



ÁHRIF HÆÐARFERILS VINDHRAÐA Á VINDORKUSPÁ

Arnar Jónsson

Lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði BSc
2014

Höfundur: Arnar Jónsson

Kennitala: 110785-2169

Leiðbeinandi: Jónas Þór Snæbjörnsson

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering

Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Áhrif hæðaferils vindhraða

Námsbraut:

Vél- og orkutæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í tæknifræði BSc

Önn:

Vorönn

Námskeið:

VT LOK
1012

Ágrip:

Markmið verkefnisins var að kanna áhrif breytilegs hæðaferils vindhraða á óvissu í vindorkuútreikningum. Unnið var með gögn frá Landsvirkjun. Einkum var stuðst við gögn úr 50 metra háum möstrum þar sem upplýsingum um vindhraða og hitastig var safnað með u.b.b. 10 metra millibili, undanfarin ár. Árið 2012 var sérstaklega skoðað. Notuð voru tíu mínútna meðaltöl vindhraða í fimm hæðum til að reikna hæðarferil vindhraða. Skoðuð voru tvö mismunandi hæðarferilslíkön, lógaritmískur hæðarferill og veldisferill. Jafnframt voru reiknaðar allar helstu stærðir sem notaðar eru við verkfræðilega lýsingu vindhraða, svo sem hviðustuðull og hviðustyrkur, ásamt hrýfisstuðli og hrýfislengd. Gerð var vindorkuspá á grundvelli mælds vindhraða út frá mismunandi vindhraðaferlum. Markmiðið var að skoða breytileika og óvissu í slíkum spám út frá gögnum úr mismunandi hæð yfir jörðu. Kannað var hvort og þá hvernig bæta megi áreiðanleika vindorkuspár með tilliti til breytilegs hæðarferils vindhraða. Jafnframt var stefnt að því að bera saman valin tilvik, vindorkuspá byggða á mælingum í 50 metra mastri og raunverulega orkuframleiðslu í tilraunavindtúrbínum Landsvirkjunar á Hafinu.

Afrakstur verkefnis er bætt þekking á eiginleikum vindhraða og mögulegri vindorku á svæðinu norðan við Búrfell.

Höfundur:

Arnar Jónsson

Umsjónarkennari:

Indriði Sævar Ríkarðsson

Leiðbeinandi:

Jónas Þór Snæbjörnsson

Fyrirtæki/stofnun:

Efla ehf
Landsvirkjun hf

Dagsetning:

14.05.14

Lykilorð íslensk:

Hæðaferill
Vindorka

Lykilorð ensk:

Wind profile
Wind energy

Dreifing:

opin

lokuð

til:

Efnisyfirlit

1	Ágrip.....	9
2	Formáli.....	10
3	Inngangur.....	11
4	Mælamastur, staðsetning og mælitæki	15
5	Vindurinn og lýsing hans.....	19
5.1	Hviður.....	20
5.2	Hrýfi	21
5.3	Logaritmískur hæðaferill (e. Log wind profile)	22
5.4	Veldisferill (e. Wind profile power-law).....	22
5.5	Líkindadreifing vindhraða.....	23
5.6	Vindskerkraftur	25
6	Mælingar og úrvinnsla.....	26
6.1	Stöðugleiki andrúmslofts.....	26
6.2	Vindstefna	30
6.3	Vindhraði.....	32
6.4	Landslag og hindranir.....	34
7	Áhrif hrýfis á orkuframleiðslu.....	37
8	Orkuframleiðsla	41
9	Niðurstöður	45
10	Lokaorð.....	47
11	Heimildaskrá.....	48
12	Viðaukar	50
12.1	A - Matlab kóði	50
12.2	C – Weibulldreifingar.....	55
12.3	E (Orkuútreikningar)	63

Myndaskrá

Mynd 1. Tæknilegar upplýsingar á vindmyllu [3]	11
Mynd 2. Prívíddarmynd af vindmyllu af gerðinni Enercon E-44 [3]	12
Mynd 3. Staðsetning masturs	15
Mynd 4. Mastrið ásamt mælitækjum [5].....	16
Mynd 5. Skemísk mynd af staðsetningu efsta mælis á mastri [6]	17
Mynd 6. Mælitæki í 10 metra hæð [5]	17
Mynd 7. Hraða og stefnumælir [7]	18
Mynd 8. Myndun á hviðu vegna hrýfis.....	20
Mynd 9. Dæmi um Weibulldreifingu með mismunandi k-gildum	24
Mynd 10. Aflþéttleiki vinds (w/m^2) í 50 metra hæð	24
Mynd 11. Breytileiki vindhraða sem fall af hæð	25
Mynd 12. Breytileiki hviðustuðuls sem fall af hæð.....	25
Mynd 13. Staðalfrávik vindáttar sem fall af tíma	27
Mynd 14. Flokkur A	27
Mynd 15. Flokkur B	28
Mynd 16. Flokkur C	28
Mynd 17. Flokkur D	28
Mynd 18. Flokkur E	29
Mynd 19. Flokkur F	29
Mynd 20. Flokkur G	29
Mynd 21. Vindátt fyrir hvern mánuð	30
Mynd 22. Histogram af vindátt úr öllum mæli hæðum	31
Mynd 23. Vindrós fyrir allar mælingar.....	31
Mynd 24. Tíðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $4.0 < U < 10.0$ [m/s]	32
Mynd 25. Tíðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $10.0 < U < 16.0$ [m/s]	33
Mynd 26. Tíðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $16.0 < U$ [m/s]	33
Mynd 27 Tíðni hrýfislengdar yfir árið 2012, (z_0)	34
Mynd 28. Tíðni hrýfislengdar yfir árið 2012, $\log(z_0)$	34
Mynd 29 Tíðni hrýfisstuðuls yfir árið 2012, k	35
Mynd 30 Tíðni hrýfisstuðuls yfir árið 2012, $\log(k)$	35
Mynd 31. Sýnir flokkun á landslagi [14]	36
Mynd 33. Hæðaferlar fyrir öll tilvik	38
Mynd 34. Hæðaferlar fyrir öll tilvik	39

Mynd 35. Aflstuðull fyrir Enercon E-44 fyrir mismunandi vindhraða.....	42
Mynd 36. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 10 metra hæð.....	55
Mynd 37. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 20 metra hæð.....	55
Mynd 38. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 30 metra hæð.....	55
Mynd 39. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 40 metra hæð.....	56
Mynd 40. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 20 metra hæð	56
Mynd 41. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 30 metra hæð	56
Mynd 42. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 40 metra hæð	57
Mynd 43. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 50 metra hæð	57
Mynd 44. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 60 metra hæð	57
Mynd 45. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 70 metra hæð	58
Mynd 46. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 80 metra hæð	58
Mynd 47. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 20 metra hæð	58
Mynd 48. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 30 metra hæð	59
Mynd 49. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 40 metra hæð	59
Mynd 50. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 50 metra hæð	59
Mynd 51. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 60 metra hæð	60
Mynd 52. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 70 metra hæð	60
Mynd 53. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 80 metra hæð	60

Töfluskrá

Tafla 1. Vinnslusvið mælisins.....	18
Tafla 2. Nokkur gildir fyrir hrýfislengd og hrýfisstuðul [11]	25
Tafla 3. Stöðugleikaflokkun.....	26
Tafla 4. Sýnir tíðni hvers stöðugleikaflokks.....	30
Tafla 5. Sýnir tíðni vindstefnu á 15° millibili	32
Tafla 6. Tíðni mismunandi vindhraða.....	33
Tafla 7. Gildi k og z_0 fyrir hvern mánuð	35
Tafla 8. Veldisvísir, α og hviðustyrkur, I_u fyrir hvern mánuð	36
Tafla 9. Hrýfislengd, Z_0 fyrir öll tilvik	37
Tafla 10. Hrýfisstuðull, κ fyrir öll tilvik	37
Tafla 11. Meðalvindhraði í túrbínuhæð (55m) fyrir öll tilvik.....	37
Tafla 12. Meðalvindhraði í mismunandi hæð fyrir öll tilvik	38
Tafla 13. Skerstuðull, α fyrir öll tilvik.	38
Tafla 14. Meðalvindhraði í túrbínuhæð (55m) fyrir öll tilvik.....	38
Tafla 15. Meðalvindhraði í mismunandi hæð fyrir öll tilvik	39
Tafla 16. Breytur fyrir Weibulldreifingu	40
Tafla 17. Aflþéttleiki vindsins reiknaður með weibulldreifingu	40
Tafla 18. Meðalvindhraði í túrbínuhæð fyrir hvern mánuð fyrir hvert tilvik með log.	41
Tafla 19. Meðalvindhraði í túrbínuhæð fyrir hvern mánuð fyrir hvert tilvik með power.	41
Tafla 20. Ársframleiðsla fyrir eina vindmyllu fyrir hvert tilvik með log.	43
Tafla 21. Ársframleiðsla fyrir eina vindmyllu fyrir hvert tilvik með power.	43
Tafla 22. Orkuframleiðsla reiknuð útfrá túrbínuhæð með log borin saman við raunframleiðslu [15].....	43
Tafla 23. Orkuframleiðsla reiknuð útfrá túrbínuhæð með power borin saman við raunframleiðslu [15].....	44
Tafla 24. Samanburður spátilvika fyrir log.....	45
Tafla 25. Samanburður spátilvika fyrir power.....	46
Tafla 26. Weibullbreytur í öllum hæðum	61
Tafla 27. Weibullbreytur fyrir allar hæðir	62
Tafla 28. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 1	63
Tafla 29. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 2	64
Tafla 30. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 3	65
Tafla 31. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 4	66

Tafla 32. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 5	67
Tafla 33. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 6	68
Tafla 34. Orkureikningar fyrir öll tilvik.....	75

1 Ágrip

Markmið verkefnisins var að kanna áhrif breytilegs hæðaferils vindhraða á óvissu í vindorkuútreikningum. Unnið var með gögn frá Landsvirkjun. Einkum var stuðst við gögn úr 50 metra háu mastrui þar sem upplýsingum um vindhraða og vindstefnu var safnað með u.þ.b. 10 metra millibili, undanfarin ár. Árið 2012 var sérstaklega skoðað. Notuð voru tíu mínútna meðaltöl vindhraða í fjórum hæðum til að reikna hæðarferil vindhraða. Skoðuð voru tvö mismunandi hæðarferilslíkön, lógaritmískur hæðarferill og veldisferill. Jafnframt voru reiknaðar allar helstu stærðir sem notaðar eru við verkfræðilega lýsingu vindhraða, svo sem hviðustuðull og hviðustyrkur, ásamt hrýfisstuðli og hrýfislengd. Gerð var vindorkuspá á grundvelli mælds vindhraða út frá mismunandi vindhraðaferlum. Markmiðið var að skoða breytileika og óvissu í slíkum spám út frá gögnum úr mismunandi hæð yfir jörðu. Kannað var hvort og þá hvernig bæta megi áreiðanleika vindorkuspár með tilliti til breytilegs hæðarferils vindhraða.

Jafnframt var stefnt að því að bera saman valin tilvik, vindorkuspá byggða á mælingum í 50 metra mastri og raunverulega orkuframleiðslu í tilraunavindtúrbínum Landsvirkjunar á Hafinu.

Afrakstur verkefnis er bætt þekking á eiginleikum vindhraða og mögulegri vindorku á svæðinu norðan við Búrfell.

2 Formáli

Áhugi skýrsluhöfundar á vindorku kvíknaði í áfanga í straumfræði. Þar var farið yfir virkni vindhverfla og hvernig beisla megi þá ótakmörkuðu orku sem streymir yfir og í kringum landið okkar. Skýrsluhöfundur starfaði hjá Verkfræðistofunni Eflu sumarið 2013 og hafði því samband við Stefán Kára Sveinbjörnsson verkfræðing til að ræða hugmyndir að mögulegu lokaverkefni. Hugmyndin að þessu verkefni átti Stefán Kári og þótti höfundi það mjög spennandi. Í kjölfarið ræddi höfundur við Jónas Þór Snæbjörnsson, prófessor við Háskólann í Reykjavík og sérfræðing í vindorku og vindafari. Stefán Kári, Jónas Þór og höfundur skilgreindu síðan markmið verkefnisins.

Skýrsluhöfundur vill þakka Verkfræðistofunni Eflu fyrir frábæra gestrisni, Stefáni Kára fyrir góð ráð og hugmyndina að verkefninu, Jónasi Þór fyrir leiðsögn og aðstoð og ekki síst fjölskyldu og unnustu fyrir mikinn og ómetanlegan stuðning.

Reykjavík 13. maí 2014

X

Arnar Jónsson
Höfundur

3 Inngangur

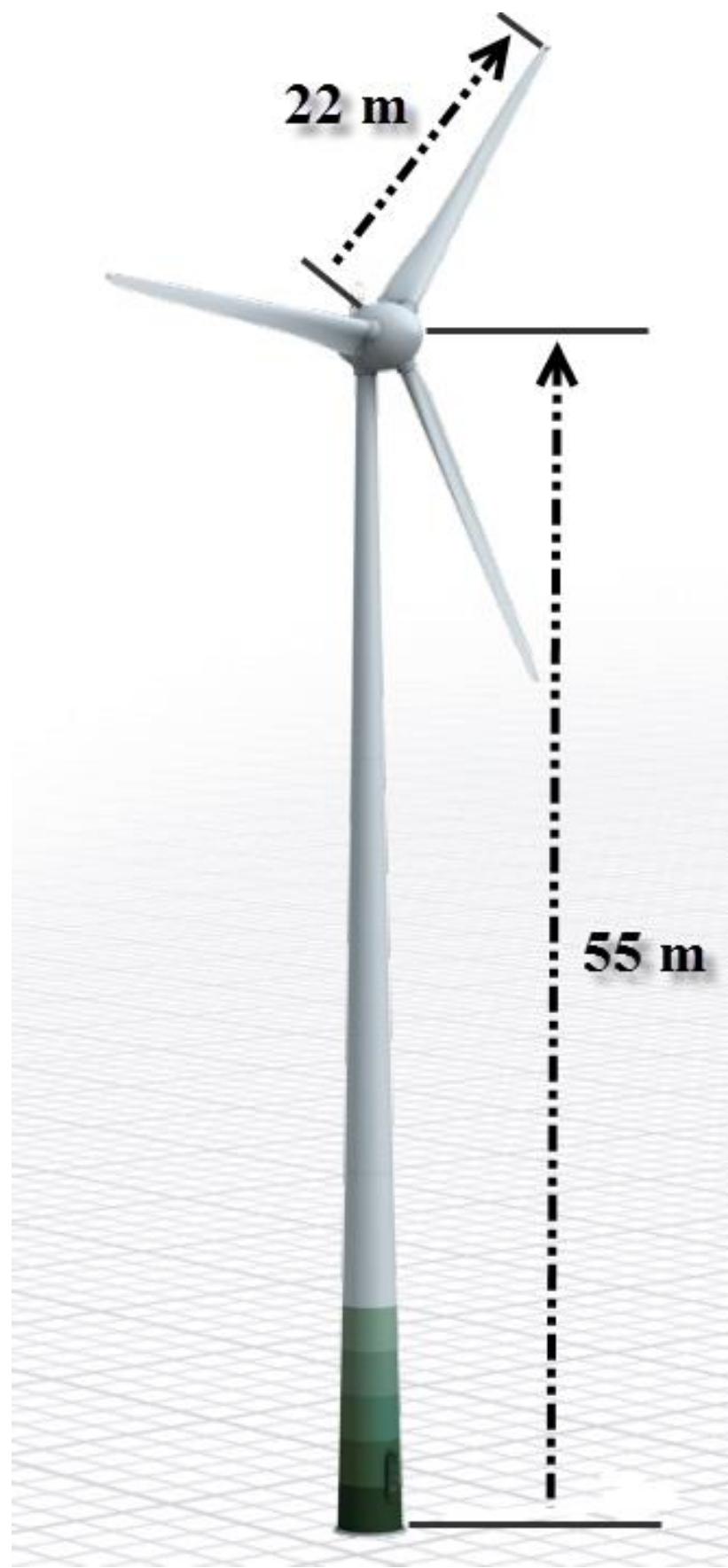
Á Íslandi er að finna mikla orku sem breyta má í raforku. Íslendingar hafa verið duglegir við að nýta orku úr rennandi vatni og jarðhita og skipað sér í fremstu röð í nýtingu þessara tveggja auðlinda.

Jarðhiti hefur aðallega verið nýttur til upphitunar á húsum. Nú eru tæplega 90% heimila hituð með heitu vatni sem er einsdæmi í heiminum. Sjö jarðvarmavirkjanir eru starfræktar á Íslandi með 663 MW_e í uppsettum rafafli. Árið 2011 nam raforkuframleiðsla jarðvarmavirkjana 4.701 GWh [1]. Tæp 73% af raforkuframleiðslu á Íslandi eru úr vatnsorku. Árið 2011 nam raforkuframleiðsla vatnsaflsvirkjana 12.507 GWh [1].

En á Íslandi er líka til önnur orka, vindorka, sem vert er að skoða hvort nýta megi betur til raforkuframleiðslu. Hingað til hefur vindorka verið lítið nýtt, einungis hafa nokkrar myllur verið settar upp til einkanota. Þó að vindurinn á Íslandi standist skilyrði til framleiðslu vindorku hafa aðrar og ódýrari leiðir svo sem vatnsafl og jarðvarmafl gert það að verkum að vindorkan hefur hlutið takmarkaðan hljómgrunn. Síðustu ár hefur áhugi á vindorku vaxið. Dæmi um það er uppsetning Landsvirkjunar norðan við Búrfell árið 2012, á tveimur vindmyllum í rannsóknarskyni. Myllurnar tvær eru að gerðinni Enercon E-44 og eru hvor um sig 900 kW . Áætluð raforkuframleiðsla þeirra er um 5.4 GWst/ár . Turninn er 55 metrar á hæð og hver spaði 22 metrar á lengd. Þetta þýðir að í hæstu stöðu er heildarhæð myllunnar 77 metrar. Snúningsflöturinn sem spaðarnir mynda er $1520,5\text{ m}^2$. [2]

Technical specifications E-44	
Rated power:	900 kW
Rotor diameter:	44 m
Hub height in meter:	45 m / 55 m
Wind zone (DIBt):	-
Wind class (IEC):	IEC/NVN IA
WEC concept:	Gearless, variable speed Single blade adjustment
Rotor	
Type:	Upwind rotor with active pitch control
Rotational direction:	Clockwise
No. of blades:	3
Swept area:	$1,521\text{ m}^2$
Blade material:	GRP (epoxy resin); Built-in lightning protection
Rotational speed:	Variable, 16 - 34.5 rpm

Mynd 1. Tæknilegar upplýsingar á vindmyllu [3]



Mynd 2. Þrívíddarmynd af vindmyllu af gerðinni Enercon E-44 [3]

Orkan sem fæst úr vindmyllum er hreyfiorka (e. Kinetic energy) vindsins. Almennt má lýsa hreyfiorku sem $E_o = \frac{1}{2}mu^2$ þar sem m er massinn og u er hraðinn. Við vindorkuútreikninga má lýsa massanum sem $m = \rho Aut$ þar sem ρ er eðlisþyngd lofts ($\rho \approx 1.225 \frac{kg}{m^3}$), t er tími fyrir ákveðið tímabil og A er það flatarmál sem spaðar vindmyllunar ná yfir. Þetta leiðir að tveimur jöfnum, þ.e. hreyfiorka, E_0 og afl, P_0 , skv. skilgreiningunni $P_0 = \frac{E_0}{t}$ [4]

$$E_0 = \frac{1}{2}At\rho u^3 \text{ (e. Kinetic energy)} \quad 1$$

$$P_0 = \frac{1}{2}A\rho u^3 \text{ (e. Power)} \quad 2$$

Þó virkjun vatnsafls og jarðvarma beisli vistvæna og endurnýjanlega orku hefur vaxandi umræða um galla slíkra virkjana ýtt undir rannsóknir á beislun vindorku hér á landi. Vatnsaflsvirkjanir kalla t.a.m. á miðlunarlón, þar sem land fer undir vatn með tilheyrandi breytingum á náttúru og dýralífi. Jarðvarmavirkjanir hafa líka sína galla en þar má helst nefna losun gastegunda á borð við koltvísýring, CO_2 og brennisteinsvetni, H_2S .

Líkt og vatnsafls- og jarðvarmavirkjanir hefur vindorka bæði kosti og ókosti.

Helstu kostir vindorkuframleiðslu á Íslandi eru:

- Á Íslandi er mjög vindasamt og vindorka nánast ótakmörkuð.
- Meðalvindhraði er hentugur fyrir nýtni vindmylla.
- Á Íslandi er mikið af óbyggðu landi. Því má virkja vindorku fjarri byggð og “náttúruperlum” sem dregur úr hávaða- og sjónmengun nærrí byggð.
- Rekstur vindorkuvera fer vel saman við rekstur vatnsorkuvera. Þannig má “spara” vatnsforða vatnsorkuveranna þegar vindmyllur skila góðum afköstum og bæta svo í framleiðslu vatnsorkuveranna þegar lök eða engin framleiðsla er í vindorkuverunum.

Helstu ókostir vindorkuframleiðslu á Íslandi eru:

- Sjónmengun.
- Hljóðmengun.
- Á Íslandi er enn takmörkuð þekking og reynsla á sviði vindorku.
- Möguleg skaðleg áhrif á dýralíf og þá helst fuglalíf.
- Kostnaður við framleiðslu vindorku er enn sem komið er mun hærri en vatnsorku.

4 Mælamastur, staðsetning og mælitæki

Í lok árs 2010 reisti Landsvirkjun 50 metra hátt mastur á sléttunni austan við Ísakotsstíflu þar sem Þjórsá rennur í Bjarnarlón. Sjá mynd 3.



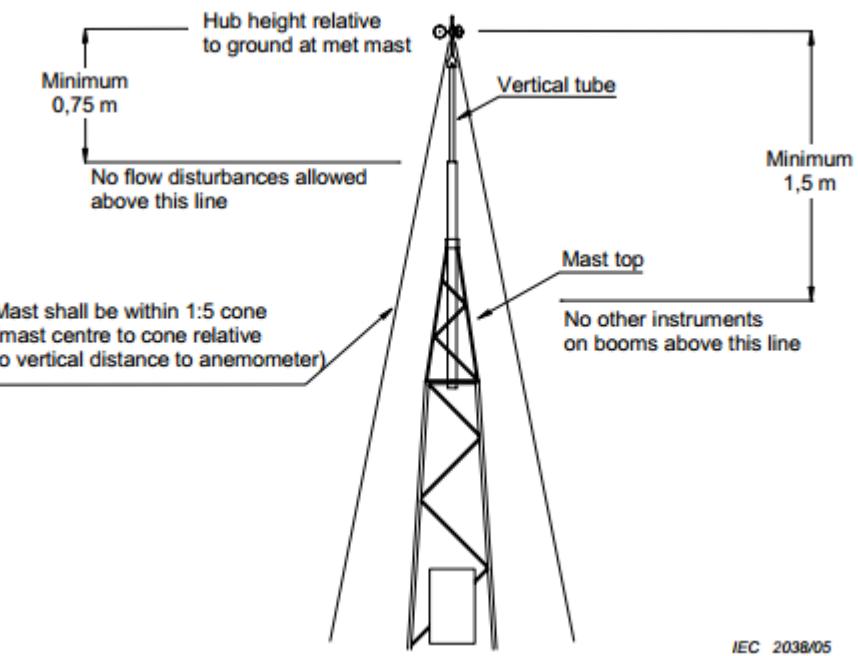
Mynd 3. Staðsetning masturs

Á mastrinu voru fimm RM Young vindmælar sem mæla bæði vindhraða og vindstefnu. Þeir sitja á örmum með 10 metra millibili frá 10 metra hæð upp í 50 metra hæð frá jörðu. Í hverri hæð voru einnig hitastigsmælar af gerðinni Logan. Í 10 metra hæð eru jafnframt tveir skálavindhraðamælar sem settir voru upp til samanburðar. Mælum var einnig komið fyrir í tveggja metra hæð. Vindmælirinn sem settur var upp þar var skálamælir. Í þessari skýrslu verður einungis unnið úr gögnum úr RM Young vindmælunum. Mælingum í 50 metra hæð er sleppt vegna galla í staðsetningu á mælinum. Sjá mynd 4 (efst á masturstóppi). Mynd 5 sýnir hvar efsti mælir á að vera staðsettur á mastri.



Mynd 4. Mastrið ásamt mælitækjum [5]

Armarnir í 10 til 40 metra hæð voru allir í 115° stefnu (stefna í aust-suð-austur). Þeir eru hornréttir á ríkjandi vindátt á svæðinu.



Mynd 5. Skemísk mynd af staðsetningu efsta mælis á mastri [6]



Mynd 6. Mælitæki í 10 metra hæð [5]



Mynd 7. Hraða og stefnumælir [7]

RM Young vindmælarnir eru af gerðinni “Alpine wind monitor, Model 05103V-45”.

Vinnslusvið og nákvæmni eru sýnd í töflu 1.

Tafla 1. Vinnslusvið mælisins

Flokkur	Vindhraði [m/s]	Vindátt [°]
Svið	0-100	360
Nákvæmni	± 0.3	± 3
Viðnámsþróskuldur	1.0	10

5 Vindurinn og lýsing hans

Við undirbúning vindorkuöflunar er nauðsynlegt að þekkja vindinn og eiginleika hans.

Vindurinn er mjög breytilegur, bæði landfræðilega og í tíma. Staðbundinn breytileiki lýsir því að til eru mörg mismunandi loftslagssvæði í heiminum. Á sumum þeirra er tölvert hvassara en öðrum. Sé litíð nánar á hvert loftlagssvæði eru talsvert margar breytingar á minni skala innan hvers svæðis.

Þessar svæðisbundnu breytingar ráðast mest af hæð. Því er óhætt að segja að vindurinn sé alla jafna meiri á hálendi en á láglendi og mestur við fjallstinda. Mismunandi landslag getur haft veruleg áhrif á yfirborðshita og rakastig í andrúmslofti, land hitnar mismikið við hita frá sólu. Til dæmis hitnar svartur sandur meira en gróið land og vötn hitna hægar en halda varmanum lengur. Þegar meta skal veðurfar þarf að hafa í huga hvernig breyting á meðalvindhraða er í tíma. Mest er breytingin á milli árstíða. Að vetri eykst t.a.m. hitamunur frá tempruðu svæðum norðurhvels til heimskautasvæða og við það myndast öflugri lægðir. [8]

Hviður (e. turbulence) eru breytingar á hraða í streymi með meðalvindhraða (e. mean wind speed) sem breytist hægt. Hægt væri að tákna vindhraða á einsleitu svæði með því að nýta þennan eiginleika.

$$U(x, y, z, t) = \bar{U}_t(z, t) - u_i(x, y, z, t)$$

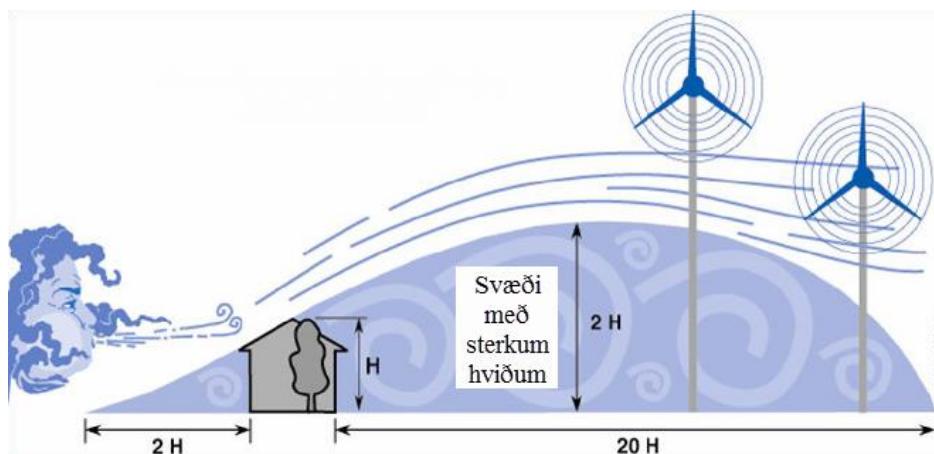
3

Hér er i vísitala sem vísar til ásanna x, y og z. U táknaðavektor sem er háður staðsetningu, (x,y,z) og tíma, t. \bar{U} táknað meðalvindhraða og u, v, w eru x-, y- og -z hlutar iðustreymisvindhraða. Meðalvindhraðinn hér er fall af hæð. [9]

Breytileiki á hraða og stefnu vinds nálægt yfirborði, upp að 100 metra hæð, er mikilvægur fyrir orkunýtingu. Eftifarandi þættir hafa áhrif á mynstur vindsins. Gola af landi og sjó er dæmi um staðbundna veðurþætti. Að degi til hitnar yfirborð lands hraðar en yfirborð sjávar sem veldur því að loftmassi nær landi rís og myndar lágþrýstisvæði. Kalt loft leitar þannig að landi frá sjó og kallast hafgola. Það sama gerist að nóttu, nema þá snýst ferlið við og vindurinn blæs af landi út á sjó. Við fjöll hitnar loft við yfirborðið og rís upp með fjallshlíðum að degi til. Kalt loft kemur í stað loftsins sem hitnar og vindur myndast. Að nóttu til kólnar loftið og færst niður með fjallshlíðinni sem skapar svokallaðan fjallsvind. Vegna þessa verða oft sterkir straumar og þar af leiðandi sterkur vindur. Windskerkraftur, iðustreymi og hröðun vinds yfir ójöfnur eru önnur áhrif staðbundinna vinda.

5.1 Hviður

Þegar talað er um hviður er átt við örar breytingar í meðalvindhraða, yfirleitt á 10 mínútna tímabili. Hviður myndast aðallega út frá ójöfnum á yfirborði jarðar (sbr. hús eða fjöll) og breytingu á hitastigi, sem getur flutt loftmassa lóðrétt. Oftast eiga þessir tveir þættir samleið. Dæmi um það er þegar loftmassi flæðir yfir fjall og er þvingaður upp í kaldara loft þar sem hitajafnvægi er ekki lengur til staðar. Til að hægt sé að túlka hviður er nauðsynlegt að taka tillit til hitastigs, loftþrýstings, eðlisþyngdar og rakastigs sem og einnig hreyfinga á loftinu sjálfu í þrívídd. Þá er hægt að móta sett af diffurjöfnum til að túlka ferlið og í framhaldi af því má tegra jöfnurnar fram í tímann til að spá fyrir um hviður með uppgefnum skilyrðum [10].



Mynd 8. Myndun á hviðu vegna hrýfis

Styrkur hviða er háður stærð á hindrunar sem vindurinn þarf að fara framhjá eða yfir. Eins og sjá má á mynd 8 geta hviðurnar teygt sig tvisvar sinnum hærra og tuttugu sinnum lengra en hindrunin sjálf. Svæðið hlémegin við húsið kallast straumskuggi. Þar er ekki mikill meðalvindur, en hins vegar mikið iðustreymi og vætanlega hár hviðustuðull og hviðustyrkur. Það eru eiginleikar sem henta illa til vindorkuframleiðslu. Á svæðinu ofan við "straumskuggann" er hins vegar aukinn meðalvindhraði sem hentar vel til vindorkuframleiðslu.

Til að skilgreina meðalstærð hviða má nota mælikvarða sem heitir hviðustyrkur, I_u , (e. turbulence intensity). Hann er skilgreindur sem hlutfall staðalfráviks σ_u og meðalvindhraða, \bar{U} .

$$I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad 4$$

Annar einfaldur mælikvarði fyrir hviður er svokallaður hviðustuðull, G_u sem er skilgreindur sem hlutfall af hágildi, \hat{U} og meðalgildi, \bar{U} vindhraða.

$$G_u = \frac{\hat{U}}{\bar{U}} \quad 5$$

Báðar þessar stærðir skilgreina vindhviður sem hlutfall af meðalvindhraða sem er sú stærð sem oftast er notuð til að lýsa vindhraða. Venjulega er meðalgildi vindhraðans miðað við 10 mínútur. [9]

5.2 Hrýfi

Breytileiki loftflæðis verður til vegna viðnáms við yfirborð jarðar (e. The boundary layer effect). Ástæða viðnámsins er meðal annars vegna hrýfis á yfirborðinu sjálfu, byggingum eða öðrum mannvirkjum. Eins og fram hefur komið þá eru vindhviður háðar hrýfi á yfirborði jarðar. Mælikvarði á hrýfi kallast hrýfisstuðull, k (e. Surface roughness coefficient) og er hann venjulega skilgreindur sem víddarlaus Reynoldsspenna τ_{xz} . [11]

$$\kappa = \frac{\tau_{xz}}{\rho \bar{U}^2} \quad 6$$

þar sem

$$\tau_{xz} = -\rho E[\mathbf{u} \cdot \mathbf{W}] \neq \mathbf{0} \quad 7$$

Af þessari skilgreiningu og jöfnu 4 fæst

$$\kappa = -r_{uw} I_u I_w \quad 8$$

þar sem $r_{uw} = E[uw]/\sigma_u \sigma_w$ er fylgnistuðull u og w. Almennt gildir að $-1 < r_{uw} < 0$ ef vindhraðinn er mikill, $\bar{U} \geq 10 \text{ m/s}$. Hrýfisstuðull vex eftir því sem yfirborð jarðar verður ójafnara. Vert er að nefna að tölulegt gildi hrýfisstuðulsins er háð þeirri hæð sem mælingin er gerð í og lengd tímabilsins sem notað er við meðaltalsútreikninga. [9]

Önnur breyta sem oft er notuð sem stærð til að lýsa hviðustreymi og helst í hendur við hrýfisstuðulinn, κ , er nefnd Skúfhraði (e. Friction velocity).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{xz}}{\rho}} \quad 9$$

5.3 Logaritmískur hæðaferill (e. Log wind profile)

Breytingu meðalvindhraða með hæð má lýsa með sambandinu:

$$d\bar{U}_z = \frac{\sqrt{\kappa}}{k_a} \bar{U}_R \frac{dz}{z} \quad 10$$

Par sem \bar{U}_R er meðalvindhraði í viðmiðunarhæð og k_a er svokallaður von Karmanstuðull. Við heildun á þessari jöfnu fæst logaritmíski hæðaferillinn:

$$\bar{U}_z = \bar{U}_R \frac{\sqrt{\kappa}}{k_a} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad z \geq z_0 \quad 11$$

Í þessari skýrslu verður notast við $k_a = 0.40$.

5.4 Veldisferill (e. Wind profile power-law)

Veldisferillinn er samband milli tveggja vindhraða í tveimur mismunandi hæðum. Veldisferillinn er oft notaður í stað logaritmískra ferilsins. Veldisferillinn er ritaður

$$\frac{U_z}{U_R} = \left(\frac{z}{z_R}\right)^\alpha \quad 12$$

Par sem U_z er mældur vindhraði í hæðinni z og U_R er mældur vindhraði í hæðinni z_R . α er svo veldisvísir á bilinu $0 \leq \alpha \leq 1$. Stærð α veltur á yfirborðinu á mælingarstað. Til þess að reikna α má umskrifa jöfnu 12 í

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{U_z}{U_R}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_R}\right)} \quad 13$$

Eins og sjá má er nóg að þekkja vindhraðann í tveimur mismunandi hæðum til þess að reikna α .

Eftir að búið er að reikna út α er hægt að framrekna vindhraðann upp í fleiri hæðir.

5.5 Líkindadreifing vindhraða

Erfitt er að segja til um hversu mikið meðalvindhraði breytist á ársgrundvelli, en hægt er að ná góðri nálgun með líkindadreifingu. Tveggja-breytu Weibulldreifingin hefur reynst vel og gefið góða lýsingu á breytingu á meðalvindhraða á klukkutímafresti yfir eitt ár. Dreifinguna má skrifa sem

$$f(\bar{U}, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\bar{U}}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{\bar{U}}{\lambda} \right)^k \right) \quad 14$$

og einkennist af tveimur breytum, λ og k þar sem λ er svokallaður „scale parameter“ ($\lambda \geq 0$, $[\frac{m}{s}]$), og k er einingalaus breyta sem kallast „shape parameter“ ($k > 1$) eða formstuðull.

Þegar búið er að finna Weibull breyturnar er hægt að finna meðalvindhraða dreifingarinnar með

$$\bar{U} = \lambda \gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad 15$$

Þar sem γ er gamma fallið. Svo hægt sé að nota þessa jöfnu þarf að finna gildi fyrir k . Ein einfaldasta leiðin til að gera það er að nota jöfnu fyrir sem gefur hlutfall á milli staðalfráviks og meðalvindhraða. Hana má skrifa sem

$$\frac{\sigma_U}{\bar{U}} = I_u = \sqrt{\frac{\gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right)}{\left(\gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right)^2} - 1} \quad 16$$

Þegar búið er að finna σ_u og \bar{U} er hægt að reikna út formstuðulinn með ofangreindri jöfnu. Þegar búið er að finna k er λ fundið með

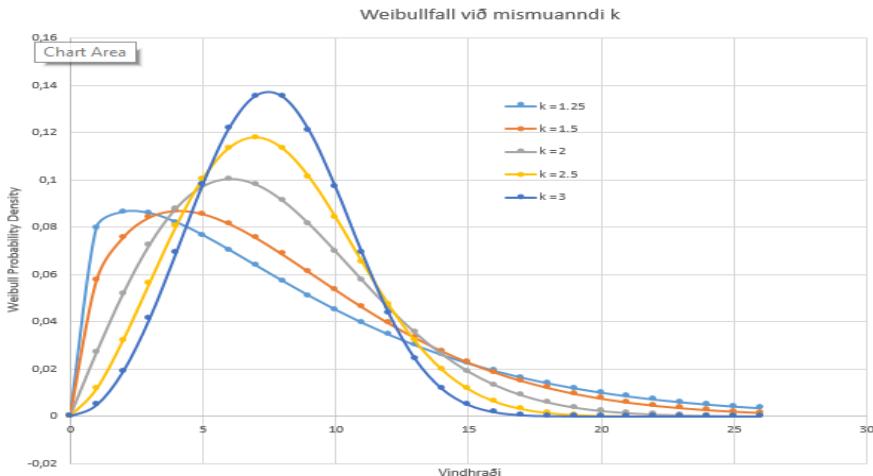
$$\lambda = \left(\frac{\bar{U}}{\gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \right) \quad 17$$

Þegar búið er að finna Weibullbreyturnar er hægt að reikna út WPD eða aflþéttleika vindsins (e. Wind Power Density, [W/m^2]). Það er gert með eftirfarandi jöfnu:

$$WPD = \frac{1}{2} \rho \lambda^3 \gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad 18$$

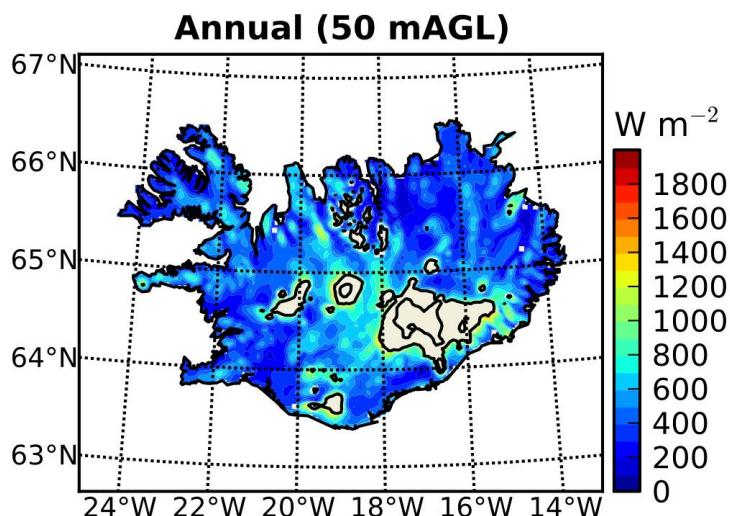
Dæmigert gildi fyrir k er 2 og flokkast það þá undir Rayleighdreifingu sem hentar á mjög mörgum stöðum. Hærra gildi á k , t.d 2.5 eða 3 gefur til kynna að breyting á klukkutímameðalvindhraða yfir árið er lítil.

Lægra gildi á k , t.d 1.25 eða 1.5, gefur til kynna meiri breytingu á meðalvindhraðanum. Nokkur dæmi um áhrif mismunandi k gildi má sjá á mynd 10. [12]



Mynd 9. Dæmi um Weibulldreifingu með mismunandi k-gildum

Á myndinni má skoða afþéttleika vinds á Íslandi í 50 metra hæð yfir jörðu, árið 2012.



Mynd 10. Aflþéttleiki vinds (w/m^2) í 50 metra hæð

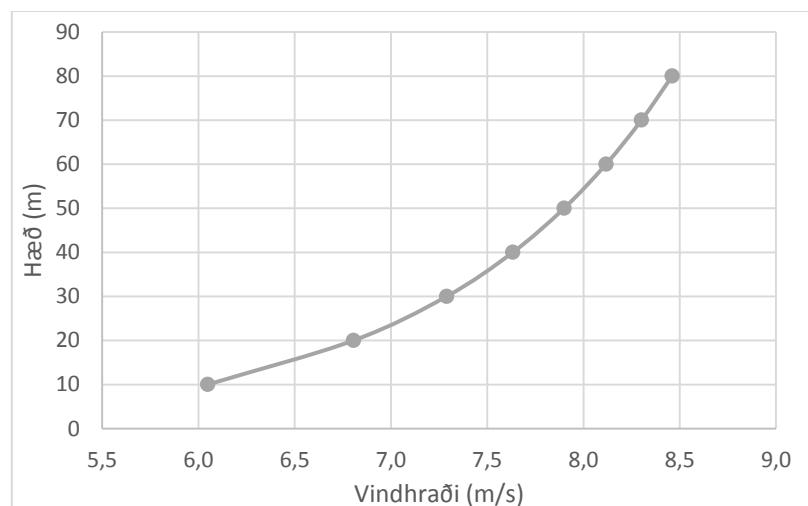
Á mynd 10 sést að afþéttleiki vinds í 50 metra hæð á Búrfellssvæðinu er 600 – 700 W/m².

5.6 Vindskerkraftur

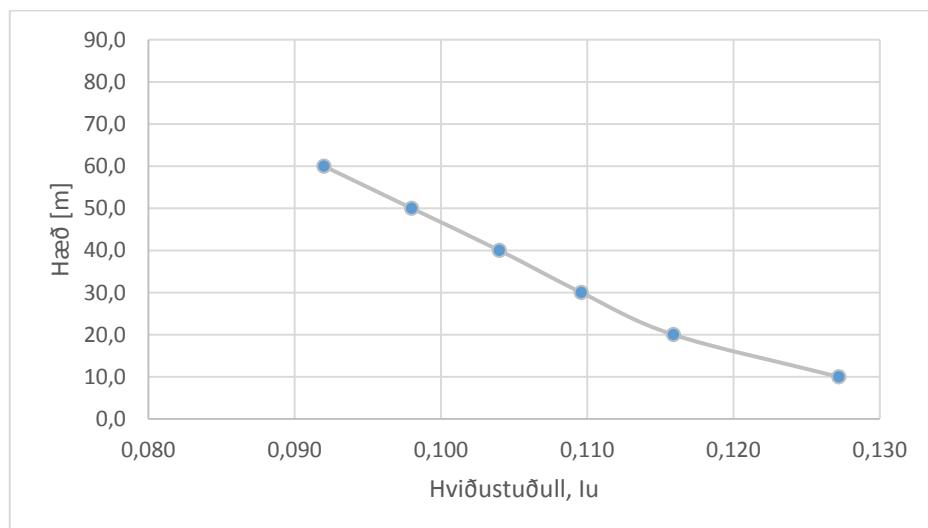
Í töflu 2 má sjá mismunandi hrýfislengd, z_0 fyrir mismunandi svæði og umhverfi. Á mynd 11 má sjá dæmigerðan hæðaferil winds. Hrýfi yfirborðs hefur áhrif á hvernig vindhraði breytist með aukinni hæð [10].

Tafla 2. Nokkur gildir fyrir hrýfislengd og hrýfisstuðul [11]

Lýsing yfirborðs	Hryfisstuðull, k	Hrýfislengd, z_0 [m]
Slétt vatnsyfirborð		1E-04
Lágvaxið gras	3-5 E-3	1-4 E-2
Mjög hávaxið gras	5-8 E-3	4-10 E-2
Bærir	10-15 E-3	0,2 - 0,6
Skógar, stórborgir	25-100 E-3	0,8 - 3



Mynd 11. Breytileiki vindhraða sem fall af hæð



Mynd 12. Breytileiki hviðustuðuls sem fall af hæð.

6 Mælingar og úrvinnsla

Mælitækin í áðurnefndu mastri Landsvirkjunar við Ísakotsstíflu skráðu niður vindhraða, vindstefnu og hitastig, á 10 mínútna fresti frá 1. janúar 2012 kl 00:00 til 31. desember 2012 kl 23:59. Þegar farið var yfir gögnin kom í ljós að hitamælir í 20 metra hæð hafði bilað 10. nóvember og var því ákveðið að sleppa þeim mælipunkti. Gögnin voru flokkuð eftir árstíðum, stöðugleika, vindátt og vindhraða.

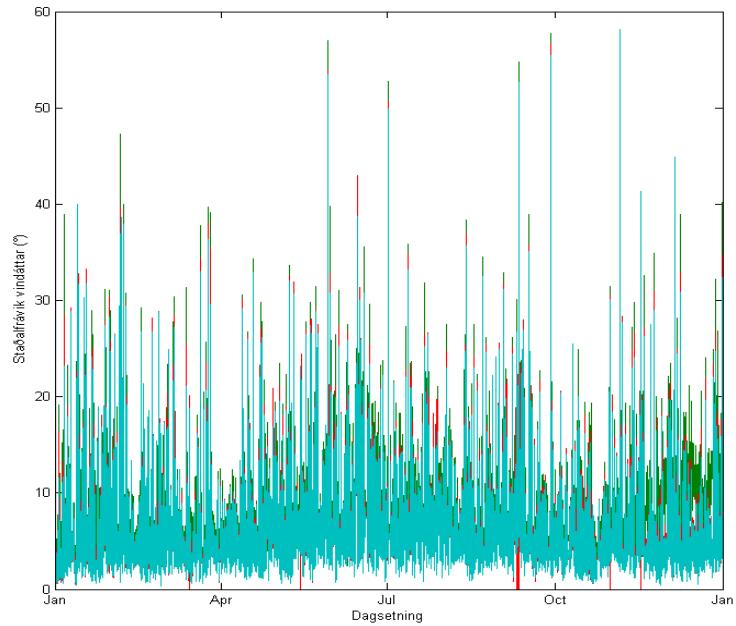
6.1 Stöðugleiki andrúmslofts

Stöðugleika í andrúmslofti má skilgreina sem hröðun á lóðrétttri hreyfingu loftsins. Hröðunin er jákvæð í óstöðugu loftslagi og við það aukast hviður. Hröðunin er núll í “neutral” ástandi og neikvæð þegar andrúmsloftið er stöðugt en við það minnka hviður. Auðveld leið til að flokka stöðugleikann er að nota aðferðina sem kennd er við “staðalfrávik vindáttar” (e. standard deviation of the wind direction method) [13]. Í töflu 3 má sjá sambandið á milli staðalfráviks vindstefnu og Pasquill stöðugleika.

Tafla 3. Stöðugleikaflokkun

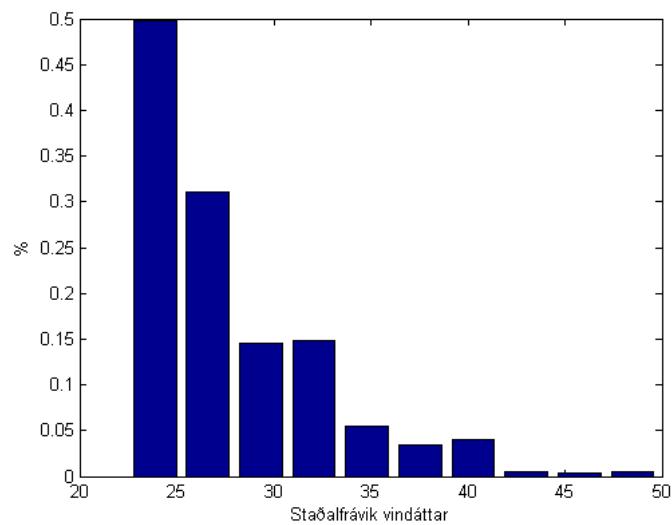
Pasquill stöðugleiki	Flokkur	Staðalfrávik vindáttar [°]
Lýsing		
Mikill óstöðugleiki	A	$22.5 < \sigma$
Meðal óstöðugleiki	B	$17.5 < \sigma < 22.5$
Örlítill óstöðugleiki	C	$12.5 < \sigma < 17.5$
Hlutlaust	D	$7.5 < \sigma < 12.5$
Meðal stöðugleiki	E	$3.75 < \sigma < 7.5$
Mikill stöðugleiki	F	$17.5 < \sigma < 22.5$
Lágir vindar, stöðugt	G	$\sigma < 2.0$

Athugun á þessu var gerð út frá mældum gögnum. Í ljós kom að staðalfrávik vindáttar breytist tölувart, eins og sjá má á mynd 13. Því var ákvaðið að gera stöðugleikaflokkun.

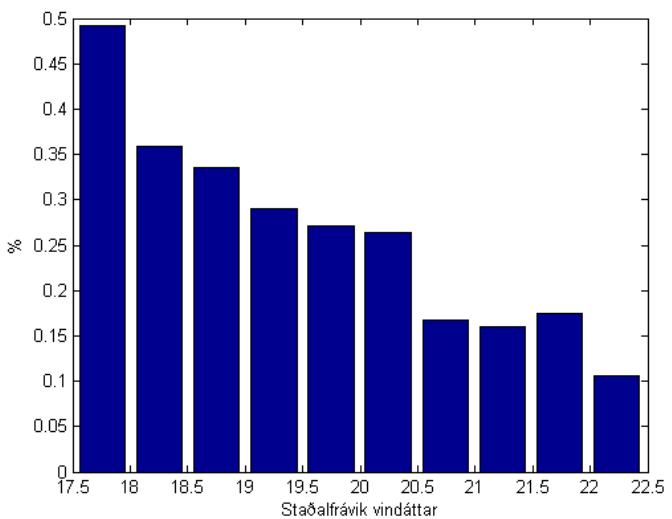


Mynd 13. Staðalfrávik vindáttar sem fall af tíma

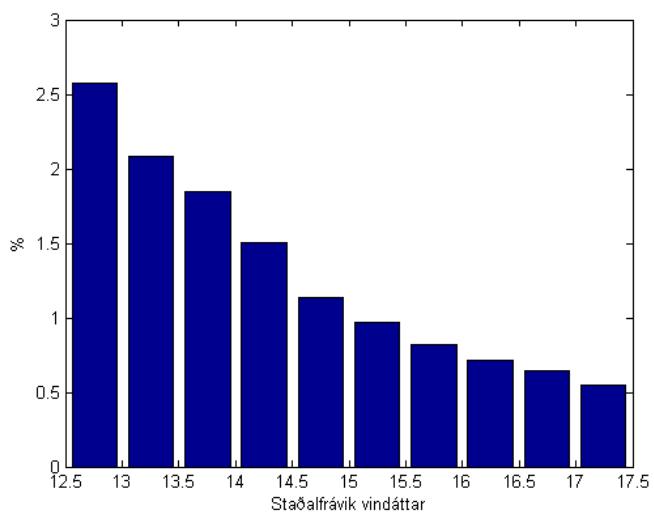
Við flokkun á gögnunum út frá staðalfráviki vindáttar kom eftirfarandi ljós. Notast var við mælingar úr 10, 20, 30 og 40 metra hæð.



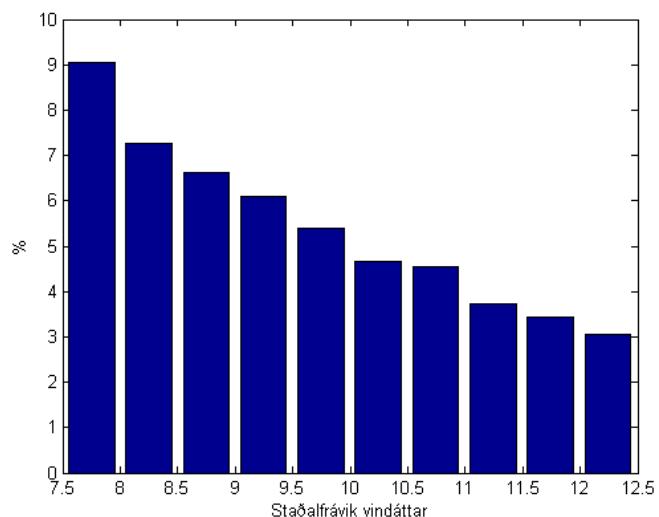
Mynd 14. Flokkur A



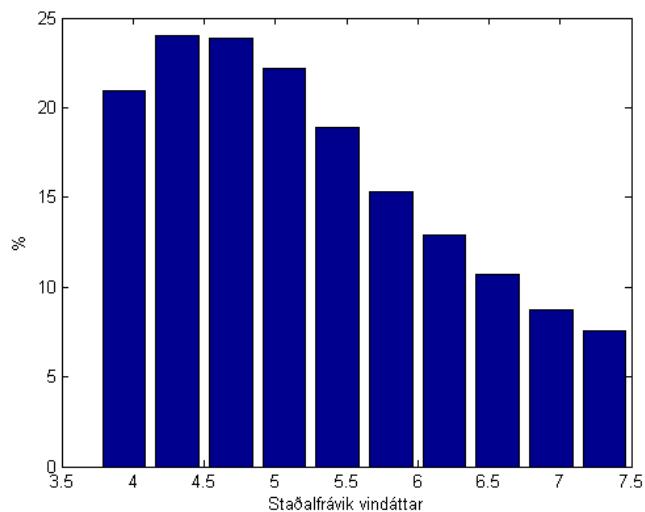
Mynd 15. Flokkur B



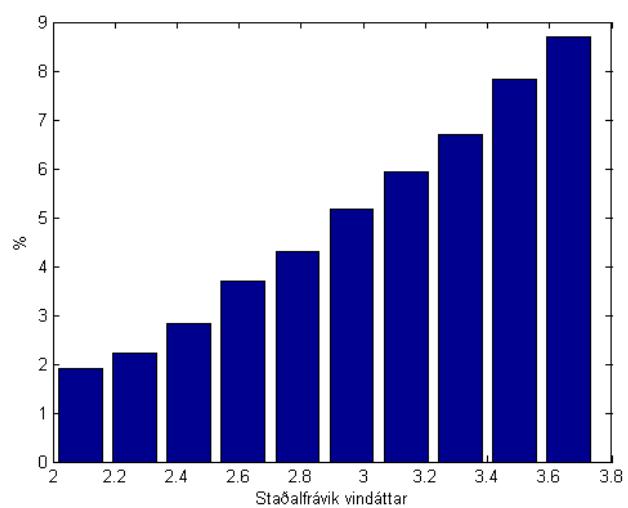
Mynd 16. Flokkur C



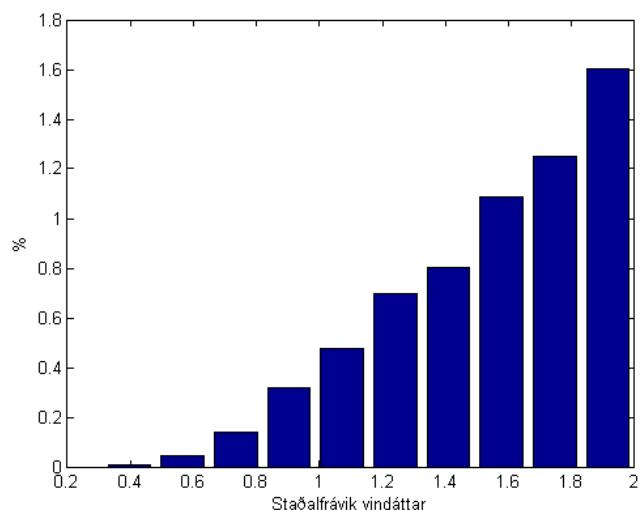
Mynd 17. Flokkur D



Mynd 18. Flokkur E



Mynd 19. Flokkur F



Mynd 20. Flokkur G

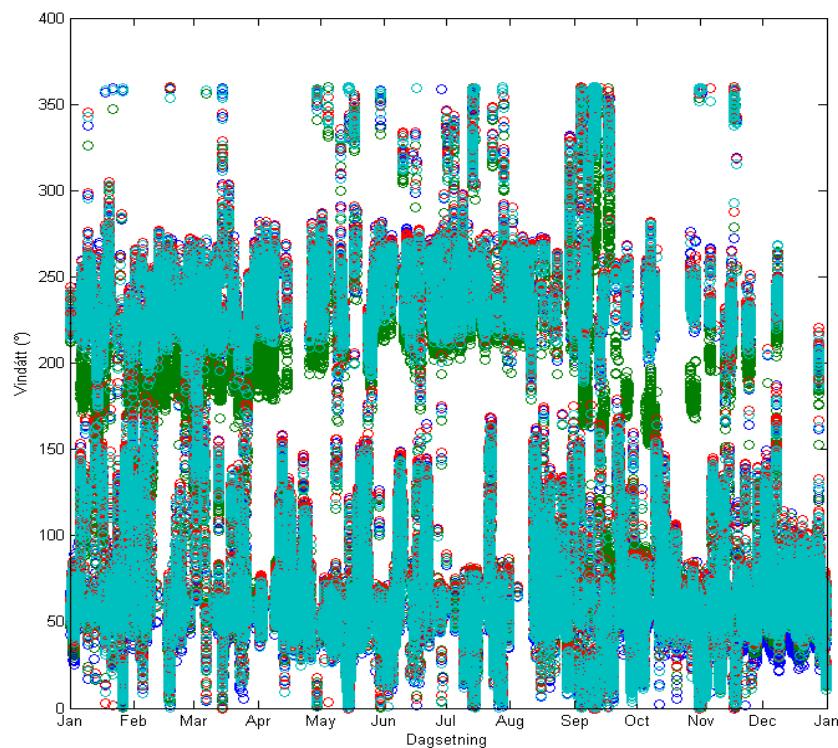
Tafla 4 sýnir tíðni hvers stöðugleikaflokks.

Pasquill stöðugleiki	Flokkur	Staðalfrávik vindáttar [°]	Tíðni [%]
Lýsing			
Mikill óstöðugleiki	A	$22.5 < \sigma$	0,5
Meðal óstöðugleiki	B	$17.5 < \sigma < 22.5$	0,9
Örlítill óstöðugleiki	C	$12.5 < \sigma < 17.5$	4,0
Hlutlaust	D	$7.5 < \sigma < 12.5$	16,2
Meðal stöðugleiki	E	$3.75 < \sigma < 7.5$	57,4
Mikill stöðugleiki	F	$17.5 < \sigma < 22.5$	18,1
Lágir vindar, stöðugt	G	$\sigma < 2.0$	2,7

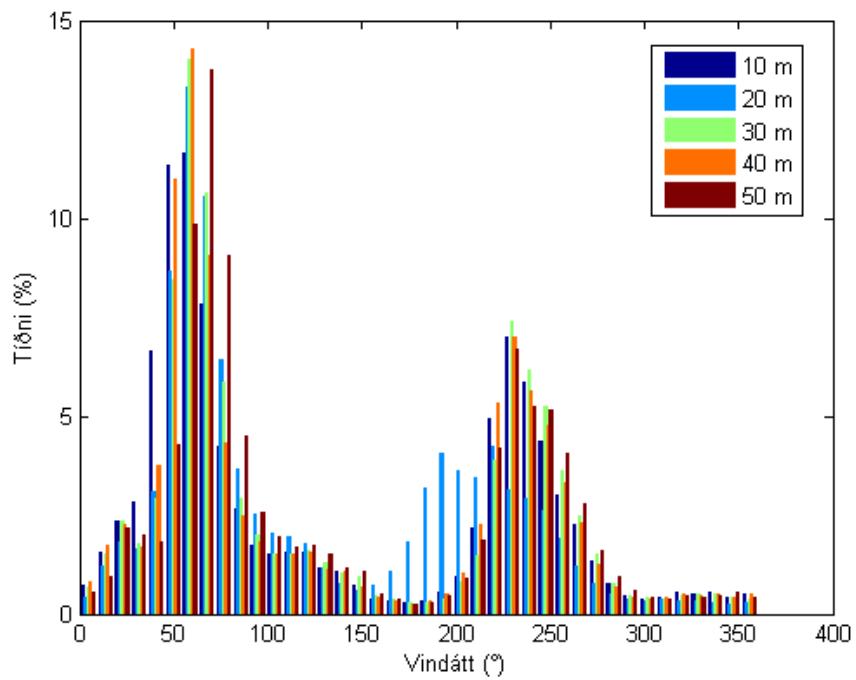
Eins og sést í töflu 4 er andrúmsloftið á svæðinu frekar stöðugt, en stöðugleikinn fellur að mestu undir flokka D, E og F.

6.2 Vindstefna

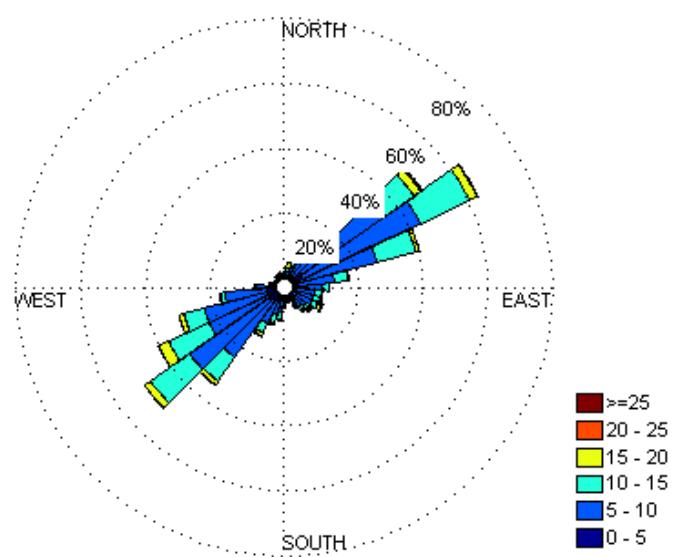
Vindátt yfir árið var skoðuð og kortlögð eftir mánuðum og stefnu. Athyglisvert var að sjá að á svæðinu myndar landslag í nágrenninu nátturuleg vindgöng.



Mynd 21. Vindátt fyrir hvern mánuð



Mynd 22. Histogram af vindátt úr öllum mælihæðum



Mynd 23. Vindrós fyrir allar mælingar

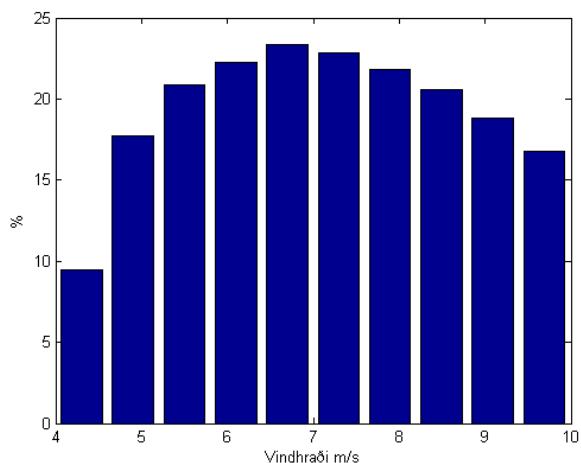
Tafla 5. Sýnir tíðni vindstefnu á 15° millibili

[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]
15	1,2	105	2,9	195	2,0	285	0,8
30	2,7	120	2,9	210	3,0	300	0,3
45	3,9	135	2,6	225	8,4	315	0,2
60	16,5	150	1,9	240	13,9	330	0,4
75	14,1	165	0,7	255	10,2	345	0,6
90	4,6	180	0,7	270	4,3	360	0,5

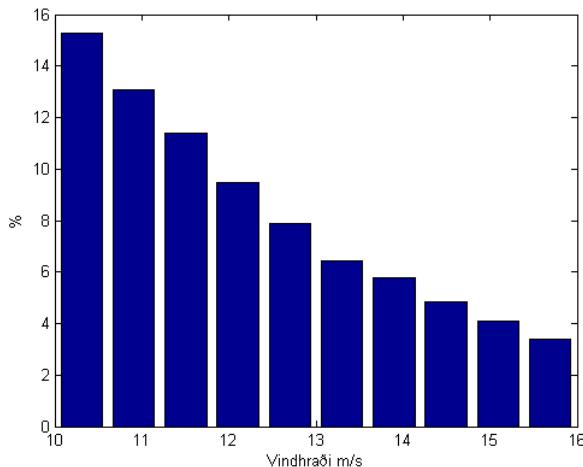
Eins og sjá má á myndum 21, 22 og 23 og á töflu 5 blæs vindurinn yfirleitt úr annað hvort norð-austri eða suð-vestri eða 43% úr norð-austri, 11,8% úr suð-austri, 41,9% úr suð-vestri og 2,9% úr norð-vestri. Þetta gefur til kynna að vindurinn sé undir miklum áhrifum frá landslagi, t.d. fjöllum og döllum, sem mynda náttúruleg vindgöng um svæðið.

6.3 Vindhraði

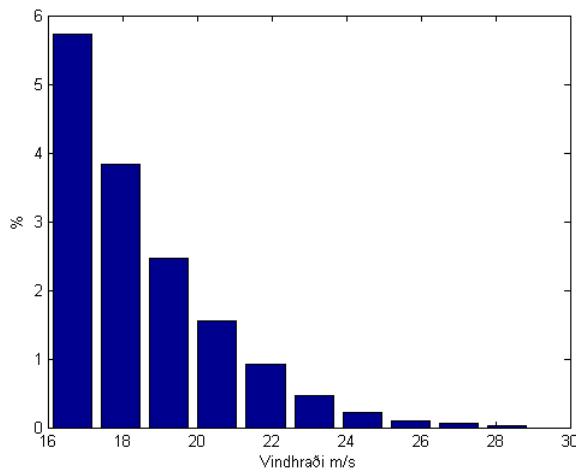
Vindhraði yfir árið var skoðaður og kortlagður eftir mismunandi vindhraða. Athyglisvert var að sjá að meirihluta ársins var vindhraði á bilinu 4 til 10 m/s.



Mynd 24. Tiðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $4.0 < U < 10.0$ [m/s]



Mynd 25. Tíðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $10.0 < U < 16.0$ [m/s]



Mynd 26. Tíðni vindhraða fyrir meðalvindhraða á bilinu $16.0 < U$ [m/s]

Tafla 6. Tíðni mismunandi vindhraða

Vindhraði [m/s]	Tíðni [%]
4 - 10	69,2
10 - 16	26,5
16 <	4,3

Eins og sést á myndum 24, 25 og 26 og í töflu 6 er algengasti vindhraði á svæðinu 4 - 10 m/s. Windmyllurnar hefja ekki rafmagnsframleiðslu fyrr en vindhraðinn er kominn yfir 3 m/s og ná fullu afli við 15 m/s. [2]

6.4 Landslag og hindranir

Eins og fram kemur í kafla 3 og 4 var mælimastrið staðsett á sléttunni norðan við Búrfell.

Hrýfislengd (z_0) og hrýfisstuðull (κ) á svæðinu voru metin útfrá mæligögnunum eftir flokkun.

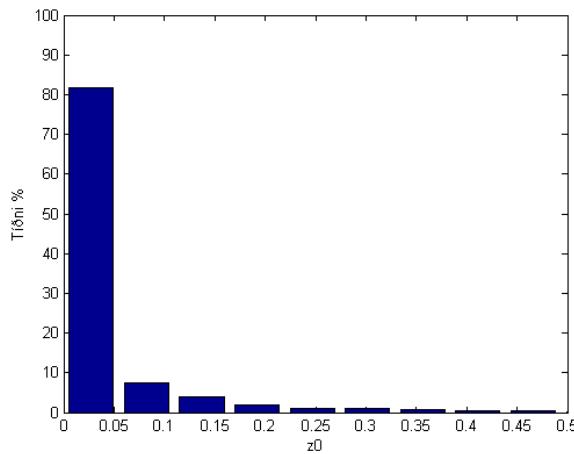
Dæmigerð gildi fyrir z_0 og κ má sjá í töflu 2. Breyturnar (z_0 og κ) fyrir log-hæðaferilinn voru metnar í samræmi við aðferðafræði sem kynnt var í jöfnum 10 til 11.

Jöfnu log ferilsins var breytt og stillt upp sem jöfnu beinnar línu, eða:

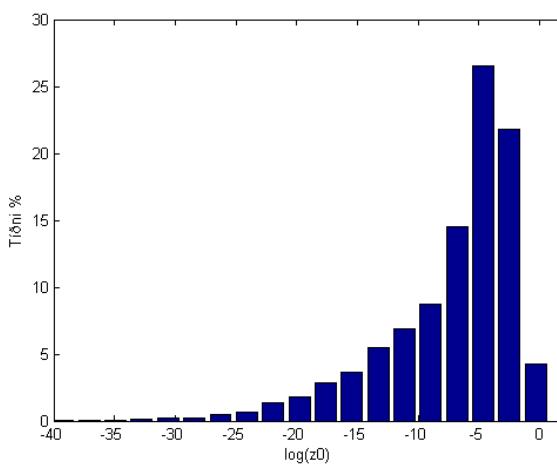
$$\ln(z) = \left(\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_R} \right) \left(\frac{k_a}{\sqrt{\kappa}} \right) + \ln(z_0) \quad 19$$

Hér er κ hrýfisstuðullinn, k_a er von Karman stuðullinn, z_0 er hrýfislengdin, \bar{U}_z er meðalvindhraðinn, z er hæð og \bar{U}_R er viðmiðunarhæð (10 m).

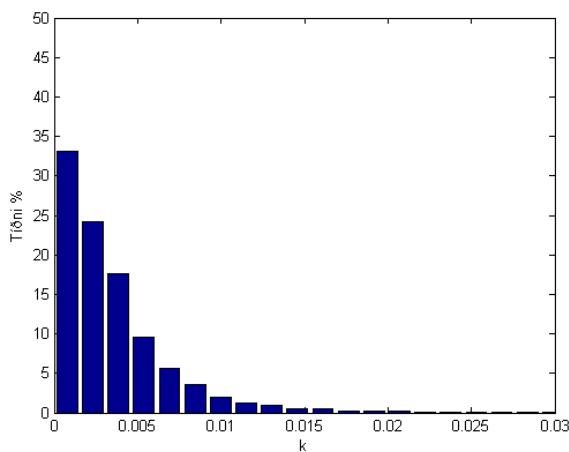
Greiningin á hrýfislengd og hrýfisstuðli byggir á vindhraðamælingum í fjórum mismunandi hæðum yfir jörðu, 10, 20, 30 og 40 metra þegar vindhraðinn, U, er 4.0 m/s eða hærri fyrir vindáttir úr NA eða SV. Myndir 27 - 30 sýna histogram af metnum gildum fyrir κ og z_0 .



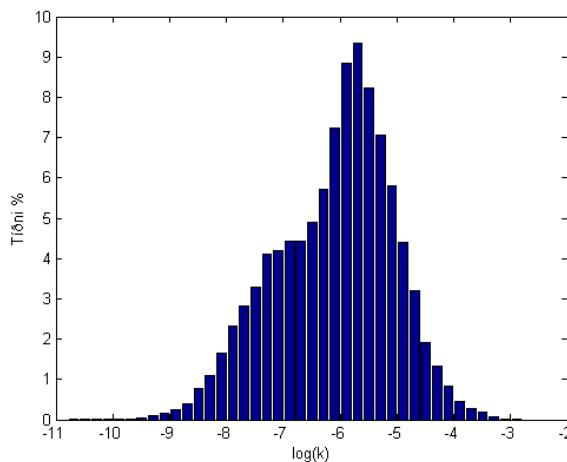
Mynd 27 Tíðni hrýfislengdar yfir árið 2012, (z_0)



Mynd 28. Tíðni hrýfislengdar yfir árið 2012, log(z_0)



Mynd 29 Tíðni hrýfisstuðuls yfir árið 2012, k



Mynd 30 Tíðni hrýfisstuðuls yfir árið 2012, log(k)

Tafla 7. Gildi k og z0 fyrir hvern mánuð

Mánuður	Hrýfisstuðull (k)		Hrýfislengd (z0)	
	mean	median	mean	median
Janúar	0,0034	0,0026	0,0677	0,0039
Febrúar	0,0048	0,0047	0,0787	0,0368
Mars	0,0037	0,0036	0,0476	0,0145
Apríl	0,0024	0,0024	0,0277	0,0031
Maí	0,0015	0,0011	0,0153	0,0001
Júní	0,0011	0,0008	0,0097	0,0000
Júlí	0,0013	0,0009	0,0153	0,0000
Ágúst	0,0024	0,0019	0,0186	0,0010
September	0,0044	0,0042	0,0731	0,0226
Október	0,0060	0,0053	0,1372	0,0519
Nóvember	0,0039	0,0031	0,0485	0,0082
Desember	0,0041	0,0035	0,0544	0,0123
Sumar	0,0029	0,0016	0,0370	0,0004
Vetur	0,0042	0,0033	0,0520	0,0105
Árið	0,0036	0,0026	0,0445	0,0042

Eins og sjá má er umtalsverður breytileiki á stuðlum þá sérstaklega á z_0 gildum. Það er auðséð að gildi á bæði z_0 og κ falla gífurlega yfir hásumarið (jún, júl, águ). Þetta mætti hugsanlega rekja til mikilla hitastigsbreytinga og rólegri vinda en yfir veturinn. Tímabil sumars er maí – oktober og tímabil veturnar er nóvember – apríl. Meðalgildin fyrir κ og z_0 eru $\kappa = 0,0036$ og $z_0 = 0,045$ sem gefur til kynna að landslagið sem prófanirnar voru gerðar á, fellur undir flokk II eins og skilgreint er í Eurocode EN-1991-1-4:2005.

Terrain category		z_0 m	z_{min} m
0	Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I	Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II	Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III	Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV	Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10
NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.			

Mynd 31. Sýnir flokkun á landslagi [14]

Til samanburðar við framreknaðan vindhraða með logarítmiska hæðaferlinum, hér eftir kallaður log, var notaður svokallaður power-law wind profile, hér eftir kallaður power. Til að beita þessari aðferð þarf að finna veldisvíssinn fyrir svæðið. Var það gert með jöfnu 13 sem kemur fyrir í kafla 5.

Tafla 8. Veldisvíssir, α og hviðustyrkur, I_u fyrir hvern mánuð

Mánuður	α median	α mean	I_u median	I_u mean
Janúar	0,1266	0,1451	0,1040	0,1187
Febrúar	0,1713	0,0174	0,1109	0,1221
Mars	0,1491	0,1529	0,1125	0,1220
Apríl	0,1217	0,1233	0,1138	0,1206
Maí	0,0818	0,0960	0,1198	0,1299
Júní	0,0700	0,0830	0,1204	0,1351
Júlí	0,0731	0,0894	0,1230	0,1332
Ágúst	0,1078	0,1151	0,1201	0,1288
September	0,1613	0,1661	0,1244	0,1338
Október	0,1824	0,1939	0,1217	0,1311
Nóvember	0,1401	0,1556	0,1180	0,1281
Desember	0,1488	0,1596	0,1131	0,1230
Sumar	0,0990	0,1169	0,1216	0,1320
Vetur	0,1439	0,1514	0,1129	0,1232
Árið	0,1278	0,1342	0,1168	0,1272

7 Áhrif hrýfis á orkuframleiðslu

Hrýfi er mikilvægur þáttur við orkuframleiðsluslpá. Eins og kom fram í kynningarkaflanum er hæð myllurnsins 55 metrar og lengd spaðanna 22 metrar. Það þýðir að efsta staða myllunnar er í 77 metrum og neðsta staða er 33 metrar. Orkan sem myllan vinnur úr vindinum er því á þessu svæði eða $33m \leq x \leq 77m$.

Log vindhraðaferillinn var notaður til að framreikna mældan vindhraða upp í 80 metra hæð með mælingum úr tveimur hæðum. Til samanburðar var power vindhraðaferillinn notaður til að framreikna vindhraðann upp í 80 metra með mælingum úr tveimur hæðum.

Til þess að sjá breytileika og óvissu fyrir framreiknaðan vindhraða var vindhraði framreiknaður við mismunandi masturshæð. Skoðuð voru sex tilvik fyrir báða hæðarferlana sem vindhraði var framreiknaður úr.

Tilvik:

- 1 - 10m og 20m
- 2 - 10m og 30m
- 3 - 10m og 40m
- 4 - 20m og 30m
- 5 - 20m og 40m
- 6 - 30m og 40m

Log vindhraðaferill

Tafla 9. Hrýfislengd, Z_0 fyrir öll tilvik

Hæð (m)	10	20	30	40
10	X	0,0045	0,0119	0,0155
20	0,0045	X	0,1406	0,0875
30	0,0119	0,1406	X	0,0437
40	0,0155	0,0875	0,0437	X

Tafla 10. Hrýfisstuðull, κ fyrir öll tilvik

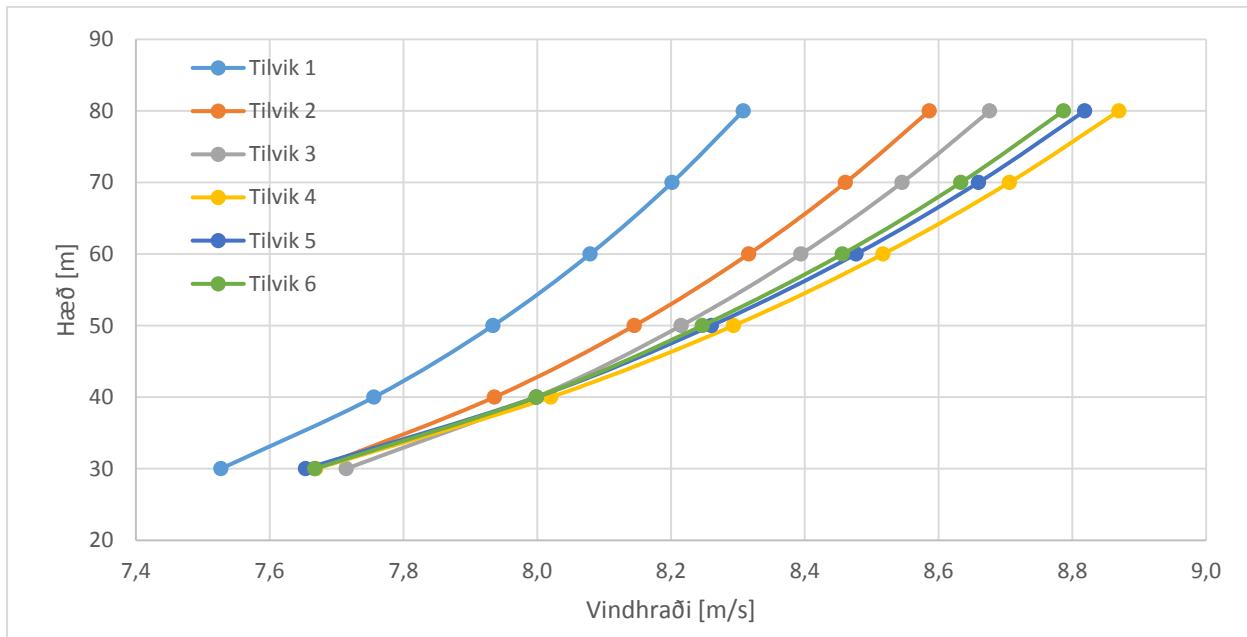
Hæð (m)	10	20	30	40
10	X	0,0023	0,0031	0,0034
20	0,0023	X	0,0052	0,0046
30	0,0031	0,0052	X	0,0034
40	0,0034	0,0046	0,0034	X

Tafla 11. Meðalvindhraði í túrbínuhæð (55m) fyrir öll tilvik

Hæð (m)	10	20	30	40
10	X	8,0065	8,2308	8,3049
20	8,0065	X	8,4054	8,3687
30	8,2308	8,4054	X	8,3516
40	8,3049	8,3687	8,3516	X

Tafla 12. Meðalvindhraði í mismunandi hæð fyrir öll tilvik

Hæð m	Tilvik					
	1	2	3	4	5	6
30	7,5272	7,6676	7,7145	7,6690	7,6538	7,6676
40	7,7560	7,9361	7,9987	8,0203	7,9987	7,9987
50	7,9338	8,1453	8,2154	8,2937	8,2604	8,2468
60	8,0791	8,3163	8,3943	8,5171	8,4769	8,4563
70	8,2017	8,4609	8,5455	8,7060	8,6598	8,6334
80	8,3082	8,5862	8,6765	8,8697	8,8184	8,7868
Túrbínuhæð (55m)	8,0065	8,2308	8,3049	8,4054	8,3687	8,3516



Mynd 32. Hæðaferlar fyrir öll tilvik

Power vindhraðaferill

Tafla 13. Skerstuðull, α fyrir öll tilvik.

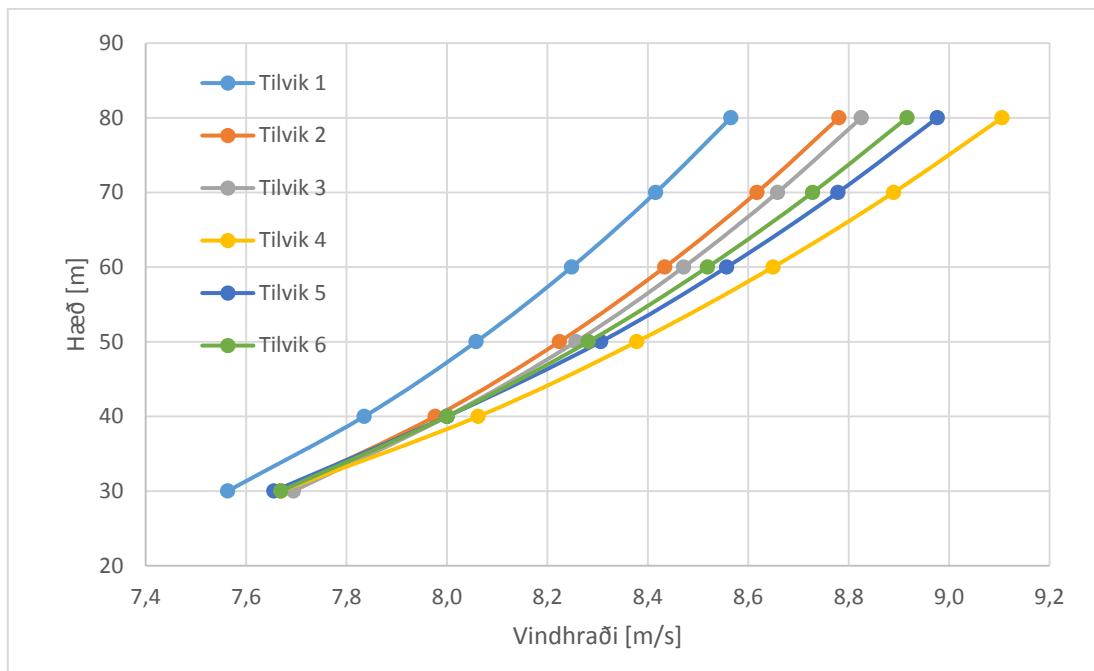
Hæð (m)	10	20	30	40
10	X	0,1246	0,1343	0,1362
20	0,1246	X	0,1673	0,1574
30	0,1343	0,1673	X	0,1499
40	0,1362	0,1574	0,1499	X

Tafla 14. Meðalvindhraði í túrbínuhæð (55m) fyrir öll tilvik

Hæð (m)	10	20	30	40
10	X	8,1531	8,3288	8,3640
20	8,1531	X	8,5138	8,4317
30	8,3288	8,5138	X	8,4002
40	8,3640	8,4317	8,4002	X

Tafla 15. Meðalvindhraði í mismunandi hæð fyrir öll tilvik

Hæð m	Tilvik					
	1	2	3	4	5	6
30	7,5631	7,6690	7,6943	7,6690	7,6553	7,6690
40	7,8353	7,9765	8,0003	8,0621	8,0003	8,0003
50	8,0579	8,2238	8,2567	8,3779	8,3061	8,2815
60	8,2483	8,4330	8,4712	8,6495	8,5571	8,5188
70	8,4156	8,6171	8,6583	8,8895	8,7785	8,7282
80	8,5654	8,7804	8,8251	9,1054	8,9766	8,9163
Túrbínuhæð (55m)	8,1531	8,3288	8,3640	8,5138	8,4317	8,4002



Mynd 33. Hæðaferlar fyrir öll tilvik

Eins og sést á ofangreindum töflum og myndum er heilmikill munur á vindhraða þegar reiknað er úr mismunandi masturshæð. Það mun hafa mikil áhrif þegar kemur að orkuútreikningum eins og sést í kafla 8.

Weibulldreifingu var stillt upp og hún notuð til þess að reikna út mögulega orkuframleiðslu eða Wött fyrir hvern fermetra rótorsins á vindmyllunum á Hafinu, w/m^2 (e. sweep area) Fyrst voru breytur fyrir Weibulldreifinguna reiknaðir. k (*e. shape factor*) og λ (*e. scale factor*) með jöfnum 16 og 17.

Tafla 16. Breytur fyrir Weibulldreifingu

Hæð	Weibullbreytar		Mælingar		Log Profile		Power Law Profile	
	k	λ (m/s)	k	λ (m/s)	k	λ (m/s)	k	λ (m/s)
10	1,631	6,751	1,631	6,751	1,631	6,751	1,631	6,751
20	1,756	7,543	1,684	7,627	1,685	7,577		
30	1,726	8,118	1,717	8,154	1,721	8,125		
40	1,737	8,529	1,737	8,529	1,737	8,529		
50			1,747	8,812	1,766	8,883		
60				1,755	9,046	1,782	9,175	
70				1,761	9,243	1,795	9,43	
80				1,766	9,413	1,806	9,658	

Þegar búið var að finna breyturnar var innbyggt Weibullfall í excel notað til að reikna og plotta dreifinguna. Aflþéttleiki vindsins var reiknaður með jöfnu 18. Framreiknaður vindhraði með logferlinum og veldisferlinum, sem og mældur vindhraði í mismunandi hæð, voru notaðir til að reikna aflþéttleikann á svæðinu.

Tafla 17. Aflþéttleiki vindsins reiknaður með weibulldreifingu

Hæð	Mældur	Log Profile		Power Law	
		m	W/m^2	W/m^2	W/m^2
10		342	342	342	342
20		436	466	475	
30		543	553	547	
40		621	631	624	
50	N/A		678	687	
60	N/A		728	747	
70	N/A		772	801	
80	N/A		811	853	

8 Orkuframleiðsla

Við Ísakot, vestan við Þjórsá, eru tvær vindmyllur sem Landsvirkjun lét setja upp. Uppsetningu þeirra lauk í desember 2012, staðsetningu má sjá á mynd 1. Myllurnar eru af gerðinni Enercon E-44 / 900kW.

Raforkuframleiðsluspá var gerð fyrir febrúar, mars, apríl og maí og tölur bornar saman við raunframleiðslu á Hafinu ári seinna. Vert er að taka fram að notast var við meðalvindhraða frá 33 metrum og 77 metrum sem einkennir lægstu og hæstu stöðu vindmylluspaðanna.

Meðalvindhraðinn er því í túrbínuhæð eða í 55 metrum.

Tafla 18. Meðalvindhraði í túrbínuhæð fyrir hvern mánuð fyrir hvert tilvik með log.

	Tilvik					
	1	2	3	4	5	6
Jan	8,8750	9,0005	9,0175	9,2290	9,0630	9,0470
Feb	8,4545	9,2105	9,3290	9,8325	9,5050	9,3620
Mar	8,7630	9,3305	9,3835	9,7560	9,5115	9,4315
Apr	7,6215	7,9525	8,0250	8,1780	8,1055	8,0745
Maí	7,4665	7,3555	7,4325	7,2595	7,4300	7,4790
Jún	5,7110	5,5380	5,5730	5,5920	5,5595	5,5950
Júl	5,6485	5,5810	5,6170	5,5085	5,6165	5,6405
Águ	7,1905	7,1245	7,1775	6,9915	7,1820	7,2160
Sep	6,8515	7,3730	7,4450	7,6415	7,5640	7,4910
Okt	7,6265	8,3420	8,4320	8,7585	8,5855	8,4870
Nóv	10,6110	10,6605	10,8005	10,8295	10,8405	10,8980
Des	11,2580	11,3005	11,4260	11,2880	11,4610	11,4975

Tafla 19. Meðalvindhraði í túrbínuhæð fyrir hvern mánuð fyrir hvert tilvik með power.

	Tilvik					
	1	2	3	4	5	6
Jan	9,1050	9,2470	9,2145	9,3685	9,2660	9,2325
Feb	8,5790	9,4015	9,4755	10,0405	9,6815	9,5100
Mar	8,9060	9,4860	9,4960	9,9190	9,6400	9,5285
Apr	7,7115	8,0130	8,0590	8,2670	8,1450	8,0985
Maí	7,5930	7,3625	7,4125	7,3010	7,4060	7,4540
Jún	5,8080	5,6820	5,7010	5,6110	5,6845	5,7190
Júl	5,7390	5,5685	5,5870	5,5395	5,5850	5,6065
Ágú	7,3100	7,0635	7,0905	7,0300	7,0880	7,1155
Sep	6,9855	7,4165	7,4465	7,7965	7,5735	7,4855
Okt	7,7895	8,4145	8,4380	8,9940	8,6225	8,4735
Nóv	10,8285	10,9140	10,9955	10,9155	11,0175	11,0710
Des	11,4825	11,3765	11,4520	11,3825	11,4705	11,5075

D = Þvermál vindmyllu [m]

A = Flatarmál rótors [m^2]

P = Eðlisþyngd lofs [kg/m^3]

W = Orkan í vindinum [W]

C_p = Aflstuðull [einingalaus]

P = Orkan sem vindmyllan nær úr vindinum [W]

t = Tíminn sem er skoðaður [klst]

U = Meðalvindhraði [m/s]

N = Fjöldi vindmylla

Aflstuðullinn fyrir vindmyllurnar á Hafinu var fenginn frá framleiðanda.

Wind (m/s)	Power P (kW)	Power-coefficient C _p (-)
5	50.0	0.43
6	96.0	0.48
7	156.0	0.49
8	238.0	0.50
9	340.0	0.50
10	466.0	0.50
11	600.0	0.48
12	710.0	0.44
13	790.0	0.39

Mynd 34. Aflstuðull fyrir Enercon E-44 fyrir mismunandi vindhraða.

Byrjað var að finna flatarmál rótors. Til þess þarf að vita þvermál eða radíus rótorsins.

D = 44m

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 1520,5 \text{ m}^2$$

Því næst má reikna orkuna í vindinum, W. Notum meðalvindhraða úr tilviki 1 í janúar.

U = 8,750 m/s

$$W = \frac{1}{2} \rho A U^3 = 651,025 \text{ kW}$$

Orkuna sem vindmyllan nær úr vindinum má því finna með því að margfalda W með aflstuðlinum.

C_p = 0,50

$$P = W C_p = 325,512 \text{ kW}$$

Til að finna raforkuframleiðslu fyrir janúar þarf að margfalda fjölda klukkustunda í janúar.

t = 744 klst

$$P_w = Pt = 242,18 \text{ MWh}$$

Þessi skref voru svo endurtekin fyrir alla vindhraða í öllum mánuðum.

Tafla 20. Ársframleiðsla fyrir eina vindmyllu fyrir hvert tilvik með log.

Tilvik	1	2	3	4	5	6
MWh	2367	2569	2643	2749	2706	2690

Tafla 21. Ársframleiðsla fyrir eina vindmyllu fyrir hvert tilvik með power.

Tilvik	1	2	3	4	5	6
MWh	2504	2673	2709	2860	2776	2746

Í töflum 20 og 21 sést að orkuspá með power hæðaferlinum gefur meiri framleiðslu en með log hæðarferlinum.

Í töflum 22 og 23 er raunframleiðsla á Hafinu frá búðum myllum Landsvirkjunar borin saman við orkuframleiðsluspá. Reiknuð eru sex spátilvik fyrir tímabilið febrúar til maí 2012, annars vegar með log og hins vegar með power.

Tafla 22. Orkuframleiðsla reiknuð útfrá túrbínuhæð með log borin saman við raunframleiðslu [15].

Ár	Uppruni	Febrúar	Mars	Apríl	Maí	Samtals
		MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
2012	Tilvik 1	378	466	297	288	1.430
2012	Tilvik 2	489	563	337	276	1.665
2012	Tilvik 3	508	572	347	284	1.712
2012	Tilvik 4	595	643	367	265	1.870
2012	Tilvik 5	537	596	357	284	1.775
2012	Tilvik 6	514	581	353	290	1.738
2013	Raunframleiðsla	532	664	430	296	1.922

Tafla 23. Orkuframleiðsla reiknuð útfrá túrbínuhæð með power borin saman við raunframleiðslu [15].

Ár	Uppruni	Febrúar	Mars	Apríl	Maí	Samtals
		MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
2012	Tilvik 1	395	489	307	303	1.495
2012	Tilvik 2	520	591	345	277	1.733
2012	Tilvik 3	532	593	351	282	1.759
2012	Tilvik 4	633	676	379	270	1.958
2012	Tilvik 5	568	621	362	281	1.832
2012	Tilvik 6	538	599	356	287	1.781
2013	Raunframleiðsla	532	664	430	296	1.922

Útreikningar voru endurteknir fyrir aflþéttleika vindsins í túrbínuhæð (Weibull).

Meðaltal aflþéttleikans var tekin úr 30 metrum upp í 80 metra yfir árið.

$$LOG: \frac{P}{A} (30m - 80m) = 695,5 \text{ W/m}^2$$

$$POWER: \frac{P}{A} (30m - 80m) = 709,8 \text{ W/m}^2$$

Þessi aflþéttleiki er í samræmi við upplýsingar frá Veðurstofu Íslands um aflþéttleika á svæðinu, sjá mynd 10.

Orkan í vindinum er því fengin með því að margfalda þverskurðsflatarmál sem spaðar túrbínunar mynda, eða $A = 1520,5 \text{ m}^2$ við aflþéttleika vindsins.

$$LOG: P = 695,5 \text{ W/m}^2 \cdot 1520,5 \text{ m}^2 = 1,05MW$$

$$POWER: P = 709,8 \text{ W/m}^2 \cdot 1520,5 \text{ m}^2 = 1,08MW$$

9 Niðurstöður

Mikill munur á framreknuðum vindhraða er greinilegur, þegar notuð eru gögn úr mismunandi hæð yfir jörðu og á milli log og power ferla. Orkuspár voru gerðar miðað við vindmyllu af gerðinni Enercon E-44, 900kW eins og tilraunavindmyllur Landsvirkjunar.

Orkuspár fyrir öll tilvik í báðum ferlum voru bornar saman við raunframleiðslu á Hafinu fyrir febrúar, mars, apríl og maí.

Orkuspá með log hæðarferli.

Fyrir logaritmiska hæðaferilinn gefur tilvik 1 lægstu orkuspá og tilvik 4 hæstu orkuspá fyrir heilt ár, miðað við eina vindmyllu.

Tilvik 1	2367 MWh
Tilvik 4	2749 MWh

Ef borin eru saman spátilvik 1-6, sést að spái er um 75-90% af raunframleiðslu, sjá töflu 24.

Athygli vekur að öll tilvikin eru undir raunframleiðslu og má því segja að log-aðferðin sé “passíf” spá. Meðaltal spátilvika gefur 88% af raunframleiðslu sem er 12% frávik.

Tafla 24. Samanburður spátilvika fyrir log

Ár	Uppruni	Framl. alls MWh	Meðal-framl. MWh	Hlutf. af raun-framl.	Meðaltal tilvika MWh	Hlutf. af raun-framl.
2012	Tilvik 1	1.430	357	74,4%		
2012	Tilvik 2	1.665	416	86,6%		
2012	Tilvik 3	1.712	428	89,1%		
2012	Tilvik 4	1.870	468	97,3%	1.698	88%
2012	Tilvik 5	1.775	444	92,4%		
2012	Tilvik 6	1.738	435	90,4%		
2013	Raunframleiðsla	1.922	481	100,0%		

Tilvik 4 er næst raunframleiðslu. Einungis vantar 52 MWh uppá spána eða 2,7%.

Framleiðslusþá allra mánaða í tilviki 4 var þó ekki næst raunframleiðslu, þó heildarspái hafi verið best. Fyrir febrúar var tilvik 5 næst raunframleiðslu, fyrir mars var tilvik 4 næst raunframleiðslu. Tilvik 5 var næst raunframleiðslu fyrir apríl. Fyrir maí var tilvik 6 næst raunframleiðslu, þó svo að tilvik 1, 3 og 5 hafi verið ansi nærri. Breytileiki eftir mánuðum er nokkur en fylgir þó breytileika í raunframleiðslunni vel. Sjá nánar í töflu 22.

Orkuspá með power hæðarferli.

Fyrir *power law* hæðaferilinn gefur tilvik 1 lægstu orkuspá. Tilvik 4 gefur hæstu orkuspá fyrir heilt ár miðað við eina vindmyllu.

Tilvik 1	2504 MWh
Tilvik 4	2860 MWh

Ef borin eru saman spátilvik 1-6 sést að spáin er um 78-102% af raunframleiðslu, sjá töflu 25. Athygli vekur að eitt tilvik er yfir raunframleiðslu en fimm undir, og það að fimm af sex spátilvikum eru með frávik innan við 10% af raunframleiðslu. Meðaltal spátilvika gefur 92% af raunframleiðslu sem er 8% frávik.

Tafla 25. Samanburður spátilvika fyrir power.

Ár	Uppruni	Framl. alls MWh	Meðal-framl. MWh	Hlutf. af raun-framl.	Meðaltal tilvika MWh	Hlutf. af raun-framl.
2012	Tilvik 1	1.495	374	77,8%		
2012	Tilvik 2	1.733	433	90,2%		
2012	Tilvik 3	1.759	440	91,5%		
2012	Tilvik 4	1.958	490	101,9%	1.760	92%
2012	Tilvik 5	1.832	458	95,3%		
2012	Tilvik 6	1.781	445	92,7%		
2013	Raunframleiðsla	1.922	481	100,0%		

Tilvik 4 er næst raunframleiðslu. Spátilvikið er einungis 36 MWh umfram raunframleiðslu, eða 1,9%. Eins og fyrir logaritmiska hæðaferilinn voru allir mánuðir í tilviki 4 ekki næstir raunframleiðslunni. Fyrir febrúar var tilvik 3 næst raunframleiðslu. Tilvik 2 og 6 voru einnig frekar nálægt raunframleiðslu. Fyrir mars og apríl var tilvik 4 næst raunframleiðslu og fyrir maí var tilvik 1 næst raunframleiðslu. Breytileiki eftir mánuðum er nokkur, en fylgir breytileika í raunframleiðslunni vel. Sjá nánar töflu 23.

Eins og sést hér að framan er vindorkuspá með power hæðarferlum töluvert nákvæmari en með log hæðarferlum, eða 8% í tilviki power á móti 12% í tilviki log. Power hæðarferillinn líkir því betur eftir raunframleiðslu en log hæðarferllinn. Þá er einfaldara að reikna power hæðarferla en log hæðarferla.

Rannsóknin sýnir að ef að vindmyllur eiga að vera raunverulegur möguleiki á Íslandi þarf að eyða þessari óvissu sem felst í að framreikna vindhraða með hæðarferlum. Vert að nefna að Landsvirkjun hefur sett upp hærra mastur af viðurkenndri gerð á sama svæði og mastrið sem

notað var í þessum mælingum. Mastur þetta mælir vindhraða í öllum snúningsfleti myllunnar (e. swept area). Það er gert til þess að minnka þá óvissu sem óhjákvæmileg er þegar vindhraði er framreknaður með hæðarferlum.

Niðurstöður þessarar skýrslu sýna mikilvægi þess að vindhraðamælingar séu gerðar eftir viðurkenndum stöðlum.

10 Lokaorð

Verkefnið var í heild sinni mjög fræðandi og talsvert flóknara en skýrsluhöfundur gerði ráð fyrir í upphafi. Við upplýsingaöflun og úrvinnslu á gögnunum kom í ljós hversu margir þættir spila inní þegar kemur að vindorkuspá og hve flókið samspil þeirra er.

11 Heimildaskrá

- [1] Orkustofnun, „Orkustofnun,“ 2014. [Á neti]. Available:
www.os.is/jardhiti/jardhitanotkun/jardvarmavirkjanir. [Skoðað 4 April 2014].
- [2] Landsvirkjun, „Landsvirkjun,“ 2013. [Á neti]. Available:
<http://www.landsvirkjun.is/Rannsokniroghroun/Throunarverkefni/Vindmyllur/>. [Skoðað 30 april 2014].
- [3] Enercon, „Enercon,“ 2012. [Á neti]. Available: <http://www.environmental-expert.com/products/e-44-900-kw-wind-turbines-235749>. [Skoðað 3 maí 2014].
- [4] F. M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 2011.
- [5] Veðurfræðifélagið, „Veðurfræðifélagið,“ 2012. [Á neti]. Available:
<http://vedur.org/index.php/fraedathing/fraeda%C3%BEing-2011-2012>. [Skoðað 17 4 2014].
- [6] IEC, IEC STANDARD 61400-12-1, 1st ritstj., Geneva: IEC, 2005.
- [7] RMYoung, „RMYoung,“ 2014. [Á neti]. Available:
<http://www.youngusa.com/products/7/47.html>. [Skoðað 5 2 2014].
- [8] Vedur.is, „Veðurstöfa Íslands,“ 17 12 2012. [Á neti]. Available:
<http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/vindorka/>. [Skoðað 09 05 2014].
- [9] R. S. Jónas Þór Snæbjörnsson, Á vatnaskilum, vindurinn er undarlega skapaður., Reykjavík: Háskólaútgáfan, 1998.
- [10] S. Mathew, Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, 2006.
- [11] R. S. Hjörtur Þráinsson, „Álag og öryggi burðarvirkja,“ Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Reykjavík, 1994.
- [12] D. S. N. J. E. B. Tony Burton, Wind Energy Handbook, John Whiley & Sons, Ltd, 2001.
- [13] J. L. Woodward, Estimating the flammable mass of vapor cloud, American institute of chemical engineers, 1998.
- [14] Eurocodes, EN 1991-1-4:2005, Eurocodes, 2005.
- [15] Orkustofnun, „Orkustofnun,“ 2013. [Á neti]. Available:
<http://www.orkustofnun.is/orkustofnun/frettir/nr/1466>. [Skoðað 5 Mai 2014].
- [16] J. Þ. S. Skúli Þórðarson, „Umferðarslys og vindfar,“ Orion Ráðgjöf ehf., Reykjavík, 2004.
- [17] D. B. G. Eric A. Meindl, „Determining the Power-Law wind profile exponent under near neutral stability conditions at sea,“ *Journal of applied meteorology*, b. 33, p. 757, 1993.

[18] G. C. H. E. r. S. Antonio Cenedese, Vertical profiles of wind, temperture and turbulence, 1997.

[19] V. íslands, „Veður.is,“ 20 12 2012. [Á neti]. Available:
<http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/vindorka/kort/>. [Skoðað 09 05 2014].

12 Viðaukar

12.1 A - Matlab kóði

```
%-----  
% Les vindgögn úr skrá og reiknar út parametra í logaritmiskum  
% vindhæðarferli og veldisvindhæðaferli  
%  
%-----  
clear all  
  
skjal = 'Burfell_2012'; % skilgreini Gagnaskjal  
[gogn, B] = xlsread(skjal); % les gögninn úr skjalinu  
  
% Vindhraðamælingar  
Z = 10:10:40; % Mælihæðir (m)  
yU1 = log(Z);  
yUv = log(Z/10);  
  
I1=find(4.0<gogn(:,7)); % Pröskuldur vinhraðamælingar er 4 m/s  
I2=find(4.0<gogn(I1,10)); I2=I1(I2); % Pröskuldur vinhraðamælingar er 4 m/s  
I3=find(4.0<gogn(I2,13)); I3=I2(I3); % Pröskuldur vinhraðamælingar er 4 m/s  
I4=find(4.0<gogn(I3,16)); I4=I3(I4); % Pröskuldur vinhraðamælingar er 4 m/s  
  
U = gogn(I4,7:3:16); % Meðal vindhraðamælingar (m/s)  
sigmaU = gogn(I4,8:3:17); % Staðalfrávik vindhraða (m/s)  
Iu = sigmaU./U; % Hviðustyrkur  
U10=U(:,1); % Meðalvindhraði í 10 m hæð  
% U50 = gogn(I5,22); % U_50 fixed ?  
  
% Mælingar á vindátt  
Dir = gogn(I4,23:2:31); % Windátt (°)  
sigmaDir = gogn(I4,24:2:32); % Staðalfrávik vindáttar (°)  
  
% Hitamælingar Ath. Höfum bara áhuga á hita þegar vindhraði er > 4m/s  
T = gogn(I4,33:38); % Hitamælingar (°C) í 2, 10, 20, 30, 40 og 50 m  
YT = [10 30 40]; % Virkar mælihæðir (m), sleppum mæli í 2 m og 20m.  
% Ath. Hitanemi í 20 m er gallaður seinni hluta tímabilsins, sleppum honum  
T = [T(:,2) T(:,4) T(:,5)];
```

```

% Read date
Dyear = gogn(I4,2);
Dmonth = gogn(I4,3);
Dday = gogn(I4,4);
Dhour = gogn(I4,5);
Dmin = gogn(I4,6);
Ddate = datenum(Dyear,Dmonth,Dday,Dhour,Dmin,0);

for i=1:length(U)

    % Hæðarferill vindhraða
    xU(i,:) = U(i,1:4)./U10(i);
    p = polyfit(xU(i,:),yU1,1);
    b(i) = p(1);
    a(i) = p(2);
    sqkappa(i)=(0.4/b(i));
    z0(i) = exp(a(i));
    Urat(i,:) = sqkappa(i)*log(Z/z0(i))/0.4;
    Uprof(i,:)=Urat(i,:)*U10(i);

    Iz(i,:) = log(Z/z0(i)).^-1;                      % relation from EN1991.1.4
    sqkap_z(i) = 0.4*0.19*(z0(i)/0.05)^0.07;        % relation from EN1991.1.4

    % powerlaw

    p = polyfit(xU(i,:),yUv,1);
    bv(i) = p(1);
    av(i) = p(2);
    alpha(i) = 1/bv(i);
    Uvrat(i,:) = (Z/10).^alpha(i);
    Uvprof(i,:) = Uvrat(i,:)*U10(i);

end

% Gagnagrunnur
save urvinnsla.mat
% Myndir
myndaplot

% Gagnagrunnur

```

```
%load urvinnsla.mat
```

MYNDAPLOT

```
% Myndir
figure; plot(Ddate,U); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Meðalvindhraði (m/s)')
figure; plot(Ddate,sigmaU); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Staðalfrávik vindhraða (m/s)')
figure; plot(Ddate,Iu); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Hviðustyrkur')
IVu = find(Iu(:,1)<0.5);
figure; hist(Iu(IVu),40);
xlabel('Hviðustyrkur')

figure; plot(Ddate,Dir,'o'); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Vindátt (°)')
figure; plot(Ddate,sigmaDir); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Staðalfrávik vindáttar (°)')
figure; hist(Dir,40); xlabel('Vindátt (°)')

figure; wind_rose(Dir(:,1),U(:,1),'dtype','meteo')
figure; wind_rose(Dir(:,2),U(:,2),'dtype','meteo')
figure; wind_rose(Dir(:,3),U(:,3),'dtype','meteo')
figure; wind_rose(Dir(:,4),U(:,4),'dtype','meteo')
figure; wind_rose(Dir(:,4),ones(size(Dir(:,4))), 'di','dtype','meteo')

figure; plot(Dir,Iu,'o')
xlabel('Windstefna (°)'); ylabel('Hviðustyrkur')
figure; plot(Dir,U,'o')
xlabel('Windstefna (°)'); ylabel('Vindhraði (m/s)')

figure; plot(Ddate,b); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Hallatala vindhraðaferils')
figure; plot(Ddate,a); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Skurðpunktur vindhraðaferils (m)')

figure; plot(Ddate,T); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Hiti (°C)')
figure; plot(Ddate,bT); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Hallatala hitaferils')
```

```

figure; plot(Ddate,aT); datetick
xlabel('Dagsetning'); ylabel('Skurðpunktur hitaferils (°C)')

figure; hist(b,40); xlabel('Hallatala vindhraðaferils')
figure; hist(a,40); xlabel('Skurðpunktur vindhraðaferils')
figure; plot(U,b,'o'); xlabel('Vindhraði (m/s)'); ylabel('Hallatala
vindhraðaferils')
figure; plot(U,a,'o'); xlabel('Vindhraði (m/s)'); ylabel('Skurðpunktur
vindhraðaferils')
figure; plot(Dir,b,'o'); xlabel('Vindátt (°)'); ylabel('Hallatala
vindhraðaferils')
figure; plot(Dir,a,'o'); xlabel('Vindátt (°)'); ylabel('Skurðpunktur
vindhraðaferils')
figure; plot(xU,yU1)

% Flokkun á gögnum með Pasquill stöðuleikaflokkun

k1=0; k2=0; k3=0; k4=0; k5=0; k6=0; k7=0;
for i = 1:length(gogn)
    if sigmaDir(i)<2
        k1=k1+1;
        dirG(k1)=i;
    elseif sigmaDir(i)<3.75
        k2=k2+1;
        dirF(k2)=i;
    elseif sigmaDir(i)<7.5
        k3=k3+1;
        dirE(k3)=i;
    elseif sigmaDir(i)<12.5
        k4=k4+1;
        dirD(k4)=i;
    elseif sigmaDir(i)<17.5
        k5=k5+1;
        dirC(k5)=i;
    elseif sigmaDir(i)<22.5
        k6=k6+1;
        dirB(k6)=i;
    elseif sigmaDir(i)>22.5
        k7=k7+1;
        dirA(k7)=i;
    end
end

[Ng,Xg]=hist(Dir(dirG),10);
Npg=Ng/length(gogn)*100;
bar(Xg,Npg,'b')
hold on
[Nf,Xf]=hist(Dir(dirF),18);
Npf=Nf/length(gogn)*100;
bar(Xf,Npf,'r')
hold on
[Ne,Xe]=hist(Dir(dirE),18);
Npe=Ne/length(gogn)*100;
bar(Xe,Npe,'y')
hold on

```

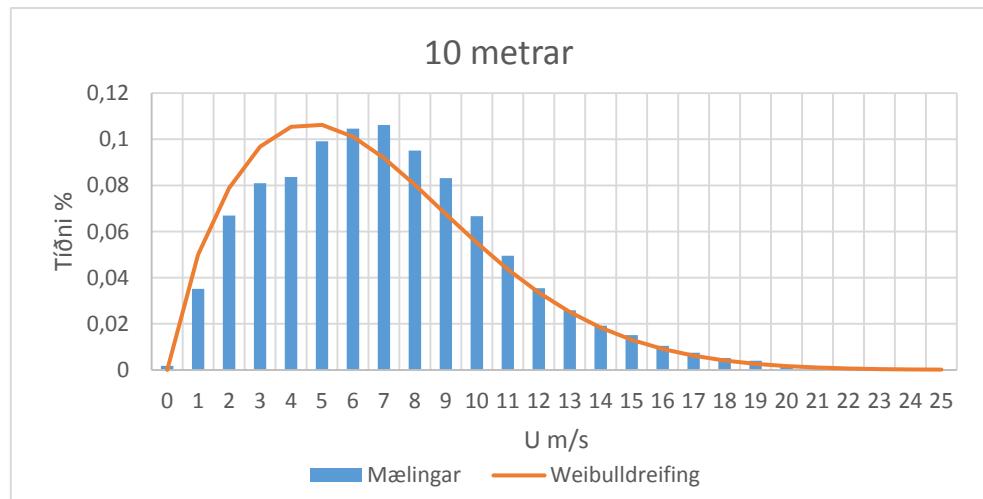
```

[Nd,Xd]=hist(Dir(dirD),18);
Npd=Nd/length(gogn)*100;
bar(Xd,Npd,'k')
hold on
[Nc,Xc]=hist(Dir(dirC),18);
Npc=Nc/length(gogn)*100;
bar(Xc,Npc,'w')
hold on
[Nb,Xb]=hist(Dir(dirB),18);
Npb=Nb/length(gogn)*100;
bar(Xb,Npb,'c')
hold on
[Na,Xa]=hist(Dir(dirA),18);
Npa=Na/length(gogn)*100;
bar(Xa,Npa,'m')
hold on

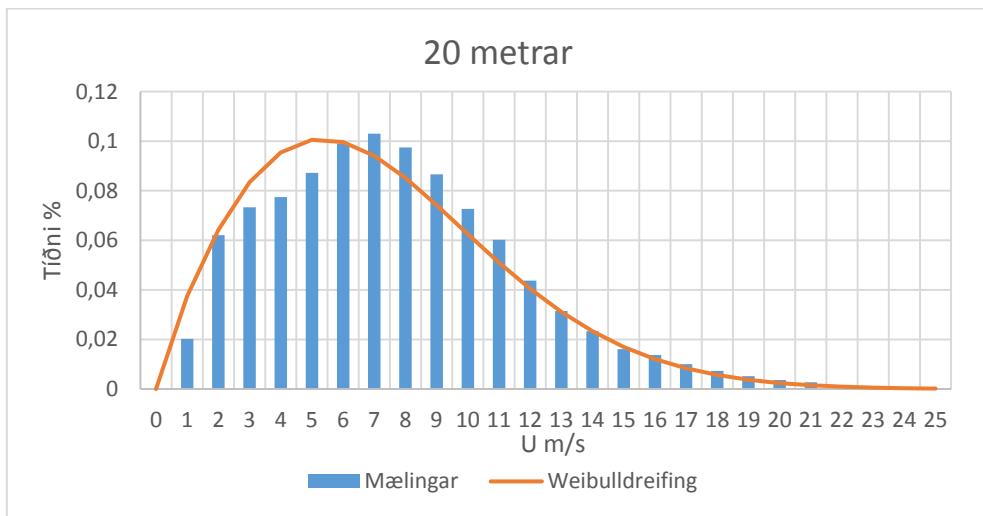
```

12.2 C – Weibulldreifingar

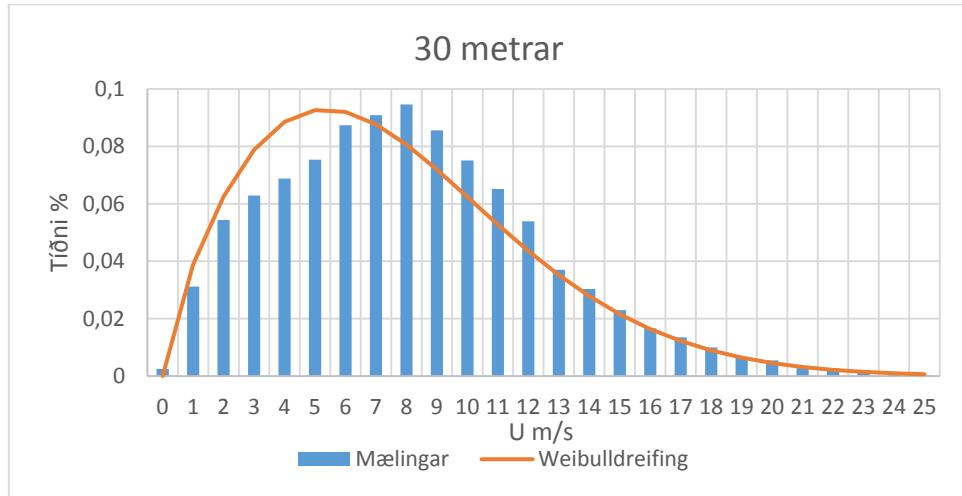
Mældur vindhraði



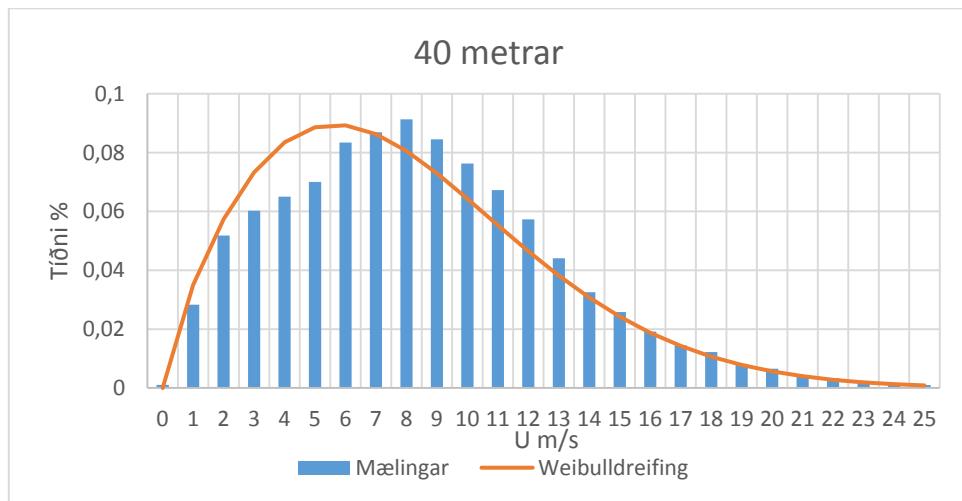
Mynd 35. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 10 metra hæð



Mynd 36. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 20 metra hæð

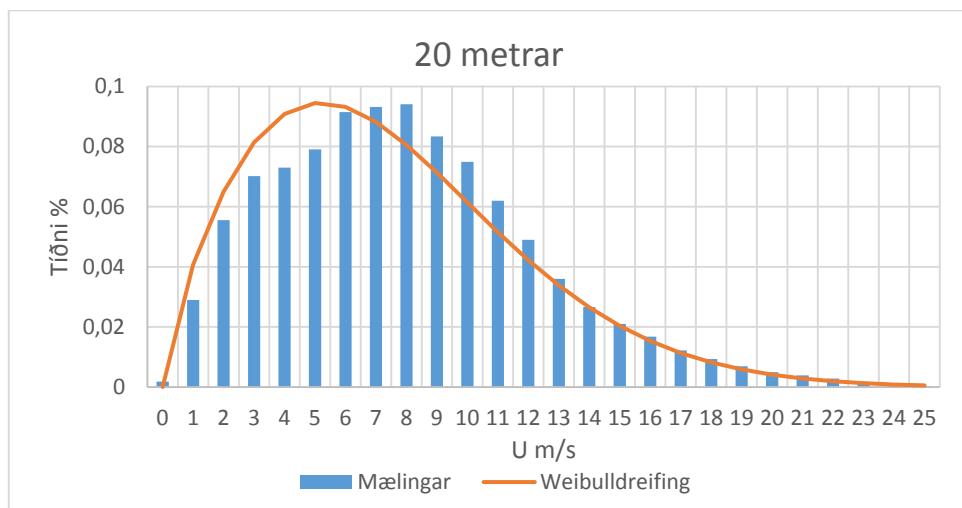


Mynd 37. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 30 metra hæð

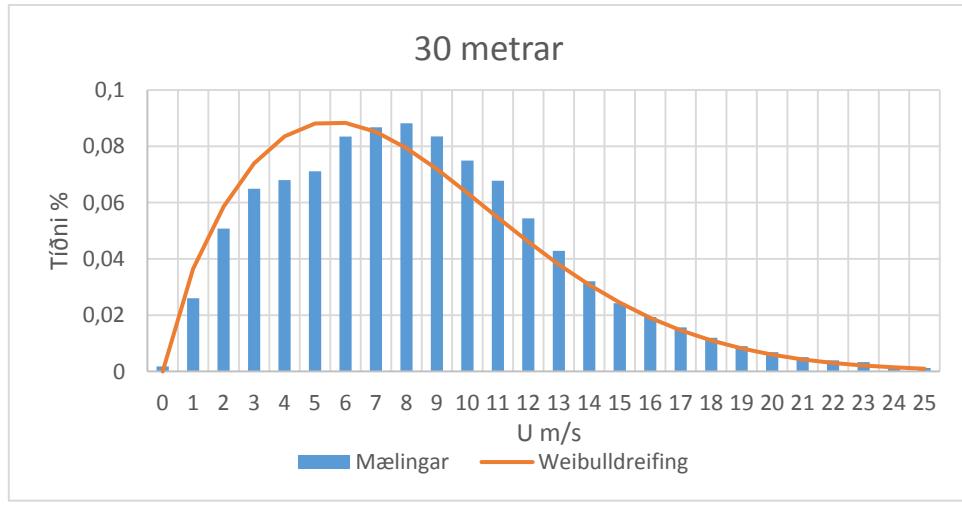


Mynd 38. Weibulldreifing fyrir mældann vindhraða í 40 metra hæð

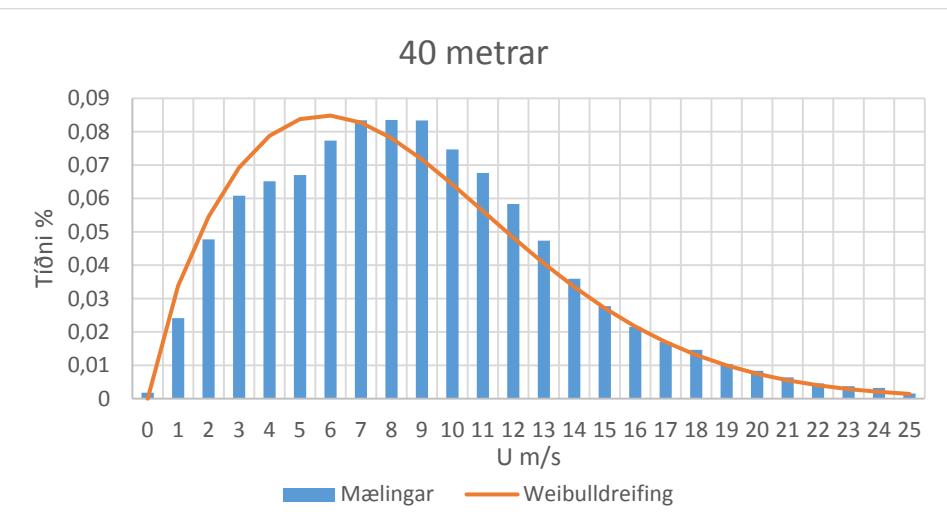
Framreknaður vindhraði með Log wind profile



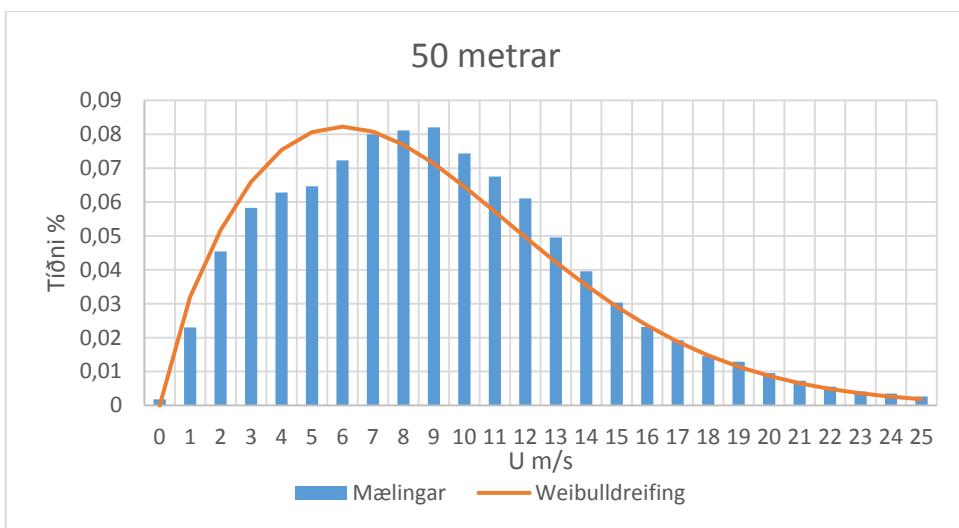
Mynd 39. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 20 metra hæð



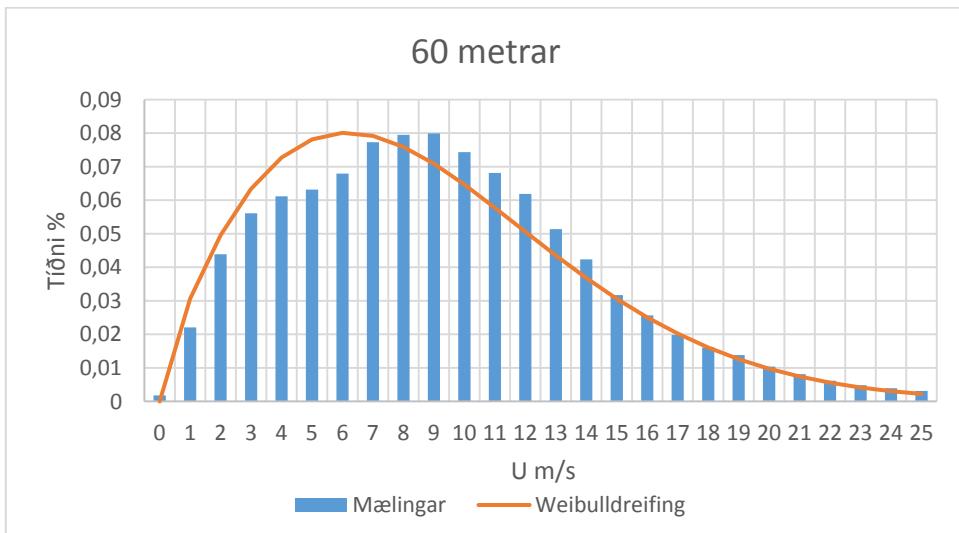
Mynd 40. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 30 metra hæð



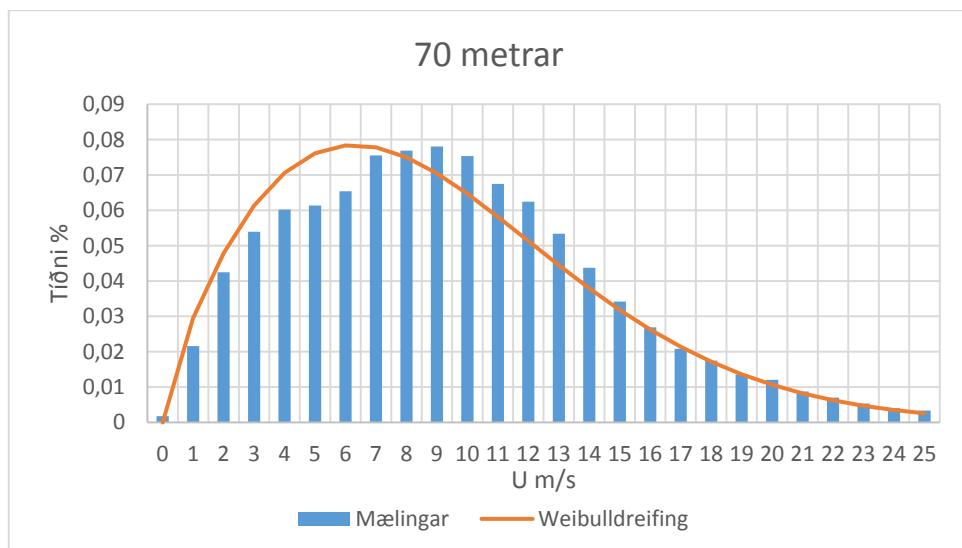
Mynd 41. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 40 metra hæð



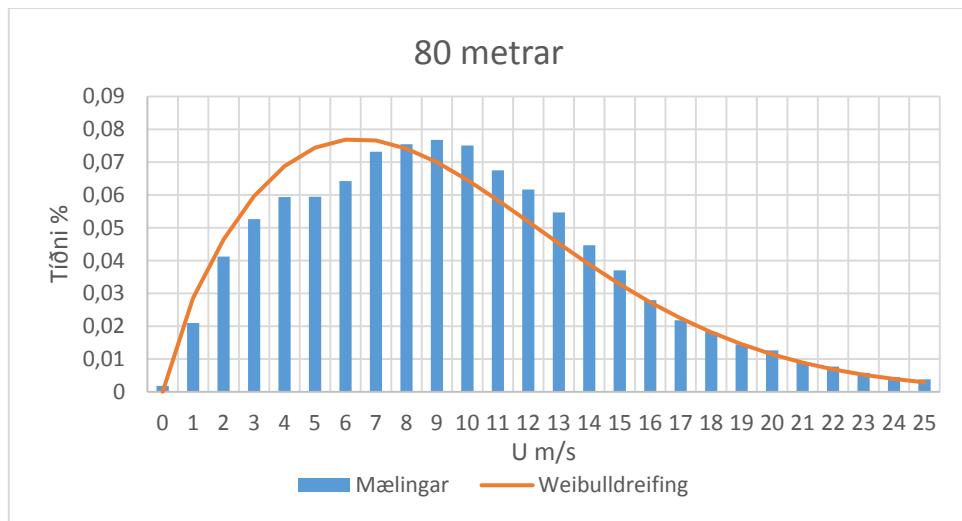
Mynd 42. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 50 metra hæð



Mynd 43. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 60 metra hæð

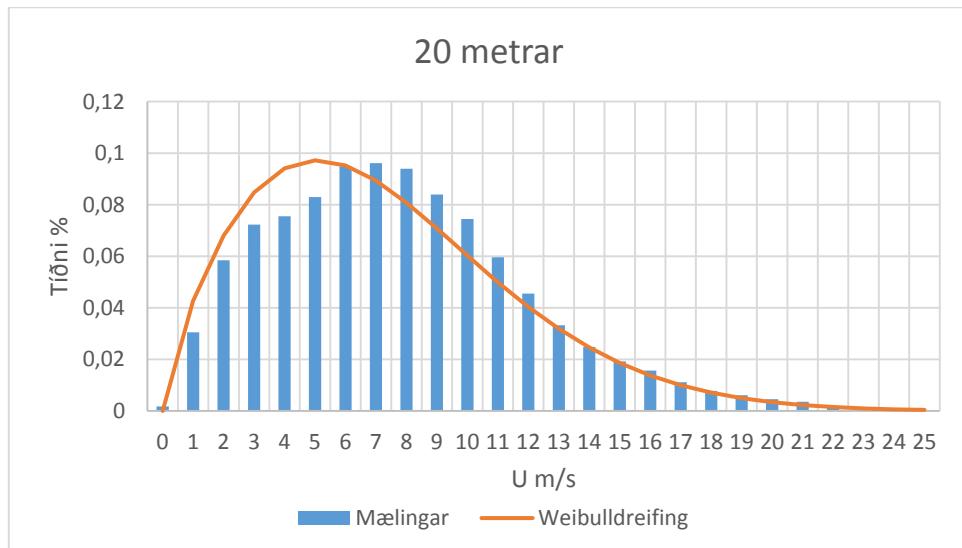


Mynd 44. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 70 metra hæð

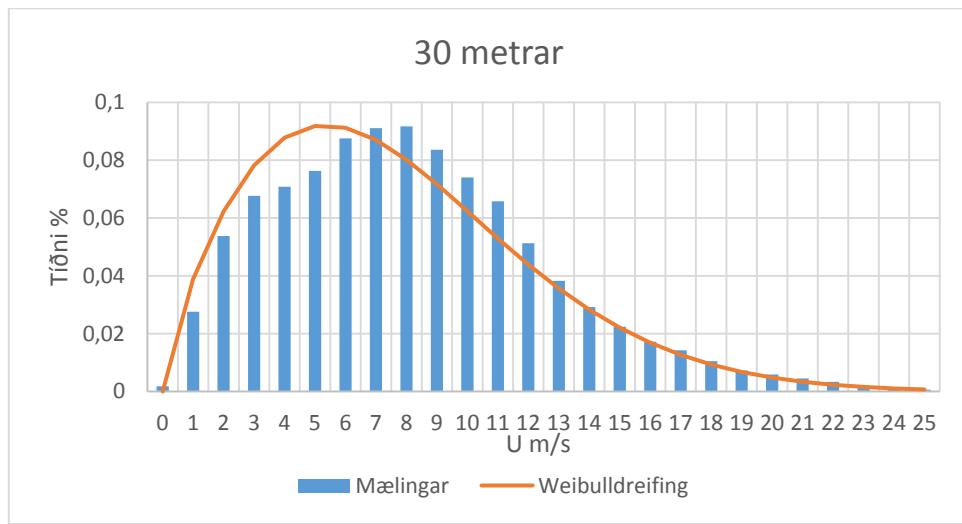


Mynd 45. Weibulldreifing fyrir log-reiknaðann vindhraða í 80 metra hæð

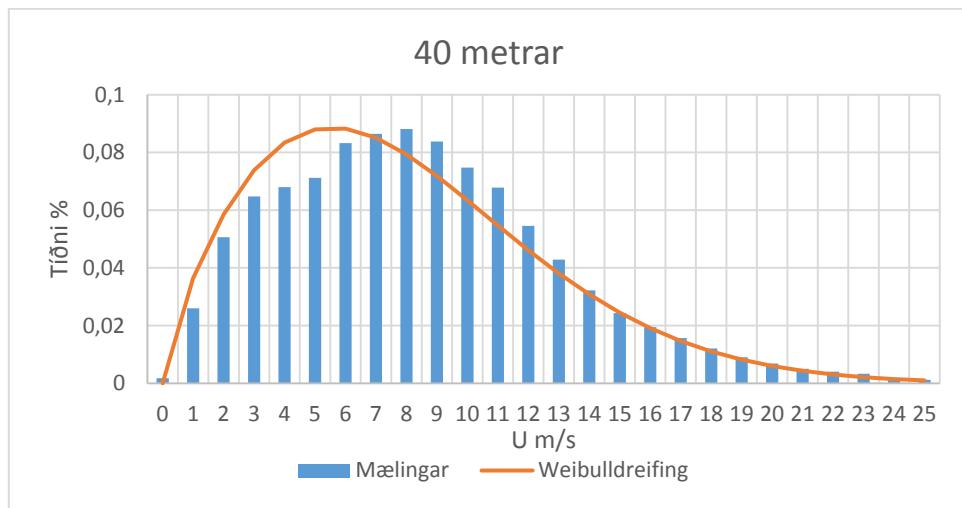
Framreknaður vindhraði með Power law profile



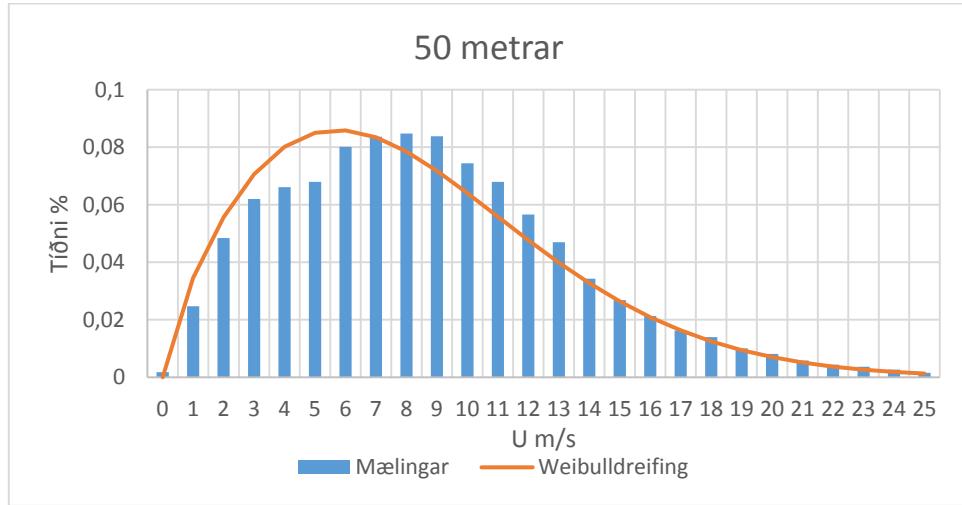
Mynd 46. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 20 metra hæð



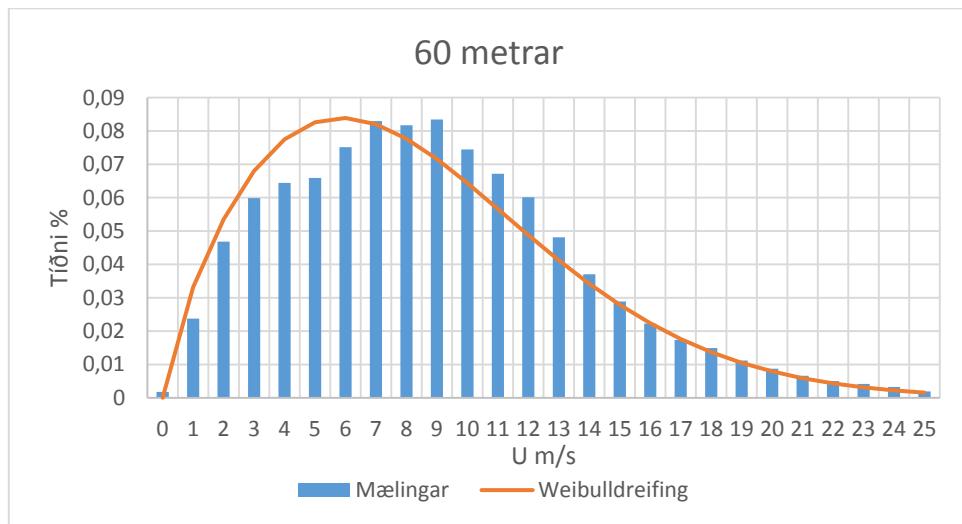
Mynd 47. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 30 metra hæð



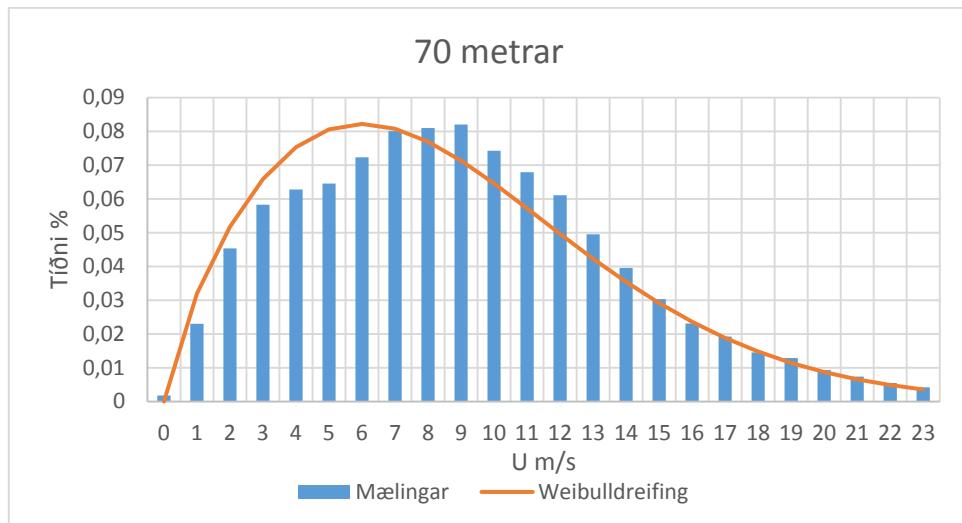
Mynd 48. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 40 metra hæð



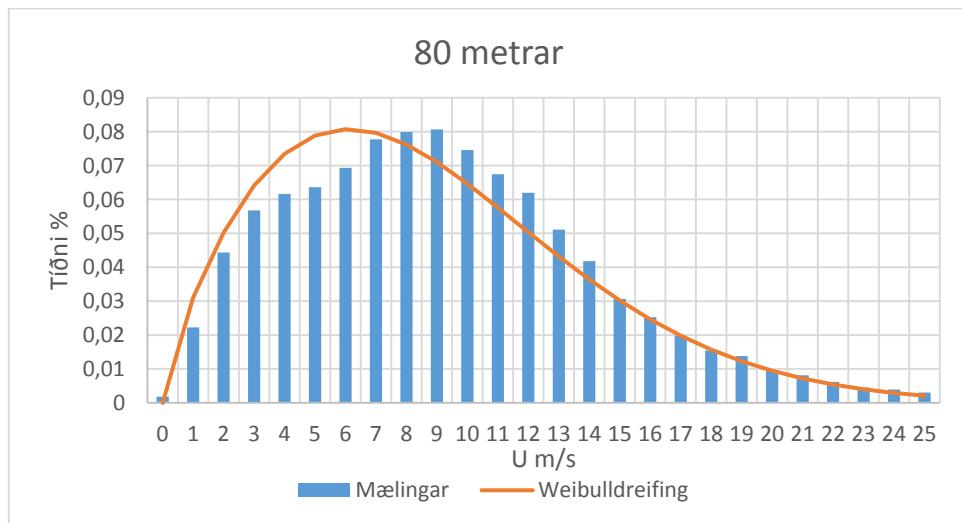
Mynd 49. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 50 metra hæð



Mynd 50. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 60 metra hæð



Mynd 51. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 70 metra hæð



Mynd 52. Weibulldreifing fyrir Power law-reiknaðann vindhraða í 80 metra hæð

Breytur fyrir Weibull dreifingu fyrir hvern mánuð

Tafla 26. Weibullbreytur í öllum hæðum

	Power law vindhæðaferill															
	U10		U20		U30		U40		U50		U60		U70		U80	
	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k
Janúar	7,990	1,678	8,769	1,678	9,259	1,678	9,624	1,678	9,917	1,678	10,162	1,678	10,375	1,678	10,562	1,678
Febrúar	8,241	1,906	9,044	1,906	9,550	1,906	9,926	1,906	10,228	1,906	10,481	1,906	10,700	1,906	10,894	1,906
Mars	8,332	1,713	9,144	1,713	9,655	1,713	10,035	1,713	10,340	1,713	10,596	1,713	10,818	1,713	11,013	1,713
Apríl	7,442	2,139	8,168	2,139	8,624	2,139	8,964	2,139	9,236	2,139	9,465	2,139	9,663	2,139	9,838	2,139
Maí	6,999	1,944	7,681	1,944	8,110	1,944	8,430	1,944	8,686	1,944	8,901	1,944	9,087	1,944	9,251	1,944
Júní	5,371	1,667	5,894	1,667	6,224	1,667	6,469	1,667	6,666	1,667	6,831	1,667	6,973	1,667	7,099	1,667
Júlí	5,339	1,781	5,860	1,781	6,188	1,781	6,431	1,781	6,627	1,781	6,791	1,781	6,933	1,781	7,058	1,781
Ágúst	6,607	1,852	7,251	1,852	7,656	1,852	7,957	1,852	8,199	1,852	8,402	1,852	8,578	1,852	8,733	1,852
September	6,586	1,671	7,228	1,671	7,632	1,671	7,933	1,671	8,174	1,671	8,376	1,671	8,552	1,671	8,706	1,671
Október	7,156	2,031	7,854	2,031	8,293	2,031	8,619	2,031	8,881	2,031	9,101	2,031	9,292	2,031	9,460	2,031
Nóvember	9,454	1,750	10,375	1,750	10,956	1,750	11,387	1,750	11,733	1,750	12,024	1,750	12,275	1,750	12,497	1,750
Desember	9,898	2,587	10,862	2,587	11,470	2,587	11,921	2,587	12,284	2,587	12,588	2,587	12,851	2,587	13,083	2,587
Meðal	7,448	1,758	8,174	1,758	8,631	1,758	8,970	1,758	9,243	1,758	9,472	1,758	9,670	1,758	9,845	1,758

Tafla 27. Weibullbreytur fyrir allar hæðir

	Log vindhæðaferill															
	U10		U20		U30		U40		U50		U60		U70		U80	
	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k	λ	k
Janúar	7.990	1.678	9.015	1.678	9.615	1.678	10.040	1.678	10.370	1.678	10.640	1.678	10.868	1.678	11.065	1.678
Febrúar	8.241	1.906	9.298	1.906	9.916	1.906	10.355	1.906	10.695	1.906	10.973	1.906	11.209	1.906	11.412	1.906
Mars	8.332	1.713	9.400	1.713	10.025	1.713	10.469	1.713	10.813	1.713	11.094	1.713	11.332	1.713	11.538	1.713
Apríl	7.442	2.139	8.397	2.139	8.955	2.139	9.351	2.139	9.659	2.139	9.910	2.139	10.122	2.139	10.306	2.139
Maí	6.999	1.944	7.896	1.944	8.421	1.944	8.794	1.944	9.083	1.944	9.319	1.944	9.519	1.944	9.692	1.944
Júní	5.371	1.667	6.060	1.667	6.463	1.667	6.749	1.667	6.970	1.667	7.152	1.667	7.305	1.667	7.437	1.667
Júlí	5.339	1.781	6.024	1.781	6.425	1.781	6.709	1.781	6.930	1.781	7.110	1.781	7.262	1.781	7.394	1.781
Ágúst	6.607	1.852	7.454	1.852	7.950	1.852	8.301	1.852	8.574	1.852	8.797	1.852	8.986	1.852	9.149	1.852
September	6.586	1.671	7.431	1.671	7.925	1.671	8.276	1.671	8.548	1.671	8.770	1.671	8.958	1.671	9.121	1.671
Október	7.156	2.031	8.074	2.031	8.611	2.031	8.992	2.031	9.288	2.031	9.529	2.031	9.733	2.031	9.910	2.031
Nóvember	9.454	1.750	10.666	1.750	11.376	1.750	11.879	1.750	12.270	1.750	12.589	1.750	12.858	1.750	13.092	1.750
Desember	9.898	2.587	11.167	2.587	11.910	2.587	12.437	2.587	12.845	2.587	13.179	2.587	13.462	2.587	13.706	2.587
Meðal	7.448	1.758	8.403	1.758	8.962	1.758	9.358	1.758	9.666	1.758	9.917	1.758	10.130	1.758	10.314	1.758

12.3 E (Orkuútreikningar)

Framreiknaðir vindhraðar með log hæðaferli

Tafla 28. Framreiknaður vindhraði fyrir tilvik 1

	Tilvik 1								
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	z0	kappa	U(55)
Jan	9,261	9,125	8,968	8,782	8,554	8,261	0,00905	0,00326	8,87500
Feb	8,697	8,611	8,513	8,396	8,252	8,068	0,00010	0,00122	8,45450
Mar	9,045	8,945	8,831	8,695	8,529	8,315	0,00042	0,00157	8,76300
Apr	7,848	7,768	7,676	7,567	7,434	7,263	0,00015	0,00130	7,62150
May	7,744	7,646	7,533	7,400	7,236	7,025	0,00208	0,00222	7,46650
Jun	5,911	5,840	5,759	5,663	5,545	5,394	0,00109	0,00192	5,71100
Jul	5,845	5,776	5,696	5,601	5,485	5,336	0,00104	0,00190	5,64850
Aug	7,479	7,377	7,260	7,121	6,951	6,732	0,00438	0,00267	7,19050
Sep	7,066	6,991	6,903	6,800	6,674	6,511	0,00030	0,00148	6,85150
Oct	7,908	7,809	7,694	7,559	7,393	7,180	0,00190	0,00218	7,62650
Nov	11,100	10,927	10,729	10,493	10,206	9,835	0,01462	0,00375	10,61100
Dec	11,794	11,605	11,387	11,129	10,813	10,406	0,01920	0,00409	11,25800

Tafla 29. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 2

	Tilvik 2								
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	z0	kappa	U(55)
Jan	9,423	9,274	9,102	8,899	8,651	8,332	0,01675	0,00392	9,001
Feb	9,637	9,487	9,313	9,108	8,857	8,536	0,01495	0,00378	9,211
Mar	9,743	9,598	9,430	9,231	8,988	8,677	0,01023	0,00338	9,331
Apr	8,253	8,147	8,025	7,880	7,703	7,476	0,00240	0,00230	7,953
May	7,611	7,521	7,417	7,294	7,144	6,951	0,00098	0,00188	7,356
Jun	5,703	5,645	5,578	5,498	5,401	5,276	0,00016	0,00132	5,538
Jul	5,765	5,700	5,625	5,537	5,429	5,290	0,00054	0,00166	5,581
Aug	7,401	7,304	7,191	7,058	6,895	6,686	0,00312	0,00245	7,125
Sep	7,704	7,587	7,453	7,293	7,098	6,849	0,01176	0,00352	7,373
Oct	8,784	8,628	8,448	8,236	7,976	7,643	0,04221	0,00535	8,342
Nov	11,162	10,985	10,781	10,540	10,245	9,865	0,01729	0,00395	10,661
Dec	11,848	11,655	11,432	11,169	10,846	10,430	0,02214	0,00428	11,301

Tafla 30. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 3

	Tilvik 3								
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Z0	kappa	U(55)
Jan	9,447	9,296	9,121	8,914	8,665	8,335	0,01902	0,00408	9,018
Feb	9,774	9,617	9,436	9,222	8,963	8,623	0,01915	0,00409	9,329
Mar	9,809	9,659	9,486	9,281	9,034	8,708	0,01270	0,00360	9,384
Apr	8,342	8,230	8,101	7,949	7,763	7,522	0,00372	0,00257	8,025
May	7,704	7,609	7,498	7,367	7,208	7,000	0,00175	0,00214	7,433
Jun	5,746	5,685	5,615	5,531	5,430	5,298	0,00028	0,00145	5,573
Jul	5,809	5,741	5,663	5,571	5,459	5,312	0,00084	0,00181	5,617
Aug	7,466	7,364	7,247	7,108	6,938	6,719	0,00442	0,00268	7,178
Sep	7,793	7,670	7,529	7,361	7,160	6,892	0,01632	0,00388	7,445
Oct	8,894	8,731	8,543	8,321	8,051	7,698	0,05410	0,00587	8,432
Nov	11,334	11,146	10,929	10,672	10,360	9,953	0,02539	0,00448	10,801
Dec	12,000	11,798	11,564	11,288	10,953	10,514	0,02886	0,00468	11,426

Tafla 31. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 4

	Tilvik 4									
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	z0	kappa	U(55)	
Jan	9,735	9,557	9,351	9,107	8,808	8,427	0,05437	0,00458	9,229	
Feb	10,603	10,331	10,018	9,647	9,194	8,610	0,43395	0,01090	9,833	
Mar	10,410	10,179	9,913	9,599	9,214	8,719	0,19132	0,00740	9,756	
Apr	8,628	8,469	8,286	8,070	7,805	7,464	0,05589	0,00463	8,178	
May	7,491	7,409	7,315	7,204	7,068	6,894	0,00036	0,00134	7,260	
Jun	5,724	5,677	5,624	5,560	5,482	5,382	0,00001	0,00071	5,592	
Jul	5,681	5,621	5,550	5,467	5,366	5,235	0,00030	0,00130	5,509	
Aug	7,255	7,162	7,055	6,928	6,773	6,573	0,00236	0,00196	6,992	
Sep	8,175	7,987	7,770	7,513	7,199	6,796	0,23937	0,00817	7,642	
Oct	9,508	9,244	8,939	8,578	8,137	7,570	0,65111	0,01364	8,759	
Nov	11,356	11,171	10,956	10,703	10,393	9,994	0,02256	0,00347	10,830	
Dec	11,870	11,665	11,428	11,148	10,805	10,364	0,03525	0,00398	11,288	

Tafla 32. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 5

	Tilvik 5								
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Z0	kappa	U(55)
Jan	9,552	9,380	9,181	8,945	8,665	8,285	0,04829	0,00441	9,063
Feb	10,161	9,930	9,663	9,347	8,963	8,462	0,22633	0,00797	9,505
Mar	10,092	9,887	9,651	9,372	9,034	8,590	0,10912	0,00589	9,512
Apr	8,520	8,374	8,205	8,006	7,763	7,447	0,03315	0,00390	8,106
May	7,701	7,605	7,495	7,365	7,208	6,999	0,00166	0,00181	7,430
Jun	5,717	5,661	5,597	5,522	5,430	5,310	0,00008	0,00104	5,560
Jul	5,809	5,741	5,663	5,570	5,459	5,311	0,00086	0,00158	5,617
Aug	7,476	7,373	7,253	7,111	6,938	6,714	0,00529	0,00236	7,182
Sep	8,059	7,884	7,683	7,445	7,160	6,778	0,16477	0,00695	7,564
Oct	9,235	9,006	8,742	8,429	8,051	7,552	0,36559	0,00999	8,586
Nov	11,423	11,218	10,981	10,700	10,360	9,914	0,04754	0,00438	10,841
Dec	12,076	11,859	11,609	11,313	10,953	10,484	0,04678	0,00436	11,461

Tafla 33. Framreknaður vindhraði fyrir tilvik 6

	Tilvik 6									
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	z0	kappa	U(55)	
Jan	9,522	9,354	9,161	8,933	8,665	8,332	0,03187	0,00341	9,047	
Feb	9,876	9,695	9,486	9,238	8,963	8,536	0,05411	0,00401	9,362	
Mar	9,919	9,747	9,549	9,314	9,034	8,677	0,03185	0,00341	9,432	
Apr	8,454	8,320	8,166	7,983	7,763	7,476	0,01656	0,00284	8,075	
May	7,812	7,695	7,559	7,399	7,208	6,951	0,01068	0,00254	7,479	
Jun	5,799	5,727	5,644	5,546	5,430	5,276	0,00149	0,00163	5,595	
Jul	5,862	5,784	5,694	5,587	5,459	5,290	0,00343	0,00194	5,641	
Aug	7,553	7,435	7,297	7,135	6,938	6,686	0,01569	0,00280	7,216	
Sep	7,899	7,755	7,589	7,393	7,160	6,849	0,04961	0,00390	7,491	
Oct	9,023	8,834	8,616	8,358	8,051	7,643	0,13001	0,00540	8,487	
Nov	11,554	11,323	11,056	10,740	10,360	9,865	0,09762	0,00488	10,898	
Dec	12,169	11,932	11,659	11,336	10,953	10,430	0,08185	0,00459	11,498	

Framreknaðir vindhraðar með power hæðaferli

	Tilvik 1							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U(55)
Jan	9,665	9,460	9,233	8,977	8,680	8,320	0,153	9,105
Feb	8,917	8,794	8,657	8,501	8,320	8,099	0,098	8,579
Mar	9,298	9,155	8,996	8,816	8,605	8,349	0,110	8,906
Apr	8,006	7,899	7,780	7,643	7,482	7,284	0,096	7,712
May	7,964	7,830	7,679	7,507	7,305	7,056	0,123	7,593
Jun	6,082	5,982	5,871	5,745	5,597	5,417	0,118	5,808
Jul	6,004	5,908	5,800	5,678	5,534	5,358	0,116	5,739
Aug	7,686	7,550	7,398	7,222	7,016	6,761	0,131	7,310
Sep	7,308	7,190	7,059	6,912	6,744	6,542	0,113	6,986
Oct	8,199	8,049	7,883	7,696	7,479	7,218	0,130	7,790
Nov	11,476	11,242	10,979	10,678	10,324	9,889	0,152	10,829
Dec	12,180	11,928	11,645	11,320	10,937	10,464	0,155	11,483

	Tilvik 2							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U(55)
Jan	9,809	9,605	9,377	9,117	8,813	8,427	0,154	9,247
Feb	9,942	9,747	9,527	9,276	8,979	8,610	0,147	9,402
Mar	10,010	9,821	9,608	9,364	9,077	8,719	0,141	9,486
Apr	8,385	8,251	8,100	7,926	7,720	7,464	0,119	8,013
May	7,682	7,566	7,437	7,288	7,113	6,894	0,110	7,363
Jun	5,883	5,811	5,729	5,635	5,524	5,382	0,091	5,682
Jul	5,795	5,713	5,621	5,516	5,391	5,235	0,104	5,569
Aug	7,395	7,276	7,141	6,986	6,803	6,573	0,120	7,064
Sep	7,848	7,692	7,516	7,317	7,083	6,796	0,147	7,417
Oct	9,005	8,790	8,551	8,278	7,960	7,570	0,177	8,415
Nov	11,542	11,315	11,060	10,768	10,422	9,994	0,147	10,914
Dec	12,069	11,819	11,538	11,215	10,834	10,364	0,155	11,377

	Tilvik 3							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U(55)
Jan	9,769	9,568	9,343	9,086	8,767	8,420	0,152	9,215
Feb	10,026	9,827	9,604	9,347	9,041	8,673	0,148	9,476
Mar	10,024	9,833	9,619	9,373	9,079	8,728	0,141	9,496
Apr	8,444	8,305	8,149	7,969	7,754	7,492	0,122	8,059
May	7,747	7,626	7,490	7,335	7,149	6,926	0,114	7,413
Jun	5,908	5,833	5,749	5,653	5,535	5,397	0,092	5,701
Jul	5,820	5,736	5,641	5,533	5,404	5,248	0,106	5,587
Aug	7,429	7,307	7,170	7,011	6,820	6,591	0,122	7,091
Sep	7,887	7,727	7,548	7,345	7,105	6,814	0,149	7,447
Oct	9,036	8,819	8,576	8,300	7,974	7,586	0,179	8,438
Nov	11,649	11,413	11,148	10,843	10,481	10,042	0,151	10,996
Dec	12,163	11,906	11,618	11,286	10,895	10,415	0,158	11,452

	Tilvik 4							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U55
Jan	10,026	9,786	9,519	9,218	8,870	8,427	0,177	9,369
Feb	11,066	10,690	10,274	9,807	9,268	8,610	0,256	10,041
Mar	10,766	10,457	10,113	9,725	9,276	8,719	0,215	9,919
Apr	8,827	8,623	8,396	8,138	7,836	7,464	0,171	8,267
May	7,575	7,476	7,365	7,237	7,088	6,894	0,096	7,301
Jun	5,756	5,704	5,645	5,577	5,497	5,382	0,068	5,611
Jul	5,744	5,670	5,587	5,492	5,381	5,235	0,094	5,540
Aug	7,336	7,225	7,101	6,959	6,790	6,573	0,112	7,030
Sep	8,510	8,248	7,959	7,634	7,260	6,796	0,229	7,797
Oct	10,032	9,650	9,229	8,759	8,220	7,570	0,287	8,994
Nov	11,545	11,317	11,062	10,769	10,424	9,994	0,147	10,916
Dec	12,082	11,829	11,545	11,220	10,836	10,364	0,156	11,383

	Tilvik5							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U55
Jan	9,876	9,654	9,406	9,126	8,767	8,406	0,166	9,266
Feb	10,499	10,201	9,869	9,494	9,041	8,529	0,213	9,682
Mar	10,348	10,090	9,803	9,477	9,079	8,635	0,185	9,640
Apr	8,643	8,463	8,260	8,030	7,754	7,427	0,155	8,145
May	7,726	7,610	7,480	7,332	7,149	6,944	0,109	7,406
Jun	5,859	5,796	5,725	5,644	5,535	5,428	0,079	5,685
Jul	5,809	5,728	5,637	5,533	5,404	5,262	0,101	5,585
Aug	7,419	7,299	7,165	7,011	6,820	6,603	0,119	7,088
Sep	8,170	7,952	7,710	7,437	7,105	6,736	0,198	7,574
Oct	9,467	9,157	8,815	8,430	7,974	7,453	0,244	8,623
Nov	11,697	11,451	11,175	10,860	10,481	10,035	0,157	11,018
Dec	12,207	11,941	11,641	11,300	10,895	10,406	0,163	11,471

	Tilvik 6							
	80m	70m	60m	50m	40m	30m	Veldis	U55
Jan	9,826	9,609	9,368	9,097	8,767	8,427	0,158	9,233
Feb	10,114	9,894	9,649	9,371	9,041	8,610	0,163	9,510
Mar	10,105	9,895	9,661	9,396	9,079	8,719	0,151	9,529
Apr	8,542	8,381	8,201	7,996	7,754	7,464	0,138	8,099
May	7,850	7,706	7,545	7,363	7,149	6,894	0,133	7,454
Jun	5,956	5,870	5,774	5,664	5,535	5,382	0,103	5,719
Jul	5,869	5,773	5,667	5,546	5,404	5,235	0,117	5,607
Aug	7,493	7,356	7,203	7,028	6,820	6,573	0,134	7,116
Sep	7,981	7,800	7,599	7,372	7,105	6,796	0,164	7,486
Oct	9,127	8,888	8,623	8,324	7,974	7,570	0,191	8,474
Nov	11,833	11,555	11,246	10,896	10,481	9,994	0,173	11,071
Dec	12,300	12,012	11,690	11,325	10,895	10,364	0,174	11,508

Tafla 34. Orkureikningar fyrir öll tilvik með log

Mánuður	Tilvik																	
	1			2			3			4			5			6		
	W	P	Pw															
	W	kW	MWh															
Jan	702963	351	262	736368	368	274	728631	364	271	765778	383	285	740917	370	276	732910	366	273
Feb	588034	294	198	773898	387	260	792317	396	266	942668	471	317	845124	423	284	801003	401	269
Mar	657871	329	245	794954	397	296	797471	399	297	908858	454	338	834303	417	310	805687	403	300
Apr	427080	214	154	479157	240	172	487457	244	175	526182	263	189	503229	252	181	494659	247	178
May	407692	204	152	371679	186	138	379303	190	141	362443	181	135	378306	189	141	385710	193	143
Jun	182462	91	66	170843	85	62	172562	86	62	164518	82	59	171068	86	62	174202	87	63
Jul	176036	88	65	160808	80	60	162416	81	60	158308	79	59	162242	81	60	164122	82	61
Aug	363785	182	135	328210	164	122	331989	166	123	323563	162	120	331638	166	123	335513	168	125
Sep	317457	159	114	379918	190	137	384547	192	138	441359	221	159	404560	202	146	390620	195	141
Oct	440171	220	164	554852	277	206	559514	280	208	677565	339	252	597024	299	222	566606	283	211
Nov	1182490	591	426	1210722	605	436	1238048	619	446	1211221	606	436	1245494	623	448	1263726	632	455
Dec	1409944	705	524	1371256	686	510	1398739	699	520	1373427	687	511	1405528	703	523	1419173	710	528
Árið	6855985	3428	2504	7332666	3666	2673	7432993	3716	2709	7855890	3928	2860	7619433	3810	2776	7533931	3767	2746

Tafla 35. Orkureikningar fyrir öll tilvik með log

Tilvik

Mánuður	1				2				3				4				5				6	
	W	P	Pw	W	P	Pw																
	W	kW	MWh	W	kW	MWh																
Jan	651025	326	242	679035	340	253	682890	341	254	732076	366	272	693280	347	258	689614	345	257				
Feb	562803	281	189	727683	364	245	756132	378	254	885288	443	297	799740	400	269	764185	382	257				
Mar	626687	313	233	756497	378	281	769462	385	286	864784	432	322	801382	401	298	781331	391	291				
Apr	412301	206	148	468386	234	169	481313	241	173	509371	255	183	495943	248	179	490275	245	176				
May	387654	194	144	370620	185	138	382382	191	142	356297	178	133	381996	191	142	389604	195	145				
Jun	173472	87	62	158180	79	57	161198	81	58	162852	81	59	160029	80	58	163115	82	59				
Jul	167839	84	62	161893	81	60	165046	83	61	155666	78	58	165002	83	61	167127	84	62				
Aug	346234	173	129	336787	168	125	344360	172	128	318276	159	118	345008	173	128	349931	175	130				
Sep	299536	150	108	373272	187	134	384314	192	138	415555	208	150	403039	202	145	391482	196	141				
Oct	413113	207	154	540634	270	201	558321	279	208	625722	313	233	589372	295	219	569318	285	212				
Nov	1112657	556	401	1128302	564	406	1173341	587	422	1182817	591	426	1186425	593	427	1205405	603	434				
Dec	1328851	664	494	1343957	672	500	1389233	695	517	1339502	670	498	1402039	701	522	1415477	708	527				
Árið	6482171	3241	2367	7045246	3523	2569	7247993	3624	2643	7548207	3774	2749	7423255	3712	2706	7376862	3688	2690				

$$D := 44\text{m} \quad A := \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \omega_{\min} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{16}{60} \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad \omega_{\max} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{34.5}{60} \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad V := 7.376 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\min} := \omega_{\min} \cdot \frac{D}{2} \quad v_{\max} := \omega_{\max} \cdot \frac{D}{2} \quad \lambda_{\min} := \frac{v_{\min}}{V} \quad \lambda_{\max} := \frac{v_{\max}}{V}$$

$$\lambda_{\min} = 4.997$$

$$\lambda_{\max} = 10.776$$

White 6th ed. Gefur C_p gildi uppá 0.49 passar við gefinn gildi frá famleiðanda.

$$C_p := 0.49 \quad \rho := 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad W := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad P := W \cdot C_p$$

$$P = 183.13 \text{kW}$$

$$t := 744 \text{hr}$$

$$P \cdot t = 136.249 \text{MW} \cdot \text{hr}$$

$$b := P \cdot t \cdot 2 \quad \text{bla} := \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2} \\ b = 272.498 \text{MW} \cdot \text{hr}$$

$$\text{bla} = 7.887$$

$$P_d := 0.5 A \cdot \rho \cdot V^3$$

$$P_d = 373.735 \text{kW}$$