



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

Tvífasa reiknilíkan og spár þess um afköst suðusvæðisins í Svartsengi

Grímur Björnsson

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

1998

OS-98012



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630-235

Grímur Björnsson

Tvífasa reiknilíkan og spár þess um afköst suðusvæðisins í Svartsengi

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-98012

Apríl 1998

ISBN 9979-68-013-X

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

Skýrsla nr.: OS-98012	Dags.: Apríl 1998	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: TVÍFASA REIKNILÍKAN OG SPÁR ÞESS UM AFKÖST SUÐUSVÆÐISINS Í SVARTSENGI		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 40
Höfundar: Grímur Björnsson	Verkefnisstjóri: Sverrir Þórhallsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Reiknilíkan, vinnsluspár	Verknúmer: 630 235	
Unnið fyrir: Hitaveitu Suðurnesja		
Samvinnuaðilar:		
<p>Útdráttur: Í skýrslunni er lýst gerð og notkun einfalds reiknilíkans af suðusvæðinu í Svartsengi, sem gefur innsýn í hvernig suðusvæðið kunni að bregðast við aukinni vinnslu. Líkangerðin er liður í könnun á hagkvæmni þess að auka raforkuframleiðslu í orkuverinu í Svartsengi. Gerð er grein fyrir helstu forsendum líkansins, lýst uppbyggingu þess og hvernig það hermir upphafsástand suðusvæðisins og vinnslusöguna í Svartsengi. Síðast en ekki síst er líkanið notað til að spá fyrir um innra ástand suðusvæðisins og viðbrögð þess við breytilegri vinnslu úr jarðhitakerfinu. Reiknilíkanið skilar nákvæmum útreikningum um lóðréttar ástandsbreytingar á dýptarbilinu 165-750 m, en mjög grófreiknuðu rennsli, þrýstingi og hita í dýpri hluta kerfisins. Skoðuð eru 12 tilvik framtíðarvinnslu úr annars vegar djúpum blautum holum og hins vegar grunnum og þurrum holum innan suðusvæðisins. Talið er að hámarksframleiðsla á gufu náið úr suðusvæðinu með því að taka úr því að jafnaði 30-50 kg/s, og að vinnslan úr dýpri hlutanum leiði til áframhaldandi, hægtvaxandi niðurdráttar. Einnig er talið hugsanlegt að hægt sé að 'búa til' neðra og stærra suðusvæði í Svartsengi með því að fella djúþrýstinginn um 15-20 bör frá því sem nú er.</p>		
Lykilord: Svartsengi, háhitasvæði, reiknilíkan, upphafsástand, vinnslusaga, þrýstingur, suðusvæði, spá, TOUGH2	ISBN-númer: ISBN 9979-68-013-X Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirlit af: SP og PI	

EFNISYFIRLIT

TÖFLUSKRÁ	4
MYNDASKRÁ	4
3. INNGANGUR	5
4. HELSTU FORSENDUR Í GERÐ REIKNILÍKANSINS	5
5. KRÖFUR TIL REIKNILÍKANSINS	6
6. EIGINLEIKAR OG ÚTLIT REIKNILÍKANSINS	7
7. KVÖRDUN LÍKANS AÐ UPPHAFSÁSTANDI	10
8. KVÖRDUN LÍKANS AÐ VINNSLUSÖGU	11
9. REIKNAÐAR BREYTINGAR Á ÁSTANDI SUÐUSVÆÐIS Á VINNSLUTÍMA	14
10. ÞRÝSTIJÖFNUN VIÐ LOKUN HOLU 10 HAUSTIÐ 1996	20
11. VINNSLUSPÁR	20
11.1 Skoðun þrýstings og vermi fyrir fasta vinnslu úr suðusvæði	21
11.2 Skoðun þrýstings og vermis fyrir fasta vinnslu úr djúpum holum	26
11.3 Kostir og gallar vinnslutilfellanna 12	32
12. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA	33
13. HEIMILDIR	35
VIÐAUKI A: Inntaksskrá TOUGH2 sem hermir upphafsástand suðusvæðisins	36
VIÐAUKI B: Inntaksskrá TOUGH2 sem hermir vinnslusögu Svartsengis	38

1. TÖFLUSKRÁ

1 Eiginleikar bútanna í reiknilíkaninu	9
2 Nokkur tilfelli framtíðarvinnslu í Svartsengi	21
3 Helstu þættirnir í ástandi dýpri hluta Svartsengis að loknum 20 ára spátíma	33
4 Helstu þættirnir í ástandi suðusvæðisins að loknum 20 ára spátíma	33

2. MYNDASKRÁ

1 Þrívíð afstöðumynd af reiknilíkani fyrir Svartsengiskerfið	9
2 Jöfnun hita og þrýstings á 1000'm dýpi fyrstu 2000 ár líkanreikninga	10
3 Mældur og reiknaður hiti/þrýstingur á suðusvæðinu við upphaf vinnslu	11
4 Vinnslusagan sem notuð er í Svartsengislíkaninu	12
5 Mældur og reiknaður þrýstingur í Svartsengi	13
6 Mældur og reiknaður þrýstingur og vermi holu SG-10	14
7 Reiknað massa- og orkustreymi upp úr suðusvæði	15
8 Reiknað massastreymi milli suðusvæðis og botnlags reiknilíkansins	16
9 Uppsafnað massastreymi milli suðusvæðis og botnlags reiknilíkansins	16
10 Reiknaður gufuhluti sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins	17
11 Reiknaður þrýstingur sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins	18
12 Reiknaður hiti sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins	19
13 Mæld og reiknuð þrýstijöfnun í suðusvæði við lokun holu 10 haustið 1996	20
14 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði	22
15 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði	22
16 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði	23
17 Þrýstingur gufuholu við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði	24
18 Vermi gufuholu við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði	24
19 Þrýstingur gufuholu við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði	25
20 Vermi gufuholu við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði	25
21 Þrýstingur gufuholu við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði	26
22 Vermi gufuholu við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði	26
23 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum	27
24 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum	27
25 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum	28
26 Þrýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum	28
27 Þrýstingur gufuholu við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum	29
28 Þrýstingur gufuholu við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum	29
29 Þrýstingur gufuholu við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum	30
30 Þrýstingur gufuholu við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum	30
31 Vermi gufuholu við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum	31
32 Vermi gufuholu við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum	31
33 Vermi gufuholu við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum	32
34 Vermi gufuholu við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum	32

3. INNGANGUR

Skýrsla þessi er unnin að beiðni Hitaveitu Suðurnesja og lýsir gerð og notkun einfalds reiknilíkans af suðusvæðinu í Svartsengi. Hitaveitan kannar nú hagkvæmni þess að auka raforkuframleiðslu í Svartsengi, að stórum hluta með gufu úr ofannefndu suðusvæði. Er skýrslan einn liður í ákvarðanatökunni, þar sem reiknilíkanið veitir svör við krefjandi spurningum um hvernig suðusvæðið kann að bregðast við aukinni vinnslu í framtíðinni. Líkansmíðin var unnin fyrrí hluta árs 1997, samhliða en óháð afkastaspám sem reiknilík-an Vatnaskila af Svartsengiskerfinu skilar (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1997). Með þessu móti er öryggi afkastaspána talið aukast og þar með forsendurnar fyrir stækkan orku-versins, en um tölувert ólik reiknilíkön er að ræða.

Skýrslan er þannig byggð upp að gerð er grein fyrir helstu forsendum reiknilíkansins, lýst uppbyggingu þess og hvernig lokagerð líkansins hermir upphafsástand suðusvæðisins og vinnslusöguna í Svartsengi. Síðast en ekki síst er líkanið svo notað til að spá fyrir um innra ástand suðusvæðisins með tímanum og hvernig því kann að vegna við breytilega vinnslu úr jarðhitakerfinu í Svartsengi.

Sú málvenja verður höfð í skýrslutextanum að sá hluti jarðhitakerfisins í Svartsengi sem er í suðu, er kallað *suðusvæði*. Orðið *gufupúði* hefur einnigtíðkast um þetta rúmmál. Skýrsluhöfundi finnst það orð misvísandi þar sem verulegur hluti af porurúmmálinu í suðusvæðinu inniheldur vatn lengstan hluta vinnslusögunnar. Þegar að því kemur að vinnslan hefur soðið burt megnið af poruvatninu á orðið *gufupúði* hins vegar vel við. Sá hluti jarðhitakerfisins sem er ekki í suðu er að sama skapi kallað *vatnssvæði*. Þá verður til hæginda talað um vatnsfasana two sem *vatn* og *gufu*, fremur en einsfasa vatn og gufu. Holur sem draga eingöngu vatn úr jarðhitakerfinu verða kallaðar *blautar holur* en holur sem vinna úr gufuríkum æðum eru kallaðar *gufuholur*. Skilflötur vatnsins og gufunnar í jarðhitakerfinu er nefndur *suðuborð*. Suðusvæðinu er skipt í *neðra* og *efra suðusvæði*.

4. HELSTU FORSENDUR Í GERÐ REIKNILÍKANSINS

Því reiknilíkani sem hér er kynnt, var frá upphafi einkum ætlað að lýsa hvernig suðusvæðið í Svartsengi hefur og mun hegða sér með tímanum. Mun minni áhersla var hins vegar lögð á nákvæma lýsingu vatnskerfisins neðan suðusvæðisins og er það reyndar gróf einföldun á raunveruleikanum.

Eftirfarandi forsendur voru lagðar til grundvallar við gerð einfalda reiknilíkansins:

1. Flatarmál suðusvæðisins er sett 2 km^2 . Þetta flatarmál skiptir höfuðmáli um afkastagetu þess. Í líkani Vatnaskila er flatarmálið áætlað nokkru minna, eða um $1\frac{1}{2} \text{ km}^2$ (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1992 og 1997). Það flatarmál er sótt í áætlaða útbreiðslu á upphaflegu suðusvæði í Svartsengi, og styðst við ummyndun og hita á yfirborði og í borholum (Hjalti Franzson, 1990). Flatarmálið 2 km^2 var aftur á móti áætlað út frá heildarvinnslu CO_2 úr holu 10 og lækkunarhraða suðuborðs í suðusvæðinu (Grímur Björnsson, 1992). Jón Örn Bjarnason benti síðar á að í því

mati var skekkja upp á eina stærðargráðu. Að henni leiðréttir hleypur flatarmálið upp í 20 km^2 . Jón kemst reyndar að sömu niðurstöðu um svæðisflatarmálið í nýlegri skýrslu (1996) en bendir á að CO_2 gasið losni úr vatnsfasanum eftir öðrum leiðum en eingöngu afgösun á skilfleti vatns og gufu í suðusvæðinu. Að teknu til liti til þessa ætti flatarmál upp á 2 km^2 að vera í varlegra lagi.

2. Poruhluti suðusvæðisins er settur fastur 10 %. Er þá stuðst við 6 % poruhluta steins sem fiskaðist óvænt úr holu SG-6 af 650 m dýpi (Grímur Björnsson og Svanur Pálsson, 1991). Þetta gildi er í lægra lagi. Sem dæmi áætlar Hjalti Franzson (1990) að poruhluti suðusvæðisins geti legið á bilinu 10-15 %. Rétt þótti því að setja poruhlutann í 10 %.
3. Á 1000 m dýpi ríkir enn upphafsprýstingur 9 km frá miðju borsvæðisins, og er hann u.p.b. 84 bör. Hér er einfaldlega gert ráð fyrir að mælda landssigið umhverfis Svartsengi sé beinu hlutfalli við þrýstilækkunina undir. Breidd sigsvæðisins er á bilinu 14-20 km og ætti meðalfjarlægðin 9 km því að vera nærrí lagi (Hjálmar Eysteinsson, 1991).
4. Hlutlektir vatns og gufu fylgja svonefndum X-ferlum. Gufa hreyfist ekki fyrr en við 5% rúmmálshluta og vatnsfasinn er að sama skapi fastur við 60% gufuhluta. Þetta er sömu forsendur og beitt var við gerð reiknilíkans af Nesjavallakerfinu (Guðmundur S. Böðvarsson o.fl., 1990).
5. Líkt er eftir jarðhitakerfinu með porulíkani, þ.e. ekki er gert ráð fyrir áhrifum sprungna á massa- og varmaflæði innan líkansins. Porur líkansins eru að fullu mettaðar af vatni og/eða gufu. Ekki er reiknað með áhrifum gass og seltu á varmafræðilega eiginleika vatnsins og gufunnar. Þá er gert ráð fyrir að rennslið í líkaninu sé ætíð lagstreymt og fylgi Darcy lögmálinu.

5. KRÖFUR TIL REIKNILÍKANSINS

Einn af helstu kostum reiknilíkana af jarðhitakerfum er að þau herma flestar þær mælanlegu stærðir sem þekktar eru um kerfin, jafnframt því að varðveita flæði massa og orku. Slíkar skorður verða tíðum til þess að reiknilíkönin ýmist staðfesta eða skjóta niður þær hugmyndir sem menn óneitanlega fá í kollinn eftir því sem boranir og vinnsla skila víðtækari upplýsingum um berggrunninn.

Hér var ákveðið að reiknilíkanið ætti að herma eftirtalda þætti í Svartsengiskerfinu.

1. Þrýstisögu svæðisins á 1000 m dýpi. Hún byggir á 170 þrýstimælingum í gagnasafni Orkustofnunar, sem þegar hafa verið birtar í ýmsum skýrslum (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991; Grímur Björnsson o.fl., 1996).
2. Upphafshita og þrýsting í holum 2, 3 og 15. Hér er enn og aftur byggt á hita- og þrýstimælingum í gagnasafni Orkustofnunar, svo og á skýrslu um upphafsástand svæðisins (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991).

3. Hækkun vermis í holu SG-10 vorið 1984, en hún skipti úr því að vera blaut hola yfir í gufuholu á örfáum vikum (Jón Örn Bjarnason, 1988).
4. Toppþrýsting holu SG-10 með tímanum eins og hann er skráður á disklingi í eftirlitsskýrslu Vatnaskila (1996).
5. Vaxandi gufuútstreymi til yfirborðs með tímanum. Hér er í raun ekki við nein gögn að styðjast önnur en þau að þegar þrýstingur tók að falla í Svartsengi, jókst gufuútstreymið upp úr suðusvæðinu. Líkaninu er því ætlað að sýna vaxandi streymi gufu upp úr sér með tímanum án þess að vitað sé um magnið.
6. Yfirþrýsting á 200 m dýpi snemma árs 1993 þegar hola HSH-14 var boruð. Yfirþrýstingur var til staðar í borun holunnar allt frá u.p.b. 150 m dýpi (Sigurður Benediktsson o.fl., 1993a). Ekki var við saman vanda að etja þegar holar 2 og 3 voru boraðar árin 1971-1972. Þá var hola HSH-15 boruð árið 1992 í 140 m dýpi, ýmist í skoltapi eða við smávægilegan yfirþrýsting á vatnssúlu (Sigurður Benediktsson o.fl., 1993b). Því eru rök fyrir að setja þéttan, láréttan jaðar á u.p.b. 150-200 m dýpi.
7. Þrýstijöfnun holu SG-10 við lokun haustið 1996. Gerð verður grein fyrir þeim mælingum í eftirlitsskýrslu Orkustofnunar um borholumælingar í Svartsengi og Eldvörpum árin 1996 og 1997.

6. EIGINLEIKAR OG ÚTLIT REIKNILÍKANSINS

Mynd 1 sýnir á þrívíðan hátt úlit reiknilíkansins sem notað var til að herma jarðhitakerfið í Svartsengi. Forðafraeðilegir eiginleikar líkansins eru gefnir upp í töflu 1. Við reikningana var beitt nýjustu útgáfu af forritinu TOUGH2 (Pruess, 1991). Forritið er eitt af mörgum forritum sem herma hvers kyns flæði á massa og orku neðanjarðar. Þau hafa verið í samfelldri þróun á jarðvísindadeild Lawrence Berkeley National Laboratory í Kaliforníu frá því um 1978. Forritið TOUGH2 var notað við gerð reiknilíkana af Kröflu og Nesjavöllum nýlega og eins sýnist það ráðandi nú á tímum í alþjóðlega jarðhitabransanum (Grímur Björnsson o.fl., 1997; Guðmundur Böðvarsson o.fl., 1990).

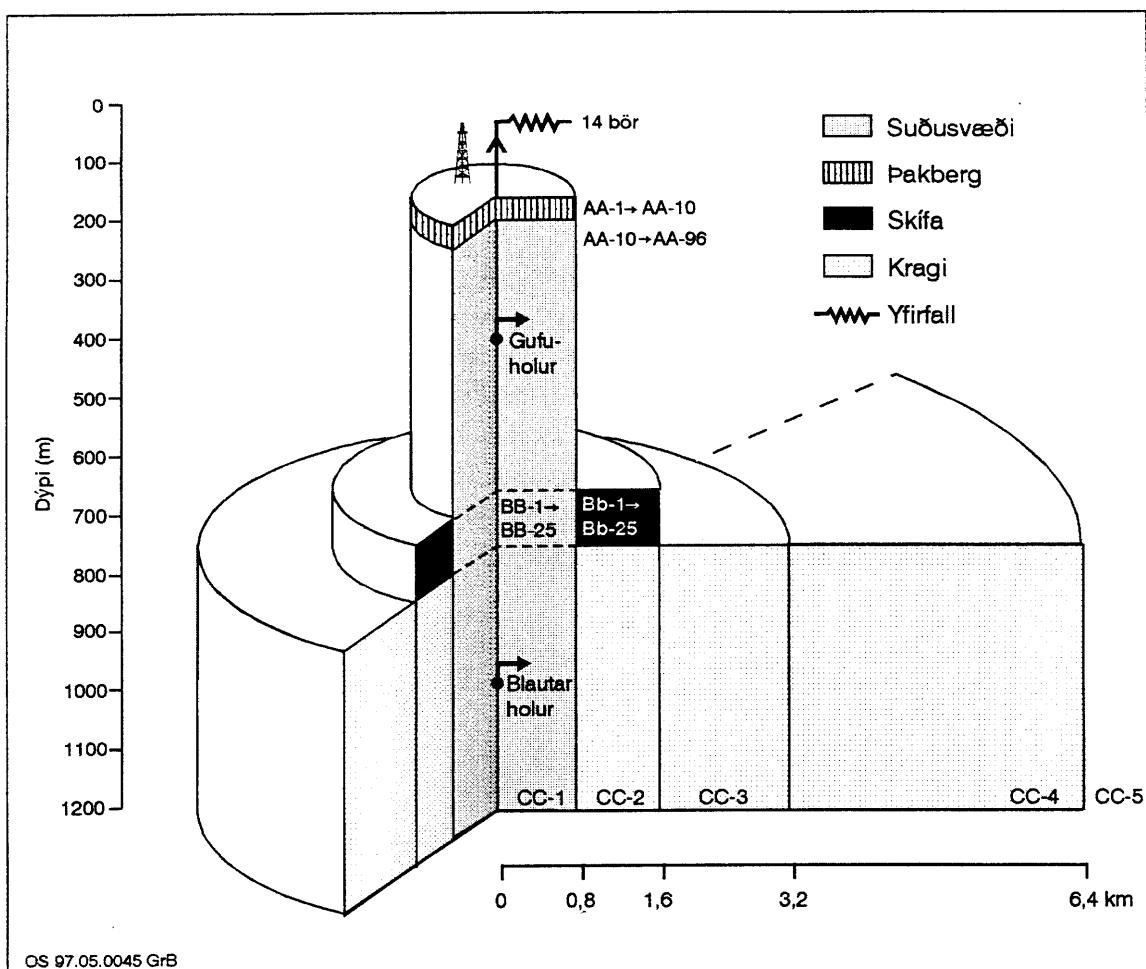
Helstu atriði líkansins á mynd 1 eru eftirfarandi:

1. Suðu- og vatnssvæði eru nálguð sem hringlaga, láréttar skífur eða bútar. Efsta hluta líkansins er skipt í 5 m þykk lög, frá 165 m og allt niður í 750 m dýpi. Þar neðan við kemur eitt 500 m þykkt og útbreitt undirlag. Það vex í fimm áföngum út í 9 km fjarlægð. Miðja lagsins er í 1000 m dýpi. Líkanið er því að stofni til einvít, þ.e. einungis lóðréttur flutningur varma og massa á sér stað í líkanbúnunum ofan 750 m, en einungis lárétt flæði á sér stað í neðsta líkanlaginu (nema innsta bútnum).
2. Einungis 4 berggerðir eru í líkaninu. Langsamlega stærst að rúmmáli er kraginn í blokkum CC-2 til CC-5 í undirlaginu. Innsti hluti kragans, svo og allar blokkir merktar AA og BB, eru með eiginleika suðusvæðisins.

3. Skífunni á 650-750 m dýpi tilheyra blokkir sem eru merktar Bb á mynd 1. Hún nær 1600 m út frá miðju líkansins. Við það stækkar flatarmál líkansins úr 2 upp í 8 km². Hér er gert ráð fyrir að skýra megi stöðugleika í þrýstingi Svartsengissvæðisins upp úr árinu 1991 með því að suða hafi breytt sig út í þetta stóra flatarmál (Grímur Björnsson o.fl., 1996). Þessi kenning um stækkun suðusvæðisins byggir á samtulkun þrýsti- og hitalíkana af Svartsengiskerfinu, en þar kemur fram að 238-240 °C berghiti virðist útbreiddur milli 650-700 m dýpis (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991). Þrýstingur á þessu dýptarbili náði suðumarksþrýstingi einmitt upp úr árinu 1991.

Tvískiptingin í útbreiðslu suðusvæðisins leiðir til þess að skýrsluhöfundur kýs að tala um efra og neðra suðusvæði. Mörkin milli þeirra eru þá á 650 m dýpi. Flatarmál neðra suðusvæðisins er hrein ágiskun að öðru leiti en því að það er að öllum líkindum umtalsvert stærra en efra suðusvæðið.

4. Yfirþrýstingur holu HSH-14 en þrýstijafnvægi HSH-15 í borun um áramótin 1992-1993 réttlætir að efsti hluti bergsins í suðusvæðinu er talinn þéttur. Verður umtalsvert þrýstifall yfir þetta bil. Þessi þétti kafli er nefndur þakberg í líkaninu.
5. Ofan á þakbergið er síðan settur eins konar öryggisventill (e. productivity index). Honum er gefinn ákveðinn lektareiginleiki og vöki tekur að streyma út um hann ef þrýstingur í þakberginu fer yfir 14 bör.
6. Innsti hluti líkansins, sem er 2 km² að flatarmáli og nær út í 800 m radíus, er allur með sama bergeiginleikann nema efstu 50 metrarnir af þakberginu.
7. Ysti búturinn (gjörðin) í botnlagi líkansins, CC-5, er með fastan þrýsting, 84 bör, og hita, 240 °C (ekki sýndur á mynd 1). Miðja gjarðarinnar er í 9 km radíus frá miðju líkansins. Það er í samræmi við tilgátuna um að landhæðarbreytingar endurspegli þrýstibreytingar, en landsig er einmitt hætt að mælast út í 6-10 km fjarlægð frá vinnslusvæðinu í Svartsengi.



Mynd 1: Prívíð afstöðumynd af reiknilíkani fyrir Svartsengiskerfið.

Tafla 1: Eiginleikar bútanna í reiknilíkaninu.

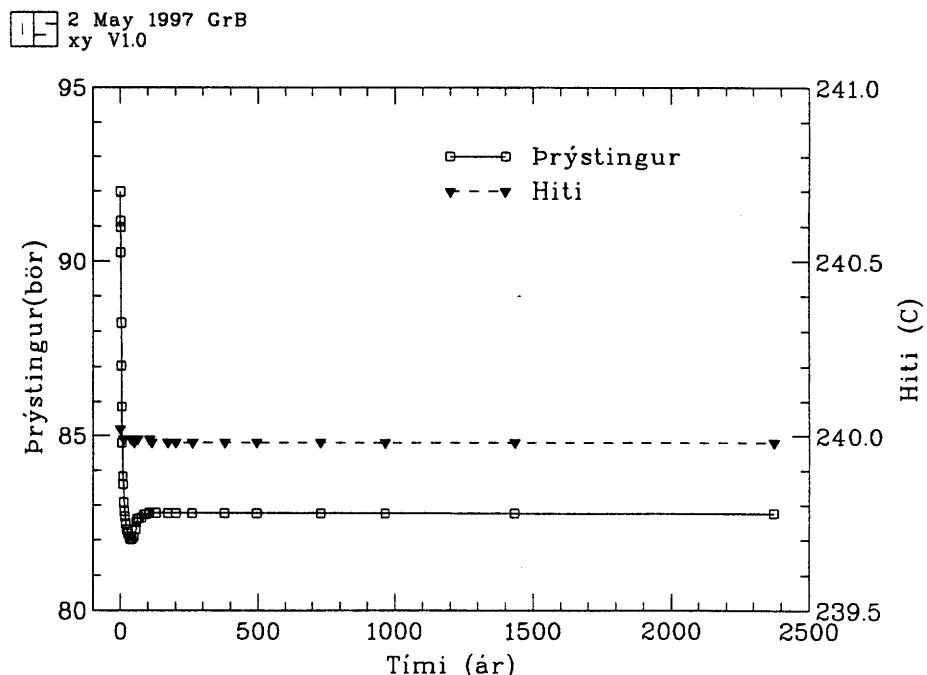
Nafn á eigin-leika	Eðlisþyngd (kg/m ³)	Poruhluti (%)	Lárétt x-lekt (mD)	Lárétt y-lekt (mD)	Lóðrétt lekt (mD)	Varma-leiðni (W/m/°C)	Varma-rýmd (J/kg/°C)
sudus	2650.	10	100	0.01	20	2.00	1000.
skifa	2650.	10	100	0.01	40	2.00	1000.
þakbg	2650.	10	100	0.01	0.3	2.00	1000.
kragi	2650.	10	16	0.001	0.001	2.00	1000.

Lektareiningin mD er milli-darcy, $1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$.

7. KVÖRÐUN LÍKANS AÐ UPPHAFSÁSTANDI

Fyrsti þátturinn í gerð reiknilíkansins fólst í að herma upphafsástand suðusvæðisins ásamt því að kvarða hita og þrýsting í hinu einfalda og útbreidda undirlagi á 1000 m. Í viðauka A er sýnd sú inntaksskrá TOUGH2 sem þótti komast næst því að herma upphafsástand jarðhitakerfisins.

Mynd 2 sýnir hvernig hiti og þrýstingur hegðuðu sér á 1000 m dýpi fyrstu 2500 árin eftir að reikningarnir voru ræstir. Í upphafi voru allir bútar líkansins settir í 84 bara þrýsting og 240 °C hita. TOUGH2 var síðan fyrirskipað að reikna ástand líkansins í annað hvort 5000 tímaskref eða í 200.000 ár. Myndin sýnir að þrýstingur rýkur upp um tæp 10 bör á fyrstu áratugum keyrslunnar, við að háþrýst vatnið í efri hluta líkansins fellur niður og hydróstatískur þrýstingur kemst á. Að því búnu jafnar þrýstingurinn sig að 82,7 börum og helst þannig mestan hluta keyrslusögunnar. Hitinn er að sama skapa ofurstöðugur í 240 °C, enda sá sami og upphafshiti allra blokkanna.

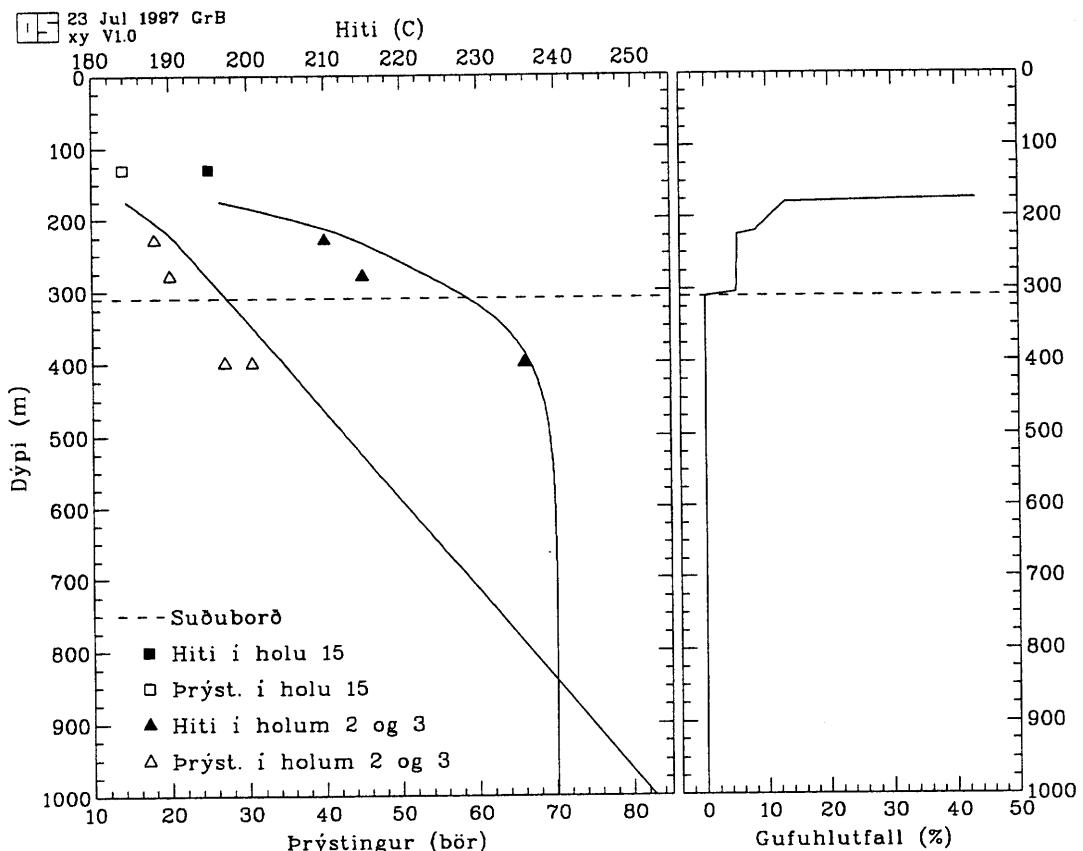


Mynd 2: Jöfnun hita og þrýstings á 1000 m dýpi fyrstu 2000 ár líkanreikninga.
Líkanið er nánast komið í jafnvægi eftir 200 ár, en var keyrt alls í 130 þúsund ár.

Alls fóru 543 tímaskref í þennan áfanga líkansins, þar af 519 fyrstu 200 árin. Reikningarnir stöðvuðust hins vegar af þeirri einföldu ástæðu að hiti- og þrýstingur í líkaninu urðu algerlega stöðugir með tímanum, eins og til er ætlast. Telst líkanið þar með komið í það jafnvægisástand sem var til staðar í Svartsengi árið 1976, að holur 4 og 5 eru boraðar og byrja að blása.

Í ljós kom við stillingu líkansins á mynd 1 að það sótti í mjög háan gufuhluta á ≈ 165–250 m dýpi. Þar með tókst ekki að herma hita og þrýsting holna 2 og 3 eins og hann mældist fyrir 1976. Þetta vandamál var einfaldlega leyst með því að leiða varma,

sem nam tæpum 200 kW, út úr efstu 39 bútum líkansins (165-360 m dýpi). Við það þéttist gufa og þrýstingurinn fór úr því að vera gufustatískur yfir í að vera vatnsstatískur. Er varmatapið haft mest í efstu bútunum en fer síðan stiglækkandi niður á við. Þetta varmatap er réttlætt með miklum hitamun milli suðusvæðisins og bergsins í kring (Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991), en eins má ekki gleyma að það bætti mjög samræmi milli líkans og mældra gagna. Þetta er sýnt nánar á mynd 3, en þar eru teiknaðir saman reiknaðir og mældir hita-, þrýsti- og gufuhlutaferlar/punktar í líkani og holum.



Mynd 3: Mældur og reiknaður hiti/þrýstingur á suðusvæðinu við upphaf vinnslu.

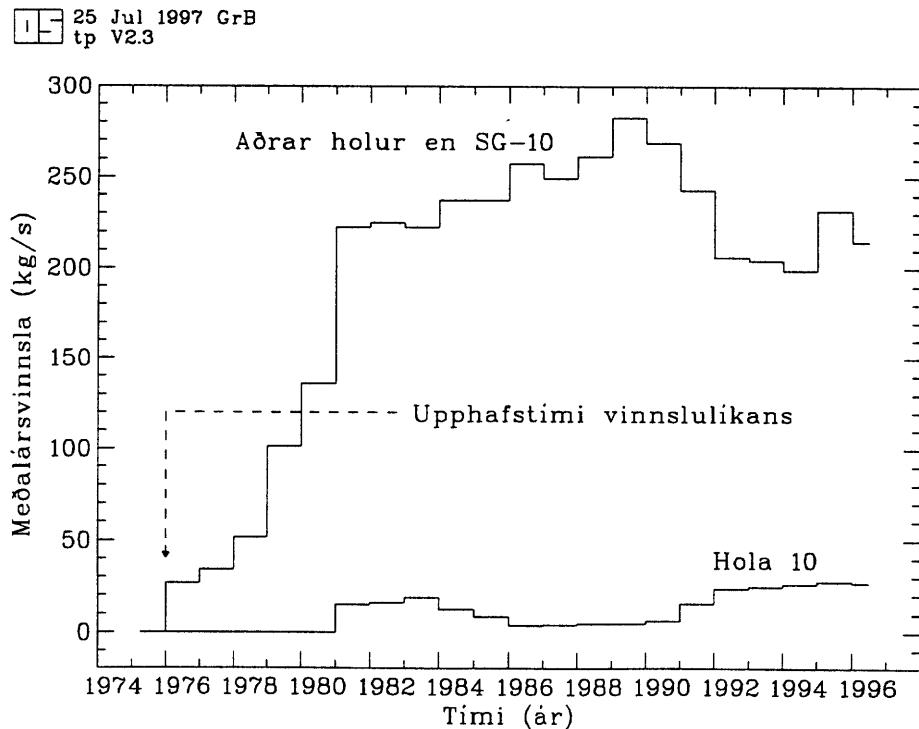
Af mynd 3 má sjá að suðuborð Svartsengissvæðisins reiknast á 310 m dýpi. Er það í góðu samræmi við mælingarnar úr holum 2 og 3, og eins við vermi holu SG-10, en hún var blaut hola í vinnslu allt fram á vor 1984. Aðalæð holunnar er einmitt á 390 m sem er 80 m undir reiknaða suðuborðinu á mynd 3.

Eins og áður kom fram var reiknilíkanið komið í stöðugt ástand eftir 120 þúsund ára keyrslu. Á þeim tímapunkti flæðir t.d. sami massi og varmi inn og út úr sérhverri blokk líkansins. Skoðun á úttaksskrá TOUGH2 sýnir að við lok keyrslunnar runnu um 12 kg/s af vatni með vermi 1020 kJ/kg út um yfirfallið í toppi líkansins. Af þeim voru einungis 1,2 kg/s af gufu. Leiðnistuðull „öryggislokans“ var ákvarðaður $1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^3$.

8. KVÖRÐUN LÍKANS AÐ VINNSLUSÖGU

Seinni hluti gerðar reiknilíkansins af Svartsengi, fólst í að stilla eiginleika þess að þrýsti- og vinnslusögu svæðisins. Var þá lokastaðan í hita, þrýstingi og gufuhluta upphafs-líkansins sett sem ástand Svartsengiskerfisins þann 1. janúar 1976. Síðan var líkaninu gefin vinnslusaga svæðisins og skoðað hvort þrýstingur þess á 1000 m dýpi, vermisbreyting og toppþrýstingur holu 10 ásamt gufustreymi út um yfirfallið í toppi líkansins, fóllu að þeim hugmyndum sem mælingar gefa til kynna. Sem venja er í slíku verkefni, kom strax í ljós að vinnslusagan gekk ekki upp ef frumgerð upphafslíkansins var notuð. Þá þurfti að endurskoða upphafslíkanið og prófa síðan að keyra vinnslusöguna á ný. Þannig var stokkið fram og til baka milli upphafs- og vinnslulíkansins uns þar kom að eitt og sama líkanið hermdi öll tiltæk gögn. Það er síðan kallað „besta“ líkanið af svæðinu og notast til að spá fyrir um framtíðahegðun þess. Inntaksskrá vinnslulíkansins er sýnd í viðauka B.

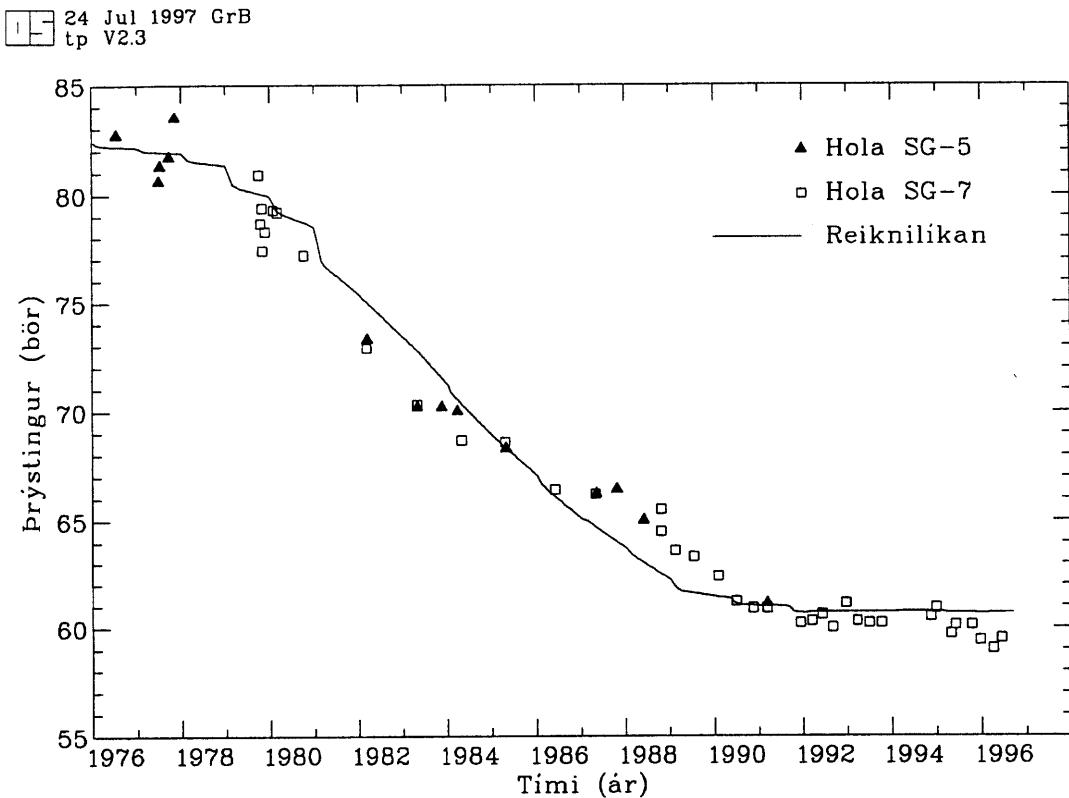
Mynd 4 sýnir vinnslusöguna sem var lögð til grundvallar við líkansmiðina. Einungis er gert ráð fyrir að massi sé unninn á tveimur stöðum úr líkaninu, 1) úr blokk AA-45 sem er í raun aðalæð holu 10 á 390 m dýpi, og 2) úr blokk CC-1 þar sem tekin er í einum punkti vinnslan úr öllum blautu Svartsengisholunum nema holu 10. Vinnslusagan er fengin í eftirlitsskýrslu Vatnaskila (1996). Er þá búið að draga niðurdælingu frá heildarvinnslunni.



Mynd 4: Vinnslusagan sem notuð er í Svartsengislíkáninu.

Myndir 5 og 6 sýna svo hvernig til tókst að herma eftir mældum stærðum í vinnslusögu Svartsengis. Á mynd 5 er sýndur saman reiknaður þrýstingur og mældur. Nokkuð gott samræmi er á milli þeirra og hegðar líkanið sér í aðalatriðum eins og mælingarnar. Smávægilega hnökra mætti laga með því að gera líkanið flóknara, einkum í undirlaginu. Slíkt

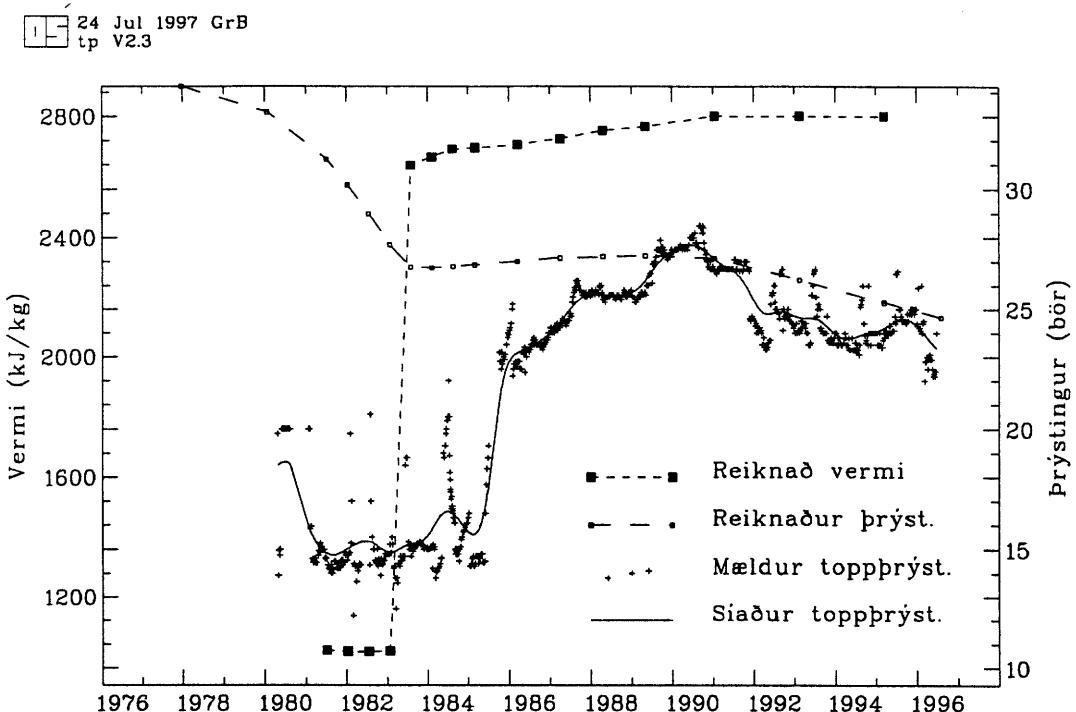
er samt andstætt þeirri forsendu líkansmíðinnar að hafa það einfalt og var því sleppt.



Mynd 5: Mældur og reiknaður prýstingur í Svartsengi.

Mynd 6 sýnir vermi og prýsting blokkar AA-45, en hún er notuð til að líkja eftir aðalæðum holu SG-10. Eins og fyrr var greint breyttist SG-10 úr að vera blaut hola í gufuholu snemma árs 1984. Það er talið eiga sér stað þegar suðuborðið í suðusvæðinu lækkaði niður fyrir holuæðarnar, vegna prýstifallsins í Svartsengiskerfinu. Þessi breyting kemur einnig fram í reiknilíkaninu, en u.b.b. einu ári of snemma. Það jafngildir skekkju í líkan-prýstingi upp á 1 bar, sem er hlutfallslega það lítil að hún er talin ásættanleg.

Rétt er að taka fram að prýstiferlar líkans og raunveruleikans á mynd 6 eru ekki sambærilegir meðan hola 10 er blaut, þar eð reiknaði prýstingurinn er miðaður við 400 m dýpi, en sá mældi er tekinn á holutoppi. Ferlarnir hegða sér hins vegar á móta eftir að holan er orðin gufuhola, þar sem sáralítið lóðrétt prýstifall á sér þá stað milli æðar og holutopps. Að þessum skýringum gefnum er því ástæða til að telja að reiknilíkanið nái að herma ástandsþreytingu holu 10 vorið 1984.

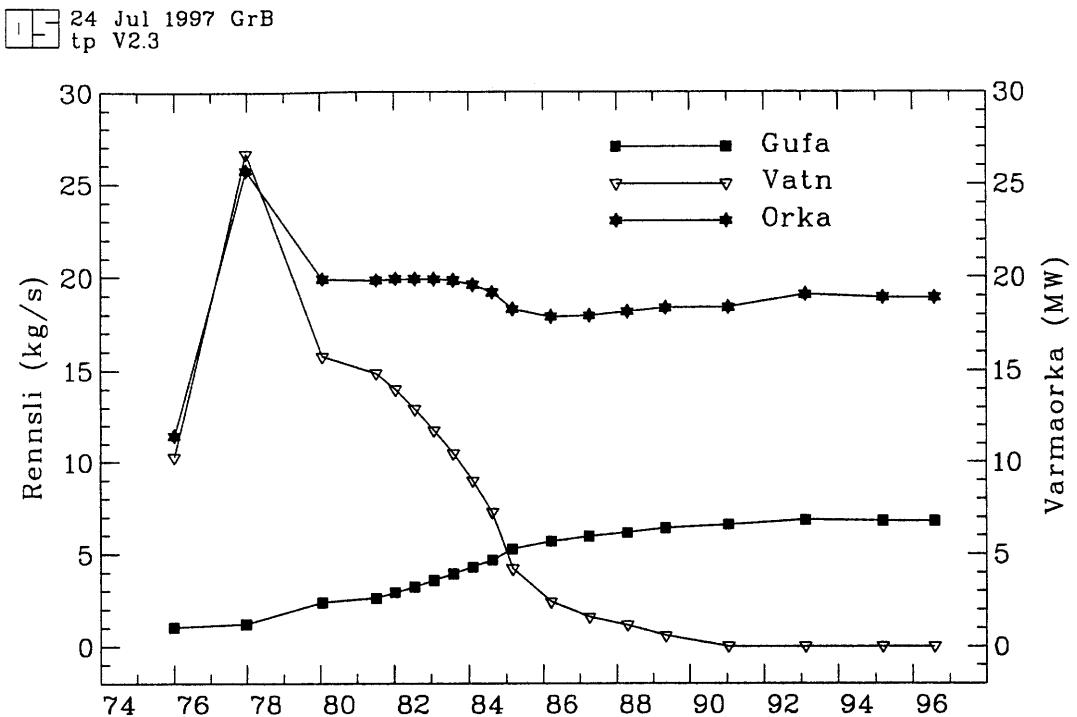


Mynd 6: Mældur og reiknaður þrystingur og vermi holu SG-10.
Athugið að hola 10 fer ekki í blástur fyrr en snemma árs 1980.

9. REIKNAÐAR BREYTINGAR Á ÁSTANDI SUÐUSVÆÐIS Á VINNSLUTÍMA

Hægt er að draga ýmsa athygliverða þætti um innra ástand suðusvæðisins út úr vinnslukani áranna 1976-1996. Þann fyrirvara verður að gera við slíka könnun að líkanið er mjög gróf nálgun á raunveruleikanum og hugsanlegt að það leiði til misvísandi niðurstaðna.

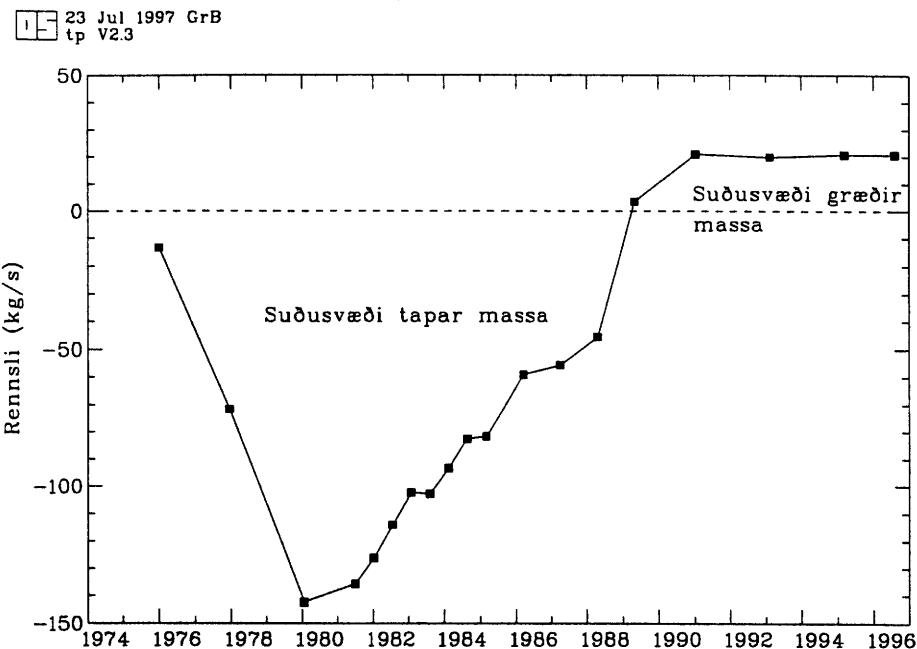
Mynd 7 sýnir reiknaða rennslissögu gufu, vatns og orku út um yfirfallið sem er í toppi reiknilíkansins. Eins og áður kom fram þá reiknaðist 10 kg/s vatnsrennslí og 1 kg/s af gufurennslí út um það í ársbyrjun 1976, þegar svæðið er nánast ótruflað af vinnslu. Hið skjóta þrystifall, sem verður á fyrstu árum vinnslunnar, leiðir til þess að efstu lög líkansins hlaupa í suðu og þrystingurinn þeirra hækkar. Það aftur eykur rennslíð út um yfirfallið. Er það í hámarki um áramótin 1977-1988, um 28 kg/s og enn mestmagnis vatn. Síðan dregur hratt úr vatnsrennslinu en á móti tekur gufustreymi að aukast. Það endar svo með því að upp úr árinu 1990 renna eingöngu 6-7 kg/s af gufu út um yfirfallið. Líkanið uppfyllir því forsenduna um að gufustreymi hafi aukist upp úr suðusvæðinu í kjölfar vinnslu og tilheyrandi þrystilækkunar.



Mynd 7: Reiknað massa- og orkustreymi um yfirfallið upp úr suðusvæði.

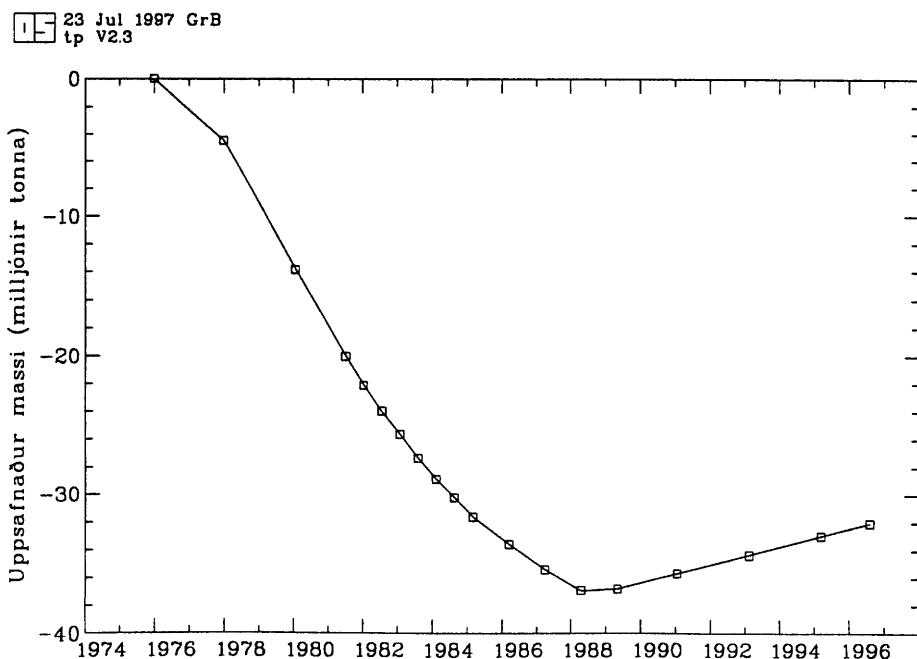
Líkt og með rennslið upp úr suðusvæðinu, er áhugavert að skoða hvernig líkanið reiknar rennsli niður úr því með tímanum. Þetta er sýnt á mynd 8. Skoðað er rennsli gegnum blokk BB-25, en hún er neðsta blokkin í suðusvæðinu, ofan útbreidda, láréttu lagsins sem er milli 750 og 1250 m dýpis (mynd 1). Þar sést að vatn rennur niður í gegnum blokkina árabilið 1976-1989. Lóðrétt rennsli er síðan í lágmarki árið 1990 en eftir það tekur vatn að renna upp í suðusvæðið svo nemur allt að 25 kg/s.

Gögnin á mynd 8 gefa því til kynna að vinnsluminnkunin milli áranna 1989 og 1990 leiði til þrýstijöfnunar í neðsta líkanlaginu. Þá verður innstreymi inn í borsvæðið meira en vinnslan upp úr holunum. Í stað þess að þrýstingur hækki, bregst jarðhitakerfið við umframaðstreyminu með geymslu massa í suðusvæðinu. Sú geymsla verður til með þéttingu gufu í porum suðusvæðisins. Kenningin um að aukin útbreiðsla suðu neðan 650 m dýpis skýri stöðugan svæðisþrýsting eftir árið 1990 er þar með fallin (kafli 4).



Mynd 8: Reiknað massastreymi milli suðusvæðis og botnlags reiknilíkansins. Öfugt formerkni á rennsli þýðir að vatn rennur niður úr suðusvæði en pósítíft að vatn renni upp í það.

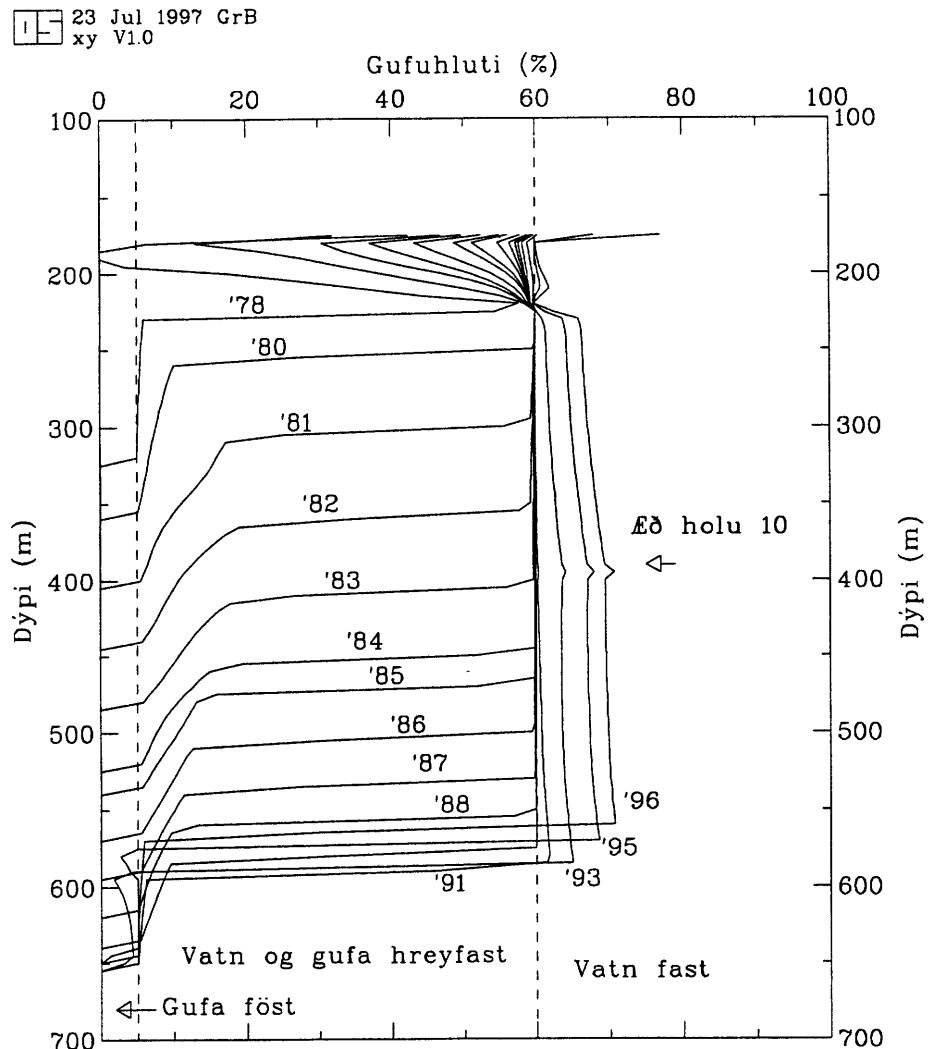
Mynd 9 sýnir uppsafnað rennsli milli suðusvæðis og botnlags reiknilíkansins, í milljónum tonna. Alls fóru kringum 38 milljónir tonna af vatni niður úr suðusvæðinu fram til ársins 1990, en eftir það hafa um 6 milljónir tonna skilað sér til baka. Samtals skilaði því suðusvæðið 20-25 % af heildarupptektinni í Svartsengi.



Mynd 9: Uppsaður massastreymi milli suðusvæðis og botnlags reiknilíkansins.

Mynd 10 sýnir gufuhluta innan suðusvæðisins sem fall af dýpi á ýmsum tíum. Strax sést að 5 og 60 % rúmmáslhluti gufu í porum stendur út úr ferlasúpunni á myndinni. Þarna koma fram stillingar á hlutlekt gufu og vatns í reiknilíkaninu. Gert er ráð fyrir að meðan

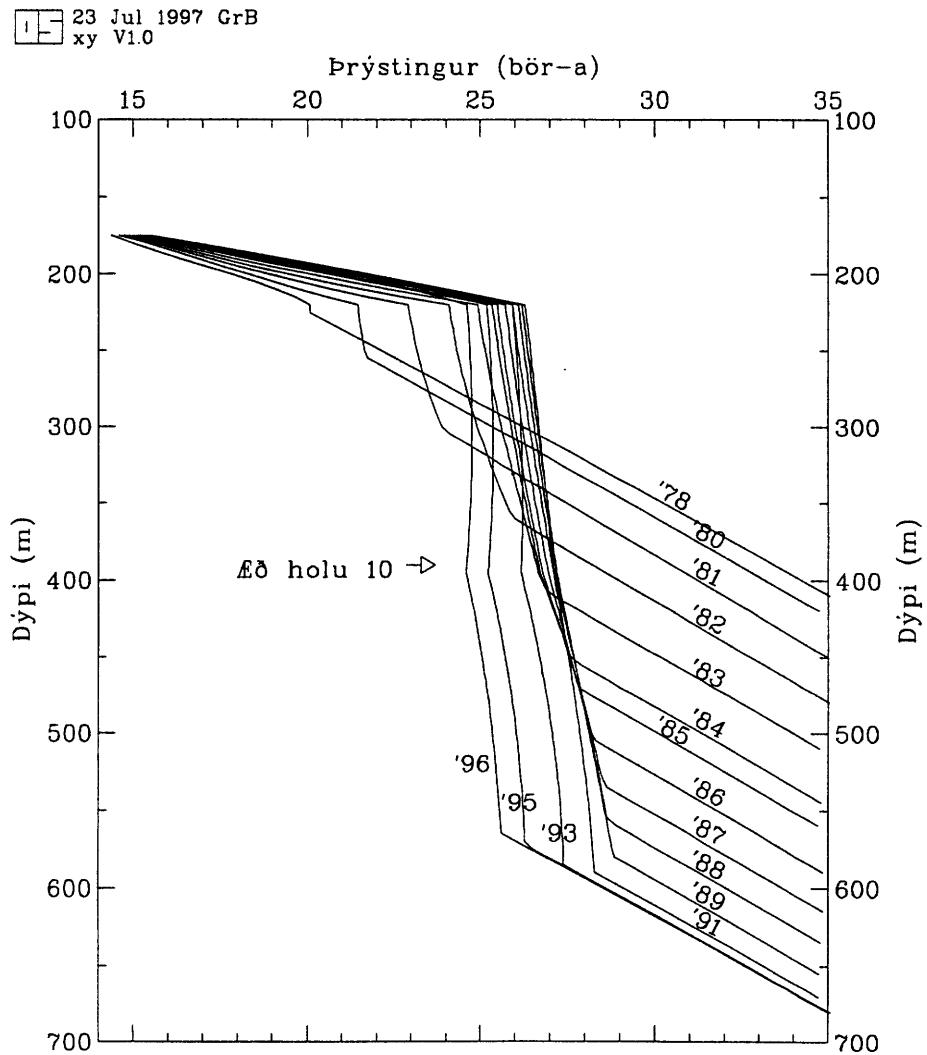
gufuhlutinn er lægri en 5 %, þá sitji dreifðar gufubólurnar fastar í bergmassanum. Eins er gert ráð fyrir að við 60 % gufuhluta „festist“ vatnsfasinn í porunum og einungis gufan sé hreyfanleg. Eina leiðin til að ná þessum vatnsmassa er þá með suðu við áframhaldandi þrýstilækkun. Það leiðir til kólnunar vatnsfilmunnar, varmi leiðist þá frá heitari bergmassanum og hitar hluta vatnsins yfir í gufu sem þá loks sleppur af stað.



Mynd 10: Reiknaður gufuhluti sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins.
Ferlar eru auðkenndir með ártali og hlutlektir gufu og vatns með strikalínúm.

Þrýstijöfnunin upp úr 1990 og reiknuð innrás vatnsfasans inn í suðusvæðið kemur vel fram á mynd 10. Á þessum tímapunkti gjörbreytist innra ástand suðusvæðisins þannig að nú verður gufuframleiðslan í holu 10 að reiða sig á staðbundna þrýstilækkun og suðu vatns yfir í gufu ofan suðuborðs. Fyrir 1990 var þessu hins vegar öfugt farið. Þá sá samfelld lækkun svæðisþrýstingsins til þess að suðuborðið seig niður á við og bætti sí og æ neðan á suðusvæðið. „Nýju metrarnir“ sem þannig bættust við hlupu í suðu og streymdi gufan þá upp á við og til æðar holu 10 meðan vatnsfasinn rann niður í djúpa undirlagið í reiknilíkaninu.

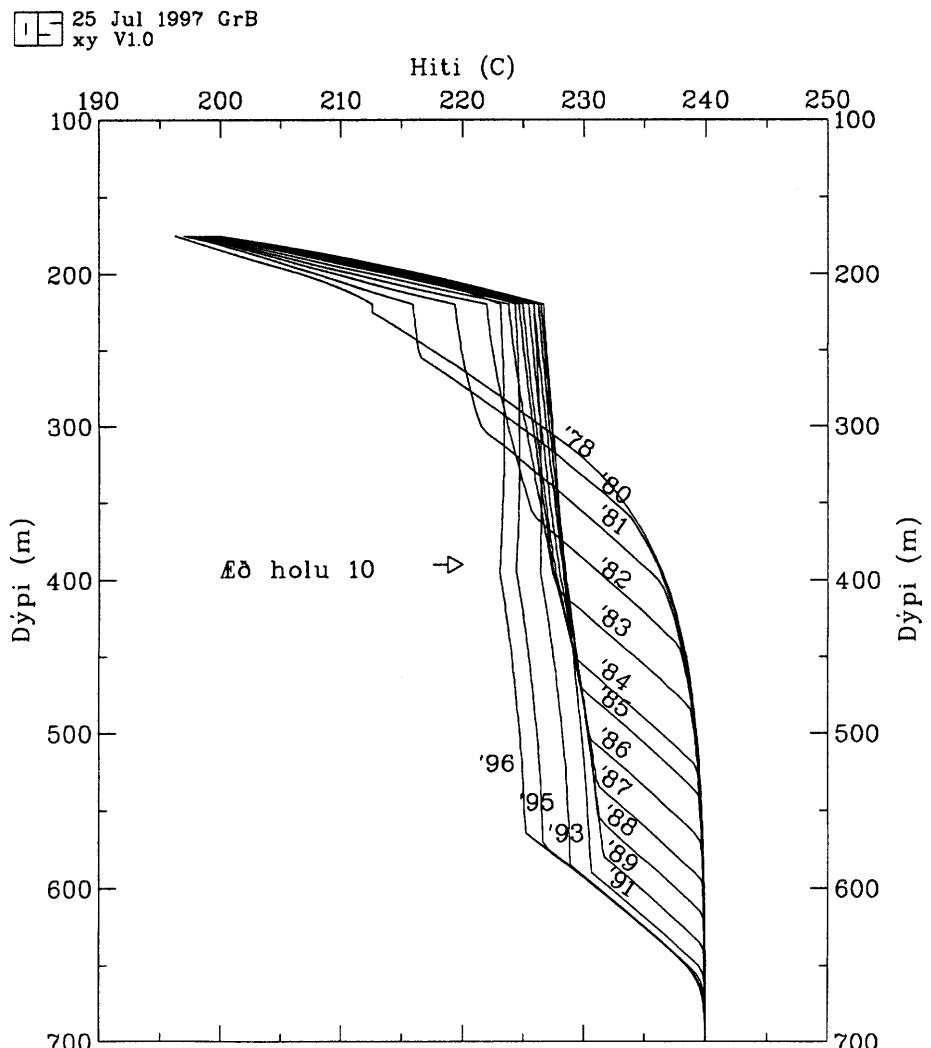
Mynd 11 sýnir reiknaðan þrýsting innan suðusvæðisins með dýpi og tíma. Þar kemur glögglega fram hvernig þrýstingur neðan suðuborðs hríðfellur og fylgir þannig niðurdrættinum sem vinnslan úr Svartsengiskerfinu olli. Straumhvörf verða svo kringum árið 1990, þegar þrýstifallið stöðvast. Sem áður segir verður suðusvæðið þá að bregðast við vinnslunni úr holu 10 með því að ganga á sinn innri vatnsforða með þrýstilækkun, svo vatnið geti soðið yfir í gufu og þannig sloppið út úr örsmáum bergporunum. Það skýrir þrýstifallið milli 200 og 600 m dýpis. Eins kemur vel fram á myndinni hvernig þrýstingur hækkar með tímanum undir þakberginu milli 165 og 210 m dýpis. Líkanið uppfyllir þannig kröfuna um að yfirþrýstingur sé undir þakberginu þegar holar 14 og 15 eru boraðar veturinn 1992-1993.



Mynd 11: Reiknaður þrýstingur sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins.
Ferlarnir eru auðkenndir með ártali.

Benda má á þrjá athyglisverða þætti á mynd 11. Í fyrsta lagi eiga allir þrýstiferlarnir sér sameiginlegan skurðpunkt í 14 börum á u.b.b. 165 m dýpi, en það er einmitt þrýstingurinn sem er við yfirlallið efst í líkaninu (mynd 1). Þá er þrýstingur fallandi við æð holu 10 eftir árið 1990. Svipuð en ekki jafnhröð þrýstilækkun sést einnig í mældum toppþrýstingi holunnar (mynd 6). Síðast en ekki síst sýnir mynd 11 fallandi þrýsting undir þéttu skilum um efst í líkaninu eftir árið 1990. Nú hefur stundum verið rætt hvort hætta sé á gufu-sprengingum og gíga- og hveramyndum ofan á suðusvæðinu í framtíðinni. Telji menn slíka hætta orðna alvarlega er ein auðveldasta leiðin til að draga úr áhrifunum að vinna sem allra mest úr holu 10 eða sambærilegum holum, og minnka þannig þrýstimuninn milli suðusvæðisins og ofanáliggjandi grunnvatns.

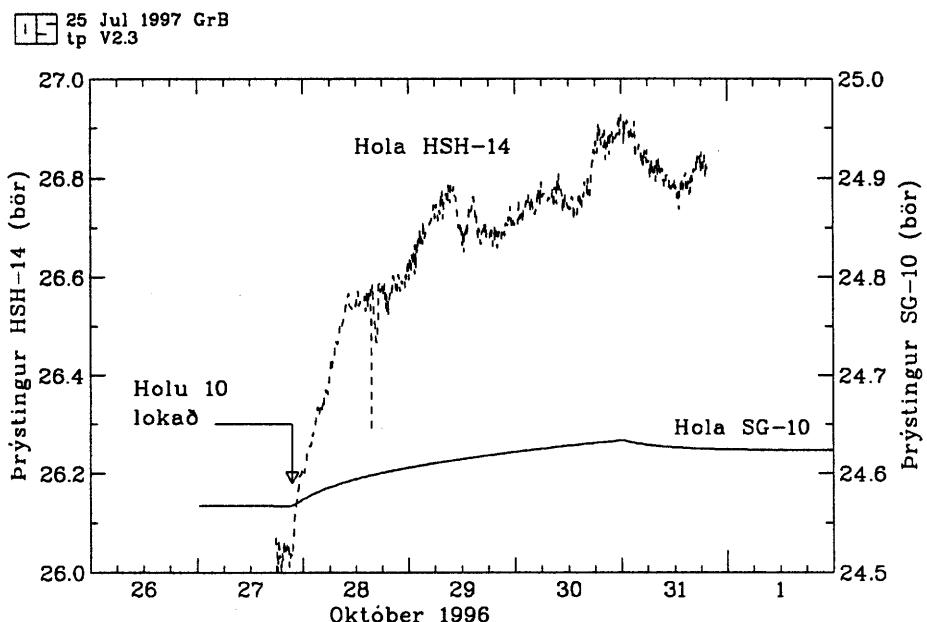
Mynd 12 sýnir í lokin hita suðusvæðisins með dýpi og tímanum. Myndin er í alla staði sambærileg við mynd 11, enda liggar megnið af ferlunum á suðumarki. Undir suðusvæðinu er svo fastur 240 °C hiti.



Mynd 12: Reiknaður hiti sem fall af dýpi og tímanum innan suðusvæðisins.
Ferlarnir eru auðkenndir með ártali.

10. PRÝSTIJÖFNUN VIÐ LOKUN HOLU 10 HAUSTIÐ 1996

Holu 10 á suðusvæðinu var lokað vegna viðgerða í október 1996. Var þá gripið tækifær-ið að mæla nákvæmlega þrýsting holu 14 meðan lokunin stóð. Mynd 13 sýnir mældu gögnin. Einnig er á mynd 14 ferill sem sýnir reiknaðan þrýsting holu 10 á 400 m dýpi. Við reikningana var lokaðastand vinnslulíkansins notað sem upphafsástand jöfnunarreikninganna. Skemmt er frá því að segja að meðan mæld þrýstihækkun holu 14 var um 0,8 bör, reiknaðist þrýstihækkun holu 10 aðeins 0,06 bör eða stærðargráðu lægri. Þessi prófun skýtur því vart sterkari stoðum undir reiknilíkanið sem hér er lýst. Væntanlega er hér um að kenna að aðeins ein líkanblokk er notuð til að lýsa æðaprýstingi holu 10. Ef ná á samræmi við mældu gögnin verður að brjóta þessa blokk upp í fleiri einingar. Slíkt er enn og aftur andstætt einfaldleikakröfunni sem hér er uppi um reiknilíkanið.



Mynd 13: Mæld og reiknuð þrýstijöfnun í suðusvæði við lokun holu 10 haustið 1996.

11. VINNSLUSPÁR

Lokaþáttur í gerð einfalda reiknilíkansins af suðusvæðinu í Svartsengi fólst í gerð spáa um ástand þess við ólíska vinnslu úr þurrum og blautum holum. Rétt er strax í upphafi að vara við ofrausti á þessar spár þar sem hér er einungis um einfalda frumgerð reiknilíkans að ræða. Sérstaklega á slík viðvörun við um stóra, láréttu undirlagið, sem er haft svo einfalt að forkastanlegt er að nota það til reikninga á ástandi Svartsengiskerfisins í framtíðinni. Tekur það þó til mikils meirihluta þess rúmmáls sem vinnslan úr Svartsengi hefur áhrif á. Miklu frekar á líkanið að efla skilning á því hvernig suðusvæðinu kann aðreiða af í framtíðinni, og hvernig best sé að haga vinnslu úr þessum afmarkaða hluta Svartsengiskerfisins.

Þær spár sem hér eru sýndar taka til nokkurra sviðsmynda um framtíðarvinnslu í Svarts-

engi. Sem fyrr er gert ráð fyrir að vatn sé eingöngu unnið úr blokk CC-1 á 1000 m dýpi, og gufa úr blokk AA-45 á 390 m dýpi. Skoðuð eru 12 tilfelli vinnslu. Annars vegar eru tekin að jafnaði 30, 50 og 70 kg/s úr æð holu 10 í suðusvæðinu. Hins vegar eru tekin til samans 100, 200, 270 og 340 kg/s að jafnaði úr blautu holunum. Alls gerir þetta 12 vinnslutilfelli. Þeim er lýst í töflu 2.

Tafla 2: Nokkur tilvik framtíðarvinnslu í Svartsengi.

Tilfelli númer	Vinnsla úr holu 10 (kg/s)	Aðrar holar (kg/s)
1	30	100
2	30	200
3	30	270
4	30	340
5	50	100
6	50	200
7	50	270
8	50	340
9	70	100
10	70	200
11	70	270
12	70	340

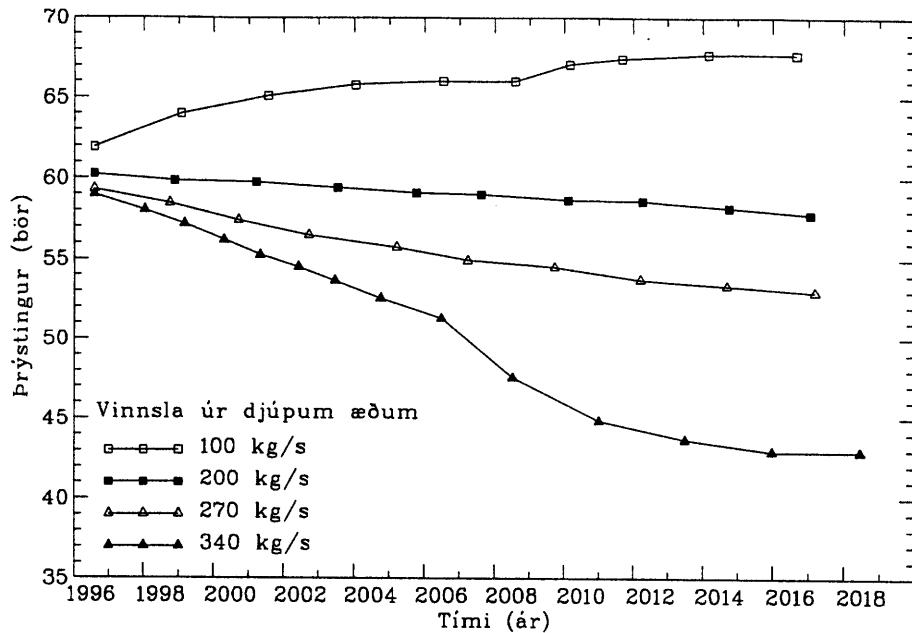
11.1 Skoðun þrýstings og vermi fyrir fasta vinnslu úr suðusvæði

Fróðlegt er að hefja skoðun spáferlanna þannig að fyrst eru tekin saman á mynd þau tilvik þar sem vinnslan úr suðusvæðinu er föst. Myndir 14-16 sýna hvernig þrýstingi er spáð á 1000 m dýpi í Svartsengiskerfinu fyrir vinnslutilfellen 12. Er þá gerð sér mynd fyrir 30, 50 og 70 kg/s vinnslu úr suðusvæðinu.

Skemmst er frá því að segja að spáð er ámóta djúppþrýstingi fyrir hvert tilfelli 100, 200, 270 og 340 kg/s vinnslu úr djúpum æðum. Þó mun þrýstingurinn falla því hraðar sem vinnslan verður meiri úr suðusvæðinu. Þrýstingurinn mun hækka ef vinnslan þar fer niður í 100 kg/s, hann mun falla um 0,3 bör á ári ef vinnslan er 200 kg/s, kringum 0,5 bör á ári ef 270 kg/s eru tekin og loks um 1 bar á ári ef 340 kg/s eru tekin úr svæðinu. Rétt er að benda á að í 340 kg/s tilvikinu fer í gang tímabil stöðugs þrýstings upp úr árinu 2010. Kennir hér áhrifa útbreiddrar suðu allt niður í blokkir BB-25 og Bb-25 í reiknilíkaninu (mynd 1). Eru þá komin til sögunnar bæði efta- og neðra suðusvæði í Svartsengi, þar sem það neðra er mun útbreiddara.

[1]

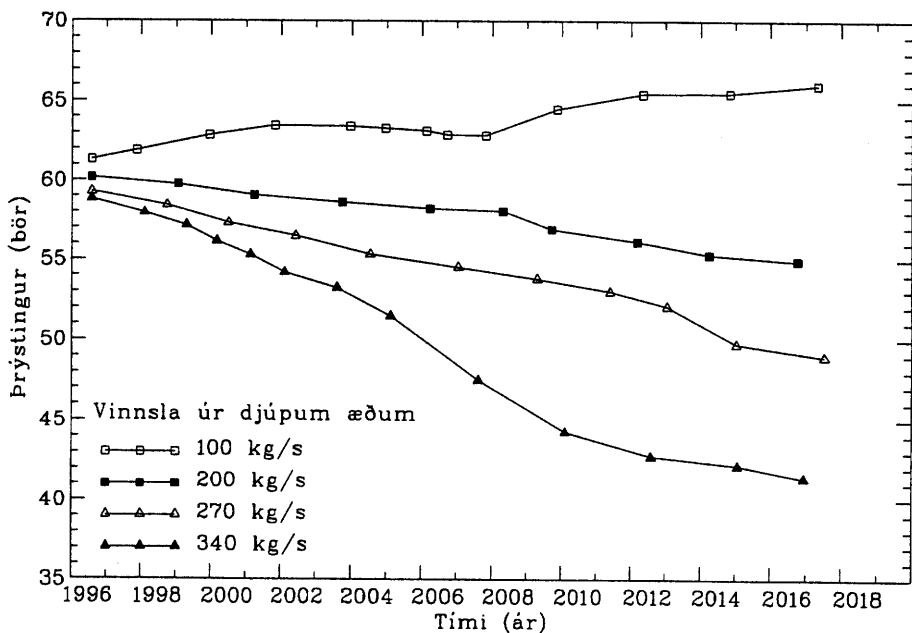
24 Jul 1997 GrB
tp V2.3



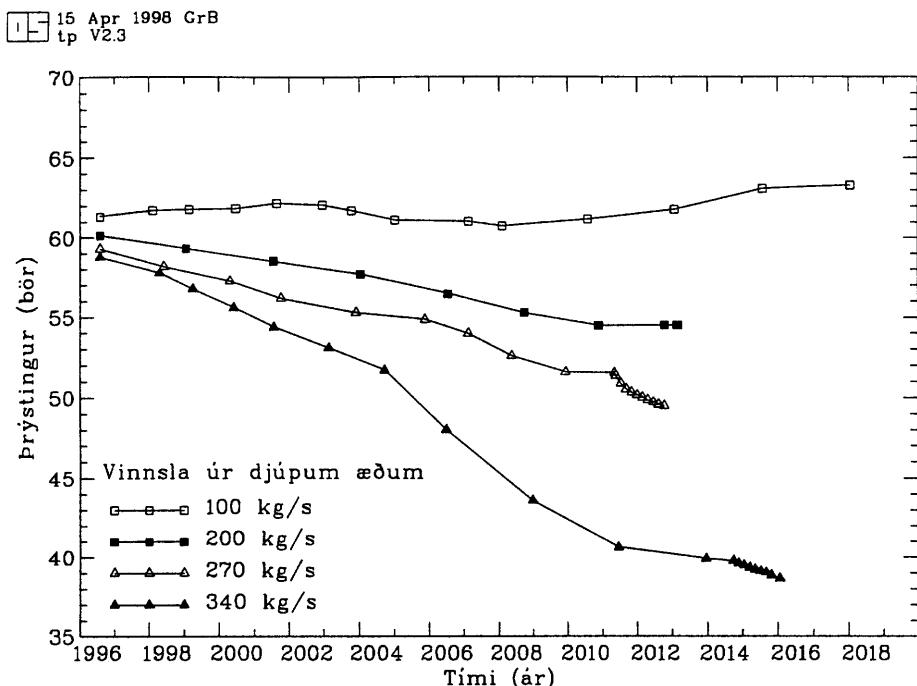
Mynd 14: Prystingur á 1000 m dýpi við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

[1]

15 Apr 1998 GrB
tp V2.3



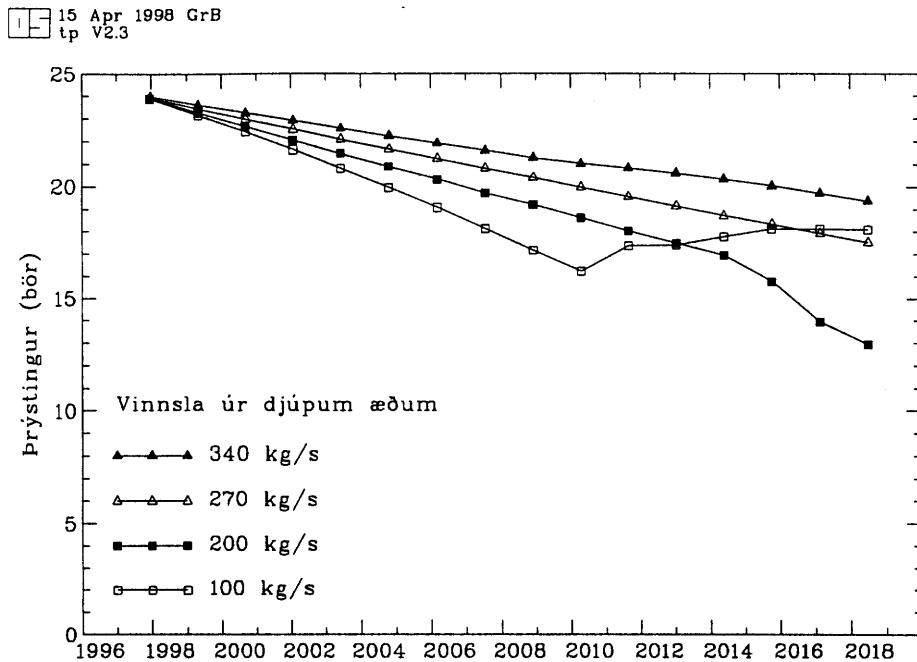
Mynd 15: Prystingur á 1000 m dýpi við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði.



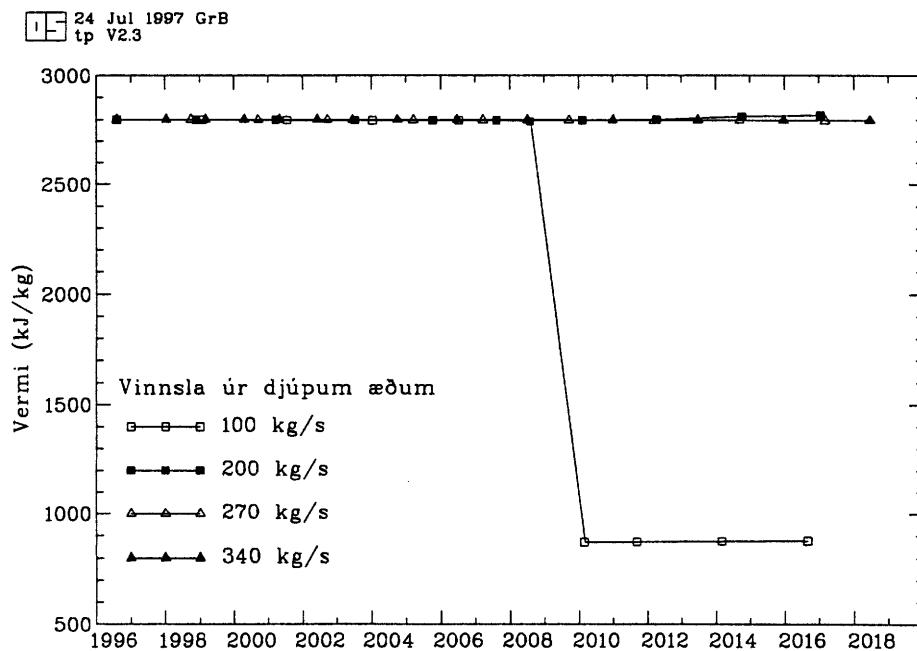
Mynd 16: Prýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

Myndir 17-22 sýna hvernig þrýstingi og vermi er spáð á 390 m dýpi og er þá miðað við aðalæð holu 10. Ef 30 kg/s vinnslan úr suðusvæðinu er fyrst skoðuð (myndir 17 og 18), sést að spáð er þrýstifalli í suðusvæðinu og nemur fallhraðinn 0,2 til 0,6 börum á ári. En nú bregður svo við að heilsa suðusvæðisins verður því betri sem meira er tekið úr djúpa hluta Svartsengiskerfisins. Því veldur sú einfalda staðreynd að við aukinn niðurdrátt stækkar sífellt rúmmál suðusvæðisins og þar með viðhaldast afköst þess lengur.

Versta ástandið innan suðusvæðisins mun skapast ef nettó vinnslan í Svartsengi fellur niður í 100 kg/s. Þá leiðir hækkandi djúþrýstingur til þess að rúmmál suðusvæðisins minnkar sífellt. Kemur svo árið 2010 að æðin á 390 m fer úr því að vera gufuæð í að vera venjuleg vatnsæð, líkt og í djúpu holunum. Að sjálfsögðu verður gufuframleiðsla þá hverfandi lítil úr holunni miðað við hvað gerist nú á tímum. Þessi tilgáta sést reyndar enn skýrar í mynd 18 sem sýnir vermi æðarinnar á 390 m. Í hinum tilvikunum virðist sem æðin haldist þurr þau 20 ár sem spáin tekur til.

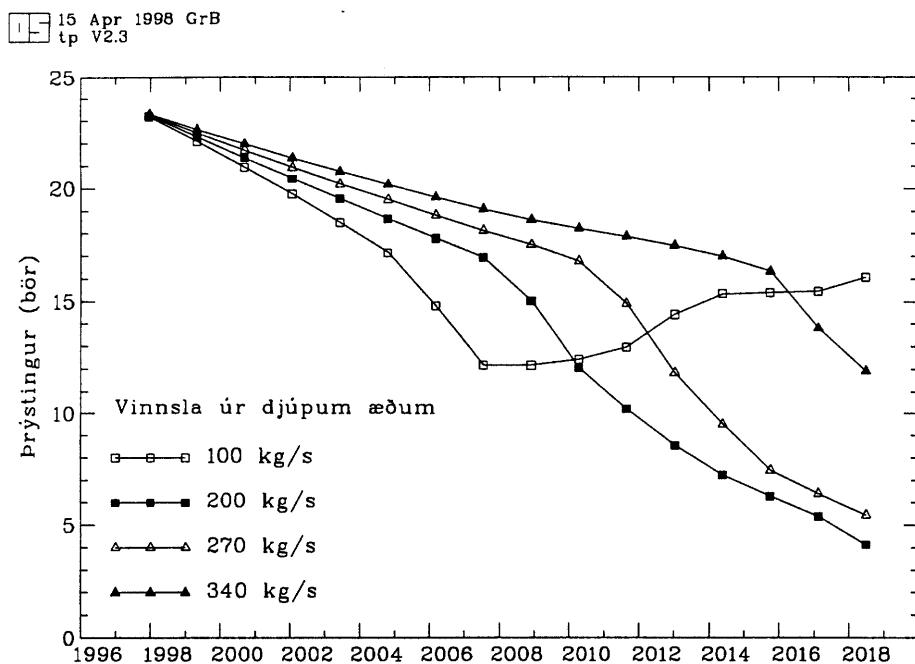


Mynd 17: Prystingur gufuholu við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

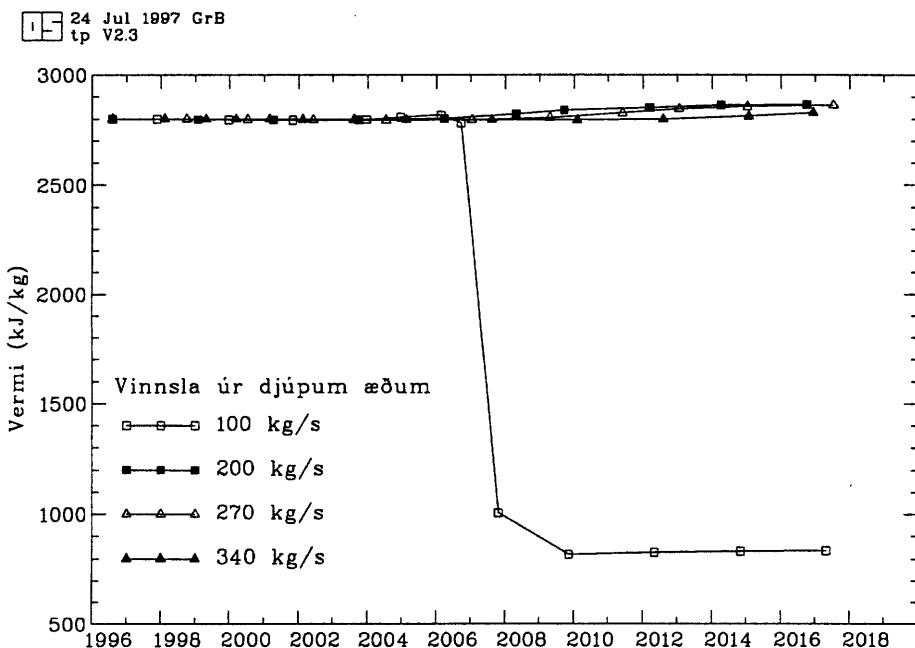


Mynd 18: Vermi gufuholu við fasta, 30 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

Myndir 19 og 20 sýna prysting og vermi holu 10 ef vinnslan úr henni er 50 kg/s en breytileg úr dýpri holum. Sem fyrr reiknast ástand gufupúðans einna best ef djúpvinnslan er mikil og þar með lækkandi djúprystingur. Niðurdráttarhraði er samt töluverður í suðusvæðinu, eða á bilinu 0,4 til 0,9 bør á ári. Brot sem koma í prystiferlana á árabilinu 2008 til 2016, stafa af því að á þessum tíma byrjar vatn að tæmast algerlega úr porum suðusvæðisins. Við það kemur fram smávægileg yfirhitum á gufunni, líkt og sést á mynd 20. Hér er rétt að kalla suðusvæðið gufupúða. Myndin sýnir að hola 10 verður að vatnsholu árið 2007.

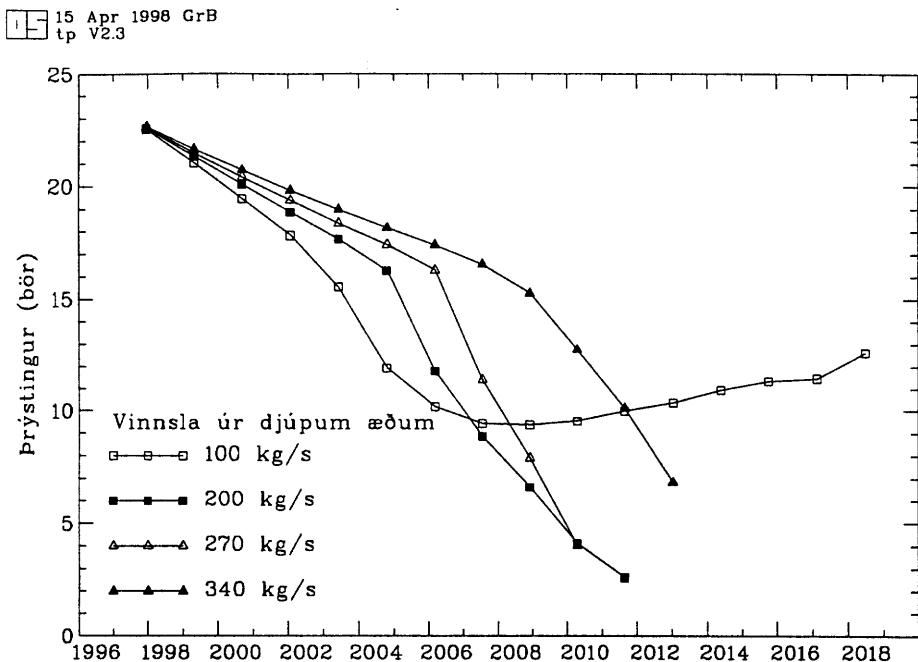


Mynd 19: Prystingur gufuholu við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

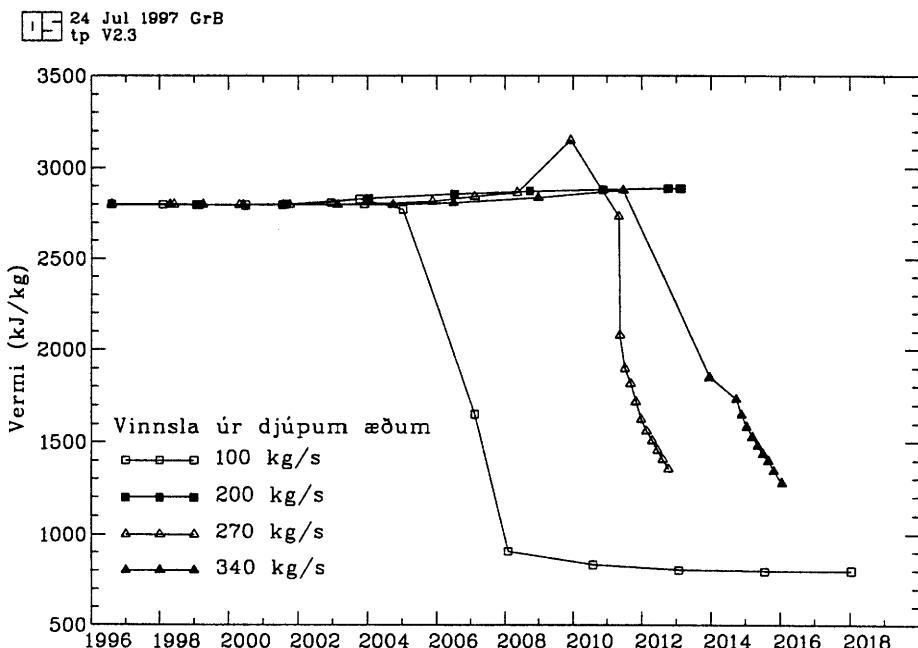


Mynd 20: Vermi gufuholu við fasta, 50 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

Myndir 21 og 22 sýna loks þrysting og vermi aðalæðar holu 10 fyrir fasta 70 kg/s vinnslu úr suðusvæðinu. Nú er fóstri sárt leikinn og vart að búast við meiri endingu suðusvæðisins en 10 árum í þessum látum. Reikningar gengu erfiðlega og er óvarlegt að trúa þrysti- og vermiferlum eftir árin 2004 til 2006. Á þessum tíma fer væntanlega að draga hratt úr afköstum suðusvæðisins, frekar en að vermi og þrystingur falli svo lágt sem myndirnar gefa til kynna.



Mynd 21: Prystingur gufuholu við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði.



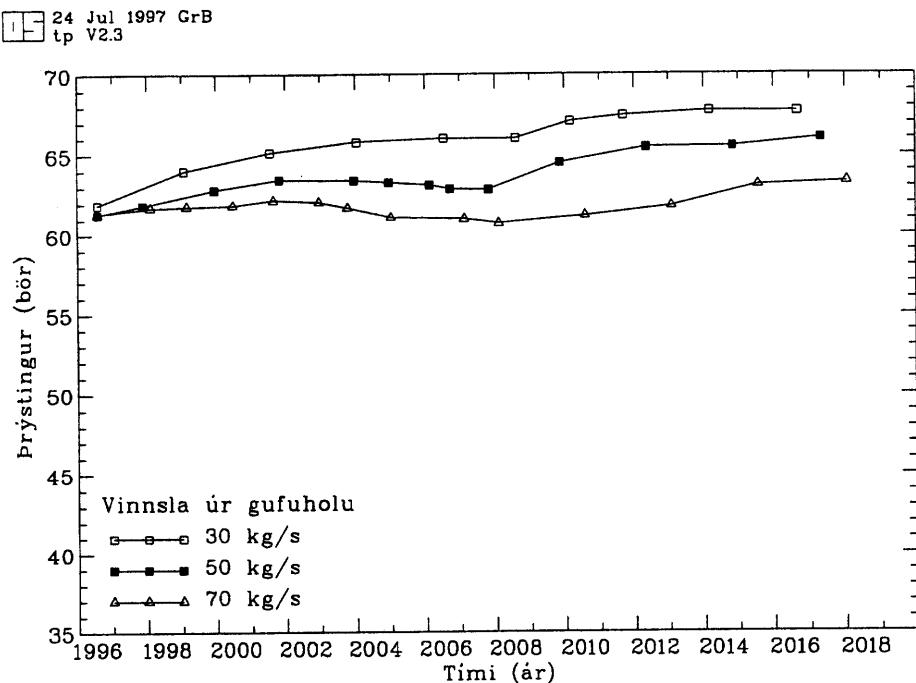
Mynd 22: Vermi gufuholu við fasta, 70 kg/s vinnslu úr suðusvæði.

11.2 Skoðun prystings og vermis fyrir fasta vinnslu úr djúpum holum

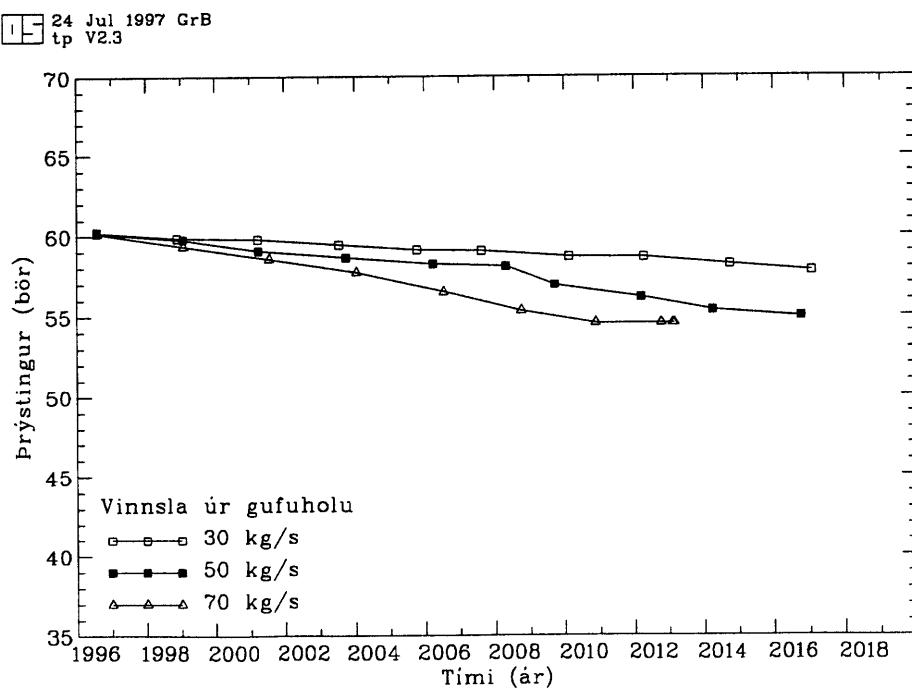
Seinni liðurinn í skoðun vinnsluspána felst í teiknum vermis og prystings fyrir fasta vinnslu úr djúpu holunum en breytilega úr gufuholunni.

Myndir 23-26 sýna spá um prysting á 1000 m dýpi næstu 20 árin fyrir mismikla, fasta vinnslu úr djúpum holum. Þar sést vel að prystijöfnun upp á u.b.b. 8 bör verður ef vinnslan er dregin niður í 100 kg/s, prystingur er stöðugur við 200 kg/s vinnslu, fellur um $\frac{1}{2}$ bar á ári við 270 kg/s vinnslu og um 1 bar á ári við 340 kg/s vinnsluna. Í öllum myndunum

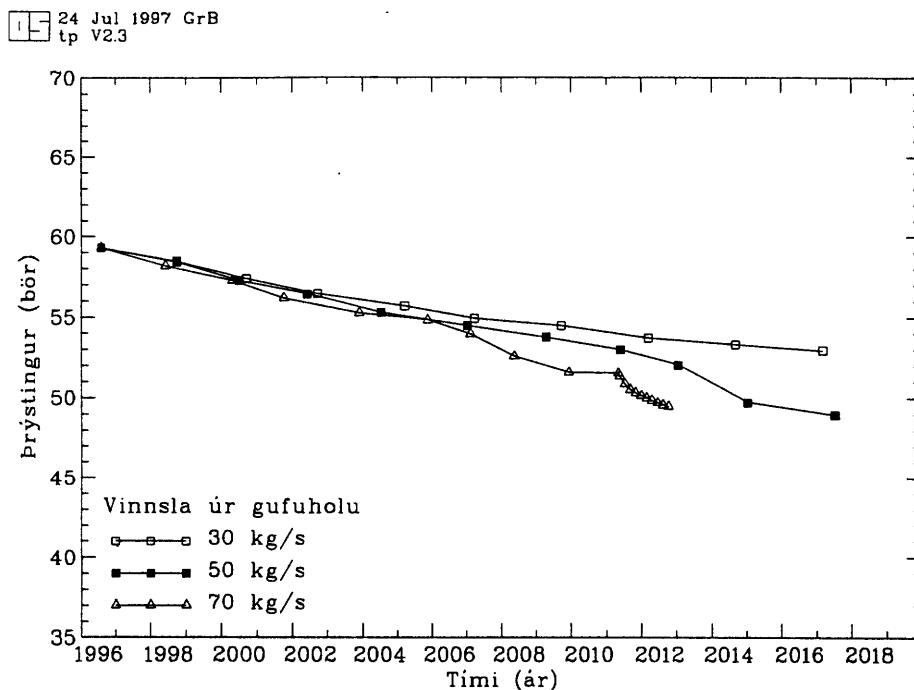
skilar 30 kg/s gufuvinnslan hæstum djúþrýstingi, og getur munurinn milli 30 og 70 kg/s vinnslunnar numið mest um 5 börum í lok spátímans. Líklega kennir hér breytilegs suðuástands milli tilvika. Þannig gæti 70 kg/s vinnslan dregið vatn upp í suðusvæðið og soðið það yfir í gufu vegna lágs þrýstings innan suðusvæðisins.



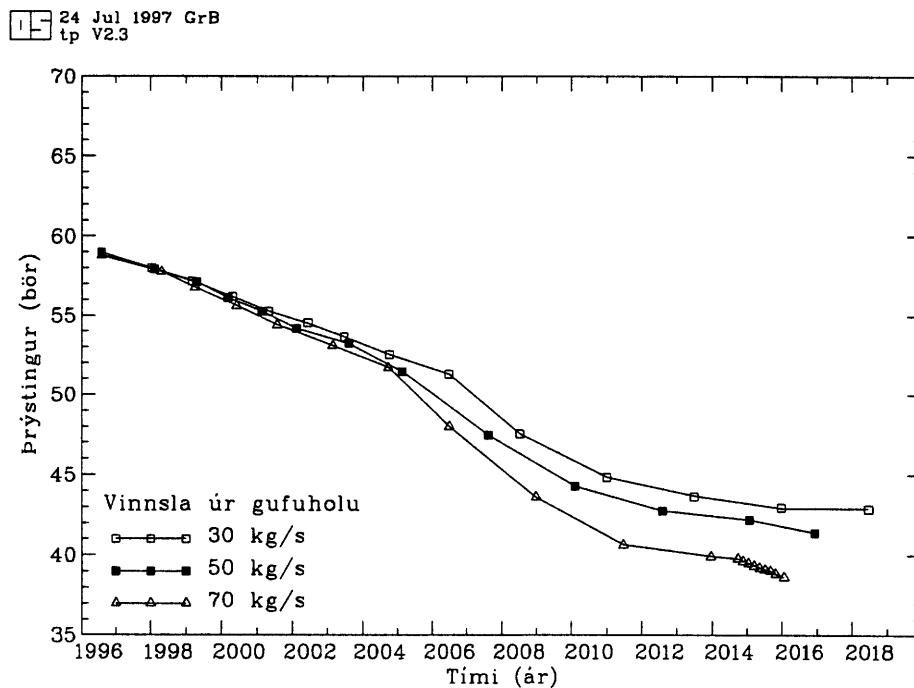
Mynd 23: Prýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



Mynd 24: Prýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



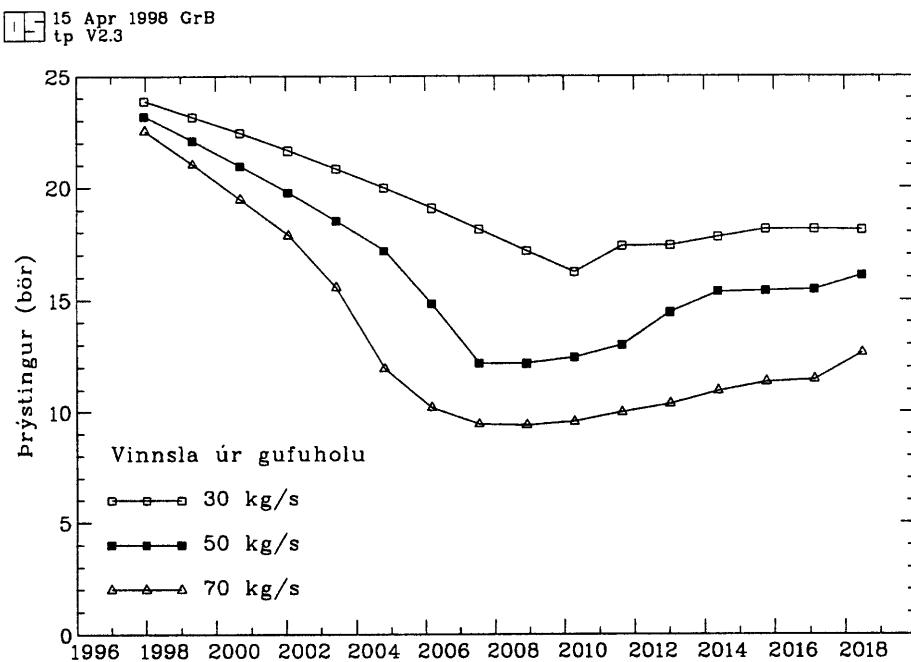
Mynd 25: Prýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



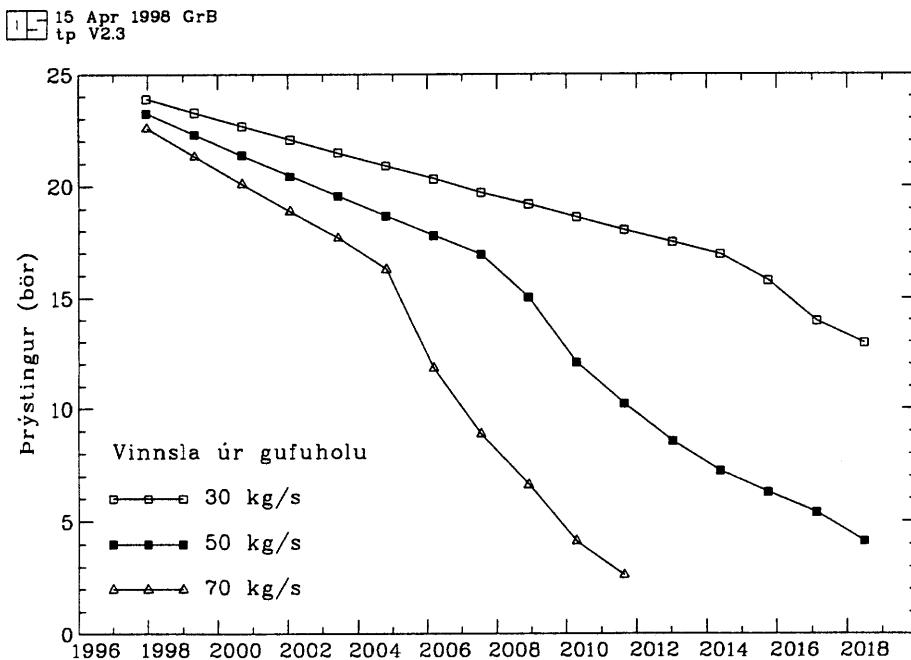
Mynd 26: Prýstingur á 1000 m dýpi við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum.

Myndir 27-30 sýna spá um þrýsting gufuholu með æð á 390 m dýpi (hola 10) næstu 20 árin við mismikla, fasta vinnslu úr djúpum holum. Þar kemur fram áberandi þrýstijöfnun við 100 kg/s djúpvinnsluna, og að hraði niðurdráttar minnkar eftir því sem meira er unnið úr djúpa kerfinu. Stafar það eins og áður segir af síauknu rúmmáli suðusvæðisins eftir því sem niðurdráttur verður meiri í Svartsengi. Brot sem koma í þrýstiferlana á myndum 28-30 árabilið 2004-2014 stafa af þurrkun poranna innan suðusvæðisins. Það ber að taka sem alvarlega viðvörun um að vökvaforði þess sé langt genginn, og að orku-

ver sem byggja á þessari vinnslu verði að leita sér annarra uppsprettna að þessum tíma liðnum.

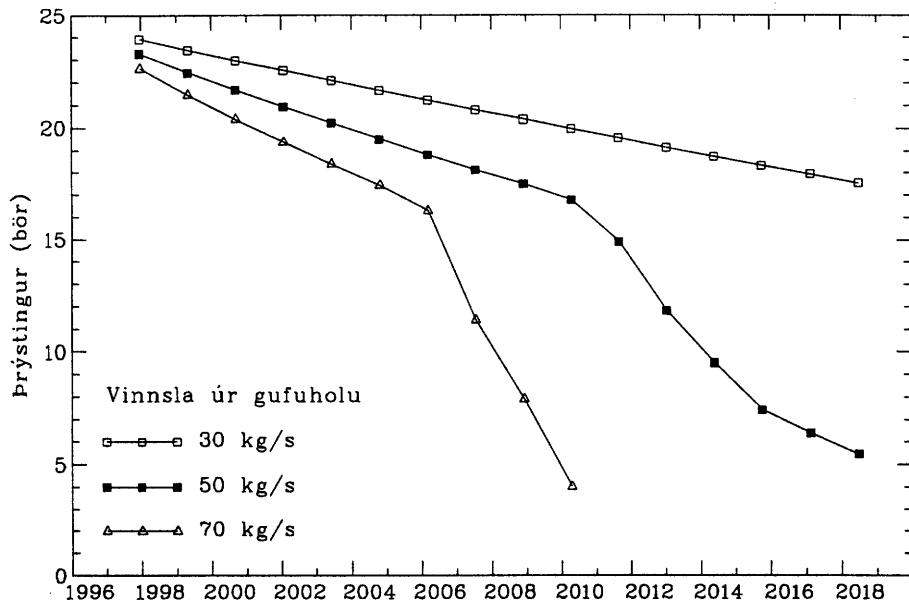


Mynd 27: Prýstingur gufuholu við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



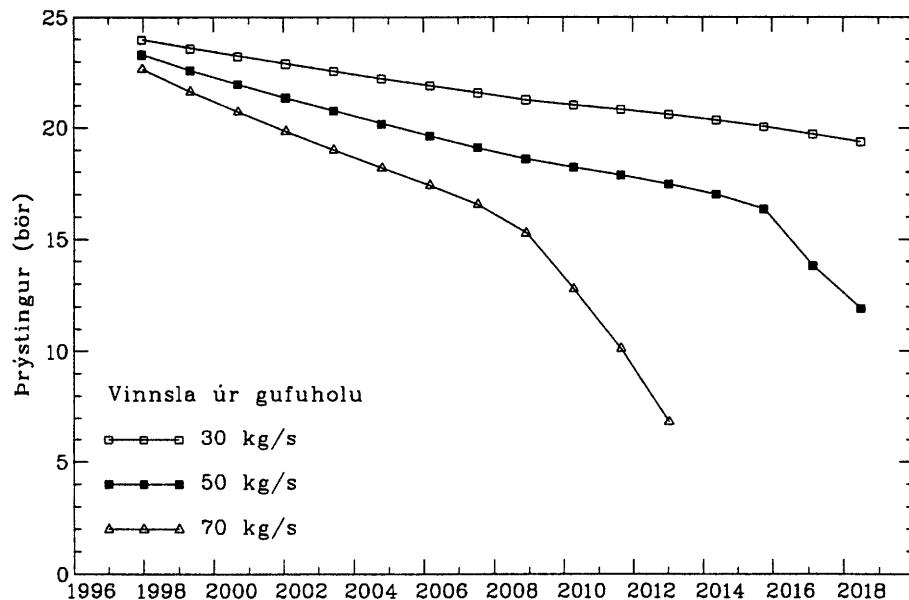
Mynd 28: Prýstingur gufuholu við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum.

15 Apr 1998 GrB
tp V2.3



Mynd 29: Prýstingur gufuholu við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum.

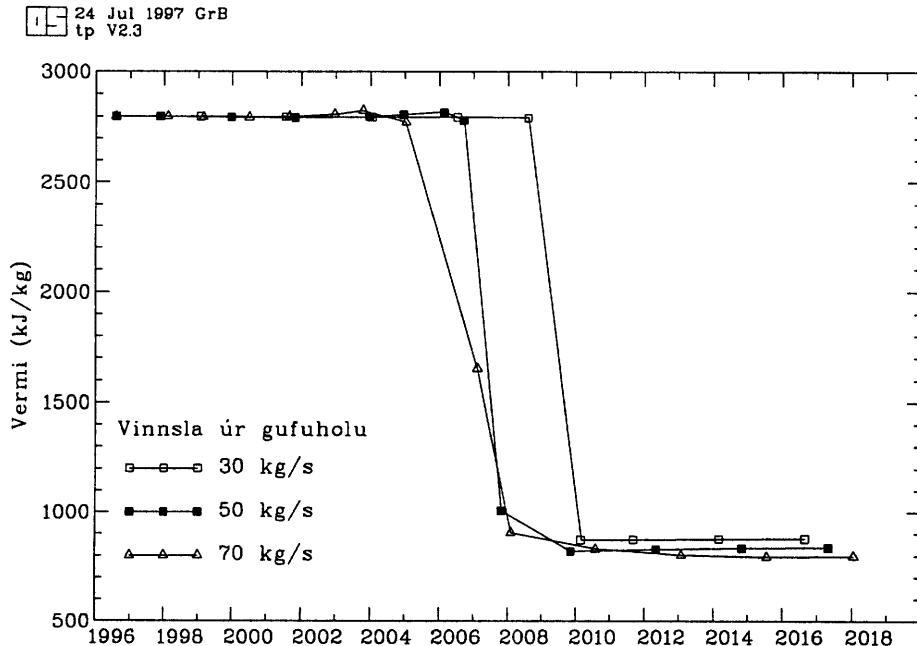
15 Apr 1998 GrB
tp V2.3



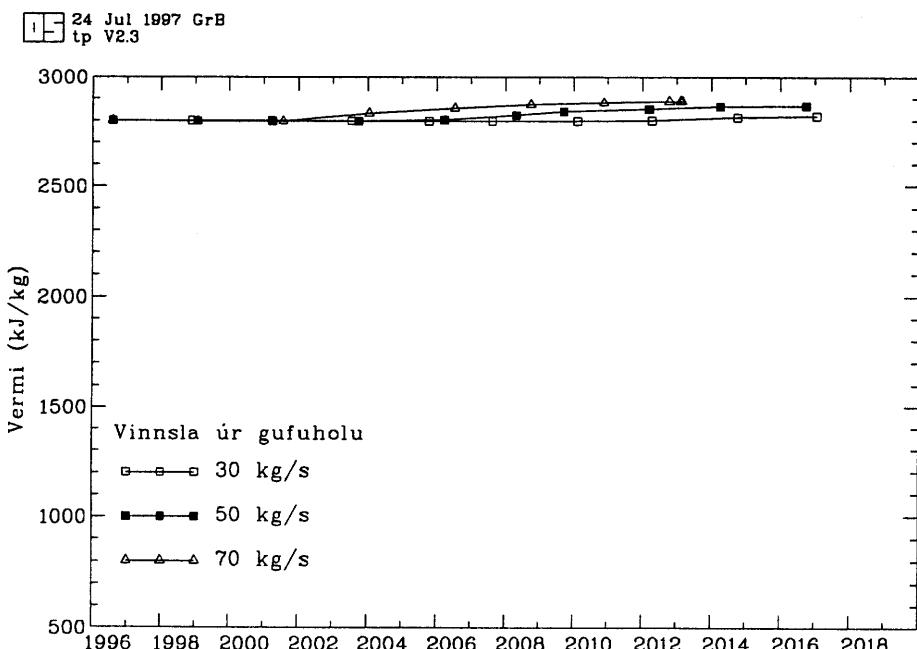
Mynd 30: Prýstingur gufuholu við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum.

Í lokin sýna myndir 31-34 spá um vermi gufuholu sem tekur vökva sinn úr æð á 390 m dýpi (hola 10). Skoðað er fyrir fasta vinnslu úr djúpu holunum. Eins og áður kom fram eyðir hækkun djúþrýstings í Svartsengi suðunni í suðusvæðinu og mun hola 10 breytast í blauta holu árabilið 2006 til 2010 (mynd 31). Gufuholan mun hins vegar skila áfram mettaðri og síðar meir lítillega yfirhitaðri gufu ef 200 kg/s eru tekin úr djúpa hlutanum (mynd 32). Hér veldur að suðuborðið milli djúpa hlutans og suðusvæðisins helst nánast kyrrt. Það veldur því að suðusvæðið byrjar að þórra upp ofan frá og veldur það yfirhituninni. Ef 270 kg/s eru tekin úr djúpa kerfinu, verður þessi yfirhitun ekki eins áberandi. Hins vegar gengur 70 kg/s gufuvinnsla fram af suðusvæðinu upp úr árinu 2010 og má þá

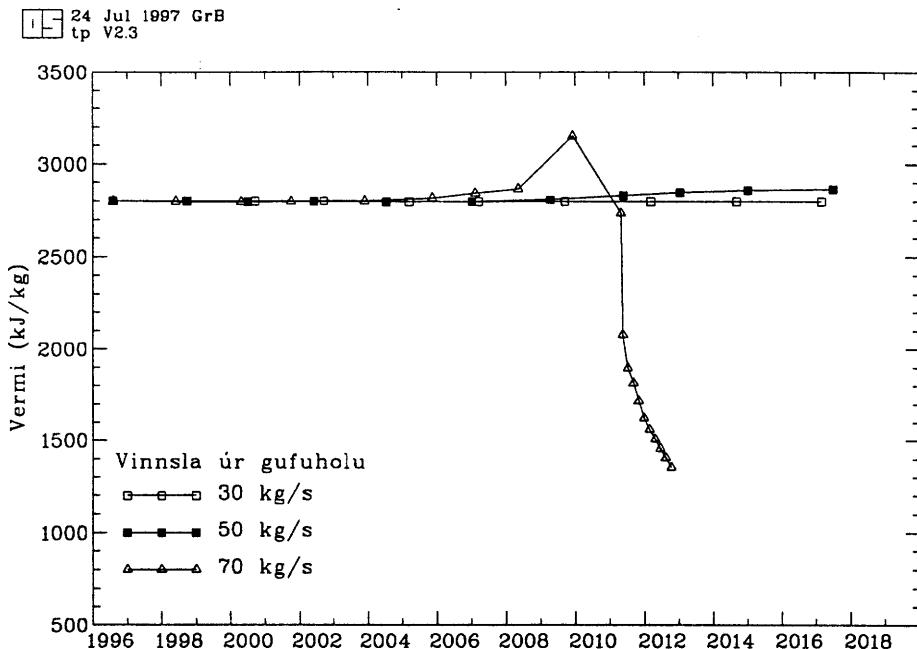
búast við hraðri afminnkun holunnar (mynd 33). Sama er uppi á teningnum ef 340 kg/s eru tekin djúpt, en afldölun gufuholunnar mun seinka til ársins 2012 við 70 kg/s vinnslu (mynd 34).



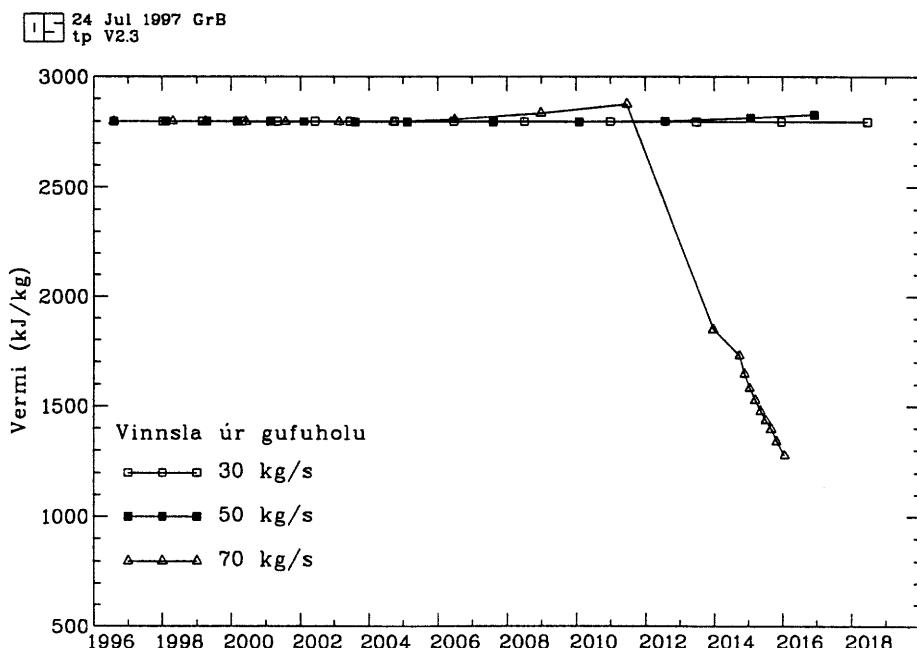
Mynd 31: Vermi gufuholu við fasta, 100 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



Mynd 32: Vermi gufuholu við fasta, 200 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



Mynd 33: Vermi gufuholu við fasta, 270 kg/s vinnslu úr djúpum holum.



Mynd 34: Vermi gufuholu við fasta, 340 kg/s vinnslu úr djúpum holum.

11.3 Kostir og gallar vinnslutilfellanna 12

Hér á undan hefur ástandi suðusvæðisins á 20 ára spátíma verið lýst og skýrðar helstu staðreyndir um hvert vinnslutilvik. Í töflum 3 og 4 er búið að draga þessi atriði saman í eins konar heildarástand djúpa kerfisins annars vegar, og suðusvæðisins hins vegar.

Tafla 3: Helstu þættirnir í ástandi dýpri hluta Svartsengis að loknum 20 ára spátíma.

Vinnsla á 1000 m dýpi (kg/s)	Ástandslýsing
100	Mikil þrýstijöfnun og allt í himnalagi ef ekki kólnar
200	Djúpþrýstingur helst í jafnvægi
270	Samfelld þrýstilækkun um ca. $\frac{1}{2}$ bar á ári. Suða langt niður í leiðara.
340	Samfelld þrýstilækkun um ca. 1 bar á ári. Suða myndar neðra suðusvæði.

Tafla 4: Helstu þættirnir í ástandi suðusvæðisins að loknum 20 ára spátíma.

Til-felli	390 m æð (kg/s)	1000 m æð (kg/s)	Ástandslýsing
1	30	100	Hola 10 blotnar 2010, mikil þrýstijöfnun
2	30	200	Hola 10 helst þurr, aflminnkun eftir árið 2014
3	30	270	Hola 10 dugir vel allan spátímann
4	30	340	Hola 10 dugir vel allan spátímann
5	50	100	Hola 10 blotnar 2008, aflminnkun eftir árið 2005
6	50	200	Gufa yfirhitnar e. 2006, aflminnkun eftir 2007
7	50	270	Gufa yfirhitnar e. 2008, aflminnkun eftir 2010
8	50	340	Hola 10 dugir vel til 2016, þá aflminnkun
9	70	100	Hola 10 blotnar 2007, aflminnkun eftir árið 2003
10	70	200	Gufa yfirhitnar e. 2002, aflminnkun eftir árið 2005
11	70	270	Gufa yfirh. 2008 og blotnar 2011, aflminnkun e. 2006
12	70	340	Gufa yfirh. 2010 og blotnar 2012, aflminnkun e. 2009

Spurningin er nú hvers konar vinnslutilvik teljast ásættanleg fyrir framtíðarreksturinn í Svartsengi. Er t.d. í lagi að fella djúpþrýsting svo mikið að suða í blautum holum fari niður í 800-900 m dýpi? Það þýðir að suðusvæðið getur skilað orkuverinu mikilli gufu og niðurdæling verður í lágmarki en þess meira streymir þá inn í Bláa lónið. Eða er kannski betra að hefja umfangsmikla niðurdælingu sem haldi djúpþrýstingnum stöðugum? Það leiðir til aflminnkunar á suðusvæðinu árabilið 2002-2014 eftir því hve mikil gufa er tekin.

12. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Helstu niðurstöður við smíði og notkun nýs reiknilíkans af suðusvæðinu í Svartsengi eru eftirtaldar:

1. Búið er að setja upp reiknilíkan sem skilar nákvæmum útreikningum um lóðréttar ástandsbreytingar í suðusvæði á dýptarbilinu 165-750 m, en mjög grófreiknuðu rennsli, þrýstingi og hita í dýpri hluta jarðhitakerfisins í Svartsengi.
2. Líkanið hermir vel eftirtaldar mældar stærðir í vinnslusögu Svartsengis: 1) Þrýsting á 1000 m dýpi. 2) Breytingu á vermi holu 10 vorið 1984. 3) Yfirþrýsting á rúmlega 200 m dýpi í suðusvæði þegar holur 14 og 15 eru boraðar. 4) Upphafshita og þrýsting holna 2,3 og 15 eins og hann er áætlaður í ársbyrjun 1976. 5) Toppþrýsting holu 10. 6) Vaxandi gufuútsteymi upp úr suðusvæðinu með tímanum. Líkanið náði ekki að herma þrýstibreytingar sem mældust við lokun holu 10 haustið 1996.
3. Töluverð breyting varð á innra ástandi suðusvæðisins þegar dró úr djúpvinnslu í Svartsengi milli áranna 1990 og 1991. Líkanið reiknar þá aðstreymi inn í kerfið meira en vinnsluna upp úr blautu holunum. Í stað þess að þrýstingur djúpa hlutans hækkaði, tók suðusvæðið við þessum umframmassa og kom honum í geymslu með því að þetta gufu í porum. Sé þessi ályktun rétt, er þar með fallin kenningin um að útbreiddari suða eftir 1990 skýri þrýstijafnvægið sem þá komst á.
4. Skoðuð voru 12 tilfelli framtíðarvinnslu úr annars vegar djúpum og blautum holum, en hins vegar úr grunnum og þurrum holum innan suðusvæðisins. Svo virðist sem einna verst ástand verði innan suðusvæðis ef annað tveggja gerist: 1) að djúpþrýstingur hækki í Svartsengiskerfinu eða 2) að vinnslan á suðusvæðinu fari upp undir 70 kg/s. Að því gefnu að vinnslan úr djúpu holunum haldist á bilinu 200-300 kg/s, virðist sem suðusvæðið geti skilað 30-50 kg/s af gufu næstu 20 árin.
5. Trúlega næst hámarksframleiðsla á gufu út úr suðusvæðinu með því að tekin séu úr því 30-50 kg/s að jafnaði og að vinnslan úr dýpri hlutanum leiði til áframhaldandi, hægvaxandi niðurdráttar. Skýring þessa er að þá bætist smátt og smátt neðan á suðusvæðið, það stækkar að rúmmáli og viðheldur þannig afkastagetu sinni.
6. Hugsanlega má „búa til“ neðra og stærra suðusvæði í Svartsengi með því að fella djúpþrýstinginn um 15-20 bör til viðbótar við það sem nú mælist.

Í heild sinni má því segja að hið einfalda reiknilíkan, sem hér er kynnt, hafi náð því takmarki sínu að auka skilning á innra ástandi suðusvæðisins í Svartsengi. Þá undirstrikar líkanið mikilvægi þeirrar jafnvægislistar sem verður að beita við ákvörðun á heppilegu hlutfalli djúpvinnslu og gufuvinnslu í framtíðarrekstri Svartsengiskerfisins.

Enn og aftur er varað við oftrú á niðurstöður reiknilíkansins við töku stórra ákvarðana um framtíð virkjana í Svartsengi, þar sem stærsti hlutinn af rúmmáli jarðhitakerfisins er nálgæður með einungis fimm stórum líkanblokkum. Þá eru engin lárétt skipti á massa og orku leyfð milli suðusvæðisins og umhverfis þess. Eins er ekki tekið tillit til áhrifa seltu og gass á ástand vatns og gufu. Þessir þættir geta haft mikil áhrif, t.d. þegar gufuhluti suðu-

svæðisins er kominn niður fyrir 10 %. Þá er vatnið í porunum komið með margfalda seltu sjávar og gerist hinn mesti þækill. Eins má nefna að reiknilíkanið nýtir sér ekki þekktar stærðir úr vinnslusögu svæðisins eins og t.d. losun CO₂ gass, landhæðar- og þyngdarbreytingar eða endurheimtu ferilefna.

13. HEIMILDIR

Grímur Björnsson og Benedikt Steingrímsson, 1991: *Hiti og prýstingur í jarðhitakerfinu í Svartsengi. Upphafsástand og breytingar vegna vinnslu.* Orkustofnun, OS-91016/JHD-04, 69 s.

Grímur Björnsson, Benedikt Steingrímsson, Guðlaugur Hermannsson, Hjálmar Eysteinson og Hjalti Franzson, 1996: *Borholumælingar í Svartsengi og í Eldvörpum árið 1995.* Orkustofnun, OS-96004/JHD-01 B, 47 s.

Grímur Björnsson og Svanur Pálsson, 1991: *Poruhluti steins af 700 m dýpi í holu SG-6, Svartsengi.* Orkustofnun, greinargerð GrB/SvP-91/04.

Grímur Björnsson, 1992: *Hugmyndalíkan að gufupúða í Svartsengi.* Orkustofnun, greinargerð GrB-92/03.

Grímur Björnsson, Guðmundur S. Böðvarsson, Helga Tulinius, Ómar Sigurðsson og Sigvaldi Thordarson, 1997: *Áhrif nýborana á Suðurhlíðar Kröflu. Áfangaskýrsla um þrívitt reiknilíkan.* Orkustofnun, OS-97027, 54 s.

Guðmundur S. Böðvarsson, Sveinbjörn Björnsson, Árni Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Ómar Sigurðsson, Valgarður Stefánsson, og Benedikt Steingrímsson, 1990: *The Nesjavellir Geothermal Field, Iceland : Part 1. Field Characteristics and Development of a Three-dimensional Numerical Model.* Geotherm. Sci. and Tech., 2(3), pp. 189-228.

Hjalti Franzson, 1990: *Svartsengi. Jarðfræðilíkan af háhitakerfi og umhverfi þess.* Orkustofnun, OS-90050/JHD-08, 41 s.

Hjálmar Eysteinsson, 1993: *Hæðar- og þyngdarmælingar á utanverðum Reykjanesskaga 1992.* Orkustofnun, OS-93029/JHD-08, 53 s.

Jón Örn Bjarnason, 1988: *Svartsengi. Efnaeftirlit 1980-1987.* Orkustofnun, OS-88001/JHD-01, 98 s.

Pruess Karsten, 1991: *TOUGH2 - A General-Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow.* Report LBL-29400, Lawrence Berkeley Laboratory, California, USA, 102 s.

Sigurður Benediktsson, Ásgrímur Guðmundsson og Grímur Björnsson, 1993a: *Svartsengi. Borun vinnsluholu HSH-14 í gufupúðann.* Lokaskýrsla. OS-93012/JHD-07 B, 77 s.

Sigurður Benediktsson, Ásgrímur Guðmundsson og Grímur Björnsson, 1993b: *Svartsengi. Borun könnunarholu HSH-15 í gufupúðann. Áfangaskýrsla.* Orkustofnun, OS-93001/JHD-01 B, 51 s.

Verkfræðistofan Vatnaskil hf, 1992: *Svartsengi. Líkanreikningar á áhrifum vinnslu úr gufupúða.* Orkustofnun, OS-92038/JHD-19 B, 16 s.

Verkfræðistofan Vatnaskil sf, 1996: *Svartsengi. Vinnslueftirlit júlí 1995 - júlí 1996.* Orkustofnun, OS-96041/JHD-26 B, 46 s.

Verkfræðistofan Vatnaskil sf, 1997: *Svartsengi. Líkanreikningar af jarðhitakerfi vegna framtíðarvinnslu.* Orkustofnun, OS-97010. ROS, 20 s.

VIÐAUKI A: Inntaksskrá TOUGH2 sem hermir upphafsástand suðusvæðisins

```
Natural State módel fyrir Svartsengi, besta gerð, sett í skýrslu í maí 1997
ROCKS
sudus    2650.     .10      1.E-13   1.E-17   2.E-14  2.00    1000.
skifa    2650.     .10      1.E-13   1.E-17   4.E-14  2.00    1000.
þakbg    2650.     .10      1.0E-13  1.E-17   3.E-16  2.00    1000.
kragi    2650.     .10      1.6E-14  1.E-18   1.E-18  2.00    1000.

START
PARAM....1....+....2....+....2....+....2
      25000    5000000000000000000000300002
      6.50e+12  -1.        2.627e+11 CC- 1       9.82
      900000.

          84.e5           240.
RPCAP....+.....+.....+.....+.....+
      1       .40      0.05     1.00     1.00
      1       1.

ELEME
AA-01    9      1 þakbg  1.000E+07
AA-11    83     1 sudus  1.000E+07
BB-01    24     1 sudus  1.000E+07
Bb-01    24     1 skifa  3.000E+07
CC-01      sudus  1.00E+09
CC-02      kragi  3.00E+09
CC-03      kragi  12.00E+09
CC-04      kragi  48.00E+09
CC-05      kragi   -1.0

CONNE
AA-01AA-02  92     1     1     3      2.5      2.5  2.000E+06 .1000E+01
AA-94BB-01          3      2.5      2.5  2.000E+06 .1000E+01
BB-01BB-02  23     1     1     3      2.5      2.5  2.000E+06 .1000E+01
BB-25CC-01          3      2.5      2.5  2.000E+06 .1000E+01
Bb-25CC-01          3      2.5      2.5  8.000E+06 .1000E+01
Bb-01Bb-02  23     1     1     3      2.5      2.5  8.000E+06 .1000E+01
BB-01Bb-01  23     1     1     2     800.     400.  2.500E+04  0.
CC-01CC-02          1     800.     400.  2.500E+06  0.
CC-02CC-03          1     400.     800.  5.000E+06  0.
CC-03CC-04          1     800.    1600. 10.00E+06  0.
CC-04CC-05          1    1600.   3200. 20.00E+06  0.

GENER....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6
AA-01PRO 1           DELV    1.5E-10   14.e+5
AA-01HEA 1           HEAT    -50000.
AA-02HEA 2     8     1           HEAT    -5000.
AA-10HEA 1     9     1           HEAT    -4000.
AA-20HEA 1     9     1           HEAT    -3000.
AA-30HEA 1     9     1           HEAT    -2000.

ENDCY
```


VIÐAUKI B: Inntaksskrá TOUGH2 sem hermir vinnslusögu Svartsengis

```
Vinnslulíkan fyrir Svartsengi, 25 ár, 1 mánaða skref
ROCKS
sudus    2650.     .10      1.E-13   1.E-17   2.E-14  2.00   1000.
skifa    2650.     .10      1.E-13   1.E-17   4.E-14  2.00   1000.
þakbg    2650.     .10      1.0E-13  1.E-17   3.E-16  2.00   1000.
kragi    2650.     .10      1.6E-14  1.E-18   1.E-18  2.00   1000.

START
PARAM....1....+....2....+....2....+....2
    2 500      25 0000000000000000300002
        6.50e+09 -1.          2.627e+06 CC- 1       9.82
    900000.

                84.e5           240.
RPCAP....+.....+.....+.....+.....+
    1         .40      0.05     1.00     1.00
    1         1.

ELEME
AA-01    9      1 þakbg 1.000E+07
AA-11    83     1 sudus 1.000E+07
BB-01    24     1 sudus 1.000E+07
Bb-01    24     1 skifa 3.000E+07
CC-01            sudus 1.00E+09
CC-02            kragi 3.00E+09
CC-03            kragi 12.00E+09
CC-04            kragi 48.00E+09
CC-05            kragi     -1.0

CONNE
AA-01AA-02    92     1     1     3      2.5      2.5 2.000E+06 .1000E+01
AA-94BB-01          3      2.5      2.5 2.000E+06 .1000E+01
BB-01BB-02    23     1     1     3      2.5      2.5 2.000E+06 .1000E+01
BB-25CC-01          3      2.5      230. 2.000E+06 .1000E+01
Bb-25CC-01          3      2.5      230. 8.000E+06 .1000E+01
Bb-01Bb-02    23     1     1     3      2.5      2.5 8.000E+06 .1000E+01
BB-01Bb-01    23     1     1     2      800.     400. 2.500E+04 0.
CC-01CC-02          1      800.     400. 2.500E+06 0.
CC-02CC-03          1      400.     800. 5.000E+06 0.
CC-03CC-04          1      800.     1600. 10.00E+06 0.
CC-04CC-05          1      1600.    3200. 20.00E+06 0.

GENER....1....+....2....+....3....+....4....+....5....+....6
AA-01PRO 1                      DELV    1.5E-10   14.e+5
AA-01HEA 1                      HEAT    -50000.
AA-02HEA 2     8     1          HEAT    -5000.
AA-10HEA 1     9     1          HEAT    -4000.
AA-20HEA 1     9     1          HEAT    -3000.
AA-30HEA 1     9     1          HEAT    -2000.
```

CC- 1ALT 1	42	MASS	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
.0000000E+00	.3161880E+08	.3162240E+08	.6315480E+08		
.6315840E+08	.9469080E+08	.9469440E+08	.1262268E+09		
.1262304E+09	.1578492E+09	.1578528E+09	.1893852E+09		
.1893888E+09	.2209212E+09	.2209248E+09	.2524572E+09		
.2524608E+09	.2840796E+09	.2840832E+09	.3156156E+09		
.3156192E+09	.3471516E+09	.3471552E+09	.3786876E+09		
.3786912E+09	.4103100E+09	.4103136E+09	.4418460E+09		
.4418496E+09	.4733820E+09	.4733856E+09	.5049180E+09		
.5049216E+09	.5365404E+09	.5365440E+09	.5680764E+09		
.5680800E+09	.5996124E+09	.5996160E+09	.6311484E+09		
.6311520E+09	.6500000E+09				
-.2640000E+02	-.2640000E+02	-.3390000E+02	-.3390000E+02		
-.5170000E+02	-.5170000E+02	-.1012000E+03	-.1012000E+03		
-.1360000E+03	-.1360000E+03	-.2224130E+03	-.2224130E+03		
-.2247150E+03	-.2247150E+03	-.2224020E+03	-.2224020E+03		
-.2373150E+03	-.2373150E+03	-.2371850E+03	-.2371850E+03		
-.2574330E+03	-.2574330E+03	-.2494140E+03	-.2494140E+03		
-.2612560E+03	-.2612560E+03	-.2823570E+03	-.2823570E+03		
-.2686520E+03	-.2686520E+03	-.2430260E+03	-.2430260E+03		
-.2062590E+03	-.2062590E+03	-.2042130E+03	-.2042130E+03		
-.1990160E+03	-.1990160E+03	-.2314660E+03	-.2314660E+03		
-.2147000E+03	-.2147000E+03				
AA-45H10 1	42	MASS	.0000E+00	.0000E+00	.0000E+00
.0000000E+00	.0000000E+00	.3162240E+08	.3162240E+08		
.6315840E+08	.6315840E+08	.9469440E+08	.9469440E+08		
.1262304E+09	.1578492E+09	.1578528E+09	.1893852E+09		
.1893888E+09	.2209212E+09	.2209248E+09	.2524572E+09		
.2524608E+09	.2840796E+09	.2840832E+09	.3156156E+09		
.3156192E+09	.3471516E+09	.3471552E+09	.3786876E+09		
.3786912E+09	.4103100E+09	.4103136E+09	.4418460E+09		
.4418496E+09	.4733820E+09	.4733856E+09	.5049180E+09		
.5049216E+09	.5365404E+09	.5365440E+09	.5680764E+09		
.5680800E+09	.5996124E+09	.5996160E+09	.6311484E+09		
.6311520E+09	.6500000E+09				
.0000000E+00	.0000000E+00	.0000000E+00	.0000000E+00		
.0000000E+00	.0000000E+00	.0000000E+00	.0000000E+00		
.0000000E+00	.0000000E+00	-.1478734E+02	-.1478734E+02		
-.1568501E+02	-.1568501E+02	-.1859780E+02	-.1859780E+02		
-.1248471E+02	-.1248471E+02	-.8614527E+01	-.8614527E+01		
-.3867288E+01	-.3867288E+01	-.4285895E+01	-.4285895E+01		
-.4744431E+01	-.4744431E+01	-.4642540E+01	-.4642540E+01		
-.6247742E+01	-.6247742E+01	-.1557436E+02	-.1557436E+02		
-.2364071E+02	-.2364071E+02	-.2468691E+02	-.2468691E+02		
-.2608359E+02	-.2608359E+02	-.2763412E+02	-.2763412E+02		
-.2700000E+02	-.2700000E+02				
INCON -- hér er einfaldlega skotið inn skránni SAVE sem verður til í viðauka A					
AA- 1		.10000000E+00			
		.1440527325322E+07	.4316195169657E+00		
:					
:					
CC- 5		.10000000E+00			
		.840000000000000E+07	.240000000000000E+03		
ENDCY					