

# *Vindorkuver*

Viðauki 03 af 92 við skýrslu Orkustofnunar OS-2015/04

*Virkjunarkostir til umfjöllunar í 3. áfanga rammaáætlunar*



## *Vindorkuver*

Viðauki 03 af 92 við skýrslu Orkustofnunar OS-2015/04

*Virkjunarkostir til umfjöllunar í 3. áfanga rammaáætlunar*





## EFNISYFIRLIT

1	Vindorkuver.....	6
2	Nýting vindorku .....	6
3	Nýting vindorku í Evrópu.....	7
4	Nýting vindorku á Íslandi.....	10
5	Mat á vindafari á Íslandi.....	12
6	Vindorkuver á landi.....	16
7	Skipulag vindorkugarða.....	16
8	Gróf staðsetning á vindmyllum .....	17
9	Nýjasta tækni.....	22
10	Nýting og rekstur.....	23
11	Hávaðamengun .....	23
12	Framleiðendur .....	24
13	Nauðsynlegar rannsóknir.....	24
14	Eiginleikar vindorkuvera.....	24
15	Heimildir .....	25

Mynd 3-1: Árleg viðbót við uppsett afl [GW] til nýtingar vindorku í Evrópusambandinu frá 2000 til 2013.....	7
Mynd 3-2: Skipting uppsetts afls í vindorku á landi (blátt) og hafi (rautt) í Evrópusambandinu frá 2000 til 2013.....	8
Mynd 4-1: Mynd af vef Landsvirkjunar af vindmyllu á Hafinu.....	11
Mynd 4-2: Mynd af vef Landsvirkjunar þann 19. Mars 2014 kl. 15:50.....	11
Mynd 4-3: Vindmyllur í Þykkvabæ.....	12
Mynd 5-1: Opin hafsvæði, firðir og vötn eru með lágt yfirborðshrýfi (0,0002) .....	13
Mynd 5-2: Opið, fremur flatt landslag og fátt sem brýtur eða breytir vindi, yfirborðshrýfi ~0,03 m. ..	14
Mynd 5-3: Fremur opið landslag, flatlendi eða aflíðandi hæðir, en tré, runnar og byggingar brjóta og breyta vindi, yfirborðshrýfi ~0,10 m. ....	14
Mynd 5-4: Kjarrlendi, garðar og landbúnaðarsvæði með mörgum hindrunum fyrir vind; hér telst yfirborðshrýfi ~0,5 m.“.....	15
Mynd 5-5: Vindatlas Veðurstofunnar (vindatlas.vedur.is. 2014).....	15
Mynd 6-1: Shepherds Flat Wind Farm Oregon (shepherdsflat.com). ....	16
Mynd 8-1: Þumalfingursregla við grófa staðsetningu vindmylla í vindorkuveri .....	18
Mynd 8-2: Samanburður á vindmyllum á Hafinu og Hallgrímskirkju (ruv.is. 2012). ....	19
Mynd 8-3: Önnur af tveimur 900 kW vindmyllum Landsvirkjunar.....	20
Mynd 8-4: Horft í átt að vindmyllum Landsvirkjunar úr 7 km fjarlægð.....	21
Mynd 8-5: 1600 tonna hreyfanlegur krani (Avezaa.2014).....	21
Mynd 8-6: Flutningur á blaði fyrir stærstu vindmyllu Siemens árið 2012 (þvermál snúningsflatar 154m (Siemens, 2012).....	22
Mynd 10-1: Kort sem sýnir meðal vindhraða í 80 m hæð (Vaisala, 2014). ....	23
Tafla 3-1: Uppsett afl í nýtingu vindorku í ríkjum Evrópusambandsins árin 2012 og 2013.....	9
Tafla 3-2: Uppsett afl í nýtingu vindorku hjá örum ríkjum í Evrópu árin 2012 og 2013.....	10
Tafla 5-1: Nokkrar yfirborðsgerðir og dæmigert yfirborðshrýfi .....	13

# 1 VINDORKUVER

Vindorka hefur til þessa ekki verið virkjuð í stórum stíl á Íslandi, en tækninni hefur fleygt mjög fram á síðari árum. Nýting vindorku í nágrannalöndum hefur farið ört vaxandi og þykir Orkustofnun tímabært að litið verði til nýtingar á þessari tækni til raforkuframleiðslu á Íslandi.

Í þessum kafla er fjallað um almennar grundvallaupplýsingar um vindorkuver. Þá verður einnig farið yfir hvaða stærðir það eru sem þyrftu að liggja til grundvallar virkjunarkostum á sviði vindorku, komi til þess að hægt verði að leggja slíka valkosti fyrir verkefnisstjórn rammaáætlunar. Gera má ráð fyrir að vindorkuver verði æ fýsilegri kostur, til lengri tíma litið, einnig hér á landi, þó hann komi ekki til umfjöllunar verkefnastjórnar að þessu sinni, vegna skorts á lagaheimild, að mati Orkustofnunar. Engu að síður er það skoðun Orkustofnunar, að rétt sé að fjalla um vindorkuver, enda sé engin lagaleg hindrun í vegi fyrir því að vindorkuver séu reist og rekin í kjölfar viðeigandi stjórnarsýslulegrar umfjöllunar, þrátt fyrir það að þau fari ekki í gegnum ferli rammaáætlunar.

## 2 NÝTING VINDORKU

Öldum saman hefur maðurinn beislað vindorkuna til þess meðal annars að sigla seglum þöndum eða mala korn, en það eru ekki nema nokkrir áratugir síðan farið var að nýta vindinn til að framleiða raforku. Á síðustu árum hefur tækninni fleygt fram á þessu sviði og vindmyllurnar verða sífellt stærri og öflugri og svara kalli eftir framleiðslu vistvænnar orku. Vindmyllum til raforkuframleiðslu svipar mjög til hefðbundinna vindmylla. Þær eru að jafnaði með þrjú blöð sem snúast um láréttan ás framan á turni úr stáli.

Flestar vindtúrbínur byrja að framleiða raforku við vindhraða upp á 3-4 metra á sekúndu og ná hámarks framleiðslu við 13 til 15 m/s. Hins vegar verður að stöðva framleiðsluna þegar vindhraðinn er kominn upp í u.þ.b. 25 m/s. Við góðar aðstæður er meðal nýting á vindmyllu 35%, þar sem vindhraði er mjög breytilegur. Nýtingarhlutfallið miðar við fræðilega hámarks nýtingu á vindmyllunni sem samsvarar því að vindur væri ávallt mesti vindur sem vindmyllan ræður við. Þeim mun stærri sem vindmyllurnar eru þeim mun aflmeiri eru þær. Stærstu vindmyllur í dag eru á turnum sem eru yfir hundrað metra háir og með spaða sem fara um snúningsflöt sem er yfir 100 metrar í þvermál. Þessar risavöxnu vindmyllur eru 5 til 7 MW og geta því, miðað við 35% nýtingu, framleitt 15 - 21 GWh/a.

Vindorkan eykst í réttu hlutfalli við vindhraðann í þriðja veldi og því skiptir vindstyrkurinn miklu máli. Hressilegar rokur geta gefið mikið af sér svo framarlega sem þær verða ekki meiri en vindmyllan ræður við. Nýjustu gerðir er hægt að fá með sérstökum stjórnbúnaði sem snýr spöðunum og keyrir vinnsluna niður fyrir vindhraða frá 25 m/s til 34 m/s. Þetta er mikill kostur, ekki aðeins þar sem það eykur nýtingu á túrbínunum, heldur einnig þar sem mjúk niðurkeyrsla á framleiðslunni er betri fyrir raforkukerfið í heild. Ef allt afl vindmyllunnar dettur út í einu, getur það valdið spennusveiflum, sérstaklega í veiku kerfi, sem æskilegt er að eigi sér ekki stað. Einnig er hægt að fá afísingarbúnað á mylluspaðana en slíkur auka búnaður tekur orku frá túrbínunni og dregur því úr framleiðni hennar á meðan á afísingu stendur. Til þess að stýra afísingunni eru veðurstöðvar á sjálfum túrbínunum sem virkja afísingu við viss veðurskilyrði.

Þar sem ekki er hægt að stýra raforkuframleiðslu vindorkunnar er ekki hægt að reka raforkukerfi sem byggir eingöngu á vindorkuframleiðslu. Samhliða vindorku er algerlega nauðsynlegt að raforkukerfi bjóði upp á framleiðslu sem hægt er að stýra til þess að heildarframleiðslan mæti þörfum á hverjum tíma.

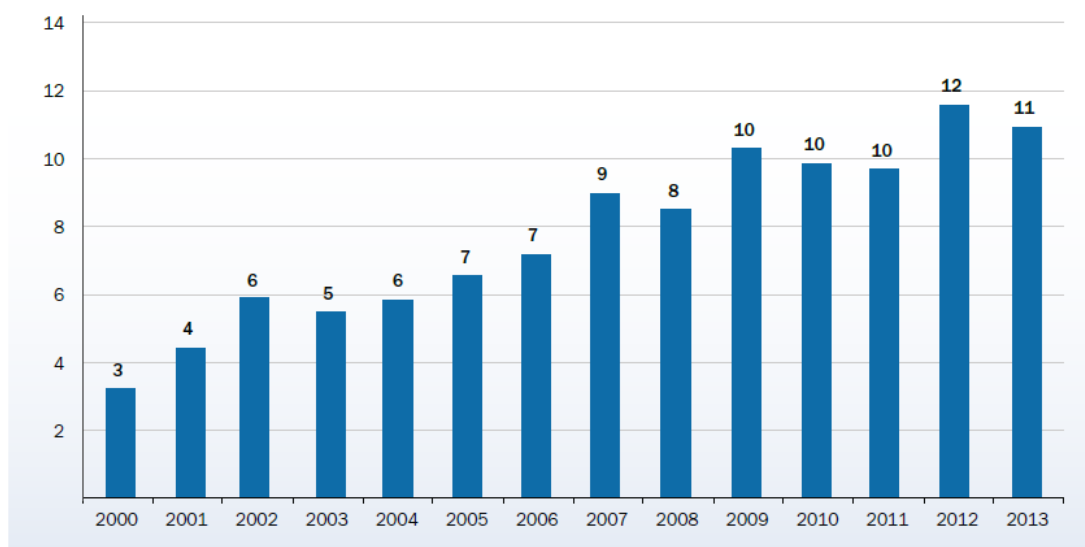
Vindorka á Íslandi hentar vel með vatnsaflsframleiðslu þar sem þeirri framleiðslu er auðvelt að stýra og vindur er mestur á veturna þegar vatnsstaðan í lónum er lág. Hins vegar eru takmörk fyrir því hversu mikla vindorku er hægt að nýta með vatnsaflinu auk þess sem mikil vindorkuframleiðsla eykur flækjustig í því að stilla saman framleiðslu og notkun.

### 3 NÝTING VINDORKU Í EVRÓPU

Í heiminum í dag er mestur vöxtur á nýtingu endurnýjanlegrar orku í formi vindorku. Þó varð ekki eins mikill vöxtur í þessum geira á árinu 2013 í Evrópu eins og árinu 2012. Árið 2013 var bætt við 11.159 MW af uppsettu afl í formi vindorku en það var 8% prósentum minna en árið 2012 skv. tölfræðiupplýsingum frá *European statistics*. Samkvæmt sömu heimild var heildar uppsett afl vindorku í Evrópu 117,3 GW.

Uppsett afl í vindorku hefur farið stigvaxandi á undanföllum árum eins og sjá má á mynd 3-1.

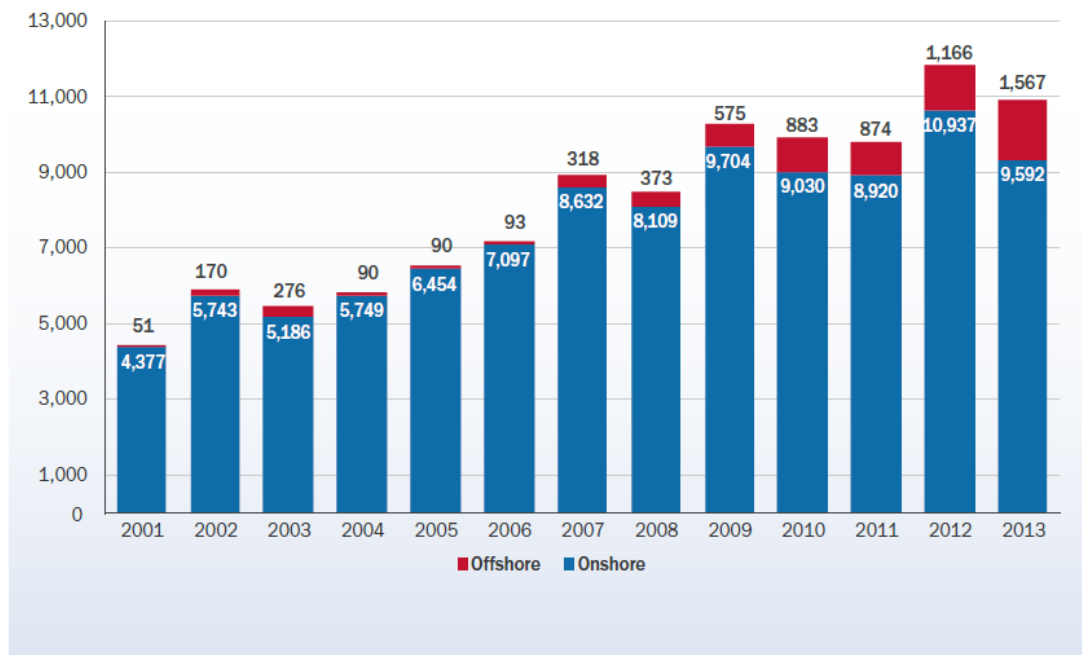
FIGURE 3.1: ANNUAL WIND POWER INSTALLATIONS IN EU (GW)



Mynd 3-1: Árleg viðbót við uppsett afl [GW] til nýtingar vindorku í Evrópusambandinu frá 2000 til 2013.

Vindmyllugarðar á hafi úti eru vaxandi hluti þess afls sem sett er upp árlega eins og sjá má á meðfylgjandi grafi.

FIGURE 3.3: ANNUAL ONSHORE AND OFFSHORE INSTALLATIONS (MW)



Mynd 3-2: Skipting uppsetts afls í vindorku á landi (blátt) og hafi (rautt) í Evrópusambandinu frá 2000 til 2013.

Þau lönd sem eru stórtækust í uppsetningu á vindorkuverum eru Þýskaland, Bretland, Ítalía og Spánn. Af Norðurlöndunum hafa Svíar sett upp mest afl í formi vindorkuvera, síðan Danir en Íslendingar reka lestina.

Ástæða þess að reynt er að virkja vindorku á hafi er að þar er vindhraðinn almennt meiri en á landi. Vindorkuver á hafi eru hins vegar umtalsvert dýrari valkostur en vindorkuver á landi. Á Íslandi eru kjöraðstæður fyrir vindorkuver þar sem hér er mikill vindur og nóg af opnum landsvæðum.



	Installed 2012	End 2012	Installed 2013	End 2013
<b>EU Capacity (MW)</b>				
Austria	296	1,377	308	1,684
Belgium	297	1,375	276	1,651
Bulgaria	158	674	7.1	681
Croatia	48	180	122	302
Cyprus	13	147	0	147
Czech Republic	44	260	9	269
Denmark	220	4,162	657	4,772
Estonia	86	269	11	280
Finland	89	288	162	448
France	814	7,623	631	8,254
Germany	2,297	30,989	3,238	33,730
Greece	117	1,749	116	1,865
Hungary*	0	329	0	329
Ireland	121	1,749	288	2,037
Italy	1,239	8,118	444	8,551
Latvia	12	60	2	62
Lithuania	60	263	16	279
Luxembourg	14	58	0	58
Malta	0	0	0	0
Netherlands	119	2,391	303	2,693
Poland	880	2,496	894	3,390
Portugal	155	4,529	196	4,724
Romania	923	1,905	695	2,599
Slovakia	0	3	0	3
Slovenia	0	0	2	2
Spain	1,110	22,784	175	22,959
Sweden	846	3,582	724	4,470
United Kingdom	2,064	8,649	1,883	10,531
<b>Total EU-28</b>	<b>12,102</b>	<b>106,454</b>	<b>11,159</b>	<b>117,289</b>
<b>Total EU-15</b>	<b>9,879</b>	<b>99,868</b>	<b>9,402</b>	<b>108,946</b>
<b>Total EU-13</b>	<b>2,224</b>	<b>6,586</b>	<b>1,757</b>	<b>8,343</b>

Tafla 3-1: Uppsett afl í nýtingu vindorku í ríkjum Evrópusambandsins árin 2012 og 2013.

	Installed 2012	End 2012	Installed 2013	End 2013
<b>Candidate Countries (MW)</b>				
FYROM**	0	0	0	0
Serbia	0	0	0	0
Turkey	506	2,312	646	2,956
<b>Total</b>	<b>506</b>	<b>2,312</b>	<b>646</b>	<b>2,956</b>
<b>EFTA (MW)</b>				
Iceland	0	0	1,8	1,8
Liechtenstein	0	0	0	0
Norway	166	703	110	768
Switzerland	4	50	13	60
<b>Total</b>	<b>170</b>	<b>753</b>	<b>125</b>	<b>830</b>
<b>Other (MW)</b>				
Belarus	0	3	0	3
Faroe Islands	2	2	5	7
Ukraine	125	276	95	371
Russia*	0	15	0	15
<b>Total</b>	<b>127</b>	<b>297</b>	<b>100</b>	<b>397</b>
<b>Total Europe</b>	<b>12,906</b>	<b>109,816</b>	<b>120,030</b>	<b>121,474</b>

Tafla 3-2: Uppsett afl í nýtingu vindorku hjá örum ríkjum í Evrópu árin 2012 og 2013.

## 4 NÝTING VINDORKU Á ÍSLANDI

Niðurstöður verkefnisskýrslu Egils Skúlasonar, *Optimization and profitability of Hydro Power combined with Wind Power*, benda til að samrekstur á vindafla og vatnsafla hafi jákvæð samlegðaráhrif á Íslandi. Vindorka er mest á veturna þegar lágt getur verið í lönunum en er minni á sumrin þegar vatnsrennsli er mest. Hámarks orkuvinnslugeta vindafls er því á veturna en vatnsafls á sumrin.

Einnig má spara vatn í uppistöðulönunum þegar vindafls nýtur við og bæta þannig heildar nýtingu á framleiðslugetu raforku á Íslandi. Í verkefni Egils eru slík samlegðaráhrif könnuð fyrir samkeyrslu á stækkun vatnsaflsvirkjunar í Mjólka í Arnarfirði á Vestfjörðum og vindmylla sem komið yrði fyrir á Þróskuldum.

Veðurstofa Íslands hefur unnið skýrslu sem gefur skýrar vísbendingar um hvar helst er hægt að beisla vind til raforkuframleiðslu á landinu. Þar má sjá að víða um land eru aðstæður góðar og má því vel reikna með að vindmyllum eigi eftir að fjölga hratt á Íslandi eins og í öðrum löndum.

Í dag eru starfræktar vindmyllur á þremur stöðum á landinu. Í lok janúar 2013 voru gangsettar tvær 900 kW vindmyllur hjá Landsvirkjun á svæði sem kallað hefur verið Hafið og er á sléttlandinu fyrir ofan Búrfellsvirkjun, milli Búrfells og Sultartanga. Rekstur þeirra gengur vonum frammar og hefur nýting þeirra verið eins og best verður á kosið. Á mynd 4-1 má sjá aðra af vindmyllunum á Hafinu.

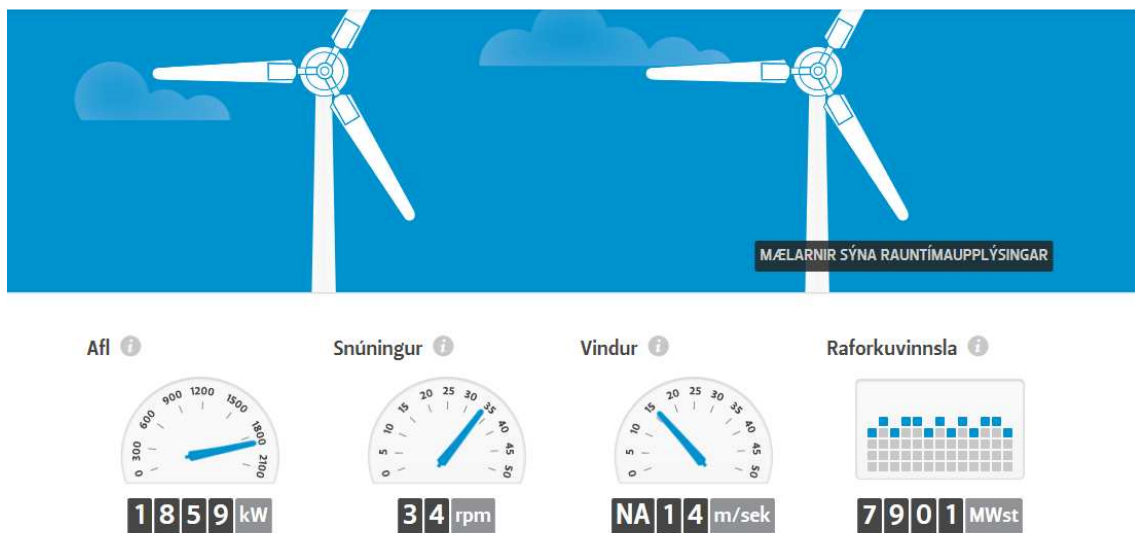


Mynd 4-1: Mynd af vef Landsvirkjunar af vindmyllu á Hafinu.

Hægt var að fylgjast með framleiðslu þeirra á vef Landsvirkjunar á síðunni:

<http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirothroun/throunarverkefni/vindmyllur/rauntimaupplýsingar>

Miðvikudaginn 19. mars 2014 kl. 15:50 var framleiðsla vindorkuversins á Búrfelli ríflega 100%, eins og sjá má á meðfylgjandi mynd en uppsett afl þeirra er 1800 kW en framleiðslan þegar myndin var tekin af vefnum var 1859 kW.



Mynd 4-2: Mynd af vef Landsvirkjunar þann 19. Mars 2014 kl. 15:50.

Bóndinn á bænum Belgsholti í Melasveit setti upp vindmyllu í júlí 2011. Hún getur framleitt inn á dreifikerfið en er aðallega hugsuð til notkunar heimavið. Þann 29. nóvember 2011 varð mikið tjón er túrbína vindmyllunnar brotnaði og losnaði af mastriinu. Haustið 2013 var vindmyllan í Belgsholti aftur komin í gagnið á lægra mastri með snúningshluta sem hefur verið endurbættur og er sterkari en sá fyrri. Vindmyllan hefur síðan þá framleitt rafmagn inn á dreifikerfið, með allnokkrum hléum.

Hægt er að kynna sér reksturinn í Belgsholti á vefsíðunni:

<http://www.belgsholt.is>

Sumarið 2014 voru síðan reistar tvær vindmyllur í Þykkvabæ, þar var um að ræða Vestas myllur af gerðinni V44 með 53 metra há möstur, þvermál spaða 44 metra og afl 600 kW. Uppsett afl á myllunum sem sjá má á mynd 4-3 er því samtals 1,2 MW og hefur reksturinn gengið vel.



Mynd 4-3: Vindmyllur í Þykkvabæ.

## 5 MAT Á VINDAFARI Á ÍSLANDI

Á heimasíðu Veðurstofunnar er að finna upplýsingar um vind og nýtingu hans fyrr og nú (<http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/vindorka/> (9.5.2014). Þar segir meðal annars:

*Til að kanna íslensku vindauðlindina þarf að hafa gott mat á vindafari. Vindafar er afar svæðisbundið. Langtíma meðaltal vindhraða í einum hluta hrepps getur verið gerólíkt meðaltali í öðrum hluta hreppsins.*

*Svæðisbundnar breytingar ráðast mest af hæð í landi, en vindur er alla jafna meiri á hálendi en á láglandi og mestur við fjallstinda. Vindur við fjöll er flókinn því fjallgarðar geta skapað skjól í sumum vindáttum en magnað vind í öðrum. Þessi áhrif fara eftir vindhraða og stöðugleika loftsins og eru því mismunandi eftir árstíma.*

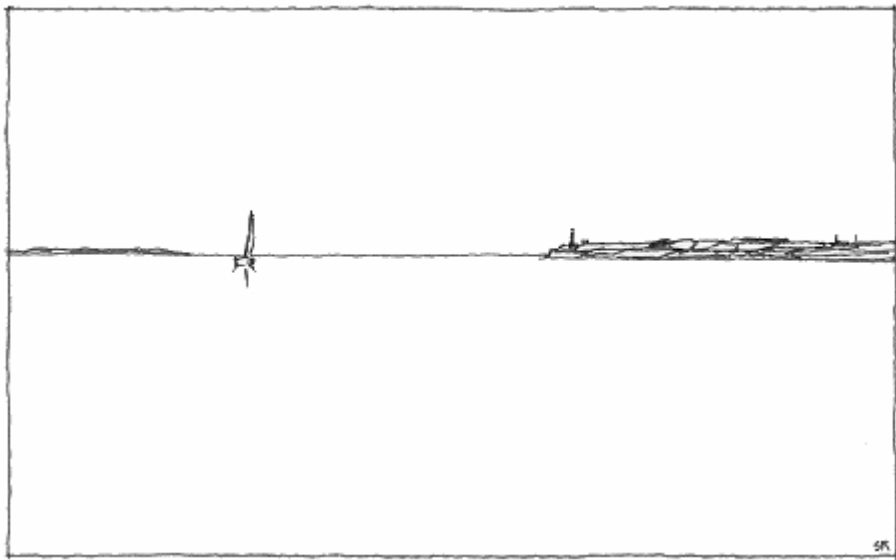
*Yfirborðsgerð ræður líka nokkru um vindhraða. Yfir kjarrlendi eða úfnu hrauni er vindur alla jafna minni en yfir sléttlendi eða vötnum. Þetta er vegna ólíks yfirborðshrýfis, því meira hrýfi því frekar dregur yfirborðið úr vindi (sjá töflu 9.1 og mynd 9.3). Þó vindur á láglandi sé yfirleitt minni en á hálendi er hvasst við ströndina því vindur mætir minni fyrirstöðu yfir sjó en landi.*

Tafla 5-1 og myndirnar sem fylgja á eftir eru fengnar af sömu vefheimild og þar er yfirborðshrýfi skilgreint fyrir mismunandi aðstæður, bæði í töflu og með myndum:

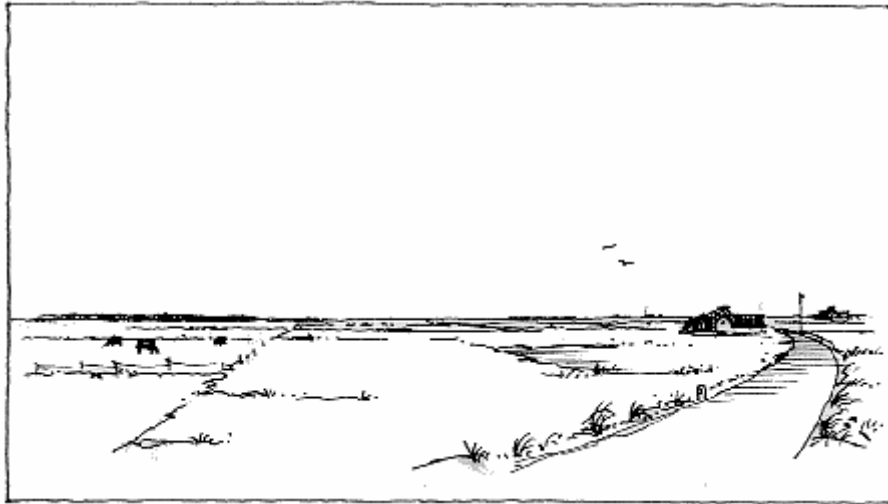
Yfirborðsgerð	Yfirborðshrýfi
Opið hafsvæði	0,0002 m
Leirur, snjór, enginn gróður, engin bygging	0,005 m
Opið flatlendi, graslendi, örfáar byggingar eða tré	0,03 m
Lágvaxinn gróður, fáar byggingar eða tré	0,10 m
Hávaxinn gróður, nokkrar byggingar og/eða tré	0,25 m
Kjarrlendi, garðar, byggingar og/eða tré	0,5 m
Úthverfi eða skóglendi	1,0 m
Borg með háum og lágum byggingum	$\geq 2$ m

*Tafla 5-1: Nokkrar yfirborðsgerðir og dæmigert yfirborðshrýfi.*

Myndirnar eru samkvæmt heimildinni fengnar frá Troen & Petersen, 1989.



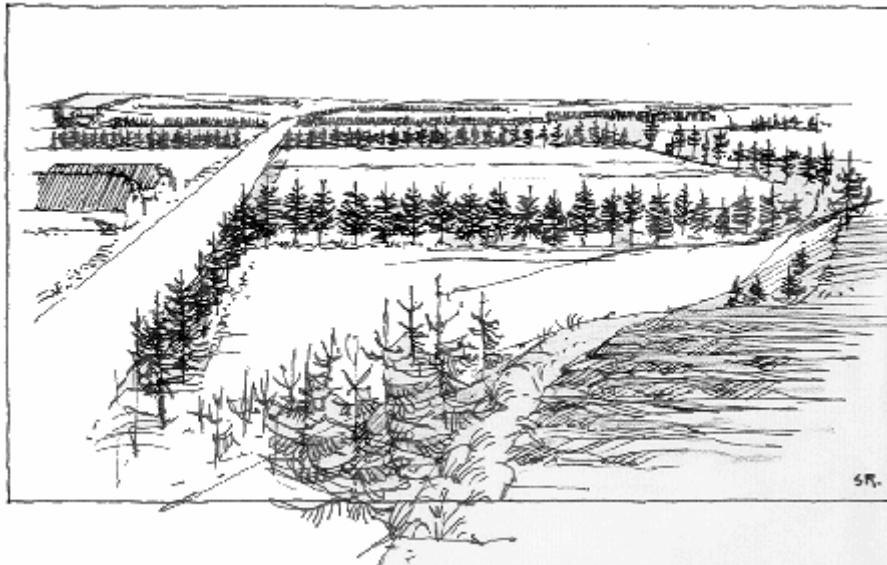
*Mynd 5-1: Opin hafsvæði, firðir og vötn eru með lágt yfirborðshrýfi (0,0002).*



Mynd 5-2: Opið, fremur flatt landslag og fátt sem brýtur eða breytir vindi, yfirborðshryfi ~0,03 m.



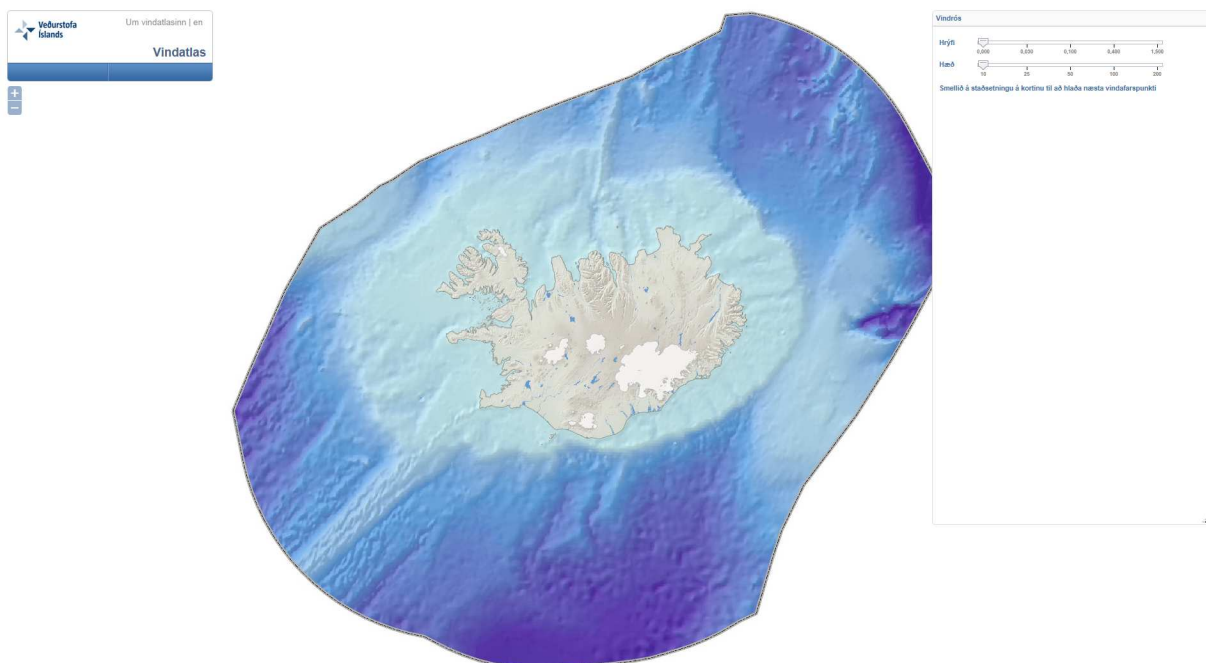
Mynd 5-3: Fremur opið landslag, flatlendi eða aflíðandi hæðir, en tré, runnar og byggingar brjóta og breyta vindi, yfirborðshryfi ~0,10 m.



Mynd 5-4: Kjarrlendi, garðar og landbúnaðarsvæði með mörgum hindrunum fyrir vind; hér telst yfirborðshryfi ~0,5 m.

Á öðrum vef á vegum veðurstofunnar hefur verið opnaður vindatlas (<http://vindatlas.vedur.is/>) sem er verkfæri sem hægt er að nýta sér til að skoða aðstæður til nýtingar vindorku vítt og breytt um landið.

Á síðunni má sjá kort af landinu sem hægt er að skoða nánar með því að stækka upp hluta af kortinu. Þegar þysjað er inn kemur í ljós þéttriðið net af mælipunktum sem hægt er að velja fyrir fyrirmunandi hæð og hryfi. Við val á mælipunkti kemur upp skýrsla með vindrós, grafi sem sýnir tíðni sem fall af vindhraða auk annarra tölulegra upplýsinga



Mynd 5-5: Vindatlas Veðurstofunnar ([vindatlas.vedur.is](http://vindatlas.vedur.is/), 2014).

## 6 VINDORKUVER Á LANDI

Dæmi um útlit vindorkuvera á landi eins og sjá má á mynd 6-1 er af Caithness Shepherds Flat Wind Farm sem er staðsettur í Oregon fylki. Vindorkuverið samanstendur af 338 vindmyllum og framleiðir 845 MW af vindorku sem nægir fyrir 227.000 heimili ([http://shepherdsflat.com/?page\\_id=19](http://shepherdsflat.com/?page_id=19) (29.10.2014)). Þessi vindorkugarður er einn af þeim stærri í heimi. Meðal afl hvernar vindmyllu miðað við uppgefinn fjölda og heildar afl er 2,5 MW.



Mynd 6-1: Shepherds Flat Wind Farm Oregon ([shepherdsflat.com](http://shepherdsflat.com)).

## 7 SKIPULAG VINDORKUGARÐA

Oft er það landeigandi eða skipulagsyfyrirvöld sem hefjast handa við rekstur vindorkuvers. Fyrsta skrefið er ávallt að finna hentugan stað. Staðsetningin krefst undirbúnings og oft endurskoðunar eftir því sem málin eru skoðuð betur. Þeir þættir sem mikilvægast er að skoða eru:

- Verður tenging við flutnings- eða dreifikerfi kostnaðarsöm
- Er líklegt að vindorka sé næg til þess að verkefnið verði ábatasamt
- Er líklegt að leyfisveitingar fyrir uppbyggingunni fáist
- Hvernig er aðgengi að staðnum (vegakerfi)
- Er hægt að tryggja réttindin til nýtingar landsins
- Hámarks uppsett afl
- Mörk svæðisins þar sem vindmyllurnar verða staðsettar
- Skoða vegkerfi, íbúðarhúsnæði, loftlínur, eignarhald ofl.
- Skoða umhverfisþætti
- Ákvarða hvar þarf að taka tillit til hávaða og skuggamyndana
- Ákvarða hvaða staðsetning er viðkvæm út frá sýnileika
- Ákvarða lágmarks bil milli túrbína samkvæmt upplýsingum frá framleiðanda
- Ákvarða takmarkanir vegna fjarskipta ef því er að skipta
- Kanna lög og reglugerðir er málið varða

Nauðsynlegt er að svörin við ofangreindum spurningum séu jákvæð til þess að ástæða sé til þess að þróa hugmyndina áfram.



Ef ætlunin er að reisa vindorkuver sem er yfir 10 MW að stærð verður samkvæmt 3 mgr. 5. gr. raforkulaga að tengja slíka framleiðslu við flutningskerfið beint.

Til þess að hægt sé að meta raforkuframleiðslu á einhverju svæði er æskilegt að framkvæma vindmælingar að lágmarki yfir heilt ár og í þeirri hæð sem ætlunin er að hafa túrbínurnar. Færanlegar vindmælingar á svæðinu til samanburðar við fastan punkt sem mælir vindinn samfellt yfir heilt ár, má síðan nota til að meta nærliggjandi staðsetningar.

Vindmælingar niðri við jörðu gefa vísbendingar um aðstæður en eru yfirleitt ekki fullnægjandi fyrir upplýsingar um vind í 50 til 100 m hæð. Ef langvarandi vindmæling fyrir minni hæð er til staðar, má leiða líkum að vindi í túrbínuhæð með reiknilíkönunum sem geta gefið góðar vísbendingar um það hvort staðurinn sé hentugur.

Að mörgu er að hyggja þegar velja á staðsetningu. Vísbending um góða staðsetningu er að um opið svæði sé að ræða og ef ein vindátt er ríkjandi bætir það mjög nýtingu svæðisins. Ekki má vanmeta hversu mikið dregur úr vindi eftir því sem fjær dregur svæðinu sem er mest opið. Ef velja á vindorkuverinu stað í halla þykir hentugt að hann sé ekki meiri en 17 gráður. Brattari hæðir auka ekki við vind og geta valdið klofningi í loftflæðinu sem gerir aðstæður á svæðinu flóknar og dregur úr nýtingu.

Gróður hefur mikil áhrif á vindinn þannig að lágur kjarrgróður getur dregið umtalsvert úr nýtingu á vindi.

Taka verður tillit til þeirra sem búa í nágrenni við vindorkuver. Ef íbúðarhúsnæði er nálægt getur hávaði og tifandi skuggar valdið óþægindum. Túrbínurnar valda líka truflunum á fjarskiptamerkjum, því er nauðsynlegt að halda vindmyllum í hæfilegri fjarlægð frá fjarskiptamöstrum.

Til þess að hanna nákvæma staðsetningu á vindorkuverum er nauðsynlegt að hafa nákvæm kort með hæðarkvarða upp á að lágmarki 5m og hugbúnað sem getur hermt eftir aðstæðum og nýst til háværkunar á afköstum vindorkuversins með því að velja bestu staðsetningu fyrir möstrin. Þetta verður aðeins gert með því að endurtaka útreikninga fyrir mismunandi staðsetningar.

Við val á staðsetningu á vindorkuverum verður einnig að taka tilliti til sýnileika sem er meiri ef vindmyllum er trónað upp á hæðir.

## 8 GRÓF STAÐSETNING Á VINDMYLLUM

Til þess að hægt sé að ákvarða grófa staðsetningu á vindmyllum er nauðsynlegt að ákveða u.þ.b. hversu stórar túrbínur er ætlunin að nota þar sem uppsett afl breytist mjög eftir því hvaða túrbínur verða fyrir valinu. Best er þó að láta nákvæmt val á túrbínu bíða þar til síðar í ferlinu.

Einnig getur verið gott að setja fyrst upp eina túrbínu og láta nokkra reynslu koma á hana áður en fleiri túrbínum er bætt við.

Við hönnun á vindorkuverum er nauðsynlegt að ákvarða lágmarks bil á milli túrbína í samráði við framleiðendur. Besta staðsetning er mjög háð aðstæðum. Ef túrbínur eru staðsettar nær hver annarri en sem nemur 5 sinnum þvermáli spaða í ríkjandi vindátt er mjög líklegt að kjölsogið á bak við fremstu túrbínurnar valdi töpum í nýtingu á vindi fyrir þær sem standa fyrir aftan. Þar sem ein vindátt er ríkjandi er mælt með því að lengra bil sé á milli vindmylla í ríkjandi vindátt heldur en þvert á þá stefnu.

Flest verkefni af þessu tagi eru fjárhagslega viðkvæmari fyrir háværkun á raforkuframleiðslu heldur en viðbótar kostnaði vegna staðsetningar. Fjármunum til nákvæmrar greiningar á því hvar best er að staðsetja vindmyllurnar er vel varið þar sem hvert prósent í viðbótar framleiðslu getur skapað miklar tekjur.

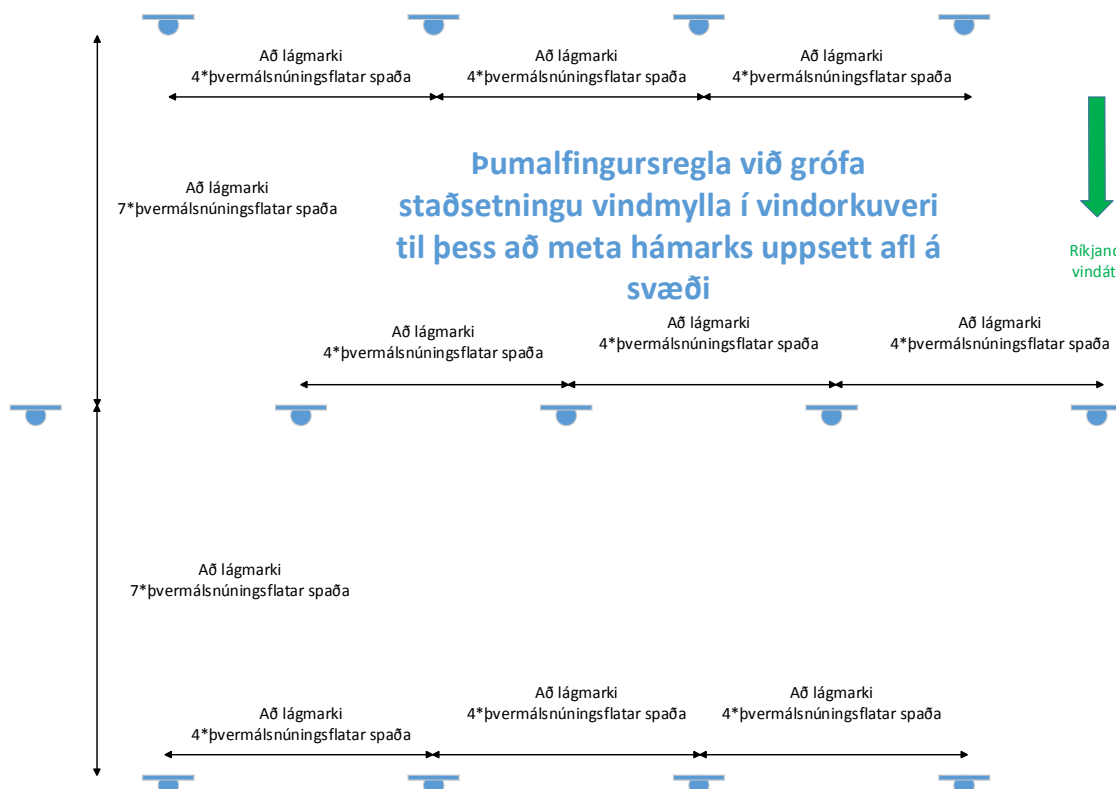
Ef vindmyllum er raðað þétt saman virka þær vindmyllur sem eru í fremstu röð gagnvart ríkjandi vindátt sem skjól fyrir fyrir þær sem eru fyrir aftan. Skjóláhrifin eru ekki einu áhrifin af fremstu vindmyllunum, heldur valda þær einnig ókyrrð eða iðustreymi. Þessi áhrif fjára út eftir því sem fjær dregur vindmyllunum.

Til eru þumalfingursreglur um grófa hönnun vindorkuvera, þar sem miðað er við að fjarlægð milli vindmylla þvert á snúningsflöt spaða sé um fimm til níu sinnum þvermál snúningsflatar spaðanna og þrisvar til fimm sinnum þvermál snúningsflatar spaða samsíða snúningsfletinum. Þessi aðferðafræði nýtist aðeins við mat á mögulegu uppsettu afl á því svæði sem ætlað er fyrir vindorkuver en verður aldrei endanleg hönnun.

Við frumhönnun vindmyllugarða sem hugsanlegt væri að leggja fyrir verkefnisstjórn rammaáætlunar þegar og ef lög standa til þess að mati stofnunarinnar, hefur Orkustofnun ákveðið að fara milliveg og miða að lágmarki við stuðlana sjö og fjóra í ofangreindu samhengi.

Ef miðað er við vindmyllur sambærilegar við þær sem standa á Hafinu fyrir ofan Búrfell þá er þvermál snúningsflatar spaða 44 m á 55 m háum turni, vegalengdir milli mastra yrðu því  $4 \cdot 44 \text{ m} = 176 \text{ m}$  og  $7 \cdot 44 \text{ m} = 308 \text{ m}$ .

Þær vindmyllur sem skoðaðar voru í þessum tilgangi voru af þremur mismunandi stærðum. 900 kW vindmyllur, sambærilegar við þær sem eru nú þegar til staðar á Hafinu fyrir ofan Búrfell, 3 MW með 82 m þvermál spaða á 78 m háum turni og síðan stærstu gerðir af vindmyllum með 135 m háum turni og þvermál snúningsflatar spaða upp á 126 m.



Mynd 8-1: Þumalfingursregla við grófa staðsetningu vindmylla í vindorkuveri.

Til þess að átta sig á stærðinni sem um er að ræða er gott að bera vindmyllurnar saman við þekkta stærð eins og á Hallgrímskirkjuturni sem er 74,5 m á hæð eins og sjá má á mynd 8-2. Hæð mastra vindmylla á Hafinu er 55 m og hvert blað er 22 m á lengd (Landsvirkjun, 2014a). Í hæstu stöðu á spaða er því heildar hæð vindmyllu og spaða 77 m sem er nokkuð herra en Hallgrímskirkjuturn.



Mynd 8-2: Samanburður á vindmyllum á Hafinu og Hallgrímskirkju (ruv.is. 2012).

Eins og sjá má á mynd 8-3 er rútbifreið og manneskjur í vettvangsferð afar smáar í samanburði við aðra af vindmyllunum á Hafinu.



*Mynd 8-3: Önnur af tveimur 900 kW vindmyllum Landsvirkjunar.*

Á mynd 8-4 má sjá vindmyllurnar á Hafinu í um það bil 7 km fjarlægð. Þær sjást greinilega úr fjarskanum en eru ekki afgerandi í landslaginu. Hins vegar má reikna með að vindorkuver með fjölda vindmylla myndi segja til sín, jafnvel í þessari fjarlægð.



*Mynd 8-4: Horft í átt að vindmyllum Landsvirkjunar úr 7 km fjarlægð.*

Stærri gerðin af vindmyllum sem er til skoðunar (3MW) er með turn upp á 78 m sem myndi þá vera 3,5 m hærri en Hallgrímskirkjuturn og blöðin í hæstu stöðu bæta 41 m við þá hæð þar sem þvermál snúningsflatar er 82 m. Hæsti punktur á þeim vindmyllum yrði því í 119 m hæð eða 1,6 sinnum Hallgrímskirkjuturn. Slíkar vindmyllur eru væntanlega nokkuð umfangsmeiri en vindmyllurnar sem sjá má á Mynd 6-1 sem að líkindum eru að meðaltali 2,5 MW. Í byrjun gæti orðið erfitt að útvega þá krana sem nauðsynlegir yrðu til að reisa 3 MW vindmyllur og sinna meiri háttar viðhaldi á þeim.

Fljótlega var stærsta gerð vindmylla með 5 til 7 MW túrbínunum útilokuð sem valkostur að sinni hér á landi, þar sem gríðarlega flókið er að flytja allt sem til þarf til að reisa slíka vindmyllu. 1600 tonna hreyfanlega krana þarf til að reisa mastrið og hífa túrbínuna upp á toppinn. Aðeins eru til tveir slíkir kranar í Evrópu.



*Mynd 8-5: 1600 tonna hreyfanlegur krani (Avezaa.2014).*

Gríðarlegt svigrúm þarf fyrir allar aðgerðir við að flytja kranann sem til þarf og einingarnar sem vindmylla af stærstu gerð er sett saman úr.



Mynd 8-6: Flutningur á blaði fyrir stærstu vindmyllu Siemens árið 2012 (þvermál snúningsflatar 154m (Siemens, 2012).

## 9 NÝJASTA TÆKNI

Nauðsynlegt er að skoða kröfur um spennugæði í tengipunktum við flutningskerfi og til þess að tryggja hámarks spennugæði út á netið þarf að vera með síur fyrir spenninn þaðan sem afhending fer fram. Þetta er ekki staðalbúnaður og er nauðsynlegt að skoða netmála þegar búnaður er valinn til þess að tryggja að spennugæðin séu fullnægjandi.

Margvíslegan aukabúnað er hægt að kaupa með vindmyllunum, eins og tennur á blöðin sem draga úr hávaða, afísingarbúnað og veðurstöðvar til að stýra afísingunni. Slíkur búnaður eykur ekki aðeins öryggi í rekstri á vindmyllunum og eykur framleiðslugetu þeirra, heldur getur hann verið nauðsynlegur þar sem ísklumpar þeytast af blöðunum ef þau fá tækifæri til þess að safna á sig ísingu.

Það hefur sýnt sig í rekstri vindmylla að gírkassinn hefur hæstu bilanatíðnina af þeim búnaði sem er að finna í þeim. Sumar gerðir af vindmyllum eru gírlausar og eykur það rekstraröryggi þeirra umtalsvert.

Einnig er til stýribúnaður sem býr yfir gervigreind þannig að búnaðurinn lærir á aðstæður og endurreiknar vinnslukúrfu fyrir vindmyllurnar til þess að hámarka nýtingu þeirra miðað við rekstraraðstæður.

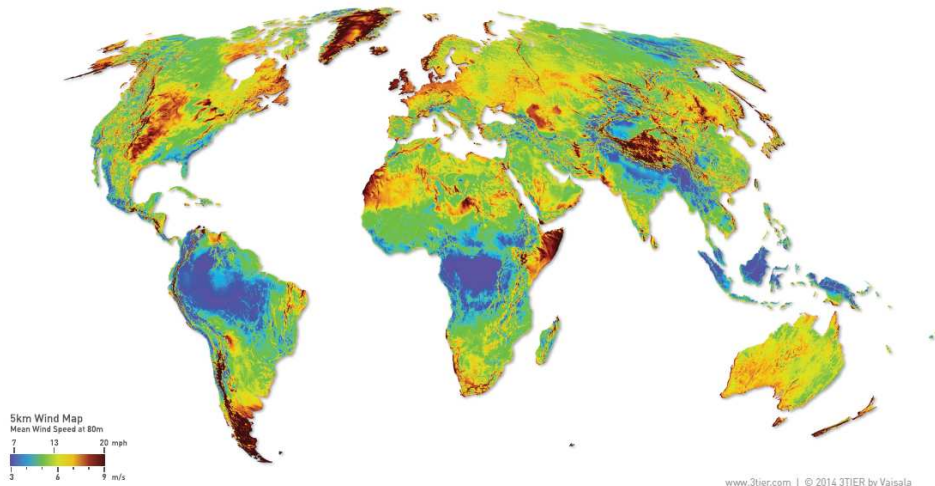
Stýringar sem geta dregið úr framleiðslu túrbína með því að snúa blöðunum þegar vindstyrkur vex, til þess að draga úr álagi á blöðin í stað þess að stöðva framleiðsluna snögglega, auka líka framleiðslugetu vindorkuvera. Það er sömuleiðis hentugra fyrir raforkukerfið sem vindmyllur tengjast að dregið sé úr framleiðslunni en að henni sé ekki hætt snögglega.

Val á þeim aukabúnaði sem fjárfest er í við val á vindmyllum þarf því að skoða gaumgæfilega og meta hvað hentar og hvað er nauðsynlegt miðað við aðstæður hverju sinni.

## 10 NÝTING OG REKSTUR

 Global Mean Wind Speed at 80m

 **3TIER**  
by Vaisala



Mynd 10-1: Kort sem sýnir meðal vindhraða í 80 m hæð (Vaisala, 2014).

Eins og sjá má á korti yfir meðal vindhraða í 80 m hæð, er meðalvindhraði í 80 m hæð á Íslandi með því mesta sem gerist í heiminum. Nýtingarhlutfall vindmylla miðað við hæstu mögulegu framleiðslu er að heimsmeðaltali 28% (Landsvirkjun, 2014b). Vindmyllur Landsvirkjunar sem staðsettar eru á svæði sem kallað er Hafíð, fyrir ofan Búrfellsvirkjun eru samkvæmt sömu heimild með umtalsvert betri nýtingu fyrsta árið eða 42% fyrir fyrsta rekstrarárið. Í þessari skýrslu er farið varlega í það að áætla nýtingu vindorkuvera og er gert ráð fyrir 32% nýtingarhlutfalli á ári.

Flestir sem reka vindorkuver eru með þjónustusamninga um reglubundið viðhald og viðbragðstíma. Reglubundið viðhald á ekki að þurfa að taka nema nokkra tugi klukkustunda á ári og uppitími á að geta verið hér. Vindorkuver eru umtalsvert kostnaðarsamari á hverja orkueiningu heldur en stór vatnsorkuver, en mögulega geta samlegðaráhrif af rekstri vindorku með vatnsafla gert vindorkuna að fýsilegum valkosti. Annar kostur sem telja verður vindorkuverum til tekna umfram vatnsaflsvirkjanir er að hægt er að byggja slík ver upp í þrepum sem elta eftirspurnina en kalla ekki á stóra fjárfestingu í upphafi sem ef til vill er ekki fullnýtt strax.

## 11 HÁVAÐAMENGUN

Hávaði frá vindorkuverum verður vegna hreyfingar spaðanna og frá túrbínunni sjálfri. Þessi hávaði er stöðugur allan sólarhringinn allt árið um kring nema þá sjaldan að það er mjög lítill vindur. Það sem hefur mest áhrif á hávaðann frá vindmyllunum er fjarlægðin og vindafar. Stærð túrbínu og gróður og bakgrunnshávaði frá umferð eða ám getur einnig haft áhrif á hávaða frá vindmyllum. Skipulag á staðsetningu vindorkuvera er einfaldasta og skilvirkasta leiðin til þess að hafa áhrif á hávaðamengun frá þeim.

Það er því nauðsynlegur hluti af hönnun vindorkuvera að gera kort af hljóðmengun frá verinu og merkja þar inn gul, rauð og græn svæði sem sýna mismikil áhrif af hávaða frá vindorkuverunum.

Mörk hljóðstígs við húsvegg íbúðarhúsnæðis á íbúðarsvæði eru samkvæmt upplýsingum á vef Umhverfisstofnunar 55 dB (A).

Ef vindmyllur eru staðsettar nálægt þéttbýli má hugsa sér að setja upp skilyrði um að dregið sé úr framleiðslu á kvöldin og um helgar til þess að draga úr hávaðamengun. Einnig verður að skoða áhrif flóktandi skugga á umhverfið og þá sem dvelja langdvölum í nágrenni við vindmyllur.

## **12 FRAMLEIÐENDUR**

Helstu framleiðendur á stórum vindmyllum í Evrópu í dag eru Enercon, Vestas og Siemens. Tvö fyrrgreindu fyrirtækin eru álíka umsvifamikil og eru með 50% markaðshlutdeild. Stærstur hluti viðskipta er í dag með vindmyllur af stærðinni 3 – 3,5 MW.

## **13 NAUÐSYNLEGAR RANNSÓKNIR**

Áður en hægt er að staðsetja hverja einstaka vindmyllu í landslagi er æskilegt að gera umfangsmiklar og nákvæmar mælingar á vindi á því svæði þar sem fyrirhugað er að setja þær niður. Hefðbundnar mælingar á vindi gefa aðeins vísbendingar um hvar aðstæður eru hentugar og hver ríkjandi vindátt er en eru ekki fullnægjandi til hagkvæmustu hönnunar á vindorkuveri.

Slíkar rannsóknir eru tímafrekar og kostnaðarsamar þar sem sérhæfðan búnað þarf til mælingar á vindi í mikill hæð og til langs tíma til þess að hægt sé að kortleggja aðstæður bæði fyrir mismunandi árstíma, hæð og með tilliti til staðsetningar á svæðinu. Umfang rannsókna ræðst því að nokkru af því, um hve stórt vindorkuver er að ræða.

## **14 EIGINLEIKAR VINDORKUVERA**

Vindorkuver framleiða orku þegar hæfilega mikill vindur blæs sem þarf ekki að vera í neinum tengslum við eftirspurn. Vindorkuver kalla því á samspil með orkugjöfum sem geta stillt af framleiðslu og eftirspurn og má vindorkan ekki vera meiri en sem nemur um þriðjungi af stýranlegri orkuframleiðslu ef vel á að vera.



## 15 HEIMILDIR

- Avezaat. (2014). <http://avezaat.com/hammerhead-cc1200-crawlercrane.php> 9.5.2014.
- Caithness Shepherds Flat. (2014). *Caithness Shepherds Flat Facts*.  
[http://shepherdsflat.com/?page\\_id=19](http://shepherdsflat.com/?page_id=19)
- Egill Skúlason. (2014). *Optimization and profitability of Hydro Power combined with Wind Power*.
- European statistics (2013). *Wind in power*, febrúar 2014.
- Landsvirkjun. (2014a). <http://www.landsvirkjun.is/rannsoknirogthroun/throunarverkefni/vindmyllur>.
- Landsvirkjun. (2014b). *Orka úr frísku lofti, vettvangsferð vegna Búrfellslundar*, 12. júní 2014.
- RÚV. (2012). <http://www.ruv.is/frett/reisa-tvaer-vindmyllur-hja-burfellsvirkjun>.
- Siemens. (2012). <http://www.siemens.com/press/en/feature/2012/energy/2012-07-rotorblade.php#ii155> 9.5.2014.
- Vaisala. (2014).  
[http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier\\_5km\\_global\\_wind\\_speed.pdf](http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tier_5km_global_wind_speed.pdf).
- Veðurstofa Íslands. (2013).  
[http://www.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/skyrslur/2013/2013\\_001\\_Nawri\\_et\\_al.pdf](http://www.vedur.is/media/vedurstofan/utgafa/skyrslur/2013/2013_001_Nawri_et_al.pdf)
- Veðurstofa Íslands. (2014). <http://www.vedur.is/vedur/vedurfar/vindorka>