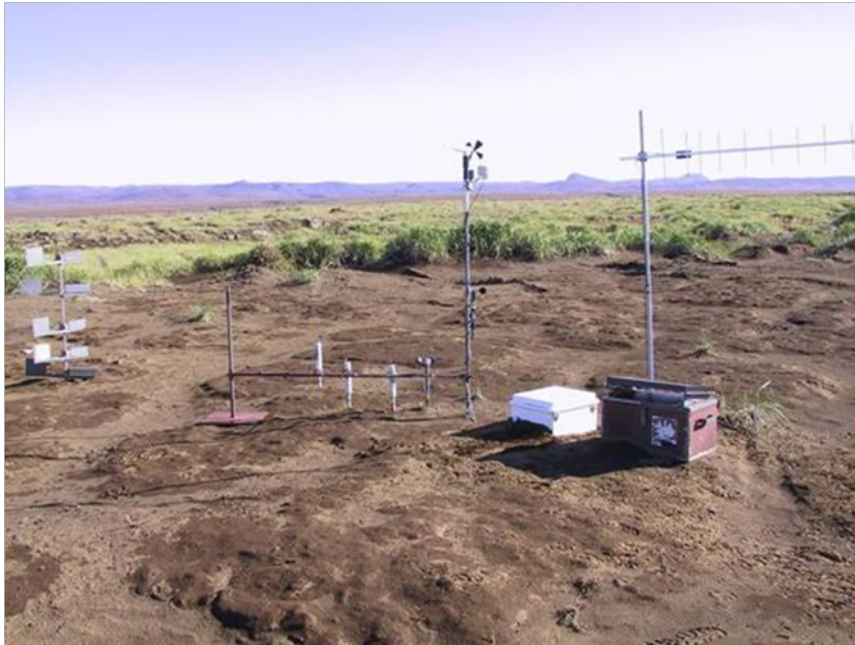


Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum

Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir



Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum

Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir

Desember 2009
Landbúnaðarháskóli Íslands, umhverfiseild
Gefið út í samstarfi við Landsvirkjun

Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum

Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir

FORMÁLI

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum mælinga á vindrofi á Hólsfjöllum, sem gerðar voru í tengslum við mat á hættu á vindrofi við jaðar Háslóns. Niðurstöður rannsóknanna hafa verið kynntar á fundum með starfsmönnum Landsvirkjunar, Stuðuls og Landgræðslu ríkisins, en drög að þessari skýrslu voru lögð fram síðla árs 2004. Þá var frumúrvinnsla þessara gagna einnig skýrð í grein á Fræðabingi landbúnaðarins 2009 (Ólafur Arnalds og Fanney Gísladóttir, 2009). Í skýrslunni eru unnið nánar út úr mælingunum á Hólsfjöllum og víðar og fengin mynd af því hve mikið magn lausra jarðvegsefna getur fokið í stormum á Íslandi.

1. INNGANGUR

Þegar Háslón fyllist lendir umtalsvert gróðurlendi undir vatni. Þetta svæði er að hluta vel gróið, einkum austanvert við lónið, og á svæðinu er víða 2-3 m þykkur jarðvegur. Hætta er talin á alvarlegu jarðvegsrofi frá jaðri Háslóns, m.a. ef jarðvegur sem er neðan efsta lónborðs en ofan vorstöðu vatnsins fýkur af stað (1. mynd). Einnig fellur til aurburður úr Jökulsá í botn lónsins og þá einnig á þau svæði sem standa upp úr fyrri hluta sumars. Magn aurburðar á ströndina hefur verið metið (VST, 2001) og verkfræðistofan Vatnaskil hefur unnið líkan fyrir aurburð og setmyndun í Háslón (Snorri Páll Kjara og Hjalti Sigurjónsson, 2005). Rannsóknastofnun landbúnaðarins (Rala) vann skýrslu um hættu á jarðvegsrofi frá jaðri Háslóns (Ólafur Arnalds og Fanney Gísladóttir, 2001) þar sem hættu á foki frá Háslóni var lýst. Á 1. mynd má sjá aðstæður við Háslón sumarið 2008, þar sem rofist hefur að hluta ofan í jarðveginn og laus fokefni sitja á yfirborðinu.



1. mynd. Aðstæður við Háslón 11. júlí 2008. Gróður neðan efsta lón borðs er tekinn að drepast og jarðvegurinn undir opnast smám saman. Einnig leggst aur yfir gróðurinn, sem eru gráu svæðin næst vatninu.

Við Jökulsá á Dal og Háslón eru afar merkileg skil í náttúru landsins þar sem samfelldar auðnir eru ríkjandi vestan lónsins (og Kringilsár) en samfelld gróðurlendi

austan hennar. Þar má heita samfelldur gróður frá láglandi að jökli, gróðurlendi sem mikilvægt er að varðveita. Þar sem mikið af lausu efni er til staðar á svæðum þar sem þurr vindur fylgir tilteknum vindáttum geta myndast áfoksgeirar sem eru tungu- laga sandsvæði sem byltast inn yfir gróið land (sjá Ólaf Arnalds o.fl., 1997). Eyðingarmáttur áfoksgeira er mjög mikill og þeir geta borist fram hundruð metra á ári í þurru og vindasömu árferði. Sandfok og myndun áfoksgeira hafa valdið hvað mestu um eyðingu gróðurlendis á Íslandi á umliðnum öldum, en ummerkin sást afar glögglega á gervihnattamyndum, m.a. á Rangárvöllum og Landsveit, Norðausturlandi, miðhálandinu (t.d. Eyvindarstaðaheiði) og víðar (sjá t.d. Ólaf Arnalds o.fl., 1997; Ólaf Arnalds og Fanney Gísladóttir, 2001). Þurrar áttir við Háslón eru m.a. suðvestlægar, inn yfir gróðurlendið austan árinna. Því er afar mikilvægt að koma í veg fyrir áfok jarðvegsefna og sets frá Háslóni á gróðurlendi austan lónsins. Í úrskurði umhverfísráðuneytis (2001) segir m.a.: „*Aðgerðir framkvæmdaraðila til að minnka jarðvegsrof og áfok úr Háslóni skulu miðast við að hvergi myndist áfoksgeirar meðfram jöðrum Háslóns í hönnunarstormi með 50-100 ára endurkomutíma.*“

Nýlegar rannsóknir sýna að vistkerfið við Háslón er afar viðkvæmt fyrir áfoki og þolir aðeins fárra sentímetra áfok (Harpa Einarsdóttir, 2007; Harpa Einarsdóttir o.fl., 2009), enda stendur það hátt (>625 m hæð). Gert er ráð fyrir að nota verkfræðilegar aðgerðir til þess að koma í veg fyrir alvarlegt vindrof, bæði til að minnka magn áfoksefna og til að stöðva áfok. Landsvirkjun hefur unnið að þróun á margvíslegum mótvægisáðgerðum og meðal mótvægisáðgerða sem þegar hafa verið framkvæmdar er hönnun og gröftur á skurði meðfram efstu stöðu lónsins, sem ætlað er að vera setgildra fyrir vindborin efni. Vegur með lónborðinu virkar einnig sem vörn og hækkar lónbakkann eftir því sem hann þróast, auk þess sem greið aðkoma er mikilvæg þurfi að grípa til frekari áðgerða (sjá Björn Jóhann Björnsson/Stuðull, 2004). Einnig hefur verið unnið að tilraunum með vökvun og rykbindingu neðan efsta lónborðs (Björn Jóhann Björnsson/Stuðull, 2004; Björn Jóhann Björnsson o.fl., 2007; Stuðull, 2008). Þá hefur verið unnið að tilraunum með að styrkja náttúrulegan gróður umhverfis lónið, til þess að minnka hættu á skaða, komi til óhappa (LbhÍ og L.r, 2010). Í úrskurði umhverfísráðuneytis (2001) er einnig fjallað um að stýra vatnssöfnun við virkjanir landsins með þeim hætti að Háslón fyllist sem fyrst til að minnka hættu á áfoki.

Til þess að hanna verkfræðilegar varnir þarf að fá sem skýrustu mynd af því hve mikið fokið frá lóninu getur orðið. Í umhverfismatsskýrslu Ólafs og Fanneyjar (2001) er gert ráð fyrir því að í stormum sem hafa >15 m sek⁻¹ vindhraða geti fok numið 500 kg m⁻¹ klst⁻¹, þ.e. að hálf tonn efnis fjúki yfir 1 m breiða línu á einni klukkustund. Með því að nota niðurstöður Ólafs og Fanneyjar, sem m.a. byggja á

mælingum á Mývatnssvæðinu og veðurmælingum á Kárahnúkum fyrstu 2 ár mælinga myndi fok frá Háslóni (miðað við engar mótvægisáðgerðir) vera 17-38 tonn m^{-1} á ári, eða 19 t á tímabilinu júní –júlí miðað við óhagstætt veðurfar. Í ljósi þessara niðurstaðna var ljóst að það er afar mikilvægt að fá sem gleggstar upplýsingar um verstu hugsanlegu rofatburði („worst case scenarios“). Þetta verkefni hefur Landsvirkjun nálgast frá nokkrum hliðum, m.a. með mælingum við náttúrulegar aðstæður, líkanareikningum og mati á atburðum sem hafa átt sér stað við Blöndulón. Einfalt roflíka verið notað til að meta hættuna út frá gefnum veðurfars-forsendum (Björn Jóhann Björnsson/Stuðull, 2004). Hjalti Sigurjónsson og Vatnaskil hafa unnið flóknari roflíkön fyrir svæðið (t.d. Hjalti Sigurjónsson, 2002,2003; Vatnaskil og Stuðull, 2006; Snorri Páll Kjarran o.fl., 2006; Snorri Páll Kjarran og Hjalti Sigurjónsson, 2007). Við Blöndulón hafa myndast áfoksgeirar sem hafa verið rannsakaðir (Björn Jóhann Björnsson/Stuðull, 2004; Olga Kolbrún Valdimarsdóttir, 2009; Olga Kolbrún Valdimarsdóttir o.fl., 2009). Niðurstöður þessara rannsókna hafa verið kynntar á fundum á vegum Landvirkjunar og hafa verið notaðar við mótun tillagna og hönnun mótvægisáðgerða vegna vindrofs við Háslón. Skúli Víkingsson (2007) dregur hins vegar í efa hættu á rofi við Háslón og byggir það ályktun á rannsóknum þar sem ætla má að svipaðar aðstæður komi fyrir í náttúru landsins án þess að til stórvandræða hafi komið.

Í þessari ritgerð segir frá rannsókn sem miðaði að því að mæla vindrof við náttúrulegar aðstæður á hálendi Íslands. Starfsmenn Rala (nú Landbúnaðarháskóli Íslands) starfræktu rofmælitæki á Hólsfjöllum í þrjú sumur (2002-2004) til að meta vindsrof við svipaðar aðstæður og gætu orðið við Háslón. Tilgangur mælinganna á Hólsfjöllum var að fá upplýsingar um tengsl vindhraða og jarðvegsfoks á moldasvæði með jarðveg sem hefur svipaða eiginleika og jarðvegur við Háslón. Jafnframt var heildarmagn fokefna metið yfir sumartímann við þær aðstæður sem ríktu á meðan mælingum stóð. Niðurstöðunum er ætlað að renna stoðum undir líkanareikning fyrir moldrok og til að finna út hve mikið getur fokið við mismunandi aðstæður við Háslón. Þessar upplýsingar eru mikilvægar forsendur til hönnunar á verkfræðilegum mótvægisáðgerðum við Háslón og hafa fræðilegt gildi fyrir fræði er lúta að vindrofi á Íslandi og á alþjóðlega vísu.

2. SANDFOK

2.1. Eðli vindrofs

Ástæða er til að áréttta hér að flutningur efna með vindrofi verður með þrenns konar hætti. Stærstu kornin skrýða með jörðu (skriðhreyfing, *creep*), en þau smæstu mynda svifefni (*suspension*) sem geta borist langar leiðir og mynda hinn kunnuglega mökk sem fylgir sandfoki, og mistur í lofti fjær upprunastaðnum. Þar á ferðinni leir og smærri siltefni. Þau korn sem eru stærri, en þó nógu smá til að takast á loft, mynda svokölluð stökk eða skokkefni (*saltation*). Skokkefni takast á loft, oft upp í 10-20 cm hæð, en skella síðan niður aftur og við áreksturinn losnar um fleiri jarðvegskorn: rofið stigmagnast undan rofáttinni; meginrofkrafturinn fylgir skokkefnunum. Korn sem skokka eða skokkhreyfast eru oftast sandkorn eða stærri siltkorn. Oft er talað um að korn sem ná 0,4-0,8 mm stærð séu of stór til að skokka, en slíkt er vitaskuld háð þáttum á borð við vindstyrk, eðlisþyngd korna og lögun þeirra. Þannig sýna tilraunir í vindgöngum að korn >2 mm fjúka á Íslandi í aftökum, ekki síst gjóska (Ólafur Arnalds, 1990; LbhÍ, óbirt gögn; Elín Fjóra Þórarinsdóttir, óbirt gögn). Sé kornastærðin hins vegar smá án stórra korna myndast tengikraftar á milli jarðvegskorna, sem kemur í veg fyrir fok. Það þarf hins vegar aðeins lítið eitt af sandkornum í annars fínu seti til að vindrof eigi sér stað, þ.e. sandkornin stugga við fína setinu við frekar lágan vindstyrk (sbr. fok frá aurasvæðum jökulvatna). Yfirleitt er meginhluti fokefna skokkefni, oft $>70\%$, en algengt að 10-30% fokefna séu svifefni, sem geta borist tugi kílómetra (Skidmore o.fl., 1994), jafnvel hundruð km á haf út frá Íslandi (Ólafur Arnalds og Sigmar Metúsalemsson, 2004). Hlutfall svifefna verður því hærra eftir því sem efnið er finna, t.d. þar sem er finn jökulleir.

Hugtakið *áfok* er yfirleitt notað um það þegar vindborið efni leggst aftur á jörðina, hvort heldur sem er gróið land eða auðn, óháð því hvort um er að ræða svifefni eða skokkefni. Áfok skokkefna er þó mun erfiðara vandamál með hliðsjón af gróður-eyðingu og valdur m.a. myndun áfoksgeira. *Uppfok* hefur verið notað um losun efna og gjarnan það efni sem veldur mistri, til aðgreiningar frá því efni sem veldur áfoki næst sandsvæðunum.

2.2. Mælingar á vindrofi og sandfoki

Mælingar á sandfoki á vettvangi eru oft erfiðleikum bundnar (sjá t.d. Stout, 1988; Zobeck o.fl., 2001), en hér á landi hefur þó tekist að safna umtalsverðum gögnum um fok, m.a. í tengslum við Háslóns-verkefnið. Til mælinga eru ýmist notaðar sérstakar gripgildir eða rafeindabúnaður sem gefur til kynna fok. Allmörg líkön

hafa verið þróuð til að meta sandfok, svo sem „the Wind Erosion Equation“ á vegum USDA (sjá Skidmore o.fl., 1994), líkön sem verkfræðingar beita (t.d. Shore Protection Manual, Stuðull, 2004; Zobeck o.fl., 2003). Eins og fyrr sagði hefur Hjalti Sigurjónsson og verkfræðistofan Vatnaskil þróað, staðfært og betrumbætt alþjóðleg módel fyrir vindrof (Saho o.fl., 1996) og niðurstöðurnar virðast gefa góða raun (Hjalti Sigurjónsson, 2002; 2003; Snorri Páll Kjaraan o.fl., 2006). Líkön til mats á vindrofi eru misflókin að því leiti að sum þeirra kalla eftir breytistærðum sem erfitt kann að afla, t.d. er varðar rakastig í jarðvegi og andrúmslofti, vatnsleiðni í jarðvegi, vatnsheldni og veðurfarsþætti.

Á undanförunum árum hefur LbhÍ (áður Rala) leitast við að byggja upp þekkingu og tækjabúnað til rannsókna á sandfoki og reynt að bæta skilning á eðli sandsvæða á Íslandi (Ólafur Arnalds o.fl., 2001; Fanney Gísladóttir o.fl., 2005). Unnin hafa verið tvö M.Sc. verkefni á þessu sviði (Fanney Ósk Gísladóttir, 2000; Hjalti Sigurjónsson, 2003) og fleiri eru nú á framkvæmdastigi (Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Ólafur Arnalds, 2009).

3. AÐFERÐIR

Mikilvægt var að reyna að finna aðstæður sem svipar til þeirra sem kunna að skapast við Háslón. Það er ekki auðvelt því lítið fok á sér stað austan Háslóns nú. Þó ber þess að geta að þar eru nokkur smá moldarsvæði með rofabörðum sem nú eru að gróa upp, en voru mun virkari þegar sauðfé var flest og árferði verra á árunum kringum 1980. Þessi svæði eru ekki nógu stór til að vera nothæf fyrir þær tilraunir sem hér greinir frá. Hólsfjöll urðu fyrir valinu því þar eru til staðar stór moldasvæði og veðurfarsaðstæður eru að mörgu leiti svipaðar á foktímabilum með þurrum suðvestan stormum. Auk þess fóru fram mælingar á foki í takmarkaðan tíma á Dyngju-sandi til samanburðar en þær gerði Jón Guðmundsson (LbhÍ/Rala).

Segja má að fjórum mismunandi aðferðum hafi verið beitt til að áætla magn fokefna á mælitímanum á Hólsfjöllum, með söfnun í gripgildrum í mismunandi hæði yfir jörðu, mæling með sjálfvirkum mælibúnaði, með söfnun í skriðgildrum og söfnun fokefna í skurð sem grafinn var á staðnum. Einar Grétarsson hafði umsjón með tækjunum, en Fanney Gísladóttir og Helgi Skúli Friðriksson komu einnig að gagnaöflun.

3.1. Rannsóknasvæðið á Hólsfjöllum

Hólsfjöll eru eitt helsta uppblásturssvæði landsins. Þar höfðu myndast stór moldasvæði á árunum kringum 1990. Út frá þeim gengu áfoksgeirar yfir gróið land með svipuðum hætti og gæti gerst við Háslón án mótvægisáðgerða. Svæðið allt var friðað árið 1992, en síðan hafa staðið miklar uppgræðsluframkvæmdir og stór hluti moldanna hafa verið græddar upp, en annars staðar er moldin alveg horfin og eftir standa klapparholt. Foksvæði sem valið var til rannsókna fannst eftir ábendingu frá Braga Benediktssyni, landgræðsluverði á Grímsstöðum, í ferð með honum, Birni Jóhanni Björnssyni og fleirum. Svæðið er staðsett nokkru norðan Grímstaða á Fjöllum, suðvestan við Krókavötn. Staðsetning er sýnd á 2. mynd. Einn helsti ókostur þessa svæðis er að það er bæði afskekkt og óaðgengilegt, og þangað er erfitt að rata nema fyrir kunnuga. Við reyndum að takmarka ferðir til að vitja um tækin vegna kostnaðar.

Moldarsvæðið var stækkað nokkuð í upphafi með traktorsgröfu og nokkrar gróður-torfur voru fjarlægðar sem olli nokkru raski í upphafi, sem m.a. kann að hafa haft áhrif á mælingar fyrsta árið.

Jarðvegur á Hólsfjöllum er tiltölulega grófur, en efni berast í hann bæði sem áfok (einkum frá aurasvæðum við Jökulsá á Fjöllum eftir stórflóð) og í gjóskugosum, en

einnig er stöðugt áfok yfir svæðið frá uppblásturssvæðum á Norðausturhálandinu, Möðrudalsöræfum og Mývatnsöræfum. Moldirnar á Hólsfjöllum minna því um margt á jarðveg við Háslón, en þó er mikilvægur mismunur þar á: við Háslón eru víða votlendi og víða gætir samlímingar í jarðveginum.

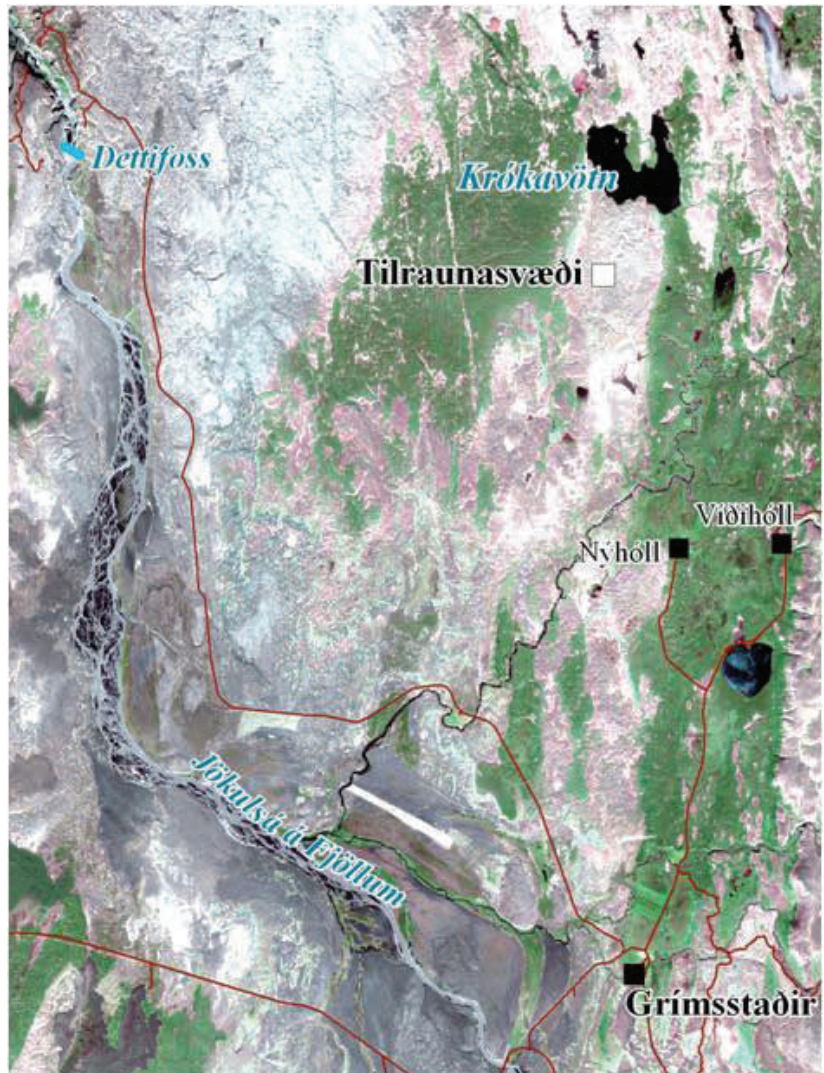
Fjöruborð Háslóns er í 625 m hæð, en tilraunasvæðið á Hólsfjöllum er í um 400 m hæð. Ætla má að frost fari úr jörðu og snjóa leysi mun síðar við Kárahnúka en á Hólsfjöllum, sem hefur áhrif á lengd tímabils sem fok getur átt sér stað.

3.2. Mælitæki

Fokstautar

Fokstautarnir eða svokölluð „Sensit“ tæki eru sjálfvirk mælitæki með svokölluðu „pizeo-electric“ efni sem gefur

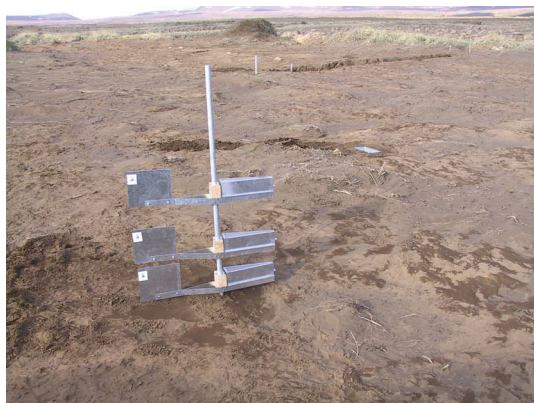
frá sér veikan rafpúls eða útslag þegar sandkorn skellur á efninu. Rafpúlsarnir eru magnaðir upp og þeim safnað. Fjöldi stautanna var mismunandi á mælitímabilunum. Árið 2002 voru þrjár stautar notaðir í 4, 8 og 28 cm yfir jörðu (3. mynd), m.a. til að meta dreifingu foks innan skokklags jarðvegsfoksins og ákvarða í hvaða hæð væri best að nota einn fokstaut í stað þriggja. Fækkun fokstauta í einn staut var vegna þess að það auðveldar mælinguna, m.a. með hliðsjón af notkun gagnastokks (datalogger) auk þess sem fáir fokstautar eru til á landinu). Árin 2003 og 2004 var einn stautur notaður í 8 cm hæð, en hann var staðsettur þar með hliðsjón af niðurstöðunum frá árinu 2002.



2. mynd. Tilraunasvæðið á Hólsfjöllum. Það er nokkra km sunnan Krókavatna sem eru á miklu uppblásturssvæði norðan Grímstaða á Fjöllum.



3. mynd. Fokstautar staðsettir í þremur hæðum á Hólsfjöllum 2002. Virka efnið eru málmþjöttur neðarlega á stautunum.



4. mynd. Gripgildrur í þremur hæðum. Vængir aftan á þeim snúa opum þeirra upp í vindinn. Það sést í holugildru á miðri myndinni og skurðinn efst til hægri.

Gripgildrur

Hannaðar hafa verið ýmsar gerðir af gripgildrum til að mæla sandfök. Sem dæmi má nefna túpur með holum sem safna kornum í fötur með sjálfvirkum nemum á vikt sem tengjast tölvu (sjá Bennet og Olyphant, 1998). Tæki þeirra er því eins konar sambland af gripgildrunum sem við notuðum (sjá hér aftar) og Sensit mælitækjunum, því þeir mæla hvenær fokið á sér stað (þynging í fötu tímasett) sem tengja má við mælingar á vindhraða. Af öðrum tegundum má nefna MWAC (Modified Wilson and Cooke samþekkingar; sjá Sterk og Spaan, 1997), Aberdeen - gildrur, Árósa – gildur og „wege-trap“ (sjá Rasmussen og Mikkelsen, 1998) og síðan BSNE (Fryrear) gildrunar sem notaðar eru í þessari rannsókn. Þær hafa náð nokkurri útbreiðslu, enda áreiðanlegar, auðveldar í notkun og þola erfiðar veðurfarsaðstæður. Gott yfirlit um ýmsar aðferðir við mælingar á vindrofi á vettvangi var m.a. birt af Zobeck o.fl. (1998) og í grein van Donk og Skidmore (2001).

BSNE gripgildrur (eða Fryrear gildrur; Fryrear, 1986) eru hannaðar með það markmið að gildrunar hafi sem minnst áhrif á vindflæði. Opnið er sem næst 10 cm² að flatarmáli, en fokefni setjast til í bakka neðst í gildrunum (4. mynd). Þær snúast á súlu þannig að op þeirra ber ávallt upp í vindinn. Fjöldi gildrana var breytileg tilraunaárin. Í upphafi var komið fyrir fimm gildrum (árið 2002) í 10, 30, 60, 100 og 150 cm hæð, síðan þremur gildrum (árið 2003) í 10, 30, og 60 cm hæð en árið 2004 voru gildrunar fjórar í 10, 20, 60 og 100 cm hæð. Súlurnar eru skrúfaðar ofan í bílfelgu sem grafin er niður í jörðina. Sýnt hefur verið fram á að gildrunar eru mjög árangursríkar við söfnun vindborins efnis (>90%) (Fryrear, 1986; Shao o.fl., 1993).

Holugildra

Komið var fyrir holugildru ofan í jörðina 2002, en þróaður hefur verið stuðull til að margfalda það sem í gildrunar fer til að reikna út heildarmagn rofs á sandsvæði sunnan Langjökuls (Fanney Gísladóttir, 2000). Holugildran er í raun fata sem grafin er ofan í jörðina, 26 x13,5 cm í þvermál, en á henni er lok með trekt svo korn sem fjúka ofan á fötuna lenda í trektinni og niður í fötuna.

Veðurmælingar – og söfnun stafrænna gagna

Vindhraði var mældur í 2 m hæð sem og vindátt. Þá var vindhraði numinn í 3 öðrum hæðum til að fá vindprófil fyrir svæðið (5. mynd). Gögnum um loftraka (2 m hæð), lofthita (2 m, og 60 cm) og jarðvegshita á 5 cm dýpi var jafnframt safnað.

Stafrænum gögnum var safnað í Campbell 21X gagnastokk árið 2002 en Campbell CR10 stokk árið 2003 og 2004. Spennu var haldið á kerfinu með straumi frá rafgeymi sem hlaðinn var með sólarrafhlöðu. Gögn voru send með símasambandi í tölvukerfi LbhÍ (Rala). Gildir voru tæmdar þegar sýnt þótti að umtalsvert fok hefði



5. mynd. Mælitækin á Hólsfjöllum. Lengst til vinstri eru 5 gripgildir en fyrir miðju eru þrjú fokstautar. Vindhraði er mældur í skálum í þremur hæðum en sá efsti (2 m hæð) mælir einnig vindátt. Þá er hiti mældur á 2 m hæð og í 60 cm hæð sem og rakastig í 2 m hæð og jarðvegshiti á 5 cm dýpi. Gögnum er safnað í gagnastokk í hvíta kassanum og nálgast mátti gögnin með símasambandi (loftnet).

átt sér stað. Það gerðu ýmist starfsmenn Rala eða Anna Bragadóttir frá Grímsstöðum á Fjöllum, þá starfsmaður L.r. á Austurlandi. Bragi Benediktsson, landgræðsluvörður, sem aðstoðaði við val á svæði, vitjaði einnig um tækin þegar sýnt þótti að bilun hefði átt sér stað. Tækin voru forrituð þannig að mælingar voru teknar á 30 min fresti ásamt skráningu á meðal- og hámarksvindhraða, en á einnar mínútu fresti á meðan fokatburður átti sér stað. Umtalsverðir byrjunarörðugleikar voru með símasamband, spenna á rafgeymi reyndist nokkuð ójöfn sem kom stundum í veg fyrir sjálfvirkar skráningar, auk þess sem erfiðleikar voru með forritun tækja í byrjun. Einnig kom fyrir að gildrur fylltust. Eigi að síður náðust mjög góðar samfelldar mælingar á mörgum tímabilum og gögn sem gefa vel til kynna fok og aðstæður fyrir þessu þrjú mælitímabil í heild.

Hafa verður í huga að meiri líkur eru á að mælingar með fokstautum misfarist en mælingar með gildrum, auk þess sem lárétt regn gæti einnig gefið púlsa (regnstormar). Mikilvægi stautanna felst fyrst og fremst í því að fá samhengi á milli vindhraða og fokmagns og til rannsókna á einstökum stormum. Vægi þeirra er mest við að meta hvað gerist í hvössum vindi (kúrfa fyrir fok). Gripgildrurnar kvarða fokstautana og gefa upplýsingar um heildarmagn fokefna.

Í upphafi tímabilsins var grafinn 10 m langur skurður, 1 m á breidd og 1 m djúpur til að kanna möguleika á virkni slíks skurðar til að safna foki og til samanburðar við niðurstöður mælitækjanna (sjá 6. mynd).

3.3. Mælingar og mælitímabil

Júní – nóvember 2002

Tækin voru sett upp um 10 júní en tekin niður í 26. nóvember. Þá náðust 4 tímabil fyrir gripgildrur sem spannaði allan tímann, en aðeins eitt tímabil fyrir Sensit mælitækin vegna síendurtekinna bilana og vandamála. Góð mæling náðist á heildarflæði á tímabilinu.

Júní–október 2003

Tækin voru sett upp 10. júní og tekin niður 6. október. Á þessu tímabili náðust 6 tímabil fyrir gripgildrur (safnað allan tímann) og 4 tímabil fyrir fokstauta. Nokkuð góð mæling náðist á heildarflæði efnis á þessu tímabili, en þau tímabil þar sem fokstautar virkuðu ekki voru stutt og lygn. Mælingar náðust í fokviðburðum allt að $16,5 \text{ m s}^{-1}$ miðað við 1 mín meðalvindhraða.

Júli–nóvember 2004

Tækin voru sett upp 22. júlí en tekin niður 2. nóvember. Þetta tímabil voru gildirur tæmdar fjórum sinnum, en fokviðburðir voru svipaðir og árið á undan.

3.4. Veðurfar á Hólsfjöllum á mælitímanum

Veðurmælingar með sjálvvirka búnaðinum á mælistaðnum voru ekki samfelldar fyrir öll mælitæki svo hér er birt meðaltöl frá Grímstöðum á Fjöllum í 1. töflu.

1. tafla. *Veðurfarsþættir á tilraunátímanum mældir á veðurstöðinni á Grímsstöðum á Fjöllum.*

| | | Hiti | | | Vindur | | Raki | Úrkoma |
|------|-----------|----------------|--------|-------|------------------------------|-------|----------|---------|
| | | hámark | lámurk | meðal | hámark | meðal | meðaltal | samtals |
| | | ----- °C ----- | | | ----- ms ⁻¹ ----- | | % | mm |
| 2002 | Júní | 19,8 | -1,5 | 9,2 | 19 | 6 | 76 | 36,4 |
| | Júlí | 18 | 0 | 10,4 | 15,4 | 5,3 | 76,4 | 59 |
| | Ágúst | 21,4 | -2,5 | 10,1 | 19 | 4,9 | 78,3 | 60,7 |
| | September | 22,5 | -3,4 | 9,4 | 26,8 | 4,9 | 77,1 | 24,8 |
| | Október | 13,6 | -19,2 | 1,5 | 19 | 6,6 | 84 | 45,8 |
| 2003 | Júní | 21,1 | 0,2 | 10,2 | 15,4 | 6,2 | 75,8 | 40,6 |
| | Júlí | 24,5 | 1,7 | 11,9 | 22,7 | 5,1 | 75,7 | 45,2 |
| | Ágúst | 21 | -1 | 13,2 | 15,4 | 4,8 | 71,9 | 20,8 |
| | September | 16,5 | -8,9 | 6,2 | 22,7 | 7,2 | 88,4 | 29 |
| | Október | 11,6 | -10,7 | 0,4 | 22,7 | 5,5 | 86,5 | 25,9 |
| 2004 | Júní | 18,6 | -1,7 | 9,4 | 15,4 | 5,7 | 66,9 | 15,1 |
| | Júlí | 23,9 | -0,8 | 12 | 22,7 | 5,3 | 67,6 | 36,2 |
| | Ágúst | 27 | -0,6 | 12,7 | 15,4 | 5,2 | 67,6 | 8,1 |
| | September | 14,5 | -5,3 | 7 | 26,8 | 6,1 | 79,5 | 57,7 |
| | Október | 12,6 | -12,2 | 0,9 | 22,7 | 6,8 | 86,6 | 24 |

Engir verulegir stormar sem geta talist til „hönnunarstorma“ við Kárahnúka (>20 m s⁻¹) geisðu á mælitímabilunum, en mælingar fengust á allt að 14 m s⁻¹ vindi (10 min meðalvindhraði) en þó í öflugri hviðum (allt að 16 m s⁻¹) (sjá einnig yfirlit um storma í 5. töflu). Árið 2004 gerði öflugur stormur á Grímsstöðum á Fjöllum (>20 m s⁻¹) en slíkur vindhraði mældist ekki á tilraunasvæðinu á sama tíma. Það er staðsett fjarri fjöllum og vindur virðist vera þar mun minni í suðvestan stormum en á Grímsstöðum.



6. mynd. Skurður til að mæla flæði sandfoksefna á Hólsfjöllum, 6 m langur, 1 m á dýpt og 1 m á breidd.

4. NIÐURSTÖÐUR

4.1. Gripgildirur - söfnun

Niðurstöður söfnunar í gildirur er sýndi í 2. töflu.

2. tafla. Efnismagn í gripgildrum á söfnunartímanum.

| Dagsetning | 10 cm | 30 cm | 60 cm | 100 cm | 150 cm |
|-----------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| | -----g----- | | | | |
| 20.07.2002 | 32,4 | 6,5 | 4 | 2,9 | 1,6 |
| 19.8.2002 | 111,4 | 29,2 | 14,8 | 9,5 | 4,4 |
| 9.9.2002 | 196,8 | 39,6 | 40 | 28,6 | 9,5 |
| 26.11.2002 | 447 (f)* | 108,5 | 57 | 42,7 | 17,8 |
| Samtals 2002 | 788 | 184 | 115 | 84 | 44 |
| 15.7.2003 | 641 (f?) | 221 | 82,2 | | |
| 3.8.2003 | 132 | 45 | 11,4 | | |
| 28.8.2003 | 152 | 60 | | | |
| 29.8.2003 | 78 | 26 | 25,8 | | |
| 6.10.2003 | 634 (f?) | 352 | 83,5 | | |
| Samtals 2003 | 1637 | 704 | 227 | | |
| 28.7.2004 | 330 | 105,4 | 25,05 | 5,62 | |
| 7.8.2004 | 388,7 | 140,3 | 63,8 | 38,2 | |
| 9.9.2004 | 165,2 | 62,4 | 31,1 | 17 | |
| 2.11.2004 | 71,3 | 20,8 | 3,7 | 0,6 | |
| Samtals 2004 | 955 | 329 | 124 | 62 | |
| Samtals 3 ár | 2425 | 888 | 343 | | |
| Meðaltal[†] | 302,7 | 98,6 | 39,8 | 21 | 8,3 |

&: f merkir að gildran var full. Ekki er alltaf hægt að skera úr um það, en þó talið líklegt.

‡: Mislöng tímabil og mismargar mismargar mælingar á bak við hvert meðaltal.

€: Áætlað gildi út frá hlutföllum á milli gilda. Sjá texta.

Það safnast eðlilega mest í neðstu gildruna sem er í 10 cm hæð yfir jörðu (A) sem er í skokkhæð (*saltation*) fokefnanna. Eins og sjá má á töflunni eru tímabilin afar misjöfn að því leiti hve rofið er mikið. Hæstu gildi fyrir neðstu gildruna eru 447 g (26 okt. 2002), og > 600 g (15 júlí og 6. nóv. 2003). Fullvíst er að í þessum mælingum frá 2003 hafi neðsta gildran verið full, en einnig líklega í mælingunni frá 2002 sem gaf 447 g. Í mörgum tilfellum er afar lítið í efstu gildrunum. Fjallað er ítarlegar um efnisdreifingu eftir hæð hér á eftir.

Fok er fremur lítið 2002 nema í október og nóvember, en þá fylltist neðsta gildran (A). Vindrof var umtalsvert bæði vor og haustið 2003. Athygli vekur að daganna

28-29/8 2003 náðist einn stormur í gripgildrum en þá voru gildrurnar tæmdar tvo daga í röð því verið að reyna að laga rafrænan hluta búnaðarins (Sensit fokstautanna, gagnastokk og spennugjafa). Um leið var töluverður þurr vindur af suðri. Fok er almennt minna á Hólsfjöllum 2004, en þó kom tímabil í júlí þar sem fauk verulega samkvæmt veðurmælingum á Grímsstöðum, en það skilaði sér ekki vel á mæli- staðnum, sem sýndi mun lægri vindstyrk en var á Grímsstöðum.

4.2. Útreikningur á fokmagni út frá gripgildrum

Hæðardreifing

Sandur hreyfist á þrenns konar hátt undan vindi eins og áður gat um: skrið (*creep*), skokk (*saltation*) og svif (*suspension*) eins og áður var vikið að. Skokkið er mikil- virkast, en misjafnt er hve hátt það nær. Yfirleitt er miðað við 25-30 cm hæð, en síðan verður svif æ stærri hluti foksins en hlutur skokks lækkar ört. Stærstu kornin skriða og geta numið nokkrum prósentum fokefna. Við útreikning á dreifingu fok- efna (fok-kúrfa) eftir hæð var mælingu á magni hvers storms í neðstu gildrunni gefið vægið 100 og vægi efna í öðrum gildrum reiknuð með hliðsjón af því, eins og sýnt er í 3. töflu.

3. tafla. *Meðaltalsdreifing korna í gildrum eftir hæð, þar sem magni sem safnast í neðstu gildruna (10 cm hæð er gefið gildið 100). Aðrar tölur eru hlutfallstölur í % miðað við neðstu gildruna.*

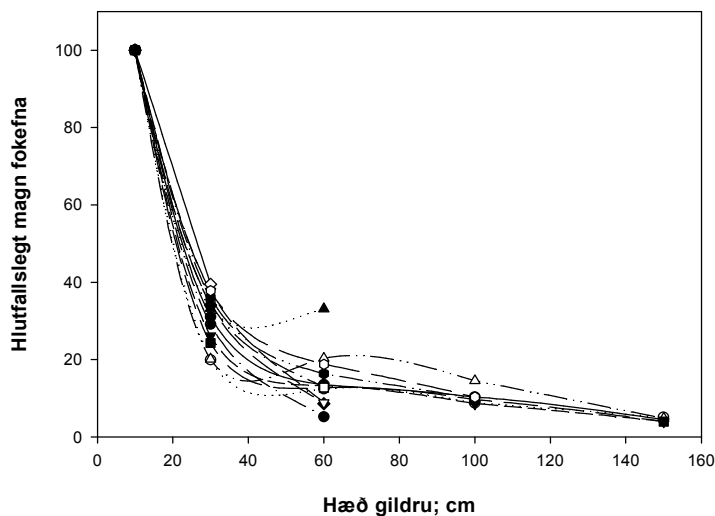
| Dagsetning | 10 cm | 30 cm | 60 cm | 100 cm | 150 cm |
|---------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | ----- g ----- | | | | |
| 20.7.2002 | 100 | 19,9 L | 12,4 LL | 8,8 LL | 5,1 LL |
| 19.8.2002 | 100 | 26,2 | 13,2 | 8,6 L | 4,0 LL |
| 9.9.2002 | 100 | 20,1 | 20,3 | 14,5 | 4,8 L |
| 26.11.2002 | 100 | 24,3 | 12,7 | 9,6 | 4 |
| 15.7.2003 | 100f? | 34,5 | 12,8 | | |
| 3.8.2003 | 100 | 34,1 | 8,6 | | |
| 28.8.2003 | 100 | 39,5 | | | |
| 29.8.2003 | 100 | 33,3 | 33,1 | | |
| 6.10.2003 | 100f? | 37,7 | 8,9 | | |
| 28.7.2004 | ekki reiknað | | | | |
| 7.8.2004 | 100 | 36,1 | 16,4 | 9,8 | |
| 9.9.2004 | 100 | 37,8 | 18,8 | 10,3 | |
| 2.11.2004 | 100 | 29,1 | 5,2 LL | 0,9 LLL | |
| Meðaltalsdreifing# | 100 | 31,1 | 13,5 | 10,3 | 4,5 |

L: magn í gildru < 10 g. LL: magn í gildru < 5 g. LLL: magn í gildru < 1 g

&: ekki notað því mæling í neðstu gildru misheppnaðist. Gildi fyrir það tímabil í öðrum útreik- ningum reiknað út frá meðalhlutföllum milli neðstu og næst neðstu gildru.

Telja má að dreifing fokefna eftir hæð eins og hún kemur fram í 3. töflu sé fremur jöfn, er haft er í huga við hve margvíslegar veðuraðstæður fokið á sér stað. Það vekur sérstaka athygli að dreifingin á milli neðstu (A-gildru, 10 cm hæð) og næst neðstu gildru (B-gildru, 30 cm hæð) er afar jöfn 2003 og 2004, en heldur lægra hlutfall fæst að meðaltali 2002. Skýringin á þeim mun er hugsanlega sú að það ár var umhverfi mælistaðarins raskað með gröfu til að fá stærra foksvæði. Athygli vekur ennfremur hve hlutfall á milli efstu gildru árið 2002 (E; 150 cm hæð) og þeirrar neðstu er jafnt, um 4,5% af þeirri neðstu. Frávik eru mun meiri þegar kemur að gildrunum í 60 og 100 cm hæð, (B og C gildirur) og þá sérstaklega í 60 cm hæð. Ástæða þessa er væntanlega að leita í mismunandi aðstæðum við fokið og eðli einstakra storma á hverju tímabili fyrir sig, en hugsanlega á hæsta talan (33,1%) að dreifast á tvö tímabil og þá verður hlutfallið um 15% fyrir bæði tímabilin, sem minnkar mjög breytileikann fyrir 60 cm hæðina. Fjallað er nánar um stormanna í umfjöllun um niðurstöður mælinga með fokstautunum.

Í neðsta dálki töflunnar er sýnd meðaldreifing foksins eftir hæð, og er þá stuðst við meðaltal hlutfallstalna í töflunni hér að ofan (þ.e. ekki meðaltal þyngdar þar sem stærri atburðir fengju meira vægi). Mælingu í efstu gildru 2 nóvember er sleppt í útreikningi (< 1 g í gildru).



7. mynd. Dreifing fokefna eftir hæð, allar mælingar í þrjú ár. Hæð gildra er sýnd á x-ásinum en fokmagn á y-ásinum, þar sem efnismagn í neðstu gildrunni er gefið gildið 100. x-ásinn gefur þá til kynna % efnis miðað við neðstu gildruna sem staðsett var í 10 cm hæð. Tólf mælitímabil eru á bak við tölur fyrir þrjár neðstu gildrurnar (10, 30 og 60 cm hæð), en færri fyrir 100 og 120 cm (sjá 3. töflu).

Á 7. mynd sést að hlutfall magns í gildrunum eftir hæð helst mjög svipuð, en sem áður sagði er breytileikinn hvað mestur í 60 cm hæð. Kúrfan fellur ört með hæð næst yfirborðinu sem sýnir vel eðli vindrofs þar sem skokkhæðin er ráðandi. Athygli vekur lítill munur á magni efna í 60 og 100 cm hæð. Þessi dreifing er notuð hér á eftir við útreikninga á fokefnum í kg efnis sem fýkur yfir 1 m breiða línu (kg m^{-1}). Meðaltalskúrfa er sýnd á 8. mynd.

Fokmagn mælt með gripgildrum

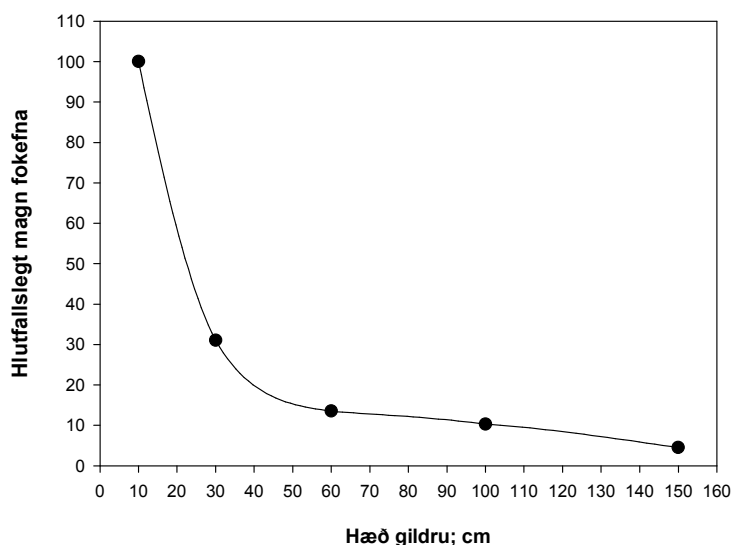
Ekki er nein einhlít leið til að reikna upp úr tölum sem gripgildrurnar (BSNE - Fryrear) gefa. Hægt er að nota kúrfuna á 8. mynd eða viðkomandi kúrfu fyrir hvern storm fyrir sig (7. mynd) og heilda fokmagnið út frá kúrfunum. Þá þarf einnig að ákvarða hvort einvörðungu sé tekið tillit til skokks eða hvort svifið sé einnig talið. Van Donk og Skidmore (2001) lýsa hvernig unnt er að nota nákvæma hæðadreifingu til að reikna veldisfallandi kúrfu á forminu:

$$q(z) = a(z + 1)^b \quad q(z) = \text{flæði (kg m}^{-2}\text{); } z \text{ er hæð gildru í cm}$$

sem síðan er heilduð. Þessi aðferð miðar vitaskuld við kúrfan sé ekki mjög „dyntótt“ á því bili þar sem hún er viðkvæmust, þ.e. neðst þar sem fýkur mest magn. Það á við á Hólsfjöllum eins og vikið er að hér neðar.

Rétt er að geta þess að sambærilegar kúrfur í erlendum rannsóknum (sjá t.d. Zobeck o.fl., 2003; van Donk og Skidmore, 2001) eru nær undantekningarlaust mun krappari, jafnvel með takmarkað efnisflæði ofan 20 cm hæðar. Mun brattari kúrfa myndi leiða til þess að kúrfan færi langt upp fyrir 100 fyrir bilið neðan 10 cm, jafnvel upp í 200. Ef svo væri hefði það verulega mikil áhrif á útreikninga á heildarfoki.

Ástæða þess að framlengjum ekki kúrfuna niður fyrir 10 cm hæð byggir á mælingum með þremur nemum á Hólsfjöllum 2002. Notaðar voru þrjár hæðir fyrir nemanna: 4, 8 og 28 cm hæð. Stautur í 8 cm hæð gaf mest fok, en sá er var í 28 cm gaf



8. mynd. Meðaltalsdreifing fokefna í gildum, meðaltal allra mælinga öll þrjú árin. Þessi kúrfa er notuð til að áætla fokmagn einstakra hæðarbila fyrir hvert tímabil, sem síðan er lagt saman til að fá heildarmagn fokefna.

að meðaltali um 80% af útslagi 8 cm stautsins, en sá í 4 cm hæð gaf 85-90% af útslagi 8 cm stautsins. Þetta gefur nokkra hugmynd um dreifingu fokefnanna. Þessi munur á milli íslensku mælinganna og þeirra erlendu (og útreikninga úr líkönum) er allrar athygli verður. Ástæða fyrir þessu liggur líklega m.a. í kornastærðardreifingu og samkornun (fín moldar efni með litla samloðun í

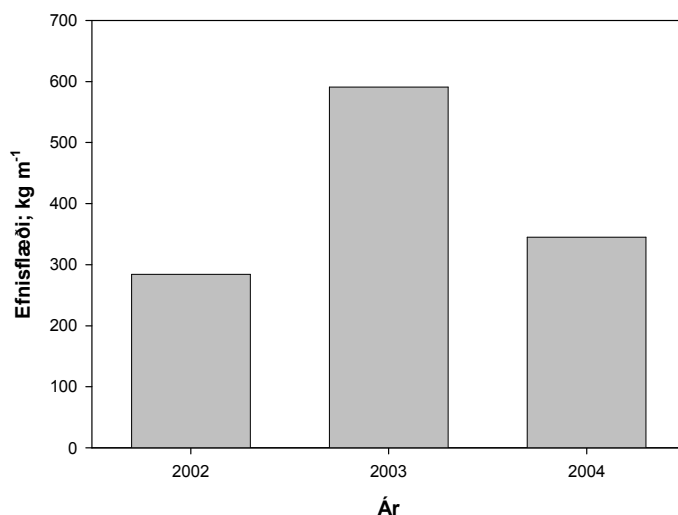
eldfjallajörð) og mikið af silti og finsandi sem eru samkorn smærri efna, sem einnig er einkennandi fyrir eldfjallajörð (sjá t.d. Dahlgren o.fl., 2004).

Við völdum einfalda leið sem byggir á því að nýta útreiknaða meðaltalskúrfu (8. mynd) og skipta foklaginu í 0-160 cm hæð í 8 bil, 10 cm bil neðst upp að 60 cm hæð en síðan tvö stærri bil frá 60 cm að 160 cm hæð (sjá 4. töflu). Síðan er fokmagn fyrir hvert þessara bila reiknað sem hlutfall af því magni sem fer í neðstu gildruna. Magnið er margfaldað upp út frá 10 cm² opi gildranna og hvert hæðarbil fyrir sig fyrir eins metra breiða línu og tölur þannig reiknaðar frá magni efnis efnis í neðstu gildrunni yfir í kg m⁻¹ fyrir hvert hæðarbil (margföldun með stuðli sem er reiknaður út frá kúrfunni). Síðan eru öll hæðarbilin lögð saman til að fá heildarfok. Hæðarbilin og stuðlarnir eru gefnir í 4. töflu, sem og niðurstöður útreikninga fyrir grip-gildrunar. Notaður er stuðullinn 0,9 fyrir neðsta bilið (þ.e. 90% af virkni gildrunnar í 10 cm hæð) og byggir það á því að kúrfan lækkar hratt frá 10 cm og áður nefndum niðurstöðum fokstauta þar sem stautur í 4 cm sýnir minna fok en sá sem er í 8 cm. Breyting á þessum stuðli um t.d. 5% breyting (í 85%) hefur þó ekki mikil áhrif á útreikninga á heildarflæði (1,4% lækkun á útreiknuðu heildarflæði).

4. tafla. *Vindrof á Hólsfjöllum 2002-2004. Hvert hæðarbil fær stuðul sem fengið er af grafinu hér fyrir ofan. Þessi stuðull er notaður til að margfalda fokmagn í neðstu gildru reiknað yfir í 10 cm hæðarbil og 1 m breiða línu (kg m⁻¹). Taflan sýnir fokmagn í hverju hæðarbili og samtals fyrir hvert einstakt söfnunartímabil.*

| Hæðarbil | | 2002 | | | | 2003 | | | | | 2004 | | | |
|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| cm | Stuðull | ----- kg m ⁻¹ ----- | | | | | | | | | | | | |
| 0-10 | 0,9 | 3 | 10 | 18 | 40 | 58 | 12 | 14 | 7 | 57 | 30 | 35 | 15 | 6 |
| 10-20 | 0,77 | 2 | 9 | 15 | 34 | 49 | 10 | 12 | 6 | 49 | 25 | 30 | 13 | 5 |
| 20-30 | 0,42 | 1 | 5 | 8 | 19 | 27 | 6 | 6 | 3 | 27 | 14 | 16 | 7 | 3 |
| 30-40 | 0,23 | 1 | 3 | 6 | 14 | 15 | 3 | 3 | 2 | 15 | 8 | 9 | 4 | 2 |
| 40-50 | 0,18 | 1 | 2 | 4 | 9 | 13 | 3 | 3 | 2 | 13 | 7 | 8 | 3 | 1 |
| 50-60 | 0,15 | 1 | 2 | 3 | 7 | 10 | 2 | 2 | 1 | 10 | 5 | 6 | 2 | 1 |
| 60-100 | 0,13 ^{&} | 2 | 6 | 10 | 23 | 33 | 7 | 8 | 4 | 33 | 17 | 20 | 9 | 4 |
| 100-160 | 0,07 ^{&} | 1 | 5 | 8 | 19 | 27 | 6 | 6 | 3 | 27 | 14 | 16 | 7 | 3 |
| Samtals | | 12 | 40 | 71 | 161 | 231 | 48 | 55 | 28 | 229 | 119 | 140 | 60 | 26 |
| Samtals hvert ár | | 284 | | | | 591 | | | | | 345 | | | |

&: stuðull er síðan margfaldaður með hæðarbili (4 og 6 fyrir tvær neðstu hæðirnar).



Samtals fuku 284 kg yfir hvern metra árið 2002, 591 kg yfir hvern m árið 2003, en 345 kg m⁻¹ sumarið 2004, samtals 1220 kg m⁻¹ öll árin. Þessar niðurstöður gefa góða hugmynd um efnisflæði á moldum á Hólsfjöllum í meðalári. Breytileiki milli ára er í raun ekki mikill, eins og sést á meðfylgjandi grafi.

9. mynd. Efnisflæði á Hólsfjöllum 2002-2004.

4.3. Rofstautar

Helstu stormar

Niðurstöður með Sensit rofstautum og öðrum mælitækjum gefa glögga mynd af þeim veðurfarsaðstæðum sem ríkja þegar vindrof verður á mælistaðnum á Hólsfjöllum.

Árið 2002 voru þrjár Sensit rofstautar notaðir á Hólsfjöllum í 4, 8 og 28 cm hæð. Árin 2003 og 2004 var 1 stautur notaður í 10 cm hæð. Þegar þrjár stautar voru notaðir gaf stautur í 8 cm hæð mest fok, en sá er var í 28 cm gaf að meðaltali um 53-80% af útslagi 8 cm stautsins og er lægsta talan frá tímabili þegar Sensit stautarnir voru að virka vel, en þeir áttu það til að sýna eyður eða aðra galla í gagnasettinu. Stauturinn í 4 cm hæð gaf 70-90% af útslagi 8 cm stautsins, 71% í því sem við teljum áreiðanlegasta mælingin. Hér er aðeins tekið tillit til gagna í veðuratburðum. Gripgildirur í 30 cm hæð gáfu að meðaltali 32,5% efnis miðað við efnismagn í 10 cm hæð og hér er um að ræða nokkurn mun á milli aðferða (33 vs 53%). Þessi munur kann að stafa að minni kornum sem fjúka ofar (minna magn en svipaður fjöldi korna), en getur einnig stafað af mismun á milli stauta og forritun skráningar frá þeim. Niðurstöður fokstautanna var þó höfð til hliðsjónar við ákvörðun á stuðlum fyrir neðstu bilin við útreikning á niðurstöðum fyrir fokgildirur.

Við úrvinnslu á gögnum fyrir Sensit fokstauta voru valin tímabil þegar var sæmilega samfellt fok, samtals 11 stormar sem gerð er grein fyrir í 5. töflu.

5. tafla. Yfirlit yfir storma sem notaðir voru við úrvinnslu á gögnum sem aflað var með fok-stautum.

| Stormur nr | Dagsetning min | Tímabil kl | Hitabil °C | Raki % | Hámarksmeðalv. & m s ⁻¹ | Mesta hviða & | |
|------------|----------------|------------|---------------|-------------|------------------------------------|---------------|--------|
| 1 | 333 | 26.06.2003 | 08:30 – 15:39 | 13,3 – 16,4 | 58 – 70 | 13,3 | 15,4 |
| 2 | 472 | 27.06.2003 | 05:00 – 16:59 | 11,9 – 18,1 | 51 – 77 | 13,0 | 15,2 |
| 3 | 58 | 04.09.2003 | 15:04 – 16:59 | 14,0 – 15,0 | 42 – 46 | 13,5 | Vantar |
| 4 | 102 | 17.09.2003 | 9:37 – 13:12 | 2,0 – 3,5 | 60 – 64 | 15,5 | Vantar |
| 5 | 216 | 20.09.2003 | 11:04 – 15:51 | 4,9 – 7,2 | 41 – 43 | 14,8 | 16,4 |
| 6 | 54 | 20.09.2003 | 17:02 – 18:20 | 6,8 – 10,0 | 38 – 40 | 12,5 | 14,4 |
| 7 | 409 | 21.09.2003 | 12:03 – 19:23 | -0,7 – 1,3 | 62 – 64 | 15,0 | 16,5 |
| 8 | 70 | 22.09.2003 | 00:19 – 01:59 | -2,1 – -1,8 | 64 – 62 | 11,2 | 12,2 |
| 9 | 82 | 30.07.2004 | 10:11 – 14:01 | 14,1 – 16,0 | 38 – 41 | 12,8 | 13,8 |
| 10 | 158 | 31.07.2004 | 08:31 – 12:38 | 13,6 – 15,6 | 24 – 36 | 13,2 | 14,6 |
| 11 | 227 | 31.07.2004 | 13:27 – 18:39 | 14,9 – 16,4 | 22 – 27 | 12,9 | 14,5 |

&: hámarksmeðalvindur á mínútu í storminum og mesta hviða mæld í storminum.

Mesta hviða nemur aðeins 16,5 m s⁻¹, sem er verulega lægra heldur en mælingar Grímsstöðum gefa til kynna (sjá 1. töflu). Hitastig er allt frá 2 stiga frosti til 18 stiga hita í þessum stormum. Lengd stormanna er afar misjöfn, allt frá 54 til 472 mínútur.

Þröskuldsvindhraði, þegar fok hefst er alla jafna á milli 9 og 10 m s⁻¹ og yfirleitt nálægt 10 m s⁻¹ miðað við vindhraða mældan í 2 m hæð og 1 mínútu meðaltal, með einni undantekningu (stormur 8; september 2003), en þá var frost og þröskuldsvindhraði mun lægri í stuttum stormi, eins og síðar verður rætt. Ákvörðun á þröskuldsvindhraða er nokkuð háð tímalengd sem miðað er við, og fer hækkandi með minni tíma (Stout, 1998), sem er rétt að hafa í huga. Hér er miðað við 60 s mælingu. Gröf sem sýna hvern þessara storma fyrir sig eru á 10. mynd (stormar 1-11), en y-ásinn er takmarkaður við 2 sensit-púlva á mínútu (lægsta gildi á gröfunum). Sensit púlvar eru alla jafna ekki fleiri en 40-80 í stormum og oft mun færri í styttri stormum. Flestir sensit púlvar mældust í stormi 7, allt að 180 púlvar á mínútu. Yfirfærsla á púlsum í fok (kg m⁻¹ klst⁻¹) er rædd síðar.

Mjög er misjafnt hvernig einstakir stormar birtast í gögnunum, eftir aðstæðum hverju sinni. Stormur 1 varir 333 mínútur en gefur fremur þrönga dreifingu þrátt fyrir langan tíma, þar sem flestir punktar eru þó við fremur lítinn vindstyrk. Svipaða sögu má segja um storm 11. Stormur 2 hefur fremur lítinn vindstyrk með fá há gildi, sem og hinir stuttu stormar nr. 3 og 4. Stormur 7 hefur há Senist gildi (mikið fok) en dreifingin er afar breið, sem gefur til kynna breytilegar aðstæður á meðan storminum stendur, en á þessum tíma er frysta. Rakaskilyrði geta breyst á meðan fokið stendur

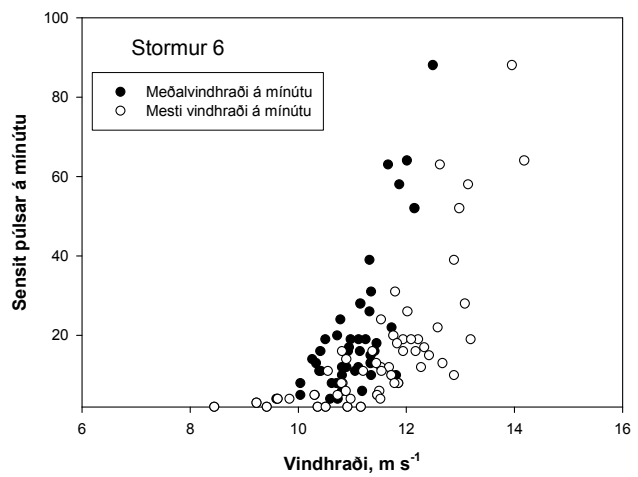
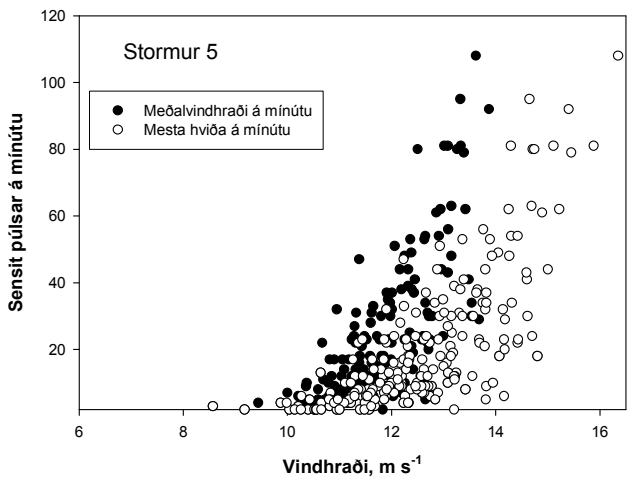
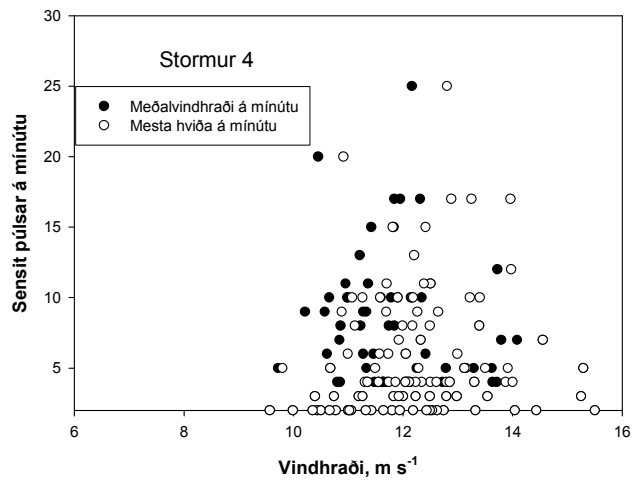
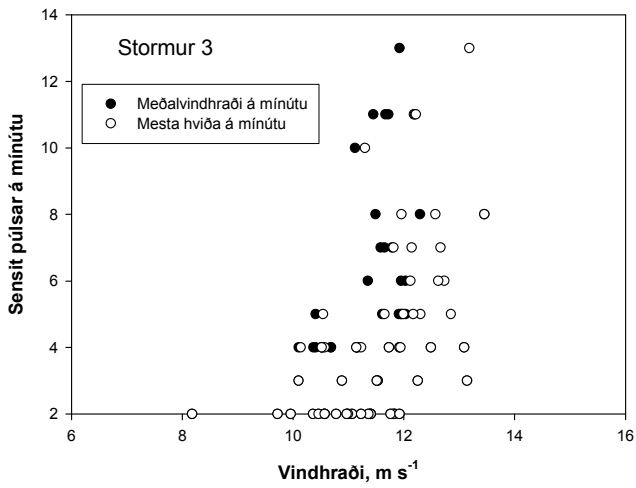
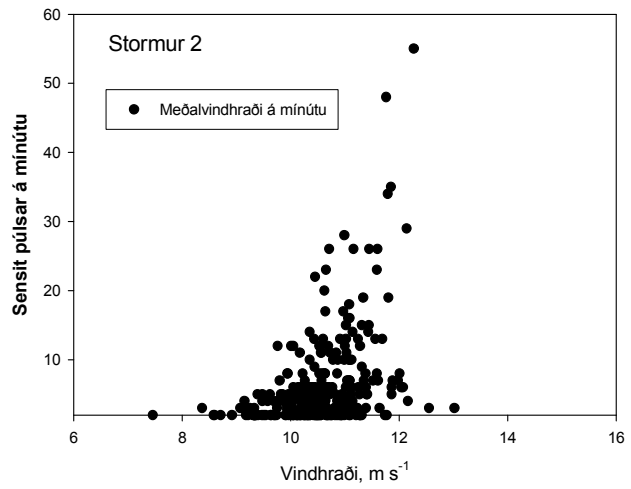
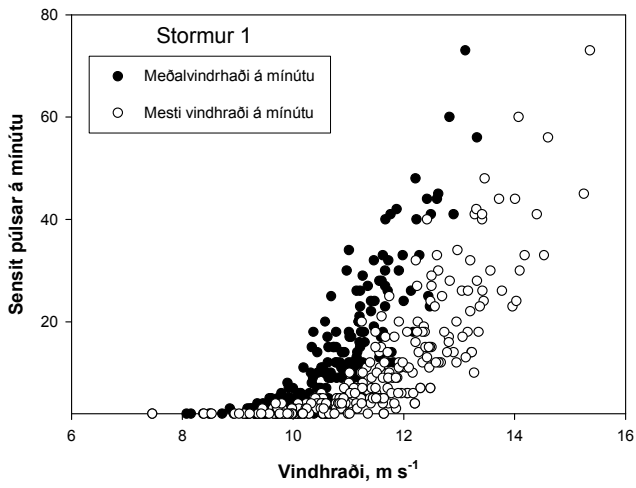
yfir, og við það getur fokið aukist (ef þornar á) eða minnkað (ef blotnar) þótt vindstyrkur haldist svipaður og því hafa mörg grafanna breiða dreifingu.

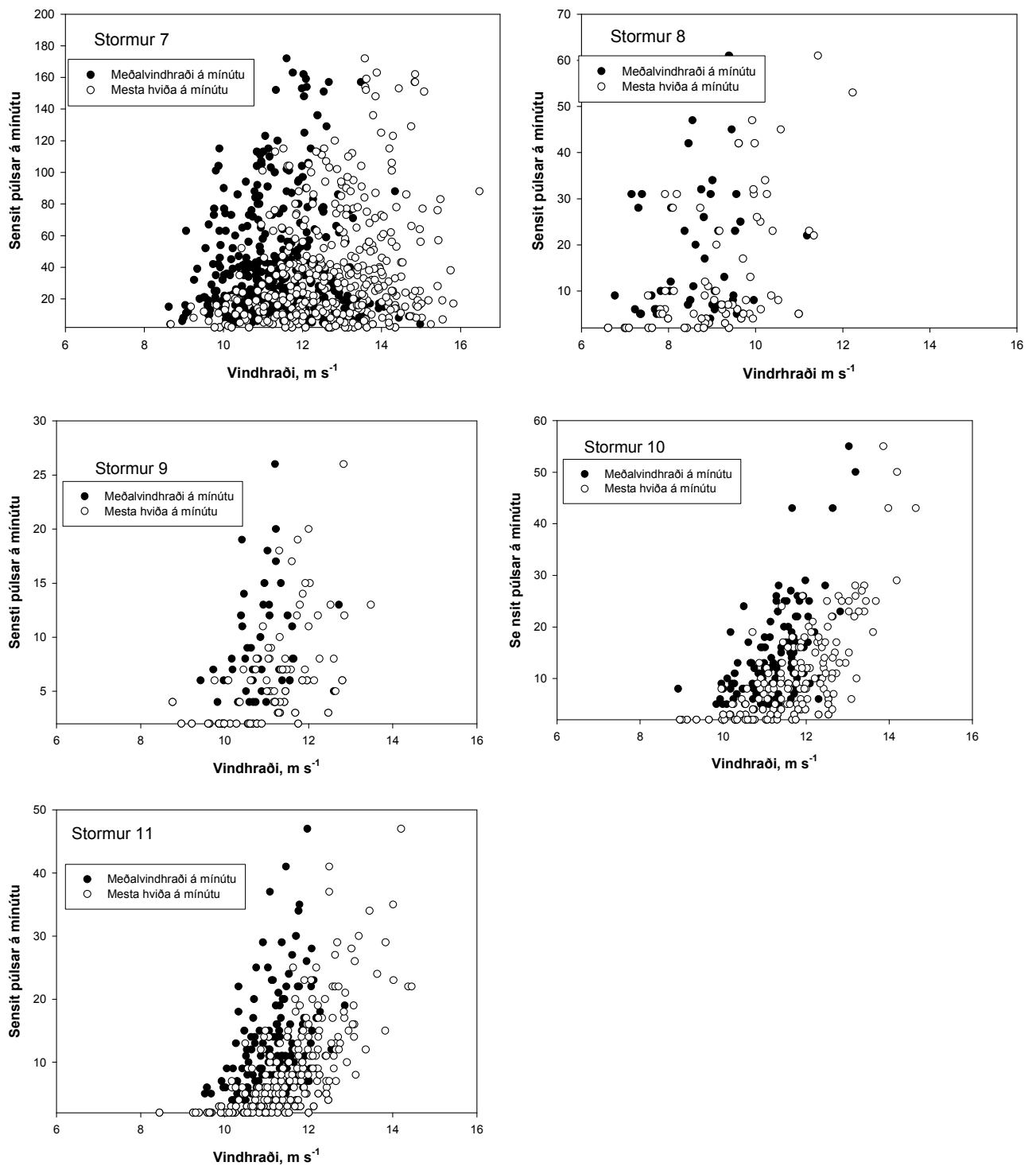
Reiknuð var fylgni á milli meðalvindhraða (1 mín) og foks (Sensit púlsa) og einnig fylgni foks við mestu hviðu hveirrar mínútu. Niðurstöðurnar voru afar misjafnar en r^2 var á bilinu 0,2 til 0,78 (stormur 1), eftir því hve dreifing stormanna var jöfn. Stormur 4 gaf enga fylgni við vindhraða. Yfirleitt fékkst betri fylgni með því að nota mesta vindhraða þegar fylgnitala var á annað borð $> 0,5$. Niðurstöður þessara fylgnigreininga (sem gáfu marktæka fylgni og $r^2 > 0,5$) var notuð til að reikna hugsanlegt fok í þessum stormum allt að 20 m s^{-1} eins og sýnt verður síðar.

Kvörðun rofstauta

Æskilegt er að geta yfirfært gögn úr fokstautum (Sensit púlsar) yfir í flæðitölur, kg m^{-1} . Hver nemi spannar afar lítið virkt svæði og því er sú yfirfærsla er vitaskuld háð fok-kúrfunni hverju sinni. Þá er eðlisþyngd og stærð korna mismunandi og því misjafnlega mikill massi á bak við hvern púls. Því er það misjafnt eftir svæðum hvert er samhengi slaga og efnisflæðis. Við upprunalega kvörðun fokstauta var miðað við að hvert slag (púls) næmi $0,019 \text{ kg m}^{-1}$ flutningi og var þá byggt á einstökum stormum sem mældir voru með stautum og gripgildrum á Landeyjasandi. Þessir útreikningar voru m.a. notaðir til að meta flæði við Háslón sem gat um í inngangi skýrslunnar. Þessi mælitæki eru þó ekki fullkomlega áreiðanleg yfir lengri tíma og geta verið ýmis vandamál við nemanna, og því eru sjaldnast heil gagnasett fyrir Sensit púlsa á móti foktímabilum gripgildranna.

Við höfum nú safnað gagnasetti fyrir Sensit nemanna sem spanna þrjú tímabil á Hólsfjöllum. Mikill breytileiki er í sambandi Sensit púlsa og magns sem mælist í gripgildrum. Hæsta Sensit talan miðað við söfnun í gripgildru kemur frá haustinu 2003 og hugsanlega veldur lárétt regn einhverju um. Einnig eru afar margir púlsar haustið 2004, líklega af sömu orsökum. Við teljum að mæling frá 2004 (28 júlí – 7 ágúst) sem spannar töluvert moldrok á meðan Sensit tækin virðast vera í góðu lagi sé fýsileg til kvörðunar. Sú niðurstaða gefur $0,026 \text{ kg m}^{-1}$ á hvert slag við útreikninga á gögnum frá Hólsfjöllum (margföldun upp úr slögum) til þess að reikna flæði í kg m^{-1} í einstökum stormum. Samanburður við önnur tímabil gáfu tiltölulega lægri stuðla og afar breytilega, m.a. vegna bilana í stafrænum tækjum á mælistaðnum, en við höfum valið þá leið að nota 0,020 fyrir yfirfærslu á Sensit púlsum yfir í kg m^{-1} fyrir mælistaðinn á Hólsfjöllum og miða allir útreikningar hér aftar við þann stuðul.





11. mynd. Sandfok í einstökum stormum á Hólsfjöllum 2002-2004. Sjá töflu um storma.

4.4. Holugildirur

Niðurstöður fyrir holugildirur er sýnd í 6. töflu, og niðurstöður flæðis mælt með gripgildrum til samanburðar. Alls fengust sjö pör með gildum fyrir flæði með gripgildrum og holugildrum. Í ljós kemur að hlutfall á milli flæðis (kg m^{-1}) mælt með gripgildrum og þess magns sem fékkst í gripgildrunar er afar stöðugt og nálægt 5. Það hlutfall er nærri því sem Fanney Gísladóttir og Hjalti Sigurjónsson reiknuðu út að myndu fara ofan í gildruna út frá útreikningum Owens um stökk lengd korna

6. tafla. Efni safnað í holugildirur borið saman við heildarfok á sama tíma mælt með gripgildrum og hlutfall þar á milli.

| Dagsetning | Heildarfok kg m^{-1} | Holugildra gr | Gildra/fok |
|------------|----------------------------------|------------------|------------|
| 9.9.2002 | 111 | 600 | 5,4 |
| 26.11.2002 | 161 | 787 | 4,9 |
| 15.7.2003 | 231 | 831 | 4 |
| 6.10.2003 | 360 | 1866 | 5,2 |
| 28.7.2004 | 119 | 531 | 4,5 |
| 7.8.2004 | 140 | 1011 | 7,2 |
| 20.11.2004 | 131 | 645 | 4,9 |

(Fanney Gísladóttir, 2002 í Viðauka), þar sem hlutfallið reyndist 8,8 fyrir skokkefni og skriðefni. Þessi litli munur á niðurstöðum bendir til að unnt sé að kvarða holugildirur fyrir margvíslegar aðstæður og að nota megi hinar ódýru holugildirur á svæðum þar sem þetta samband hefur verið staðfest. Þetta stöðuga samband styrkir enn fremur niðurstöður stöðugleika mælinga með gripgildrum.

4.5. Skurðurinn

Um leið og gengið var frá svæðinu á Hólsfjöllum til rofmælinga var grafinn um 10 m langur skurður þvert á fokáttina, 1 m djúpur og 1 m á breidd (myndir 11-13). Á einu ári, frá júlí 2002 til júní 2003 voru komin um 650 kg m^{-3} (þ.e. yfir 1 m línu á skurðinum), en mælt flæði var um 280 kg^{-1} , sem bendir til verulegs sandfoks utan mælitímabilsins með gripgildrum og Sensit stautum, hugsanlega í fáum stormum seint að hausti eða snemma vors. Þá mæla gripgildrunar ekki skriðefni, en við gerum ráð fyrir að lítið hafi verið um slík efni í moldunum á Hólsfjöllum. Í júlí og einkum í september 2004 var skurðurinn orðinn sléttfullur, en þá sýna niðurstöður með gripgildrum $>1000 \text{ kg m}^{-1}$ á þeim tíma sem þær stóðu uppi. Gera má ráð fyrir að fokið sé meira, því eftir því sem skurðurinn fyllist fýkur meira yfir hann. Það magn fokefna sem safnast hafði í skurðurinn styður eindregið við mælingarnar með gripgildrum og fokstautum sem fram fóru á Hólsfjöllum. Fok í skurðinn er meira en mældist í fokgildrunar, en stærðargráðan er sú sama, en mælingar með fokstautum og gripgildrum tóku aðeins til hluta ársins.



11 mynd. Skurðurinn nýgrafinn júní 2002. Þegar er tekið að fjúka ofan í skurðinn.



12. mynd. Skurðurinn hálf fullur, 10 júní 2003. Ætla má flæði nemi um $>600 \text{ kg m}^{-1}$ síðan skurðurinn var grafinn miðað við rúmþyngdina 1 t m^{-3} .



12. mynd. Skurðurinn fullur í júlí 2004. Heildarflæði því orðið meira en 1000 kg m^{-1} á tveimur árum, en hluti þess verður utan þess tíma sem mælingar með gripildrum og fokstautum eiga sér stað.

5. VINDROF Á HÓLSFJÖLLUM

5.1. Heildarflæði

Heildarmang fokefna var $> 1200 \text{ kg m}^{-1}$ þessi þrjú tímabil sem mælingarnar stóðu yfir. Fokið er vitaskuld afar breytilegt eftir veðurfari hvers mælitímabils. Mest var fokið á haustin, sérstaklega 2002 og 2003, en einnig í júní-júli 2003 og í ágúst 2004. Þetta mikla fok varir vitaskuld aðeins á meðan fyrir hendi er uppspretta áfoksefna, en síðan hægir hratt á því þegar jökulurðin undir svæðinu kemur í ljós, eins og reynsla af Hólsfjallasvæðinu sýnir almennt. Segja má að veðurfar á mælistaðnum hafi verið fremur kyrrlátt og engin aftakaveður komu á meðan mælingum stóð. Þessar niðurstöður gefa til kynna stærðargráðu hugsanlegt fok í meðalárum, en ekki í aftakaveðrum. Þessar niðurstöður eru í góðu samræmi við það sem áætlað var í umhverfismatsskýrslu Ólafs Arnalds og Fanneyjar Óskar Gísladóttur (2001) og það sem Hjalti Sigurjónsson (2002) hefur reiknað út fyrir meðalár. Hjalti mat það svo að þar sem fokið er það mikið í meðalárum getur heildarmagn fokefna orðið meira í þeim árum en einstökum aftakaveðrum, og verður því að taka tillit til beggja þessara þátta: mikils efnis sem leggst saman í meðalárum, sem og mikils foks í aftakaveðrum.

Sem fyrr sagði var meðaltalsdreifing fokefna eftir hæð notuð til að reikna stuðla sem gáfu síðan efnisflæði í hverju hæðarbili en efnismagn neðstu gildrunnar notuð sem grunnviðmiðun. Við athuguðum breytileika í reiknuðu heildarfokmagni með því að nota efstu og neðstu kúrfuna á 7. mynd til að reikna nýja stuðla og fokmagn. Í ljós kom fremur lítill breytileiki, neðsta kúrfan gefur heildarfokmagn 1004 kg m^{-1} árin þrjú, sú efsta 1288 kg m^{-1} en meðaltalið sem við höfum notað hér reiknaðist 1220 kg m^{-1} , sem er aðeins um 17% og 6% frávik frá reiknaða meðalgildi.

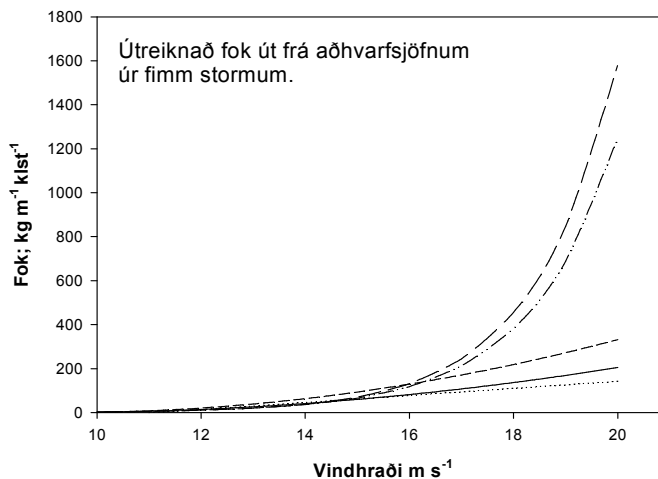
5.2. Tengsl vindhraða og foks — stormar

Einföld aðhvarfsgreining fyrir hvern storm fyrir sig

Tengsl vindhraða og foks er með afar misjöfnum hætti eins og myndir af einstökum stormum bera með sér. Sumir eru með tiltölulega þetta dreifingu (t.d. stormur 1) en aðrir með mjög breiða dreifingu (t.d. stormur 7). Þættir eins og rakastig, hiti og jarðvegshiti hafa áhrif á fok (Skidmore, 1994). Þegar hitastig er lágt og rakastig hátt eru auknar líkur á breiðari dreifingu, sem m.a. á við í stormi 7, þar sem hiti er rétt ofan frostmarks þegar fok hefst og fer undir frostmark við lok stormsins.

Við tókum þá storma sem höfðu aðhvarfsjöfnustuðul (regression coefficient, r^2) > 5 og notuðum aðhvarfsjöfnuna til að reikna út efnisflæði í allt að 20 m s^{-1} stormi

(hæsti vindhraði á hverri mínútu). Niðurstaðan er sýnd á 14. mynd. Munurinn á aðhvarfslínunum er afar mikill, þrjár stormar sýna fok 150-200 kg m⁻¹ klst⁻¹ við vind sem er 20 m s⁻¹ á meðan tveir stormar sýna tölur sem eru >1000 kg m⁻¹ klst⁻¹. Aðstæður í þessum stormum eru afar mismunandi, en rakastigið er lægst í þeim kúrfum sem rísa hæst (stormar 10



14. mynd. Útreiknað fok (kg m⁻¹ klst⁻¹) með aðhvarfsjöfnum sem eru fengnar úr fimm stormum með $r^2 > 0,5$. Miðað er við mesta vindhraða á hverri mínútu.

og 11). Þeir stormar hafa þó fremur fá gildi á efri enda kúrfunnar og því má ætla að skekkjan geti verið mikil. Þessar tölur gefa þó viðmið sem ber að gefa gaum: 200-1500 kg efnis á klukkustund yfir hvern metra við 20 m s⁻¹ vind.

Fjölþátta aðhvarfsgreining

Mun fleiri breytur voru mældar á rannsóknasvæðinu en vindhraði og fok. Við gerðum tilraun til að keyra fjölþátta aðhvarfsgreiningu (multiple regression) fyrir gögnin og völdum út öll þau tímabil þar sem fengust gildi (fok) en 5 eða fleiri mínútur fyrir hverjar 10 mínútur. Síðan var reiknað heildarfok fyrir öll slík 10 mínútna tímabil í gagnasettinu (sjá einnig útreikninga fyrir fokmagn á öllum stormum hér aftar). Þeir þættir sem notaðir voru við útreikningana voru:

- vindhraði
- rakastig
- hiti í 2 m hæð
- hiti í 60 cm hæð
- hitamunur á 2 m og 60 cm hæð
- tími sólarhrings

Öll gögn voru keyrð saman, samtals 267 10 mínútna meðaltöl. Niðurstaðan var aðhvarfsjafna með $r^2 = 0,676$, sem er mun hærra hefði mátt ætla miðað við breytileikann á gröfunum á mynd 10, þar sem aðeins 5 stormar náðu $r^2 > 5$ þegar vindhraði var notaður. Rof er gefið sem Sensit púlsar, sem þarf að margfalda með 1,2 (60 + 0,02;

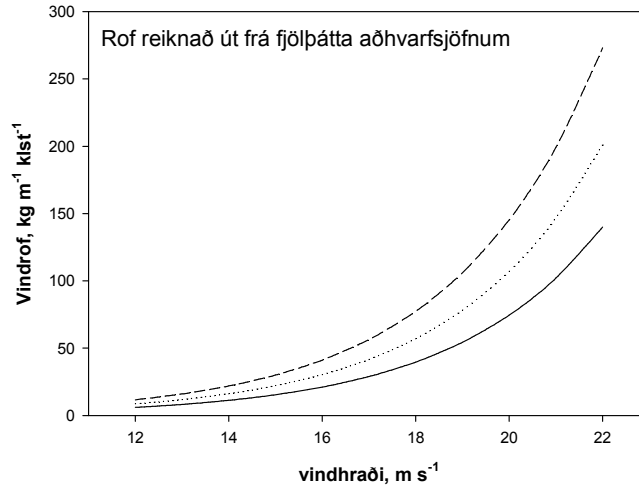
60 mínútur x 0,02 umreiknistuðull) til að fá rof í $\text{kg m}^{-1} \text{klst}^{-1}$. Aðhvarfsjafnan er eftirfarandi:

$$\text{Rof (sensit slög)} = \text{Exp}(-0,394 + (0,137 \times W) - (0,003 \times R\%) - (0,029 \times T_{2m}) + (0,051 \times T_{2m-60cm}))$$

þar sem að W er vindhraði í m s^{-1} , $R\%$ er rakastig, T_{2m} er hiti í 2 m hæð og $T_{2m-60cm}$ er hitamunur í 2m og 60 cm hæð.

Ef litið er á jöfnuna er ljóst að vindhraði er ráðandi þáttur en rakastig, hitastig og hitastigull yfir yfirborðinu hafa mótandi áhrif á flæðið. Athygli vekur neikvæð áhrif hitastigs (neikvæður stuðull) sem mun orsakast af punktum sem mælast í frosti en þá dettur þröskuldsvindhraði niður eins og síðar er vikið að. Jafnan hér að ofan er svokölluð „bakwards method“ jafna, en

„stepwise method“ gefur svipaðan stuðul en jákvæðan fyrir hitastig en nýtir ekki hitastigulinn í jöfnuna, heldu bæði hita í 2 m og 60 cm hæð. Miðað við þessar aðhvarfsjöfnur má ætla að í miklum stormum við slæmar aðstæður nemi fokið allt að $200 \text{ kg m}^{-1} \text{klst}^{-1}$ við $>20 \text{ m s}^{-1}$ vind miðað við 10 mínútna tímabil (ekki einstakar hviður) og $250 \text{ kg m}^{-1} \text{klst}^{-1}$ miðað við 22 m s^{-1} vind. Reiknað rof út frá þessari aðhvarfsjöfnu er sýnt á 15. mynd.



15. mynd. Reiknað rof allt í að 22 m s^{-1} vindi miðað við mismunandi forsendur, þar sem efsta línan túlkar aðstæður sem leiða til mikils rofs (25% rakastig, 2°C hitamunur í 60 cm og 2 m hæð), en neðsta línan aðstæður sem leiða til minna rofs.

5.3. Fok í einstökum stormum á Hólsfjöllum

Þegar reiknað er fok í hverjum stormi og miðað við að hver Sensit púls gefi $0,020 \text{ kg m}^{-1}$ er heildarfok í stormunum 11 frá árunum 2003 og 2004 samtals 641 kg m^{-1} . Heildarfok í gripildrum á sama tíma er um 988 kg m^{-1} . Ætla má að mesti efnisflutningurinn fari fram í þessum meginstormum þessi ár og samræmi á milli þessara niðurstaðna verður því að teljast nokkuð gott. Heildarflæði í hverjum þessara storma var frá 5 kg m^{-1} í stormi 3 (september 2003) upp í 312 kg m^{-1} í stormi 7 (21. september 2003). Sá stormur varir í rúma 7 tíma (440 min) og í honum mælist mesti vindhraði, $16,5 \text{ m s}^{-1}$. Svipaður vindhraði mælist mestur í stormi tveimur dögum áður, en í styttra stormi, en þá berst næst mest efnisflæðið, 113 kg m^{-1} á tæpum 4

tímum. Niðurstöður á útreikningum á efnismagni í stormum mældum með Sensit eru sýndar í 7. töflu.

7. tafla. Efnisflæði í einstökum stormum á Hólsfjöllum 2002-2004.

| Stormur nr | Dagsetning | Lengd storms | Vindhraði m s ⁻¹ | | Fok í stormi | Meðal- flæði | Hámarks- flæði |
|------------|------------|-----------------|-----------------------------|--------|-----------------|-----------------|-------------------|
| | | mín | Meðal | Mestur | | | |
| 1 | 26.6.2002 | 429 | 13,3 | 15,4 | 58 | 8 | 88 |
| 2 | 27.6.2002 | 750 | 13 | 15,2 | 40 | 3 | 66 |
| 3 | 4.9.2003 | 116 | 13,5 | 13,5 | 5 | 3 | 16 |
| 4 | 17.9.2003 | 229 | 15,5 | 15,5 | 12 | 3 | 30 |
| 5 | 20.9.2003 | 287 | 14,8 | 16,4 | 87 | 18 | 130 |
| 6 | 20.9.2003 | 78 | 12,5 | 14,4 | 19 | 14 | 106 |
| 7 | 21.9.2003 | 440 | 15 | 16,5 | 312 | 43 | 206 |
| 8 | 22.9.2003 | 101 | 11,2 | 12,2 | 20 | 12 | 73 |
| 9 | 30.7.2004 | 230 | 12,8 | 13,8 | 11 | 3 | 31 |
| 10 | 31.7.2004 | 187 | 13,2 | 14,6 | 36 | 12 | 66 |
| 11 | 31.7.2004 | 300 | 12,9 | 14,5 | 43 | 9 | 56 |

Af töflunni má sjá að flæði innan hvers storms er afar breytilegt og er augljóslega alls ekki í hæsta gildi langtímum saman, heldur stutt stund í einu. Það er í góðu samræmi við niðurstöður Stout og Zobeck (1996) um að skokkhreyfing viðhelt aðeins í hluta tímans (10-27% tímans í þeirra rannsókn) þegar vindhraði er ekki mjög langt yfir þröskuldsgildi. Athyglisvert er að bera saman gildi í þessari töflu og fjölþátta aðhvarfsjöfnu á 15. mynd. Þar verður að hafa í huga að unnið er með meðaltalstölur fyrir 10 mínútna tímabil og því rís kúrfan hægar og sýnir heldur lægri gildi fyrir 15-16 m s⁻¹ vind en hæstu gildi sem mælast í stormunum. Hins vegar falla meðaltalsgildin í hverjum stormi afskaplega vel að því bili sem efsta og lægsta kúrfa aðfallsgreiningarinnar gefa.

Þær stærðargráður á foki sem við mælum í stormum (hæstu gildi 106, 130 og 206 kg m⁻¹ klst⁻¹; reiknuð gildi >250 kg m⁻¹ klst⁻¹ fyrir >20 m s⁻¹ storma) eru sambærilegar og sjást í svipuðum mælingum erlendis, t.d. á sandströnd í Indiana (Bennet og Olyphant, 1998), þar sem hámarksflæði mælist um 100-200 kg m⁻¹ á klst; í eyðimörk í Kína (vindgöng; 100-400 kg m⁻¹ klst⁻¹; Weinan o.fl., 1996); og í Sahel (15 – 150 kg m⁻¹ í hverjum stormi; Sterk og Stein, 1997).

5.4. „Einsgildru” aðferð

Þegar í ljós kom að hlutfall foks sem safnaðist í 10 cm (A) og 30 cm gildrurnar (B) var sæmilega stöðugt var farið að skoða eldri gögn fyrir mælingar á sandfoki sem til voru á Rala (nú LbhÍ). Í ljós kom að hlutfall á milli gildra A og B (neðstu tveggja gildranna) er breytilegt á milli staða. Á Landeyjasandi, þar sem er allvel aðgreindur sandur vegna síendurtekinnna sandbylja (hátt hlutfall skokks), er hlutfallið 8-12 (15 mælitímabil), en 4-7 í sandi á Mývatnsöræfum (7 mælitímabil). Hlutfallið er mun lægra á Hólsfjöllum enda efnið finna og fýkur því hærra.

Af þessum gögnum má draga þá ályktun að unnt er að ákvarða stærðargráðu foks með einni gripgildru sem komið er fyrir í 30 cm hæð yfir jörðu að því gefnu að jafnframt er notuð súla sem sýnir hlutfall við gildru í 10 cm hæð í einhvern tíma. Þessi niðurstaða er afar mikilvæg því hún bendir til þess að unnt sé að ná margháttaðum upplýsingum um fok á stórum svæðum með tiltölulega mun færri gildrum og minni kostnaði með þessum hætti, og hafa þessar upplýsingar þegar verið nýttar við þróun rannsóknaverkefnis á sandfoki á nágrenni Heklu (Elín Fjóra Þórarinsdóttir og Ólafur Arnalds, 2009). Útreikningur á breytileika foksins á Hólsfjöllum miðað við breytileika í hæðarkúrfunni gaf aðeins 17% og 6% frávik frá meðaltalinu (brattasta og flatasta kúrfan) eins og fyrr sagði. Þessi litli munur rennir enn frekar stoðum undir það að nota „einsgildruaðferðina“ eins og hér er lýst.

5.5. Áhrif frosts á þröskuldsvindhraða

Eitt frávik í mælingu sem náðist síðla hausts 2003 með Sensit nemum vekur athygli. Í þeirri mælingu hliðrast þröskuldsvindhraði niður um 2 m s^{-1} miðað við mælingu í 2 m hæð. Þá mælist frost í 2 m hæð $-2,1^\circ\text{C}$ en lækkar í $-0,7^\circ\text{C}$ í lok stormsins. Frost er $-0,1^\circ\text{C}$ á 5 cm dýpi í jarðveginum. Myndun ísnála í moldaryfirborði á frostnóttum er vel þekkt fyrirbrigði og að þær losa um jarðvegskorn. Ætla má að þó að mikill raki tengist ísnálum þá þornar um þennan dag og eftir að þornar liggja korn sem frostið hefur losað um laus ofan á yfirborðinu sem síðan lækkar þröskulds-vindhraðann verulega. Frost er einnig mælt í storminum deginum áður (stormur 7), en þá er hiti á 5 cm dýpi í jarðveginum ennþá yfir frostmarki.

Þessar niðurstöður benda til að frosthreyfingar geti haft veruleg áhrif á vindrof á Íslandi, en reikna má með að Háslón sé orðið fullt í flestum árum þegar þessara áhrifa tekur að gæta. Mikilvægt er að hafa þessa hliðrun í huga við þróun á líkönum fyrir vindrof á norðlægum slóðum.

6. MÖGULEGT VINDROF FRÁ HÁLSLÓNI

6.1. Forsendur og hönnunarstormar

Reynsla LbhÍ / Rala / Lr

Reynsla starfsmanna LbhÍ (Rala) og Landgræðslu ríkisins á Mývatnssvæðinu og víðar bendir til að einstakir atburðir með miklum vindstyrk ráða mun meiru um fok í náttúrunni en meðalárin. Þannig var einnig um rof á Rangárvöllum og Landssveit þegar verst lét fyrir meir en 100 árum (Arnór Sigurjónsson, 1958), sem og á Hólsfjöllum á seinni hluta síðustu aldar, en þetta var einnig áberandi í Mývatnssveit og á Mývatnsöræfum á árunum 1986-1990, þegar nokkrir áfoksgeirar gengu fram í einstökum veðrum af suðvestri. Sem dæmi má nefna að áfoksgeirinn í Grænulág skammt austan við Dettifoss gekk fram 100 m og geirinn við Austari-Skógarmannafjöll um 75 m á einu ári. Eftir að þessir þurru suðvestan stormar urðu fátíðari frá 1990 hefur framgangur sands í áfoksgeirum minnkað mjög mikið eða stöðvast (geirinn í Grænulág var friðaður og græddur upp). Þetta mætti orða svo að náttúrulegt viðnám gegn áfokinu er nægjanlegt til að hamla miklum ágangi sands í venjulegum árum en ekki í afbrigðilegum árum með miklum og þurrum stormum. Þetta er nokkuð önnur reynsla en Hjalti Sigurjónsson (2003) kemst að með líkana-reikningi, þar sem hann telur að venjuleg ár munu í heild sinni veða meira en afbrigðilegir stormar þegar til lengri tíma er litið. En ekki er ljóst hvort á betur við á Háslónssvæðinu.

Í úrskurði umhverfisráðherra (Umhverfisráðuneytið, 2001) varðandi fokvarnir við Háslón segir eftirfarandi: „*Telja verður eðlilegt að búa til hönnunarstorm með 50-100 ára endurkomutíma og að mótvægisáðgerðir séu hannaðar miðað við að þær geti tekið við sandfoki frá slíkum atburði án þess að áfoksgeiri myndist utan lónstæðis.*“ Gerðar hafa verið rannsóknir á veðurfari á Kárahnjúkasvæðinu (Flosi Hrafn Sigurðsson o.fl., 2001) og af Birni Jóhanni Björnssyni.

Hönnunarstormur reiknaður af Birni Jóhanni Björnssyni

Björn Jóhann Björnsson hefur notað veðurathuganir og líkön til að reikna út hönnunarstorma (Björn Jóhann Björnsson / Stuðull, 2004) og líkur á fjölda tilvika með ákveðinn vindhraða. Niðurstaðan fyrir tímabilið júní-ágúst, þegar hætta er á foki við Háslón er eftirfarandi (8. tafla).

8. tafla. Vindhraði í 2m hæð fyrir mismunandi endurkomutíma í júní-ágúst á Kárahnúka-svæðinu (Björn Jóhann Björnsson / Stuðull, 2004).

| Endurkomutími: | 1 ár | 10 ár | 50 ár | 100 ár |
|----------------|--|-------|-------|--------|
| Lengd storms | ----- vindhraði, m s ⁻¹ ----- | | | |
| 24 klst | 12 | 14 | 16 | 17 |
| 1 klst | 17 | 19 | 21 | 22 |
| 0,5 klst | 18 | 21 | 22 | 23 |

Þessir útreikningar gefa góða hugmynd um stærðargráðu hönnunarstorms, þar sem ætla má að á 50 ára fresti komi stormar með 22 m s⁻¹ sem vara í hálf tíma; á 50 ára fresti koma stormar með 16 m s⁻¹ sem vara í sólarhring. Eins og sést á töflunni eru „100 ára stormarnir“ lítið meiri en „50 ára stormarnir“ og í raun litlu stærri en „10 ára stormarnir“. Stormur í 1 klst með 17 m s⁻¹ vindi kemur að meðaltali á hverju ári samkvæmt þessum útreikningum. Mikilvægt er að hafa í huga að vindur er ekki greindur samkvæmt stefnu í þessum útreikningum, svo ætla má að tíðni eða endurkomutími sem sýndur eru í 17 töflu sé nokkru tíðari en fyrir þá storma sem eru þurrir.

17. júní veðrið 1988 á Norðausturlandi

Við gerðum könnun á veðurlagi á Mývatnssvæðinu á þeim árum sem áfoksgeirar þar voru hvað virkastir. Heimamenn hafa í minnum „17. júní veðrið“ árið 1988. Þá geisaði mikið fok á Mývatnssvæðinu í 4 daga, 15-19 júní. Hiti var um 10°C á daginn. Á Grímstöðum var meðaltal vindhraða yfir daginn 13,2 m s⁻¹ (meðaltal vindhraða kl 7, 12, 15, 18 og 21). Í Reynihlíð var vindhraði 11,6 m s⁻¹ á þessu sama tímabili, en hviður fóru í 26 m s⁻¹. Þetta er verulega meiri vindhraði en við höfum mælt 2002- 2004 á Hólsfjöllum eða sem stöðin við Kárahnúka hefur mælt í þurrum sunnanáttum. Svo virðist sem að á Grímstöðum hafi vindhraði verið yfir 20 m s⁻¹ í 8 klukkutíma á þessu tímabili en um hviður er ekki vitað. Rétt er að huga að þessum stormi til samanburðar við útreiknaða hönnunarstorma við Háslón. Vitað er að áfoksgeirar á Mývatnsöræfum, m.a. í Grænulág, gengu áfram tugi metra í þessum stormi, jafnvel >100 m á einstaka stað.

6.2. Meðalárin

Hólsfjöll

Niðurstöður rannsókna á Hólsfjöllum gefur góða hugmynd um það flæði efnis

sem getur orðið í meðalárum við Háslón. Heildarflæði á mælitímanum hver ár var frá u.þ.b. 280 kg m⁻¹ ár⁻¹ til u.þ.b. 600 kg m⁻¹ ár⁻¹. Þessar niðurstöður er staðfestar af setflutningi í skurðinn á Hólsfjöllum og styðst enn fremur við mælingar með Sensit fokstautum. Sé aðeins litið til fyrri hluta mælitímabilanna á Hólsfjöllum 2002-2004, á því tímabili þegar lítið vatn er í Háslóni, er flæðið 50-200 kg m⁻¹ ár⁻¹. Til samanburðar verður getið hér um niðurstöður rannsókna LbhÍ á Geitasandi (Ólafur Arnalds og Berglind Orradóttir, 2009), líkanaútreikninga Hjalta Sigurjónssonar (2003) og Vatnaskila (Snorri Páll Kjara, 2005).

Geitasandur

Á Geitasandi á Rangárvöllum hefur verið komið upp gripgildrum í tengslum við viðamiklar rannsóknir á landgræðslusvæðinu þar á árunum 2004-2007 (Ólafur Arnalds og Berglind Orradóttir, 2009). Heildarniðurstöðurnar eru birtar í 9. töflu. Þær byggja á 13 mælitímabilum. Úrvinnsla gagna er sambærileg við það sem gert var á Hólsfjöllum.

9. tafla. Mælt flæði vindrofs í tilraunareitum á Geitasandi (Landbót). Ólafur Arnalds og Berglind Orradóttir, 2009).

| Svæði | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 ^S | Alls |
|------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|-------------|
| | ----- kg m ⁻¹ ----- | | | | |
| A-3 (sandmelur) | 655 | 151 | 751 | 171 | 1728 |
| B-9 (sandmelur) | 240 | 288 | 395 | 65 | 988 |
| H-3 (sandur) | 905 | 1233 | 640 | 79 | 2858 |
| G-9 (sandur) | 797 | 1192 | 450 | 120 | 2559 |

S: Aðeins tvær mælingar, apríl og maí 2007, gefur ekki heildarmynd af ársflæði.

Mælingarnar fóru fram á sendnum mel (tveir reitir) og sandsvæði (tveir reitir), eitt gildrusett í hverjum reit (samaltals 4 sett), hvert sett er með gildirum í þremur hæðum (10, 30 og 100 cm). Meðalflæði á sandsvæðum var frá um 450 til 1233 kg m⁻¹ á ári. Svæði A3 og B9, hafa grýttara yfirborð (sendinn melur) og flæðið mælist minna en á sandsvæðunum, en þó er athyglisvert hve flæðið er mikið (151 – 751 kg m⁻¹ á ári). Stormar virðast geta gefið u.þ.b. 200 kg m⁻¹ - >500 kg m⁻¹ í einstökum atburðum. Þessar mælingar eru gerðar árið um kring, en rétt að hafa í huga að fokið frá Háslóni getur aðeins orðið frá júní – ágúst/september, eftir aðstæðum.

Meðaltalsflæði reiknað af Hjalta Sigurjónssyni (2003)

Hjalti Sigurjónsson notaði líkan sitt til að meta fok í meðalári miðað við veðurgögn frá Kárahnúkum 1999-2002 yfir sumartímamann (Hjalti Sigurjónsson, 2003). Niðurstöður útreikninganna var afar háð rakaforsendum í jarðvegi og gáfu sumar líkana-keyrslurnar gríðarlega háar niðurstöður ($> 10\,000\text{ kg m}^{-1}$ á ári, miðað við engar yfirborðshindranir). Útreiknað efnisflæði nam 833 kg m^{-1} á ári (árið 2002) til $8,5\text{ t m}^{-1}$ á ári (árið 1999) miðað við minnstu hindrun (lægsta „framhliðarflatarmálsvísi“). Miðað við næsta lægstan slíkan vísi, sem hugsanlega líkist aðstæðum á Hólsfjöllum betur en lægsti vísirinn var fokið $565\text{-}6426\text{ kg m}^{-1}$ á ári.

Samanburður

Niðurstöður á samanburði á niðurstöðum á þeim niðurstöðum sem raktar voru hér að ofan eru sýndar í 10 töflu.

10 tafla. *Samanburður á niðurstöðum um meðaltalsflæði mældu á Hólsfjöllum og Geitasandi og meðaltalsflæði reiknað af Hjalta Sigurjónssyni (2003) og Vatnaskilum (Snorri Páll Kjaran o.fl., 2005) fyrir tímabilið 1999-2002 við Háslón.*

| | Tímabil | Heildarflæði, kg m^{-1} á ári |
|--|-----------|--|
| Hólsfjöll mæling sumur | 2002-2004 | 284 – 591 [§] |
| Hólsfjöll – skurður allt árið | 2002-2004 | 300 – 650 |
| Geitasandur – mæling allt árið | 2004-2007 | 450 – 1233 (melasvæði og sandsvæði) |
| Líkan Hjalta Sigurjónssonar ^{&} | 1999-2002 | 565 – 6426 |
| Líkan Vatnaskil [#] | 2005 | 3000-5000 (í suðvestan áttum) |

§: fok á júní-águst. &: Hjalti Sigurjónsson, 2003. #: Snorri Páll Kjaran o.fl., 2005.

Eins og sjá má af töflunni eru tölurnar á mjög svipuðu stærðarbili nema líkana-reikningurinn (Snorri Páll Kjaran o.fl., 2005). Þeir gera þó ráð fyrir mun meira heildarflæði í verstu árum (allt að $22\,000\text{ kg m}^{-1}$; sjá Snorra Pál o.fl., 2006 og Snorra Pál og Hjalta Sigurjónsson, 2007). Tölur á Hólsfjöllum taka ekki til meginstorma (engin aftakaveður á mælitímabilinu), en það gera tölur Hjalta Sigurjónssonar. Tölur á Geitasandi innihalda mikla storma, m.a. 2004, en hugsanlegt er að mælingar í þeim stormum séu of lágar vegna þess að hætta er á að gildirur hafi fyllst. Séu lægri tölur Hjalta og af Geitasandi hafðar til samanburðar eru tölugildin öll á afar svipuðu bili. Gildið 565 kg m^{-1} sem reiknað var fyrir árið 2002 af Hjalta Sigurjónssyni er nokkuð sambærilegt við 254 kg m^{-1} sem mælt var á Hólsfjöllum þetta ár (júlí – nóvember), enda þótt vegalengd sé þónokkur á milli og Hólsfjöllin standi

tæplega 200 m lægra. Vindamunstur eru að nokkru leiti sambærileg á milli svæðanna (þurrar vindáttir), en ætla má að harðari vindar geti geisað við Kárahnúka.

Hafa ber í huga að heildarflæði á ári vex mikið í þeim árum sem stormar eru miklir samkvæmt útreikningum úr líkönunum.

6.3. Hönnunarstormar

Niðurstöður mælinga á foki á Hólsfjöllum gefa nokkuð greinargóða mynd af hugsanlegu fokmagni í hönnunarstormum. Þessar niðurstöður má bera saman við útreikninga úr líkönunum, mælingar á foki á öðrum stöðum og mat á fokmagni við myndun áfoksgeira við Blöndu. Hér á eftir verður reynt að nýta öll þessi mismunandi gögn og aðferðir til að meta fok í mestu stormum við Háslón miðað við 50-100 ára endurkomutíma, en niðurstöðurnar settar fram í töflu 11. töflu.

Frumútreikningar í umhverfismatsskýrslu

Ólafur Arnalds og Fanney Ósk Gísladóttir (2001) gerðu ráð fyrir $>500 \text{ kg m}^{-1}$ flæði í stormum $>15 \text{ m s}^{-1}$ og ef gert er ráð fyrir nægu efnisframboði og 10 tíma stormi má nota þá tölu til að fá $>5000 \text{ kg m}^{-1}$ flæði á einum degi eða stormi. Þau gerðu ráð fyrir mun meira flæði í aftakaveðrum ($>20 \text{ m s}^{-1}$), en hér er miðað við að slíkt veður vari ekki heilan dag, heldur að meðaltalsflæðið samsvari flæði við 15 m s^{-1} .

Hólsfjöll

Gögn sem nú liggja fyrir ásamt gögn um storm á Grímsstöðum á Fjöllum árið 1988 má nota til að meta hvað gerist við verstu aðstæður. Gögnin frá Hólsfjöllum benda til þess að fok í vindi sem er 20 – 22 m á sekúndu geti numið $> 250 \text{ kg m}^{-1} \text{ klst}^{-1}$. Þó verður að hafa í huga að í mestu stormum getur efnisflæðið mettast og lögun kúrfunnar er ekki fullkomlega ljós þegar nær svo miklum vindstyrk. Gögn frá svæðinu sunnan Langjökuls (Fanney Ósk Gísladóttir, 2002) sýna fok um $1 \text{ t m}^{-1} \text{ klst}^{-1}$ fyrir vindhraða um 20 m s^{-1} . Út frá þessum gögnum metum við að rof við verstu aðstæður geti numið 2,5 - 5 t m^{-1} í slíkum veðrum (stormur í 10-20 klukkustundir, 50-100 ára hönnunarstormur, sbr töflu um endurkomutíma hér að ofan).

Þessar tölur eru mun lægri en umhverfismatsskýrsla Ólafs Arnalds og Fanneyjar Gísladóttur gerðu ráð fyrir að gæti gerst ($17 - >30 \text{ t m}^{-1}$), en þar var gert ráð fyrir allt að $500 \text{ kg m}^{-1} \text{ klst}^{-1}$ og forsendur þeirra útreikna voru einkum sandsvæði á Mývatnssvæðinu og að stormar með $>15 \text{ m s}^{-1}$ vörðu lengur en 35 klst (veðurmælingar árin 1999 og 2000, (Flosi Hrafn Sigurðssonar o.fl., 2001) hafðar til viðmiðunar).

Blanda

Við Blöndulón hafa myndast nokkrir áfoksgeirar, en þekktastur er sá við norðurenda lónsins í vík sem hefur verið kölluð Sandvík (sjá t.d. MS ritgerð Olgu Kolbrúnu Vilmundardóttur, 2009; Olgu Kolbrúnu Vilmundardóttur o.fl., 2009, Björn Jóhann Björnsson / Stuðull, 2004). Olga Kolbrún o.fl. (2009) tiltaka að áfokið hafi orðið mest í stormum árin 2000 (vindur $21,7 \text{ m s}^{-1}$) og 2005 ($>20 \text{ m s}^{-1}$) og að fok sé mun minna í stormum $< 20 \text{ m s}^{-1}$. Olga Kolbrún og samstarfsmenn mældu efnismagn í Sandvík um 514 m^3 efnis og sé gert ráð fyrir rúmpýngd $1,1- 1,3 \text{ t m}^{-1}$ (gróf ágiskun, blanda léttra jarðvegsefna og þyngri sands,) er hér um að ræða u.þ.b. 560-700 tonn. Sé gert ráð fyrir 100 m breiðu belti má ætla að heildarfok sé um 5600 – 7000 kg m^{-1} á þessu svæði, sem þó er mjög misdreift. Út frá þessum tölum má ætla að hámarksfok í verstu stormum geti verið 2000 – 3000 kg m^{-1} þar sem aðstæður eru mest á veðurs. Vindur með 20 m s^{-1} vindhraða er nálægt því sem talið er vera forsendur hönnunarstorma við Háslón.

Hönnunarstormur Björns Jóhanns Björnssonar

Björn Jóhann (Björn Jóhann Björnsson / Stuðull, 2004) reiknaði hönnunarstorma fyrir mismunandi endurkomutíma (sjá hér ofar) og notaði þær notaði til að reikna fok miðað við þessar gefnu forsendur við Háslón. Mikil líkindi eru á milli útreiknaðs veðurs Björns Jóhanns og aðstæðna sem ríktu í á Grímstöðum á Fjöllum / Mývatnssvæðinu í júní 1988. Björn notað einfalt verkfræðilegt reiknilíkan. Niðurstaða hans er um $3,1 \text{ t m}^{-1} \text{ klst}^{-1}$, og 21 t m^{-1} á dag í hönnunarstormi miðað við 50 ára endurkomutíma.

Útreikningar Vatnaskila og Hjalta Sigurjónssonar

Áður var getið útreikninga starfsmanna Vatnaskila á hugsanlegu vindrofi og uppfoki við Háslón (Hjalti Sigurjónsson, 2003; Snorri Páll Kjaran og Hjalti Sigurjónsson 2004). Hjalti telur að meðalárin skili í heild meiri foki en einstakir fokatburðir. Dæmi um fokatburð er gefin í skýrslu Snorra og Hjalta (2004) sem er útreikningur miðað við storm 18. júlí 2004, sem gaf $350 - 1150 \text{ kg m}^{-1}$ eftir staðsetningu og fokatburðum. Snorri Páll Kjaran o.fl. (2005) reiknuðu síðan einstaka fokatburði miðað við 50-100 ára endurkomutíma þar sem niðurstaðan var mannvirki þyrfti að miða við 6000 kg m^{-1} á einum degi (í „Conclusions“), sem raunar á við 18. júní 1988 (bls. 25 í skýrslunni). Þeim stormi er einmitt gerð skil fyrir Grímstaði á Fjöllum / Mývatn hér að ofan. Storminn reikna þeir út með veðurfræðilíkani sem nefnt er MM5 (sjá Snorra Pál o.fl., 2005).

Samanburður – mælingar á vettvangi og líkön

Niðurstöður úr hinum mismunandi aðferðum fyrir sandflæði í stormum ber furðu vel saman (11. tafla).

11. tafla. *Sandfok í stormum. Samanburður á niðurstöðum fyrir mælingar og útreikninga á fokstormum á Hólsfjöllum, Geitasandi, Blöndu og samkvæmt líkangerð fyrir aðstæður við Háslón, ásamt frumútreikningum í umhverfismatskýrslu. Gerð er grein fyrir forsendum og heimildum í texta hér að ofan.*

| | kg m ⁻¹ | skýringar |
|-------------------------------|--------------------|--|
| Frumskýrsla Rala ¹ | 5000 | 10 klst, meira í lengri stormi |
| Hólsfjöll, Lbhí | 2500-5000 | Miðað við 20 m s ⁻¹ hluta dagsins |
| Geitasandur, Lbhí | > 500 | Einn dagur |
| Áfoksgeiri við Blöndu | 2000-3000 | >20 m s ⁻¹ vindur |
| Líkan Háslón, BJB, Stuðull | 21000 | (3100 á klst) 50 ára stormur |
| Líkan Háslón; Vatnaskil 2004 | 350-1150 | Minni stormur, 18. júlí 2000 stormur |
| Líkan Háslón, SPK o.fl. 2005 | 6000 | Mesta fok á einum degi |

Allar þessar niðurstöður eru af sömu stærðargráðu, lægri tölurnar fyrir lægri vindstyrk, en þær hæstu (>10 t) fyrir hæsta vindstyrkinn í marga daga eða aftakaveður í einum stormi. Þær gefa klárlega til kynna verstu mögulegu aðstæður án mótvægisáðgerða. Matskýrsla Ólafs og Fanneyjar (2001) gera ráð fyrir 5000 kg m⁻¹ miðað við 10 tíma storm, og niðurstöður mælinga á Hólsfjöllum staðfesta þessa stærðargráðu. Geitasandur og Blanda gefa heldur lægri niðurstöður, en aðstæður þar eru að mörgu leiti aðrar. Björn Jóhann Björnsson / Stuðull (2009) taldi að gera þyrfti ráð fyrir nauðsynlegt yrði að geta stoppað 21 000 kg m⁻¹ þvert á strönd sem samsvarar 15 m³ m⁻¹ af foksandi. Snorri Páll Kjarran o.fl. (2005) gerður ráð fyrir að unnt þyrfti að stöðva 22 000 kg m⁻¹ í verstu árum (50-200 ár) og 6000 kg m⁻¹ á versta stormdegi. Bæði niðurstöður Snorra Páls og Björns Jóhanns bera vel saman við niðurstöður umhverfismatskýrslu og túlkun á mælingum frá Hólsfjöllum fyrir aftakastorm (1988 veður og framlenging á mældum fok kúrfum).

Landsvirkjun hefur unnið að þróun mótvægisáðgerða á svæðinu og núþegar er kominn skurður með lónborðinu, sem er af þeirri stærðargráðu að stöðva stóran hluta foks í verstu veðrum miðað við þessar niðurstöður. Reynsla af tveimur fyrstu sumrunum sýnar afar takmarkað áfok yfir varnarlínur, en þau sumur hafa verið fremur stillt (2008) og rök (2009).

Þessir útreikningar taka fyrst og fremst til aðstæðna þar sem moldarefni úr jarðvegi

undir efsta borði Háslóns taka að fjúka, en þá í bland við gorm sem berst með Jökulsá út í lónið. Hreinn gormur, ef ekki blandast sandur saman við, hefur allt aðra fokeiginleika, sem ekki hafa verið til umræðu í þessari skýrslu. Þess ber að geta að Hjalti Sigurjónsson og Vatnaskil hafa einnig unnið að útreikningum á svifryki og fl. á Kárahnúkasvæðinu (sjá t.d. Snorra Pál Kjaran og Hjalta Sigurjónsson, 2004). Ljóst er að gormurinn leggst yfir jarðveg á neðri hluta svæðisins sem kemur undan vatni á vorin, en öldurof vinnur á jarðveginum á efsta hlutanum og moldarefnin berast smám saman niður í lónið, en geta einnig valdið rofi sem lýst er í þessari skýrslu.

7. LOKAORÐ

Hér eru birtar tölur fyrir mælingar á moldroki við náttúrulegar aðstæður, þar sem fokið er mælt með mismunandi aðferðum. Samanburður við gögn sem fengin eru með öðrum aðferðum gefa niðurstöður sem eru mjög sambærilegar. Niðurstöðurnar gefa góða mynd af því sem gerist í meðalárum við Háslón þar sem laus jarðvegur er fyrir hendi og hvers má vænta komi til aftakaveðurs, en við það miða varnir gegn rofi við Háslón. Þó verður að hafa í huga að við höfum ekki tekið tillit til halla lands við Háslón á móti vindátt, sem hefur hamlandi áhrif á vindrof.

Þær stærðargráður fyrir fok á jarðvegsefnum sem hér eru birtar varpa nokkru ljósi á þær aðstæður sem ríkja við þróun og framrás áfoksgeira, sem miklu hafa valdið um jarðvegsrof og gróðureyðingu á Íslandi. Þá þarf að vera til staðar stór náma áfoks-efna í upphafi og síðan gróðurlendi með þykkum jarðvegi sem eyðist og bætist þar með í safn áfoksefna. Niðurstöðurnar gefa vísbendingu um að náttúran hafi nokkuð viðnám gegn myndun áfoksgeira þar til stormar eru verulegir ($15 - 20 \text{ m s}^{-1}$).

Það vekur athygli að skokkhæð efna á Hólsfjöllum nær mun hærra en gert er ráð fyrir í erlendum rannsóknum og líkönum, sem er mikilvægt að hafa í huga við aðlögun alþjóðlegra líkana að aðstæðum á Íslandi.

Við úrvinnslu þessara gagna sem hér birtast hafa verið þróaðar aðferðir sem hafa gildi fyrir aðrar slíkar rannsóknir á vettvangi, bæði hérlendis og fyrir alþjóðlegar rannsóknir, ekki síst með gripgildrum. Sú aðferðafræði sem þróuð er hér er að mörgu leiti einfaldari og gerir fleirum kleyft að takast á við verkefni af þessu tagi en þeim sem hafa þekkingu á flóknum líkanareikningi. Einsgildru-aðferðin er þegar í notkun á Heklusvæðinu og virðist ætla að reynast vel þar. Líklega eru gögn okkar um áhrif frosts á þröskuldsvindhraða einstæð, sem eykur enn á gildi þessara rannsókna.

Við teljum að niðurstöður mælinga okkar séu á margan hátt traustari til að spá fyrir um moldrok heldur en líkanareikningar, ekki síst þeir sem eru háðir breytum sem erfitt kanna að vera að afla. Samræmi á milli aðferða (gripgildrur, fokstautar, skurður, mælingar á Geitasandi og víðar, áfoksgeiri við Blöndu) er mjög sannfær-andi.

Við leggjum á það mikla áherslu að koma verður í veg fyrir myndun áfoksgeira og verði sandfok yfir varnalínur verði sá sandur fjarlægður aftur og varnir efldar. Þessar rannsóknir taka ekki til gorms sem sest til í botn Háslóns, en full ástæða er að gera tilraunir til að mæla magnbundið slíkt fok.

ÞAKKARORÐ

Rannsóknir þessar eru kostaðar af Landsvirkjun. Einar Grétarsson sá um að setja upp tækin á Hólsfjöllum, forritun og samskipti við tækin og kunnum við honum bestu þakkir fyrir. Berglind Orradóttir fær þakkir fyrir hjálp við tölfraðigreiningu og söfnun foks á Geitasandi. Margrét Jónsdóttir sá um uppsetningu á riti og aðstoðaði við gagnavinnslu. Heimafólki á Grímsstöðum á Fjöllum er þökkun öll aðstoðin, sem m.a. fól í sér að vitja um og taka upp tækin í misjöfnum veðrum. Pétur Ingólfsson hefur verið helsti samstarfsaðili okkar hjá Landsvirkjun og er honum og öðrum sem sitja í „rofnefnd Kárahnúkavirkjunar“ þakkað samstarfið.

HEIMILDIR

- Arnór Sigurjónsson (ritstj.). 1958. Sandgræðslan. Minnt 50 ára starfs Sandgræðslu Íslands. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík.
- Bennet, S.B. og G.A. Olyphant. 1998. Temporal and spatial variability in rates of eolian transport determined from automated sand traps: Indiana Dunes National Lakeshore, U.S.A. *Journal of Coastal Research* 14:283-290.
- Björn Jóhann Björnsson / Stuðull. 2004. Tæknilegar mótvægisáðgerðir við Háslón. Verkefnishandbók, 1. útgáfa. Stuðull/Landsvirkjun.
- Dahlgren, R.A., M. Saigusa, og F.C. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82:113-182.
- Elín Fjóla Þórarinsdóttir og Ólafur Arnalds. 2009. Vindrof á Hekluakógasvæðinu. Fræðaðing landbúnaðarins VI:528-531.
- Fanney Ósk Gísladóttir. 2000. Umhverfisbreytingar og vindrof sunnan Langjökuls. MS ritgerð, Jarð- og landfræðiskor, Raunvísindadeild, Háskóli Íslands, Reykjavík.
- Fanney Ósk Gísladóttir, Ólafur Arnalds og Guðrún Gísladóttir. 2005. The effect of landscape and retreating glaciers on wind erosion in South Iceland. *Land Degradation & Development* 16:177-187.
- Flosi Hrafn Sigurðsson, Þórunna Pálsdóttir og Guðrún Þ. Gísladóttir. 2001. Veðurfar á Kárahnjúkasvæðinu. VÍ-05005, Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
- Fryrear, D.W. 1986. A field dust sampler. *Journal of Soil and Water Conservation* 41:117-121.
- Harpa Kristín Einarsdóttir. 2007. Áhrif áfoks á gróður. MS ritgerð, Raunvísindadeild, Líf- og landfræðiskor, Háskóli Íslands, Reykjavík.
- Harpa Kristín Einarsdóttir, Ólafur Arnalds og Ása L. Aradóttir. 2009. Áhrif áfoks á gróður við Háslón og Blöndulón. Fræðaðing landbúnaðarins VI:359-361.
- Hjalti Sigurjónsson. 2002. Development of an erosion modeling system and its employment on Icelandic soils. MS ritgerð, Raunvísindadeild, Háskóli Íslands, Reykjavík.
- Hjalti Sigurjónsson. 2003. Mat á vindrofi á bökkum Háslóns. Áfangaskýrsla I. Landvirkjun, LV2003/132.
- LbhÍ og L.r. 2010. Styrking staðargróðurs við Háslón. Skýrsla í handriti, verður birt 2010
- Olga Kolbrún Vilmundardóttir, 2009. Umhverfisbreytingar við Blöndulón. Strandrof og áhrif áfoks á gróður. MS ritgerð í landfræði. Líf- og umhverfisvísindadeild. Háskóli Íslands.
- Olga Kolbrún Vilmundardóttir, Borgþór Magnússon, Guðrún Gísladóttir og Þorvaldur Þorsteinsson. 2009. Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydroelectric reservoir, Blöndulón, Iceland. *Geomorphology* 114:542-555.
- Ólafur Arnalds. 1990. Characterization and Erosion of Andisols in Iceland. Ph.D. ritgerð, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Ólafur Arnalds og Fanney Gísladóttir. 2001. Háslón. Jarðvegur og jarðvegsrof. Rannsóknastofnun landbúnaðarins, Reykjavík, mars 2001.

- Ólafur Arnalds og Sigmar Metúsalemsson. 2004. Sandfok af Suðurlandi 5. október 2004. Náttúrufræðingurinn 72:90-92.
- Ólafur Arnalds og Berglind Orradóttir. 2009. Mælingar á foki á Landbótarsvæðinu á Geitasandi. Óbirt áfangaskýrsla, Landbúnaðarháskóli Íslands.
- Ólafur Arnalds og Fanney Gísladóttir. 2009. Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum. Fræðaðing landbúnaðarins VI: 448-452.
- Ólafur Arnalds, Fanney Ósk Gísladóttir og Hjalti Sigurjónsson. 2001. Sandy deserts of Iceland: an overview. *Journal of Arid Environments* 47:359-371.
- Ólafur Arnalds, Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson og Arnór Árnason. 1997. Jarðvegsrof á Íslandi. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun landbúnaðarins. Reykjavík.
- Rasmussen, K.R. og H.E. Mikkelsen. 1998. On the efficiency of vertical array eolian field traps. *Sedimentology* 45:789-800.
- Shao, Y., G.H. McTainsh, og J.F. Leys. 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Journal of Soil Research* 34:309-342.
- Saho, Y.P., M.R. Raupach, og J.F. Leys. 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Australian Journal of Soil Research* 34:309-342.
- Shao, Y, G.H. McTainsh, F.F. Leys og M.R. Raupach. 1993. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement. *Australian Journal of Soil Research* 31:519-532.
- Skidmore E.L. 1994. Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. Í: R. Lal (ristj.) *Soil Erosion Research Methods*. 2n edition. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA.
- Skúli Víkingsson. 2007. Háslón. Rofnæmi jarðvegs. Er uppfokshætta úr Háslóni? Íslenskar Orkurannsóknir ISOR-07006.
- Snorri Páll Kjaran og Hjalti Sigurjónsson. 2004. Uppfok ryks og áfoks af bökkum Háslóns. Áfangaskýrsla II. Landsvirkjun LV-2004/018.
- Snorri Páll Kjaran og Hjalti Sigurjónsson. 2005. Háslón. Aurburður og setmyndun. Landsvirkjun LV-2005/038.
- Snorri Páll Kjaran og Hjalti Sigurjónsson. 2007. Háslón. Reikningar á vindrofi á bökkum Háslóns LV-2007/017.
- Snorri Páll Kjaran, Hjalti Sigurjónsson og Björn Jóhann Björnsson. 2006. Háslón. Calculation of wind erosion on the banks of the Háslón. Landsvirkjun LV-2006/088.
- Sterk, G. og W.P. Spaan. 1997. Wind erosion control with crop residues in the Sahel. *Soil Science Society of America Journal* 61:911-917.
- Sterk, G. og A. Stein. 1997. Mapping wind-blown mass transport by modeling variability in space and time. *Soil Science Society of America Journal* 61:232-239.
- Stout, J.E. 1998. Effect of averaging time on the apparent threshold for aeolian transport. *Journal of Arid Environments* 39:395-401.
- Stout, J.E. og T.M. Zobeck. 1996. Establishing the threshold conditions for soil movement in wind-eroding fields. *Proceedings of the International Conf. On Air Pollution from Agricultural Operations* 65-71. Kansas City, USA.

Stuðull. 2004. Tæknilegar mótvægisáðgerðir við Háslón. Verkefnishandbók. 1.útgáfa. Landvirkjun / Stuðull.

Umhverfisstofnun. 2001. Úrskurður umhverfisstofnunar. Reykjavík, 20. desember 2001. Tilvísun: UMH01080004/10-02-0601.

van Donk, S.J. og E.L. Skidmore. 2001. Field experiments for evaluating wind erosion models. *Annals of Arid Zone* 40:283-302.

Weinan, Chen, Y. Zuotao, Z Jiashen og H. Zhiwen. 1996. Vertical distribution of wind-blown sand flux in the surface layer, Taklamakan Desert, Central Asia.

Zobeck, T.M., G. Sterk, R. Funk, J.L. Rajot, J.E. Stout og R.S. Van Pelt. 2003. Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surface Processes and Landforms* 28:1163-188.