



Vistferilsgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á Hafinu við Búrfell

Vistferilsgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á Hafinu við Búrfell

Lykilsíða



Skýrsla LV nr: LV-2015-129

Dags: Desember 2015

Fjöldi síðna: 28

Upplag:

Dreifing:

- Birt á vef LV
 Opin
 Takmörkuð til

Titill: Vistferilsgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á Hafinu við Búrfell.

Höfundar/fyrirtæki: Alexandra Kjeld, Gyða M. Ingólfssdóttir og Helga J. Bjarnadóttir, EFLA verkfræðistofa

Verkefnisstjóri: Margrét Arnardóttir

Unnið fyrir: Landsvirkjun

Samvinnuaðilar: _____

Útdráttur: Markmið þessa verkefnis er að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu með vindorku á Hafinu með aðferðafræði vistferilsgreiningar. Byggir greiningin á tveimur 900 kW vindmyllum sem reistar voru í rannsóknarskyni á Hafinu norðan við Búrfell. Metin eru umhverfisáhrif frá vöggum til grafar eða frá framleiðslu, flutningum, reisingu, rekstri á 25 ára líftíma, niðurrifi og förgun. Niðurstöður greiningarinnar sýna að öflun hráefna og framleiðsla vindmyllunnar valda mestu umhverfisáhrifunum í vistferlinum. Framkvæmdir við reisingu vega einnig þungt í mörgum áhrifaflokkum. Draga má úr heildaráhrifunum með endurvinnslu efna í lok líftíma. Auk þess má minnka kolefnissporið með notkun vistvænnar steypu í undirstöður. Samanburður við sambærilega vindorkunýtingu á landi erlendis er jákvæður með tilliti til kolefnisspors og orkuarðsemi. Niðurstöður greiningarinnar nýtast m.a. sem grunnur til aðgerða í undirbúningi framkvæmda og rekstri.

Lykilorð: Vistferilsgreining, vindmyllur, vindorka, kolefnisspor, orkuarðsemi, endurgreiðslutími orku

ISBN nr:

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Samantekt

Markmið þessa verkefnis er að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu tveggja vindmylla á Hafinu með aðferðafræði vistferilsgreiningar. Byggir greiningin á tveimur 900 kW vindmyllum sem reistar voru í rannsóknarskyni á Hafinu norðan við Búrfell. Vistferilsgreining (e. *Life cycle assessment, LCA*) er aðferðafræði til þess að meta umhverfisáhrif vöru eða þjónustu frá vögg til grafar. Vistferilsgreiningin er unnin í samræmi við alþjóðlegu staðlana ISO 14040 og ISO 14044 og því má nýta niðurstöður til samanburðar við sambærilega vöru eða þjónustu. Einnig er stuðst er við leiðbeiningar um framkvæmd vistferilsgreininga fyrir gerð umhverfisýfirlýsinga.

Umhverfisáhrifin sem metin eru skiptast í 10 megin flokka umhverfisáhrifa: gróðurhúsaáhrif, eyðing ósonlagsins, svífryk, myndun ósons við yfirborð jarðar, súrt regn, næringaefnaauðgun, visteiturhrif, eituráhrif á fólk, eyðing auðlinda og jónandi geislun. Með vistferilsgreiningu má auðkenna hvar í vistferli vindmyllunnar greina megi mestu áhrifin í hverjum umhverfisáhrifaflokki, auk þess sem hægt er að meta hagkvæmni vindmyllunnar með tilliti til umhverfisáhrifa hennar og orkuarðsemi.

Aðgerðareining var skilgreind sem vinnsla 1 kWst raforku með 900 kW rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Metin eru umhverfisáhrif frá öllum vistferli einnar rannsóknarvindmyllu, þ.e. frá öflun hráefna og framleiðslu, flutningum, reisingu á Hafinu, rekstri á 25 ára líftíma, niðurrifi og förgun. Einnig var reiknaður ávinningur af endurvinnslu í lok líftíma, sem dregur úr heildaráhrifum. Stuðst var við magntölur og áætlanir frá framleiðanda, Landsvirkjun og verktökum og eru gögnin sem vistferilsgreiningin byggir á talin góð.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar sýna að öflun hráefna og framleiðsla vindmyllunnar er sá þáttur sem veldur mestu umhverfisáhrifunum, og vegur þar þyngst framleiðsla á stálturni, rafbúnaði og íhlutum í vélarhúsi, s.s. framleiðsla rafals. Framkvæmdir við reisingu eru einnig veigamikill þáttur í heildaráhrifunum, sem rekja má til framleiðslu steypu, steypustyrktarjárns og jarðstrengja til tengingar við flutningskerfi raforku. Í flestum umhverfisáhrifaflokkum skilar endurvinnsla efna að loknum líftíma ávinningi og dregur úr heildaráhrifum.

Kolefnisspor vindmyllunnar er 5,3 g CO₂-ígildi/kWst miðað við 25 ára líftíma og 43% nýtni og vegur framleiðsla hennar þyngst í kolefnissporinu. Steypa og steypustyrktarjárn vegna byggingar undirstöðu vega einnig þyngt í kolefnissporinu og þar sem vistferillinn byggir á rekstri tveggja vindmylla eingöngu, teljast árlegar viðhaldsferðir með millilandaflugi einnig markverður hluti kolefnissporsins. Ljóst er að ávinningur er töluverður af endurvinnslu málma sem til falla við niðurrif vindmyllu og getur endurvinnsla lækkað brúttó kolefnisspor um a.m.k. 11% miðað við gefnar forsendur um endurvinnslu. Niðurstaða næmnigreiningar sýnir að notkun vistvænnar steypu í undirstöðu getur lækkað kolefnissporið um allt að 10% en steypan er sá þáttur í vistferli vindmyllunnar þar sem Landsvirkjun getur haft hvað beinust áhrif til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Orkuarðsemi vindmyllunnar er 50 og endurgreiðslutími orku er 6 mánuðir. Vindmyllan framleiðir með öðrum orðum 50 sinnum meiri orku en þurfti til að hún yrði að veruleika og er búin að framleiða orkuna sem þarf yfir allan vistferilinn eftir 6 mánuði. Umhverfisáhrif vindmyllunnar á hverja framleidda kWst ræðst verulega af afköstum, sem ræðst m.a. af líftíma vindmyllu, uppsettu afli og nýtni. Nýtni rannsóknarvindmyllanna á Hafinu er 43% sem er meiri nýtni en gengur og gerist fyrir sambærilegar vindmyllur á landi og er samanburður við nýtingu vindorku og annarra orkugjafa erlendis jákvæður með tilliti til kolefnisspors og orkuarðsemi.

Niðurstöður þessarar greiningar veita upplýsingar um umhverfisáhrif vindorkunýtingar á Hafinu, meðal annars hvar megin áhrifin sé að finna yfir allan vistferilinn. Greiningin nýtist rekstraraðilum sem grunnur til aðgerða í hönnun, undirbúningi framkvæmda, innkaupum og rekstri, í þeim tilgangi að draga úr neikvæðum umhverfisáhrifum raforkuvinnslu með vindorku. Greiningin er einnig grunnur fyrir meiri rannsóknir, t.d. vistferilsgreiningu á frekari vindorkunýtingu. Þannig er vistferilsgreiningin mikilvægt tól í umhverfisstjórnun til að ná stöðugt betri árangri.

Lykilorð: Vistferilsgreining, vindmyllur, vindorka, kolefnisspor, orkuarðsemi, endurgreiðslutími orku.

Summary

The objective of this project is to assess environmental impacts of electricity generation in two 900 kW wind turbines by performing a Life Cycle Assessment (LCA). The wind turbines are located on a lava field named Hafið, north of Búrfell Mountain in Iceland. They are a part of Landsvirkjun's research and development project on the advantages of wind power in Iceland. LCAs are used to address the potential environmental impacts of products or services throughout their life cycle. The assessment is carried out in accordance with international standards ISO 14040 and ISO 14044 and the results can therefore be compared to similar products or services. Specific guidelines as defined in ISO 14025 for Type III environmental declarations have also been taken into consideration.

The assessed environmental impacts can be classified into 10 main impact categories: global warming, ozone depletion, particulate matter, photochemical ozone formation, acidification, eutrophication, ecotoxicity, human toxicity, resource depletion and ionising radiation. Life cycle impact assessment (LCIA) results can help identify environmental hot spots throughout the wind turbine's life cycle. The results can also be used to assess the turbine's environmental and energy performances, e.g. its carbon footprint per generated kWh and energy return on investment (EROI).

The functional unit is defined as 1 kWh of electricity generated by a 900 kW wind turbine at Hafið. Environmental impacts were assessed for all phases of the wind turbine's life cycle, i.e. raw material extraction and manufacturing, transport, construction in Iceland, operation and maintenance during a 25 year lifetime and end of life. Benefits of recycling at the end of life phase are calculated into the results, reducing the net environmental impacts. The assessment is built on good inventory data and best estimates from manufacturers, contractors and from the operator Landsvirkjun, supporting the quality of the LCA.

The LCA results show that raw material extraction and manufacturing dominate the environmental impacts of the wind turbine, where the largest contributors are the tower, electrical equipment and other components within the nacelle, e.g. the generator. The construction phase is also a significant part of many impact indicators, mainly due to concrete and reinforcing steel in foundations and cables connecting the turbines to the main grid. In most impact categories, environmental credits are provided through recycling of materials in the end of life phase.

The wind turbine's carbon footprint is 5.3 g CO₂-eq/kWh for a 25 year lifetime and 43% capacity factor. Raw material extraction and manufacturing of wind turbine components is a dominant part of the carbon footprint. Concrete and reinforcing steel in foundations are large contributors as well. Yearly service and maintenance trips during the operation and maintenance phase are a significant part of the carbon footprint as the assessment is built on the operation of two wind turbines only. Using conservative assumptions, recycling at the end of life phase can reduce the gross carbon footprint by at least 11%. Actions such as the use of sustainable concrete in foundations can furthermore reduce the net carbon footprint by up to 10%.

The wind turbine's energy return on investment is 50 and the payback time is 6 months. This means that the turbine generates 50 times more energy over a 25-year lifetime than it requires for its manufacturing and operation, an amount generated after only 6 months in operation. Impacts per generated kWh are determined by the turbine's net electricity generation, which is in turn determined by its lifetime, power rating and capacity factor. The wind turbines at Hafið have a capacity factor of 43% which is higher than capacity factors for many similar onshore wind turbines. The wind turbines at Hafið perform well in terms of their carbon footprint and energy return on investment when compared to other wind turbines and other energy sources.

The current assessment identifies the main environmental hot spots of wind power utilization at Hafið. The assessment can be used as a part of a comprehensive decision process in the design phase, construction preparation, procurement and in operational stages, with the purpose of reducing environmental impacts of wind power utilization. The assessment is also a basis for further research, e.g. a LCA of further wind power utilization. The LCA can thus be used as an important tool in environmental management for continuous improvement.

Keywords: Life cycle assessment, wind turbines, wind power, carbon footprint, energy return on investment, energy payback time.

Efnisyfirlit

Samantekt	i
Summary	ii
Efnisyfirlit	iii
Myndaskrá	iv
Töfluskra	v
Orðskýringar	vi
1 Inngangur	1
1.1 <i>Hafið</i>	2
2 Vistferilsgreining rannsóknarvindmyllu á Hafinu	3
2.1 <i>Markmið og umfang</i>	3
2.2 <i>Aðgerðareining</i>	3
2.3 <i>Kerfismörk</i>	4
2.4 <i>Umhverfisáhrif</i>	4
3 Öflun og meðhöndlun gagna (LCI)	5
3.1 <i>Öflun hráefna og framleiðsla</i>	5
3.2 <i>Flutningar</i>	8
3.3 <i>Reising á Hafinu</i>	8
3.4 <i>Rekstur og viðhald</i>	9
3.5 <i>Niðurrif og förgun</i>	10
4 Niðurstöður vistferilsgreiningar (LCIA)	11
4.1 <i>Öflun hráefna og framleiðsla</i>	12
4.2 <i>Reising á Hafinu</i>	13
4.3 <i>Rekstur og viðhald</i>	14
4.4 <i>Niðurrif og förgun</i>	15
4.5 <i>Kolefnisspor</i>	16
4.6 <i>Orkubúskapur</i>	18
5 Næmnigreining	20
5.1 <i>Nýtni</i>	20
5.2 <i>Viðhald</i>	21
5.3 <i>Líftími</i>	22
5.4 <i>Steypa</i>	23
6 Umræður og lokaorð	24
Heimildir	27
Viðauki 1	29
Viðauki 2	1

Myndaskrá

Mynd 1 Vindmylla á Hafinu að vetri til. Ljósmynd: Landsvirkjun.	1
Mynd 2 Vindmylla á Hafinu að næturlagi. Ljósmynd: Landsvirkjun.	2
Mynd 3 Kerfismörk vistferilsgreiningar fyrir rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Líftími 25 ár. Vistferilsgreiningin nær til allra þátta innan kerfismarkna, þ.m.t. ávinningur af endurvinnslu með útvikun kerfismarkna.	4
Mynd 4 Hver spaði á E-44 vindmyllunum á Hafinu er 22 m að lengd. Ljósmynd: Landsvirkjun.	6
Mynd 5 Vélarhúsið situr efst á vindmylluturninum í 55 m hæð. Ljósmynd: Landsvirkjun.	6
Mynd 6 Rafalar í rannsóknarvindmyllunum á Hafinu eru gírlausir. Ljósmynd: Landsvirkjun.	7
Mynd 7 Turn vindmyllunnar er stálror sem mjókkar upp og er fest saman í þremur hlutum. Ljósmynd: Landsvirkjun.	7
Mynd 8 Steypt í undirstöður rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Ljósmynd: Landsvirkjun.	9
Mynd 9 Niðurstöður vistferilsgreiningar á vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Hlutdeild mismunandi þátta vistferils vindmyllu má sjá fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa. Sjá má nánari lýsingu á flokkum umhverfisáhrifa í viðauka 1 og tölulegar niðurstöður fyrir alla þætti í viðauka 2. ..	11
Mynd 10 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild mismunandi íhluta í vindmyllu og rannsóknna og þróunar í hverjum flokki umhverfisáhrifa.	12
Mynd 11 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild sérhvers efnis- og framkvæmdaþátta vegna reisingar vindmyllu í hverjum flokki umhverfisáhrifa.	13
Mynd 12 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild sérhvers rekstrarþátta í hverjum flokki umhverfisáhrifa.	14
Mynd 13 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Sjá má hlutdeild niðurrifs, flutnings, förgunar og endurvinnslu vindmyllunnar í hverjum flokki umhverfisáhrifa.	15
Mynd 14 Kolefnisspor vegna framleiðslu 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllum á Hafinu og hlutfallsleg skipting meðal helstu þátta vistferilsins. Gefin eru upp töluleg gildi í g CO ₂ -ígildum/kWst sem og hlutfallslegt vægi hvers þátta út frá nettó kolefnisspori.	16
Mynd 15 Ávinningur niðurrifs og förgunar í lok vistferils vindmyllu, reiknað út frá nettó kolefnisspori.	17
Mynd 16 Lág-gildi og há-gildi fyrir kolefnisspor mismunandi orkugjafa auk miðgildis, sýnt með bláum punkti, unnin upp úr samantekt IPCC (Sathaye o.fl., 2011). Á myndinni kemur einnig fram kolefnisspor fyrir rannsóknarvindmyllur á Hafinu.	17
Mynd 17 Heildarorkuvinnsla og orkuþörf á líftíma rannsóknarvindmyllu á Hafinu.	18
Mynd 18 Lág-gildi og há-gildi fyrir orkuarðsemi skv. samantekt IPCC fyrir mismunandi orkugjafa (Sathaye o.fl., 2011). Algengasti tilgreindi líftíminn fyrir hvern orkugjafa er gefinn upp innan hornklofa. Á myndinni er einnig gefin upp orkuarðsemi rannsóknarvindmyllu á Hafinu.	19
Mynd 19 Lág-gildi og há-gildi fyrir endurgreiðslutíma orku skv. samantekt IPCC fyrir mismunandi orkugjafa (Sathaye o.fl., 2011). Algengasti tilgreindi líftíminn fyrir hvern orkugjafa er gefinn upp innan hornklofa. Á myndinni er einnig gefin upp endurgreiðslutími orku fyrir rannsóknarvindmyllu á Hafinu.	19
Mynd 20 Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllu á Hafinu með breytilegu nýtnihlutfalli.	20
Mynd 21 Næmnigreining á orkubúskap rannsóknarvindmyllu á Hafinu með breytilegu nýtnihlutfalli.	20
Mynd 22 Næmnigreining á kolefnisspori fyrir vinnslu á 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu með breytilegri viðhaldstilhögun. Gert er ráð fyrir viðhaldi á tveimur vindmyllum eingöngu. VF 25 VA 0 = Árlegar viðhaldsferðir með millilandsflugi í 25 ár. VF 5 VA 20 = Viðhaldsferðir að utan í fimm ár og innanlands í tuttugu ár. VF 0 VA 25 = Árlegar viðhaldsferðir innanlands, með akstri eingöngu, í 25 ár.	21
Mynd 23 Næmnigreining á orkubúskap og kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu með breytilegum líftíma, þ.e. 10 – 35 ár. Ekki er gert ráð fyrir útskiptum hreyfanlegra hluta vindmyllunnar.	22

Mynd 24 Næmnigreining á kolefnisspori rannsóknarvindmyllu á Hafinu með notkun hefðbundinnar steypu og vistvænnar steypu. Sýndur er hlutur steypu í kolefnisspori vindmyllu á Hafinu sem og töluleg gildi nettó kolefnisspors.	23
Mynd 25 Hlutfallsleg skipting kolefnisspors vegna vinnslu 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Á myndinni kemur fram hlutur sérhvers þáttar sem hlutfall af nettó kolefnisspori.	24

Töfluskrá

Tafla 1 Helstu einkennisstærðir vindmyllu í vistferilsgreiningu.	3
Tafla 2 Efnismagn og orkunotkun vegna framleiðslu einnar E-44 vindmyllu á Hafinu.	5
Tafla 3 Efnismagn og orkunotkun miðað við eina vindmyllu vegna reksturs skrifstofu, rannsóknar- og þróunardeilda hjá framleiðanda.	8
Tafla 4 Efnismagn vegna mismunandi þátta framkvæmda við reisingu tveggja rannsóknarvindmylla á Hafinu. .	8
Tafla 5 Helstu tölur vegna viðhalds- og eftirlitsferða á rekstartíma rannsóknarvindmyllu á Hafinu.	10
Tafla 6 Hlutfall efna í vindmyllu til endurvinnslu eða endurnýtingar og hlutfall þess sem reiknast sem ávinningur.	10
Tafla 7 Orkubúskapur einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu á 25 ára líftíma.	18
Tafla 8 Samantekt á niðurstöðum vistferilsgreininga af vindmyllum reknar á landi (e. Onshore); kolefnisspor og orkubúskapur. Niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Hafið eru sýndar fyrir bæði 20 ár og 25 ár til samanburðar.	25

Orðskýringar

Aðgerðareining	(e. <i>Functional unit</i>). Viðmiðunareining vistferilsgreiningar. Notuð til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilega vöru eða þjónustu.
Endurgreiðslutími orku	(e. <i>Energy payback time</i>). Sá tími sem líður þangað til að hlutföll verða 1:1 milli heildarorkuvinnslu aflstöðvar og orkuþarfar á líftíma (sjá neðar).
Kerfismörk	(e. <i>System boundaries</i>). Afmörkun þess kerfis sem taka á með í vistferilsgreiningunni.
Kolefnisspor	(e. <i>Carbon footprint</i>). Mælikvarði á gróðurhúsaáhrifum, þ.e. á heildarlosun koltvísýrings (CO ₂) og annarra gróðurhúsalofttegunda sem rekja má til athafna mannsins. Kolefnisspor er gefið upp í CO ₂ -ígildum, en losun gróðurhúsalofttegunda hefur áhrif á loftslagsbreytingar og þar með hlýnun jarðar.
Orkuarðsemi	(e. <i>Energy return on investment, EROI</i> , eða <i>Harvest factor</i>). Hlutfall milli heildarorkuvinnslu aflstöðvar og orkuþarfar hennar á líftíma. Stærðin er notuð til að bera saman þá orku sem nýtist samfélaginu með orkuvinnslu við þá orku sem þarf til að geta nýtt hana
Orkuþörf á líftíma	(e. <i>Primary energy demand, PED</i> , eða <i>Cumulative energy demand, CED</i>). Samanlögð orkuþörf aflstöðvar í öllum vistferli eða á líftíma hennar. Orkan er gefin upp í samræmi við orkuinnihald orkugjafa, t.d. orkuinnihaldi eldsneytis eða virkjanlegri fallorku vatns.
Umhverfisáhrifaflokkur	(e. <i>Impact category</i>). Flokkur sem vísar til tegund umhverfisáhrifa. Dæmi um umhverfisáhrifaflokk eru gróðurhúsaáhrif, eyðing auðlinda, svifryk, visteiturhrif og næringarefnaauðgun. Sjá viðauka 1 þessarar skýrslu fyrir nánari skýringar á þeim flokkum sem ILCD handbókinn mælir með að nota (JRC-IEC, 2011).
Umhverfisvísir	(e. <i>Impact category indicator</i>). Tölulegar niðurstöður fyrir sérhvern flokk umhverfisáhrifa. Dæmi um umhverfisvísi eru kg CO ₂ -ígilda í flokki gróðurhúsaáhrifa, þ.e. kolefnisspor, eða kg Sb-ígilda í flokki eyðingar auðlinda.
Umhverfisýfirlýsing	(e. <i>Environmental Product Declaration, EPD</i>). Yfirlýsing eða skjal um umhverfisáhrif vöru. Við gerð umhverfisýfirlýsinga er reglum um viðeigandi vöruflokk fylgt (e. <i>Product Category Rules</i>) og er skjalið tekið út af þriðja aðila skv. staðli (ISO 14025). Skjalið gefur ekki til kynna að varan eða þjónustan sé umhverfisvæn, heldur veitir eingöngu gagnsæjar og samanburðarhæfar upplýsingar um umhverfisáhrif vöru.
Vistferilsgreining	(e. <i>Life cycle assessment, LCA</i>). Aðferðafræði til þess að meta umhverfisáhrif vöru eða þjónustu frá vöggum til grafar, þ.e. yfir allan vistferilinn, á skilgreindum líftíma. Aðferðin er stöðluð og því má nýta niðurstöður til samanburðar við sambærilega vöru eða þjónustu. Undanfari vistferilsgreiningar er gagnasöfnun (e. <i>Life Cycle Inventory, LCI</i>). Í framhaldinu er lagt mat á umhverfisáhrif vöru eða þjónustu í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa (e. <i>Life Cycle Impact Assessment, LCIA</i>).

1 Inngangur

Á Íslandi byggir nánast öll raforkuvinnsla á tveimur endurnýjanlegum orkuauðlindum, vatnsorku og jarðvarma. Nýting annarra náttúruauðlinda til sjálfbærrar raforkuvinnslu hefur lengi verið til athugunar og er vindorka meðal þeirra auðlinda sem sérstök ástæða hefur þótt til að kanna nánar. Þróun vindmylla hefur verið ör á sl. árum og hefur bæði fjárfestingar- og rekstrarkostnaður þeirra lækkað á sama tíma og vinnslugeta hefur aukist. Rannsóknir standa nú yfir á fýsileika raforkuvinnslu með vindorku á Íslandi með tilliti til hérlendra aðstæðna, þ. á m. ísingar, skafrennings, ösku- og sandfoks. Einnig stendur nú yfir ferli mats á umhverfisáhrifum vindlundar við Búrfell, þar sem skoðuð eru áhrif á ýmsa umhverfisþætti, m.a. ásjúnd, hljóðvist, lífríki og samfélag.

Vistferilsgreining (e. *Life cycle assessment, LCA*) er aðferðafræði til þess að meta umhverfisáhrif vöru eða þjónustu frá vöggju til grafar. Vistferilsgreining nær yfir allan vistferilinn og tekur þar með mið af öflun hráefna, framleiðslu, flutningum, notkun og förgun. Umhverfisáhrifin sem eru metin eru bæði staðbundin og hnattræn, og ná yfir áhrif á menn, vistkerfi, andrúmsloft, vatn og jörð. Aðferðin gefur tölulegar niðurstöður fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa og því tekur aðferðafræðin ekki til ýmissa þátta sem teknir eru fyrir í lögbundnu ferli mats á umhverfisáhrifum, s.s. til sjónrænna áhrifa. Með aðferðafræðinni má greina hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin er að finna, en slíkar upplýsingar má nota til að bæta vöru eða þjónustu. Aðferðin er stöðluð og því má jafnframt nýta niðurstöður til samanburðar á sambærilegri vöru eða þjónustu.

Markmið þessa verkefnis er að meta umhverfisáhrif tveggja rannsóknarvindmylla á Hafinu með aðferðafræði vistferilsgreiningar. Umhverfisáhrifin sem metin eru skiptast í 10 megin flokka umhverfisáhrifa en þeir eru: gróðurhúsaáhrif, eyðing ósonlagsins, svifryk, myndun ósons við yfirborð jarðar, súrt regn, næringaefnaauðgun, visteituráhrif, eituráhrif á fólk, eyðing auðlinda og jónandi geislun. Með aðferðinni má auk þess meta hagkvæmni vindmyllunnar með tilliti til umhverfisáhrifa hennar og orkuarðsemi. Niðurstöður má þannig nýta til að meta áhrif vindmyllu í ólíkum flokkum umhverfisáhrifa með tilliti til raforkuvinnslu hennar, þ.m.t. kolefnisspor, til samanburðar við vindorku erlendis og aðra orkugjafa. Greiningin nýtist einnig til að auðkenna tækifæri til úrbóta á mismunandi stigum vistferilsins, t.d. í undirbúningi framkvæmda eða í rekstri.



Mynd 1 Vindmylla á Hafinu að vetri til. Ljósmynd: Landsvirkjun.

1.1 Hafið

Í lok árs 2012 setti Landsvirkjun upp tvær vindmyllur í rannsóknarskyni á Hafinu, sem er hraunslétta á Þjórsársvæðinu norðan við Búrfell. Vindmyllurnar eru þær stærstu sem hafa verið reistar hér á landi, hvor um sig 900 kW. Af rekstri þeirra fást mikilvægar upplýsingar um nýtingu vindorku og möguleika hennar hér á landi og við íslenskar aðstæður. Framleiðandi vindmyllanna tveggja er þýska fyrirtækið ENERCON, sem er meðal stærstu framleiðenda vindmylla í heiminum og er með starfsstöðvar um allan heim.

Rannsóknarvindmyllurnar tvær á Hafinu eru 55 m háar og hver spaði 22 m langur, og nær því vindmyllan 77 m heildarhæð í efstu stöðu spaðanna. Til samanburðar er Hallgrímskirkjurn 74,5 m hár. Vindmyllurnar tvær hafa nú verið í rekstri í rúm tvö ár og framleiða samanlagt um 6,8 GWst á ári.



Mynd 2 Vindmylla á Hafinu að næturlagi. Ljósmynd: Landsvirkjun.

2 Vistferilsgreining rannsóknarvindmyllu á Hafinu

2.1 Markmið og umfang

Tilgangur verkefnisins er að meta umhverfisáhrif tveggja rannsóknarvindmylla á Hafinu með aðferðafræði vistferilsgreiningar. Markmið verkefnisins er að auðkenna þá þætti vistferilsins sem valda mestum umhverfisáhrifum, en niðurstöðurnar eru einnig nýttar til að meta orkuarðsemi (e. *Energy return on investment, EROI*) og kolefnisspor (e. *Carbon footprint*) raforkuvinnslunnar.

Umhverfisáhrifin eru metin með aðferðafræði vistferilsgreiningar, sem er unnin í samræmi við alþjóðlegu staðlana ISO 14040 og ISO 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Einnig er stuðst við leiðbeiningar um framkvæmd vistferilsgreininga fyrir gerð umhverfisyfirlýsinga um raforkuvinnslu (e. *Environmental Product Declaration, EPD*) til að tryggja að niðurstöðurnar séu samanburðarhæfar við sambærilegar erlendar greiningar (The International EPD System, 2015).

2.2 Aðgerðareining

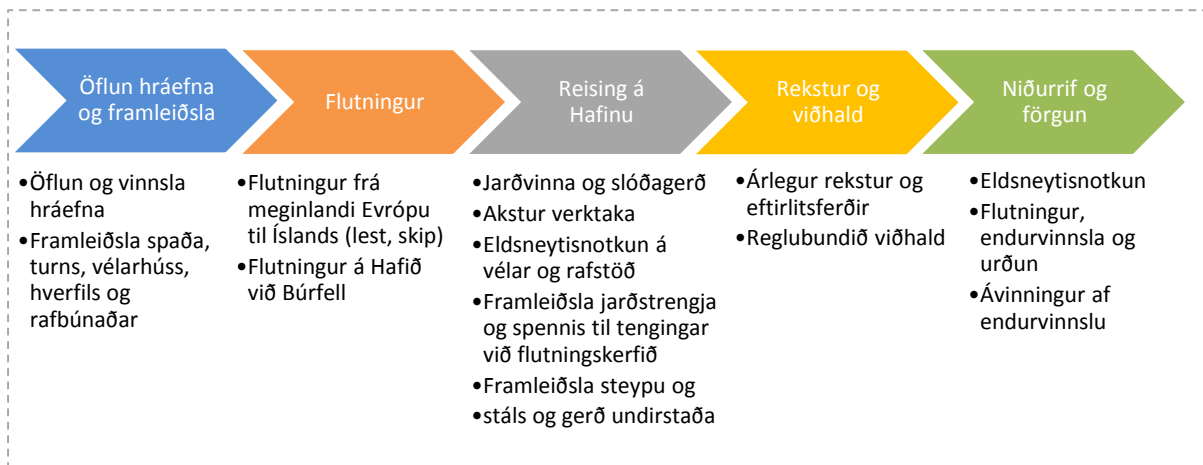
Aðgerðareining (e. *Functional unit*) vistferilsgreiningarinnar er vinnsla á einni kWst raforku í 900 kW E-44 vindmyllu með 55 m stálturni, sem stendur á Hafinu við Búrfell. Gert er ráð fyrir 25 ára tæknilegum líftíma vindmyllu í þessari greiningu, en í nýlegri skýrslu Alþjóðlegu stofnunarinnar um endurnýjanlega orkugjafa, er efnahagslegur líftími vindmylla einnig metinn 25 ár (IRENA, 2015). Tekið skal fram að þær vindmyllur sem nú standa á Hafinu eru ekki sambærilegar þeim vindmyllum sem fyrirhugaðar eru í vindlundi við Búrfell, sem eru bæði hærri og hver vindmylla með meira uppsett afl en þær vindmyllur sem notaðar eru til viðmiðunar í þessari skýrslu. Heildarraforkuvinnsla einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu yfir líftímamann byggir á rekstri vindmyllanna tveggja til þessa, þ.e. á árabílinu 2013 – 2015. Helstu einkennisstærðir vindmyllunnar eru settar fram í töflu 1.

Tafla 1 Helstu einkennisstærðir vindmyllu í vistferilsgreiningu.

Tegund vindmyllu	ENERCON E-44
Aflgeta	900 kW
Turn og spaðar	55 m stálturn með 22 m spöðum
Nýtni	43%
Meðaltími við fulla vinnslugetu	3767 klst/ári
Líftími	25 ár
Heildarraforkuvinnsla á líftíma	85 GWst

2.3 Kerfismörk

Kerfismörk greiningarinnar ná yfir öll stig vistferils einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu, þ.m.t. öflun hráefna, framleiðsla, flutning, reisingu á Hafinu, rekstur, niðurrif og förgun, sjá mynd 3.



Mynd 3 Kerfismörk vistferilsgreiningar fyrir rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Líftími 25 ár. Vistferilsgreiningin nær til allra þátta innan kerfismarkna, þ.m.t. ávinning af endurvinnslu með útvíkkun kerfismarkna.

Vistferilsgreiningin nær einnig yfir búnað sem tengist raforkuvinnslunni, s.s. jarðstrengstengingar og spennir, sem og slóðagerðar á svæðinu, og teljast þeir þættir til reisingar vindmyllunnar á Hafinu. Ávinningur af endurvinnslu málma að loknu niðurrifi er tekinn með í reikninginn með útvíkkun kerfismarkna (e. *System expansion*) og dregst frá heildarumhverfisáhrifum.

2.4 Umhverfisáhrif

Við mat á umhverfisáhrifum í ólíkum flokkum eru lagðar til grundvallar aðferðir sem sameiginleg rannsóknarmiðstöð Evrópu (JRC) setur fram í ILCD handbókinni (e. *International Reference Life Cycle Data System*) (JRC-IES, 2011). Eftirfarandi flokkar umhverfisáhrifa eru metnir í þessari greiningu:

- Gróðurhúsaáhrif
- Eyðing ósonlagsins
- Svifryk
- Myndun ósons við yfirborð jarðar
- Súrt regn
- Næringarefnaauðgun
- Visteiturhrif
- Eituráhrif á fólk
- Eyðing auðlinda
- Jónandi geislun

Þessum flokkum er nánar lýst í viðauka 1. Á niðurstöðugröfum, t.d. mynd 9 í kafla 4, birtast þessir áhrifaflokkar í þrettán súlum þar sem næringarefnaauðgun er sett fram í þrennu lagi og eituráhrif á fólk í tvennu lagi. Í viðauka 2 eru settar fram tölulegar niðurstöður fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, sk. umhverfisvísar (e. *Impact category indicator*).

Til viðbótar við þessar aðferðir eru einnig metnir mikilvægir þættir sem varða orkubúskap vindmyllunnar; þ.e. orkuþörf á líftíma (e. *Primary energy demand, PED*, eða *Cumulated energy demand, CED*), orkuarðsemi (e. *Harvest factor eða Energy return on investment, EROI*) og endurgreiðslutími orku (e. *Energy payback time*). Þannig má bera saman þá orku sem nýtist samfélaginu með vinnslu vindorku við þá orku sem þarf til að geta nýtt hana.

3 Öflun og meðhöndlun gagna (LCI)

Í þessum kafla er öflun og meðhöndlun gagna (e. *Life Cycle Inventory, LCI*) lýst. Notaður var hugbúnaðurinn GaBi við gerð vistferilsgreiningarinnar. Við líkangerð voru notaðar magntölur frá framleiðanda vindmyllu, Landsvirkjun og verktökum. Vegna framleiðslu hráefna, staðbundinnar orkuvinnslu, flutninga, ýmissa vinnsluferla o.fl. var stuðst við bakgrunnsgögn úr alþjóðlegum gagnabanka frá GaBi (í eigu thinkstep, áður PE International) sem og úr gagnabanka frá EFLU verkfræðistofu.

3.1 Öflun hráefna og framleiðsla

Upplýsingar um framleiðslu voru fengnar beint frá framleiðanda rannsóknarvindmyllanna sem standa á Hafinu (ENERCON) og byggja á ítarlegri gagnaöflun innan fyrirtækisins sem endurspeglar framleiðslutölur árin 2009 – 2010 (ENERCON, 2013a). Um er að ræða magntölur vegna framleiðslu allra íhluta í vindmyllu; spaða, vélarhúss, rafals, rafbúnaðar og turns, sjá töflu 2. Bakgrunnsgögn vegna vinnslu þeirra hráefna sem notuð eru í framleiðsluna voru fengin úr GaBi gagnabankanum. Bakgrunnsgögn frá GaBi voru einnig notuð vegna raforkunnar sem notuð er í framleiðsluna. Úrgangur frá framleiðslu var ýmist enduruninn (málmar) eða brenndur og reiknaðist þá í niðurstöður ávinningur af brennslu (endurheimt raforku) eða endurvinnslu málma (endurheimt hráefna).

Tafla 2 Efnismagn og orkunotkun vegna framleiðslu einnar E-44 vindmyllu á Hafinu.

Íhlutir einnar vindmyllu	Spaðar (3) [kg alls]	Vélarhús [kg]	Rafall [kg]	Rafbúnaður [kg]	Turn [kg]	Alls [kg]
Stál	45	2.462	9.033	7.454	65.389	84.383
Steypujárn (e. <i>Cast iron</i>)	-	19.698	-	-	-	19.698
Kopar	5	-	3.258	850	-	4.112
Ál	43	1.716	-	2.046	-	3.805
Trefjagler (epoxíresín og hvarfefni innifalin)	7.116	-	-	-	-	7.116
Önnur efni (pappír, plast, timbur, plastfilmur, skrúfur, smurefni, málning, rafmagnsvírar o.fl.)	1.831	143	128	2.892	292	5.287
Alls efni [kg]	9.040	24.018	12.419	13.243	65.681	124.401
Orkunotkun [kWst] (raforka og jarðgas)	13.662	2.454	5.168	2.255		23.539

3.1.1 Spaðar

Spaðarnir (e. *Rotor blades*) eru þrjú talsins, úr trefjagleri og eru framleiddir með sérstakri lofttæmisdukaðferð (e. *Vacuum infusion process*). Spaðarnir eru hjúpaðir ýmsum efnum til að vernda þá fyrir veðuröflunum, m.a. epoxíresíni. Alls eru notuð 26 efni við framleiðslu spaðanna sem tekið hefur verið tillit til í vistferilsgreiningunni.



Mynd 4 Hver spaði á E-44 vindmyllunum á Hafinu er 22 m að lengd. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.1.2 Vélarhús

Vélarhúsið (e. *Nacelle*) hvílir efst á turninum, sjá mynd 5, og hýsir allan framleiðsluhluta rafstöðvarinnar, m.a. hverfil og rafal. Vélarhúsið er með straumlínulagaðri hönnun til að lágmarka vindnúning og hávaða. Helstu íhlutir vélarhússins, eru klæðning (e. *Casing*), þyrilnöf (e. *Rotor hub*), öxulpinni (e. *Axle pin*), spaðafestingar (e. *Blade adapter*), burðarvirki vélarhúss (e. *Main carrier*) og rafall (e. *Generator*). Rafmagnsbúnaðurinn innan vélarhússins er talinn með öllum rafbúnaði innan vindmyllunnar, sjá kafla 3.1.4.



Mynd 5 Vélarhúsið situr efst á vindmylluturninum í 55 m hæð. Ljósmynd: Landsvirkjun.

Rafallinn (e. *Generator*) er innan vélarhússins, sjá mynd 6. Notaðar eru hringlaga gírlausir rafalar í rannsóknarvindmyllurnar á Hafinu, sem tryggir minni núning, betri endingu og meira álagsþol. Rafallinn samanstendur af diskum, snúð (e. *Rotor*) og sátri (e. *Stator*) sem innihalda að mestu koparvíra og stál, auk fáeinna annarra efna sem tekið hefur verið tillit til í vistferilsgreiningunni.



Mynd 6 Rafalar í rannsóknarvindmyllunum á Hafinu eru gírlausir. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.1.3 Turn

Mastur vindmyllanna er turn eða stálrör sem mjókkar upp. Þvermál við jörð er um 3,5 m og um 1,8 m við topp. Um er að ræða 55 m stálturn (stálmastur) á Hafinu og er stálmagn í turninum skalað upp frá efnismagni í sambærilegum 45 m turni frá framleiðanda. Auk þess er gert ráð fyrir málningu turns í vistferilsgreiningunni.



Mynd 7 Turn vindmyllunnar er stálrör sem mjókkar upp og er fest saman í þremur hlutum. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.1.4 Rafbúnaður

Rafbúnaður vindmyllunnar samanstendur af stýribúnaði fyrir snúningsdrifi, nemum, vírum, rafmagnsskápum, prentplötum o.fl., auk spennis sem staðsettur er innan í vindmyllu, til eigin nota. Rafbúnaður er staðsettur annars vegar í vélarhúsi, hins vegar neðst í turni. Magntölur eru fengnar frá framleiðanda.

3.1.5 Rannsóknir og þróun

Rekstur skrifstofa, rannsóknar- og þróunardeilda hjá framleiðanda er tekinn með í reikninginn, en magntölum vegna þessa þáttar hefur verið skipt niður á allar framleiðslueiningar hjá fyrirtækinu, þ.e. á hverja framleidda vindmyllu, sjá töflu 3.

Tafla 3 Efnismagn og orkunotkun miðað við eina vindmyllu vegna reksturs skrifstofu, rannsóknar- og þróunardeilda hjá framleiðanda.

Skrifstofur og rekstur hjá framleiðanda	Magn per vindmyllu
Rafmagn og jarðgas	1450 kWst
Notkun hráefna (málmar, gler, pappír o.fl.)	41 kg
Flokkaður úrgangur	37 kg
Óflokkaður úrgangur og spilliefni	18 kg

3.2 Flutningar

Heildarþyngd einnar fullbúinnar vindmyllu er um 120 tonn. Innifalið í flutningi eru allir íhlutir vindmyllu, þakningar, jarðstrengir og spennir. Miðað er við 27 km landflutning frá verksmiðju framleiðanda til Emden hafnar í Þýskalandi, 2.240 km skipaflutningi til Hafnarfjarðar, og loks um 130 km landflutning að Hafinu við Búrfell. Vegna landflutninga er miðað við 40 tonna flutningabíl með tengivagni (Euro 5, 27 tonna farmþyngd) og vegna sjóflutninga er miðað við 17000 dwt flutningaskip.

3.3 Reising á Hafinu

Gögn um reisingu vindmyllunnar byggja á magntölum vegna reisingar vindmyllanna tveggja við Búrfell í lok árs 2012. Gögnin koma frá Landsvirkjun og undirverktökum (Ístak, VHE o.fl.), sjá töflu 4. Reisingin felur m.a. í sér olíunotkun vegna aksturs bæði starfsmanna Landsvirkjunar og allra verktaka, olíu á rafstöð, notkun allra vinnuvéla vegna jarðvinnu, byggingu undirstaða og reisingar; slóða- og skurðagerð og framleiðslu steypu og steypustyrktarjárn í undirstöður. Tenging við flutningskerfi raforku telst einnig til reisingar á Hafinu, þ.m.t. framleiðsla jarðstrengja, gröftur jarðstrengjaskurða og framleiðsla spennis. Upplýsingar um spenninn byggja á umhverfisyfirlýsingu (EPD) frá ABB fyrir 315 kVA spenni sem búið er að skala niður fyrir 50 kVA spenni sem notaður er. Upplýsingar um steypu eru fengnar úr gagnabanka EFLU verkfræðistofu.

Tafla 4 Efnismagn vegna mismunandi þátta framkvæmda við reisingu tveggja rannsóknarvindmylla á Hafinu.

Efni	Magn
Eldsneyti alls	6.600 L
Undirstöður	
Steypa	1.010.200 kg
Steypustyrktarjárn	41.500 kg
Jarðstrengir	
Ál	2.050 kg
Kopar	930 kg
Plasteinangrun	3.430 kg
Olía á spenni	420 kg
Ýmis önnur efni (timbur, álplata, koparvír)	1.270 kg

Vistferilsgreiningin er sett upp miðað við aðstæður á Hafinu, þ.e. u.þ.b. 500 m slóða frá vindmyllu að vegtengingu, auk jarðstrengstenginga við spennu. Úrgangur sem fellur til vegna reisingar (óflokkaður, 1,5 tonn) er skv. þessari greiningu keyrður til höfuðborgarsvæðisins, um 130 km, til urðunar.



Mynd 8 Steypt í undirstöður rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.4 Rekstur og viðhald

Upplýsingar um rekstur vindmyllanna byggir á áætlun framleiðanda og Landsvirkjunar. Gert er ráð fyrir vikulegum eftirlitsferðum þar sem ekið er frá Búrfellstöð að vindmyllunum og þær sjónskoðaðar. Miðað er auk þess við 4 viðhaldsferðir á ári tveggja starfsmanna framleiðanda, þ.e. frá Þýskalandi, í fimm ár. Innfalið í viðhaldsferðunum er akstur og flug starfsmanna. Að 5 árum loknum er miðað við að innlendir starfsmenn taki við viðhaldsferðunum út líftímann. Utan eftirlits- og viðhaldsferða er reiknað með ýmsum aðföngum í árlegum rekstri vindmyllu, sjá töflu 5.

Upplýsingar um úrgang sem fellur til vegna árlegs reksturs sem og vegna viðhaldsferða voru fengin frá framleiðanda. Blönduðum úrgangi er ekið til höfuðborgarsvæðisins til urðunar (130 km) og hættulegum úrgangi (t.d. olíumengaður búnaður o.fl.) til Suðurnesja til brennslu (180 km). Plast og pappír er ekinn til höfuðborgarsvæðisins (130 km) og fluttur sjóleiðs til meginlands Evrópu til endurvinnslu (2500 km).

Á rekstartíma vindmyllunnar vinnur hún rafmagn. Af gefinni reynslu á Hafinu frá upphafi reksturs í ársbyrjun 2013 er miðað við 43% nýtingu, þ.e. orkuvinnslu upp á um 3,4 GWst á ári eða heildarorkuvinnslu upp á 85 GWst yfir líftímann (tafla 1).

Á rekstartíma notar vindmyllan einnig rafmagn til þess að reka stýribúnað, snúningsdrif o.fl. Öllu jafna notar hún rafmagn sem hún vinnur sjálf, en á niðritíma, þ.e. þegar spaðar eru í kyrrstöðu, þarf hún að taka rafmagn frá landsnetinu. Skv. upplýsingum frá framleiðanda er miðað við orkunotkun upp á 800 – 4000 kWst/ári (ENERCON GmbH, 2012, 2013a, 2013b). Til öryggis er hér miðað við 4000 kWst raforkunotkun á ári í vistferilsgreiningunni og til einföldunar dregst þessi notkun frá eigin vinnslu þar sem sjaldnast þarf að taka hana út af netinu.

Tafla 5 Helstu tölur vegna viðhalds- og eftirlitsferða á rekstrartíma rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

Aðföng í árlegum rekstri		
Skrúfur og stálíhlutir	10	kg/ári
Smurolía	5	kg/ári
Pappi, rafbúnaður, hreinsiefni o.fl.	47	kg/ári
Úrgangur í árlegum rekstri		
Óflokkaður úrgangur	21	kg/ári
Pappi	21	kg/ári
Plast	5	kg/ári
Hættulegur úrgangur	18	kg/ári
Viðhaldsferð frá Þýskalandi - vegalengdir		
Akstur erlendis	100	km Aurich – Bremen
Flug	2160	km Bremen - KEF
Akstur innanlands	170	km KEF - Hafid
Eftirlits- og viðhaldsferð frá Búrfellsstöð - vegalengd		
Akstur	8	km Búrfellsstöð - Hafid

3.5 Niðurrif og förgun

Stuðst er við gögn frá framleiðanda vegna niðurrifs vindmyllunnar, þ.e. heildarolíunotkun vegna sambærilegra framkvæmda. Miðað er við um 800 kg olíu til niðurrifs einnar vindmyllu. Í niðurrifi felst jafnframt flokkun úrgangs og flutningur hans til höfuðborgarsvæðisins, alls um 130 km. Þaðan er úrgangurinn ýmist endurnýttur, sendur til brennslu eða til urðunar, eða sendur erlendis til endurvinnslu. Miðað er við 2500 km skipaflutning endurvinnanlegra efna til meginlands Evrópu.

Stuðst er við hlutföll sem gefin eru upp af framleiðanda varðandi magn efna sem fer til endurvinnslu að loknum líftímanum, sjá töflu 6. Notuð eru bakgrunnsgögn frá GaBi um ávinning af endurvinnslu stáls, steypujárns og áls, en þau gögn byggja á markaðsvirði brotajárns og nýrra málma. Ávinningur af endurvinnslu kopars, sem aðallega er að finna í vafningi í hverfli, er áætlaður út frá endurvinnsluhlutfalli koparvírs skv. bandarísku umhverfisstofnuninni (USEPA, 2006), en ætla má að endurvinnsluhlutfallið sé hátt af svo hreinu efni (Glöser o.fl., 2013). Sem dæmi um ávinning má taka að 1 kg af endurunnu stáli kemur í veg fyrir framleiðslu á 0,37 kg af nýju stáli.

Gert er ráð fyrir að hægt sé að endurnýta hluta rafbúnaðar, annað er sent til brennslu eða út til endurvinnslu. Gert er ráð fyrir að það sem eftir stendur af óendurunnum málum, auk trefjaglers úr spöðum og annars úrgangs, sé urðað á höfuðborgarsvæðinu eða brennt á Suðurnesjum.

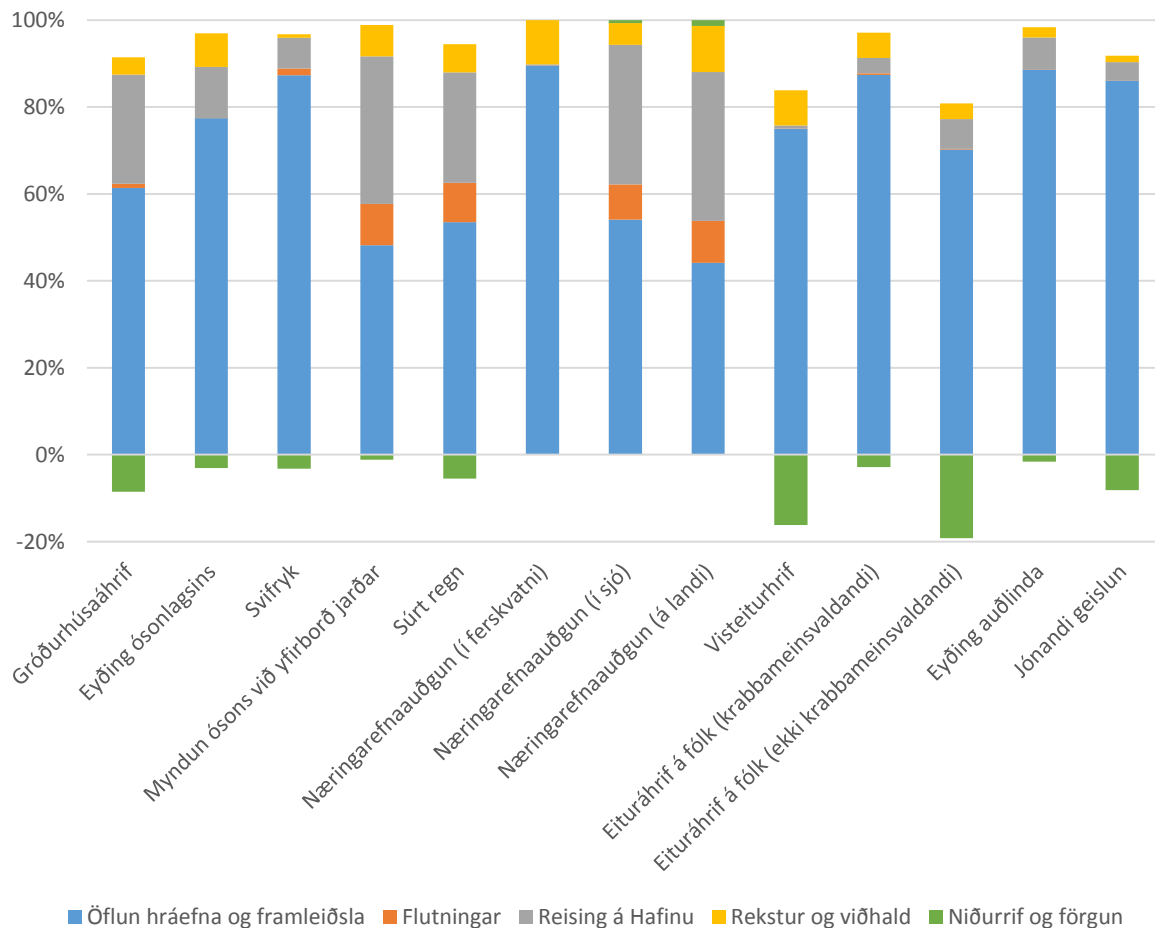
Tafla 6 Hlutfall efna í vindmyllu til endurvinnslu eða endurnýtingar og hlutfall þess sem reiknast sem ávinningur.

Hráefni	Hlutfall efna til endurvinnslu eða endurnýtingar	Ávinningur af endurunnu efni *
Stál í vélarhúsi	80% endurvinnsla	37%
Stál í turni	90% endurvinnsla	37%
Ál	95% endurvinnsla	69%
Kopar	95% endurvinnsla	81%
Steypujárn	95% endurvinnsla	37%
Rafbúnaður	80% endurnýting	-

* Skv. The International EPD System (2015) á aðeins að hafa flutninga til endurvinnslu innan kerfismarkna. Hér er valið að hafa ávinning vegna endurvinnslu innan kerfismarkna til að sýna fram á mikilvægi flokkunar og endurvinnslu.

4 Niðurstöður vistferilsgreiningar (LCIA)

Í þessum kafla eru birtar niðurstöður vistferilsgreiningar (e. *Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) fyrir vinnslu á 1 kWst af raforku með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Niðurstöður eru birtar fyrir tíu megin áhrifaflokka (mynd 9) þar sem sjá má hvernig áhrifin skiptast á milli mismunandi stiga vistferilsins. Flokkarnir næringarefnaauðgun og eituráhrif á fólk greinast frekar niður og birtast niðurstöður því í þrettán mismunandi súlum. Áhrifaflokkum er nánar lýst í viðauka 1. Valið hefur verið að birta niðurstöður í myndum 10-13 fyrir þau stig vistferilsins sem skilgreind eru í kerfismörkum (kafla 2.3). Þar eru niðurstöður settar fram fyrir helstu þætti innan hvers stigs, en hægt er að sundurliða niðurstöður enn frekar til að draga fram mögulegar umbótaágerðir.

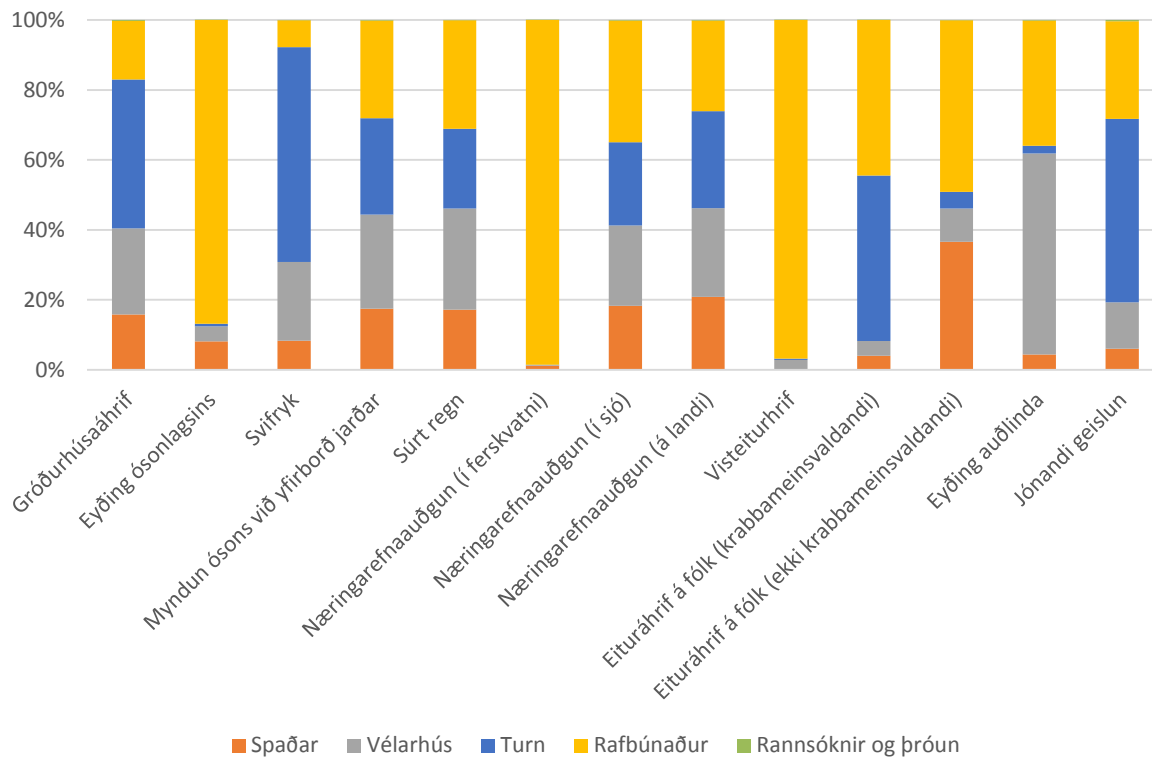


Mynd 9 Niðurstöður vistferilsgreiningar á vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Hlutdeild mismunandi þátta vistferils vindmyllu má sjá fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa. Sjá má nánari lýsingu á flokkum umhverfisáhrifa í viðauka 1 og tölulegar niðurstöður fyrir alla þætti í viðauka 2.

Framleiðsla á vindmyllu, þ.e. öflun hráefna, framleiðsla og samsetning allra íhluta í vindmyllu er ráðandi þáttur í öllum áhrifaflokkum (mynd 9). Í flokkunum gróðurhúsaáhrif, myndun ósons við yfirborð jarðar, súrt regn og næringarefnaauðgun á sjó og landi má einnig sjá að reising vindmyllunnar vegur töluvert í heildina. Í flestum umhverfisáhrifaflokkum skilar endurvinnsla efna að loknum líftíma ávinningi og dregur úr heildarumhverfisáhrifunum, hlutfallslega mest í flokkunum visteiturhrif og eituráhrif á fólk (ekki krabbameinsvaldandi).

Tölulegar niðurstöður fyrir alla flokka umhverfisáhrifa má sjá í viðauka 2, auk þess sem nánar er gerð grein fyrir niðurstöðum vistferilsgreiningarinnar í köflum hér á eftir.

4.1 Öflun hráefna og framleiðsla

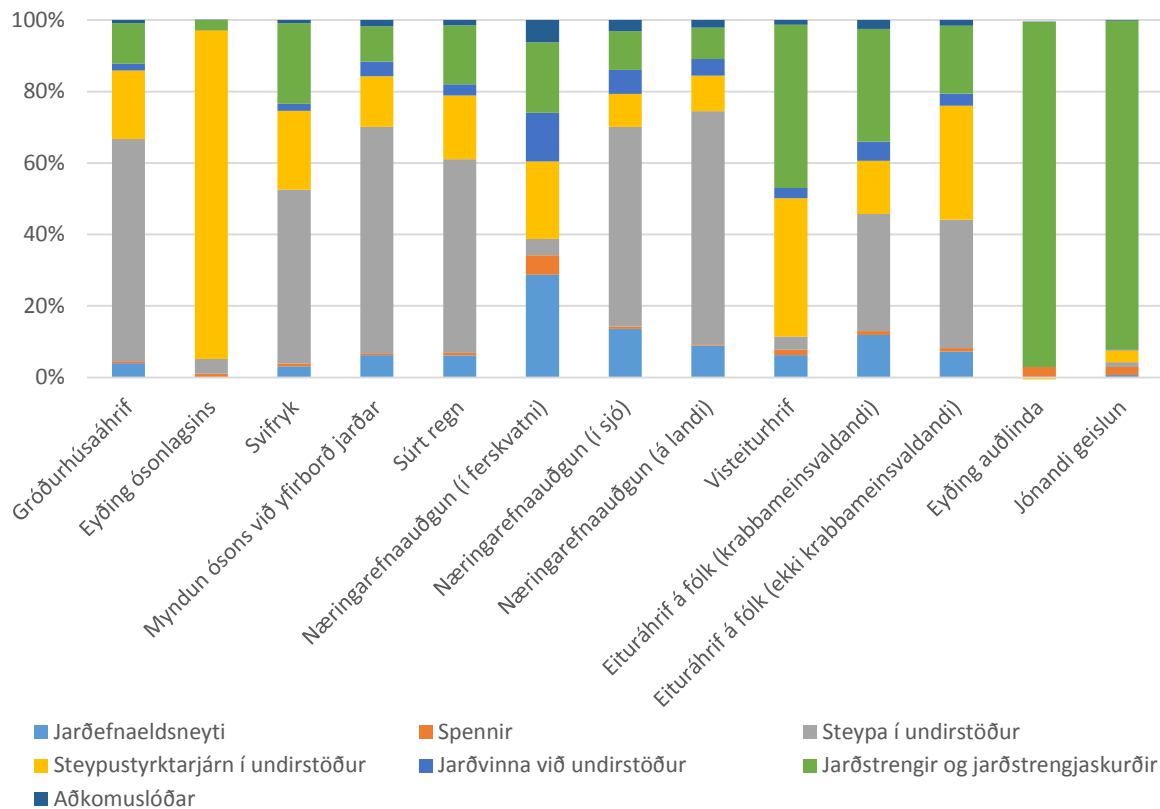


Mynd 10 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild mismunandi íhluta í vindmyllu og rannsókna og þróunar í hverjum flokki umhverfisáhrifa.

Skýringar:	
Spaðar	Framleiðsla þriggja 22 m spaða á vindmyllu auk úrgangs frá framleiðslu.
Vélarhús	Framleiðsla vélarhúss og allra íhluta þess, þ.e.a.s. framleiðsla á hverfli, rafali (snúð og sátri), klæðningu, þyrilnðf, öxulpinna, spaðafestingu, undirstöðu, snúningsdrifi, legum, auk alls úrgangs frá framleiðslu.
Turn	Framleiðsla á stálturni og málning.
Rafbúnaður	Framleiðsla á öllum rafbúnaði innan vindmyllu, þ. á m. á stýribúnaði fyrir snúningsdrifi, á nemum og skynjurum, köplum, prentplötum o.fl., spennu, auk úrgangs frá framleiðslu.
Rannsóknir og þróun	Rekstur skrifstofa, rannsóknar- og þróunardeildar hjá framleiðanda, skipt niður á hverja framleiðslueiningu, þ.e. á framleidda vindmyllu.

Hlutfallsleg skipting umhverfisáhrifa fyrir sérhvern íhlut rannsóknarvindmyllu á Hafinu er mismunandi eftir áhrifaflokkum, sjá mynd 10. Í fjórum flokkum, þ.e. í flokki gróðurhúsaáhrifa, svifryks, eituráhrifa á fólk (krabbameinsvaldandi) og jónandi geislunar, vegur framleiðsla turnsins verulega, eða á bilinu 40-60% af framleiðslu vindmyllunnar. Stafar þetta aðallega af orkufrekum og svifryksmengandi vinnsluaðferðum í stálframleiðslunni. Eituráhrifin, þ.e. visteiturhrif og eituráhrif á fólk, má einnig rekja að miklu leyti til rafbúnaðar í vindmyllunni. Framleiðsla rafbúnaðar, þ. á m. prentplatna og spennis, vegur hlutfallslega mest í flokkum sem snúa að eyðingu ósonlagsins, næringarefnaauðgun í ferskvatni og visteiturhrifum. Í flokknum eyðing auðlinda vegur rafallinn innan vélarhússins þyngst, en áhrifin má rekja til koparvafninga í rafalnum. Umhverfisáhrif vegna reksturs rannsóknar- og þróunardeildar hjá framleiðanda, þar sem búið er að skipta áhrifum niður á hverja framleiðslueiningu fyrirtækisins, hefur hverfandi áhrif í öllum flokkum. Tölulegar niðurstöður fyrir hvern íhlut vindmyllu má sjá í viðauka 2.

4.2 Reising á Hafinu



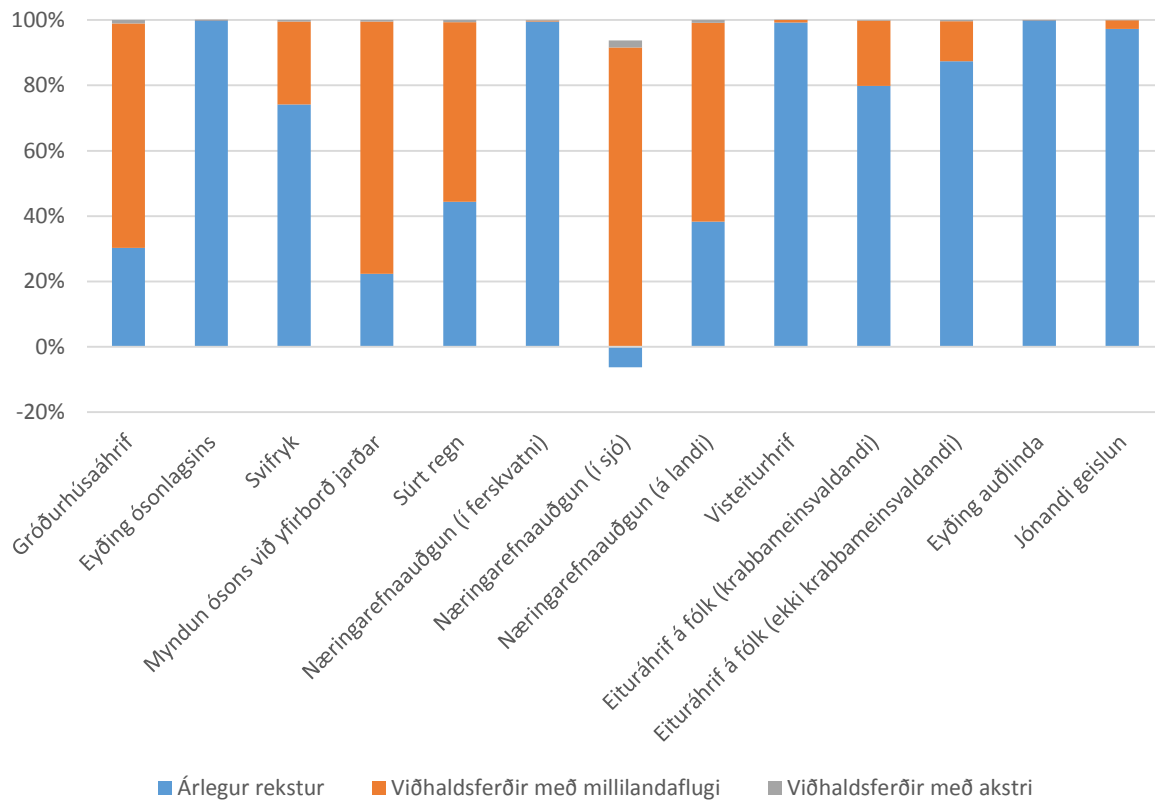
Mynd 11 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild sérhvers efnis- og framkvæmdaþáttar vegna reisingar vindmyllu í hverjum flokki umhverfisáhrifa.

Skýringar:

Jarðefnaeldsneyti	Brennsla olíu á rafstöð og eldsneytis á gröfvar, krana og vegna aksturs starfsmanna og verktaka
Spennir	Framleiðsla 50 kVA spennis
Steypa í undirstöður	Framleiðsla og flutningur steypu í undirstöður og þrifalag
Steypustyrktarjárn í undirstöður	Framleiðsla og flutningur steypustyrktarjárns í undirstöður
Jarðvinna við undirstöður	Brennsla eldsneytis vegna allrar jarðvinnu fyrir undirstöðum
Jarðstrengir og jarðstrengjaskurðir	Framleiðsla 1 kV og 12 kV jarðstrengja og brennsla eldsneytis vegna graftar og lagningu strengja
Aðkomuslóðar	Brennsla eldsneytis vegna gerðar aðkomuslóða (skeringar, losun á klöpp, fyllingar o.fl.)

Vægi einstakra framkvæmdaþátta er misjafnt eftir umhverfisáhrifaflokkum (mynd 11). Í átta áhrifaflokkum vegur steypa töluvert eða þyngst í heildina, en áhrifin felast fyrst og fremst í framleiðslu á sementi. Nánar er fjallað um hlut steypu í kolefnisspori vindmyllunnar, þ.e. gróðurhúsaáhrifum hennar, í kafla 5.4. Framleiðsla steypustyrktarjárns í undirstöður vegur þyngst í eyðingu ósonlagsins. Notkun áls í jarðstrengjum og orkufrekar framleiðsluaðferðir þeirra er aftur á móti ráðandi þáttur í eyðingu auðlinda og jónandi geislun sem og markverður þáttur í visteiturhrifum. Tölulegar niðurstöður fyrir hvern þátt reisingar má sjá í viðauka 2.

4.3 Rekstur og viðhald

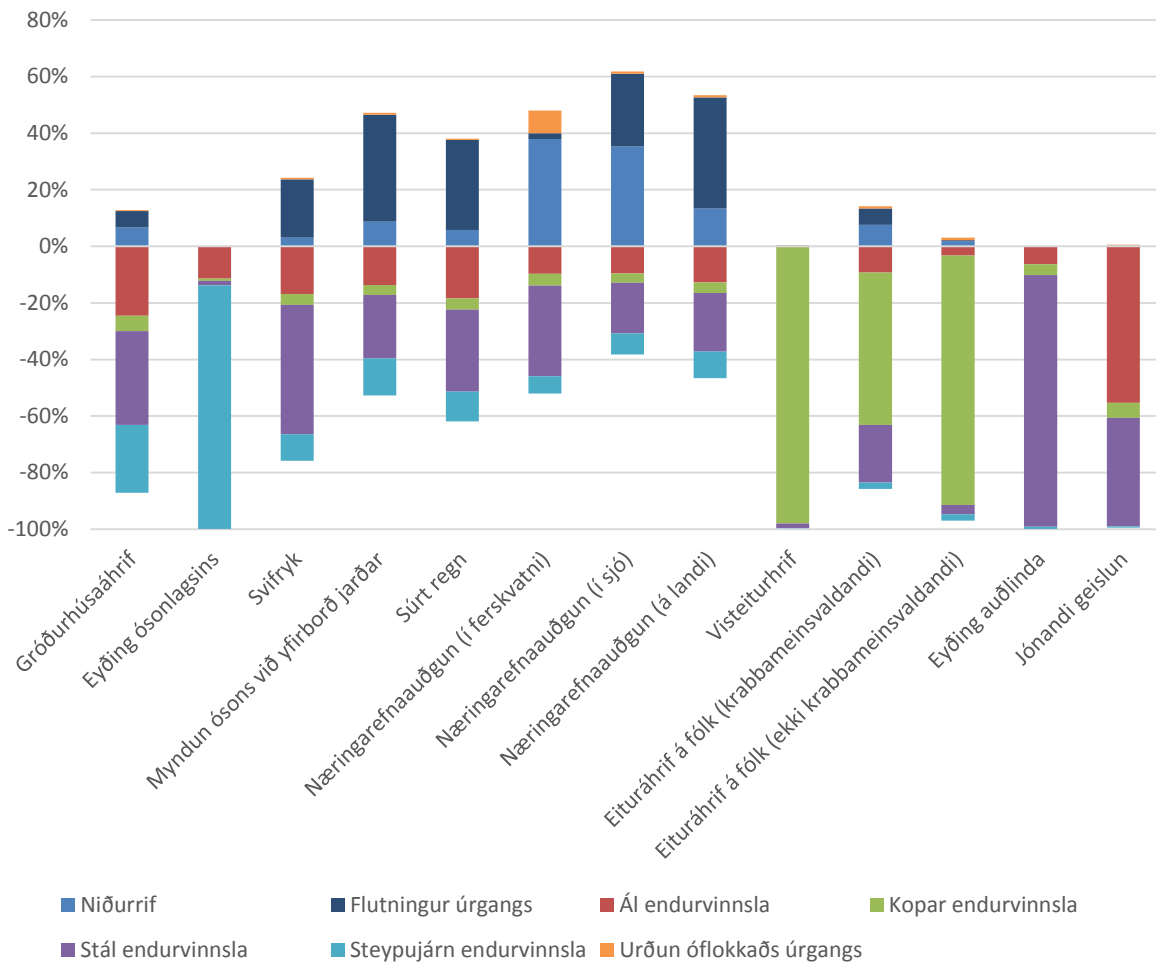


Mynd 12 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu. Sjá má hlutdeild sérhvers rekstrarþáttar í hverjum flokki umhverfisáhrifa.

Skýringar:	
Árlegur rekstur	Aðföng og úrgangur í árlegum rekstri (s.s. skráfur, rafbúnaður, smurolía, pappi o.fl.) og vikulegar eftirlitsferðir starfsmanna frá Búrfellsvirkjun.
Viðhaldsferðir með millilandaflugi	Fjórar viðhaldsferðir á ári í fimm ár frá meginlandi Evrópu. Innifalið: Flug og akstur tveggja starfsmanna og úrgangur í hverri viðhaldsferð. Að auki fara með tveir starfsmenn frá Búrfellsstöð í hverri viðhaldsferð.
Viðhaldsferðir með akstri	Fjórar viðhaldsferðir á ári tveggja starfsmanna frá Búrfellsstöð í fimmtán ár. Innifalið: Akstur tveggja starfsmanna og úrgangur í hverri viðhaldsferð.

Hlutdeild rekstrar og viðhalds er einungis um 1 til 10% af heildarumhverfisáhrifum vistferilsins í hverjum umhverfisáhrifaflokki (mynd 9). Í átta áhrifaflokkum er árlegur rekstur, þ.e. aðföng og efni sem þarf til reksturs og viðhalds s.s. smurolía, hreinsiefni, stálíhlutir ýmsir og plastefni ráðandi þáttur. Í gróðurhúsaáhrifum, myndun ósons við yfirborð jarðar, súru regni, næringarefnaauðgun í sjó og á landi veða flugferðir vegna viðhaldsferða þyngst. Þetta er vegna þeirra efna sem losna í andrúmsloftið við brennslu þotuelsneytis. Tölulegar niðurstöður fyrir ofangreinda rekstrarþætti má sjá í viðauka 2.

4.4 Niðurrif og förgun



Mynd 13 Niðurstöður vistferilsgreiningar vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Sjá má hlutdeild niðurrifs, flutnings, förgunar og endurvinnslu vindmyllunnar í hverjum flokki umhverfisáhrifa.

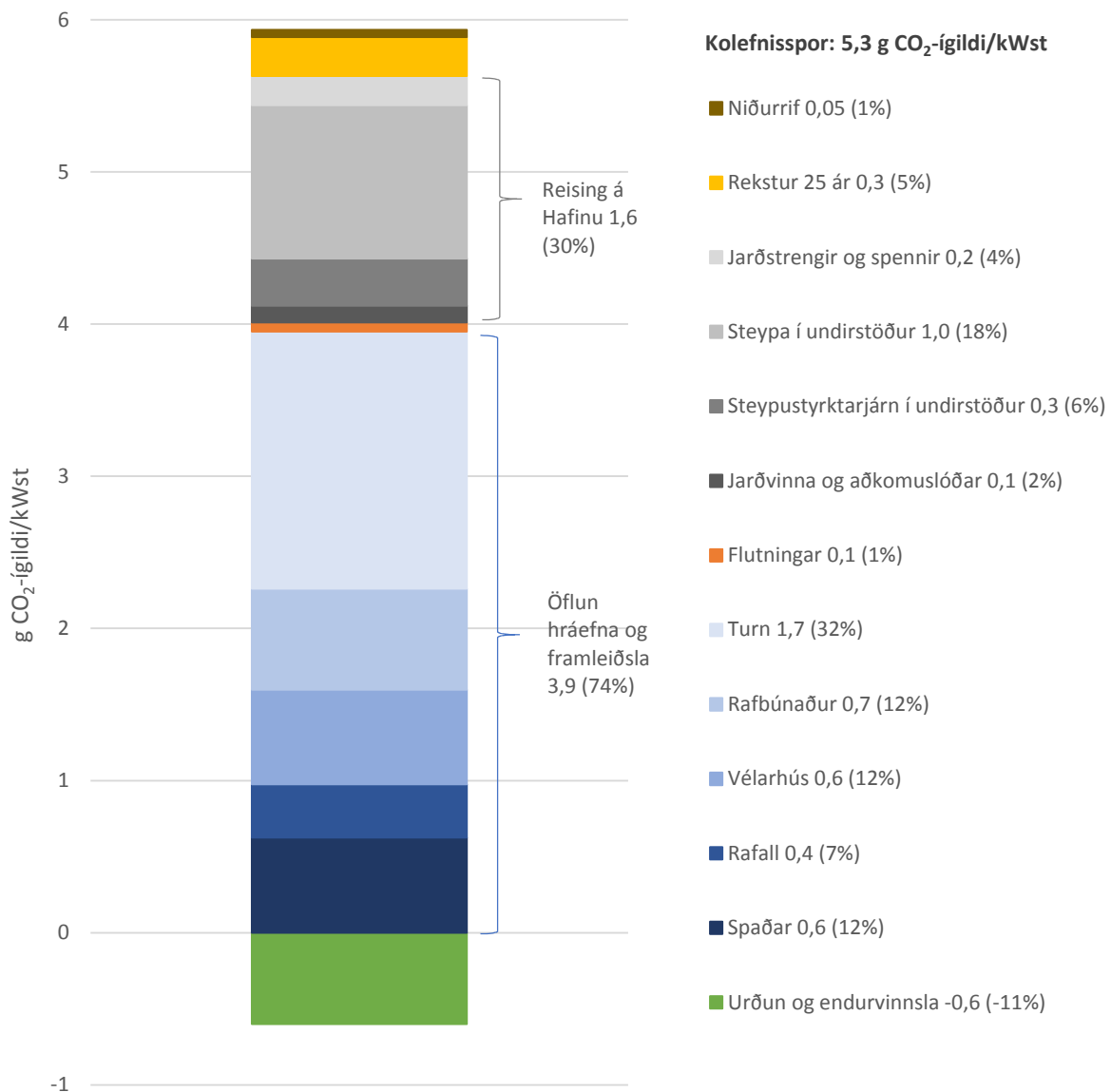
Skýringar:

Niðurrif	Brennsla eldsneytis vegna niðurrifs rannsóknarvindmyllu á Hafinu
Flutningur úrgangs	Flutningur endurvinnanlegra og óendurvinnanlegra efna til endurvinnslu eða urðunar
Ál endurvinnsla	Ávinningur af endurvinnslu áls
Kopar endurvinnsla	Ávinningur af endurvinnslu kopars
Stál endurvinnsla	Ávinningur af endurvinnslu turnstáls
Steypujárn endurvinnsla	Ávinningur af endurvinnslu steypujárns úr vélarhúsi
Urðun óflokkaðs úrgangs	Urðun óendurunnins úrgangs (málmur, plast, trefjagler o.fl.)

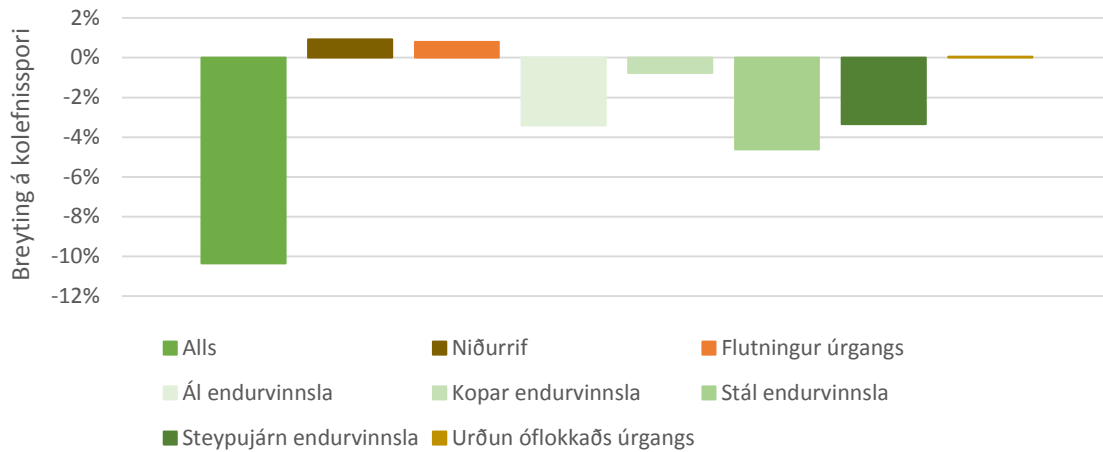
Endurvinnsla efna í vindmyllu að loknum líftíma hennar getur skilað sér í ávinningi fyrir umhverfið sem þar með dregur úr reiknuðum heildaráhrifum, en eins og fram kemur í kafla 3.5 getur endurrunnið efni komið í veg fyrir vinnslu nýs hráefnis í framtíðinni. Ávinninginn má sjá í endurvinnslu stáls í turni, endurvinnslu steypujárns innan úr vindmyllu (íhlutir vélarhúss, þ.m.t. spaðafestingar, öxulpinni, snúningsdrif o.fl.), endurvinnslu áls og endurvinnslu kopars (mynd 13). Í ellefu flokkum vegur ávinningur af endurvinnslu málmanna upp á móti umhverfisáhrifum eldsneytisnotkunar vegna niðurrifsins og flutningi efnanna. Tölulegar niðurstöður fyrir niðurrif og förgun má sjá í viðauka 2.

4.5 Kolefnisspor

Kolefnisspor, mælikvarði á gróðurhúsaáhrifum, er skilgreint sem heildarlosun gróðurhúsalofttegunda sem rekja má til athafna mannsins. Kolefnisspor einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu er 452 tonn CO₂-ígildi, eða því sem samsvarar 5,3 g CO₂-ígildum fyrir hverja framleidda kWst á 25 ára líftíma hennar. Framleiðsla turnsins hefur hlutfallslega mest áhrif á kolefnisspor vindmyllunnar, með steypu í undirstöður, framleiðslu á rafbúnaði og spöðum þar á eftir (mynd 14). Endurvinnsla efna að loknu niðurrifi dregur úr kolefnissporinu og skiptir þar mestu máli endurvinnsla á turnstáli, steypujárnri úr íhlutum vélarhúss og áli (mynd 15). Alls lækkar kolefnissporið um 0,6 g CO₂-ígildi/kWst með niðurrifi og endurvinnslu samanlagt.

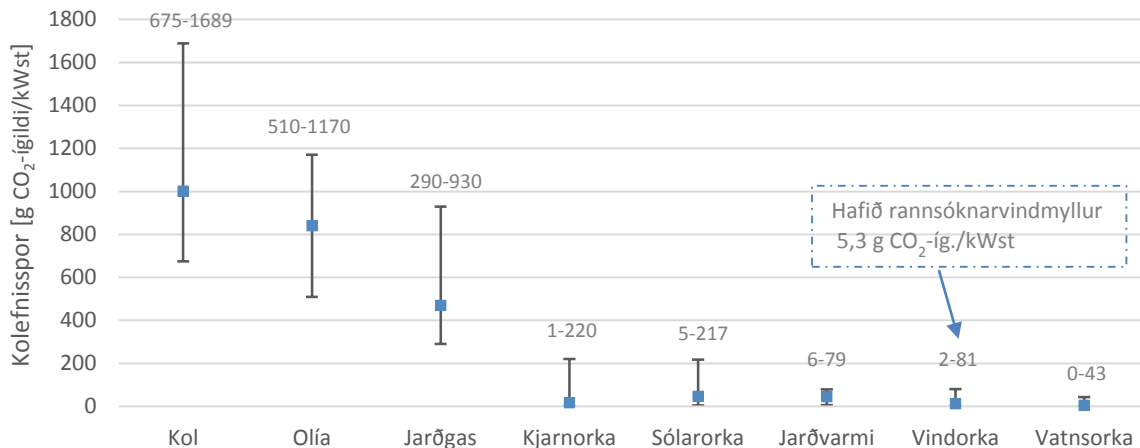


Mynd 14 Kolefnisspor vegna framleiðslu 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllum á Hafinu og hlutfallsleg skipting meðal helstu þátta vistferilsins. Gefin eru upp töluleg gildi í g CO₂-ígildum/kWst sem og hlutfallslegt vægi hvers þátta út frá nettó kolefnisspori.



Mynd 15 Ávinningur niðurrifs og förgunar í lok vistferils vindmyllu, reiknað út frá nettó kolefnisspori.

Kolefnisspor rannsóknarvindmylla á Hafinu er lágt í samanburði við aðra orkugjafa eins og kunnugt er og eru niðurstöður á Hafinu í samræmi við t.d. samantekt Milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar (IPCC), sjá mynd 16. Nánari samanburð fyrir vindorkuvinnslu á Hafinu og víðar má sjá í kafla 6.



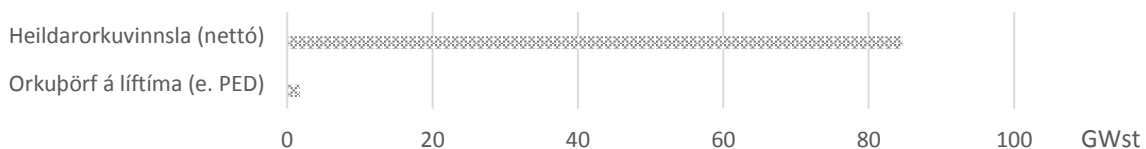
Mynd 16 Lágildi og hágildi fyrir kolefnisspor mismunandi orkugjafa auk miðgildis, sýnt með bláum punkti, unnin upp úr samantekt IPCC (Sathaye o.fl., 2011). Á myndinni kemur einnig fram kolefnisspor fyrir rannsóknarvindmyllur á Hafinu.

4.6 Orkubúskapur

Orkuþörf á líftíma (e. *Primary energy demand, PED*) er samantölur orkuþörf vindmyllunar á líftíma hennar, þ.e. vegna framleiðslu, reisingar, notkunar og förgunar hennar. Um er að ræða orkuþörf frá endurnýjanlegum og óendurnýjanlegum orkugjöfum, t.d. frá kjarnorku, vatnsorku, jarðefnaeldsneyti o.s.frv. Orkuþörf einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu á 25 ára líftíma er 1,7 GWst. Fyrst og fremst er um að ræða orku frá ólíkum orkugjöfum til framleiðslu á sjálfri vindmyllunni, en einnig til framleiðslu á steypu og stáli í undirstöður, sem og eldsneyti í vélar og flutningstæki.

Heildarorkuvinnsla einnar vindmyllu yfir líftímamann er 84,8 GWst. Orkunotkun vindmyllunnar vegna reksturs hennar er minni en 100 MWst eða 0,1 GWst yfir líftímamann og hefur því hverfandi áhrif. Orkuarðsemi (e. *Harvest factor / EROI*) er hlutfallið milli heildarorkuvinnslu og orkuþarfar á líftíma og er í þessu tilfelli 50. Vindmyllan á Hafinu framleiðir m.ö.o. 50 sinnum meiri orku en hún þarf á 25 ára líftíma sínum (mynd 17).

$$\text{Orkuarðsemi} = \frac{\text{Heildarorkuvinnsla [kWst]}}{\text{Orkuþörf á líftíma [kWst]}}$$



Mynd 17 Heildarorkuvinnsla og orkuþörf á líftíma rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

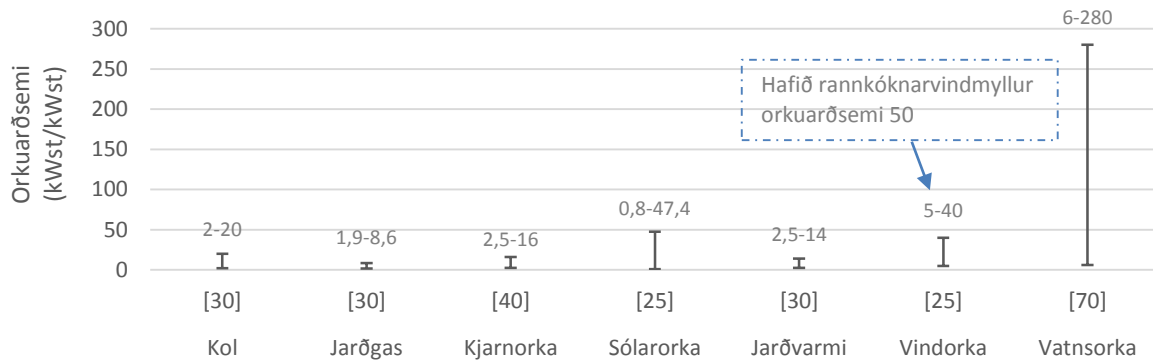
Endurgreiðslutími orku (e. *Energy payback time*) er sá tími sem líður þangað til að hlutföllin verða 1:1 milli heildarorkuvinnslu og orkuþarfar á líftíma. Endurgreiðslutími orku er í tilfelli vindmyllunnar 6 mánuðir, þ.e. að hálfu ári liðnu í rekstri er vindmyllan búin að vinna jafnmikla orku og hún þarf yfir líftíma sinn. Frá og með þessum tíma má segja að vindmyllan sé farin að skila hagnaði með tilliti til orku.

$$\text{Endurgreiðslutími orku [ár]} = \frac{\text{Orkuþörf á líftíma [kWst]}}{\text{Heildarorkuvinnsla [kWst]}} \times \text{líftími [ár]} = \frac{\text{líftími [ár]}}{\text{Orkuarðsemi}}$$

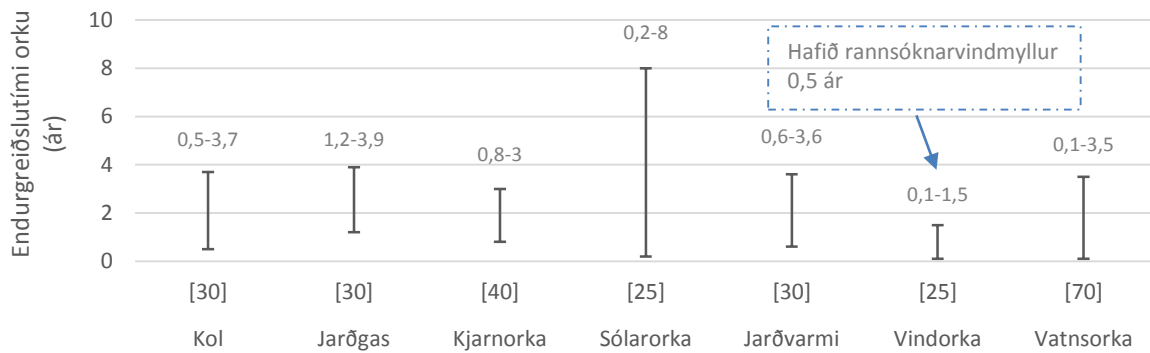
Niðurstöður fyrir orkuarðsemi og endurgreiðslutíma rannsóknarvindmyllanna á Hafinu falla vel að niðurstöðum erlendra rannsókna, sjá myndir 18 og 19. Orkuarðsemi rannsóknarvindmyllu á Hafinu er skv. þessari greiningu há miðað við birtar niðurstöður um orkuarðsemi vindmylla og er endurgreiðslutími orku í lægra lagi í samanburði við birtar niðurstöður. Hafa ber í huga að niðurstöður um orkuarðsemi og endurgreiðslutíma eru mjög háðar heildarorkuvinnslu vindmyllu og þar með líftíma hennar (kafli 5.3). Þar sem nýtni rannsóknarvindmyllanna tveggja á Hafinu (43%) er meiri en gengur og gerist fyrir sambærilegar vindmyllur á landi er samanburður við nýtingu vindorku erlendis jákvæður.

Tafla 7 Orkubúskapur einnar rannsóknarvindmyllu á Hafinu á 25 ára líftíma.

Orkuþörf á líftíma	1,7 GWst
Heildarorkuvinnsla	84,8 GWst
Orkuarðsemi	50
Endurgreiðslutími orku	6 mánuðir



Mynd 18 Lágildi og hágildi fyrir orkuarðsemi skv. samantekt IPCC fyrir mismunandi orkugjafa (Sathaye o.fl., 2011). Algengasti tilgreindi líftíminn fyrir hvern orkugjafa er gefinn upp innan hornklofa. Á myndinni er einnig gefin upp orkuarðsemi rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

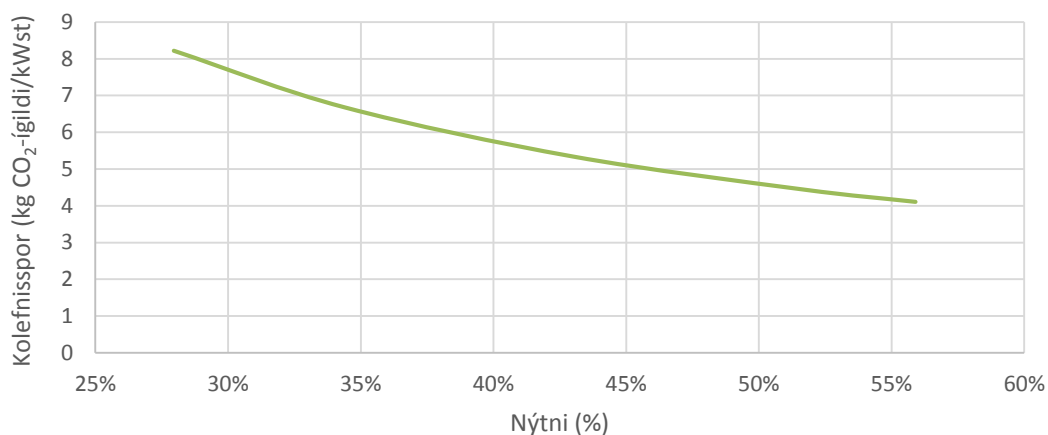


Mynd 19 Lágildi og hágildi fyrir endurgreiðslutíma orku skv. samantekt IPCC fyrir mismunandi orkugjafa (Sathaye o.fl., 2011). Algengasti tilgreindi líftíminn fyrir hvern orkugjafa er gefinn upp innan hornklofa. Á myndinni er einnig gefin upp endurgreiðslutími orku fyrir rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

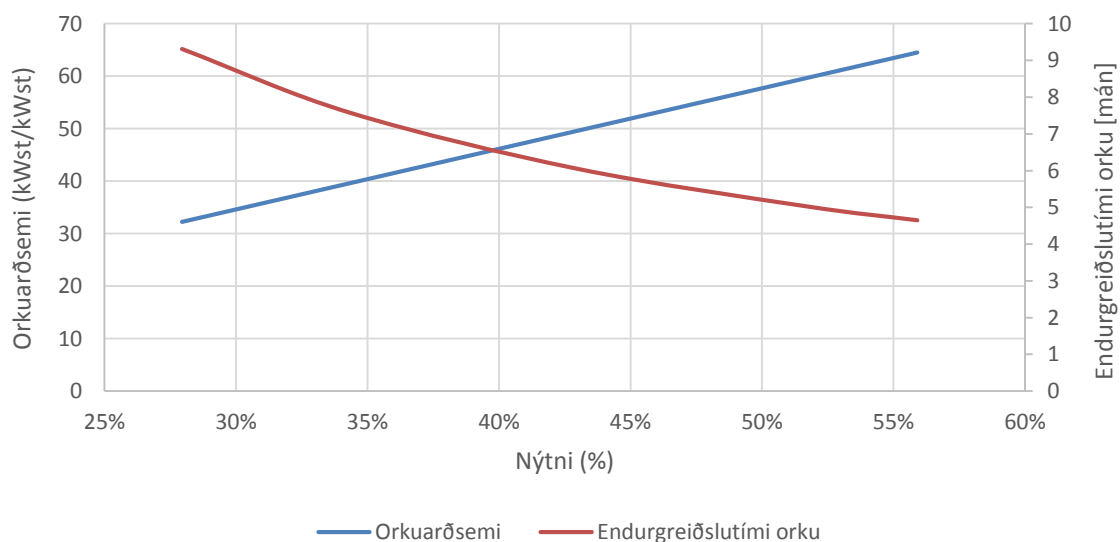
5 Næmnigreining

5.1 Nýtni

Nýtni vindmyllu er háð bæði uppsettu afli og aðstæðum á hverjum stað, ss. veðurfari og landfræðilegri legu. Hærrí vindmyllur geta t.a.m. skilað meiri orkuafköstum en lægri vegna þess að afköst aukast í þriðja veldi í hlutfalli við aukinn vindstyrk, og vindhraðinn næst jörðu eykst með vaxandi hæð yfir yfirborði. Nýtni hefur töluverð áhrif á bæði kolefnisspor og orkubúskap vindmyllu, sjá mynd 20 og mynd 21. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir 43% nýtni yfir líftímann, en sú nýtni byggir á rekstrarreynslu vindmyllanna sl. 2 ár. Raunhæft má ætla að nýtnin falli innan 10% vikmarka, þ.e. frá 39% upp í 47%, eða því sem samsvarar kolefnisspori frá 6 og niður í 5 g CO₂-ígildi/kWst. Jafngildir þetta einnig orkuarðsemi frá 45 upp í 55 og endurgreiðslutíma sem styttest eða lengist um u.þ.b. 3 vikur frá núverandi mati (6 mán).



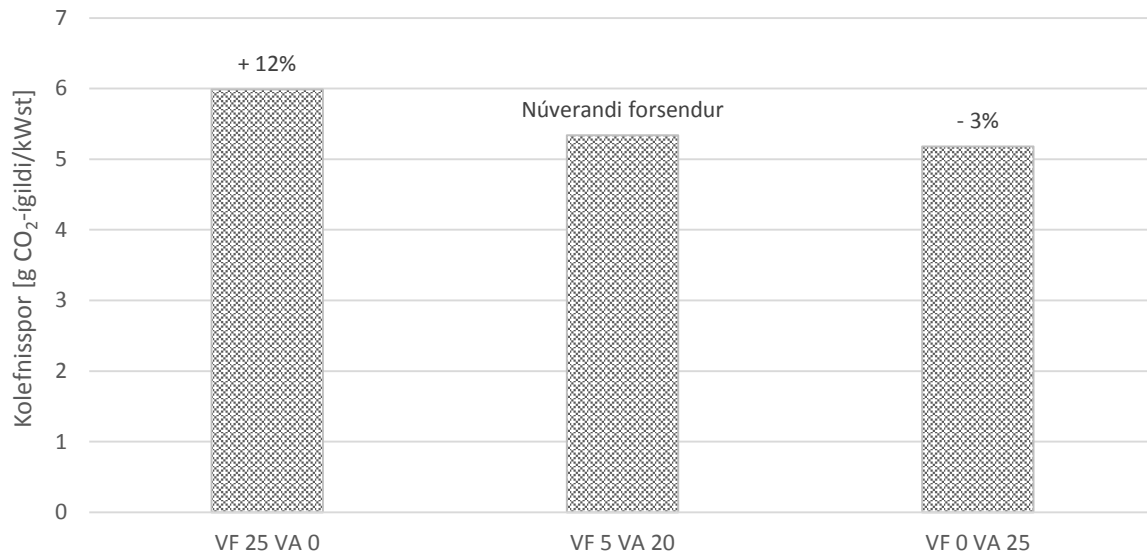
Mynd 20 Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu 1 kWst með rannsóknarvindmyllu á Hafinu með breytilegu nýtnihlutfalli.



Mynd 21 Næmnigreining á orkubúskap rannsóknarvindmyllu á Hafinu með breytilegu nýtnihlutfalli.

5.2 Viðhald

Í þessari greiningu er miðað við viðhaldsferðir frá framleiðanda á þriggja mánaða fresti eða fjórum sinnum á ári, fimm fyrstu árin. Eftir þann tíma er gert ráð fyrir viðhaldsferðum að utan ljúki, og dregur þar með úr gróðurhúsaáhrifum vegna flugferða. Eðlilega mun kolefnissporið breytast ef viðhaldsferðir að utan halda áfram yfir allan líftímann sem og ef viðhaldi er alfarið sinnt innanlands yfir líftímann (mynd 22). Þess ber að geta að um er að ræða einvörðungu tvær vindmyllur á Hafinu sem viðhaldsferðir þjónusta skv. þessari greiningu.

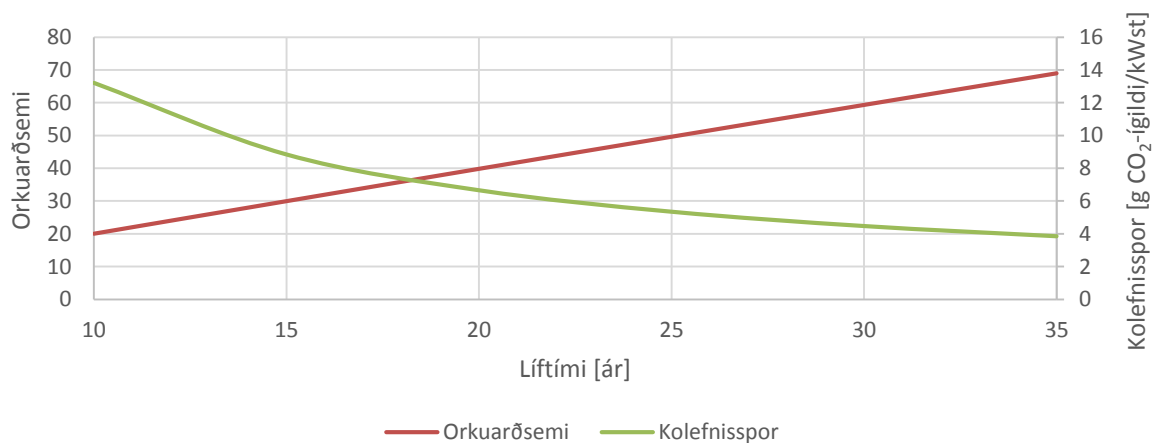


Mynd 22 Næmnigreining á kolefnisspori fyrir vinnslu á 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu með breytilegri viðhaldstilhögun. Gert er ráð fyrir viðhaldi á tveimur vindmyllum eingöngu. VF 25 VA 0 = Árlegar viðhaldsferðir með millilandsflugi í 25 ár. VF 5 VA 20 = Viðhaldsferðir að utan í fimm ár og innanlands í tuttugu ár. VF 0 VA 25 = Árlegar viðhaldsferðir innanlands, með akstri eingöngu, í 25 ár.

5.3 Líftími

Reiknuð umhverfisáhrif rannsóknarvindmyllu á Hafinu á hverja framleidda kWst minnkar eftir því sem líftími vindmyllunnar eykst og hún framleiðir meira. Áhugavert er að skoða hvernig t.d. kolefnisspor og orkubúskapur vindmyllunnar breytist með styttri eða lengri líftíma. Yfirleitt er miðað við 20 eða 25 ára tæknilegan líftíma vindmylla (Arvesen og Hertwich, 2012), þ.e. þann tíma sem framleiðandi ábyrgist vindmyllu, þó að erlendis séu dæmi þess að vindmyllur hafi náð allt að 30 eða jafnvel 40 ára aldri.

Líftími hefur mikil áhrif á orkuarðsemi og kolefnisspor (mynd 23). Ef líftími er skilgreindur 20 ár í stað 25 ára eins og gert er í þessari greiningu þá hækkar kolefnissporið úr 5,3 í 6,7 g CO₂-ígildi/kWst og orkuarðsemi lækkar úr 50 í 40. Ef líftími er skilgreindur 30 ár þá hinsvegar lækkar kolefnissporið niður í 4,5 g CO₂-ígildi/kWst og orkuarðsemi hækkar í 59. Taka ber næmnigreiningu með lengri líftíma á mynd 23 með fyrirvara því að fyrirsjáanlegt er að skipta þurfi út hreyfanlegum hlutum vindmyllunnar þegar hún hefur náð ákveðnum aldri, t.d. hverfli, rafali og rafbúnaði, en hreyfanlegir hlutir veða um 25% af kolefnisspori vindmyllunnar þegar miðað er við 25 ára líftíma (sjá mynd 14). Þá má gera ráð fyrir aðsinna þurfi umfangsmeira viðhaldi en venjulegt er. Ekki hefur verið gert ráð fyrir slíku í þessari næmnigreiningu. Þó er ljóst að líftími vindmyllu skiptir verulegu máli hvað t.d. kolefnisspor hennar varðar og má draga þá ályktun að það borgi sig út frá umhverfissjónarmiðum að halda henni vel við.



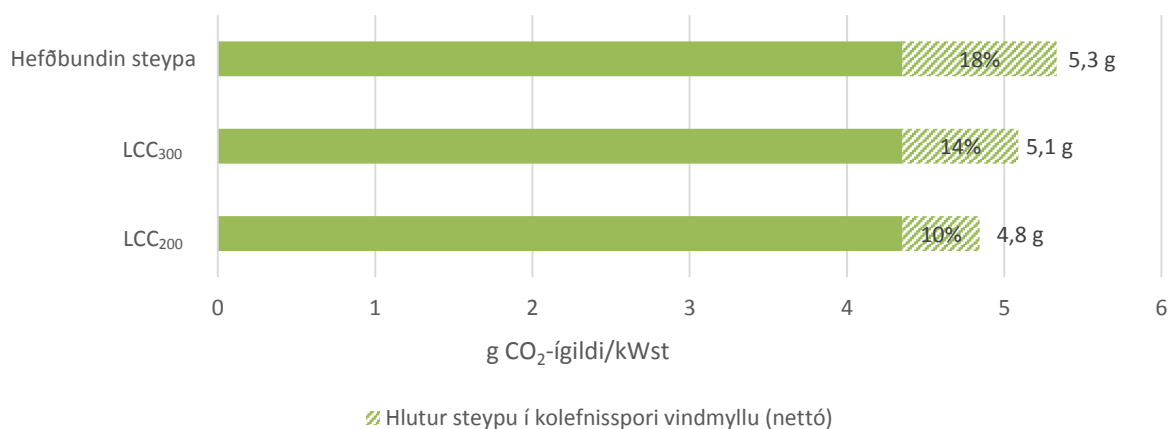
Mynd 23 Næmnigreining á orkubúskap og kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst með rannsóknarvindmyllum á Hafinu með breytilegum líftíma, þ.e. 10 – 35 ár. Ekki er gert ráð fyrir útskiptum hreyfanlegra hluta vindmyllunnar.

5.4 Steypa

Eins og fram kemur í kafla 3.3 byggir vistferilsgreiningin á gögnum frá Landsvirkjun og undirverktökum um magn og tegund efna sem notuð voru vegna reisingar rannsóknarvindmyllanna tveggja á Hafinu. Niðurstaða þessarar greiningar er að í fjórum umhverfisáhrifaflokkum er reising á verkstað veigamikill hluti áhrifanna (mynd 9), og gegnir steypa í undirstöðum lykilhlutverki í þessu sambandi (mynd 11). Reising vindmyllu er jafnframt einn þeirra þátta vistferilsins sem Landsvirkjun getur haft hvað beinust áhrif á eða breytt til að draga úr umhverfisáhrifum vindmyllunnar.

Steypa er stór þáttur kolefnissporsins, eða 18% (hlutfall af nettó kolefnisspori, sjá kafla 4.5). Áhrifin felast fyrst og fremst í framleiðslu á sementi, sem nemur þó ekki nema u.þ.b. 10% af rúmmáli hefðbundinnar steinsteypu. Mikil þróun hefur átt sér stað á undanförunum árum í framleiðslu sjálfútleggjandi steypu (e. *Self consolidating concrete, SCC*) þar sem reynt hefur verið að lágmarka sementsinnihald steypunnar samhliða því að steyptan uppfylli allar kröfur um styrk og gæði. Framleiðsluaðferðir sements og gjallinnihald í sementi (e. *Clinker*) er mjög ólíkt milli heimshorna og frá einum framleiðanda til annars og hefur því verið lagt til að flokka steypu eftir kolefnisspori hennar, þ.e. magni CO₂-ígilda á hvern m³ steypu (Ó. Wallevik o.fl., 2015).

Í þessari greiningu er gert ráð fyrir hefðbundinni steypu í undirstöður með kolefnisspor 400 kg CO₂-ígildi/m³. Áhugavert er að skoða hvernig notkun vistvænnar steypu (e. *Low carbon concrete, LCC*), þ.e. steypu með lægra kolefnisinnihaldi á hvern rúmmetra sem þó hefur sömu eiginleika hvað varðar gæði, hefði áhrif á kolefnisspor vindmyllunnar í heild. Eru niðurstöður þessarar greiningar því bornar saman við tvö tilvik vistvænnar steypu, annars vegar steypu með kolefnisspor 300 kg CO₂-ígildi/m³ (LCC₃₀₀) og hins vegar steypu með kolefnisspor 200 kg CO₂-ígildi/m³ (LCC₂₀₀). Niðurstöður sýna að lækka má nettó kolefnisspor rannsóknarvindmyllu á Hafinu um allt að 10%, eða úr 5,3 g í 4,8 g CO₂-ígildi/kWst með því að huga að undirstöðunum einum (mynd 24).



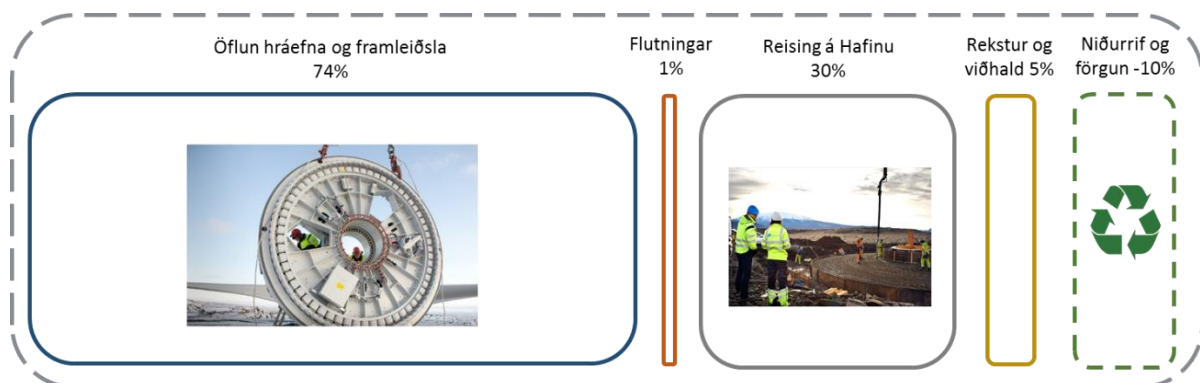
Mynd 24 Næmnigreining á kolefnisspori rannsóknarvindmyllu á Hafinu með notkun hefðbundinnar steypu og vistvænnar steypu. Sýndur er hlutfur steypu í kolefnisspori vindmyllu á Hafinu sem og töluleg gildi nettó kolefnisspors.

6 Umræður og lokaorð

Gæði gagnanna í þessari vistferilsgreiningu teljast góð, einkum varðandi stærstu þætti ferilsins sem lúta að öflun hráefna, framleiðsla og byggingu. Óvissa í niðurstöðum er helst háð áætlunum og forsendum um endurvinnslu í lok líftíma, en einnig að einhverju leyti áætlunum um rekstur vindmyllunnar.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar sýna að fyrir þá flokka umhverfisáhrifa sem teknir voru til skoðunar voru það öflun hráefna og framleiðsla vindmyllunnar sem vega mest þ.e. framleiðsla á stáltorni, rafbúnaði og íhlutum í vélarhúsi, s.s. framleiðsla rafals. Framkvæmdir við reisingu eru einnig veigamikill þáttur í heildaráhrifunum, sem rekja má til framleiðslu steypu, steypustyrktarjárns og jarðstrengja til tengingar við flutningskerfi raforku. Í flestum umhverfisáhrifaflokkum skilar endurvinnsla efna að loknum líftíma ávinningi og dregur úr heildaráhrifum, hlutfallslega mest í eituráhrifaflokkum.

Kolefnisspor vindmyllunnar er 5,3 g CO₂-ígildi/kWst miðað við 25 ára líftíma og 43% nýtni og vegur framleiðsla hennar þyngst í kolefnissporinu (mynd 25). Steypa og steypustyrktarjárn í undirstöðum vindmyllu vega einnig þungt eða alls 24% af nettó kolefnisspori. Þar sem árlegar viðhaldsferðir með millilandaflugi í upphafi rekstrar reiknast aðeins á tvær vindmyllur verður hlutfallslegt vægi þeirra markvert í kolefnissporinu. Ljóst er að ávinningur er mikill af endurvinnslu málma sem til falla við niðurrif vindmyllu og getur endurvinnsla lækkað brúttó kolefnisspor um a.m.k. 11% eða 0,8 g CO₂-ígildi/kWst miðað við forsendur þessarar greiningar. Auk þess getur notkun vistvænnar steypu í undirstöðum, sem jafnframt uppfyllir allar kröfur um gæði og styrk, lækkað kolefnissporið um allt að 10%.



Mynd 25 Hlutfallsleg skipting kolefnisspors vegna vinnslu 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllu á Hafinu. Á myndinni kemur fram hlutur sérhvers þáttar sem hlutfall af nettó kolefnisspori.

Orkuarðsemi vindmyllunnar er 50 og endurgreiðslutími orku er 6 mánuðir. Vindmyllan framleiðir með öðrum orðum 50 sinnum meiri orku en þurfti til að hún yrði að veruleika og er búin að framleiða orkuna sem þarf yfir allan líftímamann eftir 6 mánuði. Orkuarðsemin er há í alþjóðlegum samanburði og er endurgreiðslutími orku í styttra lagi í samanburði við birtar niðurstöður (tafla 8).

Í samantekt Arvesen og Hertwich (2012) á 44 vistferilsgreiningum sem gerðar hafa verið frá og með árinu 2000 er meðalnýtni 100 kW – 1 MW vindmylla á landi 22% og fyrir vindmyllur með uppsett afl 1 MW eða hærra er meðalnýtnin 31%. Hafa ber í huga að tækninni hefur fleygt hratt fram á sl. árum og er nýtni almennt meiri fyrir þær vindmyllur sem eru framleiddar og reistar í dag. Nýtni rannsóknarvindmyllanna á Hafinu er há (43%) miðað við nýtni sambærilegra vindmylla á landi, og skýrir það að miklu leyti jákvæðan samanburð við niðurstöður annarra vistferilsgreininga (tafla 8).

Tafla 8 Samantekt á niðurstöðum vistferilsgreininga af vindmyllum reknar á landi (e. Onshore); kolefnisspor og orkubúskapur. Niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Hafíð eru sýndar fyrir bæði 20 ár og 25 ár til samanburðar.

Aflstöð/ vindmylla	Uppsett afl per vindmyllu	Líftími [ár]	Nýtni [%]	Kolefnisspor [g CO ₂ -íg/kWst]	Orku- arðsemi	Endurgr.tími orku [mán]	Heimild
Hafíð, Ísland	900 kW	25	43	5,3	50	6,2 mán	
		20	43	6,7	40	7,6 mán	
Mont Crosin, Sviss	800 kW	20/40 ¹	20	11	-	-	Jungbluth o.fl., 2005
Vestas V82 Danmörk	1,65 MW	20	41	6,6	35	7,2 mán	Vestas, 2006
Vestas V112	3,0 MW	20	IEC II	7	30	8 mán	PE, 2011
Danmörk, Gridstreamer™	2 MW	20	36 – 47	7 – 10	22 – 33	8 – 11 mán	Garrett og Rønde, 2013
ENERCON, E-82 E2	2,3 MW	20	25	8,9	35,4	6,8 mán	ENERCON GmbH, 2013
			29	7,7	40,8	5,9 mán	
			35	6,1	51,0	4,7 mán	
Siemens SWT- 3.2-113	3,2 MW	20	46	4	57	4,5 mán	Siemens EPD, 2015
Meðaltal IPCC 1994-2010 ²	-		-	2 – 81 á landi 6 – 23 á hafi úti	5 – 40	1,2 – 18 mán	Wiser o.fl., 2011
Vattenfall, EPD (DK, DE, PO, SE, UK) ³	0,6-3,0 MW	20	-	15	-	-	Vattenfall, 2010
Meðaltal 2000- 2012 ⁴	0,1-1 MW	20-30	20 – 25	14,9 – 23	15 – 29	-	Arvesen og Hertwich, 2012
	> 1 MW	20-30	25 – 34	7,2 – 12,5	30 – 40		

1) Líftími hreyfanlegra hluta er 20 ár en fastra hluta (t.d. turns) er 40 ár. Nýtni miðar við evrópskar meðalaðstæður á landi.

2) Úr samantekt IPCC. Byggir á niðurstöðum 49 greina sem frá árabílinu 1994-2010 fyrir kolefnisspor, og 20 greina fyrir endurgreiðslutíma orku. Flestar niðurstöður, eða innan 25%-75% hundraðshlutamarka, eru á bilinu 8 – 20 g CO₂-ígildi/kWst fyrir kolefnisspor og 3,4 mán – 8,5 mán fyrir endurgreiðslutíma. Algengasti tilgreindi líftíminn er 25 ár.

3) Niðurstöður fyrir 10 vindlundi sem eiga að endurspegla alla raforkuvinnslu Vattenfall með vindorku. Tæknilegur líftími er skilgreindur 20 ár og vindmyllur eru af stærðargráðu 0,6 – 3 MW. Þrír þessara vindlunda eru á hafi úti (nýtni 30 – 39%), en hinir sjö eru á landi (nýtni 18 – 34%).

4) Niðurstöður vistferilsgreininga frá 2000 - 2012, fyrir vindmyllur af stærðargráðu 100 kW og stærri á landi. Um er að ræða 25% - 75% hundraðshlutamörk. Líftími er skilgreindur 20, 25 eða 30 ár.

Í skýrslu IPCC um endurnýjanlega orkugjafa og mótvægisáðgerðir við hlýnun jarðar er búið að taka saman kolefnisspor og orkubúskap mismunandi orkugjafa miðað við núverandi þekkingu (Sathaye o.fl., 2011), sjá myndir 16 og 18. Vindorka er meðal þeirra orkugjafa sem minnstu kolefnisspori valda, ásamt vatnsafli og jarðvarmaorku, öfugt við t.d. jarðefnaeldsneyti (um 800 g CO₂-ígildi/kWst) og kol (um 1000 g CO₂-ígildi/kWst). Niðurstöður þessarar greiningar eru í samræmi við ofangreinda samantekt, þar sem kolefnisspor vindorku fellur á milli kolefnisspora vatnsafis annars vegar og jarðvarma hins vegar. Ekki liggja fyrir niðurstöður vistferilsgreiningar á raforkuvinnslu á Íslandi almennt, nema fyrir einstakar aflstöðvar. Í skýrslu EFLU verkfræðistofu frá árinu 2011 (EFLA, 2011) var kolefnisspor raforku frá Fljótsdalsstöð metin 2,6 g CO₂-ígildi/kWst. Unnið er nú að vistferilsgreiningu Hellisheiðarvirkjunar og hefur kolefnisspor raforku frá virkjuninni verið metin á bilinu 25 - 27 g CO₂-ígildi/kWst (M. R. Karlsdóttir o.fl., 2015).

Hafa ber í huga að niðurstöður vistferilsgreininga fyrir vindorku (tafla 8) eru verulega háðar m.a. stærð vindmylla, afkastagetu, líftíma og fjölda. Margar vindmyllur í einni þyrpingu, þ.e. vindlundi, vinna

samanlagt meira rafmagn. Þær hafa einnig í för með sér fleiri jarðstrengjatengingar, meiri slóðatengingar, auk þess sem við bætast safnstöðvar með þar til gerðum spennivirkum sem tengjast svo flutningskerfi raforku. Heildarumhverfisáhrif raforkuvinnslu með vindorku á hverja kWst eru því háðar hverju tilviki fyrir sig.

Niðurstöður þessarar greiningar veita upplýsingar um umhverfisáhrif vindorkunýtingar á Hafinu, meðal annars hvar megin áhrifin sé að finna yfir allan vistferilinn. Greiningin nýtist jafnframt til að auðkenna mögulegar aðgerðir til að draga úr umhverfisáhrifum vindorkunýtingar, hvort sem um er að ræða í hönnun, undirbúningi framkvæmda, við innkaup eða í rekstri og er notkun vistvænnar steypu í undirstöður dæmi um slíka aðgerð. Greiningin er auk þess grunnur fyrir meiri rannsóknir, t.d. vistferilsgreiningu á frekari vindorkunýtingu, og geta niðurstöðurnar einnig nýst til að útbúa umhverfisýfirlýsingu fyrir vindorku hjá Landsvirkjun (e. *Environmental Product Declaration*). Getur vistferilsgreining þannig nýst rekstraraðilum bæði í markaðsmálum og sem öflugt verkfæri í virkri umhverfisstjórnun þar sem stöðugt er leitað leiða til úrbóta.

Heimildir

- ABB (2003) *Distribution Transformer. 315kVa, 11kV, 3 phase, ONAN. Environmental Product Declaration*. Sótt af: www.abb.com
- Arvesen, A., E.G. Hertwich (2012) *Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16; 5994-6006.
- EFLA (2011) *Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafla. Fljótsdalsstöð*. Landsvirkjun, LV-2011/086
- ENERCON GmbH (2012) *LCA of an ENERCON Wind Energy Converter E-101*. Report. ENERCON GmbH, Aurich, Germany, 29 pp.
- ENERCON GmbH (2013a) *LCA of an ENERCON Wind Energy Converter E-44*. Report. ENERCON GmbH, Aurich, Germany, 21 pp.
- ENERCON GmbH (2013b) *LCA of an ENERCON Wind Energy Converter E-82 E2*. Report. ENERCON GmbH, Aurich, Germany, 27 pp.
- Garrett, P. og Rønnde, K. (2013) *Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, pp. 37-48.
- Glöser, S., Soulier, M. og Tercero Espinoza, L.A. (2013) *A dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation*. *Environmental Science and Technology*, 47, pp. 6564-6572.
- The International EPD System (2015) *Product Group Classification: UN CPC 171 and 173 Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution*. PCR 2007:08, Version 3.0, gildir til 2. 5. 2019 Sótt af: [www. environdec.com](http://www.environdec.com)
- IRENA (2015) *Renewable Power Generation Costs in 2014*. Sótt af: www.irena.org/publications
- ISO 14040 (2006) *Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. ISO 14040: 2006
- ISO 14044 (2006) *Umhverfisstjórnun - Lífsferilsmat - Kröfur og leiðbeiningar* (Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines). ISO 14044: 2006
- JRC-IEC (2010) *ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System. Framework and requirements for Life Cycle Impacts Assessment models and indicators*. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability.
- JRC-IEC (2011) *ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context*. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability.
- Jungbluth, N., C. Bauer, R. Dones og R. Frischknecht (2005) *Life cycle assessment for emerging technologies: Case studies for photovoltaic and wind power*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10, pp. 24-34.
- Karlsdóttir, M.R., O.P. Pálsson, H. Pálsson, L.M. Drysdale (2015) *Frumorkunýting og kolefnisfótspor Hellisheiðarvirkjunar*. Erindi á Vísindadögum OR 20. mars 2015. Sótt af: <https://www.or.is/umhverfi-oryggi/visindadagur/dagskra-2015>

- Kubiszewski, I., C.J. Cleveland, P.K. Endres (2010) *Meta-analysis of net energy return for wind power systems*. *Renewable Energy* 35; 218-225.
- Landsvirkjun (2015) *Umhverfisskýrsla Landsvirkjunar 2014*. Skýrsla Landsvirkjunar nr. LV-2015/051
- PE International (2011) *Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V112 Turbine Wind Plant*. Vestas, Randers, Denmark, 78 pp.
- Sathaye, J., O. Lucon, A. Rahman, J. Christensen, F. Denton, J. Fujino, G. Heath, S. Kadner, M. Mirza, H. Rudnick, A. Schlaepfer, A. Shmakin (2011) *Renewable Energy in the Context of Sustainable Development*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Wzickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Siemens AG (2015) Environmental Product Declaration. *A clean energy solution – from cradle to grave. Onshore wind power plant employing SWT-3.2-113*. Sótt af: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/epd.htm>
- UNEP (2011) *Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. Graedel, T.E; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B.K.; Sibley, S.F.; Sonnenmann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2006) *Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life Cycle Assessment of Emissions and Sinks*. USEPA
- USGS (2015) *Mineral commodity summaries 2015*. Sótt af: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>
- Vattenfall AB (2010) *Vattenfall Wind Power Certified Environmental Product Declaration EPD of Electricity from Vattenfall's Wind Farms*. Vattenfall Wind Power, Stockholm, Sweden, 51 pp.
- Vestas Wind Systems A/S (2006) *Life Cycle Assessment of Electricity Produced from Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V82-1.65 MW turbines*. Vestas, Randers, Denmark, 77 pp.
- Vestas Wind Systems A/S (2006) *Life Cycle Assessment of Offshore and Onshore Sited Wind Power Plants Based on Vestas V90-3.0 Turbines*. Vestas, Randers, Denmark, 60 pp.
- Wallevik, Ó., Þ. Kristjánsson, Fouad Yazbek og Wassim Mansour (2015) *Extreme performance of a sustainable concrete. Eco friendly self-consolidating concrete*. Concrete Plant International – 4.1.2015. Sótt af: www.cpi-worldwide.com
- Wiser, R., Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P.H. Jensen, V. Nikolaev, M. O'Malley, G. Sinden, A. Zervos (2011) *Wind Energy*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Wzickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Viðauki 1

Umhverfisáhrifaflokkar og aðferðir

Við vistferilsgreininguna var notast við þær aðferðir sem Sameiginleg rannsóknarmiðstöð Evrópu um vistferilsgreiningar mælir með að notaðar séu við mat fyrir hverja tegund umhverfisáhrifa (JRC-IEC, 2011). Lista yfir þær aðferðir sem notaðar eru í greiningunni má sjá í töflunni hér að neðan.

Flokkur umhverfisáhrifa	Aðferð notuð við mat á umhverfisáhrifum	Eining
Gróðurhúsaáhrif	Bern model - IPCC	CO ₂ ígildi
Súrt regn	Accumulated Exceedance	mól S ígildi
Eyðing ósonlagsins	Steady state ODPs 1999 as in WMO assessment	CFC11 ígildi
Næringarefnaauðgun á landi	Accumulated Exceedance	mól N ígildi
Næringarefnaauðgun í ferskvatni	EUTREND Model (ReCiPe)	P ígildi
Næringarefnaauðgun í sjó	EUTREND Model (ReCiPe)	N ígildi
Myndun ósons við yfirborð jarðar	LOTOS-EUROS (ReCiPe)	NM VOC ígildi
Eyðing auðlinda	CML 2002	Sb ígildi
Svifryk	RiskPoll model and Greco et al 2007	PM _{2,5} ígildi
Eituráhrif á fólk (krabbameinsvaldandi)	USEtox model	CTU _h
Eituráhrif á fólk (ekki krabbameinsvaldandi)	USEtox model	CTU _h
Visteiturhrif	USEtox model	CTU _e
Jónandi geislun	Human health effect model developed by Dreicer et al. 1995	U ²³⁵

Í eftirfarandi töflu er þeim umhverfisáhrifum sem metin eru í greiningunni lýst í stuttu máli.

Gróðurhúsaáhrif (e. global warming)	Gróðurhúsaáhrif valda breytingu á meðalhita jarðarinnar sem rekja má til losunar gróðurhúsalofttegunda af manna völdum, t.d. koltvísýrings (CO ₂), metans (CH ₄) og brennisteinshexaflúoríðs (SF ₆). Það er nú samhljóða álit alþjóðasamfélagsins að aukin losun þessara lofttegunda hafi merkjanleg áhrif á loftslag jarðarinnar. Búist er við að hækkun meðalhita jarðar muni m.a. hafa í för með sér miklar breytingar á loftslagi, valda eyðimerkurmyndun (e. desertification), hækkun á yfirborði sjávar og aukningu í útbreiðslu sjúkdóma (Solomon o.fl., 2007).
Eyðing ósonlagsins (e. ozone depletion)	Eyðing ósons í heiðhvolfinu eða eyðing ósonlagsins stafar af völdum klór- og brómsambanda sem berast upp í heiðhvolfið. Þau efnasambönd sem helst valda eyðingunni eru klórflúorkolefni (CFCs), halónar og vetnisklórflúorkolefni (HCFCs). Eyðing ósonlagsins dregur úr getu þess til að draga úr útfjólubláum (UV) geislum í gufuhvolfi jarðar sem veldur aukinni geislun krabbameinsvaldandi UVB geisla á yfirborði jarðar (JRC-IEC, 2010).
Svifryk (e. particulate matter)	Svifryk í andrúmslofti má rekja til náttúrulegra uppspretta sem og frá athöfnum mannsins. Svifryk af manna völdum má helst rekja til eldsneytisbruna, umferðar og iðnaðar. Aukinn styrkur ryks í andrúmslofti getur leitt til kólnandi veðurfars, en gróft ryk veldur einnig sjónmengun og óþægindum en fínasta rykið dregur úr skyggni. Áhrif svifryks á heilsu fólks er háð stærð agnanna, en fínar agnir eru mun hættulegri en þær grófu þar sem agnir minni en 10 µm eiga greiða leið niður í lungu og geta safnast þar fyrir. Áhrifin fara þó eftir því hversu lengi og hve oft einstaklingur andar að sér menguðu lofti (UST, 2013).
Myndun ósons við yfirborð jarðar (e. photochemical ozone formation)	Í andrúmslofti sem inniheldur köfnunarefnisoxíð og rokgyörn, lífræn efnasambönd (VOCs) getur óson myndast með aðstoð sólarljóss. Þrátt fyrir að óson sé mjög mikilvægt í efri lofthjúpum er aukinn styrkur ósons í andrúmsloftinu óæskilegur og getur m.a. valdið uppskerubresti sem og auknið tíðni asma og annarra lungnasjúkdóma (JRC-IEC, 2010).
Súrt regn (e. acidification)	Súrt regn myndast er regn hvarfast við mengandi lofttegundir í andrúmsloftinu. Þær lofttegundir sem helst valda myndun súrs regns eru ammoníak (NH ₃), köfnunarefnisoxíð (NO _x) og brennisteinstvíoxíð (SO ₂). Þar sem súrt regn fellur til jarðar, oft töluverða vegalengd frá uppsprettu mengunarinnar, veldur það oft á tíðum verulegum skemmdum á vistkerfum. Skaðinn er mismunandi eftir gerð vistkerfa, en súrt regn getur valdið miklum skaða í skóglendi, á dýralífi, vötnum og mannvirkjum (JRC-IEC, 2010).
Næringarefnaauðgun (e. eutrophication)	Nítröt og fosföt eru nauðsynleg öllu lífi, hins vegar getur hár styrkur næringarefna, t.d. í vatni valdið óhóflegum þörungavexti sem leiðir af sér lækkaðan styrk súrefnis í vatninu. Næringarefnaauðgun getur valdið miklum skaða í vistkerfum með aukinni dánartíðni lífvera og lífverur sem krefjast lágs styrks næringarefna geta tapast. Losun ammoníaks, nitrata, nitroxíða og fosfórs í andrúmsloft og vötn geta valdið næringarefnaauðgun (JRC-IEC, 2010).
Visteiturhrif (e. ecotoxicity)	Losun ýmissa efna, þar á meðal þungmálma, geta haft neikvæð áhrif á vistkerfi. Álag á vistkerfi geta átt sér stað þegar styrkur mengandi efna verður hærri en náttúrulegur styrkur efnanna og hefur þannig áhrif á lífverur.
Eituráhrif á fólk (e. human toxicity)	Losun ýmissa efna, t.d. PAH efna, geta haft áhrif á heilsu manna. Eituráhrif á fólk geta annars vegar verið krabbameinsvaldandi eða valdið öðrum eituráhrifum. Gerður er greinarmunur á þessu tvennu í vistferilsgreiningunni.
Eyðing auðlinda (e. resource depletion)	Hér er átt við eyðingu auðlinda, svo sem málmgrýti, hráolíu og önnur hráefni sem unnin eru úr námum og eru óendurnýjanleg. Þessi flokkur umhverfisáhrifa tekur tillit til minnkunar á forða óendurnýjanlegra hráefna sem verður við vinnslu þeirra og notkun. Forði auðlindar er skilgreindur sem það magn auðlindarinnar sem er þekkt og er hagkvæmt að nýta (PE International, 2014).
Jónandi geislun (e. ionising radiation)	Jónandi geislun er geislun sem er nægjanlega orkumikil til að jóna frumeind eða sameind. Jónandi geislun myndast við kjarnahrörnun og kjarnasundrun eða í geislatækjum, s.s. röntgentækjum og eindahröðlum og getur verið hættuleg lífverum. Dæmi um geislun, sem ekki er jónandi er útfjólublá geislun, er útvarpsgeislun og örbylgjugeislun. Í ILCD handbókinni (JRC-IEC, 2011) er sem stendur ekki mælt með neinni aðferðafræði til að meta áhrif á vistkerfi og vísar þessi umhverfisáhrifaflokkur því á áhrif á heilsu manna vegna losunar geislavirkra efna í umhverfið.
Orkuþörf á líftíma (e. primary energy demand)	Orkuþörf á líftíma er magn orku sem hefur verið nýtt frá endurnýjanlegum og óendurnýjanlegum orkugjöfum. Um er að ræða orku sem ekki hefur verið unnin eða umbreytt vegna atbeina mannsins. Orkan er gefin upp í samræmi við orkuinnihald orkugjafanna, t.d. orkuinnihaldi eldsneytis eða virkjanlegri fallorku vatns. Gerður er greinarmunur á óendurnýjanlegum og endurnýjanlegum orkugjöfum, þ.e. á jarðefnaeldsneyti, hráolíu, brúnkol og úran annars vegar, og orku frá vatni, vindi, sól og lífmassa hins vegar.

Viðauki 2

Niðurstöður vistferilsgreiningar

Tölulegar niðurstöður fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa vegna vistferilsgreiningar rannsóknarvindmyllu á Hafinu m.v. vinnslu á 1 kWst raforku.

	<i>Eining/kWst</i>	<i>Alls</i>	<i>Öflun hráefna og framleiðsla</i>		<i>Flutningar</i>		<i>Reising á Hafinu</i>		<i>Rekstur og viðhald</i>		<i>Niðurrif og förgun</i>	
Gróðurhúsaáhrif	kg CO2 ígildi	5,3E-03	3,9E-03	74%	6,0E-05	1%	1,6E-03	30%	2,6E-04	5%	-5,5E-04	-10%
Eyðing ósonlagsins	kg CFC ígildi	2,4E-11	1,9E-11	82%	2,3E-16	0%	3,0E-12	13%	1,9E-12	8%	-7,6E-13	-3%
Svífryk	kg PM2,5 ígildi	4,5E-06	4,2E-06	93%	7,5E-08	2%	3,4E-07	8%	4,0E-08	1%	-1,5E-07	-3%
Myndun ósons við yfirborð jarðar	kg NMVOC	1,3E-05	6,5E-06	49%	1,3E-06	10%	4,6E-06	35%	9,7E-07	7%	-1,5E-07	-1%
Súrt regn	mól H1 ígildi	1,9E-05	1,1E-05	60%	1,9E-06	10%	5,4E-06	29%	1,4E-06	7%	-1,2E-06	-6%
Næringarefnaauðgun (í ferskvatni)	kg P ígildi	5,4E-07	4,8E-07	90%	7,9E-11	0%	1,5E-09	0%	5,5E-08	10%	-3,5E-11	0%
Næringarefnaauðgun (í sjó)	kg N ígildi	6,1E-07	3,3E-07	54%	4,9E-08	8%	2,0E-07	32%	3,0E-08	5%	4,1E-09	1%
Næringarefnaauðgun (á landi)	mól N ígildi	5,3E-05	2,3E-05	44%	5,2E-06	10%	1,8E-05	34%	5,6E-06	11%	7,2E-07	1%
Visteiturhrif	CTUe	1,7E-02	1,9E-02	111%	4,8E-06	0%	1,9E-04	1%	2,1E-03	12%	-4,1E-03	-24%
Eituráhrif á fólk (krabbameinsvaldandi)	CTUh	9,8E-11	9,1E-11	93%	3,4E-13	0%	3,7E-12	4%	6,1E-12	6%	-3,0E-12	-3%
Eituráhrif á fólk (ekki krabbameinsvaldandi)	CTUh	8,0E-10	9,1E-10	114%	2,0E-12	0%	8,9E-11	11%	4,7E-11	6%	-2,5E-10	-31%
Eyðing auðlinda	kg Sb ígildi	2,6E-06	2,4E-06	92%	1,1E-11	0%	2,0E-07	8%	6,5E-08	2%	-4,4E-08	-2%
Jónandi geislun	kg U235 ígildi	3,2E-04	3,3E-04	103%	7,4E-08	0%	1,6E-05	5%	5,8E-06	2%	-3,1E-05	-10%

Tölulegar niðurstöður fyrir **öflun hráefna og framleiðslu** í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa m.v. vinnslu á 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

	<i>Eining/ kWst</i>	<i>Öflun hráefna og framleiðsla</i>		<i>Rekstur skrifstofu hjá framleiðanda</i>		<i>Spaðar</i>		<i>Vélarhús (þ.m.t. rafall)</i>		<i>Rafbúnaður</i>		<i>Stálturn</i>	
Gróðurhúsaáhrif	kg CO ₂ ígildi	3,9E-03	74%	8,8E-06	0,2%	6,2E-04	12%	9,7E-04	18%	6,6E-04	12%	1,7E-03	31%
Eyðing ósonslagsins	kg CFC-11 ígildi	1,9E-11	82%	2,7E-16	0,0%	1,6E-12	7%	8,3E-13	4%	1,7E-11	72%	1,5E-13	1%
Svifryk	kg PM 2,5 ígildi	4,2E-06	93%	1,0E-09	0,0%	3,5E-07	8%	9,4E-07	21%	3,2E-07	7%	2,6E-06	57%
Myndun ósons við yfirborð jarðar	kg NMVOC	6,5E-06	49%	9,2E-09	0,1%	1,1E-06	9%	1,8E-06	13%	1,8E-06	14%	1,8E-06	14%
Súrt regn	mól H ⁺ ígildi	1,1E-05	60%	1,2E-08	0,1%	1,9E-06	10%	3,3E-06	17%	3,5E-06	19%	2,6E-06	14%
Næringarefnaauðgun (ferskvatn)	kg P ígildi	4,8E-07	90%	1,4E-11	0,0%	5,6E-09	1%	1,2E-09	0%	4,7E-07	88%	1,5E-10	0%
Næringarefnaauðgun (í sjó)	kg N ígildi	3,3E-07	54%	4,4E-10	0,1%	6,0E-08	10%	7,6E-08	12%	1,1E-07	19%	7,9E-08	13%
Næringarefnaauðgun (á landi)	mól N ígildi	2,3E-05	44%	3,7E-08	0,1%	4,9E-06	9%	6,0E-06	11%	6,1E-06	11%	6,5E-06	12%
Visteiturhrif	CTUe	1,9E-02	111%	4,0E-07	0,0%	2,4E-05	0%	5,1E-04	3%	1,8E-02	107%	7,1E-05	0%
Eituráhrif á fólk (krabbameinsv.)	CTUh	9,1E-11	93%	9,6E-15	0,0%	3,7E-12	4%	3,8E-12	4%	4,1E-11	41%	4,3E-11	44%
Eituráhrif á fólk (ekki-krabbameinsv.)	CTUh	9,1E-10	114%	2,5E-13	0,0%	3,3E-10	42%	8,7E-11	11%	4,5E-10	56%	4,4E-11	5%
Eyðing auðlinda	kg Sb ígildi	2,4E-06	92%	3,1E-09	0,1%	1,1E-07	4%	1,4E-06	53%	8,6E-07	33%	5,3E-08	2%
Jónandi geislun	kg U235 ígildi	3,3E-04	103%	9,9E-07	0,3%	2,0E-05	6%	4,4E-05	14%	9,3E-05	29%	1,7E-04	54%

Tölulegar niðurstöður fyrir **reisingu á Hafinu** í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa m.v. vinnslu á 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

	<i>Eining/ kWst</i>	<i>Reising á Hafinu</i>		<i>Jarðefnaeldsneyti</i>		<i>Spennir og ýmiss búnaður</i>		<i>Steypa í undirstöður</i>		<i>Steypustyrktarj árn í undirstöður</i>		<i>Jarðvinna við undirstöður</i>		<i>Jarðstrengir og jarðstrengjaskurðir</i>		<i>Aðkomuslóðar</i>	
Gróðurhúsaáhrif	kg CO ₂ ígildi	1,6E-03	30%	6,5E-05	1%	9,1E-06	0%	1,0E-03	19%	3,1E-04	6%	3,1E-05	1%	1,8E-04	3%	1,4E-05	0%
Eyðing ósonslagsins	kg CFC-11 ígildi	3,0E-12	13%	3,5E-16	0%	3,2E-14	0%	1,2E-13	1%	2,7E-12	12%	1,2E-16	0%	8,3E-14	0%	5,6E-17	0%
Svifryk	kg PM 2,5 ígildi	3,4E-07	8%	1,0E-08	0%	2,9E-09	0%	1,6E-07	4%	7,4E-08	2%	6,6E-09	0%	7,6E-08	2%	2,9E-09	0%
Myndun ósons við yfirborð jarðar	kg NMVOC	5,4E-06	41%	3,3E-07	2%	3,9E-08	0%	2,9E-06	22%	9,6E-07	7%	1,7E-07	1%	8,9E-07	7%	7,9E-08	1%
Súrt regn	mól H ⁺ ígildi	5,4E-06	29%	3,3E-07	2%	3,9E-08	0%	2,9E-06	16%	9,6E-07	5%	1,7E-07	1%	8,9E-07	5%	7,9E-08	0%
Næringarefnaauðgun (ferskvatn)	kg P ígildi	1,5E-09	0%	4,3E-10	0%	8,1E-11	0%	6,8E-11	0%	3,2E-10	0%	2,0E-10	0%	2,9E-10	0%	9,2E-11	0%
Næringarefnaauðgun (í sjó)	kg N ígildi	2,0E-07	32%	2,7E-08	4%	1,2E-09	0%	1,1E-07	18%	1,8E-08	3%	1,3E-08	2%	2,1E-08	3%	6,1E-09	1%
Næringarefnaauðgun (á landi)	mól N ígildi	1,8E-05	34%	1,6E-06	3%	7,1E-08	0%	1,2E-05	22%	1,8E-06	3%	8,4E-07	2%	1,6E-06	3%	3,9E-07	1%
Visteiturhrif	CTUe	1,9E-04	1%	1,2E-05	0%	2,9E-06	0%	6,9E-06	0%	7,3E-05	0%	5,4E-06	0%	8,6E-05	1%	2,5E-06	0%
Eituráhrif á fólk (krabbameinsv.)	CTUh	3,7E-12	4%	4,4E-13	0%	4,0E-14	0%	1,2E-12	1%	5,5E-13	1%	2,0E-13	0%	1,2E-12	1%	9,1E-14	0%
Eituráhrif á fólk (ekki-krabbameinsv.)	CTUh	8,9E-11	11%	6,4E-12	1%	9,0E-13	0%	3,2E-11	4%	2,8E-11	4%	3,0E-12	0%	1,7E-11	2%	1,4E-12	0%
Eyðing auðlinda	kg Sb ígildi	2,0E-07	8%	1,7E-11	0%	5,8E-09	0%	5,3E-11	0%	-1,0E-09	0%	7,7E-12	0%	1,9E-07	7%	3,5E-12	0%
Jónandi geislun	kg U235 ígildi	1,6E-05	5%	1,2E-07	0%	3,6E-07	0%	2,3E-07	0%	5,4E-07	0%	4,3E-08	0%	1,5E-05	5%	2,0E-08	0%

Tölulegar niðurstöður fyrir **rekstur og viðhald** í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa m.v. vinnslu á 1 kWst raforku með rannóknarvindmyllu á Hafinu.

	<i>Eining/ kWst</i>	Rekstur og viðhald		<i>Árlegur rekstur</i>		<i>Viðhaldsferðir með millilandaflugi</i>		<i>Viðhaldsferðir með akstri</i>	
Gróðurhúsaáhrif	kg CO ₂ ígildi	2,4E-04	4%	7,2E-05	1%	1,6E-04	3%	2,5E-06	0%
Eyðing ósonslagsins	kg CFC-11 ígildi	1,5E-12	7%	1,5E-12	7%	4,7E-16	0%	8,1E-18	0%
Svifryk	kg PM 2,5 ígildi	3,4E-08	1%	2,5E-08	1%	8,6E-09	0%	1,5E-10	0%
Myndun ósons við yfirborð jarðar	kg NMVOC	9,2E-07	7%	2,0E-07	2%	7,1E-07	5%	4,0E-09	0%
Súrt regn	mól H ⁺ ígildi	1,2E-06	7%	5,4E-07	3%	6,7E-07	4%	8,3E-09	0%
Næringarefnaauðgun (ferskvatn)	kg P ígildi	4,4E-08	8%	4,3E-08	8%	1,4E-10	0%	7,4E-11	0%
Næringarefnaauðgun (í sjó)	kg N ígildi	3,0E-08	5%	-2,2E-09	0%	3,2E-08	5%	7,3E-10	0%
Næringarefnaauðgun (á landi)	mól N ígildi	5,1E-06	10%	2,0E-06	4%	3,1E-06	6%	4,2E-08	0%
Visteiturhrif	CTUe	1,6E-03	10%	1,6E-03	10%	1,2E-05	0%	3,1E-07	0%
Eituráhrif á fólk (krabbameinsv.)	CTUh	5,1E-12	5%	4,1E-12	4%	1,0E-12	1%	9,1E-15	0%
Eituráhrif á fólk (ekki-krabbameinsv.)	CTUh	3,8E-11	5%	3,3E-11	4%	4,7E-12	1%	1,5E-13	0%
Eyðing auðlinda	kg Sb ígildi	5,2E-08	2%	5,2E-08	2%	3,2E-11	0%	1,3E-14	0%
Jónandi geislun	kg U235 ígildi	5,8E-06	2%	5,7E-06	1%	1,6E-07	0%	4,1E-09	0%

Tölulegar niðurstöður fyrir **niðurrif og förgun** í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa m.v. vinnslu á 1 kWst raforku með rannsóknarvindmyllu á Hafinu.

	<i>Eining/ kWst</i>	Niðurrif og förgun		<i>Niðurrif</i>		<i>Flutningur úrgangs</i>		<i>Ál endurvinnsla</i>		<i>Kopar endurvinnsla</i>		<i>Stál endurvinnsla</i>		<i>Steypujárn endurvinnsla</i>		<i>Urðun óflokkaðs úrgangs</i>	
Gróðurhúsaáhrif	kg CO ₂ ígildi	-5,5E-04	-10%	4,9E-05	1%	4,3E-05	1%	-1,8E-04	-3%	-4,0E-05	-1%	-2,5E-04	-5%	-1,8E-04	-3%	3,2E-06	0%
Eyðing ósonslagsins	kg CFC-11 ígildi	-7,6E-13	-3%	1,9E-16	0%	1,6E-16	0%	-8,7E-14	0%	-6,5E-15	0%	-1,2E-14	0%	-6,6E-13	-3%	5,4E-17	0%
Svifryk	kg PM 2,5 ígildi	-1,5E-07	-3%	9,3E-09	0%	6,2E-08	1%	-5,0E-08	-1%	-1,2E-08	0%	-1,4E-07	-3%	-2,8E-08	-1%	1,5E-09	0%
Myndun ósons við yfirborð jarðar	kg NMVOC	-1,5E-07	-1%	2,4E-07	2%	1,1E-06	8%	-3,8E-07	-3%	-1,0E-07	-1%	-6,3E-07	-5%	-3,7E-07	-3%	2,1E-08	0%
Súrt regn	mól H ⁺ ígildi	-1,2E-06	-6%	2,8E-07	1%	1,5E-06	8%	-9,0E-07	-5%	-1,9E-07	-1%	-1,4E-06	-8%	-5,2E-07	-3%	2,5E-08	0%
Næringarefnaauðgun (ferskvatn)	kg P ígildi	-3,5E-11	0%	3,2E-10	0%	1,8E-11	0%	-8,3E-11	0%	-3,6E-11	0%	-2,7E-10	0%	-5,2E-11	0%	6,8E-11	0%
Næringarefnaauðgun (í sjó)	kg N ígildi	3,5E-08	6%	5,3E-08	9%	3,8E-08	6%	-1,4E-08	-2%	-4,9E-09	-1%	-2,7E-08	-4%	-1,1E-08	-2%	1,2E-09	0%
Næringarefnaauðgun (á landi)	mól N ígildi	7,2E-07	1%	1,4E-06	3%	4,1E-06	8%	-1,3E-06	-3%	-4,0E-07	-1%	-2,2E-06	-4%	-9,9E-07	-2%	7,9E-08	0%
Visteiturhrif	CTUe	-4,1E-03	-24%	8,7E-06	0%	2,7E-06	0%	-5,0E-06	0%	-4,0E-03	-24%	-6,7E-05	0%	-3,5E-06	0%	4,6E-07	0%
Eituráhrif á fólk (krabbameinsv.)	CTUh	-3,0E-12	-3%	3,2E-13	0%	2,4E-13	0%	-3,8E-13	0%	-2,2E-12	-2%	-8,5E-13	-1%	-9,4E-14	0%	3,6E-14	0%
Eituráhrif á fólk (ekki-krabbameinsv.)	CTUh	-2,5E-10	-31%	4,8E-12	1%	9,4E-13	0%	-8,6E-12	-1%	-2,3E-10	-29%	-8,5E-12	-1%	-6,1E-12	-1%	2,3E-12	0%
Eyðing auðlinda	kg Sb ígildi	-4,4E-08	-2%	1,2E-11	0%	7,3E-12	0%	-2,8E-09	0%	-1,7E-09	0%	-3,9E-08	-1%	-3,6E-10	0%	1,4E-12	0%
Jónandi geislun	kg U235 ígildi	-3,1E-05	-10%	6,9E-08	0%	5,1E-08	0%	-1,8E-05	-5%	-1,7E-06	-1%	-1,2E-05	-4%	-1,3E-07	0%	5,4E-08	0%



Landsvirkjun

Háaleitisbraut 68
103 Reykjavík
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is
Sími: 515 90 00

