

Ísbráðnun og upptakarennisli jökulhlaupa vegna eldgosa í Kötluöskju og austanverðum Mýrdalsjökli

Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir

Skýrsla unnin fyrir Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra

**Jarðvísindastofnun Háskólans,
Sturlugötu 7, 101 Reykjavík**

**Febrúar 2006
RH-02-2006**

ÁGRIP

Í skýrslunni er lagt mat á stærðarþrep jökulhlaupa vegna eldgosa sem orðið geta í austan- og norðanverðum Mýrdalsjökli. Er hér rannsakaður sá hluti Mýrdalsjökuls sem ekki var tekinn fyrir í hættumati vegna hlaupa til vesturs og út kom 2005. Beitt er einföldum aðferðum við að reikna bráðnun í gosum undir jöklum þar sem ís er tiltölulega þunnur (<200 m). Þær aðstæður eiga við í hlíðum jökulsins að sunnan og austan. Einnig eru notaðar aðferðir til að meta bráðnun í eldgosum undir þykkum ís (>200 m). Slíkan ís er einkum að finna innan Kötluöskjunnar og í norðurhluta Mýrdalsjökuls. Reynslan sýnir að verulegt magn gjósku berst fram í Kötluhlaupum. Einnig brjóta hlaupin upp sporð Kötlujökuls og flytja fram jakahrannir. Á þetta einkum við um stærri hlaupin. Hér er þetta fasta efni samanlagt talið vera um um fimmtungur af hámarksrennsli hlaupa. Óvissa er mikil í reikningum af þessu tagi. Niðurstöður fást um stærðarþrep hlaupa og eru þau flokkuð með hliðsjón af þeirri takmörkuðu nákvæmni í 6 stærðarflokka. Niðurstöður eru þessar:

1. Gos innan Kötluöskjunnar má gróflega flokka í þrennt: *Lítill gos, meðalgos* og *stór gos*. Gos verða u.þ.b. tvisvar á öld. Ef gos síðustu 1200 ára eru skoðuð virðist um helmingur vera lítill gos, fjórðungur meðalgos og fjórðungur stór gos. Síðustu 500 ár hafa orðið 10 gos: 4 lítill, 2 meðalgos og 4 stór (Jónas Elíasson o.fl., 2005).

(a) *Lítill gos* valda hlaupum af stærð 3 ($Q_{\max} = 10\text{-}30$ þús. m^3/s). Kötluogosið 1860 tilheyrði sennilega þessum flokki.

(b) *Meðalgos* gætu valdið hlaupum af stærð 4 ($Q_{\max} = 30\text{-}100$ þús. m^3/s). Dæmi um hlaup af þessari stærð eru frá 1660 og 1823.

(c) *Stór gos* valda hlaupum af stærð 5 ($Q_{\max} = 100\text{-}300$ þús. m^3/s). Kötluhlaupið 1918 tilheyrir þessum flokki en hámarksrennsli þess hefur verið metið tæplega 300 þús m^3/s . Kvikustreymi í gosi af þessari stærð gæti verið svipað og var í upphafsfasa Heklugossins 1947. Engin trygging er fyrir því að Kötluhlaup verði ekki enn stærri og eins og kann að hafa verið raunin með hlaup Kötlu á 18. öld.

2. Gos undir jökli norðan Kötluöskjunnar. Á þessu svæði er talið að gjósi á 1.000-10.000 ára fresti. Sprungugos á þessu svæði gæti valdið hlaupum af stærð 4 til 5 ($Q_{\max} = 30\text{-}120$ þús. m^3/s). Gos á vesturhluta svæðisins ylli hlaupi sem félli til vesturs í Markarfljót en gos austar myndu orsaka hlaup niður til Hólmsár.

3. Gos í hlíðum Mýrdalsjökuls að austan gætu valdið hlaupum af stærð 2-4 ($Q_{\max} = 9\text{-}45$ þús. m^3/s). Gos á þessu svæði verða á 1.000-10.000 ára fresti og valda hlaupum fram á Mýrdalssand.

4. Gos í suðurhlíðum Mýrdalsjökuls austan Sólheimajökuls yllu fremur litlum hlaupum (stærð 1-2, $Q_{\max} = 1\text{-}3$ þús. m^3/s). Ef slíkt gos yrði félli hlaup fram gil í Mýrdalnum. Líkur á atburðum af þessu tagi eru litlar.

5. Stórgos á sprungu sem næði frá jökulrönd að norðan og suður fyrir miðja Kötluöskjuna. Þessi gerð gosa eru mestu hamfarir sem einhverjar líkur eru á að verði á Kötluöskjunni og hafa endurkomutíma sem er skemmri en 10.000 ár. Gosið í Eldgjá 934 og hugsanlega það hlaup sem því fylgdi var í þessu stærðarþrepi. Í ljós kemur að stórgos á 20 km langri sprungu gæti valdið hlaupi af stærð 6 ($Q_{\max} = 300$ þús. – 1 millj. m^3/s). Slíkur atburður yrði mun stærri en stærstu Kötluhlaup á seinni öldum. Hlaupið kæmi fram á Mælifellssand, undan Öldufellsjökli, Sandfellsjökulum og Kötlujökli.

Af ofangreindum atburðum eru hlaup vegna hefðbundinna Kötlugosa sem falla fram á Mýrdalssand lang algengust. Allir aðrir atburðir sem að ofan eru taldir verða sjaldnar en á 1000 ára fresti.

Efnisyfirlit

1	Inngangur	5
2	Jarðfræðilegar aðstæður og endurkomutími eldgosa	6
3	Jökulhlaup og stærðarflokkun þeirra	10
4	Reynsla frá fyrri eldgosum í jöklum	10
5	Ísbráðnun í eldgosum	13
5.1	Bráðnun í gosum undir þykkum ís	13
5.2	Bráðnun í gosum þar sem íspykkt er undir 200 m	15
6	Niðurstöður	16
6.1	Gos innan Kötluöskjunnar	16
6.2	Stórgos á sprungu frá Kötluöskju til norðausturs að jökuljaðri vestan Öldufells	17
6.3	Sprungugos norðan Kötluöskjunnar	19
6.4	Gos í hlíðum Mýrdalsjökuls að sunnan og austan	20
6.4.1	Austurhlíðar Mýrdalsjökuls	22
6.4.2	Suðurhlíðar Mýrdalsjökuls, austan Sólheimajökuls	22
7	Viðbragðstími	22
8	Samantekt	22
	Viðauki: Aðferðir við mat á ísbráðnun	26
A	Varmastraumur og nýtni	26
B	Líkön af bráðnunarhraða í gosum undir þunnum ís	28
C	Bráðnunarhraði undir þykkum ís	29
D	Flutningur fastra gosefna með bræðsluvatni	30
D.1	Hlaup úr bröttum hlíðum	31
D.2	Hlaup undan þykkum jökli	31
	Heimildir	32

1. Inngangur

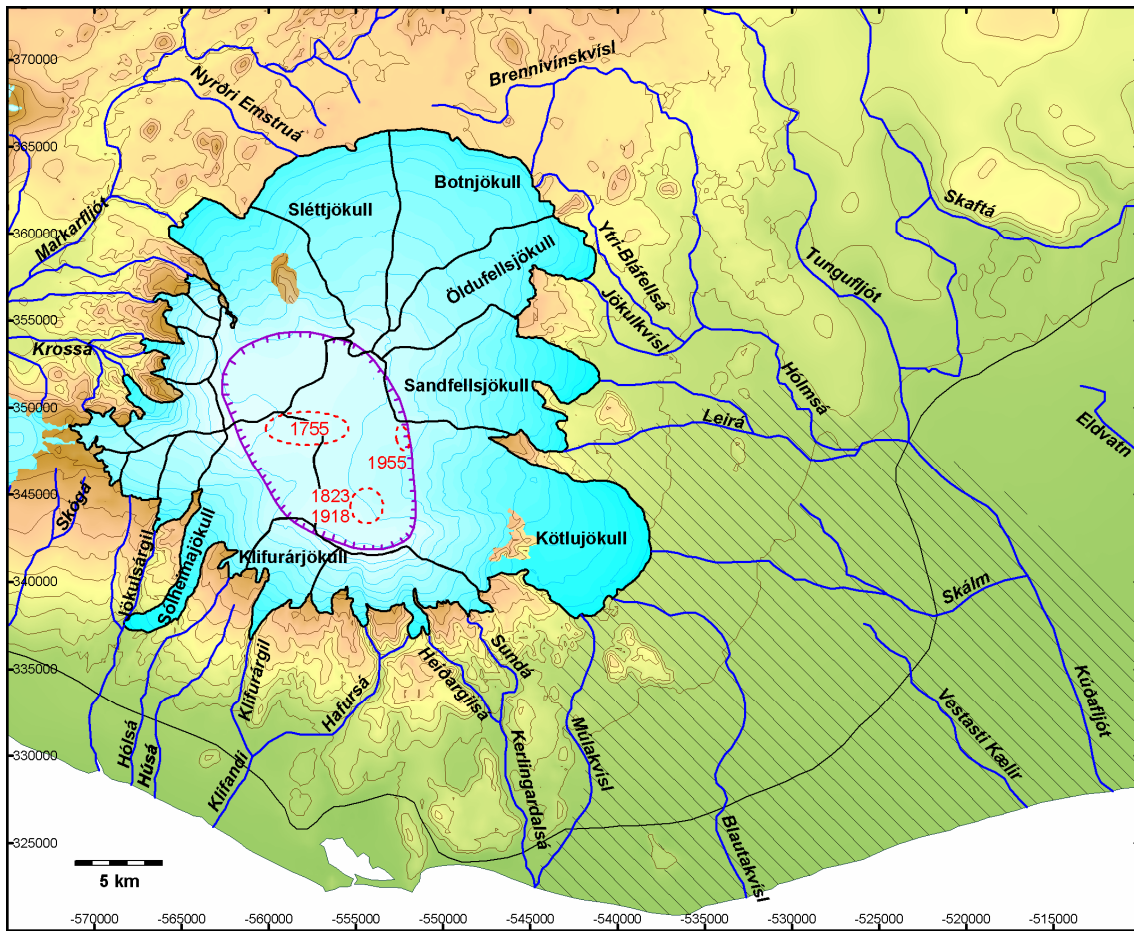
Í skýrslunni er fjallað um ísbráðnun í eldgosum sem líkur eru á að geti orðið í austurhluta Mýrdalsjökuls og gróft mat lagt á rennsli jökulhlaupa samfara gosum. Efnistöð eru svipuð og í 10. kafla hættumats vegna hlaupa til vesturs frá Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005). Hér er þó lögð meiri vinna í að skilgeina tengsl gosstærðar og hámarksrennslis jökulhlaupa þegar þykkur ís liggur yfir gosstað (ísþykkt >200-300 m). Þær aðstæður eiga við um gos í Kötluöskjunni og norðurhluta jökulsins. Öll gos Kötlu síðustu 1000 árin urðu innan öskjunnar og falla þau í þennan flokk. Mjög er stuðst við rannsóknina fyrir vesturhlutann í þessari skýrslu og vísað til hennar um fræðilegan bakgrunn þar sem það á við. Aðferðir sem þar voru settar fram um mat á ísbráðnun í eldgosum undir þunnum jökli (minni en 200 m) eru notaðar hér fyrir suður- og austurhlíðar jökulsins.

Á svæðum þar sem jökulhlaup geta orðið, ræðst hætta vegna þeirra einkum af tvennu. Annarsvegar af hámarksrennsli hlaups og hinsvegar því hve langur viðvörunartími gefst. Því er reynt að meta á bráðnunarhraða (m^3/s) íss í eldgosi þegar hann er hámarki. Það gerist yfirleitt á 1-10 klst. löngu tímabili meðan kraftur þess er mestur, áður en gosið hefur náð sér að fullu gegnum jökulísinn (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005). Ræðst lengd þessa tímabils m.a. af ísþykkt á gosstað og ákafa gossins. Gert er ráð fyrir að sterkt samband sé milli bráðnunarhraða í eldgosi og rennslis jökulhlaups. Stuðst er við reynslu af eldgosum í Vatnajökli, Kötlugosið 1918 og gos í eldkeilum í Norður-Ameríku. Sett er fram mat á líklegum bráðnunarhraða og rennsli jökulhlaupa fyrir eftirtalin tilvik:

1. Þrjár mismunandi stærðir gosa innan Kötluöskjunnar.
2. Stórgos á sprungu sem nær innan úr Kötluöskjunni og norður að jökulrönd nærri Öldufelli (hliðstætt Eldgjárgosinu 934).
3. Basísk sprungugos norðan við Kötluöskjuna.
4. Basísk sprungugos í austur- og suðurhlíðum Mýrdalsjökuls.

Engin leið er að meta öll hugsanleg tilvik. En til að fá sem gleggsta mynd af þeim atburðum sem geta átt sér stað og nokkrar líkur eru á að verði í fyrirsjáanlegri framtíð, er gert ráð fyrir “líklegu versta tilfelli”. Hér er ekki átt við að líkur á slíku gosi þurfi að vera miklar á þeim stöðum sem kannaðir eru, heldur er reynt að meta hversu hröð ísbráðnun geti orðið í allstóru eldgosi á hverju ísasvæði.

Ekki er sérstaklega metin ísbráðnun fyrir súr gos, en allmörg slík urðu á forsögulegum tíma (Guðrún Larsen, 2000). Ef frá er talið stórgos í lok ísaldar (Lacasse o.fl., 1995) virðist ekkert þessara súra gosa hafa verið sérlega stórt. Því má reikna með að ísbráðnun í þessum gosum hafi verið svipuð eða minni en í þeim atburðum sem hér eru kannaðir.

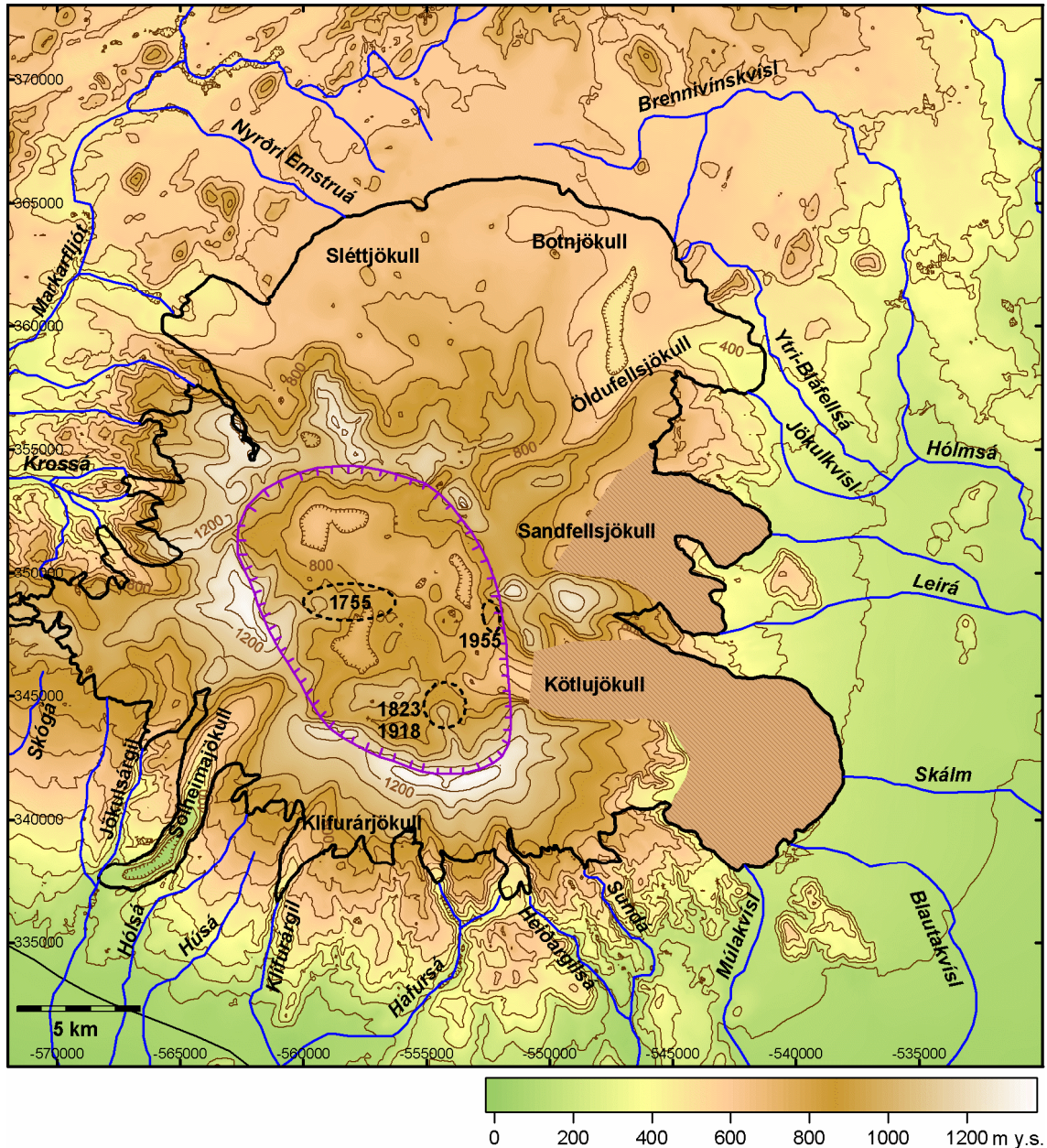


1. mynd. Rannsóknarsvæðið. Sýnd eru helstu vatnaskil í Mýrdalsjökli og jaðar Kötluöskjunnar (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Skástrikaða svæðið austan jökulsins sýnir áhrifasvæði Kötluhlaupa sem falla til austurs.

2. Jarðfræðilegar aðstæður og endurkomutími eldgosa

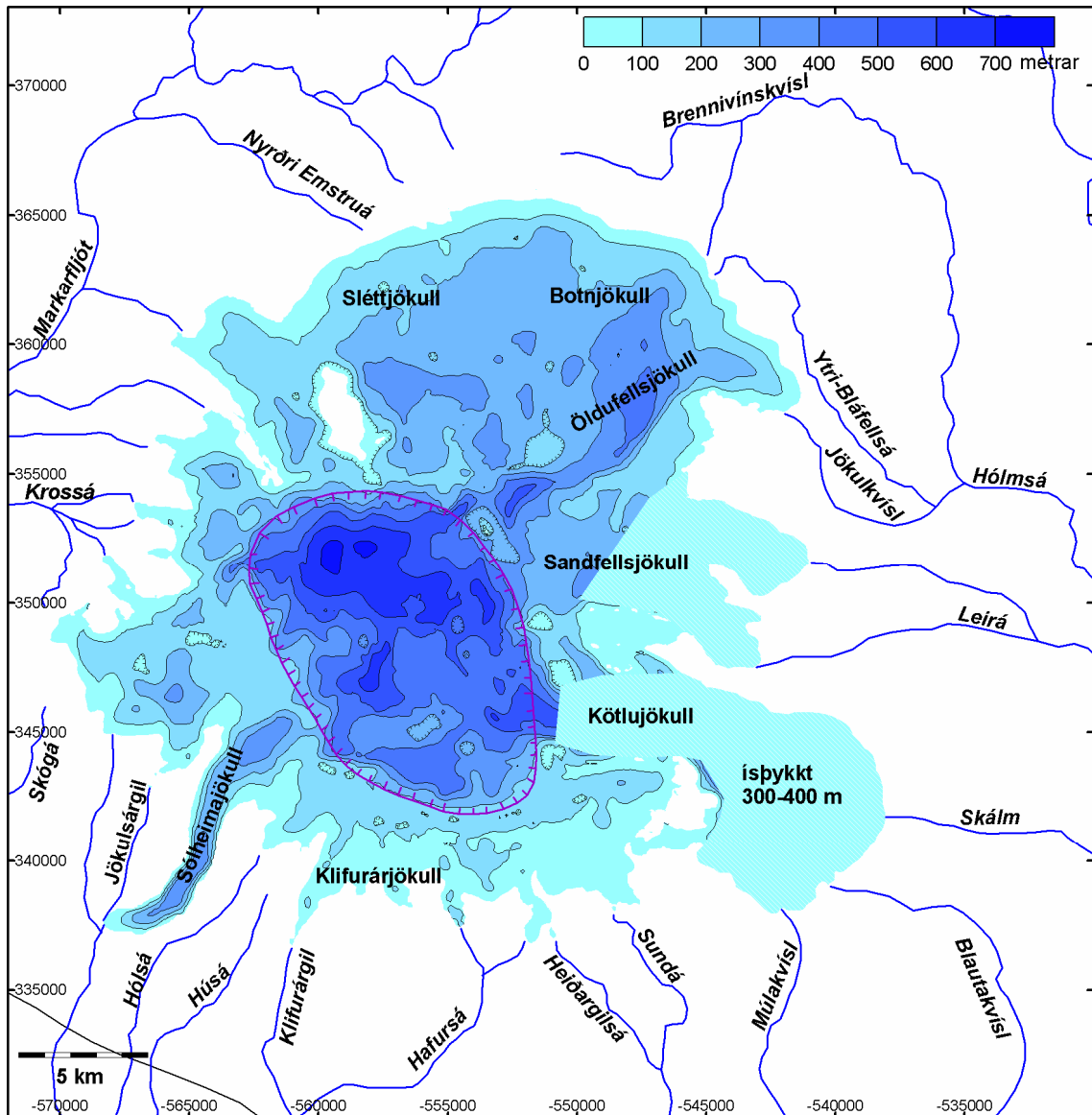
Kötlueldstöðin hefur hlaðið upp dyngjumynduðu fjallendi, um 30 km í þvermál og er Kötluaskjan í miðju þess (1. mynd). Mýrdalsjökull hylur efri hluta eldstöðvarinnar og fyllir öskjuna upp á barma. Askjan er um 100 km² að stærð og liggur botn hennar víða í 700-1000 m hæð yfir sjó (Helgi Björnsson o.fl., 2000) meðan yfirborð jökulsins er 1200-1500 m y.s. Neðri hluti eldstöðvarinnar er að langmestu leyti úr basalti en jökulsker í jöðrum öskjunnar og nokkrar myndanir utan hennar eru úr rýólíti. Þrjár gerðir eldgosa hafa orðið á Kötlukerfinu á nútíma (Guðrún Larsen, 2000):

- basísk sprengigos á sprungum undir jökli. Langflest þessara gosa hafa orðið innan Kötluöskjunnar. Öll söguleg gos tilheyra þessum flokki.
- Súr sprengigos sem flest hófust sem gos undir jökli. Um 20 gos eru þekkt á nútíma en ekkert gos af þessari gerð hefur orðið á sögulegum tíma.
- Stór basísk sprungugos bæði innan Kötluöskjunnar og utan hennar. Eldgjárgosið 934 var af þessari gerð. Það er talið stærsta eldgos Íslandssögunnar en í því komu upp um 19 km³ af gosefnum. Vitað er um tvö gos af þessu tagi á nútíma (síðustu 10.000 ár).



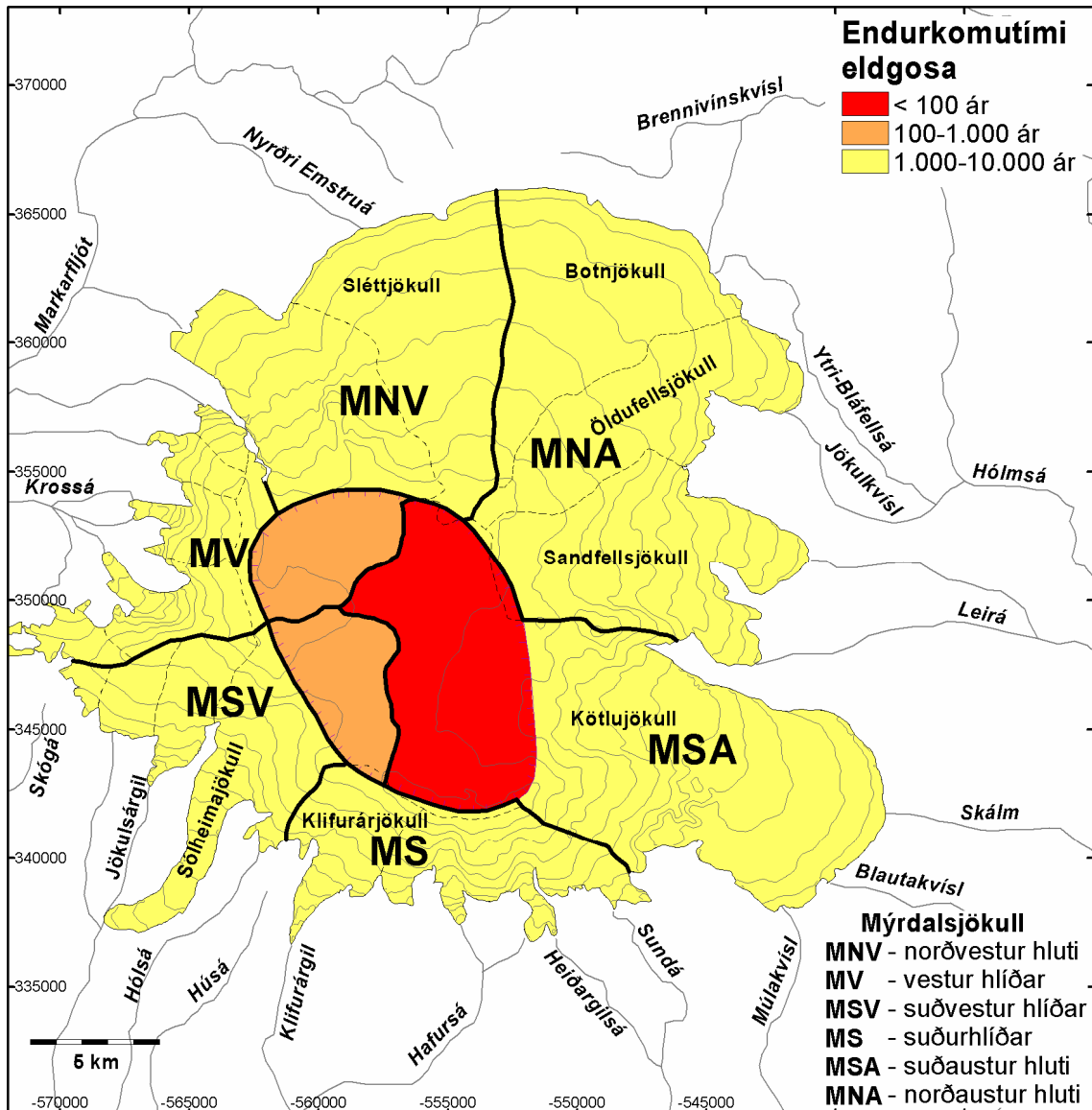
2. mynd. Botn Mýrdalsjökuls samkvæmt íssjármælingum (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Ekki eru til fullgerð kort af Kötlujökli og mælingar vantar að mestu í Sandfellsjökulum.

Kort af yfirborði og botni (1. og 2. mynd) eru grundvallargögn við rannsóknir á hegðun eldgosa undir jökli. Botn Mýrdalsjökuls var kortlagður með íssjá 1991 (Helgi Björnsson o.fl., 2000) og viðbótarmælingar hafa farið fram á Kötlujökli og víðar (Finnur Pálsson o.fl., 2005). Mælingarnar sýna að innan Kötluoðskjunnar er jökullinn 400-700 m þykkur víðast hvar (3. mynd). Á norðurhluta jökulsins, Sléttjökli, Botnjökli og ísasvæði Öldufellsjökuls er einnig nokkuð þykkur ís, 200-400 m. Á svæði Sandfellsjökla hefur lítið verið mælt. Hinsvegar er jökullinn þar brattur og þykkt því takmörkuð, víðast undir 200 m. Í Kötlujökli er ísinn 300-400 m þykkur neðan til (Finnur Pálsson o.fl., 2005).



3. mynd. Ísþykkt í Mýrdalsjökli. Notað er nýtt yfirborðskort byggt á flugradarmælingum vorið 2005 og botnkort Helga Björnssonar o.fl. (2000). Breytingar í ísþykkt innan Kötluöskjunnar hafa verið sáralitlar á síðustu árum, en jökulsporðar hafa hropað.

Til að fá nákvæma mynd af Mýrdalsjökli nú var yfirborð hans kannað með flughæðarradar og GPS úr flugvél Flugmálastjórnar í maí 2005. Mæld voru allmörg hæðarsnið og með samanburði við kort sem unnið var 1999 af Loftmyndum ehf. og Raunvísindastofnun Háskólans var hægt að meta þær breytingar sem orðið hafa á síðastliðnum 6 árum. Nýtt yfirborðskort (1. mynd) var teiknað á grundvelli mælinganna. Breytingar á þessu tímabili eru einkum hop og þynning jökulsporða. Hinsvegar hafa litlar sem engar breytingar á ísþykkt orðið á jöklinum ofan 1100-1200 m hæðar.



4. mynd. Endurkomutími eldgosa í Mýrdalsjökli.

Kötluskjan skiptist í þrjú vatnasvið sem kennd eru við skriðjöklana sem flæða út úr henni (1. mynd): Entujökull (23 km²), Sólheimajökull (19 km²) og Kötlujökull (60 km²) (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Síðustu þúsund ár hafa svo til öll gos í öskjunni orðið í austurhluta hennar, á vatnasviði Kötlujökuls. Jökullinn milli Entujökuls í vestri og Sandfellsjökuls í austri skiptist í þrjú vatnasvið: Til Markarfljóts fer vatn af Sléttjökli (Nyrðri Emstruá), en í austur til Hólmsár frá vatnasviðum Botnjökuls og Öldufellsjökuls.

Á 4. mynd er sett fram yfirlit um endurkomutíma eldgosa á mismunandi svæðum í Mýrdalsjökli. Að mestu er byggt á yfirliti um hættumat fyrir vestursvæðið (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2005) en að auki er endurkomutími skilgreindur fyrir hlíðarnar utan Kötluöskjunnar að sunnan, austan og norðan. Meðalgoshlé í Kötlu undanfarin 1200 ár er um 50 ár (Jónas Eliasson o.fl., 2006). Eldgos eru lang tíðust í austurhluta Kötluöskjunnar en á síðustu 1200 árum hafa þau orðið þar á tæplega 60 ára fresti. Á vatnasviðum Sólheimajökuls

og Entujökuls er endurkomutíminn 500-800 ár (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2005). Annarstaðar eru goshlé að jafnaði lengri og er talið að 1.000-10.000 ár líði milli milli gosa í hlíðum jökulsins og á svæðinu norðan öskjunnar.

3. Jökulhlaup og stærðarflokkun þeirra

Í yfirliti um hættumat vegna hlaupa til vesturs (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2005) voru skilgreindir fimm stærðarflokkar jökulhlaupa. Sá stærsti (flokkur 5) náði til hlaupa stærri en 100.000 m³/s. Vegna óvissunnar í matinu þykir eðlilegast að nota grófa stærðarflokkun af þessu tagi. Flokkunin byggist á hinum útreiknuðu rennslistölum sem augljóslega eru háðar forsendum reikninganna. Hafa þarf í huga að óvissa í mati á hámarksrennsli fyrir stóran atburð á hverju vatnasviði er álika stór og hið útreiknaða rennsli. Hér er skynsamlegt að búa til flokk 6, en í honum lenda atburðir þar sem útreiknað rennsli verður meira en 300.000 m³/s (1. tafla).

1. tafla. Flokkun jökulhlaupa

Stærð	Hámarksrennsli - Q (m ³ /s)
1	1.000-3.000
2	3.000-10.000
3	10.000-30.000
4	30.000-100.000
5	100.000-300.000
6	> 300.000

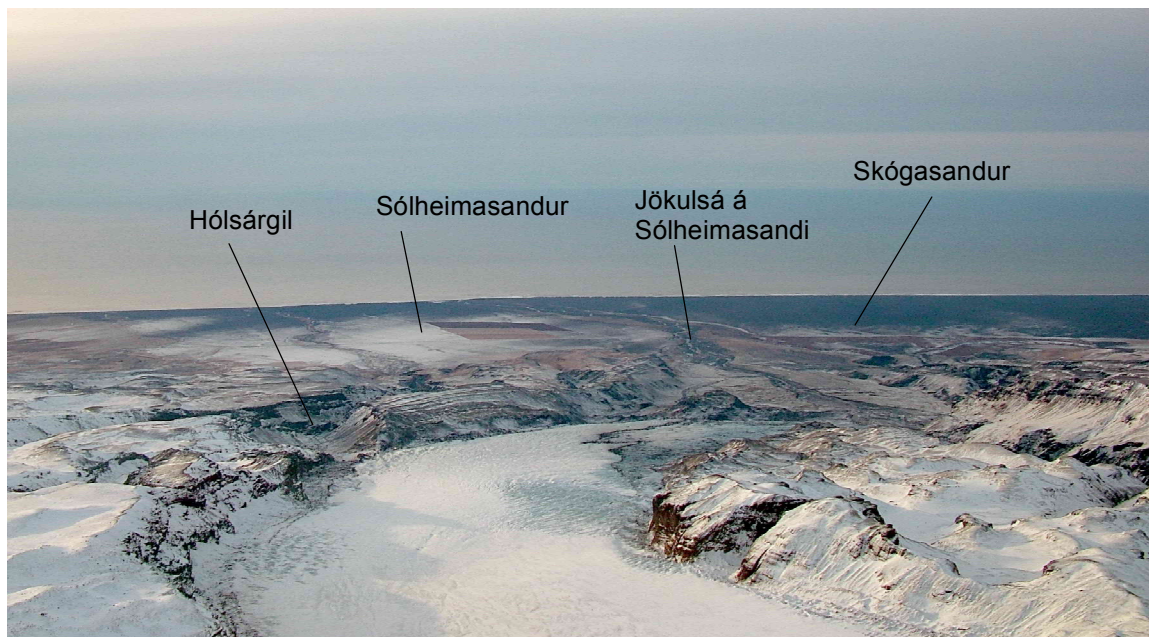
Þegar mikill vatnsflaumur leitar með botni í átt að jökuljaðri niður skriðjökla vex vatnsþrýstingur undir skriðjökluum. Við þessar aðstæður getur hluti vatnsins brotist upp á yfirborð, einkum með jöðrum skriðjökuls þar sem hann skriður niður dali. Vatnið mætir minni mótstöðu eftir að það kemst upp á yfirborð jökulsins, rennur því hraðar fram og getur náð jökuljaðri töluvert á undan þeim flaum sem berst alla leið að jaðri með botni. Í Kötluhlaupinu 1918 rann vatn ofan á Kötlujökli meðfram jaðri hans bæði að sunnan og norðan. Það vatn kom annarsvegar

fram Remundargil og hinsvegar í Krika norðan Kötlujökuls (Haukur Tómasson, 1996; Guðrún Larsen, 2000). Ef stórhlaup leitaði framrásar niður Sólheimajökul má búast við að jafnvel meirihluti hlaups kæmi fram á þennan hátt, því jökullinn er mun minni en Kötlujökull. Á 5. og 6. mynd eru aðstæður við Sólheimajökul sýndar. Kötlujökull sést á 7. mynd og aðstæður við suðurjaðar hans, þar sem meginhlaupið kom fram 1918, sjást á 8. mynd. Jökullinn hefur hoptað töluvert síðan 1918.

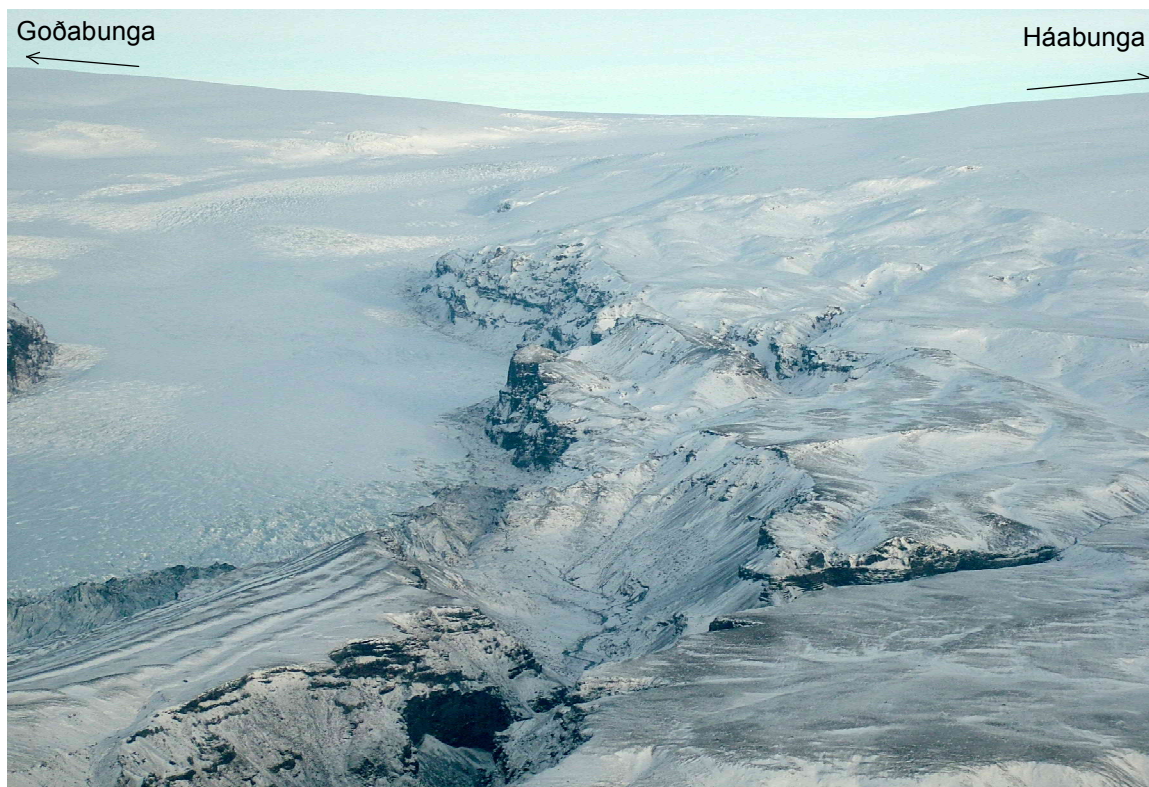
4. Reynsla frá fyrri eldgosum í jöklum

Sé tekið tillit til ísþykktar, gerðar gosefna og legu gosstöðva í eldfjöllum er hentugt að skipta gosum þar sem ís kemur við sögu í fjóra flokka (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005):

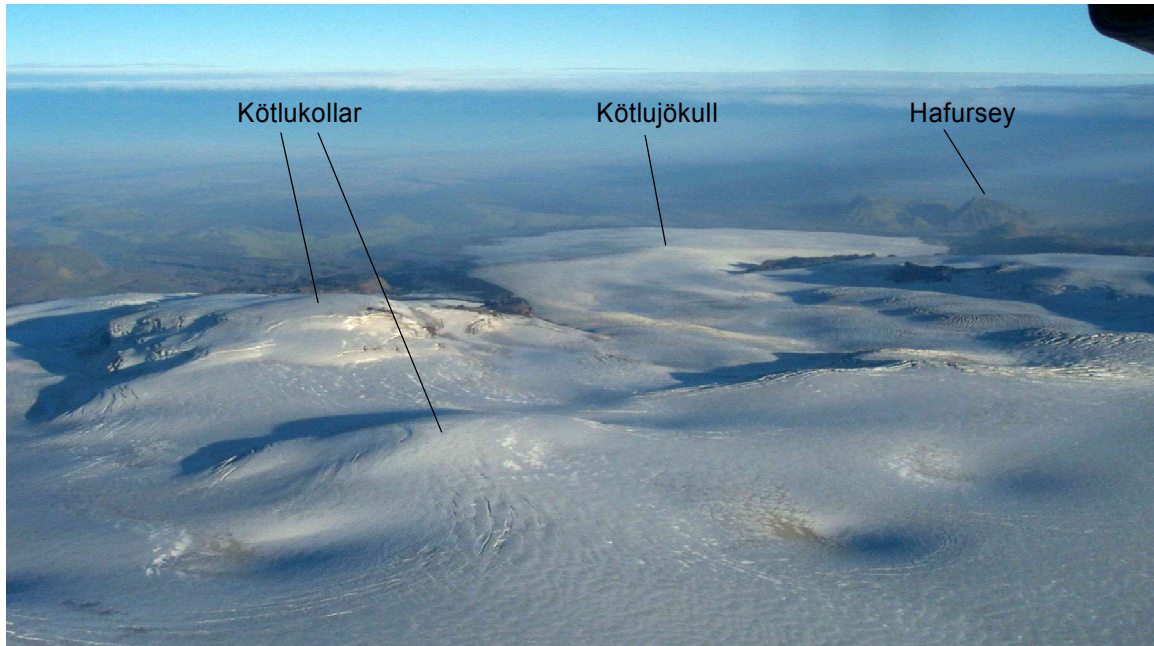
- Gos undir þykkum jökli. Gosefni geta eftir atvikum verið basísk, ísúr eða súr. Í gosum 20. aldar kom upp basalt eða basalt-andesít. Gjálpargosið 1996 og öll gos Kötlu síðustu 1000 ár falla í þennan flokk.
- Gos undir þunnum jökli (basísk, ísúr eða súr). Þau gos sem beinar athuganir ná yfir hafa verið basísk sprungugos, t.d. Grímsvatnagosin 1998 og 2004 og eldgos á Deception eyju við Suðurskautslandið 1969.
- Gos í bröttum eldkeilum með ís í hlíðum (t.d. St. Helens í Bandaríkjunum 1980-1986, Nevado de Ruiz í Kólumbíu 1985 og Redoubt í Alaska 1989-1990). Hér á landi gæti Heklugosið 1947 og gosin í Eyjafjallajökli og Öræfajökli talist til þessa flokks. Gosefni eru oft ísúr eða súr.



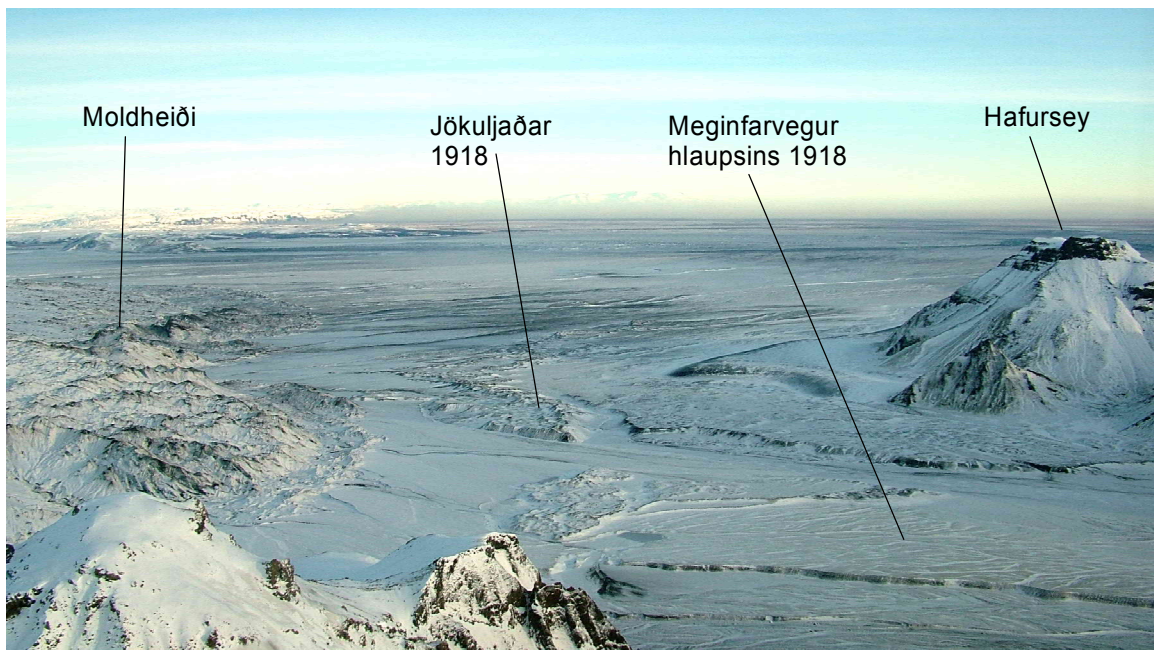
5. mynd. Horft niður Sólheimajökul 12. nóvember 2005. Stórhlaup rynnu að einhverju leyti ofan á jöklinum og hluti hlaups myndi þá falla niður Hólsárgil.



6. mynd. Upptök Hólsárgils í Sólheimajökli.



7. mynd. Horft niður Kötlujökul 19. september 2000. Sigkatlar (nr. 10, 11 og 12) og Kötlukollar nær.



8. mynd. Suðurjaðar Kötlujökuls 12. nóvember 2005. Jökuljaðarinn liggur nú mun innar en var 1918 og víðáttumiklir sléttir aurar eru nú sunnan Moldheiðar.

- d. Myndun gúls er eitt afbrigði ísúrra og súrra gosa. Slík gos eru algeng í eldfjöllum víða erlendis, t.d. hófst eitt slíkt í Mount St. Helens í Bandaríkjunum í október 2004. Þó svo að hér á landi séu basísk sprungugos ráðandi er gúla að finna í mörgum íslenskum megineldstöðvum. Dæmi eru t.d. Hlíðarfjall við Mývatn og líklega Gvendarfell og Kötlukskollur í hlíðum Mýrdalsjökuls. Gúlagos eru oft langvinn (mánuðir – ár) en kvikustreymi er á hverjum tíma lítið.

Ýtarlega er fjallað um þessar gerðir gosa og áhrif þeirra í Hættumati vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005) og vísast til þess rits með frekari umfjöllum. Fyrir austurhluta Mýrdalsjökuls skipta gosgerðir a og b mestu máli þó gos af gerð d sé einnig mögulegt. Leiddar hafa verið að því líkur að órói við Goðabungu á síðustu árum kunni að stafa af því að þar sé gúlagos í aðsigi (Páll Einarsson o.fl., 2005).

5. Ísbráðnun í eldgosum

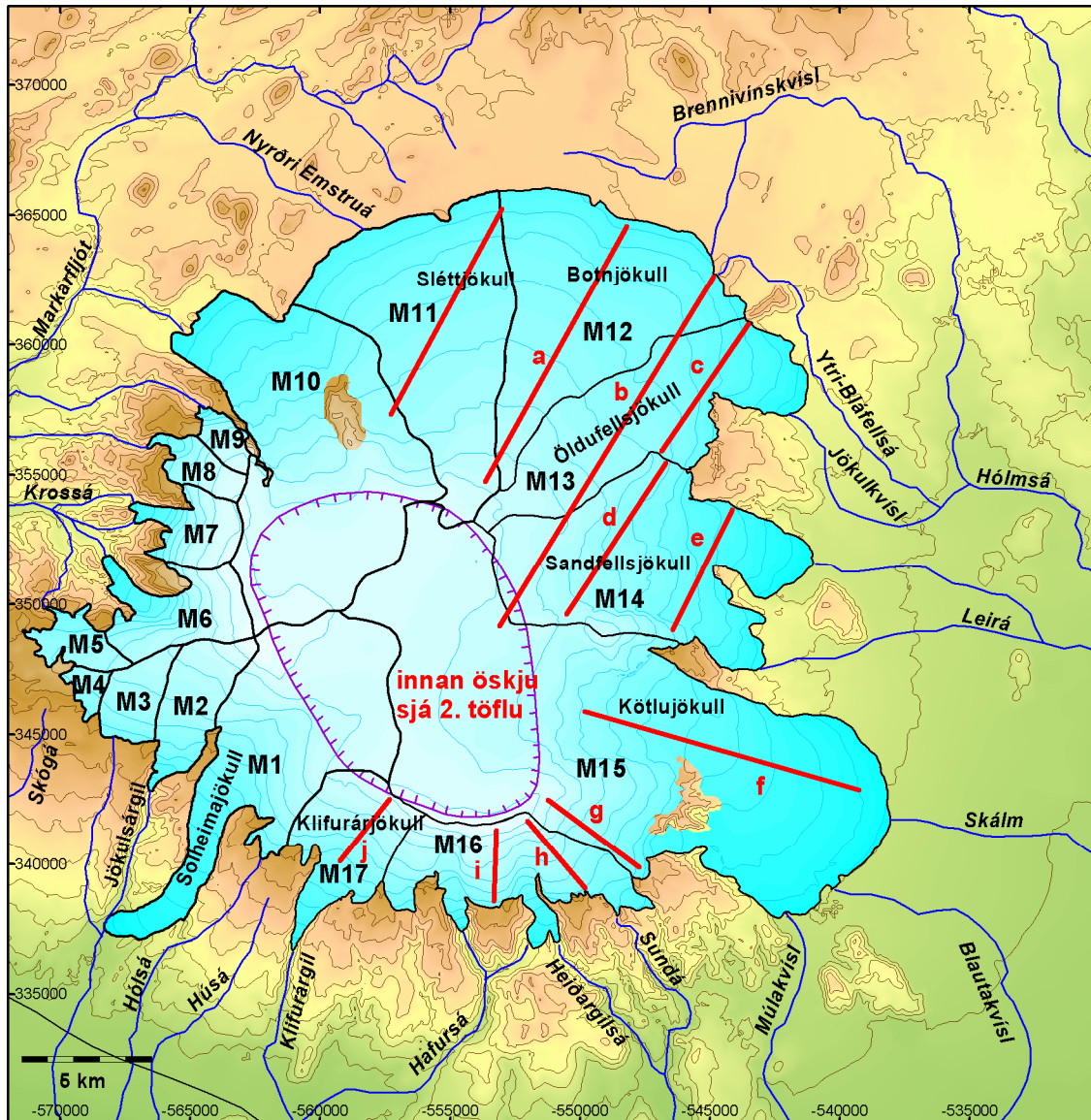
Í viðauka aftan við megintexta skýrslunnar eru sett fram þau fræði sem notuð eru til að meta ísbráðnun við mismunandi skilyrði. Megintilfellin eru eins og áður kom fram (a) þykkur ís og (b) þunnur ís. Hvert vatnasvið er tekið fyrir sérstaklega og niðurstöður settar fram í 6. kafla. Jarðfræðilegar aðstæður á hverju vatnasviði eru látnar ráða stefnu og lengd þeirra gossprungna sem reikningar eru gerðir fyrir. Stefna sprungu getur verið samsíða öskjubarmi, hornrétt á hann, eða samsíða meginprungustefnu svæðisins. Á 9. mynd hafa verið dregnar línur sem tákna eiga gossprungur. Þessar ímynduðu sprungur eru lagðar til grundvallar þegar möguleg bráðnun er metin í 6. kafla.

Í viðaukanum er að finna þær jöfnur sem notaðar eru við mat á ísbráðnun og vísa númerin til hans. Jöfnur (2a-c) eiga við tengsl bráðnunarhraða og kvikuflæðis undir þykkum ís meðan jöfnur (5-7) eiga við þunnan ís (um eða undir 200 m). Jafna (10) er síðan notuð til að meta rennsli í hlaupi sem starfar af gosi. Munurinn á niðurstöðum úr jöfnum (5-7) og (10) er sá að í (10) er 25% bætt við, til að taka tillit til flutninga gosfna og/eða íss með hlaupi.

5.1. Bráðnun í gosum undir þykkum ís

Sé ís meira en 200-300 m þykkur nær kvikan yfirleitt ekki að brjótast sem gangur gegnum jökulinn og ísbráðnun í upphafsfasa ræðst fyrst og fremst af kvikustreymi. Ef ísþykkt er mjög mikil (mörg hundruð metrar) getur orðið flæðigos við botn með myndun bólstra. En í mörgum tilfellum tvístrast kvikan og myndar fínkorna gjósku. Við þær aðstæður verður varmaflutningur frá kviku að ís hraðastur, nýtni getur orðið 60-80% (Magnús T. Guðmundsson, 2003; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004). Hér er nýtni skilgreind sem hlutfall orku á tímaeiningu sem nýtist til ísbráðnunar og þeirrar orku sem berst að gosstað með streymi kviku (Ármann Höskuldsson og Sparks, 1997; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004).

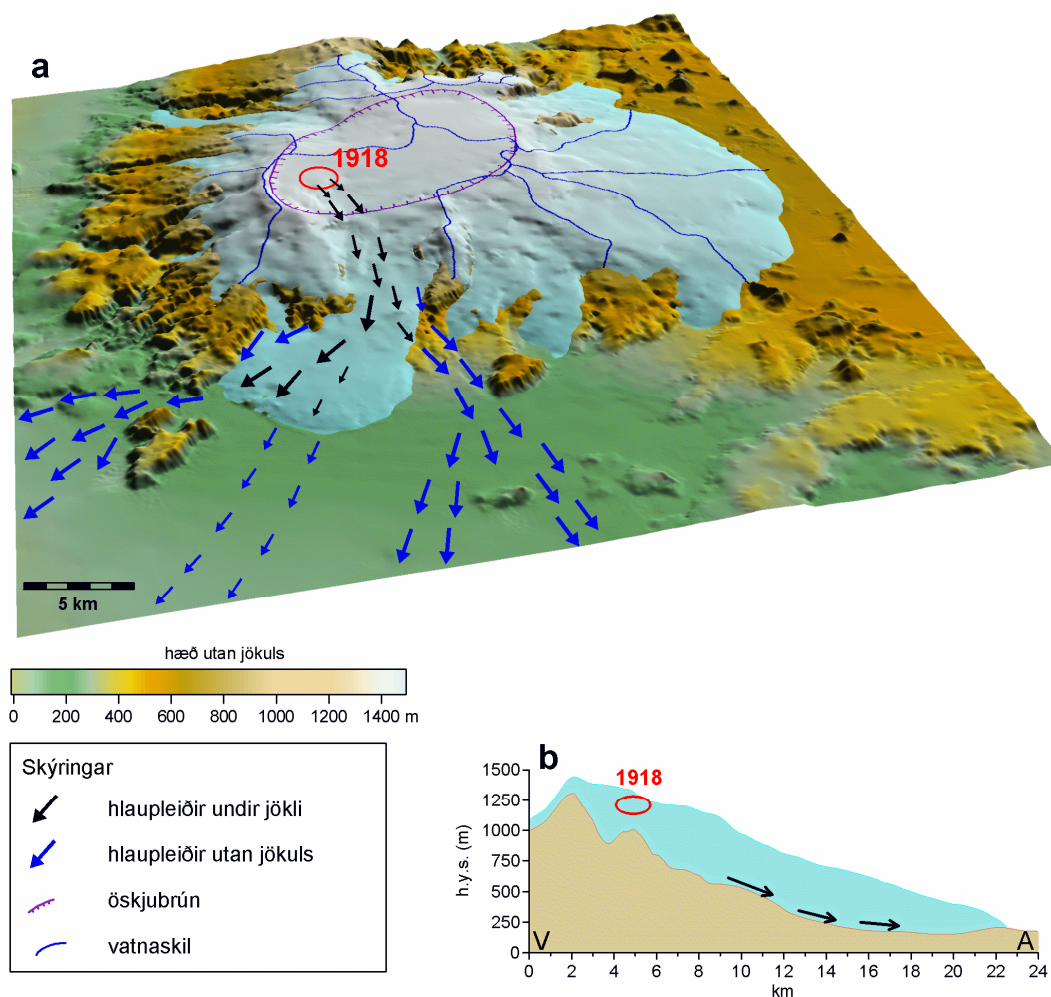
Fyrir þessar aðstæður eru jöfnur (2a-c) taldar lýsa aðstæðum. Lykilhugtak í útreikningunum er stuðullinn f , en hann stendur fyrir nýtni varmastraums. Hér á eftir er yfirleitt gert ráð fyrir nýtni $f = 60-90\%$ þar sem ís er þykkur. Í 7. töflu (sjá viðauka) eru upplýsingar um kvikustreymi á lengdareiningu gossprungu fyrir nokkur þekkt gos. Þær niðurstöður benda til þess að í meðalgosi (t.d. Hekla 1991, Gjálp 1996) geti m' , kvikustreymi á lengdareiningu



9. mynd. Vatnasvið í Myrdalsjökli (M1-M17), helstu ár og hugsaðar gossprungur (rauð strik) sem notaðar eru til að reikna ísbráðnun á einstökum vatnasviðum í sprungugosum. Skipting í vatnasvið er að mestu fengin úr grein Helga Björnssonar o.fl. (2000).

gossprungu, verið 1.000-2.000 kg/m/s (t.d. Ágúst Guðmundsson o.fl., 1992; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004). Einnig kemur fram að kvikustreymi í stórum gosum (Hekla 1947, Skaftáreldar 1783) geti verið 6.000-12.000 kg/m/s (byggt á gögnum frá Sigurði Þórarinssyni, 1968; og Þorvaldi Þórðarsyni og Self, 1993). Tölurnar úr 7. töflu eru lagðar til grundvallar við mat á kvikustreymi og þar með ísbráðnun í gosum innan Kötluoskunnar (kafli 6.1), í Sléttjökli norðan hennar (kafli 6.3) og í mjög stóru sprungugosi sem nær frá jökuljaðri að norðan og inn í Kötluoskjuna (kafli 6.2). Fyrirmynd stærstu umbrota er Eldgjárgosið 934.

Í jökulhlaupi sem orsakast af stóru gosi undir þykkum ís sýnir reynslan að jökuljaðarinn brotnar upp og stórir ísjakar flytjast með hlaupinu niður á sanda og jafnvel í sjó fram. Erfitt er að segja til um hve mikill ís fylgir bræðsluvatninu, en miðað við reynslu frá 1918 má reikna með að ísinn geti auðveldlega numið 5-15% af rúmmáli hlaups í hámarki. Að auki getur



10. mynd. (a) Fjarviddarmynd af Mýrdalsjökli, vatnasvið og gosstöðvar 1918. Örvarnar sýna í grófum dráttum leið bræðsluvatns að jökulrönd. (b) Einfaldað þversnið af jöklinum, gosstað 1918 og leið hlaupvatns að jökuljaðri.

verulegt magn gjósku flust með hlaupinu. Fyrir nýtni varma á bilinu 60-90% getur gjóskan numið 10-15% af rúmmáli hlaups. Er þá gert ráð fyrir að mestur hluti hennar berist af gosstað með bræðsluvatninu. Sé tekið tillit til íss og gjósku virðist því eðlilegt að bæta 25% við reiknaðan bráðnunarhraða þegar metinn er stærðarflokkur hlaupa á Mýrdalssandi eða Sólheimasandi.

5.2. Bráðnun í gosum þar sem ísþykkt er undir 200 m

Í meginatriðum gildir að þegar ísþykkt er undir 150-200 m ræðst bráðnun einkum af þykkt jökulsins og lengd gossprungu. Afl gossins skiptir vissulega máli en ísbráðnun takmarkast af því að öflugt gos fer hratt í gegnum ísinn og eftir það tapast stærstur hluti orku þess til andrúmsloftsins með gosmekkinum.

Hér eru jöfnur (5) og (7) notaðar til að meta ísbráðnun fyrir sprungugos á hverju vatnasviði. Við mat á stærðarþrepi hámarksrennslis í jökulhlaupi er jafna (10) notuð. Bætt er við rúmmáli lausra gosefna og gert ráð fyrir að nýtni varma $f = 35-40\%$ (sjá viðauka). Metið

rennsli verður því 25% hærra en fengist ef eingöngu væri reiknað með bræðsluvatninu (samkvæmt jöfnum 5 og 7). Þessari aðferð er beitt á suður og austurhlíðar jökulsins. Einnig er bráðnun og stærðarþrep hlaups metið út frá sömu aðferð fyrir gos á vatnasviðum í Sléttjökli. Gos á því svæði eru einnig metin út frá jöfnum fyrir þykkann ís (2c). Meðalísþykkt er rúmlega 200 m á því svæði og ef samræmi er milli aðferða ætti jafna (2c) og jöfnur (5), (7) og (10) að sýna svipaða niðurstöðu.

6. Niðurstöður

6.1. Gos innan Kötluöskjunnar

Ljóst er að Kötlugos hafa verið misstór, sum lítil (t.d. 1612, 1860), sum stór (t.d. 1755 og 1918) og önnur liggja þar á milli (t.d. 1660 og 1721) (Sigurður Þórarinnsson, 1975; Jónas Eliasson o.fl., 2006). Allar tilraunir sem gerðar hafa verið til að meta stærðir Kötluhlaupsins 1918 setja það í flokk hamfarahlaupa (stærðarflokkur 5, $Q_v > 100.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en óljóst er um flokkun minni hlaupa. Á 10. mynd er sýnd afstaða gosstaðar 1918, Kötlujökuls og rennislíða hlaups.

Engin gögn eru til sem nota má til að fá beinar tölur um kvikustreymi í þessum Kötlugosum. Vísbendingar um stærðarþrep kvikuflæðis má fá út frá því hve langan tíma það tók gosin að brjóta upp úr Mýrdalsjökli. Stór Kötlugos hafa farið gegnum ~500 m þykkann jökul á u.þ.b. 1 klukkustund (1918) meðan það tók Gjalpargosið 1996 um 30 klukkustundir að bræða sig gegnum 600 m þykkann jökul. Í litla gosinu 1860 liðu 9 klukkustundir frá því skjálftar fundust þar til hlaup kom fram á Mýrdalssand. Ekki er jafnvel þekkt hve lengi gosið var að bræða sig gegnum jökulinn. Af heimildum má þó ráða (Magnús Hákonarson, 1860) að sá tími var örugglega skemmri en 20 klukkustundir og þarf ekki hafa verið lengri en 10 klst. Þrátt fyrir að teljast með minnstu Kötlugosum fór gosið 1860 því í gegnum ísinn á mun skemmri tíma en í Gjalpargosinu 1996. Þetta bendir til þess að bræðsla í upphafsfasa gosins 1860 hafi verið síst minni en var í Gjalp. Jafnframt má ætla að 1918 hafi ísbræðsla verið stærðarþrepi hraðari en var í Gjalp.

Í 2. töflu er reiknuð ísbráðnun fyrir þrjú tilfelli af basísku eldgosum innan Kötluöskjunnar: “Lítið gos” á 2 km langri sprungu, “meðalgos” á 4 km sprungu og “stórt gos” á 6 km langri sprungu. Kvikustreymi á lengdareiningu sprungu á við um upphafsfasa gosanna og tölurnar eru valdar með hliðsjón af upplýsingum um kvikustreymi í eldgosum (7. tafla – sjá viðauka).

2. tafla. Reiknuð bráðnun og stærðarmat hlaupa vegna gosa innan Kötluöskjunnar

	l m	m' $kg/m/s$	M' kg/s	Q_v $10^3 \text{ m}^3/s$	Q_H 10^3 kg/m^3	Stærð
Lítið gos	2000	2000	$4 \cdot 10^6$	10-15	12-19	3
Meðalgos	4000	5000	$2 \cdot 10^7$	50-75	60-95	4
Stórt gos	6000	10.000	$6 \cdot 10^7$	160-230	200-290	5

Q_v reiknað með jöfnu (2b): $f = 0,6-0,9$; $C_g = 1200 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$; $\Delta T = 1200^\circ\text{C}$; $L_i = 3,35 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$.

$Q_H = 1,25Q_v$ (vatn + vatnsborin gjóska + ís).

Í 2. töflu er gert ráð fyrir að beint samband sé milli bráðnunarhraða og rennslis hlaups. Forsenda þessa er að vatn renni jafnharðan burtu frá gosstað. Það skilyrði virðist eiga við í flestum gosum undir jöklum. Í beinni tengingu hámarksrennslis í jökulhlaupi við

ísbráðnunarhraða felst veruleg einföldun. Í raunverulegu gosi geta t.d. áhrif uppsöfnunar vatns á rennslisleið undir jökli orðið til þess að rennsli verði um skamma stund miklu hærra en taflan sýnir. Þetta á einkum við um rennsli í hlaupi vegna lítills goss. Útreikningarnir benda til þess að við 60-90% nýtni varmastraums megi gera ráð fyrir rennsli hlaupa frá fáum tugum þúsunda rúmmetra á sekúndu í minni hlaupum upp í 300 þúsund m^3/s í þeim stærstu. Kötluhlaup eins og þau sem komið hafa á seinni öldum falla því í stærðarflokka 3 til 5.

Ljóst er af 7. töflu (sjá viðauka) að varmaflutningur með kviku í stórum gosum er það mikill að hann nægir til að bræða nokkur hundruð þúsund m^3/s af ís. Líkön af kólnunarhraða gjóskukorna (t.d. Magnús T. Guðmundsson, 2003) og mælingar sem gerðar hafa verið í tilraunastofu (Xu og Zhang, 2002) sýna að fingerðustu kornin kólna niður í umhverfishita (kólnun um $\sim 1000^\circ C$) á broti úr sekúndu en þau grófustu á fáum mínútum. Ef kvikan tvístrast ekki en myndar þess í stað bólstraberg, verður kólnun mun hægari. Verði flæðigos með bólstramyndun má telja víst að hlaup yrðu með nokkuð öðrum hætti en í flestum Kötlugosum. Atburðarás yrði hægari og hámarksrennsli hlaupa lægra. Tvístrun kvikunnar er því forsenda þess að varmastraumur verði í líkingu við það sem tölurnar í 2. töflu bera með sér.

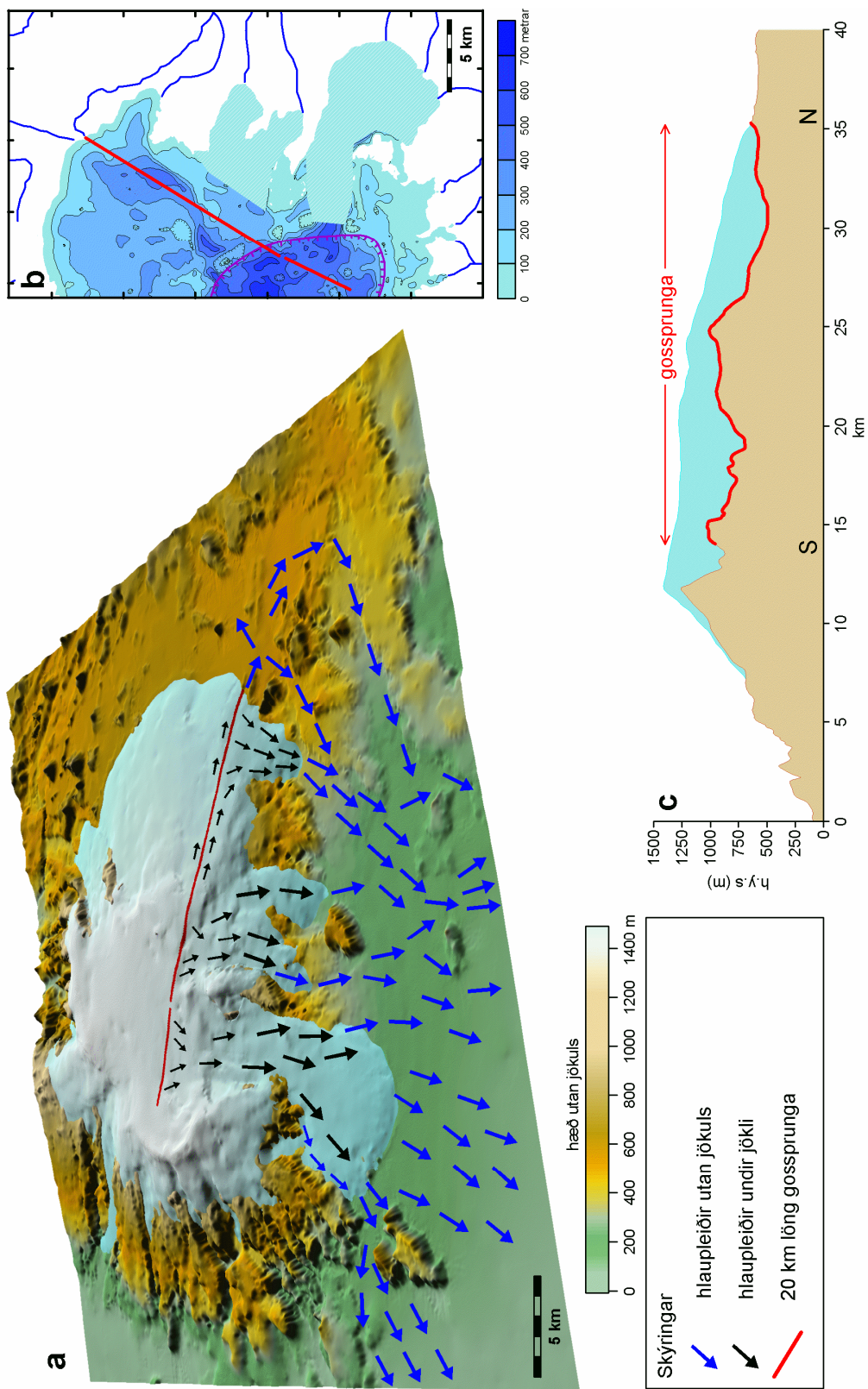
Hér að ofan er því haldið fram að hegðun Kötluhlaupa bendi til þess að kvikan tvístrist og myndi finkorna gjósku. Spyrja má hvort beinar vísbendingar séu til um það að tvístrun sé ráðandi goshumur í Kötlu. Því er til að svara að stór hluti gosefna í Kötlugosum berst með hlaupvatni fram á Mýrdalssand og finasti sallinn berst til hafs og myndar setlög á hafsbotni (Haukur Tómasson, 1996). Rannsóknir á Mýrdalssandi sýna að 90% af hlaupsetinu frá 1918 var ferskt basaltgler þar sem algengt þvermál gjóskukorna er 0,1-1 mm (Sigmundur Einarsson og Gylfi Einarsson, 1975; Haukur Tómasson, 1996). Þetta er dæmigerð kornastærð fyrir gjósku sem myndast við tvístrun í sprengingum vegna blöndunar vatns og kviku (Zimanowski, 1998). Gerð gosefna 1918 bendir því eindregið til þess að tvístrun hafi verið ráðandi hamur í gosinu, líklega allt frá upphafi.

Rennslistími hlaupvatns frá gosstað að jökulrönd hefur verið metinn nærri einni klukkustund (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005). Kólnunartími gjóskukornanna (frá broti úr sekúndu upp í fáar mínútur) er því örstuttur miðað við rennslistíma undir jökli. Gosefnin tapa því varma sínum til umhverfisins þar sem hann nýtist svo til allur til ísbráðnunar áður en gosið nær upp í gegnum ísinn. Gerð og kornastærðardreifing gosefnanna á Mýrdalssandi styðja því þá útreikninga sem hér eru settir fram um ísbráðnun í Kötlugosum.

6.2. Stórgos á sprungu frá Kötluöskju til norðausturs að jökuljaðri vestan Öldufells

Mestu umbrot á Kötlusvæðinu frá því land byggðist urðu í Eldgjárgosinu kringum árið 934. Guðrún Larsen (2000) lýsir ummerkjum um þennan atburð og telur hann stærsta gos Íslandssögunnar þar sem upp hafi komið um $19 km^3$ af gosefnum. Suðurhluti gossprungunnar lá undir Mýrdalsjökul vestan Öldufells og til suðurs inn í Kötluöskjuna. Hluti gosefnanna virðist hafa flætt sem blanda hrauns, gjósku og vatns niður í Krika við norðurjaðar Kötlujökuls. Eldgjárgosið telst án efa til stærstu eldgosa sem orðið geta á svæðinu, a.m.k. ef litið er til atburða sem hafa skemmri endurkomutíma en 10 þúsund ár. Hliðstæður atburður varð fyrir 7500-8000 árum þegar Hólmsáreldar brunnu (Guðrún Larsen, 2000).

Engar lýsingar hafa varðveist sem veita upplýsingar um stærð og umfang jökulhlaupa í Eldgjárgosinu. En talið er að stórhlaup hafi farið yfir allt það svæði þar sem nú er Mýrdalssandur og líklegt að það hafi stórskemmt eða eytt byggðum svæðum. Möguleg stærð hlaups vegna stórgoss af þessari gerð er könnuð með jöfnu (2b) og tölur um kvikustreymi á



11. mynd. Stærsti atburður sem líkur eru á að verði í Myrdalsjökli á nokkur þúsund ára fresti: (a) Fjarvildarmynd af Myrdalsjökli með 20 km langri hugsaðri gossprungu svipaðri Eldgjársprungunni frá 934. Remsleiðir vatns sýndar með örnum. (b) Ísþykkt eftir sprungunni. (c) Þversnið eftir gossprungunni.

lengdareiningu fengnar úr 7. töflu. Frá norðurbrún Mýrdalsjökuls að norðurjaðri Kötluöskjunnar eru 15 km. Sé gert ráð fyrir samfelldri gossprungu á þessu svæði og að til viðbótar nái hún 5 km inn í öskjuna, yrði lengd sprungunnar undir jökli 20 km (11. mynd). Mesta mögulega bráðnun yrði ef sprengigos með fullri tætingu kvikunnar ætti sér stað samtímis á allri sprungunni. Í 3. töflu eru reiknuð tvö tilfelli, fyrir $m'=5000$ kg/m/s og 10.000 kg/m/s.

3. tafla. Reiknuð bráðnun og stærðarmat hlaups í stórgosi á 20 km langri sprungu undir Mýrdalsjökli

m' kg/m/s	M' kg/s	Q_v 10^3 m ³ /s	Q_H 10^3 kg/m ³	Stærð
5.000	$1 \cdot 10^8$	260-390	330-490	6
10.000	$2 \cdot 10^8$	520-780	650-980	6

Q_v reiknað með jöfnu (2b): $f=0,6-0,9$; $C_g=1200$ J/(kg°C); $\Delta T=1200$ °C; $L_i=3,35 \cdot 10^5$ J/kg.
 $Q_H=1,25Q_v$ (vatn + vatnsborin gjóska + ís).

Útreikningarnir benda til þess að hámarksrennsli í hlaupi samfara stórgosi eins og varð 934 geti orðið þrefalt meira en varð í Kötluhlaupinu 1918. Líkur á að svo löng gossprungu sé öll virk með sama krafti á sama tíma eru e.t.v. ekki stórar. Í Skaftáreldum voru aðeins hlutar sprungunnar virkir á hverjum tíma. Bráðnun með þeim ákafa sem reiknað er með myndi í því tilfelli aðeins verða á nokkurra kílómetra löngum hlutum sprungunnar í einu. Hlaup yrðu fleiri og smærri þó hvert þeirra um sig gætu flokkast sem hamfarahlaup (stærð 5, rennsli >100.000 m³/s). Eigi að síður verður að líta svo á að rennsli á bilinu 0,5-1 milljón m³/s (stærð 6) sé möguleiki sem ekki sé hægt að horfa framhjá í hættumati fyrir svæðið. Verulegur hluti slíks goss yrði líklega á vatnasviði Öldufellsjökuls en vatn kæmi einnig fram undan Sandfellsjökulum og Kötlujökli. Atburðir í þessu stærðarþrepi geta gerst á nokkurra þúsund ára fresti.

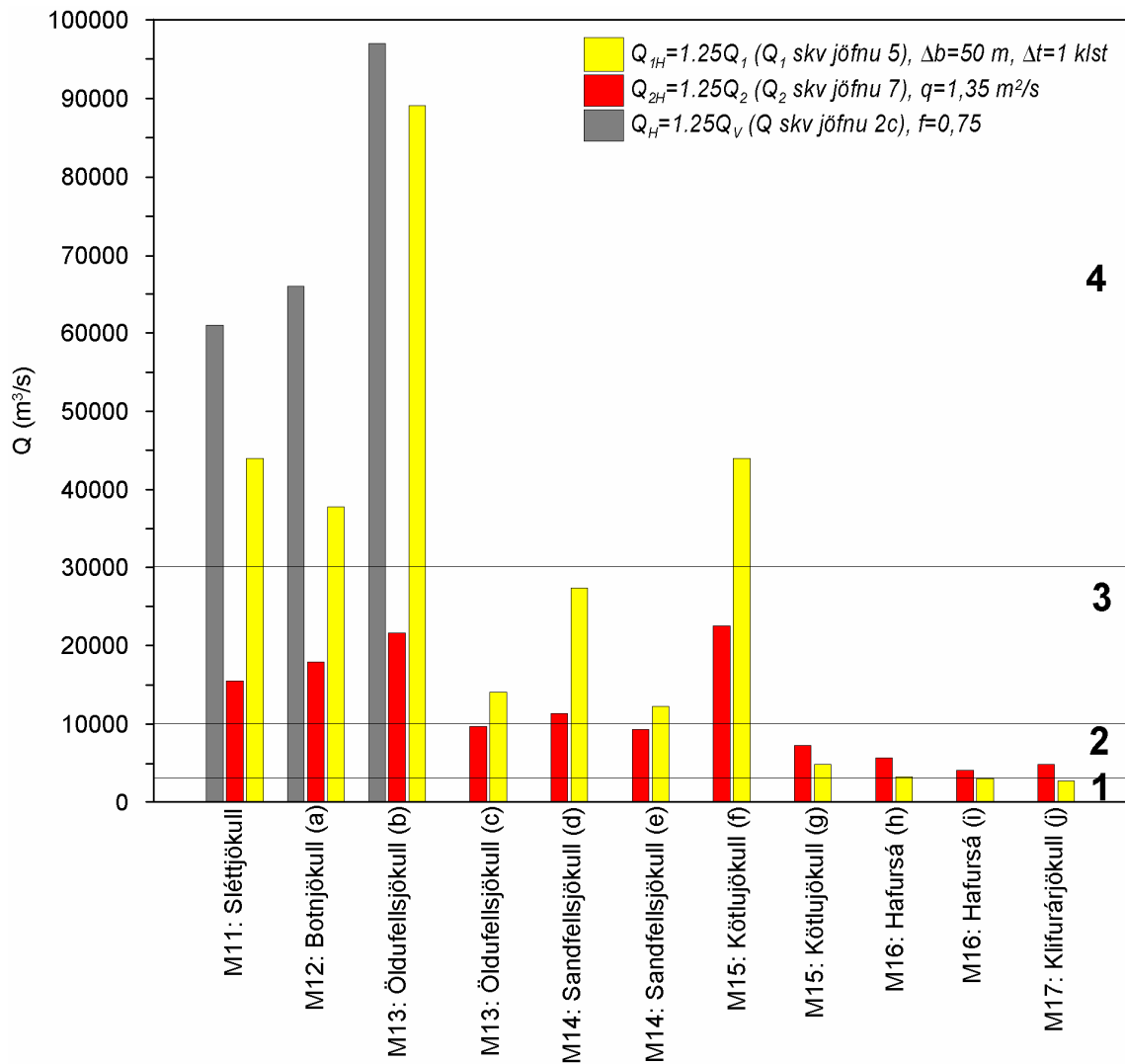
6.3. Sprungugos norðan Kötluöskjunnar

Á þessu svæði eru þrjú vatnasvið tekin fyrir, Sléttjökull (M11: Nyrðri Emstruá), Botnjökull (M12) og Öldufellsjökull (M13). Báðum aðferðum, fyrir þykkann jökul (jafna 2c – 4. tafla) og fyrir þunnan jökul (jöfnur 5, 7 og 10) er beitt á þessu svæði. Niðurstöður um Nyrðri Emstruá eru fengnar úr fyrri samantekt fyrir vesturhluta jökulsins (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005). Á 12. mynd er stærðarflokkun hlaupa sett fram á stöplariti og bornar saman niðurstöður útreikninga fyrir þunnan jökul (jöfnur 5 og 7) og þykkann jökul (2c). Heldur hærri tala fæst með (2c) en (5). Hafa þarf í huga þá ónákvæmni sem felst í þeim aðferðum sem notaðar eru. Munurinn milli mats samkvæmt (2c) og (5) er því ekki marktækur. Aðalatriðið er að báðar aðferðir benda til stórra hlaupa (stærðarflokkur 4).

4. tafla. Reiknuð bráðnun og stærðarmat hlaupa vegna sprungugosa norðan Kötluöskjunnar, $m'=1500$ kg/m/s

	l m	M' kg/s	Q_v 10^3 m ³ /s	Q_H 10^3 kg/m ³	Stærð
M11: Vatnasv. Nyrðri Emstruár	10.000	$1,5 \cdot 10^7$	39-58	50-70	4
M12: Botnjökull	11.000	$1,65 \cdot 10^7$	43-64	50-80	4
M13: Öldufellsjökull	16.000	$2,40 \cdot 10^7$	62-93	80-120	4-5

Q_v reiknað með jöfnu (2b): $f=0,6-0,9$; $C_g=1200$ J/(kg°C); $\Delta T=1200$ °C; $L_i=3,35 \cdot 10^5$ J/kg.
 $Q_H=1,25Q_v$ (vatn + vatnsborin gjóska + ís) afrúnað að næsta heila tug.



12. mynd. Mat á rennsli hlaupa í gosum utan Kötluoðskjunnar. Staðsetningar hugsaðra gossprungna eru á 10. mynd. Tölurnar til hægri sýna stærðarflokka jökulhlaupa.

Hugsanlegt hámarksrennsli í hlaupi vegna öflugs goss á þessu svæði gæti náð um 100 þús. m³/s í nokkuð öflugu gosi á 16 km langri sprungu sem næði yfir vatnasvið Öldufells- og Sandfellsjökla. Niðurstöðurnar benda því til þess að ekki sé teljandi misræmi milli aðferðanna fyrir þykkann og þunnann jökul.

6.4. Gos í jökulpöktum hlíðum Mýrdalsjökuls að sunnan og austan

Gos í brúnum Mýrdalsjökuls eru mun sjaldgæfari en gos innan öskjunnar. Hlaup vegna slíkra gosa yrðu einnig mun minni. Hinsvegar gætu hlaupin komið fram í ám þar sem engar heimildir eru um hlaup áður, t.d. í Mýrdal. Í 5. töflu er teknar saman niðurstöður útreikninga með jöfnum (5), (7) og (10) um ísbráðnun og hlaup vegna gosa á sprungum á hverju vatnasviði

5. tafla. Bráðnun í gosum utan Kötluöskjunnar reiknuð með jöfnum fyrir þunnan ís

Vatnasvið	Vatnasvið - einkennisstærðir				Gossprungur - hlaupstærðir							
	flatarm. km ²	minnsta háð m y.s.	mesta háð m y.s.	meðal þykkt m	rúm- mál km ³	lengd sprungu km	meðal- þykkt m	Q ₁ m ³ /s	Q ₂ m ³ /s	Q _H m ³ /s	flokkur	
M11: Sléttjökull	57,1	650	1390	250	600	14,0	10,0	250	35.000	12.200	44.000 *	4
M12: Botnjökull	55,3	520	1290	210	410	11,4	a	220	30.300	14.300	37.900 *	4
M13: Öldufellsjökull	43,3	340	1370	230	550	7,9	b**	350	71.300	21.600	89.100 *	4
M14: Sandfellsjökull	58,6	210	1370	180	540	(9)	c	150	11.300	7.800	14.100	3
M15: Kötlujökull innan öskju utan öskju	158 60 98	180 1480 180	1480 1480 (100-150)	270 470 (100-150)	670 670 670		d e	250 130	21.900 9.100	9.100	27.400 7.400	3 3
M16: Afrennsli til Hafursár	27,3	380	1480	60	180	1,9	f	250	35.000	15.000	44.000	4
M17: Klifurárjökull	18,1	390	1460	80	270	1,4	g	70	4.000	5.900	7.600	2
Skýringar - flokkun hlaupa	Q _H : stærð hlaups samkvæmt jöfnu (10) - Q _H = 1,25Q, þar sem Q er sú sem hærrí er af Q ₁ (jafna 5) og Q ₂ (jafna 7)											
1: <3.000 m ³ /s	2: 3.000-10.000 m ³ /s	3: 10.000-30.000 m ³ /s	4: 30.000-100.000 m ³ /s	5: >100.000 m ³ /s								
* líklega vanmat, ís yfir 200 m þykkur víðast hvar												
** þessi sprunga skiptist á vatnasvið M12, M13 og M14												

6.4.1. Austurbrúnir Mýrdalsjökuls

Gos á sprungu á austanverðu vatnasviði Öldufellsjökuls (M13) gæti orsakað hlaup af stærðarflokki 3 og sama á við um sprungugos í ofanverðum Sandfellsjökli (M14). Gos á 11 km langri geislasprungu undir Kötlujökli (M15), þvert á megin sprungustefnu svæðisins, gæti valdið hlaupi sem næði 4. stærðarflokki. Gos á svo langri sprungu með þessa stefnu verður reyndar að teljast mjög ósennilegt, en er tekið hér með sem hugsanlegt versta tilfelli.

6.4.2. Suðurbrúnir Mýrdalsjökuls, austan Sólheimajökuls

Á þessu svæði (1. og 4. mynd) er jökullinn brattur og ísþykkt að sama skapi lítil (syðsti hluti M15, M16 og M17). Lítið er vitað um eldvirkni í þessum brúnum en gos eru þó talin mjög fátíð. Þau yrðu líklega á stuttum sprungum eftir stefnu geisla út frá öskjunni. Ekki yrðu stórhlaup vegna slíkra gosa. Hlaup vegna gosa á þessu svæði yrðu líklega af stærð 1-2 (4. tafla). Þau yrðu hinsvegar mjög snögg og hliðstæð mögulegum hlaupum vegna gosa í sunnanverðum Eyjafjallajökli (Kristín Martha Hákonardóttir o.fl., 2005). Líkur á hlaupum vegna eldgosa í suðurhlíðum Eyjafjallajökuls eru ekki miklar. Líkur á slíkum atburðum í suðurbrúnum Mýrdalsjökuls milli Sólheimajökuls og Kötlujökuls eru ennþá minni.

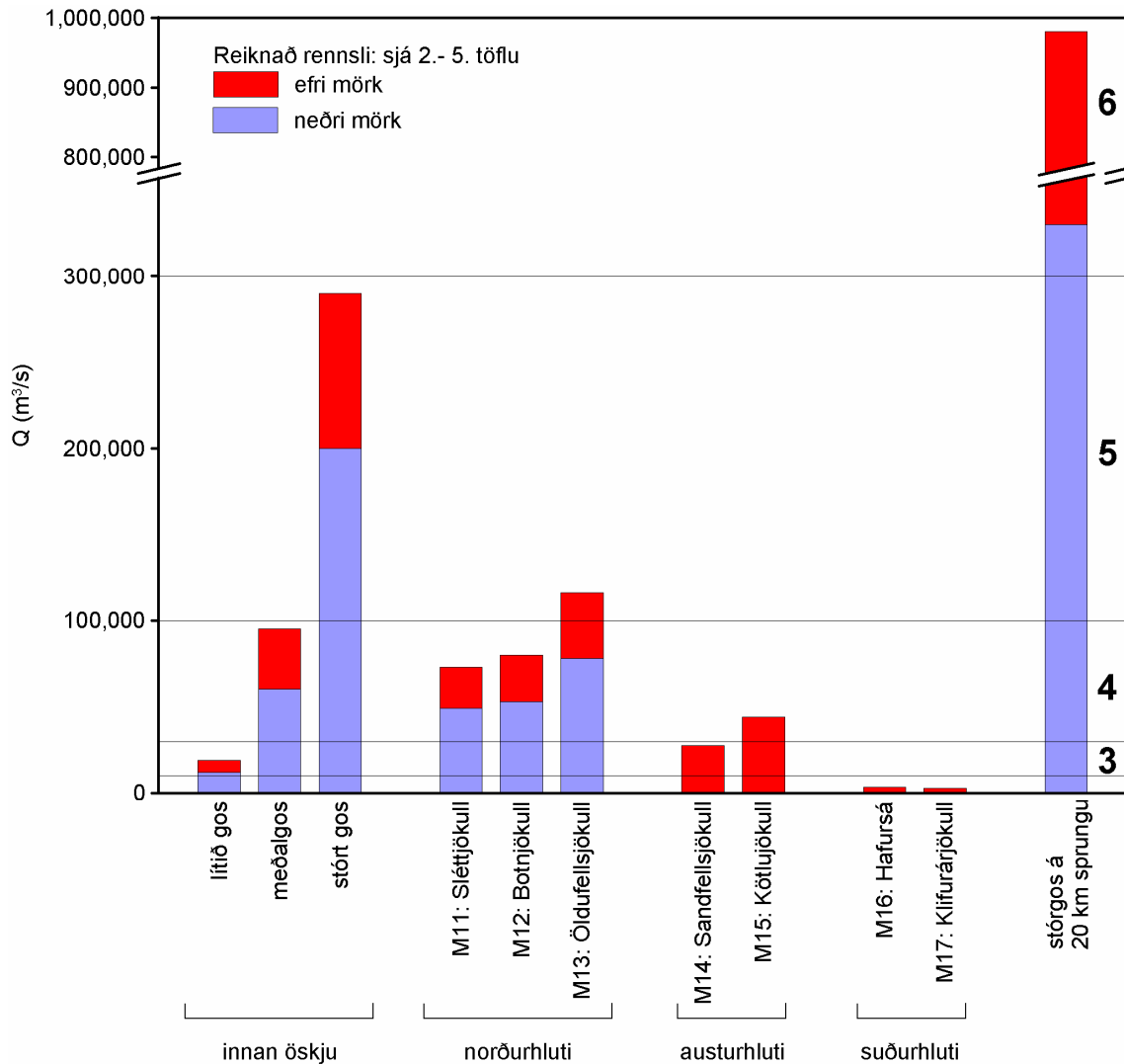
7. Viðbragðstími

Nokkuð ítarlega er fjallað um viðbragðstíma í samantekt um hættumat vegna hlaupa til vesturs (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2005). Vísað er til þeirrar umfjöllunar og hér aðeins settar fram samandregnar niðurstöður.

1. Sennilegast er að sá tími sem líður frá því fyrstu skammtímaforboðar (áköf jarðskjálftahrina, líklega með óróa) koma fram og þar til gos hefst á jökulbotni sé 1-10 klukkustundir.
2. Í eldgosum innan Kötluöskjunnar virðist tími frá því gos hefst við jökulbotn þar til hlaup nær jökuljaðri vera um 1 klukkustund.
3. Tími sem líður frá því gos hefst við jökulbotn þar til gosmökkur hefur sig til lofts yfir Mýrdalsjökli er mjög mismunandi eftir afli gosa. Í stórum gosum virðist þessi tími vera 1-2 klukkustundir. Í smærri gosum gæti hann orðið 5-20 klukkustundir, jafnvel lengri.
4. Ef gos hæfist í suðurbrúnum Mýrdalsjökuls gætu hlotist af því snögg en ekki stór hlaup. Ferðatími slíkra hlaupa yrði svipaður og sá tími sem fékkst út úr hermun hlaupa niður suðurhlíðar Eyjafjallajökuls (Kristín Martha Hákonardóttir o.fl., 2005). Líkur á hlaupum af þessu tagi eru mun minni en undir Eyjafjöllum.

8. Samantekt

Ísbráðnun í gosum og stærð jökulhlaupa sem þeim gætu fylgt hefur verið metin fyrir austanverðan Mýrdalsjökul (13. mynd). Fjórir flokkar gosa hafa verið kannaðir: Basísk sprungugos innan Kötluöskjunnar, basísk sprungugos undir jökli norðan Kötluöskjunnar, stórgos á 20 km langri sprungu sem nær innan úr Kötluöskjunni að jökuljaðri við Öldufell og basísk sprungugos í hlíðum Mýrdalsjökuls að austan og sunnan. Niðurstöður eru þessar:

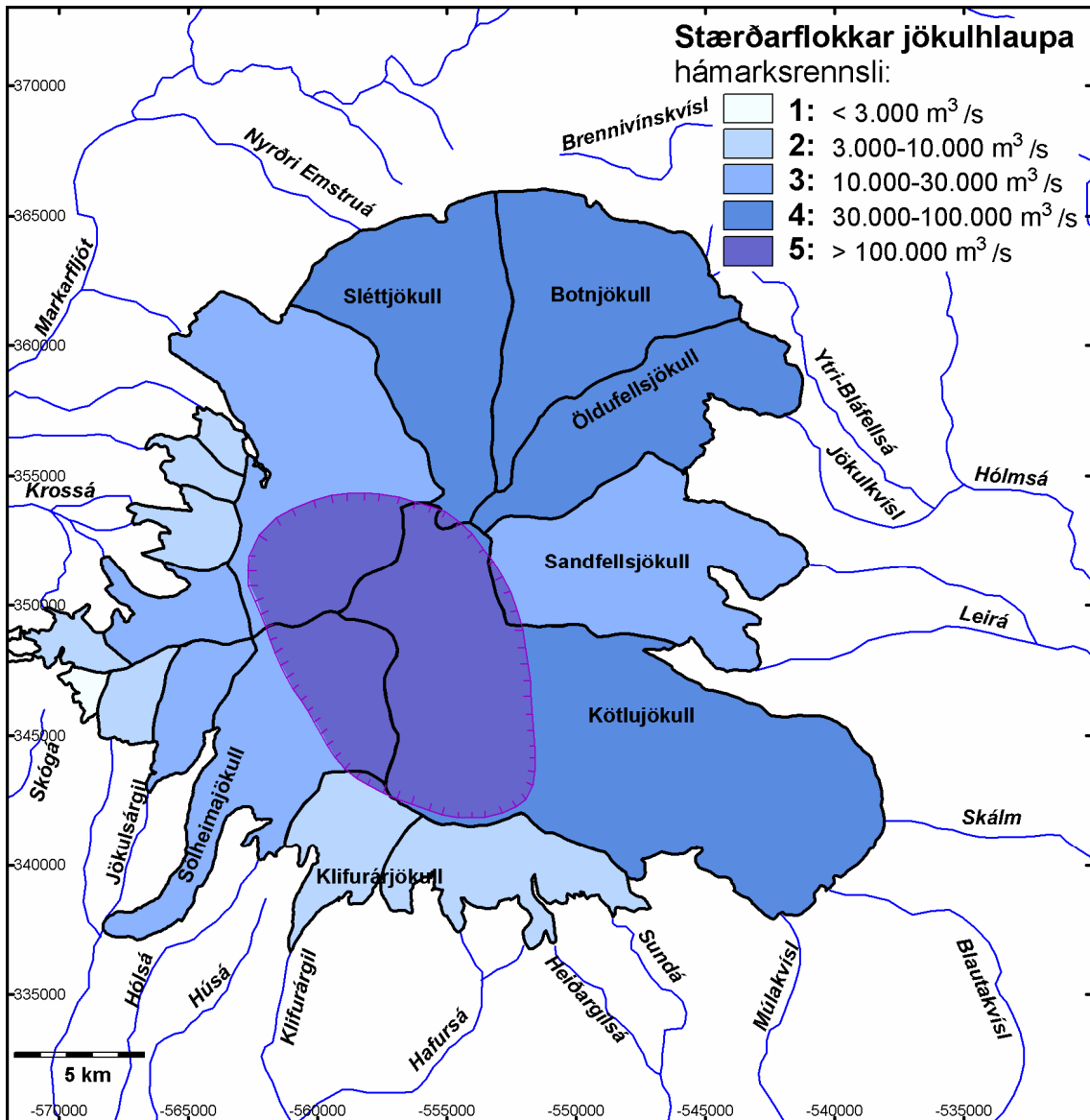


13. mynd. Samantekt um stærð hlaupa sem talið er að geti hlotist af eldgosum í Mýrdalsjökli. Langstærsti atburðurinn væri stórgos á 20 km langri gossprungu. Gos innan Kötluöskjunnar gætu orsakað nokkru stærri hlaup en hér er gert ráð fyrir.

1. Gos innan Kötluöskjunnar: Á þessu svæði verða gos á um 50 ára fresti, en algengust eru þau á vatnsviði Kötlujökuls. Hlaup vegna gosa þar falla fram á Mýrdalssand. Mat var lagt á ísbráðnun í þremur stærðum Kötlugosa:

- Lítið gos, hugsanlega sambærilegt við Kötlugosið 1860, kunna að valda jökulhlaupum í af stærð 3 (10-30 þús. m³/s).
- Meðalgos (e.t.v. sambærilegt við gosin 1660 eða 1823) gætu valdið hlaupum af stærð stærðarflokki 4, með rennsli 60-100 þús. m³/s.
- Stór gos (eins og 1755 og 1918) kunna að hafa haft kvikustreymi sambærilegt við fyrsta fasa Heklugossins 1947 og valda hamfarahlauðum, (stærðarflokkur 5) með rennsli á bilinu 200-300 þús. m³/s.

2. Gos norðan Kötluöskjunnar: Gos verða á þessu svæði á 1.000-10.000 ára fresti. Ís er víða 200-400 m þykkur. Veruleg sprungugos gætu valdið hlaupum af 4.-5. stærðarflokki, þar sem metið rennsli nær 80-120 þús. m³/s. Gos á vesturhluta þessa svæðis féllu til Markarfljóts en af mið- og austurhlutanum niður til Hólmsár og Kúðafljóts.



14. mynd. Átlað hámarksrennsli jökulhlaupa vegna eldgosá á einstökum vatnasviðum í Mýrdalsjökli. Mat fyrir vesturhlutann er samkvæmt (Magnúsi T. Guðmundssyni o.fl., 2005).

3. Stórgos á 20 km langri sprungu undir jökli: Gos af þessu tagi varð þegar Eldgjá myndaðist og teljast þau stærstu atburðir á svæðinu sem hafa skemmri endurkomutíma en 10.000 ár. Hlaup gætu náð stærð 6 (rennsli allt að 1 milljón m^3/s) – þrefalt til fjórfalt rennsli stórhlaupsins 1918. Slíkt hlaup kæmi undan Botnjökli, Öldufellsjökli, Sandfellsjökli og Kötlujökli. Auk þess að flæða yfir austanverðan Mælifellssand og svæði norðan Mýrdalssands, yrði útbreiðsla hlaups líklega svipuð og í stærstu Kötluhlaupum.

4. Gos í brúnum Mýrdalsjökuls að sunnan og austan: Gos íspöktum austurhlíðum jökulsins utan öskjunnar gætu orsakað hlaup af stærð 2-3 ($3.000\text{-}30.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en gos undir Kötlujökli gæti valdið stærra hlaupi (í stærðarflokki 4). Gos í suðurbrúnum austan Solheimajökuls gætu valdið snöggum hlaupum af stærð 1-2 ($1.000\text{-}10.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Líkur á gosum af þessu tagi eru litlar.

Á 14. mynd eru teknar saman upplýsingar um ætlað hámarksrennsli jökulhlaupa vegna eldgosa á einstökum vatnasviðum í Mýrdalsjökli. Fyrir vesturhlutann er stuðst við fyrri úttekt (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2005).

Fyrir eldgos innan Kötluöskjunnar er talið að lágmarkstími sem líði frá því jarðskjálfta verður vart í aðdraganda eldgoss þar til hlaup hefst við jökulrönd sé um 2 klukkustundir. Hlaup vegna gosa nærri jökuljaðri utan öskjunnar gætu komið fram á skemmri tíma.

Viðauki: Aðferðir við mat á ísbráðnun

Þessi viðauki er að mestu endurtekning á 3. og 4. kafla í grein Magnúsar T. Guðmundssonar og Þórdísar Högnadóttur (2005) úr riti um hættumat vegna hlaupa til vesturs. Kafli C er þó viðbót en þar er lagt mat á bráðnunargetu gosa undir þykkum jökli. Til þess eru m.a. hagnýttar tiltækar upplýsingar um kvikustreymi í upphafsfasa ýmissa eldgosa. Skilgreiningar eru í 6. töflu.

A. Varmastraumur og nýtni

Við fulla tvístrun kviku í gler verður engin kristöllun. Í mörgum eldgosum í vatni eða undir jökli lætur þetta nærri, kristallað berg er óverulegt í samanburði við gjóskuna (glerið). Þá má með góðri nálgun gera ráð fyrir að kristöllunarvarmi skipti ekki máli. Þá fæst að varmastraumur dE/dt verður

$$\frac{dE}{dt} = f\rho_{kv}Q_{kv}C_g\Delta T \quad (1)$$

Hér er ρ_{kv} eðlismassi kviku, Q_{kv} kvikustreymi (m^3/s), C_g er eðlisvarmi glersins ($J/(kg\ K)$), $\Delta T = (T_i - T_f)$ þar sem T_i er hiti kviku, T_f hiti glers eftir kólnun og f er nýtni (t.d. Magnús T. Guðmundsson, 2003). Hér er gerð sú einföldun að C_g sé fasti þó svo eðlisvarminn sé í raun háður hita. Skekkja vegna þessa er þó lítil. Nýtni er erfitt að meta beint en í Gjálpargosinu var meðalnýtnin metin sem hlutfall orku sem þurfti til að bræða þann ís sem bráðnaði á gostímanum og heildarvarmaorku gosefnanna. Þannig fékkst nýtnin $f = 70-80\%$. Í Kötlugosinu 1918 fluttist meirihluti gosefna frá gígnum með bræðsluvatninu (Haukur Tómasson, 1996) meðan þau mynduðu fjall á gosstaðnum í Gjálp. Flutningur gosefnanna með vatni ætti að auka varmaflutning frá gosefnum. Því er líklegt að nýtni í Kötlu 1918 hafi verið eitthvað hærri en í Gjálp.

Undir jökli nýtist varmastraumurinn dE/dt til að bræða ís. Sé gert ráð fyrir að jökullinn sé við frostmark (gildir um íslenska jökla), ρ_i og ρ_v eru eðlismassar íss og vatns og L_i bræðsluvarmi íss, fæst bráðnunarahraði íss Q_v (vatnsjafngildi í m^3/s) sem

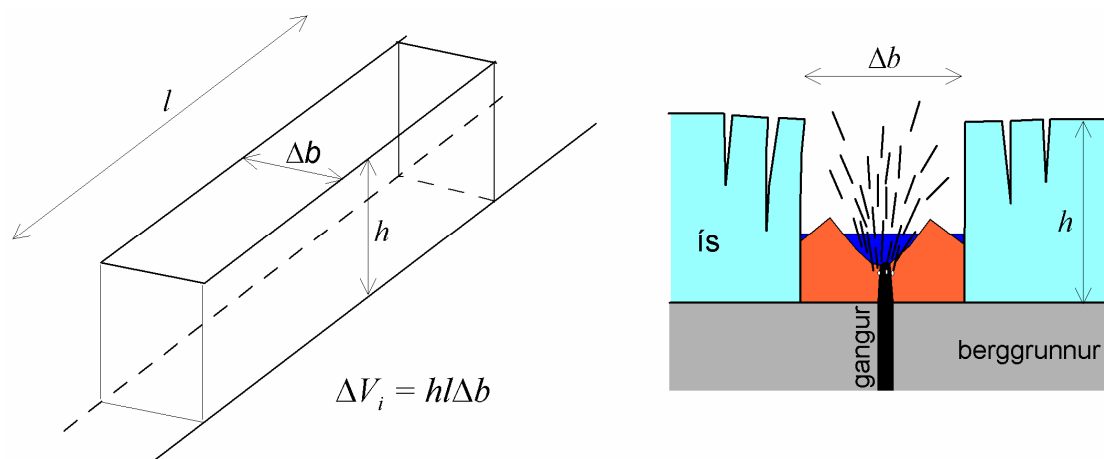
$$Q_v = \frac{\rho_i}{\rho_v} \frac{1}{\rho_i L_i} \frac{dE}{dt} = \frac{f\rho_{kv}Q_{kv}C_g\Delta T}{\rho_v L_i} \quad (2a)$$

Sé jafnan skrifuð fyrir streymi kviku í kg/s ($M' = \rho_{kv}Q_{kv}$) fæst:

$$Q_v = \frac{fM'C_g\Delta T}{\rho_v L_i} \quad (2b)$$

Hafi gossprungu lengdina l og kvikustreymi á lengdareiningu sé $m' = M'/l$, verður jafnan:

$$Q_v = \frac{flm'C_g\Delta T}{\rho_v L_i} \quad (2c)$$



Mynd A1. Mat á rúmmáli sem bráðnar í eldgosi undir þunnum jökli samkvæmt jöfnu (5) (úr Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005).

6. tafla. Skilgreiningar á táknum.

Tákn	skýring	eining
$\frac{dE}{dt}$	Varmastraumur	W
f	Nýtni varma til ísbráðunar	
Q_{kv}	Kvikustreymi – rúmmál á tímaeiningu	m^3/s
M'	Kvikustreymi – massi á tímaeiningu	kg/s
m'	Kvikustreymi á tímaeiningu/lengd sprungu	kg/m/s
Q_l, Q_2, Q_v	Bráðunarhraði í rúmmetrum vatns á sek.	m^3/s
Q_H	Rennsli hlaups (vatn + set)	m^3/s
ρ_{kv}	Eðlismassi kviku	kg/m^3
ρ_g	Eðlismassi gjósku	kg/m^3
ρ_i	Eðlismassi íss	kg/m^3
ρ_v	Eðlismassi vatns	kg/m^3
C_g	Eðlisvarmi gjósku (hér fersks glers)	J/(kg K)
T_i, T_f	Hiti	K
L_i	Bræðsluvarmi íss, $L_i = 3,35 \times 10^5$ J/kg	J/kg
H	Hæð gosmakkar	km
h	Þykkt jökuls	m
Δb	Breidd ísgjár yfir gossprungu í jökli eftir tíma Δt	m
l	Lengd (hér: lengd gossprungu í líkani af bráðnun)	m
x	Lengd	m
q	Bráðunarhraði á lengdareiningu (m^3/s)/m	m^2/s
ΔV_i	Rúmmál íss	m^3
m_{kv}	Massi kviku	kg
m_v	Massi vatns (sem bráðnar vegna varma frá m_k)	kg
V_{kv}	Rúmmál kviku	m^3
V_v	Rúmmál vatns (sem bráðnar vegna varma frá V_k)	m^3
τ	Skerspenna við botn jökuls	Pa
α	Hallahorn jökulyfirborðs	

Þessa jöfnu mætti nota til að reikna kvikustreymi í eldgosi ef hægt er að meta eða mæla Q_v . Hér skiptir þó meira máli að aðeins eru til nothæfar tölur um Q_v fyrir örfá gos. Hinsvegar eru til upplýsingar um Q_{kv} í fjölda eldgosa af öllum stærðum og gerðum. Hraunrennsli hefur t.d. verið metið fyrir allmörg gos. Einnig hefur verið sýnt fram á að samband er milli hæðar gosmakkar (H) í sprengigosum og kvikustreymis Q_{kv} (Sparks o.fl., 1997) og er því lýst með

$$H = 1,67Q_{kv}^{0,259} \quad (3)$$

þar sem H er í km og Q_{kv} í m^3/s . Jafnan gildir allvel um bæði stór og lítil sprengigos, súr, ísúr og basísk, svo fremi sem að gosmökkur falli ekki og myndi gjóskuflóð. Hægt er að nota jöfnuna til að meta kvikustreymi út frá gosmekki. Þá fæst

$$Q_{kv} = 0,138H^{3,86} \quad (4)$$

Óvissa í Q_{kv} verður allmikil en aðferðin dugur til að meta stærðarþrep kvikustreymis í sprengigosum. Í gosum sem rísa upp úr jökli fer hluti af orkunni í ísbráðnun. Sú orka nýtist ekki til að knýja gosmökk. Því má reikna með að Q_{kv} sem fengist út úr (4) fyrir slíkt gos sé lægri en raunverulegt kvikustreymi. Jafnan ætti þó að gefa hugmynd um magn þeirrar kviku sem leggur orku til gosmakkarins. Rétt er að fram komi að tölur sem fást út úr jöfnum (3) og (4) eru mjög ónákvæmar. T.d. fæst að hámarkskvikuflæði í Heklugosinu 1947 samkvæmt (4) er 40-45.000 m^3/s meðan mat Sigurðar Þórarinssonar (1968) byggt á gjóskumagni sem upp kom fyrsta hálf tímann var 17.000 m^3/s . Jöfnur (3) og (4) eru ekki notaðar í þessari skýrslu til að meta ísbráðnun.

B. Líkön af bráðnunarhraða í gosum undir þunnum ís

Reynslan bendir til þess að í basískum og íssúrum sprungugosum sem koma upp undir þunnum jökli (<100-150 m) brjótist gosið hratt upp í gegnum ísinn og að fljótt verði til allbreið gjá í jökulinn yfir gossprungunni. Mögulegt er að meta stærðargráðu bráðnunar út frá þessu ef hægt er að skorða hversu hratt gjáin breikkar (mynd A1). Ef ρ_i og ρ_v eru eðlismassar íss og vatns eins og áður, ísþykktin er h og lengd gossprungu er l verður til gjá með breidd Δb á tíma Δt . Bráðnunarhraðinn verður

$$Q_1 = \frac{\rho_i}{\rho_v} hl \frac{\Delta b}{\Delta t} \quad (5)$$

Lýkilatriði er að meta Δb . Í gosinu í Grímsvötnum 1998 varð til um 100 m breið gjá á 2 klukkustundum og svipað var uppi á teningnum í gosinu á Deception Eyju 1969 (Smellie, 2002). $\Delta b/\Delta t = 100 \text{ m}/2 \text{ klst.} = 1,4 \times 10^{-2} \text{ m/s}$.

Önnur aðferð til að meta bráðnunarhraða væri að nota reynslutölur beint, þ.e. að reikna bráðnunarhraða á lengdareiningu gossprungu, q ($m^3/s/m$), í þekktum eldgosum (jafna 6). Hér er ekki tekið tillit til ísþykktar en í þeim tilfellum sem stuðst er við var hún 100-200 m. Þessi aðferð er vissulega gróf eins og hin og rétt að ítreka að jöfnurnar gefa aðeins til kynna stærðarþrep. Bráðnunarhraði í hverju reiknuðu tilfelli verður hér beint hlutfall af lengd gossprungu (jafna 7):

$$q = \frac{\rho_i \Delta V_i}{\rho_v x \Delta t} \quad (6)$$

Hér er ΔV_i rúmmál íss sem bráðnaði á tímanum Δt og x er lengd gossprungunnar. Fyrir Grímsvötn 1998 ($\Delta V = 1,3 \times 10^7 \text{ m}^3$ $\Delta t = 2$ klst. og $x = 1300$ m), fæst talan $q = 1,3 \text{ m}^2/\text{s}$ og fyrir Deception 1969 ($\Delta V = 5 \times 10^7 \text{ m}^3$ $\Delta t = 2$ klst. og $x = 4500$ m) $q = 1,4 \text{ m}^2/\text{s}$. Þar sem ekki fengust upplýsingar um bráðnun í Grímsvatnagosinu 2004 fyrr en 8 klukkustundum eftir að gos hófst verður samskonar mat þar mjög ónákvæmt. Vísbendingarnar eru þó þær að bráðnarhraði hafi verið mjög hliðstæður því sem var 1998. Ef gos yrði á sprungu að lengd l undir þunnum jökli yrði bráðnunarhraðinn samkvæmt þessari aðferð

$$Q_2 = ql. \quad (7)$$

Jöfnur (5) og (7) eru báðar notaðar hér á eftir til að reikna mögulegan bráðnunarhraða í upphafi sprungugosa. Þær lýsa varla bráðnun nema fyrstu 1-2 klukkustundirnar. Eftir þann tíma ætti bráðnun að minnka þar sem reikna má með að vaxandi hluti af orku gossins tapist til andrúmsloftsins þegar gjáin stækkar.

C. Bráðnunarhraði undir þykkum ís

Sé jökull nokkur hundruð metra þykkur stjórnast rennislisleiðir vatns að 9/10 hlutum af fargi jökulsins en að 1/10 hluta af halla jökulbotns (Helgi Björnsson, 1988). Við botninn ríkir því vökvaprýstikerfi þar sem farg jökulsins beinir vatni í átt að minnkandi þrýstingi, þ.e. þangað sem fargið er minna. Þetta veldur því að rennislisleiðir vatns undir jökli ráðast yfirleitt af halla jökulyfirborðs. Með öðrum orðum, vatnið rennur í sömu átt og það myndi gera ef það rynni eftir yfirborði jökulsins. Eigi halli jökulbotns að ráða rennislisleið þarf hann að vera a.m.k. tífalt meiri en halli jökulyfirborðsins. Yfirborði jökla hallar svo til allstaðar niður að jaðri. Víðast hvar eru aðstæður við botn jökla því þannig að vatn safnast ekki fyrir heldur er því þrýst af fargi íssins í átt að jaðri jökulsins. Undantekningar frá þessu eru þar sem sigdældir hafa myndast í yfirborðið vegna jarðhita við botninn. Í Mýrdalsjökli eru sigkatlar vel á annan tuginn en allir eru þeir svo litlir að vatnssöfnun undir þeim er óveruleg. Bræðsluvatn frá eldgosum sem hæfist innan Kötluöskjunnar eða annarstaðar undir Mýrdalsjökli myndi því leita burtu frá gosstað. Við það myndast sigdæld með gosstaðinn í miðju. Ísinn innan dældarinnar tekur að flæða inn að miðjunni samfara því að sigdældin víkkar. Á þessu stigi gossins, áður en það nær upp úr jöklinum er ísbráðnun mest.

Sé gert ráð fyrir að kvikan tvístrist í gjósku og að nýtni sé 60-80%, ræðst bráðnunarhraði að mestu af kvikuaðstreyminu, þ.e. afli gossins. Jafna (2) lýsir því bráðnuninni. Þetta er mikilvægt hvað varðar mögulegan bráðnunarhraða. Í þunnum jökli takmarkast hann að miklu leyti af ísþykktinni en í þykkum jökli af stærð gossins (kvikustreyminu).

Svarið við því hve mikil ísbráðnun getur orðið þar sem ísinn er þykkur ræðst því af hver séu líkleg efri mörk kvikustreymis í eldgosum innan Mýrdalsjökuls. Í 7. töflu er kvikustreymi í nokkrum eldgosum á Íslandi. Fyrir Heklu gilda tölurnar fyrir upphafsfasa gosanna. Í tilfelli Skaftárelda og Gjálpar er um að ræða nokkurra daga meðaltöl. Eins og áður hefur komið fram er kvikustreymi oftast mest skömmu eftir að gossprungu opnast. Því er sennilegt að m' hafi verið ennþá hærra í einhverjar klukkustundir í þessum tveimur gosum. Það virðist því

eðlilegt að reikna með því að kvikustreymi á lengdareiningu gossprungu í öfluglu Kötlugosi ná $m' = 10^4 \text{ kg/m/s}$. Þessi tala er notuð í mati á ísbráðnun í stóru Kötlugosi í kafla 6.2 hér að framan.

7. tafla. Kvikustreymi í nokkrum eldgosum

Gos	Q_{kv} m^3/s	ρ kg/m^3	M' kg/s	l m	m' $\text{kg}/\text{m}/\text{s}$
Hekla 1947 (1)	75.000	620	$4,7 \cdot 10^7$	4000	11600
Hekla 1991 (2, 3)			$\sim 6 \cdot 10^6$	~ 4000	~ 1500
Gjálp 1996 (4)			$4 \cdot 10^6$	~ 4000	~ 1000
Skaftáreldar (5)	8500	1450	$1,2 \cdot 10^7$	2200	5600

(1) Sigurður Þórarinnsson (1968); (2) Ágúst Guðmundsson o.fl. (1992); (3) Guðrún Larsen o.fl. (1992); (4) Magnús T. Guðmundsson o.fl. (2004); (5) Þorvaldur Þórðarson og Self (1993).

D. Flutningur fastra gosefna með bræðsluvatni

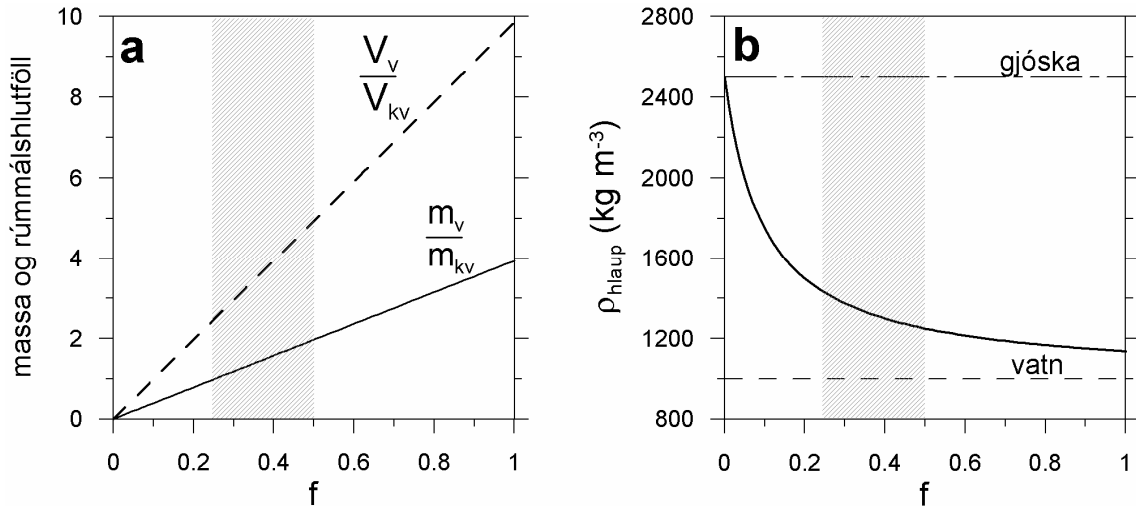
Jökulhlaup vegna eldgosa eru oft mjög aurborin. Á þetta ekki síst við um gos sem verða þar sem bratti er töluverður. Setið sem hlaupin bera með sér er gjóska úr gosinu og efni sem þau rífa með sér úr farveginum. Ómögulegt er að meta hve mikið efni hlaup af þessu tagi taka upp á leið sinni frá gosstað en hægt er að leggja mat á hlutfall gosefna og bræðsluvatns við gosstað. Sé gert ráð fyrir að hiti vatnsins sé við frostmark (0°C) þegar það kemur undan jökli fást massahlutföll bræðsluvatns (m_v) og kviku (m_{kv}) með

$$\frac{m_v}{m_{kv}} = \frac{f C_g \Delta T}{L_i} \quad (8)$$

þar sem ΔT er hitamunur vatns og kviku, C_g eðlisvarmi gjóskunnar og L_i bræðsluvarmi íssins eins og áður. Á sama hátt fást rúmmálshlutföllin

$$\frac{V_v}{V_{kv}} = \frac{f \rho_k C_g \Delta T}{\rho_v L_i} \quad (9)$$

Telja verður sennilegt að nýtni orku til ísbráðnunar í gosum í jöklum eftir að þau ná upp til yfirborðs sé varla yfir 50%, e.t.v. ekki meiri en 25%. Á mynd A2 sést hvernig massa- og rúmmálshlutföll eru háð nýtninni. Eftir því sem nýtnin er hærri verður til meira af bræðsluvatni og blanda vatns og gjósku úr gosinu verður þynnri. Í hlaupi sem tæki alla gjóskuna með sér og hefði háa nýtni (70-90%) væri eðlismassi hlaupsins 1150-1200 kg m^{-3} ($\rho_{kv} = 2500 \text{ kg m}^{-3}$, $C_p = 1200 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\Delta T = 1100 \text{ K}$). Þetta gæti látið nærri um venjuleg Kötluhlaup. Fyrir hlaup sem verða vegna gosa í bröttum hlíðum er 25-50% nýtni sennilegri þar sem hluti varmans tapast til andrúmsloftsins. Þar gæti eðlismassi hlaups legið á bilinu 1250-1400 kg m^{-3} . Ef hlaup fer niður brattar hlíðar gæti upptaka sets úr hlíðunum orðið veruleg og eðlismassi hlaupsins við brekkurætur orðið umtalsvert hærri en ofangreindar tölur gefa til kynna.



Mynd A2. (a) Mat á rúmmáls- og massahlutföllum vatns og gjóska í jökulhlaupi þegar það rennur frá gosstað í jökli samkvæmt jöfnum (8) og (9). Myndin sýnir hvernig þessi hlutföll eru háð varmanýtni. Skyggðu svæðin sýna áætlaða varmanýtni eldgosa í bröttum hlíðum. Gert er ráð fyrir að öll kvikan verði að gjósku og að hún renni öll burtu með bræðsluvatni. (b) Sýnir eðlismassa hlaups sem fall af nýtni (úr Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005).

D.1. Hlaup úr bröttum hlíðum

Í hlaupum úr bröttum hlíðum þar sem gosefni tvístrast og renna fram í hlaupunum þarf að taka tillit til rúmmáls gjóskunnar í mati á rennsli frá gosstað. Jafna (10) lýsir þessum áhrifum

$$Q_H = \frac{V_v + V_k}{V_v} Q_v \quad (10)$$

Ef jafna (5) er notuð er $Q_v = Q_1$ en fyrir jöfnu (7) verður $Q_v = Q_2$. Jafna (10) er notuð í 5. töflu til að meta rennsli frá gosstað í sprungugosum á einstökum svæðum þar sem ís er þunnur. Gert er ráð fyrir að $(V_v + V_k)/V_v = 1,25$ sem svarar til 35-40% nýtni.

D.2. Hlaup undan þykkum jökli

Við tvístrun kviku undir þykkum jökli verður nýtni að öllum líkindum töluvert hærri en 35-40%. Við 60% nýtni fæst $(V_v + V_k)/V_v = 1,17$ og fyrir 90% nýtni verður $(V_v + V_k)/V_v = 1,11$. Í stórum gosum verða hamfarahlauð og þau brjóta upp skriðjökla og jakaburður verður mikill. Haukur Tómasson (1996) áætla að 10-15% af rúmmáli hlaupsins 1918 hafi verið ís. Í ljósi þessa þykir eðlilegt að nota einnig stuðulinn 1,25 fyrir stór hlaup undan þykkum jöklum í jöfnu (10), þ.e. $Q_H = 1.25Q_v$. Alltaf verður að hafa í huga að óvissa er mjög stór í þessum reikningum, raunhæft er að líta svo að metið sé stærðarþrep hámarksrennslis hlaupa af því tagi sem um er fjallað.

Heimildir

- Ágúst Guðmundsson, Niels Óskarsson, Karl Grönvold, Kristján Sæmundsson, Oddur Sigurðsson, Ragnar Stefánsson, Sigurður R. Gíslason, Páll Einarsson, Bryndís Brandsdóttir, Guðrún Larsen og Þorvaldur Þórðarson. 1992. The 1991 eruption of Hekla, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, 54, 238-246.
- Ármann Höskuldsson og R.S.J. Sparks, 1997. Thermodynamics and fluid dynamics of effusive subglacial eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 59, 219-230.
- Finnur Pálsson, Helgi Björnsson og Eyjólfur Magnússon. 2005. Rennslisleiðir vatns undir Kötlujökli (Höfðabrekkujökli). Jarðvísindastofnun Háskólans, RH-04-2005, 17 bls.
- Guðrún Larsen, Elsa G. Vilmundardóttir og Barði Þorkelsson. 1992. Heklugosið 1991: Gjósukufallið og gjóskulagið frá fyrsta degi gossins. *Náttúrufræðingurinn*, 61 (3-4), 159-176.
- Guðrún Larsen. 2000. Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull*, 49, 1-28.
- Haukur Tómasson. 1996. The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, 22, 249-254.
- Helgi Björnsson. 1988. Hydrology of ice caps in volcanic regions. *Societas Scientiarum Islandica*, 45, Reykjavík, pp 1-139.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 2000. Surface and bedrock topography of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland: The Katla caldera, eruption sites and routes of jökulhlaups. *Jökull*, 49, 29-46.
- Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson og Freysteinn Sigmundsson. 2005. Líkindi eldgosa, hlaupa og færslu eldvirkni milli svæða innan Kötluöskjunnar. Í: Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 135-150.
- Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson og Freysteinn Sigmundsson. 2006. Probabilistic model for eruptions and associated flood events in the Katla caldera, Iceland. *Computational Geosciences*, 10, 179-200.
- Kristín Martha Hákonardóttir, Tómas Jóhannesson og Peter Sampl. 2005. Líkanreikningar á jökulhlaupum niður suðurhlíðar Eyjafjallajökuls. Í: Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 181-196.
- Lacasse, C., H. Sigurðsson, H. Jóhannesson, M. Paterne og S. Carey. 1995. Source of Ash-Zone-1 in the North-Atlantic. *Bulletin of Volcanology*, 57, 18-32.
- 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 White, J.D.L., J.L. Smellie and D. Clague (ed.): *Geophysical Monograph 140, Explosive Subaqueous Volcanism*, AGU, 61-72.
- Magnús T. Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Helgi Björnsson 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, Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Ágúst Gunnar Gylfason, Páll Einarsson, Tómas Jóhannesson, Kristín Martha Hákonardóttir og Helgi Torfason. 2005. Yfirlit um hættu vegna eldgosa og hlaupa frá vesturhluta Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökli. Í: Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 11-44.
- Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir. 2005. Ísbráðnun og upptakarennslu jökulhlaupa vegna eldgosa í Eyjafjallajökli og vestanverðum Mýrdalsjökli. Í: Magnús T.

- Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 159-179.
- Páll Einarsson, Heidi Soosalu, Erik Sturkell, Freysteinn Sigmundsson, Halldór Geirsson. 2005. Virkni í Kötlueldstöinni og nágrenni hennar síðan 1999 og hugsanleg þróun atburðarásar. Í: Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 151-158.
- Sigmundur Einarsson og Gylfi Einarsson. 1975. Final report about investigation of Icelandic pumice and scoria. Rannsóknarstofnun byggingariðnaðarins, Reykjavík, 31 bls.
- Sigurður Þórarinnsson. 1968. Heklueldar. Rangæingafélagið, Reykjavík, 185 bls.
- Sigurður Þórarinnsson. 1975. Katla og annáll Kötlugosa. Árbók Ferðafélags Íslands 1975, 129-149.
- Smellie, J.L. 2002. The 1969 subglacial eruption on Deception Island (Antarctica): events and processes during an eruption beneath a thin glacier and implications for volcanic hazards. In: Smellie, J.L., and Chapman, M. (ed.) Ice-volcano interaction on Earth and Mars. Geological Society, London Spec. Publ., 202, 59-80.
- Sparks, R.S.J., Bursik, M.I., Carey, S.N., Gilbert, J.S., Glaze, L.S., Sigurdsson, H., and Woods, A.W. 1997. Volcanic Plumes. John Wiley & Sons, Inc., England, 574 p.
- Xu, Z. og Zang, Y. 2002. Quench rates in air, water, and liquid nitrogen, and inference of temperature in volcanic eruption columns. Earth and Planetary Science Letters, 200, 315-330.
- Zimanowski, B. 1998. Phreatomagmatic explosions. Í: A. Freund og M. Rosi (ritstj.): From magma to tephra, Elsevier, Amsterdam, 25-54.
- Þorvaldur Þórðarson og S. Self. 1993. The Laki (Skaftár-fires) and Grímsvötn eruptions in 1783-1785. Bulletin of Volcanology, 55, 233-263.