



Mat á kerfisþrýstingi í Bjarnarflagi sumarið 2007

Egill Júlíusson

Unnið fyrir Landsvirkjun

**Greinargerð
ÍSOR-07183**

Verknr.: 520-005

08.06.2007

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

Efnisyfirlit

EFNISYFIRLIT	3
FORSAGA	4
MÆLINGAR Í HOLU B-11	4
MÆLINGAR Í HOLU B-12	8
SAMANTEKT UM KERFISPRÝSTING.....	11
ÁÆTЛАÐUR NIÐURDRÁTTUR Í BJARNARFLAGI.....	12
HEIMILDIR.....	15

Myndir

Mynd 1: Hitamælingar með dýpi í holu B-11.....	5
Mynd 2: Prýstingsmælingar með dýpi í holu B-11.	6
Mynd 3: Prýstingsuppbygging á 1500 m dýpi í holu B-11, sýnd á Horner-grafi.....	7
Mynd 4: Hitastig með dýpi í holu B-12.	9
Mynd 5: Prýstingur með dýpi í holu B-12.....	10
Mynd 6: Prýstingsuppbygging á 1500 m dýpi í holu B-12, sýnd á Horner-grafi.	11
Mynd 7: Áætlaður hiti á 1000 m u.s. (1340 m lóðrétt dýpi) í Bjarnarflagi.....	12
Mynd 8: Gróft mat á breytingum á þrýstingi á 1400 m dýpi í jarðhitakerfi Bjarnarflags m.v. vatnsleiðni 7×10^{-9} og vatnsrýmd 1×10^{-5} (svarar til tvífasa kerfis). X-ás sýnir fjarlægð frá ímyndaðri holu mitt á milli B-11 og B-12.....	13
Mynd 9. Gróft mat á breytingum á þrýstingi á 1400 m dýpi í jarðhitakerfi Bjarnarflags m.v. vatnsleiðni 7×10^{-9} og vatnsrýmd 1×10^{-8} (svarar til einfasa kerfis). X-ás sýnir fjarlægð frá ímyndaðri holu mitt á milli B-11 og B-12.....	14

Forsaga

Í reiknilíkani af jarðhitakerfinu undir Námafjalli, sem síðast var uppfært árið 2005 byggðust niðurstöður reikninga að stórum hluta á gögnum frá vinnsluholum B-11 og B-12 (Arnar Hjartarson et al., 2005). Þar var gert ráð fyrir að niðurdráttur umhverfis holurnar frá árinu 1979 til 1996 væri um 20 bar. Kerfisþrýstingur var endurmetinn í október 2005 og var þá niðurdráttur í holu B-11 áætlaður a.m.k. 23 bar en í holu B-12 var hann metinn allt að 30 bar (Arnar Hjartarson og Ragnar K. Ásmundsson, 2005). Þess ber að geta að mælingin á niðurdrætti fyrir holu B-12 var gerð eftir einungis 2 vikna hvíld og því gæti 30 bar niðurdráttur verið nokkuð ofmetinn.

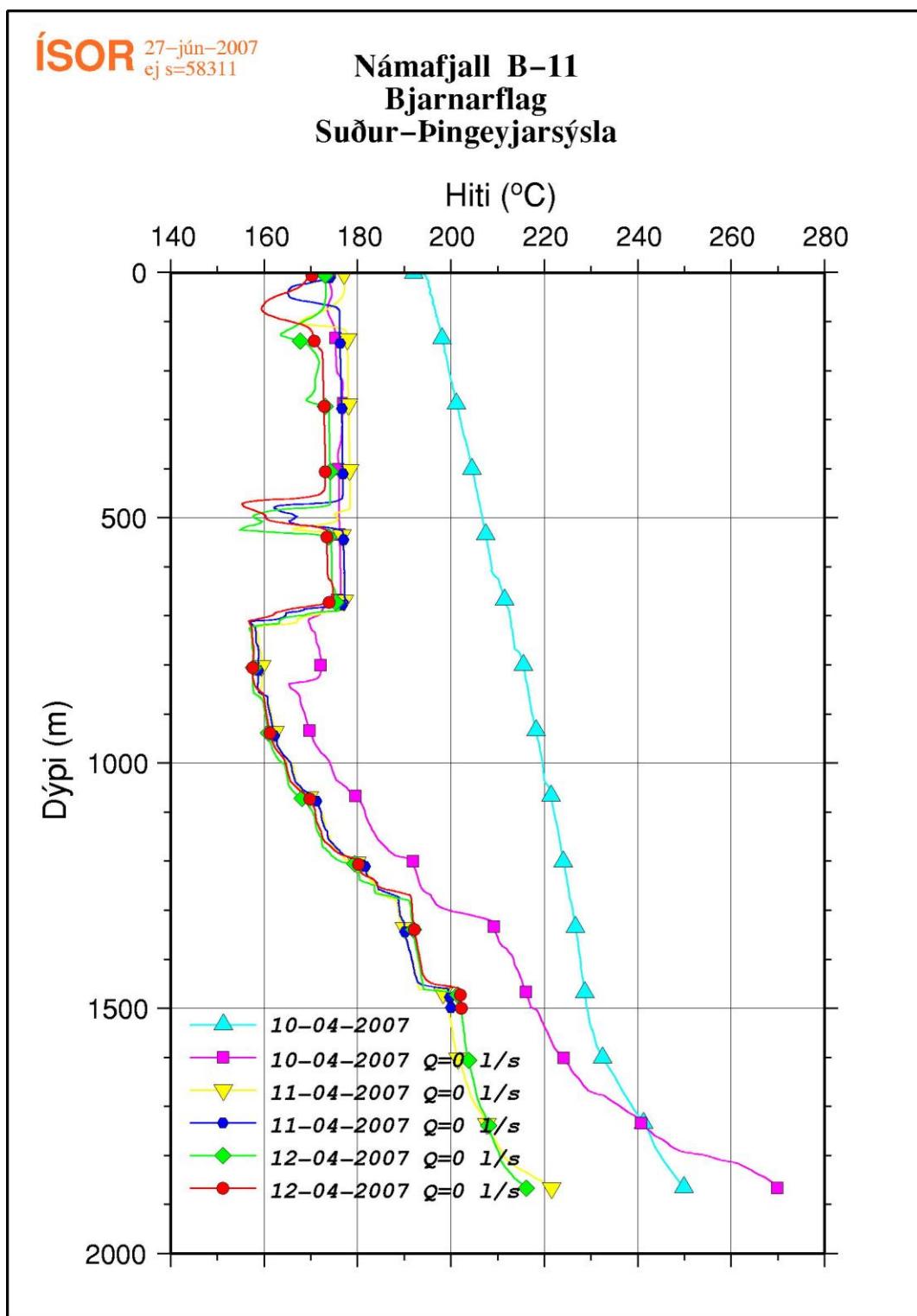
Menn hafa verið uggandi yfir þessum mikla niðurdrætti, en hann olli því m.a. að holur B-11 og B-12 duttu báðar úr vinnslu um nokkurt skeið á árunum 2004 og 2005. Þá er mikilvægt að gera sér grein fyrir því hvort um er að ræða staðbundinn niðurdrátt í nágrenni við vinnsluholurnar eða hvort þrýstingslægðin nái langt út í djúpkerfið. Því var ákveðið að slökkva á hvorri holu fyrir sig snemma árs 2007 og mæla hvernig þrýstingur jafnar sig í holunum. Þannig mætti áætla hvernig þrýstingur eykst út frá niðurdráttarsvæði holnanna en einnig reyna að meta hvernig þrýstingur jafnar sig með tíma á svæðinu og spá fyrir um hver ótruflaður þrýstingur var á svæðinu í upphafi.

Mælingar í holu B-11

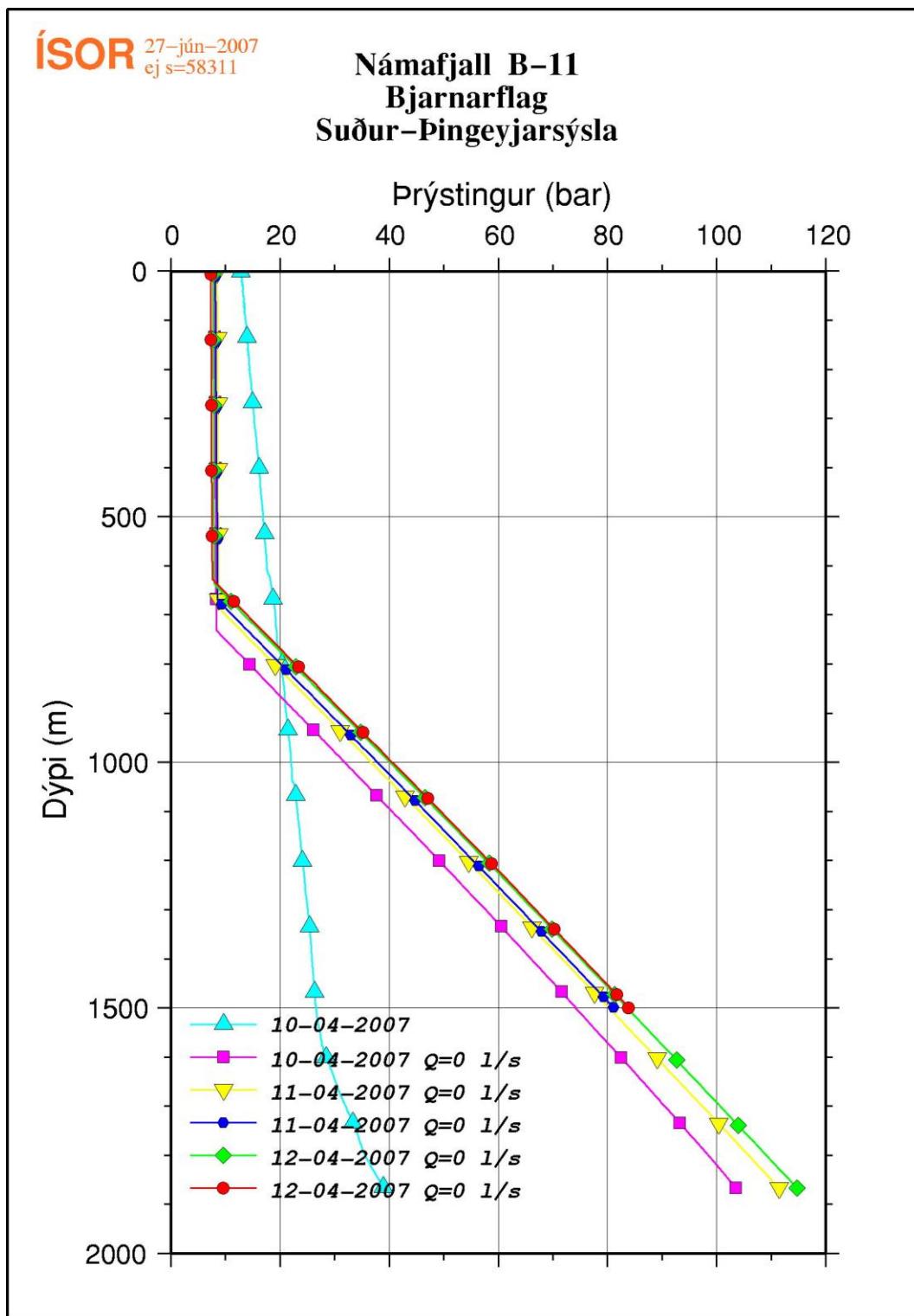
Hola B-11 í Bjarnarflagi var boruð árið 1979. Hún er staðsett sunnan megin við þjóðveginn sem liggar um Krummaskarðsmisgengið og er innan við 100 m austan við misgengið, sem hefur N-S stefnu. Hola B-11 var boruð niður á 1923 m dýpi með $8\frac{1}{2}$ " borkrónu í vinnsluhluta og fóðruð með $9\frac{5}{8}$ " skrúfaðri fóðringu niður á 629 m dýpi. Í holunni er $7\frac{5}{8}$ " leiðari sem nær niður á 1915 m dýpi (Ásgrímur Guðmundsson, 1993).

Helstu æðar í holunni eru á um 650, 1400 og 1900 m dýpi. Um 150°C heitt vatn streymir inn í holuna úr efstu æðinni, sem veldur því að erfitt er að koma holunni aftur í blástur eftir stopp. Í júlí 2004 dó hola B-11 þegar henni var lokað í nokkra klukkutíma vegna mælinga (Arnar Hjartarson, 2004). Holan komst ekki aftur í gang fyrr en um einu og hálfu ári seinna, 10 nóv. 2005, þegar hún var gangsett með loftdælingartækni úr smiðju Sverris Þórhallssonar, sérfræðings hjá ÍSOR.

Mælingar á þrýstingsuppgöggingu í holu B-11 voru loks gerðar í apríl 2007. Þann 10. apríl, kl. 10:39, var slökkt á holunni. Mælir var á 1500 m dýpi, sem mældi þrýsting og hita, á meðan holan jafnaði sig. Mælt var aftur dagana næst á eftir, þ.e. 11. og 12. apríl og einn lokapunktur var tekinn 13. júní 2007.



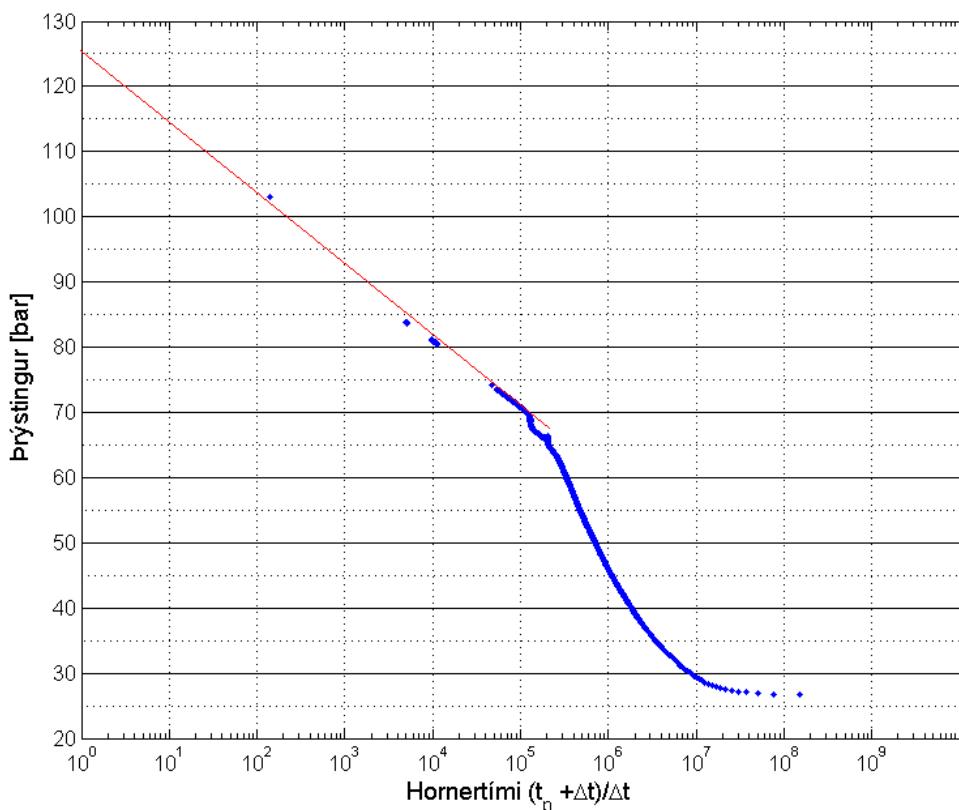
Mynd 1: Hitamælingar með dýpi í holu B-11.



Mynd 2: Þrýstingsmælingar með dýpi í holu B-11.

Gögnin, sem safnað var, voru teiknuð upp og sett á svokallað Horner-graf (Mynd 3) sem gjarna er notað til þess að meta langtíma uppbyggingu í þrýstingi fyrir jarðhitakerfi. Við gerð grafsins var gert ráð fyrir 22 ára nettó vinnslutíma (t_p), því þótt holan hafi í raun verið í vinnslu um 25 ár, var hún stopp í um $1\frac{1}{2}$ ár. Á Horner-grafinu má framlengja uppbygginguna í þrýstingi út í hið óendanlega, en það svarar til Horner-

tíma 1. Þannig má sjá að ef þrýstingur héldi áfram að byggjast upp með sama móti og hingað til hefur verið, án þess að truflast af útjöðrum jarðhitakerfisins, myndi hann ná um 125 bar þrýstingi á 1500 m dýpi. Síðasti mælipunkturinn liggur örlítið fyrir ofan rauðu línuna sem dregin er á mynd 3. Það gæti verið vegna þess að þrýstingsbylgjan á leið út frá holunni hafi rekist á jaðar með mjög lága lekt, eða að þrýstingsbylgjan frá B-11 sé að rekast á þrýstingsbylgjuna frá B-12. Í öllu falli bendir þetta til þess að þrýstingur muni jafna sig öllu hraðar en talið var áður en júní-mælingin kom fram. Erfitt er að segja til um hversu langt þrýstingsbylgjan hefur ferðast vegna óvissu um áhrif tvífasa ástands umhverfis holuna, en líklegt þykir að hún hafi farið á bilinu 0,5 til 2 km út frá holunni á þessu þriggja mánaða tímabili.



Mynd 3: Prýstingsuppbýgging á 1500 m dýpi í holu B-11, sýnd á Horner-grafi.

Reyndar var sað hængur á mælingunni í holu B-11 að vendipunktur¹ í holunni mældist á 1400 m dýpi við upphitun árið 1979 en mælingarnar voru gerðar á 1500 m dýpi. Þetta var leiðrétt miðað við 850 kg/m³ eðlismassa, sem svarar til hita og þrýstings í holunni eftir að hún hafði losað sig við gufu og áhrif holurýmdar. Miðað við þær forsendur er þrýstingur á 1400 m dýpi um 8,5 bar lægri en á 1500 m, sem gefur mat á ótrufluðum kerfisþrýstingi um 117 bar á 1400 m dýpi. Þetta mat er í hærri kantinum samanborið

¹ Vendipunktur í borholu er punktur á ákveðnu dýpi sem talinn endurspeglar þrýsting í jarðhitakerfinu í kring (á sama dýpi). Þrýstingur á þessu dýpi er óháður hitastigsbreytingum á vatni í holunni.

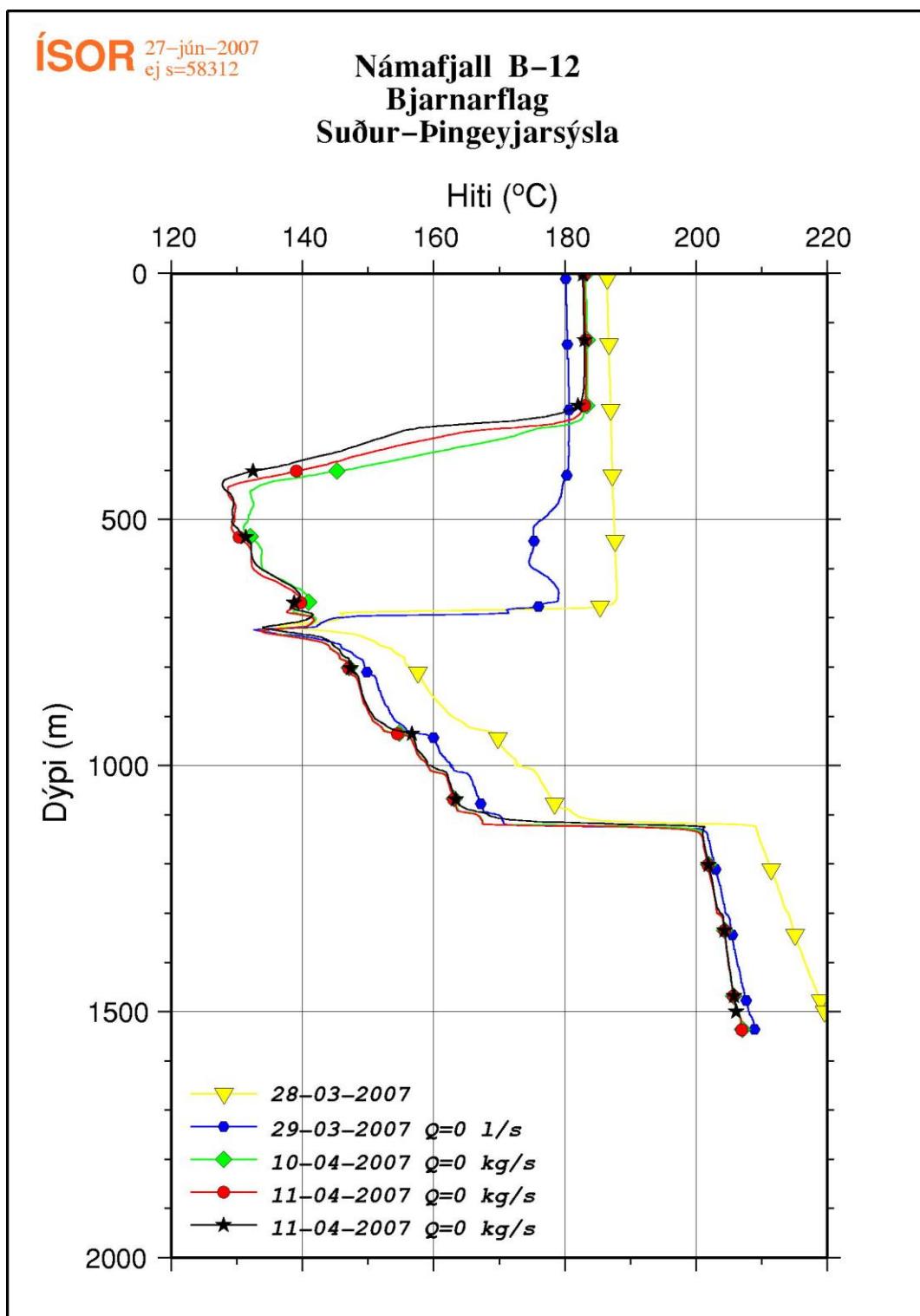
við það sem var metið í greinargerð ÍSOR árið 2005 (Arnar Hjartarson og Ragnar K. Ásmundsson, 2005), en þá var kerfisþrýstingur á 1400 m dýpi metinn 97 bar eftir rúmlega árs hvíld á vinnslu (árs hvíld samsvarar Horner-tíma 21, hér c.a. 104 bar á 1400 m dýpi). Hér ber að veita því eftirtekt að þrýstingur í jarðhitakerfinu breytist mikið með tíma og fjarlægð frá vinnsluholunni en betur er farið í saumana á því kaflanum „Áætlaður niðurdráttur í Bjarnarflagi“, aftar í þessari greinargerð.

Mælingar í holu B-12

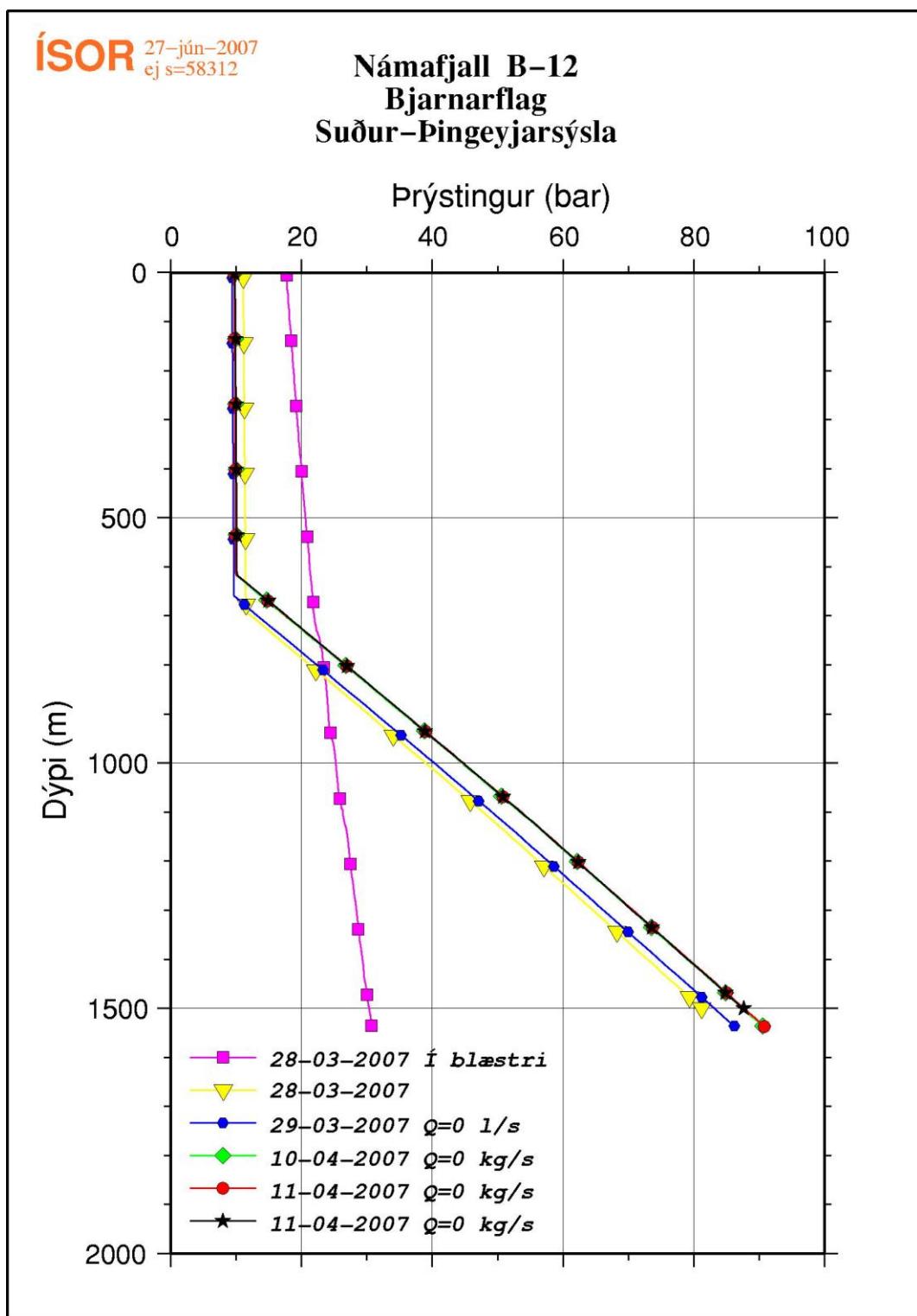
Hola B-12 í Bjarnarflagi var boruð árið 1980 og er staðsett um 230 m sunnan við holu B-11. Hola B-12 var hönnuð á svipaðan hátt og hola B-11, en hún var boruð niður á 1999 m dýpi og nær vinnsluföðringin ($9^{5/8}$) niður á 687 m dýpi. Leiðari með 7" þvermál nær niður á 1957 m dýpi (Ásgrímur Guðmundsson, 1993).

Helstu æðar í holunni eru á um 700, 900 og 1100 m dýpi en einnig er líklegt að opin æð sé við botn holunnar, en ekki hefur tekist að koma mæli þangað niður síðan skömmu eftir að borun holunnar lauk. Líkt og í holu B-11 streymir 150°C heitt vatn inn í holuna úr efstu æðinni, sem veldur því að erfitt er að koma henni aftur í blástur eftir stopp. Vinnsla úr holu B-12 lagðist af um 4 mánaða skeið haustið 2005 eftir að henni var lokað vegna viðhalds. Hún komst aftur í gang 1. janúar 2006 og var gangsett með loftdælingu.

Slökkt var á holu B-12 þann 28. mars 2007 til þess að mæla uppbyggingu þrýstings á 1500 m dýpi. Auk mælinga þennan dag var þrýstingur mældur í holunni 29. mars, 10. og 11. apríl og loks 12 júní 2007.

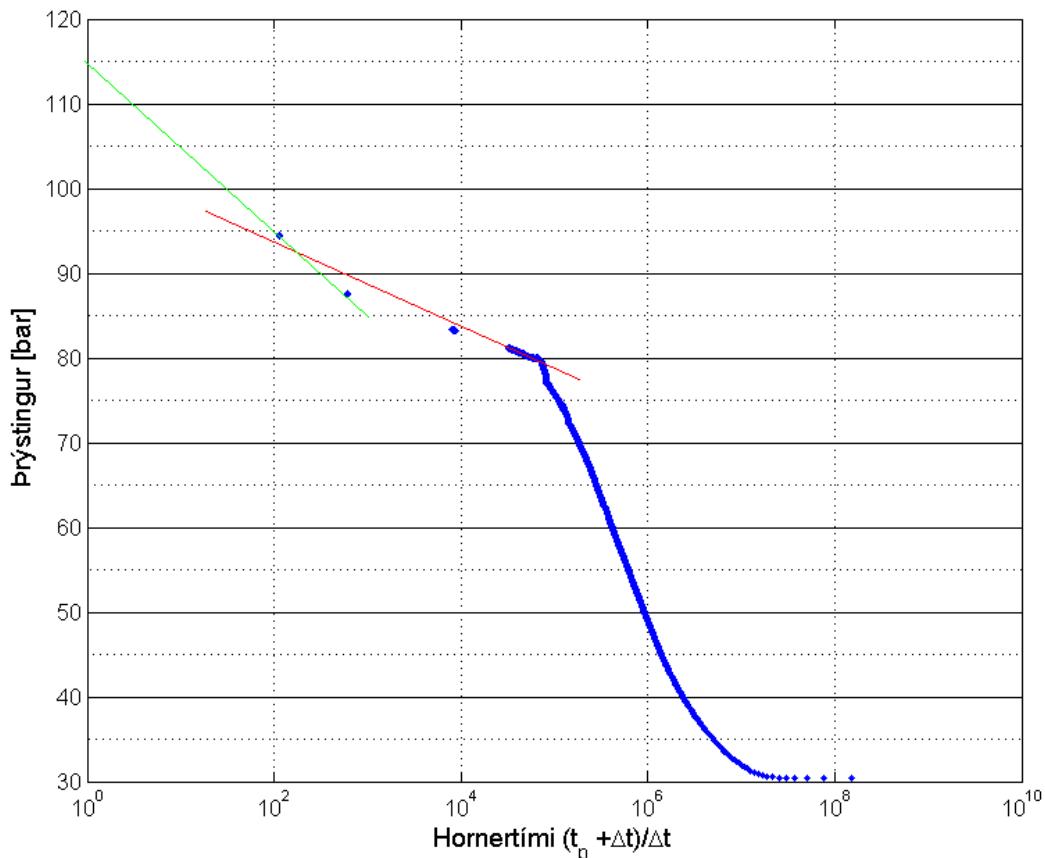


Mynd 4: Hitastig með dýpi í holu B-12.



Mynd 5: Þrýstingur með dýpi í holu B-12.

Líklegt þykir að vinnsla úr holu 11 hafi nokkur áhrif á mælingar fyrstu tvær vikurnar og að rétt mynd af uppbyggingu þrýstings sjáist ekki fyrr en í síðustu mælingunni (grænn ferill á mynd 6). Nettó vinnslutíminn (t_p) á Horner grafinu var í þessu tilfelli 24 ár, þar sem styttra stopp var á vinnslunni úr holu B-12 en B-11.



Mynd 6: Þrýstingsuppbrygging á 1500 m dýpi í holu B-12, sýnd á Horner-grafi.

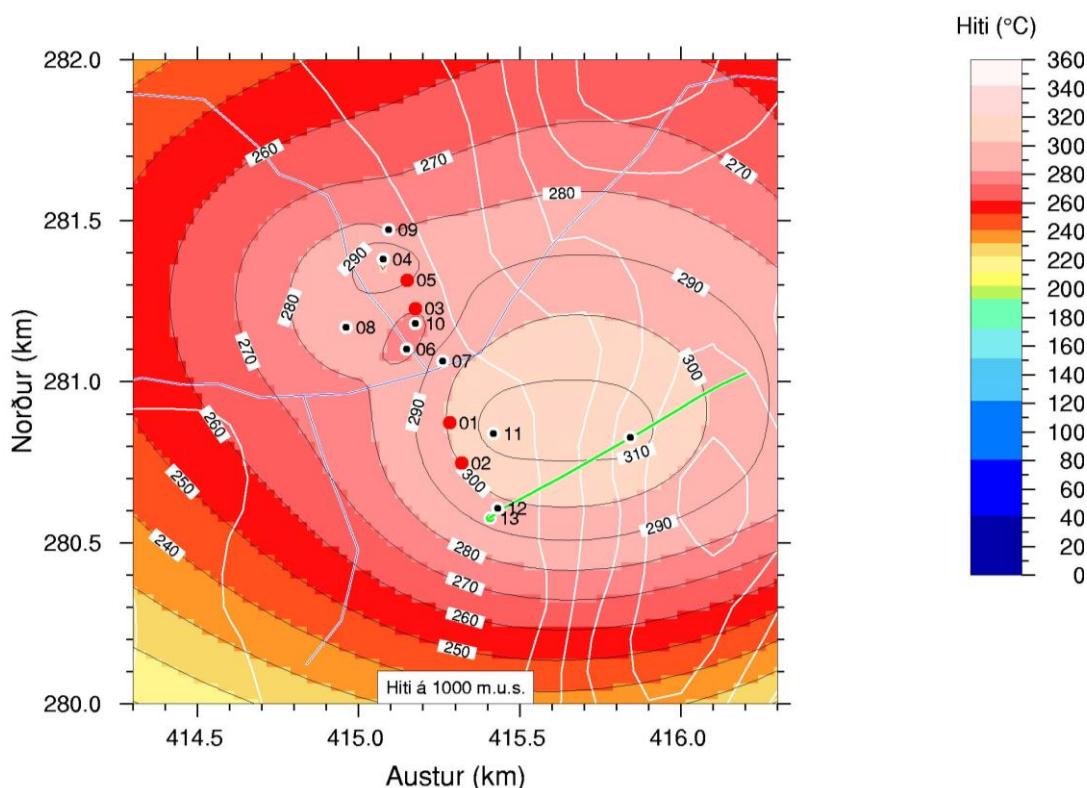
Samkvæmt mælingum sem gerðar voru við upphitun holunnar í desember 1980 er vendipunktur holunnar á um 1425 m dýpi. Mælingarnar úr holu B-12 (Mynd 6) gefa til kynna að kerfisþrýstingur sé um 115 bar á 1500 m dýpi, eða sem svarar til 106 bar þrýstings á 1400 m dýpi. Þessar niðurstöður eru í ágætu samræmi við það sem mælt var í október 2005, en þá var einnig slökkt á B-11 og þrýstingur á 1500 m dýpi fór upp í 90 bar eftir tveggja vikna vinnslustopp (samsvarar Horner-tíma 625).

Samantekt um kerfisþrýsting

Af framangreindum mælingum má segja að fundin hafi verið gróf mörk á kerfisþrýstingi fyrir Bjarnarflag. Dýpi til viðmiðunar fyrir kerfisþrýsting hefur verið nokkuð á reiki en höfundur telur réttast að miða við 1400 m. Að því sögðu virðist sem kerfisþrýstingur sé á bilinu 106 til 117 bar á 1400 m dýpi, þar sem efri mörkin eru gróflega metin af mælingum í holu B-11 en neðri mörkin skorðast af markgildi á uppbyggingu þrýstings í holu B-12. Þetta mat á kerfisþrýstingi er það sem kalla má

ótruflaðan kerfisþrýsting, þ.e. þrýsting í þeim hluta kerfisins sem hefur ekki fundið fyrir neinum áhrifum vinnslu. Búast má við að mestur hluti Bjarnarflagssvæðisins hafi fundið fyrir vinnslunni úr holunum tveimur, eftir 24 ára vinnslusögu þ.a. þrýstingur á útjöðrum kerfisins gæti verið e-ð lægri þegar þetta er skrifð. Nánar er fjallað um þetta í næsta kafla.

Eftir rúmlega þriggja mánaða hvíld er hola B-11 kominn í 96 bar þrýsting en hola B 12 stendur í um 86 bar (á 1400 m dýpi). Ekki er gott að skýra hvað veldur þessu mikla misräemi í þrýstingi milli B-11 og B-12 en vera má að hola 12 sé í betra þrýstisambandi við holu 13, sem unnið hefur verið úr (ca. 36 kg/s) frá því í september 2006. Einnig má vera að hola 11 sé nær uppstreymisrás kerfisins, sem þá skýrir hvers vegna hún er fljótari að byggja upp þrýsting. Sama mætti segja um holu 13, en myndir sem dregnar hafa verið upp af hitadreifingu í jarðhitakerfinu virðast styðja það (Mynd 7).

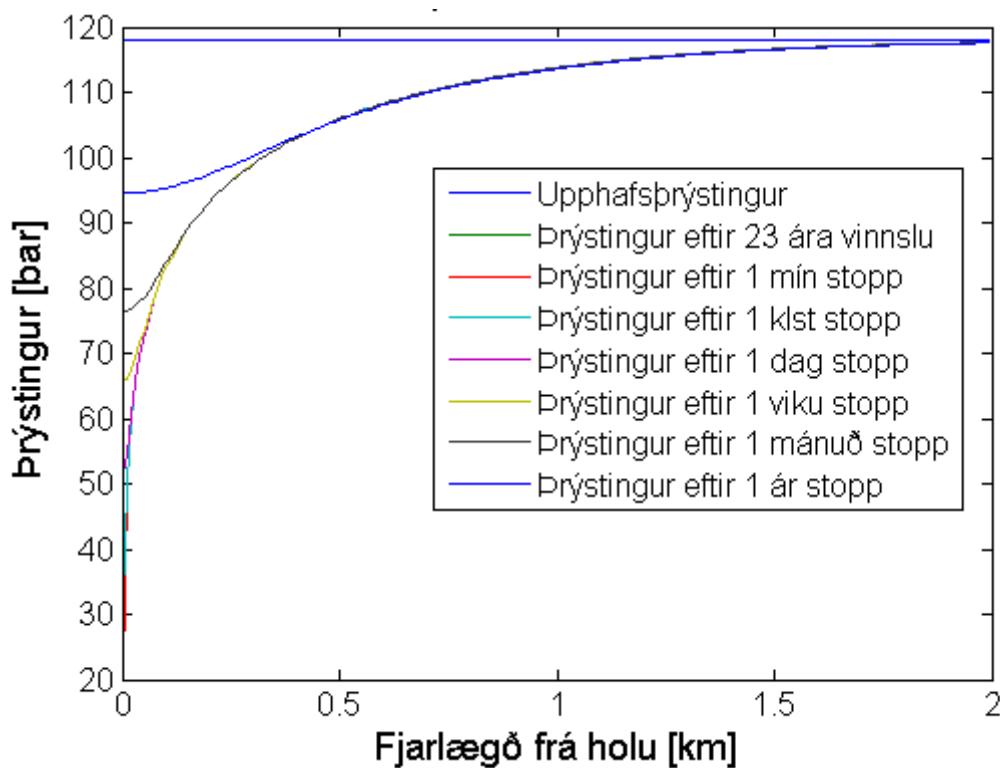


Mynd 7: Áætlaður hiti á 1000 m u.s. (1340 m löðrétt dýpi) í Bjarnarflagi (Arnar Hjartarson, 2006).

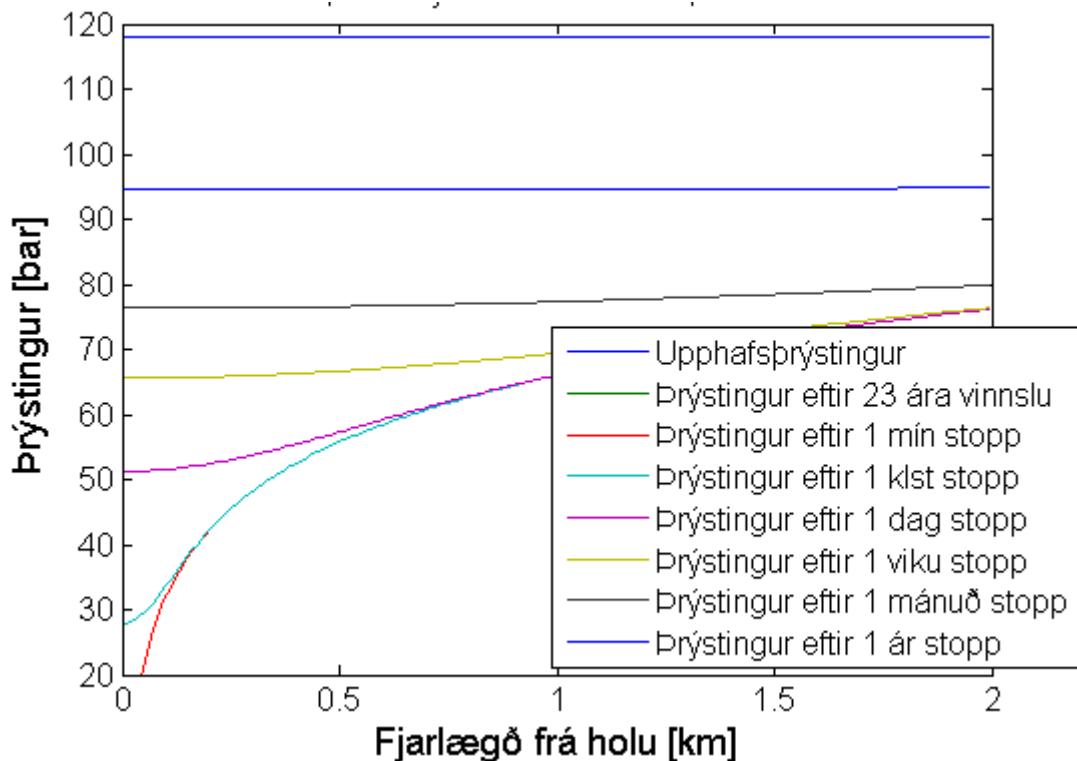
Áætlaður niðurdráttur í Bjarnarflagi

Athyglisvert er að skoða hvernig þrýstingur í jarðhitageyminum byggist upp með fjarlægð frá holu eftir að vinnsla er skyndilega stöðvuð. Það er háð bæði vatnsleiðni og vatnsrýmd kerfisins, en þá eiginleika var reynt að meta út frá þeim gögnum sem safnað var. Þetta var gert með því að fella flæðilíkan sem notað er fyrir þrepaprófanir að uppbryggingu þrýstings eftir að holunni var lokað. Flæðilíkönin sem notuð voru, fela í sér ályktanir um samþjappanleika vökva sem eiga illa við í þessu tilfelli og leiðir

það til þess að sérstaklega mikil óvissa var í mati á vatnsrýmd. Af þrýstingsmælingum með dýpi má sjá að gufa flæddi inn í holurnar allt niður á 1500 m dýpi og jafnvel neðar. Því hefur gufusvæði af óþekktri stærð líklega myndast umhverfis báðar holurnar. Þetta veldur því að þrýstibylgjan ferðast í gegnum vökva sem er mjög missamþjappanlegur, og það hefur áhrif á hvernig þrýstingur breytist með tíma í holunni. Breytileiki í samþjöppun kemur fram í breytilegri vatnsrýmd og getur umbreyting frá tvífasa kerfi yfir í einfasa kerfi ollið breytileika sem nemur um þremur stærðargráðum. Þetta hefur mikil áhrif á lögum niðurdráttarkeilunnar þannig að hér eru sett fram tvö tilfelli sem marka útgildi á vatnsrýmdinni. Í því fyrra var gert ráð fyrir mikilli vatnsrýmd, sem svarar til ástands í tvífasa kerfi, en í því seinna var vatnsrýmdin lág, eins og gerist í einfasa vökvakerfum. Líklega er réttur ferill einhversstaðar á milli þessara tveggja tilfella. Gert var ráð fyrir að taka mætti holur 11 og 12 saman í eina holu með meðalvinnslu 65 kg/s og svo reiknað út hvernig þrýstingur jafnar sig í 2 km radíus útfrá holunni eftir að slökkt er á henni. Ekki er gert ráð fyrir neinni tregðu við veggi holunnar (e. skin effect). Myndir 8 og 9 sýna gróft áætlaðan þrýstingsprófil úti í jarðhitakerfinu og hvernig hann breytist með fjarlægð og tíma.



Mynd 8: Gróft mat á breytingum á þrýstingi á 1400 m dýpi í jarðhitakerfi Bjarnarflags m.v. vatnsleiðni 7×10^{-9} og vatnsrýmd 1×10^{-5} (svarar til tvífasa kerfis). X-ás sýnir fjarlægð frá ímyndaðri holu mitt á milli B-11 og B-12.



Mynd 9. Gróft mat á breytingum á þrýstingi á 1400 m dýpi í jarðhitakerfi Bjarnarflags m.v. vatnsleiðni 7×10^{-9} og vatnsrýmd 1×10^{-8} (svarar til einfasa kerfis). X-ás sýnir fjarlægð frá ímyndaðri holu mitt á milli B-11 og B-12.

Eins og sjá má af þessum myndum er alls ekki einhlítt að gefa upp einhverja eina fasta stærð fyrir kerfisþrýsting heldur er þrýstingur í jarðhitakerfinu stærð sem er háð staðsetningu og tíma, ásamt eðli vökvans og bergsins í kring. Af Mynd 8 má sjá að í tvífasa kerfi ná þrýstiáhrifin mun styttra út frá holunni og þrýstingur jafnast hægar út. Í einfasa kerfinu verður heildar niðurdrátturinn talsvert útbreiddari, en svæðið nærist holunni jafnar sig mun hraðar eftir að vinnslu er hætt. Líklegast sjáum við e-ð samblund af þessu tvennu í Bjarnarflagi þar sem tvífasaáhrifin eru mest nálægt holunum og dvína eftir því sem þær eru lokaðar lengur.

Þegar hola B-13 var mæld eftir upphitun sumarið 2006 kom í ljós að þrýstingur á 1400 m dýpi var um 114 bar þrátt fyrir að vinnsluæðar hennar væru aðeins um 500 m frá vinnsluæðum B-11 og B-12. Ekki er útilokað að það sé vegna þess að niðurdráttakeilan í kringum B-11 og B-12 sé mjög brött, en höfundur telur líklegt að þetta sé einnig tilkomið vegna misáttu lektar í kerfinu, þ.e. einhvers konar hindrunar í þrýstisambandi á milli holu B-13 annars vegar og holna B-11 og B-12 hins vegar. Sú tilgáta samræmist einnig hugmyndum manna um sprungustefnu á svæðinu og niðurstöðum hitamælinga sem gefa til kynna að uppstreymi undir Námafjalli sé nærist holu B-13.

Heimildir

Arnar Hjartarson, 2004: *Lokun holu B-11 í Bjarnarflagi 2004*. Íslenskar Orkurannsóknir, greinargerð ÍSOR-04020, 9s.

Arnar Hjartarson, Ómar Sigurðsson, Ásgrímur Guðmundsson, Halldór Ármannsson, Ragna Karlsdóttir MAR 2005 *Reiknilíkan af jarðhitakerfinu í Námafjalli og spár um viðbrögð þess við 30-90 MW rafmagnsframleiðslu í Bjarnarflagi 14584* Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR 2004/009 123 s. : myndir, töflur, línurit.

Arnar Hjartarson og Ragnar K. Ásmundsson, 2005: *Mælingar í holum B-11 og B-12 í Bjarnarflagi í október 2005*. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð ÍSOR-05183, 10 s.

Arnar Hjartarson, 2006: *Niðurstöður mælinga í holu BJ-13 og mat á niðurdrætti í Bjarnarflagi*. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð ÍSOR-06193, 9 s.

Ásgrímur Guðmundsson, 1993: *Jarðlagasnið um holur BJ-11 og BJ-12 í Bjarnarflagi*. Orkustofnun, OS-93071/JHD-35 B, 46 s.