

Umferðarslys og vindafar Áfangaskýrsla II

Verkefni fjármagnað af RANNUM

Febrúar 2006





Titill: Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

Höfundar: Skúli Þórðarson, Dr.ing.
ORION Ráðgjöf ehf
Krókháls 5A
110 Reykjavík
Sími: 552 9970
skuli@orion.is

Jónas Þór Snæbjörnsson, Dr.ing.
Verkfræðistofnun Háskóla Íslands
Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík
Sími: 525-4128
jonas@hi.is

Laila Sif Cohagen, B.Sc.
ORION Ráðgjöf ehf
Krókháls 5A
110 Reykjavík
Sími: 552 9970
laila@orion.is

Útgáfa: Orion Ráðgjöf ehf.
Krókháls 5A
110 Reykjavík

Skýrsla RaUm0401SK01
Reykjavík, febrúar 2006
105 síður

Verkefni: RaUm0401
Umferðarslys og vindafar

Verkefnisstjóri: Skúli Þórðarson

Fjármögnun: Rannsóknarráð umferðaröryggismála
RANNUM verkefni nr. 18937

Efnisorð: Umferðaröryggi, vindur, hviða, ökutæki,
umferðarslys, færð

Aðgengi: Opin skýrsla. Þessa skýrslu má nálgast á
vefslóðunum www.orion.is eða
www.vegagerdin.is

© 2006 ORION Ráðgjöf og Verkfræðistofnun
Háskóla Íslands. Öll réttindi áskilin.

Formáli

Þetta verkefni er unnið í samstarfi ORION Ráðgjafar og Verkfræðistofnunar Háskóla Íslands með fjárstyrk frá Rannsóknarráði umferðaröryggismála. Þetta er framhald verkefnis sem hófst með styrkveitingu frá Rannum vorið 2003. Í fyrsta áfanga árið 2003 var eingöngu unnið með Hringveg undir Hafnarfjalli. Niðurstöður fyrsta áfanga gáfu ýmsar vísbendingar um hvernig vindaðstæður valda mestri slyshættu við Hafnarfjall og hve aðstæður eru breytilegar þegar skoðaðir eru mismunandi staðir í grennd við fjallið. Að auki gaf fyrsti áfangi mikilvægar upplýsingar um samspil færðar og vindhraða. Í þessum öðrum áfanga verksins voru áhrif vinda á umferð og ökutæki könnuð frekar. Samband umferðarslysa og vinds var kannað á Hringveginum um Kjalarnes og í Draugahlíðabrekku við Litlu kaffistofuna. Framkvæmdar voru frekari vindmælingar á vegum með færanlegum vindnema með endurbættri staðsetningartækni. Auk þess sem þróað var reiknilíkan til að leggja mat á öryggi ökutækja við mismunandi vindaðstæður.

Reykjavík, febrúar 2006

Skúli Þórðarson

Jónas Þór Snæbjörnsson

Laila Sif Cohagen

Samantekt

Í skýrslunni er fjallað um annan áfanga verkefni um umferðarslys og vindafar. Skýrslan skiptist í megindráttum í þrjú viðfangsefni. Í fyrsta lagi er fjallað um athuganir á umferðarslysum á Hringveginum um Kjalarnes og í Draugahlíðabrekku við Litlu kaffistofuna og niðurstöðurnar bornar saman við samskonar athuganir á Hringveginum við Hafnarfjall. Í öðru lagi var haldið áfram að þróa mælingar á vegum með hreyfanlegum vindmæli. Í þriðja lagi hefur verið unnið að endurbótum og frekari þróun reiknilíkans til að meta öryggi ökutækja við mismunandi vindaðstæður. Þessir þrír verkþættir miða allir að því auka skilning á samhengi vindafars, færðar á vegum og umferðaröryggis ökutækja. Slysarannsóknirnar á þeim þremur stöðum sem skoðaðir hafa verið gefa til kynna að ýmis fyrirsjáanleg atriði í umhverfi vindaslysa koma endurtekið fyrir og því eru góðar líkur á því að fækka megi slíkum slysum með forvarnaraðgerðum á réttum vettvangi. Mælingar með hreyfanlegum vindmæli gefa tilefni til að ætla að með því að beita slíkum mælingum kerfisbundið fyrir mismunandi vindáttir þá megi kortleggja vindsama staði við þjóðvegi landsins. Niðurstöður reiknilíkansins sýna að með því að samþætta líkindafræðilegar og aflfræðilegar aðferðir, þá er hægt að meta öryggi ökutækja á ferð við mismunandi vindaðstæður. Greiningin sýnir einnig að margar breytur hafa áhrif á öryggi ökutækisins og slys eru líklegust þegar þær spila saman með óhagstæðum hætti. Í framhaldinu er ætlunin að gera prófanir, á grundvelli mældra veðurgagna á völdum veðurstöðvum Vegagerðarinnar, með að reikna líkindi þess að umferðar óhappi verði vegna veðuráhrifa fyrir ákveðna gerð ökutækis.

Efnisyfirlit

FORMÁLI	3
SAMANTEKT	4
EFNISYFIRLIT	5
1 INNGANGUR	6
1.1 MARKMIÐ.....	6
1.2 FRAMKVÆMD ANNARS ÁFANGA	6
2 SLYSARANNSÓKNIR	7
2.1 ATHUGANIR VIÐ KJALARNES.....	8
2.1.1 Staðhættir.....	8
2.1.2 Gögn frá veðurstöð.....	8
2.1.3 Umferðarslys á Kjalarnesi 1999-2003.....	8
2.2 ATHUGANIR VIÐ DRAUGAHLÍÐARBREKKU	19
2.2.1 Staðhættir.....	19
2.2.2 Gögn frá veðurstöð.....	19
2.2.3 Umferðarslys í Draugahlíðabrekku 1999 - 2003	19
2.3 SAMANBURÐUR Á ATHUGUNARSTÖÐUM.....	25
2.3.1 Samanburður á vindaslysum	25
2.3.2 Samtímis óveður á Kjalarnesi og undir Hafnarfjalli.....	30
2.4 HRAÐI ÖKUMANNA, ALDUR ÞEIRRA OG VINDHRAÐI Í SLYSI.....	32
3 VINDMÆLINGAR Á VEGUM	38
3.1 VINDMÆLING 14.03.2005.....	39
3.2 VINDMÆLING 17.03.2005.....	43
3.3 VINDMÆLING 28.03.2005.....	47
4 REIKNILÍKAN TIL AÐ META ÖRYGGI ÖKUTÆKJA Í VINDI	50
5 UMRÆÐA	51
6 ÞAKKIR	52
HEIMILDIR	53
VIÐAUKI A – VINDMÆLINGAR Á VEGUM – MÆLIGÖGN FRÁ FÆRANLEGU VINDMÆLITÆKI	54
VIÐAUKI A1 -VINDMÆLING 14.03.2005.....	54
VIÐAUKI A2 - VINDMÆLING 17.03.2005	70
VIÐAUKI B – REIKNILÍKAN TIL AÐ META ÖRYGGI ÖKUTÆKJA Í VINDI – RÁÐSTEFNUGREIN	91

Umferðarslys og vindafar

Áfangaskýrsla II

1 Inngangur

1.1 MARKMIÐ

Meginmarkmið verkefnisins er að skapa forsendur til þess að fækka umferðarslysum á Íslandi sem að einhverju leyti má rekja til vindafars. Rannsaka skal umferðarslys þar sem vindur er hugsanleg meðverkandi orsök og tengsl þessara slysa við aðra umhverfispætti. Við úrvinnslu verkefnisins er sérstök áhersla lögð á valda athugunarstaði.

Verkefnið byggir á:

- Greiningu á staðháttum, þar á meðal legu og gerð vegar.
- Greiningu á vindafari og öðrum þáttum sem geta skapað varhugaverðar aðstæður á athugunarstöðum.
- Greiningu á slysum þar sem ætla má að vindur sé meðverkandi orsök.

Um bakgrunn og aðdraganda þessa verkefnis er fjallað í áfangaskýrslu I, þar sem fyrsta áfanga verkefnisins er lýst, en þar var einkum fjallað um samband umferðarslysa og vindaðstæðna á þjóðveginum við Hafnarfjall.

Niðurstöður þess áfanga gáfu ástæðu til vinna frekar að ýmsum þáttum sem tæpt var á þar, meðal annars að bæta við athugunarstöðum og þróa áfram mælinga- og rannsóknaraðferðir til greiningar á tengslum staðbundinna aðstæðna og umferðaröryggis.

1.2 FRAMKVÆMD ANNARS ÁFANGA

Öðrum áfanga verkefnisins má skipta í þrjá þætti, það er:

- Slysarannsóknir
- Vindmælingar á vegum
- Þróun reiknilíkans til að meta öryggi ökutækja í vindi

Eru þessir verkþættir í samræmi við þær áætlanir sem fram komu í áfangaskýrslu I og framhaldsumsókn.

Í þessum öðrum áfanga var bætt við athugunarstöðum og tekin fyrir umferðarslys á Hringvegi um Kjalarnes og um Draugahlíðabrekku til viðbótar umferðarslysum við Hafnarfjall. Markmiðið var að stækka slysagagnagrunninn og fjölga þeim slysum í gagnagrunninum sem tengjast vindaðstæðum og fá þannig betra yfirlit yfir tengsl milli vindafars, ökutækjaflokka, færðar og staðhátta á athugunarstöðum, sem gefur aukna möguleika til að greina betur hina ýmsu áhrifaþætti.

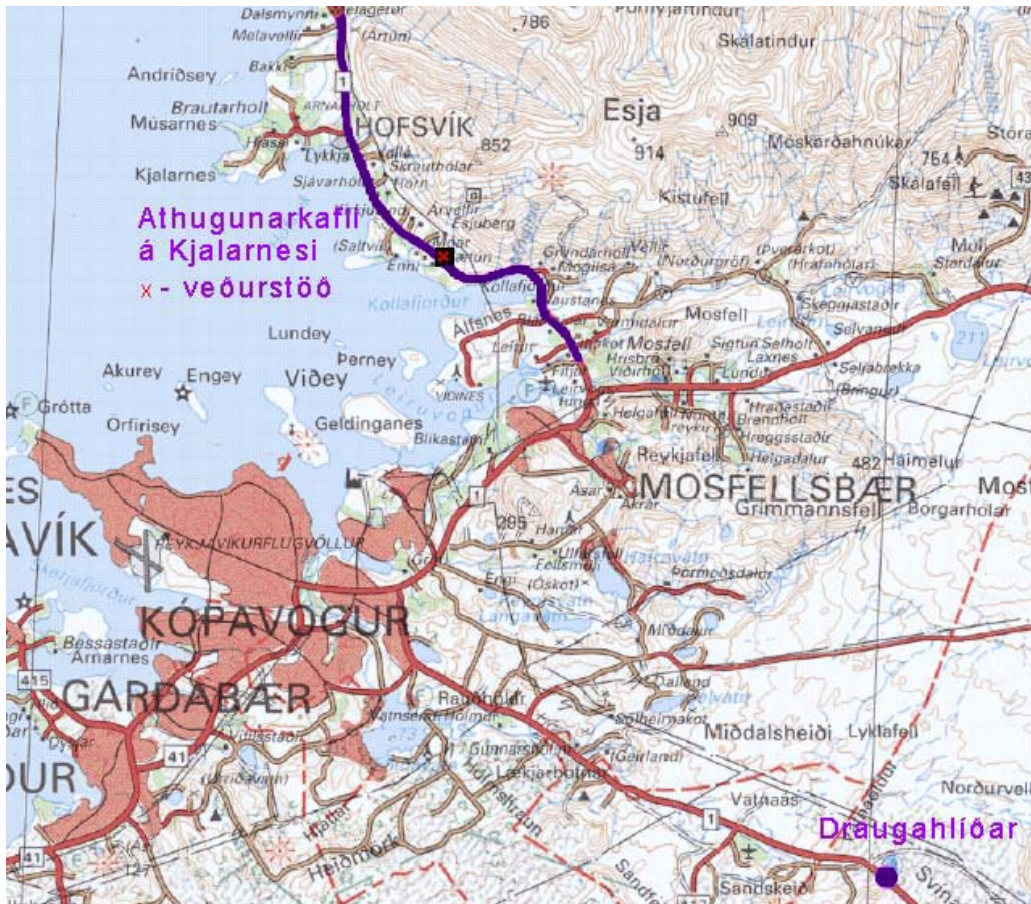
Einnig var vindmælingum á vegum með færanlegum vindnema, sem prófaðar voru í fyrsta áfanga verkefnisins haldið áfram eins og ráðgert var, til að greina betur vindaðstæður undir Hafnarfjalli. Jafnframt var mælt á Kjalarnesi og Suðurlandsvegi frá Reykjavík til Selfoss. Þessar mælingar má nýta til að fá betri yfirsýn yfir hugsanlegar leiðir til úrbóta, en einnig til þess að yfirfara og staðfesta gæði frekari tölvuhermana eða annarra reiknilíkana sem lýsa áhrifum vinds á ökutæki.

Sem hluta af öðrum áfanga var einnig unnið að endurbótum á reiknilíkani (sjá [2]) sem lýsir samspili vinds, ökutækis og vegar. Reiknilíkanið gerir kleift að meta líkurnar á því að ökutæki verði óstöðugt þ.e. velti eða skríði vegna samverkandi áhrifa ökuhraða, veghalla, núningsmótstöðu og vindaðstæðna. Tilgangurinn var að kanna frekar áhrif hinna ýmsu þátta sem hafa áhrif á öryggi ökutækja í vindi.

2 Slysarannsóknir

Í öðrum áfanga þessa verkefnis eru tveir staðir á Hringveginum til athugunar; annars vegar Kjalarnes og hins vegar Draugahlíðarbrekka. Þessir staðir þykja áhugaverðir fyrir þetta verkefni þar sem mikil umferð er um þá og reynsla hefur sýnt að þar hefur orðið fjöldi slysa og óhappa sem tengja má hvössum vindum.

Á sama hátt og í fyrsta áfanga var fenginn slysagagnagrunnur Umferðarstofu fyrir athugunarstaðina og hann tengdur við mælingar úr veðurstöðum Vegagerðarinnar. Vegagerðin rekur veðurstöð á Kjalarnesi en næsta stöð við Draugahlíðarbrekkuna er stöð Vg við Hringveginn á Sandskeiði sem liggur um tvo kílómetra frá Draugahlíðarbrekku. Reynslan sem fékkst við framkvæmd fyrsta áfanga er nýtt við úrvinnslu gagna á þessum stöðum og niðurstöður frá öllum þremur athugunarstöðum eru bornar saman. Eins og áður er miðað við það að vindur geti hugsanlega verið meðverkandi orsök slyss ef 10 mínútna meðalvindhraði er 10 m/s eða hærrí.



Mynd 1. Athugunarstaðir fyrir slysgreiningu í öðrum áfanga verkefni, Kjalarnes og Draugahlíðar.

2.1 ATHUGANIR VIÐ KJALARNES

2.1.1 Staðhættir

Hringvegurinn frá Kollafirði að Hvalfirði liggur við rætur Esjunnar og þar er algengt að hvassir vindar frá fjallinu valdi truflunum á umferð og slysum. Ákveðið var að taka til greina öll skráð slys frá hæðinni norðan Leirvogsár og að Hvalfjarðargöngum að frátöldum slysum sem tengjast göngunum sjálfum og gangnamunnum. Kafliinn sem er til skoðunar er því um 14 km langur og ljóst að líklega gæti áhrifa vinds mismikið á athugunarkaflanum.

2.1.2 Gögn frá veðurstöð

Veðurstöð Vg stendur skammt norðaustan vegar undir Þverfelli í Esju. Til eru samfelld vindagögn frá stöðinni allt frá síðari hluta ársins 1998, því hefur athugunartímabilið verið ákveðið frá ársbyrjun 1999 og út árið 2003 eða alls 5 ár.

2.1.3 Umferðarslys á Kjalarnesi 1999-2003

Umferðartölur frá vegagerðinni (www.vegag.is) sýna umferð á Hringveginum á Kjalarnesi ásamt aukningu á umferðinni frá árinu 2000, sjá töflu Tafla 1.

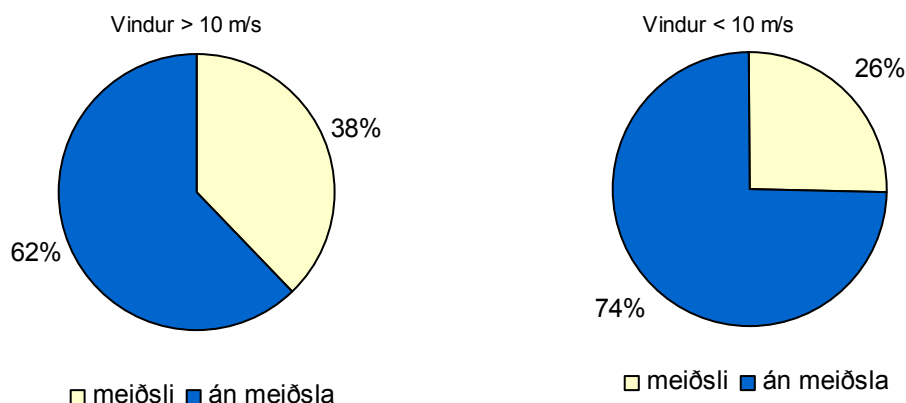
Tafla 1. Umferðartölur frá Kjalarnesi.

ár	Meðal sólarhringsumferð (SDU) júní til september	Meðal sólarhringsumferð yfir árið (ÁDU)	aukning ÁDU
2000	6055	4503	
2001	6576	4954	10%
2002	6686	5116	14%
2003	7013	5283	17%

Á athugunartímabilinu, janúar 1999 til desember 2003 urðu 127 umferðarslys á vegkaflanum frá Hvalfjarðargöngum að Leirvogsa. Fjöldi slysa þar sem skráður meðalvindhraði í veðurstöð er 10 m/s eða hærrí var 45 eða um 35% af öllum slysum. Stuðst verður við skilgreiningu úr áfangaskýrslu I og þessi slys nefnd vindaslys. Lítið er svo á að í þessum slysum geti vindur verið meðverkandi orsök þótt í þessum flokki leynist óhjákvæmilega slys þar sem litlar líkur eru á því að vindur hafi verið áhrifavaldur. Í eftirfarandi töflu (Tafla 2) er yfirlit yfir gerð slysa, meiðsli og það hvort um vindaslys geti verið að ræða. Hér er það talið til meiðsla hvort sem um ræðir lítil eða alvarleg meiðsli.

Tafla 2. Flokkun og meiðsli í umferðarslysum á Kjalarnesi 1999-2003 eftir því hvort vindur er yfir eða undir 10 m/s.

Tegund slyss	vindur > 10 m/s			vindur < 10 m/s			alls		
	meiðsli	án meiðsla	alls	meiðsli	án meiðsla	alls	öll slys	meiðsli	án meiðsla
Gatnamót	1	0	1	2	1	3	4	3	1
Framúrakstur	2	1	3	1	4	5	8	3	5
Annað	1	1	2	0	8	8	10	2	8
Mæting	6	2	8	2	2	4	12	8	4
Ekið á dýr	0	0	0	0	6	6	6	0	6
Ekið á hlut	0	10	10	0	20	20	30	0	30
Aftanákeyrsla	0	2	2	5	7	12	14	5	9
Útafakstur	5	7	12	10	12	22	34	15	19
Veltur á vegi	2	5	7	1	1	2	9	3	6
Alls	17	28	45	22	60	82	127	39	88



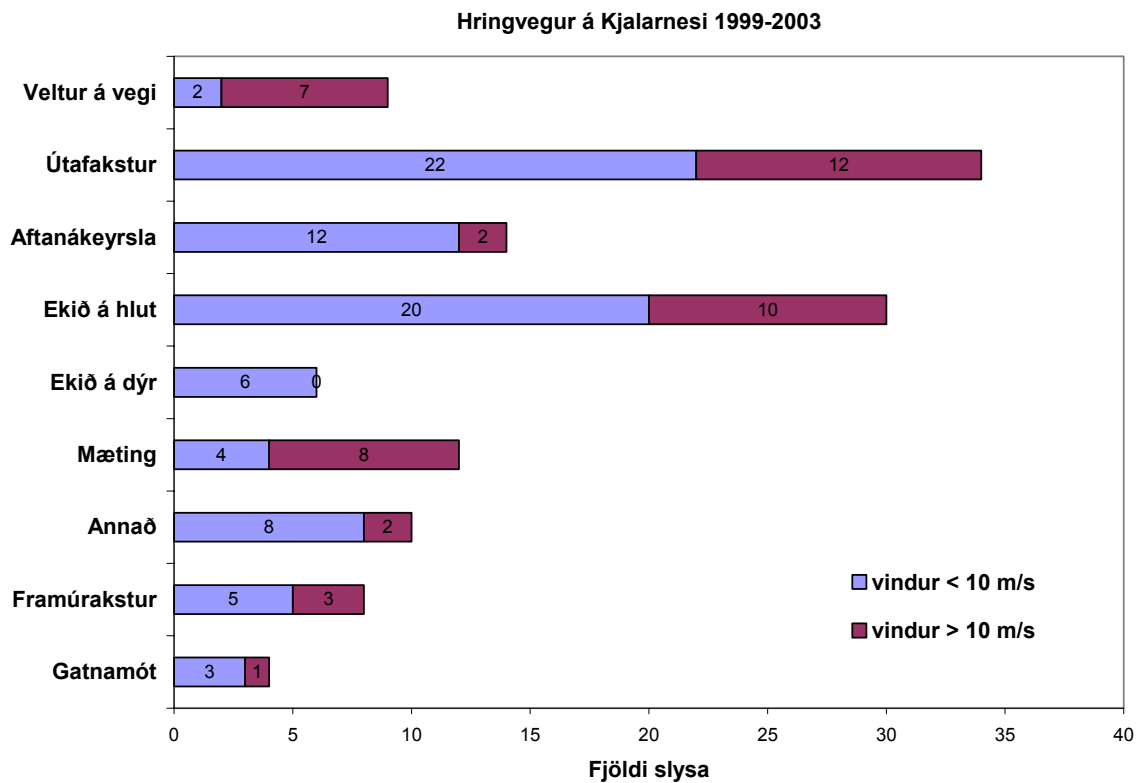
Mynd 2 Hlutfall slysa með meiðslum af heildar slysafjölda eftir því hvort um er að ræða vindaslys eða ekki.

Mynd 2 Mynd 2 sýnir samanburð á hlutfalli slysa með meiðslum eftir því hvort um vindaslys var að ræða eða þegar vindhraði var undir 10 m/s. Hlutfall slysa með meiðslum virðist nokkuð hærra fyrir vindaslys en fyrir slys við vindhraða undir 10 m/s, eða 38% á móti 26%. Niðurstöður úr Umferðarslys og vindafar, Áfangaskýrsla I, sýna að fyrir skoðun á umferðarslysum við Hafnarfjall er útkoman svipuð. Þar er hlutfall slysa með meiðslum 33% fyrir vindaslys og 23% fyrir slys við vindhraða undir 10 m/s.

Líkur á meiðslum í umferðarslysum við mismunandi veðuraðstæður hafa verið skoðaðar í Stóra-Bretlandi fyrir England og í Wales (Edwards, J.B. [4]). Niðurstöðurnar sýndu að í sumum sýslum lækkaði hlutfall slysa með meiðslum í vindasömum veðrum í samanburði við slys við bestu aðstæður en í jókst í öðrum sýslum. Á hinn bóginn var hlutfall slysa með meiðslum almennt hærra í regni. Vísbendingar fundust um að í þeim héruðum sem alla jafna eru ekki eins vindasöm og önnur hækkar hlutfall slysa með meiðslum, og setur höfundurinn fram þá tilgátu að þar sem síður er von á hvössum vindum séu ökumenn ekki eins varir um sig þegar slíkar aðstæður skapast og breyti því síður aksturslagi í hvössum veðrum en ökumenn á stöðum þar sem hvassir vindar eru tíðari.

Þessi skýring á að öllum líkindum ekki við um Kjalarnesið þar sem langflestir ökumenn landsins þekkja til vindasamra aðstæðna þar og hafa ekið um svæðið í ýmsum veðrum. Á grundvelli gagna frá Kjalarnesi var gerð lausleg athugun á því að hvaða leyti reynsla ökumanna getur haft áhrif á líkur þess að þeir lendi í slysi við í hvössum vindum, en hún byggist á því skoða aldur ökumanns, ökuhraða og vindhraða við slys (sjá Kafla 2.4).

Fjöldi slysa af hverri tegund, eftir því hvort um vindaslys er að ræða eða ekki, má sjá á Mynd 3. Útafakstur er algengasta slysatilfallið á Kjalarnesi tímabilið 1999 - 2003, en þá urðu 34 slík slys og þar af 12 vindaslys. Einnig er algengt að slys verði þegar ekið er á hlut á akbraut, skráð eru 30 slík slys á athugunartímabilinu, þar af 10 vindaslys. Í þessum slysaflokki er oft um það að ræða að ekið er á hluta af farmi sem fallið hefur af vörubifreiðum. Hlutfall vindaslysa í þessum tveimur tilfellum er svipað, eða um 1/3. Tólf umferðarslys eru flokkuð undir mætingu, þar af eru 8 vindaslys. Athygli vekur að hlutfall vindaslysa er hátt þegar skráð er að ökutæki hafi oltið á vegi eða 7 vindaslys af 9 slysum. Af þessum vindaslysum eru 4 ökutæki með einhverskonar eftirvagn, í hinum þremur er um hjólhýsi, hópbifreið og sendibifreið að ræða.



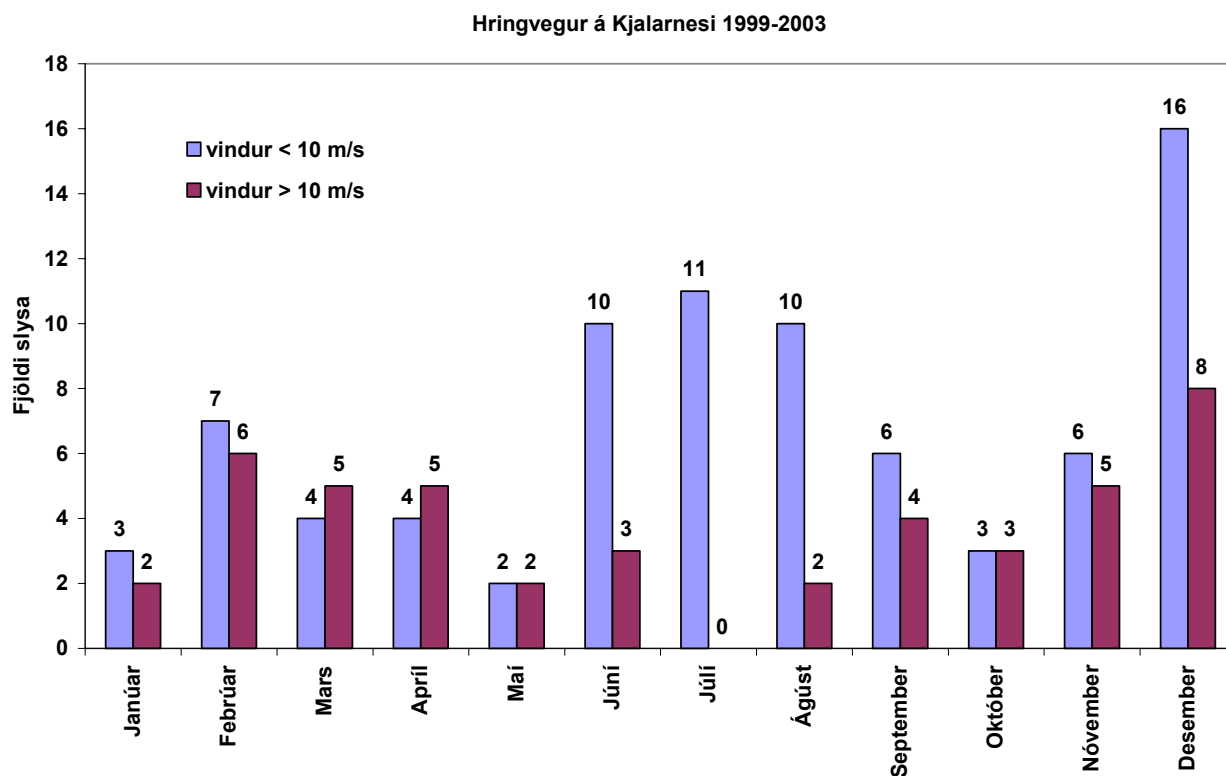
Mynd 3 Umferðarslys á Kjalarnesi 1999-2003. Tegundir slysa og vindhraði.

Tafla 3 sýnir færð á tíma slyss fyrir algengustu vindaslysin á Kjalarnesi á athugunartímabilinu.

Tafla 3. Algengustu vindaslysin á Kjalarnesi flokkuð eftir færð.

Tegund slyss	Þurrt	Blautt	Hálka/Ísing	Ekki vitað
útafakstur	2	5	3	2
ekið á hlut	4	2	0	4
mæting	1	4	3	0
veltur	5	1	1	0

Dreifingu umferðarslysa á mánuði ársins fyrir allt athugunartímabilið má sjá á Mynd 4. Fjöldi vindaslysa í mánuði var meiri yfir vetrarmánuðina en yfir sumartímann, en 33 af 45 vindaslysum urðu frá september fram í mars á þessum fimm árum.



Mynd 4. Umferðarslys á Kjalarnesi 1999-2003. Dreifing slysa á mánuði ársins.

Næst var könnuð dreifing vindaslysa á mánuði ársins þar sem slysin voru flokkuð eftir færð (Tafla 4). Alls urðu 14 slys á blautum vegi, 16 á þurrum, 8 slys eru skráð í hálku eða snjó og í 7 slysum er færð óskráð.

Tafla 4. Hringvegur á Kjalarnesi 1999-2003. Dreifing vindaslysa á mánuði ársins eftir færð.

Færð	jan	feb	mars	apríl	maí	júní	júlí	ágúst	sept	okt	nóv	des	alls
blautt	1	2	1	2	0	0	0	1	0	1	3	3	14
þurrt	0	2	1	1	2	2	0	1	4	0	2	1	16
hálka/snjór	1	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8
ekki vitað	0	0	1	2	0	1	0	0	0	2	0	1	7
samtd.	2	6	5	5	2	3	0	2	4	3	5	8	45

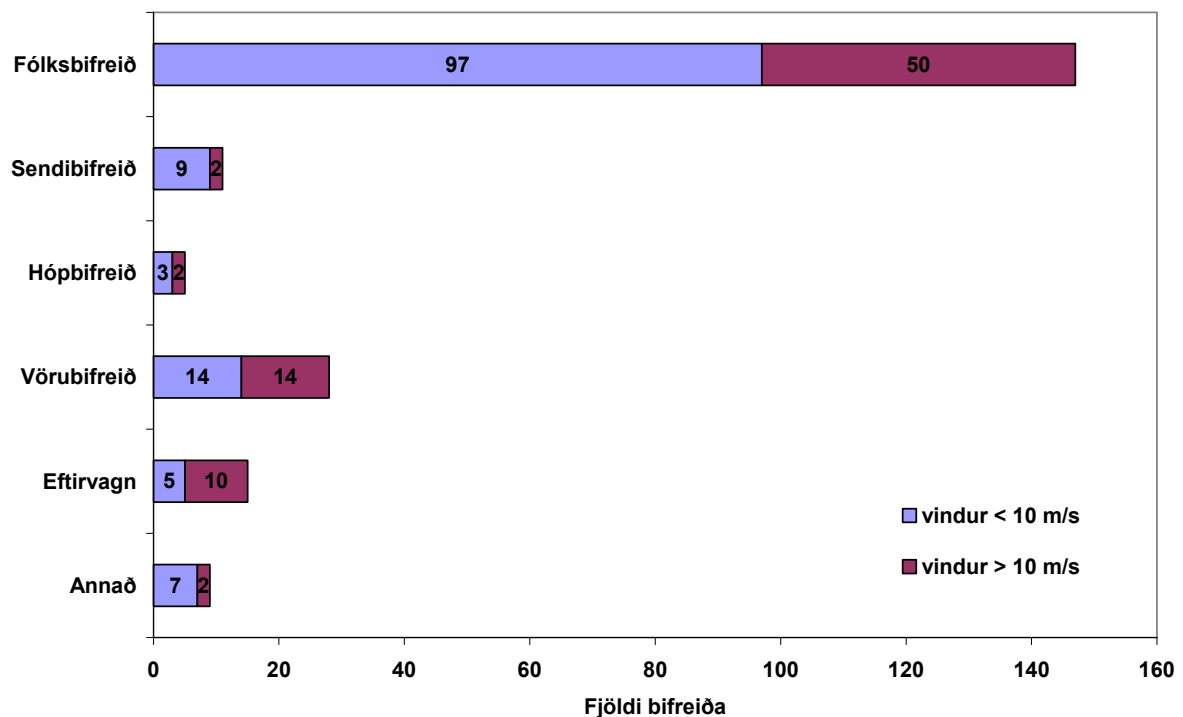
Samanborið við niðurstöður frá Hafnarfjalli þar sem aðeins þrjú slys af 18 eða um 17 % slysa urðu á þurrum vegi þá virðist vera á ferðinni hærra hlutfall vindaslysa á þurrum vegi undir Kjalarnesi eða 35 %.

Hér að neðan má sjá yfirlit yfir ökutækjaflokka allra ökutækja sem við sögu komu í slysum á Kjalarnesi 1999-2003, sjá Töflu Tafla 5 og Mynd 5. Í allt komu 215 ökutæki við sögu í 127 slysum og þar af 80 ökutæki í 45 vindaslysum. Eftirtektarvert er hátt hlutfall vindaslysa af heildar slysafjölda eftirvagna og vörubifreiða.

Tafla 5. Ökutæki í umferðarslysum á Kjalarnesi 1999-2003 flokkuð eftir tegund.

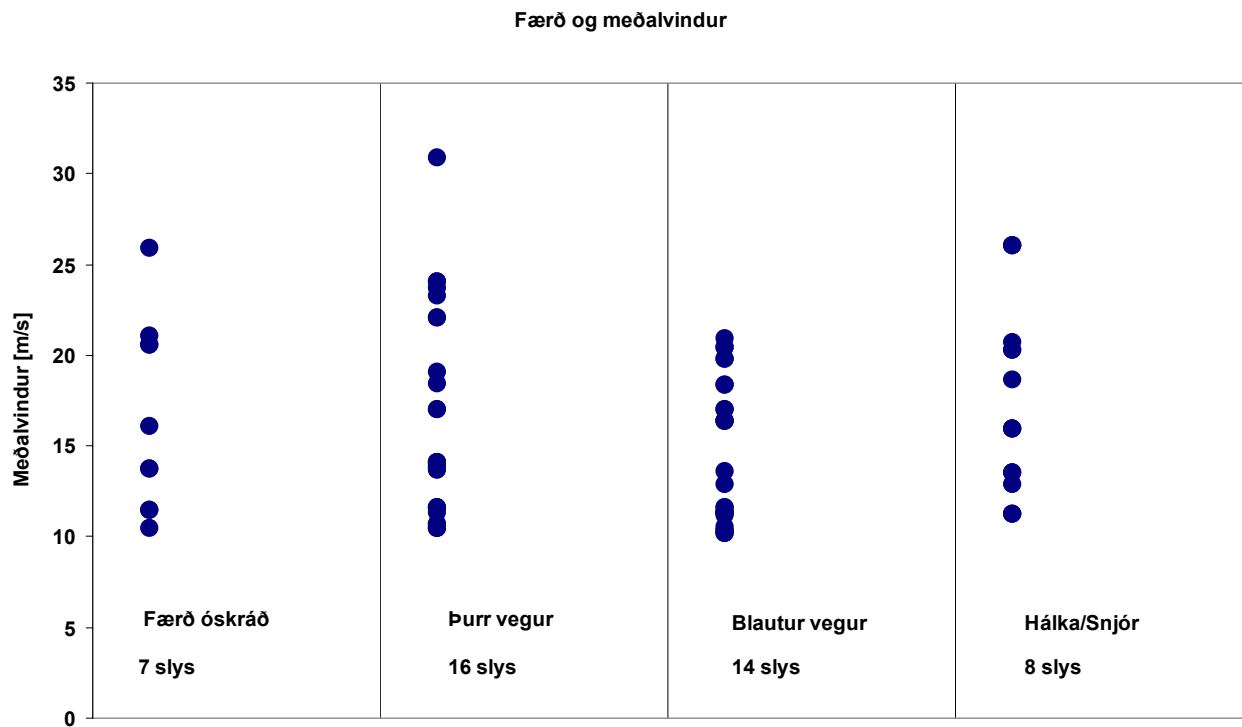
Tegund bifreiðar	vindur < 10 m/s	vindur > 10 m/s	fjöldi	hlutfall vindaslysa
Annað	7	2	9	22%
Eftirvagn	5	10	15	67%
Vörubifreið	14	14	28	50%
Hópbifreið	3	2	5	40%
Sendibifreið	9	2	11	18%
Fólksbifreið	97	50	147	34%
Alls	135	80	215	37%

Hringvegur á Kjalarnesi 1999-2003

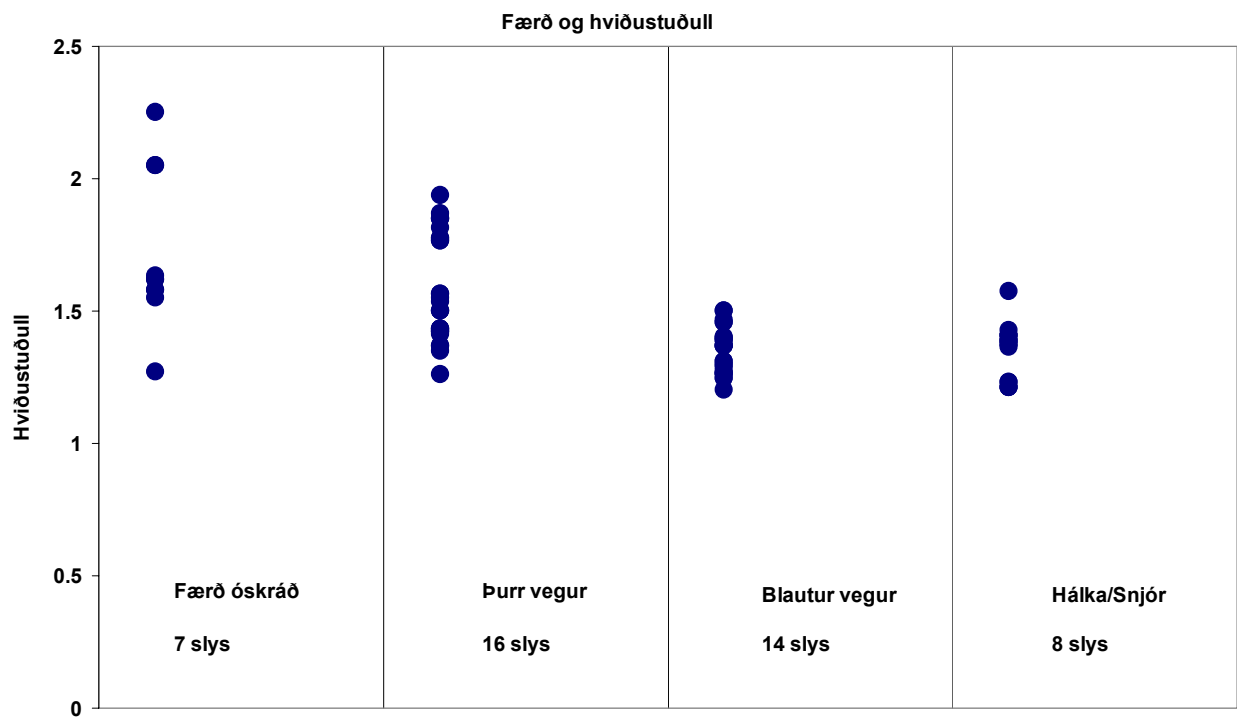


Mynd 5. Umferðarslys á Kjalarnesi 1999-2003. Tegundir ökutækja og vindhraði.

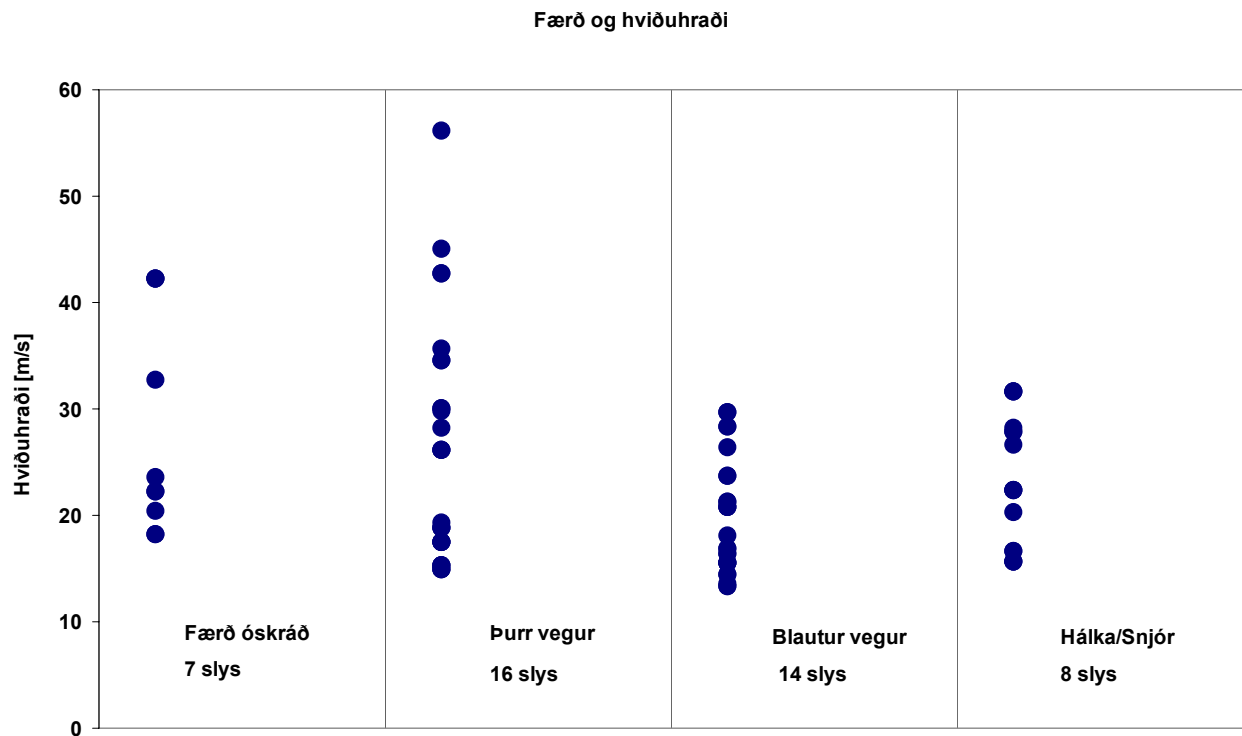
Slys sem urðu við meðalvindhraða 10 m/s eða hærri voru flokkuð eftir lýsingu á færð eins og hún var skráð í lögregluskýrslu. Þessar upplýsingar ásamt tengingu við 10 mínútna meðalvindhraða, hæstu 10 mínútna hviðu og hviðustuðul eru sýndar á næstu þremur myndum hér á eftir (Mynd 6 -Mynd 8).



Mynd 6. Meðalvindhraði og færð í vindaslysum (yfir 10 m/s) á Kjalarnesi 1999-2003.



Mynd 7. Hviðustuðull og færð í vindaslysum á Kjalarnesi 1999-2003.



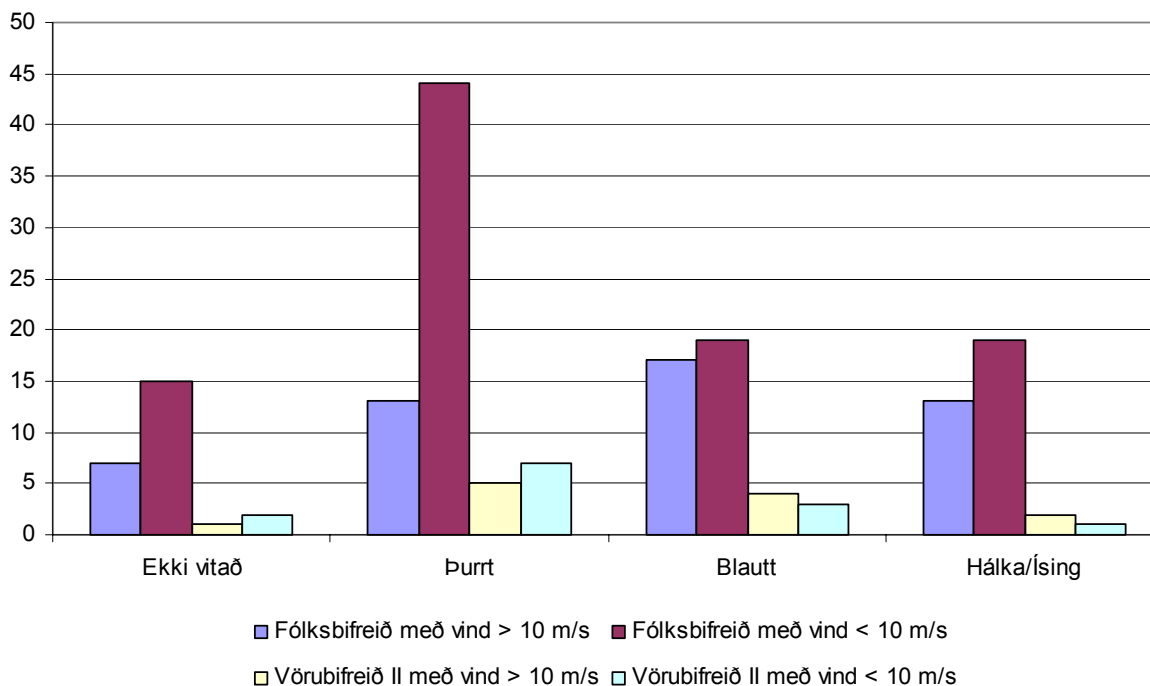
Mynd 8. Hviðhraði og færð í vindaslysum á Kjalarnesi 1999-2003.

Lítill munur er á dreifingu 10 mínútna meðalvindhraða (Mynd 6) á milli færðarflokka en hins vegar er áberandi að nokkur slysanna sem orðið hafa á þurrum vegi urðu við háa hviðu og háan hviðustuðul.

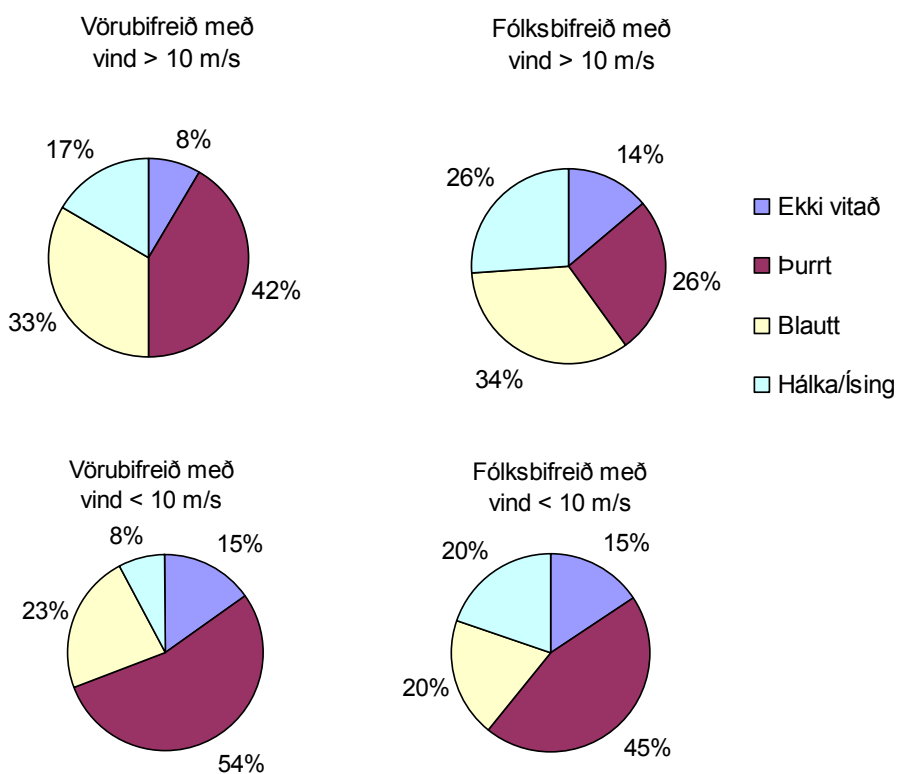
Slys sem orðið hafa á blautum vegi eða í hálku eða snjó urðu við minni meðalvindhraða og hviðhraða en slys á þurrum vegi. Öll slys sem urðu á blautum vegi eða í hálku eða snjó verða við hviðhraða um eða undir 30 m/s.

Skoðum nánar tvo mjög ólíka ökutækjaflokka: fólksbifreið og vörubifreið II (heildarþyngd yfir 12 tonn). Skoðum samband færðar, vindhraða og ökutækjaflokka.

Kjalarnes, slys 1999-2003: Samanburður tveggja ökutækjaflokka



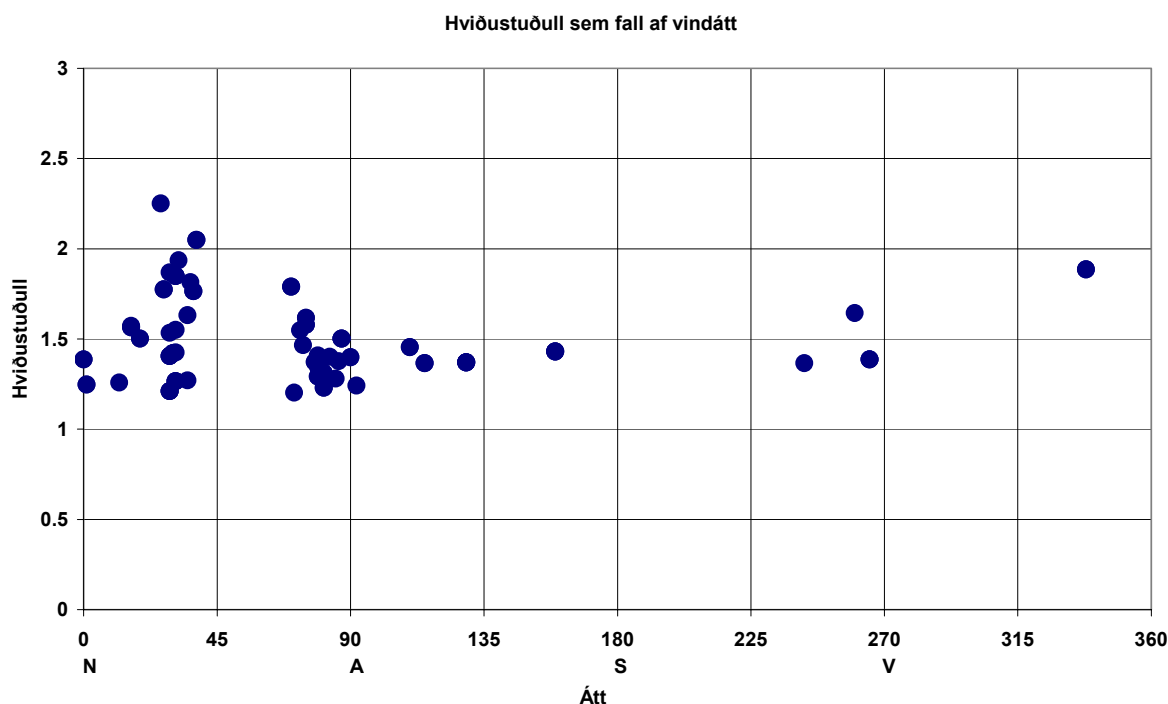
Mynd 9. Samanburður fólksbíla og vörubífiða II. Slys flokkuð eftir færð og vindhraða.



Mynd 10. Færð á vegi við slys á Kjalarnesi 1999-2003. Hlutfallsskipting slysa eftir færð fyrir fólksbíla og vörubífiða II.

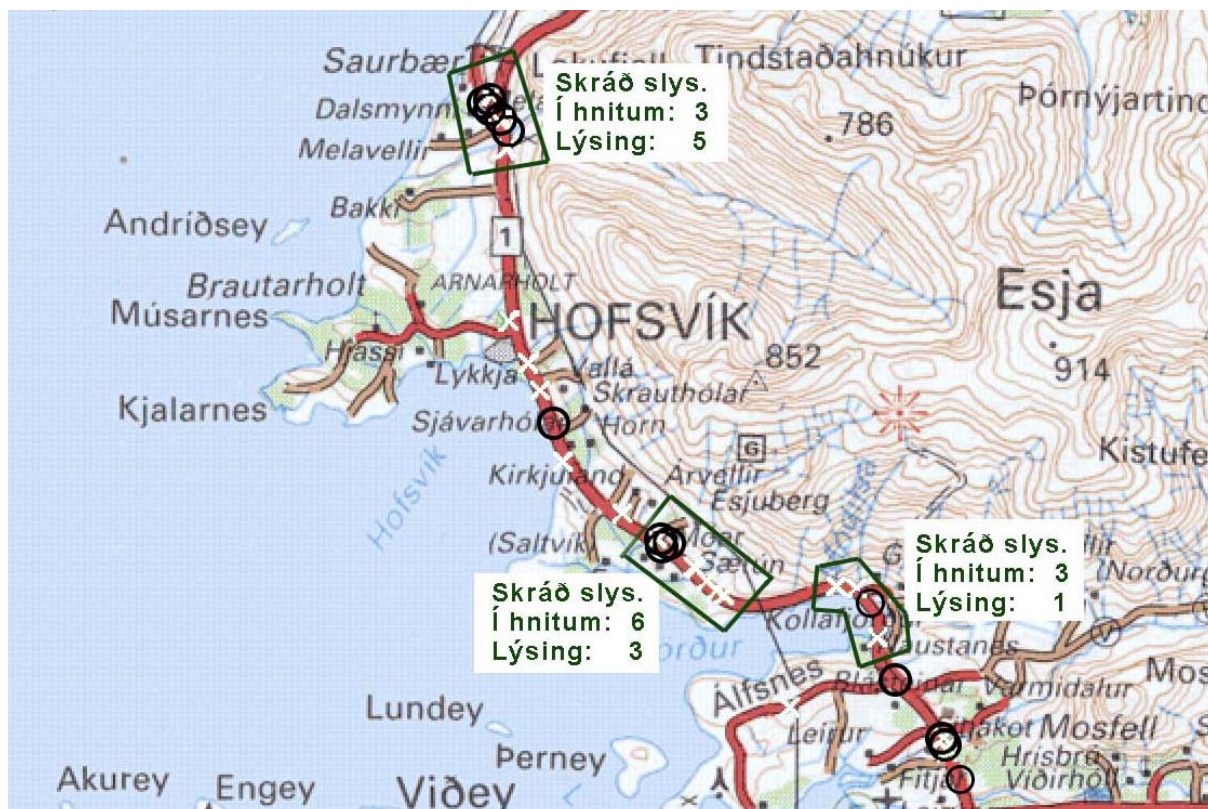
Ef við skoðum muninn á vindaslysum og slysum með vind < 10 m/s fyrir fólksbifreiðar eftir færð, þá er hlutfall vindaslysa sem verða í bleytu eða hálfu 60% allra vindaslysa en hlutfall þessara slysa undir 10 m/s er 40%. Fyrir vörubifreiðar II er hlutfall vindaslysa í bleytu eða hálfu 50% en 31% fyrir slys við vindhraða undir 10 m/s.

Upplýsingar um vindátt og hviðustuðul á tíma slyss má sjá á Mynd 11. Mikill meirihluti slysa verður þegar vindur blæs úr NNA-NA (20° - 40°) og ANA-A (70° - 90°). Þrjú slys verða við mjög háan hviðustuðul, hærrí en 2,5. Vindur blæs þá úr SA í einu tilvikanna og NV í hinum tveimur. Í öllum þessum tilvikum er meðalvindur undir 10 m/s og því verður hviðustuðullinn þetta hár. Nokkur slys eiga sér stað við all háan hviðustuðul, á bilinu 1,8 og upp í 2,25, í öllum þeim tilvikum ríkir NA átt.



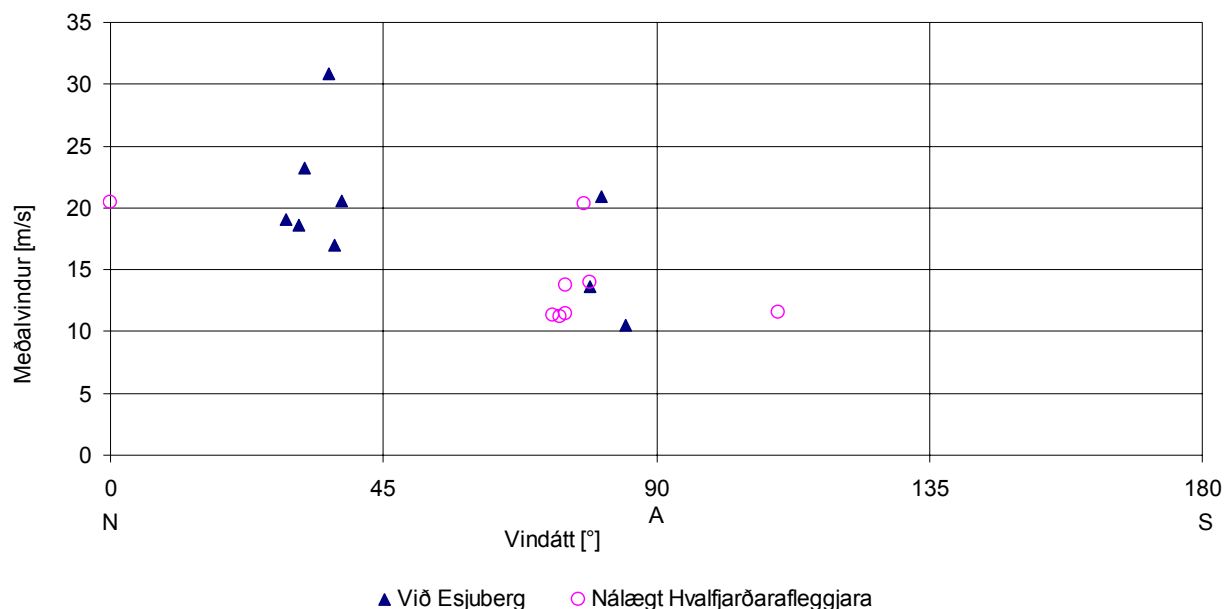
Mynd 11. Samband hviðustuðuls og vindáttar í slysi fyrir vindaslys á Kjalarnesi.

Í slysagagnagrunni Umferðarstofu er í sumum tilfellum staðsetning slyss skráð í hnitum en oft er hægt að staðsetja slysin nokkuð vel út frá skráðri lýsingu úr lögregluskýrslu, í sumum tilfellum er þó engin hnitaskráning og lýsing ekki nógu nákvæm. Mynd 12 sýnir staðsetningu þeirra slysa sem unnt var að staðsetja á veglínunni á Kjalarnesi árin 1999 – 2003. Af 45 vindaslysum var hægt að staðsetja 21 þeirra nákvæmlega með hnitum, 14 vindaslys að auki mátti staðsetja nokkuð nákvæmlega út frá lýsingu. Myndin sýnir að flest vindaslys verða við mynni Blikdals skammt sunnan Hvalfjarðarganga og á svæðinu við veðurstöð Vg í nágrenni Esjubergs. Mynd 13 sýnir svo vindátt í slysi, annars vegar fyrir slys við mynni Blikdals og hins vegar fyrir slysin skammt sunnan Hvalfjarðarganga.



Mynd 12. Staðsetning vindaslysa á Kjalarnesi. X –staðsetning í hnitum (21 slys). O –staðsetning samkvæmt lýsingu (14 slys).

Staðsett vindaslys á Kjalarnesi 1999 - 2003



Mynd 13. Samband meðalvindhraða og vindáttar fyrir 9 vindaslys við Esjuberg og 8 vindaslys sunnan Hvalfjarðarafleggjara, við mynni Blikdals (sjá Mynd 12).

2.2 ATHUGANIR VIÐ DRAUGAHLÍÐARBREKKU

2.2.1 Staðhættir

Draugahlíðar nefnist hraunjaðarinn sem Hringvegurinn liggur upp á rétt austan Litlu kaffistofunnar. Þar fer vegurinn á nokkuð hárrí fyllingu sem magnar áhrif vinda sem leggjast með hraunjaðrinum og þvera veginn. Bláfjallagarðurinn og hraunjaðarinn virðast móta vindstreymi á þessum stað í þá veru að algengt er að í hvasuviðri liggi vindstrengur þvert á veg frá suðvestri eða norðaustri. Sérstaklega verður vart við þessa vindstrengi þegar ekið er vestur af hraunbrúninni en þá hafa ökumenn greint frá því að skyndilega lendi bifreið í vindstreng. Líkur eru á því að aðdragandinn sé meiri þegar ekið er til austurs upp brekkuna og að áhrifi vinds birtist því ekki eins skyndilega þegar ekið er í þá átt.

Tafla 6. Umferðartölur frá Draugahlíðarbrekku.

ár	Meðal sólarhringsumferð (SDU) júní til september	Meðal sólarhringsumferð yfir árið (ÁDU)	aukning ÁDU
2000	5598	7435	
2001	5832	7742	4%
2002	6006	7809	5%
2003	6246	8121	9%

2.2.2 Gögn frá veðurstöð

Vindagögn eru til frá veðurstöðinni á Sandskeiði frá árinu 1999. Hafa ber í huga að veðurstöðin liggur um 2 km vestar en Draugahlíðar og vindstreymi þar er ekki mótað af hraunjaðri á sama hátt og í Draugahlíðum. Nokkru getur því munað bæði í vindátt og vindstyrk á milli þessara staða, en engu að síður ættu mælingar í veðurstöðinni að gefa góðar vísbendingar um vindafar í Draugahlíðum.

2.2.3 Umferðarslys í Draugahlíðarbrekku 1999 - 2003

Á athugunartímabilinu urðu 15 umferðarslys í Draugahlíðarbrekku. Algengastar voru aftanákeyrslur og mætingarslys eða 4 slys í hvorum flokki. Næst kom útafakstur en það á við um 3 tilvik. Af þeim 15 slysum sem áttu sér stað á athugunartímabilinu urðu 8 við meðalvindhraða hærri en 10 m/s (mælt við Sandskeið), eða rétt yfir helmingur allra umferðarslysanna. Í eftirfarandi töflu (Tafla 7) er yfirlit yfir tegund slysa, meiðsli og vindhraða.

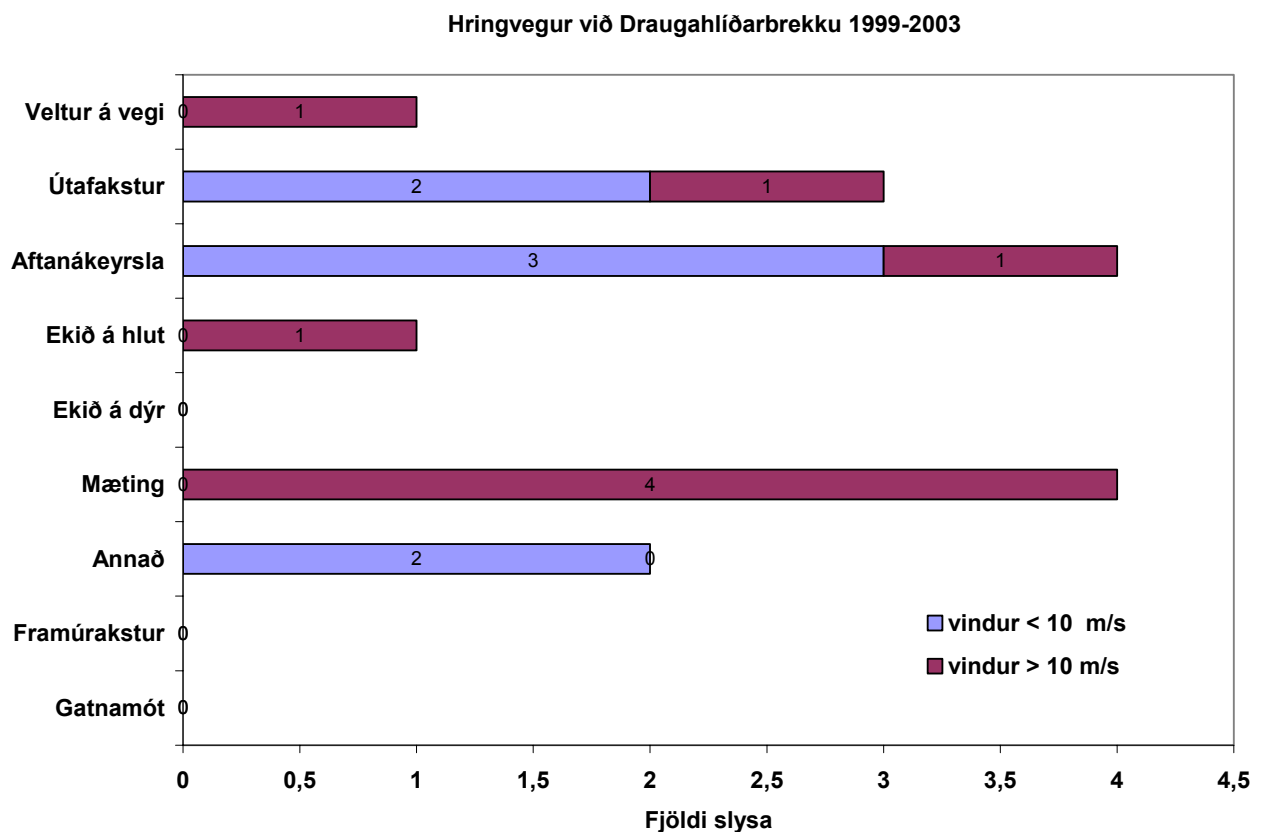
Tafla 7. Flokkun umferðarslysa í Draugahlíðarbrekku 1999-2003.

Tegund slyss	vindur > 10 m/s			vindur < 10 m/s			Alls		
	meiðsli	án meiðsla	alls	meiðsli	án meiðsla	alls	öll slys	meiðsli	án meiðsla
Gatnamót	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Framúrakstur	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Annað	0	0	0	1	1	2	2	1	1
Mæting	4	0	4	0	0	0	4	4	0
Ekið á dýr	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ekið á hlut	1	0	1	0	0	0	1	1	0
Aftanákeyrsla	1	0	1	3	0	3	4	4	0
Útafakstur	1	0	1	2	0	2	3	3	0
Veltur á vegi	1	0	1	0	0	0	1	1	0
Alls	8	0	8	6	1	7	15	14	1

Þegar fjöldi slysa með og án meiðsla er skoðaður er ljóst, hvort sem um er að ræða vindaslys eða ekki, að hlutfall slysa með meiðslum er mjög hátt. Við öll slys, með einni undantekningu þó, verða einhver meiðsli.

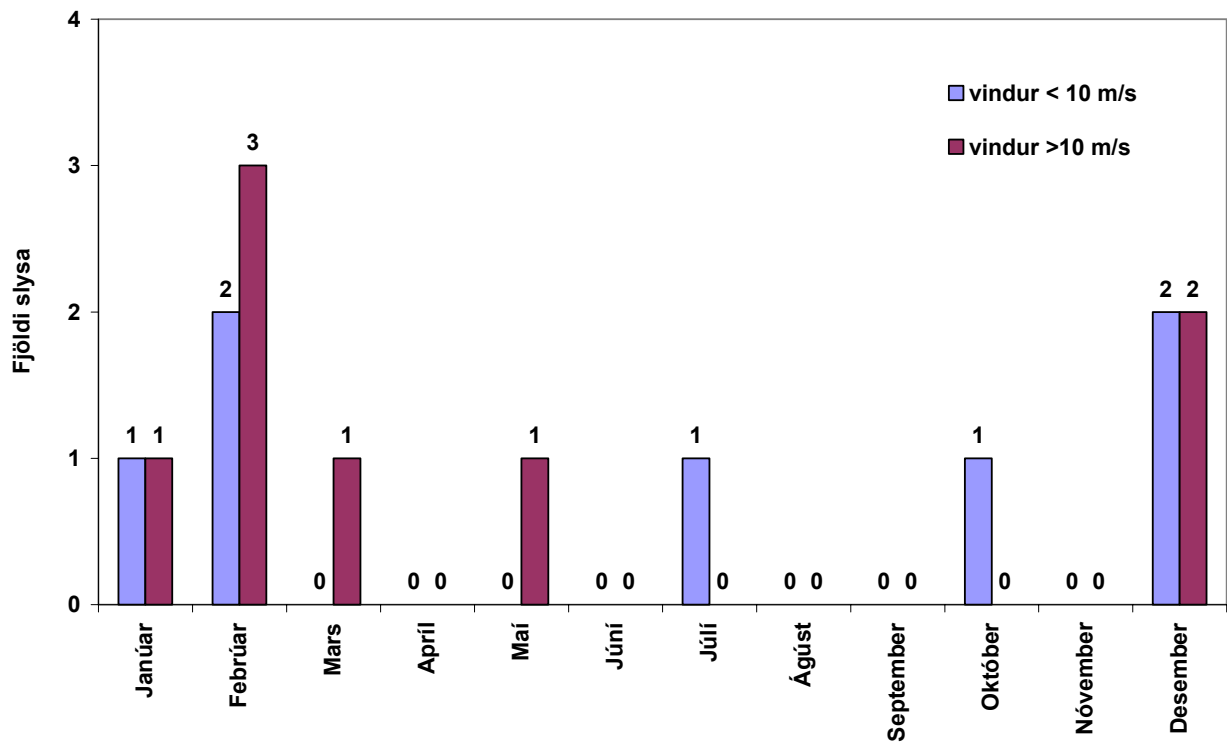
Mynd 14 sýnir skiptingu slysa eftir því hvort líkur eru á að vindur sé meðvirkandi orsök slyss, en á Mynd 15 er dreifing slysa á mánuði ársins. Einnig var dreifing vindaslysa á mánuði ársins þar sem slysin voru flokkuð eftir færð skoðuð (Tafla 8).

Algengustu tegundir slysa í Draugahlíðabrekku eru, eins og áður kom fram, mæting og aftanákeyrsla. Fjöldi slysa á athugunartímabilinu sem urðu þegar tveir bíla mætast er 4 og þetta eru í öllum tilvikum vindaslys. Aftanákeyrslur eru jafnmargar en þau slys virðast ekki að sama skapi tengd háum vindhraða, þar sem 3 þeirra verða við lægri vindhraða en 10 m/s en aðeins eitt við hærri. Erfiðara er að fullyrða um önnur slysatilfelli vegna þess hve fá slys hafa orðið á athugunartímabilinu.



Mynd 14. Umferðarslys í Draugahlíðabrekku 1999-2003. Tegundir slysa og vindhraði.

Hringvegur við Draugahlíðarbrekku 1999-2003

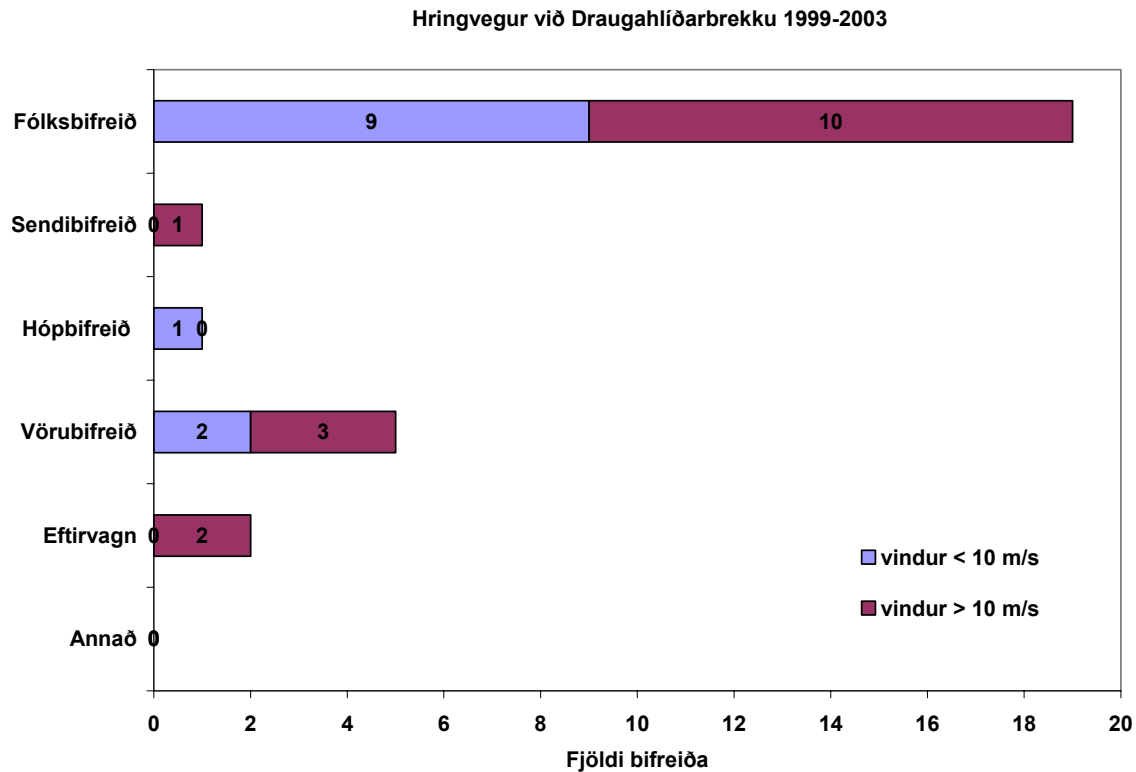


Mynd 15. Umferðarslys í Draugahlíðarbrekku 1999-2003. Dreifing slysa á mánuði ársins.

Tafla 8. Dreifing vindaslysa á mánuði ársins eftir færð.

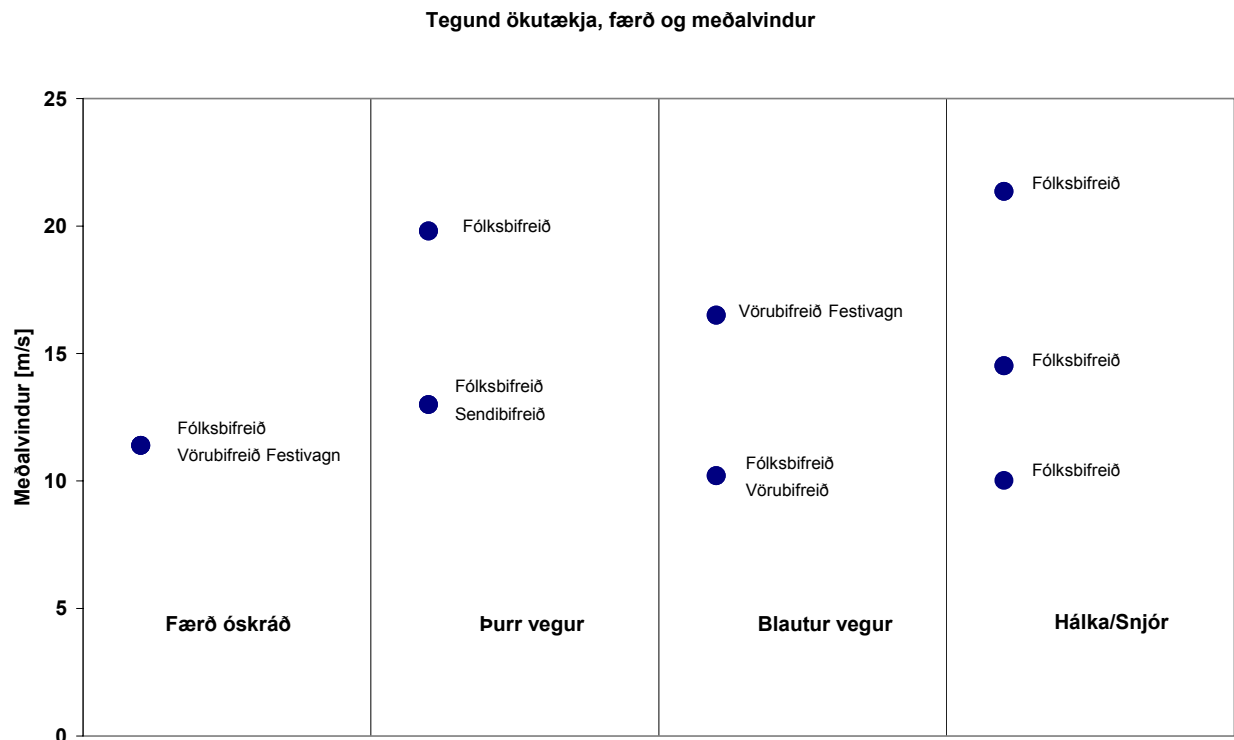
Færð	jan	feb	mars	apríl	maí	júní	júlí	ágúst	sept	okt	nóv	des	alls
blautt	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
þurrt	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
hálka/snjór	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
ekki vitað	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
samtals	1	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	8

Á Mynd 16 er yfirlit yfir ökutækjaflokk allra ökutækja sem við sögu komu í slysum í Draugahlíðarbrekku 1999-2003. Í allt komu 28 ökutæki við sögu í 15 slysum og þar af 16 ökutæki í 8 vindaslysum.

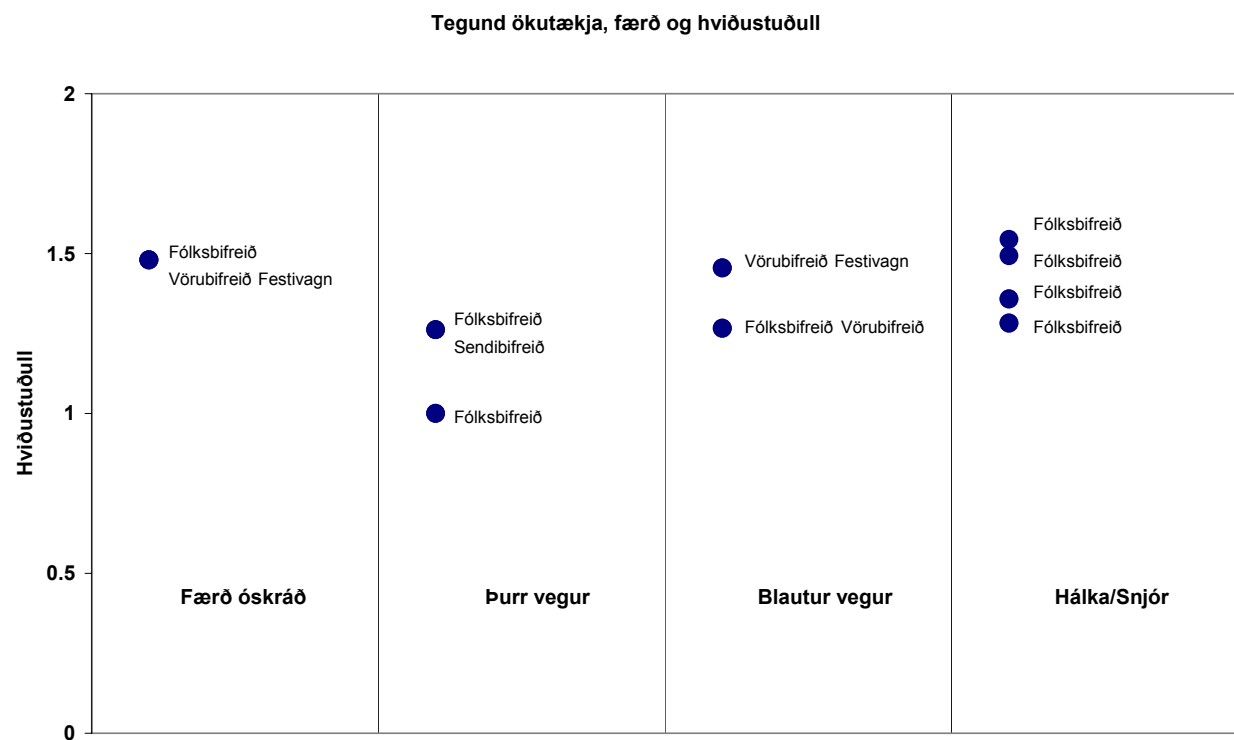


Mynd 16. Umferðarslys við Draugahlíðabrekku 1999-2003. Tegundir ökutækja og vindhraði.

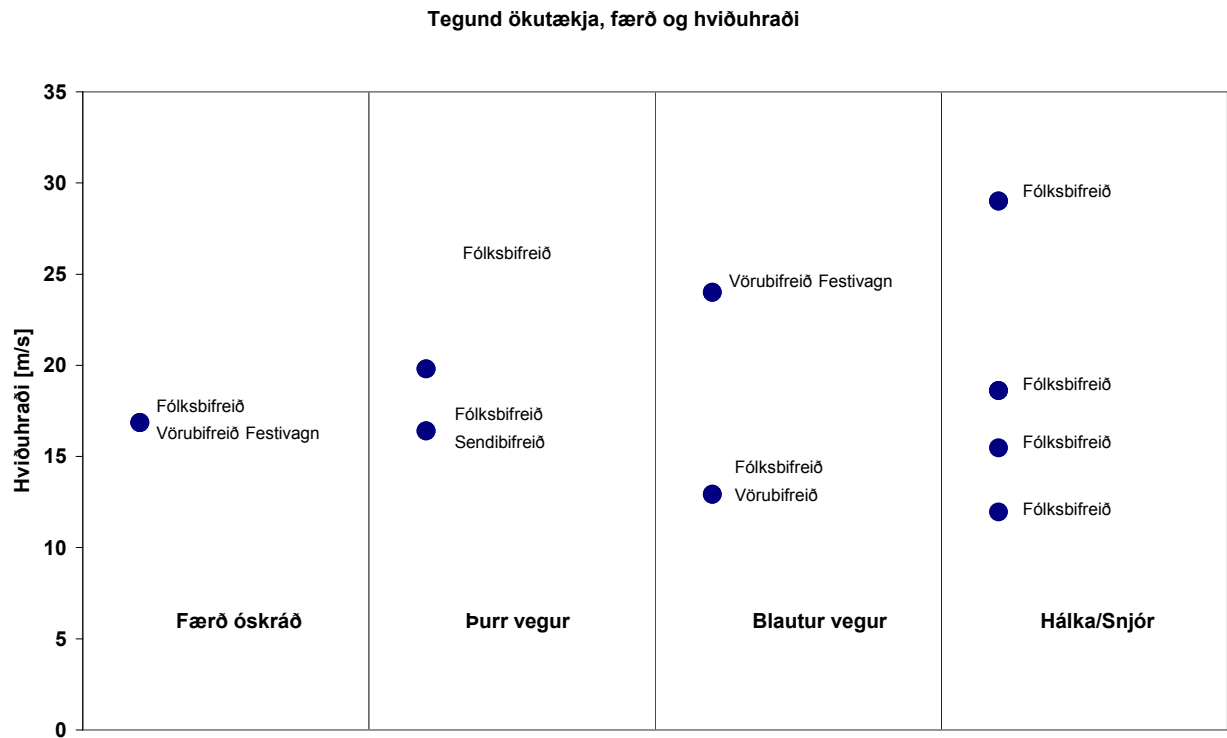
Eins og fyrir aðra athugunarstaði voru slys sem urðu við meðalvindhraða 10 m/s eða hærri flokkuð eftir lýsingu á færð eins og hún var skráð í lögregluskýrslu, og eftir tegund ökutækja. Þessar upplýsingar, fyrir Draugahlíðabrekku, ásamt tengingu við 10 mínútna meðalvindhraða, hæstu 10 mínútna hviðu og hviðustuðul eru sýndar á næstu þremur myndum hér á eftir (Mynd 17 - Mynd 19).



Mynd 17. Umferðarslys í Draugahlíðarbrekku 1999-2003. Tegund, færð og meðalvindhraði í slysi.



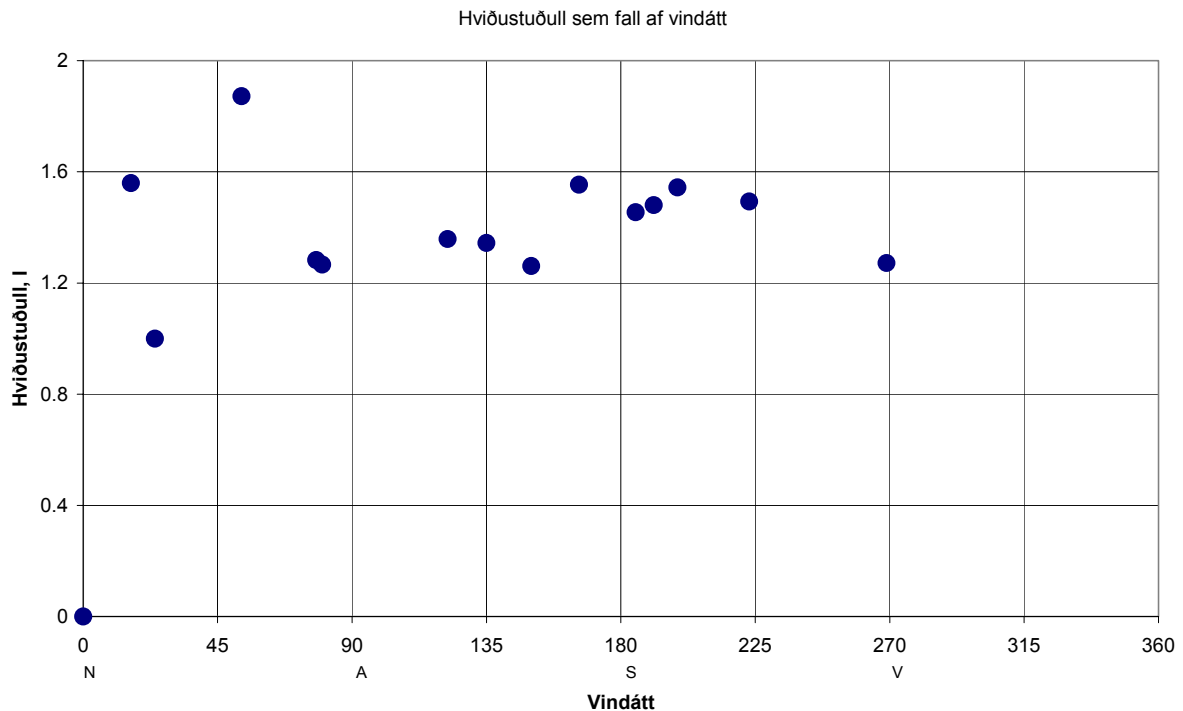
Mynd 18 Umferðarslys í Draugahlíðarbrekku 1999-2003. Tegund ökutækja, færð og hviðustuðull í slysi.



Mynd 19. Umferðarslys í Draugahlíðarbrekku 1999-2003. Tegund ökutækja, færð og hviðhraði í slysi.

Upplýsingar um vindátt og hviðustuðul á tíma slyss má sjá á Mynd 20. Vindátt í slysi virðist nokkuð breytileg, helst er það á bilinu 120°-200° sem greina má einhvern þéttleika í safninu, það er þegar blæs að sunnan og suðvestan. Þau slys sem urðu á þurru vegi eru 2 talsins og urðu bæði við lágan hviðustuðul, eða 1 og 1,2. Önnur slys áttu sér stað við hærri hviðustuðul og verri akstursskilyrði, þ.e. þegar vegur var blautur, háll eða snævi-þakinn eða þá að færð var óskráð.

Rétt er að minnast á það hér að haustið 2005 var lokið endurgerð vegar um Svínahraun þar sem byggður var s.k. 2+1 vegur með víravegriði á milli akstursstefna. Vesturmörk þessarar framkvæmdar eru rétt neðan Draugahlíða og mun þessi breytinga væntanlega fækka slysum sem tengjast mætingu og útafakstri þar, án tillits til þess hvort hvassviðri ríkir eða ekki.



Mynd 20. Draugahlíðar, vindaslys. Samband hviðustuðuls og vindáttar.

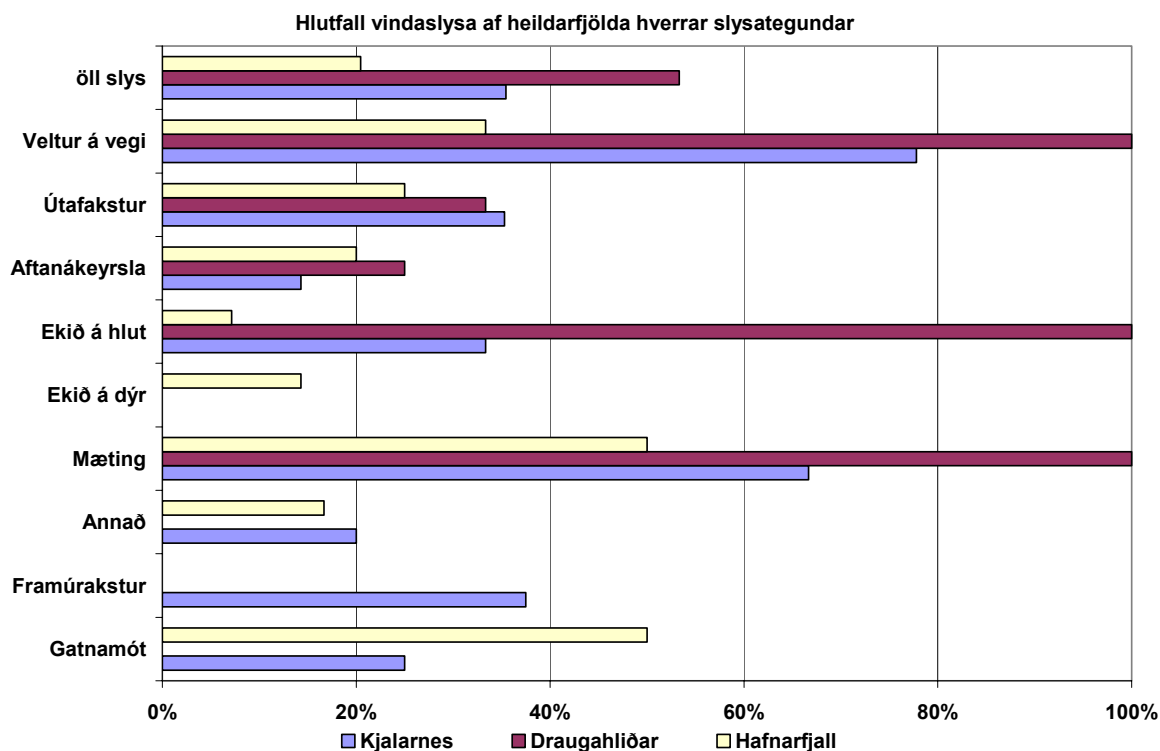
2.3 SAMANBURÐUR Á ATHUGUNARSTÖÐUM

Í fyrst áfanga þessa verkefnis var slysasaga Hringvegjar við Hafnarfjall til athugunar. Nú hafa tveir staðir til viðbótar verið skoðaðir með tilliti til tengsla umferðaslysa og vindafars; Hringvegurinn á Kjalarnesi og Draugahlíðarbrekka. Ætlunin er að bera saman þessa þrjá staði.

2.3.1 Samanburður á vindaslysum

Tegundum slysa á athugunarstöðunum þremur, Kjalarnesi, Draugahlíðum og undir Hafnarfjalli, er stillt saman á Mynd 21. Þar er hlutfall vindaslysa af heildarslysafjölda hvers slysatengdar sýnt fyrir hvern athugunarstað til samanburðar.

Hafa ber í huga þegar niðurstöður á Mynd 21 eru skoðaðar að gagnasafnið frá Draugahlíðum er lítið og skekkir því niðurstöður. Á öllum þremur athugunarstöðum er hlutfall vindaslysa við mætingu ökutækja þó hátt. Slys sem verður þegar ökutæki veltur virðist háð vindi við Kjalarnes og Draugahlíðarbrekku en ekki undir Hafnarfjalli.



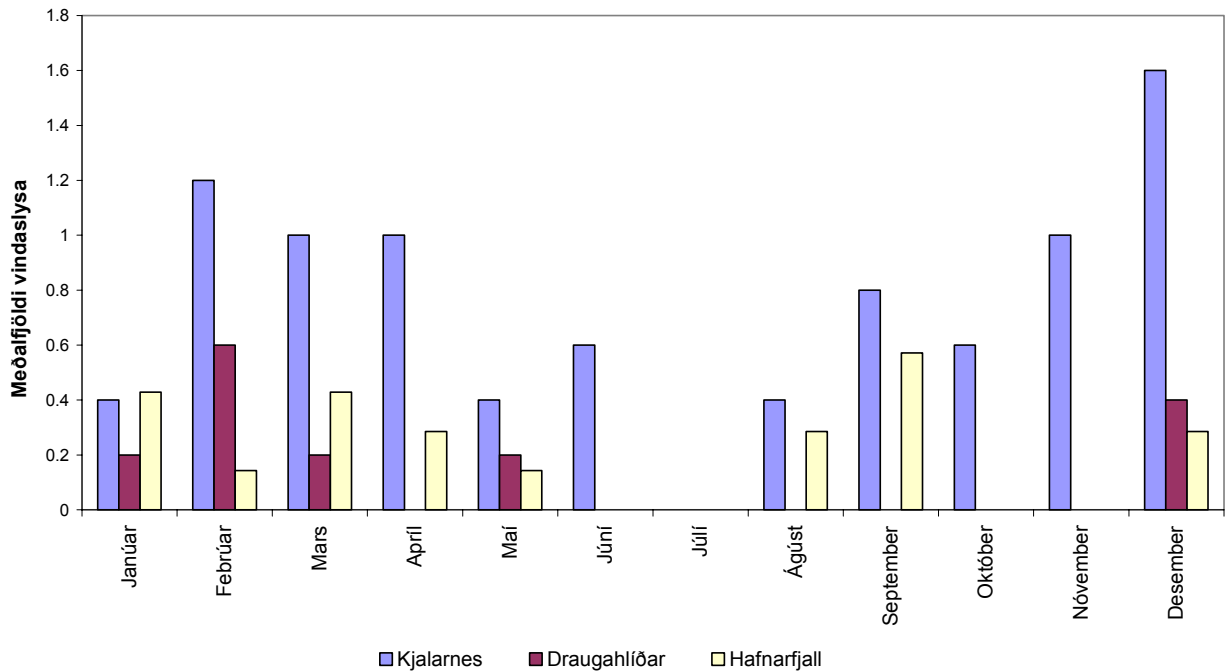
Mynd 21. Hlutfall vindaslysa af heildarfjölda hverrar slysattegundar.

Athugunarstaðirnir tveir, kaflinn á Kjalarnesi og Draugahlíðarbrekka, eru mjög ólíkir. Í Draugahlíðabrekku er athugunarkafllinn mjög afmarkaður en athugunarstaðurinn á Kjalarnesi er 14 km langur. Slys sem verða í Draugahlíðabrekku virðast alvarlegri og slys með meiðslum algengari en undir Kjalarnesi, þó eru þau ekki endilega háð vindhraða, en við alla túlkun á niðurstöðum þarf að hafa í huga smæð slysasafnsins í Draugahlíðum.

Athugunartímabilið fyrir annars vegar Kjalarnes og Draugahlíðar og hins vegar Hafnarfjallið eru ekki þau sömu. Tímabilið fyrir athugunarstaðinn undir Hafnarfjalli er frá 1995 – 2001, en tímabilið fyrir athugunarstaði við Kjalarnes og Draugahlíðar er 1999 – 2003 að báðum árum meðtöldum.

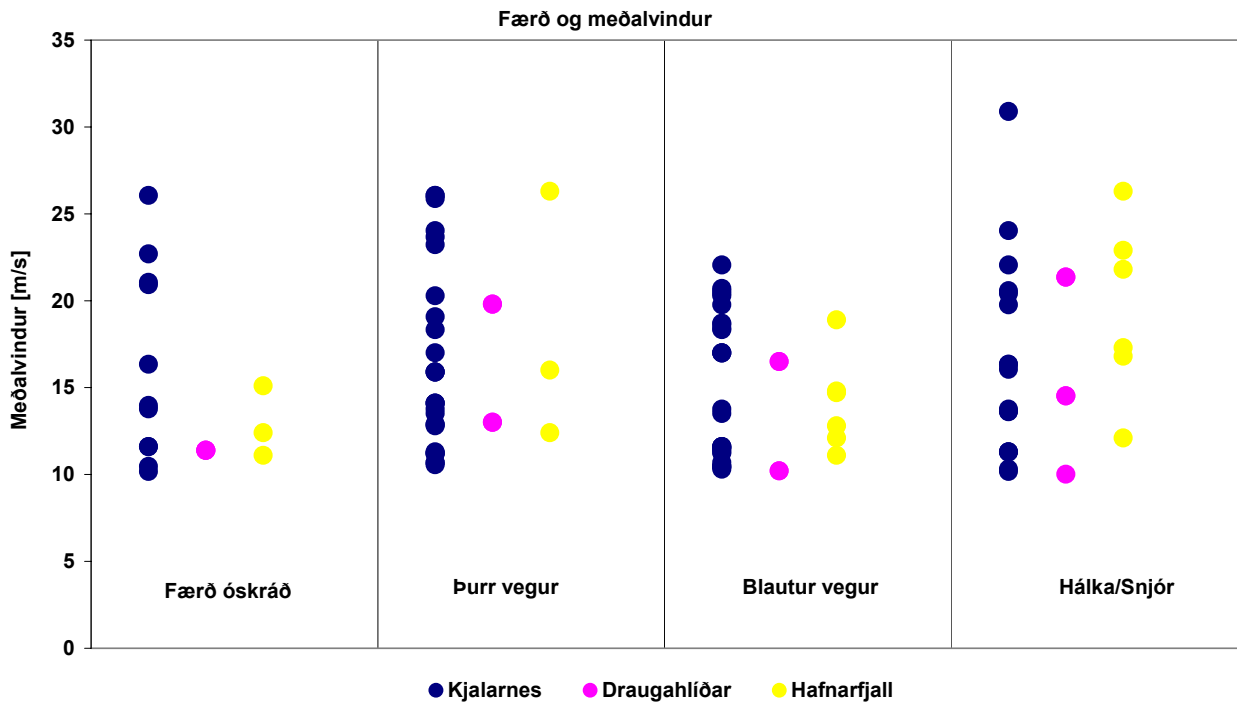
Mynd 22 sýnir samanburð milli athugunarstaða á dreifingu vindaslysa yfir mánuði ársins, þar sem skalað hefur verið með lengd tímabilsins, þ.e. fjölda ára. Vindaslys yfir vertramánuðina, frá september til mars-apríl, eru merkjanlega fleiri á öllum athugunarstöðum en yfir sumartímann. Mynd 22 sýnir dreifingu vindaslysa eftir mánuðum fyrir hvern athugunarstað og má þar sjá fleiri slys að vetrarlagi eins og við má búast. Slysasafn Draugahlíða er það lítið að erfitt er að taka afstöðu til dreifingar þess milli mánuða en þó má merkja ákveðna fjölgun í desember og fram í febrúar. Við samanburð á einstökum mánuðum fyrir mismunandi athugunarstaði ber að varast það að athugunartímabilið fyrir Hafnarfjallið er ekki það sama og fyrir Kjalarnesið og Draugahlíðar.

Samanburður á fjölda vindaslysa á athugunarstöðum

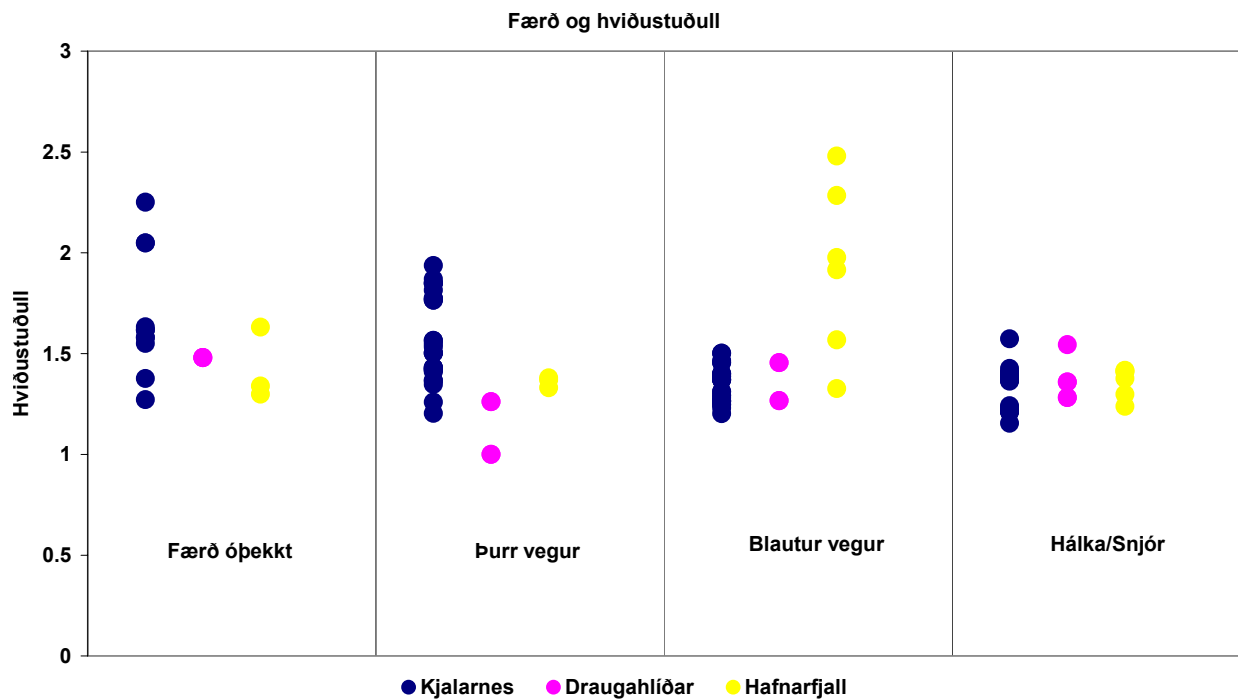


Mynd 22. Meðalfjöldi vindaslysa í hverjum almanaksmánuði á athugunartíma.

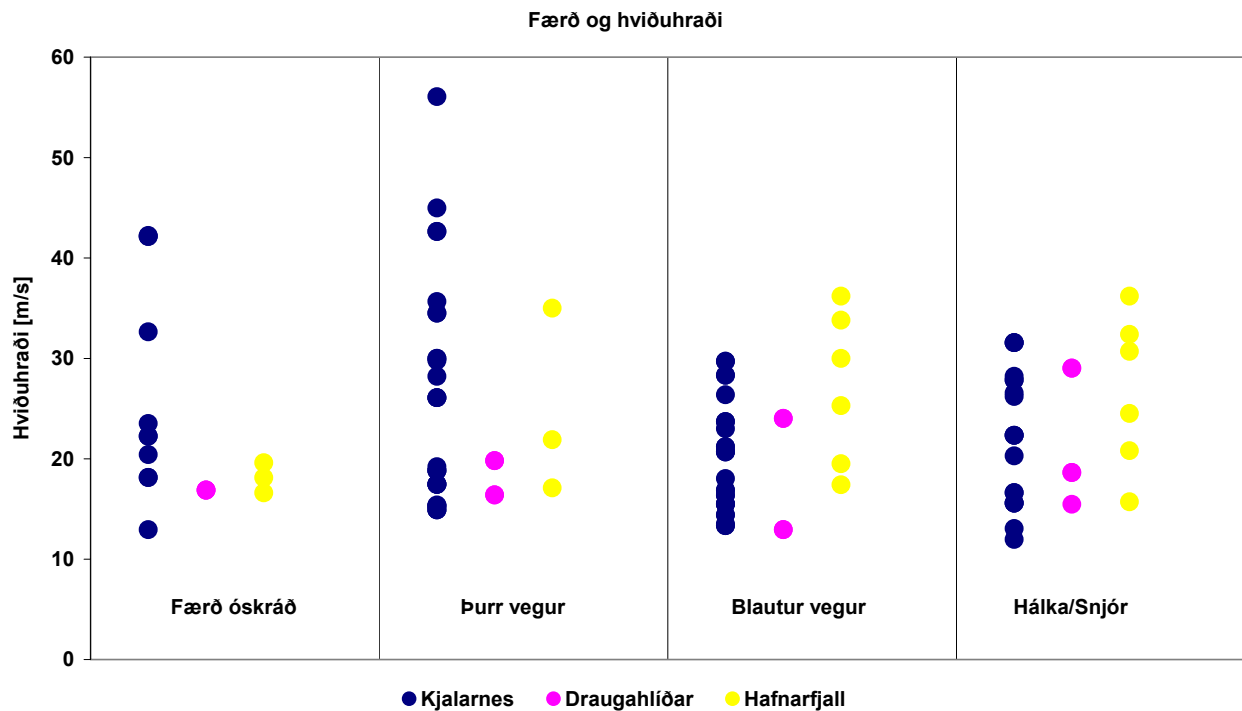
Næstu þrjár myndir (Mynd 23 - Mynd 25) sýna samanburð athugunarstaða þar sem vindaslys eru flokkuð eftir lýsingu á færð eins og hún var skráð í lögregluskýrslu. Þessar upplýsingar ásamt tengingu við 10 mínútna meðalvindhraða, hæstu 10 mínútna hviðu og hviðustuðul eru sýndar á næstu þremur myndum.



Mynd 23. Samanburður á færð og meðalvindi í slysi fyrir athugunarstaði.



Mynd 24. Samanburður á færð og hviðustuðli í slysi fyrir athugunarstaði.



Mynd 25. Samanburður á færð og hviðuhraða í slysi fyrir athugunarstaði.

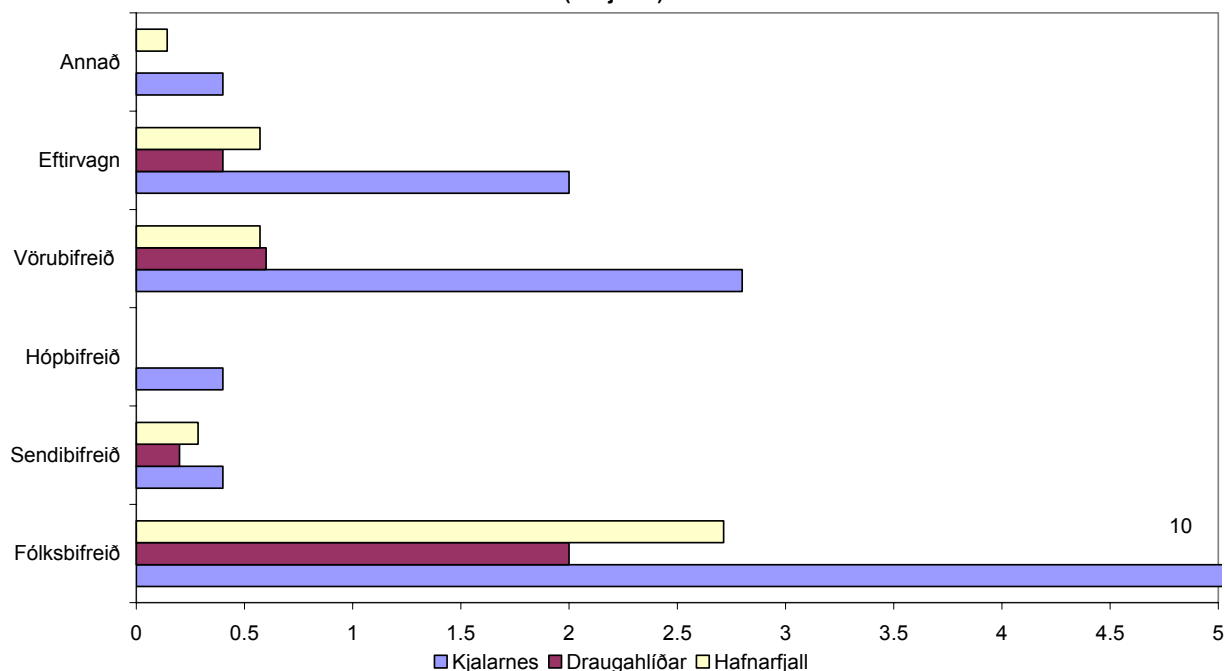
Yfirlit yfir fjölda ökutækja í slysi fyrir hvern ökutækjaflokk var tekið saman fyrir hvern athugunarstað, ásamt því hvort um var að ræða vindaslys eða ekki. Tafla 9 og Mynd 26 sýna samanburð allra athugunarstaða, en á Mynd 26 hefur heildarfjöldi ökutækja í hverjum flokki

verið staðlaður með lengd tímabilsins. Mynd 27 sýnir svo samanburð á hlutfalli vindaslysa af heildarfjölda slysa fyrir hvern ökutækjaflokk.

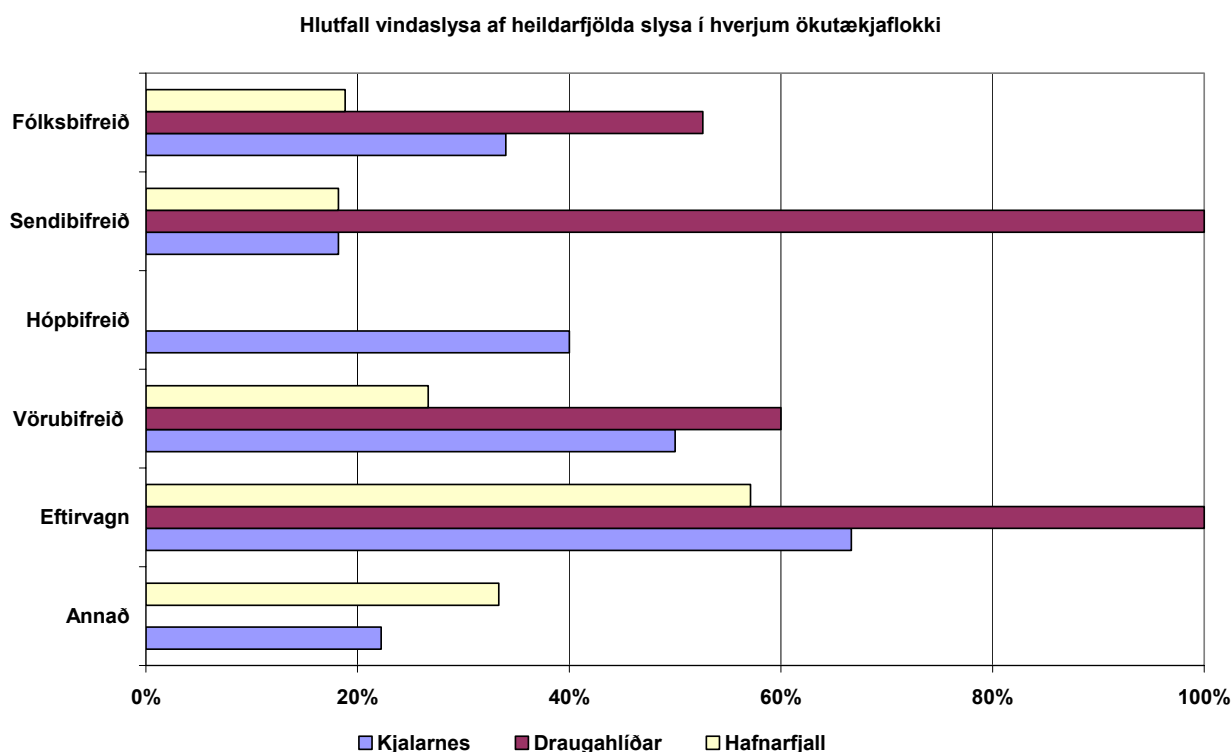
Tafla 9. Samanburður athugunarstaða. Ökutækjaflokkur og hlutfall vindaslysa.

Tegund bifreiðar	Hafnarfjall 1995 – 2001			Kjalarnes 1999 - 2003			Draugahlíðar 1999 - 2003		
	vindur > 10			vindur > 10			vindur > 10		
	fjöldi	m/s	hlutf.	fjöldi	m/s	hlutf.	fjöldi	m/s	hlutf.
Fólksbifreið	101	19	19%	147	50	34%	19	10	53%
Sendibifreið	11	2	18%	11	2	18%	1	1	100%
Hópbifreið	1	0	0%	5	2	40%	1	0	0%
Vörubifreið	15	4	27%	28	14	50%	5	3	60%
Eftirvagn	7	4	57%	15	10	67%	2	2	100%
Annað	3	1	33%	9	2	22%	0	0	0%
Alls	138	30	22%	215	80	37%	28	16	57%

Fjöldi ökutækja í vindaslysi í hverjum ökutækjaflokki staðlaður með lengd athugunartímabils (árafjöldi)



Mynd 26. Meðalfjöldi ökutækja á ári í vindaslysi á athugunarstöðunum.



Mynd 27. Hlutfall vindaslysa af heildarfjölda slysa í hverjum ökutækjaflokki.

Enn ber að hafa í huga smæð slysaafnsins við Draugahlíðar. Þar urðu tvö slys með eftirvögnum en eitt slys með sendibifreið og voru það allt vindaslys. Hlutfall vindaslysa fyrir eftirvagna er einnig hátt fyrir athugunarkafli á Kjalarnesi, 67% og Hafnarfjalli, 57%. Hins vegar er hlutfall vindaslysa af heildarslysaafjölda fyrir sendibifreiðar lágt fyrir Kjalarnes og Hafnarfjall, í báðum tilfellum 18%. Vindaslys eru hlutfallslega algengari við Kjalarnes en undir Hafnarfjalli fyrir alla ökutækjaflokka að sendibifreiðum undanskildum.

Samanburður á færð á vegi í vindaslysum var gerður fyrir vörubifreiðar II og fólksbifreiðar (Tafla 10).

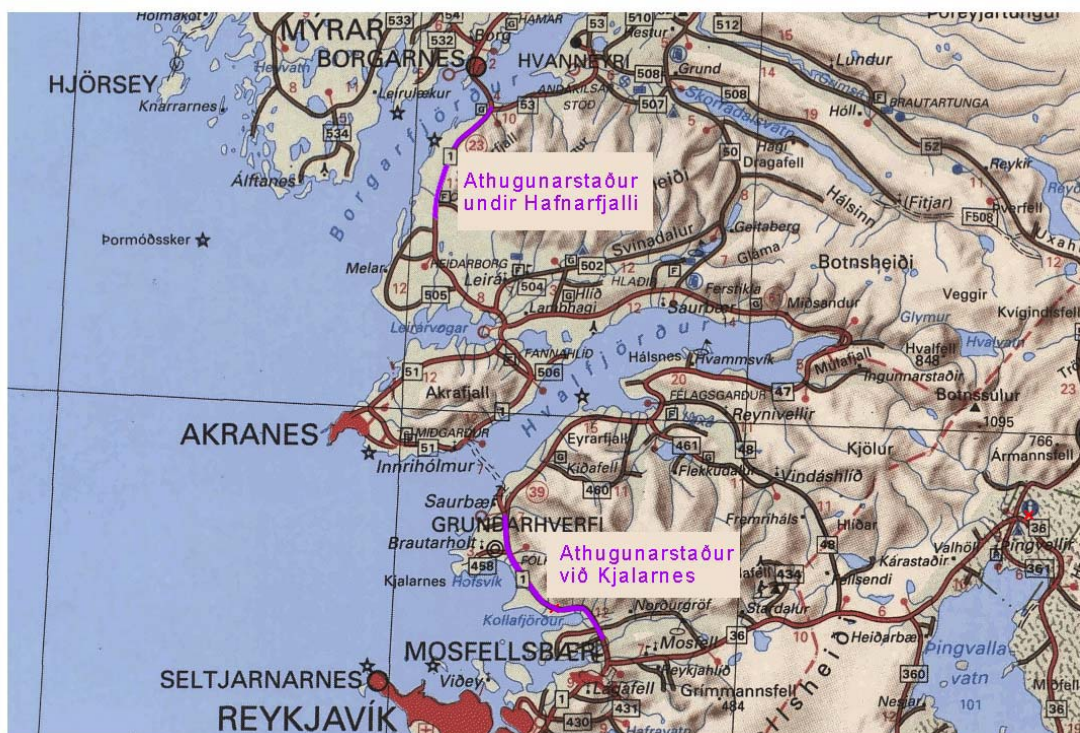
Tafla 10. Vindaslys á athugunartímabilum. Fjöldi ökutækja í slysi eftir færð

Athugunarstaður	Tegund ökutækis	Færð				Alls
		Ekki vitað	Þurrt	Blautt	Hálka/Snjór	
Kjalarnes 1999-2003	Fólksbifreið	7	13	17	13	50
	Vörubifreið II	1	5	4	2	12
Draugahlíðar 1999-2003	Fólksbifreið	1	3	1	5	10
	Vörubifreið II	1	0	1	0	2
Hafnarfjall 1995-2001	Fólksbifreið	4	4	7	4	19
	Vörubifreið II	0	0	2	2	4

2.3.2 Samtímis óveður á Kjalarnesi og undir Hafnarfjalli

Ljóst er að stór hluti þeirra sem aka um Hringveg við Kjalarnes fara einnig um Hringveg undir Hafnarfjalli, því er áhugavert að skoða hve oft óveður ríkir á báðum stöðum samtímis svo og á hvorum staðnum fyrir sig.

Óveður er hér skilgreint þegar 10 mínútna meðalvindur fer yfir 15 m/s. Óveðursdagur er dagur þar sem meðalvindhraði hefur á einhverju 10 mínútna bili farið yfir þetta mark.



Mynd 28. Athugunarkafli undir Hafnarfjalli (Áfangaskýrsla I) og athugunarkafli við Kjalarnes (núverandi rannsókn) merktir inn á kortið.

Tafla 11. Fjöldi daga, yfir vetrarmánuðina, þar sem óveður ríkir samtímis á Kjalarnesi og undir Hafnarfjalli

Mánuður	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	meðaltal
September	4	6	2	2	4	4
Október	5	5	10	10	6	7
Nóvember	8	12	6	9	6	8
Desember	2	14	5	4	6	6
Janúar	5	12	11	12	8	10
Febrúar	5	12	8	14	7	9
Mars	10	6	4	6	11	7
alls	39	67	46	57	48	51

Að meðaltali ríkir óveður samtímis á Kjalarnesi og undir Hafnarfjalli um 24% af dögnum á tímabilinu september – mars. Til nánari útskýringar þá telst sá dagur þegar vindur fer yfir 15 m/s á sama 10 mínútna millibili eða næsta bili á undan eða eftir á báðum stöðum sem dagur þar sem óveður ríkir samtímis. Ekki er talinn sá dagur þar sem til að mynda óveður ríkir á Kjalarnesi að morgni en að kvöldi til undir Hafnarfjalli. Mun oftast er meðalvindur yfir 15 m/s annað hvort á Kjalarnesi eða undir Hafnarfjalli, eins og sjá má af töflunni hér að neðan (Tafla 12). Þar má sjá að hlutfall óveðursdaga á Kjalarnesi er að meðaltali um 42%. Undir Hafnarfjalli er hlutfallið örlítið hærra, eða um 47% að meðaltali.

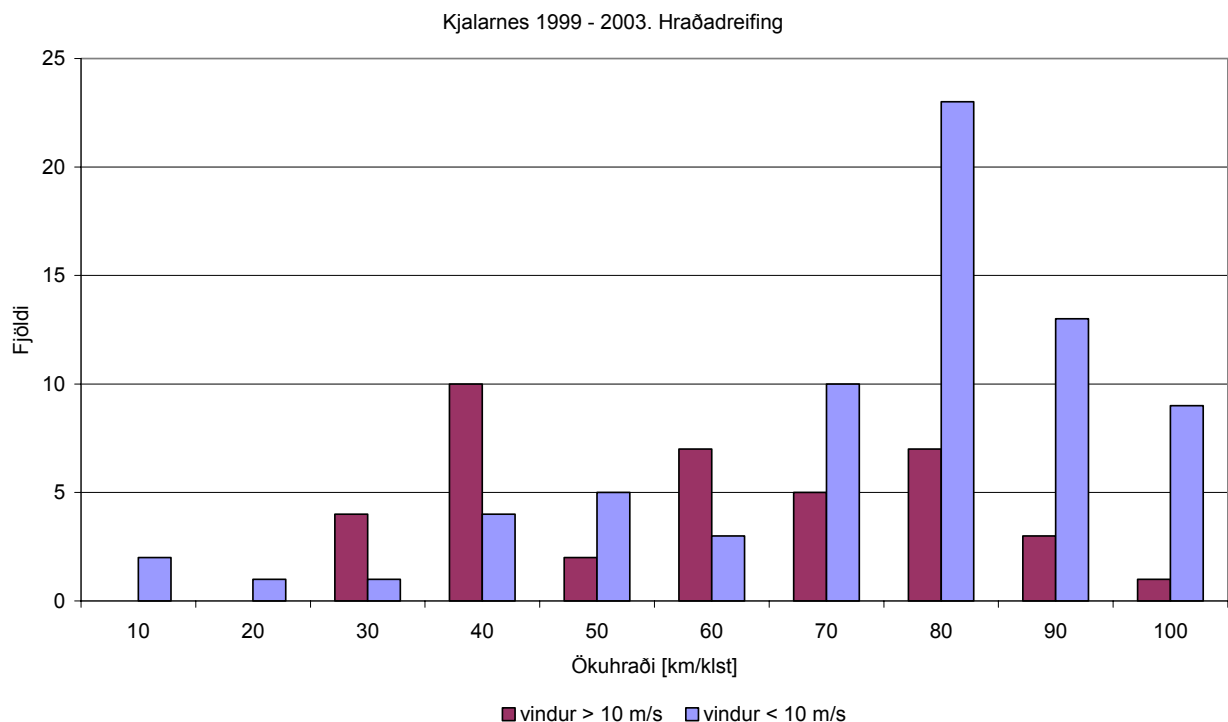
Tafla 12. Samanlagður fjöldi óveðursdaga yfir vetrarmánuði, sept-mars.

ár	Kjalarnes	Hafnarfjall	samtímis
1999-2000	89	118	39
2000-2001	98	105	67
2001-2002	82	97	46
2002-2003	85	89	57
2003-2004	96	97	48
meðaltal	90	101	51

2.4 HRAÐI ÖKUMANNA, ALDUR ÞEIRRA OG VINDHRAÐI Í SLYSI

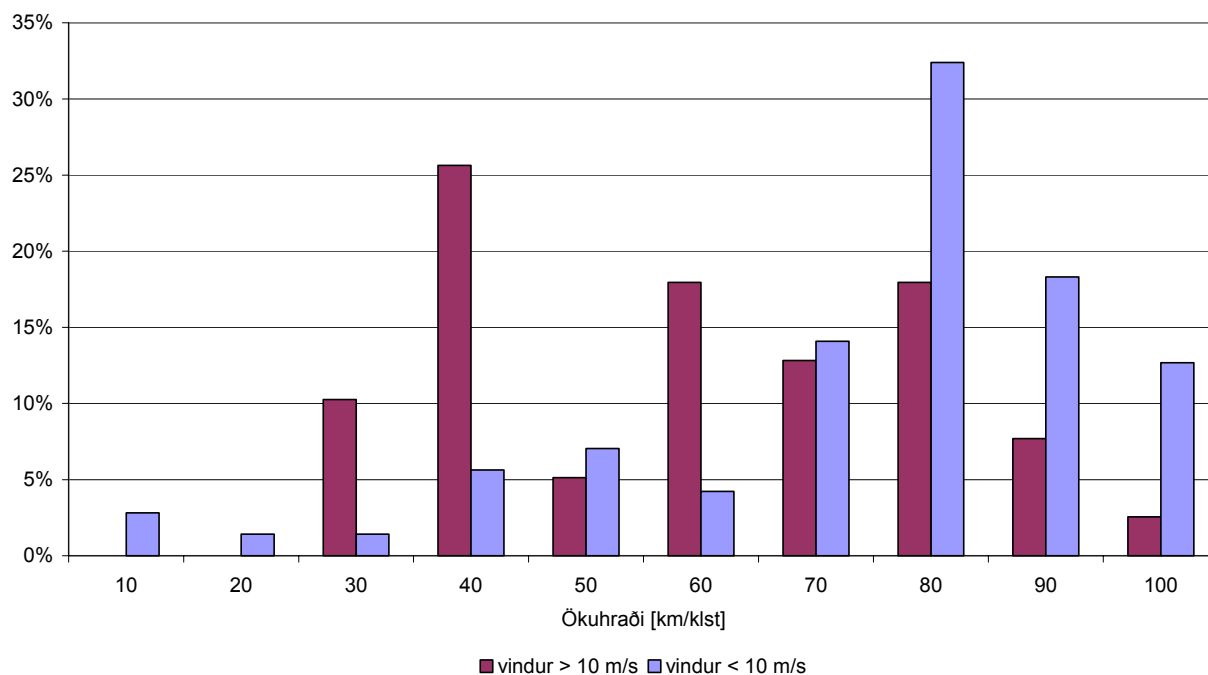
Í skýrslunni Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla I var fjallað um eiginleika vinds og samspil vinds og ökutækis. Um samband ökuhraða og vindhraða er einnig fjallað um í [2] (sjá viðauka B) þar sem sett er fram almennt líkindafræðilegt líkan til að meta umferðarslys á vindasömum svæðum. Meðal annars er samband ökuhraða og vindhraða skoðað. Þar kemur fram að ef dregið er úr ökuhraða hefur það yfirleitt í för með minni líkur á slysi ef vindur blæs í áttina að ökutæki en gagnstæð áhrif ef vindur blæs aftan á ökutæki. Aukin ökuhraði getur þá leitt til aukins öryggis á þeirri forsendu að heildarvindkraftar á ökutæki eru lægri þegar vindur stefnir aftan á ökutæki.

Hér er stuðst við áætlaðan ökuhraða í slysi eins og hann er skráður í slysaskýrslu samkvæmt framburði ökumanns eða mati lögreglu. Á næstu myndum er hraði ökutækja í slysi skoðaður m.t.t. þess hvort um vindaslys er að ræða eða ekki. Hér er því fjöldi ökutækja notaður við útreikninga en ekki fjöldi slysa. Umrædd ökutæki í slysum á Kjalarnesi voru alls 215, af þeim voru 105 skráð með ökuhraða núll í slysi en óvíst er í hvaða tilfellum það bendir til þess að ökutæki hafi verið kyrrstætt og í hvaða tilfellum upplýsingar vantar. Fjöldi ökutækja í slysi við vindhraða yfir 10 m/s er 80 talsins, þar af 39 skráð með þekktan ökuhraða yfir núlli.



Mynd 29. Ökuhraðadreifing við slys á Kjalarnesi á athugunartímabilinu 1999 – 2003.

Kjalarnes 1999 - 2003.

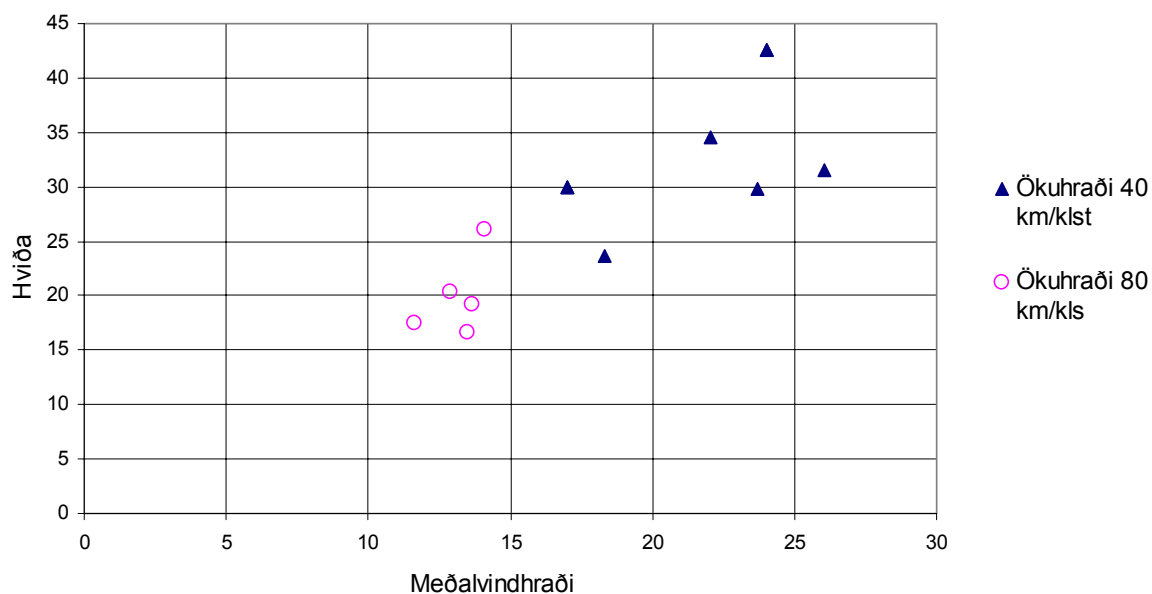


Mynd 30. Staðlaðar ökuhraðadreifingar fyrir slys á Kjalarnesi.

Þessar myndir eru skýr vísending um að stór hluti ökumanna aki hægar þegar hár vindhraði ríkir. Í vindaslysum er ökuhraðinn 40 km/klst oftast gefinn upp en 80 km/klst án vinds.

Til nánari skoðunar voru vindaslys sem verða við 40 km/klst ökuhraða borin saman við vindaslys þegar ökumenn aka á 80 km/klst.

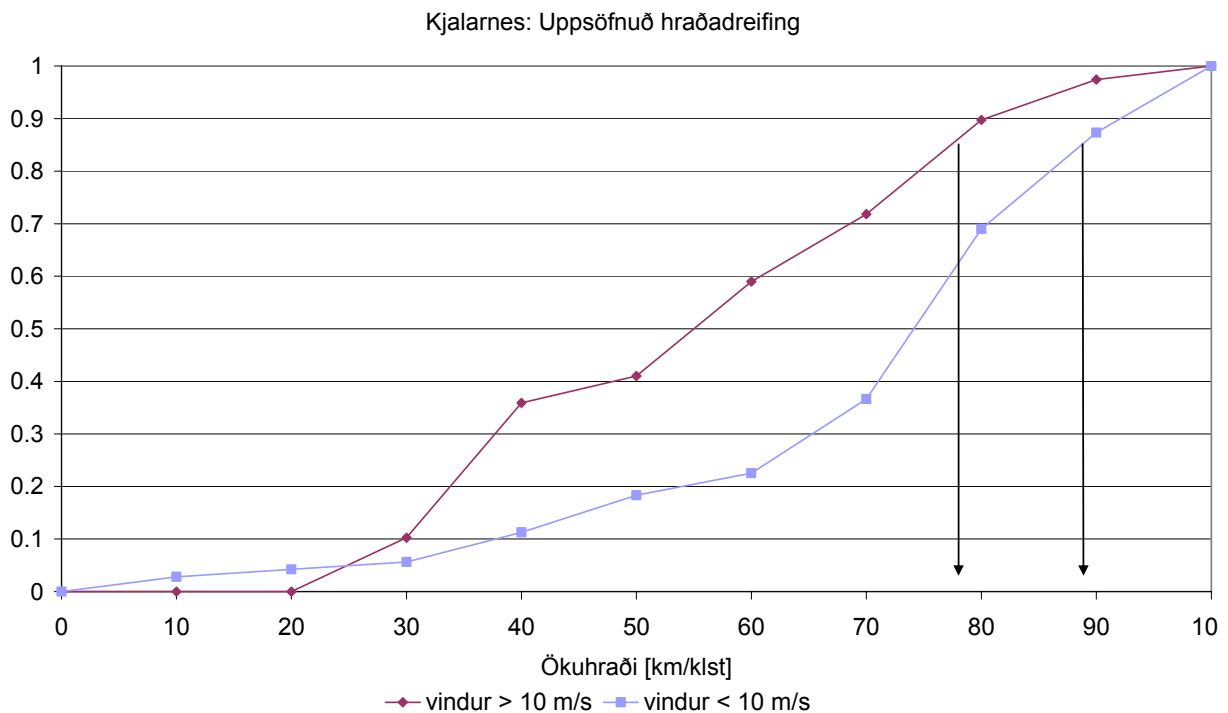
Vindaslys á Kjalarnesi 1999-2003



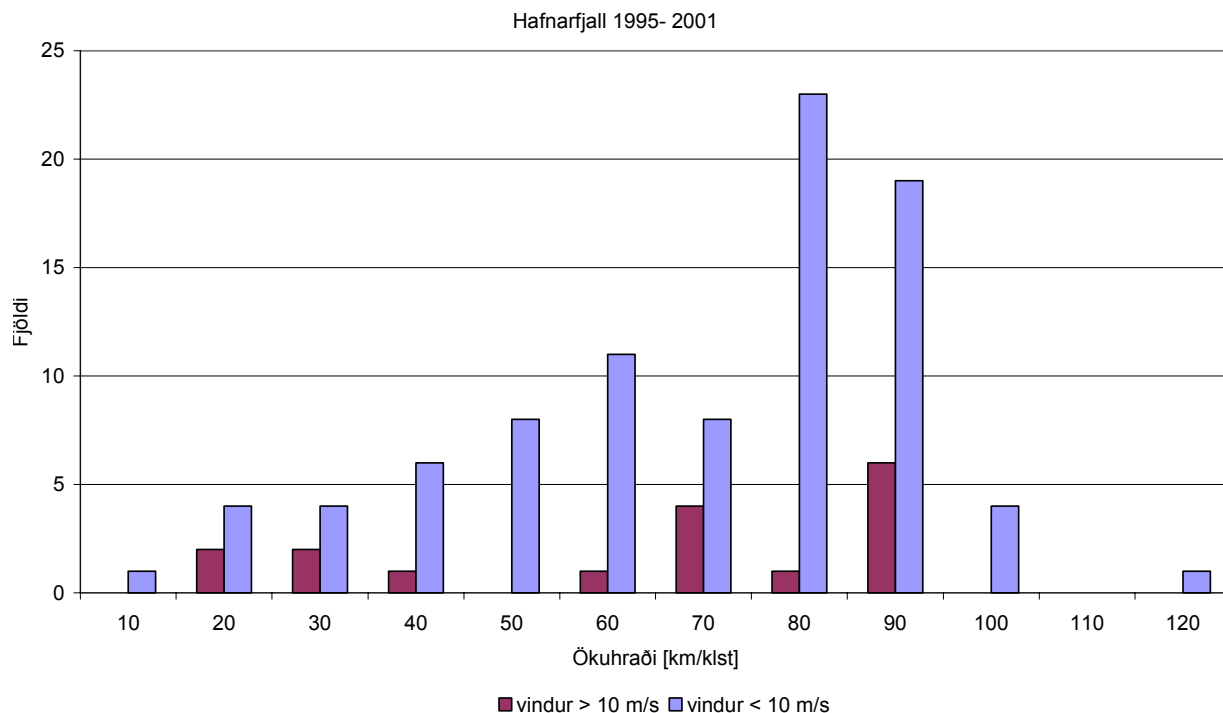
Mynd 31. Hviðuhraði í vindaslysi teiknaður sem fall af meðalvindhraða fyrir tvo ökuhraða: 40 km/klst og 80 km/klst.

Greinilegt er að akstursskilyrði voru mun verri þegar ökumenn óku 40 km/klst en 80 km/klst. Alls eru þetta 6 vindaslys við ökuhraða 40 km/klst og af þeim 6 urðu 4 við það að ökutæki veltur. Vindaslys vegna veltu urðu öll þegar vegyfirborð var skráð þurrt. Í öðru hinna slysanna var ekið aftan á kyrrstæðan bíl í hálfu, í hinu tilvikinu var ekið á bíl við hægri vegbrún á blautum vegi. Vindaslysin við ökuhraða 80 km/klst reyndust fjölbreyttari, bæði hvað varðar tegund slyss og vegyfirborð. Þá urðu flest þessi slysa við hviðuhraða um eða undir 20 m/s sem er ekki mjög hátt fyrir þennan stað.

Næsta mynd sýnir uppsafnaða hraðadreifingu fyrir annars vegar vindaslys og hins vegar slys sem verða við meðalvindhraða undir 10 m/s á Kjalarnesi. Mynd 33 sýnir hraðadreifingu fyrir slys undir Hafnarfjalli.

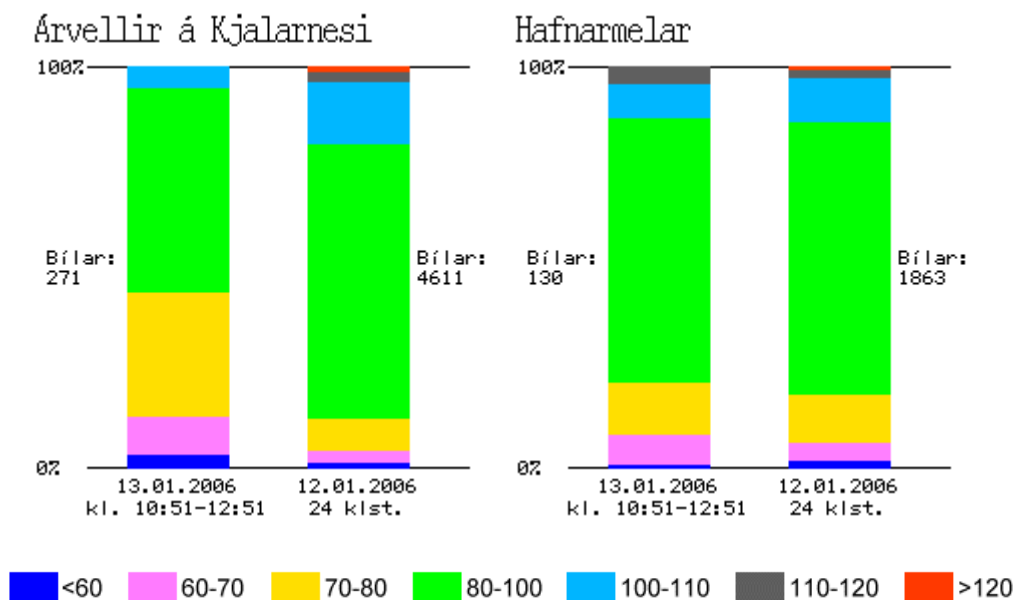


Mynd 32. Uppsafnaðir hraðadreifingarferlar fyrir vind 10 m/s og yfir og svo fyrir vind undir 10 m/s við slys. Örvagnar sýna 85 % hraðamörk (85 % ökumanna hafa valið þann ökuhraða eða lægri).



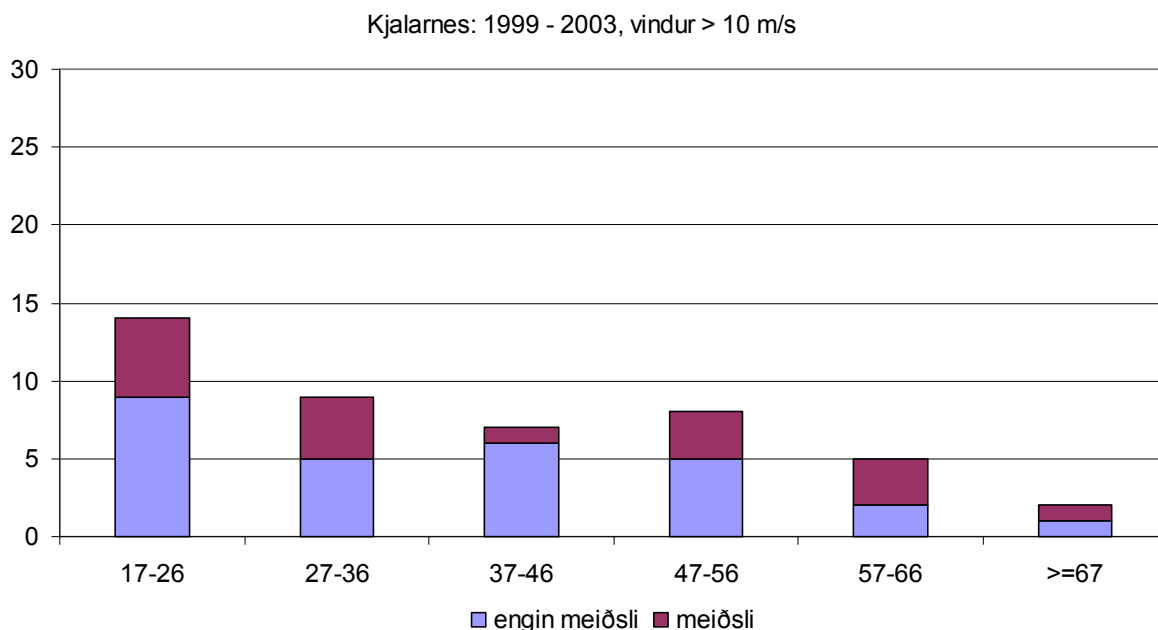
Mynd 33. Ökuhraðadreifing við slys undir Hafnarfjalli á athugunartímabilinu 1995 – 2001.

Til samanburðar má skoða Mynd 34 sem sýnir hraðadreifingu almennrar umferðar á athugunarstöðunum tveimur fyrir ákveðið tímabil valið af handahófi.

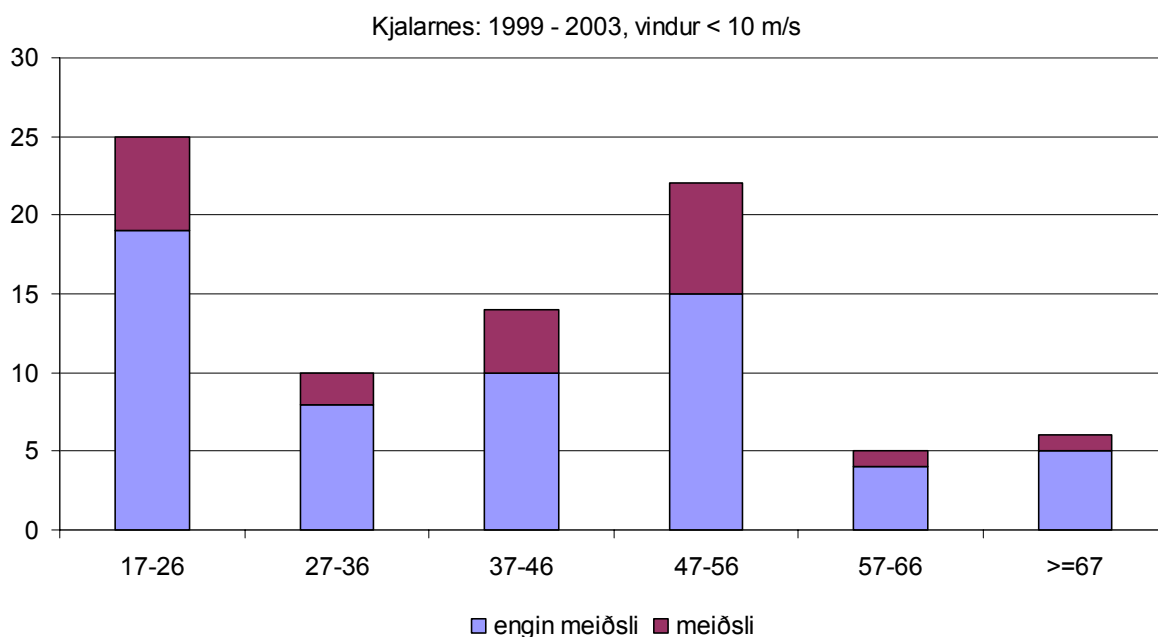


Mynd 34. Umferðargreinar: Hraðadreifing (km/klst) fyrir almenna bílaumferð. Fengið af heimasíðu vegagerðarinnar: http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/pages/ua_umferdargreinar.html.

Skoðum nánar tengsl meiðsla og vindaslysa sem aðeins var fjallað um í kafla 2.1.3. Niðurstöður frá slysum á Kjalarnesi sýna að hlutfallslega fleiri meiðast í vindaslysum en þegar vindhraði er undir 10 m/s, sama niðurstaða fæst fyrir slysin undir Hafnarfjalli.



Mynd 35. Slys á Kjalarnesi 1999 – 2003 með meðalvindhraða > 10 m/s flokkuð eftir aldri ökumanns.

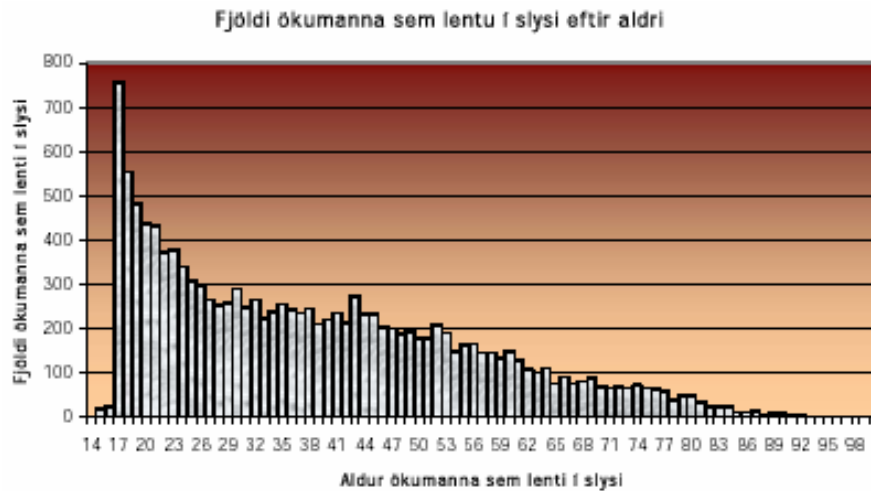


Mynd 36. Slys á Kjalarnesi með meðalvindhraða < 10 m/s flokkuð eftir aldri ökumanns.

Fjöldi slysa með meðalvind undir 10 m/s í aldursflokknum 47-56 er eftirtektarverður, hann fellur svo niður í vindaslysunum sem hugsanlega má skýra með reynslu þessara ökumanna af slæmum akstursskilyrðum samfara hvas sviðri. Þessi dreifing fyrir slys við meðalvind undir 10 m/s er ólík almennri aldursdreifingu ökumanna í slysum á Íslandi, hún er hæst fyrir yngstu ökumennina en fer svo almennt stig lækkandi (sjá Mynd 37). Það kann að vera að þessi aldurssamsetning endurspeglar umferðina undir Kjalarnesi.

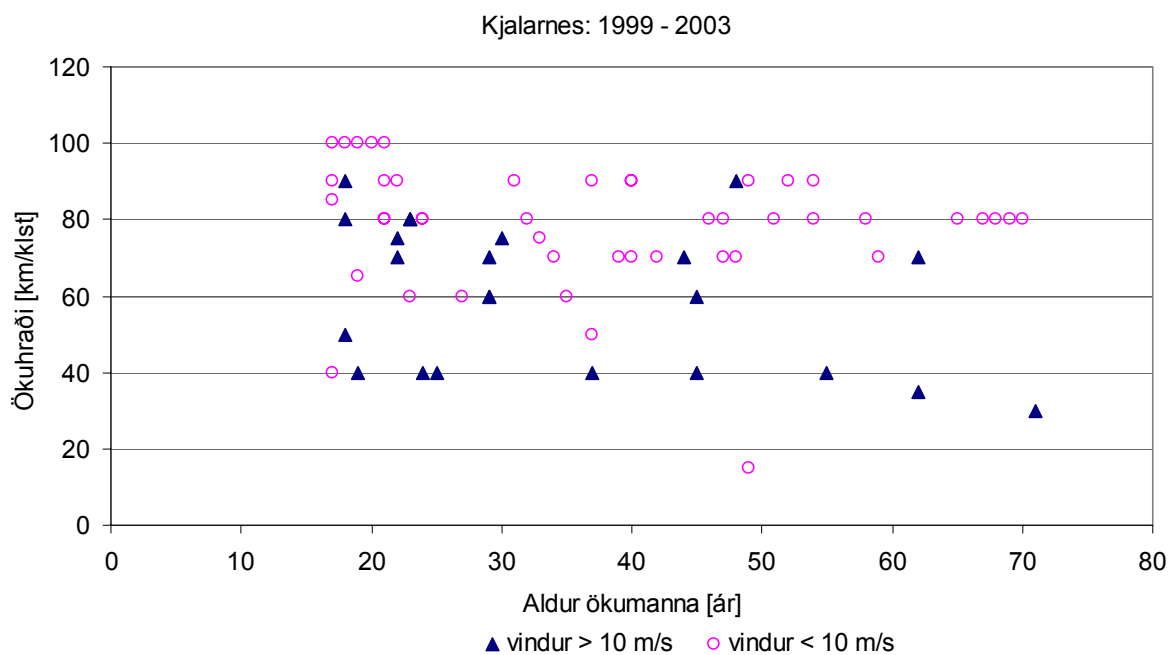
Þegar gerður er samanburður á hlutfalli meiðsla í slysi milli vindaslysa og slysa sem verða við meðalvind undir 10 m/s eftir aldursflokkum sést að hlutfallið er svipað fyrir yngsta

aldursflokkinn, 17-26. Fyrir næsta flokk er hlutfallið mun hærra fyrir vindaslysin, eins er það hærra fyrir 57-66 ára. Hins vegar er það nokkuð lægra fyrir 47-56 ára flokkinn.



Mynd 37. Mynd úr skýrslu: Skýrsla um umferðarslys á Íslandi árið 2003. (<http://samgonguraduneyti.is/frettir/nr/527>)

Skoðum næst samband aldurs ökumanns og ökuhraða í slysi eftir því hvort um vindaslys er að ræða eða ekki.



Mynd 38. Samband ökuhraða og aldurs ökumanna fyrir vindaslys og slys með meðalvindhraða < 10 m/s. Kjalarnes 1999 – 2003.

Samkvæmt niðurstöðum úr rannsóknum á slysum við Kjalarnes á tímabilinu 1999 – 2003 virðast fleiri ungir ökumenn en eldri aka hratt í vindaslysum, hins vegar er ökuhraði sem hér er notaður samkvæmt framburði ökumanns og svarhlutfall ekki alltaf gott. Til að mynda er svarhlutfall verst fyrir aldursflokk 47-56 eða um 25% (2 af 8) en best fyrir aldursflokkinn 17-

26, eða 71% (10 af 14). Í slysum með meðalvind undir 10 m/s virðist ökuhraði vera nokkuð jafn í öllum aldursflokkum, um 80 km/klst, þó aka yngstu ökumennirnir hraðast. Fyrir þessi slys er svarhlutfall einnig verst fyrir aldursflokkinn 47-56, eða 41% og best fyrir 17-26, eða 68%.

3 Vindmælingar á vegum

Í fyrsta áfanga verkefnisins voru gerðar tilraunir til að meta vindaðstæður á vegum með því að festa vindnema á bílþak og skrá vindhraða og vindstefnu þegar bílinn ók eftir vegi. Í öðrum áfanga var þessi aðferð þróuð frekar og endurbætt.

Mæling á vindhraða og vindstefnu á ökutæki á ferð er skekkt af því loftstreymi sem ökutækið sjálft myndar þegar það klýfur loftið. Þess vegna er nauðsynlegt að hafa samtíma upplýsingar um staðsetningu, ökuhraða og ökustefnu til að leiðrétta loftstreymismælingarnar til samræmis við staðbundnar vindmælingar. Keyptur var GPS móttakari til að skrá staðsetningu ökutækis og mæla ökuhraða og ökustefnu samtímis mælingu á hraða og stefnu loftstreymis yfir ökutækið með sónískum vindnema. Mynd 39, sýnir þetta færanlega vindmælitæki við Hafnarfjall.

Ökutækið var keyrt á tiltölulega jöfnum hraða og mælistærðir skráðar jafnóðum. Skráð var GPS staðsetning ökutækis, ökuhraði og ökustefna á hverjum tíma. Jafnframt var skráður láréttur og lóðréttur hraði loftstreymis yfir þaki bílsins ásamt stefnu streymisins miðað við að 0° gráður væru í stefnu ökutækis. Allar upplýsingar voru skráðar með söfnunartíðninni 5 Hz (fimm skráningar á sekúndu) og var þeim safnað með söfnunarbúnaði frá Labview. Miðað við að ökuhraði var oftast um eða innan við 20 m/s þá má segja að það jafngildi því að mæligildi hafi verið skráð á innan við 4 m fresti.

Á grundvelli þessara upplýsinga er hægt að reikna vindhraða og vindstefnu á hverjum stað. Þannig fæst ákveðin mynd af þeirri vindáraun sem ökutækið varð fyrir á leiðinni sem ekin var, sem hægt var að tengja beint við staðsetningu, ökuhraða og ökustefnu. Þetta eru annarskonar upplýsingar um vindaðstæður en fást með staðbundnum mælingum með föstum nema á mastri. Samanburður við fastar mælistöðvar gefur hins vegar ákveðnar upplýsingar um hlutfallsleg áhrif af landslagi og veglínu.

Aðferðina má nýta til að kortleggja vindasama staði, þar sem líklegt er að ökutæki verði reglulega fyrir sterkum vindáhrifum sem geta verið varhugaverðir fyrir umferð. Einnig nýtast gögn af þessu tagi vel við þróun og kvörðun reiknilíkana til að meta áhrif vinds á ökutæki sem og öryggi ökutækja í vindi, líkt og þess sem fjallað er um í kafla 4.

Farið var í nokkrar mæliferðir, og verður gerð nokkur grein fyrir þremur þeirra hér. Í þessum ferðum var keyrt um þjóðveg 1 á milli Selfossi og Reykjavíkur annars vegar og milli Reykjavík og Borgarnes hins vegar. Aðaláherslan var lögð á vindaðstæður við Hafnarfjall en einnig var horft nokkuð til aðstæðna á Kjalarnesi.



Mynd 39. Færanlegt vindmælitæki við Hafnarfjall. (a) Innfelda myndin sýnir úthljóðsvindhraðamæli (ultrasonic anemometer) frá Gill instruments sem mælir vindvektor í láréttu plani og lóðréttan vindhraða. (b) Innfelda myndin sýnir 12 rása GPS mælitæki frá Garmin til skráningar á staðsetningu, hraða og stefnu.

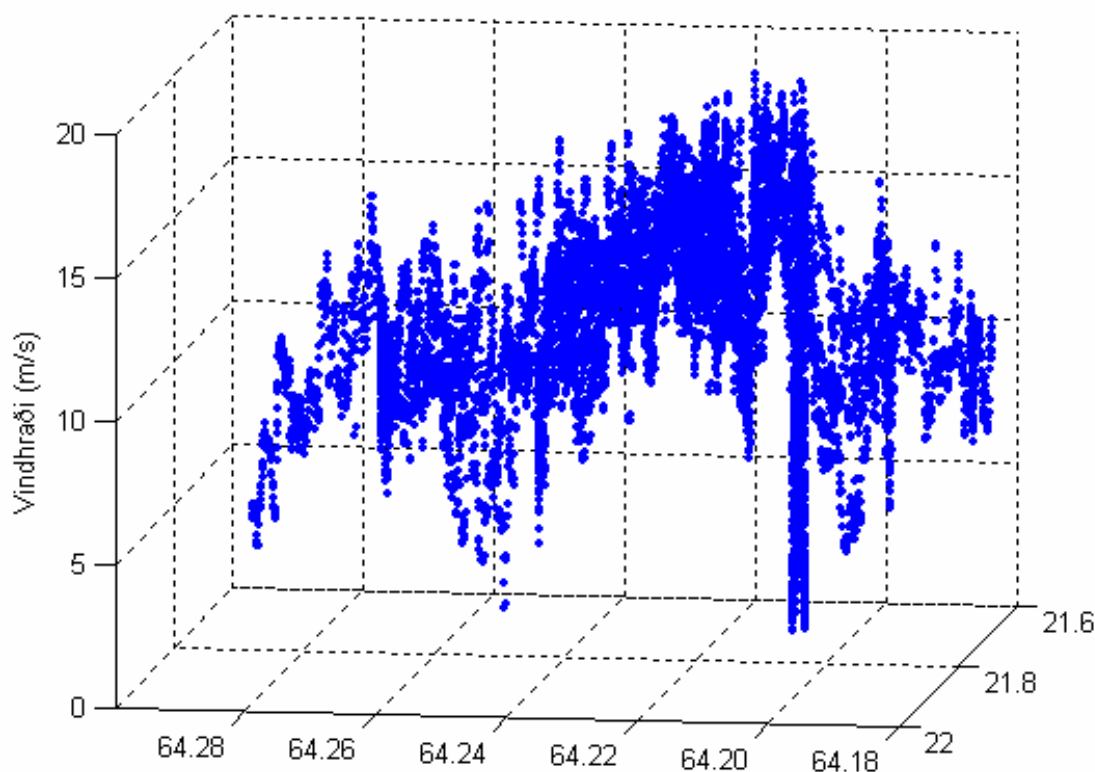
3.1 VINDMÆLING 14.03.2005

Þann 14. mars var norðaustanátt á vesturlandi og allstífur vindur fyrripart dagsins, einsog sjá má af Myndum A1 til A4, sem sýna vindmælingar frá þeim tíma á mælistöðum Vegagerðarinnar á Kjalarnesi og við Hafnarfjall. Meðalvindhraði á Kjalarnesi var um 20 m/s um morguninn og um 16 m/s við Hafnarfjall.

Lagt var upp frá Reykjavík um kl. 9:00 og keyrt sem leið lá upp á Kjalarnes. Þar var stoppað við mælistað Vegagerðarinnar og jafnframt keyrðar nokkrar ferðir fram og til baka á svæðinu. Því næst var farið í gegnum Hvalfjarðargöngin og norður að Hafnarfjalli. Þar var keyrt fram og til baka nokkrum sinnum, stoppað og mælt við veðurstöðvar Vegagerðarinnar og Veðurstofu Íslands undir fjallinu og síðan ekið aftur til Reykjavíkur. Myndir A3 til A15 í viðauka A1 sýna mæliniðurstöður frá þessari ferð. Myndir A1 og A2 sýna vindmælingar Vegagerðarinnar á Kjalarnesi og við Hafnarfjall.

Þennan morgun var vindáttin norðaustlæg og vindhraði á Kjalarnesi og við Hafnarfjall á bilinu 8 til 16 m/s samkvæmt mælingum Vg (sjá Myndir A1 og A2). Mælingarniðurstöður rannsóknaraðila eru í fullu samræmi við það. Þó virðast mælar Vegagerðarinnar skrá heldur hærri hágildi vindhraða á tímabilinu frá 9:30 til 13:00 en neminn á þaki bílsins. Það þarf þó ekki að koma á óvart þar sem hágildin eru tilviljunarkennd augnabliksgildi og bílinn aðeins staðsettur á sama stað og mastur vegagerðarinnar í u.þ.b. 10 mínútur í eitt skipti, auk þess sem

vindneminn í mastrinu stendur nokkrum metrum hærra frá jörðu. Rétt er að vekja athygli á því að heldur meiri breytileiki er í þeim gögnum sem mæld eru á ferð heldur en í þeim sem mælast þegar vindnemi er kyrrstæður. Þetta má meðal annars rekja til þess viðbótar iðustreymis sem ökutækið skapar þegar það klýfur loftið.



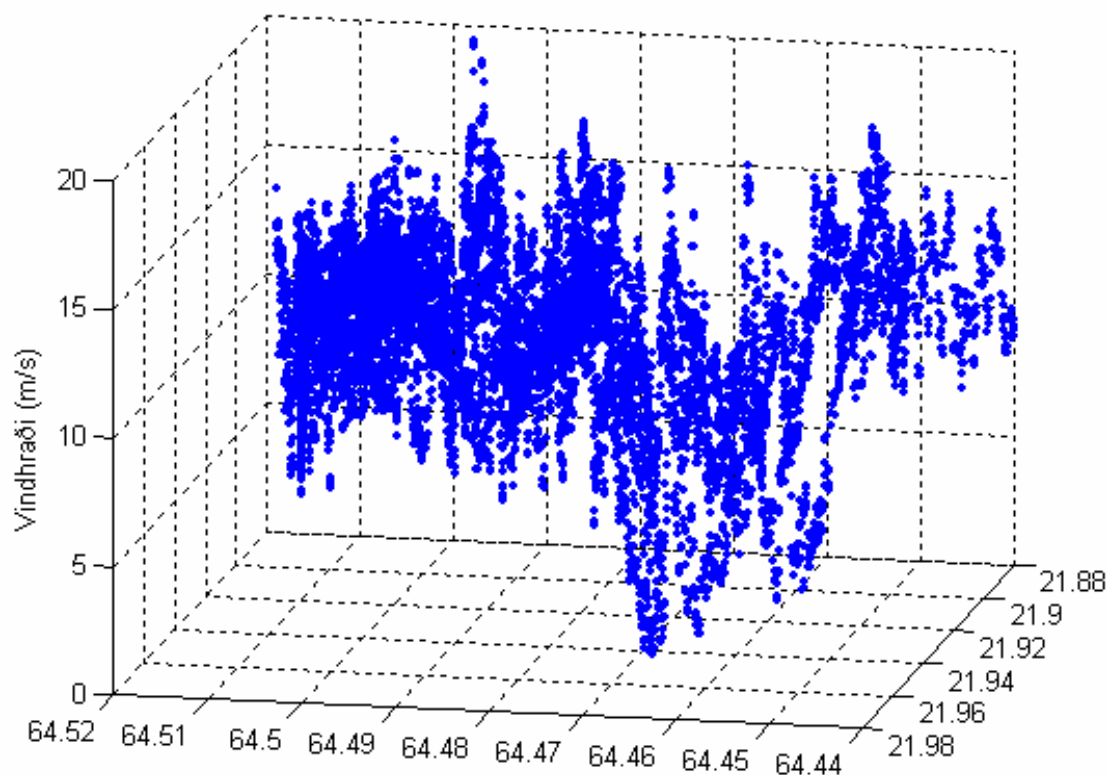
Mynd 40. Myndin sýnir samantekt á mælingum á vindhraða í akstri á Kjalarnesi þann 14.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A3, A4 og A5.

Mynd 40 sýnir samantekt á mælingum á vindhraða í akstri á Kjalarnesi þann 14.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A3, A4 og A5. Greinilegt er af Mynd 40 að í þeirri vindátt sem hér um ræðir er vindasamast á þeim slóðum sem vindnemi Vg er staðsettur (64,21;21,77).

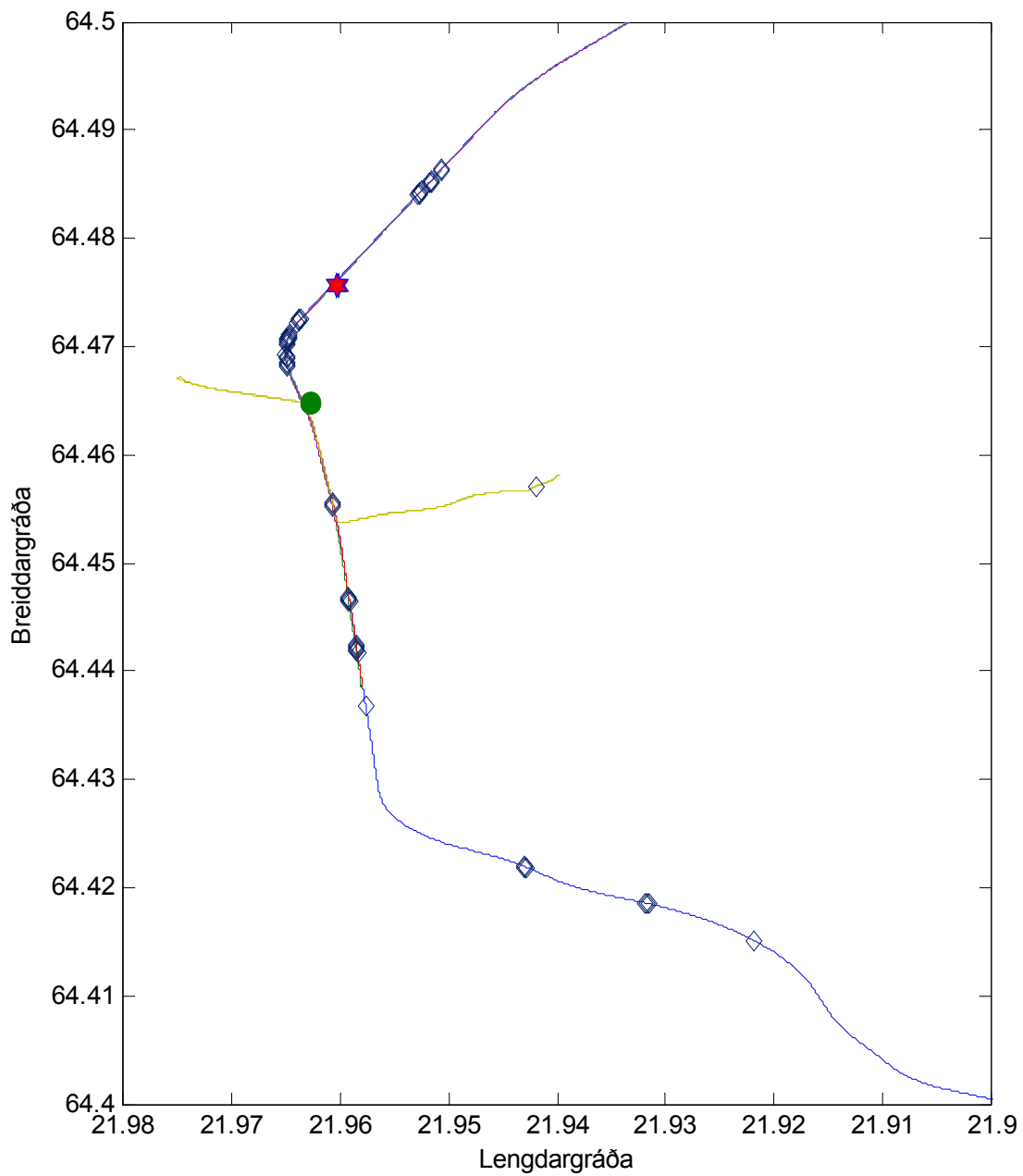
Mynd 41 sýnir sambærilega samantekt á mælingum í akstri við Hafnarfjall. Eins og sjá má, þá mælast stærstu hviðurnar þar töluvert norðan við veðurstöð Vg (64,47;21,97). Hins vegar sést að misvindasamt er við hornið þar sem veðurstöðin er staðsett sem m.a. kemur fram í háum hviðustuðli þar, sé horft til mælinga Vg samkvæmt Mynd A2. Þetta má kortleggja betur með því að leita að hágildum í mælingunum og staðsetja þau á veglínunni þar sem þau mælast. Þetta er útfært á Mynd 42, sem sýnir staðsetningu ökutækis þegar vindhraði mældist > 95% af hágildi hveftrar tímaráðar vindhraða sem skráð var þegar ekið var eftir þjóðveginum við Hafnarfjall þann 14.03.2005. Byggt er sömu gögnum og í Mynd 41. Veglínan er sýnd ásamt staðsetningu fastra mælistöðva Veðurstofu Íslands (64,46;21,96) og Vegagerðarinnar (64,21;21,77).

Mynd 43 sýnir svo dreifingu á lengdar- og breiddargráðu ökutækis þegar þau hágildi mældust sem sýnd eru á Mynd 42. Þar með fæst ákveðin staðfesting á því sem áður kom fram. Í

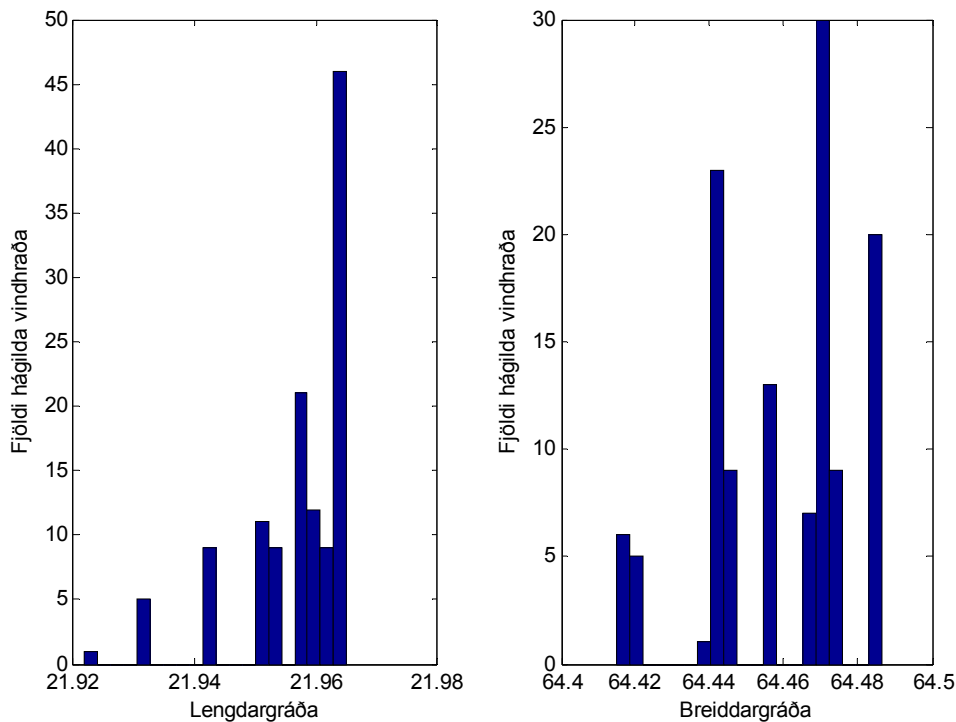
norðaustanátt við Hafnarfjall virðast vera nokkrir vindsamir staðir undir fjallinu: Rétt sunnan við Hafnarskóg , við beygjuna norðan við Hafnará (milli veðurstöðva VÍ og Vg) og sitthvoru megin við Ölversafleggjarann þar sem vindurinn streymir út Hafnardalinn.



Mynd 41. Myndin sýnir samantekt á mælingum á vindhraða í akstri undir Hafnarfjalli þann 14.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A6 til A10 auk A12.



Mynd 42. Staðsetning ökutækis þegar vindhraði (♦) mældist > 95% af hágildi hvernar tímaraðar vindhraða sem skráð var þegar ekið var eftir þjóðveginum við Hafnarfjall þann 14.03.2005. Byggt er sömu gögnum og í Mynd A17. Veglínan er sýnd ásamt staðsetningu fastra mælistöðva Veðurstofu Íslands (●) og Vegagerðarinnar (★).



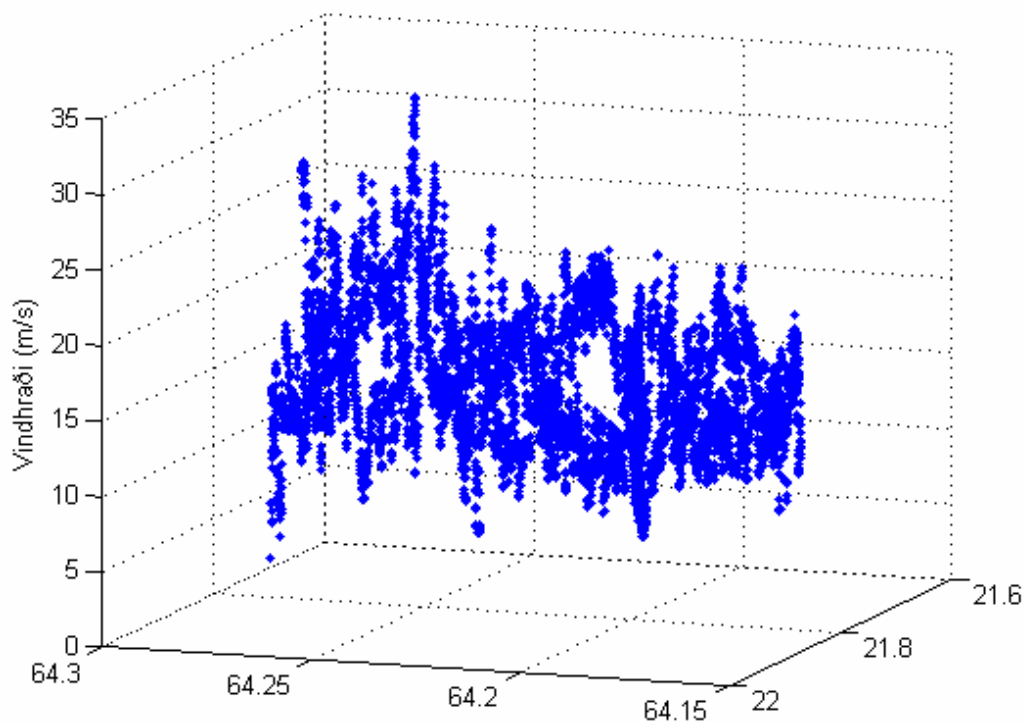
Mynd 43. Dreifing á lengdar- og breiddargráðu ökutækis þegar vindhraði mældist > 95% af hágildi hvers tímaráðar vindhraða sem skráð var þegar ekið var eftir þjóðveginum við Hafnarfjall þann 14.03.2005.

3.2 VINDMÆLING 17.03.2005

Seinnipart dags þann 17. mars var austanátt eða austsuðaustanátt á vesturlandi og stífur vindur, einsog sjá má af Myndum A1 til A4, sem sýna vindmælingar á nokkrum mælistöðum Vegagerðarinnar frá þeim tíma. Meðalvindhraði á Kjalarnesi var yfir 20 m/s og mjög sterkar hviður við Hafnarfjall.

Lagt var upp frá Selfossi um kl. 21:15 og keyrt sem leið lá til Reykjavíkur og þaðan áfram upp á Kjalarnes, gegnum Hvalfjarðargöngin og norður að Hafnarfjalli. Þar var keyrt fram og til baka nokkrum sinnum, stoppað og mælt við veðurstöðvar Vegagerðarinnar og Veðurstofu Íslands undir fjallinu og síðan ekið tilbaka til Reykjavíkur. Myndir A20 til A35 sýna niðurstöður mælinga frá þessari ferð. Myndir A16 til A19 sýna vindmælingar Vegagerðarinnar á Hellsheiði, Sandskeiði, Kjalarnesi og við Hafnarfjall.

Mælingar á vindhraða og vindstefnu ber allvel saman við mælingar Vegagerðarinnar, sérstaklega hvað varðar meðaltalsgildi. Hins vegar skráir mælir Vegagerðarinnar mun hærri hágildi vindhraða á tímabilinu frá 21:00 til 24:00 en neminn á þaki bílsins. Það þarf þó ekki að koma á óvart þar sem hágildin eru tilviljunarkennd augnabliksgildi og bílinn aðeins staðsettur á sama stað og mastur vegagerðarinnar í u.þ.b. 10 mínútur, auk þess sem vindneminn í mastrinu stendur nokkrum metrum hærra frá jörðu. Rétt er að vekja athygli á því að heldur meiri breytileiki er í þeim gögnum sem mæld eru á ferð heldur en í þeim sem mælast þegar vindnemi er kyrrstæður. Þetta má meðal annars rekja til þess viðbótar iðustreymis sem ökutækið skapar þegar það klýfur loftið.

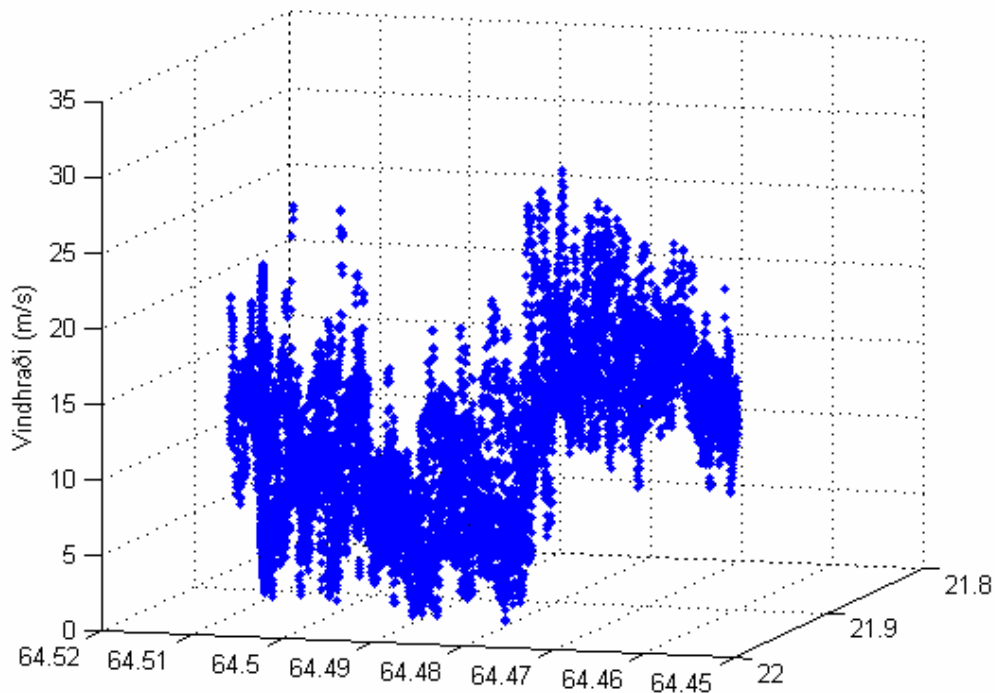


Mynd 44. Myndin sýnir samantekt á mælingum á vindhraða þegar ekið var um Kjalarnes þann 17.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu, þ.e. staðsetningu ökutækis. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A21 og A34.

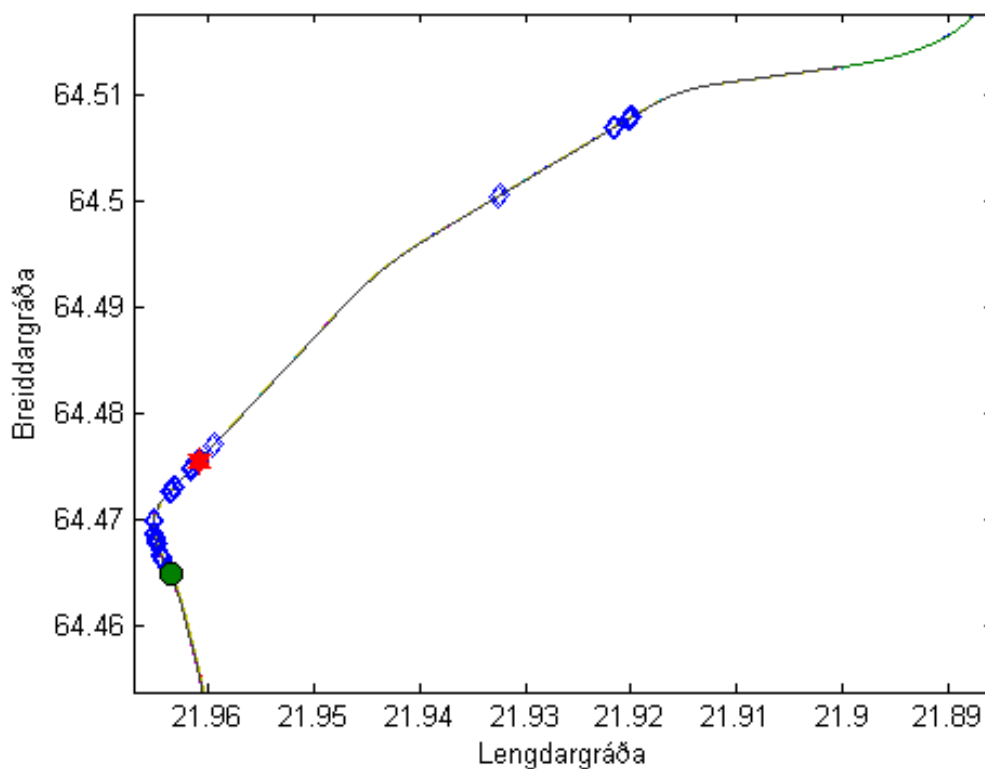
Mynd 44 sýnir samantekt á mælingum á vindhraða í akstri á Kjalarnesi þann 17.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A22 og A33. Athygli vekur að í þessari vindátt virðist vindhraðinn á Kjalarnesi vera umtalsvert meiri norðarlega á Kjalarnesi en sunnarlega. Þar sem vindnemi V_g er staðsettur í hnitunum (64,21;21,77) þá virðist hann ekki gefa rétta mynd af vindaðstæðum á svæðinu fyrir þessa vindátt. Í þessu sambandi má nefna það að þennan dag höfðu bílar hrakist út af veginum á svæðinu rétt sunnan við Hvalfjarðargöngin.

Mynd 45 sýnir samskonar samantekt á mælingum í akstri við Hafnarfjall. Greinilegt er að í þessari vindátt er vindasamast við suðurhorn Hafnarfjallsins, þó greina megi einstaka hviður norðar þ.e. í Hafnarskógi.

Þetta er kortlagt frekar á Mynd 46, með því að finna hágildi í mælingunum og staðsetja þau á veglínunni þar sem þau mælast. Veglínan er sýnd ásamt staðsetningu fastra mælistöðva Veðurstofu Íslands (64,46;21,96) og Vegagerðarinnar (64,21;21,77). Mynd 46 byggir á sömu gögnum og sýnd eru á Mynd 45. Greinilegt er að í þessari vindátt er vindasamasta svæðið við fjallið á beygjunni í veglínunni þar sem hún liggur á milli veðurstöðva VÍ og V_g .

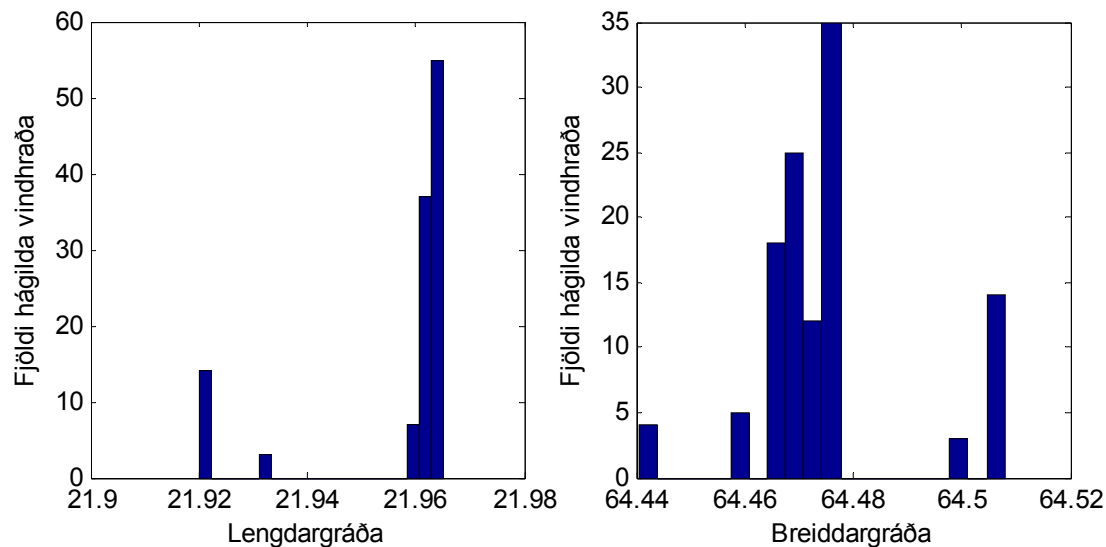


Mynd 45. Myndin sýnir samantekt á mælingum á vindhraða þegar ekið var meðfram Hafnarfjalli þann 17.03.2005, sem fall af breiddar- og lengdargráðu, þ.e. staðsetningu ökutækis. Á myndinni eru teknar saman mælingar frá Myndum A23 til A30.

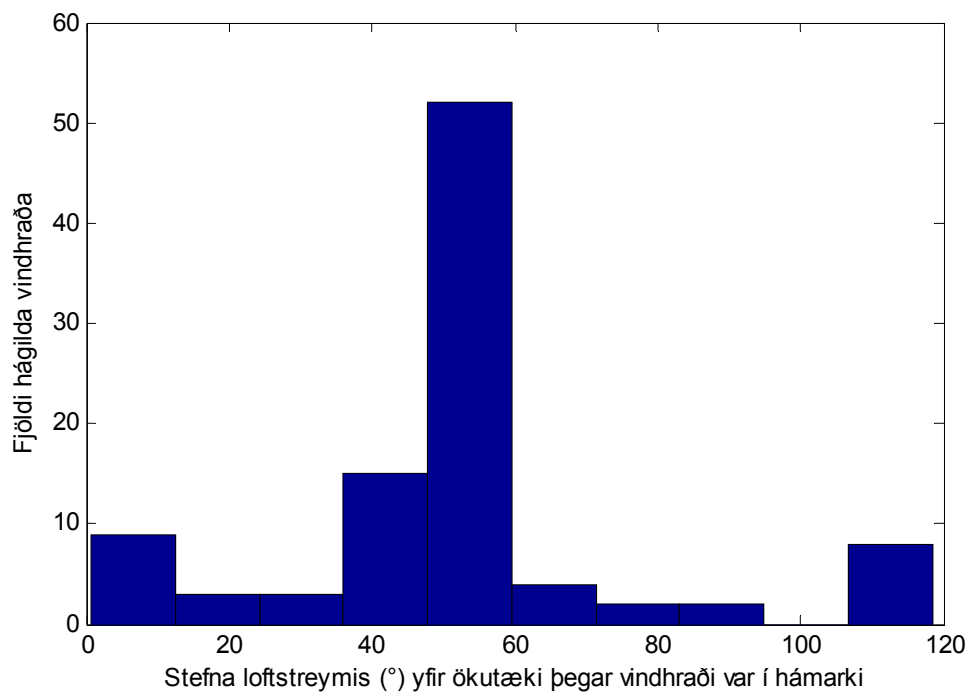


Mynd 46. Staðsetning ökutækis þegar vindhraði (\diamond) mældist $> 95\%$ af hágildi hvernar tíma- raðar vindhraða sem skráð var þegar ekið var eftir þjóðveginum við Hafnarfjall þann 17.03.2005. Byggt er sömu gögnum og í Mynd . Veglínan er sýnd ásamt staðsetningu fastra mælistöðva Veðurstofu Íslands (\bullet) og Vegagerðarinnar (\star).

Mynd 47 sýnir svo dreifingu á lengdar- og breiddargráðu ökutækis þegar þau hágildi mældust sem sýnd eru á Mynd 46. Þar með fæst ákveðin staðfesting á því sem áður kom fram. Í austsuðaustanátt við Hafnarfjall virðast vera vindasamast í beygjunni við Hafnarána, þ.e. á breiddargráðunum 64,64 – 64,48.



Mynd 47. Dreifing á lengdar- og breiddargráðu ökutækis þegar vindhraði mældist > 95% af hágildi hvarrar tímaráðar vindhraða sem skráð var þegar ekið var eftir þjóðveginum við Hafnarfjall þann 17.03.2005.



Mynd 48. Stefna loftstreymis yfir ökutæki fyrir þær mælingar sem gáfu 95% eða meira af hágildi mældra vindraða.

Loftstreymið sem hefur áhrif á ökutæki er samansett af vindinum ásamt því loftstreymi sem verður til þegar ökutækið klýfur loftið. Stefna þessa heildar loftstreymis hefur mikil áhrif á hvort og hversu mikil hætta skapast fyrir ökutæki á ferð í stormi. Það er því áhugavert að skoða hver var stefna loftstreymis yfir ökutækið fyrir þær mælingar sem gáfu 95% eða meira af hágildi mældra vindhraða. Þetta er sýnt á Mynd 48. Þar sést að stefna loftstreymisins þegar bíllinn keyrir á 16-20 m/s hraða í gegnum hið vindasama svæði við Hafnará er oftast milli 50° og 60° miðað við að 0° sé í stefnu ökutækis. Þetta er tiltölulega varasöm loftstreymisstefna, sérstaklega með tilliti til hættu á veltu, eins og kemur fram í kafla 4 og viðauka B.

3.3 VINDMÆLING 28.03.2005

Þann 28. mars var suðaustanátt á suðvesturlandi og meðalvindur yfir 10 m/s seinnipart dagsins, einsog sjá má af Mynd 49, sem sýna vindmælingar frá þeim tíma á mælistað Vegagerðarinnar á Sandskeiði.

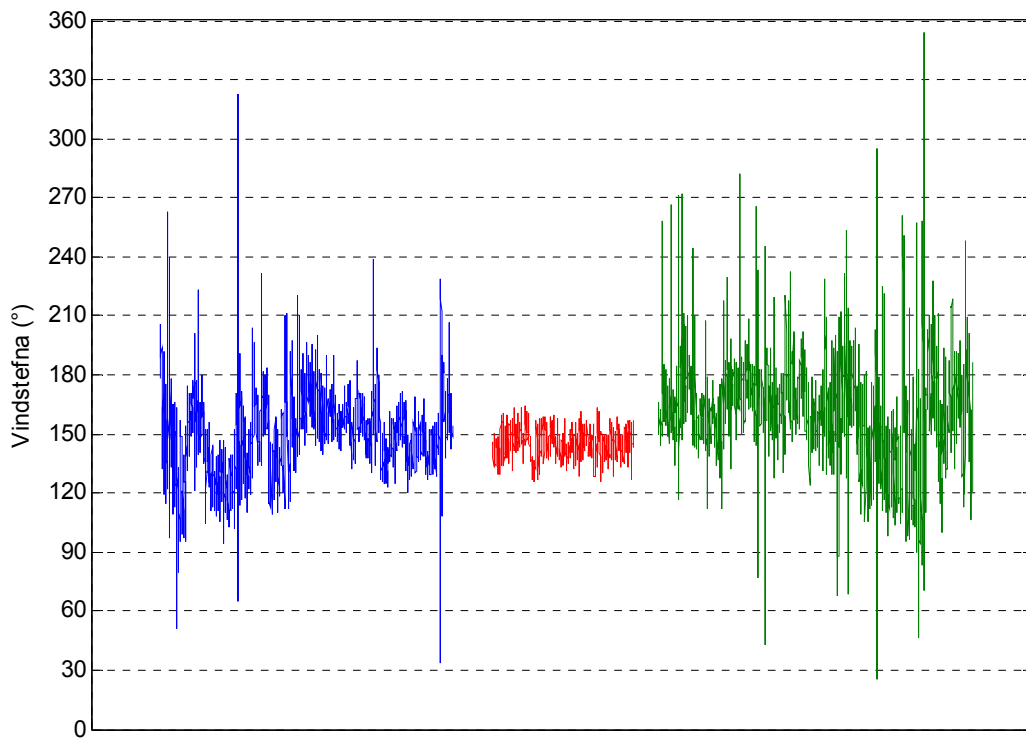
Tilgangur ferðarinnar var að sannreyna og prófa ýmsa þætti sem upp höfðu komið við úrvinnslu mælinganna þann 14. og 17. mars. Lagt var upp frá Selfossi um kl. 16:30 og keyrt sem leið lá upp á Reykjavík. Stoppað var við mælistað Vegagerðarinnar á Sandskeiðinu og mælt þar í rúmar 10 mínútur.

Mynd 50 sýnir mælingar frá þessari ferð. Mælingum á vindhraða og vindstefnu ber allvel saman við mælingar Vegagerðarinnar á Sandskeiði, jafnvel þó vindneminn í mastrinu standi nokkrum metrum hærra frá jörðu. Vindurinn fer vaxandi á leiðinni frá Selfossi og upp á Sandskeið, en svo dregur aftur úr vindi á leiðinn frá Sandskeiði til Reykjavíkur. Ef litið er á sama tímabil (16:30-17:40) í mælingum Vg á Sandskeiði, þá virðist greinilegt að vindhraði hefur verið meiri þar en bæði austan og vestan þess svæðis á þessu tímabili.

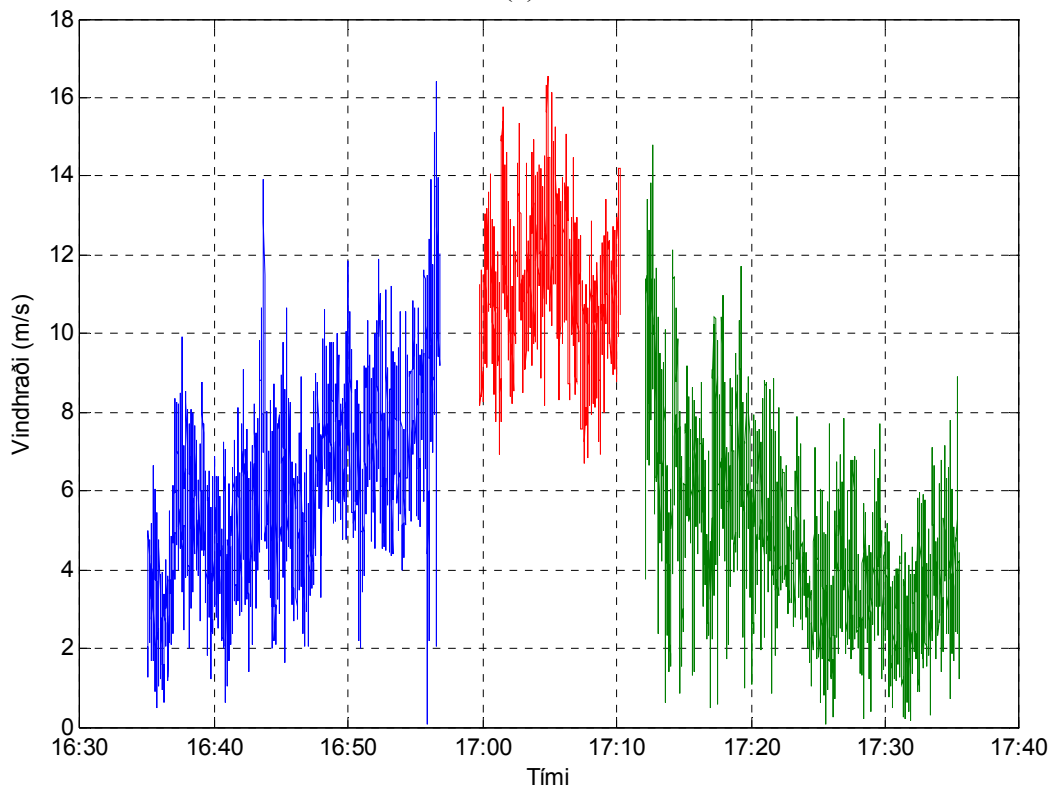
Sandskeið 28.03.2005 07:30 til 30.03.2005 07:30



Mynd 49 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg á Sandskeiði (64.06, 21.529) (<http://www.vegag.is>).



(a)



(b)

Mynd 50 – (a) Vindátt og (b) vindhraði mæld á leiðinni frá Selfossi til Reykjavíkur. Á milli kl. 17:00 og 17:10 var staðnæmst við veðurstöð Vg á Sandskeiði og mældur vindhraði og vindátt til að hafa samanburð við mælingar Vg.

4 Reiknilíkan til að meta öryggi ökutækja í vindi

Í fyrsta áfanga verkefnisins var fjallað nokkuð um samspil vinds, ökutækis og vegar. Sem hluta af öðrum áfanga var ákveðið að endurbæta líkan sem fjallað er um í [2]. Markmiðið með líkaninu er að meta líkurnar á því að ökutæki verði óstöðugt þ.e. velti eða skriði vegna samverkandi áhrifa ökuhraða, veghalla, núningsmótstöðu og vindaðstæðna. Tilgangurinn var að kanna frekar áhrif hinna ýmsu þátta sem hafa áhrif á öryggi ökutækja í vindi. Skrifuð var grein um rannsóknina sem kynnt var á fjórðu Evrópu-Afríku ráðstefnunni um vindverkfærði sem haldin var í Prag í júlí 2005. Greinin [3] fylgir með þessari skýrslu í Viðauka B.

Litið var á hvernig samspil vindhraða, vindstefnu, ökuhraða, núningsmótstöðu hjóla og vegar ásamt veghalla hefðu áhrif á öryggi ökutækis í akstri. Litið var svo á að ofangreindir áhrifaþættir væru slembibreytur, normaldreifðar um eitthvert tiltekið meðalgildi með einhverju staðalfrávik. Skoðuð voru mörg tilvik fyrir mismunandi meðalgildi á viðkomandi slembibreytum. Stærðir sem lýstu aflfræðilegum eiginleikum ökutækis voru meðhöndlaðar sem ákvarðanlegir breytur. Loftaflfræðilegir eiginleikar ökutækisina voru miðaðir við líkantilraunir fyrir flutningabíl með tengivagn (Coleman and Baker, 1994). Öryggi ökutækisins var lýst með svonefndri slysavísitölu (accident index).

Niðurstöður rannsóknarinnar sýna að með því að samþætta líkindafræðilegar og aflfræðilegar aðferðir, þá er hægt að meta öryggi ökutækja á ferð við mismunandi vindaðstæður. Greiningin sýnir einnig að allar ofangreindar breytur hafa áhrif á öryggi ökutækisins og slys eru líklegust þegar þær spila saman með óhagstæðum hætti.

Í framhaldinu er ætlunin, á grundvelli mældra veðurgagna á völdum veðurstöðvum Vegagerðarinnar, að reikna líkindi þess að umferðar óhappi verði vegna veðuráhrifa. Þannig fást tímaraðir fyrir slysalíkindi, miðað við ákveðnar forsendur hvað varðar ökuhraða, loftaflsstuðla og núningsmótstöðu. Loftaflsstuðlar myndu miðast við ákveðna gerð ökutækja, svo sem flutningabíla. Við ákvörðun á núningsmótstöðu mætti draga ályktanir af mældu rakastigi og veghita varðandi vegaðstæður. Á grundvelli tölfræðilegrar greiningar tímaraða slysalíkinda ætti að fást heildrænt mat á slyshættu bæði fyrir hvern einstakan stað sem reiknað væri fyrir, sem og fyrir vegakerfið allt ef allir mælistaðir meðfram vegum væru greindir með sama hætti. Mat af þessu tagi yrði kannski ekki algilt, en gæfi a.m.k. hlutfallslegan samanburð á aðstæðum sem fall af tíma sem og á milli mælistaða. Einnig mætti kanna fylgni milli reikningslegra slysalíkinda og slyskráningar á viðkomandi vegarköflum og jafnvel nota þær upplýsingar til að kvarða líkanið.

5 Umræða

Á Kjalarnesi er hlutfall slysa sem verða á þurru vegi nokkuð hærra en fyrir athugunarstaðinn undir Hafnarfjalli. Þegar þessi slys eru skoðuð nánar kemur í ljós að í 25% þessara tilvika hefur ökutæki oltið þegar ekið er á hraðanum 40 km/klst í hvasuviðri. Ökumenn virðast því hafa reynt að taka mið af aðstæðum en ekki getað afstýrt slysi þrátt fyrir það. Þetta vekur upp spurningar um það hvort ekki sé þörf á frekari umferðarstýringu við slíkar aðstæður en nú er.

Fjöldi óveðursdaga á Kjalarnesi og undir Hafnarfjalli er svipaður og um helming þess tíma sem óveður ríkir á öðrum staðnum er samtímis óveður á hinum. Fjöldi umferðarslysa á Kjalarnesi á 5 ára athugunartímabili er hærri en undir Hafnarfjalli á 7 ára athugunartímabili en umferð þar er einnig heldur meiri. Hlutfall vindaslysa af öllum slysum á Kjalarnesi á athugunartímabilinu var nokkuð hærra samanborið Hafnarfjall (Áfangaskýrsla I). Tveir afmarkaðir staðir á Kjalarnesi virðast mjög útsettir fyrir vindaslys, annars vegar kafli undir Esjubergi og hins vegar kafli rétt sunnan Hvalfjarðarganga við mynni Blikdals. Í fyrri tilvikinu verða slysin að stórum hluta í NA átt en í því seinna verða þau nánast öll í ANA-A átt. Þessar niðurstöður koma vel heim og saman við þær vindamælingar sem framkvæmdar voru. Þegar vindamælingar voru gerðar í norðaustan átt reyndist vindasamast við veðurstöð Vg sem stendur undir Esjubergi. Vindamæling sem gerð var eftir veginum í hvasstri ASA-átt bendir til þess að veðurstöð við Esjuberg gefi ekki lýsandi niðurstöður fyrir verstu aðstæður undir Kjalarnesi, enda voru verstu aðstæður þá nokkru norðar, nær Hvalfjarðargöngum.

Fjöldi slysa í Draugahlíðarbrekkum var tiltölulega lítill á athugunartímabilinu en þau eru þó að stórum hluta tengd háum vindhraða. Algengustu tegundir slysa í Draugahlíðarbrekku á athugunartímabilinu reyndust vera aftanákeyrslur og mætingarslys, 4 í hvorum flokki. Mætingarslysin urðu öll við vindhraða yfir 10 m/s og urðu einhver meiðsli í þeim öllum. Nú hefur vegurinn á þessu svæði verið endurgerður sem 2+1 vegur með víravegriði á milli akstursstefna og því má reikna með að breyting verði á slysasögu staðarins.

Mælingar með hreyfanlegum vindmæli sýna að vindaðstæður undir Hafnarfjall og á Kjalarnesi eru mjög háðar vindátt og þó svo að veðurstöðvar Vg virðist allvel staðsettar, þá er ekki tryggt að þær gefi að öllu leyti rétta mynd af aðstæðum. Ennfremur gefa niðurstöðurnar tilefni til að ætla að það megi kortleggja vindasama stað við þjóðvegi landsins með því að beita slíkum mælingum kerfisbundið fyrir mismunandi vindáttir.

Niðurstöður reiknilíkansins sýna að með því að samþætta líkindafræðilegar og aflfræðilegar aðferðir, þá er hægt að meta öryggi ökutækja á ferð við mismunandi vindaðstæður. Greiningin sýnir einnig að margar breytur hafa áhrif á öryggi ökutækisins og slys eru líklegust þegar þær spila saman með óhagstæðum hætti. Það eru margir óvissuþættir í líkangerð af þessu tagi og betri upplýsingar vantar um ýmsa áhrifaþætti. Þar má sérstaklega nefna tvennt, það er eðli eiginleika núningskrafta milli dekkja og vegyfirborðs annars vegar og loftsaflfræðilega kraftdreifingar fyrir mismundi ökutækis hins vegar. Í framhaldinu er ætlunin að gera prófanir, á grundvelli mældra veðurgagna á völdum veðurstöðvum Vegagerðarinnar, með að reikna líkindi þess að umferðar óhappi verði vegna veðuráhrifa fyrir ákveðna gerð ökutækis. Vonir standa til að með slíkri aðferðarfræði megi fá heildrænt mat á hættu sem nota megi til samanburðar á ákveðnum mælistöðum.

6 Þakkir

Höfundar þakka Rannsóknarráði umferðaröryggismála sem styrkti verkefnið. Þá þökkum við lögreglunni í Borgarnesi fyrir gagnlegar upplýsingar um aðstæður við Hafnarfjall. Slys- og ökutækjagögn sem notuð voru í verkefninu voru fengin frá Umferðarstofu. Einnig ber að þakka Ragnari Sigbjörnssyni, Háskóla Íslands, og Colin Baker, University of Birmingham, fyrir þeirra framlag til líkansins sem lýst er kafla 4 og viðauka B. Þá er rétt að þakka aðstoð Óðins Þórarinssonar, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, við undirbúning og framkvæmd mælinga á vegum.

Heimildir

1. Skúli Þórðarson og Jónas Þór Snæbjörnsson, 2004: Umferðarslys og vindafar. Áfangaskýrsla I. Verkefni fjármagnað af Rannsóknarráði umferðaröryggismála. ORION Ráðgjöf og Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, 42 bls.
2. Ragnar Sigbjörnsson and Jónas Þór Snæbjörnsson, 1998: Probabilistic assessment of wind related accidents of road vehicles: A reliability approach. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **74-76**: 1079-1090.
3. Jónas Þór Snæbjörnsson, Chris J. Baker and Ragnar Sigbjörnsson, 2005: Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environments. *Proceedings of EACWE4 - the 4th European-African conference on wind engineering*. J. Naprstek & C. Fischer (eds); ITAM AS CR, Prague, 11-15 July, 2005, Paper #296
4. J. B. Edwards, The Relationship Between Road Accident Severity and Recorded Weather, *Journal of Safety Research*, Volume 29, Issue 4, Winter 1998, Pages 249-262.

Áfangaskýrsla I inniheldur vísun í fleiri heimildir sem lagðar eru til grundvallar faglegri umræðu vegna verkefnisins.

Viðauki A – Vindmælingar á vegum – mæligögn frá færanlegu vindmælitæki

VIÐAUKI A1 -VINDMÆLING 14.03.2005

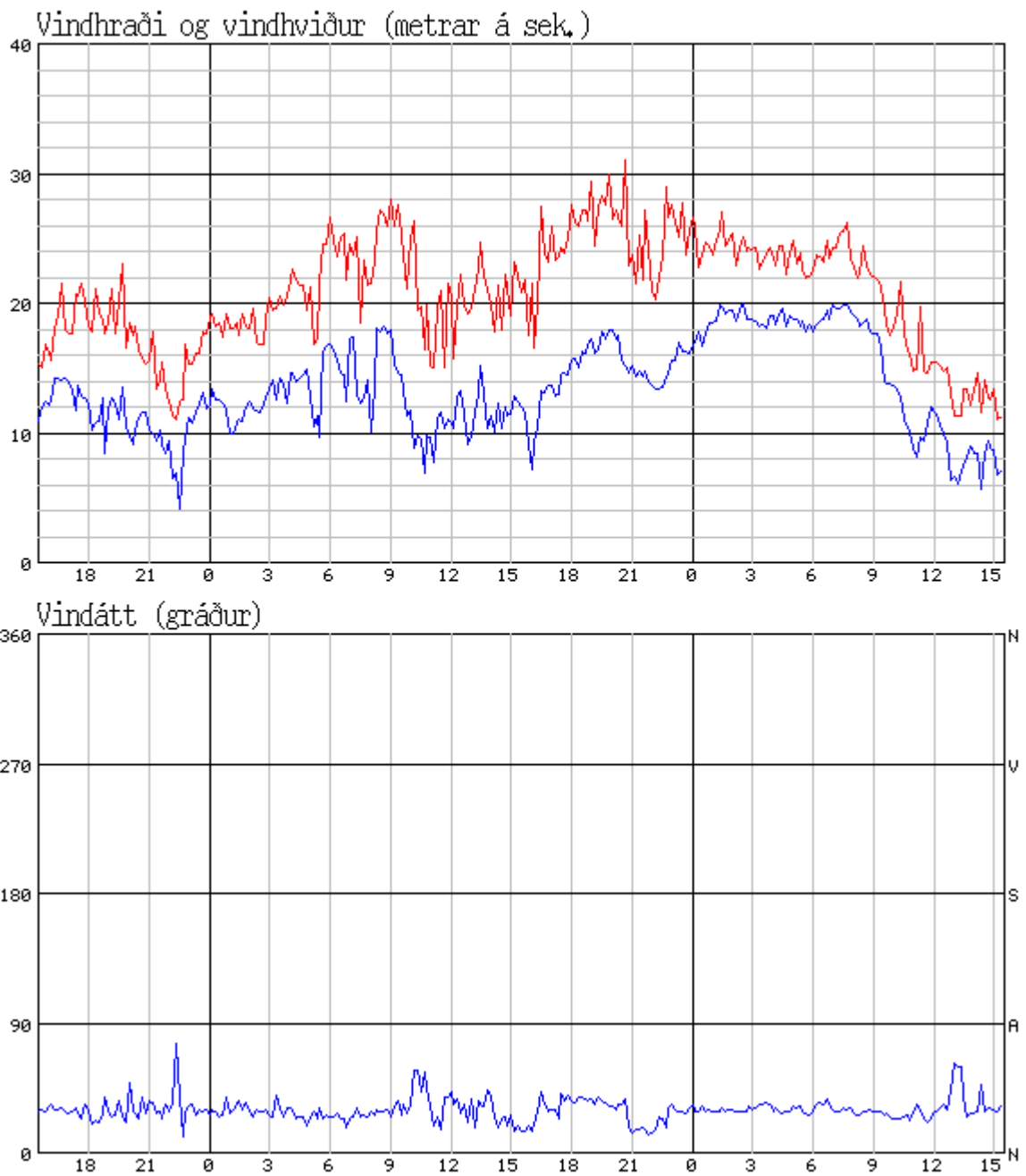
Þann 14. mars var norðaustanátt á vesturlandi og allstífur vindur fyrripart dagsins, einsog sjá má af Myndum A1 til A4, sem sýna vindmælingar frá þeim tíma á mælistöðum Vegagerðarinnar á Kjalarnesi og við Hafnarfjall. Meðalvindhraði á Kjalarnesi var um 20 m/s um morguninn og um 16 m/s við Hafnarfjall. Ákveðið var að fara í mæliferð með vindnema festan á bílþak. Lagt var upp frá Reykjavík um kl. 9:00 og keyrt sem leið lá upp á Kjalarnes. Þar var stoppað við mælistað Vegagerðarinnar og jafnframt keyrðar nokkrar ferðir fram og til baka á svæðinu. Því næst var farið í gegnum Hvalfjarðargöngin og norður að Hafnarfjalli. Þar var keyrt fram og til baka nokkrum sinnum, stoppað og mælt við veðurstöðvar Vegagerðarinnar og Veðurstofu Íslands undir fjallinu og síðan ekið aftur til Reykjavíkur. Myndir A3 til A15 sýna mæliniðurstöður frá þessari ferð. Á Myndum A3 til A13 sýna efstu gröfin leiðina sem ekin er á formi breiddar og lengdargráðu sem fall af tíma, á þessum gröfum sýnir táknið x upphafsstað en táknið ▷ sýnir endastöð. Myndir A1 og A2 sýna vindmælingar Vegagerðarinnar á Kjalarnesi og við Hafnarfjall.

Þennan morgun var vindáttin norðaustlæg og vindhraði á Kjalarnesi og við Hafnarfjall á bilinu 8 til 16 m/s samkvæmt mælingum Vg (sjá Myndir A1 og A2). Mælingarniðurstöður rannsóknaraðila eru í fullu samræmi við það. Þó virðast mælar Vegagerðarinnar skrá heldur hærri hágildi vindhraða á tímabilinu frá 9:30 til 13:00 en neminn á þaki bílsins. Það þarf þó ekki að koma á óvart þar sem hágildin eru tilviljunarkennd augnabliksgildi og bilinn aðeins staðsettur á sama stað og mastur vegagerðarinnar í u.þ.b. 10 mínútur í eitt skipti, auk þess sem vindneminn í mastrinu stendur nokkrum metrum hærra frá jörðu.

Tafla A1 – Vindmælingar Veðurstofu Íslands við Hafnarmela (64.465, 21.963) þann 14.03.2005

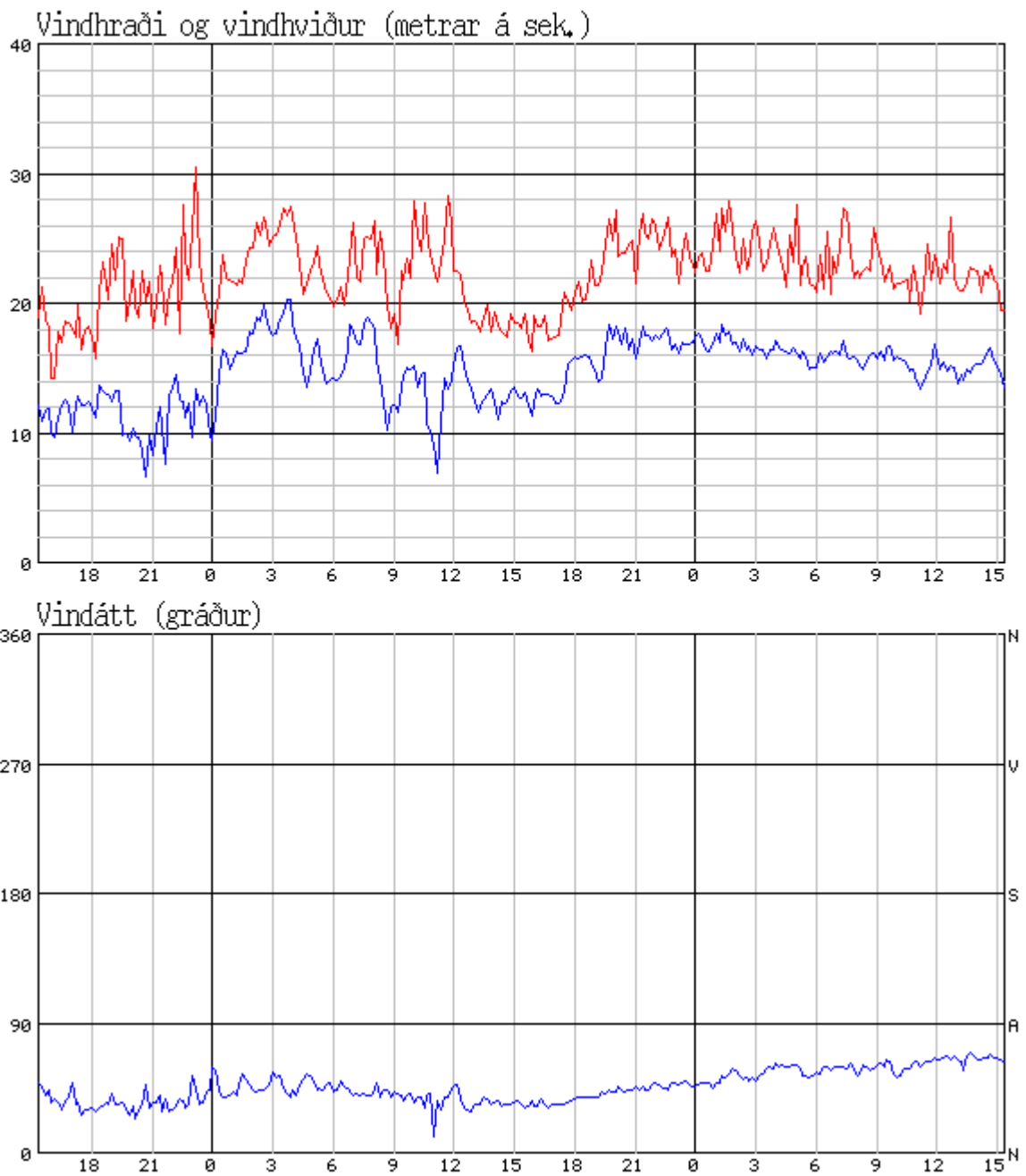
Ár	Mán.	Dagur	Kl.	Vindátt	Vindhraði m/s	Hiti C	Daggarmark C	Loftþr. hPa
2005	3	14	14	ANA	9,2	-4,3	-12,4	.
2005	3	14	13	NNA	9,4	-4,9	-12,6	.
2005	3	14	12	A	9,3	-5,1	-12,1	.
2005	3	14	11	NA	11,3	-5,7	-12	.
2005	3	14	10	NA	16,2	-6,5	-11,6	.
2005	3	14	9	NA	13,6	-6,9	-12	.
2005	3	14	8	NA	17,2	-6,6	-11,9	.
2005	3	14	7	NA	17,8	-6,5	-12,4	.
2005	3	14	6	NA	16	-6,6	-12,3	.
2005	3	14	5	NA	16,5	-6,9	-12	.

Kjalarnes 12.03.2005 15:30 til 14.03.2005 15:30



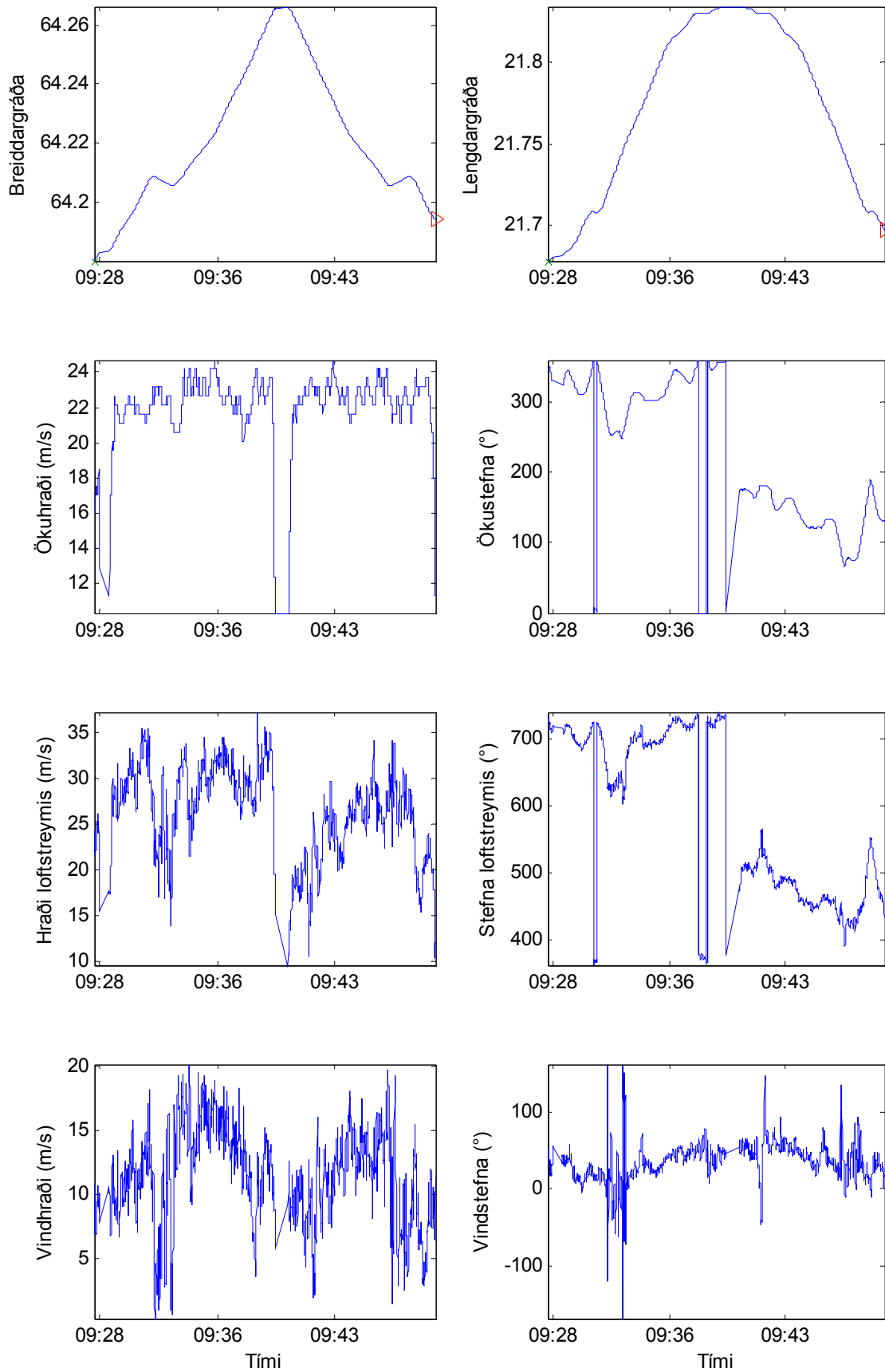
Mynd A1 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg á Kjalarnesi (64.211, 21.767) (<http://www.vegag.is>).

Hafnarfjall 12.03.2005 15:20 til 14.03.2005 15:20



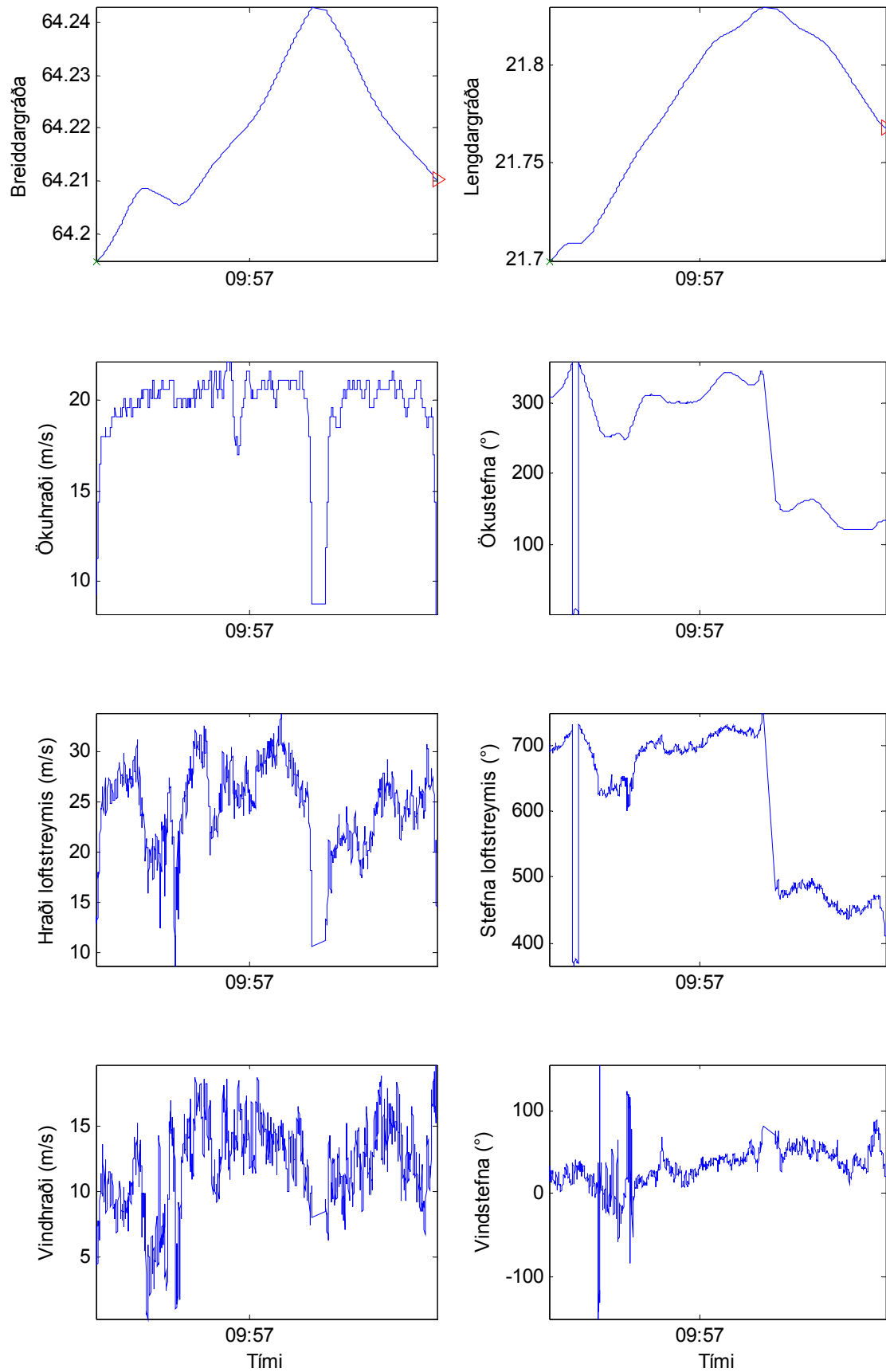
Mynd A2 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg við Hafnarfjall (64.47, 21.97) (<http://www.vegag.is>).

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



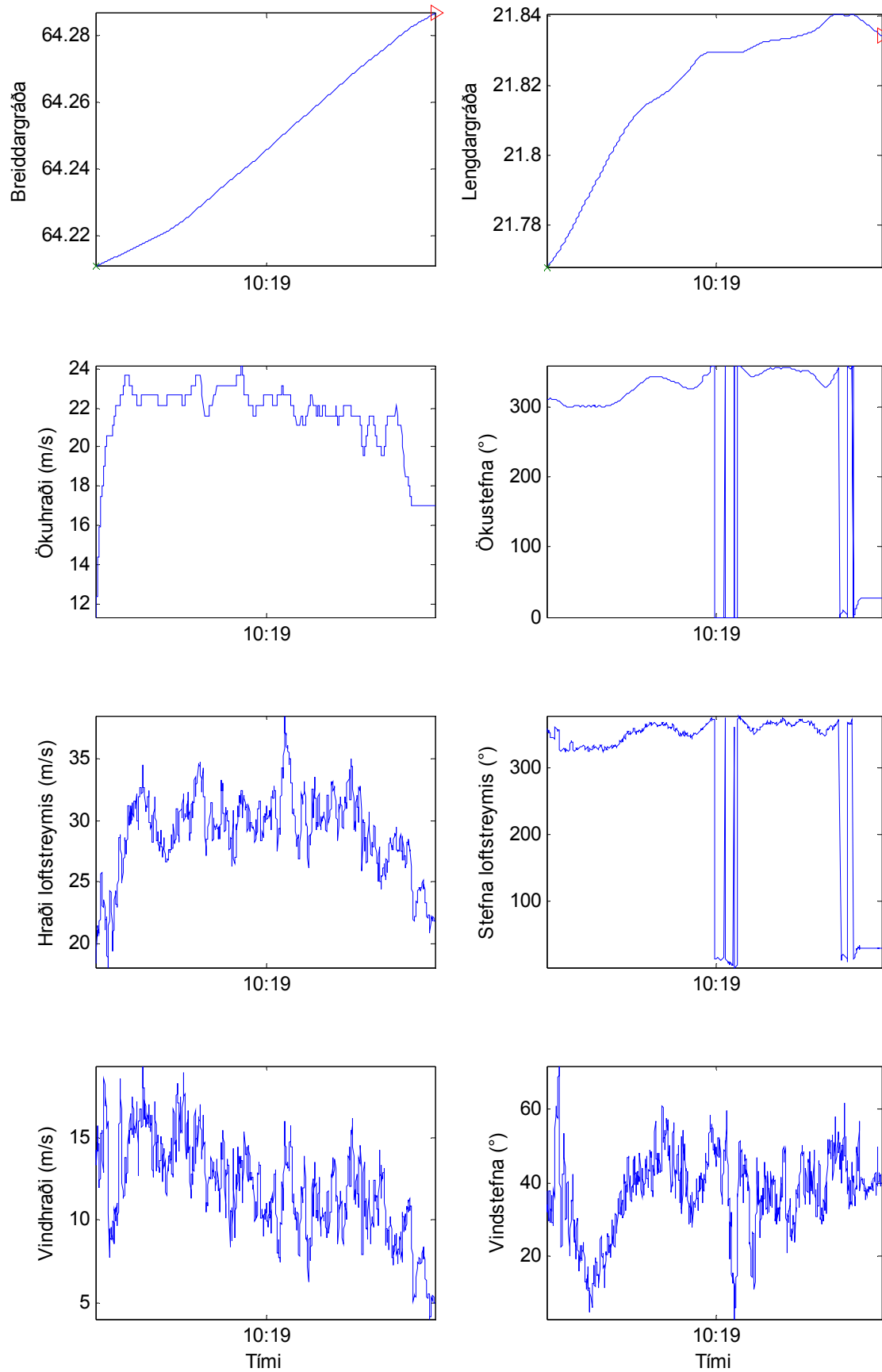
Mynd A3 – Mælingar á leiðinni frá Hvalfjarðargöngum að Blásteinsafleggjara.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



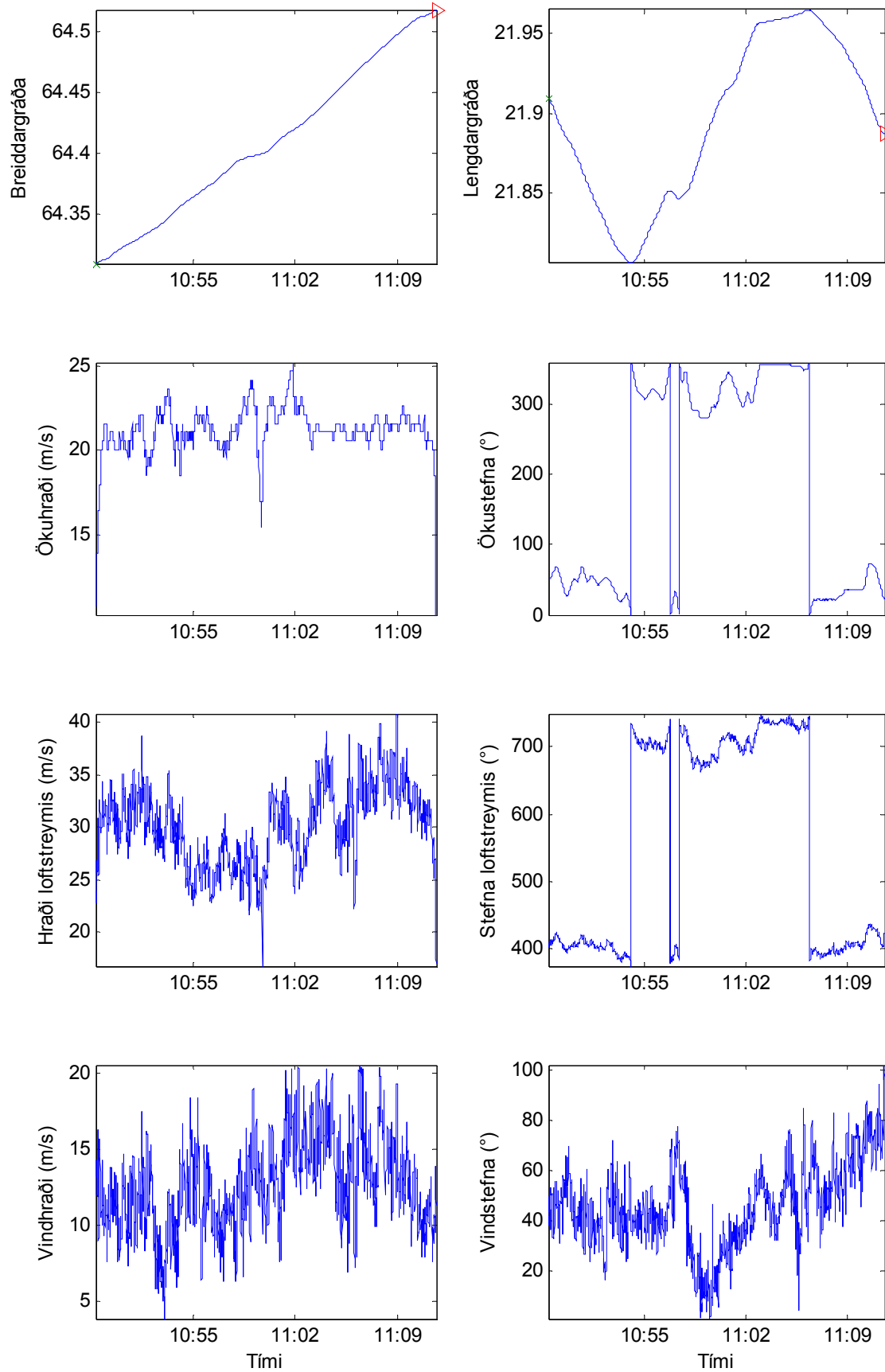
Mynd A4 – Mælingar á leiðinni frá Blásteinsafleggjara að gatnamótum við Kjalarnesbæ.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

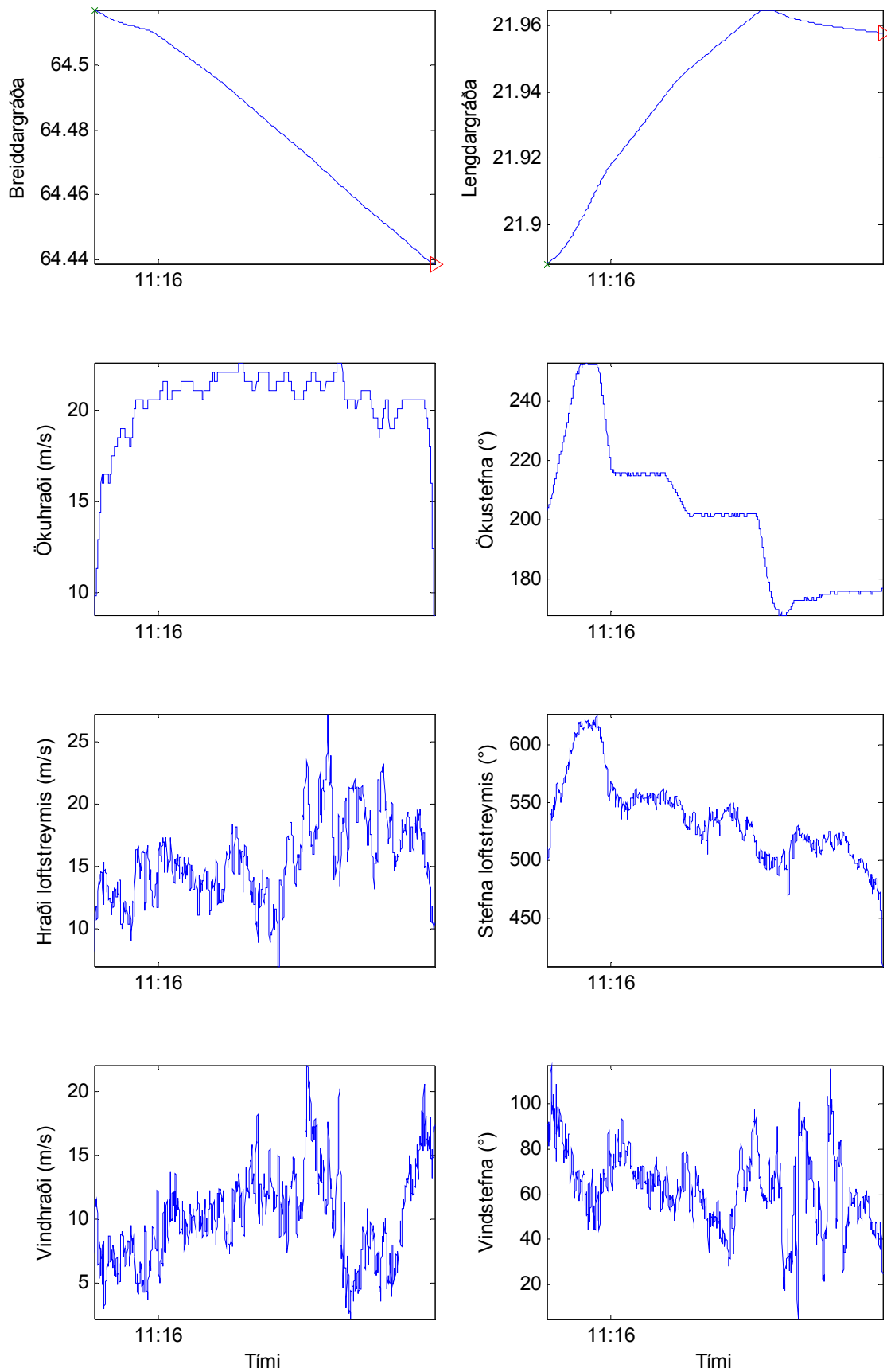


Mynd A5 – Mælingar á leiðinni frá gatnamótum Kjalarnesbæjar að vindmæli Vg.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

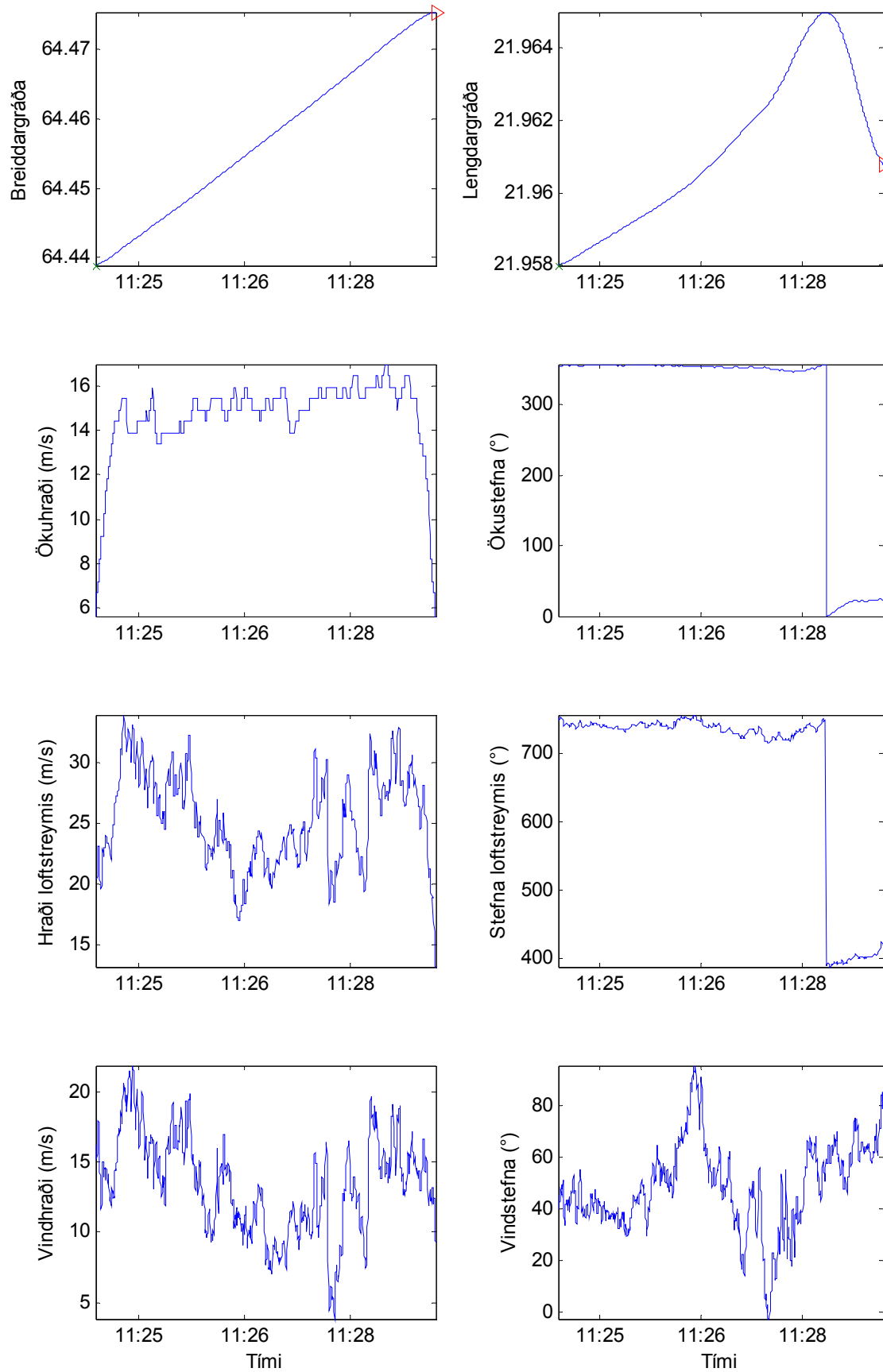


Mynd A6 – Mælingar á leiðinni frá Hvalfjarðargöngum norður að afleggjara að Mótél Venusi við Borgarfjarðarbrú.



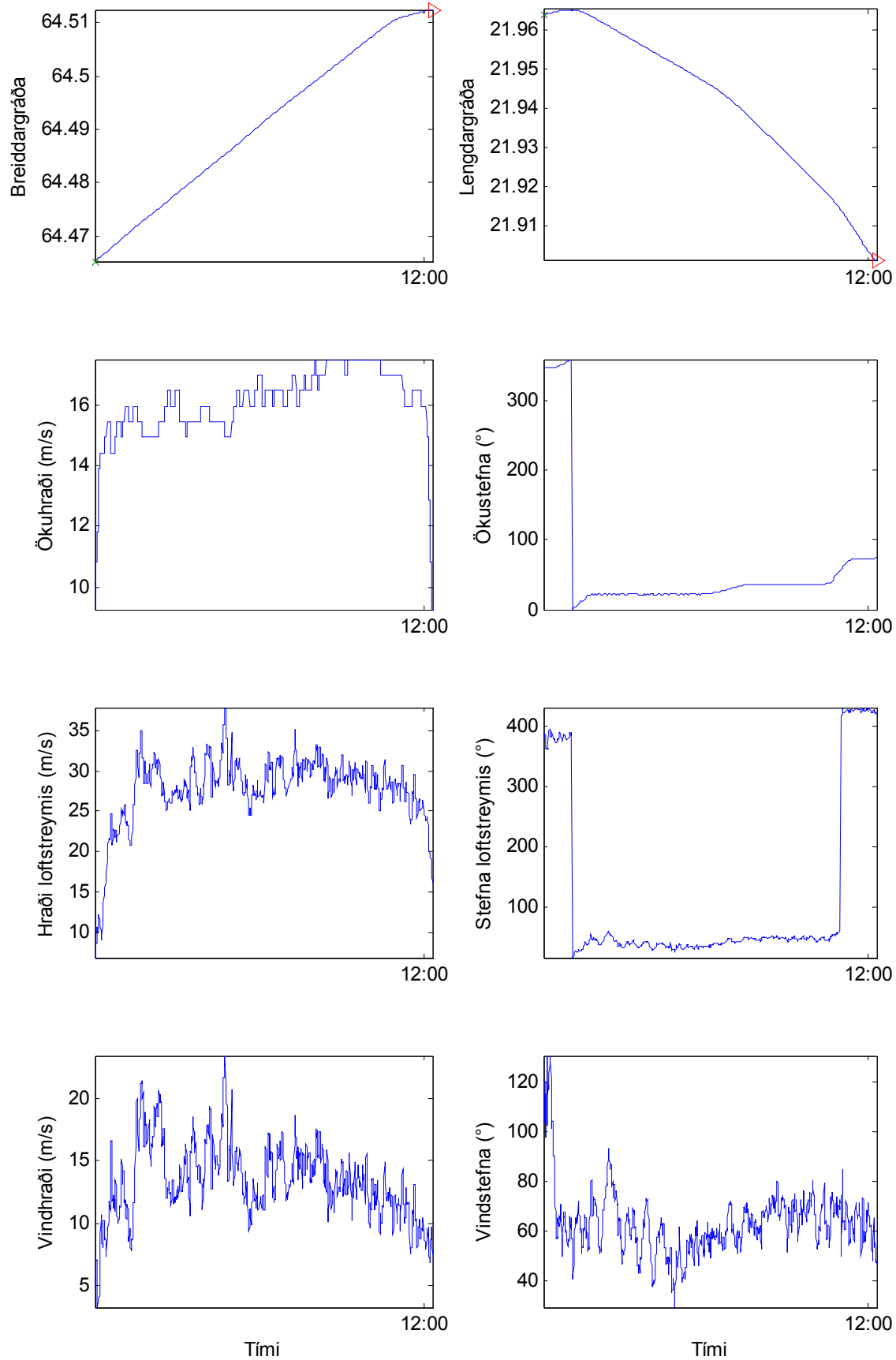
Mynd A7 – Mælingar á leiðinni frá afleggjara að Hótel Venusi tilbaka suður að Narfastaðaafleggjara.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



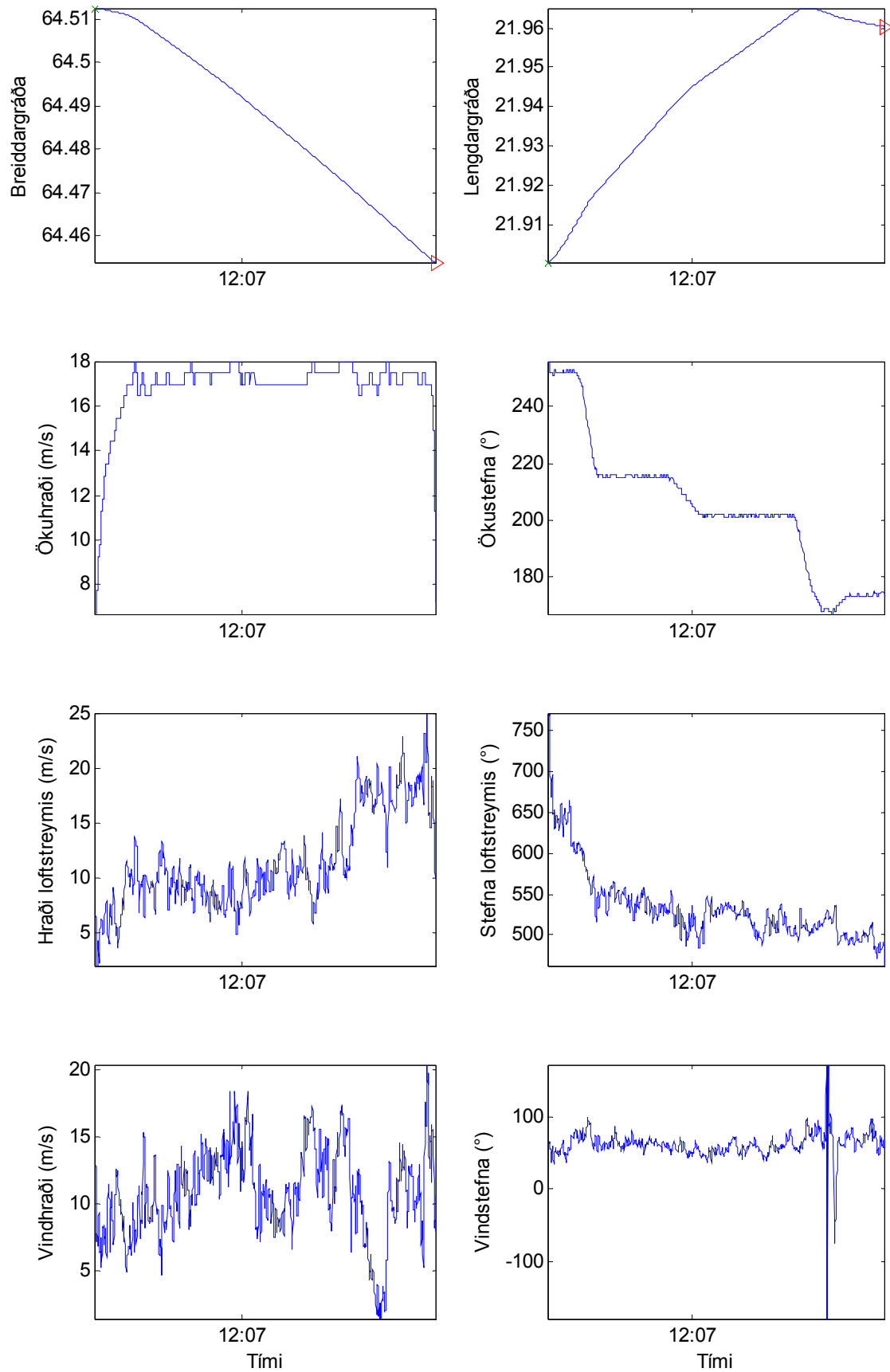
Mynd A8 – Mælingar á leiðinni frá Narfastaðaafleggjara að veðurstöð Vg við Hafnarfjall.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

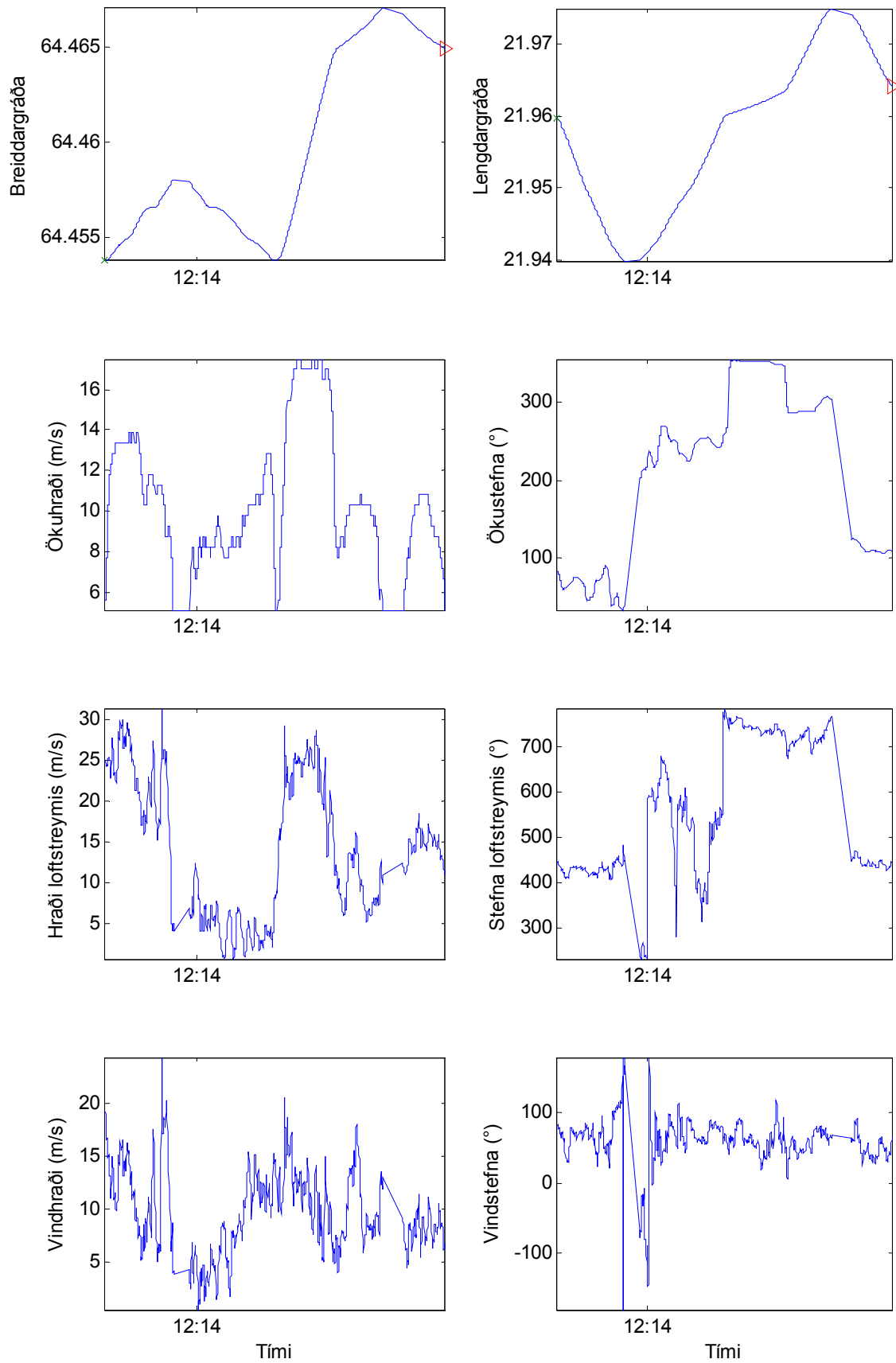


Mynd A9 – Mælingar á leiðinni frá veðurstofu Vg við Hafnarfjall norður að áningarstað á Háumelum.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

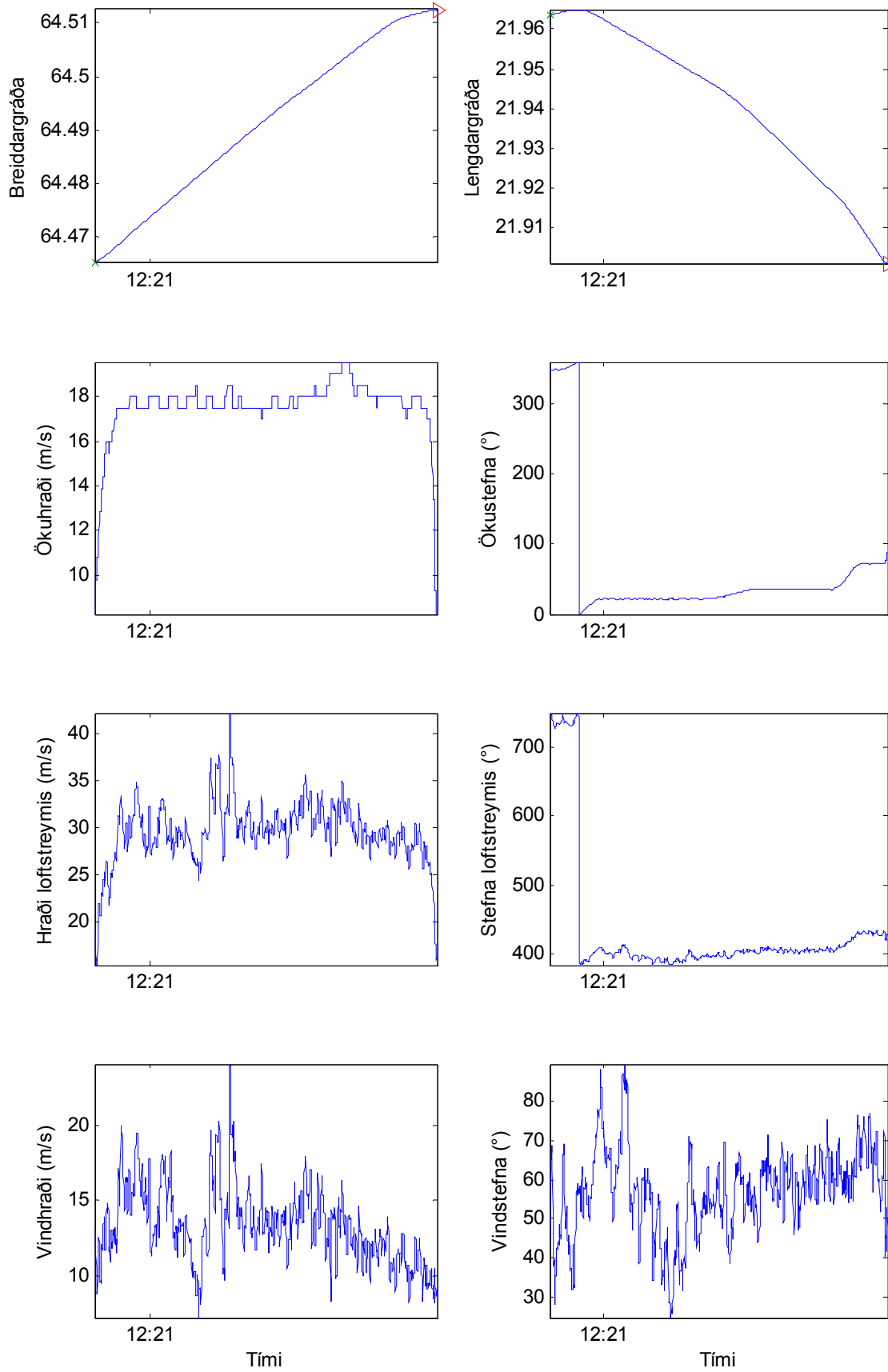


Mynd A10 – Mælingar á leiðinni frá áningarstað á Háumelum tilbaka suður að Ölfersafleggjara.



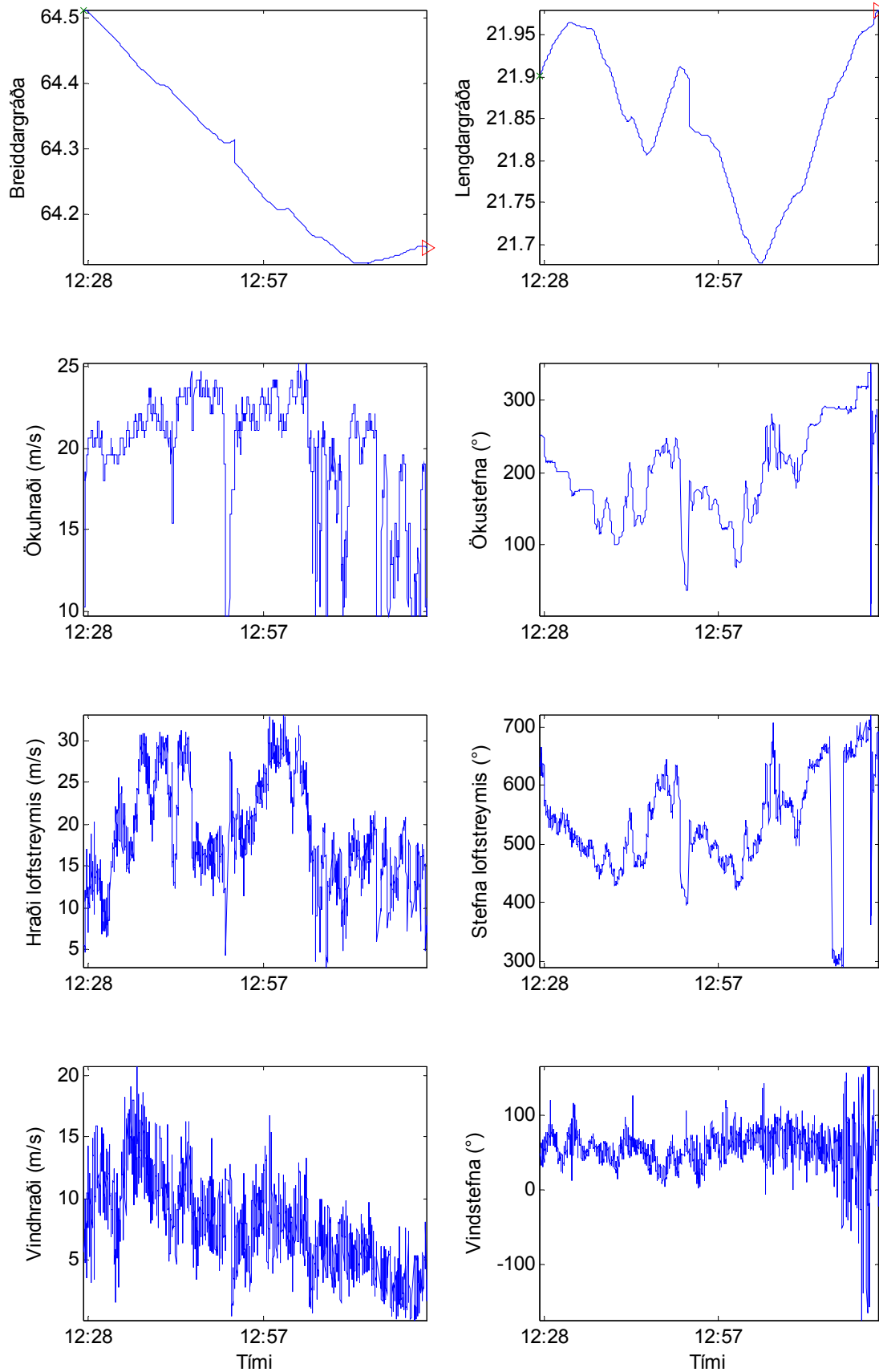
Mynd A11 – Mælingar á leiðinni eftir Ölversafleggjara upp að Ölveri, tilbaka niður á þjóðveg, þaðan niður afleggjarann að Höfn og tilbaka upp á þjóðveg.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

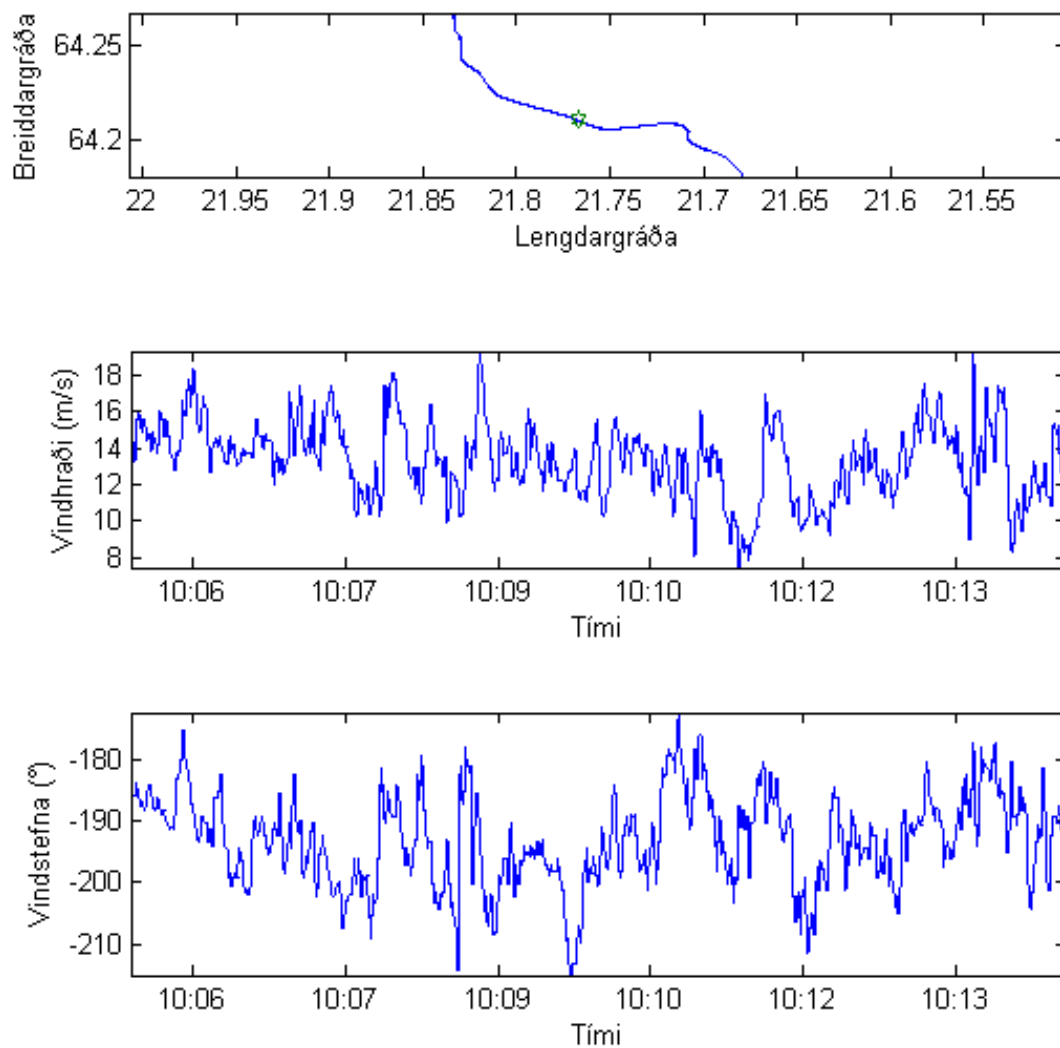


Mynd A12 – Mælingar á leiðinni frá afleggjara að Höfn norður að áningarstað á Háumelum.

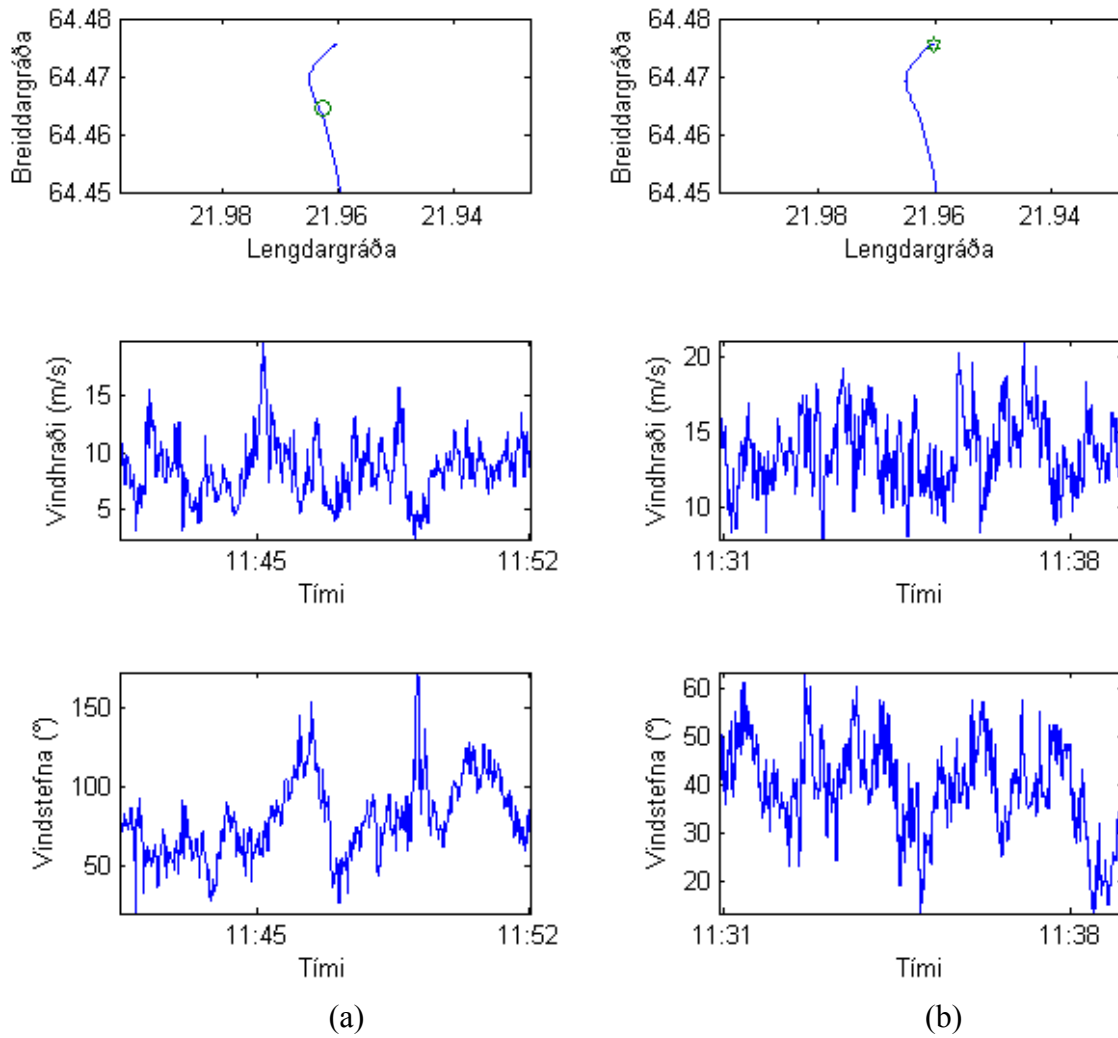
Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



Mynd A13 – Mælingar á leiðinni frá áningarstað á Háumelum tilbaka til Reykjavíkur.



Mynd A14 – Vindhraði og Vindstefna mæld við veðurstöð Vg á Kjalarnesi 14.03.2005. Ökutæki kyrrstætt. Efsta grafið sýnir staðsetningu mælistaðar.



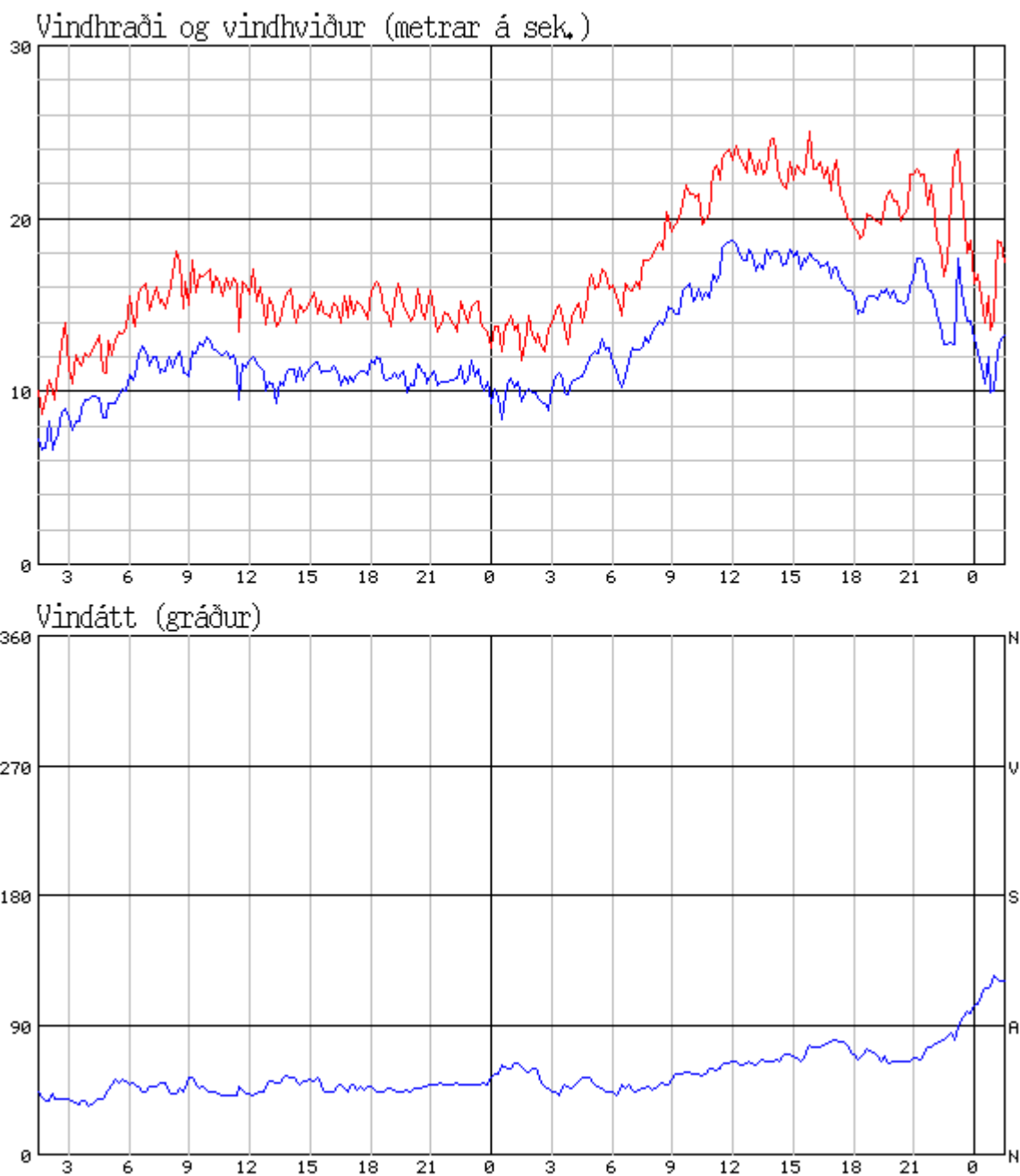
Mynd A15 – Vindhraði og Vindstefna mæld undir Hafnarfjalli (a) við veðurstöð Veðurstofu Íslands á Hafnará og (b) við veðurstöð Vg, þann 14.03.2005. Ökutæki kyrstætt. Efstu gröfin sýna staðsetningu mælistaða.

VIÐAUKI A2 - VINDMÆLING 17.03.2005

Seinnipart dags þann 17. mars var austanátt á vesturlandi og stífur vindur, einsog sjá má af Myndum A1 til A4, sem sýna vindmælingar á nokkrum mælistöðum Vegagerðarinnar frá þeim tíma. Meðalvindhraði á Kjalarnesi var yfir 20 m/s og mjög sterkar hviður við Hafnarfjall. Farið var í mæliferð með vindnema festan á bílþak. Lagt var upp frá Selfossi um kl. 21:15 og keyrt sem leið lá til Reykjavíkur og þaðan áfram upp á Kjalarnes, gegnum Hvalfjarðargöngin og norður að Hafnarfjalli. Þar var keyrt fram og til baka nokkrum sinnum, stoppað og mælt við veðurstöðvar Vegagerðarinnar og Veðurstofu Íslands undir fjallinu og síðan ekið tilbaka til Reykjavíkur. Myndir A20 til A35 sýna niðurstöður mælinga frá þessari ferð. Á Myndum A20 til A34 sýna efstu gröfin leiðina sem ekin er á formi breiddar og lengdargráðu sem fall af tíma, á þessum gröfum sýnir táknið x upphafsstað en táknið ▷ sýnir endastöð. Myndir A16 til A19 sýna vindmælingar Vegagerðarinnar á Hellisheiði, Sandskeiði, Kjalarnesi og við Hafnarfjall.

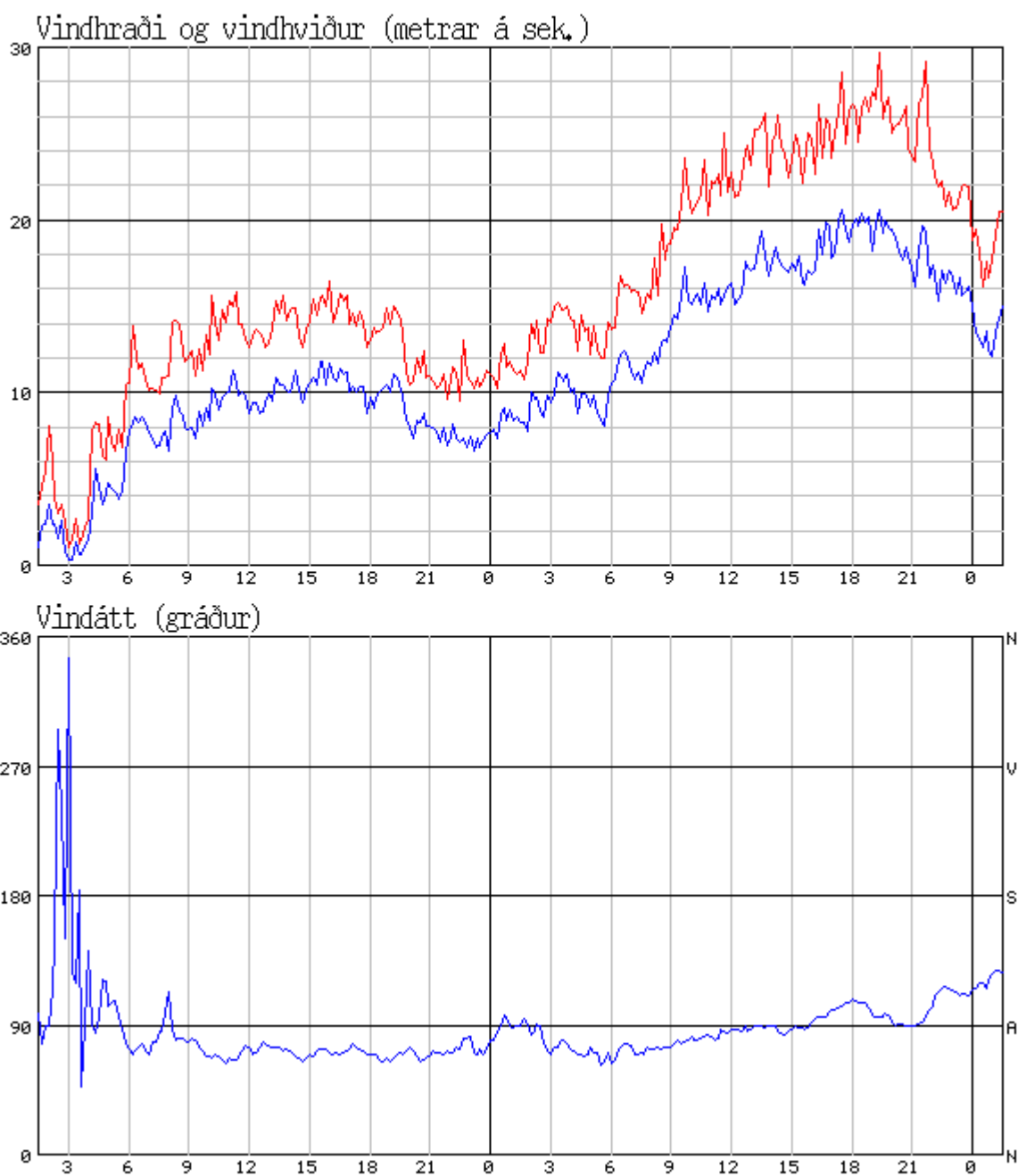
Mælingar á vindhraða og vindstefnu ber allvel saman við mælingar Vegagerðarinnar, sérstaklega hvað varðar meðaltalsgildi. Hins vegar skráir mælir Vegagerðarinnar mun hærri hágildi vindhraða á tímabilinu frá 21:00 til 24:00 en neminn á þaki bílsins. Það þarf þó ekki að koma á óvart þar sem hágildin eru tilviljunarkennd augnabliksgildi og bílinn aðeins staðsettur á sama stað og mastur vegagerðarinnar í u.þ.b. 10 mínútur, auk þess sem vindneminn í mastrinu stendur nokkrum metrum hærra frá jörðu.

Hellisheiði 16.03.2005 01:30 til 18.03.2005 01:30



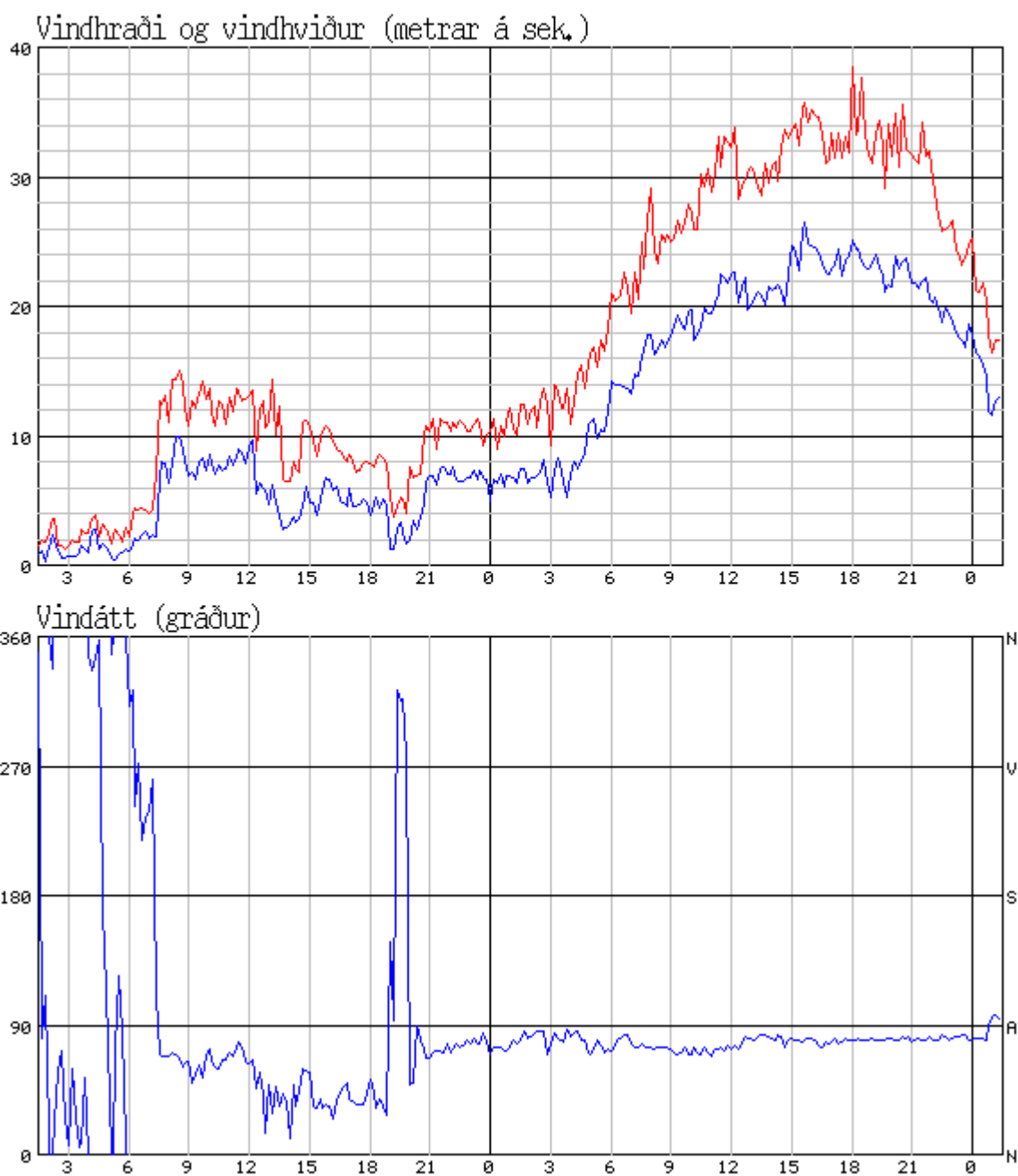
Mynd A16 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg á Hellisheið (64.02 21.32) (<http://www.vegag.is>).

Sandskeið 16.03.2005 01:30 til 18.03.2005 01:30



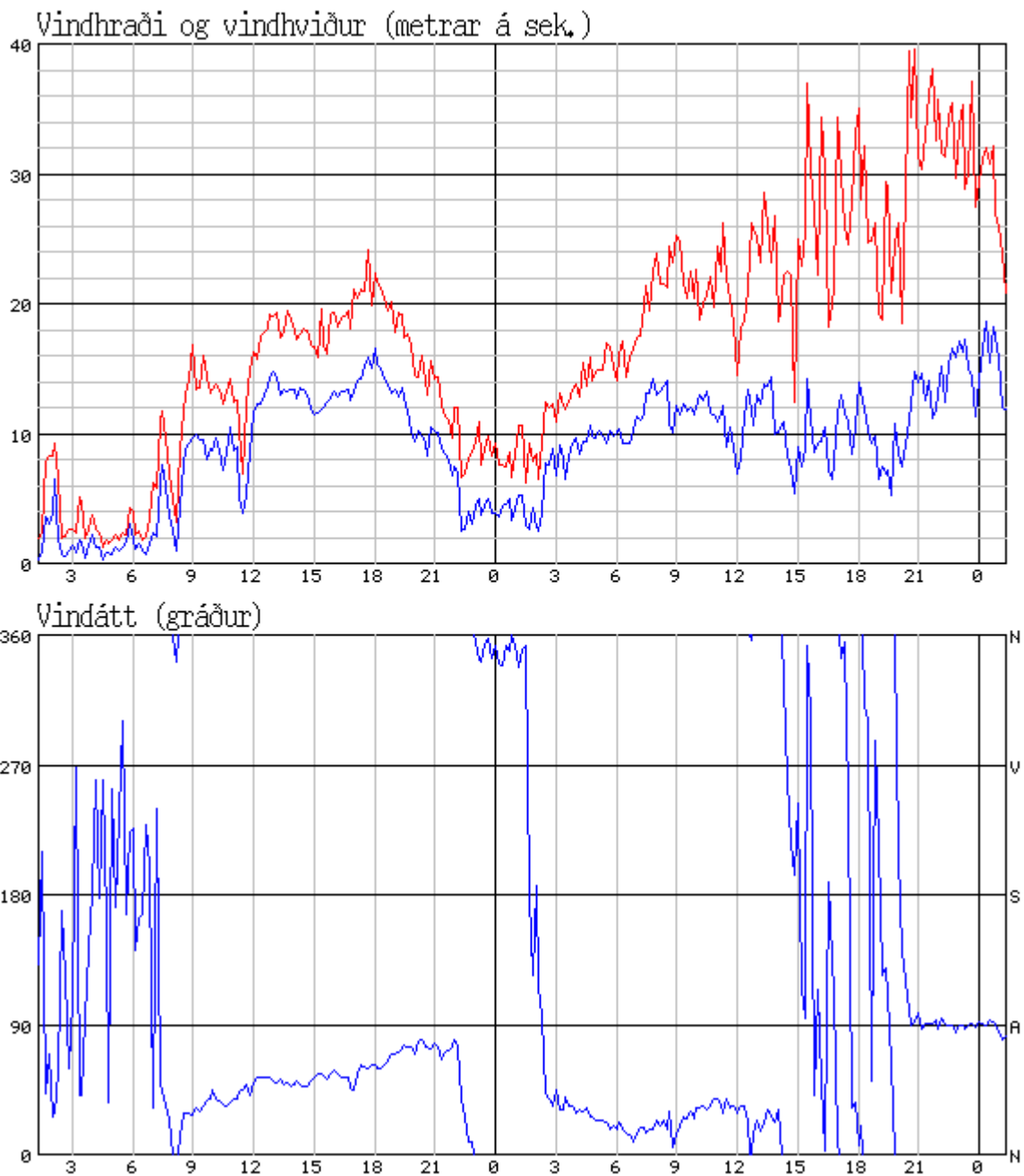
Mynd A17 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg á Sandskeiði (64.06, 21.529) (<http://www.vegag.is>).

Kjalarnes 16.03.2005 01:30 til 18.03.2005 01:30



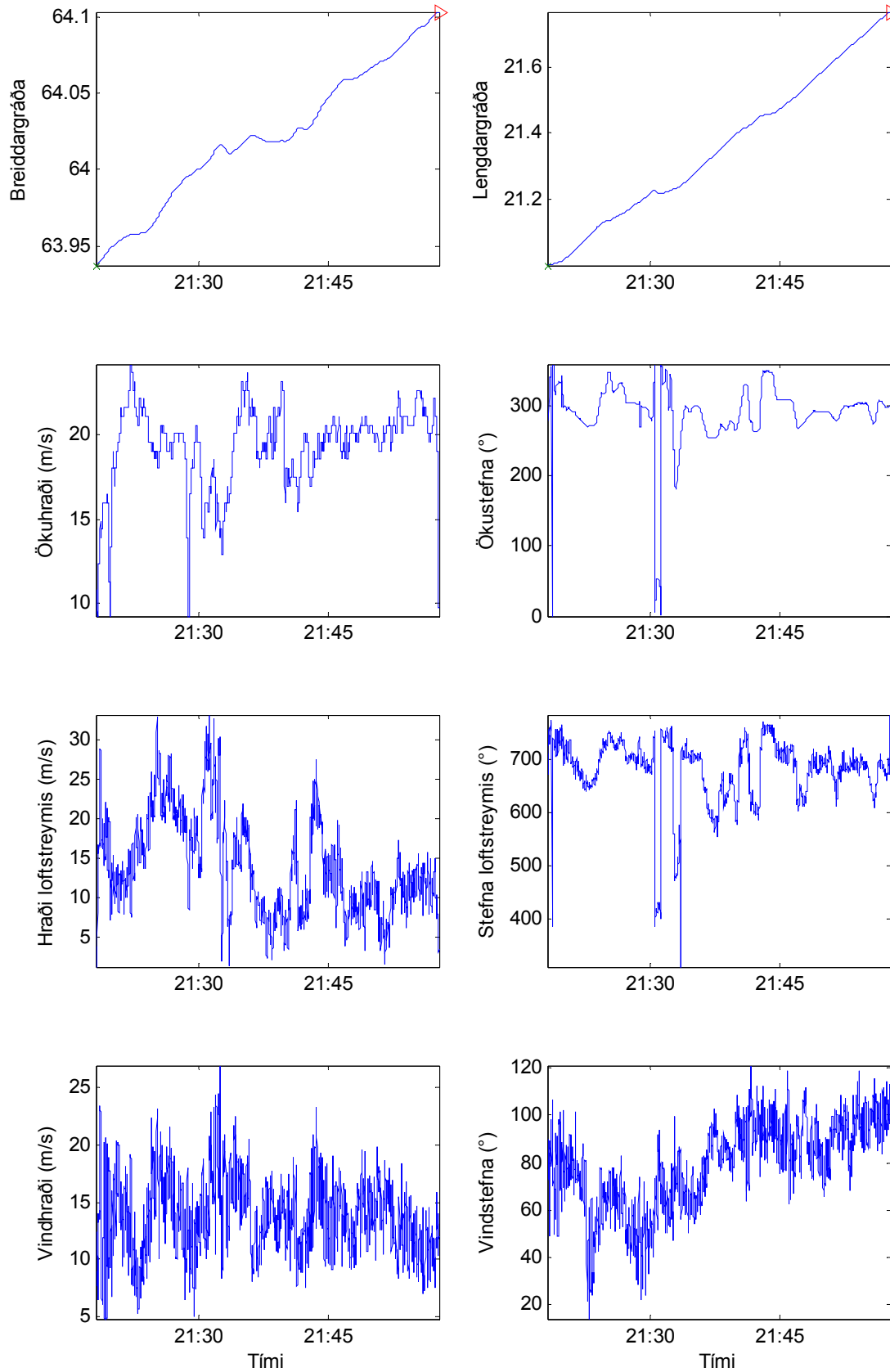
Mynd A18 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg á Kjalarnesi (64.211, 21.767) (<http://www.vegag.is>).

Hafnarfjall 16.03.2005 01:20 til 18.03.2005 01:20



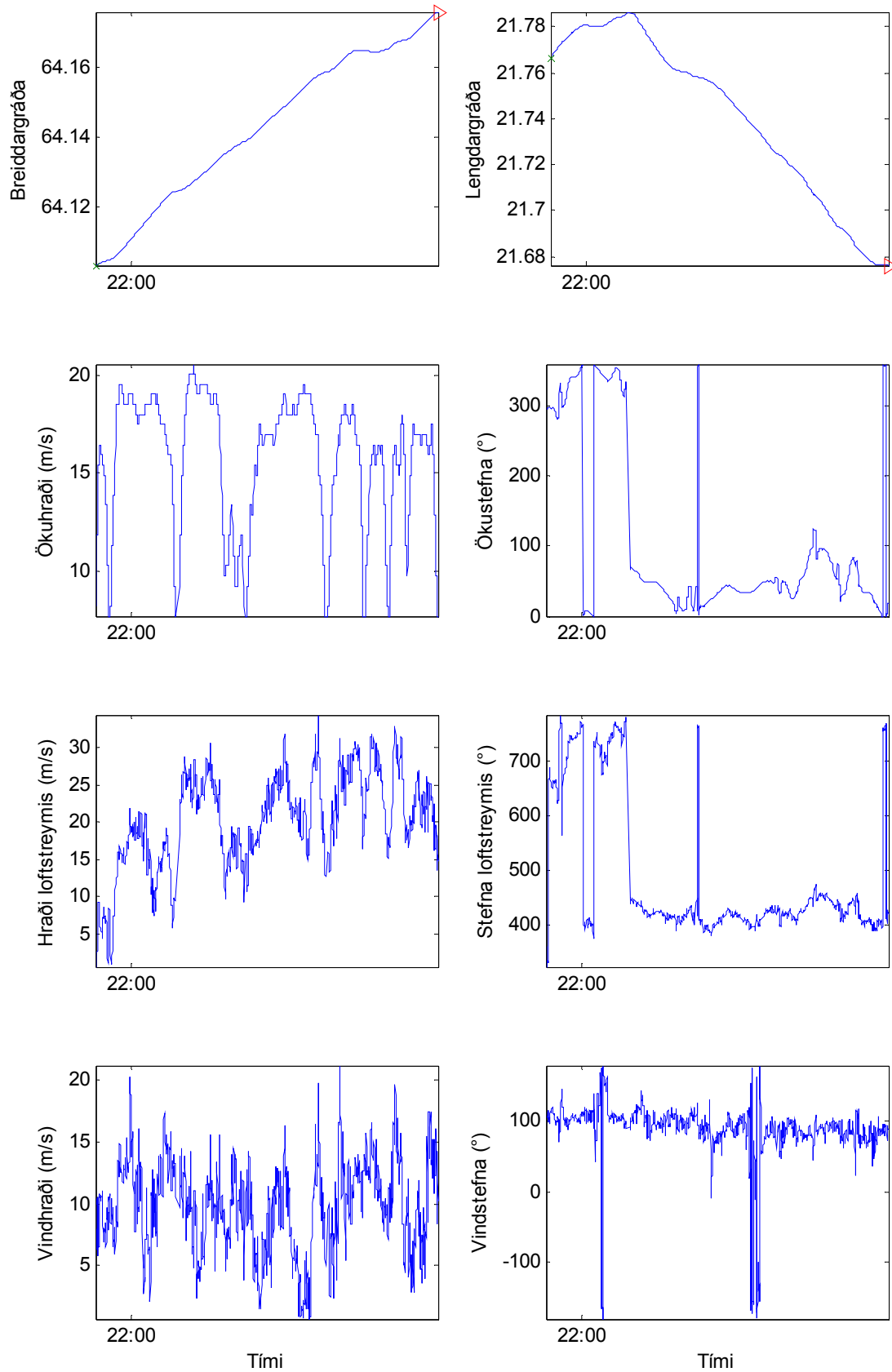
Mynd A19 – Vindhraði og vindátt samkvæmt mælingum á veðurstöð Vg við Hafnarfjall (64.47, 21.97) (<http://www.vegag.is>).

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



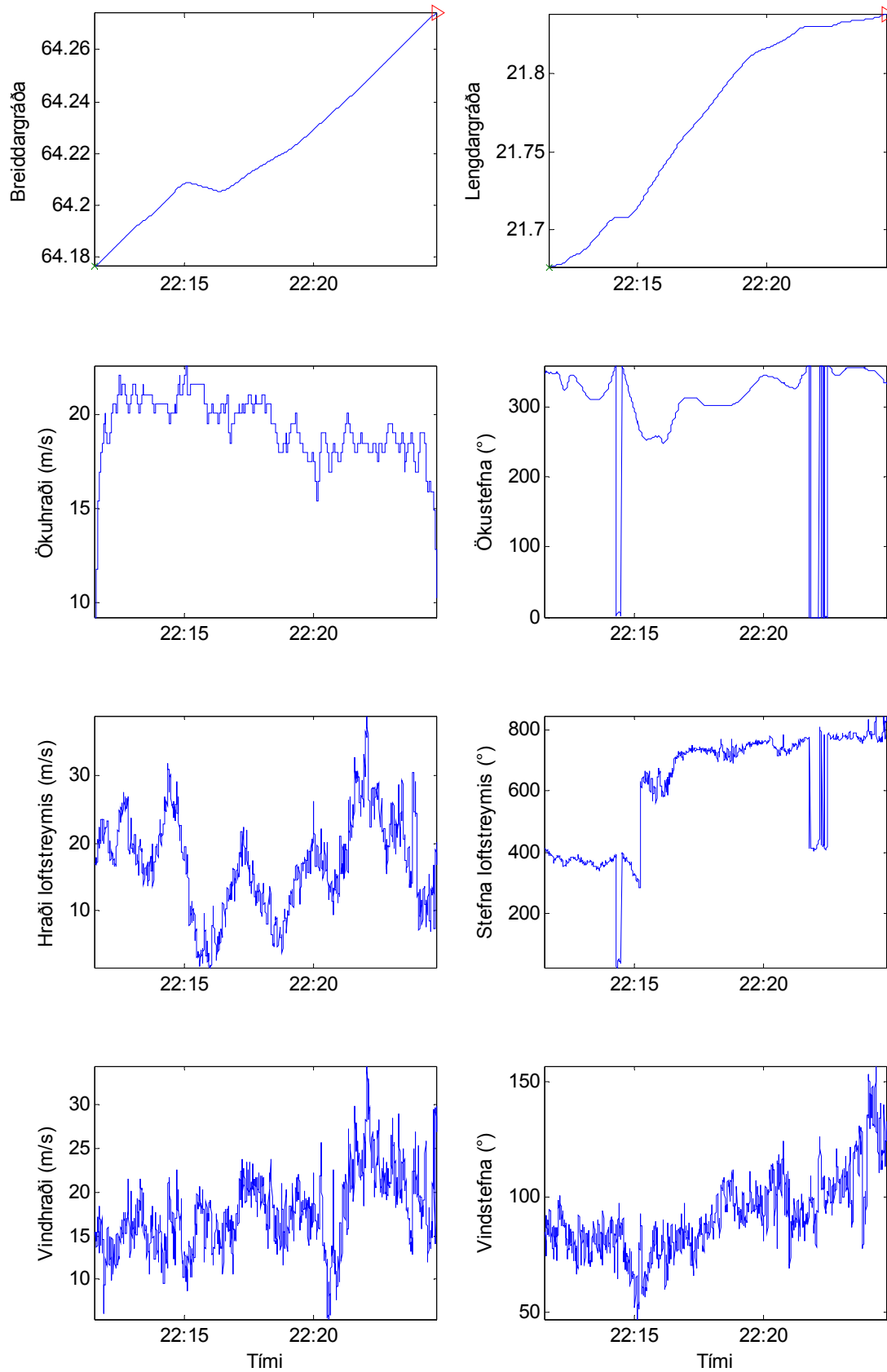
Mynd A20 - Mælingar á leiðinni frá Selfossi vestur að Árbæjarhverfi í Reykjavík.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

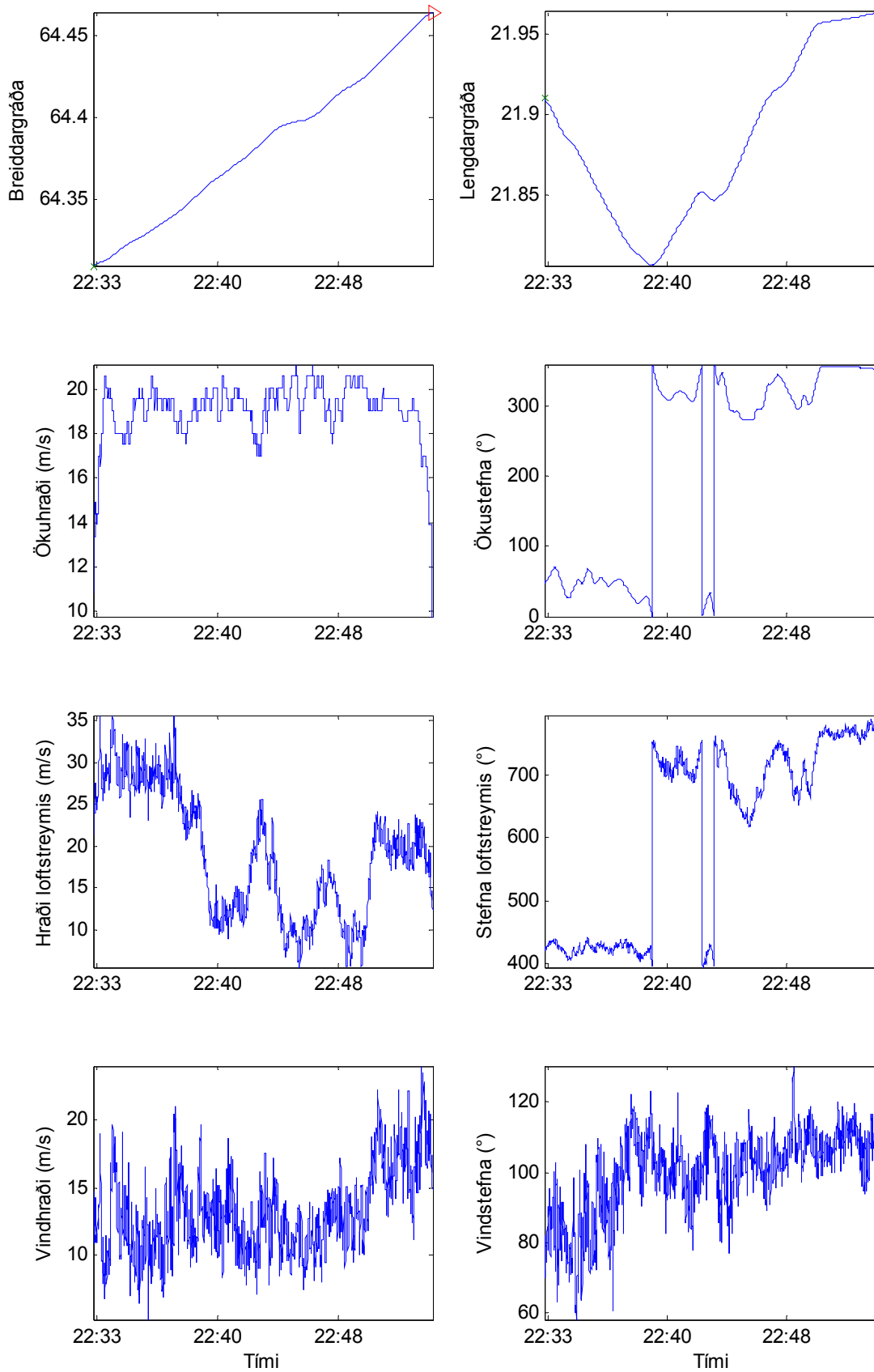


Mynd A21 – Mælingar á leiðinni frá Árbæjarhverfi í Reykjavík að Þingvallar-afleggjara í Mosfellsbæ.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

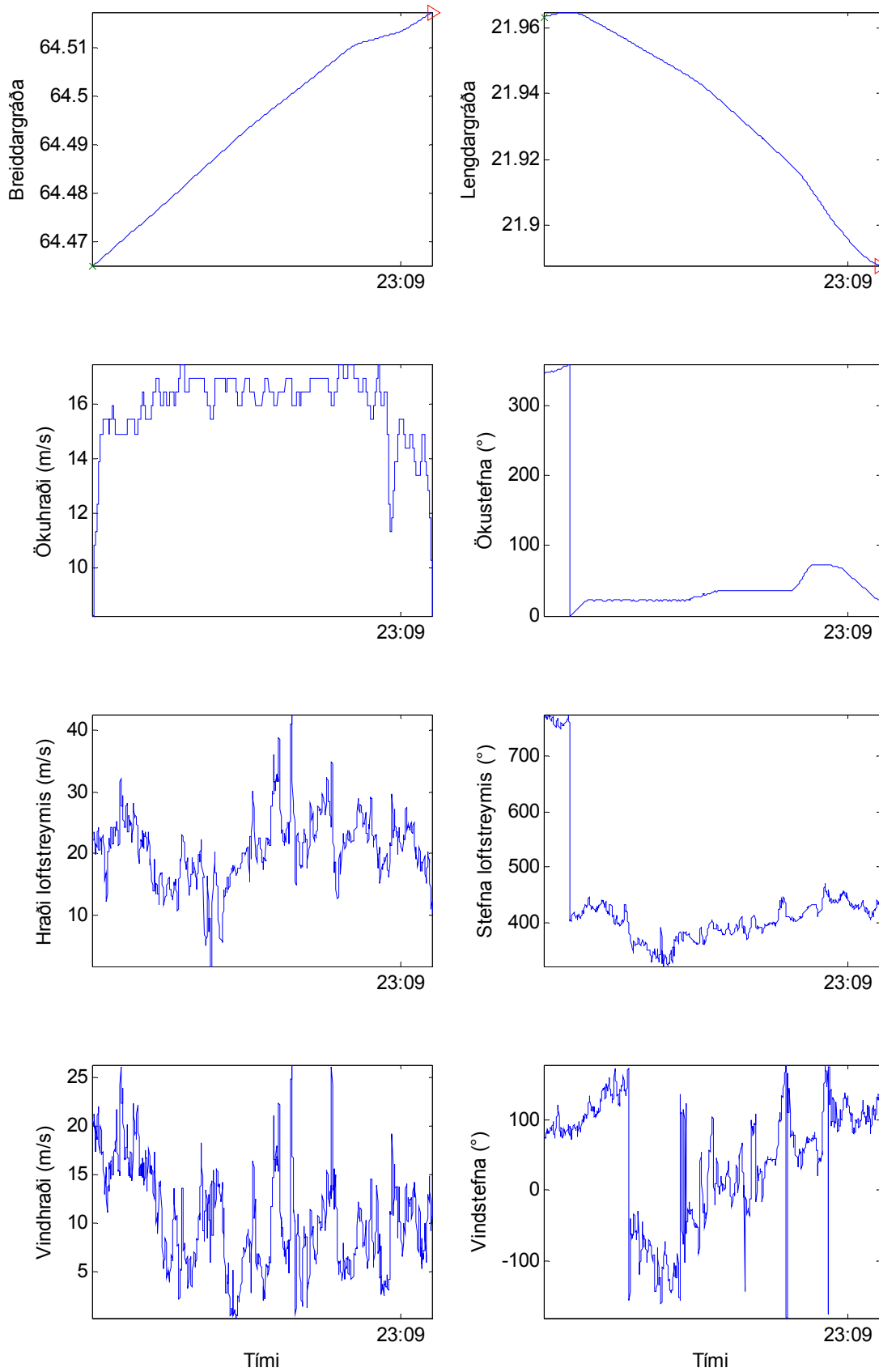


Mynd A22 – Mælingar á leiðinni frá Þingvallarafleggjara í Mosfellsbæ að Hvalfjarðargöngum.



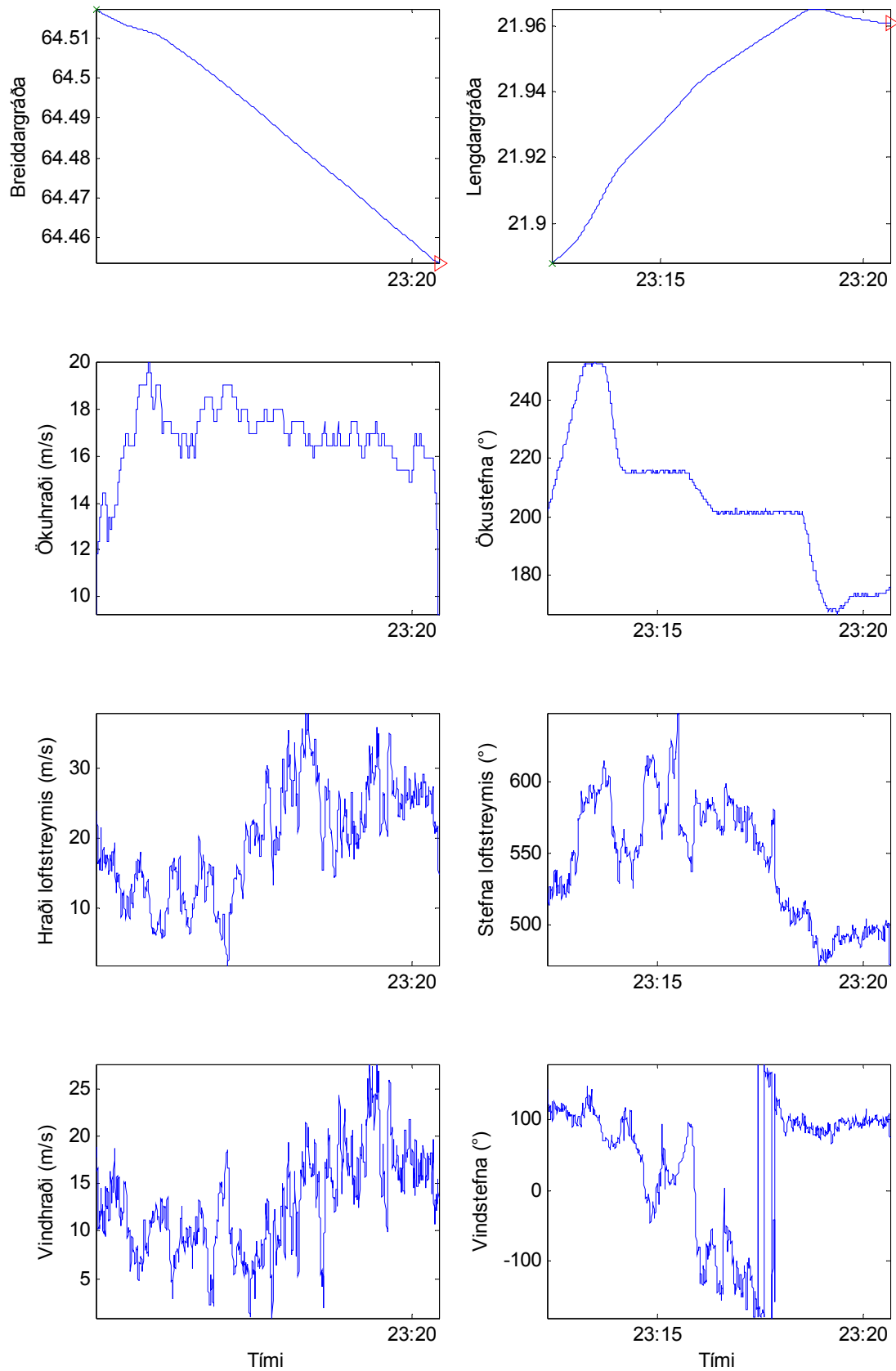
Mynd A23 – Mælingar á leiðinni frá Hvalfjarðargöngum að veðurstöð Veðurstofu Ísland á Hafnarmelum.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



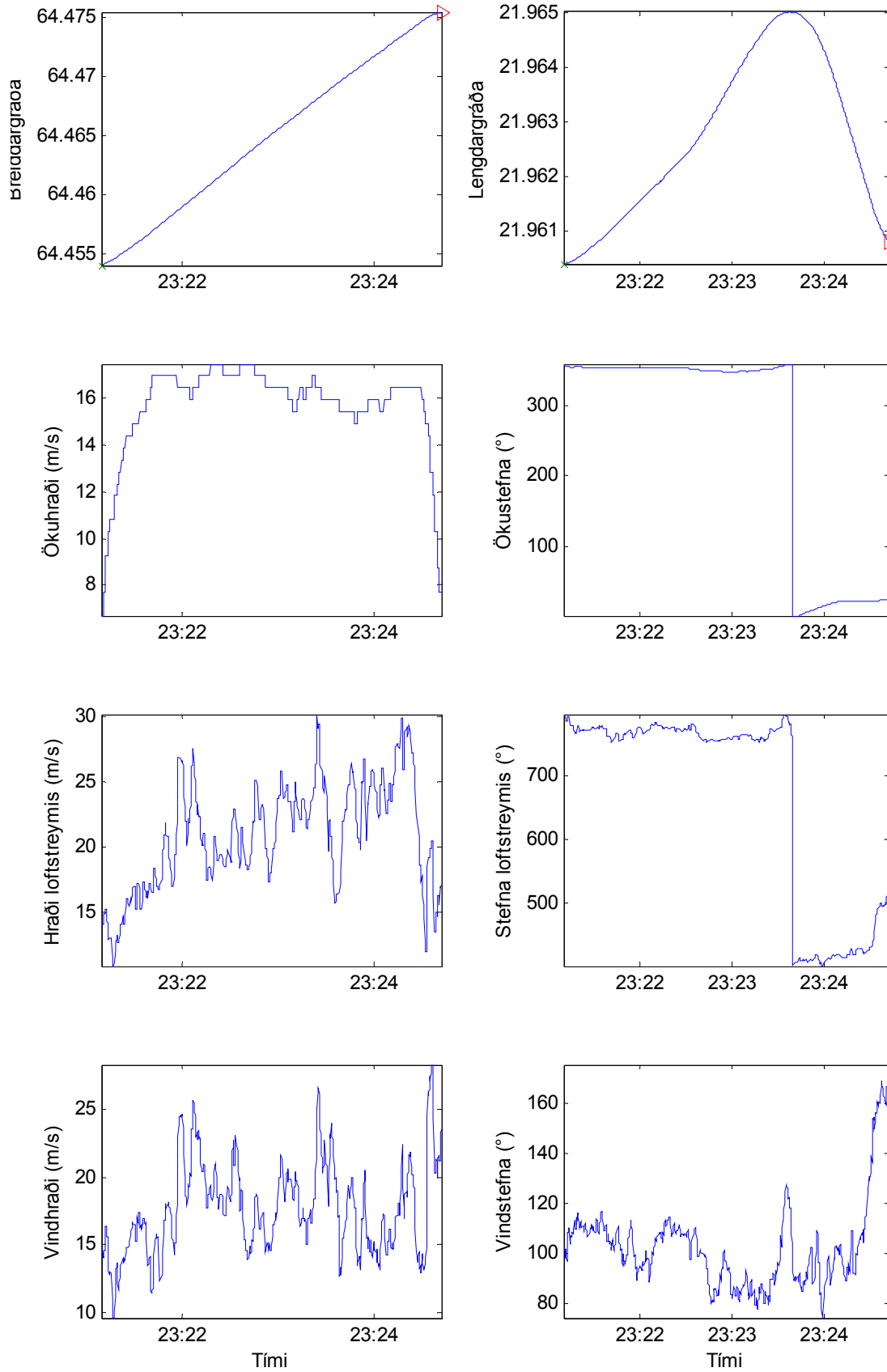
Mynd A24– Mælingar á leiðinni frá veðurstöð Veðurstofu Ísland á Hafnarmelum norður að afleggjara að Mótél Venusi við Borgarfjarðarbrú.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



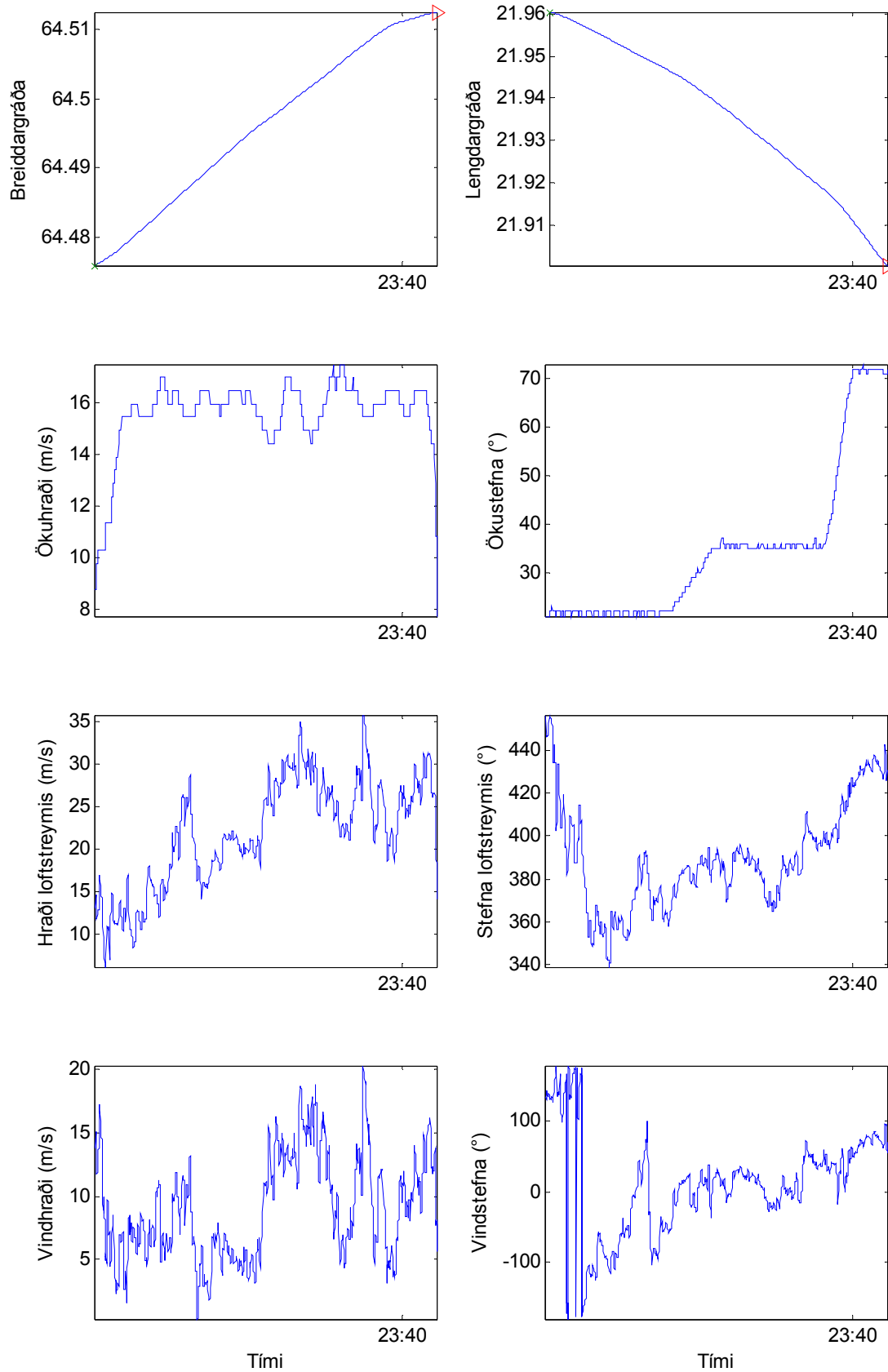
Mynd A25 - Mælingar á leiðinni frá afleggjara að Mótél Venusi við Borgarfjarðarbrú tilbaka suður að Ölfersafleggjara.

Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II

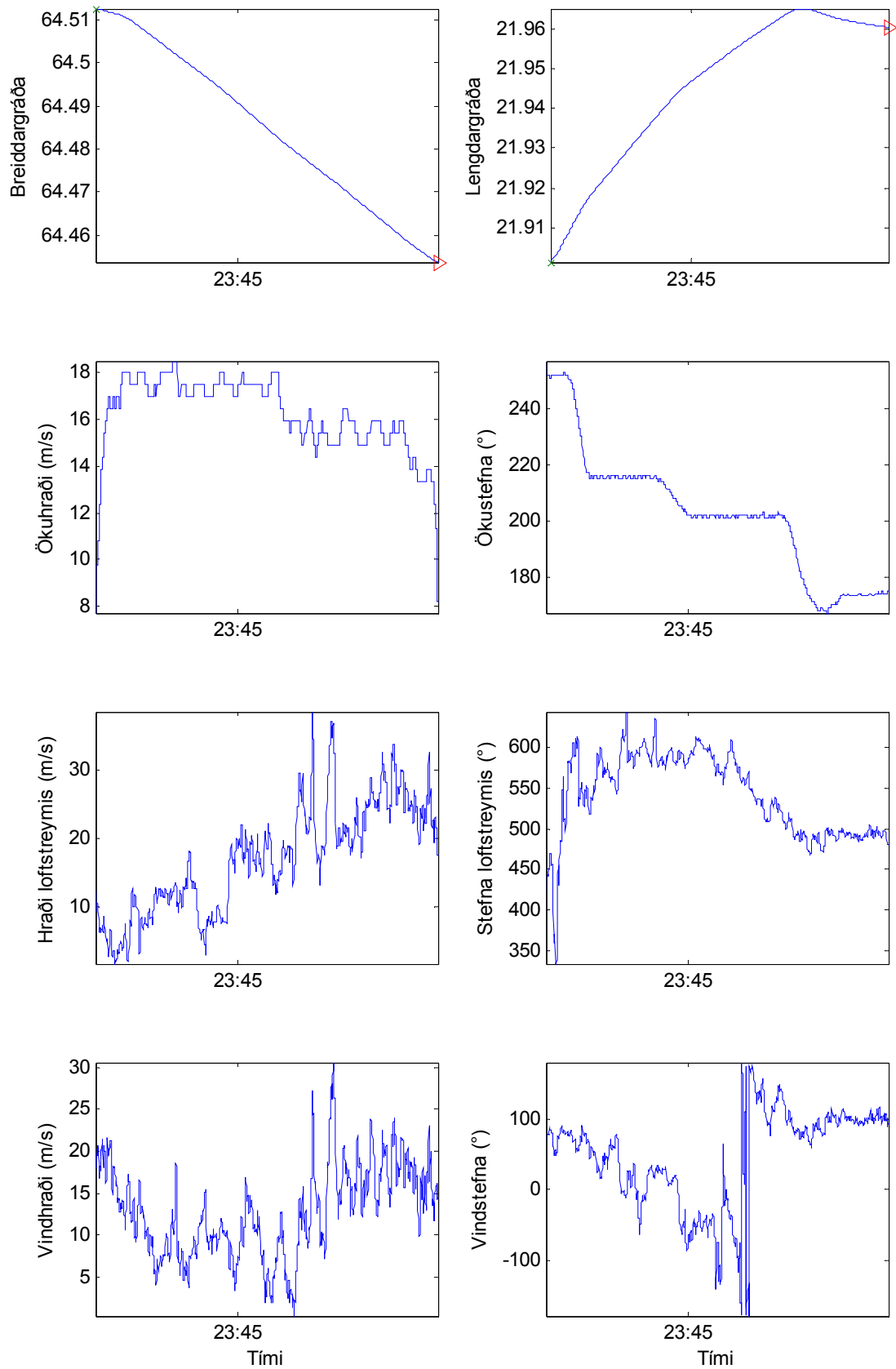


Mynd A26 - Mælingar á leiðinni frá Ölfersafleggjara að veðurstöð Vg við Hafnarfjall.

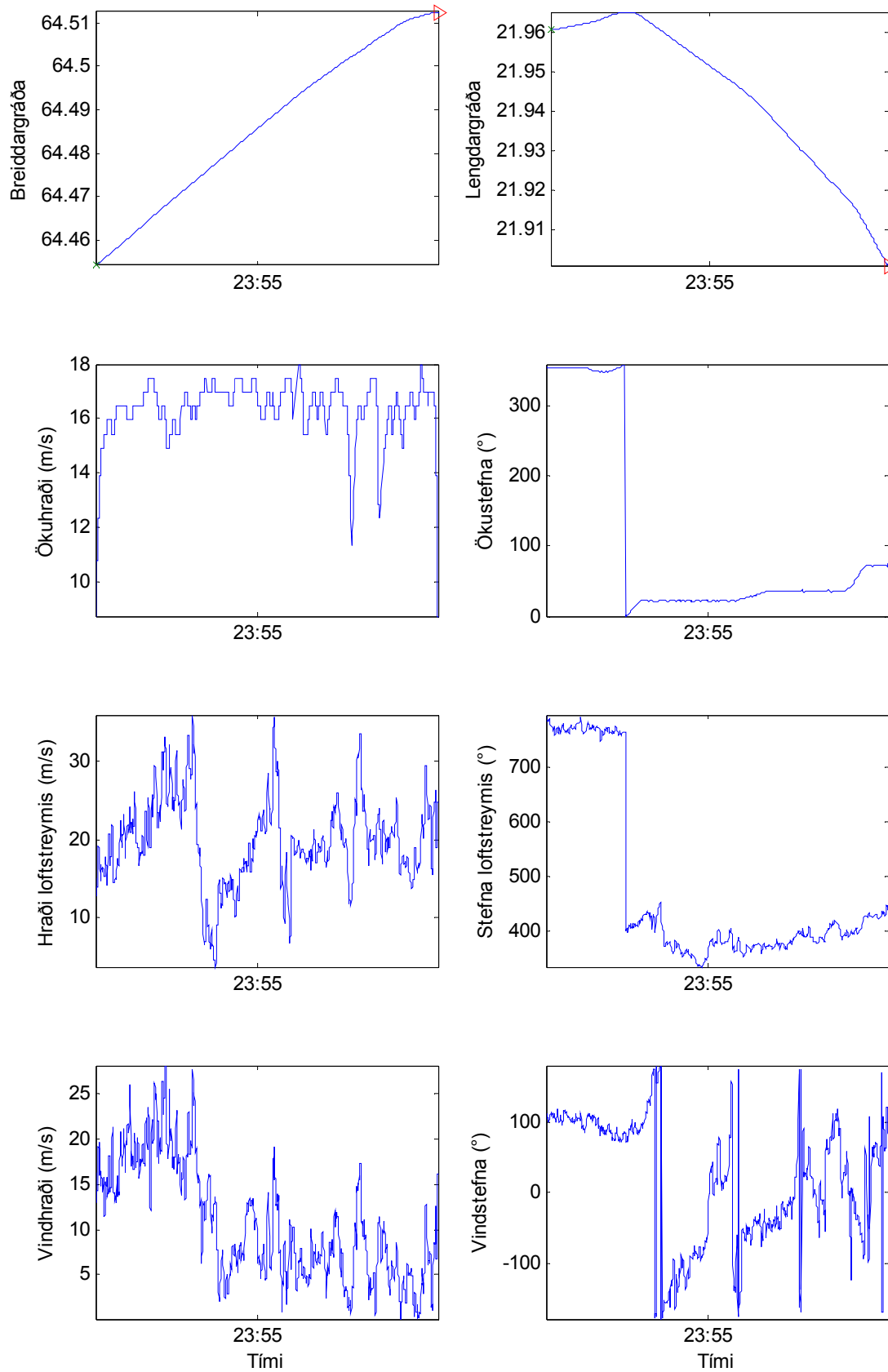
Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



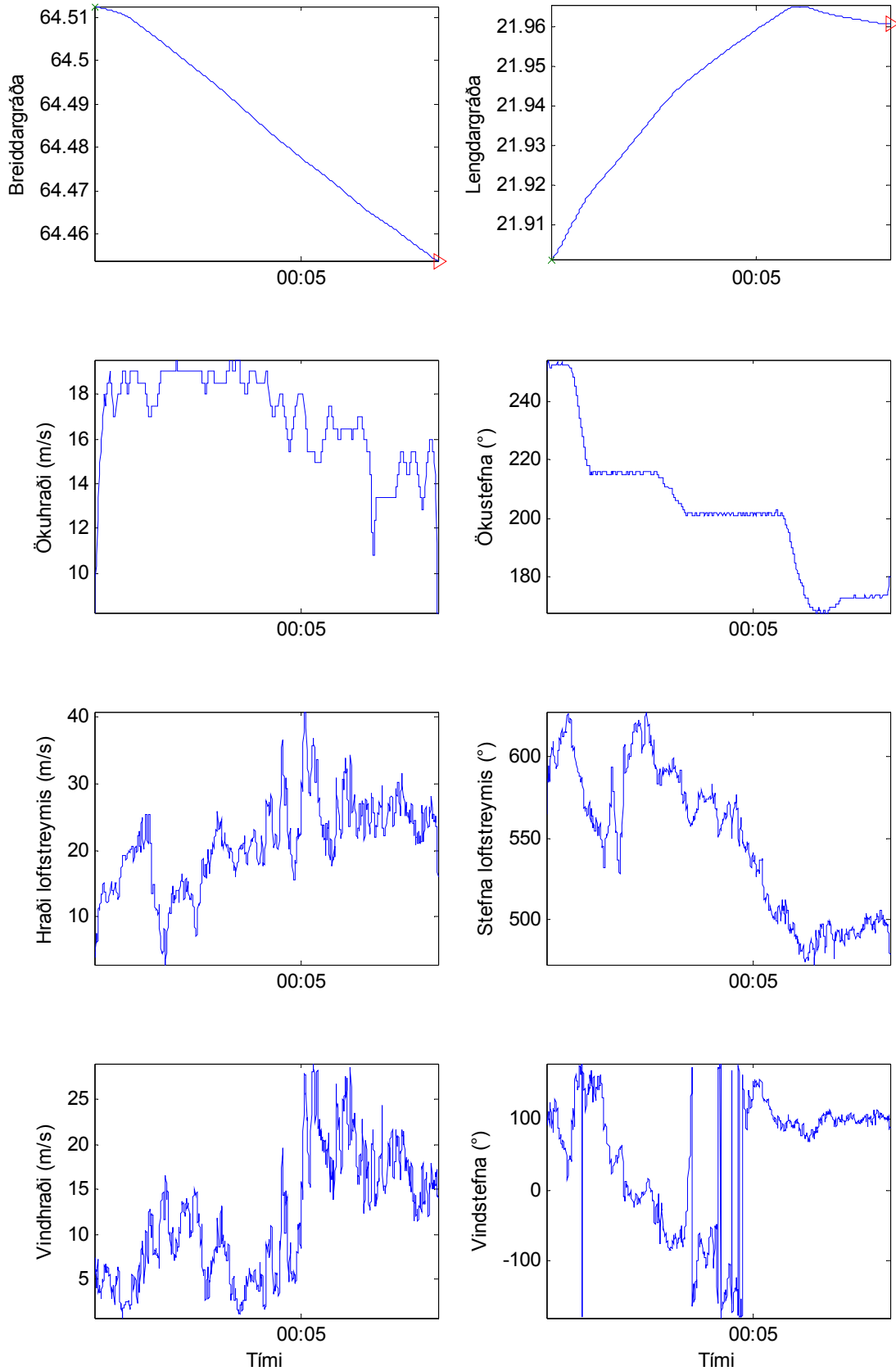
Mynd A27 - Mælingar á leiðinni frá veðurstöð Vg við Hafnarfjall norður að áningarstað við Háumela.



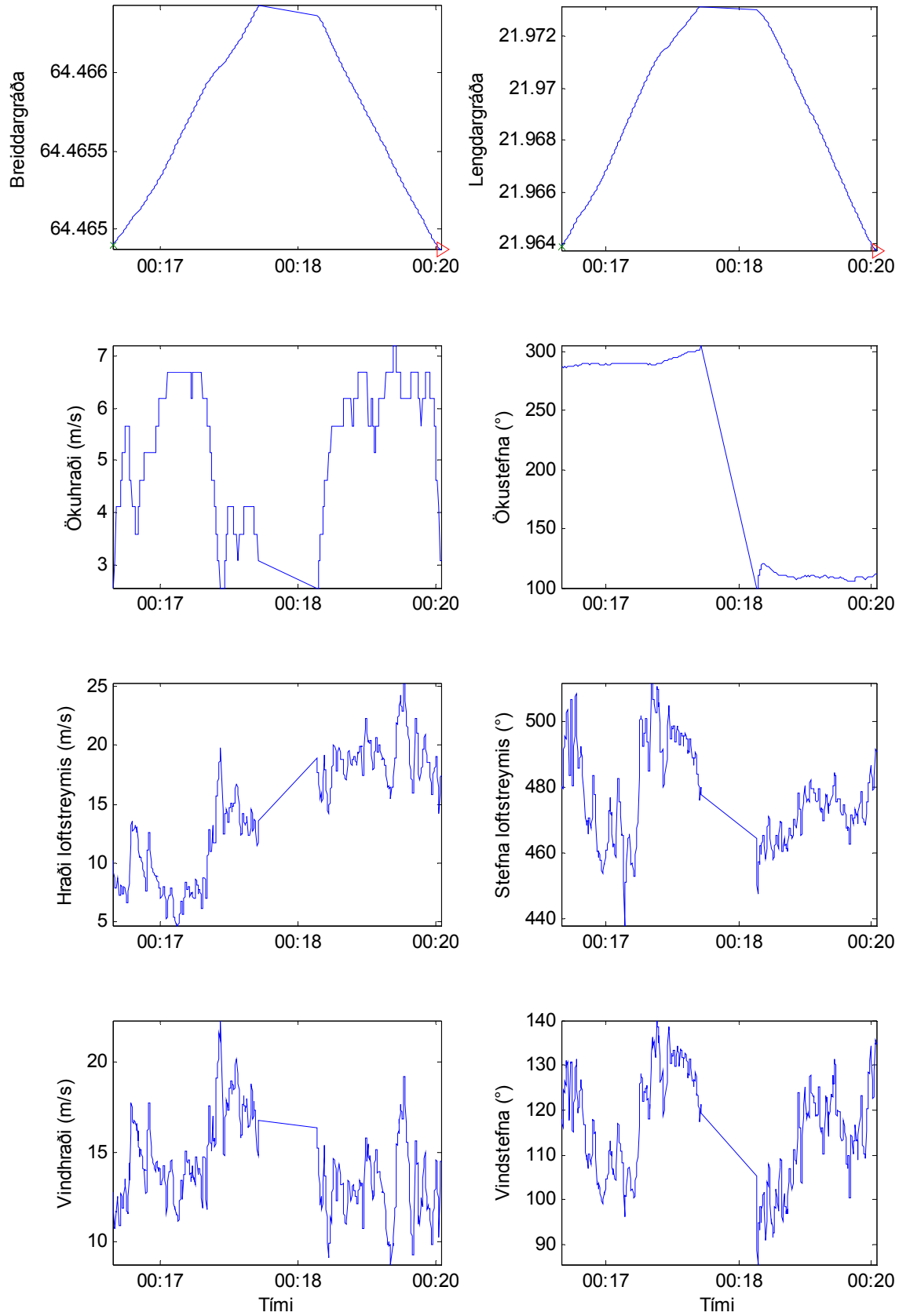
Mynd A28 - Mælingar á leiðinni frá áningarstað við Háumela tilbaka suður að Ölfersafleggjara.



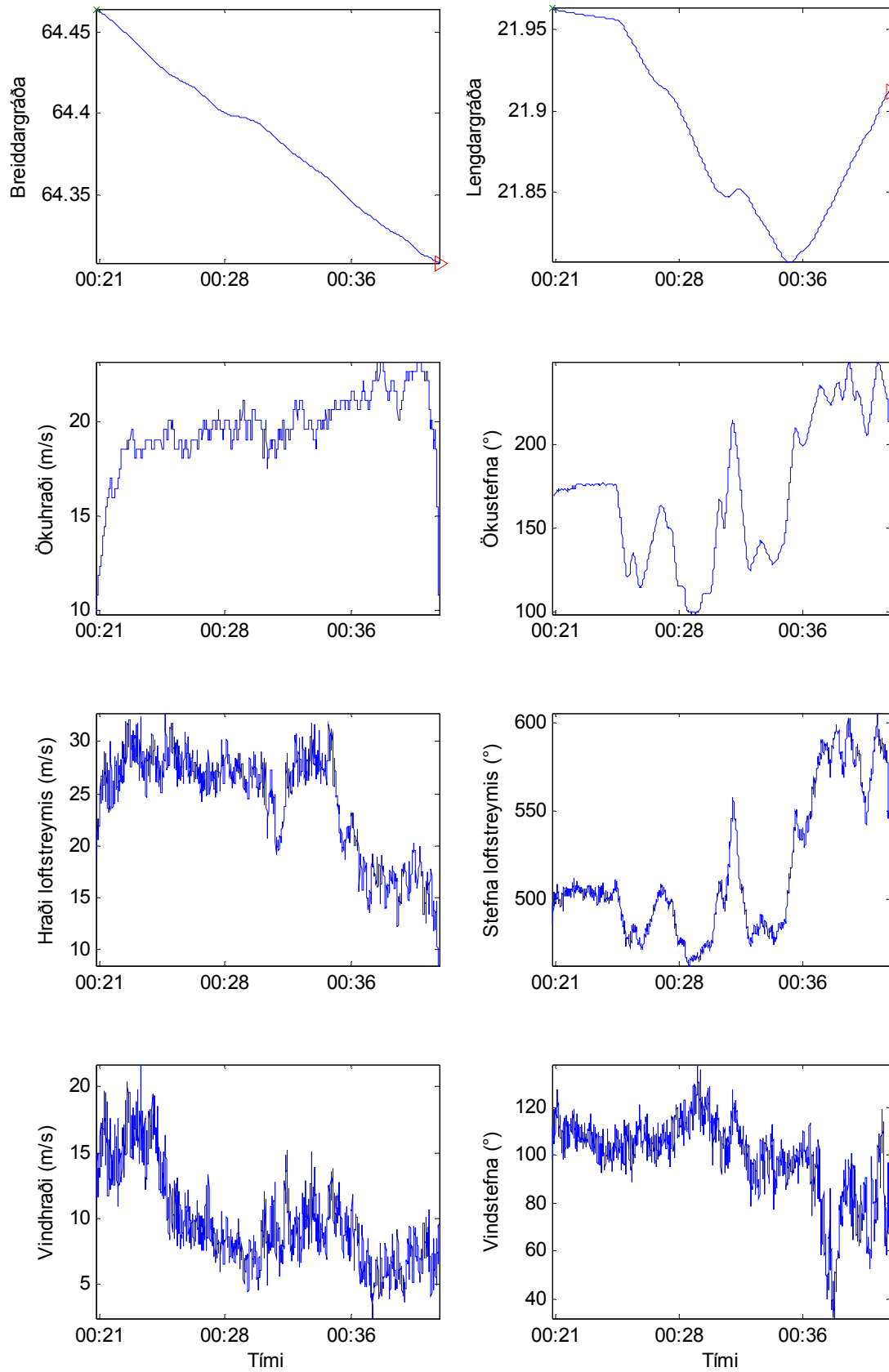
Mynd A29 - Mælingar á leiðinni frá Ölfersafleggjara tilbaka norður að áningarstað við Háumela.



Mynd A30 - Mælingar á leiðinni frá áningarstað við Háumela tilbaka að veðurstöð Veðurstofu Íslands á Hafnarmelum.

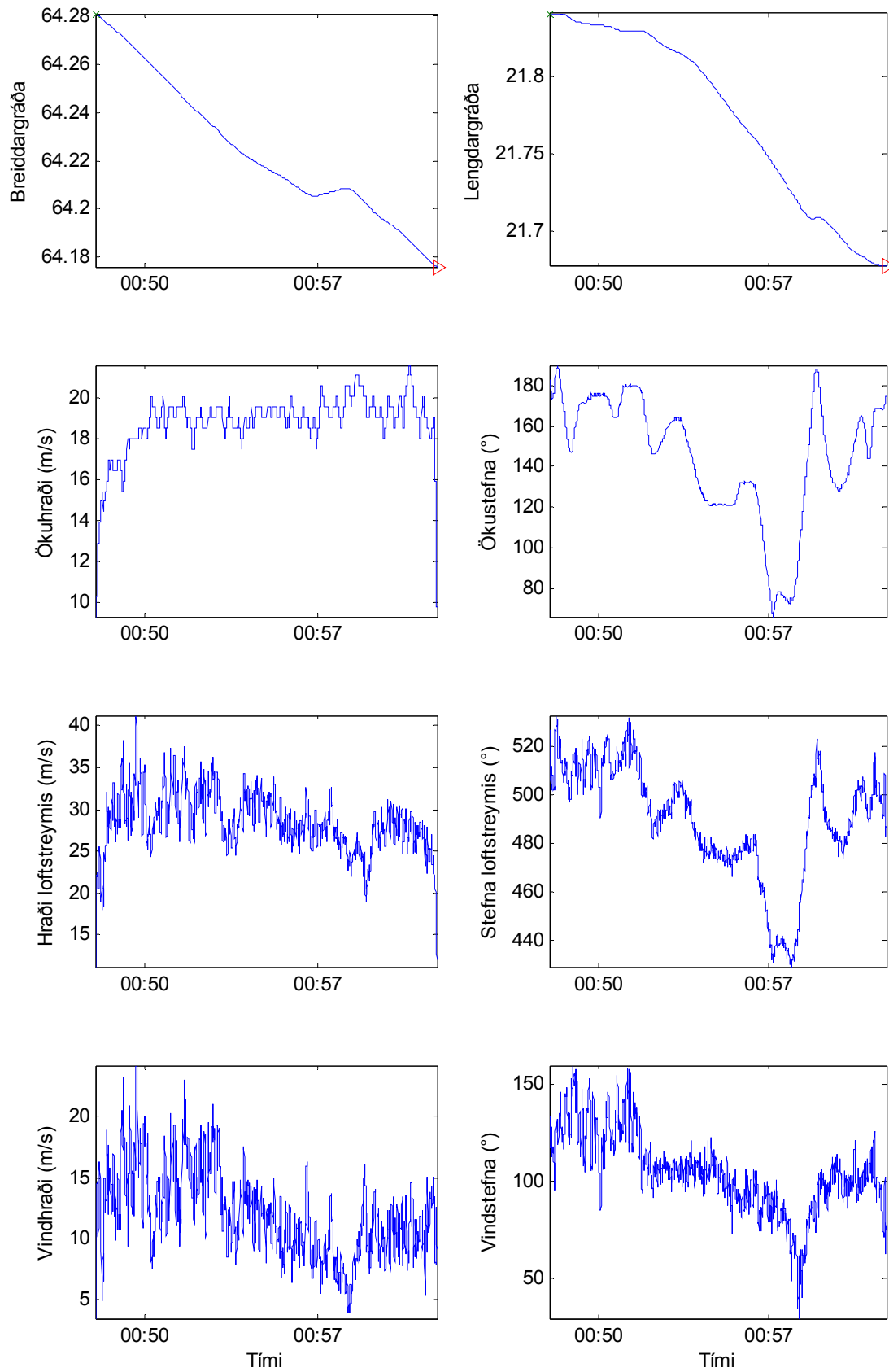


Mynd A31 - Mælingar á leiðinni frá Þjóðvegi við afleggjarann að Höfn, niður að Höfn og tilbaka upp á Þjóðveg.

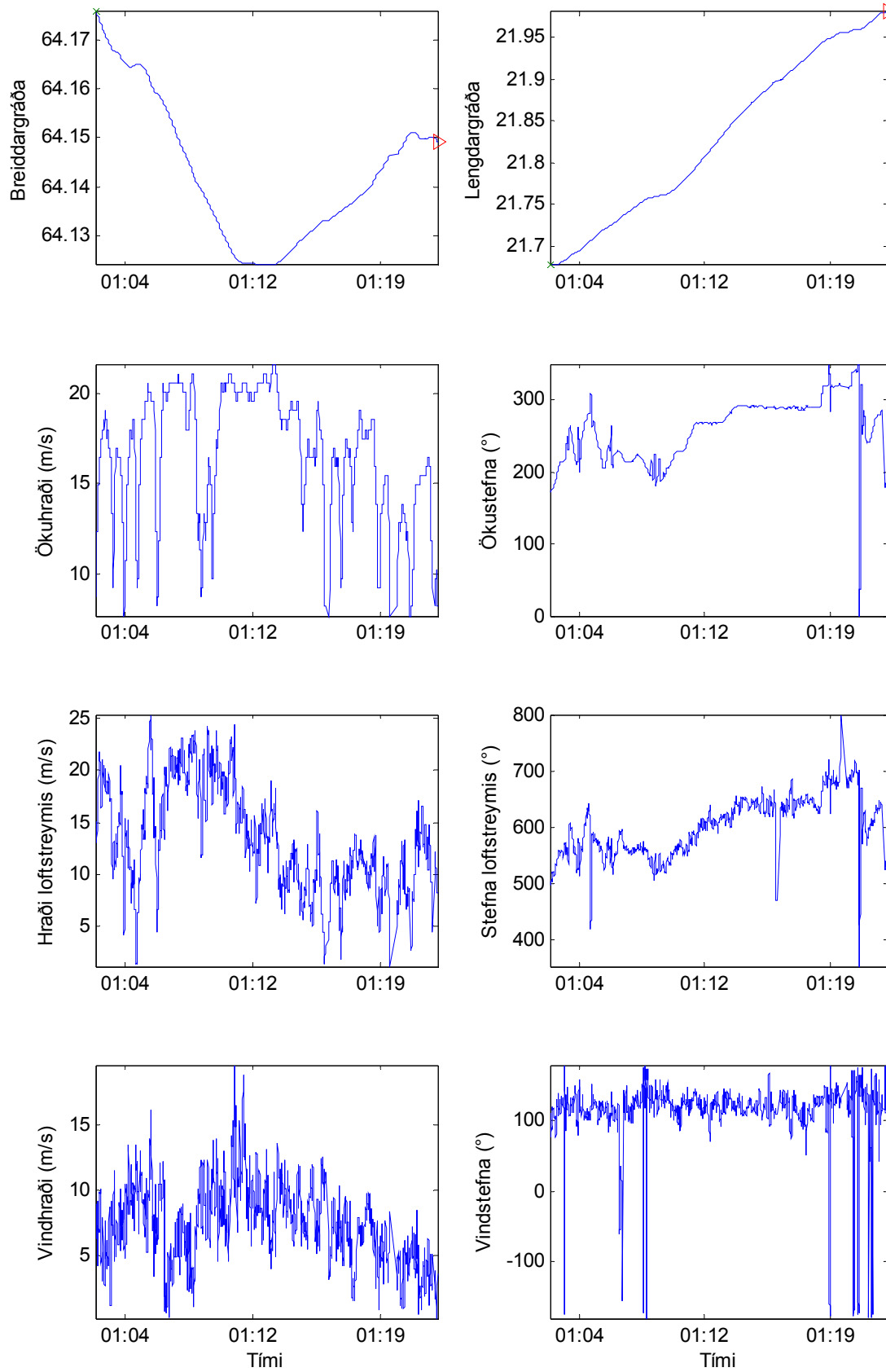


Mynd A32 - Mælingar á leiðinni frá Hafnará að Hvalfjarðargöngum.

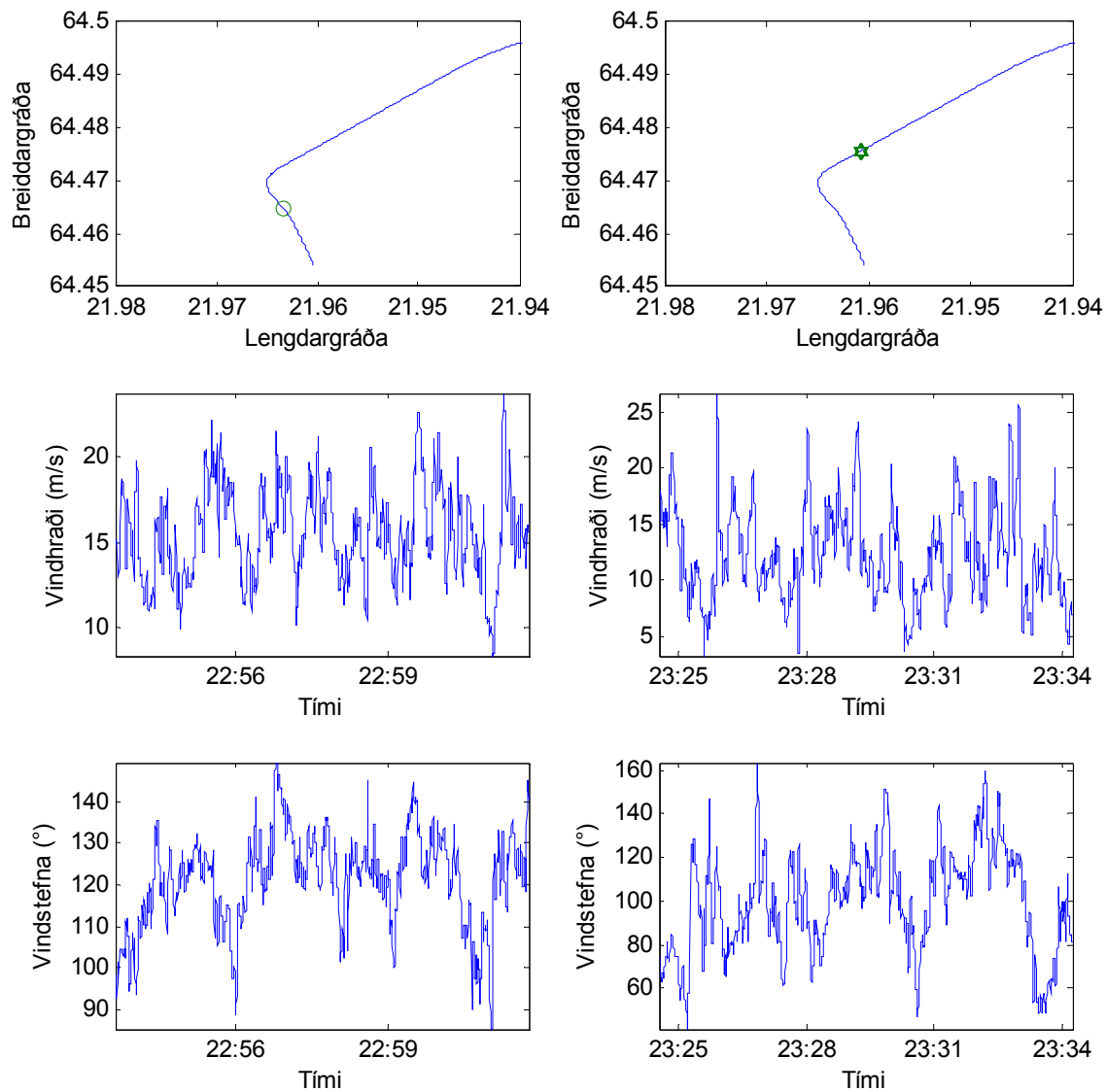
Umferðarslys og vindafar – Áfangaskýrsla II



Mynd A33 - Mælingar á leiðinni frá Hvalfjarðargöngum til Mosfellsbæjar.



Mynd A34 - Mælingar á leiðinni frá Mosfellsbæ til Reykjavíkur.



(a)

(b)

Mynd A35 – Vindhraði og Vindstefna mæld undir Hafnarfjalli (a) við veðurstöð Veðurstofu Íslands á Hafnará og (b) við veðurstöð Vg, þann 17.03.2005. Ökutæki kyrrestætt. Efstu gröfin sýna staðsetningu mælistaða.

Viðauki B – Reiknilíkan til að meta öryggi ökutækja í vindi – ráðstefnugrein

Probabilistic assessment of road vehicle safety in windy environments

J.Th. Snæbjörnsson¹, C.J. Baker², R. Sigbjörnsson¹

ABSTRACT: *Several wind and weather related accidents of road vehicles occur every year in Europe. These accidents are most common at exposed locations where topographical features magnify the wind effects. The most notable ones involve high-sided vehicles.*

The objective of this paper is to investigate, in general probabilistic settings, parameters influencing wind related accidents of road vehicles.

An outline of a general probabilistic model based on reliability approach, is presented for assessment of road vehicle stability in windy environments. An aero-elastic model is defined on a finite set of basic variables with prescribed probabilistic characteristics. The basic variables are: wind velocity and direction; frictional coefficient; camber of the road and vehicle speed. The limits of safe performance are discussed and the accident point is defined in the space of basic variables and the probability of accident is assessed. The theory presented, is applied to a multitude of scenarios to explore the interrelation between the various basic variables and how they affect the probability of accident or the so-called accident index.

The study suggests that available methods of probabilistic mechanics and theory of reliability can be of value for analysis of wind related traffic accidents. The analysis also demonstrates that wind related accidents are the consequence of a combination of several basic variables as represented by the accident point. Several potential applications of the presented methodology are conceivable, such as accident analysis, identifying potential accident risk as well as in devising preventive measures to improve traffic safety in windy environments.

1 INTRODUCTION

In the developed countries world wide, road accidents are causing more injuries and casualties than any other man-made or natural hazard. The associated socio-economic consequences are of growing concern for the responsible authorities (Blaeij et al., 2004). The natural wind does influence the road accident risk in various ways. A recent study in Iceland (Thordarsson and Snæbjörnsson, 2004), at a windy location, indicates that wind may be a causative factor in up-to 20% of road accidents at that location. However, accident reports may not express this fact accurately in all cases.

The state of knowledge on the engineering aspects of wind-related accident risk of road vehicles is under constant development and has been established through many papers (Baker, 1994) and reports dealing with accidents measures (Automotive Research Center). In accident risk analysis the key instruments used can be summarised as follows: (1) *Severity* or cost are intended to quantify extend of harm. (2) *Probability* gives the rate of occurrence of events that creates accidents. (3) *Risk* expresses the impact of accidents in terms of cost and rate of occurrence.

In the present paper we do not go into the cost issue and touch therefore only indirectly upon the concept of risk, which have strong socio-economic relations through the complex issue of acceptability of risk. Our concern is therefore mainly the quantification of probabilities as a measure of rate of occurrence of accidents.

The main objective of this paper is to present a comprehensive model, in general probabilistic settings, of road vehicle safety in windy environments. Special emphasise is put on cross-wind conditions. This includes a presentation of the engineering mechanics aspects dealing with the aero-elastic equations of motion accounting for non-linear effects related to the frictional contact problem arising from the properties of the road surface and tires. The quantification of the probability of accident is hence derived using appropriate stability criteria including side-slip and overturning limit states. The theoretical outline is followed by a numerical study to quantify and visualise the effects of the basic variables on the probability of accidents.

2 MODELLING

The procedure adopted herein for the assessment of road vehicle accidents consists of the following four main steps: (1) definition of basic variables that are

¹ Faculty of Engineering, University of Iceland, Hjardarhagi 2-6, IS-107 Reykjavik, Iceland

² School of Engineering, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham, B15 2TT, UK

modelled as independent stochastic variables;
 (2) aero-elastic model of the vehicle is obtained including frictional contact between road surface and tires; (3) definition of suitable performance criteria that ensure stability and controllability of the vehicle;
 (4) assessment of stochastic wind-induced response followed by a quantification of probability of accident.

Formally, in the following the probability of safety, P_S , is defined as: $P_S = 1 - P_A$, where P_A is the probability of accident. It should be stressed that P_S defined in this way should not be used to represent probability of safe driving and the corresponding derived environmental conditions. In that case, introduction of a reasonable safety margin should be applied, corresponding to conservative estimates of near-accidents.

2.1 On the basic assumptions

The equations of motion of road vehicle in windy environments have been put forward and discussed thoroughly by Baker and co-workers (see for instance Baker, 1994). These equations contain the mechanical properties of the environments and the vehicle, as well as the psycho-physiological characteristics of the driver. The basic forces of mechanical origin accounted for in these equations are the following:

- *Gravity forces* are due to the attraction induced by the gravitational field of the Earth. Hence, the gravity forces are static and induce the reference state the dynamic response is referred to. In defining the gravity force components it is important to account for the slope and camber of the road. They may both contribute directly to reduction of stability of vehicle performance through the tire reaction forces.
- *Elastic and damping forces* are primarily related to the suspension system and the tires of the vehicle. In the following we assume that the deformations of the body of the vehicle are negligible compared to that of the suspension system.
- *Inertia forces* are due to changes in vehicle speed and direction. These include the so-called ‘centrifugal’ forces that arise when vehicle is driving through curves.
- *Frictional forces* are contact forces that act between the tires and the road surface and provide the necessary stability for controllability and safe performance. These forces are treated in the following as being non-linear which is related to loss of road contact of the wheels.

- *Aerodynamic actions* are due to the relative motion of the vehicle and the air. Wind velocity and direction as well as vehicle speed and direction are required to define the aerodynamic forces in addition to the shape of the vehicle and the surrounding topography of the road.

The coordinate system adopted in this study is defined on Figure 1. The origin of the coordinate system is located at the centre of gravity. The equations of motion are referred to the centre of gravity which leads to decoupling of the inertia terms.

2.2 Aerodynamic actions

The aerodynamic forces and moments are defined as follows:

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{1}{2} \rho C_{F_x} A V^2 && \text{drag force} \\
 F_y &= \frac{1}{2} \rho C_{F_y} A V^2 && \text{lift force} \\
 F_z &= \frac{1}{2} \rho C_{F_z} A V^2 && \text{side force} \\
 M_x &= \frac{1}{2} \rho C_{M_x} A V^2 h && \text{rolling moment} \\
 M_y &= \frac{1}{2} \rho C_{M_y} A V^2 h && \text{yawing moment} \\
 M_z &= \frac{1}{2} \rho C_{M_z} A V^2 h && \text{pitching moment}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Here, ρ is the density of air, A is the reference area, V is the reference speed taken as the relative velocity of the air (see Figure 1), h is the reference arm, $C_{F_x}, C_{F_y}, C_{F_z}$ are force ‘coefficients’, $C_{M_x}, C_{M_y}, C_{M_z}$ are moment ‘coefficients’. The force and moment coefficients are dependent on the selection of the reference parameters. In the following the reference area, A , is taken as the frontal area of the vehicle and the reference height, h , is the height of the centre of gravity above the surface of the road. That implies that the point of action used for the aerodynamic forces and moments is the centre of gravity.

In the general case, when the reference wind speed is selected as the mean wind velocity blowing in the mean wind direction, the force and moment coefficients can be represented as a multi-dimensional stochastic process. This process has a complex correlation structure, which presently is not well known. Recent full scale experiments on the cross wind forces on trains (Baker et. al, 2004) suggest high degree of correlation between rolling moment and side force, and pitching moment and lift force with values of the correlation coefficient of around 0.95. The correlation between side and lift force is poorer (around 0.80 to 0.85) because the fluctuations are to some extent caused by different flow mechanisms..

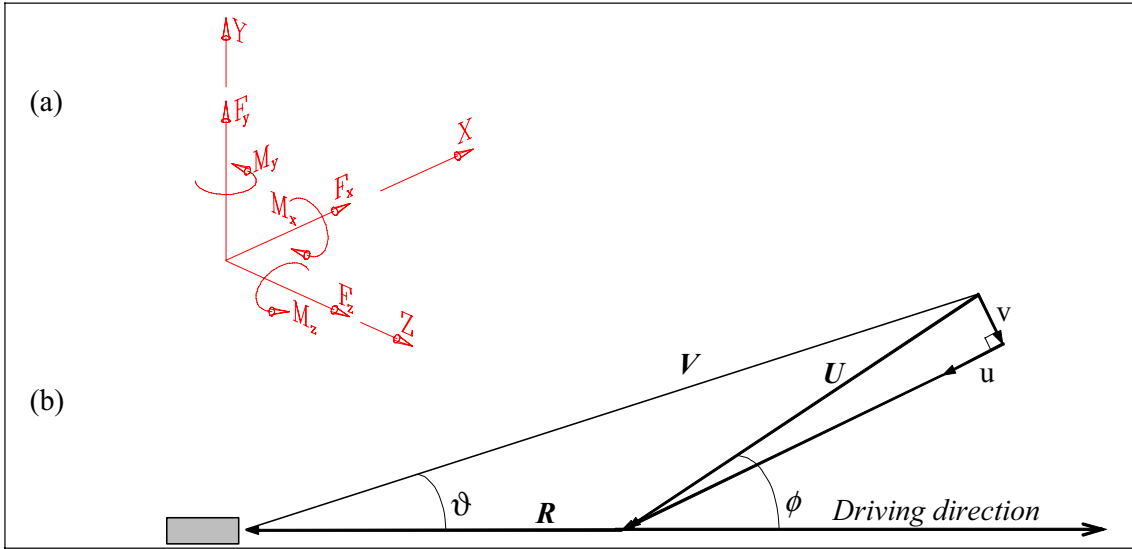


Figure 1 Definition of (a) coordinate system with origin located in centre of gravity and sign conventions for aerodynamic actions on the vehicle and (b) addition of the velocity vectors, where R represents the relative velocity of air caused by the vehicle speed, U is the mean wind velocity, ϕ is wind direction, u and v are the horizontal turbulence components (the vertical w -component is not shown), V is the total relative wind velocity of the air and ϑ is the angle of incidence. It is assumed that the mean wind is acting in the horizontal xz -plan.

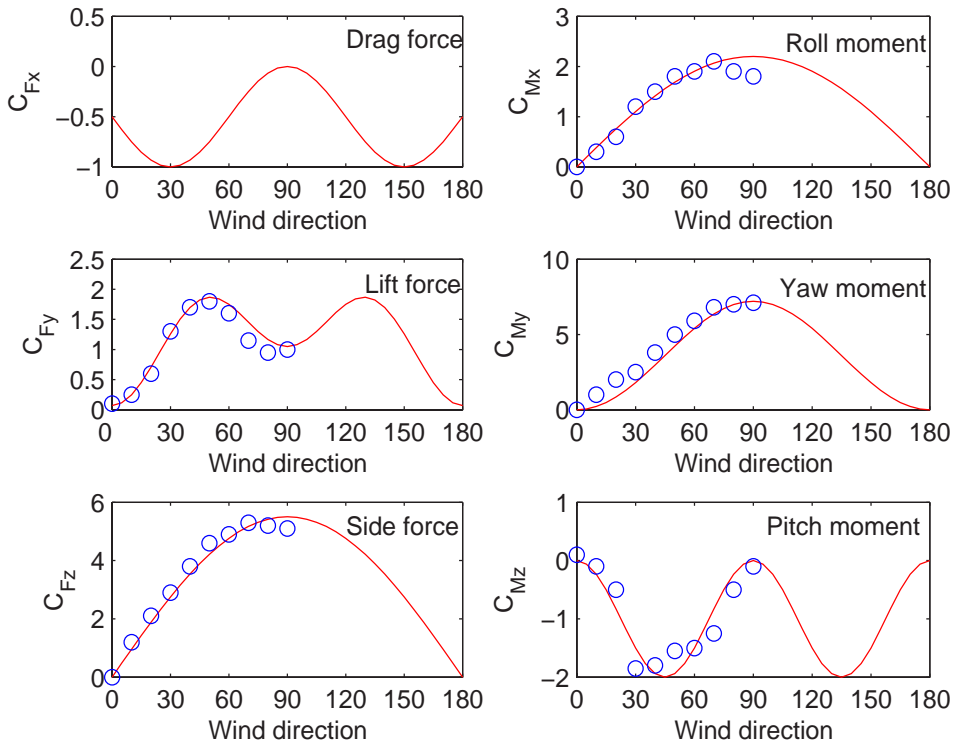


Figure 2 Aerodynamic coefficients for high sided lorry. The solid curves refer to Eq.(2) and the dots are wind tunnel data from Coleman & Baker (1994).

However, the same full-scale work on trains suggested that a second order quasi-steady assumption can work quite well to relate fluctuating wind velocities to fluctuating forces. Therefore, due to lack of information on the multi-dimensional action process we adopt a simplified model where the force and moment coefficients are represented as determi-

nistic functions depending only on the mean wind direction. The stochastic nature of the aerodynamic action process is then accounted for by treating the wind velocity as a locally stationary Gaussian process.

The aerodynamic coefficients adopted for the present study are based on formulas from (Baker, 1994

and Baker, 1987) but modified according to results from wind tunnel experiments carried out by Coleman (Coleman and Baker, 1994). The coefficients are expressed as follows:

$$\begin{aligned}
 C_{F_x} &= -0.5(1 + \sin(3\vartheta)) \\
 C_{F_y} &= 0.75(1.5 - 0.9 \cos(4\vartheta) - 0.6 \cos(2\vartheta)) \\
 C_{F_z} &= 5.5 \sin(\vartheta) \\
 C_{M_x} &= 2.2 \sin(\vartheta) \\
 C_{M_y} &= 7.2 \sin^2(\vartheta) \\
 C_{M_z} &= -1.0(1 - \cos(4\vartheta))
 \end{aligned} \tag{2}$$

where, ϑ is the angle of incidence defined in Figure 1. The coefficients are referred to the centre of gravity and the coordinate system defined in Figure 1. These coefficients are plotted in Figure 2 along with wind tunnel data. It is seen that the agreement is fair. The above coefficients are an enhancement of the earlier functions put forward by Baker (Baker, 1994 and Baker, 1987).

It should be noted, that the aerodynamic characteristics of vehicles under cross winds do not only depend on the shapes of the vehicles but also on the aerodynamics of infrastructures, such as e.g. bridges and embankments (Susuki et. al 2003). In addition any aerodynamic data is to some degree dependent upon the techniques and methodology used to acquire that same data (Baker & Humphreys 1996). A single unified set of aerodynamic coefficients may therefore be an unrealistic goal.

2.3 Contact between tires and road surface

The operational safety and controllability is secured by stable static contact between tires and road surface (Bradley et. al, 2004). This is assumed acquired by frictional forces, which unfortunately depend on many environmental factors, such as precipitation and temperature, which are difficult to control.

Friction is a contact property that is divided into static friction and kinetic friction. Static friction refers to the case when there is no slip between the surfaces. Kinetic friction, on the other hand, describes the case when the two surfaces, i.e. tire and road, are moving with respect to each other. The friction is commonly modelled applying the following simplifying assumptions:

- The frictional force is proportional to the normal force acting on the contact surface
- The frictional force is independent of the size of the area of contact
- The frictional force is independent of direction

- The frictional force is independent of the velocity of motion

These assumptions lead to the following expression:

$$F_i = \mu N_i \tag{3}$$

Here, F_i is the frictional force transmitted by wheel No. i , N_i is the axial force in suspension No. i and μ is the frictional coefficient. The frictional coefficient can either be interpreted as the static frictional coefficient, μ_s , or the kinetic frictional coefficient, μ_k . In general we can assume that $\mu_s > \mu_k$. The difference between the two depends on the road surface and types of tires. In the case of wet or icy surface the difference can be great, but is normally small for dry road surfaces.

The frictional forces have to resist lateral and longitudinal wind forces arising from the aerodynamic action, traction forces, acceleration forces and deceleration (bracing) forces. Furthermore, a rolling wheel requires a certain amount of frictional resistance to prevent the surface of contact from slipping. Hence, the amount of traction, which can be obtained for a given tire on a particular road surface, is defined by the static frictional coefficient. If the wheel is locked and slides, the friction is controlled by the kinetic frictional coefficient, which is less than the static one (Gustafsson, 1997). In the following we assume that the frictional coefficient is the static coefficient if not otherwise stated. The rolling resistance is assumed given by the following equation:

$$F_R = -m g f_R \tag{4}$$

where f_R is the rolling resistance coefficient (Gillespie, 1992), that is generally dependent on the driving velocity, m is the sprung mass of the vehicle and g is acceleration of gravity. The limit state of safe performance is checked using the friction circle, radius of which is defined by Eq.(3), by requiring that the traction field is inside this circle.

2.4 Basic variables

The quantities governing the motion of the vehicle are in most cases uncertain, that means they cannot be determined with finite certainty. Depending on the degree of uncertainty, these quantities are in this study either modelled as stochastic variables or deterministic parameters. The stochastic variables selected in this study are the wind velocity and wind direction (measured relative to the direction of the vehicle), vehicle speed, frictional coefficient and

camber of the road (see Table 1). In all cases the basic variables are taken as being normally distributed, except in the case of the friction coefficient which is assumed, on physical grounds, to be a positive quantity. Hence, for simplification it is taken as being truncated normally distributed. Quantities describing the mechanical properties of the vehicle are taken as deterministic parameters. Other variables used in modelling the behaviour of the vehicle are treated as derivatives. Their distributions do deviate from normality when the system behaviour becomes non-linear but that may be the case when the vehicle approaches instability.

Table 1 The basic variables used in this study

Name of quantity	Basic variables	Notation	Distribution
Wind velocity	X_1	U	normal
Wind direction	X_2	ϑ	normal
Coefficient of friction	X_3	μ	truncated normal
Driving speed	X_4	R	normal
Camber of road	X_5	e	normal

2.5 On the limit states of safe performance

The limit states of safe performance can be defined in terms of loss of controllability and stability. Typically, loss of controllability will result in difficulty to follow a specific lane on the road, while loss of stability implies overturning or loss of traction resulting in side slip. The solution of equations of motion along with appropriate stability criteria defines the limit states of safe performance in terms of a response hyper-surface in the space of basic variables. This can be written formally as:

$$f(\mathbf{X}) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) = 0 \quad (5)$$

In fact this hyper-surface of safe performance divides the space of basic variables in two sub-spaces, that is a safe domain, $D_S = \{\mathbf{x} : f(\mathbf{x}) > 0\}$, and an unsafe or accident domain, $D_A = \{\mathbf{x} : f(\mathbf{x}) < 0\}$.

The present study utilizes the following stability criteria:

- side slip of all four wheels
- side slip of front wheels
- side slip of rear wheels
- rollover

The side slip of a given wheel is checked using the following criterion:

$$f = -\sqrt{(F_y)^2 + (F_x + F_R)^2} - \mu N_i \quad (6)$$

Here, F_y is the total side force, F_x is the frontal drag force, F_R is the rolling resistance (friction), μ is the frictional coefficient and N_i is the axial force acting on wheel No. i . If $f > 0$ then there is no slip, if $f < 0$ the wheel will slip and critical state is emerging which potentially may result in an accident, if $f = 0$ the state is indifferent and the stability latent (neutral). This model is used to quantify the first three of the above mentioned criteria.

The state of potential rollover arises when one wheel loses road contact (Baker, 1986). The potential point of rollover can be reached if the friction is high enough to prevent slip. This happens when the relative velocity is given as follows:

$$V_{\text{rollover}} = \sqrt{\frac{2amg}{\rho A(hC_{M_x} + hC_{F_z} + aC_{F_y})}} \quad (7a)$$

Here, m is the mass of the vehicle, g is acceleration of gravity, a is half of the lateral distance between the centres of the wheels, ρ is the density of air, A is the frontal area, h is the height of the centre of gravity. The force coefficients have to be evaluated using the angle of incidence (see Fig. 1 and 2). The critical wind velocity can be obtained as:

$$U_{\text{rollover}} = -R \cos(\vartheta) \pm \sqrt{V_{\text{rollover}}^2 - R^2 \sin^2(\vartheta)} \quad (7b)$$

where, ϑ denotes the wind direction relative to the driving direction. It should be noted that the above equation will only produce real values for the wind speed provided that we have: $V_{\text{rollover}}^2 \geq R^2 \sin^2(\vartheta)$.

2.6 Quantification of accidents

The probability of accident can now be assessed as follows (Sigbjörnsson & Snæbjörnsson, 1998). The basic stochastic variables defined above, $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots\}$, are transformed into (independent) normalised Gaussian variables, $\mathbf{U} = \{U_1, U_2, \dots\}$, implying that U_i can be treated as normally distributed with zero mean and unit standard deviations. The response hyper-surface can be expressed formally in the normalised variable space as:

$$f_g(\mathbf{U}) = f_g(U_1, U_2, U_3, \dots, U_n) = 0 \quad (8)$$

The point on the response surface with the highest probability density is defined as the *accident point*, \mathbf{u}_A , that is the ‘most probable’ point on the

surface. In the normalised space this is the point on the response surface that is closest to zero. The Euclidean norm of the basic variables at the accident point, measured in the normalised space, is a measure of the odds of accident. This leads to the following definition of the accident index, β , (Sigbjörnsson and Snæbjörnsson, 1998):

$$\begin{aligned} \beta &= \text{sign}(\mathbf{n}_A \circ \mathbf{u}_A) \sqrt{\mathbf{u}_A \circ \mathbf{u}_A} \\ \mathbf{u}_A &\in \{\mathbf{u} : f_g(\mathbf{u}) = 0\} \\ \mathbf{n}_A &= \mathbf{n}(\mathbf{u}_A) \in \{\mathbf{n} : \mathbf{n} = -\nabla f_g(\mathbf{u})\} \end{aligned} \quad (9)$$

where, \mathbf{n} denotes the normal to the response hyper-surface. It should be stressed that the accident index can be both positive and negative. Positive β -values correspond to $0 < P_A < 0.5$, $\beta = 0$ gives $P_A = 0.5$ and negative β -values yield $0.5 < P_A < 1$, where, P_A , is the probability of accident which can be approximated as follows:

$$P_A \cong \Phi(-\beta) \quad (10)$$

where, Φ denotes the standardised Gaussian distribution function.

In general the limit state of safe performance can not be expressed in terms of a single function. Hence, the hyper-surface of safe performance is modelled as a set of functions where each function corresponds to a particular stability criterion as described above. From a computational view this leads to one safety index for each limit state function. The lowest of those safety indices corresponds to the point on the combined response hyper-surface with the highest probability density, i. e. the ‘most probable’ accident point in the space of basic variables.

3 NUMERICAL STUDY

3.1 Overtuning

Rollover velocity can be defined as the wind velocity which results in aerodynamic forces that give a rollover moment greater than the restoring moment provided by gravity forces (see Eq. (7a)). Evaluating Eq. (7a) in a deterministic fashion, gives the relation between driving velocity, wind velocity and wind direction that is shown in Figure 3. The evaluated surface mesh has a double slope depending on angle of incidence. As can be seen by inspecting Figure 3, the critical rollover wind velocity is reduced by increased driving velocity for wind directions below 90° to a minimum of about 20 m/s for wind directions of about 60° . However, for wind directions

above 90° the critical rollover wind velocity increases with increased driving velocity. Clearly, overturning can only be expected for wind directions between 30° and 120° . This is as expected, since the effective velocity vector is a combination of the wind vector and the vehicle driving speed vector as demonstrated in Figure 1a. At the same time, Figure 3 is both a demonstration of predicted behaviour and a test of the underlying mechanics of the model applied.

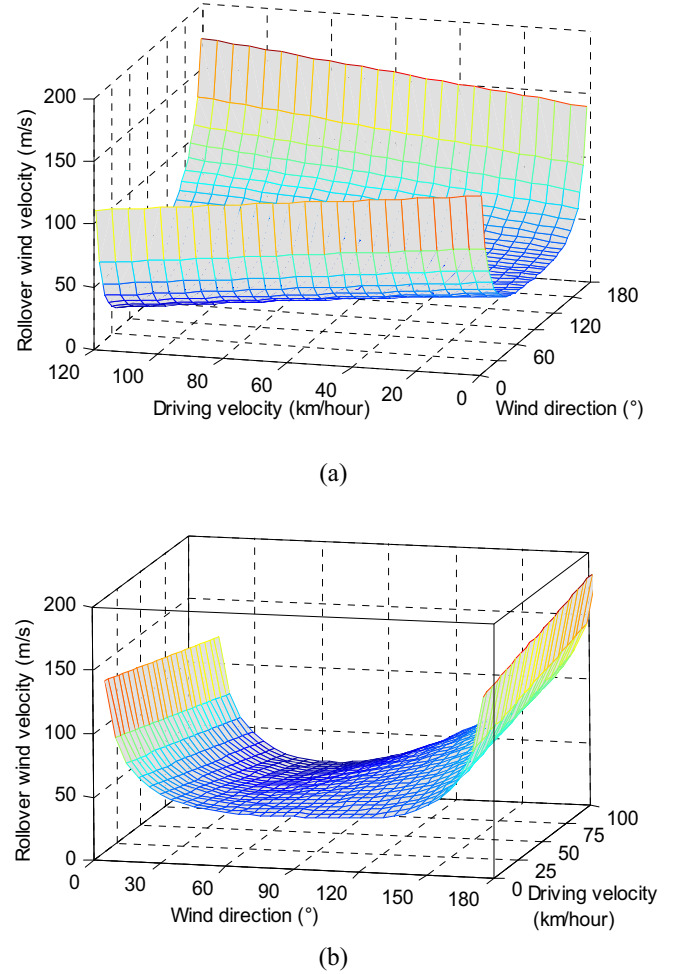


Figure 3 Two mesh plots demonstrating the relation between rollover wind velocity, wind direction and driving velocity as evaluated deterministically using Eq. (7a).

3.2 Cases studied

The combinations of parameters applied for the basic variables in this study are given in Table 2. The study further assumes that the basic mechanical quantities of the road vehicle used are the same as for the lorry found in Coleman and Baker (1994).

Figures 4 to 9 show the interrelation between the various basic variables and how they affect the accident risk, herein measured via the so-called accident index, β , defined in Eq. (9). Each Figure shows a 3-dimensional view of the accident index as a function

of two pre-chosen variables with the other three, fixed around certain mean value with a prescribed standard deviation. A projected 2-dimensional graph is also included in each figure to further reveal the relation between each basic variable and β .

Table 2 Characteristic parameters for the stochastic variables.

Name of quantity	Notation	Range of mean values	Standard deviation
Wind velocity (m/s)	U	0 : 7.5 : 112.5	2
Wind direction ($^{\circ}$)	ϑ	8 : 4 : 40	0.15 U
Coefficient of friction	μ	15 : 15 : 165	7.5
Driving speed (km/hour)	R	0.1 : 0.1 : 0.7	0.05
Camber of road	e	-0.045:0.01:0.045	0.005

Figure 4 demonstrates the interrelation between wind velocity, wind direction and the accident index. It is seen that the probability of accident increases with increased wind velocity, and for wind velocity above 30 m/s, P_A exceeds 0.5 for a wide range of wind directions. Otherwise β is at minimum for wind direction around 90° , although it is not a clear cut picture because of the aerodynamic coefficients and the fact that the driving speed affects the effective angle of incidence to a varying degree, depending on the wind velocity. For certain conditions it is therefore conceivable that β is reduced with increased driving speed relative to the wind velocity (Baker, 1987).

Figure 5 displays the relationship formed by driving speed and wind direction as parameters in the accident index. As in Figure 3, it is seen that β decreases with increased driving speed for wind directions below 90° but increases with increased driving speed for wind directions above 90° . This means that although decreased driving speed generally reduces the probability of accident when the wind is blowing towards the front of vehicle, the opposite is true when the wind is blowing at the back of the car when increasing the vehicle speed increases safety. Furthermore, the projected surface depicted in the 2-D plot in Figure 5b shows, that β is primarily influenced by the driving speed for wind directions below 90° .

Figure 6 illustrates the connection between driving speed and wind velocity in generating the accident index. In principle increased wind velocity decreases β , although for wind velocities around 25 m/s β is almost constant but for wind velocities around 30 m/s and more the probability of accident

increases rapidly especially for the higher driving speeds.

Figure 7 shows the accident index as a function of driving speed and friction coefficient. It clearly demonstrates the dramatic influence of frictional resistance on the driving safety. For snowy and icy condition, i.e. for friction coefficient below 0.4, the probability of accident is about 0.5 or more for a wide range of driving velocities at the wind velocity of 25 m/s and wind direction of 60° .

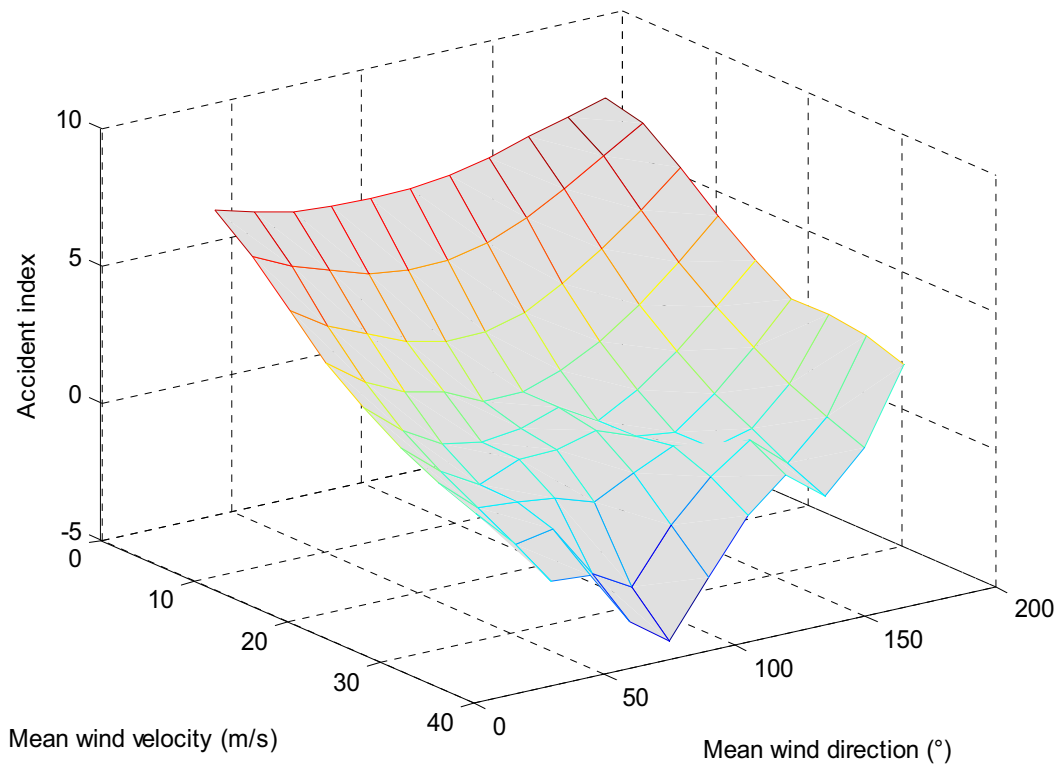
Figure 8 depicts the co-effect of driving speed and road camber on the accident index. On traditional two lane highways the road is highest in the middle and then slopes towards the embankments on each side. As can be seen in Figure 8, the road camber can have significant effect on driving safety. In fact, the conditions may be quite different depending on which lane the vehicle is driving, even when driving in the same direction. Figure 8(b) and 8(c) further demonstrate this effect of camber on the accident index for various driving speeds. For instance decreasing the vehicle speed down to 60 km/hour for camber of 0.035, results in a β value of the same order as for 90 km/hour on flat ground. The effect of camber on the measurements of aerodynamic coefficients as indicated in Coleman and Baker (1994) is not addressed herein.

It can be informative to study the behaviour of the basic variables to see how they adjust as the limit state is reached. Such observation reveals, which variables are active or inactive in the optimization process.

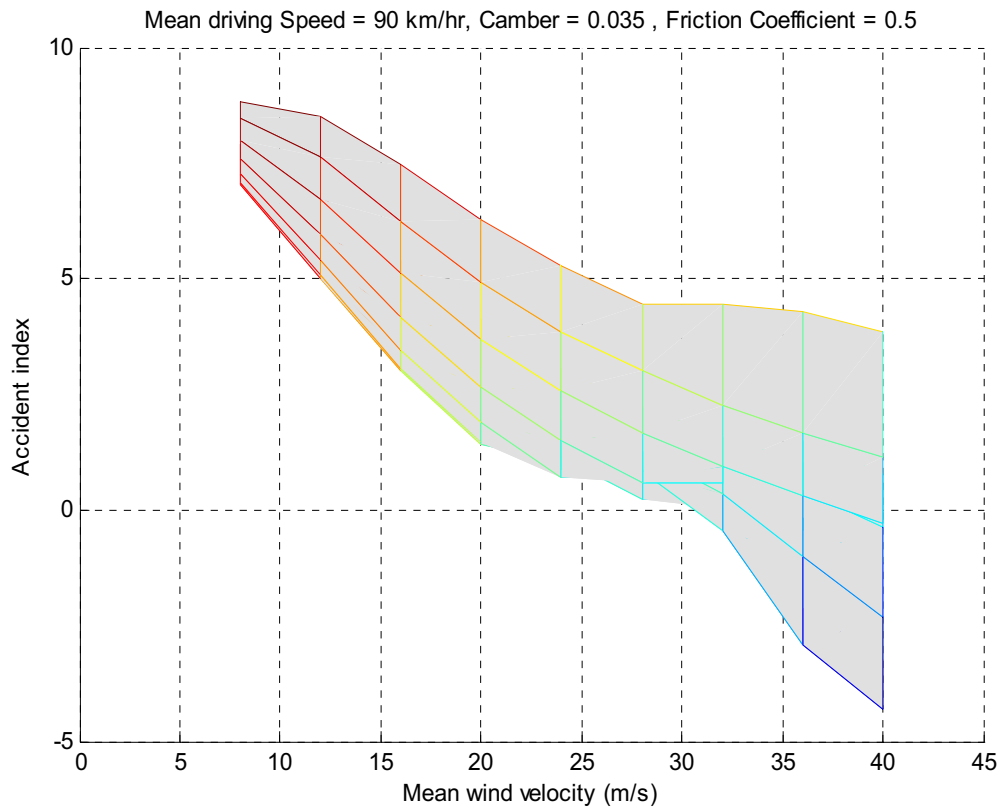
Studying the overturning accident limit state (rollover criteria) the friction and camber are found to be relatively inactive parameters. The active parameters, considering the limit state values, are primarily wind velocity and driving speed.

For the slip accident limit state (slip on at least two wheels) different behaviour is seen as the friction and camber values are adjusted throughout the convergence process, according to the freedom given by their assigned standard deviation. Their values at the accident limit state seem to depend primarily on the wind velocity. The friction values at low wind velocities go down, whereas for the higher wind velocities no adjustment is needed and the friction approaches its predefined mean value. The camber is similarly adjusted to increase probability of accident at low wind velocities, whereas the predefined mean value is approached for the higher wind velocities. The limit state wind velocity and driving velocity largely follow their mean values.

Mean driving Speed = 90 km/hr, Camber = 0.035 , Friction Coefficient = 0.5



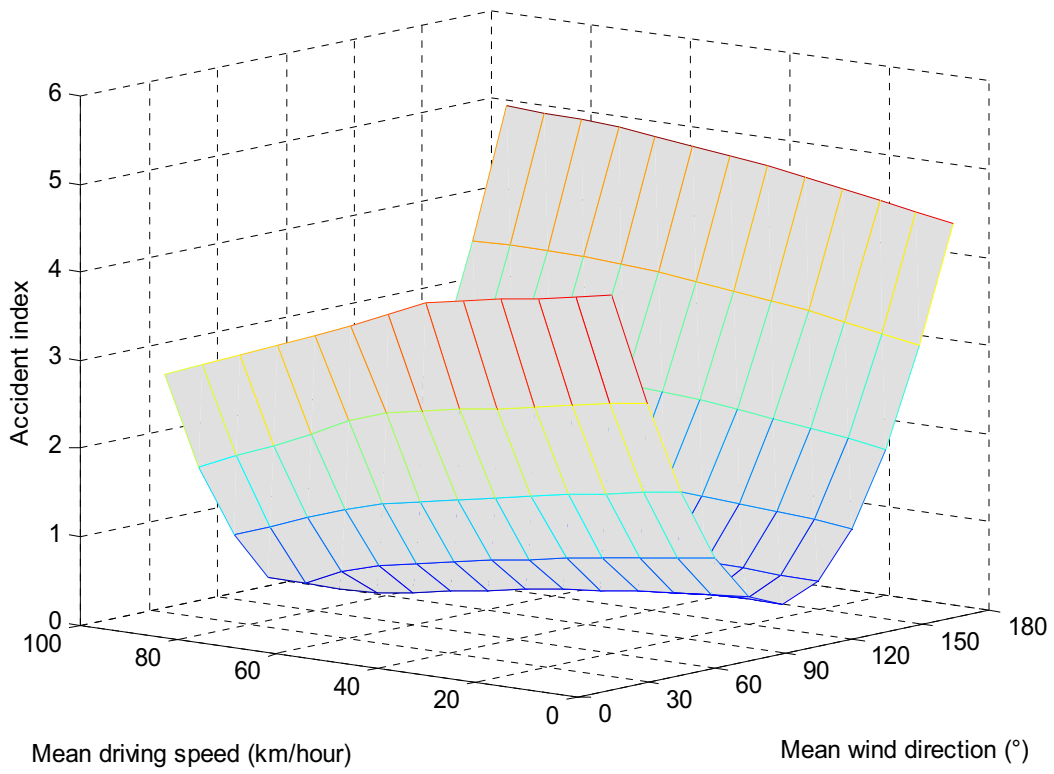
(a)



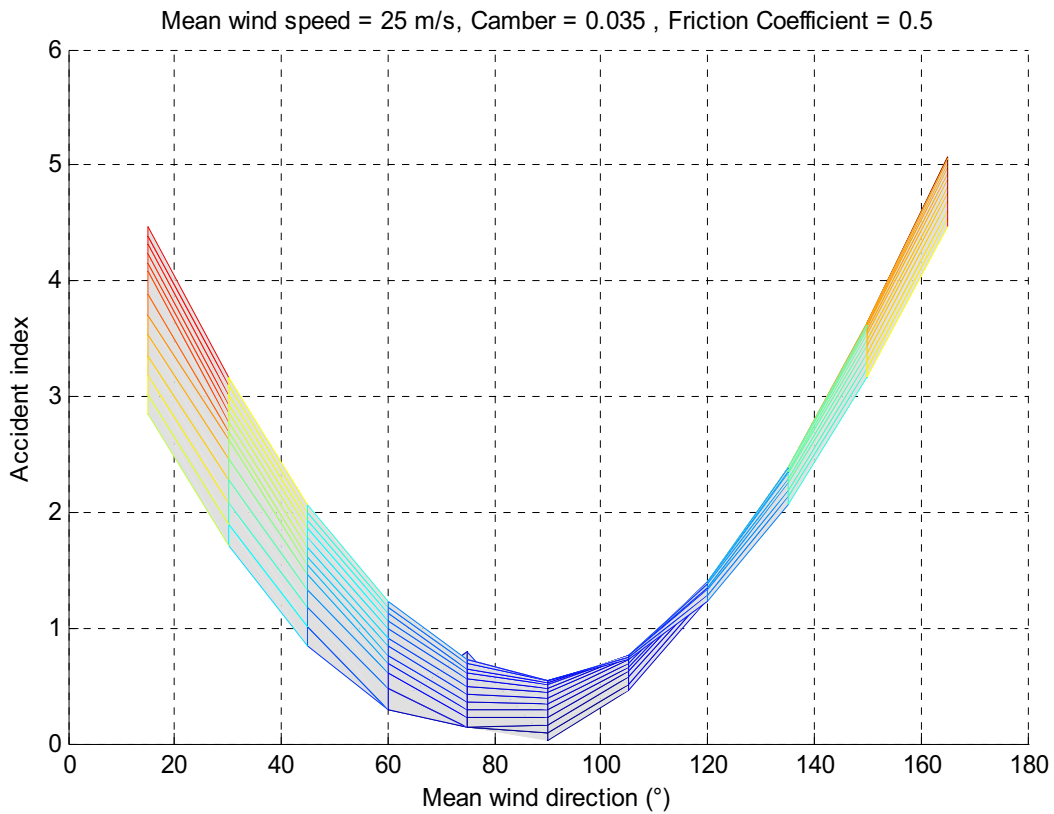
(b)

Figure 4 The accident index as a function of wind velocity and wind direction (a) 3-D representation and (b) 2-D representation. The mean values used for the other basic variables are as follows: ($V = 90$ km/hour, $\vartheta = 60^\circ$, $\mu = 0.5$ and $e = 0.035$).

Mean wind speed = 25 m/s, Camber = 0.035 , Friction Coefficient = 0.5



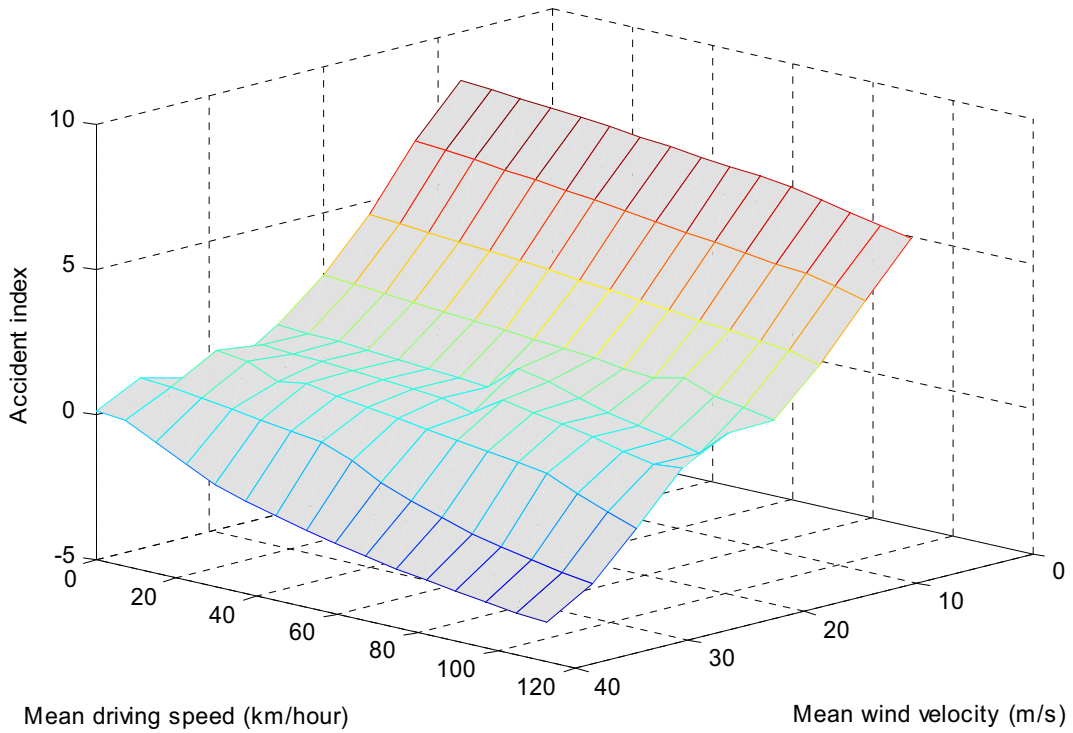
(a)



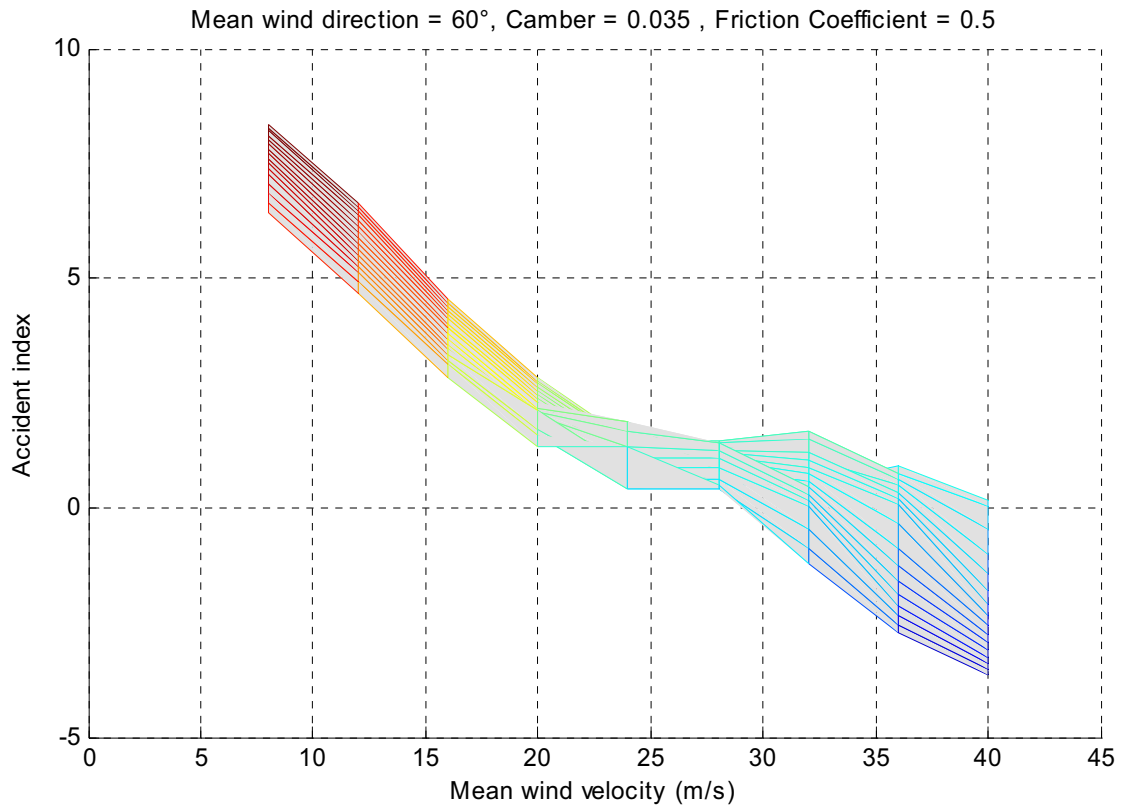
(b)

Figure 5 The accident index as a function of driving speed and wind direction. (a) 3-D representation and (b) 2-D representation. The mean values used for the other basic variables are as follows: ($U = 25$ m/s, $e = 0.035$ and $\mu = 0.5$).

Mean wind direction = 60°, Camber = 0.035, Friction Coefficient = 0.5



(a)



(b)

Figure 6 The accident index as a function of driving speed and wind velocity. (a) 3-D representation and (b) 2-D representation. The mean values used for the other basic variables are as follows: ($\vartheta = 60^\circ$, $e = 0.035$ and $\mu = 0.5$).

Mean wind speed = 25 m/s, Mean wind direction = 60°, Camber = 0.035

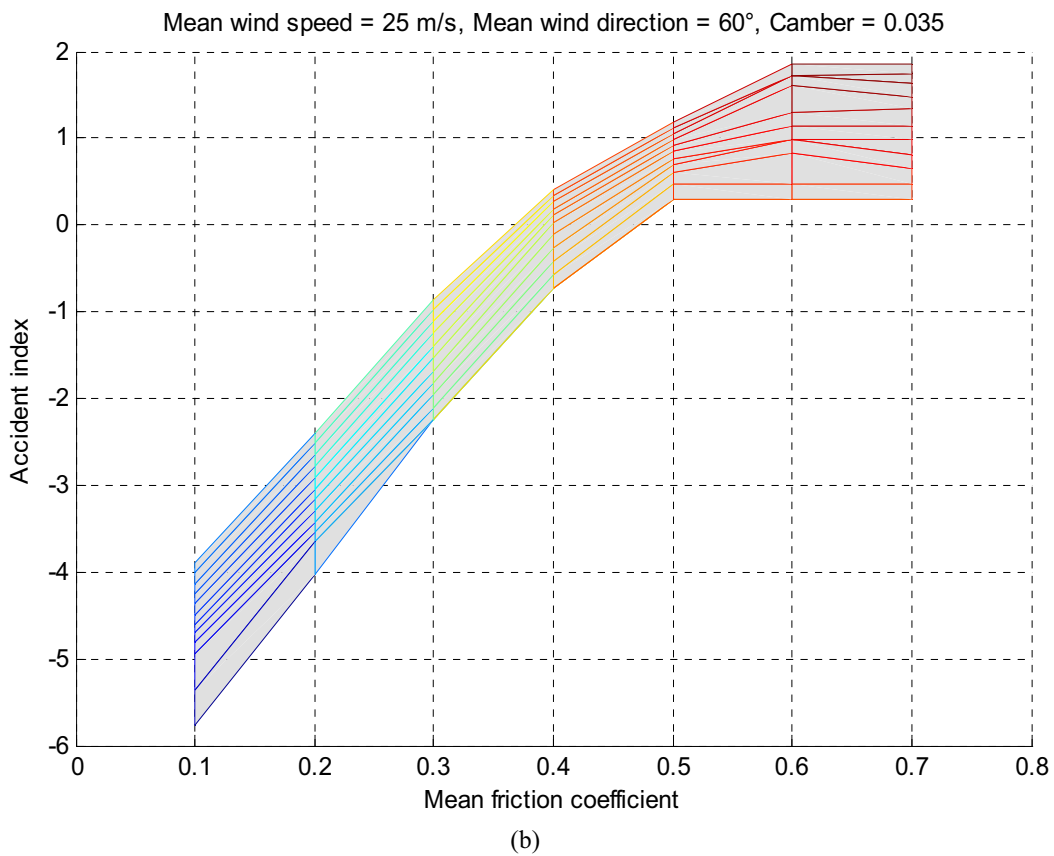
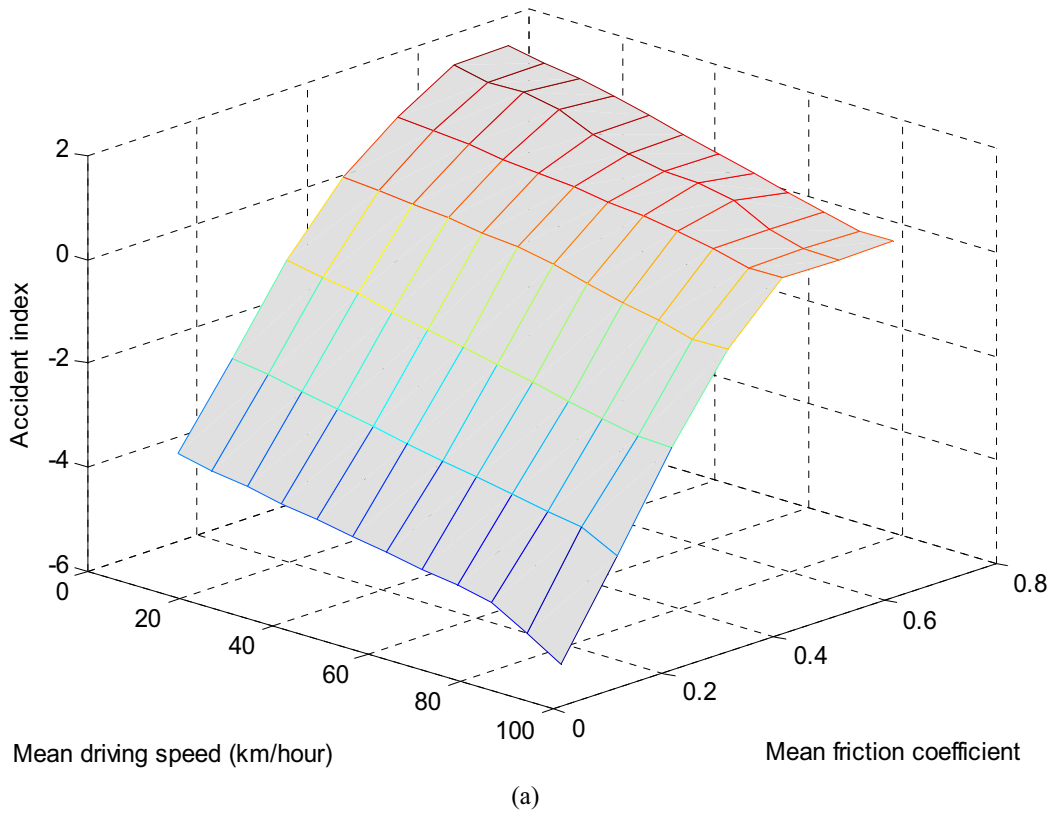


Figure 7 The accident index as a function of driving speed and friction coefficient. (a) 3-D representation and (b) 2-D representation. The mean values used for the other basic variables are as follows: ($U = 25$ m/s, $\vartheta = 60^\circ$ and $e = 0.035$).

Mean wind speed = 25 m/s, Mean wind direction = 60°, Friction Coefficient = 0.5

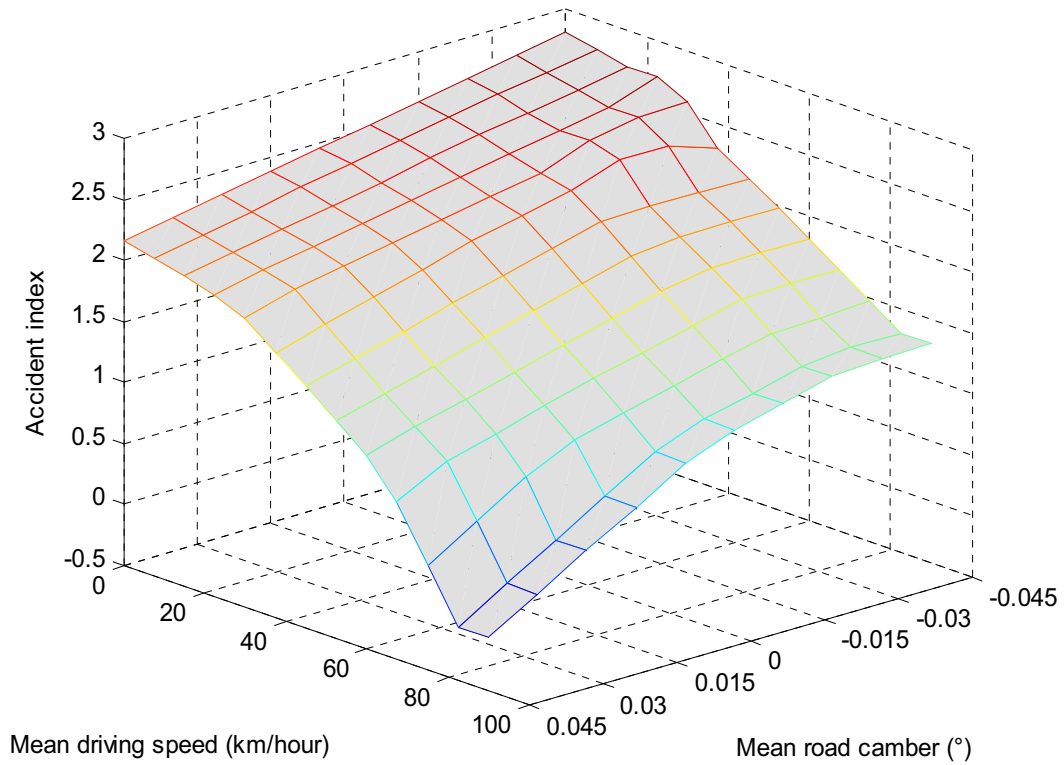


Figure 8 (a)

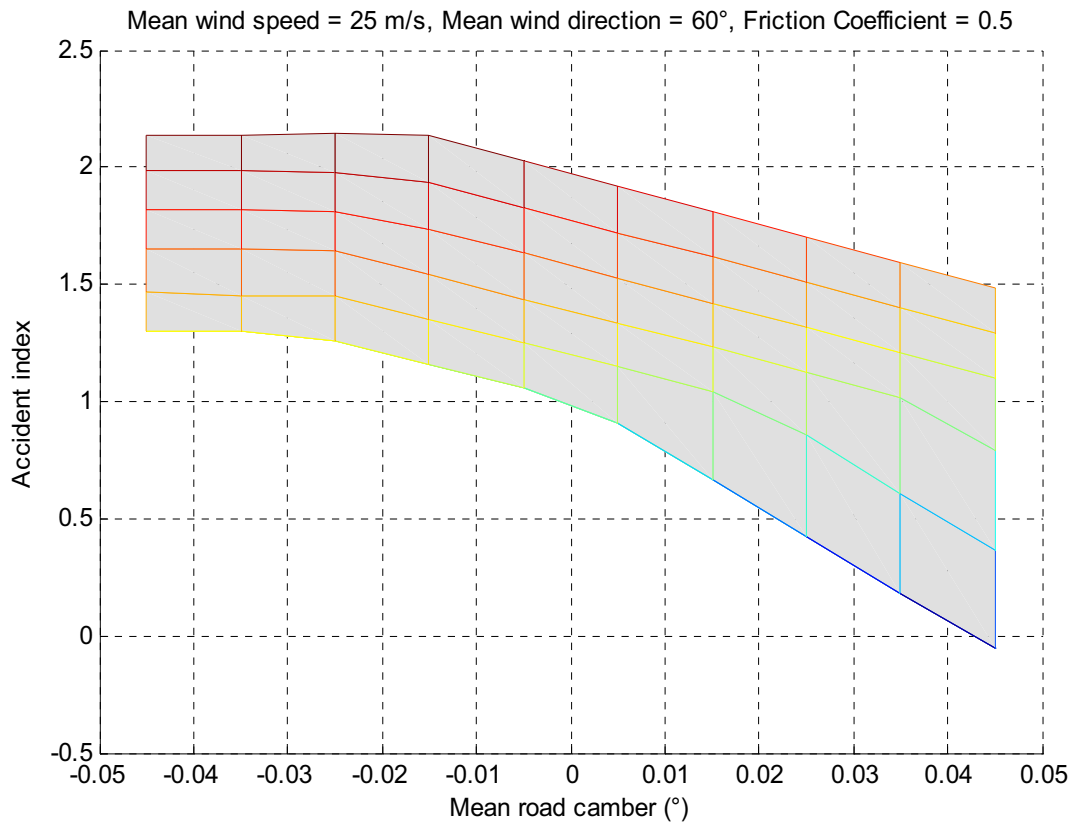


Figure 8 (b)

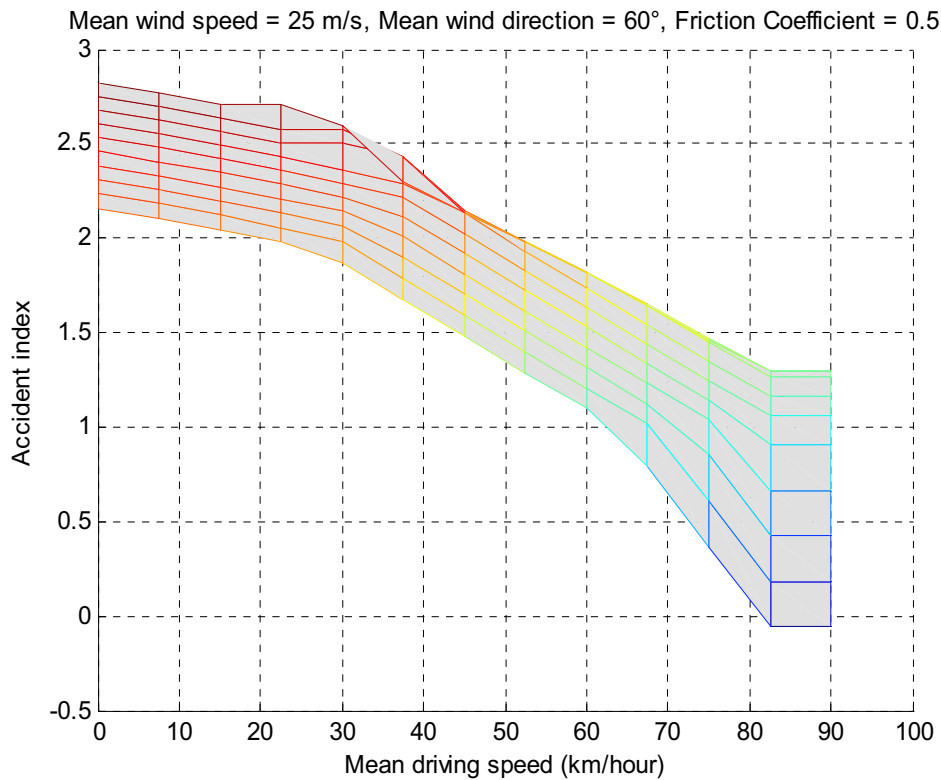


Figure 8 (c)

Figure 8 The accident index as a function of driving speed and road camber. (a) 3-D representation, (b) 2-D representation for driving speeds between 45 km/hour to 90 km/hour and (c) The accident index as a function of driving speed for camber between -0.045 and 0.045 . The mean values used for the other basic variables are as follows: ($U = 25$ m/s, $\vartheta = 60^\circ$ and $\mu = 0.5$).

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

An outline of a general probabilistic model is presented for assessment of road vehicle stability in windy environments. The model presented herein is an extension and improvement of model developed earlier by Sigbjörnsson and Snæbjörnsson (1998). An aero-elastic model is defined on a finite set of basic variables with prescribed probabilistic characteristics. The basic variables are: wind velocity and direction; frictional coefficient; camber of the road and vehicle speed. The limits of safe performance are discussed and the accident point is defined in the space of basic variables and the probability of accident is assessed. The theory presented, is applied to a multitude of scenarios to explore the interrelation between the various basic variables and how they affect the probability of accident or the so-called accident index. The analysis demonstrates how wind related traffic accidents are the consequence of a combination of several basic variables as represented by the accident point. Related parameters such as the aerodynamic properties of road vehicles are also of great importance and need further refinement.

The probability of accident increases with increased wind velocity, although for wind velocities around 25 m/s β is almost constant but for wind velocities around 30 m/s P_A exceeds 0.5 for a wide range of wind directions, especially for higher driving speeds. The accident index, β , is generally at minimum for wind direction around 90° , although it is not a clear cut picture because of the aerodynamic coefficients and the fact that the driving speed affects the effective angle of incidence to a varying degree, depending on the wind velocity.

Although decreased driving speed generally reduces the probability of accident when the wind is blowing towards the front of vehicle, the opposite is true when the wind is blowing at the back of the car when increasing the vehicle speed increases safety. However, β is primarily influenced by the driving speed for wind directions below 90° .

The frictional resistance has dramatic influence on the driving safety, and may warrant a more detailed modelling. Unfortunately, although considerable information is available on the characteristics of friction, information on the mechanics of frictional resistance of tires to side forces under driving conditions is limited.

Similarly the road camber can have significant effect on driving safety, making the driving conditions quite different depending on which lane the vehicle is driving, even when driving in the same direction.

The study suggests that available methods of probabilistic mechanics and theory of reliability can be of value for analysis of wind-related traffic accidents. Using methods of this type to set up computer simulations to analyse scenarios can be helpful in post-evaluation of accidents and to improve the design of roads and highways. For instance it is possible to analyse the accident index at locations where wind data is available along the road systems. The Road Authority in Iceland has installed data acquisition systems along the highways as several locations to monitor weather conditions and traffic. The data is made available as an online information system for drivers on the internet and on computer controlled information signals along the roads. Based on the wind data gathered by these stations time series of accident index can be evaluated at each monitoring location. This could then be used as input in statistical analysis of the probability of wind related accidents along the roads in question and correlated with accident reports. This type of information should at least give a more complete view on the wind related hazard for road vehicles than is currently available and could even be used to point out potential accident spots as well as to devise and evaluate preventive measures to improve traffic safety in windy environment

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This work was in part supported by a research grant from RANNUM (The Icelandic Research Board for Traffic Safety) which is gratefully acknowledged.

6 REFERENCES

- Baker, C. J. (1986) A simple analysis of various types of wind-induced road vehicle accidents, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **22** (1).
- Baker, C. J. (1987) Measures to control vehicles movements at exposed sites during windy periods, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **25** (2).
- Baker, C. J. (1988) High sided articulated vehicles in strong cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **31** (1).
- Baker, C. J. (1991) Ground vehicles in high cross winds - Parts I, II and III. *J. of Fluid and Structures*, **5**.
- Baker, C. J. (1994) The quantification of accident risk for road vehicles in cross wind, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **52**.
- Coleman, S. A. & Baker, C. J. (1990) High sided road vehicles in cross wind, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **36** (2).
- Colman, A. & Baker, C. J. (1994) An experimental study of the aerodynamic behaviour of high sided lorries in cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **53** (3).

- Baker, C. J. & N. D. Humphreys (1996) Assessment of the adequacy of various wind tunnel techniques to obtain aerodynamic data for ground vehicles in cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **60**.
- Baker, C. J., J. Jones, F. Lopez-Calleja & J. Munday (2004) Measurements of the cross wind forces on trains, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **92** (7-8).
- Automotive Research Center (ARC), ArcSim - a demonstration software from a center of excellence funded by The U.S. Army TARDEC: http://www.umtri.umich.edu/erd_soft
- Bradley E. Heinrichs, Boyd D. Allin, James J. Bowler & Gunter P. Siegmund (2004) Vehicle speed affects both pre-skid braking kinematics and average tire/roadway friction, *Accident Analysis & Prevention*, **36** (5).
- Gustafsson, F. (1997) Slip-based Tire-Road Friction Estimation, *Automatica*, **33** (6).
- Gillespie, T. D. (1992) *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc.
- Sigbjörnsson R. and Snæbjörnsson J.Th. (1998) Probabilistic assessment of wind related accidents of road vehicles: A reliability approach, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **74-76**.
- Thórdarson, S. & Snæbjörnsson, J. (2004) *Traffic accidents and wind conditions*, Report for Rannum (The Icelandic Research Board for Traffic Safety). (in Icelandic).
- de Blaeij A., R.J.G.M. Florax, P. Rietveld, E. Verhoef (2003) The value of statistical life in road safety: a meta-analysis, *Accident Analysis and Prevention* **35**.
- Suzuki M., K. Tanemoto & T. Maeda (2003) Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **91** (1-2).