

**Krafla – hola KG-26. Mat á upphafsástandi,  
afköstum og gæfni æða**

**Grímur Björnsson, Benedikt Steingrímsson**

**Greinargerð GrB-BS-91-07**

KRAFLA - HOLA KG-26  
MAT Á UPPHAFSÁSTANDI, AFKÖSTUM OG GÆFNI AÐA

1. Inngangur

Í þessari greinargerð er lýst borholumælingum sem gerðar hafa verið í holu KG-26 í Kröflu eftir að borun holunnar lauk í 1200 m dýpi í júlí 1991. Mælt var hvoru tveggja í staðinni og blásandi holunni. Mælingarnar eru notaðar til að ákvarða berghita og þrýsting við holu KG-26, afl holunnar í blæstri og hlutfallslegt tillag æða í holunni til heildarrennslins úr toppi.

Tafla 1 gefur yfirlit um þær borholumælingar sem gerðar hafa verið í holu KG-26 eftir að borun holunnar lauk í júlí síðastliðnum. Um er að ræða 5 þrýstimælingar og 7 hitamælingar. Allar eru mælingarnar gerðar með Amerada mælum og 5 þeirra eru gerðar í holunni blásandi. Auk þess var holan körfumæld í október. Í töflu 2 eru sýnd gildi hita og þrýstings í ofangreindum 12 mælingum.

TAFLA 1: Mælingar í upphitun og blæstri holu KG-26 haustið 1991.

Mæli- dagur	Mæling	Upphafs dýpi (m)	Loka dýpi (m)	Nema- nafn	Rennsli (kg/s)	Topp- þrýst. (bör)	Vatns- borð (m)	Vermi (kJ/kg)
19/7	Þrýst.	200	1195	EL-74370	0		104	
24/7	Hiti	300	1197	EI-69436	0		84.4	
30/7	Hiti	200	1195	EI-69436	0		76.95	
30/7	Þrýst.	100	1195	EI-74370	0		76.95	
14/8	Hiti	100	1187	EI-69436	0		67.9	
14/8	Þrýst.	100	1187	EI-74370	0		67.9	
29/8	Hiti	100	1195	EI-79485	0		63.6	
3/9	Hiti	0	1199	EI-79485	16.5	2.45		808
3/9	Þrýst.	0	1198	EI-74370	16.5	2.45		808
5/9	Hiti	0	1197	EI-79485	17.1	2.75		830
24/10	Hiti	0	1197	EI-79485	18.6	3.7		920
24/10	Þrýst.	0	1197	EI-77539	18.6	3.7		920
24/10	Körfum.	0	385	8 ½"	0			
24/10	Körfum.	0	385.5	6 ¼"	0			
24/10	Körfum.	0	600	5 ½"	0			
Samtals			14700					

Vermi holu fengið úr hitamælingum í blæstri.

8½" og 6¼" körfur stöðvuðust á hengistykki meðan 5½" karfa fór í 600 m án fyrirstöðu.

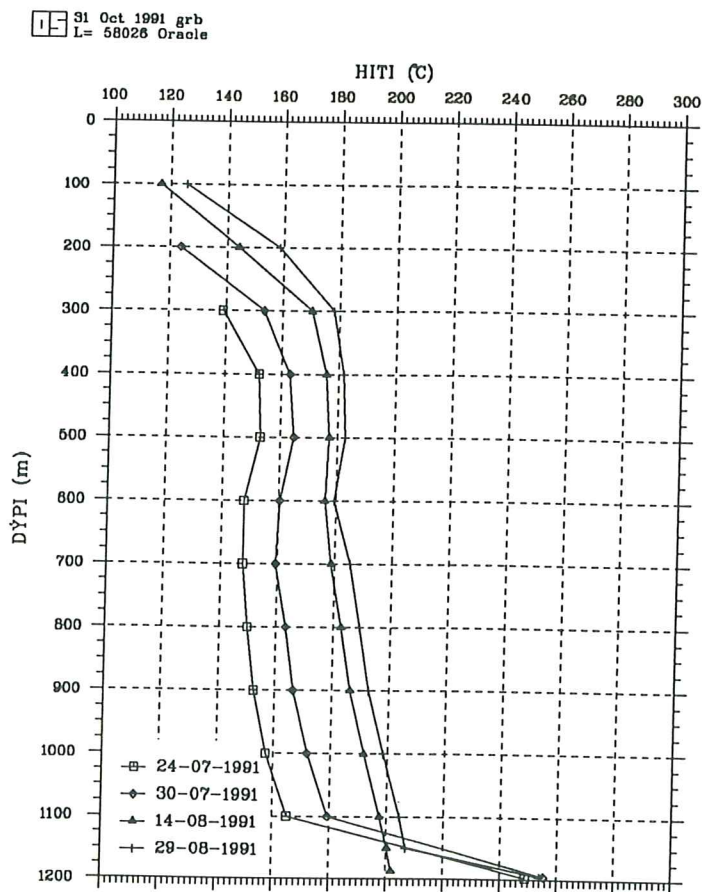
TAFLA 2: Mæligildi hita og þrýstings í upphitun og blæstri holu KG-26 haustið 1991.

Mældagur Dýpi (m)	Hitamælingar							Þrýstimælingar				
	24/7 (°C)	30/7 (°C)	14/8 (°C)	29/8 (°C)	3/9 (°C)	5/9 (°C)	24/10 (°C)	19/7 (bör-y)	30/7 (bör-y)	14/8 (bör-y)	3/9 (bör-y)	24/10 (bör-y)
.0					125.7		144.0				2.9	4.1
50.0					135.3	144.9					3.2	4.5
100.0			116.5	125.7	148.2	149.5			2.6	3.0	4.2	4.9
150.0					154.5	154.4					4.8	5.0
200.0		123.8	144.3	158.8	161.9	161.4	152.7	9.7	11.7	12.1	5.8	6.5
250.0					169.8	168.9					7.4	7.3
300.0	139.1	153.6	170.5	178.1	180.1	177.0		19.2	20.1	20.8	9.5	7.3
350.0					189.7	187.0					12.6	9.6
400.0	152.3	163.2	175.8	182.0	190.4		178.5	28.5	29.0	29.6	17.1	11.1
450.0					190.8	195.0	196.2					13.1
500.0	153.1	165.0	177.3	182.9	191.0		206.7	37.9	38.0	38.7	25.6	16.6
525.0					191.0							
550.0					191.3		215.5					
575.0					191.6	196.6						
600.0	147.9	160.5	176.2	179.5	193.4	198.4	223.6	47.0	46.7	47.2	34.2	25.1
625.0					193.4							
650.0					193.7		224.1					
675.0					193.9	199.3						
700.0	147.9	159.5	178.9	185.6	200.7	204.3	232.0	56.4	55.7	56.1		33.0
725.0					201.2							
750.0					201.5		240.3					
775.0					201.3							
800.0	150.1	163.5	182.9	189.4	201.6	205.3	241.0	65.8	64.7	64.8	51.2	40.9
825.0					201.7							
850.0					201.7		241.1					
875.0					201.3							
900.0	152.7	166.5	186.4	193.0	201.4	204.6	241.6	74.9	73.7	73.6		49.0
925.0					201.3							
950.0					200.0		242.0					
975.0					199.2	202.5						
1000.0	157.5	172.0	191.8	198.5	201.4	203.8	242.9	84.3	82.5	82.3	68.3	57.4
1025.0					208.9	208.6						
1050.0					214.3	218.0	252.7					
1075.0					215.0							
1100.0	165.2	179.4	197.6	204.5	215.9		253.5	93.5	91.2	91.1		
1101.0												
1125.0					216.6							65.0
1150.0			200.4	206.8	217.3		254.8			95.6		
1175.0					217.9	221.4				98.6		
1187.0			202.0									
1195.0		255.3		253.9				102.0	99.1			
1197.0	248.8					272.4	284.6					
1198.0											84.3	72.3
1199.0					267.5							

## 2. Hitamælingar

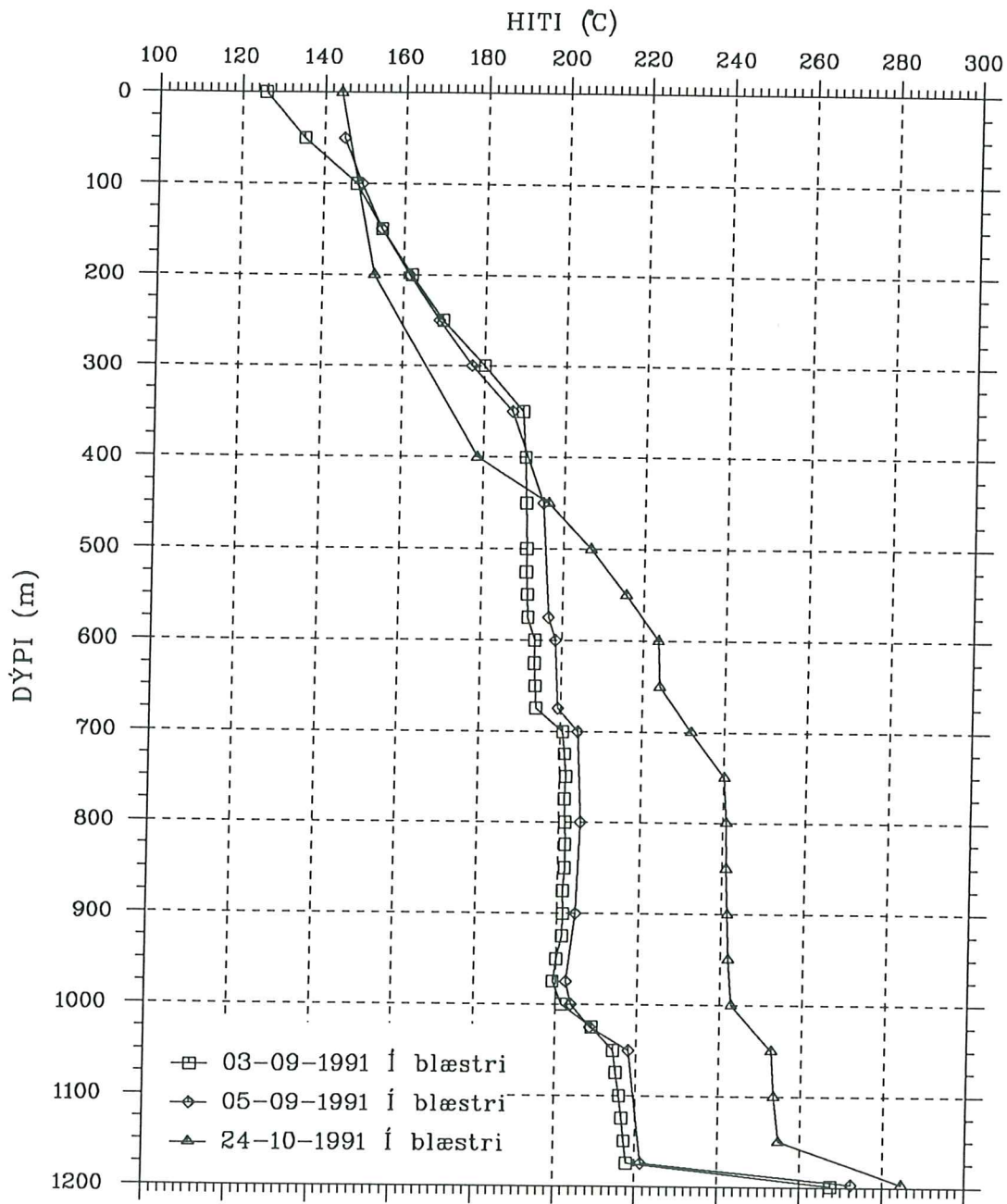
Mynd 1 sýnir hitamælingar í holu KG-26 frá borlokum þar til blástur hófst. Upphitun holunnar stjórnaðist af æð á tæplega 600 m dýpi og rann vatn niður úr henni allt til botns. Holan fer svo í blástur þann 2/9 kl 13:00. Holan reyndist mjög slöpp í toppþrýstingi og ekki náðist kríftískur þrýstingur á stút út við hljóðdeyfi. Daginn eftir upphleypingu, þann 3/9, er holan mæld í blæstri og aftur þann 5/9. Þessar mælingar eru sýndar á mynd 2. Þar sést að æðar holunnar eru á 575-600 m, 675-700 m, 950-1050 m og á 1175-1200 m dýpi. Neðsta æðin var sýnu heitust og rétt undir henni fór hitinn í rúmar 270 °C. Af mælingunum má lesa hita í holunni við suðuborð og var hann í fyrri mælingunni um 190 °C en í þeirri síðari nærri 195 °C, meðan suðuborðið færðist frá u.þ.b. 350 í 375 m dýpi. Vermi holunnar er síðan ákvarðað út frá hitanum í suðuborði og heildarrenslið út frá verminu og rennsli í kari. Niðurstöður eru gefnar í töflu 1.

Hola KG-26 fór hægvaxandi í toppþrýstingi og rennsli og þann 24. október var hún hitamæld í blæstri. Mælingin er sýnd á mynd 2. Hefur holan hitnað umtalsvert frá mælingunum í september og eru æðar greinilegar rétt um 700 m, milli 1000 og 1050 m dýpis og svo niður við holubotn. Botnhitinn hefur enn hækkað og er kominn í 285 °C. Ekki er mögulegt að sjá æðina á 575-600 m í hitaferlinum þar sem holan sýður niður á u.þ.b. 600 m dýpi.



Mynd 1: Hitamælingar í upphitun holu KG-26.

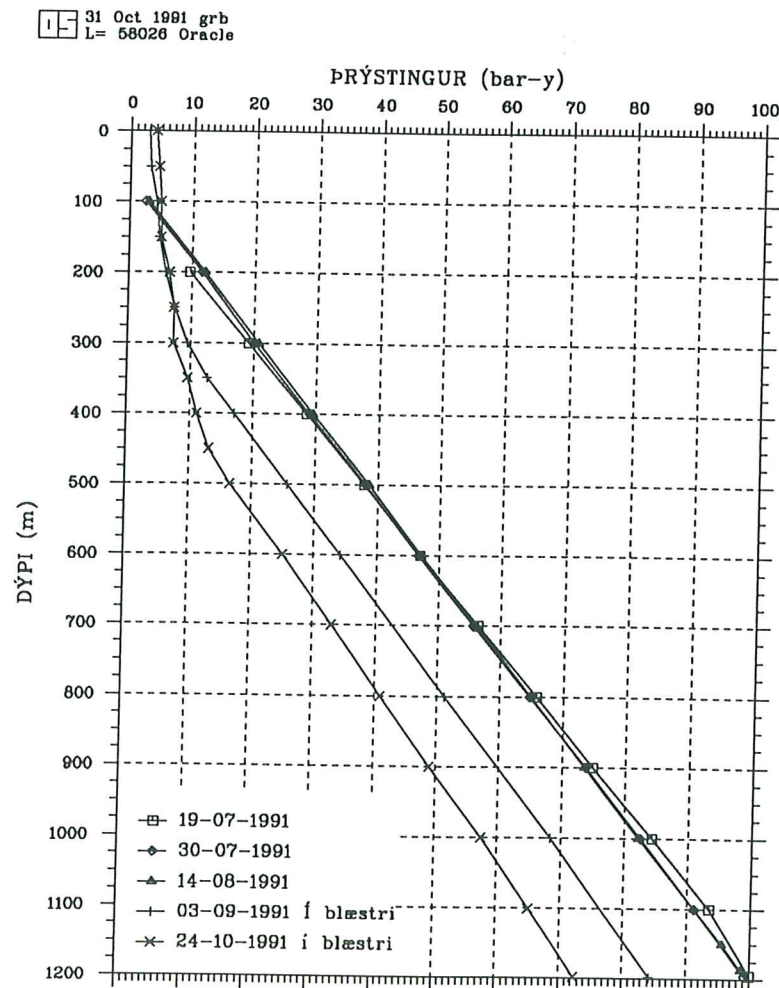
31 Oct 1991 grb  
L= 58026 Oracle



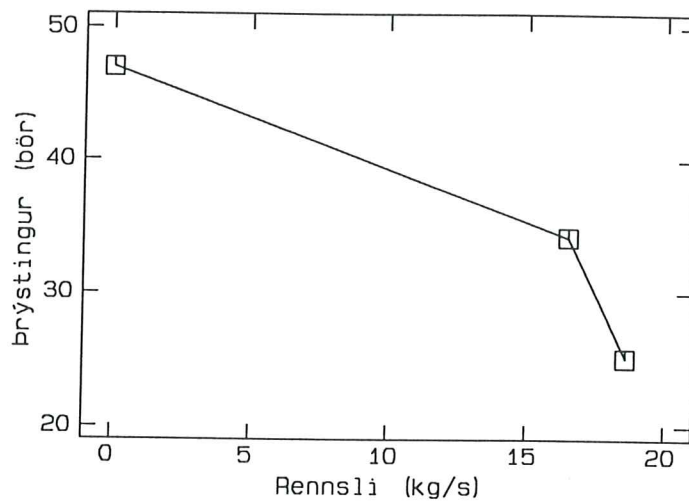
Mynd 2: Hitamælingar í blæstri í holu KG-26.

### 3. Þrýstimælingar

Mynd 3 sýnir þrýstimælingar sem gerðar hafa verið í holu KG-26 frá borlokum. Skurðpunktur þrýstiferla í staðinni holunni eru á u.þ.b. 600 m dýpi, sem bendir til að þar sé meginæð holunnar. Eins eru sýndir á mynd 3 tveir þrýstiferlar í holunni blástri. Þeir sýna að niðurdráttur í blæstri er verulegur, eða um 15 bör í fyrri mælingunni og nærri 25 börum í síðari mælingunni. Aukning niðurdráttar stafar af hækkuðum hita í suðuborði sem aftur veldur lækkuðum þrýstingi í holunni og þar með auknu rennsli úr henni. Mynd 4 sýnir hvernig heildarrennslið úr holu KG-26 breytist sem fall af þrýstingi á 600 m dýpi. Sá galli er við þessa framsetningu að vegna vinnslu hefur þrýstingur í öllu Efra-Leirbotnakerfinu hefur fallið um 1-2 bör milli mælinganna og er ekki leiðrétt fyrir því. Engu að síður er ljóst af myndinni að tregar æðar með miklum iðustreymistöpum stjórna rennslinu úr holu KG-26 en ekki hönnun holunnar.

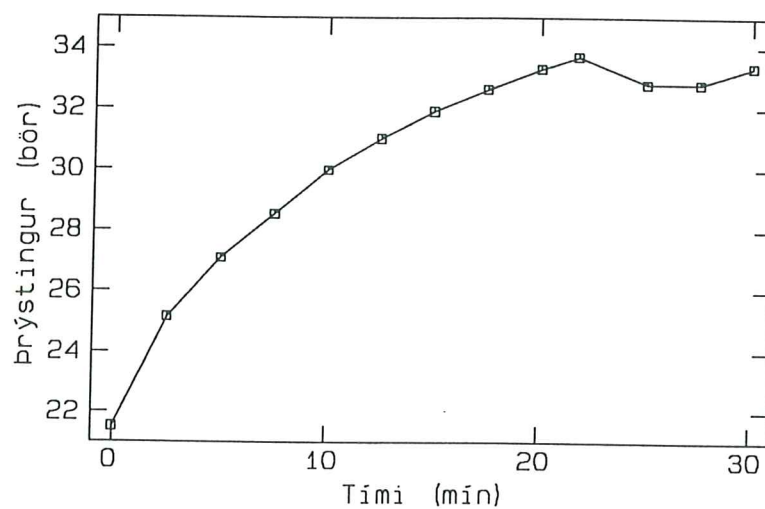


Mynd 3: Þrýstimælingar í holu KG-26.



**Mynd 4:** Samband rennslis og þrýstings á 600 m dýpi í holu KG-26.

Þegar búið var að mæla þrýsting í ótrufluðum blæstri holu KG-26 þann 24/10, var næst reynt að mæla þrýstinginn eftir að hert hafði verið að leggventli og dregið þannig úr rennslí holunnar. Virtist þá sem holan ætlaði að deyja. Var þá afráðið að slaka þrýstimælinum niður á 500 m dýpi, loka holunni og mæla þrýstijöfnunina. Niðurstöður eru sýndar á mynd 5 fyrir 30 mínútna tímabil, en þá var híf. Sést af myndinni að rúmlega 12 bara þrýstihækkun verður þennan stutta tíma, en það er um helmingur af heildarþrýstifalli holunnar í blæstri (mynd 3). Í lok mælitímans tekur að bera á óreglu í þrýstisögunni, sem vísast stafar af rennslí milli æða. Hröð þrýstijöfnun holu KG-26 er annað merki, til viðbótar við gögnin á mynd 4, um það hve iðustreymistöp í æðum eru ráðandi um vinnslu úr holunni.



**Mynd 5:** Þrýstijöfnun holu KG-26 þann 24. október 1991.

#### 4. Körfumælingar

Þegar niðurstöður hitamælingar í KG-26 þann 24/10 lágu fyrir, fannst mælímönnum með ólfskindum að holan skyldi ekki blása við 5-10 bara toppþrýsting, sem væri í samræmi við rúmlega 220 °C hita í suðuborði á 600 m. Vöknúðu grunsemdir um að annað tveggja "kældi" æðin á 575-600 m rennið það mikið að tvífasa súlan þyngdist nokkuð með tilheyrandi lækkun toppþrýstings, eða hitt að útfelling tregaði rennsli úr holunni. Þar sem ekkert högg kom á mæla þegar þeim var slakað fram hjá hengistykkinu, en slíkt var áberandi í fyrri mælingum, þótti útfellingarkenningin líkleg. Voru sendar niður þrjár körfur, 8½", 6¼" og 5½" víðar. Þær tvær fyrstnefndu stöðv-uðust á hengistykkinu en 5½" karfan fór óhindruð í 600 m (sjá töflu 1). Því er ljóst að holan er hrein og í mesta lagi um smávægilegar útfellingar að ræða við hengistykkið.

#### 5. Berghiti og þrýstingur

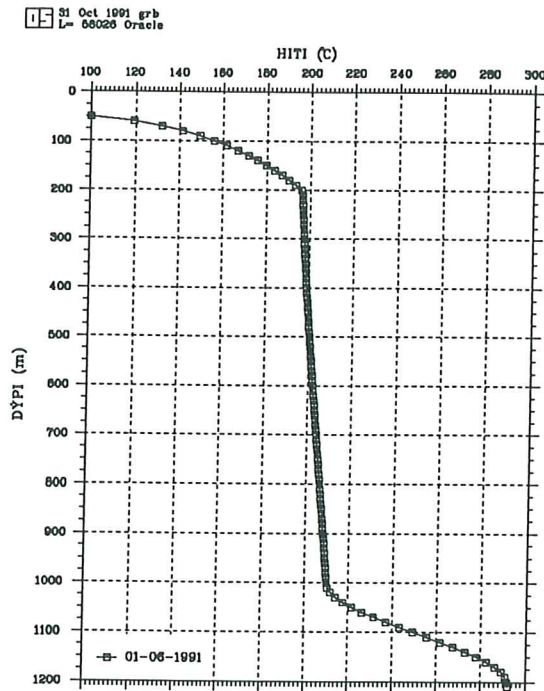
Þær hita- og þrýstimælingar sem gerðar hafa verið í holu KG-26 veita eftirfarandi forsendur sem nýta má við mat á upphafsástandi hita og þrýstings við holuna.

1. Efra-Leirbotnakerfið nær niður í um 1050 m dýpi, en á 1200 m er hiti einkennandi fyrir Neðra-Leirbotnakerfið. Skil kerfanna eru því á 1050-1200 m.
2. Þrýstingur í efra kerfinu er um 47 bör á 600 m (skurðpunktur þrýstiferla).
3. Suðumarksferlar hita og þrýstings ná frá um 50 m dýpi niður í um 200 m dýpi.
4. Hiti í botni er um og yfir 285 °C.
5. Þrýstingur í botni er hærri en 84 bör, en þá gaf botnæðin inn í holuna, og lægri en 98 bör, því þá rann vatn að ofan inn í botnæðina.

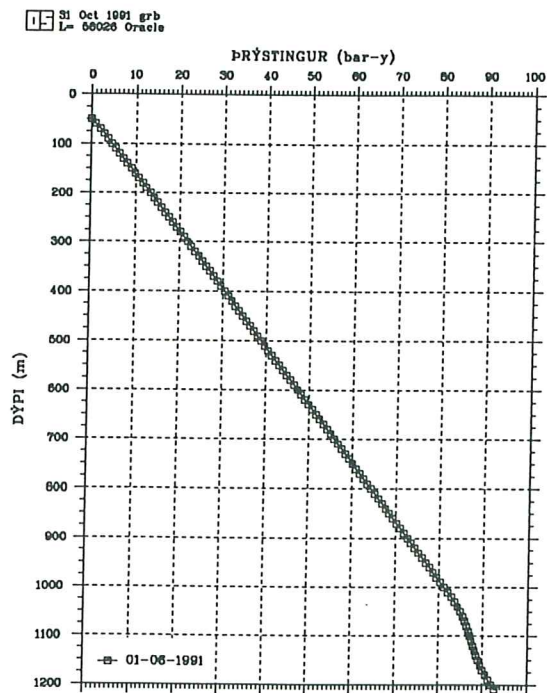
Auk þessa má áætla að hiti neðra kerfisins sé um 210 °C á 1000 m dýpi út frá hitamælingunum á myndum 1 og 2 og út frá reynslu af hitastigi annars staðar í Efra-Leirbotnakerfinu.

Myndir 6 og 7 sýna áætlaðan, ótruflaðan berghita og þrýsting í holu KG-26 og tafla 3 sýnir hita- og þrýstigildin. Ferlarnir eru byggðir á vatnsborði í 50 m dýpi, suðumarksferlum hita og þrýstings í 200 m dýpi, hvar við tekur línulegur stigull að 210 °C í 1000 m. Botnhiti er síðan áætlaður 292 °C. Þrýstingur suðumarksferilsins á 200 m dýpi er framreiknaður niður einfasa vatnssúluna, hittir á 47 bara þrýstinginn í 600 m og þaðan frameiknaður áfram í 1000 m dýpi. Ekki var unnt að ákvarða með nákvæmni þrýsting botnæðarinnar, og því valin sú einfalda leið að gefa henni meðaltal þrýstigildanna sem lýst er í lið 5 hér að ofan. Gegnum þessa fáu dýpispunkta var síðan brúað með spline aðferð.





Mynd 6: Áætlaður berghiti við holu KG-26.



Mynd 7: Áætlaður bergþrýstingur við holu KG-26.

TAFLA 3: Áætlaður berghiti og þrýstingur holu KG-26.

Dýpi (m)	Hiti (°C)	Þrýst. (bör-y)	Dýpi (m)	Hiti (°C)	Þrýst. (bör-y)	Dýpi (m)	Hiti (°C)	Þrýst. (bör-y)
50.0	100.0	0.0	350.0	198.1	30.3	1000.0	210.0	81.2
60.0	119.3	0.9	400.0	198.9	34.6	1020.0	211.8	82.8
80.0	141.6	2.8	450.0	199.7	38.9	1040.0	217.5	84.3
100.0	156.0	4.6	500.0	200.5	43.1	1060.0	226.4	85.4
120.0	167.0	6.3	550.0	201.4	47.3	1080.0	237.3	86.3
140.0	175.9	8.1	600.0	202.3	51.6	1100.0	249.4	87.1
160.0	183.5	9.8	650.0	203.3	55.8	1120.0	261.7	87.8
180.0	190.1	11.6	700.0	204.2	60.1	1140.0	273.0	88.6
200.0	196.0	13.3	750.0	205.2	64.3	1160.0	282.5	89.5
200.0	196.0	17.6	800.0	206.2	68.5	1180.0	289.1	90.6
250.0	196.9	21.8	900.0	208.1	72.7	1200.0	291.9	92.0
300.0	197.5	26.1	950.0	209.1	76.9	1220.0	292.1	93.4

## 6. Gæfni æða

Þegar mat á berghita liggur fyrir, er unnt að áætla tillag æða holu KG-26 út frá hita- og þrýstingum frá 24. október. Forsenda slíkra reikninga er að allar æðar holunnar veiti einfasa vatni af áætluðum berghita inn í holuna, og að rennsli og vermi á holutoppi sé þekkt. Þar sem kríftskur þrýstingur mældist ekki á hljóðdeyfi þann 24/10 þarf að áætla vermi holunnar út frá hita- mælingunni. Þar er við nokkurn vanda að glíma, því samantæki hita og þrýstings sýnir að holan var í suðu allt niður í 610-620 m dýpi. Það þýðir að æðin á 575-600 m kemur inn í sjóðandi súlu. Hins vegar má gera ráð fyrir að massahluti gufunnar í súlunni sé lágur við æðina. Það þýðir jafnframt að 215 °C hitinn sem mældist á 550 m dýpi er í nær fullmettaðri vatnssúlu. Út frá þeim hita og forsendunni um lágan massahluta gufu í sjóðandi súlunni, má reikna vermið ofan æðarinnar sem 920 kJ/kg.

Tillag hveirrar æðar um sig er síðan reiknað með eftirfarandi hætti. Fyrst er leyst varðveislujafna orkunnar við hverja æð út frá jöfnu á forminu:

$$\text{hiti ofan blandstaðar} = (\text{berghiti æðar}) * X + (1-X) * (\text{hiti neðan blandstaðar})$$

Þar sem X er massahluti æðarinnar í heildarrennslinu ofan blandstaðar. Þessi jafna er leyst fyrir sérhverja æð niður holuna utan þeirrar neðstu. Niðurstöður eru sýndar í töflu 4.

Tafla 4 sýnir að helstu æðar holu KG-26 eru um 600 m dýpi og við holubotn. Rétt er að ítreka að þessir reikningar eru mjög viðkvæmir fyrir skekkjum í mælingu á holutopprennsli, vermi og berghita.

TAFLA 4: Hlutfallslegt tillag æða í heildarrennsli holu KG-26.

Dýpi (m)	Æðar-hiti (°C)	Hiti ofan æðar (°C)	Hiti neðan æðar (°C)	Massahluti æðar X (%)	Hlutfall af holu-topprensli	Rennsli úr æð (kg/s)
575-600	203	215	223	40	40% af 100% = 40%	7.4
650-700	204	224.1	232.0	28	28% af 60% = 17%	3.2
700-750	205	232.0	240.3	24	24% af 43% = 10%	1.9
1000-1050	210	242.9	252.7	23	23% af 33% = 8%	1.5
neðan 1050					100-40-17-10-8 = 25%	4.6
Samtals					100%	18.6

## 7. Niðurstöður

Helstu niðurstöður borholumælinga sem gerðar voru í upphitun holu KG-26 eftir borun í 1200 m eru eftirfarandi:

1. Upphitun holunnar einkenndist af niðurrennsli frá æð á 600 m dýpi. Þessi æð stjórnaði einnig þrýstingi holunnar í upphituninni og telst því gjöfulasta æð holunnar.
2. Þrýstingur í blæstri og jöfnun þrýstings eftir að vinnsla hættir, einkennist af miklum niðurdrætti sem skýrist með iðustreymistöpum í æðum. Þessi tregða æða skýrir hinn lága toppþrýsting holunnar í blæstri.
3. Hóla KG-26 vinnur úr báðum Leirbotnakerfunum. Efra kerfið skilar um 75% af heildarrennsli holunnar en það neðra um 25%.
4. Vermis holunnar er nokkru hærra en annara efra kerfis holna, eða um og yfir 920 kJ/kg. Hiti við suðuborð í holunni komst í 215 °C í stað 190-210 °C í öðrum efra kerfisholum. Þetta háa vermi má fyrst og fremst þakka mikilli tregðu efrakerfisæða, sem veldur því að góður niðurdráttur fæst á botnæðina og þar með meira rennsli úr henni en ella.

Í stuttu máli má því segja að hola KG-26 sé léleg efra kerfis hola með þökkalega neðra kerfis æð í botni. Sú æð mun þó og því aðeins skila 3-5 kg/s rennsli af hávermi vökva að niðurdráttur í holunni sé mikill í blæstri. Óvíst er hvernig þessi botnæð kemur til með að haga sér í langtíma vinnslu. Hún gefur í októberlok u.þ.b. 260 °C heitt vatn til holunnar sem er nærri 30 °C lægra en í berginu rétt undir æðinni. Má vera að æðin vinni vatn til sín að ofan og þá frá "köldu" efra kerfinu. Það gæti leitt til kólnunar með tíma líkt og í botnæð holu KJ-9. Önnur skýring hitamunar æðar og bergs er einfaldlega kæling í borun sem enn gætir.

Ef botnæðin í holu KG-26 verður tekin með í fyrirhugaðri dýpkun holunnar, má telja góðar líkur til að hún skili 1-1½ kg/s af háþrýstigufu í blæstri og ½-1 kg/s af lágþrýstigufu. Hætta á kólnun vofir samt yfir ef til langtíma vinnslu kemur. Á móti slíkri kólnun gæti hamlað að ef holan sker fleiri neðra kerfis æðar má vinna úr henni við 15-30 bara toppþrýsting. Þá mun þrýstingur á 1200 m dýpi falla vel undir suðumarksþrýsting og æðin eykur mjög gufuhluta sinn.

Reykjavík 31. október 1991

Grímur Björnsson

Benedikt Steingrímsson