

September 2025



Jarðvarmamat

Mat á varmaforða, varmaflæði og
framtíð jarðhitanýtingar á Íslandi

Stjórnarráð Íslands

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið



Útgefandi:

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið

Jarðvarmamat – Mat á varmaforða, varmaflæði og framtíð jarðhitanýtingar á Íslandi

Skýrsla unnin af ÍSOR fyrir umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið

September 2025

urn@urn.is

stjornarradid.is

Skýrsluhöfundar:

Guðni Axelsson, Sæunn Halldórsdóttir, Steinunn Hauksdóttir, Ingimar G. Haraldsson, Gunnlaugur M. Einarsson og Þórhildur Björnsdóttir, ÍSOR

María Guðmundsdóttir, Umhverfis- og orkustofunun.

Umbrot og textavinnsla:

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið

©2025 Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið

ISBN 978-9935-566-05-8

Efnisyfirlit

Samantekt	6
1. Inngangur	7
2. Eðli jarðhitans og nýting hans.....	12
2.1 Jarðhitakerfi og jarðfræðilegar aðstæður.....	12
2.2 Jarðhitanyting á Íslandi og þróun hennar	15
2.3 Endurnýjanleiki og sjálfbær nýting jarðhitans.....	17
2.4 Dæmi um úttektir og jarðvarmamat erlendis.....	19
3. Uppfært jarðvarmamat	20
3.1 Aðferðafræði	20
3.2 Hitastigull og uppfært hitastigulskort af Íslandi	22
3.3 Svæðisskipting landsins.....	25
3.4 Náttúrulegt varmaflæði hvera og lauga, utan háhitasvæða	27
3.5 Afkastageta borholna.....	32
3.6 Varmavinnsla lághitasvæða	34
3.7 Varmaflæði um yfirborð með varmaleiðingu.....	38
3.8 Varmastraumarnir fjórir.....	41
3.9 Afkastageta háhitasvæða.....	45
3.10 Rúmmálsmat á varmaforða jarðskorpu landsins.....	51
4. Helstu niðurstöður	56
4.1 Framtíð jarðhitanytingar	61
5. Heimildir	65

Myndaskrá

Mynd 1. Varmaflæði um jarðskorpu Íslands. Sögulegar myndir sem sýna annars vegar mat Gunnars Böðvarssonar (1982) til vinstri og hins vegar mynd úr skýrslu Orkustofnunar (til hægri) (Jónas Ketilsson ofl., 2010) sem byggir á mynd Valgarðs Stefánssonar og Elíasar B. Elíassonar (1998).	8
Mynd 2. Frumorkunotkun á Íslandi 1940-2022 (Orkustofnun, 2023).	15
Mynd 3. Varmanotkun jarðhita árin 1940 til 2023. (Umhverfis- og orkustofnun óútgefið talnaefni).	16
Mynd 4. Jarðhitanotkun til fiskeldis á Íslandi 1940 til 2023 (Umhverfis- og orkustofnun óútgefið talnaefni).	16
Mynd 5. Hitastigulskort af Íslandi frá árinu 2002 (Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 2002).	22
Mynd 6. Uppfært hitastigulskort af Íslandi (Gunnlaugur M. Einarsson o.fl., 2025).	23
Mynd 7. Áhrifasvæði hvernar hitastigulsborholu eða staðar með gefnu mæligildi á hitastigulskorti (Gunnlaugur M. Einarsson, 2025).	24
Mynd 8. Svæðaskipting landsins ásamt uppfærðu hitastigulskorti og staðsetningu borholna sem notaðar voru til að reikna hitastigul.	25
Mynd 9. Náttúrulegt rennsli jarðhita, flokkað eftir hitastigi. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) en þær rauðu eru úr eldri skýrslu um jarðvarmamát (Guðmundur Pálmason ofl. 1985).	29
Mynd 10. Meðalrennsli úr stökum jarðhitastöðum eftir hitastigi. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) og þær rauðu á grein Gunnars Böðvarssonar (1983). Sjóðandi hverir eru undanskildir.	30
Mynd 11. Varmaafllaugu, flokkað eftir hitastigi sbr. Mynd 9. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) en þær rauðu byggja á gögnum úr skýrslu um jarðvarmamát (Guðmundur Pálmason ofl. 1985). Viðmiðunarhitastig er 5°C.	31
Mynd 12. Svæðaskipting landsins ásamt vegnu meðaltali hitastiguls hvers svæðis.	40
Mynd 13. Samband varmaframleiðslu lághitaveitna og varmaflæðis lauga skv. töflu 8, innifelur hvorki varmaframleiðslu háhitavirkjana né varmaflæði á háhitasvæðum.	44
Mynd 14. Svæðisskipting landsins ásamt útmörkum háhitasvæða, samkvæmt viðnámsmælingum og útbreiðslu jarðhitaummerkja á yfirborði.	45

Mynd 15. Hitaástand í efstu 5 km jarðskorðunnar eins og það er áætlað í núverandi jarðhitamati.	53
Mynd 16. Áætlað náttúrulegt varmaflæði (MW/km^2), þ.e. varmaleiðing og flæði lauga og háhitasvæða, um mismunandi svæði landsins.	59

Töfluskrá

<i>Tafla 1. Svæðisskipting landsins og flatarmál, ásamt fjölda hvera og lauga, borholna, túlkaðra gilda fyrir hitastigul og fjölda hitaveitna á hverju svæði.</i>	26
Tafla 2. Samanlagt massaflæði og varmaafli frá jarðhitastöðum fyrir hvert svæði á grundvelli gagnasafns um jarðhita á Íslandi (Helgi Torfason, 2024).	28
Tafla 3. Yfirlit um þróun á heildarrennsli og útreiknuðu varmaafli frá náttúrulegum jarðhita á lághitasvæðum.	30
Tafla 4. Upplýsingar um reglugerðarhitaveitur, vinnslutölur jarðhitasvæða frá 2023 (Orkustofnun, 2024a), samanlögð hámarksafköst borholna á tilteknu vinnslusvæði (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018) og mat á varmaafli náttúrulegs flæðis lauga (Helgi Torfason, 2024).	35
Tafla 5. Afkastageta vinnsluholna fyrir hluta af einkahitaveitum ásamt útreiknuðu varmaafli hvera og lauga á þeirra veitusvæði, m.v. 1,5 km radíus um þekktar vinnsluholur svæðisins.	36
Tafla 6. Reiknaður hitastigull ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) fyrir hvert svæði (mynd 8).	38
Tafla 7. Ýmsir þættir massaflæðis um svæði landsins.	43
<i>Tafla 8. Ýmsir þættir varmaflæðis um svæði landsins.</i>	44
Tafla 9. Rafafl jarðhitasvæðanna þriggja: Námafjalls, Kröflu og Þeistareykja metið með rúmmáls-aðferð og Monte Carlo reikningum.	46
Tafla 10. Áætluð útbreiðsla (flatarmál) háhitasvæða, mat á náttúrulegu varmaflæði, afkastageta miðað við flatarvinnslugetu á bilinu 2 til $7 \text{ MW}_e/\text{km}^2$, og til samanburðar afkastageta miðað við flatarvinnslugetu $3\text{--}9 \text{ MW}_e/\text{km}^2$ samkvæmt eldra mati. Í dalkunum lengst til hægri er uppgengið meðalafli virkjana á 5 svæðum ásamt heildarvarmaafli metnu út frá heildarfrumorkuframleiðslu.	48
Tafla 11. Varmaforði berggrunns landsins.	54
Tafla 12. Varmaforði gosbeltanna.	54
Tafla 13. Helstu niðurstöður uppfærðs jarðvarmamats fyrir Ísland samandregnar ásamt samanburði við matið frá 1985. Endurspeglar tvíþætt eðli jarðhitans, þ.e. varmaflæði og varmaforða.	58

Samantekt

Á þeim 40 árum sem liðin eru frá gerð fyrsta ítarlega jarðvarmamatsins fyrir Ísland (Guðmundur Pálmason ofl., 1985) hefur þekkingin á jarðhitaauðlindinni aukist verulega. Í uppfærslu jarðvarmamatsins sem hér er kynnt er litið til fjölmargra rannsókna og samantekta sem unnar hafa verið síðustu áratugina auk þess að byggja á þeim grunni sem fyrri kynslóðir hafa lagt. Þannig gefur uppfært jarðvarmamat fyrir Ísland góðan grundvöll fyrir stefnu og aðgerðaráætlun stjórnvalda til framtíðar. Í matinu er lögð áhersla á tvíþætt eðli jarðhitans, varmaforða og varmaflæði.

Ný gögn og túlkun gefa til kynna að hitastigull innan gosbeltanna sé hærri en áður var talið og skv. núverandi jarðvarmamati er áætlað að liðlega helmingur varmaforða jarðskorpunnar er innan gosbeltanna. Það er því líklegt að súperkítisku ástandi verði nánð víðsvegar innan þeirra og alls ekki bara í rótum háhitakerfanna. Varmaflæðið um gosbeltin er þó mjög misdreift og er langmest um háhitasvæðin sem virka þannig eins og e.k. strompar fyrir gríðaröflugt varmaflæði gosbeltanna. Núverandi mat varmaforða jarðskorpunnar er um 18% hærra en mat ársins 1985, einkum vegna hærra mats fyrir gosbeltin. Um 1% varmaforða jarðskorpu landsins niður á 5 km dýpi myndi standa undir allri frumorkunotkun Íslendinga, eins og hún er í dag, í u.þ.b. 15.000 ár.

Um 25% náttúrulega varmaflæðisins myndu jafnframt standa undir allri frumorkunotkun Íslendinga, eins og hún er í dag, um alla framtíð. Tiltölulega lítil aukning er á áætluðu varmaafli náttúrlegra lauga og hvera á landinu frá matinu 1985, sem bendir til þess að tiltölulega góð mynd hafi þegar fengist af því varmaafli fyrir 40 árum. Það breytir því þó ekki að uppgötvanir lauga sem ekki voru þekktar áður eru til þess fallnar að auka þekkingu á jarðhita landsins og geta leitt til uppgötvana á áður óþekktum jarðhitakerfum. Áframhaldandi kortlagning getur því skipt sköpum þegar kemur að frekari nýtingu.

Aðgerðaráætlun um jarðhitarannsóknir og -nýtingu þarf að fela í sér frekari grunnrannsóknir og öflun gagna um auðlindina og nýtingu hennar en það er ekki síður aðkallandi að ná utan um og fá aðgang að gögnum sem þegar hefur verið safnað. Upplýsingar um afkastamat einstakra jarðhitasvæða í nýtingu eru takmörkuð, en af þeim gögnum sem eru aðgengileg sést að meðalorkuvinnsla hluta þeirra er orðin sambærileg áætlaðri afkastagetu þeirra en á öðrum svæðum er vinnslan enn töluvert undir áætlaðri afkastagetu. Að meðaltali reiknast þetta þannig að samanlögð meðalvinnsla 15 lághitakerfa árið 2025, sem gögn voru aðgengileg um, nam um 65% samanlagðrar áætlaðrar vinnslugetu þeirra.

Í núverandi jarðvarmamati kemur fram að ekkert svæði á Íslandi er raunverulega kalt, fræðilega má alls staðar sækja varma í jarðskorpu landsins. Það þarf eingöngu að þróa vinnslutæknina sem hentar hverju svæði. Niðurstöður uppfærðs jarðvarmamats gefa því ástæðu til bjartsýni varðandi framtíð jarðhitanýtingar á Íslandi, en forsendur eru eftir sem áður áframhaldandi efling þekkingar og tækni framfarir auk sjálfbærrar nýtingar auðlindarinnar.

1. Inngangur

Jarðhitaauðlindin er afar mikilvæg íslensku þjóðarbúi, eins og þekkt er, enda stendur jarðhitinn undir u.þ.b. 2/3 frumorkunotkunar Íslendinga (Orkustofnun, 2023). Áætlað hefur verið að uppsafnaður sparnaður þjóðfélagsins af nýtingu jarðvarma í stað olíu til húshitunar sé orðinn yfir 2.000 milljarðar króna, m.v. verðlag ársins 2018 (Orkustofnun, 2019), svo ekki séu nefnd gríðarlega jákvæð umhverfisáhrif og óveruleg losun gróðurhúsalofttegunda. Þá er jarðhitinn mikilvægur vaxandi ferðaiðnaði, í efnaíðnaði auk þess að leika lykilhlutverk í vellíðan þjóðarinnar. Því er mikilvægt að Íslendingar hafi tilfinningu fyrir stærð auðlindarinnar, hvernig eigi að stýra nýtingu hennar svo komandi kynslóðir geti nýtt jarðhitann sér til hagsbóta eins og við gerum í dag og að við þekkjum þessa mikilvægu auðlind eins vel og auðið er á hverjum tíma.

Árið 2020 var Orkustefna Íslands til 2050 kynnt en hún byggði á vinnu starfshóps sem var skipaður til verksins (Stjórnarráð Íslands, atvinnu- og nýsköpunarráðuneytið, 2020). Á meðal markmiða stefnunnar eru sjálfbær nýting auðlinda, að Ísland verði óháð jarðefnaeldsneyti, að orkuþörf samfélagsins sé ávallt uppfyllt og jafnt aðgengi sé að orku um allt land. Á undanförnum árum hafa stjórnvöld einnig lagt áherslu á aukna orkuöflun bæði vegna aukinnar eftirspurnar eftir raforku, en einnig vegna aukinnar eftirspurnar eftir varma, bæði vegna fólksfjölgunar og aukinna umsvifa í iðnaði. Jarðhiti skipar þar lykilhlutverk þar sem raforka framleidd með jarðhitavirkjunum er grunnafl fyrir raforkukerfið og hitaveitur sem nýta jarðhita sjá yfir 90% af heimilum landsins fyrir varma, ásamt fyrirtækjum og iðnaði. Jarðhitánýting í iðnaði hefur farið ört vaxandi á undanförnum árum, m.a. í fiskeldi og ferðaþjónustu, og gerir Jarðvarmaspá Orkustofnunar 2021-2060 ráð fyrir að sú aukning muni halda áfram (Orkustofnun 2022). Þá var gerð úttekt á stöðu hitaveitna árið 2023 og kom þar í ljós að margar hitaveitur eru komnar að þolmörkum og þörf er á aukinni jarðhitaleit á mörgum stöðum (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023). Stjórnvöld hafa brugðist við með því að setja aukið fjármagn í styrki til jarðhitaleitar á vegum Loftslags- og orkusjóðs, en ákveðið hefur verið að verja einum milljarði króna í sérstakt jarðhitaleitaráttak árin 2025-2028 (Umhverfis- orku- og loftslagsráðuneytið, 2025). Ljóst er að þörf er á betri upplýsingum um tækifæri til aukinnar nýtingar jarðhita á Íslandi til að greiða fyrir nýjum nýtingarverkefnum.

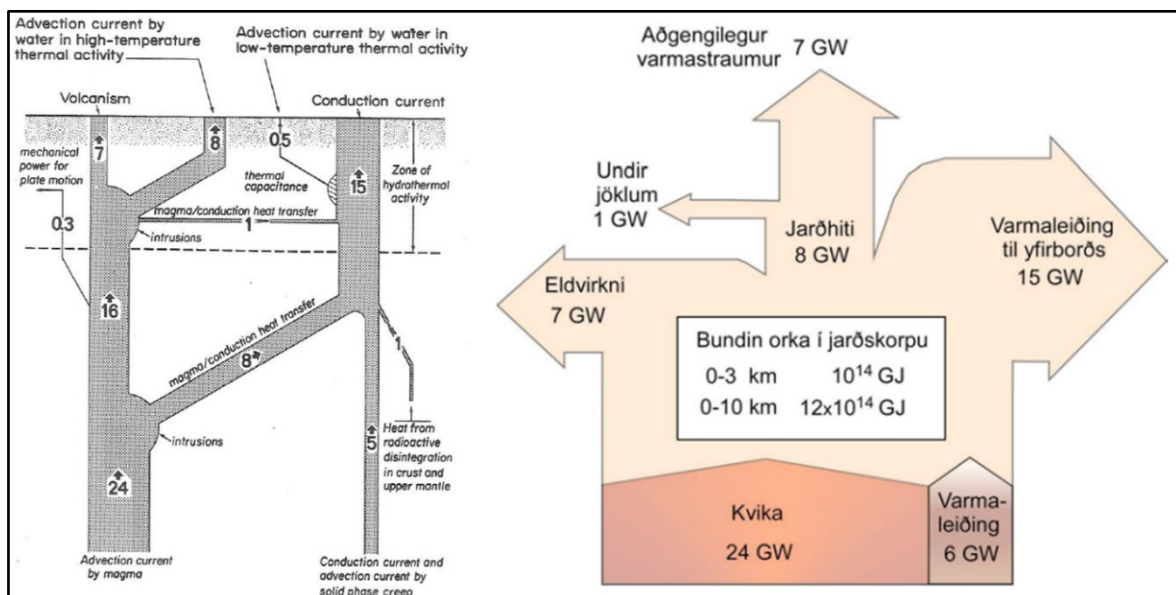
Árið 1985 kom út mat á jarðvarma Íslands, sem unnið var af hópi sérfræðinga Jarðhitadeildar Orkustofnunar (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Er þetta fyrsta ítarlega og heildstæða matið sem gert hefur verið á auðlindinni, en aðrir hafa metið auðlindina gróflega, á mismunandi vegu. Áður en lengra er haldið verður að leggja áherslu á tvíþætt eðli jarðhitans sem orkuauðlindar, en það felst annars vegar í stöðugu **varmaflæði** í gegnum ystu lög jarðskorpunnar og hins vegar í gríðarmiklum **varmaforða** sem geymdur er í berglögum jarðarinnar. Gildir þetta jafnt um jörðina í heild sem einstök jarðhitakerfi.

Í matinu 1985 var áhersla lögð á að meta varmaorkufórðann og byggt var á einföldum forsendum og alhæfingum (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Svokallaðri rúmmálsaðferð var beitt við matið, sem í grunninn felst í því að margfalda saman hita bergs, varmarýmd þess og rúmmál. Þá var landinu skipt í tvö aðalsvæði, landsvæði innan gosbeltisins og landsvæði utan þess, og þessum svæðum svo skipt í nokkur undirsvæði. Þannig var áætlað að jarðvarmaforði berggrunns landsins niður á 10 km dýpi næmi $1,2 \cdot 10^{24}$ J (1 200 000 EJ). Jafnframt var áætlað að sá varmi, sem flokkaður var sem tæknilega vinnanlegur¹ næmi

¹ Ofan 3 km dýpis og náið upp um borholur.

$3,5 \cdot 10^{21}$ J (3.500 EJ). Þessi tala hefur ekki beint hagnýtt gildi, tekur m.a. ekki tillit til kostnaðar, en hún sýnir ljóslega hve gríðarstór jarðhitaauðlindin er. Í dag er áætlað að árleg jarðhitanotkun Íslendinga svari til $1,74 \cdot 10^{17}$ J (174 PJ, frumorkunotkun 2023, miðuð við 15°C) (Orkustofnun, 2024a), sem er aðeins um 0,005% hins tæknilega vinnanlega jarðhita, skv. matinu 1985. Miðað við núverandi notkun myndi sá hluti forðans þá fræðilega endast í rúmlega 20.000 ár.

Ofangreindar tölur taka aðeins til varmaforðans í jarðskorpu Íslands, en ekki varmaflæðisins, og eru því í raun vanmat á stærð jarðhitaauðlindarinnar. Í matinu 1985 var því jafnframt lagt mat á stærð varmaflæðisins og fékkst að (a) varmaflæði til yfirborðs með varmaleiðingu² (e. *heat conduction*) á Íslandi næmi 12.000 MW á landinu öllu, (b) varmaflæði með vatns- og gufuflæði næmi 17.500 MW og (c) varmaflæði með kviku upp á yfirborðið næmi að meðaltali um 6.000 MW (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Samtals var varmaflæði áætlað vera 35.500 MW, eða $1,1 \cdot 10^{18}$ J á ári, sem eru nálægt því að vera sjöföld jarðhitaorkunotkun Íslendinga í dag (frumorka). Samanlagt matið 1985 á varmaforðanum og varmaflæðinu sýnir svart á hvítu gríðarlega stærð jarðhitaauðlindar Íslands.



Mynd 1. Varmaflæði um jarðskorpu Íslands. Sögulegar myndir sem sýna annars vegar mat Gunnars Böðvarssonar (1982) til vinstri og hins vegar mynd úr skýrslu Orkustofnunar (til hægri) (Jónas Ketilsson o.fl., 2010) sem byggir á mynd Valgarðs Stefánssonar og Elíasar B. Elíassonar (1998).

Hér er rétt að leggja áherslu á tvíþætt eðli jarðhitans, þ.e. varmaflæði og varmaforða, sem hefur verið skýrt hér að ofan. Í núverandi mati er mikil áhersla lögð á flæðið, þó hvort tveggja sé metið, en í matinu frá 1985 var áherslan á varmaforðann (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Í sögulegu samhengi er það athyglisvert að Gunnar Böðvarsson (1982) mat varmaflæðið í gegnum skorpuna á grunni þeirra upplýsinga sem til voru á þeim tíma. Tæpum tveimur áratugum seinna sameinaði svo Valgarður Stefánsson niðurstöður Gunnars um varmaflæðið og niðurstöður jarðvarma-matsins 1985 um varmaforðann heildrænt (Valgarður

² Íslensk þýðing á hugtakinu (Viðar Guðmundsson og Þorsteinn Vilhjálmsson, 1996)

Stefánsson, 2000). Niðurstöður beggja eru birtar á mynd 1 og er áhugavert að hafa niðurstöður viðeigandi frumkvöðla í huga þegar núverandi jarðvarmamat er skoðað.

Á þeim 40 árum sem eru liðin frá gerð jarðvarmamats 1985 hefur þekkingin á jarðhitaauðlindinni aukist verulega, einkum vegna gagna sem hafa safnast með miklum fjölda borholna, sem boraðar hafa verið, jafnt rannsóknarholna sem vinnsluholna. Einnig hefur miklu verið safnað af jarðvísindagögnum, jafnt jarðfræði- og jarðeðlisfræðilegum sem og gögnum um efnainnihald jarðhitavatns. Þá hafa gögn sem safnað hefur verið til eftirlits með jarðhitakerfum í vinnslu aukið verulega þekkinguna á jarðhitaauðlindinni auk þess sem lagt hefur verið mat á afkastagetu margra einsakra jarðhitakerfa, einkum með mismunandi líkanreikningum studdum gögnum um viðbrögð kerfanna við vinnslu (aðallega þrýstingsbreytingar, þ.m.t. vatnsborðsbreytingar).

Í ljósi þessa var talið tímabært að uppfæra heildaryfirlit um jarðvarmamat Íslands og er þessi skýrsla liður í því og unnin að beiðni umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytisins. Í uppfærslu jarðvarmamatsins sem hér er kynnt er litið til fjölmargra rannsókna og samantekta sem unnar hafa verið síðustu áratugina auk þess að byggja á þeim grunni sem fyrri kynslóðir hafa lagt. Þar má helst nefna eftirfarandi meginheimildir, auk jarðvarmamatsins 1985:

- Skýrsla sem unnin var sameiginlega af Orkustofnun og ÍSOR og birti **samræmt mat á vinnslugetu háhitasvæða** landsins (Jónas Ketilsson o.fl., 2009).
- Niðurstöður viðamikils verkefnis sem unnið var af Birni Má Sveinbjörnssyni o.fl. á öðrum áratug núverandi aldar, helgað **árangri jarðhitaborana á Íslandi** (Björn Már Sveinbjörnsson, 2018). Í viðkomandi skýrslu eru birtar upplýsingar og mat á afköstum vinnsluholna jarðhita á jarðhitasvæðum reglugerðarhitaveitna.
- Úttekt ÍSOR á **stöðu hitaveitna og nýtingu jarðhitavatns til húshitunar** (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023). Skýrslan inniheldur m.a. yfirlit um orkuframléiðslu hitaveitna og stöðu þeirra í ljósi stöðugt vaxandi eftirspurnar á heitu vatni.
- **Hitastigulskort af Íslandi**, sem sýnir hitastigul í efsta hluta jarðskorpu Íslands. Slíkt kort er hér uppfært á grundvelli upplýsinga úr nýjum borholum sem bætt hefur verið í gagnasafn um hitastigul (Gunnlaugur M. Einarsson o.fl., 2025). Einkum er byggt á hitamælingum úr sérstökum hitastigulsholum, en einnig holum, oft tregum eða þurrum, sem sýna ótruflaðan hitastigul. Kortið nýtist til að reikna varmaorkuflæðið út í gegnum Ísland með varmaleiðingu.
- Skv. nýútgefnu **gagnasafni um jarðhita á yfirborði** þá eru rúmlega 2.200 jarðhitastaðir þekktri á Íslandi á um 1.388 svæðum (reitum sem eru 500m í radíus) (Helgi Torfason, 2024). Um er að ræða fyrsta heildstæða safn gagna á Íslandi um náttúrulegt flæði jarðhitastaða og mikil viðbót við gagnasafns í eldri úttekt á jarðvarmamati frá 1985. Hér eru m.a. upplýsingar um upphaflegt rennsli jarðhitasvæða (áður en vinnsla hófst á viðkomandi svæði, oft með djúpdælum) og hitastig hvera og lauga svo reikna má varmaafli þeirra.
- Á undanförunum áratugum hafa verið gerðir **líkanreikningar** fyrir fjölda jarðhitasvæða í rekstri, bæði flóknir og einfaldir og fyrir stór jarðhitakerfi og lítil. Tilgangurinn hefur m.a. verið að meta afkastagetu þeirra, á mun nákvæmari hátt en gert er í sumum þeirra verkefna sem hér eru talin upp, auk þess að hjálpa til við stýringu nýtingarinnar. Niðurstöður þessara reikninga eru birtar í jafnmörgum skýrslum og verkefnum hafa verið, en ekki á einum stað. Sumar skýrslur og gögn þessu tengd eru jafnvel ekki opin og aðgengileg. Þó er í hitaveituskýrslu ÍSOR (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023) birt lauslegt yfirlit yfir hvar þetta hefur verið gert á lághitasvæðum.

Almennt má segja að þekking á lághitasvæðum landsins hafi aukist mikið síðan 1985. Í fyrsta lagi gegnum jarðhitaleit og rannsóknir, en nokkur jarðhitakerfi án yfirborðsummerkja hafa t.d. fundist og nýting þeirra hafist. Í öðru lagi hefur þekkingin aukist mikið vegna eftirlits (mælinga) með viðbrögðum þeirra við vinnslu, sem segir afar mikið um eðli þeirra. Þá hefur þekkingin aukist mikið á þeim háhitasvæðum sem nú

eru nýtt, fyrst og fremst gegnum boranir og rannsóknir tengdar borholunum, og ekki síst gegnum eftirlit með vinnsluviðbrögðum þeirra.

Uppfærsla jarðvarmamatsins, sem hér er til umfjöllunar, byggir þannig á eftirfarandi gögnum og sýn á þau:

- Jarðvarmamátið og samanburður gagna er að hluta gert á grundvelli skilgreindra svæða landsins í landshluta. Þannig er ekki horft til einstakra jarðhitasvæða eða einstakra borholna, heldur til svæðaskiptingar sem gerð er á grundvelli gagna um jarðfræði (t.d. aldur og gerð jarðlaga) og hitastiguls.
- Samanlögð **afkastageta borholna** á jarðhitasvæðum innan ofangreindra svæða er tekin saman en hún byggir mikið á stuttum afkastaprófunum í borlok. Hér er því jafnan um e.k. efri mörk á afkastagetu jarðhitasvæða til lengri tíma að ræða.
- Endurmat á upphaflegu **varmaflæði hvera og lauga**, fyrir ofangreind svæði þar sem notuð eru gögn frá því áður en vinnsla hófst á viðkomandi svæði, ef mögulegt er. Hér er fyrst og fremst um laugar á lághitasvæðum að ræða, því tölulegar upplýsingar fyrir varmaflæði sjóðandi hvera háhitasvæðunum er erfitt að mæla.
- Núverandi **vinnsla lághitasvæða** skv. gögnum sem hitaveitur landsins skila til Orkustofnunar (nú Umhverfis- og orkustofnun). Áfram er miðað við sömu svæðaskiptingu. Þegar þetta verkefni hófst var ætlunin að skoða jafnframt niðurstöður líkanreikninga fyrir lághitasvæðin, sérstaklega hvað varðar afkastagetu til langs tíma skv. framtíðarspám reikninganna fyrir mismunandi vinnslutilfelli. Í ljós kom að niðurstöðurnar eru ekki eins aðgengilegar og reiknað var með og forðamat því aðeins skoðað lauslega, einkum fyrir jarðhitakerfi sem ÍSOR hefur gert líkanreikninga fyrir.
- **Afköst háhitasvæða** skv. samræmdu mati á vinnslugetu háhitasvæða landsins frá 2009, sem vísað er í hér að ofan. Matið er þó endurskoðað fyrir þau fáu svæði þar sem frekari rannsóknir hafa verið gerðar (einkum viðnámsmælingar).
- Uppfærslu meginþátta matsins frá 1985, þ.e. **mats á varmaorkuforðanum** í jarðskorpu landsins og hve stóran hluta hans megi gera ráð fyrir að hægt sé að nýta á ákveðnu tímabili og mats á varmaorkuflæðinu í gegnum yfirborð landsins. Hér verður byggt á uppfærðum gögnum, ekki síst um hitaástand jarðskorpu, en einnig verða ýmsar breytur eldri útreikninga endurskoðaðar.

Lokaniðurstaðan í núverandi úttekt felst ekki í einni algildri tölu heldur uppfærðum tölulegum niðurstöðum fyrir hina mismunandi þætti, sem taldir eru upp hér að ofan, á grundvelli svæðisskiptingarinnar sem vísað er til. Einnig felst lokaniðurstaðan í framtíðarsýn tengdri því hvernig sé hægt að auka við jarðhitavinnsluna, m.a. á nýjum vígstöðvum því ljóst er að uppfært jarðhitamátið gefur til kynna mun stærri auðlind, en endurspeglast í nýtingu dagsins í dag.

Í skýrslunni er fyrst (kafli 2) farið yfir helstu atriði sem varða eðli jarðhitans og jarðhitaauðlindin á Íslandi sett í samhengi mismunandi gerða og nýtingar jarðhitans í heiminum. Einnig er fjallað um um nýtinguna á Íslandi í dag, mikinn vöxt síðustu árin og útlitið til framtíðar, m.a. í ljósi sjálfbærrar þróunar. Kafli 3 hefst á umfjöllun á aðferðafræðinni sem notuð er við uppfærslu jarðvarmamatsins og síðan eru niðurstöður fyrir mismunandi þætti, eða hluta, auðlindarinnar birtir. Fjallað er sérstaklega um hitastigulskort af Íslandi, en túlkaður hitastigull í borholum eru grundvallar gögn fyrir jarðvarmamat, og voru eldri gagnasöfn uppfærð samhliða gagnasöfnun fyrir þessa vinnu. Í kafla 4 er umfjöllun um framtíð jarðhitanytingar á Íslandi, með áherslu á mögulega tækni sem enn hefur ekki verið beitt hér og jarðhita sem enn hefur ekki verið nýttur vegna erfiðrar legu. Þá er í kaflanum umfjöllun um þörfina á aukinni jarðhitaleit og auknum rannsóknum á ýmsum jarðhitatengdum þáttum. Skýrslunni lýkur svo á samandregnum niðurstöðum.

Að lokum er rétt að leggja áherslu á það að við alla reikninga á flæði og magni varmaorku þarf að miða við ákveðið, fast hitastig. Hér er miðað við 5°C eins og í jarðvarmamatinu 1985, sem er meðalhitastig ársins á

Íslandi. Þannig er matið óháð nýtingunni, en oftast er þessi viðmiðunarhiti annar og þá háður því hvers eðlis viðkomandi nýting er. Þetta á t.d. við um orkutölur OS/UOS. Mikilvægt er að hafa þetta í huga þegar unnið er með gögn um varmaorku. Líka má nefna að oft er miðað við 15°C, sem er meðalhiti við yfirborð jarðar.

2. Eðli jarðhitans og nýting hans

2.1 Jarðhitakerfi og jarðfræðilegar aðstæður

Jarðhitaorka á upptök sín í varmaflæði um jarðskorpuna, sem á annars vegar rót í innri hita jarðar, sem hefur varðveist frá myndun hennar, og hins vegar í geislavirkni sem er aðallega í möttlinum. Í grunninn er jarðhitinn tvíþættur því auk varmaflæðisins er gríðarlegur varmaforði bundinn innan jarðarinnar, vaxandi með dýpi. Það sem í daglegu tali er nefnt jarðhitakerfi á við kerfi í jarðskorpunni þar sem jarðfræðilegar aðstæður valda því að varmaflæðið og varmaforðinn eru oft óvenju mikil auk þess sem góð lekt bergs veldur flæði og hræringu heits vatns, sem nýta má sem orkugjafa (*e. hydrothermal systems*). Í víðasta skilningi samanstendur jarðhitinn sem orkulind því bæði af almenna flæðinu auk orkuforðans og jarðhitakerfunum. Aðeins þau síðarnefndu, sem eru örlítið hlutmengi af flæðinu og forðanum, hafa verið nýtt í einhverjum mæli með núverandi tækni, ef undan er skilin nýting varma í jarðlögum næst yfirborði með varmadælum.

Hér á eftir verður fjallað stuttlega um mismunandi flokka jarðhitakerfa og jarðhitann almennt, og lesandanum er bent á nokkrar mismunandi heimildir þar sem finna má ýtarlegri umfjöllun, frá mismunandi sjónarhornum. Umfjöllunin hér á eftir er jafnframt byggð á þessum heimildum. Fyrst má nefna álitserð faghóps um eðli jarðhitans og sjálfbæra nýtingu hans frá 2010 (Jónas Ketilsson o.fl., 2010). Því næst bókarkafla um eðli og flokkun jarðhitakerfa (Benedikt Steingrímsson o.fl., 2022) auk annars nýlegs bókarkafla um framtíð jarðhitans (Guðni Axelsson, 2024). Að lokum má nefna grein Stefáns Arnórssonar o.fl. í tímaritinu Jökli (2008).

Á Íslandi hafa jarðhitakerfi að öllu jöfnu verið flokkuð í háhita- og lághitakerfi. Þau fyrrnefndu eru metin heitari en 200°C á 1 km dýpi en þau síðarnefndu kaldari en 150°C á 1 km dýpi. Jarðhitakerfi sem falla þarna á milli í hita eru til á landinu, en mjög fá. Jarðhitakerfi eru svo gjarnan flokkuð í eftirfarandi meginflokka á grundvelli eðlis þeirra og jarðfræðilegra aðstæðna:

- Háhitakerfi tengd eldvirkni**, þ.e. á flekaskilum og/eða í megineldstöðvum. Í slíkum kerfum eru aðalhitagjafarnir heit innskot eða jafnvel kvikuhólf eða minni kvikuhleifar. Grunnvatn sekkur niður í kerfin um opnar sprungur og hitnar þar vegna nálægðar við hitagjafana. Eftir að hafa hitnað rís vatnið vegna lægri eðlismassa og skapast við það hræring (*e. convection*) vatnsins í sprungunum, oft mjög djúpstæð, sem flytur varmann á minna dýpi, að hluta upp til yfirborðs. Mikill fjöldi slíkra jarðhitakerfi er tengdur „Eldhringnum“ (*e. Pacific Ring of Fire*) umhverfis Kyrrahafið og þá í löndum eins og Nýja Sjálandi, Indónesíu, Filippseyjum, Japan, austasta hluta Rússlands auk Norður-, Mið- og Suður-Ameríku. Jafnframt má nefna Ísland, Ítalíu og Kenía auk annarra landa í Austur-Afríku sigdalnum. Töluverður fjöldi jarðhitakerfa á þessum svæðum er nýttur til raforkuframleiðslu.
- Kerfi tengd hræringu vatns** á tektónískt virkum svæðum, oftast lághitakerfi. Hér er hitagjafinn einfaldlega heitt berg jarðskorpunnar en sprungurnar skapa skilyrði fyrir hræringu vatns sem flytur varmann af miklu dýpi nær yfirborði. Öflugustu slík kerfi eru oft nálægt flekaskilum með jarðskjálftavirkni, þar sem skorpan er heitari en ella (há hitastigull) og sprungur frekar opnar og vatnsgæfar, en þær aðstæður eru þó ekki skilyrði fyrir tilvist slíkra jarðhitakerfa. Slík kerfi eru mjög algeng á Íslandi og undirstaða húshitunar landsins. Önnur vel þekkt svæði eru „Basin and Range“ í suðvestanverðum Bandaríkjunum og Vestur-Tyrkland, en á báðum þessum svæðum er fjöldi jarðhitakerfa nýttur, aðallega til raforkuframleiðslu. Slík hræringarkerfi eru væntanlega dreifð yfir alla jörðina, sum þekkt og þar af mörg nýtt á einhvern hátt meðan mun fleiri eru ekki nýtt. Svo má reikna með miklum fjölda slíkra kerfa sem enn eru óþekkt, annars vegar vegna staðsetningar og skorts á rannsóknum og hins vegar kerfi sem hafa engin ummerki á yfirborði.
- Setlagakerfi** í vel lekum setlögum á miklu dýpi í hinum fjölmörgu setlagadældum jarðarinnar, sem flestar eru á meginlöndunum fjarri ofangreindum flekaskilum. Þau hafa mörg uppgötvast við

boranir eftir olíu og gasi, sem einmitt er að finna í sömu, eða sambærilegum, setlögum. Varminn kemur úr viðkomandi setlögum og úr nálægum lögum, en nýtingin byggir á heitu vatni sem í lögunum býr. Í setlagakerfum er varmaflutningur aðallega með varmaleiðni, en að óverulegu leyti með hræringu. Þau eru yfirleitt mjög víðáttumikil. Segja má því að setlagajarðhitakerfin séu um margt andstæður kerfa tengdum eldvirkni eða hræringu og lýst er hér að ofan. Í þessum kerfum er hiti lægri en í kerfum tengdum eldvirkni, en þau henta samt vel fyrir beina nýtingu og þá ekki síst húshitun, þar sem hennar er þörf. Setlagajarðhiti var fyrst nýttur í stórum stíl í Ungverjalandi (hófst á 19. öld) og seinna í Frakklandi (hófst um 1970). Nú er veruleg nýting setlagajarðhita í Kína, Þýskalandi, Frakklandi og mörgum löndum Austur-Evrópu, svo helstu dæmin séu nefnd. Þessi auðlind finnst þó mun víðar á meginlöndunum, algjörlega ónotuð. Sem dæmi má nefna Mið-Asíu og N-Ameríku, en þar mætti nota hana til húshitunar á köldum vetrum. Víðáttumikinn setlagajarðhiti er einnig að finna í Suður-Ameríku, Afríku og Ástralíu. Engan eiginlegan setlagajarðhiti er að finna á Íslandi.

Ofangreind flokkun byggir á töluverðri einföldun jarðfræðilegra aðstæðna og má t.d. flokka jarðhitakerfi af gerð A í marga undirflokka. Sama gildir um kerfi í flokki B og að einhverju leyti kerfi í flokki C. Ekki er ástæða til að fjalla nánar um þá hér, en lesandanum vísað á heimildir sem getið er um hér að ofan.

Almennt má segja að aðeins lítill hluti jarðhitakerfa sem falla undir ofangreinda flokka sé nýttur í dag, þótt jarðhiti sé nýttur yfir 40 löndum í dag (IEA, 2024). Kerfi sem eru fjarri mögulegum orkumörkuðum (varmi og/eða raforka) bíða enn mögulegrar nýtingar auk þess sem fjöldi jarðhitakerfa hefur lítið verið rannsakaður og þá er talið að töluverður fjöldi jarðhitakerfa, einkum af gerð B, sé enn óþekktur vegna takmarkaðra yfirborðsummerkja (s.k. falin jarðhitakerfi). Þá má nefna hugmyndir sem uppi eru tengdar útvíkkun á nýtingu jarðhitakerfa af gerð A, aðallega. Það felst í fyrsta lagi í nýtingu djúpra róta slíkra háhitakerfa, þar sem reiknað er með tilvist mjög heits og orkuríks vökva og/eða gufu, jafnvel yfirkrítíks vökva. Djúpbórunarverkefnið á Íslandi (IDDP, sjá <http://iddp.is/>) er dæmi um slíkt rannsóknarverkefni, en sambærilegar rannsóknir hafa staðið yfir í Bandaríkjunum, í Japan og á Nýja-Sjálandi. Í öðru lagi felst möguleg útvíkkun í nýtingu háhitakerfa á hafsbotni, einkum á úthafshryggjum þar sem búast má við að stærstur hluti eldvirkra háhitakerfa séu staðsett. Þess háttar nýting er enn á hugmyndastigi en á Íslandi hafa þó þegar verið gefin út tvö rannsóknarleyfi til könnunar á jarðhita á hafsbotni.

Öfugt við jarðhitakerfin sem fjallað er um hér að ofan, sem að mestu hafa staðið undir jarðhitanýtingu með nútímatækni, þá finnst varmaforði jarðarinnar og varmaflæðið alls staðar. Ef tæknin leyfði væri hér um gríðarlega orkulind að ræða.

Guðni Axelsson (2024) bendir á að varmaflæðið um yfirborð jarðar sé áætlað um 47 ± 2 TW, sem jafngildir um 1.490 EJ/ári³. Árið 2020 var heildarorkunotkun jarðarbúa áætluð um 590 EJ/ári þannig að fræðilega myndi um 1/3 varmaflæðisins fullnægja orkuþörf mannkyns, ef tæknin til að grípa það væri tiltæk. Guðni Axelsson (2023) ber orkunotkun mannkyns einnig saman við varmaorkuforðann í jarðskorpunni. Niður á 2 km dýpi reiknast hann vera um 64.000.000 EJ. Um 1% hans myndi uppfylla núverandi orkuþarfir mannkyns í meira en 100.000 ár. Að sama skapi myndi 1% varmaorkuforðans niður á 5 km dýpi uppfylla þær þarfir í nærri 700.000 ár.

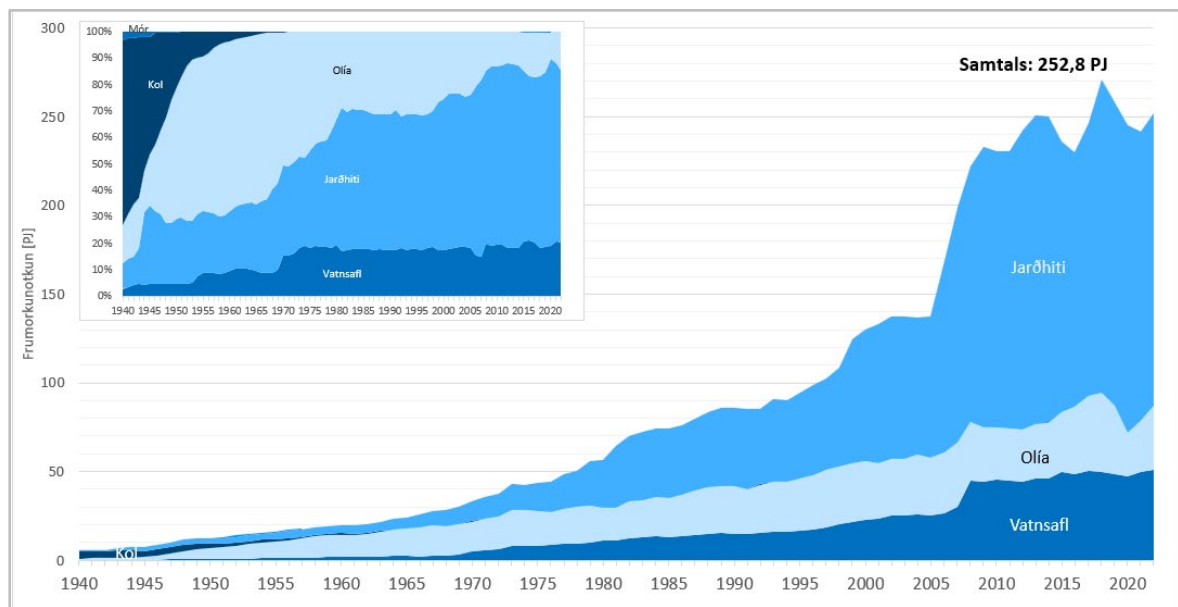
³ 1 TW (terawatt) = 1 000 000 000 000 W (10^{12} W) og 1 EJ (exawatt) = 1 000 000 000 000 000 J (10^{18} J).

Þessar gríðarlegu orkulindir eru aðeins nýttar óverulega ennþá og segja má að framtíðarnýting þeirra bíði viðeigandi tækniframfara. Þó má nefna varmaðælur sem nýta varmaorkaforða mjög grunnt og jafnframt varmaflæðið úr iðrum jarðar rétt áður en það sleppur út um yfirborðið (e. *ground source heat pumps*). Þær eru mikið notaðar á vissum landsvæðum og í mjög vaxandi mæli, einkum til húshitunar. Jafnframt má nefna svokallaða EGS-tækni (e. *enhanced/ engineered geothermal systems*) sem miðar að því að nýta varmaforðann fjarri eiginlegum jarðhitakerfum, jafnvel í lítt leku en þó vel heitu bergi⁴. EGS-tilraunir hafa staðið yfir á nokkrum stöðum í heiminum í nærri því 50 ár, en enn er nokkuð í land að tæknin verði fjárhagslega hagkvæm og hægt að beita almennt á stórum skala. Sem dæmi má nefna tilraunasvæðin í Fenton Hill (New Mexico) í Bandaríkjunum, Rosemanowes (Cornwall) á Bretlandi, Soultz í Frakklandi og Cooper Basin í Ástralíu. Núna síðast eru umfangsmiklar tilraunir hafnar í Utah (Cape Station) í Bandaríkjunum, í samstarfi stjórnvalda (<https://utahforge.com/>) og orkufyrirtækis (<https://fervoenergy.com/>). Vonir standa til að stórt skref verði tekið í átt að því að gera EGS-tæknina að raunhæfum kosti og þegar þar að kemur mun opnast gríðarstór orkuauðlind, eins og tölurnar að ofan sýna.

⁴ EGS tæknin gengur í stuttu máli út á það að sækja varmaorku í heitt berg neðanjarðar með því að bora djúpar holur og opna sprungur milli þeirra, sem vatn getur runnið um og sótt orkuna. Ýmist með því að örva sprungur sem þegar eru til staðar í viðkomandi bergi eða jafnvel mynda nýjar sprungur. Það væri oftast gert með því að dæla vatni niður í jarðlögin undir mjög háum þrýstingi.

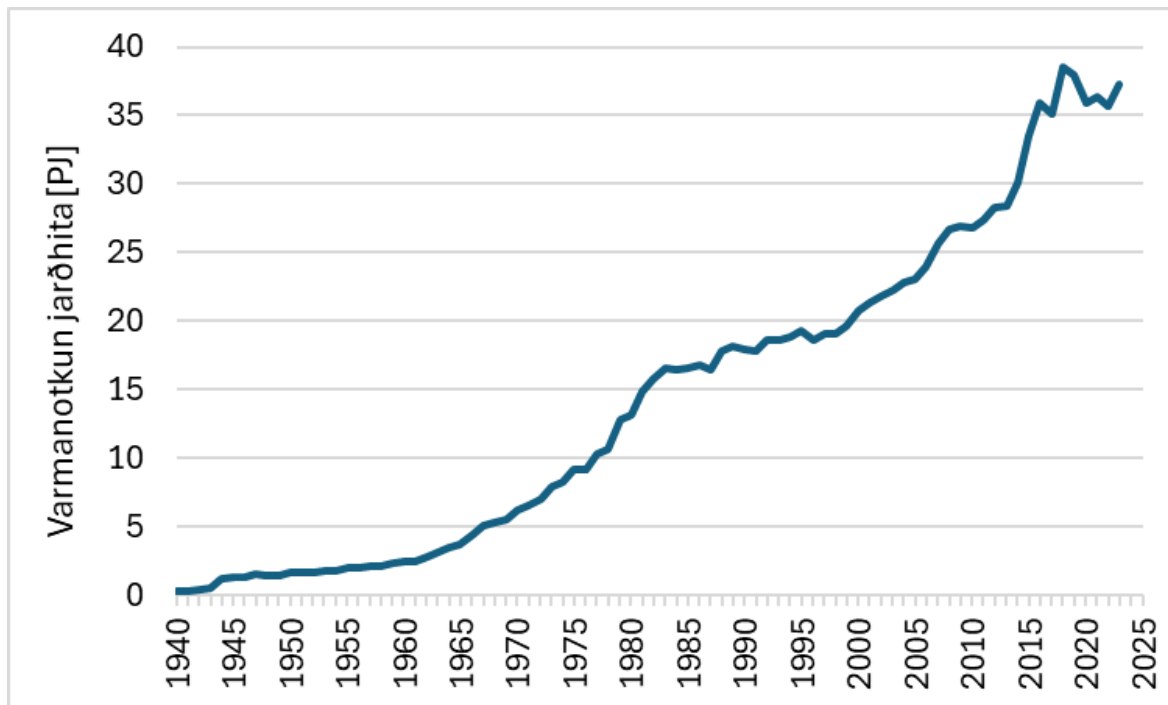
2.2 Jarðhitanyting á Íslandi og þróun hennar

Frumorkunotkun jarðhita er um 2/3 af heildarfrumorkunotkun á Íslandi og hefur haldist nokkuð stöðug undanfarin ár (mynd 2). Stærstu framleiðendur orku með jarðhita eru jarðhitavirkjanir, orkuver og hitaveitur, sem sum dæla affallsvatni aftur niður í jarðhitageyminn sem minnkar heildarfrumorkunotkun. Þetta hlutfall jarðhita til orkuframleiðslu má segja að sé einsdæmi í heiminum, þótt a.m.k. átta aðrar þjóðir séu að framleiða meiri orku en Ísland með jarðhita (ThinkGeoEnergy, 2024).

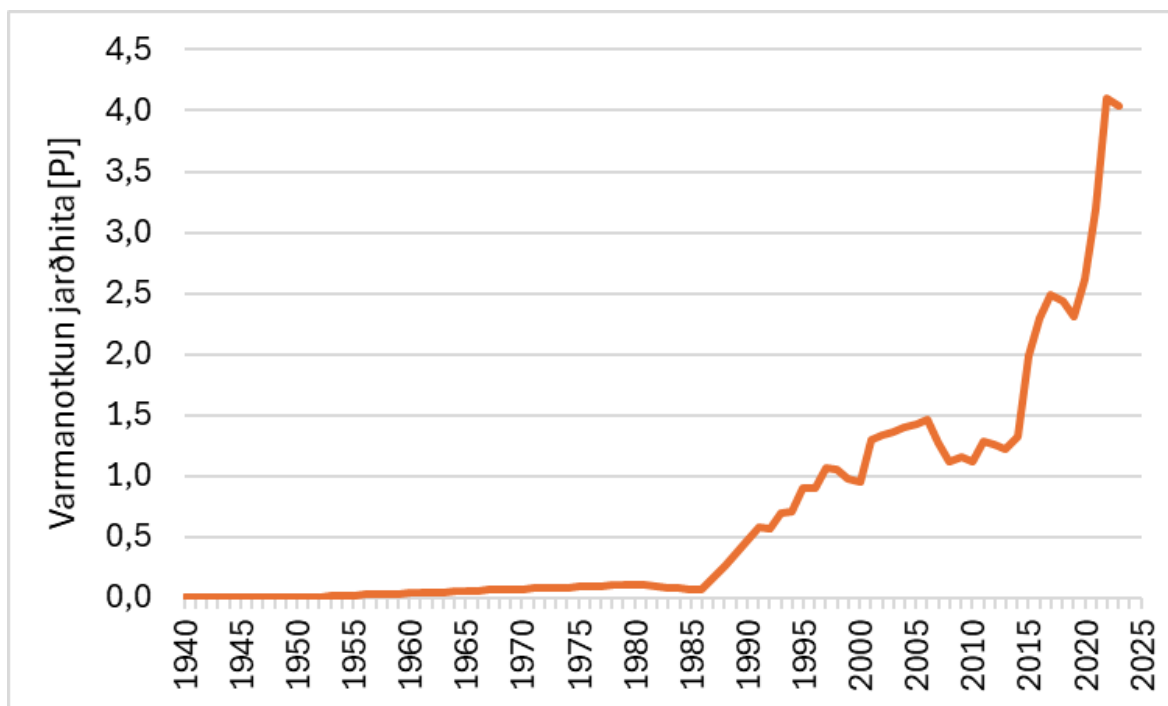


Mynd 2. Frumorkunotkun á Íslandi 1940-2022 (Orkustofnun, 2023).

Varmanotkun jarðhita hefur farið stöðugt vaxandi síðustu áratugi og var 37,3 PJ árið 2023 (mynd 3) (Orkustofnun, 2022). Samkvæmt Jarðvarmaspá Orkustofnunar er gert ráð fyrir að eftirspurn eftir varma aukist úr 35 PJ árið 2020 í 57,2 PJ árið 2060. Gert er ráð fyrir að fiskeldi muni aukast hlutfallslega mest á spátímabilinu, eða um 277% í 7,2 PJ. Árið 2020 var nýting fiskeldis um 2,6 PJ en árið 2023 var hún komin í 4,0 PJ og því augljóst að þegar er mikill vöxtur í greininni (mynd 4). Önnur aukning í varmaþörf er rakin til aukinnar fólksfjölgunar, stækkunar húsnæðis, fjölgun hótela, heitra potta og baðlauga sem tengist ferðamannaiðnaðinum og aukinna umsvifa fyrirtækja.



Mynd 3. Varmanotkun jarðhita árin 1940 til 2023. (Umhverfis- og orkustofnun óútgefið talnaefni).



Mynd 4. Jarðhitanoctkun til fiskeldis á Íslandi 1940 til 2023 (Umhverfis- og orkustofnun óútgefið talnaefni).

2.3 Endurnýjanleiki og sjálfbær nýting jarðhitans

Mannkynið horfir í vaxandi mæli til sjálfbærrar þróunar á flestum sviðum, þ.e. þróunar sem fullnægir þörfum núverandi kynslóða án þess að ganga á möguleika komandi kynslóða til að mæta væntanlegum þörfum sínum. Þarna eru auðlindanýting og verndun umhverfisins lykilþættir. Því hefur möguleikinn á því að jarðhitinn leggi verulega til sjálfbærrar þróunar og að hann megi nýta á sjálfbæran hátt, töluvert verið skoðaður undanfarna rúma tvo áratugi. Hér verður fjallað stuttlega um þennan möguleika, en mun ítarlegri umfjöllun má m.a. finna í álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita (Jónas Ketilsson o.fl., 2010). Þá má einnig benda á skrif Guðna Axelssonar (2010) og Brynhildar Davíðsdóttur og Guðna Axelssonar (2022).

Jarðhitinn er að öllu jöfnu flokkaður sem endurnýjanleg orkuauðlind, sem er eðlilegt vegna þess að hann á alls ekki heima með endanlegum auðlindum eins og olíu og kolum. Hið tvíþætta eðli jarðhitans, þ.e. sem varmaforði og varmaflæði, veldur því að hann er ólíkur öðrum orkugjöfum sem byggja annað hvort á forða (endanlegar auðlindir eins og olía og kol) eða flæði (t.d. sólar- og vindorka). Jarðhitinn er einfaldlega of flókin til að falla almennilega undir þessa einföldu flokkun í endanlegar og endurnýjanlegar auðlindir. Varmaforðinn endurnýjast hægt með varmaleiðingu, bæði í einstökum jarðhitakerfum og eins almennt í jarðskorpunni. En hann er gríðarlegur, og praktískt séð óendanlegur. Varmaflæðið er hins vegar fullkomlega endurnýjanlegt í eðli sínu, hvort sem það er með varmaburði (*e. heat convection eða heat advection*) með vatni eða jafnvel kviku eða varmaleiðingu. Sem dæmi má nefna að varmaforðinn er ráðandi í setlagakerfum (liður C. í kafla 2.1) en varmaflæðið í eldvirknikerfum og hræringarkerfum (liðir A. og B. í kafla 2.1). Hugtökunum endurnýjanleika og sjálfbærni er oft ruglað saman, bæði í ræðu og riti. Mikilvægt er að hafa í huga að fyrra hugtakið endurspeglar eðli jarðhitakerfa og auðlinda, en að það seinna endurspeglar hvernig auðlindin er nýtt (Valgarður Stefánsson, 2000).

Geta jarðhitakerfa til að standa undir sjálfbærri jarðhitavinnslu er fyrst og fremst háð eðli þeirra, sem fjallað hefur verið um hér að framan, og þar með endurnýjanleika. Ef orkuvinnslan er innan ákveðinna marka er gengið mjög hægt á varmaforðann, en varmaflæðið endurnýjast á hraða sambærilegum nýtingarhraðanum. Ef vinnslan er stöðvuð þá endurnýjast varmaforðinn jafnframt á náttúrulegan hátt. Reynslan af nýtingu margra jarðhitakerfa vítt og breitt í heiminum, í áratugi⁵, hefur sýnt að með því að halda vinnslunni undir ákveðnum mörkum virðast mörg kerfin komast nálægt því að ná e.k. jafnvægi milli vinnslunnar og endurnýjunar vatns- og orkuforða. Í öðrum kerfum eru breytingar í ástandi þeirra (þrýstingur og hiti) svo hægar að þær hafa ekki áhrif á vinnsluna áratugum saman.

Til þess að hægt sé að leggja mat á sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa, sbr. ofangreind mörk, þarf að miða við skynsamlegan tímaskala. Stuttur tímaskali upp á 20 – 30 ár er ekki í anda sjálfbærrar þróunar og mjög langur tímaskali, t.d. jarðsögulegur, er ekki raunhæfur því engan veginn er hægt að spá fyrir um stöðu mannkyns til lengri tíma. Því hefur verið lagt til að miða við tímaskala upp á 100 – 300 ár (Guðni Axelsson ofl., 2001), þegar reynt er að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitakerfa (t.d. með líkanreikningum) og setja upp langtímaáætlanir um nýtingu þeirra. Slíkar áætlanir geta gert ráð fyrir mismunandi vinnslumynstrum, því erfitt er að viðhalda stöðugri vinnslu í svo langan tíma, enda sjálfbær vinnslugeta jarðhitakerfa óþekkt við upphaf nýtingar þeirra. Það vinnslumynstur sem fellur best að hugtakinu um sjálfbæra þróun er uppbygging í hóflegum þrepum (Valgarður Stefánsson, 1992). Þannig er hægt að forðast

⁵ Helstu dæmi: Laugarnessvæðið í Reykjavík, nærri öld; Wairakei á Nýja-Sjálandi, nærri 70 ár; Larderello á Ítalíu, yfir 100 ár; Ahuachapan í El Salvador, 50 ár; Nesjavellir 35 ár; Settlög undir París, um hálf öld. Sjá líka Geothermics Special Issue (2010, Vol. 39, Issue 4).

ofnýtingu jarðhitakerfa á sama tíma og þekkingu er safnað, sem nýtist til að meta sjálfbæru vinnslugetuna og stýra notkuninni til langs tíma.

Undanfarna 1-2 áratugi hafa tilraunir verið gerðar til uppsetningar sjálfbærnimats (e. *protocols*) fyrir jarðhitanýtingu, sem byggja annars vegar á sjálfbærnimarkmiðum og hins vegar á matslyklum grundvölluðum á markmiðunum. Markmiðin þurfa að taka til allra viðeigandi þátta, s.s. auðlindarinnar, umhverfisins, hagkvæmni og þjóðfélags. Í þessu sambandi ber að nefna matslykilinn Geothermal Sustainability Assessment Protocol (GSAP) sem Orkustofnun, Landsvirkjun, Orkuveita Reykjavíkur, HS orka og Umhverfisstofnun þróuðu fyrir nokkrum árum og kynntu á WGC2020+1 ráðstefnunni í Reykjavík 2021 (Guðni Jóhannesson ofl. 2021). Í núverandi vinnu er ofangreind sýn á möguleika sjálfbærrar jarðhitanýtingar höfð að leiðarljósi í umfjöllun um framtíðarsýn í kafla 4.1.

2.4 Dæmi um úttektir og jarðvarmammat erlendis

Á 8. og 9. áratug síðustu aldar var unnið heilstætt mat á varmaforða og vinnanlegum þætti jarðhitaauðlindarinnar hjá mörgum þeim þjóðum sem nú hafa hvað lengsta reynslu og þekkingu á sviði jarðhitanýtingar, t.d. Íslandi (Guðmundur Pálmason ofl, 1985), Ítalíu (Muffler, P. og Cataldi, R. (1978), Nýja Sjálandi (Donaldson, I.G. og Grant, M.A., 1978) og Bandaríkjunum (Muffler, L.P.J., 1979). Þá var byggt á aðferðum rúmmáls mats og ýmsar mikilvægar forsendur voru ákvarðaðar í samræmi við nýjustu rannsóknir þess tíma. Slíkar heildstæðar úttektir og mat á jarðvarma eru jafnan grundvöllur til að meta með meiri nákvæmni einstök jarðhitasvæði eða tiltekin landssvæði, og þá eru sett upp nákvæm reiknilíkön, s.k. forðalíkön, ef tiltæk gögn leyfa (Valgarður Stefánsson, 2005).

Heildarmat á jarðhitaauðlindinni í Bandaríkjunum var síðast uppfært árið 2008 (USGS, 2008). Í því mati kemur fram að þekkt jarðhitasvæði, í þeim 13 fylkjum sem þegar eru að nýta jarðhita, eru talin geta staðið undir rúmlega 9.000 MW_e. Þá var talið að um 30.000 MW_e felist í nýtingu á óþekktum jarðhitasvæðum með hefðbundnum aðferðum og jafnvel 500.000 MW_e á svæðum sem væru mögulega nýtt með EGS tækni. Í Bandaríkum er uppsett afl til framleiðslu raforku með jarðhita tæplega 4.000 MW_e (ThinkGeoEnergy, 2024). Á síðustu árum hafa þau lönd sem standa fremst í jarðhitanýtingu í heiminum unnið að mati og skoðun á gögnum fyrir tiltekin landsvæði þar sem dregin eru fram mikilvæg gögn til að meta jarðhitaauðlindina og greina hvar eru tækifæri og hvar skortir á gögn til að byggja undir ákvarðanir framkvæmdaraðila. Nýleg löggjöf (Energy law 2020) krefur Jarðfræðistofnun Bandaríkjanna um uppfært jarðvarmamat þar sem horft er til fleiri tegunda af jarðhitakerfum (t.d. EGS) og skoða einnig svæði sem ekki hafa verið tekin inn í slíkt yfirlit hingað til (t.d. Alaska). Slíkar úttektir eru farnar að líta dagsins ljós, t.d. nýleg skýrsla um s.k. Great Basin svæði í vesturhluta Bandaríkjanna og möguleika til vinnslu jarðhita með EGS. Great Basin jarðhitasvæði framleiða allt að 10% af núverandi orkuframleiðslu landsins (Burns, ofl., 2025).

Á grundvelli heildar jarðvarmamats fyrir Nýja Sjáland (Donaldson og Grant, 1978) og uppbyggingar jarðhitanýtingar, sem þó hefur dregið úr á síðustu áratugum, hafa stjórnvöld nýlega lagt fram vegvísi og aðgerðaráætlun (New Zealand Government, 2025). Markmið áætlunarinnar er að gera landið leiðandi í endurnýjanlegri orkuframleiðslu, leiða nýsköpun jarðhitanýtingar í heiminum og hafa tvöfaldað orkuöflun með jarðhita árið 2040. Þar liggja til grundvallar opinber gögn og þekking um auðlindina (t.d. hitastigulskort), en það er grunnurinn að því að auka áhuga, minnka áhættu og bæta samkeppni sem leiðir til tækifæra og frekari framfara.

Á árinu 2026 hyggst Evrópusambandið leggja fram aðgerðaráætlun um jarðhita (e. *Geothermal Action Plan*) sem verður nýtt til að hvetja til nýtingar og nýsköpunar á sviði jarðhita, bæði til varma, kælingar og framleiðslu raforku. Kortlagðar hafa verið áskoranir sem verða markmið áætlunarinnar, m.a. sem varðar skipulags- og leyfismál, mannauð og þekkingu, fjármögnun og aðgengi að gögnum (EU, 2024). Á grundvelli þess hafa ýmsir aðilar sem tengjast rannsóknnum og þróun jarðhita í Evrópu hafið undirbúning til þess að fylgja eftir áherslu og tækifærum sem í því felast. Meðal annars hafa samtök jarðfræðistofnana í Evrópu tekið saman s.k. Position Paper þar sem áhersla er lögð á mikilvægi þess að jarðvísindaþekking og samræmd opin gögn verði aðgengileg til ákvarðana (EuroGeoSurvey, 2025).

3. Uppfært jarðvarmamat

3.1 Aðferðafræði

Aðferðafræði núverandi jarðvarmamats byggir á því að meta auðlindina á grunni tvíþætts eðlis hans (sbr. kafla 1). Annars vegar varmaflæðið í gegnum jarðskorpuna og hins vegar varmaorkuna sem geymd er í skorpunni. Í köflunum hér á eftir verður farið ítarlegar í hvern og einn þeirra þátta sem varða matið, grein gerð fyrir gögnunum og helstu niðurstöðum við skoðun á þeim. Fyrst er hér samandregið yfirlit til skýringa á þeim gögnum/þáttum og jarðeðlisfræðilegum eiginleikum sem þau lýsa:

- A. **Varmaflæðið** er margþætt og í dag eru til ítarleg gögn um flesta þættina:
- 1) Kortlagning, og í flestum tilfellum upplýsingar um rennsli og hita, náttúrulegra lauga og hvera. Annars vegar eru gögn úr upphaflegu yfirliti frá 1985 (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985) og hins vegar nýtt jarðhitakort og gagnasafn um jarðhita (Helgi Torfason, 2024). Yfirlitið má nota til að reikna varmafl einstakra staða og leggja saman fyrir landshluta og landið í heild. Í mörgum tilfellum hefur rennslið stöðvast vegna þrýstingslækkunar af völdum vinnslu úr borholum. Þess vegna gefur aðferðin mat á náttúrulegu varmaafli hvers staðar áður en nýting hófst. Þetta kallast varmaburður (e. *heat advection* eða *convection*). Tiltækar upplýsingar takmarkast þó að mestu við lághitasvæði, þó einhverjar upplýsingar um háhitasvæði megi finna í gagnasafninu. Í skýrslunni er varmaflæði um háhitasvæðin þó metið gróflega á sambærilegan hátt og 1985 (háhitasvæðum undir jökli þó sleppt utan Grímsvatna).
 - 2) Til viðbótar við þetta er varmaleiðingin (e. *heat conduction*) í gegnum jarðskorpu landsins í heild sinni, sem áætla má á grunni nýjasta hitastigulskorts landsins (kafla 3.2) og almennrar þekkingar á hitaástandi jarðskorpunnar á þeim svæðum sem eyður eru í hitastigulskortinu. Samanlagt gefa þættir 1) + 2) varmaflæðið upp í gegnum jarðskorpu Íslands í náttúrulega ástandi áður en nýting hófst.
 - 3) Næsti þáttur varmaflæðisins felst í samanlögðu afli jarðhitaborholna landsins, eða mögulegu varmaflæði um þær. Hér er ekki um stöðugt varmaflæði að ræða, nema að hluta. Frekar mat á hvað viðkomandi holur gæfu ef þær væru allar í gangi samtímis á fullum afköstum, sem þá er hægt að leggja saman fyrir landshluta og landið í heild. Þessi þáttur er því ólíkur þáttum 1) og 2), en felur í sér mikilvægar upplýsingar um jarðhitaauðlind landsins. Hér er byggt á samantekt á gögnum og skýrslum Orkustofnunar og ÍSOR um afl borholna (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018). Inn í þetta gagnasafn vantar að töluverðu leyti upplýsingar um afköst flestra borholna á háhitasvæðum, eins og fyrir þátt 1). Hafa ber í huga að hámarksafl borholna er meira en náttúrulegt afl hvera og lauga. Aflið er metið út frá tölum í stuttum afkastaprófunum og getur í sumum tilfellum verið meira en sjálfbær vinnslugeta einstakra svæða.
 - 4) Fjórði varmaflæðisþátturinn sem skoðaður er byggir á vinnslu á jarðhitasvæðum landsins skv. gögnum Umhverfis- og orkustofnunar (áður Orkustofnun). Viðkomandi tölur eru tiltækar fyrir svokallaðar reglugerðarhitaveitur⁶, háhitasvæði sem eru virkjuð og nokkurn fjölda einkahitaveitna. Eitthvað vantar því upp á að þessi gögn séu fullkomlega heildstæð þótt lítið vanti upp á það. Nýjustu tölur stofnunarinnar eru fyrir árið 2023. Tölurnar eru skráðar sem rúmmál og massi vatns sem framleitt er á ársgrundvelli og sem heildarvarmaorkuframleiðsla ársins m.v. grunnhitastigið 15°C. Hér eru þær umreiknaðar í meðalafl eða ársmeðalvarmaflæði m.v. 5°C. Í þessu sambandi má einnig benda á úttekt sem ÍSOR gerði um stöðu hitaveitna og nýtingar jarðhitavatns á Íslandi (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023).

⁶ Á grundvelli V. kafla orkulaga nr. 58/1967 um leyfisveitingu til sveitarfélaga eða samtaka þeirra um einkaleyfi til þess að starfrækja hitaveitur, sem annist dreifingu eða sölu heits vatns eða gufu til almenningsþarfa á tilteknu veitusvæði.

- 5) Síðasti varmaflæðisþátturinn sem skoðaður er byggir á áætlaðri vinnslugetu háhitasvæða (afkastamat). Hún er metin með aðferðarfræði sem áður hefur verið útfærð í samvinnu Orkustofnunnar og ÍSOR (Jónas Ketilsson o.fl., 2009) og hefur hér verið endurmetinn í tilvikum þar sem nýjar niðurstöður liggja fyrir (undirkafl 0 hér á eftir).

B. **Varmaorka** jarðskorpunnar er reiknuð miðað við ákveðnar forsendur:

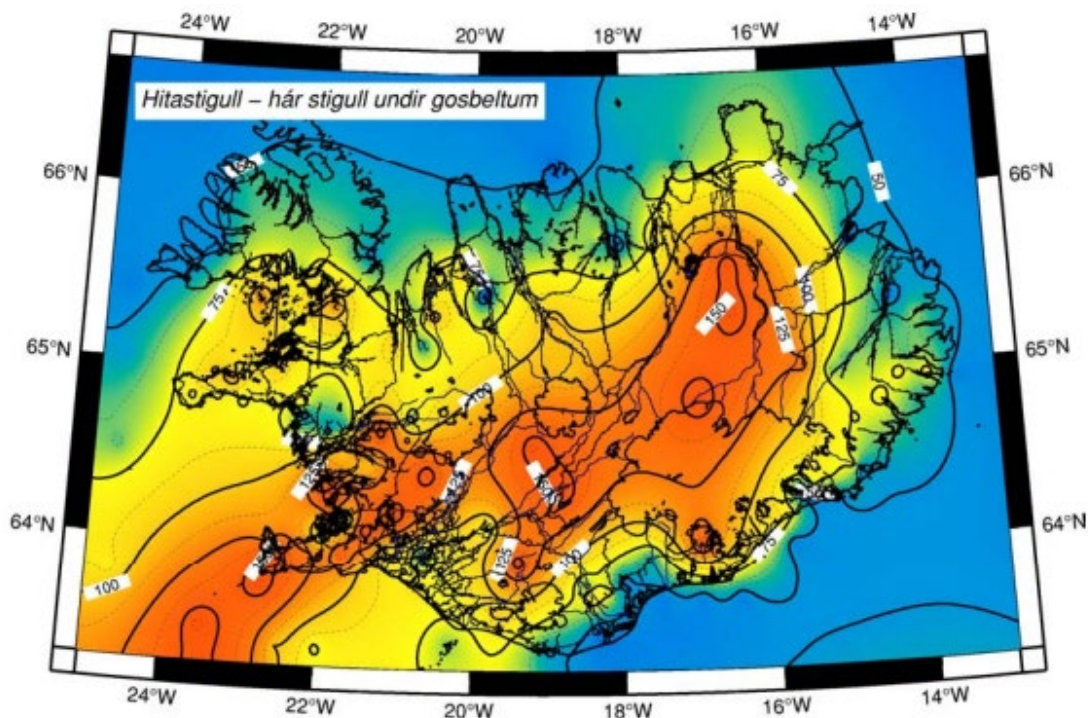
- 1) Fyrst er orkuinnihaldið niður á ákveðið dýpi reiknað byggt á berghita og viðeigandi bergeiginleikum. Berghitinn er metinn út frá áætluðum hitastigli, sjá þátt A. 2) hér að ofan fyrir stærstan hluta landsins. Þó eru háhitasvæðin tekin fyrir sérstaklega. Hér er að mestu fylgt aðferðarfræði jarðvarmamatsins 1985, en orkuforðinn reiknaður niður á bæði 5 km dýpi og 10 km dýpi. Segja má að 5 km séu hámarksbordýpi í dag, ef horft er til tiltækrar tækni og hagkvæmni, þó hægt sé að bora dýpra. Ganga má út frá að það dýpi muni aukast á næstu árum og áratugum.
- 2) Í jarðvarmamatinu 1985 var mikil áhersla lögð á að meta hve stóran hluta ofangreinds orkuinnihalds jarðskorpunnar væri hægt sækja til yfirborðs og nýta. Þar sem tæknin til þess er enn á frumstigi þróunar verður ekki lögð sama áhersla það nú, en þó slegið á líklega stærðargráðu orkunnar sem nýta má með EGS-tækni og annarri tækni framtíðarinnar.

3.2 Hitastigull og uppfært hitastigulskort af Íslandi

Hitastigull segir til um það hve ört hiti vex með dýpi í berggrunni og nýtist til að reikna varmaorkuflæði í gegnum jarðskorpuna með varmaleiðingu. Svæðislægur eða bakgrunns-hitastigull endurspeglar ótruflaðan hitastigul, sem eingöngu stýrist af varmaleiðingu, og á Íslandi hefur fjarlægð frá gosbeltunum stór áhrif á þann stigul. Hitastigull er iðulega túlkaður út frá hitamælingum í grunnnum rannsóknarholum þar sem mæling á efstu 50 til 100 metrum berg-grunns er reiknuð niður á 1000 m dýpi og hann gefinn upp í einingunni $^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Það er margt sem getur truflað bakgrunnshitastigul. Algengast er flæði í vatnsæðum borholna en auk þess geta þættir eins og mismunandi varmaleiðni bergtegunda, vatnsrennsli í jarðlögum og landhæð haft áhrif á gildi hitastiguls. Mælingar á hitastigli í borholum hafa reynst mjög gagnlegar við jarðhitaleit á Íslandi, til að finna svæði þar sem heitt vatn rennur um sprungur í jörðu og koma þau þá fram sem frávik í bakgrunnshitastigli svæðisins. Hitastigull er þannig lykilþáttur til að meta varmaflæði um yfirborð landsins með varmaleiðingu.

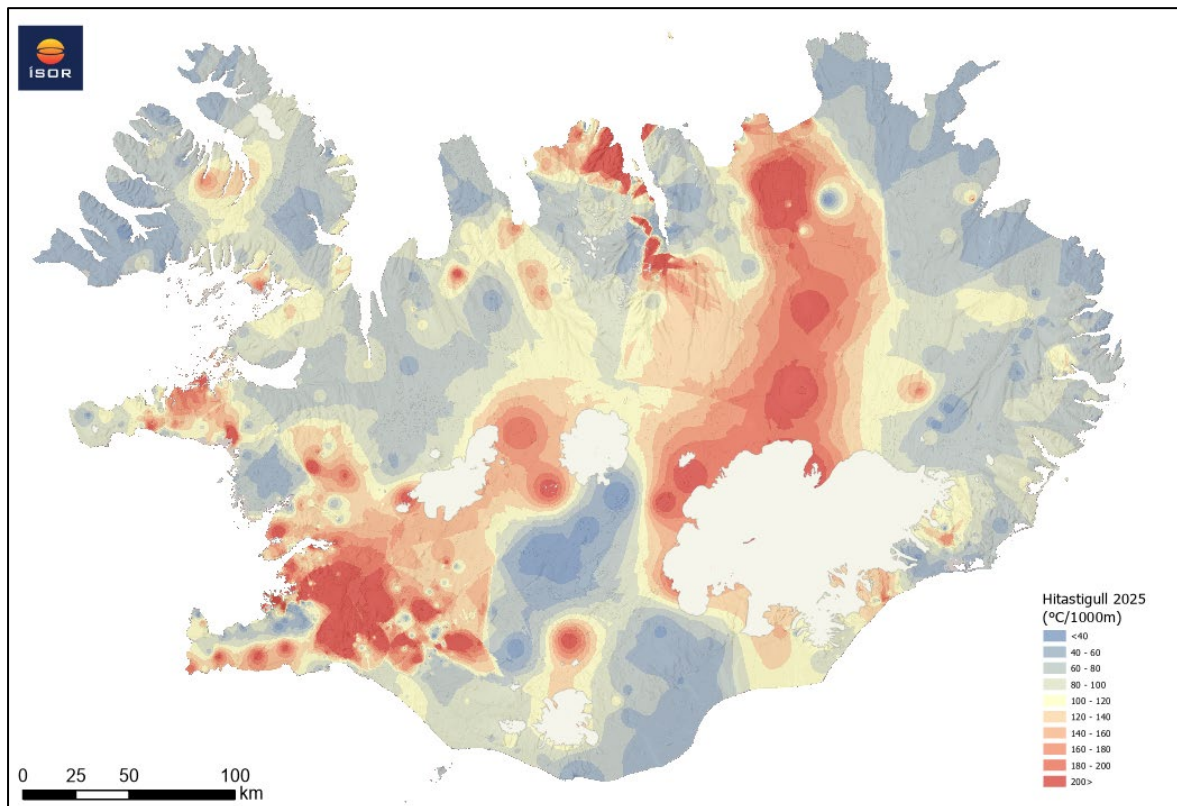
Gögnum um hitastigul hefur verið safnað í gagnasafn Rannsóknasviðs Orkustofnunar (1997-2003) og síðar ÍSOR (frá 2003), en þeim gögnum hefur ekki verið skipulega viðhaldið. Þau eru þó reglulega notuð til að teikna upp og uppfæra túlkaðan hitastigul fyrir tiltekin svæði vegna jarðhitaleitar. Fyrsta heildstæða samantektin um hitastigul er frá vinnu við jarðvarmamát árið 1985 (Guðmundur Pálmason ofl., 1985). Árið 2002 var útbúið hitastigulskort af Íslandi sem kynnt var á Norrænni jarðfræðiráðstefnu (mynd 5) (Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 2002). Það byggði á gagnasafni Orkustofnunar og á vinnu sem höfundar höfðu áður kynnt í ritrýndri vísindagrein (Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 1993).



Mynd 5. Hitastigulskort af Íslandi frá árinu 2002 (Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 2002).

Nokkrar vísindagreinar sem fjalla um þykkt jarðskorpunnar undir Íslandi hafa stuðst við gögn um hitastigul, m.a. til að meta uppruna og eðli skorpunnar. Í þeim hópi er t.d. grein Axels Björnssonar (2008) þar sem nálgun um línulega framlengingu á hitastigli í grunnnum holum niður í gegn um skorpuna er studd með öðrum gögnum. Síðasta útgáfa af hitastigulskorti af Íslandi kom út árið 2014 og var liður í vinnu ÍSOR

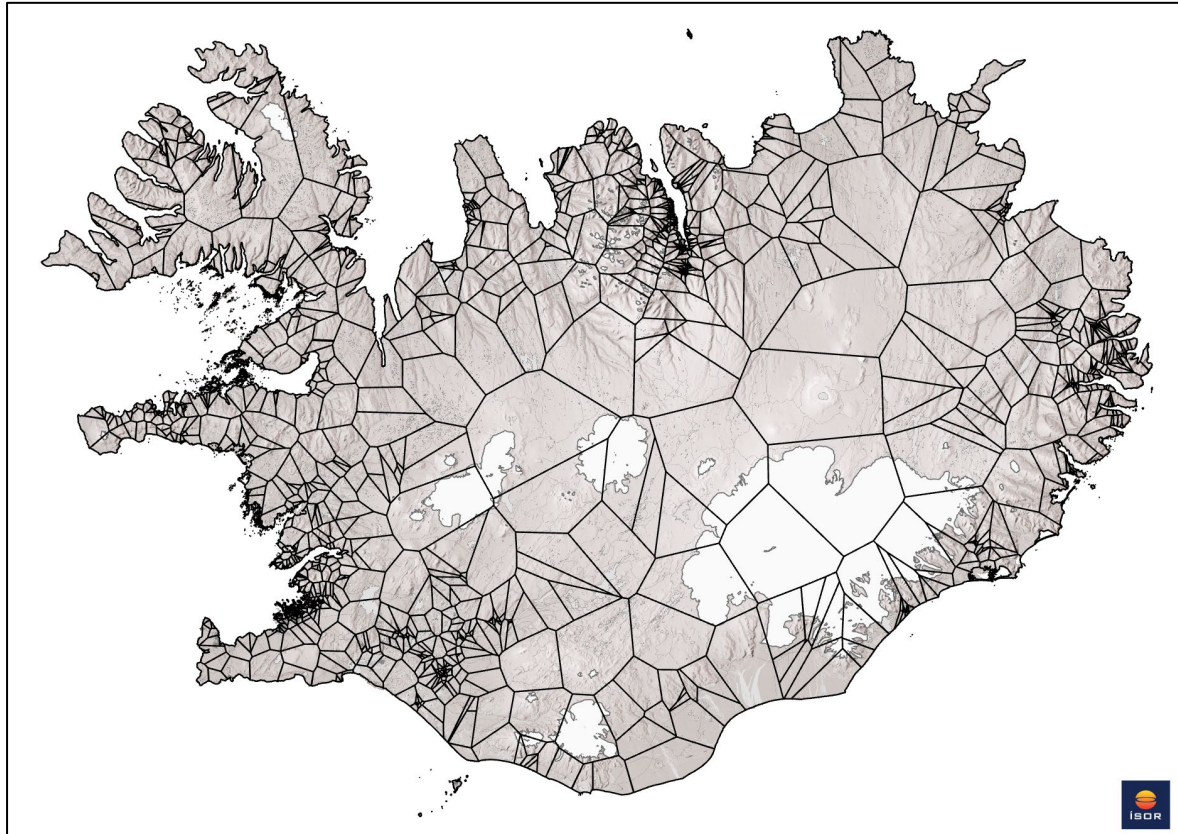
við gerð Nag-Tec Atlas um jarðfræði Norður Atlantshafsins (Hopper, J.R. ofl. 2014). Það hitastigulskort byggði á túlkuðum hitastigli úr 1044 borholum á Íslandi ásamt 23 gildum sem voru metin fyrir háhitasvæðin. Landupplýsingakerfi ESRI var nýtt til að gera kortið þar sem hitastigull var brúaður í möskvastærð 2 x 2 km.



Mynd 6. Uppfært hitastigulskort af Íslandi (Gunnlaugur M. Einarsson o.fl., 2025).

Umhverfis- og orkustofnun heldur samkvæmt lögum utan um skráningu og gagnasafn um borholur landsins. Gagnagrunnur ÍSOR nýtir sama skráningarkerfi og er því auðvelt að samræma gögnin við önnur gögn úr borholum, þ.m.t. jarðvísindaleg gögn frá ÍSOR og frá ýmsum framkvæmdaraðilum. Þannig hefur verið hægt að viðhalda á ÍSOR heildstæðu safni hitamælinga og niðurstöðum um hitastigul í borholum eru nú safnað og þær vistaðar í gagnagrunni ÍSOR. Síðan 2014 hefur mikið af gögnum um hitastigul bæst við, ekki síst samhliða vinnu sérfræðinga ÍSOR við jarðhitaleit fyrir viðskiptavinum um allt land. Við undirbúning á þessari skýrslu um uppfært jarðvarmamat var farið í markvisst átak hjá ÍSOR að finna öll ný gögn um hitastigul og mælingar í borholum sem væri hægt að nýta við vinnuna. Þá var gagnasafn ÍSOR um hitastigul uppfært með nýjum gögnum um túlkaðan hitastigul, sem höfðu verið birt í skýrslum og greinargerðum ÍSOR frá árinu 2014, alls um 790 ný eða uppfærð gildi (Gunnlaugur M. Einarsson ofl., 2025). Í kjölfarið var hitastigulskort af Íslandi uppfært (mynd 6) með nýjum hitastigulsgögnum sem voru brúuð í meiri upplausn en áður og niðurstaðan svo skoðuð með hliðsjón af nýju gagnasafni um jarðhita og stafrænt jarðhitakort af Íslandi (Helgi Torfason, 2024). Öllum skilgreindum háhitasvæðum er gefinn hitastigull upp á 220°C/km og er það gildi sett í einn punkt á miðju svæði. Við gerð hitastigulskorts var brúað á milli gilda með „Inverse distance weighted“ aðferð og er niðurstaðan rastakort með 500 x 500 m möskvastærð. Gildi hvers reits er reiknað miðað við gildi úr þeim 25 punktum sem næstir eru. Niðurstaðan var svo flokkuð og svæði teiknuð sem sýna nokkur hitastigulsbil frá <40 til >200 °C/km.

Kort á mynd 7 sýnir áhrifasvæði hvernar borholu sem hefur skráðan hitastigul í gagnasafni ÍSOR. Þar sést glögglega hve dreifing á hitastigulsborholum um landið er mismunandi, en mest er af þeim nærri þéttbýlisstöðum og þar sem kerfisbundin jarðhitaleit hefur farið fram. Á hálendinu þar sem borholur eru mun færri, hefur því hvert gildi hitastiguls mun meira vægi og þarf að hafa í huga við skoðun hitastigulskortsins.

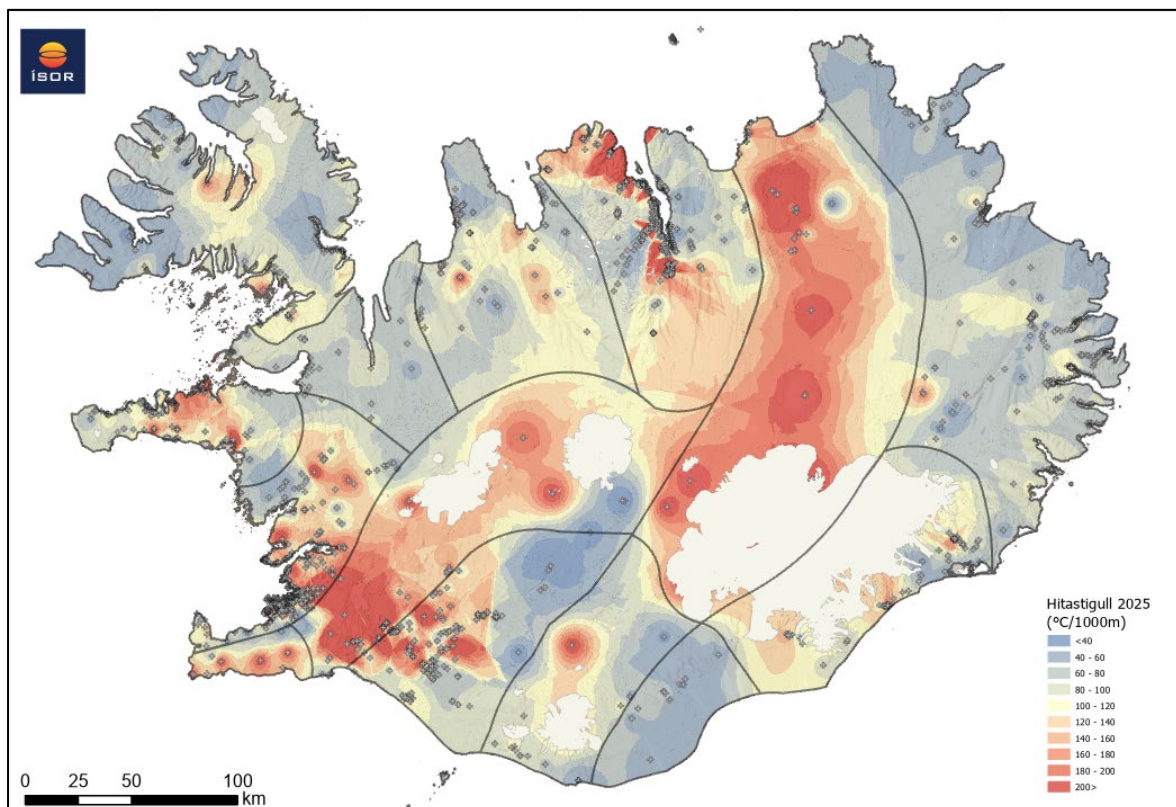


Mynd 7. Áhrifasvæði hvernar hitastigulsborholu eða staðar með gefnu mæligildi á hitastigulskorti (Gunnlaugur M. Einarsson, 2025).

3.3 Svæðisskipting landsins

Uppfærsla jarðvarmamatsins felur í sér úrvinnslu og skoðun gagna á grundvelli alls 14 landsvæða (mynd 8). Tilgangurinn er m.a. að greina betur eiginleika tiltekinna hluta landsins og bera saman mismunandi svæði og eiginleika þeirra m.t.t. varmaflæðis og -forða og möguleika til jarðhitanýtingar. Þessi svæði hafa mismunandi eiginleika m.t.t. berggrunns og hitaástands, og hafa verið skilgreind á grundvelli eftirtalinna þátta; berggrunnskortlagning og þá sér í lagi aldur jarðlaga og rekbelta, mat á virkum rekbeltum, helstu megineldstöðvar, dreifing yfirborðsjarðhita skv. kortlagningu á laugum og virkum háhitasvæðum og hitastigull, túlkaður af mældum hita í rannsóknarholum (sjá kafla 3.2). Jarðvarmamatið 1985 byggði á svipaðri skiptingu landsins en þó í færri svæði (7 svæði), enda voru gögn um hitaástand í efstu lögum berggrunnsins þá mun takmarkaðri en nú, þótt grundvallarþættir í hitaástandi jarðskorpu landsins væru þá þegar orðnir nokkuð ljósir (Guðmundur Pálmason ofl., 1985).

Mynd 8 sýnir svæðisskiptinguna sem notuð er í núverandi jarðvarmati, þar sem hún er teiknuð með hitastigulskorti ásamt staðsetningum rannsóknarborholna sem notaðar voru til að reikna hitastigul. Fjölgun svæðanna frá matinu 1985 er möguleg þar sem mikið hefur bæst við af gögnum og því hægt að auka þannig upplausn við skoðun gagnanna. Í töflu 1 er samantekt á nokkrum gagnasöfnum tengdum jarðhita og nýtingu hans, á grundvelli svæðaskiptingarinnar.



Mynd 8. Svæðaskipting landsins ásamt uppfærðu hitastigulskorti og staðsetningu borholna sem notaðar voru til að reikna hitastigul.

Tafla 1. Svæðisskipting landsins og flatarmál, ásamt fjölda hvera og lauga, borholna, túlkaðra gilda fyrir hitastigul og fjölda hitaveitna á hverju svæði.

Svæði	Flatarmál (km ²)	Hverir og laugar ¹⁾	Jarðhita-borholur ²⁾	Hitastigull ³⁾	Hitaveitur ⁴⁾
Suðvesturland	4.237	163	296	443	45
Snæfellsnes	2.719	58	25	106	4
Vestfirðir	9.230	210	129	94	15
Norðvesturland	4.100	17	13	25	5
Skagafjörður	7.442	86	63	85	19
Eyjafjörður	8.412	119	145	446	23
Norðausturland	14.423	62	17	232	3
Vatnajökull suður	7.398	16	8	84	1
Suðausturland	2.851	5	0	11	0
Suðurland	6.373	131	168	172	62
Reykjanesgosbelti	926	25	111	8	0
Vesturgosbelti	11.365	154	271	54	45
Suðausturgosbelti	5.488	119	12	19	7
Norðausturgosbelti	17.755	168	130	50	1
Samtals		1.333	1.388	1.829	230

¹⁾ Fjöldi reita (500 m radíus) með kortlögðum hverum og laugum, skv. Helga Torfasyni (2024).

²⁾ Jarðhitaborholur skv. gagnagrunnum ÍSOR og UOS sem eru boraðar og skráðar sem heitavatns- eða gufuholur.

³⁾ Fjöldi hitastigulsholna í gagnagrunnum ÍSOR og UOS sem hafa útreiknaðan hitastigul. Sumar holur hafa fleiri en eitt gildi.

⁴⁾ Fjöldi hitaveitna sem eru á skrá hjá UOS, bæði reglugerðar- og einkaveitur, óháð því hvort þær skili inn árlegum vinnslugögnum.

3.4 Náttúrulegt varmaflæði hvera og lauga, utan háhitasvæða

Jarðhitinn er samofinn sögu þjóðarinnar og hefur þekking á laugum og hverum snemma verið allgöð. Í sumum tilvikum voru bæir reistir í námunda við laugar og þær gagnert nýttar, en í öðrum tilvikum voru laugar áningarstaðir, jafnvel langt frá byggð. Þannig má segja að gróf kortlagning hafi snemma legið fyrir. Yfirborðsmerki jarðhita voru víða notuð sem kennileiti við landnám, eins og mörg staðarnöfn bera vitni (Ingvar B. Friðleifsson, 1995). Orðin hver, laug, reykur og varmi birtast t.d. í ýmsum myndum og samsetningum í örnefnum. Nærtækt dæmi er staðarnafnið *Reykjavík*, sem líklegt er talið að kennd sé við gufu sem stigið hafi upp frá laugum í *Laugardal* og á *Laugarnesi*. Landsmenn hafa vafalaust snemma uppgötvað notagildi jarðhitalauga, þá sér í lagi til baða. Fjölmargar heimildir eru til um slíka notkun í gegnum aldirnar. Í grein í Náttúrufræðingnum er fjallað um sögu jarðhitarannsókna á Íslandi, allt frá því snemma á síðustu öld (Axel Björnsson, ofl. 1990). Kerfisbundnar rannsóknir á vegum íslenska ríkisins hófust svo með tilkomu Raforkumála-skrifstofu árið 1947 og síðar Jarðhitadeild Orkustofnunar sem stofnuð var 1967.

Jarðvarmamatið frá 1985 byggir á gagnasafni Orkustofnunar þess tíma, á gögnum um mælt rennsli og hitastig lauga víðs vegar um landið og er skrásett í töflum í viðauka skýrslunnar (Guðmundur Pálmason ofl., 1985). Innan stofnunarinnar var áfram unnið að því að bæta og uppfæra safnið og hafa m.a. Jón Sólmundsson (1959-1962), Jón Benjamínsson, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Haukur Jóhannesson og ýmsir sérfræðingar Orkustofnunar og Náttúrufræðistofnunar lagt þar hönd á plóg í gegnum tíðina.

Árið 2024 gaf Orkustofnun út skýrsluna „Stafrænt jarðhitakort af Íslandi og gagnasafn um jarðhita“ (Helgi Torfason, 2024). Ítarlegt fylgiskjal er sett fram í töflu og inniheldur upplýsingar um staðsetningu, rennsli, hitastig og tímasetningu athugana á þekktum jarðhitastöðum landsins. Þar hefur gögnum verið safnað saman úr ýmsum rituðum heimildum, allt frá Landnámu til nýlegra rannsóknarskýrslna, en einnig er í töflunni að finna munnlegar heimildir frá þeim sem gerst til þekkja og hafa ekki komið fram annars staðar. Því má slá föstu að þarna sé um að ræða best uppfærða safn upplýsinga um laugar og hveru á landinu. Stuðst er við þetta gagnasafn við mat á náttúrulegu varmaflæði um hveru og laugar utan háhitasvæða í þessari skýrslu. Gagnasafnið er byggt upp á grundvelli reita sem eru skilgreind svæði með 500 m radíus og inniheldur hver reitur mismarga jarðhitastaði eða uppsprettur (Helgi Torfason, 2024). Þannig er fjöldi hvera og lauga sem kemur fram í töflu 1 ekki endanlegur fjöldi á heitum uppsprettum á yfirborði, heldur fjöldi reita þar sem jarðhiti hefur verið kortlagður.

Í töflu 2 eru teknar saman tölur um massaflæði heits vatns á kortlögðum jarðhitastöðum á grundvelli svæðisskiptingar landsins. Þar kemur berlega í ljós það sem áður hefur verið lýst að afl jarðhitasvæða er meira vestan við gosbeltið (Axel Björnsson ofl., 1990), og hér er það staðfest þar sem hæstu gildi eru fyrir Suðvesturland, Vestfirði, Eyjafjörð og Suðurland. Síðar í skýrslunni eru svo birtir afleiddir útreikningar fyrir varmafl lauga og hvera á grundvelli veitusvæða lághitanýtingar (tafla 4).

Skrásetning gagnasafns um jarðhita á Íslandi var mikið verk en ljóst er að það nær ekki til allra yfirborðslinda á hitastigsbilinu 5°C til 100°C. Því verður mat á varmafli sem byggir á þeim gögnum ávallt lágmarksmat. Vert er þó að benda á að vermi vatns á þessu hitastigsbili er nokkurn veginn línulegt fall af hitastigi. Þó skrásetning gagnanna nái yfir langt tímabil hefur þeirra að mestu leyti verið aflað á síðustu áratugum og lítið hlutfall athugana nær lengra aftur en öld. Gögnin verða því að teljast tiltölulega nýleg, sér í lagi ef horft er til ætlaðs tímaskala jarðhitakerfa sem má ætla að sé af stærðinni nokkur þúsund ár (Gunnar Böðvarsson, 1982).

Tafla 2. Samanlagt massaflæði og varmaafli frá jarðhitastöðum fyrir hvert svæði á grundvelli gagnasafns um jarðhita á Íslandi (Helgi Torfason, 2024).

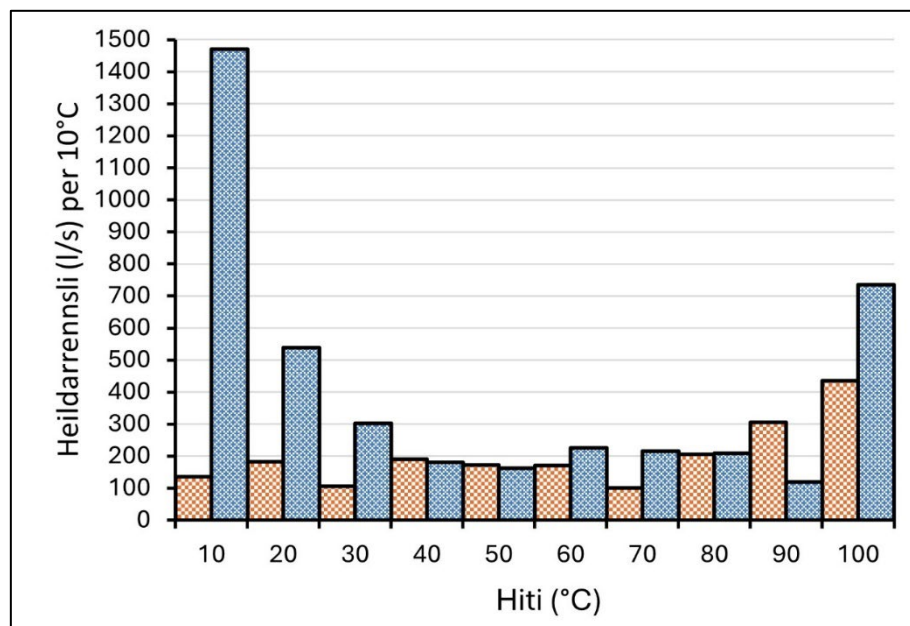
Svæði	Massaflæði úr jarðhitareitum (kg/s) ¹⁾	Varmaafli úr jarðhitareitum (MW _{th}) ²⁾
Suðvesturland	803	239
Snæfellsnes	36	2,4
Vestfirðir	622	102
Norðvesturland	42	8,7
Skagafjörður	211	38,5
Eyjafjörður	175	39,1
Norðausturland	135	6,7
Suðausturland	1	0,1
Vatnajökull suður	10	1,6
Suðurland	369	95,9
Reykjanesgosbelti	0	0
Vesturgosbelti	251	55,2
Suðausturgosbelti	17	3,8
Norðausturgosbelti	1.433	41,6
Samtals	4.105	635

¹⁾ Massarennslí frá hverum og laugum innan hvers svæðis var reiknað út frá uppgöfnum rúmmálsrennslí og eðlis massa við ríkjandi hitastig (Helgi Torfason, 2024).
²⁾ Varmaafli reiknað út frá massarennslí og vermi vökvans við ríkjandi hitastig á yfirborði niður að 5°C.

Mynd 9 sýnir heildarrennslí fyrir mismunandi hitabil m.t.t. hitastigs á grundvelli gagnasafnsins (meðal rennslispéttleiki). Rennslí er safnað á 10°C bil með miðgildi á heilum tugum í samræmi við framsetningu gagna í jarðvarmati frá 1985. Bláu súlurnar byggja á rennslitölum úr nýju gagnasafni um náttúrulegan jarðhita frá 5°C til 100°C. Rauðu súlurnar sýna dreifingu sambærilegra gagna í eldra jarðvarmamati frá 1985. Með því að bera dreifingu beggja gagnasafna saman kemur í ljós að mikið af þeim gögnum sem bæst hafa við, eru vegna jarðhita sem er lægri en 35°C og svo 95°C eða hærri. Umtalsverð rennslisaukning á hæsta hitastigsbilinu stafar mögulega að einhverju leyti af endurmati á hitastigi í laugum sem áður flokkuðust í bilið 85-95°C, en eins og myndin gefur til kynna er það eina hitastigsbilið þar sem mat á rennslí lækkar verulega frá fyrri úttekt.

Meðal massarennslí stakra uppspretta sem fall af hitastigi þeirra lauga er sýnt á mynd 10. Gögnum um rennslí er safnað á 10°C bil með miðgildi á hálfum tugum til samræmis við framsetningu Gunnars Böðvarssonar (1983). Eins eru sjóðandi hverir undanskildir í uppfærðu gagnasafni til samræmis, en meðalrennslí þeirra nemur 28,7 kg/s. Leitnin virðist vera upp á við með hitastigi, sem samræmist vel framsetningu og niðurstöðum Gunnars. Tiltekur hann tvær megin hugmyndir um jarðhitakerfi. Annars vegar kerfi þar sem vatn rennur langar leiðir á dýpi drifið af vökvastöðuprýstingi. Hins vegar kerfi þar sem vatn rennur tiltölulega grunnt til að byrja með, en finnur svo leið niður á dýpi þar sem það hitnar og rís á ný að yfirborði. Í síðara tilfellinu er vökvastreymið aðallega knúið áfram af eðlisþyngdarmun vatns á niður- og uppleið. Tiltölulega kalt vatn á niðurleið kælir bergið og veldur samdrætti og sprungumyndun sem víkkar rásir og eykur streymi frekar. Þessi áhrif verða því mun meiri eftir því sem hitastigsmunur bergs og vatns á niðurleið eykst og veldur því að vatnið myndar dýpri rásir með tíma. Tilhneigingin er þá sjálfstýrjandi streymi niður á töluvert dýpi, sem leiðir til mikils varmanáms og hás hitastigs. Gunnar leiðir

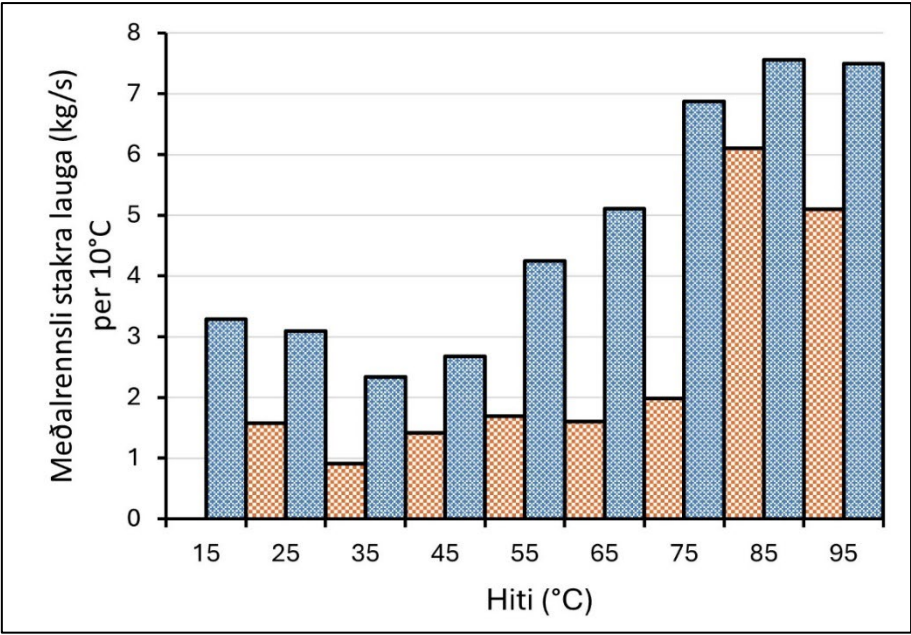
að því líkur að leitni á borð við þá sem fram kemur á mynd 10 bendi til kerfa af seinni gerðinni við hærri hitastig. Seinni tíma greiningar hafa að miklu leyti viðhaldið þessari mynd (Stefán Arnórsson o.fl., 2008).



Mynd 9. Náttúrulegt rennsli jarðhita, flokkað eftir hitastigi. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) en þær rauðu eru úr eldri skýrslu um jarðvarmamat (Guðmundur Pálmason o.fl. 1985).

Heildar massarennisli frá jarðhitastöðum er samkvæmt núverandi mati um 4.105 kg/s (tafla 2), sem samsvarar 4.159 l/s. Heildar varmaafli rennslisins nemur 635 MW og er meðalhitastig um 42°C. Gufa sem sleppur út í andrúmsloftið frá sjóðandi hverum er hvergi mæld og í henni getur verið fólgið talsvert varmafl. Töluverð áskorun er að meta gufuaflíð, en það er ekki gert hér.

Í gegn um tíðina hafa ýmsir sérfræðingar tekið saman yfirlit um afköst og afl þekktra jarðhitastaða, til þess að auka skilning á og meta stærð lághitaauðlindarinnar á Íslandi. Tafla 3 sýnir yfirlit og þróun útreiknaðs varmafls á grundvelli hita og rennslis jarðhitastaða sem þá voru þekktir. Í grein frá árinu 1982 áætla Gunnar Böðvarsson varmafl lághitasvæða um 500 MW, og vísar þar til fyrra mats síns (Gunnar Böðvarsson, 1956, 1982). Í ítarlegri grein sem birtist ári síðar áætla Gunnar að um 1800 l/s af jarðhitavatni streymi til yfirborðs á lághitasvæðum landsins við meðalhitastig 79°C (Gunnar Böðvarsson, 1983). Þá metur hann varmafl um 600 MW og byggir væntanlega á uppfærðum gögnum. Hitastigsviðmið við útreikninga á varmaaflinu er 0°C. Í jarðvarmamati frá 1985 meta höfundar sjálfrennsli úr hverum og laugum um 1.800 l/s (bls. 28) áður en nokkuð var borað, sem jafngildir um 511 MW varmafls miðað við 15°C (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Af töflu 3 má ráða að mat á rennsli frá náttúrulegum jarðhita á yfirborði hefur rúmlega tvöfaldast á þeim 40 árum sem liðin eru frá gerð jarðvarmamats árið 1985, þ.e. farið úr 1991 l/s í 4.159 l/s, á meðan reiknað varmafl hefur einungis aukist um 7,2%, frá 592 MW í 635 MW. Um leið lækkar meðalhitastig skráðra jarðhitastaða úr 78°C árið 1985 í 42°C í gagnasafni frá 2024.

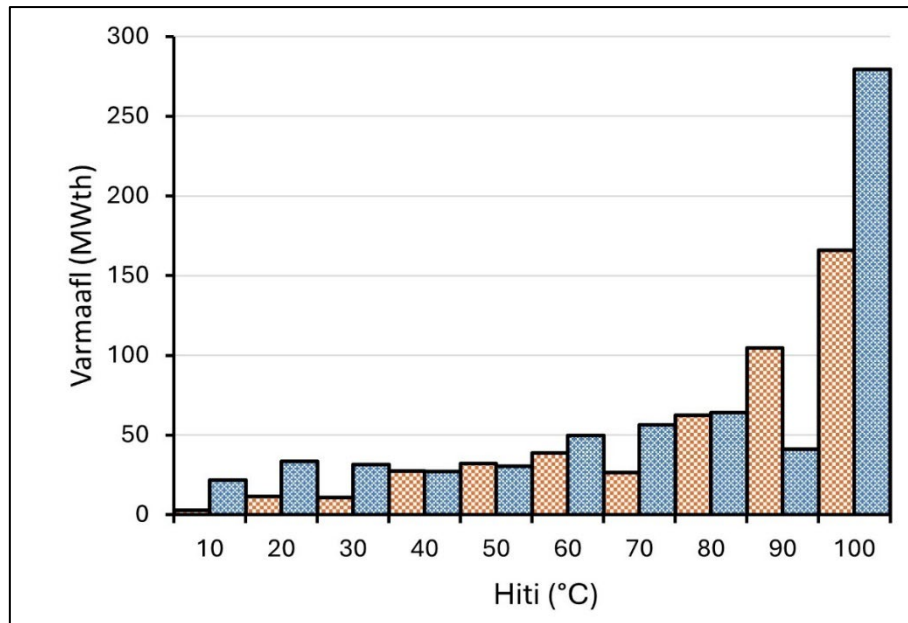


Mynd 10. Meðalrennsli úr stökum jarðhitastöðum eftir hitastigi. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) og þær rauðu á grein Gunnars Böðvarssonar (1983). Sjóðandi hverir eru undanskildir.

Tafla 3. Yfirlit um þróun á heildarrennsli og útreiknuðu varmaafli frá náttúrulegum jarðhita á lághitasvæðum.

Heimild	Heildarrennsli (l/s)	Meðal-hitastig	Heildar-rennsli (kg/s)	Varmaafli (MW _{th})	Við miðunar-hitastig (°C)	Varmaafli vatns við 5°C (MW _{th})
Þorkell Þorkellsson 1929 ?	1200					
Gunnar Böðvarsson 1956	1500					
Gunnar Böðvarsson 1982				500	0	
Gunnar Böðvarsson 1983	1800	79	1750,3	600	0	563
Guðmundur Pálmason ofl. 1985	1991	78	1937,6	511	15	592
Guðni Axelsson ofl. 2025	4159	42	4105,5	635	5	635

Mynd 11 sýnir varmaafli m.t.t. hitastigs, hliðstætt við mynd 9. Bláu súlurnar byggja á útreiknuðu afli hvers jarðhitasvæðis sem safnað er á 10°C bil á grundvelli gagnasafns um náttúrulegan jarðhita (Helgi Torfason, 2024). Rauðu súlurnar byggja á afli sem metið var með hliðsjón af mynd 9, þ.e. rennsli hvers bils og miðgildi hitastigs. Eins og áður hefur komið fram (tafla 2) nemur heildarvarmaafli náttúrulegs rennslis lauga í uppfærðu mati 635 MW. Í viðauka 4 í skýrslu frá 1985 kemur fram að varmaafli yfir 15°C, byggt á 1991,3 l/s rennsli, nemi 511 MW. Þegar það hefur verið fært að 5°C hitastigsviðmiði nemur varmaaflið 592 MW (tafla 3). Uppsafnað varmaafli matsins 1985 sbr. mynd 11 nemur hins vegar 483,6 MW m.v. 5°C viðmið (404,3 MW m.v. 15°C viðmið). Því vantar því töluvert upp á að massarennslíð 1985 (Guðmundur Pálmason ofl., 1985, mynd V.4-1) skili því varmaafli sem tilgreint er í skýrslunni. Ástæða þessa er núverandi höfundum ókunn.



Mynd 11. Varmaafli lauga, flokkað eftir hitastigi sbr. Mynd 9. Bláu súlurnar byggja á uppfærðu gagnasafni um jarðhitastaði (Helgi Torfason, 2024) en þær rauðu byggja á gögnum úr skýrslu um jarðvarmamát (Guðmundur Pálmason ofl. 1985). Viðmiðunarhitastig er 5°C.

Eins og rætt er hér framfar hefur mikið áunnist í kortlagningu rennslis og hitastigs hvera og lauga á umliðnum áratugum. Stærsta breytingin á gagnasafninu sem notuð var í matinu 1985 er sú að töluvert mikið af jarðhitastöðum, og þar af leiðandi rennslis, hefur bæst við lægri hitastigsbil, enda var áherslan framan af á heitari laugar. Í skýrslu frá 1985, *Mat á Jarðvarma Íslands*, segir: „*Upplýsingar um volgrur á hitabilinu 6-14°C eru afar naumar, og lítið hefur verið sinnt um að safna þeim kerfisbundið*“. Að auki virðist hafa vantað nokkuð í kortlagningu rennslis lauga upp að 35°C heitum eða þar í kring, sbr. mynd 9. Á þeim áratugum sem liðnir eru frá matinu 1985 virðist einnig hafa farið fram endurmat á hitastigi lauga yfir 85°C sem fram kemur í kerfisbundinni hækkun. Þrátt fyrir mikla aukningu á rennslis við neðri hitastigsbil þá hefur varmaafli frá 1985 einungis hækkað lítillega sbr. mynd 11. Almennt hækkar varmaafli frá matinu 1985, eða stendur í stað, yfir hitastigsbilin sem sýnd eru á mynd 11, að undanskildu bilinu 85-95°C þar sem leiða má líkur að því að rennslis hafi færst yfir á bilið 95-105°C. Rennslis fyrri bilsins lækkar um 180 kg/s á milli mata, en hækkun síðara bilsins nemur 287,8 kg/s. Aflækkun fyrri bilsins nemur 63,7 MW_{th}, en afl þess síðara hækkar hins vegar um 113,6 MW_{th}. Hér er þó vert að hafa í huga að aftölur matsins 1985 eins og þær koma fyrir á mynd 11 virðast of lágar miðað við útgefið heildarafl matsins, þrátt fyrir að byggja á gögnum þess.

Sú tiltölulega litla aukning í varmaafli frá matinu 1985 til núverandi mats bendir til þess að tiltölulega góð mynd hafi þegar fengist af varmaafli náttúrlegra lauga og hvera á landinu og að frekari athuganir séu ekki líklegar til að breyta heildartölunni mikið þegar horft er til vatnsrennslis einvörðungu. Það breytir því þó ekki að uppgötvanir smærri lauga sem ekki voru þekktar áður eru til þess fallnar að auka þekkingu á jarðhita landsins og geta leitt til uppgötvana á áður óþekktum jarðhitakerfum. Áframhaldandi kortlagning getur því skipt sköpum þegar kemur nýtingu. Magn gufu sem sleppur frá sjóðandi hverum á lághitasvæðum og varmaafli sem í henni er fylgið er óþekkt og felast þar tækifæri til frekari athugana og mats. Ef hægt er að þróa aðferðir til að meta gufustreymi með áreiðanlegum hætti er líklegt að talsvert varmaafli bætist við það afl sem metið hefur verið út frá vatnsrennslis.

3.5 Afkastageta borholna

Afköst vinnsluholna til jarðhitanýtingar eru yfirleitt metin að borun lokinni í þeim tilgangi að sannreyna árangur borunar og fá fyrstu gögn fyrir afkastamat. Oft er afkastaprófun á lághitasvæðum fölginn í stuttri loftdælingu á meðan borinn er enn á holunni, eða lengri tíma prófun er framkvæmd þar sem ýmist er mælt sjálfrennsli eða tiltekin dæling í gangi og vatnsborð mælt samhliða. Dæmi er um slíkar prófanir sem standa yfir í allt að ár en langoftast er um mun skemmri tíma að ræða, en nákvæmi afkastamatsins eykst oftast með tímalengd prófunar og faglegri útfærslu hennar. Þær upplýsingar sem fást með slíku afkastamati fyrir einstakar holur eru hámarksafköst þeirrar holu. Ádælingarpróf eru notuð til að meta afköst háhitaholna á hliðstæðan hátt strax eftir borun. Til að meta langtíma sjálfbæra vinnslugetu tiltekins jarðhitasvæðis er ekki raunhæft að leggja saman afkastagetu einstakra holna en þó er mögulegt að líta á þau gögn sem hámarksvinnslugetu svæðisins á þeim tíma. Hér verða gögn um samanlögð afköst allra vinnsluholna á tilteknu lághitasvæði notuð, m.a. til samanburðar við mat á vinnslugetu svæða og öðrum gögnum.

Hitaveitur skiptast í tvo flokka eftir því hvort þær hafa einkaleyfi til starfsemi á sínu veitusvæði og starfa samkvæmt reglugerð⁶ eða hvort starfsemin fer fram án slíks leyfis. Fjölmargar smærri hitaveitur starfa ekki samkvæmt einkaleyfi og reglugerð. Er áætlaður heildarfjöldi slíkra veitna um 200. Þær nýta flestar heitt vatn úr borholum, laugum eða hverum til húshitunar. Margar sjá einungis stökum sveitabæjum fyrir vatni, en einnig er um að ræða veitur sem veita vatni til fleiri bæja og sumarhúsabyggða eða atvinnustarfsemi á borð við fiskeldi, iðnað og ylrækt. Almennu eru gerðar ríkari kröfur til reglugerðarveitna en einkaveitna um gagnsæi og miðlun upplýsinga til opinberra stofnana og almennings. Reglugerðarveitur sjá um 95% þjóðarinnar fyrir varma, en auk jarðhitaveitna eru þar á meðal nokkrar rafkyntar fjarvarmaveitur (Orkustofnun, 2025).

Mikilvægt gagnasafn er nú aðgengilegt um jarðhitavinnsluholur 64 reglugerðarhitaveitna lághitasvæða en það var unnið skv. samningi ÍSOR við Orkustofnun um mat á afkastagetu borholna og árangri í jarðhitaborunum á Íslandi (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018). Áður hafði Björn Már unnið að slíku yfirliti og greiningum fyrir sjóðandi lághita, þar sem mat var lagt á bæði afl til framleiðslu varma og raforku (Björn M. Sveinbjörnsson, 2016), og eins fyrir árangur háhitaborana (Björn M. Sveinbjörnsson, 2014). Yfirgnæfandi meirihluti borholna sem skráðar eru í gagnasafnið þjóna því reglugerðarveitum og má telja líklegt að safnið nái yfir allar slíkar borholur sem voru í notkun eða töldust nothæfar árið 2018. Einnig er að finna í safninu upplýsingar um margar borholur sem þjóna einkaveitum, en ljóst er þó að stóran hluta slíkra borholna vantar. Þá er að finna í safninu upplýsingar um margar sögulegar borholur sem hafa runnið sitt æviskeið og koma því ekki inn í afkastamatið. Í gögnunum sem unnið var með eru 571 skráðar vinnsluholur. Fjöldi nýtanlegra holna reglugerðarveitna telst vera 224, en fjöldi nýtanlegra holna einkaveitna í gagnasafninu er 60. Þær holur sem standa út af hafa verið aflagðar með öllu eða eru ekki taldar lengur nýtanlegar til vinnslu. Sem fyrr segir ber að líta á samanlagða afkastagetu borholna sem hámark mögulegrar vinnslu nýtttra jarðhitasvæða til skamms tíma.

Samanlagt hámarksrennsli borholna reglugerðarveitna er metið 6.185 kg/s við meðalhitastig 97°C. Samsvarandi afkastageta nemur 2.395 MW_{th} sbr. tafla 4. Til viðbótar, og utan við það sem hér er til umfjöllunar úr vinnsluholum, er rennsli úr laugum og hverum sem reglugerðarveitur nýta (s.s. hluti Deildartunguhvers í framleiðslu Hitaveitu Akraness og Borgarness), en það rennsli nemur 384 kg/s með meðalhitastig 96°C og samsvarandi varmafl 147 MW. Hámarksrennsli sem reglugerðarveitur eru þannig taldar geta nýtt úr borholum, laugum og hverum samanlagt nemur þannig um 6.569 kg/s og varmafl upp á 2.542 MW. Samanlagt hámarksrennsli borholna einkaveitna er metið 663 kg/s með meðalhitastig 106°C.

Samanlögð afkastageta þeirra er metin $280 \text{ MW}_{\text{th}}$ (tafla 5). Þekkt nýting einkaveitna á laugum og hverum nemur 132 kg/s við meðalhitastig 95°C og varmaafli 50 MW .

3.6 Varmavinnsla lághitasvæða

Vinnsla á heitu vatni úr lághitasvæðum er breytileg yfir árið vegna mismikillar hitunarþarfar á milli árstíða. Meðalvinnsla hvers svæðis er töluvert undir samanlagðri afkastagetu borholna, enda teldist hámarksvinnsla úr öllum borholum vinnslusvæðis verulega ágeng og líklega umfram þau mörk sem jarðhitakerfi þola til lengri tíma. Ágeng vinnsla leiðir til lækkandi hámarks afkasta kerfanna með tímanum og þar með vinnslu. Æskilegt er að meðalvinnsla sé sem næst því að vera sjálfbær, þ.e. vinnsla sem jarðhitakerfin þola til lengri tíma án þess að hún leiði til verulegra breytinga á þeim.

Umhverfis- og orkustofnun (áður Orkustofnun) safnar samkvæmt lögum árlega vinnslugögnum frá reglugerðarveitum, og í einhverjum tilvikum einkaveitum, og birtir á vefsíðu stofnunarinnar. Nýjasta gagnasafnið nær yfir árið 2023 (Orkustofnun, 2024a). Í því eru birt eftirfarandi gögn fyrir hitaveitur og vinnslusvæði þeirra: meðal rúmmálsrennsli notkunar (l/s), heildarrúmmálsnotkun (m^3), heildarmassanotkun (tonn) og heildarfrumorkunotkun (TJ), auk ýmissa frekari upplýsinga. Uppgefnar stærðir miðast við notkun, sem jafngildir vinnslu að frádreginni niðurdælingu. Hitastigsviðmið útreikninga á frumorkunotkun er 15°C.

Reglugerðarveitur eru misgamlar, en margar hafa verið reknar svo áratugum skiptir. Því hefur í mörgum tilfellum reynt á vinnslugetu undirliggjandi jarðhitakerfa og má líta á vinnslu hitaveitna sem einn mælikvarða á langtíma vinnslugetu. Í töflu 4 eru skráð gögn um meðal varmvinnslu reglugerðarveitna yfir árið út frá gögnum Orkustofnunar og upplýsingar fyrir einkaveitur er að finna í töflu 5. Frumorkunotkun er aðlöguð að hitastigsviðmiði þessarar skýrslu, 5°C, og dreift jafnt yfir árið. Í reynd er varmvinnslan mun meiri á veturna og minni á sumrin en meðaltalið gefur til kynna, sem kemur þó ekki að sök þegar horft er til álags á jarðhitakerfin til lengri tíma. Þekkt er að hitastig, sólargeislun og vindhraði hafa áhrif á hitunarþörf. Ætla má að varmvinnsla geti vikið um tugi prósentu frá meðaltali yfir einstaka mánuði, til aukningar yfir vetrartímann en minnkunar yfir sumarið. Þannig er mögulegt að vinnsla yfir köldustu vetrarmánuði nálgist eða fari yfir skammtíma afkastagetu í einhverjum tilfellum.

Í töflu 4 kemur fram yfirlit um náttúrulegt afl lauga og hvera sbr. kafla 3.4 og afkastagetu borholna reglugerðarveitna sbr. umfjöllun í kafla 3.5. Eins og búast má við er meðalvinnsla reglugerðar-veitna almennt undir afkastagetu og af þeim 50 hitaveitum sem eru í töflu 4 eru 9 veitur með meðalvinnslu undir 30% af metinni afkastagetu borholna, 21 á bilinu 30-60% og 10 á bilinu 60-90%. Af þeim sem útaf standa er meðalvinnslan hærri en uppgefin afkastageta borholna sem skýrist ýmist af því að veiturnar nýta hver og laugar samhliða borholum eða jafnvel eingöngu (4 tilvik) og af mismunandi aldri vinnslu- og afkastagagna. Á þeim 5 árum sem skilja í milli gagnanna hafa nokkrar hitaveitur tekið í gagnið nýjar vinnsluholur. Þær koma því ekki fyrir í gagnasafni Björns M. Sveinbjörnssonar (2018), en leggja fram til vinnslunnar 2023. Einhverjar hitaveitur hafa úr fleiri en einu vinnslusvæði að spila og geta aukið vinnslu mismikið eftir því sem hitunarþörf eykst yfir veturinn.

Tafla 4. Upplýsingar um reglugerðarhitaveitur, vinnslutölur jarðhitasvæða frá 2023 (Orkustofnun, 2024a), samanlögð hámarksafköst borholna á tilteknu vinnslusvæði (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018) og mat á varmaafli náttúrulegs flæðis lauga (Helgi Torfason, 2024).

Hitaveita (rekstraraðili)	Vinnsla 2023 (MW _{th}) ¹⁾	Afkastageta borholna (MW _{th}) ²⁾	Náttúrulegt afl lauga (MW _{th}) ³⁾
Veitustofnun Seltjarnarness	21,2	57,8	0,0
Hitaveita Höfuðborgarsvæðis, Laugarnes (Veitur)	58,6	162,0	3,6
Hitaveita Höfuðborgarsvæðis, Elliðaárdalur (Veitur)	26,2	82,9	0,0
Hitaveita Höfuðborgarsvæðis, Reykir (Veitur)	128,4	286,9	29,9
Hitaveita Höfuðborgarsvæðis, Reykjahlið (Veitur)	130,3	324,3	0,5
Kjósarveitur	7,3	34,9	0,0
Hitaveita Skorradals (Veitur)	2,8	4,6	0,0
Hitaveita Akraness og Borgarness, Deildartunga, Bær, Laugarholt (Veitur)	55,4	23,4	97,4
Munaðarnesveitur (Veitur)	2,4	3,4	0,0
Norðurárdalsveita, Svartagil/Bifröst (Veitur)	4,2	11,2	0,0
Hitaveita Dalabyggðar (RARIK)	4,0	23,2	0,1
Suðvesturland	440,8	1014,6	131,5
Hitaveita Stykkishólms (Veitur)	8,3	32,5	0,0
Snæfellsnes	8,3	32,5	0,0
Hitaveita Reykhóla (Orkubú Vestfjarða)	1,3	6,4	7,9
Hitaveita Suðureyrar (Orkubú Vestfjarða)	3,1	9,5	0,0
Hitaveita Drangsness	1,4	4,6	0,0
Vestfirðir	5,8	20,5	7,9
Hitaveita Borðeyrar (Hitav. Húnaþings vestra)	0,2	0,2	0,0
Hitaveita Reykjum (Hitav. Húnaþings vestra)	0,7	3,1	0,8
Hitaveita Hvammstanga (Hitav. Húnaþings vestra)	8,5	14,8	0,2
Norðvesturland	9,4	18,1	1,0
Hitaveita Blönduóss (RARIK)	10,7	10,2	0,6
Hitaveita Sauðárkróks, Borgarmýrar (Skagafjarðarveitur)	19,9	37,2	0,0
Hitaveita Varmahlíðar (Skagafjarðarveitur)	10,1	14,4	1,2
Hitaveita Steinsstaða og Hverhóla (Skagafjarðarveitur)	2,3	2,0	9,0
Hólaveita (Skagafjarðarveitur)	5,0	11,0	0,6
Hofsós-, Sólgarða og Langhúsveita (Skagafjarðarveitur)	9,2	26,0	0,5
Skagafjörður	57,2	100,8	11,9
Hitaveita Siglufjarðar (RARIK)	6,6	19,3	0,3
Hitaveita Ólafsfjarðar (Norðurorka)	10,3	16,5	0,1
Hitaveita Dalvíkur Hamar og Birnunes	13,1	43,1	0,0
Akureyrarv.N Hjalteyri, þelamörk, Hrísey, Ytri-Hagi (Norðurorka)	63,4	84,5	0,1
Akureyrarv.S Laugaland, Ytri-Tjarnir, Hrafnagil/Botn, Glerárdalur (Norðurorka)	31,3	34,8	1,9
Reykjaveita í Fnjóskadal (Norðurorka)	5,1	11,1	2,1
Eyjafjörður	129,8	209,3	4,5
Hitaveita Húsavíkur, Hveravellir,Húsavík, Hafnalækur (Orkubú Húsavíkur)	42,9	50,0	18,1
Hitaveita Óxarfjarðarhéraðs	5,3	24,0	3,8
Norðausturgosbelti	48,2	74,0	21,9
Hitaveita Egilsstaða og Fella	20,0	31,6	0,0
Hitaveita Fjarðabyggðar	5,2	16,2	0,0
Austurland	25,2	47,8	0,0
Hitaveitan Höfn, Hoffell (RARIK)	9,0	29,0	0,0
Vatnajökull suður	9,0	29,0	0,0
Hitaveita Flúða	25,3	91,1	9,1
Hitaveita Brautarholts	0,4	1,0	0,2
Hitaveita Laugaráss (Bláskógaveita)	10,0	0,0	35,1
Hitaveita Reykhólts (Bláskógaveita)	15,2	13,6	4,3
Hitaveitan Kringla (GoGG)	2,3	3,8	0,0
Hitaveita Vaðness (GoGG)	15,1	10,7	0,0
Hitaveita Rangæinga, Laugaland Holtum og Kaldárholt (Veitur)	26,8	31,0	1,5
Suðurland	95,1	151,2	50,2
Hitaveita Laugarvatns (Bláskógaveita)	6,5	0,0	12,3
Hlíðarveita (Veitur)	8,8	27,8	0,2
Austurveita (Veitur)	5,9	23,6	0,0
Grímsnesveita (Veitur)	17,2	55,4	0,2
Hitaveita Hveragerðis, Hverasvæði, Ölfusdalur, Reykjakot, Vorsabær (Veitur)	19,4	437,1	0,0
Hitaveita Þorlákshafnar, Bakki, Hjallakrökur (Veitur)	25,5	13,8	1,9
Ölfusveita, Þóroddsstaðir (Veitur)	-	5,8	0,3
Hitaveita Árborgar, Ósabotnar, Þorleifskot, Jórutún (Selfossveitur)	52,3	133,8	0,3
Vesturgosbelti	135,6	697,3	15,2
Samtals	964,4	2395,1	244,1

1) Talnaefni Orkustofnunar (nú UOS) (Orkustofnun, 2024a).
2) Útreiknað varmaafli úr borholum (ekki laugum) m.v. nýtingu í 5°C (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018).
3) Útreiknað varmaafli út frá massarennisli lauga sem eru í 1,5 km radíus innan svæða í nýtingu, undir 100°C og vermi vökvans við ríkjandi hitastig á yfirborði, reiknað niður að 5°C (Orkustofnun, 2024b).

Tafla 5. Afkastageta vinnsluholna fyrir hluta af einkahitaveitum ásamt útreiknuðu varmaafli hvera og lauga á þeirra veitusvæði, m.v. 1,5 km rás um þekktar vinnsluholur svæðisins.

Hitaveita	Afkastageta borholna (MWth) ¹⁾	Náttúrulegt afl lauga og hvera (MWth) ²⁾
Hitaveitan Fremri-Hálsi í Kjós	8,7	0
Hitaveitan á Miðsandi í Hvalfirði	3,7	0
Hitaveitan í Eystri-Leirargörðum	4,4	0
Hitaveita Lunddæla	2,8	0
Hitaveita Lunddæla, Englandshver	0,0	13,2
Hitaveitan á Varmalandi, Borgarfirði	6,0	1,0
Hitaveitan á Varmalandi, Laugaland	2,0	1,0
Hitaveita Stafholtstungna, Varmalandi (hver/laug)	0,0	1,0
Hitaveitan í Reykholti í Borgarfirði	18,3	3,7
Hitaveitan frá Brúarreykjum, Borgarbyggð (hver)	0,0	4,0
Hitaveitan Kleppjárnsreykir (hver)	0,0	0,6
Hitaveitan á Húsafelli	11,5	1,1
Suðvesturland	57,4	25,5
Hitaveitan í Eiðhúsum	7,8	0
Hitaveita frá Dal, Lynghagi	2,6	0
Snæfellsnes	10,4	0,0
Hitaveita Húnapings vestra	4,7	0,2
Norðvesturland	4,7	0,2
Hitaveitan frá Reykjarhóli í A-Fljótum	1,7	2,1
Hitaveitan á Stóru-Tjörnum	3,1	0
Eyjafjörður	4,8	2,1
Hitaveita Reykdælahrepps	19,6	2,3
Ytribakki, Öxarfjörður	8,0	0
Norðausturgosbelti	27,6	2,3
Þjórarárholt, Skeiða og Gnúverjahreppur	6,2	0
Hitaveitan á Reykjabóli	7,2	1,5
Hitaveitan á Þórarinsstöðum	1,9	0
Hvammur, Gamla laugin	3,4	0
Hitaveitan frá Reykjadal	1,1	0,0
Hitaveitan frá Kópavatni	33,3	0,0
Hitaveitan Gýgjarhóli	2,0	0,0
Hitaveita Bergstaða	2,2	0,1
Hitaveitan á Syðri-Reykjum (hver)	0,0	15,3
Hitaveita Böðmóðsstaða	3,4	0,6
Hitaveitan í Eyvík, (GoGG)	5,8	0,4
Hitaveitan á Árbæ	6,4	0,1
Suðurland	72,9	17,9
Hitaveitan Kjarnahiti sf. Kjarnholtum	1,0	0
Hitaveitan í Neðridal	0,6	0,5
Hitaveitan í Helludal	0,4	5,9
Hitaveitan á Klausturhólum	17,7	0,1
Hitaveitan á Hæðarenda	34,8	0,0
Garðyrkjuskólinn Reykjum - NLFÍ	26,6	0
Hitaveitan í Ölfusborgum	3,1	1,1
Hitaveitan á Kröggólfsstöðum í Ölfusi	5,3	1,9
Hitaveitan á Öxnalæk í Ölfusi	0,9	1,9
Hitaveitan á Núpum í Ölfusi	9,6	1,1
Littaland, Ölfusi	0,4	0
Hitaveitan á Vindheimum	2,2	0
Suðvesturgosbelti	102,6	12,6
	280,4	60,6

¹⁾ *Útreiknað varmaafli úr borholum (ekki laugum) m.v. nýtingu í 5°C (Björn M. Sveinbjörnsson, 2018).*

²⁾ *Útreiknað varmaafli út frá massarennisli lauga sem eru í 1,5 km radíus innan svæða í nýtingu, undir 100°C og vermi vökvans við ríkjandi hitastig á yfirborði, reiknað niður að 5°C (Orkustofnun, 2024b).*

Í fjölþættu jarðvarmamati eins og hér er til umfjöllunar væri æskilegt að taka saman yfirlit yfir áætlaða afkastagetu jarðhitakerfa, sem byggð væri á niðurstöðum líkanreikninga fyrir kerfin, fyrst og fremst niðurstöðum spáreikninga slíkra líkana. Þær væri þá hægt að bera saman við orkustraumana sem hafa verið til umfjöllunar hér að ofan. Þegar núverandi verkefni hófst var ætlunin að gera þetta, eins og kemur fram í inngangi skýrslunnar. Því miður reyndust tiltækar upplýsingar rýrari en vonast hafði verið til, og misaðgengilegar. Því var ákveðið að ítarleg úrvinnsla yrði að bíða betri tíma, en aftur er bent á yfirlit í hitaveituskýrslu ÍSOR (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023). Í staðinn voru tiltækar upplýsingar skoðaðar lauslega.

Einhvers konar líkanreikningar hafa verið gerðar fyrir u.þ.b. helming þeirra rúmlega 60 jarðhitakerfa sem reglugerðarveitur landsins nýta til orkuvinnslu. Oftast er um að ræða einföld þjöppuð líkön en líka flóknari kubbalíkon í nokkrum tilvikum. Í þeim öllum hafa líkönin verið kvörðuð með gögnum um vinnslu og viðbrögð við henni í langan tíma (ár – áratugir). Í u.þ.b. helmingi þeirra tilfella (eða ca. 15 kerfi) eru niðurstöður að fullu aðgengilegar og/eða birtar þannig að áætluð afkastageta til næstu áratuga liggur fyrir. Í hinum helmingi líkanreikninganna eru niðurstöður hvað varðar afkastagetu ekki aðgengilegar af ýmsum ástæðum eða líkanreikningarnir orðnir úreltir vegna breyttra aðstæðna.

Ef ofangreindar niðurstöður eru skoðaðar nánar sést að meðalorkuvinnsla hluta þessara svæða er nú þegar orðin sambærileg áætlaðri afkastagetu þeirra. Á öðrum svæðum er vinnslan enn töluvert undir áætlaðri afkastagetu. Að meðaltali reiknast þetta þannig að samanlögð meðalvinnsla þessara 15 jarðhitakerfa nam um 65% samanlagðrar áætlaðrar vinnslugetu þeirra árið 2023. Ekki er að svo stöddu hægt að yfirfæra þessa niðurstöðu á aðrar reglugerðarveitur landsins, en samantekt ÍSOR (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023) bendir til þess að mörg vinnslusvæði, einkum þau sem þjóna stærri veitusvæðum nálgist afkastagetuna, miðað við núverandi tækni.

3.7 Varmaflæði um yfirborð með varmaleiðingu

Til viðbótar við varmaflæðið, sem felst í streymi heits vökva til yfirborðs og fjallað hefur verið um hér að ofan, er varmaflæði með varmaleiðingu⁷ mikilvægur þáttur í jarðvarma landsins. Öfugt við varmaflæðið með heitum vökva, sem er staðbundið, á varmaflæði með varmaleiðingu sér stað alls staðar í jarðskorpunni. Fræðilega þá er varmaleiðingin reiknuð sem margfeldi hitastiguls (°C/m) og varmaleiðni viðkomandi bergs ($J/(s \cdot m \cdot ^\circ C)$) eða $W/(m \cdot ^\circ C)$.

Eins og fjallað er um í undirkafla 3.2 þá eru nú til mun viðameiri gögn um hitastigul landsins en var 1985 og sýnir mynd 6 uppfært hitastigulskort af landinu, byggt á öllum viðeigandi upplýsingum sem tiltækar eru í dag. Út frá þeim gögnum hafa jafnframt verið reiknuð meðaltöl hitastigulsins fyrir landsvæðin 14, bæði bein meðaltöl og vegin meðaltöl, sem birt eru í töflu 6. Tafla 1 sýnir hve mörg gildi (fjöldi hitastigulsholna) eru á bak við hvert meðaltal, en þau er mjög mismörg fyrir einstök svæði og gögnin eru jafnframt verulega misdreifð. Á stórum svæðum landsins eru t.d. engar hitastigulsholur (sjá mynd 7), einkum á gosbeltum og svæðum inn til landsins, þ.á.m. undir jöklum. Vegna misdreifingar holnanna var gripið til þess ráðs að reikna líka vegið meðaltal þar sem vigtin er stærð áhrifasvæðis hvernar hitastigulsholu, sem aftur ákvarðast af fjarlægðum til nærliggjandi holna (tafla 6).

Tafla 6. Reiknaður hitastigull (°C/km) fyrir hvert svæði (mynd 8).

Svæði	Flatarmál (km ²)	Hitastigull, meðaltal ¹⁾	Hitastigull, vegið meðaltal ²⁾	Hitastigull 1985 (°C/km)	Hitastigull 2025 (°C/km)
Suðvesturland	4.237	194	118	90	100
Snæfellsnes	2.719	121	90	90	80
Vestfirðir	9.230	84	71	60	60
Norðvesturland	4.100	76	75	70	70
Skagafjörður	7.442	80	103	70	80
Eyjafjörður	8.412	141	86	70	80
Norðausturland	14.423	79	62	60	65
Vatnajökull suður	7.398	124	93	60	90
Suðausturland	2.851	55	61	60	80
Suðurland	6.373	121	85	90	85
Reykjanesgosbelti	926	120	140	60	170
Vesturgosbelti	11.365	169	125	60	150
Suðausturgosbelti	5.488	102	87	60	160
Norðausturgosbelti	17.755	165	196	60	170

⁷ Varmaleiðing (e. *heat conduction*) felur í sér flæði varmaorku um efni (bæði fast efni og vökva) eins og t.d. berg jarðskorpu Íslands. Flæðið er frá hærri hita til lægri skv. lögmáli Fouriers. Eiginleiki efnisins sem stýrir varmaflæðinu nefnist varmaleiðni, eða „thermal conductivity“ á ensku. Áður fyrr var þetta flæði líka kallað varmaleiðni á íslensku, sem eðlilega olli ruglingi.

¹⁾ Beint meðaltal skv. tiltækum hitastigulsholum í gagnagrunni ÍSOR (sbr. töflu 1), án holna sem hafa hitastigul hærrí en 500°C/km.

²⁾ Meðaltal vegið með flatarmáli áhrifasvæðis hverrar hitastigulsholu.

Fyrir um helming svæðanna eru vegnu meðaltölin svipuð og beinu meðaltölin, en að meðaltali eru þau lægri (ca. 15%). Í fljótu bragði kemur þetta á óvart, en stafar sennilega af því að hitastigulsholur hafa almennt frekar verið boraðar á svæðum með hitastigul í hærrí kantinum, þ.e. svæðum þar sem grunur er um jarðhitavirkni. Í næstsíðasta dálki töflu 6 eru birt hitastigulsgildi sambærileg þeim sem notuð voru í matinu 1985 (Guðmundur Pálmason ofl., 1985), til samanburðar.

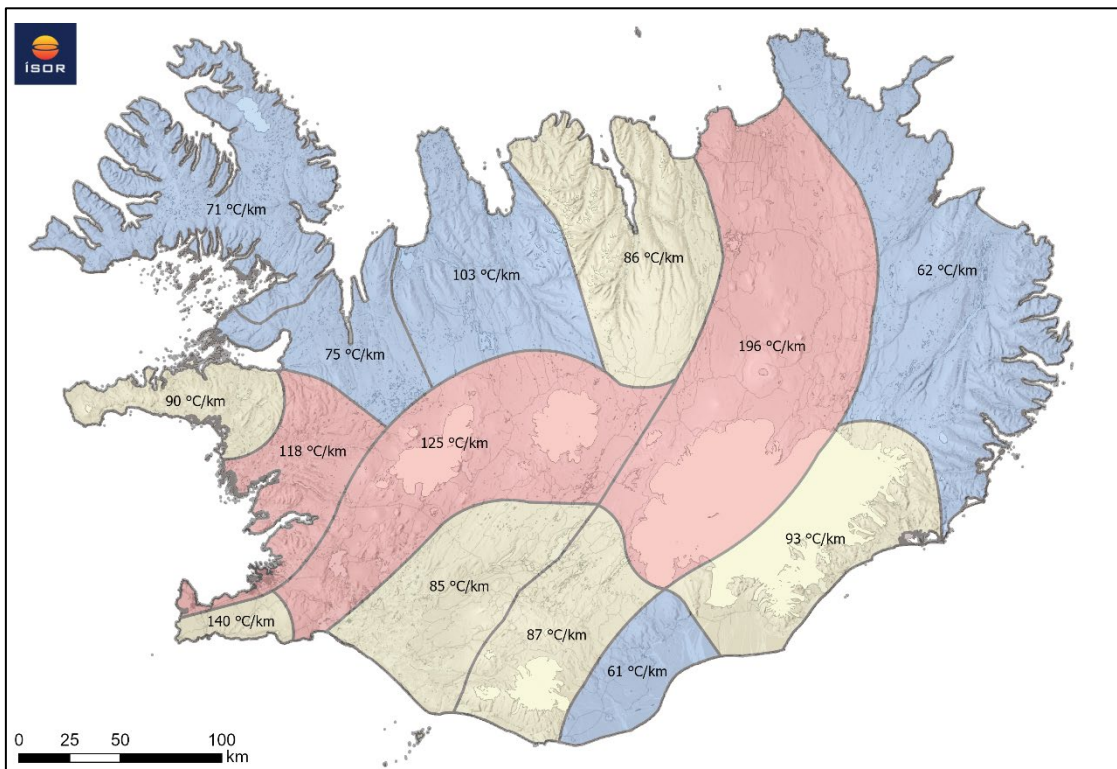
Við ákvörðun hitastiguls til að nota fyrir landsvæðin 14 í núverandi mati mætti í fljótu bragði telja eðlilegt að nota vegnu meðaltölin í töflu 6. Það er þó ekki svo vegna þess hve dreifing hitastigulsholna um landið er mismunandi og hve stórir hlutar landsins eru hreinlega án slíkra holna. Því er hér jafnframt stuðst við hitastigul skv. hitaástands líkanreikningum birtum í matsskýrslunni frá 1985 (Guðmundur Pálmason ofl., 1985). Fyrir svæðin utan gosbeltanna voru því valin gildi milli vegnu meðaltalanna og líkangildanna, e.k. miðgildi eða meðaltal. Fyrir gosbeltin var nær eingöngu stuðst við líkangildin, að teknu tilliti til breytileika milli þeirra bæði jarðfræðilega og hvað varðar virkni. Niðurstaðan er birt í aftasta dálki töflu 6 og sýnd á mynd 12.

Í svo til öllum landsvæðunum utan gosbeltanna eru uppfærð hitastigulsgildi mjög sambærileg þeim sem notuð voru 1985. En fyrir gosbeltin er matið nú gjörbreytt. Í matinu 1985 var gengið út frá lágum hitastigli í gosbeltunum á þeirri forsendu að þar væri lekt bergs svo mikil að kalt grunnvatn væri þar ráðandi í efstu nokkur hundruð metrunum og því lítil varmaleiðing til yfirborðs. Nú er álitíð að ekki sé rétt að gera það þannig, því þó kalt grunnvatn „gleypi“ varmaflæðið með leiðingu þá er samt varmaflæði að neðan, og það mjög mikið. Þessu til stuðnings er bent á nánari umfjöllun í undirkafla 3.8 hér á eftir, tengd áætluðu orkuflæði inn í jarðskorpu gosbeltanna með kviku.

Að lokum var varmaflæðið með leiðingu reiknað með því að nota varmaleiðni 1,7 W/(m°C), sem er talið nærri meðalvarmaleiðni basaltskorpu eins og á Íslandi (Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson, 1993). Þá fæst niðurstaðan, sem birt er í töflu 7 hér á eftir.

Eins og kemur fram hér að ofan eru meðalgildi hitastiguls hvers landshluta ákvörðuð á einfaldan hátt, enda ekki tilgangur núverandi mats að leggjast í nákvæmar rannsóknir á einstökum þáttum, heldur byggja á tiltækum gögnum og eldra matinu þar sem það þykir viðeigandi og enn í gildi. Til er töluvert af rannsóknum á hitaástandi jarðskorpunnar og segja má að núverandi niðurstöður (hitastigull og þar með varmaflæði með leiðingu) samræmist þeim í grófum dráttum. Það býður þó betri tíma og annarra verkefna að leggjast nákvæmar yfir þær rannsóknir og tengja beint hitaástandi jarðskorpu Íslands. Af

tiltækum rannsóknum má helst nefna rannsóknir Ólafs G. Flóvenz og Kristjáns Sæmundssonar á hitastigli Íslands (1993), sem hafa verið hér til hliðsjónar. Þá má nefna að þekking á jarðskorpu Íslands hefur aukist mikið síðustu áratugin, ekki síst á grundvelli jarðskjálftarannsóknar, en líka viðnámsmælinga og þyngdarmælinga. Þau gögn hafa að einhverju leyti verið notuð til þess að túlka hitaástand jarðskorpunnar. Sjá t.d. Arnar M. Vilhjálmsson og Ólafur G. Flóvenz (2017) og Kaban o.fl. (2002), svo dæmi séu nefnd. Niðurstöður þeirra fyrrnefndu benda til þess að hitastigull norðurgosbeltisins utan háhitasvæða, í grennd við Upptýppinga stutt austan Öskju, sé u.þ.b. $120\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$.



Mynd 12. Svæðaskipting landsins ásamt vegnu meðaltali hitastiguls hvers svæðis.

3.8 Varmastraumarnir fjórir

Eins og sjá má á samantektinni hér að framan og niðurstöðum gagnaúrvinnslunnar, sem þar er birt, þá má líta á niðurstöðurnar sem mat á fjórum mismunandi orkustraumum tengdum Íslandi. Samanlagðar niðurstöður fyrir landshlutana, sem hér eru lagðir til grundvallar, eru birtar í töflu 7 og töflu 8. Fyrri taflan birtir upplýsingar um samanlagt massastreymi meðan seinni taflan birtir tölur um orkuflæðið. Orkustraumarnir eru:

- A. Orkuflæði um laugar og hverir í ótrufluðu (náttúrulegu) ástandi áður en vinnsla hófst á viðkomandi svæði, sbr. undirkafla 3.4. Hafa þarf í huga að viðkomandi tölur fela ekki í sér orkuflæði um hverir á háhitasvæðum sem mjög erfitt er að mæla/meta (aðallega gufu-streymi). Fyrir ákveðna landshluta er þessi orkustraumur því verulega vanmetinn í töflunum, en þó er gerð tilraun til að meta hann í næsta undirkafla (3.9).
- B. Orkuflæði með varmaleiðingu um berg jarðskorpunnar, byggt á áætluðum hitastigli (sjá undirkafla 3.2).
- C. Orkuflæði sem svara til afkastagetu borholna, sbr. undirkafla 3.5. Hér er um samanlagða afkastagetu borholna á hverju svæði að ræði, sem endurspeglar afkastagetu þeirra í stuttan tíma (klukkustundir – dagar), en tekur hvorki tillit til dölunar í afköstum holna með tíma né áhrifa milli holna þegar fleiri en ein hola er í gangi. Þau áhrif draga einnig úr afköstum holna. Þannig endurspeglar tölur fyrir þennan orkustraum e.k. efri mörk afkastagetu mismunandi svæði. Hér þarf að hafa í huga að upplýsingar um afkastagetu eru ekki tiltækar fyrir allar jarðhitaholur á landinu. Einkum vantar upplýsingar um holur á háhitasvæðum, sem skekkir myndina (sjá undirkafla 3.5).
- D. Orkuflæði sem svarar til framleiðslu hitaveitna árið 2023, umreiknað í meðal afl miðað við 5°C viðmiðunarhita, sjá undirkafla 3.6. Orkuframleiðsla orkuvera á háhitasvæðum er ekki talin með hér, hvorki raforka né varmaorka. Það er hins vegar gert í undirkafla 3.9.

Fyrstu tveir varmastraumarnir samanlagt (A+B) lýsa í raun núverandi mati á heildarvarmaflæðinu út í gegnum jarðskorpu Íslands í náttúrulegu ástandi, áður en veruleg vinnsla jarðhita hófst á landinu. Þó vantar inn í tölurnar varmaflæði um háhitasvæði landsins, sem reynt er að meta í næsta undirkafla.

Talið er að straumur D, þ.e. núverandi framleiðsla lághitaveitna, sé nærri samanlagðri afkastagetu þeirra lághitavinnslusvæða, sem nú eru nýtt, miðað við núverandi vinnslutækni, þó enn sé borð fyrir báru í mörgum tilfellum. Þetta er niðurstaða úttektar ÍSOR á stöðu jarðhitaveitna landsins frá 2023 (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023) auk þess sem niðurstöður undirkafla 3.6 sýna það sama. Þetta þýðir þó ekki að það verði ekki hægt að auka nýtingu lághita á Íslandi í framtíðinni, það er hægt að gera t.d. með bættri vinnslutækni og nýta betur og meira þekkt svæði sem ekki eru nýtt að ráði í dag auk þess sem reikna má með að fleiri falin lághitakerfi muni finnast (sjá frekari umræðu í lokakafla skýrslunnar). Þó vekur athygli að núverandi framleiðsla lághitavatns er í heildina aðeins um helmingi meiri en samanlagt afl kortlagðra lauga landsins, en jafnan er gengið út frá því að með borunum megi margfalda náttúrulegt

rennsli. Samanlögð hámarksafköst borholna er hins vegar meira en fjórum sinnum meiri, afköst sem þó ekki er hægt að viðhalda til lengdar.

Orkustraumur C er langt yfir núverandi vinnslu og þar með samanlagðri afkastagetunni, sem kemur ekki á óvart því þessi straumur byggir á skammtímaprófunum holnanna, eins og komið hefur fram. Þetta má túlka þannig að auka megi vinnslu á mörgum svæðum ef fullri niðurdælingu væri beitt (þ.e. ef svo til öllum vökvænum er skilað aftur niður í jarðhitakerfin). Allavega má líta þessa tölu sem fræðileg efri mörk samanlagðrar afkastagetu svæðanna, sem borað hefur verið á, og hugsanlega mætti nálgast með framförum í vinnslutækni.

Eins og nefnt er, þá eru göt í ofangreindum gögnum vegna skorts á tölulegum upplýsingum. Reynt verður að meta stærð stærsta gatsins, sem er náttúrulegt orkuflæði um háhitasvæðin, í undirkafla 3.9 hér strax á eftir. Jafnframt eru þar birtar tölur um orkuframleiðslu á háhitasvæðunum 2023. Allt er svo tekið saman á nokkrum myndum/kortum í lok núverandi kafla og í töflu 13 í niðurstöðukafla skýrslunnar (kafla 5).

Að lokum var samband milli einstakra þátta í tafla 8 kannað með því að teikna mismunandi þætti sem fall af öðrum þáttum (einn punktur fyrir hvert hinna 14 landssvæða) og kanna hvort augljóst samband kemur fram. Skýrasta sambandið fékkst fyrir vinnsluna 2023 og náttúrulegt afl lauga, eins og sést á mynd 13. Myndin sýnir að mest von er um nýtanlegan lághita á svæðum þar sem mikið er um laugar, sem ekki kemur á óvart. Eitt landssvæði sker sig þó aðallega úr, en það eru Vestfirðir, þar sem nýtingin er mun minni en afl lauga bendir til að væri mögulegt, væntanlega að miklu leyti afleiðing jarðfræðilegra aðstæðna í þeim landshlutum og krefjandi jarðhitaleitar með borunum auk dreifingar byggðar. Einnig er skýrt samband milli afkastagetu borholna og vinnslu hitaveitna, sem telja má augljóst og ekki ástæða til að birta hér.

Tafla 7. Ýmsir þættir massaflæðis um svæði landsins.

Svæði	Flatarmál (km ²)	Um hveru og laugar (kg/s) ¹⁾	Afkastageta borholna (kg/s) ²⁾	Vinnsla 2023 (kg/s) ³⁾
Suðvesturland	4.237	803	2.967	1200
Snæfellsnes	2.719	36	124	25
Vestfirðir	9.230	622	77	21,9
Norðvesturland	4.100	42	59,2	24,5
Skagafjörður	7.442	211	335	195
Eyjafjörður	8.412	175	699	392
Norðausturland	14.423	135	168	78,1
Vatnajökull suður	7.398	10	95,9	28,6
Suðausturland	2.851	1,4	-	0
Suðurland	6.373	369	580	268
Reykjanesgosbelti	926	-	-	0
Vesturgosbelti	11.365	251	1486	378
Suðausturgosbelti	5.488	17	-	0
Norðausturgosbelti	17.755	1.433	256	113
Samtals		4.105	6.848	2.723

¹⁾ Massarennisli frá hverum og laugum reiknað frá uppgefnu rúmmálsrennsli og eðlismassa við ríkjandi hitastig (Helgi Torfason, 2024).
²⁾ Samanlögð afkastageta borholna til skamms tíma (Björn M. Sveinbjörnsson, 2016, 2018)
³⁾ Meðalvinnsla heits vatns (Orkustofnun 2024)

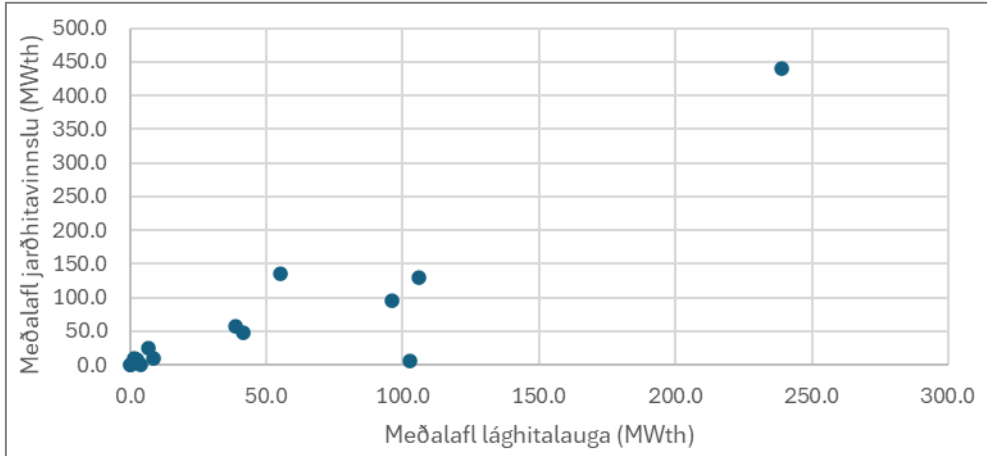
Tafla 8. Ýmsir þættir varmaflæðis um svæði landsins.

Svæði	Flatarmál (km ²)	Um hver og laugar (MW _{th}) ¹⁾	Afkastageta borholna (MW _{th}) ²⁾	Framleiðsla 2023 (MW _{th}) ³⁾	Varma- leiðing (MW _{th})
Suðvesturland	4.237	239	1.072	441	720
Snæfellsnes	2.719	2,4	42,9	8,3	370
Vestfirðir	9.230	103	20,5	5,8	940
Norðvesturland	4.100	8,7	22,8	9,4	490
Skagafjörður	7.442	38,5	101	57,2	1.010
Eyjafjörður	8.412	39,1	214	130	1.140
Norðausturland	14.423	6,7	47,8	25,2	1.590
Vatnajökull suður	7.398	1,6	29,0	9,0	1.130
Suðausturland	2.851	0,1	-	-	390
Suðurland	6.373	95,9	224	95,1	920
Reykjanesgosbelti	926	-	-	-	240
Vesturgosbelti	11.365	55,2	800	136	2.900
Suðausturgosbelti	5.488	3,8	-	-	1.490
Norðausturgosbelti	17.755	41,6	102	48,2	5.130
Samtals		635	2.676	964	18.460

1) Varmaafll frá hverum og laugum reiknað frá uppgefnu rúmmálsrennsli og eðlismassa við ríkjandi hitastig (Helgi Torfason, 2024).

2) Samanlögð afkastageta borholna til skamms tíma (Björn M. Sveinbjörnsson, 2016, 2018)

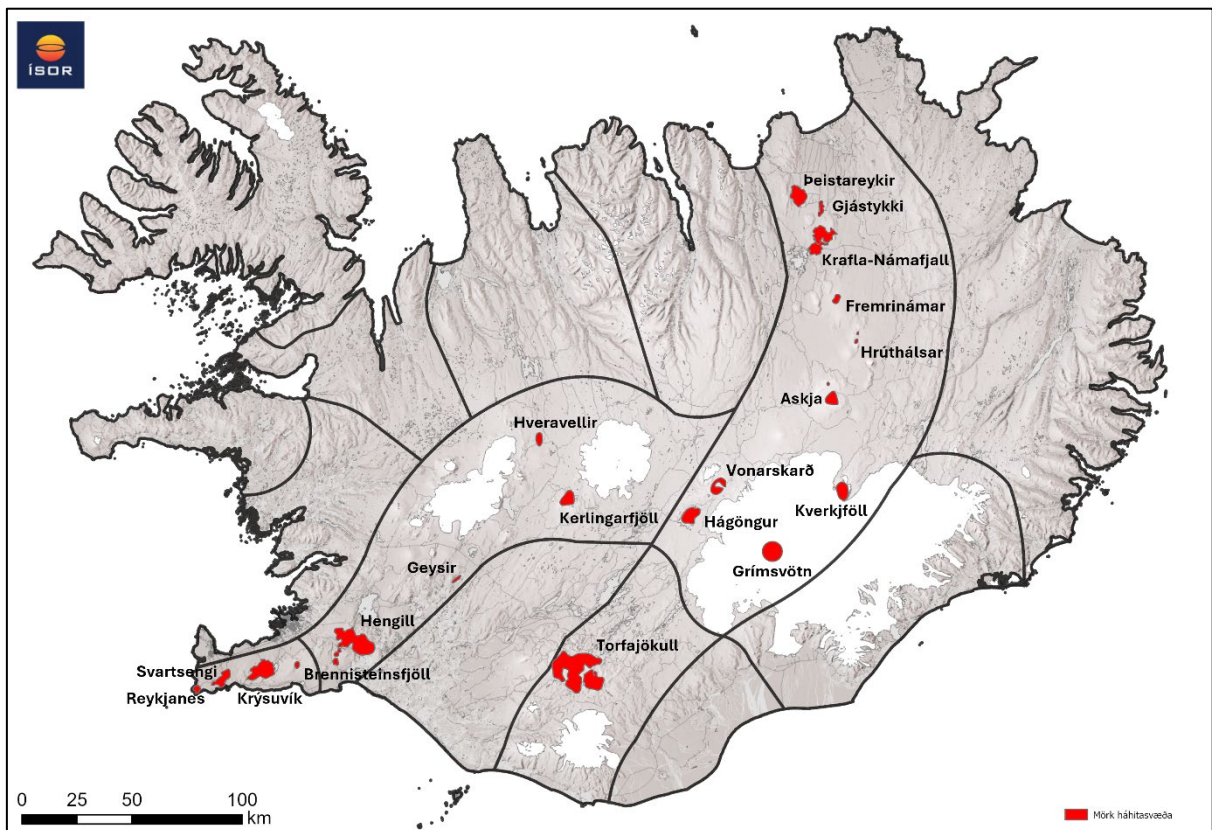
3) Vinnsla heits vatns birt sem meðalvarmaafll (Orkustofnun 2024)



Mynd 13. Samband varmaframleiðslu lághitaveitna og varmaflæðis lauga skv. töflu 8, innifelur hvorki varmaframleiðslu háhitavirkjana né varmaflæði á háhitasvæðum.

3.9 Afkastageta háhitasvæða

Lagt hefur verið mat á vinnslugetu háhitasvæða út frá rúmmálsmati (e. *volumetric assessment*). Aðferðin gengur út á að meta útbreiðslu og þykkt svæðanna (rúmmál) ásamt hitaástandi. Með einföldum forsendum um eðlisvarma bergs og vatns, fæst mat á varma innan ákveðins rúmmáls (e. *heat in place*). Aðferðin er gjarnan notuð á frumrannsóknarstigi, þegar fyrstu yfirborsrannsóknnum er lokið og í sumum tilfellum, fyrstu rannsóknarborunum. ÍSOR hefur metið afköst flestra háhitasvæða í nýtingu, á annaðhvort nýtingar- eða rannsóknarstigi, með rúmmálsmati. Hér verða þó sérstaklega tilgreind svæði og virkjanir Landsvirkjunar á Norðausturlandi, Námafjall (Bjarnarflagsvirkjun), Krafla (Kröfluvirkjun) og Þeistareykir (Þeistareykjavirkjun). ÍSOR gerði rúmmálsmöt fyrir svæðin á árunum 2008-2009. Einnig í tengslum við áform um virkjun á Þeistareykjum (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 2008), og til að skoða möguleika á stærri virkjun í annars vegar Kröflu og hins vegar Námafjalli (Anette K. Mortensen o.fl., 2009 og Sæunn Halldórsdóttir og Héðinn Björnsson, 2009). Niðurstöður úr rúmmálsmati svæðanna þriggja eru notuð til að finna meðalafli á flatareiningu háhitasvæða og þær tölur eru notaðar til að áætla afl allra háhitasvæða með hliðsjón af þekktum útmörkum þeirra. Þetta er sama aðferðafræði og beit var 2009 við samræmt mat Orkustofnunnar og ÍSOR á háhitasvæðu (Jónas Ketilsson o.fl., 2009).



Mynd 14. Svæðisskipting landsins ásamt útmörkum háhitasvæða, samkvæmt viðnámsmælingum og útbreiðslu jarðhitaummerkja á yfirborði.

Flest íslensk háhitakerfi hafa verið rannsökuð með viðnámsmælingum og út frá niðurstöðum þeirra er hægt að fá mat á lárétta útbreiðslu svæðanna (Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 2006) (mynd 14). Í flestum tilfellum er miðað við útbreiðslu svokallaðs háviðnámskjarna á 800-1000 m dýpi. Röksemdafærslan fyrir matinu byggir á því (a) að innan háviðnámskjarnans er hitastig jarðhitageymisins talið hafa náð 230°C, en það hitastig er vel nýtilegt til raforkuframleiðslu, og (b) að flestar íslenskar háhitaholur eru boraðar í 2-3 km dýpi og hafa vinnsluhluta neðan 800 m. Hér er rétt að árétta að oftast er flatarmál samkvæmt viðnámsmælingum stærra en útbreiðsla háhitaummerkja á yfirborði. Í örfáum tilfellum er miðað við hámarksútbreiðslu svokallaðrar lágviðnámskápu en það er þegar háviðnámskjarni kemur ekki í ljós í niðurstöðum viðnámsmælinga. Þetta á t. d. við um jarðhitasvæðin á Geysi og Hveravöllum á Kili, sem hér flokkast sem háhitasvæði. Innan lágviðnámskápunnar er miðað við að hitastig jarðhitageymisins sé yfir 150-160°C.

Við mat á afkastagetu háhitasvæðanna þriggja á Norðausturlandi var beitt svokallaðri Monte-Carlo aðferðafræði samhliða rúmmálsmati (Gunnar Þorgilsson og Sæunn Halldórsdóttir, 2008). Þetta er gert þar sem töluverð óvissa ríkir um bæði stærð, hitastig og eðli jarðhitakerfa þegar aðeins hluti þeirra hefur verið kannaður með borun. Upplýsingar úr borun eru þá yfirfærðar á þann hluta kerfisins sem er ókannaður en hefur verið afmarkaður á grunni tiltækra rannsókna. Monte-Carlo aðferðin gengur út á að skilgreina líkindadreifingu helstu kennistærða út frá lág-, mið-, og hámarksgildi breytunnar. Gildin eru ákvörðuð út frá niðurstöðum rannsókna og samkvæmt bestu þekkingu á hverjum tíma. Þannig er hægt að reikna líkindadreifingu fyrir heildarorku mögulegs jarðhitakerfis og jafnframt afkastagetu. Sjá nánar um aðferðafræðina í skýrslu ÍSOR (Gunnar Þorgilsson og Sæunn Halldórsdóttir, 2008) og skýrslu ÍSOR fyrir Landsvirkjun um rúmmálsmat fyrir jarðhitasvæðið við Námafjall (Sæunn Halldórsdóttir og Héðinn Björnsson, 2009).

Tafla 9. Raf afl jarðhitasvæðanna þriggja: Námafjalls, Kröflu og Þeistareykja metið með rúmmáls-aðferð og Monte Carlo reikningum.

Svæði	Útmörk (km ²) ¹⁾	Raf afl reiknað til 50 ára (MW _e) ²⁾			Meðal afl á flatarmál (MW _e /km ²)		
	Metin út frá viðnámi	90% öryggisbil	50% mörk	90% mörk	90% öryggisbil	50% mörk	90% mörk
Námafjall	29	50-170	100	60	2-6	3	2
Krafla	52	120-350	220	150	2-7	4	3
Þeistareykir	48	115-370	230	145	2-8	5	3

¹⁾ Mynd 14 sýnir útmörk svæðanna þriggja.
²⁾ Samkvæmt skýrslum ÍSOR um svæðin og tilgreindar eru í texta.

Við gerð afkastamats á svæðunum var hámarksflatarmál háhitasvæðis talið vera jafnt útbreiðslu túlkðra viðnámsmælinga og lágmarksflatarmál talið vera jafnt útbreiðslu háhitaummerkja á yfirborði að viðbættu því sem boranir hafa

staðfest. Niðurstöður fyrir svæðin þrjú eru birt í töflu 9. Samkvæmt þeim er rafafl Námafjallssvæðisins á bilinu 50 MW_e til 170 MW_e (90% öryggisbil) en óvissan hlýst af því að óvissa er um helstu breytur og þá sérstaklega hitastig og rúmmál. Sambærilegar tölur eru 120-350 MW_e fyrir Kröflu og 115-370 MW_e fyrir Þeistareyki. Meðalafl á flatareiningu er á bilinu 2-8 MW_e/km² fyrir svæðin (90% öryggisbil). Það er lægst á Námafjallssvæðinu 3 MW_e/km², á Kröflusvæðinu er það 4 MW_e/km² og hæst 5 MW_e/km² á Þeistareykjasvæðinu, miðað við 50% mörk.

Til samanburðar var meðalafl á flatareiningu metið á bilinu 3-9 MW_e/km² (90% öryggisbil) í skýrslu Orkustofnunnar og ÍSOR sem gefin var út í tengslum við rammaáætlun (Jónas Ketilsson ofl., 2009). Í því tilviki var flatarvinnslugetan ákvörðuð út frá niðurstöðum rúmmáls mats með Monte Carlo reikningum fyrir sömu jarðhitakerfi (sömu heimildir), að vitbættum niðurstöðum frá jarðhitakerfinu Hengli (Sarmiento og Grímur Björnsson, 2007). Í skýrslunni var flatarvinnslugetan að meðaltali 5 MW_e/km² í 50% tilvika (50% mörk/miðgildi). Rétt er að geta þess að samkvæmt mati fyrir Hengilinn er meðalaflíð 10 MW_e/km² í 5% tilvika (efri mörk 90% öryggisbilsins) og hækka niðurstöður þess lokaniðurstöður sem birtar eru í skýrslunni (Jónas Ketilsson ofl., 2009). Að auki er flatarmál Námafjalls og Kröflu metið lægra en í núverandi mati og á það sinn þátt í að útskýra muninn. Í töflu 10er birt mat á útbreiðslu háhitasvæðanna ásamt mati á afköstum miðað við flatarvinnslugetu á bilinu 2-7 MW_e/km². Til samanburðar er afkastageta miðað við flatarvinnslugetu á bilinu 3-9 MW_e/km² sem fékkst í matinu frá 2009. Heildarafkastageta háhitasvæða landsins er metin á bilinu 1900-6500 MW_e. Bilið endurspeglar óvissuna sem fólgin er í afkastamatinu. Fæst svæðanna hafa verið rannsökuð með borunum en aðeins með þeim hætti er hægt að staðfesta hitaástand og vinnslueiginleika.

Tafla 10. Áætluð útbreiðsla (flatarmál) háhitasvæða, mat á náttúrulegu varmaflæði, afkastageta miðað við flatarvinnslugetu á bilinu 2 til 7 MW_e/km², og til samanburðar afkastageta miðað við flatarvinnslugetu 3-9 MW_e/km² samkvæmt eldra mati. Í dálkunum lengst til hægri er uppgæfið meðalafl virkjana á 5 svæðum ásamt heildarvarmaafli metnu út frá heildarfrumorkuframleiðslu.

Svæði	Flatarmál (km ²)	Náttúrulegt varmaflæði (MW _{th})	Mat á afkastagetu (MW _e)	Eldra mat á afkastagetu (MW _e) ¹⁾	Meðalafl 2023 (MW _e) ²⁾	Varmaafli 2023 (MW _{th}) ²⁾
Reykjanes ³⁾	9	135	20-60	30-80	80	577
Svartsengi	32	320	60-230	90-270	65	547
Krýsuvík	72	1080	140-500	270-800		
Brennisteinsfjöll	5	50	10-40	15-45		
Hengill	142	2130	270-950	430-1280	398	2440
Geysir ³⁾	5	125	10-40	15-45		
Kerlingarfjöll	32	800	60-220	120-350		
Hveravellir ³⁾	14	210	30-100	40-130		
Torfajökull	269	6725	540-1.880	760-2280		
Grímsvötn ⁴⁾	65	1800	130-460	-		
Hágöngur	43	430	90-300	130-390		
Vonarskarð	29	725	60-200	90-260		
Kverkfjöll ⁵⁾	34	1200	70-240	90-280		
Askja ⁵⁾	27	540	50-190	80-240		
Hrúthálsar ⁵⁾	3	30	10-20	10-40		
Fremrinámar	10	100	20-70	30-90		
Krafla-Námafjall	81	1215	160-560	190-560	57	530
Gjástykki	11	110	20-80	30-100		
Þeistareykir	48	720	100-340	140-430	86	444
Samtals	931	18.445	1.860 - 6.520	2.560 - 7.670	686	4538

1) Samkvæmt Jónasi Ketilssyni o.fl. (2009).
2) Talnaefni Orkustofnunnar (2023).
3) Viðnámsmælingar miða við lágviðnámskápu á sama dýpi þar sem háviðnámskjarni kom ekki fram.
4) Samkvæmt Helga Björnssyni o.fl. (1982).
5) Viðnámsmælingar ekki til staðar og því byggir flatarmál á yfirborðsummerkjum.

Fimm háhitasvæði hafa verið virkjuð og er orkuvinnsla svæðanna samkvæmt tölum Orkustofnunnar frá 2023 gefin upp í töflunni. Meðalaflíð er samanlagt afl allra virkjanna innan hvers svæðis. Sem dæmi eru þrjú vinnslusvæði á Hengilssvæðinu: Hellisheiði, Hverahlíð og Nesjavellir og var samanlagt meðalafl þeirra 400 MW_e árið 2023. Meðalafl virkjana endurspeglar ekki endilega vinnslugetu svæðis enda er í flestum tilvikum aðeins hluti svæðisins virkjaður í hverju og einu tilfelli. Rétt er að hafa það í huga við samanburð talnanna. Heildarvarmaafli er metið út frá heildarfrumorkuframleiðslu virkjananna.

Auk áætlaðrar afkastagetu háhitasvæða landsins og upplýsinga um núverandi orkuvinnslu, þá birtir tafla 10 einnig áætluð gildi um náttúrulegt varmaflæði um svæði, eða afl þeirra. Hér er fyrst og fremst um varmaflæði með vatni og gufu

um vatns- og leirhverfi, gufuaugu og aðra yfirborðsvirkni að ræða, en einnig varmaleiðingu um skilgreint yfirborð svæðanna. Varmaleiðingin er þó smávægileg miðað við fyrrgreinda varmaflæðið (innan við 2% þess), sem er í eðli sínu varmaður sbr. skilgreiningu fyrr í skýrslunni. Til að meta náttúrulegt varmaflæðið um háhitasvæðin er notuð sama aðferðafræði og notuð var 1985. Hún felst í eftirfarandi:

- Grímsvötn eru eina háhitasvæði landsins þar sem til er þökkalegt mat á náttúrulegu afli svæðis. Er það vegna þess að það er hulið jökli og allt varmaflæðið fer í að bræða jökulís. Vatnið safnast svo saman í Grímsvatnalægðinni, en sleppur í burtu í jökulhlaupum, sem hafa lengi verið mæld á Skeiðarársandi. Vatnsmagnið gefur þá mælingu á varmaorkunni sem streymt hefur upp til yfirborð frá síðasta hlaupi. Helgi Björnsson o.fl. (1982) áætluðu varmaafli Grímsvatna vera 5.000 MW, en Reynolds o.fl. (2018) áætla að það sé 1.800 MW. Hér munar reyndar miklu en líklegt er að töluverð eldvirkni í Grímsvötnum á fyrri hluta 20. aldar skýri hærra matið. Skv. áætluðu yfirborðsflatarmáli Grímsvatna (65 km²; Helgi Björnsson o.fl., 1982) þá gefur nýrra matið, sem stuðst verður við hér, flatarvarmaflæði (e. heat flux) upp á u.þ.b. 28 W/m².
- Grófara mat er jafnframt til fyrir Kverkfjöll (Friedman o.fl., 1970), sem er upp á 1.200 – 2.100 MW (aðallega byggt á innrauðum myndum). Í núverandi skýrslu er miðað við neðri mörkin sem gefa flatarvarmaflæði upp á u.þ.b. 39 W/m².
- Í varmamatinu 1985 var talan 20 W/m² notuð fyrir öll önnur háhitasvæði, en hér er tekinn inn meiri breytileiki. Fyrir svæði með mikla yfirborðsvirkni⁸ er notuð talan 25 W/m² (flatarvarmaflæði), fyrir svæði með miðlungsvirkni⁹ er notað 15 W/m² og fyrir svæði með litla virkni¹⁰ 10 W/m². Að meðaltali gefur þetta þó nærri 20 W/m², eins og í 1985 matinu. Varmaafli háhitasvæðanna er svo metið með því að margfalda flatarmál og flatarvarmaflæði hvers svæðis (tafla 10). Hafa verður í huga að umrætt mat er mjög ónákvæmt og má frekar líta á sem ágiskun. Jafnframt má reikna með að náttúrulegt varmaflæði um háhitasvæðin sé mjög breytilegt með tíma þar sem virkni þeirra er sveiflukennd. Hún eykst t.d. örugglega mjög mikið í kjölfar eldvirkni.
- Að lokum má nefna að í byrjun sjöunda áratugar síðustu aldar mat Gunnar Böðvarsson (1961) afl Torfajökuls vera á bilinu 500 – 3.200 MW. Árið 1985 var það metið 2.800 MW, en nú 6.300 MW, aðallega vegna stærra áætlaðs flatarmáls.

Samanlagt náttúrulegt varmaflæði háhitasvæða landsins er nú metið u.þ.b. 18.000 MW_{th} í stað 17.000 MW_{th} 1985. Munurinn verður að teljast lítill í ljósi ónákvæmni matsins. Nú er yfirborðsflatarmál flestra svæðanna þó metið töluvert stærra (um 70% að meðaltali) en var gert 1985, en á móti er afl Grímsvatna metið mun minna og neðri mörk notuð fyrir afl Kverkfjalla. Þá vekur

⁸ Fyrir Geysissvæðið, Kerlingarfjöll, Torfajökull, Vonarskarð, Askja (20 W/m² notuð í stað 25 W/m²).

⁹ Reykjanes, Krýsuvík, Hengill, Hveravellir, Krafla-Námafjall, Þeistareykir.

¹⁰ Svartsengi, Brennisteinsfjöll, Hágöngur, Hróthálsar, Fremrinámar, Gjástykki.

athygli að náttúrulegt varmaflæði háhitasvæðanna er metið svo til jafnmikið og varmaleiðingin um allt yfirborð Íslands ($19.000 \text{ MW}_{\text{th}}$), þó samanlagt yfirborðsflatarmál háhitasvæðanna sé innan við 1% flatarmáls landsins. Svona öflug eru háhitasvæðin enda virka þau í raun sem e.k. strompar fyrir orkustreymið um gosbeltið auk eldvirkinnar.

3.10 Rúmmálsmat á varmaforða jarðskorpu landsins

Við mat á orkuforða jarðskorunnar undir landinu er notast við rúmmálsmat. Eins og útskýrt var í fyrri kafla um afkastamat háhitasvæða er hægt að meta varma innan ákveðins rúmmáls með því að gefa sér forsendur um hitaástand þess auk eðlisvarma bergs og vatns. Jafnan er gert ráð fyrir að varmarýmd (eðlisvarmi á rúmmálseiningu) og hitastig séu einsleit í láréttar stefnur en breytist með dýpi. Þá er heildarvarmi innan ákveðins rúmmáls

$$Q = F \int_0^h C(z)[T(z) - T_0]dz. \quad (1)$$

Þar sem F er flatarmál og h er þykkt rúmmálsins, $C(z)$ er varmarýmd, $T(z)$ lýsir hitaástandinu og T_0 er viðmiðunarhiti. Varmarýmd á rúmeiningu í jarðlagi, þar sem holrými (grop/poruhluti) er fyllt með vatni, er skilgreind sem

$$C(z) = c_b \rho_b (1 - \phi) + c_v \rho_v \phi. \quad (2)$$

Þar sem c_b og ρ_b tákna eðlisvarma og eðlismassa bergs, samskonar tákni eru fyrir vatn, og ϕ táknar grop bergsins. Til einföldunar er gert ráð fyrir að eðliseiginleikarnir haldist fastir yfir skilgreind dýptarbil. Við mat á varmaforða er varmi skilgreinds svæðis fundinn með því að heilda hitastigið yfir dýptarbilin skv. jöfnu (1) og margfalda með flatarmáli svæðisins. Aðferðinni eru gerð góð skil í skýrslu Gunnars Þorgilssonar og Sæunnar Halldórsdóttur (2008). Aðferðafræðin er að öllu leyti sambærileg við þá sem notast var við 1985, en bæði hitaástand jarðskorunnar og mat á eðliseiginleikum bergs og vatns hafa þó verið endurskoðað.

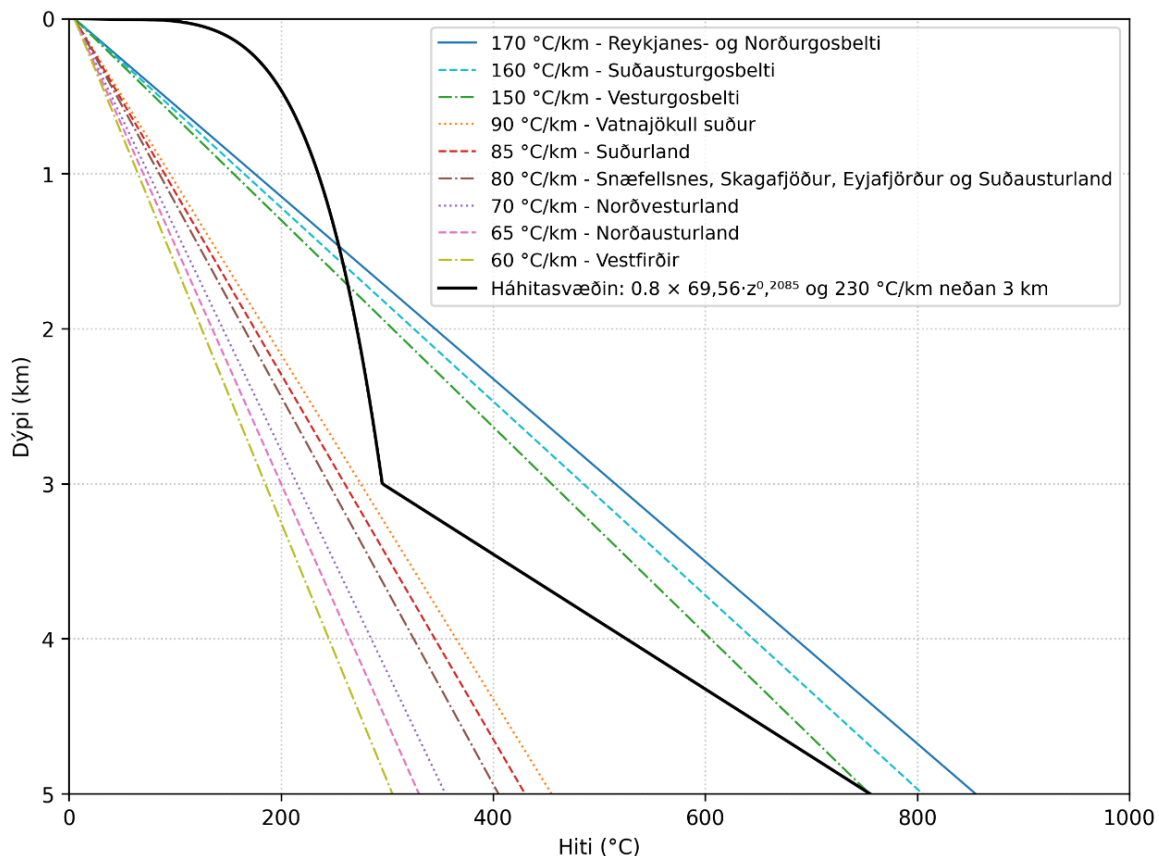
Við mat á varmaforða er sama svæðisskipting notuð og hér fyrir framan. Gert er ráð fyrir að hitastig breytist línulega með dýpi í samræmi við þann hitastigul sem gefinn er upp í dálkinum lengst til hægri í töflu 6 og að hitastig við yfirborð sé 5°C. Jarðskorpunni er skipt í tvö dýptarbil. Það efra þar sem meðalgrop bergsins er 5% og varmarýmd er fundin út frá eiginleikum bergs og vatns (jafna 2), nær niður á 3 km dýpi. Það neðra þar sem þrýstingur er það mikill að holrými þrýstast saman og grop er 0%, er metið út frá eiginleikum bergs eingöngu. Eðlisvarmi og eðlismassi bergsins eru áætlaðir 900 J/(kg°C) og 3.000 kg/m³. Fyrir vatnið eru eðliseiginleikarnir áætlaðir 4.500 J/kg°C og 870 kg/m³ sem jafngildir eiginleikum vatns við u.þ.b. 200°C.

Innan háhitasvæða eru útreikningarnir öðruvísi. Þar er lekt berglaga talin vera meiri en á öðrum svæðum og er það aðalega vegna opinna sprungna sem ýta undir flæði vatns um bergið. Af þessu leiðir að meðalgrop bergsins er hærra. Vegna eldvirkni er tíðni innskota meiri og þau eru öflugir hitagjafar. Samspil öflugra hitagjafa og aukinnar lektar veldur því að hitaferill frá yfirborði niður á 3 km dýpi líkist suðumarksferli vatns og er algengt að ganga út frá því að hitaferill ofan 3 km fylgi eftirfarandi líkingu:

$$T_{háhitasv}(z) = X 69,56 z^{0,2085}. \quad (3)$$

Þarna er X hlutfall af suðumarksferli vatns, þ.e.a.s. ef $X = 1$ er vatnið við suðu yfir allt dýptarbilið, en ef $X < 1$ nær vatnið ekki suðu, en ferillinn hefur sömu lögun. Í útreikningum er gert ráð fyrir að meðalgrop bergs á háhitasvæðum sé 15% og hitaferill sé 80% af suðumarksferli vatns ($X = 0,8$ í jöfnu 3), bæði til að herma breytileika innan hvers jarðhitakerfis og breytileika milli svæða. Jafnframt hermir hlutfallið það að háhitakerfin eru aðeins við suðumark í afmörkuðum hlutum þeirra.

Mynd 15 sýnir hitaástand með dýpi fyrir mismunandi landsvæði, eins og það er áætlað hér, og jafnframt fyrir háhitasvæðin sem staðsett eru innan gosbeltanna (mynd 14 í kafla 3.9) sérstaklega. Hitaástandið liggur til grundvallar útreikningi á heildarvarma jarðskorpunnar innan svæðanna sem ákvarðað er samkvæmt jöfnu 1 með 5°C sem viðmiðunarhita. Innan gosbeltanna nær hitinn 1200°C á 7-8 km dýpi við þær aðstæður sem hér er miðað við, en við þann hita eru líkur á að berg sé að öllu leiti bráðið. Þá bætist við dýptarbil þar sem hitastig er fasti og bætist það við þau tvö efri dýptarbilin (a) 0-3 km þar sem holrými bergsins eru fyllt vatni og varmarýmd er samkvæmt jöfnu 2, (b) neðan 3 km þar sem engin holrými eru og varmarýmd er margfeldi eðliseiginleika bergsins (jafngildir 0% grop í jöfnu 2).



Mynd 15. Hitaástand í efstu 5 km jarðskorðunnar eins og það er áætlað í núverandi jarðhitamati.

Varmaforði jarðskorpu landsins fyrir hvert svæði áætlaður með ofangreindri rúmmálsaðferð, þar sem hitaástand með dýpi er samkvæmt mynd 15, uppgafið í töflu 11. Forðinn er gefinn annars vegar niður á það dýpi sem talið er aðgengilegt með nútíma bortækni (0-5 km) og sem heildarvarmi í jarðskorðunni (0-10 km). Varmaforði gosbeltanna er tekinn sérstaklega saman í töflu 12, enda reiknaður á annan hátt en forðinn utan þeirra. Samkvæmt núverandi jarðhitamati er rétt líðlega 50% alls varmaforða landsins bundinn í berggrunni gosbeltanna. Heildarvarmi gosbeltanna er áætlaður $0,73 \times 10^{24}$ J (0,73 milljón EJ) og þar af eru $0,20 \times 10^{24}$ J (0,20 milljón EJ) í efstu 5 km.

Tafla 11. Varmaforði berggrunns landsins.

Svæði	Flatarmál (km ²)	Hitaástand	0-5 km (J)	0-10 km (J)
Suðvesturland	4.237	Hækkar línulega með dýpi	1,44E+22	5,73E+22
Snæfellsnes	2.719	Hækkar línulega með dýpi	7,40E+21	2,94E+22
Vestfirðir	9.230	Hækkar línulega með dýpi	1,88E+22	7,49E+22
Norðvesturland	4.100	Hækkar línulega með dýpi	9,76E+21	3,88E+22
Skagafjörður	7.442	Hækkar línulega með dýpi	2,03E+22	8,05E+22
Eyjafjörður	8.412	Hækkar línulega með dýpi	2,29E+22	9,10E+22
Norðausturland	14.423	Hækkar línulega með dýpi	3,19E+22	1,27E+23
Vatnajökull suður	7.398	Hækkar línulega með dýpi	2,27E+22	9,01E+22
Suðausturland	2.851	Hækkar línulega með dýpi	7,76E+21	3,09E+22
Suðurland	6.373	Hækkar línulega með dýpi	1,84E+22	7,33E+22
Reykjanesgosbelti	926	Hækkar línulega með dýpi utan háhitasvæða en fylgir jöfnu 3 innan þeirra	5,75E+21	2,02E+22
Vesturgosbelti	11.365	Hækkar línulega með dýpi utan háhitasvæða en fylgir jöfnu 3 innan þeirra	5,96E+22	2,23E+23
Suðausturgosbelti	5.488	Hækkar línulega með dýpi utan háhitasvæða en fylgir jöfnu 3 innan þeirra	3,12E+22	1,13E+23
Norðurgosbelti	17.755	Hækkar línulega með dýpi utan háhitasvæða en fylgir jöfnu 3 innan þeirra	1,05E+23	3,76E+23
Samtals:			3,76E+23	1,43E+24

Tafla 12. Varmaforði gosbeltanna.

Gosbelti	Flatarmál (km ²)	Hitaástand með dýpi	0-5 km (J)	0-10 km (J)
Reykjanesgosbelti	926			
Utan háhitasvæða	808	Fylgir línulegum ferli og síðan fasti, 1200°C, neðan 7,0 km	4,75E+21	1,70E+22
Reykjanes, Svartsengi, Krýsuvík, Brennisteinsfjöll	118	Jafna 3 ofan 3 km, síðan línulegt og loks 1200°C neðan 6,9 km	1,01E+21	3,20E+21
Vesturgosbelti	11.365			
Utan háhitasvæða	11.172	Fylgir línulegum ferli og síðan fasti, 1200°C, neðan 8,0 km	5,79E+22	2,18E+23
Hengill, Geysir, Kerlingarfjöll, Hveravellir	193	Jafna 3 ofan 3 km, síðan línulegt og loks 1200°C neðan 6,9 km	1,64E+21	5,23E+21
Suðausturgosbelti	5.488			
Utan háhitasvæða	5.219	Fylgir línulegum ferli og síðan fasti, 1200°C, neðan 7,5 km	2,89E+22	1,06E+23
Torfajökull	269	Jafna 3 ofan 3 km, síðan línulegt og loks 1200°C neðan 6,9 km	2,29E+21	7,29E+21
Norðurgosbelti	17.755			
Utan háhitasvæða	17.404	Fylgir línulegum ferli og síðan fasti, 1200°C, neðan 7,0 km	1,02E+23	3,67E+23
Grímsvötn, Hágöngur, Vonarskarð, Kverkfjöll, Askja, Hróúthálsar, Fremrinámar, Krafla-Námafjall, Gjástykki, Þeistareykir	351	Jafna 3 ofan 3 km, síðan línulegt og loks 1200°C neðan 6,9 km	2,99E+21	9,51E+21
Samtals:			2,02E+23	7,33E+23

Heildarvarmaforði skorpu landsins er áætlaður annars vegar $0,38 \times 10^{24}$ J (0,38 milljón EJ) niður á 5 km dýpi og hins vegar $1,4 \times 10^{24}$ J (1,4 milljón EJ) niður á 10 km dýpi. Þetta má bera saman við $0,1 \times 10^{24}$ J (0,1 milljón EJ) og $1,2 \times 10^{24}$ (1,2 milljón EJ) fyrir annars vegar forða niður á 3 km og hins vegar forða niður á 10 km dýpi í fyrra mati frá 1985. Munurinn skýrist fyrst og fremst af því að nú er gert ráð fyrir hærri hita innan gosbeltanna en áður var gert, þó enn sé um mjög ónákvæmt mat að ræða vegna takmarkaðra gagna. Þegar bornir eru saman tveir síðustu dálkarnir í töflu 6 sést að stigull innan svæðis hækkar í flestum tilfellum. Á þetta sérstaklega við í gosbeltunum utan háhitasvæðanna en þar er hækkunin umtalsverð. Þetta skýrir um 8% aukningu á forða utan gosbeltanna og um 30% aukningu innan þeirra, eða 18% fyrir allt landið.

Hér hefur storknunarvarmi ekki verið tekinn með í útreikningana eins og gert var í jarðvarmamatinu frá 1985, þ.e. bæta við viðbótarvarmanum sem er í bráðnu bergi djúpt í jarðskorpu landsins. Á grundvelli sömu forsenda og 1985 er hægt að gera ráð fyrir að berg sem náð hefur 800°C sé að hlutatil bráðið og gefi frá sér varma þegar það storknar í jarðskorpunni. Við núverandi hitalíkan (mynd 15) má í grófum dráttum álykta að berg innan gosbeltisins hafi náð því hitastigi á 5 km dýpi. Með því að áætla að varmi sem bráðið berg gefur frá sér við storknun sé $9,0 \times 10^{17}$ J/km³, fæst að storknunarvarminn gæti verið af stærðargráðunni $0,1\text{--}0,2 \times 10^{24}$ J. Í núverandi jarðvarmamati er þessum þætti sleppt, enda er stærð hans innan óvissumarka varmaforðamatsins auk þess sem hann er háður mikilli óvissu og einfaldlega efni í annað rannsóknarverkefni.

Í jarðvarmamatinu 1985 var lagt mat á hve stór hluti áætlaðs varmaforða jarðskorpunnar væri tæknilega nýtanlegur og niðurstöðurnar birtar í nokkrum ítarlegum töflum (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Þessu er sleppt núna enda hafa niðurstöðurnar ekkert hagnýtt gildi því tæknin til þess að nýta varmaforðann í stórum stíl er enn ekki tiltæk, þó vonir séu bundnar við það að EGS-tæknin muni nýtast til þess í framtíðinni (sjá undirkafla 2.4). En bæði þá og nú sýna niðurstöðurnar fyrst og fremst hve varmaforðinn í jarðskorpu landsins er gríðarlegur og að ef hægt verður að nýta lítið brotabrot hans með EGS-tækninni mun það uppfylla orkuþörf Íslendinga um ókomnar aldir (sjá niðurstöður einfaldra útreikninga í kafla 4).

4. Helstu niðurstöður

Jarðvarmamat fyrir Ísland, sem síðast var unnið heildstætt og ítarlega árið 1985, hefur nú verið uppfært. Það er aðallega á grunni mjög yfirgripsmikilla upplýsinga sem safnað hefur verið síðustu 40 árin, einkum um afköst jarðhitaborholna (>1400 holur) og hitastigul rannsóknarholna (u.þ.b. 1800 holur) auk gagna um nýtingu jarðhitasvæða (>230 hitaveitur). Segja má að mat þessara þátta, sem líta má á sem manngerða orkustrauma, bætist nú við jarðvarmamátið, til viðbótar við náttúrulega orkustrauma (varmaleiðing og varmastraumur lauga og hvera). Jafnframt hefur jarðvísindaleg þekking á jarðskorpu Íslands aukist mikið. Að öðru leyti fylgir núverandi mat aðferðafræði matsins frá 1985 þó tölur um flesta þætti séu uppfærðar á grundvelli nýjustu upplýsinga, eins og lýst er ítarlega í inngangi skýrslunnar og í undirkafla 3.1.

Megináhersla núverandi mats snýr að ferns konar orkuflæði eða orkustraumum, sem eru (takmarkanir útlistaðar stuttlega í sviga):

1. Varmaleiðing um jarðskorpu landsins (hitastigulsholur mjög misdreifðar um landið, vantar algjörlega víða).
2. Varmaflæði um laugar og hverir í ótrufluðu, náttúrulegu ástandi (áætlað/mælt fyrir stóran hluta landsins, þó ekki fyrir háhitasvæði nema í litlum mæli – því áætlað óbeint).
3. Áætluð skammtímaafköst flestra jarðhitaholna landsins (gögn um háhitaholur hafa þó aðeins verið tekin saman í takmörkuðum mæli).
4. Jarðhitavinnsla á landinu 2023 (gögn fyrir töluverðan fjölda lítilla einkaveitna þó takmörkuð).

Fyrstu tveir þættirnir lýsa náttúrulegu og ótrufluðu varmaflæði meðan seinni tveir eru mannanna verk. Jafnframt er varmaforðinn í jarðskorpunni metinn niður á bæði 5 og 10 km dýpi í núverandi mati, til þess að matið nái yfir báða þættina í tvíþættu eðli jarðhitas, en meiri áhersla var lögð á þann þátt 1985.

Tölulegar niðurstöður fyrir ofangreint eru að mestu birtar í hinum ýmsu töflum í kafla 3 auk nokkurra korta. Þær eru svo dregnar saman í töflu 13 hér fyrir neðan auk þess að vera bornar saman við sömu þætti í matinu frá 1985. Taflan sýnir reiknað varmaflæði mismunandi þátta (varmastrauma) og áætlaðan varmaforða í skorpunni, fyrir annars vegar gosbeltin og hins vegar svæðin utan þeirra.

Helstu niðurstöðurnar eru eftirfarandi:

- Náttúrulegt varmaflæði er samanlagt áætlað um 37.000 MW_{th} fyrir Ísland allt, sem er gríðarmikið flæði. Bæði í samanburði við varmaflæði jarðarinnar almennt og í samanburði við orkunotkun Íslendinga.

- Meðalflæði um óvirk svæði jarðar af sömu stærð og Ísland má til samanburðar áætla að sé rétt undir 8.000 MW_{th}.¹¹
- Önnur viðmiðun er jarðhitaorkunotkun Íslendinga, sem áætla má að svari nú til u.þ.b. 5.500 MW_{th}.
- Varmaleiðing innan gosbeltis landsins er nú metin mun meiri en í eldra mati frá 1985. Höfundar þessarar skýrslu telja hana hafa verið verulega vanmetna þá, eins og fjallað er um í undirkafla 3.8. Þó er um mjög grófa áætlun að ræða, því mælingar á hitastigli innan gosbeltanna eru mjög takmarkaðar (sjá kafla 3.2).
- Varmaflæði um háhitasvæðin með vatni og gufu er nú metið tæplega 18.000 MW_{th}, sem er sambærilegt matinu frá 1985. Eins og lögð er áhersla á framfarir í skýrslunni er hér líka um mjög grófa áætlun að ræða. Jafnframt er þessi þáttur ekki metinn fyrir lítið þekkt svæði undir jöklum, að undanskildum Grímsvötnum og að einhverju leyti Kverkfjöllum.
- Varmaflæðið með vatni og gufu um háhitasvæðin er metið um 30 sinnum meira en varmaflæði lauga í öðrum hlutum landsins. Það síðarnefnda er nú metið lítið eitt meira en var gert 1985, byggt á ítarlegri gögnum.
- Uppfært mat á samanlagðri afkastagetu allra háhitasvæða landsins gefur bilið 2000-7000 MW raforku (MW_e). Þetta má bera saman við samanlagt meðalafl þeirra sjö svæða sem nú eru nýtt (Hengillinn talinn eitt svæði), sem var 690 MW_e árið 2023 (uppsett afl 790 MW_e). Heildarvarmafl (hrávarmi) þeirra var auk þess 4500 MW sama ár.
- Varmaforðinn í skorpu landsins er jafnframt metinn vera gríðarmikill, eða um 1,7 milljón EJ niður á 10 km dýpi. Til samanburðar má áætla að heildarorkunotkun (frumorka) Íslendinga 1940 – 2022 (í 83 ár) hafi verið um 8 EJ, sem jafngildir aðeins 0,0007% forðans.
- Núverandi mat varmaforðans er um 18% hærra en 1985, einkum vegna hærra mats fyrir gosbeltin.
- Uppfært jarðhitamat sýnir að á Íslandi eru engin „köld svæði“.
- Skýr fylgni er á milli meðalvinnslu hitaveitna og varmaafis lauga í mismunandi hlutum landsins. Vestfirðir skera sig þó úr því nýtingin er þar mun minni en afl lauga bendir til að ætti að vera mögulegt.
- Lausleg skoðun aðgengilegra niðurstaðna frá 15 lághitasvæðum sem eru nýtt fyrir hitaveitur sýnir að meðalvinnsla þeirra 2023 nær um 65% vinnslugetu þeirra skv. líkanreikningum. Þetta gefur vísbendingu, en úrtakið telst ekki nægilega marktækt til að yfirfæra niðurstöðuna á allt landið.

Kortið á mynd 16 sýnir myndrænt eina meginniðurstöðu matsins, þ.e. náttúrulega varmaflæðið, áætlaða varmaleiðingu og varmaburð með vatni og gufu. Kortið sýnir áætlaðan þéttleika flæðisins (W/m²) frekar en heildarflæði hvers landshluta, enda eru landshlutarnir mjög misstórir að flatarmáli. Segja má að ekkert komi á óvart á þessu korti þar sem lang öflugasta flæðið er um

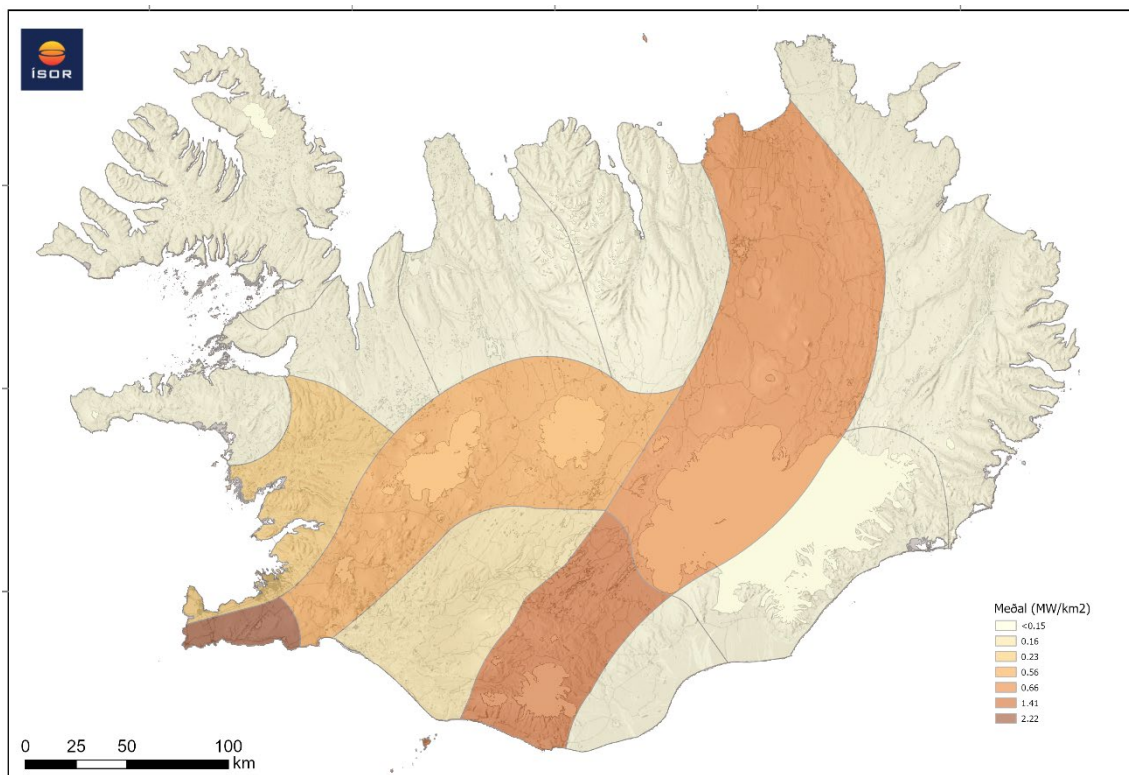
¹¹ Byggt á mati höfunda á vegnu meðaltali meginlanda- og úthafsskorpu skv. ýmsum nýlegum heimildum, 0,075 W/m².

gosbeltin. Í raun er flæðið um gosbeltin þó mjög misdreift, langmest um háhitasvæðin eins og kemur fram í undirkafla 3.10. Háhitasvæðin virka þannig eins og e.k. strompar fyrir gríðaröflugt varmaflæði gosbeltanna.

Tafla 13. Helstu niðurstöður uppfærðs jarðvarmamats fyrir Ísland samandregnar ásamt samanburði við matið frá 1985. Endurspeglar tvíþætt eðli jarðhitans, þ.e. varmaflæði og varmaforða.

Yfirþáttur	Hluti lands	Undirþáttur	1985	2025
Varmaflæði (MWth)	Gosbeltið	Varmaleiðing	3.300	9.800
		Vatn og gufa	17.000	17.900
		Afköst borholna	- ¹⁾	- ¹⁾
		Nýting	- ¹⁾	4.540 ²⁾
	Utan gosbeltis	Varmaleiðing	8.900	8.700
		Vatn og gufa	500	640
		Afköst borholna	1.400	2.680
		Nýting	- ¹⁾	960 ²⁾
Varmaforði (EJ ⁴⁾)	Gosbeltið	0 – 3 km dýpi	34.400	- ³⁾
		0 – 5 km	- ¹⁾	202.000
		0 – 10 km	565.000	733.000
	Utan gosbeltis	0 – 3 km dýpi	62.400	- ³⁾
		0 – 5 km	- ¹⁾	174.000
		0 – 10 km	644.000	693.000

1) Ekki metið eða upplýsingar ekki tiltækar
2) Tala fyrir árið 2023
3) Ekki metið fyrir árið 2025
4) EJ = 10¹⁸ J



Mynd 16. Áætlað náttúrulegt varmaflæði (MW/km^2), þ.e. varmaleiðing og flæði lauga og háhitasvæða, um mismunandi svæði landsins.

Náttúrulega varmaflæðið (varmaleiðing og flæði með vatni og gufu) um landið í heild hefur verið skoðað nánar og borið saman við varmaflæðið um óvirk svæði jarðarinnar almennt. Eins og kemur fram hér að ofan þá er heildarvarmaflæðið um Ísland nú áætlað um $37.000 \text{ MW}_{\text{th}}$ en meðalvarmaflæði um óvirk svæði jarðar sambærileg að stærð er um $8.000 \text{ MW}_{\text{th}}$. Umfram varmaflæðið reiknast því um $29.000 \text{ MW}_{\text{th}}$.

Þetta umframflæði á rót sína í kvikuflæði upp í jarðskorpu landsins, neðan úr möttli jarðar og þeim hluta kvikunnar sem verður eftir neðanjarðar, að mestu sem gríðarlegir berggangar sem myndast í því rúmmáli neðanjarðar sem verður til vegna gliðunar landsins. Gunnar Böðvarsson (1982) áætlaði þetta út frá gliðunarhraða gosbeltanna ($2 \text{ cm}/\text{ár}$) og orkuinnihaldi kvikunnar ásamt því að reikna með 300 km löngu gosbelti og fékk um $9.000 \text{ MW}_{\text{th}}$. Í jarðvarmamatinu 1985 var þetta endurreiknað fyrir 500 km gosbelti og var útkoman þá $13.000 \text{ MW}_{\text{th}}$ (Guðmundur Pálmason o.fl., 1985). Með því að byggja á grunnforsendum Gunnars, en reikna með 600 km gosbelti til að taka tillit til kvikuflæðis upp í allt gosbeltið auk Snæfellsness, Örfajökuls og fleiri svæða utan hinna eiginlegu gosbelta fæst talan $18.000 \text{ MW}_{\text{th}}$.

Þar með eru um $11.000 \text{ MW}_{\text{th}}$ af áætluðu umframvarmaflæði enn óútskýrð. Hluti þess er sennilega tengdur ýmsum kvikuinnskotum og -hólfum öðrum en kvikugöngum gliðunarbeltanna, eins og í hinum ýmsu megineldstöðvum. Svo má eflaust skýra hluta þess flæðis með kvikuflæði tengdu heita reitnum sem

talinn er vera undir Íslandi, beint og óbeint. En jafnframt er rétt að hafa í huga óvissuna sem er tengd áætluðu varmaflæði um gosbeltin og háhitasvæðin. Það er mögulegt að í núverandi mati hafi þetta verið að einhverju leyti ofmetið.

Það er ljóst af fyrirliggjandi niðurstöðum að jarðhitaauðlind Íslands er mjög öflug og sennilega er leitun að sambærilegum svæðum á jörðinni. Á Íslandi eru jarðfræðilegar aðstæður ólíkar flestum öðrum í heiminum þar sem fara saman heitur reitur og flekaskil en önnur svæði sem búa yfir öflugum jarðhita eru t.d. sigdalur A-Afríku, Nýja-Sjáland og Indónesía. Jarðhitaauðlindin á Íslandi er jafnvel enn öflugri en áður hefur verið ályktað, þó það sé alltaf háð nokkurri óvissu vegna skorts á gögnum og rannsóknum. Nefna má þrennt því til staðfestingar:

- Um 25% náttúrulega varmaflæðisins myndu standa undir allri frumorkunotkun Íslendinga, eins og hún er í dag, um alla framtíð.
- Um 1% varmaforða jarðskorpu landsins niður á 5 km dýpi myndi standa undir allri frumorkunotkun Íslendinga, eins og hún er í dag, í u.þ.b. 15.000 ár.
- Um 1% varmaforða jarðskorpu landsins niður á 10 km dýpi myndi standa undir allri frumorkunotkun Íslendinga, eins og hún er í dag, í u.þ.b. 57.000 ár.

4.1 Framtíð jarðhitanýtingar

Niðurstöður núverandi jarðvarmamats gefa ástæðu til bjartsýni varðandi framtíð jarðhitanýtingar á Íslandi. Forsendur þess að það gangi eftir eru áframhaldandi öflug efling þekkingar og tækniframfara auk sjálfbærrar nýtingar auðlindarinnar. Því er ástæða til að velta fyrir sér framtíðinni hvað þessa þætti varðar. Heildstætt jarðvarmamat fyrir Ísland eins og það sem hér er kynnt, getur einmitt orðið mikilvægur grunnur og hvatning til þeirrar nýsköpunar og tæknilegu framþróunar, sem nauðsynleg er fyrir framtíðarþróun jarðhitanýtingar.

Jarðhitinn er sívaxandi orkugjafi á heimsvísu og tækniframfarir skapa nýjar leiðir til að nýta þessa hreinu og endurnýjanlegu orku enn betur. Á heimsvísu eru nýsköpun og rannsóknir í jarðhita leiddar áfram af rannsóknar- og fjárfestingarsjóðum, ásamt núverandi orkufyrirtækjum, en í sífellt meiri mæli eru olíu- og gasfyrirtæki að færa sig yfir í jarðhita og leita nýrra lausna á grundvelli sérþekkingar þeirra. Með áframhaldandi nýsköpun mun jarðhiti gegna lykilhlutverki í grænum orkuskiptum á heimsvísu. Fjölpættari nýting auðlindarinnar, bæði hvað varðar það hvernig varminn er sóttur og hvernig hann er nýttur á yfirborði, ásamt bættri nýtni og háþróaðri djúpbörðun, til viðbótar við samþættingu við aðrar hreina orkugjafa, mun tryggja að jarðhitinn verði mikilvægur þáttur í sjálfbæru samfélagi framtíðarinnar. Til að tryggja áframhaldandi þróun á nýtingu jarðhita á sjálfbæran og tryggan hátt þarf þó að takast á við fjölda áskorana umfram þær tæknilegu, s.s. umhverfis- og leyfisferli auk almenningsálits.

Hér á eftir verður farið yfir nokkra helstu flokka og áherslur í þróun jarðhitanýtingar, bæði á Íslandi og á heimsvísu, m.a. í ljósi niðurstaðna jarðvarmamatsins. Mikilvægt er fyrir jarðhitapekkingu og nýsköpun við nýtingu jarðhita á Íslandi að fylgjast með og taka virkan þátt í þeirri þróun og helst að leiða hana að einhverju leyti.

a) Grunnrannsóknir og stefna stjórnvalda

Núverandi vinnslutækni jarðhita er takmörkuð við það að nýta virk jarðhitakerfi, en ekki auðlindina almennt. Þannig er hefðbundinni jarðhitavinnslu á Íslandi takmörk sett hvað mikinn vöxt varðar. Þetta kom m.a. vel fram í Hitaveituskýrslu þar sem skoðuð var staða hitaveitna á Íslandi og möguleikar þeirra til að bregðast við aukinni eftirspurn á heitu vatni (Steinunn Hauksdóttir o.fl., 2023). Gjarnan er rætt um nýjar rannsóknaraðferðir, bættar úrvinnsluaðferðir, aukna tæknipróun og að efla nýsköpun þegar skoðað er hvernig núverandi jarðhitavinnsla geti haldið áfram um ókomnar aldir auk mögulegrar uppgötvunar á s.k. „földum“ jarðhitasvæðum, ekki síst þar sem möguleikar til vaxtar virðast gríðarlegir. Þá er vert að nefna að hagnýtar grunnrannsóknir á sviði jarðhita hafa mikið þjóðhagslegt gildi og eru forsenda þess að Ísland verði áfram meðal fremstu þjóða í nýtingu jarðhita.

Það yfirlit sem uppfærða jarðvarmamatið fyrir Ísland gefur er góður grundvöllur undir stefnu og aðgerðaráætlun stjórnvalda. Sérstaklega má nefna að í jarðvarmamatinu kemur skýrt fram að gosbeltin utan háhitasvæða eru stór varmaauðlind, sem þó er að mestu ókönnuð, hvort sem er með yfirborðsrannsóknnum (t.d. jarðeðlisfræðilegum) eða rannsóknarborunum. Þá má nefna nýtingu varmaforða jarðskorpunnar, utan jarðhitakerfa, niður á nokkurra km dýpi með EGS tækni (e. *enhanced/engineered geothermal systems*), sem virðist færast nær því að verða hagkvæmur nýtingarmöguleiki á varmaorku í jarðskorpunni, og fjallað var um í kafla 2 fyrr í skýrslunni.

Aðgerðaráætlun um jarðhitarannsóknir og -nýtingu þarf að fela í sér frekari grunnrannsóknir og öflun gagna um auðlindina og nýtingu hennar en það er ekki síður aðkallandi að ná utan um og fá aðgang að gögnum sem þegar hefur verið safnað. Mikilvægt er fyrir sjálfbæra jarðhitavinnslu framtíðarinnar að aðgengi að gögnum, þekkingu og reynslu orkufyrirtækja sé almennt opið en núverandi jarðvarmamat sem hér er kynnt, er að nokkru leyti takmarkað vegna skorts á aðgengi að gögnum. Í þessari skýrslu kemur skýrt fram hvar stærstu þekkingargötin eru, hvort sem um er að ræða einfalda samantekt tiltækra gagna, samantekt gagna sem ekki hafa reynst aðgengileg eða gagnaöflun þar sem gögn vantar.

Notkun spunagreindar (e. *artificial intelligence*) við úrvinnslu á gögnum sem varða jarðhitaleit og jarðhitanýtingu er nú á frumstigi, en þegar eru nokkur dæmi um ágætan árangur rannsóknarverkefna sem þróa slíkar lausnir (t.d. Holmes, R.C. og Fournier, A., 2022; AlGaier M. o.fl., 2024). Eftir sem áður verða gögnin, gæði og samræming þeirra, alltaf lykilatriði en viðbúið er að þróunin verði ekki síður hröð á þessum vettvangi en öðrum sem nýta spunagreind eða vélánám (e. *machine learning*).

b) Djúpborun og háhitasvæði

Þegar horft er til hinna mörgu þekktu háhitasvæða á Íslandi og orkunnar sem í þeim býr, án tillits til forsendna sem þarf að uppfylla til að réttlæta nýtingu þeirra, þá gætu þau verið mjög öflugir orkugjafar. Ekki síst ef tekst að nýta djúpar rætur þeirra, þar sem hiti er hár og orkuinnihald vökva mjög mikið (súperkrítískur vökvi). Einnig gæti djúpborun (>5 km) á öðrum svæðum landsins skilað miklu, sér í lagi innan gosbelta utan háhitasvæðanna, og þá að undangengnum viðeigandi rannsóknnum. Niðurstöður núverandi jarðvarmamats sýna að liðlega helmingur varmaforða jarð-skorpunnar er væntanlega innan gosbeltanna. Nýjar upplýsingar gefa til kynna að hitastigull innan gosbeltanna sé hærri en áður var talið. Því er líklegt að súperkrítísku ástandi sé náð víðsvegar innan gosbeltanna og alls ekki bara í rótum háhitakerfanna. Ennþá eru að koma í ljós áður óþekkt háhitasvæði sem hafa verið hulin jökli svo það er ljóst að margt sem varðar jarðhitaauðlindina á Íslandi á enn eftir að rannsaka.

Samanburður gagna um afl orkuvera á háhitasvæðum við núverandi mat á afkastagetu er erfiður. Til að mynda er í flestum tilfellum aðeins hluti

heildarsvæðisins sem skilgreindur hefur verið út frá viðnámsmælingum í nýtingu. Að auki er núverandi mat byggt á einföldum rúmmálsreikningum en líkanreikningar út frá nákvæmum vinnslugögnum eru betur til þess fallnir að sýna fram á raunverulega afkastagetu. Þó þarf að gera ráð fyrir því að bæði geta afkastageta þeirra og reiknilíkön, sem spá um slíkt, tekið breytingum með auknum rannsóknum og tækniframförum. Þar má nefna láréttar boranir (e. *horizontal drilling*), SHG djúpbörur (e. *super hot geothermal*) eða EGS tækni, sem geta „stækkað“ tæknilega nýtanlegan jarðhita á jarðhitasvæðum í nýtingu. Tækniþekking á sviði bortækni í jarðhita er að mestu fengin úr olíuiðnaðinum, en aðrar áskoranir eru við jarðhitaboranir sem tengjast aðallega auknu dýpi og hita. Nokkrar helstu nýjungar á sviði bortækni eru t.d. púlsafls-börur (e. *High-pulsed-power drilling*), varmaáfalls-börur (e. *Thermal-shock drilling*), laser-börur (e. *Millimetre-wave laser drilling*), háþrýstivatns-börur (e. *High-pressure water jet-assisted drilling*), og plasma-börur (e. *Plasma-based drilling*) (IEA, 2024).

Miklar áskoranir eru tengdar börur og viðhaldi borholna vegna hás hita, þrýstings og efnasamsetningar vökva og gass sem hafa áhrif á burðarþol og veldur efnaáraun á mannvirknið (e. *structural integrity and chemical attack*) og þá eru fódðingar háhitaholna mikilvægur þáttur. Gerð hefur verið úttekt á því hverjar helstu ástæður skemmda á háhitaholum eru og þar eru skemmdir á fódðingum langalgengasta orsökina (Björn M. Sveinbjörnsson ofl., 2015). ÍSOR á gilt einkaleyfi á hönnun sérstakra s.k. skriðtengja (e. *flexible couplings*) sem tengja fódurrör úr stáli innan háhitaholna og hafa eiginleika sem takmarka tjón sem verður vegna hitabreytinga við rekstur vinnsluholna (Gunnar S. Kaldal ofl., 2024).

Á sama grundvelli er einnig unnið að nýsköpun í gerð mælitækja sem standast hærri hita og aukinn þrýsting og hafa íslensk orkufyrirtæki og ÍSOR tekið þátt í alþjóðlegum rannsóknarverkefnum sem miða að því.

c) Sjálfbær nýting virkra lághitasvæða

Við áframhaldandi þróun á nýtingu hefðbundins jarðhita á lághitasvæðum um allt land, sem flest eru nýtt til hitaveitu, er mikilvægt að bæta bæði stýringu nýtingarinnar og orkunýtingu vatns og gufu á yfirborði. Þegar vinnsla er hafin úr jarðhitasvæði þá er mat á afköstum jarðhitakerfa og eftirlit með viðbrögðum þeirra við vinnslu einn veigamesti þátturinn í að halda henni sjálfbærri.

Horft er til þess að nýta spunagreind og vélanám við líkanreikninga á sama tíma og stöðugt er verið að þróa frekar hugbúnað sem notaður er í dag við slíka reikninga. Dæmi um slíkan hugbúnað eru innlend forrit eins og LUMPFIT, sem eru í stöðugri þróun (sjá yfirlit Sæunnar Halldórsdóttur o.fl., 2025) til líkanreikninga og nýtast sérstaklega vel til að meta afkastagetu lághitasvæða og hvernig best sé að haga jarðhitavinnslu til framtíðar, og erlendur hugbúnaður eins og TOUGH2 sem nýtist til fjölþættari og flóknari líkanreikninga (Guðni Axelsson o.fl., 2006).

Niðurdæling jarðhitavökva að lokinni orkuframleiðslu, er lykilatriði í sjálfbærri jarðhitanýtingu. Henni er þó minna beitt á Íslandi en víða annars staðar í heiminum og einna minnst á lághitasvæðum. Það að samarlögð afköst tiltækra borholna eru verulega meiri en núverandi vinnsla, skv. núverandi jarðvarmamati, vísar til þess að auka megi afkastagetu jarðhitakerfa umtalsvert með niðurdælingu. Það kallar eftur á frekari rannsóknir og boranir í flestum tilfellum.

Mikilvægur þáttur við sjálfbæra nýtingu er að hafa fjölnýtingu að leiðarljósi. Nýting á tilteknu svæði getur falist í húshitun, kælingu, matvælaframleiðslu, rafhlöðugeymslu og ýmsu öðru sem nýsköpun og reynsla mun leiða í ljós.

d) Varmadælur og nýting utan virkra jarðhitasvæða

Í núverandi jarðvarmamati kemur fram að ekkert svæði á Íslandi er raunverulega kalt, fræðilega má alls staðar sækja varma í jarðskorpu landsins. Það er eingöngu vinnslutæknina sem hentar hverju svæði, sem þarf að skoða. Varmaflæði með varmaleiðingu og varmaforða má svo nýta með grunnum varmadælum (e. *ground source heat pumps*), sem öfugt við EGS-tæknina er nú þegar bæði þróuð og í mikilli notkun á norðurhveli jarðar. Nýting þeirra til húshitunar hefur vaxið mikið undanfarin ár á norðlægum slóðum, en vægi þeirra er lítið hér á landi enn sem komið er. Þó er verið að skoða möguleika á að nýta slíka tækni á svæðum sem áður voru talin „köld“, t.d. á Vestfjörðum, þar sem hitastig vökva sem fannst við jarðhitaleit á árum áður var ekki nógu hátt fyrir hefðbundna hitaveitu, en er vel nýtilegt með varmadælutækni.

e) Jarðhiti á hafsbotni

Þó núverandi jarðhitamat nái ekki út fyrir landsteinana, er nýting jarðhita á hafsbotni möguleg framtíðarsýn, einkum nýting hinna öflugu jarðhitakerfa á úthafshryggjum. Þekking á jarðfræði og umhverfi hafsbotnsins er forsenda skynsamlegrar auðlindanýtingar, en leit, rannsóknir og nýting auðlinda hafsbotnsins innan íslenskrar lögsögu er skammt á veg komin. Nokkur jarðhitasvæði við rekhryggi suðvestan og norðaustan við landið eru þekkt og nýlega gaf Orkustofnun út fyrstu leyfin til jarðhitaleitar og rannsókna á hafsbotni. Fyrirkomulag, ákvæði og viðmið vegna jarðhitarannsókna á hafsbotni styðst að nokkru við auðlindalög, hafsbotnslög og kolvetnislög, en ljóst er að þörf er á að aðlag regluverk að nýju viðfangsefni. Ýmsar tæknilegar hindranir eru fyrir nýtingu jarðhita á hafsbotni í dag, en auk þeirra eru fjármögnun og leyfismál stórir þættir sem þarf að yfirstíga fyrir frekari þróun í jarðhitaleit og -vinnslu á hafsbotni. Nokkrar þjóðir eru að skoða möguleika til að nýta jarðhita á hafsbotni, s.s. Ítalía, Portúgal, Bandaríkin og Japan, en olíuvinnsla og förgun á CO₂ er áfram aðaláhersla flestra í auðlindanýtingu hafsbotns.

5. Heimildir

- AlGaïar, M., Hossain, M., Petrovski, A., Lashin, A., og Faisal, N. (2024). Applications of artificial intelligence in geothermal resource exploration: a review. *Deep Underground Science Engineering*. 2024; 3(3): s. 269-285. [doi:10.1002/dug2.12122](https://doi.org/10.1002/dug2.12122).
- Anette K. Mortensen, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Freysteinn Sigmundsson, Guðni Axelsson, Halldór Ármannsson, Héðinn Björnsson, Kristján Ágústsson, Kristján Sæmundsson, Magnús Ólafsson, Ragna Karlsdóttir, Sæunn Halldórsdóttir og Trausti Hauksson (2009). Jarðhitakerfið í Kröflu. Samantekt rannsókna á jarðhitakerfinu og endurskoðað hugmyndalíkan. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2009/057, 208 s.
- Arnar M. Vilhjálmsson og Ólafur G. Flóvenz (2017). Geothermal implications from a resistivity survey in the volcanic rift zone of NE-Iceland and comparison with seismic data. Prepared for GEORG, ÍSOR-2017/065, 48 s.
- Axel Björnsson, Guðni Axelsson og Ólafur G. Flóvenz (1990). Uppruni hvera og lauga á Íslandi. Náttúrufræðingurinn 60 (1), s. 15-38.
- Axel Björnsson (2008). Temperature of the Icelandic crust: Inferred from electrical conductivity, temperature surface gradient, and maximum depth of earthquakes. *Tectonophysics*, 447 (2008), s. 136-141.
- Ásgrímur Guðmundsson, Bjarni Gautason, Christian Lacasse, Guðni Axelsson, Gunnar Þorgilsson, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Kristján Sæmundsson, Ragna Karlsdóttir, Snorri Páll Kjaran, Sveinn Óli Pálmarsson, Sæunn Halldórsdóttir og Þorsteinn Egilson (2008). Hugmyndalíkan jarðhitakerfisins á Þeistareykjum og jarðvarmamat með rúmmálsaðferð. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR 2008/024, 69 s.
- Benedikt Steingrímsson, Einar Gunnlaugsson, Kristján Sæmundsson og Guðni Axelsson (2022). Nature and classification of geothermal resources. Í: T. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*, second ed., vol. 7, Elsevier, Oxford, s. 3-17.
- Björn M. Sveinbjörnsson (2014). Success of hight temperature geothermal wells in Iceland. Prepared for Orkustofnun, ÍSOR-2014/053, 42 s.
- Björn M. Sveinbjörnsson, Gunnar S. Kaldal og Ingólfur Þorbjörnsson (2015). Failure modes in Icelandic High Temperature Geothermal Wells (unpublished work).
- Björn M. Sveinbjörnsson (2016). Medium enthalpy geothermal systems in Iceland. Thermal and electric potential. Prepared for Orkustofnun, ÍSOR-2016/008, 123 s.
- Björn M. Sveinbjörnsson (2018). Drilling success in geothermal fields utilized by major district heating services in Iceland. Prepared for Orkustofnun, ÍSOR-2018/043, 203 s.
- Brynhildur Davíðsdóttir og Guðni Axelsson (2022). Sustainable geothermal development. Í: T. Letcher (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy*, second ed., vol. 7, Elsevier, Oxford, s. 291-314.
- Burns, E.R., Zhang, J., Zhan, H. and Williams, C.F. (2025). Update of the 2008 provisional enhanced geothermal systems (EGS) assessment for the Great

- Basin, USA. Proceedings 50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, California, February 10-12. 2025. SGP-TR-229, 16 s.
- Donaldson, I.G. and Grant, M.A. (1978). An estimate of the resource potential of New Zealand geothermal fields for power generation. *Geothermics*, Vol. 7, Issues 2-4, s. 243-252.
- EU (2024). Geothermal energy European Parliament resolution of 18 January 2024 on geothermal energy (2023/2111(INI)) (C/2024/5738). Document 52024IP0049. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:C_202405738
- EuroGeoSurvey (2025). Advancing geothermal energy in Europe. The strategic role of a Geological Service for Europe. EGS-Position Paper, 7 s. <https://eurogeosurveys.org/advancing-geothermal-energy-in-europe-the-strategic-role-of-a-geological-service-for-europe/>
- Friedman, J.D., Williams, R.S., Sigurður Þórarinnsson og Guðmundur Pálmason (1972). Infrared emission from Kverkfjöll subglacial volcanic and geothermal area, Iceland. *Jökull*, 22 (1. tölubl.), s. 27-43.
- Guðmundur Pálmason, Gunnar V. Johnsen, Helgi Torfason, Kristján Sæmundsson, Karl Ragnars, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gísli Karel Halldórsson (1985). Mat á jarðvarma Íslands. Orkustofnun, OS-85076/JHD-10, 134 s.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson (2001). Um endurnýjanleika jarðhitans. Umfjöllun málstofu Orkustofnunar. Greinargerð Orkustofnunar, 2001-07, 33 s.
- Guðni Axelsson, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson (2006). Hvernig á að meta sjálfbæra vinnslugetu jarðhitasvæða. Orkuþing 2006, Samorka, s. 468-476.
- Guðni Axelsson (2010). Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, Vol. 39, Issue 4, s. 283-291.
- Guðni Axelsson (2024). The future of geothermal energy. *Kaflí 20 í: Living with climate change*, Elsevier, s. 397-422. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18515-1.00009-5>
- Guðni Jóhannesson, Jónas Ketilsson, Jón Ingimarsson, Ragnheiður Ólafsdóttir, Bjarni Pálsson, Hildigunnur Thorsteinsson, Hólmfríður Sigurðardóttir, Kristín Vala Matthíasdóttir, Aðalbjörg Birna Guttormsdóttir og Sigurður Arnalds (2021). Development of GSAP – Geothermal Sustainability Assessment Protocol. Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavík, Iceland, April-October 2021.
- Gunnar Böðvarsson (1956). Natural Heat in Iceland. Paper 197 K/B. Funfte Weltkraftkonferenz, Wien 1956.
- Gunnar Böðvarsson (1961). Physical characteristics of natural heat resources in Iceland. *Jökull*, 11 (1. tölubl.), s. 29-38.
- Gunnar Böðvarsson (1982). Terrestrial energy currents and transfer in Iceland. *Continental and Ocean Rifts Geodynamics Series*, Volume 8, s. 271-282.

- Gunnar Böðvarsson (1983). Temperature/flow statistics and thermomechanics of low-temperature geothermal systems in Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 19, Issues 3-4, s. 255-280.
- Gunnar S. Kaldal, Steinþór Níelsson og Þorri Þorsteinsson (2024). Increased Structural Integrity og Casings of High-Temperature Geothermal Wells using Novel Technologies. Waikoloa, HI, Erindi haldið á GRC 2024.
- Gunnar Þorgilsson og Sæunn Halldórsdóttir, (2008). Jarðvarmamat með rúmmálsaðferð og Monte Carlo reikningum. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR 2008/001, 27 s.
- Gunnlaugur M. Einarsson, Guðmundur Freyr Jónsson og Steinunn Hauksdóttir (2025). Gagnasafn um hitastigul og uppfært hitastigulskort af Íslandi, ÍSOR 2025/054, 10 s.
- Helgi Björnsson, Sveinbjörn Björnsson og Þorbjörn Sigurgeirsson (1982). Penetration of water into hot rock boundaries of magma at Grímsvötn, *Nature*, s. 580-581.
- Helgi Torfason (2024). Stafrænt jarðhitakort af Íslandi og gagnasafn um jarðhita. Orkustofnun, OS-2024/018, 74 s. <https://gogn.orkustofnun.is/Skyrslur/OS-2024/OS-2024-18.pdf>
- Holmes, R. C., and A. Fournier (2022). Machine Learning-Enhanced Play Fairway Analysis for Uncertainty Characterization and Decision Support in Geothermal Exploration. *Energies* 15, no. 5: 1929. <https://doi.org/10.3390/en15051929>
- Hopper, J.R., Funck, T., Stoker, M.S., Ártíng, U., Peron-Pinvidic, G., Doornenbal, H., Gaina, C., NAG-TEC Contributors, (2014). Tectonostratigraphic Atlas of the North-East Atlantic Region, <https://doi.org/10.22008/FK2/ZZQRO1>, GEUS Dataverse, V1.
- IEA - International Energy Agency (2024). The future of geothermal energy. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy>
- Ingvar B. Friðleifsson (1995). Historical aspects of geothermal utilization in Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress, 1995, Florence, Italy*, s. 427-431.
- Jónas Ketilsson, Héðinn Björnsson, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson (2009). Mat á vinnslugetu háhitasvæða. Orkustofnun, OS-2009/09, 17 s.
- Jónas Ketilsson, Axel Björnsson, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, Bjarni Pálsson, Grímur Björnsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson (2010). Eðli jarðhitans og sjálfbær nýting hans. Álitsgerð faghóps um sjálfbæra nýtingu jarðhita. Orkustofnun, OS-2010, 138 s.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir (2006). Mat á stærð háhitakerfa með viðnámsmælingum. Íslenskar orkurannsóknir, unnið fyrir Orkustofnun vegna Rammaáætlunar. Greinargerð ÍSOR-06108, 9 s.
- Mikhail K. Kaban, Ólafur G. Flóvenz og Guðmundur Pálmason (2002). Nature of the crust-mantle transition zone and the thermal state of upper mantle beneath Iceland from gravity modelling. *Geophysical Journal International*, Vol. 149, Issue 2, s. 281-299.

- Muffler, L.P.J. (1979). Assessment of geothermal resources of the United States—1978, U.S. Geological Survey Circular 790, 163 s.
- Muffler, P. og Cataldi, R. (1978). Methods for assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 1978, Vol. 7(2), s.53-89.
- New Zealand Government (2025). From the ground up. A draft strategy to unlock New Zealand's geothermal potential. Published by the Ministry of Business, Innovation and Employment, 13 s.
- Orkustofnun (2019). OS-2019-T010-01: Efnahagslegur ávinningur af nýtingu jarðvarma í stað olíu til húshitunar á Íslandi [tölvuskjal]. <https://gogn.orkustofnun.is/Talnaefni/OS-2019-T010-01.pdf>
- Orkustofnun (2022). Jarðvarmaspá 2021-2060: Eftirspurnarspá á landsvísu. Orkustofnun-orkuspárnefnd, 82 s. <https://gogn.orkustofnun.is/Skyrslur/OS-2022/OS-2022-01.pdf>
- Orkustofnun (2023). OS-2023-T011-01: Frumorkunotkun á Íslandi 1940-2022. Talnaefni Orkustofnunar [tölvuskjal]. <https://orkustofnun.is/upplýsingar/talnaefni/orka>
- Orkustofnun (2024a). OS-2024-20: Frumorkunotkun jarðhita á Íslandi 2023 eftir vinnslusvæðum. Talnaefni Orkustofnunar [tölvuskjal]. <https://orkustofnun.is/upplýsingar/talnaefni/varmi>
- Orkustofnun (2024b). Gagnasafn um jarðhita. Viðauki við Stafrænt jarðhitakort af Íslandi og gagnasafn um jarðhita (Helgi Torfason, 2024). <https://gogn.orkustofnun.is/Skyrslur/OS-2024/OS-2024-19.pdf>
- Orkustofnun (2025). Hitaveitur - Hvað gerum við. Vefsíða Orkustofnunar, skoðað 30. júlí 2025. <https://orkustofnun.is/hitaveitur-hva%C3%B0gerumvi%C3%B0>
- Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson (1993). Heat flow and geothermal processes in Iceland. *Tectonophysics*, 225(1), s 123-138. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90253-G](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90253-G)
- Ólafur G. Flóvenz og Kristján Sæmundsson (2002). A new heatflow map of Iceland. The 25th Nordic Geological Winter Meeting, Jan 6th - 9th, Reykjavík, s 45. (ágrip).
- Reynolds, H., Guðmundsson, M.T., Högnadóttir, Þ og Pálsson F. (2018). Thermal power of Grímsvötn, Iceland, from 1998-2016: Quantifying the effects of volcanic activity and geothermal anomalies. *Journal of volcanology and geothermal research*, Vol. 358, June 1st 2018, s. 184-193.
- Sarmiento Z. and G. Björnsson (2007). Reliability of Early Modelling Studies for High-Temperature Reservoirs in Iceland and the Philippines. *Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, California.
- Stefán Arnórsson, Guðni Axelsson og Kristján Sæmundsson (2008). Geothermal systems in Iceland. *Jökull* No. 58, s. 269-302.
- Steinunn Hauksdóttir, Auður Agla Óladóttir, Bjarni Gautason, Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson og Sigurður G. Kristinsson (2023). Hitaveitur á Íslandi. Úttekt á stöðu hitaveitna og nýtingar jarðhitavatns til húshitunar. Unnið af ÍSOR fyrir umhverfis-. orku- og loftslagsráðuneytið, 142 s.

https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/URN/230430_URN_Hitaveitur_Web.pdf

Stjórnarráð Íslands (2020). Sjálfbær orkuframtíð. Orkustefna til ársins 2050. Atvinnu- og nýsköpunar-ráðuneytið, 27 s.

<https://www.stjornarradid.is/verkefni/audlindir/orkumal/orkustefna-fyrir-island/>

Stjórnarráð Íslands (2025). Hitaveitur. Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 30. júlí 2025.

<https://www.stjornarradid.is/verkefni/audlindir/hitaveitur/>

Sæunn Halldórsdóttir og Héðinn Björnsson (2009). Afkastageta jarðhitakerfisins í Bjarnaflagi metin með rúmmálsaðferð. Unnið fyrir Landsvirkjun (LV-2009/125). Greinargerð ÍSOR-2009/061, 24 s.

Sæunn Halldórsdóttir, Kjartan Marteinsson, Þorsteinn Egilson, Bjarni Gautason, Helga Tulinius, Gunnar Þorgilsson, Rögnvaldur Magnússon og Guðni Axelsson (2025). Simulation of Pressure Response in Geothermal Reservoirs by an Updated Lumped Parameter Method – Hjalteyri Case Study. PROCEEDINGS, 50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, February 10-12, 2025, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-229.

ThinkGeoEnergy (2024). Geothermal energy production and utilisation.

<https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/geothermal-energy-production-utilisation/>

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið (2025). Jarðhitaleitaráttak árin 2025-2028: Styrkir til nýtingar og leitar á jarðhita. Loftslags- og orkusjóður, Ísland.is

<https://island.is/v/orkusjodur/styrkir-til-nytingar-og-leitar-a-jardhita>

USGS (2008). Assessment of moderate- and high temperature geothermal resources of the United States. USGS Fact Sheet 2008-3082.

<https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3082/pdf/fs2008-3082.pdf>

Valgarður Stefánsson og Elías B. Elíasson (1998). Samnýting orkulinda. Erindi flutt á afmælisráðstefnu Orkustofnunar „Orkuvinnsla í sátt við umhverfið“ í október 1997. Orkustofnun OS-98005.

<https://gogn.orkustofnun.is/Skyrslur/OS-1998/OS-98005.pdf>

Valgarður Stefánsson (1992). Success in geothermal development. Geothermics, Vol. 21, Issues 5-6, s. 823-834.

Valgarður Stefánsson (2000). The renewability of geothermal energy. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28th-June10th 2000, s. 883-888.

Valgarður Stefánsson (2005). World geothermal assessment. Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29. April 2005, 6 s.

Viðar Guðmundsson og Þorsteinn Vilhjálmsson, ritstj. (1996). Orðaskrá um eðlisfræði og skyldar greinar. Enska-íslensk, íslenska-ensk. Orðanefnd Eðlisfræðifélags Íslands. Heimskringla Háskólaforlag Máls og menningar, Reykjavík.

