

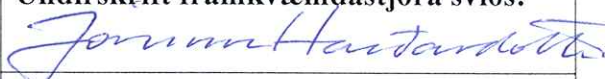
Greining á hreyfingu í gosmekkinum í eldgosinu í Eyjafjallajökli 2010

Sindri Magnússon
Halldór Björnsson

Greining á hreyfingu í gosmekkinum í eldgosinu í Eyjafjallajökli 2010

Sindri Magnússon, Háskóla Íslands
Halldór Björnsson, Veðurstofu Íslands

Lykilsíða

Skýrsla nr.: VÍ 2012-004	Dags.: Júní 2012	ISSN: 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Greining á hreyfingu í gosmekkinum í eldgosinu í Eyjafjallajökli 2010		Upplag: 20 Fjöldi síðna: 72 Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
Höfundar: Sindri Magnússon og Halldór Björnsson		Verkefnisstjóri: Halldór Björnsson Verknúmer: 2518-8-0002	
Gerð skýrslu/verkstig:		Málsnúmer:	
Unnið fyrir:			
Samvinnuaðilar: Nýsköpunarsjóður námsmanna			
Útdráttur: Eldgosið í Eyjafjallajökli er einstakt að því leyti að aldrei áður hefur náðst í einu gosi að safna á kerfisbundinn hátt jafnmiklu af myndagögnum. Þessi skýrsla er afrakstur verkefnis sem styrkt var af Nýsköpunarsjóði námsmanna og var unnið af Sindra Magnússyni undir leiðsögn Halldórs Björnssonar. Verkefnið snérist um að búa til sjálfvirkar aðferðir til þess að vinna með myndagögn úr gosinu með það að leiðarljósi að hægt yrði að prófa þau fræði sem til eru um hegðun gosmakka. Þau gögn sem aðferðin skilar benda til þess að flotfasi gosmakkarins sé vel merkjanlegur. Erfiðara er að greina skotfasann sem finnast ætti neðst í mekkinum í þessum gögnum. Með því að nota aðferðina á kvikmyndir má leiða að því líkum að skotfasalagið annað hvort sé of grunnt til að sjást, eða að hraðabreytingar allra neðst í mekki séu flóknari en gert er ráð fyrir í einföldum líkönum af gosmökkum.			
Lykilorð: Eldgos, Eyjafjallajökull, gosmökkur, aska, ljósmyndir, vefmyndavél, líkön		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: GNP	

Efnisyfirlit

1 Inngangur	7
2 Gögn	9
3 Aðferð við greiningu mynda	9
3.1 Lýsing á aðferð.....	9
3.2 Nánari útfærsla á aðferð	11
3.3 Verklag við greiningu á ferlum agna í mekki	12
4 Niðurstöður	13
4.1 Lóðréttur hraði	13
4.2 Mökkurinn notaður til að reikna vindhraða	19
4.3 Stækkandi bólstrar	23
5 Umræða	26
6 Lokaorð	27
I Hversu þykkt er skotfasalagið?	29
II Pixlastærð	33
III Myndir af lóðréttum hraða	34
III.1 17. apríl 2010	34
III.2 20. apríl 2010	37
III.3 11. maí 2010	40
III.4 15. maí 2010	43
IV Skotfasar úr kvimyndaskeiðum	46
V Myndir af láréttum vindhraða	50
VI Myndir af samanburði á vindhraða og lóðréttum hraða	54
VII Myndir af greiningu á bólstrum	62
VII.1 Greining á vefmyndum.....	62
VII.2 Greining á kvimyndaskeiðum.....	68

1 Inngangur

Þegar eldgos verða geta aðstæður í lofti haft áhrif á ris gosmakkarins. Ef loft er óstöðugt við gosstöðvarnar getur mökkurinn risið hærra en ef loftið er stöðugt. Einnig getur vindur aukið blöndun á köldu umhverfislofti inn í mökkinn og þannig haft áhrif á hversu hátt mökkurinn nær að rísa. Hér skiptir þó máli hversu öflugt gosið er. Almenna reglan er sú að þeim mun minni kraftur sem er í gosinu, þeim mun áhrifameiri geta umhverfisþættir orðið. Í öflugum gosum er hitauppstreymi hinsvegar svo mikið að utanaðkomandi áhrif skipta litlu neðarlega í lofthjúpnum (neðstu 10 – 15 km). Þó er það svo að jafnvel í öflugustu gosum stöðvast mökkurinn að lokum þegar hann rís upp í heiðhvolfið, þar sem loft mjög stöðugt.

Í öskugosi getur verið erfitt að meta styrk gossins, þ.e. hversu mikið magn af ösku spýttist upp í lofthjúpinn á hverri sekúndu. Að gosi loknu má mæla öskufallið og reikna út hversu öflugt gosið var, en slíkar upplýsingar nýtast ekki við rauntímavöktun, fyrir almannavarnir, flugmálalyfivöld og aðra sem þurfa upplýsingar á meðan á gosinu stendur. Hefðbundin leið til að meta gosstyrkinn er að fylgjast með í hvaða hæð mökkurinn rís og beita reynslu líkingu sem tengir saman hæð og styrk gossins. Þessi líking byggir á mjög einfaldaðri kenningu um hvernig heitur strókur rís ((Morton et al., 1956); sjá einnig yfirlit í Oddson (2007)), en nota þarf athuganir til að finna gildi fyrir tölulega stuðla í þeirri líkingu sem kenningin spáir. Á þennan hátt hefur verið sýnt fram á að ásættanlegt samband milli styrks og hæðar gosmakkar fæst með s.k. Mastin-líkingu: $V = (H/2.0)^{4.15}$ þar sem H er hæð gosmakkarins og V er framleiðsla ösku (í rúmmetrum á sekúndu; sjá nánar Mastin et al. (2009)). Það að öskuframleiðslan sé háð hæð gosmakkar í fjórða veldi (og rúmlega það) þýðir að ef borin eru saman tvö gos og mökkurinn í því seinna rís tvöfalt hærra en mökkurinn í því fyrra, þá má gera ráð fyrir að styrkur seinna öskugosins sé rúmlega 16 faldur styrkur þess fyrra!

Verulegu máli getur skipt að hafa tímabæra vitneskju um stærð eldgoss meðan á því stendur. Allar spár um dreifingu ösku, t.d. frá Íslandi til Evrópu, eru gagnslitlar nema vitað sé hvort og þá hversu mikið af ösku sé að berast upp í háloftin. Mastin líkingin er ein þeirra aðferða sem notaðar eru til að leggja mat á styrk gosa, en vitað að henni fylgir veruleg. Þó hún hvíli á fræðilegum grunni er ekki gert ráð fyrir mörgum þáttum sem geta skipt máli um það hversu hátt gosmökkur rís. Líkingin kann að vera góð að meðaltali, en aðstæður á gosstað og í lofthjúpnum geta valdið því að hún gefi mjög villandi niðurstöður í einstaka tilvikum. Til að skilja betur framvinduna í eldgosum þarf því að nota reiknilíkön sem reyna að herma eftir hegðan gosmakkarins.

Þessi reiknilíkön eru í tveimur þyngdarflokkum: þung og létt. Þungu líkönin (sjá t.d. Oberhuber et al. (1998)) eru í ætt við veðurspálíkön, leysa flóknar hlutafleiðujöfnur, eru mjög frek á reikniafl og henta ekki vel fyrir rauntímanot. Létti flokkurinn er einhverskonar millstig milli þessara flóknu líkana og reglu Mastin. Þau eru nægilega flókin til að geta tekið helstu umhverfisþætti með í reikningin, en samt svo einföld í uppbyggingu að hægt er að beita þeim í rauntíma og kanna áhrif mismunandi óvissuþátta á niðurstöður.

Í þessum einföldu líkönum er mekkinum skipt í þrjú svæði eftir því hvaða þættir eru ráðandi í hreyfingu makkarins (Woods, 1988). Neðst er svo kallað skotfasalag þar sem gosmökkurinn hegðar sér eins og þungt blandað gas (t.d. blanda af gastegundum og ösku) sem gýs upp í lofthjúpinn. Það að blandan er þung þýðir að meðan hún rís hægir hún á sér, ekki ólíkt því þegar grjóti er kastað upp í loftið. Ef ekkert annað gerist myndi gosblandan að lokum stöðvast og falla til jarðar sem sjóðandi heitur öskustrókur. Ef hinsvegar gosmökkurinn nær að blanda inn lofti úr

umhverfinu geta flotkraftar náð yfirhöndinni. Innblöndunin gerist á jaðri makkarins þar sem iður í mekkinum soga inn loft úr umhverfinu. Þetta loft er mörg hundruð gráðum kaldara en mökkurinn og snögghitnar því þegar það blandast inn í mökkinn. Þegar loftið hitnar þenst það út, og eðlismassi þess lækkar. Á þennan hátt leiðir blöndun lofts inn í mökkinn til lækkaði eðlismassa og ef hann verður minni en eðlismassi lofts í umhverfinu, flýtur mökkurinn af sjálfu sér. Fyrir ofan skotfasalagið tekur því við lag þar sem mökkurinn er í flotfasa, þar sem hann er eðlisléttari en loftið umhverfis og flotkraftar stýra uppstreymi gosefna.

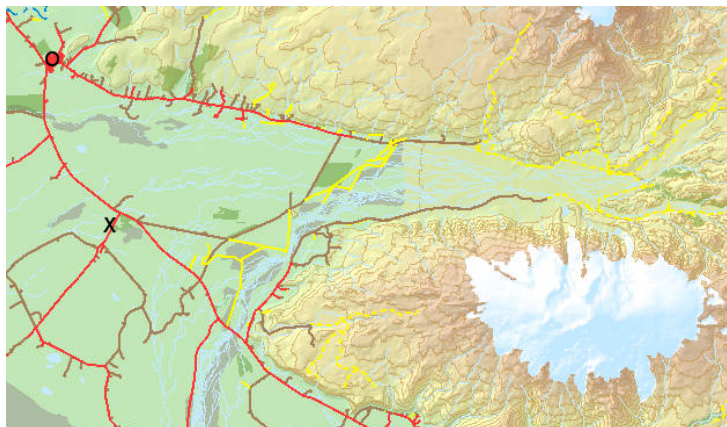
Segja má að í skotfasanum eigi sér stað umbreyting þungar blöndu af gasefnum og föstum gosefnum (t.d. ösku og hraunmolum) yfir í léttan mökk sem rísi vegna eigin varma. Mikilvægt er þó að hafa í huga að léttning makkarins í skotfasa stafar einnig af því að þungum föstum efnun rignir úr honum. En þar sem mökkurinn er þyngri en loft í skotfasanum, er það eitt einkenni skotfasalagsins að í því minnkar rishraði makkarins með hæð.

Meðan mökkurinn er í flotfasa umbreytist varmaorka makkarins í hreyfiorku, og að lokum stöðuorku. Neðst í þessu lagi eykst hraði uppstreymis í mekkinum með hæð en áframhaldandi innblöndun kælir mökkinn enn frekar uns hitamunur makkarins og umhverfisins verður ekki nægur til að knýja öflugt uppstreymi. Þá dregur úr hraða uppstreymisins og efst í flotlaginu kemst mökkurinn í jafnvægi við umhverfi sitt.

Fyrir ofan flotfasalagið getur mökkurinn dreift úr sér; hversu mikið hann dreifist fer eftir aðstæðum, en oft myndar hann stóran kúf, öskuský sem rekur með vindi. Einföld reiknilíkön af hegðan gosmakka leitast við að skýra í hvaða hæð kúfurinn myndast og hversu mikil aska berst upp í þessa hæð (sjá t.d. Bursik (2001) og Mastin (2007)). Þessi líkön taka mismikið tillit til umhverfisþátta, s.s. vindhraðabreytinga með hæð, stöðugleika lofts o.þ.h., en geta gefið mikilvæga innsýn inn í þau ferli sem eru ráðandi í þróun gosmakkar í einstökum eldgosum. Þó þessi einföldu líkön byggja yfirleitt á traustum eðlisfræðilegum grunni, eru í þeim einfaldanir (nálganir) sem hvíla ekki á traustum grunni athugana. Í mjög fáum tilvikum hefur verið fylgst svo nákvæmlega með eldgosum að hægt sé að mæla uppstreymið í mekkinum eða aðrar stærðir sem nota má til að kanna gildi líkananna. Æskilegt væri að nota þessi einföldu reiknilíkön frekar en Mastin-reglu til að meta styrk öskugosa, en til þess þarf að kanna gildi þeirra betur og bæta þau ef þarf.

Eldgosið í toppgíg Eyjafjallajökuls hófst þann 14. apríl og stóð í 39 daga, eða til 22. maí, 2010. Á meðan eldgosinu stóð breytti það nokkrum sinnum um ham og m.a. voru tveir kaflar með öflugum öskugosi, dagana 14. – 18. apríl og 4. – 17. maí (Arason et al., 2011). Fylgjast mátti með eldgosinu á nokkrum vefmyndavélum sem settar voru upp í nágrenni gosstöðvanna og sást vel til gossins um 20% af góstimunum (Arason et al., 2011). Myndasafnið frá þessum vefmyndavélum, auk kvikmynda sem teknar voru af gosinu, eru einstakt gagnasafn sem nota má til þess að mæla hreyfingu gosmakkarins og skoða hversu vel hún fellur að þeim einföldu hugmyndum sem lýst var hér að framan.

Tilgangur þessa verkefnis var að þróa aðferðir sem má nota á myndasafnið svo hægt verði að prófa þau fræði sem eru til um hegðun gosmakka. Ítarleg prófun fræðanna krefst þess að skoða mörg mismunandi fræðileg líkön og bera hvert þeirra saman við gögnin. Slíkt er viðameira en svo að það verði gert í þessu verkefni. Látið verður nægja að ræða niðurstöður með tilliti til þeirra hugmynda um hegðun gosmakka sem áður var lýst.



Mynd 1. Sjáum hér staðsetningu vefmyndavélarinnar, merkt með O, og staðsetningu myndbandsupptökunnar, merkt með X. (Mynd úr kortasjá Landmælinga Íslands).

2 Gögn

Fjarskiptafyrirtækið Míla var með 3 vefmyndavélar með útsýni yfir gosið. Sú þeirra sem þótti gefa best útsýni yfir gosmökkinn var staðsett á Hvolsvelli í 34 km fjarlægð frá sjálfri gosstöðinni (sjá mynd 1). Myndirnar úr vefmyndavélinni voru svo geymdar á 5 sekúndu fresti og veitti Míla vísindamönnum leyfi til að vinna úr þeim og dreifa. Þótt myndavélin hafi verið vel staðsett með gott útsýni yfir gosmökkinn var aðeins u.þ.b. 16% af tímanum nógu heiðskirt og bjart til að hægt væri að vinna eitthvað með myndirnar. Upplausn myndanna var yfirleitt um 7m í hverjum pixli, en fjórum sinnum breyttust stillingar á myndavél Mílu og varð upplausnin verri þá daga (sjá nánar viðauka II).

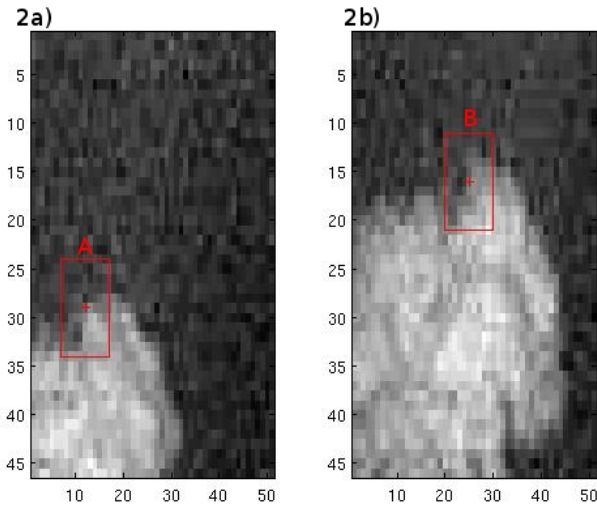
Einnig voru skoðaðar stafrænar kvikmyndatökur teknar af fyrirtækinu Kukl ehf skammt suðaustan við Hvolsvöll (sjá mynd 1). Upptökurnar eru frá frá 17. apríl í kringum hádegi, í allt er um 8 myndskeið að ræða. Myndböndin sýna um 20 ramma á sekúndu, sem er 100 falt þéttara en vefmyndirnar, en upplausn myndanna er um 20m á pixil sem er verri upplausn en vefmyndirnar (sjá nánar viðauka II). Kukl ehf veitti góðfúslega leyfi til að nota upptökurnar til vísindarannsóknna.

3 Aðferð við greiningu mynda

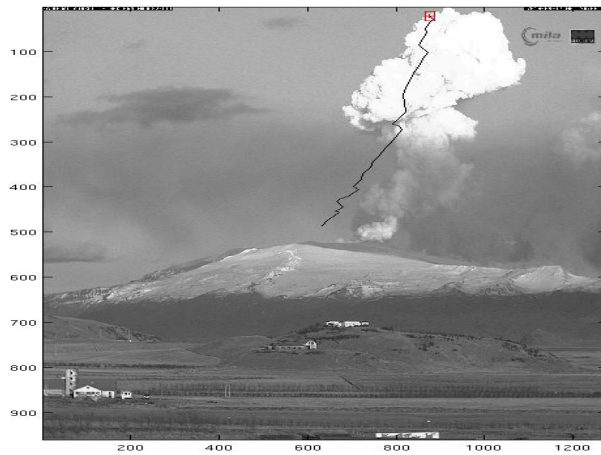
Gögnin frá Mílu eru mjög langar myndarunur, allar teknar frá sömu staðsetningu og með 5 sekúndu millibili og henta myndirnar mjög vel til að kanna hreyfingu í mekkinum. Innan verkefnisins var þróuð aðferð til þess að rekja hreyfingu auðkennanlegra útlitsþátta í mekkinum (t.d. jaðar gufubólsturs eða annarra búta af mekkinum). Aðferðin byggir á því að hámarka fylgni milli myndaramma og er nægilega öflug til þess að ruglast ekki þó útlitsþátturinn aflagist með tíma. Nánari lýsing á aðferðinni fylgir.

3.1 Lýsing á aðferð

Hugsum okkur að við höfum tvær myndir (myndir 2a og 2b) úr sömu myndarunu þar sem mynd 2a er næsta mynd á undan mynd 2b. Hugsum okkur einnig að við höfum áhuga á ögn á fyrri myndinni og við viljum staðsetja hana á þeirri seinni. Ein leið til að gera þetta er að teikna kassa



Mynd 2. Samanburður á tveimur myndarömmum og hvernig rekja má staðsetningu agnar á milli mynda. Myndin til vinstri sýnir ögn í miðju kassa A og myndin til hægri sýnir ögnina í miðju kassa B sem er sá kassi sem er líkastur kassa A, eins og lýst er nánar í texta.



Mynd 3. Dæmi um feril agnar í mekki. Ljósmyndin sýnir loka myndina í rununni sem ferillinn byggir á.

umhverfis ögnina á mynd 2a (kassa A) og finna svo þann kassa á mynd 2b (kassa B) sem líkist mest kassa A. Ef við einskorðum leitina við jafnstóra kassa þarf bara að finna skynsamlega leið til þess að ákvarða hvaða jafnstóri kassi á mynd 2b er líkastur kassa A á mynd 2a.

Fyrst einungis eru skoðaðir kassar sem eru jafnstórir þá hafa A og B sama fjölda pixla. Þetta þýðir að ef myndbútararnir í A og B eru verulega líkir, þá er fylgnin milli gildanna í A og B mjög há. Til að finna kassa B má því skipta mynd 2b upp í marga kassa sem allir eru jafnstórir A og reikna fylgni milli gilda í hverjum kassa og gildanna í A. Sá kassi á mynd 2b sem hefur hæstu fylgnina við kassa A er þá líkastur honum í þeim skilningi að pixlar hans eru næstir því að vera þeir sömu og pixlar kassa A. Við ákveðum því að þetta sé kassi B, sem leitað var að.

Nú eru myndir 2a og 2b samliggjandi í myndarununni svo það eru efri mörk á því hversu langt kassi B getur hafa færst. Því er óþarfi að skoða alla jafnstóra kassa á mynd 2b heldur nægir að skoða bara þá kassa sem eru skynsamlega nálægt kassa A.

Gerum nú ráð fyrir að við höfum n – mynda runu og upphafspunkt á fyrstu myndinni í rununni. Við viljum búa til tímaröð sem segir til um staðsetningu agnarinnar með þennan upphafspunkt á sérhverjum tíma $t = 1, 2, \dots, n$. Upphafsstæðsetningin á tíma $t = 1$ er þekkt og beita má aðferðinni hér að ofan til að fara milli tíma $t = 1$ og $t = 2$ og síðan milli $t = 2$ og $t = 3$ og svo koll af kolli upp í $t = n$. Almennit beitung við aðferðinni milli $t = i$ og $t = i + 1$ (þ.s. $1 \leq i < n$) og búum þannig til tímaröð með staðsetningu agnarinnar. Mynd 3 sýnir dæmi um feril agnar þegar búið er að finna staðsetningu hennar á öllum myndum í rununni.

3.2 Nánari útfærsla á aðferð

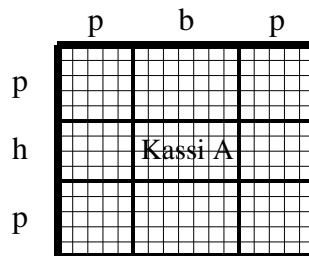
Aðferðin var útfærð eftir þeirri uppskrift sem útskýrð var hér að framan í forritunarumhverfinu MatlabTM. Þó hugmyndin á bak við aðferðina sé nokkuð skýr þá komu upp nokkur atriði sem kröfðust nánari skoðunar og ákvarðanatöku. Þeim helstu verður lýst hér á eftir og ákvarðanir rökstuddar nánar.

Þar sem myndirnar úr Mílu safninu eru alltaf teknar með 5 sekúnda millibili er augljóslega nóg að leita á takmörkuðu svæði umhverfis kassa A á mynd $a2$. Ef við látum nú p vera fjölda pixla sem við erum tilbúin að hliðra kassanum, þá þarf að reikna fylgnistuðulinn milli kassa A og $(2p + 1)^2$ kassa á mynd $2b$ til að finna kassa B .

Mynd 4 sýnir hvernig þessi tala er fundin. Ef kassi A hefur breiddina b og hæðina h þá er hægt að setja hann á

$$(p + h + p + 1 - h)(p + b + p + 1 - b) = (2p + 1)^2$$

mismunandi vegu í stærri kassann.



Mynd 4. Hér er b breiddin á kassa A og h hæð hans. Það er auðvelt að sannfæra sig út frá myndinni að kassa A má raða á $(2p + 1)^2$ vegu inn í stærri kassann.

Augljóst er af jöfnunni að fjöldi kassa sem bera þarf saman við kassa A er óháður stærð A og aðeins háður p , því hversu langt út fyrir A er leitað. Nauðsynlegt er að p sé nægilega stórt til að ögnin sleppi ekki burtu en heppilegt gildi má ákvarða með tilraunum.

Eftir viðamiklar tilraunir kom í ljóst að kassinn náði aldrei að hliðrast um meira en 17 pixla í aðra hvora áttina. Því var ákveðið að gera mestu mögulegu hliðrun kassans 20 pixla til að gefa ófyrirséðum jaðartilfellum svigrúm. Þó var hámarks hliðrun minnkuð aðeins við sérstakar aðstæður eins og t.d. þegar kvimyndatökur af mekkinum voru skoðaðar, en þar var styttri tími á milli mynda.

Eins og áður sagði er fjöldi skipta þar sem þarf að finna fylgnistuðul óháður því hversu stór kassinn er. Samt sem áður þarf kassinn að hafa einhverja stærð og stærð hans ræður því hversu

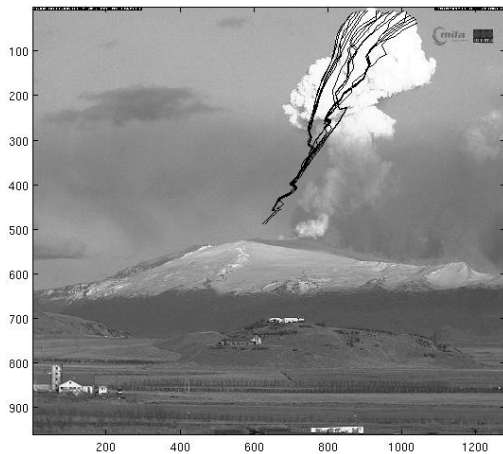
mörg gildi eru tekin með þegar fylgnin er reiknuð. Tilraunir leiddu í ljós að ef kassinn er of stór þá fer hann að elta alltof stóra bita af mekkinum, en of lítil kassi átti það til að missa af þeim skýjabút sem hann var að fylgja og stökkva handahófskennt um myndina.

Til að reyna að finna bestu stærð voru gerðar tvær tilraunir. Í þeirri fyrri var framkvæmd ein stór keyrsla þar sem prófaðar voru allar mögulegar lengdir á hæð og breidd kassans og umraðana þar á frá 11 pixlum upp að 101 pixlum. Allir kassarnir voru svo látnir elta sama partinn í mekkinum, frá vel valinni mynndarunu. Strax var ljóst að til að lóðrétt og lárétt stefna agnarinnar hefðu sama vægi væri nauðsynlegt að hafa hæð og breidd jafn stóra. Þegar kassarnir voru komnir með hliðarlengdina stærri en 31 pixla þá voru þeir farnir að elta of stóra parta af mekkinum. Eftir þessa tilraun varð ljóst að pixlastærðin mætti í mesta lagi vera 31 pixill og að hæð og breidd þyrftu að vera jöfn. Í seinni tilrauninni var farið að á svipaðann hátt og í þeirri fyrri nema hæð og breidd var haldið jöfnum og pixlastærð látin ganga frá 3 pixlum upp í 31. Ítarleg skoðun á niðurstöðum leiddi í ljós að bestar niðurstöður fengust með kassa sem hafði 21 pixla hliðarlengd. Því var ákveðið að nota kassa af þessari stærð í rannsókninni.

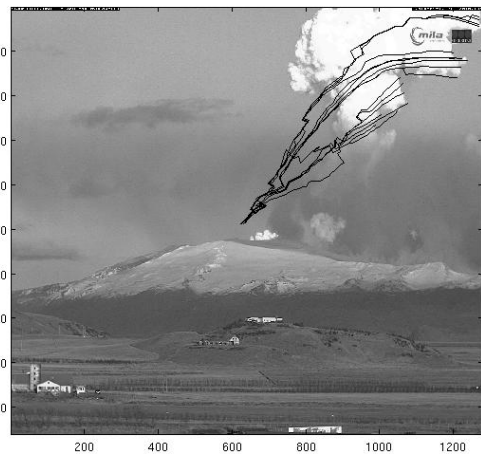
Á tölvutæku formi eru svarthvítar ljósmyndir í grunninn einungis tafla, eða tvívítt fylki, þar sem hver reitur inniheldur gildi sem lýsir birtustigi viðkomandi pixils. Allar myndirnar úr Mílusafninu voru í lit og því geymdar í þrívíðum fylkjum (einu tvívíðu fylki fyrir hvern grunnlit). Þetta þýðir að reikna þurfti fylgnina þrisvar sinnum, einu sinni fyrir hvern grunnlit. Vegna þess að reikningar með svarthvítum myndum gengu þrefalt hraðar voru tvær útgáfur af aðferðinni prófaðar, ein í lit og önnur sem notaði svarthvítar myndir. Prófanir leiddu í ljós að ekkert betri niðurstöður fengust með litmyndum en svarthvítum og var því ákveðið að breyta öllum myndunum yfir í svarthvítar áður en þær voru notaðar til að greina hreyfingu í mekkinum.

3.3 Verklag við greiningu á ferlum agna í mekki

Fyrst í stað var mestur áhugi á að skoða lóðrétt hreyfingu gosmakkarins. Áhuginn helgaðist af því að einföld líkön spá, eins og áður sagði, ákveðnum hraðabreytingum með hæð (minnkandi hraði neðst, í skotfasalagi; aukinn hraði í neðri hluta flotfasalags og minnkandi hraði í efri hluta þess). Síðar komu upp hugmyndir um að skoða tengda hluti, s.s. að reikna lárétt vindhraðasnið og kanna hegðan bólstra. Óháð því hvað verið var að skoða voru allar reiknilraunir framkvæmdar á sama hátt. Valin var myndaruna og upphafspunktur og gögnin greind með aðferðinni sem lýst var hér að framan. Í upphafi þurfti að finna hnit áhugaverðra upphafsgilda og skrá þau inn í keyrsluskrá. En það þótti of seinlegt svo brugðið var á það ráð að bæta við virkni í forritið sem gerir notandanum kleift að velja upphafsgildin á mynd með músabendlinum. Val á myndarunum og upphafspunktunum fór svo eftir því hvað var verið að skoða hverju sinni. Þegar toppur makkarins og hraði hans var skoðaður kom í ljós að það er ekki alveg ljóst hvaða agnir fylgja toppnum. Sama gildir um hliðarjaðar þegar skoðaður er láréttur vindhraði. En með því að byrja á síðustu myndinni og þræða svo í gegnum mynda rununa afturábak í tíma var hægt að elta bara agnir sem fylgdu toppi eða hliðarjaðri. Þetta má sjá betur á mynd 5 en þar sjást nokkrir agnaferlar sem hafa verið raktir aftur á bak frá jaðri makkarins að gíg eins og hann var á síðustu myndinni í rununni.



(a) Greining í lóðréttu stefnu



(b) Greining í lárétta stefnu

Mynd 5. Ferðir agna í mekki. 5a sýnir niðurstöður þar sem leitast var við að elta agnir sem ferðast lóðrétt með því að byrja ofan á skýinu og rekja agnirnar aftur á bak (í tíma niður að gíg), en 5b sýnir niðurstöður þar sem leitast var við að rekja lárétta hliðrun agnanna, með því að byrja á hlið skýsins og rekja hreyfinguna til baka (niður að gíg). Í báðum tilvikum eru ferlarnir teiknaðir á síðustu ljósmyndina í rununni og sjást því upphafsstöður vel.

4 Niðurstöður

4.1 Lóðréttur hraði

Bestu myndskleiðin úr gosinu fengust daganna 17. apríl, 20. apríl, 11. maí og 15. maí. Tafla 1 sýnir þrjú bestu tímabilin þessa daga og verða niðurstöður greiningar á þessum tilvikum skoðuð nánar hér á eftir. Þar sem um mjög yfirgripsmiklar niðurstöður er að ræða eru þær dregnar saman í myndir og sýnir mynd 6 dæmi um niðurstöðu fyrir eitt tímabil. Fyrir hvern feril gegnum mökkinn var lóðréttur hraði agnanna reiknaður út frá færslu agnar á milli mynda. Bilinu frá gíg upp að toppi ferilsins var svo skipt í nokkur þrep og meðaltal og staðalfrávik hraðans í hverju hæðarþrepi reiknað. Þjáll ferill var síðan reiknaður gegnum meðalhraða hvers hæðarþreps og niðurstöðurnar teiknaðar. Á mynd 6 sýna punktarnir meðalhraða agnanna reiknaðan frá risi þeirra í mekkinum, lárétta línurnar sýna staðalfrávik meðaltalsins og sveigði ferillinn sýnir hraðabreytingar með hæð. Til hægri á myndinni má sjá fjölda hraðamælinga í viðkomandi þrepi, þ.e. þann fjölda sem meðaltalið og staðalfrávikði byggja á.

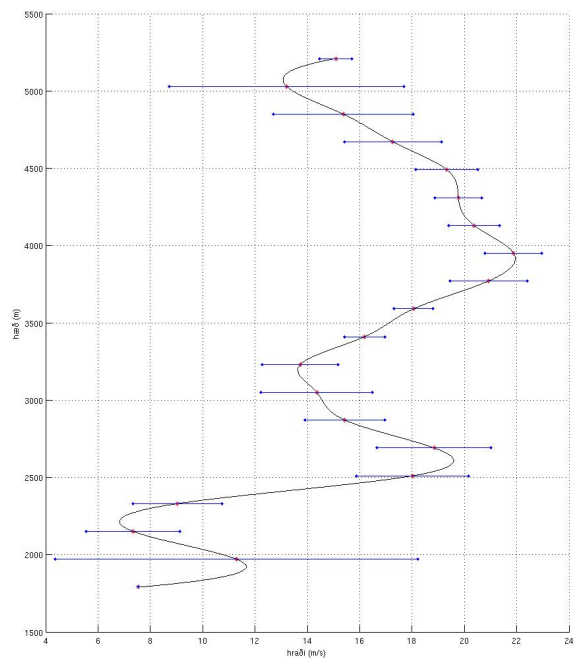
Samandregnar niðurstöður má enn frekar sjá á myndum 7, 8, 9 og 10. Á þessum myndum er niðurstöðum frá hverju hinna þriggja tímabila hvers dags raðað upp hlið við hlið, myndir í fullri stærð eru í viðauka.

Mökkurinn reis mismikið eftir dögum; hann reis hæst þann 17. apríl en lægst þann 20. apríl. Í flestum tilvikum virðast myndirnar lýsa flotfasa gosmakkarins, þær sýna hraðaaukningu í neðrihluta makkarins, lóðréttur hraði nær svo hámarki og síðan dregur úr honum.

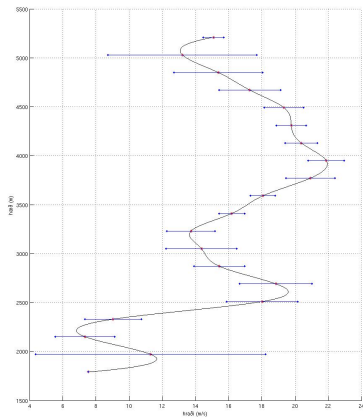
Dagur	Byrjar	Endar	Fjöldi ferla
17. apríl	16:09	16:12	24
17. apríl	16:33	16:36	43
17. apríl	20:03	20:08	20
20. apríl	06:49	06:54	21
20. apríl	07:54	07:59	4
20. apríl	08:01	08:09	50
11. maí	08:16	08:20	4
11. maí	10:48	10:55	4
11. maí	15:00	15:05	23
15. maí	08:00	08:06	2
15. maí	11:55	12:00	3
15. maí	17:04	17:09	9

Tafla 1. Bestu myndskleiðin úr gosinu og fjöldi ferla sem unnt reyndist að rekja í mekkinum.

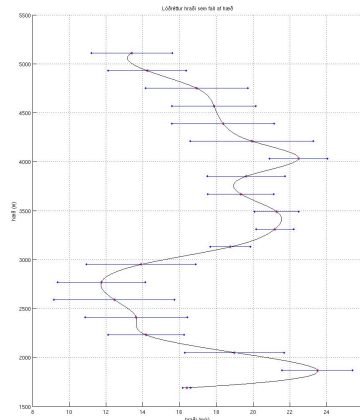
1



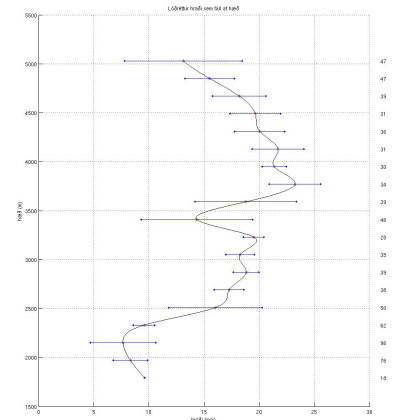
Mynd 6. Dæmi um greiningu lóðrétts hraða í mekkinum. Sjá nánar í texta.



(a) 16:09 til 16:12



(b) 16:33 til 16:36

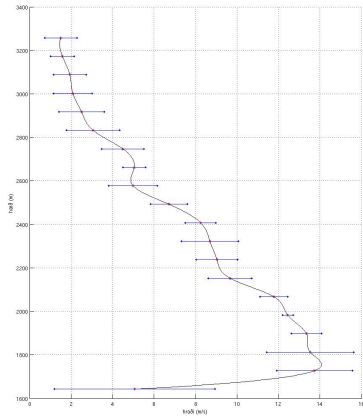


(c) 20:03 til 20:08

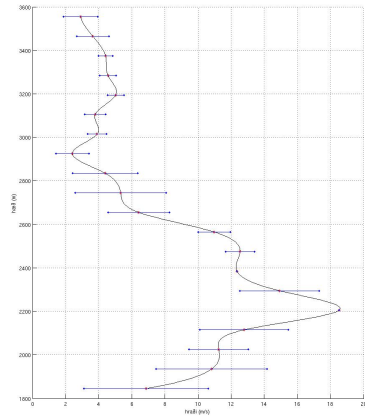
Mynd 7. Lóðréttir hraðaferlar í gosmekkinum þann 17. apríl 2010

Það er ekki auðvelt að greina skotafasa á myndunum. Skotfasinn ætti að sjást sem hæðarbil rétt fyrir ofan gíginn (neðst á myndum 7–10 þar sem hraði fellur með hæð. Í viðauka I er rætt um skotfasann og leitt út að ef innblöndun leiðir til þess að lóðrétt hröðun (a) breytist með tíma t samkvæmt $a = g + \alpha t$ þar sem g er hefðbundin þyngdarhröðun, α er stuðull tengdur innblöndun og upphafshraði makkarins (við gígopið) er 100 m/s , verður þykkt skotfasalagsins mest $500\text{--}700\text{ m}$ og minni sé upphafshraði lægri.

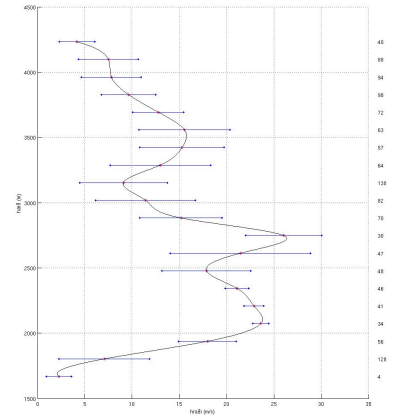
Með myndum sem teknar eru á 5 sekúndna fresti getur því verið erfitt að greina þetta lag. Vegna þessa var ákveðið að greina einnig kvikmyndir frá Kukl ehf. Í þeim er tímaupplausnin miklu betri en á móti kemur að lóðrétt upplausn er verri eins og fyrir getur. Framkvæmd greiningarinnar var eins og áður er lýst og niðurstöður má sjá á mynd 11. Á öllum myndunum er kafli neðarlega þar sem hraðinn er meiri en þegar ofar dregur. Hinsvegar er þessi “háhraða” kafli ekki alltaf neðst á myndinni. Þetta bendir til þess að hraðabreytingar neðst í mekki séu flóknari en hin einfalda hugmynd um skotfasalagið gerir ráð fyrir. Ýmsar skýringar geta verið á þessu og verða þær reifaðar betur í kafla 5.



(a) 06:49 til 06:54

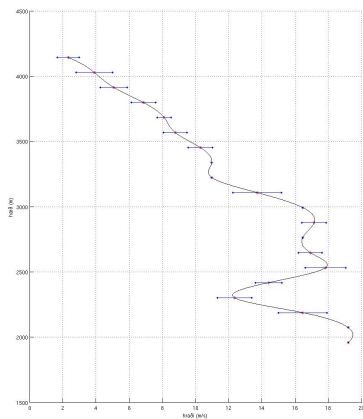


(b) 07:54 til 07:59

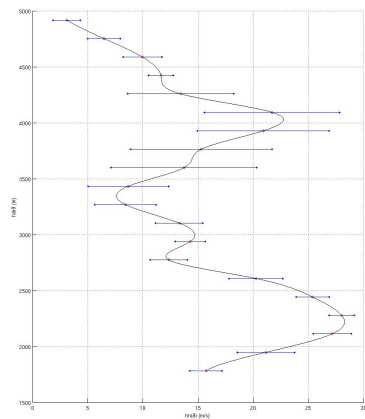


(c) 08:01 til 08:09

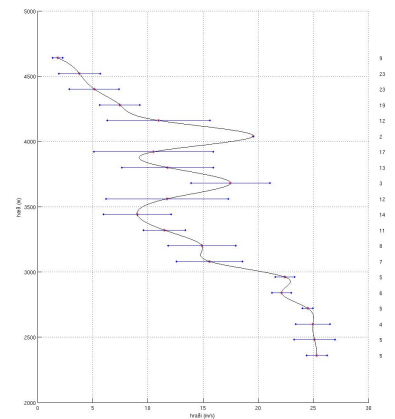
Mynd 8. Lóðréttir hraðaferlar í gosmekkinum þann 20. apríl 2010



(a) 08:16 til 08:20

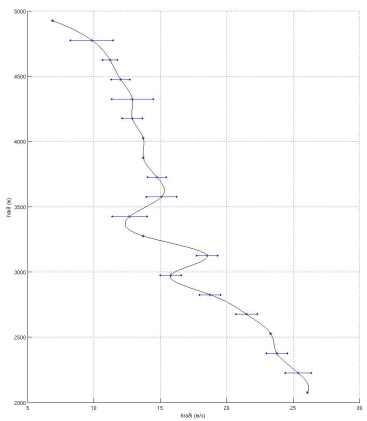


(b) 10:48 til 10:55

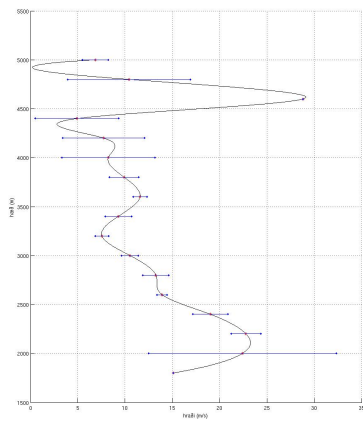


(c) 15:00 til 15:05

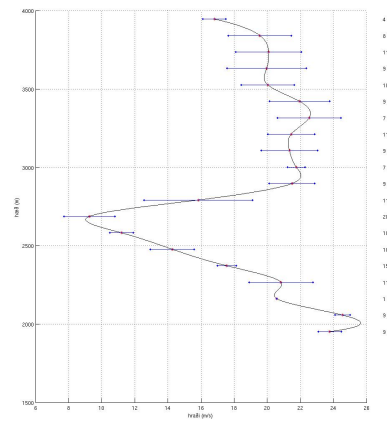
Mynd 9. Lóðréttir hraðaferlar í gosmekkinum þann 11. maí 2010



(a) 08:00 til 08:06

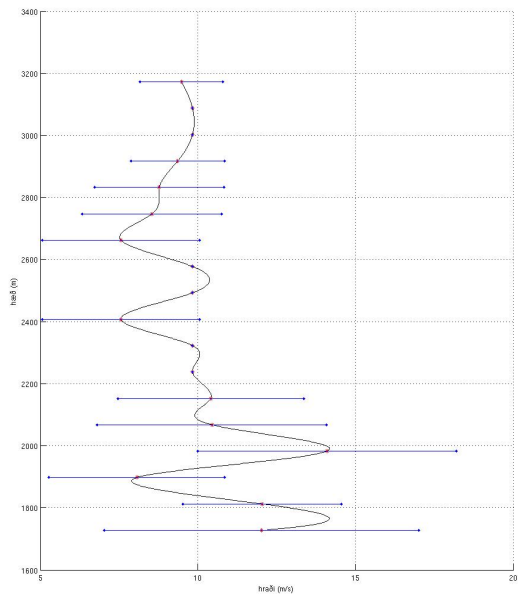


(b) 11:55 til 12:00

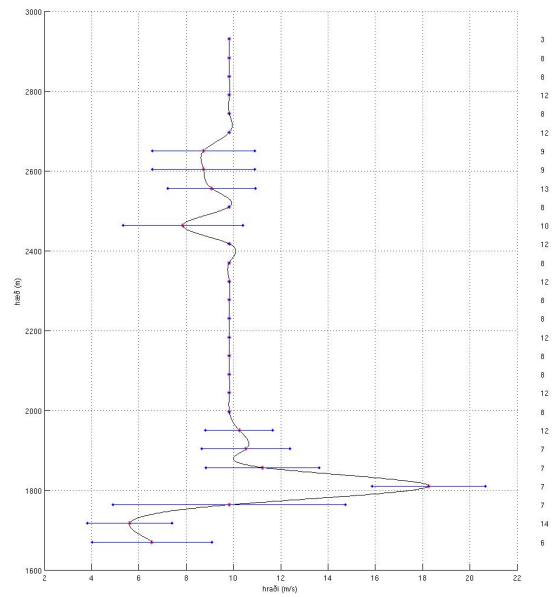


(c) 17:04 til 17:09

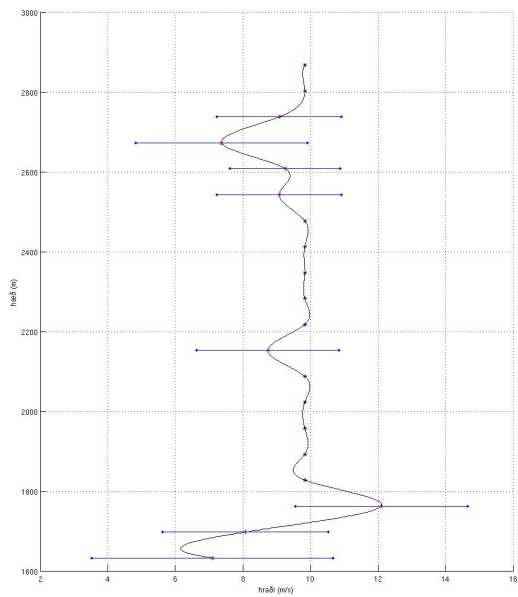
Mynd 10. Lóðréttir hraðaferlar í gosmekkinum þann 15. maí 2010



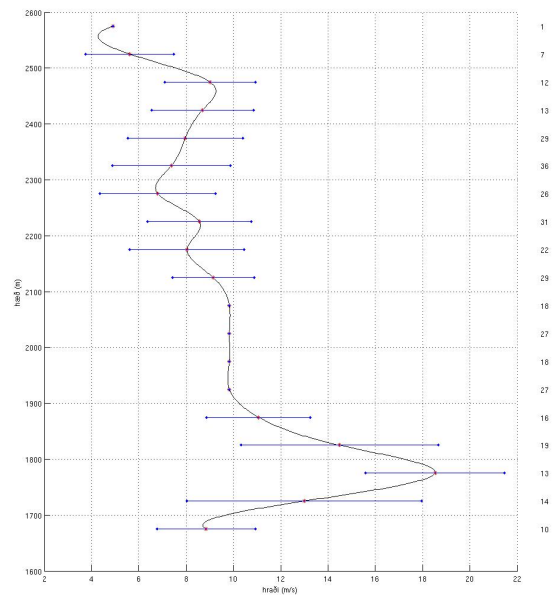
(a) Myndskeið 2



(b) Myndskeið 3



(c) Myndskeið 4



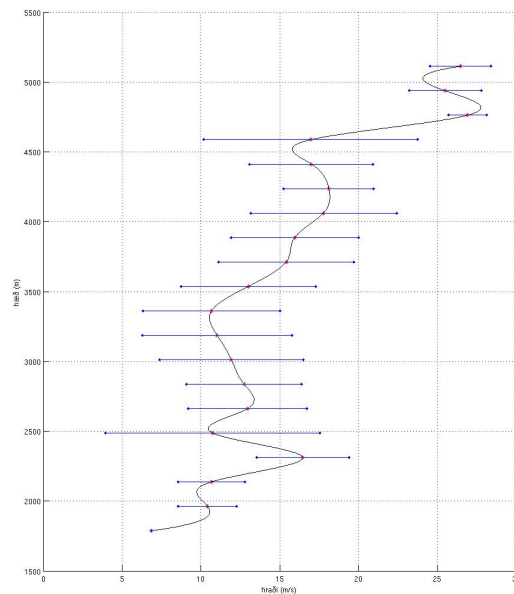
(d) Myndskeið 7

Mynd 11. Niðurstöður greiningar fjögurra myndskeiða úr myndbandi Kukul ehf um hádegi þann 17. apríl 2010. Athyglinni var beint að neðsta hluta makkarins til að reyna að greina skotfasalagið.

4.2 Mökkurinn notaður til að reikna vindhraða

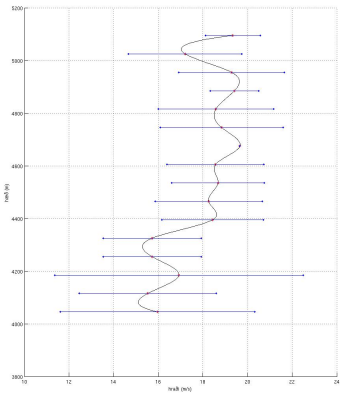
Eftir að búið var að greina lóðréttan hraða var ákveðið að skoða einnig lárétt vindsnið. Ástæða þess er að í sumum einföldum líkönum er innblöndunin háð láréttum vindhraða og ætti því að skila sér í sambandi milli lárétts hraða og lóðrétts. Aukinheldur var áhugavert að athuga hvort hægt væri að nota gosmökkinn sem vindsniðsmæli.

Myndir 12 og 13 sýna láréttan vindhraða fyrir nokkur valin myndskleið þegar stefna vindsins var nánast samsíða myndinni. Í öllum tilvikum vex vindur með hæð. Vöxturinn er samt ekki jafn og athygli vekur að í kvikmyndaskeiðunum (mynd 13) er verulegur munur milli myndskleiða, sérstaklega í neðri hluta makkarins. Þessi skeið eru öll tekin á sama klukkutímanum svo myndin sýnir greinilega hversu mikill breytileiki getur verið í láréttum vindi yfir eldsstöðinni.

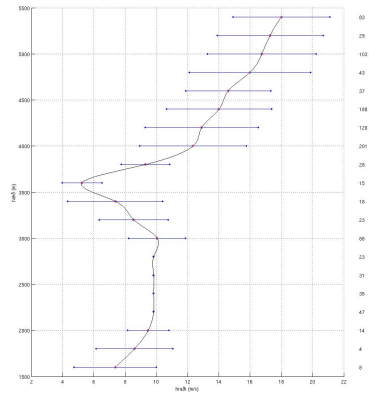


Mynd 12. Láréttur hraði í mekkinum þann 17. apríl frá klukkan 20:03 til 20:07

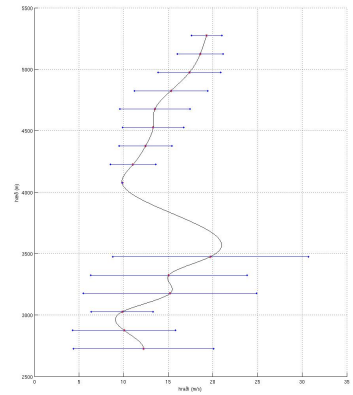
Myndir 14 til 17 sýna samanburð á lóðréttum og láréttum hraða í mekkinum samkvæmt greiningu á vefmyndavélum. Samanburðurinn bendir ekki til þess að augljóst samband sé á milli þessara stærða, en þó virðist oft að smærri sveiflur í vindhraða samsvari einnig litlum sveiflum í lóðréttum hraða. Fræðileg líkön gera ekki öll ráð fyrir sama sambandi innblöndunar og lárétts hraða, og því verður frekari samanburður við gögn ekki reyndur hér.



(a) Úr myndskaiði 1

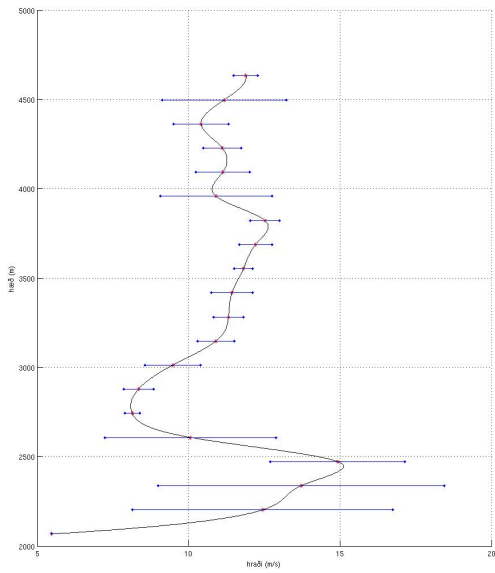


(b) Úr myndskaiði 3

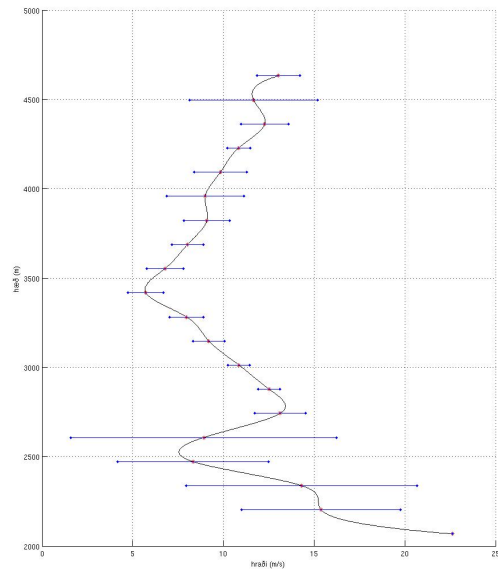


(c) Úr myndskaiði 8

Mynd 13. Láréttur hraði í þremur myndskaiðum frá Kukl afh.

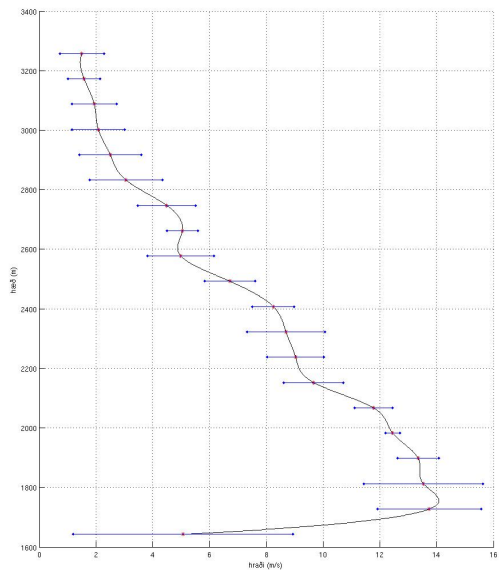


(a) Lóðréttur hraði sem fall af hæð

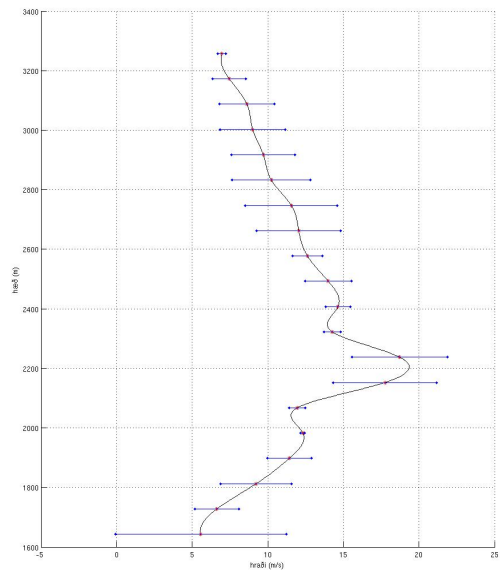


(b) Vindhraði sem fall af hæð

Mynd 14. Samanburður á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 17. apríl 2010 frá 17:25 til 17:31

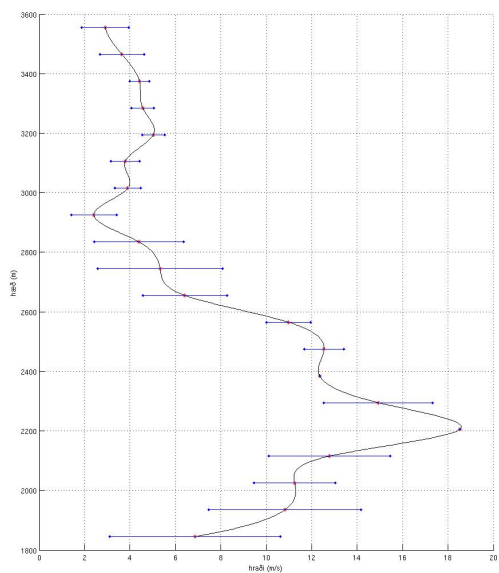


(a) Lóðréttur hraði sem fall af hæð

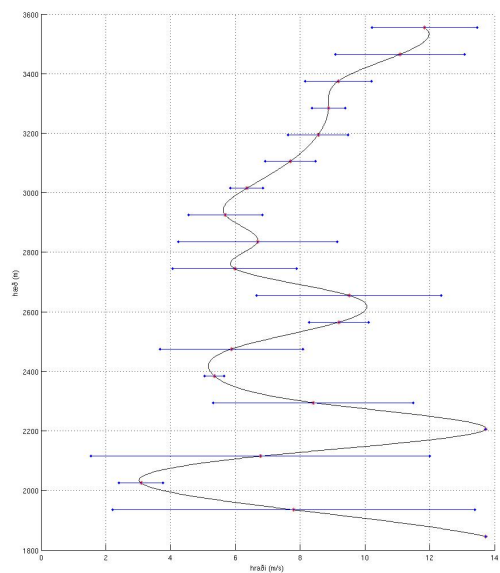


(b) Vindhraði sem fall af hæð

Mynd 15. Samanburður á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl 2010 frá 06:50 til 06:55

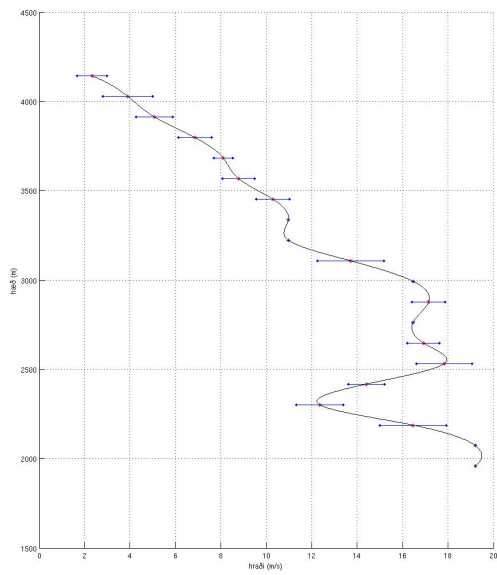


(a) Lóðréttur hraði sem fall af hæð

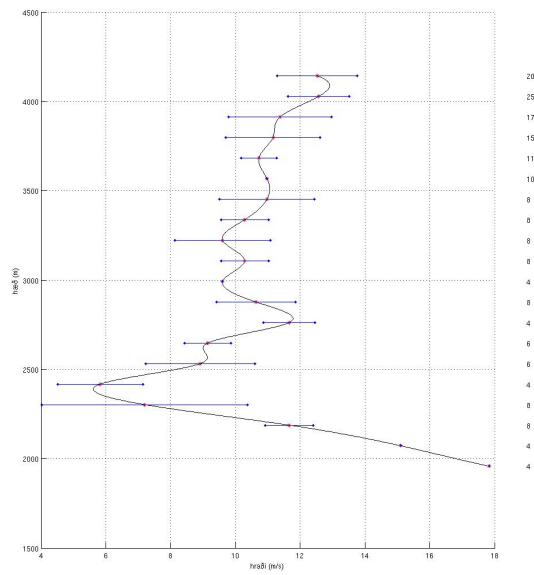


(b) Vindhraði sem fall af hæð

Mynd 16. Samanburður á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl frá 07:54 til 07:59



(a) Lóðréttur hraði sem fall af hæð



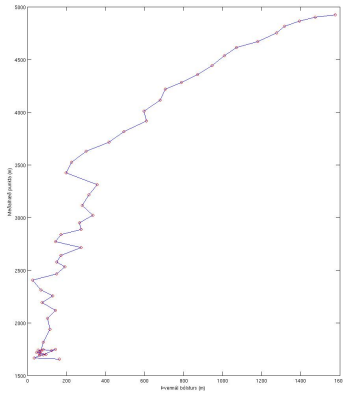
(b) Vindhraði sem fall af hæð

Mynd 17. Samanburður á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 11. maí 2010 frá 08:16 til 08:20

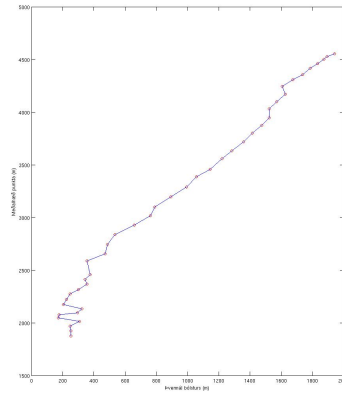
4.3 Stækkandi bólstrar

Þegar kvikmynd af gosmekkinum er skoðuð hratt sést vel að einstakir bólstrar myndast og þenjast út þegar þeir rísa upp frá eldstöðinni. Auðvelt er að reikna hversu mikið þrýstingsfall ætti að þenja bólstur út þegar hann rís í lofthjúpinum, og hversu mikið fallandi hiti ætti að draga hann saman. Í heildina ættu þessi áhrif að þenja bólstur út um $\sim 20\%$, en bólstrarnir þöndust mun meira út en þetta. Ástæðan er sú að megnið af útpennslunni stafar af innblöndun lofts, og upphitunar þess. Til að kanna þetta betur var aðferðin við greiningu myndanna endurbætt til að fylgja bólstri og reyna að mæla vaxandi þvermál hans þegar hann reis upp frá eldstöðinni. Þetta reyndist erfitt, því bólstrarnir voru ekki samvinnuþýðir, en mynd 18 sýnir þær tilraunir sem heppnuðust best fyrir vefmyndavélarnar. Sambærilegar niðurstöður fyrir kvikmyndirnar má sjá á mynd 19.

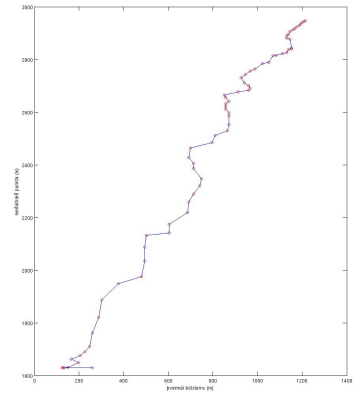
Greinilegt er að útpennslan er veruleg, og í flestum tilvikum er stækkun með hæð minni neðarlega í mekkinum en meiri efst. Oft var það svo að þegar hægði á risi bólsturs hélt hann eftir sem áður áfram að þenjast út, og skýrir það að hluta hina sveigðu lögun ferilsins. Eftir sem áður sýna þessar myndir merkilega jafna stækkun, sérstaklega í neðri hluta makkarins. Þessi gögn lofa góðu um að hægt verði að leggja tölulegt mat á innsog og betrum bæta líkön af gosmekki.



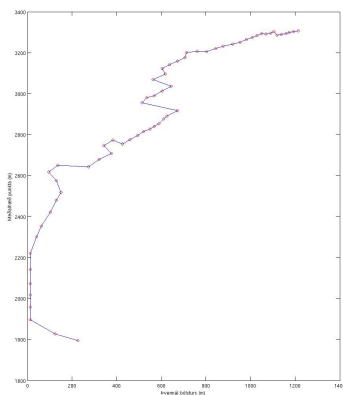
(a) 17. apríl 16:30 til 16:35



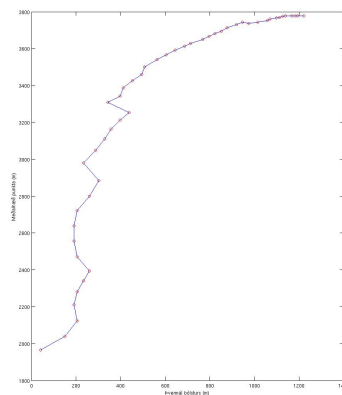
(b) 17. apríl 20:03 til 20:07



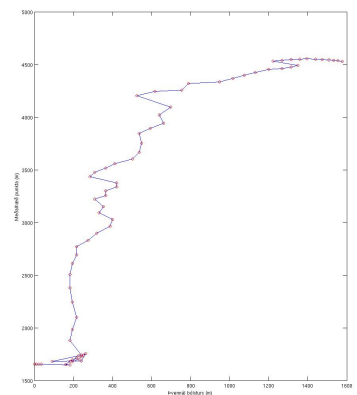
(c) 20. apríl 06:50 til 06:55



(d) 20. apríl 07:54 til 07:59

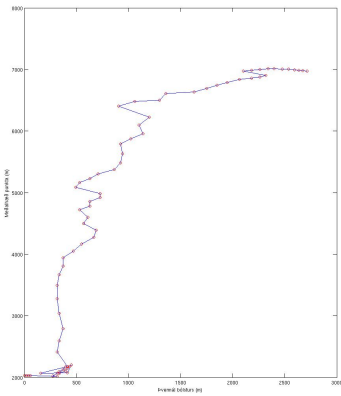


(e) 11. maí 08:16 til 08:20

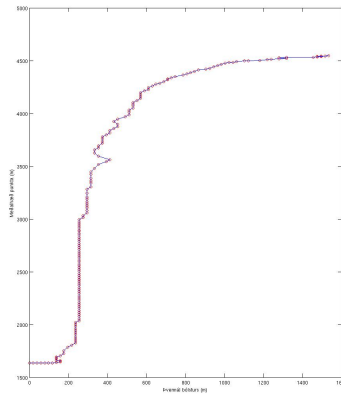


(f) 11. maí 10:48 til 10:55

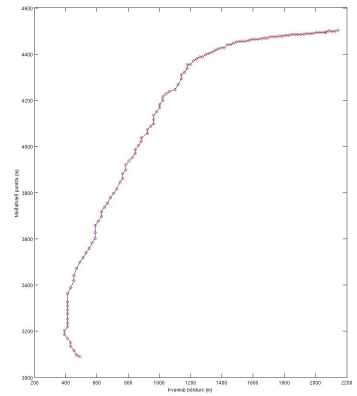
Mynd 18. Þvermál bólsturs sem fall af hæð. Einungis eru sýndar þær tilraunir þar sem viðunnandi niðurstöður fengust í greiningum vefmyndanna.



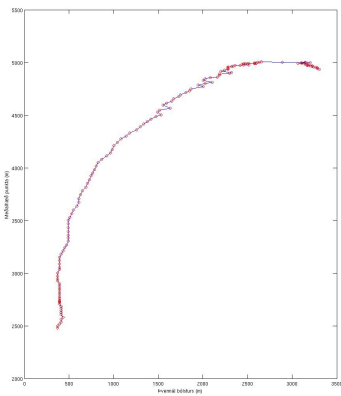
(a) Úr myndskleiði 2



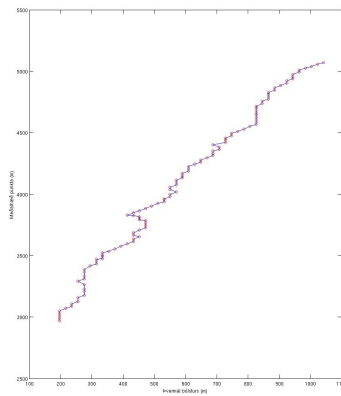
(b) Úr myndskleiði 4



(c) Annar bólstur úr myndskleiði 4



(d) Úr myndskleiði 6



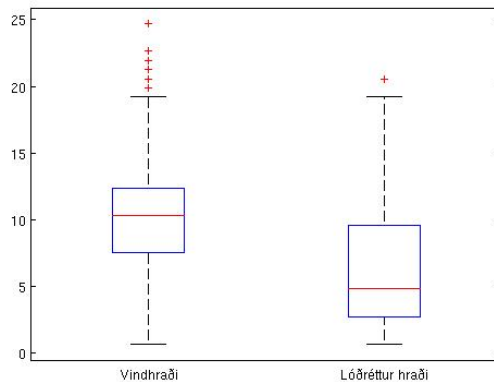
(e) Úr myndskleiði 8

Mynd 19. Þvermál bólsturs sem fall af hæð. Einungis eru sýndar þær tilraunir þar sem viðunnandi niðurstöður fengust í greiningum kvikmynda Kukl ehf.

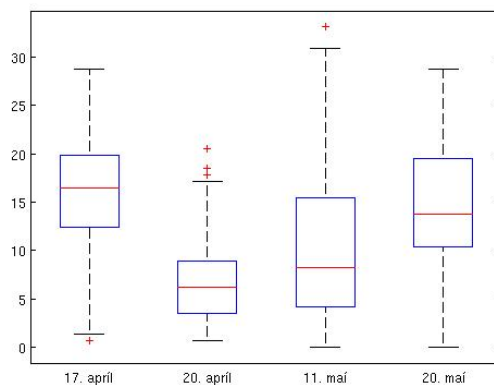
5 Umræða

Hefð er fyrir því að flokka gosmekki sprengigosa í veika og sterka mekki. Veikur mökkur fæst ef láréttur vindhraði er meiri en lóðréttur hraði uppstreymis, en hann er sagður sterkur ef lóðréttur hraði er meiri en láréttur vindhraði. Þessi skilgreining þýðir augljóslega að breytingar í veðri meðan á gosi stendur geta t.d. breytt sterkum mekki í veikan, ef vindhraði eykst nægilega. Mynd 20 sýnir samanburð á lóðréttum vindi og láréttum fyrir fjögur myndskleið þar sem til voru góð gögn um bæði láréttan hraða og lóðréttan hraða (sjá myndir 14–17). Greinilegt er að lárétti vindhraðinn var meiri en sá lóðrétti, svo þessa daga var gosið veikt. Það rýrir gildi þessara niðurstaðna að best heppnaðist að ná upplýsingum um láréttan vind þá daga sem lóðréttur hraði var lægstur.

Mynd 21 sýnir breytileikann á lóðréttum hraða á dögnum fjórum sem taldir eru upp í töflu 1. Augljóst er að 17. apríl og 20. maí skera sig úr hvað styrk varðar, en þann 11. maí er mestur munur á stærstu útgildum og á miðgildinu.



Mynd 20. Samanburður á láréttum vindhraða og lóðréttum uppstreymishraða í gosinu fyrir tímabil þar sem til eru góðar upplýsingar um báða þætti.



Mynd 21. Lóðréttur hraði í gosmekki þá daga sem vefmyndavélar gáfu bestu myndirnar.

Ef lóðréttu hraðferlarnir frá dögnum fjórum í töflu 1 eru grandskoðaðir er eins og áður var lýst ekki augljóst að skotfasalagið sjáist yfirhöfuð. Hinsvegar sést flot fasinn yfirleitt vel og með góðum vilja má á sumum myndanna greina hver neðstu mörk hans eru. Þannig er líklegt að neðri mörk flotfasa þann 17. apríl (sjá myndir 24–25 í viðauka) liggi í kringum 2200, 2500 og 2100 metrum yfir sjávarmáli. Þykkt skotfasalagsins í hverju tilviki er þá ekki meiri en 540, 840 og 440 metrar.

Í viðauka I er rætt um skotfasa þar sem lóðrétt hröðun (a) fellur með tíma skv. $a = g + \alpha t$, þar sem g er þyngdarhröðunin ($g < 0$ því hún er niður á við) og $\alpha > 0$ er stuðull sem lýsir aukningu flotkrafta vegna innblöndunar. Við kl. $t = 0$ er $a = g < 0$ en með tíma minnkar hröðunin í $a = 0$ og í framhaldinu verður hröðunin jákvæð ($a > 0$) og flotkraftar ná yfirhöndinni. Sýnt er fram á að taka þurfi tillit til tveggja tilvika, annars vegar þess að lóðrétti hraðinn skipti um formerki og mökkurinn falli að jörðu áður en lóðrétt hröðunin verður hverfandi, og hinsvegar að lóðrétt hröðunin skipti um formerki áður en lóðrétti hraðinn verður hverfandi. Í síðara tilvikinu hægir mökkurinn á sér um skeið og eykur svo aftur hraðann þegar flotkraftar ná yfirhöndinni. Reiknaðar eru myndir sem sýna þykkt skotfasalagsins sem fall af α fyrir tvo upphafshraða $V_o = 70\text{m/s}$ og 100m/s (sjá mynd 23 í viðauka). Í samhengi við þessa mynd verður 840 m/s mjög ótrúleg þykkt skotfasalags, nema upphafshraði hafi verið enn meiri en $V_o = 100\text{m/s}$. Þykktargildi á bilinu 400 - 600 m eru möguleg ef α er í kringum 1.5 og upphafshraði um $V_o = 100\text{m/s}$. Sé upphafshraðinn lægri en þetta markar botn flotfasalagsins ekki almennilega topp skotfasalagsins. Það passar ágætlega við niðurstöður frá greiningu kvikmyndaskeiðanna sem gáfu til kynna að hraðabreytingar í skotfasalaginu væru flóknari en ætla mætti frá einföldum líkönum.

Í þessari umræðu er þó mikilvægt að hafa í huga að myndavélarnar sjá ekki ofan í gíginn, og gætu því misst af þunnu skotfasalagi. Í öðru lagi er hugsanlegt að ef nýr bólstur skýst undan fyrri bólstri mælir aðferðin fyrst hægfara bólstur og svo hraðfara bólstur, sem gefur flóknari hraðferil en ef rishraði fellur jafnt og þétt. Loks má ekki gleyma því að verulegt öskufall er neðst í mekkinum, sem breytir eðlisþyngd makkarins mjög snögglega. Samspil þessa við flotkrafta gæti líka leitt til flóknari hraðferils.

6 Lokaorð

Myndir frá eldgosinu í Eyjafjallajökli eru mikill fjársjóður upplýsinga um hegðan gosmakka. Tilgangur verkefnisins var að þróa aðferðir til að vinna þessar upplýsingar úr myndunum og bera þær saman við einfaldar hugmyndir um þau ferli sem eru ráðandi í gosmekki.

Aðferðin sem þróuð var í þessari rannsókn virkar mjög vel, sérstaklega fyrir vefmyndavélarnar. Þau gögn sem aðferðin skilar benda til þess að flotfasi gosmakkarins sé vel merkjanlegur. Erfiðara er að greina skotfasann neðst í mekkinum í þessum gögnum. Með því að nota aðferðina á kvikmyndir má leiða að því líkum að skotfasinn annað hvort sjáist ekki eða hann sé flóknari en gert er ráð fyrir í þessum einföldu hugmyndum.

Aðferðin getur einnig unnið upplýsingar um láréttann vindhraða og stækkun bólstra í mekkinum, og þessar upplýsingar má síðan nota til þess að bera saman við mismunandi fræðileg líkön af gosmökkum.

Heimildir

- Arason, P., Petersen, G. N., & Bjornsson, H. (2011). Observations of the altitude of the volcanic plume during the eruption of eyjafjallajökull, aprilmay 2010. *Earth System Science Data*, 3(1):9–17.
- Bursik, M. (2001). Effect of wind on the rise height of volcanic plumes. *Geophys. Res. Lett.*, 28:3621–3624.
- Mastin, L. (2007). A user-friendly one-dimensional model for wet volcanic plumes. *G3*, 8.
- Mastin, L., Morton, B. R., Taylor, G., & Turner, J. S. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J. Volcanol. Geoth.*, 186:10–21.
- Morton, B. R., Taylor, G., & Turner, J. S. (1956). Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 234:1–23.
- Oberhuber, J. M., Herzog, M., Graf, H.-F., & Schwanke, K. (1998). Volcanic plume simulation on large scales. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1-4):29 – 53.
- Oddson, B. (2007). The grímsvötn eruption in 2004: Dispersal and total mass of tephra and comparison with plume transport models. Master's thesis, University of Iceland.
- Woods, A. W. (1988). The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns. *Bull. Volcanol.*, 50.

Viðaukar

I Hversu þykkt er skotfasalagið?

Til að finna lágmarksþykkt skotfasalagsins er rétta að athuga hversu hátt grjót sem skotið er upp með upphafshraðanum, v_0 , nær. Gerum ráð fyrir að v_0 sé minni en 100m/s . Grjótið hægir á sér með þyngdarhröðun ($g \approx -10\text{m/s}^2$) svo hraði þess verður:

$$V_1(t) = v_0 + gt = 100\frac{\text{m}}{\text{s}} - t \cdot 10\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (1)$$

Grjótið stoppar þá eftir $T = 10$ sek, í hæðinni :

$$H = \int_0^T V_1(t)dt = v_0 \cdot T - T^2\frac{g}{2} = 500\text{m} \quad (2)$$

Eftir að hafa staðnæmst í 500m hæð dettur grjótið svo aftur til jarðar. Ef þetta væri rétt nálgun á því sem gerist í skotfasanum myndu allir gosmekkir hrynja skammt frá eldstöðinni. Slíkt gerist auðvita ekki því hröðun bólsturs í skotfasa er ekki jöfn þyngdarhröðuninni g . Meðan bólsturinn rís er hann að draga inn og hita upp loft úr umhverfinu. Þetta loft eykur framlag flotkrafta sem vilja hraða bólstrinum upp á við og draga úr nettóhröðun niður á við.

Segjum að þetta gerist jafnt og þétt í tíma, og lýsa megi nettó hröðun niður á við sem $a = g + \alpha$ með skilyrðunum $\alpha > 0$ og $g < 0$ Skilyrðið $g < 0$ tryggir að nettó hröðun sé niður á bóginn fyrst í stað.

Þá er

$$V_2(t) = \int a(t)dt = v_0 + gt + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad (3)$$

Ef α er núll er $V_2 = V_1$ en ef $\alpha > 0$ er $V_2 > V_1$ fyrir $t > 0$. Ef α er þekkt má skilgreina þykkt skotfasalagsins með því að finna tímann T þar sem nettóhröðun niður á við hverfur, þ.e. finna T þ.a $a(T) = 0$ og reikna þykkina með $H = \int_0^T V_2(t)dt$. Af skilgreiningu a er augljóst að $T = -g/\alpha$.

Þetta einfalda líkan af hraða í skotfasa er ofurlítið flóknara en ætla mætti við fyrstu sýn. Rétt samsetning af α og upphafshraða gefur núllstöð í $V_2(t)$, þ.e. hæð þar sem bólsturinn stöðvast. Þetta má sjá með því skoða núllstöðvar $V_2(t)$:

$$T_{\pm} = \frac{-g \pm \sqrt{g^2 - 2v_0\alpha}}{\alpha} \quad (4)$$

Skoðun á þessum núllstöðvum leiðir í ljós að

$$0 < T_- = \frac{-g - \sqrt{g^2 - 2v_0\alpha}}{\alpha} < \frac{-g}{\alpha} = T < T_+ = \frac{-g + \sqrt{g^2 - 2v_0\alpha}}{\alpha}.$$

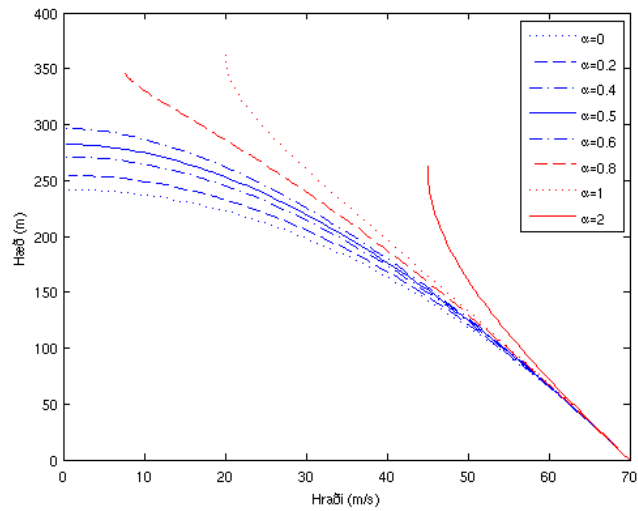
Ef $\sqrt{g^2 - 2v_0\alpha}$ er rauntala (þ.e. ef $\alpha \leq \alpha_c \equiv \frac{g^2}{2v_0}$) hættir mökkurinn að rísa þegar $t = T_-$, áður en flotkraftar ná yfirhöndinni, sem gerist þegar $t = T$. Milli T_- og T_+ er $V_2 < 0$ þannig að mökkurinn myndi aftur falla í átt að yfirborði og líklega hrynja skammt frá eldstöðinni. Í þessu tilviki er því eðlilegt að miða þykkt skotfasalagsins við tímann T_- .

Fyrir gefið v_0 er augljóst ef $\alpha > \alpha_c \equiv \frac{g^2}{2v_0}$ er engin núllstöð og í þessum tilvikum er $V_2 > 0$ jafnvel í lágmarki. Mynd 22 sýnir þykkt skotfasalagsins fyrir $v_0 = 70m/s$ og $100m/s$ og nokkur ólík gildi á α . Myndin sýnir að þegar α er lítil hegðar hraði makkarins sér svipað og þegar $\alpha = 0$ (grjót). Fyrir $V_0 = 100m/s$ er $\alpha_c = 0.5$ og þykkt skotfasalagsins er rúmlega $150m$ hærri þegar $\alpha = \alpha_c$ en þegar $\alpha = 0$, en eftir sem áður stöðvast mökkurinn að lokum. Þegar α vex upp fyrir α_c fellur hröðunin nægilega hratt til þess að mökkurinn hættir að hægja á sér áður en hann stöðvast. Þykkt skotfasalagsins vex því fyrst í stað eftir að $\alpha > \alpha_c$. En ef α er nægilega stórt fellur hröðunin svo hratt að flotkraftar taka yfir mun neðar. Þannig minnkar þykkt lagsins þegar α verður stærra en 0.8 . Í þessu tilviki fer mökkurinn mjög hratt inn í flotfasann og skotfasalagið verður grunnt. Samskonar niðurstöður fást fyrir $v_0 = 70m/s$ nema þá er $\alpha_c = \frac{g^2}{2v_0} \approx 0.7$.

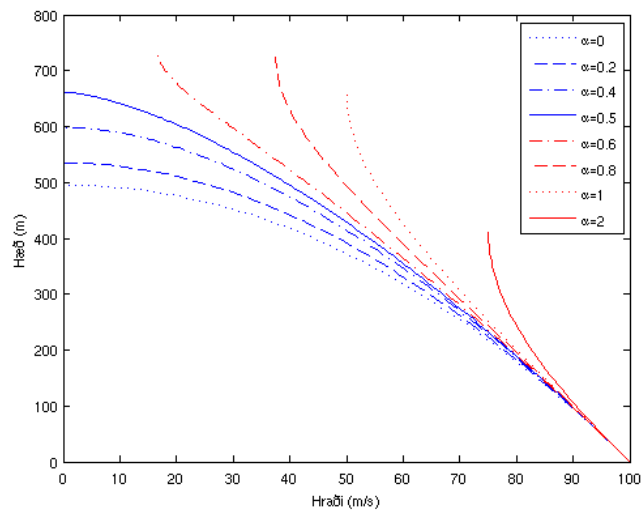
Ef þykktin á skotfasalaginu er skilgreind með

$$H = \int_0^T V_2(t) dt = \frac{1}{2}gT^2 + \frac{1}{6}\alpha T^3 + v_0T \quad (5)$$

þar sem $T = \frac{g}{\alpha}$ ef $\alpha > \alpha_c = \frac{g^2}{2v_0}$ en $T = T_- = \frac{-g - \sqrt{g^2 - 2v_0\alpha}}{\alpha}$ má ef $\alpha \leq \alpha_c$ teikna H sem fall af upphafshraða fyrir mismunandi gildi á α . Mynd 23 sýnir slíka teikningu fyrir upphafshraðana $v_0 = 70m/s$ og $100m/s$. Myndin sýnir að ef upphafshraði er ekki meiri en $100m/s$ er mesta þykkt ekki mikið yfir $700m$.

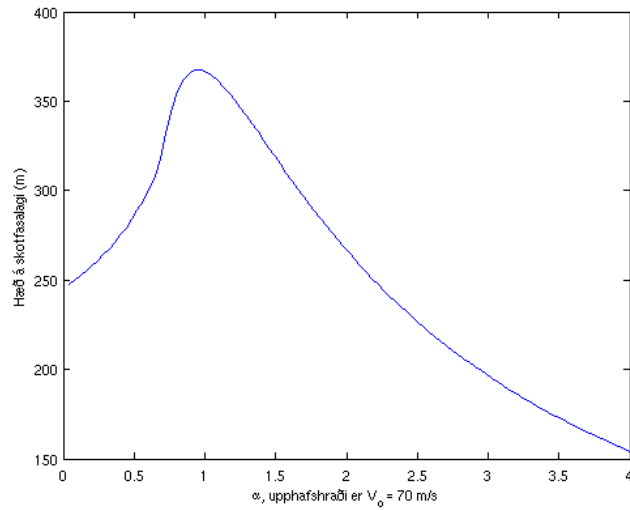


(a) $v_o = 70m/s$

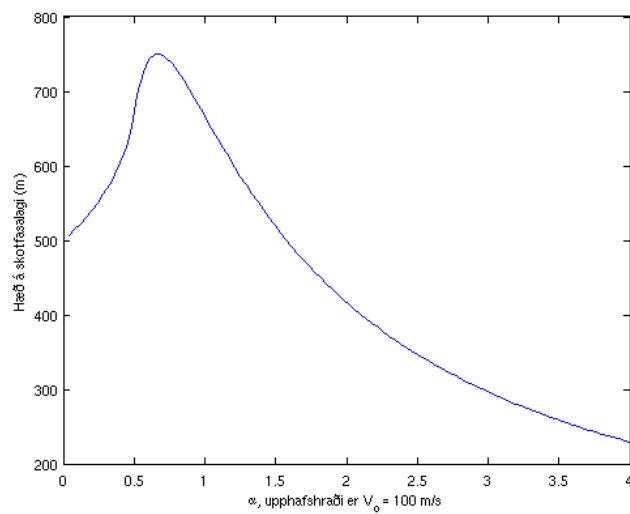


(b) $v_o = 100m/s$

Mynd 22. Hæð skotfasalagsins. Bláu línurnar sýna tilvik þar sem flotkraftar ná ekki yfirhöndinni, tilvikið $\alpha = 0$ samsvarar grjóti sem skotið er upp frá gígnum. Ef $v_o = 100m/s$ og $\alpha = < 0.5$ verður $V_2 = 0$ áður en hröðun niður á við verður hverfandi, ef $v_o = 70m/s$ gerist þetta ef $\alpha < 0.7$.



(a) $v_0 = 70 \text{ m/s}$



(b) $v_0 = 100 \text{ m/s}$

Mynd 23. Þykkt skotfasalagsins fyrir mismunandi gildi á α . Hér eru $v_0 = 70 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (og þá er $\alpha_{\text{crit}} = \frac{g^2}{2V_0} \approx 0.7$) og $v_0 = 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (og $\alpha_{\text{crit}} \approx 0.5$).

II Pixlastærð

Með því að bera saman þekkt kennileiti á vefmyndunum var hægt að búa til lengdarkvarða fyrir myndirnar. Þó myndirnar sýndu alltaf sama flötin voru nokkrar breytingar á stillingu myndavél-arinnar og þar með á fjölda pixla og stærð hvers pixils. Eftirfarandi tafla gefur sambandið milli fjölda pixla og stærð pixils í metrum.

fjöldi pixla	stærð pixils (m)
960×1280	6.86
600×800	10.29
567×768	11.43
480×640	13.72

Ef L er fjöldi pixla frá efri ramma myndar og P er stærð pixils þá gefur jafna 6 hæð yfir sjávarmáli.

$$H = -P \cdot L + 5209.25; \quad (6)$$

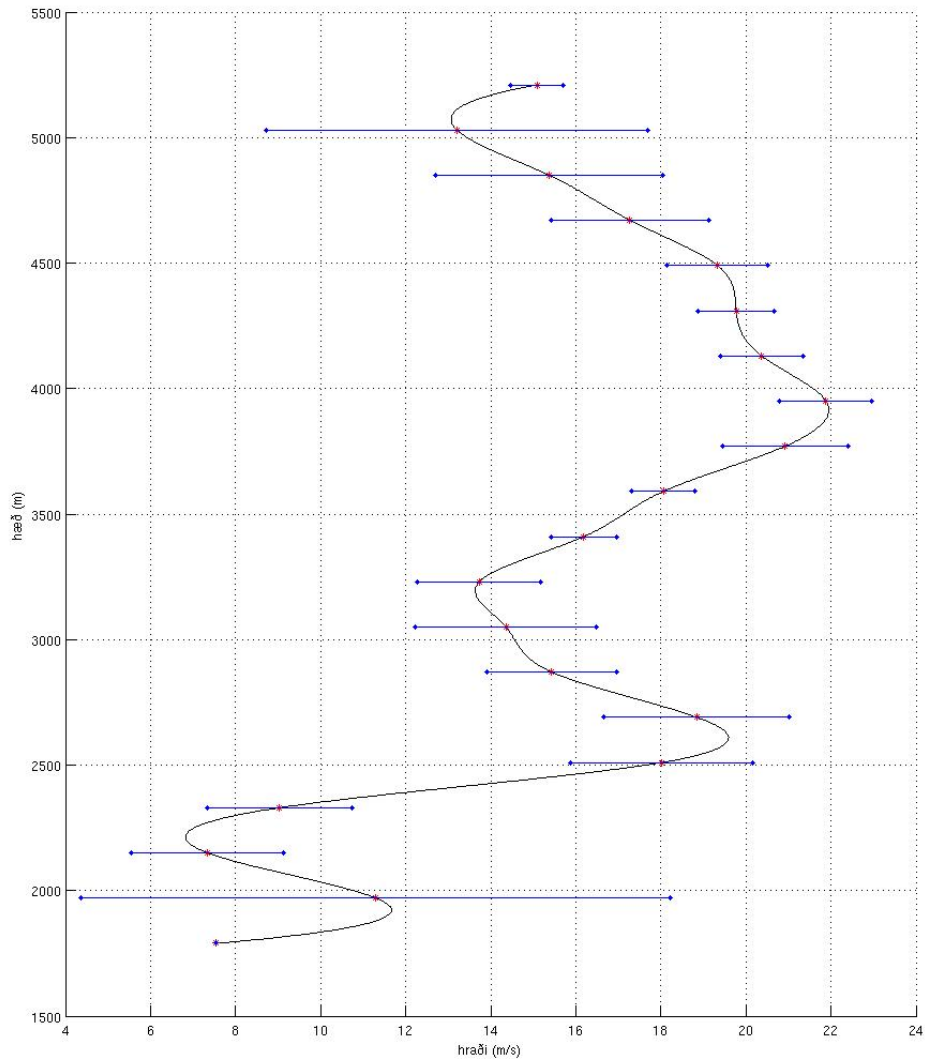
Í kvikmynda upptökunum er fjöldi pixla alltaf sá sami eða 720×1280 pixlar. Á sama hátt og fyrr var búinn til lengdarkvarði fyrir myndarammann með samanburði við þekkt kennileiti. Stærð hvers pixils var ákvörðuð 19.66 metrar.

Ef L er fjöldi pixla frá efri ramma kvikmyndar þá gefur jafna 7 hæð yfir sjávarmáli.

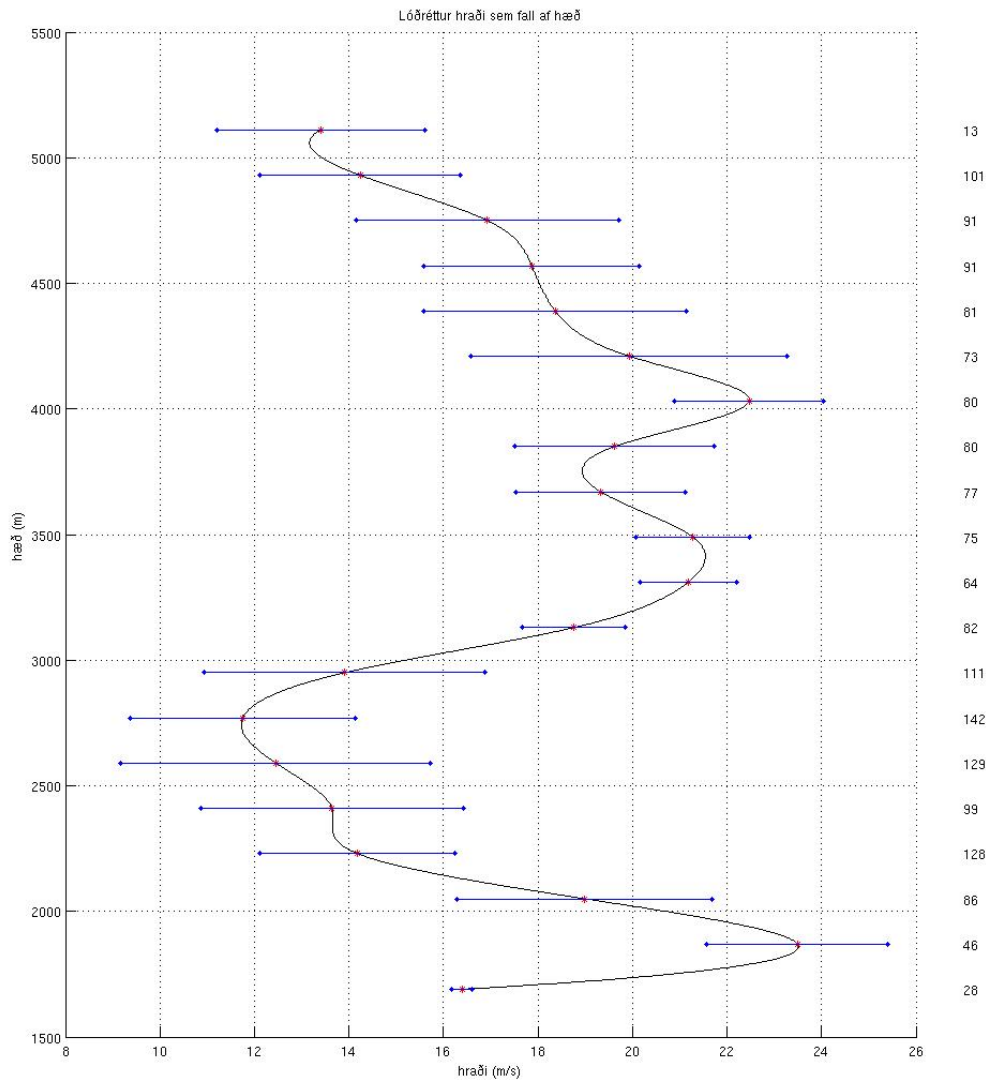
$$H = 8140 - 19.66 \cdot L \quad (7)$$

III Myndir af lóðréttum hraða

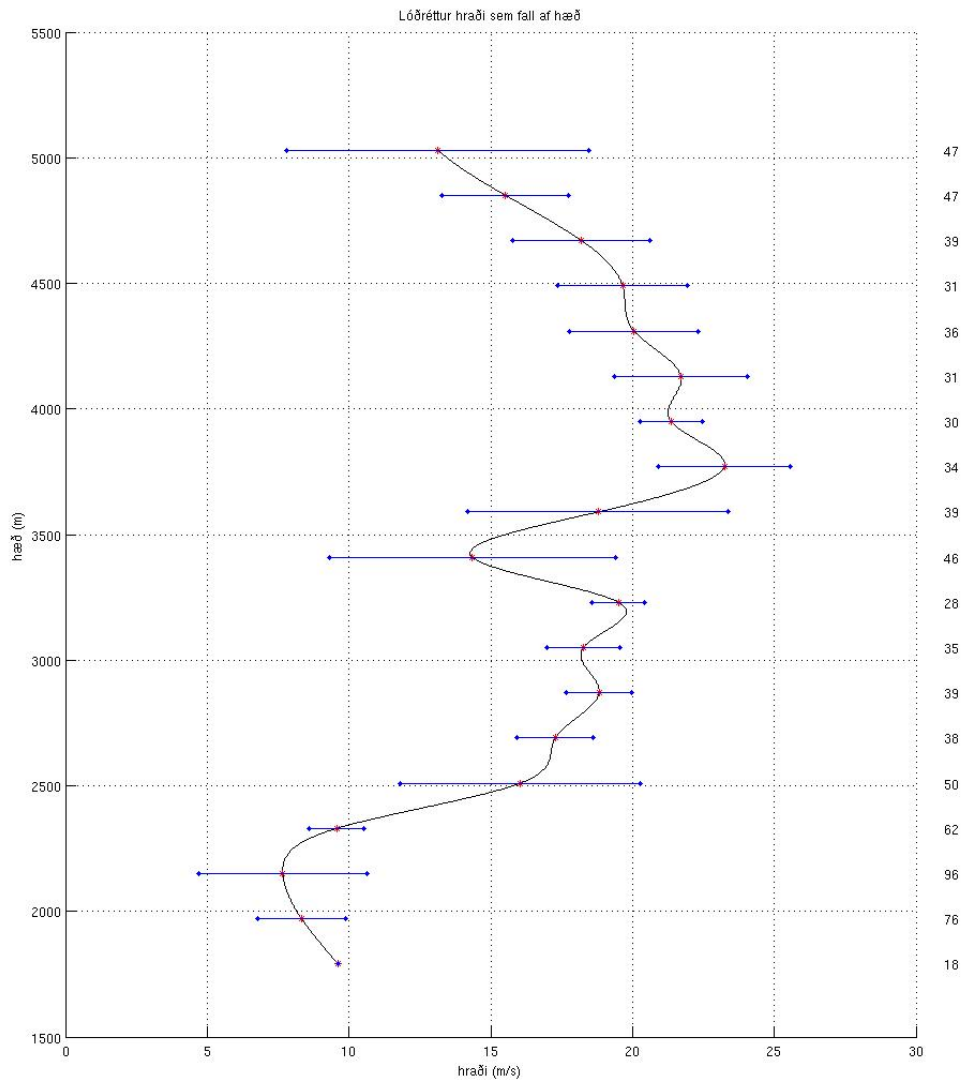
III.1 17. apríl 2010



Mynd 24. Stækkuð útgáfa af mynd 7a. Lóðréttur hraði sem fall af hæð þann 17. apríl 2010 frá 16:09 til 16:12.

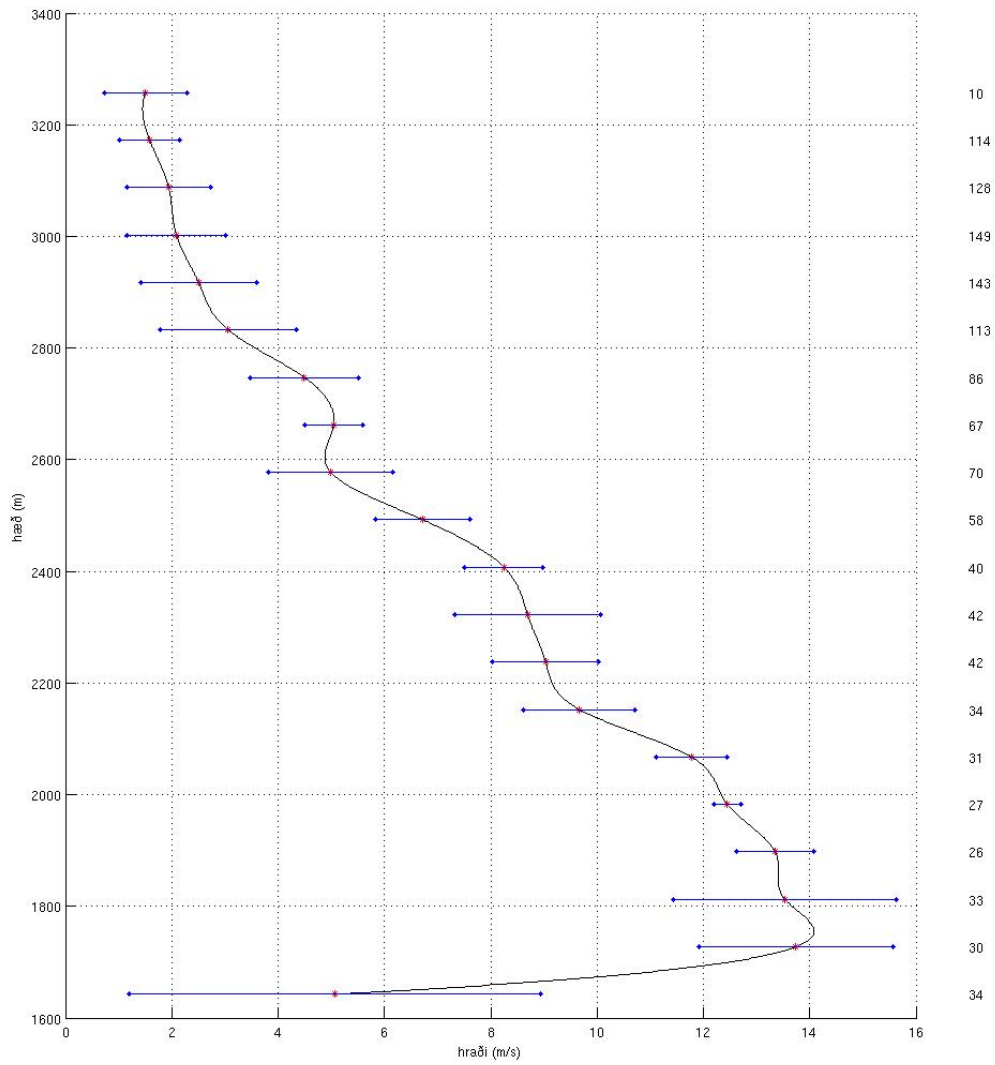


Mynd 25. Stækkuð útgáfa af mynd 7b. Lóðréttur hraði sem fall af hæð þann 17. apríl 2010 frá frá 16:33 til 16:36.

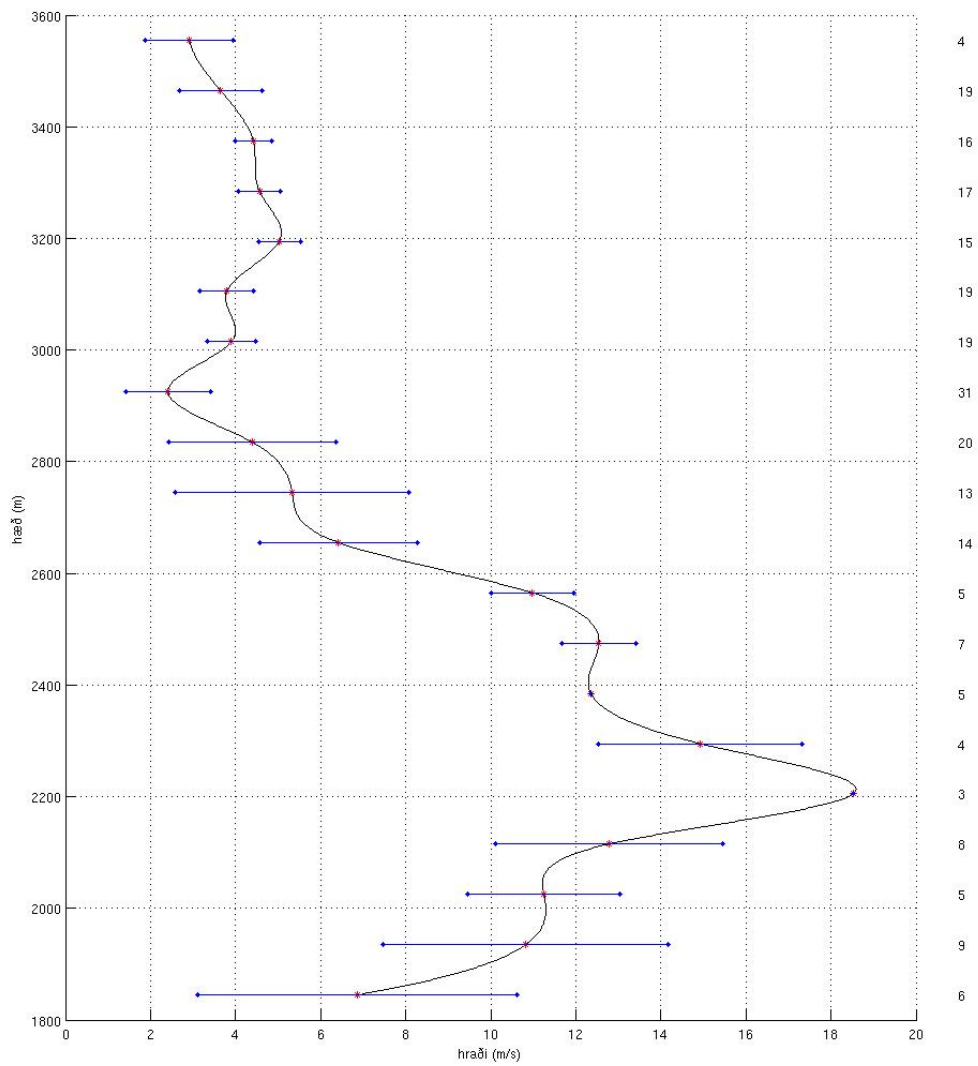


Mynd 26. Stækkuð útgáfa af mynd 7c. Lóðréttur hraði sem fall af hæð þann 17. apríl 2010 frá 20:03 til 20:08.

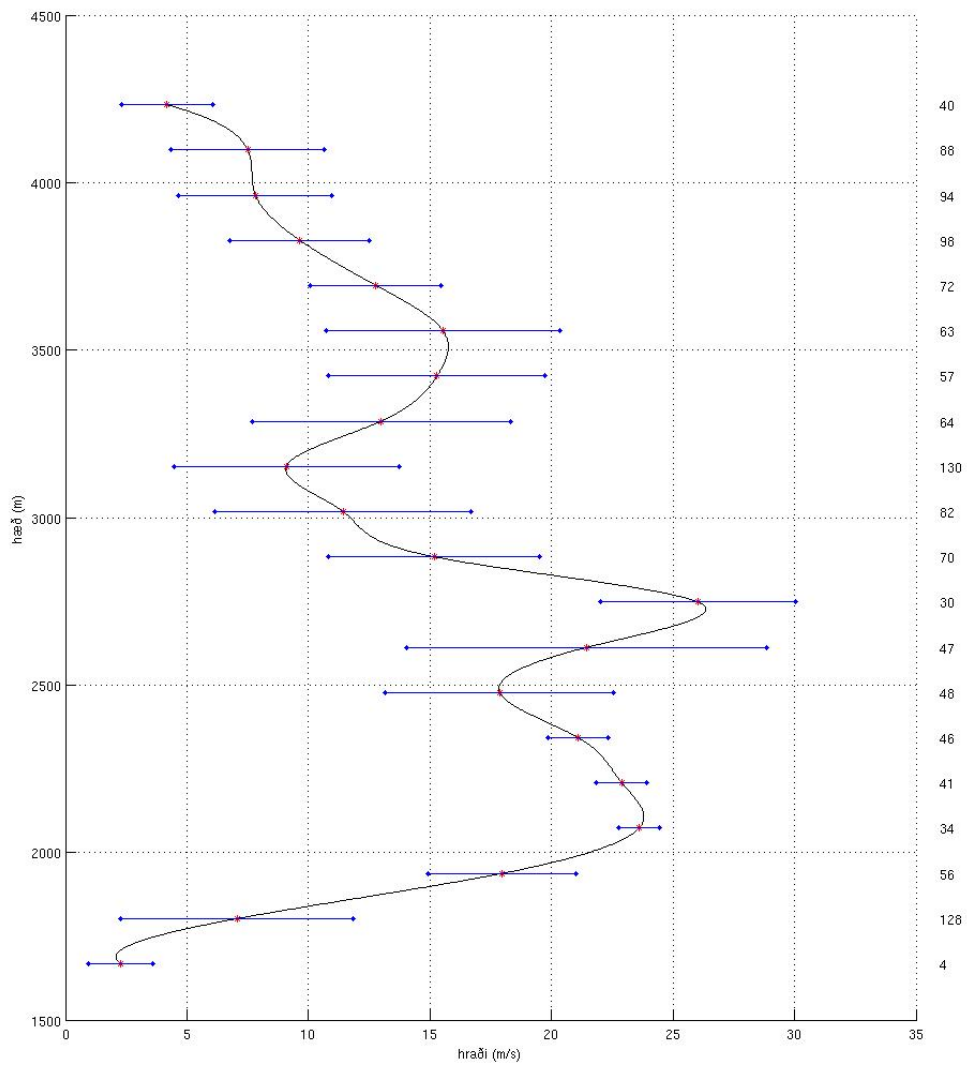
III.2 20. apríl 2010



Mynd 27. Stækkuð útgáfa af mynd 8a. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 20. apríl 2010 frá 06:49 til 06:54.

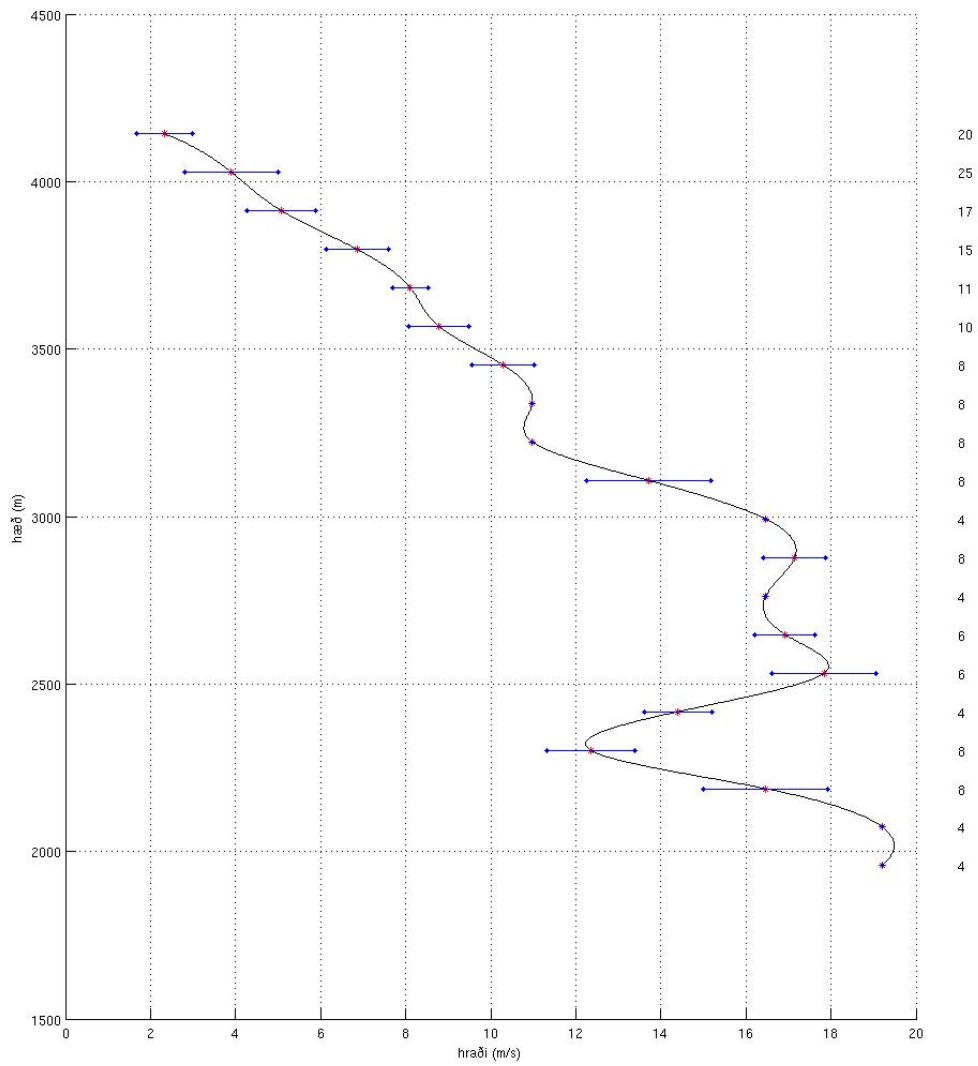


Mynd 28. Stækkuð útgáfa af mynd 8b. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 20. apríl 2010 frá 07:54 til 07:59.

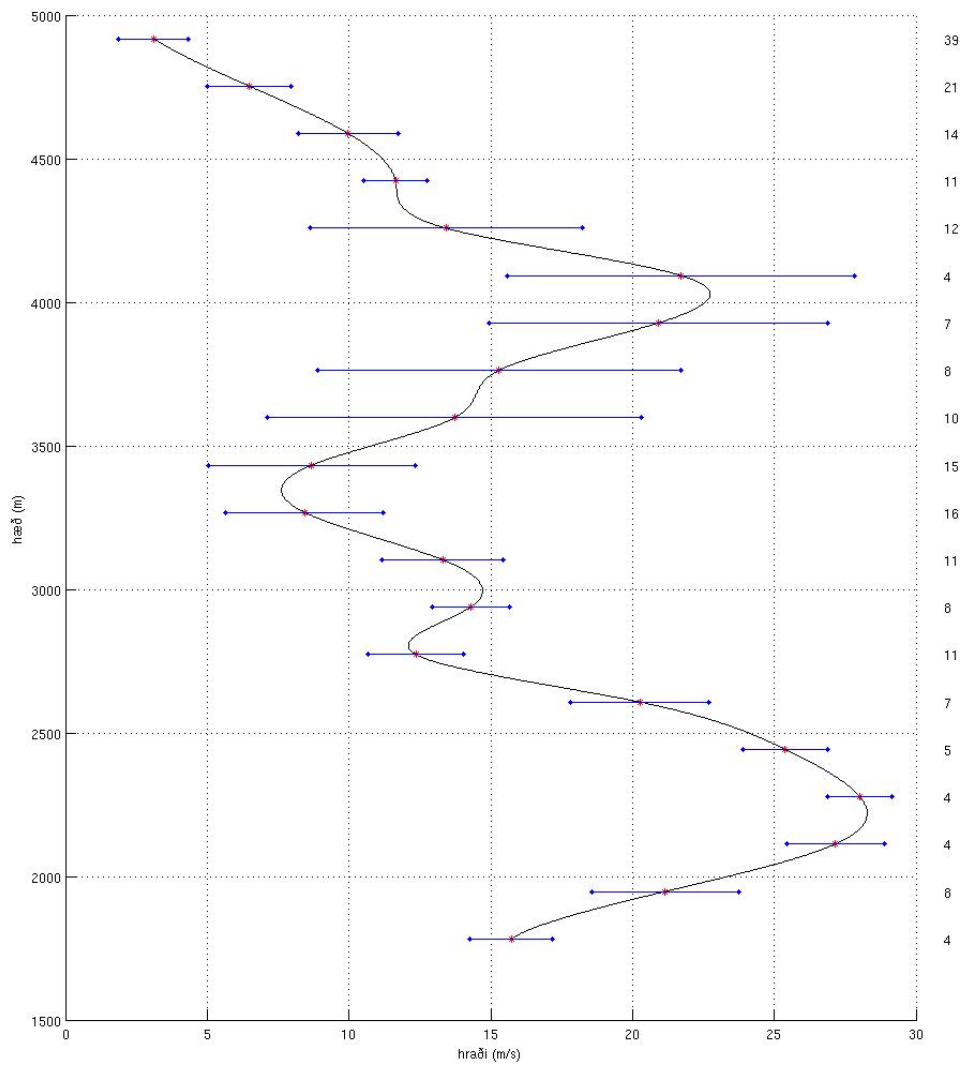


Mynd 29. Stækkuð útgáfa af mynd 8c. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 20. apríl 2010 frá 08:01 til 08:09.

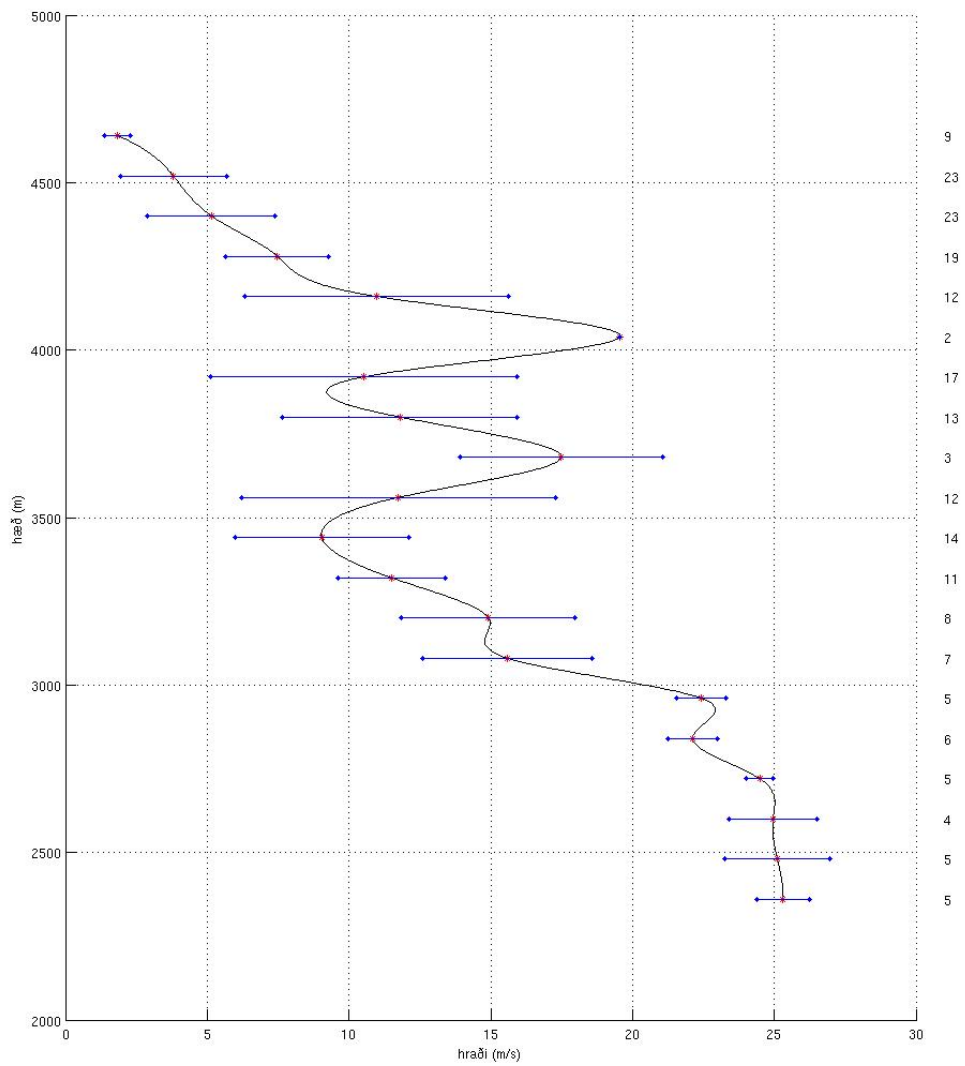
III.3 11. maí 2010



Mynd 30. Stækkuð útgáfa af mynd 9a. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 11. maí 2010 frá 08:16 til 08:20.

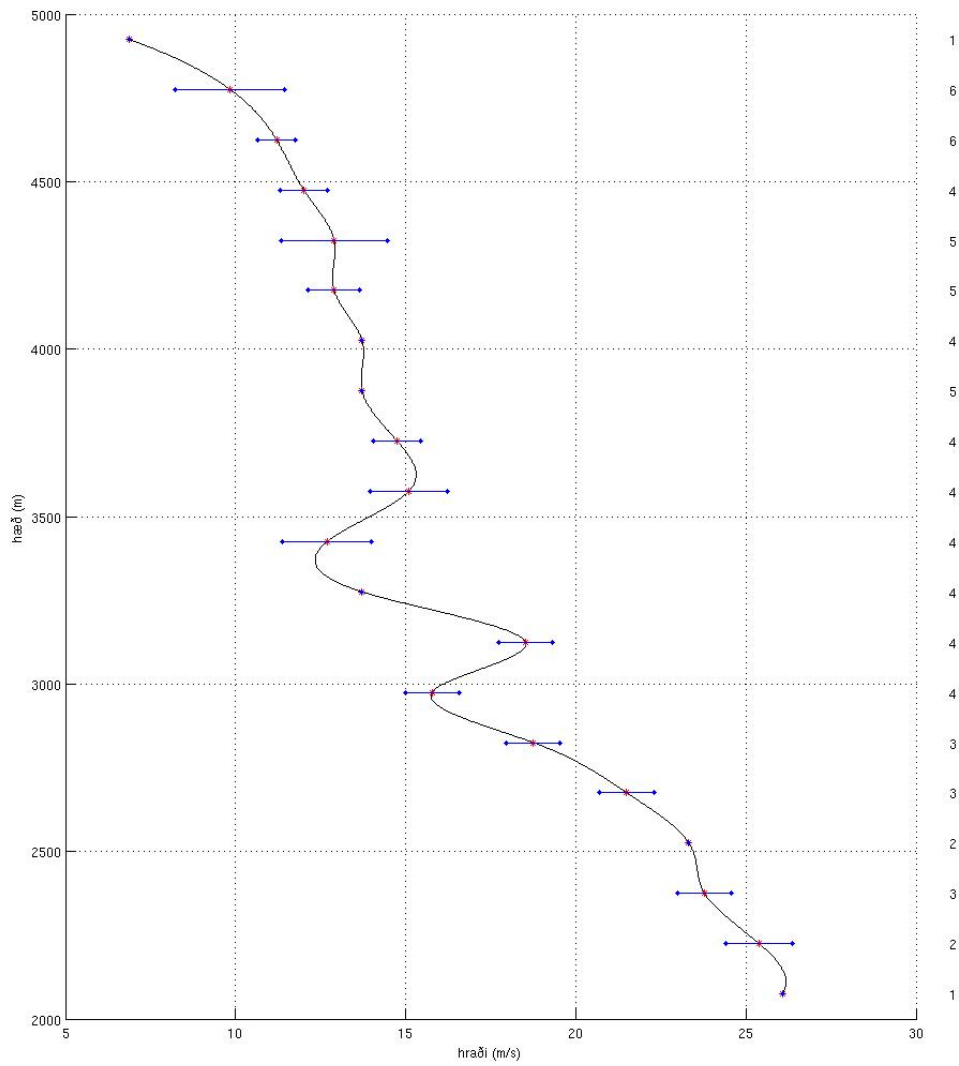


Mynd 31. Stækkuð útgáfa af mynd 9b. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 11. maí 2010 frá 10:48 til 10:55.

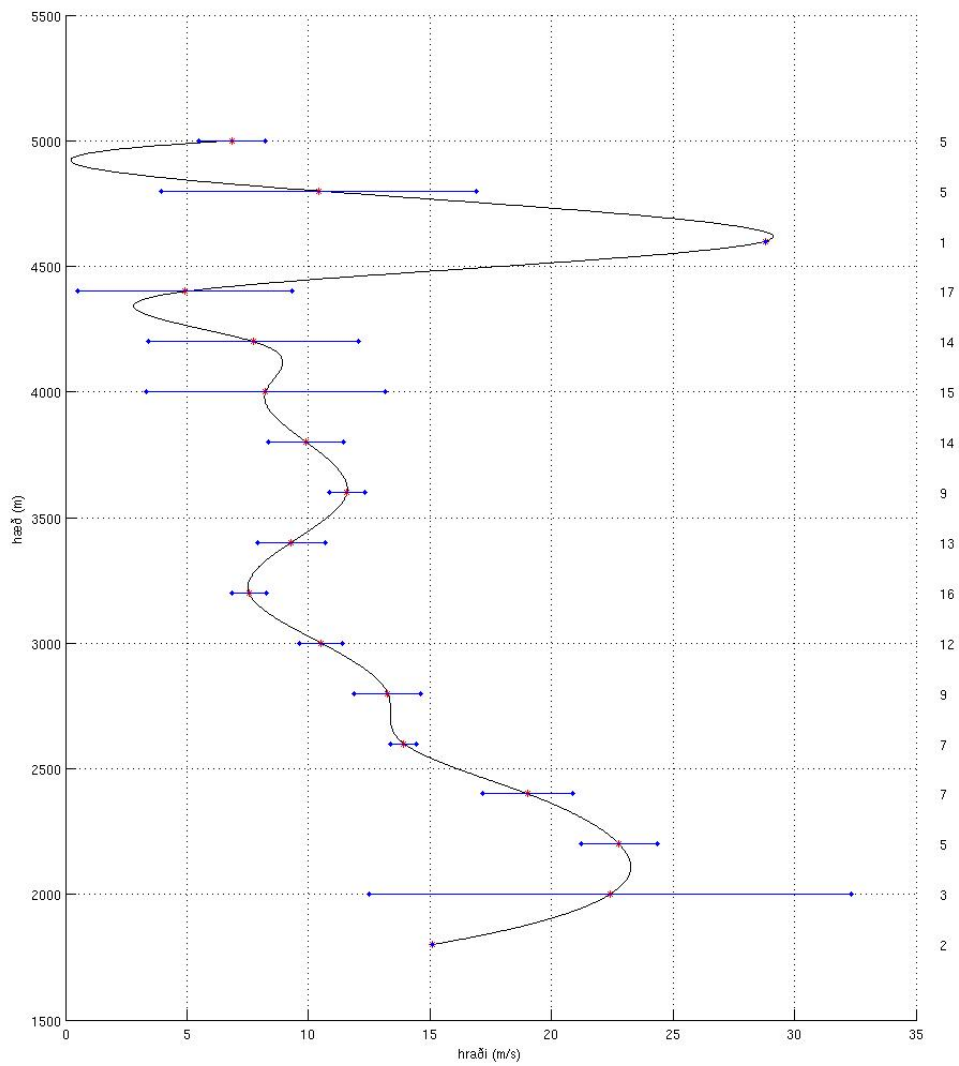


Mynd 32. Stækkuð útgáfa af mynd 9c. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 11. maí 2010 frá 15:00 til 15:05.

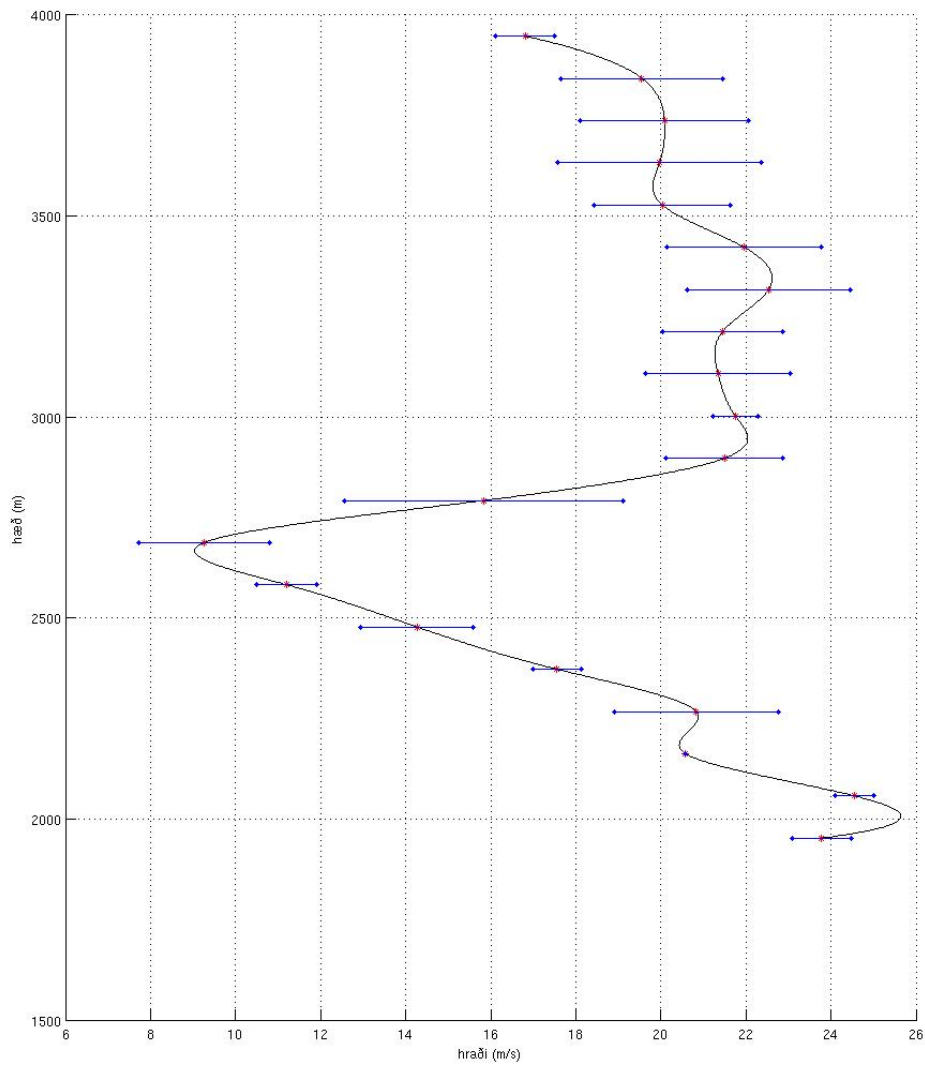
III.4 15. maí 2010



Mynd 33. Stækkuð útgáfa af mynd 10a. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 15. maí 2010 frá 08:00 til 08:06.

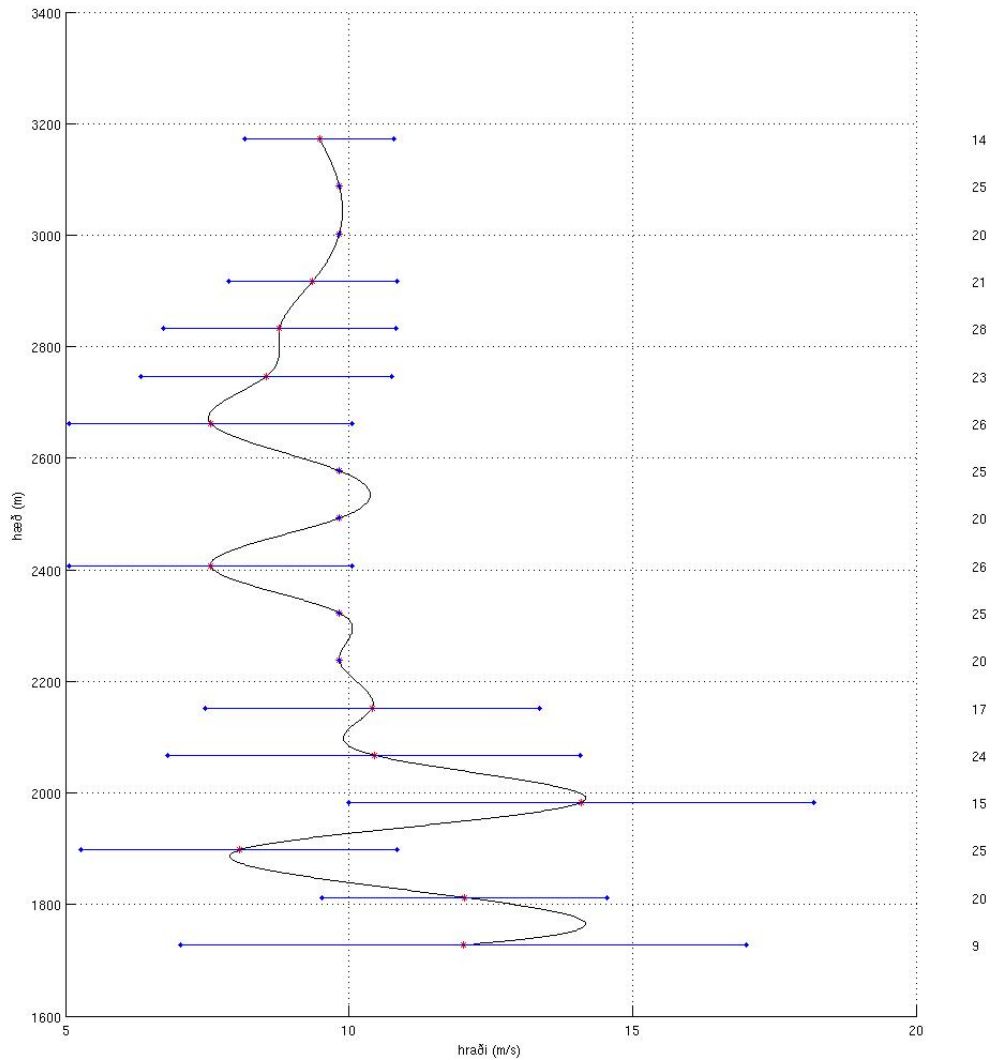


Mynd 34. Stækkuð útgáfa af mynd 10b. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 15. maí 2010 frá 11:04 til 11:09.

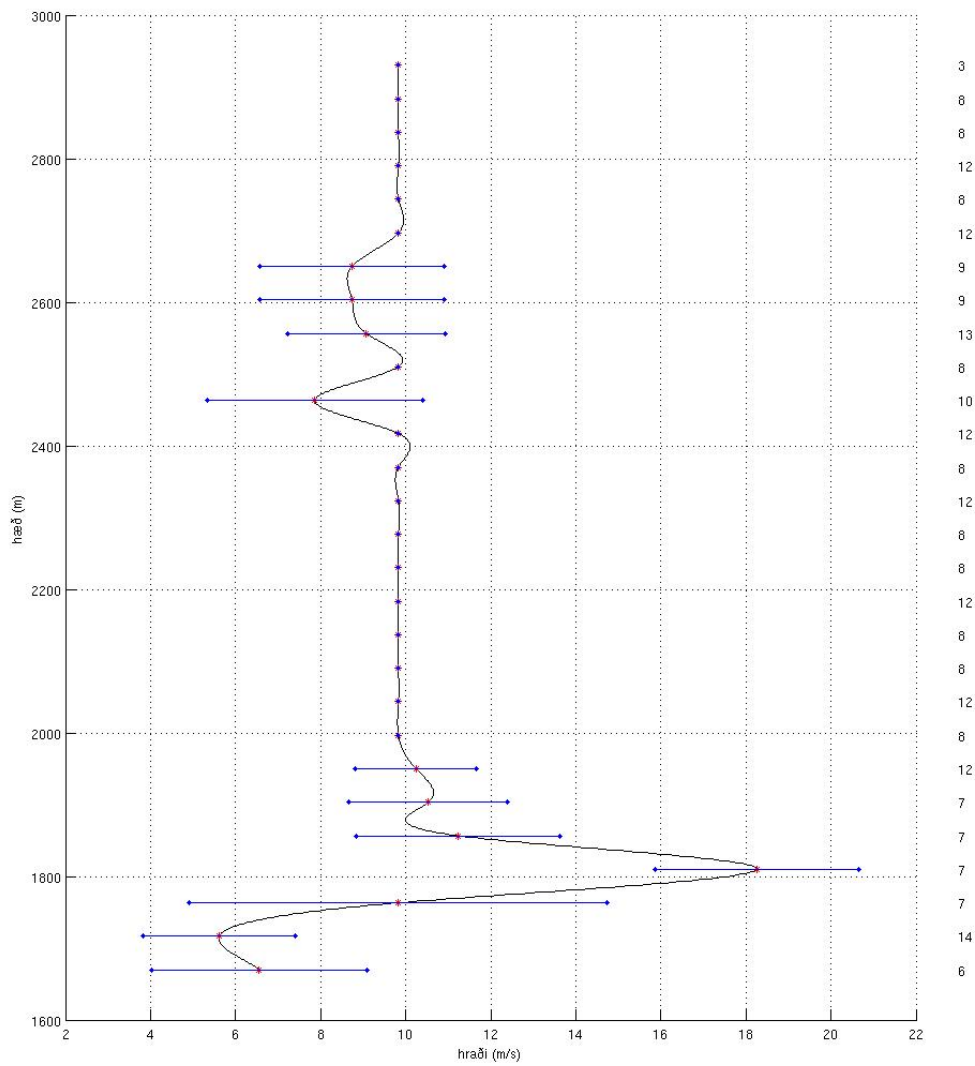


Mynd 35. Stækkuð útgáfa af mynd 10c. Lóðréttur hraði sem fall af hæð 15. maí 2010 frá 17:55 til 18:00.

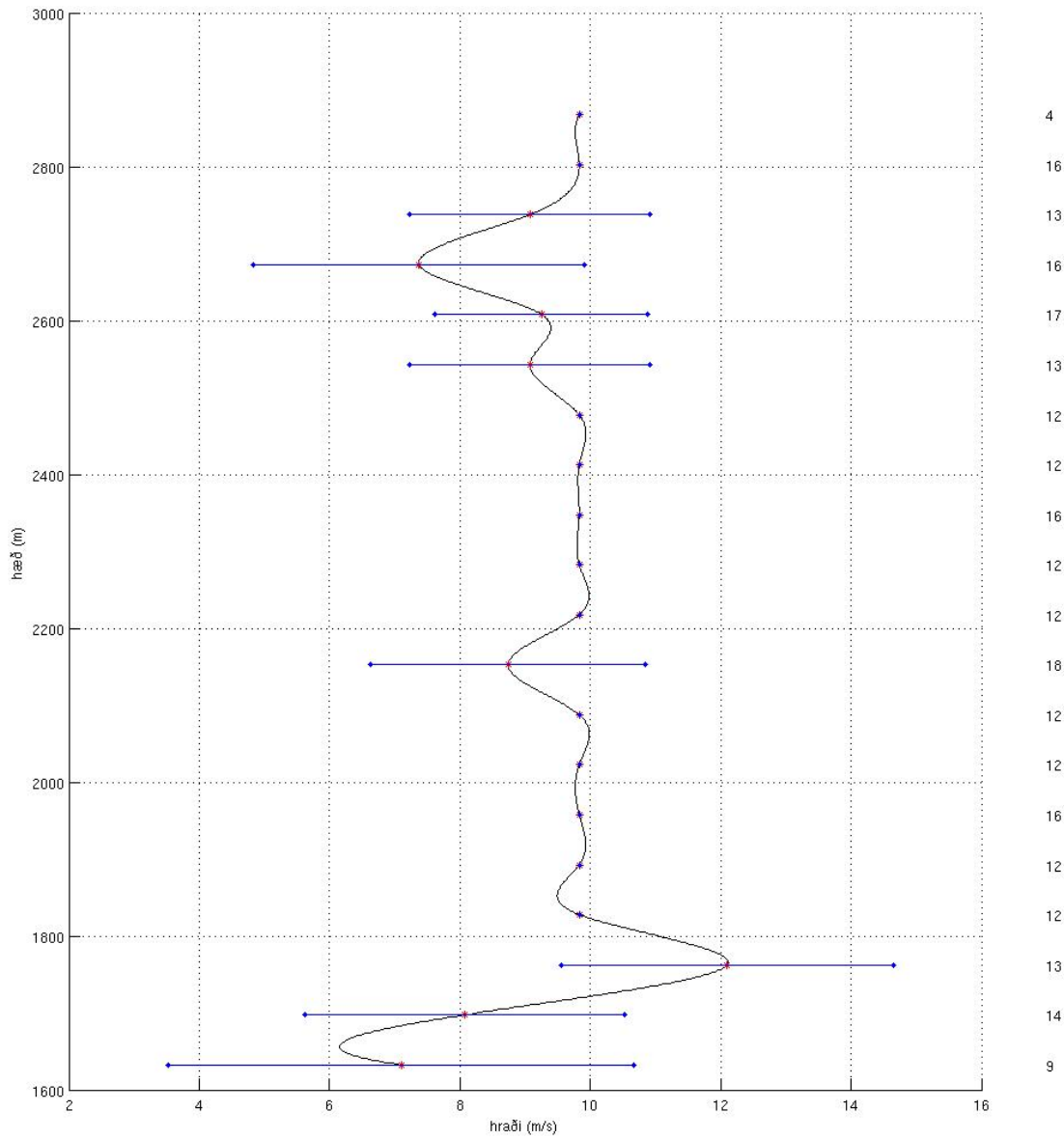
IV Skotfasar úr kvimyndaskeiðum



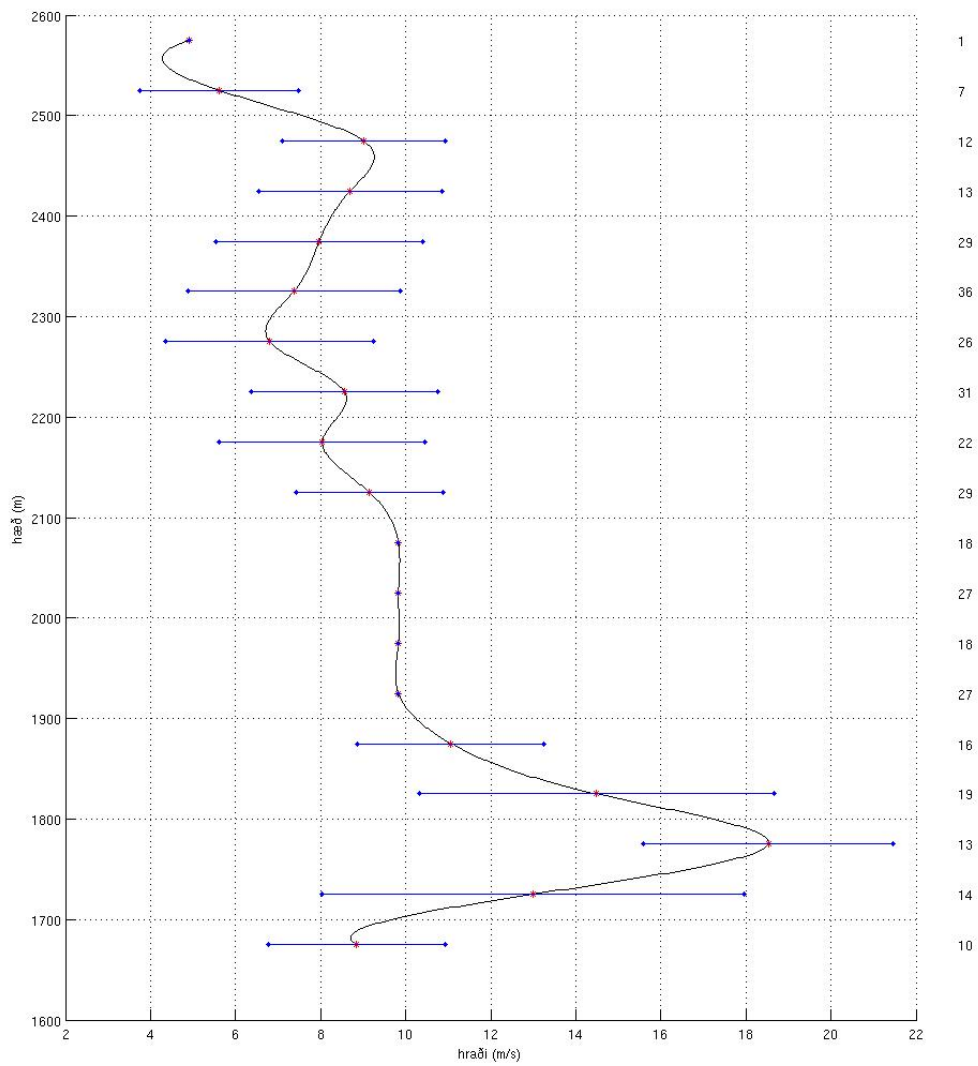
Mynd 36. Lóðréttur hraði í neðsta hluta makkar, greindur frá kvimyndaskeiði 2. Stækkuð útgáfa af mynd 11a.



Mynd 37. Lóðréttur hraði í neðsta hluta makkar, greindur frá kvikmyndaskeiði 3. Stækkuð útgáfa af mynd 11b.

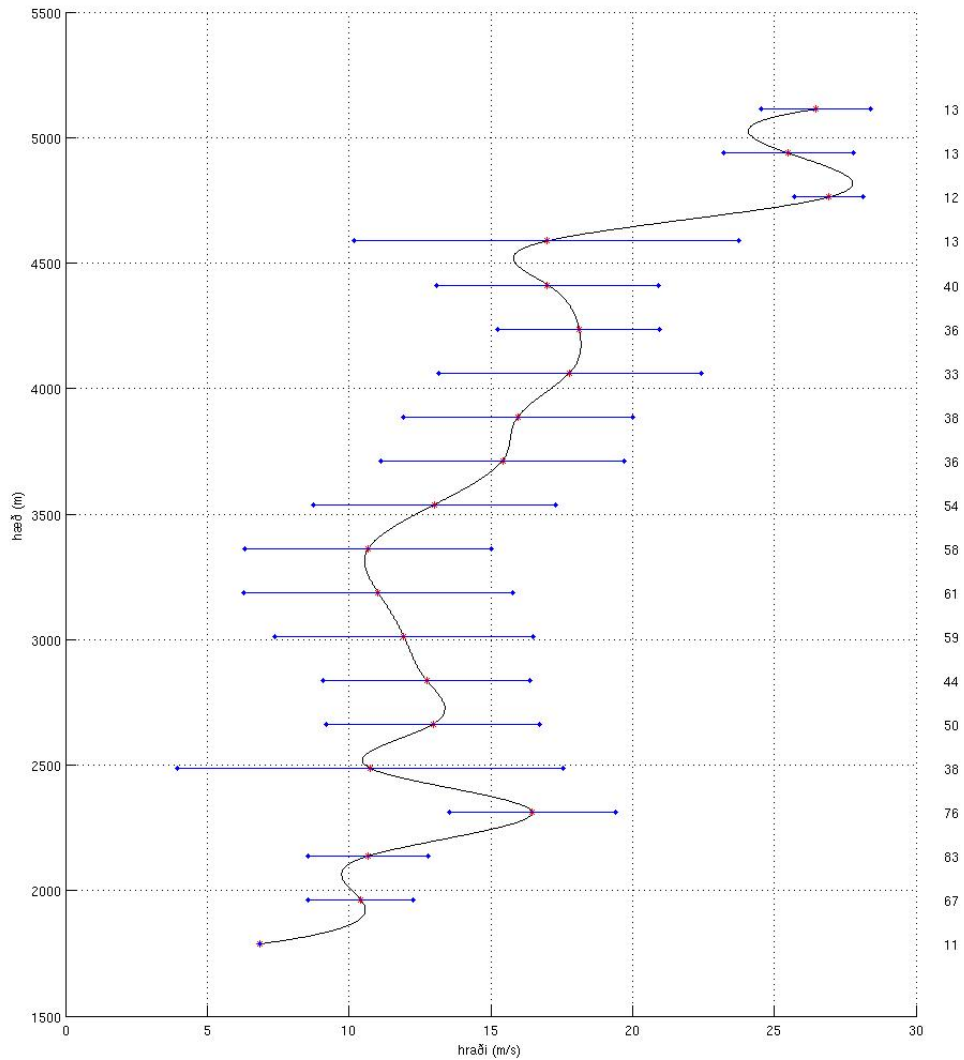


Mynd 38. Lóðréttur hraði í neðsta hluta makkar, greindur frá kvikmyndaskeiði 4. Stækkuð útgáfa af mynd 11c.

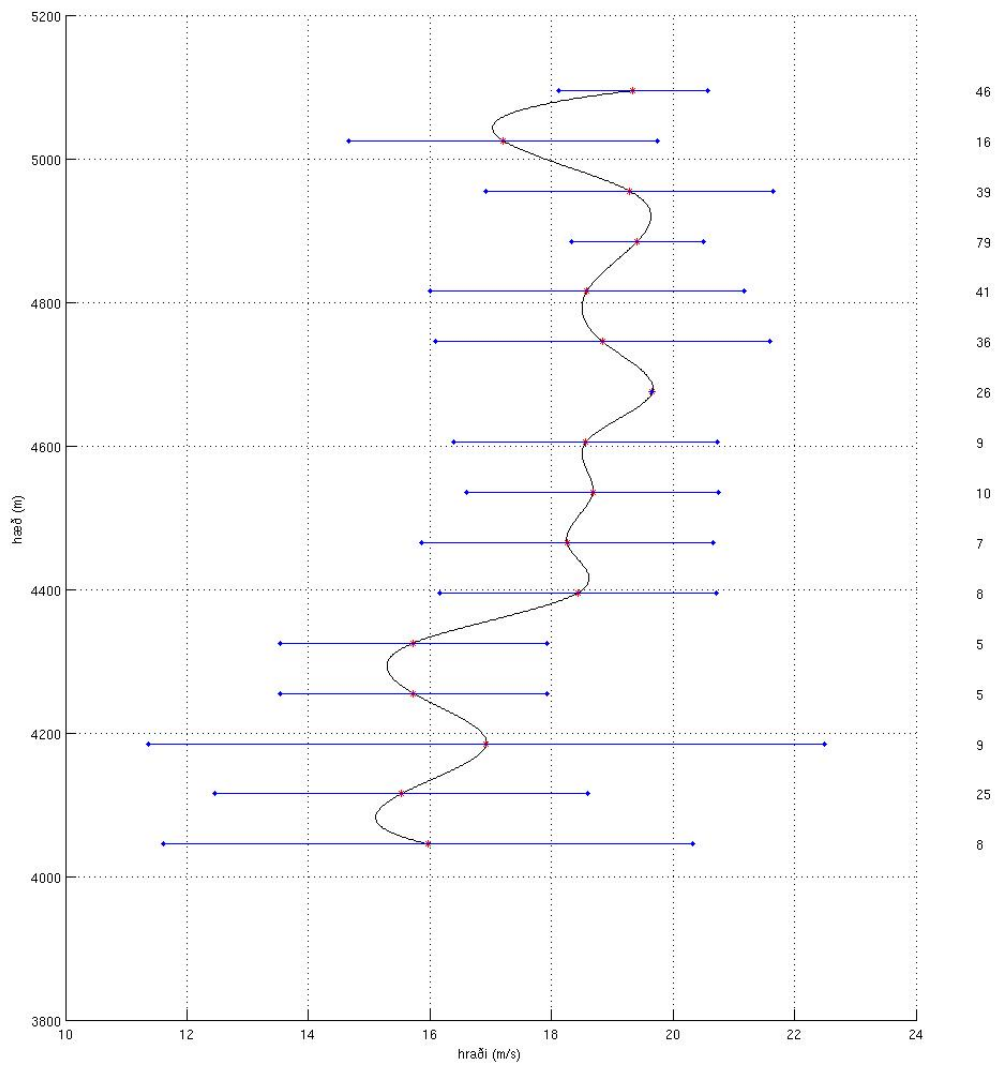


Mynd 39. Lóðréttur hraði í neðsta hluta makkar, greindur frá kvikmyndaskeiði 7. Stækkuð útgáfa af mynd 11d.

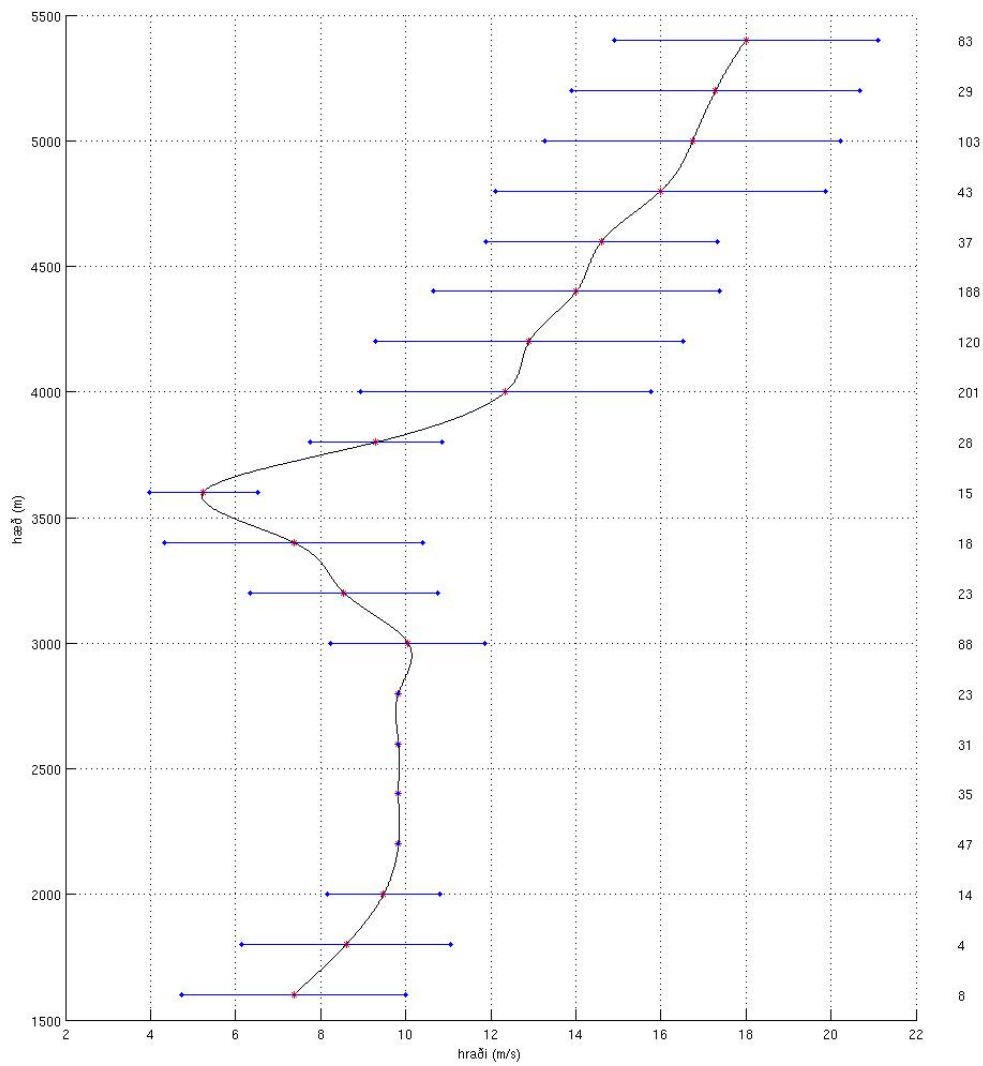
V Myndir af láréttum vindhraða



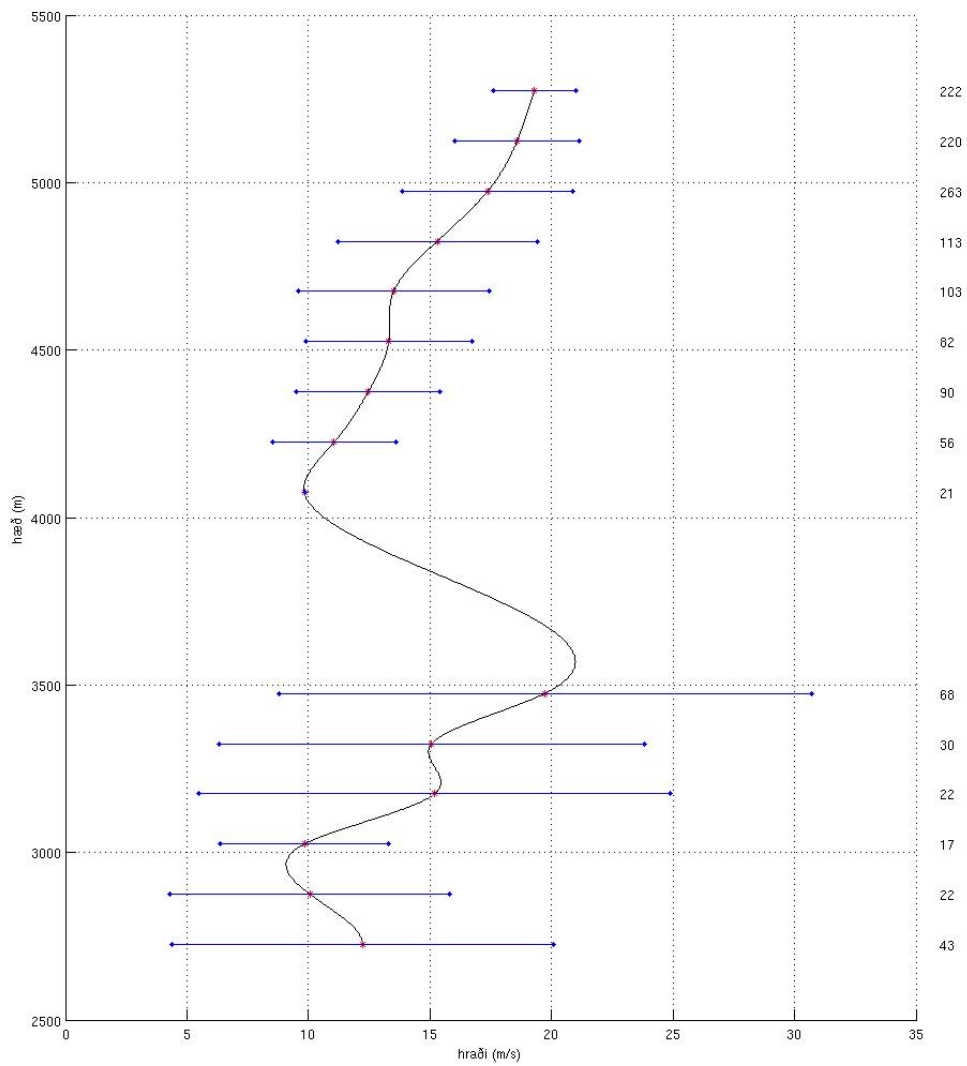
Mynd 40. Láréttur vindhraði í mekkinum þann 17. apríl 2010 frá klukkan 20:03 til 20:07. Stækkuð útgáfa af mynd 12.



Mynd 41. Láréttur vindhraði í mekkinum um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 1). Stækkuð útgáfa af mynd 13a.

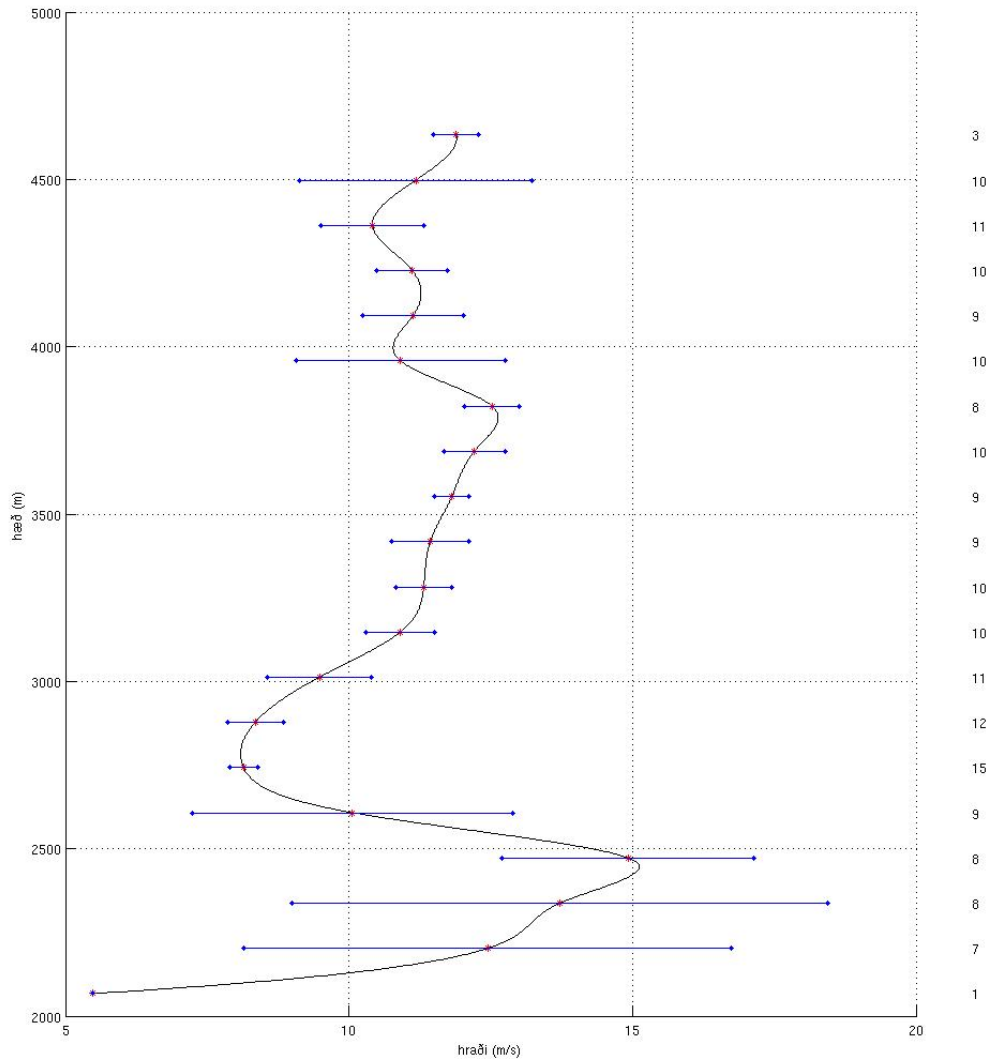


Mynd 42. Láréttur vindhraði í mekkinum um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 3). Stækkuð útgáfa af mynd 13b.

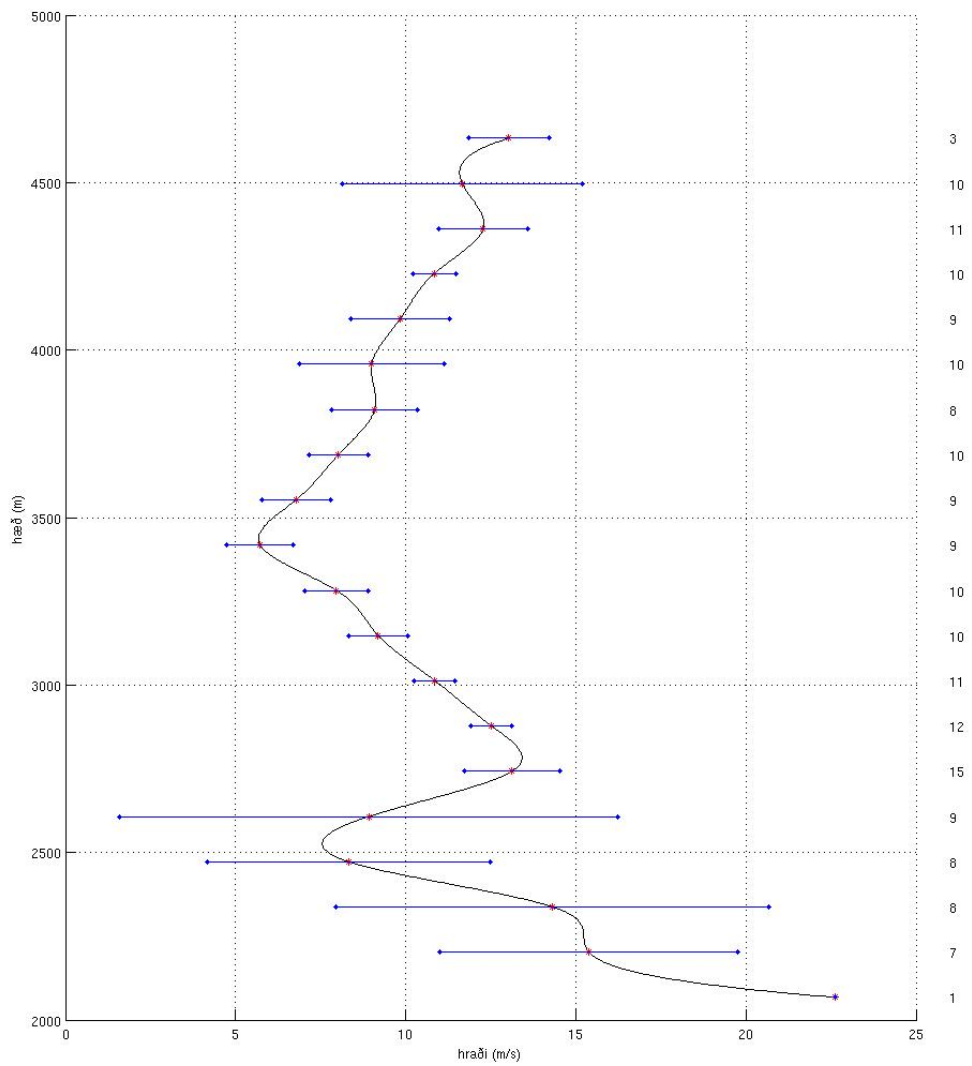


Mynd 43. Láréttur vindhraði í mekkinum um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 8). Stækkuð útgáfa af mynd 13c.

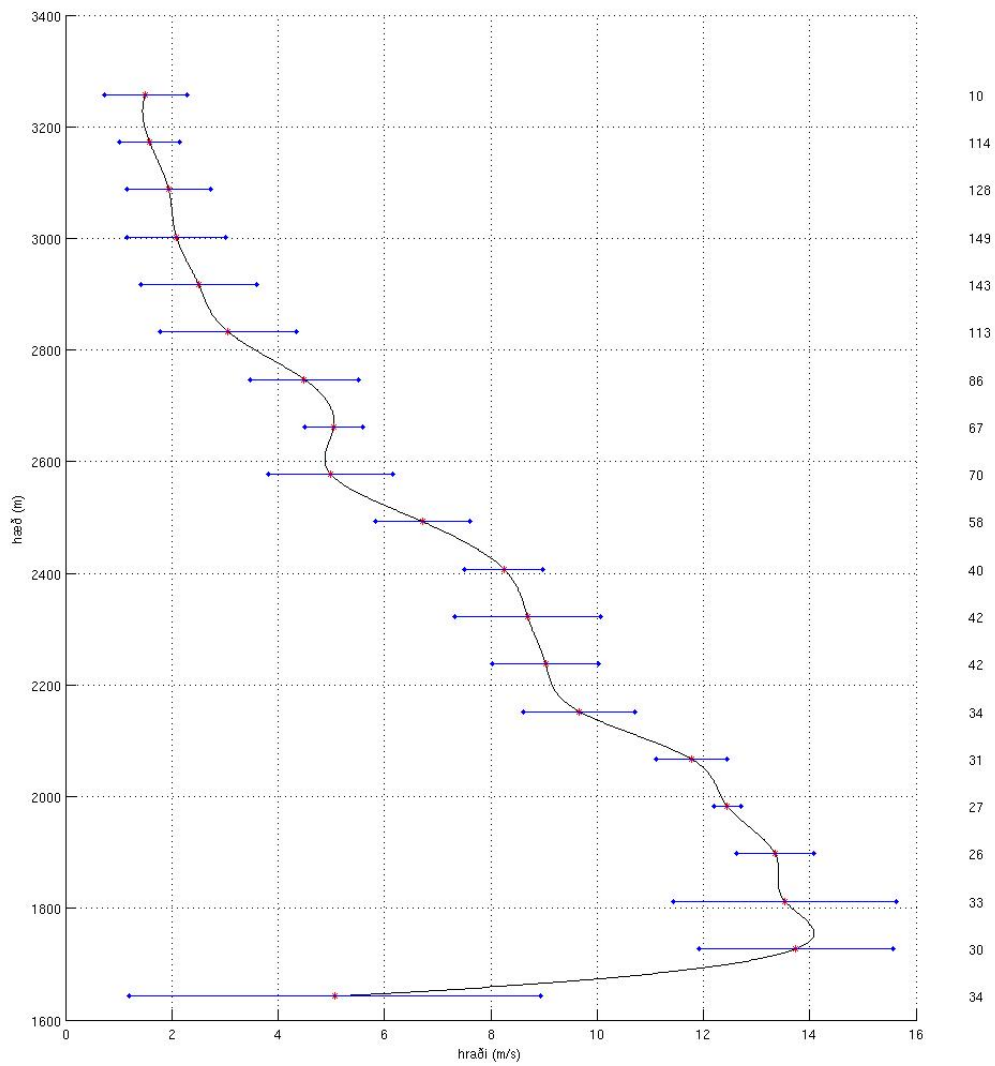
VI Myndir af samanburði á vindhraða og lóðréttum hraða



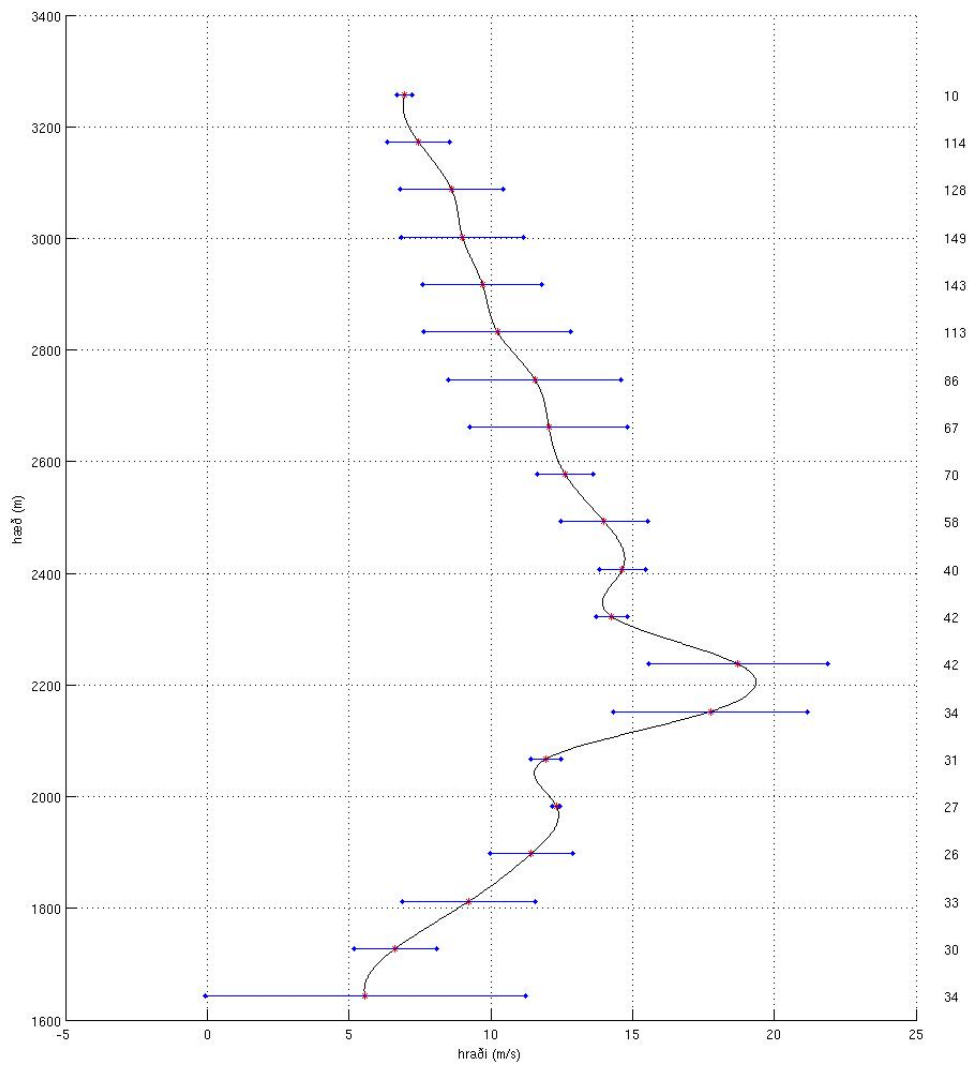
Mynd 44. Lóðréttur uppstreymishraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 17. apríl 2010 frá 17:25 til 17:31. Stækkuð útgáfa af mynd 14a.



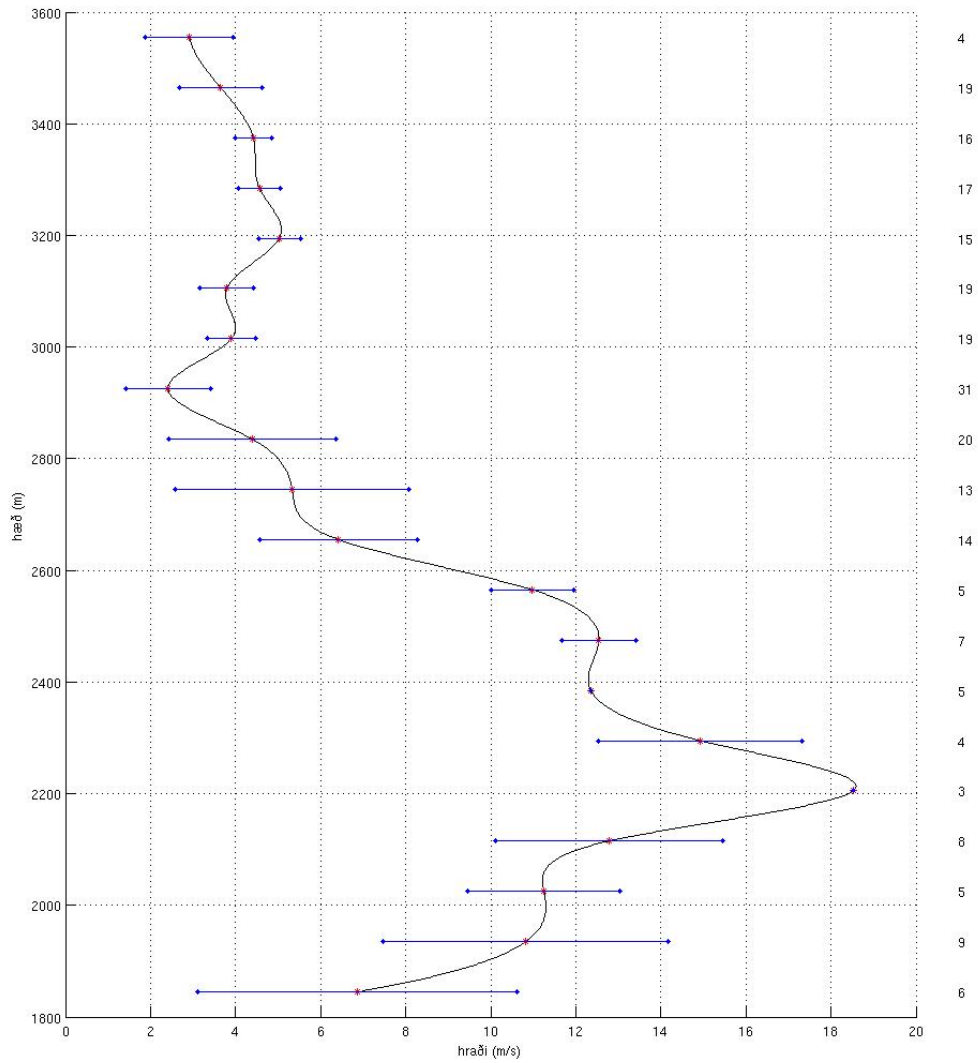
Mynd 45. Láréttur vindhraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 17. apríl 2010 frá 17:25 til 17:31. Stækkuð útgáfa af mynd 14b.



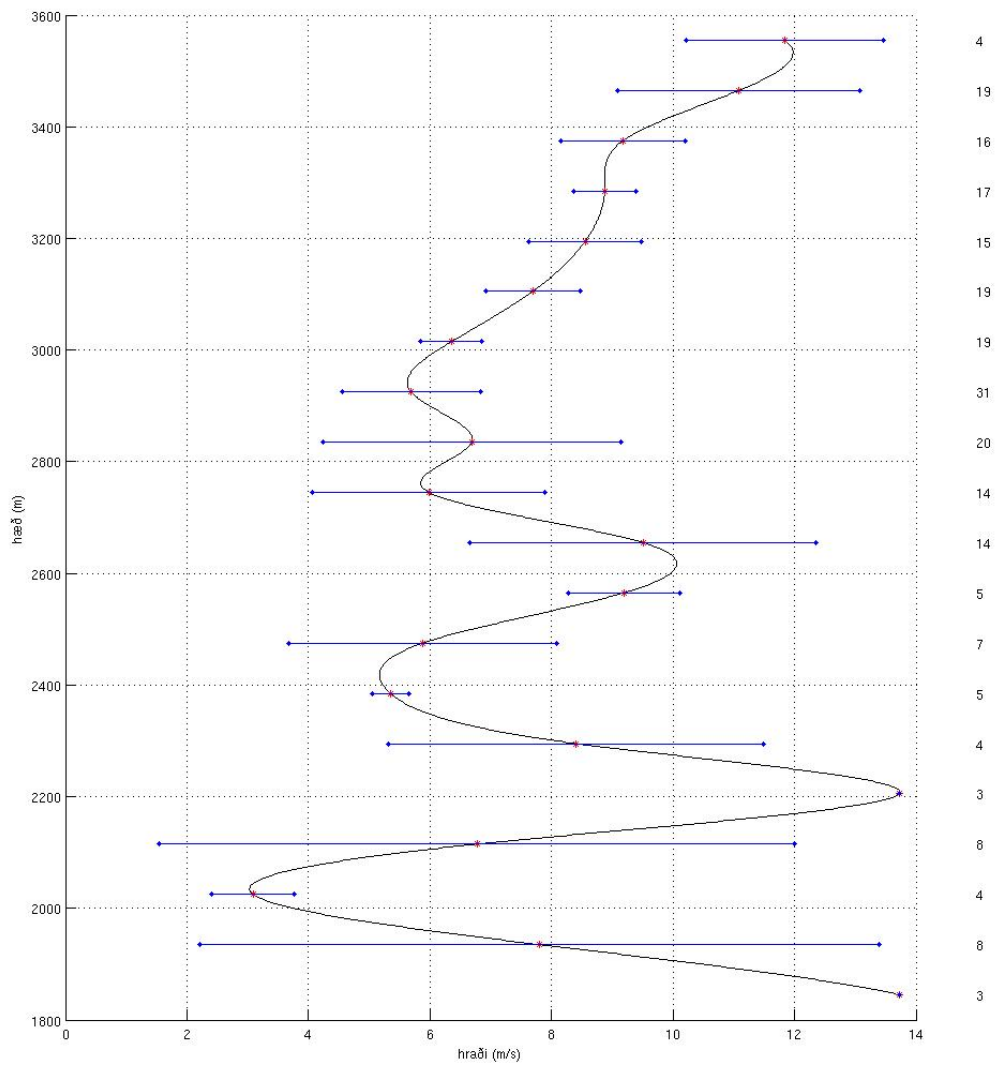
Mynd 46. Lóðréttur uppstreymishraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl 2010 frá 06:50 til 06:55. Stækkuð útgáfa af mynd 15a.



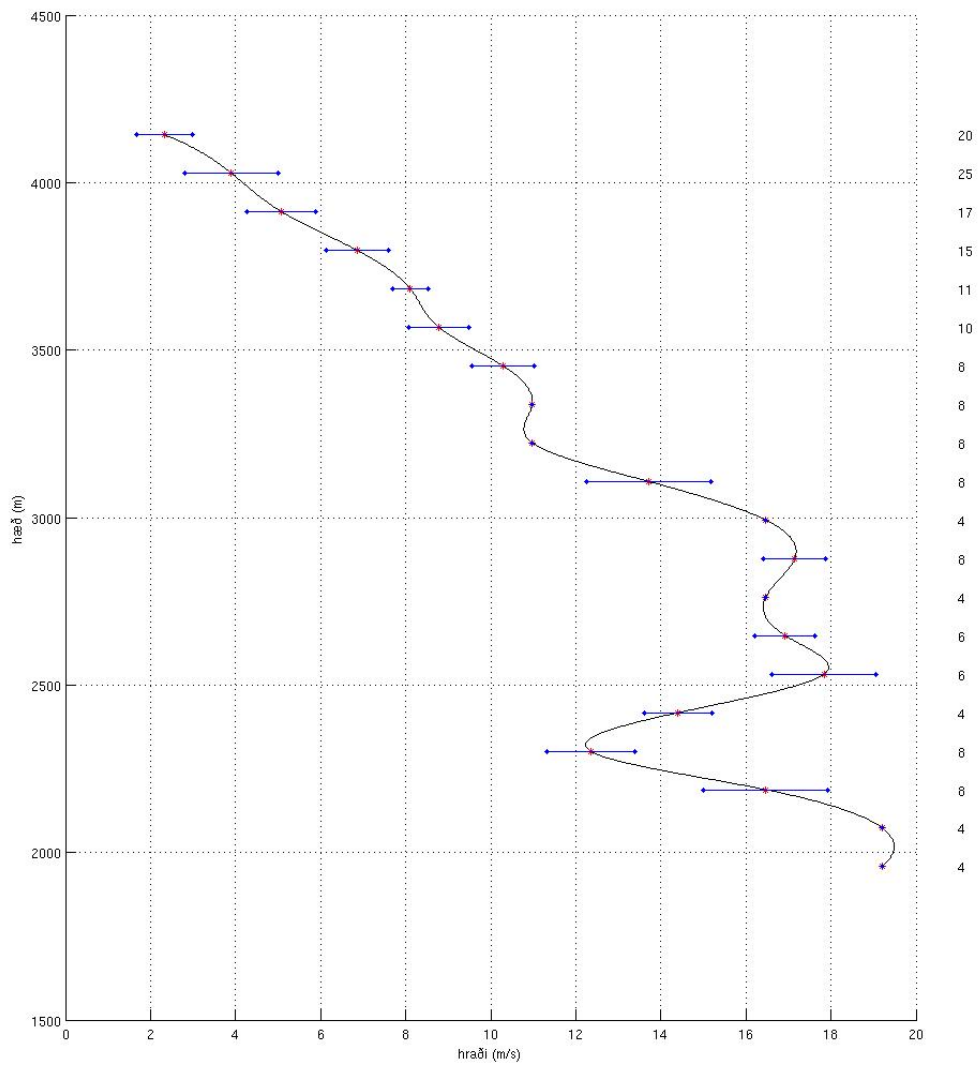
Mynd 47. Láréttur vindhraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl 2010 frá 06:50 til 06:55. Stækkuð útgáfa af mynd 15b.



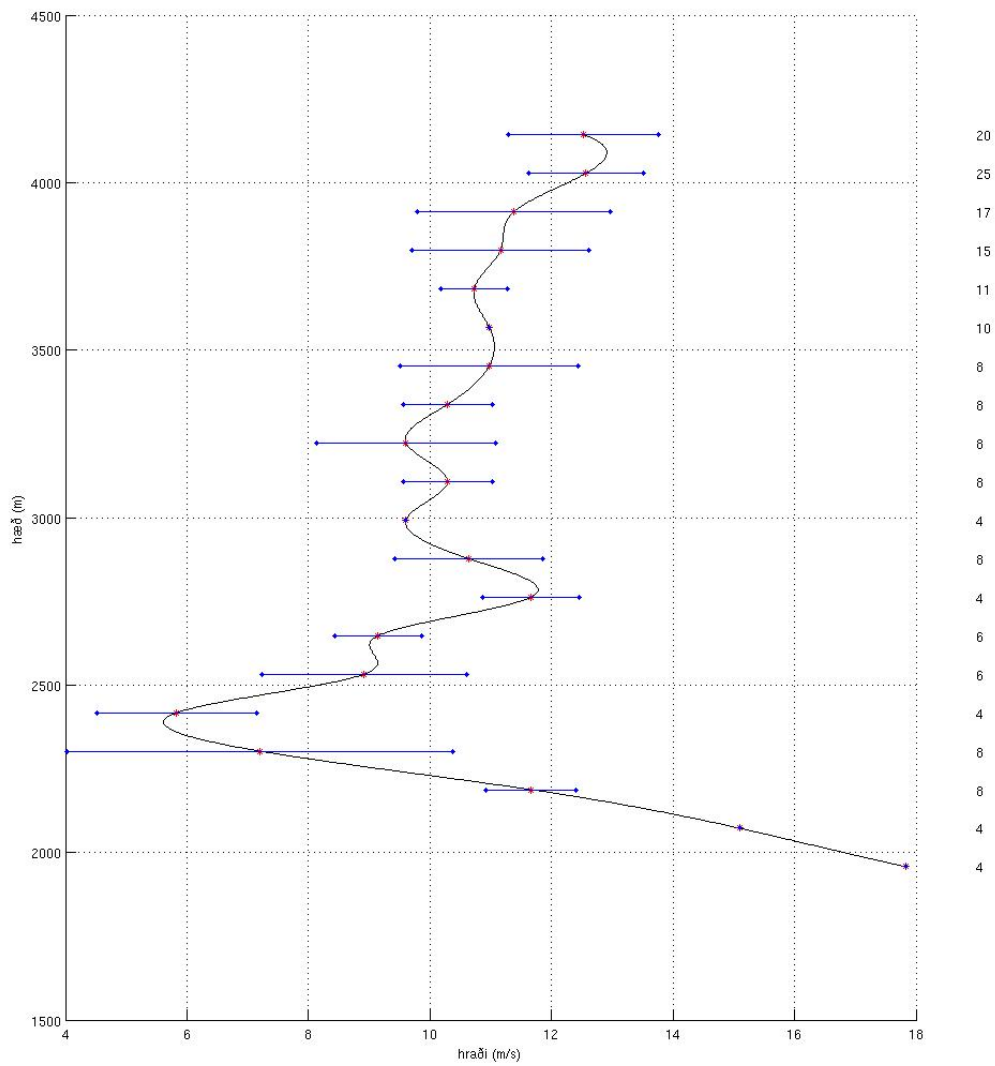
Mynd 48. Lóðréttur uppstreymishraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl 2010 frá 07:54 til 07:59. Stækkuð útgáfa af mynd 16a.



Mynd 49. Láréttur vindhraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 20. apríl 2010 frá 07:54 til 07:59. Stækkuð útgáfa af mynd 16b.



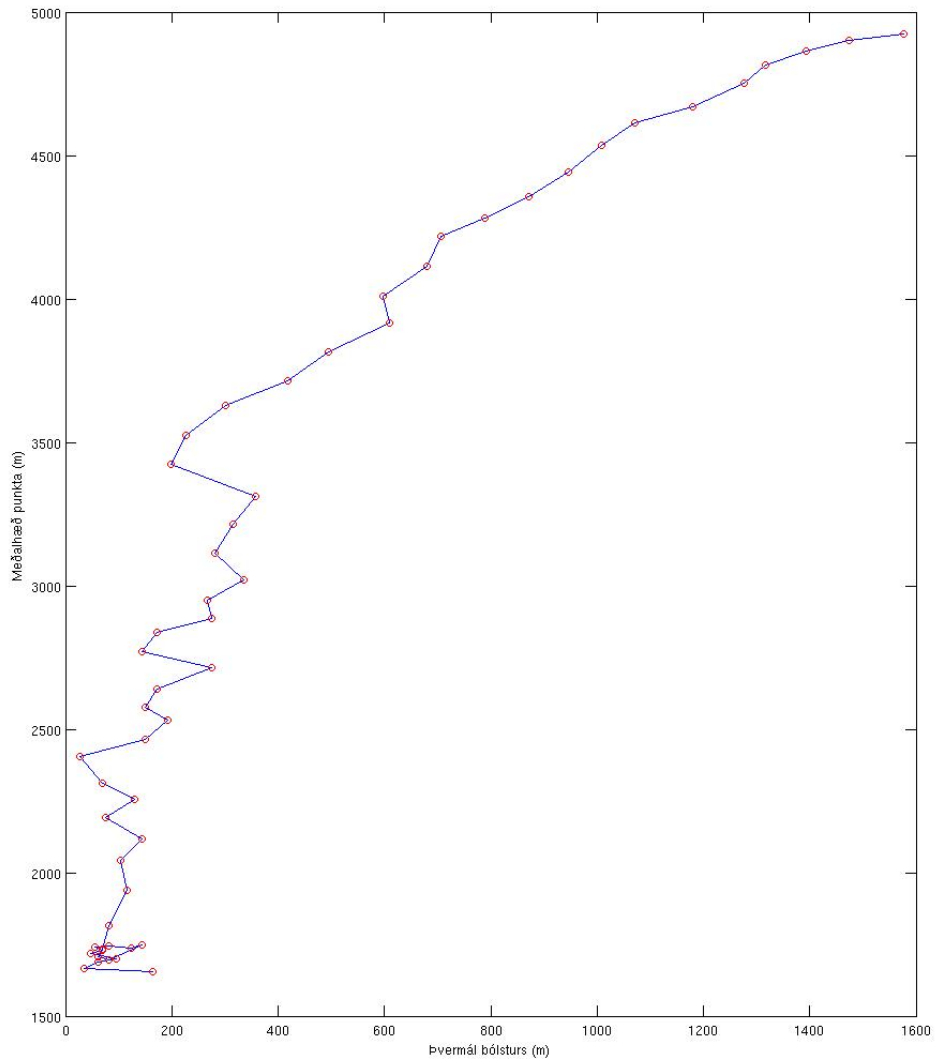
Mynd 50. Lóðréttur uppstreymishraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 11. maí 2010 frá 08:16 til 08:20. Stækkuð útgáfa af mynd 17a.



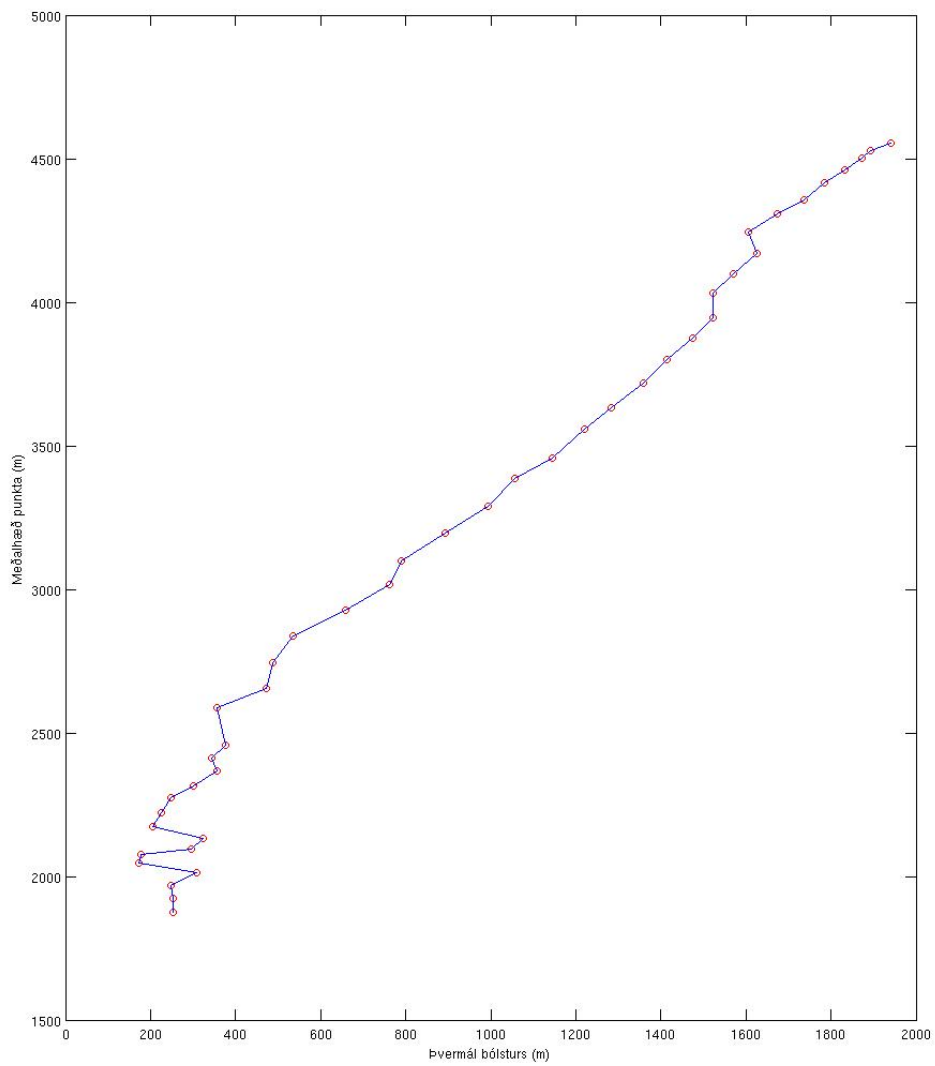
Mynd 51. Láréttur vindhraði. Frá samanburði á lóðréttum hraða og láréttum vindi, fyrir þann 11. maí 2010 frá 08:16 til 08:20. Stækkuð útgáfa af mynd 17b.

VII Myndir af greiningu á bólstrum

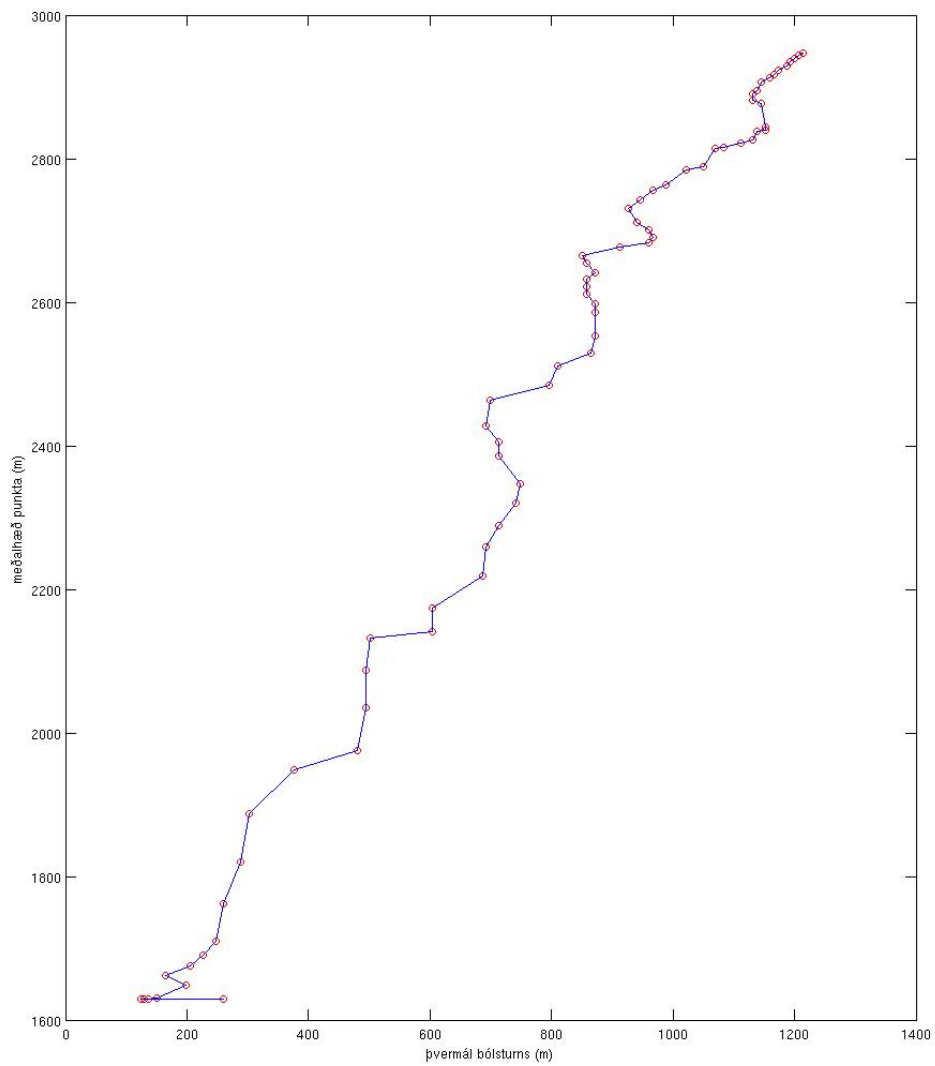
VII.1 Greining á vefmyndum



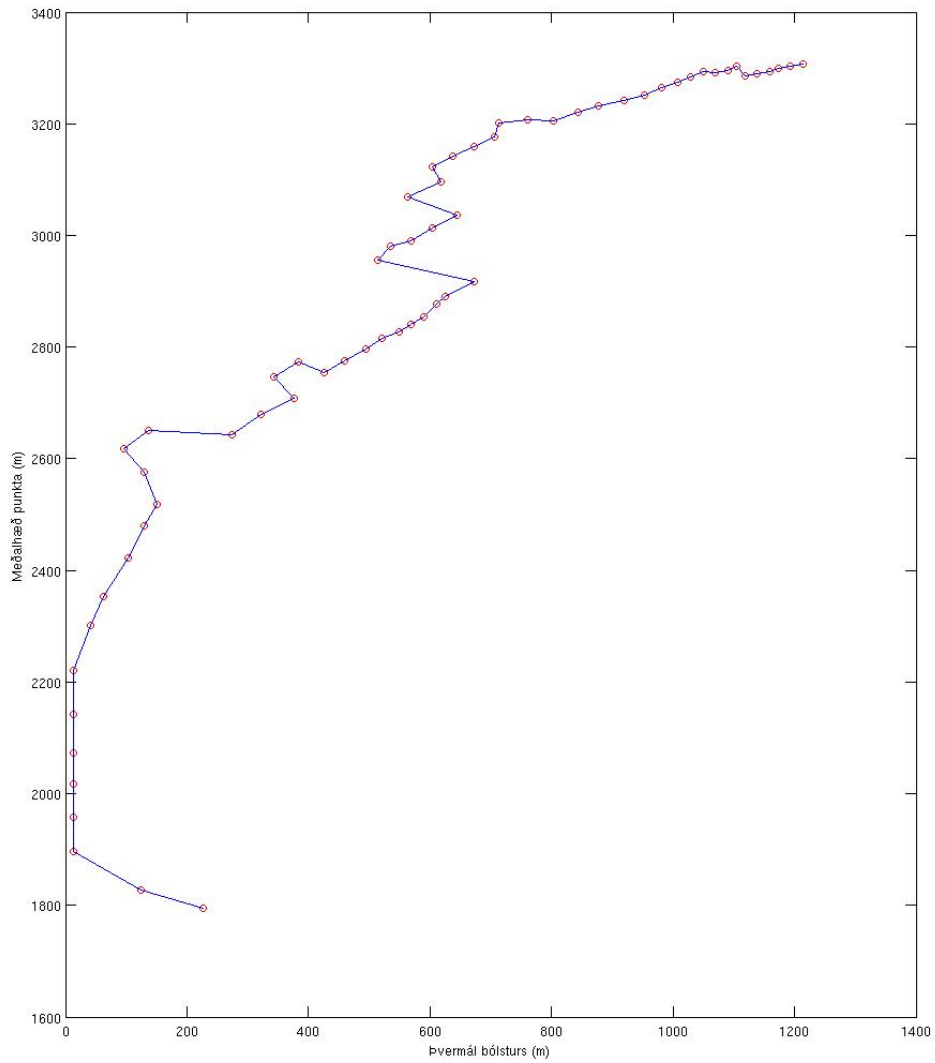
Mynd 52. Þvermál bólsturs sem fall af hæða 17. apríl 2010 frá 16:30 til 16:35. Stækkuð útgáfa af mynd 18a.



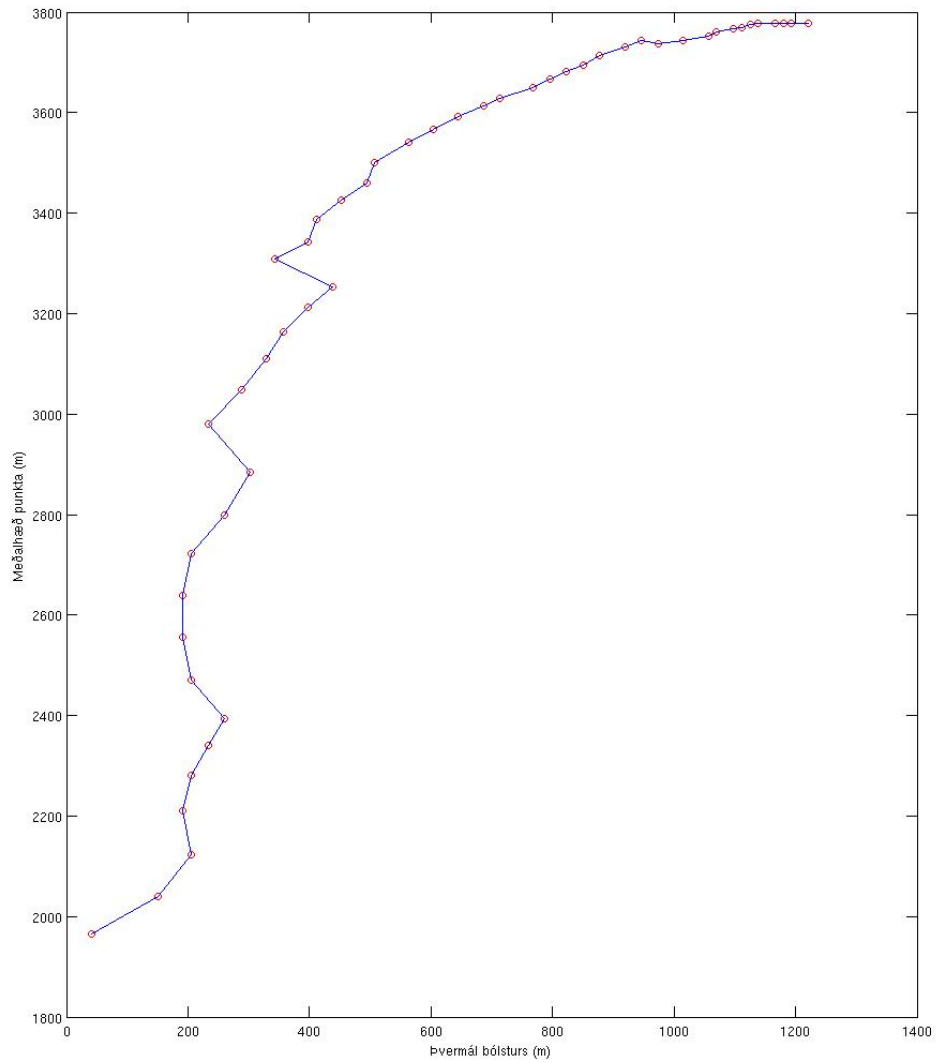
Mynd 53. Þvermál bólsturs sem fall af hæð 17. apríl 2010 frá 20:03 til 20:07. Stækkuð útgáfa af mynd 18b.



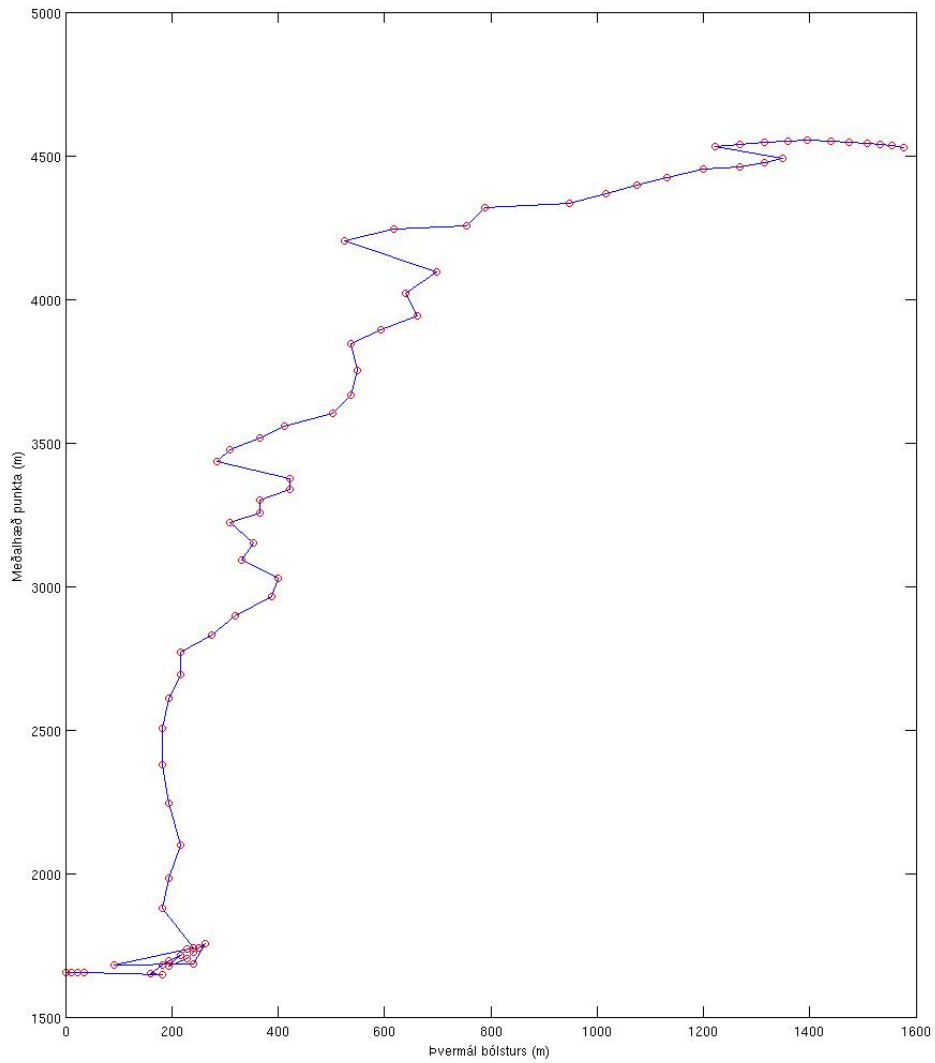
Mynd 54. Þvermál bólsturs sem fall af hæð 20. apríl 2010 06:50 til 06:55. Stækkuð útgáfa af mynd 18c



Mynd 55. Þvermál bólsturs sem fall af hæð 20. apríl 2010 frá 07:54 til 07:59. Stækkuð útgáfa af mynd 18d.

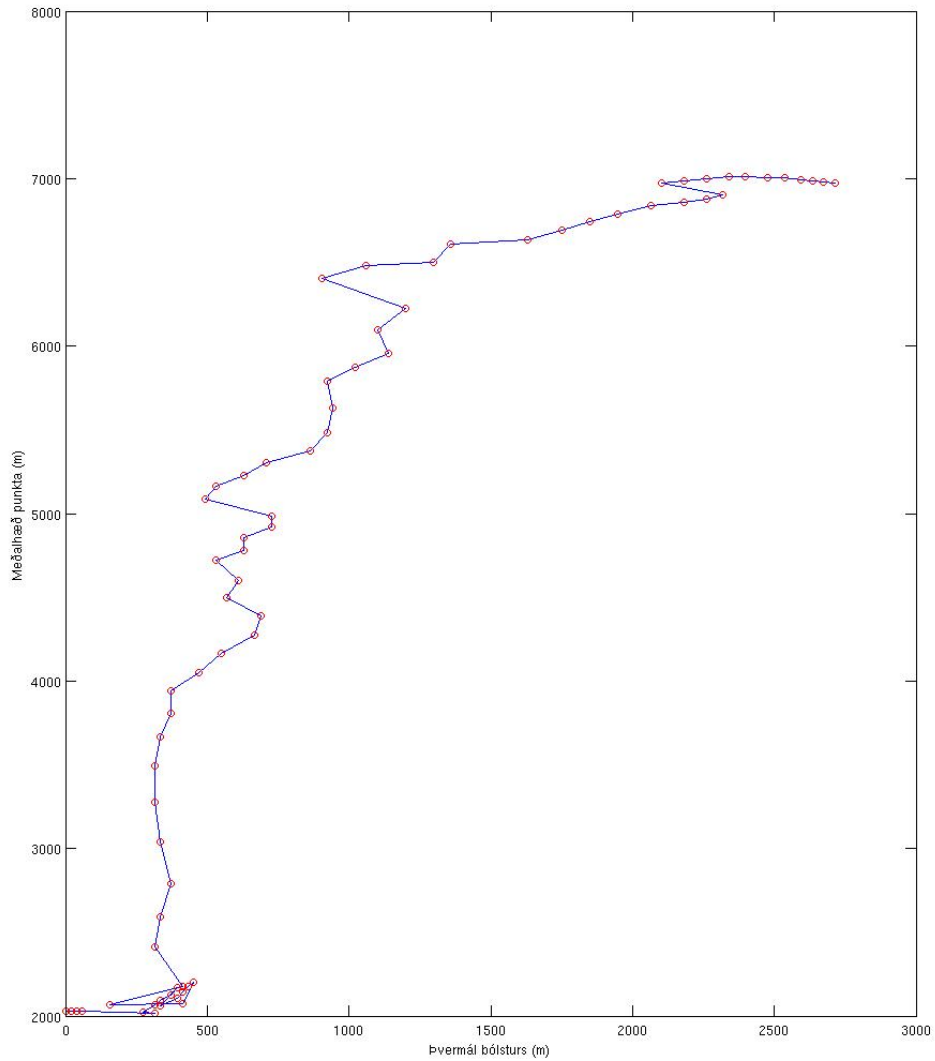


Mynd 56. Þvermál bólsturs sem fall af hæð 11. maí 2010 frá 08:16 til 08:20. Stækkuð útgáfa af mynd 18e.

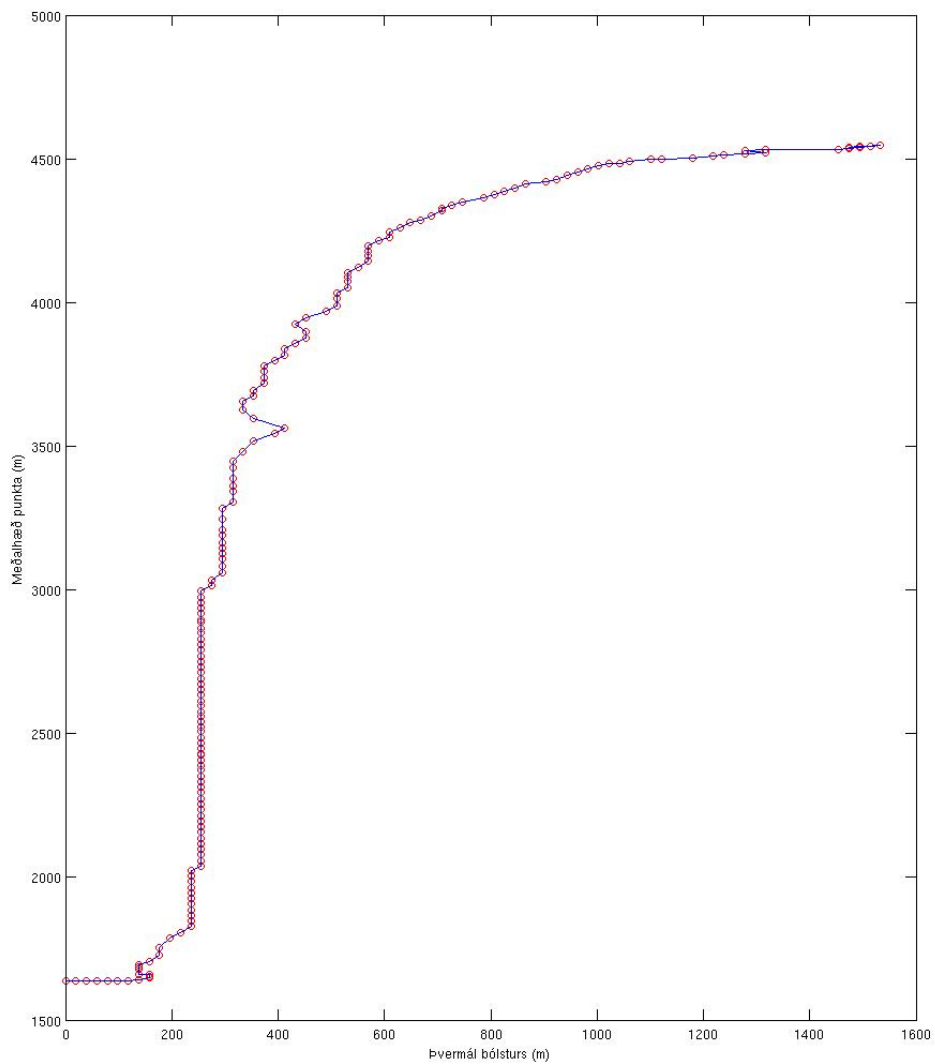


Mynd 57. Þvermál bólsturs sem fall af hæð 11. maí 2010 frá 10:48 til 10:55. Stækkuð útgáfa af mynd 18f.

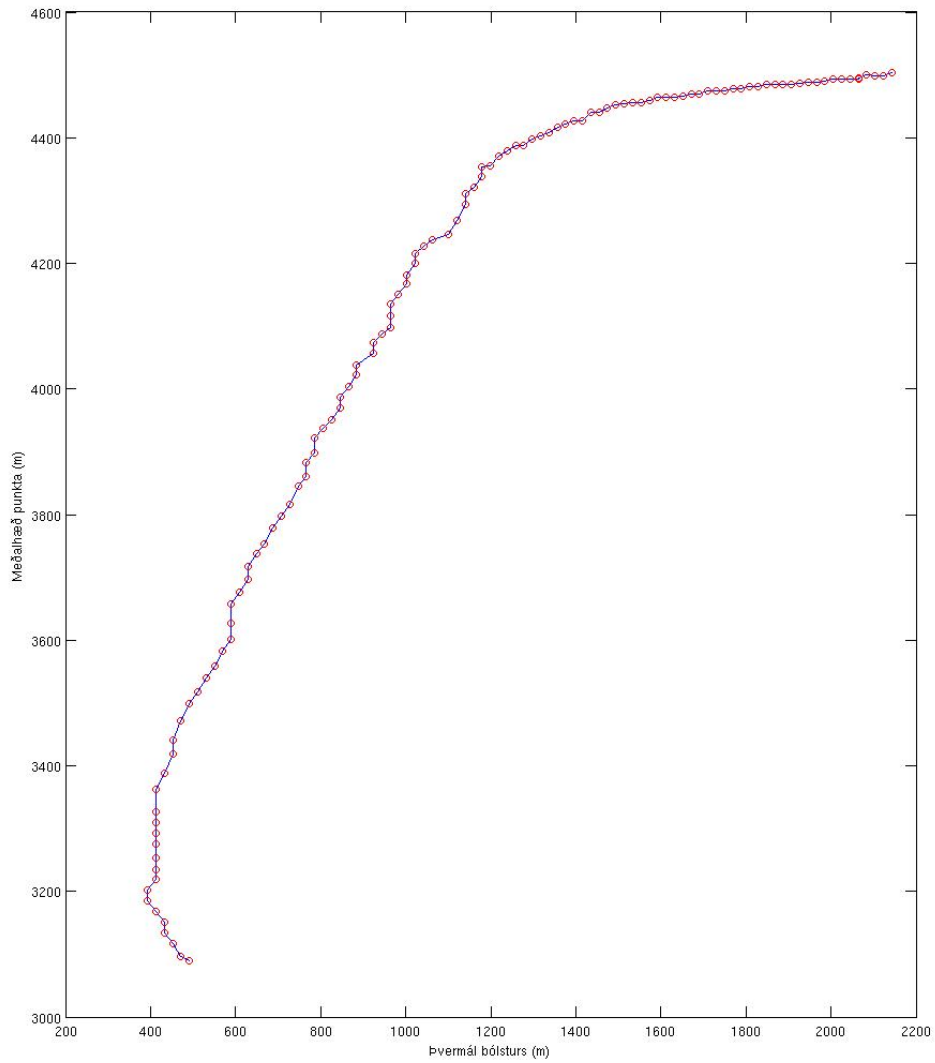
VII.2 Greining á kvikmyndaskeiðum



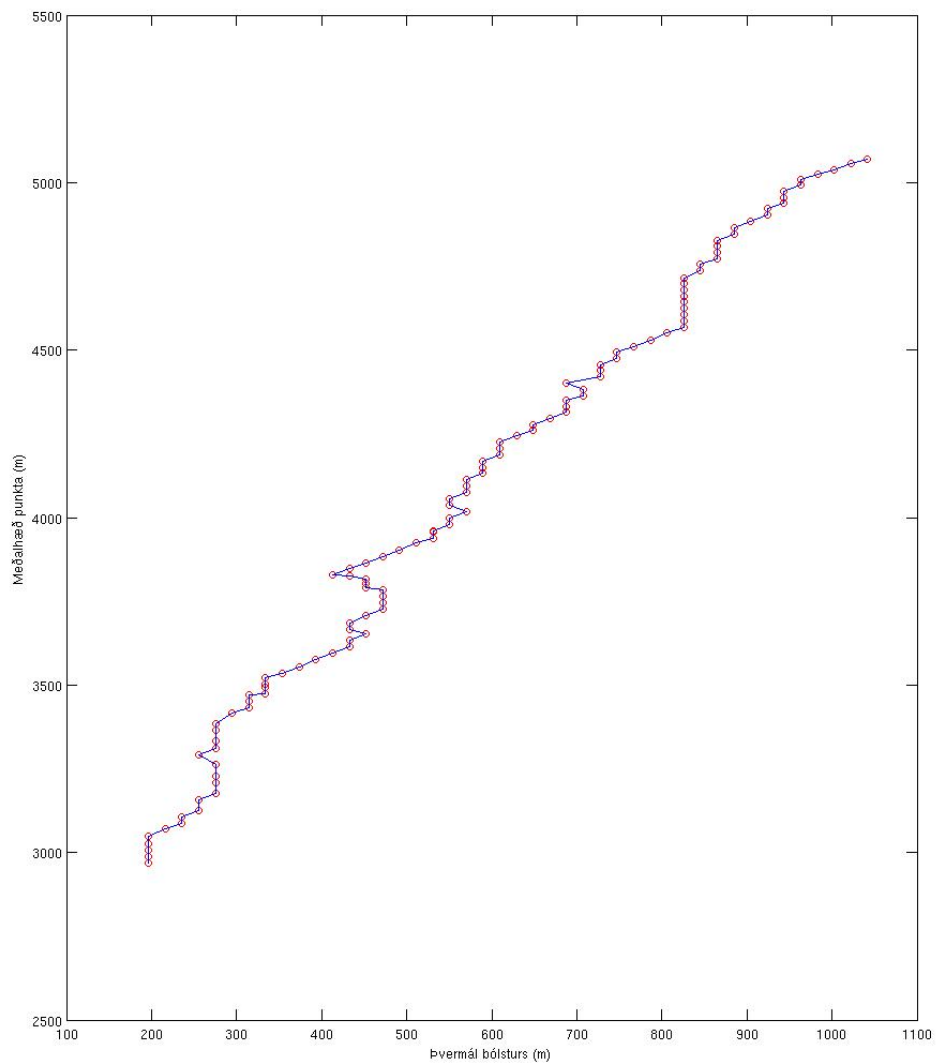
Mynd 58. Þvermál bólsturs sem fall af hæð um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskleið 2). Stækkuð útgáfa af mynd 19a.



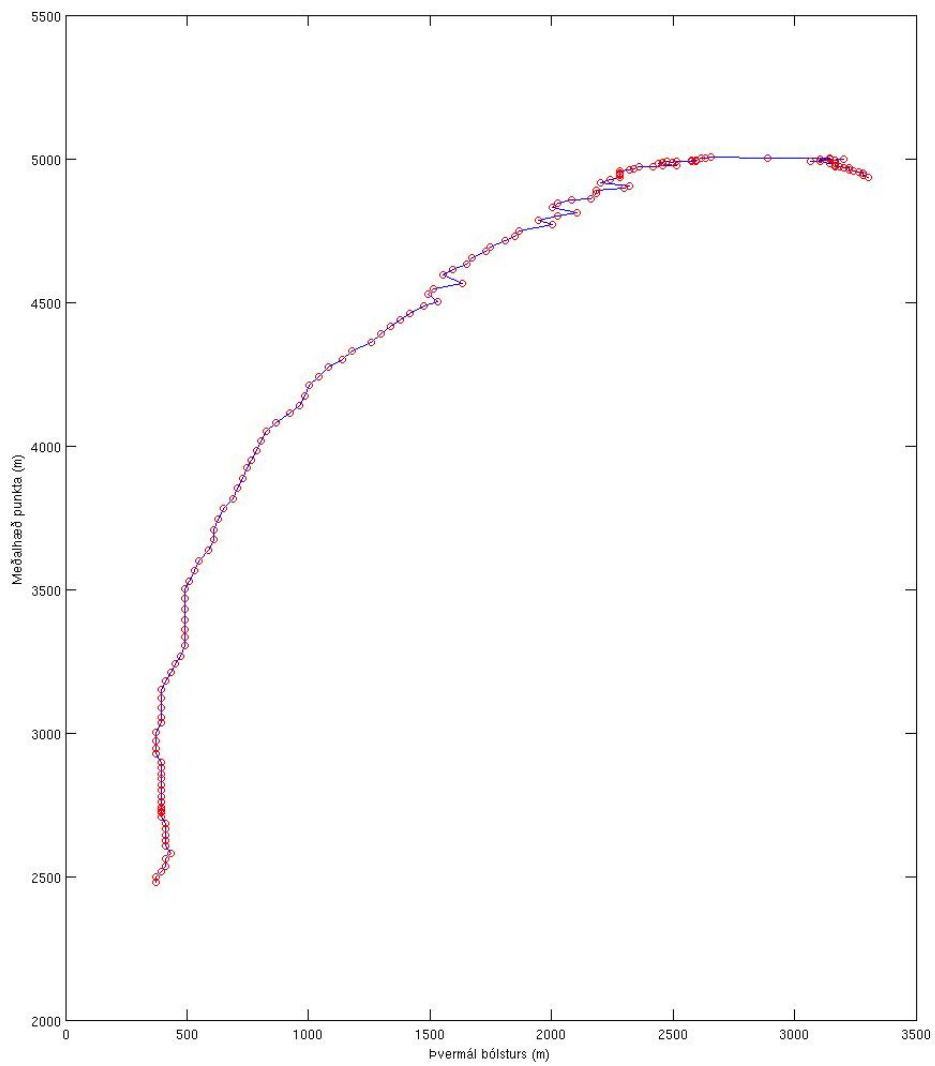
Mynd 59. Þvermál bólsturs sem fall af hæð um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 4, hluti 1). Stækkuð útgáfa af mynd 19b.



Mynd 60. Þvermál bólsturs sem fall af hæð um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 4, hluti 2). Stækkuð útgáfa af mynd 19c.



Mynd 61. Þvermál bólsturs sem fall af hæð um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 8). Stækkuð útgáfa af mynd 19e.



Mynd 62. Þvermál bólsturs sem fall af hæð um hádegisbil þann 17. apríl 2010 (kvikmynd, myndskaið 6). Stækkuð útgáfa af mynd 19d.