

Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma

Þeistareykjastöð





Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma Þeistareykjastöð

Höfundar

Alexandra Kjeld, Helga J. Bjarnadóttir,
Þorbjörg Anna Sigurbjörnsdóttir, Gyða Mjöll Ingólfssdóttir

Dagsetning

Maí 2025

Lykilsíða

Skýrsla LV nr	LV-2025-022	Dagsetning	Maí 2025
Fjöldi síðna	70 s.	Upplag	1
Dreifing	[x] Birt á vef LV	[] Opin innan LV	[] Takmörkuð til [dags.]
Titill	Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma: Þeistareykjastöð		
Höfundar/fyrirtæki	EFLA verkfræðistofa: Alexandra Kjeld, Helga J. Bjarnadóttir, Þorbjörg Anna Sigurbjörnsdóttir, Gyða Mjöll Ingólfssdóttir		
Verkefnisstjóri	Björn Halldórsson		
Unnið fyrir	Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar	—		
Útdráttur	<p>Í þessari skýrslu er að finna niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Þeistareykjastöð, sem unnin er skv. alþjóðlegum stöðlum. Metin eru umhverfisáhrif frá framleiðslu og flutningum byggingarefna og vélbúnaðar, frá byggingarframkvæmdum, frá beinni losun og orkunotkun við rekstur stöðvarinnar í 40 ár, ásamt niðurrifi og endurvinnslu byggingarefna. Niðurstöður eru á formi tölulegra upplýsinga um umhverfisáhrif raforkuvinnslunnar og leiða í ljós að vinnsla í Þeistareykjastöð er umhverfislega hagkvæm miðað við aðra orkugjafa og gefur góðan samanburð við aðrar jarðvarmavirkjanir. Kolefnisspor raforkuvinnslu í stöðinni er 13,8 g CO₂-ígildi/kWst fyrir raforku sem kemur út úr stöðinni, eða 14,7 g CO₂-ígildi/kWst með raforkuflutningi. Niðurstöður greiningarinnar draga fram hvar finna megi helstu tækifæri til úrbóta í vistferli jarðvarmastöðvarinnar. Skýrslan var fyrst gefin út í október 2020 en uppfærð í maí 2025 með vísan í staðal ISO 14067.</p>		
Lykilorð	Vistferilsgreining, Life Cycle Assessment, LCA, kolefnisspor, gróðurhúsaáhrif, jarðvarmi, jarðvarmaorka, Þeistareykir, losun		

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar



VISTFERILSGREINING RAFORKUVINNSLU MEÐ JARÐVARMA

Peistareykjastöð

23.05.2025



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

1611-210-SKY-V02

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

70

VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Björn Halldórsson

VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Helga J. Bjarnadóttir

LYKILORÐ

Jarðvarmi, jarðvarmaorka, vistferilsgreining, kolefnisspor, endurnýjanleg orka

STAÐA SKÝRSLU

- Drög
 Drög til yfirlustrar
 Lokið

DREIFING

- Opin
 Dreifing með leyfi verkkaupa
 Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma. Þeistareykjastöð

VERKHEITI

Vistferilsgreining fyrir Þeistareykjastöð

VERKKAUPI

Landsvirkjun

HÖFUNDUR

Alexandra Kjeld, Helga J. Bjarnadóttir, Þorbjörg Anna Sigurbjörnsdóttir, Gyða Mjöll Ingólfssdóttir

ÚTDRÁTTUR

Í þessari skýrslu er að finna niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Þeistareykjastöð, sem unnin er skv. alþjóðlegum stöðlum. Metin eru umhverfisáhrif frá framleiðslu og flutningum byggingarefna og vélbúnaðar, frá byggingarframkvæmdum, frá beinni losun og orkunotkun við rekstur stöðvarinnar í 40 ár, ásamt niðurrifi og endurvinnslu byggingarefna. Niðurstöðurnar eru á formi tölulegra upplýsinga um umhverfisáhrif raforkuvinnslunnar og leiða í ljós að vinnsla í Þeistareykjastöð er umhverfislega hagkvæm miðað við aðra orkugjafa og gefur góðan samanburð við aðrar jarðvarmavirkjanir. Kolefnisspor raforkuvinnslu í stöðinni er 13,8 g CO₂-ígildi/kWst fyrir raforku sem kemur út úr stöðinni, eða 14,7 g CO₂-ígildi/kWst með raforkuflutningi. Niðurstöður greiningarinnar draga fram hvar finna megi helstu tækifæri til úrbóta í vistferli jarðvarmastöðvarinnar.

ÚTGÁFUSAGA

NR.	HÖFUNDUR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
01	AK	apríl 20	HJB, SLT	mars,maí	AK	maí 2020
	Líkan, niðurstöður og drög að lokaskýrslu					
02	AK, HJB	22.05.20	BH, RÓ, VK o.fl.	06.06.20	AK	06.06.20
	Lokadrög til verkkaupa					
03	ÁRB	01.04.25	AK	28.04.25	AK	23.05.2025
	Uppfærsla					

SAMANTEKT

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur þann kost umfram aðra sjálfbæra orkugjafa að vinnslan er stöðug og er ekki háð dægursveiflum, árstíma eða veðri. Í dag er hlutur jarðvarma í heildarorkunotkun Íslendinga 60,9%. Sé litið til raforkuvinnslu eingöngu er hlutur vatnsafls 73% og jarðvarma 27%. Markmið þessa verkefnis er að greina og meta umhverfisáhrif og eyðingu auðlinda við raforkuvinnslu í Þeistareykjastöð, 90 MW_e, sem er nýjasta jarðvarmavinnslustöðin á Íslandi og var gangsett 2017. Verkefnið er jafnframt liður í að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu fyrir allar tegundir orkuauðlinda Landsvirkjunar, en nú þegar hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðahálsstöð, Fljótsdalsstöð, Blöndustöð og Búrfellsstöð II, sem allt eru vatnsaflsstöðvar, og vindmyllur á Hafinu. Matið er framkvæmt með aðferðafræði vistferilsgreiningar (e. *Life Cycle Assessment, LCA*) í samræmi við alþjóðlegu staðlana ISO 14040 og ISO 14044. Einnig er stuðst við leiðbeiningar um framkvæmd vistferilsgreininga fyrir gerð umhverfisýfirlýsinga (e. *Environmental Product Declaration*) fyrir ólíka orkukosti til að tryggja samanburðarhæfni niðurstaða. Þá eru Evrópustaðlarnir EN 15978 og EN 15804 um sjálfbærni í byggingariðnaði hafðir til hliðsjónar.

Vistferilsgreining er aðferðafræði sem er notuð til þess að meta staðbundin og hnattræn umhverfisáhrif vöru, framleiðsluferils eða þjónustu yfir allan vistferilinn. Greiningin nær því yfir alla virðiskeðju vörunnar, þ.e. allt frá öflun hráefna og framleiðsluferli hennar, auk notkunar og meðhöndlunar í lok líftíma. Með aðferðinni má greina hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin verða, en slíkar upplýsingar má nota til að bæta ákveðna vöru eða þjónustu. Aðferðin er stöðluð og birtast niðurstöður vistferilsgreininga á formi tölulegra upplýsinga, t.d. kolefnisspor, sem nota má til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilegar vörur eða þjónustu.

Aðgerðareining vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem **1 kWst raforka unnin í Þeistareykjastöð**, annars vegar 1 kWst sem kemur út úr stöðinni og hins vegar 1 kWst sem flutt er til notanda eða dreifikerfis. Reiknað er með 40 ára líftíma stöðvarinnar. Niðurstöðurnar sýna umhverfisáhrif í sjö flokkum umhverfisáhrifa; gróðurhúsaáhrif, súrnun lands og vatns, myndun ósons við yfirborð jarðar, næringarefnaauðgun, eyðing ósonlagsins, eyðing ólífrænna auðlinda og eyðing jarðefnaeldsneytis.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar sýna að losun jarðgass á rekstartíma er ráðandi í flokkunum gróðurhúsaáhrif og súrnun. Öflun hráefna og framleiðsla byggingarefna og búnaðar, framkvæmdir og bygging veldur að öðru leyti töluverðum áhrifum í flokkunum sem eru til skoðunar. Kolefnisspor raforkuvinnslu í Þeistareykjastöð er 13,8 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst sem kemur út úr stöðinni og 14,7 g CO₂-ígildi/kWst þegar bætt er við flutningi til notanda. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (69%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökvanum á 40 árum, eða 10,2 g CO₂-ígildi/kWst. Framleiðsla byggingarefna og búnaðar og framkvæmdir mynda samanlagt 2,5 g CO₂-ígildi/kWst eða um 17% af kolefnissporinu. Bein losun áður en rekstur hefst er 0,5 g CO₂-ígildi/kWst eða 3,2% kolefnissporsins. Af öllum mannvirkjum stöðvarinnar vega jarðhitaholurnar þyngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og eldsneytisnotkun vegna bæði núverandi borhola og tilvonandi viðhaldshola, eða samanlagt 8,2% af kolefnissporinu. Af byggingarefnum vega þyngst framleiðsla stáls (4,6%) og sements og steypu (1,3%).

Kolefnisspor raforku Þeistareykjastöðvar er lágt miðað við nýlegar niðurstöður fyrir aðrar jarðvarmavirkjanir og um helmingi minna en miðgildi losunar fyrir jarðvarma skv. samantekt IPCC frá 2014. Raforkuvinnsla með óendurnýjanlegum orkugjöfum (kol, gas og lífmassi og kol saman) er með margfalt stærra kolefnisspor en vinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum á borð við vatnsafl, jarðvarma, vind- og sólarorku.

Losun brennisteinsvetnis á rekstrartíma Þeistareykjastöðvar er aðalvaldur súrnunar. Gastegundin er hvarfgjörn og í oxandi umhverfi getur hún myndað brennistein (S), brennisteinstvíoxíð (SO₂) eða brennisteinssýru (H₂SO₄), en talið er að hún oxist að mestu í brennistein (S) og falli til jarðar í úrkomu og verði að málmstöðum í jarðvegi. Bent skal þó á að losun koltvísýrings og brennisteinsvetnis frá jarðhitasvæðum er náttúruleg en heimildum ber ekki saman hvort að vinnsla raforku hafi áhrif á heildarlosun frá þessum svæðum.

Upplýsingar um framkvæmd og rekstur Þeistareykjastöðvar sem notaðar eru í þessari greiningu byggja á mjög góðum gögnum; lokauppgjöri frá verktökum, upplýsingum frá framleiðendum búnaðar og upplýsingum frá birgjum Landsvirkjunar. Þá byggja upplýsingar um rekstur frá rekstri aflstöðva á Norðausturlandi. Í þessari greiningu er tekið mið af öllum veigamestu þáttum vistferilsins og þeir hafðir innan kerfismarka, í samræmi við aðferðafræði vistferilsgreiningar og leiðbeiningar um gerð vistferilsgreininga. Þeir þættir sem bundnir eru mestri óvissu í þessari greiningu eru bein losun koltvísýrings (CO₂) og brennisteinsvetnis (H₂S) á 40 ára líftíma, fjöldi viðhaldshola sem þarf til að viðhalda vinnslugetu og áætlanir um meðhöndlun úrgangs að loknu niðurrifi stöðvar. Einnig er ákveðin óvissa varðandi skilgreindan líftíma, orkugjafa framtíðarinnar, áætlanir um viðhald og eftirlit í rekstri og endurnýjun búnaðar.

Hreinsun koltvísýrings og brennisteinsvetnis úr útblæstri jarðgass væri ein öflugasta aðgerðin til að draga úr gróðurhúsa- og súrnunaráhrifum aflstöðvarinnar, en í því sambandi má nefna að stefnt er að því að setja upp búnað til hreinsunar koltvísýrings frá annarri jarðvarmastöð Landsvirkjunar, Kröflustöð. Aðrar aðgerðir sem geta dregið úr umhverfisáhrifum stöðvarinnar fyrir hverja framleidda kWst væru að bæta nýtingu raforkuvinnslunnar og/eða framlengja líftíma stöðvarinnar með góðu viðhaldi og tilheyrandi endurnýjun vélbúnaðar. Niðurstöður eru bundnar þónokkurri óvissu um fjölda viðhaldshola sem þarf að bora til að halda við vinnslugetu stöðvarinnar, en í þessari greiningu eru auðkennd tækifæri til að draga úr umhverfisáhrifum þeirra, t.a.m. með rafvæðingu framkvæmda, og með innkaupakröfum varðandi þau hráefni sem þarf í hverja holu. Spara má sem dæmi um 500 tonn CO₂-ígilda fyrir hverja holu ef nýttir eru rafknúnir borar í stað bora sem knúnir eru eldsneyti.

Niðurstöður greiningar veita gagnlegar upplýsingar fyrir umhverfisstjórnunarkerfi Landsvirkjunar sem fyrirtækið vinnur eftir í samræmi við alþjóðlega umhverfisstjórnunarstaðalinn ISO 14001:2015. Greiningin sýnir hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin verða. Landsvirkjun stefnir að því að verða kolefnishlutlaust fyrirtæki 2025 og með þessari greiningu eru dregnar fram mikilvægar upplýsingar varðandi rekstur jarðvarmastöðva fyrirtækisins á Norðausturlandi og til hvaða aðgerða hægt verði að grípa til til að ná markmiðum fyrirtækisins. Fjöldi tækifæri gefast til að draga úr umhverfisáhrifum á líftíma stöðvarinnar næstu áratugi, þar með töldu kolefnisspori, og bæta þannig vinnsluna að öllu leyti, hvort sem til standi að viðhalda eða auka vinnslugetu eða fjölga nýtingarmöguleikum. Tölulegar upplýsingar liggja nú fyrir sem hægt er að nota í markaðssetningu á raforkunni sem endurnýjanlegur orkugjafi með lítið kolefnisspor.

SUMMARY

Geothermal energy generation has the advantage over other renewable energy sources that the generation process is steady and independent of diurnal and seasonal variations. Today, geothermal energy provides the population of Iceland with approximately 61% of its entire energy supply, thermal and electric. Considering electricity generation only, the share of hydropower in Iceland is 73% and geothermal energy is 27%. The aim of the present project is to assess the environmental impacts of electricity generation in Landsvirkjun's geothermal power plant in Northeast Iceland, Theistareykir, 90 MW_e, which is the country's most recent geothermal power plant and came online in 2017. The project is part of an ongoing assessment of environmental impacts of the company's electricity generation via hydropower, wind and geothermal power sources. The assessment is carried out using the same Life Cycle Assessment (LCA) methodology which was used to assess environmental impacts from four hydropower stations (Fljótisdalur, Búðarháls, Blanda, Búrfell II) and Landsvirkjun's two research wind turbines located at Hafið in South Iceland. The LCA is performed in accordance with international standards ISO 14040, ISO 14044 and ISO 14067, also considering Product Category Rules according to ISO 14025 for Type III environmental declarations – also referred to as Environmental Product Declarations (EPD) – for electricity generation, and European standards EN 15978 and EN 15804 on sustainability of construction works.

Life Cycle Assessment is a methodology to assess local and global environmental impacts of a product, encompassing the whole life cycle (cradle to grave). The environmental impacts of a product or service are hence evaluated over its entire value chain, from the initial resource extraction to material production, product manufacturing, use of the product and down to its disposal at the end of its life cycle. Using the methodology, environmental hot spots can be identified and the information can be used to improve the product or service. The standardized methodology provides numerical results on environmental impacts, e.g. the carbon footprint, which can then be used for comparison purposes with other similar products or services.

The functional unit is 1 kWh of electricity generated at the Theistareykir Station, and the results are presented with and without electricity transmission to a user or distributor. A lifetime of 40 years is assumed. Results are presented for seven environmental impact categories; global warming, acidification, photochemical ozone creation, ozone depletion, eutrophication, depletion of abiotic resources and depletion of fossil resources.

The largest contributors to environmental impacts in two impact categories, global warming and acidification, are direct emissions during the operational lifetime of the station. The materials needed for the manufacturing of all station components and the construction phase are large contributors to all other impact categories. The carbon footprint of electricity generation at Theistareykir is 13.8 g CO₂-eq. per kWh leaving the station, and 14.7 g CO₂-eq per kWh when electricity transmission to the user has been included. The carbon footprint is dominated by direct CO₂ emissions from the geothermal fluid during the 40 year lifetime, amounting to 10.2 g CO₂-eq/kWh or 69%. The manufacturing and construction of station buildings, infrastructure and machinery accounts for 2.5 g CO₂-eq/kWh or 17% of the carbon footprint. Direct CO₂ emissions since exploration drilling began until the station came online accounts for 0.5 g CO₂-eq/kWh or 3.2% of the carbon footprint. Out of all the station's infrastructure unit, the most carbon intensive are the wells, due to fuel and material use for the drilling and casing of each well, in total constituting 8.2% of the

carbon footprint. Of all individual construction materials used at Theistareykir, steel (4.6%) and cement/concrete (1.3%) are the largest contributors.

The carbon footprint of electricity generated at Theistareykir is small compared to recent LCA results for other geothermal projects and approximately half of the mean emission value for geothermal energy according to an IPCC summary of different energy sources from 2014. The carbon footprint of electricity from renewable energy sources is typically only a very small fraction of its non-renewable counterparts.

Direct hydrogen sulfide emissions at Theistareykir is the main contributor to the impact category acidification. The gas easily reacts with other substances and when exposed to air it can form elemental sulfur (S), sulfur dioxide (SO₂) or sulfuric acid (H₂SO₄). At geothermal sites it is thought to mostly oxidize to S and fall to the ground with precipitation. CO₂ and H₂S emissions are natural to geothermal sites and there is not a clear consensus on whether geothermal exploitation via drilling increases or has a negligible impact on natural emissions.

The life cycle inventory used in this assessment is built on high quality data from Landsvirkjun, contractors and manufacturers. The inventory on the operational phase is built on operational experience from Landsvirkjun other geothermal plants the Northeast region. This assessment covers all significant impact factors within the life cycle, in accordance with the LCA methodology. The main sources of uncertainties in this assessment are direct emissions of CO₂ and H₂S during the lifetime of the station, the number of make-up wells needed to sustain the installed generation capacity and assumptions regarding treatment of waste after the station has been dismantled. There are also uncertainties involved with the defined lifetime of the station, future sources of fuel, and assumptions regarding station maintenance and the renewal of machinery.

Direct targeting of CO₂ and H₂S emissions from the geothermal fluid is the single most effective action to reduce the station's global warming and acidification impacts. Landsvirkjun has introduced an ambitious plan to become carbon neutral by 2025, which includes cleaning CO₂ emissions from the nearby Krafla geothermal station. Other actions that may reduce the station's environmental impacts per generated kWh is to improve the station's capacity and/or extend its lifetime with good maintenance and any necessary renewal of units or machinery. Although there is uncertainty regarding the number of make-up wells needed, this LCA identifies opportunities to reduce their environmental impacts, e.g. via electrification of drilling equipment and via sustainable procurement practices for materials needed for each well. Emissions of approximately 500 tonnes CO₂-equivalents can be avoided per well using electricity instead of diesel oil.

There are many opportunities for improvement during the station's lifetime. The results of this assessment provide valuable information for the company, which operates according to an accredited ISO 14001:2015 environmental management system. The LCA results identify environmental hot spots, relevant for the company's geothermal stations in Northeast Iceland, highlighting where the largest improvements can be made in terms of environmental impacts from the operational and end-of-life phase. The results can furthermore be used for marketing or communication purposes for electricity generated from a renewable source with a low carbon footprint.

EFNISYFIRLIT

SAMANTEKT	5
SUMMARY	7
MYNDASKRÁ	10
TÖFLUSKRÁ	11
ORÐSKÝRINGAR	13
1 INNGANGUR	14
1.1 Bakgrunnur verkefnisins	14
1.2 Þeistareykjastöð	14
2 VISTFERILSGREINING FYRIR ÞEISTAREYKJASTÖÐ	17
2.1 Markmið og umfang	17
2.2 Aðgerðareining og líftími	17
2.3 Kerfismörk	17
2.4 Umhverfisáhrifaflokkar	19
3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA	20
3.1 Framleiðsla og framkvæmdir	20
3.2 Rekstur og viðhald - raforkuvinnsla í þeistareykjastöð	33
3.3 Niðurrif stöðvar, förgun og endurvinnsla	36
3.4 Flutningur raforku	37
4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR	38
4.1 Umhverfisáhrif á vistferli þeistareykjastöðvar	38
4.2 Vægi umhverfisáhrifaflokka í evrópsku samhengi	39
4.3 Umhverfisáhrif á mismunandi stigum vistferils	40
4.4 Kolefnisspor	43
4.5 Yfirlit yfir umhverfisáhrif á vistferli þeistareykjastöðvar	46
4.6 Orkubúskapur	48
5 NÆMNIGREINING	50
5.1 Breytilegur líftími	50
5.2 Breytileg gaslosun	51
6 UMRÆÐUR	53
6.1 Gæði gagna og forsendur	53
6.2 Bein losun og náttúruleg losun	53
6.3 Vistferilsgreiningar jarðvarmavirkjana	56
6.4 Kolefnisspor orkugjafa	57
6.5 Tækifæri til úrbóta	59
7 LOKAORÐ	62
8 HEIMILDASKRÁ	64

MYNDASKRÁ

MYND 1	Þeistareykjastöð er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [9]. _____	15
MYND 2	Mynd af samsetningu Þeistareykjastöðvar og helstu þáttum raforkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun. _____	16
MYND 3	Einfölduð mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar. _____	18
MYND 4	Holutoppur við eina borholu Þeistareykjastöðvar. Ljósmynd: ÍSOR [62]. _____	23
MYND 5	Framkvæmdir við stöðvarhúsið haustið 2016, borhola ÞG-12 í forgrunni. Ljósmynd: Landsvirkjun [17]. _____	24
MYND 6	Yfirlitsmynd af vinnslusvæði Þeistareykjastöðvar, þ.e. borteigum, skiljustöð, niðurrennslistvæði, gufuveitu og stöðvarhúsi. Mynd: Landsvirkjun. _____	25
MYND 7	Hverfill fyrstu vélasamstæðu færður á sinn stað á Þeistareykjum með aðstoð tveggja krana í febrúar 2017. Ljósmynd: Landsvirkjun. _____	28
MYND 8	Eimsvali vélasamstæðu tvö frá Balcke-Dürr hífður á geymslusvæði utan við stöðvarhús Þeistareykjavirkjunar. Ljósmynd: Landsvirkjun. _____	28
MYND 9	Rafall fyrstu vélasamstæðu Þeistareykjavirkjunar hífður af borði flutningsskipinu BBC Polonia í desember 2016. Ljósmynd: Landsvirkjun. _____	30
MYND 10	Ekið með hverfil fyrstu vélasamstæðu Þeistareykjavirkjunar um götur Húsavíkur í desember 2016. Hverfillinn vegur um 134 tonn. Ljósmynd: Landsvirkjun. _____	31
MYND 11	Bygging stöðvarhúss Þeistareykjastöðvar. Ljósmynd: Landsvirkjun. _____	33
MYND 12	Umhverfisáhrif frá vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. _____	38
MYND 13	Innbyrðis vægi sjö flokka umhverfisáhrifa í heildarumhverfisáhrifum við vinnslu raforku í Þeistareykjastöð yfir 40 ára líftíma. _____	39
MYND 14	Hlutdeild framleiðslu- og framkvæmdaþátta vistferils fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. _____	40
MYND 15	Sundurliðuð hlutdeild framleiðslu- og framkvæmdaþátta vistferils fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. _____	41
MYND 16	Hlutdeild ólíkra rekstrarþátta fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. _____	42
MYND 17	Hlutdeild ólíkra rekstrarþátta fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. _____	43
MYND 18	Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar er 13,8 g CO ₂ -ígildi fyrir hverja unna kWst sem kemur út úr stöðinni, eða 14,7 g CO ₂ -ígildi/kWst með raforkuflutningi. _____	44
MYND 19	Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar. _____	44
MYND 20	Gróðurhúsaáhrif einstakra þátta í kolefnisspori Þeistareykjastöðvar. _____	45
MYND 21	Heildarorkuvinnsla og orkuþörf á 40 ára líftíma Þeistareykjastöðvar _____	48
MYND 22	Birtar niðurstöður fyrir orkuarðsemi mismunandi orkugjafa [2, 3, 27, 5, 4, 6]. _____	49
MYND 23	Birtar niðurstöður endurgreiðslutíma orku fyrir mismunandi orkugjafa [2, 3, 27, 5, 4]. _____	49
MYND 24	Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í Þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegum líftíma. _____	51
MYND 25	Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í Þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegri beinni losun koltvísýrings (CO ₂) í andrúmsloftið. _____	52
MYND 26	Næmnigreining á súrnun vegna vinnslu á 1 kWst í Þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegri beinni losun brennisteinsvetnis (H ₂ S) í andrúmsloftið. _____	52

MYND 27 Meðallosun CO ₂ og H ₂ S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2018. _____	54
MYND 28 Árleg losun koltvísýrings frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagn. _____	55
MYND 29 Árleg heildarlosun koltvísýrings frá íslenskum jarðvarmavirkjunum. _____	55
MYND 30 Losun gróðurhúsalofttegunda frá vinnslu raforku með mismunandi orkugjöfum _____	58
MYND 31 Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar og áætluð uppsöfnuð losun gróðurhúsalofttegunda á skilgreindum líftíma stöðvarinnar. _____	59
MYND 32 Gróðurhúsaáhrif einnar borholu á Þeistareykjum. _____	61

TÖFLUSKRÁ

TAFLA 1 Helstu kennistærðir Þeistareykjastöðvar. _____	15
TAFLA 2 Aflstöðvar á Íslandi sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu eða til hitaveitu einnig [10]. _____	16
TAFLA 3 Hlutar vistferils raforkuvinnslu í Þeistareykjastöð sem liggja innan kerfismarka _____	18
TAFLA 4 Ítarlegri skipting framkvæmdar Þeistareykjastöðvar í verksamninga og verkáfangi, raðað í tímaröð. _____	21
TAFLA 5 Yfirlit yfir þær borholur sem hafa verið boraðar á Þeistareykjum og staðfest eða áætlað afl hverrar holu sem nýtt er eða verður nýtt til vinnslu [17]. _____	22
TAFLA 6 Lykiltölur - hráefna- og eldsneytisnotkun og úrgangsmýndun á hverja borholu Þeistareykjastöðvar. _____	23
TAFLA 7 Losun gastegunda í andrúmsloftið á rannsóknar- og framkvæmdartímabili 2008-2017 [10]. _____	24
TAFLA 8 Samantekt byggingarefna í byggingar Þeistareykjastöðvar – stöðvarhús og steypar þrær fyrir kæliturnna. _____	26
TAFLA 9 Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og vatnsveitur Þeistareykjastöðvar. _____	26
TAFLA 10 Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og rakaskiljur Þeistareykjastöðvar. _____	27
TAFLA 11 Samantekt byggingarefna fyrir kaldavatnsveitur Þeistareykjastöðvar. _____	27
TAFLA 12 Samantekt byggingarefna fyrir vélasamstæður og kalda enda (eimsvala og kæliturnna) Þeistareykjastöðvar (2 x 45 MW). _____	29
TAFLA 13 Samantekt byggingarefna fyrir stöðvarveitur (að ómeðtöldum stöðvarnotkunarspennum). _____	29
TAFLA 14 Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Þeistareykja. _____	30
TAFLA 15 Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Þeistareykja. _____	31
TAFLA 16 Yfirlit yfir eldsneytis- og olíunotkun vegna byggingar Þeistareykjastöðvar. _____	32
TAFLA 17 Úrgangur frá byggingu Þeistareykjastöðvar, skipt eftir framkvæmdaþáttum. _____	32
TAFLA 18 Flutningur úrgangs til brennslu, urðunar eða endurvinnslu. _____	32
TAFLA 19 Forsendur til útreikninga á ávinning af endurvinnslu vegna byggingar aflstöðvar. _____	33
TAFLA 20 Áætluð orkunotkun Þeistareykjastöðvar út frá orkunotkun jarðvarmastöðva Landsvirkjunar á Norðausturlandi. _____	34
TAFLA 21 Eldsneytisnotkun vegna rekstrar á aflstöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2014 – 2018 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. _____	34
TAFLA 22 Heildarmagn rekstrarúrgangs (óflokkaðs og flokkaðs úrgangs, auk spilliefna) sem féllu frá jarðvarmastöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2008 – 2018. _____	34
TAFLA 23 Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá jarðvarmastöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2008 – 2018. _____	34

TAFLA 24 Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma á Þeistareykjum. _____	35
TAFLA 25 Samantekt hráefna í ofanjarðarmannvirkjum sem farið er með til urðunar eða í endurvinnslu að loknu niðurrifi. _____	36
TAFLA 26 Hlutfallsleg skipting áhrifa (%) í metnum flokkum umhverfisáhrifa frá vistferli Þeistareykjastöðvar. _____	47
TAFLA 27 Orkubúskapur Þeistareykjastöðvar á 40 ára líftíma _____	48
TAFLA 28 Forsendur næmnigreiningar á líftíma Þeistareykjastöðvar. _____	50
TAFLA 29 Niðurstöður vistferilsgreininga (LCA) fyrir jarðvarmavirkjanir. _____	57
TAFLA 30 Kolefnisspor aflstöðva Landsvirkjunar, byggð á vistferilsgreiningum sem unnar hafa verið fyrir Landsvirkjun [4, 5, 3, 2, 6]. _____	58
TAFLA 31 Samantekt á kolefnisspori ólíkra orkugjafa skv. nokkrum umhverfisýfirlýsingum (EPD) sem gefin hafa verið út á undanförunum fjórum árum. _____	58

ORÐSKÝRINGAR

Aðgerðareining	(<i>e. Functional unit</i>). Viðmiðunareining vistferilsgreiningar. Notuð til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilega vöru eða þjónustu.
Endurgreiðslutími orku	(<i>e. 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	(<i>e. System boundaries</i>). Afmörkun þess kerfis sem taka á með í vistferilsgreiningunni.
Kolefnisspor	(<i>e. Carbon footprint</i>). Mælikvarði á gróðurhúsaáhrifum, þ.e. á heildarlosun koltvísýrings (CO ₂) og annarra gróðurhúsalofttegunda sem rekja má til athafna mannsins og hefur áhrif á loftslagsbreytingar. Kolefnisspor er gefið upp í CO ₂ -ígildum.
LCIA	Niðurstöður vistferilsgreiningar (<i>e. Life Cycle Impact Assessment</i>).
Orkuarðsemi	(<i>e. Energy return on investment, EROI, eða 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	(<i>e. Primary energy demand, PED, eða 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.
Stöðlun	(<i>e. Normalization</i>). Við stöðlun eru niðurstöður settar í samhengi við heildarlosun á ákveðnu svæði eða heildarlosun einstaklings.
Umhverfisáhrifaflokkur	(<i>e. Environmental impact category</i>). Flokkur sem vísar til tegundar umhverfisáhrifa. Dæmi um umhverfisáhrifaflokk eru gróðurhúsaáhrif, eyðing auðlinda, svifryk, visteiturhrif og næringarefnaauðgun.
Umhverfisyfirlýsing (EPD)	(<i>e. Environmental Product Declaration, EPD</i>). Yfirlýsing eða skjal um umhverfisáhrif vöru. Við gerð umhverfisyfirlýsinga er reglum um viðeigandi vöruflokk fylgt (<i>e. Product Category Rules</i>) og er yfirlýsingin tekin 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.
Vigtun	(<i>e. Weighting</i>). Staðlaðar niðurstöður eru vigtaðar, en vigtunin byggir á því að hver flokkur umhverfisáhrifa hefur skilgreint ákveðið vægi sem getur t.d. verið byggt á pólitískum markmiðum um lækkun eða á skoðunum sérfræðinga.
Vistferilsgreining (LCA)	(<i>e. Life Cycle Assessment, LCA</i>). Aðferðafræði til þess að meta umhverfisáhrif vöru eða þjónustu yfir allan vistferil hennar, á skilgreindum líftíma. Aðferðin er stöðluð og því má nýta niðurstöður til samanburðar við sambærilega vöru eða þjónustu. Undanfari vistferilsgreiningar er gagnasöfnun (<i>e. Life Cycle Inventory, LCI</i>). Í framhaldinu er lagt mat á umhverfisáhrif vöru eða þjónustu í mismunandi flokkum umhverfisáhrifa (<i>e. Life Cycle Impact Assessment, LCIA</i>).

1 INNGANGUR

1.1 Bakgrunnur verkefnisins

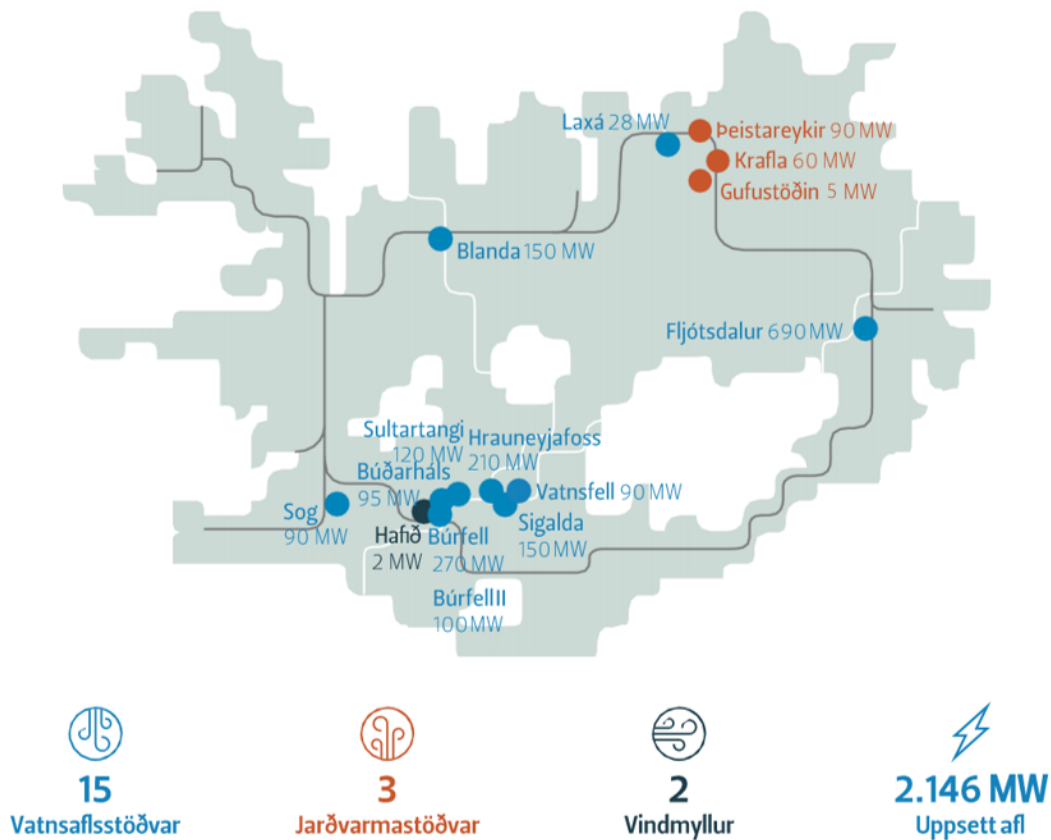
Markmið verkefnisins er greining og mat á umhverfisáhrifum og eyðingu auðlinda við raforkuvinnslu í jarðvarmastöð Landsvirkjunar, Þeistareykjastöð, sem er nýjasta jarðvarmavinnslustöðin á Íslandi. Nú þegar hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðahálsstöð, Fljótsdalsstöð, Blöndustöð, sem allt eru vatnsaflsstöðvar, Búrfellsstöð II, sem er aflaukning við Búrfellsstöð, og tvær rannsóknarvindmyllur á Hafinu. Verkefnið er liður í að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu fyrir allar tegundir orkuauðlinda og allar aflstöðvar Landsvirkjunar [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Matið er framkvæmt með aðferðarfræði vistferilsgreiningar (e. *Life Cycle Assessment, LCA*) í samræmi við alþjóðlegu staðlana ISO 14040 [7], ISO 14044 [8] og ISO 14067 [9].

Vistferilsgreining er aðferðarfræði sem er notuð til þess að meta staðbundin og hnattræn umhverfisáhrif vöru, framleiðsluferils eða þjónustu yfir allan vistferilinn. Greiningin nær því yfir alla virðiskeðju vörunnar, þ.e. allt frá öflun hráefna og framleiðsluferli hennar, auk notkunar og meðhöndlunar í lok líftíma. Með aðferðinni má greina hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin verða, en slíkar upplýsingar má nota til að bæta ákveðna vöru eða þjónustu. Aðferðin er stöðluð og birtast niðurstöður vistferilsgreininga á formi tölulegra upplýsingar um umhverfisáhrif fyrir svokallaða aðgerðareiningu (e. *functional unit*) sem nota má til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilegar vörur eða þjónustu. Kerfismörk (e. *system boundaries*) eru skilgreind, en þau eru afmörkun þess kerfis sem greiningin nær yfir. Niðurstöður verkefnisins er m.a. hægt að nýta til að meta vistspor (e. *ecological footprint*) og kolefnisspor (e. *carbon footprint*) raforkuvinnslu Landsvirkjunar. Þannig getur Landsvirkjun veitt raforkunotendum áreiðanlegar upplýsingar um umhverfisáhrif orkuvinnslunnar.

1.2 Þeistareykjastöð

Saga Þeistareykjastöðvar nær aftur til ársins 1999 en stöðin er nýjasta jarðvarmavirkjun á Íslandi og er með 90 MW uppsett afl, sjá töflu 1. Hönnun mannvirkja hófst árið 2011 og hófust byggingarframkvæmdir árið 2015. Framkvæmdir náðu hámarki á árabílinu 2016-2017 og þegar mest var störfuðu þar um 240 manns. Áætluð orkuvinnslugeta svæðisins er um 200 MW en frá upphafi hefur

verið lögð rík áhersla á að stöðin taki mið af umhverfi sínu og náttúru og er gert ráð fyrir uppbyggingu til lengri tíma. Þeistareykjastöð er þriðja aflstöð Landsvirkjunar á Norðausturlandi (Mývatnssvæði) sem nýtir jarðvarma til orkuvinnslu, en fyrir eru Kröflustöð og Gufustöðin í Bjarnarflagi, sjá mynd 1.



MYND 1 Peistareykjastöð er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [10].

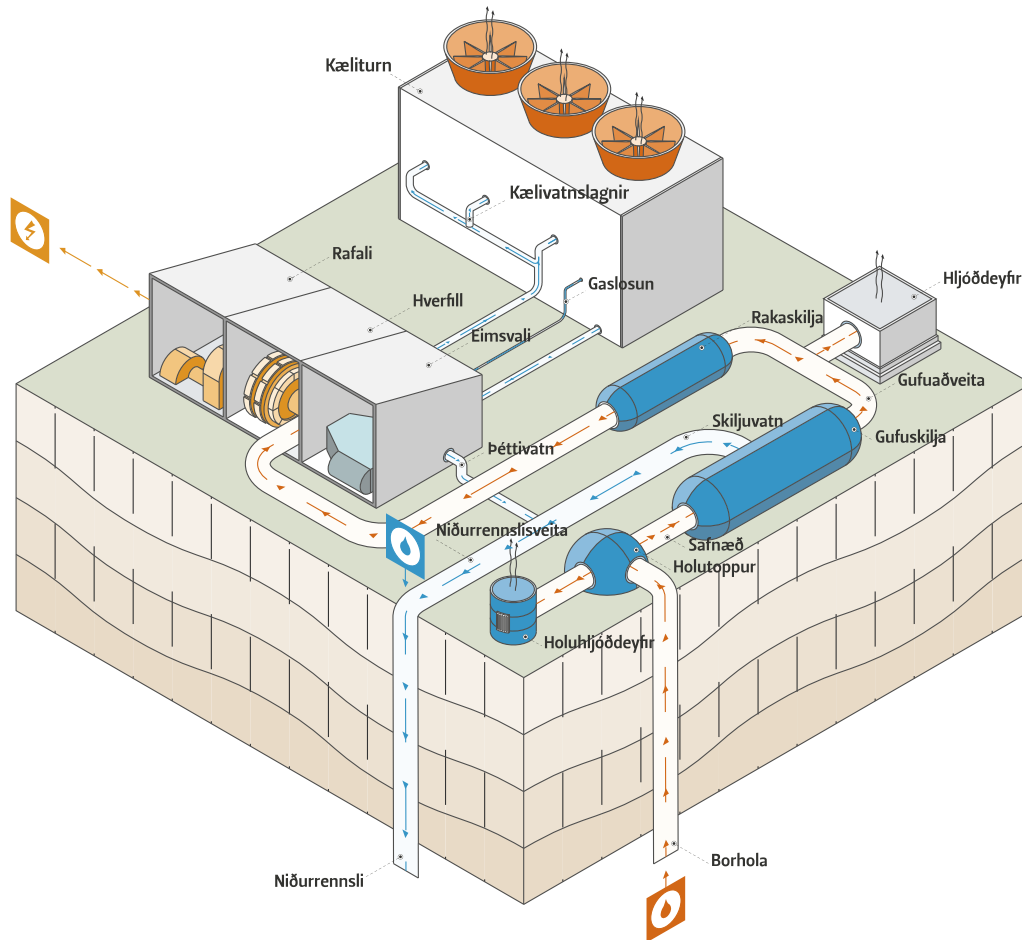
TAFLA 1 Helstu kennistærðir Peistareykjastöðvar.

ÞEISTAREYKJASTÖÐ	
Uppsett afl	90 MW
Gufuhverflar	2 x 45 MW
Orkuvinnslugeta	738 GWst á ári
Orkuvinnsla á 40 árum	29,5 TWst
Gangsetning á vél 1	17. nóvember 2017
Gangsetning á vél 2	18. apríl 2018

Borholur á Þeistareykjum eru rúmlega 2 km djúpar að meðaltali (sjá kafla 3.1.2) og er hitastig jarðgeymisins talinn vera á bilinu 270 – 290°C. Jarðhitavökvinn sem kemur upp úr holunum er blanda af sjóðandi heitu vatni og gufu, og inniheldur þessi blanda einnig gas og uppleyst jarðefni. Gufan er skilin frá vatninu í skiljustöð, sjá mynd 2, og þar eftir er hún nýtt í raforkuframleiðslu. Þéttivatninu er blandað út í skiljuvatn og er því losað aftur niður í jaðri nýtingarsvæðis. Gas sem verður til við raforkuvinnsluna losnar út í andrúmsloftið.

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur þann kost umfram aðra sjálfbæra orkugjafa að vinnslan er stöðug og er ekki háð dægursveiflum, árstíma eða veðrum. Í dag er hlutur jarðvarma í heildarorkunotkun Íslendinga 60,9%, og er þá bein notkun jarðvarma, ss. til húshitunar, snjóbræðslu og sundlauga, meðtalin. Hlutur vatnsafls er 20,3% (mestmegnis raforkuvinnsla) og hlutur olíu er 16,9% (samgöngur).

Á tuttugustu öld fór fram mikil fjárfesting í bæði veitustarfsemi og orkuöflun sem gerði það að verkum að í dag eru um 96% húsa á Íslandi kynt með jarðvarma og nær 100% rafmagns á Íslandi kemur frá endurnýjanlegum orkugjöfum. Sé litið til raforkuvinnslunnar eingöngu, þá er hlutur vatnsafls 73% og jarðvarma 27%. Í dag er heildarafl jarðvarmavirkjana á Íslandi 753 MW_e [11], sjá töflu 2, og er Þeistareykjastöð nýjasta viðbótin.



MYND 2 Mynd af samsetningu Þeistareykjastöðvar og helstu þáttum raforkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun.

TAFLA 2 Aflstöðvar á Íslandi sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu eða til hitaveitu einnig [11]. DF (tveggja þrepa, e. double flash), SF (eins þrepa, e. single flash), B (tvívökva, e. binary) og DS (þurruguflu, e. dry steam).

AFLSTÖÐ	GANGSETNING/UPPBYGGING	UPPSETT AFL	TÆKNI
Gufustöðin (Bjarnarflag)	1969	5 MW _e	SF
Svartsengi	1976-2007	76,4 MW _e (+ 200MW _{th} í varmafli)	SF/B/DS
Krafla	1978-1997	60 MW _e	DF
Nesjavellir	1998-2005	120 MW _e (+ 300 MW _{th} í varmafli)	SF
(Húsavík – Kalina)	(Orkuvinnsla 2000-2007)	2 MW _e	(B)
Hellisheiði	2006-2011	303,4 MW _e (+133 MW _{th} í varmafli)	SF/DF
Reykjanes	2006	100 MW _e (+XX MW _{th} í varmafli)	SF
Flúðavirkjun	2018	0,6 MW _e	B
Þeistareykir	2017-2018	90 MW_e	SF

2 VISTFERILSGREINING FYRIR ÞEISTAREYKJASTÖÐ

2.1 Markmið og umfang

Markmið vistferilsgreiningarinnar er að meta umhverfisáhrif og notkun auðlinda við vinnslu raforku í þeistareykjastöð. Vistferilsgreiningin nær til vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og vélbúnaðar, flutningsferla, byggingu aflstöðvarinnar sem og til reksturs og viðhalds hennar. Umhverfisáhrifin sem greind eru með aðferðafræði vistferilsgreiningar ná ekki til staðbundinna umhverfisáhrifa jarðvarmavirkjana á borð við breytingar á vistkerfum, landsig, lækkun grunnvatnsborðs, skjálftavirkni og sjónrænna áhrifa.

Greiningin er unnin í samræmi við staðlana ISO 14040 og ISO 14044 um gerð vistferilsgreininga [7, 8] og ISO 14067 [9] sem byggir á fyrrgreindum stöðlum. Einnig er stuðst við leiðbeiningar um framkvæmd vistferilsgreininga á orkuvinnslu [12] fyrir gerð umhverfisýfirlýsinga (e. Environmental Product Declaration), til að tryggja að niðurstöðurnar séu samburðarhæfar við sambærilegar greiningar. Þá eru Evrópustaðlarnir EN 15978 og EN 15804 um sjálfbærni í byggingariðnaði einnig hafðir til hliðsjónar [13, 14].

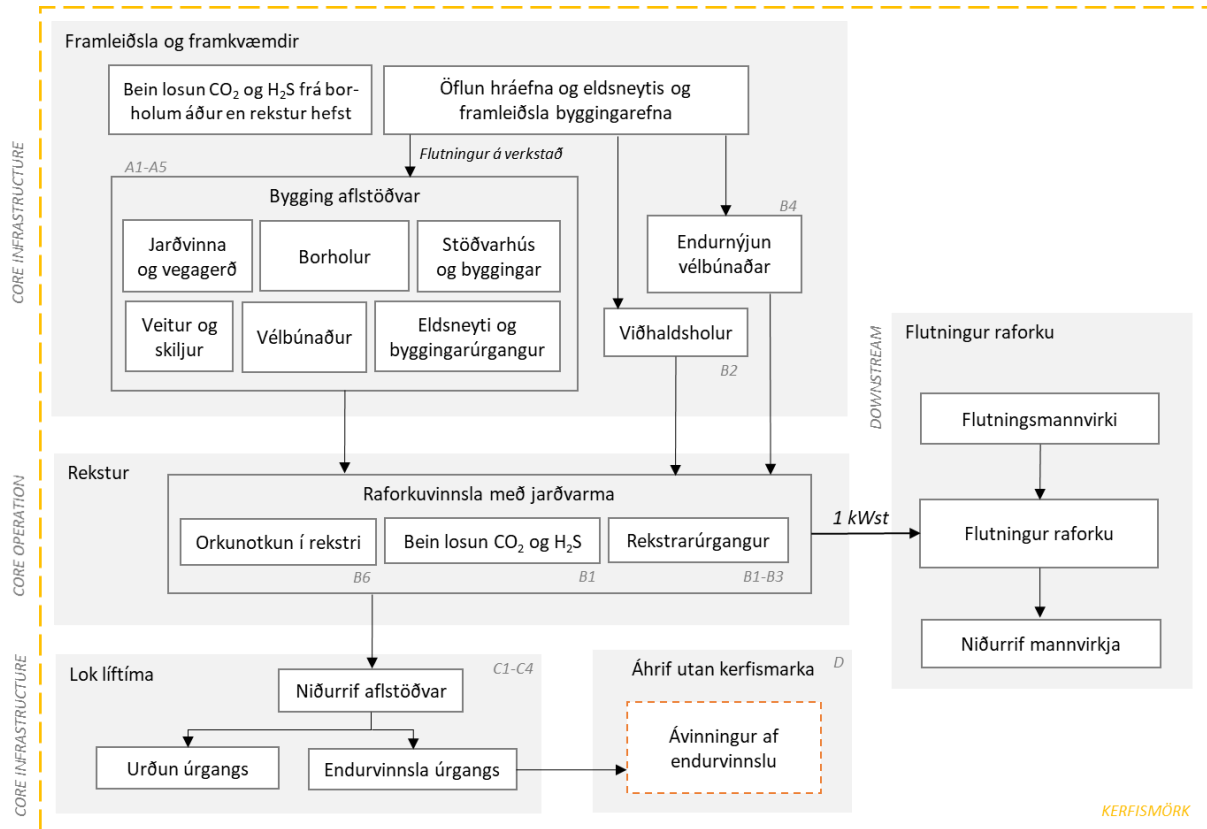
2.2 Aðgerðareining og líftími

Aðgerðareining vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem 1 kWst raforka unnin í þeistareykjastöð, annars vegar 1 kWst sem kemur út úr stöðinni og hins vegar 1 kWst sem búið er að flytja til stórnotanda eða dreifikerfis. Umhverfisáhrif og notkun auðlinda við vinnslu raforkunnar eru reiknuð fyrir hverja unna kWst í stöðinni. Reiknað er með 40 ára líftíma aflstöðvarinnar í samræmi við leiðbeiningar [12], en einnig má sjá næmnigreiningu niðurstaða fyrir mismunandi líftíma í kafla 5.1. Orkuvinnslugeta þeistareykjastöðvar er 738 GWst á ári, sjá töflu 1, og er því reiknað með að heildarorkuvinnslan á 40 árum sé 29,5 TWst.

2.3 Kerfismörk

Kerfismörk vistferilsgreiningarinnar fela í sér vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og búnaðar, flutninga hráefna, byggingarefna, búnaðar og úrgangs, byggingu þeistareykjastöðvar sem og

rekstur og viðhald aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma með tilheyrandi beinni losun frá vinnslunni. Flutningur raforku með flutningskerfi á hárrí spennu er innan kerfismarka. Gert er ráð fyrir að aflstöðin sé rifin að loknum líftímanum og að málmum sé komið til endurvinnslu. Sjá má einfaldaða mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar á mynd 3. Í töflu 3 má sjá hvaða hlutar vistferilsins falla innan kerfismarka greiningarinnar og flokkun samkvæmt EN 15804.



MYND 3 Einfölduð mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar. Greiningin felur í sér vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og búnaðar, flutninga, byggingu þeistareykjastöðvar, rekstur og viðhald stöðvarinnar á 40 ára líftíma ásamt beinni losun frá vinnslu og niðurrif og meðhöndlun úrgangs að líftíma loknum. Þá er flutningur raforku til notanda einnig innan kerfismarka. Lóðréttur texti táknar flokkun efna skv. leiðbeiningum fyrir orkuvinnslu- og orkuflutningsfyrirtækja um gerð umhverfisfyrirlýsinga [12], sem er í samræmi við fyrstu drög að samræmdum leiðbeiningum fyrir vistferilsgreiningar jarðhitaverkefna [15]. Bókstafir vísa í samsvarandi fasa vistferils skv. EN 15804 [14].

TAFLA 3 Hlutar vistferils raforkuvinnslu í þeistareykjastöð sem liggja innan kerfismarka og flokkun samkvæmt EN 15804.

Fasar í vistferli	Framleiðslufasi			Framkvæmdafasi		Rekstrarfasi							Lok líftíma				Áhrif utan kerfismarka
	Öflun hráefna	Flutningur til verksmiðju	Framleiðsla vöru	Flutningur á verkstað	Byggingarframkvæmd	Rekstur	Viðhald	Viðgerðir	Endurnýjun	Endurbætur	Orkunotkun í rekstri	Vatnsnotkun í rekstri	Niðurrif	Flutningur til förgunar	Meðhöndlun úrgangs	Förgun	Endurnotkun, endurheimt orku, endurvinnsla
Flokkur skv. EN 15804	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Liggur innan kerfismarka	x	x	x	x	x	x	x		x		x		x	x	x	x	x

2.4 Umhverfisáhrifaflokkar

Við vistferilsgreininguna er notast við aðferðir CML við mat á umhverfisáhrifum. Þetta er í samræmi við þær núverandi kröfur fyrir birtingu niðurstaða fyrir orkuvinnslu í umhverfisyfirlýsingum og í samræmi við nógildandi staðal EN 15804. Umhverfisáhrif fyrir eftirfarandi flokka eru metin:

- Gróðurhúsaáhrif
- Súrnun lands og vatns
- Myndun ósons við yfirborð jarðar
- Næringarefnaauðgun
- Eyðing ósonlagsins
- Eyðing ólífrænna auðlinda
- Eyðing jarðefnaeldsneytis

Þessum flokkum er nánar lýst í viðauka A. Þess ber að geta að í nýsamþykktum breytingartillögum á staðli EN 15804, sem taka gildi árið 2022, verða gerðar kröfur um að reikna einnig vatnsnotkun auk þess sem að krafist verður sundurliðunar á niðurstöðum í flokkum gróðurhúsaáhrifa og næringarefnaauðgunar. Vatnsnotkun er mælikvarði á það hversu mikið er gengið á vatnsauðlindir heims og þar með vatnsauðlindir vistkerfa. Þetta er mikilvægur umhverfisþáttur í viðkvæmari heimssvæðum þar sem sjálfbær orkuuppbygging á sér stað, en á e.t.v. minna við í flestum tilvikum fyrir íslensk verkefni.

Til viðbótar við þá umhverfisáhrifaflokka sem metnir eru fyrir þeistareykjastöð í þessari greiningu eru einnig metnir mikilvægir þættir sem varða orkubúskap aflstöðvarinnar; þ.e. orkuþörf á líftíma (e. *primary energy demand, PED*, eða e. *cumulated energy demand, CED*), orkuarðsemi (e. *harvest factor* eða e. *energy return on energy invested, EROI*) og endurgreiðslutími orku (e. *energy payback time*), sjá kafla 4.6.

3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA

Notaður var hugbúnaðurinn GaBi við gerð vistferilsgreiningarinnar. Við líkangerð voru notaðar magntölur frá verktökum og upplýsingar sem unnar voru upp úr lokaskýrslum framkvæmda. Auk þess fengust framleiðslutölur frá framleiðendum búnaðar og upplýsingar um rekstur aflstöðvarinnar voru fengnar frá Landsvirkjun. Vegna framleiðslu hráefna, staðbundinnar orkuvinnslu fyrir framleiðslu byggingarefna, flutninga, ýmissa vinnsluferla o.fl. var stuðst við bakgrunnsgögn úr alþjóðlegum gagnabanka frá GaBi. Einnig voru nýttar nýlega birtar EPD niðurstöður vegna framleiðslu íslenskrar Steinullar í greiningunni [16]. Bein losun vegna vinnslu jarðvarma byggir á mælingum.

3.1 Framleiðsla og framkvæmdir

Í þessu verkefni eru framleiðslufasi og framkvæmdafasi vegna Þeistareykjastöðvar skilgreindir sem:

- Framleiðsla byggingarefna fyrir mannvirki, veitur, skiljur, borholur og vélbúnað
- Flutningar byggingarefna og vélbúnaðar á verkstað
- Eldsneytisnotkun við jarðvinnu, vegagerð, borun hola og byggingarframkvæmdir, og flutningur og meðhöndlun framkvæmdarúrgangs

Ofangreindir fasar mynda innviði fyrir kjarnastarfsemi Þeistareykjastöðvar, þ.e. raforkuvinnslu, sbr. mynd 3 (e. Core infrastructure). Magntölum var safnað fyrir framleiðslu og flutninga byggingarefna, fyrir borholur og fyrir byggingu aflstöðvarinnar. Byggja tölur á lokauppgjöri frá verktökum eða samanteknum gögnum frá Landsvirkjun. Við mat á umhverfisáhrifum fyrir framleiðslu byggingarefna og eldsneytis fyrir Þeistareykjastöð er miðað við evrópska framleiðslu nema annað sé tekið fram.

Í töflu 4 má sjá hvernig upplýsingaöflun vegna mannvirkja, vélbúnaðar og framkvæmda var skipt niður eftir verksamningum og verkáföngum. Verksamningunum er svo skipt niður á stig vistferilsins eins og við á, þ.e. framleiðslu byggingarefna og vélbúnaðar, flutning frá framleiðslustað til verkstaðar, og orku- og eldsneytisnotkun á framkvæmdastað á byggingatíma.

TAFLA 4 Ítarlegri skipting framkvæmdar Þeistareykjastöðvar í verksamninga og verkáfanga, raðað í tímaröð. Allir þeir samningar sem fela í sér ílag og frágang efna og orku voru nýttir í þessari vistferilsgreiningu.

VERKÞÁTTUR	VERKSAMNINGUR	SKÝRING
Þeistareykjavegur nyrðri	THR-16-1	Vegagerð frá Húsavík að Þeistareykjavirkjun. Verkið var í höndum fjögurra verktaka og var unnið á árabílinu 2011-2014.
Kaldavatnsveita	THR-16-2	Lagning vatnsveitu frá vatntökusvæði við Skildingahól að stöðvarhússlóð og lagning hitaveitulagnar frá hitaveituholu ÞG-1 að stöðvarhússlóð og heimreið vinnubúða. Þ.S. verktakar önnuðust verkið.
Jarðvinna á stöðvarhússlóð	THR-16-4	Gerð heimreiðar að stöðvarhúsi, gröftur og fyllingar undir stöðvarhús ásamt fyllingu á hluta af plönnum við stöðvarhús. Einnig fól verkið í sér gerð slóða milli stöðvarhúss og skiljustöðvarsvæðis ásamt greftri og fyllingum undir skiljustöð
Borholur	NAL-01	Jarðhitaboranir. Framkvæmdir annaðist Jarðboranir ehf.
Byggingar	THR-15-1	Bygging stöðvarhúss og steypra þróa fyrir kæliturna. Framkvæmdir annaðist LNS Saga
Veitur	THR-10-2	Framkvæmdir við gufuveitu og vatnsveitu. Framkvæmdir annaðist LNS Saga
Vélasamstæða	NAL-30	Hönnun, smíði, flutningur og uppsetning á gufuverfil, rafala og kalda enda (eimsvala og kæliturna). Framleiðsla og uppsetning véla og kæliturna annaðist Fuji Electric og Balcke-Dürr
Spennar	NAL-31	Hönnun, smíði, flutningur og uppsetning á spennum. Spennar voru framleiddir af Tamini.
Skiljur	THR-10-1	Smíði og uppsetning á gufuskiljum og rakaskiljum. Skiljur voru framleiddar af Vélsmiðjunni Héðni.
Stjórnbúnaður*	NAL-35	Hönnun, smíði, forritun og uppsetning á stjórnbúnaði. Framleiðsla og uppsetning stjórnkerfis var í höndum ABB.
Stöðvarveitur	NAL-37	Stöðvarnotkunarspennar, 11 kV dreifikerfi, ásamt 400 V dreifiveitu og jafnstraumskerfi. Stöðvarveitur annaðist verktakinn Rafeyri.
Yfirborðsfrágangur	THR 16-3	Frágangur á virkjanasvæði, unnið sumarið 2018
Þeistareykjavegur syðri	-	Vegagerð frá Þeistareykjum að Kísilvegi (87)

*Verksamningur NAL-35 varðandi uppsetningu á stjórnkerfi fól ekki í sér hráefni eða orkunotkun, en tengist húsarafmagni í THR-15 og stöðvarveitum í NAL-37.

3.1.1 Jarðvinna og vegagerð

3.1.1.1 Jarðvegsframkvæmdir

Jarðvegsframkvæmdir fólu í sér heimreið að stöðvarhúsi, gröftur og fyllingar undir stöðvarhús ásamt fyllingu á hluta af plönnum við stöðvarhús og gerð slóða milli stöðvarhúss og skiljustöðvarsvæðis. Jarðvegsvinna vegna undirstaða stöðvarhúss og plans fór fram á árinu 2014. Samkvæmt grænu bókhaldi Landsvirkjunar voru alls 443 þúsund lítrar af dísilolíu notuð vegna þessarar vinnu. Sjá olíunotkun og úrgang frá jarðvegsframkvæmdum í kafla 3.1.6.

3.1.1.2 Vegagerð

Leggja þurfti 27 km veg norðan við stöðina, frá Húsavík til Þeistareykja (Þeistareykjavegur nyrðri), og 17,1 km veg frá stöðvarhúsi suður að Kísilvegi (Þeistareykjavegur syðri). Notuð var vistferilsgreining EFLU frá árinu 2013 á lagningu sambærilegs 1+1 vegar í íslenska þjóðvegakerfinu, með bundnu slitlagi, til þess að áætla umhverfisáhrif þessarar vegagerðar [17].

3.1.2 Borholur

3.1.2.1 Boranir og fóðringar

Borholur að Þeistareykjum eru allt að 2.800 m djúpar og boraðar með 20° – 40° stefnuhalla. Alls hafa 17 borholur verið boraðar og fóðraðar á Þeistareykjum og eru stáltoppur hluti af frágangi hola. Meðallengd hola er 2.400 m. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir að allar borholur sem hafa verið boraðar á svæðinu, hvort sem þær nýtast til vinnslu eða ekki, tilheyri stöðinni og eru innan kerfismarka. Árið 2019 voru 12 af 17 borholum nýttar til raforkuvinnslu og var verið að prófa tvær til viðbótar. Sjá má yfirlit yfir núverandi holur Þeistareykjastöðvar í töflu 5.

TAFLA 5 Yfirlit yfir þær borholur sem hafa verið boraðar á Þeistareykjum og staðfest eða áætlað afl hvernar holu sem nýtt er eða verður nýtt til vinnslu [18]. Gráskyggðir reitir eru holur sem ekki er verið að nýta.

BORHOLA NR.	DÝPI (M)	BORUÐ	AFL (MW _e)	ATHS.
ÞG-01	1953	2002	6,9	Staðfest / í notkun. Eftirlitshola
ÞG-02	1723		-	Ekki í notkun (rannsóknarhola)
ÞG-03	2659	2006	7	Staðfest / í notkun
ÞG-04	2240	2007	21,3	Staðfest / í notkun
ÞG-05	2499	2007/2009	8,4	Staðfest / í notkun
ÞG-06	2799	2009	7,3	Staðfest / í notkun
ÞG-07	2509	2011	4,7	Staðfest / í notkun
ÞG-08	2503		-	Ekki í notkun (rannsóknarhola)
ÞG-09	2194	2012	3,6	Staðfest / í notkun
ÞG-10	193		-	Ónýt
ÞG-11	2224	2016	14,4	Staðfest / í notkun
ÞG-12	2710	2016	5,7	Staðfest / í notkun
ÞG-13	2505	2016	7,3	Staðfest / í notkun
ÞG-14	2500	2016-2017	-	Prófanir
ÞG-15	2260	2017	2	Áætlað / ekki í notkun
ÞG-16	2702	2017	1,9	Staðfest / í notkun
ÞG-17	2500	2017	14,8	Staðfest / í notkun
ÞG-18	2644	2017	2	Áætlað / ekki tengd

Þörf er á töluverðu magni af eldsneyti við borun og fóðringu á sérhverri holu og til fóðringar er notað sement, leir og stál. Magn eldsneytis og hráefna til borunar og fóðringar á borholum byggir á borskýrslum frá verktökum varðandi þær holur sem boraðar voru á árunum 2015 – 2018 (holur ÞG-11 – ÞG-18), sjá töflu 6. Tekið skal fram að allnokkur breytileiki á hráefnanotkun var á milli hola. Allt fóðringarstál fyrir þær holur kom frá Japan eða Kína og hefur það verið yfirfært á allar holur, bæði núverandi og framtíðarholur, í þessari greiningu.

TAFLA 6 Lykiltölur - hráefna- og eldsneytisnotkun og úrgangsmýndun á hverja borholu Þeistareykjastöðvar. Byggir á borskýrslum fyrir holur ÞG-11 – ÞG-18 sem boraðar voru á árunum 2016 – 2017 og gögnum frá Landsvirkjun. Heildarmagn efna er áætlað fyrir 17 boraðar og fóðraðar holur á Þeistareykjum.

HRÁEFNI	MAGN	MEÐALTAL PER HOLU	ÁÆTLAÐ HEILDARMAGN
Bentonít	tonn	96	1.633
Silica	tonn	82	1.390
Sement	tonn	248	4.214
Barít	tonn	12	196
Perlít	tonn	4	70
Borvökvi (pólýmerar), þéttiefni og íblöndunarefni*	tonn	7	114
Stálfóðring (API 5CT staðall)	tonn	176	3.000
Stálhýsing	tonn	3	51
OLÍUNOTKUN	MAGN		
Disilolía	þús. lítrar	183	3.107
Smurefni	þús. lítrar	1,5	26
ÚRGANGUR	MAGN		
Blandaður úrgangur	tonn	2	42
Timbur (litað og ólitað)	tonn	4	65
Spilliefni	tonn	4	68
Málmar	tonn	3	56

* Ekki hluti af þessari greiningu vegna skorts á itarlegri gögnum. Um er að ræða 1% af massa þeirra efna sem þarf í borholunum, og því ekki talið hafa áhrif á niðurstöður.



MYND 4 Holutoppur við eina borholu Þeistareykjastöðvar. Ljósmynd: ÍSOR [62].

Ámóta upplýsingar voru teknar saman fyrir borholur Hellisheiðarvirkjunar vegna vistferilsgreiningar þeirrar aflstöðvar [19, 20]. Hráefna- og eldsneytistöður eru af sömu stærðargráðu skv. upplýsingaöflun þeirrar greiningar [19], en að meðaltali var notað meira stál í holufóðringum á Hellisheiði og minna af sement og dísilolíu fyrir hverja holu.

3.1.2.2 Losun gass frá rannsóknar- og framkvæmdatíma

Losun á gasi frá Þeistareykjum var mæld og tilkynnt til Orkustofnunar á meðan á rannsóknum og borunum stóð, og er í þessari greiningu gert ráð fyrir að þessi losun tilheyri framkvæmdinni, sjá töflu 7, þó svo að erfitt sé að greina náttúrulega losun frá losun vegna rannsókna eða vinnslu, einkum á þessu stigi framkvæmda, sjá umfjöllun í kafla 6.2.

TAFLA 7 Losun gastegunda í andrúmsloftið á rannsóknar- og framkvæmdartímabili 2008-2017 [11].Allar tölur eru gefnar upp í tonnum.

GASTEGUND	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2008-2017
CO ₂	964	1.654	656	827	1.863	672	895	2.345	770	2.922	13.568
H ₂ S	613	462	523	570	246	136	391	971	150	787	4.849
CH ₄	-	-	-	-	1	-	1	1	-	2	5



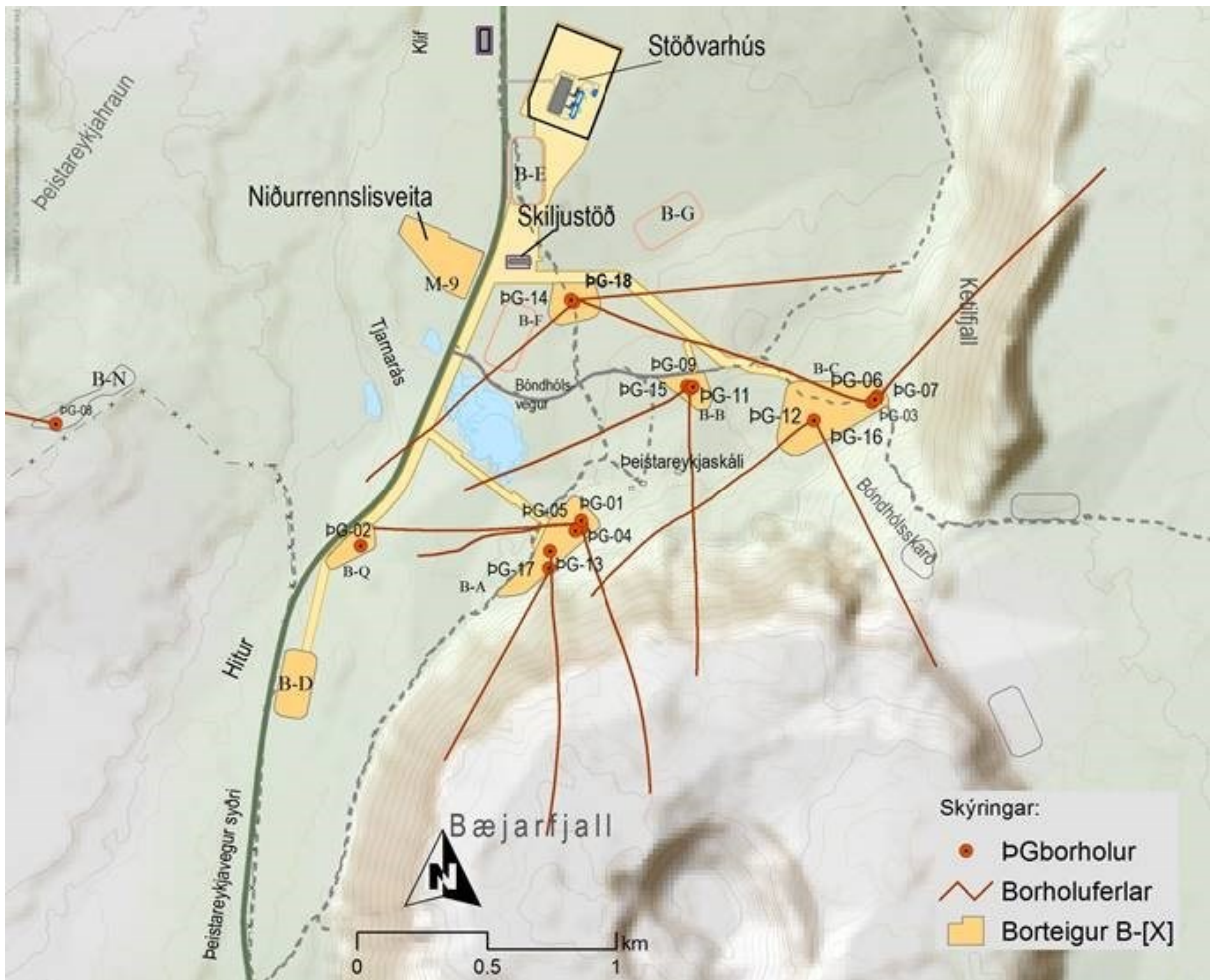
MYND 5 Framkvæmdir við stöðvarhúsið haustið 2016, borhola ÞG-12 í forgrunni. Ljósmynd: Landsvirkjun [18].

3.1.2.3 Skolvökvi bors og skiljuvatn frá borholum

Við borun og rekstur borhola verður til skiljuvatn og skolvökvi. Strangar kröfur eru um meðhöndlun skolvökva á bortíma þar sem krafist er þrepahreinsunar í setkörum og tjörnum. Skiljuvatn verður til þegar skiljast að vatn og gufa úr borholum. Þetta ferli á sér t.a.m. stað þegar hola er látin blása á hljóðdeyfi á borteig (ekki opin inn á gufuveitu), svo sem við aflprófanir eða í skemmri tíma vegna tilfallandi verkefna á rekstartíma. Að jafnaði eru holur látnar blása í u.þ.b. 3 mánuði við álagsprófanir eftir borun en í einhverjum tilfellum voru holur á þeistareykjum álagsprófaðar oftár en einu sinni. Skiljuvatn verður síðan einnig til í rekstri virkjunar þegar vatn er skilið frá gufu í gufuskiljum á skiljusvæði og er það skiljuvatn losað á niðurrenslissvæði (sjá kafla 1.2). Í rekstri, þegar holur eru tengdar inn á gufuveitu, verður einungis til skiljuvatn á skiljusvæði en ekki á borteigum.

Frárennsliskerfi er frá hverjum borteig, sjá mynd 6. Frá borteigum B og C er frárennslí leitt eftir niðurgrafinni fráveitulögn að svelgholum, og þaðan á yfirfalli, ef svelgholan hefur ekki undan, um niðurgrafna fráveitulögn út í náttúrulega tjörn austan við Tjarnarás, tjörn sem mótuð er af náttúrulegu afrennslí jarðhitasvæðisins norðan undir Bæjarfjalli. Frárennslí frá borteigum A og F er leitt um

niðurgrafnar fráveitulagnir út í tjörn austan við Tjarnarás. Yfirfall er á austari tjörninni yfir í tjörn vestan Þeistareykjavegar, þaðan sem vatnið rennur niður um opna sprungu.



MYND 6 Yfirlitsmynd af vinnslusvæði Þeistareykjastöðvar, þ.e. borteigum, skiljustöð, niðurrennslissvæði, gufuveitu og stöðvarhúsi. Mynd: Landsvirkjun.

Ekki er hægt að segja nákvæmlega til um hversu mikið vatn rann frá borteigum á framkvæmdatíma en ávallt var reynt að lágmarka innrennsli í tjarnir. Nær allt frárennsli frá borteigum B og C rann í svelgholur sem staðsettar eru innan jarðhitasvæðisins, nærri borteigum B og C. Frá borteigum A og F fór vatn í gegnum tjarnir austan og vestan Þeistareykjavegar áður en það rann niður um opna sprungu. Til eru mælingar á rennsli vatns í borholum sem og rennsli í frárenniskerfi þegar holur eru í blæstri. Mælingar sýna að magn vatns í frárennsli frá holum í blæstri er í lang flestum tilfellum frekar lítið, eða á bilinu 1-6 l/s (breytilegt eftir því hversu vatnsríkar holur eru). Af þeim 12 holum sem nú eru í rekstri eru tvær áberandi vatnsríkastar og með meira rennsli skiljuvatns í blæstri en að framan greinir; ÞG-01 þar sem rennsli mælist yfir 10 l/s og ÞG-05 sem mælist með meðaltalsrennsli á bilinu 40-50 l/s. Báðar eru þær staðsettar við borteig A.

Af ofangreindu má ráða að um hlutfallslega takmarkaða losun frárennslisvatns er um að ræða í tjarnir við Tjarnarás. Erfitt er að áætla hlutfall þess vatns sem fór í tjarnir annars vegar og í svelgholur hins vegar auk þess uppbygging borhola á sér stað yfir langt tímabil. Af þessum sökum er ekki tekið mið af frárennsli frá borteigum á prófunartíma hola inni í vistferilsgreiningu Þeistareykjavirkjunar. Talið er að

áhrif tímabundins frárennslis séu lítil þegar horft er til heildaráhrifa Þeistareykjavirkjunar á framkvæmda- og rekstrartíma, auk þess að um er að ræða áhrif á jarðveg innan háhitasvæðis sem mjög er mótaður virkni jarðhitakerfisins. Þess skal einnig getið að eftirlit með lífríki í tjörnum við Tjarnarás er hluti af bæði umhverfisvöktun Þeistareykjavirkjunar og grunnrannsóknnum á undirbúningsstigi framkvæmda.

3.1.3 Mannvirki aflstöðvar

3.1.3.1 Stöðvarhús, kæliturnaprær og stokkar

Gögn um allar byggingar eru byggðar á upplýsingum frá verktaka og lokauppgjöri verksamninga. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 8. Byggingar Þeistareykjavirkjunar (THR-15) fela í sér stöðvarhús, byggingu kæliturnapróa undir kæliturna og byggingu stokka með forsteyptum stökklokum fyrir gufulagnir, alls u.þ.b. 8.000 m². Stöðvarhúsið samanstendur af tveimur vélasölum, tengibyggingu, þjónustukjarna og grófvinnuverkstæði með búningaðstöðu. Húsið sjálft er stálgrindahús á staðsteyptum undirstöðum og undir vélasal er steyptur kjallari að hluta. Útveggir vélasalar eru úr forsteyptum einingum og klæddir barylaga málmklæðningu. Tengibygging og þjónustukjarni eru staðsteypt og útveggir einangraðir og klæddir sléttum álplötum. Kæliturnaprær eru steyptar þrær undir kæliturna, um 50 x 20 metrar að grunnfleti.

TAFLA 8 Samantekt byggingarefna í byggingar Þeistareykjastöðvar – stöðvarhús og steyptar þrær fyrir kæliturna.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN	
Steypa	tonn	17.275
Stál	tonn	1.466
Gler	tonn	270
Steinull	tonn	114
Ál	tonn	32
Steypujárn	tonn	21
Tjörudúkur	tonn	11
Ryðfrítt stál	tonn	10
Plast og önnur efni	tonn	12

3.1.3.2 Gufuveitur og vatnsveitur

Gufuveitur (e. steam supply system) samanstanda af safnæðum frá borholum að safnæðastofnum, skiljustöðvar, aðveituæðar, lokahús og gufuháfa, auk gufuhljóðdeyfa. Upplýsingar vegna framkvæmda við gufu- og vatnsveitur (THR 10-2) voru fengnar úr uppgjöri verkefnisins. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 9.

TAFLA 9 Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og vatnsveitur Þeistareykjastöðvar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN	
Steypa	tonn	7.041
Stál	tonn	2.025
Ryðfrítt stál	tonn	375
Steinull	tonn	148
Plast	tonn	82

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN	
Ál	tonn	58
Önnur efni	tonn	25

3.1.3.3 Skiljur

Skiljur (e. steam separators) voru framleiddar á Íslandi og fela í sér bæði gufu- og rakaskiljur. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 10.

TAFLA 10 Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og rakaskiljur Þeistareykjastöðvar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN	
Stál	tonn	62
Ál	tonn	0,9
Steinull	tonn	2,5

3.1.3.4 Kaldavatnsveitur

Í aflstöðinni þurfti kalt vatn til kælingar og skolunar á borsvari upp úr holunum og til nýtingar sem neysluvatn. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 11, en framkvæmdir fóru fram á árinu 2014. Sjá má olíu- og úrgangsmagn vegna kaldavatnsveitna í kafla 3.1.6

TAFLA 11 Samantekt byggingarefna fyrir kaldavatnsveitur Þeistareykjastöðvar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN	
Stál	tonn	13,5
Ál	tonn	18
Plas (PE, PU, PEX)	tonn	235
Forsteyptar einingar	tonn	3,5
Kopar	tonn	3,2

3.1.4 Vélbúnaður aflstöðvar

3.1.4.1 Vélasamstæða: hverflar, raflar og kaldir endar

Vélasamstæða Þeistareykjastöðvar felst í tveimur settum af 45 MW jarðgufuhverfli, rafali og búnaði fyrir kalda enda (eimsvalar og kæliturnar) ásamt tilheyrandi lögnum og varahluti.

Hverflar og rafalar voru fluttir frá fyrirtækinu Fuji Electric í Japan í tveimur áföngum. Fyrsta vélasamstæða kom til landsins í desember 2016 og seinni samstæðan í lok apríl 2017. Sjóflutningar tóku um 9-10 vikur hvort sinn og lögðu skipin við Húsavíkurhöfn, þaðan sem búnaðurinn var svo fluttur til Þeistareykja. Eimsvalar voru einnig fluttir inn í tveimur áföngum frá þýska fyrirtækinu Balcke-Dürr, annars vegar í nóvember 2016 og hins vegar í apríl 2017. Heildarþyngd vagnlestanna sem fluttu hverfla stöðvarinnar, með aðstoðardráttarbilum, var um 220 tonn í bæði skiptin, og var þar með slegið fyrri Íslandsmet í þungaflutningum, sem var 196 tonn, með flutningum aflspenna í Fljótsdalsstöð.



MYND 7 Hverfill fyrstu vélasamstæðu færður á sinn stað á Þeistareykjum með aðstoð tveggja krana í febrúar 2017. Ljósmynd: Landsvirkjun.



MYND 8 Eimsvali vélasamstæðu tvö frá Balcke-Dürr hífður á geymslusvæði utan við stöðvarhús Þeistareykjavirkjunar. Ljósmynd: Landsvirkjun.

TAFLA 12 Samantekt byggingarefna fyrir vélasamstæður og kalda enda (eimsvala og kæliturna) Þeistareykjastöðvar (2 x 45 MW).

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN
Steypujárn	tonn 81
Byggingarstál	tonn 409
Ryðfrítt stál	tonn 529
Ál	tonn 31
PVC plast	tonn 85
Trefjaplast	tonn 119
Steypa	tonn 30
Steinull	tonn 6

3.1.4.2 Spennar

Spennarnir (verksamningur NAL-31) voru fluttir frá Tamini í Ítalíu og um er að ræða tvo spenna fyrir hverja vélasamstæðu, þ.e. alls tveir 50 MVA 220/11 kV vélaspenningar og tveir 6,3 MVA 11/11 kV spennar. Spennarnir voru fluttir frá Rotterdam. Heildarþyngd einnar spennastæðu (50 MVA + 6,3 MVA) er um 105 tonn. Magn hráefna í spennum byggir á upplýsingaöflun vegna annarrar aflstöðvar Landsvirkjunar [4], þar sem búið er að áætla heildarmagnið miðað við massa í spennum.

3.1.4.3 Stöðvarveitur

Stöðvarveitur (e. station auxiliaries) fela í sér dreifikerfi fyrir raforku og jafnstraumskerfi. Sjá samantekt byggingarefna í töflu 13. Einnig eru þrjú stöðvarnotkunarspenningar (2,5 MVA) hluti af stöðvarveitum og var í þessari greiningu stuðst við umhverfisyfirlýsingu frá sænskum spennuframleiðanda [21].

TAFLA 13 Samantekt byggingarefna fyrir stöðvarveitur (að ómeðtöldum stöðvarnotkunarspennum).

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN
Stál	tonn 19
Ál	tonn 8
Plast	tonn 13
Kopar	tonn 2
Önnur efni	tonn 1

3.1.5 Flutningur á verkstað

Upplýsingar um uppruna hráefna og flutninga voru fengnar frá Landsvirkjun og birgjum fyrirtækisins. Öllu jafna er reiknað með landflutningum í framleiðslulandi, sjóflutningum frá framleiðslulandi til Húsavíkurhafnar og landflutningum þaðan til Þeistareykja. Við landflutninga á Íslandi er gert ráð fyrir að ökutæki aki tóm til baka. Flutningsvegalengdir fyrir einstök byggingarefni eru teknar saman í töflu 14.

TAFLA 14 Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalemdir frá framleiðslustað til Þeistareykja.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLendis	SJÓFLUTNINGUR	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI
Sement	Noregur/Danmörk	100 km	3.000 km	30 km
Kísill	Belgía	100 km	3.000 km	30 km
Bentonít	Bandaríkin	3,500 km	5.000 km	30 km
Stálfóðringar	Japan/Kína	500 km	21.500 km	30 km
Steypa (forsteypt)	Ísland	-	-	400 km
Steypujárn	Pólland	100 km	3.000 km	30 km
PP lagnir	Þýskaland	100 km	3.000 km	30 km
Stállagnir og byggingarstál	Þýskaland	100 km	3.000 km	30 km
Steinull	Ísland	-	-	220 km
Steypustyrktarstál	Hvíta Rússland	1,400	3.000 km	30 km
PEX plast	Svíþjóð	100 km	3.000 km	30 km



MYND 9 Rafall fyrstu vélasamstæðu Þeistareykjavirkjunnar hífður af borði flutningsskipinu BBC Polonia í desember 2016. Ljósmynd: Landsvirkjun.

TAFLA 15 Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Þeistareykja.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐANDI / FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLENDIS	SJÓFLUTNINGUR	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI
Spennar	Tamini, Ítalía	983 km	3.048 km	30 km
Vélbúnaður: gufuhverfill og rafall	Fuji Electric, Japan	136 km	22.273 km	30 km
Vélbúnaður: eimsvali, kæliturnar, lagnir	Balcke-Dürr, Þýskaland	280 km	2.900 km	30 km
Stöðvarveitur og stöðvarnotkunarspennir	Þýskaland/Pólland	100 km	3.000 km	30 km

**MYND 10** Ekið með hverfil fyrstu vélasamstæðu Þeistareykjavirkjunar um götur Húsavíkur í desember 2016. Hverfillinn vegur um 134 tonn. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.1.6 Bygging aflstöðvar

Bygging aflstöðvarinnar hófst árið 2015, en áður höfðu verið boraðar 9 borholur. Mestu framkvæmdirnar áttu sér stað á árabílinu 2016-2017. Í töflu 16 má sjá yfirlit yfir olíunotkun vegna ólíkra framkvæmdaþátta við Þeistareykjastöð til ársins 2018, þegar yfirborðsfrágangi lauk. Eldsneytisnotkun var tekin saman sameiginlega fyrir byggingu stöðvarhúss (THR-15) og veitna (THR-10) og er gert ráð fyrir að notkun skiptist til helminga milli þessara verkþátta. Yfirlit yfir úrgang frá framkvæmdum má sjá í töflu 17 og meðhöndlun hans (urðun eða endurvinnsla) í töflu 18.

TAFLA 16 Yfirlit yfir eldsneytis- og olíunotkun vegna byggingar Þeistareykjastöðvar. Hér er ekki meðtalin áætluð eldsneytisnotkun vegna vegagerðar, hún er tiltekin í kafla 3.1.1. Díselolíunotkun vegna ýmissa smáverka og snjómoksturs á virkjanasvæði á Norðausturlandi á framkvæmdartíma (210 þúsund lítrar) eru ekki tekin með í þessari greiningu.

VERKÞÁTTUR	DÍSILOLÍA (LÍTRAR)	BENSÍN	STEINOLÍA	SMUROLÍUR	FROSTLÖGUR
Jarðvegsframkvæmdir	443.435	-	-	-	-
Bygging stöðvarhúss og veitna	384.247	1.364	1.200	254	381
Borholur*	3.107.039	-	-	25.936	43
Uppsetning vélbúnaðar	23.807	13.438	225	326	
Kaldavatnsveitur	63.565			509	
Yfirborðsfrágangur	17.536				

*Sjá einnig töflu 6 í kafla 3.1.2

TAFLA 17 Úrgangur frá byggingu Þeistareykjastöðvar, skipt eftir framkvæmdaþáttum. Allar tölur eru rauntölur (tonn) úr bókhaldi LV en magn úrgangs vegna borhola er áætlað út frá gögnum um holur ÞG-11 – ÞG-18.

VERKÞÁTTUR	ÓFLOKKAÐUR EÐA GRÓFUR ÚRGANGUR	PAPPÍR	TIMBUR	PLAST	MÁLMAR	LÍFRÆNT	ÚRGANGSOLÍA	SPILLEFNI
Jarðvegsframkvæmdir	3,34	100	840					
Bygging stöðvarhúss og veitna	164	12	311	3	181	25	0,3	0,2
Borholur	42	-	65	-	56	2	15	53
Uppsetning vélbúnaðar	35		95		6	0,2	16	
Kaldavatnsveitur	-	-	-	-	-	-	0,45	-
Annað (smáverk og snjómokstur)								
Yfirborðsfrágangur				0,128				0,005

TAFLA 18 Flutningur úrgangs til brennslu, urðunar eða endurvinnslu. Ekki er gert ráð fyrir landflutningum erlendis þar sem ekki liggja fyrir nákvæmari upplýsingar um förgunarstað.

ÚRGANGUR	MEÐHÖNDLUN	STAÐSETNING	LANDFLUTNINGUR Á ÍSLANDI	SJÓFLUTNINGUR
Olíuúrgangur	Brennsla	Kalka, Reykjanes	532 km	-
Önnur spilliefni	Brennsla, orkuheimt	Danmörk / Svíþjóð	100 km	2200 km
Óflokkaður / grófur úrgangur	Urðun	Stekkjarvík	249 km	-
Pappír	Endurvinnsla	Holland	100 km	2250 km
Timbur	Urðun, yfirlag	Stekkjarvík	249 km	-
Plast	Endurvinnsla	Holland	100 km	2250 km
Lífrænn úrgangur	Moltugerð	Akureyri	100 km	-
Málmar	Endurvinnsla	Bretland	100 km	1600 km

TAFLA 19 Forsendur til útreikninga á ávinning af endurvinnslu vegna byggingar aflstöðvar.

ÚRGANGUR	ÁVINNINGUR AF ENDURVINNSLU
Pappír	1 kg af endurunnum pappír kemur í veg fyrir framleiðslu á 0,78 kg af nýjum pappír [22]
Plast	1 kg af endurunnu plasti kemur í veg fyrir framleiðslu á 0,75 kg af nýju [23]
Málmar	1 kg af endurunnum málmum kemur í veg fyrir framleiðslu á 0,37 kg af nýjum málmum [24]

**MYND 11** Bygging stöðvarhúss Þeistareykjastöðvar. Ljósmynd: Landsvirkjun.

3.2 Rekstur og viðhald - raforkuvinnsla í Þeistareykjastöð

Í þessum kafla er fjallað um það sem kalla mætti kjarnastarfsemi aflstöðvarinnar (e. core operation), þ.e. raforkuvinnsla á skilgreindum 40 ára líftíma aflstöðvarinnar. Þetta er sá fasi vistferilsins sem tekur við eftir að búið er að byggja stöðina, og felur í sér eldsneytisnotkun, úrgang frá rekstri og viðhaldi og beina losun gastegunda vegna vinnslunnar. Hér er einnig fjallað um nauðsynlegar endurfjárfestingar og viðhaldsframkvæmdir fyrir innviði stöðvarinnar (e. core infrastructure), þ.e. borun nýrra borhola til að viðhalda 90 MW vinnslugetu á líftímanum og endurnýjun og endurvinnslu vélbúnaðar.

3.2.1 Orkunotkun og úrgangur frá rekstri

Magn raforku er áætlaður út frá gögnum um rekstur jarðvarmastöðva Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra (Krafla og Gufustöðin í Bjarnarflagi, og Þeistareykjastöð frá 2017). Fyrir magn eldsneytis og úrgangs á rekstartíma eru notaðar meðaltölur frá rekstri Kröflustöðvar og Gufustöðvarinnar.

TAFLA 20 Áætluð orkunotkun Þeistareykjastöðvar út frá orkunotkun jarðvarmastöðva Landsvirkjunar á Norðausturlandi.

AFLSTÖÐ	ORKUVINNSLA	TÖP OG EIGIN NOTKUN
Kröflustöð	500 GWst/ári	5,0% (meðaltal 2013 – 2016)
Gufustöðin	42 GWst/ári	0,2% (meðaltal 2013 – 2016)
Þeistareykjastöð	738 GWst/ári	4,7% (áætlað)

Eldsneytisnotkunin byggir á gögnum Landsvirkjunar frá árunum 2014 – 2018, sjá töflu 21, og magn úrgangs út frá gögnum Landsvirkjunar frá árabílinu 2008-2018, sjá töflur 22 – 23. Á þessu ellefu ára tímabili var um hefðbundinn rekstur að ræða, en einnig áttu sér stað viðhaldsaðgerðir í Kröflustöð 2008. Um sambærilegan rekstur er að ræða fyrir rekstrartíma Þeistareykjastöðvar, sem bættist við á þessu svæði á árinu 2017 þegar fyrsta vélin var gangsett.

TAFLA 21 Eldsneytisnotkun vegna rekstrar á aflstöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2014 – 2018 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. Allar tölur eru gefnar í lítrum á ári.

ORKUNOTKUN	2014	2015	2016	2017	2018	MEÐALTAL 2014-2018
Bensín	1.662	411	855	865	1.212	1.001
Dísill	13.029	13.064	12.364	9.846	7.661	11.193
Lífdísill	-	-	-	6.065	7.844	4.636

TAFLA 22 Heildarmagn rekstrarúrgangs (óflokkaðs og flokkaðs úrgangs, auk spilliefna) sem féllu frá jarðvarmastöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2008 – 2018. Allar tölur eru gefnar í tonnum.

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	MEÐALTAL ÚRGANGS 2008-2018 (TONN/ÁRI)
218	30	40	88	18	56	46	37	44	34	33	58

TAFLA 23 Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá jarðvarmastöðvum Landsvirkjunar á Norðurlandi eystra á árunum 2008 – 2018.

ÚRGANGSFLOKKAR	2008-2018		TONN/ÁRI
Brotamálmar og góðmálmar	221	34%	20,1
Tímbur (málað og ómálað)	252	39%	22,9
Almennur óflokkaður úrgangur til urðunar	72	11%	6,6
Óvirkur úrgangur (jarð og steinefni, gler og postulín)	23	4%	2,1
Lífrænn úrgangur - Eldhúsúrgangur til jarðgerðar	21	3%	1,9
Plast	18	3%	1,6
Pappír (bylgjupappír, tímarit, fernur, skrifstofupappír)	13	2%	1,2
Spilliefni	10	2%	0,9
Rafeindabúnaður	7	1%	0,7
Olíuúrgangur	6	1%	0,5
Alls úrgangur	643	100%	58,4

3.2.2 Bein losun í andrúmsloftið frá rekstri

Jarðhitasvæði losa ýmsar gastegundir náttúrulega en jarðvarmavinnsla og boranir á svæðunum getur valdið aukinni losun eða flýtt fyrir henni. Helstu gastegundir sem losna frá Þeistareykjastöð eru CO₂, H₂S, N₂, H₂ og CH₄, og þar sem þrjár síðastnefndu eru í snefilmagni er eingöngu litið til losunar CO₂ og H₂S í þessari greiningu. Árið 2018 var fyrsta heila rekstrarár stöðvarinnar. Fyrsta 45 MW vélin var gangsett þann 17. nóvember 2017 og seinni vélin þann 18. apríl 2018. Vegna þess í hve skamman tíma Þeistareykjastöð hefur verið í rekstri eru gögn um rekstur hennar takmörkuð. Byggir því áætluð losun á 40-ára líftíma á rekstrarreynslu árána 2018 og 2019, sjá töflu 24. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir að árleg losun CO₂ sé 7.500 tonn/ári og H₂S sé 3.000 tonn/ári á líftíma aflstöðvarinnar.

Í rekstri, þegar holur eru tengdar inn á gufuveitu, verður einungis til skiljuvatn á skiljusvæði en ekki á borteigum. Öllu skilju- og þéttivatni er safnað og losað niður á niðurrennsliðsvæði í jaðri nýtingarsvæðis, þar sem vatnshitastig er sambærilegt. Ekki er því gert ráð fyrir losun efna í vatnsviðtaka á rekstartíma í þessari greiningu, heldur eingöngu losun í andrúmsloft. Sjá nánari umfjöllun um losun skilju- og þéttivatns á framkvæmda og prófanatíma í kafla 3.1.2.3.

TAFLA 24 Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma á Þeistareykjum.

GASTEGUND	LOSUN 2018 TONN	ÁÆTLUÐ LOSUN 2019*	ÁÆTLUÐ ÁRLEG LOSUN TONN/ÁRI	ÁÆTLUÐ ÁRLEG LOSUN G/KWST
CO ₂	7.909	6.139	7.500	10,2
H ₂ S	3.304	2.826	3.000	4,1

*Losun vegna ársins 2019 er metin út frá haustmælingum og er efra þak losunar CO₂ metið um 6.600 tonn.

3.2.3 Viðhald vinnslugetu með nýjum borholum

Samkvæmt upplýsingum frá Landsvirkjun er gert ráð fyrir að bora þurfi 10 auka borholur til að halda uppi 90 MW vinnslu á 30 ára líftíma, eða því sem nemur einni holu á þriggja ára fresti. Þar sem miðað er við 40 ára líftíma í þessari greiningu er því gert ráð fyrir 13 auka borholum sem þarf að bora á líftíma stöðvarinnar.

Gert er ráð fyrir sama magni hráefna til borunar og fóðrunar borhola og lýst er í kafla 3.1.2. Landsvirkjun hefur sett sér markmið um að verða kolefnishlutlaust fyrirtæki og að árið 2030 muni hvorki bifreiðar né vinnuvélar í starfsemi fyrirtækisins brenna jarðefnaeldsneyti. Í þessari greiningu er því gert ráð fyrir að fyrir allar framtíðarholur nýti eigin raforku stöðvarinnar til borunar og að engin dísilólía verði brennd við borun holanna.

3.2.4 Endurnýjun búnaðar

Áætluð endurnýjunarþörf búnaðar byggir á mati Landsvirkjunar og reynslu af rekstri Gufustöðvarinnar og Kröflustöðvar. Gert er ráð fyrir að endurnýja þurfi einu sinni á 40 ára líftíma aflstöðvarinnar:

- vélasamstæðu (gufuhverfill, rafall, kaldir endar)
- spenna
- stöðvarveitur (stöðvarnotkunarspennar og rafbúnaður)

Gert er ráð fyrir að búnaði sem skipt er út sé komið til endurvinnslu og er stuðst við sömu forsendur og lýst er í kafla 3.3.

3.3 Niðurrif stöðvar, förgun og endurvinnsla

Í lok skilgreinds líftíma er gert ráð fyrir niðurrifi allra mannvirkja ofanjarðar og förgun byggingarefna og hráefna þar sem það á við, sem og niðurrif vélbúnaðar. Gert er ráð fyrir að settar verða lokur á borholur að líftímanum loknum, og því hlutfallslega lítið magn hráefna sem þarf í endanlegan frágang þeirra. Þar sem mikil óvissa er um áætlaða orkunotkun vegna niðurrifs stöðvar, sem og hvaða orkugjafa stuðst verður við að líftíma loknum er hér gert ráð fyrir sömu eldsneytisþörf og úrgangsmýndun og vegna byggingar stöðvarhúss og veitna, sjá nánar í kafla 3.1.6. Er þetta gert til að hægt sé að setja áætlað niðurrif í samhengi við umhverfisáhrif stöðvarinnar í heild sinni. Erfitt er að ætla hversu góð endurheimt verður af hráefnum við niðurrif, en hér er gert ráð fyrir 100% endurheimt þessara efna. Gert er ráð fyrir endurvinnslu stáls, áls og kopars úr ofanjarðarmannvirkjum, sjá töflu 25, á meðan gert er ráð fyrir urðun annarra efna. Notuð eru markaðshlutföll til að reikna út ávinning af endurunnum málmum, t.d. fyrir 100 kg af stáli sem fer til endurvinnslu er komið í veg fyrir framleiðslu á 37 kg af stáli. Ljóst er að nýta má steypuúrgang með miklu betri hætti en í urðun, t.d. í hverskyns fyllingar eða vegbyggingar, en í þessari greiningu eru forsendur einfaldaðar til glöggvunar.

TAFLA 25 Samantekt hráefna í ofanjarðarmannvirkjum sem farið er með til urðunar eða í endurvinnslu að loknu niðurrifi. Allar tölur eru gefnar í tonnum.

	STÖÐVARHÚS	VEITUR	KALDAVATNSVEITUR	SKILJUR	STÖÐVARVEITUR	SAMTALS (TONN)	ENDURVINNSLU- HLUTFALL /FÖRGUN
Stál	1.497	2.401	14	62	19	3.992	37%
Ál	32	58	18	1	8	118	69%
Kopar			3		2	5	81%
Steypa	17.275	7.041	4			24.319	Urðun
Plast	5	82	235		13	335	Urðun
Gler	270					270	Urðun
Steinull	114	148	0	3		265	Urðun
Önnur efni	18	25			1	44	Urðun

3.4 Flutningur raforku

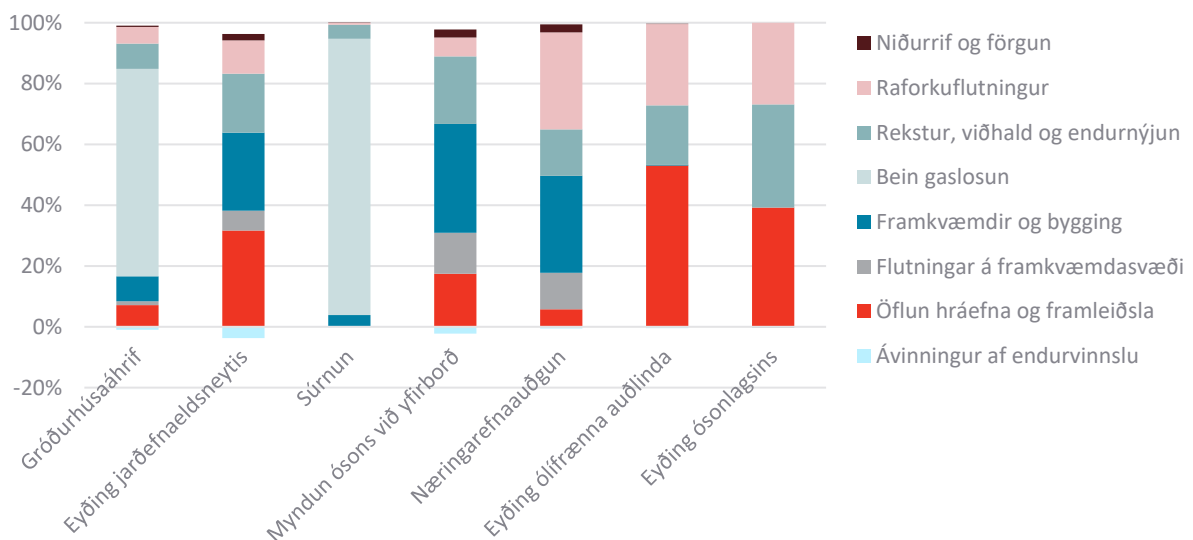
Þær upplýsingar sem hafa verið taldar upp í köflunum hér að framan duga til að framkvæma vistferilsgreiningu sem kalla mætti „cradle to gate“ eða frá vögggu að hliði. Raforka sem framleidd hefur verið í Þeistareykjastöð þarf að flytja til notenda með flutningskerfi raforku, og fer sá flutningur fram á hárri spennu með loftlínunum og tilheyrandi búnaði kerfisins, s.s. tengivirki. Nýttar eru hér niðurstöður vistferilsgreiningar sem EFLA gerði fyrir flutningskerfi Landsnets á 220 kV, 132 kV og 66 kV spennu [25], þar sem umhverfisáhrif voru reiknuð fyrir eina flutta kílóvattstund í kerfinu.

Flutningur raforku er það sem nefna mætti frálagsþáttur eða frálag (e. downstream), og er hann hafður hér innan kerfismarka í samræmi við staðla um gerð vistferilsgreininga [7, 8] og leiðbeininga um gerð umhverfisýfirlýsinga [12], sjá mynd 3 í kafla 2.3. Bent skal á að þessi þáttur hefur ekki verið innan kerfismarka fyrir fyrri vistferilsgreiningar á aflsstöðvum Landsvirkjunar [3, 4, 5] þar sem ekki var búið að birta greininguna á flutningskerfinu.

4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR

4.1 Umhverfisáhrif á vistferli þeistareykjastöðvar

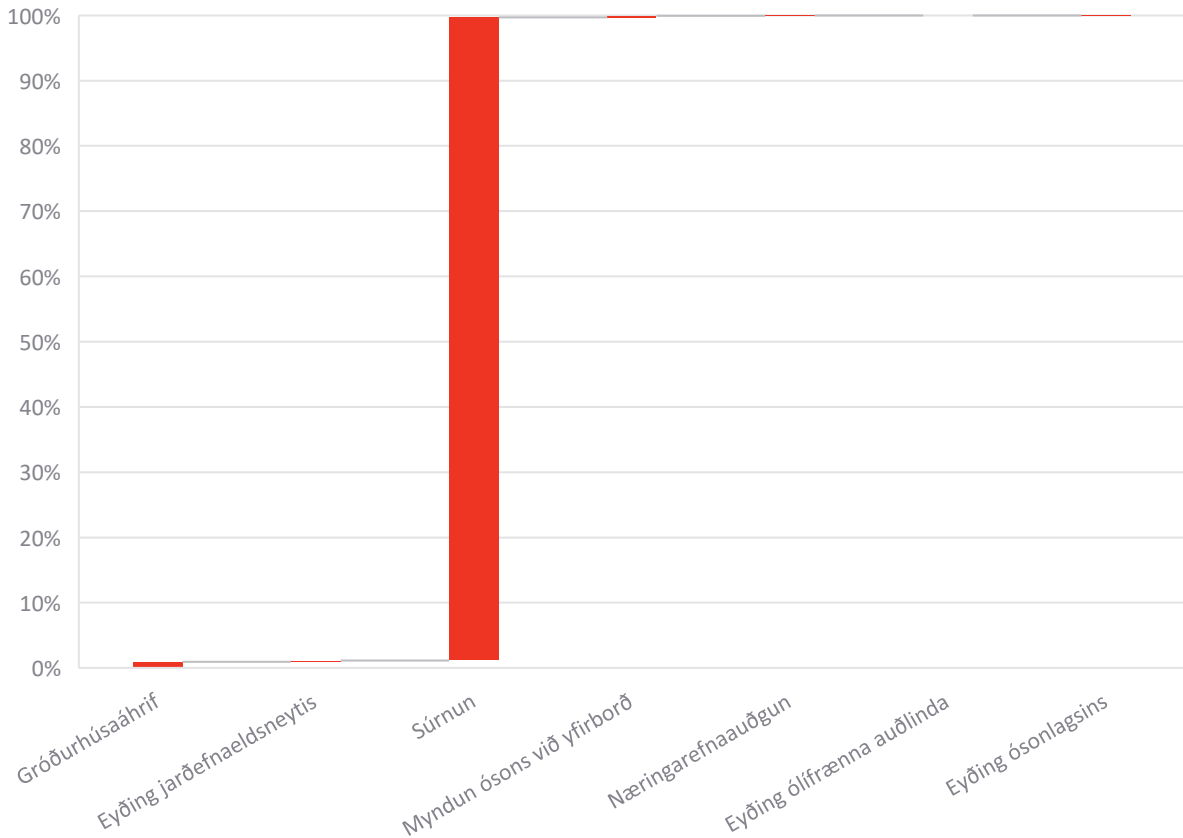
Í þessum kafla má sjá niðurstöður vistferilsgreiningar (e. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) fyrir vinnslu á 1 kWst af raforku í þeistareykjastöð. Niðurstöðurnar eru birtar fyrir sjö flokka umhverfisáhrifa. Á mynd 12 má sjá hvernig umhverfisáhrif skiptast á milli mismunandi stiga vistferils aflstöðvarinnar í hverjum flokki á 40 ára líftíma. Losun jarðgass frá orkuvinnslunni er ráðandi í flokkunum gróðurhúsaáhrif og súrnun. Öflun hráefna og framleiðsla byggingarefna og búnaðar veldur mestum áhrifum í flokkunum eyðing ósonlagsins, eyðing ólifrænna auðlinda og eyðing jarðefnaeldsneytis. Framkvæmdir og bygging aflstöðvar valda einnig hlutfallslega miklum áhrifum í eyðingu jarðefnaeldsneytis, myndun ósons og næringarefnaauðgun. Rekstur, viðhald og endurnýjun (þ.m.t. borun á viðhaldsholum og endurnýjun vélbúnaðar) veldur einnig hlutfallslega miklum áhrifum í öllum flokkum, mest í eyðingu jarðefnaeldsneytis, myndun ósons og eyðingu ósonlags. Ávinningur er af endurvinnslu stáls í öllum flokkum, mest í eyðingu jarðefnaeldsneytis og myndun ósons við yfirborð jarðar.



MYND 12 Umhverfisáhrif frá vinnslu 1 kWst raforku í þeistareykjastöð. Á myndinni má sjá hlutdeild mismunandi þátta vistferils aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa.

4.2 Vægi umhverfisáhrifaflokka í evrópsku samhengi

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar eru birtar fyrir sjö mismunandi flokka umhverfisáhrifa sem allir hafa mismunandi einingar. Til að greina vægi mismunandi flokka er framkvæmd svokölluð stöðlun og vigtun niðurstaða, en inn í þá aðgerð kemur m.a. inn mannlegt mat á mikilvægi flokka. Við stöðlun eru niðurstöður settar í samhengi við umhverfisáhrif vegna mannglegra athafna sem verða í heiminum eða á ákveðnu svæði, t.d. Evrópu, á einu ári. Vigtun byggir á því að hver flokkur umhverfisáhrifa hefur skilgreint ákveðið vægi sem getur t.d. verið byggt á pólitískum markmiðum um lækkun eða á skoðunum sérfræðinga.



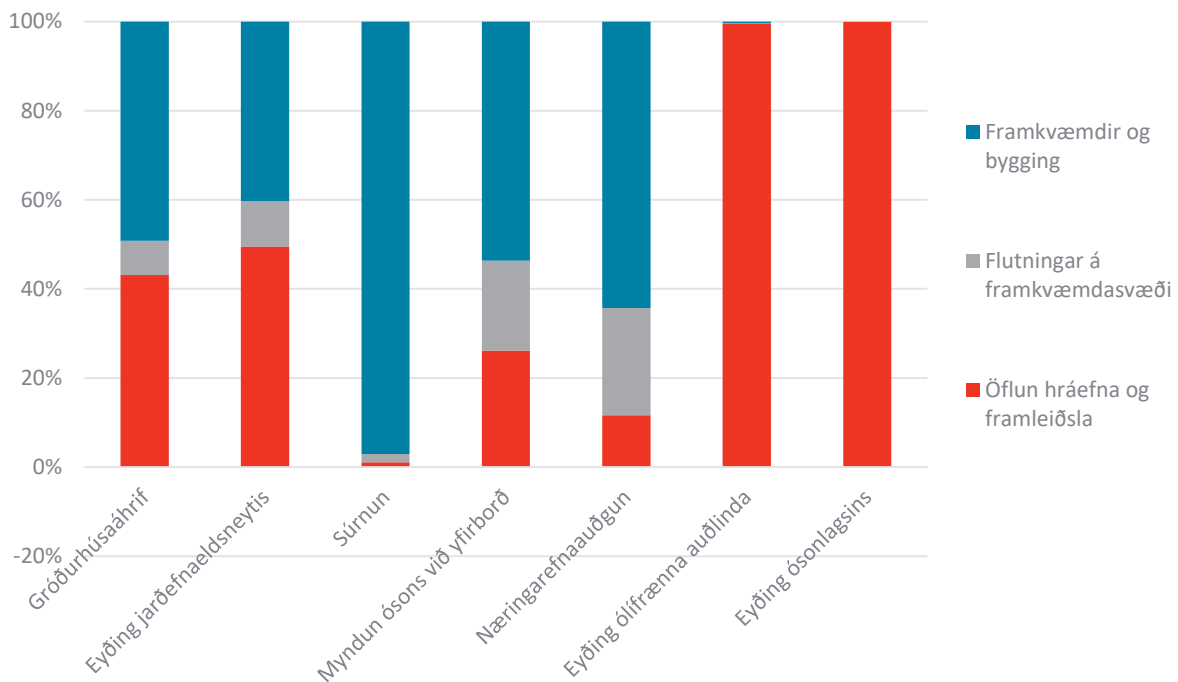
MYND 13 Innbyrðis vægi sjö flokka umhverfisáhrifa í heildarumhverfisáhrifum við vinnslu raforku í Þeistareykjastöð yfir 40 ára líftíma. Hér hafa niðurstöður verið staðlaðar og vigtaðar m.v. meðaláhrif vegna mannglegra athafna í Evrópu skv. CML aðferðinni.

Í þessari greiningu er notuð aðferðafræði CML 2001 og við stöðlunina eru niðurstöður settar í samhengi við árlega heildarlosun vegna mannglegra athafna í Evrópu (EU 25+3) árið 2000. Vigtunin byggir á upplýsingum frá árinu 2012 og er mat sérfræðinga alls staðar að úr heiminum þar sem umhverfisáhrifum var gefið vægi á skalanum frá 1-10. Niðurstöður stöðlunar og vigtunar fyrir Þeistareykjastöð, þ.e. innbyrðis vægi þeirra sjö flokka sem hér eru metnir, má sjá á mynd 13. Framlag stöðvarinnar til umhverfisáhrifa í Evrópu er hlutfallslega mest í flokknum súrnun, næstmest í flokknum gróðurhúsaáhrif, sjá nánar kafla 4.5. Rekja má þessi umhverfisáhrif fyrst og fremst til losunar H₂S frá jarðhitavökvanum á rekstartíma stöðvarinnar. Næsti flokkur í röðinni eru gróðurhúsaáhrif, og er aðalvaldur áhrifa í þeim flokki frá sömu uppsprettu, þ.e. losun CO₂ frá jarðhitavökva á rekstartíma stöðvarinnar.

4.3 Umhverfisáhrif á mismunandi stigum vistferils

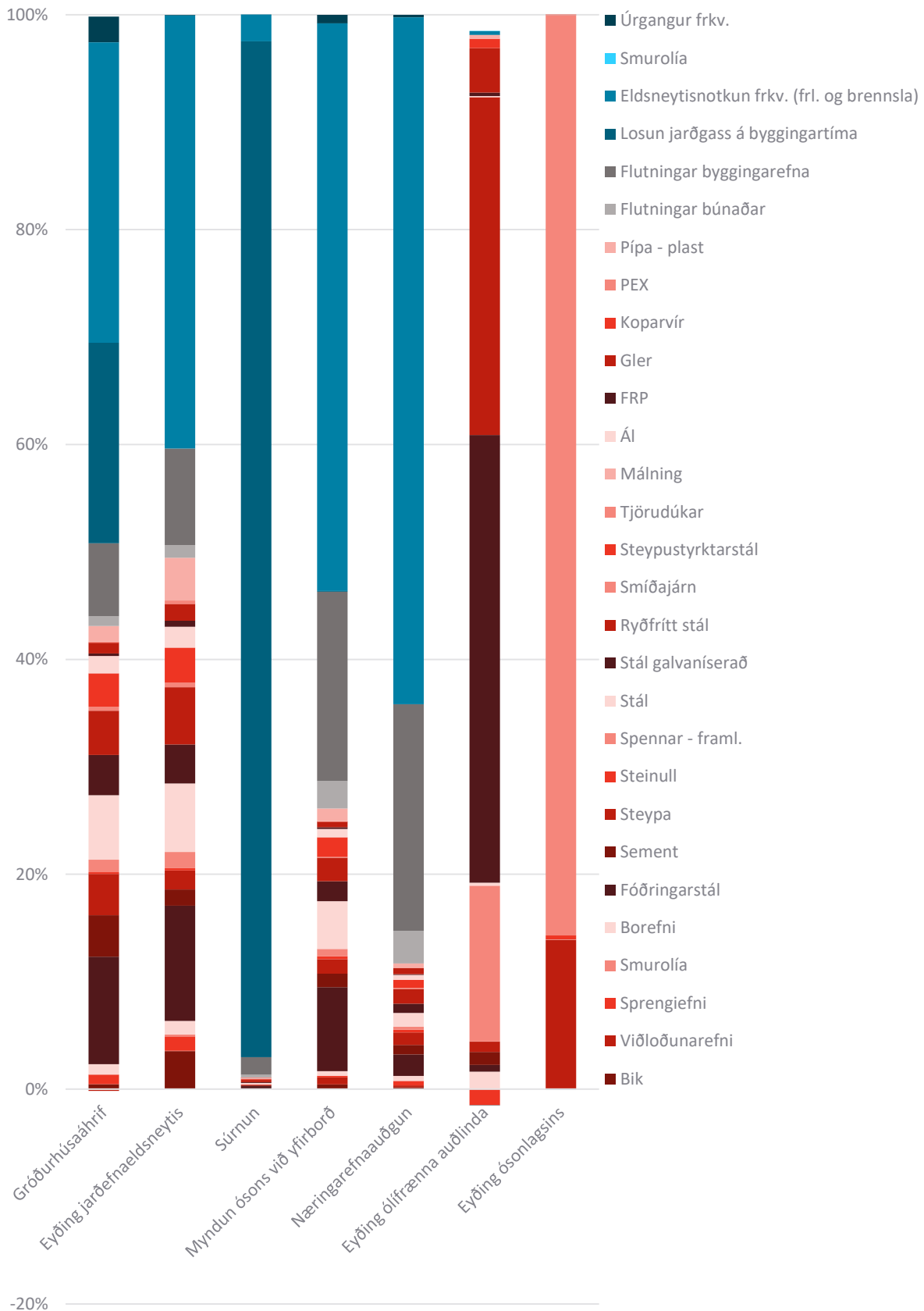
4.3.1 Framleiðslu- og framkvæmdafasi

Á mynd 14 má sjá hvernig umhverfisáhrif mismunandi þátta innan framleiðslu- og framkvæmdafasa þeistareykjastöðvar skiptast innan hvers flokks áhrifa. Framleiðslu- og framkvæmdafasi samanstendur af þremur meginþáttum, þ.e. 1) öflun hráefna og framleiðsla á byggingarefnum, vél- og rafbúnað, 2) flutningi allra byggingarefna og íhluta á framkvæmdasvæðið og tilheyrandi framleiðslu og brennslu eldsneytis og að lokum 3) orkunotkun vegna sjálfrar framkvæmdar, auk flutnings og meðhöndlunar úrgangs. Nánari sundurliðun eftir ólíkum byggingarefnum og framkvæmdaþáttum má sjá á mynd 15.



MYND 14 Hlutdeild framleiðslu- og framkvæmdaþátta vistferils fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í þeistareykjastöð. Á myndinni má sjá niðurstöður fyrir þá sjö flokka umhverfisáhrifa sem reiknað er fyrir á 40 ára líftíma.

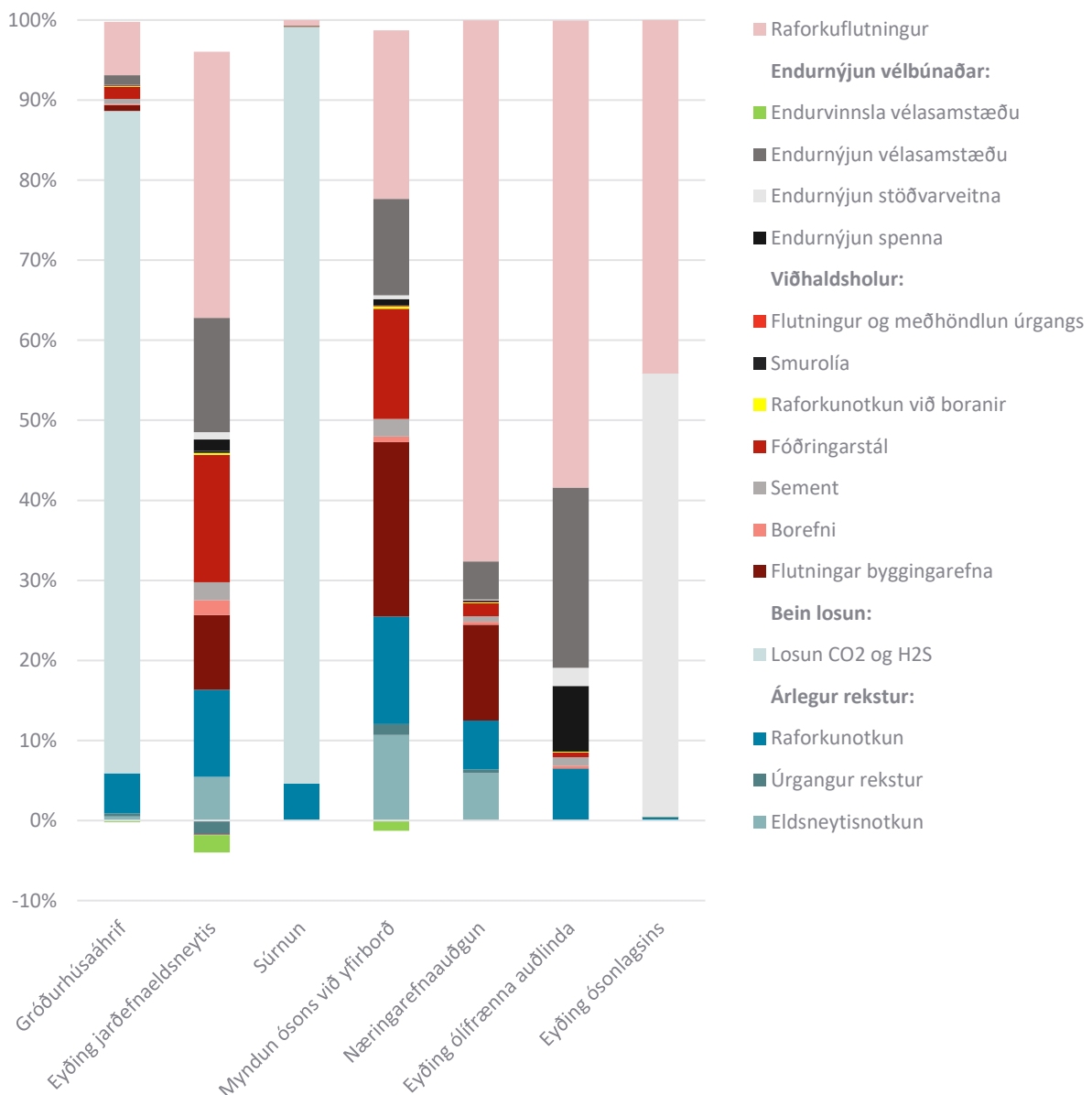
Öflun hráefna og framleiðsla byggingarefna (rauður litur) hefur töluverð áhrif í fimm flokkum af sjö. Framkvæmdir og bygging aflstöðvar (blár litur) hefur einnig hlutfallslega mikil áhrif í fimm flokkum. Veigamestu einstöku byggingarefnin innan framleiðslu- og framkvæmdafasa eru fóðringarstál og sement í borholum, og stál og steypunotkun í mannvirkjum og veitum stöðvarinnar (mynd 15). Framleiðsla spennolíu á spenna veldur töluverðum áhrifum í flokkunum eyðing ósonlagsins og eyðingu ólífrænna auðlinda. Bruni eldsneytis við framkvæmdir veldur stórum hluta áhrifa í flokkunum gróðurhúsaáhrif, eyðing jarðefnaeldsneytis, myndun ósons og næringarefnaauðgun. Í flokkunum gróðurhúsaáhrif og súrnun veldur gaslosun á rannsóknar- og byggingartíma aflstöðvarinnar töluverðum áhrifum, eða 19% annars vegar og 95% hins vegar.



MYND 15 Sundurliðuð hlutdeild framleiðslu- og framkvæmdapátta vistferils fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. Á myndinni má sjá niðurstöður fyrir þá sjö flokka umhverfisáhrifa sem reiknað er fyrir á 40 ára líftíma.

4.3.2 Rekstrarfasi

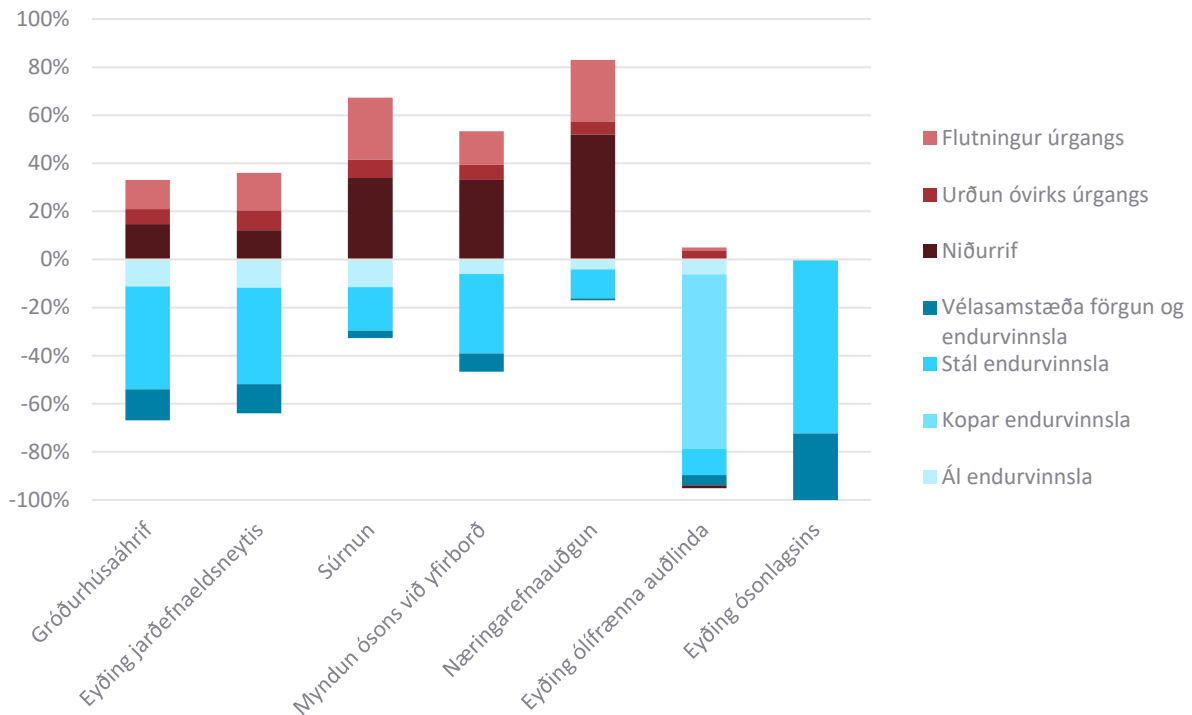
Umhverfisáhrif frá mismunandi þáttum rekstrar þeistareykjastöðvar má sjá á mynd 16. Myndin sýnir skiptingu innan hvers flokks umhverfisáhrifa, þ.e. áhrif vegna árlegs rekstrar, beinnar gaslosunar á rekstartíma, vegna framkvæmda við nýjar viðhaldsholur og endurnýjun vélbúnaðar, og vegna raforkuflutnings. Í tveimur af sjö flokkum er bein gaslosun frá aflstöðinni ráðandi þáttur, þ.e. í flokkunum gróðurhúsaáhrif og súrmun. Gróðurhúsaáhrif vegna losunar CO₂ frá aflstöðinni er metin alls 10,2 g CO₂-ígildi/kWst. Í fjórum flokkum af sjö er raforkuflutningur stór þáttur og skýrist það af þeim mannvirkjum og framkvæmdum sem raforkuflutningskerfið þarf til að flytja raforku frá aflstöðinni til notenda [25], en kerfið samanstendur m.a. af loftlínum, möstrum og tengivirkjum.



MYND 16 Hlutdeild ólíkra rekstrarþátta fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. Á myndinni má sjá niðurstöður fyrir þá sjö flokka umhverfisáhrifa sem reiknað er fyrir á 40 ára líftíma.

4.3.3 Niðurrif, förgun og ávinningur af endurvinnslu

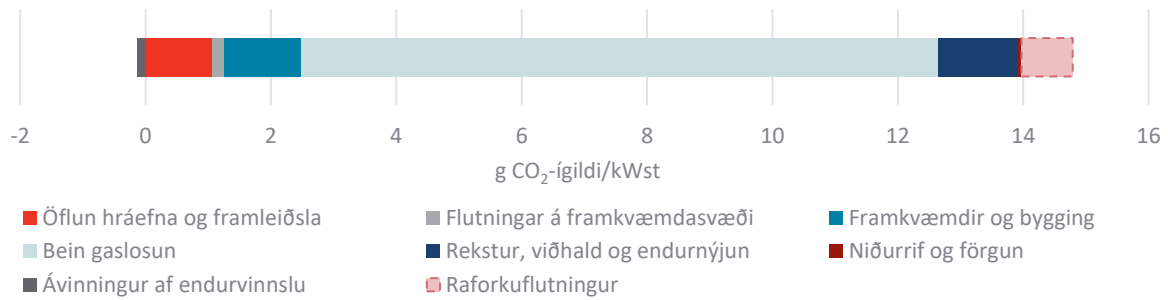
Í lok líftíma aflstöðvarinnar er gert ráð fyrir niðurrifi hennar og förgun efna sem til falla. Niðurstöður eru háðar töluverðri óvissu varðandi orkugjafa við niðurrif og flutning byggingarúrgangs, en einnig varðandi örlög þeirra efna sem falla til við niðurrif, eins og bent er á í kafla 3.3, en sjá má að ávinningur vegna endurvinnslu málma sem mögulegt er að endurheimta í lok líftímans getur verið töluverður, og í nokkrum flokkum vegið upp á móti eldsneytisnotkun og flutning og urðun úrgangs. Ávinningurinn er sýndur sem neikvætt hlutfall, þ.e. magn þeirra málma sem forðast má að frumframleiða fyrir önnur kerfi með endurnýtingu efna úr þessu kerfi.



MYND 17 Hlutdeild ólíkra rekstrarþátta fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa, vegna vinnslu 1 kWst raforku í Þeistareykjastöð. Á myndinni má sjá niðurstöður fyrir þá sjö flokka umhverfisáhrifa sem reiknað er fyrir á 40 ára líftíma.

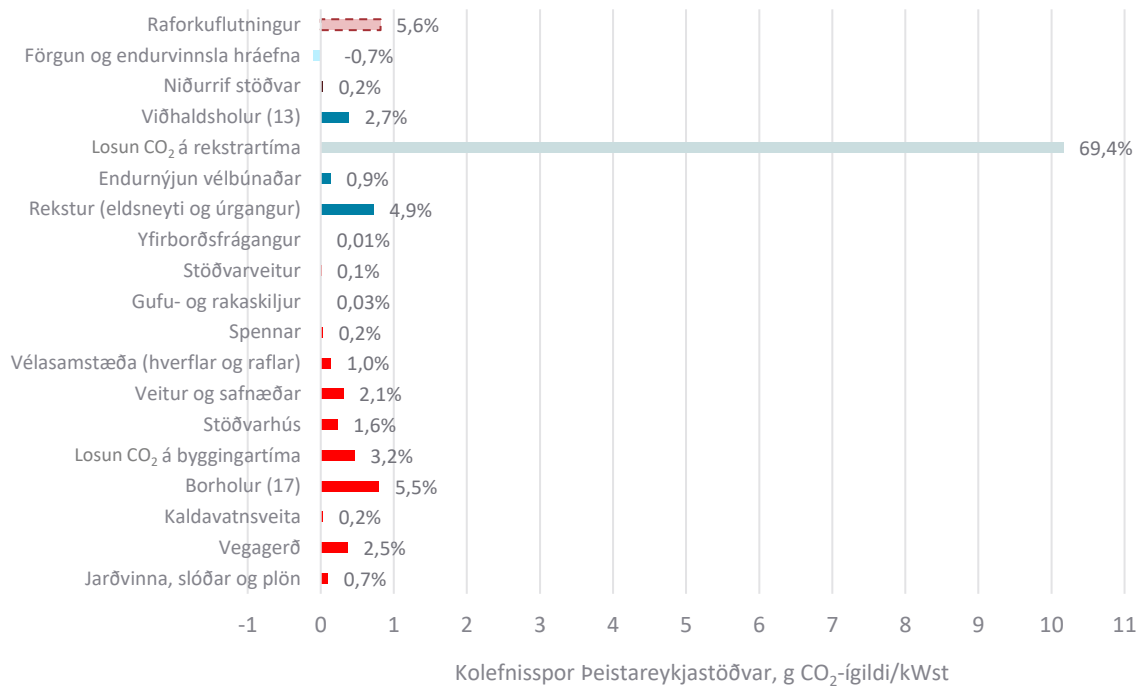
4.4 Kolefnisspor

Gróðurhúsaáhrif Þeistareykjastöðvar á 40 ára líftíma, án raforkuflutnings, er 408 þúsund tonn CO₂-ígildi og því er kolefnisspor raforkuvinnslu í Þeistareykjastöð 13,8 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst sem kemur út úr stöðinni. Þegar bætt er við flutningi til stórnotanda eða dreifikerfis er kolefnisspor raforkunnar 14,7 g CO₂-ígildi/kWst. Til samanburðar má nefna að losun Íslands árið 2018 (án landnotkunar) var 4.857 þúsund tonn CO₂ ígildi [26] og samsvarar árleg meðallosun frá aflstöðinni þannig 0,2% af heildarlosun landsins fyrir það ár. Á mynd 18 má sjá hvernig kolefnisspor Þeistareykjastöðvar skiptist á milli mismunandi fasa á vistferli stöðvarinnar, þ.e. framleiðslu-, flutninga- og framkvæmdafasa, rekstrarfasa og lok líftíma. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (69%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökva á 40 árum eða 10,2 g CO₂-ígildi/kWst. Til samanburðar má nefna að bein losun frá lónum Blöndustöðvar var metin 19,6 g CO₂-ígildi/kWst [5], en einungis 0,3 g CO₂-ígildi/kWst frá lónum Fljótsdalsstöðvar [3]. Kolefnisspor vegna framleiðslu byggingarefna og búnaðar sem og framkvæmda er samanlagt 2,5 g CO₂-ígildi/kWst eða um 17% af kolefnissporinu.



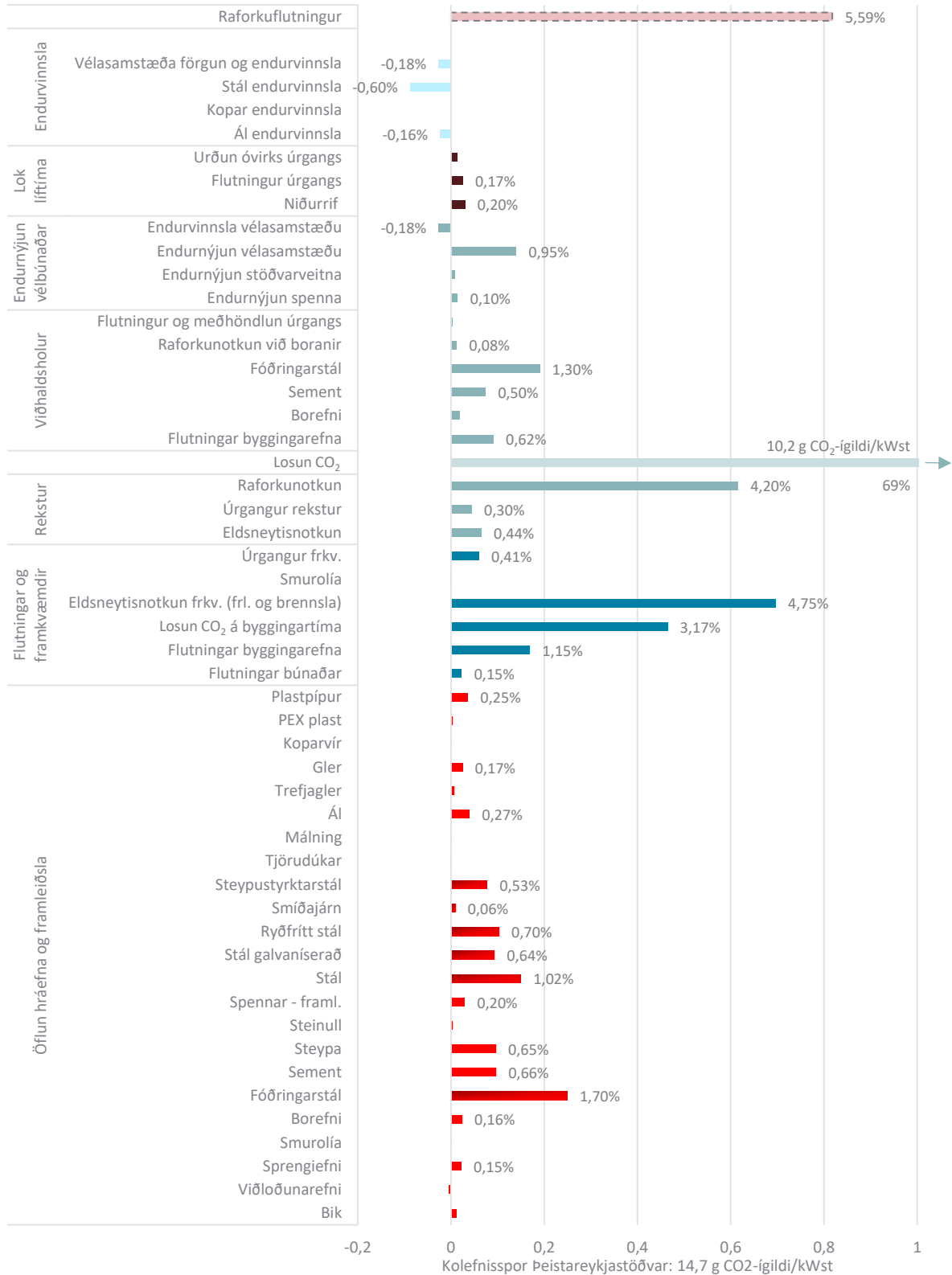
MYND 18 Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar er 13,8 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst sem kemur út úr stöðinni, eða 14,7 g CO₂-ígildi/kWst með raforkuflutningi. Myndin sýnir hvernig kolefnissporið skiptist milli mismunandi fasa vistferilsins.

Kolefnisspor mismunandi eininga og þátta í vistferli aflstöðvarinnar má sjá á myndum 19 og 20. Þegar litið er heildrænt til einstakra mannvirkja og vélbúnaðar (mynd 19) má sjá að utan beinnar losunar, þá vega jarðhitaholur þyngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og eldsneytisnotkun vegna bæði núverandi og tilvonandi viðhaldshola. Samanlagt mynda holurnar 8,2% af heildarkolefnisspori stöðvarinnar. Utan þeirra eru þau mannvirki sem vega þyngst í kolefnissporinu vegagerð, veitur og safnæðar, stöðvarhús, vélbúnaður og endurnýjun vélbúnaðar. Bein losun á rannsóknar- og framkvæmdartímabili er 0,5 g CO₂-ígildi/kWst eða 3,2%.



MYND 19 Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar.

Þegar litið er nánar til þeirra byggingarefna sem mynda aflstöðina (mynd 20) má sjá að framleiðsla stáls (fóðringarstál, byggingarstál, galvaníserað stál, ryðfrítt stál, smíðajárn og steypustyrktarstál) vegur samanlagt þyngst af öllum byggingarefnum eða samanlagt 4,6% af kolefnisspori stöðvarinnar. Sement og steypa í aflstöðinni veldur næstmestu gróðurhúsaáhrifunum, eða samanlagt 1,3%. Þar á eftir kemur plast (0,3%) og ál (0,3%). Flutningar byggingarefna og búnaðar mynda 1,3% kolefnissporsins, losun CO₂ á rannsóknartíma um 3,2% og eldsneytisnotkun á framkvæmdatíma myndar um 4,8% kolefnissporsins.



MYND 20 Gróðurhúsaáhrif einstakra þátta í kolefnisspori þeistareykjastöðvar. Athugið að x-ás stoppar við 1 g CO₂-ígildi/kWst, en bein CO₂ losun er mun hærrí eða 10,2 g CO₂-ígildi/kWst.

4.5 Yfirlit yfir umhverfisáhrif á vistferli Þeistareykjastöðvar





Samantekt á hlutfallslegri skiptingu áhrifa frá vistferli Þeistareykjastöðvar má sjá í töflu 26. Æskilegt er að hafa til hliðsjónar áætlað vægi áhrifaflokkanna sbr. umfjöllun í kafla 4.2. Í sumum tilfellum er vægi metinnar losunar hverfandi í evrópsku samhengi og á það við um eyðingu ólfrænna auðlinda og eyðingu ósonlagsins.

Losun brennisteinsvetnis á rekstartíma Þeistareykjastöðvar er aðalvaldur súrnunar. Áætlað er að um 3 þús. tonn af H_2S losni árlega frá Þeistareykjum, en alls losnuðu um 20 þús. tonn brennisteinsvetnis frá öllum jarðvarmavirkjunum á Íslandi árið 2018, mest frá Nesjavöllum (7 þús. tonn) og næstmest frá Kröflu (5 þús. tonn). Gastegundin er hvarfgjörn og í oxandi umhverfi getur hún myndað brennistein (S), brennisteinstvíoxíð (SO_2) eða brennisteinssýru (H_2SO_4). Talið er að brennisteinsvetni sem berst með lofti frá jarðhitasvæðum oxist að mestu í brennistein (S) og falli til jarðar í úrkomu og verði að málmsöltum í jarðvegi. Sjá má t.d. útfellingu S við gufuhveri og lághitasvæði. Hins vegar er talið að hluti brennisteinsvetnisins oxist í brennisteinstvíoxíð (SO_2) og myndi súrt regn. Ein af meginuppsprettum brennisteinssambanda sem rekja má til athafna mannsins er iðnaður og brennsla jarðefnaeldsneytis (kol, brúnkol, olía og gas) til orkuvinnslu. Til samanburðar má nefna að árið 2017 var heildarlosun brennsluvera í Evrópu um 800 þúsund tonn SO_2 -ígilda [27], en magnið hefur farið ört lækkandi á síðastliðnum árum.

Í flokknum eyðing jarðefnaeldsneytis er tekin saman öll auðlindanotkun jarðefnaeldsneytis á vistferlinum (vinnsla þess úr jörðu), bæði fyrir notkun í ökutækjum á framkvæmdastað eða t.d. til vinnslu raforku sem unnin er erlendis með kolum eða olíu og notuð til framleiðslu byggingarefna eða búnaðar. Á vistferli Þeistareykjastöðvar er það framleiðsla dísilolíu fyrir framkvæmdir (vegna borana og vegagerðar fyrst og fremst) og flutning byggingarefna sem vegur þyngst innan flokksins. Framleiðsla fódriingarstáls fyrir borholur hefur einnig töluverð áhrif í þessum flokki vegna stálframleiðslu á erlendri grundu. Sömu þættir eru stærstir innan flokkanna myndun ósons við yfirborð jarðar og næringarefnaauðgun. Myndun ósons við yfirborð jarðar er knúin áfram af rokgyörnum lífrænum efnum sem myndast við bruna eldsneytis og framleiðslu stáls.

Innan flokksins eyðing ólfrænna auðlinda eru það framleiðsla vélbúnaðar og galvaníseraðs og ryðfrís stáls sem valda mestu áhrifunum og er það m.a. vegna nýtingar fágætra málma í framleiðslunni. Útreikningar á eyðingu auðlinda byggja á hlutfalli milli magns auðlindarinnar sem notuð er í framleiðslunni og forða auðlindar á jörðinni, þ.e. það magn auðlindarinnar sem þekkt er og hagkvæmt að nýta.

TAFLA 26 Hlutfallsleg skipting áhrifa (%) í metnum flokkum umhverfisáhrifa frá vistferli þeistareykjastöðvar. Prósentur sem birtast sem 0,00 eru <0,01%.

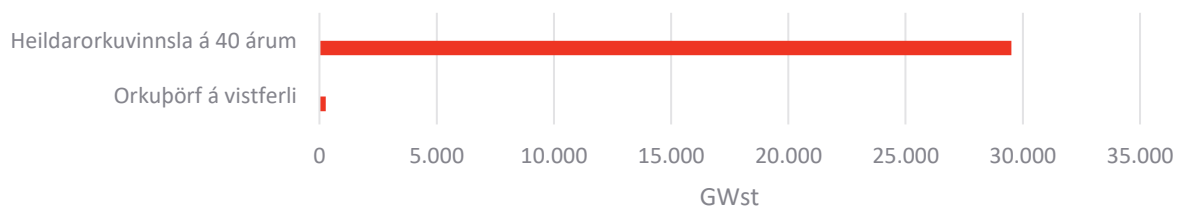
		GRÓÐURHÚSA- ÁHRIF	EYÐING JARÐ- EFNAELDSNEYTIS	SÚRNUN	MYNDJUN ÓSONS VIÐ YFIRBÖRD	NÆRINGAREFNA- AUGJUN	EYÐING ÓLÍFR. AUDLINDA	EYÐING ÓSONLAGSINS	
			50-100%						
			5-50%						
			1-5%						
			0-1%						
Öflun hráefna og framleiðsla	Bik	0,08	2,44	0,00	0,31	0,08	0,01	0,00	
	Viðloðunarefni	-0,03	0,03	0,00	0,45	0,10	0,00	5,47	
	Sprengiefni	0,15	0,91	0,00	0,10	0,21	0,00	0,00	
	Borefni	0,16	0,86	0,00	0,28	0,23	0,88	0,00	
	Fóðringarstál	1,70	7,41	0,01	5,48	1,00	0,35	0,00	
	Sement	0,66	1,05	0,00	0,88	0,45	0,67	0,00	
	Steypa	0,65	1,21	0,00	0,94	0,58	0,53	0,00	
	Steinull	0,02	0,14	0,00	0,19	0,13	0,01	0,15	
	Spennar - framl.	0,20	1,05	0,00	0,47	0,14	8,06	33,65	
	Stál	1,02	4,39	0,00	3,11	0,63	0,15	0,01	
	Stál galvaníserað	0,64	2,51	0,00	1,31	0,43	23,15	0,00	
	Ryðfrítt stál	0,70	3,68	0,01	1,53	0,69	17,46	0,00	
	Smíðajárn	0,06	0,28	0,00	0,04	0,04	0,01	0,00	
	Steypustyrktarstál	0,53	2,24	0,00	1,28	0,38	-0,84	0,00	
	Ál	0,27	1,30	0,00	0,52	0,23	0,05	0,00	
	Trefjaplast (FRP)	0,04	0,38	0,00	0,11	0,03	0,19	0,00	
	Gler	0,17	1,08	0,00	0,36	0,29	2,29	0,00	
	Koparvír	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,49	0,00	
	Plast (PE, PEX)	0,26	2,96	0,00	0,85	0,21	0,19	0,00	
	Önnur byggingarefni	0,01	0,20	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	
	Flutningar og framkvæmdir	Flutningar búnaðar	0,15	0,82	0,01	1,80	1,52	0,00	0,00
		Flutningar byggingarefna	1,15	6,20	0,06	12,31	10,59	0,02	0,00
		Losun CO ₂ og H ₂ S á rannsóknartíma	3,17	0,00	3,67	0,05	0,00	0,00	0,00
Eldsneyti (frl. og brennsla)		4,75	27,82	0,10	36,94	32,07	0,19	0,00	
Úrgangur frkv.		0,41	0,04	0,00	0,56	0,11	-0,01	0,00	
Rekstur	Eldsneytisnotkun	0,44	1,94	0,01	3,27	2,83	0,01	0,00	
	Úrgangur rekstur	0,30	-0,63	0,00	0,41	0,21	-0,01	0,00	
	Raforkunotkun	4,20	3,87	4,43	4,10	2,93	3,02	0,26	
	Losun CO ₂ og H ₂ S á rekstartíma	69,43	0,00	90,86	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Viðhaldsholur	2,65	10,60	0,12	11,86	7,07	0,99	0,01	
	Endurnýjun spenna	0,10	0,50	0,00	0,24	0,10	3,82	0,01	
	Endurnýjun stöðvarveitna	0,05	0,33	0,00	0,14	0,04	1,06	33,64	
	Endurnýjun vélasamstæðu	0,95	5,08	0,02	3,67	2,27	10,48	0,01	
	Endurvinnsla vélasamstæðu	-0,18	-0,76	0,00	-0,39	-0,03	-0,02	0,00	
Lok líftíma	Niðurrif	0,20	0,76	0,00	1,69	1,69	-0,01	0,00	
	Flutningur úrgangs	0,17	0,97	0,00	0,72	0,83	0,01	0,00	
	Urðun óvirks úrgangs	0,09	0,53	0,00	0,32	0,18	0,02	0,00	
Endurvinnsla	Ál endurvinnsla	-0,16	-0,73	0,00	-0,31	-0,14	-0,03	0,00	
	Kopar endurvinnsla	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	-0,33	0,00	
	Stál endurvinnsla	-0,60	-2,52	0,00	-1,69	-0,39	-0,05	-0,01	
	Vélasamstæða förgun og endurvinnsla	-0,18	-0,76	0,00	-0,39	-0,03	-0,02	0,00	
Raforkuflutningur		5,59	11,83	0,68	6,43	32,28	27,19	26,81	
Alls		100	100	100	100	100	100	100	

4.6 Orkubúskapur

Orkuþörf yfir vistferil (PED, Primary Energy Demand) er samanlögð orkuþörf þeistareykjastöðvar yfir allan líftíma hennar eða yfir allan vistferilinn. Um er að ræða orkuþörf frá endurnýjanlegum og óendurnýjanlegum orkugjöfum, t.d. jarðefnaeldsneyti, vatnsorka, kjarnorku o.s.frv. Orkuþörf þeistareykjastöðvar á vistferlinum er 1,6 TWst.

Heildarorkuvinnsla þeistareykjastöðvar á 40 ára líftímanum er 29,5 TWst (kafla 1.2). Orkuarðsemi (e. *harvest factor/EROI*) er hlutfallið milli heildarorkuvinnslu og orkuþarfar yfir vistferilinn og er 109 í tilfalli þeistareykjastöðvar. Þeistareykjastöð vinnur m.ö.o. 109 sinnum meiri orku á skilgreindum líftíma sínum en þarf fyrir framleiðslu og byggingu hennar og rekstur (mynd 21). Til samanburðar þá liggur orkuarðsemi jarðvarmavirkjana á heimsvísu á birtum niðurstöðum á bilinu 2-14 (mynd 22) [28].

$$\text{Orkuarðsemi} = \frac{\text{Heildarorkuvinnsla [kWst]}}{\text{Orkuþörf yfir vistferil [kWst]}}$$



MYND 21 Heildarorkuvinnsla og orkuþörf á 40 ára líftíma þeistareykjastöðvar.

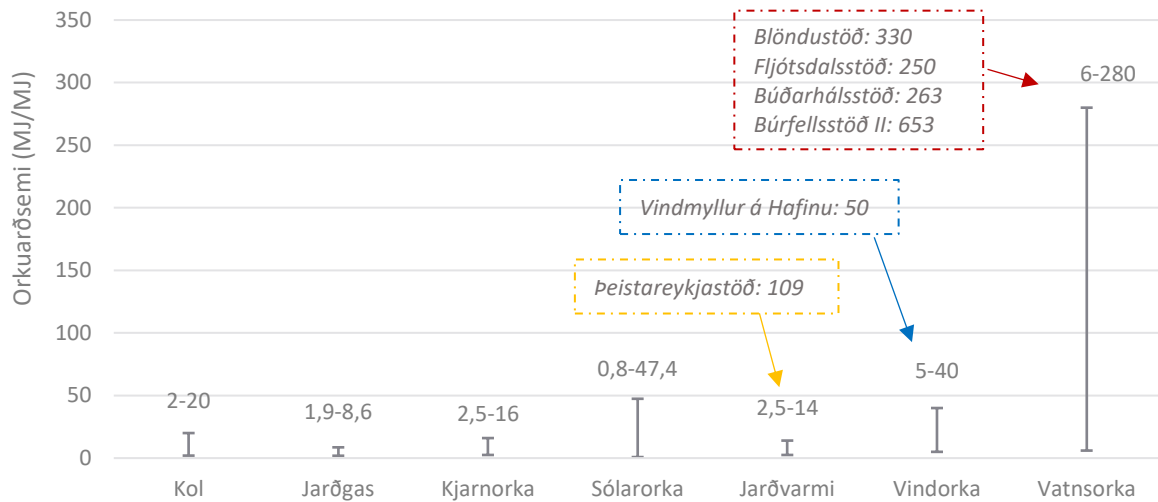
Endurgreiðslutími orku (e. *energy payback time*) er sá tími sem líður áður en að hlutföllin verða 1:1 milli orkuvinnslu aflstöðvar og orkuþarfar yfir vistferil hennar. Endurgreiðslutími orku er í tilfalli þeistareykjastöðvar tæpir 5 mánuðir, þ.e. að þeim tíma loknum í rekstri er aflstöðin búin að vinna jafnmikla orku og hún þarf yfir vistferil sinn (tafla 27). Frá og með þeim tíma byrjar aflstöðin að borga sig í raforkuvinnslu. Birtar niðurstöður um endurgreiðslutími orkuvinnslu frá jarðvarmavirkjunum á heimsvísu liggur á bilinu 0,6 – 3,6 ár [28].

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

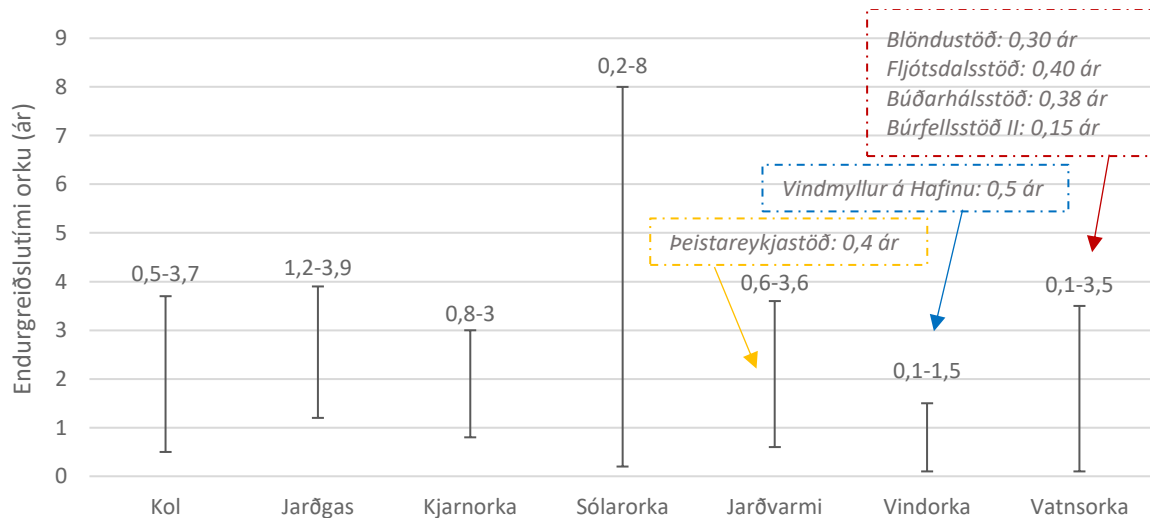
TAFLA 27 Orkubúskapur þeistareykjastöðvar á 40 ára líftíma.

Orkuþörf yfir vistferil (PED)	1550	Gwst
Heildarorkuvinnsla á 40 árum	29.520	GWst
Orkuarðsemi (EROI)	109	
Endurgreiðslutími orku	0,4	ár

Birtar niðurstöður fyrir endurgreiðslutíma orku sýna að neðri mörk endurgreiðslutíma vatns-, vind- og sólarorku er styttri en fyrir aðra orkugjafa, sjá mynd 23. Neðri mörk endurgreiðslutíma fyrir jarðvarma liggur hærra en hinir endurnýjanlegu orkugjafarnir og rétt fyrir ofan neðri mörk fyrir kol. Hinsvegar er endurgreiðslutími Þeistareykjastöðvar undir birtum neðri mörkum fyrir jarðvarma og kol eða 0,4. Hvað varðar orkuarðsemi þá sýna birtar niðurstöður að orkuarðsemi er hvað hæst fyrir vatns-, vind- og sólarorku, en niðurstöður Þeistareykjastöðvar er töluvert hærri og á pari við vatnsaflsstöðvar í orkuarðsemi.



MYND 22 Birtar niðurstöður fyrir orkuarðsemi mismunandi orkugjafa [2, 3, 28, 5, 4, 6].



MYND 23 Birtar niðurstöður endurgreiðslutíma orku fyrir mismunandi orkugjafa [2, 3, 28, 5, 4].

5 NÆMNIGREINING

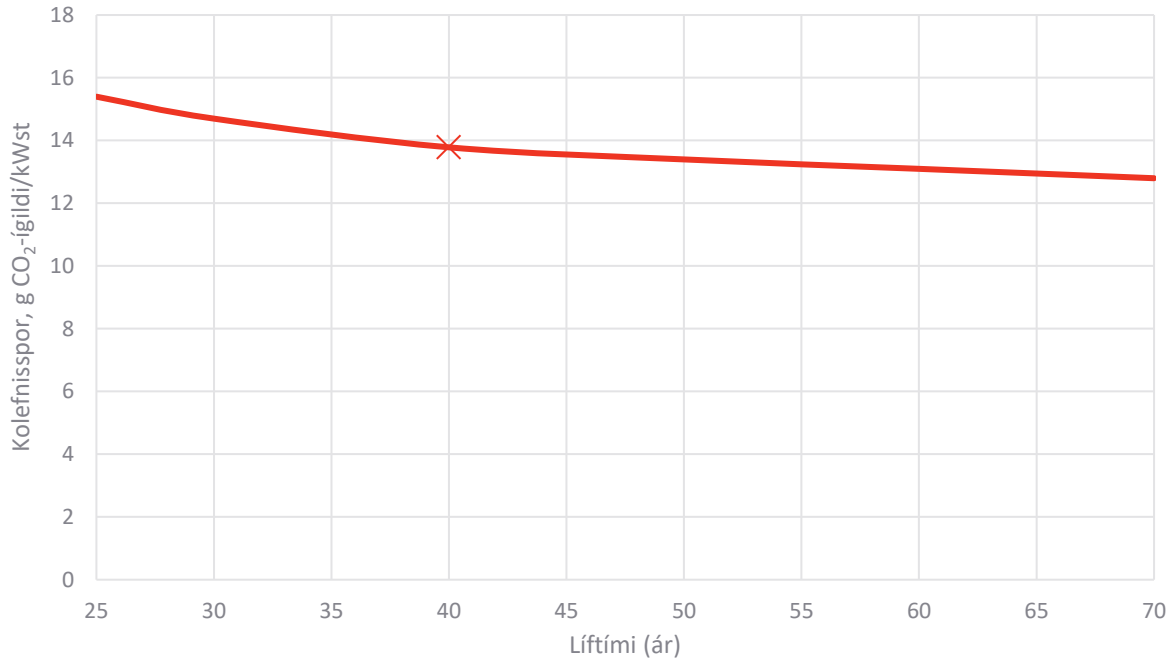
5.1 Breytilegur líftími

Í þessari greiningu er gert ráð fyrir 40 ára líftíma í samræmi við leiðbeiningar [12], en skilgreina má líftímamann með ólíkum hætti. Sumar greiningar hafa miðað við 25 ára líftíma stöðvar, og er sá líftími e.t.v. valinn með hliðsjón af endurnýjunarþörf, þ.e. að þessum tíma loknum er líklegt að grípa þurfi til útskipta á hverflum og öðrum lykilbúnaði aflstöðvar. Í fyrstu drögum að samræmdum leiðbeiningum að gerð vistferilsgreininga fyrir jarðvarmastöðvar er lagt til að miða við 30 ára líftíma [15]. Hérland reynsla hefur þó sýnt fram á mun lengri líftíma. Elsta aflstöð á Íslandi, Gufustöðin í Bjarnarflagi, hefur verið í rekstri frá 1969 og er því orðin rúmlega fimmtug að aldri. Til þess að meta áhrif líftíma á niðurstöður var gerð næmnigreining á kolefnisspori Þeistareykjastöðvar með breytilegum aldri. Helstu breytur næmnigreiningar má sjá í töflu 28.

Niðurstöður benda til þess að líftími hefur ekki ráðandi áhrif á kolefnisspori aflstöðvarinnar (mynd 24). Hefði líftíminn verið skilgreindur 30 ár en ekki 40, þá hefði kolefnissporið hækkað um 7%, úr 13,8 g CO₂-ígildi/kWst í 14,7 g CO₂-ígildi/kWst (án raforkuflutnings). Hefði líftíminn verið skilgreindur 70 ár, með tilheyrandi auknum fjölda viðhaldshola og tvöfaldri endurnýjun vélbúnaðar, myndi kolefnissporið minnka um 8% eða niður í 12,8 g CO₂-ígildi/kWst (án raforkuflutnings). Stærsti þátturinn í losuninni væri sem fyrr bein losun jarðgass.

TAFLA 28 Forsendur næmnigreiningar á líftíma Þeistareykjastöðvar.

LÍFTÍMI	FJÖLDI VIÐHALDSHOLA	ENDURNÝJUN VÉLBÚNAÐAR	ORKUVINNSLA ALLS
25 ár	8	1 x	18,5 TWst
30 ár	10	1 x	22,1 TWst
40 ár	13	1 x	29,5 TWst
50 ár	16	2 x	36,9 TWst
60 ár	20	2 x	44,3 TWst
70 ár	23	2 x	51,7 TWst

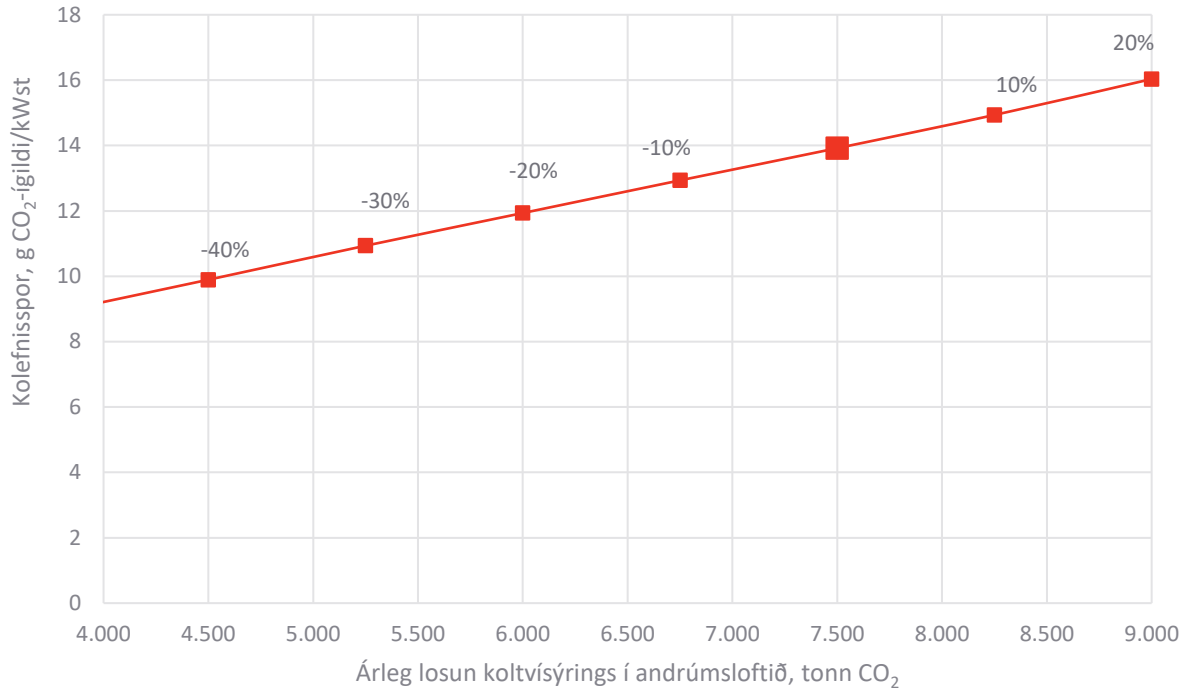


MYND 24 Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í Þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegum líftíma.

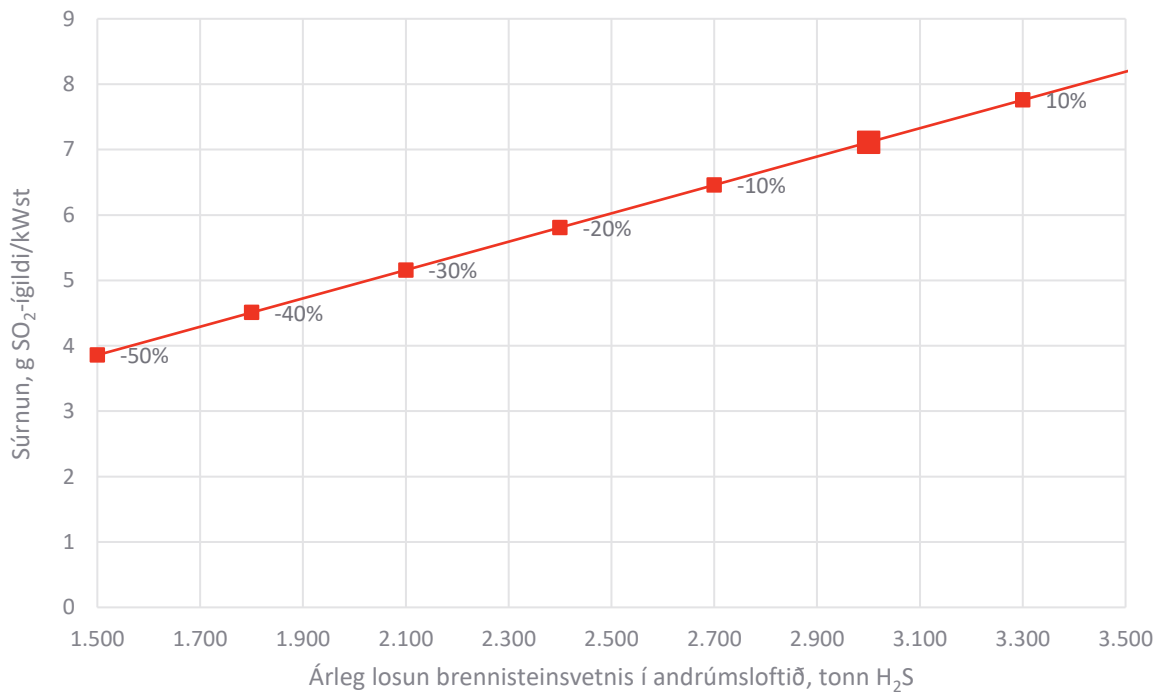
5.2 Breytileg gaslosun

Bein losun CO₂ og H₂S á rekstartíma Þeistareykjastöðvar er stærsti einstaki þátturinn í tveimur umhverfisáhrifaflokkum, gróðurhúsaáhrif og súrnun, en bein losun er 69% kolefnissporsins og 91% súrnunar. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir áætlaðri óbreyttri meðallosun CO₂ og H₂S sem byggir á tveggja ára rekstrarreynslu fyrirtækisins 2018-2019. Þessi losun er háð töluverðri óvissu þar sem ekki er vitað hvernig jarðhitageymirinn mun þróast eða hvernig styrkur þessara gastegunda eigi eftir að breytast. Einnig kunna að vera tækifæri í framtíðinni til að draga úr þessum stærsta losunarpætti. Á myndum 25 og 26 er skoðað kolefnisspor Þeistareykjastöðvar með breytilegum styrk losunar CO₂ og H₂S. Má þannig sjá hvernig kolefnissporið hækkar eða lækkar, hvort sem ástæður má rekja til breytingar í meðalstyrk gastegunda í jarðhitavökva sem tekinn er upp úr jarðhitageyminum, eða t.d. vegna tilkomu hreinsibúnaðar í framtíðinni. Hafa skal þó í huga að hér er ekki gert ráð fyrir framleiðslu eða uppsetningu slíks búnaðar, og taka ber niðurstöðum með þeim fyrirvara.

Á mynd 25 má sjá hvernig 10% minni bein árleg losun CO₂ getur minnkað kolefnissporið um 7% eða úr 13,8 g CO₂-ígildi/kWst í 12,8 g CO₂-ígildi/kWst. Á sama hátt getur samdráttur í beinni losun um 40% (4.500 tonn CO₂ á ári í stað 7.500 tonn) minnkað kolefnissporið um u.þ.b. 30%, eða niður í 9,8 g CO₂-ígildi/kWst. Þar sem súrnunaráhrifa má nánast alfarið rekja til beinnar losunar H₂S, dregur á sama hátt verulega úr þeim áhrifum með minnkaðri losun gassins, sjá mynd 26.



MYND 25 Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegri beinni losun koltvísyrings (CO₂) í andrúmsloftið.



MYND 26 Næmnigreining á súrnun vegna vinnslu á 1 kWst í þeistareykjastöð (án raforkuflutnings) með breytilegri beinni losun brennisteinsvetnis (H₂S) í andrúmsloftið.

6 UMRÆÐUR

6.1 Gæði gagna og forsendur

Upplýsingar um framkvæmd og rekstur þeistareykjastöðvar sem notaðar eru í þessari greiningu byggja á mjög góðum gögnum. Upplýsingar um framleiðslu og framkvæmdir byggja á lokauppgjöri frá verktökum, upplýsingum frá framleiðendum búnaðar og upplýsingum frá birgjum Landsvirkjunar. Þá byggja rekstrarupplýsingar á rekstri aflstöðva Landsvirkjunar á Norðausturlandi. Í þessari greiningu er tekið mið af öllum veigamestu þáttum vistferilsins og þeir hafðir innan kerfismarkna, í samræmi við aðferðafræði vistferilsgreiningar. Nefna má að margir þættir sem hér eru innan kerfismarkna, t.d. aðkomuvegir að aflstöðinni, allir flutningar hráefna og endalok stöðvar, eru ekki alltaf innan kerfismarkna í öðrum sambærilegum greiningum. Taka ber því samanburð milli greininga með þessum fyrirvara.

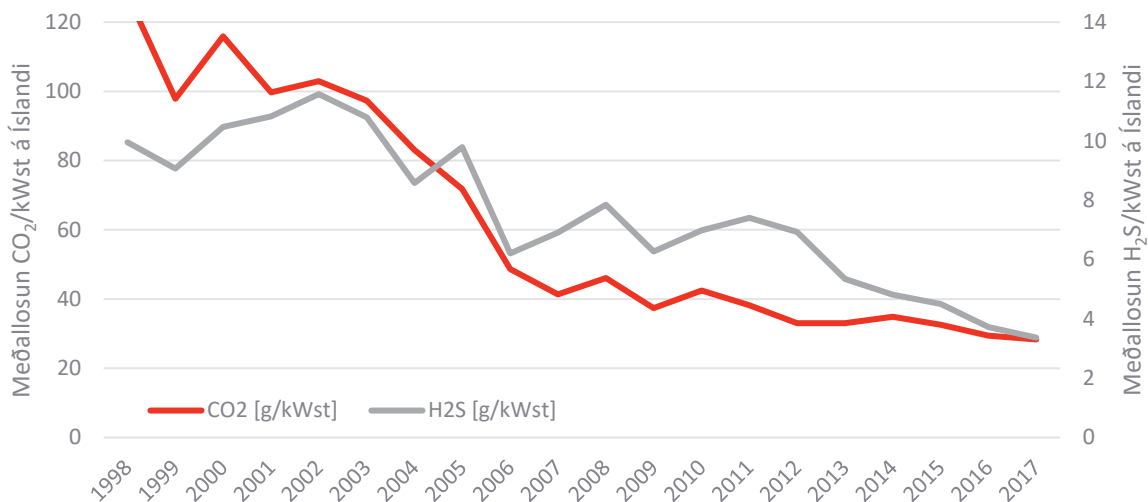
Þeir þættir sem bundnir eru mestri óvissu í þessari greiningu eru bein losun CO₂ og H₂S á skilgreindum líftíma aflstöðvarinnar, fjöldi viðhaldshola sem þarf til að viðhalda vinnslugetu á líftímanum, forsendur um niðurrif og áætlanir um flutning og meðhöndlun úrgangs að loknu niðurrifi stöðvar. Einnig er ákveðin óvissa varðandi skilgreindan líftíma, áætlanir um viðhald og eftirlit í rekstri og endurnýjun búnaðar. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir að á rekstartíma og að loknum líftímanum sé verið að nota eldsneyti eins og gert er í dag, að undanskildum rafvæddum borunum vegna viðhaldshola. Til greina kemur að búa til sviðsmyndir með öðrum orkugjöfum sem koma til greina í framtíðinni.

6.2 Bein losun og náttúruleg losun

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur í för með sér losun á gasi út í andrúmsloftið. Mest er losunin á koltvísýringi, sem veldur loftslagsbreytingum, og brennisteinsvetni, sem getur valdið súrnun, lyktarmengun og eituráhrifum á lífríki og heilsu manna. Gas er í jarðhitavökvanum sem dælt er upp úr jarðhitageyminum og síðan losað út í andrúmsloftið í vinnsluferlinu, en einungis gufan úr jarðhitavökvanum er nýtt til orkuvinnslu. Styrkur gastegunda í jarðhitavökva getur verið mjög misjafn milli heimssvæða og jarðhitasvæða og geta einnig þróast og breyst á líftíma aflstöðvar. Oft er vitnað í samantekt Bertani og Thain frá 2002 [29] þar sem tekin var saman losun CO₂ frá 85 jarðvarmavirkjunum í 11 löndum. Vigtað meðaltal losunar var 122 g CO₂/kWst, en breiddin var mikil eða 4 – 740 g CO₂/kWst.

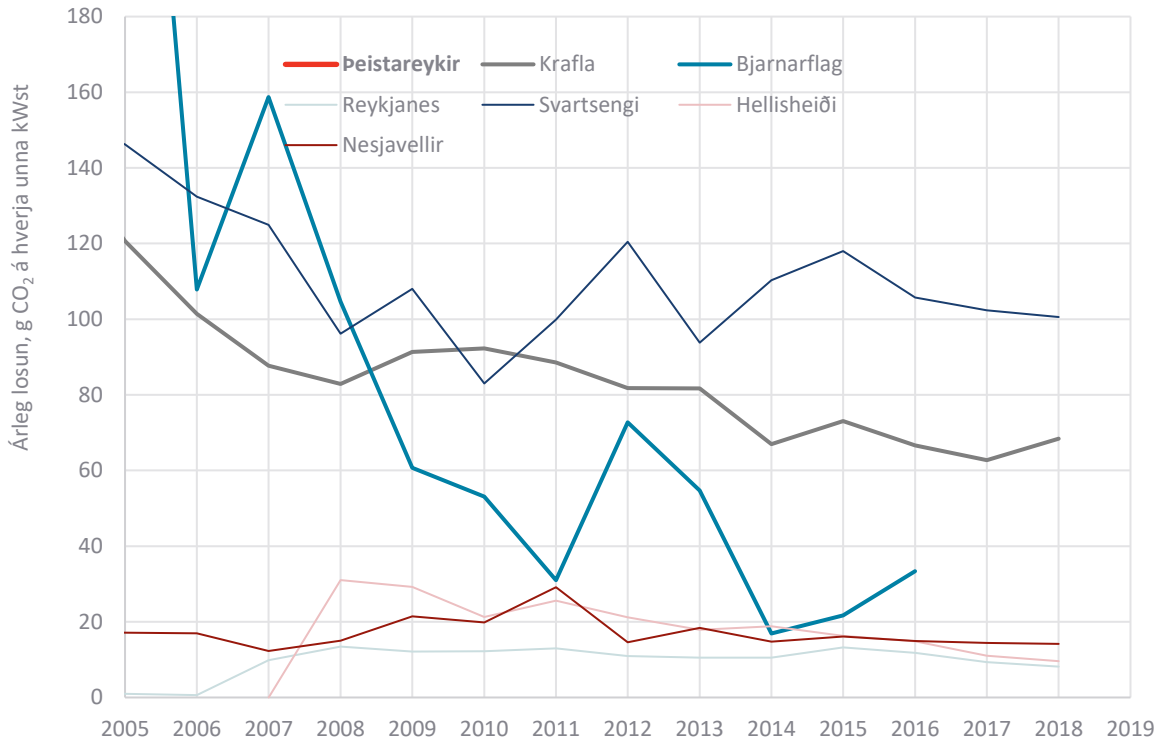
Síðan þá hafa bæst við jarðvarmavinnslusvæði með ennpá hærri losun. Meðallosun er ólík milli svæða og landa, eins og gefur að skilja, og víðast hvar virðist vera þróun til lækkunar eftir því sem jarðhitasvæði ná jafnvægi við vinnslu. Gefin hafa verið út landsmeðaltölin 106 g CO₂/kWst í Bandaríkjunum (2002), 330 g CO₂/kWst í Ítalíu (2013) og 123 g CO₂/kWst í Nýja Sjálandi (2012) [30] sem er komið niður í 76 g CO₂/kWst árið 2018 [31]. Mjög há losunargildi hafa verið mæld á fáeinum stöðum; meðallosun um 1.000 g CO₂/kWst eða á einstaka stað allt að 1.800 g/kWst í Tyrklandi [32], sem er þá orðið tvöfalt hærra gildi en losun vegna raforkuvinnslu með kolum.

Meðallosun koltvísýrings og brennisteinsvetnis á hverja kílóvattstund rafmagns unna í jarðvarmavirkjunum á Íslandi hefur farið stöðugt lækkandi á undanförunum árum og áratugum, sjá mynd 27. Losunin er afar breytileg milli ólíkra aflstöðva (mynd 28) og náði sögulegu hámarki 570 g/kWst í Gufustöðinni í Bjarnarflagi (1980) og 297 g/kWst í Kröflu (1981). Tengdust þessir tveir viðburðir Kröflueldum sem stóðu yfir frá 1975 til 1984. Meðallosun vegna raforkuvinnslu með jarðvarma á Íslandi árið 2018 var 26 g CO₂/kWst og 3,3 g H₂S/kWst og telja má líklegt að með yfirlýstum loftslagsmarkmiðum helstu vinnslufyrirtækja jarðvarma á Íslandi að losunin eigi eftir að lækka enn frekar á komandi árum.

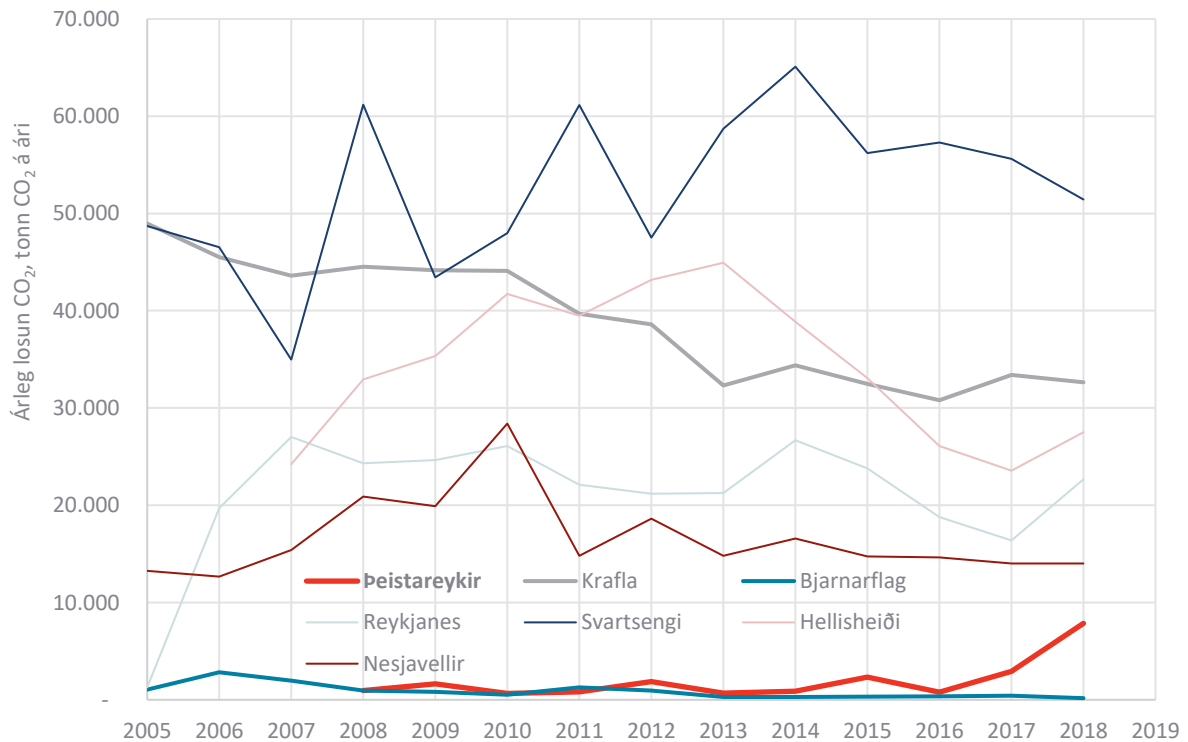


MYND 27 Meðallosun CO₂ og H₂S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2018. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2020-T002-01 (2020) [11].

Losun koltvísýrings frá jarðvarmasvæðum er náttúruleg og ber heimildum ekki alltaf saman hvort að vinnsla raforku hafi áhrif á heildarlosun frá þeim svæðum. Landsvirkjun hefur um árabíl skoðað losun gróðurhúsalofttegunda frá fyrirtækinu og reynt að varpa ljósi á útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum, og hvort að orkuvinnsla hafi áhrif á náttúrulegt útstreymi eða ekki (e. anthropogenic) [33]. Kannað hefur verið hvort að aukin orkuvinnsla úr jarðhita myndi valda aukningu á heildarútblæstri gróðurhúsalofttegunda frá Íslandi. Mælingar benda til þess að jarðvarmavirkjanir á Suðurnesjum hafi aukið losun um allt að 80%, en á Hengilsvæði og á Norðausturlandi virðast mælingar benda til þess að aukningin hafi verið mjög lítil eða hverfandi [34]. Náttúruleg losun frá Hengilsvæðinu er rétt rúmlega tvöföld losuninni frá Nesjavallavirkjun og Hellisheiðavirkjun [35] og hið sama á við um Kröflusvæði, þar er náttúruleg losun u.þ.b. tvöfalt meiri en losun frá jarðvarmavirkjununum á svæðinu. Hið gagnstæða virðist eiga við á Reykjanesinu, þar er losun frá Reykjanesvirkjun er um tvöföld náttúrulegri losun og virðist hafa farið hækkandi frá því að stöðin var gangsett.



MYND 28 Árleg losun koltvísýrings frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagni. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2020-T002-01 (2020) [11].



MYND 29 Árleg heildarlosun koltvísýrings frá íslenskum jarðvarmavirkjunum. Stöðvarnar vinna ýmist eingöngu raforku eða bæði raforku og heitt vatn. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2020-T002-01 (2020) [11].

Heildarlosun frá þeistareykjasvæðinu var metin vera um 110.000 t CO₂ á ári eftir viðamiklar mælingar sumarið 2015 [36]. Bein losun vegna vinnslu raforku á svæðinu (mynd 29) nemur þannig um 7% af ætlaðri náttúrulegri losun frá svæðinu. Til samanburðar hefur árleg náttúruleg losun frá Kröflusvæðinu verið metin um 190.000 t CO₂/ár [37].

Styrkur H₂S í jarðhitavökva getur breyst töluvert á nokkrum árum, og hefur reynslan m.a. sýnt að styrkur H₂S eykst meira en CO₂ á meðan á vinnslu stendur [38]. H₂S er talið skolest að mestu út með rigningu [39] þannig að aðeins lítil hluti hvarfast í SO₂. Losun í andrúmsloftið er því mjög háð veðurfari, landnotkun, vindum og landlegu. Sett hafa verið heilsuverndarmörk fyrir magn brennisteinsvetnis í andrúmslofti (50 µg/m³) en ekki hafa verið settar beinar skorður á leyfilegt magn losunar frá atvinnurekstri. Heilsuverndarmörkin urðu til þess að þróaðar voru mótvægisáðgerðir til að stemma stigu við losun H₂S í andrúmsloftið frá Hellisheiðarvirkjun, sem síðar varð að rannsóknarverkefnum SulFix og CarbFix [40]. CarbFix snýr að því að leysa CO₂ í vatni og dæla því í basísk jarðlög og þar með að binda það varanlega í basalt. Tæknin er háð aðgengi að miklu vatni sem og gropnu basalti og er framkvæmdin því hentug á Íslandi þar sem mikill aðgangur er að vatni og e.t.v. síður á öðrum stöðum þar sem minna framboð er af því.

Segja má, að þrátt fyrir að ýmsar rannsóknir gefi til kynna ákveðnar breytingar á heildarlosun svæðis í kjölfar orkuvinnslu, sé ekki enn kominn grundvöllur til þess að hægt sé að fullyrða um áhrif vinnslu á heildarlosun, og hvort og að hversu miklu leyti losunin megi teljast manngerð [30, 41]. Þetta kann að breytast þegar meiri gögn og betri upplýsingar liggja fyrir.

6.3 Vistferilsgreiningar jarðvarmavirkjana

Ekki eru til margar vistferilsgreiningar fyrir nýtingu jarðvarma, samanboreið við aðra endurnýjanlega orkugjafa. Þetta er ein helsta niðurstaða tveggja samantektargreina frá árunum 2013 og 2017 [42, 43], þar sem rýnt er í LCA rannsóknir fyrir jarðvarmastöðvar. Niðurstöður örfárra greininga hafa verið birtar síðan þá, þar á meðal ein um raforkuvinnslu og nýtingu heits vatns í Hellisheiðarvirkjun [20]. Vorið 2020 var einnig gefin út samantekt sem unnin var fyrir Evrópusambandið, sem byggði á nokkrum útgefnum ritrýndum vistferilsgreiningum frá árabílinu 2012-2019 [41].

Sjá má niðurstöður nokkurra nýlegra vistferilsgreininga fyrir jarðvarmavirkjanir í töflu 29 með eins eða tveggja þrepa tækni (SF, DF), en þessar aðferðir eru notuð í um 63% af öllum jarðvarmavirkjunum heimsins sem framleiða rafmagn [29]. Ekki eru hér teknar saman niðurstöður greininga fyrir tvívökva-eða þurrufuvirkjanir en þær má finna í nýlegum samantektargreinum [43, 42]. Jarðhitasvæði eru ólík milli svæða og heimshorna og sú tækni sem valin er til nýtingar jarðvarmans fer m.a. eftir hitastigi og eðli jarðhitavökva. Niðurstöður eru því tæpast samanburðarhæfar milli aflstöðva sem notast við ólíka tækni. Einnig er, eðli málsins samkvæmt, munur á milli virkjana sem vinna eingöngu rafmagn eða nýta einnig heitt vatn með beinum hætti. Á síðastliðnum árum hefur einnig áhuginn glæðst fyrir vinnslu úr örvuðum jarðhitakerfum (e. enhanced geothermal systems, EGC) og eru til nokkrar vistferilsgreiningar þess efnis.

Ítrekað skal að ekki er hægt að gera beinan samanburð milli niðurstöður vistferilsgreininga sem fram koma í töflu 29, þar sem gríðarlegur munur er á milli greininga hvaða þættir framkvæmdar eru hluti af kerfismörkum. Í tilfelli þeirrar vistferilsgreiningar sem lýst er í þessari skýrslu fyrir þeistareykjastöð er um yfirgripsmikla og ítarlega greiningu sem byggir á mjög góðum og öruggum gögnum sem tekur mið

af fleiri þáttum vistferilsins en flestar aðrar greiningar. Nærtækara væri að bera þessar greiningu saman við niðurstöður umhverfisyfirlýsinga fyrir orkuvinnslu (EPD), sjá töflu 31, en þar eru gerðar strangari kröfur til upplýsingaöflunarinnar og til skilgreinda kerfismarkna [12].

TAFLA 29 Niðurstöður vistferilsgreininga (LCA) fyrir jarðvarmavirkjanir. Dregnar eru hér fram nokkrar nýlegar greiningar á eins og tveggja þrepa (SF, DF) stöðvum, auk tveggja samantekta fyrir jarðvarmavinnslu. Niðurstöður fyrir þeistareyki eru birtar án raforkuflutnings.

VIRKJUN, LAND	STÆRÐ (TÆKNI)	LÍFTÍMI (ÁR)	KOLEFNISSPOR (g CO ₂ -íg/kWst)	SÚRNUN (g H ₂ S-íg/kWst)	HEIMILD (ÁR)
Bouillante, Gouadeloupe	15,74 MW (SF, DF)	30	38-47	1,6-2	[44] (2015)
Hellisheiðarvirkjun, Ísland*	303 MW (DF)	30	15,9 án CarbFix 11,4 með CarbFix	9,7 án SulFix 3,6 með SulFix	[20] (2020)
Bagnore 3, Piancastagnaio 3-5 (Monte Amiata), Ítalía**	20 MW (SF)	25	380-1045	0,1-44,8	[43, 45] (2014, 2017)
Chiusdino 1 (Ítalía)	20MW	30	270-430	1-9	[46] (2020)
Japan***	55 (DF)	30	15	-	[47] (2005)
IPCC	-	-	38 (6 – 79)	-	[28] (2011)
EU	-	-	238 (5 – 898)	-	[41] (2020)
Þeistareykir, Ísland	90 MW (SF)	40	13,8	7,1	EFLA (2020)

*Kerfismörk innihalda ekki flutning byggingarefna og vélbúnaðar til landsins, úrgang frá rekstri, niðurrif stöðvar og meðhöndlun úrgangs og raforkuflutninga. Eldsneytisnotkun við byggingu stöðvar byggir á áætlun. Í greiningunni er reiknað með 34% niðurdælingu CO₂ og 68% niðurdælingu H₂S [20].** Kerfismörk greininganna fela ekki í sér framleiðslu byggingarefni, vélbúnaðar eða byggingu stöðvar, heldur eingöngu rekstur og beina losun. ***Kerfismörk innhéldu ekki beina losun á rekstrartíma

6.4 Kolefnisspor orkugjafa

Kolefnisspor þeistareykjastöðvar er í minni kantinum miðað við nýlegar niðurstöður fyrir aðrar jarðvarmavirkjanir (tafla 29). Raforkuvinnsla með óendurnýjanlegum orkugjöfum (kol, gas og lífmassi og kol saman) er með mun stærra kolefnisspor en vinnsla með endurnýjanlegum orkugjöfum. Í töflum 30 og 31 má sjá niðurstöður vistferilsgreininga fyrir þrjá orkugjafa sem Landsvirkjun nýtir til raforkuvinnslu og í töflu 31 má sjá niðurstöður nýlegra umhverfisyfirlýsinga fyrir raforkuvinnslu með ólíkum orkugjöfum. Á mynd 30 má sjá samanburð á kolefnisspori mismunandi orkugjafa [48]. Gögnin sem myndin byggir á eru fyrir hvern orkugjafa frá a.m.k. fimm mismunandi vistferilsgreiningum raforkuvinnslu og sýnir miðgildi, há- og lággildi hvers orkugjafa. Miðgildi losunar fyrir jarðvarma er 38 g CO₂ ígildi/kWst og er kolefnisspor þeistareykjastöðvar meira en helmingi minna eða 13,8 g CO₂ ígildi/kWst án raforkuflutnings. Kolefnisspor fyrir jarðvarma er töluvert háð aðstæðum á hverjum stað fyrir sig og hefur bein losun í andrúmsloftið frá jarðhitavökva mestu áhrifin. Á mörgum svæðum er beina losunin lítil, en til eru dæmi um jarðhitasvæði í heiminum sem losa töluvert af koltvísýringi og metan (kafli 6.3) eða allt að 1.000 eða 1.800 g CO₂/kWst.

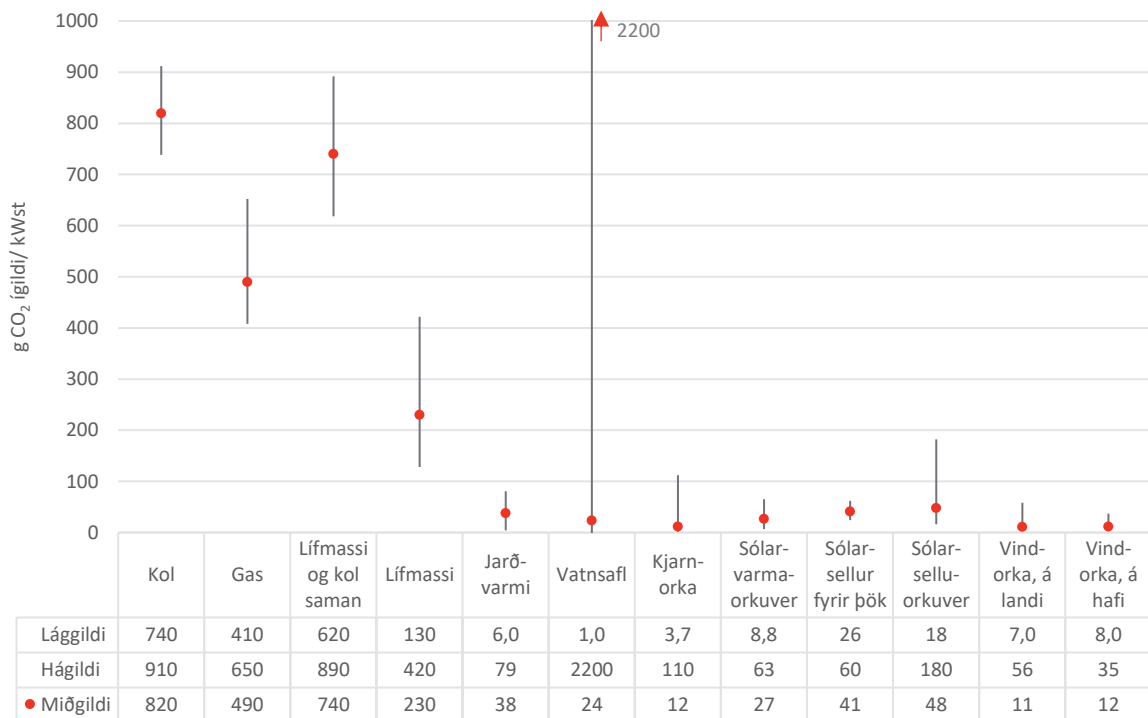
Af þeim orkugjöfum sem hér eru skoðaðir (mynd 30) má sjá að vindorka, sólarorka, kjarnorka og vatnsorka geta unnið raforku með kolefnisspori sem er minna en 5% af kolefnisspori raforkuvinnslu með kolum [48]. Séu aflstöðvar Landsvirkjunar (tafla 30) bornar saman við samantekt fyrir alla helstu orkugjafa, má sjá að þær eru allar með kolefnisspor undir miðgildi samantektar IPCC frá 2014 og langt undir miðgildi kolefnisspors fyrir óendurnýjanlega orkugjafa. Vert er að nefna að valinn er þröskuldurinn 100 g CO₂-ígildi/kWst til skilgreiningar á endurnýjanlegum orkugjöfum í nýjasta flokkunarkerfinu (e. taxonomy) fyrir sjálfbæran fjármálamarkað í Evrópu [49], og fer þröskuldurinn lækkandi í átt að kolefnishlutleysi eða 0 g CO₂-ígildi/kWst árið 2050.

TAFLA 30 Kolefnisspor aflstöðva Landsvirkjunar, byggð á vistferilsgreiningum sem unnar hafa verið fyrir Landsvirkjun [4, 5, 3, 2, 6]. Kolefnisspor aflstöðvanna er gefið upp bæði án og með raforkuflutningi.

ORKUGJAFI	LÍFTÍMI	AFLSTÖÐ	KOLEFNISSPOR ÁN RAFORKUFLUTNINGS (g CO ₂ -íg/kWst)	KOLEFNISSPOR MEÐ RAFORKUFLUTNINGI (g CO ₂ -íg/kWst)
Vatnsafl	100 ár	Búðarhálsstöð	1,5	2,4
		Fljótsdalsstöð	1,2	2,1
		Blöndustöð	20,4	21,3
Vindafl	25 ár	Búrfellsstöð II	0,5	1,4
		Hafið við Búrfell	5,3	6,2
Jarðvarmi	40 ár	Þeistareykjastöð	13,8	14,7

TAFLA 31 Samantekt á kolefnisspori ólíkra orkugjafa skv. nokkrum umhverfisyfirlýsingum (EPD) sem gefin hafa verið út á undanföllum fjórum árum. Kolefnisspor er gefið upp í g CO₂-ígildi/kWst.

ORKUGJAFI (LAND)	FRAMLEIÐANDI	KOLEFNISSPOR ÁN RAFORKUFLUTNINGS (g CO ₂ /kWst)	KOLEFNISSPOR MEÐ RAFORKUFLUTNINGI (g CO ₂ /kWst)	HEIMILD (ÁR)
Kjarnorka (SE)	Vattenfall	2,48	4,13	[50] (2019)
Blönduð gasstöð, CCGT (IT)	Axpo	414	469	[51](2019)
Vatnsafl (NO)	Statkraft	6,81	8,24	[52](2019)
Lífgas frá lífrænum úrg. (CH)	Axpo	101	-	[53] (2018)
Vatnsafl (SE, FI)	Vattenfall	8,59	10,5	[54] (2018)
Vindorka (UK, ES, IT, PO, FR, FI)	Siemens Gamesa	8,56	9,24	[55] (2017)

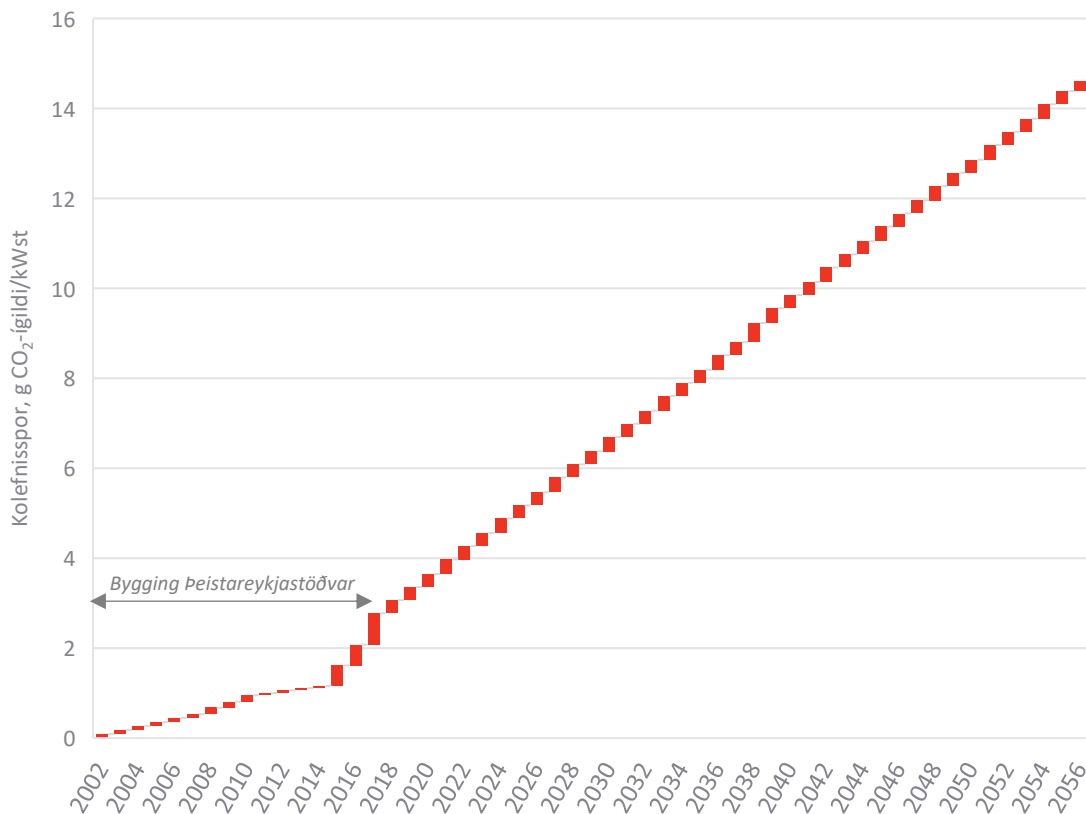


MYND 30 Losun gróðurhúsalofttegunda frá vinnslu raforku með mismunandi orkugjöfum í g CO₂ ígilda fyrir unna kWst. Myndin byggir á samantekt IPCC frá árinu 2014 [48] og sýnir miðgildi (rauður punktur), há- og lággildi frá niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir hvern orkugjafa. Frá því að þessi samantekt var gefin út hafa verið birtar niðurstöður fyrir jarðvarma með losun allt að 1.800 g CO₂-ígildi/kWst. Kolefnisspor Þeistareykjavirkjunar er 13,8 g CO₂ ígildi/kWst án raforkuflutnings.

6.5 Tækifæri til úrbóta

6.5.1 Dregið úr beinni losun

Landsvirkjun kynnti í byrjun árs 2020 aðgerðaáætlun til ársins 2030 þar sem fyrirtækið stefnir að því að verða kolefnishlutlaust árið 2025. Meðal meginmarkmiða í núverandi aðgerðaáætlunar fyrirtækisins er að draga úr losun vegna jarðvarmavinnslu, en fyrirtækinu tilheyra þrjár aflstöðvar á Norðausturlandi; Krafla, Þeistareykjastöð og Gufustöðin. Þó að Þeistareykjastöð vinni meiri orku þá er losunin töluvert meiri frá Kröflu (myndir 28 og 29), eða fjórum sinnum meiri losun CO₂ og helmingi meiri losun H₂S en frá Þeistareykjastöð árið 2018. Rannsóknir standa nú yfir vegna þróun búnaðar til hreinsunar koltvísýrings frá Kröflustöð [10]. Ef unnt verður að dæla niður koltvísýringnum eða nýta hann til verðmætasköpunar, standa vonir til að losunin á Norðausturlandi geti dregist saman um 60% miðað við árið 2008. Ef að reynslan úr Kröfluverkefninu er jákvæð getur aðferðafræðin hugsanlega nýst á Þeistareykjum einnig og dregið þannig úr árlegri losun á líftíma stöðvarinnar (mynd 31). Hreinsun koltvísýrings og brennisteinsvetnis úr útblæstri jarðgass væri ein öflugasta aðgerðin til að draga úr gróðurhúsa- og súrnunaráhrifum aflstöðvarinnar, líkt og gert hefur verið með góðum árangri á Hellsisheiði [20].



MYND 31 Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar og áætluð uppsöfnuð losun gróðurhúsalofttegunda á skilgreindum líftíma stöðvarinnar. Áður en rekstur hefst er búið að valda um 17% kolefnissporsins og á mesta losunin sér stað á rekstrarævi stöðvarinnar. Spá um beina losun CO₂ á rekstartíma er háð töluverðri óvissu þar sem losunin getur tekið breytingum og er háð þróun í jarðhitageyminum.

6.5.2 Auka vinnslugetu svæðisins með nýrri tækni

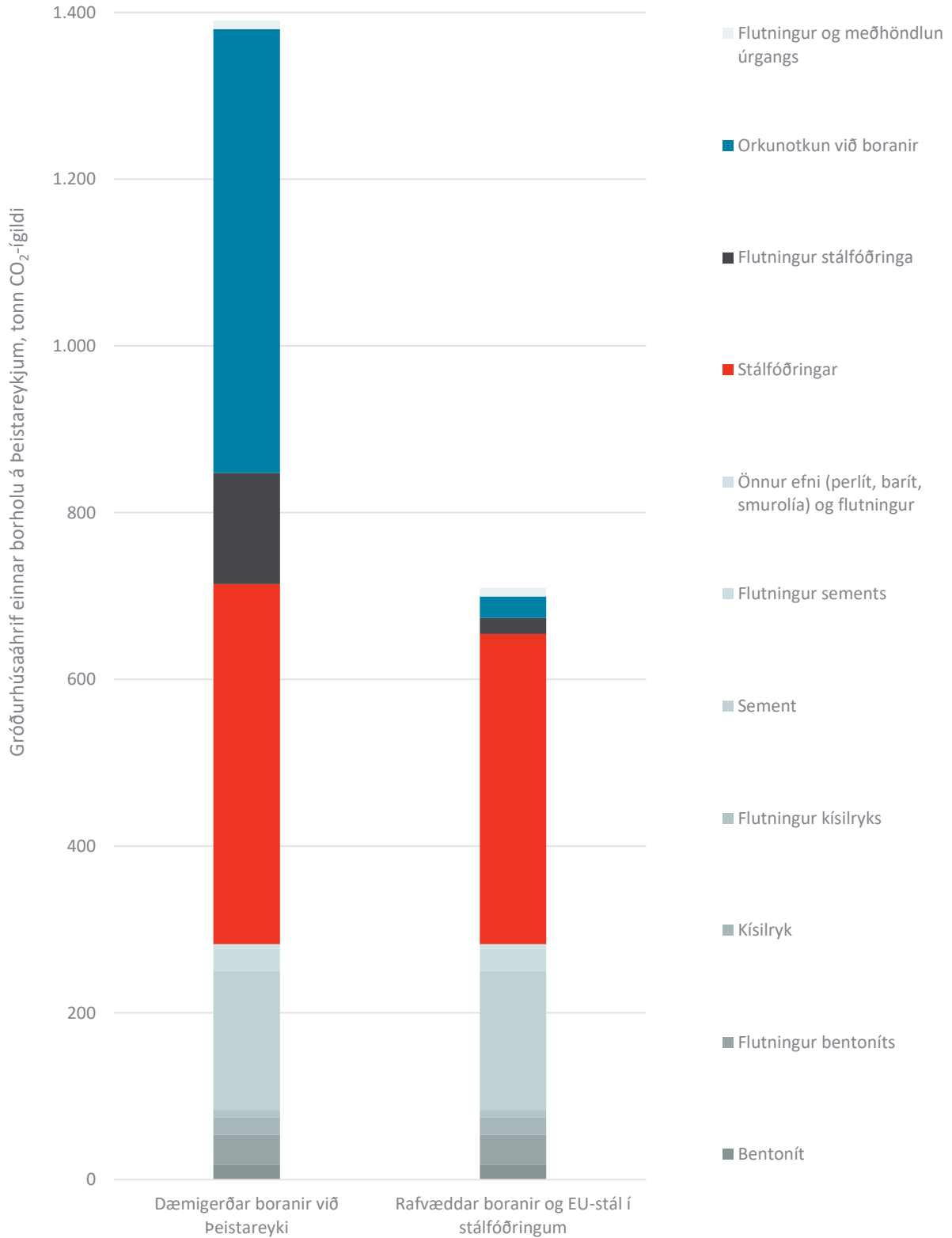
Sífelld er að koma á markað afkastameiri vélbúnaður sem nýtir gufuna betur og ómögulegt er að segja til um hvaða tæki verða komin á markað þegar vélbúnaði stöðvarinnar verður skipt út á 40 ára líftíma stöðvarinnar (eða lengri). Talið er að hægt sé að bæta nýtingu raforkuvinnslu um a.m.k. 20% með því að bæta við vélbúnaði til að endurnýta gufuna á lægri þrýstingi (e. double flash) eða jafnvel endurnýta hana tvisvar (triple flash). Þá eru ótaldir möguleikar á beinni nýtingu jarðvarmans, sem myndi minnka vistspor stöðvarinnar; kolefnisspor, súrnun og önnur umhverfisáhrif.

6.5.3 Rafvæddar boranir og innkaupakröfur

Meðal annarra markmiða sem Landsvirkjun hefur sett sér í vegferð að kolefnishlutleysi er að hvorki bifreiðar né vinnuvélar í starfsemi fyrirtækisins brenni jarðefnaeldsneyti árið 2030. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir borun 13 viðbótarborhola á 40 ára líftíma starfsstöðvarinnar til að viðhalda vinnslugetu stöðvarinnar. Gróðurhúsaáhrif einnar dæmigerðrar borholu sem nú er nýtt á Þeistareykjum er alls um 1.400 tonn CO₂-ígilda (mynd 32 – vinstri súla). Sjá má að stærstu losunarþættirnir eru stál- og sementsframleiðsla, flutningar stálfóðringa og eldsneytisnotkun sem þarf við boranirnar.

Sé eldsneytisnotkun skipt út fyrir raforku sem framleidd er í Þeistareykjum og stál keypt frá framleiðanda sem er bæði með lægra kolefnisspor og í minni fjarlægð frá Íslandi (mynd 32 – hægri súla), væri hægt að minnka gróðurhúsaáhrif einnar borholu um næstum því helming eða allt að 700 tonn CO₂-ígilda, þar af um 500 tonn vegna eldsneytis sem sparast. Það eru því allnokkur tækifæri til að lágmarka umhverfisáhrif við borun á framtíðarviðhaldsholum, t.d. með því að huga að framleiðslu hráefna, flutningi þeirra og framkvæmdum, og fara t.d. fram á vottanir eða umhverfisýfirlýsingar í útboðs- eða innkaupaferli.

Aðrir stærstu þættir eldsneytisnotkunar eru framkvæmdir (vegagerð mest, svo jarðvinnu- og byggingarframkvæmdir) og eldsneytisnotkun í árlegum rekstri. Þó að allur véla- og bílafloki verði ekki rafvæddur er einnig hægt að tileinka sér ábyrga notkun eldsneytis, sem felur m.a. í sér að slökkt sé á tækjum þegar þau eru ekki í notkun og þannig komið í veg fyrir lausagang; að biðtími sé lágmarkaður, t.d. í námum, og að kappkostað sé að tæki sem valin eru séu orkunýtin. Einnig getur skipt máli að viðhald tækja sé gott og vélar séu stilltar þannig að bruni vélarinnar verði sem bestur. Einnig hefur náðst árangur af því að þjálfa ökumenn í vistakstri. Á Norðurlöndum hefur allnokkur vinna átt sér stað á undanförunum árum varðandi lágmarkun gróðurhúsaáhrifa frá byggingarframkvæmdum, og hefur Oslóborg t.a.m. gefið út leiðbeiningar fyrir framkvæmdaaðila [56].



MYND 32 Gróðurhúsaáhrif einnar borholu á Þeistareykjum. Vinstra megin er dæmi um borholu á Þeistareykjum og gert er ráð fyrir í þessari greiningu fyrir bæði núverandi holur og viðhaldsholur: eldsneyti er nýtt við borunina og fóðringarstál framleitt í Asíu (meðaltölur) og flutt inn þaðan. Til hægri er dæmi um borholu þar sem búið er að rafvæða framkvæmdir (eigin raforka aflstöðvar nýtt í stað dísilólíu) og þar sem fóðringarstálið kemur ekki frá Asíu heldur er framleitt í Evrópu (meðaltölur) og flutt inn frá meginlandinu.

7 LOKAORÐ

Í þessari vistferilsgreiningu fyrir Þeistareykjastöð er fjallað um 7 flokka umhverfisáhrifa; gróðurhúsaáhrif, eyðingu jarðefnaeldsneytis, súrnun, myndun ósons við yfirborð, næringarefnaauðgun, eyðingu ólífrænna auðlinda og eyðingu ósonlagsins. Einn stærsti losunarþátturinn er bein losun CO₂ og H₂S frá jarðhitavökva á rekstrartíma stöðvarinnar. Kolefnisspor raforkuvinnslu í Þeistareykjastöð er 13,8 g CO₂-ígildi/kWst við stöðina og 14,7 g CO₂-ígildi/kWst flutt til notanda.

Kolefnisspor raforkuvinnslu með jarðvarma hefur verið metinn á bilinu 6 – 79 g CO₂-ígildi/kWst á heimsvísu en fyrir einstaka stöðvar getur sporið náð upp fyrir 1.000 g CO₂-ígildi/kWst. Kolefnisspor Þeistareykjastöðvar er mun lægra en kolefnisspor annarra óendurnýjanlegra orkugjafa en á pari við aðrar vistferilsgreininga fyrir aðra innlenda raforkuvinnslu, t.d. 1,2 – 20,4 g CO₂-ígildi fyrir vatnsaflsstöðvar Landsvirkjunar og 11,4 g CO₂-ígildi/kWst fyrir raforkuvinnslu í Hellisheiðarvirkjun, sem dælir um 34% af því CO₂ sem upp kemur aftur niður í jarðgeyminn [20].

Orkubúskapur Þeistareykjastöðvar er góður, en á 40 ára líftíma vinnur stöðin rúmlega 100 sinnum meiri orku en þarf til að byggja og reka stöðina og hefur stöðin unnið jafnmikla orku og stöðin þurfti á vistferli sínum á innan við 5 mánuðum frá gangsetningu. Góð orkuarðsemi bendir til þess að nýting jarðvarma á Þeistareykjum sé góður valkostur og mjög samkeppnishæfur gagnvart öðrum endurnýjanlegum orkukostum; vatnsafli, vindorku og sólarorku, sem veita jarðvarmanum mikla samkeppni um þessar mundir, að því tilskyldu að jarðhitageymirinn sé nýttur með sjálfbærum hætti.

Í skýrslu vísindanefndar Sameinuðu Þjóðanna um loftslagsmál (IPCC) frá haustinu 2018 [57] kemur fram hversu aðkallandi það er að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda með öllum tiltækum ráðum á næstu árum til að sporna við hlýnun jarðar umfram 1,5°C. Þörf er á umfangsmiklum aðgerðum að hálfu stjórnvalda, fyrirtækja og einstaklinga til þess að þetta takmark náist. Aðgerðir sem gripið er til fljótt vega þyngra til þess að ná þessu markmiði.

Tækifæri til úrbóta liggja t.d. í að:

- Nýta jarðhitavökvann betur um leið og það verður raunhæfur kostur
- Hreinsa jarðhitagas
- Minnka notkun jarðefnaeldsneytis
- Setja kröfur er varða umhverfismál við innkaup á vörum og þjónustu
- Huga að vistvænni hönnun fyrir viðhald og endurnýjun á líftíma stöðvarinnar

Þannig má nýta niðurstöður greiningarinnar til að hefja samtal upp virðiskeðju Landsvirkjunar, við birgja um kaup á vörum og þjónustu með minna vistspor. Vistferilsgreiningin er leiðbeinandi um hvar ber helst að hefja það samtal. Þá eru niðurstöðurnar grunnur fyrir umhverfisyfirlýsingu (Environmental Product Declaration, EPD) fyrir vinnslu raforku og er hægt að leggja slíkar upplýsingar inn í alþjóðlega gagnabanka um umhverfisáhrif raforkuvinnslunnar og nýttast þannig viðskiptavinum Landsvirkjunar og notendum raforkunnar við útreikninga á umhverfisáhrifum sinnar vöru eða í loftslagsbókhalð viðkomandi reksturs.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar er liður í því að fá vitneskju um raunáhrif raforkuvinnslu allra orkukosta hjá Landsvirkjun. Tölulegar upplýsingar liggja nú fyrir sem hægt er að nota í markaðssetningu á raforkunni sem endurnýjanlegur orkugjafi með lítið kolefnisspor. Nú hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðahálsstöð [4], Fljótsdalsstöð [3], Blöndustöð [5] og vindmyllur á Hafinu [2]. Einnig hafa niðurstöður verið birtar fyrir Búrfellsstöð II [6], sem er aflaukning við eina elstu vatnsaflsstöð á Íslandi, Búrfellsstöð. Upplýsingar sem notaðar voru við gerð þessarar greiningar eru mjög góðar en töluverð óvissa er þó í upplýsingum varðandi beina losun á líftímanum og fjölda viðhaldshola. Einnig er óvissa varðandi endurnýjun og viðhald stöðvarinnar og lok líftíma, og endurvinnslu.

Niðurstöður greiningar veita gagnlegar upplýsingar fyrir umhverfisstjórnunarkerfi Landsvirkjunar sem fyrirtækið vinnur eftir í samræmi við alþjóðlega umhverfisstjórnunarstaðalinn ISO 14001:2015. Greiningin sýnir hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin verða. Landsvirkjun stefnir að því að verða kolefnishlutlaust fyrirtæki 2025 og með þessari greiningu eru dregnar fram mikilvægar upplýsingar varðandi rekstur jarðvarmastöðvarinnar að þeistareykjum á Norðausturlandi og til hvaða aðgerða hægt verði að grípa til til að ná markmiðum fyrirtækisins. Fjöldi tækifæra gefast til að draga úr umhverfisáhrifum á líftíma stöðvarinnar næstu áratugi, þar með töldu kolefnisspori, og bæta vinnsluna að öllu leyti, hvort sem standi til að viðhalda eða auka vinnslugetu eða fjölga nýtingarmöguleikum.

Elstu jarðvarmavirkjanir í heiminum í dag eru eldri en 50 ára, og reynslan sýnir að líklega verður hægt að halda áfram rekstri þeirra í marga áratugi í viðbót. Jarðhitasamfélagið finnur fyrir aukinni áherslu á sjálfbærni jarðhitageyma og niðurdælingu samfara orkuvinnslu og hefur mikilvæg þekking hlotist á því sviði á undanförunum árum. Einnig mun færast í aukana að vinna saman rafmagn og varma, og líklegt þykir að örvuð jarðhitakerfi verði vinsæll og raunhæfur kostur í náinni framtíð.

8 HEIMILDASKRÁ

- [1] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Fljótsdalsstöð,“ Landsvirkjun, LV-2011-086, 2011.
- [2] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á Hafinu við Búrfell,“ Landsvirkjun LV-2015-129, 2015.
- [3] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Fljótsdalsstöð,“ Landsvirkjun, LV-2018-064, 2018.
- [4] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Búðarhálsstöð,“ Landsvirkjun, LV-2018-048, 2018.
- [5] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Blöndustöð,“ Landsvirkjun, LV-2019-030, 2019.
- [6] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Búrfellsstöð II,“ Landsvirkjun. LV-2020-035, 2020.
- [7] ISO, *ISO 14040: 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organization for Standardization, Second edition, 2006.
- [8] ISO, *ISO 14044: 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, International Organization for Standardization, First edition, 2006.

- [9] ISO, *ISO 14067:2018. Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification*, International Organization for Standardization, First edition, 2018.
- [10] Landsvirkjun, „Loftslagsbókhald 2019,“ 2020. [Á neti]. Available: <https://arsskyrsla2019.landsvirkjun.is/media/loftslagsbokhald-2019.pdf>.
- [11] Orkustofnun, „Talnaefni Orkustofnunar OS-2020-T002-01,“ [Á neti]. Available: <https://orkustofnun.is/gogn/Talnaefni/OS-2020-T002-01.pdf>.
- [12] The International EPD System, *Product Group Classification: UN CPC 171 and 173 Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution. PCR 2007:08. Version 4.0*, The International EPD system, 2020.
- [13] ÍST EN 15978:2011, „Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method,“ 2011.
- [14] ÍST EN 15804:2012, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*, CEN/TC 350, 2012.
- [15] I. Blanc; L. Damen; M. Douziech; D. Fiaschi; V. Harcouët-Menou; G. Manfrida; B. Mendecka; M.L. Parisi; P. Perez Lopez; G. Ravier; L. Tosti, „First version of harmonized guidelines to perform environmental assessment for geothermal systems based on LCA and non LCA impact indicators: LCA Guidelines for Geothermal installations. Deliverable number: (D.3.2). Date: 27 May 2020.,“ GEOENVI, 2020.
- [16] Steinull hf, „Steinull hf. stone wool insulation, density group 75-100 kg/m³,“ The Norwegian EPD Foundation, 2019.
- [17] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining fyrir veg - Rannsóknarverkefni Vegagerðarinnar 2012. Rannsóknarskýrsla,“ Vegagerðin, 2013.
- [18] Valur Knútsson; Sigurgeir Björn Geirsson; Hreinn Hjartarson & Jón Arnar Emilsson, „Theistareykir Geothermal Power Plant, A Sustainable Construction,“ *GRC Transactions, Vol. 42*, 2018.
- [19] Marta Rós Karlsdóttir; Ólafur Pétur Pálsson; Halldór Pálsson; Larisa Maya-Drysdale, „Life cycle inventory of a flash geothermal combined heat and power plant located in Iceland,“ *International Journal of Life Cycle Assessment*, b. 20, pp. 503-519, 2015.

- [20] Marta R. Karlsdóttir; Jukka Heinonen; Halldór Pálsson; Ólafur P. Pálsson, „Life cycle assessment of a geothermal combined heat and power plant based on high temperature utilization,“ *Geothermics*, b. 84, p. 101727, 2020.
- [21] ABB T&D S.p.A., *Environmental Product Declaration. Large Distribution Transformer 16/20 MVA (ONAN/ONAF).*, The International EPD System, 2006.
- [22] Confederation of European paper industries, „Resource efficiency in the pulp and paper industry. Making more from our natural resources,“ CEPI, Brussels.
- [23] L. Rigamonti; M. Grosso; M.C. Sunseri, „Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems,“ *The International Journal of Life Cycle Assessment*, b. 14, pp. 411-419, 2009.
- [24] Sphera - thinkstep , *GaBi databases*, 2020.
- [25] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining fyrir flutningskerfi raforku. Flutningskerfi Landsnets rekið á 66 kV, 132 kV og 220 kV spennu,“ Landsnet, Reykjavík, 2018.
- [26] Umhverfisstofnun, „National Inventory Report. Emissions of greenhouse gases in Iceland from 1990 to 2018. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol,“ Umhverfisstofnun, Reykjavík, 2020.
- [27] European Environment Agency, „Emissions of air pollutants from large combustion plants in Europe,“ 2020. [Á neti]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/emissions-of-air-pollutants-from-16/assessment>.
- [28] Sathaye, J; O. Lucon; A. Rahman; J. Christensen; F. Denton; J. Fujino; G. Heath; S. Kadner; M. Mirza; H. Rudnick; A. Schlaepfer; A. Shmakin, „Renewable Energy in the Context of Sustainable Development. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,“ Cambridge University Press, Cambridge and New York, 2011.
- [29] Bertani, R.; Thain, I., „Geothermal power generating plant CO2 emission survey.,“ *International Geothermal Association (IGA) News*, 2002:3.
- [30] Þráinn Friðriksson; Almudena Mateos; Pierre Audinet; Yasemin Oruco, „Greenhouse gases from geothermal power production. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) technical report; 009/16,“ World Bank Group, Washington D.C., 2016.

- [31] Katie McLean; Ian Richardson, „Greenhouse gas emissions from New Zealand geothermal power generation in context,“ New Zealand Geothermal Association, 2019.
- [32] Niyazi Aksoy; Ozge Solak Gok; Halim Mutlu & Gizem Kilinc, „CO2 Emission from Geothermal Power Plants in Turkey,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 2015.
- [33] Sigurður Óli Guðmundsson; Bjarni Pálsson, „Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum. LV-2011-017,“ 2011.
- [34] Halldór Ármannsson, „Carbon Dioxide Emissions from Icelandic Geothermal Areas. An Overview. LV-2016-036,“ Landsvirkjun, ÍSOR, Reykjavík, 2016.
- [35] Halldór Ármannsson, „An overview of carbon dioxide emissions from Icelandic geothermal areas,“ *Applied Geochemistry*, b. 97, pp. 11-18, 2018.
- [36] Sigurður G. Kristinsson; Finnbogi Óskarsson; Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson, „Háhitavæðin í Kröflu, Námafjalli og á Þeistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2017. LV-2017-123,“ ÍSOR-2017/086, 2017.
- [37] Dereinda, F.H.; Ármannsson, H., „CO2 Emissions from the Krafla Geothermal Area, Iceland,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 2010.
- [38] H. Kristmannsdóttir; H. Ármannsson, „Environmental aspects of geothermal energy utilization,“ *Geothermics*, b. 32, pp. 451-461, 2003.
- [39] Hrefna Kristmannsdóttir; Magnús Sigurgeirsson; Halldór Ármannsson; Hreinn Hjartarson; Magnús Ólafsson, „Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland,“ *Geothermics*, b. 29, pp. 525-538, 2000.
- [40] [Á neti]. Available: www.carbfix.com.
- [41] Directorate-General for Research and Innovation (European Commission); Ernst & Young; RINA Consulting S.p.A.; VITO, „Study on 'Geothermal plants' and applications' emissions: overview and analysis'. Final Report.,“ EU publications, 2020.
- [42] Peter Bayer; Ladislaus Rybach; Philipp Blum; Ralf Brauchler, „Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, b. 26, pp. 446-463, 2013.

- [43] C. Tomasini-Montenegro; E. Santoyo-Castelazo; H. Gujba; R.J. Romero; E. Santoyo, „Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: An updated review,“ *Applied Thermal Engineering*, b. 114, pp. 1119-1136, 2017.
- [44] Mathilde Marchand; Isabelle Blanc; Aline Marquand; Antoine Beylot; Sophie Bezelgues-Courtade; Hervé Traineau, „Life Cycle Assessment of High Temperature Geothermal Energy Systems,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 2015.
- [45] Mirko Bravi; Riccardo Basosi, „Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy,“ *Journal of Cleaner Production*, b. 66, pp. 301-308, 2014.
- [46] Riccardo Basosi; Roberto Bonciani; Dario Frosali; Giampaolo Manfrida; Maria Laura Parisi; Franco Sansone, „Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems,“ *Sustainability*, b. 12, pp. 1-29, 2020.
- [47] Hiroki Hondo, „Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case,“ *Energy*, b. 30, pp. 2042-2056, 2005.
- [48] Bruckner, Bashmakov, Mulugetta, Chum, d. I. V. Navarro, Edmonds, Faaij, Fungtammasan, Garg, Hertwich, Honnery, Infield, Kainuma, Khennas, Kim, Nimir, Riahi, Strachan, Wisser og Zhang, „Energy Systems. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2014.
- [49] EU Technical Expert Group on Sustainable Finance, „EU Taxonomy Report: Technical Annex. Updated methodology & Updated Technical Screening Criteria. March 2020,“ European Commission, 2020.
- [50] VATTENFALL, „EPD of Electricity from Vattenfall Nordic Nuclear Power Plants,“ The International EPD System, 2019.
- [51] AXPO, „Environmental Product Declaration. Rizziconi Combined-Cycle Gas Turbine plant,“ The International EPD System, 2019.
- [52] Statkraft, „Environmental Product Declaration. Hydroelectricity form Trollheim Power Station,“ The Norwegian EPD Foundation, 2019.

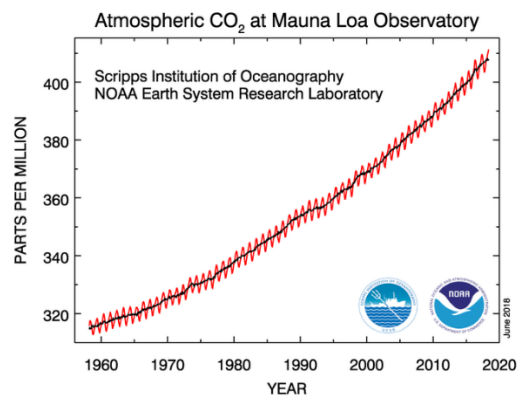
- [53] AXPO, „Environmental Product Declaration. Otelfingen Kompogas Facility,“ The International EPD System, 2018.
- [54] VATTENFALL, „EPD of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower,“ The International EPD System, 2018.
- [55] SIEMENS Gamesa Renewable Energy, „Environmental Product Declaration. Electricity from European G114-2.5 MW On-shore Wind Farm,“ The International EPD System, 2017.
- [56] Energy Norway, the Norwegian District Heating Organization, ENOVA, Federation of Norwegian Construction Industries (BNL), Norwegian Contractors Association Oslo, Akershus and Ostfold (EBAO), Climate Agency, City of Oslo and Nelfo, „Guide to arranging fossil- and emission- free solutions on building sites,“ DNV GL AS Energy, Oslo, 2018.
- [57] IPCC, WG I, WG II, WG III, *Global Warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways...*, IPCC, 2018.
- [58] Dr. Thilo Kupfer; Dr. Martin Baitz; Dr. Cecilia Makishi Colodel; Morten Kokborg; Steffen Schöll; Matthias Rudolf; Dr. Lionel Thellier; Maria Gonzalez, Dr. Oliver Schuller; Jasmin Hengstler; Alexander Stoffregen; Dr. Annette Köhler; Daniel Thylmann, *GaBi Database & Modelling Principles. 2017 Edition - January 2017*, thinkstep, 2017.
- [59] JRC-IEC, *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, 2011.
- [60] National Oceanic and Atmospheric Administration , „Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide,“ U.S. Department of Commerce, [Á neti]. Available: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>. [Skoðað 2 July 2018].
- [61] NASA Ozone Watch, „National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center,“ 17 October 2016. [Á neti]. Available: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/history_SH.html. [Skoðað 2 July 2018].
- [62] Umhverfisstofnun, „Óson,“ [Á neti]. Available: <https://www.ust.is/einstaklingar/loftgaedi/oson/>. [Skoðað 2 July 2018].
- [63] ÍSOR, „Peistareykir. Eftirlitsmælingar árið 2018.LV-2019-034,“ Landsvirkjun, Reykjavík, 2019.

VIÐAUKI A UMHVERFISÁHRIFAFLOKKAR

Í eftirfarandi töflu er þeim umhverfisáhrifum sem metin eru í greiningunni lýst í stuttu máli. Upplýsingar eru aðlagðar frá GaBi Database & Modelling Principles [58] og ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context [59].

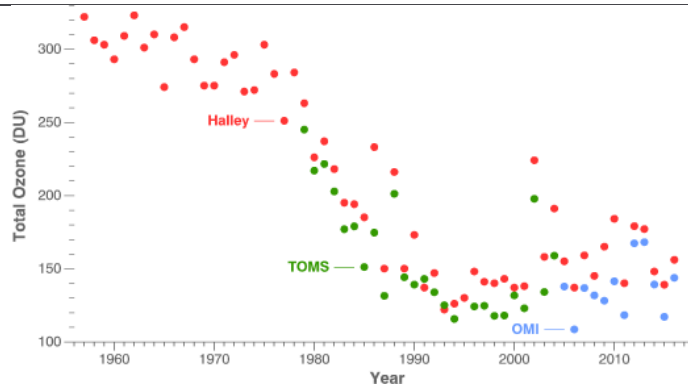
Gróðurhúsaáhrif valda breytingu á meðalhita jarðarinnar sem rekja má til losunar gróðurhúsalofttegunda af manna völdum, t.d. koltvísýrings (CO_2), metans (CH_4) og brennisteinshexaflúoríðs (SF_6). Búist er við að hækkun meðalhita jarðar muni m.a. hafa í för með sér miklar breytingar á loftslagi og veðurfari, valda eyðimerkurmyndun (e. desertification), hækkun á yfirborði sjávar og aukningu í útbreiðslu sjúkdóma. Styrkur CO_2 í andrúmslofti hefur verið mældur á Mauna Loa í Hawaii frá árinu 1958 og sýnir greinilega aukinn styrk lofttegundarinnar í lofthjúpnunum [60]. Grafið að neðan sýnir styrk CO_2 í andrúmslofti sem fall af tíma.

Gróðurhúsaáhrif (e. Global warming, GWP 100 years)



Eyðing ósonlagsins (e. ozone depletion)

Eyðing ósons í heiðhvolfinu eða eyðing ósonlagsins stafar af völdum klór- og brómsambanda sem berast upp í heiðhvolfið, sem er í um 10 – 50 km hæð yfir yfirborði jarðar. 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. Mælingar á styrk ósons í heiðhvolfinu yfir Suðurskautslandinu hafa verið gerðar frá árinu 1956. Árið 1985 fóru mælingar að sýna töluverða lækkun á styrk ósons, í kjölfarið var undirrituð s.k. Montreal bókun um efni sem valda rýrnun ósonlagsins þar sem kveðið er á um að horfið verði frá notkun ósoneyðandi efna [61]. Grafið að neðan sýnir heildarmagn ósons í DU einingum sem fall af tíma.



<p>Myndun ósons við yfirborð jarðar (e. photochemical ozone formation)</p>	<p>Í andrúmslofti sem inniheldur köfnunarefnisoxíð og rokkgjörn, 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 aukið tíðni asma og annarra lungnasjúkdóma. Um er að ræða staðbundin umhverfisáhrif þar sem auknum styrk ósons við yfirborð, við ákveðnar verðuraðstæður, getur fylgt mikið hitamystur og kallast fyrirbrigðið photochemical smog á ensku. Þetta er mjög þekkt fyrirbæri í stórborgum heimsins, en hefur minnkað nokkuð á vesturlöndum á allra síðustu áratugum vegna kröftugra mótvægisáðgerða. Talið er að mengun frá umferð og orkuverum hafi hækkað bakgrunnstyrk ósons niður við jörð á stórum svæðum í Evrópu og Norður Ameríku og er t.d. styrkur ósons yfir Atlantshafi helmingi hærri á norðurhveli jarðar en suðurhvelinu [62].</p>
<p>Súrnun lands og vatns (e. acidification)</p>	<p>Súrnun lands og vatns á sér stað þegar súrt regn myndast er regn hvarfast við mengandi lofttegundir í andrúmsloftinu. Hér er ekki um að ræða súrnun sjávar af völdum gróðurhúsaáhrifa. 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 á skóglendi, á dýralífi, vötnum og mannvirkjum.</p>
<p>Næringarefnaauðgun (e. eutrophication)</p>	<p>Næringarefnaauðgun getur átt sér stað í vatni eða í jarðvegi. Nitröt 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 horfið úr vistkerfinu. Losun ammoníaks, nitrata, nituroxíða og fosfórs í andrúmsloft og vötn geta valdið næringarefnaauðgun. Næringarefnaauðgun veldur staðbundnum umhverfisáhrifum og dæmi um slík áhrif eru t.d. næringarefnaauðgun í Mývatni sem rekja má til ófullnægjandi hreinsunar á fráveituvatni sem losað er í vatnið.</p>
<p>Eyðing auðlinda (e. resource depletion)</p>	<p>Hér er átt við eyðingu auðlinda, svo sem málmgryti, 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.</p>
<p>Orkuþörf á líftíma (e. primary energy demand)</p>	<p>Orkuþörf á líftíma er magn frumorku 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. jarðefnaeldsneyti, hráolíu, brúnkol og úran annars vegar, og orka frá vatni, vindi, sól og lífmassa hins vegar.</p>

VIÐAUKI B TÖLULEGAR NIÐURSTÖÐUR

Tölulegar niðurstöður fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa frá vinnslu á 1 kWst raforku í þeistareykjastöð á vistferli aflstöðvarinnar.

	Eining/kWst	Alls	Öflun hráefna og framleiðsla (A1-A3)	Flutningar á framkvæmda-svæði (A4)	Framkvæmdir (A5)	Bein losun jarðgass	Rekstur, viðhald og endurnýjun	Raforku-flutningur	Niðurrif og förgun	Ávinningur af endurvinnslu								
Gróðurhúsaáhrif	kg CO ₂ ígildi	1,47E-02	1,07E-03	7%	1,91E-04	1%	1,22E-03	8%	1,02E-02	69%	1,25E-03	9%	8,18E-04	6%	6,75E-05	0%	-1,37E-04	-1%
Eyðing jarðefnaeldsneytis	MJ	3,39E-02	1,16E-02	34%	2,38E-03	7%	9,44E-03	28%	1,95E-06	0%	7,09E-03	21%	4,01E-03	12%	7,66E-04	2%	-1,36E-03	-4%
Súrnun lands og vatns	kg SO ₂ ígildi	7,16E-03	3,06E-06	0%	5,23E-06	0%	2,70E-04	4%	6,50E-03	91%	3,28E-04	5%	4,87E-05	1%	6,54E-07	0%	-3,18E-07	0%
Myndun ósons við yfirborð	kg ethene ígildi	1,99E-06	3,64E-07	18%	2,81E-07	14%	7,47E-07	38%	3,00E-10	0%	4,64E-07	23%	1,28E-07	6%	5,43E-08	3%	-4,75E-08	-2%
Næringarefnaauðgun	kg fosfat ígildi	4,74E-06	2,78E-07	6%	5,73E-07	12%	1,53E-06	32%	4,54E-11	0%	7,31E-07	15%	1,53E-06	32%	1,28E-07	3%	-2,63E-08	-1%
Eyðing ólfrænna auðlinda	kg Sb ígildi	2,90E-08	1,55E-08	53%	6,36E-12	0%	5,31E-11	0%	3,68E-13	0%	5,73E-09	20%	7,83E-09	27%	5,09E-12	0%	-1,24E-10	0%
Eyðing ósonlagsins	kg R11 ígildi	6,03E-11	2,37E-11	39%	2,64E-20	0%	-2,44E-15	0%	2,10E-16	0%	2,05E-11	34%	1,62E-11	27%	-2,31E-15	0%	-8,75E-15	0%

Tölulegar niðurstöður fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa frá vinnslu á 1 kWst raforku í þeistareykjastöð, sundurliðað eftir mannvirkjum og verkþáttum

	JARÐVINNA, SLÓÐAR OG PLÖN	VEGGERÐ - PEISTAREYKJAVEGUR NYRÐRI OG SYÐRI	KALDAVATNSVEITA	BORHOLUR (17)	BEIN LOSUN JARÐGASS Á RANNSÓKNARTÍMA	STÖÐVARHÚS	VEITUR OG SAFNÆÐAR	VÉLASAMSTÆÐA (HVERFLAR OG RAFLAR)	SPENNAR	GUFU- OG RAKASKILJUR	STÖÐVARVEITUR	YFIRBORÐSFRÁGANGUR	REKSTUR - ELDSNEYTI OG ÚRGANGUR	ENDURNÝJUN OG ENDURVINNSLA VÉLBÚNAÐAR	BEIN LOSUN JARÐGASS Á REKSTRARTÍMA	VIÐHALDSHOLUR (13)	RAFORKUFLUTNINGUR	NIÐURRIF STÖÐVAR	FÖRGUN OG ENDURVINNSLA HRÁEFNA
Gróðurhúsaáhrif kg CO ₂ ígildi / kWst	1,E-04	4,E-04	3,E-05	8,E-04	5,E-04	2,E-04	3,E-04	1,E-04	3,E-05	4,E-06	7,E-06	2,E-06	7,E-04	1,E-04	1,E-02	4,E-04	8,E-04	3,E-05	-1,E-04
Eyðing jarðefnaeldsneytis MJ / kWst	6,E-04	6,E-03	7,E-04	9,E-03	0,E+00	2,E-03	3,E-03	2,E-03	3,E-04	4,E-05	1,E-04	2,E-05	2,E-03	2,E-03	0,E+00	4,E-03	4,E-03	3,E-04	-9,E-04
Súrnun kg SO ₂ ígildi / kWst	4,E-07	3,E-06	2,E-07	7,E-06	3,E-04	9,E-07	2,E-06	1,E-06	1,E-07	2,E-08	2,E-08	2,E-08	3,E-04	1,E-06	7,E-03	9,E-06	5,E-05	3,E-07	7,E-09
Myndun ósons við yfirborð kg ethene ígildi / kWst	6,E-08	4,E-07	2,E-08	6,E-07	1,E-09	9,E-08	2,E-07	7,E-08	1,E-08	2,E-09	3,E-09	2,E-09	2,E-07	7,E-08	0,E+00	2,E-07	1,E-07	3,E-08	-3,E-08
Næringarefnaauðgun kg fosfat ígildi / kWst	1,E-07	7,E-07	2,E-08	1,E-06	0,E+00	1,E-07	2,E-07	1,E-07	9,E-09	2,E-09	2,E-09	4,E-09	3,E-07	1,E-07	0,E+00	3,E-07	2,E-06	8,E-08	2,E-08
Eyðing ólifrænna auðlinda kg Sb ígildi / kWst	2,E-12	-1,E-11	3,E-12	6,E-10	0,E+00	3,E-09	7,E-09	3,E-09	2,E-09	7,E-13	3,E-10	2,E-13	9,E-10	4,E-09	0,E+00	4,E-10	8,E-09	-1,E-12	-1,E-10
Eyðing ósonlagsins kg R11 ígildi / kWst	-3,E-17	3,E-12	7,E-20	2,E-15	0,E+00	4,E-14	5,E-14	4,E-15	8,E-15	1,E-15	2,E-11	4,E-22	2,E-13	2,E-11	0,E+00	5,E-15	2,E-11	-2,E-15	-9,E-15



KPMG ehf.
Borgartún 27
105 Reykjavík

Sími 545 6000
Fax 545 6001
Veffang www.kpmg.is

Independent Practitioners' Limited Assurance Report

To Landsvirkjun

Report on “Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma – Peistareykjastöð” (e. Life Cycle Assessment of Geothermal Electricity Production at Peistareykjastöð)

We were engaged by Landsvirkjun to conduct an independent limited assurance on the life cycle GHG emissions of Peistareykjastöð, reported in the life cycle assessment of Peistareykjastöð in Chapter 4.4 (here after the *Report*), dated 23rd May 2025.

The Life Cycle Assessment (LCA) has been “performed in accordance with international standards ISO 14040, ISO 14044 and ISO 14067” (hereafter the *Criteria*).

Conclusion

We have performed a limited assurance engagement on whether the *Report* dated May 2025, has been prepared in accordance with the *Criteria*.

Based on our Procedures performed, and evidence obtained, nothing has come to our attention that causes us to believe that the *Report* has not been prepared, in all material respects, in line with the *Criteria*.

Basis for conclusion

We conducted our engagement in accordance with the International Standard on Assurance Engagements (ISAE) 3000 (Revised), Assurance Engagements Other Than Audits or Reviews of Historical Financial Information. Our responsibilities under this standard are further described in the ‘Our responsibilities’ section of our report.

We have complied with the independence and other ethical requirements of the International Code of Ethics for Professional Accountants (including International Independence Standards) issued by the International Ethics Standards Board for Accountants (IESBA).

Our firm applies International Standard on Quality Management (ISQM) 1, Quality Management for Firms that Perform Audits or Reviews of Financial Statements, or Other Assurance or Related Services Engagements, issued by the IAASB. This standard requires the firm to design, implement and operate a system of quality management, including policies or procedures regarding compliance with ethical requirements, professional standards, and applicable legal and regulatory requirements.



We believe that the evidence we have obtained is sufficient and appropriate to provide a basis for our conclusion.

Landsvirkjun responsibilities

The management of Landsvirkjun are responsible for:

- designing, implementing and maintaining internal control relevant to the preparation of the *Report* such that it is free from material misstatement, whether due to fraud or error;
- selecting or developing suitable criteria for preparing the *Report* and appropriately referring to or describing the criteria used; and
- preparing the *Report* in accordance with the Criteria.

Further the management of Landsvirkjun is responsible for that their employees and hired contractors that prepare and set up the *Report* are properly trained and that information systems are up to date.

Inherent Limitations in Preparing the Report

The primary limitation of the LCA study received lies in the direct emissions (CO₂ and H₂S) from the geothermal power plant. The yearly forecast of geothermal emissions was based on historical data from the National Energy Authority (total gas emissions into the atmosphere from geothermal power plants and heat plants, 1969–2019).

EFLA calculated a weighted average of the emissions for the plant's first full year of operation (2018) and partially for 2019, using a conservative estimation approach to avoid underestimating the primary source of life cycle emissions for the geothermal power plant. However, actual emissions data show that since the LCA was carried out in 2019, the Þeistareykir geothermal power plant's emissions have been lower than the conservative estimate. This outcome is preferable to underestimating emissions, as it reflects a more conservative and environmentally cautious approach.

Another limitation of the study was the estimated number of make-up wells required to maintain the plant's capacity. It is estimated that one make-up well will need to be drilled every three years on average to sustain this. However, this estimate is based on experience from previous geothermal projects and is subject to uncertainty.

Our Responsibilities

We are responsible for:

- planning and performing the engagement to obtain limited assurance about whether the Report is free from material misstatement, either due to fraud or error;
- forming an independent conclusion, based on the procedures we have performed and the evidence we have obtained; and
- reporting our conclusion to Landsvirkjun

Summary of the work we performed as the basis for our conclusion.

We exercised professional judgment and maintained professional skepticism throughout the engagement. We designed and performed our procedures to obtain evidence about the Report that is sufficient and appropriate to provide a basis for our conclusion. Our procedures selected depended on our understanding of the Report and other engagement circumstances, and our consideration of areas where material misstatements are likely to arise. In carrying out our engagement, the procedures we performed primarily consisted of:

- Critical review and inspection of the LCI development and LCA calculations:
 - Primary data sampling from the LCA practitioner (EFLA) to assess the key global warming potential (GWP) contributors by focusing on the hotspots identified in the Report against the Criteria.
 - 99% of the GWP emissions has been checked against material misstatement based on the received primary data, input and output screenshots that connect the primary data to the (Life Cycle Impact Assessment (LCIA) modelling phase and reality checks on the emission factors used in the LCIA.

- Critical review of LCA report against ISO 14067, 14040, and 14044 standards
 - The critical review process is to review if:
 - the methods used to carry out the LCA are consistent with this International Standard
 - the methods used to carry out the LCA are scientifically and technically valid
 - the data used are appropriate and reasonable in relation to the goal of the study
 - the interpretations reflect the limitations identified and the goal of the study
 - the study report is transparent and consistent.

The procedures performed in a limited assurance engagement vary in nature and timing from, and are less in extent than for, a reasonable assurance engagement. Consequently, the level of assurance obtained in a limited assurance engagement is substantially lower than the assurance that would have been obtained had a reasonable assurance engagement been performed.



Reykjavík, 1. October 2025

KPMG ehf.

Margrét Pétursdóttir, certified public accountant