

Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma

Kröflustöð





Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma Kröflustöð

Höfundar

Alexandra Kjeld, Ása Rut Benediksdóttir

Dagsetning

Apríl 2025

Lykilsíða

Skýrsla LV nr	LV-2025-023	Dagsetning	Apríl 2025
Fjöldi síðna	70 s.	Upplag	1
Dreifing	[x] Birt á vef LV	[] Opin innan LV	[] Takmörkuð til [dags.]
Titill	Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma: Kröflustöð		
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 Kröflustöð, sem unnin er skv. alþjóðlegum stöðlum. Metin eru umhverfisáhrif frá framleiðslu og flutningum byggingarefna og vélbúnaðar, frá byggingarframkvæmdum, frá beinni losun og orkunotkun við rekstur stöðvarinnar í 40 ár, ásamt niðurrifi og endurvinnslu byggingarefna. Niðurstöðurnar eru á formi tölulegra upplýsinga um umhverfisáhrif raforkuvinnslunnar og leiða í ljós að kolefnisspor raforkuvinnslu í Kröflustöð að meðtöldum raforkuflutningi er 89 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, Kröflustöð, losun		

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar



VISTFERILSGREINING RAFORKUVINNSLU MEÐ JARÐVARMA

Kröflustöð

25.04.2025



SKÝRSLA – UPPLÝSINGABLAÐ

SKJALALYKILL

108413-SKY-002-V01

SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI

70

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 raforkuvinnslu með jarðvarma. Kröflustöð

VERKHEITI

Vistferilsgreining fyrir Kröflustöð

VERKKAUPI

Landsvirkjun

HÖFUNDUR

Alexandra Kjeld, Ása Rut Benediktsdóttir

ÚTDRÁTTUR

Í þessari skýrslu er að finna niðurstöður vistferilsgreiningar fyrir Kröflustöð, sem unnin er skv. alþjóðlegum stöðlum. Metin eru umhverfisáhrif frá framleiðslu og flutningum byggingarefna og vélbúnaðar, frá byggingarframkvæmdum, frá beinni losun og orkunotkun við rekstur stöðvarinnar í 40 ár, ásamt niðurrifi og endurvinnslu byggingarefna. Niðurstöðurnar eru á formi tölulegra upplýsinga um umhverfisáhrif raforkuvinnslunnar og leiða í ljós að kolefnisspor raforkuvinnslu í Kröflustöð að meðtöldum raforkuflutningi er 89 g CO₂-ígildi/kWst. Niðurstöður greiningarinnar draga fram hvar finna megi helstu tækifæri til úrbóta í vistferli jarðvarmastöðvarinnar.

ÚTGÁFUSAGA

NR.	HÖFUNDUR	DAGS.	RÝNT	DAGS.	SAMÞYKKT	DAGS.
01	ÁRB	17.10.24	AK, EMG	28.10.24	ÁRB, AK	5.11.24
02	Landsvirkjun	14.11.24	ÁRB	28.11.24	AK	16.12.24
03	ÁRB	01.04.25	AK	14.04.25	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. Í dag er hlutur jarðvarma í frumorkunotkun Íslendinga 60,9%, en sé litið til raforkuvinnslu eingöngu er hlutur vatnsafls 73% og jarðvarma 27%. Markmið þessa verkefnis er að greina og meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu í Kröflustöð, 60 MW_e, sem var gangsett árið 1978. Verkefnið er jafnframt liður í að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu 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 virðisikeðju 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.

Aðgerðareining (e. functional unit) vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem **1 kWst raforka unnin í Kröflustöð**. Reiknað er með 40 ára líftíma stöðvarinnar í samræmi við leiðbeiningar og til þess að niðurstöður verði samanburðarhæfar við sambærilegar greiningar. 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 rekstartíma 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 raforkuvinnslu í Kröflustöð er 89 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (89%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökvanum á 40 árum, eða 79,4 g CO₂-ígildi/kWst. Framleiðsla byggingarefna og búnaðar og framkvæmdir mynda samanlagt 2,5 g CO₂-ígildi/kWst. Af öllum mannvirkjum stöðvarinnar vega borholurnar þýngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og orkunotkun borunar bæði núverandi borhola og tilvonandi viðhaldshola, eða samanlagt 2,7 g CO₂-ígildi/kWst.

Kolefnisspor raforku Kröflustöðvar er af sömu stærðargráðu og nýlegar niðurstöður sýna fyrir aðrar jarðvarmavirkjanir. 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. Kröflustöð fellur innan þessara marka og uppfyllir því fyrsta viðmið reglugerðarinnar.

Losun brennisteinsvetnis á rekstrartíma Kröflustöðvar er aðalvaldur súrnunar. Gastegundin er hvarfgjörn og í oxandi umhverfi getur hún myndað brennistein (S), brennisteinstvíoxíð (SO_2) eða brennisteinssýru (H_2SO_4), 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 raforku hafi áhrif á heildarlosun frá þessum svæðum. Náttúruleg losun um jarðveg á Kröflusvæðinu er þó þekkt fyrir að vera veruleg og jafnframt meiri en frá öðrum jarðhitasvæðum á Íslandi.

Upplýsingar um framkvæmd og rekstur Kröflustöðvar 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 kerfismarka, 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 (CO_2) og brennisteinsvetnis (H_2S) 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. 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 raforkunni 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, Kröflustöð, 60 MW_e, which is one of the Iceland's oldest geothermal power plants and came online in 1978. 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 Kröflustöð Geothermal Station. A lifetime of 40 years is assumed. 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 Kröflustöð is 89 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 79.4 g CO₂-eq/kWh or 89%. The manufacturing and construction of station buildings, infrastructure and machinery accounts for 2.5 g CO₂-eq/kWh or 3% of the carbon footprint. Out of all the station's infrastructure unit, the most carbon intensive are the wells, due to fuel and material use for the drilling and casing of each well, in total constituting 2.7 g CO₂-eq/kWh.

The carbon footprint of electricity generated at Kröflustöð 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 results confirm that the generation of electricity from geothermal energy at Kröflustöð produces less than 100 g CO₂e/kWh, thus fulfilling the technical screening criteria set by the EU regulation no. 2020/852 to be considered a substantial contribution to climate change mitigation.

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

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) or natural emissions 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 Kröflustöð	13
2 VISTFERILSGREINING FYRIR KRÖFLUSTÖÐ	16
2.1 Markmið og umfang	16
2.2 Aðgerðareining og líftími	16
2.3 Kerfismörk	19
2.4 Umhverfisáhrifaflokkar	20
2.5 Aðferðir við gagnaöflun og gæði og uppruni gagna	20
2.6 Útilokunarviðmið	21
3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA	22
3.1 Framleiðsla og framkvæmdir	22
3.2 Rekstur og viðhald - raforkuvinnsla í Kröflustöð	31
3.3 Niðurrif stöðvar, förgun og endurvinnsla	36
3.4 Flutningur raforku	36
4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR	38
4.1 Umhverfisáhrif á vistferli Kröflustöðvar	38
4.2 Kolefnisspor raforkuvinnslu	39
5 UMRÆÐUR	43
5.1 Vistferilsgreiningar jarðvarmastöðva	43
5.2 Bein losun og náttúruleg losun gróðurhúsalofttegunda	44
5.3 Ein af elstu starfandi jarðvarmavirkjunum landsins	47
5.4 Breytilegur líftími	47
6 LOKAORÐ	49
7 HEIMILDASKRÁ	50

MYNDASKRÁ

MYND 1	Kröflustöð er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [11]. _____	14
MYND 2	Einfölduð vinnslurás jarðvarmavinnslu og helstu þættir raforkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun. _____	15
MYND 3	Helstu viðburðir yfir líftíma Kröflustöðvar og afmarkaður líftími stöðvarinnar í þessari greiningu, þ.e. árabilið 1995 - 2034. _____	18
MYND 4	Einfölduð mynd af kerfismörkum vistferilsgreiningarinnar. _____	19
MYND 5	Aðkoma að Kröflustöð er eftir Kröfluvegi nr. 863 frá Þjóðvegi 1 sem er um 9 km langur. _____	23
MYND 6	Unnið við borun og fóðrun á einum af borholum Kröflustöðvar árið 1988. Mynd: Landsvirkjun. _____	25
MYND 7	Holutoppur og gufuháfur við eina af borholum Kröflustöðvar 1986. Ljósmynd: Landsvirkjun _____	26
MYND 8	Loftmynd af Kröflustöð frá 2024 sem sýnir helstu mannvirki stöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun. _____	27
MYND 9	Loftmynd af nokkrum af borholum Kröflustöðvar, en þær eru dreifðar á stórt svæði. Mynd: Landsvirkjun. _____	28
MYND 10	Menn að störfum við viðhald á hverfli. Mynd: Landsvirkjun. _____	29
MYND 11	Mannvirki Kröflustöðvar. Mynd: Landsvirkjun. _____	30
MYND 12	Kröflueldar árið 1980. Mynd: Landsvirkjun. _____	34
MYND 13	Unnið að endurnýjun á kæliturni 1 í Kröflustöð. Mynd: Landsvirkjun. _____	35
MYND 14	Umhverfisáhrif vegna vinnslu 1 kWst raforku í Kröflustöð. Á myndinni má sjá hlutdeild mismunandi þátta vistferils aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa. _____	39
MYND 15	Kolefnisspor Kröflustöðvar er 89 g CO ₂ -ígildi fyrir hverja unna kWst. Myndin sýnir hvernig kolefnissporið skiptist milli mismunandi fasa vistferilsins. _____	40
MYND 16	Kolefnisspor Kröflustöðvar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar. _____	40
MYND 17	Gróðurhúsaáhrif einstakra efnis- og verkþátta í kolefnisspori framleiðslu- og framkvæmdafasa Kröflustöðvar. _____	41
MYND 18	Gróðurhúsaáhrif einstakra framleiðslu- og framkvæmdarþátta innan ólíkra hluta Kröflustöðvar. _____	42
MYND 19	Meðallosun CO ₂ og H ₂ S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2022. _____	44
MYND 20	Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum og hitaveitum. _____	45
MYND 21	Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagni. _____	45
MYND 22	Kröflustöð er staðsett á háhitasvæðinu við Mývatn á Norðurlandi eystra. Mynd: Landsvirkjun. _____	46
MYND 23	Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í Kröflustöð með breytilegum líftíma. Kolefnisspor hækkar eftir því sem meiri rekstrarsaga er tekin með í reikninginn, þ.m.t. Kröflueldar (1975-1984), en lækkar svo aftur þegar tekið er mið af framtíðarspám út frá núverandi rekstri. _____	48
MYND 24	Niðurstöður greiningar samkvæmt aðferðafræði CML2001. _____	57

TÖFLUSKRÁ

TAFLA 1	Helstu kennistærðir Kröflustöðvar. _____	14
TAFLA 2	Aflstöðvar á Íslandi sem nýta jarðvarma til raforkuvinnslu eingöngu eða til hitaveitu einnig [12]. _____	15
TAFLA 3	Hlutar vistferils raforkuvinnslu í Kröflustöð sem liggja innan kerfismarkna _____	20
TAFLA 4	Umhverfisáhrifaflokkar í samræmi við staðal EN 15804+A2. _____	20

TAFLA 5	Yfirlit yfir þær borholur sem hafa verið boraðar í Kröflustöð. _____	23
TAFLA 6	Hráefna- og eldsneytismagn á hverja borholu Kröflustöðvar ásamt úrgangsmýndun. Heildarmagn efna er áætlað fyrir 51 boraðar og fóðraðar holur í Kröflustöð sem boraðar voru á árunum 1974-2016. _____	26
TAFLA 7	Flatarmál og rúmmál bygginga Kröflustöðvar (gögn frá Landsvirkjun). _____	27
TAFLA 8	Samantekt byggingarefna fyrir rakaskiljur Kröflustöðvar. _____	28
TAFLA 9	Samantekt byggingarefna fyrir vélasamstæður og kalda enda (eimsvala og kæliturna) Kröflustöðvar (2 x 30 MW). _____	29
TAFLA 10	Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Kröflustöðvar. _____	31
TAFLA 11	Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Kröflustöðvar. _____	31
TAFLA 12	Eigin rafmagnsnotkun og töp vegna rekstrar í Kröflustöð á árunum 2018 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. _____	32
TAFLA 13	Eldsneytisnotkun vegna rekstrar í Kröflustöð á árunum 2008 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili. _____	32
TAFLA 14	Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá Kröflustöð eftir skiptingu á milli Gufustöðvarinnar og Kröflustöðvar á árunum 2019 – 2023 eftir uppsettu afli. _____	33
TAFLA 15	Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma í Kröflustöð. _____	33
TAFLA 16	Samantekt byggingarefna fyrir viðhald á vélasamstæðu Kröflustöðvar. _____	34
TAFLA 17	Samantekt hráefna í ofanjarðarmannvirkjum sem farið er með til urðunar eða endurvinnslu að loknu niðurrifi. Allar tölur eru gefnar í tonnum. _____	36
TAFLA 18	Niðurstöður vistferilsgreininga (LCA) fyrir jarðvarmavirkjanir. _____	43
TAFLA 19	Forsendur næmnigreiningar á líftíma Kröflustöðvar. Í þessari greiningu er miðað við 40 ára líftíma (1995-2034). _____	48

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

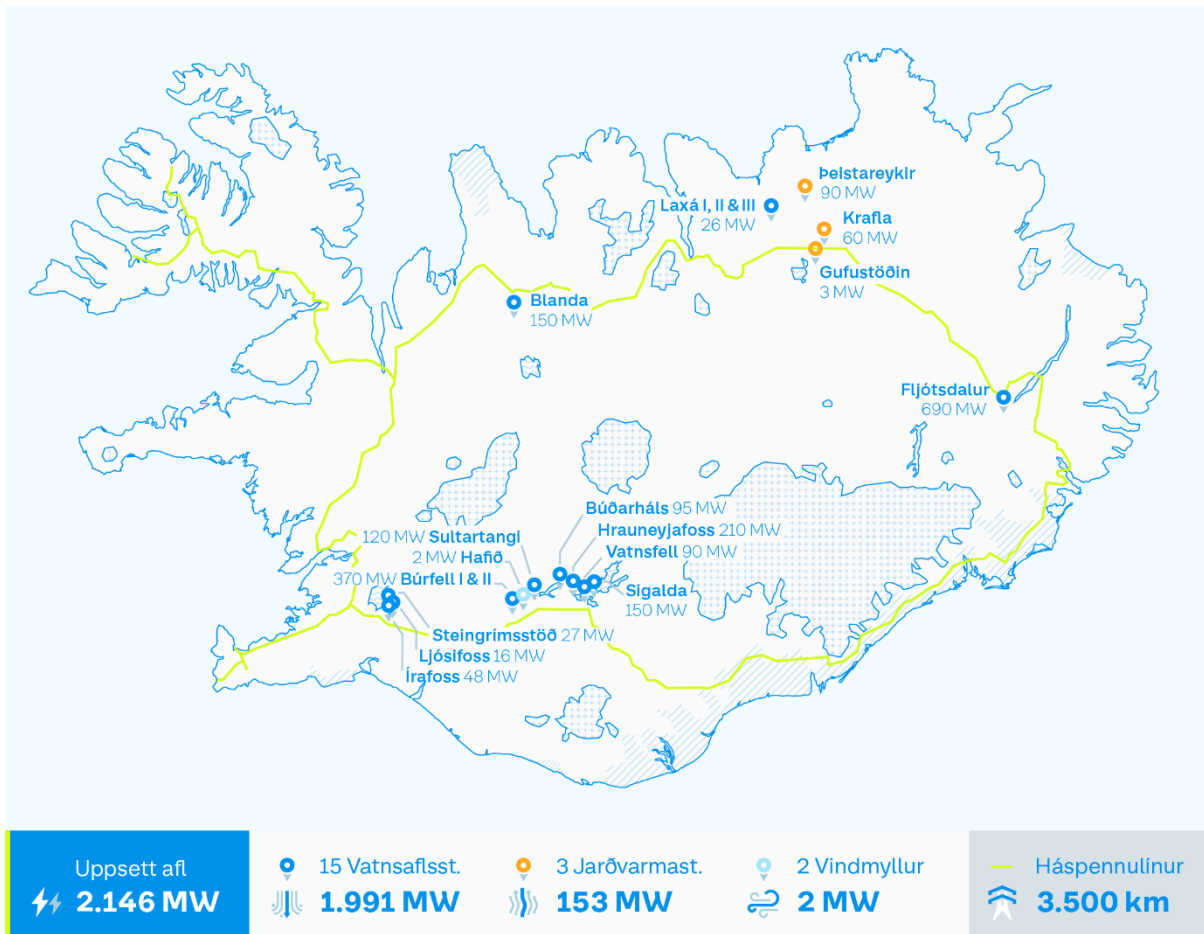
Markmið verkefnisins er greining og mat á umhverfisáhrifum raforkuvinnslu í jarðvarmastöð Landsvirkjunar, Kröflustöð, sem er ein af elstu jarðvarmastöðvum landsins. Nú þegar hafa verið gerðar sambærilegar greiningar fyrir Búðarhálsstöð, Fljótsdalsstöð, Blöndustöð - sem allt eru vatnsaflsstöðvar - Búrfellsstöð 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 Kröflustöð

Kröflustöð er ein af þremur aflstöðvum Landsvirkjunar á Norðausturlandi (Mývatnssvæði) sem nýtir jarðvarma til orkuvinnslu, en hinar tvær eru Þeistareykjastöð og Gufustöðin í Bjarnarflagi, sjá mynd 1. Bygging Kröflustöðvar hófst árið 1974 með tilraunaborunum, en borun vinnsluhola og bygging stöðvarinnar hófst árið 1975. Kröflustöð hóf raforkuframleiðslu árið 1978 og fyrst var gufan nýtt að

knýja einn 30 MW hverfil. Allt frá árinu 1999 hefur Kröflustöð starfað með tveimur vélasamstæðum með samtals 60 MW uppsett afl og orkuvinnslugeta er um 500 GWst á ári, sjá töflu 1. Raunorkuvinnsla hefur yfirleitt verið um og yfir orkuvinnslugetu eins og mynd 3 í kafla 2.2 sýnir.



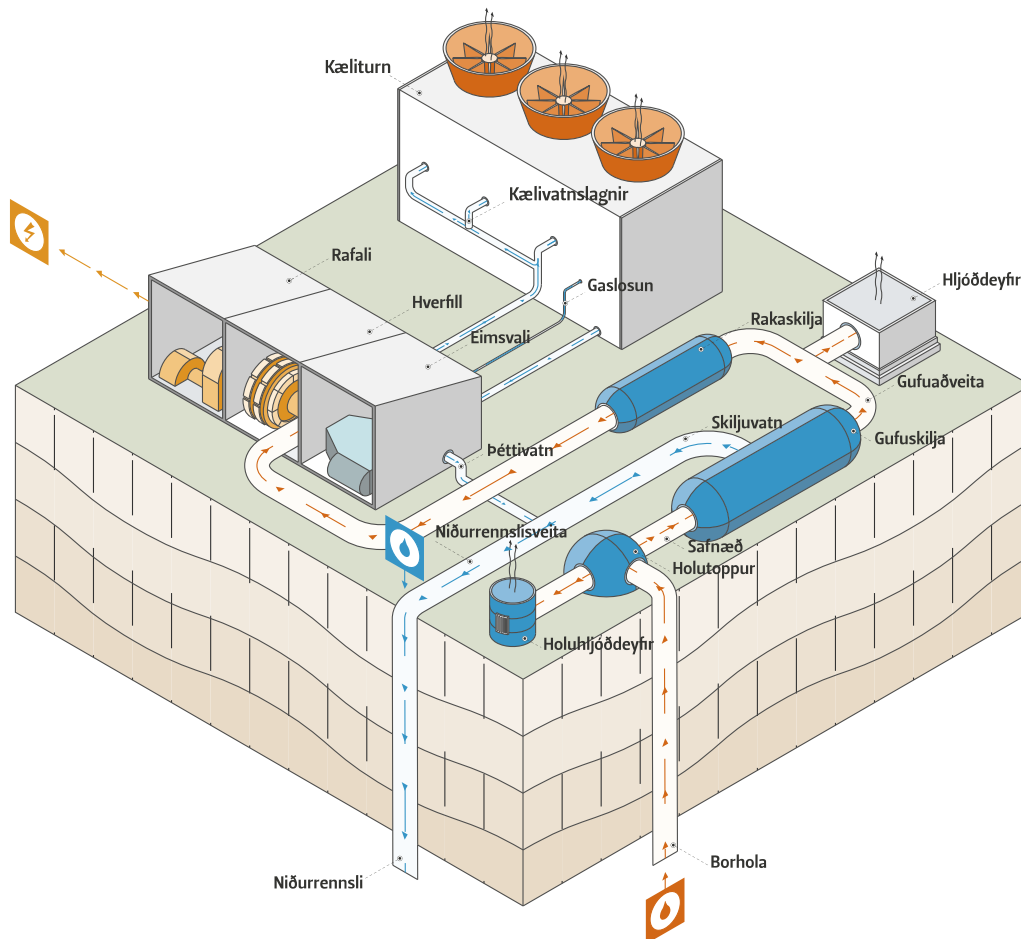
MYND 1 Kröflustöð er staðsett á Norðausturlandi þar sem Landsvirkjun rekur alls þrjár jarðvarmastöðvar [11].

TAFLA 1 Helstu kennistærðir Kröflustöðvar.

KRÖFLUSTÖÐ	
Gangsetning	1978
Uppsett afl 1978-1998	30 MW
Uppsett afl 1999-	60 MW
Gufuhverfill 1 1978-	30 MW
Gufuhverfill 2 1999-	30 MW
Orkuvinnslugeta 1978-1998	233 GWst á ári
Orkuvinnslugeta 1999-	465 GWst á ári

Borholur Kröflustöðvar eru að meðaltali um 1,7 km djúpar (sjá kafla 3.1.2) og er hitastig jarðhitageymisins talið vera á bilinu 200 – 320°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 2, og þar eftir er hún nýtt til raforkuvinnslu. Frá árinu 2002 hefur hluta af skiljuvatninu frá skiljustöð verið dælt niður í jarðhitageyminn til að styðja við jarðhitakerfið. Gas sem kemur upp með gufunni losnar út í andrúmsloft við raforkuvinnsluna upp um kæliturna.

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 heildar afl jarðvarmastöðva á Íslandi 753 MW_e [12], sjá töflu 2.



MYND 2 Einfölduð vinnslurás jarðvarmavinnslu og helstu þættir raforkuvinnslunnar. Mynd: Landsvirkjun.

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 (þurrgefufu, 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
Nesjavallavirkjun	1998-2005	120 MW _e (+ 300 MW _{th} í varmaafli)	SF
Hellisheiðavirkjun	2006-2011	303,4 MW _e (+133 MW _{th} í varmaafli)	SF/DF
Reykjanesvirkjun	2006-2022	130 MW _e	SF/DF
Þeistareykjastöð	2017-2018	90 MW _e	SF
Flúðavirkjun	2018	0,6 MW _e	B

2 VISTFERILSGREINING FYRIR KRÖFLUSTÖÐ

2.1 Markmið og umfang

Markmið vistferilsgreiningarinnar er að meta umhverfisáhrif raforkuvinnslu í Kröflustöð. Vistferilsgreiningin nær til vinnslu auðlinda, öflun hráefna, 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].

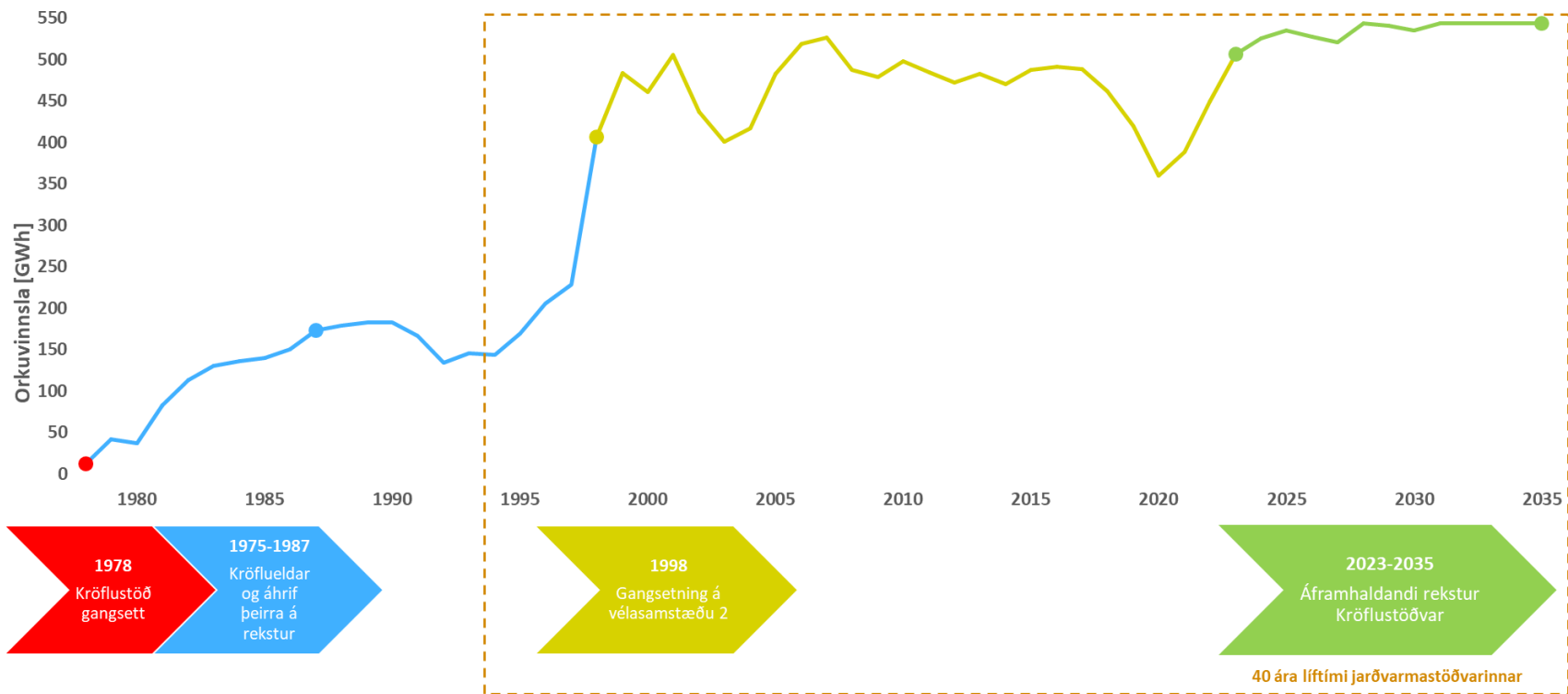
2.2 Aðgerðareining og líftími

Aðgerðareining vistferilsgreiningarinnar er skilgreind sem 1 kWst raforka sem unnin er í Kröflustöð. Umhverfisáhrif og notkun auðlinda við vinnslu raforkunnar eru reiknuð fyrir hverja unna kWst í stöðinni.

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 líftímamann sem 30 ár. Kröflustöð hefur verið í rekstri frá 1978 og verður að öllum líkindum í áframhaldandi rekstri að minnsta kosti fram til ársins 2035, en þá fer Kröflustöð mögulega í stóra endurnýjun. Í þessari greiningu er því reiknað með 40 ára líftíma. Er það jafnframt í samræmi við núgildandi og samræmdar leiðbeiningar

fyrir gerð umhverfisyfirlýsinga. Skilgreindur líftími aflstöðvarinnar er settur frá árinu 1995 til 2034, sjá mynd 3.

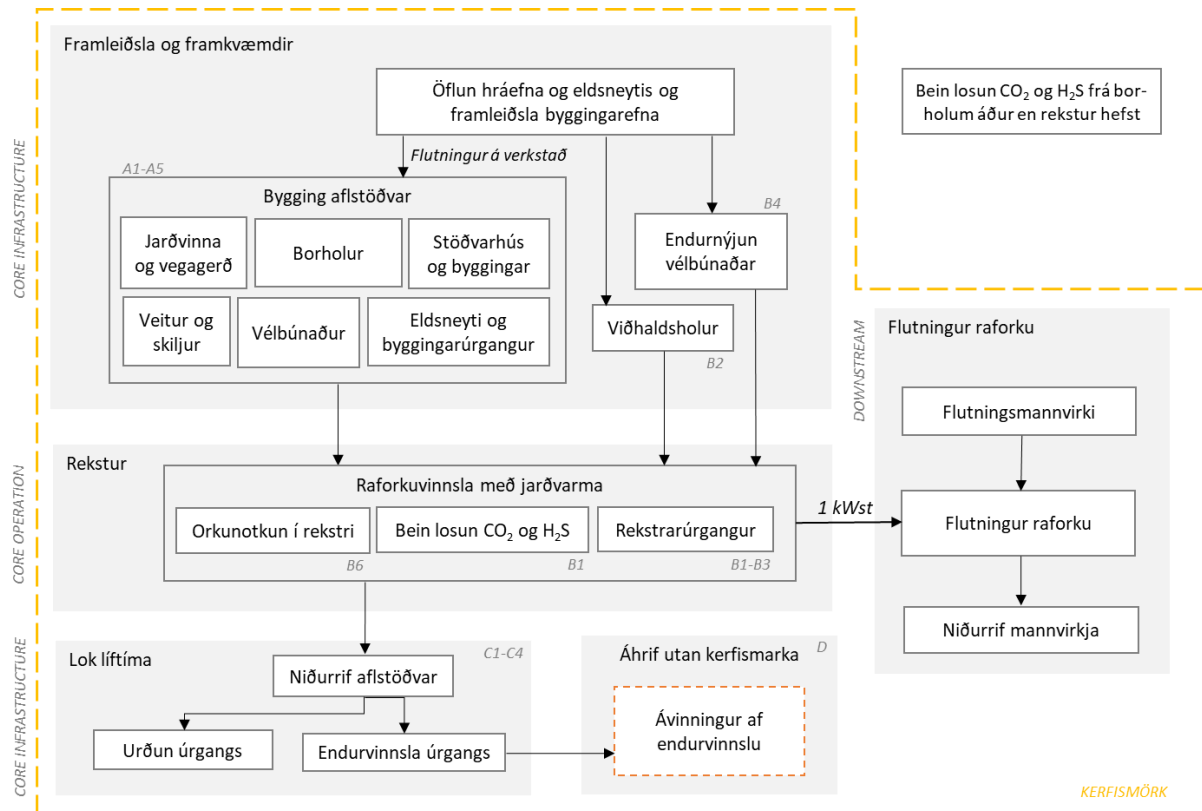
Heildarorkuvinnslan yfir þetta tímabil byggir á raunverulegri heildarraforkuvinnslu á árunum 1995-2022 sem var að meðaltali 434 GWh/ári. Árleg raforkuvinnsla á þessu tímabili var almennt um og yfir uppsettri orkuvinnslugeta aflstöðvarinnar, sjá töflu 1 og orkuvinnslu sem sjá má á mynd 3. Fyrir tímabilið 2023-2039 er gert ráð fyrir að raforkuvinnsla verði í góðu samræmi við uppsett aflstöðvarinnar, eða að meðaltali 534 GWh/ári, sem er svipað og orkuvinnslugeta Kröflustöðvar, sjá töflu 1 og mynd 3. 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 mun heildarorkuvinnslan á þessu 40 ára tímabili vera 19 TWst.



MYND 3 Helstu viðburðir yfir líftíma Kröflustöðvar og afmarkaður líftími stöðvarinnar í þessari greiningu, þ.e. árabilið 1995 - 2034.

2.3 Kerfismörk

Kerfismörk vistferilsgreiningarinnar fela í sér vinnslu auðlinda, framleiðslu hráefna, byggingarefna og búnaðar, flutninga hráefna, byggingarefna, búnaðar og úrgangs, byggingu Kröflustöðvar 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 Kröflustöðvar, 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 orkuflytningafyrirtækja 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 raforkuvinnslu í Kröflustöð 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 núgildandi 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	VS [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. Kröflustöð er ein 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 nýjustu jarðvarmavirkjun sem reist hefur verið á Íslandi, sem byggð var á mjög góðum gögnum.

Auk þess voru upplýsingar um rekstur og viðhald Kröflustöðvar fengnar frá Landsvirkjun. Losun vegna vinnslu jarðvarma var byggð á mælingum [12] 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 [18]. 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 Kröflustöð 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 Kröflustöðvar og engin gögn eða ferli með teljandi umhverfisáhrif voru útilokuð.

3 ÖFLUN OG MEÐHÖNDLUN GAGNA

3.1 Framleiðsla og framkvæmdir

Í þessu verkefni eru framleiðslufasi og framkvæmdafasi vegna Kröflustöðvar 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 Kröflustöðvar, þ.e. raforkuvinnslu, 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 heimreið að stöðvarhúsi, gröft og fyllingar undir stöðvarhús ásamt fyllingu á hluta af plönnum við stöðvarhús og gerð slóða milli stöðvarhúss og skiljustöðvarsvæðis. Ekki var hægt að nálgast gögn vegna jarðvegsframkvæmda fyrir Kröflustöð, og þar af leiðandi var gert ráð fyrir sömu dísilolíunotkun og fyrir Þeistareykjastöð, en heildarflatarmál bygginga Þeistareykjastöðvar (um 8.000 m²) er sambærilegt flatarmáli bygginga Kröflustöðvar (um 6.500 m²). Sjá olíunotkun og úrgang frá jarðvegsframkvæmdum í kafla 3.1.6.

3.1.1.2 Vega- og slóðagerð

Aðkoma að Kröflusvæðinu er eftir Kröfluvegi nr. 863 frá Þjóðvegi 1. Vegurinn er uppbyggður, um 9 km langur og lagður bundnu slitlagi. Notuð var vistferilsgreining EFLU frá árinu 2013 á lagningu sambærilegs 1+1 vegar í íslenska þjóðvegakerfinu, með bundnu slitlagi, til þess að áætla umhverfisáhrif þessarar vegagerðar [19]. Einnig voru gerðir slóðar að borholum stöðvarinnar, samtals um 10 km að lengd. Eldsneytisnotkun vegna slóðagerðar var byggð á áætlun EFLU verkfræðistofu fyrir vistferilsgreiningar sem EFLA gerði fyrir flutningskerfi Landsnets [20].



MYND 5 Aðkoma að Kröflustöð er eftir Kröfluvegi nr. 863 frá Þjóðvegi 1 sem er um 9 km langur.

3.1.2 Borholur

3.1.2.1 Boranir og fóðringar

Alls hafa 55 borholur verið boraðar og fóðraðar í Kröflustöð. Borholuhús eru hluti af frágangi hola og meðallengd þeirra er 1.656 m. Í þessari greiningu er gert ráð fyrir að allar borholur sem hafa verið boraðar á svæðinu og ekki er búið að steypa í, hvort sem þær nýtast til vinnslu eða ekki, tilheyri stöðinni og eru innan kerfismarka. Búið er að steypa í 4 borholur. Borholur sem boraðar voru fyrir tilsettan líftíma, þ.e. fyrir árið 1995, alls 28 talsins, eru teknar með í framleiðslu og framkvæmdafasa, en borholur sem boraðar voru eftir árið 1995 eru skilgreindar sem viðhaldsborholur og eru því teknar með í rekstur og viðhald, sjá kafla 3.2.3. Í dag eru 21 borholur nýttar til raforkuvinnslu. Sjá má yfirlit yfir holur Kröflustöðvar í töflu 5.

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

BORHOLA NR.	BORUÐ	DÝPI (M)	ATHS.
K-01	1974	1138	Rannsóknarhola
K-02	1974	1204	Fyllt með mól
K-03	1975	1740	Ekki í notkun
K-03A	1983	985	Ekki í notkun
K-04	1975	2000	Ekki í notkun
K-05	1975	1299	Ekki í notkun
K-06	1976	2000	Í notkun

BORHOLA NR.	BORUÐ	DÝPI (M)	ATHS.
K-07	1976	2165	Búið að steypa í
K-08	1976	1658	Fyllt með mól
K-09	1976	1263	Búið að steypa í
K-10	1976	2082	Eftirlitshola
K-11	1976	2217	Ekki í notkun
K-12	1978	2222	Búið að steypa í
K-13	1980	2050	Borað út úr
K-13A	1983	1780	Í notkun
K-14	1980	2107	Í notkun
K-15	1980	2097	Niðurdæling
K-16	1981	1981	Borað út úr
K-16A	1997	2191	Í notkun
K-17	1980	2190	Í notkun
K-18	1981	2215	Eftirlitshola
K-19	1982	2150	Í notkun
K-20	1982	1823	Í notkun
K-21	1982	1200	Í notkun
K-22	1983	1876	Ekki í notkun
K-23	1983	1968	Stífluð
K-24	1988	1400	Í notkun
K-25	1990	2105	Ekki í notkun
K-26	1991	2127	Niðurdæling
K-27	1997	1771	Í notkun
K-28	1996	1003	Í notkun
K-29	1997	2103	Ekki í notkun
K-30	1997	2054	Í notkun
K-31	1997	1440	Í notkun
K-32	1998	1875	Í notkun
K-33	1999	2011	Niðurdæling
K-34	1999	2002	Í notkun
K-35	2007	2508	Ekki í notkun
K-36	2007	2501	Í notkun
K-37	2008	2194	Í notkun
K-38	2008	2700	Í notkun
K-39	2008	2865	Í notkun
K-40	2009	1460	Í notkun
K-41	2016	1313	Í notkun
KHB-08	1976	30	Rannsóknarhola
KHB-10	1976	30	Rannsóknarhola
KR-09	1997	62	Ekki í notkun
KS-01	2007	2502	Ekki í notkun
KV-01	2004	2894	Ekki í notkun
AE-05	2006	60	Rannsóknarhola
AE-06	2006	67	Rannsóknarhola
AE-07	2006	67	Rannsóknarhola

BORHOLA NR.	BORUÐ	DÝPI (M)	ATHS.
AE-11	2008	60	Rannsóknarhola
KN-01	2022	195	Niðurdæling
IDDP-01	2008	2104	Búið að steypa í



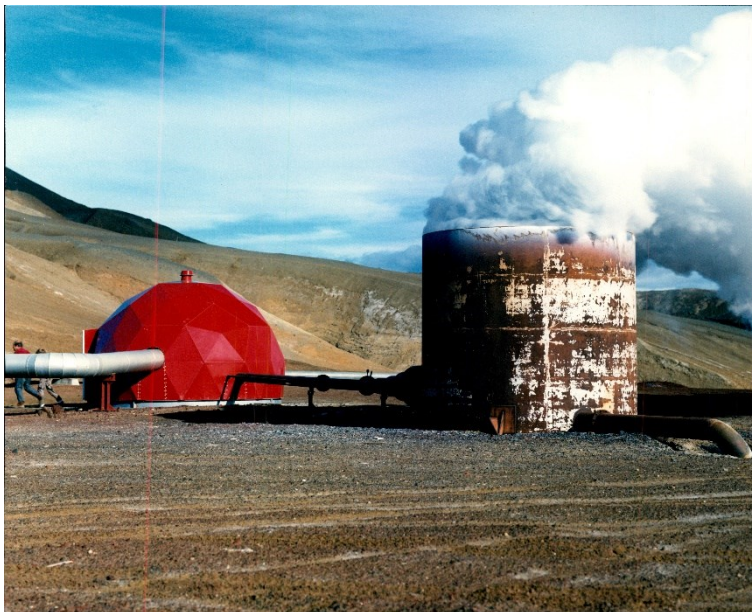
MYND 6 Unnið við borun og fóðrun á einum af borholum Kröflustöðvar árið 1988. Mynd: Landsvirkjun.

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

TAFLA 6 Hráefna- og eldsneytismagn á hverja borholu Kröflustöðvar ásamt úrgangsmýndun. Heildarmagn efna er áætlað fyrir 51 boraðar og fóðraðar holur í Kröflustöð sem boraðar voru á árunum 1974-2016.

HRÁEFNI	MEÐALTAL PER HOLU	ÁÆTLAÐ HEILDARMAGN	EINING
Bentonít	63	3238	tonn
Kísill (SiO ₂)	54	2756	tonn
Sement	164	8356	tonn
Barít	8	389	tonn
Perlít	3	154	tonn
Borvökvi (pólýmerar), þéttiefni og íblöndunarefni*	3	138	tonn
Stálfóðring (API 5CT staðall)	117	5.949	tonn
Ál (borholuhús)	0,3	17	tonn
Trefjaplast (borholuhús)	2	124	tonn
OLÍUNOTKUN			MAGN
Dísilólía	122	6.160	þús. lítrar
Smurefni	1	51	þús. lítrar
ÚRGANGUR			MAGN
Blandaður úrgangur	2	83	tonn
Timbur (litað og ólitað)	3	128	tonn
Spilliefni	2	105	tonn
Málmur	2	111	tonn

* 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.



MYND 7 Holutoppur og gufuháfur við eina af borholum Kröflustöðvar 1986. Ljósmynd: Landsvirkjun

3.1.2.2 Losun gass frá rannsóknar- og framkvæmdatíma

Framkvæmdir við byggingu Kröflustöðvar hófust árið 1974 með tilraunaborunum, en mælingar á gaslosun í Kröflustöð hófust ekki fyrr en árið 1977. Þar af leiðandi eru ekki til gögn fyrir losun gass frá rannsóknar- og framkvæmdatíma. Þar sem erfitt er að leggja mat á losun vegna tilraunborana, er henni sleppt í þessari greiningu.

3.1.3 Mannvirki aflstöðvar

3.1.3.1 Stöðvarhús, kæliturnapræi og stokkar

Gögn um byggingar Kröflustöðvar eru byggð á upplýsingum sem koma fram í skráningu mannvirkja í Bjarnarflagi og Kröflustöð [21]. Tafla 7 tekur saman upplýsingar um mannvirki Kröflustöðvar, gerð þeirra, flatarmál og rúmmál.

TAFLA 7 Flatarmál og rúmmál bygginga Kröflustöðvar (gögn frá Landsvirkjun).

BYGGING	GERÐ BYGGINGAR	FLATARMÁL (M ²)	RÚMMÁL (M ³)
Stöðvarhús	Steinsteypt	1460	30.660
Kæliturnar	Timbur	1280	21.380
Verkstæði og birgðaskemma	Stálgrind	969	4.849
Verkstæði og birgðaskemma	Stálgrind	396	1500
Þeysahús	Stálgrind	190	1.620
Brunadæluhús	Steinsteypt	80	320
Geymsluhús	Steinsteypt	40	146
Rakaskiljuhús	Stálgrind	30	97
Skiljuhús	Stálgrind	342	3.661
Lokahús	Stálgrind	103	659
Vinnubúðir og mötuneyti	Timbur/einingar	1131	3556



MYND 8 Loftmynd af Kröflustöð frá 2024 sem sýnir helstu mannvirki stöðvarinnar. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.3.2 Gufuveitur og vatnsveitur

Gufuveita (e. steam supply system) samanstendur af safnæðum frá borholum að safnæðastofnum, skiljustöðvum, aðveituæðum, lokahúsum og gufuháfum, auk gufuhljóðdeyfa. Ekki voru til nægilega góð gögn fyrir gufuveitu og þar af leiðandi var notast við efnismagn sem tekið var saman fyrir Þeistareykjastöð [7]. Þar sem borholur Kröflustöðvar eru dreifðar yfir stærra svæði en borholur Þeistareykjastöðvar var gert ráð fyrir tvöföldu efnismagni.



MYND 9 Loftmynd af nokkrum af borholum Kröflustöðvar, en þær eru dreifðar á stórt svæði. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.3.3 Skiljur

Rakaskiljur (e. steam separators) voru framleiddar á Íslandi. Efnismagn í rakaskiljum var fengið úr útboðsgögnum. Sjá má samantekt byggingarefna í töflu 8.

TAFLA 8 Samantekt byggingarefna fyrir rakaskiljur Kröflustöðvar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Stál	162
Ál	18
Steinull	4

3.1.3.4 Kaldavatsveitur

Ekki voru til gögn fyrir kaldavatsveitu í Kröflustöð. 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 kaldavatsveitna í kafla 3.1.6.

3.1.4 Vélbúnaður aflstöðvar

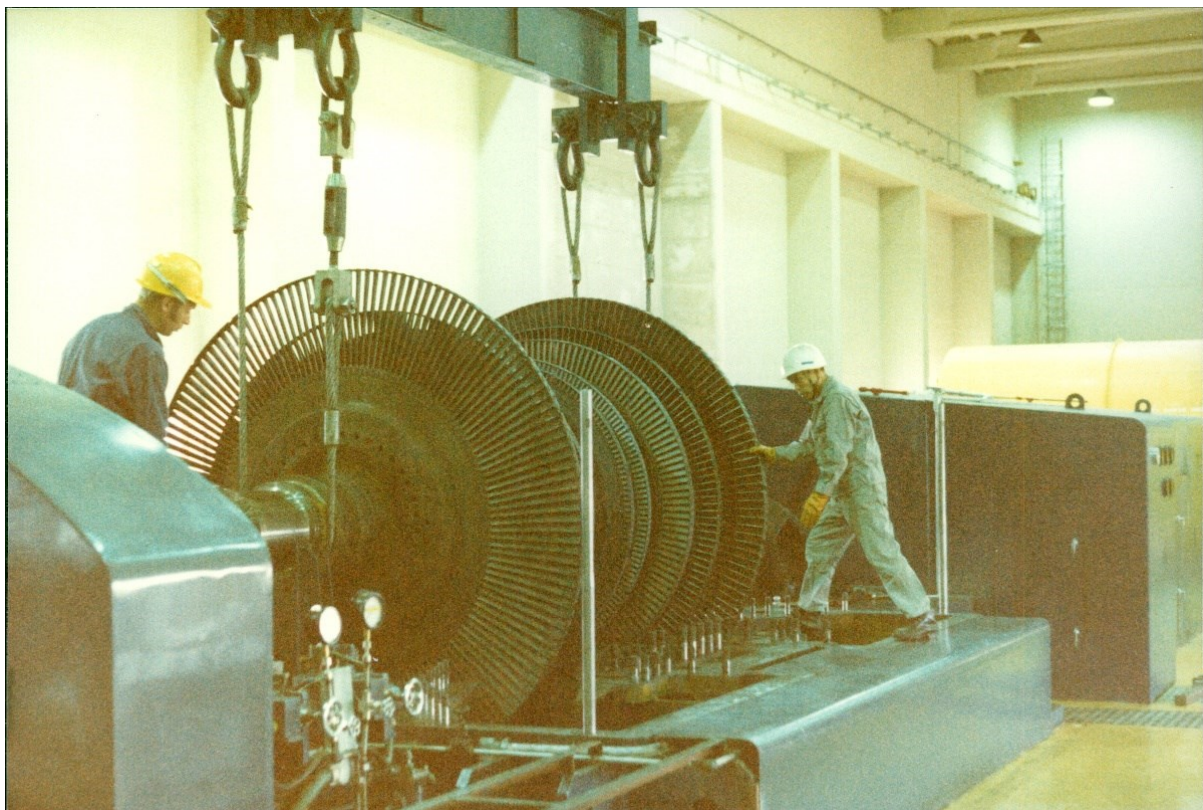
3.1.4.1 Vélasamstæða: hverfill, rafalar og kaldir endar

Vélasamstæða Kröflustöðvar felst í tveimur settum af 30 MW jarðgufuhverfli, rafala og búnaði fyrir kalda enda (eimsvalar, gastæmikerfi og kæliturnar) ásamt tilheyrandi lögnum og varahlutum. Efnismagn vélasamstæðu má sjá í töflu 9.

Mitsubishi framleiddi hverfla og eimsvala (Mitsubishi Heavy Industries), sem og rafala (Mitsubishi Electric Co.). Búnaðurinn var að öllum líkindum fluttur frá Yokohama í Japan. Kæliturnar voru framleiddir af SPX Cooling Technologies í Bandaríkjunum og gert er ráð fyrir að þeir hafi verið fluttir frá Kansas City og þaðan til Húsavíkurhafnar.

TAFLA 9 Samantekt byggingarefna fyrir vélasamstæður og kalda enda (eimsvala og kæliturna) Kröflustöðvar (2 x 30 MW).

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Byggingarstál	167
Ryðfritt stál	112
Ál	9
Trefjaplast	37
Timbur	312
Steypa	30
Steinull	6



MYND 10 Menn að störfum við viðhald á hverfli. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.4.2 Spennar

Spennarnir voru framleiddir af EGB og voru fluttir frá Austurríki. Hægt var að áætla magn hráefna í spennum út frá upplýsingaöflun vegna annarrar aflstöðvar Landsvirkjunar [2], þar sem búið var að áætla heildarmagnið miðað við massa í spennum. Miðað við skölun út frá uppsettu afli virkjananna er heildarþyngd einnar spennastæðu í Kröflustöð um 73 tonn.

3.1.4.3 Stöðvarveitur

Ekki voru til gögn fyrir stöðvarveitur í Kröflustöð. Þar af leiðandi var gert ráð fyrir sama efnismagni og notast var við í Þeistareykjastöð [7].



MYND 11 Mannvirki Kröflustöðvar. Mynd: Landsvirkjun.

3.1.5 Flutningur á verkstað

Gert var 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 til Kröflustöðvar. Við landflutninga á Íslandi er gert ráð fyrir að ökutæki aki tóm til baka. Flutningsvegalengdir fyrir einstök byggingarefni eru teknar saman í töflu 10 og flutningsvegalengdir fyrir ýmsan vélbúnað eru teknar saman í töflu 11.

TAFLA 10 Framleiðsluland byggingarefna og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Kröflustöðvar.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLendis (KM)	SJÓFLUTNINGUR (KM)	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI (KM)
Sement	Noregur/Danmörk	100	3.000	68
Kísill	Belgía	100	3.000	68
Bentonít	Bandaríkin	3.500	5.000	68
Stálfóðringar	Japan/Kína	500	21.500	68
Steypa (forsteypt)	Ísland	-	-	400
Steypujárn	Pólland	100	3.000	68
PP lagnir	Þýskaland	100	3.000	68
Stállagnir og byggingarstál	Þýskaland	100	3.000	68
Steinull	Ísland	-	-	215
Steypustyrktarstál	Hvíta Rússland	1.400	3.000	68
PEX plast	Svíþjóð	100	3.000	68

TAFLA 11 Framleiðsluland vélbúnaðar og flutningsvegalengdir frá framleiðslustað til Kröflustöðvar.

BYGGINGAREFNI	FRAMLEIÐANDI / FRAMLEIÐSLULAND	LANDFLUTNINGUR ERLendis (KM)	SJÓFLUTNINGUR (KM)	LANDFLUTNINGUR ÍSLANDI (KM)
Spennar	EGB, Austurríki	1.022	3.395	68
Vélbúnaður: gufuhverfill, rafall, eimsvali	Mitsubishi, Japan	136	22.273	68
Vélbúnaður: kæliturnar, lagnir	SPX Cooling Technologies, Bandaríkin	280	2.900	68
Stöðvarveitur og stöðvarnotkunarspennir	Þýskaland/Pólland	100	3.000	68

3.1.6 Bygging aflstöðvar

Bygging aflstöðvarinnar og borun vinnsluhola hófst árið 1975, en áður höfðu verið boraðar tilraunaborholur. Þar sem ekki var hægt að nálgast gögn yfir olíunotkun og úrgangsmyndun vegna ólíkra framkvæmdaþátta við Kröflustöð var gert ráð fyrir sömu eldsneytisnotkun og úrgangsmyndun og fyrir byggingu þeistareykjastöðvar [22]. Þetta er talin vera varfærin nálgun þar sem að uppsett afl Kröflustöðvar er lægra en uppsett afl þeistareykjastöðvar. Þessi aðferð var einnig nýtt til þess að meta magn úrgangs frá framkvæmdum, sem og meðhöndlun hans.

3.2 Rekstur og viðhald - raforkuvinnsla í Kröflustöð

Í þessum kafla er fjallað um það sem kalla mætti kjarnastarfsemi aflstöðvarinnar (e. core operation), þ.e. raforkuvinnsla á skilgreindum 40 ára líftíma aflstöðvarinnar. Þetta er sá fasi vistferilsins sem tekur við eftir að búið er að byggja stöðina, og felur í sér eldsneytisnotkun, úrgang frá rekstri og viðhaldi og beina losun gastegunda vegna vinnslunnar. Hér er einnig fjallað um nauðsynlegar endurfjárfestingar og viðhaldsframkvæmdir fyrir innviði stöðvarinnar (e. core infrastructure), þ.e. borun nýrra borhola til að viðhalda 60 MW_e 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 12.

TAFLA 12 Eigin rafmagnsnotkun og töp vegna rekstrar í Kröflustöð á árunum 2018 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili.

ÁR	RAFMAGNSNOTKUN (MWST)	RAFMAGNSTÖP (MWST)
2018	23.311	2.687
2019	21.632	1.646
2020	19.527	2.134
2021	19.744	2.070
2022	21.305	2.680
2023	28.905	2.105
Meðaltal 2018-2023	22.404	2.220

Eldsneytisnotkunin byggir á gögnum Landsvirkjunar frá árunum 2008-2023, sjá töflu 13. Magn úrgangs byggir á gögnum um rekstur Kröflustöðvar og Gufustöðvarinnar frá árabílinu 2019-2023, sjá töflu 14. Þar sem allur úrgangur Kröflustöðvar sameinast úrgangi Gufustöðvarinnar, var heildarmagn rekstrarúrgangs aflstöðvanna aðgreint út frá uppsettu afli þeirra.

TAFLA 13 Eldsneytisnotkun vegna rekstrar í Kröflustöð á árunum 2008 – 2023 og meðaltalsnotkun á þessu tímabili.

ÁR	BENSÍN (L)	DÍSILL (L)	LÍFDÍSILL (L)
2008	1.249	17.229	-
2009	2.723	45.377	-
2010	1.928	28.095	-
2011	1.528	30.073	-
2012	2.392	31.344	-
2013	2.088	45.837	-
2014	1.890	29.786	-
2015	1.102	31.611	-
2016	1.797	35.705	-
2017	1.545	35.294	3.942
2018	1.577	35.136	4.520
2019	1.647	21.215	15.574
2020	1.459	17.100	6.143
2021	2.096	15.093	7575
2022	1.172	10.493	11.381
2023	1.498	11.362	14.549
Meðaltal 2008-2023	1.731	27.547	9.098

TAFLA 14 Sundurliðað magn rekstrarúrgangs frá Kröflustöð eftir skiptingu á milli Gufustöðvarinnar og Kröflustöðvar á árunum 2019 – 2023 eftir uppsettu afli.

ÚRGANGSFLOKKAR	2019-2023 (TONN)		TONN/ÁRI
Timbur (málað og ómálað)	59	36%	12
Óvirkur úrgangur (jarð og steinefni, gler og postulín)	45	27%	9
Almennur óflokkaður úrgangur til urðunar	34	21%	7
Lífrænn úrgangur - Eldhúsúrgangur til jarðgerðar	8	5%	2
Spilliefni	6	3%	1
Plast	4	3%	1
Brotamálmar	4	2%	1
Pappír (bylgjupappír, tímarit, fernur, skrifstofupappír)	3	2%	1
Alls úrgangur	163	100%	33

3.2.2 Bein losun í andrúmsloftið frá rekstri

Jarðhitasvæði losa ýmsar gastegundir náttúrulega en vísbendingar eru um að jarðvarmavinnsla og boranir á svæðunum getur valdið aukinni losun í hverfandi magni eða flýtt fyrir henni [23]. Helstu gastegundir sem losna frá Kröflustöð eru CO₂, H₂S, N₂, H₂ og CH₄, og þar sem þrjár síðastnefndu eru í snefilmagnni er eingöngu litið til losunar CO₂ og H₂S í þessari greiningu. Losun koldíoxíðs frá Kröflustöð hefur haldist fyrir neðan 100 g CO₂/kWst allt frá árinu 2006 á meðan að losun brennisteinsvetnis hefur verið um og yfir 10 g H₂S/kWst. Til samanburðar hefur árleg losun koldíoxíðs og brennisteinsvetnis frá Þeistareykjum verið um 10 g CO₂/kWst og 4 g H₂S/kWst [12]. Losun gastegunda frá jarðhitasvæðum er breytileg og fer eftir bæði eðli vinnslu, virkni og tektóniskri uppbyggingu þeirra [24]. Hærri losun frá Kröflustöð 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 Kröflustöð, en í þessari greiningu er gert ráð fyrir að öll losun tengist starfsemi Kröflustöðvar. Notast er við útgefnar losunartölur á tímabilinu 1995-2022, sem byggja á mælingum Kemíu fyrir Landsvirkjun [12], en losunartölur á tímabilinu 2023-2034 byggja á áætlaðri losun samkvæmt Landsvirkjun, sjá töflu 15.

TAFLA 15 Bein árleg losun gastegunda vegna vinnslu jarðvarma í Kröflustöð.

GASTEGUND	LOSUN 1995-2022 TONN/ÁRI	ÁÆTLUÐ LOSUN 2023-2034 TONN/ÁRI	MEÐALLOSUN 1995-2034 TONN/ÁRI	ÁÆTLUÐ ÁRLEG LOSUN G/KWST
CO ₂	40.529	28.333	36.870	79,4
H ₂ S	4.460	4.059	4.339	9,3



MYND 12 Kröflueldar árið 1980. Mynd: Landsvirkjun.

3.2.3 Viðhald vinnslugetu með nýjum borholum

Samkvæmt upplýsingum frá Landsvirkjun um borholur virkjunarinnar, er um það bil ein borhola boruð á þriggja ára fresti ef gert er ráð fyrir sömu þróun í gufubúskap Kröflustöðvar og hefur verið síðastliðin 15 ár, eða því sem nemur 4 borholum á tímabilinu 2024-2034 til viðbótar við þær 23 sem boraðar voru eftir árið 1995, sjá töflu 5. Gert er ráð fyrir sama magni hráefna til borunar og fóðrunar borhola og lýst er í kafla 3.1.2. Rafmagnsborun er orðin algengari í dag og er því gert ráð fyrir að allar framtíðarholur nýti eigin raforku stöðvarinnar til borunar.

3.2.4 Endurnýjun búnaðar

Enn þann dag í dag er notast við upprunalegan búnað sem hefur verið viðhaldið. Viðhaldssaga Kröflustöðvar er þekkt og því var hægt að áætla efnismagn sem hefur farið í margskonar endurnýjun og yfirhalningar, þ.á.m. á kæliturnum og hverflum, sjá töflu 16.

TAFLA 16 Samantekt byggingarefna fyrir viðhald á vélasamstæðu Kröflustöðvar.

BYGGINGAREFNI	HEILDARMAGN (TONN)
Byggingarstál	22
Ryðfritt stál	43
Trefjaplast	28
Timbur	37



MYND 13 Unnið að endurnýjun á kæliturni 1 í Kröflustöð. 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 niðurrifi vélbúnaðar. Gert er ráð fyrir að borholur í Kröflustöð verði lokaðar á sama máta og áður hefur verið gert, 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 úrgangsmýndun og vegna byggingar stöðvarhúss og veitna, sjá nánar í kafla 3.1.6. Er þetta gert til að hægt sé að setja áætlað niðurrif í samhengi við umhverfisáhrif stöðvarinnar í heild sinni. Erfitt er að 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 17, 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 17 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	311	4802	14	162	19	5308	37%
Ál		116	18	4	8	146	69%
Kopar		0	3		2	5	81%
Steypa	14035	14082	4		0	28121	Urðun
Plast		164	235		13	412	Urðun
Steinull		296	0	18	0	314	Urðun
Önnur efni	942	50	0		1	993	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 Kröflustöð 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 ígili 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.

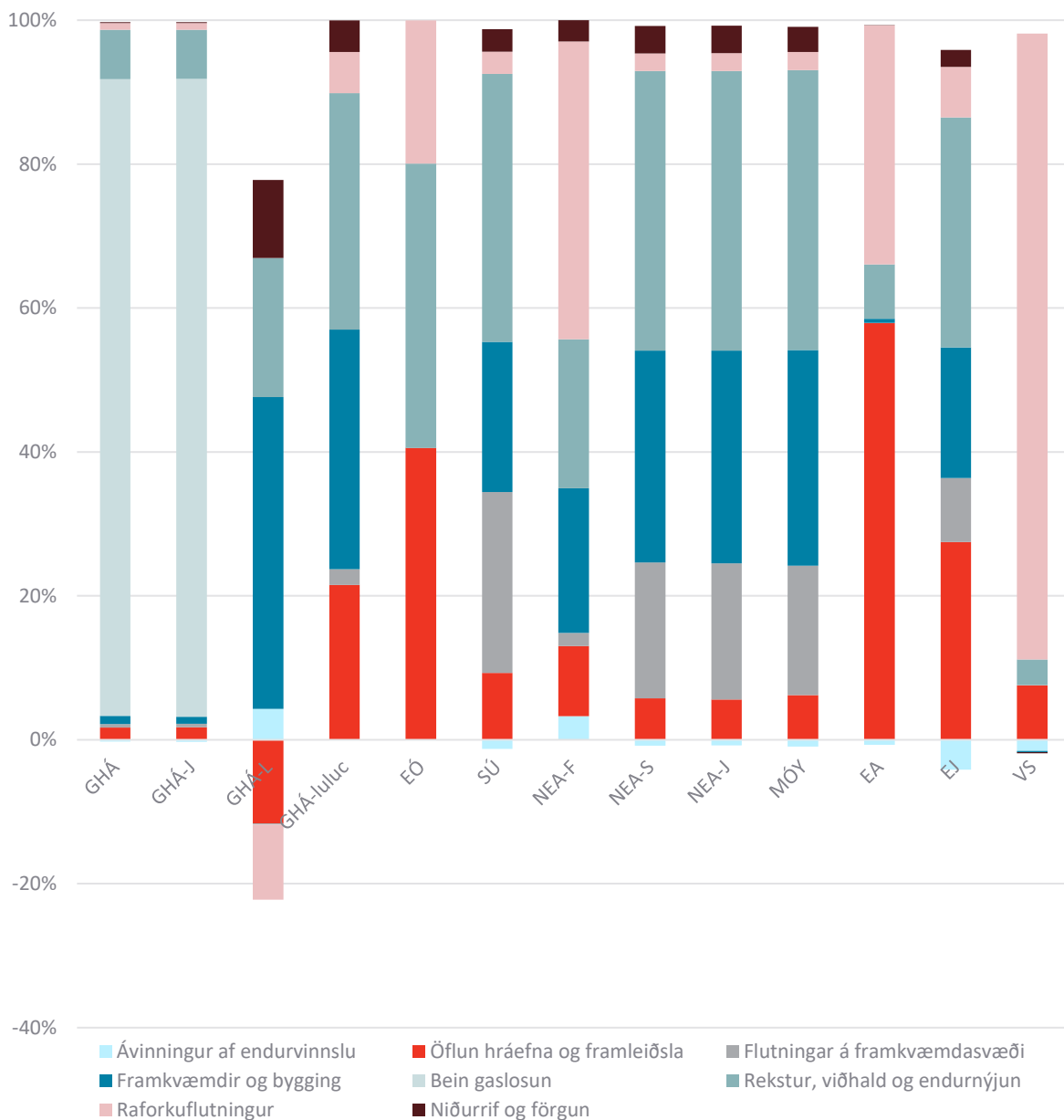
Flutningur raforku er það sem nefna mætti frálagsþáttur eða frálag (e. downstream) og er hann hafður hér innan kerfismarka í samræmi við staðla um gerð vistferilsgreininga [8, 9] og leiðbeininga um gerð umhverfisyfirlýsinga [13], sjá mynd 3 í kafla 2.3.

4 NIÐURSTÖÐUR VISTFERILSGREININGAR

4.1 Umhverfisáhrif á vistferli Kröflustöðvar

Í þessum kafla má sjá niðurstöður vistferilsgreiningar (e. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) fyrir vinnslu á 1 kWst af raforku í Kröflustöð. Niðurstöðurnar eru birtar fyrir þrettán flokka umhverfisáhrifa. Á mynd 14 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 áhrifaflokkum. Framkvæmdir og bygging valda mestum áhrifum í flokkunum gróðurhúsaáhrif - lífrænt (GHÁ-L) og gróðurhúsaáhrif - landnotkun og breyting á landnotkun (GHÁ-luluc) og miklum áhrifum í súrnun lands og sjávar (SÚ), öllum næringarefnaauðgunarflokkunum (NEA) og eyðingu jarðefnaeldsneytis (EJ). Rekstur, viðhald og endurnýjun, þ.m.t. borun á viðhaldsholum og endurnýjun vélbúnaðar, valda hlutfallslega mestum áhrifum í 4 af 13 flokkum, þ.e. súrnun lands og sjávar (SÚ), næringarefnaauðgun í sjó (NEA-S), næringarefnaauðgun - jarðnesk (NEA-J) og myndun ósons við yfirborð jarðar (MÓY), og næst mestum áhrifum í 6 af 13 flokkum, þ.e. gróðurhúsaáhrifaflokkarnir fjórir (GHÁ, GHÁ-J, GHÁ-L, GHÁ-luluc), eyðing ósonlagsins (EÓ) og eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ). Raforkuflutningur veldur mestum áhrifum í flokkunum næringarefnaauðgun - ferskvatn (NEA-F) og vatnsskortur (VS), og hefur þar að auki mikil áhrif í flokkunum eyðing ósonlagsins (EÓ), eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ) og eyðing auðlinda (EA). Ávinningur er af endurvinnslu stáls í öllum flokkum, mest í súrnun lands og sjávar (SÚ), næringarefnaauðgun í sjó (NEA-S), næringarefnaauðgun - jarðnesk (NEA-J), myndun ósons við yfirborð jarðar (MÓY), eyðing auðlinda (EA), eyðing jarðefnaeldsneytis (EJ) og vatnsskortur (VS).

Eins og vistferilsgreining þeistareykjastöðvar sýndi fram á [7], hefur bein losun H₂S frá jarðhitavökvænum ráðandi áhrif í áhrifaflokk súrnunar. Þetta sést best með aðferðafræði CML 2001 sem leggur meira vægi á áhrif vegna losunar H₂S, sjá mynd 24 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 mannlegra athafna í Evrópu skv. CML aðferðinni.

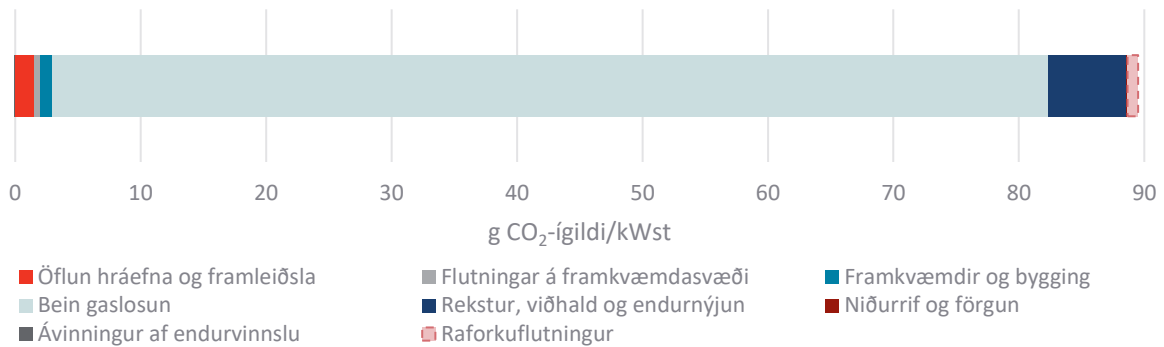


MYND 14 Umhverfisáhrif vegna vinnslu 1 kWst raforku í Kröflustöð. Á myndinni má sjá hlutdeild mismunandi þátta vistferils aflstöðvarinnar á 40 ára líftíma fyrir hvern flokk umhverfisáhrifa.

4.2 Kolefnisspor raforkuvinnslu

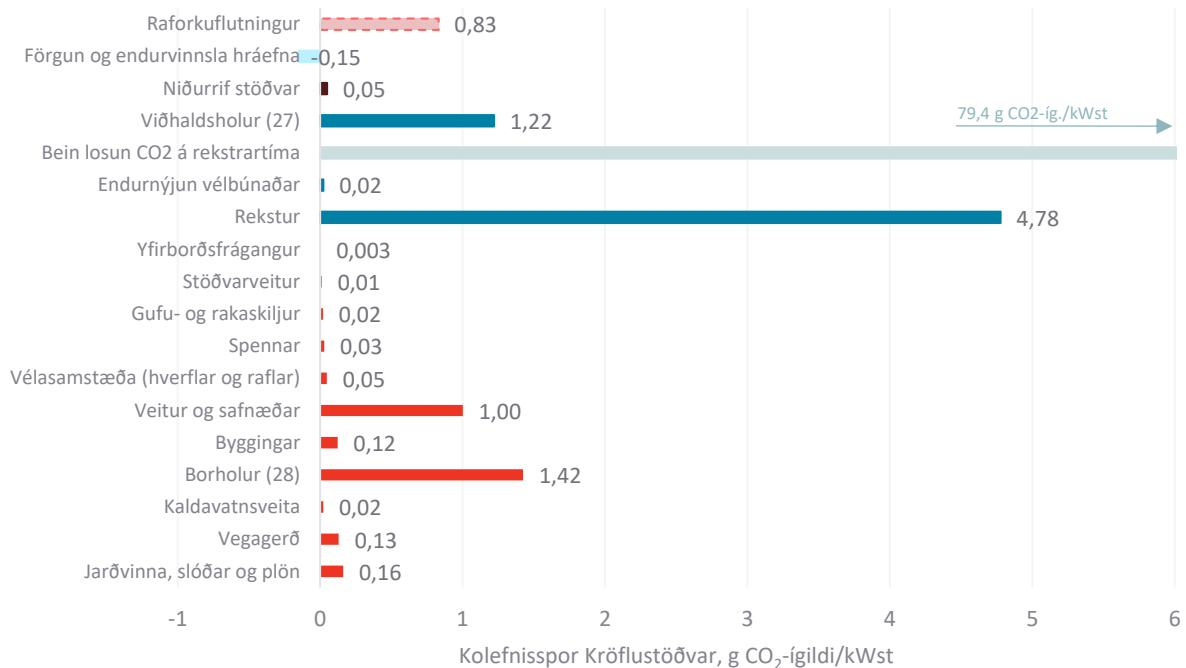
Gróðurhúsaáhrif raforkuvinnslu í Kröflustöð á 40 ára líftíma er 1.660 þúsund tonn CO₂-ígildi. Kolefnisspor raforkuvinnslunnar er 89 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst í Kröflustöð. Á mynd 15 má sjá hvernig kolefnisspor Kröflustöðvar skiptist á milli mismunandi fasa á vistferli stöðvarinnar, þ.e. framleiðslu-, flutninga- og framkvæmdafasa, rekstrarfasa og lok líftíma. Ráðandi þáttur í kolefnissporinu (89%) er bein losun CO₂ frá jarðhitavökva á 40 árum eða 79,4 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 í beinni losun frá stöðvunum skýrist helst í eðlismun á vinnslusvæðum þeirra, en losun frá jarðhitasvæðum er breytileg milli svæða og háð bæði virkni og tektónískri uppbyggingu

þeirra [24]. Kolefnisspor vegna framleiðslu byggingarefna og búnaðar, flutninga þeirra sem og framkvæmda er samanlagt 3,0 g CO₂-ígildi/kWst eða um 3% af kolefnissporinu.



MYND 15 Kolefnisspor Kröflustöðvar er 89 g CO₂-ígildi fyrir hverja unna kWst. Myndin sýnir hvernig kolefnissporið skiptist milli mismunandi fasa vistferilsins.

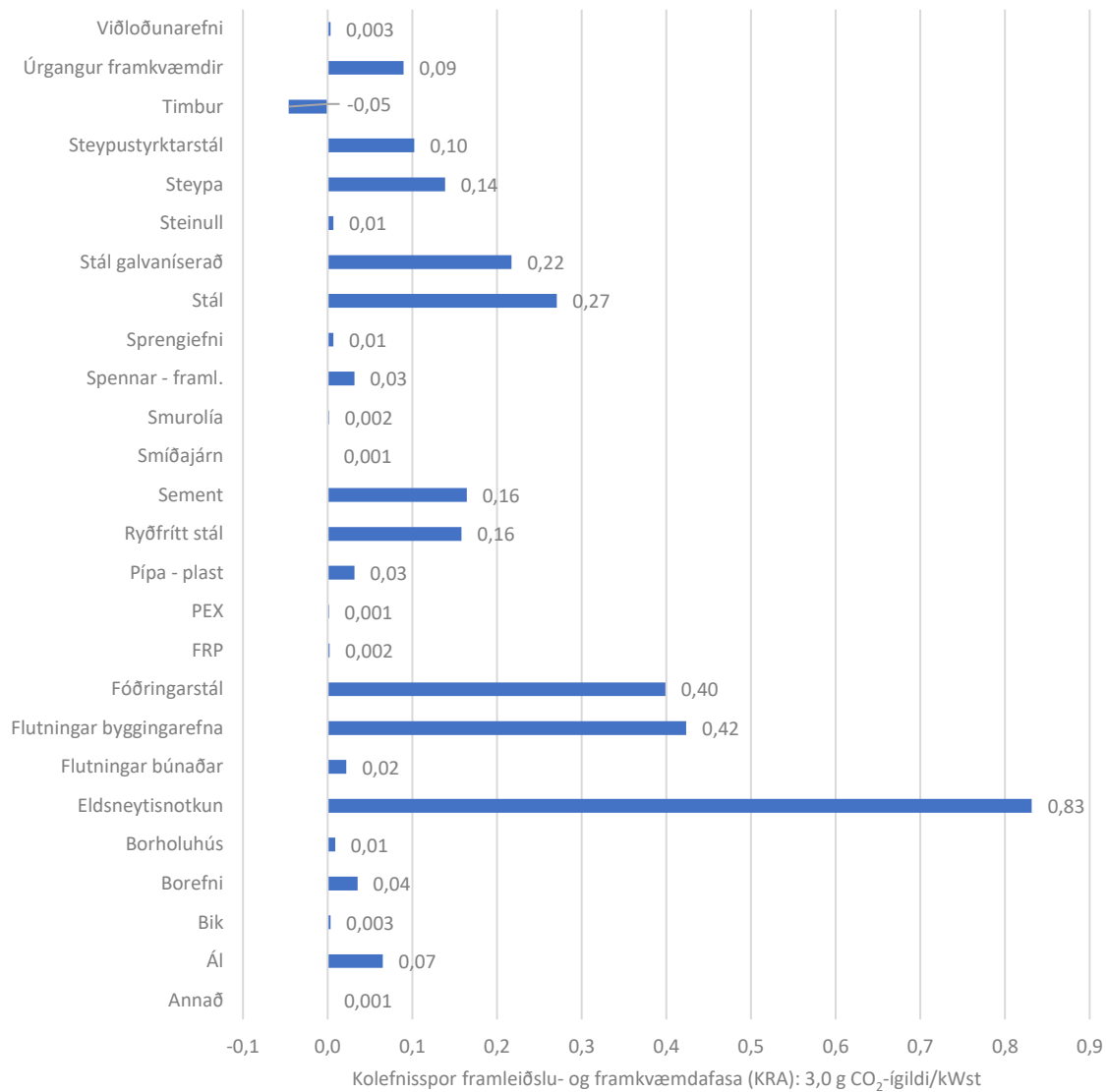
Kolefnisspor mismunandi eininga og þátta í vistferli aflstöðvarinnar má sjá á mynd 16. Þegar litið er heildrænt til einstakra mannvirkja og vélbúnaðar má sjá að utan beinnar losunar, vega borholur þyngst í kolefnissporinu, þ.e. hráefna- og eldsneytisnotkun vegna bæði núverandi og tilvonandi viðhaldshola. Kolefnisspor vegna þeirra er samanlagt 2,65 g CO₂-ígildi/kWst. Utan þeirra eru þau mannvirki sem vega þyngst vélasamstæða, byggingar, vegagerð og jarðvinna, slóðar og plön. Auk þessara fasa, er aðeins rekstur og raforkuflutningur sem hafa teljandi áhrif á kolefnissporið.



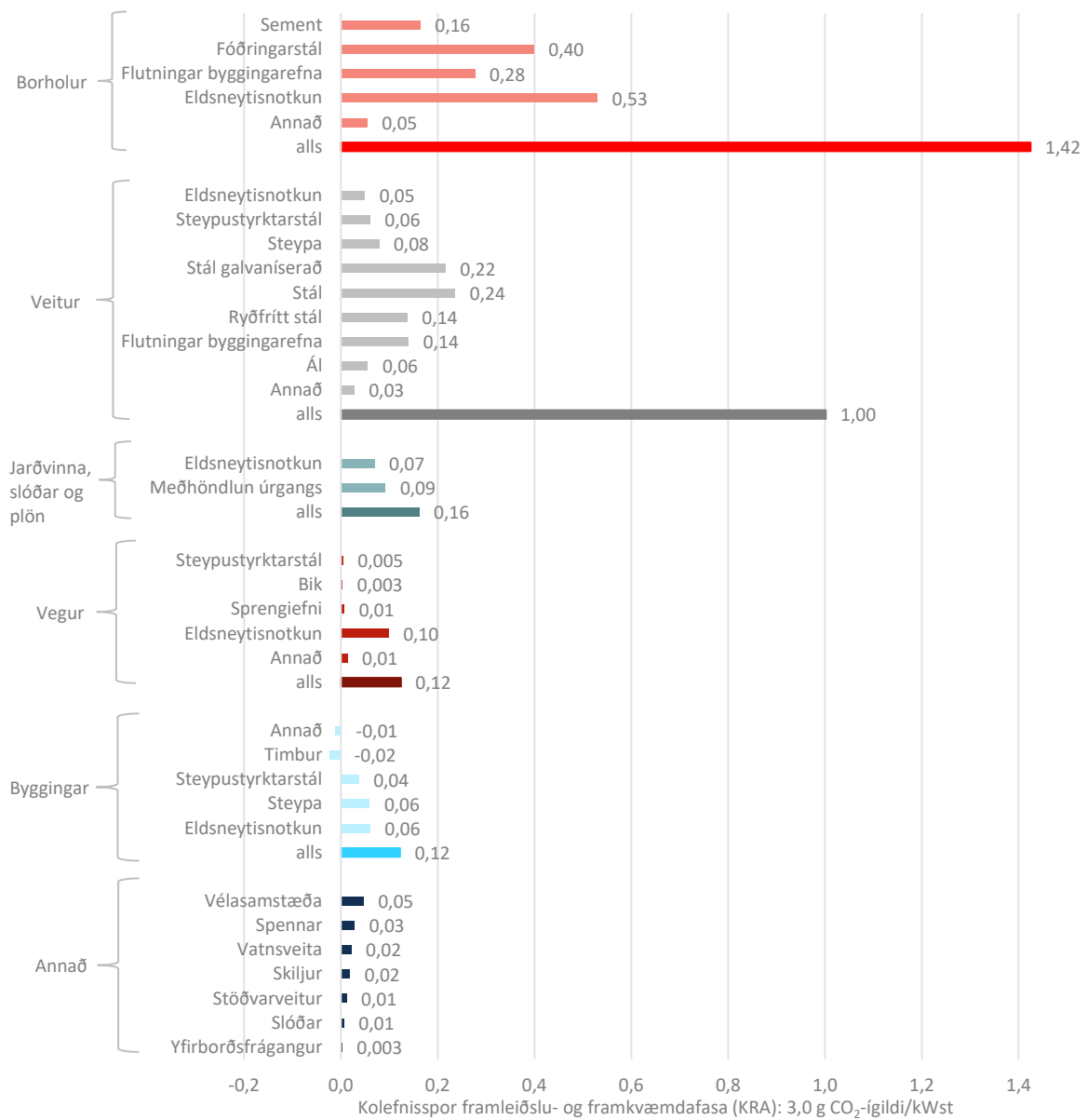
MYND 16 Kolefnisspor Kröflustöðvar, skipt eftir ólíkum einingum og framkvæmdaþáttum stöðvarinnar.

Kolefnisspor framleiðslu- og framkvæmdafasa Kröflustöðvar er aðgreint frekar í stök efni og eldsneytisnotkun á mynd 17. Mynd 19 sýnir þar að auki hvernig efnis- og eldsneytisnotkun skiptist eftir innviðum fyrir kjarnastarfsemi Kröflustöðvar. Framleiðsla stáls (fóðringarstál, stál í veitu, galvaníserað stál, ryðfrítt stál, smíðajárn) vegur samanlagt þyngst af öllum byggingarefnum, eða því sem nemur 1,15

g CO₂-ígildi/kWh. Sement og steypa í aflstöðinni valda næstmestu gróðurhúsaáhrifunum af byggingarefnum, eða samanlagt 0,30 g CO₂ ígildi/kWh. Þar á eftir kemur ál, borefni og plast sem samtals mynda um 0,13 g CO₂-ígildi/kWh af kolefnissporinu. Kolefnisspor eldsneytisnotkunar á framkvæmdatíma vegur mest af öllu í framleiðslu- og framkvæmdafasa, eða 0,83 g CO₂-ígildi/kWh. Flutningar byggingarefna valda næst næstmestu gróðurhúsaáhrifunum, 0,45 g CO₂-ígildi/kWh.



MYND 17 Gróðurhúsaáhrif einstakra efnis- og verkþátta í kolefnisspori framleiðslu- og framkvæmdafasa Kröflustöðvar.



MYND 18 Gróðurhúsaáhrif einstakra framleiðslu- og framkvæmdarþátta innan ólíkra hluta Kröflustöðvar.

5 UMRÆÐUR

5.1 Vistferilsgreiningar jarðvarmastöðva

Kolefnisspor Kröflustöðvar er af sömu stærðargráðu og kolefnisspor annarra jarðvarmastöðva á heimsvísu (tafla 18). Kolefnisspor jarðvarmavinnslu er töluvert háð aðstæðum á hverjum stað fyrir sig og hefur bein losun í andrúmsloftið frá 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 [25]. 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 [26]. Kröflustöð fellur því vel innan þess viðmiðs. Heildarútsreymi gróðurhúsalofttegunda frá Kröflustöð er sambærilegt í samanburði við aðrar íslenskar stöðvar en í hærra lagi sé tillit tekið til þeirrar raforkuvinnslu sem fram fer innan hvernar stöðvar, sem gerir það að verkum að losunarkræfni Kröflustöðvar, þ.e. losun á hverja kWst, er hærri, sjá myndir 19-20.

Tekið skal sérstaklega fram að ekki er hægt að gera beinan samanburð milli niðurstaða vistferilsgreininga sem fram koma í töflu 18, þar sem töluverður munur er á milli greininga hvað kerfismörk varðar. Nærtækara væri að bera þessa greiningu saman við niðurstöður umhverfisýfirlýsinga fyrir orkuvinnslu (EPD), en þar eru gerðar strangari kröfur til upplýsingaöflunarinnar og til skilgreinda kerfismarkna [13].

TAFLA 18 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.

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	[27] (2015)
Hellisheiðarvirkjun, Ísland*	303 MW (DF)	30	15,9 án CarbFix 11,4 með CarbFix	9,7 án SulFix 3,6 með SulFix	[28] (2020)
Reykjanesvirkjun, Ísland	130	30	17,1	-	[29] (2023)
Bagnore 3, Piancastagnaio 3-5 (Monte Amiata), Ítalía**	20 MW (SF)	25	380-1045	0,1-44,8	[30, 31] (2014, 2017)
Chiusdino 1 (Ítalía)	20 MW	30	270-430	1-9	[32] (2020)

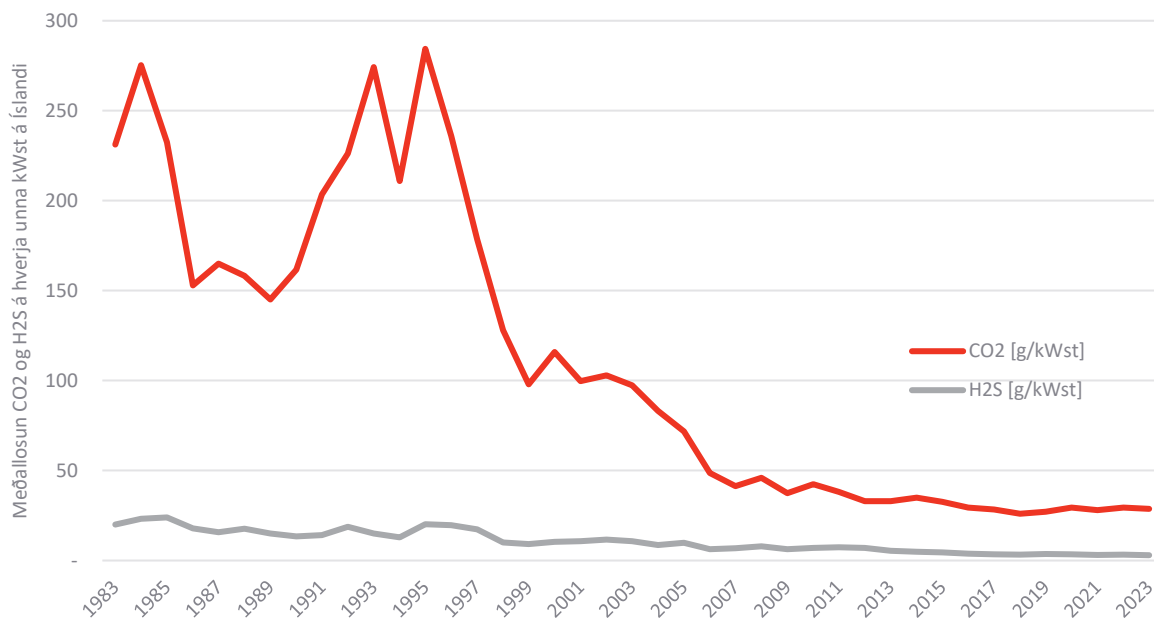
VIRKJUN, LAND	STÆRÐ (TÆKNI)	LÍFTÍMI (ÁR)	KOLEFNISSPOR (g CO ₂ -íg/kWst)	SÚRNUN (g H ₂ S-íg/kWst)	HEIMILD (ÁR)
Japan***	55 (DF)	30	15	-	[33] (2005)
IPCC	-	-	38 (6 – 79)	-	[34] (2011)
EU	-	-	238 (5 – 898)	-	[35] (2020)
Peistareykjastöð, Ísland	90 MW (SF)	40	13,8	7,1	[7] (2020)
Kröflustöð, Ísland	60 MW		89		

*Kerfismörk innihalda ekki flutning byggingarefna og vélbúnaðar til landsins, úrgang frá rekstri, niðurrif stöðvar og meðhöndlun úrgangs og raforkuflutninga. Eldsneytisnotkun við byggingu stöðvar byggir á áætlun. Í greiningunni er reiknað með 34% niðurdælingu CO₂ og 68% niðurdælingu H₂S [28].** 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.

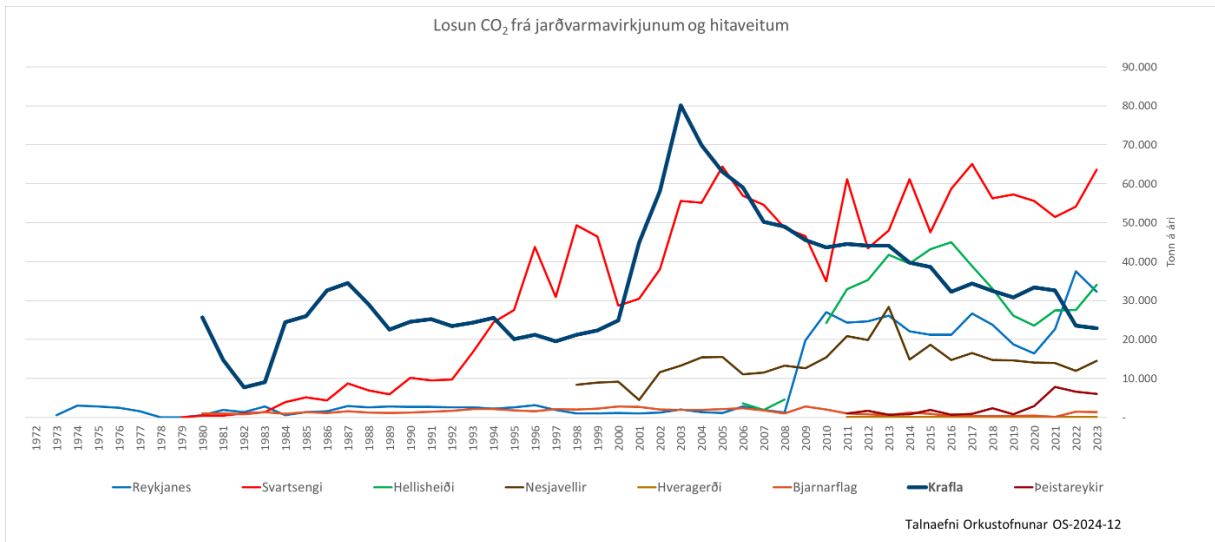
5.2 Bein losun og náttúruleg losun gróðurhúsalofttegunda

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.

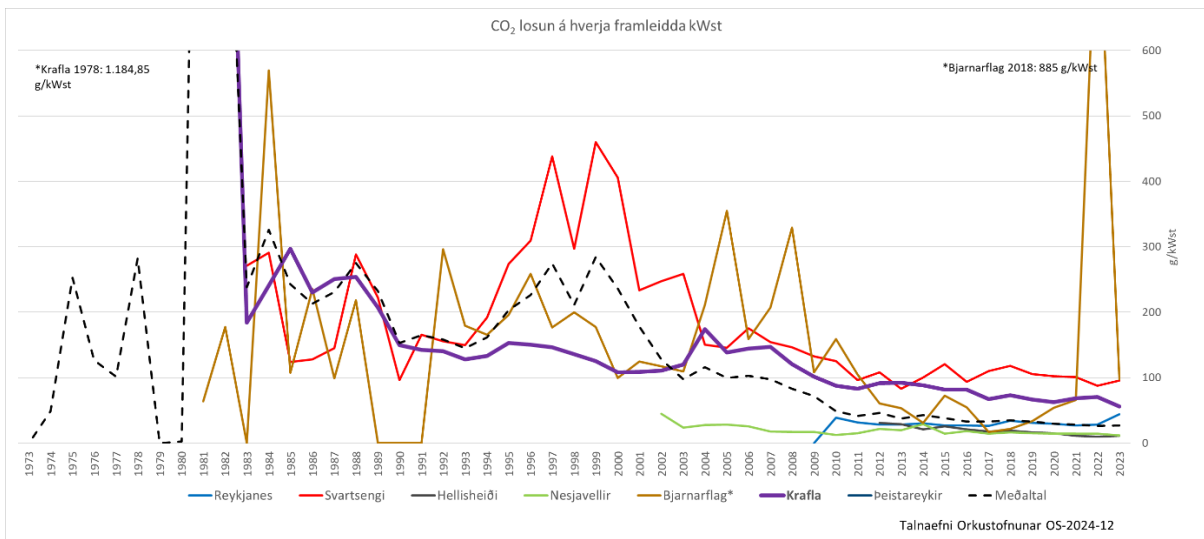
Losun koldíoxíðs er afar breytileg milli ólíkra aflstöðva á Íslandi (mynd 20 og mynd 21) og náði sögulegu hámarki 570 g/kWst í Gufustöðinni í Bjarnarflagi (1980) og 297 g/kWst í Kröflu (1981). Tengdust þessir tveir viðburðir Kröflueldum sem stóðu yfir frá 1975 til 1984. Náttúruleg losun gróðurhúsalofttegunda frá Kröflusvæðinu um jarðveg er meiri en frá öðrum jarðhitasvæðum á Íslandi [36], en náttúruleg losun frá Kröflusvæðinu hefur verið metin um 190.000 t CO₂/ár [37]. Til samanburðar er náttúruleg losun gróðurhúsalofttegundar um jarðveg frá Peistareykjasvæðinu metin vera um 110.000 t CO₂ á ári eftir viðamiklar mælingar sumarið 2015 [38].



MYND 19 Meðallosun CO₂ og H₂S á hverja framleidda kílóvattstund frá jarðvarmavirkjunum á Íslandi sem vinna rafmagn 2000-2022. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2024-13 (2024) [12].



MYND 20 Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum og hitaveitum. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2024-13 (2024) [12].



MYND 21 Árleg losun koldíoxíðs frá íslenskum jarðvarmavirkjunum á hverja framleidda kílóvattstund (kWst) af rafmagni. Talnaefni Orkustofnunar, OS-2024-13 (2024) [12]. Mikil minnkun var á framleiðslu árið 2018 í Gufustöðinni í Bjarnarflagi vegna viðhalds vélbúnaðar, því er losun á framleidda kWst mun hærrí en fyrri ár.

Losun koldíoxíðs frá jarðvarmasvæðum er náttúruleg og ber heimildum ekki saman hvort að vinnsla raforku hafi áhrif á heildarlosun frá þeim svæðum. Landsvirkjun hefur um árabíl skoðað losun gróðurhúsalofttegunda frá fyrirtækinu og reynt að varpa ljósi á útstreymi koldíoxíðs frá jarðvarmavirkjunum, þar með talið hvort að orkuvinnsla hafi áhrif á náttúrulegt útstreymi eða ekki [39]. 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 [23]. Náttúruleg losun frá Hengilsvæðinu er rétt rúmlega tvöföld losuninni frá Nesjavallavirkjun og Hellisheiðavirkjun [40]. 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 [41]. 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 [42] þannig að aðeins lítill hluti hvarfast í SO_2 . Talið er að brennisteinsvetni sem berst með lofti frá jarðhitasvæðum oxist að mestu í brennistein (S) og falli til jarðar í úrkomu og verði að málmsöltum í jarðvegi. 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 [43]. 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 [44]. 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) [45, 35]. Þetta kann að breytast þegar meiri gögn og betri upplýsingar liggja fyrir.



MYND 22 Kröflustöð er staðsett á háhitasvæðinu við Mývatn á Norðurlandi eystra. Mynd: Landsvirkjun.

5.3 Ein af elstu starfandi jarðvarmavirkjunum landsins

Kröflustöð var gangsett fyrir 46 árum síðan og er áætlaður áframhaldandi rekstur í núverandi mynd að minnsta kosti fram til ársins 2034. Jarðvarmastöðin mun á þeim tímapunkti ná 56 ára aldri, sem gerir hana einstaka á heimsvísu og gefur tilefni til þess að meta áhrif langs líftíma á umhverfisáhrif hennar þar sem þau dreifast í raun á fleiri rekstrarár heldur en þann 40 ára líftíma sem miðað er við í þessari vistferilsgreiningu. 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. Þar sem stærsti hluti kolefnissporsins er vegna beinnar losunar frá vinnslu má segja sem svo að „40-ára“ kolefnisspor stöðvarinnar hafi farið lækandi eftir því sem raforkuvinnsla hefur aukist og jarðhitageymir hefur að einhverju leyti náð jafnvægi eftir Kröfluelda 1978 – 1984, en bein losun CO₂ á hverja unna kWst hefur verið undir 100 g/kWst síðastliðin 18 ár, eða frá árinu 2006 (mynd 21). Einnig mætti fullyrða að kolefnisspor Kröflustöðvar sé áreiðanlegra og byggji á betri gögnum en flestar yngri stöðvar, þar sem bæði losun og viðhaldssaga er vel þekkt áratugi aftur í tímann, einkum m.t.t. borhola og vélbúnaðar.

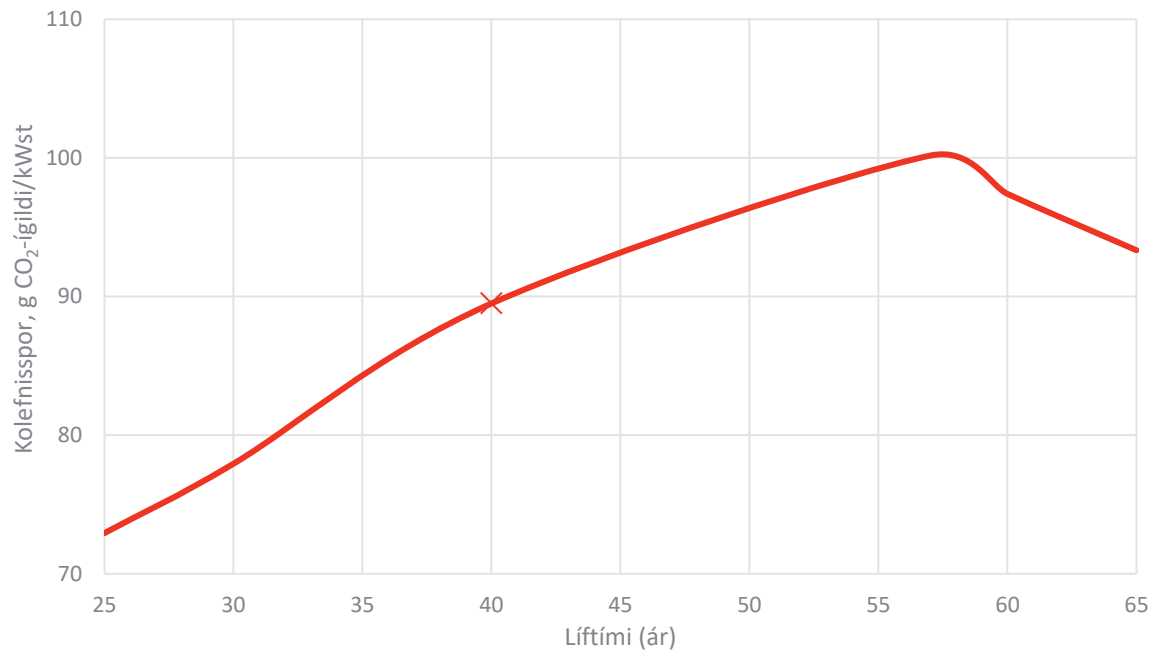
5.4 Breytilegur líftími

Í þessari greiningu er gert ráð fyrir 40 ára líftíma í samræmi við leiðbeiningar [46], en skilgreina má líftímamann með ólíkum hætti. Sumar greiningar hafa miðað við 25 ára líftíma stöðvar og er sá líftími e.t.v. valinn með hliðsjón af endurnýjunarþörf véla, þar sem líklegt þurfi að grípa til útskipta á hverflum og á öðrum lykilbúnaði aflstöðvar að þeim tíma loknum. Í fyrstu útgáfu samræmdra leiðbeininga að gerð vistferilsgreininga fyrir jarðvarmastöðvar var lagt til að miða við 30 ára líftíma [17]. Hérlend reynsla hefur þó sýnt fram á mun lengri líftíma. Elsta jarðvarmastöð landsins, Gufustöðin í Bjarnarflagi, hefur verið í rekstri frá 1969 og búist er við að hún verði í áframhaldandi rekstri að minnsta kosti til ársins 2040. Kröflustöð hefur verið í rekstri frá 1978 og er því nú þegar orðin 46 ára. Til þess að meta áhrif líftíma á niðurstöður var gerð næmnigreining á kolefnisspori Kröflustöðvar með breytilegum aldri og skilgreindu árabili.

Niðurstöður benda til þess að líftími jarðvarmastöðvarinnar hafi töluverð áhrif á kolefnisspor hennar, sjá töflu 19 og mynd 22. Ef líftíminn er skilgreindur sem 57 ár á árabilinu 1978-2034, sem er áætlaður raunlíftími jarðvarmastöðvarinnar, hækkar kolefnissporið um 12%. Hækkunina má rekja til aukinnar losunar á hverja framleidda kWst og minni orkuvinnslu á meðan á Kröflueldum stóð (1975-1984), eins og tafla 19 og mynd 3 sýna. Ef Kröflustöð heldur áfram í rekstri eftir 2034 mun kolefnisspor hennar hins vegar lækka samhliða bæði áframhaldandi lækkun á losun eftir árið 2034 og aukinni orkuvinnslu samkvæmt spám Landsvirkjunar. Ef líftíminn er skilgreindur sem 30 ár á árabilinu 2005-2034, lækkar kolefnissporið um 13%. Sú lækkun er tilkomin vegna þess að bein losun CO₂ á hverja unna kWst hefur verið undir 100 g/kWst frá árinu 2006 og árabilið 1978-2005, þar sem losun CO₂ var í öllum tilfellum hærri en 100 g/kWst, sjá mynd 21, er ekki með.

TAFLA 19 Forsendur næmnigreiningar á líftíma Kröflustöðvar. Í þessari greiningu er miðað við 40 ára líftíma (1995-2034).

LÍFTÍMI	ÁRABIL	MEÐALLOSUN TONN CO ₂ /ÁRI	ORKUVINNSLA ALLS TWST	ÁRLEG LOSUN G CO ₂ /KWST
25 ár	2019-2034	30.170	12,4	61,0
30 ár	2005-2034	32.700	14,9	66,0
40 ár	1995-2034	36.870	18,6	79,4
57 ár	1978-2034	33.200	20,7	89,7
60 ár	1978-2037	32.400	22,4	87,0
65 ár	1978-2042	31.970	25,1	82,9



MYND 23 Næmnigreining á kolefnisspori vegna vinnslu á 1 kWst í Kröflustöð með breytilegum líftíma. Kolefnisspor hækkar eftir því sem meiri rekstrarsaga er tekin með í reikninginn, þ.m.t. Kröflueldar (1975-1984), en lækkar svo aftur þegar tekið er mið af framtíðarspám út frá núverandi rekstri.

6 LOKAORÐ

Í þessari vistferilsgreiningu fyrir Kröflustöð er fjallað um 13 flokka umhverfisáhrifa. Einn stærsti losunarþátturinn er bein losun CO₂ og H₂S frá jarðhitavökva á rekstrartíma stöðvarinnar. Kolefnisspor raforkuvinnslu með jarðvarma hefur verið metið á bilinu 6–79 g CO₂-ígildi/kWst á heimsvísu [34] (q25, miðgildi og q75 eru 20, 45 og 57 g CO₂-ígildi/kWst) en fyrir einstaka stöðvar getur sporið náð allt að 1.800 g CO₂-ígildi/kWst [25]. Kolefnisspor raforkuvinnslu í Kröflustöð er 89 g CO₂-ígildi/kWst. Næmnigreining á líftíma staðfestir að losun á Kröflusvæðinu og þróun losunarinnar hefur töluverð áhrif á kolefnisspor stöðvarinnar, en Kröflustöð er ein af elstu stöðvum landsins. Vistferilsgreiningar á jarðvarmavinnslu hafa auðkennt nokkur tækifæri til að minnka kolefnissporið [7], og er ein þeirra að huga áfram að góðu viðhaldi og endurnýjun á líftíma stöðvarinnar, líkt og gert hefur verið um árabíl fyrir jarðvarmastöðvar Landsvirkjunar á Norðausturlandi.

Niðurstöður vistferilsgreiningarinnar er liður í því að fá vitneskju um raunáhrif raforkuvinnslu aflstöðva 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 Búðahálsstöð [2], Fljótsdalsstöð [3], Blöndustöð [4], vindmyllur á Hafinu [6] og Þeistareykjastöð [7]. Einnig hafa niðurstöður verið birtar fyrir Búrfellsstöð II [5], sem er aflaukning við eina elstu vatnsaflsstöð á Íslandi, Búrfellsstöð.

Losun frá Kröflusvæðinu hefur jafnt og þétt dregist saman frá því að Kröflueldum lauk, en náttúruleg losun heldur þó áfram að vera meiri en frá öðrum jarðhitasvæðum á Íslandi [36]. Losun var meiri en 100 g CO₂/kWst til ársins 2005, en hefur síðan þá verið lægri en 100 g CO₂/kWst, eða að meðaltali 74 g CO₂/kWst á árunum 2006-2022. Segja má að eftir því sem vinnslusvæði Kröflustöðvar kemst í meira jafnvægi mun kolefnisspor jarðvarmastöðvarinnar lækka samhliða lægri losun.

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-2024-13. Gaslosun jarðvarmavirkjana og hitaveitna 1969-2023.,“ [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] „Sphera,“ [Á neti]. Available: <https://sphera.com>. [Skoðað 22 January 2024].
- [19] EFLA verkfræðistofa, „Vistferilsgreining fyrir veg - Rannsóknarverkefni Vegagerðarinnar 2012. Rannsóknarskýrsla,“ Vegagerðin, 2013.
- [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] EFLA Verkfræðistofa, „Vistferilsgreining raforkuvinnslu með jarðvarma. Þeistareykjarstöð,“ Landsvirkjun, LV-2020-034, 2020.
- [23] Halldór Ármannsson, „Carbon Dioxide Emissions from Icelandic Geothermal Areas. An Overview. LV-2016-036,“ Landsvirkjun, ÍSOR, Reykjavík, 2016.
- [24] HS Orka, „Loftslagsmál. Losun gróðurhúsalofttegunda á jarðhitasvæðum,“ [Á neti]. Available: <https://www.hsorka.is/sjalfbaerni/loftslagsmal/>.
- [25] 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.
- [26] F. Evrópusambandsins, *Framseld reglugerð framkvæmdastjórnarinnar (ESB) 2021/2139*, Evrópusambandið, 2021.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] V. C. Engineers, „Life Cycle Assessment of a Geothermal Power Plant,“ HS Orka, 2023.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.

- [33] Hiroki Hondo, „Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case,“ *Energy*, b. 30, pp. 2042-2056, 2005.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Bjarni Pálsson; Hákon Aðalsteinsson; Hildur Ríkharðsdóttir; Ragnheiður Ólafsdóttir; Sigurður Óli Guðmundsson, „Loftslagsáhrif Landsvirkjunar - samantekt og tillögur að aðgerðum,“ Landsvirkjun, LV-2011-016, 2011.
- [37] Dereinda, F.H.; Ármannsson, H., „CO2 Emissions from the Krafla Geothermal Area, Iceland,“ í *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 2010.
- [38] Sigurður G. Kristinsson; Finnbogi Óskarsson; Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson, „Háhitavæðin í Kröflu, Námafjalli og á Peistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2017. LV-2017-123,“ ÍSOR-2017/086, 2017.
- [39] Sigurður Óli Guðmundsson; Bjarni Pálsson, „Útstreymi koltvísýrings frá jarðvarmavirkjunum. LV-2011-017,“ 2011.
- [40] Halldór Ármannsson, „An overview of carbon dioxide emissions from Icelandic geothermal areas,“ *Applied Geochemistry*, b. 97, pp. 11-18, 2018.
- [41] H. Kristmannsdóttir; H. Ármannsson, „Environmental aspects of geothermal energy utilization,“ *Geothermics*, b. 32, pp. 451-461, 2003.
- [42] 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.
- [43] Landsvirkjun, „Loftslagsbókhald,“ Landsvirkjun, 2019.
- [44] HS Orka, „Sjálbæriskýrsla 2023,“ HS Orka, 2024.

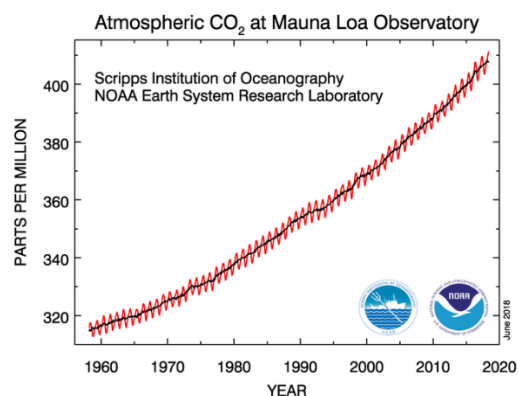
- [45] Þráinn Friðriksson; Almudena Mateos; Pierre Audinet; Yasemin Oruco, „Greenhouse gases from geothermal power production. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP) technical report; 009/16,“ World Bank Group, Washington D.C., 2016.
- [46] The International EPD System, *Product Group Classification: UN CPC 171 and 173 Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution. PCR 2007:08. Version 4.0*, The International EPD system, 2020.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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].
- [50] 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].
- [51] 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 [47] og ILCD Handbook. International Reference Life Cycle Data System. Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context [48].

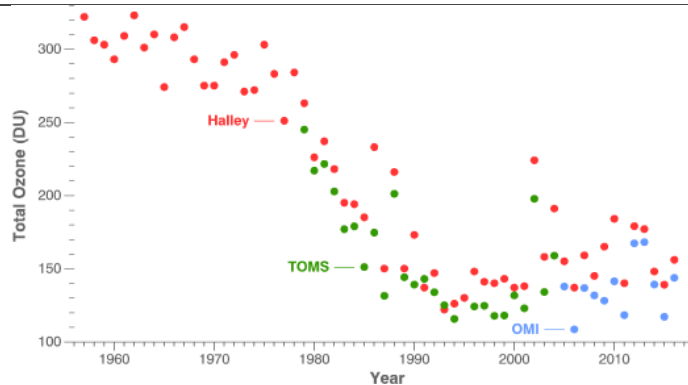
Gróðurhúsaáhrif valda breytingu á meðalhita jarðarinnar sem rekja má til losunar gróðurhúsalofttegunda af manna völdum, t.d. koldíoxíðs (CO_2), metans (CH_4) og brennisteinshexaflúoríðs (SF_6). Búist er við að hækkun meðalhita jarðar muni m.a. hafa í för með sér miklar breytingar á loftslagi og veðurfari, valda eyðimerkurmyndun (e. desertification), hækkun á yfirborði sjávar og aukningu í útbreiðslu sjúkdóma. Styrkur CO_2 í andrúmslofti hefur verið mældur á Mauna Loa í Hawaii frá árinu 1958 og sýnir greinilega aukinn styrk lofttegundarinnar í lofthjúpunum [49]. Grafið að neðan sýnir styrk CO_2 í andrúmslofti sem fall af tíma.

Gróðurhúsaáhrif (e. Global warming, GWP 100 years)



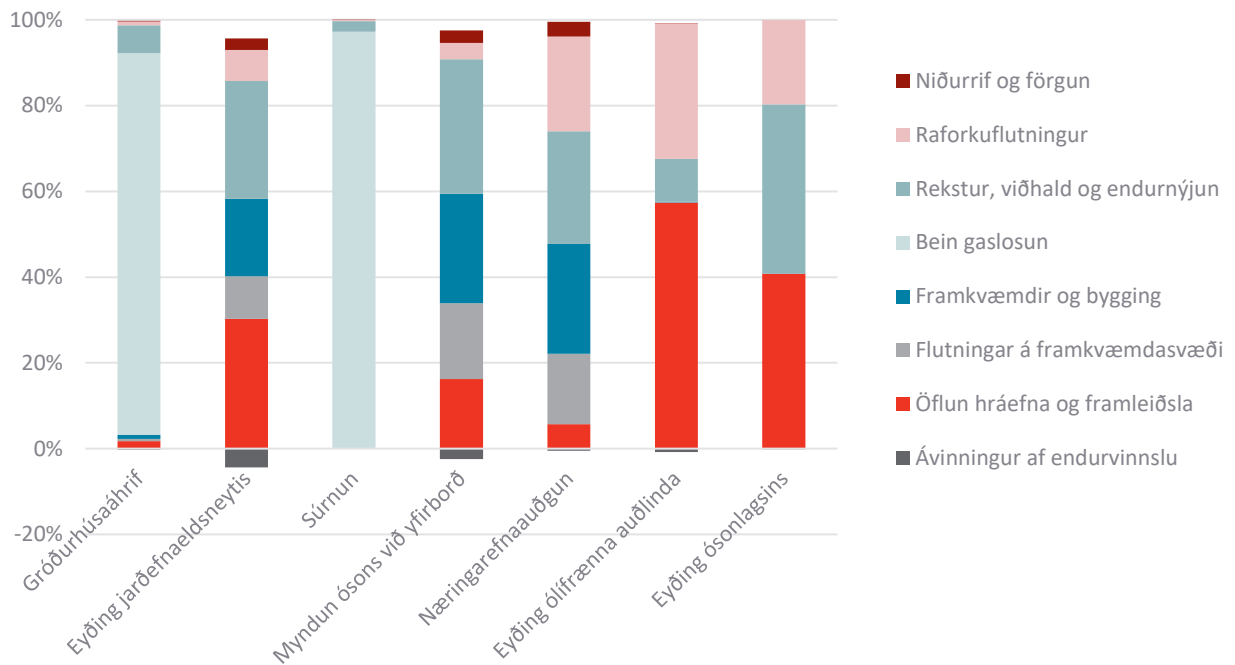
Eyðing ósonlagsins (e. ozone depletion)

Eyðing ósons í heiðhvolfinu eða eyðing ósonlagsins stafar af völdum klór- og brómsambanda sem berast upp í heiðhvolfið, sem er í um 10 – 50 km hæð yfir yfirborði jarðar. Þau efnasambönd sem helst valda eyðingunni eru klórflúorkolefni (CFCs), halónar og vetnisklórflúorkolefni (HCFCs). Eyðing ósonlagsins dregur úr getu þess til að draga úr útfjólubláum (UV) geislum í gufuhvolfi jarðar sem veldur aukinni geislun krabbameinsvaldandi UVB geisla á yfirborði jarðar. Mælingar á styrk ósons í heiðhvolfinu yfir Suðurskautslandinu hafa verið gerðar frá árinu 1956. Árið 1985 fóru mælingar að sýna töluverða lækkun á styrk ósons, í kjölfarið var undirrituð s.k. Montreal bókun um efni sem valda rýrnun ósonlagsins þar sem kveðið er á um að horfið verði frá notkun ósoneyðandi efna [50]. Grafið að neðan sýnir heildarmagn ósons í DU einingum sem fall af tíma.



<p>Myndun ósons við yfirborð jarðar (e. photochemical ozone formation)</p>	<p>Í andrúmslofti sem inniheldur köfnunarefnisoxíð og rokkgjörn, lífræn efnasambönd (VOCs) getur óson myndast með aðstoð sólarljóss. Þrátt fyrir að óson sé mjög mikilvægt í efri lofthjúpum er aukinn styrkur ósons í andrúmsloftinu óæskilegur og getur m.a. valdið uppskerubresti sem og aukið tíðni asma og annarra lungnasjúkdóma. Um er að ræða staðbundin umhverfisáhrif þar sem auknum styrk ósons við yfirborð, við ákveðnar verðuraðstæður, getur fylgt mikið hitamystur og kallast fyrirbrigðið photochemical smog á ensku. Þetta er mjög þekkt fyrirbæri í stórborgum heimsins, en hefur minnkað nokkuð á vesturlöndum á allra síðustu áratugum vegna kröftugra mótvægisáðgerða. Talið er að mengun frá umferð og orkuverum hafi hækkað bakgrunnstyrk ósons niður við jörð á stórum svæðum í Evrópu og Norður Ameríku og er t.d. styrkur ósons yfir Atlantshafi helmingi hærri á norðurhveli jarðar en suðurhvelinu [51].</p>
<p>Súrnun lands og vatns (e. acidification)</p>	<p>Súrnun lands og vatns á sér stað þegar súrt regn myndast er regn hvarfast við mengandi lofttegundir í andrúmsloftinu. Hér er ekki um að ræða súrnun sjávar af völdum gróðurhúsaáhrifa. Þær lofttegundir sem helst valda myndun súrs regns eru ammoníak (NH_3), köfnunarefnisoxíð (NO_x) og brennisteinstvíoxíð (SO_2). Þar sem súrt regn fellur til jarðar, oft töluverða vegalengd frá uppsprettu mengunarinnar, veldur það oft á tíðum verulegum skemmdum á vistkerfum. Skaðinn er mismunandi eftir gerð vistkerfa, en súrt regn getur valdið miklum skaða á skóglendi, á dýralífi, vötnum og mannvirkjum.</p>
<p>Næringarefnaauðgun (e. eutrophication)</p>	<p>Næringarefnaauðgun getur átt sér stað í vatni eða í jarðvegi. Nitröt og fosföt eru nauðsynleg öllu lífi, hins vegar getur hár styrkur næringarefna, t.d. í vatni valdið óhóflægum þörungavexti sem leiðir af sér lækkaðan styrk súrefnis í vatninu. Næringarefnaauðgun getur valdið miklum skaða í vistkerfum með aukinni dánartíðni lífvera og lífverur sem krefjast lágs styrks næringarefna geta horfið úr vistkerfinu. Losun ammoníaks, nitrata, nituroxíða og fosfórs í andrúmsloft og vötn geta valdið næringarefnaauðgun. Næringarefnaauðgun veldur staðbundnum umhverfisáhrifum og dæmi um slík áhrif eru t.d. næringarefnaauðgun í Mývatni sem rekja má til ófullnægjandi hreinsunar á fráveituvatni sem losað er í vatnið.</p>
<p>Eyðing auðlinda (e. resource depletion)</p>	<p>Hér er átt við eyðingu auðlinda, svo sem málmgryti, hráolíu og önnur hráefni sem unnin eru úr námum og eru óendurnýjanleg. Þessi flokkur umhverfisáhrifa tekur tillit til minnkunar á forða óendurnýjanlegra hráefna sem verður við vinnslu þeirra og notkun. Forði auðlindar er skilgreindur sem það magn auðlindarinnar sem er þekkt og er hagkvæmt að nýta.</p>
<p>Vatnsskortur (e. water depletion potential)</p>	<p>Vatnssnotkun 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 TÖLULEGAR NIÐURSTÖÐUR



MYND 24 Niðurstöður greiningar samkvæmt aðferðafræði CML2001.

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

UMHVERFIS- ÁHRIFAFLOKKUR	EINING	ÖFLUN HRÁEFNA OG FRAMLEIÐSLA	FLUTNINGAR Á FRAMKVÆMDA- SVÆÐI	FRAMKVÆMDIR OG BYGGING	BEIN GASLOSUN
GHÁ	[kg CO ₂ íg.]	3,41E-03	1,38E-03	2,89E-03	4,74E-02
GHÁ-J	[kg CO ₂ íg.]	3,43E-03	1,38E-03	2,74E-03	4,74E-02
GHÁ-L	[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-F	[kg PO ₄ íg.]	5,79E-09	9,28E-10	1,05E-08	0,00E+00
NEA-S	[kg N íg.]	2,28E-06	1,06E-05	1,74E-05	0,00E+00
NEA-J	[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
VS	[m ³ heims íg. svipt]	5,93E-04	4,17E-06	1,80E-05	0,00E+00

UMHVERFIS- ÁHRIFAFLOKKUR	EINING	REKSTUR, VIÐHALD OG ENDURNÝJUN	RAFORKUFLUTN INGUR	NIÐURRIF OG FÖRGUN	ÁVINNINGUR AF ENDURVINNSLU
GHÁ	[kg CO ₂ íg.]	4,50E-03	6,88E-04	1,85E-05	-1,31E-04
GHÁ-J	[kg CO ₂ íg.]	4,43E-03	7,10E-04	1,72E-05	-1,31E-04
GHÁ-L	[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-F	[kg PO ₄ íg.]	5,53E-09	5,91E-09	4,81E-11	-8,18E-11
NEA-S	[kg N íg.]	1,12E-05	3,65E-07	9,59E-08	-8,22E-08
NEA-J	[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
VS	[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 - Kröflustöð” (e. Life Cycle Assessment of Geothermal Electricity Production at Krafla)

We were engaged by Landsvirkjun to conduct an independent limited assurance on the life cycle GHG emissions of Krafla, reported in the life cycle assessment of Krafla 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.



- 95% 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