

Þrívítt reiknilíkan af Hengilssvæði: staða og
horfur í júní 2002

**Grímur Björnsson,
Arnar Hjartarson,
Benedikt Steingrímsson**

Greinargerð GrB-ArH-BS-2002-02

ÞRÍVÍTT REIKNILÍKAN AF HENGILSSVÆÐI STAÐA OG HORFUR Í JÚNÍ 2002

Ágrip

Á undanförunum mánuðum hefur Rannsóknasvið Orkustofnunar unnið að gerð viðamikils reiknilíkans af Hengilssvæðinu fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. Verkið hófst haustið 2001 með hrafnaþingi um jarðhitann í Hengli og endurskoðun hugmyndalíkans fyrir svæðið. Nesjavellir eru hluti af Hengilssvæðinu og byggir Hengilslíkanið á reiknilíkani Nesjavalla sem þróað var á árunum 1984-2000. Innri uppbygging er þó nokkuð breytt auk þess sem líkanið nær yfir mun stærra svæði en áður. Segja má að hér sé á ferðinni eitt allsherjarlíkan fyrir jarðhitasvæði Orkuveitunnar á Hengilssvæðinu, þ.e. Nesjavelli norðan Hengils, Kolviðarhól og Hellisheiði sunnan Hengils og Ölkelduháls.

Þróun reiknilíkanans er nú á nokkrum tímamótum. Uppbyggingu líkansins er lokið í megin atriðum. Þá er kvörðun þess einnig langt komin. Á Nesjavöllum er gagnamagnið gífurlegt, en mun minna á hinum svæðunum. Á næstu mánuðum verður leitað leiða til að bæta samræmi mældra og reiknaðra stærða auk þess sem gögn úr nýjum holum sunnan Hengils verða sett inn í líkanið.

Líkanið hefur verið notað til að meta annars vegar áhrif aukinnar vinnslu á Nesjavöllum á jarðhitakerfið þar og hins vegar til að kanna hvernig jarðhitakerfið á Hellisheiði bregst við vinnslu. Á Nesjavöllum byggir líkanið á ytarlegum jarðhitagögnum um svæðið og viðbrögðum þess við vinnslu síðustu 15-20 ára. Líkanið hermir gögnin þokkalega og verður því að telja vinnsluspárnar áreiðanlegar, en niðurstöður reiknilíkansins eru þær að enn sé hægt að auka gufuvinnslu á Nesjavöllum án stórtækra breytinga á ástandi jarðhitasvæðisins í framtíðinni. Áframhaldandi rekstur 90 MW virkjunar veldur hægfara lækkun á þrýstingi í jarðhitakerfinu og í vermi og rennsli vinnsluholna. Stækkun virkjunarinnar í 120 MW breytir þar litlu. Stækkunin krefst borunar 2-3 holna strax í upphafi, en síðan er tíðni nýborana nánast sú sama samkvæmt reiknilíkaninu hvort heldur sem gufuvinnsla næstu 30 ára samsvarar 90 eða 120 MW raforkuframleiðslu. Segja má einnig að þetta sé í samræmi við reynsluna af rekstri svæðisins undanfarin ár, en aukin vinnsla vegna stækkunar virkjunarinnar og vinnsla úr nýjum borholum hefur t.d. ekki hert á þrýstiniðurdrætti í mæliholum eða haft veruleg áhrif á afl vinnsluholnanna. Samkvæmt reiknilíkaninu og reynslunni af rekstri svæðisins verður að bora nýjar holur vel innan þess svæðis þar sem jarðhitakerfið er hvað heitast, og tappa vökva úr æðum sem liggja ýmist tiltölulega grunnt eða mjög djúpt í jarðhitakerfinu.

Á Hellisheiði eru upplýsingar hins vegar enn takmarkaðar. Boranir hófust fyrir alvöru á síðasta ári og vinnsla úr fyrstu tveimur rannsóknarholunum hófst í vor. Viðbrögð svæðisins við vinnslu eru því enn lítt þekkt. Þær takmörkuðu upplýsingar sem fyrirliggja benda þó til þess að Hellisheiðarsvæðið standi undir allt að 40 MW rafmagnsframleiðslu sem fyrsta áfanga á því svæði. Áreiðanleiki þessarar spár mun hins vegar aukast þegar nýjar upplýsingar liggja fyrir um svæðið. Þar vega þyngst gögn um hita og þrýsting í rannsóknarholum boruðum á þessu og síðasta ári, gæfni holnanna og vermi og síðast en ekki síst gögn sem segja til um hvernig svæðið bregst við vinnslu úr þessum holum.

Inngangur

Eftirfarandi greinargerð er ætlað að lýsa stöðu í þróun viðamikils reiknilkans af Hengilssvæðinu og nær líkanið til jarðhitakerfa Orkuveitu Reykjavíkur á Nesjavöllum og á Hellisheiði. Til verksins var stofnað haustið 2001 í framhaldi af hrafnaþingi um Hengilssvæðið í Rafveituheimilinu við Elliðaár. Þegar liggja fyrir tvær greinargerðir um áfanga í verkefninu, þar sem uppbyggingu líkansins og lagskiptingu þess er einnig lýst (Arnar Hjartarson o.fl. 2001a og 2001b).

Sá árangur hefur náðst, frá því verkinu var síðast lýst skriflega, að nú er unnið við að herma nánast öll tiltæk gögn um upphafshita og þrýsting, vinnslu og vermi holna á Hengilssvæði, auk þrýstibreytinga með tímanum. Verkið er verulegt að umfangi og í raun með stærstu hermilkönnum sem gerð hafa verið fyrir jarðhitakerfi. Verkið hefur náð þeirri stöðu að sjálfleit líkanstærða (iterative parameter inversion) er möguleg í nýrri, samsíðareiknandi tölvu á Orkustofnun (26 örgjörva frá Linux Networx). Þessum áfanga var náð í mars síðastliðnum, og má segja að tölvan hafi varla kólnað síðan. Í fyrstu var megináherslan lögð á Hengilssvæðið í heild sinni, en síðustu vikur og mánuði færðist áherslan meira yfir á Nesjavallahluta líkansins. Þetta var gert að ósk Orkuveitunnar um að fýsileiki aukinnar gufuvinnslu á Nesjavöllum yrði skoðaður og skilgreindur í ljósi reiknilkansins. Það reiknilkan sem hér er lýst telst lyklatríði í slíku mati. Það hefur verið látið reikna bráðabirgðaspár um frammistöðu borsvæða á Nesjavöllum og Hellisheiði til næstu 30 ára, þó svo að líkanið að baki spánum sé enn ekki fullkvarðað.

Greinargerðin er þannig upp byggð að lýst er stuttlega núverandi stöðu í kvörðun líkansins, og þá með áherslu á samræmi mældra og reiknaðra stærða. Þar næst er fjallað um aðferðafræði við gerð vinnsluspáa. Þá er lýst 9 spátílfellum um framtíðarvinnslu og áætlaðan æðafjölda í nýjum borholum, með aðaláherslu á stækkun Nesjavalla. Loks er rætt um framhald verksins og eins almennar ályktanir sem má draga af líkansmiðinni um eðli og eiginleika jarðhitakerfa á Hengilssvæði.

Samræmi mældra og reiknaðra stærða

Í viðaukum A og B er sýnt samræmi milli reiknaðra og mældra stærða í borholum skv. líkaninu eins og það er í dag. Sökum þess að kvörðun reiknilkansins er ekki lokið, var valin sú leið að kynna til sögunnar tvö afbrigði líkansins, hér kölluð "þurra" og "blauta" líkanið. Ástæða nafngiftanna er að bæði líkönin herma vel þá massatöku sem átt hefur sér stað á Nesjavöllum, meðan blauta líkanið vanmetur meðalvermi borholna en það þurra ofmetur meðalvermið. Með þessu móti er *vonast* til þess að líkanspárnar hegði sér sem hugsanleg útmörk framtíðarástands á Nesjavöllum. Þó ber að sjálfsögðu að hafa þann fyrirvara að reiknilíkon af sjóðandi jarðhitakerfum eru ólínuleg og spár reiknaðar eftir að líkanið hefur verið fullkvarðað geta því, siglt út fyrir þau mörk sem blautu og þurru líkönin mynda.

Í núverandi ástandi er sjálfleitinn í reikniverki itough2 látin ákvarða 116 eiginleika líkansins, aðallega bergeiginleika en þar næst vinnslustuðla borholna sem blása. Leit að bestu líkaneiginleikum byggir á lágmarkun svonefnds "objectivity" falls, en því er lýst sem summu mældra mínus reiknaðra gilda í öðru veldi, deildu með staðalfrávikum hverrar mældrar stærðar. Sjálfvirk leit líkaneiginleika (inversion) byggir á reiknun hlutfleiðna, sem fást eftir 116 framkeyrslur upphafslíkans þar sem í hverri framkeyrslu er einungis búið að trufla 1 líkaneiginleika lítillaga. Það sett leifafalla sem af þessu leiðir er síðan grunnur að næsta setti líkaneiginleika og þannig koll af kalli. Framkvæma þarf óheyrilegan fjölda reikninga til að þessi aðferð virki og til þess eru brúkaðir samsíða reikningar á 26 örgjörva Linux klasa. Í þessum skifuðu orðum er rétt lokið samsetningu 24 örgjörva viðbótar við Linux vélina í Bandaríkjunum og líkur á að hún muni komin í gagnið á Íslandi innan fárra vikna. Þessi

viðbót fer langt með að fjórfalda reiknigetu vélarinnar og veitir ekki af því lengstu keyrslur vara núna í rúma 2 sólarhringa.

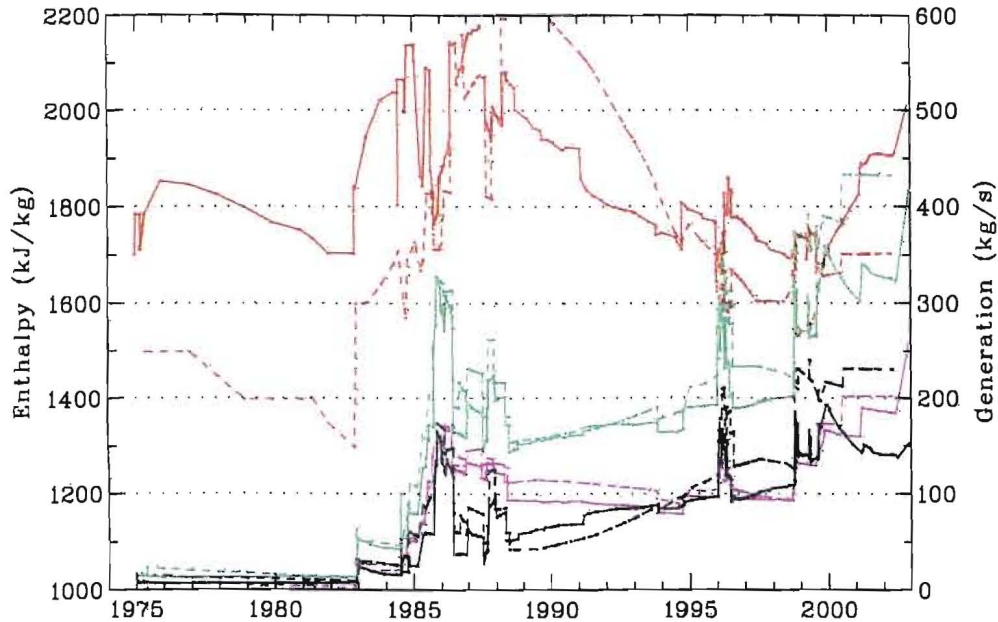
Upphitun og vinnslusaga eru keyrð saman, og eru reikningar látnir hefjast fyrir 10^{+16} sekúndum og upphitunin síðan talin í gangi þar til lengd tímaskrefa er komin í 1 til 10 þúsund ár. Þegar slíkt gerist stekkur reikniverkið í tímann núll, sem hér er 1. janúar 1975, skömmu áður en hola 5 á Nesjavöllum blæs fyrsta sinni. Að því búnu er vinnslusagan hermuð Mikill kostur er af þessu, því nú er tryggt að eitt og sama líkanið hermi bæði upphafsástand og viðbrögð svæðisins við vinnslu.

Viðauki A sýnir hvernig samræmi reiknast milli áætlaðs upphafshita- og þrýstings á Nesjavöllum, Hellisheiði, Kolviðarhóli, Ölkelduhálsi og í nokkrum holum í Ölfusinu og austur í Grímsnes. Mæld gildi eru sýnd með krossum, rauðar línur tákna reiknuð gildi í þurra líkaninu og grænar í því blauta. Sem gengur er samræmi oftast nokkuð gott, en eins má nefna að í sumum holum er blauta líkanið fremra því þurra og öfugt. Tímafrekt er að laga svona og lagt til að það býði stækkunar á tölvukosti. Eins á eftir að nostra betur við holur austan eldstöðvakerfisins í Hengli og taka inn í líkanið það mikla útstreymi varma sem á sér stað í laugum, hverum og ölkeldum víðs vegar á Hellisheiði. Þá er viðvarandi galli að reiknaður þrýstingur í vinnslusvæði Nesjavalla er of hár, meðan holur NJ-12, NJ-17, NJ-18 í jaðri borsvæðisins og KhG-1 við Kolviðarhól, eru allar nokkuð réttar í reiknuðum þrýstingi. Virðist sem sjálf háhitasvæðin séu undirþrýst á miklu dýpi ($>1,5$ km) og dragi þannig til sín vatn gegnum stórt rúmmál frá jöðrunum. Rík ástæða er að nostra við þennan þátt, því langtíma vinnsluþol borsvæða eykst ef hægt er að sýna fram á að massatökunni sé mætt með djúpu og heitu aðrennsli á miklu dýpi. Þá má vera að innan þrýstilægðar borsvæðisins á Nesjavöllum finnist staðbundnar þrýstihæðir, sem gætu þá verið afleiðing langvarandi uppstreymis frá mjög heitu eða jafnvel súperkrítísku jarðhitakerfi, t.d. nærri holu NJ-11.

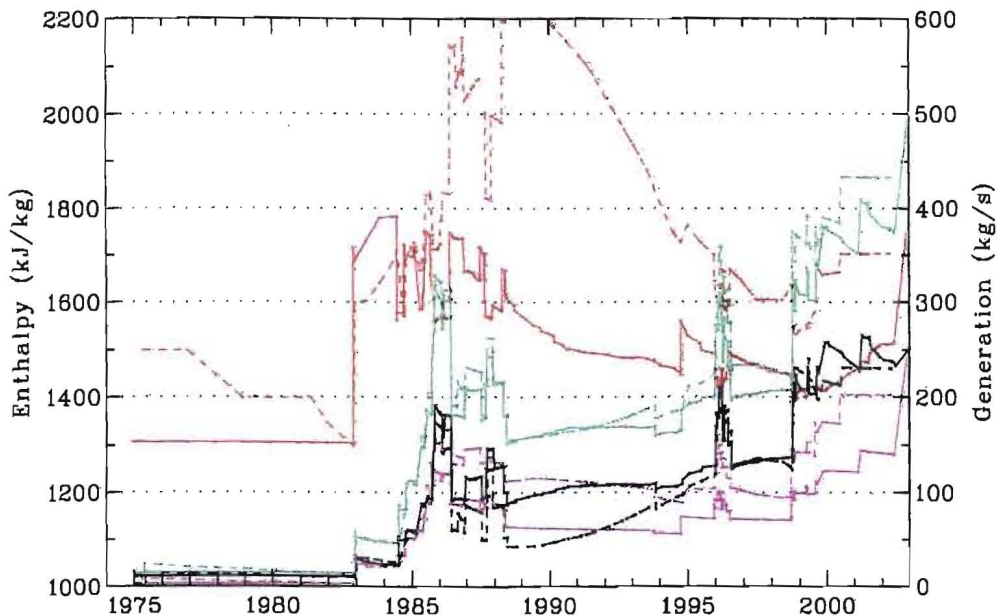
Viðauki B sýnir samræmi mældrar og reiknaðrar vinnslusögu fyrir blautu og þurru líkönin. Tveir flokkar mælinga eru sýndir, annars vegar reiknaðar/mældar þrýstibreytingar í holum sem ekki blása og hins vegar mælt/reiknað vermi og rennsli í vinnsluholum. Mikil vinna var að koma þessum gögnum í gott ástand og telst hún komin vel á veg en ekki lokið. Einkum hvað varðar þrýstibreytingar milli holna, en þau gögn eru grunnur að vel kvarðaðri lekt vinnslusvæðisins á Nesjavöllum.

Líkt og með upphafsástandið falla reiknuð gildi þurra líkansins betur að mældum gildum í sumum tilvikum, meðan það blauta hermir mæld gildi betur í öðrum tilvikum. Þó má segja að þurra líkanið sé að jafnaði fremra hinu blauta hvað vermi varðar, nema í holum 7, 10 og 14. Hér á eftir að nostra nokkuð við varmatöp sem verða af gufuúttreymi í Nesja- og Köldulaugagilum. Þau leiða til þess að heitur vökví frá uppstreymi í suðri mun kólna meira á leið sinni til norðurs í þurra líkaninu en nú er.

Á mynd 1 er búið að teikna heildarvinnslu, vinnslu háþrýstigufu, skiljuvatns og meðalvermi á Nesjavöllum í þurra líkaninu, meðan mynd 2 sýnir sömu stærðir í blauta líkaninu. Einnig eru sýndir ferlar “umbeðinna” gilda, þ.e. áætluð summa vinnslu og meðalvermis út frá vinnslusögunni. Skoðun myndanna sýnir að þurra líkanið nær að herma mun betur alla þætti samanlögðu vinnslunnar en það blauta. Eina undantekningin er að blauta líkanið hermir betur heildarvinnsluna eftir árið 2000. Eins má nefna að bæði líkönin ná að herma með ágætum samanlögðu heildarvinnsluna.



Mynd 1: Samræmi reiknaðra (heilar línur) og umbeðinna (slitnar línur) summu- og meðalgilda í vinnslusögu Nesjavalla, samkvæmt þurra líkaninu. Rautt táknar meðalvermi og fylgir vinstri ás myndar. Grænt er heildarvinnsla, fjólublátt er rennsli háþrýstigufu við 10 bara skiljuþrýsting og svart táknar rennsli skiljuvatns.



Mynd 2: Mældir og umbeðnir ferlar í vinnslusögu Nesjavalla, skv. blautu líkaninu. Sömu ferlaskýringar og á mynd 1. (ensk heiti ása skýra sig sjálf)

Spár um framtíðarástand Nesjavalla

Að fengnu því samræmi sem nú er milli mældra og reiknaðra gilda í blautu- og þurru geymsluförum, lá næst fyrir að spá fyrir um framtíðarafköst borholna á Nesjavöllum og á Hellisheiði. Var valin sú leið að skoða 4 spátílvik fyrir blautu og þurru Nesjavallalíkanin, alls 8 tilvik. Gengið er út frá að Nesjavallasvæðið þurfi að skila háþrýstigufu til samfelldrar framleiðslu 90 eða 120 MW raforku fram til ársins 2030. Í reikningunum er miðað við að aukning gufuvinnslunnar verði á árinu 2003. Þá er gert ráð fyrir að æðar í framtíðarholum

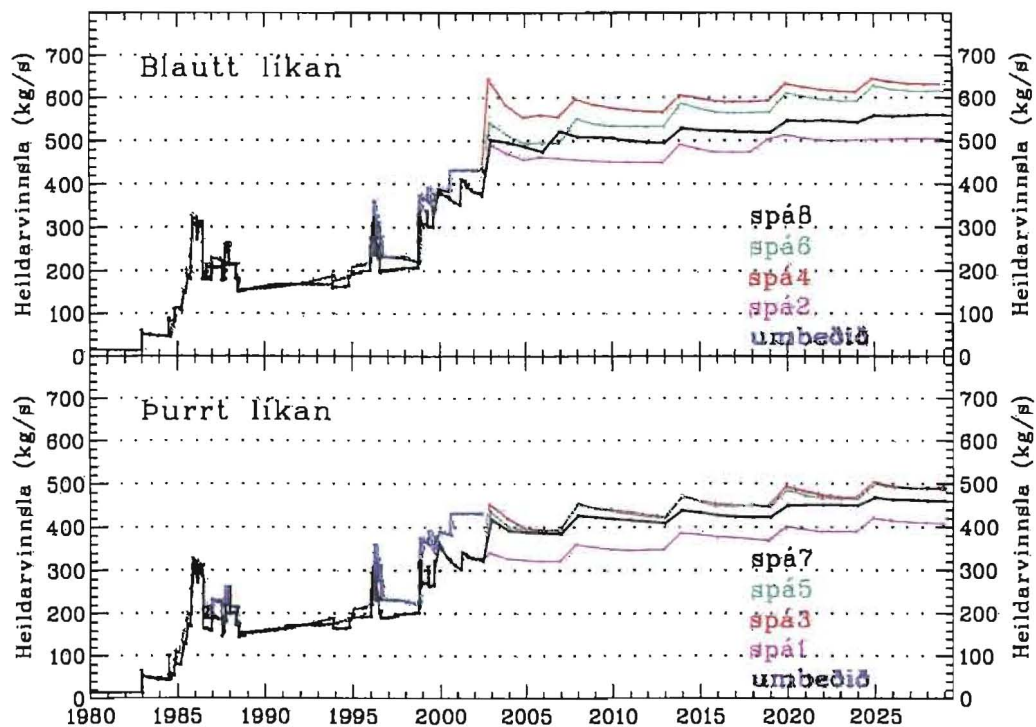
komi ýmist djúpt, millidjúpt eða grunnt í nýju holunum. Með því að skoða svo marga möguleika ættu spárnar að taka tillit til þess að árangur af borunum er ætíð ófyrirséður. Til viðbótar Nesjavallaspánum 8 kemur svo spá um 40 MW raforkuframleiðslu í 30 ár á Hellisheiði, sem verður lýst í næsta kafla. Tafla 1 sýnir hvernig spárnar eru hugsaðar. Þar kemur einnig fram úr hvaða lögum hver ný hola er látin vinna. Nafngiftir laganna eru skýrðar í fyrri greinargerðum, en L og R lögín eru meginvinnslulög Nesjavalla, en G er gufulagið sem liggur yfir syðri hluta Nesjavalla og S er dýpsta virka lagið sem dýpstu holurna vinna úr að hluta til.

Tafla 1: Yfirlit um vinnsluspár gerðar með núverandi reiknilíkani af Hellisheiði

Spá númer	Þurra líkanið	Blauta líkanið	Nýjar holur í lögum
1	90 MW áfram á Nesjavöllum		G,L,R,S
2		90 MW áfram á Nesjavöllum	G,L,R,S
3	120 MW á Nesjavöllum		R og S
4		120 MW á Nesjavöllum	R og S
5	120 MW á Nesjavöllum		L og R
6		120 MW á Nesjavöllum	L og R
7	120 MW á Nesjavöllum		G og L
8		120 MW á Nesjavöllum	G og L
9		90 MW á Nesjavöllum og 40 MW á Hellisheiði	L og R

Nýjar holur í borsvæði Nesjavalla eru hugsaðar allt að 7. Sú fyrsta lóðrétt ofan í plan holna 8, 21 og 22, næst lóðrétt hola miðja vegu milli plans 21/22 og 14, sú þriðja er lóðrétt miðja vegu milli holna 11 og 19. Þessar þrjár holur eru hugsaðar í gang í ársbyrjun 2003 til að fullnægja 120 MW orkuveri á Nesjavöllum. Árin 2008, 2014, 2020 og 2025 kæmu síðan inn nýjar holur númer 4-7, boraðar í nýjan borteig á stelli utan í Hengli, sunnan holu 17. Sú fyrsta færi á ská til ASA, önnur á ská til SSA, sú þriðja á ská til SSV og sú fjórða loks lóðrétt niður. Í reiknilíkaninu er gert ráð fyrir allt að fjórum vatnsæðum í hverri holu, en síðan er slökkt á æðunum á víxl milli spánúmera til að kanna áhrif djúprar, millidjúprar og grunnrar vinnslu í nýju holunum.

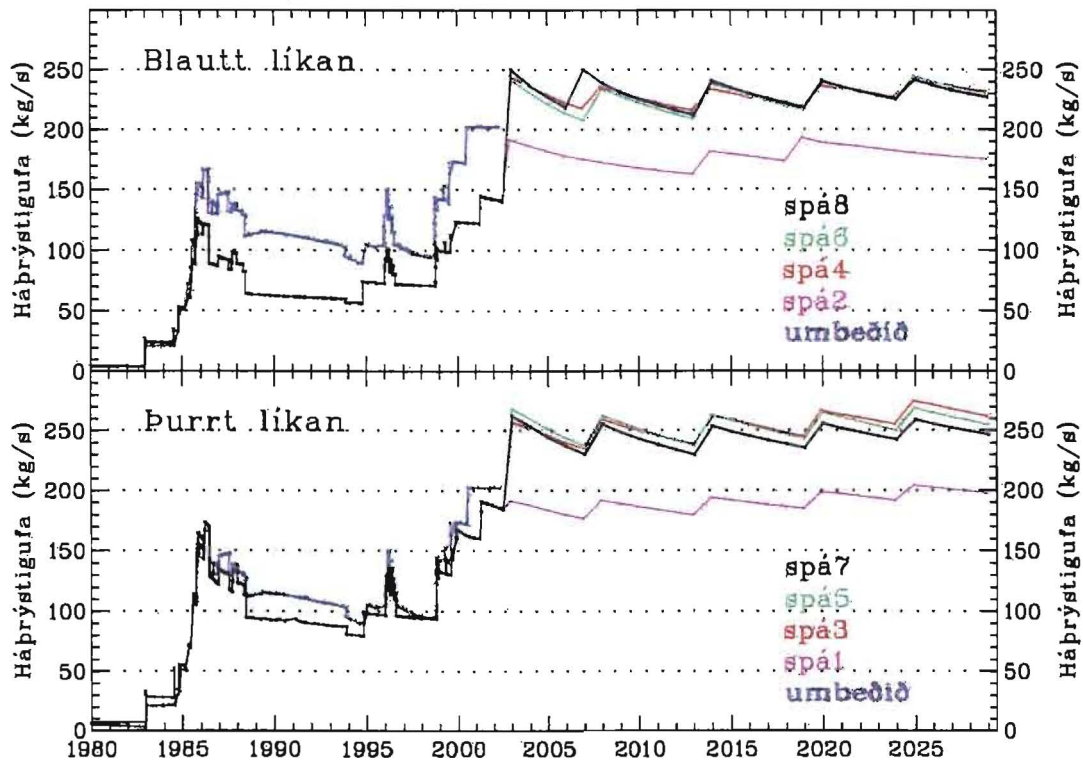
Mynd 3 sýnir reiknaða og umbeðna heildarvinnslu á Nesjavöllum, milli 1980 og 2030. Til að unnt verði að keyra 90 MW orkuverið áfram næstu 30 árin er hér gert ráð fyrir viðbótarholum á u.þ.b. 5 ára fresti eða sjaldnar, hvort sem litið er til þurra eða blauta líkansins. Þeirra gerist þörf þar sem spáð er viðvarandi niðurdrætti þrýstings með tímanum, og þar með minnkandi þrýstímunar milli borholna og jarðhitakerfis.



Mynd 3: Samræmi mældrar og reiknaðrar heildarvinnslu á Nesjavöllum, auk spáa um afköst núverandi og nýrra borholna í framtíðinni.

Þá er gert ráð fyrir að aukning raforkuvinnslunnar í 120 MW útheimti borun þriggja nýrra holna árið 2003 og að síðan bætist við hola á u.þ.b. 5 ára fresti. Rétt er að taka fram að hver hola í reiknilíkaninu vinnur úr tveimur æðum og ekki víst að borárangur verði svo góður í raun. Því kann að verða nauðsynlegt að bora heldur fleiri holur. Það væri svartsýnismat, að mati höfunda ef bæta þurfi við holu á 2-3 ára fresti, auk þess sem ekki er gert ráð fyrir að eldri vinnsluholur gangi úr sér. Nánari grein er gerð fyrir forsendum um afköst nýrra holna í töflu 2.

Mynd 4 sýnir spá um gufuvinnslu og er hún í raun forsenda þess hvernig spár um ástand svæðisins í framtíðinni voru unnar, þ.e. að rafmagnsframleiðslan hafi forgang í rekstri Nesjavallavirkjunar og að 120 MW stöð verði rekin með mjög háum nýtingarstuðli. Spáreikningarnir voru því stilltir af þ.a. viðnámsstuðlar æða í nýjum borholum pössuðu við að u.þ.b. 180 kg/s af háþrýstigufu væru ætíð til taks miðað við 90 MW virkjun í 30 ár, og að u.þ.b. 240 kg/s væru til taks handa 120 MW stöð sama tímabil. Sökum þess að enn er nokkur vermisskekkja í blauta og þurra líkaninu til of eða vans, er miðað við að blauta líkanið framleiði rétt undir 180/240 kg/s langtímamarkinu, en að það þurra sé oftast nokkru yfir þessum gildum.

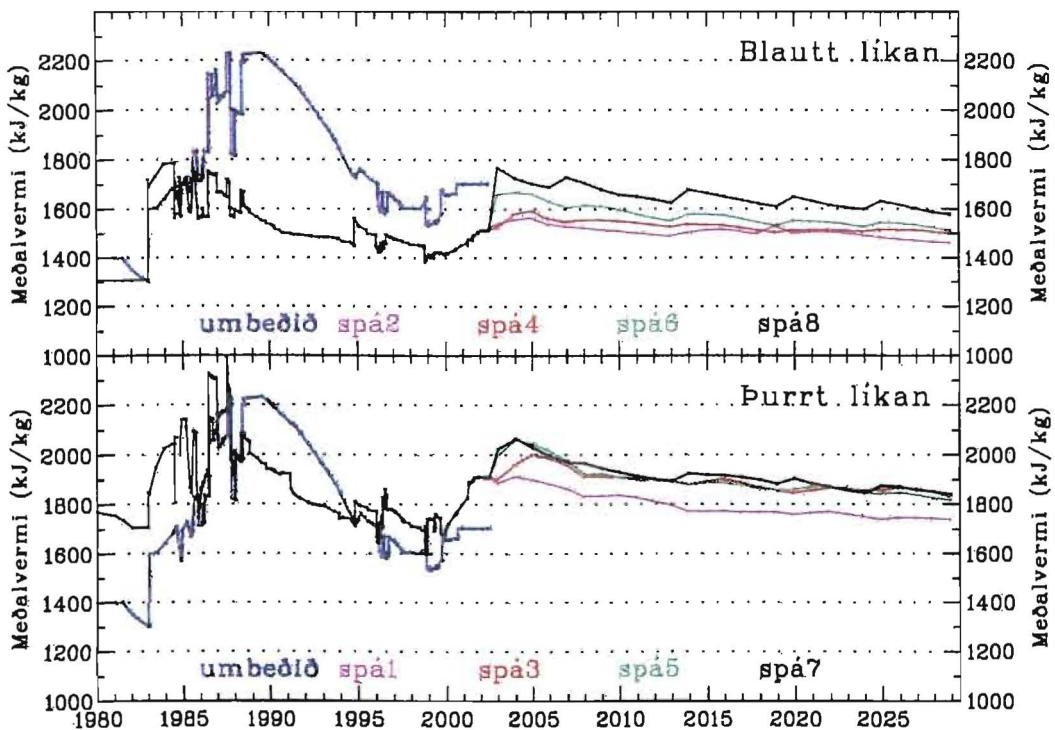


Mynd 4: Samræmi mældrar og reiknaðrar gufuvinnslu á Nesjavöllum, auk spáa um afköst núverandi og nýrra borholna í framtíðinni. Skilið er við 10 bör-a.

Mynd 5 sýnir reiknað rennsli skiljuvatns í spánum 8 fyrir Nesjavelli. Hér er búist við hægfara aukningu í rennslinu í takt við lækkandi vermi vegna kælingar frá ytri jöðrum jarðhitakerfisins og vegna minnkaðrar suðu í bergi næst hávermiholum. Mynd 6 sýnir loks meðalvermi allra Nesjavallaholna. E.t.v. er athyglisverðast við samanburð mynda 5 og 6 að blauta líkanið er næmt fyrir dýpi á æðar í nýjum holum meðan það er þurra er ónæmara. Eins má benda á að hraði vermislækkunar með tímanum er svipaður í báðum líkönum.



Mynd 5: Samræmi mælds og reiknaðs rennslis skiljuvatns á Nesjavöllum, auk spáa um hegðan þess í framtíðinni. Skilið er við 10 bör-a.



Mynd 6: Samræmi mælds og reiknaðs vermis á Nesjavöllum, auk spáa um hegðan vermisins í framtíðinni.

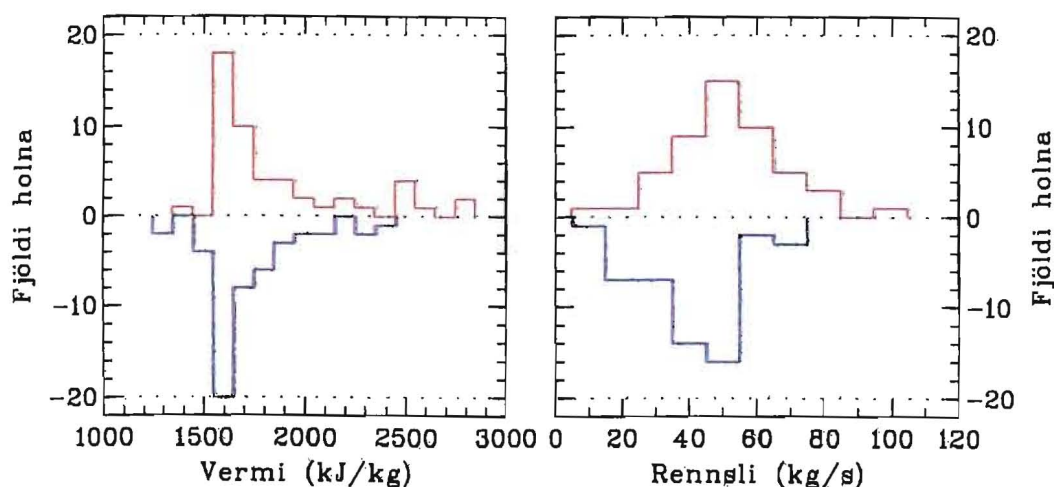
Tafla 2 lýsir nánar þeim forsendum sem beitt var til að boranir, á u.þ.b. 5 ára fresti, ynnu ætíð upp minnkandi rennsli háþrýstigufu með tímanum. Er þá sýnt á annan veginn spánúmer og hins vegar upphafsrennsli, vermi og vinnslustuðull æða í nýjum holum og áætlaður holuþrýstingur við æðar í hverju laganna fjögurra.

Tafla 2: *Eiginleikar æða í nýjum borholum. Viðnámsstuðlar æða taka veldið 10^{-12} og eru þeir sýndir á undan holuþrýstingi (E5 Pa) í línunum sem eiga við lög G,L,R og S.*

Hola	Spá 1	Spá 2	Spá 3	Spá 4	Spá 5	Spá 6	Spá 7	Spá 8
1								
Borár	óboruð	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003
Rennsli	óboruð	56.6	48.8	84.1	46.2	55.8	44.2	47.2
Vermi	óboruð	1578	1691	1582	1890	1931	2046	2466
Lag G		.471 20E5	.371 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	3.7 20E5
Lag L		.471 30E5	.371 30E5	.471 30E5	1.0 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	3.7 30E5
Lag R		.471 45E5	.371 45E5	.871 45E5	1.0 45E5	1.5 45E5		
Lag S		.471 70E5	.371 70E5	.871 70E5				
2								
Borár	óboruð	2003	2003	2003	2003	2003	2003	2003
Rennsli	óboruð	51.8	39.7	77.8	30.5	48.8	35	57.3
Vermi	óboruð	1719	1953	1709	2549	2269	2498	2585
Lag G		.471 20E5	.371 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	3.7 20E5
Lag L		.471 30E5	.371 30E5	.471 30E5	1.0 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	3.7 30E5
Lag R		.471 45E5	.371 45E5	.871 45E5	1.0 45E5	1.5 45E5		
Lag S		.471 70E5	.371 70E5	.871 70E5				
3								
Borár	óboruð	óboruð	2003	2003	2003	2003	2003	2003
Rennsli	óboruð	óboruð	31.2	96.3	27.9	53.3	13.9	17
Vermi	óboruð	óboruð	2107	1401	2539	1897	2762	2825
Lag G			.371 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	3.7 20E5
Lag L			.371 30E5	.471 30E5	1.0 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	3.7 30E5
Lag R			.371 45E5	.871 45E5	1.0 45E5	1.5 45E5		
Lag S			.371 70E5	.871 70E5				
4								
Borár	2008	óboruð	2008	2008	2008	2008	2008	2007
Rennsli	39.8	óboruð	62	50.7	74	66.4	67.4	52.6
Vermi	1651	óboruð	1685	1649	1595	1691	1658	2238
Lag G	.271 20E5		.471 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	2.7 20E5
Lag L	.271 30E5		.471 30E5	.471 30E5	1.2 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	2.7 30E5
Lag R	.271 45E5		.471 45E5	.471 45E5	1.2 45E5	1.5 45E5		
Lag S	.271 70E5		.471 70E5	.371 70E5				
5								
Borár	2014	2014	2014	2014	2014	2014	2014	2014
Rennsli	41.1	49.7	60.8	47.7	71.6	75.6	57.5	66
Vermi	1565	1594	1635	1662	1583	1600	1745	1795
Lag G	.271 20E5	.371 20E5	.471 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	2.7 20E5
Lag L	.271 30E5	.371 30E5	.471 30E5	.471 30E5	1.2 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	2.7 30E5
Lag R	.271 45E5	.371 45E5	.471 45E5	.471 45E5	1.2 45E5	1.5 45E5		
Lag S	.271 70E5	.371 70E5	.471 70E5	.371 70E5				
6								
Borár	2020	2019	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Rennsli	38.1	29.3	55.4	45	59.6	64.6	47.8	56
Vermi	1575	2231	1642	1621	1618	1599	1806	1785
Lag G	.271 20E5	.371 20E5	.471 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	2.7 20E5
Lag L	.271 30E5	.371 30E5	.471 30E5	.471 30E5	1.2 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	2.7 30E5
Lag R	.271 45E5	.371 45E5	.471 45E5	.471 45E5	1.2 45E5	1.5 45E5		
Lag S	.271 70E5	.371 70E5	.471 70E5	.371 70E5				
7								
Borár	2025	óboruð	2025	2025	2025	2025	2025	2025
Rennsli	33.6	óboruð	48.4	39.7	49.6	53.9	38.9	39.6
Vermi	1631	óboruð	1676	1647	1649	1618	1843	1862
Lag G	.271 20E5		.471 20E5	.471 20E5			1.7 20E5	2.7 20E5
Lag L	.271 30E5		.471 30E5	.471 30E5	1.2 30E5	1.5 30E5	1.7 30E5	2.7 30E5
Lag R	.271 45E5		.471 45E5	.471 45E5	1.2 45E5	1.5 45E5		
Lag S	.271 70E5		.471 70E5	.371 70E5				

Skoðum viðnámsstuðlanna í töflu 2 leiðir í ljós kerfisbundið mynstur, þ.e. eftir því sem grynna er til æða, því betri lekt þarf milli holu og jarðhitageymis til að afköst verði nægjanlega mikil. Ef forsendur reiknaða æðarennslisins eru sæmilega réttar í reiknilíkaninu, leiðir þessi niðurstaða til eftirfarandi ályktana: 1) að fleyting gufu ofan af jarðhitakerfinu í tiltölulega grunnum holum krefst góðrar lektar í æðum, og 2) að ef nýjar holur á Nesjavöllum fara á annað borð niður á ~1500 m dýpi, er rík ástæða til að senda þær enn dýpra því sama smáæðin verður hlutfallslega aflmeiri eftir því sem dýpra kemur. Í báðum ofanefndra tilvika er ástæðan einföld, sem sé að lóðréttur þrýstistigull í blásandi holu er um og undir helmingur þess sem gerist í jarðhitakerfinu. Drifkraftur innrennslis til holu vex því hratt með auknu dýpi og gerir djúpar holur þannig, fræðilega, spennandi og afkastamiklar.

Mynd 7 sýnir hvernig upphafsafköst nýju holnanna í töflu 2 flokkast í stöplarit, samanborðið við afdreifinguna árið 2030. Gögnin að baki myndarinnar koma úr 8 spám þ.a. fjöldi holna verður eðlilega mjög mikill. Myndinni er ætla að sýna að tölfræðilega geri spámar 8 ráð fyrir að meðalafköst nýrra holna á Nesjavöllum verði nærri 50 kg/s og meðalvermið kringum 1600 kJ/kg. Slíkt rennslí er í hærra lagi, og skýrist hér af því að oftast eru 2 æðar í hverri nýrri holu reiknilíkansins. Samanburður á ferlunum á mynd 7 sýnir að aflrýrnum með tíma er tiltölulega hæg. Holufjöldinn í töflu 2 kann því að vera bjartsýnismat en að sama skapi er svartsýnismat að helmingi fleiri holur þurfi til að standa undir gufuvinnslunni ef aðeins kemur 1 æð í holu (meðalafköst nýrra holna falli úr 50 í 25 kg/s við meðalvermi upp á 1600 kJ/kg).



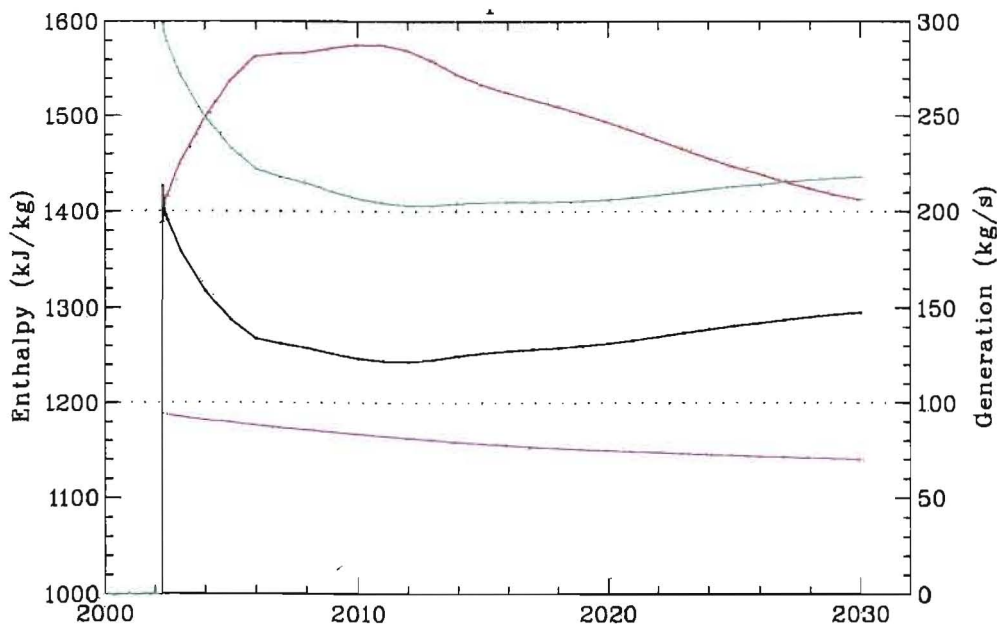
Mynd 7: Dreifing í afköstum og vermi nýrra holna í Nesjavallalíkani. Rauðir ferlar tákna reiknuð upphafsafköst en þeir bláu afköst holnanna árið 2030. Til að ná þessu inn á sömu myndina er ferlunum speglað um lárétta ásinn. Negatíva tölugildið fyrir holufjölda táknar því fjölda holna árið 2030.

Spár um framtíðarástand á Hellisheiði

Það reiknilíkan sem hér er kynnt er ætlað að vera allsherjarlíkan fyrir öll jarðhitakerfin á Hellisheiði. Því er sjálfsagt að skoða einnig hvernig nýju rannsóknarholurnar á Hellisheiði kunni að standa sig í framtíðinni, þrátt fyrir mjög stutta vinnslusögu og litla þekkingu um hita- og þrýstidreifingu innan jarðhitakerfisins þarna. Kemur því núna til sögunnar þriðja afbrigði líkansins, Hellisheiðarlíkanið, til viðbótar þeim blautu og þurru. Öll eru líkanaafbrigðin nánast eins utan þess að fíkað hefur verið staðbundið í líkönunum til að betra samræmi fái st milli reiknaðra og mældra gilda í einstökum holum.

Hermun holna á Hellisheiði hófst með því að metinn var upphafshiti holna HE-3 og HE-4. Reyndist það nokkur þraut þar sem holurnar voru enn að jafna sig í hita þegar þeim var hleypt upp þann 4. apríl 2002. Í meginatriðum er þó talið að báðar fylgi suðumarksferli niður á ~800 m dýpi, en að síðan taki við 270-290 °C heitt vatnskerfi. Grundvallarmunur er þó í einu atriði milli holnanna, sem sé að hola 4 hefur 5-10 börum hærri þrýsting en HE-3 miðað við sama dýpi. Þessi munur vakti strax efasemdir um að uppstreymissvæði Nesjavalla væri sameiginlegt með Hellisheiði. Var því sett annað uppstreymi í Hellisheiðargossprunguna nokkru norðan holna 3 og 4. Eins vakti athygli að Kolviðarhólsholan er hæst þessara þriggja í þrýstingi og hefur ekkert breyst í þrýstingi frá borun árið 1985. Er það í ágætu samræmi við hvað lærst hefur á Nesjavöllum, þ.e. að holur vestan Kýrdalsbrúna eru þrýstingshærri en þær sem eru boraðar austan við hann.

Að fengnu áætluðu upphafsástandi, tóku við sérstillingar á Hellisheiðinni. Þær fólust í að setja 18 göt, í línu eftir Hellisheiðarsprungunni, á þakberg jarðhitakerfisins. Með þessu jókst streymi heits vökva að neðan sem aftur hitaði bergið grunnt. Að þessu skrefi loknu voru því næst settar í gang, í apríl 2002, 8 borholur sem raða sér í norður eftir Hellisheiðargosreininni, frá holu HE-4, og taka vökva ýmist úr L eða R laginu. Spáð var um rennsli og vermi næstu 30 árin og er niðurstaðan sýnd á mynd 8.



Mynd 8: Spá um vermi og rennsli þegar 8 nýjar holur blása á Hellisheiði. Rauður ferill táknar vermið, grænn er heildarvinnslan, svartur skiljuvatn og fjólublár háþrýstigufa. Skiljuþrýstingur er sem áður 10 bör-a.

Spáin á mynd 8 sýnir að ef núverandi mat á jöðrum vinnslusvæðisins á Hellisheiði er rétt, þá muni svæðið standa nokkuð vel undir 40 MW framleiðslu næstu 30 árin. Reyndar kom á óvart

að hraði vermislækkunar er nánast sá sami og á Nesjavöllum. Kann það að skýrast af þeirri forsendu Helligheiðarreikninga að ytri lektir líkansins séu þær sömu þar og á Nesjavöllum. Má reyndar nefna í þessu samhengi að lekt ytri jaðrana í líkaninu ræðst líka af jöfnun þrýstings í Kolviðarhólsholunni eftir blástur árið 1987.

Skoðun mynda í viðaukum sýnir að talsverður þrýstisamgangur reiknast milli Nesjavalla og Kolviðarhóls. Sem dæmi reiknast um 3 bara niðurdráttur í KHG-1 árið 2001, sem er mun meira en mælingar sýna, og að ámóta niðurdráttur þrýstings (15-20 bör) verði á Kolviðarhóli árið 2030 og í holum 17 og 18 á Nesjavöllum. Kann þetta að sýna að forsendan um að Kýrdalssprungan liggja suður í gegnum allt Hengilssvæðið sé röng, en góð lekt í henni er langlíklegasta orsök þess að reiknaður niðurdráttur Nesjavalla skili sér svo langt í suður. Af þessu má ráða að nokkuð er í land með að hugmyndalíkan Helligheiðarjarðhitans sé orðið sæmilega öruggt.

Nokkur atriði í stærri dráttum jarðhitans í Hengli

Þrátt fyrir að reiknilíkan Hengilsins teljist enn ekki fullkvarðað að fyrirbyggjandi þekkingu, hefur gerð þess vakið upp spurningar og hugmyndir um innri gerð jarðhitakerfanna í Hengli. Ætti það að vera vel, því jarðhitakerfi teljast í raun aldrei fullkönnuð né rannsökuð, heldur má líta á rekstur þeirra sem langtímarannsókn. Verkefni jarðvísindamanna er þá fyrst og fremst að draga úr óvissum, styrkja ákvarðanatöku og bæta hittni borholna. Er nýleg skýrsla um viðnám á Hengilssvæði ágætt dæmi um slíkt þróunarverk og hefur talsvert verið horft til hennar um ytri mörk jarðhitans á Helligheiði í því reiknilíkani sem hér er lýst.

Eftirfarandi punktar eru settir fram af handahófi sem umhugsunarefni og fóður í hugmyndalíkon af jarðhitnum í Hengli:

- Djúpt í jarðhitakerfunum virðist þrýstingur lægri en í ytri jöðrum. Það leiðir eðlilega til láréttis innstreymis að miðju kerfanna, þar sem greið lóðrétt lekt leyfir “uppstreymisstrók” með tiltölulega lágrí eðlisþyngd. Lága eðlisþyngdin leiðir svo til þess að uppstreymisstrókurinn nær að verða yfirþrýstur grunnt, miðað við umhverfið og losun jarðhitavökva á sér stað á yfirborði. Allar fyrri útgáfur reiknilíkana af Nesjavöllum hafa beitt þessari hugmynd til að skýra út yfirþrýstinginn sem mælist grunnt í holum uppi á stallinum.
- Nákvæmnisverk er að herma í reiknilíkani slíkt aðstreymi vökva frá jöðrum, sökum þess að það veldur reiknuðum viðsnúningi í hita djúpt í reiknilíkaninu. Má sjá nokkur dæmi þessa í viðauka A. Hægt er að verjast reiknuðum viðsnúningi með lágrí lekt og miklu varmastreymi að neðan, sem síðan hitar lárétta aðstreymið. Með því að beita þessari líkantækni hefur myndast sú tilfinning gagnvart Hengilslíkaninu, að vatnið í uppstreymisrásunum hafi komið lárétt og djúpt að þeim, en að varmaorka þeirra komi fyrst og fremst með leiðingu að neðan, hugsanlega einnig í tengslum við innskotavirkni.
- Er þá komið að öðru atriði í innri gerð jarðhitakerfa og lýtur að því hvort íslensku háhitasvæðin séu hæðaskipt, og að undir þeim kerfum sem nú eru nýtt að 2-2,5 km dýpi, hrærist súperkrítísk kerfi. Á milli þeirra sé nánast þétt þakberg sem lítil vökví nær í gegnum, en varmi siglir hins vegar í gegnum það eftir lögmáli Fourier, og því meiri sem skilflöturinn er þynnri. Auk þess geta verið til staðar afmörkuð göt í slíku þakbergi, og að ofan þeirra finnist þá uppstreymisrásir jarðhitakerfanna eins og við þekkjum þau.
- Athyglisvert er að aðeins ein hola á Nesjavöllum er viðsnúinn í hita svo öruggt teljist, hola 17. Og er hún þó einna næst meintum uppstreymisstrók undir Hengli. Kann að vera að hún nái niður í aðstreymisúg uppstreymisrásarinnar?
- Þá hafa skýrsluhöfundar grun um að auðveldara verði að herma djúphita á Nesjavöllum ef staðbundið uppstreymi á sér stað nærri holu 11. Stuðningur fyrir

tilvist þess er þá sóttur í háan þrýsting og hita djúpt í holu 11 (2265 m), sem auðveldlega getur drifið massastreymi upp í jarðhitakerfið.

- Áður var nefnt að nú þykir ólíklegt að Kýrdalssprungan og gossprungurnar á Helliheiði séu einn og sami vatnsleiðarinn. Það leiðir þá til þess að tvö uppstreymi verði að fæða þessi tvö kerfi og að kerfin megi reka tiltölulega óháð hvort öðru. Ástæða er til að láta frekari þróun reiknilíkansins taka á þessu.
- Veruleg ósamleitni er í lekt milli austurs og vesturs um Kýrdals- og Helliheiðargossprungurnar. Virðist sem holur austan sprungnanna eigi erfitt með að sækja sér vökva vestan að, eftir því sem tímar líða fram. Svæðin bæti sér þá massatapið með innstreymi að austan. Þegar hafa komið fram vísbendingar um þetta í gögnum um breytingar á klóríðstyrk á Nesjavöllum. Nú er það svo að langtímaafköst jarðhitakerfa ráðast einna helst af jöðrum þeirra, þ.e. hvað geta þeir skilað inn miklu massastreymi við gefinn niðurdrátt og hvað heitu. Fáar holur hafa verið boraðar austan við Helliheiðar-gossprungurnar, nema þá helst á Ölkelduhálsi og síðan í Hveragerði. Íhuga má hvernig best væri að kanna þetta mikilvæga berggrúmmál betur. Kemur þá einna helst í hugann borun á Ölkelduhálsi eða dýpkun holu ÖJ-1, með það að markmiði að kanna hvort jarðhitinn á Ölkelduhálsi sé hæðaskiptur líkt og í Kröflu, og að mun heitara neðra kerfi sé þá neðan við 1000 m dýpið.
- Þá er sérstakt verkefni að beita reynslu og tölfræðilegum aðferðum til að snúa viðnámi jarðlaga í Hengli yfir í hita, og nota þann hita sem inntak í hermílíkanið. Þegar er búið að gera slíka tilraun í þessu verkefni, og sýnast nú líkur til að þannig megi fá enn betri stuðning af viðnámsgögnum í reiknilíkaninu. Mikill fengur væri að slíku og má jafnvel taka svo djúpt í árinna að segja að túlkun viðnámsmælinga sé ekki lokið fyrir en slíkt hitakort liggja fyrir.
- Áður hefur verið minnst á viðvarandi, ofreiknaðan djúpþrýsting holna austan gossprungna í Hengli og leiðir til að laga það ósamræmi. Ein leið væri að láta líkanið hleypa jarðhitavatni upp til yfirborðs í mun meira mæli en nú er, auk þess sem lárétt útrás til suðurs er ekki óhugsandi. Má hér nefna að nú er verið að skoða, í tengslum við úrvinnslu gagna frá suðurlandsskjálftunum 2002, að skjálftahrinur á Ölkelduhálsi árin 1997 og 1998 hafi rifið upp sprungur á svæðinu. Við það tapaði jarðhitakerfið í holu ÖJ-1 þrýstingi og þar með massa til lágþrýstari kerfa, annað hvort lóðrétt niður eða þá til suðurs eftir sterkri upptakalínu skjálfta um Bitru og út á Helliheiði.

Niðurstöður og umræða

Með þeim áfanga sem hér er kynntur í gerð reiknilíkans af Hengilssvæði, má segja að komið sé að vissum þáttaskilum í verkinu. Líkanið byggir á ýtarlegum jarðhitagögnum frá Nesjavöllum og viðbrögðum svæðisins við vinnslu síðustu 20 ára. Bráðabirgðaniðurstöður reiknilíkansins eru þær að hægt sé að auka gufuvinnslu á Nesjavöllum án stórtækra breytinga á ástandi jarðhitasvæðisins í framtíðinni. Á Helliheiði eru upplýsingar hins vegar enn mjög takmarkaðar. Boranir hófust fyrir alvöru á síðasta ári og vinnsla úr fyrstu tveimur holunum hófst í vor. Viðbrögð svæðisins við vinnslu eru því enn í óvissu. Þær takmörkuðu upplýsingar sem fyrirliggja bend þó til þess að Helliheiðarsvæðið standi undir allt að 40 MW stöð sem fyrsta áfanga á því svæði.

Sá annmarki er þó á ofangreindum niðurstöðum að kvörðun reiknilíkansins mætti vera betri á sumum sviðum meðan hún telst góð á öðrum. Í þessu samhengi má samt ekki gleyma að nú hafa verið tekin inn til hermunar talsvert meira af gögnum en áður. Ætti það eitt og sér að tryggja ámóta öruggt reiknilíkan og áður, að ekki sé minnst á lengri vinnslusögu á Nesjavöllum og tilkomu nýrra holna í suðri á Nesjavöllum og á Helliheiði auk nýja viðnámskortsins af Hengilssvæðinu. Eins hafa verið keyrð tvö afbrigði líkansins á Nesjavöllum og þannig reynt að afmarka útmörk í svæðishegðun, sem reynslan ætti vonandi að skella sér inn á milli. Til að skoða enn frekar næmni líkansins voru gerðar 8 spár sem taka

tillit til misdjúprar vinnslu úr nýjum holum á Nesjavöllum. Síðast en ekki síst hafa verið inntir af hendi gríðarlega miklir reikningar í öflugum tölum og nýjustu tækni í sjálfleit beitt.

Að öllu þessu samanlögðu er ljóst að auka má enn vinnslu úr jarðhitasvæðinu á Nesjavöllum. Áframhaldandi rekstur 90 MW virkjunar veldur hægfara lækkun á þrýstingi í jarðhitakerfinu og í vermi og rennsli vinnsluholna. Stækkun virkjunarinnar í 120 MW breytir þar litlu eins og sést best á því að tíðni nýborana er nánast sú sama samkvæmt reiknilíkaninu hvort heldur sem vinnsla næstu 30 ára verður 90 eða 120 MW. Segja má einnig að þetta sé í samræmi við reynsluna af rekstri svæðisins undanfarin ár, en aukin vinnsla vegna stækkunar virkjunarinnar og vinnsla úr nýjum borholum hefur t.d. ekki hert á þrýstiniðurdrætti í mæliholum eða haft veruleg áhrif á afl vinnsluholnanna. Samkvæmt reiknilíkaninu og reynslunni af rekstri svæðisins verður að bora nýjar holur vel innan þess svæðis þar sem jarðhitakerfið er hvað heitast, og tappa vökva úr æðum sem liggja ýmist tiltölulega grunnt eða mjög djúpt í jarðhitakerfinu.

Lagt er til að nú verði gert hlé á þróun reiknilíkansins af Hengli í nokkra mánuði, meðan frekari gögn safnast úr borunum á Helligheiði og tölvafl til verksins verður fjórfaldað. Eins verði á sama tíma hugað að tengingu viðnáms við hita í bergi og safnað hugmyndum um hvernig bæta megi kvörðun reiknilíkansins. Á meðan verði áhersla lögð á þrýstibreytingar í rannsóknum á Helligheiði, sem stafa af núverandi blæstri holna. Hóla KhG-1 hentar sérlega vel í þetta verkefni. Færi vel að setja í hana sírita sem skráir mjög þétt og sendir frá sér gögnin. Einnig verði fylgst með þrýstijöfnun holna HE-3 og HE-4 eftir að blæstri þeirra lýkur, og þá með sama hætti og í holu KhG-1 árið 1987. Jafnframt að holunum verði ekki lokað samtímis, heldur verði reynt að sjá hvort lokun annarrar hafi áhrif á hina. Hugsanlega mun sú sískráning holutoppsgilda sem nú er í gangi sjá slíkt. Sökum þess að Orkuveita Reykjavíkur leggur áherslu á sem hraðasta ákvarðanatöku á Helligheiði, má líka hugsa sér óhefðbundna upphitun þeirra holna sem bora á í sumar. Bæði með mun örari hitamælingum í upphitun en nú er, svo og með því að mæla í blæstri snemma í vinnslusögu nýrra holna (áður en sýður út í berg). Að öllum þessum gögnum fengnum verði reiknilíkanið kvarðað áfram með Helligheiðarþátt þess í huga, og nýjar spár um hegðan þess við mismikla vinnslu gerðar á vetri komanda.

Viðauki A: Samræmi mælds og reiknaðs upphafshita og þrýstings í borholum

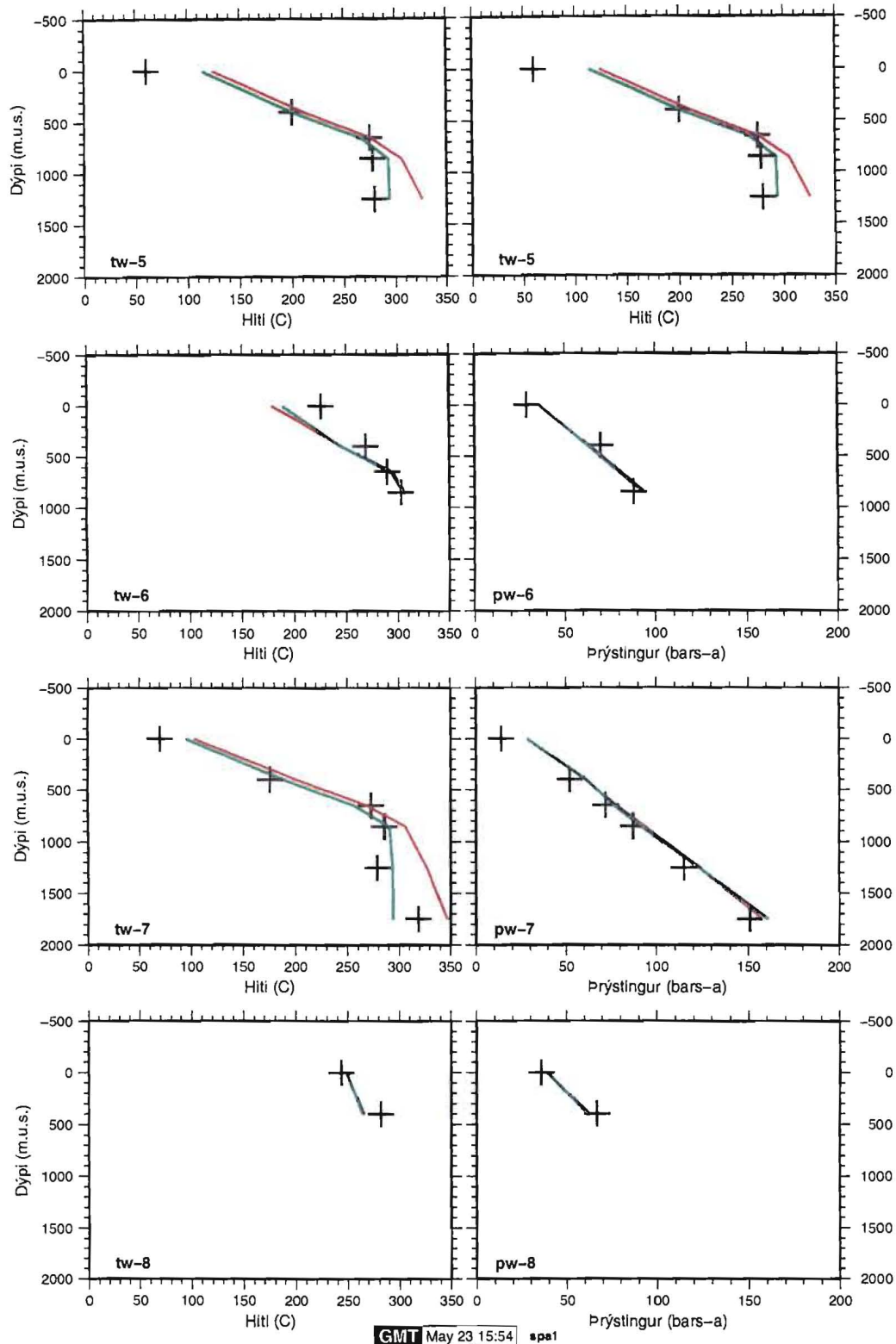
Nafn holu sem mynd á við er sýndt í neðra vinstra horni. Holur á Nesjavöllum heita þannig ýmist tw# eða pw# þar sem # er holunúmerið

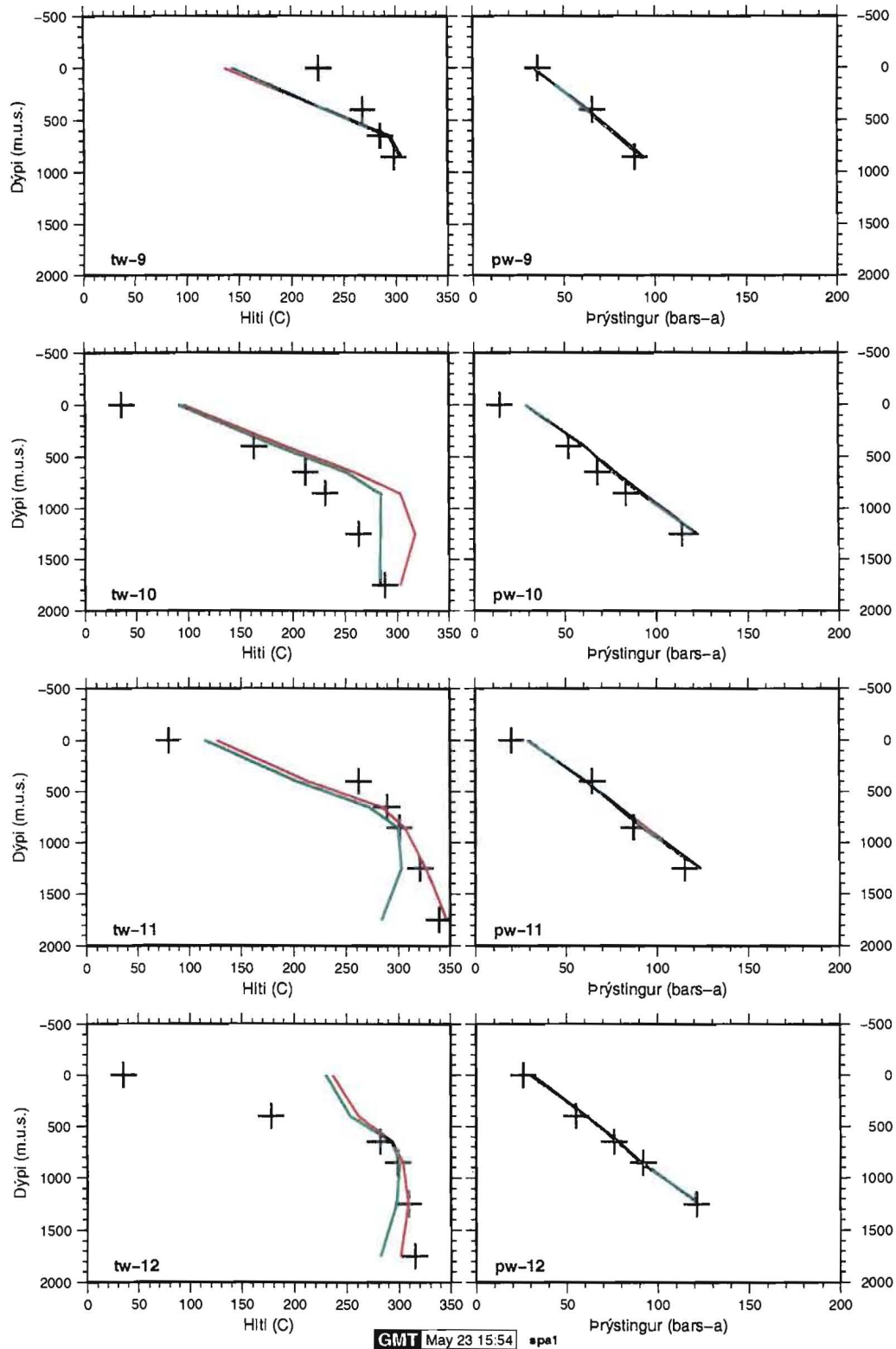
Þegar um er að ræða háhitaholur, má oftast finna mældan og reiknaðan hita vinstra megin á blaðsíðu og mælda/reiknaða þrýstinginn hægra megin.

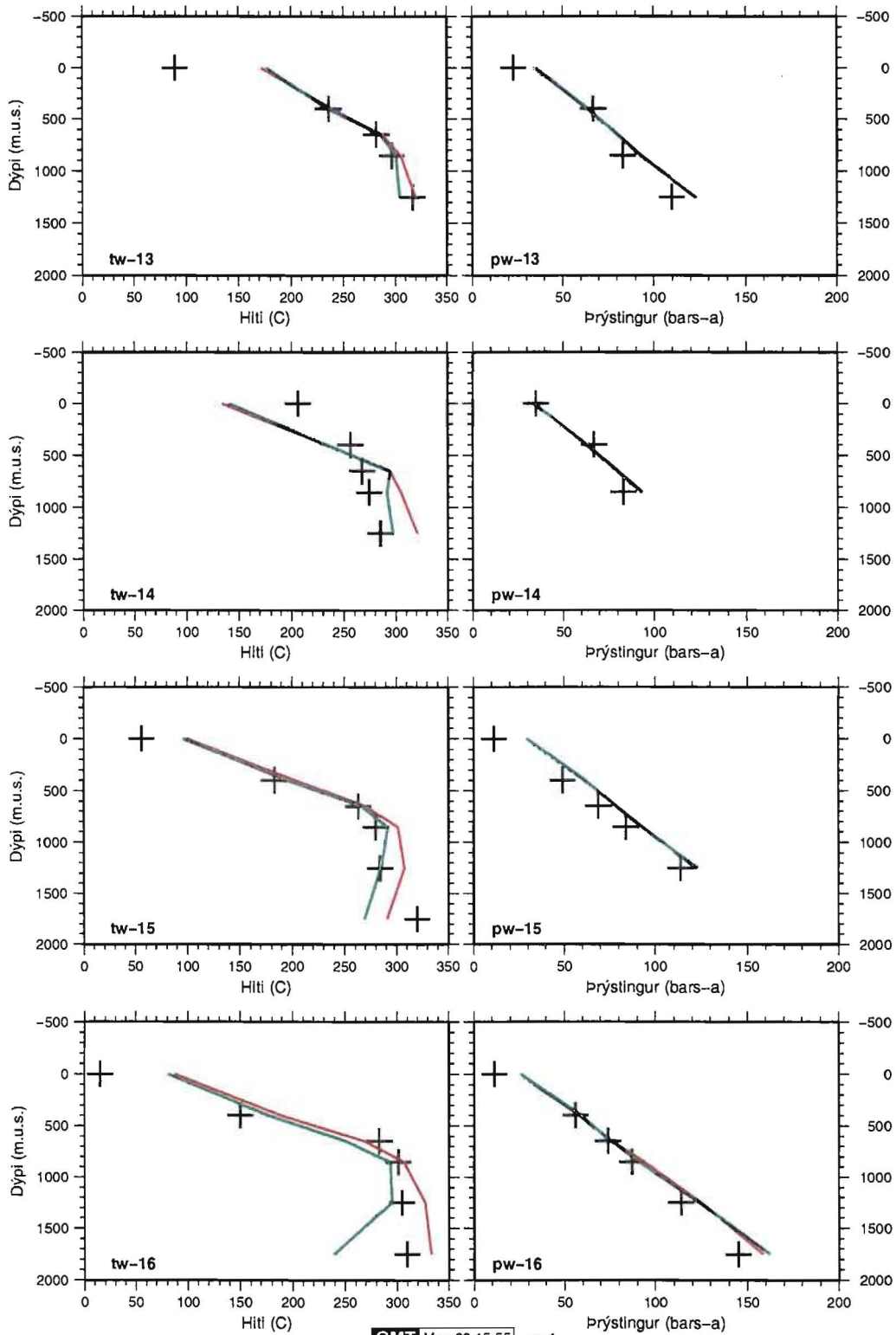
Plúsar tákna þann þrýsting (mældan) sem sjálfleitin er beðin um að herma

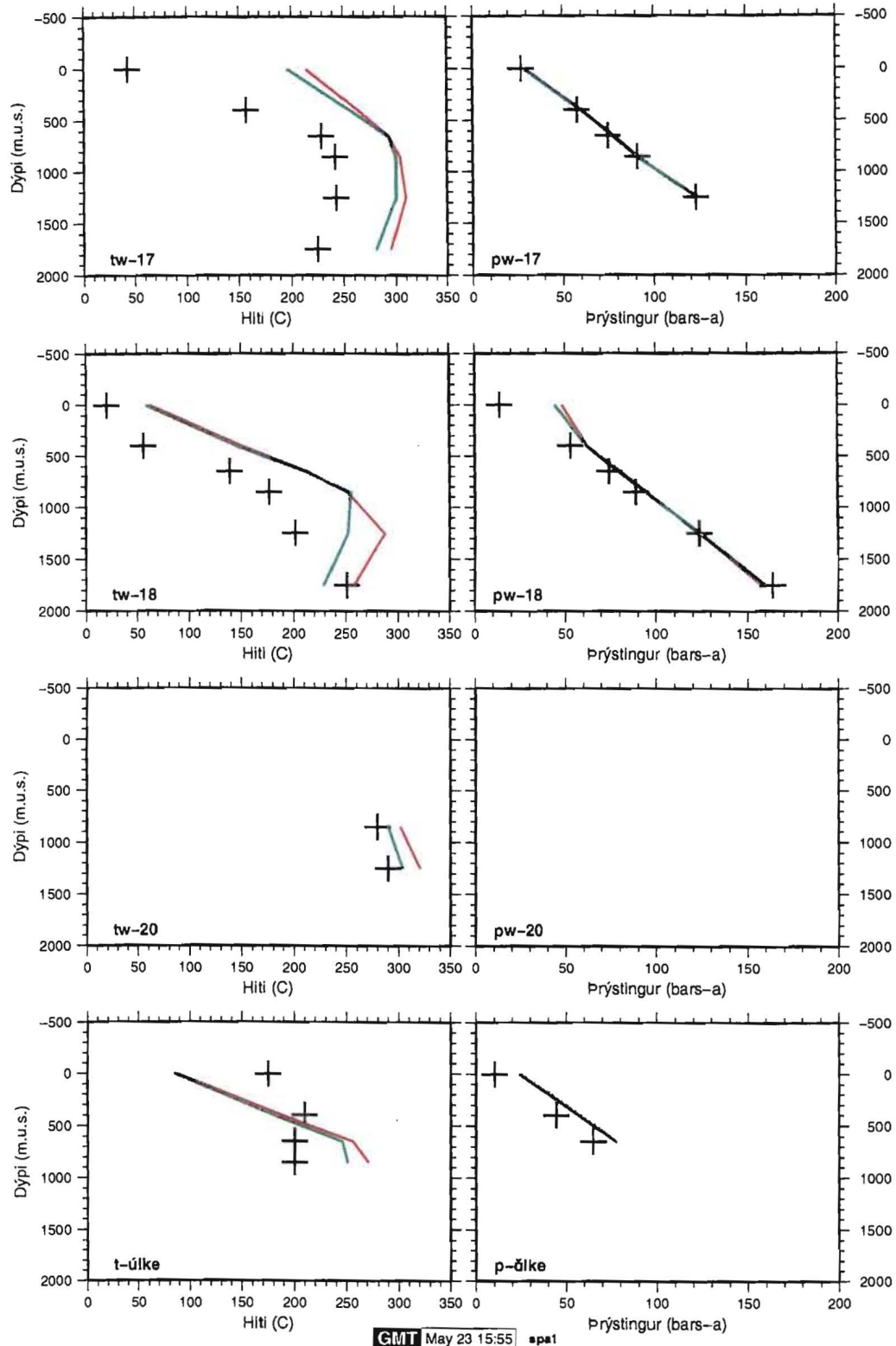
Rauð, heildregin lína er reiknað upphafsástand í þurra líkaninu.

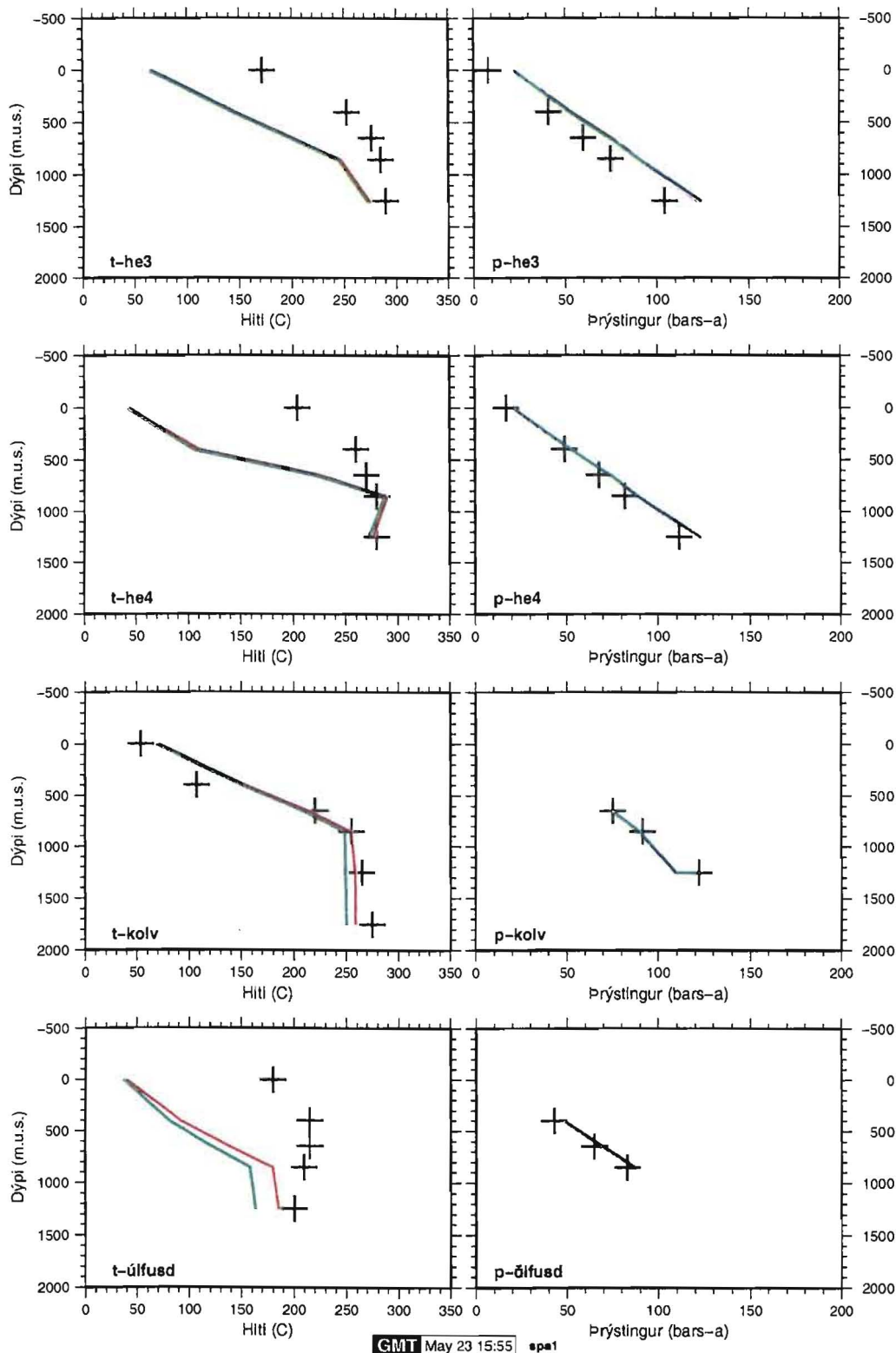
Græn, heildregin lína er reiknað upphafsástand í blauta líkaninu.

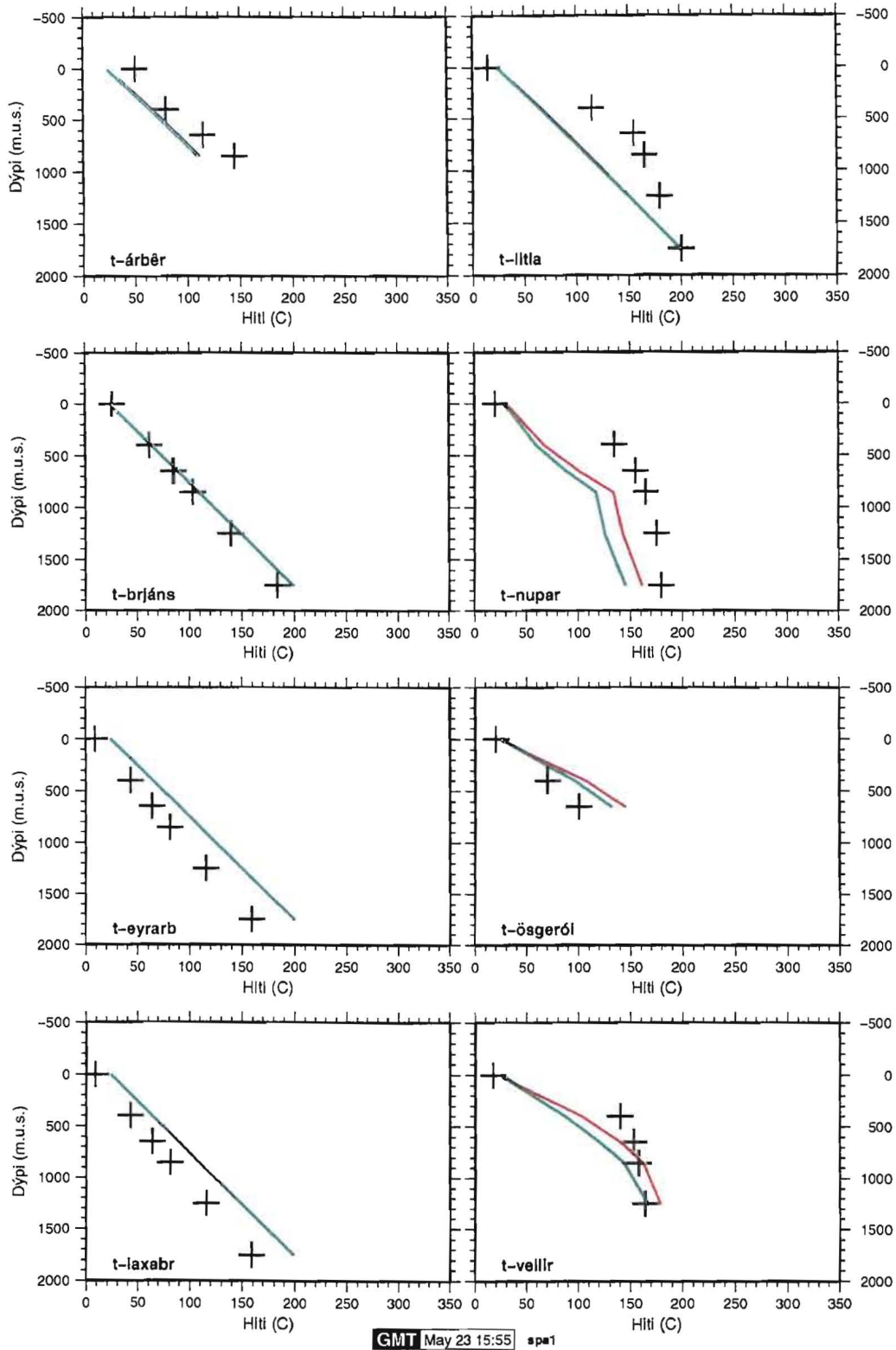


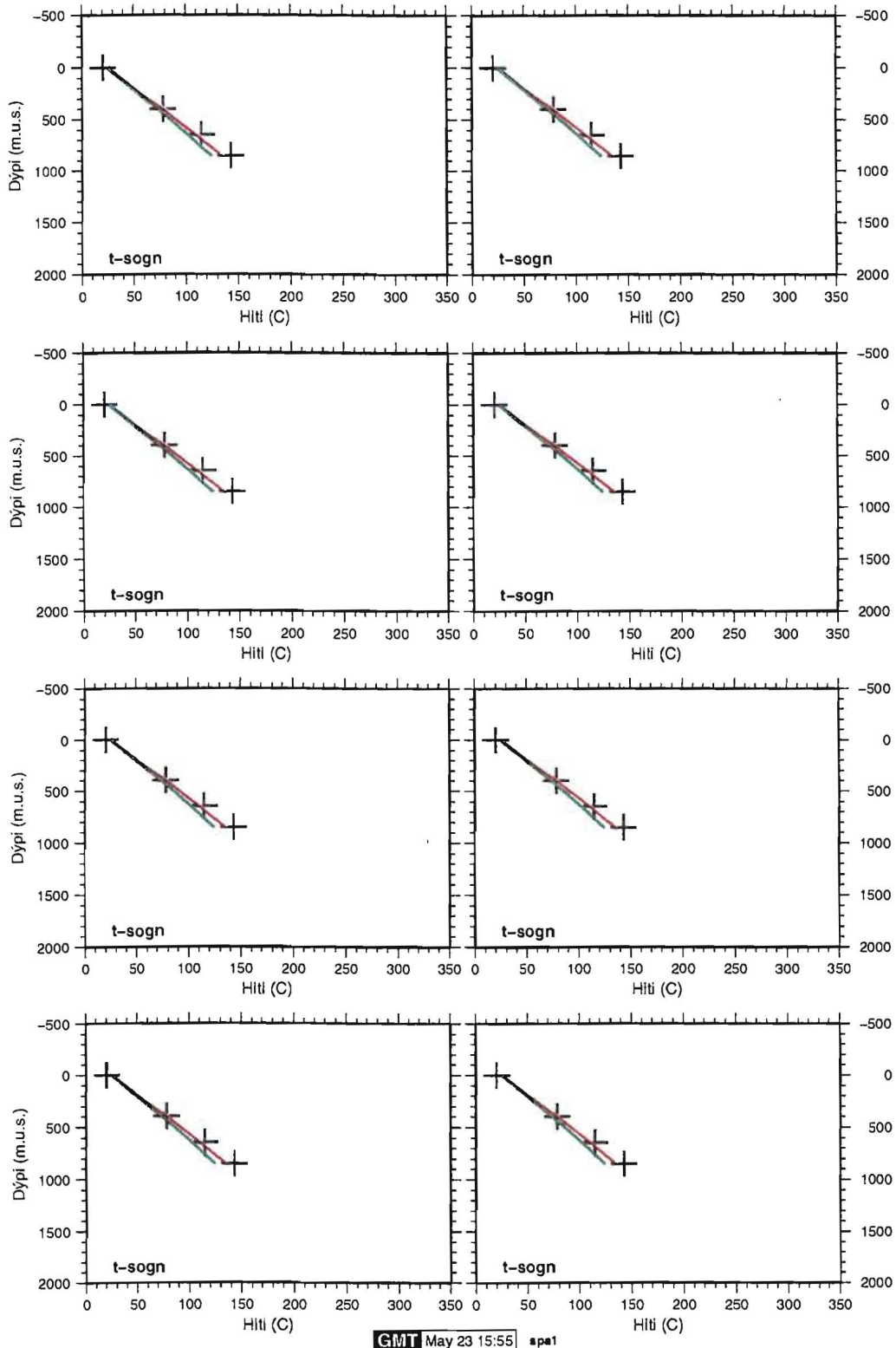












Viðauki B: Samræmi mældrar og reiknaðrar vinnslu og vermis á Nesjavöllum og á Hellisheiði. Teiknaðar eru spá 1 og spá 2 til ársins 2030 þar sem það á við

Nafn holu sem mynd á við er sýnd í neðra vinstra horni. Holur á Nesjavöllum heita þannig ýmist h # eða m # þar sem # er holunúmerið, m stendur fyrir heildarvinnslu og h fyrir vermið. Stafurinn p kemur síðan á undan holunúmeri í myndum sem sýna mældan og reiknaðan niðurdrátt.

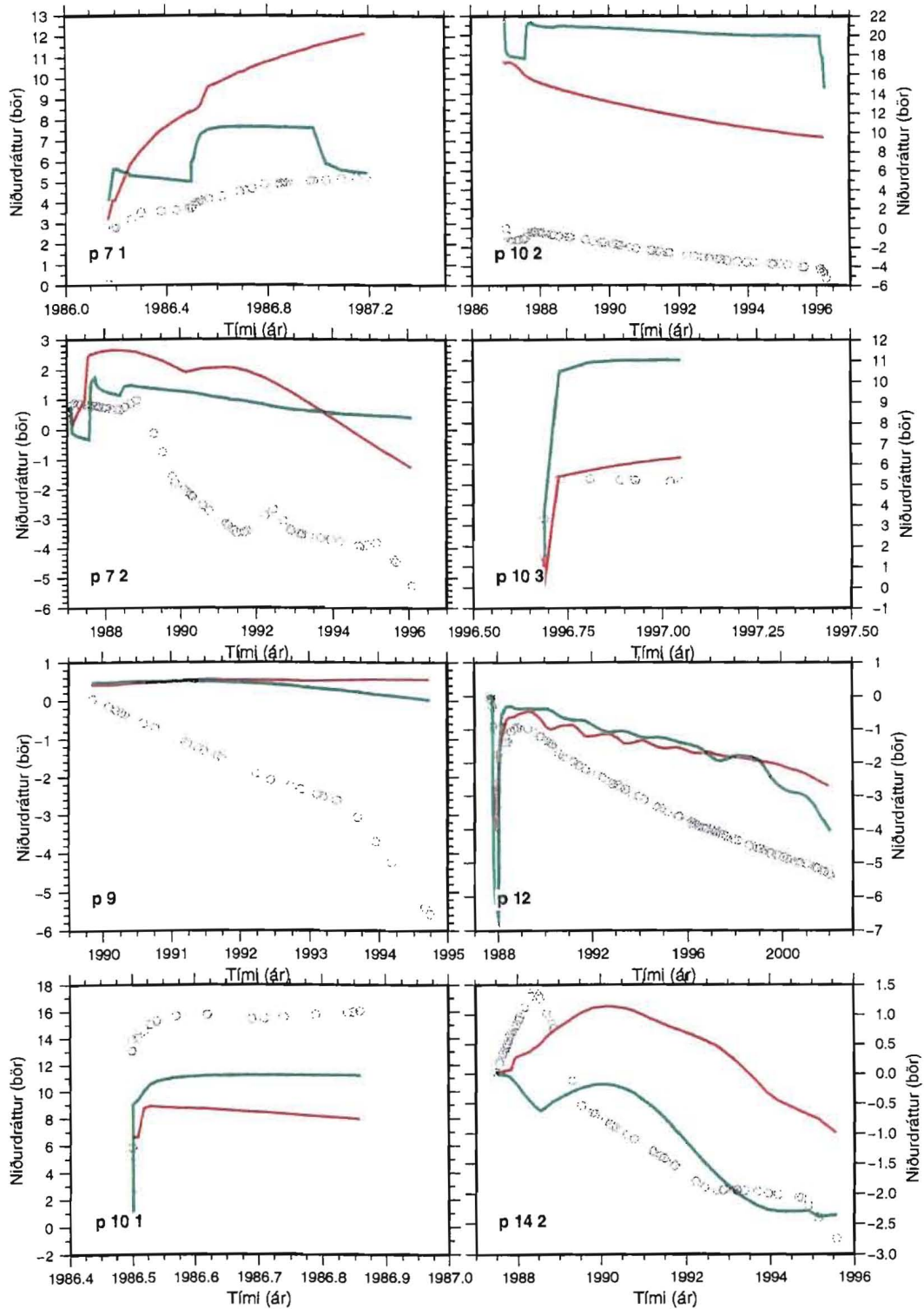
Oft er vinnslugögnum skipt upp í undirtímabil, og koma þau þá aftan við holunafnið sem þriðja sviðið # þar sem # er númer undirtímabilsins.

Þegar um er að ræða afkastamælingar, er mælt og reiknað vermi sýnt vinstra megin á blaðsíðu og melda/reiknaða vinnslan hægra megin.

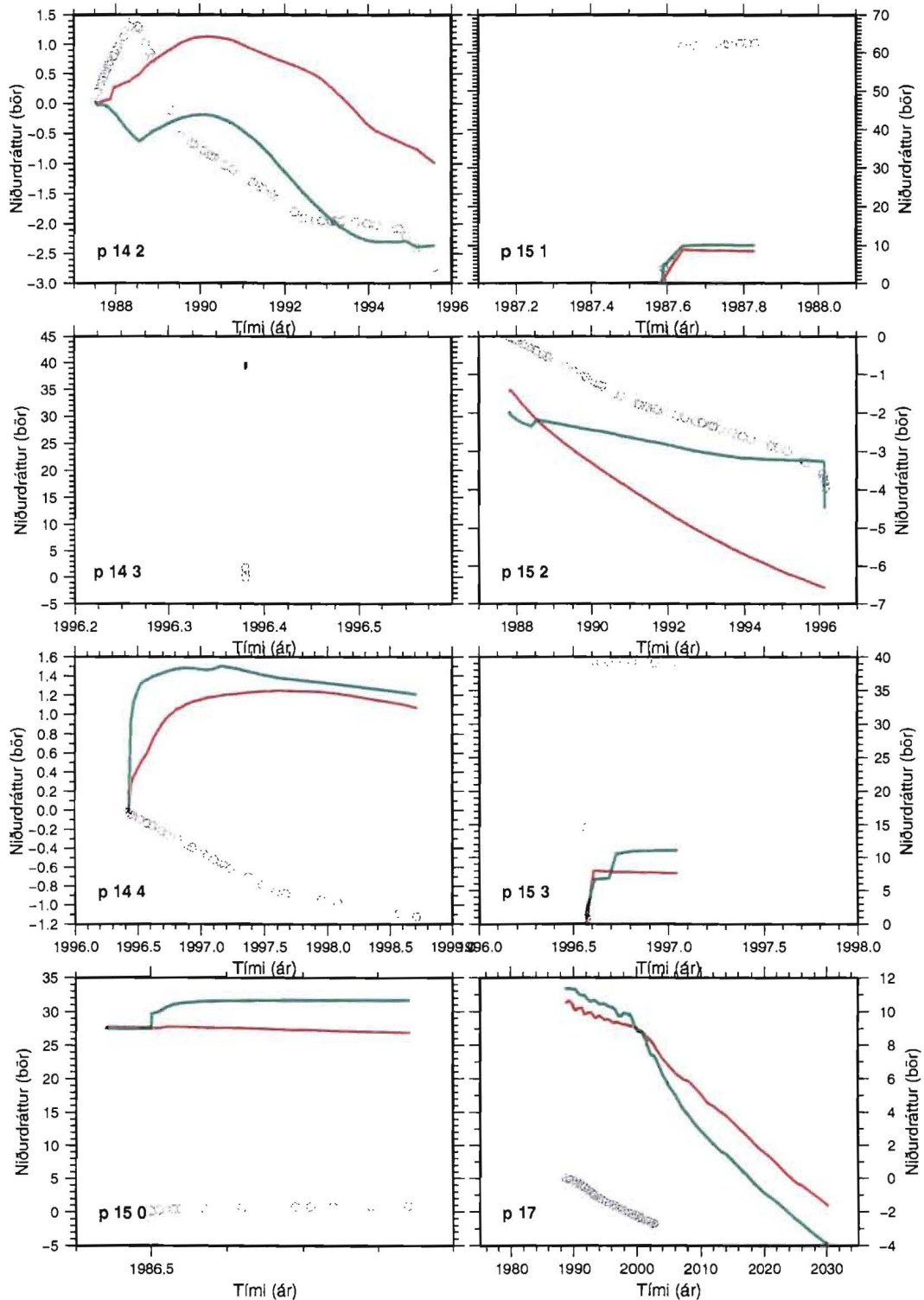
Daufir hringir tákna þann þrýsting (mældan) sem sjálfleitinn er beðinn um að herma, skyggðir fletir eru hafðir svona til að betur sjáist hvenær holur eru að framleiða. Bláir krossar tákna augnabliksmælingar á holuafköstum.

Rauð, heildregin lína er reiknað upphafsástand í þurra líkaninu.

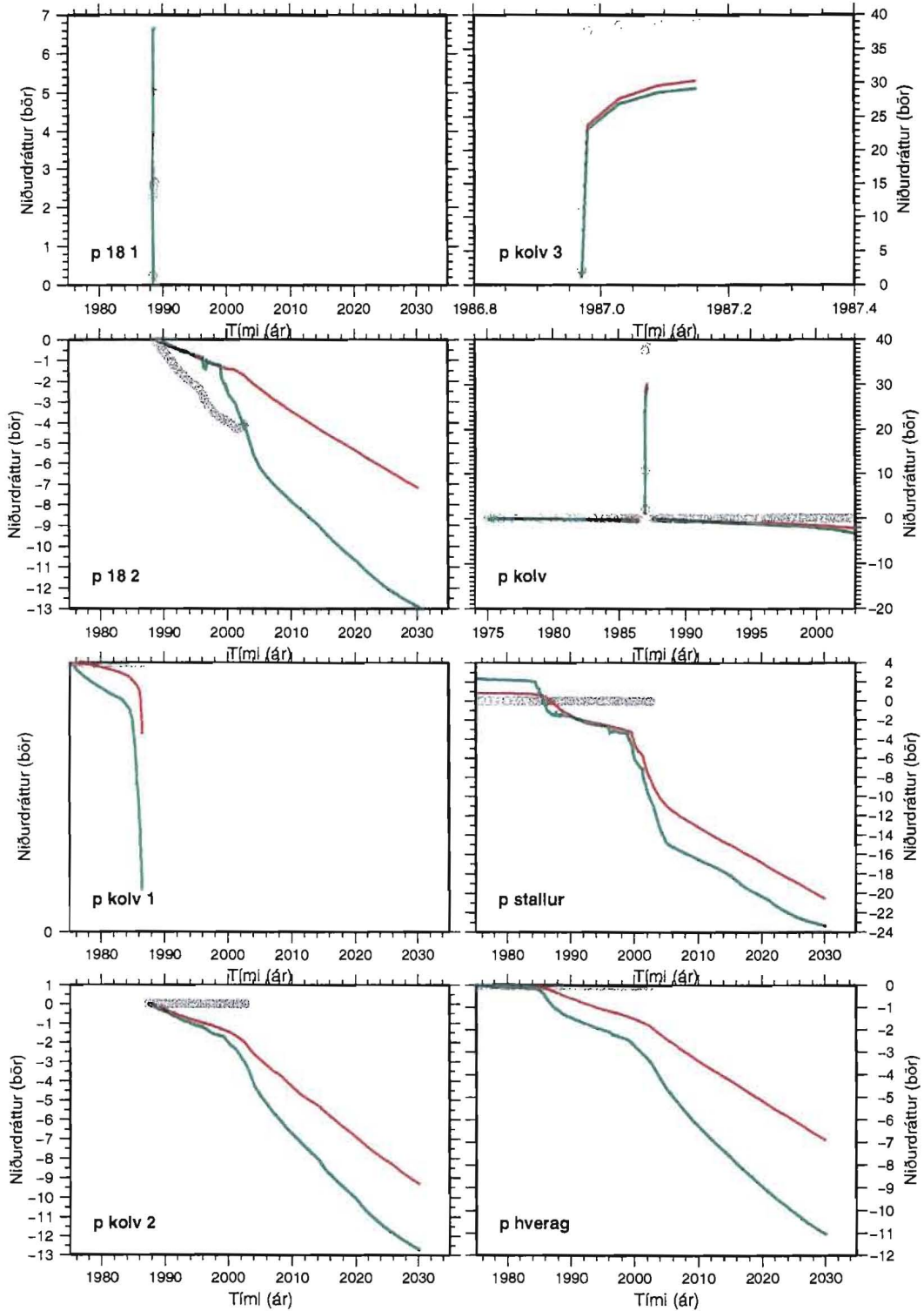
Græn, heildregin lína er reiknað upphafsástand í blauta líkaninu.



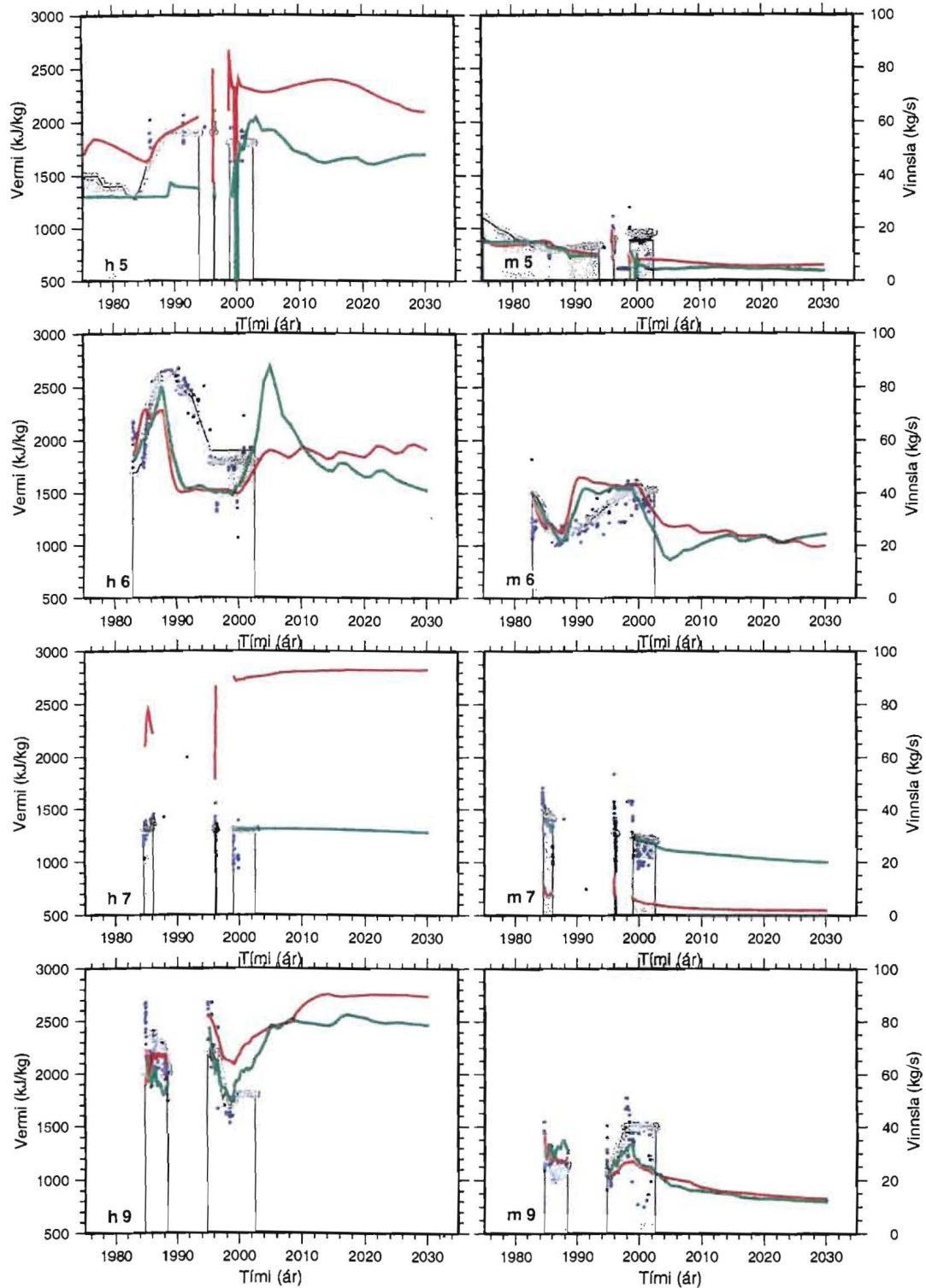
GMT May 24 10:46 keyrt á /ftr/hengill/vekijar.grb/spa1/ með skipuninni: ../draw.all.histories spa1 spa2



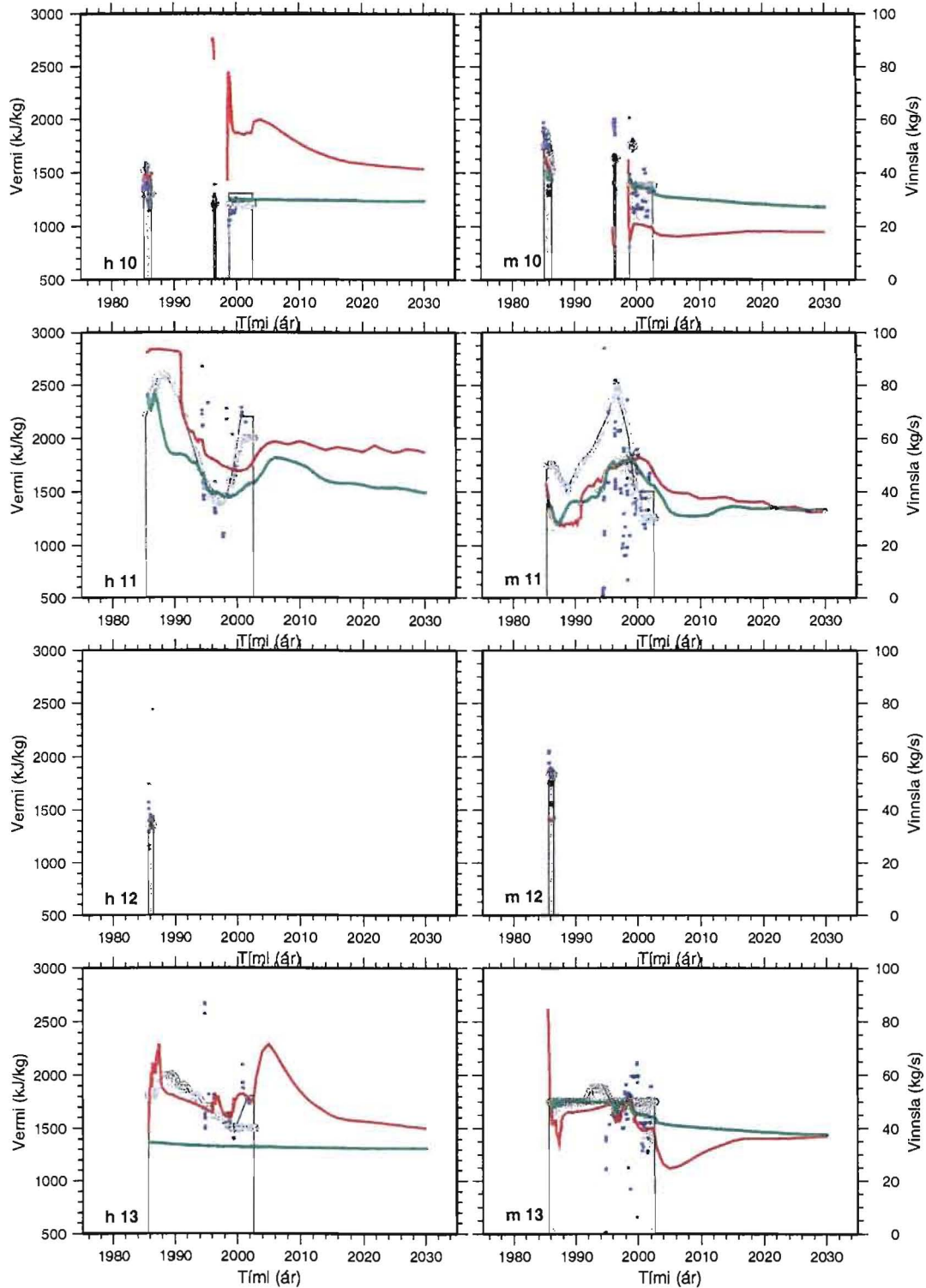
GMT May 24 10:46 keyrt á /ftr/hengill/ekeljar.grb/spa1/ með skipuninni: ./draw.all.histories spa1 spa2



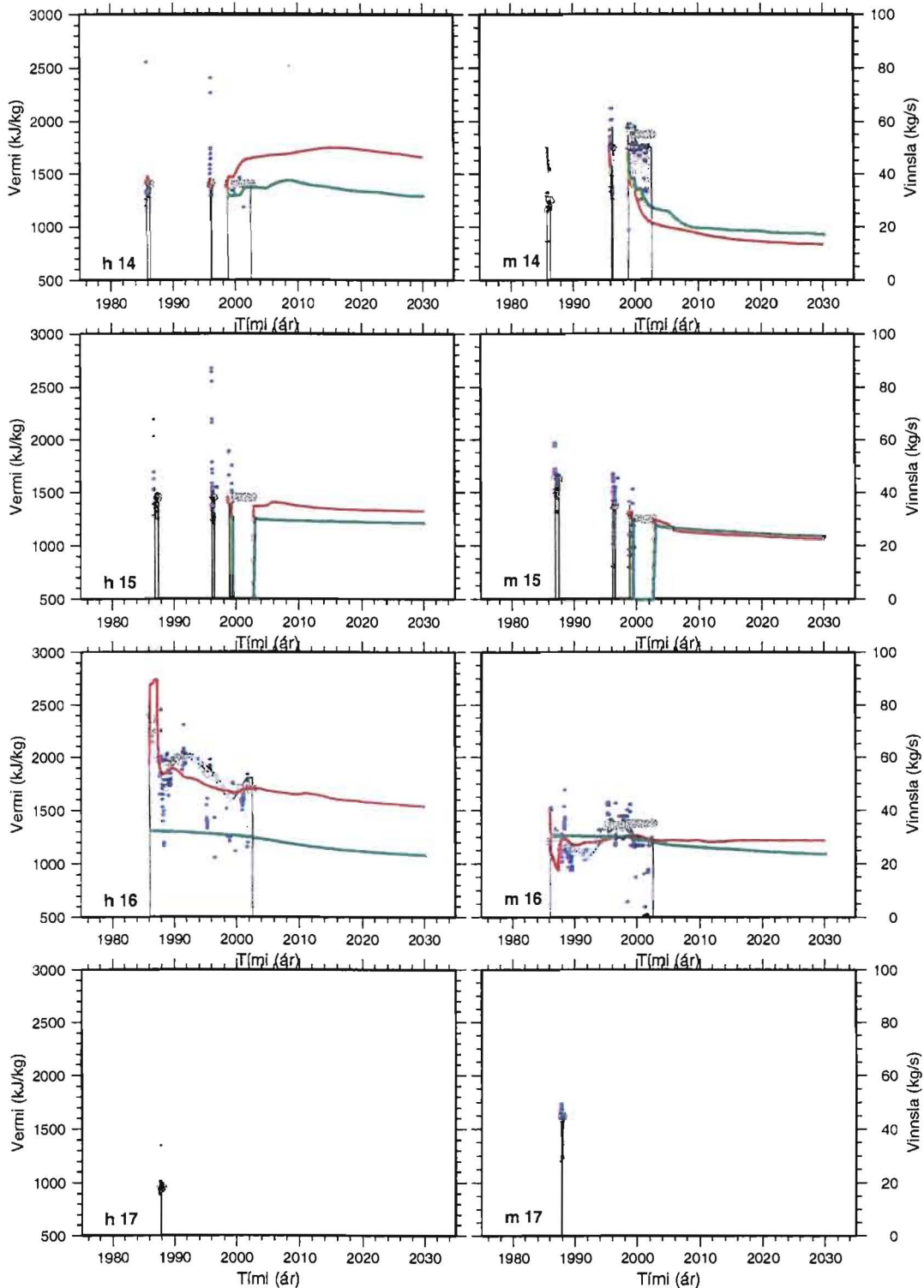
GMT May 24 10:47 keyrt á /ftr/hengillu/skeljar.grb/spa1/ með skipuninni: ./draw.all.histories spa1 spa2



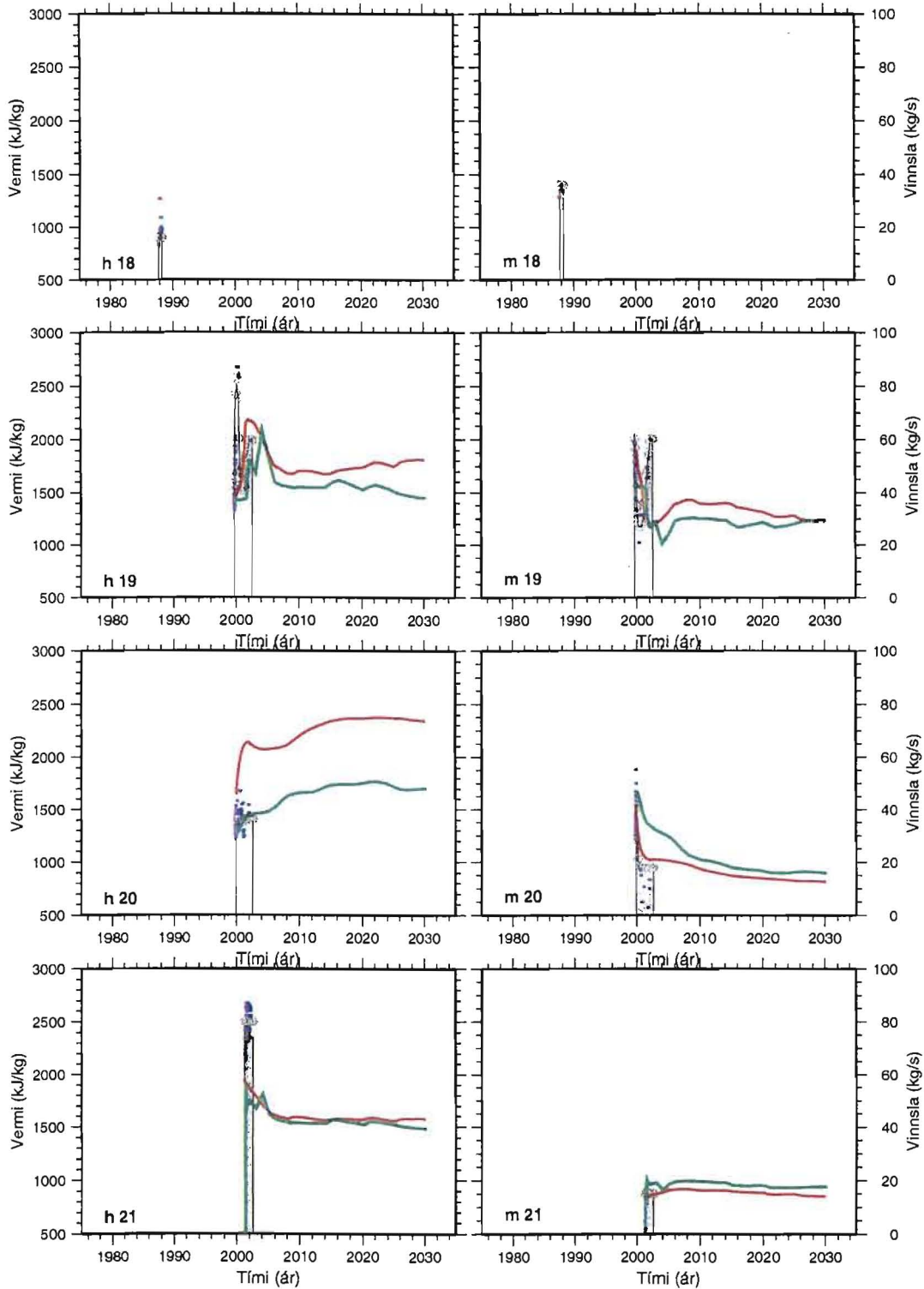
GMT May 24 10:47 keyrt á /frr/hengill/skelljar.grb/apa1/ með skpuninni: ../draw.all.histories apa1 apa2



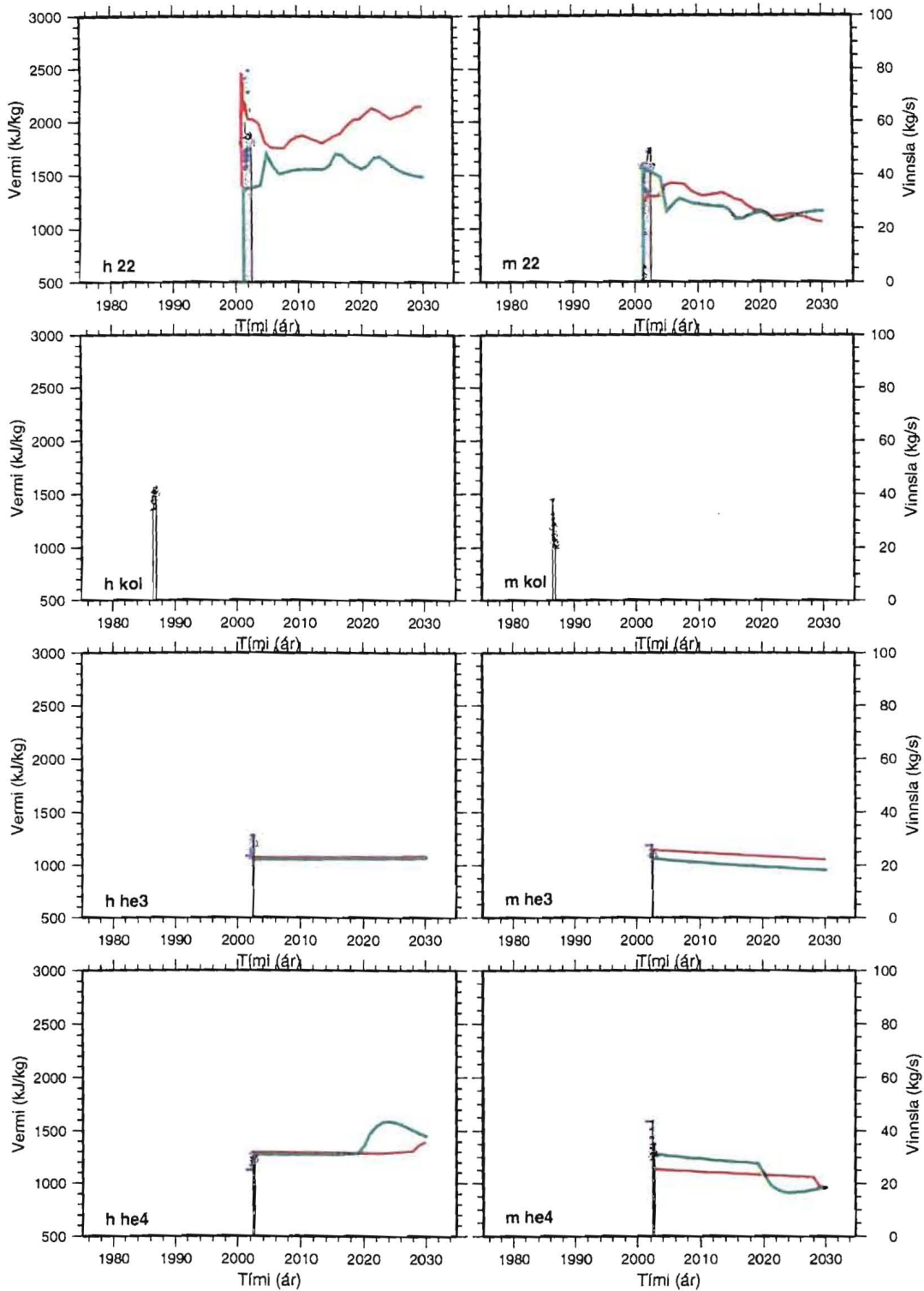
GMT May 24 10:47 keyrt á /frr/hengill/skaljar.grb/spa1/ með skipuninni: ../draw.all.histories spa1 spa2



GMT May 24 10:47 keyrt á /ftr/hengill/vekeljar.grb/apa1/ með skipuninni: ./draw.all.histories spa1 apa2



GMT May 24 10:47 keyrt á /ftr/hengill/skeljar.grb/spa1/ með skipuninni: ./draw.all.histories spa1 spa2



GMT May 24 10:47 keyrt á /fr/hengill/skeljar.grb/spa1/ með skipuninni: ./draw.all.histories spa1 spa2