gera ráð fyrir því að loftborin mengun frá álverinu berist ekki jafnt yfir sýnatökusvæðið. Gera má ráð fyrir því að mengunarefni frá

álverinu í Straumsvík fylgi því ríkjandi vindáttum samanber vindrósir hér að ofan (mynd 3.19 og 3.20) Kannað var hvort mælingar í plöntum gefi einhverja vísbendingu um hið sama og hvort meira álag (hærri flúorstyrkur) sé á plöntum sem vaxa á ákveðnum sýnatökustöðum. Til þess var skoðað magn flúors á yfirborði birkiplantna eftir stöðum (mynd 3.21). Birki var talið henta best í þennan samanburð vegna þess að sýnatökustaðir þess er vel dreifðir yfir sýnatökusvæðin. Einnig er mikilvægt að nota eingöngu eina tegund hér þar sem sýnt hefur verið fram á að flúorstyrkur á yfirborði plöntuvefs, mældur í skolvatni, getur verið mismunandi (mynd 3.18). Jafnframt var ekki talið heppilegt að nota barrtré vegna fyrri niðurstaðna um að lítið samband sé á milli upptöku í vef barrnála og álags (mynd 3.17).

Flúorstyrkur í birkivef var einnig borinn saman milli sýnatökustaða (mynd 3.22). Búist var við því að niðurstöður þess samanburðar yrðu í samræmi við samanburð á flúorstyrk í skolvatni eftir stöðum (mynd 3.21) og mælast hærri á þeim stöðum þar sem flúorstyrkur mælist hærri á yfirborði vegna þess að hærri flúorstyrkur á yfirborði plantna skilar sér í hærri flúorstyrk í vef plantna (Vike, 2005 og Havas, 1971). Hér hefur þegar verið sýnt fram á að jákvætt samband er á milli flúors á yfirborði og flúor í vef laufplantna (mynd 3.15).



Mynd 3.21. Flúor (ppm) á yfirborði (mælt í skolvatni) birkiplantna á helstu sýnatökustöðum. Mælingarnar eru frá árunum 2007-2017.

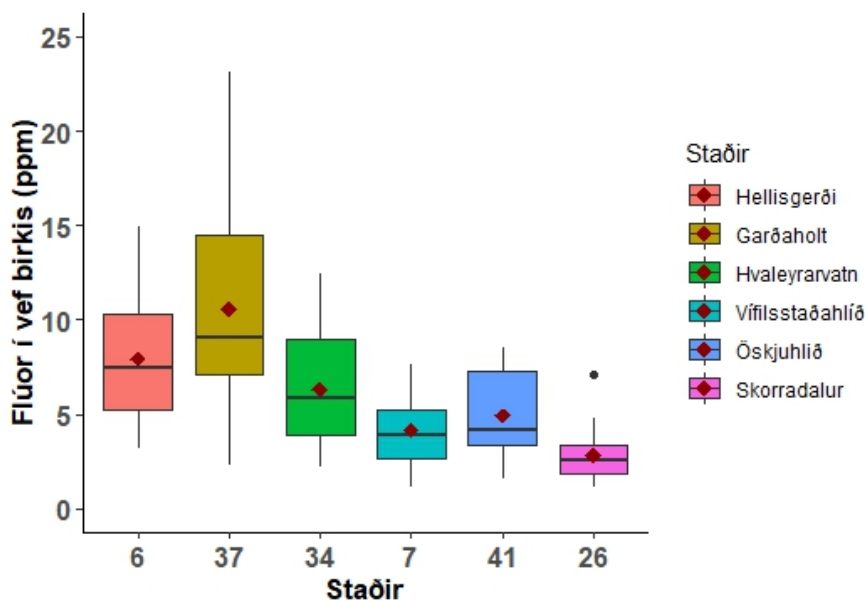
Hæstu meðaltölín eru á Garðaholti og í Hellisgerði (mynd 3.21). Gert var tölfræðipróf til þess að komast að því hvort marktækur munur væri á milli staða. Bartlett próf sýndi að dreifing mælinganna eftir stöðum var ekki eins (p -gildi $<0,05$). Welch's fervikagreining ($F_{5,55}=14,92$, $p<0,05$) og Games-Howell post hoc próf voru gerð í framhaldinu til þess að bera saman meðaltöl staðanna en niðurstöður þess eru í töflu 3.1.

Tafla 3.1. Niðurstöður Games - Howell prófs sem ber saman flúormagn (ppm) á yfirborði birkiplantna (í skolvatni) á mismunandi sýnatökustöðum. Skyggðu línurnar tákna marktækan mun á tilteknum stöðum.

	Df	X ²	p
Hellisgerði - Garðaholt	36	2,58	0,68
Hellisgerði - Hvaleyrarvatn	32	2,09	1
Hellisgerði - Vífilsstaðahlíð	28	-0,22	0,01
Hellisgerði- Öskjuhlíð	30	0,04	0,06
Hellisgerði- Skorradalur	27	-0,38	<0,01
Garðaholt - Hvaleyrarvatn	39	1,47	0,88
Garðaholt - Vífilsstaðahlíð	23	-0,6	<0,01
Garðaholt - Öskjuhlíð	24	-0,35	0,01
Garðaholt- Skorradalur	23	-0,76	<0,01
Hvaleyrarvatn - Vífilsstaðahlíð	23	0,62	0,32
Hvaleyrarvatn - Öskjuhlíð	24	0,87	0,54
Hvaleyrarvatn - Skorradalur	23	0,45	0,21
Vífilsstaðahlíð - Öskjuhlíð	38	0,84	0,85
Vífilsstaðahlíð - Skorradalur	39	0,39	0,96

Niðurstöður post hoc prófs (tafla 3.1) sýna að það er nokkuð takmarkað hvað hægt er að fullyrða um mun á flúorstyrk á yfirborði birkiplantna eftir sýnatökustöðum. Út frá meðaltalsgildum væri hægt að álykta að flúorstyrkur væri mestur á Garðaholti, Hellisgerði og svo Hvaleyrarvatni en þegar að er gáð er ekki marktækur munur á meðaltali Garðaholts frá Hellisgerði eða Hvaleyrarvatni. Hellisgerði og Garðaholt eru marktækt frábrugðið Vífilsstaðahlíð, Öskjuhlíð og Skorradal.

Sama aðferð var notuð til þess að skoða hvort flúorstyrkur (ppm) í birkivef væri misjafnlega mikill á sýnatökustöðunum (mynd 3.22). Vegna þess að samband flúorstyrks í vef birkis er í nokkru sambandi við flúorstyrk í skolvatni (mynd 3.15 t.v.) má búast við að hér fáið svipaðar niðurstöður og í samanburði á flúormagni í skolvatni birkis eftir stöðum og Garðaholt og Hellisgerði með hæstu meðaltölin og Hvaleyrarvatn fylgdi þeim á eftir.



Mynd 3.22. Flúor (ppm) í vef birkiplantna á helstu sýnatökustöðum. Mælingarnar eru frá árunum 2007-2017.

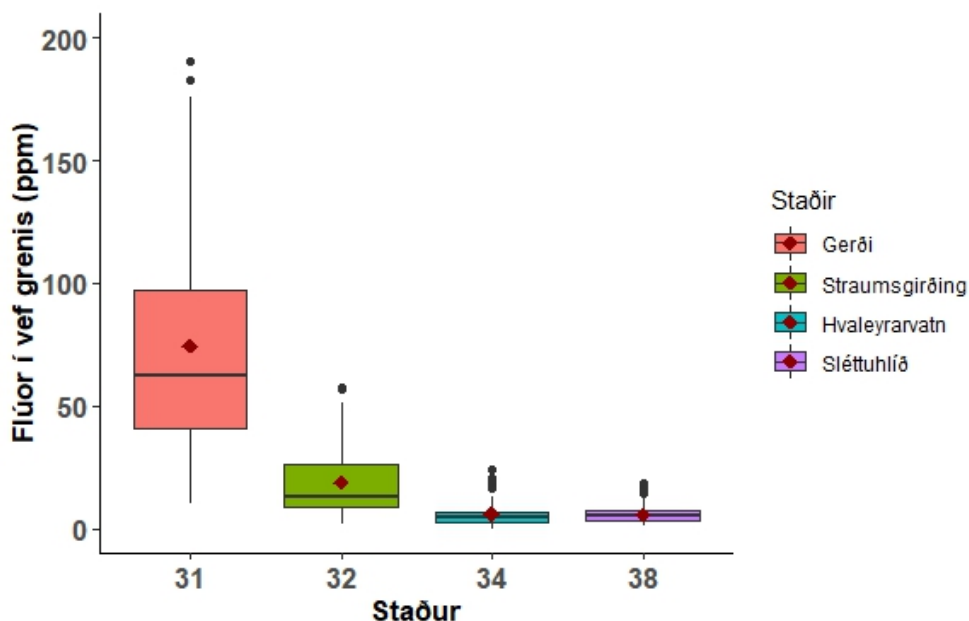
Niðurstöður á samanburði flúorstyrks í birkivef sýna að hæsta meðaltalið er í Garðaholti og næst hæst í Hellisgerði og þá á Hvaleyrarvatni (mynd 3.22). Lægsta meðaltalið er í Skorradal. Bartlett próf sýndi að dreifing gagnanna á sýnatökustöðunum var ekki sú sama (p -gildi $<0,05$) og Welch's fervikagreining ($F_{8,55}=7,84$, $p<0,05$) sýndi að meðaltöl hópanna eru marktækt frábrugðin. Niðurstöður Games-Howell post hoc prófs sem greinir hvaða hópar eru frábrugðnir, eru í töflu 3.2.

Tafla 3.2. Niðurstöður Games - Howell prófs sem bara saman flúormagn (ppm) í vef birkiplantna á mismunandi sýnatökustöðum. Skyggðu svæðin tákna marktækan mun á þeim tilteknu stöðum.

	Df	X^2	p
Hellisgerði - Garðaholt	26	11,88	0,3
Hellisgerði - Hvaleyrarvatn	41	1,26	0,55
Hellisgerði - Víflsstaðahlíð	34	-1,27	<0,01
Hellisgerði - Öskjuhlíð	37	-0,44	0,01
Hellisgerði - Skorradalur	28	-2,7	<0,01
Garðaholt - Hvaleyrarvatn	25	0,45	0,08
Garðaholt - Víflsstaðahlíð	23	-1,83	0,01
Garðaholt - Öskjuhlíð	23	-1,06	0,02
Garðaholt - Skorradalur	22	-3,16	<0,01
Hvaleyrarvatn - Víflsstaðahlíð	36	0,12	0,07
Hvaleyrarvatn - Öskjuhlíð	39	0,96	0,48
Hvaleyrarvatn - Skorradalur	29	-1,33	<0,01
Víflsstaðahlíð - Öskjuhlíð	40	2,66	0,85
Víflsstaðahlíð - Skorradalur	34	0,26	0,15
Öskjuhlíð - Skorradalur	35	-0,33	0,01

Í fyrstu virðist Garðaholt mjög frábrugðið öðrum sýnatökustöðum með hæsta meðaltalið. Hins vegar sýna niðurstöður Games-Howell prófs (tafla 3.2) að ekki er hægt að fullyrða að marktækur munur sé á milli þeirra þriggja sýnatökustaða með hæstu meðaltölin, þ.e. Garðaholt, Hellisgerði og Hvaleyrarvatn. Aðrir staðir eru þó marktækt frábrugðnir Garðaholti og Hellisgerði. Hvaleyrarvatn, Öskjuhlíð og Vífilsstaðahlíð hafa ekki marktækt frábrugðin meðaltöl. Skorradalur er með marktækt lægra meðaltal flúors í birkivef en aðrir staðir ef frá er talin Vífilsstaðahlíð. Í Skorradal eru sýni tekin til þess að afla bakgrunnsgilda. Engra áhrifa frá álverksmiðjunni á að gæta þar og er eðlilegt að meðaltal sé marktækt lægra en á öðrum sýnatökustöðum.

Til þess að kanna enn fremur mun á milli flúorupptöku gróðurs eftir sýnatökustöðum var gerður sambærilegur samanburður á flúorstyrk í grenitrjám (mynd 3.23). Sýnatökustaðirnir sem bornir voru saman eru Gerði, Straumsgirðing, Hvaleyrarvatn og Sléttuhlíð en þessir sýnatökustaðir eru dreifðir yfir það landsvæði sem algengast að vindur blási yfir þegar þurrt er í veðri (mynd 3.19) en miðað við að mestur flúor falli út úr andrúmslofti með útfellingu þurrefnis (Cheng, 2018) er við því að búast að mikill flúorstyrkur geti mælst í vef plantna á þessum sýnatökustöðum.



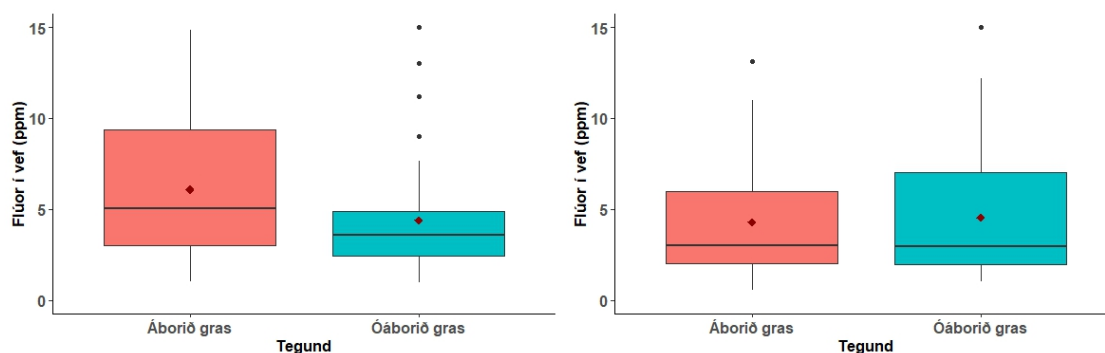
Mynd 3.23. Flúorstyrkur (ppm) í vef grenitrjáa á sýnatökustöðum sem verða fyrir ríkjandi, þurru norðan og norðvestlægum vindáttum.

Samkvæmt þurri vindrósi (mynd 3.19) standa ríkjandi vindáttir þegar þurrt er í veðri yfir bæði Gerði og Straumsgirðingu. Hvaleyrarvatn og Sléttuhlíð eru þar rétt utan við og einnig lengra frá álverinu og því er við því að búast að flúorstyrkur í grenitrjám sé ekki jafn hár þar. Samanburður á flúorstyrk í grenivef á þessum upptöldu sýnatökustöðum (mynd 3.23) sem liggja sunnan og suðaustan við álverið, sýnir að langhæsta meðaltalið er í Gerði, sem er í um það bil 440 metra loftlínu frá aðalbyggingu álversins í Straumsvík. Meðaltalið í Straumsgirðingu er mun lægra en í Gerði en Straumsgirðing liggur í um það bil 5 km

loftlínu frá Straumsvík. Fervikagreining á flúorstyrk í greni eftir stöðum leiðir í ljós að marktækur munur er á meðaltali hópanna ($F_{3,340}=81,7$, $p < 0,05$). Tukey post hoc próf gefur að marktækur munur ($p < 0,05$) sé á meðaltali sýna í Gerði og allra annarra en að þó sé hins vegar ekki marktækur munur á meðaltali sýna í Straumsgirðingu, Hvaleyrarvatni og í Sléttuhlíð (Straumsgirðing–Hvaleyrarvatn $p=0,64$, Straumsgirðing–Sléttuhlíð $p=0,62$, Sléttuhlíð–Hvaleyrarvatn $p=0,99$).

3.4.3 Grasmælingar

Sýni hafa verið tekin annars vegar af ábornu grasi og óábornu grasi. Tveir sýnatökustaðir hafa báðar sýnagerðir (tafla 2.2), en það eru Dysjar við Garðaholt og Sviðholt á Álftanesi. Bornar voru saman mælingar á flúorstyrk í óábornu og ábornu grasi á þessum tveimur sýnatökustöðum (mynd 3.24).



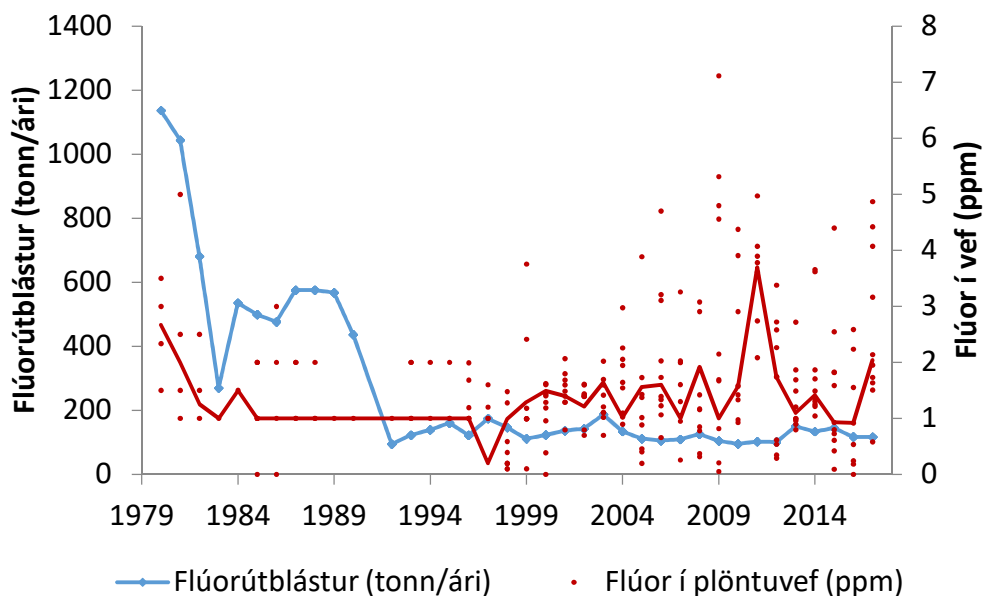
Mynd 3.24. Flúorstyrkur (ppm) í vef af ábornu (rauður) og óábornu grasi (blár) að Dysjum (t.v.) og á Sviðholti (t.h.).

Til þess að athuga hvort munur væri á flúorstyrk í ábornu og óábornu grasi á báðum sýnatökustöðum var notuð fervikagreining og meðaltöl sýnagerða borin saman á hvorum stað fyrir sig. Framkvæmt var Bartlett próf til þess að athuga hvort staðalfrávik hópanna væri það sama og niðurstaðan var neikvæð ($p < 0,05$). Því var notuð Welch's fervikagreining til þess að prófa mun á meðaltali flúorstyrks í ábornu og óábornu grasi að Dysjum. Meðaltal flúors í vef af ábornu grasi við Dysjar er 11,22 ppm en 13,05 ppm í óábornu grasi (mynd 3.24 t.v.). Welch fervikagreining sýndi að ekki var marktækur munur á flúorstyrk í ábornu og óábornu grasi að Dysjum ($F_{1,90}=0,06$, $p=0,8$).

Í Sviðholti (mynd 3.24 t.h.) var einnig framkvæmt próf til að kanna mun á meðaltali flúorstyrks í ábornu og óábornu grasi. Framkvæmt var Bartlett próf til þess að kanna hvort staðalfrávik hópanna væri svipað en svo var ekki ($p < 0,05$). Þá var notuð Welch's fervikagreining til þess að kanna mun á milli meðaltali hópanna. Meðaltal flúorstyrks í vef af ábornu grasi við Sviðholt var 5,4 ppm en 8,07 ppm í óábornu grasi. Welch's fervikagreining leiddi í ljós að ekki er hægt að fullyrða að um marktækan mun sé að ræða ($F_{1,57}=2,23$, $p=0,14$) á flúorstyrk í óábornu og ábornu grasi við Sviðholt.

3.4.4 Bakgrunnsgildi í Skorradal

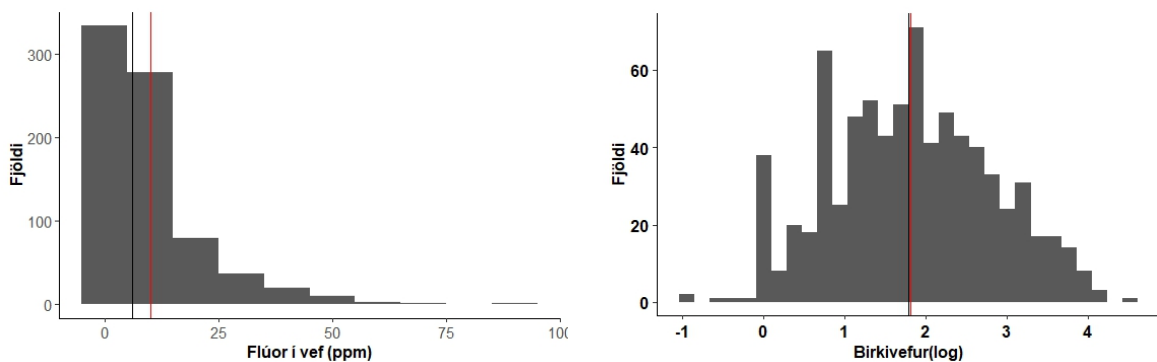
Teknar voru saman allar flúormælingar sem gerðar hafa verið á gróðri í Skorradal og útblástur álversins sem fall af tíma (mynd 3.25). Fram kemur annað mynstur í flúorstyrk gróðurs en í sambærilegri samantekt sem gerð var fyrir sýnatökustaði á svæðum 1, 2 og 3 (mynd 3.1).



Mynd 3.25. Allar mælingar á flúorstyrk (ppm) í gróðri (rauðir punktar) á viðmiðunarsvæðinu í Skorradal frá 1980-2017. Flúorútblastur álversins (blá lína) í losuðum tonnum á ári. Rauða línan sýnir miðgildi flúorstyrks í vef plantna.

Munurinn á því sem kemur fram á sýnatökustöðum á höfuðborgarsvæðinu (mynd 3.1) og í Skorradal á þessu tímabili felst í því að í Skorradal fara gildi flúorstyrks í gróðri lækkandi frá árunum 1980-1999 en byrja þá að fara hækkandi á ný. Gildin frá árinu 1999 eru mjög dreifð og stór hluti sýna sem hafa hærri flúorstyrk en sýni árin fyrir 2000. Rétt er þó að benda á að styrkur flúors (ppm) í plöntuvef í Skorradal er mun lægri en á sýnatökustöðunum á höfuðborgarsvæðinu (sjá mynd 3.1 og 3.2). Hér er því eingöngu verið að sýna fram á breytingar á dreifingu niðurstaðanna. Það sem er öðruvísi við þróun flúorstyrks plantna í Skorradal miðað við önnur svæði er að styrkur flúors í plöntuvef í Skorradal hefur átt marga toppa frá árinu 1998, það ár sem miðgildi flúorstyrks í plöntum á vöktunarsvæði höfuðborgarsvæðisins (svæði 1, 2, 3) var mjög lágt. Hæsti toppur í Skorradal frá 1998 kemur árið 2011 þegar miðgildi mælinga er 3,7 ppm, sem er hækkun um 2,71 ppm frá árinu 1998. Miðgildi flúorstyrks í birki á vöktunarsvæði höfuðborgarsvæðisins hefur ekki hækkað hlutfallslega jafn mikið og í Skorradal. Á höfuðborgarsvæðinu fer hæsti toppur frá 1998 úr 3,91 í 5,54 árið 2016, það er hækkun um 1,63 ppm.

3.4.5 Dreifing gagna og ályktanir um meðaltöl



Mynd 3.26. Dreifing allra flúormælinga í birki (t.v.) og dreifing sömu gagna eftir log umbreytingu (t.h.). Rauða línan sýnir meðaltal hvorrar dreifingar fyrir sig og svarta línan sýnir miðgildi dreifinganna.

Dreifing gagnanna er ekki normaldreifð (mynd 3.26, t.v.) en þegar gögnunum er log umbreytt (mynd 3.26, t.h.) verða þau normaldreifð; eru því log-normal dreifð. Reiknað meðaltal af dreifingu hrágagnanna er 6,65 ppm og miðgildið 4,03 ppm. Meðaltal log-dreifingarinnar er 1,79 og miðgildið 1,18. Hægt er að umbreyta logrunum til baka og fá þá út raunveruleg meðaltöl og miðgildi miðað við normaldreifingu. Raunverulega meðaltalið, umbreytt er 5,98 ppm og miðgildið 3,25 ppm. Meðaltöl og miðgildi úr log dreifingu og náttúrulegu dreifingunni eru ekki svo frábrugðin eða innan við 1 ppm munur í báðum tilfellum.

Stór hluti þessa verkefnis hefur byggst á því að bera saman meðaltöl ýmissa hópa s.s. flúormælinga eftir stöðum, með fervikagreiningu. Slíkt getur verið varhugavert ef dreifingar gagna eru ekki normaldreifðar. Niðurstöður (mynd 3.26) sýna að gögnin eru log-normaldreifð og raunveruleg meðaltöl ekki mjög frábrugðin reiknuðum meðaltölum hrágagnanna sem ekki voru normaldreifð. Niðurstöðurnar sýna að hægt er að taka mark á samanburði meðaltala sem framkvæmd hafa verið í þessu verkefni.

4 Umræða

4.1 Tímalína

Almennt virðist sem flúorstyrkur í gróðri hafi lækkað með tíma í takt við að dregið hefur úr flúorútblastri álversins (myndir 3.1, 3.2, 3.3). Það er í samræmi við niðurstöður mælinga sem gerðar hafa verið í Noregi (Hornvedt, 1995) á barnálum og sýna að flúorstyrkur í plöntuvef lækkar með minnkandi útblæstri álvera.

Miðgildi flúorstyrks í vef hjá birki og greni hefur einnig farið hækkandi frá 2010 en misjafnlega mikið þó á milli svæða. Allt bendir til þess að einhverjar breytingar séu að eiga sér stað á árunum 2010 til 2017 sem valda því að miðgildi eru að hækka þrátt fyrir óverulegar breytingar á útblæstri. Áhugavert væri að sjá frekari rannsóknir á þessu og hugsanlegar skýringar á því hvað veldur.

Hágildum flúorstyrks í vef birkis og grenis hefur verið að fjölga frá árinu 2010 og hágildin mælast á stöðum sem virðast frekar útsettir fyrir mengun en aðrir (mynd 3.1). Við því var að búast að grenisýni í Gerði mældust með hæsta flúorstyrk í vef vegna þess að það er eini sýnatökustaður grenis innan þynningarsvæðisins álversins (mynd 3.2). Flúor í andrúmslofti á þynningarsvæðinu hefur borist stutt frá álverinu og styrkur þess minna útþynntur þar miðað við aðra sýnatökustaði. Það vekur athygli að öll hágildi síðustu ára hjá birki safnist á Garðaholti (mynd 3.1). Hágildi flúorstyrks í birkiplöntum á Garðaholti samrýmast niðurstöðum rannsókna sem sýnt hafa fram á að mengunarefni dreifast ekki jafnt út frá mengunaruppsprettu heldur hefur vindstyrkur og ríkjandi vindáttir áhrif á að efnin dreifast heldur út frá þeim í geirum (Þröstur Þorsteinsson o.fl., 2013). Vindrósir (myndir 3.19 og 3.20) sýna að Garðaholt er einna útsettast fyrir vindi frá álverinu, af þeim sýnatökustöðum þar sem birkisýni eru tekin (tafla 2.2).

Árlegar niðurstöður flúorvöktunar í umhverfi frá álverinu í Straumsvík hafa hingað til verið settar fram sem meðaltöl allra mælinga innan svæða 1, 2 og 3, eins og áður var lýst í kafla 1.2. Talið var að skýr mynd af umhverfisáhrifum fengist ekki nema með meðaltali mælinga á stóru svæði (Flúornefndin, 1970). Framsetning gagnanna í árlegum vöktunarskýrslum álversins hefur ekki breyst frá því 1970 með tilliti til þessa. Í tilfelli birkimælinga á mynd 3.1 hverfa öll hágildi yfir 10 ppm flúors í birkivef inni meðaltal allra birkimælinga á svæðunum þremur. Sé eingöngu horft á niðurstöður vöktunarinnar í meðaltalsgildum kemur ekki í ljós að greinilegt álag er á sýnum frá Garðaholti. Það er mjög mikilvægt að stöðum og nágrenni þeirra, þar sem mengun mælist hærri en annars staðar sé veitt aukin athygli. Draga þarf niðurstöður þessara svæða, þar sem mengunarálag virðist meira, sérstaklega fram þar sem mögulegt er að auka þurfi umhverfisvöktun á þessum stöðum. Niðurstöður þessar gefa til kynna að tilefni sé til þess að auka umhverfisvöktun á Garðaholti og nálægu svæði.

4.2 Uppsöfnun mengunar í plöntuvef

4.2.1 Uppsöfnun milli ára

Mjög sterkt samband er á milli flúormagns í vef eins og tveggja ára nálum barrtrjáa. Flúorstyrkur í tveggja ára barrnálum er hærri í eins árs barrnálum sem er í samræmi við niðurstöður rannsókna sem gerðar hafa verið á flúoruppsöfnun í barrtrjám (Havas, 1971). Aukningin á flúorstyrk frá eins til tveggja ára barrnála er að meðaltali 80% í grenitrjám (mynd 3.6) og 140% í furum (mynd 3.5). Vegna þess hve sambandið er sterkt á milli eins og tveggja ára barrnála væri hægt er að réttlæta að sýnatökur á tveggja ára eða eins árs barrnálum væru óþarfar í umhverfisvöktun á flúor í barrtrjám við álverið í Straumsvík.

4.2.2 Uppsöfnun yfir vaxtartímann

Laufré safna upp flúor í vef sinn yfir vaxtartímann. Birki- (mynd 3.7) og reynilauf (mynd 3.8) hafa svipuð skýringarhlutföll en upptaka frá vori til hausts eykst þó heldur meira hjá reynitrjám. Að meðaltali er 62% af flúorstyrk í birki á haustin útskýrt með flúorstyrk að vori en 65% hjá reyniplöntum. Miðað við niðurstöður þekktra rannsókna á uppsöfnun flúors í vef plantna yfir vaxtartímann (Vike, 1995) var við því að búast að aukning hjá lauftrjám væri mikil yfir sumarið. Það kemur því á óvart að sjá birkimælingar í Hellisgerði (mynd 3.10) þar sem virðist sem á síðari árum hafi stöku sinnum mælst lægri flúor í birkivef að hausti en vori. Slíkt væri ekki mögulegt nema að miklar sviptingar ættu sér stað á milli sýnatöku að vori og hausti. T.d. gæti spretta blaðvefs verið mjög mikil ásamt því að flúorstyrkur í andrúmslofti félli og eða úrkoma eftir vorsýnatöku yrði svo mikil að flúor skolaðist af plöntunni og upptaka hans yrði óveruleg í hlutfalli við vöxt plöntuvefsins. Sömuleiðis er hugsanlegt að aðrir þættir s.s. plöntusjúkdómar eða sýkingar hafi haft áhrif á þessi hlutföll.

Varla er hægt að tala um samand á milli flúorstyrks að vori og hausti í grasvef (mynd 3.9). Það er ekki við því að búast að flúorstyrkur geti verið lægri að hausti en á vori þar sem ólíklegt er að plantan losi sig við þegar upptekinn flúor. Sambærilegar rannsóknir sýna fram á að flúor safnast upp í blaðvefnum með tíma (Vike, 1995). Niðurstöður samanburðar á flúorstyrk í vef af óábornu grasi koma því nokkuð á óvart í þeim tilfellum þar sem flúor hefur mælst minni að hausti en vori. Þetta getur þó verið skýrt af því að ef til vill eru sýni tekin af grasi sem ekki vex villt. Það gras sem ekki vex villt er bitið eða slegið, eins og oft er tilfellið þegar gras vex í nálægð við mannabústaði eða útivistarsvæði, eins og á við um marga sýnatökustaðina í umhverfisvöktuninni sem hér hefur verið fjallað um. Þegar grasið vex aftur upp að nýju eftir beit eða slátt vex nýr og ferskur gróðurvefur, sem ekki sætir áhrifum af áður uppteknum flúor í blöð plöntunnar sem fjarlægð hafa verið. Ef grasið er bitið eða slegið missir samanburður flúormælinga að vori og hausti mark sitt. Jafnvel er hægt að rökstyðja að það þjóni ekki tilgangi að taka sýni aftur að hausti ef vitað er að grasið hefur verið slegið frá sýnatöku að vori. Tilgangur þess að bera áburð á gras er að auka sprettu þess fyrir slátt og hirðu svo hægt er að reikna með því að ekki sé um sama grasvef að ræða í sýnatökum að vori og hausti hjá ábornu grasi. Niðurstöður um að í sumum tilfellum mælist flúor lægri að hausti en vori hjá ábornu grasi (mynd 3.9 t.h.), annað en lauf- (myndir 3.7 og 3.8) og barrtré (mynd 3.5 og 3.6) hafa sýnt, koma því ekki á óvart. Í fyrsta lagi er ekki verið að taka sýni af sama grasi í þessum tilfellum vegna þess að grasið að hausti er væntanlega, í flestum tilfellum, tekið eftir slátt og því ekki ekki um

uppsöfnun í sama plöntuvef að ræða. Ef notaður er flúorlaus áburður væri því ekki að búast við hærri flúorstyrk að hausti en vori í þessum sýnatökum. Í öðru lagi hefur áburðurinn þau áhrif að spretta eykst og upptekinn flúorstyrkur í plöntunni (mg/kg) minnkar í hlutfalli við aukningu á massa plöntuvefs. Í þessum tilfellum væri hægt að færa rök fyrir því að óþarft væri að taka samanburðarsýnið að hausti ef eingöngu er ætlunin að vakta flúor í umhverfi. Niðurstöður haustsýna af ábornu grasi nýtast þó við að meta um hvort grasið sé hæft til beitar grasbíta og búfænaðar.

4.2.3 Upptökuhraði

Samband útblásturs álversins og upptökuhraða birkis í Hellisgerði (mynd 3.13) og Vífilsstöðum (mynd 3.14) eru nokkuð sterk. Niðurstöður sýna að samband upptökuhraða grenis við útblástur er misjafn á milli sýnatökustaða innan sýnatökusvæðis 1. Fylgni er á milli útblásturs og upptökuhraða grenis við Straumsgirðingu (mynd 3.11) en sú er ekki raunin á öðrum stöðum sýnatökusvæðisins þar sem upptökuhraði er mjög misjafn við sama útblástur (mynd 3.12).

Hugsanlegar skýringar á þessu geta verið þær að dreifing útblásturs sé ekki jöfn yfir svæðið eins og heimildir gefa vísbendingu um (Þröstur Þorsteinson o.fl., 2013). Hugsanlegt er þó að fleiri óþekktar breytur hafi áhrif eins og veðurfræðilegar ástæður sem hafa jákvæð áhrif á opnun loftaugna, t.d. ljós, hitastig og úrkoma (Vike, 1995). Þegar upptökuhraði birkis í Hellisgerði og Vífilsstöðum sýnir frábrugðin gildi, t.d. sérstaklega há eða lág kemur það gjarnan fram á báðum stöðum. Það gefur enn fremur til kynna að ofantaldar veðurfræðilegar ástæður séu fyrir hendi sem geti skýrt það.

4.3 Samband flúorstyrks í vef og á yfirborði plöntu

Munur á sambandi flúorstyrks (ppm) á yfirborði plöntu (mælt í skoli) og í plöntuvef er nokkur milli tegunda. Bæði milli lauftrjáa (mynd 3.15), grass (mynd 3.16) og barrtrjáa (mynd 3.17) en einnig innan þessara hópa. Sambandið er þó sterkast hjá grasi (mynd 3.16) og minnst hjá barrtrjám (mynd 3.17) þar sem varla er hægt að tala um samband. Athuga þarf að hér getur þó verið nokkur óvissa þar sem flúorstyrkur á yfirborði plantna stjórnast verulega af veðurfari. Bæði ríkjandi vindáttum (Mikhailova, 2011) og úrkomu (Vike, 2005). Rannsóknir sýna að regluleg úrkoma sem skolar flúori af yfirborði plantna minnki magn þess flúors sem tekinn er upp í gegnum yfirborð laufblaða (Vike, 2005). Plöntur sem ekki verða fyrir áhrifum úrkomu hafa því hærri flúorstyrk í vef sínum og því getur flúorstyrkur í plöntum sveiflast á milli ára ef koma sumur þar sem úrkoma er tíð og mikil. Einnig geta mælingar á flúorstyrk á yfirborði plantna (skolmælingar) verið ómarktækar og sveiflukenndar ef stutt var síðan rigndi þegar sýnataka fór fram. Af niðurstöðum gagnanna má álykta að flúorupptaka aukist eftir því sem meiri flúor berst að lauftrjám (mynd 3.15) og grasi (mynd 3.16).

Samkvæmt heimildum hefur úrkoma mismikil áhrif á plöntutegundir. Mest flúor skolest af barrtrjám og lauftrjám með slétt blöð en minna flúor skolist af jurtategundum og tegundum með gróf eða loðin blöð (Vike, 2005). Niðurstöður samanburðar á meðaltali flúorgilda í skolvatni tegundanna (mynd 3.18) eru í nokkru samræmi við það þar sem minnstur flúor

mældist í skolvatni af barrnálum sem gefur til kynna að efni á yfirborði þeirra skolist vel af. Marktækur munur er á meðaltali flúors á yfirborði barrtrjáa og annarra tegunda. Meðaltal flúors á yfirborði furu er lægst og grenis næst-lægst. Meðaltöl lauftrjáa og grassins eru nokkuð svipuð. Það er því við því að búast að flúor á yfirborði plöntuvefs hafi minni áhrif á upptöku flúors í vef barrtrjáa en gras og lauftegunda eins niðurstöður samanburðar sýndi fram á (mynd 3.17).

4.4 Veðurfar og dreifing mengunar um landsvæðið

4.4.1 Veðurfar

Samkvæmt heimildum sest flúor frekar til jarðar úr andrúmslofti með þurri útfellingu en útskolun (Cheng, 2018) og þá ættu vindáttir í þurru veðri (mynd 3.19) að hafa meiri áhrif á dreifingu loftborins flúors frá Straumsvík en við úrkomu (mynd 3.20). Ekki má gleyma að úrkoma getur þó haft þau áhrif að mengunarefni sem sest hafa á yfirborð plantna skolest af (Vike, 2005). Mikil úrkoma getur einnig haft þau áhrif að flúor fellur út úr andrúmsloftinu með regndropum en slíkt gerist ekki í eins miklu magni og þegar þurrt er (Cheng, 2018). Úrkoma í litlu magni og eða hátt rakastig getur haft jákvæð áhrif á opnun loftaugna plantna og þar af leiðandi haft jákvæð áhrif á upptöku efna úr andrúmsloftinu (Vike, 1995). Þetta er því ekki einfalt samspil veðurs, dreifingar flúors að plöntum og upptöku plantnanna. Miðað við þurru vindrósina (mynd 3.19) þá geta þurrir vindar af norð- og norðvestlægum áttum borið mengunarefni að Gerði og Straumsgirðingu en áhrifa gæti einnig gætt við Hvaleyrarvatn og í Sléttuhlíð. Þessar ríkjandi áttir eru einnig oftast hæggar en stöðugur hægur vindur til lengri tíma getur leitt til þess að mengunin dreifist langt frá uppsprettu og þynnist lítið. Við ákveðnar aðstæður af þessu tagi getur mengun því verið nokkuð mikil og teygst sig yfir stórt svæði. Aftur á móti þynnist mengun í sterkum vindi mikið og minni áhrifa gætir eftir því sem fjarlægð frá uppsprettu verður meiri. Gerði og Straumsgirðing eru í nokkurri nálægð við álverið en Sléttuhlíð og Hvaleyrarvatn eru lengra frá og ættu því að verða fyrir minni áhrifum en Straumsgirðing og Gerði.

Suðaustlægar áttir blása að mestu út á haf en Sviðholt á Álftanesi verður beint fyrir sunnanáttum og Garðaholt er þar á jaðrinum. Suðlægu áttirnar eru heldur sterkari en þær norðlægu og því líklegra að mengun berist lengra og þynnist frekar með þessum suðlægu áttum en þeim norðlægu.

4.4.2 Flúor á yfirborði plantna og í plöntuvef eftir stöðum

Skol

Niðurstöður samanburðar á flúor í skolvatni plantna eftir stöðum leiddu í ljós að ekki er auðvelt að fullyrða um að munur sé á mengunarálagi eftir stöðum af niðurstöðum skolmælinga að dæma. Þó er hægt að sýna fram á það að gildi á Garðaholti eru frábrugðin gildum í Vífilsstaðahlíð og Öskjuhlíð (mynd 3.21). Ef niðurstöðurnar eru bornar saman við vindrós í þurru veðri (mynd 3.19) sést að Garðaholt (sýnatökustaður nr. 37) og Öskjuhlíð (sýnatökustaður nr. 41) eru í mjög svipaðri stefnu frá álverinu en Vífilsstaðahlíð (sýnatökustaður nr. 7) töluvert austar. Fjarlægðin gæti mögulega skýrt mun á milli

Garðaholts og Öskjuhlíðar. Stefna gæti skýrt mun á Garðaholti og Vífilstaðahlíð vegna þess að miðað við vindrósinu er mjög sjaldgæft að vindur blási frá álverinu yfir Vífilstaðahlíð. Ekki er marktækur munur á gildum í Vífilstaðahlíð og Skorradal sem gefur til kynna að gildin í Vífilstaðahlíð séu sérstaklega lág, líklega af þeim veðurfræðilegum ástæðum.

Vefur

Fervikagreining á flúorstyrk í vef birkis eftir stöðum (mynd 3.22) sýnir að það eru marktækt lægri gildi í Skorradal eins og eðlilegt væri á stað fyrir mælingar á bakgrunnssýnum til viðmiðunar. Hæsta meðaltalið er í Garðaholti og næsthæst eru meðaltöl úr Hellisgerði og frá Hvaleyrarvatni (mynd 3.22). Fervikagreiningin leiðir hins vegar í ljós að ekki er marktækur munur á meðaltali þessara þriggja staða (tafla 3.2).

Áhugavert er að bera saman meðaltöl í skoli (mynd 3.21) og vef birkis (mynd 3.22). Í báðum tilfellum er hæsta meðaltalið í Garðaholti, næst-hæsta í Hellisgerði, þá Hvaleyrarvatni og svo aðrir staðir lítið frábrugðnir. Líkindi þessa eru í takt við niðurstöður um að samband sé á milli flúors á yfirborði birkis og í vef (mynd 3.15). Niðurstöðurnar koma einnig heim og saman við að algengar sunnanáttir (mynd 3.19) bera flúor yfir Garðaholt (sýnatökustaður nr. 37) fremur en aðra staði austan við Garðaholt, Hellisgerði (sýnatökustaður nr. 6) og Hvaleyrarvatni (sýnatökustaður nr. 34). Ástæða þess að ekki mælist marktækur munur á milli meðaltala þessara staða er líklega sú að dreifing flúorgilda á þessum stöðum er mikil.

Greni

Niðurstöður grenimælinga sunnan og suðaustan við álverið (mynd 3.23) sýna að meðaltal flúorstyrks í greni er hæst í Gerði og þá Straumsgirðingu. Rökrétt er að mestur flúorstyrkur sé á þeim stað sem stýst er frá uppsprettu mengunarefna (Mikhailova, 2011) og því sé hæsta meðaltalið í Gerði. Hvað varðar ríkjandi vindáttir (mynd 3.19) er líklegra að mengunarefni dreifist í meira magni yfir Gerði og Straumsgirðingu en að Hvaleyrarvatni og Sléttuhlíð. Samkvæmt fervikagreiningu er ekki marktækur munur á meðaltölum flúorstyrks (mynd 3.23) á Hvaleyrarvatni, Sléttuhlíð og í Straumsgirðingu en meðaltalið í Straumsgirðingu er þó nokkuð hærra og niðurstöðurnar að vissu leyti í samræmi við ríkjandi vindáttir.

4.5 Tillögur til úrbóta

4.5.1 Grasmælingar

Borin hafa verið saman flúorgildi í ábornu og óábornu grasi á þeim tveimur sýnatökustöðum þar sem báðar sýnagerðirnar hafa verið teknar, þ.e. að Dysjum og á Sviðholti. Fervikagreining hefur sýnt að ekki er marktækur munur á flúorstyrk sýnagerðanna. Hvorki á Sviðholti né Dysjum. Af þessum niðurstöðum er hægt að álykta að ekki sé nauðsynlegt að taka sýni af báðum sýnagerðum. Einnig getur verið möguleiki á því að sýnagerðir sem teknar eru á báðum stöðum séu ekki svo frábrugðnar og ekki raunverulegur munur á grasi sem safnað er sem óábornu og því grasi sem safnað er sem ábornu. Búskapur á þessum stöðum hefur farið minnkandi og því líklegt að notkun áburðar fari minnkandi og því e.t.v. ekki jafn mikið um áborið gras á þessum sýnatökustöðum.

Í kafla 4.2.2 kom fram að ólíklega skilaði það miklum árangri að taka bæði vor- og haustsýni af grasi. En hér vaknar upp sú spurning hvort gras sé yfir höfuð hentug planta í umhverfissvöktun að öðru leyti en til þess að vernda grasbíta. Hross og sauðfé eru haldin úti á Garðaholti og Álftanesi sem geta verið á beit allan ársins hring ef frátaldir eru hörðustu vetrarmánuðir ársins. Fyrir þessi dýr er mikilvægt að gras á svæðinu sé vaktað. Ef vakta á fóðurframleiðslu, þar sem gras er áborið og heyað, er auðvitað best að vakta flúorstyrk í lokaafurðinni, heyinu sjálfu. Einar og sér gefa niðurstöður flúormælinga í grasi ekki góða mynd af mengunarálagi tiltekinna sýnatökustaða sem eru notaðir í þessari vöktunaráætlun. Því er óskynsamlegt að taka eingöngu grassýni á svo mörgum sýnatökustöðum eins og raun ber vitni.

4.5.2 Dreifing sýnatökustaða

Vöktun á grasi er mjög heppileg þegar vakta á áhrif á grasbíta. Vöktunaráætlun álversins sem er frá árinu 2014 (Rio Tinto, 2014) er að mörgu leyti byggð á umhverfissvöktun á árum áður þegar mikil áhersla var lögð á að vakta áhrif á grasbítana. Svo virðist vera sem komin sé tími til þess að endurskoða hvaða lífverur séu heppilegar til vöktunar á hverjum sýnatökustað til þess að sem best mynd fái á umhverfisáhrifin. Til að mynda væri hægt að bæta vöktunina með því að bæta við gróðurtegundum til vöktunar á mörgum stöðum, t.d. þeim stöðum þar sem eingöngu eru tekin grassýni eins og tilfellið er á fjórum sýnatökustöðum af þrettán. Þetta eru Sviðholt, Dysjar, Straumur og Hvassahraun. Straumur og Hvassahraun eru einu sýnatökustaðirnir í vöktuninni til vesturs af álverinu. Sviðholt á Álftanesi sem er eini sýnatökustaðurinn sem er beint norður af álverinu. Vindrós í þurru veðri (mynd 3.19) hefur sýnt fram á að ríkjandi vindáttir frá álverinu blási norður yfir þetta svæði. Flúormælingar í birki (mynd 3.22) hafa gefið vísbendingar um að meira álag sé á gróðri í Garðaholti, Hellisgerði og við Hvaleyrarvatn. Álagið hefur sérstaklega aukist síðustu ár á Garðaholti (mynd 3.1). Á næstu sýnatökustöðum við Garðaholt, þ.e. á Dysjum og Sviðholti eru eingöngu tekin grassýni. Þar sem sýnt hefur verið fram á að gras sé ekki sérstaklega heppileg planta til vöktunar áhrifa almennt er ekki hægt að útiloka að álag sem gætir í Garðaholti nái til annarra nærliggjandi staða.

Í ljósi þessara niðurstaðna væri rökrétt að vöktun til austurs og sérstaklega norðurs væri aukin. En með tilliti til þess hve takmörkuð vöktun er til vesturs og suðurs væri einnig hægt að bæta vöktun í þær áttir. Með aukinni vöktun er hægt að bæta við sýnatökustöðum og vöktunarlífverum. Hægt væri að fjölga gróðurtegundum sem sýni er tekin af á mörgum stöðum, hægt væri að taka sýni af lyngi, mosa og fléttum á þeim stöðum þar sem ekki vaxa tré og gras. Eingöngu ein loftgæðamælistöð mælir flúor í andrúmslofti við álverið og stendur hún á Hvaleyrarholti eða til austurs af álverinu. Hægt væri að mæla flúor í lofti á fleiri stöðum til þess að bera saman við niðurstöður flúormælingar í gróðri.

4.5.3 Bakgrunnsgildi í Skorradal

Niðurstöður á mynd 3.25 sýna að undanfarna tvo áratugi hafa komið fram toppar í flúorstyrk plantna í Skorradal. Skoða þarf vel hvaða þættir geta haft þessi áhrif á niðurstöðurnar í Skorradal. Eftir árið 1999 taka að mælast hærri gildi flúors í gróðri en áður. Einmitt um það leiti hóf nýtt álver starfsemi á Grundartanga í Hvalfirði og óvíst hvort útlosun þess geti haft þessi áhrif. Hugsanlegt er að flúorútlosun í eldgosum geti haft áhrif á niðurstöður viðmiðunargilda í Skorradal en miðað við heimildir (Sigurður Sigurðsson,

ódags.; WHO, 2002) ættu áhrifin ekki að vara lengi af þeim sökum og gætu því skapað einn og einn topp í gögnunum en ekki útskýrt hágildi yfir svo langt tímabil.

Skoða þarf hver sé skýringin á hækkun flúorstyrks plantna í Skorradal til þess að ganga úr skugga um að þessi sýnatökustaður verði áfram nothæfur og traustur sýnatökustaður viðmiðunarsýna í áframhaldandi umhverfisvöktun.

5 Lokaorð

Þegar flúorvöktun í gróðri umhverfis álverið í Straumsvík var fyrst skipulögð árið 1968 var mikil áhersla lögð á vöktun umhverfisáhrifa á grasbíta og vöktunin er enn þann dag í dag lítið breytt. Að lokinni fimmtíu ára vöktunarvinnu er eðlilegt að gerð sé greining á þeirri vinnu sem hefur átt sér stað og hún endurmetin. Mikilvægt er að niðurstöðurnar séu skoðaðar í samhengi svo meta megi breytingar og þróun á milli ára. Þannig er hægt að leggja mat á hvort vöktunin nái yfir nauðsynlega þætti eða hvort styrkja megi hana á einhverjum sviðum. Niðurstöður þessa rannsóknarverkefnis gefa sterklega til kynna að tími sé kominn til þess að endurskoða marga þætti varðandi framkvæmd flúorvöktunar í gróðri við álverið í Straumsvík.

Niðurstöður sýna að álag af völdum flúors er mismikið eftir sýnatökustöðum. Flúorstyrkur birkis mælist hæstur í Garðaholti af öllum sýnatökustöðum og greinilega kemur fram álag af völdum flúors í Hellisgerði og á Hvaleyrarvatni. Veðurfar hefur mikil áhrif á dreifingu mengunarefna og því er mismikið álag á svæðum eftir því. Flúorstyrkur plantna hefur í mörgum tilvikum farið hækkandi síðast liðin ár þrátt fyrir að útblástur álversins hafi ekki hækkað á sama tíma. Mjög mikilvægt er að ástæður þessa séu skoðaðar og komist að því hvað veldur þessum breytingum. Eðlilegt er að núverandi vöktunaráætlun verði endurskoðuð með tilliti til þess að fyrirliggjandi gögn sýna fram á mismikið álag eftir svæðum. Bæta þarf vöktun til norðurs af álverinu, við Garðaholt og Álftanes en einnig við Hellisgerði í norðaustri og í átt að Hvaleyrarvatni til austurs. Hægt væri að bæta vöktunina með því að fjölga sýnatökustöðum og taka sýni af fleiri gróðurtegundum. Niðurstöðurnar sýna að gras er að ákveðnu leyti óheppileg planta til þess að vakta flúormengun vegna þess að erfitt er að meta uppsöfnun í plöntunni vegna sláttar og beitar. Erfitt er því að segja til um raunverulegt mengunarálag þeirra sýnatökustaða sem eingöngu eru vaktaðir með grassýnatökum. Niðurstöðurnar sýna jafnframt að erfitt er að réttlæta tvær sýnatökur af barrtrjám á hverjum stað, þ.e. af eins og tveggja ára þar sem mjög sterkt samband ($R^2=0,86$) er til staðar. Veruleg ástæða er til þess að kanna bakgrunnsgildi sem fengin eru úr gróðri í Skorradal. Niðurstöður þessa verkefnis sýna að varhugavert er að treysta á niðurstöður þessara mælinga sem bakgrunnsgildi þar sem miklar sveiflur og há gildi hafa mælst þar á síðustu tveimur áratugum.

Þegar þetta er skrifað er ár þar til starfsleyfi álversins í Straumsvík og umhverfisvöktunaráætlun þess þarf að endurskoða en bæði starfsleyfið og umhverfisvöktunaráætlunin gilda til ársins 2020. Upplýsingar og niðurstöður þessa rannsóknarverkefnis geta styrkt þá vinnu við að endurskoða vöktunaráætlun er varðar flúorvöktun í gróðri. Um leið hefur opnast aðgengi að öllum mæligögnum vöktunarinnar sem vonandi leiðir til þess að efnið verði rannsakað enn frekar í framtíðinni og flúorvöktun í gróðri styrkt enn frekar.

Heimildir

- Alcoa Fjarðarál. 2013. *Vöktunaráætlun, Álver Alcoa Fjarðaráls, Reyðarfirði. Útbúið fyrir Umhverfisstofnun*. Sótt 15.5.2019: https://www.ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Starfsleyfi/Eftirlitsskýrslur/alver/Alcoa_vo ktunaraaetlun_2014.pdf
- Alþingi, 1998. Lög nr. 7 um hollustuhætti og mengunarvarnir. Sótt 12.3.2018 <https://www.althingi.is/lagas/nuna/1998007.html>
- Anna Helga Jónsdóttir og Sigrún Helga Lund. 2015. *Tölfræði frá grunni*. Háskólafróðritun, Reykjavík.
- Cheng, MD. 2018. Atmospheric chemistry of hydrogen fluoride. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 75(1): 1-16
- EFLA verkfræðistofa. 2017. *Umhverfissvöktun iðnaðarsvæðisins á Grundartanga. Niðurstöður ársins 2016*. Sótt 7.3.2018: http://nordural.is/Files/Skra_0077036.pdf
- Eyjólfur Sæmundsson og Guðmundur H. Einarsson. 1991. *Löftgæði á Hvaleyrarholti. Údráttur úr skýrslu um niðurstöður mælinga 1990*. Heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðarsvæðis, Hafnarfjörður.
- Flúornefndin. 1970. *Skýrsla haustið 1970, niðurstöður flúorrannsóknna*. Iðnaðarráðuneytið, Reykjavík.
- Flúornefndin. 1972. *Report Fall 1971, Result of the Fluorine Investigation*. Iðnaðarráðuneytið, Reykjavík.
- Fréttablaðið. 2007. Stækkun álversins hafnað. 1. apríl. Sótt 7.5.2019 af: http://timarit.is/view_page_init.jsp?issId=276979&lang=da
- Guðjón Atli Auðunsson. 2014. *Könnun á ólífrænum snefilefnum og aromatískum fjölhringjasamböndum (PAH) í kræklingi við álverið í Straumsvík. Sýnataka 2013*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Havas, P. 1971. Injury to Pines in the Vicinity of a Chemical Processing Plant in Northern Finland. *Acta Forestalica Fennica*. Suomalaisen Kirjallisuuden Kirjapaino, Helsinki.
- Helena Marta Stefánsdóttir. 2016. Rannsóknir á flúor í náttúru Ísland: samantekt heimilda. *Rit lbhl* 66. Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri.
- Hermann Þórðarson. 2016. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi Rio Tinto á Íslandi. Mæligögn 2015*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Hermann Þórðarson. 2017. *Umhverfissvöktun Hvaleyrarholti. Mælingar í lofti*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Horntvedt, R. 1995. Fluoride uptake in conifers related to emissions from aluminium smelters in Norway. *The Science of the Total Environment*, 163: 35-37.

- Hörður Kristinsson. 1998. Gróðurbreytingar við álverið í Straumsvík. *Náttúrufræðingurinn* 67: 241-254
- Kristmann Gíslason. 2019. *Fluormælingar í gróðri í umhverfi Rio Tinto á Íslandi. Mæligögn 2018*. Reykjavík, Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- McDonald, J.H. 2014. *Handbook of Biological Statistics* (3ja útg.). Baltimore Maryland, Sparky House Publishing, Baltimore, 145-156.
- Mikhailova, T.A., Kalugina, O.V., Shergina, O.V. 2011. Phytomonitoring of techogenic fluorides in Baikal region. *Fluorine notes* 3(76).
- Norðurál. 2018. *Umhverfissvöktunaráætlun iðnaðarsvæðisins á Grundartanga 2018-2028*. Sótt 15.4.2019: https://www.ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Starfsleyfi/Eftirlitsskyrslur/alver/Voktunar_aetlun_2018_2021_2endursk_28032018.pdf
- Reglugerðarsafn. 2018. Reglugerð nr. 550 um losun frá atvinnurekstri og mengunarvarnaeftirlit. Sótt 6.5.2019: <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/eftir-raduneytum/umhverfisraduneyti/nr/21098>
- Reglugerðarsafn. 2001. Reglugerð nr. 340 um eftirlit með fóðri. Sótt 7.3.2018: <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/allar/nr/340-2001>.
- Reglugerðarsafn. 2002. Reglugerð nr. 941 um hollustuhætti. Sótt 19.2.2019: <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/allar/nr/941-2002>
- Rio Tinto á Íslandi. Ódagsett. Upphafið. Sótt 4.3.2018 af <http://www.riotinto.is/?PageID=27>
- Rio Tinto á Íslandi, 2014. *Umhverfissvöktunaráætlun 2014-2020*. Sótt 4.3.2018 <http://ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Starfsleyfi/Eftirlitsskyrslur/Verksmidjur/2014-01-21%20Umhverfissv%C3%B6ktunar%C3%A1%C3%A6tlun%20Rio%20Tinto%20Alcan%20%C3%A1%20%C3%8Dslandi.pdf>
- Rio Tinto á Íslandi. 2016. *Grænt bókhald ISAL 2016*. Sótt 4.3.2018 <http://www.riotinto.is/lisalib/getfile.aspx?itemid=1117>
- Rio Tinto á Íslandi. 2017. *Grænt bókhald ISAL 2017*. Sótt 15.4.2018 <https://www.riotinto.is/lisalib/getfile.aspx?itemid=1241>
- Sigurður Sigurðsson. Ódagsett. *Áhrif eldgosa á dýr*. Sótt 7.3.2018 http://www.mast.is/Uploads/document/yd_eydublod/ahrif_eldgosa_a_dyr.pdf
- Sighvatur Arnmundsson. 2018. Norðurál sýknað af kröfum um ábyrgð á heilsuleysi hrossa. *Vísir*, 14. júlí. Sótt 18.4.2019: <https://www.visir.is/g/2018180719461>
- Umhverfisstofnun. 2005. *Starfsleyfi fyrir álver Alcan á Íslandi, ISAL Straumsvík, Hafnarfirði*. Sótt 25.2.2018 af http://ust.is/library/Skrar/Atvinnulif/Starfsleyfi/Starfsleyfi-i-gildi/alver/ISALStraumsvik_2020.pdf

- Vike, E. og A. Håbjørg. 1995. Variation in fluoride content and leaf injury on plants associated with three aluminium smelters in Norway. *Science of the Total Environment* 163: 25-34.
- Vike, E. 2005. Uptake, deposition and wash off of fluoride and aluminium in plant foliage in the vicinity of an aluminium smelter in Norway. *Water, Air, and Soil Pollution* 160: 145-159.
- Walna, B., Kurzyca, I. og Bednoz, E. 2013. Fluoride pollution of atmospheric precipitation and its relationship with air circulation and weather patterns (Wielkopolski National Park, Poland). *Environmental Monitoring and Assessment* 185:5497-5514. doi: 10.1007/s10661-012-2962-9
- Weinstein, L.H. og Davison, A.W. 2003. Native plant species suitable as bioindicators and biomonitoring for airborne fluoride. *Environmental pollution* 125(1): 3-11.
- WHO, World Health Organization. 2002. *Environmental Health Criteria 227 – FLUORIDES*. Geneva. Sótt 4.3.2018:
http://whqlibdoc.who.int/ehc/WHO_EHC_227.pdf
- Þór Tómasson og Hörður Þormar, 1998. Loftborin mengun frá álverinu í Straumsvík. *Náttúrufræðingurinn* 67 (3-4): 233-240.
- Þróstur Þorsteinsson o.fl. 2013. Statistical assessment and modeling of the effects of weather conditions on H₂S plume dispersal from Icelandic geothermal power plants. *Geothermics* 45:31-40.

Viðauki A

Listi yfir allar skýrslur 1968-2017 sem gagnagrunnurinn var unninn uppúr.

Parity Fluorine Comission. 1971. *1968 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1971. *1969 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1971. *1970 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1971. *1971 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1973. *1972 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1974. *1973 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1975. *1974 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1976. *1975 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1977. *1976 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1978. *1977 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1979. *1978 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1980. *1979 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1981. *1980 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1982. *1981 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1983. *1982 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1984. *1983 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1985. *1984 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1986. *1985 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1987. *1986 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1988. *1987 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1989. *1988 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1990. *1989 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

Parity Fluorine Comission. 1991. *1990 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.

- Parity Fluorine Comission. 1992. *1991 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.
- Parity Fluorine Comission. 1993. *1992 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.
- Parity Fluorine Comission. 1994. *1993 Complete Data From the Laboratories*. Reykjavík.
- Kolbeinn Sigurðsson. 1995. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1994*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 1996. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1995*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 1997. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1996*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 1998. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1997*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 1998. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1998*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2000. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 1999*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2001. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2000*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2002. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2001*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2003. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2002*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2004. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2003*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Iðntæknistofnun Íslands. 2005. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2004*. Environmental & Chemical Laboratory, ISAL.
- Center of Chemical Analysis, IceTec. 2006. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2005*. ISAL (Alcan á Íslandi).
- Center of Chemical Analysis, IceTec. 2007. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL. Complete Data From the Laboratories 2006*. ISAL (Alcan á Íslandi).
- Center of Chemical Analysis, Innovation Center Iceland. 2008. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL- Alcan Iceland Ltd. Complete Data From the Laboratories 2007*. ISAL (Alcan Iceland Ltd.).

- Center of Chemical Analysis, Innovation Center Iceland. 2009. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL-Alcan Iceland Ltd. Complete Data From the Laboratories 2008*. ISAL (Alcan á Íslandi).
- Center of Chemical Analysis, Innovation Center Iceland. 2010. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL-Alcan Iceland Ltd. Complete Data From the Laboratories 2009*. ISAL (Alcan á Íslandi).
- Center of Chemical Analysis, Innovation Center Iceland. 2011. *Fluorine Investigation in the Vicinity of ISAL-Alcan Iceland Ltd. Complete Data From the Laboratories 2010*. ISAL (Alcan á Íslandi).
- Hermann Þórðarsson. 2012. *Fluoride in vegetation in the vicinity of ISAL- Alcan Iceland Ltd. Complete data*. Innovation Center Iceland, ISAL (Rio Tinto Alcan).
- Hermann Þórðarson. 2013. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto Alcan á Íslandi. Mæligögn 2012*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Helga Dögg Flosadóttir. 2014. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto Alcan á Íslandi. Mæligögn 2013*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Helga Dögg Flosadóttir. 2015. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto Alcan á Íslandi. Mæligögn 2014*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Hermann Þórðarson. 2016. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto Alcan á Íslandi. Mæligögn 2015*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Helga Dögg Flosadóttir. 2017. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto á Íslandi. Mæligögn 2016*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.
- Kristmann Gíslason. 2018. *Flúormælingar í gróðri í umhverfi ISAL – Rio Tinto á Íslandi. Mæligögn 2017*. Nýsköpunarmiðstöð Íslands, Reykjavík.

Viðauki B

Yfirlit yfir sýnatökur á hverjum sýnatökustað.

Svæði	Staður	Tegund	Ár											
			68-72	73-77	78-82	83-87	88-92	93-97	98-02	03-07	08-12	13-17		
0	1	óáborið gras												
0	31	greni												
1	2	óáborið gras												
1	6	óáborið gras												
1	6	greni												
1	6	birki												
1	6	reynir												
1	6	gullregn												
1	9	óáborið gras												
1	9	áborið gras												
1	9	hey												
1	28	óáborið gras												
1	32	óáborið gras												
1	32	greni												
1	32	fura												
1	33	greni												
1	36	greni												
1	36	fura												
2	5	óáborið gras												
2	5	áborið gras												
2	5	hey												
2	8	óáborið gras												
2	8	áborið gras												
2	8	hey												
2	27	óáborið gras												
2	27	áborið gras												
2	34	óáborið gras												
2	34	greni												
2	34	fura												
2	34	birki												
2	34	reynir												
2	37	óáborið gras												
2	37	greni												
2	37	fura												
2	37	birki												
3	3	óáborið gras												
3	3	áborið gras												

