

Vistferilsgreining orkuvinnslu með jarðvarma

Gufustöðin í Bjarnarflagi





Vistferilsgreining orkuvinnslu með jarðvarma

Gufustöðin í Bjarnarflagi

Höfundar

Alexandra Kjeld, Ása Rut Benediksdóttir

Dagsetning

Maí 2025

Lykilsíða

Skýrsla LV nr	LV-2025-024	Dagsetning	Maí 2025
Fjöldi síðna	58 s.	Upplag	1
Dreifing	<input checked="" type="checkbox"/> Birt á vef LV	<input type="checkbox"/> Opin innan LV	<input type="checkbox"/> Takmörkuð til [dags.]
Titill	Vistferilsgreining orkuvinnslu með jarðvarma: Gufustöðin í Bjarnarflagi		
Höfundar/fyrirtæki	EFLA verkfræðistofa: Alexandra Kjeld, Ása Rut Benediktsdóttir		
Verkefnisstjóri	Ívar Kristinn Jasonarson		
Unnið fyrir	Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar	—		
Útdráttur	<p>Í þessari skýrslu er að finna niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Gufustöðina í Bjarnarflagi, 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 orkuvinnslunnar og leiða í ljós að kolefnisspor orkuvinnslu í Gufustöðinni er 73 g CO₂-ígildi/kWst. Niðurstöður greiningarinnar draga fram hvar finna megi helstu tækifæri til úrbóta í vistferli jarðvarmastöðvarinnar.</p>		
Lykilorð	Vistferilsgreining, Life Cycle Assessment, LCA, kolefnisspor, gróðurhúsaáhrif, jarðvarmi, jarðvarmaorka, Gufustöðin, losun		

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar



VISTFERILSGREINING ORKUVINNSLU MEÐ JARÐVARMA

Gufustöðin í Bjarnarflagi

25.04.2025



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

108413-SKY-001-V02

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

58

VERKEFNISSTJÓRI / FULLTRÚI VERKKAUPA

Ívar Kristinn Jasonarson

VERKEFNISSTJÓRI EFLA

Alexandra Kjeld

LYKILORÐ

Jarðvarmi, jarðvarmaorka, vistferilsgreining, kolefnisspor, endurnýjanleg orka

STAÐA SKÝRSLU

- Drög
 Drög til yfirlstrar
 Lokið

DREIFING

- Opin
 Dreifing með leyfi verkkaupa
 Trúnaðarmál

TITILL SKÝRSLU

Vistferilsgreining orkuvinnslu með jarðvarma. Gufustöðin í Bjarnarflagi

VERKHEITI

Vistferilsgreining fyrir Gufustöðina í Bjarnarflagi

VERKKAUPI

Landsvirkjun

HÖFUNDUR

Alexandra Kjeld, Ása Rut Benediktsdóttir

ÚTDRÁTTUR

Í þessari skýrslu er að finna niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Gufustöðina í Bjarnarflagi, 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 orkuvinnslunnar og leiða í ljós að kolefnisspor orkuvinnslu í Gufustöðinni er 73 g CO₂-ígildi/kWst. Niðurstöður greiningarinnar draga fram hvar finna megi helstu tækifæri til úrbóta í vistferli jarðvarmastöðvarinnar.

ÚTGÁFUSAGA

<u>NR.</u>	<u>HÖFUNDUR</u>	<u>DAGS.</u>	<u>RÝNT</u>	<u>DAGS.</u>	<u>SAMÞYKKT</u>	<u>DAGS.</u>
01	ÁRB	24.9.24	AK	3.10.24	ÁRB	11.10.24
	Líkan, niðurstöður og drög að lokaskýrslu					
02	Landsvirkjun	21.10.24	ÁRB, AK	18.12.24	ÁRB, AK	20.12.24
03	ÁRB	16.04.25	AK	16.04.25	ÁRB, AK	25.04.25

SAMANTEKT

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur þann kost umfram aðra endurnýjanlega orkugjafa að vinnslan er stöðug og er ekki háð dægursveiflum, árstíma eða veðri. Hlutur jarðvarma í frumorkunotkun Íslendinga er í dag 60,9%, en sé litið til orkuvinnslu eingöngu er hlutur vatnsafls 73% og jarðvarma 27%. Gufustöðin í Mývatnssveit, gangsett árið 1969, er elsta starfandi jarðvarmastöð á landinu og ein sú elsta í heiminum. Markmið þessa verkefnis er að greina og meta umhverfisáhrif orkuvinnslu í Gufustöðinni í Bjarnarflagi, 5 MWe. Verkefnið er jafnframt liður í að meta umhverfisáhrif orkuvinnslu fyrir allar tegundir aflstöðva Landsvirkjunar, en nú þegar hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðarhálsstöð, Fljótsdalsstöð, Blöndustöð og Búrfellsstöð II, sem allt eru vatnsaflsstöðvar, jarðvarmastöðina Þeistareykjastöð og vindmyllur á Hafinu.

Vistferilsgreining (e. *Life Cycle Assessment, LCA*) er stöðluð aðferðarfræði sem er notuð til þess að meta staðbundin og hnattræn- umhverfisáhrif vöru, framleiðsluferils eða þjónustu yfir allan vistferilinn. Greiningin nær því yfir alla virðis_keðju 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. Niðurstöður vistferilsgreininga birtast á formi tölulegra upplýsinga, t.d. kolefnisspor, sem nota má til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilegar vörur eða þjónustu. Í þessari greiningu er auk þess stuðst við staðlaðar og samræmdar leiðbeiningar um gerð vistferilsgreininga fyrir orkuvinnslu og byggingariðnað.

Gufustöðin í Bjarnarflagi er nýtt annars vegar til raforkuvinnslu og hins vegar fyrir Hitaveitu Reykjahlíðar í Mývatnssveit. Aðgerðareining (e. functional unit) vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem **1 kWst orka unnin í Gufustöðinni í Bjarnarflagi**. Einnig er metið kolefnisspor 1 kWst varmaorku sem unnin er í Gufustöðinni. Reiknað er með 40 ára líftíma stöðvarinnar í samræmi við leiðbeiningar og til þess að niðurstöður verði samanburðarhæfar við sambærilegar greiningar. Þar sem jarðhitavökvinn er nýttur bæði til raforku- og varmaorkuvinnslu er einnig farið yfir hvernig umhverfisáhrifum er skipt á milli hitaveitunnar og orkuvinnslunnar í Gufustöðinni út frá aðgengilegri orku (e. exergy). Niðurstöðurnar eru birtar í þrettán flokkum umhverfisáhrifa; heildar gróðurhúsaáhrif (GHÁ), gróðurhúsaáhrif vegna jarðefnaeldsneytis (GHÁ-J), gróðurhúsaáhrif vegna efna af lífrænum uppruna (GHÁ-L), gróðurhúsaáhrif vegna landnotkunar og breyttrar landnotkunar (GHÁ-luluc, (e. land use and land use change)), eyðing ósonlagsins (EÓ), súrnun (SÚ), næringarefnaauðgun í ferskvatni (NEA-F), næringarefnaauðgun í sjó (NEA-S), næringarefnaauðgun í jarðvegi (NEA-J), myndun ósons við yfirborð jarðar (MÓY), eyðing auðlinda (EA), eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ) og vatnsskortur (VS).

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar sýna að losun jarðgass á rekstrartíma er ráðandi í flokkunum GHÁ-heild og GHÁ-jarðefnaeldsneyti. Öflun hráefna og framleiðsla byggingarefna, flutningar á framkvæmdasvæði og framkvæmdir og bygging valda markverðum áhrifum í flestum umhverfisáhrifaflokkum. Kolefnisspor samþættaðrar orkuvinnslu í Gufustöðinni er 73 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (79%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökvunum á 40 árum, eða 57,4 g CO₂-ígildi/kWst. Öflun hráefna og framleiðsla byggingarefna og búnaðar og framkvæmdir mynda samanlagt 7,6 g CO₂-ígildi/kWst. Af öllum mannvirkjum stöðvarinnar vega borholurnar þyngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og orkunotkun vegna bæði núverandi borhola og tilvonandi viðhaldshola, eða samanlagt 11,3 g CO₂-ígildi/kWst.

Kolefnisspor orku Gufustöðvarinnar er af svipaðri stærðargráðu og nýlegar niðurstöður sýna fyrir aðrar jarðvarmavirkjanir. Samkvæmt evrópsku flokkunarreglugerðinni þarf losun gróðurhúsalofttegunda á vistferlinum frá framleiðslu orku úr jarðvarmaorku að vera minni en 100 g CO₂-ígildi/kWh til þess að geta talist sem verulegt framlag til mótvægis við loftslagsbreytingar. Gufustöðin fellur innan þessara marka og uppfyllir því fyrsta viðmið reglugerðarinnar.

Losun brennisteinsvetnis á rekstrartíma Gufustöðvarinnar 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 málmsöltum í jarðvegi. Bent skal þó á að losun koldíoxíðs og brennisteinsvetnis frá jarðhitasvæðum er náttúruleg en heimildum ber ekki saman hvort að vinnsla orku hafi áhrif á heildarlosun frá þessum svæðum.

Upplýsingar um framkvæmd og rekstur Gufustöðvarinnar sem notaðar eru í þessari greiningu byggja á góðum gögnum. Í þeim tilfellum þar sem ekki var hægt að nálgast raungögn frá Landsvirkjun eða framleiðendum búnaðar var annað hvort notast við bakgrunnsgögn úr alþjóðlegum gagnagrunnum eða stærðir áætlaðar út frá vistferilsgreiningu Þeistareykjastöðvar frá árinu 2020, sem var byggð á áreiðanlegum gögnum. Í þessari greiningu er tekið mið af öllum veigamestu þáttum vistferilsins og þeir hafðir innan kerfismarkna, í samræmi við aðferðafræði vistferilsgreiningar og leiðbeiningar um gerð vistferilsgreininga. Þeir þættir sem bundnir eru mestri óvissu í þessari greiningu snúa að því hversu stór hluti losunar koldíoxíðs (CO₂) og brennisteinsvetnis (H₂S) stafar af Kröflueldum (1975-1984) eða náttúrulegri losun og hversu stóran hluta losunarinnar má rekja til jarðvarmavinnslunnar.

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 eiga sér stað, en Landsvirkjun vinnur samkvæmt aðgerðaráætlun fyrirtækisins í loftslagsmálum sem var samþykkt árið 2019 og nær til 2030. Með þessari greiningu eru dregnar fram mikilvægar upplýsingar varðandi rekstur jarðvarmastöðva fyrirtækisins á Norðausturlandi. Fjöldi tækifæra gefast til að draga úr umhverfisáhrifum á líftíma stöðvarinnar, þar með töldu kolefnisspori. Tölulegar upplýsingar liggja nú fyrir sem hægt er að nota í markaðssetningu á orkunni sem endurnýjanlegur orkugjafi með lágt 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, Gufustöðin, 5 MWe., which is the country's oldest geothermal power plant and one of the first of its kind in the world and came online in 1968. 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), one of their geothermal power stations, Theistareykir, 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+A2 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 Bjarnarflag Geothermal Station. A lifetime of 40 years is assumed. Since Bjarnarflag is a Combined Heat and Power Plant (CHP), the environmental impacts of the geothermal station are allocated based on the exergy content of its two output products; heat and power. Results are presented for thirteen environmental impact categories; global warming-total, global warming -fossil, global warming -biogenic, global warming-land use and land use change, ozone depletion, acidification, eutrophication-freshwater, eutrophication-marine, eutrophication-terrestrial, photochemical ozone formation, depletion of minerals and metals, depletion of fossil resources, and water depletion.

The largest contributors to environmental impacts in two impact categories, global warming-total 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 Bjarnarflag is 73 g CO₂-eq. per kWh leaving the station. The carbon footprint is dominated by direct CO₂ emissions from the geothermal fluid during the 40 year lifetime, amounting to 57.4 g CO₂-eq/kWh or 79%. The manufacturing and construction of station buildings, infrastructure and machinery accounts for 7.6 g CO₂-eq/kWh. 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 11.3 g CO₂-eq/kWh.

The carbon footprint of electricity generated at Bjarnarflag is comparable to other recent LCA results for other geothermal projects and is also within the limits defined by the IPCC in 2014 for geothermal power.

The life cycle inventory used in this assessment is in many cases built on specific data from Landsvirkjun and manufacturers. In some instances, it was necessary to use generic background data from international databases or estimate inventory based on the LCA conducted for the Theistareykir geothermal power plant in 2020 which was based on highly reliable data. 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 concern how much of the direct emissions of CO₂ and H₂S are caused by the Krafla Eruptions (1975-1984) and how much can be attributed to the geothermal power station.

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 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	10
ORÐSKÝRINGAR	12
1 INNGANGUR	13
1.1 Bakgrunnur verkefnisins	13
1.2 Gufustöðin	13
2 VISTFERILSGREINING FYRIR GUFUSTÖÐINA Í BJARNARFLAGI	17
2.1 Markmið og umfang	17
2.2 Aðgerðareining og líftími	17
2.3 Kerfismörk	20
2.4 Umhverfisáhrifaflokkar	21
2.5 Aðferðir við gagnaöflun og gæði og uppruni gagna	21
2.6 Útilokunarviðmið	22
2.7 Skipting umhverfisáhrifa	22
3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA	24
3.1 Framleiðsla og framkvæmdir	24
3.2 Rekstur og viðhald - orkuvinnsla í Gufustöðinni	31
3.3 Niðurrif stöðvar, förgun og endurvinnsla	35
3.4 Flutningur raforku	36
4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR	37
4.1 Umhverfisáhrif á vistferli Gufustöðvarinnar	37
4.2 Kolefnisspor orkuvinnslu	38
5 UMRÆÐUR	43
5.1 Vistferilsgreiningar jarðvarmavirkjana	43
5.2 Bein losun gróðurhúsalofttegunda	44
5.3 Elsta starfandi jarðvarmavirkjun landsins	47
6 LOKAORÐ	48
7 HEIMILDASKRÁ	49

MYNDASKRÁ

MYND 1	Gufustöðin er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [11].	14
MYND 2	Lónið sem hefur myndast fyrir neðan Gufustöðina var vinsæll baðstaður en svæðið hefur nú verið afmarkað. Mynd: Landsvirkjun.	15
MYND 3	Helstu viðburðir yfir líftíma Gufustöðvarinnar í Bjarnarflagi og skilgreindur líftími stöðvarinnar í þessari greiningu, þ.e. árabilið 2000 - 2039.	19
MYND 4	Einfölduð mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar.	20
MYND 5	Aðkoma að Gufustöðinni er frá Þjóðvegi 1. Vinstra megin við Þjóðveg 1 er Gufustöðin og á myndinni sjást Bjarnarflagslón og skiljustöðvar 1 og 2.	25
MYND 6	Yfirlitsmynd af svæðinu í kringum Gufustöðina í Bjarnarflagi. Vinstra megin við Þjóðveg 1 má sjá þrjár af borholum Gufustöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun.	26
MYND 7	Stöðvarhús Gufustöðvarinnar við upphaf reksturs 1969. Mynd: Landsvirkjun.	28
MYND 8	Menn að störfum við uppsetningu á vélbúnaði Gufustöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun.	30
MYND 9	Kröflueldar árið 1980. Mynd: Landsvirkjun.	34
MYND 10	Menn að störfum við uppsetningu á vélbúnaði Gufustöðvarinnar árið 1969 sem var síðar endurnýjaður árið 2018. Mynd: Landsvirkjun.	35
MYND 11	Umhverfisáhrif vegna vinnslu 1 kWst orku í Gufustöðinni. Á myndinni má sjá hlutdeild mismunandi þátta vistferils aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa.	38
MYND 12	Kolefnisspor Gufustöðvarinnar er 73 g CO ₂ -ígildi fyrir hverja unna kWst.	39
MYND 13	Kolefnisspor Gufustöðvarinnar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar.	39
MYND 14	Heildarkolefnisspor jarðvarmavinnslunnar í Gufustöðinni er 73 g CO ₂ -ígildi fyrir hverja unna kWst. Þar af er kolefnisspor raforkuvinnslunnar 60 g CO ₂ -íg/kWst og hitaveitunnar 13 g CO ₂ -íg/kWst.	40
MYND 15	Gróðurhúsaáhrif einstakra efnis- og verkþátta í kolefnisspori framleiðslu- og framkvæmdafasa Gufustöðvarinnar.	41
MYND 16	Gróðurhúsaáhrif einstakra framleiðslu- og framkvæmdaþátta innan ólíkra hluta Gufustöðvarinnar.	42
MYND 17	Meðallosun CO ₂ og H ₂ S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2022.	45
MYND 18	Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum og hitaveitum. Gufustöðin er hér auðkennd sem Bjarnarflag.	45
MYND 19	Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagni.	46
MYND 20	Flæðirit af samsetningu Gufustöðvarinnar og helstu þáttum orkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun.	56
MYND 21	Niðurstöður greiningar samkvæmt aðferðafræði CML2001.	57

TÖFLUSKRÁ

TAFLA 1	Helstu kennistærðir Gufustöðvarinnar.	14
TAFLA 2	Aflstöðvar á Íslandi sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu eða til hitaveitu einnig [12].	16
TAFLA 3	Hlutar vistferils orkuvinnslu í Gufustöðinni sem liggja innan kerfismarkna	21

TAFLA 4	Umhverfisáhrifaflokkar í samræmi við staðal EN 15804+A2. _____	21
TAFLA 5	Yfirlit yfir þær borholur sem hafa verið boraðar í Gufustöðinni. Gráskyggðir reitir eru holur sem ekki er verið að nýta. _____	25
TAFLA 6	Hráefna- og eldsneytismagn á hverja borholu Gufustöðvarinnar ásamt úrgangsmýndun. Heildarmagn efna er áætlað fyrir 16 boraðar og fóðraðar holur í Gufustöðinni sem boraðar voru á árunum 1963 – 2008. _____	27
TAFLA 7	Flatarmál og rúmmál stöðvarhúss og skiljuhúsa (gögn frá Landsvirkjun). _____	28
TAFLA 8	Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og vatnsveitur Gufustöðvarinnar. _____	28
TAFLA 9	Samantekt byggingarefna fyrir rakaskiljur Gufustöðvarinnar. _____	29
TAFLA 10	Samantekt byggingarefna fyrir upprunalega vélasamstæðu Gufustöðvarinnar. _____	29
TAFLA 11	Samantekt byggingarefna fyrir stöðvarveitur (að undanskildum stöðvarnotkunarspennum). _____	30
TAFLA 12	Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags. _____	31
TAFLA 13	Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags. _____	31
TAFLA 14	Eigin rafmagnsnotkun og töp vegna rekstrar í Gufustöðinni á árunum 2020 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. _____	32
TAFLA 15	Eldsneytisnotkun vegna rekstrar í Gufustöðinni á árunum 2008 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. _____	32
TAFLA 16	Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá Gufustöðinni eftir skiptingu á milli Gufustöðvarinnar og Kröflustöðvar á árunum 2019 – 2023 eftir uppsettu afli. _____	33
TAFLA 17	Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma í Gufustöðinni. _____	33
TAFLA 18	Samantekt byggingarefna fyrir nýju vélasamstæðu Gufustöðvarinnar. _____	34
TAFLA 19	Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags. _____	35
TAFLA 20	Samantekt hráefna í ofanjarðarmannvirkjum sem farið er með til urðunar eða endurvinnslu að loknu niðurrifi. Allar tölur eru gefnar í tonnum. _____	36
TAFLA 21	Niðurstöður vistferilsgreininga (LCA) fyrir jarðvarmavirkjanir. _____	44

ORÐSKÝRINGAR

Aðgerðareining	(<i>e. Functional unit</i>). Viðmiðunareining vistferilsgreiningar. Notuð til samanburðar á niðurstöðum vistferilsgreininga fyrir sambærilega vöru eða þjónustu.
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 koldíoxíðs (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>).
Umhverfisáhrifaflokkur	(<i>e. Environmental impact category</i>). Flokkur sem vísar til tegundar umhverfisáhrifa. Dæmi um umhverfisáhrifaflokk eru gróðurhúsaáhrif, eyðing auðlinda, svifryk, visteiturhrif og næringarefnaauðgun.
Umhverfisýfirlýsing (EPD)	(<i>e. Environmental Product Declaration, EPD</i>). Yfirlýsing eða skjal um umhverfisáhrif vöru. Við gerð umhverfisýfirlýsinga 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.
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 orkuvinnslu í jarðvarmastöð Landsvirkjunar í Mývatnssveit, Gufustöðinni í Bjarnarflagi, sem er elsta jarðvarmastöð landsins og á meðal þeirra fyrstu í heimi. Nú þegar hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðarhálsstöð, Fljótisdalsstöð, Blöndustöð - sem allt eru vatnsaflsstöðvar - Búrfellsstöð II, sem er aflaukning við Búrfellsstöð, jarðvarmastöðina Þeistareykjastöð, og tvær rannsóknarvindmyllur á Hafinu. Verkefnið er liður í að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu fyrir allar tegundir orkuauðlinda Landsvirkjunar [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Matið er framkvæmt með aðferðarfræði vistferilsgreiningar (e. *Life Cycle Assessment, LCA*) í samræmi við alþjóðlegu staðlana ISO 14040 [8], ISO 14044 [9] og ISO 14067 [10].

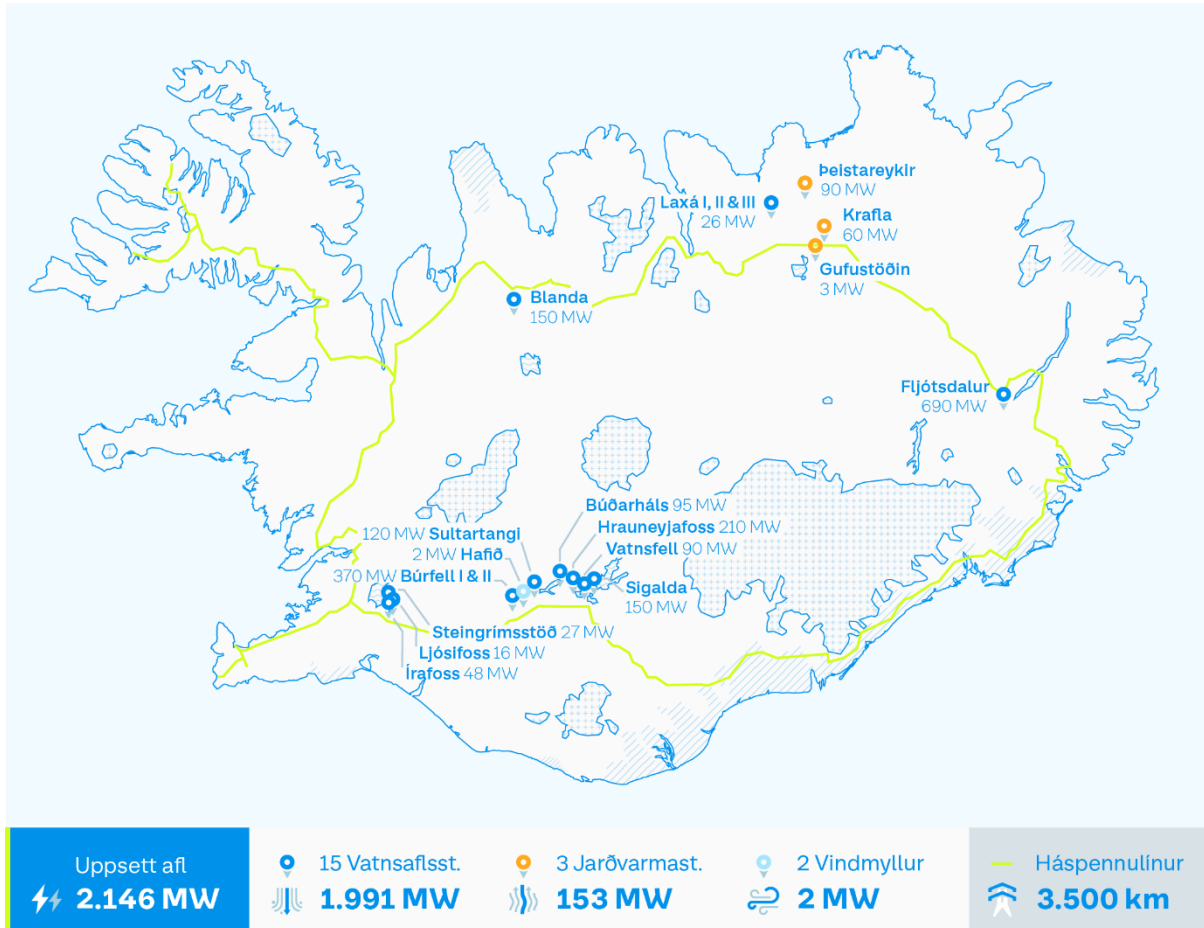
Vistferilsgreining er aðferðarfræði sem er notuð til þess að meta staðbundin og hnattræn umhverfisáhrif vöru, framleiðsluferils eða þjónustu yfir allan vistferilinn. Greiningin nær því yfir alla virðiskeðju vörunnar, þ.e. allt frá öflun hráefna og framleiðsluferli hennar, auk notkunar og meðhöndlunar 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 í formi tölulegra upplýsinga 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 Gufustöðin

Gufustöðin í Bjarnarflagi er ein af þremur aflstöðvum Landsvirkjunar á Norðausturlandi (Mývatnssvæði) sem nýtir jarðvarma til orkuvinnslu, en hinar tvær eru Þeistareykjastöð og Kröflustöð, sjá mynd 1. Gufustöðin í Bjarnarflagi er elsta jarðvarmavirkjun á Íslandi, gangsett árið 1969. Forsagan er sú að veturinn 1966-1967 voru virkjunarmöguleikar jarðgufu til orkuvinnslu við Námafjall kannaðir.

Í framhaldi af því hófst tæknilegur undirbúningur byggingar stöðvarinnar í byrjun júní 1968 og hófst byggingarframkvæmdir síðar sama sumar. Uppsett afl Gufustöðvarinnar var áður 2,8 MW, en var hækkað í 5 MW eftir miklar endurbætur á vélbúnaði árið 2019 og orkuvinnslugeta því meiri, sjá töflu 1. Raunkuvinnsla hefur þó yfirleitt verið undir orkuvinnslugetu eins og mynd 3 í kafla 2.2 sýnir.

Stöðin er gufuaf- og hitaveitustöð (e. Combined Heat and Power, CHP), þar sem hún vinnur bæði rafmagn og heitt vatn úr jarðhitavökvanum. Hinar jarðvarmastöðvar Landsvirkjunar á Norðausturlandi eru ekki nýttar til hitaveitu.



MYND 1 Gufustöðin er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [11].

TAFLA 1 Helstu kennistærðir Gufustöðvarinnar.

GUFUSTÖÐIN	
Uppsett afl 1969-2018	2,8 MW
Uppsett afl 2019-	5 MW
Gufuhverfill 1969-2018	2,8 MW
Gufuhverfill 2019-	5 MW
Orkuvinnslugeta 1969-2018	25 GWst á ári
Orkuvinnslugeta 2019-	44 GWst á ári
Gangsetning á upprunalegum vélbúnaði	1968
Gangsetning á nýjum vélbúnaði	2019

Borholur Gufustöðvarinnar eru að meðaltali rúmlega 1,3 km djúpar (sjá kafla 3.1.2) og er hitastig jarðhitageymisins talið vera á bilinu 270 – 290°C. Jarðhitavökvinn sem kemur upp úr holunum er blanda

af sjóðandi heitu vatni og gufu, gasi og uppleystum jarðefnum. Gufan er skilin frá vatninu í skiljustöð, sjá mynd 20 í Viðauka B, og þar eftir er hún nýtt til orkuvinnslu. Gas sem kemur upp með gufunni losnar út í andrúmsloft við orkuvinnsluna. Skiljuvatn frá Bjarnarflagi hefur frá upphafi reksturs stöðvarinnar verið losað á yfirborð sem hefur haft í för með sér myndun á stóru lóni fyrir neðan Gufustöðina. Lónið varð vinsæll baðstaður en þar sem vatnið getur orðið heitt og hættulegt á vissum stöðum þar sem innrennslið er í lónið, var svæðið afmarkað, sjá mynd 2. Skiljuvatn og gufa er einnig að hluta til notað til upphitar hitaveituvatns í varmaskiptastöð fyrir Hitaveitu Reykjahlíðar og skiljuvatninu er veitt í Jarðböðin við Mývatn. Rekstur hitaveitunnar er í forgangi þannig að á köldum vetrardögum er skerpt á gufu til hitaveitunnar.



MYND 2 Lónið sem hefur myndast fyrir neðan Gufustöðina var vinsæll baðstaður en svæðið hefur nú verið afmarkað. Mynd: Landsvirkjun.

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur þann kost umfram aðra endurnýjanlega orkugjafa að vinnslan er stöðug og ekki háð dægursveiflum, árstíma eða veðrum. Í dag er hlutur jarðvarma í frumorkunotkun á Íslandi 60,9%, og er þá bein notkun jarðvarma, s.s. 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 90% húsa á Íslandi kynt með jarðvarma og nær allt rafmagn á Íslandi kemur frá endurnýjanlegum orkugjöfum. Sé litið til raforkuvinnslunnar eingöngu, þá er hlutur vatnsafls 73% og jarðvarma 27%. Í dag er uppsett heildarafl jarðvarmavirkjana á Íslandi 753 MW_e [12], sjá töflu 2.

TAFLA 2 Aflstöðvar á Íslandi sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu eða til hitaveitu einnig [12]. DF (tveggja þrepa, e. double flash), SF (eins þrepa, e. single flash), B (tvívökva, e. binary) og DS (þurrögufu, e. dry steam).

AFLSTÖÐ	GANGSETNING/UPPBYGGING	UPPSETT AFL	TÆKNI
Gufustöðin	1969	5 MW_e (+ MW_{th} í varmaafli)	SF
Svartsengi	1976-2007	76,4 MW _e (+ 200MW _{th} í varmaafli)	SF/B/DS
Kröflustöð	1978-1997	60 MW _e	DF
Nesjavallarvirkjun	1998-2005	120 MW _e (+ 300 MW _{th} í varmaafli)	SF
Hellisheiðarvirkjun	2006-2011	303,4 MW _e (+133 MW _{th} í varmaafli)	SF/DF
Reykjanesvirkjun	2006	130 MW _e	SF/DF
Þeistareykjastöð	2017-2018	90 MW _e	SF
Flúðavirkjun	2018	0,6 MW _e	B

2 VISTFERILSGREINING FYRIR GUFUSTÖÐINA Í BJARNARFLAGI

2.1 Markmið og umfang

Markmið vistferilsgreiningarinnar er að meta umhverfisáhrif orkuvinnslu Gufustöðvarinnar í Bjarnarflagi. Vistferilsgreiningin nær til öflunar hráefna og vinnslu auðlinda, framleiðslu 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 [8, 9] og ISO 14067 [10] sem byggir á fyrrgreindum stöðlum. Einnig er stuðst við leiðbeiningar um framkvæmd vistferilsgreininga á orkuvinnslu [13] fyrir gerð umhverfisyfirlýsinga (e. Environmental Product Declaration), til að tryggja að niðurstöðurnar séu samanburðarhæfar við sambærilegar greiningar. Þá eru Evrópustaðlarnir EN 15978 og EN 15804+A2 um sjálfbærni í byggingariðnaði einnig hafðir til hliðsjónar [14, 15].

2.2 Aðgerðareining og líftími

Aðgerðareining vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem 1 kWst samþætt orka sem unnin er í Gufustöðinni. Umhverfisáhrif og notkun auðlinda við vinnslu orkunnar eru reiknuð fyrir hverja unna kWst í stöðinni. Einnig er metið kolefnisspor raforku sem unnin er í stöðinni (aðgerðareining 1 kWst_{el}) sem og kolefnisspor hitaveitunnar sem hefur aðgerðareininguna 1 kWst af varma sem fer frá varmaskiptistöð Hitaveitunnar í Reykjahlíð.

Ekki er samhljómur milli leiðbeininga um hver líftími skuli vera í vistferilsgreiningum fyrir jarðvarmavirkjanir. Samkvæmt leiðbeiningum um framkvæmd vistferilsgreininga á orkuvinnslu [13] skal miða við 40 ára líftíma, en skv. evrópsku rannsóknarverkefni sem ætlað var að skilgreina hvernig meta skyldi umhverfisáhrif jarðvarmavinnslu [16], var lagt til að skilgreina líftímann sem 30 ár. Gufustöðin hefur verið í rekstri frá 1969 og verður að öllum líkindum í áframhaldandi rekstri með nýju vélasamstæðunni að minnsta kosti fram til ársins 2040. Í þessari greiningu er því reiknað með 40 ára

líftíma. Er það jafnframt í samræmi við nógildandi og samræmdar leiðbeiningar fyrir gerð umhverfisyfirlýsinga. Líftími aflstöðvarinnar er skilgreindur frá árinu 2000 til 2039, sjá mynd 3.

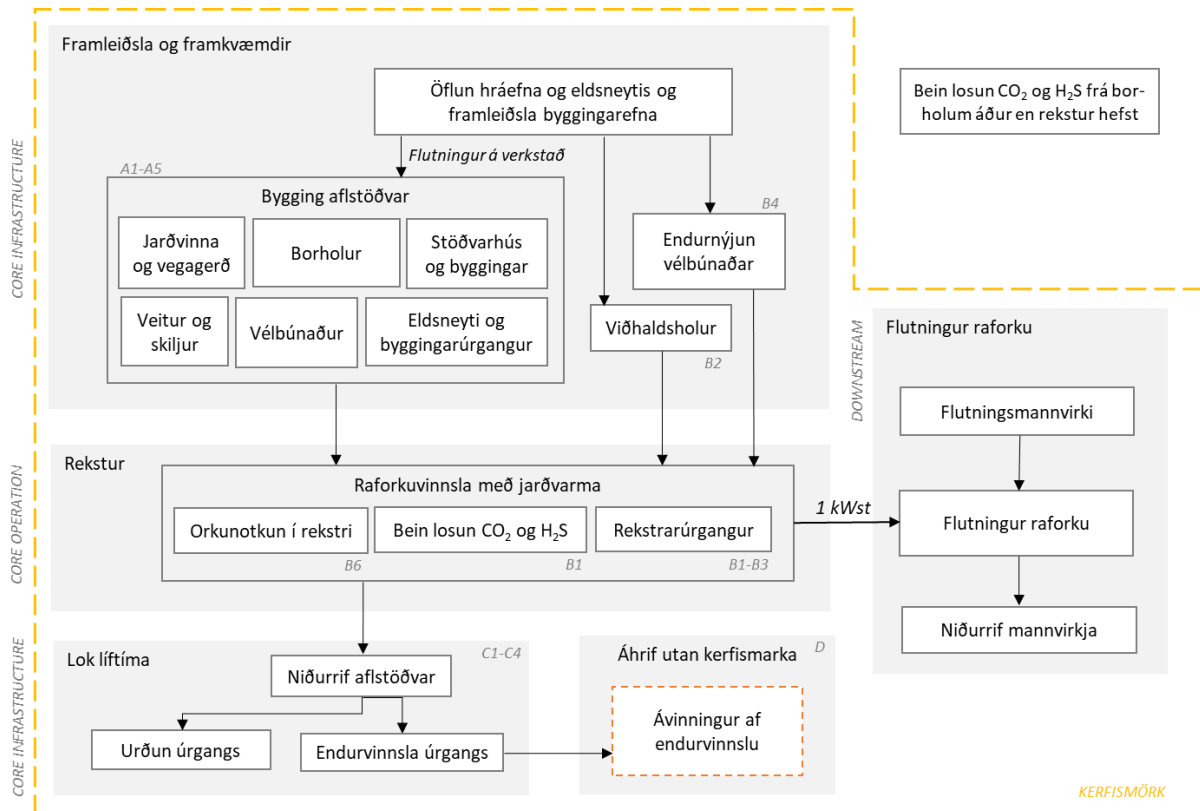
Heildarorkuvinnslan yfir líftímann byggir annars vegar á raunverulegri vinnslu í yfir tvo áratugi og hins vegar á þeirri forsendu að raforkuvinnsla verði í samræmi við uppsett afl stöðvarinnar um 15 ár fram yfir tímann. Um er að ræða raunverulega heildarraforkuvinnslu á árunum 2000-2022 sem var að meðaltali 15 GWh/ári, en árleg raforkuvinnsla á þessu tímabili var almennt lægri en uppsett orkuvinnslugeta aflstöðvarinnar, sjá töflu 1 og orkuvinnslu sem sjá má á mynd 4. Raforkuvinnsla á tímabilinu 2023-2039 er samkvæmt uppsettu afli stöðvarinnar, eða um 44 GWh/ári sem er nálægt orkuvinnslugetu Gufustöðvarinnar, sjá töflu 1 og mynd 4. Ekki er tekin til greina rýrnun á vinnslugetu þar sem tekið er til greina viðhald á vinnslugetu með nýjum borholum, og er slík nálgun í samræmi við bæði leiðbeiningar og staðal [10] [17]. Út frá þessum upplýsingum er heildarorkuvinnsla á þessu 40 ára tímabili 1,1 TWst.



MYND 3 Helstu viðburðir yfir líftíma Gufustöðvarinnar í Bjarnarflagi og skilgreindur líftími stöðvarinnar í þessari greiningu, þ.e. árabilið 2000 - 2039.

2.3 Kerfismörk

Kerfismörk vistferilsgreiningarinnar fela í sér vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og búnaðar, flutninga hráefna, byggingarefna, búnaðar og úrgangs, byggingu Gufustöðvarinnar 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 4. Í töflu 3 má sjá hvaða hlutar vistferilsins falla innan kerfismarka greiningarinnar og flokkun samkvæmt EN 15804+A2.



MYND 4 Einfölduð mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar. Greiningin felur í sér vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og búnaðar, flutninga, byggingu Gufustöðvarinnar, 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 umhverfisyfirlýsinga [13], sem er í samræmi við fyrstu drög að samræmdum leiðbeiningum fyrir vistferilsgreiningar jarðhitaverkefna [16]. Bókstafir vísa í samsvarandi fasa vistferils skv. EN 15804+A2 [15].

TAFLA 3 Hlutar vistferils orkuvinnslu í Gufustöðinni sem liggja innan kerfismarka og flokkun samkvæmt EN 15804+A2.

Fasar í vistferli	Framleiðslufasi			Framkvæmdafasi		Rekstrarfasi							Lok líftíma				Áhrif utan kerfismarka
	Öflun hráefna	Flutningur til verksmiðju	Framleiðsla vöru	Flutningur á verkstað	Byggingarframkvæmd	Rekstur	Viðhald	Víðgerðir	Endurnýjun	Endurbætur	Orkunotkun í rekstri	Vatnsnotkun í rekstri	Niðurrif	Flutningur til förgunar	Meðhöndlun úrgangs	Förgun	Endurnotkun, endurheimt orku, endurvinnsla
Flokkur skv. EN 15804+A2	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	x	x

2.4 Umhverfisáhrifaflokkar

Við vistferilsgreininguna er notast við aðferðir EN 15804+A2 staðalins við mat á umhverfisáhrifum. Þetta er í samræmi við núverandi kröfur fyrir birtingu niðurstaðna fyrir orkuvinnslu í umhverfisyfirlýsingum og í samræmi við nógildandi staðal EN 15804+A2. Umhverfisáhrif fyrir 13 umhverfisáhrifaflokka eru metin, sjá töflu 4.

TAFLA 4 Umhverfisáhrifaflokkar í samræmi við staðal EN 15804+A2.

UMHVERFISÁHRIFAFLOKKUR	EINING
Gróðurhúsaáhrif - heild	GHÁ [kg CO ₂ íg.]
Gróðurhúsaáhrif - jarðefnaeldsneyti	GHÁ-J [kg CO ₂ íg.]
Gróðurhúsaáhrif - lífrænt	GHÁ-L [kg CO ₂ íg.]
Gróðurhúsaáhrif – landnotkun og breyting á landnotkun	GHÁ-luluc [kg CO ₂ íg.]
Eyðing ósonlagsins	EÓ [kg CFC 11 íg.]
Súrnun lands og sjávar	SÚ [mól H ⁺ íg.]
Næringarefnaauðgun í ferskvatni	NEA-F [kg PO ₄ íg.]
Næringarefnaauðgun í sjó	NEA-S [kg N íg.]
Næringarefnaauðgun - jarðnesk	NEA-J [mól N íg.]
Myndun ósons við yfirborð jarðar	MÓY [kg NMVOC íg.]
Eyðing auðlinda	EA [kg Sb íg.]
Eyðing jarðefnaeldsneytis	EJ [MJ, nettó varmagildi]
Vatnsskortur	VN [m ³ heims íg. svipt]

Þessum flokkum er nánar lýst í viðauka A. Þessir umhverfisáhrifaflokkar eru í samræmi við samþykktar breytingartillögur á staðli EN 15804+A2, sem tóku gildi árið 2020. Nú eru gerðar kröfur um að reikna einnig vatnsnotkun auk þess sem að krafist er sundurliðunar á niðurstöðum í flokkum gróðurhúsaáhrifa og næringarefnaauðgunar.

2.5 Aðferðir við gagnaöflun og gæði og uppruni gagna

Gæði gagnanna sem notuð voru í greiningunni voru metin samkvæmt töflum E.1 og E.2 í Viðauka E í EN15804+A2. Gufustöðin er elsta jarðvarmastöð á Íslandi og því vandkvæðum bundið að nálgast upplýsingar frá undirbúnings- og framkvæmdatíma stöðvarinnar. Í sumum tilfellum var því stuðst við

gögn úr vistferilsgreiningu fyrir Þeistareykjastöð [7], annarri jarðvarmastöð Landsvirkjunar á Kröflusvæðinu og nýjstu jarðvarmavirkjun sem reist hefur verið á Íslandi, sem byggð var á mjög góðum gögnum.

Auk þess voru upplýsingar um rekstur og viðhald Gufustöðvarinnar fengnar frá Landsvirkjun. Losun vegna vinnslu jarðvarma var byggð á mælingum [18] og áætlunum Landsvirkjunar, sjá kafla 3.2.2. Einnig var stuðst við útboðsgögn, samantekin gögn frá Landsvirkjun og upplýsingar frá framleiðendum búnaðar.

Gögnin sem greint er hér frá þykja endurspegla vel staðsetningu, tækni og tímabil og eru metin mjög áreiðanleg, þar sem þau eru fengin beint frá viðkomandi aðilum eða eiga við um sambærilega jarðvarmastöð.

Við gerð vistferilsgreiningarinnar var notaður hugbúnaðurinn Sphera LCA for Experts (LCA FE). Vegna framleiðslu hráefna, staðbundinnar orkuvinnslu fyrir framleiðslu byggingarefna, flutninga, ýmissa vinnsluferla o.fl. var stuðst við bakgrunnsgögn úr alþjóðlegum gagnabanka frá Sphera LCA FE sem gefur út einn stærsta og áreiðanlegasta vistferilsgagnagrunninn á markaðnum í dag [19]. Gagnagrunnarnir innihalda um 18.500 hágæða gagnasett og byggja að mestu leyti á gögnum beint frá iðnaði og endurspegla þar með vel viðeigandi tækni. MLC (Managed LCA Content) gagnagrunnurinn er uppfærður árlega en allir almennir bakgrunnsferlar sem notast var við gilda til ársins 2024 eða 2025 og endurspegla þar með vel tímabil greiningar.

Við mat á umhverfisáhrifum vegna framleiðslu byggingarefna og eldsneytis fyrir Gufustöðina var stuðst við framleiðsluferla sem samsvara viðkomandi landi framleiðslu til að tryggja að umhverfisáhrifin taki mið af landfræðilegri staðsetningu. Í einhverjum tilfellum voru aðeins evrópskir eða hnattrænir ferlar tiltækir, en landfræðileg samsvörun engu að síður metin góð.

2.6 Útilokunarviðmið

Ekki var nauðsynlegt að styðjast við útilokunarviðmið (e. Cut off criteria) í greiningunni þar sem öll mikilvæg hráefni og orkunotkun voru tekin með í útreikningana. Þar af leiðandi ná útreikningarnir yfir að minnsta kosti 99% af umhverfisáhrifum Gufustöðvarinnar og engin gögn eða ferli með teljandi umhverfisáhrif voru útilokuð.

2.7 Skipting umhverfisáhrifa

Jarðhitinn í Bjarnarflagi er ekki aðeins nýttur til rafmagnsframleiðslu, heldur eru mörg dæmi um fjölnýtingu hans í nágrenninu. Jarðböðin við Mývatn og Hitaveitan í Reykjahlíð nýta helst jarðvarmann. Af þeim sökum er mögulegt að skipta umhverfisáhrifum vegna nýtingar jarðhita í Bjarnarflagi á milli þessara notenda.

Slík skipting er framkvæmd samkvæmt aðferðafræði sem þróuð var í tengslum við GeoEnvi verkefnið. Aðferðafræðin kveður á um að umhverfisáhrifum skuli vera skipt (e. allocation) í samræmi við aðgengilega orku (e. exergy) sem nýtist annarsvegar Gufustöðinni og hinsvegar hitaveitunni. Hins vegar setja lokaniðurstöður greiningarinnar fram heildarumhverfisáhrif nýtingarinnar á jarðvarmanum í

Bjarnarflagi. Tilgangurinn skiptingarinnar er að skýra betur hve stóran hluta umhverfisáhrifanna má rekja til Gufustöðvarinnar annars vegar og hitaveitunnar hins vegar, sé slík aðgreining tekin til greina.

Reiknaðir eru sérstakir stuðlar (e. allocation factors) til þess að eyrnamerkja umhverfisáhrif niður á rafmagn og hitaveitu, $\alpha_{rafmagn}$ og $\alpha_{hitaveita}$, eru þeir fengnir með eftirfarandi jöfnum:

$$\alpha_{rafmagn} = \frac{E_{rafmagn}}{E_{rafmagn} + \theta \cdot Q_{hitaveita}}$$

$$\alpha_{hitaveita} = \frac{\theta \cdot Q_{hitaveita}}{E_{rafmagn} + \theta \cdot Q_{hitaveita}}$$

þar sem $E_{rafmagn}$ er afl Gufustöðvarinnar, θ er Carnot nýtni-stuðull sem tekur til greina nýtingu á varma flæðisins til hitaveitunnar, og $Q_{hitaveita}$ er varmi sem fer í hitaveituna.

Carnot nýtni stuðullinn er reiknaður út með eftirfarandi jöfnu:

$$\theta = \left(1 - \frac{T_0}{T_Q}\right)$$

þar sem T_0 er hitastig við staðalaðstæður eða 20°C. T_Q er óreiðu-meðaltalshitastig (e. entropy-average temperature) varmans sem flæðir inn í varmaskipti hitaveitunnar og er reiknað út á eftirfarandi máta:

$$T_Q = \frac{T_H - T_T}{\log(T_H/T_T)}$$

T_H er hitastig vatnsins þegar það fer inná hitaveitukerfi Mývatnssveitar, og T_T er hitastig vatnsins þegar það fer út úr kerfinu. Gert er ráð fyrir því að T_H er 80°C og T_T er 50°C.

Út frá flæðiriti fyrir Gufustöðina sem sjá má á mynd 20 í Viðauka B og ofangreindum jöfnum er stuðull umhverfisáhrifa sem tilheyrir rafmagni 0,826, og stuðull umhverfisáhrifa sem tilheyrir hitaveitu er 0,174. Þannig tilheyra 82,6% umhverfisáhrifa jarðvarmans Gufustöðinni í Bjarnarflagi og 17,4% tilheyra Hitaveitu Reykjahlíðar.

3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA

3.1 Framleiðsla og framkvæmdir

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

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

Ofangreindir fasar mynda innviði fyrir kjarnastarfsemi Gufustöðvarinnar, þ.e. orkuvinnslu, sbr. mynd 4 (e. Core infrastructure). Allir viðeigandi ferlar, bæði bakgrunns- og forgrunnsferlar, voru teknir með í líkani.

3.1.1 Jarðvinna og vegagerð

3.1.1.1 Jarðvegsframkvæmdir

Jarðvegsframkvæmdir fólu í sér gerð slóða að stöðvarhúsi og skiljuhúsum og gröft og fyllingar undir húsin. Ekki var hægt að nálgast gögn vegna jarðvegsframkvæmda fyrir Gufustöðina. Þar af leiðandi var notast við dísilolíunotkun sem tekin var saman fyrir slíka vinnu í Þeistareykjastöð [7], og magnið skalað í samræmi við uppsett afl stöðvarinnar. Sjá olíunotkun og úrgang frá jarðvegsframkvæmdum í kafla 3.1.6.

3.1.1.2 Slóðagerð

Aðkoma að Gufustöðinni er frá Þjóðvegi 1, sjá mynd 5. Á svæðinu er búið að útbúa slóða að borholum virkjunarinnar sem eru samtals um 693 m að lengd. Eldsneytisnotkun vegna gerðar malarvegarins og slóða var byggð á áætlun EFLU verkfræðistofu fyrir vistferilsgreiningu sem EFLA gerði fyrir flutningskerfi Landsnets [20].



MYND 5 Aðkoma að Gufustöðinni er frá Þjóðvegi 1. Vinstra megin við Þjóðveg 1 er Gufustöðin og á myndinni sjást Bjarnarflagslón og skiljustöðvar 1 og 2.

3.1.2 Borholur

3.1.2.1 Boranir og fóðringar

Alls hafa 16 borholur verið boraðar og fóðraðar í Bjarnarflagi. Meðallengd þeirra er 1.340 m og eru borholutoppar úr stáli hluti af frágangi hola. 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. Borholur sem boraðar voru fyrir tilsettan líftíma, þ.e. fyrir árið 2000, alls 12 talsins, eru teknar með í framleiðslu og framkvæmdafasa, en borholur sem boraðar voru eftir árið 2000, alls 4 talsins, eru skilgreindar sem viðhaldsborholur og eru því teknar með í rekstur og viðhald, sjá kafla 3.2.3. Í dag eru 3 borholur nýttar til orkuvinnslu. Sjá má yfirlit yfir núverandi holur Gufustöðvarinnar í töflu 5.

TAFLA 5 Yfirlit yfir þær borholur sem hafa verið boraðar í Gufustöðinni. Gráskyggðir reitir eru holur sem ekki er verið að nýta.

BORHOLA NR.	BORUÐ	DÝPI (M)	ATHS.
B-01	1963	342	Ekki í notkun
B-02	1963	492	Ekki í notkun
B-03	1966	683	Ekki í notkun
B-04	1968	1138	Ekki í notkun
B-05	1968	638	Ekki í notkun
B-06	1969	1193	Ekki í notkun
B-07	1969	1206	Ekki í notkun

BORHOLA NR.	BORUÐ	DÝPI (M)	ATHS.
B-08	1969	1312	Ekki í notkun
B-09	1970	1312	Í notkun
B-10	1975	1809	Ekki í notkun
B-11	1978	1923	Í notkun
B-12	1979	1996	Í notkun
B-13	2006	2155	Ekki í notkun
BJ-14	2007	2506	Ekki í notkun (lokuð)
BJ-15	2007	2690	Blæðing
BJ-16	2008	75	Ekki í notkun



MYND 6 Yfirlitsmynd af svæðinu í kringum Gufustöðina í Bjarnarflagi. Vinstra megin við Þjóðveg 1 má sjá þrjár af borholum Gufustöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun.

Þörf er á töluverðu magni af eldsneyti við borun og fóðringu á hverri holu og til fóðringar er notað sement, leir og stál. Magn eldsneytis og hráefna til borunar og fóðringar á borholum, sjá töflu 6, byggir á upplýsingum sem teknar voru saman fyrir vistferilsgreiningu Þeistareykjastöðvar [7]. Samkvæmt Landsvirkjun er efnisnotkun per lengdarmeter sú sama fyrir borholurnar í Gufustöðinni. Hins vegar eru borholurnar á Þeistareykjum almennt dýpri en borholur Gufustöðvarinnar.

TAFLA 6 Hráfna- og eldsneytismagn á hverja borholu Gufustöðvarinnar ásamt úrgangsmýndun. Heildarmagn efna er áætlað fyrir 16 boraðar og fóðraðar holur í Gufustöðinni sem boraðar voru á árunum 1963 – 2008.

HRÁEFNI	MAGN	MEÐALTAL PER HOLU	ÁÆTLAÐ HEILDARMAGN
Bentonít	tonn	51	823
Kísill (SiO ₂)	tonn	44	701
Sement	tonn	133	2.124
Barít	tonn	6	99
Perlít	tonn	2	35
<i>Borvökvi (pólýmerar), þéttiefni og íblöndunarefni*</i>	<i>tonn</i>	<i>2</i>	<i>39</i>
Stálfóðring (API 5CT staðall)	tonn	95	1.512
Ál (borholuhús)	tonn	0,6	9
Trefjaplast (borholuhús)	tonn	2	28
OLÍUNOTKUN	MAGN		
Disilólía	þús. lítrar	98	1.566
Smurefni	þús. lítrar	1	13
ÚRGANGUR	MAGN		
Blandaður úrgangur	tonn	1	21
Timbur (litað og ólitað)	tonn	2	33
Spilliefni	tonn	2	27
Málmar	tonn	2	28

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

3.1.2.2 Losun gass frá rannsóknar- og framkvæmdatíma

Veturinn 1966-1967 voru virkjunarmöguleikar jarðgufu til orkuvinnslu við Námafjall kannaðir með tilraunaborunum. Mælingar á gaslosun frá Gufustöðinni hófust hins vegar ekki fyrr en árið 1977, og þar af leiðandi eru ekki til gögn fyrir losun gastegunda frá rannsóknar- og framkvæmdatíma. Þar sem erfitt er að leggja mat á losun vegna tilraunborana á sjöunda áratug seinustu aldar, fyrir skilgreindan líftíma í þessari greiningu, er hún höfð utan kerfismarka.

3.1.3 Mannvirki aflstöðvar

3.1.3.1 Stöðvarhús og skiljuhús

Gögn um byggingar Gufustöðvarinnar eru byggð á upplýsingum sem koma fram í skráningu mannvirkja í Bjarnarflagi og Kröflustöð [21]. Byggingar Gufustöðvarinnar samanstanda af stöðvarhúsbyggingu og tveimur skiljustöðvum. Stöðvarhúsið var byggt árið 1968 og er formfast kassalaga steinsteypt mannvirki. Við stöðvarhúsið stendur lítill skúr með trapisuklæðningu sem hýsir spennu. Skiljustöðvar eru einföld stálgrindarhús með mænisþaki og trapisuklæðningu og voru byggð árið 1984. Flatarmál og rúmmál bygginganna var áætlað út frá teikningum og myndum í mannvirkjaskráningunni, sjá töflu 7. Til þess að áætla efnismagn í byggingunum var notast við bakgrunnsgögn úr alþjóðlegum gagnabanka frá Sphera LCA FE.

TAFLA 7 Flatarmál og rúmmál stöðvarhúss og skiljuhúsa (gögn frá Landsvirkjun).

BYGGING	FLATARMÁL (M ²)	RÚMMÁL (M ³)
Stöðvarhús	100	600
Skiljustöð 1	109	630
Skiljustöð 2	84	490



MYND 7 Stöðvarhús Gufustöðvarinnar við upphaf reksturs 1969. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.3.2 Gufuveitur og vatnsveitur

Gufuveita (e. steam supply system) samanstendur af safnæðum frá borholum að safnæðastofnum, aðveituæðum, gufuháfum, auk gufuhljóðdeyfa. Upplýsingar vegna framkvæmda við gufu- og vatnsveitur voru fengnar úr útboðsgögnum vegna endurbóta í Bjarnarflagi árið 2003. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 8.

TAFLA 8 Samantekt byggingarefna fyrir gufu- og vatnsveitur Gufustöðvarinnar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Stál	96
Plast	19
Steypa	10
Ryðfrítt stál	9

3.1.3.3 Skiljur

Rakaskiljur (e. steam separators) voru framleiddar á Íslandi. Efnismagn í rakaskiljum var áætlað út frá teikningum. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 9.

TAFLA 9 Samantekt byggingarefna fyrir rakaskiljur Gufustöðvarinnar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Stál	62
Ál	1
Steinull	3

3.1.3.4 Kaldavatnsveitur

Ekki voru til gögn fyrir kaldavatnsveitu í Gufustöðinni. Þar af leiðandi var notast við efnismagn sem tekið var saman fyrir Þeistareykjastöð [7] og magnið skalað í samræmi við uppsett afl stöðva. Sjá má olíu- og úrgangsmagn vegna kaldavatnsveitna í kafla 3.1.6.

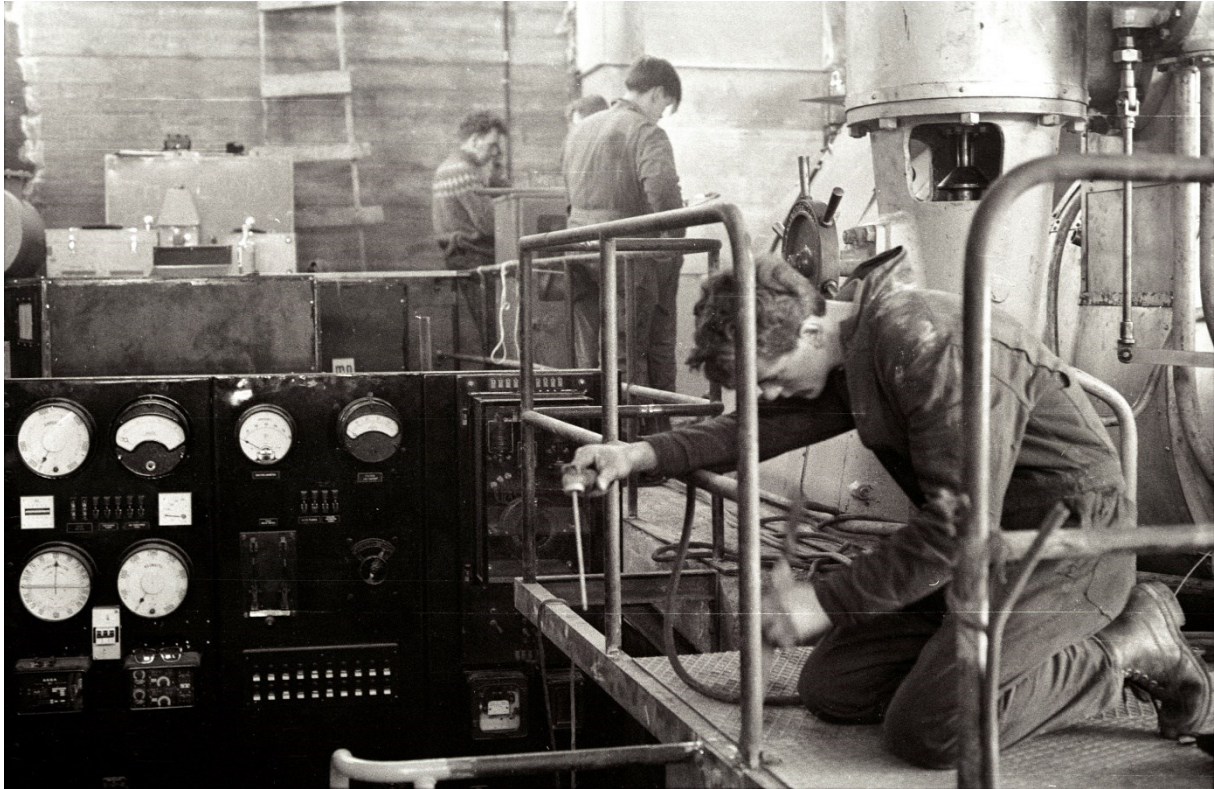
3.1.4 Vélbúnaður aflstöðvar

3.1.4.1 Vélasamstæða: hverfill og rafall

Vélasamstæða Gufustöðvarinnar var endurnýjuð 2019, en áður var starfræktur upprunalegur vélbúnaður frá árinu 1969 sem var smíðaður árið 1934 og keyptur notaður frá Bretlandi [22]. Í upphafi var afkastageta vélasamstæðunnar 2,8 MW, en hún hafði minnkað umtalsvert þegar vélbúnaðurinn var tekinn úr notkun, eða niður í u.þ.b. 800 kW. Gamla vélasamstæða Bjarnarflags samanstóð af jarðgufuhverfli og rafala ásamt tilheyrandi lögnum og varahlutum.

TAFLA 10 Samantekt byggingarefna fyrir upprunalega vélasamstæðu Gufustöðvarinnar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Byggingarstál	11
Ryðfrítt stál	9
Ál	0,2



MYND 8 Menn að störfum við uppsetningu á vélbúnaði Gufustöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.4.2 Spennar

Spenninum sem var áður í Gufustöðinni var fyrst skipt út í kringum 1995-2000. Þegar Gufustöðin var endurnýjuð árið 2019, var spenninum aftur skipt út. Hvorki var hægt að nálgast gögn fyrir upprunalega spenninn né þann sem skipt var út fyrir þann sem er nú í Gufustöðinni. Er því gert ráð fyrir að eldri spennarnir tveir hafi verið svipaðir og sá nýi. Nýi spennirinn, 6,3 MVA 11/11 kV, var fluttur frá Tamini í Ítalíu og heildarþyngd hans er um 16,5 tonn. Magn hráefna í spennum byggir á upplýsingaöflun vegna annarrar aflstöðvar Landsvirkjunar [2], 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 orku og jafnstraumskerfi. Í þessari greiningu voru aðeins teknir til greina háspennustrengir og stöðvarnotkunarspennar. Lengd háspennustrengsins var fengin út frá teikningum. Stuðst var við umhverfisyfirlýsingu frá sænskum spennaframleiðanda [23].

TAFLA 11 Samantekt byggingarefna fyrir stöðvarveitur (að undanskildum stöðvarnotkunarspennum).

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Stál	2
Ál	2
Plast	4
Kopar	2

3.1.5 Flutningur á verkstað

Gert er ráð fyrir að uppruni hráefna og flutningar þeirra hafi verið þeir sömu og fyrir þeistareykjastöð [7]. Öllu jafna er reiknað með landflutningum í framleiðslulandi, sjóflutningum frá framleiðslulandi til Húsavíkurhafnar og landflutningum þaðan í Bjarnarflag. Við landflutninga á Íslandi er gert ráð fyrir að ökutæki aki tóm til baka. Flutningsvegalengdir fyrir einstök byggingarefni eru teknar saman í töflu 12 og flutningsvegalengdir fyrir ýmsan vélbúnað eru teknar saman í töflu 13.

TAFLA 12 Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLendis (KM)	SJÓFLUTNINGUR (KM)	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI (KM)
Sement	Noregur/Danmörk	100	3.000	67
Kísill	Belgía	100	3.000	67
Bentonít	Bandaríkin	3.500	5.000	67
Stálfóðringar	Japan/Kína	500	21.500	67
Steypa (forsteypt)	Ísland	-	-	400
Steypujárn	Pólland	100	3.000	67
PP lagnir	Þýskaland	100	3.000	67
Stállagnir og byggingarstál	Þýskaland	100	3.000	67
Steinull	Ísland	-	-	220
Steypustyrktarstál	Hvíta Rússland	1.400	3.000	67
PEX plast	Svíþjóð	100	3.000	67

TAFLA 13 Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐANDI / FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLendis (KM)	SJÓFLUTNINGUR (KM)	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI (KM)
Spennar	Tamini, Ítalía	983	3.048	67
Vélbúnaður: gufuhverfill og rafall	British Thomson-Houston, Bretland	343	3.480	67
Stöðvarveitur og stöðvarnotkunarspennir	Þýskaland/Pólland	100	3.000	67

3.1.6 Bygging aflstöðvar

Undirbúningur fyrir Gufustöðina hófst árið 1968, en áður höfðu verið boraðar fimm borholur. Ekki lágu fyrir gögn yfir olíunotkun og úrgangsmýndun frá þessum tíma vegna ólíkra framkvæmdaþátta við Gufustöðina. Þar af leiðandi var notast við olíunotkun og úrgangsmýndun sem var tekin saman fyrir þeistareykjastöð [7], og magntölurnar skalaðar í samræmi við uppsett afl virkjananna. Þessi aðferð var einnig nýtt til þess að meta magn úrgangs frá framkvæmdum, sem og meðhöndlun hans.

3.2 Rekstur og viðhald - orkuvinnsla í Gufustöðinni

Í þessum kafla er fjallað um það sem kalla mætti kjarnastarfsemi aflstöðvarinnar (e. core operation), þ.e. orkuvinnsla 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, úrgangsmýndun 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 5 MW vinnslugetu á líftímanum og endurnýjun og endurvinnslu vélbúnaðar.

3.2.1 Orkunotkun og úrgangur frá rekstri

Magn raforku er áætlað út frá gögnum Landsvirkjunar fyrir rekstur jarðvarmastöðvarinnar, sjá töflu 14.

TAFLA 14 Eigin rafmagnsnotkun og töp vegna rekstrar í Gufustöðinni á árunum 2020 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili.

ÁR	RAFMAAGNSNOTKUN (MWST)	RAFMAAGNSTÖP (MWST)
2020	113	442
2021	105	433
2022	93	557
2023	108	654
Meðaltal 2018-2023	105	522

Eldsneytisnotkunin byggir á gögnum Landsvirkjunar frá árunum 2008-2023, sjá töflu 15. Magn úrgangs byggir á gögnum um rekstur Kröflustöðvar og Gufustöðvarinnar frá árabílinu 2019-2023, sjá töflu 16. Þar sem allur úrgangur Gufustöðvarinnar sameinast úrgangi Kröflustöðvar, var heildarmagn rekstrarúrgangs aflstöðvanna aðgreint út frá uppsettu afli þeirra.

TAFLA 15 Eldsneytisnotkun vegna rekstrar í Gufustöðinni á árunum 2008 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili.

ÁR	BENSÍN (L)	DÍSILL (L)	LÍFDÍSILL (L)
2008	96	1.325	-
2009	209	3.491	-
2010	148	2.161	-
2011	118	2.313	-
2012	184	2.411	-
2013	161	3.526	-
2014	145	2.291	-
2015	85	2.432	-
2016	138	2.747	-
2017	119	2.715	303
2018	121	2.703	348
2019	127	1.632	1.198
2020	112	1.315	473
2021	161	1.161	583
2022	90	807	875
2023	115	874	1.119
Meðaltal 2008-2023	133	2.119	700

TAFLA 16 Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá Gufustöðinni eftir skiptingu á milli Gufustöðvarinnar og Kröflustöðvar á árunum 2019 – 2023 eftir uppsettu aflí.

ÚRGANGSFLOKKAR	2019-2023 (TONN)		TONN/ÁRI
Timbur (málað og ómálað)	4,9	36%	1,0
Óvirkur úrgangur (jarð og steinefni, gler og postulín)	3,7	27%	0,7
Almennur óflokkaður úrgangur til urðunar	2,9	21%	0,6
Lífrænn úrgangur - Eldhúsúrgangur til jarðgerðar	0,6	5%	0,1
Spilliefni	0,5	3%	0,1
Plast	0,4	3%	0,1
Brotamálmar	0,3	2%	0,1
Pappír (bylgjupappír, tímarit, fernur, skrifstofupappír)	0,3	2%	0,1
Alls úrgangur	13,6	100%	2,7

3.2.2 Bein losun í andrúmsloftið frá rekstri

Jarðhitasvæði losa ýmsar gastegundir náttúrulega en vísbendingar eru um að jarðvarmavinnsla og boranir á svæðunum geti í einhverjum tilvikum valdið aukningu í losun eða flýtt fyrir henni [24]. Helstu gastegundir sem losna frá Gufustöðinni eru CO₂, H₂S, N₂, H₂ og CH₄, og þar sem þær þrjár síðastnefndu eru í snefilmagni er eingöngu litið til losunar CO₂ og H₂S í þessari greiningu. Að árinu 2018 frátöldu þegar mikil minnkun var á orkuvinnslu í Gufustöðinni vegna viðhalds, sem hafði í för með sér hækkandi losun á hverja kílóvattstund, hefur losun koldíoxíðs frá Gufustöðinni verið fyrir neðan 100 g CO₂/kWst allt frá árinu 2008. Losun brennisteinsvetnis hefur verið ansi sveiflukennd en haldist fyrir neðan 100 g H₂S/kWst síðan árið 2005 [18]. Til samanburðar hefur árleg losun koldíoxíðs og brennisteinsvetnis frá Þeistareykjum verið um 10 g CO₂/kWst og 4 g H₂S/kWst [18]. Losun gastegunda frá jarðhitasvæðum er breytileg og fer eftir eðli vinnslu, virkni og tektóniskri uppbyggingu þeirra [25]. Hærri losun frá Gufustöðinni tengist þar að auki að hluta til Kröflueldum sem stóðu yfir frá 1975 til 1984. Mögulegt er að meta hlutdeild náttúrulegrar losunar vegna Kröfluelda og losunar vegna vinnslu á jarðvarma í Bjarnarflagi, en í þessari greiningu er gert ráð fyrir að öll losun tengist starfsemi Gufustöðvarinnar. Notast er við útgefnar losunartölur á tímabilinu 2000-2022, sem byggja á mælingum Kemíu fyrir Landsvirkjun [18], en losunartölur á tímabilinu 2023-2039 byggja á áætlaðri losun samkvæmt Landsvirkjun, sjá töflu 17.

TAFLA 17 Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma í Gufustöðinni.

GASTEGUND	LOSUN 2000-2022 TONN/ÁRI	ÁÆTLUÐ LOSUN 2022-2039 TONN/ÁRI	MEÐALLOSUN 2000-2039 TONN/ÁRI	ÁÆTLUÐ ÁRLEG LOSUN G/KWST
CO ₂	1.243	1.984	1.558	57,4
H ₂ S	903	1.099	986	36,4



MYND 9 Kröflueldar árið 1980. Mynd: Landsvirkjun.

3.2.3 Viðhald vinnslugetu með nýjum borholum

Að mati Landsvirkjunar verður ekki nauðsynlegt að bora fleiri viðhaldsborholur til viðbótar við þær 4 sem boraðar hafa verið eftir árið 2000, sjá töflu 5, til þess að halda uppi 5 MW afli yfir líftíma Gufustöðvarinnar, þ.e. til ársins 2039.

3.2.4 Endurnýjun Gufustöðvarinnar

Á árunum 2018-2019 var farið í miklar endurbætur á Gufustöðinni. Gömlu vélasamstæðu Gufustöðvarinnar var skipt út fyrir nýja og á sama tíma var uppsett afl stöðvarinnar aukið úr 2,8 MW í 5 MW. Upplýsingar um efnismagn og flutninga nýju vélasamstæðunnar má sjá í töflum 18 og 19. Byggingar voru endurnýjaðar og gert er ráð fyrir sama efnismagni og tilgreint er í kafla 3.1.3.1. Þar að auki voru endurbætur framkvæmdar á gufuveitu og lögnum í jörðu. Áætlað er að efnismagn sem fór í slíkar endurbætur hafi verið um helmingur þess sem notað var í upprunalegu gufuveituna, sjá kafla 3.1.3.2.

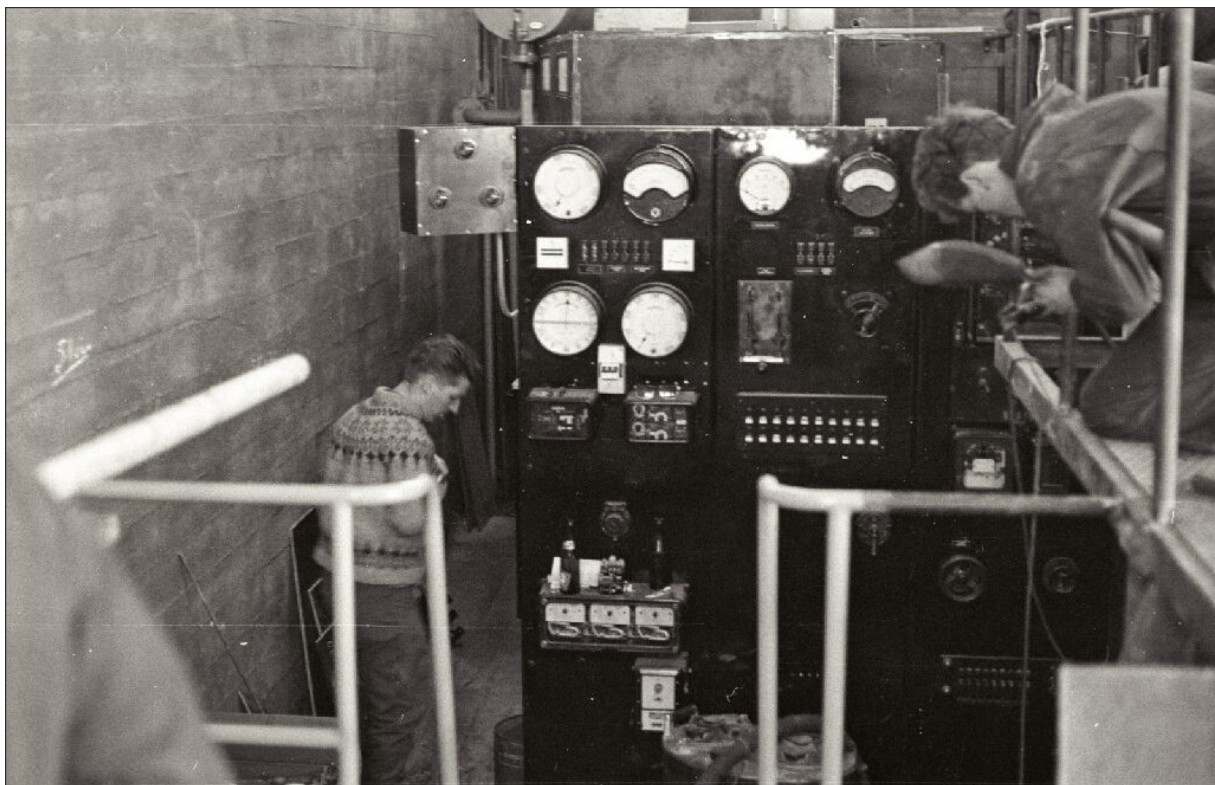
TAFLA 18 Samantekt byggingarefna fyrir nýju vélasamstæðu Gufustöðvarinnar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Byggingarstál	22
Ryðfrítt stál	19
Ál	0,5

TAFLA 19 Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Bjarnarflags.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐANDI / FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLENDIS (KM)	SJÓFLUTNINGUR (KM)	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI (KM)
Spennar	Tamini, Ítalía	983	3.048	67
Gufuhverfill	M+M Turbinen- Technik, Þýskaland	269	3.395	67
Rafall	Ingeteam Indar Machines, Spánn	44	4.344	67
Stöðvarveitur og stöðvarnotkunarspennir	Þýskaland/Pólland	100	3.000	67

Nýjar skiljur voru framleiddar af Vélsmiðjunni Héðni. Fyrir skiljur og stöðvarveitur er stuðst við sömu forsendur og lýst er í kafla 3.1.



MYND 10 Menntað störfum við uppsetningu á vélbúnaði Gufustöðvarinnar árið 1969 sem var síðar endurnýjaður árið 2018. Mynd: Landsvirkjun.

3.3 Niðurrif stöðvar, förgun og endurvinnsla

Í lok skilgreinds líftíma, í samræmi við aðferðafræði þessarar greiningar, 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 borholur í Gufustöðinni verði lokaðar á sama máta og áður hefur verið gert í Kröflustöð, en þær holur sem voru lokaðar á tímabilinu 1976-1978 og árið 2008 voru í öllum tilvikum fylltar af mól og síðan steiptur tappi. Magn sements í steiptum tappa er hverfandi í samanburði við magn sements í borholu, eða 0,1% og það er því hlutfallslega lítið magn hráefna sem þarf í endanlegan frágang þeirra. Þar sem mikil óvissa er um áætlaða orkunotkun í tengslum við niðurrif

stöðvar, sem og hvaða orkugjafa stuðst verður við þegar þar að kemur er hér gert ráð fyrir sömu eldsneytisþörf og úrgangsmyndun 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 áætla endurheimt hráefna 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 20 Samantekt hráefna í ofanjarðarmannvirkjum sem farið er með til urðunar eða endurvinnslu að loknu niðurrifi. Allar tölur eru gefnar í tonnum.

	BYGGINGAR	VEITUR	KALDAVATNSVEITUR	SKILJUR	STÖÐVARVEITUR	SAMTALS (TONN)	ENDURVINNSLU- HLUTFALL /FÖRGUN
Stál	19	105	1	14	2	141	37%
Ál			1	0,2	2	3	69%
Kopar			0,2		2	3	81%
Steypa	224	10	0,2			235	Urðun
Plast		19	13		4	36	Urðun
Steinull				1		1	Urðun
Önnur efni	42					42	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 vöggju að hliði. Raforka sem framleidd hefur verið í Þeistareykjastöð þarf að flytja til notenda með flutningskerfi raforku, og fer sá flutningur að hluta til fram á hárrí spennu með loftlínunum og tilheyrandi búnaði kerfisins. Nýttar eru hér niðurstöður vistferilsgreiningar sem EFLA gerði fyrir flutningskerfi Landsnets á 220 kV, 132 kV og 66 kV spennu [20], þar sem umhverfisáhrif voru reiknuð fyrir eina flutta kílóvattstund í kerfinu. Niðurstöður þeirrar greiningar sýndu m.a. að kolefnislosun íslenska raforkuflutningskerfisins væri 0,9 g CO₂ ígildi á hverja flutta kWst, en gert er ráð fyrir að þetta gildi lækki í uppfærðri greiningu sem stendur til að gefa út áramótin 2024/25.

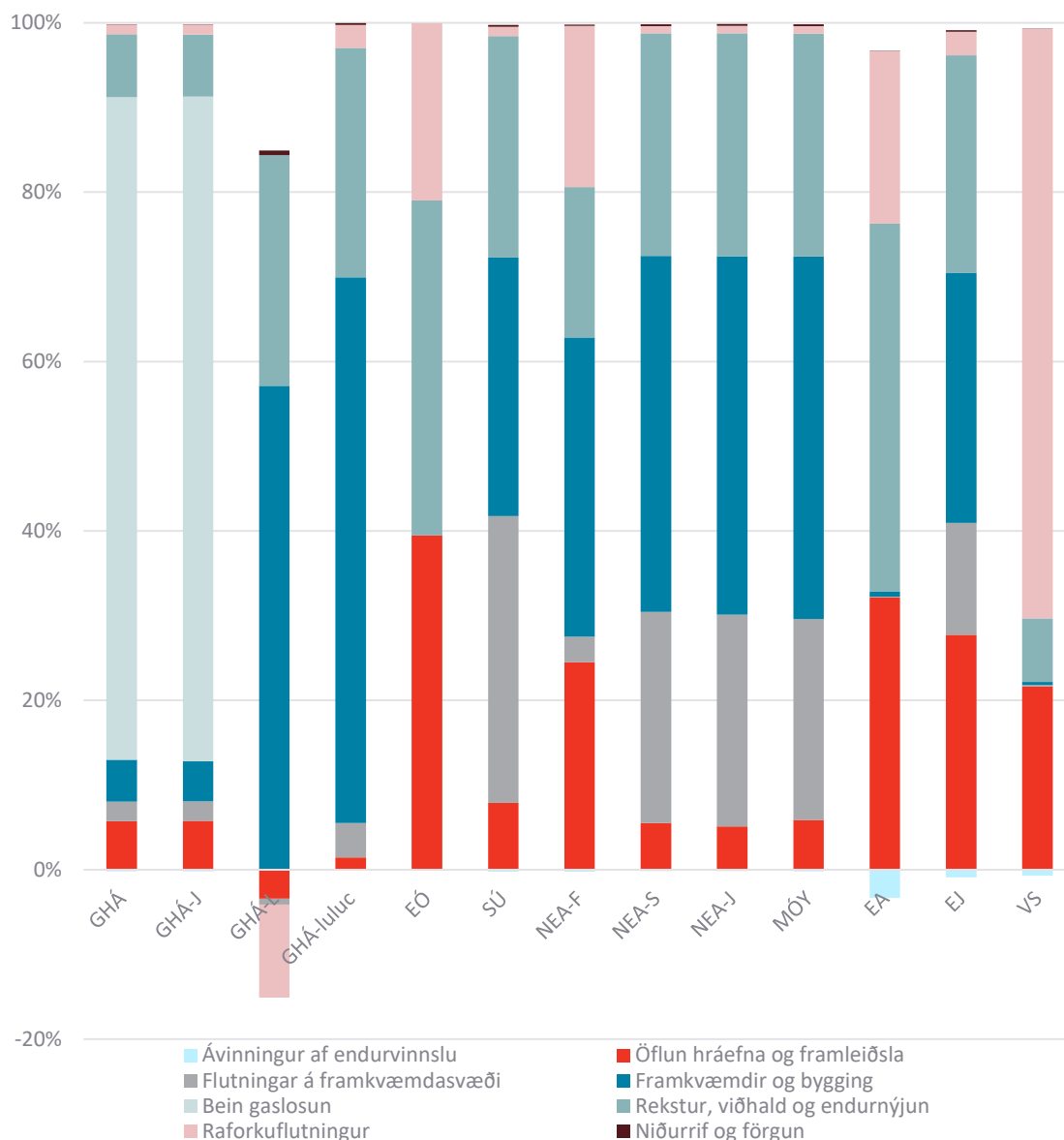
Flutningur raforku er það sem nefna mætti frálagsþáttur eða frágag (e. downstream), og er hann hafður hér innan kerfismarkna í samræmi við staðla um gerð vistferilsgreininga [8, 9] og leiðbeininga um gerð umhverfisýfirlýsinga [13], sjá mynd 3 í kafla 2.3.

4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR

4.1 Umhverfisáhrif á vistferli Gufustöðvarinnar

Í þessum kafla má sjá niðurstöður vistferilsgreiningar (e. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) fyrir vinnslu á 1 kWst af orku í Gufustöðinni. Niðurstöðurnar eru birtar fyrir þrettán flokka umhverfisáhrifa. Á mynd 11 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 (GHÁ) og gróðurhúsaáhrif - jarðefnaeldsneyti (GHÁ-J). Öflun hráefna og framleiðsla og flutningar á framkvæmdasvæði valda markverðum áhrifum í flestum umhverfisáhrifaflokkum. Framkvæmdir og bygging aflstöðvar valda hlutfallslega mestum áhrifum í 7 flokkum af 13, þ.e. gróðurhúsaáhrif - lífrænt (GHÁ-L), gróðurhúsaáhrif – landnotkun og breyting á landnotkun (GHÁ-luluc), öllum næringarefnaauðgunarflokkunum (NEA), myndun ósons við yfirborð jarðar (MÓY) og eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ). Raforkuflutningur veldur mestum áhrifum í flokknum VN, og hefur þar að auki mikil áhrif í flokkunum eyðing ósonlagsins (EÓ), næringarefnaauðgun - ferskvatn (NEA-ferskvatn) og eyðing auðlinda (EA). Rekstur, viðhald og endurnýjun (þ.m.t. borun á viðhaldsholum og endurnýjun vélbúnaðar) veldur töluverðum áhrifum í öllum flokkum. Ávinningur er af endurvinnslu stáls í öllum flokkum, mest í eyðing auðlinda (EA), eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ) og vatnsskortur (VN).

Eins og vistferilsgreiningin Þeistareykjastöðvar sýndi fram á [7], hefur bein losun H₂S ráðandi áhrif í áhrifaflokk súrnunar. Þetta sést best með aðferðafræði CML 2001 sem leggur meira vægi á áhrif vegna losunar H₂S, sjá mynd 19 í Viðauka C og [16], en er ekki jafnsýnilegt með aðferðafræði EN15804+A2 eins og sett er fram hér í samræmi við þann staðal. Vægi súrnunaráhrifa frá jarðvarmavinnslu er tiltölulega mikið í Evrópsku samhengi, þ.e. eftir að áhrif hafa verið stöðluð og vegin m.v. meðaláhrif vegna mannglegra athafna í Evrópu skv. CML aðferðinni. Súrnunaráhrifin má aðallega rekja til losunar brennisteinsvetnis frá jarðhitavökvanum.

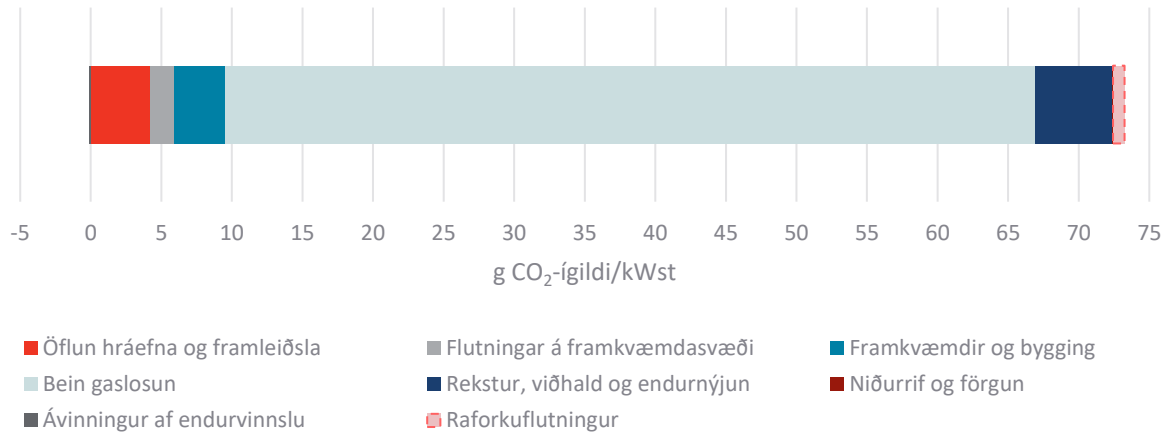


MYND 11 Umhverfisáhrif vegna vinnslu 1 kWst orku í Gufustöðinni. Á myndinni má sjá hlutdeild mismunandi þátta vistferils aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa.

4.2 Kolefnisspor orkuvinnslu

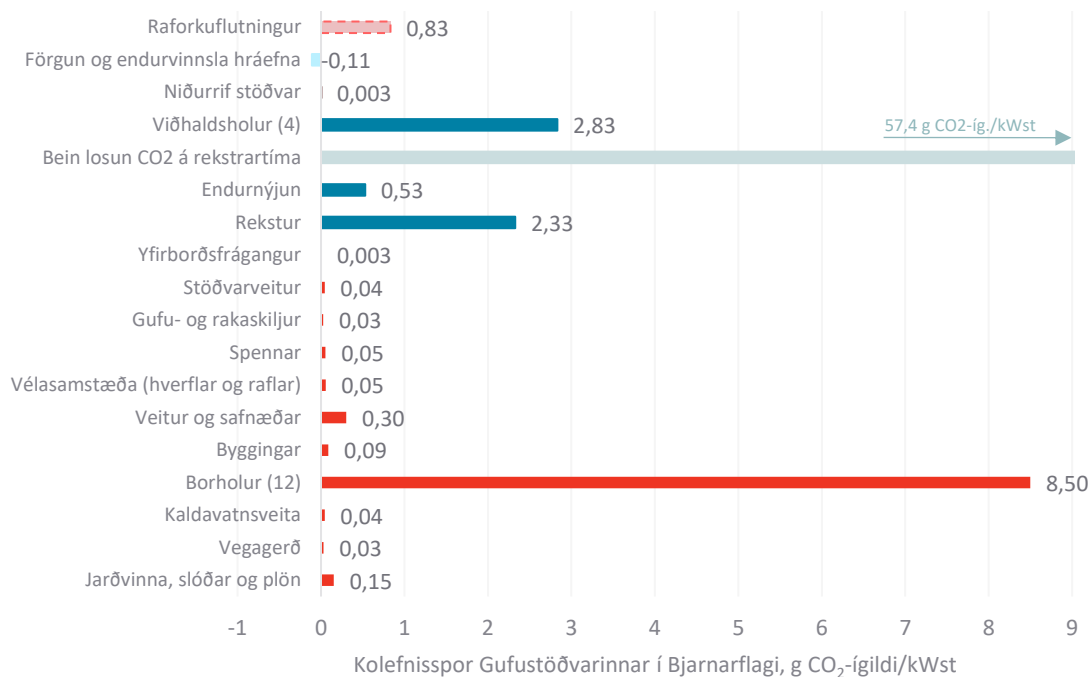
Gróðurhúsaáhrif sambættar orkuvinnslu í Gufustöðinni á 40 ára líftíma er 80 þúsund tonn CO₂-ígildi. Kolefnisspor orkuvinnslunnar er 73 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst í Gufustöðinni. Á mynd 12 má sjá hvernig kolefnisspor Gufustöðvarinnar skiptist á milli mismunandi fasa á vistferli stöðvarinnar, þ.e. framleiðslu, flutninga- og framkvæmdafasa, rekstrarfasa og lok líftíma. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (78%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökva á 40 árum eða 57,4 g CO₂-ígildi/kWst. Til samanburðar má nefna að bein losun frá þeistareykjastöð var metin 10,2 CO₂-ígildi/kWst [7], eða 69% af kolefnissporinu. Munur á beinni losun frá stöðvunum skýrist helst á mun á jarðhitasvæðunum sem þær liggja á. Losun frá jarðhitasvæðum er breytileg milli svæða og háð bæði virkni svæða og tektónískri uppbyggingu

þeirra [25]. Kolefnisspor vegna framleiðslu byggingarefna og búnaðar sem og framkvæmda er samanlagt 7,9 g CO₂-ígildi/kWst eða um 11% af kolefnissporinu.



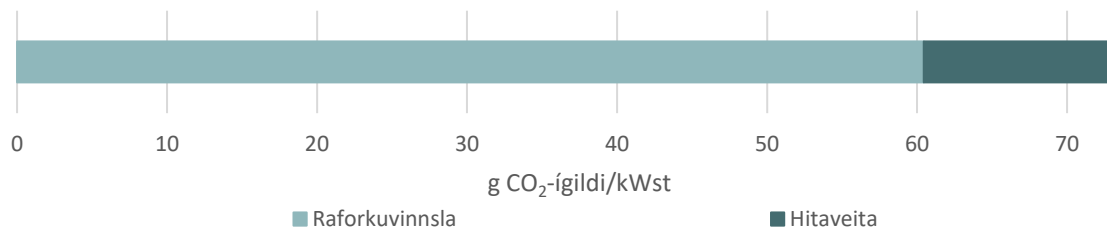
MYND 12 Kolefnisspor Gufustöðvarinnar er 73 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst. Myndin sýnir hvernig kolefnissporið skiptist milli mismunandi fasa vistferilsins.

Kolefnisspor mismunandi eininga og þátta í vistferli aflstöðvarinnar má sjá á mynd 13. Þegar litið er heildrænt til einstakra mannvirkja og vélbúnaðar má sjá að utan beinnar losunar, vega borholur þyngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og eldsneytisnotkun vegna bæði núverandi og tilvonandi viðhaldshola. Samanlagt mynda holurnar 16% af heildarkolefnisspori stöðvarinnar. Utan þeirra eru þau mannvirki sem vega um 0,2% eða meira í kolefnissporinu veitur og safnæðar, jarðvinna, slóðar og plön og endurnýjun vélbúnaðar. Auk þessara fasa, er aðeins rekstur og raforkuflutningur sem hafa teljandi áhrif á kolefnissporið.



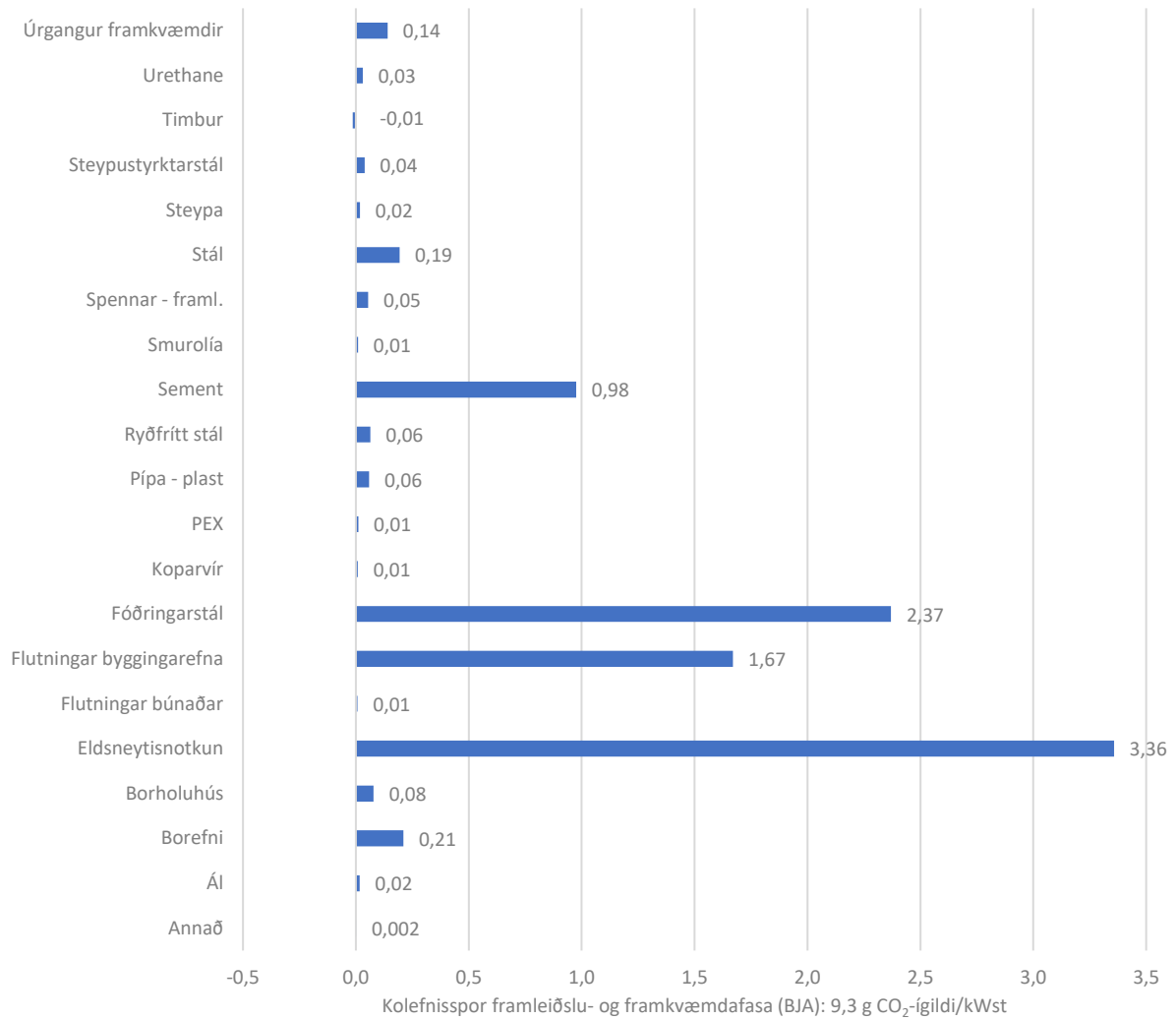
MYND 13 Kolefnisspor Gufustöðvarinnar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar.

Ef umhverfisáhrifum er skipt á milli raforkuvinnslunnar og hitaveitunnar, sjá kafla 2.5 og mynd 15, er kolefnisspor raforkunnar 60 g CO₂-íg/kWst og kolefnisspor hitaveitunnar 13 g CO₂-íg/kWst í samræmi við stuðla, α_{rafmagn} og $\alpha_{\text{hitaveita}}$.

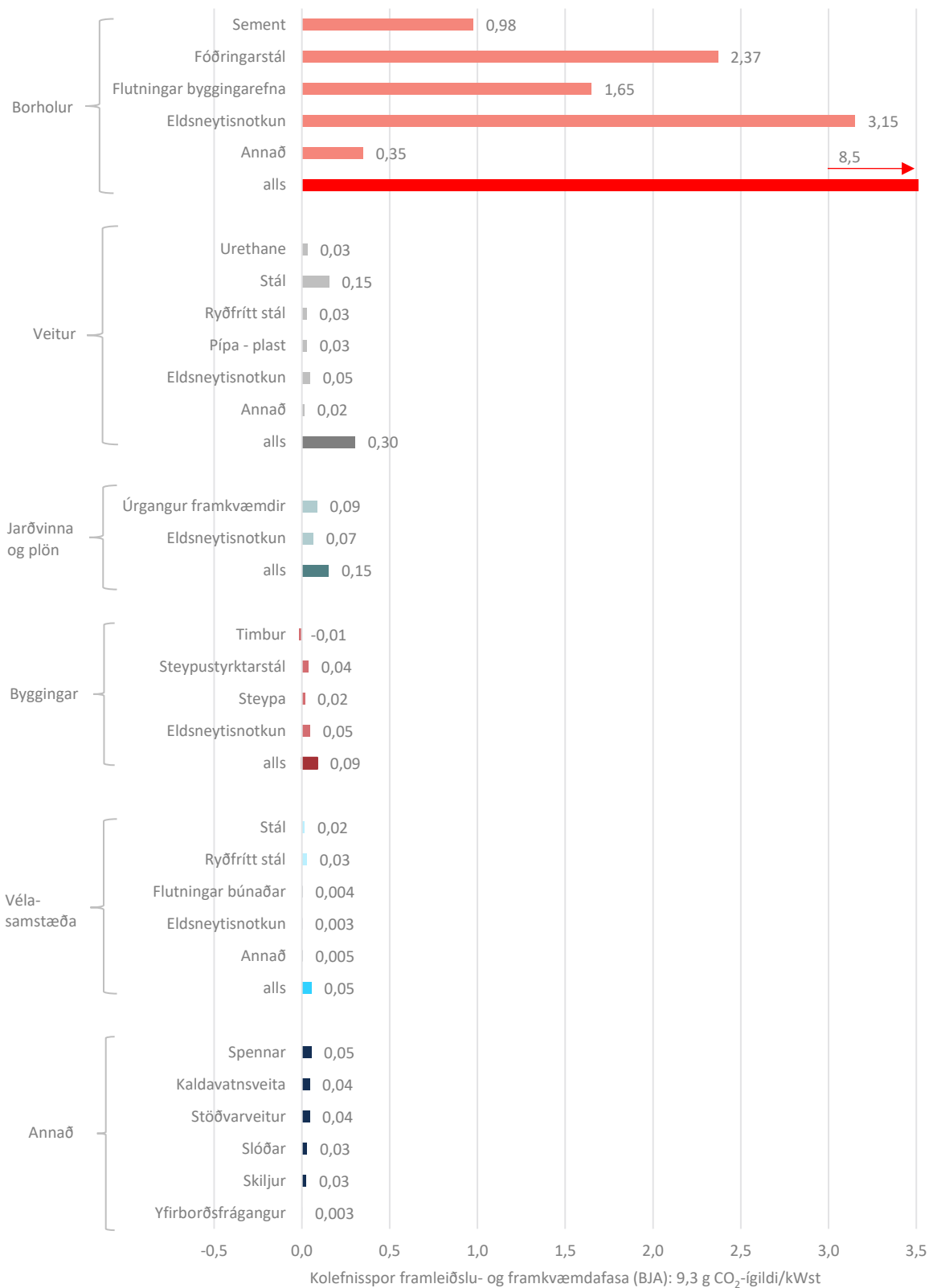


MYND 14 Heildarkolefnisspor jarðvarmavinnslunnar í Gufustöðinni er 73 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst. Þar af er kolefnisspor raforkuvinnslunnar 60 g CO₂-íg/kWst og hitaveitunnar 13 g CO₂-íg/kWst.

Kolefnisspor framleiðslu- og framkvæmdafasa Gufustöðvarinnar er aðgreint frekar í stök efni og eldsneytisnotkun á mynd 15. Mynd 16 sýnir þar að auki hvernig efnis- og eldsneytisnotkun skiptist eftir innviðum fyrir kjarnastarfsemi Gufustöðvarinnar. Framleiðsla stáls (fóðringarstál, stál í veitu, ryðfrítt stál, smíðajárn) vegur samanlagt þýngst af öllum byggingarefnum, eða því sem nemur 2,66 g CO₂-ígildi/kWh. Sement og steypa í aflstöðinni valda næstmestu gróðurhúsaáhrifunum af byggingarefnum, eða samanlagt 0,99 g CO₂ ígildi/kWh. Þar á eftir koma borefni, borholuhús og plast sem samtals mynda um 0,35 g CO₂-ígildi/kWh af kolefnissporinu. Kolefnisspor eldsneytisnotkunar á framkvæmdatíma vegur mest af öllu í framleiðslu- og framkvæmdafasa, eða 3,36 g CO₂-ígildi/kWh. Flutningar byggingarefna valda næst næstmestu gróðurhúsaáhrifunum, 1,67 g CO₂-ígildi/kWh.



MYND 15 Gróðurhúsaáhrif einstakra efnis- og verkþátta í kolefnisspori framleiðslu- og framkvæmdafasa Gufustöðvarinnar.



MYND 16 Gróðurhúsaáhrif einstakra framleiðslu- og framkvæmdarþátta innan ólíkra hluta Gufustöðvarinnar.

5 UMRÆÐUR

5.1 Vistferilsgreiningar jarðvarmavirkjana

Kolefnisspor Gufustöðvarinnar er af sömu stærðargráðu og kolefnisspor annarra jarðvarmastöðva á heimsvísu (tafla 21). Kolefnisspor fyrir jarðvarmavinnslu er töluvert háð aðstæðum á hverjum stað fyrir sig og hefur bein losun til andrúmslofts með hagnýtingu jarðhitavökva mestu áhrifin. Á mörgum svæðum er bein losun frá vinnslu lítil, en til eru dæmi um jarðhitasvæði í heiminum sem losa töluvert af koldíoxíði og metani, eða allt að 1.800 g CO₂/kWst [26]. Samkvæmt evrópsku flokkunarreglugerðinni þarf losun gróðurhúsalofttegunda á vistferlinum frá framleiðslu raforku úr jarðvarmaorku að vera minni en 100 g CO₂-ígildi/kWh til þess að geta talist sem verulegt framlag til mótvægis við loftslagsbreytingar. Gufustöðin fellur því vel innan þess viðmiðs [27].

Tekið skal sérstaklega fram að ekki er hægt að gera beinan samanburð milli niðurstaða vistferilsgreininga sem fram koma í töflu 21, þar sem töluverður munur er á milli greininga hvað kerfismörk varðar. Nærtækara væri að bera þessa greiningu saman við niðurstöður umhverfisyfirlýsinga fyrir orkuvinnslu (EPD), en þar eru gerðar strangari kröfur til upplýsingaöflunarinnar og til skilgreinda kerfismarka [13].

TAFLA 21 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 Gufustöðina og Þeistareyki eru birtar án orkuflutnings.

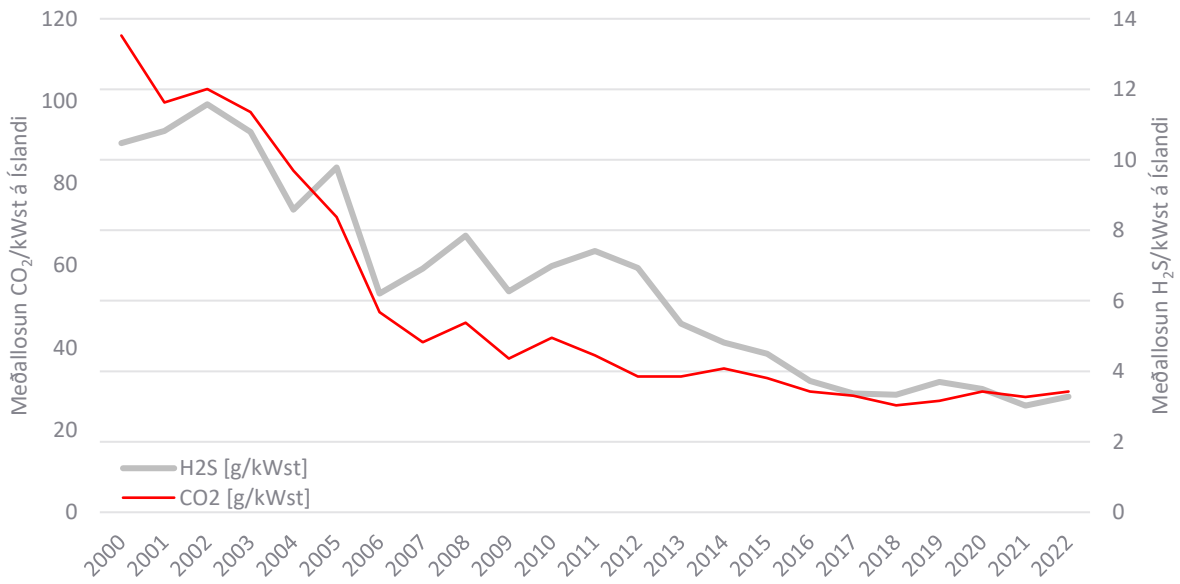
VIRKJUN, LAND	STÆRÐ (TÆKNI)	LÍFTÍMI (ÁR)	KOLEFNISSPOR (g CO ₂ -íg/kWst)	SÚRNUN (g H ₂ S-íg/kWst)	HEIMILD (ÁR)
Bouillante, Gouadeloupe	15,74 MW (SF, DF)	30	38-47	1,6-2	[28] (2015)
Hellisheiðarvirkjun, Ísland*	303 MW (DF)	30	15,9 án CarbFix 11,4 með CarbFix	9,7 án SulFix 3,6 með SulFix	[29] (2020)
Svartsengi, Ísland	70 MW	30	43,5	-	[30] (2023)
Reykjanesvirkjun, Ísland	130 MW	30	17,1	-	[31] (2023)
Bagnore 3, Piancastagnaio 3-5 (Monte Amiata), Ítalía**	20 MW (SF)	25	380-1045	0,1-44,8	[32, 33] (2014, 2017)
Chiusdino 1 (Ítalía)	20 MW	30	270-430	1-9	[34] (2020)
Japan***	55 (DF)	30	15	-	[35] (2005)
IPCC	-	-	38 (6 – 79)	-	[36] (2011)
EU	-	-	238 (5 – 898)	-	[37] (2020)
Þeistareykir, Ísland	90 MW (SF)	40	13,8	7,1	[7] (2020)
Gufustöðin, Ísland	5 MW		60		

*Kerfismörk innihalda ekki flutning byggingarefna og vélbúnaðar til landsins, úrgang frá rekstri, niðurrif stöðvar og meðhöndlun úrgangs og orkuflutninga. Eldsneytisnotkun við byggingu stöðvar byggir á áætlun. Í greiningunni er reiknað með 34% niðurdælingu CO₂ og 68% niðurdælingu H₂S [29].** 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

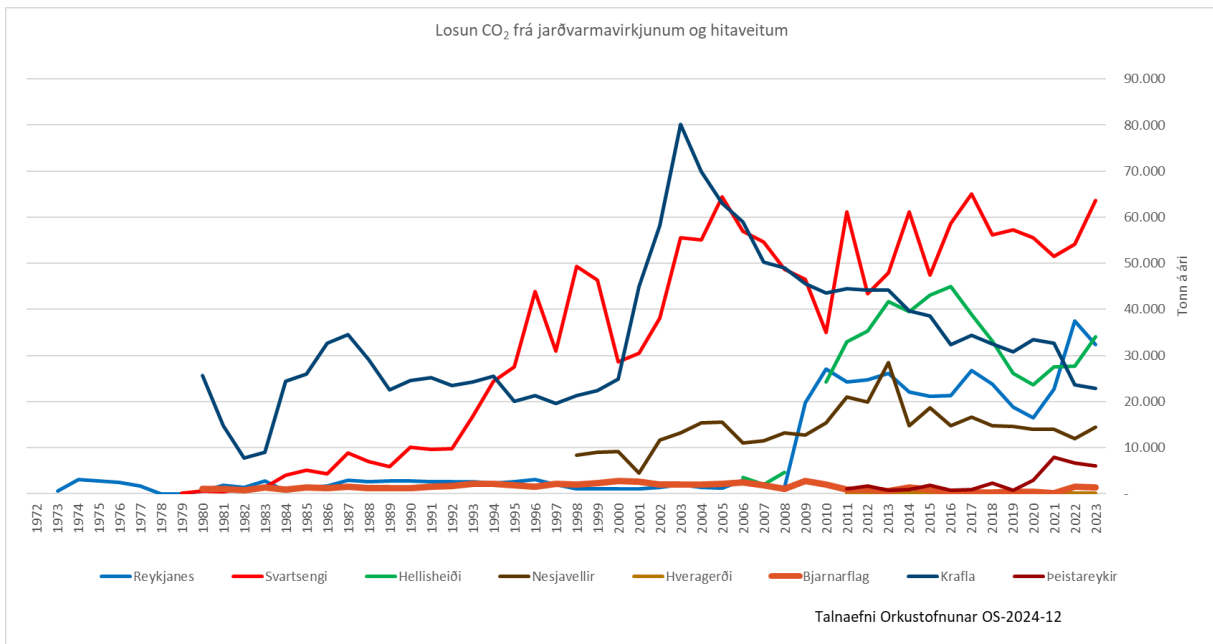
5.2 Bein losun gróðurhúsalofttegunda

Orkuvinnsla með jarðvarma hefur í för með sér losun á gasi til andrúmslofts. Mest er losunin á koldíoxíði, sem veldur loftslagsbreytingum, og brennisteinsvetni, sem getur valdið súrnun, lyktarmengun og eituráhrifum á lífríki og heilsu manna. Gas er í jarðhitavökvanum sem kemur upp úr jarðhitageyminum og síðan losað til andrúmslofts í vinnslurásinni, en einungis gufan úr jarðhitavökvanum er nýtt til orkuvinnslu. Styrkur gastegunda í jarðhitavökva getur verið mjög misjafn milli jarðhitasvæða í heiminum og getur einnig þróast og breyst á líftíma orkuvinnslunnar.

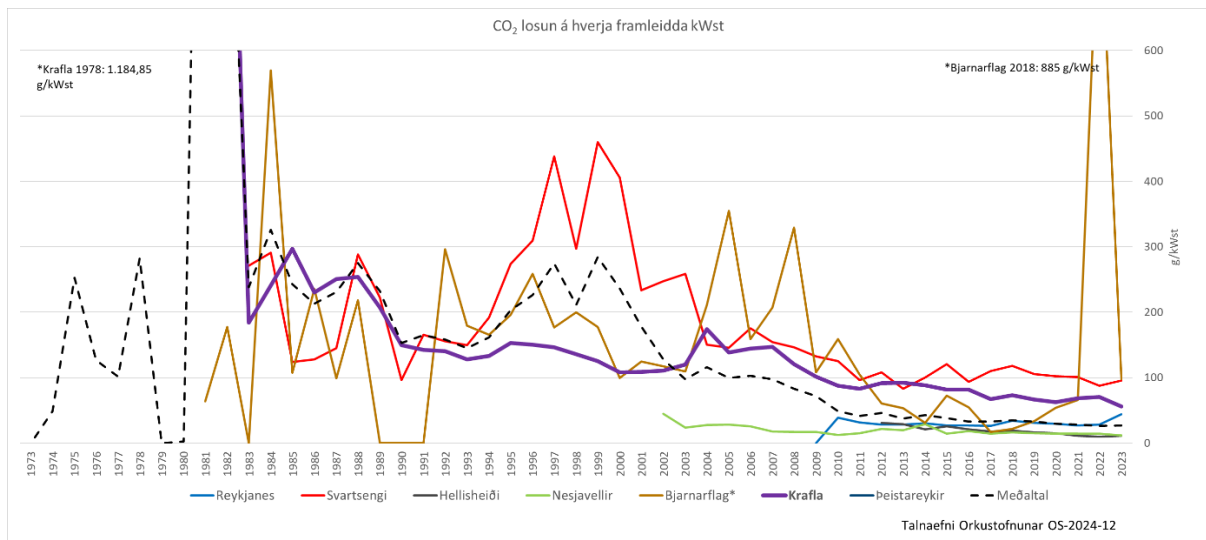
Losun koldíoxíðs er afar breytileg milli ólíkra aflstöðva á Íslandi (mynd 19) og náði sögulegu hámarki 570 g/kWst í Gufustöðinni í Bjarnarflagi (1980) og 297 g/kWst í Kröflu (1981). Tengdust þessir tveir viðburðir Kröflueldum sem stóðu yfir frá 1975 til 1984. Náttúruleg losun gróðurhúsalofttegunda frá Kröflusvæðinu um jarðveg er meiri en frá öðrum jarðhitasvæðum á Íslandi [38], en náttúruleg losun frá Kröflusvæðinu hefur verið metin um 190.000 t CO₂/ár [39]. Til samanburðar er náttúruleg losun gróðurhúsalofttegundar um jarðveg frá Þeistareykjasvæðinu metin vera um 110.000 t CO₂ á ári eftir viðamiklar mælingar sumarið 2015 [40].



MYND 17 Meðallosun CO₂ og H₂S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2022. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2023-T013-01 (2022) [12].



MYND 18 Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum og hitaveitum. Gufustöðin er hér auðkennd sem Bjarnarflag. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2024-13 (2024) [18].



MYND 19 Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagni. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2024-12 (2024) [18].

Losun koldíoxíðs frá jarðvarmasvæðum er náttúruleg og ber heimildum ekki alltaf saman hvort að vinnsla raforku hafi áhrif á heildarlosun frá þeim svæðum. Landsvirkjun hefur um árabil skoðað losun gróðurhúsalofttegunda frá fyrirtækinu og reynt að varpa ljósi á útstreymi koldíoxíðs frá jarðvarmavirkjunum, þar með talið hvort að orkuvinnsla hafi áhrif á náttúrulegt útstreymi eða ekki [41]. Kannað hefur verið hvort að aukin orkuvinnsla úr jarðhita myndi valda aukningu á heildarútbæstri 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 [24]. Náttúruleg losun frá Hengilsvæðinu er rétt rúmlega tvöföld losuninni frá Nesjavallavirkjun og Hellisheiðavirkjun [42]. Hið sama á við um Kröflusvæði, en þar er náttúruleg losun u.þ.b. tvöfalt meiri en losun frá jarðvarmavirkjununum á svæðinu. Hið gagnstæða virðist eiga við á Reykjanesinu. Losun frá Reykjanesvirkjun er um tvöföld náttúrulegri losun og virðist hafa farið hækkandi frá því að stöðin var gangsett, og virðist sú þróun vera í takt við yfirstandandi eldsumbrot á því svæði.

Styrkur H_2S í jarðhitavökva getur breyst töluvert á nokkrum árum, og hefur reynslan m.a. sýnt að styrkur H_2S eykst meira en CO_2 á meðan á vinnslu stendur [43]. Gastegundin er hvarfgjörn og í oxandi umhverfi getur hún myndað brennistein (S), brennisteinstvíoxíð (SO_2) eða brennisteinssýru (H_2SO_4). H_2S er talið skolast að mestu út með rigningu [44] þannig að aðeins lítil hluti hvarfast í SO_2 . Talið er að brennisteinssvæði sem berst með lofti frá jarðhitasvæðum oxist að mestu í brennistein (S) og falli til jarðar í úrkomu og verði að málmsöltum í jarðvegi. Losun í andrúmsloftið er því mjög háð veðurfari, landnotkun, vindum og landlegu.

Þrátt fyrir að losun frá Kröflusvæðinu hefur dregist saman ár frá ári síðan að Kröflueldum lauk, er svæðið enn þann dag í dag þekkt fyrir verulegt flæði koldíoxíðs. Kröflueldar ollu breytingum á eiginleikum svæðisins. Efnasamsetning í borholum breyttist og gaslosun í kerfinu jókst, einkum á koldíoxíði sem losnar bæði við vinnslu jarðvarma og með náttúrulegum hætti upp úr jarðhitageyminum [45]. Þetta er í takt við áhrifin sem langvarandi jarðhræringar á Reykjanesi, sem hófust árið 2021 með tilheyrandi sprungumyndun, hafa haft á vinnslusvæði jarðvarma á Svartengissvæðinu [46].

Sprungurnar geta aukið aðgengi gass í jarðhitavökvanum upp til yfirborðs sem getur leitt til aukningar á náttúrulegri losun, en ekki hafa verið gefnar út tölulegar upplýsingar því til staðfestingar.

Segja má að þrátt fyrir að ýmsar rannsóknir gefi til kynna ákveðnar breytingar á heildarlosun svæðis í kjölfar orkuvinnslu, sé enn ekki hægt að fullyrða um áhrif vinnslu á heildarlosun, og hvort og að hversu miklu leyti losunin megi teljast manngerð (e. anthropogenic) [47, 37]. Þetta kann að breytast þegar meiri gögn og betri upplýsingar liggja fyrir.

Á meðan á endurnýjun á Gufustöðinni stóð árið 2018 var orkuvinnsla í stöðinni afar lítil og losun á framleidda kWst því mun hærri en fyrri ár eins og mynd 19 sýnir. Losun frá Gufustöðinni hefur verið ansi sveiflukennd en eftir endurnýjun hennar hefur hún verið að ná ákveðnum stöðugleika. Samanborið við önnur venjuleg rekstrarár hefur hún farið lækkandi sem er talið tengjast tímanum frá því að Kröflueldum lauk.

5.3 Elsta starfandi jarðvarmavirkjun landsins

Gufustöðin í Bjarnarflagi var gangsett fyrir 55 árum síðan og, líkt og fram hefur komið, er áætlað að hún muni vera í áframhaldandi rekstri í núverandi mynd að minnsta kosti fram til ársins 2039. Jarðvarmastöðin mun því ná 70 ára aldri, sem gerir hana einstaka á heimsvísu og gefur tilefni til þess að meta áhrif langs líftíma á umhverfisáhrif hennar. Það kolefnisspor sem dregið er fram í þessari skýrslu, út frá 40 ára skilgreindum líftíma, er ætlað að tryggja samanburðarhæfni við aðrar sambærilegar jarðvarmastöðvar þar sem reikningar lúta sömu aðferðafræði. Fullyrða má að gæði niðurstaða sé mikil þar sem vistferilsgreiningin byggir að verulegu leyti á raungögnum og orkuvinnslu sl. áratuga, en þeir þættir sem bundnir eru mestri óvissu í þessari greiningu snúa að því hversu stór hluti losunar koldíoxíðs (CO₂) og brennisteinsvetnis (H₂S) stafar af Kröflueldum (1975-1984) eða náttúrulegri losun og hversu stóran hluta losunarinnar má rekja til jarðvarmavinnslunnar.

6 LOKAORÐ

Gufustöðin er ein elsta jarðvarmavirkjun í heiminum í dag, og búist er við því að rekstur hennar með endurnýjuðum búnaði muni halda áfram í að minnsta kosti 15 ár til viðbótar. Jarðhitasamfélagið finnur fyrir aukinni áherslu á sjálfbærni jarðhitageyma og niðurdælingu samfara orkuvinnslu og hefur mikilvæg þekking hlotist á því sviði á undanförunum árum.

Í þessari vistferilsgreiningu fyrir Gufustöðina er fjallað um 13 flokka umhverfisáhrifa. Einn stærsti losunarþátturinn er bein losun CO₂ og H₂S frá jarðhitavökva á rekstrartíma stöðvarinnar. Kolefnisspor orkuvinnslu með jarðvarma hefur verið metið á bilinu 6–79 g CO₂-ígildi/kWst [36] (q25, miðgildi og q75 eru 20, 45 og 57 g CO₂-ígildi/kWst) á heimsvísu en fyrir einstaka stöðvar getur sporið náð upp fyrir 1.000 g CO₂-ígildi/kWst [26]. Kolefnisspor samþættrar orkuvinnslu í Gufustöðinni er 73 g CO₂-ígildi/kWst við stöðina. Vistferilsgreiningar á jarðvarmavinnslu hafa auðkennt nokkur tækifæri til að minnka kolefnissporið [7], og er ein þeirra að huga sérstaklega að viðhaldi og endurnýjun á líftíma stöðvarinnar, sem hefur verið gert um árábil fyrir jarðvarmastöðvar Landsvirkjunar á Norðausturlandi.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar er liður í því að fá vitneskju um raunáhrif orkuvinnslu allra orkukosta hjá Landsvirkjun, í samræmi við alþjóðlega umhverfisstjórnunarstaðalinn ISO 14001:2015, en greiningin sýnir hvar í vistferlinum mestu umhverfisáhrifin verða. Nú hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðarhálsstöð [2], Fljótsdalsstöð [3], Blöndustöð [4], vindmyllur á Hafinu [6], Þeistareykjastöð [7] og var Kröflustöð greind samfara þessari greiningu fyrir Gufustöðina. Einnig hafa niðurstöður verið birtar fyrir Búrfellsstöð II [5], sem er aflaukning við eina elstu vatnsaflsstöð á Íslandi, Búrfellsstöð.

7 HEIMILDASKRÁ

- [1] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Fljótsdalsstöð,“ Landsvirkjun, LV-2011-086, 2011.
- [2] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Búðarhásstöð,“ Landsvirkjun, LV-2018-048, 2018.
- [3] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Fljótsdalsstöð,“ Landsvirkjun, LV-2018-064, 2018.
- [4] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Blöndustöð,“ Landsvirkjun, LV-2019-030, 2019.
- [5] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með vatnsafli. Búrfellsstöð II,“ Landsvirkjun. LV-2020-035, 2020.
- [6] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með rannsóknarvindmyllum á Hafinu við Búrfell,“ Landsvirkjun LV-2015-129, 2015.
- [7] EFLA Verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma. Þeistareykjastöð,“ Landsvirkjun, LV-2020-034, 2020.
- [8] ISO, *ISO 14040: 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, International Organization for Standardization, Second edition, 2006.

- [9] ISO, *ISO 14044: 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, International Organization for Standardization, First edition, 2006.
- [10] ISO, *ISO 14067:2018. Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification*, International Organization for Standardization, First edition, 2018.
- [11] Landsvirkjun, „Loftslagsbókhald 2019,“ 2020. [Á neti]. Available: <https://arsskyrsla2019.landsvirkjun.is/media/loftslagsbokhald-2019.pdf>.
- [12] Orkustofnun, „Talnaefni Orkustofnunar OS-2023-T013-01,“ [Á neti]. Available: <https://orkustofnun.is/upplýsingar/talnaefni/varmi>.
- [13] The International EPD System, *Product Category Rules for Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution. PCR 2007:08. Version 4.2.1*, The International EPD system, 2024.
- [14] ÍST EN 15978:2011, „Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method,“ 2011.
- [15] ÍST EN 15804:2012+A2:2019, *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*, CEN/TC 350, 2019.
- [16] I. Blanc, L. Damen, M. Douziech, D. Fiaschi, V. Harcouët-Menou, G. Manfrida, B. Mendecka, M. Parisi, P. Perez Lopez, G. Ravier og 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,“ GEOENVI, 2020.
- [17] 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.
- [18] Orkustofnun, „Talnaefni Orkustofnunar OS-2024-13. Gaslosun jarðvarmavirkjana og hitaveitna 1969-2023.,“ [Á neti]. Available: <https://orkustofnun.is/upplýsingar/talnaefni/varmi>.
- [19] „Sphera,“ [Á neti]. Available: <https://sphera.com>. [Skoðað 22 January 2024].
- [20] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining fyrir flutningskerfi raforku. Flutningskerfi Landsnets rekið á 66 kV, 132 kV og 220 kV spennu,“ Landsnet, Reykjavík, 2018.

- [21] H. B. T. Þorkell Magnússon, „Mannvirkjaskráning í Bjarnarflagi og Kröflustöð,“ Landsvirkjun, LV-2017-061, 2017.
- [22] L. J. Antonsdóttir, „Elsti gufuhverfill á Íslandi. Skráning á vélbúnaði gufuaflstöðvarinnar í Bjarnarflagi,“ Landsvirkjun, LV-2020-028, 2020.
- [23] ABB T&D S.p.A., *Environmental Product Declaration. Large Distribution Transformer 16/20 MVA (ONAN/ONAF).*, The International EPD System, 2006.
- [24] Halldór Ármannsson, „Carbon Dioxide Emissions from Icelandic Geothermal Areas. An Overview. LV-2016-036,“ Landsvirkjun, ÍSOR, Reykjavík, 2016.
- [25] HS Orka, „Loftslagsmál. Losun gróðurhúsalofttegunda á jarðhitasvæðum.,“ [Á neti]. Available: <https://www.hsorka.is/sjalfbaerni/loftslagsmal/>.
- [26] N. Aksoy, O. S. Gok, H. Mutlu og G. Kilinc, „CO2 Emission from Geothermal Power Plants in Turkey,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, 2015.
- [27] F. Evrópusambandsins, *Framseld reglugerð framkvæmdastjórnarinnar (ESB) 2021/2139*, Evrópusambandið, 2021.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] V. C. Engineers, „Life Cycle Assessment for Svartsengi Geothermal Power Plant,“ HS Orka, 2023.
- [31] V. C. Engineers, „Life Cycle Assessment of a Geothermal Power Plant,“ HS Orka, 2023.
- [32] 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.

- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Hiroki Hondo, „Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case,“ *Energy*, b. 30, pp. 2042-2056, 2005.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] H. A. H. R. R. Ó. S. Ó. G. Bjarni Pálsson, „Loftslagsáhrif Landsvirkjunar - samantekt og tillögur að aðgerðum,“ Landsvirkjun, LV-2011-016, 2011.
- [39] Dereinda, F.H.; Ármannsson, H., „CO2 Emissions from the Krafla Geothermal Area, Iceland,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 2010.
- [40] 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.
- [41] Sigurður Óli Guðmundsson; Bjarni Pálsson, „Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum. LV-2011-017,“ 2011.
- [42] Halldór Ármannsson, „An overview of carbon dioxide emissions from Icelandic geothermal areas,“ *Applied Geochemistry*, b. 97, pp. 11-18, 2018.
- [43] H. Kristmannsdóttir; H. Ármannsson, „Environmental aspects of geothermal energy utilization,“ *Geothermics*, b. 32, pp. 451-461, 2003.

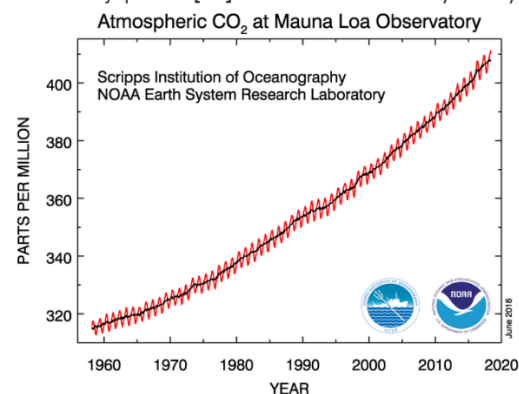
- [44] Hrefna Kristmannsdóttir; Magnús Sigurgeirsson; Halldór Ármannsson; Hreinn Hjartarson; Magnús Ólafsson, „Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland,“ *Geothermics*, b. 29, pp. 525-538, 2000.
- [45] Landsvirkjun, „Loftslagsbókhald,“ Landsvirkjun, 2019.
- [46] HS Orka, „Sjálbæriskýrsla 2023,“ HS Orka, 2024.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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].
- [51] 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].
- [52] Umhverfisstofnun, „Óson,“ [Á neti]. Available: <https://www.ust.is/einstaklingar/loftgaedi/oson/>. [Skoðað 2 July 2018].

VIÐAUKI A UMHVERFISÁHRIFAFLOKKAR

Í eftirfarandi töflu er þeim umhverfisáhrifum sem metin eru í greiningunni lýst í stuttu máli. Upplýsingar eru aðlagðar frá Sphera LCA FE Database & Modelling Principles [48] og ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context [49].

Gróðurhúsaáhrif valda breytingu á meðalhita jarðarinnar sem rekja má til losunar gróðurhúsalofttegunda af manna völdum, t.d. koldíoxíðs (CO_2), metans (CH_4) og brennisteinshexaflúoríðs (SF_6). Þúist er við að hækking meðalhita jarðar muni m.a. hafa í för með sér miklar breytingar á loftslagi og veðurfari, valda eyðimerkurmyndun (e. desertification), hækkingu 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 [50]. Grafið að neðan sýnir styrk CO_2 í

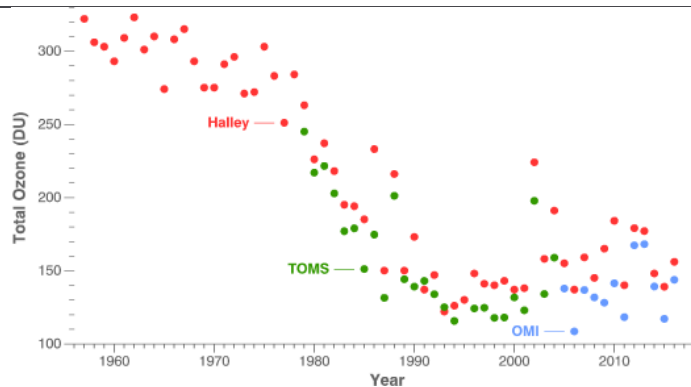
Gróðurhúsaáhrif (e. Global warming, GWP 100 years)



andrúmslofti sem fall af tíma.

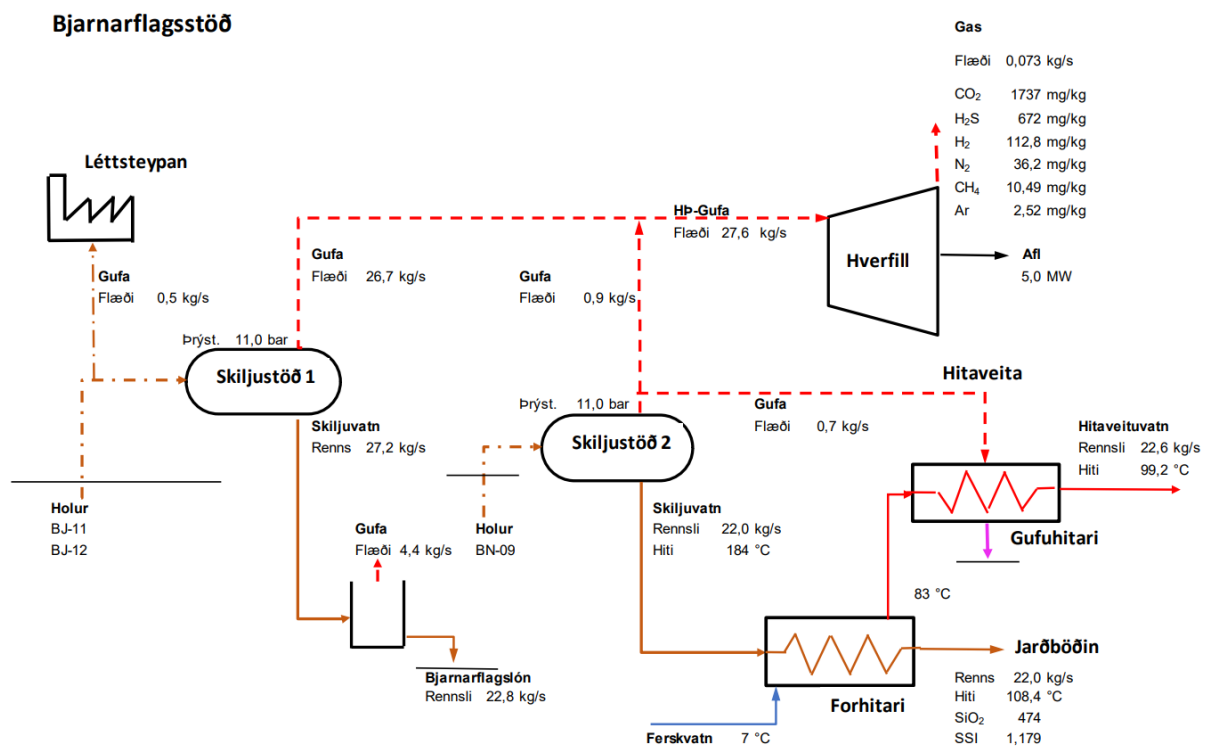
Eyðing ósonlagsins (e. ozone depletion)

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 Suðurskautlandinu 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 [51]. Grafið að neðan sýnir heildarmagn ósons í DU einingum sem fall af tíma.



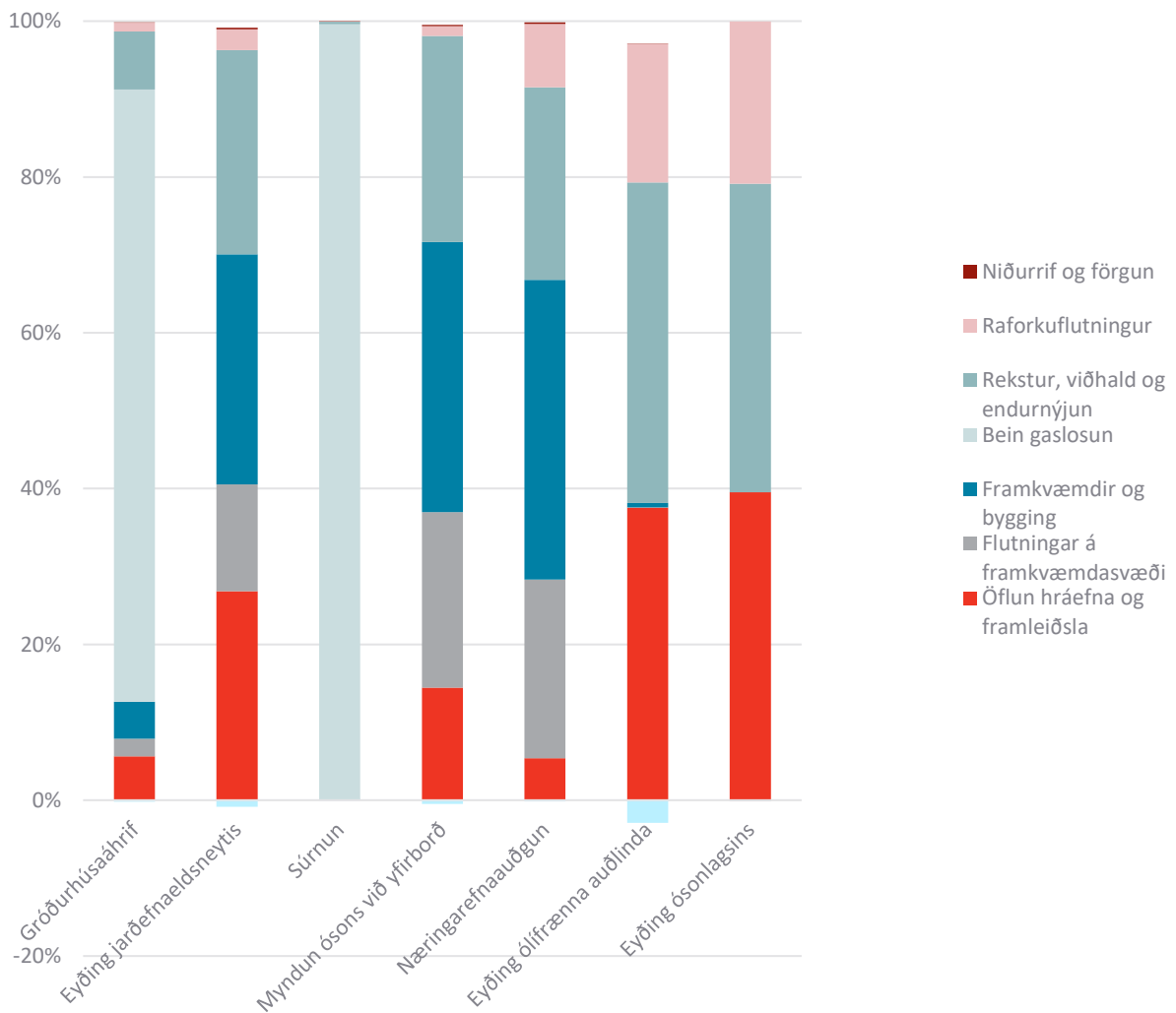
<p>Myndun ósons við yfirborð jarðar (e. photochemical ozone formation)</p>	<p>Í andrúmslofti sem inniheldur köfnunarefnisoxíð og rokgjörn, lífræn efnasambönd (VOCs) getur óson myndast með aðstoð sólarljóss. Þrátt fyrir að óson sé mjög mikilvægt í efri loftþjúpum er aukinn styrkur ósons í andrúmsloftinu 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 [52].</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 í skóglendi, á dýralífi, vötnum og mannvirkjum.</p>
<p>Næringarefnaauðgun (e. eutrophication)</p>	<p>Næringarefnaauðgun getur átt sér stað í vatni eða í jarðvegi. Nítröt og fosföt eru nauðsynleg öllu lífi, hins vegar getur hár styrkur næringarefna, t.d. í vatni valdið óhóflegum þörungavexti sem leiðir af sér lækkaðan styrk súrefnis í vatninu. Næringarefnaauðgun getur valdið miklum skaða í vistkerfum með aukinni dánartíðni lífvera og lífverur sem krefjast lágs styrks næringarefna geta 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 málmgrýti, hráolíu og önnur hráefni sem unnin eru úr námum og eru óendurnýjanleg. Þessi flokkur umhverfisáhrifa tekur tillit til minnkunar á forða óendurnýjanlegra hráefna sem verður við vinnslu þeirra og notkun. Forði auðlindar er skilgreindur sem það magn auðlindarinnar sem er þekkt og er hagkvæmt að nýta.</p>
<p>Vatnsskortur (e. water depletion potential)</p>	<p>Vatnsskortur er mælikvarði á það hversu mikið er gengið á vatnsauðlindir heims og þar með vatnsauðlindir vistkerfa. Þetta er mikilvægur umhverfisþáttur á viðkvæmari heimssvæðum þar sem sjálfbær orkuuppbygging á sér stað, en á e.t.v. minna við í flestum tilvikum fyrir íslensk verkefni.</p>

VIÐAUKI B FLÆÐIRIT



MYND 20 Flæðirit af samsetningu Gufustöðvarinnar og helstu þáttum orkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun.

VIÐAUKI C TÖLULEGAR NIÐURSTÖÐUR



MYND 21 Niðurstöður greiningar samkvæmt aðferðafræði CML2001.

Tölulegar niðurstöður fyrir mismunandi flokka umhverfisáhrifa frá vinnslu á 1 kWst orku í Gufustöðinni á vistferli aflstöðvarinnar.

UMHVERFIS- ÁHRIFAFLOKKUR	EINING	ÖFLUN HRÁEFNA OG FRAMLEIÐSLA	FLUTNINGAR Á FRAMKVÆMDA- SVÆÐI	FRAMKVÆMDIR OG BYGGING	BEIN GASLOSUN
GHÁ-heild	[kg CO ₂ íg.]	3,41E-03	1,38E-03	2,89E-03	4,74E-02
GHÁ-jarðefnaeldsneyti	[kg CO ₂ íg.]	3,43E-03	1,38E-03	2,74E-03	4,74E-02
GHÁ-lífkynja	[kg CO ₂ íg.]	-2,26E-05	-1,51E-06	1,18E-04	0,00E+00
GHÁ-luluc	[kg CO ₂ íg.]	6,07E-07	1,68E-06	2,58E-05	0,00E+00
EÓ	[kg CFC 11 íg.]	2,54E-11	1,06E-16	-3,36E-15	0,00E+00
SÚ	[mól H ⁺ íg.]	9,80E-06	4,36E-05	3,83E-05	0,00E+00
NEA-ferskvatn	[kg PO ₄ íg.]	5,79E-09	9,28E-10	1,05E-08	0,00E+00
NEA-sjór	[kg N íg.]	2,28E-06	1,06E-05	1,74E-05	0,00E+00
NEA-jarðvegur	[mól N íg.]	2,31E-05	1,16E-04	1,91E-04	0,00E+00
MÓY	[kg NMVOC íg.]	7,12E-06	2,95E-05	5,20E-05	0,00E+00
EA	[kg Sb íg.]	9,74E-09	2,29E-11	1,79E-10	0,00E+00
EJ	[MJ, nettó varmagildi]	3,50E-02	1,71E-02	3,72E-02	0,00E+00
VN	[m ³ heims íg. svipt]	5,93E-04	4,17E-06	1,80E-05	0,00E+00

UMHVERFIS- ÁHRIFAFLOKKUR	EINING	REKSTUR, VIÐHALD OG ENDURNÝJUN	ORKU- FLUTNINGUR	NIÐURRIF OG FÖRGUN	ÁVINNINGUR AF ENDURVINNSLU
GHÁ-heild	[kg CO ₂ íg.]	4,50E-03	6,88E-04	1,85E-05	-1,31E-04
GHÁ-jarðefnaeldsneyti	[kg CO ₂ íg.]	4,43E-03	7,10E-04	1,72E-05	-1,31E-04
GHÁ-lífkynja	[kg CO ₂ íg.]	5,97E-05	-2,40E-05	1,15E-06	-3,68E-08
GHÁ-luluc	[kg CO ₂ íg.]	1,12E-05	1,12E-06	1,02E-07	-5,99E-09
EÓ	[kg CFC 11 íg.]	2,55E-11	1,35E-11	-7,94E-17	-4,99E-15
SÚ	[mól H ⁺ íg.]	3,36E-05	1,41E-06	3,06E-07	-3,83E-07
NEA-ferskvatn	[kg PO ₄ íg.]	5,53E-09	5,91E-09	4,81E-11	-8,18E-11
NEA-sjór	[kg N íg.]	1,12E-05	3,65E-07	9,59E-08	-8,22E-08
NEA-jarðvegur	[mól N íg.]	1,22E-04	3,97E-06	1,06E-06	-8,35E-07
MÓY	[kg NMVOC íg.]	3,28E-05	1,10E-06	2,52E-07	-2,71E-07
EA	[kg Sb íg.]	1,36E-08	6,40E-09	7,21E-13	-1,26E-09
EJ	[MJ, nettó varmagildi]	3,34E-02	3,61E-03	2,33E-04	-1,39E-03
VN	[m ³ heims íg. svipt]	2,27E-04	2,10E-03	1,32E-07	-2,61E-05



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 - Bjarnarflag” (e. Life Cycle Assessment of Geothermal Electricity Production at Bjarnarflag)

We were engaged by Landsvirkjun to conduct an independent limited assurance on the life cycle GHG emissions of Bjarnarflag, reported in the life cycle assessment of Bjarnarflag in Chapter 4.2 (here after the '*Report*'), dated 25th April 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 April 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 reviewed life cycle assessment covers the full expected lifetime of the geothermal power plant. As the assessment includes future operational phases, assumptions regarding the plant's future energy production are required. These assumptions are based on projections and scenarios that are inherently uncertain due to potential and unforeseeable changes in operational performance, maintenance schedules, and external factors such as market or regulatory developments and acute physical events. As a result, the total energy output over the plant's lifetime and thus the environmental impacts per kWh, may differ from those estimated in the LCA.

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 aim 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