



ORKUSTOFNUN

Rannsóknasvið

ÖXARFJÖRÐUR

Athuganir á gasi

Halldór Ármannsson

SÝNIEINTAK
má ekki fjarlægja

Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar

1998

OS-98051



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 510 600

Halldór Ármannsson

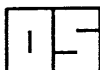
ÖXARFJÖRÐUR

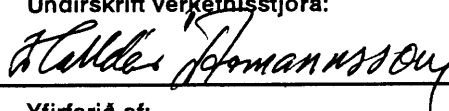
Athuganir á gasi

Unnið fyrir auðlindadeild Orkustofnunar

OS-98051

September 1998



Skýrsla nr.: OS-98051	Dags.: September 1998	Dreifing: ☒ Opin ☐ Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: ÖXARFJÖRÐUR Athuganir á gasi		Upplag: 25
		Fjöldi síðna: 14
Höfundar: Halldór Ármannsson		Verkefnisstjóri: Halldór Ármannsson
Gerð skýrslu / Verkstig: Efnafræðirannsókn, gagnaöflun		Verknúmer: 510 600
Unnið fyrir: Auðlindadeild Orkustofnunar		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: Í skýrslunni er gerð grein fyrir frekari athugunum á gasi úr borholum í Skógarlóni í Öxarfirði í framhaldi af fyrri rannsóknum og efnagreiningum á gasi þaðan (1989-1993). Gefið er yfirlit um mælingar á styrk metans í köldu og heitu gasstreymi á Íslandi, og stutt yfirlit um jarðfræðilegar aðstæður í Öxarfirði en þrjú sprungubelti liggja frá norðri til suðurs um undirlendið þar. Gasið í Öxarfirði er mjög frábrugðið gasi annars staðar á landinu að því leyti að það hefur eiginleika hitamyndaðs lífræns gass fremur en lífmyndaðs eða jarðhitagass. Er sennilega blanda af lífrænu hitamynduðu gasi og jarðhitagasi en hlutfall þeirra í gasstreyminu virðist mjög breytilegt. Athuganir á ummyndun benda til þess að gasið hafi myndast við minni hita en lengst af hefur ríkt í setinu sem er í holu ÆR-04 við Skógarlón. Því er líklegt að hitamyndaða lífræna gasið sé aðkomið. Auk þess benda aldursgreiningar til þess að gasið sé myndað á meira dýpi en botn holunnar, sem er sú dýpsta á svæðinu.		
Lykilorð: Öxarfjörður, jarðfræði, jarðhiti, efnagreiningar, gas, metan, samsætur		ISBN-númer:
		Undirskrift verkefnisstjóra: 
		Yfirfarið af: GÓF, MÓ

EFNISYFIRLIT

1.	INNGANGUR	3
2.	METAN Á ÍSLANDI	4
3.	JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR Í ÖXARFIRÐI	6
4.	NIÐURSTÖÐUR GASGREININGA ÚR BORHOLUM Í SKÓGALÓNI	7
5.	ÁLYKTANIR	12
6.	HEIMILDIR	13

TÖFLUSKRÁ

1.	Metanstyrkur og $\delta^{13}\text{C}$ í náttúrulegu íslensku gasi	5
2.	Efnasamsetning gass úr borholum í Skógalóni, Öxarfirði (Rúmmáls %)	7
3.	Samsætuhlutföll metans af mismunandi uppruna	8
4.	$\delta^{13}\text{C}$ í surtarbrandi frá Tjörnesi og Lóni og jarðolíu frá Lóni	12

MYNDASKRÁ

1.	Breytingar á CH_4 styrk í gasi frá holu B-04, Námafjalli 1969 – 1997	4
2.	Sprungubelti, jarðhiti og borholur í Öxarfirði og Kelduhverfi	6
3.	Flokkun kolvetnisgasa	8
4.	Samband $\delta^{13}\text{CH}_4$ og $\delta^{13}\text{CO}_2$ í gasi frá íslenskum jarðhitasvæðum	9
5.	Einfaldað jarðfræðikort og hugmynd að jarðlagasniði frá Skjálfandaflóa austur yfir Tjörnes og Öxarfjörð	11
6.	Samband $\delta^{13}\text{CH}_4$ og $\delta^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ í gassýni úr holu ÆR-04	12
7.	Samband $\delta^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ og $\delta^{13}\text{C}_3\text{H}_8$ í gassýni úr holu ÆR-04	13

1. INNGANGUR

Unnið var að verkefni um skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði á 9. áratugnum og voru boraðar nokkrar holur í leit að heppilegu vatni vegna þess verkefnis (Lúðvík S. Georgsson o. fl. 1989). Efnagreining gass úr dýpstu holunum leiddi í ljós að styrkur kolvetna var umtalsverður og marktækur hluti þeirra á formi efna byggðum úr kolefniskeðjum (C_{2+}). Slíkt er einkenni svokallaðs hitamyndaðs lífræns ("thermogenic") gass sem algengt er að fylgi olíu þar sem hún myndast. Þessi fundur þótti það áhugaverður að ástæða þótti til að bora sérstaka holu til að kanna þetta gas nánar. Til þess að ná niður úr setlögum var ákveðið að sú hola ætti að vera 700 m djúp en af tæknilegum og fjárhagslegum ástæðum varð hún aðeins 450 m djúp. Teknir voru kjarnar, gerðar yfirgripsmiklar jarðeðlisfræðilegar mælingar og jarðfræðivinna til að tengja jarðlög í holunni þekktum lögum í nágrenni. Nokkur gassýni voru tekin úr nýju holunni, ÆR-04 og þeim eldri holum sem gas hafði fundist í (ÆR-01 og ÆR-03).

Niðurstöður voru birtar í skýrslu (Magnús Ólafsson o.fl. 1992) og þóttu gefa ástæðu til að leita álits erlendra sérfræðinga á því hvort áfram skyldi haldið. Var skýrslan þýdd á ensku (Ólafsson o. fl. 1993) og send olíufélögum og rannsóknarstofnunum. Viðbrögð voru yfirleitt á þá lund að rannsóknir væru ekki nógu langt komnar til þess að a.m.k olíufélög sæju sér fært að taka þátt í verkefni um gasið á þessu stigi.

Meðal þess sem bent var á að vantaði í niðurstöðurnar voru samsætuhlutföll ýmis, einkum $\delta^{13}C$ þyngri kolvetna en metans, og koldíoxíðs. Þær geta hugsanlega gefið mikilvægar upplýsingar um uppruna gassins. Danske Geologiske Undersøgelser (DGU), sem tekið hafði þátt í fyrri rannsóknum og sýnt áhuga á frekara samstarfi, tók að sér að gera slíkar mælingar ef Orkustofnun sæi um að safna til þeirra sýnum.

Á meðan á þessu stóð var unnið úr ýmsum gögnum sem gáfu skýrari mynd af svæðinu (Lúðvík Georgsson o. fl. 1993) og gerðar voru endurkastsmælingar með svonefndri "Vibroseis" aðferð á Öxarfjarðarsöndum til að afla nákvæmari upplýsinga en fyrir lágu um gerð jarðlaga á svæðinu (Karl Gunnarsson o. fl. 1996). Helstu niðurstöður voru að setlög virtust ríkjandi niður á 700-1000 m dýpi en þar fyrir neðan taki við hraunlög þar sem setlög geti traúðla verið í miklu magni.

Guðmundur Ómar Friðleifsson o. fl. (1993) settu fram áætlun um æskilegar viðbótarrannsóknir á gasinu og skiptust þær í rannsóknir á landi og rannsóknir á landgrunninu. Æskilegar rannsóknir á landi voru taldar í fimm liðum:

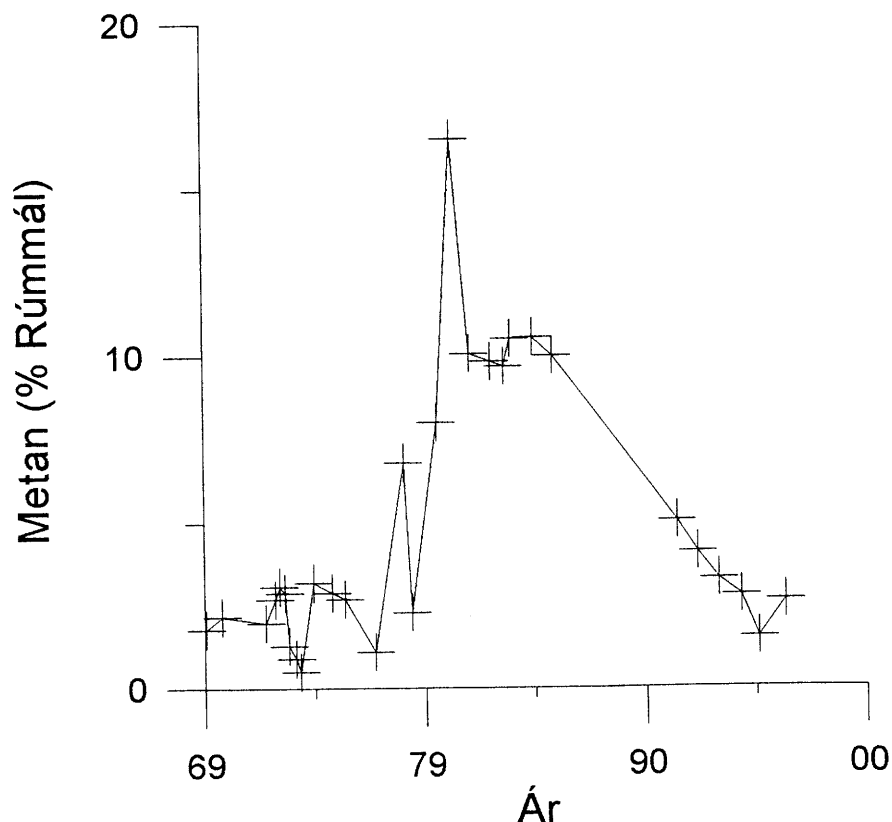
- 1) Gassýnataka á holutoppi ÆR-04 til $\delta^{13}C$ samsætugreininga í C_{2+} hluta kolvetna og CO_2 .
- 2) Kortlagning á gasuppstreymi í Öxarfirði með borun u.þ.b. 50 2-3 m djúpra Copra-holna.
- 3) Rannsókn á surtarbrandslögum í Tjörneslögum með borun fjögurra 50 m djúpra kjarnaholna til að ná óveðruðum surtarbrandi til TOC-mælinga (TOC: Total Organic Carbon: heildarmagn lífræns kolefnis) og könnunar á þroskastigi laganna með tilliti til olíumyndunar, por/perm-mælinga o. fl.
- 4) Rannsóknarboranir annars staðar í Öxarfirði eða á einhverjum eyjanna úti fyrir landi og hugsanlega fleiri endurkastsmælingar.
- 5) Borun 1500-2000 m djúprar rannsóknarholu í Öxarfirði.

Ráðist var í fyrsta hluta þessarar áætlunar, þ.e. gassýnatöku 1994 og voru sýnin send til samsætugreininga til DGU og bárust niðurstöður þaðan vorið 1995. Þá hafði ekki verið gert ráð fyrir frekari úrvinnslu en á fundi með orkumálastjóra í apríl 1997 var ákveðið að tíma yrði til þess varið og er þessi skýrsla árangur þeirrar vinnu.

Þess má geta að nýlega hafa fengist niðurstöður úr mælingum á þessu setlagasvæði sem virðast mjög áhugaverðar og ættu að ýta undir frekari könnun á setlögnum og því sem þau geyma, þ.e. TOC-mælingar á kjörnum í Eyjafjarðarál, þar sem mældist allt að 4.14 % TOC (Jón Eiríksson og Hafliði Hafliðason, persónulegar upplýsingar) og hitamælingar í hitastigulsholu sem boruð var í Tjörneslögin og leiddu í ljós hitastigul um 170°C/km.

2. METAN Á ÍSLANDI

Metan kemur upp sem kalt gasstreymi á nokkrum stöðum á Íslandi, t.d. í Lagarfljóti, Ísafjarðarhöfn, Bolungarvík, Vesturhópsvatni og Haukadalsvatni. Þar sem það hefur verið greint hefur verið um að ræða lífmýndað gas ("mýragas"). Þá er yfirleitt nokkurt metan í jarðhitagasi og er það nokkuð misjafnt eftir eðli gassins. Í töflu 1 er gas frá ýmsum stöðum á Íslandi flokkað eftir umhverfi sínu til að kanna áhrif þess á efnasamsetningu. Rúmmálshluti metans er ekki hærri en 2-3% nema í þremur tilvikum, í Kröflu, Námafjalli og Grímsvötnum, þar sem metanaukning hefur orðið eftir eldsumbrot. Í öllum tilvikum hefur aukningin fyrst komið fram um 2 árum eftir umbrot.



Mynd 1. Breytingar á CH₄ styrk í gasi frá holu B-04, Námafjalli 1969 – 1997.

Tafla 1. Metanstyrkur og $\delta^{13}\text{C}$ í náttúrulegu íslensku gasi.

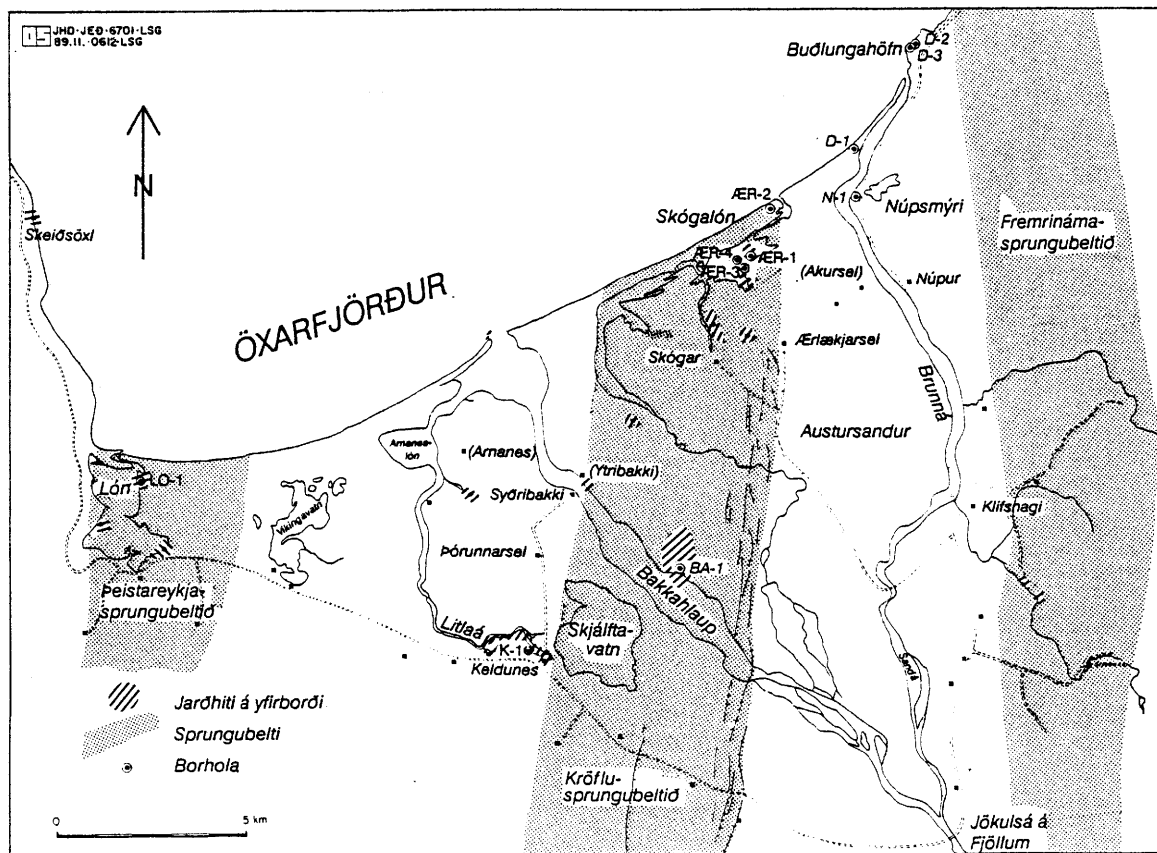
Staður	G ¹⁾	Aðalgas	Metan %	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$
Reykjanes	H	CO ₂	0.03	-3.3	-24.7
Svartsengi	H	CO ₂	0.04	-2.5	
Eldvörp	H	CO ₂	0.04		
Krísuvík	H	CO ₂	0.02-0.3	-3.6	-33.5
Hveragerði	H	CO ₂	0.1-0.7	-3.6	
Ölkelduháls	H	CO ₂	0-0.05		
Nesjavellir I	H	CO ₂	0.1		
Nesjavellir II	H	CO ₂	1-1.5	-4.0	-37.3
Kolviðarhóll	H	CO ₂	0.5		
Geysir	H	CO ₂	0.03-0.3	-6.4	-22 - -22.4
Torfajökull	H	CO ₂	0-1	-3.6 - -4.7	
Kverkfjöll	H	CO ₂	0.02-0.2	-4.1	-32.4 - -36.4
Fremri námar	H	CO ₂	0.07		
Námafjall I	H	H ₂	0.1-0.4	-6	-29.9 - -32.7
Námafjall II	H	H ₂	3 - 20		-36
Krafla I	H	CO ₂	0.1	-3.5	-27.7
Krafla II	H	CO ₂ /N ₂	3-8	-2.4 - -3.4	-39.3 - -40.1
Þeistareykir	H	CO ₂	0.1-1.7		
Grímsfjall	H	CO ₂	0.01		
Grímsvötn I	H	CO ₂	0.2-0.6		
Grímsvötn II	H	CO ₂	5.9-16.3		
Askja	H	CO ₂	0.003	-3.4	-26.8
Kerlingarfjöll	H	CO ₂	0.12	-3.7	-26.2
Köldukvíslarbotnar	H	CO ₂	1.1-2.2		
Vonarskarð	H	CO ₂	0.3		
Öxarfjörður	M	N ₂	2.2-5.8	-9.3	-22.5 - -40.0
Bakki	M	N ₂	0.9		
Kröggólfsstaðir	M	N ₂ /CO ₂	0.8		
Hæðarendi	M	CO ₂	0.03	-1.6	
Miðsandur, Hvalfirði	M	N ₂	0.8		
Oddgeirshólar	L	N ₂	0.05		
Kringla	L	N ₂	0.3		
Brjánsstaðir	L	N ₂	0.6		
Flúðir	L	N ₂	0.5		
Skarð	L	N ₂	0.3		
Laugarvalladalur	L	N ₂	0.3		
Urriðavatn	L	N ₂	0.2-0.8		
Áreyjar	L	N ₂	0.08		
Reykir, Hjaltadal	L	N ₂	0.06		
Sauðárkrókur	L	N ₂	0.4		
Lýsuhóll	L	CO ₂	0.05	-5.5	-17.8
Lake Lagarfljót	K	CH ₄	54-98		-73 - -81
Ísafjörður	K	CH ₄	88		

¹⁾G: gerð; H: háhiti (>180°C), M: millihiti (110–180°C), L: lághiti (<110°C), K: kalt uppstreymi

Í efri hluta Námafjallskerfisins kemur þetta mjög skýrt fram í gömlu holunum og verður mikil aukning þar um 1979. Til er nokkuð heilleg runa af mælingum úr holu B-04 sem sýnir tiltölulega öra aukningu frá um 2% upp í um 16%, lækkun í um 10% metan, tiltölulega stöðugan styrk í allmörg ár, síðan hæga minnkun en loks öra minnkun í 2% aftur u.þ.b. 15 – 16 árum eftir að aukningin hófst (mynd 1). Hærri kolvetni (C_{2+} , þ.e. kolvetni með tveimur eða fleiri kolefnisatómum) hafa ekki fundist í jarðhitagasi nema að vottur hefur fundist í gasi frá Grímsvötnum um leið og metanstyrkur jókst í kjölfar eldgoss, og örlitill vottur í tiltölulega metanríku gasi úr efrihlutaholu (KG-24) á Leirbotnasvæðinu í Kröflu, þar sem metan jókst eftir umbrot, en löngu eftir þau. Yfirlit um metanstyrk í gasi frá ýmsum stöðum á Íslandi er í töflu 1 ásamt upplýsingum um aðalgas og kolefnis-13 hlutfall í koldíoxíði og metani þar sem þær eru til (Orkustofnun, óbirt gögn; Jeffrey, A.W.A, Kaplan, I.R., Ármannsson, H. and Arnórsson, S. óbirt gögn; Halldór Ármannsson og Sigmundur Einarsson 1995, Ármannsson et al. 1989, Ármannsson et al. 1998, Sano et al. 1985).

Sé litið á þessar upplýsingar verður gasið í Öxarfirði að teljast einstakt þar eð eiginleikar þess eru greinilega eiginleikar hitamyndaðs lífræns gass fremur en lífmyndaðs eða jarðhitagass. Þó virðist nokkur skörun í eiginleikum jarðhitagass frá millihita (sjá skýringar við töflu 1) og þess gass sem fram hefur komið í kjölfar eldsumbrota, og hitamyndaðs lífræns gass ($\delta^{13}C_{CH_4}$ lágt, vottur af C_{2+}).

3. JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR Í ÖXARFIRÐI



Mynd 2. Sprungubelti, jarðhiti og borhulur í Öxarfirði og Kelduhverfi.

Þrjú sprungubelti, kennd við Þeistareyki, Kröflu og Fremri náma, liggja frá norðri til suðurs um Öxarfjarðarundirlendið (mynd 2.), sem er á mótum norðaustur-suðvestur rekbeltisins og Tjörnesbrotabeltisins, en í því síðarnefnda er að finna þykkustu setlög á Íslandi á landi og undan ströndum á 140 km löngu (norður-suður) og 40 km breiðu (austur-vestur) svæði, allt að 4 km þykk. Í efstu lögum í Öxarfirði er árframburður sem sest hefur til eftir síðustu ísöld (<10.000 ára). Jarðhitamerki eru flest innan sprungubeltanna. Hæsti hiti á yfirborði, 100°C, hefur mælst við Skógalón. Viðnámslægð, um 10 km² að flatarmáli, er undir Bakkahlaupi, og undir henni viðnáms hæð en slíkar aðstæður eru algengar á íslenskum háhitasvæðum. Er þetta talin sterk visbending um að 10 km² háhitasvæði teygi sig í áttina N15°V eftir Kröflusprungubeltinu í Öxarfirði. Tvær smærri viðnámslægðir hafa sést, önnur undir Skógalóni (Lúðvík S. Georgsson o.fl. 1993).

4. NIÐURSTÖÐUR GASGREININGA ÚR BORHOLUM Í SKÓGALÓNI

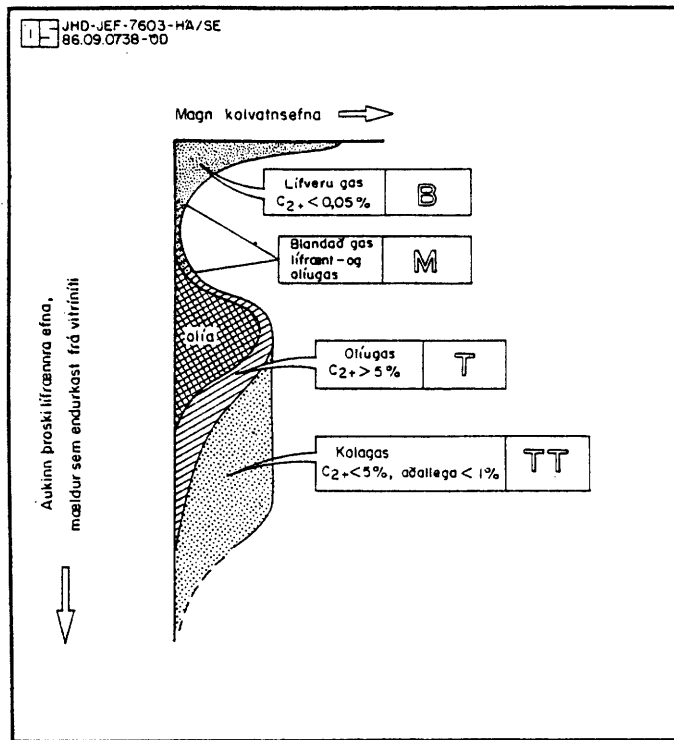
Niðurstöður gasgreininga úr holum ÆR-01, ÆR-03 og ÆR-04 eru birtar í töflu 2.

Tafla 2. Efnasamsetning gass úr borholum í Skógalóni, Öxarfirði (Rúmmáls %).

Hola nr.	ÆR-04	ÆR-04	ÆR-04	ÆR-03	ÆR-03	ÆR-03	ÆR-01	ÆR-01	ÆR-01
Sýni nr.	94-200	91-209	91-189	90-237	89-087	88-149	88-088	88-211	87-119
Sýnataka ¹⁾	Skilja	Skilja	Bein	200 m	Bein	Bein	Bein	Bein	Bein
N ₂	83.80	86.20	92.80	81.00	93.40	95.90	92.80	93.80	94.60
O ₂ +Ar	4.26	0.10	0.10	18.40	1.10	1.80	1.20	1.70	2.70
H ₂		0.07	0.25	0.06	0.02	0.02	0.07	0.23	0.00
He			0.00	0.00	0.00	<0.01	0.00	0.03	0.00
CO ₂	3.51	7.88	0.91	0.05	0.02	<0.05	0.00	0.05	0.04
CH ₄	4.33	5.70	5.80	0.45	5.20	3.60	5.60	4.00	2.22
C ₂ H ₆	0.30	0.082	0.120	0.0015	0.230	0.150	0.300	0.200	0.218
C ₃ H ₈	0.085	0.074	0.083	0.002	0.047	0.050	0.057	0.092	0.156
i-C ₄ H ₁₀	0.0107	0.0088	0.011		0.0066	0.0088	0.0076	0.0164	0.0251
n-C ₄ H ₁₀	0.0169	0.024	0.031	0.0034	0.0093	0.0110	0.0100	0.0208	0.0280
Neo-C ₅ H ₁₂					0.0002		0.0030		
i-C ₅ H ₁₂	0.0021	0.0019	0.0052	0.0002	0.0016	0.0035	0.0027	0.0123	0.0147
n-C ₅ H ₁₂	0.0031	0.0042	0.0170		0.0018	0.0058	0.0036	0.0152	0.0132
i-C ₆ H ₁₄		<0.0001	0.0007	0.0002	Vottur		Vottur		
n-C ₆ H ₁₄		0.0010	0.006						
C ₆ H ₆	0.0080	0.0195	0.0044						
ΣC ₂₊	0.426	0.196	0.274	0.021	0.297	0.229	0.384	0.357	0.455
δ ¹³ C _{CO2} ‰(PDB)	- 9.3								
δ ¹³ C _{CH4} ‰(PDB)	-28.6	-38.9	-40.0	-26.6	-31.9	-29.6	-29.0	-29.0	-22.5
δD _{CH4} ‰(SMOW)	-222				-138		-154		

¹⁾ Skilja: Gufa skilin frá með skilju. Beint: Gasi safnað beint af holutoppi án skiljunar.

200 m: Djúpsýni af 200 m



Mynd 3. Flokkun kolvetnissgasa (Schoell 1980).

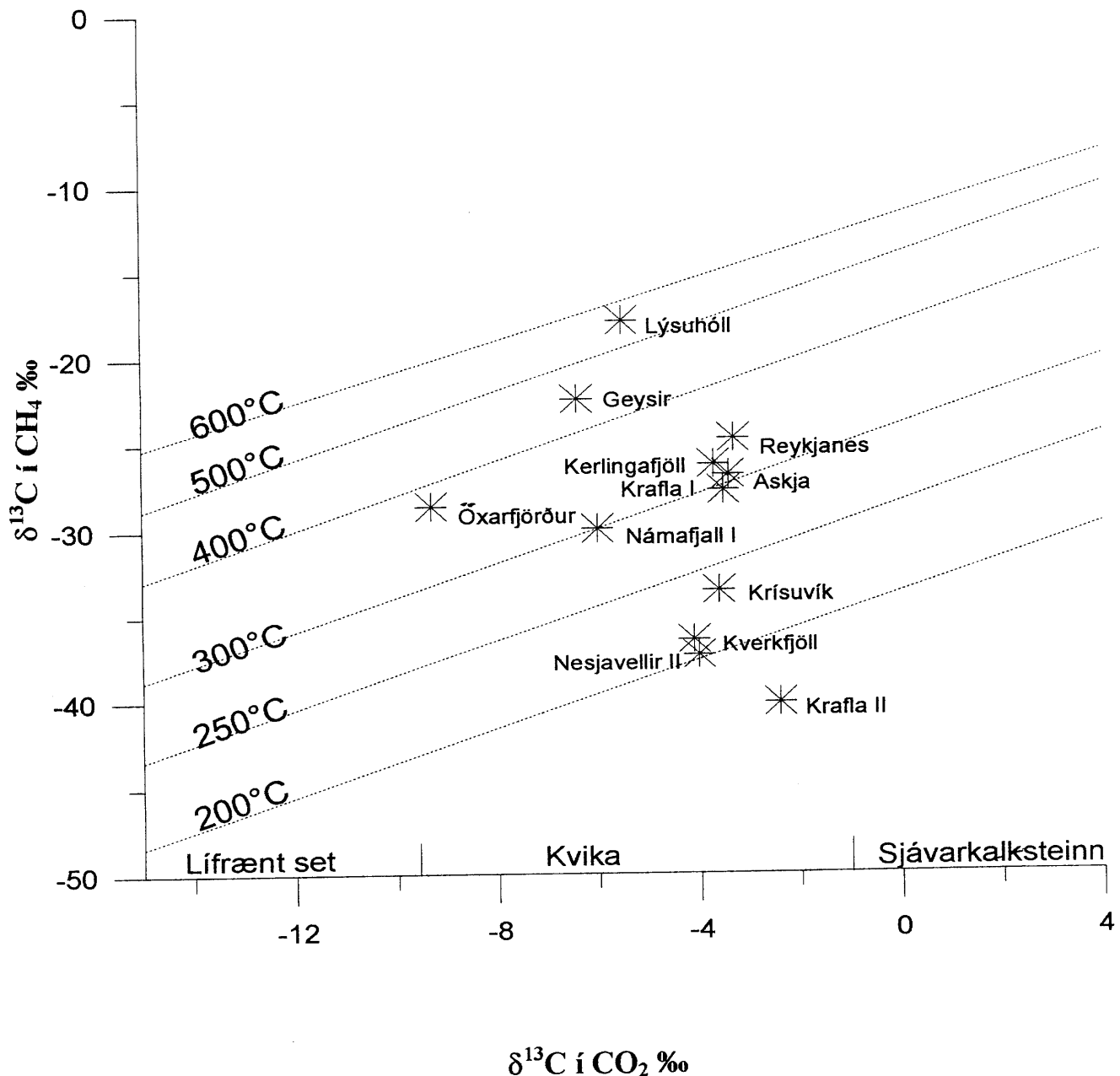
Um mismunandi samsetningu náttúrlegra kolvetna gildir að í lífmynduðu gasi er eingöngu metan, í hitamynduðu lifrænu blautgasi, sem fylgir olíu, er töluvert (>5%) af hærri kolvetnum (C_{2+}) en í hitamynduðu lifrænu þurr-gasi, sem fylgir kolum hafa hærri kolvetnin að mestu eyðst aftur (mynd 3). Um samsætuhlutföll gildir að lífmyndað gas er mjög skert að $\delta^{13}C_{CH_4}$, hitamyndað lifrænt gas minna skert, jarðhita- og eldfjallagas ríkast af því (tafla 3) en hitamyndað lifrænt gas og jarðhitagas skarast.

Tafla 3. Samsætuhlutföll metans af mismunandi uppruna.

Uppruni	Lífmyndað	Hitamyndað lifrænt	Jarðhiti (lifrænt set)	Jarðhiti (CO_2 , CO)	Ólífmyndað
$\delta^{13}C_{CH_4}$ ‰ (PDB)	-100 - -55	-50 - -25	-45 - -25	-40 - -25	-20 - -10

Þó að mörkin séu þau sem sýnd eru er t.a.m. fátítt að hitamyndað lifrænt gas fari herra í kolefnis-13 hlutfalli en -30 - -35‰ og algengast að jarðhitagas sé á bilinu -35 - -25‰. Um kolefnis-13 hlutfall í CO_2 gildir að hærri gildi en -2‰ eru talin benda til uppruna í karbónötum í setlögum, frá -8 - -5‰ í kviku en lægri gildi (oft < 20‰) í lifrænum efnum. Gildin fyrir kolefnis-13 hlutfall í metani dreifast yfir verulegt bil en benda mörg til jarðhitauppruna. Þó eru sum gildin, einkum þau tvö eldri fyrir gas úr ÆR-04, það lág að allar líkur virðast á því að um hitamyndað lifrænt gas sé að ræða.

Hæsta gildið, sem fannst í gasi úr ÆR-01, er hins vegar það hátt að nær útilokað er að um hitamyndað lífrænt gas sé að ræða. Annað sem athyglisvert er við þessar niðurstöður er mjög misjafn hlutur CO₂ í heildargasinu. Unnt er að koma fram með tvær tilgátur með hliðsjón af niðurstöðunum, þ.e. að umtalsverður styrkur CO₂ sé eingöngu í gasi úr ÆR-04 eða að CO₂ tapist við beina sýnatöku á holutoppi. Það breytir því þó ekki að mjög mismunandi niðurstöður hafa fengist fyrir gas úr ÆR-04 og enn fremur er rétt að geta þess að niðurstöðum fyrir tvítök sem ákvörðuð hafa verið á OS annars vegar en erlendis hins vegar (BGS, DGU) ber mjög illa saman hvað varðar



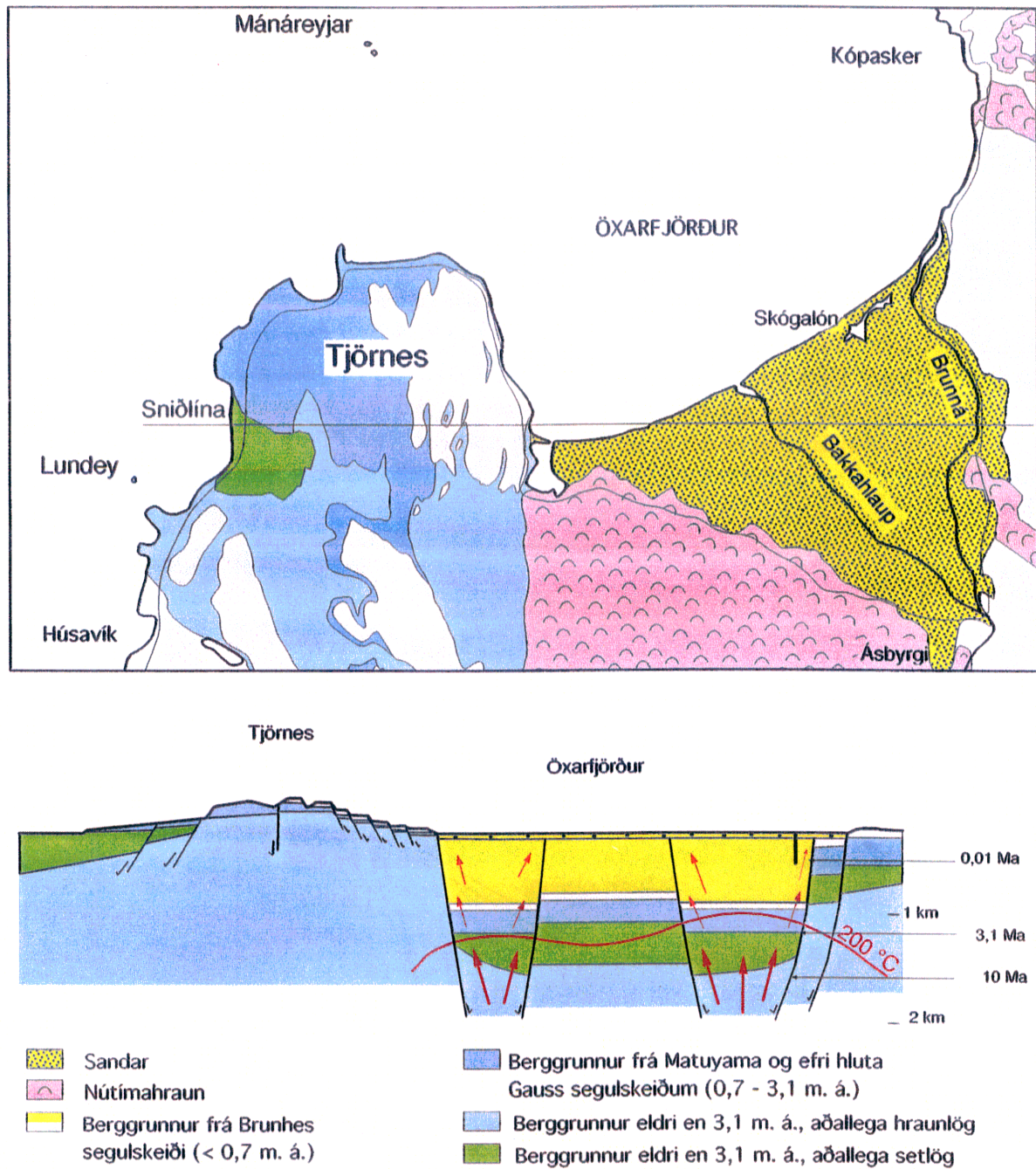
Mynd 4. Samband $\delta^{13}\text{CH}_4$ og $\delta^{13}\text{CO}_2$ í gasi frá íslenskum jarðhitasvæðum.

CO₂. Helsta skýring sem unnt er að gefa á þessum niðurstöðum er að gasið sé blanda af jarðhitagasi og hitamynduðu lífrænu gasi og að á þessum slóðum sé hlutur hvors um sig breytilegur. CO₂ er fylgífiskur jarðhitagass og má búast við að aukinn styrkur þess bendi til aukins hluta jarðhitagass. Þó er það ekki einhlítt. Gildið fyrir $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ er það lágt að það yrði venjulega túlkað sem svo að um væri að ræða blöndu af lífrænu og kvikumynduðu (eða jarðhita-) CO₂. Eykst þá túlkunarvandinn enn, en þar kemur frekari vísbending um að gasið sé blanda af jarðhitagasi og hitamynduðu lífrænu gasi.

Giggenbach (1982) velti sambandi $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ og $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ fyrir sér og dró upp línurit er sýnir samband þeirra miðað við myndunarhita og uppruna. Þær niðurstöður sem til eru fyrir íslensk jarðhitasvæði hafa verið teiknaðar inn á slíkt línurit (mynd 4). Yfirleitt sýna niðurstöðurnar tiltölulega ákveðinn kvikuuppruna fyrir koldíoxíðið en mismunandi hitastig kemur fram, yfirleitt nær því sem ríkir í jarðhitakerfunum en líklegum myndunarhita í kviku. Þó kemur fram vísbending um hærra hitastig í gasi frá ölkelduvatni á Lýsuhóli, Snæfellsnesi, og einnig í gasi frá Geysi þar sem um kulnandi jarðhitasvæði er að ræða og gasið e.t.v. að einverju marki lengra að komið en ekki í jafnvægi. Í því sýni frá Öxarfirði sem til er um gildi fyrir $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ teygir það sig yfir í gildi fyrir gas myndað úr lífrænu seti eins og áður sagði. Þau gildi sem mælst hafa fyrir $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ eru hins vegar mjög breytileg og gætu bent til myndunar við mjög mismunandi hita eða frá um 200°C upp fyrir 500°C. Ef metan myndast á ólífrænan hátt með hvarfi milli CO₂ og H₂ við háan hita myndast alken sem hliðarmyndefni (Gunter and Musgrave 1971) og $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ er hátt (-10 - -20‰). Alken fundust ekki og $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ var lægra en -20‰ í öllum tilvikum svo að slíkur uppruni er ólíklegur. Nokkur munur er á þeim gildum sem fengist hafa fyrir $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ í gasi frá Öxarfjarðarholunum en öll liggja á því bili sem mælst hefur áður í íslensku jarðhitagasi og einnig í hitamynduðu lífrænu gasi. Ekki verður á þeim grundvelli skorið úr en mismunurinn milli þess gildis (-222‰), sem mælist í síðasta gassýni úr holu ÆR-04, og þeirra tveggja gilda sem fengist hafa fyrir gas úr holum ÆR-01 og ÆR-03 (-154 og -138‰) bendir hins vegar til þess að um mismunandi gas geti verið að ræða eða gasblöndur í mismunandi hlutföllum. Hærri gildin nálgast gildi fyrir hitamyndað lífrænt þurrgas (kolagas).

Aldursgreining með ¹⁴C aðferð á sýni nr. 91-209 úr holu ÆR-04 bendir til þess að aldur gassins sé a.m.k. 20.000 ár og sennilega miklu hærri, en til samanburðar reyndist lífmyndað gas úr Lagarfljóti 9.220 ± 195 ára og metan úr efra Leirbotnakerfinu í Kröflu (Kröflu II á mynd 4) um 5.600 ára gamalt. Eins og minnst var á áður eru setlög þau sem borað var í í Öxarfirði tilkomin með framburði Jökulsár á Fjöllum eftir ísöld og getur gasið því ekki verið þaðan ættað heldur lengra að komið. Hins vegar bendir ummyndun til þess að strax á um 400 m dýpi sé ummyndunarhiti kominn vel yfir 200°C og ekki ástæða til að ætla að hann minnki með dýpi. Hafi hiti um langt skeið verið svo hár hefðu hærri kolvetni (C₂₊) eyðilagst og ekki mælst í þeim mæli sem raun ber vitni. Því eru líkur á að gasið hafi ekki borist beina leið að neðan heldur frá svalara svæði utan jarðhitans.

Leidd hafa verið rök að því að gasið geti verið myndað úr surtarbrandslögum eins og þeim sem þekkt eru á Tjörnesi og einnig vestan við Öxarfjörð og suður af honum, t.d. í Lóni en þar fannst eina jarðolía sem fundist hefur á Íslandi (Sveinn P. Jakobsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson 1989). Til eru $\delta^{13}\text{C}$ mælingar á surtarbrandi frá Tjörnesi og frá Lóni og eru niðurstöður mjög svipaðar. Gildi fyrir jarðolíuna sjálfa eru og nánast þau sömu (tafla 4).



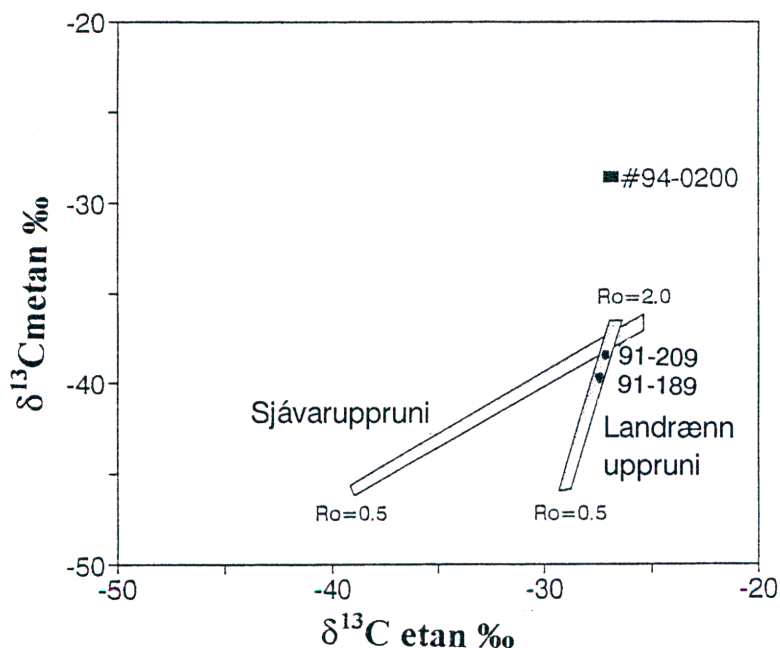
Mynd 5. Einfaldað jarðfræðikort og hugmynd að jarðlagasniði frá Skjálfandaflóa austur yfir Tjörnes og Öxarfjörð (Guðmundur Ómar Friðleifsson o.fl. 1998).

Tafla 4. $\delta^{13}\text{C}$ í surtarbrandi frá Tjörnesi og Lóni og jarðolíu frá Lóni.

Gerð/ staður	Surtarbrandur/Tjörnes (meðaltal)	Surtarbrandur/ Lón	Jarðolia/Lón
$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰ (PDB)}$	-27.8	-27.1	-27.7

Setlög nálægt yfirborði á Tjörnesi (mynd 5) eru 3-5 miljón ára gömul, en neðar gætu leynst eldri lög. Við Þeistareykjasprungubeltið er mikið misgengi, með nokkur metra falli til austurs. Í jarðlagalíkaninu á mynd 5 er reiknað með að gömlu Tjörnessetin hafi sokkið niður á mikið dýpi og fergst undir yngri jarðlög. Farg það ásamt jarðhita kann að hafa skapað skilyrði fyrir olíu- og gasmyndun úr lífrænum efnum.

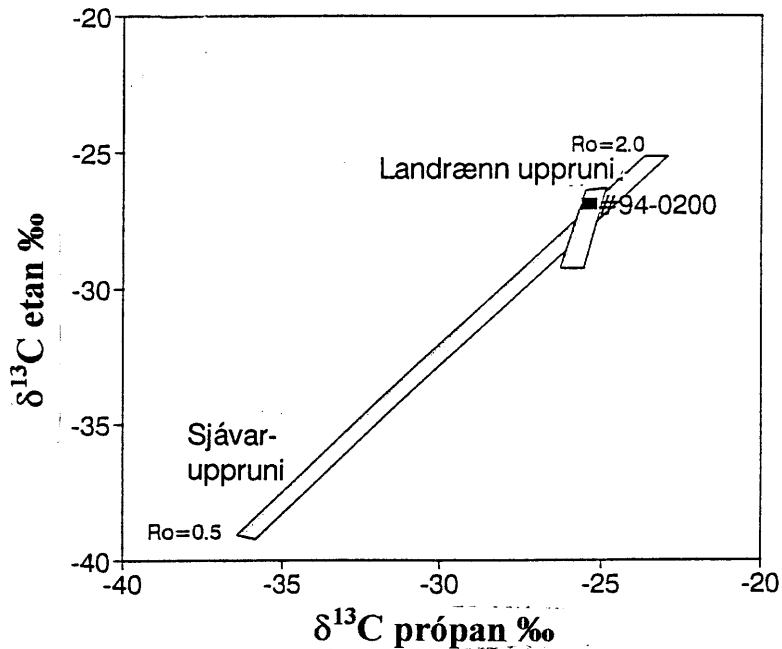
Sambönd milli samsætugilda metans og C_{2+} hlutfalls gassins bentu til hitamyndaðs lífræns gass á mörkum þess að vera landrænt og sjávarættað (Magnús Ólafsson o.fl. 1992). Sambönd $\delta^{13}\text{C}$ í metani, etani og própáni eru dregin upp á myndum 6 og 7 og sýna að það gildi sem fékkst fyrir metan í sýni úr holu ÆR-04 frá 1994 er hærri en við er að búat fyrir lífmyndað gas (mynd 6), þó að gildi fyrir tvö fyrri sýni úr sömu holu hafi verið lægri. Hins vegar falla gildi fyrir $\delta^{13}\text{C}$ í etani og própáni á það bil þar sem gildi fyrir landrænt og sjávarættað set skarast (mynd 7). Þroskalínur miðast við endurskin frá vitriníti sem er eitt af grunnefnum kola (Schoell 1980).

Mynd 6. Samband $\delta^{13}\text{CH}_4$ og $\delta^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ í gassýni úr holu ÆR-04. Þroskalínur 0.5-2.0

5. ÁLYKTANIR

Það gas sem kemur upp með jarðhitavökva í holum við Ærlækjarsel í Öxarfirði, er sennilega blanda af hitamynduðu lífrænu gasi og jarðhitagasi. N_2 er úr jarðhitagasi og CO_2 líklega að langmestu leyti en CH_4 að hluta úr hitamynduðu lífrænu gasi en að hluta úr jarðhitagasi. C_2H_6 og C_3H_8 eru sennilega eingöngu úr hitamynduðu lífrænu gasi. Mismunandi styrkur CO_2 og CH_4 og mikill breytileiki í ^{13}C í CH_4 bendir til þess að hlutfall jarðhitagass og hitamyndaðs lífræns gass í gasstreyminu sé mjög breytilegt.

Athugun á ummyndun bendir til þess að gasið hafi myndast við minni hita en lengst af hefur ríkt í setinu sem er í holunum. Því er líklegt að hitamyndaða lífræna gasið sé aðkomið. Að auki benda aldursgreiningar til þess að gasið sé myndað á meira dýpi en botn dýpstu borholunnar (ÆR-04).



Mynd 7. Samband $\delta^{13}\text{C}_2\text{H}_6$ og $\delta^{13}\text{C}_3\text{H}_8$ í gassýni úr holu ÆR-04. Þroskalínur 0.5-2.0

6. HEIMILDIR

Ármannsson, H., Benjamínsson, J. og Jeffrey, A.W.A. 1989: Gas changes in the Krafla geothermal system, Iceland. *Chem. Geol.*, 76: 175-196.

Ármannsson, H., Ólafsson, M., Friðleifsson, G.Ó., Darling, W.G. og Laier, T. 1998: Organic gas in Öxarfjörður, NE Iceland. In: Arehart, G.B. and Hulston, J.R. (editors). *Water-Rock Interaction*, Balkema, Rotterdam: 609-612.

Giggenbach, W.F. 1982: Carbon-13 exchange between CO_2 and CH_4 under geothermal conditions. *Geochim. cosmochim. Acta*, 46: 159-165.

Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Halldór Ármannsson og Jón Eiríksson. Gas í Öxarfirði. Drög að rannsóknaráætlun. Orkustofnun, 2 s.

Guðmundur Ómar Friðleifsson, Sverrir Þórhallsson, Steinar Þór Guðlaugsson, Halldór Ármannsson og Jón Eiríksson 1998: Hönnun háhitaholu við Bakkahlaup í Öxarfirði og rannsóknaráætlun. Orkustofnun OS-98010, 66 s.

Gunter, B.D. og Musgrave, B.C. 1971: New evidence on the origin of methane in hydrothermal gases. *Geochim. cosmochim. Acta*, 35: 113-118.

Halldór Ármannsson og Sigmundur Einarsson 1995: Gasið í Lagarfljóti. Náttúrufræðingurinn, 64: 265-280.

Karl Gunnarsson, Einar Kjartansson, Knútur Árnason, David Abensour og Yngve Kristoffersen 1996: Auðlindakönnun í Öxarfirði. Endurkastsmælingar á Öxarfjarðarsöndum með Víbróseis-aðferð. OS-96001/JHD-01, 46 s. + 2 kort.

Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Magnús Ólafsson, Ómar Sigurðsson og Þórólfur H. Hafstað 1989: Skilyrði til fiskeldis í Öxarfirði. Ferskvatn, jarðsjór, jarðhiti og rannsóknarboranir. Orkustofnun, OS-89041/JHD-08, 61 s.

Lúðvík S. Georgsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ólafur G. Flóvenz, Guðmundur Ingi Haraldsson og Gunnar V. Johnsen 1993: Rannsóknir á jarðhita og setlögum í Öxarfirði og Kelduhverfi. Orkustofnun, OS-93063/JHD-15, 63 s.

Magnús Ólafsson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Jón Eiríksson, Hilmar Sigvaldason og Halldór Ármannsson 1992: Könnun á uppruna gass í Öxarfirði. Borun og mælingar á holu ÆR-04 við Skógalón. Orkustofnun, OS-92031/JHD-03, 78 s.

Ólafsson, M., Friðleifsson, G.Ó., Eiríksson, J., Sigvaldason, H. and Ármannsson, H. 1993: On the origin of organic gases in Öxarfjörður, NE-Iceland. Orkustofnun, OS-93015/JHD-05, 76 s.

Sano, Y., Urabe, A., Wakita, H., Chiba, H. og Sakai, H. 1985: Chemical and isotopic compositions of gases in geothermal fluids in Iceland. *Geochem. J.*, 19: 135-148.

Schoell, M. 1980: The hydrogen and carbon isotopic composition of methane from natural gases of various origins. *Geochim. cosmochim. Acta*, 44: 649-661.

Sveinn P. Jakobsson og Guðmundur Ómar Friðleifsson 1989: jarðbik í holufyllingum í Skyndidal, Lóni. Náttúrufræðingurinn, 59: 169-188.