



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

ÁHRIF NÝBORANA Á SUÐURHLÍÐAR KRÖFLU

**Áfangaskýrsla um
prívítt reiknilíkan**

**Grímur Björnsson
Guðmundur S. Böðvarsson
Helga Tulinius
Ómar Sigurðsson
Sigvaldi Thordarson**

Unnið fyrir Landsvirkjun

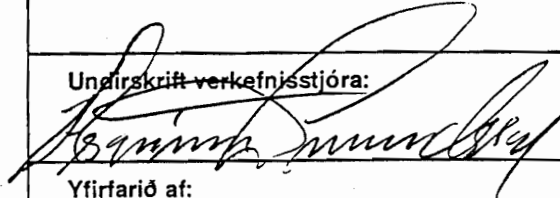
1997

OS-97027

**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

Skýrsla nr.: OS-97027	Dags.: Júní 1997	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: ÁHRIF NÝBORANA Á SUÐURHLÍÐAR KRÖFLU Áfangaskýrsla um þrívítt reiknilíkan	Upplag: 25 + 25	
	Fjöldi síðna: 54	
Höfundar: Grímur Björnsson, Guðmundur S. Bóðvarsson, Helga Tulinius, Ómar Sigurðsson og Sigvaldi Thordarson	Verkefnisstjóri: Ásgrímur Guðmundsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Nýtt þrívítt reiknilíkan, áfangaskýrsla	Verknúmer: 630 666	
Unnið fyrir: Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar: Kemía ehf.		
Útdráttur: Í skýrslunni er lýst gerð reiknilíkans af Kröflusvæðinu og áhrifum nýrra holna á ástand vinnslusvæðisins í Suðurhlíðum í tengslum við stækkun virkjunarinnar. Verkið er áfangi í gerð nákvæms líkans fyrir öll jarðhitakerfin í Kröflu. Sett var upp og stillt af þrívítt reiknilíkan sem hermir bæði upphafsástand Kröflusvæðisins og vinnslusögu þess. Að svo stöddu er einungis búið að grófstilla líkanið. Byggt er á vinnslusögu allra holna allt frá árinu 1974 til hausts 1996. Gögnin eru sett inn í reikniforritið TOUGH2 sem síðan er stillt af þar til það hermir þokkalega bæði upphafsástand og vinnslusögu svæðisins. Líkanið samanstendur af 5000 bútum. Samkvæmt því myndi borun nýrrar holu valda 5-20 bara viðbótarþrýstifalli í Suðurhlíðum á 20 ára tímabili umfram það sem annars hefði orðið. Nákvæmari rekstrarforsendur munu ekki liggja fyrir fyrr en við lokagerð líkansins.		
Lykilorð: Kröfluvirkjun, háhitasvæði, vinnslusaga, nýborun, líkanreikningar, hugmyndalíkan, þrívítt reiknilíkan, TOUGH2, vinnsluspár	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra:  Yfirfarið af: ÁsG, BS, PI	



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 666

**Grímur Björnsson
Guðmundur S. Böðvarsson
Helga Tulinius
Ómar Sigurðsson
Sigvaldi Thordarson**

ÁHRIF NÝBORANA Á SUÐURHLÍÐAR KRÖFLU
Áfangaskýrsla um þrívítt reiknilíkan

Unnið fyrir Landsvirkjun

OS-97027

Júní 1997

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	3
2. HUGMYNDA- OG REIKNILÍKAN KRÖFLUSVÆÐISINS	4
2.1 Hugmyndalíkan jarðhitakerfisins	4
2.2 Helstu heimildir	6
2.3 Nýtt reiknilíkan	6
2.4 Tölvuvinnsla og teikningar	9
3. HERMUN Á UPPHAFSÁSTANDI	9
3.1 Bergeiginleikar	9
3.2 Massa- og hitauppsprettur og svelgir	11
3.3 Upphafshiti og þrýstingur	12
4. HERMUN Á VINNSLUSÖGU	13
5. SPÁR UM ÁHRIF AUKINNAR VINNSLU Á SUÐURHLÍÐAR	14
5.1 Aðferðafræði við spágerðina	14
5.2 Nýjar holur og framtíðarvinnsla	14
5.3 Spár um þrýsting Suðurhlíðaholna árin 1997-2018	16
6. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA	22
7. HEIMILDIR	24
VIÐAUKI A: Dreifing bergeiginleika í reiknilíkani Kröflu	27
VIÐAUKI B: Jafngildislínur gufuhluta, hita og þrýstings í upphafsástandi	47
VIÐAUKI C: Rennslisstefnur vökva í upphafsástandi	65
VIÐAUKI D: Mældur og reiknaður hiti og þrýstingur í borholum	83
VIÐAUKI E: Hermun vinnslusögu árána 1974-1996	93

MYNDASKRÁ

1. Aðaldrættirnir í hugmyndalíkani Kröflusvæðisins	5
2. Kubbaskipting í innri hluta Kröflulíkansins og nöfn búta	8
3. Núverandi (svartar doppur) og nýjar holur (stjörnur) á Kröflusvæði	15
4. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 14	17
5. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 14	17
6. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá fyrir holu 16	18
7. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá fyrir holu 17	18
8. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 18	19
9. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 19	20
10. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 19	20
11. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 20	21
12. Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 20	21

TÖFLUSKRÁ

1. Eiginleikar bergsins í Kröflulíkaninu	10
2. Massa- og hitauppsprettur í Kröflulíkani	12
3. Framtíðarárvinnsla Kröfluholna í spáreikningum árána 1997-2018	14

1. INNGANGUR

Í kjölfar ákvörðunar um stækkun Kröfluvirkjunar á síðasta ári, var samið við Orkustofnun um að hún setti upp og stillti af þrívítt reiknilíkan sem hermdi hvoru tveggja, upphafsástand Kröflusvæðisins og vinnslusögu þess. Að því búnu mætti beita líkaninu til að meta hvort og þá hve fýsilegt það er að auka vinnslu úr svæðinu umfram það sem þarf í núverandi 30 MW virkjun. Einkum og sér í lagi var áhugi á að metið yrði hvaða áhrif nýboranir og aukin vinnsla kynnu að hafa á innra ástand Suðurhlíða Kröflu.

Uppsetning þrívíðs reiknilíkans er umfangsmikið og tímafrekt nákvæmnisverk sem reynir mjög á mannskap og tölvur. Ytri aðstæður til líkansmíðinnar voru óhagstæðar í nóvember 1996, vegna endurskipulagnar og niðurskurðar fjárveitinga til Orkustofnunar og losi sem því fylgir. Við því ástandi var brugðist með því að kalla inn í ræsingu verksins Guðmund Bøðvarsson frá Kaliforníu. Eins var kaupum á nýrri og öflugri tölvu flýtt á seinni stigum verksins.

Í þessum skrifuðum orðum er búið að grófherma bæði upphafsástand og vinnslusögu Kröflusvæðisins. Vinnslusögu allra holna allt frá árinu 1974 hefur verið safnað saman til hausts 1996 og hún færð í búning reikniforritsins TOUGH2, sem notað er við reikningana. Haldnir hafa verið fjölmargir verkfundir. Framan af snerust þeir um að samstillja niðurstöður hinna ýmsu jarðvísinda í eitt hugmyndalíkan af öllu Kröflukerfinu. Á seinni stigum fækkaði hins vegar mjög á verkfundunum. Hafa þeir þá einkum farið í að ræða málefni sjálfrar líkansmíðinnar og í ákvarðanir þar að lútandi.

Skýrslan hefst með stuttri lýsingu á því hugmyndalíkani jarðhitakerfanna í Kröflu sem menn urðu ásáttir um að nota og hvernig það er fellt að nýju, þrívíðu reiknilíkani. Eins er greint frá reiknimaskínunni TOUGH2 og fjölmörgum hjálpartækjum sem þróa þurfti umhverfis reikningana. Síðan koma þrír hefðbundnir kaflar um stillingu og notkun líkansins, þ.e. 1) hermun á upphafsástandi, 2) hermun á vinnslusögu og 3) spár um framtíðarástand Suðurhlíða. Í lokin eru niðurstöður reifaðar og gerðar tillögur um lúkningu verksins.

Rétt er að minna á að sú skýrsla sem hér birtist, er í raun áfangaskýrsla í því stóra verkefni sem er að láta eitt reiknilíkan herma lungann úr tiltækri þekkingu um jarðhitakerfin í Kröflu. Ekki ber að líta á hana sem einhvern Stóradóm um framtíðarástand svæðanna. Fremur er hún besta fáanlega verkfærið, á þessari stundu, til ákvarðanatöku um áframhaldandi boranir og aukna vinnslu úr Suðurhlíðum.

2. HUGMYNDA- OG REIKNILÍKAN KRÖFLUSVÆÐISINS

2.1 Hugmyndalíkan jarðhitakerfisins

Fyrsti áfanginn í gerð nýja reiknilíkansins af Kröflu fólst í samstillingu á núverandi „neð-anjarðarþekkingu“ jarðvísindamanna inn í eitt hugmyndalíkan af svæðinu. Haldnir voru sérstakir verkfundir um þennan áfanga sem að komu: forða-, jarð-, jarðefna- og jarðeðlisfræðingar Orkustofnunar, Trausti Hauksson frá Kemíu og Guðmundur Böðvarsson frá Lawrence Berkeley National Laboratory í Kaliforníu. Á þessum fundum var einkum tekið á eftirfarandi atriðum:

- Hvar innstreymi á köldu og heitu vatni (gufu) eigi sér stað á Kröflusvæðinu.
- Hvar og hverjar séu helstu rennislisleiðir vatns og gufu.
- Skilgreining á helstu láréttu bergeiningum og útbreiðsla þeirra.

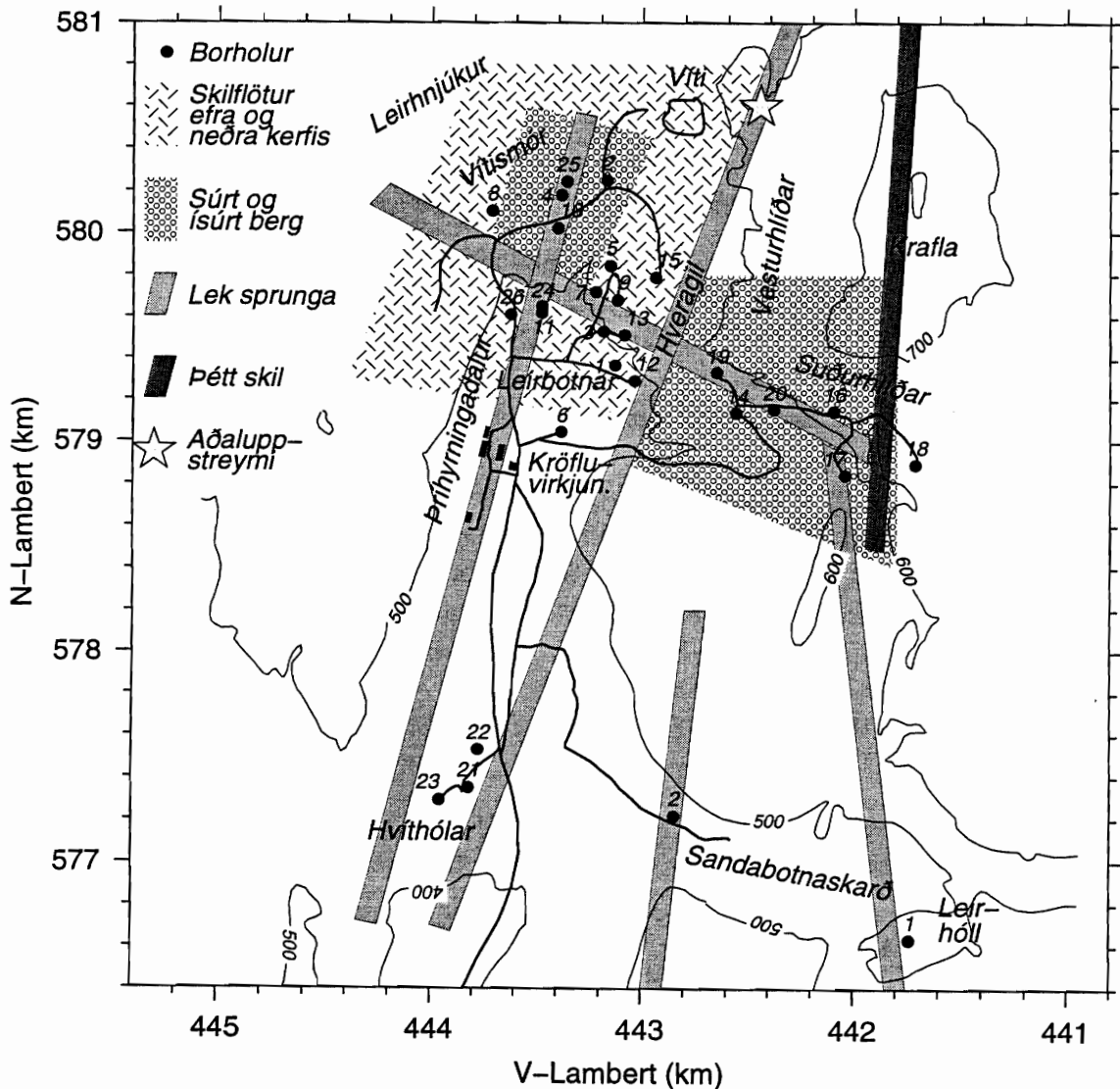
Í meginatriðum var sæst á það hugmyndalíkan sem notað hefur verið í Kröflu allt frá árinu 1981, þ.e. svæðinu má skipta í undirsvæðin Leirbotna, Suðurhlíðar og Hvíthóla. Leirbotnarnir eigi sér efra og neðra kerfi sem eru aðgreind af þéttu, u.þ.b. 200 m þykku millilagi. Í Suðurhlíðum finnast á u.þ.b. 1000 m dýpi ísúrt lag með nokkra útbreiðslu og betri lekt en annars staðar, svo og neðan 2000 m dýpis í Vítismó.

Jarðlagastaflinn í Kröflu er í hugmyndalíkaninu talinn skorin af sex ýmist vel eða illa lekum og mjóum, lóðréttum einingum. Mynd 1 sýnir útbreiðslu þessara lóðréttu bergeininga. Frægust er þar Hveragilssprungan. Hún er talinn ná norðan frá Víti og allt suður til Hvíthóla. Framlengingin til suðurs er nýjung í hugmyndalíkani Kröflu. Hún hefur stuðning í ríkjandi sprungustefnu. Eins benda vatnsborðsbreytingar í holu 6, vegna borunar og blásturs holna 27 og 28, til þess að góð lekt með norður-suður stefnu nái a.m.k. suður til holu 6. Næst ber að telja austur-vestur strúktúr, „horst“, sem liggur þvert yfir Suðurhlíðar og Leirbotna. Hann kemur vel fram í jarðfræði borholna og er grunnþáttur í túlkun viðnámsmælinga og í dreifingu ummyndunar og jarðhita á yfirborði. Þriðji lóðrétti skrokkurinn er talinn liggja úr norðri um holur 4, 11, 25 og 26 og síðan suður um Þríhyrningadal og áfram til suðurs vestan Hvíthóla. Skáholan KJ-22 er talinn ná þessari sprungu neðan 1000 m dýpis. Sprungan skýri lágan hita og mikla dýpt efrakerfisins í holu 25. Jafnframt veitir hún vatni í magni inn í efra kerfið, og skýrir þannig hraða þrýstijöfnun þess í sum-arhvíldum svo og kólnun holu 10 þegar hola 24 blæs.

Annar lóðréttur lektareiginleiki er stemmir með norður-suður stefnu sem skilur holu 18 frá Suðurhlíðum. Eins var ákveðið að bjóða upp á lóðréttu og leka sprungu milli Suðurhlíða og Leirhóls ef í ljós kæmi að stillingar á reiknilíkaninu myndu krefjast slíks. Loks var ákveðið að setja inn lóðréttu og kalda sprungu í N-S stefnu sem fylgir stóru misgengi í austurhlíðum Hlíðardals norður í Sandabotnafjall. Hún á að skýra lágan hita holu 2 í Sandabotnaskarði svo og háviðnámsvæðið sem liggur eftir misgenginu, úr suðri, inn undir Leirbotna.

Segja má að einna mesta umræðan við gerð hugmyndalíkansins hafi farið í skilgreiningu á hvar heitt og kalt vatn eigi að streyma inn í Kröflulíkaninu. Einkum var þar tekið á tilverurétti Leirhnjúks í líkaninu. Að íhuguðu máli var afraðið að sleppa honum. Réði þar

helst að djúpþrýstingur virðist fara lækandi frá austri til vesturs í Kröflu. Það setur Leirhnjúk neðanstreymis við Leirbotna og Suðurhlíðar og þar með verður ólíklegt að hann gefi frá sér vökva inn í núverandi borsvæði. „Kaldi“ strúktúrinn, sem liggur til suðurs frá holu 25, austan Þríhyrningsadals, gæti þannig virkað sem eins konar svelgur á vökva-streymi innan borsvæðisins og eins á Leirhnjúk. Hleypir hann þá vökva úr báðum svæðunum til suðurs, í átt að Námafjalli. Þessi ákvörðun er ekki alveg sársaukalaus því erfitt er að skýra tiltölulega háan hita vestustu Kröfluholunnar, holu 8, nema með yl frá Leirhnjúk. Það býður fínstillingar reiknilíkansins að fá botn í þessa spurningu.



Mynd 1: Aðaldrættirnir í hugmyndalíkani Kröflusvæðisins.

Annars voru menn sammála um að aðaluppstreymi líkansins ætti að vera norðarlega í Hveragilssprungunni, u.þ.b. við Víti, vegna hás efnahita gufu sem þar kemur upp. Eins þótti mögulegt að staðbundnar uppsprettur hreinnar gufu væru til staðar, einkum neðst í horstinum sem gengur þvert yfir Suðurhlíðar og Leirbotna. Nákvæmari skilgreining á legu þeirra og afli yrði hins vegar að koma í sjálfu reiknilíkaninu. Gert er ráð fyrir a.m.k.

tveimur köldum grunnvatnskerfum í yfirborði. Annað er í fersku bergi Sandabotnafjallsins, sem liggur ofan á þéttari sökkli. Það nærast á sumarúrkomu og bráðnun fanna. Afrennsli er síðan til suðurs um fyrnefnt misgengi austan í Hlíðardalnum. Þá stendur grunnvatn upp að 600 m hæð austan í Kröflu. Gæti það grunnvatnskerfi t.d. fætt vatnsból Kröfluvirkjunar í Sandabotnum og eins skýrt að einhverju leyti háan þrýsting holu 18.

Stórt séð er því gert ráð fyrir að meginstefnur vökvastrauma í Kröflu séu frá norðri og norðaustri til suðurs og suðvesturs. Vökvauppsprettur geta verið hvort sem er heitt uppstreymi á miklu dýpi eða háttliggjandi, köld grunnvatnskerfi. Loks er það reiknilíkansins að meta hvort sérstakar djúpar og heitar vökvauppsprettur séu til staðar á syðri öskjujaðrinum, þ.e. í Sandabotnaskarði og við Hvíthól.

2.2 Helstu heimildir

Stuðst var við fjölmargar skýrslur og greinargerðir við endurgerð hugmyndalíkansins af Kröflu. Þar má helst nefna eftirtaldar yfirlitsgreinar og skýrslur.

Borholumælingar: Benedikt Steingrímsson, Grímur Björnsson, 1996: Borholumælingar í Kröflu og Bjarnarflagi árið 1995.

Jarðeðlisfræði: Knútur Árnason, Ragna Karlsdóttir, 1996: Viðnámsmælingar í Kröflu.

Vatnsnám og efnaeftirlit: Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1988-1995: Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás. Árlegar eftirlitsskýrslur.

Yfirborðsjarðfræði: Grein Kristjáns Sæmundssonar í bókinni Náttúra Mývatns, 1991.

Jarð- og jarðefnafræði: Yfirlitsgrein Halldórs Ármannssonar o.fl. í Jökli, 1987.

Hugmyndalíkan: Grein Valgarðs Stefánssonar í Geothermal Systems, 1981.

Forðafræði Leirbotna og Suðurhlíða: Greinar Guðmundar Böðvarssonar o.fl. í Water Resources Research, 1984.

Forðafræði Hvíthóla: Helga Tulinius, Ómar Sigurðsson, 1991: Krafla. Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæðið á Hvíthólum

Þessi upptalning er síður en svo tæmandi, því t.d. eru nú 147 skýrslur og greinargerðir í bókasafni Orkustofnunar þar sem nafnið Krafla kemur fyrir.

2.3 Nýtt reiknilíkan

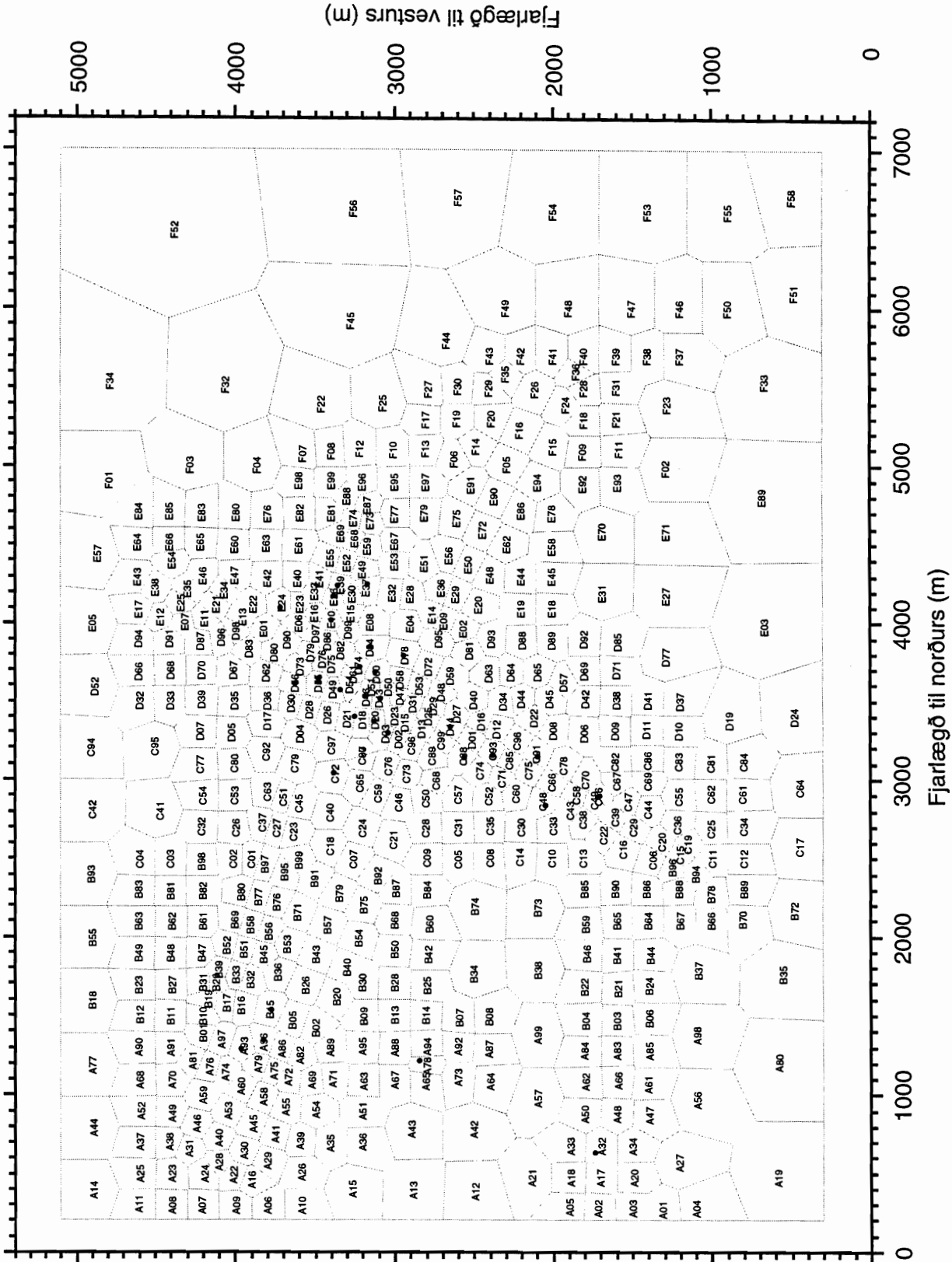
Eftir að grunnþættirnir í hugmyndalíkani Kröflusvæðisins lágu fyrir, var lagt í annan áfanga líkangerðarinnar. Hann fólst í uppsetningu sjálfs reiknilíkansins. Ákveðið var að líkanið skyldi þegar frá upphafi vera nákvæmt, þ.e. að fjöldi líkanblokka yrði nægilegur til að skoða megi rennsli úr einstökum holum nánast hvar sem er á líkansvæðinu (e. well by well grid). Reiknilíkanið samanstendur því af rúmlega 5000 virkum kubbum, sem liggja í átta láréttum lögum um 20 km í allar áttir út frá miðju borsvæðisins. Þá liggur ofan á líkaninu lárétt lag með rúmlega 500 óvirkum kubbum (fastir í hita og þrýstingi) og eins eru dýpst á jöðrum líkansins 8 óvirkir kubbar. Orðvenja er að tala um innri og ytri hluta líkansins. U.þ.b. 550 blokkir eru í innri hluta hvers lags og u.þ.b. 70 blokkir í þeim

Mynd 2 sýnir kubbaskiptinguna í innri hluta líkansins og nöfn kubbanna.

Lögin 8 í Kröflulíkaninu bera nöfnin A-H. Þau eru öll 300 m þykk nema miðlögin, D og E, sem eru einungis 100 m þykk. Miðjur laganna eru í u.þ.b. -50, 250, 550, 750, 850, 1050, 1350 og 1650 m undir sjávarmáli. Meðalhæð Kröfluholna er í rúmlega 500 m y.s., þannig að í kerfi þeirra er dýpsta lagið, H, á 1900-2200 m dýpi. Yfir öllu saman hvílir svo óvirka lagið U, einnig 300 m þykkt og með miðju í 250 m yfir sjó.

Hermireikningarnir eru gerðir með því margreynda og virta forriti TOUGH2. Það byggir á „integral finite difference“ reiknirými. Nafnið TOUGH er skammstöfun á „transport of unsaturated groundwater and heat“ og talan 2 þýðir að um er að ræða aðra kynslóð forritsins. TOUGH2 tilheyrir reyndar fjölskyldu forrita sem reikna flæði orku og massa neð-anjarðar. Þau eru í stöðugri þróun á Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) í Kaliforníu. Notuð var nýjasta útgáfa þess frá haustinu 1996. Til fróðleiks má geta þess að tvífasa reiknilíkan Kröflusvæðisins frá 1981 er það fyrsta sinna gerðar í heiminum. Vitna LBNL menn oft til þeirrar góðu samvinnu sem þá tókst við Íslendinga, og að hún sé ein af undirstöðum þess hve hópurinn þeirra hefur náð langt í rannsóknum á margfasa grunnvatnskerfum. Rannsóknum sem þeir beita mjög til að líkja eftir aðstæðum sem myndast kringum hitamyndandi neðanjarðargeymslur kjarnorkuúrgangs.

Í tilfelli reiknilíkansins á mynd 2, þarf forritið TOUGH2 að setja upp fylki af stærð u.þ.b. 10.000×10.000 . Síðan er leyst fyrir meðalþrýstingi og hita/gufuhluta allra 5000 virku bútanna, í hægvoxandi tímaskrefum. Fyrir hvern bút þarf að skilgreina forðastuðla eins og t.d. lekt og poruhluta. Alls eru notaðar til þess u.þ.b. 25 berggerðir. Nánari lýsing á þeim er í kafla 3 og í viðauka A. Kjarni reikninganna hvílir á varðveislujöfnum orku og massa hvers búts líkansins. Jöfnurnar eru ólínulegar. Eru notaðar að jafnaði 4-5 Newton-Raphson ítranir í hverju tímaskrefi uns leifar af orku- og massamun tímaskrefsins falla niður fyrir eðlileg mörk.



GIMT Jun 5 21:00

Mynd 2: Kubbaskipting eins lags í innri hluta Kröflulíkansins og nöfn búta. Holur eru sýndar með svörtum doppum. Kubbanöfnin eru í raun lengri en hér er sýnt. Búturinn A19 í neðra hægra horni myndarinnar heitir t.d. AA-19 í lagi A, BA-19 í lagi B o.s.frv.

2.4 Tölvuvinnsla og teikningar

Reikniforritið TOUGH2 er keyrt á Unix tölvum, það tekur að jafnaði 60-80 Mb í vinnslu-
minni og disknotkun er veruleg. Eldri vinnsutöðvar Orkustofnunar þurftu um eina mín-
útu fyrir hvert tímaskref reikninganna, en eftir páska komu inn á netið nýjar vinnustöðvar
sem anna 2½-3 tímaskrefum á mínútu. Keyrsla líkansins frá köldu upphafsástandi til árs-
ins 1974 tekur u.þ.b. 8-12 CPU klukkustundir á nýju tölvunum og keyrsla vinnslusögunn-
ar (milli 1974 og 1996) tekur um 8 CPU klukkustundir. Hins vegar tekur einungis rúma
klukkustund að reikna 20 ára spá, ef vinnslan er höfð jöfn. Alger bylting var að fá þessar
tölvur í notkun því eldri vélarnar hefðu verið þrisvar sinnum lengur að.

Skoðun á reikniniðurstöðum er umfangsmikil. Til að skoða upphafsástand eru teiknaðar
um 80 myndir og til skoðunar á vinnslusögu eru einnig teiknaðar um 80 myndir með alls
um 300 ferlum. Mikill fjöldi ferla skýrist af því að upplýsingar úr 28 holum eru notaðar
til að skorða af eiginleika reiknilíkansins. Bornir eru saman mældur og reiknaður hiti,
þrýstingur svo og vermi og gufuhluti allra holna sem nokkru sinni hafa blásið. Sumir
viðaukanna í þessari skýrslu eru teiknaðir með forritinu GMT (Wessel, P., and W. H. F.
Smith, 1995). Það nýtur vinsælda meðal UNIX sinnaðra jarðvísindamanna og er auðvelt
að beita í skeljaforritum líkt og þeim sem teikna viðaukamyndirnar. Nær allar skrár sem
tengjast líkangerðinni eru geymdar á svæðunum /ffr/krafla og /ffr/work, samtals um 1,3
gígabæti.

3. HERMUN Á UPPHAFSÁSTANDI

Fyrri áfanginn í stillingu reiknilíkans Kröflu fólst í hermun á upphafsástandi Kröflusvæð-
isins eins og það er metið árið 1974, þegar hola 1 er boruð. Þar var einkum glímt við
staðsetningu og kraft á heitum uppsprettum, þrýsting og hita á jöðrum og sér í lagi lekt
jarðlaga í líkaninu. Þetta reyndist töluvert tímafrek vinna enda margs að gæta. Einkum
reyndist tímafrekt að fá fram háan þrýsting í miðju líkansins, lækkandi út til allra átta,
svo og almennt fallandi þrýsting frá norðaustri til suðvesturs. Reyndist líkanið mjög
næmt fyrir lekt jaðra og þrýstingi óvirku blokkanna og tók stilling þessa töluverðan
tölvutíma.

3.1 Bergeiginleikar

Tafla 1 sýnir berggerðirnar sem eru til staðar í inntaksskrá TOUGH2. Tilgreina þarf eftir-
talda eiginleika fyrir hvern búa líkansins: *eðlisþyngd*, *poruhluta*, *lektir í x, y og z stefnur*,
varmaleiðni og *varmarýmd*. Venja er að lekt í x stefnu sé höfð lárétt milli norðurs og
suðurs, lekt í y stefnu er lárétt milli austurs og vesturs og lekt í z stefnu er lóðrétt. Reynd-
ar er y-lektin einungis frábrugðin x-lektinni í fáum tilvikum, enn sem komið er.

Tafla 1: Eiginleikar bergsins í Kröflulíkaninu.

Nafn berg-eiginl.	Eðlisþyngd (kg/m ³)	Poruhluti	k _x (mD)	k _y (mD)	k _z (mD)	Varmaleiðni (W/m°C)	Varmarýmd (J°C/kg)
efrak	2650	.10	10.	5.	10.	2.20	1000.
3hdal	2650	.05	.1	1.	.1	2.20	1000.
hvgil	2650	.10	40.	10.	7.	2.20	1000.
horst	2650	.10	25.	10.	5.	2.20	1000.
leirh	2650	.10	25.	10.	5.	2.20	1000.
midj1	2650	.03	0.05	10.	0.05	2.20	1000.
out_1	2650	.05	4.0	2.0	4.	2.20	1000.
out_2	2650	.05	2.0	1.0	2.	2.20	1000.
efrij	2650	.05	4.0	2.0	4.	2.20	1000.
nedrj	2650	.03	2.0	1.0	2.	2.20	1000.
djup1	2650	.03	1.0	1.0	1.0	2.20	1000.
lipar	2650	.10	5.	5.	1.	2.20	1000.
s-hvg	2650	.10	2.	1.0	1.	2.20	1000.
out4E	2650	.10	4.0	2.0	4.0	2.20	1.E+30
out4N	2650	.10	2.0	1.0	2.0	2.20	1.E+30
misge	2650	.10	10.	10.	5.	2.20	1000.
bar18	2650	.03	0.01	10.	0.01	2.20	1000.
Krafl	2650	.03	2.	1.	3.	2.20	1000.
þakbe	2650	.05	5.	1.	0.15	2.20	1000.
nokul	2650	.10	30.	30.	30.	2.20	1000.
slagA	2650	.05	0.5	2.	0.2	2.20	1000.
slagB	2650	.05	4.	8.	13.	2.20	1000.
hveba	2650	.10	5.	1.	5.	2.20	1000.
horba	2650	.10	5.	1.	5.	2.20	1000.
leiba	2650	.10	5.	1.	5.	2.20	1000.

k_x , k_y og k_z eiga við lektir í x , y og z stefnur. Lektin er gefin í einingunni $mD = \text{milliDarcy} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$.

Í viðauka A er sýnt hvernig ofangreindum bergeiginleikum er raðað á blokkirnar í innri hluta reiknilíkansins. Skoðun myndanna sýnir að þar er í meginatriðum fylgt þeim stóru dráttum sem færðir eru inn á mynd 1. Eiginleikar ytri hluta líkansins eru ekki sýndir. Honum fylgja eiginleikarnir *out_1*, *out_2*, *efrij*, *nedrj*, *out4E* og *out4N*. *out_1* vísar til innsta blokkahringsins í ytri hlutanum (a-blokkir) og *out_2* til blokkahringsins næst utan við (b-blokkir). *Efrij* er síðan settur á svonefndar c blokkir í lögum A-C og *nedrj* á c blokkir í lögum D-H. Í ysta blokkahringnum eru svo einungis 8 blokkir í hverju lagi. Þær hafa sömu eiginleika (*out4E* og *out4N*) og *efrij* og *nedrj* utan að varmarýmd er höfð óendanlega há til að tryggja sé að hiti sé stöðugur í þeim. Í neðsta laginu, H, er rúmmál blokkanna þess utan haft óendanlega hátt til að tryggja stöðugan þrýsting.

3.2 Massa- og hitauppsprettur og svelgir

Mikilvægur þáttur í hermun á upphafsástandi felst í skilgreiningu á stöðum þar sem massi og hiti er að streyma inn og út úr líkaninu í föstu magni. Hér er ýmist um að ræða massa- og/eða hitauppsprettur, en einnig gegna óvirku blokkirnar ofan á og neðst í hliðum líkansins stóru hlutverki.

Segja má að aðeins ein veigamikil breyting hafi verið gerð á uppsetningu reiknilíkansins frá því sem afráðið var í byrjun desember 1996. Þar er átt við tilkomu lagsins, U, sem liggur eins og plata yfir öllum innri hluta líkansins. Til þessa lags tapar líkanið varma með leiðni og eins virðist sem ákveðin lekt þurfi að vera til þess. Framan af var reynt að líkja eftir varmatapinu til yfirborðs með föstum hitasvelgjum og styrkur þeirra felldur að þeim hitastigli sem mælist í efstu 200 m borholna. Þessi aðferðafræði hafði þann ókost að stundum varð varmatapið upp úr líkanblokk meiri en varmaflæðið inn í hana, hún smákólnaði uns hitinn fór í 1 °C og stöðvast keyrsla TOUGH2 þar með. Slík vandkvæði hurfu sem dögg fyrir sólu með tilkomu U-lagsins, auk þess sem það kældi töluvert efra kerfið í Kröflu, miðað við hvað gerðist með fasta varmatapinu. Sem stendur virðist heppi-legt að skilgreina hita U-lagsins sem 40 °C og þrýsting um 10 bör-a.

Þá streymir upp í líkanið, neðan frá, hiti sem jafngildir u.þ.b. 0,2 W/m². Það er sambærilegt við 90 °C/km stigul þar sem varmaleiðnin er 2,2 W/m/°C. Hugsanlega á eftir að skipta þessu hitaflæði út með öðru óvirku lagi, líku U-laginu. Það gefur líka kost á misheitu undirlagi.

Tafla 2 sýnir hvar massi er látinn streyma í föstu magni inn í Kröflulíkanið. Þar eru veigamestar uppsprettur í Hveragilssprungunni og í Suðurhlíðum, samtals með um 50 kg/s af 310-350 °C heitum vökva. Þess utan eru minni uppsprettur gufu, einkum eftir horstinum svonefnda.

Í töflu 2 sést að í nokkru hefur verið vikið frá upphaflegum markmiðum um staðsetningu innstreymispunkta og eru þeir mun víðar en fyrst var ætlunin, þ.e. auk Hveragils í Vítismó, Hvíthólum, við Leirhól og í Suðurhlíðum. Fjöldi þeirra skýrist að hluta af þeirri tímapressu sem sett var á gerð reiknilíkansins, en mun auðveldara er að ná samræmi mælds og reiknaðs hita með mörgum dreifðum massauppsprettum fremur en fáum.

Tafla 2: Massa- og hitauppsprettur í Kröflulíkani.

Blokkar- heiti	Rennsli (kg/s)	Vermi (kJ/kg)	Hiti (C)	Gerð	Staðsetning
HE- 9	8.	1630.	350	Vatn	Nyrst í Hveragili
HE-29	8.	1630.	350	Vatn	Nyrst í Hveragili
HE-50	8.	1630.	350	Vatn	Nyrst í Hveragili
HE-72	8.	1630.	350	Vatn	Nyrst í Hveragili
HE-73	5.	1630.	350	Vatn	Norðan við KG-25
HC-10	18.	1430.	315	Vatn	Sunnan við KJ-17
HA-89	9.	1402.	310	Vatn	Austan Hvíthóla
HA-50	9.	1402.	310	Vatn	Norðan Leirhóls
HD- 1	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HD-14	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HD-25	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HC-93	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HC-85	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HC-75	0.5	2800.		gufa	Í horsti Suðurhlíða
HD-31	0.5	2800.		gufa	Í skurðp. Hveragils og horst
HD-15	0.5	2800.		gufa	Við skurðp. Hveragils og horst
HD-47	0.5	2800.		gufa	Við skurðp. Hveragils og horst
HD- 2	0.5	2800.		gufa	Við skurðp. Hveragils og horst
HD-76	0.5	2800.		gufa	Í skurðp. Þríhyrningad. og horst
AB-60	2.	3.	1	Vatn	Kaldavatnskerfi í Sandabotnafjalli
AE-89	2.	3.	1	Vatn	Kaldavatnsk. austan í Kröflu
AA-13	-2.			Vatn	Hermir útrennsli í misg. til suðurs
BD-15	-0.1	2700		Gufa	Hermir gufuaugu í Hveragili
BD-53	-0.1	2700		Gufa	Hermir gufuaugu í Hveragili

3.3 Upphafshiti og þrýstingur

Tæknilega má segja að reiknilíkanið sem hér er kynnt, sé hitað upp frá einhverju köldu upphafsástandi þar til hiti og þrýstingur allra blokka er kominn í jafnvægi, oft að 10 til 20 þúsund árum liðnum. Á þeim tímapunkti er staldrað við og skoðað hvernig samræmi er komið á milli reiknaðs og áætlaðs berghita og þrýstings í öllum Kröfluhólunum. Viðauki B sýnir jafngildislínur hita, þrýstings og gufuhluta í lögunum 8, í viðauka C er sýnt hvernig láréttu og lóðréttu streymi var háttað í lögunum 8, og loks sýnir viðauki D hvernig samræmi fékkst milli mælds og reiknaðs hita og þrýstings í holum.

Almennt má segja að samræmi mældra og reiknaðra gilda sé orðið þökkalega gott, en að víða megi stilla betur hita- og þrýstístandið. Bíður það títtnefndrar fínstillingar líkansins. Líkanið er heitast um miðbikið, einmitt þar sem heitu uppsprettur eru. Löngu og

leku sprungurnar koma áberandi í gegn um jafngildislínur hita og þrýstings, líkt og til var ætlast í upphafi. Sömu sögu er að segja af rennslisstefnum, þær eru áberandi sterkastar eftir sprungunum. Eins er áberandi að vökvi sækir upp um miðbik líkansins og streymir niður á jöðrunum. Það veldur því að vatn sækir lárétt inn að kjarna líkansins, í neðsta laginu H, og kælir það óþarflega mikið.

Skoðun holumyndanna í viðauka D sýnir að þrýstingur er almennt nærri lagi í efra kerfi Kröflu en hiti of hár, meðan að þrýstingur er almennt of hár í dýpri hluta líkansins en hiti aftur á móti nærri lagi. Suðurhlíðaholurnar eru yfirleitt nærri lagi í upphafsástandi, en eru þó ívið of lágar í upphafsþrýstingi. Lagfæring þessa bíður næsta áfanga verksins.

4. HERMUN Á VINNSLUSÖGU

Síðari áfangi líkansmíðinnar fólst í hermun á vinnslusögu Kröflukerfisins. Hér fór svo að samansöfnun á vinnslusögu svæðisins tók á móta langan tíma og sjálf tölvuvinnslan, enda þurfti að leita fanga í fjölmörgum skýrslum, tveimur tölvukerfum og í hirslum Kröflu-virkjunar.

Nú hefur venjan verið sú í rekstri Kröflusvæðisins, að afl holna er oftast skráð tvisvar á ári, við upphaf og lok rekstartímans. Er aflið þá oftast minna í lokin en í upphafi. Ekki er ljóst hvernig vinnslan hefur hagað sér þarna á milli. Hér var valin sú leið að láta hana falla hratt í byrjun en síðan hægði verulega á aflmínkuninni (veldisfall).

Síðan var útbúin sá hluti af inntaksskrá TOUGH2, þar sem lýst er vinnslu í kg/s með tímanum, og látinn líða einn mánuður á milli tímagilda. Með því móti er búið að lýsa vinnslunni eins vel tæknilega og frekast er unnt. Eins var líkanblokkum sem innihalda vinnsluholur skipt upp í þrjár minni, til aukinnar nákvæmni í þrýsti- og vermireikningum.

Eftir að vinnslusagan var komin á rétt form, var unnið samkvæmt henni úr Kröflulíkaninu frá ársbyrjun 1974 og fram að áramótum 1996/1997. Upphafsástand líkansins var það sama og lokaástand upphitunarlíkansins. Reikniknetið og bergeiginleikarnir eru alveg þeir sömu. Þessi hluti reikninganna gekk furðu vel, smávægileg keyrsluvandræði urðu í einstökum æðum en þau var auðvelt að leysa. Niðurstöður úr þeirri gerð líkansins sem hér er til umfjöllunar eru sýndar í viðauka E, en þar eru teiknuð saman reiknað og mælt vermi í holum, svo og mældur og reiknaður þrýstingur. Gerð er sérstök mynd fyrir hverja æð sem skilgreind er í vinnsluskránni, en oft eru tvær æðar í sömu holunni.

Segja má að nálgun vinnslusögunnar hafi tekist þokkalega vel. Sums staðar þarf þó að bæta um betur, einkum hvað varðar þrýsting efra kerfisins. Hann reiknast hægfallandi með tímanum, öfugt við hvað er mælt. Veldur það ákveðinni svartsýni í framtíðarspám og ætti að teljast öryggisspilamennska í áfangaskýrslu sem þessari. Þá er eftir ákveðin vinna í stillingu á poruhluta, en hann hefur mikil áhrif á reiknað vermi holna.

5. SPÁR UM ÁHRIF AUKINNAR VINNSLU Á SUÐURHLÍÐAR

5.1 Aðferðafræði við spágerðina

Hér á eftir er sett fram mat á áhrifum aukinnar vinnslu úr Suðurhlíðum og til þess notað líkan sem einungis er grófkvarðað. Hvaða brögðum er þá hægt að beita til að það framleiði marktæka spáreikninga? Hér er tekin sú afstaða að beita eigi eins konar truflana-reikningi, þ.e. bornir eru saman afkastaferlar Suðurhlíðaholna án og með tilkomu nýrrar holu. Þar með fáist tilfinning fyrir áhrifum viðbótarinnar, þó svo að reiknilíkanið spái ekki endilega rétt um heildarástand svæðisins.

5.2 Nýjar holur og framtíðarvinnsla

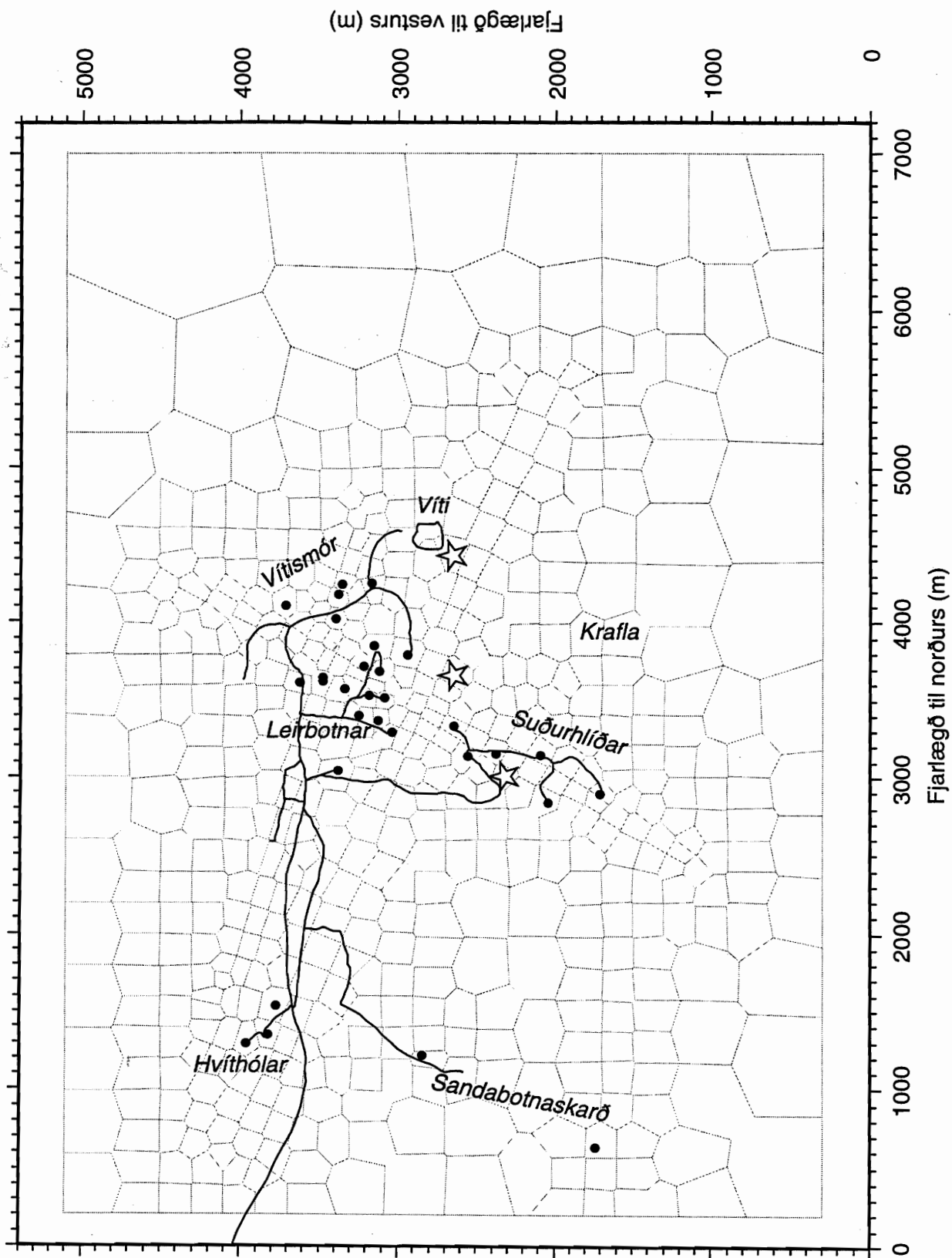
Mynd 3 sýnir kubbaskiptingu reiknilíkansins og staðsetningu núverandi holna fram að holu 28. Gert er ráð fyrir framtíðarvinnslu úr þremur öðrum nýjum holum (óboraðar á þessari stundu). Þær eru:

- Suðurhlíðahola skammt sunnan holu 20.
- Vesturhlíðahola sem fer á ská til norðurs út frá holu 19.
- Önnur vesturhlíðahola austan Vítis.

Tafla 3 sýnir hvaða jafnaðarársvinnslu er gert ráð fyrir í spánum, sem látnar eru ná frá ársbyrjun 1997 til ársins 2018. Er þá búist við því að Kröflustöð verði keyrð árið um kring og að afköst núverandi vinnsluholna haustið 1996 haldist þau sömu allan keyrslutímann.

Tafla 3: *Framtíðarársvinnsla Kröfluholna í spáreikningum árána 1997-2018. Miðað er við að haustvinnslan 1996 haldist áfram í holum 5-26.*

Svæði	Vinnsla (kg/s)	Skýringar
Efri Leirbotnar	80	Holur 5, 9 (70%), 24, 25 efri og 28. Ekki full vinnsla v. fínstillingamála.
Neðri Leirbotnar	48	Holur 9 (30%), 11, 12, 13, 15, 25 neðri og hola 26.
Suðurhlíðar	39	Holur 14, 17, 19 og 20.
Hvíthólar	40	Hola 21, líklega afminkun með tímanum.
<i>Tvær nýjar holur í neðri Leirbotnum</i>	20	<i>Hola 27 (dýpkun) og hola 29</i>
<i>Tvær nýjar holur í Vesturhlíðum</i>	20	<i>Skáhola frá 19 og hola austan Vítis</i>
<i>Ný hola í Suðurhlíðum</i>	<i>0,20,40,60</i>	<i>Boruð sunnan holu 20.</i>
Samtals	250-300	



Mynd 3: Núverandi (svartar doppur) og spáholur (stjörnur) á Kröflusvæði.

Í töflu 3 er gert ráð fyrir minni vinnslu úr Efrakerfinu en verður í raun. Skýring þess er sú að í núverandi reiknilíkani eru jaðrar þess skilgreindir of þéttir, sem aftur leiðir til reiknaðs langtímaniðurdráttar. Það er andstætt vinnslusögunni. Frekar en að eyða tíma í að stilla jaðarlektina nákvæmar, var því gripið til þess ráðs að minnka vinnsluna úr Efrakerfinu. Áhrifin ættu að vera svipuð.

Þá var einnig dregið úr vinnslu úr holum 5, 13 og 21, eingöngu til að koma í veg fyrir að reiknilíkanið hryndi á of lágum þrýstingi við þær. Enn og aftur er það fínstillingaratriði í líkaninu að rétta þetta af.

Sú vinnsla sem sýnd er í töflu 3 jafngildir um 8-10 milljóna tonna ársvinnslu. Til samanburðar má geta þess að vinnsla vetursins 1994-1995 dró um 2½ milljónir tonna úr svæðinu. Vinnslan í töflu 1 ætti því að vera nærri lagi hvað varðar gufuöflun fyrir 60 MW stöð sem er keyrð árið um kring.

5.3 Spár um þrýsting Suðurhlíðaholna árin 1997-2018

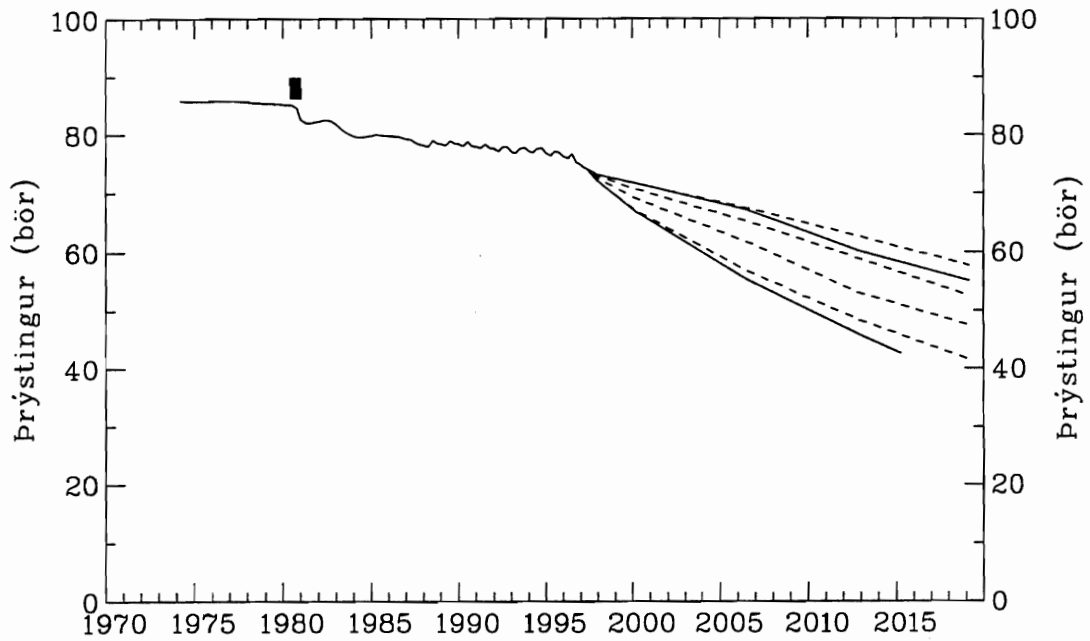
Myndir 4-12 sýna mældan og reiknaðan þrýsting allra holna í Suðurhlíðum árabilið 1974 til 2018. Er þá búið að skoða fjögur vinnslutilvik úr töflu 3:

- Engin nýborun í Suðurhlíðum en aðrar holur eins og í töflu 3.
- Ný hola suðvestan holu 20 vinnur 20 kg/s að meðaltali. Vinnur úr tveimur jafngóðum æðum á u.þ.b. 1000 og 1700 m dýpi.
- Nýja holan vinnur 40 kg/s að meðaltali.
- Nýja holan vinnur 60 kg/s að meðaltali.

Þessu til viðbótar var einnig skoðað hvað gerðist ef slökkt er á 18 kg/s hitaupstreyminu sem er í líkaninu sunnan holu 17.

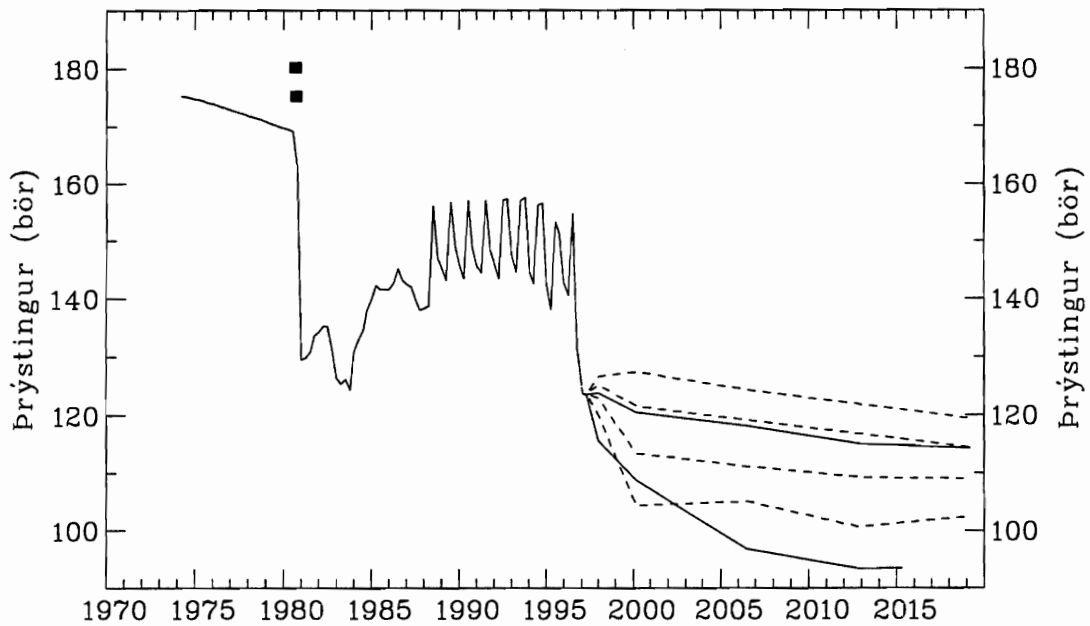
Myndirnar sem fylgja hér á eftir skýrast þannig: Fylltir ferningar tákna mældan þrýsting, heildregin lína er reiknuð skv. vinnslusögu árána 1974-1996 og slitnar línur tákna spá. Er efsti brotni ferillinn í öllum tilfellum þá spá um þrýsting ef engin ný hola kemur í Suðurhlíðar, sá næsti gildir ef 20 kg/s eru tekin úr nýrri holu, þá 40 kg/s og sá neðsti er þrýstisþá ef 60 kg/s ársmeðaltal er tekið úr nýju holunni. Heildregnu ferlarnir, eftir árið 1996, sýna svo hvernig þrýstingurinn muni haga sér ef slökkt er á 18 kg/s innrennslinu sunnan KJ-17. Táknar sá efri þrýsting án nýrrar Suðurhlíðaholu en sá neðri gildir ef ný hola tekur alls 60 kg/s. Allir þrýstiásar spanna sama tölubil.

23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 4: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 14.

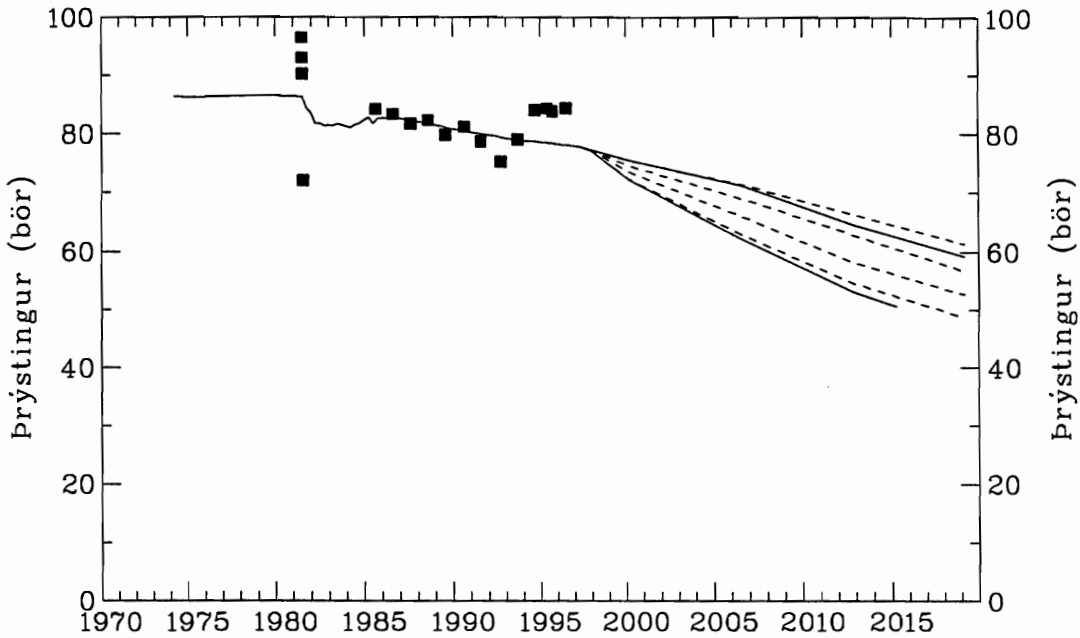
23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 5: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 14.

Töluverður munur er á niðurdrætti í efri og neðri æð holu 14. Hér er væntanlega um að kenna of lágrri lekt í neðri æðinni og of hárrí í þeirri efri. Heildaráhrifin ættu að koma út á eitt þegar leiðrétt hefur verið fyrir þessu.

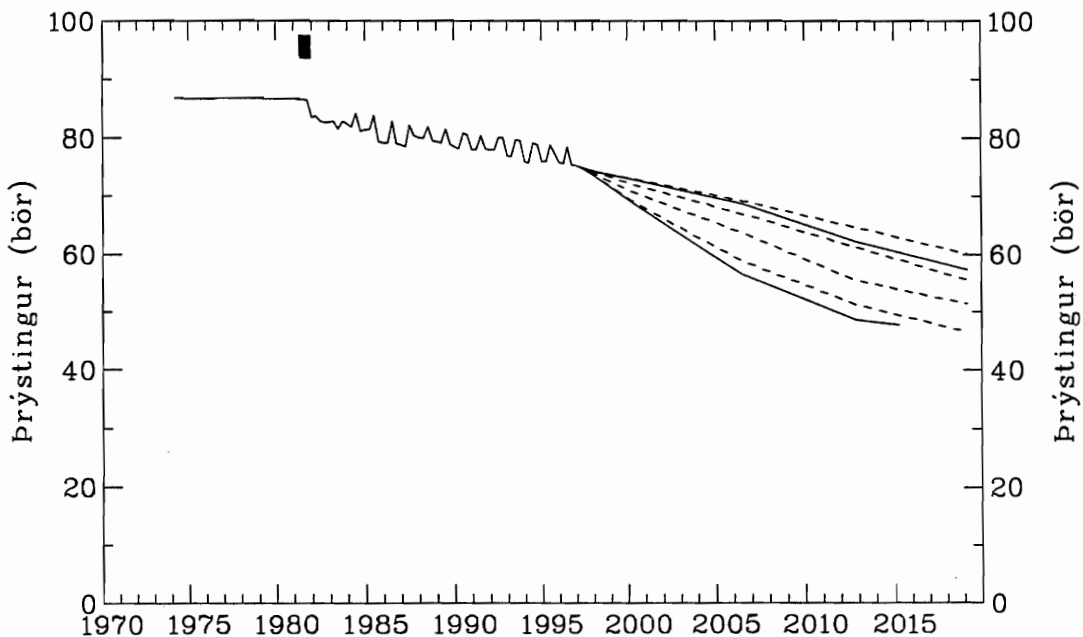
23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 6: Mældur og reiknaður prýstingur og prýstispá fyrir holu 16.

Hola 16 er önnur af aðaleftirlitsholunum í Suðurhlíðum og hafa árlegar prýstimælingar í henni verið færðar inn á mynd 6. Þar sést að reiknilíkanið fylgir þokkalega vel niðurdrætti árána 1983-1993, en nær ekki að herma prýstijöfnunin eftir árið 1993. Meir en tvöföldun vinnslu úr Suðurhlíðum nær ekki að tvöfalda niðurdráttarhraða árána 1983-1993 og verður árlegt prýstifall einhvers staðar á bilinu 0,8 til 1,4 bör á ári.

23 May 1997 GrB
tp V2.3

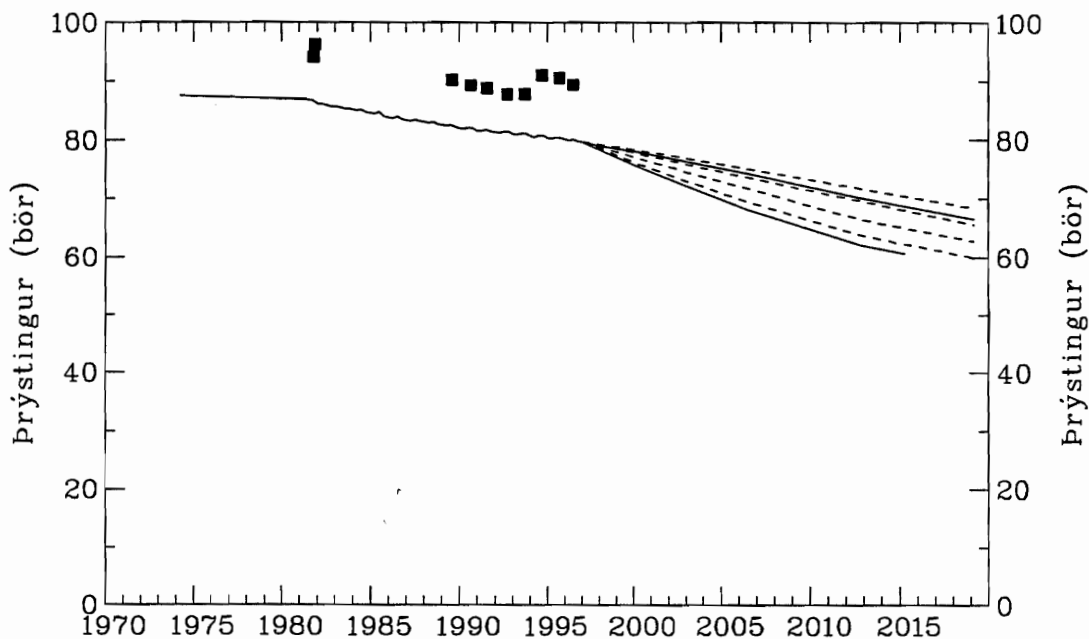


Mynd 7: Mældur og reiknaður prýstingur og prýstispá fyrir holu 17.

Hola 17 virðist lítt taka eftir aukinni vinnslu úr Leirbotnum og Vesturhlíðum, því sá halli sem er á reiknuðum prýstingi fram til ársins 1996 virðist haldast áfram til 2018 ef engin

ný Suðurhlíðahola er boruð. Nýja holan eykur hins vegar á hraða niðurdráttar og verður hann u.þ.b. 15 bör umfram það sem óhjákvæmilega yrði ef engin ný hola er boruð.

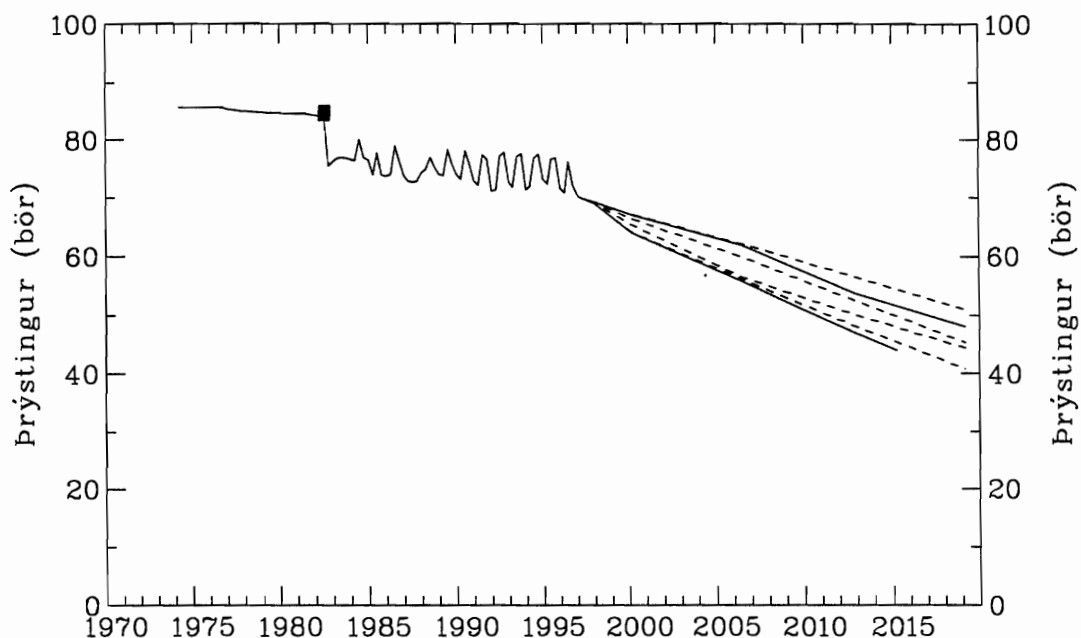
23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 8: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 18.

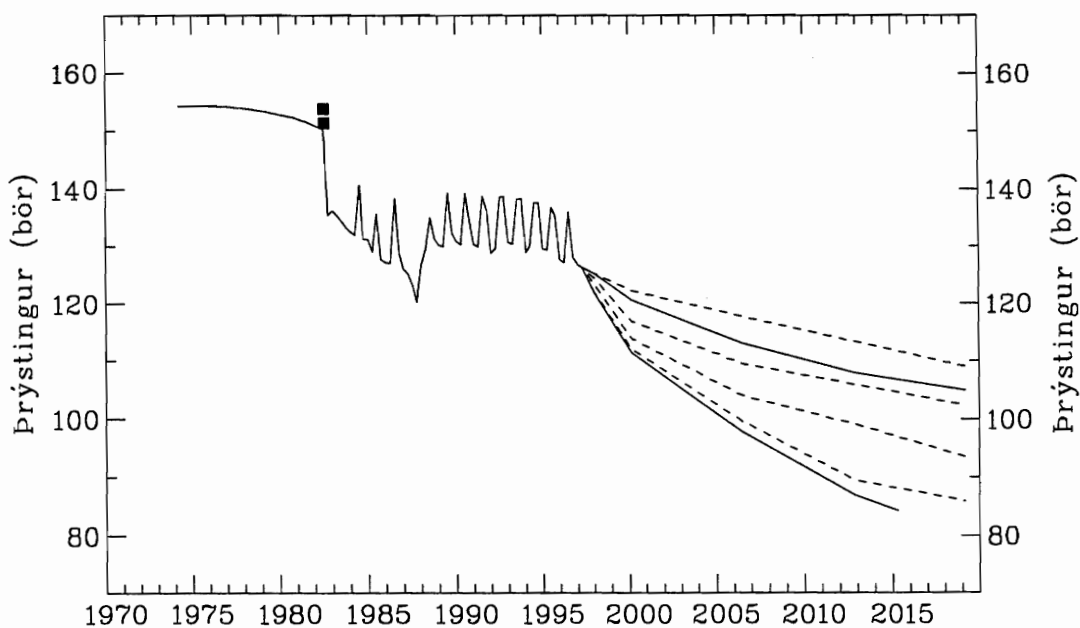
Líklega gefur hola 18 einna besta vísbendingu allra Kröfluholna um ástandið á jöðrum svæðisins, og þar með innsýn í hve miklum viðbótarvökva þeir veita að borsvæðunum eftir því sem þrýstingur fellur innan þeirra. Líkanið hermir vel mældan niðurdráttarhraða árabilið 1982-1993, en líkt og í holu 16 er ekki búið að nálgast þrýstihækkunina sem varð eftir árið 1993. Dreigið hefur úr þrýstifallinu um tæpan helming frá því sem var í holu 16. Spannar það nú innan við 10 bör í holu KJ-18 fyrir vinnslutilfellið sem skoðuð voru.

23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 9: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 19.

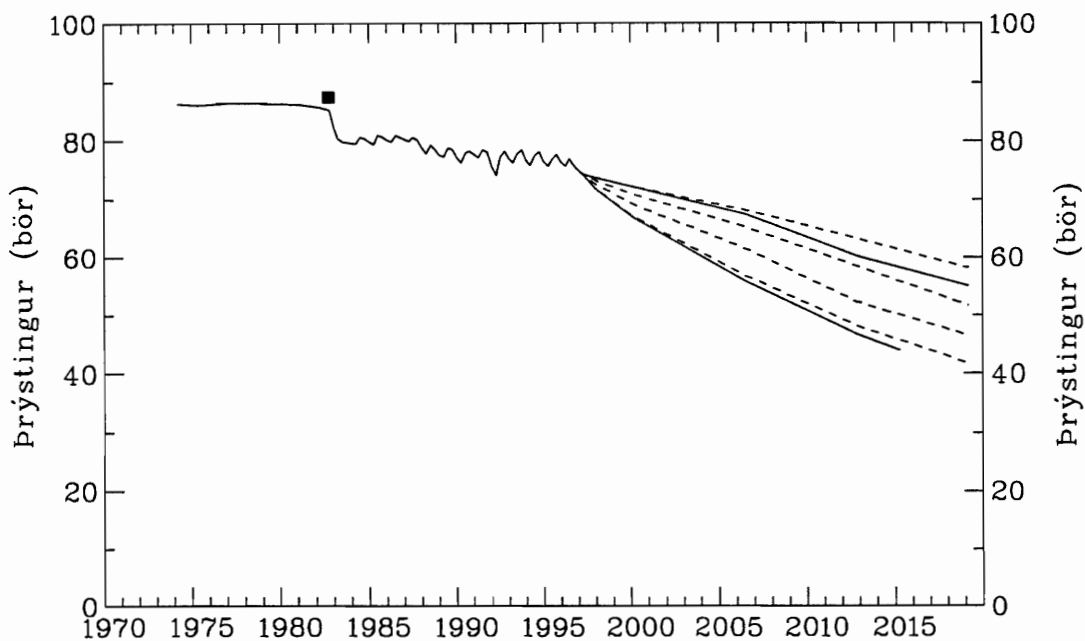
23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 10: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 19.

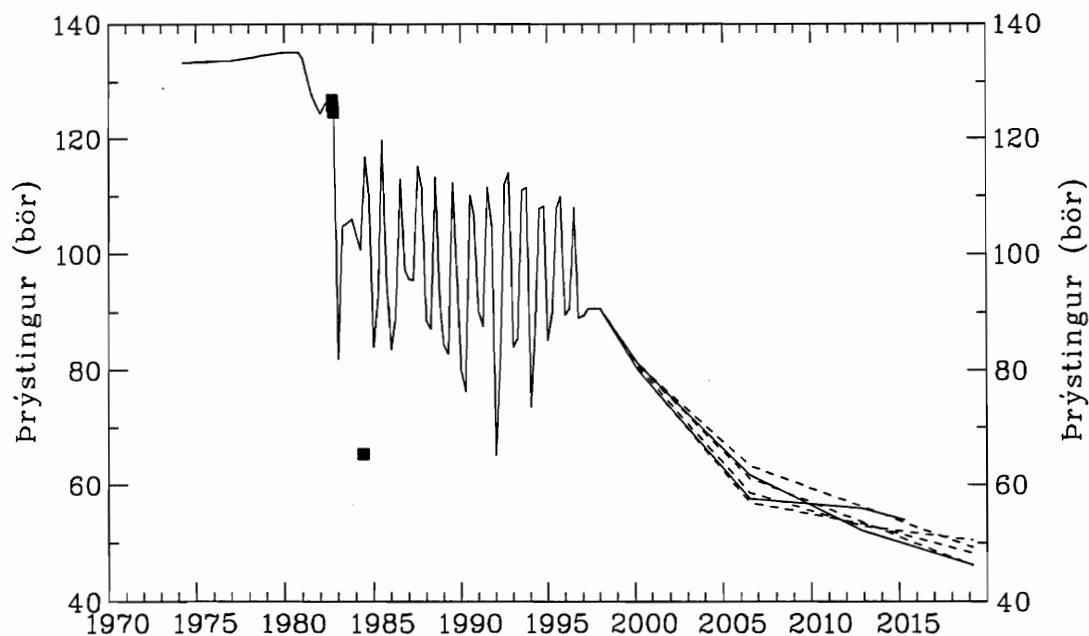
Hola 19 hegðar sér mjög líkt hinum Suðurhlíðaholunum og samanburður milli æða bendir enn og aftur til þess að lektir þurfi að lækka eitthvað í efri æðinni en hækka í þeirri neðri (eru núna 1 og 5 mD). Munur þrýstings eftir vinnslu úr nýju Suðurhlíðaholunni fer vaxandi og má vera að hola 19 kenni hér aukinnar vinnslu úr nýju Vesturhlíða- og Leirbotnaholunum.

23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 11: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í efri æð holu 20.

23 May 1997 GrB
tp V2.3



Mynd 12: Mældur og reiknaður þrýstingur og þrýstispá í neðri æð holu 20.

Hola 20 finnur hvað harðast fyrir vinnslu úr nýju Suðurhlíðaholunni, og ræðst það af stuttri fjarlægð frá henni. Eftir er að gera ráð fyrir halla holu 20 til norðurs í reiknilíkaninu og gefur mynd 12 því of svartsýna spá um framtíðarástandið.

Athyglisvert er að Suðurhlíðaholurnar eru lítt næmar fyrir styrk 18 kg/s massainnstreymisins sunnan holu KJ-17. Það er jákvætt að vita, því hugsanlega hefði þetta kröftuga inn-

streymi leitt til óþarfa bjartsýni um afköst Suðurhlíða. Ljóst er að gera þarf fleiri slíka næmnireikninga í fullnaðargerð líkansins.

Í heild sinni virðist því sem ný hola í Suðurhlíðum, sunnan holu 20, hafi ekki umtalsverð áhrif á þrýsting holna í nágrenninu. Gera má ráð fyrir þrýstisamgangi upp á 5-20 bör á 20 ára tímabili, eða 0,25-1 bara viðbótarþrýstifalli frá því sem ella yrði. Það veldur smávægilegri aflminnkun gömlu holnanna, en væntanlega er hún óveruleg í samanburði við heildarvinnsluna. Vermi virðist haldast nokkuð hátt og jafnt í ofangreindum spádómum, en óvarlegt er að slá föstu um það fyrir en fínstillingu líkansins er lokið.

6. NIÐURSTÖÐUR OG UMRÆÐA

Helsu niðurstöður þessarar áfangaskýrslu um gerð reiknilíkans af Kröflusvæðinu og áhrifum nýrra holna á ástand Suðurhlíða, eru eftirtaldar:

1. Hugmyndalíkan Kröflukerfanna hefur verið endurmetið með aðkomu margra jarðvísindamanna sem unnið hafa á svæðinu. Eldra hugmyndalíkani er fylgt í meginatriðum. Þó eru þar á tvær nýjungar. Gert er ráð fyrir að Hveragilssprungan nái allt suður til Hvíthóla. Eins er kynnt til sögunnar lóðrétt, N-S sprunga austan Þríhyrn-ingadals.
2. Sett hefur verið upp rúmlega 5000 búta kubbalíkan og það fellt í meginatriðum að hugmyndalíkaninu. Vinnslusögu allra Kröfluholna árabilið 1974-1996 var safnað saman og hún færð í búning reikniforritsins TOUGH2, sem notað er við hermireikningana. Eins hafa fjölmörg hjálpartæki verið þróuð til að skoða og teikna niðurstöður úr hermireikningunum.
3. Á þessari stundu er búið að grófherma bæði upphafsástand og vinnslusögu Kröflusvæðisins. Vökvaflæði er almennt mikið í nokkrum, löngum sprungum en mun minna í þéttu bergi milli sprunganna. Stillingu líkansins er ekki lokið, og á eftir að fínvinna hluti eins og t.d. poruhluta og styrk vökvauppsprettna. Þá er líkanið óþarflega svartsýnt um viðbrögð efri hluta Leirbotna og reiknast þar langtímaþrýstifall, öfugt við mælda vinnslusögu.
4. Gerðar voru spár um viðbótaráhrif þess að vinnsla sé aukin í Suðurhlíðum (ný hola boruð). Er þá gengið út frá því að haustvinnsla ársins 1996 haldist árið um kring í eldri Kröfluholum (5-26), og að nýjar holur í Leirbotnum og Vesturhlíðum vinni samtals um 40 kg/s. Skoðuð voru áhrif af 0, 20, 40 og 60 kg/s viðbótarvinnslu úr nýrri holu sunnan KJ-20. Samtals jafngildir þetta 7-10 milljóna tonna ársvinnslu, sem er þre- til fjórföldun massatöku frá því sem var í rekstri einnar 30 MW vélar með sumarhléum.
5. Svo virðist sem borun nýju holunnar valdi á 20 ára tímabili 5-20 bara viðbótarþrýstifalli við það sem annars hefði orðið. Jafngildir það 0,25-1 bari á ári. Talið er að þetta viðbótarþrýstifall verði tæknilega viðráðanlegt á svo löngum tíma, þó svo

að afl eldri holna muna hnigna að einhverju leyti í hlutfalli við aukinn hraða niðurdráttar. Nota má lokaútgáfa reiknilíkansins til að spá fyrir um hvort og þá hve oft þurfi að bora viðbótarholur í Suðurhlíðum vegna þessa.

6. Reiknilíkaninu er ekki treyst til að spá um vermi holna í Suðurhlíðum á þessu stigi. Vísbendingar eru þó um að það haldist kringum 2000 kJ/kg mestallan spátímann. Botn fæst ekki í þetta atriði fyrr en fínstillingu líkansins er lokið.

Á þessari stundu má segja að gerð stórs, þrívíðs Kröflulíkans sé komin vel á veg og að farið sé að hilla undir lok verksins. Framundan er þó fínstilling líkansins með tilliti til hita og þrýstings, bæði í upphafi og eins gagnvart langtímahegðun. Einkum þarf að skoða ítarlega hve vel jaðrar líkansins eiga að vera opnir, en segja má að þeir skipti sköpum um hvernig afköst svæðisins dvíni með tímanum. Eins er í vafa hvort og hvernig á þá að tengja Suðurhlíðar við Leirbotnasvæðið, einkum hvort horstinn, frá austri til vesturs, á að hafa lekt eður ei. Vísbendingar eru um að lekt svæðisins eigi almennt að vera mismög, þ.e. mun betri milli norðurs og suðurs en austurs og vesturs. Þá þarf að skoða vel poruhluta umhverfis vinnsluholur, en hann er ráðandi í vermireikningum. Loks gæti verið fróðlegt að skoða sögu lokunarþrýstings í Suðurhlíðum og reyna þannig að draga fram bráðnaðsynlegar upplýsingar um djúpþrýsting sjálfra vinnsluholnanna með tímanum.

Þá má nefna að nú fleygir fram þekkingu um sum undirsvæði Kröflu vegna borana í fyrra og á þessu ári. Má þar nefna mjög athyglisverðar upplýsingar um vatnsborðsbreytingar vegna borunar og blásturs holna 27 og 28. Eins er næsta víst að boranirnar 1997 bæti inn þekkingu og færi líkansmíðinni tímaraðir sem gagnast vel til að gera líkanið sem nákvæmast.

Meginmarkmiðið með þróun reiknilíkana fyrir jarðhitakerfi er að fá í hendurnar verkfæri sem í senn hermir eftir þekkttri hegðun viðkomandi jarðhitakerfis en segi jafnframt fyrir um viðbrögð kerfisins við vinnslu. Þegar fínstillingu Kröflulíkansins er lokið, þarf samt áfram að halda því við og gera spár til framtíðar. Eins þarf að endurstilla líkanið eftir því sem vinnslusagan lengist og nýjar upplýsingar bætast við. Þannig og aðeins þannig fást full not af líkaninu sem rekstartæki fyrir jarðhitakerfið í Kröflu.

7. HEIMILDIR

- Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1996: *Borholumælingar í Kröflu og Bjarnarflagi árið 1995*. Orkustofnun, OS-96025/JHD-14 B, 50 s.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Sally Benson, Ómar Sigurðsson and Valgarður Stefánsson, 1984: *The Krafla Geothermal Field, Iceland. 1. Analysis of Well Test Data*. Water Resources Research, Vol. 20, no. 11: 1515-1530.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson and Einar T. Elíasson, 1984: *The Krafla Geothermal Field, Iceland. 2. The Natural State of the System*. Water Resources Research, Vol. 20, no. 11: 1531-1544.
- Guðmundur S. Böðvarsson, Karsten Pruess, Valgarður Stefánsson and Einar T. Elíasson, 1984: *The Krafla Geothermal Field, Iceland. 3. The Generating Capacity of the Field*. Water Resources Research, Vol. 20, no. 11: 1545-1559.
- Halldór Ármannsson, Ásgrímur Guðmundsson and Benedikt Steingrímsson, 1987: *Exploration and Development of the Krafla Geothermal Field*. Jökull 37: 13-29.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1988: *Jarðhitasvæðið við Hvíthóla. Hermireikningar og vinnsluspá*. Orkustofnun, OS-88007/JHD-03 B, 24 s.
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson, 1991: *Krafla. Þrívíð hermun fyrir vinnslusvæðið á Hvíthólum*. Orkustofnun, OS-91046/JHD-07, 37 s.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson, 1994: *Kröflusvæði og Námafjall. Rannsóknir á gufuaugum og frárennsli 1993*. Landsvirkjun - Kröflustöð.
- Karsten Pruess, Guðmundur S. Böðvarsson, Valgarður Stefánsson and Einar T. Elíasson, 1984: *The Krafla Geothermal Field, Iceland. 4. History Match and Prediction of Individual Well Performance*. Water Resources Research, Vol. 20, no. 11: 1561-1584.
- Knútur Árnason og Ragna Karlsdóttir, 1996: *Viðnámsmælingar í Kröflu*. Orkustofnun, OS-96005/JHD-03, 96 s.
- Kristján Sæmundsson, 1991: *Jarðfræði Kröflukerfisins. Í: Náttúra Mývatns*. Ritstjórar Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson. Hið íslenska náttúrufræðifélag: 24-95.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1988: *Kröflustrið. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1988*. Landsvirkjun, Kröflustöð, 49 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1989: *Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1989*. Landsvirkjun, Kröflustöð, 51 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1990: *Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1990*. Landsvirkjun, Kröflustöð, 56 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1991: *Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1991*. Landsvirkjun - Kröflustöð, 54 s.

Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson, 1994: *Krafla og Bjarnarflag. Afköst borholna og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1994*. Landsvirkjun, Kröflustöð, 62 s.


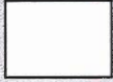
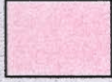
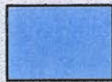
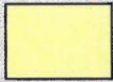
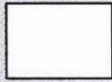

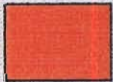



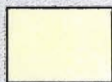
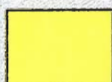

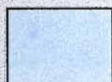

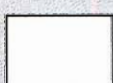
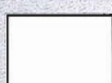
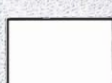
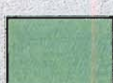

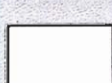


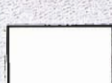
Valgarður Stefánsson, 1981: *The Krafla Geothermal Field, Northeast Iceland*. In: *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, edited by L. Ryback and L.J.P. Muffler: 273-294. John Wiley, New York.

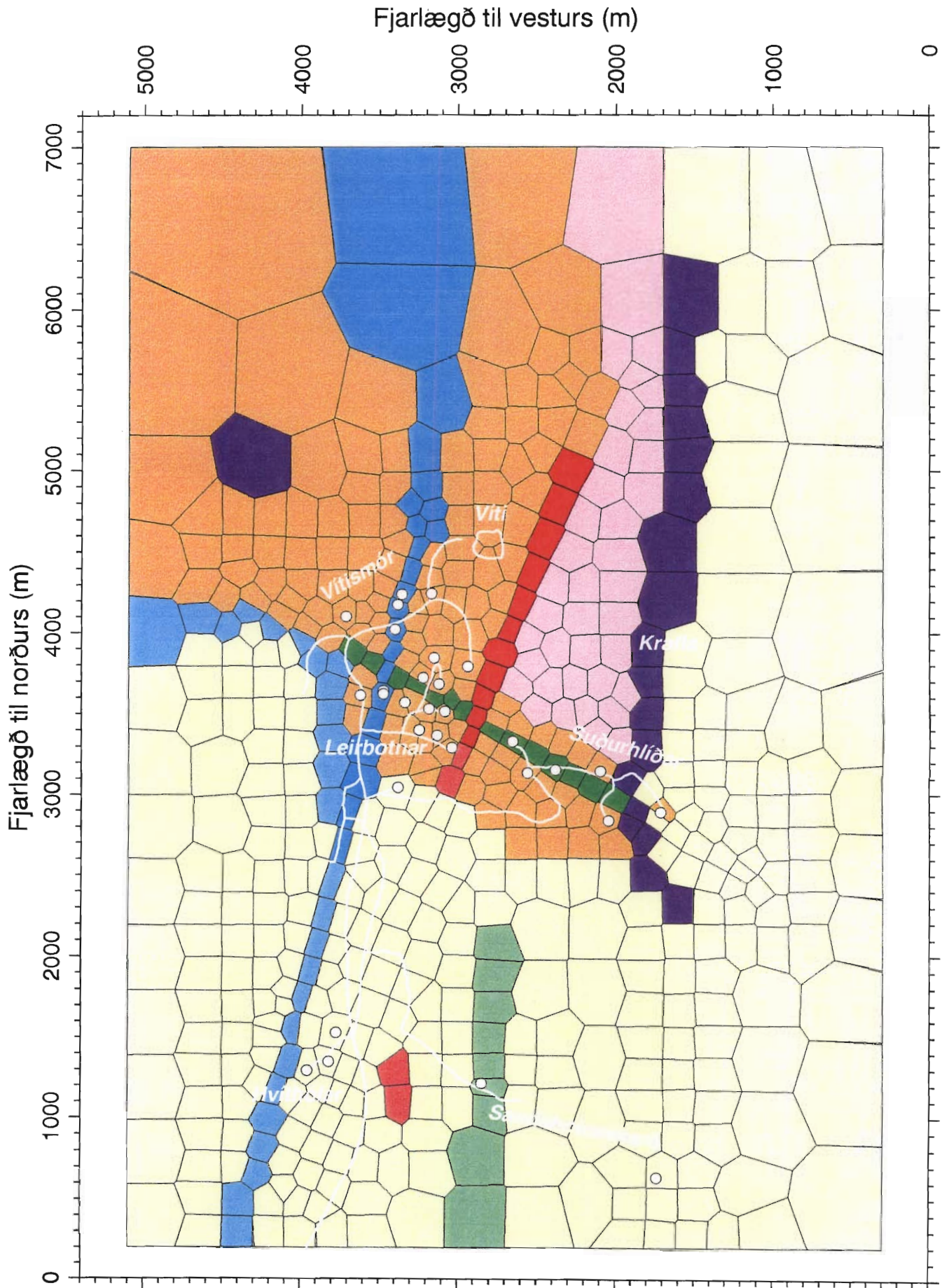
Wessel, P., and W. H. F. Smith, 1995: *New Version of the Generic Mapping Tools Released*. EOS Trans. AGU, 76. 329.

VIÐAUKI A

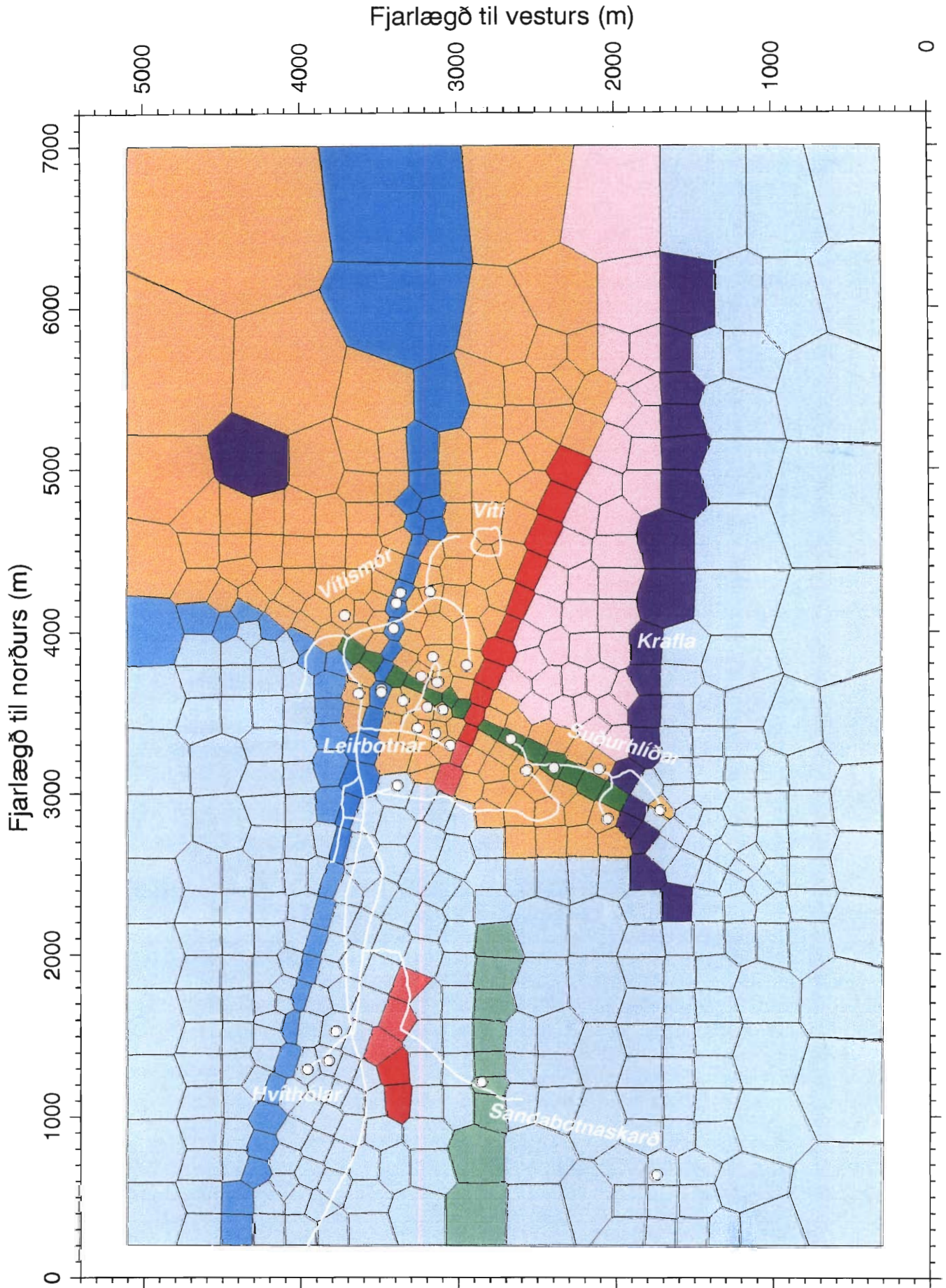
Dreifing bergeiginleika í reiknilíkani Kröflu

Litaskýring bergeiginleika

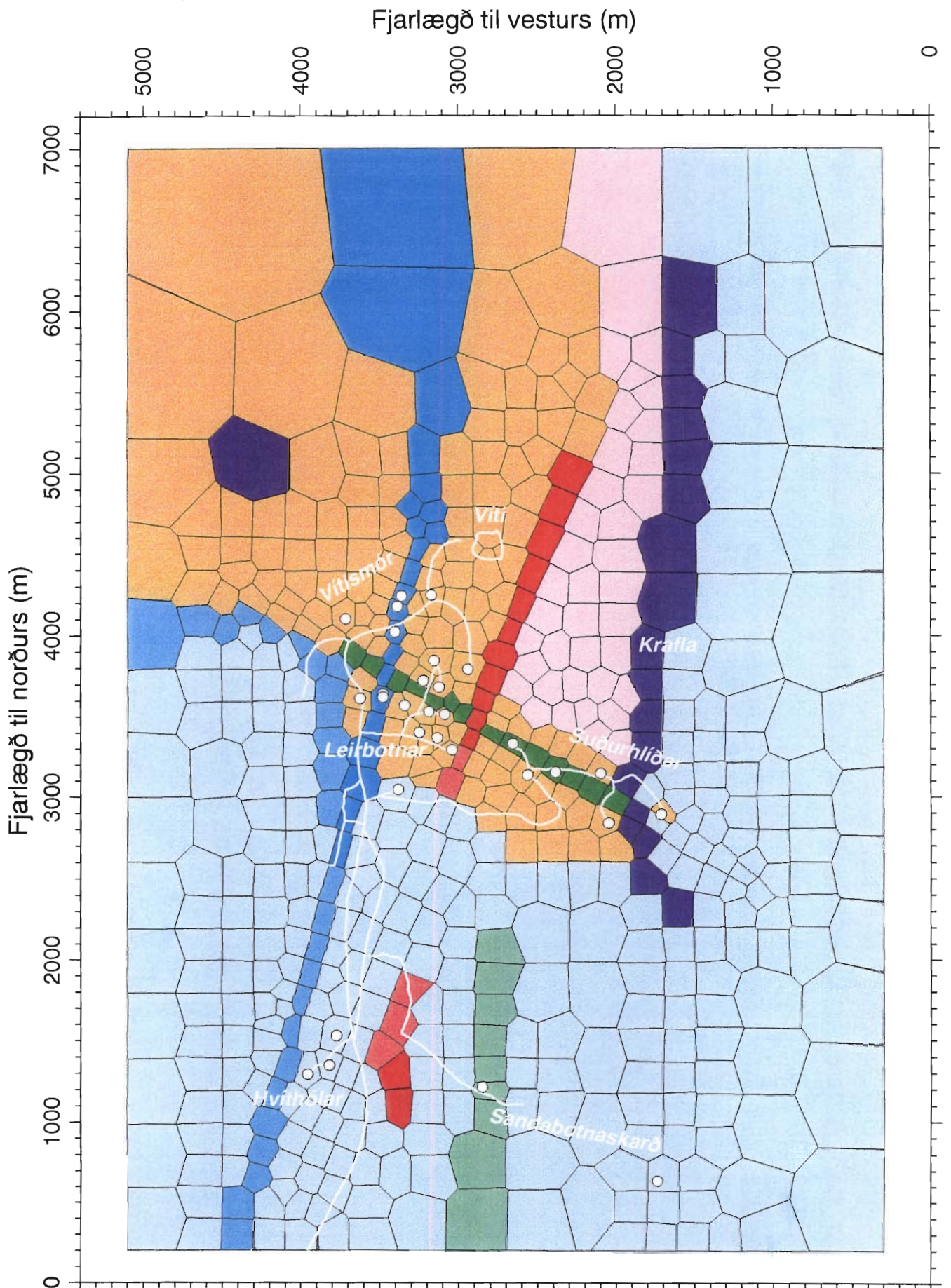
 efrak	 nedrj	 Krafl
 3hdal	 djup1	 þakbe
 hvgil	 lipar	 nokul
 horst	 s-hvg	 slagA
 leirh	 out4E	 slagB
 midj1	 out4N	 hveba
 out_1	 misge	 horba
 out_2	 bar18	 leiba
 efrið		



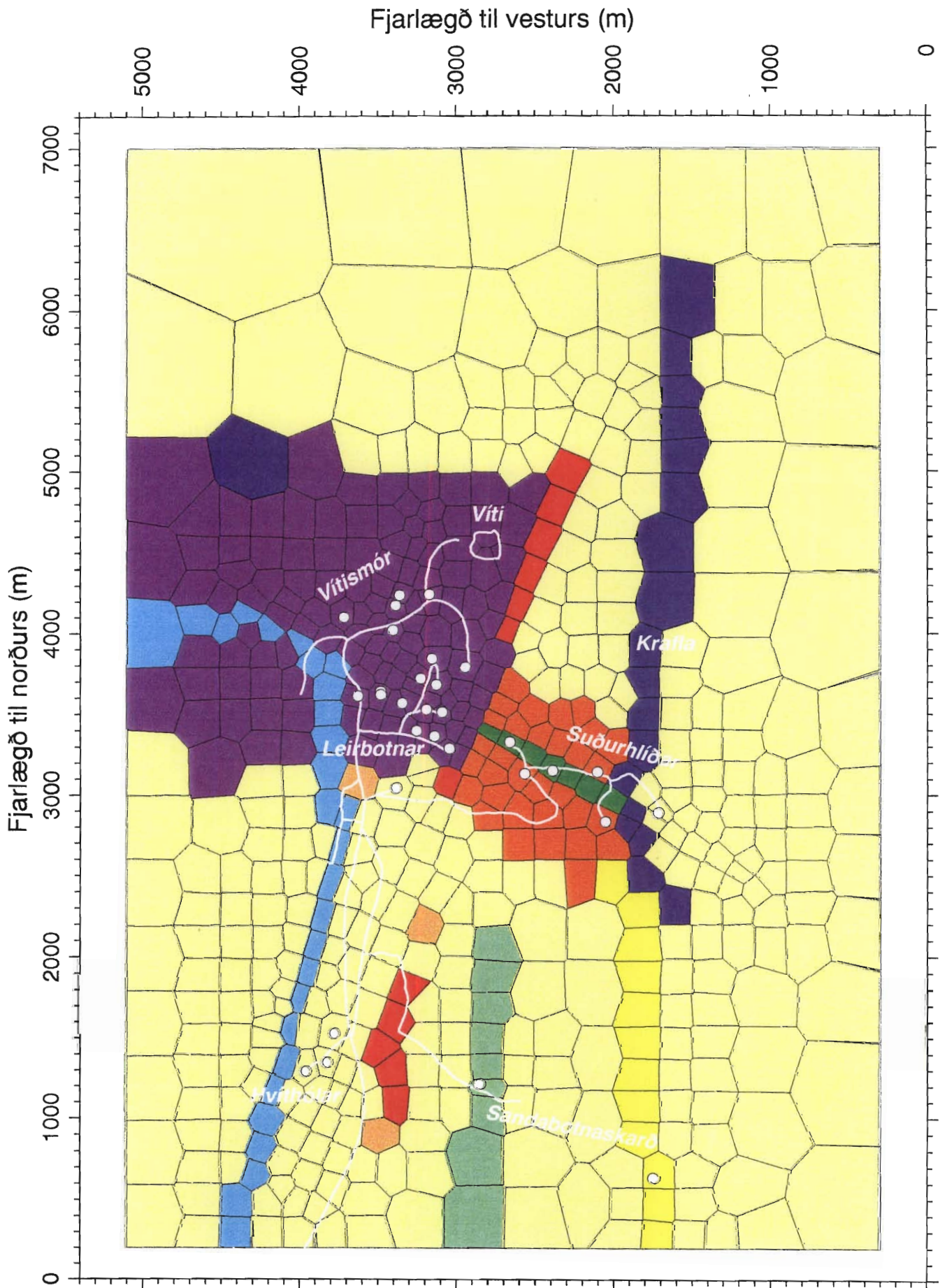
Mynd A-1: Eiginleikar reiknilíkans í lagi A



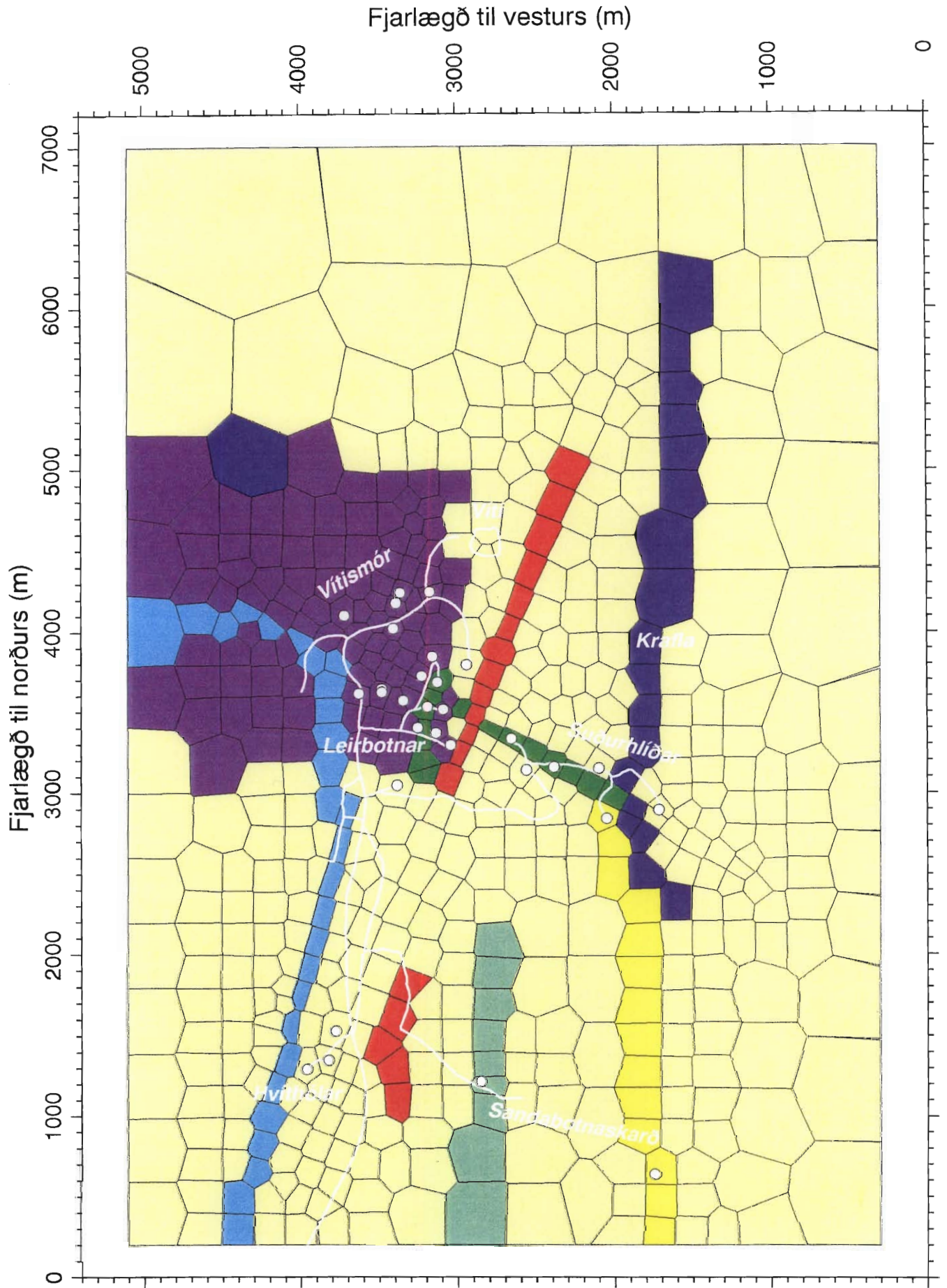
Mynd A-2: Eiginleikar reiknilíkans í lagi B



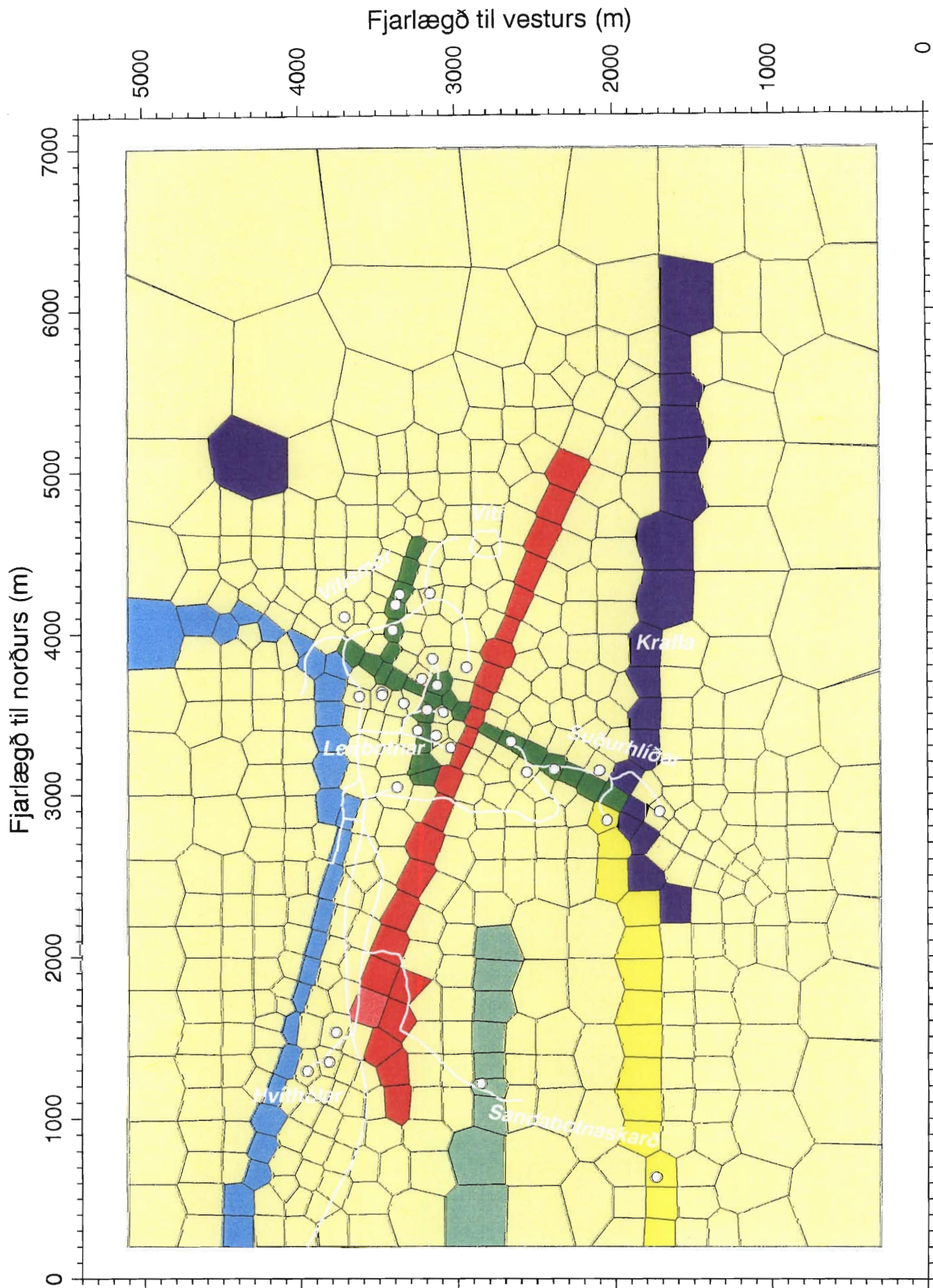
Mynd A-3: Eiginleikar reiknilíkans í lagi C



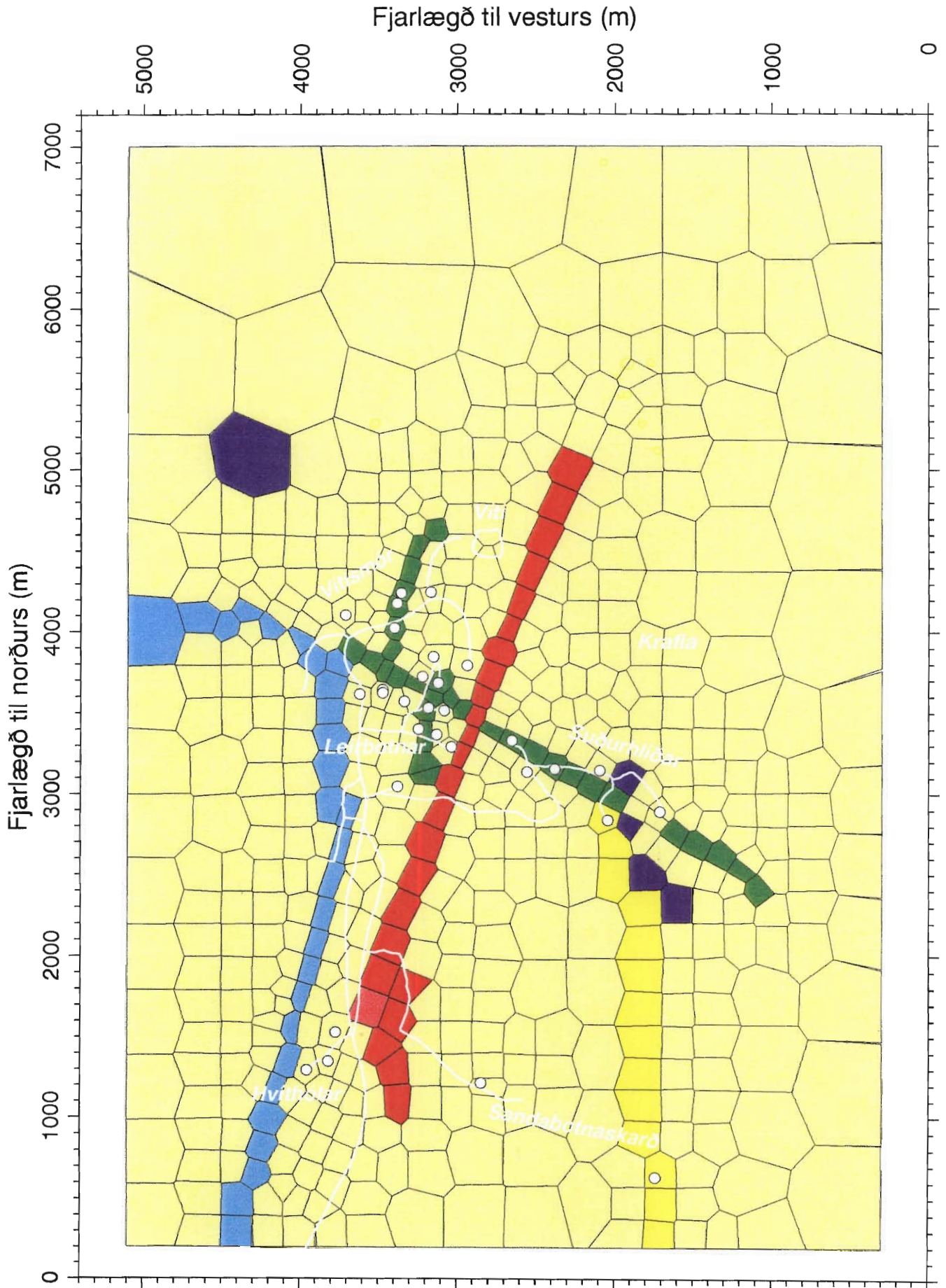
Mynd A-4: Eiginleikar reiknilíkans í lagi D



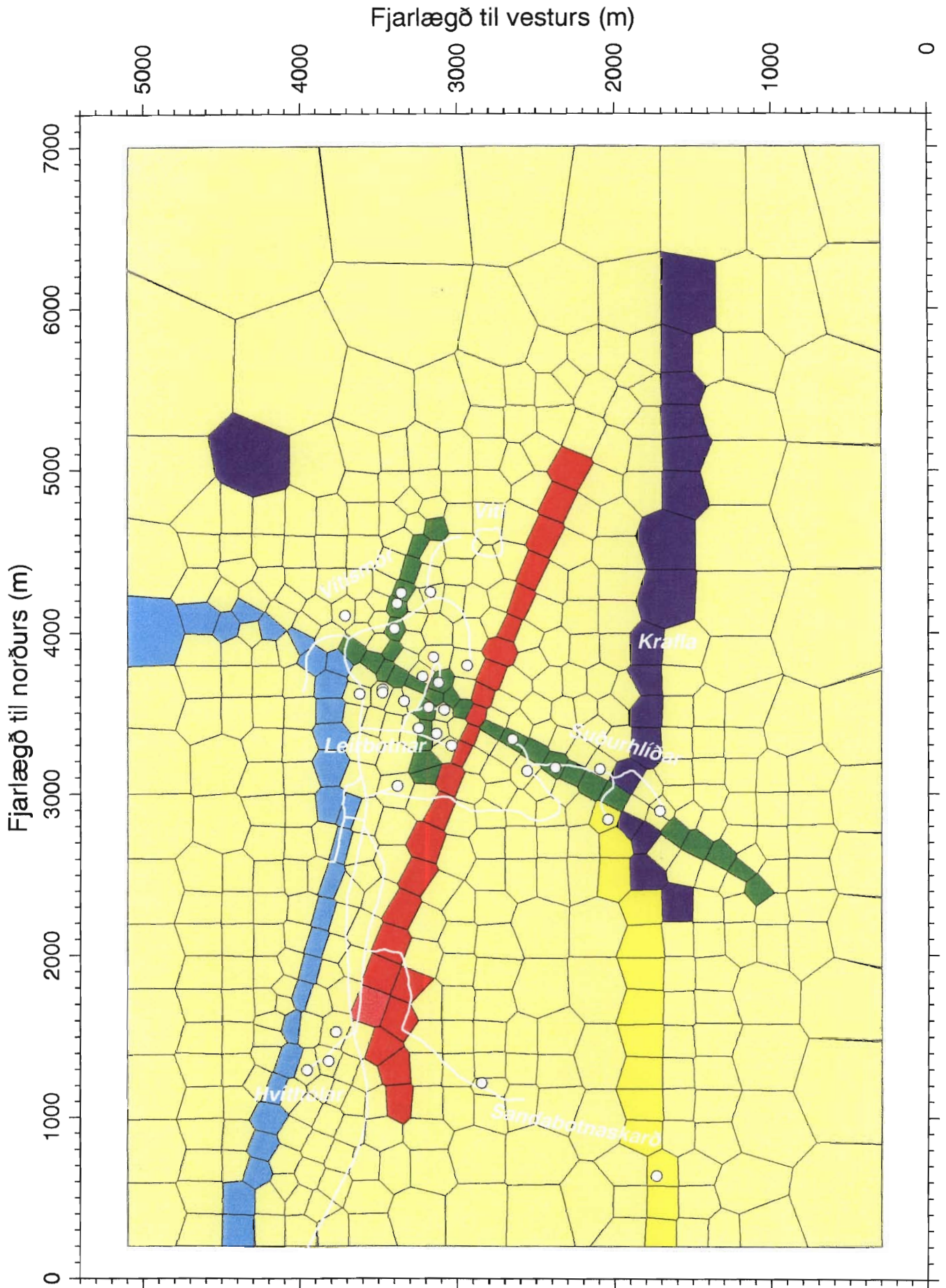
Mynd A-5: Eiginleikar reiknilíkans í lagi E



Mynd A-6: Eiginleikar reiknilíkans í lagi F



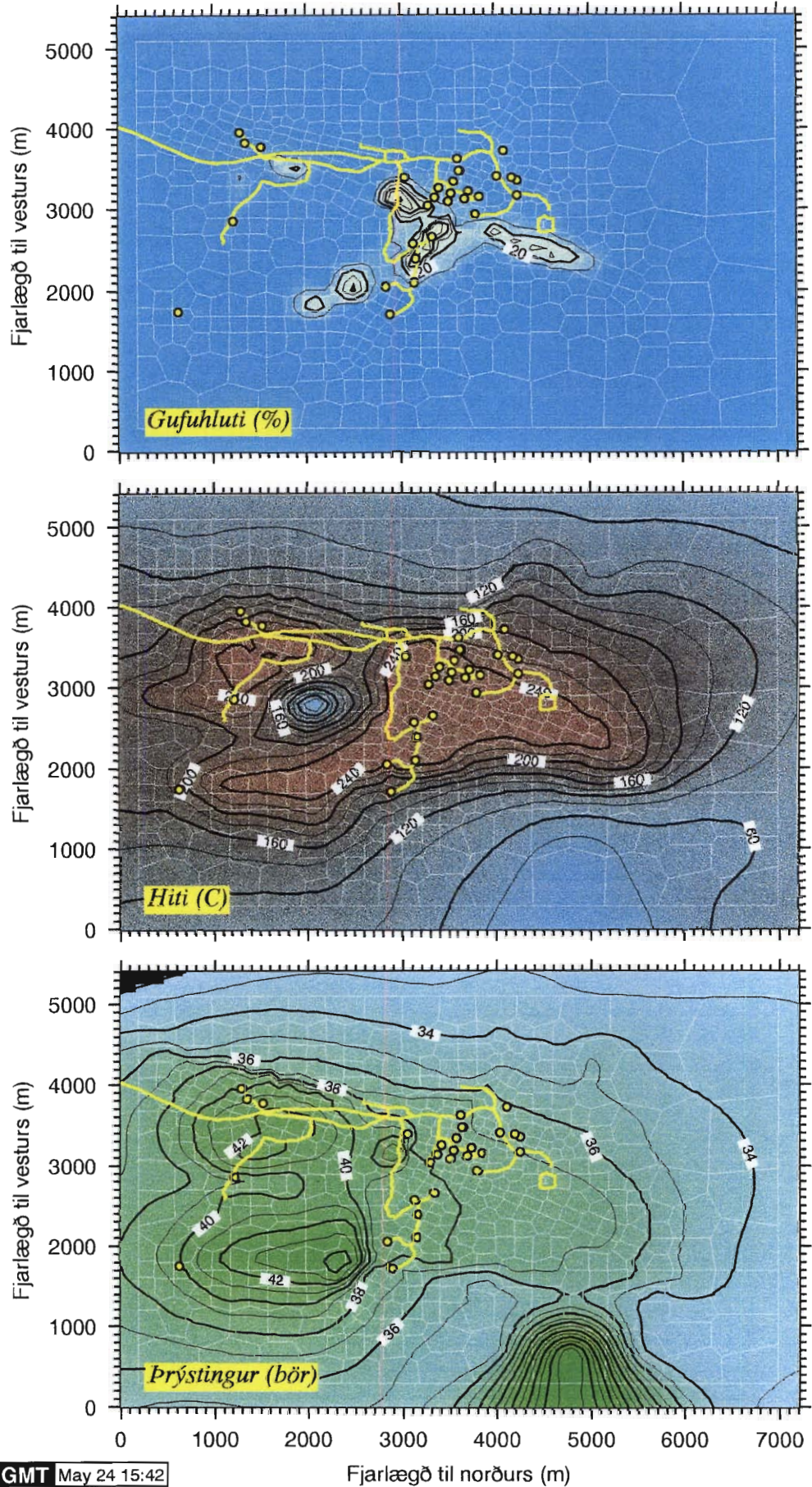
Mynd A-7: Eiginleikar reiknilíkans í lagi G



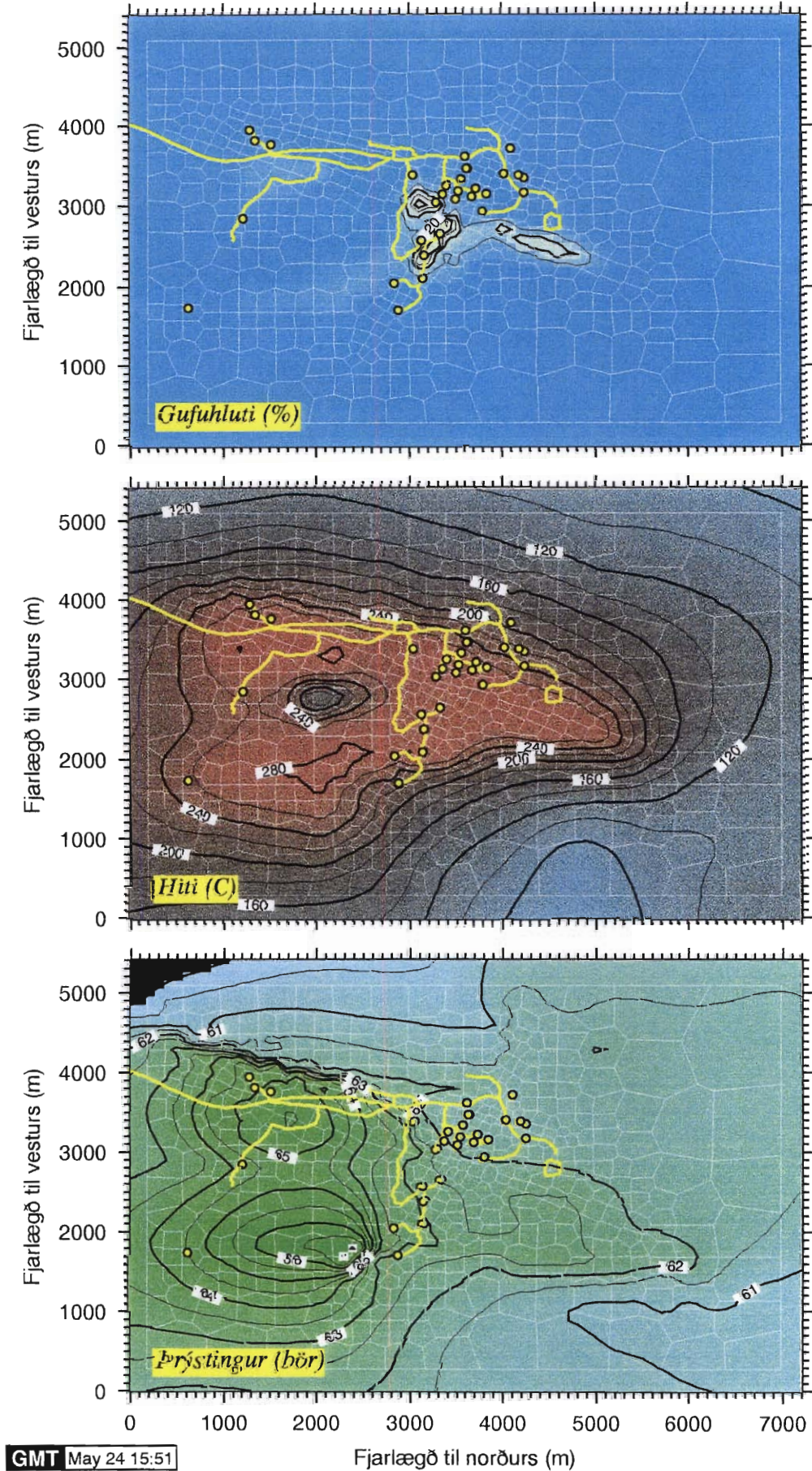
Mynd A-8: Eiginleikar reiknilíkans í lagi H

VIÐAUKI B

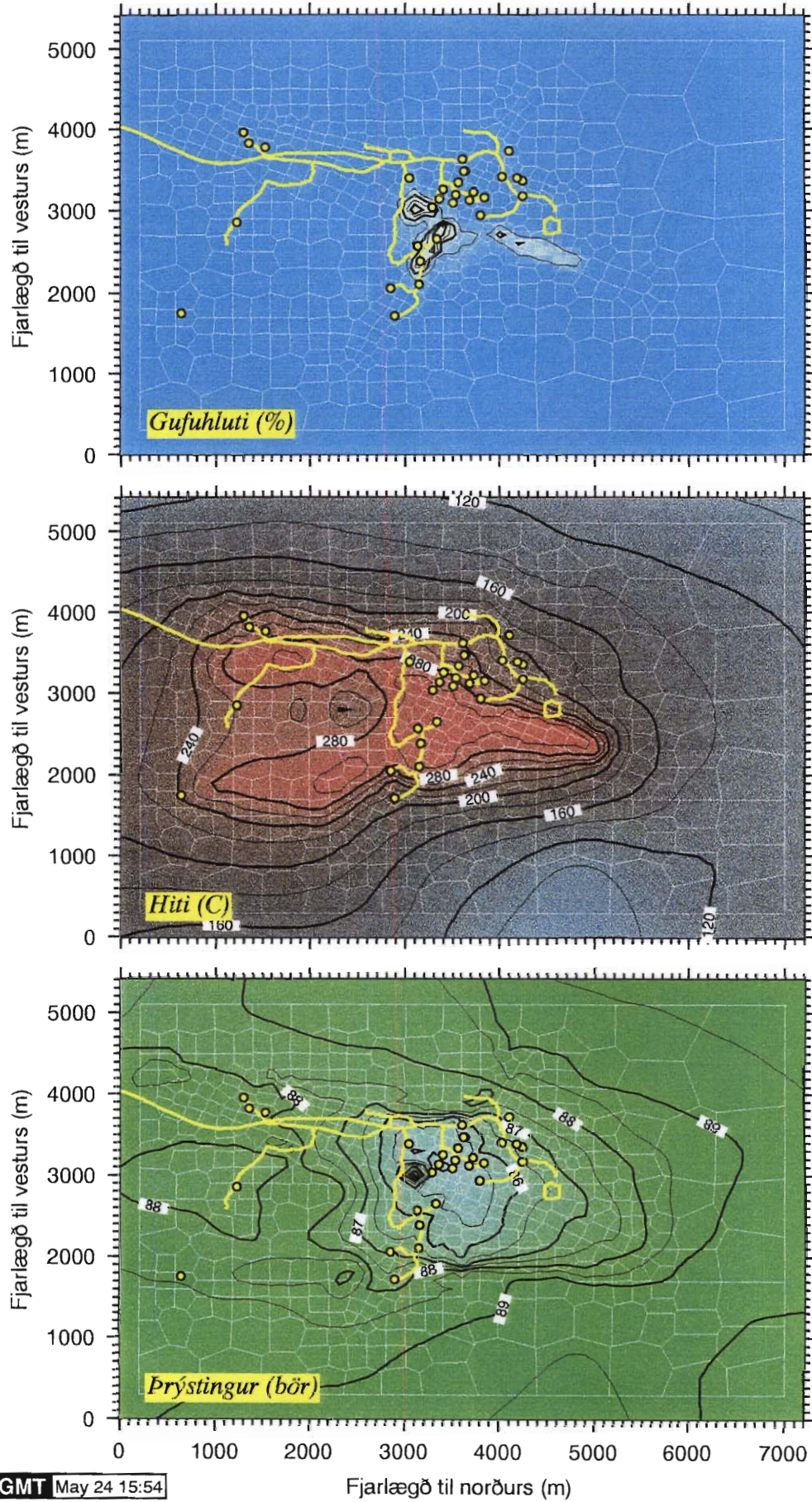
Jafngildislínur gufuhluta, hita og þrýstings í upphafsástandi



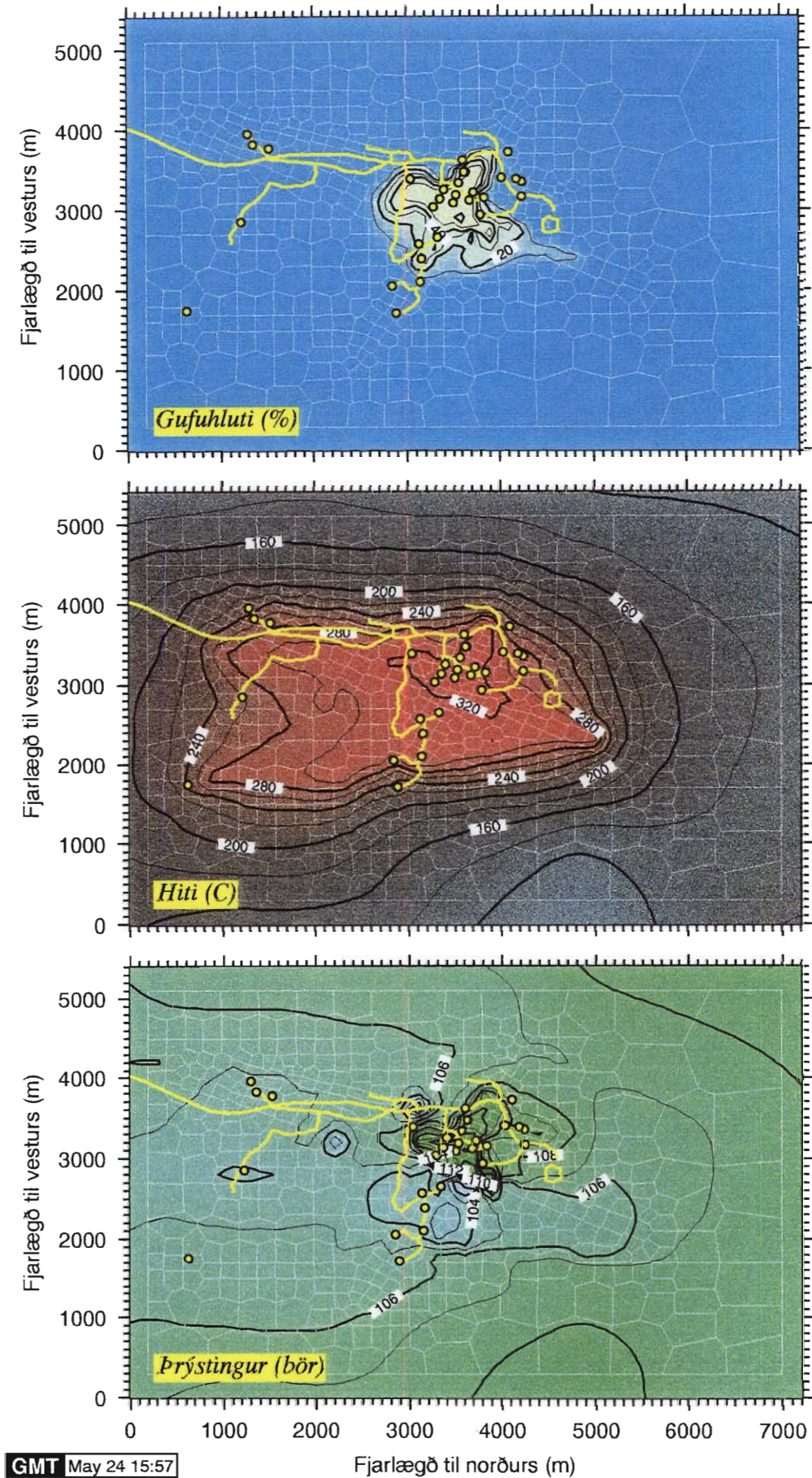
Mynd B-1: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi A



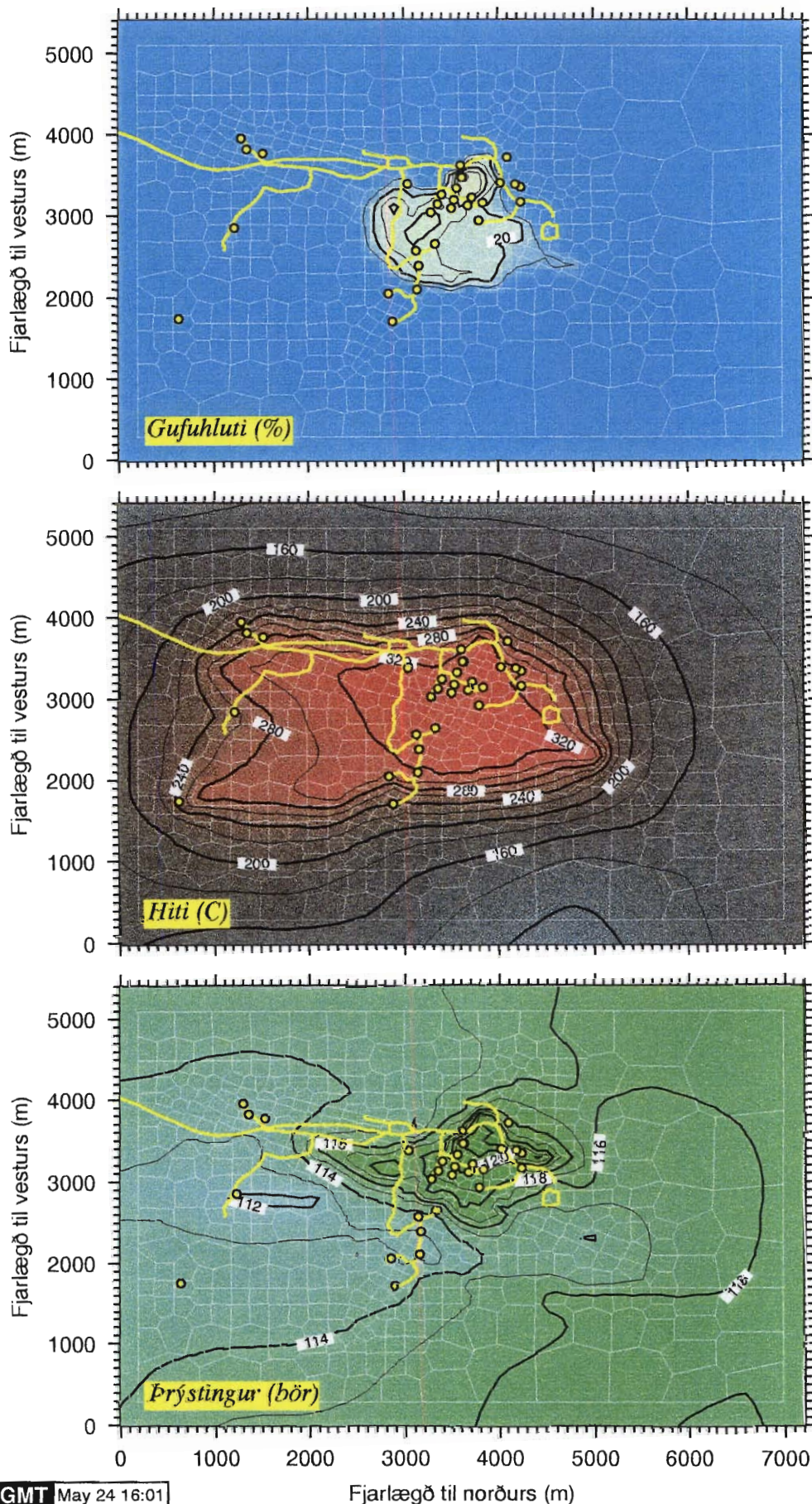
Mynd B-2: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi B



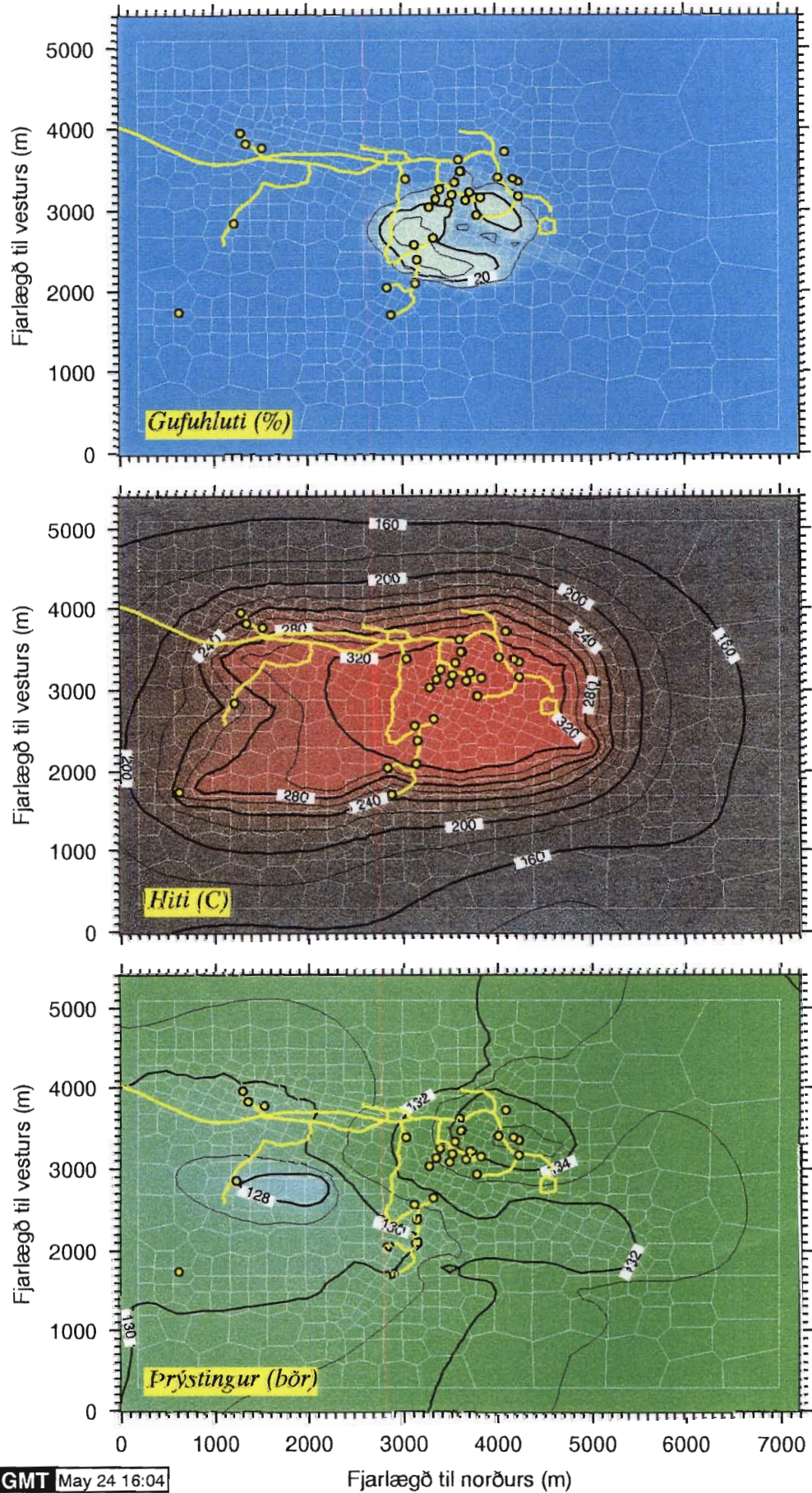
Mynd B-3: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi C



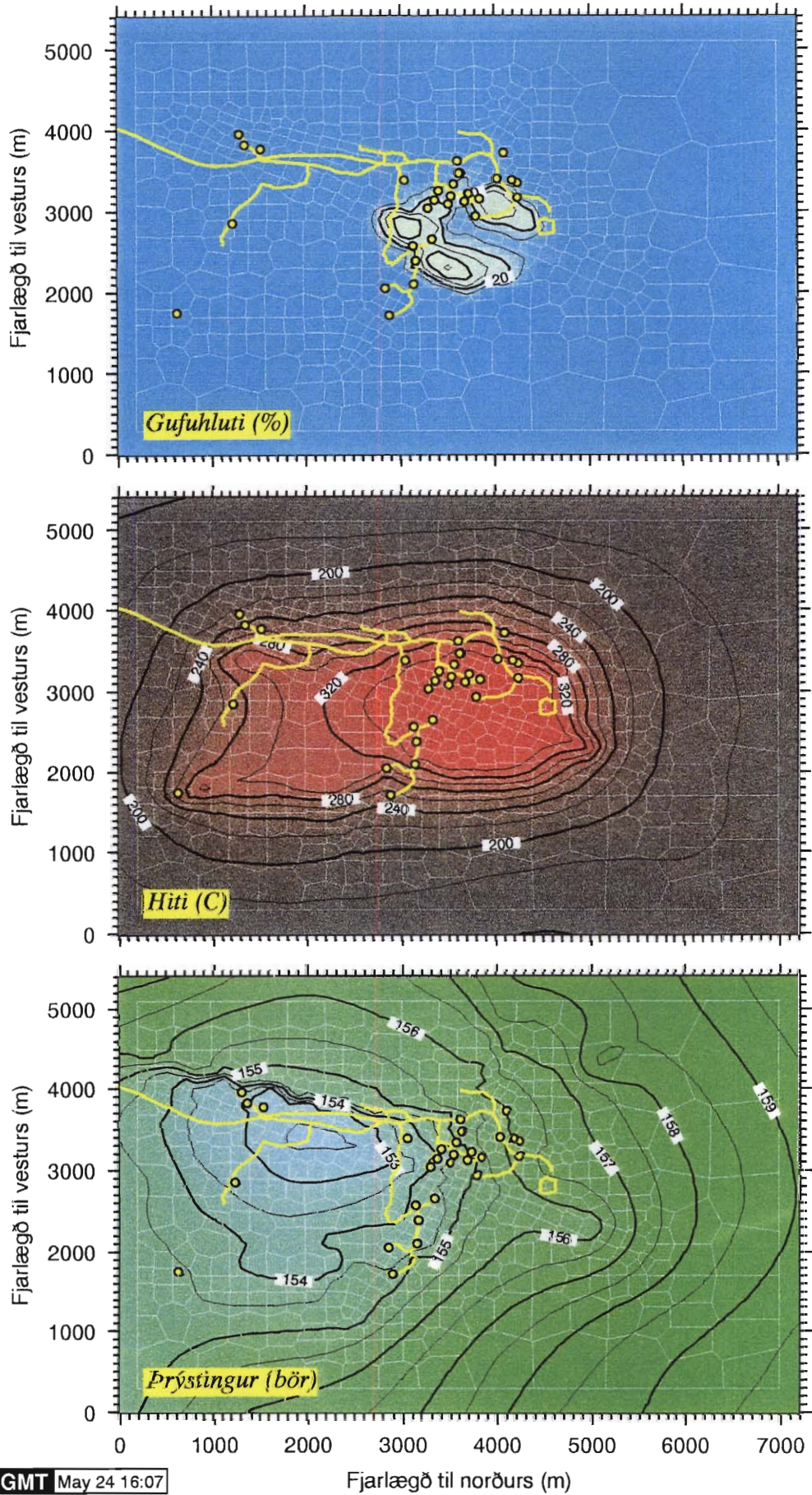
Mynd B-4: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi D



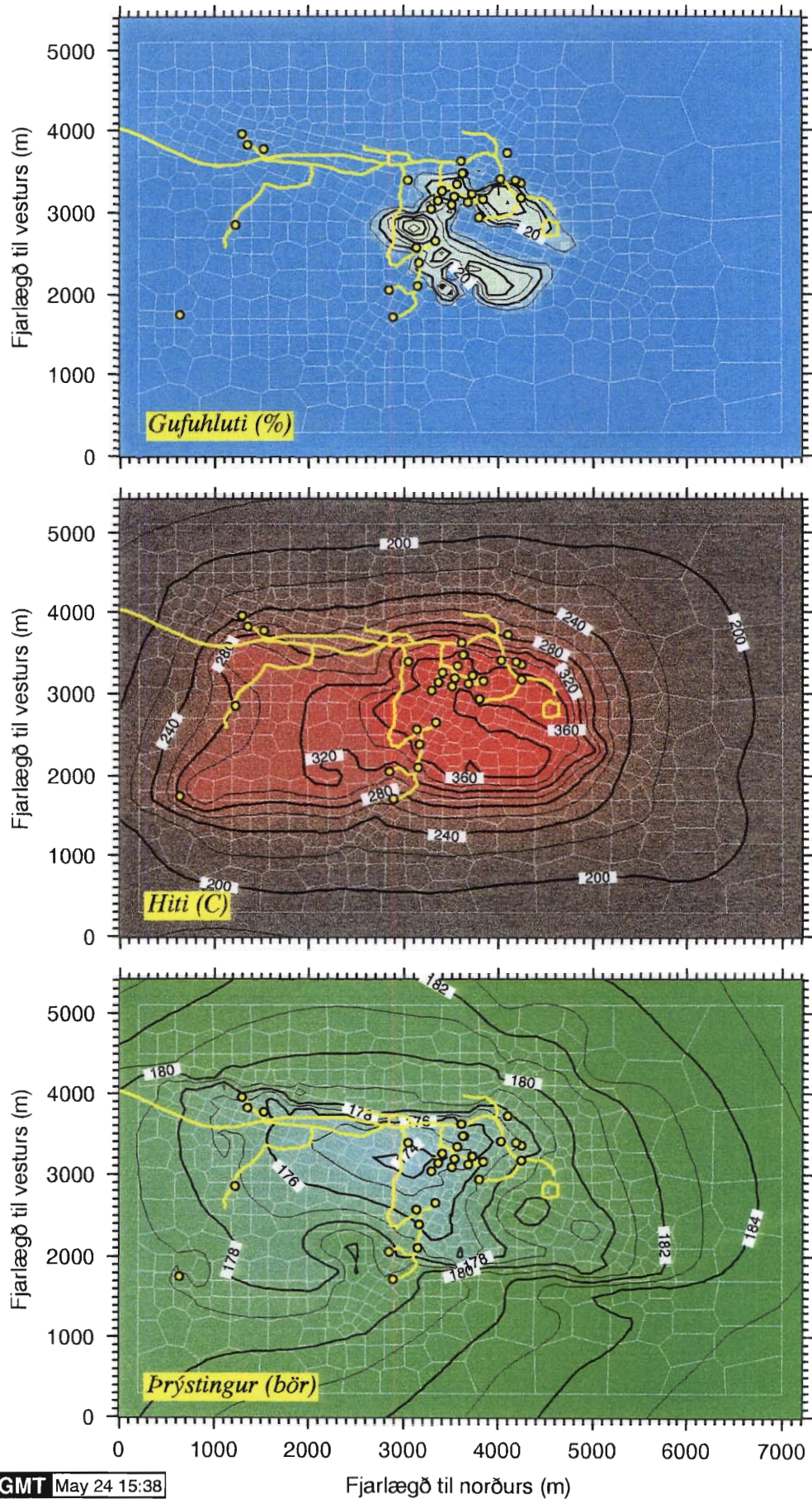
Mynd B-5: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi E



Mynd B-6: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi F



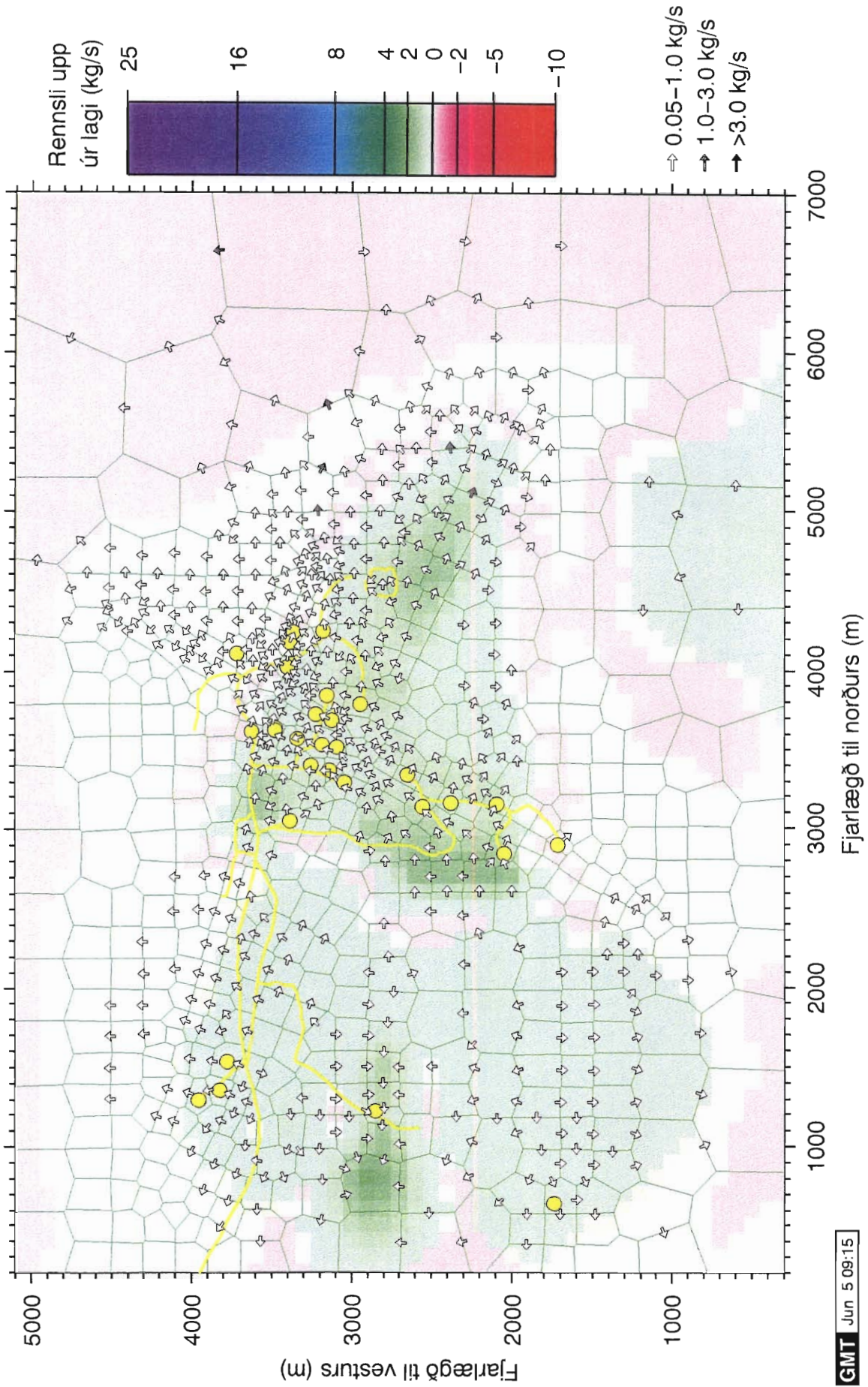
Mynd B-7: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi G



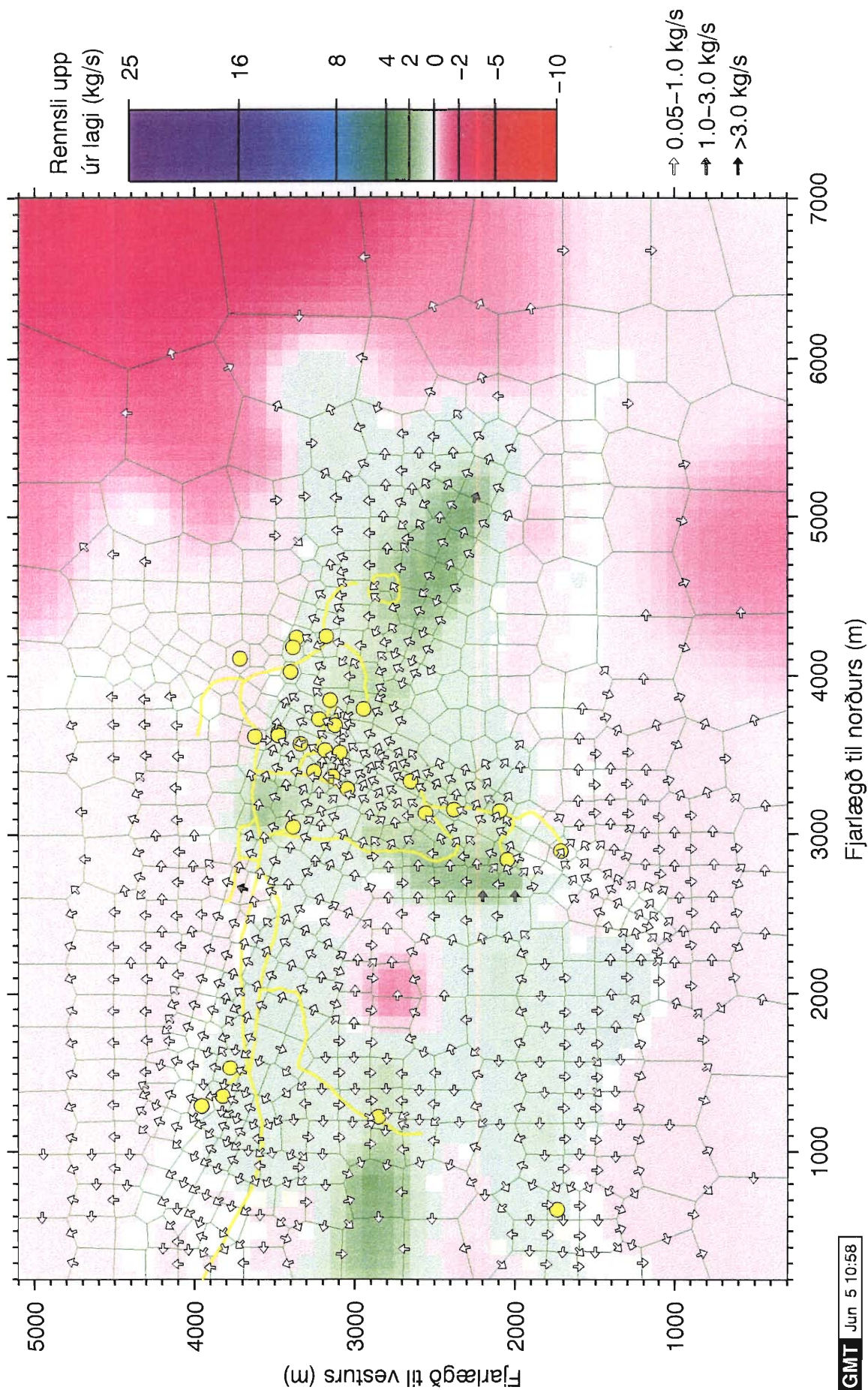
Mynd B-8: Gufuhluti, hiti og þrýstingur í lagi H

VIÐAUKI C

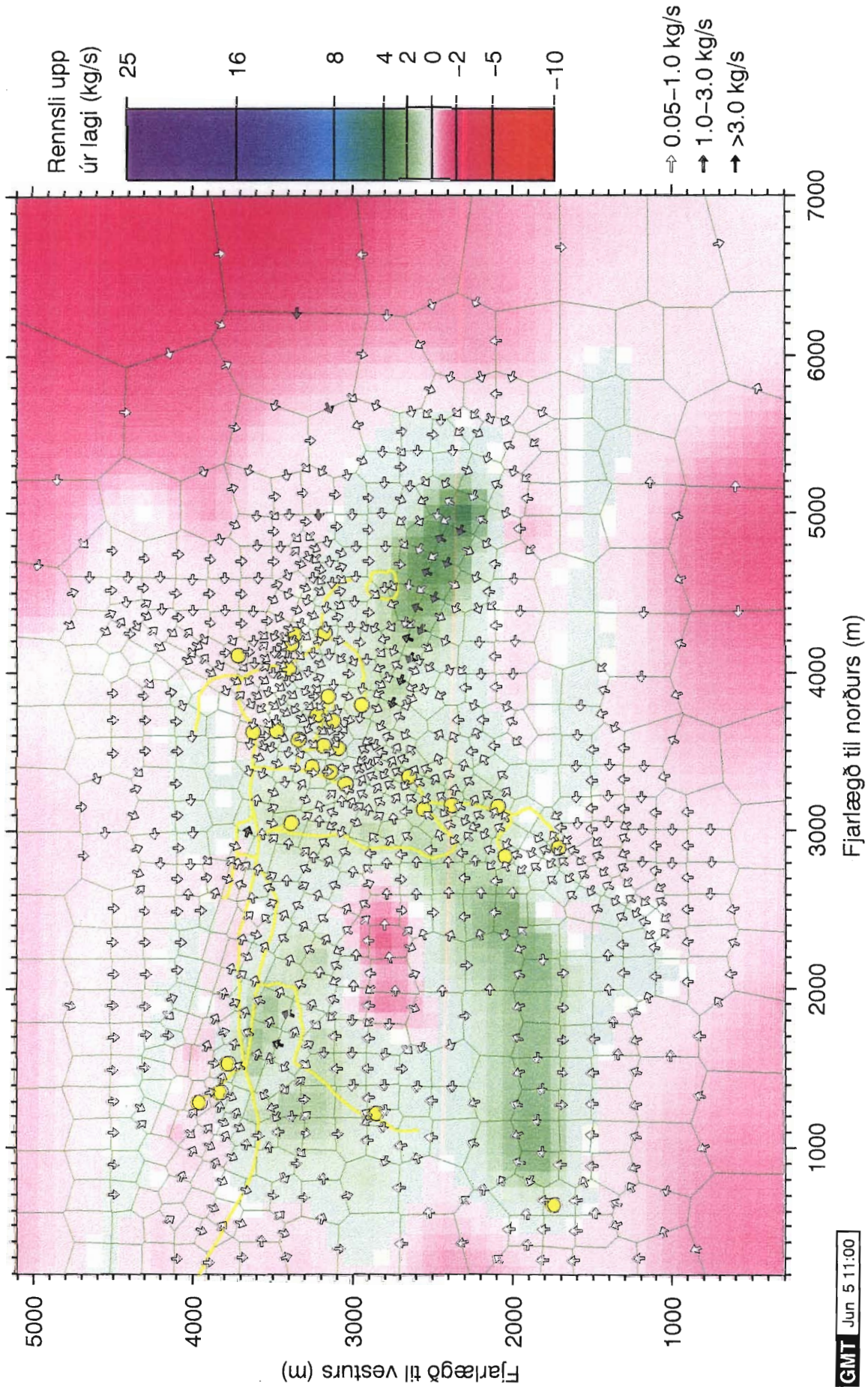
Rennslisstefnur vökva í upphafsástandi



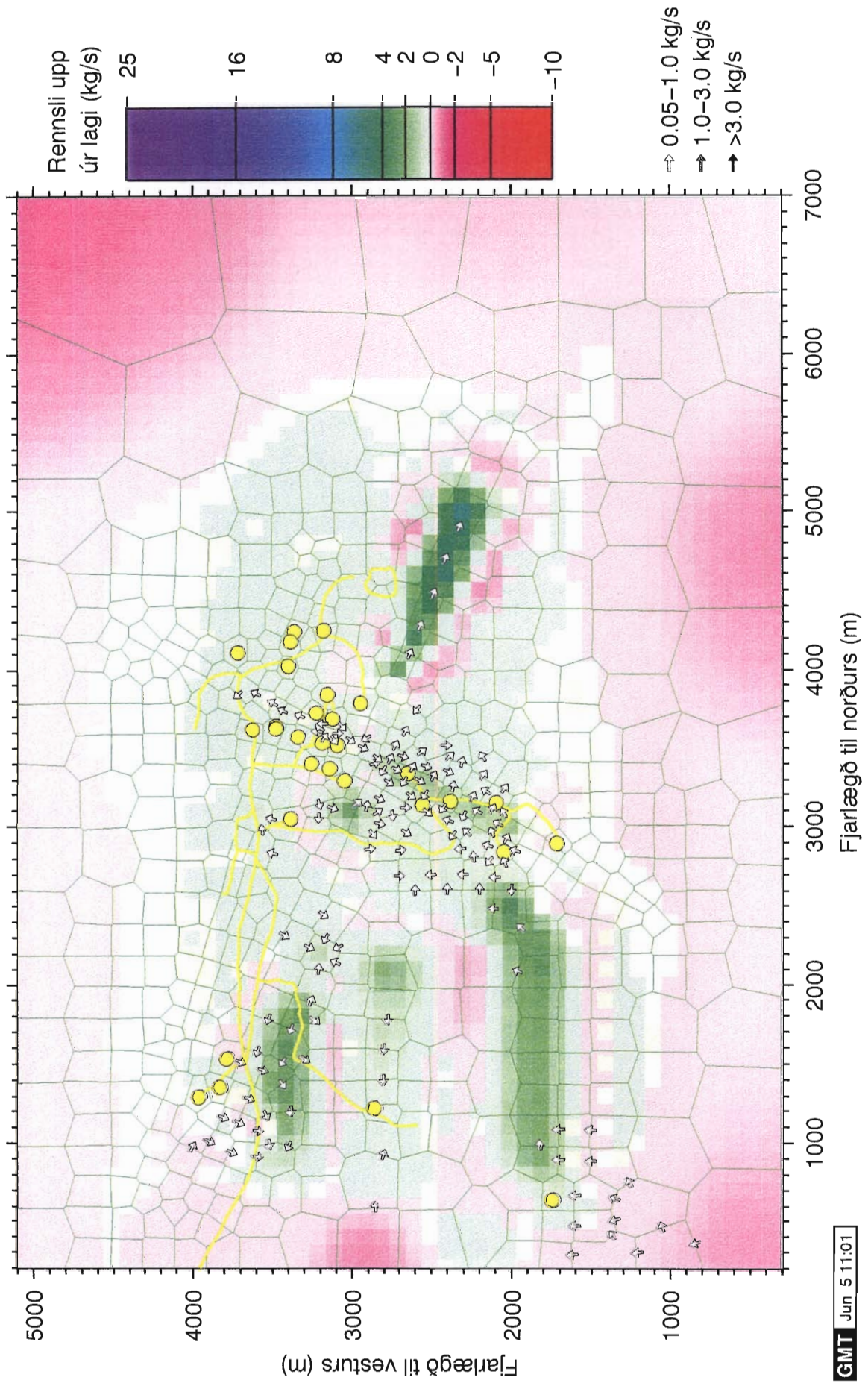
Mynd C-1: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi A



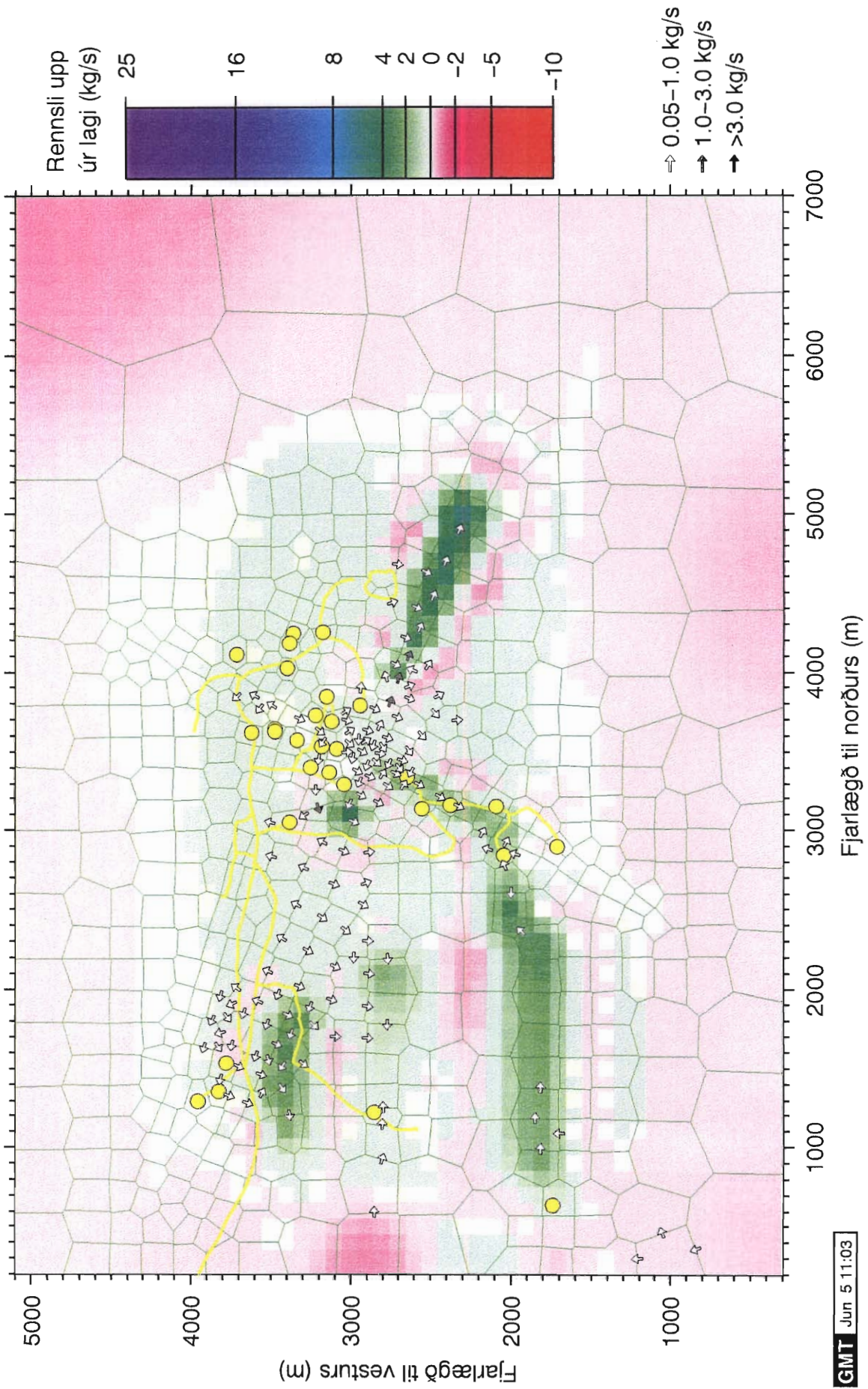
Mynd C-2: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi B



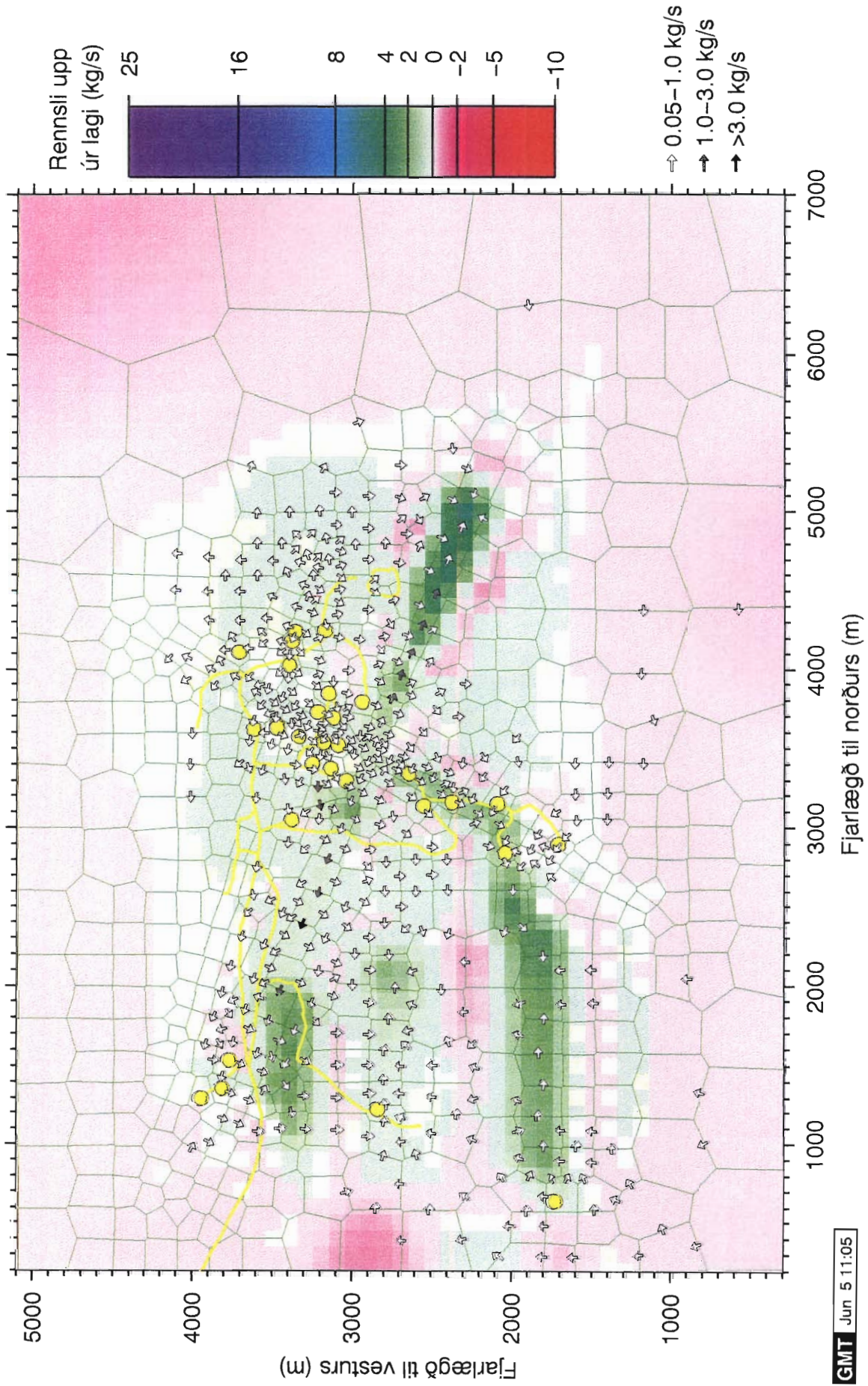
Mynd C-3: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi C



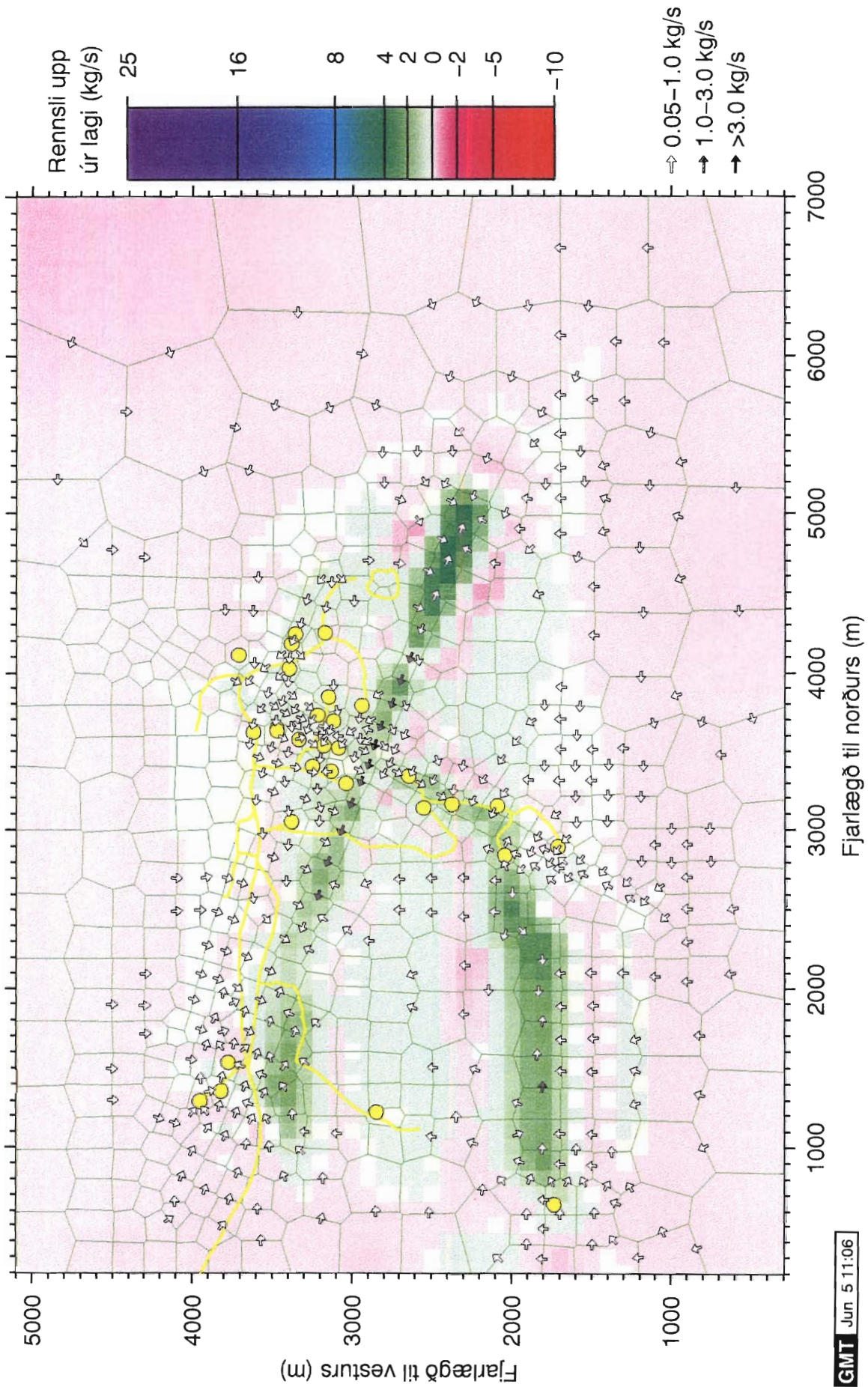
Mynd C-4: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi D



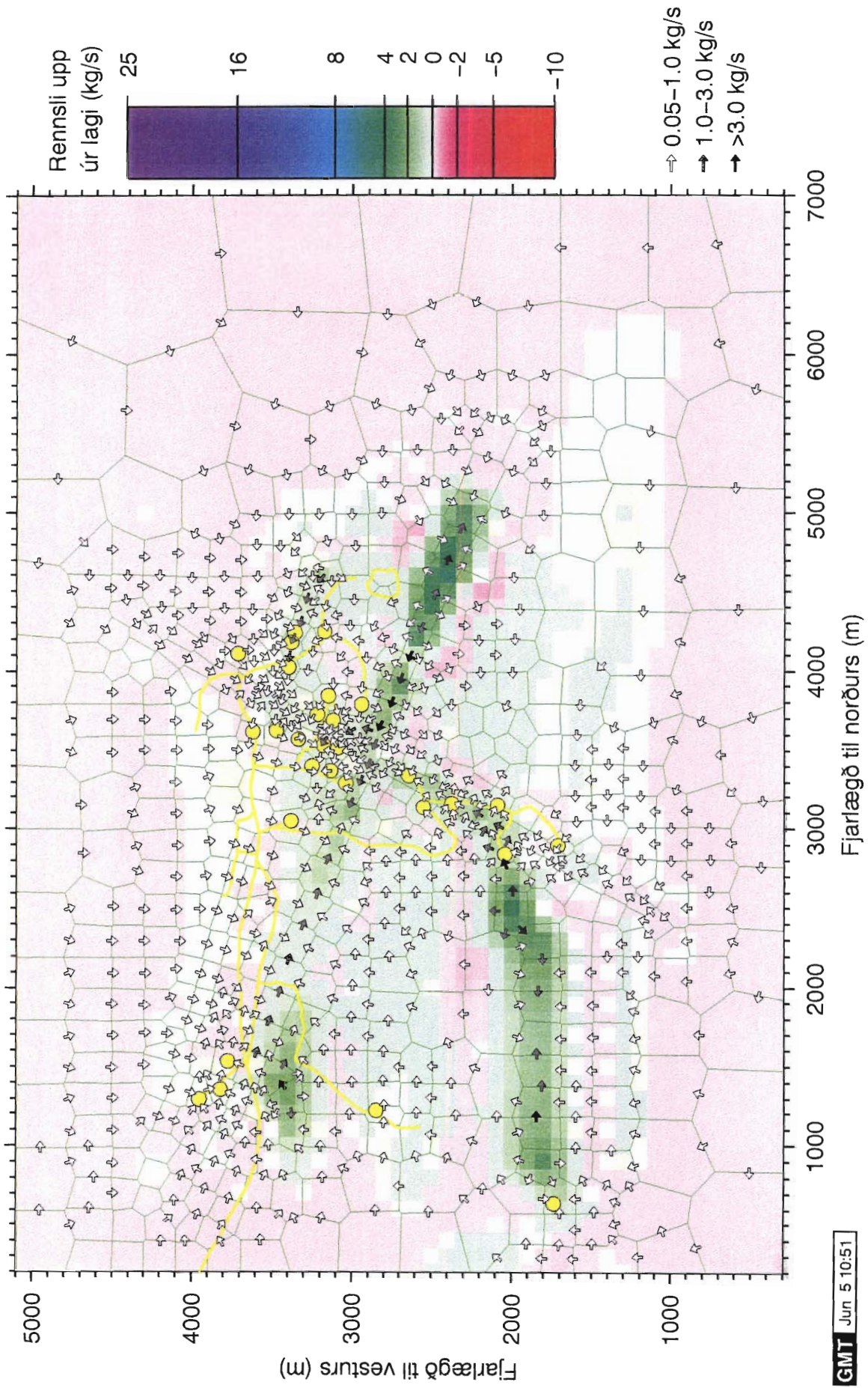
Mynd C-5: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi E



Mynd C-6: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi F



Mynd C-7: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi G

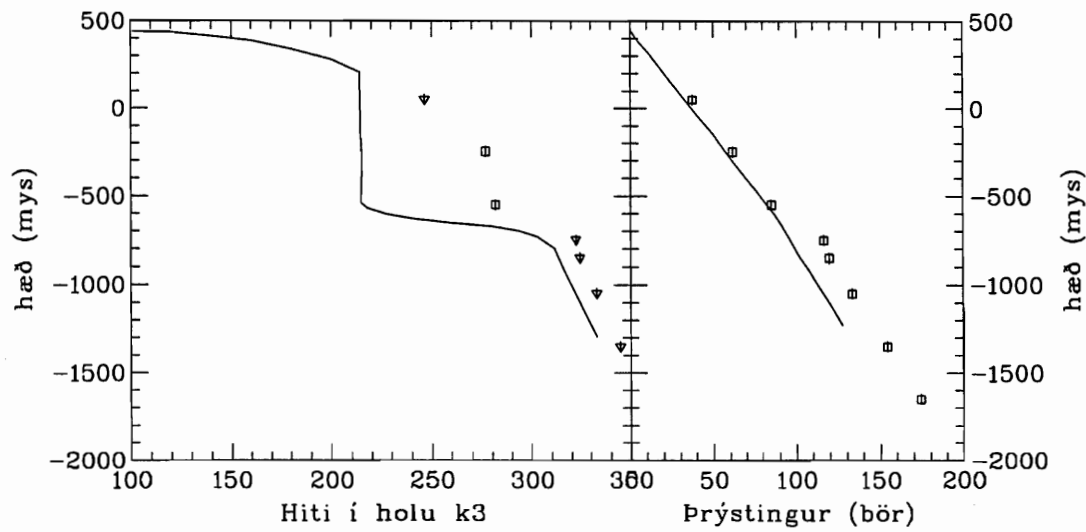
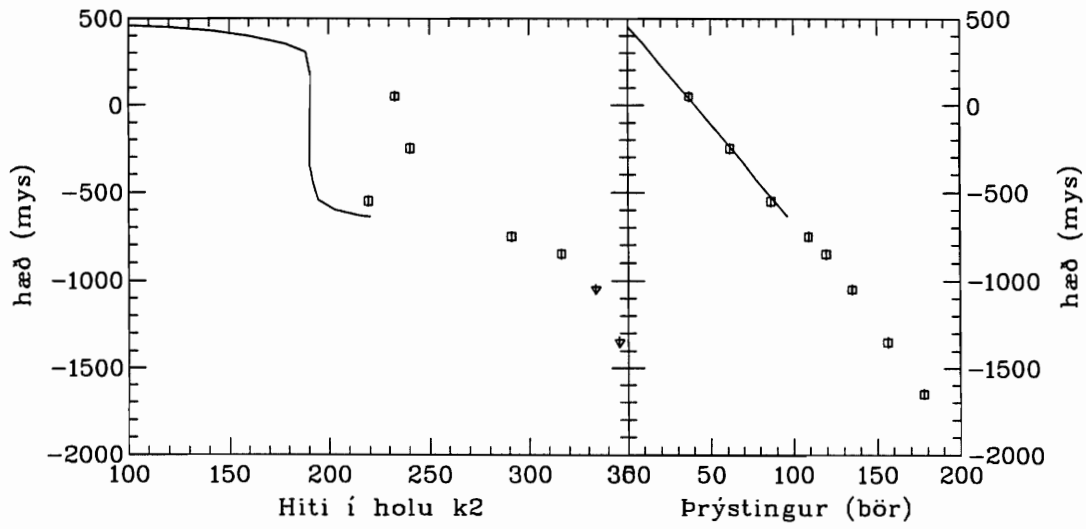
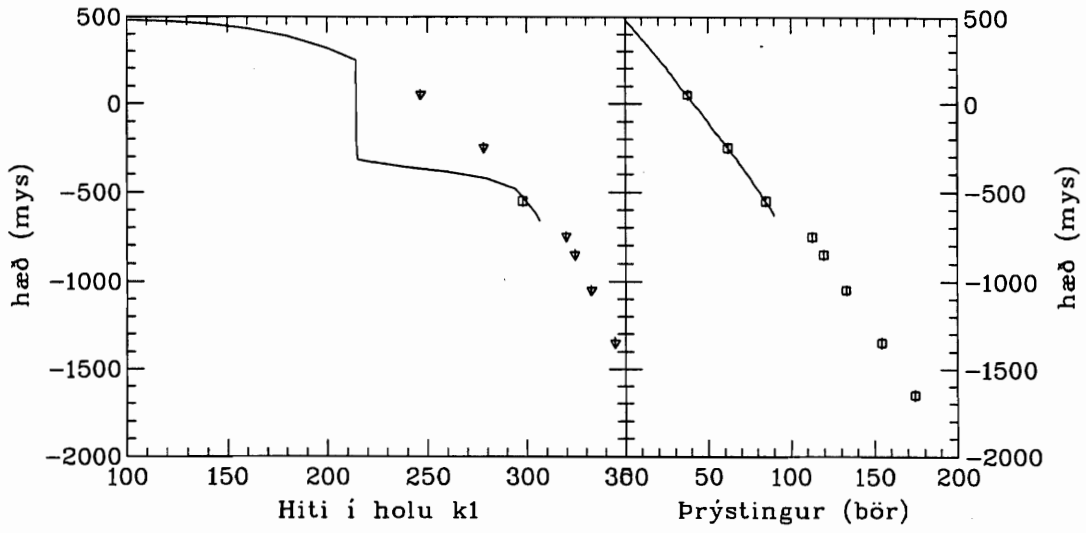


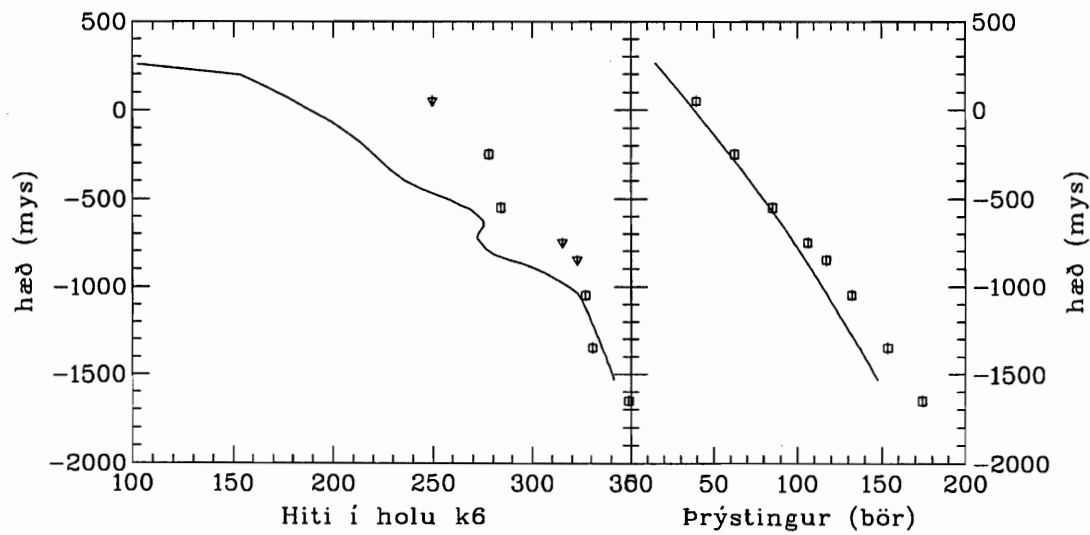
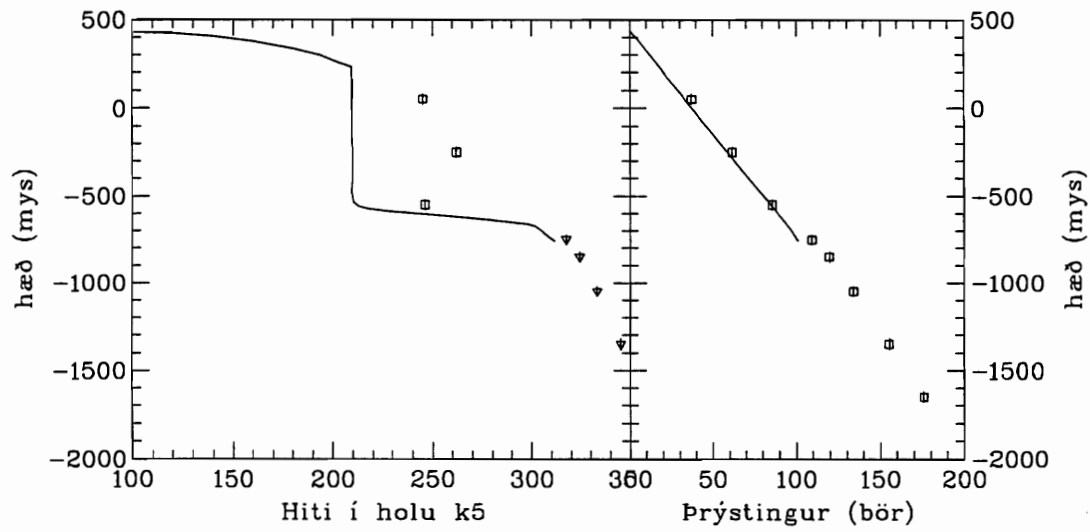
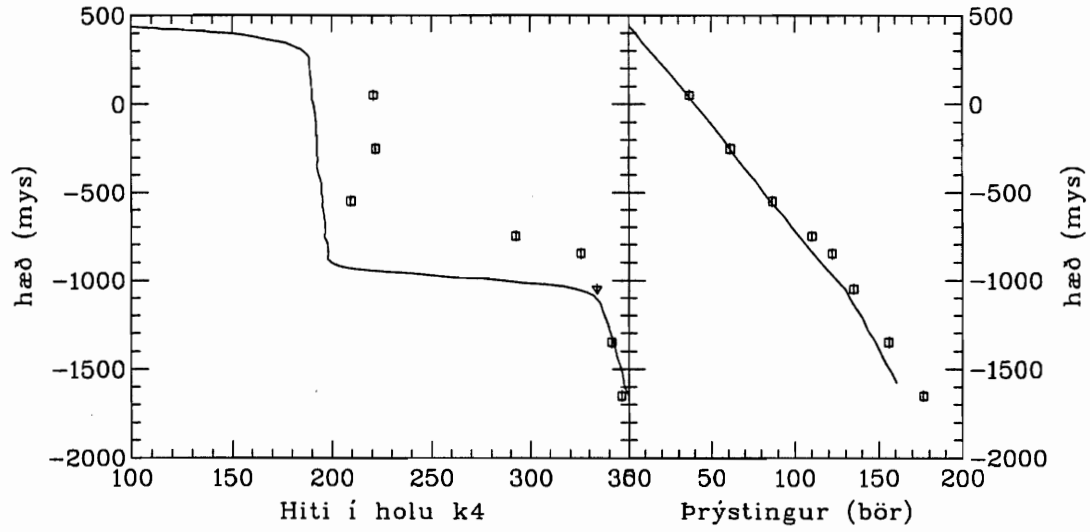
Mynd C-8: Lárétt og lóðrétt rennsli í lagi H

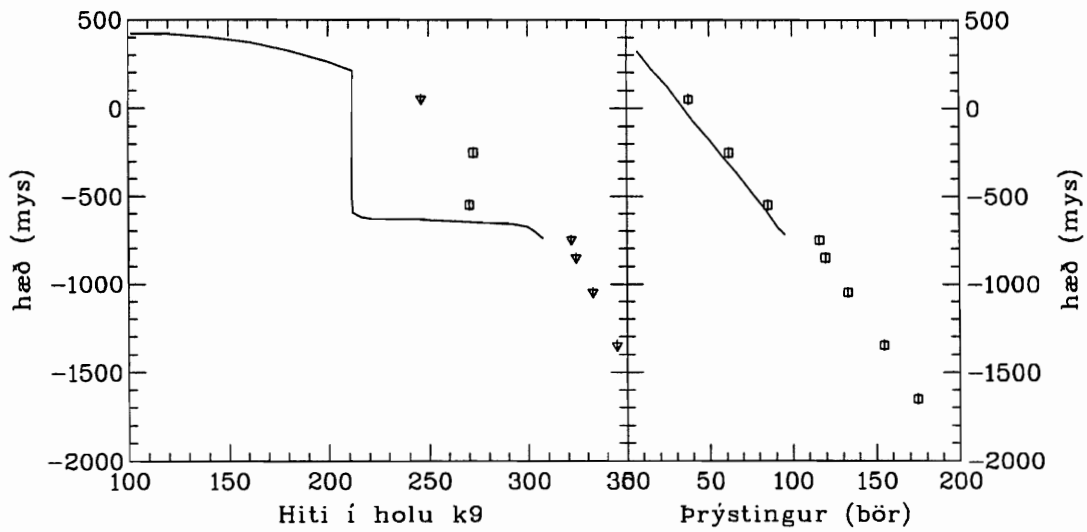
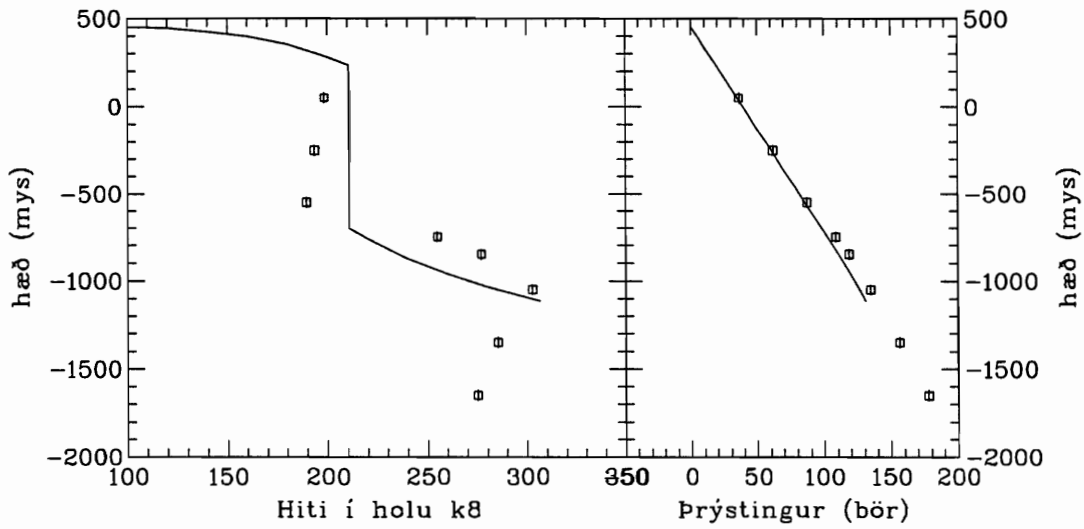
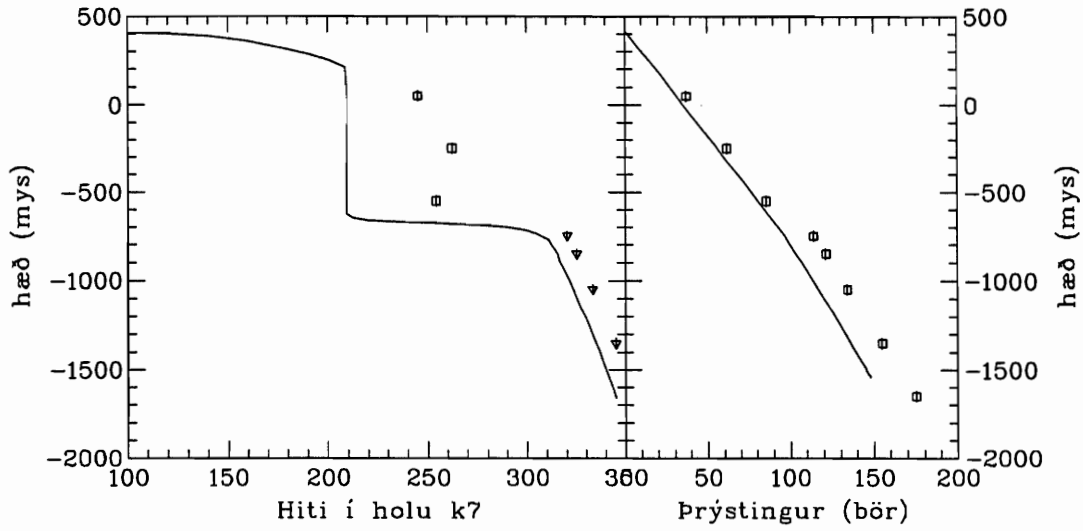
VIÐAUKI D

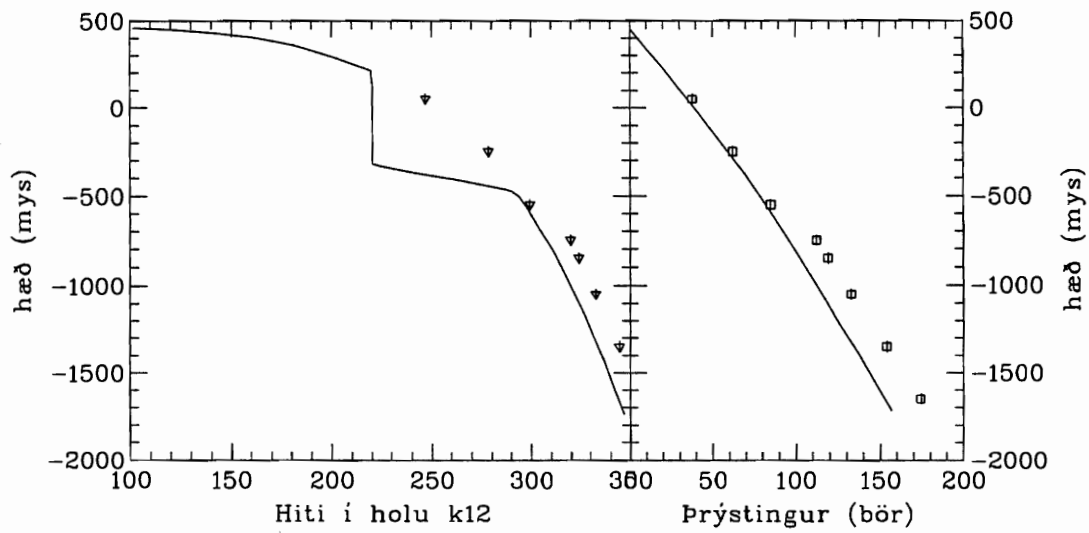
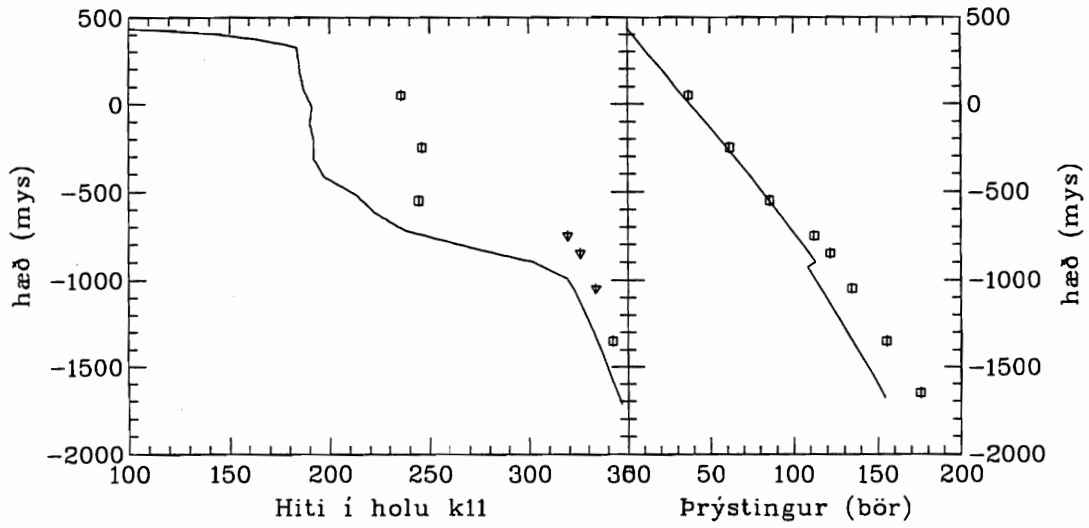
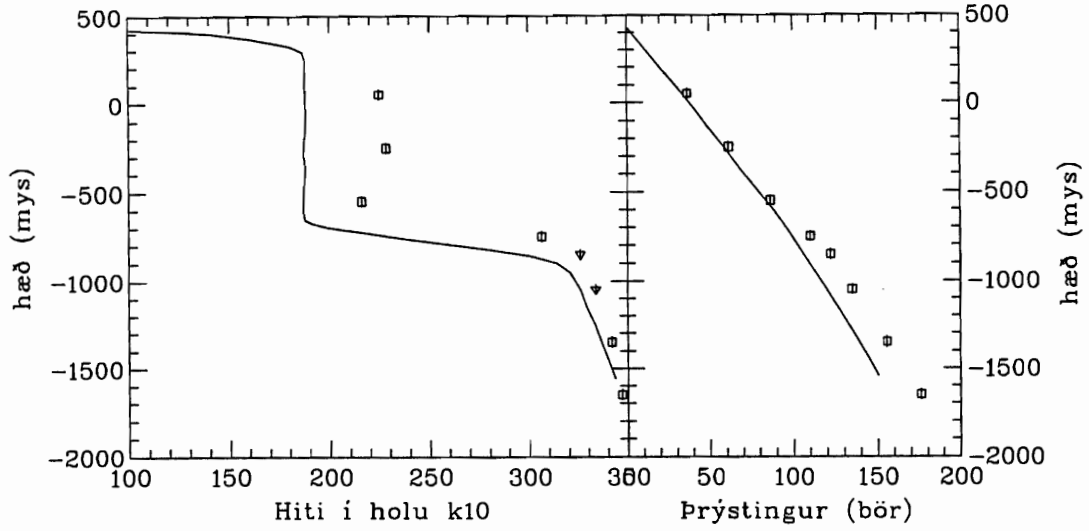
Mældur og reiknaður hiti og þrýstingur í borholum

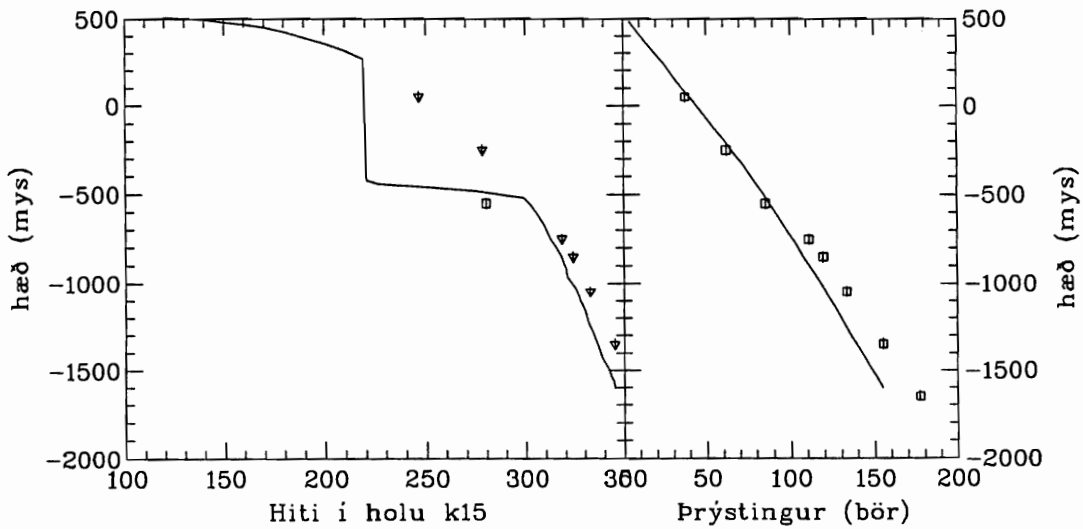
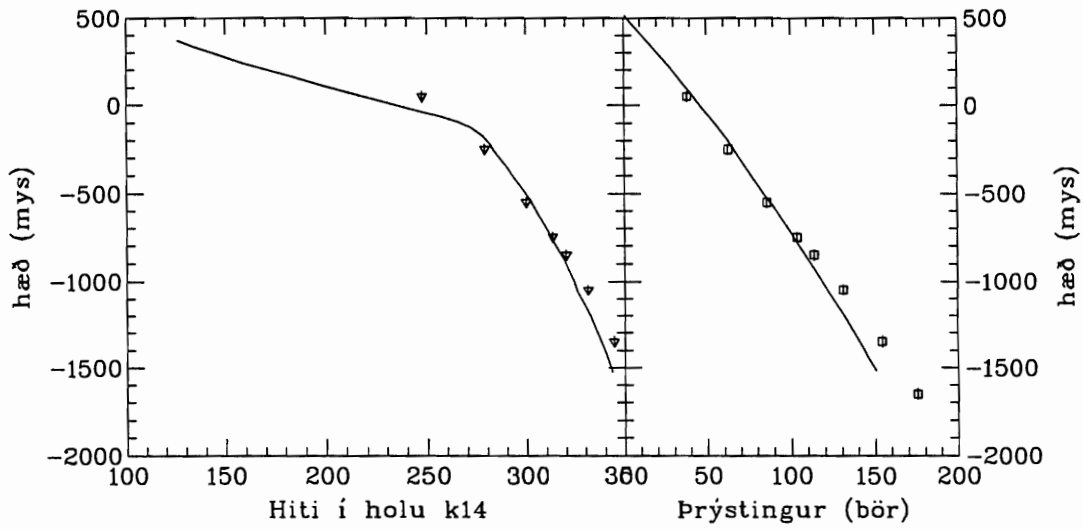
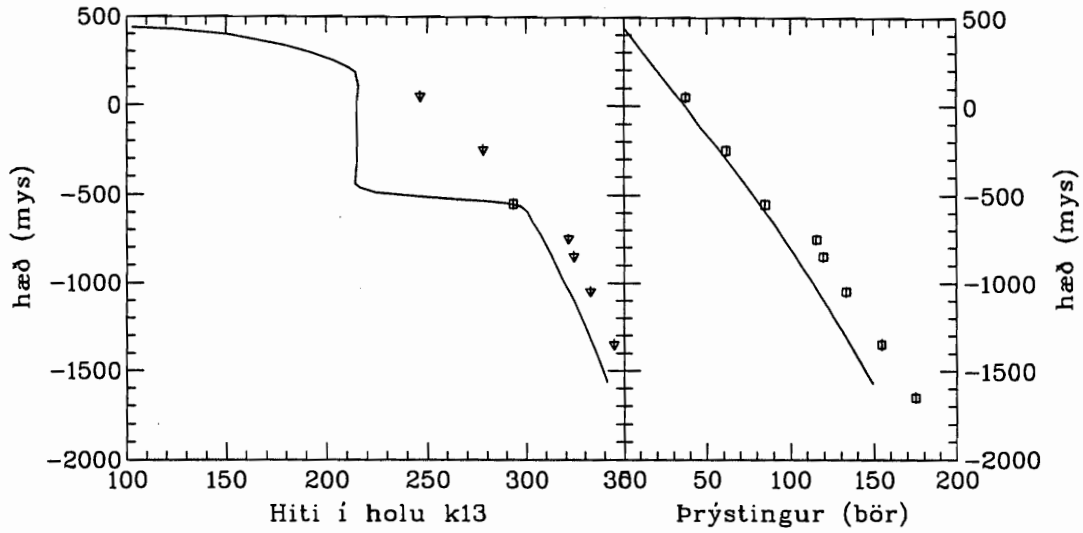
Mæld gildi eru sýnd með heildregnum ferlum en reiknuð ýmist með opnum kössum eða þríhyrningum. Eiga þríhyrningarnir við tvífasa ástand en ferningar við einsfasa vatn. Djúpu Kröfluholurnar eru merktar með bókstafnum k á undan holunúmeri, en holurnar í Sandabotnaskarði hafa auðkennið s.

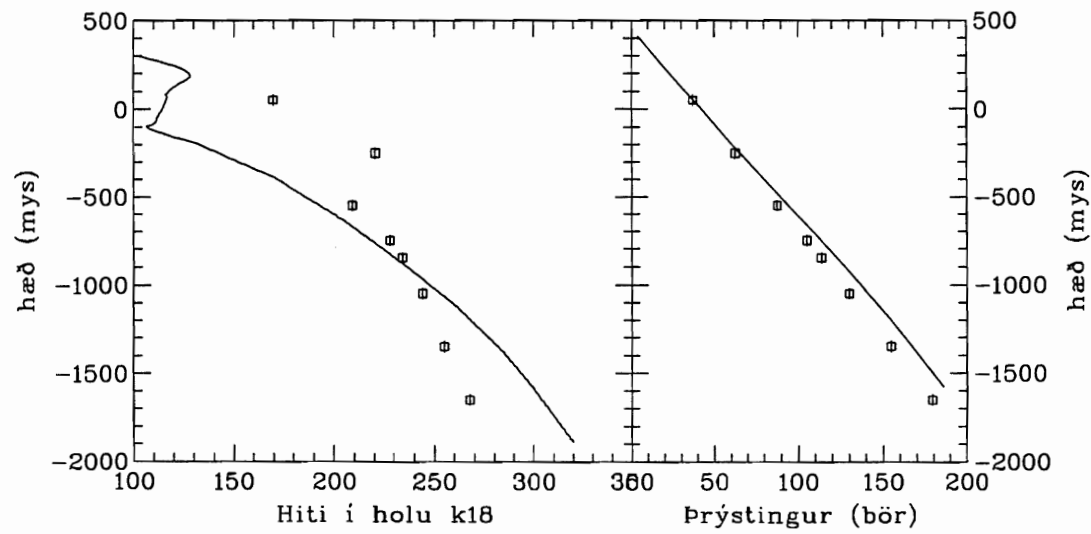
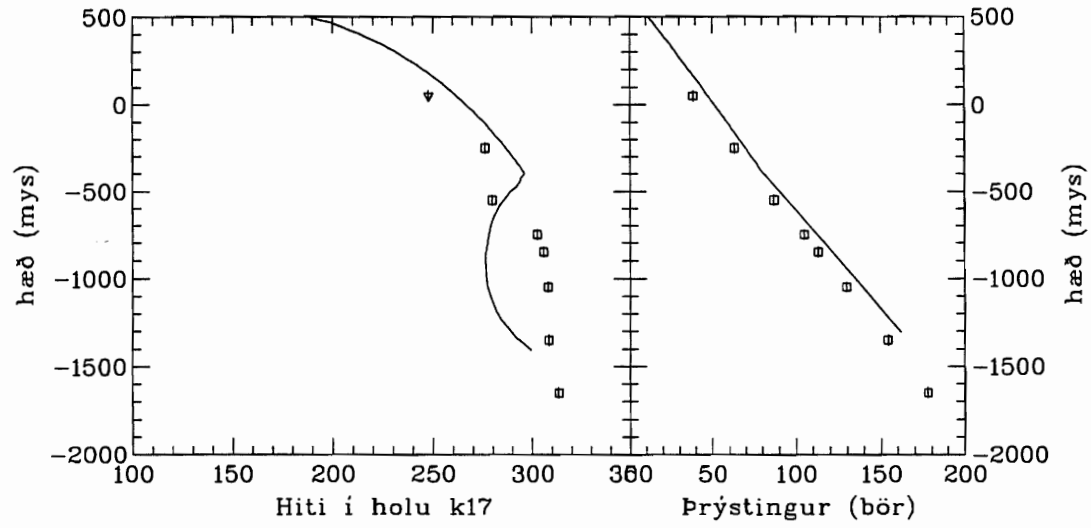
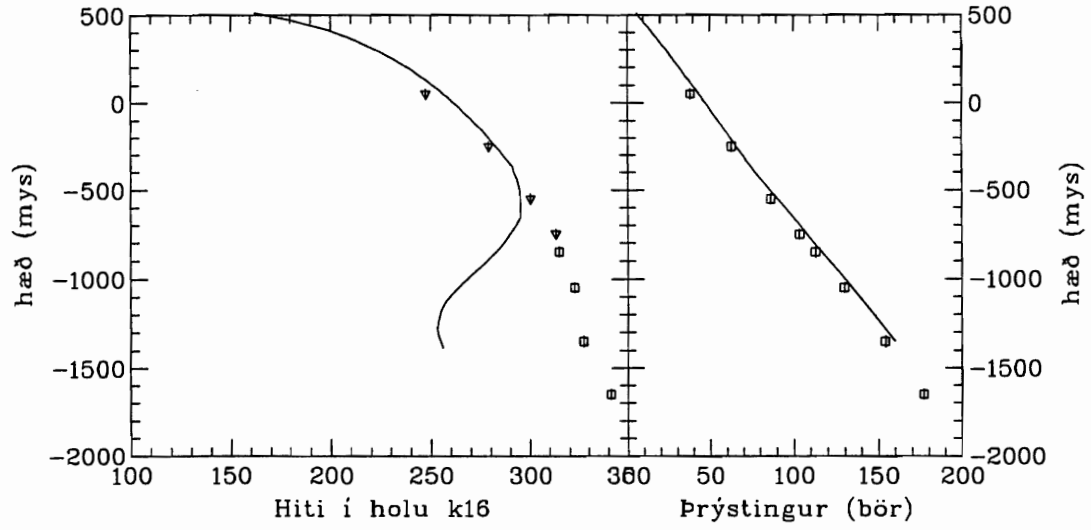


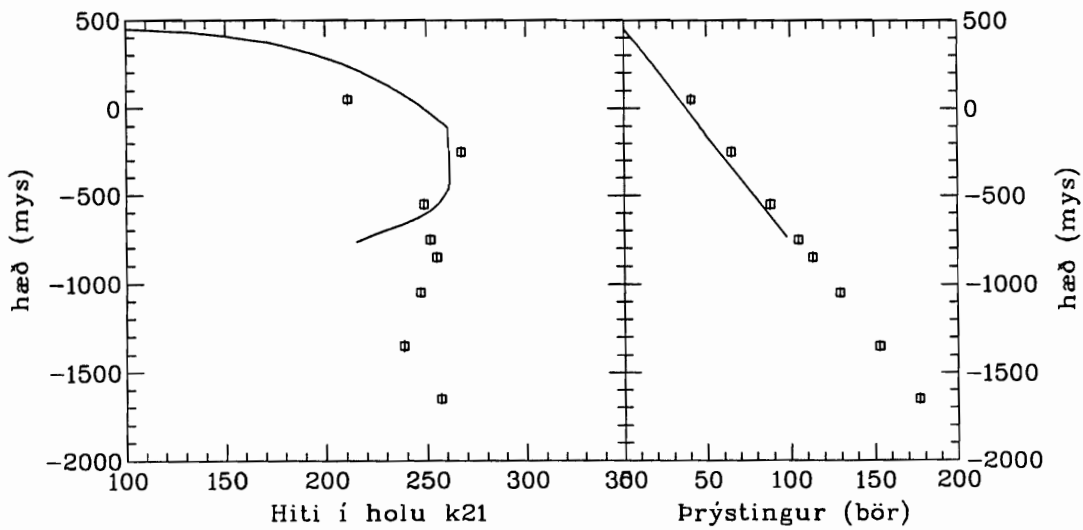
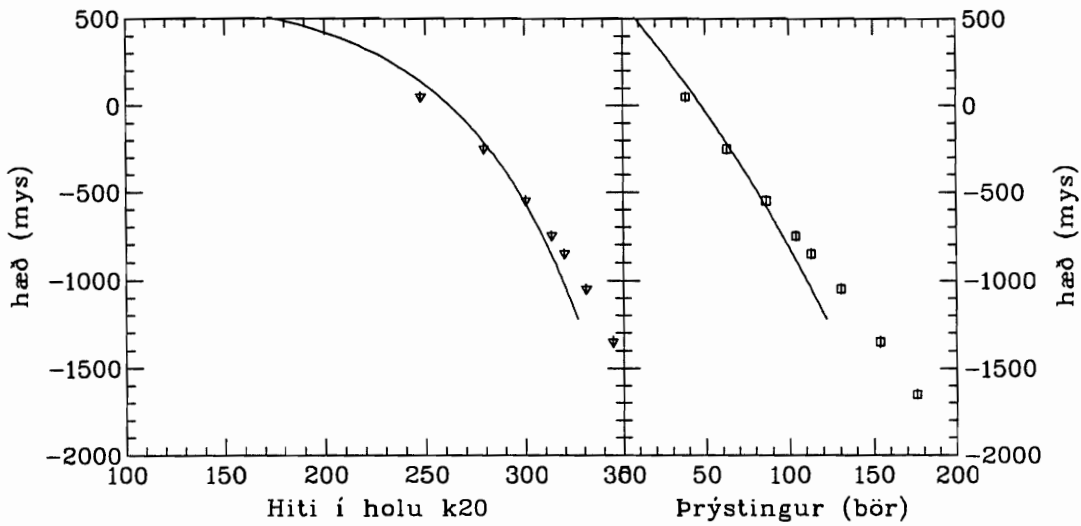
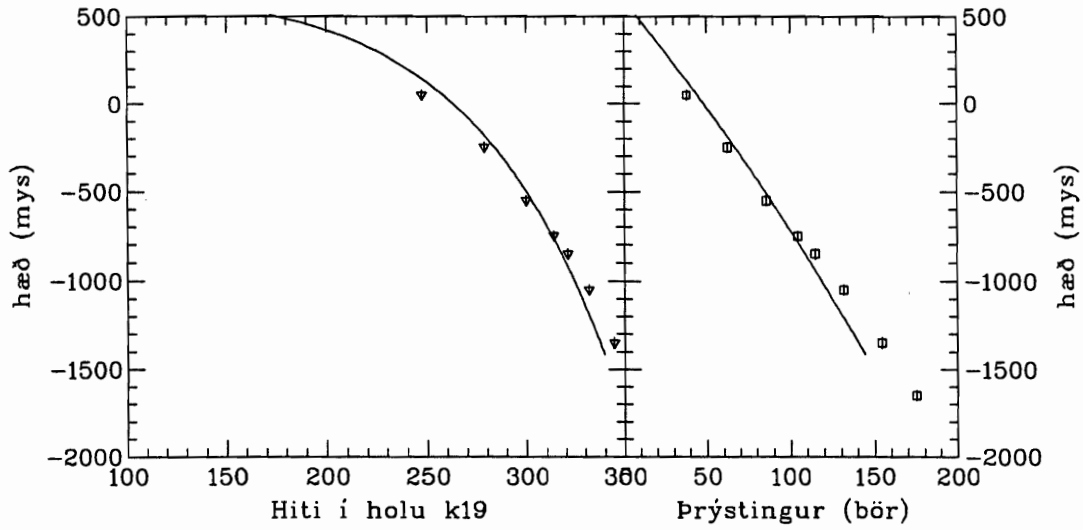


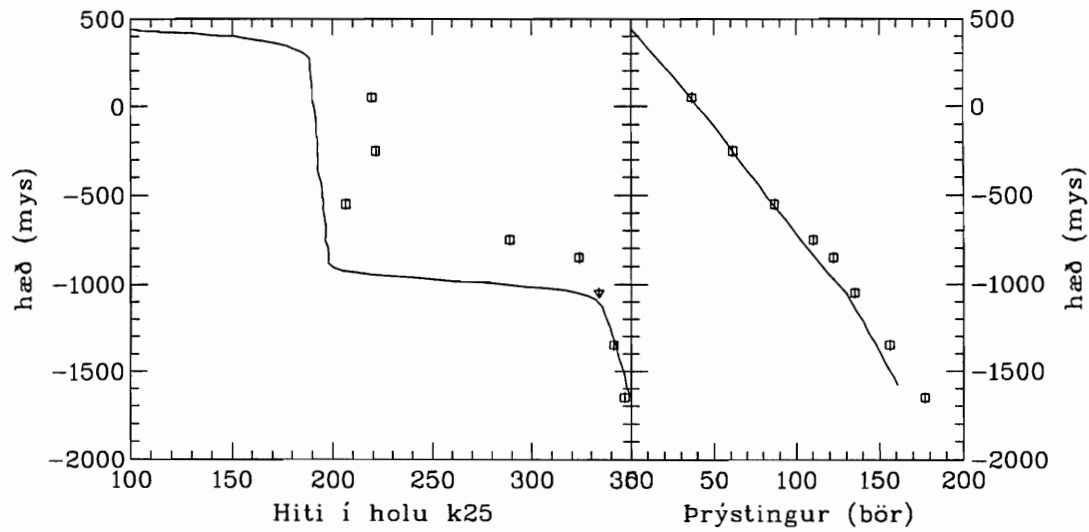
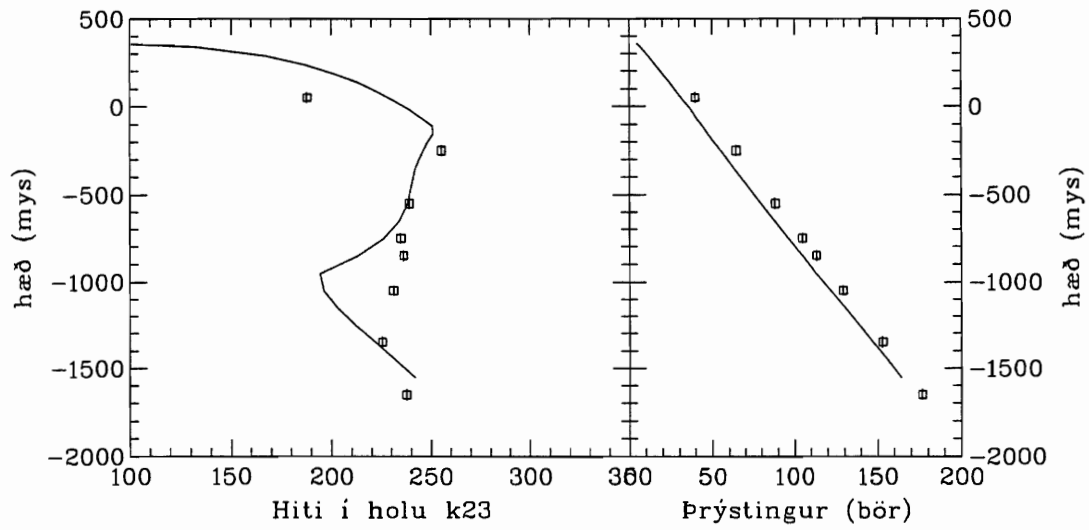
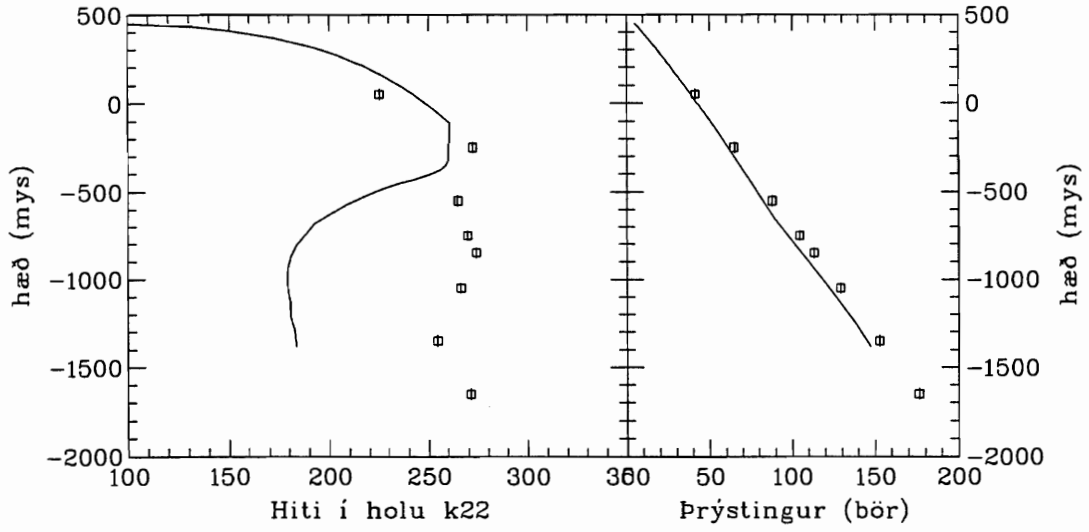


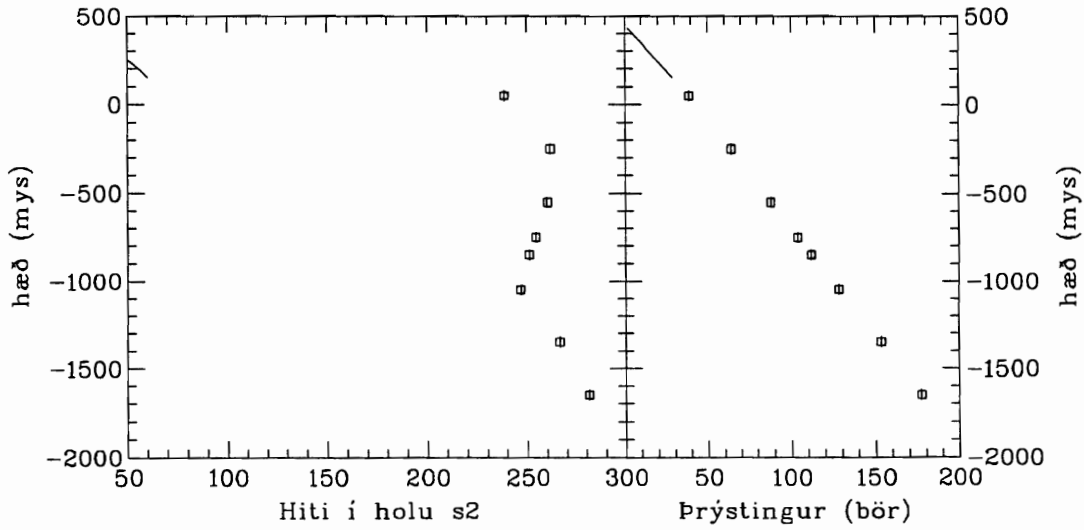
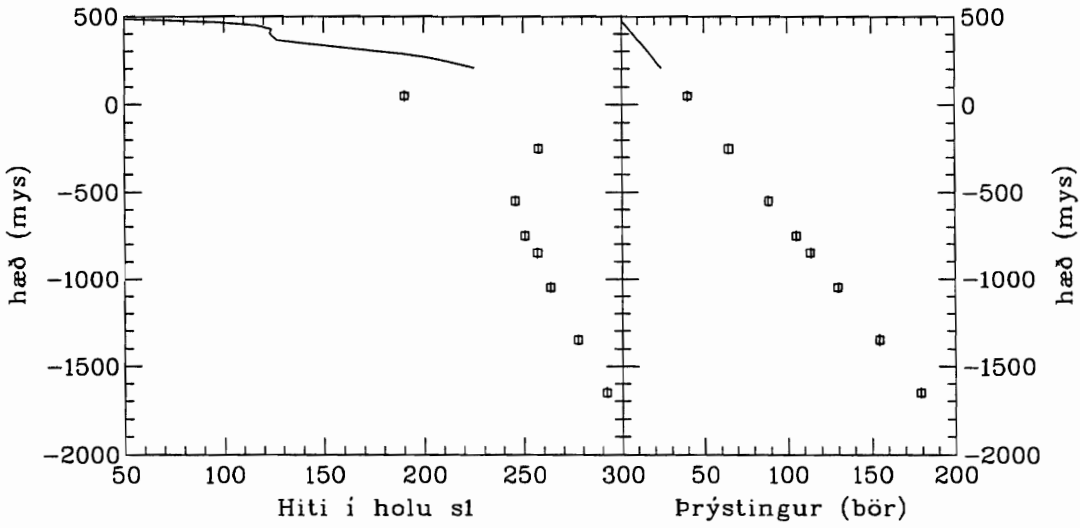
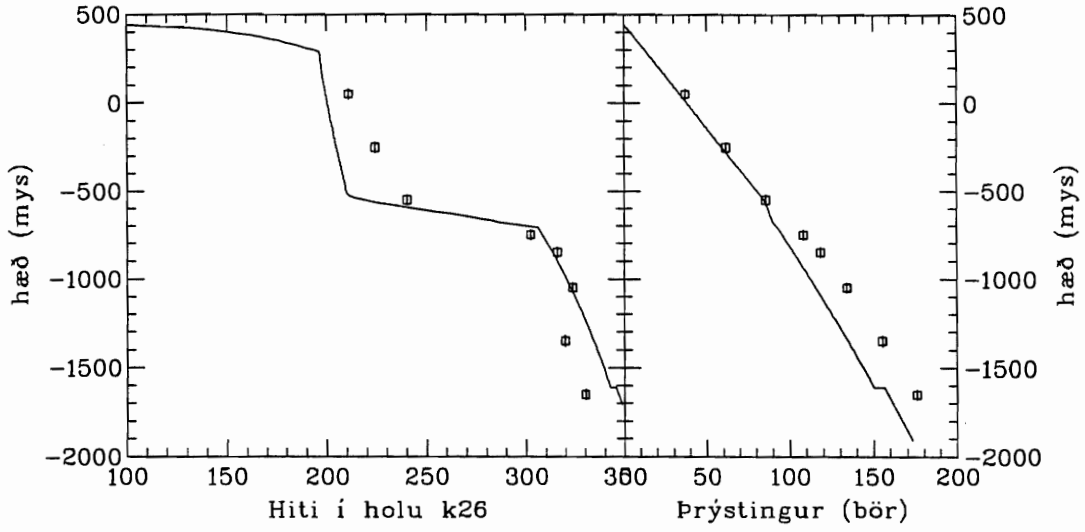












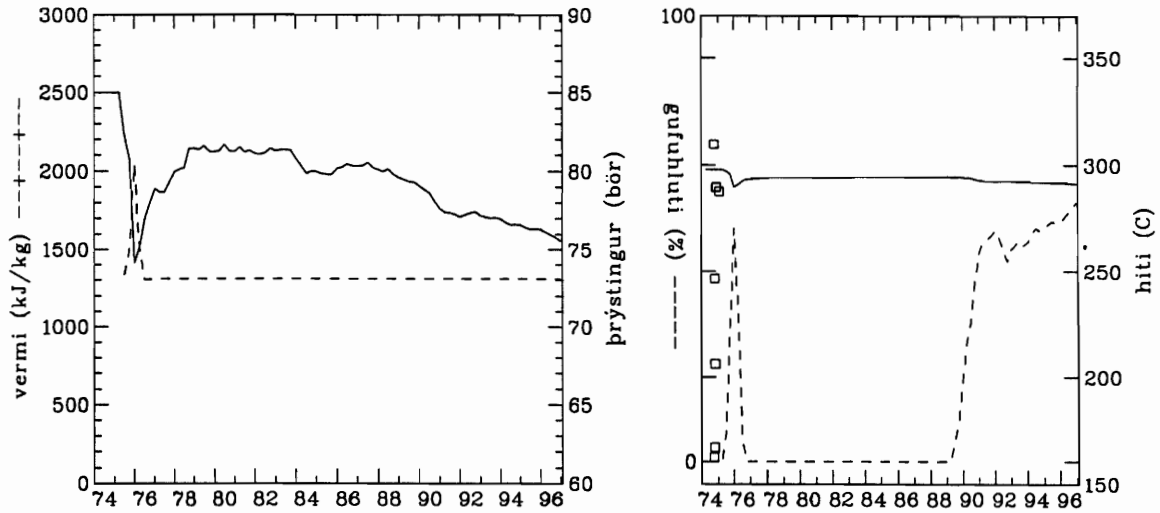
VIÐAUKI E

Hermun vinnslusögu áráanna 1974-1996

Mæld gildi hita og þrýstings eru sýnd með opnum kössum en heildregnir ferlar tákna reiknaðan hita og þrýsting. Mælt vermi er sýnt með krossum og slitnar línur tákna ýmist reiknað vermi eða massahluta gufu í holuæðum.

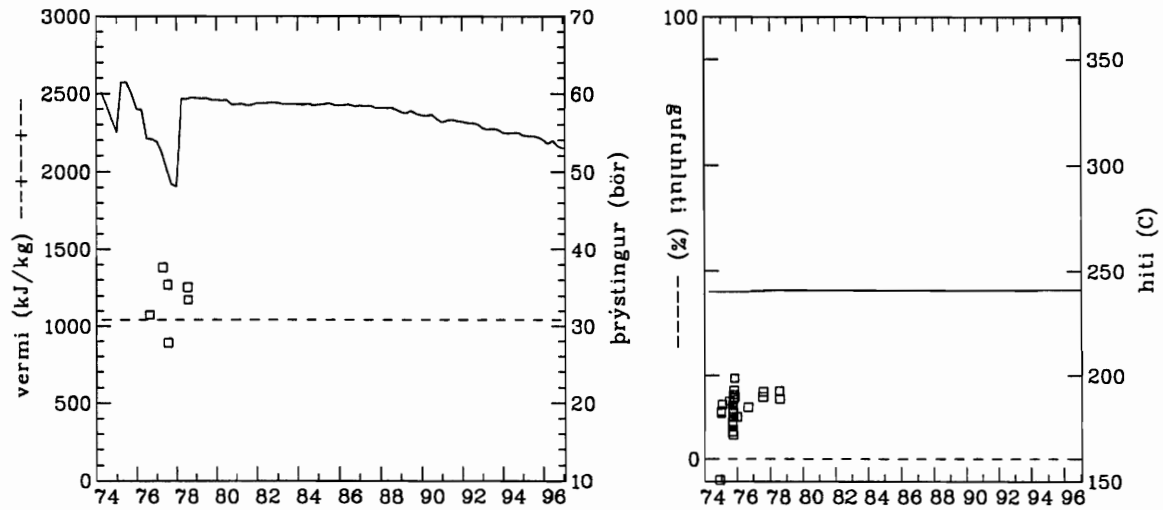
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 1, æð 1, blokk E01-1



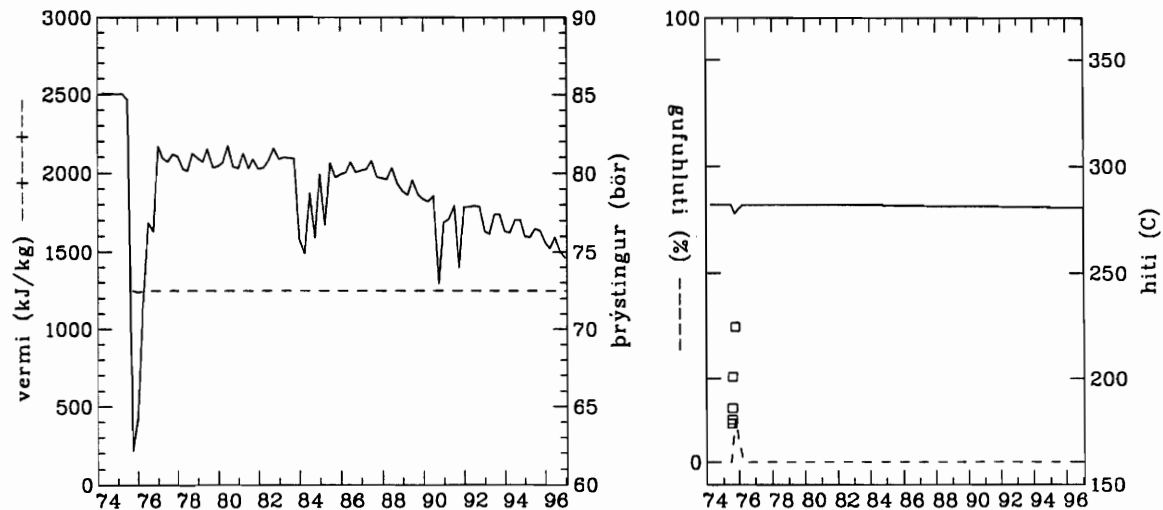
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 2, æð 1, blokk E02-1



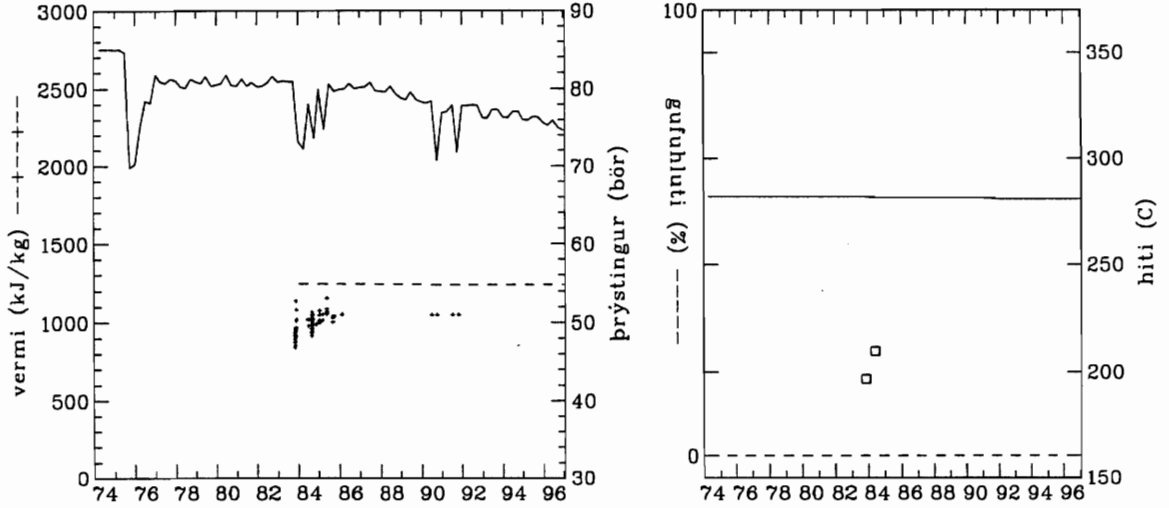
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 3, æð 1, blokk E03-1



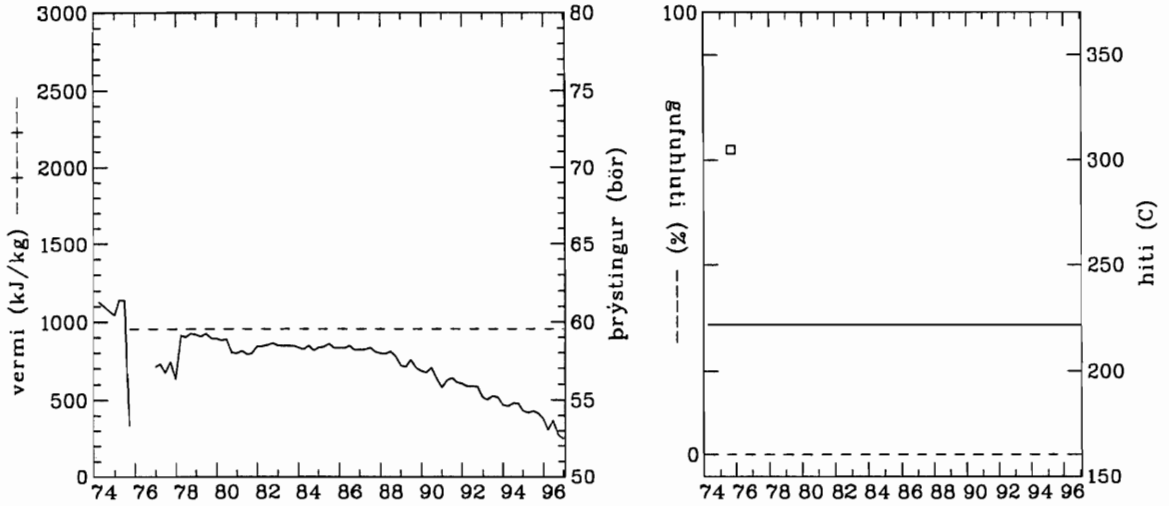
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 3a, æð 1, blokk Æ3A-1



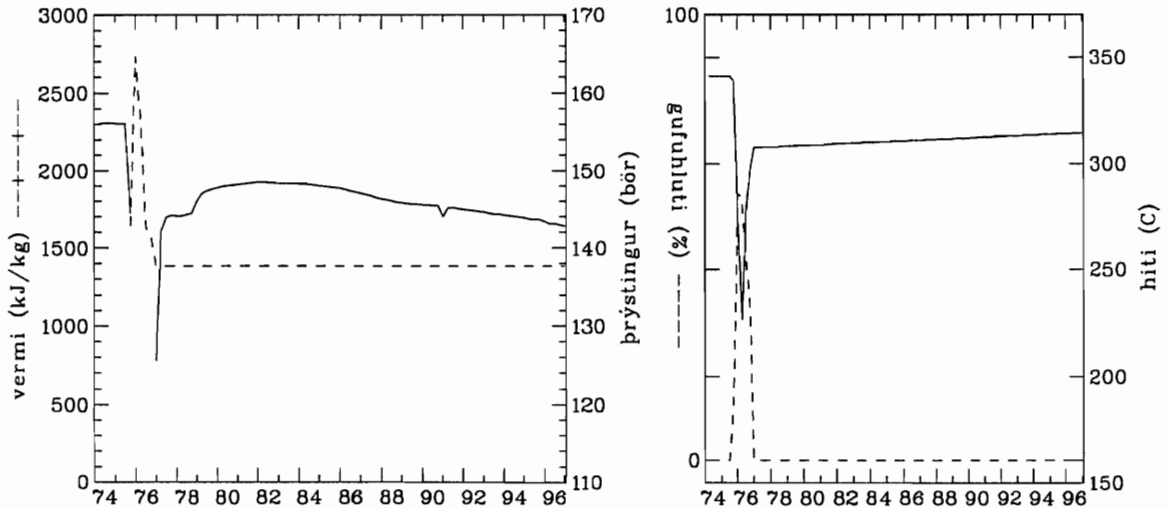
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 4, æð e, blokk Æ04-1



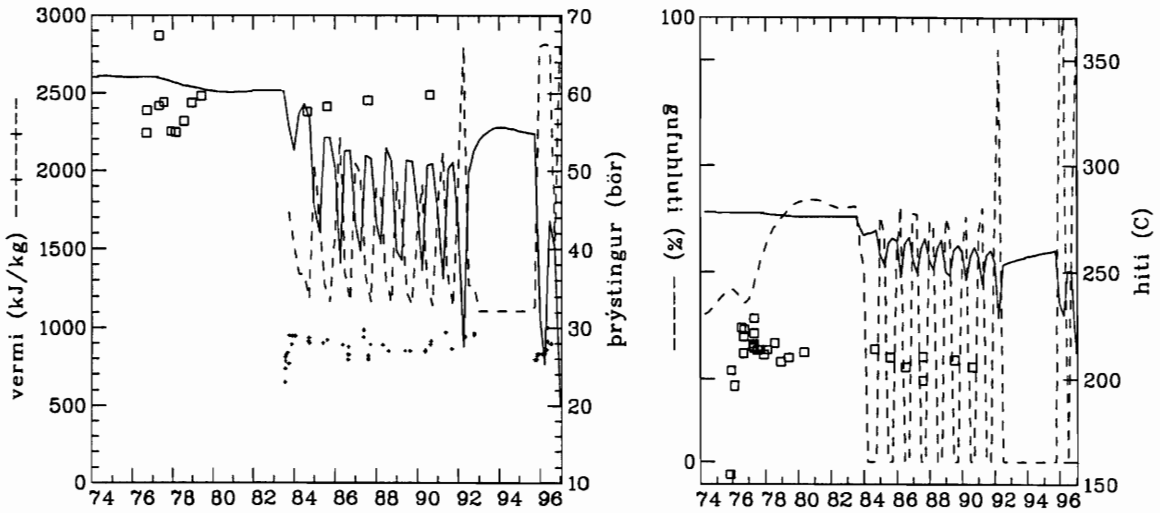
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 4, æð n, blokk Æ04-3



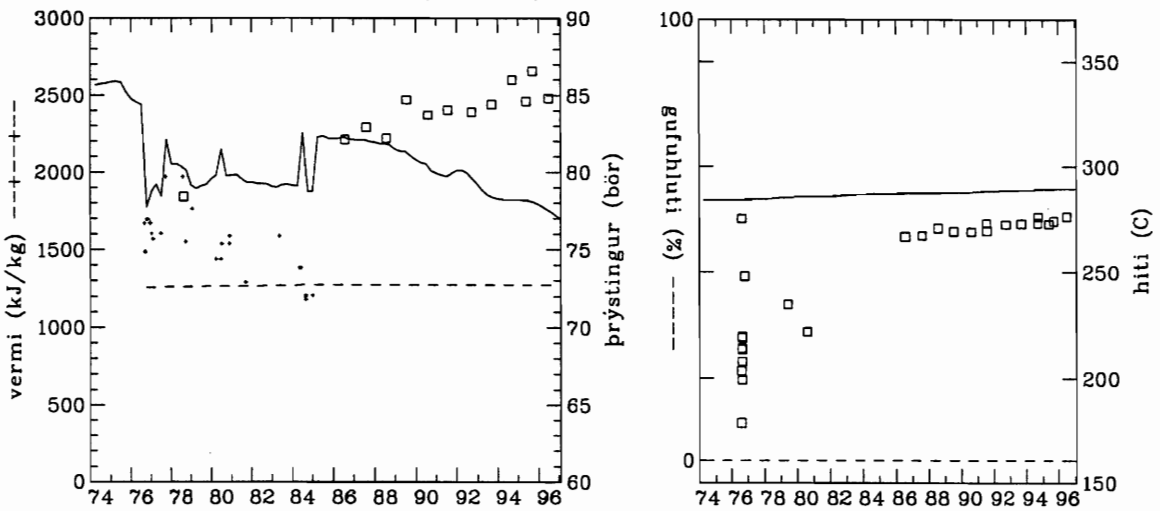
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 5, æð 1, blokk Æ05-1



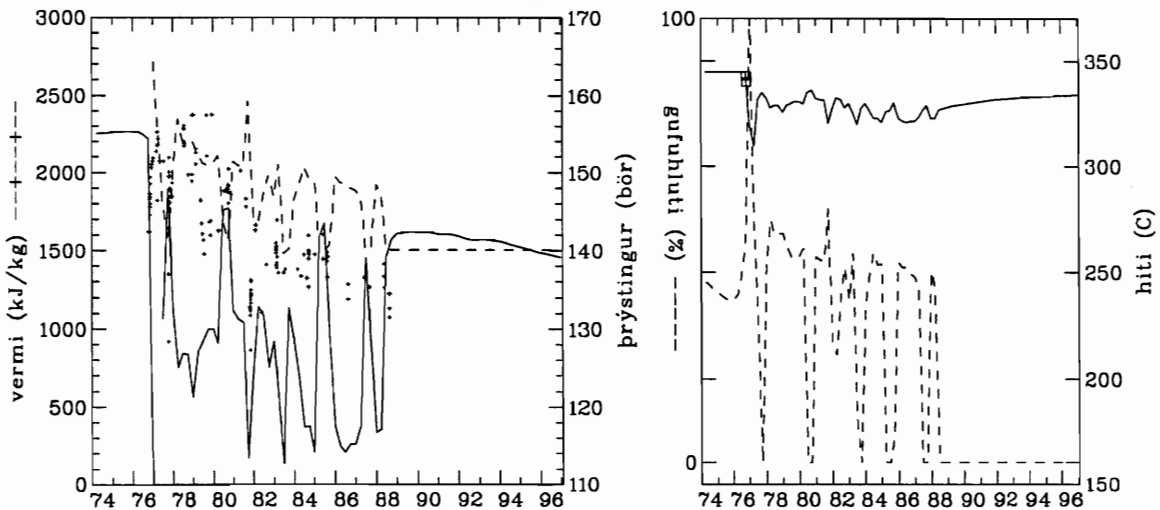
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 6, æð 1, blokk Æ06-1



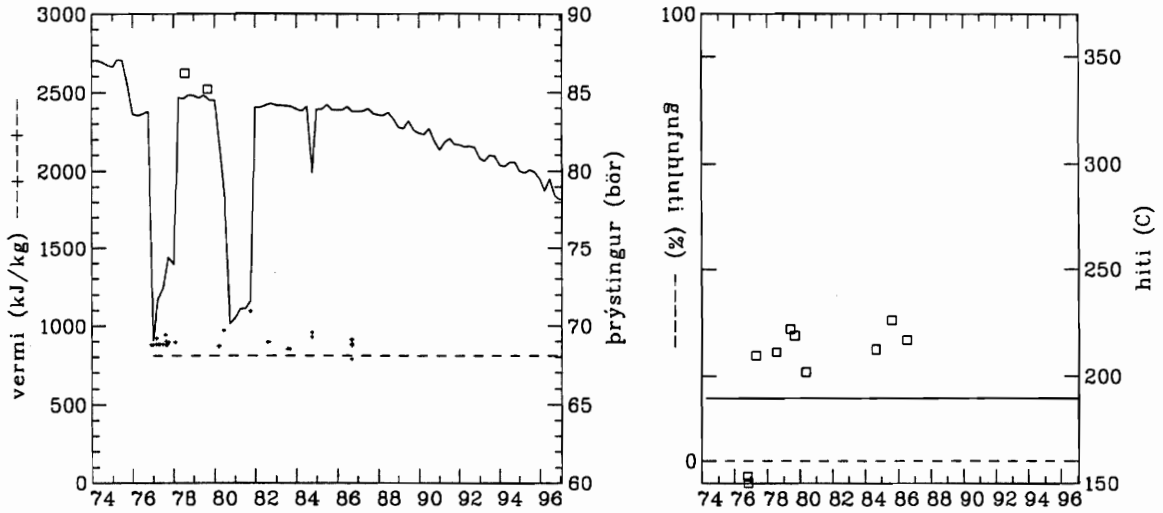
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 7, æð 1, blokk Æ07-1



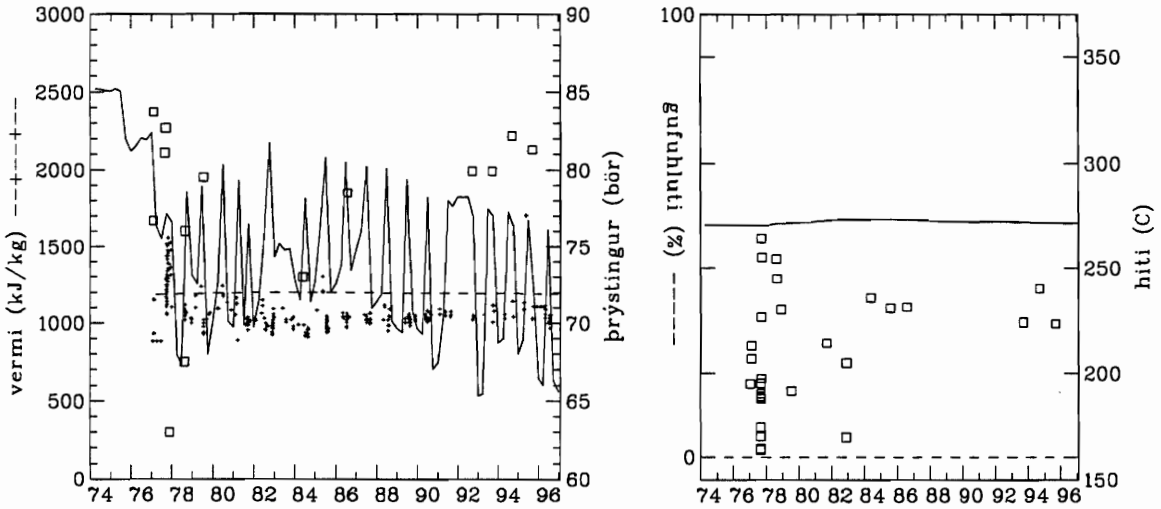
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 8, æð 1, blokk Æ08-1



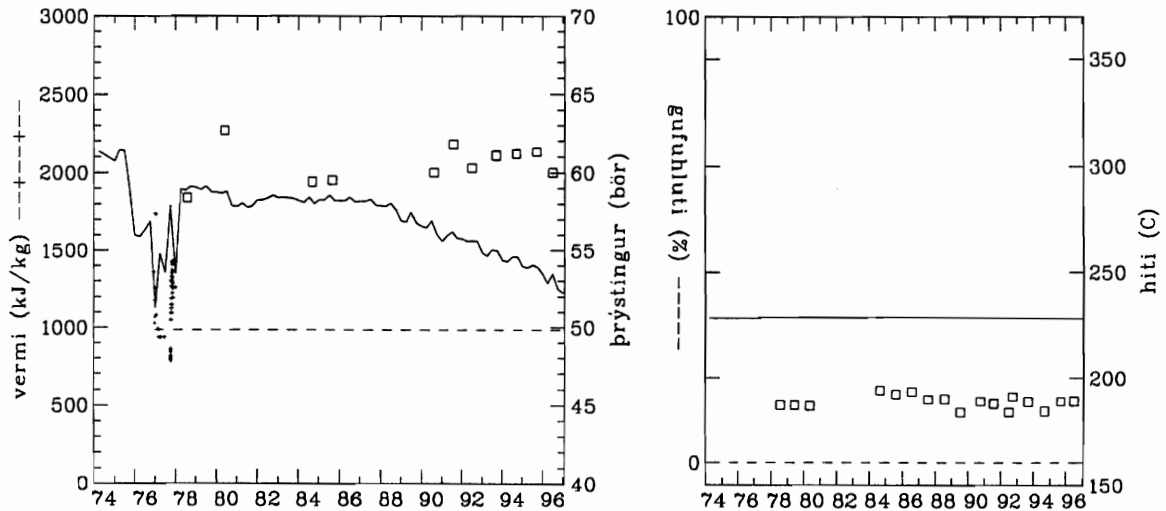
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 9, æð 1, blokk Æ09-1



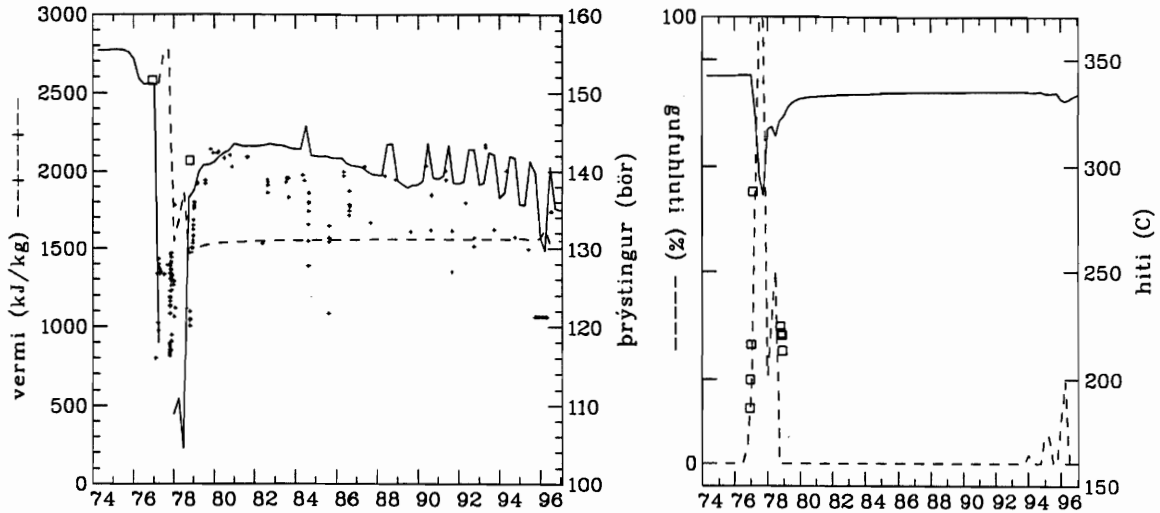
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 10, æð e, blokk Æ10-1



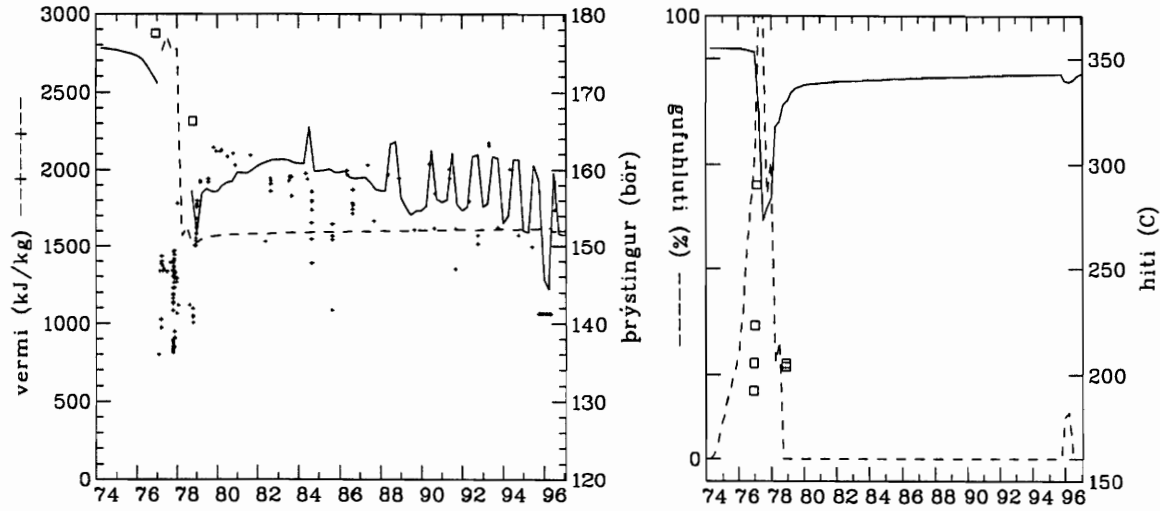
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 11, æð e, blokk E11-1



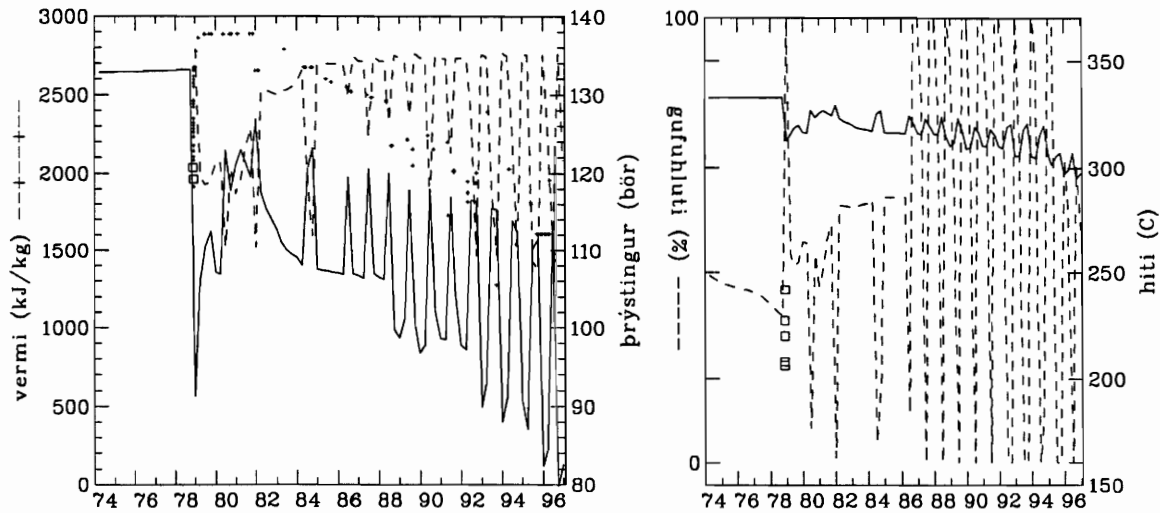
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 11, æð n, blokk E11-3



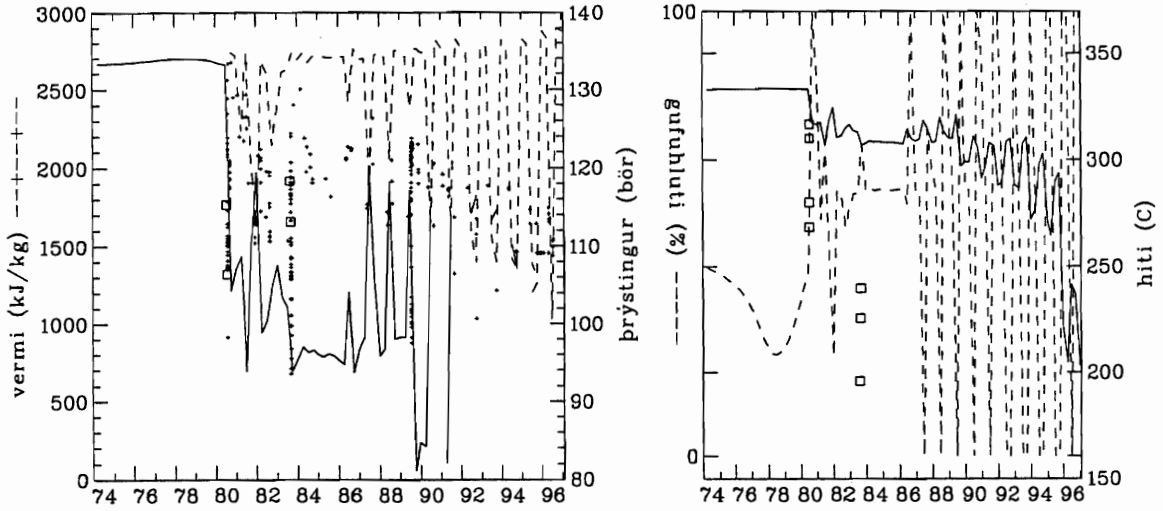
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 12, æð 1, blokk E12-1



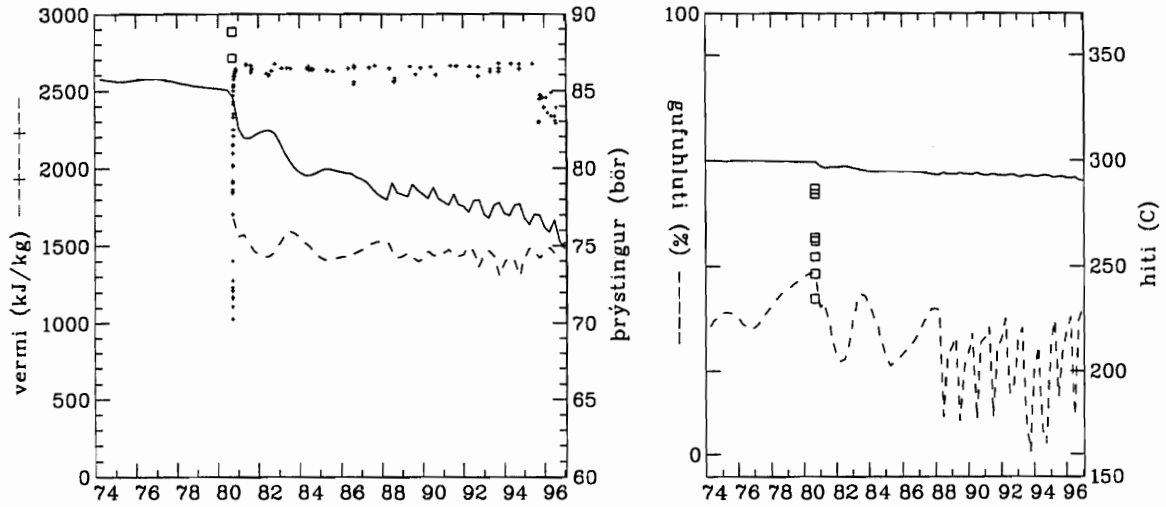
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 13, æð 1, blokk Æ13-1



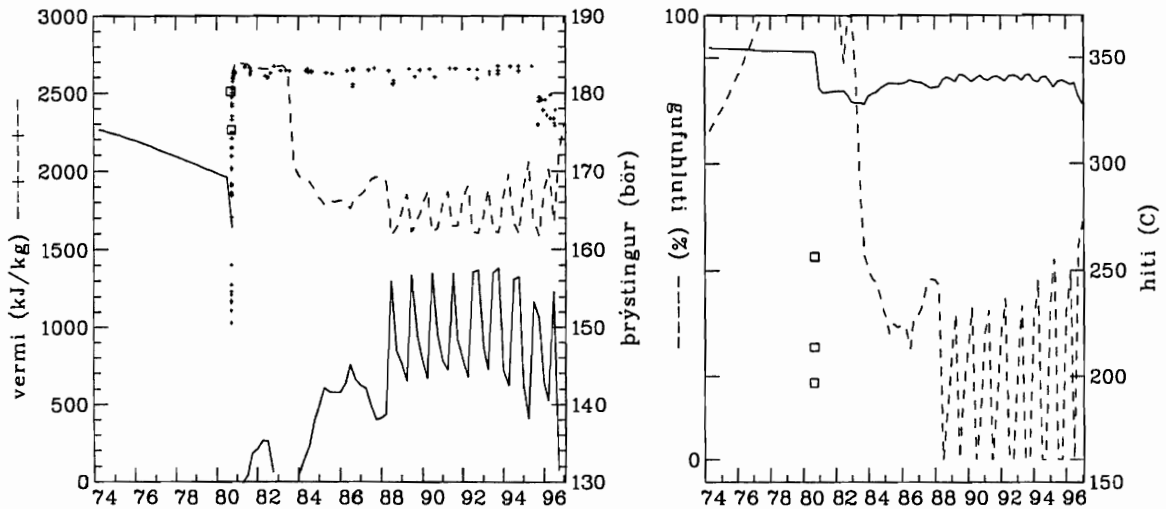
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 14, æð e, blokk Æ14-1



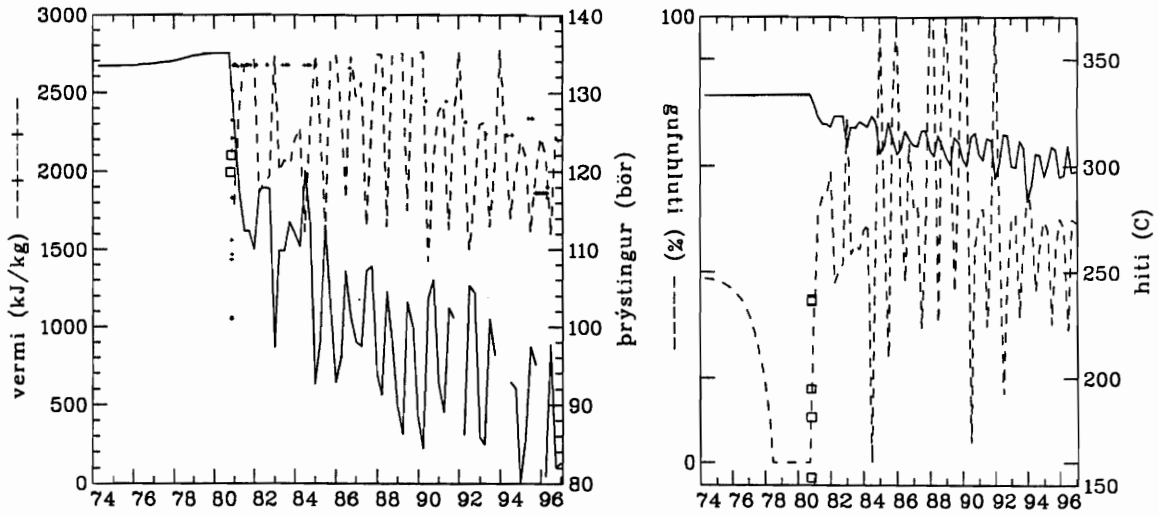
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 14, æð n, blokk Æ14-3



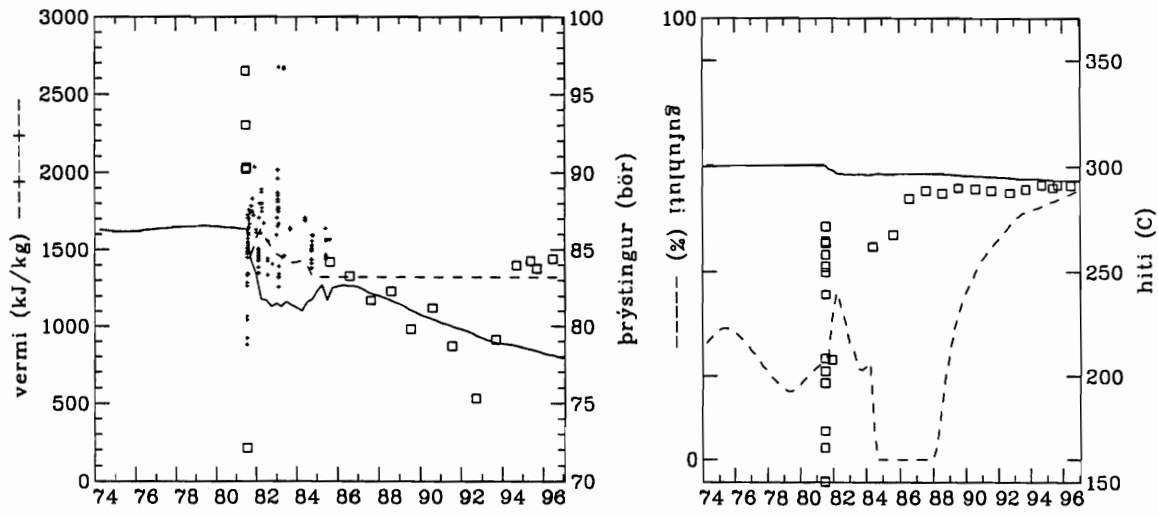
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 15, æð 1, blokk Æ15-1



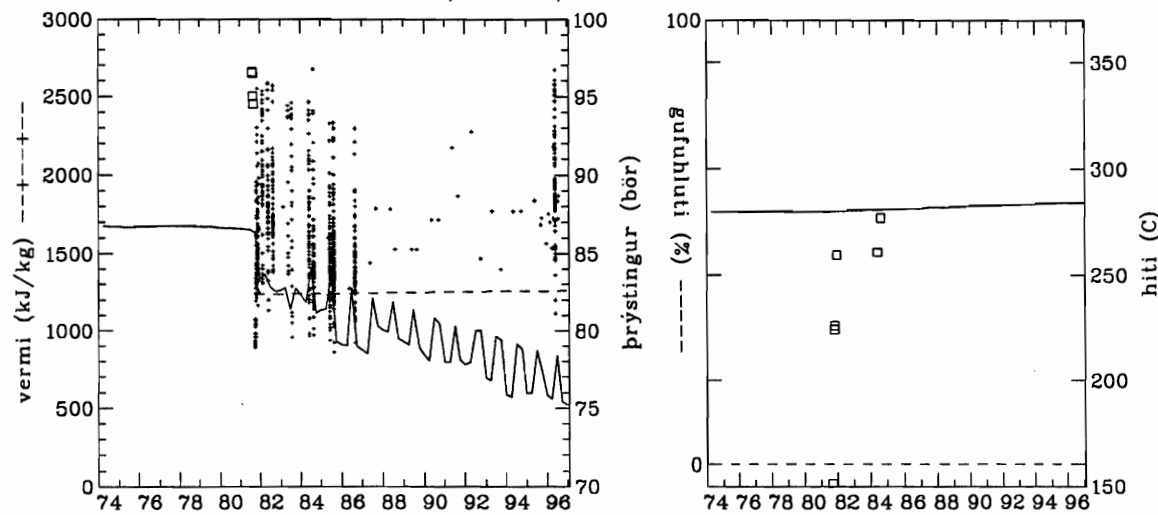
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 16, æð 1, blokk Æ16-1



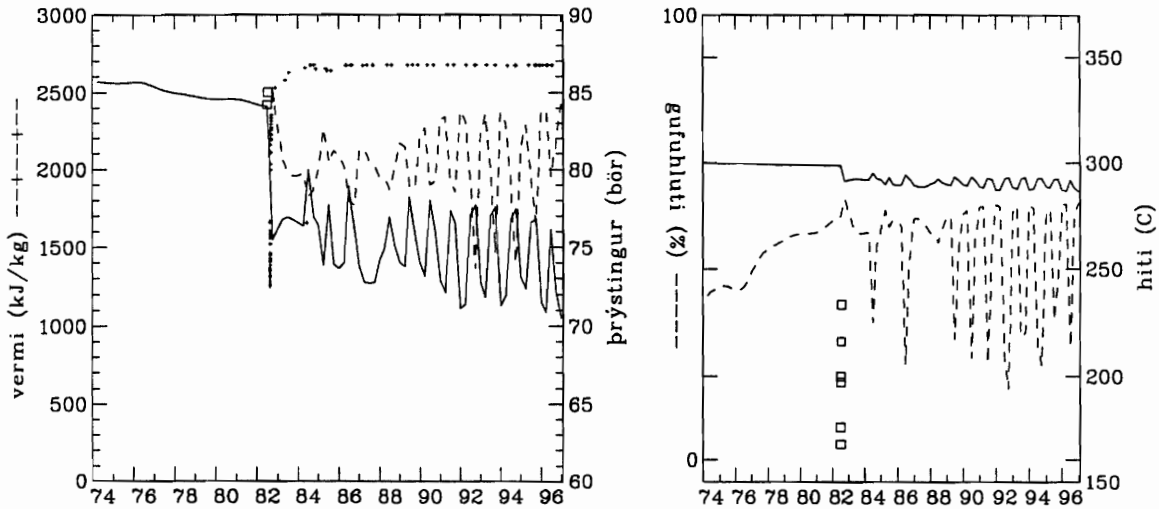
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 17, æð 1, blokk Æ17-1



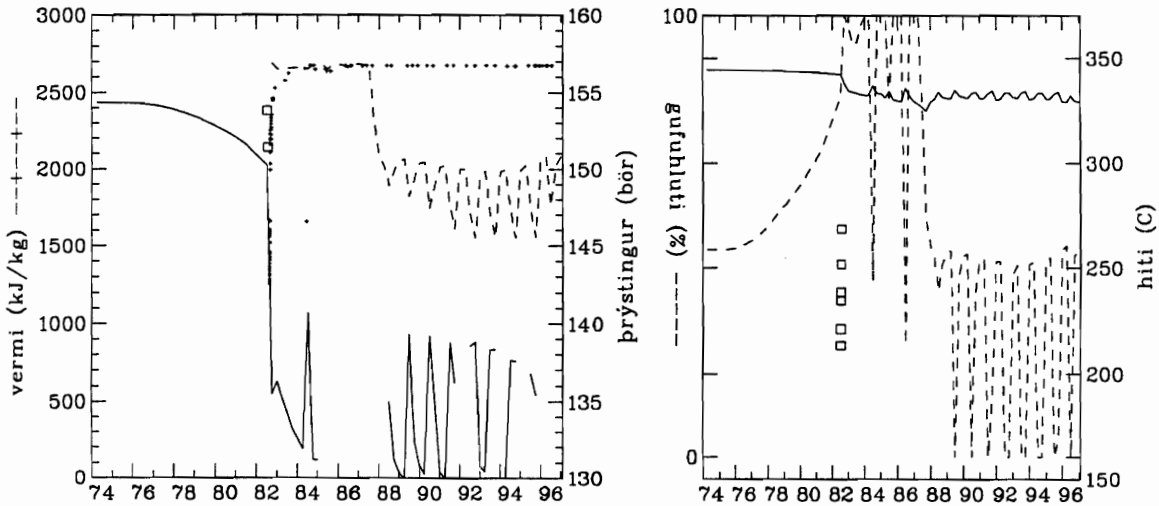
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 19, æð e, blokk Æ19-1



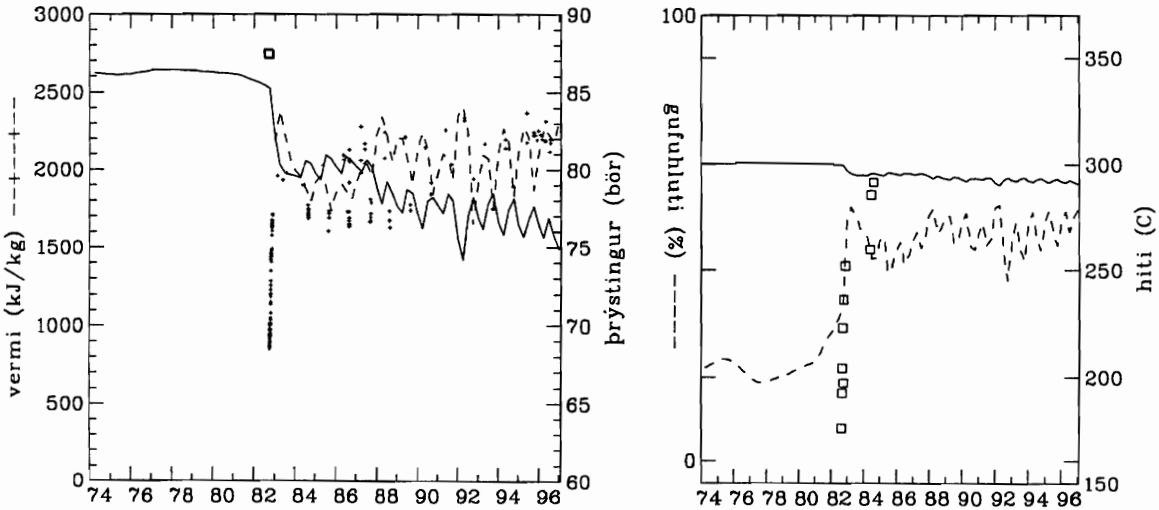
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 19, æð n, blokk Æ19-3



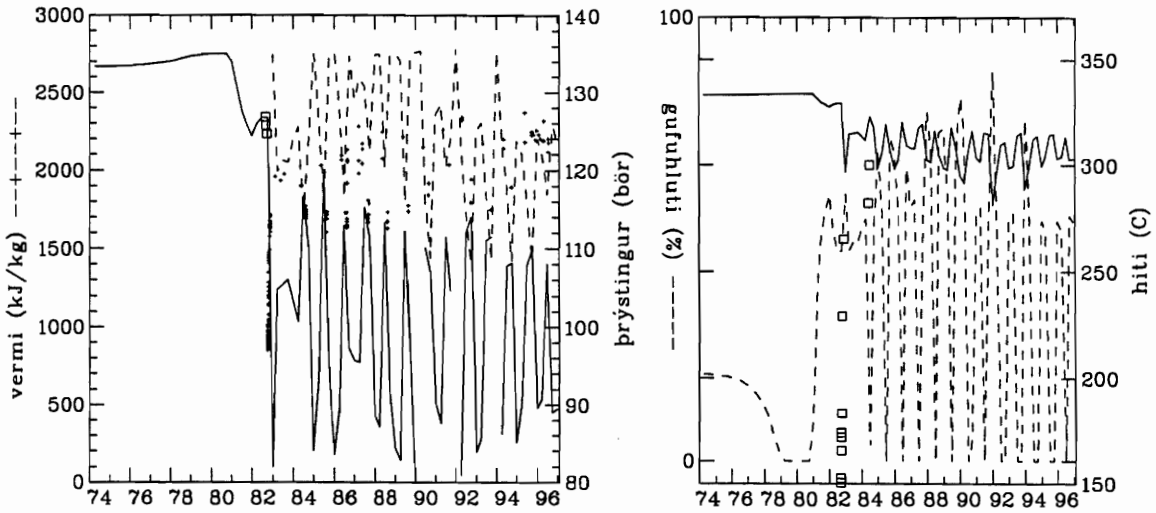
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 20, æð e, blokk Æ20-1



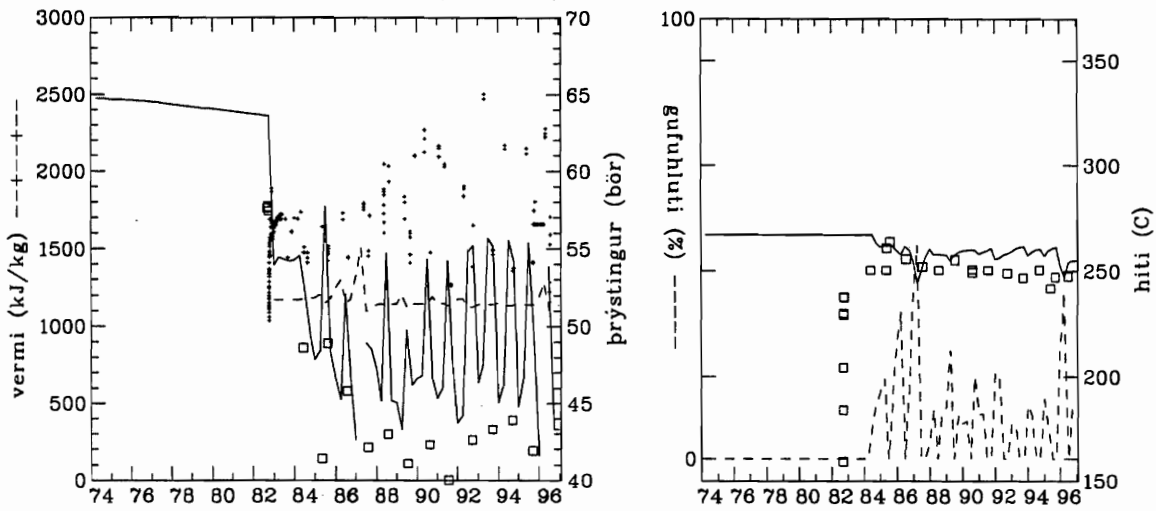
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 20, æð n, blokk Æ20-3



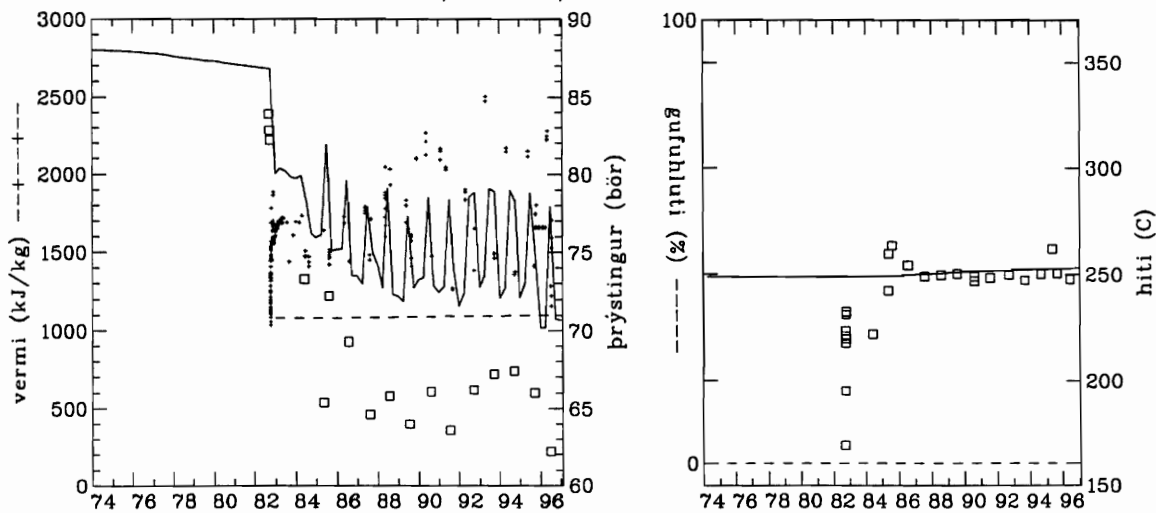
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 21, æð e, blokk Æ21-1



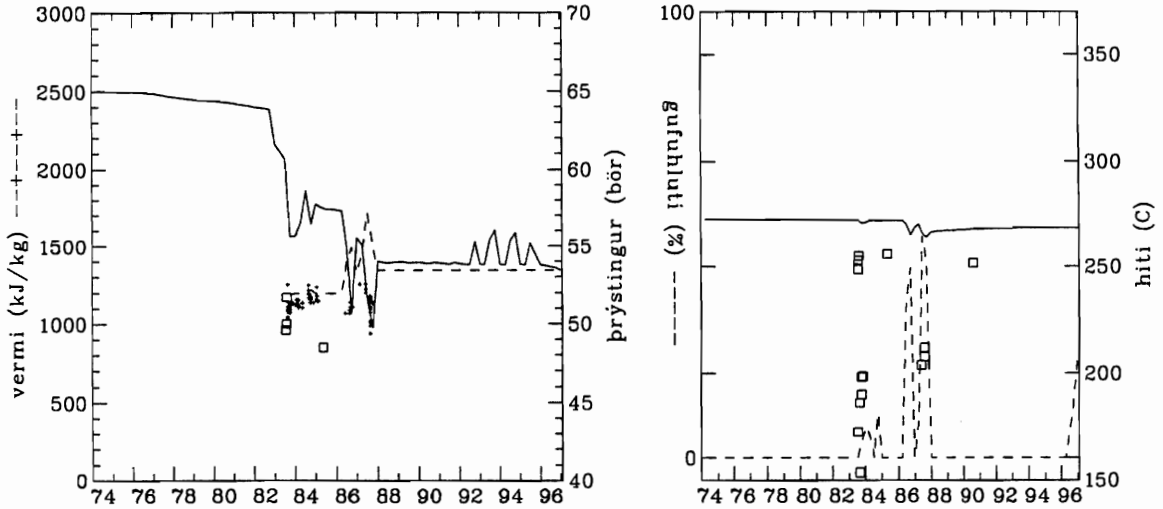
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 21, æð n, blokk Æ21-3



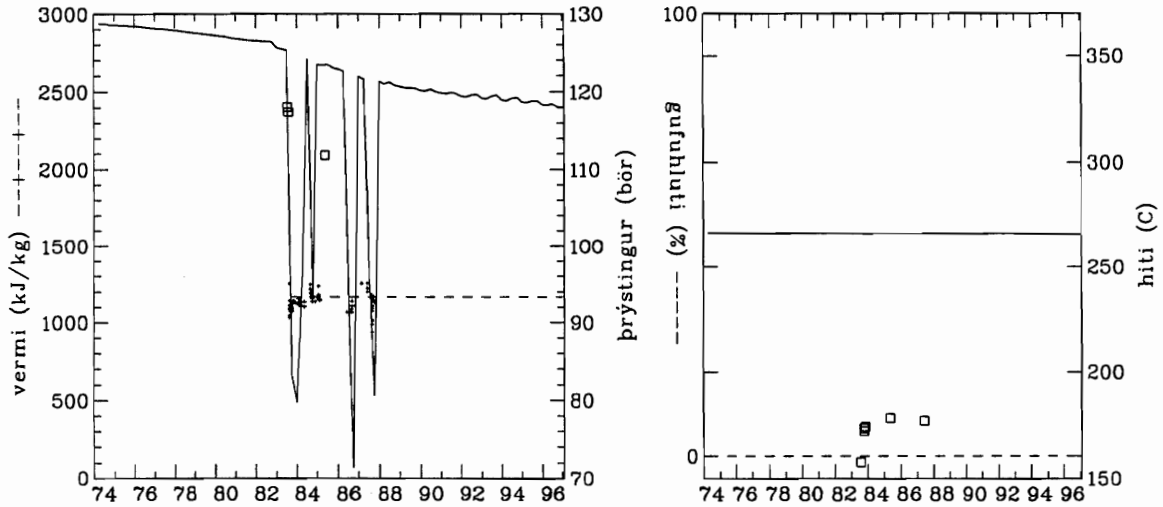
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 22, æð e, blokk E22-1



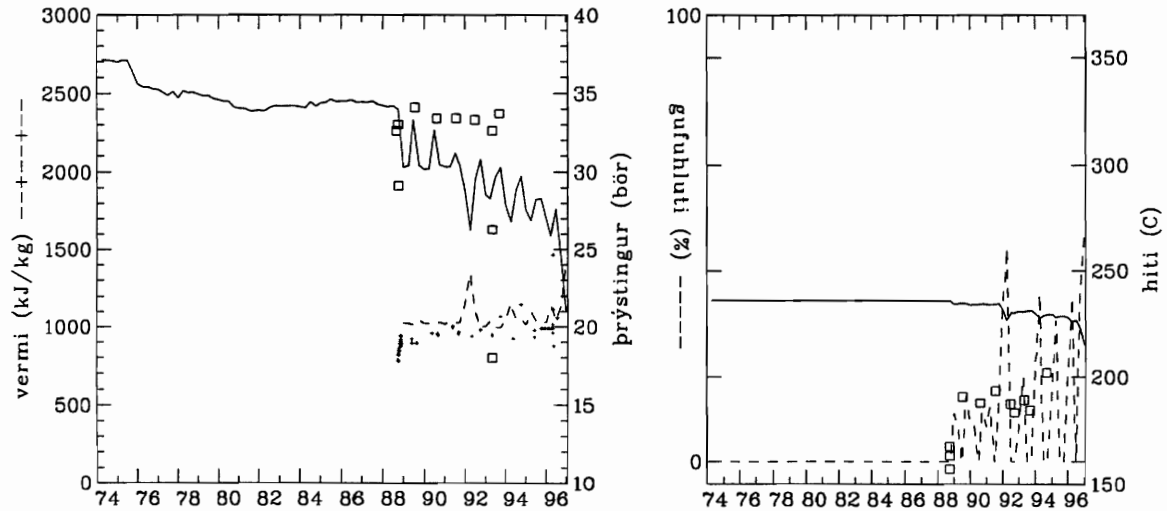
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 22, æð n, blokk E22-3



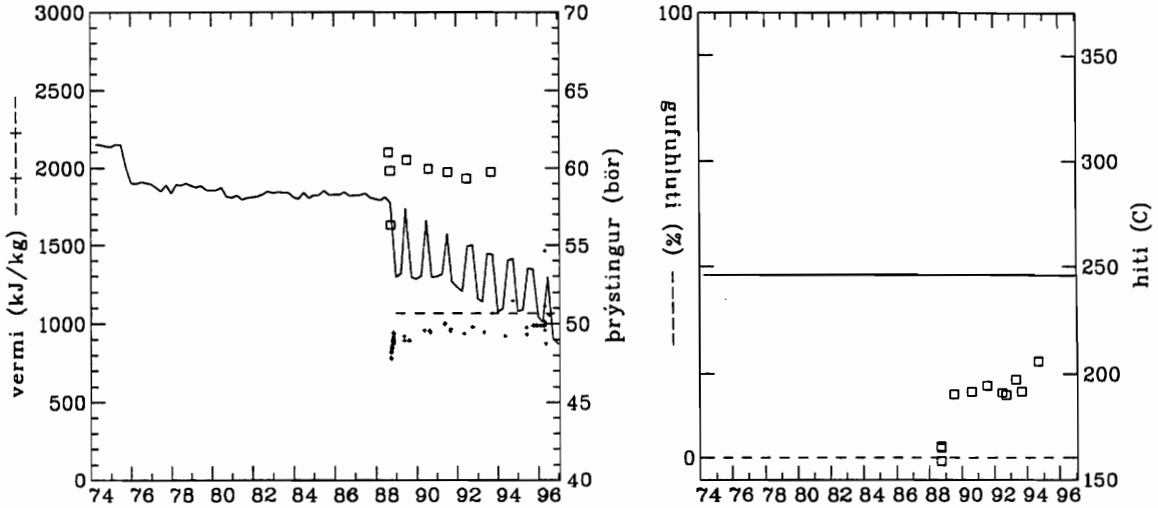
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 24, æð e, blokk E24-1



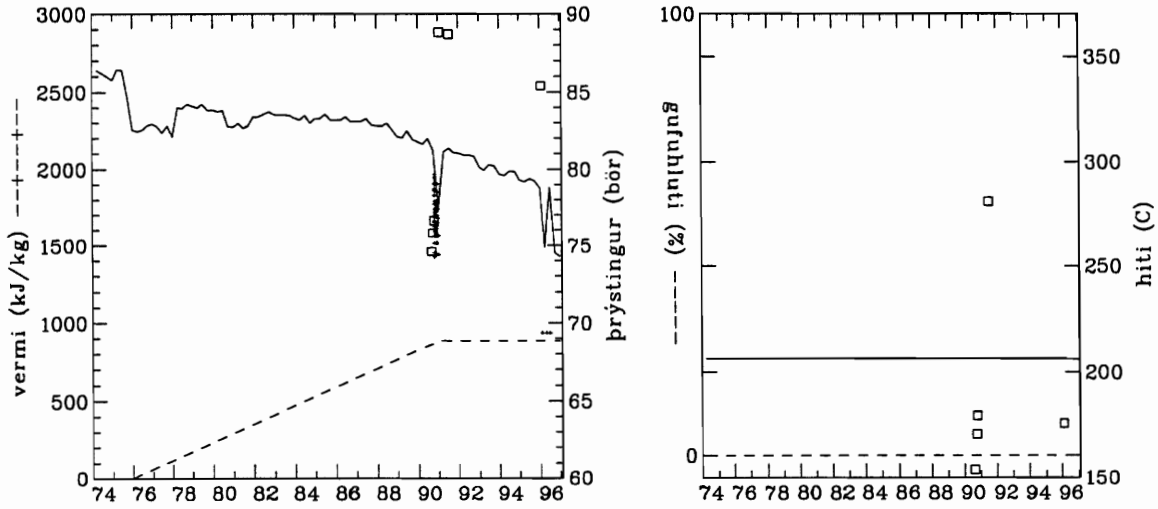
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 24, æð n, blokk Æ24-3



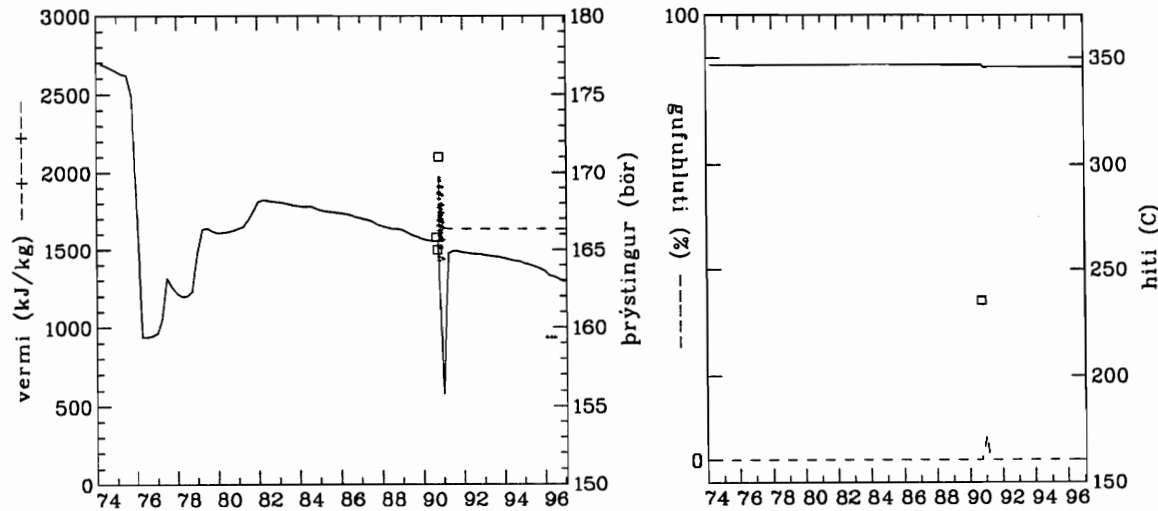
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 25, æð e, blokk Æ25-1



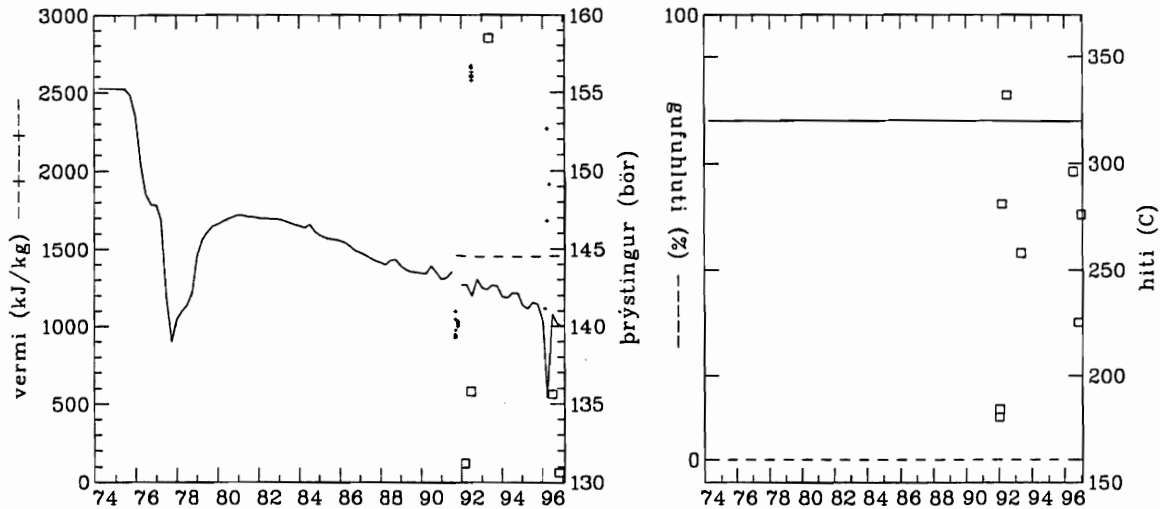
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 25, æð n, blokk Æ25-3



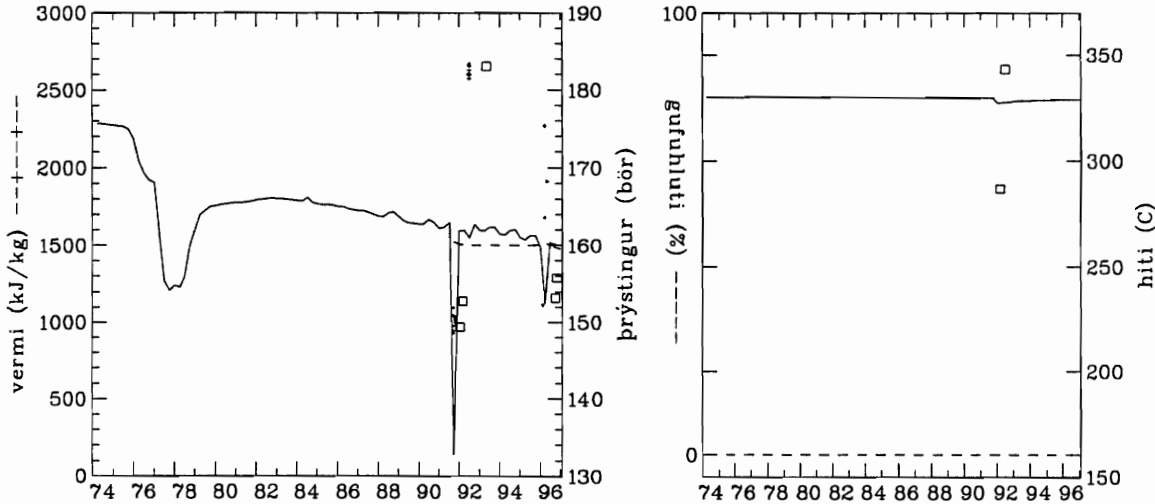
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 26, æð e, blokk Æ26-1



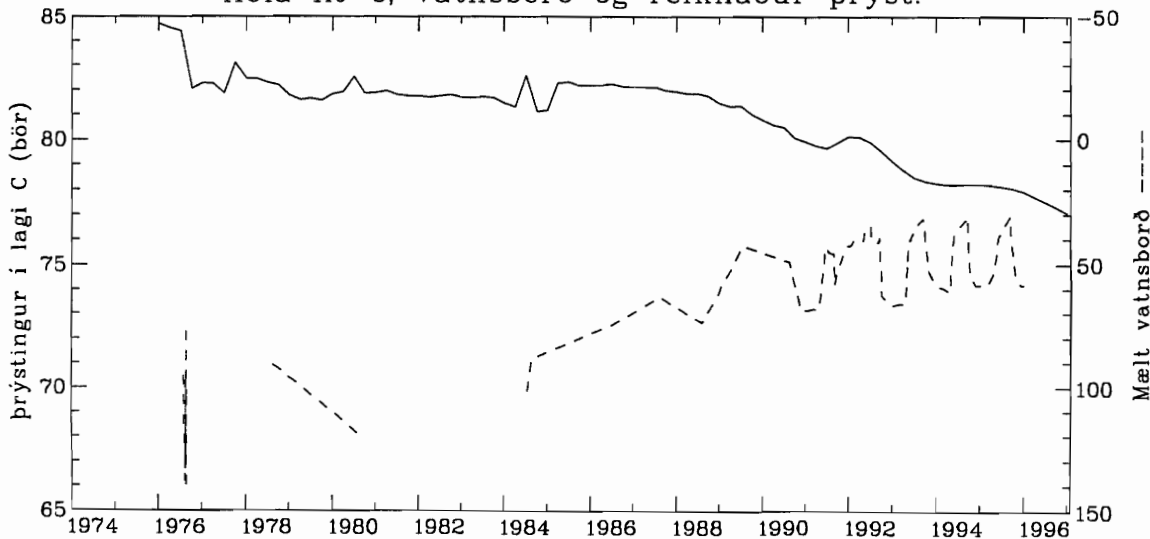
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola 26, æð n, blokk Æ26-3



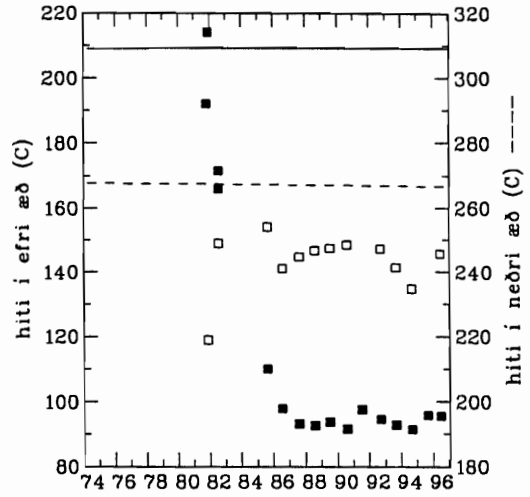
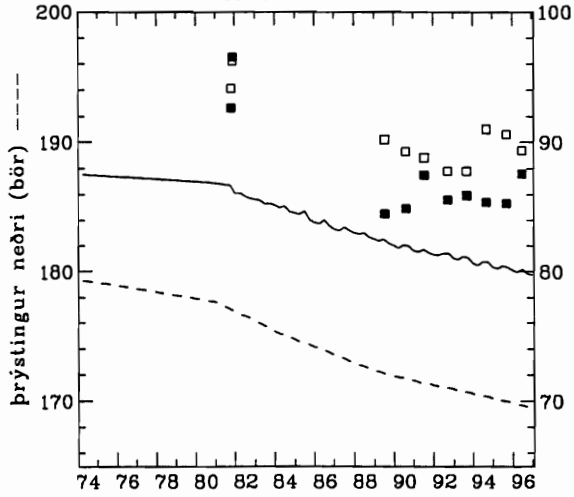
15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola KJ-6, vatnsborð og reiknaður þrýst.



15 May 1997 GrB
tp V2.3

Hola KJ-18



15 May 1997 GrB
tp V2.3

Holo KJ-23

