



**ÍSOR**  
ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR

# **Orðanotkun, aðferðafræði og skilgreiningar við gerð hugmynda- og reiknilíkana af jarðhitakerfum í Hengli**

Grímur Björnsson

Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur

**Greinargerð**

**ÍSOR-05203**

Verknr.: 8 630 020

25.11.2005

ÍSLENSKAR ORKURANNSÓKNIR

Reykjavík: Orkugarður, Grensásvegi 9, 108 Rvk. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1699  
Akureyri: Rangárvöllum, P.O. Box 30, 602 Ak. – Sími: 528 1500 – Fax: 528 1599  
isor@isor.is – www.isor.is

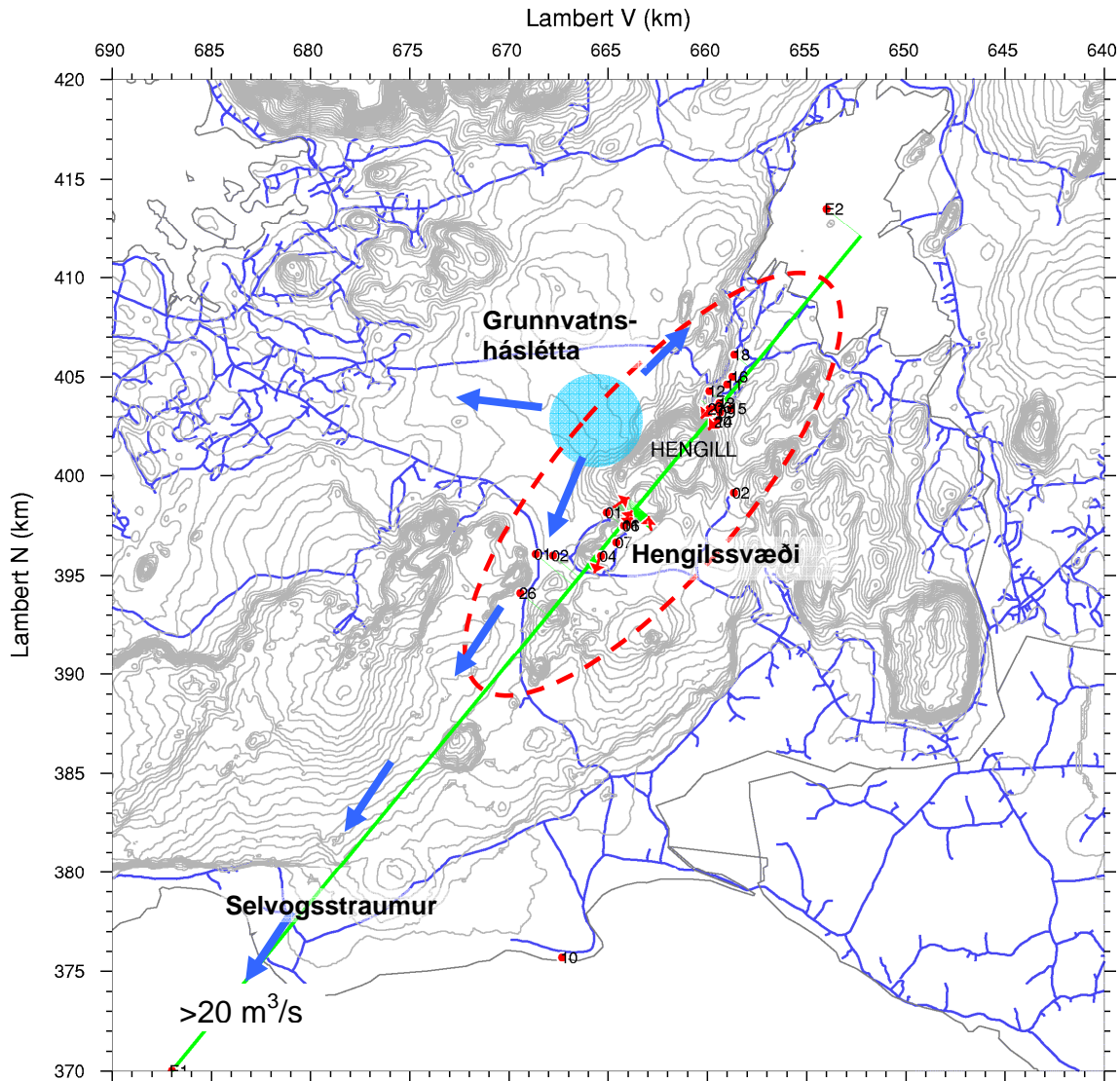
## INNGANGUR

Orkuveita Reykjavíkur kannar nú fýsileika þess að stækka virkjanir á Hengilssvæðinu. Liður í því verki er gerð skýrslu um umhverfisáhrif allt að 120 MW virkjunar sem nýtir vökva undan Skarðsmýrarfjalli. Sá er hér ritar hefur komið talsvert að matinu. Vann m.a. mjög sérhæfðan hluta þess, sem snýr að reiknilíkani er hermir marga mælda eiginleika jarðhitakerfanna á Hellisheiði og á Nesjavöllum (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003; Grímur Björnsson, 2005). Eins hefur höfundur komið að rannsókn á volgum og köldum vatnskerfum utan við sjálf háhitasvæðin, einkum suður í Þrengslum (Hjalti Franzson o.fl., 2004; Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005; Þórólfur H. Hafstað o.fl., 2005).

Hætta er á, í svo yfirgripsmikilli rannsókn, að gripið sé til hugtaka og lýsinga sem einungis hinn þröngi hópur er að rannsóknunum stendur kannast við. Að sama skapi kann ósamræmis að gæta í orðavali milli skýrslna og milli höfunda, sem einnig getur valdið ruglingi. Illt er að svo sé. Þessi greinargerð er því sett saman sem viðleitni til að skýra hugtök og skerpa á skilgreiningum sem höfundur notar tíðum í textum sínum. Rétt er að taka fram að einungis er um sjónarhorn höfundar er að ræða, en ekki endilega ÍSOR né t.d. Jarðfræðafélagsins. Mikilvægur liður í slíkri lýsingu er hugmyndalíkan vatnskerfanna sem orkuvinnsla í Hengli tekur til. Er greinargerðin því þannig byggð upp að í fyrstu er lýst á landakorti því svæði þar sem áhrifa orkuvinnslu kann að gæta, og svæðislæg hugtök skýrð. Því næst er dregið upp hitaþversnið milli Selvogs í suðri og Þingvallavatns í norðri, hvar hugtök er lúta að rúmtaki í náttúrunni eru skýrð. Þá er notkun á hugtökunum ágeng jarðhitavinnslu og afturkræf reifuð svo og geta jarðhitakerfa til að endurnýjast. Greinargerðin endar svo með töflum þar sem dregin eru fram helstu hugtök og þau skýrð í stuttu máli.

## SVÆÐISBUNDIN HUGTÖK

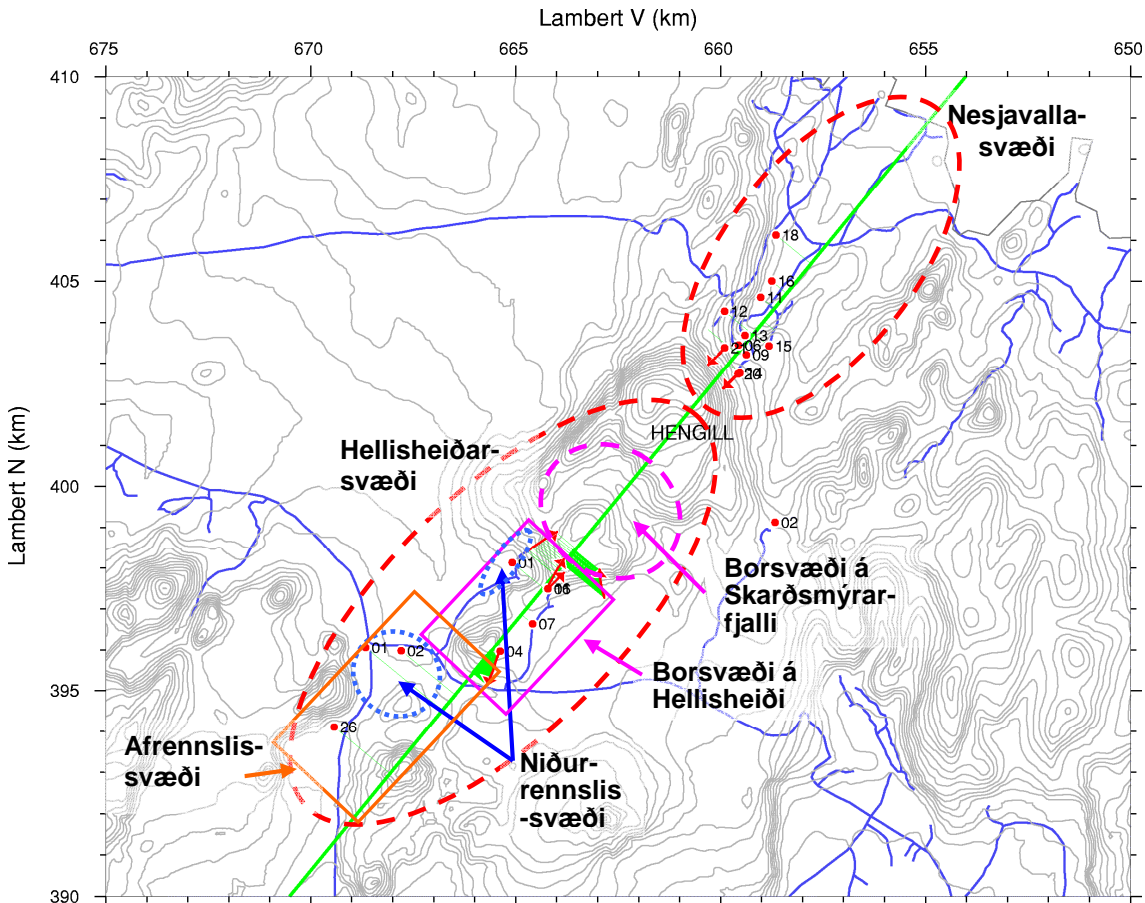
Mynd 1 sýnir landslag kringum Hengil. Þar stendur Orkuveita Reykjavíkur nú fyrir virkjanaframkvæmdum. Inn á myndina er afmarkað, með sporvölu, hið margnefnda *Hengilssvæði*. Flötur sem er í raun fjalllendi megineldstöðvarinnar í Hengli, í Hrómundartindi og austur í átt að Hveragerði. Hugtakið *Hengilssvæði* nær því yfir nánast flest það ofanjarðar og neðan sem menn rekast á í vinnu sinni, og hefur almennasta merkingu allra hugtaka í orðabók höfundar. Eldstöðin í Hengli hefur leikið hér aðalhlutverkið, myndað *sigdal* sem nú er fylltur af ungum gosefnum, móbergsfjöll eru þarna tíðum og hraun hafa runnið frá eldstöðinni bæði um sigdalinn og eins langt út fyrir hann á hlýskeyðum. Mikilvægur þáttur í ástandi svæðisins er að land lækkar út frá Hengli. Stöðug úrkoma leiðir til þess að berg er að hluta eða að fullu vatnsmettað á Hengilssvæði. Fylgir *grunnvatnsyfirborð* því að miklu leyti landslaginu. *Grunnvatns-hásléttu* er til staðar vestan við Hengil, og falla *grunnvatnsstraumar* frá henni til norðurs í Þingvallavatn, til vesturs um Sandskeið og til suðurs í Selvog (Sigurður Sveinn Jónsson o.fl., 2003). Straumurinn suður um Þrengsli og niður í Selvog hefur fengið nafnið *Selvogsstraumur*. Afrennsli hans er metið yfir 20 m<sup>3</sup>/s (Freysteinn Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, 1995). Telst straumurinn fyrir vikið verðmæt auðlind sem virkjanaframkvæmdir á Hengilssvæði mega ekki spilla.



**Mynd 1:** Landakort af Hengli og nágrenni. Græn lína sýnir legu hitaþversniðs milli Selvogs í suðvestri og Þingvallavatns í norðaustri. Holur eru sýndar með rauðum doppum og skáferlar þeirra með rauðum örvum. Rauð sporvala afmarkar flöt sem höfundur kallar Hengilssvæði. Innan sporvölnunnar gætir áhrifa af virkjanaframkvæmdum Orkuveitu Reykjavíkur. Vegir í bláu og hæðarlínur í gráu. Grunnvatnshásléttta vestan Hengils er sýnd með bláum hring og grunnvatnsstraumar frá henni eru táknadír með bláum örvum.

Helsta yfirborðseinkenni Hengilssvæðisins er mikil hveravirkni á yfirborði. Slík virkni leiðir eðlilega til þess að menn tala um *háhitasvæðið* í Hengli. Orðið háhitasvæði hefur þá almennari merkingu en t.d. *hverasvæði*, sem öllum finnst eðlilega eiga við um auðþekkt og afmörkuð (punkt)fyrirbæri á yfirborði jarðar. Hins vegar er háhitasvæðið í Hengli, samkvæmt orðanna hljóðan heitt, meðan Hengilssvæðið tekur yfir bæði heitar og kaldar myndanir og er því mun víðfeðmara hugtak.

Hengilssvæðinu má síðan skipta upp í nokkur undirsvæði. Er sýn höfundar á þá skiptingu sýnd á mynd 2. Þar eru aðalleikendur tveir, *Nesjavallasvæði* og *Hellisheiðarsvæði*. Innan Hellisheiðarsvæðisins má svo skilgreina tvö *niðurrennslistsvæði*, annað í Þrengslum og hitt í stórum misgengjum í Húsmúla. Loks finnst höfundi eðlilegt að ræða um nýtt *borsvæði* á *Skarðsmýrarfjalli*. Er það til aðgreiningar frá núverandi *borsvæði* á *Hellisheiði*, er samþykki hlaut við mat á umhverfisáhrifum þeirrar 120 MW virkjunar sem nú rís við Kolviðarhól. Niðurrennslistsvæðið í Þrengslum er síðan talið tengjast *afrennslistsvæði* háhitasvæðisins á *Hellisheiði*.



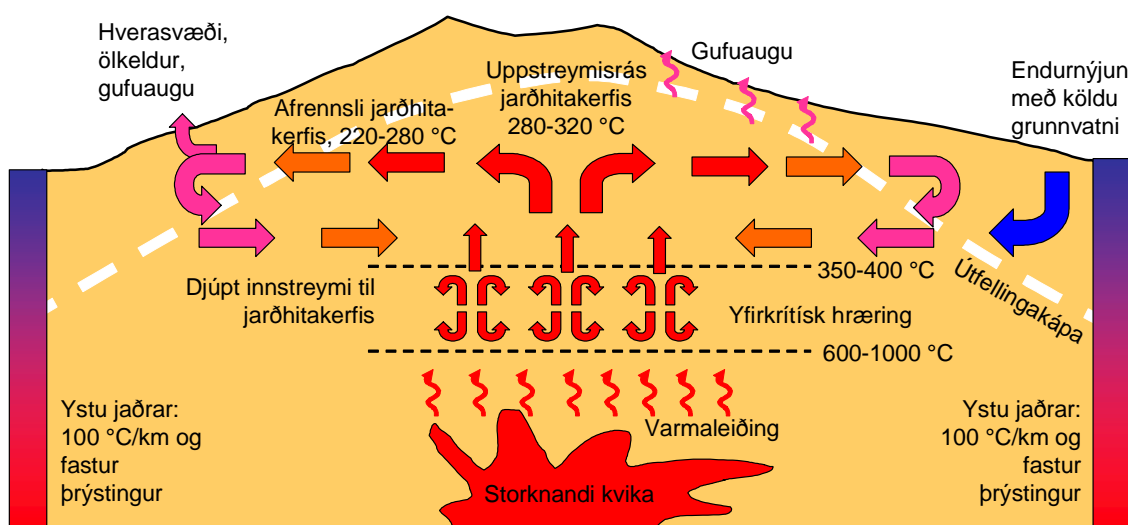
**Mynd 2:** Skilgreining undirsvæða á Hengilssvæði. Dregið er allfrjálsglega.

Loks ber að nefna að *Hellisheiðarvirkjun* nýtir *Hellisheiðarsvæðið* en *Nesjavallavirkjun* nýtir *Nesjavallasvæðið*. Hefð er að myndast um að skilgreina stærð orkuveranna á þessum tveimur svæðum í MW rafmagns, þótt slíkt sé ekki alls kostar rétt og í raun talsvert vanmat. Í raun getur *Nesjavallavirkjun* framleitt 120 MW rafmagns auk 300 MW í varma inn á hitaveitu. Þá er leyfi komið fyrir allt að 120 MW rafmagnsvirkjun á *Hellisheiði*, auk 300-400 MW varmastöðvar. Þessi áfangi *Hellisheiðarvirkjunar* nýtir vökva úr *borsvæði Hellisheiðar*. Til skoðunar er svo að stækka *Hellisheiðarvirkjun* í allt að 240 MW rafmagns. Mun orkan til hennar þá koma, sem áður segir, úr nýju *borsvæði* á *Skarðsmýrarfjalli*. Í stað *borsvæða* mætti einnig tala um *vinnslusvæði*. Höfundur kýs *borsvæðin*, þau eru mun skýrar afmörkuð en *vinnslusvæði*. Enskumælandi tala einnig um “wellfield” í þessu samhengi.

## HUGTÖK TENGD RÚMTAKI OG DÝPI

Hér fer skoðun á orku- og vökvaforða Hengilssvæðisins að verða nákvæmari. Litið er ofan í borholur og dýpi fer að fléttast inn í hugtök. Mikilvægur þáttur í rannsóknavinnunni snýst um að samþætta niðurstöður sem flestra athugana inn í eitt og sama líkanið, sem þá er kosið að nefna *hugmyndalíkan*. Mynd 3 sýnir dæmi um slíkt. Hér er eldfjall á ferð. Lögð er áhersla á að sýna vökvastrauma jarðhitakerfisins sem á því þrífst. Jarðhitakerfis sem er í raun aðeins örlítil agnarögn þess mikla orkukerfis sem virk megineldstöð í rekbelti er. Nú spretta fram mörg hugtök. Skulu þessi upp talin:

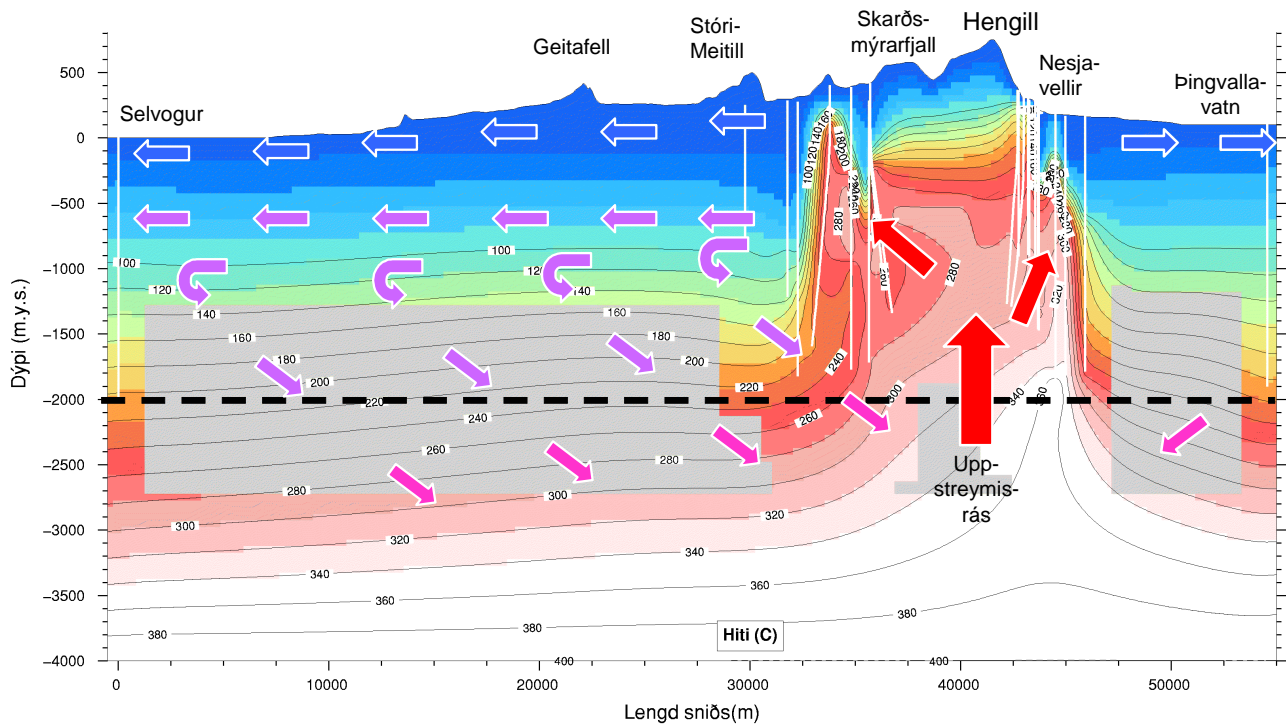
- *Storknandi innskot* eru aðalvarmagjafi jarðhitakerfisins.
- *Jarðhnik* sér til þess að *lekt* er til staðar í *fjaðrandi hluta* jarðskorpunnar, niður að 600-1000 °C hita. *Yfirkrítískur* vökvi hrærist hér, flytur til varma, leysir upp mikið magn steinefna, lyftist og kólnar.
- *Yfirkrítíska hræringin* er oft talin ná grynnt að u.þ.b. 380-400 °C hita, en þar fellur kísill út og þéttir í sprungur. Sífelld ið á jarðskorpunni í gosbeltum sér til þess að ávalt streymir hluti af yfirkrítíska vökvanum upp í gegn, auk þess sem varmaleiðing er mikil, upp á við sem til hliðanna. Þessi straumur er talinn *endurnýjanlegur*.
- Yfir storknandi innskotum og yfirkrítísku hræringunni finnast svo hin *hefðbundnu jarðhitakerfi*, lík þeim sem nú eru virkjuð í Hengli.
- Jarðhitakerfin samanstanda í aðalatriðum af *uppstreymisrás*, *afrennsli* til hliðanna og til yfirborðs í hverasvæðum, auk *djúps aðstreymis*. Varma- og massastraumurinn, sem stígur í uppstreymisrásinni, sér um að knýja þessa hringrás.
- Vökvamassi, sem tapast út úr jarðhitakerfum um hverasvæði og með blöndun við yfirleggjandi grunnvatn, er síðan *endurnýjaður* með köldu grunnvatni. Annars vegar sekkur það niður vegna eðlisþunga, en hins vegar berst það inn með láréttu aðrennsli frá ystu jöðrum jarðhitakerfisins. Gera má ráð fyrir að þessir *ystu jaðrar* séu æstæðir í þrýstingi og að hitastigull sé þar um 100 °C/km.
- Uppleyst efni í afrennsli jarðhitakerfisins leiða til myndunar *útfellingakápu* ofan á heitasta hluta jarðhitakerfisins. Undir henni er sjálfur *jarðhitageymirinn*.



**Mynd 3:** Hugmyndalíkan af jarðhitakerfi sem þrífst í eldstöð þar sem kvika storknar djúpt í jörðu. Jarðhitageymirinn er skilgreindur milli yfirkrítísku hræringarinnar og útfellingakápu.

Mikilvægt er að átta sig á að mörg *vatnskerfi* koma fyrir á mynd 3. Er það neðsta yfirkrítíska hræringin. Þar yfir er hefðbundna jarðhitakerfið. Innan þess eru uppstreymisrásin, afrennslíð, djúpa aðstreymið, útfellingakápan og hverasvæðin. Jarðhitageymirinn er síðan sá hluti jarðhitakerfisins þar sem hiti og vatnslekt eru nægjanlega há til að holur tengdar því blási af krafti og skili háþrýstigufu inn á orkuver. Jarðhitageymirinn afmarkast í huga höfundar þá af útfellingakápum bæði að ofan og neðan. Loks eru köld og volg vatnskerfi til staðar utan við efri útfellingakápuna.

Mynd 4 sýnir hitaþversnið af Hengilssvæðinu, en lega þess er sýnd á myndum 1 og 2. Sýndur er hiti byggður á mælingum í borholum. Þó ekki á endum sniðsins. Þar er gert er ráð fyrir 100 °C/km hitastigli. Sá stigull er t.d. mældur í nær 1000 m djúpri holu LA-10 í Þorlákshöfn, og má sjá staðsetningu hennar á mynd 1. Eins er skilgreindur 400 °C hiti þvert yfir sniðið á 4 km dýpi, í samræmi við stigulinn svo og 4 °C í yfirborðinu. Koma þá í ljós sömu megindrættir og í hugmyndalíkaninu á mynd 3. Uppstreymisrás er undir Hengli og beinir heitum vökva til suðurs um Skarðsmýrarfjall og Hellisheiði, en einnig norður til Nesjavalla. Hæsti mældi hiti er yfir 380 °C í holu 11 á Nesjavöllum. Hæsti mældi hiti á Hellisheiði er hins vegar tæpar 290 °C, einnig í holu 11 þar.



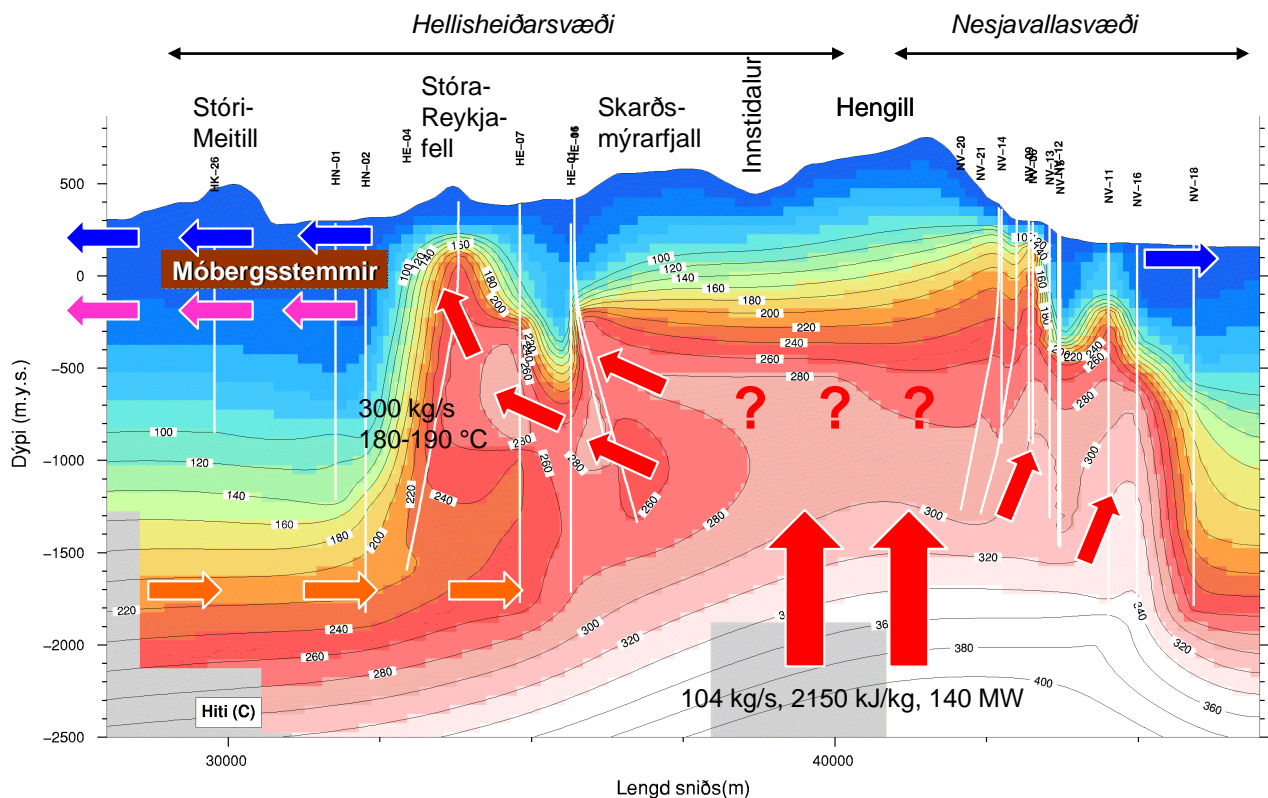
**Mynd 4:** Hitadreifing í jörðu um Hengil, milli Selvogs og Þingvallavatns. Örvar tákna helstu rennislíðir vatns, litur þeirra endurspeglar hitann. Holur eru raunverulegar nema tvær á ystu endum. Svört, slitin lína merkir botn á reiknilíkani sem hermir Hengilssvæðið. Myndin er framleidd í möppunni [/i/grb/hellisheiði/umhverfismat/hugmyndalíkan\\_mynd](#).

Mynd 4 sýnir einnig rennislísteftnur kalda vatnsins. Í yfirborði er áður nefndur Selvogstraumur, í efstu 200-300 m jarðlaga. Kringum 400-500 m undir sjávarmáli er svo gert ráð fyrir öðru, aðskildu afrennslí, sem einnig fellur til sjávar. Þetta vatnskerfi hefur verið nefnt *afrennslissvæði*. Hluti þess nær jafnframt að sökkva og skilar sér á nýjan leik inn í hringrás jarðhitakerfisins.

Nú kynni mörgum að þykja sérstætt ef umtalsverðir grunnvatnsstraumar næðu að falla frá hálandi til sjávar djúpt í jörð. Slíkt er þó, þegar betur er að gáð, ekki svo fjarstæðukennt. Sem dæmi má nefna að vatn úr ríflega 1000 m djúpum borholum í Vestmannaeyjum er hálfalt (Guðmundur Pálmason o.fl., 1965). Nú háttar svo til í Vestmannaeyjum að þær eru að langstærstum hluta myndaðar við gos og setframburð í fullsöltum sjó. Erfitt er að sjá fyrir sér að úrkoma, sem fellur beint á eyjarnar, þynni jarðsjóinn 1-2 km niður í jörð. Mikið líklegra er að hér valdi grunnvatnsstraumur ofan af landi. Önnur dæmi um fersk vatnskerfi í hafi eru til að mynda Hrísey í Eyjafirði og Oddbjarnarsker í Breiðafirði.

## VATNSKERFI Á HELLISHEIÐI OG NESJAVÖLLUM

Mynd 5 sýnir aftur hita í sniðinu milli Selvogs og Þingvallavatns. Að þessu sinni er þysjað inn á borsvæðin á Hellisheiðarsvæði og Nesjavallasvæði. Sem áður var nefnt má greina hér mörg vatnskerfi. Í yfirborði streymir kalt vatn út frá hálandi Hengilsins, bæði til Þingvallavatns og suður í Selvog. Sunnan Hellisheiðar hafa boranir á niðurrennsli-holum HN-1 og HN-2, auk eftirlitsholna HK-25 og HK-26 við Lambafell, sýnt að útbreidd móberssyrpa skilur kalda strauminn í yfirborði frá volgu vatnskerfi sem er á 400-800 m dýpi í þessum holum (Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005). Síðan kemur jarðhitakerfið í Hengli, með meinta uppstreymisrás á svæði sem enn hefur ekki verið borað í. Hitaviðsnúning í holum syðst á Hellisheiði má síðan skilgreina sem lárétt aðstreymi vökva úr suðri. Getur það kallast sérstakt vatnskerfi innan jarðhitakerfisins.



**Mynd 5:** Hiti í sniði milli Hellisheiðar og Nesjavalla. Örvar tákna rennslisstefnur vatns og litur endurspeglar hitann. Tölur sýna magn og vermi vökva í reikni-líkani af Hengilssvæðinu, áður en vinnsla hefst. Spurningamerki undirstrika að enn er óborað í miðju jarðhitakerfisins, undir sjálfum Hengli.

## TENGING HUGMYNDA- OG REIKNILÍKANA

Hitasniðin á myndum 4 og 5 hafa grundvallarþýðingu um skilning á jarðhitakerfum sem verið er að rannsaka með borunum og vinnsluþrófunum. Framsækin orkufyrirtæki láta samt ekki þar við sitja, heldur auka rannsóknagildið með því að láta þróa víðtæk reiknilíkon af jarðhitakerfum sem þau nýta sem og ytri jöðrum þeirra. Slíkt líkan er þegar tiltækt af Hengilssvæðinu. Myndar það ákveðinn grunn í ákvarðanatökum Orkuveitu Reykjavíkur, svo og í mati á umhverfisáhrifum þess að vinna heitan vökva úr sumum hlutum jarðhitakerfisins í Hengli og skila honum kældum niður í annan (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003; Grímur Björnsson, 2005).

Líkansmiðin gengur í aðalatriðum út á að skipta jarðskorpunni upp í fjölmarga búta og leysa síðan varðveislujöfnur massa og orku samtímis fyrir alla búta og í mörgum tímaskrefum. Reikningar eru gerðir í samsíða tölvuumhverfi. Hugbúnaðurinn getur sjálfur skalað til líkaneiginleikana uns þar kemur að ósamræmi reiknaðra og mældra gilda lágmarkast. Almenna reglan er sú að líkanið er fínskipt þar sem borað hefur verið, en mun grófara til jaðranna. Reiknilíkið af Hengilssvæði er þróað með tölunum TOUGH2 og iTOUGH2 (Pruess et. al., 1999; Finsterle, 1999 a og b).

Grunnflötur reiknilíkansins er 100x100 km. Nær það niður á 2 km undir sjávarmáli, gert af 8 láréttum lögum. Þegar litið er á mynd 4 sést að svo grunnstætt reiknilíkan er aðskilið frá heitasta hluta jarðskorpunnar. Þó ekki að fullu því skilgreindur er fastur hiti undir líkaninu sem aftur leiðir til þess að varmi berst yfir 2 km dýpislínuna en enginn vökvi. Undantekninguna er að finna í uppstreymisrásinni. Þar er gert ráð fyrir föstu magni af vökva sem streymir inn í líkanið. Eins eru sunnan til í reiknilíkaninu massasvelgir. Er það staðir þar sem vökvi sleppur út úr reiknilíkaninu og kemur ekki til baka, t.d. vegna blöndunar við yfirliggjandi grunnvatn.

Núverandi kvörðun líkansins gerir ráð fyrir að inn í það komi 104 kg/s af gufuríku innrennsli. Síðan tapast um 300 kg/s út úr líkaninu um massasvelgi í suðri (mynd 5). Mismunurinn þarna á milli kemur frá jöðrum líkansins. Þeir eru, eins og á mynd 3, samfelld vökvasúla frá sjávarmáli með stigul upp á 100 °C/km og þrýsting til samræmis. Má segja að hinn mikli hiti í uppstreymisrásinni leiði til eins konar strompáhrifa í þrýstingi. “Súgurinn” frá strompinum dregur því að vatn frá jöðrum, hitar það og lyftir ásamt vökvanum sem kemur að neðan, frá yfirkrítíska hlutanum. Skýrir það hví heita afrennslið frá jarðhitakerfinu er mun meira en rennslið gegnum uppstreymisrásina. Líkansmiðir voru ánægðir að ná fram þessu sértæka atriði í hermireikningum og fá með því ákveðið samræmi við almennu vökvahræringuna sem menn lýsa í hugmyndalíkönnum (mynd 3).

Umdeilt er hvort íslenska aðferðin við að skilgreina jaðra á reiknilíkani líki best eftir því sem gerist í náttúrunni í raun. Aðferðin er íhaldsöm í þeim skilningi að þegar byrjað er að vinna vökva úr reiknilíkaninu, er brugðist við tapinu með því að láta ytri og kaldari jaðra líkansins bæta upp tapið. Nýsjálendingar láta hins vegar botn reiknilíkana bæta upp massatapið (O’Sullivan and Mannington, 2005). Leiðir það til þess að vinnslan er endurnýjuð með mun heitari vökva en ef endurnýjunin verður frá hlið. Líkur eru því til þess að íslenska aðferðin vanmeti orkuforðann og ofmeti þannig áhrif vinnslunnar. Kýs höfundur að kalla slíkt *varúðarreglu*.

## ÁGENG VINNSLA, SJÁLFBÆRNI, AFTURKRÆFNI OG VARÚÐARREGLA

Sú þróun hefur nýlega orðið í mati á afkastagetu jarðhitakerfa að ekki dugir lengur að skoða eingöngu frammistöðu borsvæða á afskriftartíma virkjunar, heldur er líka gerð krafa um að ástand svæðanna verði metið í marga mannsaldra. Spretta þá fram hugtök eins og hvort jarðhitakerfið teljist *endurnýjanleg auðlind* miðað við þá virkjun sem til stendur að reisa. Eins hvort virkjun, sem er svo *ágeng* á jarðhitageymi að nauðsynlegt verði að draga úr afköstum hennar að einhverjum tíma liðnum, falli að markmiðum um *sjálfbæra þróun*. Íslenskir jarðhitamenn hafa síðustu ár skoðað þessi mál og birt greinar á alþjóðlegum vettvangi (sjá t.d. Guðna Axelsson o.fl., 2005). Loks ber að nefna að skilgreiningin um *afturkræfni* framkvæmdar hefur einnig hlutverk þegar kemur að mati á umhverfisáhrifum.

Almennt má segja að ekki sé til neinn eingildur sannleikur um hvernig bera að meta hvort jarðvarmalind sé endurnýjanleg, né hvernig best sé að haga vinnslu úr henni þannig að falli að markmiðum um sjálfbæra þróun. Eftirfarandi lýsir sjónarhorni höfundar:

- Síendurtekin gosvirkni og jarðhnik í íslensku gosbeltunum leiðir til þeirrar ályktunar að háhitasvæðin í þeim teljast sem heild *endurnýjanleg auðlind*. Hins vegar má ljóst vera að einstakar megineldstöðvar munu fyrr eða síðar reka út úr gosbeltunum og þær kólna. Gosbeltin sjálf endurnýja sig hins vegar. Við að tapa einni megineldstöð er næsta víst að önnur kemur í staðinn.
- Þá má gera ráð fyrir að háhitavirknin sé sveiflukennnd frá náttúrunnar hálfu. Sem dæmi má nefna að nýleg borhola í Öxarfirði bar merki yfir 240 °C hita í ummyndun meðan raunverulegur hiti bergsins var rétt rúmar 100 °C (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 1999). Á hinn veginn sýnir sig að hiti ofarlega í borholum á Helliheiði er meiri en ummyndun bergsins bendir til (Hjalti Franzson og Bjarni Reykr Kristjánsson, 2003).
- Jarðhitakerfin eru því ýmist að hitna eða kólna af náttúrunnar völdum. Getan til endurnýjunar er að nokkru háð skala, þ.e. gosbeltin eru örugglega endurnýjanleg orkukerfi meðan álmur út úr megineldstöðvunum, sem e.t.v. eiga hita sinn að þakka grunnu innskoti, eru það ekki. Álitamál hlýtur þá að vera hvort náttúran eigi að kæla slík innskot með eigin verkfærum, eða hvort manningnum leyfist það á miklu meiri hraða, t.d. með því að reisa jarðhitavirkjun.
- Vinnuhópur Orkustofnunar skilgreindi *hámark sjálfbærrar vinnslu* jarðhita í greinargerðum árið 2001 (Guðni Axelsson o.fl., 2001a og 2001b). Var það fram fyrirbærinu  $E_0$ , og kallað hámark sjálfbærrar vinnslu. Ef orkuvinnslu úr jarðhitakerfi er haldið um eða neðan við  $E_0$  má nýta það um árhundruð.
- Mikilvæg forsenda í skilgreiningu á  $E_0$  er að þetta hámark er háð tæknistigi og þekkingu. Sem dæmi má vísa til þess að vinnslugeta lághitasvæðisins í Laugarnesi vex með meiri notkun (Guðni Axelsson o.fl., 2005). Má þakka það framförum í dælutækni og borunum. Vaxandi þekking á jarðhitaauðlindinni hefur því, enn sem komið er, oftast leitt til þess að mat á vinnslugetu hækkar með tímanum.
- Ágætis dæmi um slíkt mat eru endurteknar kvarðanir á reiknilíkani Nesjavalla (Grímur Björnsson o.fl., 2003). Reiknilíkan var þróað samhliða því að svæðið var rannsakað og virkjunin stækkuð í þrepum. Beitt var varúðarreglu í hönnun reiknilíkansins þegar kom að álitamálum, þ.e. valið að stilla forsendur ætíð í svartsýnni kantinum. Vinnslusagan hefur síðan sýnt að svæðið er afkastameira en talið var í upphafi. Ef heimfæra á þá vinnslugetu, sem fæst með smíð reiknilíkana, að hámarki sjálfbærrar vinnslu,  $E_0$ , má ætla að líkanreikningarnir á Nesjavöllum hafi a.m.k.

framan af skilað niðurstöðum innan þessa hámarks. En vissulega eru aðrir þættir sem hafa líka áhrif, einkum að nýjar holur sýna að jarðhitageymirinn á Nesjavöllum er stærri og heitari en fyrstu holur bentu til. Undirstrikar það enn og aftur að matið á  $E_0$  er geysinæmt fyrir tæknistigi. Hefur það að öllum líkindum hækkað með vaxandi þekkingu og auknum borunum hér á Íslandi.

- Nú var 120 MW Hellisheiðarvirkjun, alin með borsvæðinu á Hellisheiði, talin ágeng í reiknilíkaninu sem kvarðað var vorið 2003 (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Á þeim tíma voru yngstu gögnin um svæðið úr holu HE-7. Síðan þá hafa verið boraðar 11 holur til viðbótar, flestar með ljómandi árangri. Niðurstöður mælinga í þeim sýna að neðri hluti jarðhitageymisins er heitari en áður var talið. Eins sýnir sig að góður árangur næst ef holum er beint inn undir Skarðsmýrarfjall. Þar mælist og mestur hiti. Má því telja næsta vísit að reiknilíkanið frá 2003 hafi haldið sig við þá óformlegu reglu íslenskra líkansmiða að vera í svartsýnni kantinum; óvissur eru því túlkaðar hámarks vinnslugetu í óhag. Að sama skapi telst virkjunin síður ágeng á orkuforðann í Hellisheiðarsvæðinu en talið var árið 2003, einfaldlega vegna þess að varmanáman er hlutfallslega stærri og öflugri.
- Enn er ekki hægt að leggja sömu mælistukur á hvort 120 MW viðbótin á Skarðsmýrarfjalli teljist ágeng jarðhitavinnsla. Til þess skortir borholur og vinnslusögu. Varúðarreglan segir að stækkunin sé ágeng jarðhitavinnsla.
- Mynd 5 sýnir á hinn veginn að nýtt borsvæði á Skarðsmýrafjalli teygir sig í átt að meintri uppstreymisrás jarðhitans í Hengli. Mikils er því að vænta ef hugmyndalíkanið fæst staðfest með borunum. Að sama skapi geta boranirnar leitt til þess að matið á hámarki sjálfbærrar vinnslu vaxi frá því sem nú má giska á með reiknilíkönunum.
- Hins vegar hentar reiknilíkan Hengilssvæðisins prýðilega til að meta hvort jarðhitavinnsla teljist *afturkræf*, einfaldlega með því að stöðva vinnslu úr borholum að ákveðnum tíma liðnum. Spáir reiknilíkanið þá því að þrýstingurinn þurfi ámóta langan tíma til að jafna sig að upphafsástandi og vinnsluskeiðið varði. Varmanáman er hins vegar talsvert lengur að jafna sig, allt að 1000 ár. Stórt séð er hún samt líka að mestu afturkræf, því mesta spáða kæling í reiknilíkaninu er á bilinu 10-20 °C.

Svo sem sjá má að ofan er skipulagsyfirvöldum vandi á höndum þegar þeim berst ósk um að heimila einstakar jarðgufuvirkjanir. Sá vandi kristallast í að ekki er unnt að meta vinnsluþol jarðhitageymis af nákvæmni nema bora og vinna mikið úr honum fyrst. Rannsóknir verður því að stunda um leið og virkjað er, öfugt við t.d. vatnsaflsvirkjun þar sem vinnslugetan liggur fyrir áður en framkvæmdir hefjast. Vandast síðan enn málið því að hámark sjálfbærrar vinnslu,  $E_0$ , er nánast útilokað að ákvarða nema með borunum og rekstri í áratugi. Ef ákveðinni jarðgufuvirkjun er t.d. hafnað, sökum þess að mat skortir á  $E_0$ , kann svo að fara að sú kynslóð sem þá er uppi missi af tækifærinu að nýta auðlind sem er ágætlega endurnýjanleg. Höfundur á ekki lausn á þeirri þverstæðu um að  $E_0$  haldist illþekkt án framkvæmda, aðra en þá að tryggt sé að þekkingin sem aflast við rekstur jarðgufuvirkjana skili sér áfram til næstu kynslóða. Mun þá dulúðin yfir  $E_0$  vonandi minnka með tímanum.

## SAMANTEKT

Tafla 1 dregur saman helstu hugtök sem notuð hafa verið við gerð hugmynda- og reiknilíkana á Hengilssvæði og tengjast svæðishugtakinu.

**Tafla 1** Skilgreining höfundar á svæðistengdum hugtökum

Hugtak	Gerð	Skilgreining
Hengilssvæði	Svæði	Samheiti um nánast öll fyrirbæri ofanjarðar og neðan í fjallendi megineldstöðvarinnar í Hengli, frá Þingvallavatni og suður í Þrengsli
Áhrifasvæði	Flötur	Sá hluti Hengilssvæðis þar sem áhrifa gætir af virkjanaframkvæmdum
Jarðhitasvæði	Flötur	Svæði þar sem jörð er heit og vatnslek ofan 1 km dýpis (>50-100 °C).
Háhitasvæði	Flötur	Svæði þar sem hiti nær 200 °C á 1 km dýpi.
Hverasvæði	Yfirborðs-fyrirbæri	Afrennsli sjóðandi vökva frá háhitasvæði til yfirborðs
Sigdalur	Jarðmyndun	Myndaður af landreki og gliðnun. Miðja megineldstöðvarinnar í Hengli sígur og myndar aflangan dal. Eldvirkni sér um að fylla í gapið.
Grunnvatns-yfirborð	Flötur	Það dýpi í jarðskorpunni þar sem berg er fullmettað af vatni, oftast köldu. Regnvatn sígur til þess að ofan og endurnýjar forðann.
Grunnvatns-háslétta	Flötur	Það dýpi þar sem grunnvatnsyfirborð stendur hátt og flatt. Hér á Mosfellsheiði, við rætur Hengils.
Grunnvatns-straumar	Neðanjarðar-vatnsföll	Úrkoma á grunnvatnshásléttuna leiðir til þess að vatn fellur í straumum út frá henni.
Selvogs-straumur	Neðanjarðar-vatnsfall	Straumur til suðurs um Þrengsli frá grunnvatnshásléttunni vestan Hengils. Er talinn á áhrifasvæði Hellisheiðarvirkjunar.
Nesjavalla-svæði	Flötur	Svæði sem Nesjavallavirkjun nýtir, heitt og kalt
Hellisheiðar-svæði	Flötur	Svæði sem Hellisheiðarvirkjun nýtir, heitt og kalt
Borsvæði	Flötur	Svæði sem á eru boraðar vinnsluholur Hellisheiðar- og Nesjavallavirkjana.
Niðurrennsli-svæði	Flötur	Svæði sem á eru boraðar niðurrennslisholur sem taka við skiljuvatni Hellisheiðar- og Nesjavallavirkjana
Afrennslis-svæði	Flötur	Svæði sem um rennur náttúrulegt afrennsli háhitasvæðis og ber einkenni háhita, t.d. í efnasamsetningu og hita

Tafla 2 dregur síðan saman helstu hugtök sem notuð hafa verið við gerð hugmynda- og reiknilíkana á Hengilssvæði og tengjast rúmmáli og bergskrokkum í jörðu.

**Tafla 2:** Skilgreining höfundar á rúmmálstengdum hugtökum

Hugtak	Gerð	Skilgreining
Kvikuhólf	Hita-uppspretta	Til staðar í gosbeltum. Landrek sér til þess að nýtt rúmmál myndast sífellt í skorpunni, handa kviku að skjóta sér inn í. Endurnýjanleg aflvél háhitasvæða.
Jarðhnik	Aflræn átök í skorpu	Misvíxl storknaðra (fjaðrandi) jarðskorpufleka. Sér til þess að vökvi finnur sér leið djúpt ofan í skorpu. Æstætt ferli sem viðheldur öflugri vökvaflutningsrás fyrir varma úr neðra.
Lekt	Flutningskerfi	Oftast sprungur í jörð sem eru afleiðing jarðhniks, en finnast einnig á lagmótum, utan á innskotum o.s.frv.
Yfirkrítiskur vökvi	Vökvakerfi	Að mestu leyti vatn sem hrærist mjög djúpt í jarðskorpunni og hefur hita og þrýsting ofan krítísk punkts fyrir vatn, u.þ.b. 384 °C og 221 bar.
Útfellingakápa	Hindrun fyrir vökvastreymi í jörð	Berg þar sem uppleyst steinefni hafa fallið út úr jarðhitavökva og nánast stíflað bergið fyrir vökva-hræringu.
Jarðhitakerfi (hefðbundið)	Forðabúr þar sem vökvi og varmi er í hræringu	Rúmmál í jörðu þar sem heitt vatn úr neðra stígur upp og hitar berg í mikinn hita, þó ekki yfirkrítískan. Inni-felur alla þætti kerfisins, þ.e. uppstreymisrás, afrennsli, hverasvæði og djúpt aðrennsli.
Jarðhita-geymir	Forðabúr vökva og varma	Heitt rúmmál í jörðu, neðan útfellingarkápu og ofan yfirkrítísku hræringarinnar. Háhitaholum er einkum beint að þessu rúmmáli. Útvegur nægilega heitan vökva á holutoppi til framleiðslu á háþrýstigufu fyrir eimsvalavélar.
Uppstreymis-rás	Vökvakerfi	Staður í jarðhitageymi þar sem heitur vökvi stígur upp sökum góðrar, lóðréttar lektar. Er talinn vera blanda yfirkrítísks vökva og djúps aðstreymis til jarðhitakerfis
Afrennsli	Vökvakerfi	Rúmmál í jörð þar sem heiti vökvinn, er reis í uppstreymisrásinni, tekur að leita til hliðanna
Aðstreymi	Vökvakerfi	Rúmmál í jörð þar sem vatn flyst frá ytri jöðrum jarðhitakerfis inn að uppstreymisrásinni
Vatnskerfi	Vökvakerfi	Rúmmál í jörð þar sem vökvi með sérstök einkenni er í hræringu. Jarðhitakerfi eru oftast samsett úr mörgum vatnskerfum.

Loks sýnir tafla 3 sjónarhorn höfundar á ýmsar skilgreingar og verkfæri sem brúkuð eru til mats á hagrænum sem og umhverfisþáttum jarðhitavirkjana.

**Tafla 3:** Hugtök sem snúast um tæknilega og umhverfistengda ásjónu jarðhitavinnslu

Hugtak	Skilgreining
Hugmyndalíkan	Líkan sem dregur saman niðurstöður sem flestra rannsókna á jarðhitakerfi í eina mynd. Lýsir flæði orku og vökva, oftast í sniðum.
Reiknilíkan	Líkan af jarðskorpunni, í þremur víddum, og skipt upp í fjölmarga búta og lárétt lög. Látið herma sem flestar mælingar sem gerðar eru í jarðhitakerfi og á ytri jöðrum þess.
Varúðarregla	Höfundar reiknilíkana vita oft ekki nákvæmlega hvaða ástand ríkir í jörð neðan dýpstu borholna né utan borsvæða. Hægt er að velja úr syrpu möguleika. Ber höfundum þá að halda sér á svartsýnni kantinum og ofmeta frekar viðbrögð jarðhitakerfis við vinnslu, t.d. með því að vanmeta rúmmál þess og hita.
Endurnýjanleg auðlind	Kerfi á hræringu í náttúrunni sem ekki breytist stórkostlega í árhundruð eða árþúsundir. Gosbeltin í heild sinni eru álitin endurnýjanleg uppspretta storknandi kviku sem gefur af sér mikinn varma sem aftur knýr vökva- og varmahringrás háhitasvæðanna.
Ágeng vinnsla	Reist er stór jarðgufuvirkjun sem gengur hraðar á massa- og varmaforða jarðhitakerfis en náttúran nær að bæta upp með aðstreymi frá jöðrum og í uppstreymisrás. Hætt er við að draga þurfi úr afköstum orkuvers að ákveðnum tíma liðnum.
Endurnýjanleg vinnsla	Þegar sama orka og massi, sem tekið upp úr borsvæði, berst til þess um jaðra. Aukin vinnsla leiðir til meira aðstreymis þ.a. ekki er víst að hún hætti að teljast endurnýjanleg. Reiknilíkon svara við þessu.
Afturkræf vinnsla	Fari svo í rekstri jarðgufuvirkjunar að hún gangi óhóflega á massa- og orkuforða í jörð, má e.t.v. endurheimta ótruflað ástand jarðhitakerfisins með því einfaldlega að stöðva vinnsluna og bíða þess að jöfnun verði. Reiknilíkon henta vel í að skoða þetta.
Hámark sjálfbærrar vinnslu	Miðast við að vinnsla úr jarðhitakerfi verði ekki meiri en svo að því vinnslustigi megi viðhalda um árhundruð. Ekki er endilega víst að jarðhitakerfið endurnýjst jafnharðan. Háð tæknistigi og þekkingu. Sem stendur virðist sem hámark sjálfbærrar vinnslu vaxi eftir því sem meir og lengur er átt við jarðhitakerfi með borunum og vinnslu. Reiknilíkon Nesjavalla eru talin hafa spáð, a.m.k. framan af, vinnslugetu sem er neðan við hámark sjálfbærrar vinnslu.
Upphafsstand	Ástand jarðhitakerfis áður en vinnsla hefst að marki úr því
Niðurdráttur þrýstings	Manngerð breyting í vökvaþrýstingi neðanjarðar við að vinnsla hefst úr jarðhitageymi um borholur.
Massaforði	Allur vökvi sem er til staðar í þorum bergs á hverjum tíma. Summa vatns og gufu og gastegunda.
Orkuforði	Allur hrávarmi sem er til staðar neðanjarðar, bæði í vökvanum í þorum bergsins, sem og í berginu sjálfu
Varmanáma	Samheiti massa og orku í jarðhitageymi
Ystu jaðrar	Ysti hluti jarðhitakerfis, nær frá yfirborði og í mikið dýpi. Vatnsmettaður og fylgir 100 °C/km hitastigli. Æstætt ástand. Sjá um að endurnýja mikinn hluta þess vökva sem vinnsla dregur út úr jarðhitageymi

## HEIMILDASKRÁ

- Finsterle, S. 1999a: iTOUGH2 User's Guide, Report LBNL-40040, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.
- Finsterle, S. 1999b: iTOUGH2 Command Reference, Report LBNL-40041, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif., 1999b.
- Freysteinn Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað, 1995: Þorlákshöfn. Grunnvatn og vatnsvernd. Orkustofnun OS-95027/VOD-04 B 42
- Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003: Reiknilíkan af jarðhitakerfum í Hengli og spár um framtíðarástand við allt að 120 MW rafmagnsframleiðslu á Hellsheiði og 120 MW á Nesjavöllum. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2003/009 150 s.
- Grímur Björnsson, 2005 Hellsheiðarvirkjun - Skarðsmýrarfjall: spár um viðbrögð jarðhitakerfis við stækkun raforkuvers úr 120 í 240 MW. ÍSOR-2005/022 20 s.
- Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005: Hiti og jarðlög í nýjum borholum í Þrengslum. Greinargerð, ÍSOR-05140.
- Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, Guðmundur S. Bodvarsson and Benedikt Steingrímsson 2003: Development of a 3-D Geothermal Reservoir Model for the Greater Hengill Volcano in Sw-Iceland. PROCEEDINGS, TOUGH Symposium 2003. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 12–14, 2003
- Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005: Hiti og jarðlög í nýjum borholum í Þrengslum. Greinargerð ÍSOR-05140.
- Guðni Axelsson<sup>1</sup>, Valgardur Stefánsson<sup>2</sup>, Grímur Björnsson and Jiurong Liu, 2005: Sustainable Management of Geothermal Resources and Utilization for 100 – 300 Years. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson, Valgardur Stefánsson 31-12-2001 Um sjálfbæra vinnslu jarðhita. Orkustofnun, greinargerð, GAX-ÁsG-BS-GP-HÁ-HTul-ÓGF-SvB-VS-2001/06 6 s.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmason, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgardur Stefánsson, 2001: Um endurnýjanleika jarðhitans. Orkustofnun, greinargerð GAX-ÁsG-BS-GP-HÁ-HTul-ÓGF-SvB-VS-2001/07 3 s.
- Guðmundur Pálmason, Jens Tómasson, Jón Jónsson og Ísleifur Jónsson, 1965: Djúpborun í Vestmannaeyjum 10231 Raforkumálastjóri 52
- Guðmundur Ómar Friðleifsson, Grímur Björnsson, Bjarni Richter, Kjartan Birgisson, Sverrir Þórhallsson og Sveinbjörn Þórisson, 1999: Bakkahlaup Öxarfirði hola BA-02. Áfangaskýrsla 3. Borun vinnsluhluta holunnar. Orkustofnun, ROS OS-99079 24 s.
- Hjalti Franzson og Bjarni Reyr Kristjánsson, 2003: Jarðhitafræðilegar aðstæður á virkjanasvæði Hellsheiðar. Ísor greinargerð, HF-BRK-2003/02 20 s.
- Hjalti Franzson, Grímur Björnsson, Þórólfur H. Hafstað, Ómar Sigurðsson, Sigvaldi Thordarson, Blischke, Anett, 2004: Hellsheiðarvirkjun: niðurrennslishola HN-1 : borun, jarðfræði, vinnsluprófanir og örvun. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2004/042 52 s.
- O'Sullivan M. and W. Mannington, 2005: Renewability of the Wairakei-Tauhara Geothermal Resource. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey,

Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis, 1999: TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Report LBNL-43134, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Calif.

Sigurður Sveinn Jónsson, Bjarni Reyr Kristjánsson, Þórólfur H. Hafstað, Kristján Sæmundsson JAN 2003 Grunnvatnsborholur á Hellisheiði og nágrenni : greining jarðlaga í HK-holum, 2001-2002. Orkustofnun, Rannsóknasvið OS-2003/003 60 s.

Þórólfur H. Hafstað, Kristján Sæmundsson, Bjarni Reyr Kristjánsson og Grímur Björnsson, 2005: Hellisheiðarvirkjun: hugmyndalíkan af grunnvatnsaðstæðum í grennd við Kolviðarhól og borstaðir þar. Íslenskar orkurannsóknir ÍSOR-2005/033 19 s.