

VIII. LÍKINDI ELDGOSA, HLAUPA OG FÆRSLU ELDVIRKNI MILLI SVÆÐA INNAN KÖTLUÖSKJUNNAR

Jónas Elíasson¹, Guðrún Larsen², Magnús Tumi Guðmundsson² og Freysteinn Sigmundsson³

1: Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, Hjarðarhaga 2-6, 107 Reykjavík

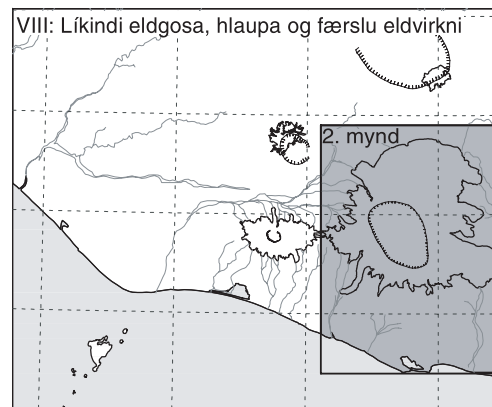
2: Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

3: Norræna Eldfjallasetrinu, Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 101 Reykjavík

1. Inngangur

Gossaga Kötlu á sögulegum tíma er all-vel þekkt og töluverðar upplýsingar liggja fyrir um eldgos frá lokum síðasta jökulskeiðs fyrir um 10 þúsund árum (t.d. Sigurður Þórarinnsson 1975, Guðrún Larsen 2000, Bergún A. Óladóttir 2004). Gossagan varðveitir upplýsingar um hegðunarmynstur eldstöðvarinnar, hvar gos eru algengust, hver dreifing þeirra er í tíma og rúmi auk þess sem vísbendingar eru um stærðir eldgosa. Hér er gossagan rannsökuð með líkindafræðilegum aðferðum.

- Í fyrsta lagi er gossagan á sögulegum tíma skoðuð og kannað samband stærðar eldgosa og lengdar gosshlés á undan og eftir gos.
- Líkur þykja benda til að þekktar gosstöðvar innan Kötluöskjunnar gjósi ekki óháð hverri annarri heldur flakki gosvirkni milli staða innan öskjunnar þannig að jökulhlaup vegna þeirra geta komið niður frá hverju sem er af 3 þekktum meginvatnasviðum
- Sett er upp líkindalíkan af dreifingu eldgosa innan Kötluöskjunnar þar sem tímalengd milli eldgosa innan öskjunnar dreifist með sama hætti og gögn sýna, og flakkið milli vatnasviða stjórna af Markov fylki þar sem stað-



Mynd 1. Rannsóknarsvæðið.

setning síðasta goss stjórnar líkindum á hvar næst gýs.

- Metnar eru líkur á eldgosi í Kötluöskjunninni að meðaltali, en auk þess reiknaðar líkur á hvað langt sé í næsta gos, að teknu tilliti til lengdar gosshlés og stærðar síðasta goss.

Rétt er að taka fram að sú úttekt sem hér er sett fram lýsir líkum atburða með hliðsjón af gossögu eingöngu. Ekki er tekið tillit til jarðeðlisfræðilegra gagna sem sýna vaxandi óróa í eldstöðinni frá og með árinu 1999 (kafla IX). Talið er að grunnt innskot eða minniháttar gos und-

ir jöklinum kunni að hafa orðið í júlí það ár (Páll Einarsson, 2000; Erik Sturkell o.fl., 2003). Síðan þá hefur gætt meiri skjálftavirkni, jarðhitavirkni hefur aukist og fjallið hefur þanist út um nokkra cm á ári. Þetta bendir til vaxandi þrýstings undir eldstöðinni. Þetta ástand verður að telja eðlilegan undanfara næsta goss, svo líkur á gosi eru væntanlega mun meiri en þær líkur sem hér eru reiknaðar út frá tölfraðilegri greiningu gossögunnar. Einnig ber að hafa í huga að eldgos í Mýrdalsjökli geta orðið utan Kötluöskj-

unnar sbr. hina auknu jarðskjálftavirkni undir Goðabungu síðustu ár (kaflí IX).

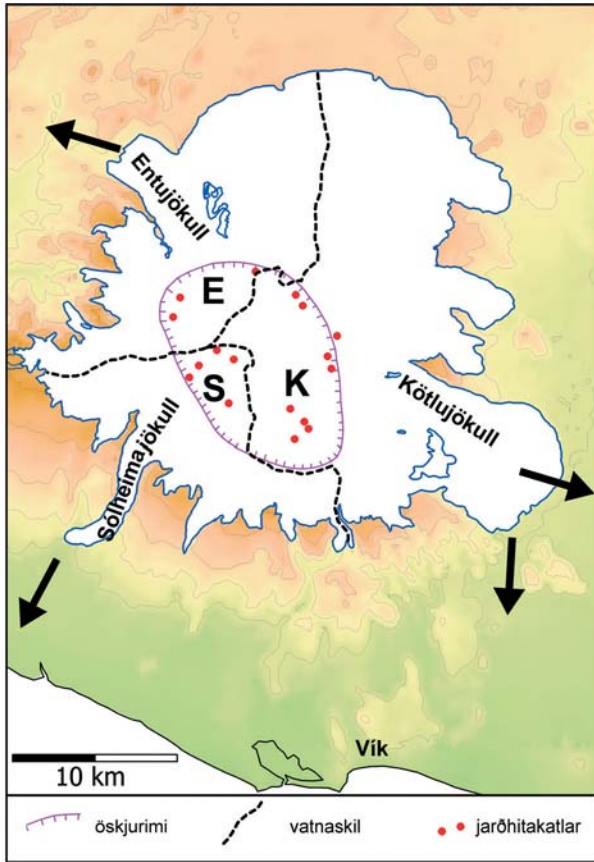
Umfang og dýpt Kötluöskjunnar kom í ljós í íssjarmælingum árið 1991 (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Þá kom fram að sigdældin skiptist í þrjú afrennissvæði, þar sem ísbráð frá hverju vatnasviði rennur um skörð í útjöðrum öskjunnar (mynd 2). Austasta vatnasviðið, Kötlujökull (K-svæði) er stærst (60 km²) og hefur afrennsli til austurs Af vatnasviði Sólheimajökuls (S-svæði, 19 km²) rennur vatn til suðurs. Frá þriðja vatnasviðinu,

Tafla 1

Gos sem náð hafa upp úr jökli í Kötlu frá því á 8. öld. K: gos og jökulhlaup þeim tengd innan svæðis K. S: gos og jökulhlaup þeim tengd innan svæðis S.

Staðsetning flóða	Tímasetning atburðar	Upphaf goss	Tímabil fyrir gos	Tímabil eftir gos	Stærð gjóskulaga	Umfang hlaups
K	1918	12. okt.	58	(86+)	Stór	Stórt
K + (S)	1860	08. maí	37	58	Lítill	Lítið
K	1823	26. jún.	68	37	Lítill	Miðlungs
K	1755	17. okt.	34	68	Stór	Stórt
K	1721	11. maí	61	34	Miðlungs	Stórt
K	1660	03.nóv.	35	61	Miðlungs	Miðl./Stórt
K	1625	02.sept.	13	35	Stór	Miðlungs
K	1612	12. okt.	32	13	Lítill	Lítið
K	1580	11. ág.	80	32	Lítill	Lítið/Miðl.
K	1500		(20)	80	Stór	Miðl./Stórt
K	15 öld.		(20)	(20)	Lítill	?
K	1440		(24)	(20)	Lítill	?
K	1416		(59)	(24)	Miðlungs	?
K	1357		(95)	(59)	Miðlungs	?
K	1262		17	(95)	Stór	?
K	1245		(66)	17	Lítill	?
K	1179		(50)	(66)	Lítill	?
K	12 öld.		(200)	(50)	Lítill	?
K+S ? *	934/938		(16)	(200)	Stór	Stórt
K	920		(20)	(16)	Miðlungs	?
K	9 öld.		-	(20)	Lítill	?
S	9 öld		-	-	Lítill	?
S	8 öld		-	-	Miðlungs	?

*Gos í Eldgjá, atburður sem var einstakur að umfangi og staðsetningu

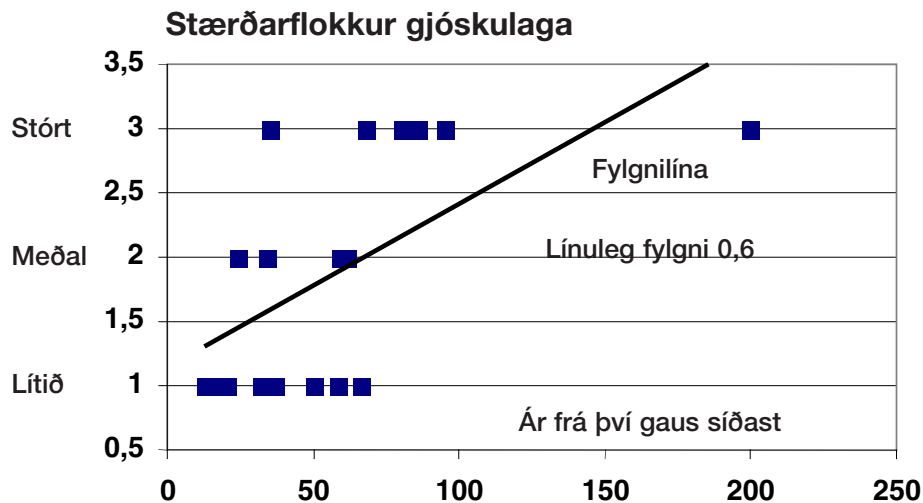


Mynd 2. Mýrdalsjökull, Kötlusaskjan, jarðhitasigkatlar innan hennar og vatnaskil undir jöklinum (Björnsson og fl. 2000). Helstu farvegir jökulhlaupa frá svæðunum þremur (Svæði K, S og E) eru sýndir með örnum.

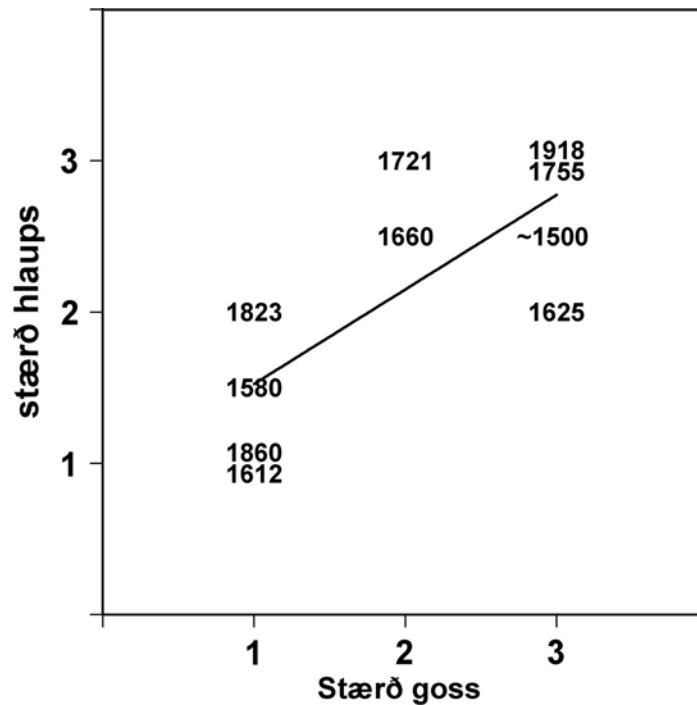
Entujökli (E-svæði, 23 km²), rennur leysingarvatn í norðvestur (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Á sögulegum tíma hafa flest hlaup komið frá K-svæði, nokkur frá S-svæði en engin frá svæði E.

2. Gossaga Kötlu

Gömul skjöl, svo sem annálar og skrár úr fórum presta og bænda í byggðum í nágrenni Mýrdalsjökuls geyma gosár og lýsingar á 14 sögulegum gosum í Kötlu (Sigurður Þórarinnsson, 1975). Þá hafa jarðfræðirannsóknir að auki



Mynd 3. Fylgni milli gosblés í kjölfar goss og stærðar goss. Stærðir gosa: Lítið = 1, meðalstórt = 2, stórt = 3.



Mynd 4. Fylgni milli stærðar goss og stærðar jökulhlaupa 1500-1918. Stærðir gosal hlaupa: lítið = 1, meðalstórt = 2, stórt = 3.

sýnt fram á 6 gos í Kötlu og stórt gos úr Eldgjá. Því eru heimildir um 21 gos á sögulegum tíma (Guðrún Larsen, 2000). Í töflu 1 er samantekt á sögulegum gosum, ásamt gosum/jökulhlaupum úr Sólheimajökli frá áttundu og níundu öld (Guðrún Larsen, 1978).

Gos innan Kötluöskjunnar eru sprengigos og framleiða gjósku, hraun rennur yfirleitt ekki. Hinsvegar berst stór hluti gosefna í Kötlugosum niður á sandana með jökulhlaupunum. Í gosunum bráðnar mikill ís og jökulbráðin leitast frá gosstöðvunum undir jöklinum að jaðri jökulsins og veldur gríðarlegum flóðum (Gísli Sveinsson, 1919; Sigurður Þórarinnsson, 1975; Haukur Tómasson, 1996; Guðrún Larsen, 2000).

Hin mikla framleiðsla bræðsluvatns og bræðsluhraðinn sem sést hefur í gos-

um undir jökli hefur verið skýrð með mikilli tvístrun kvikunnar í gjósku. Algengt þvermál vatnsborinna gjóskukorna er um eða undir 1 mm. Sé nægt vatn fyrir hendi á gosstaðnum næst varmajafnvægi milli gjóskunnar og vatnsins á fáum sekúndum (Magnús T. Guðmundsson, 2003; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004) og hið háa hitaflæði sem af hlýst er talin helsta ástæða fyrir umfangi Kötluhlaupanna.

3. Umfang gosa og flóða

Búið er að kortleggja dreifingu og þykkt gjóskulaga úr allmörgum Kötlugosum (Sigurður Þórarinnsson, 1975, 1980; Guðrún Larsen, 1978, 2000 og óbirt gögn). Út frá þeim gögnum er um-

fang gosa skilgreint í töflu 1. Söguleg gjóskulög eru flokkuð í þrennt: Lítil: rúmmál $<0,1 \text{ km}^3$; Miðlungs: rúmmál milli $0,1$ og $0,5 \text{ km}^3$; Stór: rúmmál $>0,5 \text{ km}^3$. Þessi flokkun á einungis við um loftborna gjósku, sá hluti sem flyst burt með hlaupvatni er ekki tekinn með í reikninginn. Líklegast er sá hluti sem flyst burt með hlaupvatninu að miklum hluta komin til á meðan gosvirknin er undir jöklinum, á meðan gosið er að bræða sig upp í gegnum ísinn á fyrstu klukkustundum umbrotana. Rúmmál þessara gosefna getur verið mjög breytilegt, en leiða má líkur að því að helstu áhrifaþættir séu kvikustreymi og þykkt jökuls (kafla X), sem er á bilinu 400-600 m á flestum svæðum sigdældarinnar. Það ætti því að vera jákvæð fylgni milli magns loftborinnar gjósku og þess magns sem flyst með hlaupvatni. Við lítum því á rúmmálsgreininguna í töflu 1 sem nýtsamlega leið til ákvörðunar umfangs sögulegra Kötlugosa. Eins og sýnt er á mynd 3, þá er einhver fylgni milli stærðar goss og lengdar goshlés sem á eftir fylgir (fylgnistuðull 60%). Eldarnir í Eldgjá frá 934 skera sig frá, þessi atburður var stærðargráðu meiri að umfangi en þau gos sem komið hafa síðan (Guðrún Larsen, 2000).

Jökulhlaup úr Kötlu er blanda af vatni, ís og gosefnum, í hlutföllum sem geta verið breytileg milli gosa og einnig milli farvega hlaupsins. Vatnshluti hlaupsins er bræðsluvatn úr jöklinum og því má leiða líkur að því að samband sé á milli umfangs goss og hlaups. Því þarf að rannsaka fylgni milli rúmmáls hlaups og stærðar goss. Haukur Tómasson (1996) áætla að rúmmál hlaupvatns í jökulhlaupinu frá 1918 hafi verið 8 km^3 og flóðtoppurinn hafi náð $300.000 \text{ m}^3/\text{sek}$. Þetta var eitt af stærstu jökulhlaupum Kötlu. Ritaðar heimildir frá atburðum frá

og með 1580 geyma lýsingar sem hægt er að nota við mat á líklegri stærð hlaups. Í töflu 1 er að finna líklegt umfang hlaupanna eftir árið 1500, flokkað niður í lítil, miðlungs og stór. Þessi flokkun er óvissari og ekki byggð á jafnmiklum upplýsingum og gögnin um gjóskumagn (tafla 1). Hinsvegar, eins og mynd 4 sýnir, þá er fylgni milli umfangs gos og umfangs jökulhlaupa, eins og við var að búast.

4. Rennslisleiðir jökulhlaupa

Gos í Kötluöskjunni mun valda jökulhlaupi í einhverjum af þremur vatnasviðum, K, S, eða E (mynd 2). Hlaup frá K-svæði eru algengust (tafla 1) og verða vegna gosa innan 60 km^2 vatnasviðs Kötlujökuls. Þetta eru hin dæmigerðu Kötlugos (síðast 1918). Heimildir um gos innan svæðis S og jökulhlaup í kjölfar þeirra eru úr jarðfræðilegum gögnum ásamt óljósum tilvísunum í gömlum handritum (Sigurður Þórarinnsson, 1975; Guðrún Larsen, 1978). Upplýsingar um hlaup frá svæði E er einungis að finna í jarðfræðilegum gögnum (sjá kafla III-VII). Þessi hlaup hafa komið undan Entujökli í norðvesturhorni öskjunnar. Sýnt hefur verið fram á a.m.k. 10 stóra atburði af þessu tagi á síðustu 8000 árum, sem bendir til að endurkomutími sé í mesta lagi 800 ár.

5. Líkindalíkan af dreifni gosa og tíðni

5.1 Val á líkindalíkani

Aðalhættan af völdum gosvirkni í eldstöðinni Kötlu er vegna jökulhlaupa. Þess vegna er umfang jökulhlaupa og

Tafla 2
Breytistærðir hermunar

Gildi	Ár
Meðal tímabil á milli gosa	49
Staðfrávik fyrir tímabil	25

endurkomutími þeirra mikilvægustu breytistærðir sem skoða þarf í hættumati. Hinsvegar er ákvörðun á stærð sögulegra hlaupa óviss. Í samanburði er stærðarákvörðun á gosum, þó ónákvæm sé, mun betur afmörkuð. Í áframhaldinu munum við því kanna eiginleika gosgunar með líkindalíkani.

Einungis verða tekin með gos sem valda verulegum jökulhlaupum, bræða leið sína í gegnum jökulinn og mynda gjóskulög (þ.e. atburðir eins og þeir sem skráðir eru í töflu 1). Líkindalíkan fyrir ár X_i , þegar slík gos verða, er hægt að setja fram á almennu formi, miðað við síðasta gos X_{i-1} , sem:

$$X_i = X_{i-1} + \xi_i \quad (1)$$

Þar sem, ξ_i , er slembibreyta (e. stochastic variable) sem fær eitt gildi fyrir hvert i og lýsir tímabili milli gosa. Eftir er að ákvarða á hvaða svæði gosið verður, K, S eða E.

Áður en áfram er haldið verður að velja milli tveggja líkana fyrir eldvirkni í öskjunni:

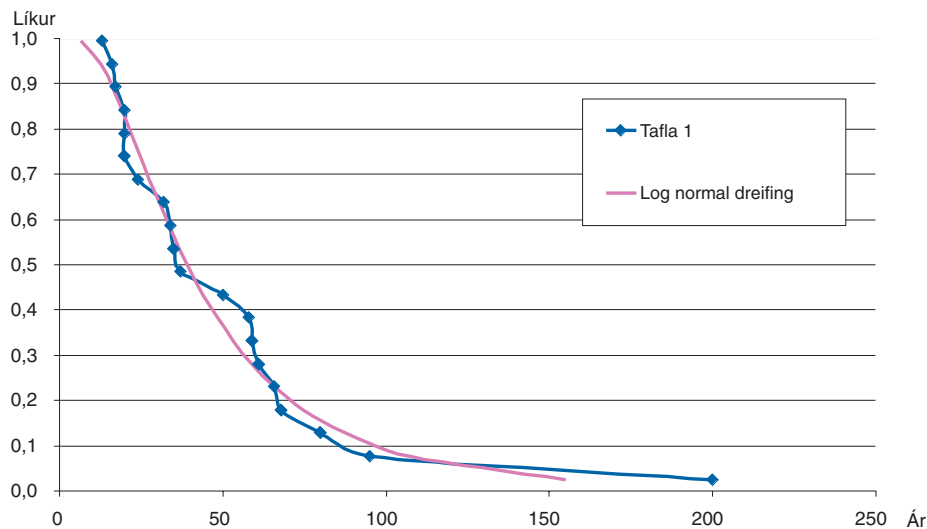
- a) Gos á öllum þremur svæðum eru óháðir atburðir.
b) Gos í öskjunni eru stókastíkt skyldir atburðir.

Núverandi þekking á gossögunni (tafla 1) inniheldur ekki næg gögn til að velja á milli þessara tveggja valkosta. Það er vel þekkt að gos á svæði K eru tíðari en á hinum svæðunum en þetta er hægt að heimfæra bæði á a) og b). Ef a) er rétt, þá er meðaltímabil milli gosa stærðargráðu styttri fyrir svæði K heldur en hin svæðin. Ef b) er rétt, þá stekkur gosvirkni milli svæða með mun meiri líkum á að lenda á svæði K. Meðaltímabil milli gosa er breytistærð sem ætti að ná til öskjunnar í heild sinni, þar sem tekin eru með í reikninginn gos á öllum svæðum (tafla 2).

Valið milli a) og b) þarf því að gerast m.t.t. jarðeðlisfræðilegra þátta, frekar en með stærðfræðilegri meðhöndlun á gögnum úr töflu 1. Það er mikilvægt að átta sig á því að mörk þessara þriggja svæða (K, S og E) stýrast fyrst og fremst af lögun jökulyfirborðsins, ekki af landslagi í botni öskjunnar (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Athuganir á dreifingu jarðskjálftabylgna hafa leitt í ljós grunnstætt kvikuhólf í norðausturhluta öskjunnar að mestu á svæði K (Ólafur Guðmundsson o.fl., 1994). Vesturmörk kvikuhólfsins eru ekki vel þekkt en ná hugsanlega inn á svæði E og S. Önnur jarðeðlisfræðileg

Tafla 3
Markov-fylki fyrir þrjár keyrslur sem sýndu samræmi við gögn í töflu 1.

		K = 1	S = 2	E = 3
Síðasta gos	K = 1	1	0,11	0,07
	S = 2	1	0,38	0,07
	E = 3	1	0,30	0,07



Mynd 5. Dreifing tímabila milli gosa innan Kötluöskjunnar (öll svæði). Log-normal dreifing með meðalgildi 49 ár og staðalfrávik 25 ár fellur að gögnunum

gögn, svo sem dreifing á skjálfta- og jarðhitavirkni, þensla sigdædarinnar á undanförunum árum og frávik í segulsviði og þyngdarsviði benda til þess að ekki séu aðrar óreglur í byggingu öskjunnar en kvikuhólfið sem að framan var nefnt (Helgi Björnsson o.fl., 2000; Erik Sturkell o.fl., 2003a,b; Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir, 2000; Magnús T. Guðmundsson, 1994; Geirfinnur Jónsson og Leó Kristjánsson, 2000). Þessar staðreyndir benda til þess að virknin sé tengd en ekki óháð, á öllum þremur svæðunum. Við gerum því ráð fyrir því að líkan b) eigi betur við um gosvirkni í Kötluöskjunni.

Markov ferlar hafa ekki verið mikið notaðir til þessa við lýsingu á tímaröðum í eldfjallafræði. Þó eru þeir algeng slembiferli (t.d. Henderson og Quant, 1958), sem mikið eru notuð í vatnafræði, hagfræði og öðrum vísindagreinum. Við leggjum til hér að tímaröð fyrir eldgos skilgreinist sem Markov-keðja og að flutningur á gosvirkni milli svæða innan eldstöðvarinnar sé lýst með stókastísku

Markov-fylki. Hægt er að byggja stókastískt líkan og prófa breytistærðir á gögnum í töflu 1.

5.2 Líkindi eldgoss á tilteknum stað innan Kötluöskjunnar

Setjum svo að umtalsvert gos sem veldur stóru hlaupi verði á einu af þessum þremur svæðum K, S, E. Næsta gos getur orðið á hverju þessara svæða sem er. Markov-fylki gefur líkindi á því hvort gos mun verða á nýju svæði eða halda sig við sama svæðið. Í okkar tilfalli er þetta 3×3 líkindafylki, $p_{n,m}$. Breyturnar n og m fá gildin 1, 2, 3, og gildi þeirra stýrir því hvar næsta gos verður (tafla 3). Ef við látum n eða m taka gildið 1 í eftirfarandi jöfnu, þá sýnir það gos á svæði K, gildið 2 sýnir S og gildið 3 sýnir E. Sem dæmi þá mun, $p_{1,3}$, með þessari skilgreiningu verða líkurnar á því að næsta gos muni verða á svæði E (=3), að því gefnu að síðasta gos hafi verið á svæði K (Kötluhlaup = 1). Samkvæmt skilgreiningu höfum við:

$$\sum_{m=1}^{m=3} P_{n,m} = 1 \text{ fyrir öll } n \quad (2)$$

Þetta líkindalíkan er í samræmi við líkan b). Með þessu vali á líkani geta gos á tveimur svæðum samtímis ekki gerst. Þetta er ekki í algjöru samræmi við gos-söguna, en slíkir atburðir eru sjaldgæfir og við lítum svo á að þetta sé ásættanleg einföldun.

5.3 Gosröðin X_i

Tímabilið milli hverra tveggja gosa, táknað með ξ_i í jöfnu 1, er hægt að rita sem:

$$\xi_i = m_y + s_y \eta_i \quad (0,1) \quad (3)$$

Hér eru m_y og s_y meðalgildi og staðalfrávik tímabilana í árum milli gosa í öskjunni en þessi gildi eru byggð á töflu 1. Breytan η_i er stókatísk með meðaltal 0 og staðalfrávik 1, sem tekur eitt gildi fyrir hvert i . Tíðnidreifingin á ξ_i og tímabilana milli gosa verður að vera sú sama. Jafna 3 verður notuð fyrir hermum á tímabilum milli gosa. Nú er hægt að líkja eftir líkindum á gosi með jöfnum 1 – 3. Tímabil mill gosa úr töflu 1 fylgja log – normal dreifingu eins og sýnt er á mynd 5. Þess vegna er hægt að nota bætta útgáfu af jöfnu 3 í reikningum:

$$\xi_i = \exp(m_y + s_y \eta_i) \quad (0,1) \quad (4)$$

Hérna er m_y meðaltal lygrans (\log_e) af tímabilunum í töflu 1 og s_y er staðalfrávik lygrana (\log_e) af tímabilunum í töflu 1. Þessi jafna var notuð í hermumunum, út frá þeim talinn fjöldi gosa og líkindi reiknuð.

5.4 Staðsetningarröðin Y_i

Við skilgreinum staðsetningarröðina Y_i samhliða gos-röðinni. Staðsetningarröðin getur einungis haft þrjú gildi, 1, 2 eða 3, þar sem $K \Rightarrow Y_j = 1$, $S \Rightarrow Y_j = 2$ og $E \Rightarrow Y_j = 3$. Við komum aftur að líkindafylkinu úr jöfnu 2. Ef við skilgreinum síðasta gos með Y_{j-1} , þá er gildi þessarar breytu jafnt tölunni n úr líkindafylkinu $p_{n,m}$. Líkindafylkið er nú endurskrifað til hagræðingar við útreikninga sem nýtt fylki P . Fyrsta línan í fylki P er:

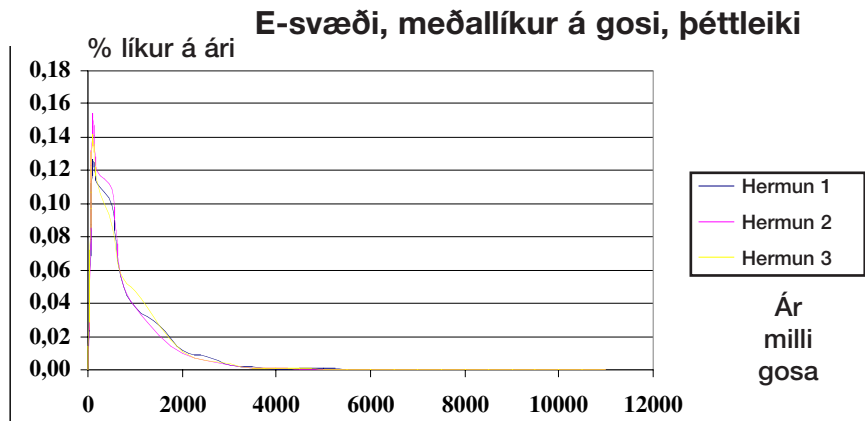
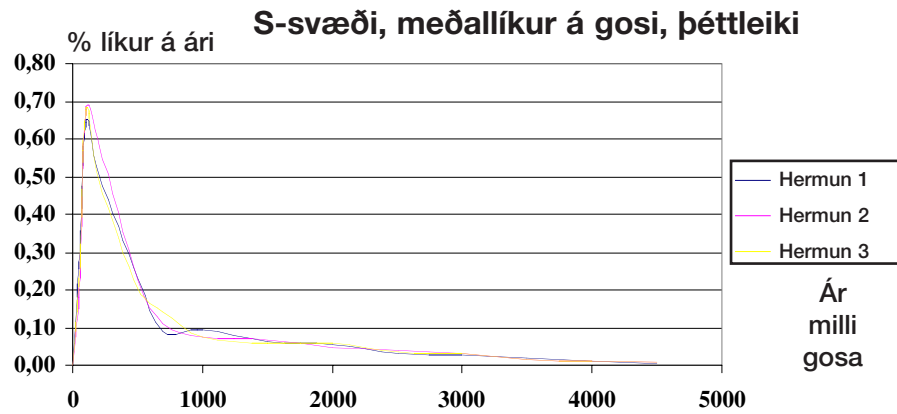
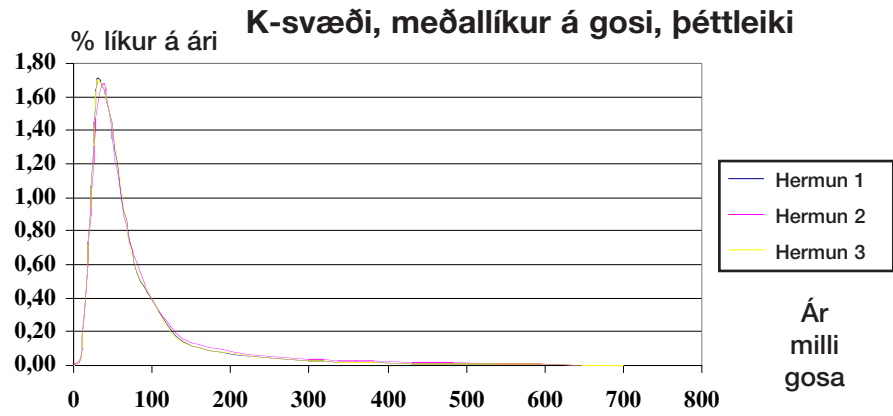
$$P_{1,m} = \{1; p_{1,2} + p_{1,3}; p_{1,3}\} \quad (5)$$

fyrir $Y_{j-1} = 1$

Þessi fyrsta lína samsvarar því að $Y_{j-1} = 1$ í samræmi við að síðasta gos hafi verið á K -svæði. Línur 2 og 3 í P -fylkinu samsvara á sama hátt $Y_{j-1} = 2$ og 3. Til þess að stjórna flutningi næsta goss milli svæða K , S og E , þá skilgreinum við nú $0 < \theta_j < 1$ nýja jafndreifða slembibreytu sem fær eitt gildi fyrir hvert j . Þar sem gos $j-1$ gerist á svæði $Y_{j-1} = 1$, næsta gos mun því gerast á $Y_j = 1, 2$ eða 3. Nákvæmt gildi verður:

$$\begin{aligned} Y_j = 1 & \text{ fyrir } \theta_j > P_{1,2} + p_{1,3} \\ Y_j = 2 & \text{ fyrir } P_{1,2} \geq \theta_j > P_{1,3} = p_{1,3} \\ Y_j = 3 & \text{ fyrir } \theta_j \leq P_{1,3} = p_{1,3} \end{aligned} \quad (6)$$

Svipaðar reglur gilda um $Y_{j-1} = 2$ og 3. Þegar fundið hefur verið gildi Y_j , þá er auðvelt að finna Y_{j+1} . Með áframhaldandi útreikningum er hægt að byggja upp tímaröð. Að því gefnu að líkindin úr jöfnu 6 séu þekkt, þá er hægt að ákvarða líkindi á sjaldgæfum atburðum með því að byggja upp nógu langa tímaröð. Velja þarf sex (3×2) P_m gildi, sem samsvara líkindafylkinu $p_{n,m}$.



Mynd 6. Líkindaþéttleikaföll fyrir gos. a) Svæði K, b) Svæði S, c) svæði E.

Tafla 4
Niðurstaða hermunar fyrir 566925 ára keyrslutímabil.

	K	S	E
Fjöldi gosa	9874	948	822
Meðal tímabil, ár	58	599	691
Líklegasta tímabil, ár	35	140	150
Stærsta tímabil, ár	539	5949	12143
Meðaltími milli gosa í öskjunni	49		

5.5 Breytistærðir hermunarinnar

Helstu breytistærðir voru valdar í samræmi við gögn um gossögu úr töflu 1. Þær eru settar fram í töflu 2 hér að neðan. Einungis 10 gos frá síðustu 500 árum eru notuð við útreikninga gildanna í töflu 2 þar sem önnur gögn eru óáreiðanlegri. Núverandi goshlé er gefið hálf vægi miðað við önnur gos.

Velja verður Markov-fylkið (jafna 2). Farin er sú leið að gera ráð fyrir að gosagan úr töflu 1 hafi mikil líkindi (sé dæmigerð fyrir eldstöðina). Þó nokkrar keyrslur og aðlaganir í kjölfar þeirra voru gerðar. Hér er notað það fylki (tafla 3) sem best hermdi gossöguna. Á mynd 6 (a-c) eru sýndar þrjár samskonar keyrslur með stuðlunum úr töflu 3. Niðurstöður eru þær sömu í öllum tilvikum sem sýnir að hermunartíminn (~570 þúsund ár) er nægilega langur. Einnig voru gerðar keyrslur með lægri gostíðni fyrir S og E. Sýndu þær að einkenni líkindaþéttleikans fyrir hvert svæði haldast svipuð og sýnt er á mynd 6.

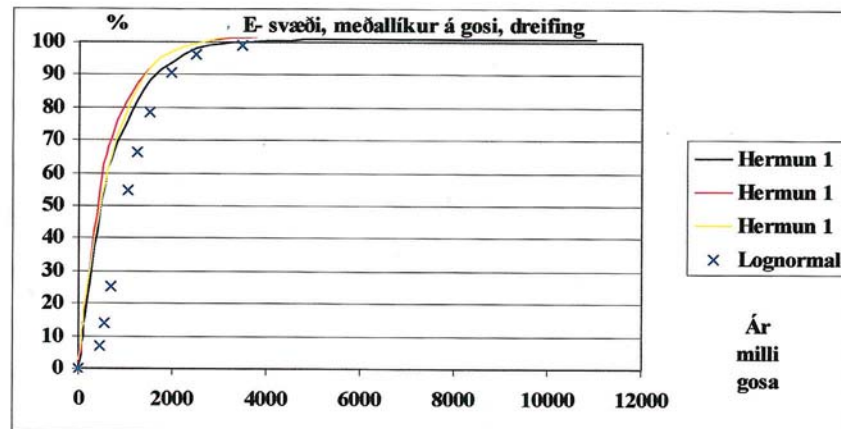
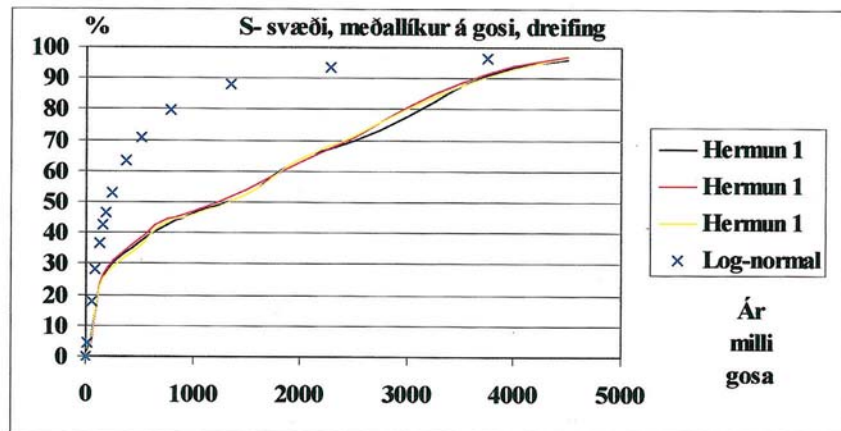
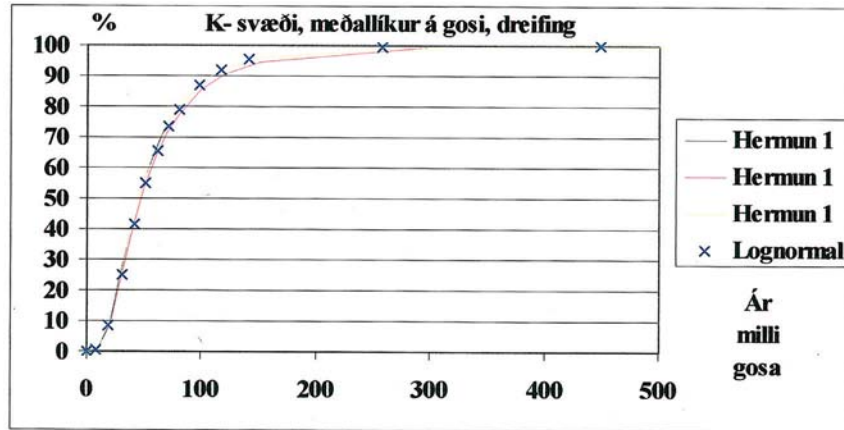
6. Niðurstöður hermunar

Hermunin var gerð með Monte-Carlo aðferð í töflureikni fyrir ~570.000 ára tímabil. Niðurstaðan (tafla 4) sýnir meðaltal lengdar goshlés á hverju svæði. Taka þarf fram að hermunartímabilið er

miklu lengra en sá tími sem reikna má með að eldstöðin hafi fylgt ofangreindu hegðunarmynstri. Lengd hermunartímabilsins snýst eingöngu um að fá tölfræðilega marktækar niðurstöður sem eiga við núverandi hegðunarmynstur. Niðurstöðurnar gefa því vísbendingar um líkindi á gosi í nánustu framtíð. Þær lýsa hvorki hegðun eldstöðvarinnar fyrir tugþúsundum ára né hafa þær forspárgildi um hegðun hennar í fjarlægri framtíð.

Meðal tímabil milli gosa eru í góðu samræmi við væntingar. Líklegustu goshlé eru furðu stutt og lengstu goshlé nokkuð löng. Lengstu tímabilin hafa hins vegar ekki mikla tölfræðilega þýðingu. Þau gefa til kynna að dreifni milli gostímabila sé óáreiðanleg fyrir lengstu goshlé, en sýna þó að mjög löng goshlé eru möguleg án þess að þau þurfi að þýða að eldstöðin hafi breytt um hegðun. Líkindaþéttleiki (probability density functions), er settur fram á myndum 6a – 6c. Rétt er að vekja athygli á líkindaþéttleika fyrir E-svæði. Hámarks þéttleikinn flöktir mikið, sem gerir að verkum að erfitt er að ákvarða líklegasta bil milli gosa á þessu svæði.

Líkindaþéttleiki fyrir K-svæðið hefur alla þá eiginleika sem við var búist. Líklegasta goshlé er nokkuð styttra en meðal goshlé, og löng goshlé eru sjaldgæf. Líkindaþéttleiki S-svæðis er marktækt frábrugðið líkindaþéttleika K-svæðisins. Þó



Mynd 7. Líkindadreifingar fyrir tímabil milli gosa borin saman við log-normal dreifingu.
a) Svæði K, b) Svæði S, c) svæði E.

svo meðalgoshlé sé miklu lengra er líklegasta goshlé svipað og fyrir K-svæðið. Þetta þýðir að ef gos verður á svæði S þá er líklegt að á eftir fylgi annað gos á því svæði. Þessi einkenni eru enn meira áberandi í líkindaþéttleika E-svæðis. Af þessu má draga sömu ályktun og fyrir S-svæði, það er frekar líklegt að á eftir gosi á svæði E, fylgi annað gos á sama svæði.

Á mynd 7 (a)-(c) eru sýndar líkinda-dreifingar fyrir hermunina á svæðum K, S og E og þær bornar saman við log-normal dreifingu. Ef líkan (a) í 5.1 (að gos verði á hverju svæði óháð hinum) ætti betur við en líkan (b) (að öll askjan sé eitt svæði) má gera ráð fyrir að dreifing fyrir hvert svæði hefði líkindadreifingu sem líktist log-normal. Í K og E fellur dreifingin úr hermuninni vel að log-normal en er mjög frábrugðin fyrir S. Þetta fellur betur að líkani (b) og skýrist af þeirri hegðun að gos hafi tilhneigingu til að koma nokkur saman í klasa á svæði S en síðan komi löng hlé meðan virknin er að mestu á K-svæðinu.

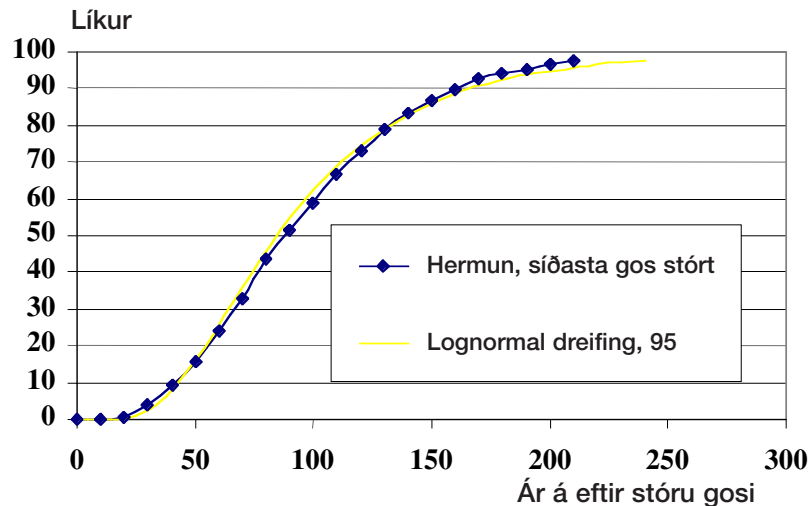
7. Umræða

Fylgnin milli lengdar goshlés og stærðar gossins á undan (mynd 3) er ekki mikil, en hún gefur til kynna að á eftir stóru gosi komi langt goshlé. Engin áberandi fylgni er á milli stærðar goss og lengdar tímabils frá síðasta gosi. Ekki er að fullu ljóst hvernig eigi að skýra hegðun af þessu tagi. Ef gert er ráð fyrir að kvika í Kötlugosum komi úr grunnstæðu kviku-hólfi í norðausturhluta öskjunnar (Ólafur Guðmundsson o.fl., 1994), gæti fylgnin gefið til kynna að umfang goss sé frekar háð hversu vel kvikuhólfið opnast í upphafi frekar en að skýringa í stærð gosa sé að leita í mismunandi háum þrýsingi í kvikuhólfinu þegar gos hefst. Ef þessi

tilgáta er rétt verður mikið gos þegar greið leið opnast fyrir kviku úr hólfinu en minna gos þegar leiðin til yfirborðs er torsóttari. Þegar lítið magn af kviku losnar úr hólfinu nær hólfið fyrr upp þrýstingi á ný og goshlé verður stutt. Þetta eru ennþá getgátur. Hins vegar, ef sú fylgni sem komið hefur í ljós er raunveruleg, er ekki hægt að draga neinar ályktanir um umfang næsta Kötlugos á grundvelli langs tímabils frá gosinu 1918.

Líftími margra eldfjalla skiptist í nokkur tímabil með nokkuð reglubundinni virkni. Við slíkar aðstæður er framleiðsluhraði svipaður yfir löng tímabil og gostíðni er vel skilgreind. Að auki koma tímabil þegar gos verða í einum hluta eldfjalls meðan aðrir hlutar þess liggja í dvala. Virkni getur fæst af einum hluta eldfjallsins yfir á annan. Það eru vísbendingar í gossögu Kötlu (tafla 1) um að svæði S hafi farið í gegnum slíkt skeið á áttundu til tíundu öld. Líkindaþéttleikana úr Markov hermuninni (mynd 6) er hægt að skilja út frá slíkum tilflutningi gosvirkni milli svæða. Þetta gefur til kynna að þegar virkni flyst frá svæði K yfir til svæðis S eða E, þá eru mun meiri líkur á þyrpingu gosa á svæðum S eða E.

Rétt er að hafa þessa tilhneigingu til færslu gosvirkni milli svæða í huga við mat á hættu vegna jökulhlaupa. Ekki hafa komið fram beinar jarðeðlisfræðilegar vísbendingar um að virkni sé að færast frá K-svæði til S- eða E-svæða en það útilokar þó ekki gos þar í náinnni framtíð. Á hinn bóginn, ef gos verður annaðhvort á svæði S eða E og veldur jökulhlaupi annað hvort í Jökulsá á Sólheimasandi eða í Markarfljóti, eru auknar líkur fyrir því að næsta jökulhlaup fari í sama farveg. Eðlilegt er að taka þennan möguleika á goshrinu á svæðum S eða E með í reikninginn þegar landnotkun er



Mynd 8. Hermun á lengd tímabila milli gosa í kjölfar stórra gosa í samanburði við log-normal dreifingu.

skipulögð á láglendinu vestan og sunnan Mýrdalsjökuls.

Gosin eru ekki óháðir atburðir, heldur hafa skyldleika eins og fram kemur í Markov-fylkinu. Hér tökum við líkindi nálægt því meðaltali sem notað var í keyrslunum þremur (sjá töflu 3) og reiknum líkindi fyrir næsta gosi. Þar sem síðasta gos var á svæði K, þá ættu líkindi að vera 89% fyrir öðru gosi þar, 4% fyrir gosi á svæði S, og 7% fyrir gosi á svæði E. Í ljósi ófullkominnar gossögu fyrir svæði S og E verður þó að telja að ekki sé marktækur munur á líkindum gosa á þessum tveimur svæðum.

Mynd 3 sýnir að það er tilhneiging fyrir löngum tímabilum í kjölfar stórra gosa. Gosið 1918 var nokkuð stórt svo að goshlé ætti að vera í lengra lagi eins og mynd 3 bendir til. Meðal goshlé í kjölfar stórra gosa í töflu 1 er 95 ár. Fylgnilína á mynd 3 bendir til að 150 ár sé væntanlegt goshlé eftir stór gos en stórgosið í Eldgjá 934 hefur þarna veruleg áhrif. Sé þetta stórgos ekki tekið með í reikninginn fæst meðalgoshlé 73 ár í

stað 95. Því er ljóst að langt goshlé í kjölfar stærri gosa byggist á tímaröðinni í heild, Eldgjárgosið hefur áhrif en er ekki afgerandi.

Til að reikna líkindi á næsta gosi eftir stórt gos (eins og 1918), var eftirfarandi jafna notuð:

$$Y = m_y + r_{xy} (X - m_x) s_y/s_x + \sqrt{(1 - r_{xy}^2)} s_y \eta(0,1) \quad (7)$$

Y stærð goss

X lengd goshlés

m_y meðalgildi stærðarákvörðunar (lítill = 1, miðlungs = 2, stór = 3)

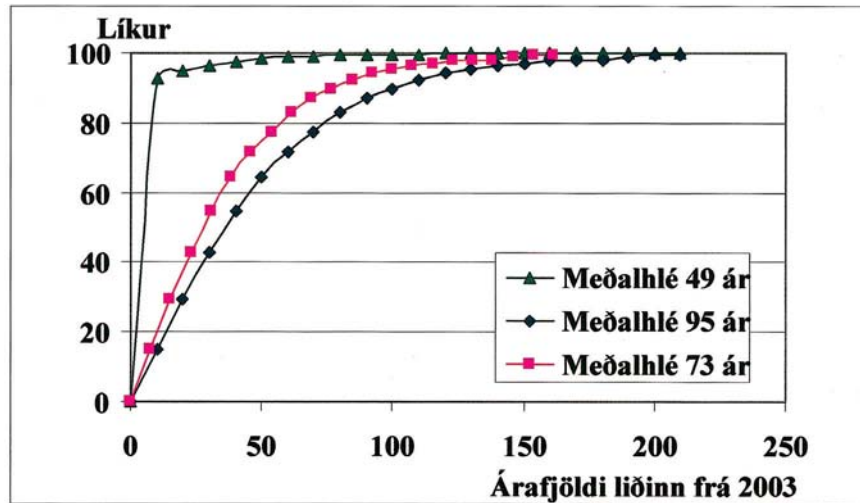
r_{xy} fylgni milli umfangs goss og lengd tímabils (0,6 – sjá mynd 3)

m_x meðal tímabil notað við hermun

s_y/s_x staðalfrávik

$\eta(0,1)$ Normaldreifð slembibreyta eins og áður

Niðurstöður hermunarinnar fyrir tímabil í kjölfar stórra gosa (meðalgoshlé 95 ár) eru sýndar á mynd 8. Líkindaföllin fylgja nokkurn veginn log-normal dreifingu.



Mynd 9. Líkindi á því að gos muni verða eftir árið 2004 að því gefnu að gosblé er orðið 86 ár. Þrjár ferlar eru sýndir, i) fyrir meðalgosblé 95 ár (mynd 8), ii) fyrir meðalgosblé 78 ár (Eldgjá 934 undanskilin) og iii) þar sem meðaltal óbáð stærð er notað (49 ár).

Á mynd 9 eru reiknaðar líkur á gosi á næstu áratugum (eftir árið 2004). Ferillinn merktur með meðalhlé 95 ár gengur út frá að meðalgosblé eftir stórt gos sé 95 ár, meðalhlé 73 ár að meðalgosblé sé 73 ár og til samanburðar er sýndar líkur ef engin fylgni væri milli goshlés og stærðar goss (meðalhlé 49 ár). Sé meðalgosblé við núverandi aðstæður 95 ár eru 65% líkur á að gos verði í öskjunni innan 50 ára, 50% að það verði innan 37 ára og 15% að það verði innan 10 ára. Sennilegra er að 73 ára gosblé eigi við. Þá fæst að 76% líkur eru á að næsta gos verði innan 50 ára, 50% líkur innan 29 ára og 20% líkindi fyrir gosi innan 10 ára. Ef 49 ára meðalgosblé ætti við væru 93% líkindi á gosi innan 10 ára.

Rétt er að ítreka að ofangreind líkindi taka ekki tillit til þess óróa sem gætt hefur í Kötlun undanfarin ár. Þau eru því lágmarksgildi. Meðan óróa gætir eru raunveruleg líkindi gosa mun hærri en formlegar leiðir til að reikna þau eru ekki fyrir hendi.

8. Samantekt og niðurstöður

- Kötluskjan skiptist í þrjú vatnasvið og gostíðni á þeim er mjög mismunandi. Gossagan sýndi að gos urðu að meðaltali á 49 ára fresti í Kötlusöskjunni á sögulegum tíma. Að teknu tilliti til þess að öðru hvoru stökkvi gossvirknin frá einu svæði til annars, fæst að til lengri tíma litid verða gos á svæði Kötlujökuls (K-svæði) að meðaltali á 58 ára fresti. Meðaltímabil milli gosa á svæði Sólheimajökuls (S-svæði) er talið vera u.þ.b. 600 ár en um 700 ár á svæði Entujökuls (E-svæði).
- Jákvæð fylgni kemur fram milli stærðar Kötlugosa og lengdar goshlés sem á eftir fylgir. Stærð goss virðist hinsvegar ekki tengjast lengd undanfarandi goshlés.
- Ef ekki er tekið tillit til stærðar eldgosa, bendir tölfræðileg úrvinnsla gossögunnar til þess að 85-89% líkindi

séu á að næsta gos verði á svæði K, en 4-8% á hvoru svæða S og E.

- Gert er ráð fyrir að gosvirkni á hverju hinna þriggja svæða sé háð gosvirkni á hinum, enda stjórnast skiptingin í svæði fyrst og fremst af lögun jökulyfirborðsins en ekki jarðfræðilegri eða landfræðilegri skiptingu innan öskjunnar. Tímaraðir gosa voru hermdar með Markov aðferðum. Hermunin spáir því að líklegasta goshlé á svæðum E og S sé stærðargráðu styttra en meðalgoshlé á þessum svæðum. Þetta má skilja þannig að öðru hverju verði hrinur gosa á hverju svæði. Svæði K hvílist því þegar virkni flytur sig tímabundið yfir til S eða E. Vísbendingar eru í gossögunni um slíka goshrinu á svæði Sólheimajökuls á 8.-10. öld.
- Í ljósi þess að Kötlugosið 1918 var stórt, er eðlilegt að núverandi goshlé sé orðið 86 ár. Líklegasta goshlé eftir stórt gos er 95 ár ef Eldgjárgosið 934 er tekið með í reikninginn en 73 ár ef því er sleppt. Líkur á gosi innan 10 ára eru því almennt 15-20% eftir 86 ára goshlé í kjölfar mikils goss. Rétt er að taka fram að sá órói sem verið hefur í fjallinu frá 1999 er ekki tekinn með í reikninginn. Meðan hann varir eru raunverulegar líkur á gosi innan nokkurra ára miklu hærri.
- Þegar skoðað er hvernig ofangreind 20% skiptast á milli hinna þriggja svæða innan Kötlusigdældarinnar eru líkindi fyrir gosi á næstu 10 árum á svæði K 17-18% og 1-2% fyrir hvort hinna svæðanna. Hér er ekki tekið tillit til þess að óróa hefur gætt í Kötlu undanfarin ár. Við núverandi

aðstæður eru líkur á gosi mun meiri en að ofan greinir.

Heimildir

- Bergrún A. Óladóttir. 2004. Eruption history and magmatic evolution at the Katla volcanic system Iceland, during the Holocene. DEA thesis, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand. 79 pp.
- Erik Sturkell, Freysteinn Sigmundsson og Páll Einarsson. 2003a. Recent unrest and magma movements at Eyjafjallajökull and Katla volcanoes, Iceland. *Journal of Geophysical Research* 108 (B8): 2369. doi:10.1029/2001JB000917.
- Erik Sturkell, Páll Einarsson, Freysteinn Sigmundsson, Halldór Geirsson, Halldór Ólafsson, Rósa Ólafsdóttir og Gunnar B. Guðmundsson. 2003b. Þrýstingur vex undir Kötlu. *Náttúrufræðingurinn* 71: 80-86.
- Freysteinn Sigurdsson. 1988. Fold og vötn að Fjallabaki. *Árbók Ferðafélags Íslands*: 181-202.
- Geirfinnur Jónsson og Leó Kristjánsson. 2000. Aeromagnetic measurements over Mýrdalsjökull and vicinity. *Jökull* 49: 47-58.
- Gísli Sveinsson. 1919. Kötlugosið 1918 og afleiðingar þess. Prentsmidjan Gutenberg, Reykjavík. 61 bls.
- Guðrún Larsen. 1978. Gjósökulog í nágrenni Kötlu. 4.-árs ritgerð, Háskóli Íslands. 57 bls.
- Guðrún Larsen. 2000. Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull* 49: 1-28.
- Guðrún Larsen, Kate Smith, Anthony Newton, Óskar Knudsen. 2005. Jökulhlaup til vesturs frá Mýrdalsjökli: Ummerki um forsöguleg hlaup niður Markarfljót. Þetta rit, kafli III.
- Gunnar Orri Gröndal, Guðrún Larsen og Sverrir Elefsen. 2005. Stærðir forsögulegra hamfaraflóða í Markarfljóti – mæling á farvegum neðan Einhyrningsflata. Þetta rit, kafli IV.

- Gunnar Orri Gröndal og Sverrir Elefsen. 2005. Farvegir Markarfljóts í Landeyjum og rennsli jökulhlaupsins 1822. Þetta rit, kafli V.
- Haraldur Sigurdsson. 2000. Encyclopedia of volcanoes. Academic Press, San Diego. 1417 bls.
- Haukur Tómasson. 1996. The Jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology* 22: 249-254.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 2000. Surface and bedrock topography of the Myrdalsjökull ice cap, Iceland. *Jökull* 49: 29-46.
- Henderson, J. M. and Quant, E. R. 1958. *Microeconomic Theory*. McGraw Hill, New York.
- Hreggviður Norðdahl. 2005. Ummerki stórfloða í Vestur-Landeyjum. Þetta rit, kafli VII.
- Hreinn Haraldsson. 1981. The Markarfljót sandur area, southern Iceland: Sedimentological, petrographical and stratigraphical studies. Ph.D. thesis, Uppsala University, Uppsala. 65 bls.
- Ingibjörg Kaldal og Elsa G. Vilmundardóttir. 2002. Jökulmenjar á Emstrum, norðvestan Mýrdalsjökuls. Rannsóknaskýrsla OS-2002/080, Orkustofnun, Reykjavík. 29 bls.
- Magnús T. Guðmundsson. 2003. Melting of ice by magma-ice-water interactions during subglacial eruptions as an indicator of heat transfer in subaqueous eruptions. Í: *Explosive Subaqueous Volcanism*, Geophysical Monograph 140, White, J.D.L., J.L. Smellie and D. Clague (ritstj.). American Geophysical Union, bls. 61-72.
- Magnús T. Guðmundsson. 1994. The structure of Katla, a central volcano in a propagating rift zone, south Iceland from gravity data. *Eos Transactions, AGU*, 75: 335.
- Magnús T. Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Helgi Björnson og Þórdís Högnadóttir. 2004. The 1996 eruption at Gjalp, Vatnajökull ice cap, Iceland: Efficiency of heat transfer, ice deformation and subglacial water pressure. *Bulletin of Volcanology* 66: 46-65.
- Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir. 2005. Ísbráðnun og upptakarennslu jökulhlaupa vegna eldgosa í Eyjafjallajökli og vestanverðum Mýrdalsjökli. Þetta rit, kafli X.
- Ólafur Guðmundsson, Bryndís Brandsdóttir, William Menke og Guðmundur E. Sigvaldason. 1994. The crustal magma chamber of the Katla volcano in south Iceland revealed by 2-D seismic undershooting. *Geophysical Journal International* 119: 277-296.
- Óskar Knudsen og Ólafur Eggertsson. 2005. Jökulhlaupaset við Þverá í Fljótshlíð. Þetta rit, kafli VI.
- Páll Einarsson. 2000. Atburðarás í tengslum við hlaup í Jökulsá á Sólheimasandi í júlí 1999. Jarðfræðafélag Íslands, Febrúaráráðstefna 2000, Reykjavík, bls. 14.
- Páll Einarsson og Bryndís Brandsdóttir. 2000. Earthquakes in the Mýrdalsjökull area, Iceland, 1978-1985: Seasonal correlation and connection with volcanoes. *Jökull* 49: 59-74.
- Páll Einarsson, Heidi Soosalu, Erik Sturkell, Freysteinn Sigmundsson, Halldór Geirsson. 2005. Virkni Kötlueldstöðvarinnar síðan 1999 og hugsanleg þróun atburðarásar. Þetta rit, kafli IX.
- Sigurður Þórarinnsson. 1975. Katla og annáll Kötlugosa. Árbók Ferðafélags Íslands (1975): 125-149.
- Sigurður Þórarinnsson. 1980. Langleiðir gjóskuur þremur Kötlugosum. *Jökull* 30: 65-73.
- Sigurjón Rist. 1990. Vatns er þörf. Menningar-sjóður, Reykjavík, 1990). 248 bls.
- Smith, K.T., Dugmore, A.J., Larsen, G., Vilmundardóttir, E.G. and Haraldsson, H. 2002. New evidence for Holocene Jökulhlaup routes west of Myrdalsjökull. The 25 Nordic Geological Winter Meeting Abstracts volume: 196. Reykjavík.
- Smith, K. 2003. Holocene jökulhlaups, glacier fluctuations and palaeoenvironment, Mýrdalsjökull, South Iceland. Ph.D. Thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, 140 pp.