



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

**Grímur Björnsson  
Benedikt Steingrímsson**

# **HITI OG ÞRÝSTINGUR Í JARÐHITAKERFINU Í SVARTSENGI Upphafsstand og breytingar vegna vinnslu**

**OS-91016/JHD-04**  
Reykjavík, maí 1991

**Unnið fyrir  
Hitaveitu Suðurnesja**



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 613221

**Grímur Björnsson  
Benedikt Steingrímsson**

**HITI OG ÞRÝSTINGUR Í  
JARÐHITAKERFINU Í SVARTSENGI  
Upphafsstand og breytingar vegna vinnslu**

**OS-91016/JHD-04**  
Reykjavík, maí 1991

**Unnið fyrir  
Hitaveitu Suðurnesja**

## ÁGRIP

Jarðhitadeild Orkustofnunar hefur annast borholumælingar í Svartsengi frá því boranir hófust þar haustið 1971. Alls hafa verið framkvæmdar rúmlega 511 mælingar og aðgerðir í Svartsengisholum fram til ársloka 1990. Í skýrslunni er unnið ítarlega úr þessu mikla safni upplýsinga.

Kerfisbundin skoðun hitamælinga staðfestir fyrri hugmyndir um þrískiptingu vatnskerfa í Svartsengi. Á 70-300 m dýpi er volgt vatnskerfi (30-100 °C) sem streymir hægt til SV. Volga kerfið leikur um gufupúða sem stingst upp til yfirborðs við holar 2, 3 og 10. Neðan 600 m dýpis hefst svo þriðja vatnskerfið, 230-240 °C heitt og er það hið eiginlega jarðhitakerfi. Á 300-600 m dýpi er hins vegar torlekt berg sem varnar samgangi jarðhitakerfisins og volga vatnskerfisins.

Nánari skoðun hitamælinga leiðir í ljós fínni drætti í rennsli jarðhitavökvans. Þannig hitnar volga vatnskerfið við að leika um gufupúðann á leið sinni til SV. Eins sést daft hitahámark með N-S stefnu í jarðhitakerfinu við holu 4. Það er túlkað sem uppstreymisrás svæðisins. Hitamælingarnar sýna að margar holar eru viðsnúnar í hita neðan 1000-1300 m dýpis. Viðsnuningurinn orsakast af greiðu láréttu streymi vatns um jarðlagasyrpur á 700 og 1000-1300 m dýpi. Líklega fæðir uppstreymið við holu 4 þessar syrpur og hugsanlega einnig gufupúðann. Hitamælingarnar sýna einnig að hiti lækkar til vesturs frá uppstreyminu, en óvist er hvernig hita háttar til austurs frá borsvæðinu.

Vinnslan úr Svartsengi hefur valdið rúmlega 20 bara niðurdrætti frá 1976 til ársloka 1990. Núverandi hraði niðurdráttarins er um 1,2 bör á ári. Þrýstilækkunin er viðfeðm og nær allt til Eldvarpa. Eins veldur hún smávægilegri samþjöppun jarðлага sem kemur fram í landsigi. Myndar landsigið skál sem teygist til VSV frá borholunum í Svartsengi. Sambærileg teyging landsigs sést hins vegar ekki til austurs sem bendir til að jarðhitakerfið sé lokað í þá átt. Þrýtisamband Eldvarpa og Svartsengis virðist vera um lek jarðlöög neðan 2000 m dýpis. Vökvi kominn af þessu dýpi getur skýrt hví meðalhiti allra Svartsengisholna hefur hækkað um 1-2 °C í seinni tíð.

Niðurdrátturinn í Svartsengi hefur þegar haft áhrif á vinnslu úr borholum. Þannig hefur orðið að lækka toppþrýsting holna um rúm 0,3 bör/ári til að rennsli úr þeim haldi í við þrýstilækkun vatnsæða. Kalktappar, sem myndast rétt ofan suðuborðs í holum, hafa færst neðar í takt við niðurdráttinn og myndast þeir nú neðan vinnslufóðringa í öllum holum. Merki eru um að leiðarar skemmist við hreinsiboranir. Niðurdrátturinn leiddi til þess að kaldara vatn streymdi a.m.k. 4 sinnum í stuttan tíma inn í jarðhitakerfið og olli allt að 15 °C kólnun borholna. Slíkir kæliviðburðir gerast fátíðir í seinni tíð, hugsanlega vegna þess að niðurdrátturinn fergir mjög jaðra jarðhitakerfisins og gerir þá óbrotgjarnari.

Niðurdæltinum í Svartsengi hefur verið mætt að hluta með niðurdælingu 70-80 °C heits vatns í borholur. Niðurdælingin olli um 8 °C kólnun vatnsæða holu 6. Upphitnun holu 12 eftir niðurdælingu sýnir dæmigerð einkenni jarðhitakerfa af sprungugerð. Í þeim er vökvarennslí mest um lóðréttar og láréttar sprungur, meðan sjálfur vatns- og varmaforði jarðhitakerfisins er fólginn í bergen milli sprungnanna. Breytingar á ástandi vökvans í sprungunetinu breiðast hratt um það, en þegar breytingarnar eru yfirlitnar tekur bergmassinn milli sprungnanna aftur völdin og skilar hita vatnsæða fljótt í fyrra horf.

Mesta hætta sem vofir yfir vinnslunni í Svartsengi er fólgin í kólnun vatnsæða. Núverandi innstreymishiti borholna þarf að vera rúmlega 210 °C til að þær blási inn á gufuveitu með nægum þrýstingi. Mun þessi lágmarkshiti fara hækkandi með auknum niðurdrætti. Hins vegar er nú komið að þeim tímamótum í jarðhitakerfinu að gufupúðinn við holar 2, 3 og 10 er tekinn að breiða sig lárétt út um bergið neðan 600 m dýpis. Slíkt mun allt í senn, auka afl borholna, verja þær fyrir áhrifum kælingar og minnka massatöku úr svæðinu, meðan afl Orkuversins helst óbreytt.

## EFNISYFIRLIT

|   |    |
|---|----|
| ÁGRIP . . . . .   | 2  |
| EFNISYFIRLIT . . . . .  | 3  |
| MYNDASKRÁ . . . . .   | 4  |
| TÖFLUSKRÁ . . . . .   | 6  |
| 1. INNGANGUR . . . . .  | 7  |
| 2. YFIRLIT HITA- OG ÞRÝSTIMÆLINGA . . . . .                         | 10 |
| 2.1 Mæliaðferðir . . . . .  | 10 |
| 2.2 Nákvæmni mælinga . . . . .                                      | 11 |
| 3. HITADREIFING Í JARÐHITAKERFINU . . . . .                         | 12 |
| 3.1 Upphaflegur berghiti . . . . .                                  | 12 |
| 3.2 Hitabreytingar vegna vinnslu . . . . .                          | 19 |
| 3.3 Áhrif niðurdælingar . . . . .                                   | 23 |
| 4. ÞRÝSTIDREIFING Í JARÐHITAKERFINU . . . . .                       | 28 |
| 4.1 Upphaflegur þrýstingur . . . . .                                | 28 |
| 4.2 Niðurdráttur vegna vinnslu . . . . .                            | 30 |
| 4.3 Láréttar þrýstibreytingar . . . . .                             | 31 |
| 4.4 Niðurdráttur í borholum í blæstri . . . . .                     | 33 |
| 5. ÚTFELLINGAR Í BORHOLUM . . . . .                                 | 34 |
| 5.1 Körfumælingar . . . . .   | 34 |
| 5.2 Hreinsiboranir á kalkútfellingum . . . . .                      | 35 |
| 5.3 Þrýstifall vegna útfellinga . . . . .                           | 39 |
| 5.4 Botnfall í holum . . . . .                                      | 41 |
| 6. ÁHRIF BREYTINGA Í JARÐHITAKERFINU Á AFKÖST<br>BORHOLNA . . . . . | 43 |
| 7. VINNSLUÁHRIF Í NÁGRENNI SVARTSENGIS . . . . .                    | 47 |
| 7.1 Þrýstilækkun í Eldvörpum . . . . .                              | 47 |
| 7.2 Landhæðarbreytingar . . . . .                                   | 47 |
| 8. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA<br>HEIMILDIR . . . . .                     | 49 |
| ENGLISH SUMMARY . . . . .   | 53 |
| VIÐAUKI 1: Staðsetning borholna í Svartsengi . . . . .              | 55 |
| VIÐAUKI 2: Yfirlit um mælingar í Svartsengisholum . . . . .         | 57 |
| VIÐAUKI 3: Blandreikningar í holu SG-12 . . . . .                   | 59 |
|   | 69 |

## MYNDASKRÁ

|  |    |
|--|----|
| Mynd 1. Yfirlitsmynd af jarðhitasvæðum á Reykjanesskaga ásamt meginþráttum í jarðfræði svæðisins (Haukur Jóhannesson, 1989). . . . . | 8  |
| Mynd 2. Staðsetning borholna og annarra mannvirkja í Svartsengi. . . . .   | 9  |
| Mynd 3. Árleg vinnsla úr jarðhitasvæðinu í Svartsengi, að frádeginni niðurdælingu (Vatnaskil, 1989 a). . . . .                       | 10 |
| Mynd 4. Lega hitaþversniða í Svartsengi. . . . .   | 14 |
| Mynd 5. Hitaþversnið A-A'. . . . .   | 15 |
| Mynd 6. Hitaþversnið B-B'. . . . .   | 15 |
| Mynd 7. Jafnhitalínur á 200 m undir sjávarmáli. . . . .  | 16 |
| Mynd 8. Jafnhitalínur á 300 m undir sjávarmáli. . . . .  | 16 |
| Mynd 9. Jafnhitalínur á 400 m undir sjávarmáli. . . . .  | 16 |
| Mynd 10. Jafnhitalínur á 500 m undir sjávarmáli. . . . .   | 16 |
| Mynd 11. Jafnhitalínur á 600 m undir sjávarmáli. . . . .   | 17 |
| Mynd 12. Jafnhitalínur á 800 m undir sjávarmáli. . . . .   | 17 |
| Mynd 13. Jafnhitalínur á 1000 m undir sjávarmáli. . . . .  | 17 |
| Mynd 14. Jafnhitalínur á 1400 m undir sjávarmáli. . . . .  | 17 |
| Mynd 15. Hitasaga Svartsengisholna á 800 m dýpi. . . . .   | 20 |
| Mynd 16. Skyndikæling í Svartsengi vorið 1983. . . . .   | 21 |
| Mynd 17. Skyndikæling holu SG-12 vorið 1984. . . . .   | 21 |
| Mynd 18. Meðalhiti holna í Svartsengi yfir mislöng tímabil. . . . .  | 22 |
| Mynd 19. Hækkun botnhita holu SG-7 við vinnslu. . . . .  | 22 |
| Mynd 20. Hitabreytingar holu SG-6 vegna niðurdælingar í SG-12. . . . .   | 25 |
| Mynd 21. Hitamælingar í holu SG-12 eftir lok niðurdælingar. . . . .  | 26 |
| Mynd 22. Hitasaga holu SG-12 eftir að niðurdælingu lauk. . . . .   | 27 |
| Mynd 23. Niðurstöður rennslis- og hitamælinga í holu SG-5 í mars 1990. . . . .   | 27 |
| Mynd 24. Upphafleg þrýstidreifing í jarðhitakerfinu í Svartsengi. . . . .  | 29 |
| Mynd 25. Þrýstingur á 900 m u.s. með tíma fyrir allar holar í Svartsengi. . . . .  | 30 |
| Mynd 26. Hraði niðurdráttar og breytingar í meðalvinnslu í Svartsengi. . . . .   | 31 |
| Mynd 27. Munur mælds þrýstings og meðalþrýstings á 900 m u.s. í nokkrum holum. . . . .   | 32 |

|  |    |
|--|----|
| Mynd 28. Niðurstöður körfumælinga í holu SG-8 í ágúst<br>1990. . . . .   | 34 |
| Mynd 29. Dýptarbil útfellinga og reiknað dýpi á suðuborð í holu SG-7 með<br>tíma. . . . .  | 37 |
| Mynd 30. Myndun útfellinga í holum 6, 7, 8, 9 og 11 árin 1985-1989. . . . .  | 38 |
| Mynd 31. Hitamaelingar í holum SG-7 og SG-8 í blæstri þann 4. júlí 1990. . . . .   | 40 |
| Mynd 32. Hitamaelingar í holu SG-9 í blæstri fyrir og eftir hreinsun í maí<br>1989. . . . .  | 40 |
| Mynd 33. Mælingar á dýpt holu SG-7 með tíma. . . . .   | 42 |
| Mynd 34. Upptök jarðskjálfta í júlí 1989 (Veðurstofa Íslands og Raunvísindastofnun HÍ<br>1989; Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991). . . . .                  | 42 |
| Mynd 35. Tímasaga toppþrýstings holu SG-7. . . . .   | 45 |
| Mynd 36. Prýstimælingar í holum SG-7 og SG-12 í október 1988. . . . .  | 45 |
| Mynd 37. Spá um lækkun toppþrýstings 9 5/8" holu með tíma og fyrir mismikla<br>kælingu. . . . .  | 46 |
| Mynd 38. Prýstingur á 1000 m dýpi í holu EG-2 í Eldvörpum. . . . .   | 47 |
| Mynd 39. Hraði landsigs og reiknaður niðurdráttar á utanverðum Reykjanesskaga<br>(Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991; Vatnaskil 1989 b). . . . .             | 48 |
| Mynd 40. Áætluð hitadreifing um Eldvörp og Svartsengi, ásamt uppstreymissvæðum,<br>rennslishindrunum, gufupúðum og rennslisleiðum vatns og gufu. . . . . | 52 |

## TÖFLUSKRÁ

|   |    |
|---|----|
| TAFLA 1. <i>Yfirlit um borholur í Svartsengi.</i> . . . . .   | 8  |
| TAFLA 2. <i>Yfirlit um fjölda hita- og þrýstimælinga í Svartsengi og Eldvörpum.</i> . . . . .           | 11 |
| TAFLA 3. <i>Áætlaður berghiti í Svartsengisholum. Dýpi í metrum undir holutoppi.</i> . . . . .          | 13 |
| TAFLA 4. <i>Yfirlit um kæliviðburði í Svartsengi.</i> . . . . .   | 19 |
| TAFLA 5. <i>Reikningar á tillagi œðar á 1000 m í rennsli holu SG-12.</i> . . . . .                      | 24 |
| TAFLA 6. <i>Dýpi og rennsli um œðar holu SG-5 í 20 l/s ádælingu.</i> . . . . .                          | 25 |
| TAFLA 7. <i>Áætlaður upphafsprýstingur í gufupúða, efra og neðra vatnskerfi í Svartsengi.</i> . . . . . | 28 |
| TAFLA 8. <i>Niðurdráttur í Svartsengisholum í blæstri. Dýpi er í m u.s.</i> . . . . .                   | 33 |
| TAFLA 9. <i>Yfirlit um körfumælingar í Svartsengisholum.</i> . . . . .                                  | 35 |
| TAFLA 10. <i>Yfirlit um hreinsiboranir í Svartsengi.</i> . . . . .                                      | 36 |
| TAFLA 11. <i>Fjöldi hreinsiborana og meðallengd útfellinga í Svartsengisholum.</i> . . . . .            | 37 |
| TAFLA 12. <i>Áætlað þrýstifall vegna útfellinga í holu SG-8.</i> . . . . .                              | 39 |
| TAFLA 13. <i>Þrýstifall í holu SG-9 fyrir og eftir hreinsun í maí 1989.</i> . . . . .                   | 39 |
| TAFLA 14. <i>Grynnkuun nokkurra Svartsengisholna frá borlokum.</i> . . . . .                            | 41 |
| TAFLA 15. <i>Aflmælingar holna sem sýndar eru á mynd 39.</i> . . . . .                                  | 44 |

## 1. INNGANGUR

Jarðhitadeild Orkustofunar hefur annast borholumælingar í Svartsengi frá því boranir hófust þar haustið 1971. Þessum mælingum má skipta í þrjá þætti. Í fyrsta lagi eru mælingar sem gerðar eru vegna borvinnu við holur. Dæmi um slíkar mælingar eru víddarmælingar þegar borað er í hrungjörn jarðlög, steypumælingar til að meta fóðringarsteypu o.s.frv. Tilgangur þessara mælinga er að fá fram upplýsingar sem hjálpa borverktakanum að ljúka viðkomandi borun greiðlega. Í öðru lagi er mældur hiti og þrýstingur í holum skömmu eftir borun auk jarðlagamælinga sem gerðar eru í lok hvers boráfanga. Tilgangur þessara mælinga er að meta gerð jarðhitakerfisins með tilliti til jarðlaga og upphaflegrar hita- og þrýstdreifingar í hverri holu. Þriðji þáttur borholumælinga í Svartsengi hefur svo snúist um mælingar á þeim hita- og þrýstibreytingum í jarðhitakerfinu sem vinnsla hefur valdið. Þá hefur vídd borholna verið mæld regulega til mats á útfellingum. Yfirleitt hefur víddin verið mæld með körfum, en í undantekningatilvikum hafa holur verið mældar samfellt með rafstýrðum mælum.

Nú eru tiltækar 249 hitamælingar og 113 þrýstimælingar í 12 borholmum í Svartsengi. Auk þess eru skráðar 149 aðrar aðgerðir eða mælingar í holunum í Oracle gagnagrunni Orkustofnunar. Alls er því um að ræða 511 mælingar og aðgerðir. Slíkt magn upplýsinga gefur margvísleg tækifæri til úrvinnslu og túlkana sem veita upplýsingar um innri gerð jarðhitakerfisins í Svartsengi. Um flestar þessar mælingar hefur áður verið fjallað í öðrum skýrslum Orkustofnunar.

Í þessari skýrslu er ætlunin að gefa yfirlit um hita- og þrýstimælingar í borholmum í Svartsengi frá upphafi borana til ársloka 1990. Dregin verður upp mynd af upphaflegum hita og þrýstingi í jarðhitakerfinu, lýst þeim breytingum sem vinnsla hefur valdið og spáð í hvernig holur kunni að breyta sér við áframhaldandi niðurdrátt í vatnskerfinu og/eða við skyndilega kælingu. Einnig verður fjallað um hegðun útfellinga í borholmum. Að lokum verður litið á breytingar sem vinnslan hefur valdið í nágrenni Svartsengis.

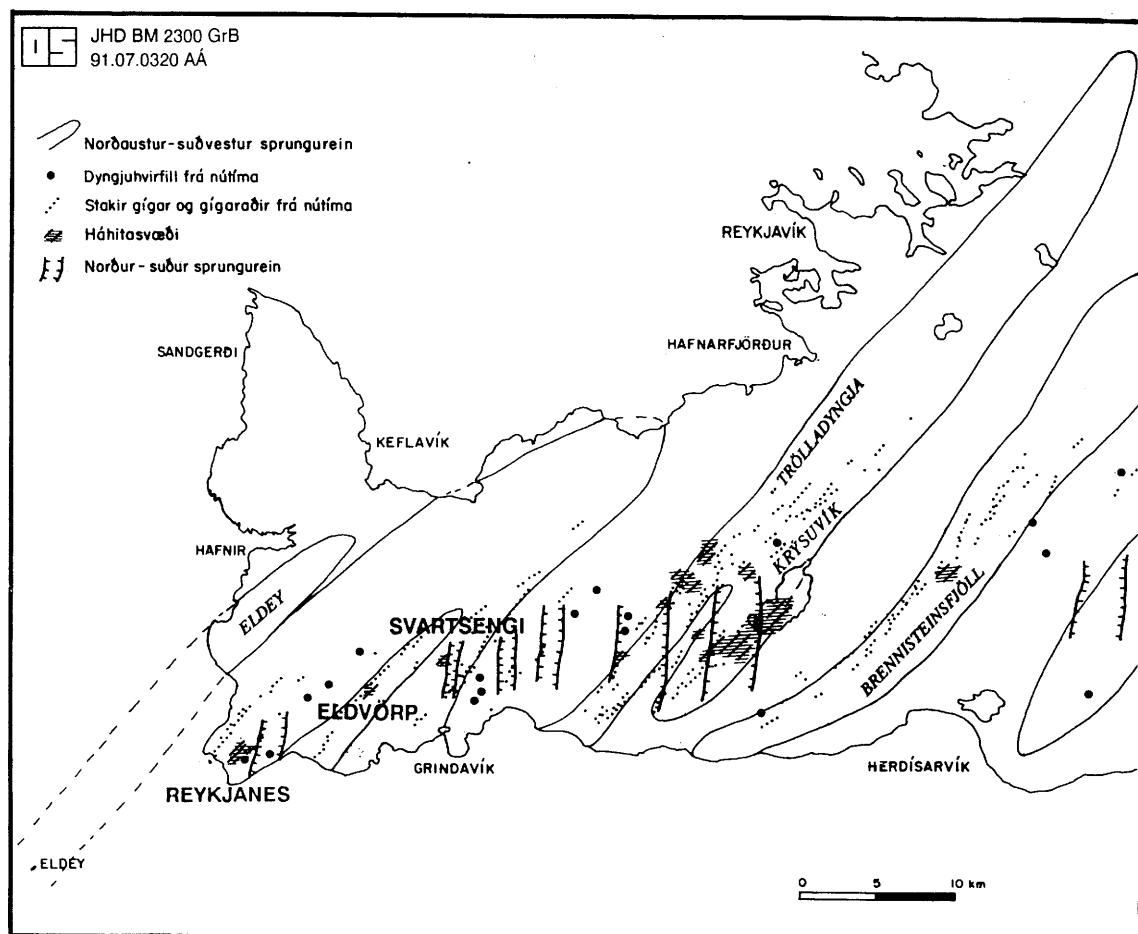
Mynd 1 sýnir það svæði sem umfjöllun skýrslunnar nær til. Á mynd 2 er sýnd afstöðumynd af Svartsengi og staðsetningu borholna þar. Í töflu 1 er gefið yfirlit um borun holna og hönnun þeirra og hvernig þær hafa verið nýttar til þessa. Í viðauka 1 eru sýnd hnit borholnanna (Hnit, 1982).

Vinnsla hefst í Svartsengi í október 1976 en eykst þegar rekstur Orkuvers 1 hefst árið 1979, og eykst síðan enn með Orkuveri 2 sem hóf rekstur 1981. Núverandi vinnsla úr svæðinu er á bilinu 240-320 kg/s eftir árstíma, en á móti kemur það vatnsmagn sem dælt hefur verið í holur síðustu ár. Á mynd 3 er sýnd meðalmassataka úr Svartsengi, að frádreginni niðurdælingu, frá upphafi vinnslu (Vatnaskil, 1989).

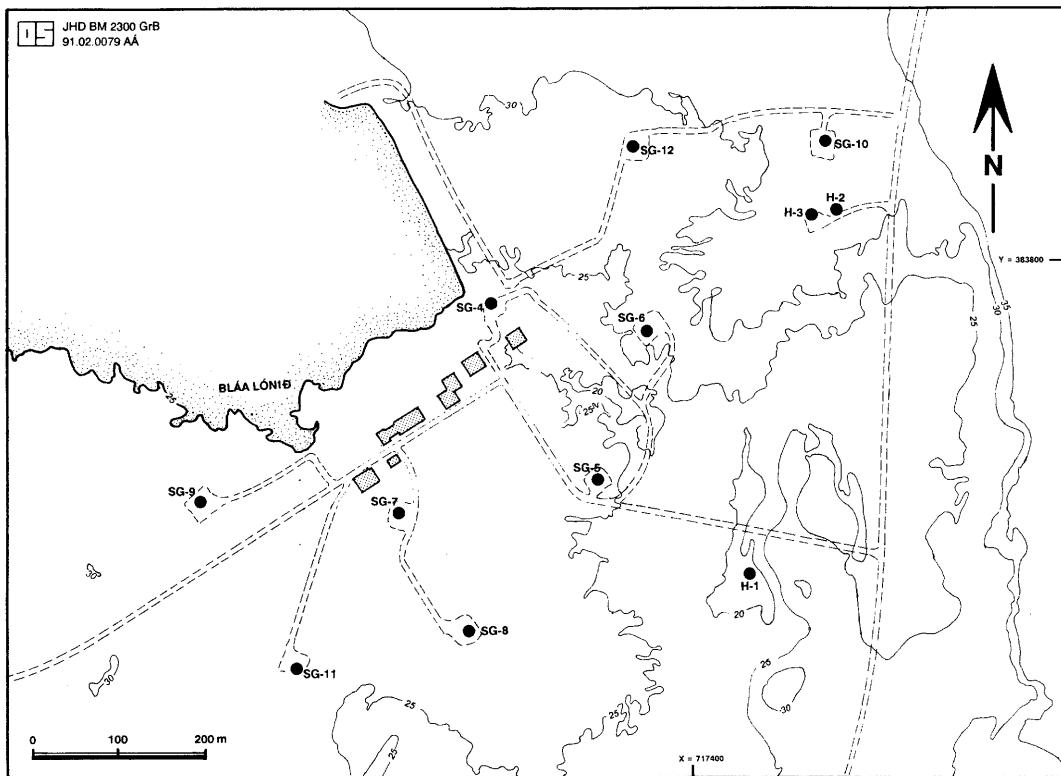
TAFLA 1. Yfirlit um borholur í Svartsengi.

| Hola  | Bor-<br>lok | Bor-<br>dýpi<br>(m) | Vinnslufóðring<br>Þvermál<br>(") | Lengd<br>(m) | Leiðari<br>Þvermál<br>(") | Lengd<br>(m) | Nýting holu<br>V = vinnsluhola<br>N = niðurdælingah.<br>R = rannsóknarhola |
|-------|-------------|---------------------|----------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|--|
| 1     | des '71     | 262                 | 10                               |              |                           |              | Skolvatnshola  |
| 2     | jan '72     | 239                 | 8                                | 103          | 6                         | 234          | R, nú uppsteypt  |
| 3     | feb '72     | 402                 | 8                                | 145          |                           |              | R, nú uppsteypt  |
| SG-4  | maí '74     | 1713                | 9 5/8                            | 394          | 7 5/8                     | 363-1665     | V/R  |
| SG-5  | júní '74    | 1519                | 9 5/8                            | 395          | 7 5/8                     | 363-1465     | V/N/V  |
| SG-6  | apr '78     | 1737                | 9 5/8                            | 612          | 7                         | 560-1730     | V  |
| SG-6  | apr '82     | 1998                | 9 5/8                            | 612          | *)                        |              | Dýpkuð, V  |
| SG-7  | sep '79     | 1438                | 13 3/8                           | 600          | *)                        |              | V  |
| SG-8  | jan '80     | 1603                | 13 3/8                           | 622          | 9 5/8                     | 585-1595     | V  |
| SG-9  | júní '80    | 994                 | 13 3/8                           | 588          | 9 5/8                     | 557-976      | V  |
| SG-10 | feb '80     | 425                 | 13 3/8                           | 220          | 9 5/8                     | 192-408      | V  |
| SG-11 | júlí '80    | 1141                | 13 3/8                           | 582          | 9 5/8                     | 547-1130     | V  |
| SG-12 | mars '82    | 1488                | 13 3/8                           | 606          | *)                        |              | V/N/V  |

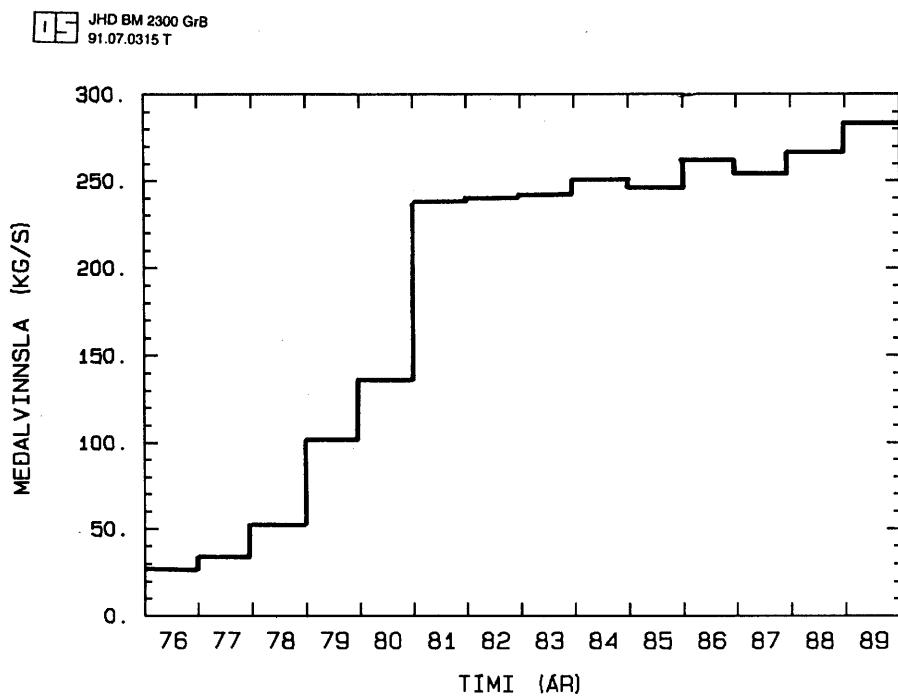
\*) Enginn leiðari er í holu



Mynd 1. Yfirlitsmynd af jarðhitasvæðum á Reykjanes-skaga ásamt meginindráttum í jarðfræði svæðisins (Haukur Jóhannesson, 1989).



**Mynd 2.** Staðsetning borholna og annarra mannvirkja í Svartsengi.



**Mynd 3.** Árleg vinnsla úr jarðhitasvæðinu í Svartsengi, að frádreginni niðurdælingu (Vatnaskil, 1989 a).

## 2. YFIRLIT HITA- OG PRÝSTIMÆLINGA

### 2.1 Mæliaðferðir

Borholumæling er aðgerð þar sem mælinema eða tóli er slakað niður borholu. Nemanum/tól-inu er ætlað annað tveggja að framkvæma eina mæliaðgerð í einu dýpi, eða að skrá reglulega niður holuna þann eiginleika sem neminn mælir. Hita- og þrýstimælingar falla í síðari flokkinn. Í þeim er skráð með dýpi borholugildi hita eða þrýstings.

Þeim hita- og þrýstimælingum sem gerðar hafa verið í Svartsengi er venjulega skipt í two flokka eftir gerð mælinema. Í fyrri floknum eru hita- og þrýstimælingar sem gerðar eru með rafeindamælum sem senda stöðugt upplýsingar um hita eða þrýsting á mælistoð í holu til yfirborðs um mælikapal. Aflestur fer síðan fram á skjá í mælingabil. Þessi aðferð hefur þau takmörk að mælitólin og mælikapallinn, sem Jarðhitadeild hefur yfir að ráða, duga einungis að 150 °C hita. Þá fer að reyna á einangrun í kaplinum og örràsir í mælum með tilheyrandi bilum. Við hærrí hita eru notaðir svokallaðir Amerada mælar, en þeir eru sérhannaðir til hita- og þrýstimælinga í háhitaholum. Amerada mælarnir eru búin innbyggðum síritum sem skrá útslag mælinema á sótspjald. Klukka stýrir síritanum. Mælarnir eru ræstir á yfirborði og síðan slakað niður holurnar á grönum stálvír í fyrirfram ákveðin dýpi þar sem mælirinn er stoppaður og láttinn bíða uns jafnvægi er komið á milli ástands nemans og holunnar. Amerada mæling býður upp á tiltölulega gisna skráningu hita og þrýstings sökum þess að klukka mælanna gengur út á 3 klst. Er venjan hérlandis að skrá gildi hita og þrýstings á einungis 100 m bili.

Verulegu máli skiptir við skoðun hita- og þrýstimælinga, í hvernig ástandi hola var þegar mæling fór fram. Í Svartsengi má skipta mæliástandi holna í þrjá flokka:

1. *Dauðar holur*: Hér er átt við holur sem standa þrýstingslausar með vatnsborð neðan við holutopp. Auðvelt er að gera mælingar við þessar aðstæður. Flestar holur í Svartsengi deyja ef þeim er lokað um lengri tíma. Efsti hluti holunnar kólnar þá niður fyrir 150 °C og hægt er að mæla þær í u.p.b. 350 m dýpi með rafstýrðum hitanemum.
2. *Lokaðar holur undir þrýstingi*: Hér er átt við holur sem voru í blæstri fyrir mælingu en er lokað meðan mæling fer fram. Í Svartsengi eru venjulega um 2 m milli aðalventils holu og 2" lokað efst á holutoppi. Þegar mæling fer fram er viðkomandi hola tekin út af gufuveitu, aðalventli hennar lokað og þrýstingi hleypt af toppnum. Þá er 2" ventillinn opnaður og Amerada mæli slakað á grönum stálvír niður í bilið milli ventlanna tveggja. Þétt er með stálvírnum við 2" lokann og aðalventillinn síðan opnaður á nýjan leik og þar með opnuð leið fyrir mælinn niður holuna.
3. *Blásandi holur*: Hér er átt við holur sem eru í fullri vinnslu meðan mæling fer fram. Sökum mikils rennslis upp holu er þungt lóð fest við Amerada mæli og einnig er komið fyrir nær 4 m hárri framlengingu ofan á 2" ventilinn á toppi holunnar. Mælir og lóð eru dregin inn í framlenginguna, þétt með stálvírnum efst á framlengingunni og 2" ventillinn síðan opnaður. Er þá opin leið fyrir mælinn niður alla holuna. Þetta er algengasta aðferð við mælingar í Svartsengisholum nú á tímum, sökum þess að oft er vandkvæðum bundið að taka vinnsluholur út af gufuveitu og trufla þannig rekstur Orkuversins.

Tafla 2 gefur yfirlit um hita- og þrýstimælingar í Svartsengisholum og reyndar einnig í holu EG-2 í Eldvörpum, sem kemur við sögu síðar í þessari skýrslu. Nákvæmari upplýsingar um mælingarnar er að finna í viðauka 2, þar sem birtar eru upplýsingar um allar mælingar og aðgerðir í Svartsengisholum sem tiltækjar voru í gagnagrunni Jarðhitadeilda um áramótin 1990-1991 (Tómas Jóhannesson og Helga Tuliníus, 1989; Helga Tuliníus og Tómas Jóhannesson, 1990).

**TAFLA 2. Yfirlit um fjölda hita- og þrýstimælinga í Svartsengi og Eldvörpum.**

| Hola  | Rafstýrðir mælar<br>Fjöldi hitamælinga | Fjöldi hitamælinga | Amerada mælar<br>Fjöldi þrýstimælinga |
|-------|--|--------------------|---------------------------------------|
| 1     | 4                                      |                    | 1                                     |
| 2     |  | 3                  | 2                                     |
| 3     | 1                                      | 9                  | 7                                     |
| SG-4  | 20                                     | 16                 | 9                                     |
| SG-5  | 12                                     | 22                 | 14                                    |
| SG-6  | 13                                     | 19                 | 13                                    |
| SG-7  | 7                                      | 23                 | 21                                    |
| SG-8  | 6                                      | 18                 | 11                                    |
| SG-9  | 11                                     | 18                 | 11                                    |
| SG-10 | 1                                      | 5                  | 5                                     |
| SG-11 | 2                                      | 15                 | 10                                    |
| SG-12 | 8                                      | 16                 | 9                                     |
| EG-2  | 22                                     | 9                  | 6                                     |
| Alls  | 107                                    | 173                | 119                                   |

## 2.2 Nákvæmni mælinga

Hita- og þrýstimælingar í Svartsengi spanna nærfelt 20 ára sögu og hefur margt breyst á þeim tíma í mælitækni hvað varðar rafeinda hitamælana. Hins vegar hafa Amerada mælinemarnir verið óbreyttir allt þetta tímabil og byggir smíði þeirra enn á honnun frá um 1930. Með bættri aðstöðu Borholumælinga Orkustofnunar var komið upp búnaði til kvörðunar og eftirlits með mælum, og er nú hægt að kvarða upp að 300 °C hita og 180 bara þrýstingi samtímis.

Hægt er að gefa eftirfarandi þumalfingursreglur um áreiðanleika mæligilda borholumælinga í Svartsengi:

*Rafstýrðir nemar* duga til mælinga á hita undir 150 °C. Því hefur ætíð verið auðvelt að prófa nákvæmni þeirra á rannsóknarstofu. Ætla má að eldri gerð hitamæla, thermistor mælar, hafi verið nákvæmir upp á 1-2 °C. Síðari kynslóð hitamæla, svonefnir GO-mælar, eru hinsvegar mun fullkomnari og er óvissa þeirra minni en 0,5 °C.

*Amerada mælar* eru tól sem eru mjög samkvæm í kvörðun frá einni mælingu til annarrar, svo framarlega sem ekki hendi óhöpp eins og t.d. högg í slökun fram hjá hengistykjum. Nemarnir eru kvarðaðir hjá framleiðanda og er þeirri kvörðun fylgt við notkun mælanna. Mælarnir eru framleiddir til að mæla ákveðin hita- og þrýstisvið. Í Svartsengi hefur verið algengast að nota hitanema með 100-300 °C eða 120-280 °C svið, og þrýstinema með 0-200 bara svið. Framleiðandi gefur að nákvæmni nemanna sé um 1 % af fullu útslagi mælis. Í tilfelli þrýstinema er nákvæmnin þá 2 bör en í hitamælum 2 °C. Mun betri nákvæmni er innbyrðis milli mælinga með sama tólinu. Því hafa mikil til sömu hita- og þrýstinemarnir verið notaðir í Svartsengi síðustu árin. Auk þess eru nemarnir nú endur-kvarðaðir reglulega til að kanna hvort útslag þeirra sé í samræmi við það sem framleiðandi gefur. Ef svo reynist ekki er í flestum tilvikum hætt að nota viðkomandi nema og hann sendur í viðgerð eða hent. Þetta stranga eftirlit og not fárra nema er talið auka nákvæmni Ameradamælinga í Svartsengi í  $\pm 0,5$  bör og  $\pm 1,5$  °C í mælingum sem gerðar voru eftir 1984, en fyrir þann tíma er nákvæmnin sú sem framleiðandi gefur.

### 3. HITADREIFING Í JARÐHITAKERFINU

#### 3.1 Upphaflegur berghiti

Áreiðanleg vitneskja um ótruflaðan hita jarðлага við borholur gegrnir lykilhlutverki við mat á útbreiðslu og eiginleikum sérhvers jarðhitakerfis. Málvenja er að kalla slíkan ótruflaðan hita berghita. Með því er átt við þann hita sem myndi mælast á viðkomandi dýpi í borholu ef engra truflana gætti vegna borana eða millirennslis í holunni. Oft reynist erfitt að snúa slíkan berghita út úr hitamælingum í borholmum, og æ erfiðara sem meiri nákvæmni er krafist í ákvörðun hitagilda, því alltaf er mismikil túlkun nauðsynleg við mat á berghita.

Það er einkennandi fyrir jarðhitakerfið í Svartsengi að neðan 600 m dýpis eru flestar holur svæðisins 230-240 °C heitar. Pessi litla hitadreifing er innan þeirra óvissumarka sem berghitaferlum eru vanalega gefnir. Hins vegar er mjög fýsilegt að vita upphaflegan hita Svartsengisholna með betri nákvæmni en  $\pm 5$  °C, því þá fyrst er hægt að gera sér grein fyrir hverjar voru rennslisstefnur í jarðhitakerfinu áður en boranir hófust. Höfundar þessarar skýrslu gripu til þess ráðs að fara mjög ítarlega í saumana á öllum tiltækum hitamælingum í Svartsengisholum og voru þá þrjú atriði könnuð sérstaklega í hitamælingum neðan 400 m dýpis:

1. Teiknuð var hitasaga sérhverrar holu á ákveðnum dýpum fyrstu 2-3 árin eftir borun. Á grundvelli slíkra teikninga var metinn berghiti á 100 m bili frá 400 m dýpi til botns. Sérstök áhersla var lögð á botnhita holna, enda ekkert millirennslí neðan neðstu æða og mat á berghita því áreiðanlegt.
2. Reiknaður var meðalhiti í sérhverri holu á 100 m fresti niður í holubotn. Til þess voru skoðaðar allar hitamælingar gerðar 1972-1990 og sérstaklega mælingar frá fyrri hluta mælisögunnar (1972-1980).
3. Athugað var hvort fylgni væri í hitabreytingum með dýpi í mörgum mælingum í sömu holunni, t.d. hvort hæg hitnun yrði ætloð á sama dýptarbili í holu. Mátti þannig ákvarða hvernig lögun hitaferils á að vera þó nákvæmt gildi hita sé ekki þekkt.

Pegar þessir þættir lágu fyrir voru þeir skoðaðir í heild og mátti þannig ákvarða berghita með nákvæmni sem höfundar telja  $\pm 2$  °C milli holna í sama dýpi. Enn betri er nákvæminn í lögun berghitaferils með dýpi. Ekki er ólíklegt að nákvæminn þar sé  $\pm 0,5$  °C á hvert 100 m dýptarbili í holum.

Ofangreind upptalning á við um mat á berghita neðan 400 m dýpis í holum. Á 100-400 m dýpi var hins vegar mun auðveldara að meta berghita. Þar eru örar hitabreytingar með dýpi og því ekki þörf 1-2 °C nákvæmni í matinu, og einnig er hitinn mældur með rafstýrðum hitanemunum í fóðringum þannig að ekki þarf að kljást við mælinákvæmni né millirennslí á þessu dýptarbili.

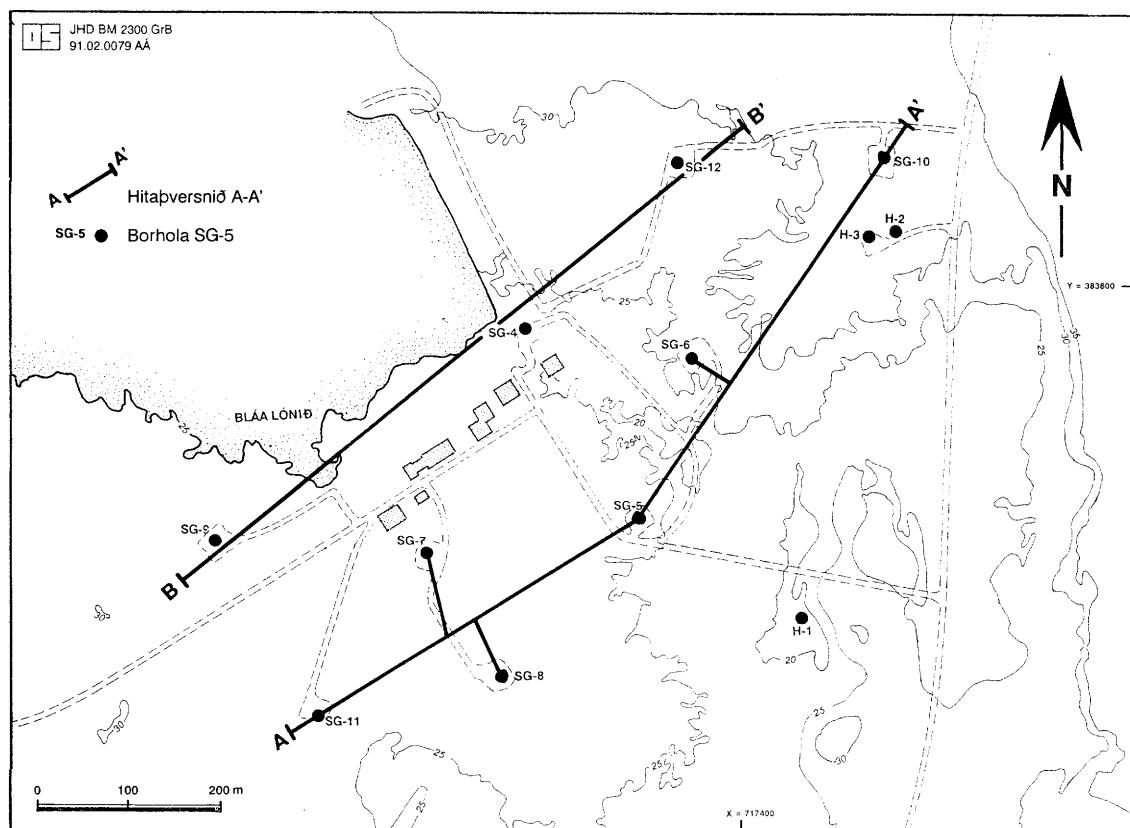
Holur 2,3 og SG-10, sem eru boraðar í svokallaðan gufupúða í Svartsengi, þurftu sérstakrar meðhöndlunar við. Á þessu svæði er talin góð lóðrétt lekt sem leiddi til gufuútstreymis á yfirborði. Upphafleg útbreiðsla þessa gufupúða er illa þekkt, en þó er talið að holur 2,3 og SG-10 séu allar boraðar í hann. Hitamælingar í þessum holum eru fáar og mjög truflaðar. Varð að grípa til þess ráðs að áætla berghita þeirra með suðumarksferli, sem var skorðaður að neðan við suðuborð í holu 3. Það suðuborð var metið, samkvæmt hita- og þrýstimælingum frá árinu 1975, á um 350 m dýpi og hiti þar 230 °C. Slíkur suðumarksferill hermir mælt botnástand holna 2 og 3 og er því talinn sýna réttan upphafshita bergsins sem þessar holur eru boraðar í. Efri endi ferilsins er þá á 30 m dýpi miðað við hreint, sjóðandi vatn. Öðru máli gegndi með holu SG-10. Botnástand hennar mátti herma með suðumarksferli frá 80 m í stað 30 m fyrir holur 2 og 3. Hæðarmunurinn stafar af lækkuðu vatnsborði (niðurdrætti) í gufupúðanum vegna vinnslu fram til 1980 þegar hola SG-10 var boruð. Því er talið að sami berghitaferill hafi upphaflega gilt fyrir holur 2, 3 og 10.



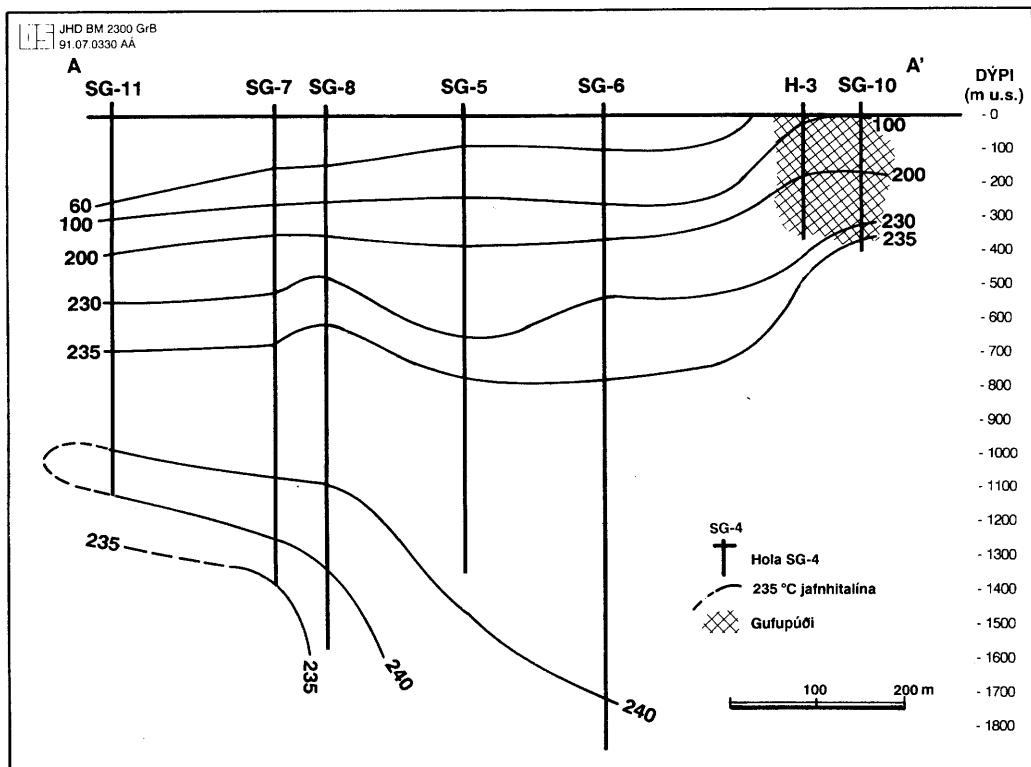
Þessa hitadreifingu má skýra með tveimur ólíkum vatnskerfum, 30-100 °C og 230-243 °C heitum. Prýstingur í volga kerfinu er hærri en í jarðhitakerfinu, sem þýðir að kerfin eru aðskilin af torleku bergi (sjá kafla 4). Utan gufupúðans eru þessi skil lárétt á 300-600 m dýpi. Gufupúðinn sjálfur er hins vegar umlukinn lóðréttum og torlekum veggjum allt til yfirborðs, því innan hans er prýstingur mun lægri en í volga vatnskerfinu. Léleg lekt í jöðrum púðans er væntanlega til-komin vegna útfellinga í bergeninu.

Hið eiginlega jarðhitakerfi í Svartsengi hefst á 500-600 m dýpi. Samkvæmt því mati á berghita sem sýnt er á myndum 5 og 6 virðist sem uppstreymi í svæðinu sé nærrí holu SG-4. Þetta uppstreymi fæðir lárétt, vel lek jarðlög á u.b.b. 700 og 1000-1300 m dýpi undir sjávarmáli. Þessi ályktun byggir á aðeins 5-15 °C láréttum hitabreytingum milli holna og kann sumum að þykja hún djörf, sérlega ef tekið er tillit til þess að nákvæmni mælanna sem notaðir voru til að ákvarða berghitann er 2-3 °C. Hins vegar eru nokkur önnur óháð atriði sem styrkja þessa mynd. Þau eru eftirfarandi:

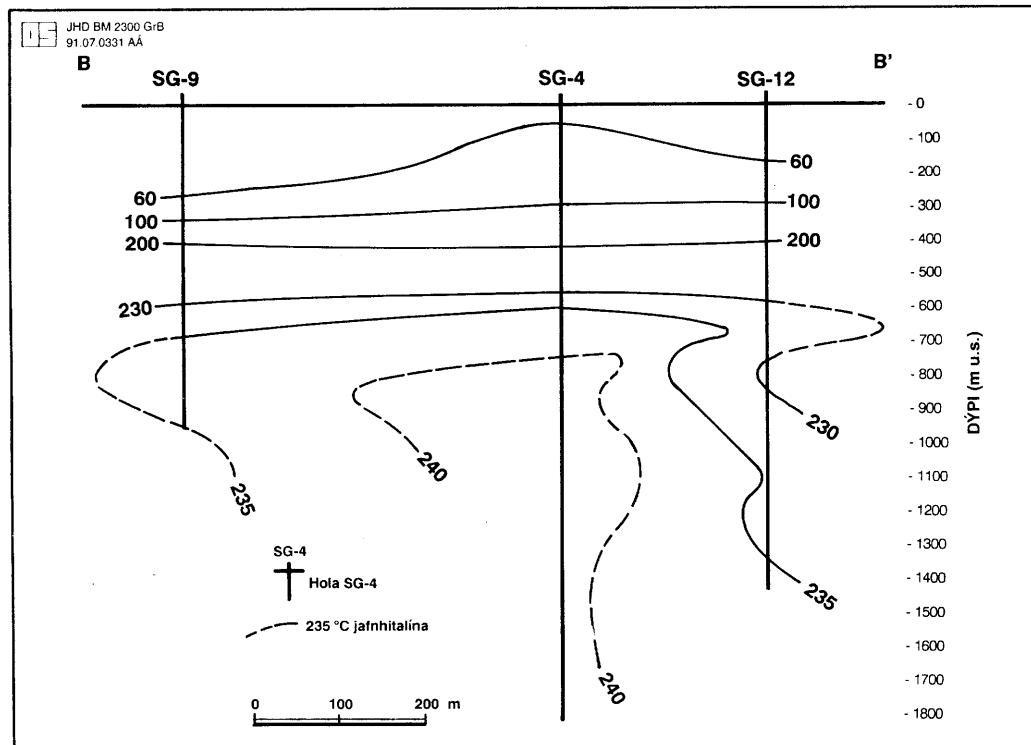
1. Holur 4,7,8 og 9 eru allar greinilega viðsnúnar á 900-1400 m dýpi undir sjávarmáli (tafla 3). Eins koma hitahámörk fram í mörgum holum á 1000-1300 m u.s.
2. Hola SG-11 kólnaði tímabundið vorið 1983. Auðvelt er að skýra þá kælingu með köldu innstreymi að vestan um leka kaflann á 1000-1300 m u.s. Það réttlætir jafnframta að 240 °C hitalínunni á mynd 5 sé lokað vestan holu SG-11.
3. Svarfgreiningar sýna að góðar vatnsæðar í Svartsengisholum tengjast oftast innskotasyrpu á 1000-1300 m dýpi (Hjalti Franzson, 1990). Þessi innskotasyrpa verkar eins og láréttur vatnsleiðari, sem gerir mikla útbreiðslu 235-240 °C berghita mögulega eins og sést vel á hitapversniðunum. Jafnframta skýrir það hví hitahámörk koma fram í þessu dýpi í mörgum holum.



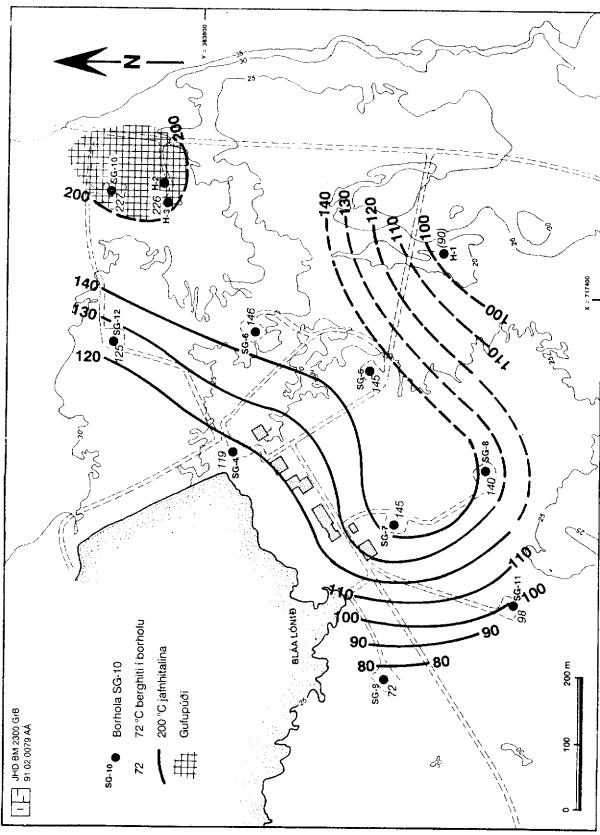
Mynd 4. Lega hitapversniða í Svartsengi.



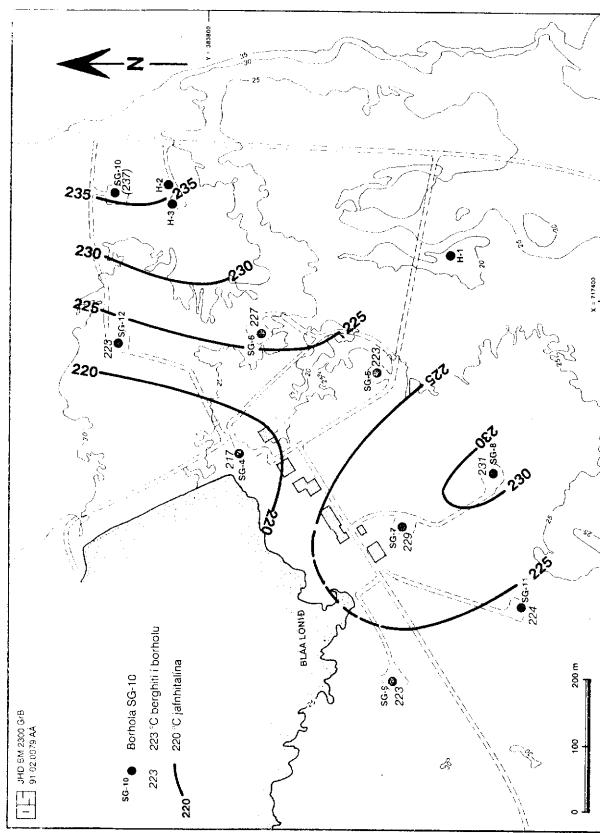
**Mynd 5.** Hitaþversnið A-A'.



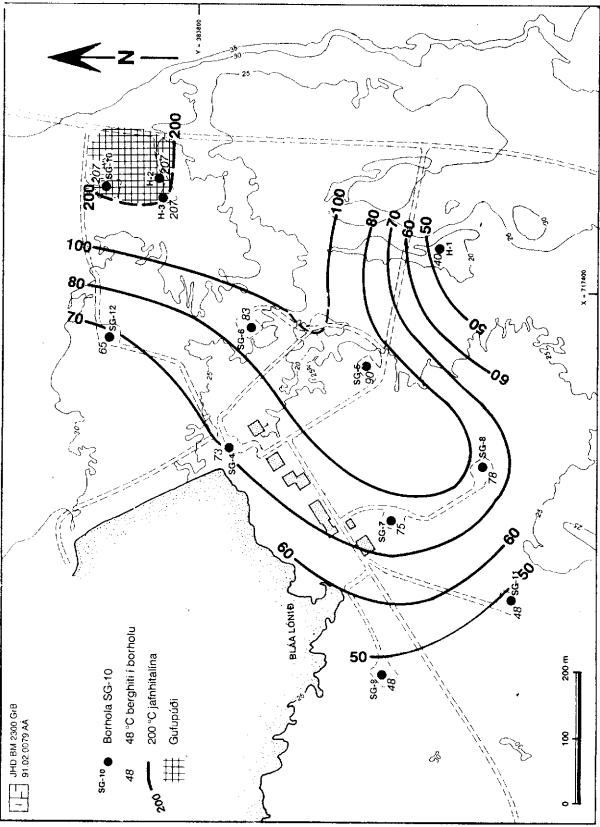
**Mynd 6.** Hitaþversnið B-B'.



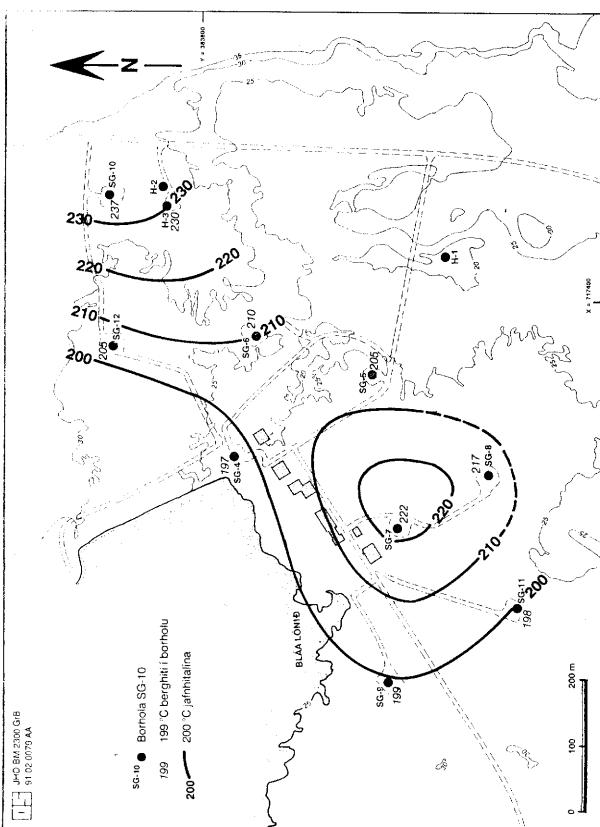
Mynd 8. Jafnhitalínur á 300 m undir sjávarmáli.

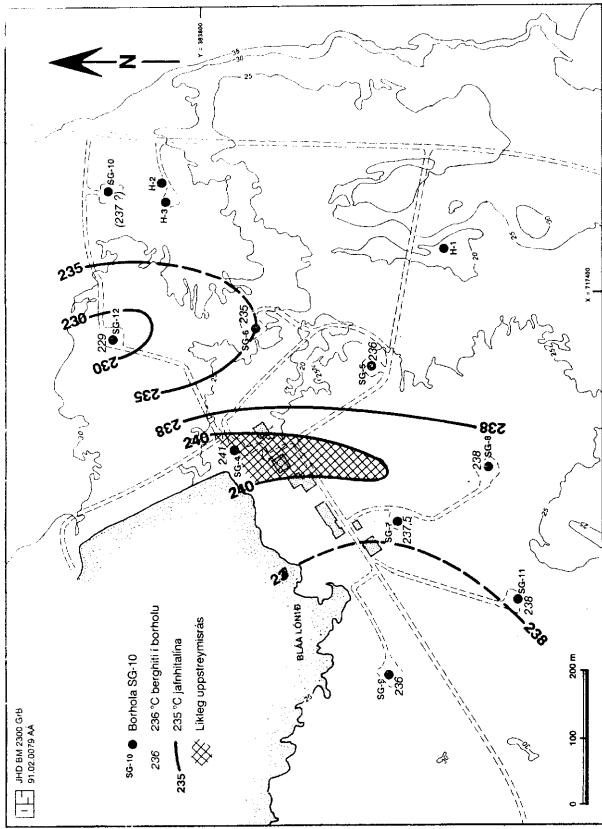


Mynd 10. Jafnhitalínur á 500 m undir sjávarmáli.

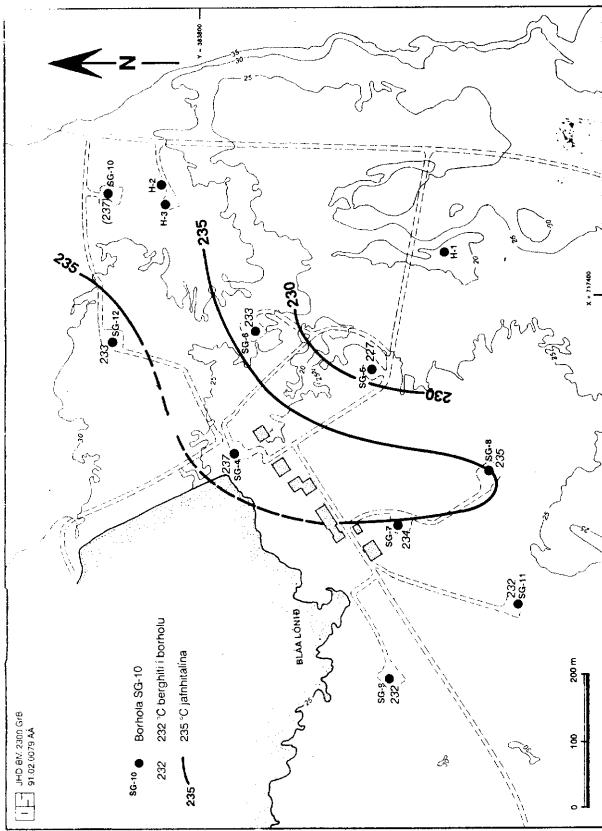
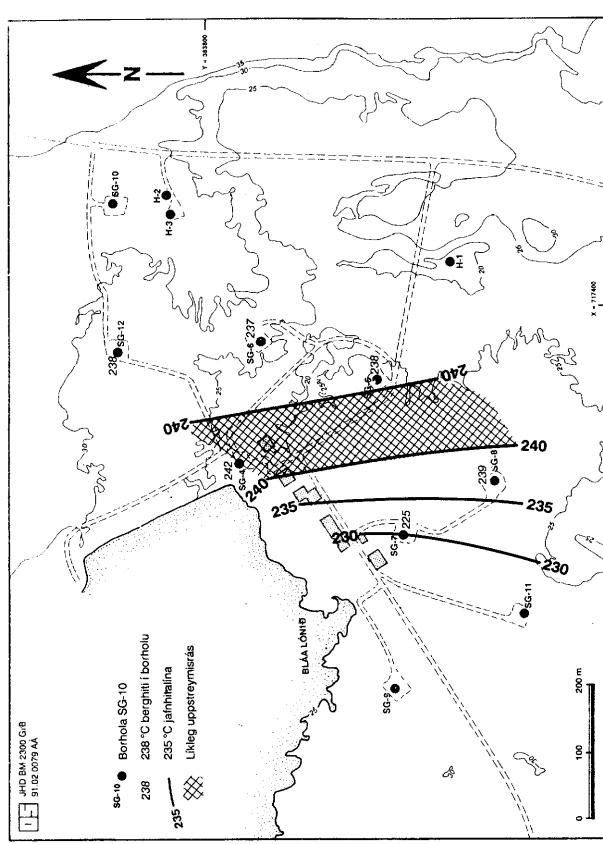


Mynd 8. Jafnhitalínur á 300 m undir sjávarmáli.

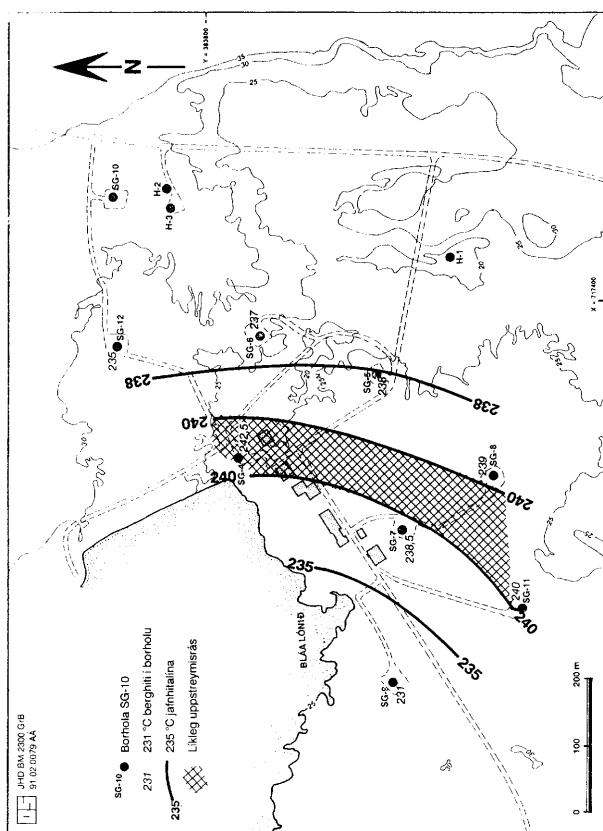




Mynd 12. Jafnhítalnur á 800 m undir sjávarmáli.



Mynd 11. Jafnhítalnur á 600 m undir sjávarmáli.



Jafnhitakortin á myndum 7-14 skerpa enn frekar þessa mynd. Á 200 og 300 m u.s. (myndir 7 og 8) sést vel uppstreymi heits vökva í gufupúðanu í NV-horni myndarinnar. Þar leiðist varmi úr gufupúðanum til grunnvatnsstraums, sem rennur til SV í átt að holum 7 og 8. Einnig gæti þéttivatn soðið upp úr gufupúðanum við yfirborð og borist út í grunnvatnsstrauminn. Á 400 og 500 m u.s. (myndir 9 og 10) klofnar þessi heita tunga og fram koma tvö hitahámörk, í gufupúðanum og við holur 7 og 8. Síðara hitahámarkið virðist hafa NV-stefnu. Erfitt er samt að full-yrða slíkt þar sem lögun borsvæðisins býður upp á að norðvestlægar stefnur myndist við túlkun mæligilda. Í 600 m u.s. kemur fram sveigð tunga, 235 °C heit, sem tengir fyrrgreindu hitahámörkin tvö. Þessa mynd mætti einnig teikna með tveimur aðskildum hitasvæðum, undir gufupúðanum annars vegar og holum 4 og 8 hins vegar. Á 800 m u.s. (mynd 12) kemur fram 240 °C N-S tunga við holu 4, en upplýsingar skortir til að meta hvort önnur slík sé undir gufupúðanum. Meir en 235 °C vatnshiti neðst í holu 10 ræður því að lágur hiti holu 12 á þessu dýpi er teiknaður sem tunga úr NNV og hærri hiti áætlaður austan hennar. Að lokum sýna myndir 13 og 14 meir en 240 °C heitt uppstreymissvæði með norðlæga stefnu í suður frá holu 4.

Í stuttu máli má því segja að hiti í Svartsengi ofan 350 m dýpis stjórnist af grunnvatnsstraum sem hirðir varma og þéttivatn úr gufupúðanum á leið sinni til SV. Síðan tekur við illa lekt millilag með línulegum hitastigli. Neðra borð þess er á 500-600 m u.s. Þar undir er jarðhitakerfi sem einkennist af tveimur vel lekum og láréttum syrpum á 700 og 1000-1300 m u.s. með nokkuð jafnan hita í láréttar stefnur. Um mitt borsvæðið kemur fram dauft hitahámark með norðlæga stefnu, túlkað hér sem uppstreymisrás jarðhitakerfisins. Þessi uppstreymisrás er glögglega afmörkuð til vesturs af viðsnúnum hita í holum 7, 8 og 9. Eins sér henni stað í hitahámörkum um holur 7 og 8 á 400 og 500 m u.s. Hins vegar er óljóst hvernig djúphiti hagar sér austan uppstreymisrásarinnar. Hér eru settar fram tvær tilgátur. Annars vegar má hugsa sér annað aðskilið uppstreymi undir gufupúðanum, en hins vegar að vöki renni lárétt til austurs frá uppstreymisrásinni um leku syrpurnar á 700 og 1000-1300 m u.s. og rísi síðan lóðrétt til yfirborðs í gufupúðanum. Síðari tilgátan myndi einfalda mjög jafnhitalínur neðan 800 m u.s. Mjög er óvarlegt að gera upp á milli þessara tilgátna. Til þess þarf frekari upplýsingar sem væntanlega fást aðeins með borun djúprar holu í eða austan gufupúðans.

### 3.2 Hitabreytingar vegna vinnslu

Mynd 15 sýnir sögu hita í öllum Svartsengisholum á 800 m dýpi frá upphafi mælinga í þessu dýpi til ársloka 1990. Í myndinni má greina ýmis áhrif sem vinnsla og niðurdæling hafa á hitastig í holunum.

Áhrif niðurdælingar má einkum greina í holu SG-6, en hitastig hennar félst stöðugt meðan dælt var niður í holu SG-12 (sjá kafla 3.3). Aðrar breytingar á hita holna hafa orðið við skyndilega kólnun jarðhitakerfisins með tilheyrandi lækkun í toppþrýstingi allra vinnsluholna (Benedikt Steingrímsson og Guðjón Guðmundsson 1984 og 1985; Guðjón Guðmundsson og Guðlaugur Hermannson 1986). Tveir slíkir kæliviðburðir eru merktir sérstaklega á mynd 15, en þá kólnuðu sumar holar um allt að 12 °C frá því sem venjulega mælist. Tafla 4 gefur yfirlit um 4 kæliviðburði sem orðið hafa í Svartsengi. Þeirra varð allra vart þegar toppþrýstingur holna lækk-aði skyndilega. Í sumum tilvikum var mæld kólnunin sem fylgdi þrýstilækkuninni (tafla 4). Reyndust holar 9, 11 og 12 verða fyrir mestum truflunum í hita. Mun minni kólnun kom hins vegar fram í öðrum holum. Sama er uppi á teningnum ef vinnsluþrýstingur holna er skoðaður. Þá voru það holar 9 og 11 sem lækkuðu mest í þrýstingi við kælingu svæðisins, og nam sú lækkun allt að 5 börum (Vatnaskil; 1985 og 1988). Þessar skyndikælingar gengu allar fljótt yfir, venjulega á 1-4 vikum.

**TAFLA 4. Yfirlit um kæliviðburði í Svartsengi.**

| Við-burður | Tímabil        | Lækkun topp-þrýstings (bar) | Mesta kæling (°C) |      |      |      |      |       |       |  |
|------------|----------------|-----------------------------|-------------------|------|------|------|------|-------|-------|--|
|            |                |                             | SG-5              | SG-6 | SG-7 | SG-8 | SG-9 | SG-11 | SG-12 |  |
| 1          | mars-júní 1983 | 1-1,5                       | 3,5               | 1-2  | 5,5  | 5,0  | 6,0  | 12,5  | > 7   |  |
| 2          | mars 1984      | 1-1,5                       |                   |      |      |      |      | 3     | 10    |  |
| 3          | ág.-sept. 1986 | 1-6                         |                   | 3,5  |      |      | 7-8  | 4     |       |  |
| 4          | nóv.-des. 1987 | 4                           |                   |      |      | 2    |      | 5     |       |  |
| 5          | apríl-máí 1988 | 0,5                         |                   |      |      |      |      |       |       |  |

Kæling í viðburðum 1 og 2 er fengin úr skýrslum Benedikts Steingrímssonar og Guðjóns Guðmundssonar (1984 og 1985). Ella er miðað við 800 m dýpi í holum.

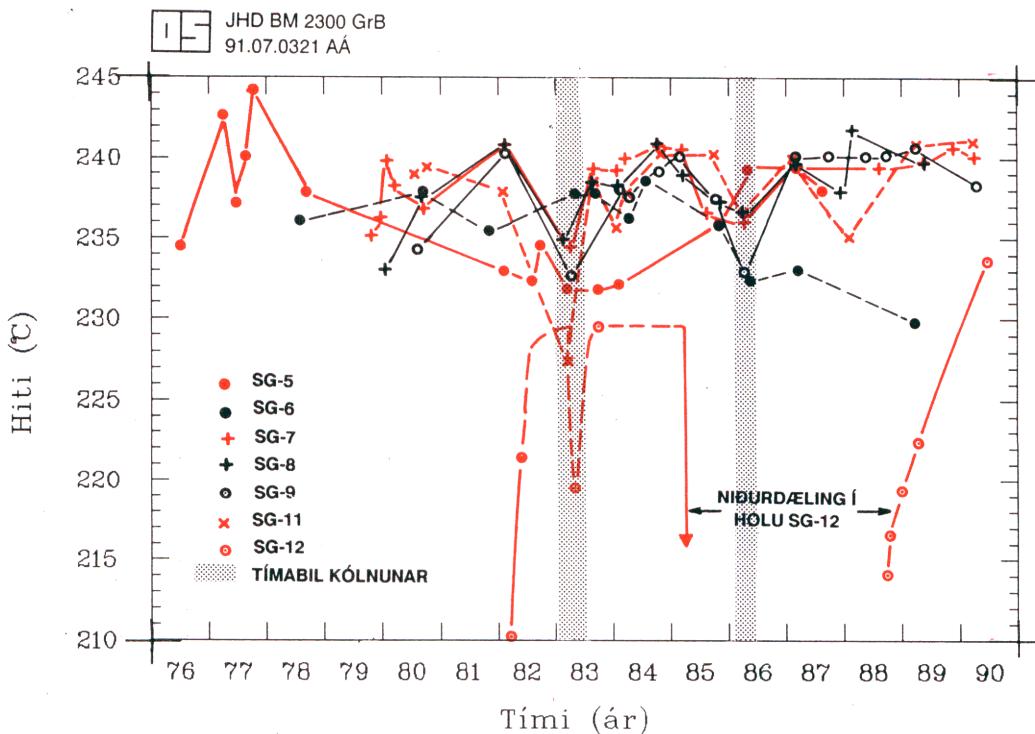
Á mynd 16 er sýnd kólnun holna í Svartsengi vorið 1983, samkvæmt gögnunum í töflu 4. Þar sést að líklegustu aðkomustefnur kólnunarinnar eru úr SV og NA. Erfitt er samt að fullyrða um slíkt vegna fárra gagnapunkta í myndinni. Á mynd 17 er hins vegar sýnd kólnun sem varð í holu SG-12 vorið 1984. Mældist kæling aðeins á dýptarbilinu 1100-1300 m. Holan stóð lokuð veturninn '83-'84 og var hiti hennar því ótruflaður af blæstri. Helsta vatnsæð holu 12 kom á u.p.b. 1200 m dýpi (Benedikt Steingrímsson og Guðjón Guðmundsson 1985). Virðist kælingin því aðeins hafa orðið um vatnsæðina. Samkvæmt því líkani berghita sem sýnt er í hitasniðnum á myndum 5 og 6, er líklegast að kælingin hafi orðið í láréttum fleti á þessu dýptarbili. Orsakir þess að kalt vatn gerði slíka innrás eru ókunnar en þó er líklegast, samkvæmt þeim hugmyndum sem hér eru reifaðar, að kaldara vatn hafi ruðst inn í láréttu vatnsleiðarann á 1100-1300 m dýpi. Útfellingar tengdar hitnun aðkomuvökvars (t.d. anhydrit) hafi síðan valdið því að aðstremisrásirnar lokaðust tiltölulega fljótt.

Athyglisvert er að kæling holna varð mest í fyrstu skyndikælingunni 1983 en síðan hafa kæliviðburðirnir orðið vægari. Lækkun þrýstings, vegna vinnslu úr jarðhitakerfi, veldur því að bæði láréttar og lóðréttar virkar bergspennur hækka. Við það vex þungi á opnar sprungur í

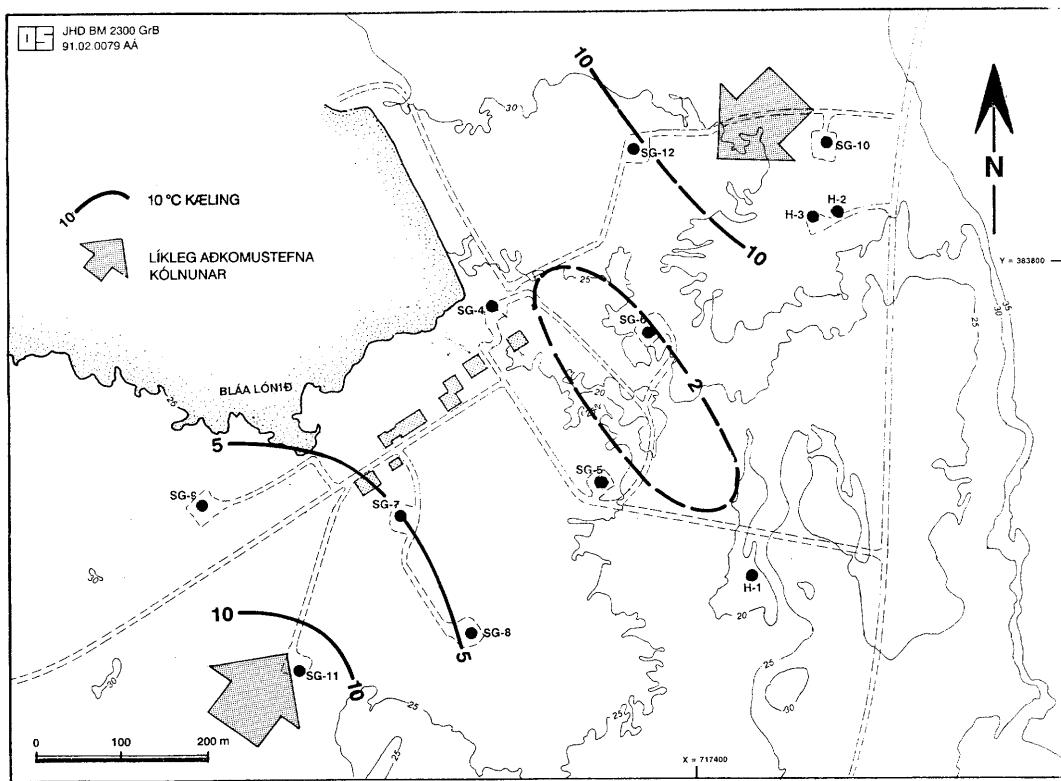
berginu og þær þrengjast eða lokast. Vaxandi niðurdráttur leiðir til þess að jaðrar jarðhitakerfisins herpast saman og líkur á nýmyndun sprungna í þeim minnka. Það kann að skýra hví kælivíðburðir hafa orðið vægari og fátíðari í Svartsengi í seinni tíð.

Ef rýnt er í hitasöguna á mynd 15, og sleppt úr mælingum sem greinilega eru truflaðar af niðurdælingu eða mældar eftir skyndikólnun jarðhitakerfisins, virðist sem hæg hitnun eigi sér stað í Svartsengi. Til að kanna þetta nánar voru gerðir meðaltalsreikningar á hita í Svartsengisholum. Fundið var meðalgildi hita í nokkrum dýpum fyrir allar holur á tveimur mælingatímabilum. Undanskilin frá reikningunum voru þó hitagildi lægri en  $225^{\circ}\text{C}$ , en þau er tæpast hægt að skýra nema með truflun vegna borana eða annarra mannanna verka (neðan 400 m). Niðurstöður eru sýndar á mynd 18. Ef borinn er saman meðalhiti allra hitamælinga annars vegar en hins vegar meðalhiti mælinga gerðra eftir 1986, sést að um væga hitnun virðist vera að ræða. Nemur hækkunin  $1\text{-}2^{\circ}\text{C}$  í öllum dýpum. Kemur hækkunin fram þrátt fyrir nokkra niðurdælingu af um  $70^{\circ}\text{C}$  heitu vatni seinni hluta mælisögunnar.

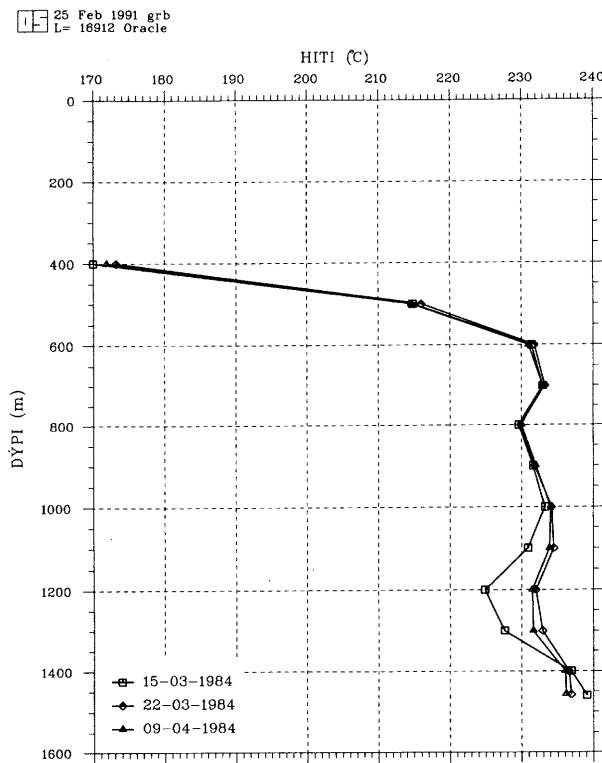
Að lokum er athyglisvert að skoða hvernig botnhiti holu SG-7 hefur hækkað síðan borun lauk. Aðalæð holunnar er milli 1300 og 1350 m dýpis, en botn mældist á rúmlega 1415 m eftir borlok. Ekki er vitað um æðar þarna á milli. Mynd 19 sýnir hvernig hiti á 1350 og 1400 m dýpi hefur þróast í tímans rás. Við gerð myndarinnar var miðað við að hiti aðalæðarinnar hafi ætíð verið  $239^{\circ}\text{C}$  og eru mæligildin kvörðuð í samræmi við það. Auðséð er af myndinni að botnhiti holu SG-7 var við borlok allt að  $15^{\circ}\text{C}$  lægri en vatnsins sem streymdi upp holuna úr æðinni á 1300-1350 m. Eins hefur hiti á 1350 m verið  $5\text{-}10^{\circ}\text{C}$  lægri en æðarinnar. Þessi hitamunur hefur nú jafnast út vegna samspils varmaleiðni um bergið og hræringar vatns í holunni. Myndin sýnir því að hiti er viðsnúinn í holu SG-7. Hitaviðsnúningur kemur einnig fram í botni holna 8 og 9. Þetta þrennt staðfestir að jarðhitakerfið í Svartsengi er afmarkað til vesturs ofan 1500 m dýpis.



Mynd 15. Hitasaga Svartsengisholna á 800 m dýpi.

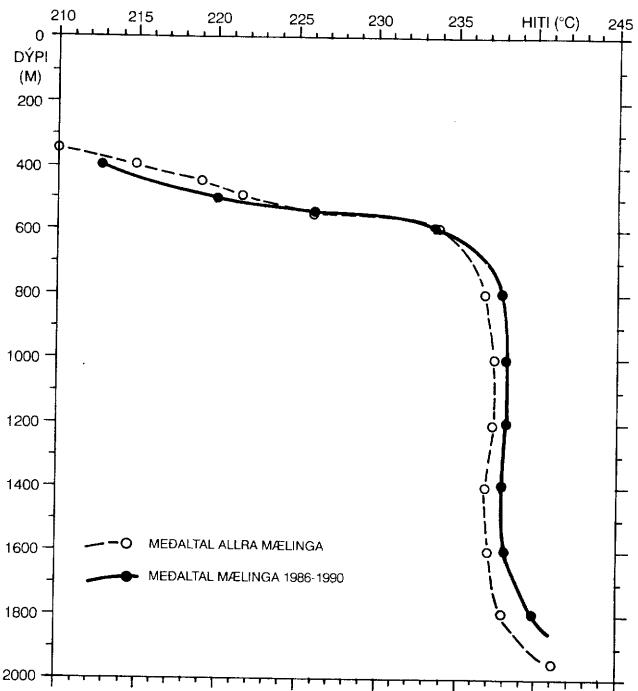


Mynd 16. Skyndikæling í Svartsengi vorið 1983.

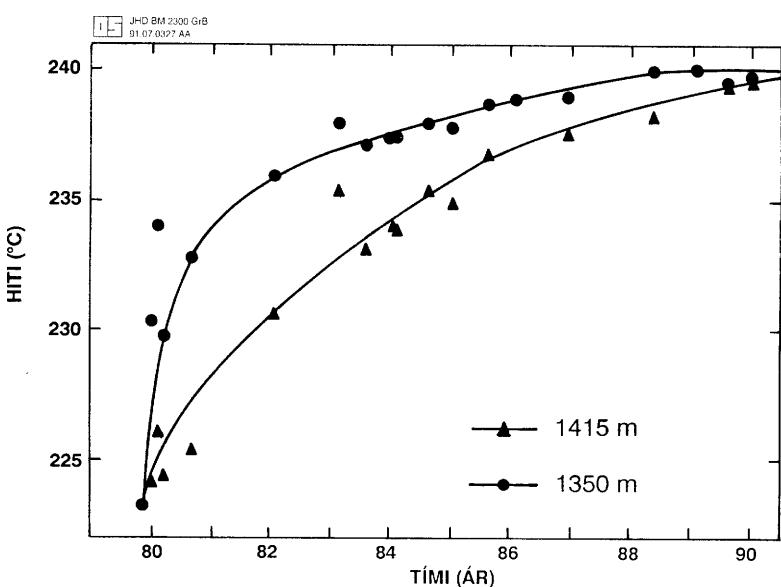


Mynd 17. Skyndikæling holu SG-12 vorið 1984.

JHD BM 2300 GrB  
91 07 0329 ÅÅ



**Mynd 18.** Meðalhiti holna í Svartsengi yfir mislöng tímabil.



**Mynd 19.** Hækkun botnhita holu SG-7 við vinnslu.

### 3.3 Áhrif niðurdælingar

Niðurdæling vatns í jarðhitakerfið í Svartsengi hefur staðið með nokkrum hléum allt frá 1982. Hola SG-12 var nýtt til niðurdælingar fram til 1988, en þá tók hola SG-5 við hlutverki hennar. Upphaflega var dælt niður köldu ferskvatni af Lágasvæðinu í tilraunaskyni. Mestur hluti niðurdælingarinnar var þó í formi u.p.b. 70 °C heits hitaveituvatns (Jón Steinar Guðmundsson 1983; Vatnaskil 1985, 1988 og 1989 a).

Töluverðar rannsóknir hafa tengst niðurdælingum í Svartsengi. Merkastar eru niðurstöður tveggja ferlunarprófana, en þar kom í ljós, að mikill hluti niðurdælingavatns holu SG-12 skilaði sér suður til holu SG-6 (Vatnaskil 1989 b). Áhrif niðurdælingar í holu SG-12 hafa einnig sést í borholumælingum, annars vegar sem kæling í holu SG-6 (mynd 15), en hins vegar í ójafnri upphitnun holu SG-12 eftir að niðurdælingu lauk.

Á mynd 20 er sýnt hvernig hiti hefur breyst í holu SG-6 við niðurdælinguna í holu 12. Neðsta æð holunnar er, samkvæmt hitamælingu í blæstri, á 1600-1650 m dýpi. Myndin sýnir að hiti ofan og neðan æðarinnar á 1600 m helst svipaður fram yfir mitt ár 1984. Þá tekur að gliðna milli hitaferla fyrir 800 og 1400 m dýpi annars vegar, og 1900 m dýpi hins vegar. Hefur svo haldist síðan. Nær samfellt niðurdæling í holu 12 hófst sumarið 1984. Er ljóst að hluti þess vatns hefur skilað sér niður til æðarinnar á 1600 m í holu 6, og kælt hana frá u.p.b. 238 °C fyrir niðurdælinguna í 232 °C sumarið 1989. Kælihraðinn virðist rúmlega 1 °C á ári neðan til í holunni en meiri ofar.

Í maílok 1988 varð sú breyting í vinnslu úr jarðhitakerfinu í Svartsengi, að niðurdælingu í holu SG-12 var hætt. Holan var síðan sett í blástur 12. ágúst 1988 (Vatnaskil 1989 a). Á mynd 21 er sýnt hvernig hiti hefur hegðað sér með dýpi í holu 12 eftir að niðurdælingu lauk. Hitamælingarnar eru sérstæðar fyrir að flestar eru þær gerðar í blæstri og má því túlka þær með rennsli upp holuna eingöngu. Svo er þó ekki um fyrstu 2 mælingarnar. Þá stendur holan og virðist sem hiti hennar stjórnist af 210-215 °C heitu vatni sem rennur inn á tæpum 1000 m og niður holuna í æð á 1200 m. Holunni er síðan hleypt í gos í ágúst og mæld eftir það í blæstri fjórum sinnum á 8 mánuðum. Á þessu tímabili hitnaði holan rólega upp samhlíða því að toppþrýstingur hennar hækkaði úr 8 í 10 1/2 bar.

Mynd 22 sýnir hitnun holu SG-12 með tíma eftir að blástur hófst í ágúst 1988. Til skoðunar voru valin dýpi milli æða í holunni. Helstu æðar hennar eru, skv. hitamælingum í blæstri, á tæplega 1000 m dýpi, á u.p.b. 1025 m dýpi og síðan samsafn æða neðan 1050 m. Það vatn virðist samt koma aðallega úr æð á 1200 m dýpi. Það sem vekur fyrst athygli við skoðun myndar 22 er að upphitnun æða er nánast línuleg með tíma ofan 1250 m dýpis. Eins sést, að upphitnunarferlar ofan 1250 m dýpis skerast í ≈ 240 °C um árslok 1990. Virðist sem þá séu yfirstaðin áhrif niðurdælingar á vinnsluæðar holunnar, en þau hins vegar enn viðvarandi í þéttum botnhluta holunnar neðan 1250 m dýpis. Mismunandi hraði upphitnunar stafar vísast af samspili kælingar sprungna og kælingar bergsins á milli þeirra. Hægt er að áætla gróflega hitnunarhraða kældrar æðar sem hola vinnur úr með líkingu á bord við (sjá viðauka 3):

$$\frac{dT}{dt} \approx K \dot{m} \Delta T$$

þar sem T er hiti í æðinni við vinnsluholuna, t er tími, K er fasti sem lýsir eiginleikum æðarinnar og  $\Delta T$  er heildarkæling æðarinnar við borholu við upphaf vinnslu. Mynd 22 sýnir að  $dT/dt$  mælist fasti fyrir góðar æðar. Massaskipti eru ör í þeim og áhrif kælingar hreinsast hratt burtu. Nálgunin gildir hins vegar ekki fyrir tregar æðar. Í þeim skiptir miklu máli að bergið við æðarnar er kælt. Við hægt rennsli frá ótrufluðum jarðhitageyminum að holunni eru áhrif kalda bergsins ríkjandi og valda því að æðin hitnar hægt við vinnslu.

Ef hitnunarferlar á 1250, 1300 og 1400 m eru framlengdir í tíma, sést að það tekur langan tíma að fá  $\approx 240^{\circ}\text{C}$  á þessum dýpum. Því er ályktað hér að þessi hluti holunnar skili mjög litlu í heildarrennslinu á holutoppi, vegna hægs rennslis um kælt berg að holunni. Eins má áætla rennslishlutfall æðar á tæpum 1000 m með eftirfarandi hætti. Æðin rann inn í holuna í mælingum gerðum 13. júlí og 5. ágúst. Í fyrri mælingunni var hiti æðarinnar  $210^{\circ}\text{C}$  en í þeirri seinni  $216^{\circ}\text{C}$ . Sami neminn var notaður í bæði skiptin. Hitnunarhraði æðarinnar á þessu tíma-bili var því  $0,26^{\circ}\text{C/dag}$ . Blástur hefst úr holunni 12. ágúst og hefur hiti hennar þá verið um  $218^{\circ}\text{C}$ . Fyrsta mæling í holunni í blæstri er svo gerð 31. október sem er 80 dögum síðar. Þá ætti hiti æðarinnar að hafa verið minnst  $218 + 0,26 \cdot 80 \approx 239^{\circ}\text{C}$ , sem er venjulegur æðahiti í Svartsengi á þessu dýpi. Út frá því er auðvelt að reikna massahluta æðarinnar á 1000 m skv. jöfnum sem gefnar eru í viðauka 2. Tafla 5 gefur niðurstöður reikninganna, sem eru í stuttu máli á þá leið að æðin á 1000 m gefur um 40 % af heildarrennsli holunnar.

**TAFLA 5. Reikningar á tillagi æðar á 1000 m í rennsli holu SG-12.**

| Mælidagur             | 31/10 1988 | 28/11 1988 | 14/2 1989 | 14/6 1989 |
|-----------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Hiti ofan æðar °C     | 213.7      | 216.0      | 219.0     | 222.0     |
| Hiti neðan æðar °C    | 196.0      | 200.0      | 205.0     | 211.0     |
| Reiknað tillag æðar % | 41         | 41         | 41        | 39        |

Allar mælingarnar eru gerðar í blæstri. Hiti æðar á tæpum 1000 m er hafður fasti =  $239^{\circ}\text{C}$ .

Ekki er hægt að reikna framlag annarra æða í holunni, utan að æðar á 1250 m og neðar gefa u.p.b. 6 % af holutoppsrennslinu, ella yrði hiti æðarinnar milli 1200 og 1250 m að vera hærri en  $240^{\circ}\text{C}$  um áramót 1990-1991.

Mælingar á hitnun holu SG-12 í blæstri, eftir áralanga niðurdælingu, gefa mikilsverðar upplýsingar um innri gerð jarðhitageymisins í Svartsengi. Ljóst er, bæði út frá hitnun æða í SG-12 og út frá niðurdælingu sporefna, að jarðhitageymirinn hegðar sér samkvæmt því sem á ensku er nefnt *double porosity reservoir* sem mætti nefna á íslensku sprungugeymir. Með því er átt við að hugsa megi sér jarðhitakerfið sem flókið net láréttra og lóðrétttra sprunguflata með gegnheilar bergeiningar á milli. Mikil lekt er í sprunguflötunum en lítið rúmmál, kannski 1 % af rúmmáli geymisins. Bergeiningarnar milli sprungna einkennast aftur á móti af lágrí lekt en háum poruhluta. Allar breytingar á ástandi vökvans í sprungukerfinu breiðast hratt út um vel lekt sprungunetið, líkt og sást við skyndikælingu svæðisins 1983 og 1986. Bergeiningarnar á milli eru hins vegar svifaseinar og missa aðeins lítið brot af massa- og varmaforða sínum við slíkar breytingar. Petta veldur því að þegar kalt innrennslí í svæðið stöðvest, hvort sem er af völdum skyndikælingar eða niðurdælingar, taka bergeiningarnar umsvifalaust völdin og skila hitaástandi sprungukerfisins í fyrra horf. Slíkt gerist hraðast þar sem lekt sprungunetsins er mest, en mun hægar þar sem lektin er lág, samanber máttitlu æðarnar neðst í holu SG-12.

Fróðlegt er að skoða hvað varð um vatn sem dælt var niður holu SG-5 vorið 1990. Farið var á holuna þann 22. mars og mælt í ádælingu bæði hiti og rennsli (spinner) í holunni. Niðurstöður eru sýndar á mynd 23. Ádæling fyrir og í mælingunni var að jafnaði um 20 l/s af  $78^{\circ}\text{C}$  heitu vatni. Rennslið var stöðvað til að koma mætti mælum í holuna og fylgdi því hitatruflun sem sést vel í fyrri mælingunni. Ljóst er af hitamælingunum að langtíma ádælingin hefur náð alveg niður í 1150 m dýpi, en stöðvun ádælingar fékk æðar á u.p.b. 1050 og á 1120 m dýpi til að renna inn í holuna. Þá rennur og inn heitara vatn á 820-830 m dýpi sem veldur allsérstæðu og reglubundnu flökti í mælda hitanum allt niður í 900 m. Þessa hegðan má skýra með að sem veitir vökva inn í holuna á 600-650 m og rennur það niður bak við óraufaðan leiðarann að fyrstu rauf sem kemur á 818 m dýpi. Æðarvatnið virðist síðan vera í blöndun allt niður í 900 m dýpi.

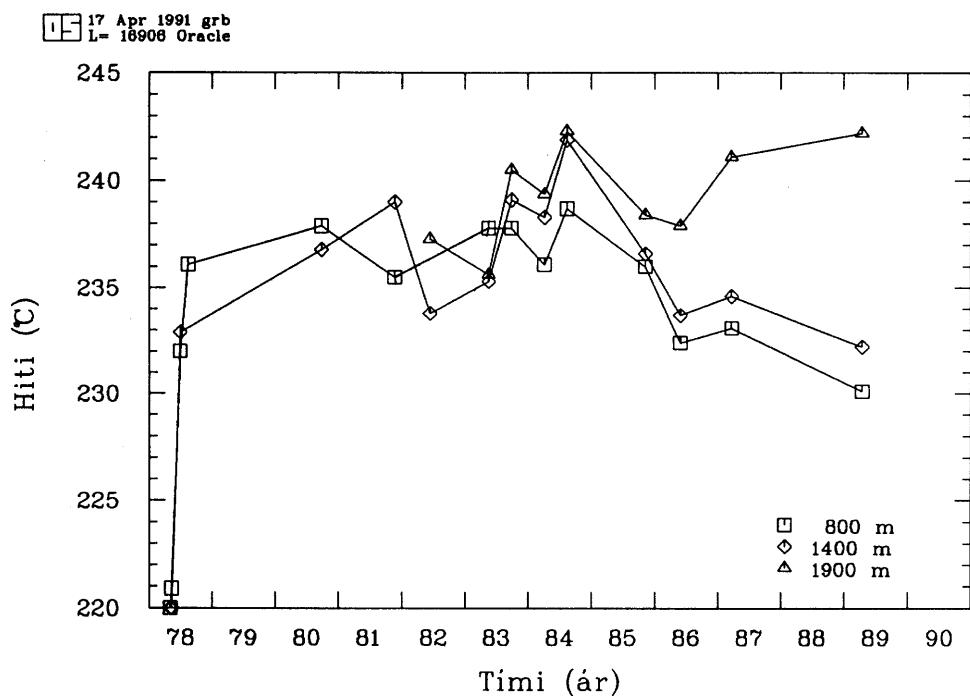
Á mynd 23 er einnig sýnd túlkun á rennsli í holunni. Gengið var út frá að uppgefin ádæling Svartsengismanna, 20 l/s, væri rétt og skalast aðrar stærðir af henni. Niðurstöður eru sýndar í töflu 6, sem sýnir æðadýpi og túlkað rennsli úr/í þær samkvæmt rennslis- og hitamælingum. Við 20 l/s ádælingu reiknast koma 71/s af 200 °C vatni úr lítið kældri að á 600-650 m dýpi, sem renna niður holuna að fyrstu rauf á 820 m dýpi. Þar hefst hin sérkennilega blöndun sem jafnast ekki út fyrr en á 900 m. Á 850 og 950 m virðist síðan mest af vatninu fara út í bergið.

**TAFLA 6.** Dýpi og rennsli um æðar holu SG-5 f 20 l/s ádælingu.

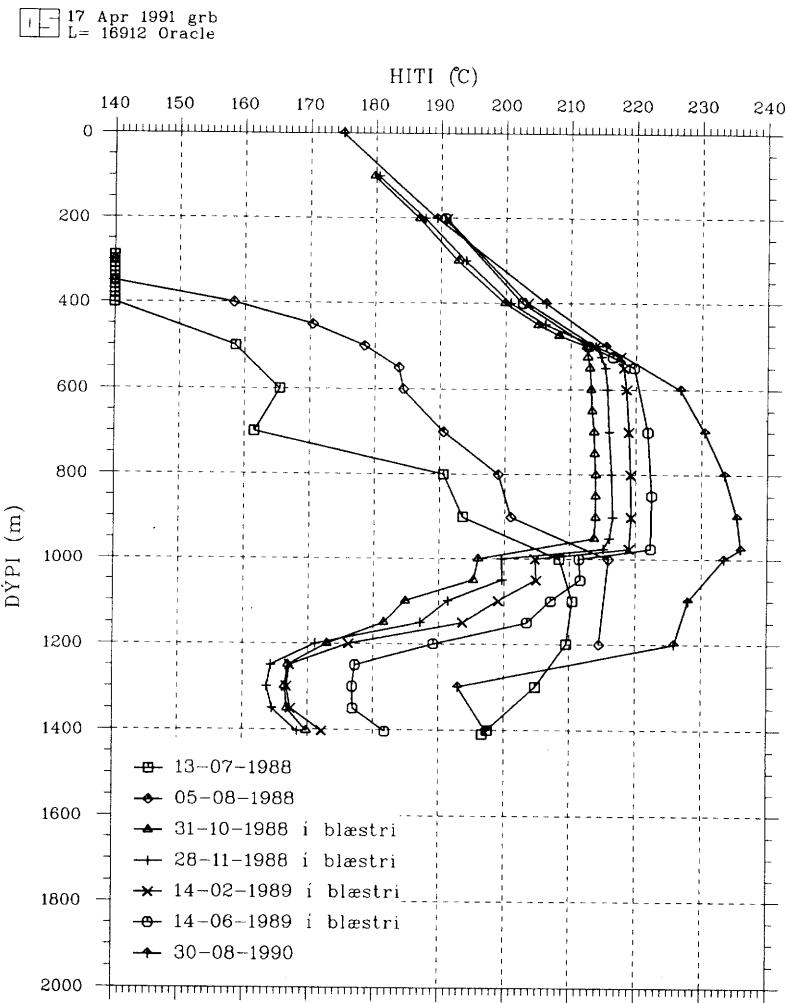
| Dýpi<br>(m) | Hiti<br>(°C) | Rennsli úr úr holu<br>(l/s) | Rennsli inn í holu<br>(l/s) |
|-------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0           | 78           |                             | 20                          |
| 600-650     | 200          |                             | 7                           |
| ≈ 850       | ?            | 22                          |                             |
| ≈ 950       | ?            | 5                           |                             |
| ≈ 1050      | > 120        |                             | lítíð                       |
| ≈ 1120      | > 130        |                             | lítíð                       |

Dýpi og hiti æðar á 600-650 m áætlað út frá rennslis- og hitamælingum. Æðin hitar 20 l/s af 80 °C vatni í 27 l/s af u.p.b. 112 °C vatni.

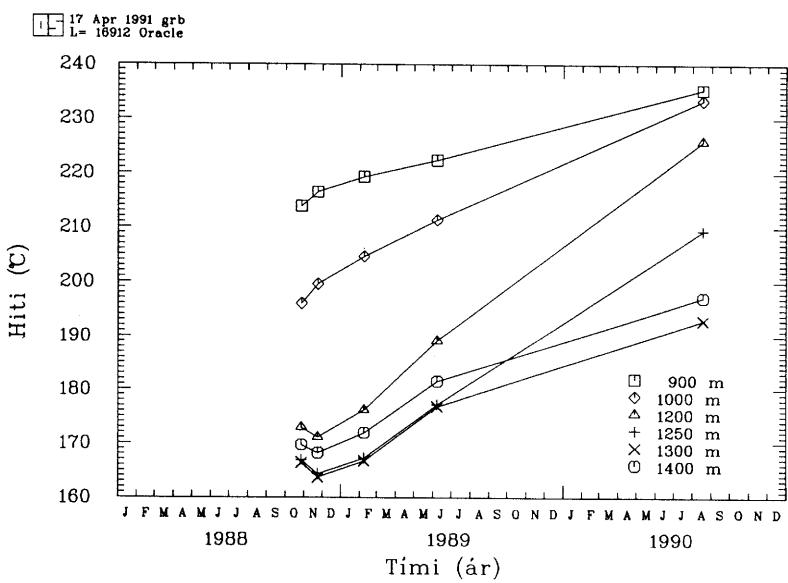
Einnig sást í mæligögnum holu SG-5 hærri rennslishraði á dýptarbilinu 350-400 m, en þvermál fóðringar og leiðara gefur tilefni til. Þar sem engin hitabreyting varð á þessu bili, er ljóst að einhver kalkútfelling er á þessu dýpi.



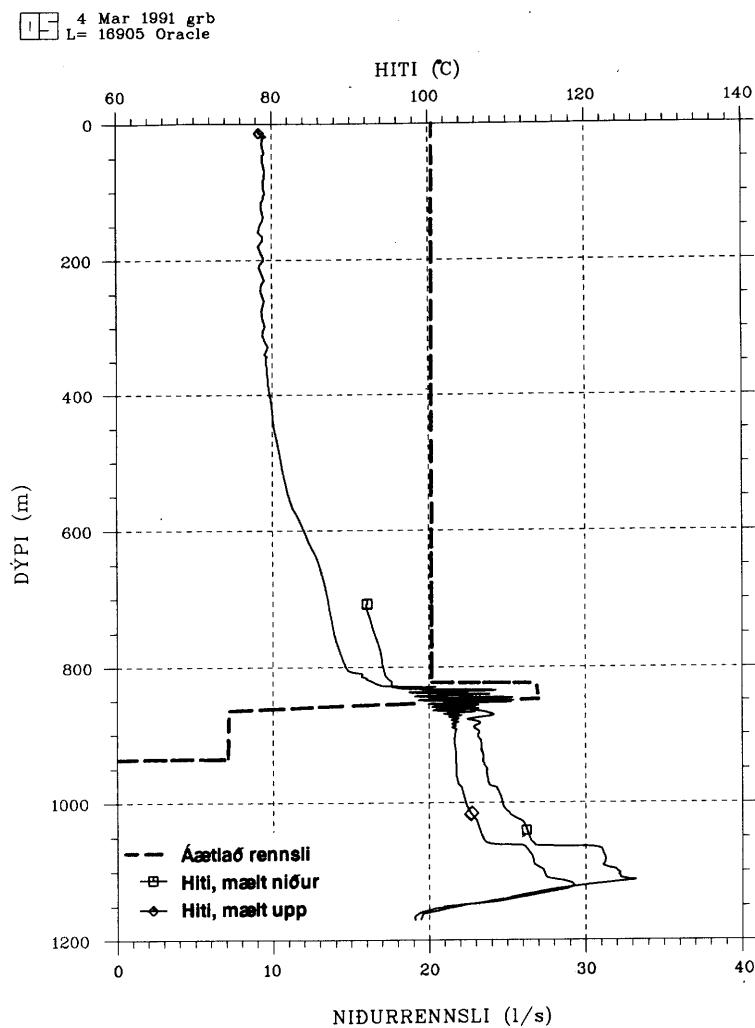
**Mynd 20.** Hitabreytingar holu SG-6 vegna niðurdælingar í SG-12.



**Mynd 21.** Hitamælingar í holu SG-12 eftir lok niðurdælingar.



**Mynd 22.** Hitasaga holu SG-12 eftir að niðurdælingu lauk.



Mynd 23. Niðurstöður rennslis- og hitamælinga í holu SG-5 í mars 1990.

## 4. PRÝSTIDREIFING Í JARÐHITAKERFINU

### 4.1 Upphaflegur þrýstingur

Áreiðanleg vitneskja um upphaflegan þrýsting í jarðhitakerfi er ekki síður nauðsynleg við mat á rennsli vökva um kerfið en góðir berghitaferlar í holum. Jarðhitakerfið í Svartsengi er hins vegar aerið illt viðureignar í þessu efni því bæði eru mjög litlar láréttar breytingar í þrýstingi svæðisins og eins hefur þrýstingur fallið hratt við vinnslu þannig að flestar holar í Svartsengi eru boraðar í svæðið truflað. Upphafleg þrýstidreifing í svæðinu verður því aðeins byggð á mælingum í holum 1-5.

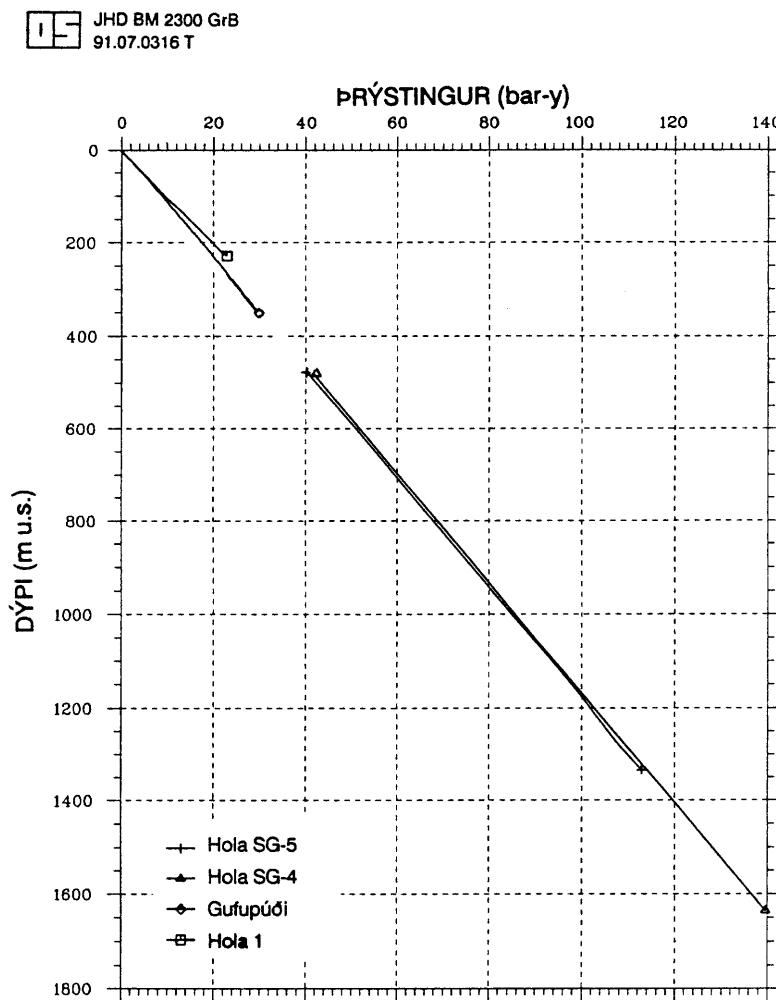
Í Svartsengi finnast þrjú vatnskerfi, volga vatnskerfið á 30-300 m u.s., gufupúðinn og jarðhitakerfið neðan 600 m (sjá kafla 3.1). Upphaflegur þrýstingur í þessum kerfum var nálgadoður með eftirfarandi hætti (sjá töflu 7 og mynd 24).

1. Í kafla 3.1 voru leidd rök að því að upphaflegt ástand gufupúðans við holar 2, 3 og 10 einkenndist af sjóðandi vatnssúlu sem hæfist við sjávarmál (30 m holudýpi) og næði að u.p.b. 230 °C hita. Mynd 24 sýnir slíkan suðumarksferil þrýstings (fyrir hreint vatn).
2. Þrýstingur í volga vatnskerfinu er settur hinn sami og í þrýstimælingu sem gerð var í holu 1 í júlí 1976. Sú þrýstimæling fellur saman við reiknaðan þrýsting holunnar út frá vatnsborði og mældum hita árin 1983 og 1991, þannig að eftir vatnskerfið virðist ekki finna fyrir vinnslu fram til dagsins í dag. Þessi mældi þrýstingur holu 1 er sýndur á mynd 24.
3. Mynd 24 sýnir þrýstimælingar í holum 4 og 5 frá júlí 1976. Þær verða notaðar hér sem mat á upphaflegan þrýsting neðan 600 m dýpis. Þrýstimælingarnar voru gerðar eftir að holurnar höfðu staðið ótruflaðar í rúmt ár.

TAFLA 7. Áætlaður upphafþrýstingur í gufupúða, efra og neðra vatnskerfi í Svartsengi.

| Dýpi<br>(m u.s.) | Gufupúði<br>(bar-y) | Hola 1<br>(bar-y) | Dýpi<br>(m u.s.) | Hola SG-4<br>(bar-y) | Hola SG-5<br>(bar-y) |
|------------------|---------------------|-------------------|------------------|----------------------|----------------------|
| .0               | 0.0                 |                   | 575              | 49.8                 | 48.8                 |
| 10.0             | 0.9                 | 0.9               | 675              | 58.2                 | 57.3                 |
| 40.0             | 3.7                 | 3.9               | 775              | 66.7                 | 65.7                 |
| 70.0             | 6.3                 | 6.8               | 875              | 75.2                 | 74.2                 |
| 100.0            | 9.0                 | 9.7               | 975              | 83.7                 | 82.7                 |
| 130.0            | 11.6                | 12.9              | 1075             | 92.1                 | 91.6                 |
| 160.0            | 14.1                | 15.9              | 1175             | 100.7                | 99.9                 |
| 190.0            | 16.7                | 18.9              | 1275             | 109.1                | 107.6                |
| 220.0            | 19.2                | 21.8              | 1335             |                      | 112.9                |
| 230.0            | 20.0                | 22.7              | 1375             | 117.6                |                      |
| 260.0            | 22.5                |                   | 1475             | 126.0                |                      |
| 300.0            | 25.8                |                   | 1575             | 134.5                |                      |
| 340.0            | 29.0                |                   | 1635             | 139.6                |                      |

Skoðun á mynd 24 sýnir að litlar láréttar breytingar eru í þrýstingi milli gufupúðans og holu 1. Helst er að sjá þrýstimun á 250 m u.s., en þar munar 3 börum á gufupúða og holu 1. Þá er hola 4 eilítið hærri en hola 5 í þrýstingi og verður sá munur að teljast marktækur þar sem holurnar eru mældar með sama nema, á sama tíma og við á móta hitastig. Munar minnst 0,5 börum á 1100 m dýpi. Það styrkir kennunguna um að hola 4 sé nærrí heitu uppstreymi svæðisins því hæstur þrýstingur ætti að vera í uppstreymirsánni (sjá t.d. myndir 13 og 14). Eins sést, ef þrýstiferlar holna 4 og 5 eru framlengdir upp á við, að þeir hitta á botnþrýsting gufupúðans. Það sýnir að greið tengsl eru milli gufupúðans og neðra vatnskerfisins.



**Mynd 24.** Upphafleg þrýstdreifing í jarðhitakerfinu í Svartsengi.

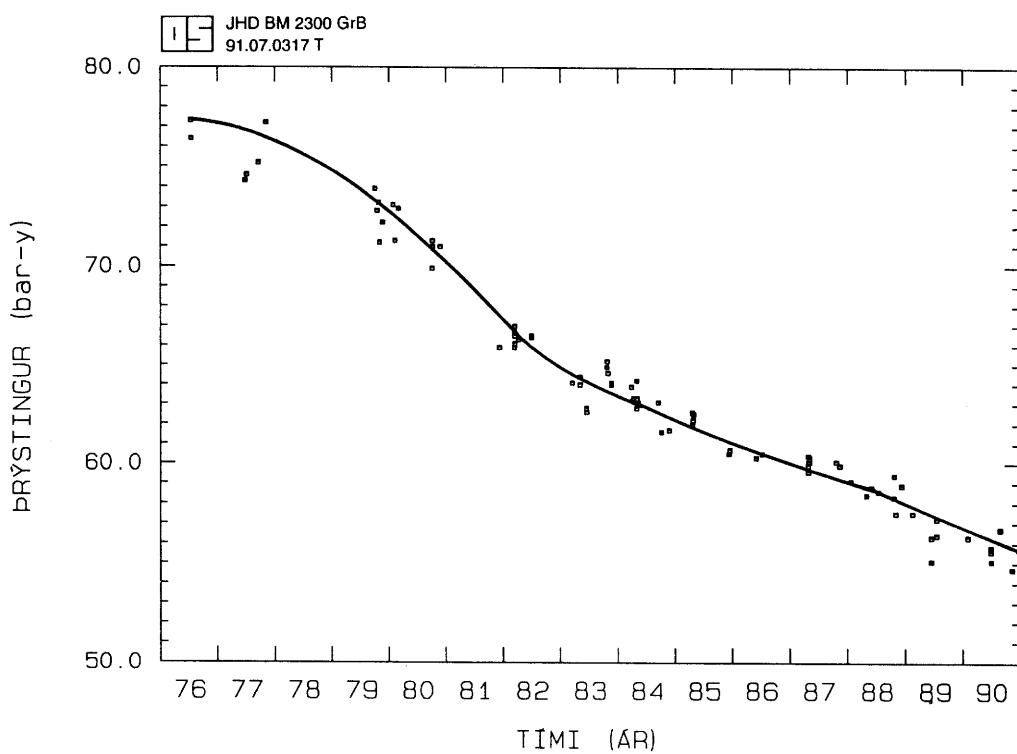
## 4.2 Niðurdráttur vegna vinnslu.

Eitt af markmiðum reglulegra þrýstimælinga í borholum í Svartsengi er að fylgjast með niðurdrætti í jarðhitakerfinu. Mynd 25 sýnir hvernig þrýstingur allra holna á 900 m .u.s. hefur hegðað sér í mælisögunni. Út úr myndinni voru þó grisjuð mæligildi sem fengust í mjög trufluðum holum t.d. vegna blásturs eða ádælingar. Dýpið 900 m var valið þar sem það inniheldur allar holur utan gufupúðans og er næst vel leku innskotasyrpunni á 1000-1300 m dýpi. Einnig er teknaður inn á myndina ferill sem sýnir áætlað meðaltal þrýstigilda samkvæmt augnmati. Hægt er að nálgan þennan feril með eftirfarandi margliðu:

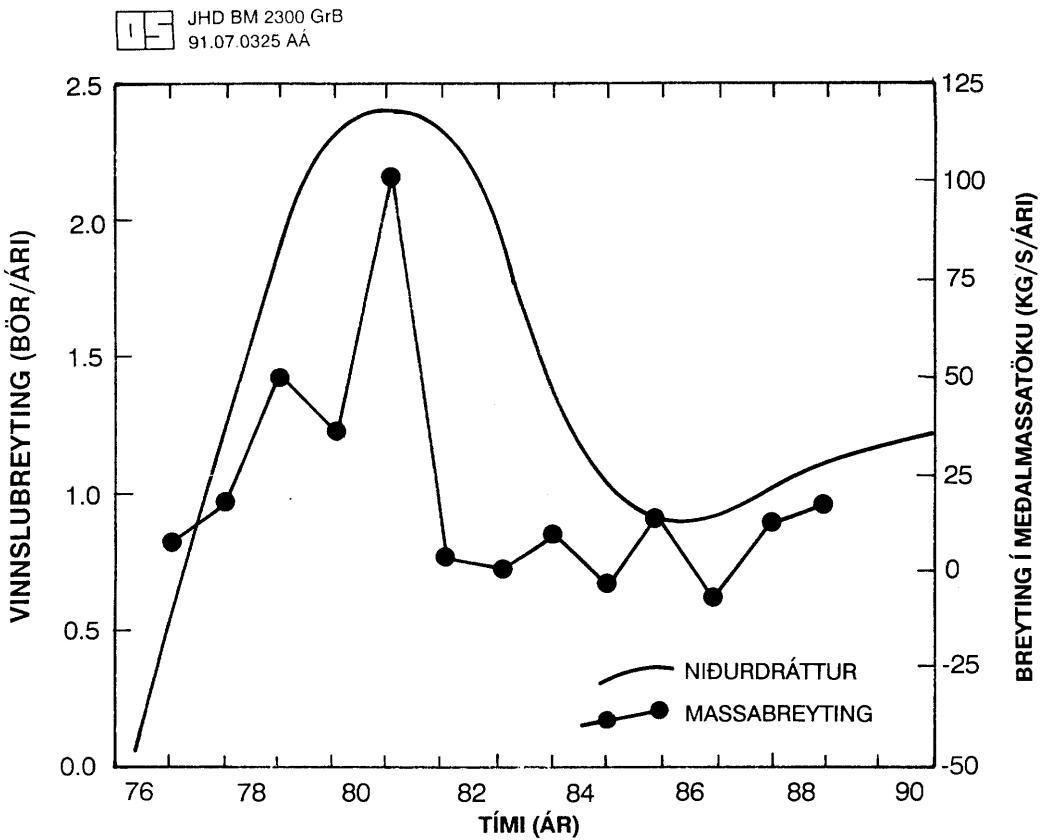
$$P(t) = 76.78 + 1.164*t - 0.862*t^2 + 0.0841*t^3 - 0.00254*t^4$$

þar sem P er meðalsvæðisþrýstingur (bar-y) og t er tími í árum frá 1976-1990.

Mynd 26 sýnir hvernig hraði niðurdráttar hefur breyst með tíma í Svartsengi. Eins er sýnt á sömu mynd hvernig meðalmassataka (kg/s) hefur breyst milli ára. Sést þar að við upphaf vinnslu fellur hraði niðurdráttar nánast línulega með tíma og nær hámarki 1981, þegar Orkuver 2 kemur inn og massataka fer í tæp 240 kg/s. Við þá stöðugu vinnslu dró úr hraða niðurdráttarins og fél Hann niður í 1 bar/ári kringum 1985. Eftir það hefur hraðinn verið hægvaxandi á nýjan leik og virðist nú um 1,2 bör/ári.



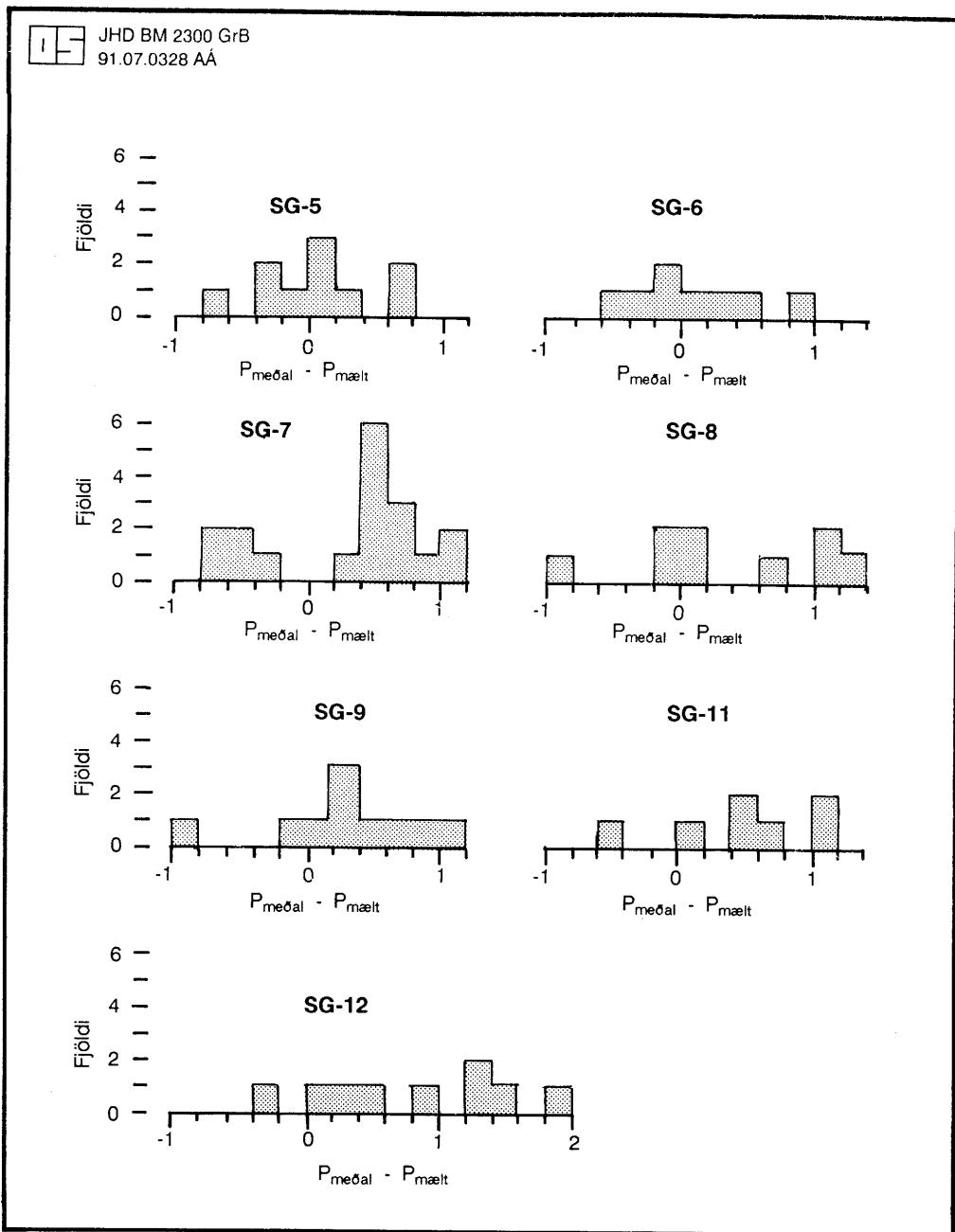
**Mynd 25.** Þrýstingur á 900 m u.s. með tíma fyrir allar holur í Svartsengi.



Mynd 26. Hraði niðurdráttar og breytingar í meðalvinnslu í Svartsengi.

### 4.3 Láréttar þrýstibreytingar

Ljóst er að láréttar breytingar í þrýstingi eru mjög litlar í Svartsengi. Einu tryggu merkin um slíkt eru sýnd á mynd 24, en þau eru munur upphafþrýstings gufupúða og volga vatnskerfisins annars vegar, og munur djúpþrýstings í holum 4 og 5 hins vegar. Þrýstimælar þeir sem hafa verið notaðir í Svartsengi eru nákvæmir upp á einungis  $\pm 0,5$  bör. Því er erfitt að meta út frá einstökum mælingum hvort þrýstingur einnar holu er hærri en annarrar á sama dýpi. Ein leið til að fara í kringum þessa takmörkuðu mælinákvæmni er að skoða hvernig margar mælingar á sama dýpi í holu, dreifast kringum það sem kalla mætti meðalþrýsting í Svartsengi. Gögnin í mynd 25 voru skoðuð með þessu tilliti. Athugað var hvort þrýstingur einstakra holna væri að jafnaði hærri eða lægri en meðalþrýstingurinn sem táknaður er með heildreginni línu á myndinni. Niðurstöður eru á mynd 27, sem sýnir fjölda mæligilda ( $P_{mælt}$ ) sem fóllu ofan eða neðan meðaltalsþrýstingsins ( $P_{meðal}$ ). Úr myndinni var samt sleppt mæligildum sem bersýnilega voru of lág vegna niðurdráttar í blæstri eða kælingar eftir ádælingu. Í stuttu máli má segja að ekki er marktækur munur meðalþrýstings og mælds þrýstings í holum 5, 6, 7 og 8, meðan mældur þrýstingur í holum 9, 11 og 12 er yfirleitt undir meðalþrýstingi svæðisins. Lágan þrýsting í holu 12 má skýra að hluta með niðurdælingu í hana, því kaldí vökvinn sem í hana fór fellir þrýsting ofan bestu æðar (milli 1000-1200 m) miðað við það sem yrði ef holan væri fullheit. Lægri þrýsting holna 9 og 11 liggur hins vegar beinast við að skýra með vaxandi fjarlægð frá uppstreymisrás svæðisins.



Mynd 27. Munur mælðs þrýstings og meðalþrýstings á 900 m u.s. í nokkrum holum.

#### 4.4 Niðurdráttur í borholum í blæstri

Einn þeirra þátta sem lesa má út úr þrýstingönum í Svartsengi, er hve mikið þrýstingur holna fellur í blæstri miðað við það sem er í jarðhitageyminum fjarri holunni. Tafla 8 gefur niðurstöður slíks samanburðar. Við gerð töflunnar var notuð sú mæliniðurstaða að niðurdráttur holu SG-7 í blæstri er einungis um 1 bar við 55 kg/s rennsli. Hola 7 hefur í seinni tíð verið eftirlitshola með svæðisþrýstingi og því tiltækjar margar þrýstimælingar í henni sem bera má saman við blástursþrýsting í öðrum holum til að meta niðurdrátt í þeim. Undanskilin er þó hola 4. Niðurdráttur í henni er fenginn með samanburði blástursmælinga og mælda upphafþrýstingsins á mynd 24.

**TAFLA 8. Niðurdráttur í Svartsengisholum í blæstri. Dýpi er í m u.s.**

| Mæli-dagur | Bor-hola | Rennsli <sup>+) (kg/s)</sup> | Niðurdráttur í 600 m (bör) | Niðurdráttur í 700 m (bör) | Niðurdráttur í 800 m (bör) | Meðaltal (bör) | Gæfni (kg/s/bar) |
|------------|----------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|------------------|
| 21.04.1977 | SG-4     | 30                           | 1.9                        |                            |                            | 1.9            | 16               |
| 9.11.1977  | SG-4     | 30                           | 2.6                        |                            |                            | 2.6            | 12               |
| 13.06.1989 | SG-6     | 45                           | 8.4                        | 9.0                        | 9.5                        | 9.0            | 5                |
| 21.10.1988 | SG-7     | 55                           | 1.0                        | 1.0                        | 1.1                        | 1.0            | 55               |
| 18.07.1989 | SG-8     | 50                           | 1.4                        | 1.2                        | 1.7                        | 1.4            | 36               |
| 7.12.1988  | SG-9     | 54                           | 0.4                        | 0.6                        | 0.6                        | 0.6            | 90               |
| 13.06.1989 | SG-9     | 65                           | 1.7                        | 1.5                        | 2.0                        | 1.7            | 40               |
| 14.06.1989 | SG-11    | 55                           | 2.5                        | 2.4                        | 3.1                        | 2.5            | 22               |
| 3.07.1990  | SG-11    | 10                           | 0.5                        | 0.2                        | 0.3                        | 0.4            | 25               |
| 31.10.1988 | SG-12    | 50                           | 2.9                        | 2.6                        | 2.3                        | 2.6            | 19               |

<sup>+) Gildi rennslis eru fengin úr skýrslum Vatnaskila (1985 og 1989 a), utan að rennsli holu 11 í júlí 1990 er sjónmat skýrsluhöfunda. Þá er rennsli holu 8 sett það sama og eftir hreinsun 1988, en holan var einnig nýhreinsuð í júní 1989.</sup>

Í töflu 8 er sýnd stærð sem er kölluð gæfni holu. Með því er átt við hve mikinn massa (kg/s) hver hola gefur að meðaltali fyrir hvert bar í niðurdrætti. Situr hola 6 þar í neðsta sæti, síðan hola 4, þá eru holur 11 og 12 svipaðar með 20-25 kg/s/bar, þar næst koma holur 8 og 9 með kringum 40 kg/s á barið og á toppnum trónir hola 7 með 55 kg/s/bar. Sýnir það að hola 7 hentar best Svartsengisholna til mælinga á geymisþrýstingi sökum lítils niðurdráttar í blæstri. Taflan sýnir vel yfirburði víðra holna fram yfir grannar hvað gæfni snertir. Holur 4 og 6 eru fóðraðar með 9 5/8" vinnslufóðringum og boraðar með 8 1/2" krónum í botn, meðan sambærilegar tölur í öðrum holum eru 13 3/8" fóðringar og 12 1/4" borkrónur.

Samantektin í töflu 8 er engan vegin endanleg. Segja má að niðurdráttur holu 7 í blæstri sé vel ákvárdarur en síður í hinum holunum. Ef ástæða þykir að ákvárdar nákvæmlega niðurdrátt í öðrum holum, þarf að mæla samdægurs eða með dags millibili þrýsting staðinnar holu og í blæstri. Annað býður upp á óvissur eins og sést í mælingu holu 9 frá 1988. Niðurstöður hennar virka ótrúverðugar og hefur kvörðun mælisins væntanlega verið röng.

## 5. ÚTFELLINGAR Í BORHOLUM

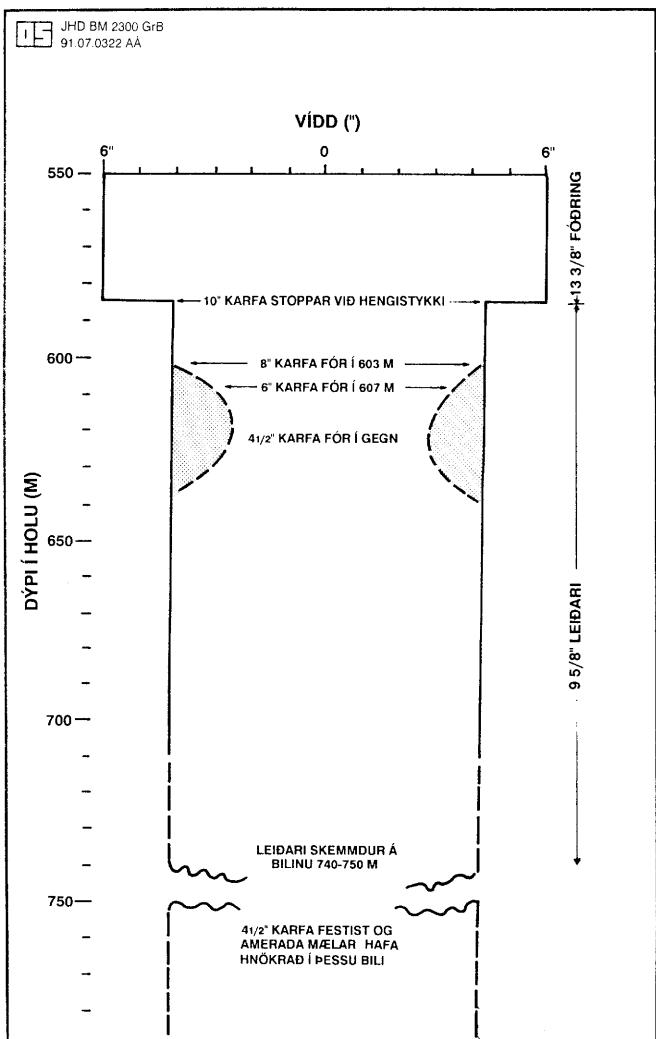
Einn þeirra þátta sem eftirlitsmælingar í Svartsengisholum beinast að, er að fylgjast með hvernig kalkútfellingar setjast í vinnslufóðringar og leiðara. Reynslan sýnir að þessar útfellingar verða rétt ofan suðuborðs í borholunni, þegar hiti rennisins lækkar og magn kalks í vatnsfasa fer yfir mettunarmörk (Jón Örn Bjarnason, 1988). Vitneskja um útfellingar í borholum er mikilvæg í rekstri Orkuversins í Svartsengi, því heppilegast er að útfellingar í holum séu hreinsaðar að sumarlagi þegar álag á Orkuverið er minnst.

### 5.1 Körfumælingar

Útfellingar í borholum má mæla með mjög einföldum hætti. Neðan á stálvír mælingabíls er fest spísslagi karfa, gildust í miðju. Köfunni er komið í holuna með því að loka aðalloka og taka síðan lok af holutoppi þannig að karfan komist niður á milli. Þá er holunni lokað, aðalloki opnaður og karfan send af stað niður holu. Ef karfan stöðvast er ljóst að holan er grennri körfunni í viðkomandi dýpi. Í þrengsta skilningi mælir karfan því vídd holunnar í aðeins einu dýpi,

en einnig má finna á hnökróttri hifingu hvort útfellingar eru ofan þess dýpis hvar karfan stoppaði. Ef karfa stoppar er venjan að skipta yfir í minni körfu og mæla síðan hvort hún kemst í gegn eður stoppar neðar. Fæst þannig mynd af því hvernig útfellingin lítur út séð ofan frá.

Í töflu 9 eru dregnar saman þær upplýsingar um körfumælingar sem tiltækjar eru í gagnagrunni Orkustofnunar. Á mynd 28 er sýnt dæmi um niðurstöður körfumælinga í holu SG-8 frá 27. ágúst 1990. Ástæða var til að körfumæla holuna því Amerada hitamælir sökk ekki nema í 605 m í holunni blásandi þann 4. júlí sama ár. Var þar með komin vitneskja um aukinn streymishraða og tilheyrandi móttöðu á mæli vegna útfellinga um þetta dýpi. Körfumælingin leiddi glögglega í ljós að útfelling var í leiðara neðan 603 m dýpis, en þar stöðvaðist 8" karfa. Í 607 m stöðvaðist svo 6" karfa en 4 1/2" karfa slapp í gegn.



**Mynd 28.** Niðurstöður körfumælinga í holu SG-8 í ágúst 1990.



**TAFLA 10. Yfirlit um hreinsiboranir í Svartsengi.**

| Bor-tími | Holu-nafn | Dýptar-bil (m) | Bor-tími | Holu-nafn | Dýptar-bil (m) | Bor-tími | Holu-nafn | Dýptar-bil (m) |
|----------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|----------|-----------|----------------|
| Ágú '77  | SG-4      | 352-400        | Mar '81  | SG-6      | 600-640        | Jún '85  | SG-8      | 473-539        |
| Maí '78  | SG-4      | 363-405        | Feb '82  | SG-5      | 427-492        | Jún '85  | SG-7      | 482-546        |
| Des '78  | SG-4      | 350-405        | Mar '83  | SG-8      | 431-532        | Júl '85  | SG-6      | 510-637        |
| Júl '79  | SG-4      | 355-417        | Apr '83  | SG-7      | 408-498        | Jún '87  | SG-6      | 618-651        |
| Okt '79  | SG-4      | 343-430        | Apr '83  | SG-9      | 380-516        | Maí '89  | SG-8      | 514-587        |
| Nóv '79  | SG-5      | 376-415        | Apr '83  | SG-11     | 408-504        | Maí '89  | SG-9      | 520-564        |
| Mar '80  | SG-6      | 480-560        | Apr '83  | SG-6      | 546-605        | Jún '89  | SG-6      | 630-659        |
| Apr '80  | SG-5      | 419-456        | Des '83  | SG-9      | 450-522        |          |           |                |
| Sep '80  | SG-6      | 563-642        | Jún '85  | SG-9      | 414-538        |          |           |                |
| Feb '81  | SG-5      | 410-470        | Jún '85  | SG-11     | 482-535        |          |           |                |

Upplýsingar um hreinsiboranir er að finna í borskýrslum Jarðborana hf.

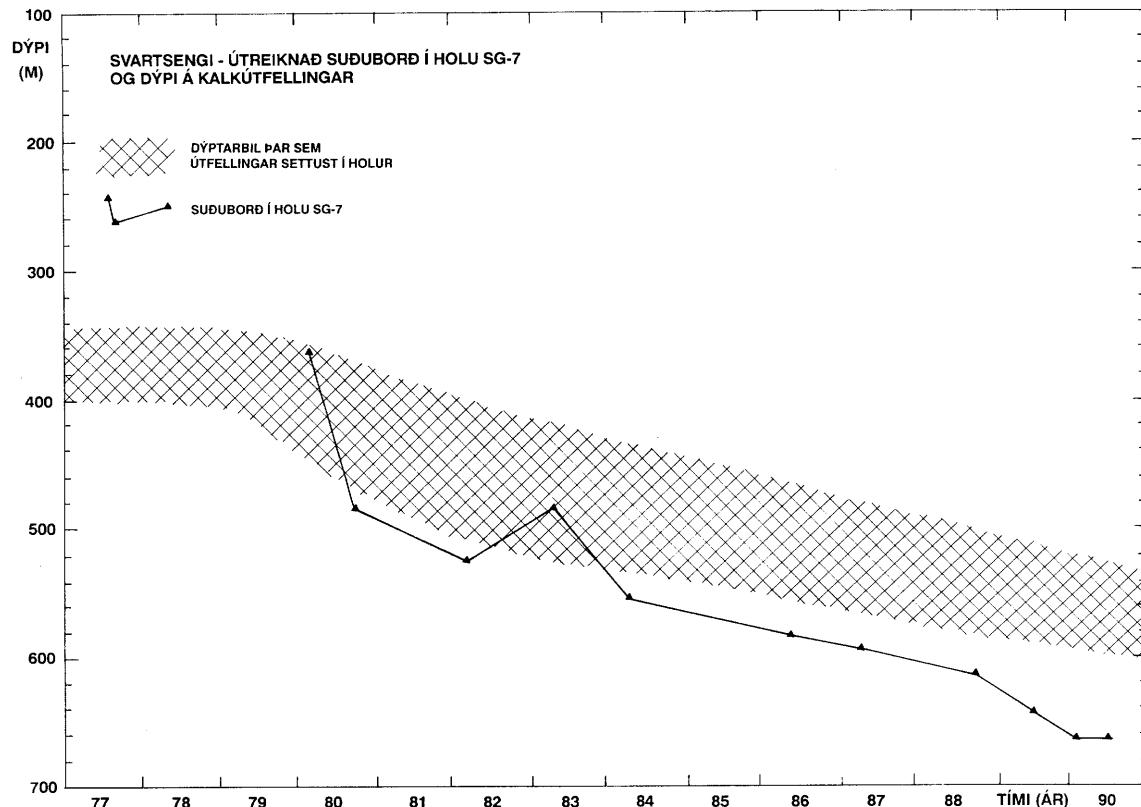
50 % meiri í víðum holum en grönum. Einföld en ekki örugg skyring þessa fæst í hugsanlegu samspili þykknunarhraða útfellingar á holuveggjum og lækkunar suðuborðs vegna vaxandi niðurdráttar. Má vera að útfellingaskæni setjist á holuveggi með jöfnum hraða sem næmi e.t.v. nokkrum millimetrum á mánuði rétt ofan suðuborðs. Vaxandi niðurdráttur dýpkar stöðugt á suðuborð og 15-20 m af hreinum holuveggjum bætast árlega við það svæði þar sem útfellingar myndast. Það þýðir að holan nær ekki að þrengjast verulega vegna sífelldrar niðurfærslu útfellingsvæðisins. Jafnþykkt útfelling við holuverg veldur hins vegar meiri þrystitöpum í grannri holu en víðri. Það leiðir til þess að grönnu holurnar dala hraðar í afköstum og eru hreinsaðar oftar en víðar holur. Þar með verður útfellingin styttri að meðaltali.

Á mynd 30 er sýnt á hvaða dýptarbilum útfellingar voru að myndast í Svartsengisholum árin 1985-1989. Má þar sjá að á árinu 1989 var útfellingakaflinn kominn niður að hengistykjum leiðara í holum 8 og 9. Mynd 28 sýnir síðan ástand holu 8 í ágúst 1990, en þá voru útfellingar nær eingöngu í leiðara. Þetta er óheillaþróun því hreinsiboranir verða tafsamari þar eð nota þarf 2 borkrónur í stað einnar. Eins er þess að vænta að hreinsiboranir verði tíðari í þróngum leiðurum en víðum vinnslufóðringum, ef mið er tekið af þeirri sögu sem sýnd er í töflu 11. Að síðustu eru uppi merki um það að holurnar þoli illa að leiðarinn sé hreinsaður. Eftir fyrstu hreinsun leiðara holu 8 sumarið 1989 fannst í hita- og þrystimælingum að skemmd var komin í leiðara kringum 750 m dýpi. Til að skoða orsakir þessa var 4 1/2" karfa send niður á 800 m dýpi í ágúst 1990. Ekkert athugavert fannst á niðurleið en í hífingu festist karfan í 740-750 m og varð ekki losuð nema með nokkru átaki (mynd 28). Þegar upp var komið sáust brotnar suður á körfunni og rispur eftir núning við brodda. Er líklegast að leiðarinn í holu 8 hafi snúist eitthvað og beyglast við hreinsunina 1989. Skemmdin kemur fram rétt neðan 710 m dýpis þar sem efstu raufarnar í leiðaranum byrja og hann verður veikari gagnvart átaki miðað við gegnheila hlutann ofan við.

**TAFLA 11.** Fjöldi hreinsiborana og meðallengd útfellinga í Svartsengisholum.

| Holu-nafn | 9 5/8" vinnslufóðringar |                           | Holu-nafn | 13 3/8" vinnslufóðringar |                           |
|-----------|-------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|
|           | Fjöldi hreinsana        | Meðallengd útfellinga (m) |           | Fjöldi hreinsana         | Meðallengd útfellinga (m) |
| SG-4      | 5                       | 59                        | SG-7      | 2                        | 77                        |
| SG-5      | 4                       | 51                        | SG-8      | 3                        | 92                        |
| SG-6      | 7                       | 64                        | SG-9      | 4                        | 94                        |
| Alls      | 16                      | Meðlatal 60               | SG-11     | 2                        | 75                        |
|           |                         |                           | Alls      | 11                       | Meðaltal 87               |

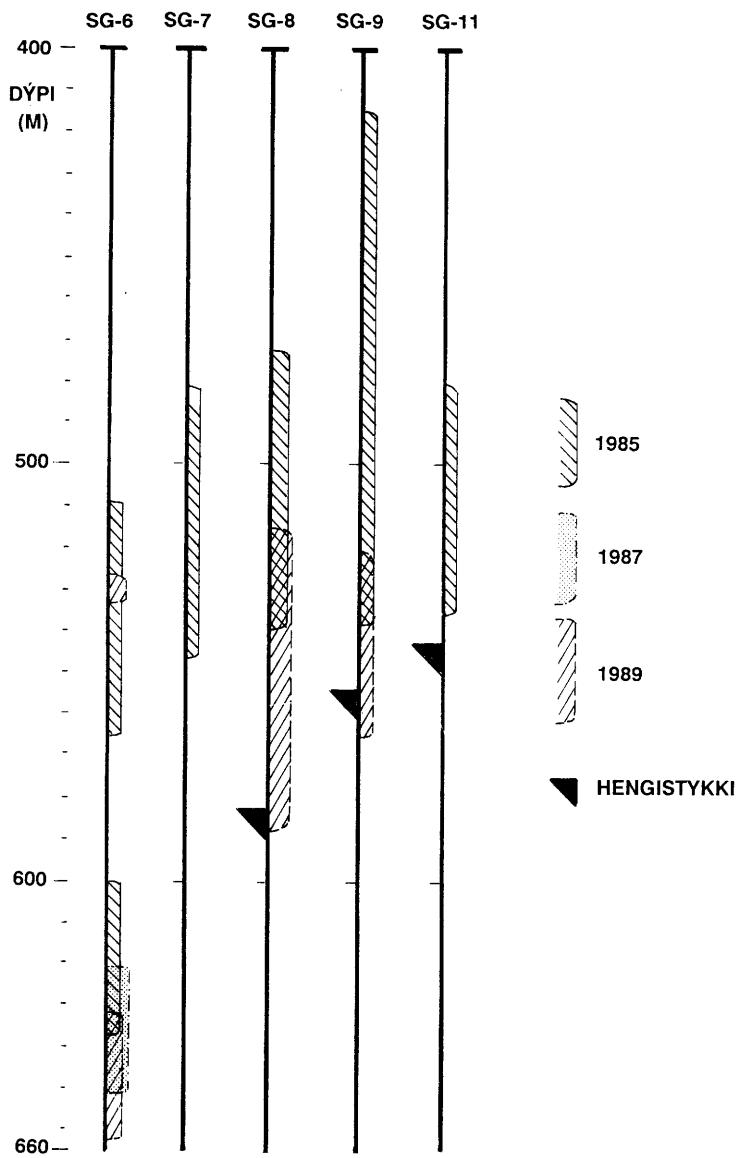
JHD BM 2300 GrB  
91 02 0066 AA



**Mynd 29.** Dýptarbil útfellinga og reiknað dýpi á suðuborð í holu SG-7 með tíma.

JHD BM 2300 GrB  
91.02.0065 AÁ

HREINSIBORANIR Á KALKÚTFELLINGUM Í SVARTSENGI



**Mynd 30.** Myndun útfellinga í holum 6, 7, 8, 9 og 11 árin 1985-1989.

### 5.3 Prýstifall vegna útfellinga

Þær þrengingar sem útfellingar valda í holum, geta haft veruleg áhrif á rennsliseiginleika holna, jafnvel þótt litlar breytingar komi fram á holutoppi. Hér skulu tínd til tvö dæmi um slík áhrif.

Í byrjun júlí 1990 voru holur 7 og 8 mældar samdægurs í blæstri. Mæling gekk vel í holu 7 en mælir komst hins vegar ekki gegnum útfellingakaflann í holu 8 sem lýst er í fyrri kafla. Niðurdráttur í blæstri er svipaður í holunum, 1-1 1/2 bar (sjá töflu 8). Prýstingur holu 8 neðan útfellinga ætti því að vera sambærilegur við prýsting holu 7 á sama dýpi. Á mynd 31 eru sýndar hitamælingar í holunum tveimur og í töflu 12 er metið prýstifall vegna útfellinga í holu 8 borð saman við holu 7 hreina. Ekki var gerð þrýstimæling í holu 8 þennan dag þannig að prýstingur holunnar er reiknaður út frá hitamælingunni og gufutöflum. Ljóst er af töflu 12 að útfellingin í holu 8 veldur nær þriggja bara lækkun í blástursþrýstingi á 600 m dýpi miðað við holuna hreina. Áhrifin á holutoppsþrýsting voru hins vegar hverfandi, m.a. vegna þess að holan viðheldur þrýstingnum á kostnað minnkunar í rennsli.

**TAFLA 12.** *Áætlað prýstifall vegna útfellinga í holu SG-8.*

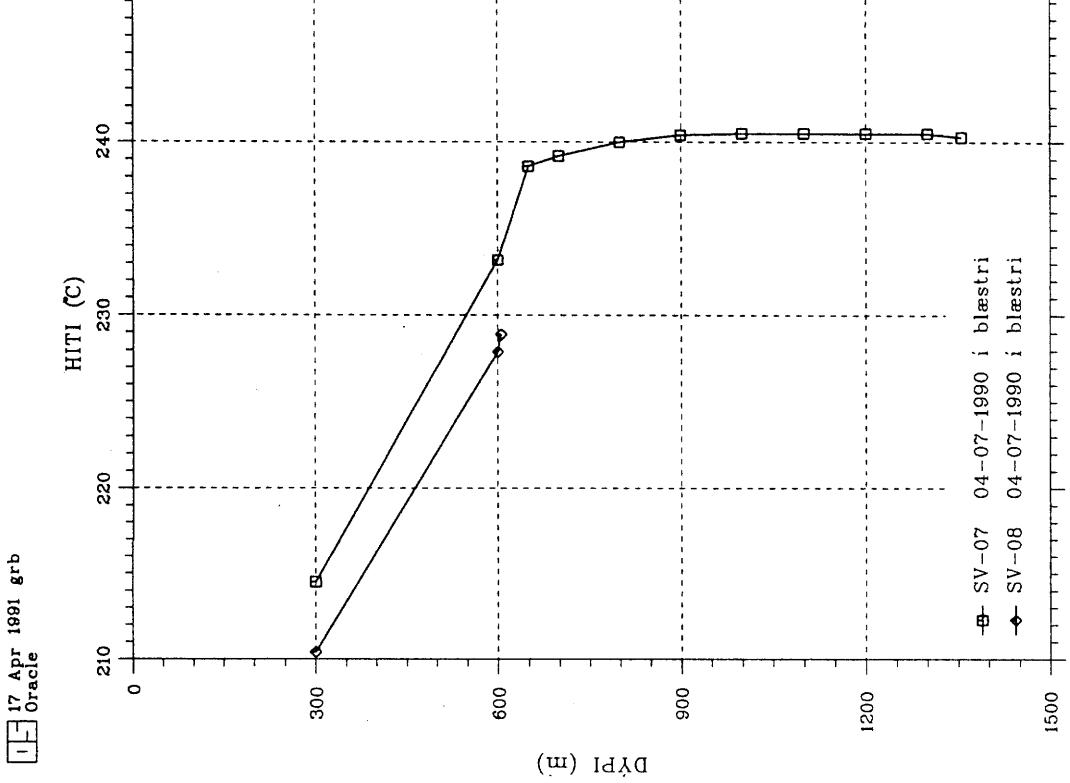
| Dýpi<br>(m) | Hola SG-7<br>mælt<br>(bör-y) | Hola SG-8<br>reiknað<br>(bör-y) | Prýsti-<br>fall<br>(bör) |
|-------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 300         | 20.1                         | 18.2                            | 1.9                      |
| 600         | 28.8                         | 25.9                            | 2.9                      |
| 605         | 29.2                         | 26.4                            | 2.8                      |

Seinna dæmið um áhrif útfellinga á djúþrýsting er tekið úr holu SG-9. Holan var mæld í blæstri 7. desember 1988 og 13. júní 1989. Sú breyting varð á högum holunnar í millitíðinni að hún var hreinsuð af útfellingum í maí 1989. Reyndust útfellingar í henni á bilinu 520-564 m. Á mynd 32 eru sýndar saman hitamælingar í blæstri fyrir og eftir hreinsun. Sést þar að holan sýður sig lengra niður hrein. Tafla 13 sýnir mælt þrýstifall fyrir og eftir hreinsun á mismunandi dýpi. Sést þar að þrýstifall vex um 2 bör neðan útfellingar frá því sem gerðist í holunni óhreinsaðri, meðan toppþrýstingur vex um 0,5 bör. Hefur rennslistregða útfellingarinnar valdið því að holan sauð ofar en ella sem aftur orsakaði minnkað massastreymi úr henni og örliðið lækkaðan toppþrýsting. Hreinsun holunnar gerði það hins vegar að verkum að bæði rennsli og toppþrýstingur jukust á kostnað niðurdráttar í holunni.

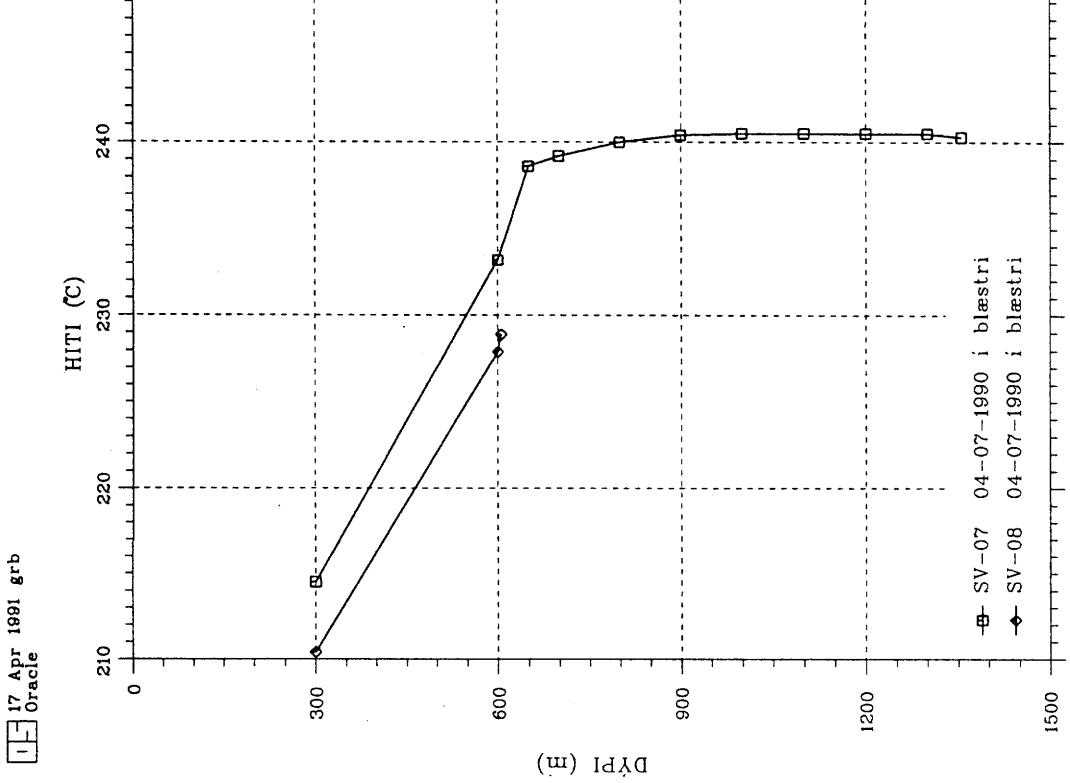
**TAFLA 13.** *Prýstifall í holu SG-9 fyrir og eftir hreinsun í maí 1989.*

| Mæli-<br>dagur | Prýstingur (bör-y) á |       |       |       |       |       | Dýpi á suðu-<br>borð (m) | Rennsli<br>(kg/s) | Toppþrýst-<br>ingur (bör-y) |
|----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|
|                | 300 m                | 400 m | 500 m | 600 m | 700 m | 800 m |                          |                   |                             |
| 7/12 '88       | 21.0                 | 23.3  | 26.1  | 31.0  | 39.2  | 47.5  | 630                      | 53                | 15.2                        |
| 13/6 '89       | 19.9                 | 22.1  | 24.8  | 29.3  | 37.1  | 45.6  | 660                      | 64                | 15.7                        |
| Breyting       | -1.1                 | -1.2  | -1.3  | -1.7  | -2.1  | -1.9  | 30                       | 11                | 0.5                         |

Gögn um rennsli og toppþrýsting eru fengin úr skýrslu Vatnaskila 1989 a. Þar sem þrýstifall í Svartsengi var um 1,2 bör á ári þegar mælingarnar voru gerðar, var þrýstingur mælingar frá 7/12 '88 felldur um 0,6 bör til að gera hana sambærilega í tíma við mælingu frá 13/6 '89.



Mynd 31. Hitamælingar í holum SG-7 og SG-8 í blæstri þann 4. júlí 1990.



Mynd 32. Hitamælingar í holu SG-9 í blæstri fyrir og eftir hréinsun í maí 1989.

## 5.4 Botnfall í holum

Venja er í eftirlitsmælingum í Svartsengi að mæla holur í botn ef þess er kostur. Mælisagan sýnir að holur í Svartsengi hafa grynnst með tímanum. Í töflu 14 er sýnt hve mikil dýpi holna hefur breyst frá fyrstu mælingum eftir borlok til ársloka 1990.

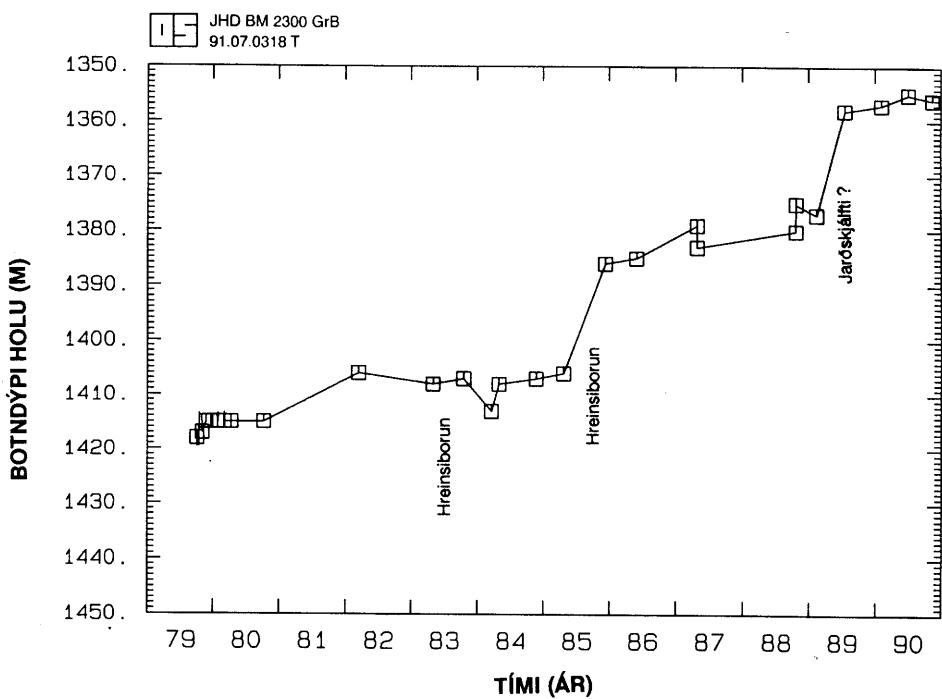
**TAFLA 14.** *Grynnkun nokkura Svartsengisholna frá borlokum.*

| Holunafn | Grynnkun (m) | Holunafn | Grynnkun (m) |
|----------|--------------|----------|--------------|
| SG-6     | 10           | SG-9     | 35           |
| SG-7     | 60           | SG-11    | 30           |
| SG-8     | 5            | SG-12    | 60           |

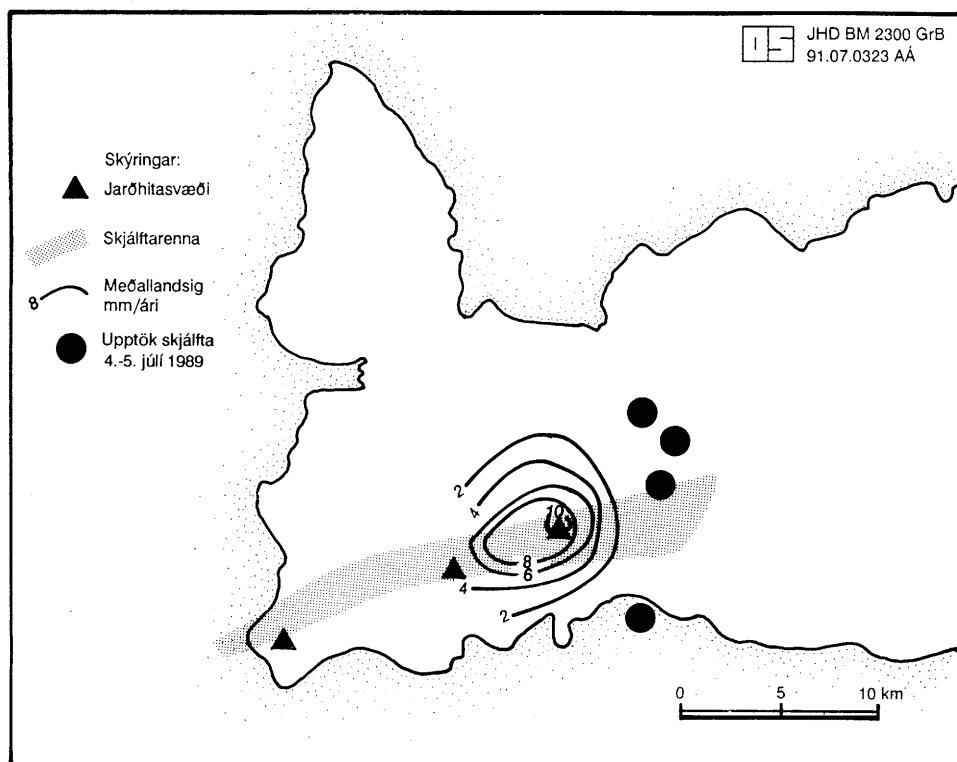
Taflan sýnir að holur hafa grynnst að meðaltali um rúma 30 m. Í flestum tilvikum er um að kenna botnfalli sem kemur í holur í hreinsiborunum. Hins vegar er mjög breytilegt hversu miklu botnfalli holur hafa safnað í sig í hreinsunum. Í holu 6 virðist t.d. öll útfellingin nást upp, trúlega vegna grannrar vinnslufóðringar og mikils streymishraða vatns og gufu upp holu meðan hreinsað er. Í holu 8 er góð að við holubotn sem líklega skolar upp öllu botnfalli þegar holan fer í fullt gos eftir hreinsun. Holur 9 og 11 hafa hins vegar eingöngu grynnst sökum botnfalls sem í þær kom við hreinsanir. Það bendir til að rennsli í hreinsiborunum víðra holna sé ekki nægjanlegt til að skila upp öllu borsvarfi.

Hækkun botnfalls í holu SG-7 hefur sérstöðu. Mynd 33 sýnir mælt dýpi hennar með tíma. Meginæð holunnar er á 1300-1350 m dýpi og hitasaga neðan æðarinnar bendir til nánast þéttar holu (sjá kafla 3.2). Svarf og útfellingabrot sem ná að falla niður fyrir 1350 m koma því til með að sitja þar. Hola 7 var hreinsuð 1983 og 1985. Í fyrri hreinsuninni sjást engin merki um að botnfall hafi komið í holuna, en hins vegar myndast um 20 m fylla í hreinsiborun 1985 (mynd 35). Síðasta grynnkun holunnar verður svo milli mælinga 14. febrúar og 18. júlí 1989. Sú hækkun varð ekki af bors völdum, heldur virðist sem holan hafi fallið saman eða steinn stöðvast í henni á þessu dýpi og meinað mælum ferð neðar.

Engin einhlít skýring er á því hvers vegna hola 7 lokaðist á rúnum 1350 m á árinu 1989. Hér er sett fram sú tilgáta að titringur af völdum jarðskjálfta 4. og 5. júlí 1989 sé orsókin. Þessa daga urðu 4 skjálftar af stærðinni 2-3 á Richter kvarða 5-10 km SA og NA Svartsengis. Einn skjálftanna fannst í Svartsengi (Veðurstofa Íslands og Raunvísindastofnun Háskólags 1989). Upptök skjálftanna eru sýnd á mynd 34 ásamt útbreiðslu landsigs (sjá kafla 7) og legu skjálftarennu. Sterkustu skjálftarnir urðu í framhaldi af langás sigskálarinnar sem vinnsla úr Svartsengi veldur. Ómögulegt er að segja hvort tengsl eru á milli.



Mynd 33. Mælingar á dýpt holu SG-7 með tíma.



Mynd 34. Upptök jarðskjálfta í júlí 1989 (Veðurstofa Íslands og Raunvísindastofnun HÍ 1989; Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991).

## 6. ÁHRIF BREYTINGA Í JARÐHITAKERFINU Á AFKÖST BORHOLNA

Hér er ætlunin að fjalla um þau áhrif sem orðið hafa í afköstum borholna sökum eftirtalda breytinga í jarðhitakerfinu í Svartsengi:

1. Vaxandi niðurdráttur vegna vinnslu.
2. Kæling vegna vinnslu og niðurdælingar.
3. Suða í vatnsæðum vegna þrýstilækkunar svæðisins.

Drifkraftur rennslis í blásandi holu er rúmmálsaukning sem vökvásúlan í holunni verður fyrir við að sjóða. Við það léttist súlan verulega og þrýstingur vegna þunga súlunnar ofan við fyrstu æð verður lægri en þrýstingur úti í jarðhitakerfinu á sama dýpi. Við það ástand helst sírennslí úr kerfinu til holu og þaðan til yfirborðs. Þó getur að því komið við vaxandi niðurdrátt, að þrýstingurinn í vatnsæðum lækki til jafns við þunga súlunnar í blásandi holunni. Þá mun rennslí úr holunni minnka verulega og stöðvast að lokum.

Í Svartsengi verður suða í flestum holum við u.p.b. 239 °C hita og 33,9 bar-y þrýsting. Mynd 31 sýnir að suðuborð í holu SG-7 var á tæplega 500 m dýpi árið 1980 en er nú á um 660 m dýpi. Er það í góðu samræmi við árlegt þrýstifall í svæðinu, sem er að jafnaði um 1,2 bör á ári (mynd 26). Salti vökvinn í Svartsengiskerfinu er að eðlisþyngd 830 kg/m<sup>3</sup> (við 240 °C). Þrýstifall upp á 1,2 bör á ári jafngildir þá 15 m lengingu á sjóðandi súlum Svartsengisholna árlega. Lenging súlunnar þýðir óhjákvæmilega að hún þyngist. Það þýðir, ef viðhalda á jöfnu rennslí úr holu, að lækka verður toppþrýsting hennar.

Mynd 35 sýnir mældan toppþrýsting holu SG-7 eins og hann er skráður í skýrslum Vatnaskila (1986, 1988 og 1989). Sýnir myndin glögglega að toppþrýstingur holunnar hefur farið lækkandi með tímanum og er nú í rúnum 15 börum í stað 18 bara við upphaf vinnslu úr holunni árið 1981. Árlegt þrýstifall á toppi nemur samkvæmt þessu rúnum 0,3 börum á ári. Það er fjórðungur af árlegri þrýstilækkun jarðhitageymisins. Ef miðað er við 6 bar-y hönnunarþrýsting Orkuversins í Svartsengi munu víðar holur í Svartsengi megna að blása inn á gufuveitu næstu 20-30 árin. Er þá miðað við að hiti svæðisins, fasaástand vatnsæða (suða), rennslí og hraði niðurdráttar haldist óbreytt allan tímann.

Niðurdæling í holu SG-12 olli kælingu í vatnsæðum holunnar sem hafði töluverð áhrif á þrýsting í blaestri eftir að holan var sett í vinnslu á nýjan leik (sjá kafla 3.3). Þannig mældist hiti í suðuborði einungis 213 °C við þrýsti- og hitamælingar í holunni í október 1988. Hola SG-7 var einnig hita- og þrýstimæld í blaestri í sama mánuði og reyndist þá tæplega 240 °C heit í suðuborði. Á mynd 36 eru þessar tvær þrýstimælingar teiknaðar. Sést þar að hola 12 sýður mun ofar en hola 7 og nær SG-12 þar af leiðandi ekki jafnháum toppþrýstingi. Ræður þar að suðuþrýstingur 213 °C vatns er mun lægri en 240 °C vatns. Það þýðir í jafngæfum holum og eru í Svartsengi, að sjóðandi súla kældrar holu verður styttri en súla fullheitar holu. Það mun óhjákvæmilega valda lækkuðum vinnsluþrýstingi og þar með lækkuðum toppþrýstingi og/eða rennslí.

Samanburður mynda 35 og 36 sýnir að kæling vatnsæða er mun afdrifaríkari í afköstum holna en hægfara lækkun toppþrýstings af völdum sívaxandi niðurdráttar. Fróðlegt er að skoða við hvaða innstrey mishita og tíma holur í Svartsengi hætta að framleiða inn á gufuveitu með 6 bar-y þrýstingi. Til að kanna það nánar var mynd 37 gerð. Hún sýnir þrýsting í blaestri í nokkrum íslenskum háhitaholum sem allar eiga það sammerkt að vera fóðraðar með 9 5/8" vinnslufóðringum að undanskilinni holu SG-7. Til að þrýstiferlarnir yrðu sambærilegir var dýptarskali þeirra felldur að 33,9 bar-y þrýstingi á 600 m dýpi. Við þann þrýsting og 239 °C

hita hófst suða á u.p.b. 600 m dýpi í holu SG-7 í ársbyrjun 1988. Í töflu 15 er sýnt afl holnanna á mynd 37 þegar þær voru mældar í blæstri og eins hvaða hiti mældist við suðuborð (innstreymishiti).

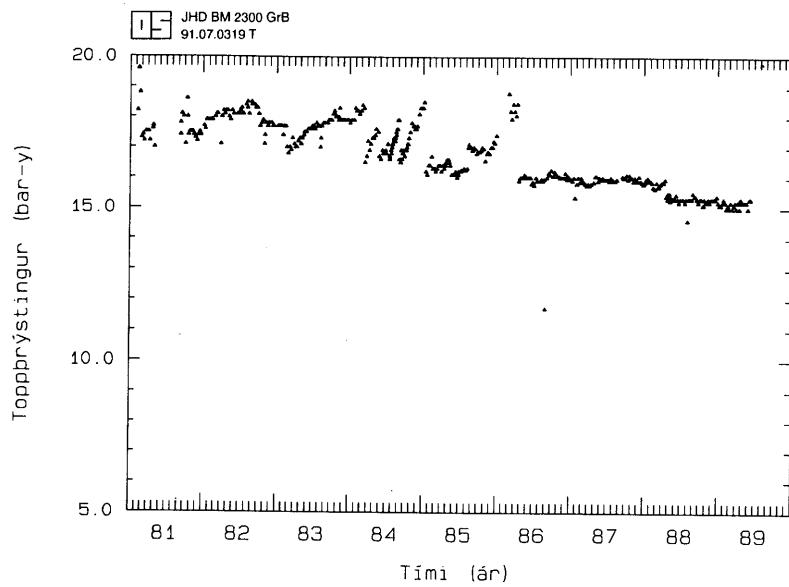
**TAFLA 15. Aflmælingar holna sem sýndar eru á mynd 39.**

| Hola                | Rennsli<br>(kg/s) | Toppþr.<br>(bar-y) | Vermi<br>(kJ/kg) | Suðuhiti<br>(°C) |
|---------------------|-------------------|--------------------|------------------|------------------|
| KG-5, Kröflu        | 20                | 3.2                | 800              | 188              |
| NJ-18, Nesjavöllum  | 20                | 4.6                | 925              | 210              |
| SG-6, Svartsengi    | 40                | 11.2               | 980              | 228              |
| SG-7, Svartsengi    | 49                | 15.2               | 1030             | 239              |
| BJ-11, Bjarnarflagi | 20                | 25.5               | 2080             |                  |

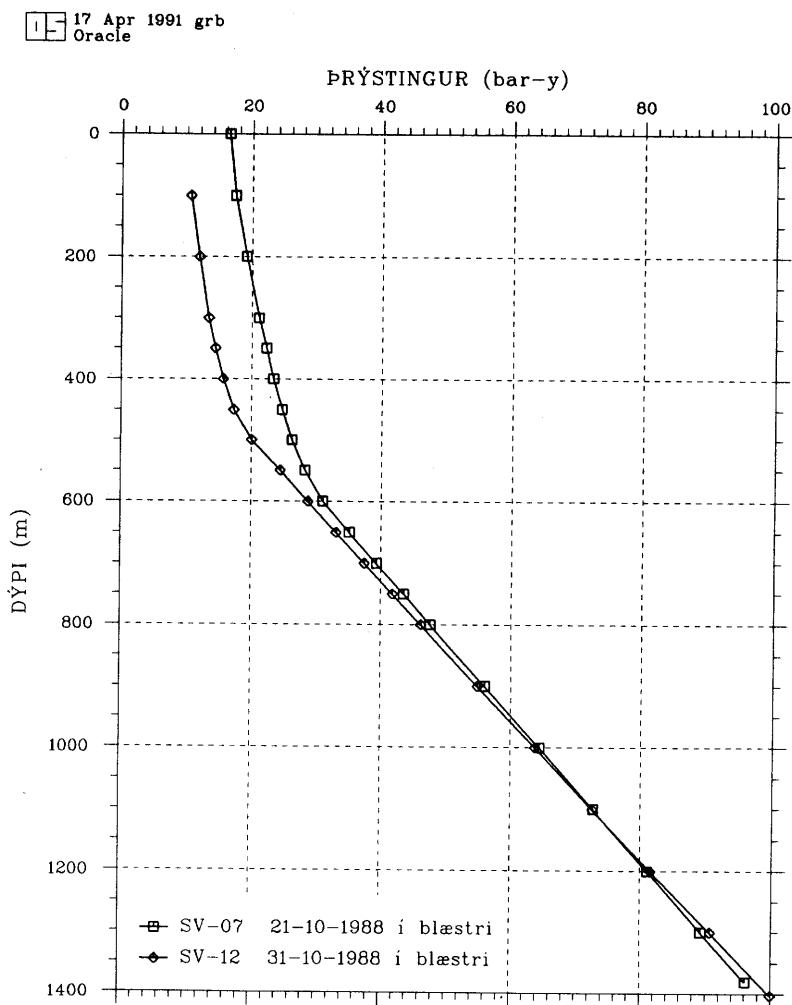
Skoða má mynd 37 þannig að hún sýni þrýstiferla ímyndaðra 9 5/8" Svartsengisholna með mismunandi innstreymishita. Spágildi myndarinnar fyrir breytingar í toppþrýstingi með tíma felst í því að niðurdráttur í jarðhitakerfinu í Svartsengi er um 15 m á ári. Það þýðir að ferlavöndurinn á mynd 37 sígur um 15 m/ári, sem á myndinni kemur fram á sama hátt og 15 m árleg hækkun á holutoppi. Á myndinni eru mæliferlarnir teiknaðir vel upp fyrir holutopp ársins 1988 (0 m dýpi). Má þá auðveldlega lesa toppþrýsting misheitrar holu með tímanum með því að fara upp dýpisásinn um 15 m fyrir hvert ár sem liðið hefur frá 1988.

Ef mynd 37 er skoðuð með þessa reglu í huga, sést að innstreymishiti þarf að vera a.m.k. 210 °C til að grönn Svartsengishola haldi uppi veituþrýstingi við árslok 1990. Kólnun jarðhitakerfisins í Svartsengi um 30 °C þýðir því að holur svæðisins verða ónothæfar fyrir gufuveituna, ef engin suða á sér stað í vatnsæðum. Kólnun um 12 °C héldi toppþrýstingi um og ofan við 10 bör-y næstu 5-10 árin, og eins og áður hefur komið fram mun niðurdráttur svæðisins ekki nægja til að kæfa fullheita 239 °C holu fyrr en eftir 20-30 ár.

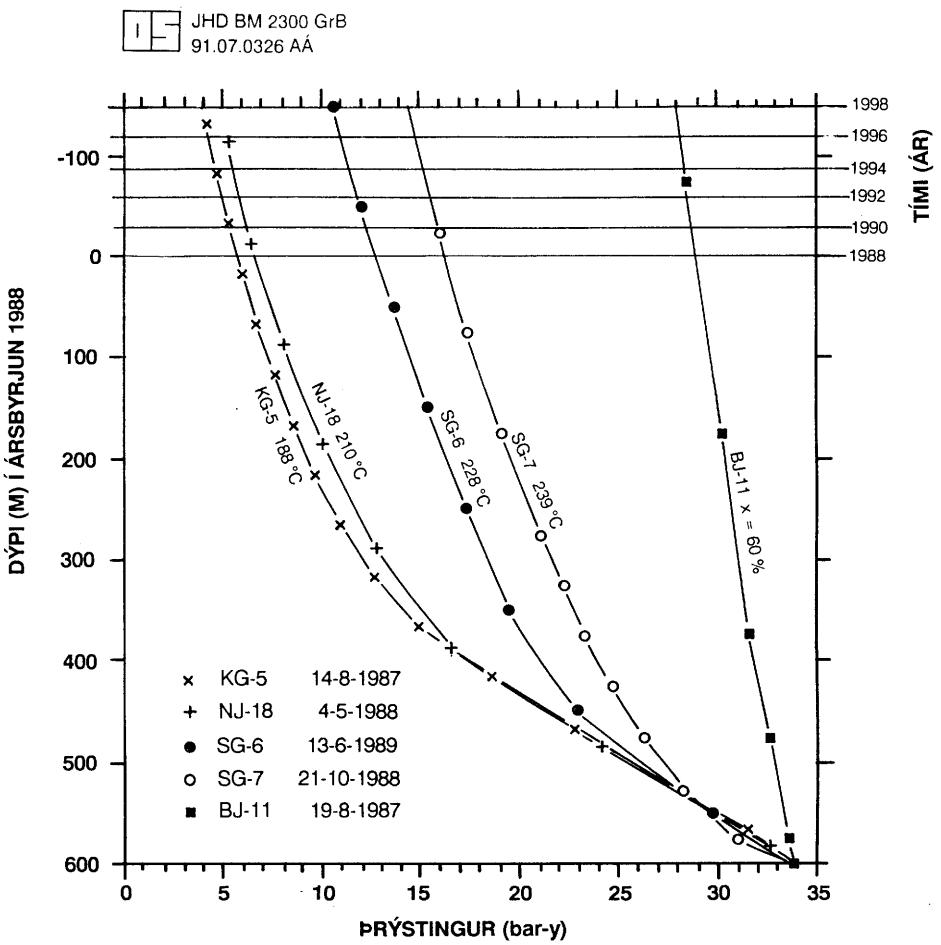
Að lokum er rétt að hyggja að þrýstiferli holu BJ-11 sem einnig er sýndur á mynd 39. Þessi hola er með u.p.b. 2080 kJ/kg vermi á holutoppi. Til að ná því vermi í Svartsengisholu, þyrftu fullheitar vatnsæðar (239 °C og 33,9 bar-y) að skila blöndu þar sem 60 % massans væri í formi gufu en 40 % sem vatn. Slíkt tillag æða inn í ímyndaða 9 5/8" Svartsengisholu myndi keyra toppþrýsting upp fyrir 25 bör. Það gerir holuna mjög hagkvæma í rekstri með tilliti til mikils orkuinnihalds vökvans úr holunni sem myndi spara massatöku úr svæðinu og auka getu Orkuværisins til rafmagnsframleiðslu. Eins myndu útfellingar heyra sögunni til í slíkri holu. Þrýstilækkunin í Svartsengi hefur reyndar þegar breytt holu SG-10 í slíka hávermisholu og þess er að vænta með vaxandi niðurdrætti að fleiri holur fylgi í kjölfarið, þó ekki sé von á jafnmikilli vermishækkun og í holu SG-10.



**Mynd 35.** Tímasaga toppþrýstings holu SG-7.



**Mynd 36.** Þrýstimælingar í holum SG-7 og SG-12 í október 1988.



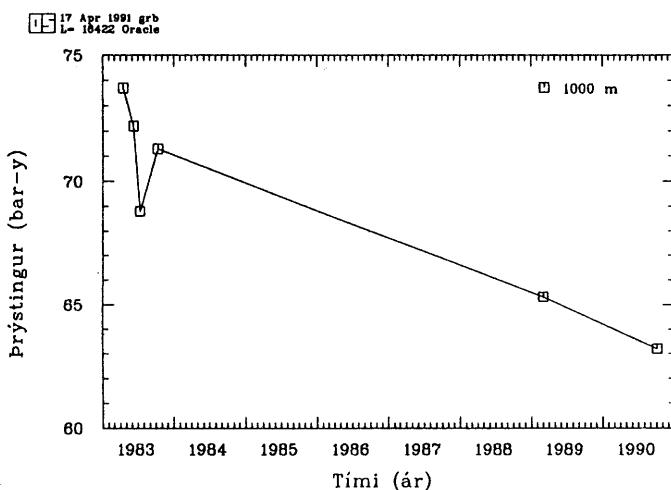
**Mynd 37.** Spá um lækkun toppþrýstings 9 5/8" holu með tíma og fyrir mismikla kælingu.

## 7. VINNSLUÁHRIF Í NÁGRENNI SVARTSENGIS

Massataka Orkuversins í Svartsengi hefur haft víðfeðm áhrif bæði innan sem utan sjálfs jarðhitakerfisins. Í undangengnum köflum hefur verið lagt mat á breytingar innan kerfisins. Nú skal sjónum beint víðar og athugað hvernig umhverfi Svartsengis hefur skynjað vinnsluna þar.

### 7.1 Prýstilækkun í Eldvörpum

Verkfræðistofan Vatnaskil gerði umfangsmikla líkanreikninga á jarðhitakerfinu í Svartsengi árin 1988 og 1989. Þegar reikningarnir voru komnir vel á veg, kom í ljós að þeir spáðu töluverðri prýstilækkun í átt til Eldvarpa (Vatnaskil 1989 b). Var því afráðið að hita- og þrýstímæla holu EG-2 í Eldvörpum og fá þannig samanburð við niðurstöður líkanreikninganna. Niðurstöður eru á mynd 38 sem sýnir þrýsting á 1000 m dýpi með tíma í holu EG-2. Ljóst er af myndinni að þrýstingur hefur fallið verulega frá haustinu 1983, eða að meðaltali um 1,1 bar á ári. Er það nær sami hraði niðurdráttar og mælist nú í Svartsengi. Þetta sýnir óyggjandi að góð tengsl eru milli jarðhitakerfanna í Eldvörpum og Svartsengi.



Mynd 38. Þrýstingur á 1000 m dýpi í holu EG-2 í Eldvörpum.

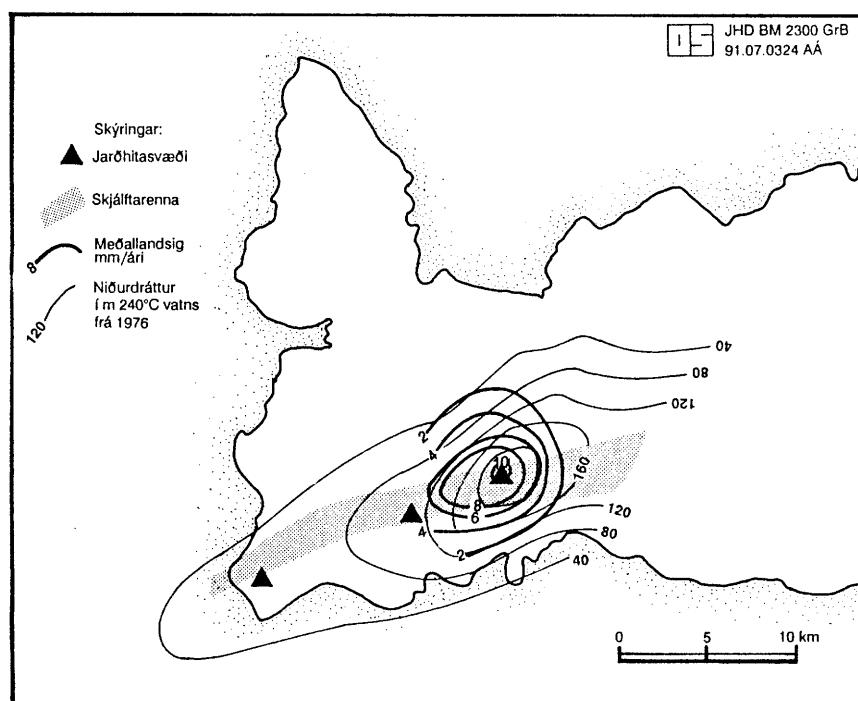
### 7.2 Landhæðarbreytingar

Á undansförnum áratug hefur verið sett upp og bæði þyngdar- og hæðarmælt umfangsmikið mælinet á utanverðum Reykjanes-skaga (Gunnar Þorbergsson og Ásgeir Gunnarsson 1983; Gunnar V. Johnsen 1983; Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991). Tilgangur mælinetsins er tvíþættur. Annars vegar má nota það til mats á breytingum sem landrekshreyfingar valda. Hins vegar má nota það til að meta áhrif og umfang massatöku upp úr jarðhitavæðunum á Reykjanes-skaga. Þekkt er viða utan úr heimi að land tekur að síga þegar vatn er tekið í miklum mæli úr dýpri jarðlöögum. Því veldur að vatnið í porum bergsins ber uppi hluta af þunga þeirra jarð-laga sem ofan á hvíla. Við lækkaðan þrýsting færst þunginn í vaxandi mæli á sjálft bergið. Það svarar auknu á lagi með því að þjappast lítillega saman sem aftur mælist sem landsig á yfirborði. Nokkuð er flókið að reikna landsigið út frá niðurdrættinum og verður ekki gert hér. Þó má segja að í einföldstu nálgun sé landsigið í réttu hlutfalli við þrýstilækkun undir mælistað (Grant o.fl. 1982).

Á mynd 39 er borinn saman sighraði lands og reiknaður niðurdráttur vegna vinnslu í Svartsengi (Vatnaskil 1989 b; Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991). Við útreikning niðurdráttarins var

gert ráð fyrir að lekt væri góð eftir jarðskjálftarennunni sem fannst í smáskjálftamælingum 1972 (Klein o.fl. 1977). Er það og í góðu samræmi við mældan niðurdrátt í Eldvörpum. Ljóst er af myndinni að landsigið teygir sig til VSV frá Svartsengi í stefnu skjálftarennunnar. Hins vegar sést ekki viðíka teyging jafnsigslína til ANA frá Svartsengi. Benda landhæðarmælingarnar því til að djúþrýstingur sé enn lítt breyttur u.p.b. 5 km austan Svartsengis. Það sýnir jafnframt að annað tveggja er Svartsengiskerfið með þéttan austurjaðar nokkru nær en gert var ráð fyrir í reiknlíkani Vatnaskila (1989) eða að verulegt uppstreymi/niðursteymi vökva eigi sér stað á þessum slóðum. Tilgátan um þéttan austurjaðar er sennilegri, því ef mikil uppstreymi væri í gangi á þessum slóðum, fylgdi því góð lóðrétt lekt sem ylli jarðhita á yfirborði eða stóru lágvíðnámssvæði. Um hvorugt er vitað á þessum slóðum (Lúðvík S. Georgsson og Helga Tuliníus, 1983).

Ef gert er ráð fyrir að tilgátan um þéttan austurjaðar í Svartsengi sé rétt, vinnur Orkuverið mest af sínu vatni úr forða sjálfs Svartsengisgeymisins annars vegar og hins vegar að vestan frá Eldvörpum. Í hitaþversniðnum á myndum 5 og 6 sést að hiti var viðsnúinn í holum 7, 8 og 9 við upphaf borana og líklega hefði sama komið í ljós í holu 11 ef hún væri boruð dýpra. Þetta krefst þess að 238-240 °C heita vatnið, sem er í láréttu vatnsleiðaranum á 1000-1300 m dýpi, komi að austan til holnanna, og að vestan þeirra sé lekt þessa vatnsleiðara mjög lág og lítið um aðrennsli vökva nema í skyndikælingunum þegar kaldara vatn brýst úr vestri og norðri inn í jarðhitakerfið. Það leiðir áfram til þess að vökvinn sem kemur vestan frá Eldvörpum þarf að ferðast á meira dýpi en sem nemur dýpt holna vestan til í Svartsengi, líklega á meir en 1600-2000 m dýpi. Ella væru holur 7-11 mun kaldari en eftirlitsmælingar gefa. Ómögulegt er að spá fyrir um eiginleika þessa djúpa vatnsleiðara eða hvort vænlegt sé að bora í hann. Að eins er hægt að segja að allar líkur eru til að hann finnist um eða neðan 2 km dýpis og að hiti hans er væntanlega svipaður eða hærri 240 °C, þar sem Svartsengisholur hafa verið jafnheitar eða lítillega hitnandi frá upphafi vinnslu (mynd 18).



**Mynd 39.** Hraði landsigs og reiknaður niðurdráttar á utanverðum Reykjanes-skaga (Hjálmar Eysteinsson o.fl. 1991; Vatnaskil 1989 b).

## 8. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Helstu niðurstöður þessarar skýrslu eru eftirfarandi:

1. Eftir nákvæma skoðun rúmlega 240 hitamælinga, var hægt að ákvarða berghitaferla fyrir allar Svartsengisholur. Staðfestu þeir fyrri vitneskju um gerð grunnvatnskerfa í Svartsengi, þ.e. að volgt vatnskerfi ( $30-100^{\circ}\text{C}$ ) er á 70-300 m dýpi, og að neðan 600 m tekur við  $230-240^{\circ}\text{C}$  háhitakerfi. Priðja vatnskerfið er í formi gufupúða sem stingst upp í gegnum volga vatnskerfið við holur 2, 3 og 10.
2. Nánari skoðun berghitaferlanna leiðir í ljós finni drætti í streymi vatns í grunnvatnskerfum. Þannig sést að grunnvatnsstraumur, sem rennur til SV í volga vatnskerfinu, hirðir varma og jafnvel þéttivatn á leið sinni fram hjá gufupúðanum. Myndast við það heit tunga á 200-500 m u.s. til SV frá gufupúðanum. Eins kemur fram dauft hitahámark í jarðhitakerfinu með N-S stefnu um holu SG-4.
3. Hitahámarkið um holu SG-4 er túlkað hér sem uppstreymisrás í jarðhitasvæðinu. Virðist hún fæða tvær vel lekar og láréttar syrpur á 700 og 1000-1300 m u.s. Í þessum láréttu lögum er jafn og samur berghiti, en neðan þeirra er greinilegur viðsnúningur í hita í sumum holum sem afmarkar jarðhitakerfið til vesturs. Óvist er hvort önnur uppstreymisrás er til staðar undir gufupúðanum.
4. Upphafleg þrýstdreifing bendir til að þrýstijafnvægi hafi ríkt milli gufupúðans og jarðhitakerfisins áður en boranir hófust og lítið lóðrétt rennsli þar á milli. Þrýstingur volga vatnskerfisins var hins vegar 2-3 börum hærri, sem krefst þess að það sé aðskilið frá jarðhitakerfinu með lóðrétt torleku bergi á 300-600 m dýpi.
5. Vinnsla úr jarðhitakerfinu hefur orsakað mikinn niðurdrátt í því. Núverandi hraði niðurdráttarins er um 1,2 bör á ári, en hæst fór hann í tæp 2,5 bör á ári þegar Orkuver 2 fór í gang árið 1981.
6. Þrýstifallið í jarðhitakerfinu leiddi til þess að jarðhitakerfið varð nokkrum sinnum fyrir skyndikólnun sem mældist allt að  $13^{\circ}\text{C}$  frá venjulegum hita. Virðist kólnunin aðallega hafa orðið í láréttu vatnsleiðaranum á 1000-1300 m u.s. Áhrif kælingar vörudu í skamman tíma eða 1-4 vikur. Slíkir kæliviðburðir eru fátíðari og vægari nú en við upphaf vinnslu. Má vera að fergusing bergs í jóðrum jarðhitakerfisins, vegna sívaxandi niðurdráttar, hindri opnun vatnsleiðandi sprungna í jóðrunum.
7. Til að hamla þrýstilækkun hefur  $70-80^{\circ}\text{C}$  vatni verið dælt í nokkrum mæli niður í Svartsengisholur. Niðurdælingin kældi holu SG-6 um  $6^{\circ}\text{C}$  árabilið 1984-1989.
8. Hola SG-12 var nýtt til niðurdælingar um fjögurra ára skeið. Fylgst var með hitnun holunnar eftir að hún fór í blástur á nýjan leik. Sýndi sig að bestu æðar hennar hitnuðu hratt að svæðishita, meðan torlekar æðar eru enn kældar. Þetta eru dæmigerð einkenni sprungugeymis (double porosity reservoir) en hann má hugsa sér sem flókið net lárétra og lóðréttura sprunguflata með gegnheilar bergeiningar á milli. Mikil lekt er í sprungunetinu og lágur poruhluti, meðan bergeiningarnar eru með háan poruhluta og lága lekt. Allar breytingar á ástandi vökvans í sprungunetinu breiðast hratt um það líkt og sést hefur í skyndikælingunum, niðurdælingu sporefna og hitnun holu SG-12. BERGEININGARNAR Á MILLI eru hins vegar svifaseinar og færa ástand sprungunetsins hratt í fyrra horf eftir að breytingarnar eru gengnar yfir.
9. Rennslismaeling í holu SG-5 í ádælingu sýnir að mestur hluti niðurdælingarvatns getur farið út í einungis eina eða tvær æðar, meðan aðrar vatnsæðar standa lítið eða ókældar.

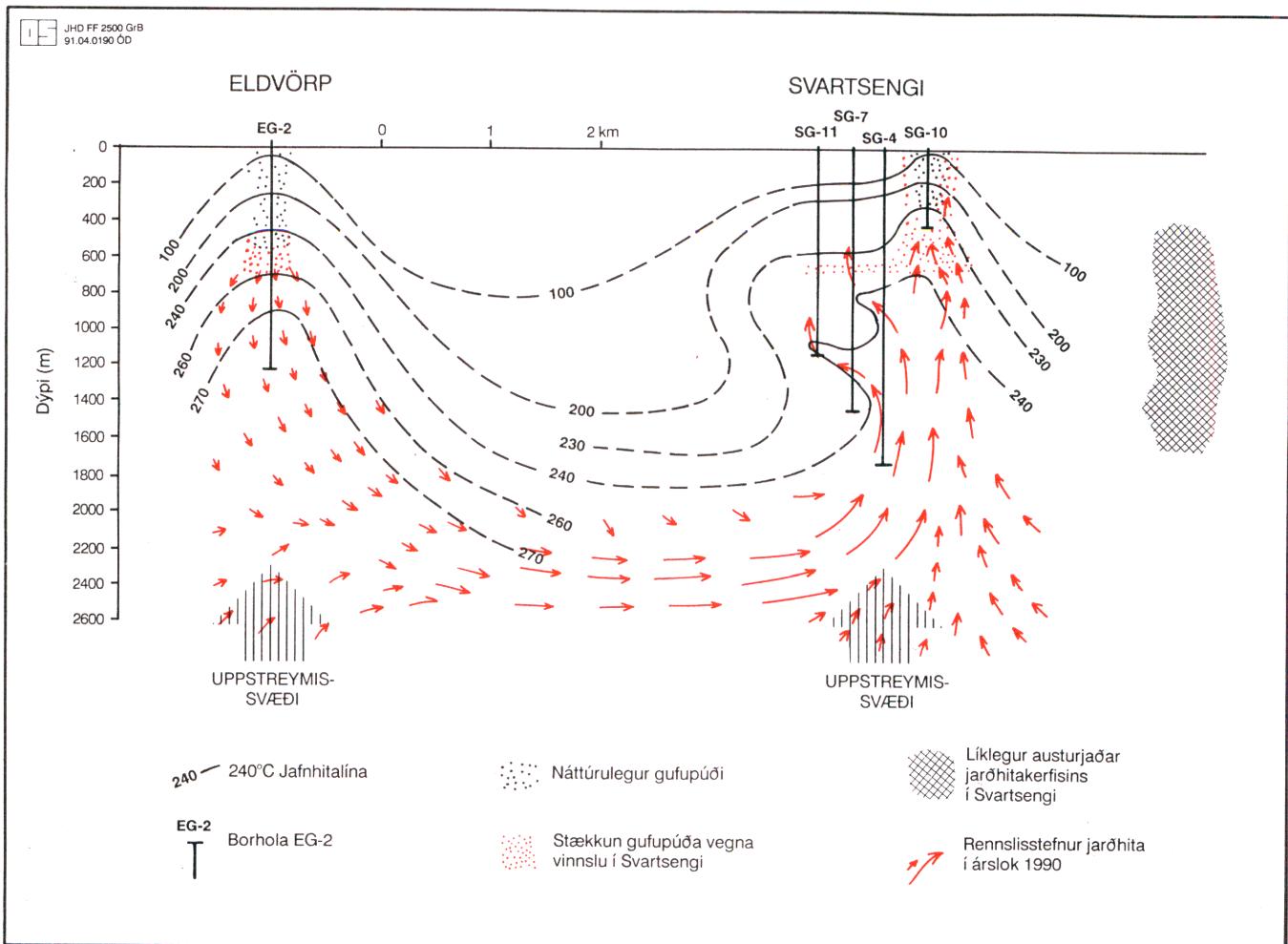
10. Kerfisbundin skoðun þrýstimælinga sýnir að flestar Svartsengisholur fylgja áætluðum meðalþrýstingi svæðisins. Undantekningar eru holar SG-9, SG-11 og SG-12. Þær mælast mun oftar neðan en ofan áætlaðs svæðisþrýstings, sem bendir til að þær séu fjærst uppstreymi jarðhitakerfisins.
11. Útreikningar á meðalhita allra Svartsengisholna síðustu 15 árin, benda til þess að svæðið hitni hægfara við vinnslu. Nemur hækjunin 1-2 °C á öllum dýpum neðan 400 m. Hækjunin kemur fram þrátt fyrir nokkra niðurdælingu síðari hluta vinnslusögunnar.
12. Verulegur munur er á niðurdrætti í borholum í blaestri eftir því hvort vinnsluhluti holanna er boraður með 8 1/2" eða 12 1/4" krónum. Algengur niðurdráttur í víðum holum er 1-3 bör, meðan grónnu holurnar þurfa allt að 9 bör til að viðhalda svipuðu eða minna rennsli á holutoppi.
13. Útfellingar, sem myndast rétt ofan suðuborðs í Svartsengisholum, hafa færst niður holurnar með sama hraða og niðurdráttur vegna vinnslu. Er útfellingasvæðið nú komið niður fyrir vinnslufóðringu í öllum holum. Merki eru um það að leiðarar holna þoli illa hreinsiboranir. Athyglisvert er að hreinsa þarf víðu holurnar mun sjaldnar en þær grónnu, sem kann að stafa af samsíði útfellingahraða á holuveggjum og u.p.b. 15 m árlegri lækkun suðuborðs í holum vegna niðurdráttar í svæðinu.
14. Prýstifall við útfellingar í holum hefur mælst 2-3 bör miðað við mælingar eftir hreinsiboranir. Til að viðhalda rennsli hafa holurnar bætt sér upp þrýstítapið með því að lækka toppþrýsting sinn.
15. Hreinsiboranir hafa myndað mismikið botnfall í holum og er meðalgrynnkun um 30 m. Botnfallið stafar vísast af ónógu rennsli í hreinsiborum. Undantekning er grynnkun holu SG-7 á árinu 1989. Þá lokaðist holan á rúnum 1350 m. Hugsanlega hrundi holan á þessu dýpi í jarðskjálftum í júlíþyrjun 1989.
16. Sífelld lækkun þrýstings í Svartsengi lengir og þyngir sjóðandi súlur borholna í svæðinu með tímanum. Til að viðhalda föstu rennsli hefur þurft að lækka toppþrýsting holu SG-7 um rúm 0,3 bör/ári.
17. Mesta hætta sem steðjar að vinnslu úr Svartsengisholum er fólgin í kólnun vatnsæða. Er kólnunin mun afdrifaríkari í afköstum borholna en þrýstilækkun svæðisins. Ljóst er að innstremishiti grannrar (9 5/8") borholu þarf að vera a.m.k. 213 °C til að hún haldi veituþrýstingi. Ef núverandi hraði niðurdráttar helst, mun 228 °C innstremishiti halda toppþrýstingi holna ofan við 10 bör næstu 5-10 árin og fullheit hola (239 °C) mun halda veituþrýstingi næstu 20-30 árin.
18. Þrýstilækkun jarðhitakerfisins hefur breytt holu SG-10 í þurrgufuholu, og merki eru um að vermisbreytinga sé von í fleiri holum. Þetta eru mjög hagstæð áhrif niðurdráttar í rekstrarlegu tilliti, því aukið orkuinnihald holuvökvans sparar massatöku úr svæðinu og eykur getu orkuversins til rafmagnsframleiðslu.
19. Hermireikningar spáðu mikilli þrýstilækkun í Eldvörpum og staðfestu þrýstimælingar í holu EG-2 þá tilgátu. Er mælda þrýstilækkunin um 1,1 bar/ári sem er nærfellt sami hraði niðurdráttar og í Svartsengi.
20. Mælingar á landsigi vegna massatöku úr Svartsengi sýna að skál landsigsins teygir sig til VSV frá Svartsengi, sem er í samræmi við þrýstilækkunina í Eldvörpum. Hins vegar sést ekki viðlíka teyging til ANA, sem bendir til að jarðhitakerfið hafi þéttan austurjaðar nokkru nær en fyrri hugmyndir bentu til.

21. Tilgátan um þéttan austurjaðar jarðhitakerfisins í Svartsengi, krefst þess að orkuverið vinni mest af vatni sínu úr forða sjálfs Svartsengisgeymisins annars vegar, og hins vegar að vestan frá Eldvörpum. Vökvinn að vestan þarf þá að koma til Svartsengis um eða neðan 2 km dýpis til að hitalíkanið með viðsnúnum berghita í veststu holunum standist. Þessi vöki er trúlega meir en 240 °C heitur, sem kann að skýra hví hægfara hitnun kemur fram í vinnsluholum.

Á mynd 40 er sýnt gróft hitaþversnið um Eldvörp og Svartsengi ásamt borholum, gufupúðum, hugsanlegum austurjaðri svæðisins og uppstreymissvæðum. Eins er sýnt á myndinni hvernig vinnslan í Svartsengi hefur sett af stað vökvatrauma og stækkað gufupúðana í Eldvörpum og Svartsengi. Í ósnortnu ástandi olli góð lóðrétt lekt hægu uppstreymi vatns og gufu til yfirborðs og litlir gufupúðar voru til staðar í báðum svæðunum. Vinnslan í Svartsengi lækkaði þrýsting við æðar vinnsluholna sem aftur leiddi til þess að vöki byrjaði að leita frá þrýstingshærri Eldvörpum til Svartsengis og þannig koll af kolli. Hraði þrýstingsslækkunarinnar hefur til þessa verið mikill, einkum þar sem jarðhitakerfið hefur mestmeginis bætt sér upp massatapið með þenslu vatnsins í porum bergsins, en að sáralitlu leyti með myndun gufupúða. Nú eru þess merki að gufupúði Svartsengis sé tekinn að vaxa út fyrir lóðréttu gufustrompinn við holur 2, 3 og 10 og breiði sig um lárétt jarðlög á 600-650 m dýpi. Eins er þykkandi gufupúði í Eldvörpum.

Aukið gufuinnihald jarðlaga hefur í senn bæði jákvæð og neikvæð áhrif á vinnsluna í Svartsengi. Neikvæðu áhrifin felast í hættu á gufusprengingum þar sem gufupúðinn nær allt til yfirborðs. Slíkar sprengingar geta valdið verulegri röskun á yfirborði og skemmdum á mannvirkjum. Erlendis hafa slíkar gufusprengingar grandað fjölda mannslífa (Valgarður Stefánsson, munnlegar upplýsingar). Jákvæðu áhrifin eru hins vegar að allt í senn mun afl borholna aukast, draga mun úr hraða niðurdráttar eða hann stöðvast og líkur minnka á að holur kafni vegna kælingar vatnsæða um meir en 20 °C. Óvist er hve stór slíkur gufupúði gæti orðið. Stærð hans mun ráðast af berghita, lekt, poruhluta og hvort þrýstingur nær að falla um 2-3 bör til viðbótar frá því sem nú er.

91.04.0190



**Mynd 40.** Áætluð hitadreifing um Eldvörp og Svartsengi, ásamt uppstreymissvæðum, rennslishindrunum, gufupúðum og rennslisleiðum vatns og gufu.

## HEIMILDIR

- Benedikt Steingrímsson og Guðjón Guðmundsson 1984: *Hiti og þrýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi*. Orkustofnun, OS-84005/JHD-01 B, 15 s.
- Benedikt Steingrímsson og Guðjón Guðmundsson 1985: *Svartsengi - Hita- og þrýstimælingar í borholum 1984*. Orkustofnun, OS-85017/JHD-05 B, 39 s.
- Grant M.A., I.G. Donaldson and P.F. Bixley 1982: *Geothermal reservoir engineering*. Academic Press, 369 s.
- Guðjón Guðmundsson og Guðlaugur Hermannson 1986: *Svartsengi - Borholumælingar 1985*. Orkustofnun, OS-86050/JHD-17 B, 30 s.
- Gunnar V. Johnsen 1983: *Þyngdarmælingar í nágrenni Svartsengis*. Orkustofnun, OS-83083/JHD-15, 31 s.
- Gunnar Þorbergsson og Ásgeir Gunnarsson 1983: *Hæðarmælingar í nágrenni Svartsengis fyrir Hitaveitu Suðurnesja*. Orkustofnun, OS-83041/VOD-20 B, 4 s.
- Haukur Jóhannesson 1989: Jarðfræði Reykjaneskaga. I: Náttúrufar á Sunnanverðum Reykjaneskaga, ritsjóri Kristbjörn Eyjólfsson, bls. 13-22.
- Helga Tuliníus og Tómas Jóhannesson 1990: *Skráning á borholumælingum í gagnasafn JHD*. Orkustofnun, greinargerð HTul/TJ-90/01, 5 s.
- Hjalti Franzson 1990: *Svartsengi - Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess*. Orkustofnun, OS-90050/JHD-08, 41 s..
- Hjálmar Eysteinsson, Gunnar Þorbergsson og Ólafur G. Flóvenz 1991: *Landhæðar- og þyngdarmælingar við Svartsengi og á Reykjanesi*. Orkustofnun, greinargerð HE-GP-ÓGF-91/01, 10 s.
- Hnit hf 1982: *Svartsengi - kortablað 4438/82*.
- Jón Örn Bjarnason 1988: *Svartsengi - Efnaeftirlit 1980 - 1987*. Orkustofnun, OS-88001/JHD-01, 98 s.
- JónSteinar Guðmundsson 1983: *Niðurdælingartilraun við Svartsengi 1982*. Orkustofnun, OS-83047/JHD-07, 49 s.
- Klein F.W., P. Einarsson and M. Wyss 1977: The Reykjanes Peninsula Iceland, earthquake swarm of september 1972 and its tectonic significance. *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, no. 5: 865-888.
- Lúðvík S. Georgsson og Helga Tuliníus 1983: *Viðnámsmælingar á utanverðum Reykjaneskaga 1981 og 1982*. Orkustofnun, OS-83049/JHD-09, 70 s.
- Tómas Jóhannesson og Helga Tuliníus 1989: *Gagnasafn BHM - Kröfulýsing/Aðgerðalýsing*. Orkustofnun, greinargerð TJ/HTul-89/03, 5 s.
- Vatnaskil 1985: *Svartsengi- Vinnslueftirlit 1976- 1985*. Orkustofnun, OS-85097/JHD-12, 99 s.
- Vatnaskil 1988: *Svartsengi- Vinnslueftirlit júlí 1985- júlí 1988*. Orkustofnun, OS-88056/JHD-12, 41 s..
- Vatnaskil 1989 a: *Svartsengi- Vinnslueftirlit júlí 1988- júlí 1989*. Orkustofnun, OS-89062/JHD-09, 34 s.

Vatnaskil 1989 b: *Svartsengi - Reiknilíkan af jarðhitakerfinu.* Orkustofnun, OS-89031/JHD-05, 111 s.

Veðurstofa Íslands og Raunvísindastofnun Háskólags 1989: *Mánaðaryfirlit jarðskjálfra, frumniðurstöður fyrir júlí 1989.* Skjálftabréf útgefið af ofannefndum stofnunum, 5 s.

## ENGLISH SUMMARY

The Sudurnes Regional Heating Company has operated a geothermal power plant in Svartsengi since 1976. The cumulative mass produced is nearly 80 million tons and the present production rate is about 250 kg/s. The Geothermal Division of Orkustofnun has undertaken extensive well logging in Svartsengi since the drilling of the first well in 1971. At present, more than 500 different types of measurements and operations have been carried out in the wells. A detailed evaluation of this data base has been carried out and the results are presented in this report.

A systematic analysis of more than 240 temperature logs confirms previous ideas of three different aquifer systems within the Svartsengi reservoir. At the depth of 30-300 m exists a warm fresh water system (30-100 °C) which flows laterally to the SW. The main geothermal aquifer resides at depths greater than 600 m. It is liquid dominated and contains brine (approx. 2/3 seawater) of temperatures between 230 and 240 °C. This geothermal aquifer recharges an overlaying steam dominated aquifer (chimney) which extends to the surface in the area around wells 2, 3 and 10. The steam aquifer is in good pressure communication with the main reservoir. A low permeable rocks at 300-600 m depth separate, on the other hand, the main reservoir and the warm water aquifer. The steam chimney is also sealed from the shallow warm water, probably by depositions in the rock formation.

A more detailed analysis of the temperature data shows some finer flow structures in the reservoir. As an example, the warm groundwater lens gains some heat as it flows to the SW around the steam chimney. A minor temperature maximum (243 °C) is also seen in the geothermal reservoir close to well 4. This temperature anomaly is interpreted as the upflow zone of the geothermal system. The temperature logs also show a temperature reversal in most wells below 1000-1300 m depth. The reversal is most likely caused by permeable, horizontal layers (intrusives) which transmit geothermal fluid laterally at approximately 700 and 1000-1300 m depth. The geothermal upflow, close to well 4, feeds these horizontal layers and also the steam chimney. The data show decreasing temperatures to the west, but temperatures east of the wellfield remain unknown.

The fluid production in Svartsengi since 1976, has caused more than 20 bars pressure drawdown within the wellfield, and decreasing pressures are observed at considerable distances from the field. As an example, a more than 10 bars pressure drawdown has been measured in Eldvörp, 7 km to the west of Svartsengi. The present drawdown rate in Svartsengi is 1.2 bars/year. The pressure drawdown induces a slight compression of the rock matrix and has led to up to 15 cm subsidence of the surface. The subsidence anomaly is elongated to the WSW from the Svartsengi wellfield. A similar subsidence is, however, not seen to the east, which indicates that the eastern margin of the reservoir is close to the wellfield. The pressure communications between Svartsengi and Eldvörp is most likely along permeable paths at more than 2000 m depth. Recharging fluids from this depth may explain a 1-2 °C increase in wellbore temperatures in Svartsengi since 1975.

The pressure drawdown has some adverse effects on fluid production from the Svartsengi wells. As an example, the wellhead pressures have been reduced by 0.3 bars/year on in order to maintain the same flowrate from the wells. Calcite scaling in production wells is also a significant problem and must be cleaned regularly. The scaling occurs right above the boiling level in the wells. The depth to scaling has increased hand in hand with the pressure drawdown. This depth is at present close to 650 m depth, some tens of meters deeper than the production casings. There are already some examples of wellbore damages during calcite

cleaning operations.

The pressure drawdown has induced a temporary inflow of colder fluids on few occasions early in the production history. These cooling events lasted from a few days to a few weeks and the maximum cooling detected in a well was 15 °C. The cold inflow is believed to be due to fracturing on the peripheries of the reservoir. No sudden cooling has been observed during the last five years. This may be connected to the pressure drawdown in the reservoir. Decreasing fluid pressure increases effective stresses and makes therefore the rock more resistant to fracturing.

In order to maintain pressure in the Svartsengi reservoir, some injection of cooler fluids (70-80 °C) has been carried out for the last 7 years. The fluid has been injected into well 12, and later in well 5. Due to this injection, a 6 °C cooling was observed in well 6. The heat recovery of well 12 after injection, showed behaviour typical for fractured reservoirs (double porosity reservoirs).

The greatest potential danger to the production from Svartsengi wells is massive inflow of colder fluids into the fracture network. Wellbore temperatures lower than 210 °C would at present reservoir pressure, reduce wellhead production pressures below 6 bars, the operational pressure of the steam gathering system. This minimum wellbore temperature for operation of the wells will increase as the reservoir pressure continues to go down.

A continuation of the pressure drawdown in Svartsengi reservoir will lead to boiling in the upper part of the main geothermal reservoir below 600 m depth. The development of an extensive steam zone will increase the production enthalpy of wells, reduce scaling rates and increase wellhead pressures. Higher enthalpy fluids from wells will, furthermore, reduce necessary mass production from the reservoir for full load operation of the power plant.

## VIÐAUKI 1: Staðsetning borholna í Svartsengi

Hnitin eru gefin í landskerfi 1955/56 (Lambert) og hæðir í Grindavíkurkerfi (Hnit 1982).

| Holu-nafn | X       | Y       | Hæð<br>(m.y.s) |
|-----------|---------|---------|----------------|
| H-1       | 717.337 | 382.437 | 17.7           |
| H-2       | 717.233 | 382.856 | 31.87          |
| H-3       | 717.263 | 382.854 | 33.01          |
| SG-4      | 717.637 | 382.751 | 24.39          |
| SG-5      | 717.511 | 382.547 | 25.7           |
| SG-6      | 717.454 | 382.720 | 27.03          |
| SG-7      | 717.744 | 382.507 | 26.7           |
| SG-8      | 717.661 | 382.371 | 26.1           |
| SG-9      | 717.977 | 382.519 | 27.8           |
| SG-10     | 717.246 | 382.940 | 34             |
| SG-11     | 717.804 | 382.326 | 27.2           |
| SG-12     | 717.472 | 382.935 | 28.5           |



## VIÐAUKI 2: Yfirlit um mælingar í Svartsengisholum

Upplýsingar um mælingarnar eru sýndar á eftirfarandi formi:

|                      |   |
|----------------------|---|
| <i>Dags</i>          | er dagsetning mælingar (dagur-mánuður-ár).  |
| <i>Mæling</i>        | er mæliaðferð eða mæliaðgerð (texti).   |
| <i>Upph.dýpi</i>     | er upphafsdýpi mælisyrpu, þ.e. í hvaða dýpi var byrjað að mæla (m).                                 |
| <i>Lokadýpi</i>      | er lokadýpi mælisyrpu, þ.e. í hvaða dýpi var hætt að mæla (m).                                      |
| <i>Mældir metrar</i> | er mismunur upphafs- og lokadýpis (m).  |
| <i>Mælitæki</i>      | sýnir hvaða tæki var notað við að slaka nema niður holuna (texti).                                  |
| <i>Mælingamenn</i>   | er skammstöfun nafna mælingamanna með skástriki á milli (texti).                                    |
| <i>Svuntunr</i>      | segir hvert er númer mælingar í Oracle gagnagrunni Orkustofnunar. Engin önnur mæling á þetta númer. |

Eins er gefið á eftir upptalningu mælinga í hverri holu, summa lokadýpa og summa mældra metra í holunni.

















## Yfirlit um mælingar í holu SG-12.

| Dags      | Mæling              | Upph. dýpi | Loka dýpi metrar taki          | Mæltinga nenn | Svuntu nr | Dags                             | Mæling      | Upph. dýpi | Loka dýpi metrar taki | Mæltinga men        | Svuntu nr |
|-----------|---------------------|------------|--------------------------------|---------------|-----------|----------------------------------|-------------|------------|-----------------------|---------------------|-----------|
| 15-MAR-82 | Holuvidd Hiti       | 0.0        | 585 R47453 GuG/HS              | 1459          |           | 05-AUG-88                        | Hiti        | 300.0      | 1200                  | 900 R24585 GrB      | 3320      |
| 31-MAR-82 | Holuvidd Nifteindir | 0.0        | 602 R47453 GuG/HS              | 1460          |           | 31-OCT-88                        | Prystingur  | 100.0      | 1402                  | 1302 R24585 GrB/BS  | 3318      |
| 10-APR-82 | Hiti                | 600.0      | 1300 R50402 HöHa/HS            | 1461          |           |                                  | Hiti        | 100.0      | 1402                  | 1302 R24585 GrB/BS  | 3319      |
|           |                     | 600.0      | 1250 R50402 HöHa/HS            | 1462          |           | 28-NOV-88                        | Hiti        | 100.0      | 1403                  | 1303 R24585 BS/GrB  | 3315      |
|           | Hiti                | 0.0        | 1355 R50402 GjG/HS/            | 1463          |           | 14-FEB-89                        | Hiti        | 200.0      | 1402                  | 1202 R24585 GrB/GuH | 3325      |
|           | R64"                | 600.0      | 1300 R50402 HöHa/HS            | 1464          |           | 14-JUN-89                        | Hiti        | 200.0      | 1403                  | 1203 R24585 GrB/GuH | 3306      |
|           |                     | 0.0        | 350 R24585 BS/GjG              | 1465          |           | 30-AUG-90                        | Hiti        | 0.0        | 1400                  | 1400 R24585 GrB/GuH | 801       |
|           | Hiti                | 500.0      | 1467 R24585 BS/GjG             | 9304          |           |                                  | Prystingur  | 0.0        | 1400                  | 1400 R24585 GrB/GuH | 802       |
|           | Prystingur          | 220.0      | 1467 1247 R24585 BS/GjG        | 9305          |           | 01-OCT-90                        | Körfumæling | 0.0        | 422                   | 422 KERRA BS        | 8971      |
|           | Hiti                | 0.0        | 350 R24585 GjG/GAX             | 7733          |           |                                  | Körfumæling | 0.0        | 471                   | 471 KERRA BS        | 8972      |
|           | Prystingur          | 200.0      | 1461 1261 R24585 GjG/SPG       | 3316          |           |                                  | Körfumæling | 0.0        | 700                   | 700 KERRA BS        | 8973      |
|           | Hiti                | 800.0      | 1461 661 R24585 GjG/SPG        | 3317          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Hiti                | 0.0        | 322 R24585 GjG/SPG             | 7732          |           | Mælt alls                        |             | 52740      | 43591                 |                     |           |
|           |                     | 0.0        | 1300 R24585 BS/GjG             |               |           | Samtals 44 mælingar og aðgerðir. |             |            |                       |                     |           |
| 22-SEP-82 | Hiti                | 0.0        | 1300 R24585 BS/GjG             | 1466          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 19-NOV-82 | Körfumæling Fiskun  | 0.0        | 1459 R24585 GjG/GuG            | 8196          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           |                     | 0.0        | 600 R24585 GjG/GuG             | 8198          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 15-JUN-83 | Prystingur Hiti     | 225.0      | 1458 1233 R24585 BS/GjG        | 3307          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 21-NOV-83 | Prystingur          | 400.0      | 1458 1058 R24585 BS/GjG        | 3308          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Hiti                | 200.0      | 1455 1255 R24585 BS/SPG        | 3310          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           |                     | 400.0      | 1455 1055 R24585 BS/SPG        | 3311          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 15-MAR-84 | Hiti                | 400.0      | 1460 1060 R24585 BS/HTul       | 3309          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 22-MAR-84 | Hiti                | 400.0      | 1458 1058 R24585 BS            | 3312          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 09-APR-84 | Hiti                | 0.0        | 316 R24585 GuG/GjG             | 1467          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Prystingur          | 300.0      | 1457 1157 R24585 GuG/GjG       | 3323          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Hiti                | 400.0      | 1457 1057 R24585 GuG/GjG       | 3324          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
| 24-SEP-84 | Hiti                | 0.0        | 1466 1466 R50402 GuG/HÖH       | 1468          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Holuvidd            | 0.0        | 1460 1460 R50402 GuG/HÖH       | 1469          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           |                     |            | 400.0 1447 1047 R24585 HS/GjG  | 3321          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Hiti                | 514.0      | 1447 933 R24585 HS/GjG         | 3322          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Prystingur          | 300.0      | 1448 1148 R24585 BS/GuG        | 3313          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Hiti                | 400.0      | 1448 1048 R24585 BS/GuG        | 3314          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | Körfumæling         | 0.0        | 1407 1407 R24585 BS            | 8251          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |
|           | 13-JUL-88           | Hiti       | 290.0 1409 1119 R24585 BS/Ómar | 3305          |           |                                  |             |            |                       |                     |           |

### VIÐAUKI 3: Blandrekningar í holu SG-12

Rennsli og hiti æða í upphitnun holu SG-12 eftir niðurdælingu var nálgæð með eftifarandi hætti:

#### *SAMBAND FLÆÐIS ÚR ÆÐ OG HITNUNARHRAÐA HENNAR*

Gert er ráð fyrir að nálgæð megi hitnunarhraða kældrar vatnsæðar með jöfnu á forminu

$$\frac{dT}{dt} = K \dot{m} (T_g - T) \quad (1)$$

þar sem  $T$  er hiti æðar í holu,  $T_g$  er berghiti úti í ótrufluðum jarðhitageyminum,  $t$  er tími og  $\dot{m}$  er tala sem lýsir massaflæði úr æðinni. Stuðullinn  $K$  er ótilgreindur fasti til varðveislu eininga og er hugsanlega eins fyrir allar æðar í holu. Eftir óendanlegan tíma mun hiti æðarinnar jafna sig að fullu eftir niðurdælinguna og verða  $T_g$ . Með breytuskiptunum  $\phi = T_g - T$  fæst lausn á (1):

$$T(t) = T_g - \Delta T e^{-K \dot{m} t} \quad (2)$$

þar sem  $\Delta T$  er mesta kæling æðarinnar frá  $T_g$ . Fyrir lítil gildi tíma ( $t < 1$ ) gildir að  $e^{-K \dot{m} t} \approx (1 - K \dot{m} t)$ . Þá má nálgæð með

$$T(t) \approx T_g - \Delta T + K \Delta T \dot{m} t \quad (3)$$

Hitnunarhraði æðar er þá í hlutfalli við

$$\frac{dT}{dt} \approx K \dot{m} \Delta T \quad (4)$$

Nauðsynlegt er að þekkja rennslið  $\dot{m}$  eða upphafskælinguna  $\Delta T$  til að leysa jöfnu 4 í tilfelli holu SG-12 á mynd 22.

#### *BLÖNDUN TVEGGJA ÆÐA*

Hugsum okkur að tvær æðar séu í holu í blaðstri. Æð númer 1 er ofar í holunni, en rennslið sem kemur neðan að æð 1 hefur hitann  $T_2$ . Mælingar í blásandi holunni gefa  $T_2(t)$  og hita blöndunnar ofan við æð 1, sem við köllum f. Þá má tengja hita æðarinnar,  $T_1$ , hita blöndunnar og massahluta efri æðarinnar,  $x$ , í heildarrennslinu með jöfnu á forminu:

$$f(t) = x T_1 + (1-x) T_2 \quad (5)$$

Óþekktu stærðirnar í þessari jöfnu eru  $T_1$  og  $x$ . Vita þarf aðra til að leysa fyrir hina.

Mynd 22 gefur ekki einungis stærðirnar  $T_2$  og  $f$  fyrir renni holu SG-12, heldur einnig afleiður þeirra með tíma  $dT_2/dt$  og  $df/dt$  og eru þær fasti. Reynt var að finna aðra jöfnu í  $x$  og  $T_1$  sem mætti leysa saman við jöfnu 5 þannig að rennsli og hiti allra æða holu 12 væri þekkt á öllum tínum upphitnunarinnar. Var helst mænt til fullkomnari útleiðslu jöfnu 4 í því sambandi. Ekki tókst samt að finna neina líkingu í þessari atrennu og má vera að æðarennslu holu 12 verði einungis fundið með líkanreikningum. Slíkt bíður betri tíma.