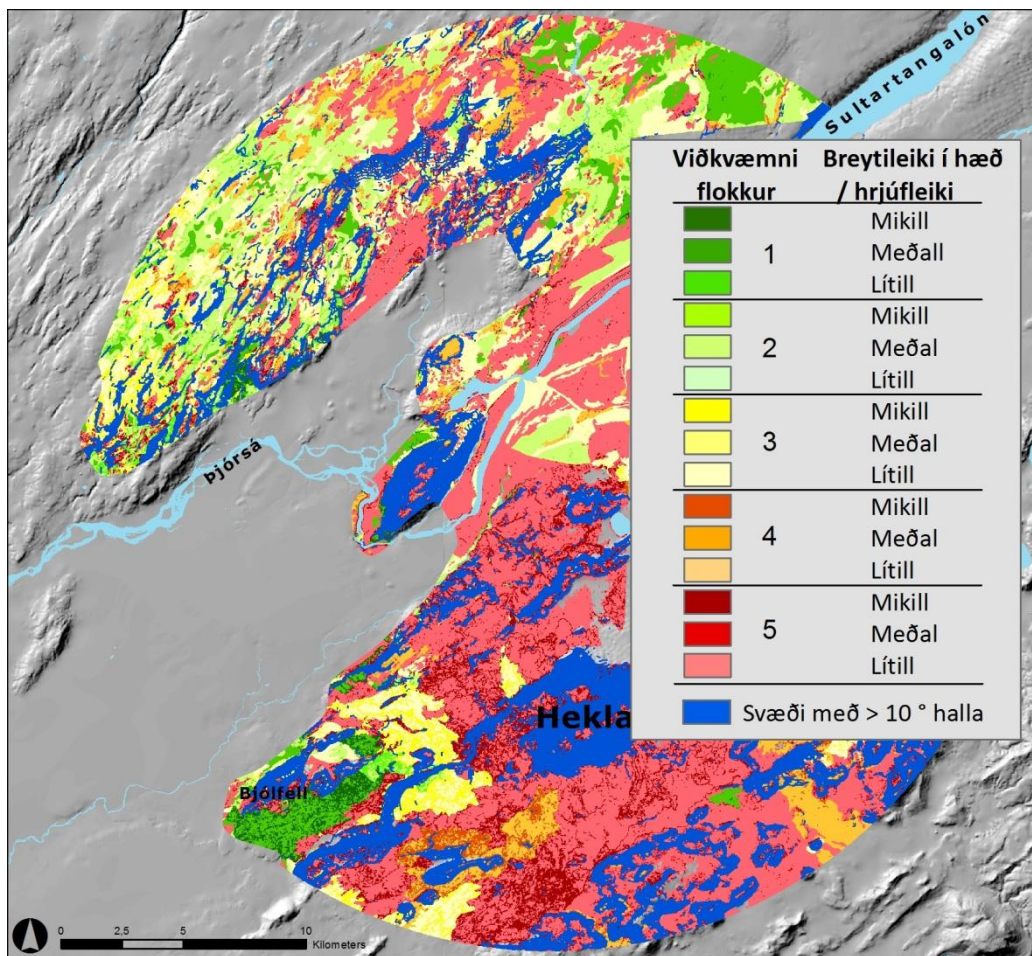


# Kortlagning á áfallapoli vistkerfa í nágrenni Heklu með tilliti til öskufalls

Skýrsla til Ofanflóðasjóðs

Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Arna Björk Þorsteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Guðmundur Halldórsson



*Mapping of the ecological resilience of ecosystems in the vicinity of Mt Hekla towards tephra fall*

Report to The Icelandic Avalanche and Landslide Fund  
In Icelandic with English abstract

## EFNISYFIRLIT

ÁGRIP .....	2
ABSTRACT .....	3
1. INNGANGUR .....	4
1.1 Fyrri rannsóknir.....	4
1.2 Öskuþykkt .....	6
1.3 Flutningur jarðvegsefna með vindi og vatni .....	7
1.4 Hrjúfleiki yfirborðs og landslag .....	8
1.5 Tíminn .....	10
2. AFMÖRKUN Á RANNSÓKNARSVÆÐI .....	11
2.1 Um rannsóknarsvæðið.....	12
3. GÖGN.....	14
3.1 Val á gagnabeikjum við mat á ástandi vistkerfa .....	14
3.2 Val á gögnum m.t.t. flutnings ösku .....	15
4. AÐFERÐIR.....	16
4.1 Mat á ástandi vistkerfa .....	16
4.2 Úrvinnsla gagna .....	18
4.3 Tilgáta um viðkvæmniflokka vistkerfa .....	20
4.4 Vettvangsskoðun - mat á einkunnagjöf og viðkvæmniflokkun .....	22
4.5 Hæðarlíkan.....	23
5. NIÐURSTÖÐUR.....	25
5.1 Viðkvæmniflokkun .....	25
5.2 Hallagreining.....	31
5.3 Hrjúfleiki yfirborðs .....	33
6. UMRÆÐUR.....	36
7. HEIMILDIR.....	40

## ÁGRIP

Verkefninu „GróGos - Mat á hættu á síðkominni dreifingu gosefna“ var ætlað að þróa aðferðir til að meta getu vistkerfa til að standast öskufall og hindra flutning ösku á síðari stigum. Það eru fjölmargir umhverfisþættir sem þar hafa áhrif á, einkum gróðurfar, gróðurþekja, landslag og hrjúfleiki yfirborðs.

Lagt var upp með að nýta fyrirliggjandi gögn til að leggja mat á ástand vistkerfa m.t.t. þess hversu vel þau þola öskufall og hindra öskudreifingu og sannreyna þau gögn með vettvangsrannsóknnum. Þróað var svokallað viðkvæmniflokkunarkerfi þar sem landi var gefin einkunn sem spáir fyrir um hversu þolin vistkerfin séu gagnvart öskufalli og hversu líkleg þau séu til að hindra frekari öskudreifingu. Yfirborðsflokkun Nyttjalds, gróðurkort Náttúrufræðistofnunar Íslands af hálendi Íslands og kortlagning RALA og Landgræðslu ríkisins á jarðvegsrofi voru notuð við gerð flokkunarkerfisins. Flokkun var yfirfarin á vettvangi og mat lagt á gæði gagnanna og flokkunarinnar. Niðurstaðan var að vistgerðir og gróðurþekju-upplýsingar af gróðurkortum NÍ af hálendi Íslands gáfu bestu samsvörun við skoðun á vettvangi.

Landslag og yfirborðshrjúfleiki hefur margvísleg áhrif þegar meta á líkur á flutningi eldfjallaösku í kjölfar öskufalls. Til að meta þá þætti var unnið með tvö hæðarlíkön með mismikilli nákvæmni. Annars vegar var hæðarlíkan LMÍ með 20 m upplausn og hins vegar Arctic DEM hæðarlíkan með 2 m upplausn. Unnt reyndist að nýta bæði þessi hæðarlíkön en á mismunandi hátt. LMÍ hæðarlíkanið var notað til að meta áhrif landslags með því að gera hallalíkan sem nýttist til að undanskilja land sem hallaði  $> 10^\circ$ , því líklegt er að aska hreinsist tiltölulega fljótt af þeim svæðum. Arctic hæðarlíkanið var notað til að meta hrjúfleika yfirborðs með meiri nákvæmni. Yfirborðshrjúfleikinn var flokkaður í 3 flokka eftir því hversu mikil áhrif hann er líklegur til að hafa á flutning ösku.

Niðurstöður viðkvæmniflokkunarinnar og yfirborðshrjúfleika flokkunarinnar voru að lokum lagðar saman, þannig að hverjum viðkvæmniflokki var í raun skipt í þrennt á grundvelli hrjúfleikaflokkanna. Varð þá til kort sem sýnir 15 flokka sem hafa mismikið þol gagnvart öskufalli og flutningi ösku í kjölfar eldgosa.

Helstu niðurstöður verkefnis eru þær að nýta má þessa aðferðafræði og gögn eins og vistgerðarkort og hæðarmódel til að flokka gróflega landið allt eftir því hversu viðkvæmt það er gagnvart öskufalli og flutningi ösku í kjölfar eldgosa. Flokkun sem þessi er góður grunnur til þess að draga fram helstu áhættusvæði og leggja mat á hvar er mikilvægt að styrkja gróður eða hefja landgræðsluáðgerðir, sem forvörn fyrir hugsanlegt öskufall.

## ABSTRACT

The aim of the project, *GróGos – Assessing potential secondary distribution of volcanic tephra* was to develop methods to assess the ability of ecosystems to survive deposition of volcanic tephra and to hinder secondary distribution of the tephra. There are several ecosystem and physical factors that are of importance, primarily: vegetation structure and community, vegetation cover, topography and surface roughness.

The project was primarily based on existing data on ecosystem characteristics in relation to how well ecosystems are likely to survive tephra fall and hinder secondary distribution of tephra. Following datasets/maps were used for developing classification of the ecosystem resilience of the area towards deposition of volcanic tephra: Land classification according to the database *Nytjaland*; habitat type classification of the Icelandic highlands produced by the Icelandic Institute of Natural History and; soil erosion maps of the Soil Conservation Service of Iceland and RALA (now the Agricultural University of Iceland). This primary resilience classification was compared with strategic field studies. The results showed that the habitat type maps of the Icelandic highlands conformed best with field data and were therefore used in the following work on mapping ecological resilience of the study area.

Topography and surface roughness are important factors in relation to secondary distribution of tephra. To estimate these factors two land elevation models were used. These are 20 m resolution model, produced by the National Land Survey of Iceland (NLSI) and 2 m resolution ArcticDEM land elevation model. The NLSI model was used to assess the effects of topography by creating a slope model which allowed exclusion of areas with slope  $> 10^\circ$ , as tephra is likely to be removed relatively soon from such areas. The ArcticDEM model was used to assess surface roughness with higher resolution. This information was used to create three different classes of surface roughness in relation to how likely this factor is to influence secondary transport of tephra.

Finally, ecosystem data (vegetation communities and vegetation cover), topography and surface roughness were combined to give a general character of ecosystem resilience towards tephra fall and tephra distribution for the whole area. The main results of the present project are that this methodology, based on ecosystem data, topography and surface roughness, can be used to classify the ecological resilience of areas towards tephra fall and secondary distribution of tephra. Such classification creates a useful platform for identifying major risk areas in order to plan ecological restoration actions to prevent and to mitigate disasters caused by volcanic tephra fall.

## 1. INNGANGUR

Í þessari skýrslu eru dregnar saman niðurstöður verkefnisins *GróGos – Mat á hættu á síðkominni dreifingu gosefna*. Markmið verkefnisins var að afla upplýsinga um gerð og ástand vistkerfa í nágrenni eldfjalla og þróa aðferðir til að meta getu þeirra til að standast öskufall og hindra dreifingu öskunnar að gosi loknu. GróGos er hluti af heildarhættumati vegna eldgosa á Íslandi GOSVÁ sem styrkt er af Ofanflóðasjóði og jafnframt tengist það verkefnunum ERMOND (*Ecosystem Resilience for Mitigation of Natural Disaster*) sem er styrkt af Norðurlandaráði og RECARE sem styrkt er af 7. Rammaáætlun ESB. Verkefnið var unnið í nágrenni Heklu á svokölluðu Hekluskógasvæði. Upphaflega var ætlunin að verkefnið næði einnig til svæða í nágrenni Kötlu en frá því var horfið þar sem vinna við greiningu á svæðum við Heklu reyndist tímafreakari og dýrari en upphaflega var áætlað. Verkefnið Hekluskógar miðar að því að rækta skóg/kjarr á svæðum við Heklu til að vernda svæðið og nærliggjandi byggð fyrir afleiðingum öskugosa, en þar hafa öskugos þrífaldlega valdið miklu tjóni á gróðurlendum og byggð. Sandstormar hafa síðan borið þessi lausu gosefni langt út fyrir þau svæði þar sem askan olli markverðu tjóni. Þessir sandstormar hafa í raun valdið mun meira tjóni en sjálft öskufallið. Markmið Hekluskógaverkefnisins er að draga úr þessari náttúruvá. Verkefninu GróGos er ætlað að styrkja faglegan grunn vistheimtarverkefna sem miða að því að draga úr náttúruvá af völdum öskugosa. Þetta er gert með því að þróa aðferðir til að meta getu vistkerfa til að standast slík áföll og greina hvernig er hægt að bregðast við veikleikum í áfallapoli svæða við eldfjöll. Þannig er hægt að gera verkefni eins og Hekluskógaverkefnið markvissari og árangursríkari.

Til að unnt sé að þróa aðferðir til að meta getu vistkerfa til að standast öskufall er nauðsynlegt að afla upplýsinga um þá umhverfisþætti sem mestu ráða um afleiðingar öskufalls fyrir vistkerfi og um líkindi þess að askan taki að flytjast til fyrir tilstuðlan vinda og vatns og valdi víðtækari tjóni. Þessir megin áhrifaþættir eru gróðurfar, yfirborðshrjúfleiki og landslag. Öskubykktin er úrslitaþáttur, er spilar saman með áferð yfirborðsins þar sem aska fellur. Þar er bæði átt við hversu óslétt landið er og hæð og samsetningu gróðurs. Í ósléttu og vel grónu landi safnast askan í lægðir og niður á milli plantnanna. Mishæðir draga úr vindhraða við yfirborð og minnka þar með líkur á að askan fjúki. Vistkerfi á ósléttu landi með þróttmiklum gróðri, einkum trjám og trjákenndum tegundum, eiga því meiri möguleika á að lifa af og endurnýja styrk sinn eftir öskufall, en vistkerfi á sléttlendi með lávöxnum gróðri.

Ákveðið var að byggja matið fyrst og fremst á fyrirliggjandi gögnum fremur en að fara í nýja kortlagningu eða aðra gagnaöflun. Hugmyndin er að svæði í nágrenni Heklu verði nýtt sem tilraunasvæði og jafnframt verði stefnt að því að unnt verði að yfirfæra aðferðirnar og útbúa áhættumat fyrir landið allt.

Markmið verkefnisins er því að þróa matskefi til að meta viðkvæmni vistkerfa gagnvart öskufalli og áhrifum yfirborðsgerða á líklegan flutning öskunnar. Jafnframt að slíkt matskerfi geti nýst við skipulag landgræðsluáðgerða til að takmarka öskufok og önnur neikvæð áhrif af öskufalli.

### 1.1 Fyrri rannsóknir

Við mat á þanþoli vistkerfa gagnvart öskufalli og flutningi lausra jarðvegsefna þarf að huga að mörgum þáttum, eins og jafnan þegar verið er að skoða og/eða spá fyrir um þróun

náttúrulegra ferla. Varðandi viðfangsefni GróGos er ekki á mikilli reynslu né rannsóknum að byggja héraendis en til eru ýmis gögn varðandi einstaka áhrifaþætti.

Ólafur Arnalds (2013) hefur tekið saman yfirlitsgrein um áhrif öskufalls á vistkerfi. Þar kemur fram að afleiðingar öskufalls eru mjög margþættar. Ólafur bendir m.a. á að eðlis- og efnafræðilegir eiginleikar öskunnar séu ólíkir, öskumagnið og dreifing þess afar mismunandi, vistkerfi standist álag öskufalls á ólíkan hátt og möguleikar þeirra til endurnýjunar eftir öskufall séu mjög breytilegir.

Tvær rannsóknir hafa verið gerðar héraendis á áhrifum áfoks á gróður og eflaust má heimfæra þær rannsóknarniðurstöður að einhverju leyti á áhrif öskufalls á gróður. Þar er annars vegar um að ræða yfirgripsmiklar rannsóknir þar sem fylgst er með framvindu og áhrifum áfoks úr lónstæði Blöndulóns (Olga Kolbrún Vilmundardóttir og fl. 2009, Borgþór Magnússon og Sigmar Metúsalemsson 2015). Sandur fýkur þar inn yfir aðliggjandi mólendi. Sandurinn safnast fyrir í lægðum en þúfnakollar standa víða uppúr. Athuganirnar hafa leitt í ljós að tegundum fækkar og gróðurþekja minnkar með aukinni áfoksþykkt. Lágplöntur hurfu þar sem sandþykktin var 2,5 – 5 cm. Flestar blómplöntur, hálfgrös og smárunnar hurfu þar sem sandþykktin var 5-10 cm. Það voru grös (t.d. túnvingull) og runnar, (loðvíðir, fjalldrapi og grasvíðir) sem best þoldu áfokið (Olga Kolbrún Vilmundardóttir o.fl., 2009).

Harpa Kristín Einarsdóttir (2007) gerði tilraunir um áhrif mismikils áfoks á gróðurþekju og tegundasamsetningu norðan Blöndulóns og austan Háslóns. Tilraunareitirnir við Háslón voru á sléttlendi en reitirnir við Blöndulón voru svolítið þýfðir. Rannsóknasvæðið við Blöndulón er í um 500 m h.y.s. en svæðið við Kárahnjúka er í um 625 m h.y.s.. Gróður á rannsóknarsvæðinu við Blöndulón var hávaxnari en gróðurinn við Háslón. Við Háslón var krækilyng, loðvíðir og fjallavíðir áberandi en við Blöndulón voru fjalldrapi og krækilyng mest áberandi. Settir voru ramar á gróið land og þeir þaktir með misþykku sandlangi. Niðurstöðurnar sýndu að tegundum fækkaði og gróðurþekja minnkaði samfara aukinni sandþykkt. Gróður við Háslón þoldi áfokið verr en við Blöndulón og munaði þar mestu í reitum með þunnu áfokslagi (1 og 2 cm). Líklegasta skýringin á því er sú að gróðurinn við Háslón var lávaxnari fyrir.

Í kjölfar gossins í Eyjafjallajökli vorið 2010 var fylgst með áhrifum öskufallsins og flutningi öskunnar á Skógaheiði. Jafnframt var gerð tilraun í Gunnarsholti þar sem fylgst var með áhrifum mismunandi öskuþykktar á gróður. Í tilrauninni voru lagðir út 1 m<sup>2</sup> reitir og þeir þaktir með 1 cm, 2 cm, 4 cm og 8 cm þykku öskulagi ásamt viðmiðun í tvennskona landi, vel grónu mólendi og svo á rýrum mel. Fylgst var með reitunum í þrjú ár alls. Það sem tilraunin leiddi í ljós, og gerðist einnig á Skógaheiði og nágrenni, var að askan hvarf mjög hratt og olli litlu sjáanlegu tjóni. Á Skógaheiði var askan nánast öll horfin að hausti en sat þó eftir í lægðum og í vel grónu landi. Vorið eftir var sú aska nánast horfin líka. Það sást gróðurskemmdir á Skógaheiði þar sem leysingavatn hafði borið með sér ösku en þau ummerki hurfu fljótt. Einnig fundust dæmi um verulegt vindrof þar sem hvassir vindstrengir voru ríkjandi sem hafa borið með sér mikið af ösku. Allir þessir atburðir virtust hins vegar um garð gengnir vorið 2011 því þá var askan horfin. Langtímaáhrif gjóskunnar m.t.t. landhnignunar og rofs voru því almennt ekki fyrir hendi á því svæði á Skógaheiði sem fylgst var með og má rekja það til þess hversu fín gosefnin voru og því höfðu þau skamma viðdvöl og jafnframt höfðu þau lítinn rofmátt. Tilraunin sem var gerð í Gunnarsholti staðfesti að nokkru það sem sást gerast á Skógaheiði. Askan var fljót að hverfa og hún hvarf fyrst af ógrónum svæðum. Áhrif hennar voru lítil nema þar sem þykkustu öskulöggin voru og askan hafði lengstan dvalartíma, þ.e. í velgrónu landi, þar virtist hún hafa áhrif á tegunda-

samsetningu til skamms tíma. Eins mátti sjá áhrif á þekju viðkvæmstu tegundahópana sbr. fléttur á ógróna svæðinu þar sem öskuþykkt var mest (Jóhann Þórsson, óbirtar niðurstöður).

Lausleg heimildarleit um afleiðingar öskufalls á vistkerfi erlendis leiddi í ljós um margt sambærilegar niðurstöður. Mosar og lágróður láta fyrst undan undan síga og svo virðist vera að hæð gróðursins ráði mestu um lifun svo fremi sem plönturnar nái eitthvað að standa upp úr öskunni.

Víðtækustu upplýsingarnar eru af afleiðingum sprengigossins sem varð í Mount St. Helens árið 1980 (Dale og fl., 2005). Gróðurfar, veðurfar og aðrar umhverfisaðstæður eru þar mjög ólíkar Heklusvæðinu og því vafasamt að heimfæra afleiðingarnar þar á umhverfi Heklu. Niðurstöður frá St. Helens sýndu að gróður sem stóð upp úr öskulaginu átti mun auðveldara með að ná sér á strik en lágvaxinn gróður sem kaffærðist. Flestar plöntur drápust þó þar sem öskuþykktin var > 15 cm. Nánast allur mosi drapst þar sem öskuþykktin var 5 cm eða meiri. Möguleikar plantna til að lifa af aukast ef öskunni er raskað t.d. ef gengið eða keyrt er um svæðið, ef dýr klóra í yfirborðið, askan fýkur eða skolast burt og fleira því um líkt (Walker og Moral, 2003). Tré eiga mesta möguleika á að lifa af öskufall en sé öskuþykktin 30 cm eða meiri þá hefur það sýnt sig m.a. á Nýja Sjálandi að skógar létu undan síga (Kent og fl., 2001). Rannsóknir hafa sýnt að efnasamsetning öskunnar getur skipt sköpum fyrir afdrif trjáa. Úrkoma samfara öskufalli og/eða skömmu eftir öskufallið getur aukið skaða af völdum eiturefna (súlfat, flúor, klórit) með því að umbreyta þeim, svo úr verði súrt regn (Kent og fl., 2001). Skaði af slíkri úrkomu hérlendis yrði einkum á þeim árstíma sem tré eru laufguð.

Þegar horft er til fyrirliggjandi upplýsinga varðandi afleiðingar öskufalls á vistkerfi er ekki hægt að draga einfaldar ályktanir um hver áhrifin verða næst út frá því hvernig þau voru síðast. Hvert tilfelli er einstakt hvað varðar einn eða alla áhrifaþætti. Sumar rannsóknir benda til að aðeins þunnt öskulag og/eða áfokslag skaði gróður verulega eða drepri gróður varanlega. Aðrar rannsóknir benda til að gróður eða rætur geti lifað undir 40 cm þykkri ösku og náð sér á strik ef aðstæður leyfa, s.s. ef askan fýkur eða skolast burt (t.d. Zobel og Antos 1997; Newnham og fl., 1999; Kent og fl., 2001).

## 1.2 Öskuþykkt

Öskufall frá einstökum eldfjöllum og eldgosum er mjög mismikið. Þykkt öskunnar ræður miklu um það hvort gróður lifir af eður ei. Eftir því sem þykktin er meiri verða afleiðingarnar eðlilega meiri. Öskuþykkt minnkar að jafnaði hratt með vaxandi fjarlægð frá upptökum.

Öskulög í jarðvegi hafa mikið verið rannsökuð hérlendis og flest þeirra aldursgreind og rakin til upprunastaðar (t.d. Sigurður Þórarinnsson 1979; Thordarson og Larsen, 2007). Þorvaldur Þórðarson og Guðrún Larsen hafa útbúið mynd sem sýnir þykkt ösku frá nokkrum Heklugosum og af henni má lesa að langmest af öskunni fellur í innan við 10 km fjarlægð frá upptökunum. Öskuþykktin er yfirleitt ekki meiri en 10 mm þegar komið er 50 km frá upptökunum en í nokkur skipti þegar Hekla hefur gosið líparíti (Rhyolite) þá er dreifingin meiri (Thordarson og Larsen, 2007).

Jafnfallin þykkt öskunnar ein og sér segir ekki allt. Ef landi hallar, er þýft eða mishæðótt, er líklegt að askan flytjist tiltölulega fljótt niður í lægðirnar. Gróður á landi sem rís upp fyrir umhverfið hefur því meiri möguleika á að lifa af. Þetta sýndi sig mjög vel eftir Eyjafjallajökulsgosið. Úrkoma og vindur flutti öskuna af landi sem hærra stóð niður í lægðirnar (mynd 1).



**Mynd 1.** Á Skógaheiði í september 2010. Aska frá Eyjafjallajökulsgosinu (2010) hefur flust með vatni og vindum og sest til í lægðum. Ljósmynd Elín F. Þórarinsdóttir. Skógaheiði in September 2010. Ash from the Eyjafjallajökull eruptions (2010) has been transferred by water and wind and accumulated in depressions.

### 1.3 Flutningur jarðvegsefna með vindi og vatni

Eins og komið hefur fram þá segir jafnfallin öskubýkkt ekki allt varðandi það hvernig vistkerfum reiðir af. Vindrof í kjölfar öskufalls getur ekki síður valdið skaða á gróðri.

Vindhraði er sá þáttur sem stjórnar mestu um áfok og vindrof en aðrir þættir eins og kornastærðarsamsetning, hrjúfleiki yfirborðs, gróðurþekja og veðurfarsþættir hafa einnig áhrif (Rose, 1998; Zobeck og fl., 2003). Flutningsmáti efna með vindi er þrenns konar, skrið (*e. creep*) er hreyfing stærstu kornanna með jörðu, svif (*e. suspension*) lýsir hreyfingu smæstu kornanna sem þyrlast hátt í loft og valda rykmekki í loftinu. Þau geta borist langar leiðir en valda almennt ekki skaða á gróðri. Þriðji flutningsmátinn er skopp (*e. saltation*) sem lýsir hreyfingu stærri korna sem eru þó nógu smá til að takast á loft. Skopp-hreyfingu fylgir mesti rofrafturinn því kornin takast á loft en skella síðan niður aftur og við áreksturinn losnar um fleiri jarðvegskorn og rofið stigmagnast þannig undan rofáttinni (Bagnold, 1941). Stærstur hluti fokefna berst yfirleitt með skoppi, jafnvel yfir 70% (Hudson, 1981).

Nokkrar rannsóknir hafa verið gerðar á vindrofi og sandflutningi hérlandis, einkum á auðnasvæðum, sem aukið hafa skilning á þessum rofferlum (t.d. Hjalti Sigurjónsson o.fl., 1999; Fanney Gísladóttir, 2000; Ólafur Arnalds og Fanney Ó. Gísladóttir, 2009; Ólafur Arnalds og Berglind Orradóttir, 2010; Elín Fjóra Þórarinsdóttir, 2010).

Í kjölfar eldgossins í Eyjafjallajökli vorið 2010 voru gerðar mælingar á Skógaheiði á flutningi öskunnar þá um sumarið og fram í október. Fok mældist í yfir þrjátíu skipti og m.a. einn mesti sandstormur sem mælingar hafa náðst af á jörðinni (Ólafur Arnalds og fl., 2013). Þetta undirstrikar það að hætta á vindrofi eykst eftir því sem framboð fokefna er meira og er í



samræmi við niðurstöður rannsóknar á vindrofi á landslagsskala sem gerð var á Hekluskógasvæðinu (Elín Fjóla Þórarinsdóttir, 2010). Þær sýna að mikill munur var á magni fokefna milli svæða sem helgaðist fyrst og fremst af því hvar uppsprettur áfoksefna voru. Bæði vindur og vatn höfðu áhrif á efnisflutninginn því hann reyndist vera mestur á auðnasvæðum þar sem mikið var af lausum fokefnum en einnig þar sem jarðvegsefni bárust inn á svæðið með leysingavatni.

Þegar meta á hættu á dreifingu gosefna í kjölfar eldgoss þarf einnig að hafa fleiri umhverfisþætti en vind og vatn í huga sbr. rannsóknir á Hekluskógasvæðinu sem sýndu að þættir s.s. gróðurþekja, kornastærð og hlutfall grjóts á yfirborði reyndust líka hafa áhrif á efnisflutning (Elín Fjóla Þórarinsdóttir, 2010).

#### 1.4 Hrjúfleiki yfirborðs og landslag

Eitt af því sem mestu ræður um flutning eldfjallaösku er hrjúfleiki yfirborðs. Með hrjúfleika er átt við allar mishæðir í landi s.s. gróður, grjót, klappir, þúfur, dældir og skurði (á fínum skala) en einnig landslag s.s. fjöll, hóla og dali (á grófum skala). Allar mishæðir í landinu, stórar og litlar hafa áhrif á loftstreymi og þar með á flæði áfoksefna (Chepil, 1950). Fjöll og hæðir breyta vindstefnu og allar ójöfnur yfirborðsins s.s. fast berg, grjót og gróður, draga úr vindhraða við yfirborð auk þess sem þær veita öskuögnum skjól (Chepil og Woodruff, 1963). Landslag nær til breytinga í hæð (á grófum skala) s.s. hólur, fjöll og dalir sem stuðla m.a. að flutningi efna niður af svæðum sem hærra liggja. Rétt er að geta þess að þegar fjallað er um að landslag eða hrjúfleiki yfirborðs hindri áfok er átt við þann hluta áfoksefnanna sem sem flytjast með stökk eða skriðhreyfingu.

Hávaxinn gróður, grýtt yfirborð og land með hæðum og lægðum veita því lausum jarðvegsefnum (ösku) skjól og draga þar með úr líkum á flutningi efnanna eftir á (mynd 2).



**Mynd 2.** Á Skeiðarársandi í júlí 2011. Aska frá Grímsvatnagosinu í maí 2011, hefur safnast í gróðureyjar og lægðir. Ljósmynd Elín F. Þórarinsdóttir. Skeiðarársandur in July 2011. Ash from the Grimsvatna eruptions has accumulated in vegetation patches and depressions.

Aska sem berst með vindi frá eldstöð dreifist í fyrstu jafnt yfir landið en á Íslandi er vindasamt og vindur feykir skjólausum öskuögnum fljótt af stað. Það fer því eftir öskumagninu og yfirborðsgerðinni hvort öskuagnirnar tolli þar sem þær lentu eða taki að fjúka. Á ógrónu sléttlendi er líklegt að askan fjúki af stað og stöðvist ekki fyrir en hún hefur borist inn yfir gróið eða óslétt svæði þar sem agnirnar fá skjól. Þunnt öskulag (<3cm) veldur líklega litlum skaða á algrónu landi en falli sambærilegt magn ösku á land með rofinni gróðurþekju getur skaðinn orðið mun meiri þegar askan af lítt grónu svæðunum fýkur af stað og sverfur og safnast í gróðureyjarnar (mynd 2).

Landslagið ræður einnig miklu um það af hvaða svæðum askan fer og hvar hún safnast saman. Vindrof og vatnsrof stuðla að því að sum svæði hreinsast af ösku, einkum þau sem hærra liggja og landi hallar (Walker og Moral, 2003). Með mikilli einföldun má segja að askan hreinsist af hæðunum og safnist fyrir hlémegin og í lægðum. Landslagið hefur einnig áhrif á síðari flutning eldfjallaösku þar sem korn sem berast undan vindi með skrið- og skoppfreyfingu berast ekki upp brattar brekkur. Víða um land má sjá hlíðar sem eru gróðurlausar neðan til en hærra uppi er gróið. Mörk gróins og ógróins lands sýna vel þá hæð þar sem svörfunar gætir (sjá mynd 3).



**Mynd 3.** Á Mælifelli á Mælifellssandi og á nærliggjandi hæðum sjást skörp skil milli auðnarinnar þar sem sandsvörfunar gætir og gróðursins í hlíðunum. At the foothills of Mt. Mælifell a clear distinction can be seen between areas where sand abrasion occurs and the slopes where the sand saltation does not reach (mynd/image: <http://www.amazingplacesonearth.com/mt-maelifell-iceland/>).

Athuganir á hallatölu nokkurra slíkra hlíða leiddu í ljós að svörfunar gætir almennt ekki í hlíðum sem hallar meira en 10°. Þar safnast áfoksefni gjarnan saman við brekkurætur (Faney Ósk Gísladóttir 2000). Gróður sem liggur hærra í hlíðum á því meiri möguleika á að lifa af og endurnýja sig í kjölfar öskufalls. Aska rennur niður brattar hlíðar og hallinn kemur í veg fyrir endurtekna svörfun af völdum áfoks. Ójöfnur á flatlendi stuðla einnig að því að askan hreinsast af svæðum sem hærra liggja t.d. eins og sýnt hefur sig í áfoksgeirum við Blöndulón þar sem þúfnakollarnir standa upp úr (Borgþór Magnússon og Sigmar Metúsalemsson, 2015).

Magn áfoksefna og umfang setstaða stjórnar því hvort öll askan fái skjól eða hvort efnisflutningur heldur áfram þegar hindrun nær ekki lengur að skýla. Eftir því sem land er

Ósléttara því minni líkur eru á að aska sem fallið hefur fjúki um langan veg og sverfi og drepri gróður.

Þegar spá á fyrir um flutning eldfjallaösku eftir öskufall er einnig nauðsynlegt að skoða hvernig landið liggur með tilliti til ríkjandi rofátta, þ.e. vindátt sem jafnan er þurr.

## 1.5 Tíminn

Miklu skiptir hvenær ársins aska fellur og hversu langan tíma það tekur vistkerfi að jafna sig eftir öskufall.

Á Íslandi getur árstíðin skipt sköpum fyrir afleiðingar öskufalls. Ef askan fellur á snjó er líklegt að hluti hennar skolist út í læki og ár með leysingarvatni. Annar hluti skolast niður á jarðvegsyfirborðið og nýgræðingur að vori hefur meiri möguleika á að vaxa upp úr öskunni en ef askan fellur á auða jörð. Líklega er gróður viðkvæmastur fyrstu vikur gróandans og þær vikur sem gróður er í vexti hér á landi.

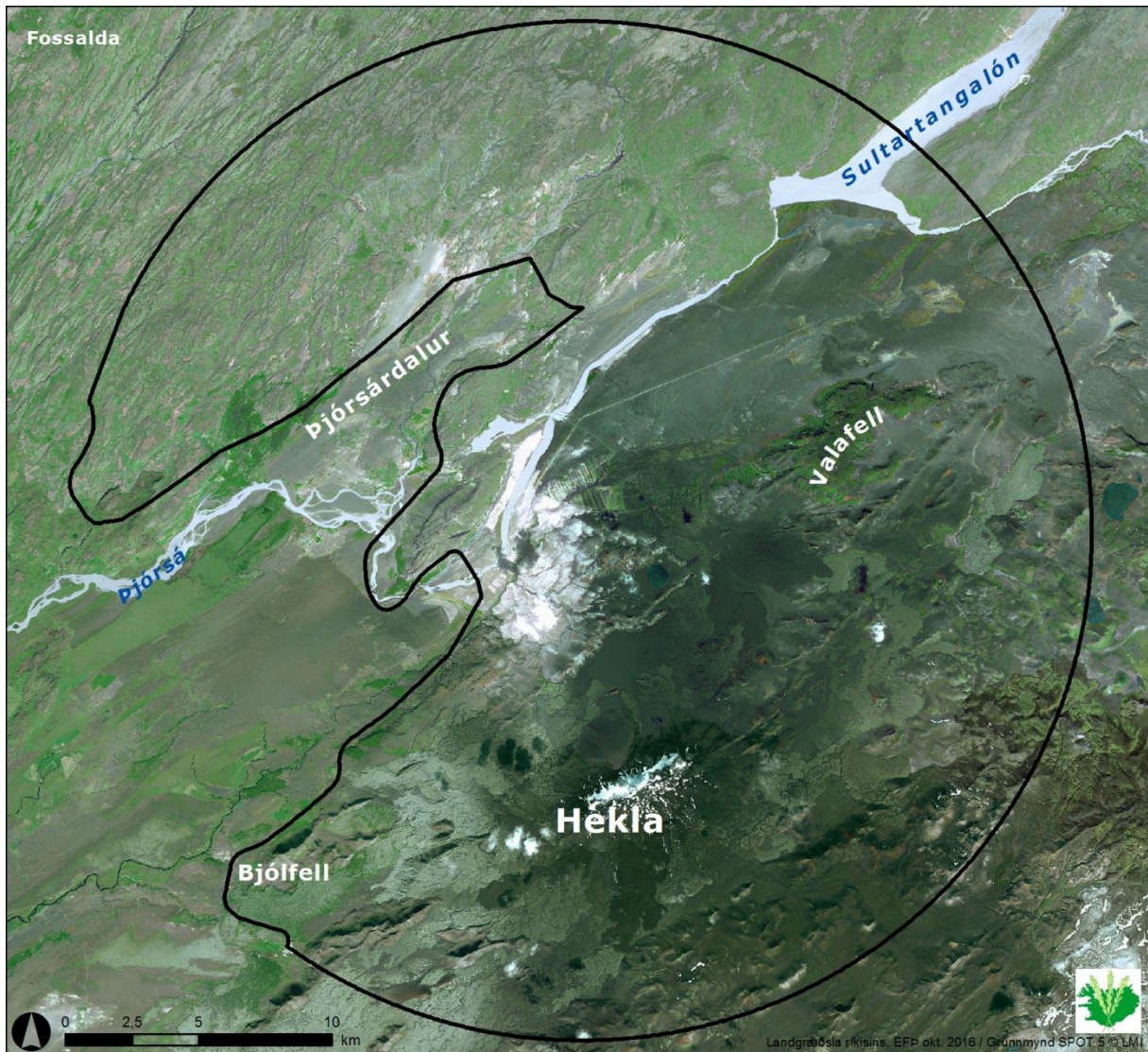
Þegar verið er að meta þol vistkerfa gagnvart öskufalli er nauðsynlegt að íhuga hvaða tímaspönn miðað skuli við. Falli aska á gróandanum getur komið bakslag í vöxt plantna, en hversu mikið fer eftir magni öskunnar og veðráttunni næstu daga. Ef öskulag er þunnt og það rignir fljótlega í kjölfarið má vera að bakslagið verði lítið. Ef öskulag er hins vegar þykkt og/eða vindur feykir öskunni strax af stað er líklegt að flestar plöntur skaðist eða drepist. Eitthvað af þeim gæti þó lifað og náð sér á strik að ári eða á næstu árum.

Vandlega hefur verið fylgst með framvindu gróðurs í kjölfar sprengigossins sem varð í St. Helens 1980. Fyrstu 20 árin var stöðug framþróun í gróðurendurkomunni en eftir það hægði á framvindunni. Öskuþykktin og aðstæður á hverjum stað réði því hvað lifði af og náði sér á strik. Svo dæmi sé tekið þá er áætlað að á svæðinu sé aðeins um ¼ - ½ þeirra mosategunda sem voru fyrir gos og á svæðum þar sem 6 tommu (~15 cm) þykk aska huldi land eru nú aðeins um 30-60 % þeirra jurta sem áður voru þar (Casey 2015).

<http://www.cbsnews.com/news/35-years-after-mt-st-helens-eruption-nature-returns/>

## 2. AFMÖRKUN Á RANNSÓKNARSVÆÐI

Í upphaflegri áætlun var gert ráð fyrir að verkefnið GróGos næði bæði til svæða við Heklu og Kötlu. Fljótlega kom í ljós að sú vinna yrði mun meiri en fjárveitingar leyfðu og var því ákveðið að verkefnið næði á þessu stigi aðeins til nágrennis Heklu. Til að ná fjölbreytni í bæði landslag og gróðurfar var valið svæði innan hrings sem er um 38 km í þvermál og nær yfir bæði gróin og ógróin hraun í nágrenni Heklu en einnig vestur og norður yfir Þjórsá (mynd 4).



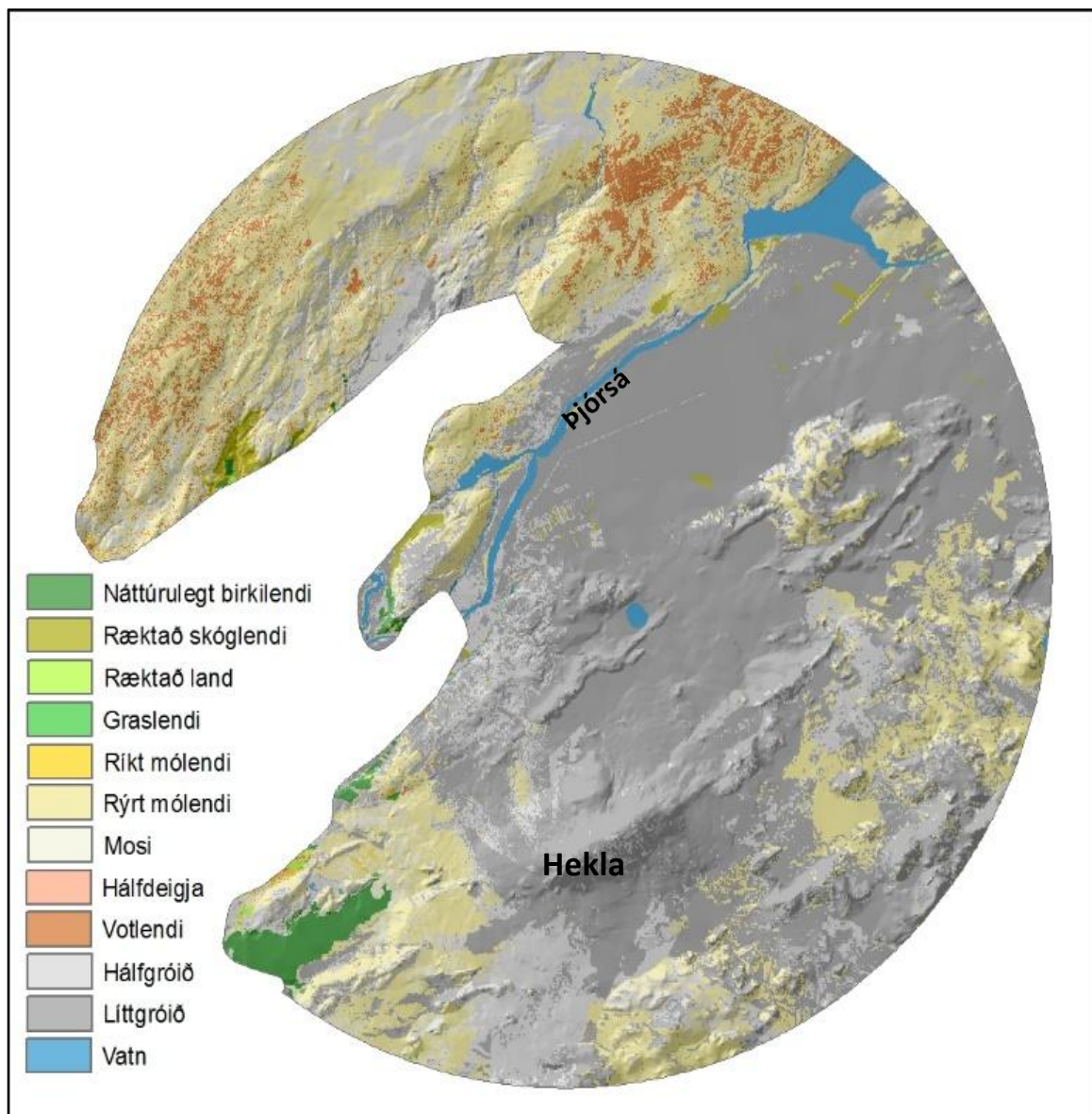
**Mynd 4.** Yfirlitsmynd sem sýnir afmörkun svæðisins kringum Heklu sem verkefnið nær til. An image showing the outline of the research area around Mt. Hekla.

Ástæða þess að það vantar hluta svæðisins er sú að ein af gagnabekjunum sem valdar voru (sjá kafla 3.1) nær ekki niður í Þjórsárdal og efsta hluta Landsveitar. Rannsóknarsvæðið er 960 km<sup>2</sup>.

## 2.1 Um rannsóknarsvæðið

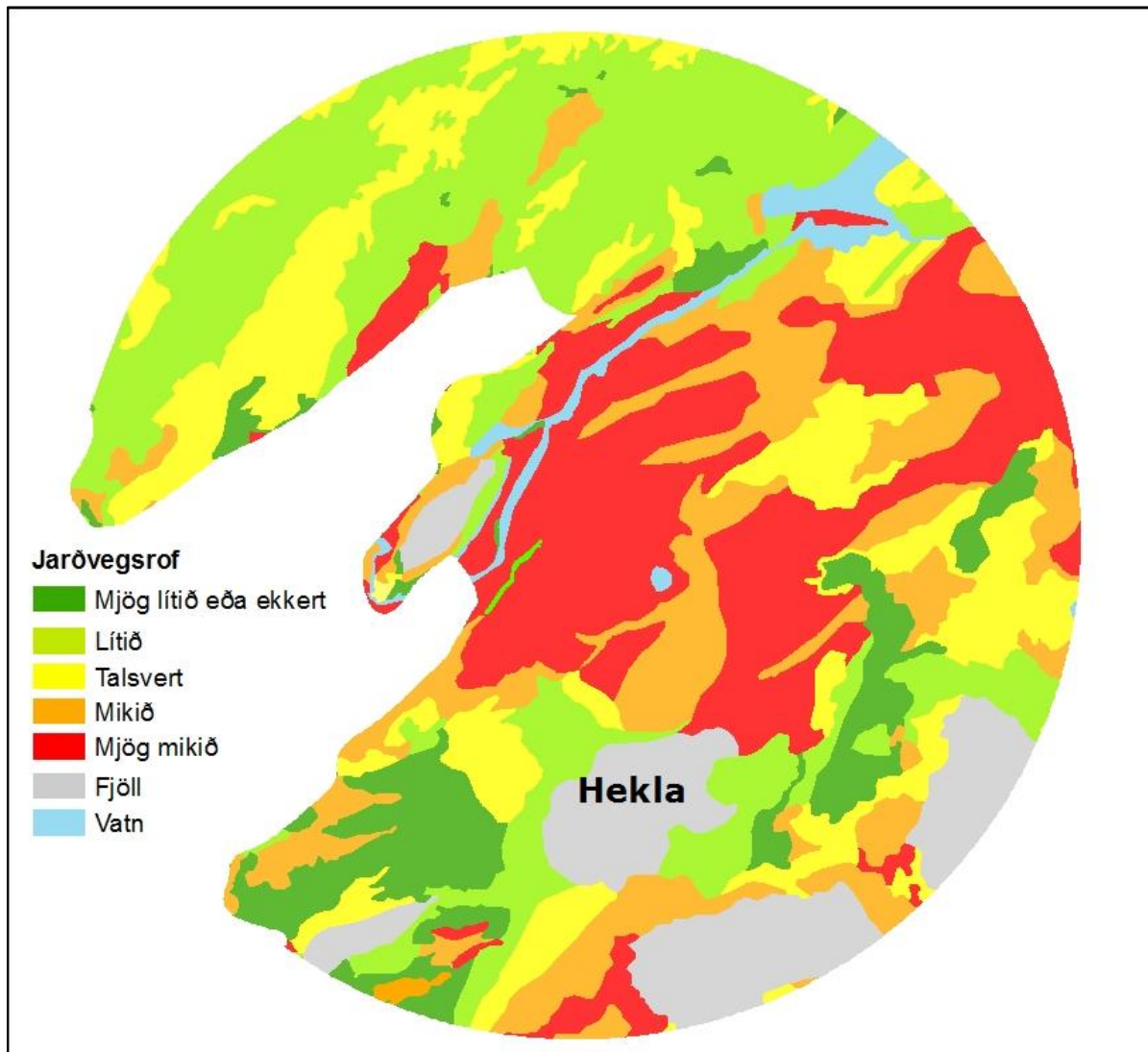
Hekla er eitt virkasta eldfjallið á Íslandi og frá landnámi hafa 18 eldgos í Heklu verið skráð (Ármann Höskuldsson o.fl., 2007). Frá lokum síðasta jökulskeiðs, eða síðustu 11 þúsund árin hefur Hekla framleitt meiri ösku og vikur en nokkuð annað íslenskt eldfjall, eða um  $32,4 \text{ km}^3$  (Árni Hjartarson, 1995). Aska frá Heklu hefur valdið miklum gróðurskemmdum og jarðvegsrofi (Arnór Sigurjónsson, 1958) og stór svæði í nágrenni fjallsins eru þakin vikri og sandi.

Gróður á rannsóknarsvæðinu er víða rýr. Samkvæmt yfirborðsflokkun Nytjalands (Fanney Ósk Gísladóttir og fl., 2014) eru vel gróin svæði á stöku stað, einkum á vestanverðu rannsóknarsvæðinu þar sem dálítið er af votlendum ( $33 \text{ km}^2$ ). Skógar þekja um  $18 \text{ km}^2$ . Önnur þokkalega vel gróin svæði þekja um  $3 \text{ km}^2$  til viðbótar. Rýr mólendi þekja  $257 \text{ km}^2$  og mosi  $23 \text{ km}^2$ . Meira en helmingur svæðisins er hálfgróinn (gróðurþekja 20-50%) og líttgróinn (gróðurþekja < 20%) samtals  $610 \text{ km}^2$  (mynd 5).



**Mynd 5.** Yfirborðsflokkun á rannsóknarsvæðinu skv. Nytjalandi. Nytjaland, vegetation land cover classification of the research area. Legends, from top: Birch woodland; forest plantations; cultivated land; grassland; rich heathland; degraded heathland; moss; semi wetland; wetland; semi-vegetated land (vegetation cover: 20-50%); poorly-vegetated land (vegetation cover: < 20%); lakes and rivers.

Mikil jarðvegseyðing hefur átt sér stað í grennd við Heklu m.a. vegna þess að gjóska frá eldgosum hefur kæft lággróður og fokið af stað. Samkvæmt rofkorti af rannsóknarsvæðinu (Ólafur Arnalds o.fl. 1997) er jarðvegsrof útbreitt þar. Um 37% rannsóknarsvæðisins fékk rofeinkunnina 4 eða 5 sem þýðir mikið eða mjög mikið rof og um 18% flokkast þar með talsvert rof (mynd 6).



**Mynd 6.** Flokkun jarðvegsrofs á rannsóknarsvæðinu. Soil erosion classification of the research area. Legends, from top: No/very little erosion; little erosion; severe erosion; very severe erosion; mountains; lakes and rivers.

Landgræðsla ríkisins hefur unnið að uppgræðslum innan rannsóknarsvæðisins og teljast um 147 km<sup>2</sup> til landgræðslusvæða.

Mælingar við Búrfell sýna að norðaustlægar vindáttir eru ríkjandi á svæðinu en þær eru jafnfram helstu rofáttirnar (Elín Fjóra Þórarinsdóttir, 2010). Áfoksgeirar sem gengu niður Rangárvelli og Landsveit bera vitni um það en stefna þeirra er frá norðaustri til suðvesturs, eins og sjá má á rofmynstrum á mynd 6.

### 3. GÖGN

Til að meta ástand vistkerfa í nágrenni eldfjalla m.t.t. öskufalls og flutnings ösku í kjölfar eldgosa var lagt upp með eftirfarandi:

- að nota landupplýsingagögn sem ná yfir stór samfelld svæði og helst til alls landsins til að meta núverandi ástand vistkerfa
- að leggja mat á viðkvæmni mismunandi vistkerfa gagnvart öskubýkkt m.a. útfrá hæð og gerð gróðurs og gróðurþekju
- að leggja mat á líklegan flutning efnis/ösku en hann fer eftir gróðurhæð, hrjúfleika yfirborðs, halla lands og fl..
- að draga saman upplýsingar af ólíkum toga til að flokka viðkvæmni vistkerfa gagnvart öskufalli og til að öðlast sýn á hvaða svæði væri mikilvægt að styrkja með landgræðslu/skógrækt m.t.t. hugsanlegs öskufalls.

Lagt var upp með að nýta fyrirliggjandi gögn og takmarka sem mest gagnaöflun á vettvangi. Safnað var saman fyrirliggjandi gögnum sem talin voru nýtast annars vegar til að leggja mat á ástand vistkerfa (gróður, jarðvegur, rof o.fl.) og hins vegar gögn sem lúta að landlagsþáttum og hafa áhrif á dreifingu ösku (hrjúfleiki yfirborðs, landslag o.fl.).

#### 3.1 Val á gagnþekjum við mat á ástandi vistkerfa

Fyrirliggjandi landupplýsingar sem talið var að myndu nýtast til að fá yfirlit yfir ástand vistkerfa og hugsanlegt þol þeirra gagnvart öskufalli eru eftirfarandi:

**Nytjaland** er landupplýsingagrunnur þar sem yfirborðsþekja landsins er flokkuð í 12 flokka, þar af eru 10 flokkar gróins lands. Viðmiðunarmælikvarði gangnanna er 1:30.000. Yfirborðsflokkunin var unnin með fjarkönnunaraðferðum á grundvelli LANDSAT og SPOT gervitunglamynda frá árunum 1999–2006 (Fanney Ósk Gísladóttir o.fl. 2014).

**Gróðurkort af miðhálandi Íslands.** Unnið er að heildstæðu gagnasafni um gróður á Íslandi á vegum Náttúrufræðistofnunnar Íslands (NÍ) í viðmiðunarmælikvarða 1:25.000. Úr þessu gagnasafni var árið 2014 gefið út gróðurkort af hálandi landsins þar sem annars vegar má finna upplýsingar um gróðurþekju og hins vegar gróðurfur (gróðurfélag og gróðurlendi) og vistgerðir (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2014). Flokkun á vistgerðum byggir í grunninn á gróðri þar sem plöntur teljast góðir umhverfisvísar því útbreiðsla þeirra byggir að miklu leyti á umhverfisaðstæðum þ.e. veðurfari, jarðvegi og berggrunni. Inni í flokkunina spilar það lífríki sem þrífst á viðkomandi svæði. Vistgerðaflokkunin á gróðurkortinu rannsóknarsvæðisins byggist á skilgreiningum NÍ á vistgerðum á hálandi Íslands sem birtar hafa verið á vistgerðarkortum. Á nokkrum svæðum innan rannsóknarsvæðisins vantaði skilgreiningu á vistgerð og þar voru upplýsingar um gróðurfélag og gróðurlendi notaðar til að áætla vistgerð. Skilgreiningar fyrir vistgerðir má sjá á: <http://www.ni.is/grodur/vistgerdir> (Náttúrufræðistofnun Íslands, á.á.).

**Gróðurþekja.** Upplýsingar um gróðurþekju er að finna í Gróðurkortinu af miðhálandi Íslands (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2014). Á kortinu er gróið land flokkað í fjóra þekjuflokka þ.e. algróið >90% gróðurhula, 75% gróðurhula, 50% gróðurhula og 25% gróðurhula. Fimmti flokkurinn er land sem hefur minni gróðurþekju en 10% og er það flokkað í 14 landgerðir eftir eðliseiginleikum lands. Upplýsingarnar byggja á vettvangsgögnum gróðurkortagerðar Rannsóknastofnunar landbúnaðarins og Náttúrufræðistofnunar Íslands frá árabílinu 1955 til 2014 (sjá <http://www.ni.is/midlun/utgafa/kort/grodurkort>).

**Jarðvegsrof á Íslandi.** Jarðvegsrof var kortlagt á árunum 1991-1997 af RALA (nú Landbúnaðarháskóli Íslands) og Landgræðslu ríkisins. Kortlagt var á gervitunglamyndir á vettvangi, í mælikvarðanum 1:100.000. Skráð var hverskonar rof var um að ræða, svokölluð rofmynd og einnig hversu virkt rof var, þ.e. rofeinkunn. Rofmyndirnar eru 14 talsins og þar af 6 sem tilgreina rofform í grónu landi. Hinar 8 rofmyndirnar tilgreina rof í mismunandi yfirborðsgerðum (Ólafur Arnalds o.fl. 1997).

### 3.2 Val á gögnum m.t.t. flutnings ösku

Til að meta hugsanlega öskudreifingu út frá landlagspáttum var ákveðið að vinna með eftirfarandi gögn:

**Hæðarlíkan af Íslandi.** Landmælingar Íslands (2016) hafa útbúið hæðarlíkan af Íslandi og byggir það á hæðarlínunum með 20 m mun og hver myndeining er 20 m á kant. Hluti rannsóknarsvæðisins hefur verið uppfærður með meiri nákvæmni (sjá <http://www.lmi.is/nytt-landhaedarlikan-af-islendi/>). Hæðarlíkanið sýnir vel meginrætti landslagsins en það felur ekki í sér neinar upplýsingar um nærlandslag eða hrjúfleika yfirborðsins sem skiptir miklu máli þegar verið er að fjalla um áhrif öskufalls og hugsanlegan flutning eldfjallaösku í kjölfar öskufalls.

**ArticDem hæðarlíkan.** Unnið er að gerð hæðarlíkans fyrir norðurheimskautssvæðið (University of Minnesota, 2016 <http://pgc.umn.edu/arcticdem>) og þar með talið Ísland. Það líkan byggir á nýjum gervitunglagögnum og er stærð hverrar myndeiningar 2 x 2 m. Líkanið er í vinnslu og vantar talsvert upp á að líkanið af rannsóknarsvæðinu sé tilbúið (sjá mynd 7). Engu að síður var ákveðið að gera tilraun til að nota líkanið til að gera grófa yfirborðshjúfleikaflokkun. Rétt er að taka fram að greiningin er byggð á óútgefnu líkani og ber að skoða niðurstöðurnar með hliðsjón af því.



**Mynd 7.** Svarthvít svæði sýna þann hluta rannsóknarsvæðisins sem ArticDem hæðarlíkanið er tilbúið fyrir. Eftir því sem liturinn er ljósari því hærra er landið.

Grayscale image showing the area covered by the new ArticDem model. Lighter colors represent increased altitude.



## 4. AÐFERÐIR

### 4.1 Mat á ástandi vistkerfa

Til að meta ástand vistkerfa var ákveðið að taka hvert gagnasett fyrir sig og gefa einstökum flokkum einkunn út frá því hversu viðkvæmt landið er gagnvart öskufalli (þoleinkunn). Einkunnaskalinn samanstóð af 5 þoleinkunnum 1 – 3 – 7 – 13 – 21 þar sem 1 er besta einkunn en 21 sú lakasta. Talnabilið milli einkunna var 2, 4, 6 og 8 en með því að nota stækkandi talnabil teygist á einkunnarskalanum sem auðveldar að greina mun milli mismunandi vistkerfa. Eftirfarandi gagnasett voru notuð við ástandsmatið: (1) Nytjaland, (2) Vistgerðarflokkun NÍ og (3) Rofkort RALA og Landgræðslu ríkisins.

Við einkunnagjöfina var horft til þátta eins og gróðurgerðar, gróðursamsetningar, hæðar gróðurs, gróðurþekju og rofs.

Þoleinkunnir fyrir gróðurflokka Nytjalands (tafla 1) voru gefnar m.t.t. þess að gróðurflokkunum var ætlað að endurspegla hversu gróskumikil svæði eru og jafnframt gefa upplýsingar um ástand lands og beitargildi þess (Fanney Ósk Gísladóttir og fl. 2014). Skóglendi, votlendi og ræktað land fengu því bestu einkunn (1) og gróskumikil gróðurlendi eins og graslendi og ríkt mólendi fengu einnig góða einkunn (3). Eftir því sem gróður er rýrari (rýrt mólendi, 7) og viðkvæmari (mosi, hálfgróið land, 13) lækkaði einkunnin. Lökustu einkunn (21) fékk svo lítt gróið land.

**Tafla 1.** Þoleinkunnir gróðurflokka Nytjalands þar sem 1 gefur bestu einkunn en 21 lökustu einkunn. Skilgreiningar fyrir Nytjalandsflokka má sjá á: <http://www.nytjaland.is/landbunadur/wgrala.nsf/key2/nytjaland.html> (Landbúnaðarháskóli Íslands, á.á.)

Nytjaland	21	13	7	3	1
Graslendi				x	
Ríkt mólendi				x	
Ræktað land					x
Rýrt mólendi			x		
Birki					x
Barrskógar					x
Mosi		x			
Hálfdeigja					x
Votlendi					x
Hálfgróið land		x			
Lítt gróið land	x				
Vatn					x

Einkunnagjöf fyrir vistgerðarflokkun (tafla 2) byggist á gróðurþekju, hæð gróðurs og tegundasamsetningu. Vistgerðir sem einkennast af lítilli gróðurþekju fengu lökustu þoleinkunn (21) og þar er gróður líka almennt mjög lágvaxinn. Þekja mosa getur verið mikil en þeir eru viðkvæmari en æðplöntur og fengu því laka einkunn (13). Mólendisvistgerðir sem einkennast af fremur lágvöxnum og oft rýrum gróðri fengu miðlungseinkunn (7) en votlendisvistgerðir fengu betri einkunn (3). Ástæða þess að votlendi fékk hér aðeins lakari þoleinkunn en í Nytjalandsflokkin er sú að vistgerðarflokkunin miðar einungis við vistgerðir á hálendi en Nytjaland gerir ekki greinamun eftir landsvæðum. Þær vistgerðir sem einkennast af hávöxnum tegundum eins og birki og víði fengu svo bestu einkunn (1).

**Tafla 2.** Þoleinkunnir vistgerðarflokka NÍ þar sem 1 er besta einkunn en 21 lakasta einkunn. Skilgreiningar fyrir einstaka vistgerðir má sjá á: <http://www.ni.is/grodur/vistgerdir/landvistgerdir> (Náttúrufræðistofnun Íslands, á.á.).

Vistgerðaflokkun NÍ	21	13	7	3	1
Eyravist	x				
Eyðihraunavist	x				
Eyðimelavist	x				
Grasmelavist	x				
Víðimelavist	x				
Sandvikravist	x				
Melhólar			x		
Moldir	x				
Melagambravist		x			
Breiskjuhraunavist	x				
Gambrahraun		x			
Hélumosavist		x			
Víðimóavist				x	
Lyngmóavist /giljamóavist			x		
Starmóavist			x		
Fléttumóavist			x		
Mosamóavist			x		
Víðikjarrvist					x
Rekjuvist				x	
Móarekjuvist				x	
Lágstarflóavist				x	
Sandmýravist				x	
Runnamýravist				x	
Starungsmýravist					x
Birkikjarr					x
Lúpína				x	
Skógrækt					x
Tún					x
Uppgræðsla			x		
Melavist	x				
Reski/námur	x				
Skriður/klettur		x			
Flög	x				
Byggð					x
Ár og vötn					x

Við einkunnagjöf á jarðvegsrofi (tafla 3) var horft til þess hvort rofið tengdist gróðurlendum (*a, b, d, j, k og v*) eða auðnum (*c, m, sm, s, sh, h, o og f*). Auðnaflokkarnir fengu almennt lakari einkunn því þar er gróðurþekjan rýr og lítið sem bindur ösku.

**Tafla 3.** Þoleinkunnir jarðvegsrofs á Íslandi þar sem 1 er besta einkunn en 21 lakasta einkunn. Skilgreiningar fyrir rofmyndir og rofeinkunnir má sjá: [http://land.is/wp-content/uploads/2015/11/Jarðvegsrof\\_islenska.pdf](http://land.is/wp-content/uploads/2015/11/Jarðvegsrof_islenska.pdf) (Landgræðsla ríkisins, á.á.)

Jarðvegsrof á Íslandi	21	13	7	3	1
a - áfoksgeirar	Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
b - rofabörð		Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt
d - dílarof		Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
j - jarðsil			Mikið	Talsvert	Nokkurt
k - skriður			Mjög mikið	Mikið	Talsvert
v- vatnsrásir			Mjög mikið	Mikið	Talsvert
c - scree (grjótskriður)			Mjög mikið	Mikið	Talsvert
m - melar		Talsvert		Nokkurt	Lítið
sm - sandmelar	Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
s - sandur	Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
sh - sandhraun	Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
h - hraun				Nokkurt	Lítið
o - moldir	Mjög mikið	Mikið	Talsvert	Nokkurt	Lítið
f - fjöll				Lítið	
zero - ekkert rof					Lítið

Einkunnagjöf fyrir gróðurþekjuflokkun (tafla 4) byggir á því að gróðurþekja segir m.a. til um styrkleika viðkomandi gróðursamfélaga og hefur þar með áhrif á það hversu vel viðkomandi vistkerfi þolir öskufall. Hversu stór hluti yfirborðsins er gróinn hefur einnig mikið að segja um líkur þess að askan fjúki af stað. Því stærri sem opurnar í gróðurþekjunni eru því meiri líkur eru á að askan fari af stað og sverfi gróðurinn.

**Tafla 4.** Þoleinkunnir gróðurþekju skv. gróðurkortu NÍ af hálendi Íslands (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2014). 1 er besta einkunn en 21 lakasta einkunn.

Gróðurþekja NÍ	21	13	7	3	1
< 10%	x				
25% (11-33%)		x			
50% (34-66%)			x		
75% (67-90%)				x	
> 90%					x

## 4.2 Úrvinnsla gagna

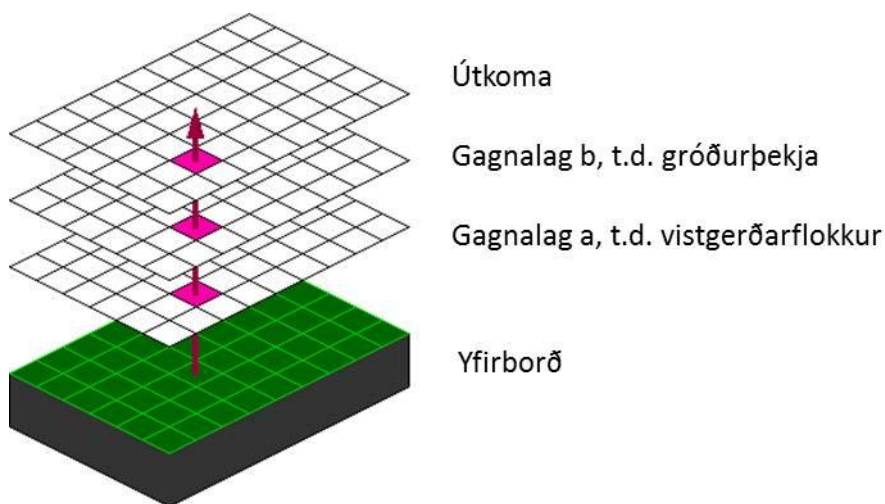
Við úrvinnslu gagnanna var ákveðið að vinna með öll kortagögnin á samskonar formi. Nytjalandsgögnin eru rastagögn en gróðurkortin og rofgögnin vektorgögn og var síðarnefndu gagnasettunum breytt í rastagögn. Rastagögn byggjast á reitum/myndeiningum (e. *pixels*) þar sem hver reitur hefur númer sem segir til um í hvaða flokki svæðið er. Gildum myndeyninganna var breytt með tilliti til þoleinkunnarskalans sem kemur fram í töflum 1-4. Dæmi: Talan 1 stendur fyrir graslendi í Nytjalandsflokkuninni. Graslendi fékk ástands-einkunnina 3 og var því gildi allra myndeyninga sem stóðu fyrir graslendi, breytt í 3. Öll gagnasettin eru með 15 m upplausn til samræmis við Nytjalandsgögnin. Öll vinna með

gagnaþekjur og úrvinnslu þeirra var unnin í forritinu ArcMap frá Esri (á.á.) <http://www.esri.com/>.

Til að fá mat á ástandi vistkerfa voru þessar fyrrgreindu gagnabækjur þ.e. gróðurþekja, Nytjalandsflokkun/vistgerð og rofflokkun settar saman. Þar sem bæði Nytjalandsgögnin og vistgerðir NÍ byggjast á flokkun á gróðurfari en eru unnin með mismunandi aðferðafræði var ákveðið að meta hvort gagnasettið nýttist betur. Með það að markmiði var unnið með tvennskonar samsetningu gagnanna:

- Vistgerðarflokkun - gróðurþekja NÍ - jarðvegsrof
- Nytjalandsflokkun - gróðurþekja NÍ - jarðvegsrof

Þoleinkunn hvernar myndeyningar var margfölduð með þoleinkunn myndeyninganna sem féllu á sama stað í hinum tveimur gagnasettunum (mynd 8). Gildi reita var margfaldað saman (með raster calculator í ArcMap) en með því næst fram meiri breytileiki milli flokka heldur en ef notuð er samlagning (tafla 5).



**Mynd 8.** Mynd sem sýnir hvernig ákveðinn reitur í einu gagnalagi er tengdur við reiti með sömu staðsetningu í öðrum gagnalögum til að fá heildarniðurstöðu viðkomandi úrvinnslu. The picture explains the connection between pixels, with the same location but in different data layers and how it is used to calculate results for multiple layers.

**Tafla 5.** Öll hugsanleg gildi sem fengust með margföldun þriggja gagnasetta þ.e. gróðurþekju, gróðurflokkunar/vistgerða og rofs.

Einkunn			Margfeldi
1	1	1	1
1	1	3	3
1	1	7	7
1	3	3	9
1	1	13	13
1	3	7	21
3	3	3	27
1	3	13	39
1	7	7	49
3	3	7	63
1	7	13	91
3	3	13	117
3	7	7	147
1	13	13	169
3	3	21	189
3	7	13	273
7	7	7	343
3	7	21	441
3	13	13	507
7	7	13	637
3	13	21	819
7	7	21	1029
7	13	13	1183
3	21	21	1323
7	13	21	1911
13	13	13	2197
7	21	21	3087
13	13	21	3549
13	21	21	5733
21	21	21	9261

#### 4.3 Tilgáta um viðkvæmniflokka vistkerfa

Almennt má segja að það sé töluverð fylgni milli einkunnagjafa þessara þriggja gagnasetta þ.e. ef einn flokkur fær slaka einkunn á ákveðnum stað er fremur líklegt að aðrir flokkar fái það líka á sama stað t.d. þar sem gróðurfarið einkennist af rýrum gróðri þar er gróðurþekja oft lítil og rof umtalsvert.

Til að túlka ástand vistkerfa út frá þoleinkunnagjöf og niðurstöðum þeirra (tafla 5) var sett fram tilgáta um að skipta mætti landi í 5 mismunandi viðkvæmniflokka út frá því hversu viðkvæm vistkerfi eru með tilliti til öskufalls og með tilliti til þess hvort askan stöðvist í gróðrinum eða líkindum á að hún fjúki af stað þegar tekur að blása (tafla 6).

**Tafla 6.** Tilgáta um skiptingu vistkerfa í viðkvæmniflokka.

Viðkvæmniflokkur	Tilgáta
1	Sterk vistkerfi sem þola öskufall vel - lítil öskudreifing
2	Nokkuð sterk vistkerfi sem þola öskufall sæmilega - fremur lítil öskudreifing
3	Viðkvæm vistkerfi sem þola öskufall illa - talsverð öskudreifing
4	Mjög viðkvæm vistkerfi sem þola öskufall mjög illa - mikil öskudreifing
5	Illa farin vistkerfi sem þola öskufall afar illa - mikil öskudreifing

Til að meta hvernig skipta ætti milli þessara viðkvæmniflokka voru skoðaðar einkunnirnar sem fengust með margföldun af öllum hugsanlegum samsetningum þeirra (tafla 5 og 7a). Þar sem ekki var augljóst hvar setja ætti mörk milli viðkvæmniflokka útfrá margföldunargildum voru sett inn gildi í skalanum 100-500 í stað einkunna (þ.e. einkunn 1=gildi 100, 3=200, 7=300, 13=400 og 21=500) og þessi gildi svo lögð saman (tafla 7b). Með þessari aðferð var auðveldara að greina milli viðkvæmniflokka (tafla 7c).

**Tafla 7.** Einkunnir og margfeldi þriggja gagnasetta (a), einkunnagildi og samtala þeirra (b) og viðkvæmniflokkar (c).

a)				b)				c)	
Einkunnir			Margfeldi	Gildi einkunna			Samanlagt	Viðkvæmniflokkun	
1	1	1	1	100	100	100	300	<b>VIÐKVÆMNI 1</b> Gildi einkunna samtals 300 eða 400	
1	1	3	3	100	100	200	400		
1	1	7	7	100	100	300	500		
1	3	3	9	100	200	200	500		
1	1	13	13	100	100	400	600		
1	3	7	21	100	200	300	600		
3	3	3	27	200	200	200	600		
1	3	13	39	100	200	400	700		
1	7	7	49	100	300	300	700		
3	3	7	63	200	200	300	700		
1	7	13	91	100	300	400	800		
3	3	13	117	200	200	400	800		
3	7	7	147	200	300	300	800		
1	13	13	169	100	400	400	900		
3	3	21	189	200	200	500	900		
3	7	13	273	200	300	400	900		
7	7	7	343	300	300	300	900		
3	7	21	441	200	300	500	1000		
3	13	13	507	200	400	400	1000		
7	7	13	637	300	300	400	1000		
3	13	21	819	200	400	500	1100		
7	7	21	1029	300	300	500	1100		
7	13	13	1183	300	400	400	1100		
3	21	21	1323	200	500	500	1200		
7	13	21	1911	300	400	500	1200		
13	13	13	2197	400	400	400	1200		
7	21	21	3087	300	500	500	1300		
13	13	21	3549	400	400	500	1300		
13	21	21	5733	400	500	500	1400		
21	21	21	9261	500	500	500	1500		
								<b>VIÐKVÆMNI 2</b> Gildi einkunna samtals 500 eða 600	
								<b>VIÐKVÆMNI 3</b> Gildi einkunna samtals 700 eða 800	
								<b>VIÐKVÆMNI 4</b> Gildi einkunna samtals 900 eða 1000	
								<b>VIÐKVÆMNI 5</b> Gildi einkunna samtals 1100 til 1500	

Til að rökstyðja betur skiptingu í ákveðna viðkvæmniflokka var gerð eftirfarandi lýsing á hverjum flokki og þoleinkunnagjöf mismunandi gagnapekja sem lögð er til grundvallar. Rétt

er að taka fram að öskuþykktin sem er tilgreind er aðeins til að gefa hugmynd, en eins og fram hefur komið þá er það einnig ýmsum öðrum breytum háð hvernig vistkerfum reiðir af eftir öskufall.

**Í viðkvæmniflokki 1** eru mjög sterk vistkerfi þar sem gróðurþekjan er almennt heil (>90%), rof því lítið og vistkerfið einkennist af hávöxnum gróðri s.s. skóglendi og kjarri eða sterkum vistkerfum eins og votlendi. Þessi vistkerfi ættu að þola nokkuð mikið öskufall (líklega 8-15 cm) og öskudreifing að verða lítil vegna þess hve vel gróður á svæðinu bindur ösku. Allar gagnapekjur eða a.m.k. tvær þeirra fá bestu þoleinkunn (1).

**Í viðkvæmniflokki 2** eru nokkuð sterk vistkerfi þar sem gróðurþekjan er almennt samfelld, jarðvegsrof fremur lítið og gróðurlendi sterk en einkennast af lágvaxnari tegundum en í viðkvæmniflokki 1. Þessi vistkerfi ættu að þola talsvert öskufall nokkuð vel (líklega 4-8 cm) og dreifing ösku ætti ekki verða mjög mikil þar sem gróður bindur hana að einhverju leyti. Að minnsta kosti tvær af gagnapekjunum fá bestu eða næstbestu einkunn (1 og 3) og engin fær lökustu einkunn (21).

**Í viðkvæmniflokki 3** eru viðkvæm vistkerfi. Gróðurþekjan er oftast allmikil og fer yfirleitt ekki niður fyrir hálfgróið, jarðvegsrof getur farið upp í það að vera talsvert en þó ekki auðnaflokkar. Gróðurfarið einkennist oft af mólendum eða öðrum gróðurlendum með fremur lágvöxnum gróðri. Þessi vistkerfi eru mjög viðkvæm fyrir öskufalli en gætu að öllum líkindum þolað fremur lítið öskufall (líklega 2-4 cm) og dreifing ösku verður líklega töluverð þar sem lítil binding er í gróðri. Að minnsta kosti tvær gagnapekjur fá bestu til miðlungs einkunn (1, 3 og 7) og engin með lökustu einkunn (21).

**Í viðkvæmniflokki 4** eru vistkerfi í löku ástandi. Þar er gróðurþekjan gjarnan undir 50%, talsvert eða mikið rof og gróðurlendi sem einkennast af rýrum og lágvöxnum gróðri. Þessi vistkerfi þola öskufall illa og öskudreifing verður umtalsverð þar sem mjög lítil binding er í gróðri. Að minnsta kosti tvær gagnapekjur með miðlungs eða laka einkunn (7 og 13) eða eina gagnapekju með lökustu einkunn (21).

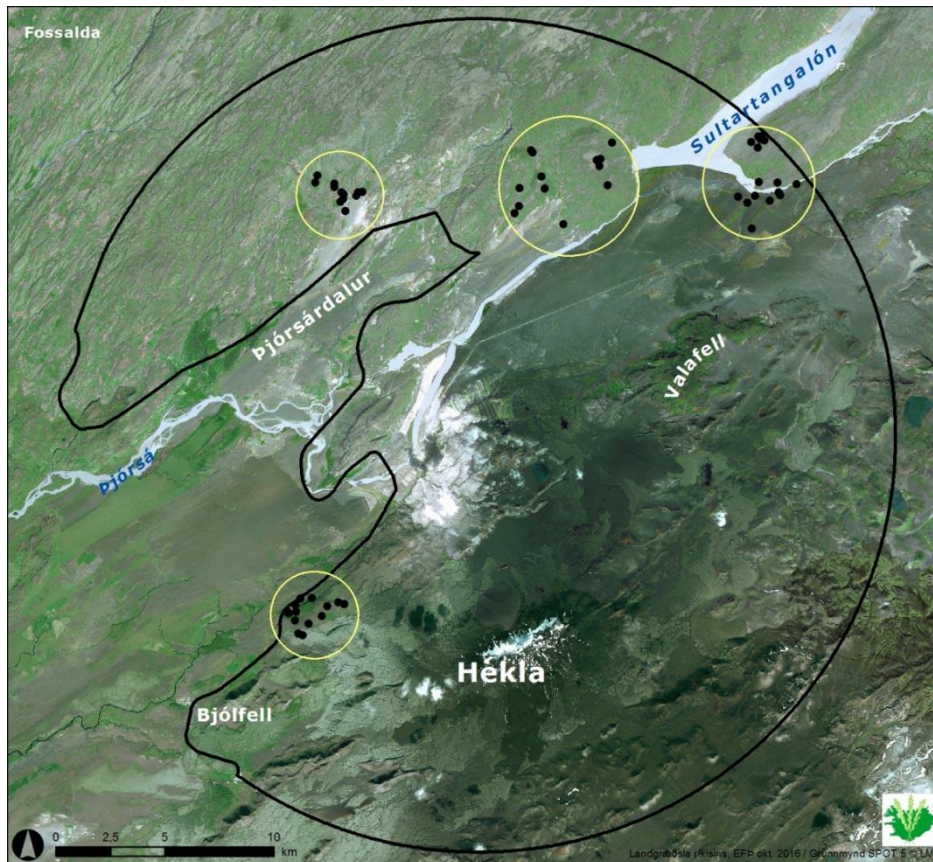
**Í viðkvæmniflokki 5** eru vistkerfi í mjög slæmu ástandi. Almennt er gróðurþekja fremur lítil, mikið jarðvegsrof og gróður mjög rýr og lágvaxinn. Þessi vistkerfi eru í mjög slæmu ástandi og þau þola því öskufall mjög illa og dreifing ösku verður mikil því svo til enginn gróður er til að binda hana. Að minnsta kosti tvær gagnapekjur með lökustu og næst lökustu einkunn (13 og 21) eða tvær með miðlungseinkunn og ein með lökustu (21).

#### **4.4 Vettvangsskoðun - mat á einkunnagjöf og viðkvæmniflokkun**

Til að leggja mat á hversu rétta mynd sú aðferðafræði sem hér hefur verið lýst gefur af ástandi vistkerfanna var farið á vettvang til að sannreyna flokkunina. Þar sem unnið var með tvær mismunandi samsetningar á gagnapekjum þ.e. annars vegar jarðvegsrof, gróðurþekju og vistgerðarflokkun og hins vegar jarðvegsrof, gróðurþekju og yfirborðsflokkun Nýtalands var jafnfram skoðað hvor samsetningin gæfi réttari mynd af ástandi vistkerfisins m.t.t. viðkvæmni gagnvart öskufalli.

Ákveðið var að velja úttektarstaðina handvirkt (valdir hnitpunktar), frekar en leggja út tilviljanakennt úrtak. Valin voru svæði úr öllum viðkvæmniflokkum og með sem fjölbreyttustu gróðurfari. Einnig var lögð áhersla á að úttektarhnit væru nálægt vegi til að spara tíma við vettvangsvinnu. Með þetta að markmiði voru valin fjögur svæði innan

rannsóknasvæðisins og miðað við að innan hvers svæðis væru a.m.k. 2-3 hnitpunktar sem féllu innan hvers viðkvæmniflokks (mynd 9).



**Mynd 9.** Svæði (gulir hringir) sem valin voru til vettvangsskoðunar og dreifing hnitpunkta sem skoðaðir voru innan þeirra. Yellow circles represent areas for field work and black spots show the exact location of site inspection.

Við vettvangsvinnuna var gengið á viðkomandi hnitpunkt (skv. gps-tæki) þar sem sett var niður flagg og tekin yfirlitsmynd. Einnig voru teknar myndir til allra höfuðátta út frá punktinum en miðað var við að meta það svæði sem væri í um 50-100 m radíus frá honum. Skráð var jarðvegsrof og gróðurþekja á svæðinu og flokkun bæði í samræmi við vistgerðarflokkun og yfirborðsflokkun Nytjlands. Einnig var lagt mat á meðalhæð gróðurs, hrjúfleika yfirborðs og svarðlagsþykkt en þær mælingar voru hugsaðar sem ítarefni frekar en að þær nýttust beint við flokkunina.

#### 4.5 Hæðarlíkan

Eins og áður hefur komið fram voru notuð 2 hæðarlíkon. Miklu munar á nákvæmni þeirra og hentar það til að meta áhrif landslags og yfirborðshrjúfleika á ólíkum skala.

Á hverri myndeiningu í hæðarlíkonunum er tala sem segir til um hæð landsins í metrum. Þegar búið er til hallalíkan á grunni slíkra gagna þá fær hver myndeining gildi í gráðum sem segir til um hver sé mesti hæðarmunur á henni og aðliggjandi myndeiningum.


Úr LMÍ hallalíkaninu með 20 metra upplausn voru valdar allar myndeingar sem höfðu hallatölu sem var stærra en 10°. Á landi sem hallar það mikið má búast við að laus eldfjallaaska berist í talsverðum mæli undan hallanum auk þess sem hallinn hamlar flutningi vindborins efnis.



Á grundvelli Artic hallalíkansins var yfirborðshrjúfleiki sem byggir á breytileika í hæð flokkaður. Þess ber að geta að hver myndeining í líkaninu er 2 m á kant og felur það því ekki í sér neinar upplýsingar um hæðarmun á gróðri, steinum né öðrum minniháttar fyrirbærum á yfirborðinu.

Til að breyta hallagráðum úr hallalíkaninu í hrjúfleikaflokka eftir því hveru mikill hæðarmunur var á myndeiningum, var notuð Focal Variety reikniaðgerð. Sú aðgerð felur í sér að hver myndeining fær gildi á grundvelli breytileikans á gildum í hallalíkaninu. Þetta má útskýra á þann hátt að tölvan telji hversu mörg ólík gildi komi fyrir í kringum hverja myndeiningu og gefi viðkomandi myndeiningu fjöldann sem gildi (sjá mynd 10). Ef allar aðliggjandi myndeiningar hafa sama hallagildi og myndeiningin sem verið er að reikna fyrir fær myndeiningin gildið 1. Ef hins vegar engar tvær aðliggjandi myndeiningar eru með sama gildi, auk þess sem myndeiningin sem verið er að reikna út frá er líka með annað gildi en allar myndeiningar í kring, þá fær sú myndeining gildið 9. Eftir því sem Focal Variety gildið er hærra (bilið er 1-9) því meiri er hæðarmunurinn á svæðinu.

25	22	20
25	20	18
20	18	18



25	22	20
25	<b>4</b>	18
20	18	18

**Mynd 10.** Focal Variety útreikningur. Hugbúnaðurinn gefur hverri myndeiningu gildi út frá fjölda gilda sem eru ólík í kringum hana. Á myndinni til vinstri eru 3 ólík gildi kringum myndeininguna í miðjunni þ.e. 25, 22 og 18. Myndeiningin í miðjunni (sem verið er að reikna fyrir) hefur gildið 20 þannig að 4 ólík gildi koma fyrir í þessum 9 myndeiningum og miðju myndeiningin fær því gildið 4. The Focal Variety tool performs a neighborhood operation that computes an output raster where the value for each output cell is a function of the values of all the input cells that are in a specified neighborhood around that location.

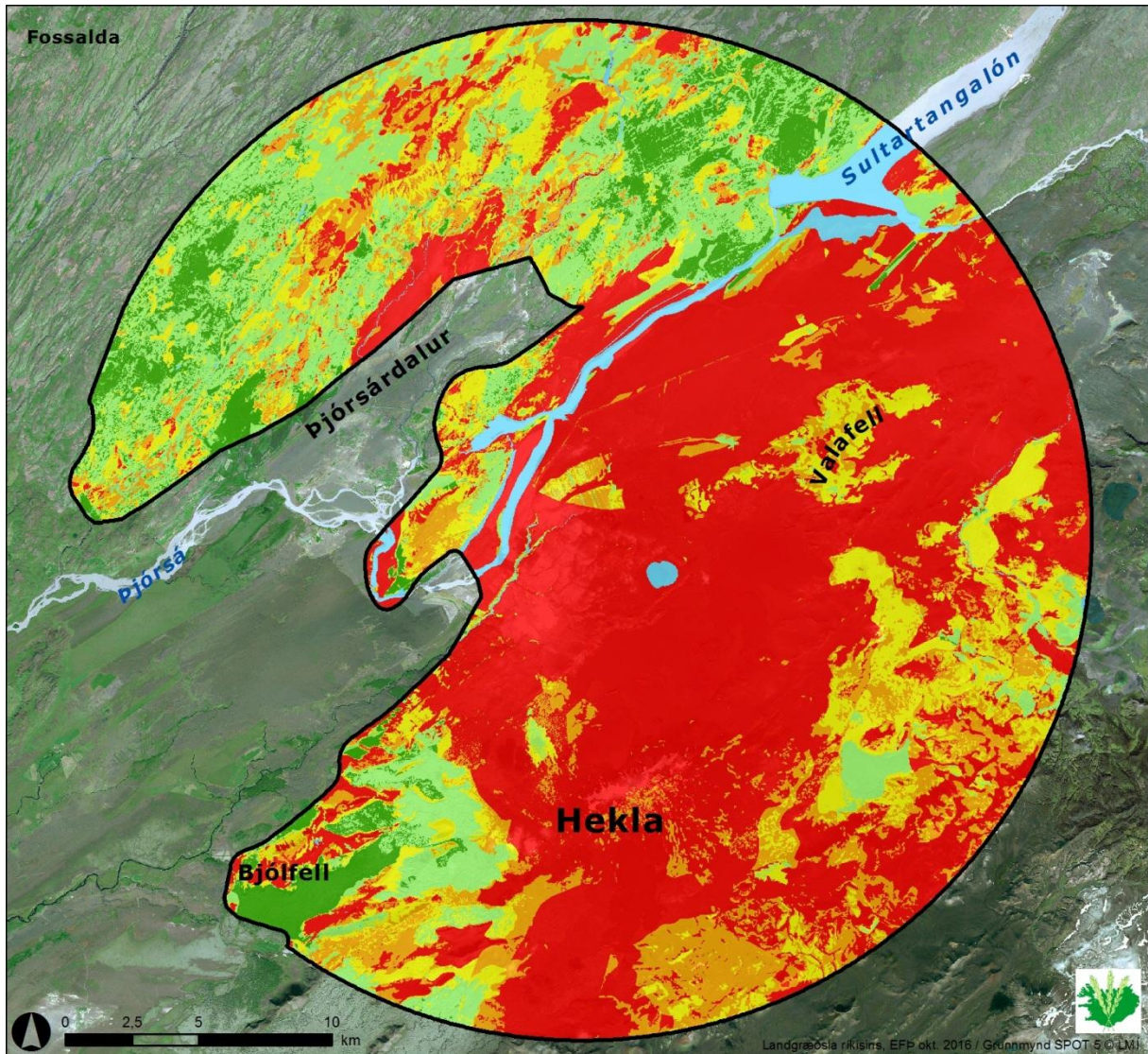
Til einföldunar var útkoman úr Focal Variety einfölduð úr 9 flokkum í 3. Flokkar 1-3 voru sameinaðir í flokkinn *lítill breytileiki í hæð*. Flokkar 4-6 voru sameinaðir í flokkinn *talsverður breytileiki í hæð* og flokkarnir 7-9 sameinaðir og fengu heitið *mikill breytileiki í hæð*.

Flokkarnir þrjú virtust mjög blandaðir og erfitt var að greina megindrættina í hrjúfleikanum. Megin ástæðan fyrir því er að Arctic hæðarlíkanið er í mikið nákvæmari mælikvarða (hver myndeining 2 m á kant) en önnur gögn sem unnið er með (hver myndeining 15 m á kant). Til að fá fram skýrara mynstur í hrjúfleikaflokkunina og til að færa mælikvarðann nær öðrum gögnum var ákveðið að einfalda útkomuna úr Focal Variety með aðgerðum sem heitir Clump og Eliminate með Erdas hugbúnaði (<http://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>). Clump aðgerðin vinnur þannig að ef það eru myndeiningar með gildi sem er annað en meirihluti nágrannamyndeininganna, þá fær sú myndeining gildið sem er algengast umhverfis hana. Þannig verða til knippi af myndeiningum sem allar hafa sama gildi. Áður en Eliminate aðgerðin er gerð þarf að tilgreina lármarksstærð knippa eða flokks og aðgerðin sameinar þá svæði sem erum minni en tilgreint lármark í þeim nágrannaflokki sem algengastur er. Valið var að hafa minnsta svæði 1000 m<sup>2</sup> eða 250 myndeiningar.

## 5. NIÐURSTÖÐUR

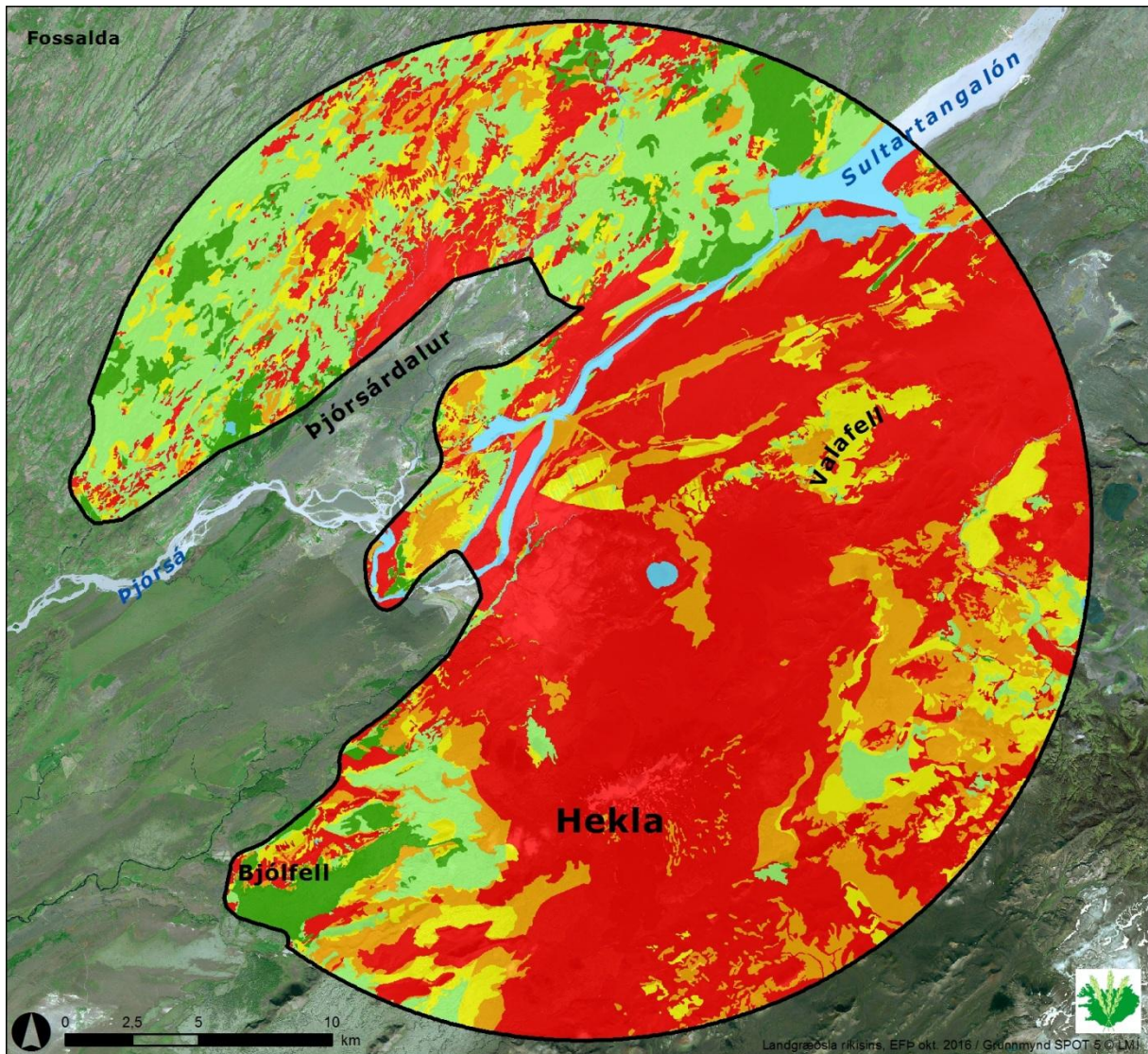
### 5.1 Viðkvæmniflokkun

Niðurstöður úr viðkvæmniflokkun á rannsóknasvæðinu sem eru byggðar á yfirborðsflokkun Nýtjalds, gróðurþekju og jarðvegsrofi má sjá á mynd 11.



**Mynd 11.** Viðkvæmniflokkun byggð á Nýtjaldsflokkun, gróðurþekju og jarðvegsrofi. Svæði sem eru viðkvæmest fyrir öskufalli eru rauð. Classification of ecosystem sensitivity based on land classification, vegetation cover and soil erosion. Red color shows areas which are most sensitive towards ash deposition.

Niðurstöður úr viðkvæmniflokkun á rannsóknasvæðinu sem eru byggðar á vistgerðarflokkun NÍ, gróðurþekju og jarðvegsrofi má sjá á mynd 12.



**Mynd 12.** Viðkvæmniflokkun byggð á vistgerðarflokkun, gróðurþekju og jarðvegsrofi. Classification of ecosystem sensitivity based on habitat type classification, vegetation cover and soil erosion. Red color shows areas which are most sensitive towards ash deposition.

Niðurstöður þessara tveggja mismunandi samsetninga á gagnþekjum gáfu í mörgum tilfellum mismunandi niðurstöður fyrir einstök svæði. Vettvangsskoðun var því notuð til að leggja mat á hvor samsetning gagnanna gæfi réttari mynd af núverandi ástandi vistkerfa.

Í vettvangsskoðunum voru teknar ljósmyndir af öllum reitum og þeir metnir sjónrænt m.t.t. gróðurfars, gróðurþekju og rofs og flokkaðir í viðkvæmniflokka. Dæmi um svæði sem lenda í viðkvæmniflokki 1 má sjá á myndum 13 og 14.



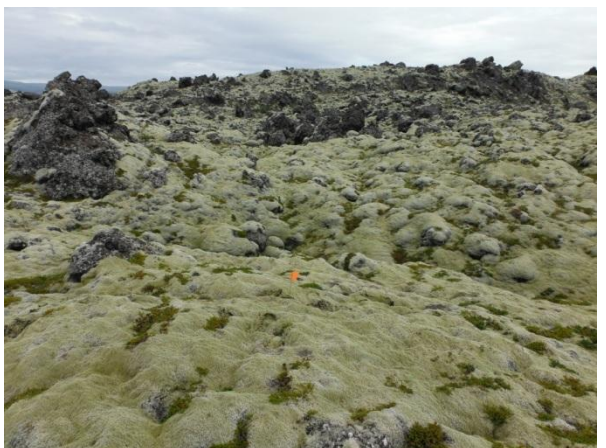
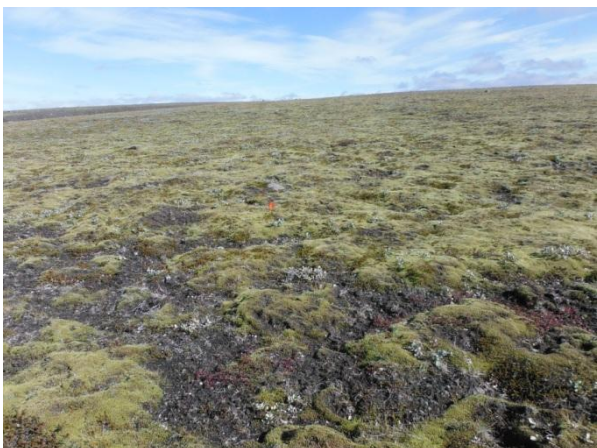
**Myndir 13 og 14.** Dæmi um svæði sem flokkuðust í viðkvæmniflokk 1. Examples of ecosystem sensitivity, class 1.

Dæmi um svæði sem lentu í viðkvæmniflokki 2 má sjá á myndum 15 og 16.



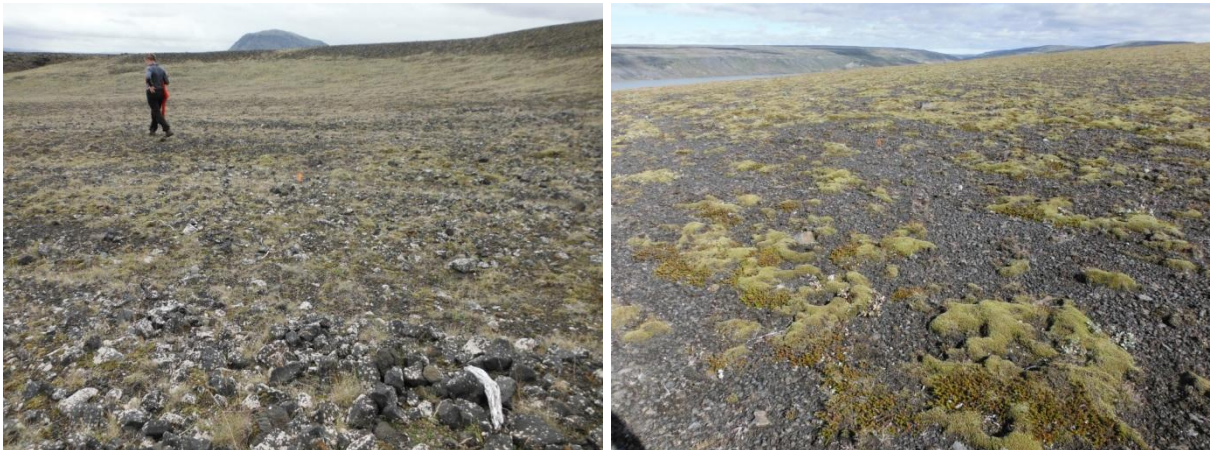
**Myndir 15 og 16.** Dæmi um svæði sem flokkuðust í viðkvæmniflokk 2. Examples of ecosystem sensitivity, class 2.

Dæmi um svæði sem lentu í viðkvæmniflokki 3 má sjá á myndum 17 og 18.



**Myndir 17 og 18.** Dæmi um svæði sem flokkuðust í viðkvæmniflokk 3. Examples of ecosystem sensitivity, class 3.

Dæmi um svæði sem lentu í viðkvæmniflokki 4 má sjá á myndum 19 og 20.



**Myndir 19 og 20.** Dæmi um svæði sem flokkuðust í viðkvæmniflokk 4. Examples of ecosystem sensitivity, class 4.

Dæmi um svæði sem lentu í viðkvæmniflokki 5 má sjá á myndum 21 og 22.



**Myndir 21 og 22.** Dæmi um svæði sem flokkuðust í viðkvæmniflokk 5. Examples of ecosystem sensitivity, class 5.

Þegar niðurstöður úr vettvangsskoðun voru bornar saman við niðurstöður úr greiningu fyrirbyggjandi ganga kom í ljós að samsetning með vistgerðarflokkun NÍ, gróðurþekju og rofi gaf betri útkomu þ.e. 62,5% rétt greindra reita, heldur en Nytjalandsflokkunin, gróðurþekja og rof sem gaf 50% réttra reita (tafla 8).

**Tafla 8.** Samanburður á viðkvæmnigreiningu úr samsettum gagnabækjum ((a) Nytjalandsflokkun, gróðurþekja og rof og (b) Vistgerðarflokkun NÍ, gróðurþekja og rof)) og niðurstöðum úr mati á vettvangi.

Fjöldi reita með:	a) Nytjalandsflokkun, gróðurþekja og rof	b) Vistgerðarflokkun, gróðurþekja og rof
Lægra gildi en mat á vettvangi	10	11
Hærra gildi en mat á vettvangi	14	7
Sama gildi og mat á vettvangi	24	30
Fjöldi reita alls:	48	48
<b>Hlutfall réttrar greiningar</b>	<b>50%</b>	<b>62,5%</b>

Þegar gögnin voru skoðuð nánar kom í ljós að með því að sleppa upplýsingum um jarðvegsrof fékkst umtalsvert hærra hlutfall svæða þar sem vettvangsúttekt gaf sömu niðurstöðu og greining gagnanna þ.e. 64,5% með Nytjalandsgögnum en 75% með vistgerðarflokkun NÍ (tafla 9).

**Tafla 9.** Samanburður á viðkvæmnigreiningu úr tveimur gagnabækjum (gróðurflokkun og gróðurþekja) og niðurstöðum úr mati á vettvangi.

Fjöldi reita með:	Nytjalandsflokkun	Vistgerðarflokkun
Lægra gildi en mat á vettvangi	5	6
Hærra gildi en mat á vettvangi	12	6
Sama gildi og mat á vettvangi	31	36
Fjöldi reita alls:	48	48
<b>Hlutfall réttar greiningar</b>	<b>64,5%</b>	<b>75%</b>

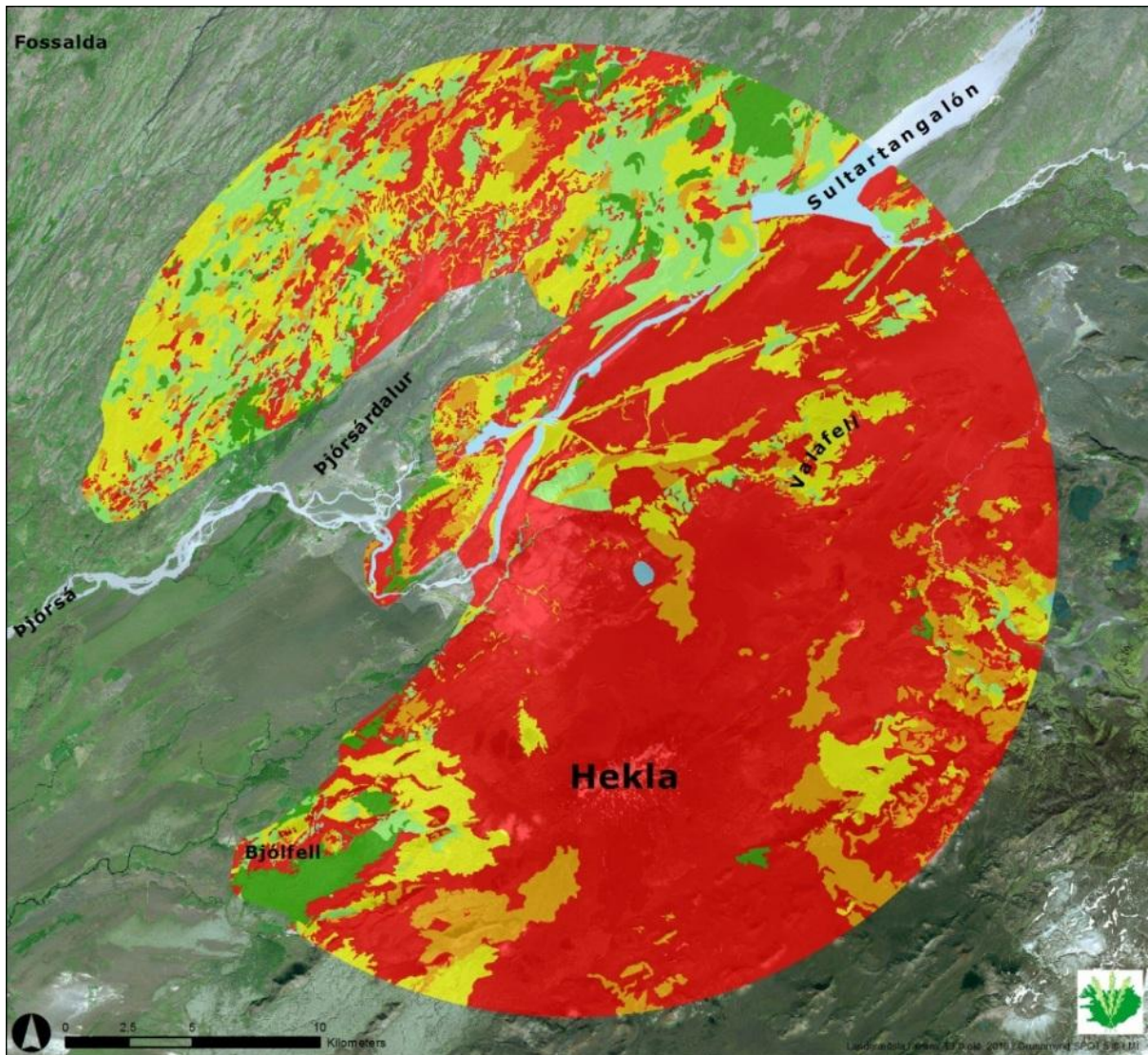
Út frá þessum niðurstöðum var ákveðið að sleppa því að nota upplýsingar um jarðvegsrofið enda eru þær í mun grófari mælikvarða en gróðurfarsupplýsingarnar. Einnig má benda á að jarðvegsrofsöggnin eru að stofni til 20-25 ára gömul og viðbúið að þau séu að einhverju leyti orðin úrelt. Jafnframt var ákveðið að nota vistgerðarflokkun NÍ við frekari úrvinnslu gagna þar sem henni bar oftast saman við mat á vettvangi en Nytjalandsflokkuninni.

Þar sem einungis tvær gagnabækjur voru notaðar voru hugsanleg margföldunargildi þeirra endurreiknuð (tafla 10a). Nauðsynlegt reyndist einnig að endurskoða skiptingu milli viðkvæmniflokka út frá þessum nýju margföldunargildum (tafla 10b og 10c).

**Tafla 10.** Einkunnir og margfeldi tveggja gagnasetta (a), einkunnagildi og samtala þeirra (b) og viðkvæmniflokkar (c).

a)			b)			c)
Einkunnir	Margfeldi		Gildi einkunna	Samtals		Viðkvæmniflokkun
1	1	1	1	1	2	VIÐKVÆMNI 1
1	3	3	1	2	3	Gildi einkunna samtals 2 eða 3
1	7	7	1	3	4	VIÐKVÆMNI 2
3	3	9	2	2	4	Gildi einkunna samtals 4
1	13	13	1	4	5	VIÐKVÆMNI 3
3	7	21	2	3	5	Gildi einkunna samtals 5 eða 6
3	13	39	2	4	6	
7	7	49	3	3	6	
3	21	63	2	5	7	VIÐKVÆMNI 4
7	13	91	3	4	7	Gildi einkunna samtals 7
7	21	147	3	5	8	
13	13	169	4	4	8	VIÐKVÆMNI 5
13	21	273	4	5	9	Gildi einkunna samtals 8 til 10
21	21	441	5	5	10	

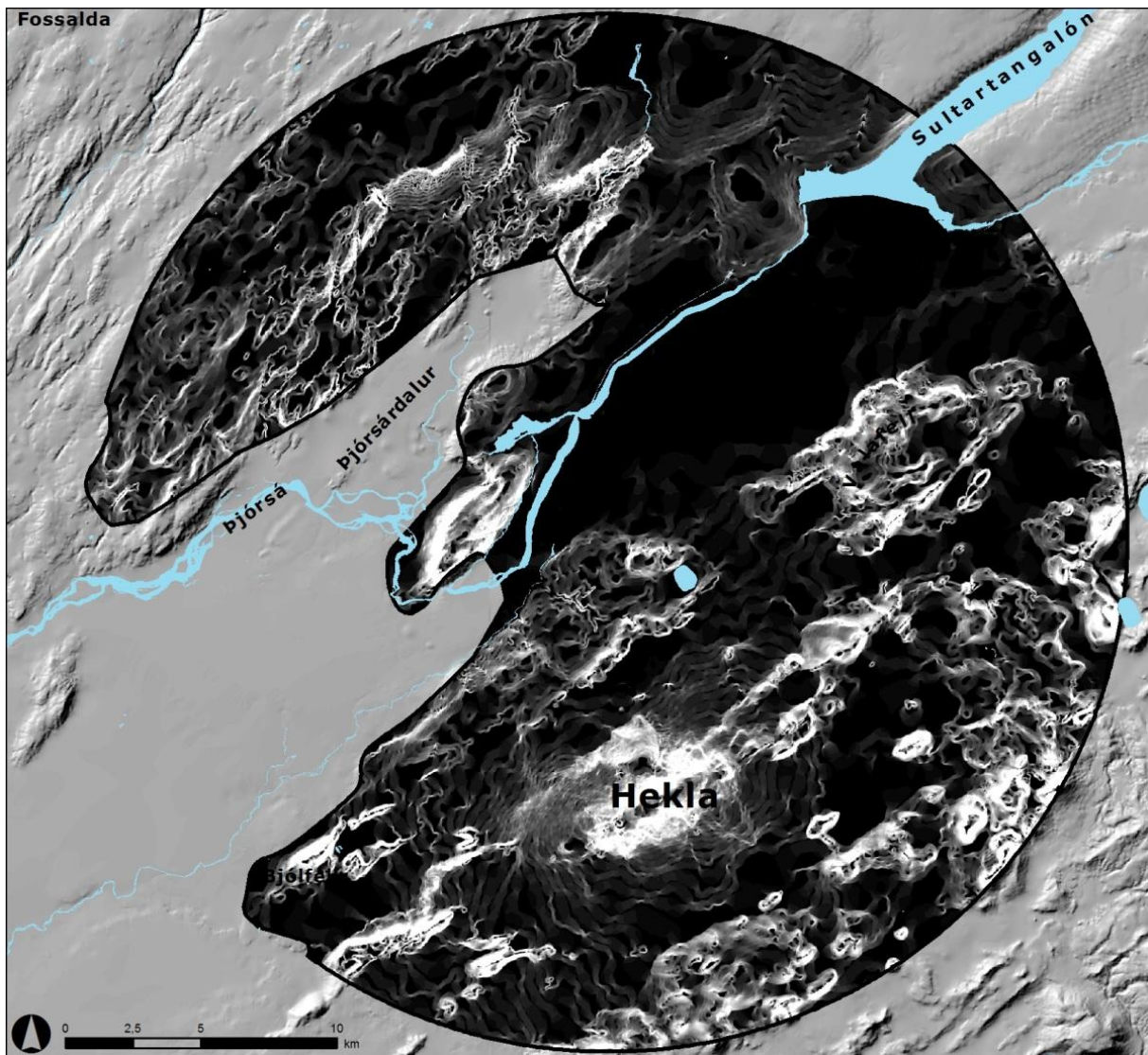
Út frá þessum tveimur gagnakefjum þ.e. vistgerðarflokkun og gróðurþekju var unnin ný viðkvæmniflokkun (mynd 23).



**Mynd 23.** Viðkvæmniflokkun byggð á vistgerðarflokkun Ní og gróðurþekju. Classification of ecosystem sensitivity based on habitat type classification and vegetation cover.

## 5.2 Hallagreining

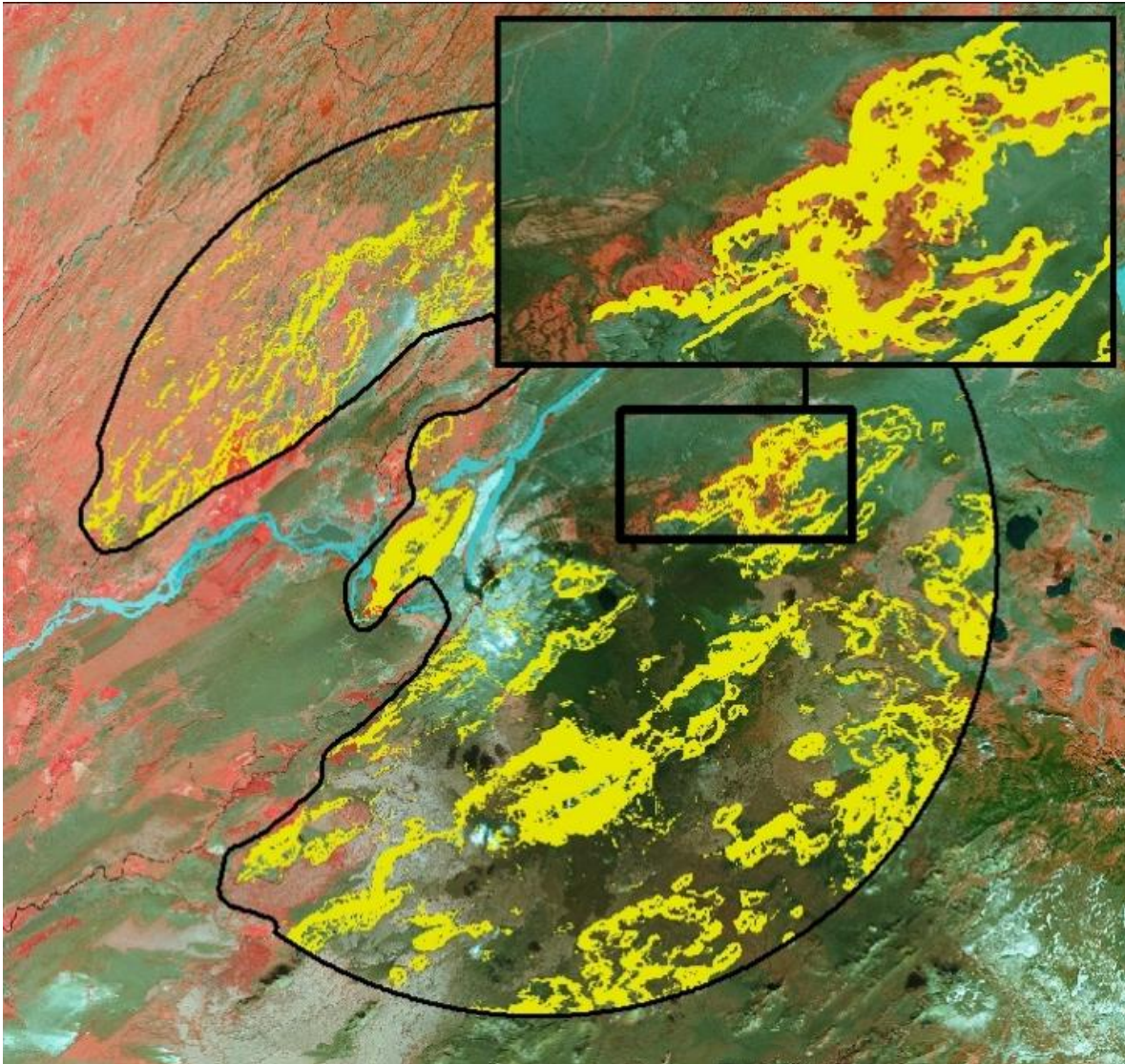
Mynd 24 sýnir hallalíkanið sem er með 20 m myndeyningum. Því ljósari sem liturinn er því meiri er hallinn. Glögggt má sjá að lega helstu fjalla er suðvestur-norðaustur. Þurr vindur berst einkum úr norðri á þessu svæði og því má vænta þess, ef eldfjallaaska fer að fjúka, að hún berist til suðvesturs. Stefna áfoksgeiranna sem gengu niður Rangárvelli, fyrir og eftir aldamótin 1900, staðfestir megin rofáttina á þessu svæði (Ólafur Arnalds 1998).



**Mynd 24.** Hallalíkanið sýnir brattlendi með hvítum lit og eftir því sem hallinn er minni því dekkri verður liturinn. Model for slope, lighter color represent increased altitude.



Til að skoða hvaða hlíðar eru nóg brattar til að þær hreinsist að einhverju marki af eldfjallaösku voru sérstaklega dregnar fram hlíðar sem hallaði meira en  $10^\circ$  og eru þær sýndar með gulum lit á 25. mynd. Bakgrunnsmýndin er innrauð Spot gervitunglamynd sem sýnir gróður rauðan. Uppi í hægra horninu á mynd 25 er sýnd stækkun á hlíðum Valafells og þar sést að svörfunar gætir ekki upp að  $10^\circ$  hallamarkinu, þar sem gróin rönd (rauður litur) er á milli rofsvæðisins á flatanum (blágrár litur) og gula litarins sem sýnir svæði með  $>10^\circ$  halla.



**Mynd 25.** Hlíðar sem halla meira en  $10^\circ$  eru sýndar með gulum lit. Grunnmyndin er innrauð Spot gervitunglamynd sem sýnir gróið land með rauðum lit. Á stækkunin uppi í hægra horninu sést að rofið nær ekki upp að  $10^\circ$  hallamarkinu í hlíðum Valafells. Slopes with  $>10^\circ$  incline are shown as yellow on an infrared SPOT image.

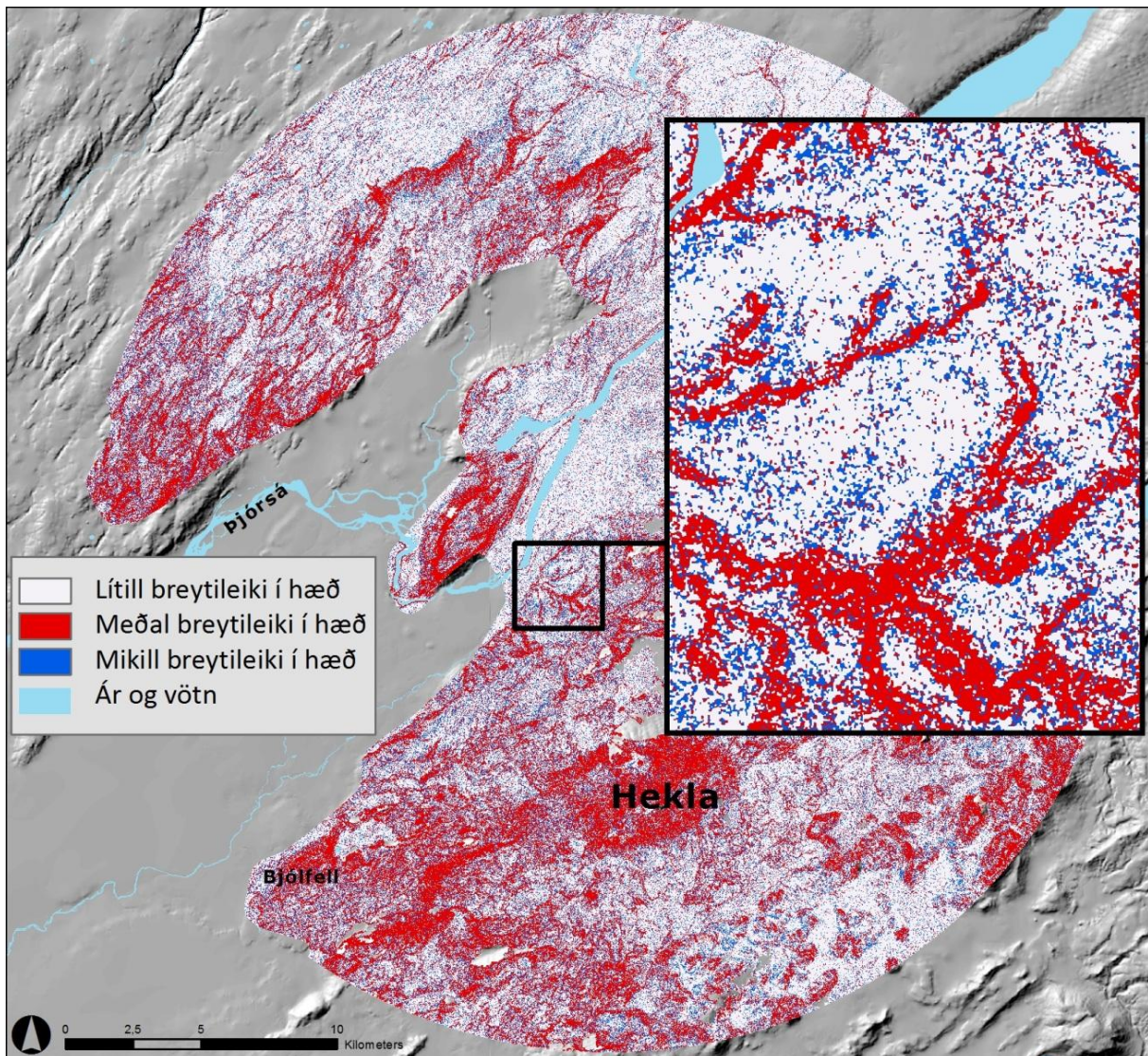
Stærsti hluti þessara bröttu hlíða lenti í viðkvæmniflokki 5 eða tæp 63%, um 30% í viðkvæmniflokki 3 og 4 og tæp 5% í viðkvæmniflokki 1 og 2.

Ef til þess kemur að aska renni niður þessar hlíðar þá mun mest af henni væntanlega setjast til í hlíðarfætinum. Þar er hins vegar heldur meira gróið. Þar sem fyrir er vel gróið land með hávöxnum gróðri má gera ráð fyrir að askan stöðvist þar og valdi ekki frekari skemmdum. Sé svo ekki má gera ráð fyrir að þarna myndist sanduppsprettur sem gætu valdið skemmdum út frá sér.

### 5.3 Hrjúfleiði yfirborðs

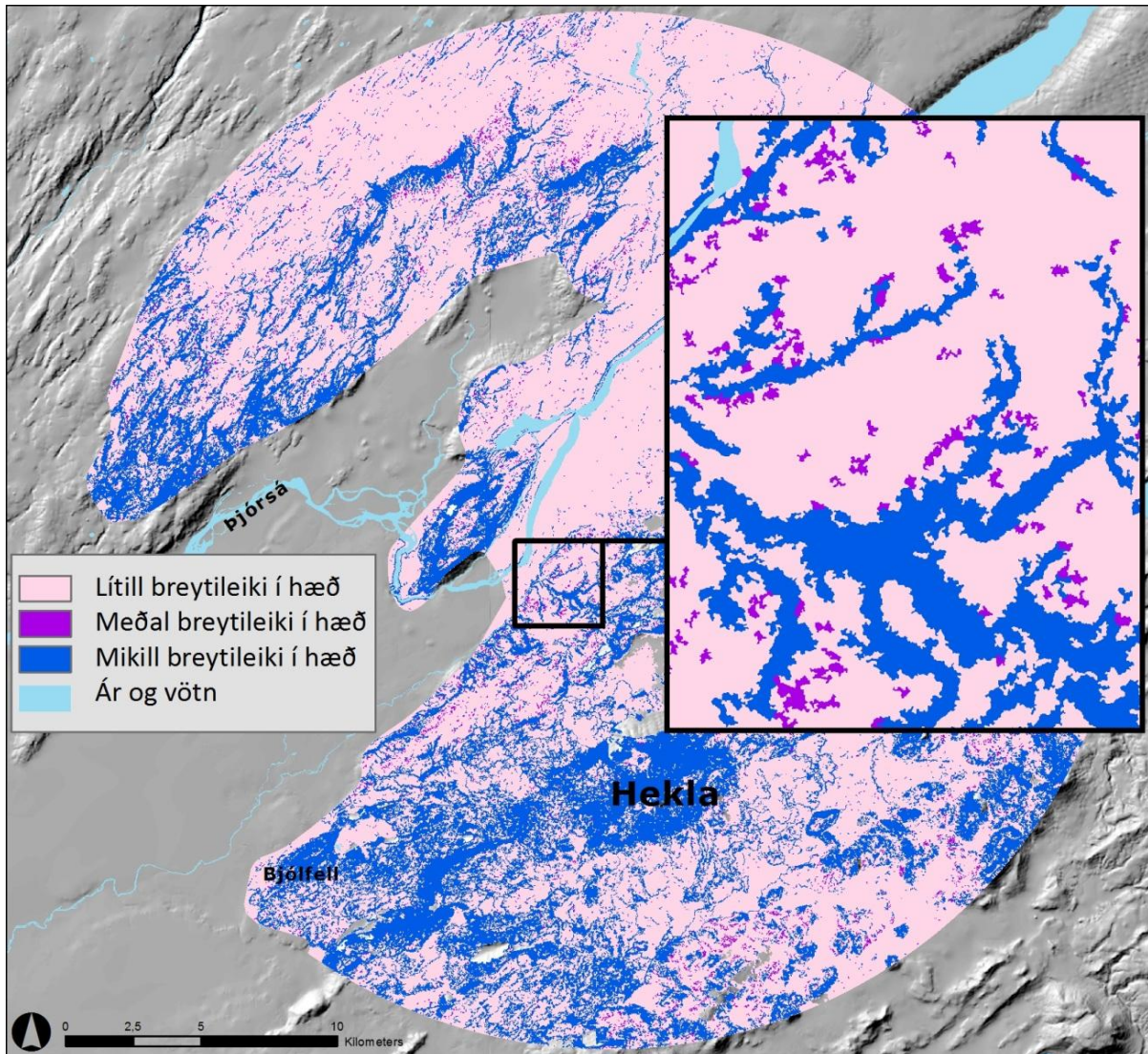
Hæðarlíkan Landmælinga Íslands sýnir landslagið á rannsóknarsvæðinu í stórum dráttum, en til að skoða hrjúfleiða yfirborðsins þar sem hallinn er lítill var unnið með hæðarlíkan Arctic Dem sem er í meiri upplausn. Arctic Dem hæðarlíkanið er í vinnslu, eins og fyrr segir og m.a. vantar hluta af rannsóknarsvæðinu norðan við Heklu (mynd 7). Úrvinnsla gagna sem byggja á hrjúfleiðaflokkun verða því miðuð við þann hluta rannsóknarsvæðisins sem Arctic Dem hæðarmódelið nær yfir. Hrjúfleiði yfirborðs sem hér er fjallað um byggist á breytileiki í hæð sem fundinn er út frá hæðarmismun í landi en ekki eftir misfellum á yfirborði eins og grjóti eða gróðri.

Í kafla 4.5 var farið yfir það hvernig hæðarmuninum sem líkanið felur í sér var breytt í 3 flokka (sjá mynd 26).



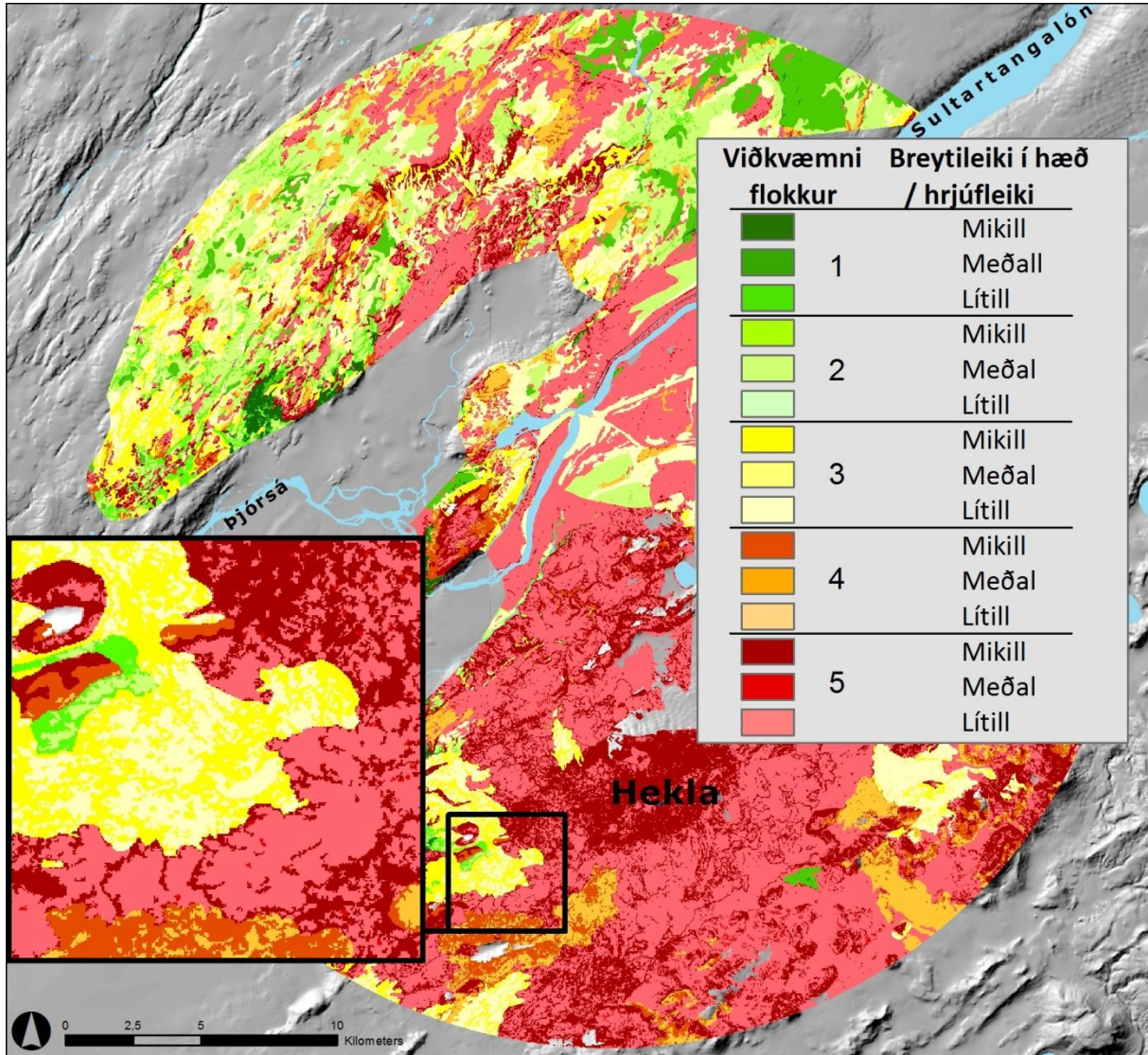
**Mynd 26.** Hrjúfleiðaflokkun á ArcticDem hæðarmódeli og unnin með Focal Variety reikniáðferð. Hrjúfleiði sýndur í þremur flokkum en á stækkuninni hægra megin sést að niðurstaðan gefur mjög „óhreina“ mynd sem erfitt er að túlka. Surface roughness analysis based on the Arctic Dem. White areas have little variation in elevation; red have average variation; dark blue areas have a high variation in elevation and; light blue is rivers and lakes.

Myndin sem sýndi niðurstöðuna úr Focal Variety reikniaðgerðinni sem gerð var á Artic hallalíkanið var mjög óregluleg (mynd 26). Hver myndeyning í hæðarlíkaninu er 2 m og þó að þessi sameining flokkanna úr Focal Variety greiningunni hafi verið einfölduð í 3 flokka var útkoman óljós. Það úði og grúði af myndeyningum úr mismunandi flokkun og óljóst hvar væru svæði með það ósléttu yfirborði að það gæti haft umtalsverð áhrif á roflíkindi, þá bæði að vindur næði ekki til nýfallinar ösku og að vindborin aska fengi skjól að einhverju marki. Geta má þess að hrjúflekagreiningin nær ekki til áhrifa gróðurhæðar. Þegar búið var að einfalda flokkunina enn (sjá kafla 4.1. Hæðarlíkan) kom skýrar fram hvar ósléttasta landið er (sjá mynd 27).



**Mynd 27.** Einfölduð mynd af hrjúflekaflokkun á ArticDem hæðarmódeli unnin með Clump og Eliminate reikniaðferð í Erdas. Hrjúfleiki sýndur í þremur flokkum en á stækkuninni hægra megin sést að niðurstaðan gefur nokkuð „hreina“ mynd sem auðvelt er að túlka. A simplified surface roughness analysis based on the Arctic Dem (Clump and Eliminate method in Erdas). Pink areas have little variation in elevation; purple have average variation; dark blue areas have high variation in elevation and; light blue is rivers and lakes.

Til að skoða samspil hrjúfleika og viðkvæmni svæða m.t.t. öskufalls voru þessi gögn lögð saman (mynd 28). Hverjum viðkvæmniflokki (sjá töflu 10) er þá skipt í þrennt m.t.t. hrjúfleika landsins/breytileika í hæð. Vistkerfi með mesta þolið gagnvart öskufalli og vindbornum áfoksefnum er þá í viðkvæmniflokki 1 og með mikinn hrjúfleika. Þar með eru viðkvæmniflokkarnir í raun orðnir 12 í stað 5.

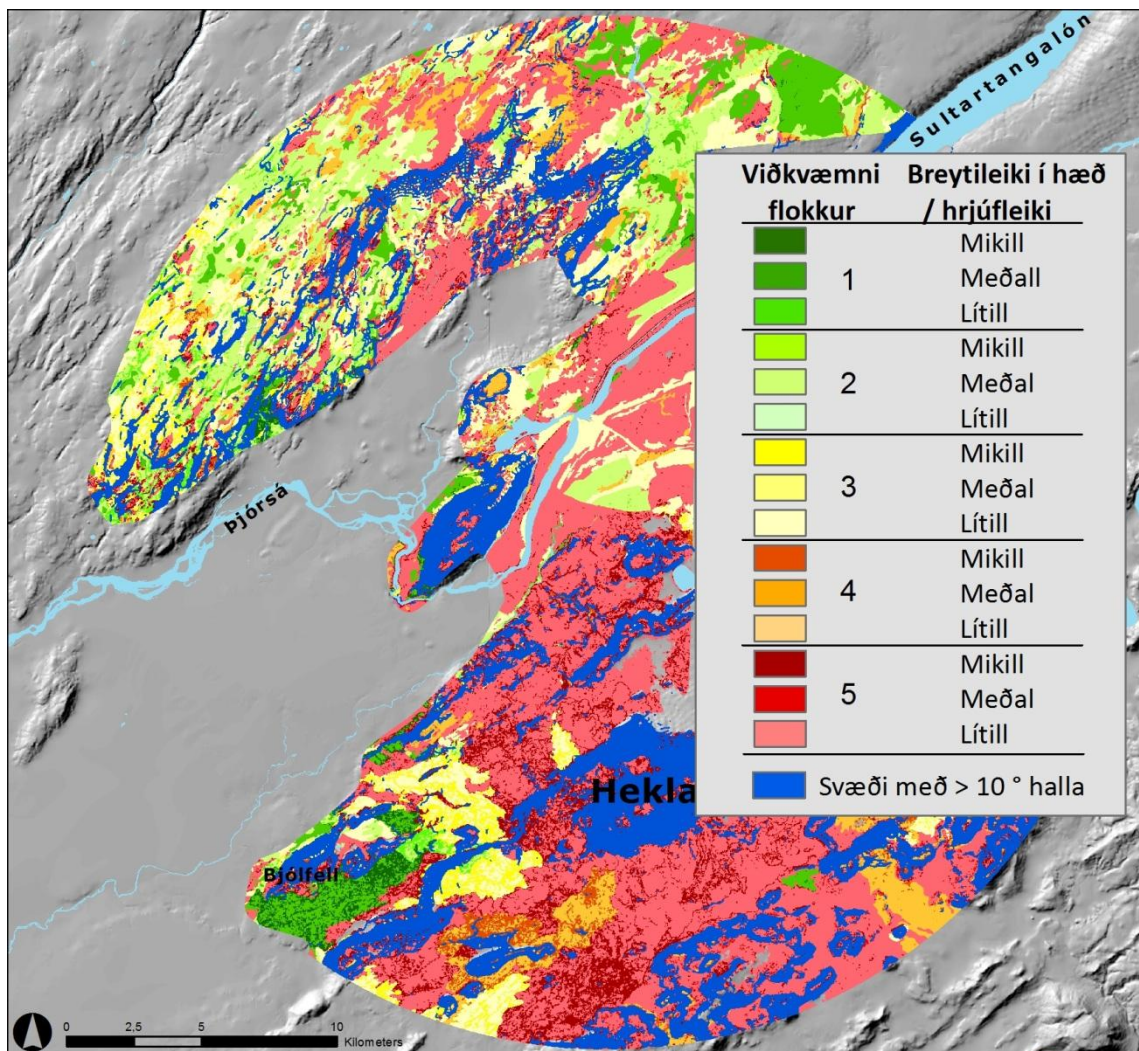


**Mynd 28.** Mynd sem sýnir samspil hrjúfleikaflokkunar á ArticDem hæðarmódeli og viðkvæmniflokkuninni. Hver viðkvæmniflokkur er flokkaður í þrjú hrjúfleika flokka. Combination of classification of ecosystem sensitivity (Viðkvæmniflokkur) and surface roughness analysis (Breytileiki í hæð) based on ArticDem. 1 represents little ecosystem sensitivity and 5 high ecosystem sensitivity. Light shades of colours represent little variation in elevation and dark colors represent high variation in elevation.

## 6. UMRÆÐUR

Eins og komið hefur fram hefur fjöldi þátta s.s. veðurfar, árstími, landslag og öskubykkt áhrif á það hversu vel vistkerfi þola áföll eins og öskufall og hverjar afleiðingar þess verða. Niðurstöður þessa verkefnis geta nýst til að meta áhrif öskufalls á landsvæði fyrst og fremst út frá tveimur sjónarhornum. Annars vegar hversu vel viðkomandi vistkerfi þolir öskufall miðað við ástand vistkerfisins (gróðurfar og gróðurþekja) sem metið er út frá vistgerðar-flokkuninni. Hins vegar hversu líklegt er að öskudreifing verði en þar ræður mestu hrjúfleiði yfirborðs, halli lands, gróðurfar og gróðurþekja.

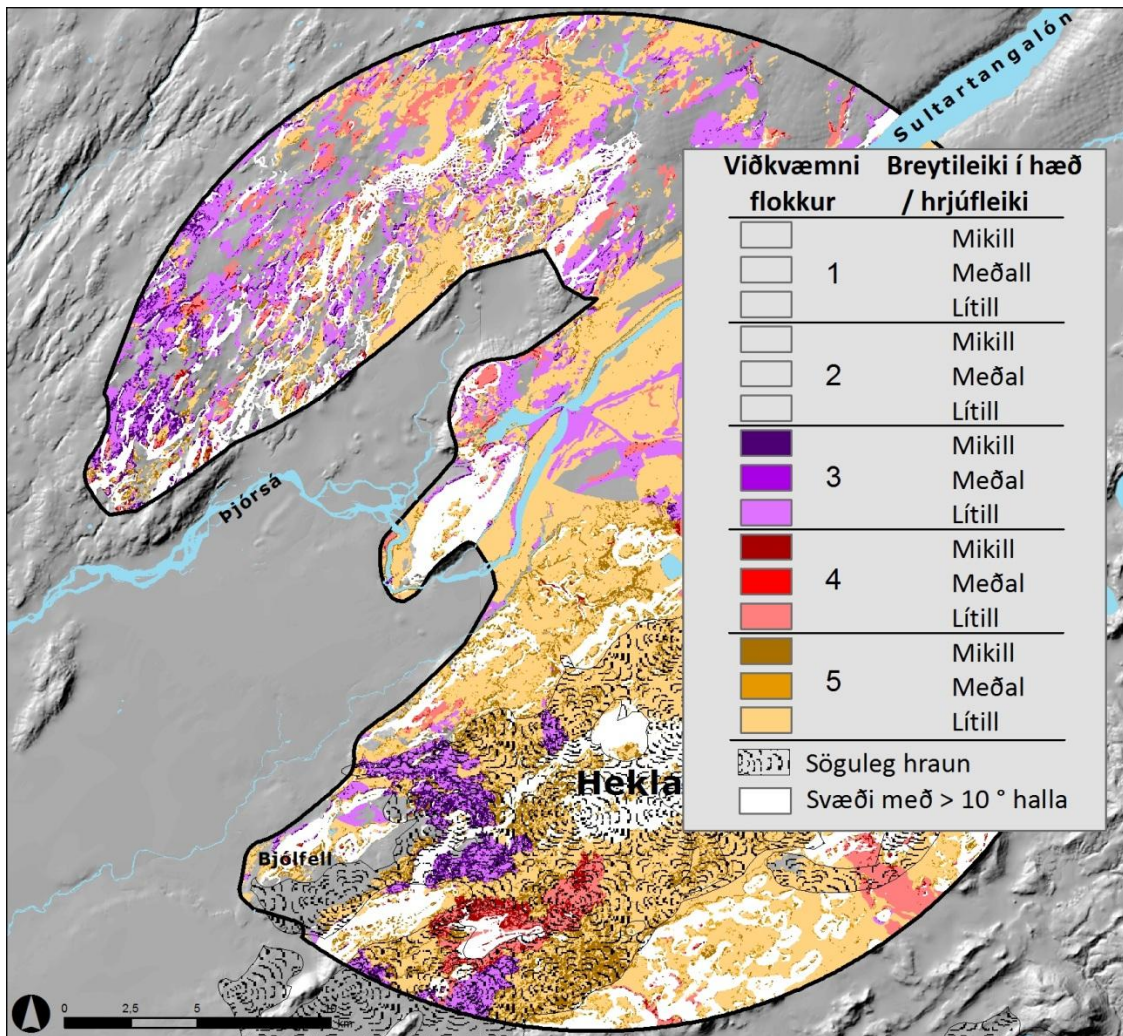
Eins og gerð hefur verið grein fyrir má ætla að eftir því sem hrjúflekinn er meiri því minni verði flutningur ösku og vikurs í kjölfar öskufalls. Undantekningin á því er þó þar sem halli lands er það mikill að allar líkur eru á því að aska og vikur hreinsist fljótlega af þeim svæðum með vatni og/eða vindum og e.t.v. fyrir tilstuðlan þyngdaraflsins. Það má því áætla að gróður á þeim svæðum þar sem halli er yfir 10° skaðist ekki umtalsvert af öskufalli en þessi svæði eru einkum í kringum Heklu og önnur fjöll á rannsóknasvæðinu (mynd 29).



**Mynd 29.** Mynd sem sýnir samspil hrjúflekaflokkunar og viðkvæmniflokkunar, en svæði þar sem halli er meiri en 10° eru merkt með bláum lit. Combination of classification of ecosystem sensitivity (Viðkvæmniflokkur) and surface roughness analysis (Breytileiki í hæð). Slopes with >10° incline are blue. 1 represents little ecosystem sensitivity and 5 high ecosystem sensitivity. Light shades of colours represent little variation in elevation and dark shades represent high variation in elevation.

Þegar horft er til áhrifa á vistkerfi eru þau svæði sem lenda í viðkvæmniflokki 2 og þó sérstaklega í flokki 3 viðkvæmust að því leyti að líklegt er að þar verði hlutfallslega mesti skaði á gróðri því þau eru almennt nokkuð vel gróðin en gróðurinn ekki mjög hávaxinn og/eða gróðurþekjan ósamfelld. Svæði sem lenda í viðkvæmniflokkum 4 og sérstaklega 5 eru yfirleitt lítið gróin og því hlutfallslega minna af gróðri sem skaðast en hins vegar verður mikið tjón á þeim litla gróðri sem þar finnst m.a. vegna svörfunar af öskufoki sem hamlar gróðurframvindu. Þegar hins vegar horft er til öskudreifingar eru svæði í viðkvæmniflokki 4 og 5 viðkvæmust því þar er gróðurinn almennt lágvaxinn, rýr og ósamfelldur og því lítið sem bindur öskuna. Hrjúfleiði svæðanna kemur inn þegar verið er að skoða síðbúna dreifingu ösku. Því meiri sem breytileiki í hæð er því minni líkur eru á öskufoki.

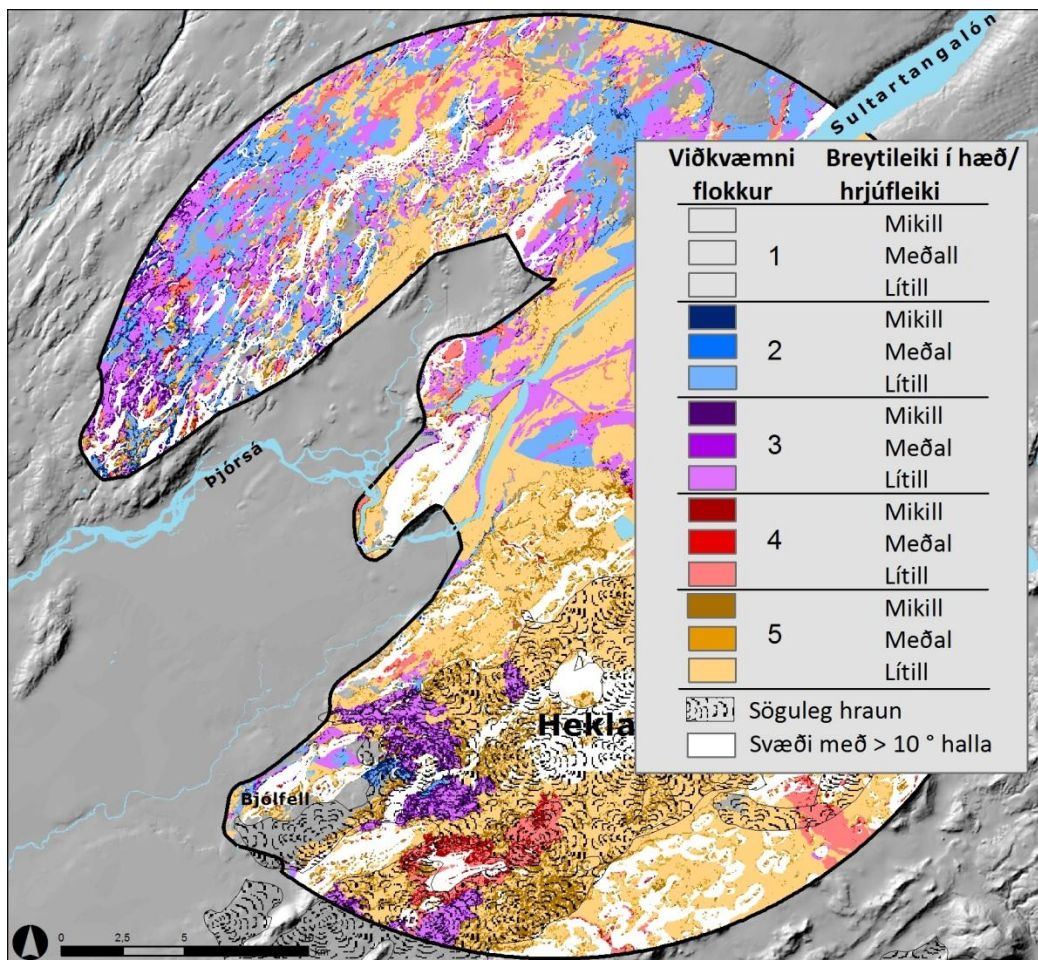
Hér hefur verið sýnt hvernig þessi gögn geta nýst til að flokka vistkerfi landsins með tilliti til styrkleika gagnvart öskufalli og vindrofi í kjölfarið. Frekari greining á gögnunum, svo og aðrar upplýsingar s.s. veðurfarsgögn, öskuþykkt og hæð yfir sjó má nota til að meta þessa þætti. Dæmi um slíkt er sett fram mynd 30 þar sem gert er ráð fyrir 2-5 cm öskuþykkt á svæðinu.



**Mynd 30.** Á myndinni er gert ráð fyrir að 2-5 cm öskufall hafi lent á rannsóknarsvæðinu. Svæði í viðkvæmniflokki 1 og 2 (grá) ættu að þola slíka öskuþykkt og svæði þar sem halli er meira en 10° (hvít). Önnur svæði eru flokkuð eftir viðkvæmniflokkum og hrjúfleiða. Gera má ráð fyrir mestum skaða á ljósbrúnum svæðum. Ash fall of 2-5 cm is assumed in the research area. Areas classified as 1 and 2 in ecosystem sensitivity (gray) and areas with >10° incline should not be affected by the ash (white). Other areas are classified based on ecosystem sensitivity (Viðkvæmniflokkur) and surface roughness analysis (Breytileiki í hæð). Highest damage is to be expected on light brown areas.

Forsendur fyrir flokkun á mynd 30 eru þær að svæði með meira en 10° halla hreinsist fljótt af ösku og hún hafi því ekki áhrif þar. Svæði í viðkvæmniflokkum 1 og 2 ættu að þola nokkuð vel slíka öskuþykkt og gróðurinn á þeim svæðum binda öskuna þannig að ekki er heldur mikil hætta á öskufoki þar. Svæði í viðkvæmniflokkum 3-5 þola slíkt öskufall hins vegar ekki eins vel þar sem gróðurinn er almennt rýrari, lágvaxnari og gisnari og því eru ljósfjólublá svæði (viðkvæmniflokkur 3 með lítinn hrjúfleika) þau svæði þar sem gróður er hvað viðkvæmastur fyrir slíku öskufalli. Að sama skapi binda svæði í viðkvæmniflokkum 3-5 öskuna ekki eins vel en hrjúfleiki svæða innan hvers flokks hefur þó áhrif þar þannig að ljós appelsínugul svæði (viðkvæmniflokkur 5 með lítinn hrjúfleika) eru þau svæði þar sem mestar líkur eru á öskufoki. Svæði þar sem hrjúfleikinn/breytileiki í hæð er mestur eru sýnd með dökkum litum en svæði þar sem hrjúfleiki er lítill og meiri hætta á foki, sýnd í ljósum litum. Jafnframt var bætt inn þekju frá Náttúrufræðistofnun sem sýnir söguleg hraun við Heklu þar sem gera má ráð fyrir miklum yfirborðshrjúfleika sem væntanlega dregur enn frekar úr öskufoki á þeim svæðum.

Á mynd 31 eru notaðar sömu forsendur og á mynd 30 nema hér er gert ráð fyrir 5-10 cm öskuþykkt og þá má gera ráð fyrir að gróður á svæðum í viðkvæmniflokkum 2 skaðist vegna öskuþykktar og öskufoks og þá sérstaklega þar sem hrjúfleikinn er lítill.



**Mynd 31.** Á myndinni er gert ráð fyrir að 5-10 cm öskufall hafi lent á rannsóknarsvæðinu. Svæði í viðkvæmniflokkum 1 (grá) ættu að þola slíka öskuþykkt og svæði þar sem halli er meira en 10° (hvít). Önnur svæði eru flokkuð eftir viðkvæmniflokkum og hrjúfleika. Gera má ráð fyrir mestum skaða á ljósbrúnum svæðum. Ash fall of 5-10 cm is assumed in the research area. Areas classified as 1 and 2 in ecosystem sensitivity (gray) and areas with >10° incline (white) should not be affected by the ash. Other areas are classified based on ecosystem sensitivity (Viðkvæmniflokkur) and surface roughness analysis (Breytileiki í hæð). Highest damage is to be expected on light brown areas.

Niðurstöður þessa þróunarverkefnis sem hér eru kynntar eru fyrst og fremst ætlaðar til að sýna möguleika á hvernig er hægt að nýta fyrirbyggjandi gögn til að meta hversu viðkvæmt land er gagnvart öskufalli og flutningi á ösku og vikri í kjölfar eldgosa. Sum af þeim gögnum sem unnið var með eru ennþá í vinnslu eða að öðru leyti ekki fullnægjandi heimild. Sem dæmi um það vantaði í tæplega 5% tilfella flokkun á vistgerð í gróðurkortinu af hálendinu og þá var sett „áætluð“ vistgerð sem metin var út frá viðkomandi gróðurlendum og loftmynd. Vinna við útgáfu nýrra vistgerðakorta fyrir allt landið er á lokastigi en nýttist ekki fyrir þetta verkefni. Þá er ArticDem hæðarmódelið sem notað var ennþá í vinnslu og náði ekki yfir allt rannsóknarsvæðið.

Með verkefninu GróGos hefur verið byggð upp aðferðafræði til að flokka land eftir því hversu viðkvæmt það er gagnvart öskufalli og flutningi ösku í kjölfar eldgosa. Þessi aðferðafræði getur nýst til þess að í draga fram helstu svæði í nágrenni eldfjalla sem líklegt er að þoli öskufall illa og geti verið uppspretta öskufoks. Jafnframt getur flokkunin nýst til að skipuleggja mótvægisáðgerðir sem geta verið bæði til forvarnar t.d. með landgræðslu-áðgerðum í nágrenni eldfjalla til að styrkja vistkerfin en einnig áðgerðir í kjölfar eldgosa t.d. til að hefta öskufok. Frekari þróun þessarar aðferðafræði gæti falið í sér að taka tillit til fleiri umhverfisþátta s.s. ríkjandi vindátta, úrkomu og hæðar yfir sjó og einnig má gera ráð fyrir að betri fjarkönnunargögn verði aðgengileg á næstu árum sem nýttist við slíka þróunarvinnu.

## **Þakkir**

Verkefnið sem hér er kynnt var styrkt af Ofanflóðasjóði. Eftirfarandi starfsmenn Landgræðslu ríkisins, Landbúnaðarháskóla Íslands og Náttúrufræðistofnunar tóku þátt í verkefninu auk höfunda. Guðný H. Indriðadóttir hjá Lr aðstoðaði við vettvangsvinnu og Ólafur Arnalds hjá Lbhí las yfir skýrslu og veitti góðar ábendingar. Sigmar Metúsalemsson hjá NÍ sá um úrvinnslu hæðargagna með Erdas. Höfundar færa öllum þessum aðilum bestu þakkir fyrir sitt framlag.



## 7. HEIMILDIR

Arnór Sigurjónsson (ritstj.) (1958). *Sandgræðslan*. Búnaðarfélag Íslands og Sandgræðsla ríkisins, Reykjavík.

Ármann Höskuldsson, Niels Óskarsson, Rikke Pedersen, Karl Gronvold, Kristín Vogfjord & Rósa Ólafsdóttir (2007). The millennium eruption of Hekla in February 2000. *Bulletin of Volcanology*, 70(2): 169-182.

Árni Hjartarson (1995). *Á Hekluslóðum*. Árbók Ferðafélags Íslands, Ferðafélag Íslands, Reykjavík, 257 bls.

Bagnold, R. A. (1941). *The Physics of Blown sand and desert dunes*. William Morrow & Company, New York. 265 bls.

Borgþór Magnússon og Sigmar Metúsalemsson (2015). *Vöktun á strandrofi og áfoki*. Áfangaskýrsla 2014. Náttúrufræðistofnun Íslands, NÍ-14005. Unnið fyrir Landsvirkjun, LV-2015/055. Náttúrufræðistofnun Íslands

Casey, M. (2015). 35 years after Mount St. Helens eruption, nature returns. CBS NEWS. May 18. 2015. <http://www.cbsnews.com/news/35-years-after-mt-st-helens-eruption-nature-returns/>

Chepil, W.S. (1950). Properties of soil which influence wind erosion: II. Dry aggregate structure as an index of erodibility. *Soil Science* 39: 403-414.

Chepil, W. S. & Woodruff, N. P. (1963). The physics of wind erosion and its control. *Advances in agronomy*, 15, 211-302.

Dale, V.H., Swanson F.J. & Crisafulli, C.M. (2005). *Disturbance, 2005. Survival, and Succession: Understanding Ecological Responses to the 1980 Eruption of Mount St. Helens*. Í: *Ecological Responses to the 1980 Eruption of Mount St. Helens*. Ritstjórar: Virginia H. Dale, Frederick J. Swanson and Charles M. Crisafulli. Springer Science+Business Media.

Elín Fjóra Þórarinsdóttir (2010). *Landscape scale measurements of wind erosion of volcanic materials in the Hekla area*. M.S. ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands.

Esri (á.á.). Sótt 15. nóvember 2016 af : <http://www.esri.com/>

Fanney Ósk Gísladóttir (2000). *Umhverfisbreytingar og vindrof sunnan Langjökuls*. M.S. ritgerð, Háskóli Íslands.

Fanney Ósk Gísladóttir, Sigmundur Helgi Brink & Ólafur Arnalds (2014). *Nytjaland*. Rit Lbhí nr. 49. Landbúnaðarháskóli Íslands.

Harpa K. Einarsdóttir (2007). *Áhrif áfoks á gróður*. Ritgerð til meistaraþrófs í umhverfisfræði, Háskóli Íslands. 43 bls.

Hexagon Geospatial (á.á.). Sótt 15. nóvember 2016 af :

<http://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine>

Hjalti Sigurjónsson, Fanney Ósk Gísladóttir & Ólafur Arnalds (1999). Measurements of eolian processes on sandy surfaces in Iceland. *Fjölrit RALA nr. 201*.

Hudson, N. (1981). *Soil conservation*. Batsford Academic and Educational, London.

Kent, M., Owen, N.W., Dale, P., Newnham R.M. & Giles, T.M. (2001). Studies of vegetation burial: a focus for biogeography and biogeomorphology? *Progress in Physical Geography* 25, 4. <http://ppg.sagepub.com/content/25/4/455.full.pdf+html>

Landbúnaðarháskóli Íslands (á.á.). Nytjaland – Jarðabók Íslands. Sótt 10. September 2016 af: <http://www.nytjaland.is/landbunadur/wqrala.nsf/key2/nytjaland.html>

Landgræðsla ríkisins (á.á.). Jarðvegsrof á Íslandi. Sótt 10. september 2016 af: [http://land.is/wp-content/uploads/2015/11/Jardvegsrof\\_islenska.pdf](http://land.is/wp-content/uploads/2015/11/Jardvegsrof_islenska.pdf)

Landmælingar Íslands (2016, 14. júní). Nýtt landhæðarlíkan af Íslandi. Sótt 12. nóvember 2016 af: <http://www.lmi.is/nytt-landhaedarlikan-af-islandi/>

Náttúrufræðistofnun Íslands. (2014). *Gróðurkort af miðhálandi Íslands*. <http://www.ni.is/midlun/utgafa/kort/grodurkort>

Náttúrufræðistofnun Íslands (á.á.). Vistgerðir. Sótt 10. október 2016 af: <http://www.ni.is/grodur/vistgerdir>

Newnham, R.M., Lowe, D.J. & Alloway, B.V. (1999): Volcanic hazards in Auckland, New Zealand: a preliminary assessment of the threat posed by central North Island silicic volcanism based on the Quaternary tephrostratigraphical record. In Firth, C.R. and McGuire, W.J., editors, *Volcanoes in the Quaternary*. Geological Society London, Special Publications, 161, London: Geological Society, 27–45.

Olga Kolbrún Vilmundardóttir, Borgþór Magnússon, Guðrún Gísladóttir & Sigurður H. Magnússon (2009). Áhrif sandfoks á mólendisgróður við Blöndulón. *Náttúrufræðingurinn* 78: 125–137.

Ólafur Arnalds (1998). Sandur – Sandfok. Í: *Græðum Ísland; Landgræðslan 1995 -1997*. (ritstj. Úlfur Björnsson og Andrés Arnalds). Landgræðsla ríkisins

Ólafur Arnalds (2013). The Influence of Volcanic Tephra (Ash) on Ecosystems. *Advances in Agronomy* 121. 331-380.

Ólafur Arnalds, Elin Fjola Thorarinsdóttir, Johann Thorsson, Pavla Dagson Waldhauserova & Anna Maria Agustsdóttir (2013). An extreme wind erosion event of the fresh Eyjafjallajökull 2010 volcanic ash. *Scientific Reports* 3: 1257 doi:10.1038/srep01257

Ólafur Arnalds & Berglind Orradóttir (2010). Mælingar á foki á Landbótarsvæðinu á Rangárvöllum. Fræðaðing landbúnaðarins 7.

Ólafur Arnalds, Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Sigmar Metúsalemsson, Ásgeir Jónsson, Einar Grétarsson & Arnór Árnason (1997). *Jarðvegsrof á Íslandi*. Landgræðsla ríkisins og Rannsóknastofnun Landbúnaðarins.

Ólafur Arnalds & Fanney Ósk Gísladóttir (2009). Mælingar á vindrofi á Hólsfjöllum. *Rit Lbhí* nr. 25.

Rose, C.W. (1998). Modeling Erosion by Wind and Water. Í: *Methods for Assessment of Soil Degradation* (ritstj. Lal, R., Blum, W.H., Valentine, C. & Stewart, B.A.). CRC Press, bls. 57-88.

Sigurður Þórarinsson (1979). Teprochronology and its application in Iceland. *Jökull*, 29. 33-36.

University of Minnesota (á.á.). Sótt 15. nóvember 2016 af: <http://pgc.umn.edu/arcticdem>

Zobeck, T.M., Sterk, G., Funk, R., Rajot, J.L., Stout, J.E. & Van Pelt, R.S. (2003). Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surface Processes and Landforms* 28:1163-1188.

Zobel, D.B. & Antos, J.A. (1997). A Decade of recovery of understory vegetation buried by volcanic tephra from Mount St. Helens. *Ecological Monographs*, 67 (3) 317-344.

Thordarson, T. & Larsen, G. (2007). Volcanism in Iceland in historical time: Volcano types, eruption styles and eruptive history. *Journal of Geodynamics* 43, 118-152.

Walker, L.R. & Moral R.del (2003). [Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation. Cambridge University Press. https://books.google.is/books/cambridge?ie=UTF-8&vid=ISBN0521529549&q=&redir\\_esc=y](https://books.google.is/books/cambridge?ie=UTF-8&vid=ISBN0521529549&q=&redir_esc=y)