

**Grímur Björnsson**

## **Hellisheiðarvirkjun – Skarðsmýrarfjall**

**Spár um viðbrögð jarðhitakerfis við  
stækkun raforkuvers úr 120 í 240 MW**

**Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur**

**ÍSOR-2005/022**

**Júní 2005**

ISBN 9979-780-23-1

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



Skýrsla nr. ÍSOR-2005/022	Dags. Júní 2005	Dreifing <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill <b>Hellisheiðarvirkjun – Skarðsmýrarfjall</b> Spár um viðbrögð jarðhitakerfis við stækkun raforkuvers úr 120 í 240 MW	Upplag 20	Fjöldi síðna 20
Höfundar Grímur Björnsson	Verkefnisstjóri Benedikt Steingrímsson Grímur Björnsson	
Gerð skýrslu / Verkstig Reiknilíkan af jarðhitakerfi og spár	Verknúmer 8-630220	
Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur		
Samvinnuaðilar		
Útdráttur Gerð er grein fyrir spám um áhrif stækkunar rafmagnshluta Hellisheiðarvirkjunar, úr 120 í 240 MW, á jarðhitakerfi kringum Hengil. Verkið er unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Spánnar eru framleiddar í reiknilíkani sem er þegar tiltækt. Áformað er að þróa nýtt borsvæði uppi á Skarðsmýrarfjalli og eru viðbrögð við vinnslu þar grófmétin í líkaninu. Vinnsluspánnar sem hér eru lagðar fram eru mjög óvenjulegar og eiga sér vart hefð í rannsókn háhitasvæða þar sem enn á eftir að bora. Fyrst er lýst áformuðu borsvæði á Skarðsmýrarfjalli og hvernig má tengja það núverandi reiknilíkani. Síðan er skilgreint hvernig massi er þvingaður út úr líkaninu, uns þar kemur að rennsli háþrýstigufu samsvavar gróflaga því sem 120 MW rafstöð þarfnast. Slíkt leiðir eðlilega til þess að spánnar eru ótryggar til að meta stofn- og rekstrarkostnaði virkjunar. Gert er ráð fyrir að vatn og gufa handa 120 MW stækkun Hellisheiðarvirkjunar verði unnin úr líkankubbum sem eru innan 1200 m láréttar fjarlægðar frá mögulegum borteigum á Skarðsmýrarfjalli. Öllu skiljuvatni er rennt ofan í líkanið á ný um stór misgengi sem eru í vesturkanti sigdalsins á Hellisheiði. Líkanið er óhæft til mats á fjölda borholna sem þarf til reksturs allt að 120 MW virkjunar á Skarðsmýrarfjalli. Spáð er hægfara minnkun í heildarrennsli og gufurennsli holna á Hellisheiði ef líka er unnið úr Skarðsmýrarfjalli og allt að 5 bara þrýstilækkun á Nesjavöllum við slíka vinnslu. Ef öll vinnsla á Nesjavöllum (120 MW), Hellisheiði (120 MW) og á Skarðsmýrarfjalli (120 MW) er stöðvuð árið 2036, mun lækkun þrýstings ganga til baka á ámóta löngum tíma og vinnslan stöð yfir, þ.e. á 40 til 60 árum. Varmaforði reiknilíkansins þarf hins vegar mun lengri tíma til að jafna sig eftir stöðvun vinnslu. Að samanlögðu má því gera ráð fyrir því að varmanámuna í Hengli megi endurnýja með hvíld vinnslusvæða.		
Lykilorð Háhitasvæði, jarðhitakerfi, jarðhitavirkjun, reiknilíkan, spár, borholur, borteigar, hiti, þrýstingur, rennsli, gufa, vermi, vinnsla, endurnýjanleiki, Hellisheiði, Skarðsmýrarfjall	ISBN-númer 9979-780-23-1	Undirskrift verkefnisstjóra
	Yfirfarið af BS, GrB	

## EFNISYFIRLIT

1	INNGANGUR.....	5
2	LÝSING REIKNILÍKANS .....	5
3	SPÁREIKNINGAR.....	9
4	ÁHRIF Á VINNSLUSVÆÐI HELLISHEIÐAR OG NESJAVALLA.....	11
5	ENDURNÝJANLEIKI, SJÁLFBÆRNI OG AFTURKRÆFNI.....	14
6	NIÐURSTAÐA OG UMRÆÐA.....	18
7	HEIMILDASKRÁ.....	20

## TÖFLUR

Tafla 1:	<i>Nöfn líkankubba undir Skarðsmýrarfjalli og vinnsla úr þeim .....</i>	9
----------	---	---

## MYNDIR

Mynd 1:	<i>Kubbaskipting í innri hluta Hengilslíkansins. ....</i>	6
Mynd 2:	<i>Lagskipting reiknilíkansins. ....</i>	7
Mynd 3:	<i>Nýir borteigar á Skarðsmýrarfjalli (gráir hringir) og áhrifasvæði hvers borteigs (rauður hringur dreginn út í 1200 m). ....</i>	8
Mynd 4:	<i>Spár um vermi, heildarrennsli, rennsli háþrýstigufu, rennsli skiljuvatns og niðurrennsli úr líkankubbum undir Skarðsmýrarfjalli. ....</i>	10
Mynd 5:	<i>Spá um heildarvinnslu úr holum á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli .....</i>	12
Mynd 6:	<i>Spá um meðalvermi holna á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli .....</i>	12
Mynd 7:	<i>Spá um rennsli háþrýstigufu úr holum á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli. Skilið er við 10 bör-a.....</i>	13
Mynd 8:	<i>Spá um rennsli háþrýstigufu úr holum á Nesjavöllum, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli. Skilið er við 10 bör-a.....</i>	13
Mynd 9:	<i>Þrýstijöfnun holna í Hengilslíkani ef öll vinnsla stöðvast árið 2036. ....</i>	15
Mynd 10:	<i>Hitajöfnun holna í Hengilslíkani ef öll vinnsla stöðvast árið 2036. ....</i>	16
Mynd 11:	<i>Breyting í gufumassa í Hengilslíkani. ....</i>	16
Mynd 12:	<i>Breyting í vökvamassa í Hengilslíkani (vatn og gufa). ....</i>	17
Mynd 13:	<i>Breyting í orkuforða Hengilslíkans.....</i>	18

## 1 INNGANGUR

Eftirfarandi skýrsla er unnin að beiðni Orkuveitu Reykjavíkur. Hún lýsir spám um áhrif stækkunar rafmagnshluta Hellisheiðarvirkjunar, úr 120 í 240 MW, á jarðhitakerfi kringum Hengil. Spárnar eru framleiddar í þegar tiltæku reiknilíkani (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Áformað er að þróa nýtt borsvæði uppi á Skarðsmýrarfjalli og leikur áhugi á að grófmæta hver viðbrögð við vinnslu þar verða. Niðurstöður þeirrar vinnu sem hér er kynnt stendur til að flétta inn í skýrslu um umhverfisáhrif stækkunarinnar (Orkuveita Reykjavíkur og VGK, 2005).

Rétt er að taka fram strax í upphafi að þær vinnsluspár sem hér eru lagðar fram eru mjög óvenjulegar og eiga sér vart hefð í rannsókn háhitasvæða vítt um lönd. Sem dæmi taka spárnar til hluta jarðhitakerfis sem enn hefur ekkert verið borað í. Þá hefur vinnsla úr núverandi borholum á Hellisheiði verið lítil fram til þessa, sem gerir það að verkum að óvissa er nokkur um hve hratt jaðrar háhitasvæðisins ná að skila inn vatni í stað þess sem upp er tekið. Þessi óvissa hefur aðallega áhrif í stofn- og rekstarkostnaði virkjana. Reiknilíkanið er á hinn veginn talið tækt í skoðun á áhrifum aukinnar vinnslu á víðtækari hluta jarðhitakerfa í Hengli. Veldur þar að líkanið er skorðað af mældum hita í borholum allt í kringum eldstöðina í Hengli. Ætti það því að reikna með þokkalegri vissu áhrif stækkaðrar virkjunar á varmaforða jarðhitakerfa og þannig slá mati á hve ágeng vinnslan verður á stærð varmanámunnar. Þá sýnir reynslan frá Nesjavöllum, Laugarnesi og víðar að ytri jaðrar jarðhitakerfa á Íslandi eru ætíð lekir í einhverjum mæli (Guðni Axelsson o.fl., 2001). Munu þeir því með tíð og tíma skila til baka þeim vatnsmassa sem upp var tekinn, sér í lagi ef vinnsla hættir.

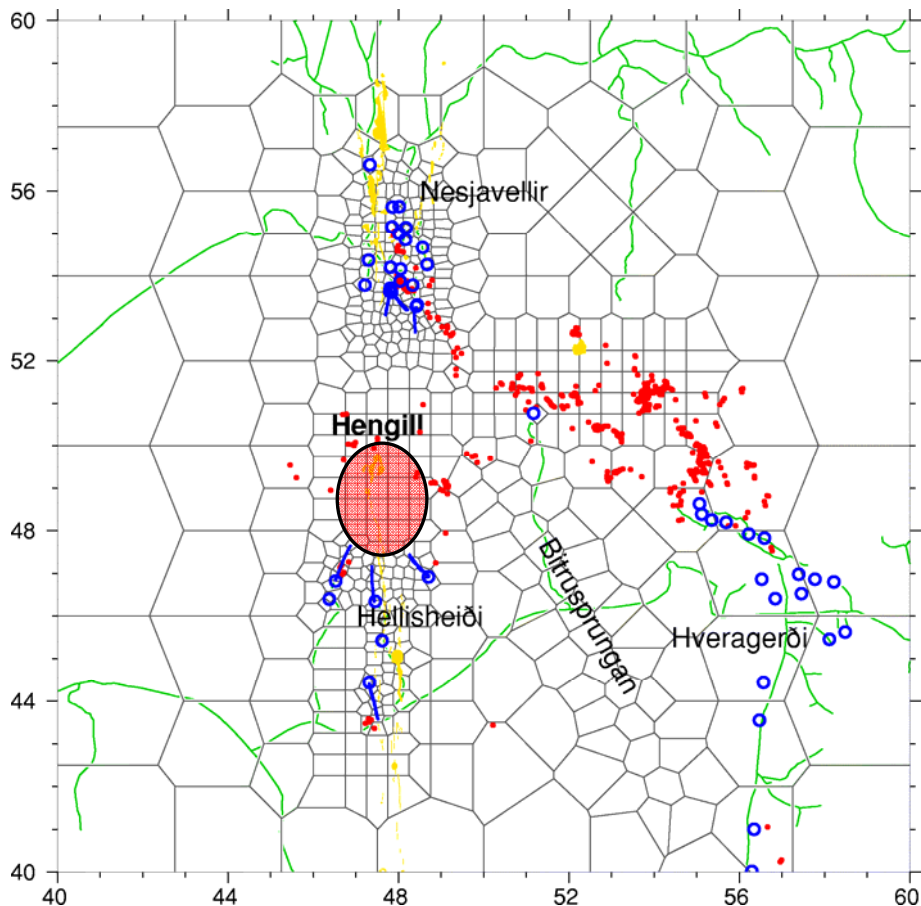
Skýrslan er þannig upp byggð að fyrst er lýst áformuðu borsvæði á Skarðsmýrarfjalli og hvernig má tengja það núverandi reiknilíkani. Þar næst er skilgreint hvernig massi er þvingaður út úr líkaninu, uns þar kemur að rennsli háþrýstigufu samsvarar gróflega því sem 120 MW rafstöð þarfnast. Aðferðin leiðir til þess að holufjöldi er aldrei spáð enda engar forsendur til þess nú aðrar en almenn reynsla af meðalafköstum borholna. Jafnframt er gert ráð fyrir að skiljuvatn fari allt ofan í djúpa háhitakerfið á ný, að þessu sinni þó í stór misgengi vestan til í sigdal Hellisheiðar í stað holna sunnarlega í sigdalnum. Loks er skoðað hve hratt vatns- og varmaforði reiknilíkansins endurnýjast við að öll vinnsla á Hellisheiði, Skarðsmýrarfjalli og á Nesjavöllum er stöðvuð kringum árið 2036.

## 2 LÝSING REIKNILÍKANS

Sem fyrr greinir eru þær spár sem hér er lýst gerðar með reiknilíkani sem var þróað árið 2003 í tengslum við áform um allt að 120 MW virkjun á Hellisheiði (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Líkaninu var seinna beitt til að skoða áhrif af enn frekari stækkun Nesjavallavirkjunar (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2005). Líkaninu hefur þegar verið lýst ítarlega í ofangreindum skýrslum, svo og því hugmyndalíkani sem reiknilíkanið byggir á. Boranir hafa haldið áfram á Hellisheiði eftir að reiknilíkanið var kvarðað árið 2003. Eru nú komnar 15 holur á Hellisheiði í stað 7 á tímum líkanreikninga. Boranirnar virðast í aðalatriðum staðfesta það hugmyndalíkan sem lá fyrir um mitt ár 2003, þ.e. jarðhitakerfið á Hellisheiði er fyrst og fremst bundið við sigdal Hengilseldstöðvarinnar til suðurs. Sigdalurinn er fylltur af ungum gosefnum og þau hýsa jafnframt það jarðhitakerfi sem til stendur að vinna úr vatn og gufu. Sigdalurinn hefur hitnað upp með jarðhitavökva sem streymir úr norðri, frá Hengli, til suðurs. Sú breyting

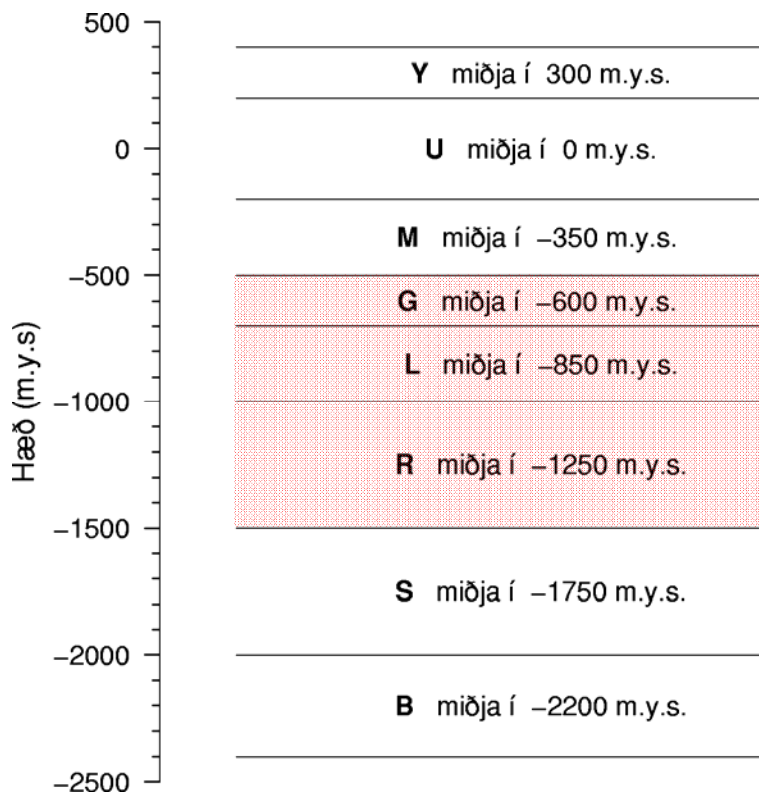
er þó að verða á hugmyndalíkaninu að viðsnúningur hita, neðan lekra bergfyllinga sigdalsins, er ekki jafnmikill og áður var haldið. Auk þess sýna blásturssögur nýrra holna á Hellsheiði að verulegan tíma tekur fyrir þær að losa sig við kælinguna sem fylgir skoltapi í borun. Slíka hegðun má skýra með því að kælingin er ekki eingöngu bundin við afmarkaðar sprungur, heldur virðist sem ádælingarvökvinn dreifi sér mun betur um bergmassann en áður var haldið. Ef rétt reynist þýðir þetta að einporu reiknilíkanið, sem hér er stuðst við, ætti að herma svæðið betur en ef vökví ferðaðist að miklu leyti eftir sprungum.

Mynd 1 sýnir innri hluta reiknilíkansins á einfaldan hátt. Aðaldrættir þess sjást á myndinni, þ.e. sprungustykki Hengilsins sem hýsir hvoru tveggja jarðhitann á Nesjavöllum og á Hellsheiði. Eins gerir kubbaskipting líkansins ráð fyrir þverbelti frá hálendi Hengilsins til austurs um Ölkelduháls, svo og Bitrusprunguna sem á sér stoð í skjálftaupptökum og viðnámsdreifingu (Knútur Árnason og Ingvar Þ. Magnússon, 2001). Jarðhitavökví stígur upp undir miðjum Henglinum og rennur bæði til norðurs um Nesjavelli og til suðurs um Hellsheiði.



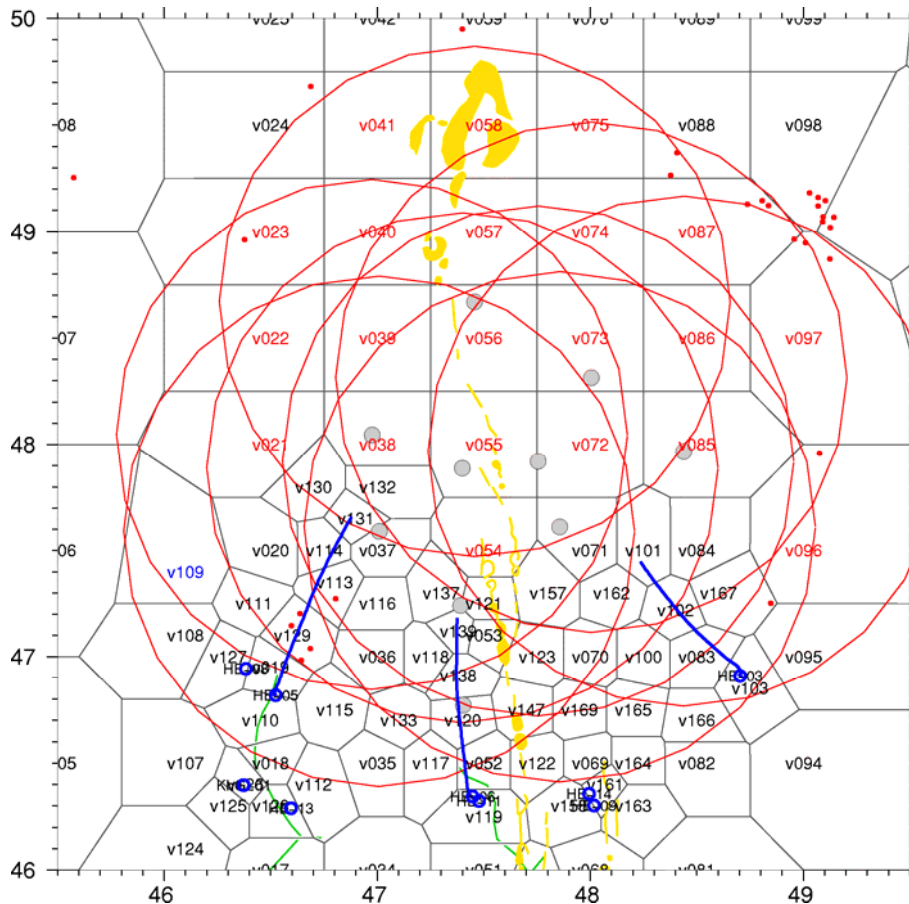
**Mynd 1:** Kubbaskipting í innri hluta Hengilslíkansins. Vegir eru í grænu, borholur í bláu, ungar gossprungur í gulu og jarðhiti á yfirborði í rauðu. Nýtt borsvæði á Skarðsmýrarfjalli er sýnt sem rauð sporvala. Líkanhnit eru í kílómetrum.

Rétt er að taka fram að hæðaskipting reiknilíkansins er áfram sú sama og áður. Skiptingin er sýnd á mynd 2. Nú hefur reynslan á Hellisheiði kennt að æðar í holum koma helst á dýpum sem svarar til L og R laga reiknilíkansins. Sökum þess að nýtt borsvæði á Skarðsmýrarfjalli verður 100–200 m hærra yfir sjó en núverandi borsvæði á Hellisheiði, auk þess að vera nær uppstreyminu undir Hengli, var afráðið að nýjar æðar þar gætu einnig sýnt sig í G laginu.



**Mynd 2:** Lagskipting reiknilíkansins. Nýjar holur á Skarðsmýrarfjalli eru látnar vinna úr lögum G, L og R (rauð skygging).

Að svo komnu máli lá næst fyrir að velja þá kubba reiknilíkansins sem nýtt borsvæði á Skarðsmýrarfjalli myndi ná til. Aðferðin er einföld. Jarðvísindamenn á Íslenskum orkurannsóknnum og hjá Orkuveitu Reykjavíkur lögðust yfir kort og fóru á vettvang með það fyrir augum að velja borteigum á Skarðsmýrarfjalli stað. Var þá reynt eftir fremsta megni að sameina tvö markmið, annars vegar að skáholur frá borteigum næðu sem víðast undir fjallinu og út frá því. Á sama tíma var þess gætt að borteigarnir nýttu sér staðbundnar lægðir í landi og væru nægjanlega langt frá brekkubrúnum að erfitt yrði að sjá mannvirkin á þeim frá hlið. Þessir borteigar voru hnitsettir. Síðan eru einfaldlega dregnir hringir utan um hvern borteig. Ná þeir 1200 m til hliðar, sem er talið nærri hámarkshliðrun holu frá toppi. Líkankubbar sem lenda innan 1200 m geirans eru síðan skilgreindir sem mögulegar borholuæðar. Mynd 3 sýnir þetta.



**Mynd 3:** Nýir borteigar á Skarðsmýrarfjalli (gráir hringir) og áhrifasvæði hvers borteigs (rauður hringur dreginn út í 1200 m). Nýjar holur á Skarðsmýrarfjalli vinna úr kubbum sem eru merktir með rauðum bókstöfum. Niðurrennsli skiljuvatns er látið eiga sér stað í blámerktan búi v109. Núverandi borholur á Hellsheiði eru sýndar með bláum hringjum og ferlar nokkurra skáholna með bláum línum. Ungar gígaraðir eru sýndar með gulum flekkjum og jarðhiti á yfirborði með rauðum doppum. Líkahnitt eru í kílómetrum.

Rétt er að nefna að í reiknilíkaninu verður tæplega 100 °C skiljuvatn látið renna ofan í líkankubb v109 í lagi S (mynd 3). Er hugsunin sú að stór misgengi, sem mynda vesturkant sigdalsins á Hellsheiði, dreifi vel úr skiljuvatninu auk þess að senda það niður á mikið dýpi. Reynsla er þegar fengin af niðurrennsli í þau um holu HE-8. Sýndi sig að væg skjálftavirkni fylgir ádælingu í holuna og náði hún allt niður á 6 km dýpi samkvæmt mælum Veðurstofunnar (Grímur Björnsson, 2004). Er það talið til merkis um að þrýstíáhrifa ádælingarinnar gæti víða. Slíkt er talið mjög æskilegt og tryggir að kæling vinnsluholna verður hæg og jafnvel óveruleg. Enn á þó eftir að komast að þessu með tilraunum og kann niðurstaða þeirra að verða sú að niðurrennslið gangi ekki til langframa. Fari svo mun niðurrennslinu verða beint suður í Þrengsli, á sömu slóðir og til stendur að endurnýta skiljuvatn Hellsheiðarvirkjunar.

### 3 SPÁREIKNINGAR

Þegar nöfn líkankubba sem borholur á Skarðsmýrarfjalli ná til lágu fyrir (mynd 3), var næst ráðist í að vinna úr þeim gufu sem svaraði til 200–250 kg/s af háprýstigufu við 10 bör-a. Ætti það að nægja til rekstur allt að 120 MW rafstöðvar sem byggir á eimsva-  
tækni og þarfnast 1,8–2,0 kg/s af háprýstigufu fyrir hvert framleitt MW.

Tafla 1 lýsir hvernig vinnslan var skilgreind. Aðferðin er einföld, Vinnslusögunni er skipt í 4 tímaseið. Í því fyrsta, frá 2008 til 2016, eru þvinguð út rúm 440 kg/s. Næsta tímabil er frá 2016 til 2026. Er vinnslan þá tæp 390 kg/s. Á þriðja skeiðinu, 2026 til 2036, nemur vinnslan rúmum 340 kg/s. Fjórða tímaseiðið varir síðan milli 2036 og ársins 3000, hvorki meira né minna. Þar verða þau tíðindi í ársbyrjun 2036 að slökkt er á öllum virkjununum þremur í líkaninu, Nesjavöllum, Hellisheiði og Skarðsmýrarfjalli. Með því er leitast við að spá fyrir um hve þessi jarðhitakerfi eru lengi að jafna sig ef vinnsla úr þeim hættir og fá þannig tilfinningu fyrir afturkræfni framkvæmdarinnar. Samtals er unnið úr 56 líkankubbum, eru 13 þeirra í G laginu en 21 í hvoru, L og R. Færri kubbar í G lagi skýrast einfaldlega af því er erfitt er að ná út í ystu rauðmerktu kubbana á mynd 3 svo grunnt.

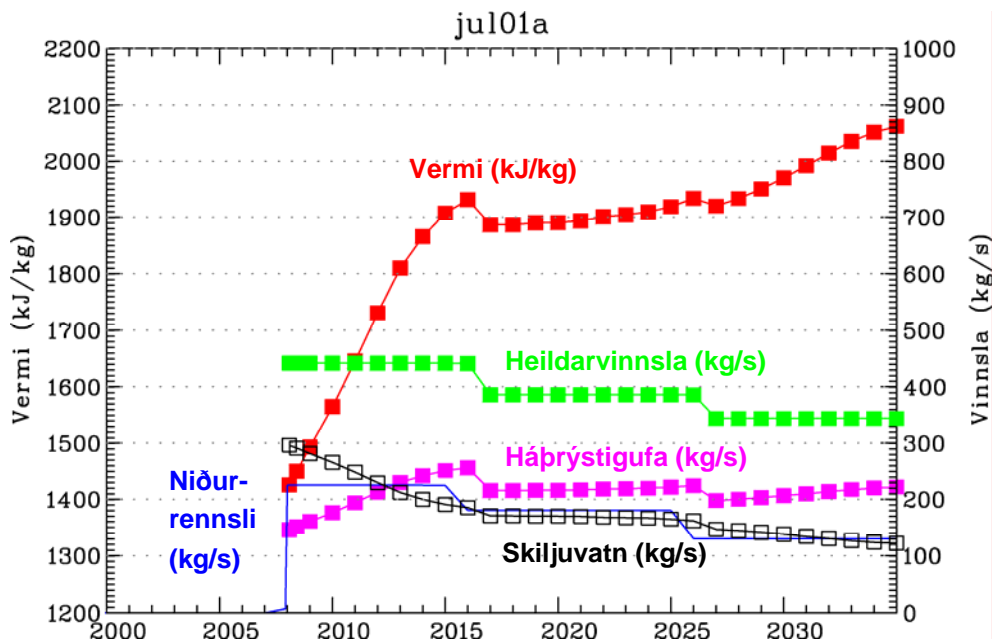
**Tafla 1:** Nöfn líkankubba undir Skarðsmýrarfjalli og vinnsla úr þeim.

Líkan- kubbur	Vinnsla 2008- 2016 (kg/s)	Vinnsla 2016- 2026 (kg/s)	Vinnsla 2026- 2036 (kg/s)	Líkan- kubbur	Vinnsla 2008- 2016 (kg/s)	Vinnsla 2016- 2026 (kg/s)	Vinnsla 2026- 2036 (kg/s)
Lv021	6	6	6	Rv057	14	10	7
Rv021	6	6	6	Lv058	14	10	7
Lv022	6	6	6	Rv058	14	10	7
Rv022	6	6	6	Gv072	6	6	6
Lv023	6	6	6	Lv072	6	6	6
Rv023	6	6	6	Rv072	6	6	6
Gv038	6	6	6	Gv073	6	6	6
Lv038	6	6	6	Lv073	6	6	6
Rv038	6	6	6	Rv073	6	6	6
Gv039	6	6	6	Gv074	6	6	6
Lv039	6	6	6	Lv074	6	6	6
Rv039	6	6	6	Rv074	6	6	6
Gv040	6	6	6	Lv075	6	6	6
Lv040	6	6	6	Rv075	6	6	6
Rv040	6	6	6	Gv085	6	6	6
Lv041	6	6	6	Lv085	6	6	6
Rv041	6	6	6	Rv085	6	6	6
Gv054	14	10	7	Gv086	6	6	6
Lv054	14	10	7	Lv086	6	6	6
Rv054	14	10	7	Rv086	6	6	6
Gv055	14	10	7	Gv087	6	6	6
Lv055	14	10	7	Lv087	6	6	6
Rv055	14	10	7	Rv087	6	6	6
Gv056	14	10	7	Lv096	6	6	6
Lv056	14	10	7	Rv096	6	6	6
Rv056	14	10	7	Lv097	6	6	6
Gv057	14	10	7	Rv097	6	6	6
Lv057	14	10	7	Sv109	6	6	6

Sem áður var nefnt er öllu skiljuvatni rennt aftur ofan í reiknilíkanið um líkanbút Sv109. Tekur hann við 225 kg/s milli árána 2008 og 2016, 180 kg/s milli 2016 og 2026 og loks 130 kg/s milli 2026 og 2036.

Nú ríður á að vinnslan úr Skarðsmýrarfjalli skerði ekki óhóflega afköst holna á Hellisheiði, sem þjóna eiga allt að 120 MW rafstöð þeirri sem nú er í byggingu. Var því afráðið að fýsileiki stækkunar á Skarðsmýrarfjalli byggði á samanburði við spá sem fyrir liggur um 120 MW vinnslu á Hellisheiði og 100 % niðurrennsli suður í Þrengslum (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Til verksins var sett í gang tölvueykið gamalkunna og þrautreynda, sleggjan. Síðan var afrituð skráamappan /home/finster/hengill/vinnsla.2003likan/spa5\_6 yfir í sleggjuslóðina /home/finster/hengill/skardsmyrarfjall. Líkanið var síðan keyrt með skipuninni “itough2 -v 4.4 inputI input”. Aðferðin hefur þann annmarka að sú endurkvörðun sem átti sér stað árið 2005 í Nesjavallahluta reiknilíkansins (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2005) er ekki til staðar í núverandi líkani. Kemur þó ekki að sök hér þar sem líkaneiginleikar eru áfram þeir sömu sunnan Hengils í báðum líkönum. Síðan voru endurskrifuð alls kyns skeljaforrit til myndgerða o.s.frv. á HP-Unix slóðinni /ffr/hengill/skeljar.grb/skardsmyrarfjall. Mappan sem geymir þá útgáfu reiknilíkansins sem kynnt er í þessari skýrslu heitir jul01a á Sleggjunni.

Mynd 4 sýnir hvernig heildarafköst og meðalvermi allra æðanna á Skarðsmýrarfjalli reiknast. Spáin er í möppunni /home/finster/hengill/skardsmyrarfjall/jul01a. Mynd 4 er síðan teiknuð með skipuninni “gera.hq jul01a” á HP-Unix ásamt fleirum hér á eftir. Vekur athygli að meðalvermið er í upphafi rúm 1400 kJ/kg og fer síðan ört hækkandi með tímanum. Veldur að þrýstingur er greinilega að falla við aukna vinnslu og leiðir það til suðu í jarðhitageyminum. Suðan verður svo aftur til þess að vermið hækkar. Hér verður að minna á að vinnslan er þvinguð og þess vegna ekki víst að rennsli úr sjóðandi æðum verði jafnmikið og hér er gert ráð fyrir.



**Mynd 4:** Spár um vermi, heildarrennsli, rennsli háþrýstigufu, rennsli skiljuvatns og niðurrennsli úr líkankubbum undir Skarðsmýrarfjalli.

Að sama skapi ber að ítreka að reiknilíkanið er á þessari stundu ófært um að spá fyrir um þann holufjölda sem þarf til að skila þeim 200–250 kg/s af háþrýstingufu sem áformuð stækkun Hellisheiðarvirkjunar kann að þurfa. Til þess þarf að bora fyrst. Má þó hafa til hliðsjónar almenna reynslu af árangri í borun. Þannig má nefna að núverandi borsvæði á Hellisheiði er að skila yfir 5 MW meðalholu meðan svæðisþrýstingur er ótruflaður. Meðalafköstin munu síðan lækka við niðurdrátt svæðisþrýstings. Óvarlegt er að gera ráð fyrir betri árangri á Skarðsmýrarfjalli. Því þurfi 120 MW stöð sem er alin með gufu úr Skarðsmýrarfjalli a.m.k. 25 vinnsluholur. Þegar einnig hefur verið tekið tillit til þrýstilækkunar í kerfinu, niðurrennslisholum og þess háttar getur þessi tala allt að tvöfaldast.

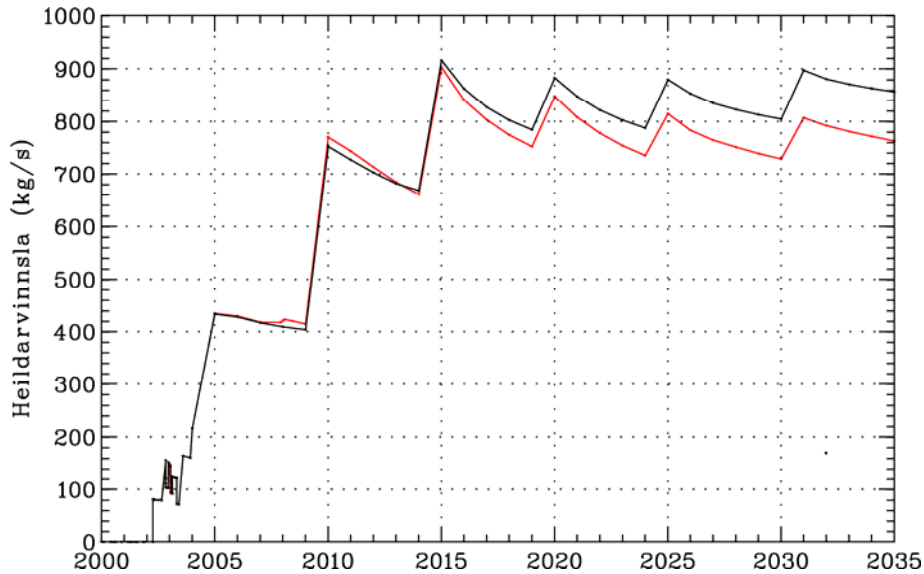
Nú kann einhverjum að þykja talsverð umhverfisáhrif fylgja borun á allt að 50 holum á líftíma Skarðsmýrarfjallsvirkjunar, jafnvel þó svo að fjöldi borteiga verði margfalt minni. Er þá nærtækt að skoða losaða rúmmetra af bergi úr jörð. Gróft metið losar 2 km djúp háhitahola u.þ.b. 200 rúmmetra af bergi. Mest af því kemur til yfirborðs með skolvatni en hluti verður eftir neðanjarðar. Fimmtíu slíkar holur losa þá að hámarki um 10 þúsund rúmmetra af bergi. Til samanburðar bora risaborvélar í Kárahnúkum rúmlega 7 m breið göng og losa þá 40 m<sup>3</sup> bergs á hvern metra ganganna. Losað efni neðanjarðar í borsvæði Skarðsmýrarfjalls er því ígildi um 0,25 km langs kafla af þeim 38 km sem til stendur að bora í Kárahnúkum, eða u.þ.b. 0,7 % af þeirri borframkvæmd.

#### **4 ÁHRIF Á VINNSLUSVÆÐI HELLISHEIÐAR OG NESJAVALLA**

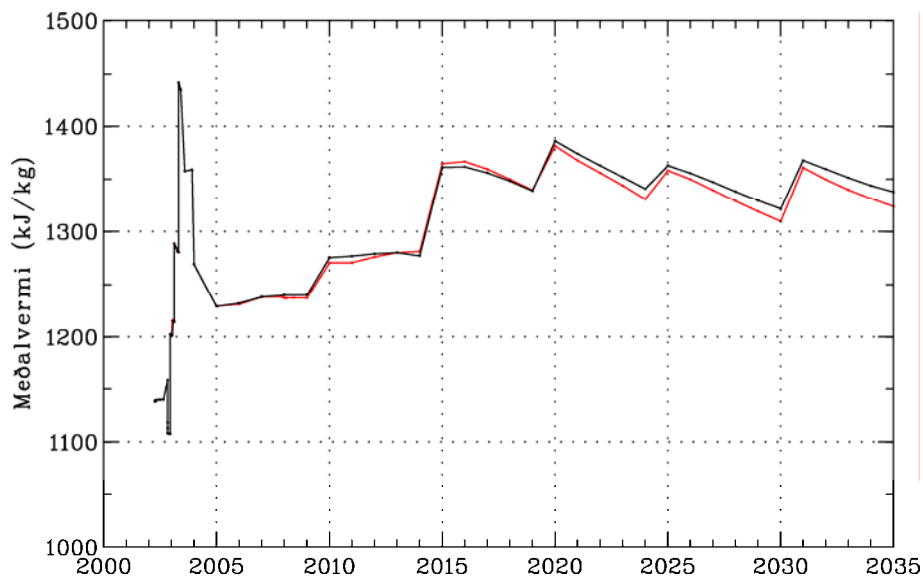
Mikilvægt atriði í hagkvæmni þess að stækka Hellisheiðarvirkjun, felst í að meta hvort og þá í hve ríkum mæli holur á Skarðsmýrarfjalli rýra afköst holna sem þjóna þeirri Hellisheiðarvirkjun sem nú er í byggingu. Segja má að reiknilíkanið af Hengli gegni þar veigamiklu hlutverki, sér í lagi meðan enn hafa ekki verið boraðar holur uppi á Skarðsmýrarfjalli. Var því skoðað sérstaklega hvernig vinnsla sú á Skarðsmýrarfjalli, sem sýnd er á mynd 4 hér að framan, breytti þegar birtri spá um 120 MW virkjun á Hellisheiði með fullu niðurrennsli skiljuvatns í jarðhitageyminn (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003).

Mynd 5 sýnir spád heildarrennsli úr holum á Hellisheiði með og án vinnslu úr Skarðsmýrarfjalli. Sést þar að stærri virkjun hefur áhrif á þá fyrri og skerða „nýju“ holurnar á Skarðsmýrarfjalli vinnslu úr „eldri“ holum um samtals 100 kg/s í lok spátímans. Áhrifin birtast hins vegar rólega og ættu fremur að koma fram í rekstrarkostnaði virkjananna en stofnkostnaði.

Mynd 6 sýnir spá um meðalvermi á Hellisheiði með og án framkvæmda á Skarðsmýrarfjalli. Greina má örlitla lækkun og kemur hún rólega fram. Nærtækast er að skýra hana með því að heitt aðstreymi jarðhitavökva úr norðri fer nú upp um holur á Skarðsmýrarfjalli í stað þess að fara út um holur á Hellisheiði.

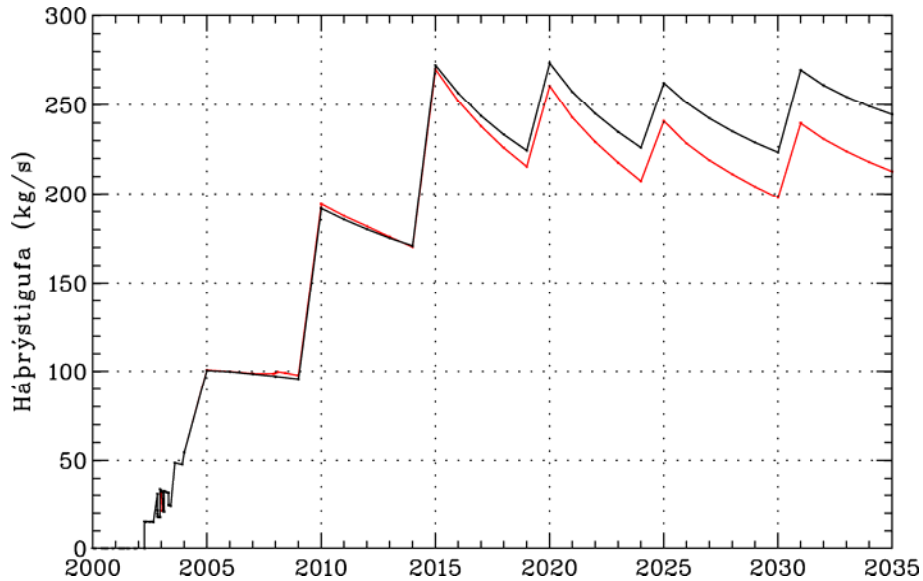


**Mynd 5:** Spá um heildarvinnslu úr holum á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli.



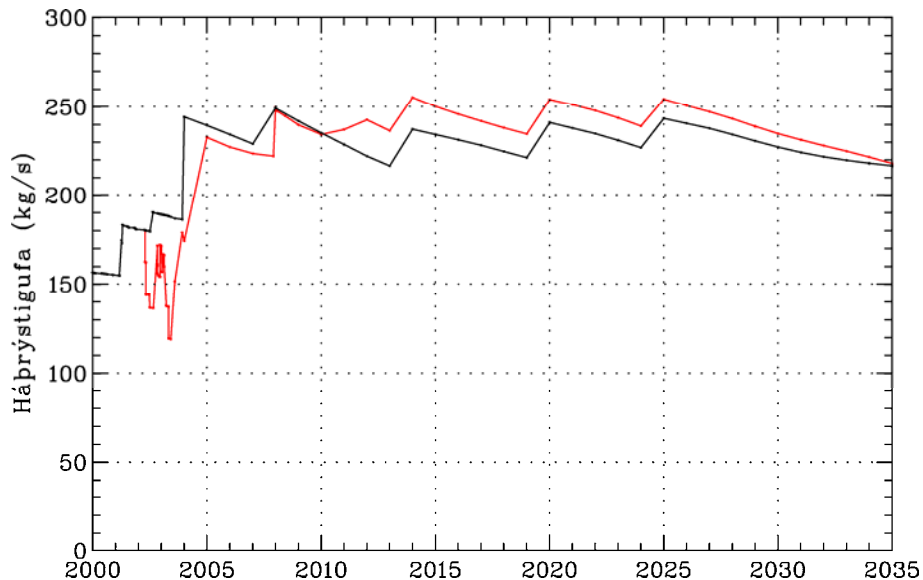
**Mynd 6:** Spá um meðalvermi holna á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli.

Mynd 7 sýnir spár um rennsli háþrýstigufu á Hellisheiði, með og án borana á Skarðsmýrarfjalli. Sem von er til minnka afköst borsvæðisins á Hellisheiði um 40 kg/s í lok spátíma sem er ígildi 20 MW í rafafli eða tæp 20 %. Skerðingin er talsvert minni ef litið er til tonna af háþrýstigufu úr holum á spátíma. Fæst þá að gufumagnið fer úr 208 í 196 milljónir tonna sem er ígildi 6 % skerðingar. Í fljótu bragði virðist því efnahagsleg áhætta af vinnslu úr Skarðsmýrarfjalli á borsvæði Hellisheiðar ekki verða umtalsverð og kunna samlegðaráhrif að veega hana upp. Þessa ályktun reiknilíkansins ber samt að endurskoða við að vinnslusaga lengist á Hellisheiði og holur verða boraðar á Skarðsmýrarfjalli.



**Mynd 7:** Spá um rennsli háprýstingufu úr holum á Hellisheiði, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli. Skilið er við 10 bör-a.

Þá er fróðlegt að skoða hvort vinnsla úr Skarðsmýrarfjalli hafi áhrif á afköst borholna á Nesjavöllum. Er það sýnt á mynd 8. Ósamræmið sem kemur í gúfurenslið milli 2000 og 2005 stafar af því að vinnslusagan á Nesjavöllum er ekki eins skilgreind í báðum. Að teknu tilliti til þess ósamræmis kemur sú athyglisverða niðurstaða í ljós að spáð er jafnmiklu ef ekki meira flæði háprýstingufu á Nesjavöllum við að virkjað er á Skarðsmýrarfjalli. Veldur hér að öllum líkindum lækkun þrýstings og aukið gufuhlutfall í reiknilíkaninu.



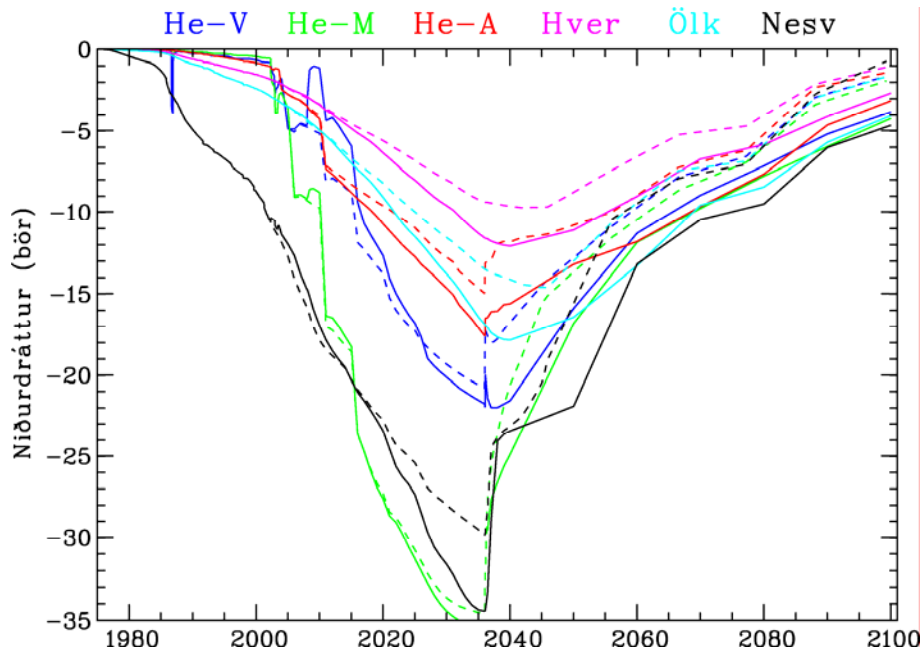
**Mynd 8:** Spá um rennsli háprýstingufu úr holum á Nesjavöllum, án (svart) og með (rautt) nýju borsvæði á Skarðsmýrarfjalli. Skilið er við 10 bör-a.

## 5 ENDURNÝJANLEIKI, SJÁLFBÆRNI OG AFTURKRÆFNI

Jarðhitakerfi myndast á hundruðum eða þúsundum ára og hringrás vökva í þeim er væntanlega talsvert hægari í náttúrulegu ástandi en verður við mikla massatöku úr borholum. Því er eðlilegt að spurt sé hvernig núverandi virkjanahugmyndir leika svæðin og hvort þær komi til með að draga úr nýtingarmöguleikum næstu kynslóða. Segja má að slík umræða sé ung og enn í þróun og ekki mikið um verkefni sem hægt er að miða sig við. Forðafræðingar á Íslenskum orkurannsóknum og hjá Auðlindadeild Orkustofnunar hafa þó tekið þátt í þessari umræðu síðustu árin og birt greinar þar um (sjá t.d. Guðni Axelsson o.fl., 2004; Valgarður Stefánsson, 2000). Þá var tekið á endurnýjanleika, sjálfbærni og afturkræfni jarðhitavirkjana á Nesjavöllum og Hellisheiði í líkanreikningum árið 2003 (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Er vísað til þeirrar skýrslu um skilgreiningar sem lýsa áhrifum jarðhitavinnslu og hvort hún teljist sjálfbær, endurnýjanleg og afturkræf.

Mikilvægt atriði í rekstri og hagkvæmni jarðhitavirkjana nú á tímum er að þær séu stórar og þar með ágengar á háhitakerfin sem þær vinna úr. Óhjákvæmilega leiðir það til þess að heilsu jarðhitakerfanna hrakar með tímanum og að afköst virkjana minnka nema til komi tækni framfarir og ný þekking um jarðhitakerfin. Ágætis dæmi um slíkt er til dæmis hugmyndin um borun mjög djúpra, súperkrítískra holna í háhitasvæði á Íslandi (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl., 2005). Nú miðast virkjunarhugmyndin á Skarðsmýrarfjalli við rafstöð af hefðbundinni gerð þar sem vinnsla á sér stað að mestu úr æðum á 1–2 km dýpi. Eðlilegt er því að staldra við og meta hve mikill varmi og massi hefur tapast út úr reiknilíkaninu árið 2036, og hve lengi öll jarðhitakerfin umhverfis Hengil eru að jafna sig að upphafsástandi miðað við að vinnsla hætti það ár. Er um sama sjónarhorn að ræða og áður (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003) og skeljar til myndteikninga sóttar í HP-Unix möppurnar /ffr/hengill/skeljar.grb/spa5\_7.

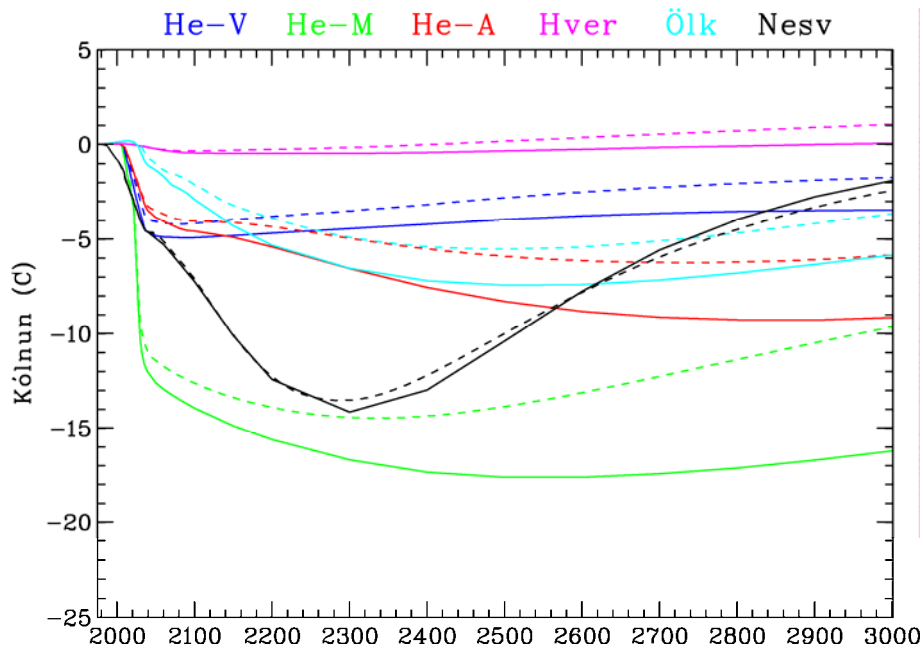
Mynd 9 sýnir spár um þrýstijöfnun á nokkrum stöðum umhverfis Hengil við að öll vinnsla stöðvast árið 2036, með og án borsvæðis á Skarðsmýrarfjalli. Eru áhrif 120 MW viðbótarvinnslu úr borsvæði á Skarðsmýrarfjalli borin saman við 120 MW vinnslu á Hellisheiði og önnur 120 MW á Nesjavöllum (spá 5–6). Er ekki annað að sjá en að sama beri við í báðum tilvikum, sem sé að þrýstingur svæða jafni sig á móta hratt að upphafsástandi ársins 1975 og vinnslan stóð yfir, þ.e. kringum 50–60 ár. Aðalbreytingin er helst sú að vinnslan undan Skarðsmýrarfjalli fellir þrýsting á Nesjavöllum um allt að 5 bör árið 2036. Þrýstingur hækkar hins vegar árið 2008 og stendur síðan í stað í holu KhG-1. Er það von þegar tekið er tillit til þess að skiljuvatn úr holu á Skarðsmýrarfjalli fer niður í reiknilíkanið mjög nærri KhG-1. Aðrar holur sýna hámarksbreytingu upp á 2–3 bör á spátímanum. Stórt séð er því niðurstaða reiknilíkansins sú að hægt sé að endurnýja vatnsforðann í jörð umhverfis Hengil að því sem áður var einfaldlega með því að hvíla jarðhitakerfin á móta lengi og vinnsla stóð áður.



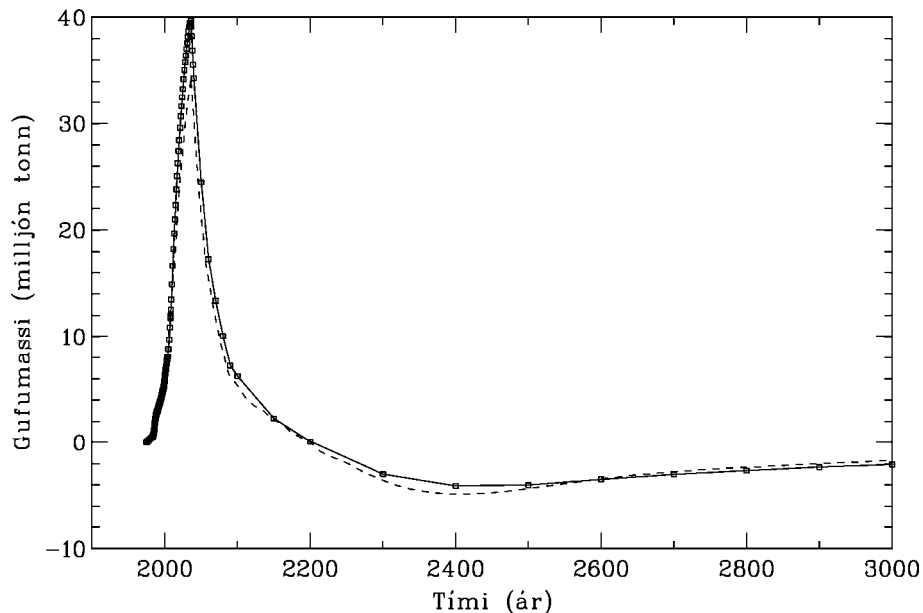
**Mynd 9:** Þrýstijöfnun holna í Hengilslíkani ef öll vinnsla stöðvast árið 2036. Heildregnir ferlar eiga við 120 MW vinnslu á Skarðsmýrarfjalli en þeir slitnu eru þeir sömu og í spá 5\_6 (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). He-V stendur fyrir holu vestan Hellisheiðar (KhG-1), He-M fyrir holu á miðri Hellisheiði, He-A fyrir holu í austurhluta Hellisheiðar, Hver fyrir Hveragerði, Ölk fyrir Ölkelduháls og loks Nesv fyrir Nesjavelli.

Mynd 10 sýnir spár um jöfnun hita ímyndaðra eftirlitsholna á nokkrum stöðum umhverfis Hengil. Er þá miðað við að öll vinnsla stöðvist árið 2036, bæði með og án massatöku undan Skarðsmýrarfjalli. Skemmst er frá því að segja að saga hita er ámóta í báðum tilvikum með einni undantekningu þó. Hún er að kólnun eykst í miðri dal-fyllunni á Hellisheiði og nær ekki að jafna sig á 1000 árum. Áformuð vinnsla getur því breytt varanlega hita á afmörkuðum blettum í líkaninu. Reiknuð kæling er að öllu jöfnu innan við 10°C og að hámarki 20°C á myndinni. Þessa hitabreytingu má skoða í samhengi við núverandi 240 til 280°C hita jarðhitakerfisins. Sá samburður leiðir til þeirrar almennu niðurstöðu að stórt séð verði jarðhitakerfið ennþá ágætlega vinnsluhæft árið 2036. Finnst höfundu að lækkun þrýstings muni frekar skorða af vinnslugetuna þá en hnignun varmafordans.

Mynd 11 sýnir breytingar í massa gufu í reiknilíkani fram til ársins 3000, enn miðað við stöðvun vinnslu árið 2036. Ferlarnir eru mjög ámóta utan árið 2036 að gufumassi líkansins er um 5 milljón tonnum meiri þegar unnið er úr Skarðsmýrarfjalli. Telst það í rökréttu samhengi við að þrýstiniðurdráttur er orðinn útbreiddari en áður og þar með gufuhlutfall í þorum.

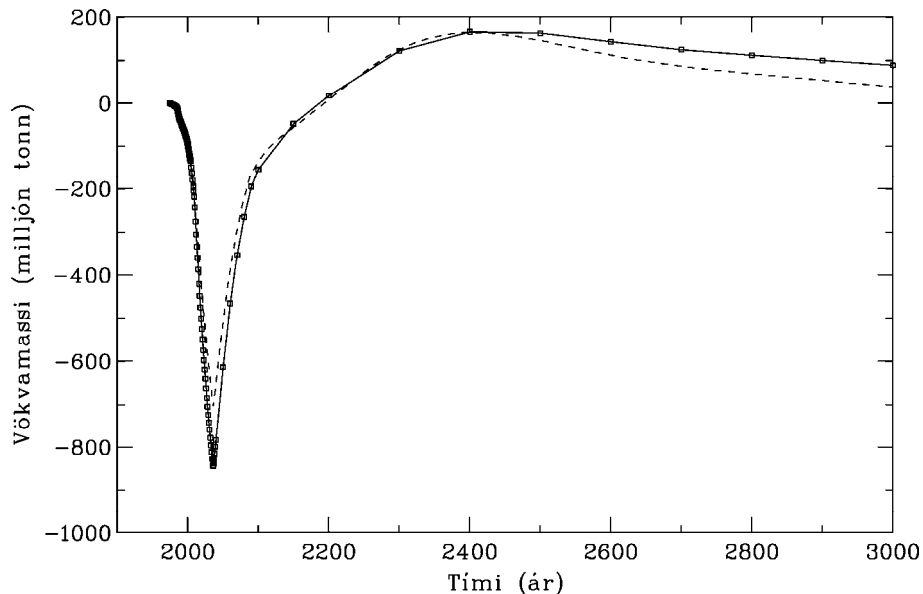


**Mynd 10:** Hitajöfnun holna í Hengilslíkani ef öll vinnsla stöðvast árið 2036. Heildregnir ferlar eiga við 120 MW vinnslu á Skarðsmýrarfjalli en þeir slitnu eru þeir sömu og í spá 5\_6 (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). He-V stendur fyrir holu vestan Hellisheiðar (KhG-1), He-M fyrir holu á miðri Hellisheiði, He-A fyrir holu í austurhluta Hellisheiðar, Hver fyrir Hveragerði, Ölþ fyrir Ölkelduháls og loks Nesv fyrir Nesjavelli.



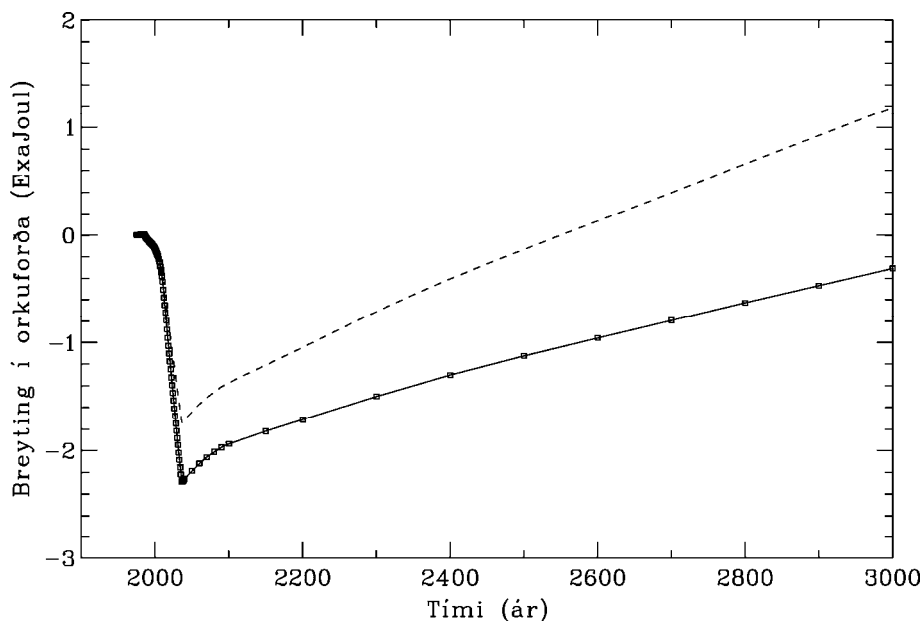
**Mynd 11:** Breyting í gufumassa í Hengilslíkani. Heil lína miðar við 120 MW vinnslu undan Skarðsmýrarfjalli, en sú slitna er án hennar.

Mynd 12 sýnir reiknaða þróun í vökvamassa reiknilíkans. Fer mesta upptakan úr 700 í 800 milljón tonn árið 2036 en að öðru leyti er spáð líkri hegðun reiknilíkans.



**Mynd 12:** *Breyting í vökvamassa í Hengilslíkani (vatn og gufa). Heil lína miðar við 120 MW vinnslu undan Skarðsmýrarfjalli, en sú slitna er án hennar.*

Mynd 13 sýnir í lokin spár um orkuforða reiknilíkans, með og án vinnslu undan Skarðsmýrarfjalli. Er orkuforðinn sýndur í exa-joulum hvar 1 EJ samsvarar  $10^{18}$  J. Nú reiknast nokkur breyting. Í fyrsta lagi er 10–20 % viðbótarlækkun í orkuforða líkansins árið 2036 ef líka er unnið undan Skarðsmýrarfjalli. Eins verður sú breyting að orkuforði líkansins, með vinnslu úr Skarðsmýrarfjalli, verður nokkurn veginn sá sami árið 3000 og var árið 1975 að vinnsla hófst úr líkaninu. Vinnsla á Hellisheiði og Nesjavöllum eingöngu leiddi hins vegar til þess að orkuforði líkansins reiknaðist meiri en áður er vinnslan hófst. Ekki er talin ástæða til að gera of mikið þúður úr þessu. Svo langt er reiknað fram í tímann að litlar skekkjur nú geta leitt af sér hægfara rek í orkuforðanum. Þá er næsta víst að kvika eigi eftir að skjóta sér inn í jarðhitakerfið á þessum tíma eða önnur þau atvik verða í náttúrunni sem geta flutt til samsvarandi orku í jörðu og maðurinn gerir með stórum jarðhitavirkjunum á áratugum. Aðalatriðið er að orkuforði líkansins er talsvert lengur að jafna sig en vatnsforðinn, en mun þó að endingu gera það. Í lokin er ágætt að setja þá rúmlega 2 EJ orkubreytingu reiknilíkansins í samhengi við heildarforðann. Hann er af stærðargráðunni 3000 EJ.



**Mynd 13:** *Breyting í orkuforða Hengilslíkans. Heil lína miðar við 120 MW vinnslu undan Skarðsmýrarfjalli, en sú slitna er án hennar*

## 6 NIÐURSTAÐA OG UMRÆÐA

Þessar eru helstar niðurstöður af gerð vinnsluspáa fyrir nýtt borsvæði undir Skarðsmýrafjalli:

- Spárnar eru unnar með reiknilíkani sem þróað var árið 2003. Síðan þá hafa bæst við 8 borholur á Hellisheiði. Rannsóknir í þeim gefa ekki ástæðu til stórvægi- legra breytinga á því hugmyndalíkani jarðhitakerfisins sem nú er stuðst við. Djúpt undir megineldstöð Hengils rís heitur jarðhitavökvi sem síðan flæðir til norðurs og suðurs um sprungustykki eldstöðvarinnar. Hefur hann hitað upp jarð- hitakerfin á Nesjavöllum og á Hellisheiði í tímans rás. Jarðhitakerfið á Hellis- heiði er hýst í ungum gosefnum í sigdalsins, niður undir 1500 m dýpi að eldra berg tekur til. Góð lekt fylgir gossprungum um Gígahnúk sem stefna í NNA.
- Óvenjulegt er að gera vinnsluspár af þessari stærðargráðu á svæði þar sem enn á eftir að bora. Slíkt leiðir eðlilega til þess að spárnar eru ótryggar til mats á stofn- og rekstrarkostnaði virkjunar. Hins vegar ætti líkanið að vera fært um að skoða massa- og hitabreytingar á stórum svæðum og eins að meta hvort hægt sé að endurheimta jarðhitakerfið í núverandi mynd einfaldlega með því að stöðva vinnslu að 30 árum liðnum.
- Gert er ráð fyrir að vatn og gufa handa 120 MW stækkun Hellisheiðarvirkjunar verði unnin úr líkankubbum sem eru innan 1200 m láréttar fjarlægðar frá mögu- legum borteigum á Skarðsmýrarfjalli.
- Vinnslu er nokkuð jafndreift undin fjallinu og eingöngu er tekið úr líkanlögum G, L og R.
- Vinnslan er þvinguð út úr líkani, að heildarrensli sem skilar 200–250 kg/s af háþrýstigufu.
- Öllu skiljuvatni er rennt ofan í líkanið á ný um stór misgengi sem eru í vestur- kanti sigdalsins á Hellisheiði.

- Spáð er sívaxandi hækkun vermis úr holuæðum undir Skarðsmýrarfjalli fram til ársins 2036. Ekki er víst að svo verði í raun þar sem vinnslan er þvinguð út úr líkaninu í stað þess að vera í hlutfalli við þrýstimun líkans og holu.
- Líkanið er óhæft til mats á fjölda borholna sem þarf til reksturs allt að 120 MW virkjunar á Skarðsmýrarfjalli. Reynslan af borunum á Hellisheiði gefur ástæðu til að ætla að þær verði ekki færri en 25 og vart fleiri en 50 á líftíma mannvirkisins. Borteigar verða mun færri.
- Spáð er minnkun í heildarrennsli og gufurennslu holna á Hellisheiði ef líka er unnið úr Skarðsmýrarfjalli. Áhrifin koma hægt inn og eru því frekar talin hafa áhrif á rekstrarkostnað en stofnkostnað. Minnkun í rafmagnsframleiðslu er metin mest um 20 % í lok spátímans meðan skerðing í uppsöfnuðu gufurennslu er 6 %. Þetta er að sjálfsögðu bráðabirgðamat reiknilíkansins sem verður að endurskoða þegar borað hefur verið uppi Skarðsmýrarfjalli.
- Spáð er allt að 5 bara þrýstilækkun á Nesjavöllum við vinnslu úr Skarðsmýrarfjalli. Þrýstilækkunin hefur merkilegt nokk ekki áhrif á reiknað gufustreymi Nesjavalla, e.t.v. sökum þess að suða eykst í jarðhitakerfinu og þar með meðalvermið.
- Ef öll vinnsla á Nesjavöllum (120 MW), Hellisheiði (120 MW) og á Skarðsmýrarfjalli (120 MW) er stöðvuð árið 2036, mun lækkun þrýstings ganga til baka á ámóta löngum tíma og vinnslan stóð yfir, þ.e. á 40 til 60 árum. Massaforði jarðhitakerfanna telst því að miklu leyti endurnýjanlegur og afturkræfur.
- Varmaforði reiknilíkansins þarf hins vegar mun lengri tíma til að jafna sig eftir stöðvun vinnslu, eða 500 til 1000 ár. Víðast er reiknuð hitalækkun á vinnslusvæðum innan við 10 °C og verður mest tæpar 20 °C. Slíka hitalækkun má setja í samhengi við núverandi 240 til 280 °C hita vinnslusvæðisins á Hellisheiði. Ætti það að sýna að jarðhitakerfin verða áfram vinnsluhæf árið 2036 en að lækkun svæðisþrýstings leiði til þess að hægt verður á vinnslunni.
- Að samanlögðu má því gera ráð fyrir því að varmanámuna í Hengli megi endurnýja með hvíld vinnslusvæða. Eins ættu virkjanahugmyndirnar að falla að markmiðum um sjálfbæra þróun sökum þess að áfram virðist mega vinna talsvert úr holum að 30 árum liðnum. Tækifæri næstu kynslóða til nýtingar á jarðhitaauðlindinni eru því síst skert, sér í lagi ef þekkingin varðveitist, og tækniframfarir og nýjungar á borð við borun mjög djúpra súperkrítískra holna skila árangri.

Í lokin er áréttað að spáarnar í þessari skýrslu taka til óþekkts svæðis á Skarðsmýrarfjalli hvað varðar vinnslueiginleika. Verður því að ítreka fyrirvarann um notkun þeirra í stofn- og rekstraráætlunum hugsanlegrar virkjunar. Á hinn veginn telst reiknilíkanið meðal einungis örfárra verkfæra sem hæf eru til að rannsaka og meta endurnýjun jarðhitaauðlindarinnar í Hengli við breytilega vinnslu, sjálfbærni framkvæmdar og afturkræfni varma- og massaforða í jörð. Er von höfundar að líkanið styðji þannig við farsælar ákvarðanir um nýtingu jarðhitans í Hengli, hvort sem litið er til hagsmuna einnar kynslóðar eða margra.

## 7 HEIMILDASKRÁ

- Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, 2003. *Reiknilíkan af jarðhitakerfum í Hengli og spár um framtíðarástand við allt að 129 MW rafmagnsframleiðslu á Hellisheiði og 120 MW á Nesjavöllum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2003/009, 150 s.
- Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, 2005. *Nesjavallavirkjun: Endurkvörðun reiknilíkans og spár um viðbrögð jarðhitakerfis við stækkun raforkuvers úr 120 í 150 MW*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2005/001, 82 s.
- Grimur Bjornsson, 2004. Reservoir Conditions at 3-6 km Depth in the Hellisheiði Geothermal Field, SW-Iceland, estimated by Deep Drilling, Cold Water Injection and Seismic Monitoring. *Proceedings, Twenty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2004.
- Gudmundur Omar Fridleifsson, Wilfred A. Elders, Sverrir Thorhallson og Albert Albertsson, 2005. The Iceland Deep Drilling Project - A Search for Unconventional (Supercritical) Geothermal Resources. *World Geothermal Congress 2005*.
- Guðni Axelsson, Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Guðmundur Pálmarsson, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Ólafur G. Flóvenz, Sveinbjörn Björnsson og Valgarður Stefánsson, 2001. *Um sjálfbæra vinnslu jarðhita*. Umfjöllun málstofu Orkustofnunar. Orkustofnun, greinargerð, GRG GAX-ÁSG-BS-GP-HÁ-HTul-ÓGF-SvB-VS-2001/06, 6 s. + viðaukar
- Guðni Axelsson, Valgarður Stefánsson og Grímur Björnsson, 2004. Sustainable utilization of geothermal resources for 100 - 300 years. *Proceedings, twenty-ninth workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 26-28, 2004 9 s.
- Knútur Árnason og Ingvar Þór Magnússon, 2001. *Jarðhiti við Hengil og á Hellisheiði. Niðurstöður viðnámsmælinga*. Orkustofnun - Rannsóknasvið, OS-2001/091, 250 s.
- Orkuveita Reykjavíkur og VGK, 2005. *Stækkun Hellisheiðarvirkjunar. Tillaga að matsáætlun*. Skýrsla lögð inn til Skipulagsstofnunar í apríl 2005, 33 s.
- Valgarður Stefánsson, 2000. The Renewability of Geothermal Energy. *World Geothermal Congress*, Japan May 29 - June 10, s. 2000 6.

