

**Einfalt þjappað reiknilíkan af jarðhitakerfinu  
á Nesjavöllum: spár um þrýstibreytingar**

**Guðni Axelsson**

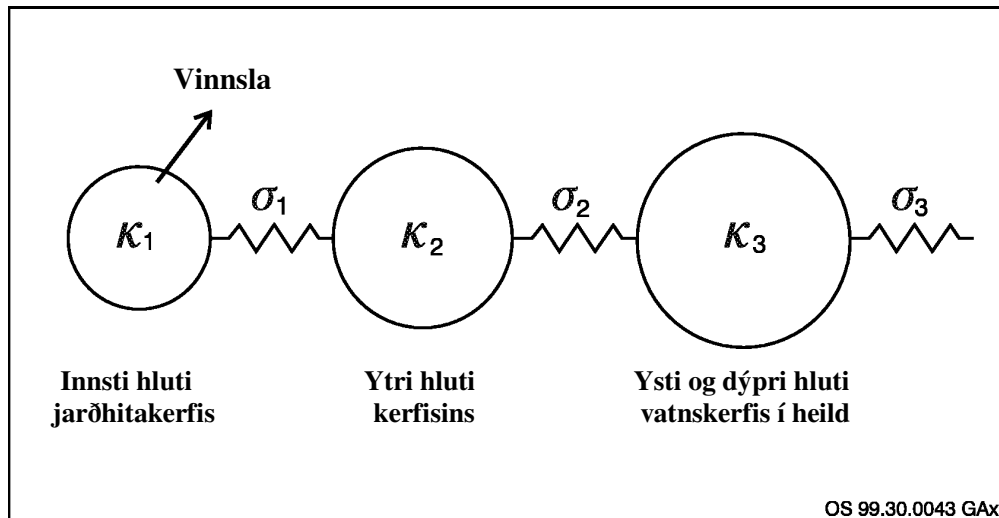
**Greinargerð Gax-2003-04**

## Einfalt þjappað reiknilíkan af jarðhitakerfinu á Nesjavöllum - Spár um þrýstibreytingar

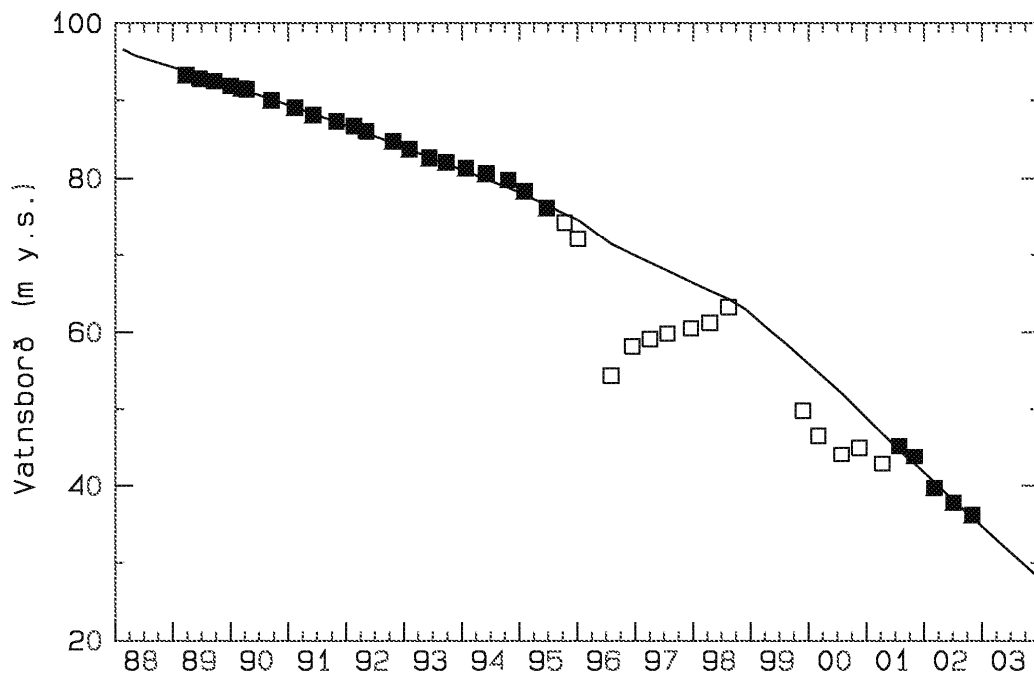
Í þessari greinargerð er fjallað stuttlega um niðurstöður einfaldra hermireikninga sem gerðir voru fyrir jarðhitakerfið á Nesjavöllum í maí 2003. Í þeim reikningum voru þrýstibreytingar í jarðhitakerfinu síðustu þrjá áratugina hermdar með svokölluðum þjöppuðum geymslíkönum og líkönin síðan notuð til þess að reikna þrýstispár aðra þrjá áratugi fram í tímann. Tilgangurinn var fyrst og fremst að fá samanburð við spádóma hins viðamikla þrívíða reiknilíkans af Hengilssvæðinu sem nú er verið að þróa (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Þessir hermireikningar er þó á engan hátt sambærilegir. Þjöppuðu líkönin herma einungis þrýstibreytingar í miðju Nesjavallakerfisins (þrýstibreytingar ráða reyndar einna mestu um afkastagetu jarðhitakerfa), en þrívíða reiknilíkanið hermir fjölþætt eðlisástand Hengilssvæðisins, breytileika þess í rúmmálinu sem líkanið nær yfir auk breytinga á eðlisástandinu í tímans rás. Segja má að ef þjöppuðu líkönin spá svipuðum þrýstibreytingum og þrívíða líkanið þá styrki sú niðurstaða spár síðarnefnda líkansins. Ef ósamræmi er hins vegar í spánum bendir það til þess að endurskoða þurfi einhverja þætti í uppbyggingu þrívíða líkansins.

Þjöppuð geymslíkön hafa verið notuð með góðum árangri fyrir fjölda jarðhitakerfa á Íslandi og erlendis (Guðni Axelsson og Einar Gunnlaugsson, 2000). Aðferðin sem er notuð er bæði öflug og fljótvirk (Guðni Axelsson, 1989). Mynd 1 sýnir skýringarmynd af slíku líkani, en það samanstendur af nokkrum vatnsgeymum, sem herma vatnsrýmd jarðlaga, og rennslisviðnámum, sem herma rennslisviðnám, eða lekt, jarðlaga. Þrýstings- eða vatnsborðsbreytingar í geymum líkananna eru láttnar herma sömu breytingar vegna dælingar, skv. raunverulegum gögnum. Í framhaldinu eru líkönin notuð til þess að reikna vatnsborðsspár fyrir viðeigandi vinnslutilfelli auk þess sem líkönin gefa upplýsingar um eðli og eiginleika jarðhitakerfisins sem á í hlut. Þjöppuð líkön er ýmist opin eða lokuð. Í opnum líkönum næst á endanum jafnvægi milli dælingar og innstreymis og þrýstingur/vatnsborð hættir að lækka, en í lokuðum líkönum er ekkert innstreymi og þrýstingur/vatnsborð lækkar stöðugt með tímanum. Opin líkön gefa bjartsýnar vatnsborðsspár, en lokuð svartsýnar. Reynslan hefur sýnt að raunveruleg viðbrögð jarðhitakerfa lenda einhvers staðar á milli spáa opinna og lokaðrar líkana.

Gögn um þrýstibreytingar í holu NJ-15 á Nesjavöllum eru þau gögn sem einföldu hermireikningarnir byggja á. Þetta eru fyrst og fremst vatnsborðsmælingar Hitaveitu Reykjavíkur, síðar Orkuveitu Reykjavíkur, sem tiltækar eru að mestu leyti samfellt síðan 1987, en dýpi á vatnsborð endurspeglar þrýstinginn djúpt í jarðhitakerfinu. Einnig er stuðst við reglulegar þrýstimælingar (þrýstiferlar) Orkustofnunar í holunni í gegnum árin (Arnar Hjartarson og Benedikt Steingrímsson, 2002). Gögnin voru hermd með lokuðu og opnu tveggja geyma líkani og sýnir mynd 2 samanburð mældra og reiknaðra vatnsborðsgilda frá byrjun árs 1989. Tekið skal fram að vatnsborðsmælingar frá þremur tímabilum, eftir að holan hafði verið blástursprófuð, voru ekki tekin með í reikninginn.



**Mynd 1.** *Opið þriggja geyma líkan af jarðhitakerfi notað til þess að herma þrýstings/vatnsborðsbreytingar í jarðhitakerfum.*



**Mynd 2.** *Mælt og reiknað vatnsborð í holu NJ-15 á Nesjavöllum. Mælt vatnsborð er sýnt með kössum og er opnu kössunum sleppt í reikningunum (mælingar truflaðar af blæstri holunnar o.fl.). Vatnsborð reiknað með lokuðu og opnu þjöppuðu líkönunum er sýnt með heildregnum línunum (þær falla alveg saman).*

Mynd 2 sýnir að þjöppuðu líkönin ná að herma mjög nákvæmlega ótruflaða hluta vatnsborðssögunnar, en það er tæplega sjö ára tímabil frá byrjun árs 1989 og 1½ árs tímabil undir lok sögunnar. Það verður þó að segjast að þrýstisaga Nesjavalla er ekki eins nákvæmlega þekkt og þrýstisaga margra lághitasvæða, en svo er gjarnan með háhitasvæði.

Bæði líkönin herma vatnsborðsbreytingarnar jafn vel og ekki er hægt að greina mun á milli þeirra.

Eiginleikar líkananna eru eftirfarandi ( $\kappa_i$  stendur fyrir heildarvatnsrýmd geymis nr. i og  $\sigma_i$  fyrir vatnsleiðni viðnáms nr. i, sjá mynd 1):

Lokað tveggja geyma líkan:

$$\kappa_1 = 190.000 \text{ kg/Pa}$$

$$\kappa_2 = 87.100 \text{ kg/Pa}$$

$$\sigma_1 = 0,00036 \text{ kg/(Pa.s)}$$

Opið tveggja geyma líkan:

$$\kappa_1 = 166.000 \text{ kg/Pa}$$

$$\kappa_2 = 76.200 \text{ kg/Pa}$$

$$\sigma_1 = 0,00094 \text{ kg/(Pa.s)}$$

$$\sigma_2 = 0,000085 \text{ kg/(Pa.s)}$$

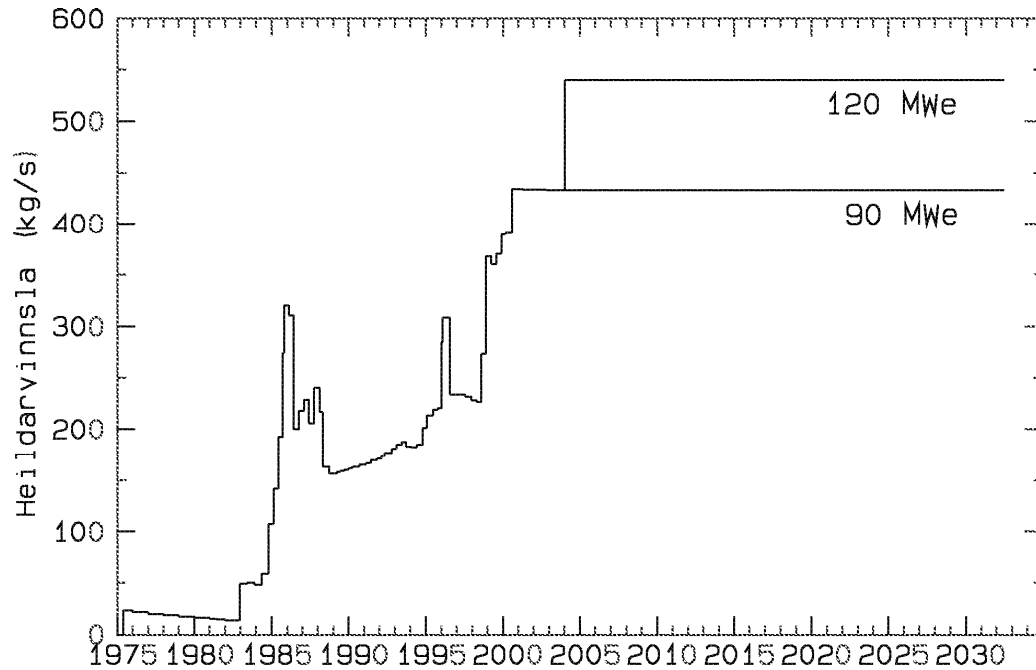
Þessir líkaneiginleikar fela í sér upplýsingar um stærð og eiginleika jarðhitakerfisins, sem þó eru m.a. háðar því hvers eðlis vatnsrýmd í kefinu er, þ.e. hvort hún er eingöngu háð samþjappanleika vatns og bergs eða einnig fasabreytingum. Rúmmál vatnskerfisins í heild sinni er á bilinu 20 – 1500 km<sup>3</sup>, skv. líkaninu. Þá sýna leiðnigildin að lekt bergs er mjög góð innan jarðhitakerfisins, eins og þekkt er, og áætla má að margfeldi lektar þess og þykktar sé af stærðargráðunni  $kh \approx 16 \text{ Darcy-m}$  ( $16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ).

Þjöppuðu líkönin tvö voru að lokum notuð til þess að reikna þrýstingsspár (vatnsborð NJ-15) fyrir tvö vinnslutilfelli sem miða við 90 og 120 MW<sub>e</sub> raforkuvinnslu á Nesjavöllum til 30 ára eða svo. Þetta eru sömu tilfelli og þrívíða líkanið hefur verið látið spá fyrir (Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003). Vinnslusagan er sýnd á mynd 3 og er þar annars vegar gert ráð fyrir stöðugri 430 kg/s heildarvinnslu og hins vegar 540 kg/s vinnslu frá því í byrjun árs 2004.

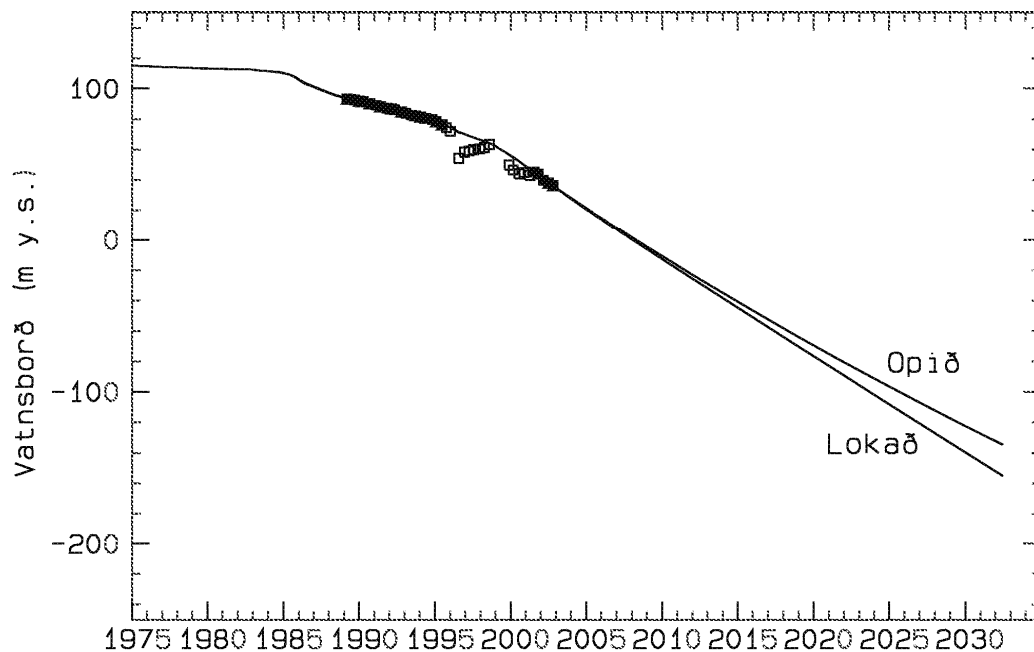
Myndir 3 og 4 sýna spárnar fyrir þessi tvö tilfelli reiknaðar bæði með opna og lokaða líkaninu. Fyrri myndin sýnir spár fyrir 430 kg/s heildarvinnslu, en sú seinni spár fyrir 540 kg/s vinnslu. Oftast má ganga út frá því að opið líkan gefi efri vökmörk en lokað neðri, en hér vekur athygli hve lítill munur er á spám líkananna. Það bendir yfirleitt til þess að spár séu vel afmarkaðar og nákvæmar.

Samkvæmt spánum ætti vatnsborð í NJ-15 að hafa fallið um 270 m frá upphafi vinnslu á Nesjavöllum til ársins 2033, ef vinnslan er 430 kg/s. Þetta samsvarar þrýstifalli í jarðhitakerfinu upp á u.þ.b. 26 bar. Þá ætti það að hafa fallið um 320 m frá upphafi vinnslu á Nesjavöllum til ársins 2033, ef vinnslan er aukin í 540 kg/s. Þetta samsvarar þrýstifalli í jarðhitakerfinu upp á u.þ.b. 31 bar. Til samanburðar spáir þrívíða líkanið þrýstifalli upp á u.þ.b. 30 bar fyrir seinna vinnslutilfellið. Það verður að teljast mjög gott samræmi, eða aðeins um 3% frávík í spám til 30 ára. Þessi niðurstaða styrkir því spádóma þrívíða líkansins eindregið.

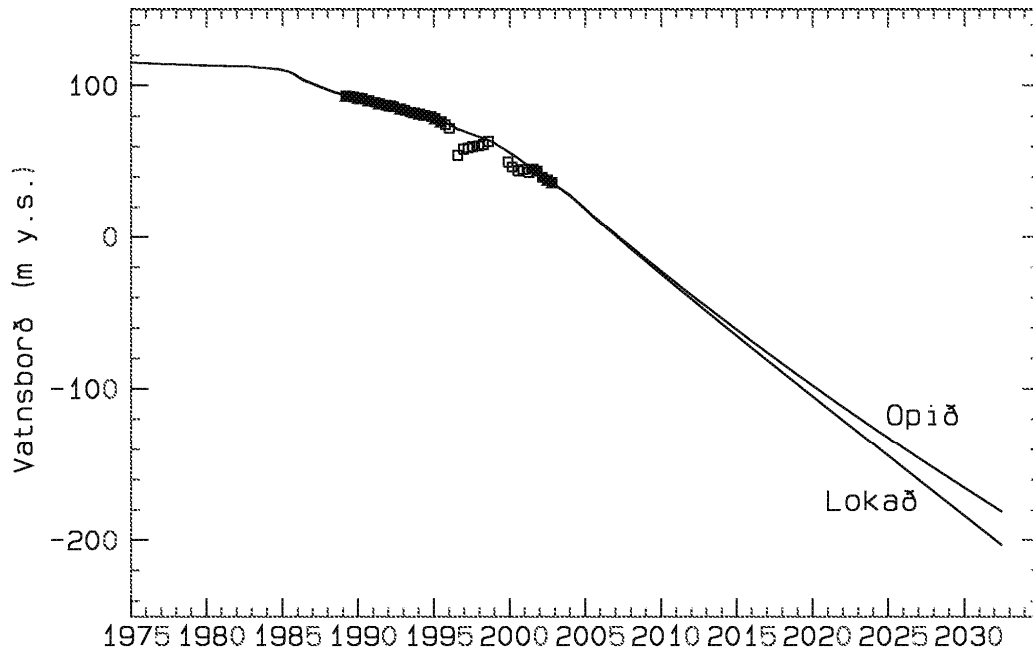
Ljóst er að afköst borholna munu minnka við það þrýstifall sem spáð er á Nesjavöllum næstu 30 árin. Því mun þurfa að bora fleiri vinnsluholur til að mæta þeirri afkastaminnkun. Þjöppuðu líkönin geta hvorki svarað því hve mikið holur muni dala né hve margar viðbótarholur muni þurfa að bora. Aftur á móti má nota þrívíða líkanið til þess og eins er mögulegt að áætla þetta út frá mældri dölun holna á Nesjavöllum síðustu 15 – 20 árin.



**Mynd 3.** Vinnslusaga Nesjavallasvæðisins eins og hún er lögð til grundvallar hermireikningunum. Sagan er byggð á mældum gögnum til ársins 2002, en eftir það er gert ráð fyrir tveimur vinnslutilfellum, öðrum með 90 MW<sub>e</sub> stöðugri raforkuframleiðslu, en hinu með 120 MW<sub>e</sub> raforkuframleiðslu frá árinu 2004.



**Mynd 4.** Vatnsborðsspár fyrir holu NJ-15 fyrir 430 kg/s stöðuga vinnslu (90 MW<sub>e</sub> raforkuframleiðslu) reiknuð með opna og lokaða þjappaða líkaninu.



**Mynd 5.** Vatnsborðsspár fyrir holu NJ-15 fyrir 540 kg/s stöðuga vinnslu (120 MW<sub>e</sub> raforkuframleiðslu) reiknuð með opna og lokaða þjappaða líkaninu.

Hér þarf að leggja áherslu á það að þjöppuðu líkönin reikna eingöngu með þrýstibreytingum, en taka ekki tillit til ýmissa annarra breytinga sem orðið geta í jarðhitakerfinu. Þar má t.d. nefna breytingar í vermi vegna innstreymis kaldari vökva úr næsta umhverfi jarðhitakerfisins og útbreiðslu tveggja-fasa skilyrða vegna lækkunar þrýstings.

Því má bæta hér við að með mjög einföldum reikningum, sem byggja á þeirri forsendu að heiti kjarni Nesjavallakerfisins sé sívalningslaga og um 2 – 3 km<sup>3</sup> að rúmmáli, má áætla að kólnunar vegna innstreymis kaldari vökva úr umhverfi jarðhitakerfisins ætti varla að fara að gæta fyrir en vinnslusaga Nesjavalla verður um 60 – 100 ára. Þetta er þó mjög ónákvæm áætlun.

Helstu niðurstöður þeirra einföldu hermireikninga fyrir jarðhitakerfið á Nesjavöllum, sem hér hefur verið lýst, eru eftirfarandi:

- 1) Hermun þrýstissögu NJ-15 með þjöppuðum líkönum tókst vel, en hafa þarf í huga að þrýstisagan er þó ekki mjög nákvæmlega þekkt.
- 2) Líkönin spá þrýstifalli upp á u.þ.b. 27 bar fram til 2033 við 90 MW<sub>e</sub> raforkuframleiðslu og upp á c.a. 28 bar við 120 MW<sub>e</sub> framleiðslu
- 3) Til samanburðar spáir þrívíða líkanið þrýstifalli upp á u.þ.b. 30 bar fyrir 120 MW<sub>e</sub> vinnslutilfellið. Þetta telst mjög gott samræmi, sem styrkir spádóma þrívíða líkansins eindregið.
- 4) Skv. þjöppuðu líkönunum er lekt bergs mjög góð innan jarðhitakerfisins og margfeldi lektar þess og þykktar af stærðargráðunni 16 Darcy-m ( $16 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ).
- 5) Þessir líkanreikningar geta hvorki svarað því hve mikið holur muni dala, né hve margar viðbótarholur muni þurfa að bora, vegna ofangreindrar þrýstilækkunar.

- 6) Þjöppuðu líkönin eru nú tiltæk til þess að reikna þrýstibreytingar fyrir ýmis önnur vinnslutilfelli, en þau tvö sem hér hafa verið skoðuð.
- 7) Einfaldir reikningar sýna að aðstreymi kaldari vökva muni líklega ekki kæla innsta hluta Nesjavallakerfisins að ráði næstu áratugina.

***Heimildir:***

Arnar Hjartarson og Benedikt Steingrímsson, 2002: Mælingaefirlit 2002 á Nesjavöllum, Kolviðarhól og Ölkelduhálsi. Orkustofnun, Rannsóknasvið, skýrsla OS-2002/066, 35 bls.

Grímur Björnsson og Arnar Hjartarson, 2003: Þrívítt reiknilíkan af Hengilssvæði. Staða og horfur í maí 2003. Orkustofnun, Rannsóknasvið, greinargerð GrB/ArH-2003/02, 7 bls.

Guðni Axelsson, 1989: Simulation of pressure response data from geothermal reservoirs by lumped parameter models. *Proceedings 14<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, USA, 257-263.

Guðni Axelsson og Einar Gunnlaugsson (convenors), 2000: *Long-term Monitoring of High- and Low-enthalpy Fields under Exploitation*. International Geothermal Association, World Geothermal Congress 2000 Short Course, Kokonoe, Kyushu District, Japan, maí 2000, 226 bls.

*Guðni Axelsson*

Lykilorð: Nesjavellir (svæðisnr. 11443), þrýstingsbreytingar, líkanreikningar, þjöppuð líkөн.