



## **Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum**

Samanburður uppsettra styrkinga við Q-kerfið ásamt tölulegri greiningu á bergfærslum og öryggi styrkinga

Helga Jóna Jónasdóttir



**Jarðvísindadeild  
Háskóli Íslands  
2015**



# Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum

Samanburður uppsettra styrkinga við Q-kerfið ásamt tölulegri greiningu á bergfærslum og öryggi styrkinga

Helga Jóna Jónasdóttir

60 eininga ritgerð sem er hluti af  
*Magister Scientiarum* gráðu í jarðfræði

Leiðbeinandi  
Dr. Sigurður Erlingsson

Prófdómari / Fulltrúi deildar  
Matthías Loftsson

Jarðvísindadeild  
Verkfræði- og náttúruvísindasvið  
Háskóli Íslands  
Reykjavík, desember 2015

Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum. Samanburður uppsettra styrkinga við Q-kerfið ásamt tölulegri greiningu á bergfærslum og öryggi styrkinga.

Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum

60 eininga ritgerð sem er hluti af *Magister Scientiarum* gráðu í jarðfræði

Höfundarréttur © 2015 Helga Jóna Jónasdóttir

Öll réttindi áskilin

Jarðvísindadeild

Verkfræði- og náttúruvísindasvið

Háskóli Íslands

Öskju, Sturlugötu 7

101 Reykjavík

Sími: 525 4600

Skráningarupplýsingar:

Helga Jóna Jónasdóttir, 2015, *Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum. Samanburður uppsettra styrkinga við Q-kerfið ásamt tölulegri greiningu á bergfærslum og öryggi styrkinga*, meistararitgerð, Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands, 243 bls.

Prentun: **XX**

Reykjavík, desember 2015

# Útdráttur

Samkvæmt útboðsgögnum eiga bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum að vera í samræmi við Q-berggæðamatskerfið. Engin úttekt er gerð á fylgni styrkinga við Q-kerfið í tengslum við framkvæmdina og því er ekki ljóst hvort uppsettar styrkingar samræmist viðmiðum Q-kerfisins. Markmið verkefnisins er að kanna hvort styrkingar í Norðfjarðargöngum falli að ákvæðum Q-kerfisins. Með líkanreikningum er reynt að leggja mat á þá þætti sem mest áhrif hafa á bergfærslur og öryggi styrkinga.

Tekin eru fyrir fjögur jarðfræðilega ólík svæði í göngunum og bergstyrkingar hannaðar í samræmi við Q-kerfið miðað við Q-mat verktaka. Hannaðar styrkingar eru bornar saman við uppsett magn styrkinga á sömu svæðum. Með líkanreikningum er hegðun bergmassa í tveimur gangaþversniðum könnuð miðað við ákveðið magn styrkinga. Áhrif álagsdreifingar og mismunandi eiginleika bergs á niðurstöður líkanreikninga eru skoðuð.

Í ritgerðinni er fjallað um mikilvægi og forsendur Norðfjarðarganga ásamt helstu kennistærðum ganganna. Fjallað er um jarðfræði Íslands og Austurlands með áherslu á svæðið á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar. Gerð er grein fyrir mikilvægi tæknilegra eiginleika bergs þegar jarðgangagerð er annars vegar og fjallað um berggæðamat sem notað er til þess að áætla styrkingaþörf bergs. Sérstök áhersla er lögð á Q-kerfið sem náð hefur fótfestu í íslenskri gangagerð.

Bergspennum og aflögun í bergi er lýst og fjallað um þá röskun sem verður á spennuástandi bergs við jarðgangagerð. Fjallað er um bergstyrkingar sem ætlað er að tryggja stöðugleika bergmassa við breytt spennuástand. Áhersla er lögð á þær styrkingaraðferðir sem Q-kerfið kveður á um og skapast hefur hefð fyrir í íslenskum veggöngum. Virkni styrkinganna er lýst og fjallað um þá þætti sem horft er til við mat á öryggi þeirra.

Fjallað er um líkanreikninga með einingaraðferð og forritið  $RS^2$  sem notað er við rannsóknina. Helstu inntaksstærðum forritsins er lýst og fjallað stuttlega um þau efnislíkon sem líkanreikningarnir byggja á. Ákvörðun á inntaksstærðum líkanreikninga er lýst og gerð grein fyrir þeim forsendum sem rannsóknin byggir á.

Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum eru í samræmi við Q-kerfið að undanskildum þeim svæðum sem kalla á notkun sprautusteypuboga. Þar eru notaðir færri bergboltar en Q-kerfið kveður á um en fjöldi sprautusteypuboga fer umtalsvert fram úr viðmiðum og umframmagn sprautusteypu er verulegt.

Líkanreikningar sýna að bergfærslur eru mestar neðan við lagmót þar sem veikari jarðlög síga inn í gangaþversniðin. Eiginleikar veikra jarðlaga virðast hafa meiri áhrif á niðurstöður líkanreikninga en eiginleikar sterkari jarðlaga. Einásaprýstistyrkur basaltkarga skiptir þannig meira máli en einásaprýstistyrkur og fjaðurstuðull þóleiít-basalts, bæði fyrir bergfærslur og fjölda hniginna eininga. Útpenslustuðull í þunnu, veiku setlagi hefur mikil áhrif á heildarbergfærslur en virðist hafa lítil áhrif á hnig styrkinga. Lítil breyting á GSI-

gildum hefur áberandi mikil áhrif á bergfærslur en hlutfallslega minni áhrif á hnig bergs og styrkinga. Álagsdreifing fyrir og eftir uppsetningu styrkinga hefur lítil áhrif á heildarbergfærslur en mikil áhrif á öryggi styrkinga.

Af bergfærsluferlum að dæma þurfa bergstyrkingar að hafa náð fullri virkni áður en þrýstispenna á gangayfirborðið hefur fallið um u.þ.b. 70%. Sé miðað við að bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum þoli bergfærslur allt að 12,5 mm reynist álag á bergstyrkingar of mikið í meirihluta líkana miðað við 80-20 álagsdreifingu. Fari heildarbergfærslur í göngunum mikið yfir 92 mm (2% af radíus ganganna) má gera ráð fyrir aukinni styrkingaþörf. Þetta á við um eitt líkan af salva F377 og öll líkön af salva 554. Bergstyrkingar hafa lítil áhrif á heildarbergfærslur.

Könnun á álagi á bergstyrkingar fyrir þrjú líkön af hvorum salva sýnir að togspenna í bergboltum eykst samfara lækkun GSI-gilda en minnkar við hækkun einásaþrýstistyrks basaltkarga. Líkur á þrýstibroti í sprautusteypueiningum aukast samfara lækkun GSI-gilda en minnka við hækkun einásaþrýstistyrks basaltkarga.

Séu bergstyrkingar í salva F377 útfærðar í samræmi við Q-kerfið geta styrkingar í veggjum ekki talist fyllilega öruggar þar sem bergboltar hníga næst gangayfirborðinu og öryggisstuðlar gagnvart þrýstibroti í sprautusteypueiningum eru iðulega lægri en 1,4. Séu bergstyrkingar í salva 554 útfærðar í samræmi við Q-kerfið geta hvorki bergboltar né sprautusteypa talist fyllilega örugg miðað við öryggisstuðulinn 1,4.

# Abstract

According to tender documents the rock reinforcement in Norðfjarðargöng tunnel should be in accordance with the Q-system. During construction no track is kept of how well these conditions are met. It is therefore not known whether the installed reinforcement agrees with the outline of the Q-system. The aim of this research project is to test if the reinforcement in Norðfjarðargöng tunnel is in line with the Q-system. Through finite element modelling a rock displacement analysis is carried out along with an estimation of reinforcement safety.

A reinforcement design in line with the Q-system is carried out for four geologically different areas in the tunnel, based on Q-values from the contractor. The designed amount of rock support is compared with the installed support for the same areas. Finite element modelling is used for estimating rock stability around two tunnel cross sections given a fixed amount of support. The effects of load splitting and different rock mass properties are explored.

The thesis covers the importance and purpose of Norðfjarðargöng tunnel as well as describing its main dimensions. An outline of the geology of Iceland is given, focusing on East-Iceland and the construction area between Eskifjörður and Norðfjörður. The importance of rock mass properties in tunnelling is highlighted and rock mass classification systems used for reinforcement design are introduced. The main emphasis is on the Q-system that has been adapted to Icelandic conditions.

Rock stresses and strains are discussed along with the changes in a given stress field following tunnel construction. Rock reinforcement strategies that aim to stabilize rock mass around an opening are introduced with special emphasis on support methods described in the Q-system and most frequently used in Icelandic tunnels. The rock-support interaction is discussed as well as methods for estimating support safety.

Finite element modelling is described and the  $RS^2$  software used for modelling in the research is introduced. The main input parameters of the software are discussed along with its material theories. Methods for determining input parameters are described as well as the premises for the research work.

The rock reinforcement in Norðfjarðargöng tunnel is in accordance with the Q-system apart from areas where the use of lattice girders is needed. In lattice girder areas fewer rockbolts are used but the number of lattice girders is higher than recommended by the Q-system and the use of shotcrete far exceeds recommendations.

Finite element modelling shows that the highest rock displacement occurs below rock mass boundaries where weaker rock converges into the tunnel. Weak rock properties seem to have more influence on model results than properties of stronger rock. Thus, the uniaxial compressive strength (UCS) of scoriaceous basalt has higher impact on convergence and reinforcement safety than UCS and Young's modulus of tholeiite-basalt.

Dilatancy of a thin, weak sediment has high impact on total displacement but seems to have less impact on support yield. Small changes in GSI-values have high influence on total displacement but relatively low on rock and support yield.

Judging from ground reaction curves (GRC) the reinforcement should be fully activated before internal support pressure has dropped around 70%. Given that the reinforcement in Norðfjarðargöng tunnel can tolerate up to 12,5 mm rock displacement, the support will suffer too much displacement in most models with 80-20 load split. If the total displacement exceeds 92 mm (2% of the tunnel radius) more need for support can be expected. This is true for one model of round F377 and all models of round 554. Total displacement is barely affected by rock reinforcement.

Support analysis for three models of each round reveals that tensile stress in rockbolts increases with lower GSI-values but decreases as UCS of scoriaceous basalt is increased. The probability of compression failure in shotcrete elements is increased by lowering GSI-values but decreased by increasing UCS of scoriaceous basalt.

If the rock reinforcement in round F377 is designed in accordance with the Q-system, the wall support cannot be considered safe as rockbolts yield closest to the tunnel surface and factors of safety against compressive failure in shotcrete elements are frequently below 1,4. If the rock reinforcement in round 554 is designed according to the Q-system neither rockbolts nor shotcrete can be considered safe, given a factor of safety of 1,4.



# Efnisyfirlit

Myndir .....	x
Töflur .....	xvii
Þakkir.....	xx
<b>1 Inngangur .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Norðfjarðargöng .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Jarðfræði.....</b>	<b>8</b>
3.1 Jarðfræði Íslands .....	8
3.2 Jarðfræði Austurlands.....	9
3.2.1 Upphleðsla .....	10
3.2.2 Landmótun og laus jarðefni .....	12
3.2.3 Ummyndun.....	13
3.3 Vandamál í gangagerð á Íslandi .....	13
3.4 Jarðfræðilegar aðstæður á gangaleiðinni á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar.....	14
<b>4 Tæknilegir eiginleikar bergs .....</b>	<b>19</b>
4.1 Aflfræðilegir eiginleikar bergs .....	19
4.1.1 Brotlíking Mohr-Coulomb .....	20
4.1.2 Brotlíking Hoek & Brown.....	21
4.1.3 Fjaðureiginleikar .....	21
4.2 Sprungur .....	22
4.2.1 Heilleikastuðull berglaga RQD og sprungutíðni.....	22
4.2.2 Eiginleikar sprungna .....	23
<b>5 Berggæðamat.....</b>	<b>24</b>
5.1 Q-kerfið .....	24
5.1.1 Gagnrýni á Q-kerfið .....	27
5.1.2 Q-kerfið á Íslandi .....	27
<b>6 Spennur og aflögun í bergi .....</b>	<b>29</b>
6.1 Feltspennur (e. in situ).....	30
6.2 Spennuástand í íslensku bergi .....	32
6.3 Aflögun bergs .....	34
6.3.1 Spennur og streitur umhverfis jarðgöng.....	35
<b>7 Bergstyrkingar .....</b>	<b>41</b>
7.1 Bergboltar .....	41
7.1.1 Forboltun.....	43

7.2	Sprautusteypa .....	44
7.3	Sprautusteypurif .....	44
7.4	Sprautusteypubogar .....	45
7.5	Fræðileg virkni bergstyrkinga .....	46
7.5.1	Bergboltar .....	46
7.5.2	Sprautusteypa.....	48
7.5.3	Bergboltar og sprautusteypa .....	48
7.5.4	Sprautusteypubogar og -rif .....	48
7.5.5	Stuðningsgeta fódninga (e. liners).....	49
7.6	Uppsetning bergstyrkinga.....	54
<b>8</b>	<b>Líkanreikningur með einingaraðferð.....</b>	<b>56</b>
8.1	$RS^2$ .....	56
8.1.1	Inntaksstærðir $RS^2$ .....	57
<b>9</b>	<b>Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum.....</b>	<b>64</b>
9.1	Rannsóknarsvæðin .....	64
9.1.1	Rannsóknarsvæði 1 .....	65
9.1.2	Rannsóknarsvæði 2 .....	66
9.1.3	Rannsóknarsvæði 3 .....	67
9.1.4	Rannsóknarsvæði 4 .....	68
9.2	Hönnunarforsendur .....	70
9.2.1	Bergboltar .....	70
9.2.2	Trefjastyrkt sprautusteypa .....	72
9.2.3	Sprautusteypurif og -bogar .....	73
9.2.4	Þykkt sprautusteypu á bogasvæðum .....	74
9.3	Styrkingaþörf miðað við Q-kerfið.....	76
9.3.1	Rannsóknarsvæði 1 .....	76
9.3.2	Rannsóknarsvæði 2 .....	77
9.3.3	Rannsóknarsvæði 3 .....	80
9.3.4	Rannsóknarsvæði 4 .....	82
9.4	Uppsettar styrkingar .....	83
9.4.1	Vinnustyrkingar .....	83
9.4.2	Lokastyrkingar .....	84
9.4.3	Rannsóknarsvæði 1 .....	84
9.4.4	Rannsóknarsvæði 2 .....	85
9.4.5	Rannsóknarsvæði 3 .....	87
9.4.6	Rannsóknarsvæði 4 .....	88
9.4.7	Margföldunarstuðull sprautusteypu .....	89
9.5	Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum.....	90
9.5.1	Rannsóknarsvæði 1 .....	90
9.5.2	Rannsóknarsvæði 2 .....	92
9.5.3	Rannsóknarsvæði 3 .....	94
9.5.4	Rannsóknarsvæði 4 .....	96
9.5.5	Fylgni styrkinga við Q-gildi í þekju.....	97
9.5.6	Lengd bergbolta .....	98
9.6	Virkni styrkinga – FEM útreikningar .....	99
9.6.1	Ákvörðun á inntaksstærðum líkanreikninga.....	99

9.6.2	Líkan af salva F377 .....	103
9.6.3	Líkan af salva 554 .....	106
9.6.4	Niðurstöður líkanreikninga .....	109
<b>Samantekt</b>	.....	<b>155</b>
<b>Lokaorð</b>	.....	<b>158</b>
<b>Heimildir</b>	.....	<b>160</b>
<b>Viðaukar</b>	.....	<b>167</b>

# Myndir

Mynd 2.1	Lega nýrra Norðfjarðarganga .....	3
Mynd 2.2	Ákvörðun á gangaþversniði.....	5
Mynd 2.3	Kennisnið Norðfjarðarganga .....	6
Mynd 3.1	Berggrunnskort af Íslandi .....	9
Mynd 3.2	Jarðfræðilegar aðstæður á gangaleiðinni á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar .....	16
Mynd 3.3	Dæmigerð berglagaröð í berggrunni Austfjarða .....	18
Mynd 4.1	Einfölduð mynd af uppsetningu þrýstiprófa.....	19
Mynd 4.2	Brotlíking Mohr-Coulomb .....	20
Mynd 4.3	Samband spennu, streitu og einásaprýstistyrks í einásaprófi.....	22
Mynd 5.1	Nýjasta útfærsla Q-kerfisins.....	26
Mynd 6.1	Höfuðspennurnar þrjár .....	29
Mynd 6.2	Lóðréttar og láréttar spennur í jarðlagastafla .....	29
Mynd 6.3	Spennuástand í bergi umhverfis göng .....	30
Mynd 6.4	Lóðréttar spennur í jarðlagastafla sem fall af dýpi.....	31
Mynd 6.5	Láréttar spennur í jarðlagastafla sem fall af dýpi.....	33
Mynd 6.6	Láréttar færslur GPS-mælistöðva á Íslandi frá 1993 til 2004 .....	34
Mynd 6.7	Spennu-streitu graf fyrir fjaðrandi-deigt efni.....	35
Mynd 6.8	Kringlótt göng í einsleitu og einsátta spennusviði .....	36
Mynd 6.9	Hornrétt spenna og snertilspenna sem fall af fjarlægð frá yfirborði ganga .....	37
Mynd 6.10	Mohr-Coulomb brotlíking fyrir hornréttu spennu og snertilspennu í göngum.....	37
Mynd 6.11	Deig aflögun í bergi næst göngum .....	38
Mynd 6.12	Bergfærslur samfara fallandi þrýstispenntu á gangaveggi.....	39
Mynd 7.1	Ankerisfestur bergbolti.....	42
Mynd 7.2	Innsteyptur bergbolti .....	42

Mynd 7.3	Bergboltun við óstöðugar aðstæður.....	43
Mynd 7.4	Dæmigerð aðferð við steypuásprautun.....	44
Mynd 7.5	Sprautusteypurif.....	45
Mynd 7.6	Dæmi um uppsetningu sprautusteypurifja og sprautusteypuboga.....	45
Mynd 7.7	Þríhyrnd og ferhyrnd grind sprautusteypuboga.....	46
Mynd 7.8	Inntaksstærðir stífnistuðuls fyrir endafesta bergbolta.....	47
Mynd 7.9	Álag á heilfóðraðan hálfhring í fjaðrandi bergi.....	49
Mynd 7.10	Álag á sveigðan bita í heilfóðruðum göngum sem mynda hálfhring.....	50
Mynd 7.11	Ákvörðun á öryggisstuðlum gagnvart þrýsti- og togbroti með hliðsjón af áslægum spennum í sveigðum bita.....	51
Mynd 7.12	Stuðningsgetugraf fyrir samspil áslægrar þrýstispenntu (N) og beygjuvægis (M) í fódningu ganga.....	52
Mynd 7.13	Ákvörðun á öryggisstuðlum gagnvart þrýsti- og togbroti með hliðsjón af höfuðspennum í sveigðum bita.....	53
Mynd 7.14	Stuðningsgetugraf fyrir samspil áslægrar þrýstispenntu (N) og skúfkrafts (Q) í fódningu ganga.....	54
Mynd 7.15	Virkjun bergstyrkinga samfara bergfærslum.....	55
Mynd 8.1	Dæmigert, tvívítt tölvulíkan af jarðgöngum.....	56
Mynd 8.2	Útvíkkun bergs samfara skriði eftir örprungum og smáögnum.....	60
Mynd 8.3	Langsnið úr þrívíðu einingarlíkani sem sýnir aflögun bergs við kringlótt jarðgöng.....	62
Mynd 8.4	Aflögun bergs umhverfis jarðgöng í greftri.....	63
Mynd 9.1	Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 1.....	65
Mynd 9.2	Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 2.....	66
Mynd 9.3	Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 3.....	68
Mynd 9.4	Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 4.....	69
Mynd 9.5	Samband Q-gildis og bils á milli bergbolta.....	71
Mynd 9.6	Stuðningur bergbolta við sexhyrningslaga svæði.....	71
Mynd 9.7	Samband Q-gildis og fjölda bergbolta á fermetra.....	72
Mynd 9.8	Samband Q-gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu.....	73

Mynd 9.9	Samband Q-gildis og bilsins á milli sprautusteypuboga .....	74
Mynd 9.10	Hönnun sprautusteypuboga skv.útboðsgögnum Norðfjarðarganga.....	75
Mynd 9.11	Þverskurðarmynd af sprautusteypubogum sem notaðir eru í Norðfjarðargöngum. ....	76
Mynd 9.12	Fjöldi bergbolta á metra á rannsóknarsvæði 1. ....	91
Mynd 9.13	Rúmmál sprautusteypu á metra á rannsóknarsvæði 1. ....	91
Mynd 9.14	Fjöldi bergbolta á metra á rannsóknarsvæði 2. ....	92
Mynd 9.15	Rúmmál sprautusteypu á metra á rannsóknarsvæði 2. ....	93
Mynd 9.16	Fjöldi bergbolta á metra á rannsóknarsvæði 3. ....	95
Mynd 9.17	Rúmmál sprautusteypu á metra á rannsóknarsvæði 3. ....	95
Mynd 9.18	Fjöldi bergbolta á metra á rannsóknarsvæði 4. ....	96
Mynd 9.19	Rúmmál sprautusteypu á metra á rannsóknarsvæði 4. ....	96
Mynd 9.20	Samanburður á sambandi Q-gildis þekju og fjölda bergbolta .....	97
Mynd 9.21	Samanburður á sambandi Q-gildis þekju og magns sprautusteypu .....	98
Mynd 9.22	Einfaldað þversnið Norðfjarðarganga sem notað er við líkangerð.....	103
Mynd 9.23	Líkan af jarðlagaskipan á rannsóknarsvæði 1 .....	104
Mynd 9.24	Hoek & Brown brotlíkan þóleiít-basalts og basaltkarga á rannsóknarsvæði 1 .....	105
Mynd 9.25	Líkan af jarðlagaskipan á rannsóknarsvæði 4 .....	107
Mynd 9.26	Hoek & Brown brotlíkan basaltkarga og setbergs á rannsóknarsvæði 4 .....	108
Mynd 9.27	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu .....	111
Mynd 9.28	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 50-50 álagsdreifingu.....	111
Mynd 9.29	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásapryástistyrk basaltkarga .....	112
Mynd 9.30	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásapryástistyrk basalts .....	112
Mynd 9.31	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul basalts.....	113
Mynd 9.32	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi.....	113
Mynd 9.33	Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi.....	114

Mynd 9.34	Hnignar einingar í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu .....	115
Mynd 9.35	Hnignar einingar í salva F377 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu .....	115
Mynd 9.36	Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	116
Mynd 9.37	Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásaprýstistyrk basalts .....	116
Mynd 9.38	Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul basalts .....	117
Mynd 9.39	Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi.....	117
Mynd 9.40	Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi .....	118
Mynd 9.41	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	119
Mynd 9.42	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu.....	119
Mynd 9.43	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	120
Mynd 9.44	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásaprýstistyrk þóleiít-basalts .....	120
Mynd 9.45	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul þóleiít-basalts .....	121
Mynd 9.46	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi.....	121
Mynd 9.47	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi .....	122
Mynd 9.48	Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt grunnlíkan .....	123
Mynd 9.49	Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt grunnlíkan .....	124
Mynd 9.50	Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	124
Mynd 9.51	Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	125
Mynd 9.52	Bergfærsluferill grunnlíkans fyrir salva F377.....	126
Mynd 9.53	Bergfærsluferill miðað við 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga í salva F377.....	126

Mynd 9.54	Öryggi bergstyrkinga í salva F377: kannaðir bergboltar og sprautusteypueiningar.....	127
Mynd 9.55	Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	128
Mynd 9.56	Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	128
Mynd 9.57	Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækkun GSI-gilda um 10.....	129
Mynd 9.58	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	130
Mynd 9.59	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	130
Mynd 9.60	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. ....	131
Mynd 9.61	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	131
Mynd 9.62	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækkun GSI-gilda um 10.....	132
Mynd 9.63	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækkun GSI-gilda um 10.....	132
Mynd 9.64	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu .....	133
Mynd 9.65	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu .....	134
Mynd 9.66	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	134
Mynd 9.67	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga úþpenslu setlags .....	135
Mynd 9.68	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi.....	135
Mynd 9.69	Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi.....	136
Mynd 9.70	Hnignar einingar í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	137
Mynd 9.71	Hnignar einingar í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu.....	137
Mynd 9.72	Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	138
Mynd 9.73	Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga úþpenslu setlags .....	138



Mynd 9.74	Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi .....	139
Mynd 9.75	Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi.....	139
Mynd 9.76	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	140
Mynd 9.77	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu.....	141
Mynd 9.78	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga .....	141
Mynd 9.79	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga útpenslu setlags.....	142
Mynd 9.80	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi .....	142
Mynd 9.81	Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi .....	143
Mynd 9.82	Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt grunnlíkan .....	144
Mynd 9.83	Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt grunnlíkan .....	145
Mynd 9.84	Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	145
Mynd 9.85	Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	146
Mynd 9.86	Bergfærsluferill grunnlíkans fyrir salva 554 .....	147
Mynd 9.87	Bergfærsluferill fyrir salva 554 m.v. 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	147
Mynd 9.88	Öryggi bergstyrkinga í salva 554: kannaðir bergboltar og sprautusteypueiningar .....	148
Mynd 9.89	Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	149
Mynd 9.90	Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga.....	150
Mynd 9.91	Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði miðað við lækun GSI-gilda um 10 .....	150
Mynd 9.92	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	151
Mynd 9.93	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu.....	152

Mynd 9.94	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásapryástistyrk basaltkarga .....	152
Mynd 9.95	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásapryástistyrk basaltkarga .....	153
Mynd 9.96	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10 .....	153
Mynd 9.97	Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í veggjum í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10 .....	154

# Töflur

Tafla 2.1	Helstu magntölur Norðfjarðarganga.....	7
Tafla 3.1.	Meðalþykkt hraunlaga í nágrenni Reyðarfjarðar.....	11
Tafla 3.2	Tæknileg flokkun íslensks basalts .....	11
Tafla 5.1	Aðlögun Q-gilda við hönnun bergstyrkinga í gangaveggi.....	26
Tafla 5.2	Algengir stuðlar sem notaðir eru við útreikninga á Q-gildi bergs .....	28
Tafla 6.1	Stuðlarnir A og B í jöfnum Hoek & Brown fyrir mismunandi þversnið.....	40
Tafla 8.1	Mat á einásaprustistyrk mismunandi berggerða í felti .....	58
Tafla 8.2	Ákvörðun á gildi fastans $m_i$ eftir berggerðum .....	59
Tafla 9.1	Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 1 .....	66
Tafla 9.2	Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 2 .....	67
Tafla 9.3	Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 3 .....	68
Tafla 9.4	Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 4.....	69
Tafla 9.5	Samband Q-gildis og bils á milli bergbolta skv. styrkingagrafi .....	70
Tafla 9.6	Samband Q-gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu skv. styrkingagrafi.....	72
Tafla 9.7	Samband Q-gildis, fjölda rifjalaga, bils á milli rifja og heildarþykktar sprautusteypu skv. styrkingagrafi .....	73
Tafla 9.8	Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum Q-gildum á rannsóknarsvæði 1 .....	76
Tafla 9.9	Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1 .....	77
Tafla 9.10	Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2 .....	77
Tafla 9.11	Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum Q-gildum á rannsóknarsvæði 2 .....	78
Tafla 9.12	Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2 .....	78
Tafla 9.13	Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2 .....	79
Tafla 9.14	Hannað bil á milli sprautusteypuboga á rannsóknarsvæði 2 .....	80
Tafla 9.15	Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum Q-gildum á rannsóknarsvæði 3 .....	80
Tafla 9.16	Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3 .....	81

Tafla 9.17	Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3 .....	81
Tafla 9.18	Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum (*) Q-gildum á rannsóknarsvæði 4.....	82
Tafla 9.19	Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 4 .....	82
Tafla 9.20	Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 4 .....	83
Tafla 9.21	Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 1.....	85
Tafla 9.22	Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1 .....	85
Tafla 9.23	Magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.....	86
Tafla 9.24	Bergboltar, sprautusteypubogar og steypuhula á rannsóknarsvæði 2.....	86
Tafla 9.25	Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 3.....	87
Tafla 9.26	Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3 .....	88
Tafla 9.27	Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 4.....	88
Tafla 9.28	Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 4 .....	89
Tafla 9.29	Samanburður á styrkingapörf skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 1.....	90
Tafla 9.30	Samanburður á styrkingapörf skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 2.....	92
Tafla 9.31	Samanburður á fjölda og þéttleika sprautusteypuboga skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 2 .....	93
Tafla 9.32	Samanburður á magni steypuhulu á bogasvæði m.v. hönnunarteikningar og lokastyrkingar.....	94
Tafla 9.33	Samanburður á heildarmagni sprautusteypu á bogasvæði m.v. hönnunarteikningar og lokastyrkingar .....	94
Tafla 9.34	Samanburður á styrkingapörf skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 3.....	94
Tafla 9.35	Samanburður á styrkingapörf skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 4.....	96
Tafla 9.36	RQD-gildi og sprungutíðni á rannsóknarsvæðum 1–4.....	98
Tafla 9.37	Lengd bergbolta miðað við Poisson-dreifingu sprungna .....	99
Tafla 9.38	Tæknilegir eiginleikar austfirskis basalts .....	100
Tafla 9.39	Eiginleikar setbergs í Norðfjarðargöngum.....	101

Tafla 9.40	Eiginleikar setbergs Eskifjarðarmegin í Norðfjarðargöngum .....	101
Tafla 9.41	Yfirlit yfir helstu eiginleika bergbolta í Norðfjarðargöngum.....	102
Tafla 9.42	Yfirlit yfir helstu eiginleika trefjastyrktrar sprautusteypu í Norðfjarðargöngum.....	102
Tafla 9.43	Dýpi og bergspennur á rannsóknarsvæði 1 .....	103
Tafla 9.44	Inntaksstærðir berggerða fyrir líkan af rannsóknarsvæði 1 .....	104
Tafla 9.45	Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðlar fyrir þóleiít-basalt og basaltkarga.....	105
Tafla 9.46	Eiginleikar þóleiít-basalts og basaltkarga eftir að brotþoli er náð .....	106
Tafla 9.47	Magn bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 1 .....	106
Tafla 9.48	Dýpi og bergspennur á rannsóknarsvæði 4.....	106
Tafla 9.49	Inntaksstærðir setbergs fyrir líkan af rannsóknarsvæði 4 .....	107
Tafla 9.50	Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðlar fyrir setberg .....	108
Tafla 9.51	Eiginleikar setbergs eftir að brotþoli er náð.....	109
Tafla 9.52	Magn og eiginleikar bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 4.....	109
Tafla 9.53	Áhrif GSI-gildis á bergfærslur í dæmigerðu íslensku veggangasniði.....	110
Tafla 9.54	Niðurstöður líkanreikninga fyrir salva F377.....	122
Tafla 9.55	Samanburður á bergspennum skv. grunnlíkani og jöfnum.....	125
Tafla 9.56	Niðurstöður líkanreikninga fyrir salva 554.....	143
Tafla 9.57	Samanburður á bergspennum skv. grunnlíkani og jöfnum.....	146

# Þakkir

Kærar þakkir færi ég öllum þeim sem studdu mig með einum eða öðrum hætti við vinnu verkefnisins. Sérstakar þakkir fá eftirtaldir aðilar:

Þórey Ólöf Þorgilsdóttir jarðfræðingur á Hnit verkfræðistofu fær sérstakar þakkir fyrir skjóta útvegum gagna og ómælda aðstoð í tíma og ótíma. Guðmundur Þór Björnsson og Ófeigur Örn Ófeigsson hjá Hnit fá einnig þakkir fyrir góða samvinnu og veittar upplýsingar.

Birgir Jónsson dósent við Háskóla Íslands og eftirlitsmaður hjá Hnit verkfræðistofu fær þakkir fyrir auðsýnda aðstoð og áhuga á verkefninu.

Gísli Eiríksson yfirmaður jarðgangadeildar Vegagerðarinnar fær þakkir fyrir gagnlegar ábendingar við mótun verkefnisins.

Matthías Loftsson, annar aðalhönnuður ganganna, hjá Mannvit verkfræðistofu fær þakkir fyrir skjót og greinargóð svör við fyrirspurnum og gagnlegar ábendingar.

Dr. Sigurður Erlingsson leiðbeinandi minn og prófessor við Háskóla Íslands fær kærar þakkir fyrir góða leiðbeiningu, hvatningu og stuðning við að móta krefjandi og áhugavert verkefni.

Dr. Hreggviður Norðdahl umsjónarkennari minn og dósent við Háskóla Íslands fær einnig þakkir fyrir góða leiðbeiningu, hvatningu og stuðning.

Þá er ástæða til þess að þakka Jessicu Curran hjá Rocscience fyrir aðstoðina við að fá aðgang að  $RS^2$  og *RocData*.

Foreldrar mínir Anna Maren Sveinbjörnsdóttir og Jónas Pétur Jónsson fá sérstakar þakkir fyrir afnotin af Núpalandinu. Án húsaskjólis á höfuðborgarsvæðinu hefði framhaldsnámið verið illmögulegt.

Eiginmaður minn Björn Halldórsson og afkvæmin Jónas Bjarki, Bergrún Eva og Hulda Kristín eiga skilið ómælt hrós og þakklæti fyrir óeigingjarnan stuðning og hvatningu.

# 1 Inngangur

Veggöng eru með dýrari opinberum framkvæmdum sem ráðist er í hér á landi. Gera má ráð fyrir að hver kílómetri í jarðgöngum kosti að jafnaði um 1,2 milljarða króna að núvirði (Fjármála- og efnahagsráðuneytið, 2004). Jafnvel þótt þörfin fyrir samgöngubætur sé brýn og augljós getur reynst erfitt að rökstyðja svo kostnaðarsamar framkvæmdir fáum til handa. Fyrir vikið er lögð áhersla á að forgangsraða verkefnum og meta arðsemi þeirra, bæði m.t.t. fjárhagslegs ábata en ekki síður öryggis og bættra lífsgæða.

Sá einstaki þáttur sem hvað ófyrirsjáanlegust áhrif hefur á kostnað við veggöng er jarðfræði viðkomandi svæðis. Mikilvægi jarðfræðirannsókna verður því seint ofmetið. Jarðfræðin ræður mestu um framvindu verksins, umfang bergstyrkinga og þær ráðstafanir sem grípa þarf til vegna vatnsaga og óvæntra uppákoma. Berggæði eru því afar þýðingarmikil þegar kostnaður við jarðgangagröft er annars vegar. Með ítarlegum undirbúningsrannsóknum má jafnframt lágmarka vandamál þótt þau verði seint fyrirbyggð eða fyrirséð að öllu leyti.

Í því skyni að meta áhrif berggæða á kostnað við jarðgöng m.t.t. umfangs bergstyrkinga hafa verkfræðingar á sviði jarðgangagerðar komið sér upp sk. berggæðamatskerfum. Kerfin byggja á því að gefa berginu einkunn út frá eiginleikum þess og tengja einkunnina við áætlaða styrkingaþörf. Kerfin byggja á áratuga reynslu af jarðgangagerð víða um heiminn og eru í sífelldri þróun samfara aukinni þekkingu og bættri tækni.

Á Íslandi hefur norska Q-kerfið verið notað í öllum veggangaframkvæmdum frá árinu 1980. Vegna þess hve jarðfræði Íslands er ólík því sem gerist á meginlöndunum hefur Vegagerðin í samstarfi við íslenska jarð- og verkfræðinga unnið að aðlögun kerfisins að íslenskum aðstæðum. Árið 2009 gaf Vegagerðin út leiðbeiningaritíð *Kortlagning á jarðfræði og styrkingum í jarðgöngum* þar sem inntaksstærðum Q-gildisins er lýst fyrir íslenskt berg.

Í útboðsgögnum fyrir Norðfjarðargöng er kveðið á um að bergstyrkingar skuli útfærðar í samræmi við Q-kerfið. Verktaki og eftirlitsaðilar eru meðvitaðir um þá kröfu þótt henni sé ekki fylgt eftir með markvissum hætti. Að jafnaði eru bergstyrkingar í íslenskum göngum ekki teknar út m.t.t. þess hversu vel þær samræmast Q-kerfinu jafnvel þótt ætlast sé til þess að kerfið sé haft til hliðsjónar við val á styrkingum. Af þessum sökum þykir áhugavert að kanna hvort samræmi sé á milli uppsettra styrkinga og þeirra styrkinga sem Q-kerfið kveður á um í Norðfjarðargöngum.

Við mat á Q-gildi bergs reynir mjög á þekkingu og reynslu þess sem framkvæmir matið. Því má ætla að Q-matið sé að nokkru leyti persónubundið. Að því gefnu að Q-gildið sé rétt metið geta styrkingar ýmist verið í samræmi við Q-kerfið eða ekki. Verulegar og kerfisbundnar of- eða vanstyrkingar eða mikil óregla í styrkingum geta þýtt að styrkingarnar séu einfaldlega rangar miðað við Q-kerfið en ekki má útiloka þann möguleika að kerfið henti illa við íslenskar aðstæður eða þarfnist frekari aðlögunar. Annar

möguleiki er sá að Q-gildið sé *rangt* metið en styrkingarnar ýmist réttar eða rangar m.t.t. kerfisins.

Vegna hinna empirísku eiginleika Q-kerfisins er gagnlegt að kanna réttmæti Q-gildisins og öryggi bergstyrkinga með líkanreikningum. Berginu eru þá gefnir ákveðnir eiginleikar sem byggja á prófunum og mælingum og áhrif uppsettra bergstyrkinga á tiltekin gangaþversnið könnuð. Þannig má sjá hvort samræmi sé á milli berggæða, Q-gildis og styrkinga. Með líkanreikningum má einnig kanna áhrif mismunandi jarðlaga og eiginleika þeirra á stöðugleika bergmassa og öryggi styrkinga umhverfis jarðgöng. Þannig fæst tilfinning fyrir því hvaða inntaksstærðir hafa mikil áhrif á niðurstöður líkanreikninga.

Verkefnið sem hér fer á eftir er þríþætt:

Fyrsti hlutinn felur í sér hönnun styrkinga fyrir valda kafla í Norðfjarðargöngum. Styrkingar eru hannaðar í samræmi við Q-kerfið og tekið er mið af þeim Q-gildum sem gefin eru upp í jarðfræðiskýrslum verktaka.

Í öðrum hluta eru hannaðar styrkingar bornar saman við uppsettar styrkingar í göngunum, bæði stakir salvar og heildarmagn styrkinga. Upplýsingar um uppsettar styrkingar eru fengnar úr bolta- og sprautusteyppuskýrslum frá verktaka ásamt Excel-skjölum frá eftirliti.

Þriðji hlutinn felur í sér líkangerð með forritinu  $RS^2$  þar sem samspil bergmassa og uppsettra styrkinga er kannað í völdum þversniðum Norðfjarðarganga. Inntaksstærðir á borð við tæknilega eiginleika bergs og styrkinga, bergspennur og ásættanlegar bergfærslur eru skilgreindar og kannað hvaða áhrif mismunandi eiginleikar bergs hafa á bergfærslur og öryggi styrkinga. Mikilvægt er að þær stærðir sem mest áhrif hafa á útkomu líkanreikninga séu sem *réttastar*.



## 2 Norðfjarðargöng

Ný Norðfjarðargöng munu leysa af hólmi aldagamla þjóðleið um Oddsdal og Oddsskarð á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar. Með framkvæmdinni verða hin fjörutíu ára gömlu Oddsskarðsgöng aflögð og Norðfjarðarvegur um Oddsskarð mun heyrja sögunni til (mynd 2.1). Þörfin fyrir samgöngubætur á svæðinu er brýn en vegurinn uppfyllir ekki nútímakröfur um umferðaröryggi og akstursþægindi enda brattur, með kröppum beygjum og takmarkaðri sjónlengd. Hin einbreiðu Oddsskarðsgöng sem liggja í um 630 m h.y.s. megna engan veginn að rjúfa vetrareinangrun Norðfjarðar vegna fannfergis og veðurhæðar auk þess sem þokusælt er umhverfis göngin allt árið um kring. Þrátt fyrir að göngin séu aðeins 640 m löng með tveimur mætingarútskotum eru akstursskilyrði í Oddsskarðsgöngum nokkuð erfið vegna blindhæðar inni í göngunum (Helga Aðalgeirsdóttir, Magnús Björnsson & Sóley Jónasdóttir, 2009).



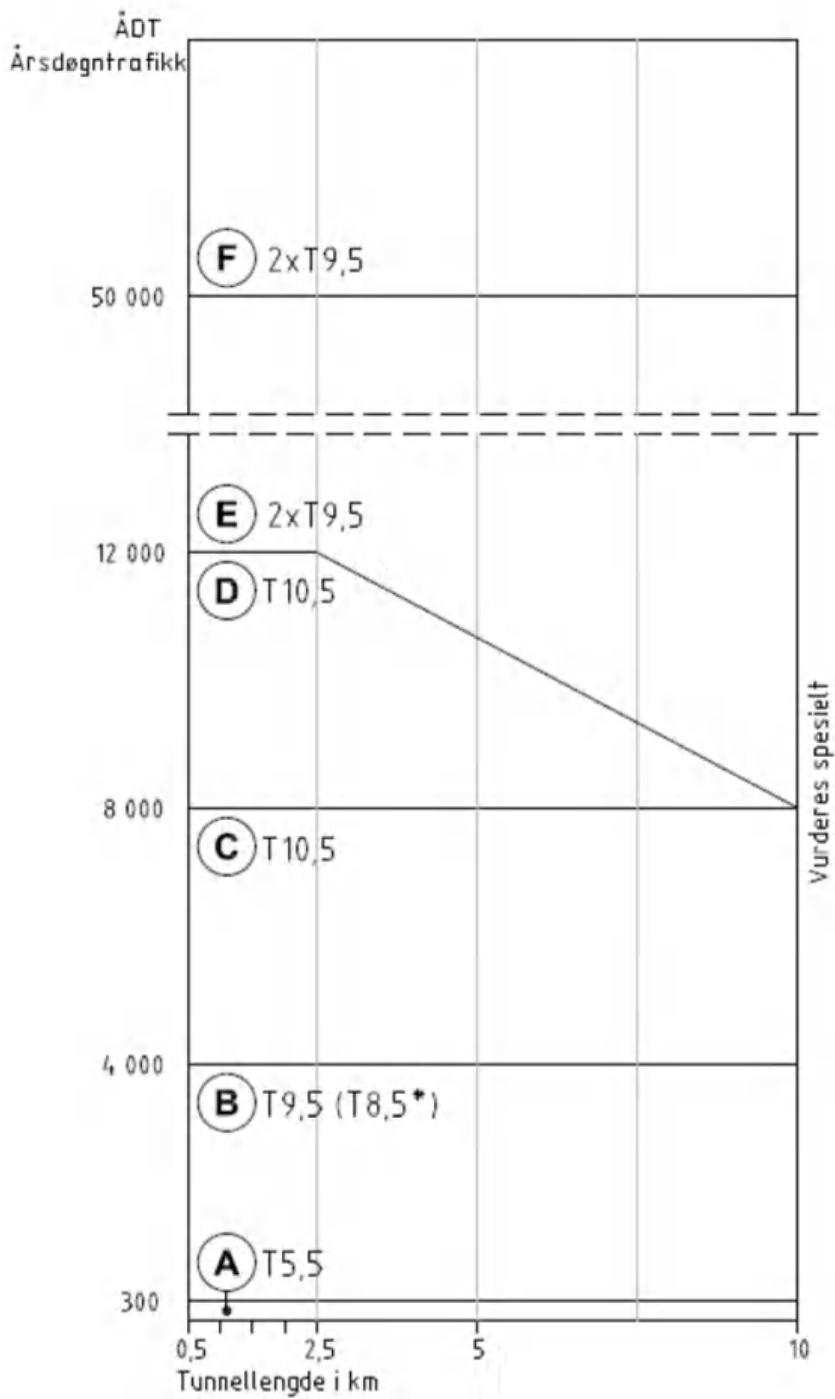
Mynd 2.1 Lega nýrra Norðfjarðarganga (Vegagerðin, 2012). Þjóðvegur 92 um Oddsskarð heyrir brátt sögunni til.

Norðfjarðargöng eru mikilvæg samgöngubót fyrir Norðfirðinga og Fjarðabyggð í heild sinni en göngin treysta enn frekar samstarf og samgöngur innan hins sameinaða sveitarfélags. Þau hafa einnig mikil áhrif á öllu Mið-Austurlandi og bæta verulega aðgengi að mikilvægum mennta- og heilbrigðisstofnunum sem ætlað er að þjóna öllum landsfjórðungnum. Þá má gera ráð fyrir að öryggi íbúa á svæðinu aukist, t.d. varðandi sjúkraflutninga auk þess sem hagkvæmari og öruggari flutningsskilyrði skapast fyrir aðföng og afurðir til og frá Neskaupstað (Helga Aðalgeirsdóttir o.fl., 2009).

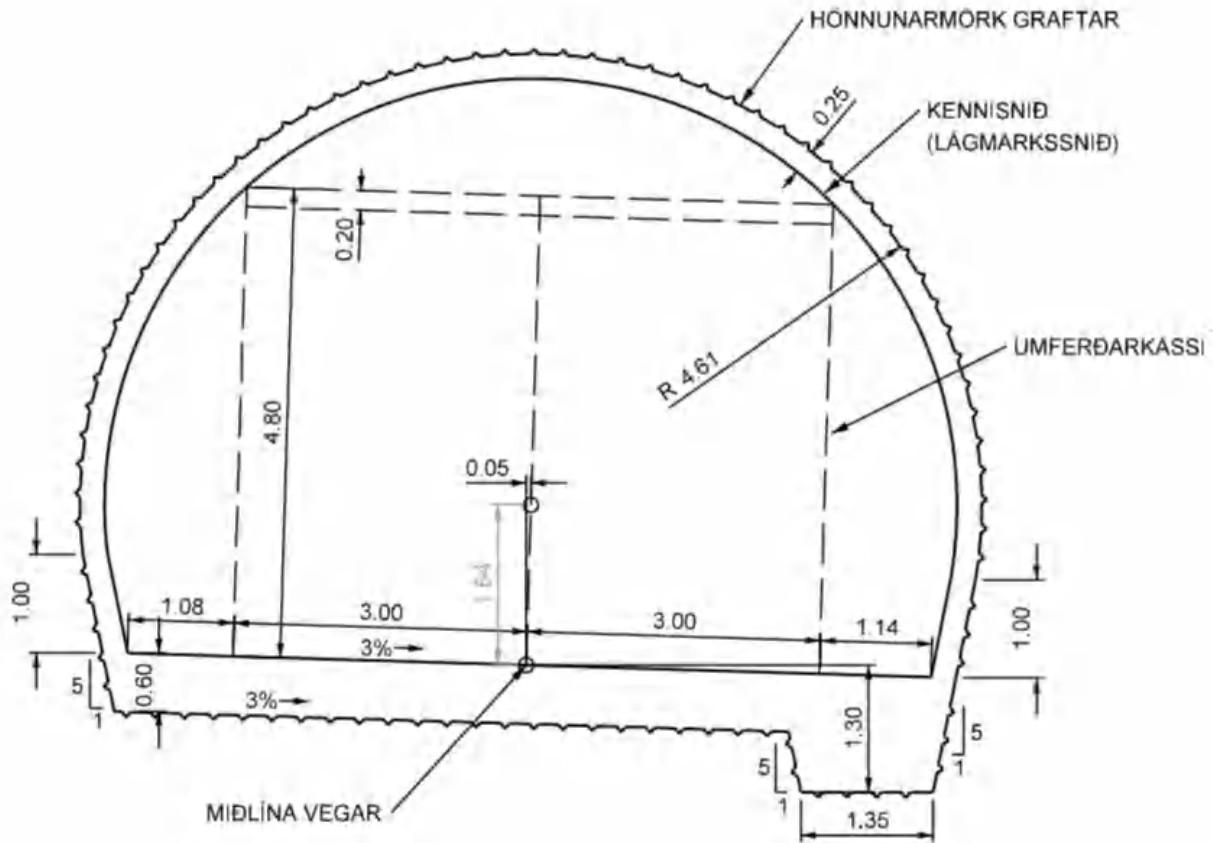
Hönnun samgöngumannvirkja á borð við veggöng ræðst að verulegu leyti af því umferðarmagni sem mannvirkjunum er ætlað að bera. Við hönnunina er tekið mið af þeirri umferð sem ætla má að fari um göngin tuttugu árum eftir opnun þeirra. Erfitt getur reynst að áætla umferðarmagn langt fram í tímann enda hefur reynslan sýnt að akstur er nátengdur ýmsum þjóðhagslegum þáttum sem oft á tíðum getur reynst erfitt að sjá fyrir (Friðleifur Ingi Brynjarsson, 2013). Þar sem um umtalsverðar samgöngubætur eða styttingu vegalengda er að ræða þarf enn fremur að áætla þá umferðaraukningu sem verður eingöngu af þeim sökum.

Árið 2012 lét Vegagerðin vinna spá um þróun umferðar um ný Norðfjarðargöng fyrir tímabilið 2017–2038. Í spánni er gert ráð fyrir því að skammtíma fjölgun íbúa vegna álvers í Reyðarfirði hafi þegar komið fram og að árleg íbúafjölgun á áhrifasvæði ganganna (Reyðarfjörður, Eskifjörður og Neskaupstaður) verði á bilinu 0,25–0,50%. Vegna væntinga ferðarþjónustunnar um fjölgun ferðamanna þykir eðlilegt að gera ráð fyrir a.m.k. 0,5% árlegri umferðaraukningu. Lágmarks ÁDU fyrir árið 2038 er því 465 ökutæki samanborið við 407 ökutæki árið 2012. Þegar tekið er mið af þyngdarpunktalíkani Vegagerðarinnar og horft til þess að erfiður fjallvegur verður lagður af auk þess sem um endastöð er að ræða fæst miðspárgildi upp á 680 ökutæki á sólarhring fyrir árið 2038. Háspá gerir síðan ráð fyrir 2,85% árlegri umferðaraukningu og orsakaðri umferð upp á 35% við opnun ganganna sem gefur ÁDU = 1140 ökutæki árið 2038. Sé lág- og háspám gefið vægið 1/5 og miðspá vægið 3/5 fæst líklegasta gildi ÁDU = 725 ökutæki fyrir árið 2038 (Friðleifur Ingi Brynjarsson, 2012). Þetta samsvarar 78% aukningu umferðar frá árinu 2012.

Skv. norska veggangastaðlinum eru veggöng flokkuð á grundvelli umferðarmagns og vegalengdar eins og sjá má á mynd 2.2. Að forskálum meðtöldum verða Norðfjarðargöng rúmir 7,9 km að lengd og lenda því í gangaflokk B (Statens vegvesen, 2010). Vegna lítillar umferðar ( $\text{ÁDU} \leq 1\,500$ ) mættu þau vera af gerðinni T8.5 en Vegagerðin (2012) hefur ákveðið að notast við gangaþversnið af gerðinni T8. Göngin verða því rúmlega 8 m breið í akbrautarhæð með 6 m breiðri akbraut. Á mynd 2.3 má sjá kennisnið ganganna.



Mynd 2.2 Ákvörðun á gangaþversniði ræðst af lengd ganga og ársdagsumferð (Statens vegvesen, 2010).



Mynd 2.3 Kennisnið Norðfjarðarganga. Göngin verða af gerðinni T8, þ.e. rúmlega 8 m breið í akbrautarhæð (Vegagerðin, 2013).

Gangaflokkurinn ræður ekki aðeins þversniði ganganna heldur einnig langsniðinu m.t.t. útskota og öryggisráðstafana (Statens vegvesen, 2010). Fyrir veggöng í flokki B er gerð krafa um öryggisútskot á 500 m fresti og snúningsútskot með 2000 m millibili (þó ekki innan á beygju ef beygjuradíusinn er < 5000 m). Í Norðfjarðargöngum verða því fjórtán útskot, þar af fjögur snúningsútskot (Vegagerðin, 2012). Neyðarstöðvar með einum neyðarsíma og tveimur slökkvitækjum skulu vera á 125 m fresti í göngum í B-flokki. Í Norðfjarðargöngum verða slíkar stöðvar þó með 250 m millibili. Líklegt má telja að lítið umferðarmagn ráði einhverju þar um. Í veggöngum í flokki B verður að vera varaafsstöð skv. norska staðlinum en engin slík verður í Norðfjarðargöngum enda verður rafmagn til ganganna tryggt í gegnum báða gangamunna.

Áætlað er að um 420 þúsund rúmmetrar af sprengdu bergi falli til við gangagröftinn og hluta þess á að nota í fyllingar og burðarlög við vegagerð. Í Fannardal þarf að byggja upp 5,3 km langan veg og vegna snjóflóðahættu þarf að verja hann að hluta. Sprengda bergið verður því einnig notað í snjóflóðavarnir. Í Eskifirði þarf að byggja 2 km langan veg. Vegirnir verða 8 m breiðir með 7 m breiðri akbraut. Í tengslum við vegagerð að göngum verða byggðar nýjar brýr á Norðfjarðará og Eskifjarðará (Vegagerðin, 2012). Tafla 2.1 sýnir helstu magntölur verkefnisins skv. útboðsgögnum og tilboðsskrám.

Tafla 2.1 Helstu magntölur Norðfjarðarganga skv. útbodsgögnum og tilboðsskrám (Vegagerðin, 2012; Gísli Eiríksson, 2013).

Gröftur jarðganga	420.000 m <sup>3</sup>
Sprautusteypa	17.000 m <sup>3</sup>
Bergboltar	26.800 stk.
Steinsteypa	3.000 m <sup>3</sup>
Forskering	100.000 m <sup>3</sup>
Fylling	650.000 m <sup>3</sup>

Norðfjarðargöng munu liggja í tveimur aflíðandi beygjum með 12 000 m radíus. Eskifjarðarmegin verður gangamunninn í um 15 m h.y.s. en Norðfjarðarmegin liggur hann í um 125 m h.y.s. Þrír fjórðu hlutar leiðarinnar verða með 3% halla upp frá Eskifirði og fer gangagólfið hæst í 175 m h.y.s. Fjórðungi leiðarinnar hallar síðan niður til Fannardals í Norðfirði með 1,5% halla (Vegagerðin, 2012). Í viðauka A má sjá langsníð og grunnmynd ganganna.

Í útbodsgögnum er gerð krafa um nákvæma skráningu og kortlagningu á jarðfræði og bergstyrkingum í göngunum í samræmi við leiðbeiningar Vegagerðarinnar frá árinu 2009. Jarðfræði verður að kortleggja, bæði vegg og þekju ganganna, áður en bergið er hulið með sprautusteypu. Gæði bergsins skulu metin skv. hinu norska Q-kerfi og styrkingaþörf ákvörðuð í samræmi við það. Bergboltar og aðrar styrkingar sem sprautað er yfir með steypu skulu einnig kortlögð fyrir sprautun. Jarðfræði og styrkingar skal kortleggja með nákvæmni upp á  $\pm 1$  m. Gera skal nákvæma grein fyrir framvindu verksins og hverri sprengifæru skulu gerð ítarleg skil. Að auki skal greina sérstaklega frá innrennsli vatns og fráveitumálum. Allar vatnslæðningar, lagnir og brunna þarf að kortleggja með nákvæmni upp á  $\pm 0,5$  m á meðan á framkvæmdum stendur (Vegagerðin, 2009).

Framkvæmdir við ný Norðfjarðargöng hófust í nóvember 2013. Framkvæmdin er í höndum tékkneska verktakans Metrostav a.s. og Suðurverks hf. og verkfræðistofan Hnit hf. hefur eftirlit með verkinu. Áætlaður kostnaður við verkið er 12.054 m. kr. á verðlagi í febrúar 2013. Í þeirri tölu er innifalinn kostnaður við rannsóknir, hönnun og eftirlit auk framkvæmdanna sjálfra. Áætluð verklok eru í september 2017 (Vegagerðin, á.á.).

## 3 Jarðfræði

Allar mikilvægar ákvarðanir er varða gangagerð eru á einn eða annan hátt háðar jarðfræði viðkomandi svæðis. Hönnun ganganna m.t.t. staðsetningar og legu, framkvæmdin sjálf, ákvörðun á fýsileika og kostnaði ásamt mati á frammistöðu og endingu ganganna verða að taka mið af þeim jarðlagastafla sem farið er í gegnum. Rannsóknir sýna að jarðfræði er sá þáttur sem helst hefur kostnaðaraukandi áhrif í gangagerð (Efron & Read, 2012). Nákvæm jarðfræðikortlagning ásamt prófun á jarðtæknilegum eiginleikum bergsins á gangaleiðinni eru því grundvallarforsendur þess að áætlanir um framvindu verksins, styrkingaþörf og kostnað standist. Þekking á jarðfræði svæðisins getur einnig gefið vísbendingar um þau vandamál sem upp kunna að koma á framkvæmdatímanum og þannig skapað svigrúm til þess að bregðast við þeim fyrirfram (Parker, 1996).

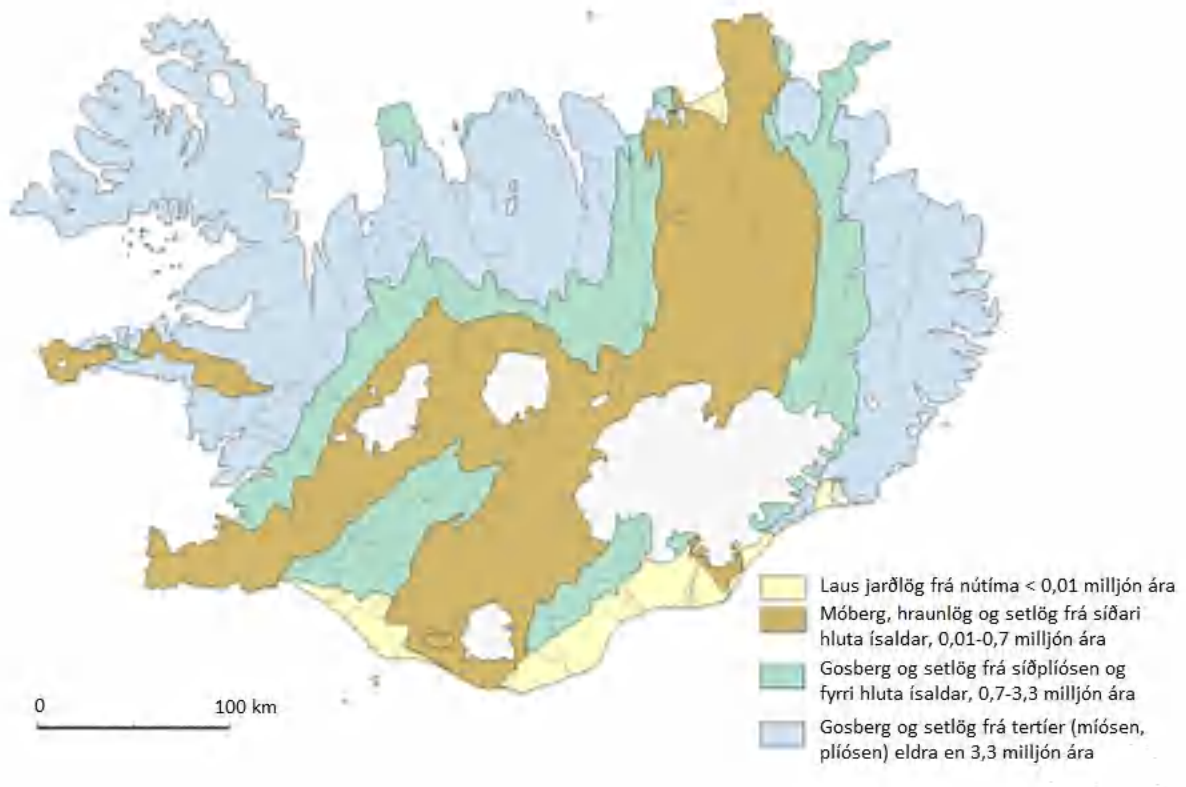
### 3.1 Jarðfræði Íslands

Ísland er hluti af Mið-Atlantshafshryggnum. Hryggurinn, sem alla jafna liggur neðansjávar, markar skilin á milli jarðskorpufleka Norður-Ameríku og Evrasíu og veldur því að meginlöndin fjarlægjast um tæpa 2 cm á ári. Eldvirkni á flekaskilunum ásamt einum öflugasta möttulstróki jarðar gera það að verkum að miðhafshryggurinn ris upp fyrir hafflötinn og myndar Ísland. Í jarðfræðilegu tilliti er Ísland einstakt á heimsvísu. Bæði vegna mikillar eldvirkni en einnig er gerð gosefna og hegðun eldstöðva ólík því sem gerist á meginlöndunum. Þetta má rekja til þess hve grunnt er niður á kvikuuppsprettur í möttlinum undir Íslandi auk þess sem flekaskilin teygja í sífellu á jarðskorpunni og gera spennuástand hennar ólíkt spennuástandi meginlandanna sem myndast hafa við samrek (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).

Eldvirkni á Íslandi er bundin við flekaskilin sjálf ásamt virkum gosbeltum í nágrenni þeirra. Yngsta bergið er því að finna á og við flekaskilin en vegna flekareksins verður bergið eldra eftir því sem fjær dregur. Elsta berg sem fundist hefur ofansjávar á Íslandi er 15–16 milljóna ára gamalt en slíkt berg er að finna á Aust- og Vestfjörðum.

Íslenskum jarðmyndunum má í grófum dráttum skipta í fernt eftir jarðsögulegum aldri þeirra (Kristján Sæmundsson 1979; Þorleifur Einarsson, 1991). Elst er blágrýtismyndunin sem varð til á síðari hluta míósen og fyrri hluta plíósen (ca. 16–3,1 milljón ára) þegar Ísland var að byggjast úr sjó. Þá runnu hér basalhraun í miklum flæðigosum á þurru landi í tiltölulega hlýju loftslagi. Á milli gosanna varð til járnrikur jarðvegur sem myndar hin áberandi rauðu millilög blágrýtisstafans. Næst elst er grágrýtismyndunin sem varð til á seinni hluta plíósen og fyrri hluta pleistósen (3,1–0,7 milljón ára). Þar skiptast á gráleit basalhraunlög, bólstraberg og móberg auk þess sem setbergslög af ýmsu tagi verða áberandi. Rauðu millilögin fara hins vegar þverrandi sem bendir til kólnandi veðurfars. Þriðja jarðmyndunin, móbergsmyndunin, varð til á síðari hluta pleistósen (0,7–0,01 milljón ára) og samanstendur einkum af grágrýtishraunlögum sem runnið hafa á hlýskeiðum og bólstrabergi og móbergi sem hafa myndast undir jökli. Blágrýtis-, grágrýtis- og

móbergsmýndanirnar mynda í sameiningu berggrunn Íslands sem fjórða og yngsta jarðmyndunin hvílir á (mynd 3.1). Yngsta myndunin samanstendur af lausum eða lítt hörðnuðum jarðlögum, s.s. jökulruðningi, árseti og jarðvegi, en einnig gjósku og hraunum frá eldvirkni á nútíma. Hún hóf að myndast í ísaldarlok og er enn í myndun.



Mynd 3.1 Berggrunnskort af Íslandi. Austfirðir tilheyra blágrýtismýnduninni, elsta hluta landsins (eftir Þorleifi Einarssyni, 1991).

### 3.2 Jarðfræði Austurlands

Upp úr miðri síðustu öld voru unnar umfangsmiklar rannsóknir á jarðfræði Austurlands undir forystu breska jarðfræðingsins G.P.L. Walker. Walker kortlagði jarðlagastaflann á svæðinu í þaula og birti í kjölfarið fjölda greina þar sem viðfangsefninu voru gerð ítarleg skil. Jarðlagastaflinn var greindur m.t.t. berggerða og holufyllinga og umfang þeirra metið. Halli jarðlaga var mældur ásamt þéttleika og legu bergganga og misgengja. Þá voru fornar megineldstöðvar á svæðinu teknar til sérstakrar skoðunar og áhrif þeirra á jarðfræði svæðisins rannsökuð. Rannsóknir Walkers beindust einkum að svæðinu frá fjallgarðinum á milli Norðfjarðar og Reyðarfjarðar og suður að Höfn í Hornafirði. Framlag hans til jarðfræðikortlagningar á svæðinu hefur reynst afar mikilvægt við undirbúning mannvirkjagerðar.

### 3.2.1 Upphleðsla

Berggrunnur Austurlands tilheyrir hinni sk. blágrýtismyndun sem varð til fyrir u.þ.b. 3–16 milljónum ára þegar Ísland byggðist úr sjó. Þá runnu hér basalthraun í miklum flæðigösum á þurru landi í tiltölulega hlýju loftslagi. Á milli gosanna varð til járnríkur jarðvegur sem m.a. myndar hin áberandi rauðu millilög blágrýtisstaflans (Þorleifur Einarsson, 1991). Á Austurlandi er blágrýtismyndunin talin vera um 9 km þykk þegar þykkt einstakra hraunlaga frá Gerpi og inn á Fljótsdal er lögð saman (Walker, 1958). Í blágrýtisstaflanum má víða finna leifar af fornum megineldstöðvum sem einkennast af kísilríku (súru) bergi, auknum gangapétteleika, jarðhitaummyndun og óreglulegum jarðlagahalla (Walker, 1963). Á Austurlandi hafa fundist a.m.k. fimmtán megineldstöðvar frá tertíer-tímabilinu (Lúðvík E. Gústafsson o.fl., 1989). Stærst þeirra er Breiðdalsmegineldstöðin sem Walker (1963) rannsakaði og kortlagði ítarlega. Aðrar stórar og vel þekktar megineldstöðvar á svæðinu eru t.d. Reyðarfjarðar- og Þingmúlaeldstöðvar (Walker, 1974).

Utan megineldstöðva samanstendur blágrýtismyndunin á Austurlandi nær eingöngu af basalthraunlögum. Á heildina litið er hlutfall þeirra 80–85% af berggrunni Austurlands. Súr og ísúr hraunlög mynda um 10% jarðlagastaflans en þau er nær eingöngu að finna innan megineldstöðvanna þar sem hlutfall þeirra er mun hærra ( $\leq 30\%$ ) (Walker, 1963). Millilög úr gjósku- og setbergi mynda innan við 10% staflans (Walker, 1958).

Basísku hraunlögum má skipta í þrjár berggerðir m.t.t. bergfræði: ólivín-basalt (ólivín-þóleiít), þóleiít og dílabasalt (Walker, 1958). Ólivín-basalt og þóleiít tilheyra sömu bergsyrpu og mynda efnafræðilega samfellu í jarðlagastafla Austurlands. Hins vegar koma fram tiltölulega skörp skil í gerð holufyllinga á milli berggerðanna tveggja þar sem holufyllingar eru mjög viðkvæmar fyrir smávægilegum breytingum í efnasamsetningu bergsins (Walker, 1963). Þannig eru geislasteinar (zeólítar) fágætir í dæmigerðu þóleiíti á meðan dæmigert ólivín-basalt inniheldur afgerandi geislasteinabelti (Walker, 1958). Dílabasalt þekktist best á áberandi ( $\geq 5\%$ ) plagióklasdílum ásamt minna magni af ágít- eða ólivíndílum. Í jarðlagastaflanum á Austurlandi er að finna áberandi dílabasaltsyrpu, sk. Grænavatnslag, sem er eitt helsta leiðarlag í austfirsku staflanum (Walker, 1963). Á milli basísku hraunlaganna má jafnan finna mjög blöðróttan basaltkarga sem hefur þjappast með tímanum og fyllst af seti og útfellingum.

Þar sem basísk kvika er að jafnaði heit og þunnfljótandi geta basísk hraunlög náð mikilli útbreiðslu og verða fyrir vikið þynnri en súr og ísúr hraunlög. Eftir því sem kvikan er súrari þeim mun seigara verður hraunrennslið að jafnaði sem gerir það að verkum að skriðfletir myndast í hrauninu. Hið súra og ísúra berg hefur síðan tilhneigingu til þess að flagna eftir skriðflötunum (Walker, 1963). Þannig má greina hið dökka, ísúra andesít frá öðru dökku (basísku) bergi. Súr hraunlög þekkjast ennfremur á ljósu yfirbragði auk þess sem þau eru að jafnaði mun þykkari en önnur hraunlög. Fyrir vikið takmarkast útbreiðsla þeirra við megineldstöðvarnar sjálfar. Walker (1958) komst að þeirri niðurstöðu að í nágrenni Reyðarfjarðar væri meðalþykkt hraunlaga af mismunandi berggerðum í samræmi við það sem tafla 3.1 sýnir.



Tafla 3.1. Meðalþykkt hraunlaga í nágrenni Reyðarfjarðar (aðlagð frá Walker, 1958)

Berggerð	Meðalþykkt [m]
Ólivín-basalt	7
Dílabasalt	9,5
Þóleítt	10
Andesít	12
Súr hraun	30

Birgir Jónsson (1996) hefur bent á að hin þrískipta flokkun Walkers á íslensku basalti taki fyrst og fremst mið af bergfræði og áferð (e. texture) sem hafi takmarkaða þýðingu þegar framkvæmdir eru annars vegar. Þar skipti uppbygging (e. structure) staflans meira máli t.d. þykkt hraunlaga, stuðlun og kargahlutfall. Hann leggur því til að hver flokkur Walkers sé greindur í tvennt út frá tæknilegum eiginleikum bergsins. Flokkarnir sex sem Birgir Jónsson (1996) leggur til eru sýndir í töflu 3.2 ásamt algengri þykkt, kargahlutfalli og einásaþrýstistyrk bergsins.

Tafla 3.2 Tæknileg flokkun íslensks basalts (Birgir Jónsson, 1996).

Flokkun íslensks basalts skv. Walker (1958)	Tákn á korti	Tæknileg flokkun íslensks basalts við kortlagningu	Tæknilegir eiginleikar		
			Kargahlutfall (%)	Algeng þykkt hraunlaga (m)	Algengur einásaþrýstistyrkur (MPa)
Þóleítt	Thl	Þóleítt, þunn lög (í tengslum við megineldstöðvar)	25–35	3–8	>200 (150–300)
	Tht	Þóleítt, þykkt (staðbundið)	15–20	10–20	>200 (150–300)
Dílabasalt	Pom	Dílabasalt, massíft (dílur > 10% af rúmmáli)	1–5	10–20	200 (100–250)
	Pob	Dílabasalt (dílur < 10% af rúmmáli)	5–15	10–20	200 (100–300)
Ólivín-basalt	Olt	Ólivín-basalt (ólivín þóleítt)			
	Olc	Samsett hraun (úr dyngjugosum)	0–5	20–80	100 (80–140)

Millilög í austfirsku staflanum eru að jafnaði aðeins fáeinir sentimetrar að þykkt (Walker, 1958). Er þar fyrst og fremst um að ræða rauð millilög sem myndast hafa á mislögum tíma á milli basískra flæðigosa. Rauðu lögin eru jafnan gjóskublandaður jarðvegur sem dregur lit sinn af efnaveðrun í tiltölulega hlýju og röku loftslagi (Roaldset, 1983). Einstaka millilög eru þó af allt öðrum toga og stærðargráðu. Þar er einkum um að ræða flikrubergrs-

og túfflög sem mörg hver hafa náð mikilli útbreiðslu og geta á köflum verið tugir metra að þykkt. Þar helst að nefna Skessulagið sem talið er ein af fyrstu myndunum Breiðdalsmegineldstöðvarinnar. Lagið þekur yfir 400 km<sup>2</sup> lands og er því mikilvægt leiðarlag í jarðlagastaflanum á Austurlandi. Þykkast mælist Skessulagið um 14 m en meðalþykkt þess er nálægt 9 m (Walker, 1962). Úr Reyðarfjarðareldstöðinni hafa einnig komið stór gjóskuflóð sem náð hafa mikilli útbreiðslu. Gibson, Kinsman og Walker (1966) fjalla sérstaklega um sk. Reyðarfjarðartúff og Hólmatindstúff sem finna má ofarlega í staflanum. Þeir gera einnig stuttlega grein fyrir setlögum í neðri hluta jarðlagastaflans, m.a. molabergslagi sem þeir telja hluta af fornum árfarvegi. Við undirbúning Norðfjarðarganga sá Ágúst Guðmundsson (2012) ástæðu til þess að leggja sérstaka áherslu á þessi setlög sem virðast marka nokkuð langt goshlé í uppbyggingu Austfjarðabasaltsins. Þar ægir saman súru gjóskubergi, molabergi og flikrubergi sem rekja má allt til fornu megineldstöðvarinnar í Kækjuskörðum við Loðmundarfjörð. Vegna mikillar útbreiðslu telur Ágúst setbergslögin einhver mikilvægustu leiðarlög í norðanverðu Austfjarðabasaltinu.

Utan megineldstöðvanna er jarðlagahalli á Austurlandi nokkuð einsleitur hvað varðar stefnu og stærðargráðu. Við sjávarmál er hallinn á bilinu 6–9° til vesturs eða suðvesturs en ofar í staflanum, í 700–900 m hæð, mælist hann 2–6° í sömu stefnu (Walker, 1974). Hinn einsleiti jarðlagahalli er tilkominn vegna þeirrar upphleðslu sem á sér stað á rekbeltum Íslands og leiðir til þess að jarðlögum hallar inn að rekbeltunum. Í nágrenni megineldstöðvanna breytist hallinn verulega og jarðlögum tekur almennt að halla nokkuð bratt ( $\leq 35^\circ$ ) inn að kjarna eldstöðvarinnar þar sem jarðlög hafa sigið, ýmist vegna þunga eða öskjumyndunar. Að auki geta hin seigu, súru hraunlög haft upprunalegan halla upp á um 20° ólíkt þunnfljótandi, basískum hraunlögum sem eru að jafnaði lárétt í upphafi (Walker, 1974).

Berggangar eru mjög algengir í jarðlagastafla Austurlands. Þéttleiki þeirra er mestur við sjávarmál og minnkar jafnt og þétt með hæð. Í nágrenni megineldstöðvanna eru berggangar allt að 9% af heildarstaflanum en þéttleikinn er mun minni þegar fjær dregur. Basískir berggangar eru að jafnaði um 3 m á þykkt ( $< 1\text{--}15$  m) en samsettir berggangar eru að jafnaði um 20 m þykkir (Gibson et al., 1966). Ríkjandi ganga- og sprungustefna á svæðinu er N-S eða NA-SV, samsíða áætlaðri legu rekbelta undir lok tertíer-tímabilsins (Walker, 1974). Gangar og misgengi hafa yfirleitt verið lóðrétt í upphafi en hallast lítið eitt með jarðlagastaflanum.

### 3.2.2 Landmótun og laus jarðefni

Upphleðslu jarðlaga á Austurlandi virðist að mestu hafa verið lokið fyrir um 2 milljónum ára (Þorleifur Einarsson, 1991). Frá þeim tíma hafa jöklar ísaldar unnið umfangsmikið niðurrifsstarf á jarðlagastaflanum. Út frá legu ummyndunarbelta í austfirsku staflanum áætlaði Walker (1982) að staflinn hefði að meðaltali lækkað um 900 m á 12 milljón ára tímabili. Ætla má að þetta rof hafi að mestu orðið á þeim tíma er jöklar huldu stærstan hluta landsins. Mikið af efninu er nú að finna á hafsbotni þótt víða á Austurlandi megi sjá tignarlega jökulgarða og víðáttumikla sanda sem bera rofmætti jöklanna gott vitni.

Annað ummerki jöklunar eru hinar bröttu fjallshlíðar sem jöklar ísaldar skildu eftir. Víða á Austurlandi má finna miklar urðir sem myndast hafa við framhlaup stórra bergfylla úr óstöðugum fjallshlíðum (Ólafur Jónsson, 1976). Þar hafa veikingar í berggrunni, s.s.

setlög, sprungur og berggangar, lagt sitt af mörkum við myndun brotflata. Miklar urðir geta því verið til marks um veikleika undirliggjandi jarðlaga eða sprunginn berggrunn.

Fjörumörk sem finnast tugum metra ofan við núverandi sjávarmál eru ennfremur til vitnis um þá krafta sem að verki eru þegar jöklar ganga fram og hopa á víxl. Á sunnanverðum Austfjörðum finnast fjörumörk frá Yngra-Dryas (10 300 <sup>14</sup>C ár BP) og Preboreal (9 900 <sup>14</sup>C ár BP) tímabilunum í allt að 60 m h.y.s. (Hreggviður Norðdahl og Þorleifur Einarsson, 2001).

Framburður vatnsfalla myndar víða miklar aurkeilur við gilkafta eða áreyrar í dalbotnum og við strendur fjarða. Útrænu öflin hafa þannig gert það að verkum að berggrunnur Austurlands er víða hulinn misþykkum og mishörðnuðum setlögum sem geta reynst þýðingarmikil við vatnsöflun og verklegar framkvæmdir.

### 3.2.3 Ummyndun

Þegar basaltstafla hleðst upp og eldri jarðmyndanir grafast sífelld dýpra undir yngri jarðlögum valda aukinn hiti og þrýstingur ummyndun í berginu. Vatn sem leikur um bergið hitnar og leysir upp ýmis efni úr berginu. Þegar vatnið kólnar á leið sinni til yfirborðs falla uppleystu efnin út í blöðrur og sprungur bergsins og mynda holu- og sprungufyllingar. Þær steindir sem falla út á hverjum stað á hverjum tíma stjórna af hitastigi, þrýstingi og efnasamsetningu bergsins. Belti mismunandi holufyllinga gefa því upplýsingar um þann hita og þrýsting sem ríkti í berginu við útfellinguna og má nota til þess að áætla á hvaða dýpi steindirnar urðu til (Walker, 1982). Með tímanum þetta holu- og sprungufyllingarnar berggrunninn með þeim afleiðingum að lekt hans minnkar og verður bundin við einstaka sprungur og misgengi, leiðandi millilög og bergganga. Alla jafna eru hraunlög úr ólivín- og dílabasalti í austfirsku staflanum vel holufyllt með greinilegum geislasteinabeltum. Öðru máli gegnir um þóleíft basalt sem er snauðara af útfellingasteindum og þ.a.l. lekara (Ágúst Guðmundsson, 2012). Efstu 150 m austfirsku staflans eru að jafnaði lausir við holufyllingar og þar á vatn greiða leið um bergið (Walker, 1974).

Ummyndun fornu megineldstöðvanna og afurða þeirra er talsvert frábrugðin því sem almennt gerist í basaltstaflanum. Í kjarna eldstöðvanna hefur háhitaummyndun orðið til þess að allar berggerðir hafa breytt verulega um svip. Þrátt fyrir mikla ummyndun getur skortur á hefðbundnum útfellingasteindum valdið því að í kringum megineldstöðvarnar hefur bergið töluverða lekt (Ágúst Guðmundsson, 2012). Háhitaummyndað ólivín-basalt í Breiðdalseldstöðinni er t.a.m. alveg laust við geislasteina (Walker, 1963) og því ekki eins þétt og sambærilegt berg utan eldstöðvarinnar.

## 3.3 Vandamál í gangagerð á Íslandi

Þrátt fyrir að Ísland sé að mestu hlaðið upp af basalhraunlögum og jarðlagastaflinn kunnir að virðast einsleitur er misleitur jarðlagastaflinn (e. mixed face conditions) eitt helsta vandamálið í íslenskri gangagerð (Björn A. Harðarson, 1991). Þannig getur eitt þversnið í göngum innihaldið 2–4 mismunandi berggerðir, t.d. basalhraun, basaltkarga, millilög og bergganga. Vegna mismunandi eiginleika er vinnsluhæfni og styrkingaþörf berggerðanna mismunandi. Alla jafna ræður þó bergið í þekju ganganna mestu um styrkingar hverju sinni

(Rawlings & Simic, 1996). Einstök jarðlög geta einnig verið til vandræða vegna óæskilegra eiginleika. Þykk og útbreidd setlög geta valdið umtalsverðum töfum og kostnaðarauka vegna hrúnhættu og tilheyrandi ráðstafana í bergstyrkingum. Í Óshlíðargöngum þurfti t.a.m. að grípa til umfangsmikilla ráðstafana til þess að hindra hrún úr þykku setlagi (Einar Hrafn Hjálmarsson, 2011). Straumflögótt og sprungin hraunlög geta einnig valdið töluverðum vandkvæðum. Í Oddsskarðsgöngum settu flögnun og hrún úr andesítlögum verulegt strik í reikninginn (Björn A. Harðarson, 1984) og í Múlagöngum urðu umtalsverðar tafir vegna flögnunar úr veggjum og hreyfingar bergs í veggjum inn í göngin (Hreinn Haraldsson og Björn A. Harðarson, 1992).

Berggangar, sprungur og misgengi kalla einnig á auknar styrkingar, einkum þar sem þau koma fyrir í þekju jarðganga eða liggja samsíða gangastefnunni. Einstaka sprungum og berggöngum getur jafnframt fylgt mikill vatnsagi, einkum þegar um nýlegar sprungur eða lítið ummyndað berg er að ræða. Vatn er einmitt sá þáttur sem veldur nær undantekningalaust vandræðum í íslenskri gangagerð. Innrennsli á köldu vatni um opið misgengi hafði t.d. töluverð áhrif á framgang grafrar í Múlagöngum þar sem heildarvatnsrennslið fór upp í um 200 l/s (Hreinn Haraldsson og Björn A. Harðarson, 1992). Í Vaðlaheiðargöngum hefur mikið innrennsli á bæði heitu og köldu vatni sett allar áætlanir úr skordum og valdið ómældum töfum og kostnaðarauka (Vaðlaheiðargöng, 2015). Við gröft Hvalfjarðarganga fór hitinn á innrennslinu hátt í 60°C sem skapaði erfið vinnuskilyrði jafnvel þótt rennslið hafi verið viðráðanlegt (Spölnur, 1997). Í sumum tilvikum getur reynst nær ómögulegt að þetta innrennslið sem eykur þann kostnað og tíma sem fer í frárennismál.

Jarðfræðilegar aðstæður utan ganganna geta einnig haft áhrif á framgang verksins. Jarðgöng eru alla jafna grafin í fjalllendi þar sem gangamunnar standa í bröttum hlíðum. Við upphaf framkvæmda þarf víðast að byrja á því að sprengja eða grafa gryfju inn í landið til þess að fá nógu hátt bergstál til þess að hefja gangagröftinn (Hreinn Haraldsson, 1991). Við þetta getur hlíðin orðið óstöðug með tilheyrandi skriðuföllum og snjóflóðum sem tefja framkvæmdir í byrjun. Til þess að koma í veg fyrir að slík gryfja fyllist af snjó bæði á framkvæmda- og rekstartíma eru reistir forskálar við gangamunnann, sem standa það langt út úr hlíðinni að ekki komi til lokunar vegna skriðufalla eða snjóflóða (Hreinn Haraldsson, 1991).

### **3.4 Jarðfræðilegar aðstæður á gangaleiðinni á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar**

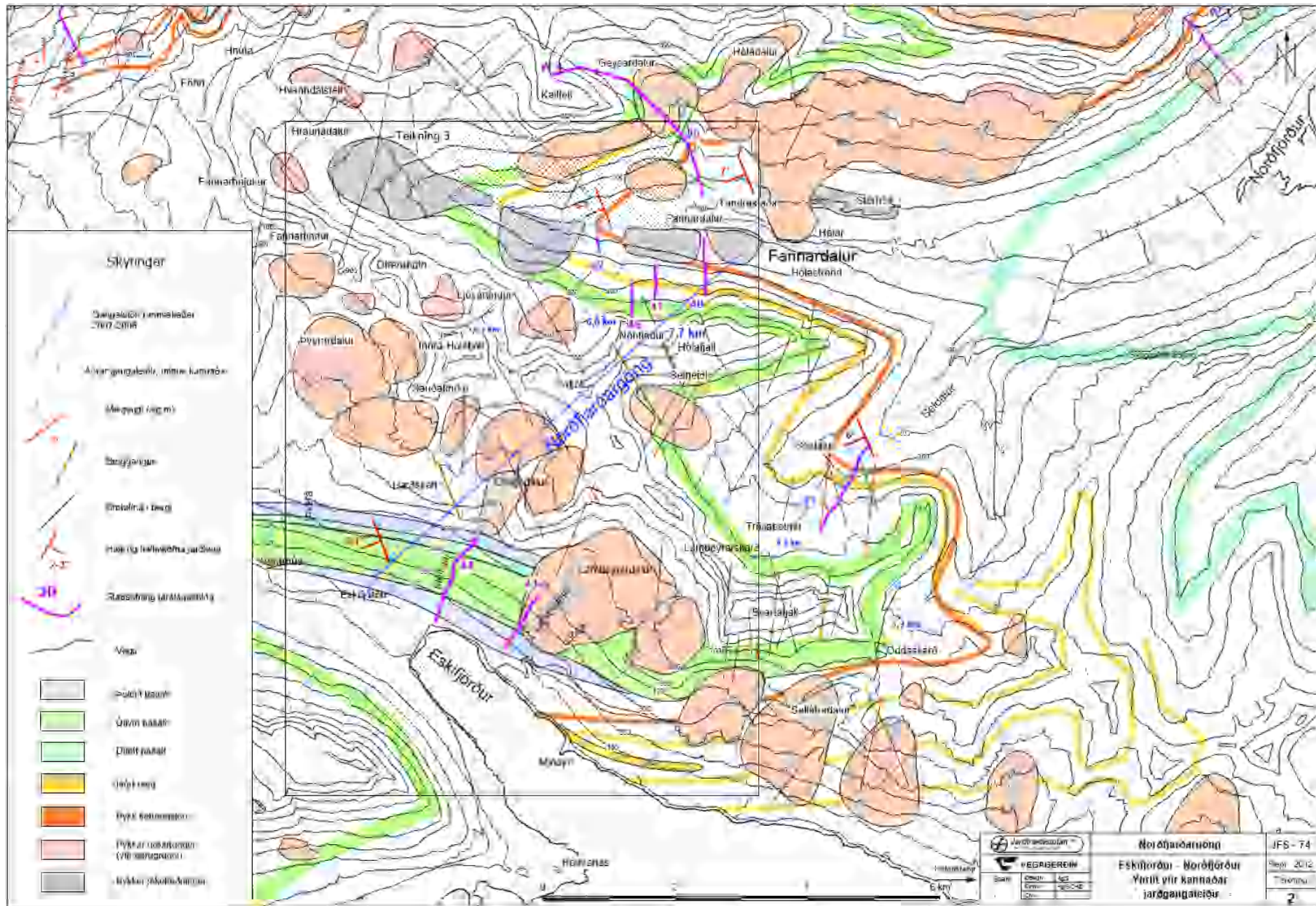
Á árunum 2004–2008 vann Jarðfræðistofan ehf. úttekt á jarðfræðilegum aðstæðum til gangagerðar á fyrirhugaðri leið Norðfjarðarganga á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar (Ágúst Guðmundsson, 2012). Upplýsinga um jarðfræði svæðisins var aflað með yfirferð greina og handrita um jarðfræði Austurlands eftir G.P.L. Walker ásamt vettvangsskoðun, loftmyndaskoðun og túlkun á jarðfræði og lýsingum jarðlagasniða frá árunum í kringum 1990 og 2002–2004. Þá bættust við rannsóknarboranir í Norðfirði og Eskifirði frá árunum 2007 og 2008. Útbúið var jarðfræðikort af svæðinu sem sjá má á mynd 3.2.

Hin tæplega 8 km löngu jarðgöng munu liggja í gegnum nokkur hundruð metra þykkar jarðlagastafla sem hallar til suðvesturs um 6–7°. Lengst af gangaleiðinni er að finna

bergsyrpur úr misþykkum basaltlögum með tiltölulega þunnum millilögum. Nær Eskifirði þykir bergið nokkuð fýsilegt til gangagerðar að frátöldum nokkrum setbergslögum. Nær Norðfirði er bergið hins vegar breytilegra og talið síðra til gangagerðar. Líkur eru á að þar fari göngin í gegnum nokkur hundruð metra af andesítlögum sem gætu valdið vandræðum bæði vegna flögnunar og skorts á útfellingasteindum (Ágúst Guðmundsson, 2012).

Lektarmælingar í kjarnaborholum sýna að jafnaði fram á meiri lekt í bergi nær Norðfirði en Eskifirði sem rakið er til mikillar upphleðslu þóleiít basalts Norðfjarðarmegin í göngunum. Eins og áður sagði er minna um útfellingasteindir í þóleiíti sem viðheldur frumlekt bergsins. Því má ætla að kraftmikið innrennsli vatns verði á allmörgum stöðum þar sem farið er í gegnum brotalínur. Alla jafna má gera ráð fyrir að innrennslið hjaðni á nokkrum dögum en þó eru vísbendingar um lóðrétt streymi í berginu sem gæti viðhaldið rennslinu (Ágúst Guðmundsson, 2012).

Stefna jarðganganna nálægt NA-SV er að jafnaði skáhallt á legu þeirra bergganga og misgengja sem kortlögð hafa verið á svæðinu. Búast má við að þéttleiki bergganga á gangaleiðinni verði nálægt 3–6% sem er með minna móti samanborið við nærliggjandi berg (Ágúst Guðmundsson, 2012). Fá misgengi sjást nálægt gangaleiðinni og því ættu berggangar og misgengi ekki að verða til teljandi vandræða (mynd 3.2).



Mynd 3.2 Jarðfræðilegar aðstæður á gangaleiðinni á milli Eskifjarðar og Norðfjarðar (Ágúst Guðmundsson, 2012).



Nokkur óvissa ríkir um þykkt, útbreiðslu og eiginleika veikra setlaga sem finna má í fjallshlíðum beggja vegna ganganna. Ágúst Guðmundsson (2012) telur næsta víst að göngin liggja í gegnum þessi lög sem gætu orðið til vandræða vegna lágs brot- og togstyrks. Árið 2010 lét Vegagerðin vinna rannsókn á eiginleikum setbergs úr borholum á gangaleið fyrirhugaðra Norðfjarðarganga (Matthías Loftsson o.fl., 2010). Þar kom í ljós að styrkur laganna ræðst mjög af því hversu sambrædd þau eru en flikrubergrög (sambrædd) eru ekki talin erfið til gangagerðar. Þar sem lögin eru ekki sambrædd geta þau hins vegar haft mjög lágan brot- ( $UCS \leq 10$  MPa) og togstyrk ( $< 1$  MPa). Ágúst Guðmundsson (2012) telur hugsanlegt að inni í fjallinu myndi lögin allt að 40 m þykka samfelli sem kallar að öllum líkindum á sérstakar ráðstafanir vegna styrkinga. Þar gæti reynsla af styrkingu setlaga í Óshlíðar- og Fáskrúðsfjarðargöngum komið sér vel.

Þegar farið er inn frá Eskifirði veldur jarðlagahallinn því að jarðlög birtast jafnan fyrst upp úr gólfinu sem ætti að auðvelda alla vinnu við veik jarðlög. Engu að síður hafa framkvæmdir við Norðfjarðargöng tafist umtalsvert vegna styrkingar veikra jarðlaga Eskifjarðarmegin í göngunum. Norðfjarðarmegin veldur jarðlagahallinn því að jarðlög birtast fyrst í þekjunni sem gerir vinnuna við veik millilög erfiðari (Ágúst Guðmundsson, 2012). Þegar búið var að grafa um 73% af gangaleiðinni var framvindan í Fannardal það góð að ákveðið var að grafa 400 m lengra frá þeim munna en upphaflegar áætlanir gerðu ráð fyrir, þ.e. 3 km í stað 2,6 km. Þetta var líka gert til þess að anna betur efnisþörf í snjóflóðavarnir í Fannardal (Austurfrétt, 2015).

Á mynd 3.3 má sjá yfirlit yfir tæknilega eiginleika basaltstaflans sem Norðfjarðargöng liggja um skv. jarðfræðiskýrslu Ágústs Guðmundssonar (2012). Í apríl 2015, þegar búið var að sprengja yfir 80% af gangaleiðinni, höfðu framkvæmdir almennt gengið vel og framvinda verksins að mestu staðist áætlun. Mestar tafir höfðu orðið vegna þykkra setlaga, einkum Eskifjarðarmegin, en vinna við styrkingar samfara styttri sprengilengd dró verulega úr afköstum á þessum svæðum. Berggangar, sprungur og misgengi höfðu ekki valdið teljandi vandræðum á gangaleiðinni og göngin höfðu nánast verið þurr (Metrostav, 2015a). Í viðauka B má sjá þversnið af jarðfræði ganganna sem unnið er samhliða gangagreftri.

## Dæmigerð berglagaröð í berggrunni Austfjarða Almennir tæknilegir eiginleikar bergs við Norðfjarðargöng

**Einkennandi einása brotþol (UCS) [MPa]**  
Mest byggt á "Point load" brotum

**Einkennandi Q gildi**  
Byggð á mælingu borkjarna  
Ef Q-gildi er mælt á bergi eftir sprengingu  
lækkar Q-gildi borkjarna með deilistölu 2-3

Rauður sandsteinn og leirsteinn  
Mælt <10-40 MPa Q = 0,1-2,0  
Brotþol í efri hluta karga 20-40 MPa  
Q = 4-8

Brotþol í neðri hluta karga 30-50 MPa  
Q = 6-12

Brotþol blöðrótts basalts 40 - 120 MPa  
algengasti brotþol 60-80 MPa  
Q = 4-12

Brotþol basalts 50 - 250 MPa  
Q = 3-15

Algengasta brotþol miðhluta basalts  
100-150 MPa  
Q = 4-12

Botnkargi  
algengasta brotþol 20-40 MPa  
Q = 4-12

Sandsteinn og túfkennnd setög,  
mælt brotþol 10-60 MPa  
Súr glöskulög 20-30 MPa  
Q = 0,1-1

Brotþol sambæddra setbergslaga  
er hlöstað meðalstærku basalti  
50-150 MPa

Kargaberg  
Brotþol 20-40 MPa  
Q = 4-12



### Lýsing bergs

Kristallað basalt

Botnkargi basallaga, þykkt 0,3-1 m  
Míllög ur selbergi, ofast ísvil basalt luff  
Algengasta þykkt 0,1-1, m en allt að 0-3 m  
þykk lög finnast  
Kargaberg í efri hluta basallaga, algeng.  
þykkt 2-3 m, inniheldur oft setlagafylingar  
settur úr yfirleggjandi selbergi

Óreglulegt yfirbúð kristallaðs basalts,  
oft þöyr mörk

Kristallað basalt, oft blöðrót og gropað  
næst karganum og hefur þá fremur lágan  
brotstyrk

Kristallaði hluti basallagans, 70-80% af  
þykkt póleittbasalts en yfirleitt yfir 80% af  
þykkt dinnbasalts og óleibasalts

Algeng þykkt kristallaða hlutans er 4-12 m  
en minnaka lög málast yfir 20 m þykk.

Algengi að bægið springi í mismunandi  
óreglulega stúla (með þvermál 1-2,5 m en  
stúlaþega-orðó bæði smærri og stærr)

Órblöður (micropores) eru algengar og  
straumfögun með órblöðum (algengust í  
póleittbasalti) leiðir oft til samslökleyfn.  
oft lárrétt bönd en geta verið hallandi

Vaxandi hútfall hlutfjörna næst botni laganna

Botnkargi, oft 3-8% af lagþykktinni

Einkennandi þykkt 0,3-1 m  
Selbergslög, oft með ljóslitum vtri og  
gjósku, oft teiknend

Hátt hútfalli teiknendra sedaga er með svo  
lágan brotstyrk að ekki er unnt að mæla  
hann (með PLT)

Sambædd glöskulög, kimbberg  
Fáan 5-15 m þykk lög

Kargi í efsta hluta næsta lags



Mynd 3.3 Dæmigerð berglagaröð í berggrunni Austfjarða (Ágúst Guðmundsson, 2012).



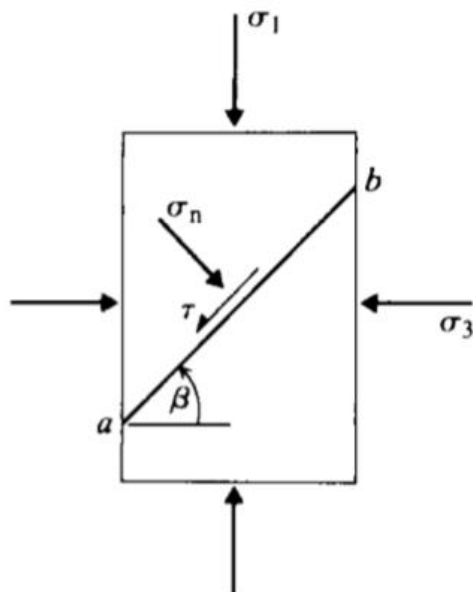
## 4 Tæknilegir eiginleikar bergs

Jarðgangagerð er á þann hátt frábrugðin mörgum öðrum framkvæmdum að aðalbyggingar-efnið, sem ætlað er að bera mannvirkið uppi, er jafnframt sá þáttur sem veldur mestu álagi á mannvirkið. Tæknilegir eiginleikar bergsins eru því ekki síður mikilvægir en annarra byggingarefna sem notuð eru við framkvæmdina (steypa eða stál) (Parker, 1996).

Tæknilega eiginleika bergs má meta með tilliti til ýmissa þátta. Í tengslum við framkvæmdir er þó mikilvægast að horfa á þá eiginleika sem mestu máli skipta fyrir viðkomandi mannvirki. Í gangagerð er algengast að taka til skoðunar bergtegundir og aflfræðilega eiginleika þeirra, fjölda sprungukerfa og einkenni þeirra ásamt grunnvatnsaðstæðum. Suma þessara þátta má meta í felti með einföldum athugunum og prófunum á meðan aðrir krefjast flókans tækjabúnaðar og tímafrekra rannsókna. Raunhæft mat á tæknilegum eiginleikum bergs er forsenda allra líkanreikninga og getur skipt sköpum við mat á styrkingaþörf.

### 4.1 Aflfræðilegir eiginleikar bergs

Þrýstistyrk bergs má kanna með einása- og þríasaprófum auk þess sem hið einfalda punktálagspróf hefur reynst gagnlegt í því skyni (Hoek, 2007). Á mynd 4.1 má sjá einfaldaða mynd af framkvæmd slíkra þrýstiprófa. Niðurstöður þríasaprófa geta gefið vísbendingu um togstyrk bergsins sem er þó kannaður með sérstöku togprófi. Prófin eru einnig notuð til þess að áætla fjaðureiginleika bergsins sem skipta miklu máli við hönnun og uppsetningu styrkinga.



Mynd 4.1 Einfölduð mynd af uppsetningu þrýstiprófa (Brady & Brown, 1985).

### 4.1.1 Brotlíking Mohr-Coulomb

Skv. Mohr-Coulomb brotlíkingunni má lýsa broteiginleikum bergsins á mynd 4.1 með jöfnunni

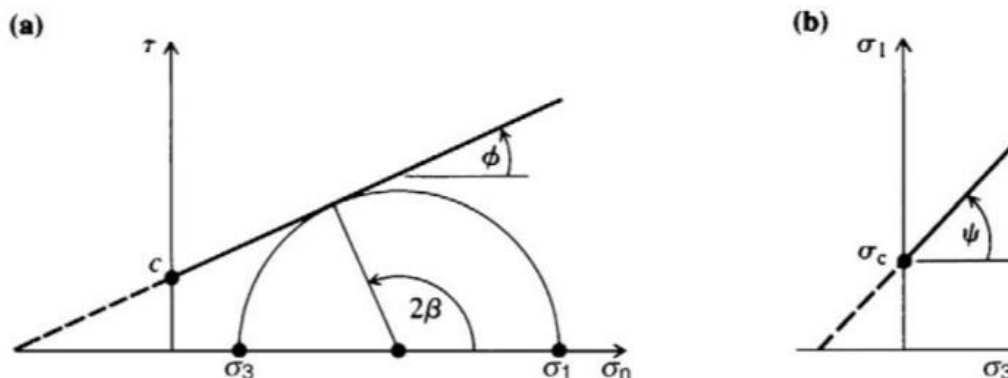
$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (4.1)$$

þar sem  $\tau_f$  er skúfspennan á brotflötinn þegar brotmörkum er náð,  $c$  er samloðun bergsins,  $\sigma_n$  er normalspenna á brotflötinn og  $\varphi$  er innra viðnámshorn bergsins.

Brotlíkinguna má einnig setja fram á formi höfuðspennanna  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$  en þá fæst

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \varphi + \sigma_3 (1 + \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \quad (4.2)$$

Á mynd 4.2 má sjá myndræna framsetningu á brotlíkingu Mohr-Coulomb bæði á formi normal- og skúfspenna (a) og höfuðspenna (b). Sé samspil höfuðspennanna með þeim hætti að Mohr-hringurinn snerti brotlínuna á mynd 4.2 a eða punkturinn  $\sigma_3, \sigma_1$  lendir á eða ofan við línuna á mynd 4.2 b má búast við að bergið láti undan.



Mynd 4.2 Brotlíking Mohr-Coulomb á formi normal- og skúfspenna (a) og höfuðspenna (b) (Brady & Brown, 1985).

Einásáþrýstistyrkur bergsins ( $\sigma_c$ ) fæst skv.

$$\sigma_c = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4.3)$$

og fræðilegur togstyrkur bergsins ( $\sigma_t$ ) fæst þegar  $\sigma_1$  er núll eða skv.

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (4.4)$$

Mælingar gefa hins vegar til kynna að togstyrkur bergs sé almennt umtalsvert lægri en hið fræðilega gildi. Til einföldunar mæla Brady & Brown (1985) með því að miðað sé við að berg hafi engan togstyrk.

#### 4.1.2 Brotlíking Hoek & Brown

Reynslan sýnir að hin línulega aflfræði, sem Mohr-Coulomb líkingin byggir á, hermir ekki nógu vel eftir hegðun bergs yfir breitt þrýstibil. Brotlíking Hoek og Brown (1980a) tekur tillit til þessa og þykir falla betur að niðurstöðum prófana (Brady & Brown, 1985). Skv. Hoek og Brown má almennt lýsa brotþoli bergs með eftirfarandi jöfnu (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4.5)$$

þar sem  $\sigma_{ci}$  er einásabrotstyrkur ósprungins (e. intact) bergs.  $m_b$ ,  $s$  og  $a$  eru efnisfastar sem ráðast af berggerð og heilleika bergsins skv.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (4.6)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (4.7)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (4.8)$$

þar sem  $m_i$  er efnisfasti sem ræðst af eiginleikum ósprungins bergs,  $GSI$  (e. Geological Strength Index) er stuðull sem ræðst af berggerð og sprunguástandi (sjá viðauka C).  $D$  er stuðull sem ræðst af þeirri röskun sem bergið verður fyrir við sprengingar og spennulosun (sjá viðauka C).

#### 4.1.3 Fjaðureiginleikar

Með fjaðureiginleikum er einkum átt við fjaðurstuðul Young's ( $E$ ) og Poisson's hlutfall ( $\nu$ ) en stuðlarnir eru fengnir með álagsprófum þar sem fylgst er með aflögun sýnisins bæði samsíða ( $\epsilon_a$ ) og þvert á álagsaukninguna ( $\epsilon_r$ ).

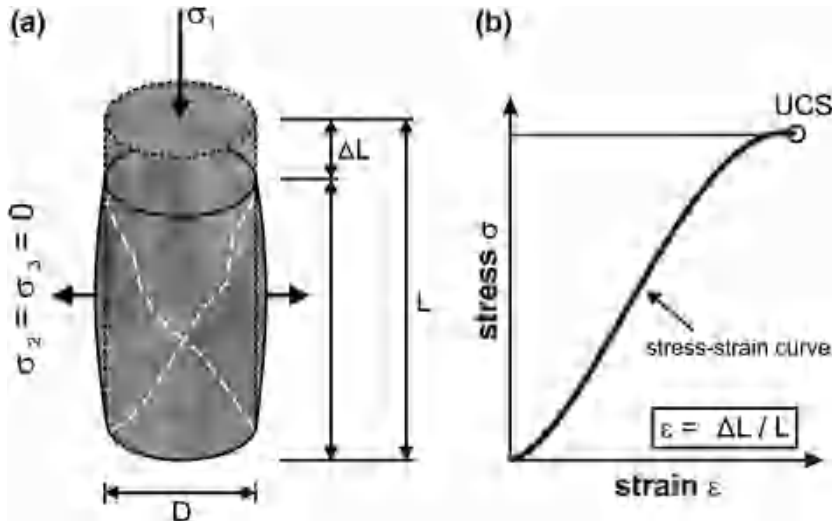
Young's stuðullinn er reiknaður skv.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon_a} \quad (4.9)$$

og Poisson's hlutfallið fæst með

$$\nu = -\frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta\epsilon_a} \quad (4.10)$$

Mynd 4.3 sýnir samband spennu, streitu og einásaprýstistyrks (UCS) í einásaprófi.



Mynd 4.3 Samband spennu, streitu og einásaprýstistyrks í einásaprófi (Siegesmund & Dürrast, 2014)

## 4.2 Sprungur

Bergmassi er að jafnaði nokkuð misleitt efni. Massinn samanstendur af ósprungum bergveiningum sem aðskildar eru af sprungum og misgengjum sem geta innihaldið sprungufyllingar og grunnvatn. Fyrir vikið eru eiginleikar ósprungins bergs ekki lýsandi fyrir heildareiginleika bergmassans. Ýmsar leiðir eru farnar við að meta þau áhrif sem sprungur hafa á aflfræðilega eiginleika bergs.

### 4.2.1 Heilleikastuðull berglaga RQD og sprungutíðni

Algengt er að taka tillit til sk. RQD-gildis (e. Rock Quality Designation) við mat á berggæðum. RQD-gildið er mælikvarði á heilleika bergs í borkjarna og er skilgreint skv.

$$RQD = \frac{\sum \text{Lengd kjarnabrota} > 10 \text{ cm}}{\text{Heildarlengd borkjarna}} \cdot 100\% \quad (4.11)$$

Gildið er afar einfalt í notkun og var fljótlega yfirfært á berg í göngum þrátt fyrir að vera hannað fyrir undirbúningsrannsóknir á borkjörnum (Deere & Deere, 1988).

Hudson og Priest (1979) lýsa sambandi RQD-gildisins og sprungutíðninnar  $\lambda$  með eftirfarandi jöfnu

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(1 + 0,1\lambda) \quad (4.12)$$

#### 4.2.2 Eiginleikar sprungna

Við mat á gæðum sprungins bergmassa skiptir fjöldi og lega sprungukerfa verulegu máli þegar stöðugleiki er annars vegar. Yfirborðs- og borholurannsóknir á undirbúningstíma geta gefið nokkrar vísbendingar um hversu sprungið bergið er en erfiðara getur reynst að sjá fyrir eiginleika sprunguflatanna. Þar hafa hrýfi og ummyndun sprunguflata mikið að segja varðandi samloðun bergmassans. Þessa þætti þarf jafnan að skoða í göngunum sjálfum. Opnun sprungna og grunnvatnsstreymi hafa líka áhrif á jarðgangaf framkvæmdir og eru því tekin til skoðunar í göngunum. Í viðaukum D og E má sjá hvernig eiginleikar sprungna og grunnvatnsaðstæður eru metin í berggæðamatskerfum.

## 5 Berggæðamat

Gæði bergsins sem umlykur göngin ráða hvað mestu um framvindu verksins og styrkingaþörf mannvirkisins. Berggæðin geta þannig vegið þungt á metunum þegar fýsileiki framkvæmdanna er skoðaður. Í því skyni að áætla styrkingaþörf bergs hafa verkfræðingar á sviði jarðgangagerðar komið sér upp sk. berggæðamati sem byggir á rannsóknum á tæknilegum eiginleikum bergsins.

Kerfisbundið mat á berggæðum í tengslum við gangaframkvæmdir má rekja aftur á 19. öld (Hoek, 2007). Flest berggæðamatskerfi eiga það sameiginlegt að gefa bergi ákveðna einkunn út frá eiginleikum þess. Einkunnin er síðan leiðbeinandi fyrir mat á styrkingaþörf bergsins. Mismunandi kerfi meðhöndla tiltekna eiginleika með ólíkum hætti og vægi einstakra þátta er nokkuð breytilegt á milli kerfa. Á undanförunum áratugum hafa þrjú kerfi náð hvað mestri fótfestu í jarðgangagerð á heimsvísu: RSR-kerfið (Rock Structure Rating), RMR-kerfið (Rock Mass Rating) og Q-kerfið (Tunnelling Quality index) (Hoek, 2007). Kerfin byggja á áratuga reynslu af gangaframkvæmdum víðsvegar um heiminn en eru þó nokkuð ólík í eðli sínu. Í viðauka D má sjá uppbyggingu og inntaksstærðir RSR- og RMR-kerfanna. Á Íslandi hefur hið norskættaða Q-kerfi verið nær allsráðandi undanfarin 35 ár.

### 5.1 Q-kerfið

Frá árinu 1980 hefur Q-kerfið verið notað á Íslandi til þess að meta gæði bergs m.t.t. jarðgangagerðar (Vegagerðin, 2009). Kerfið er ættað frá Noregi og byggir á því að skoða sprungur og aðrar misfellur í bergi og gefa því einkunn m.t.t. sex breyta:

- RQD lengdarhlutfall kjarnabrota sem mælast  $> 10$  cm (rock quality designation)
- $J_n$  fjöldi sprungukerfa (joint set number)
- $J_r$  löggun og áferð sprunguflata (joint roughness number)
- $J_a$  gerð og þykkt sprungufyllinga (joint alteration number)
- $J_w$  vatn í sprungum (joint water reduction number)
- SRF mælikvarði fyrir spennuástand (stress reduction factor)

Q-gildið er síðan reiknað skv. jöfnunni (Barton, Lien & Lunde, 1974)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (5.1)$$

Líta má á Q-gildið sem margfeldi þriggja stærða sem lýsa stöðugleika bergs umhverfis opnur í jarðlagastafla:

$$\frac{RQD}{J_n} \quad \text{sem er mælikvarði á stærð bergblokka,}$$

$\frac{J_r}{J_a}$  sem er mælikvarði á skerstyrk milli blokka,

$\frac{J_w}{SRF}$  sem er mælikvarði á virka spennu í berginu.

Kerfið er ætlað til notkunar á framkvæmdatíma en getur þó komið að gagni við yfirborðskönnun og borholurannsóknir á undirbúningstíma. Almenn er þó ekki mælt með því að gefa borkjörnum Q-gildi nema fram hafi farið mat á  $J_w$  og  $SRF$  (NGI, 2013). Í nýjstu handbók norsku jarðtæknistofnunarinnar um notkun Q-kerfisins er að finna lýsandi töflur og leiðbeiningar um ákvörðun á gildi einstakra breyta (viðauki E).

Q-gildið er síðan notað til þess að ákvarða styrkingaþörf viðkomandi berggerðar að teknu tilliti til umfangs (e. equivalent dimension) þeirrar framkvæmdar sem um ræðir. Umfangið er metið út frá vídd eða hæð mannvirkisins (e. span or height) með hliðsjón af sk.  $ESR$ -gildi (e. excavation support ratio) sem stjórnast af tilgangi mannvirkisins. Veggöng fá  $ESR$ -gildið 1,0.

$$\frac{\text{vídd eða hæð í m}}{ESR} = \text{umfang} \quad (5.2)$$

Hæfilega lengd bergbolta ( $L_b$ ) má að sama skapi áætla út frá vídd ( $B$ ) ganganna og  $ESR$ -gildi skv. jöfnu 5.3 (Barton, Løset, Lien & Lunde, 1980):

$$L_b = 2 + \frac{0,15 \cdot B}{ESR} \quad (5.3)$$

Í nýrri útgáfum kerfisins er lengd bergbolta gefin upp myndrænt eins og sjá má á mynd 5.1 (NGI, 2013).

Þegar kerfið var fyrst kynnt til sögunnar settu höfundarnir fram jöfnu sem sýnir samband Q-gildisins og inntaksstærða þess við nauðsynlega þrýstisþennu bergstyrkinga í þekju (e. radial support pressure) í  $kg/cm^2$  (Barton, Lien & Lunde, 1974):

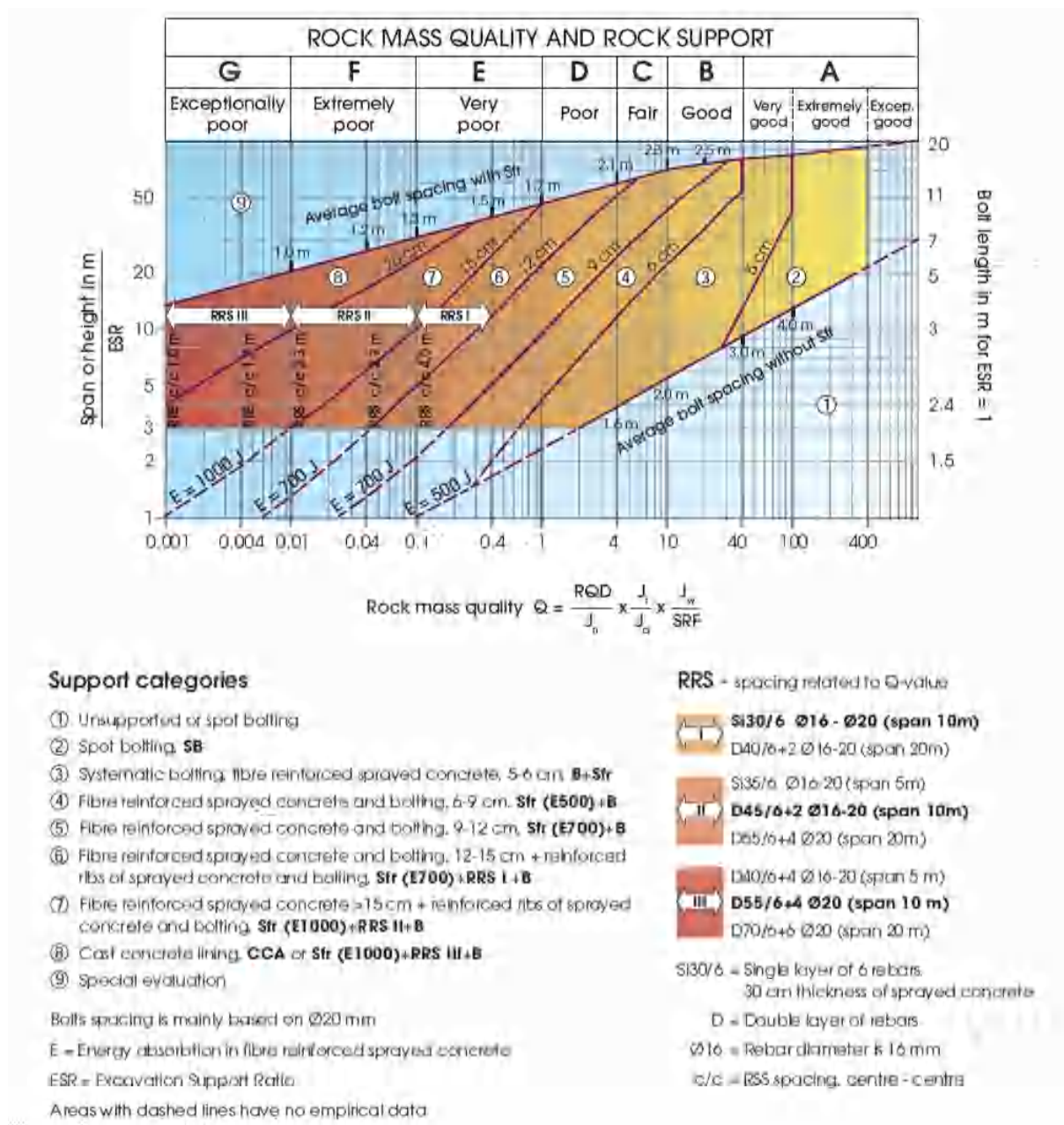
$$p_{roof} = \left( \frac{2J_n^{\frac{1}{2}} Q^{\frac{1}{3}}}{3J_r} \right) [kg/cm^2] \quad (5.4)$$

Þar sem  $p_{roof}$  er hornréttur þrýstingur á gangaþekju. Í leiðbeiningum með nýjstu útgáfu Q-kerfisins kemur fram að styrkingagrafið á mynd 5.1 eigi fyrst og fremst við um þekju og breiðasta hluta (e. springlines) ganganna. Við hönnun styrkinga í gangavegg þurfi að aðlaga Q-gildin skv. töflu 5.1 (NGI, 2013).

Tafla 5.1 Aðlögun Q-gilda við hönnun bergstyrkinga í gangaveggi (NGI, 2013).

Gæði bergmassa	Q-gildi	Aðlögun
Gott berg	$Q > 10$	Margfalda Q-gildi með 5.
Meðalgott berg	$0,1 < Q < 10$	Margfalda Q-gildi með 2,5. Ef bergspennur eru háar skal nota upphaflegt Q-gildi.
Lélegt berg	$Q < 0,1$	Nota upphaflegt Q-gildi.

Mynd 5.1 sýnir hvernig sambandi Q-gildis, umfangs framkvæmdar og styrkinga er háttáð.



Mynd 5.1 Nýjasta útfærsla Q-kerfisins. Myndin sýnir Q-gildi, umfang mannvirkis og styrkingaþörf (NGI, 2013).



Q-kerfið byggir á áratuga reynslu af neðanjarðarframkvæmdum víðsvegar um heiminn. Frumútgáfa kerfisins byggði á gögnum frá um 200 framkvæmdum (Barton o.fl., 1974) en til grundvallar nýjustu útgáfu þess liggja yfir 2000 framkvæmdir (NGI, 2013). Q-kerfið hefur því tekið nokkrum breytingum í árána rás, bæði vegna aukinnar reynslu og þekkingar en ekki síst vegna bættra styrkingaraðferða. Umfangsmikil endurskoðun átti sér t.d. stað árið 2002 eftir ítarlega úttekt á virkni sprautusteypurifja (Grimstad, Kankes, Bhasin, Magnussen & Kaynia, 2002). Í nýjustu útgáfu kerfisins hafa sprautusteypurif alfarið komið í stað forsteypra eininga (NGI, 2013).

Við notkun Q-kerfisins við hönnun bergstyrkinga ber að hafa nokkur atriði í huga (NGI, 2013):

- Styrkingagrafið sýnir meðaltal styrkinga í þeim framkvæmdum sem kerfið byggir á. Í einhverjum tilvikum reyndust styrkingar yfirdrífna en í öðrum tilvikum reyndust þær ónógar.
- Líta ber á styrkingagrafið sem samfelldan kvarða en ekki skilgreinda styrkingaflokka. Þetta á sérstaklega við um þykkt sprautusteypu og fjölda bergbolta.
- Í mjög erfiðum tilvikum getur reynst nauðsynlegt að styrkja meira en grafið kveður á um.
- Bilið sem gefið er upp á milli bergbolta er í raun viðmið fyrir boltamagn en ekki munstur. Staðsetning og stefna bolta ræðst af legu sprungna.
- Boltalengd er háð umfangi framkvæmdar en þar sem sprungustefna er óhagstæð getur þurft lengri bolta.
- Almennt þarf lengri bolta eftir því sem Q-gildið lækkar.

### 5.1.1 Gagnrýni á Q-kerfið

Við notkun berggæðamatskerfa er mikilvægt að hafa í huga að þau eru takmörkunum háð. Varast ber að útvíkka notkun þeirra umfram upphaflegan tilgang. Palmström og Broch (2006) vilja meina að þegar ákveðið kerfi hefur hlotið viðurkenningu sé þess ekki langt að bíða að kerfið sé yfirfært á aðstæður sem það nær ekki til. Þannig telja þeir Q-kerfið henta best við undirbúning framkvæmda, helst í sprungnu bergi, en síður við ákvörðun styrkinga á framkvæmdatíma. Þeir segja kerfið gefa besta raun fyrir Q-gildi á bilinu 0,1–40. Við aðrar aðstæður sé nauðsynlegt að beita frekari rannsóknum s.s. bergfærslumælingum og líkanreikningum til þess að ákvarða styrkingar. Þá telja þeir ráðlegt að notast alltaf við a.m.k. tvö berggæðamatskerfi í hönnunarferlinu og taka þannig til skoðunar fleiri breytur en þær sem Q-kerfið byggir á. Þar má t.d. nefna sprungustefnu og bergstyrk (Palmström & Broch, 2006).

### 5.1.2 Q-kerfið á Íslandi

Vegagerðin hefur gefið út almenn einkunnaviðmið fyrir hverja breytu Q-gildisins m.t.t. íslenskra berggerða. Viðmiðin má nálgast í ritinu *Kortlagning og gæðamat bergs í jarðgöngum* (Vegagerðin, 2009). Ágúst Guðmundsson (2012) hefur einnig tekið saman algenga stuðla sem notaðir eru við útreikninga á Q-gildi bergs (Tafla 5.2).

Tafla 5.2 Algengir stuðlar sem notaðir eru við útreikninga á Q-gildi bergs (Ágúst Guðmundsson, 2012).

Flokkun í mismunandi berggerðum			Algengir stuðlar Q-kerfisins					
No.	Berggerð	Lýsing	RQD	7a	7i	7a	7b*	SRF**
1	Basalt	Hart, gaddi stuðla- og sprungustærir	70-100	9-10	2-3	2-3	1	1
2	Basalt	Hart smáir stuðlar þær sprungustærir	40-70	9-10	2-3	2-3	1	1
3	Basalt	Kargakemi, heillegt	50-100	9-10	2-4	2-3	1	1
4	Basalt	Mjög unnið	50-100	9-10	2-4	2-4	1	1
5	Basalt	Mjög unnið sprungið	< 40	12-15	2-3	2-4	1	1
6	Kargaberg	Harðnað og samsteppi	50-100	6-10	2-4	2-3	1	1
7	Kargaberg	Losalegt, með tefjufingri og illa samlímt	< 50	9-20	1-4	2-4	1	0,2,5/5
8	Selberg	Stærlegur sandsteinur og slátsteinur	50-100	6-9	1-2	3-4	1	1
9	Selberg	Litill brútsykli, mjúkur sandst. og slátst.	< 50	6-9	1-2	3-4	1	0,2,5/5
10	Braksia	Brúberg, misgengibrotsis málmað	< 50	15-20	1	3-8	1	0,2,5/5

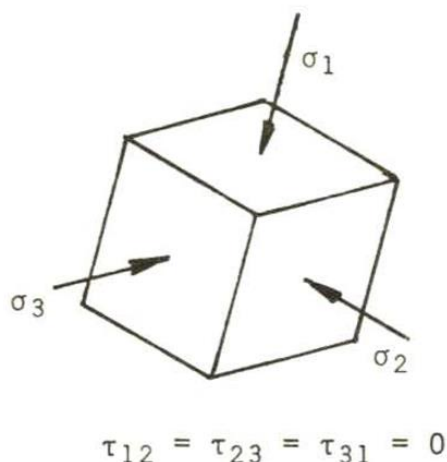
\*Vandandi vinnu þá er tryggt að að mæla við stuðul !

\*\*Vandandi SRF, þá er þrífleitt mælað við 1 (allt frá yfirbóðu) (þar til mannvala hefur verið hannað) SRF Berg með mjög lágan styrk frá strau leggi talu

Samkvæmt Vegagerðinni (2009) gefur berggæðamat á borkjörnum í íslensku basalti mjög oft Q-gildi á bilinu 4–20. Rannsóknir sem gerðar voru í Noregi í kringum 1990 benda til þess að berg af þeim gæðum sé sérstaklega viðkvæmt fyrir sprengingum sem geti lækkað Q-gildið umtalsvert (Vegagerðin, 2009). Þetta ber að hafa í huga þegar íslenskt basalt er annars vegar. Ágúst Guðmundsson (2012) mælist til þess að Q-gildi sem metið er út frá borkjarna sé lækkað með deilitölu 2–3 fyrir sprengt berg.

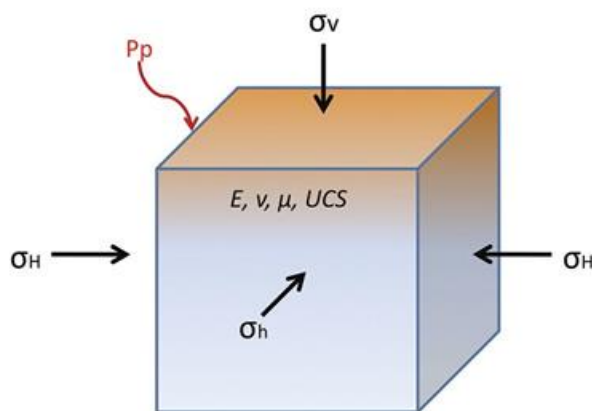
## 6 Spennur og aflögun í bergi

Spenna (e. stress) er sá kraftur sem verkar á flatareiningu tiltekins hlutar. Í einsleitni (e. homogeneous) spennusviði eru skilgreindar þrjár höfuðspennur,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$  þar sem  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Höfuðspennurnar verka hornrétt á þrjá fleti sem skv. skilgreiningu hafa enga skúfspannu (mynd 6.1). Í sinni einföldustu mynd má líta á spennuástand jarðlagastafla sem einsleitt spennusvið.



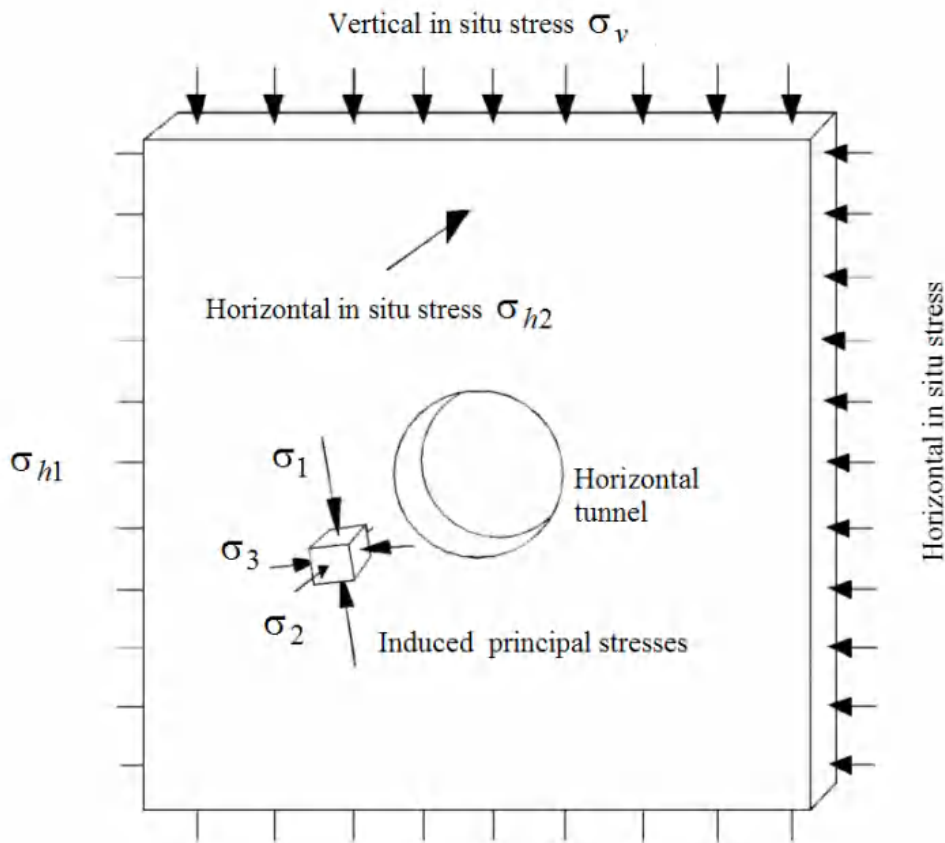
Mynd 6.1 Höfuðspennurnar þrjár (Hoek & Brown, 1982).

Spennur í jarðlagastafla eru einkum tilkomnar vegna fergingar og jarðskorpuhreyfinga. Allt berg undir yfirborði býr, í sinni einföldustu mynd, við lóðréttar spennur ( $\sigma_v$ ) vegna jarðlagafargs og láréttar spennur ( $\sigma_H$  og  $\sigma_h$ ) vegna flekareks (mynd 6.2). Að auki leggja landslag og jarðfræði á hverjum stað sitt af mörkum við mótun spennusviðsins (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).



Mynd 6.2 Lóðréttar og láréttar spennur í jarðlagastafla.  $P_p$  er póruvatnsþrýstingur (Wikel, 2011).

Spennuástand bergs hefur mikla þýðingu við jarðgangagröft. Áður en framkvæmdir hefjast má gera ráð fyrir að höfuðspennurnar þrjá séu þær sömu og lóðréttar og láréttar spennur í berginu. Við gangagröftinn raskast spennusviðið umhverfis göngin með þeim afleiðingum að bergið aflagast og getur orðið óstöðugt. Umfang óstöðugleikans ræðst af hinu nýja spennusviði og eiginleikum bergsins. Þekking á stærð og stefnu höfuðspennanna þriggja fyrir og eftir gröftinn (mynd 6.3) er því grundvallarþáttur í hönnun neðanjarðarmannvirkja og bergstyrkinga (Hoek, 2007).



Mynd 6.3 Spennuástand í bergi umhverfis göng (Hoek, 2007).

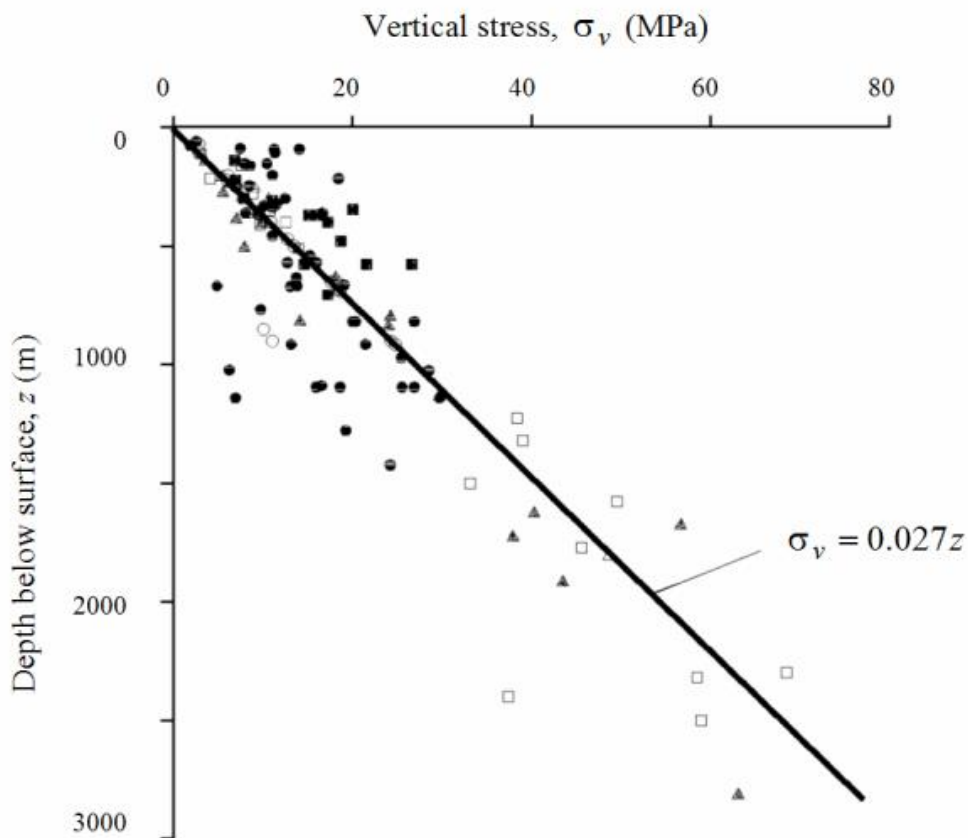
## 6.1 Feltspennur (e. in situ)

Við mat á lóðréttum spennum (bergþungaspennum) í óhreyfðum jarðlagastafla er algengast að notast við eftirfarandi jöfnu:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (6.1)$$

þar sem  $\sigma_v$  er lóðrétt spenna,  $\gamma$  er rúmþyngd bergsins, yfirleitt er notast við  $\gamma = 0,027 \text{ MN/m}^3$  og  $z$  er dýpi frá yfirborði í metrum.

Mælingar á bergþungaspennu í tengslum við neðanjarðarframkvæmdir víðsvegar um jörðina staðfesta þetta samband þótt nokkur dreifing sé í gagnasafninu eins og sjá má á mynd 6.4.



Mynd 6.4 Lóðréttar spennur í jarðlagastafla sem fall af dýpi (Hoek, 2007).

Erfiðara hefur reynst að meta láréttar spennur í bergi, einkum nærri yfirborði þar sem landslagsáhrif eru mikil. Algengt er að gefa lárétta spennu upp sem hlutfall af lóðréttri spennu skv.

$$\sigma_h = k \cdot \sigma_v \quad (6.2)$$

þar sem  $\sigma_h$  er lárétt spennu og  $k$  er hlutfallsstuðull.

Reynslan hefur sýnt að hlutfallið ( $k$ ) virðist lækka með dýpi og vera háð fjaðureiginleikum bergsins. Sheorey (1994) lýsir sambandi  $k$ , fjaðurstuðuls og dýpis með eftirfarandi jöfnu:

$$k = 0,25 + 7E_h \left( 0,001 + \frac{1}{z} \right) \quad (6.3)$$

þar sem  $E_h$  er láréttur fjaðurstuðull bergsins.

Þessi jafna þykir líkja vel eftir raunverulegu spennuástandi bergs (mynd 6.5).

## 6.2 Spennuástand í íslensku bergi

Lóðréttar spennur í íslensku bergi virðast almennt í ágætu samræmi við jöfnu (6.1) (Sigurður Erlingsson, 2013). Í Fáskrúðsfjarðargöngum, einu veggöngunum á Íslandi þar sem spennumælingar hafa verið framkvæmdar samhliða gangagreftri, mældust þó á köflum nokkru hærri lóðréttar spennur en útreikningar gáfu til kynna (Gunnar Arnar Gunnarsson, 2008). Hugsanlegt má telja að bergið endurspegli að einhverju leyti eldra spennuástand en núverandi landslag gefur til kynna þar sem langan tíma getur tekið fyrir berg á stóru svæði að laga sig að breyttum aðstæðum (Pacovský, 2002). Hið umfangsmikla rof ísaldarjökla á sunnanverðum Austfjörðum olli verulegum breytingum á bergþungaspennum sem gætu enn átt eftir að ná jafnvægi. Almennt er þó talið að lóðréttar spennur jafni sig mun hraðar en láréttar spennur.

Vegna jarðskorpuhreyfinga (mynd 6.6) má búast við því að láréttar spennur í íslensku bergi séu almennt lægri en á meginlöndunum. Þetta virðist þó ekki eiga við um efstu hluta jarðskorpunnar en þar hafa almennt mælt hærri láréttar spennur en rekhreyfingar gefa til kynna. Mælingar í Fáskrúðsfjarðargöngum bentu til þess að á 510 m dýpi væri  $k = 1,47$  (Gunnar Arnar Gunnarsson, 2008) og í stöðvarhúsi Blönduvirkjunar á um 220 m dýpi reyndist  $k$  vera nálægt 1,25 (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006). Hinar háu láréttu spennur eru einkum raktar til landslagsáhrifa, innskotavirkni í tengslum við fornar eldstöðvar og þess að eldra spennusvið frá þykkari jarðlagastafla hafi læst inni í berginu með aðstoð holu- og sprungufyllinga (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).

Í Fáskrúðsfjarðargöngum var notast við sk. *overcoring* aðferð við mat á spennuástandi bergsins. Sú aðferð er talin mjög viðkvæm fyrir spennubreytingum umhverfis göngin auk þess sem hún þykir óáreiðanleg í sprungnu og gropnu bergi. Fyrir vikið ber að taka niðurstöðum mælinga í Fáskrúðsfjarðargöngum með nokkrum fyrirvara (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).

Spennumælingar með bergbrotsaðferð (e. hydraulic fracturing) þykja almennt gefa áreiðanlegri niðurstöður en *overcoring* mælingar. Slíkar mælingar voru framkvæmdar árin 1980 og 1998 í tengslum við fyrirhugaðar virkjanaframkvæmdir í Fljótsdal. Báðar mælingar gáfu svipaðar niðurstöður og við hönnun stöðvarhúss Kárahnjúkavirkjunar var miðað við  $k \approx 0,4$  (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006). Jöfnur (6.4)–(6.6) sýna niðurstöður spennumælinganna frá árinu 1998 (Matthías Loftsson, Ægir Jóhannsson & Einar Erlingsson, 2005):

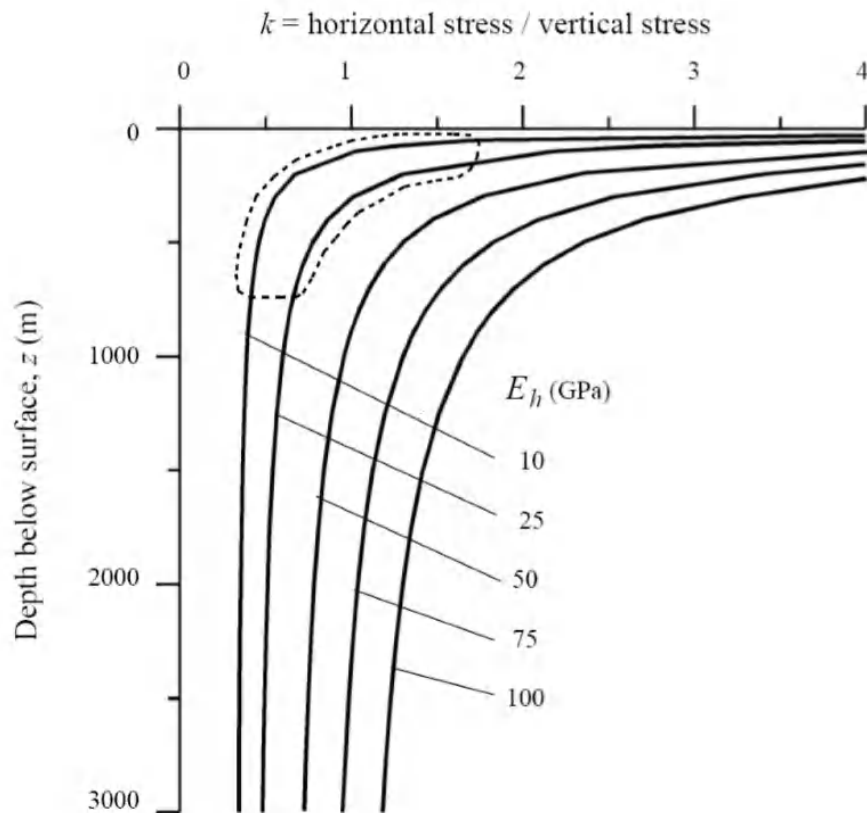
$$\sigma_v = 0,0275z \quad (6.4)$$

$$\sigma_h = 2,68 + 0,007(z - 150) \quad (6.5)$$

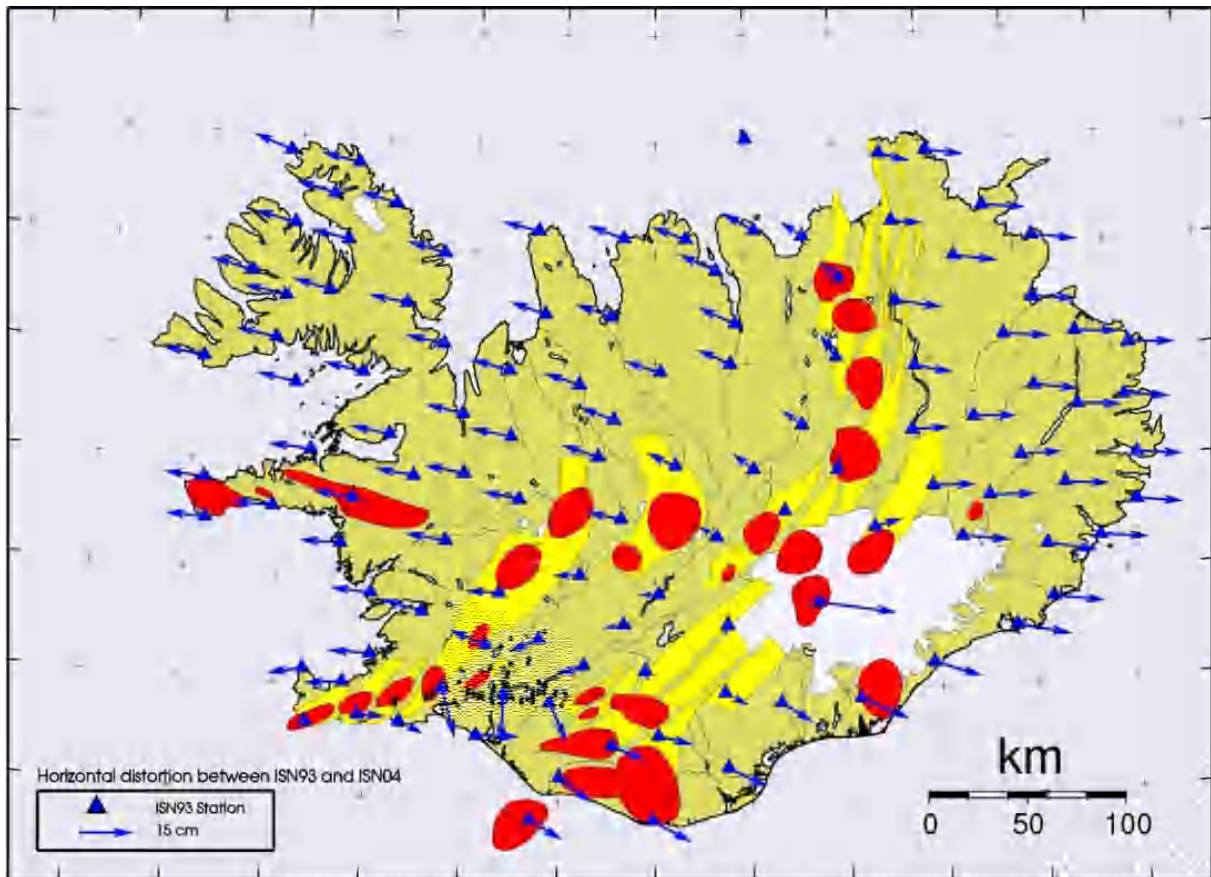
$$\sigma_H = 5,23 + 0,003(z - 150) \quad (6.6)$$

Mælingar á spennuástandi í íslensku bergi gefa einnig til kynna að fjaðurstuðull þess sé lágur samanborið við berg meginlandanna (mynd 6.5). Þetta er rakið til meiri sprungu-

Þéttleika og fjölda millilaga sem ýta undir aflögun bergsins (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).



Mynd 6.5 Láréttar spennur í jarðlagastafla sem fall af dýpi. Spennurnar eru háðar fjaðurstuðli bergsins. Íslenskt berg fellur innan brotalínunnar (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson, 2006).



Mynd 6.6 Láréttar færslur GPS-mælistöðva á Íslandi frá 1993 til 2004. Bláu þríhyrningarnir eru mælistöðvar, gulu svæðin marka rekbeltin og rauðu svæðin eru eldstöðvakerfi (Guðmundur Valsson, Markus Rennan & Þórarinn Sigurðsson, 2005).

## 6.3 Aflögun bergs

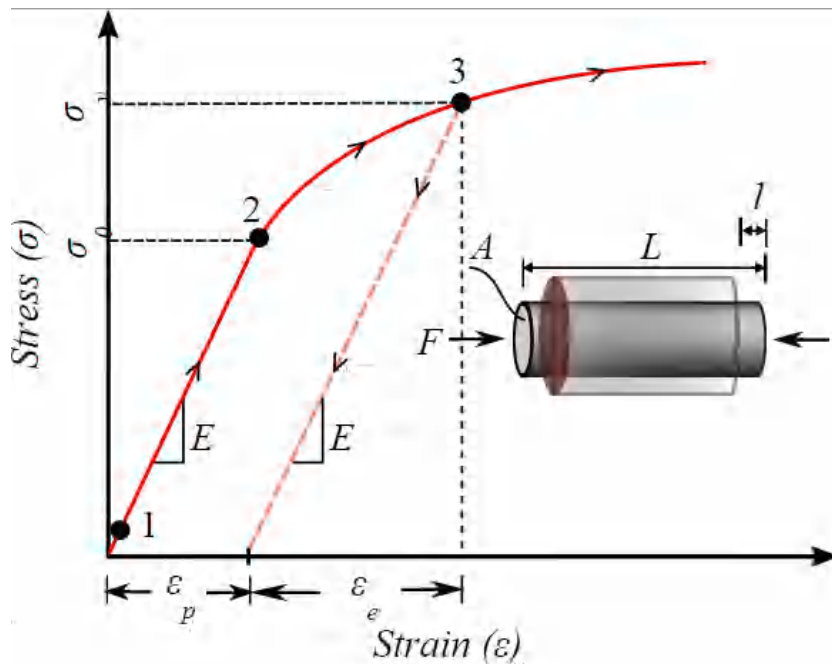
Allt efni sækist eftir að ná jafnvægi við þær aðstæður sem ríkja hverju sinni. Þannig aðlagast jarðlagastafla því spennusviði sem honum er búinn. Verði staflinn fyrir álagi ( $\Delta\sigma$ ) t.d. vegna fargs eða jarðganga bregst hann við með aflögun eða streitu (e. strain) sem er í réttu hlutfalli við spennuna en öfugu hlutfalli við fjaðurstuðul bergsins:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6.7)$$

þar sem  $\varepsilon$  er streita,  $\sigma$  er spenna og  $E$  er fjaðurstuðull.

Mynd 6.7 sýnir dæmigerða hegðun bergs undir einása álagi. Í fyrstu sýnir bergið fullkomlega fjaðrandi hegðun (punktar 1–2) en þegar álagið fer að nálgast brotþol bergsins (punktar 2–3) fer bergið að hníga (e. yield) með varanlegri, deigri (e. plastic) aflögun. Eftir að einása brotþoli (3) er náð má búast við auknum óstöðugleika og jafnvel broti.





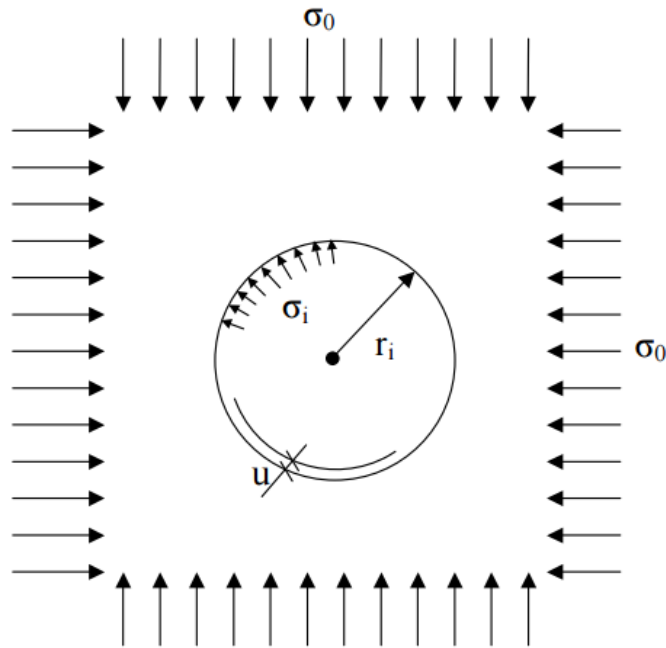
Mynd 6.7 Spennu-streitu graf fyrir fjaðrandi-deigt efni. Á milli punkta 1 og 2 er aflögunin fullkomlega fjaðrandi en eftir það fer efnið að hníga með varanlegri aflögun (Wikipedia, 2015).

### 6.3.1 Spennur og streitur umhverfis jarðgöng

Aflögun og brot í bergi má rekja til stefnuhneigðs (e. anisotropic) spennusviðs, þ.e. þegar höfuðspennurnar eru misstórar. Við gangagröft skapast óhjákvæmilega slíkar aðstæður þar sem engin spenna verkar hornrétt á yfirborð ganganna ( $\sigma_3 = 0$ ). Viðbrögð bergsins við hinu breytta spennuástandi ráðast af umfangi breytinganna, styrk bergsins og fjaðureiginleikum þess.

#### Einsátta spennusvið

Einfaldast er að skoða kringlótt göng með radíusinn  $r_i$  sem grafin eru í fullkomlega fjaðrandi berg sem býr við einsleitt, einsátta (e. isotropic) spennusvið, þ.e. í öllum bergmassanum eru spennurnar jafnstórar ( $\sigma_v = \sigma_h = \sigma_0$ ) í allar áttir (mynd 6.8).



Mynd 6.8 Kringlótt göng í einsleitu og einsátta spennusviði (Sigurður Erlingsson, 2011).

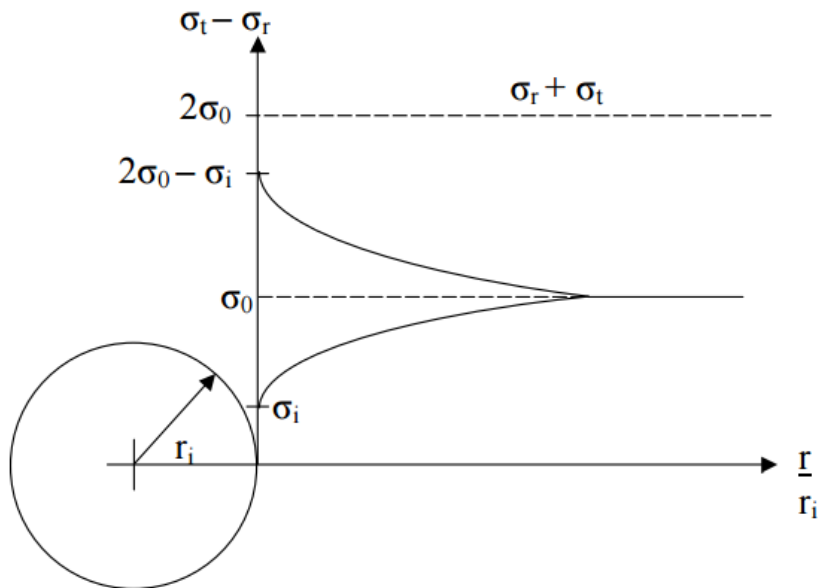
Með tilkomu ganganna verður hornrétt spenna (e. radial stress) á gangaveggina engin en vex með aukinni fjarlægð ( $r$ ) frá miðju ganganna skv.

$$\sigma_r = \sigma_0 \left( 1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (6.8)$$

Að sama skapi verður snertilspennan (e. tangential stress) mest við gangavegginn en minnkar með fjarlægð skv. jöfnu (6.9) (Franklin & Dusseault, 1989).

$$\sigma_t = \sigma_0 \left( 1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (6.9)$$

Mynd 6.9 sýnir hvernig hornrétt spenna og snertilspenna breytast með fjarlægð frá gangaveggnum.



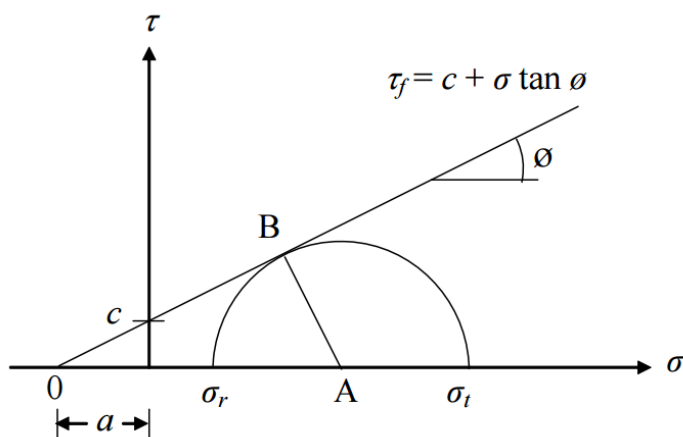
Mynd 6.9 Hornrétt spenna og snertilspenna sem fall af fjarlægð frá yfirborði ganga (Sigurður Erlingsson, 2011).

Fjaðrandi aflögunina ( $u$ ) má reikna skv. jöfnu (6.10) (Sigurður Erlingsson, 2011).

$$u = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_i \frac{r_i^2}{r} \quad (6.10)$$

þar sem  $\nu$  er Poisson's hlutfall bergsins sem finna má með prófunum.

Næst opinu verður munurinn á  $\sigma_r$  og  $\sigma_t$  mestur. Þar má því búast við deigri (e. plastic) aflögun og jafnvel broti þegar Mohr's hringurinn snertir brotlínu bergsins (mynd 6.10). Þessari aflögun er nauðsynlegt að mæta með bergstyrkingum sem hækka hornréttu spennuna á gangaveggina.

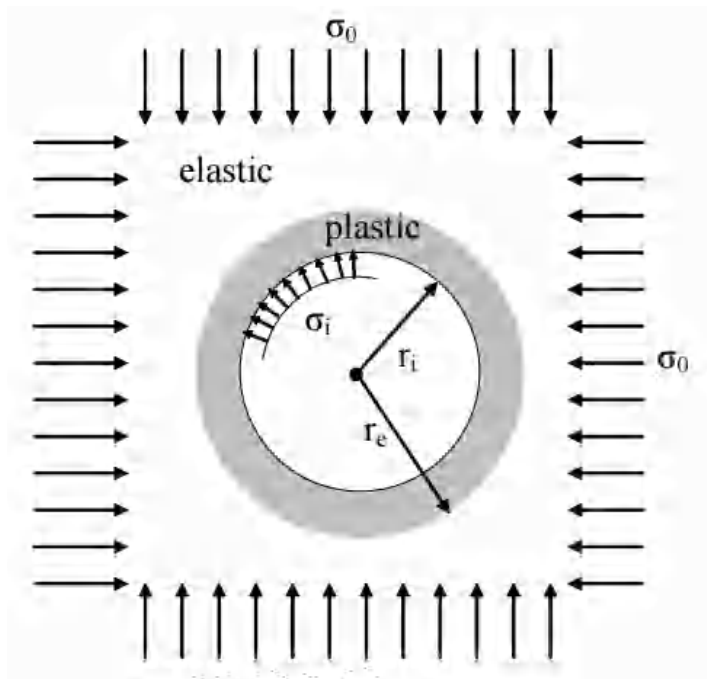


Mynd 6.10 Mohr-Coulomb brotlíking fyrir hornréttu spenna og snertilspenna í göngum (Sigurður Erlingsson, 2011).

Umfang svæðisins sem sýnir deiga hegðun má reikna skv.

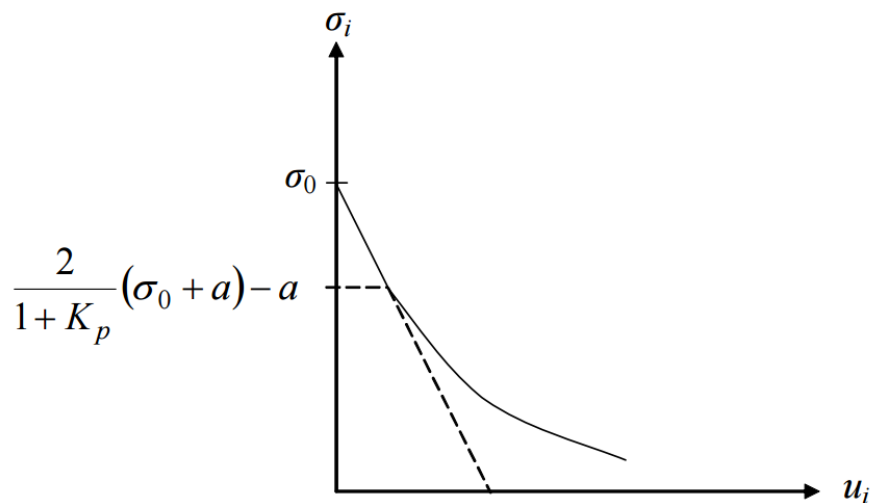
$$r_e = \left[ \frac{2}{1 + K_p} \cdot \frac{\sigma_0 + a}{\sigma_i + a} \right]^{\frac{1}{K_p - 1}} \cdot r_i \quad (6.11)$$

þar sem  $K_p$  er passífur jarðþrýstistuðull bergsins. Þykkt deiga svæðisins verður þá  $r_e - r_i$  eins og sjá má á mynd 6.11.



Mynd 6.11 Deig aflögun kemur fram í berginu næst göngunum (Sigurður Erlingsson, 2011).

Á mynd 6.12 má sjá hvernig bergfærslur inn í göngin ( $u_i$ ) aukast samfara fallandi þrýstispenntu á gangaveggina ( $\sigma_i$ ). Í þekju ganganna má búast við meiri aflögun en myndin sýnir vegna bergþunga. Að sama skapi má ætla að aflögunin sé minni við gólf ganganna. Brotalínan sýnir fullkomlega fjaðrandi hegðun.



Mynd 6.12 Bergfærslur samfara fallandi þrýstisþennu á gangaveggi. Brotalínan sýnir fullkomlega fjaðrandi hegðun (Sigurður Erlingsson, 2011).

### Stefnuhneigt spennusvið

Þegar berg býr við stefnuhneigt spennusvið þar sem láréttar spennur ákvarðast af jöfnu (6.2) má nota sk. Kirsch-jöfnur til þess að reikna spennur og streitur umhverfis kringlótt göng í fullkomlega fjaðrandi efni (Brady & Brown, 1985). Hornréttar spennur, snertilspennur og skúfþennur ( $\tau_n$ ) umhverfis göngin verða þá:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_v}{2} \left[ (1+k) \left( 1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) - (1-k) \left( 1 - 4 \frac{r_i^2}{r^2} + 3 \frac{r_i^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (6.12)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_v}{2} \left[ (1+k) \left( 1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) + (1-k) \left( 1 + 3 \frac{r_i^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (6.13)$$

$$\tau_n = \frac{\sigma_v}{2} \left[ (1-k) \left( 1 + 2 \frac{r_i^2}{r^2} - 3 \frac{r_i^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right] \quad (6.14)$$

þar sem hornið  $\theta$  miðast við láréttan flöt í miðju ganganna.

Hornréttar bergfærslur við yfirborð ganganna fást með jöfnu (6.15):

$$u_r = -\frac{\sigma_v r_i^2}{4Gr} \left[ (1+k) - (1-k) \left\{ 2(1-2\nu) - \frac{r_i^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad (6.15)$$

og jafna (6.16) sýnir færslurnar samsíða yfirborði ganganna:

$$u_t = -\frac{\sigma_v r_i^2}{4Gr} \left[ (1-k) \left\{ 2(1-2\nu) + \frac{r_i^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right] \quad (6.16)$$

þar sem  $G$  er skúfstífni bergsins og  $\nu$  Poisson's hlutfall (Brady & Brown, 1985).

Séu göngin ellipsulaga má reikna snertilspennur í veggjum ( $\sigma_t^a$ ) og þekju ( $\sigma_t^c$ ) ganganna með eftirfarandi jöfnum (Brown & Brady, 1985):

$$\sigma_t^a = \sigma_v \left( 1 - k + 2 \frac{W}{H} \right) \quad (6.17)$$

$$\sigma_t^c = \sigma_v \left( k \left( 1 + 2 \frac{H}{W} \right) - 1 \right) \quad (6.18)$$

þar sem  $H$  er hæð ellipsunnar og  $W$  breidd hennar.










Þegar um flóknari gangaþversnið er að ræða má styðjast við viðmið Hoek og Brown (1980b) fyrir snertilspennur í veggjum og þekju:

$$\sigma_t^a = \sigma_v (B - k) \quad (6.19)$$

$$\sigma_t^c = \sigma_v (Ak - 1) \quad (6.20)$$

Gildi stuðlanna A og B má nálgast í töflu 6.1.

Tafla 6.1 Gildi stuðlanna A og B í jöfnum Hoek og Brown (1980b) fyrir mismunandi gangaþversnið.

VALUES OF CONSTANTS A & B									
									
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	5.0	1.9	3.9

Aflögun bergs umhverfis flókið gangaþversnið í misleitum bergmassa er nauðsynlegt að skoða með líkanreikningum.

Hönnun og uppsetning bergstyrkinga verður að taka mið af viðbrögðum bergsins við breyttu spennuástandi. Til þess að styrkingar verði sem áhrifaríkastar skiptir tímasetning höfuðmáli auk þess sem styrkingarnar verða að þola það álag sem bergið veldur og vera hæfilega fjaðrandi til þess að geta brugðist við hreyfingum bergmassans (Brady & Brown, 1985).

## 7 Bergstyrkingar

Til þess að koma í veg fyrir að bergmassi umhverfis jarðgöng gefi sig og hrynji eða sígi inn í göngin þarf að grípa til ráðstafana sem styðja við bergið og hjálpa því að standa uppi. Þær aðferðir og efni sem notuð eru til þess að bæta stöðugleika og viðhalda burðarþoli bergs kallast einu nafni bergstyrkingar.

Algengt er að bergstyrkingum sé komið fyrir í tvennu lagi. Vinnustyrkingar (bráðabirgðastyrkingar) eru settar upp á meðan gangagröfturinn stendur yfir og er ætlað að tryggja stöðugleika bergmassans á framkvæmdatímanum. Endanlegum styrkingum er síðan komið fyrir áður en mannvirkið er tekið í notkun en þeim er ætlað að endast út líftíma þess. Algengast er að vinnustyrkingar verði einnig uppistaðan í endanlegum styrkingum vegganga (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006).

Í grófum dráttum má skipta bergstyrkingum í tvennt eftir eðli þeirra. Annars vegar er um að ræða virkar (e. active) styrkingar sem veita berginu stuðning strax við uppsetningu og er ætlað að halda við stakar bergblökkir eða laus svæði. Hins vegar er um að ræða óvirkar (e. passive) styrkingar sem veita engan stuðning við uppsetningu en virkjast samfara aflögun bergsins (Brady & Brown, 1985). Algengast er að nota bæði virkar og óvirkar styrkingar.

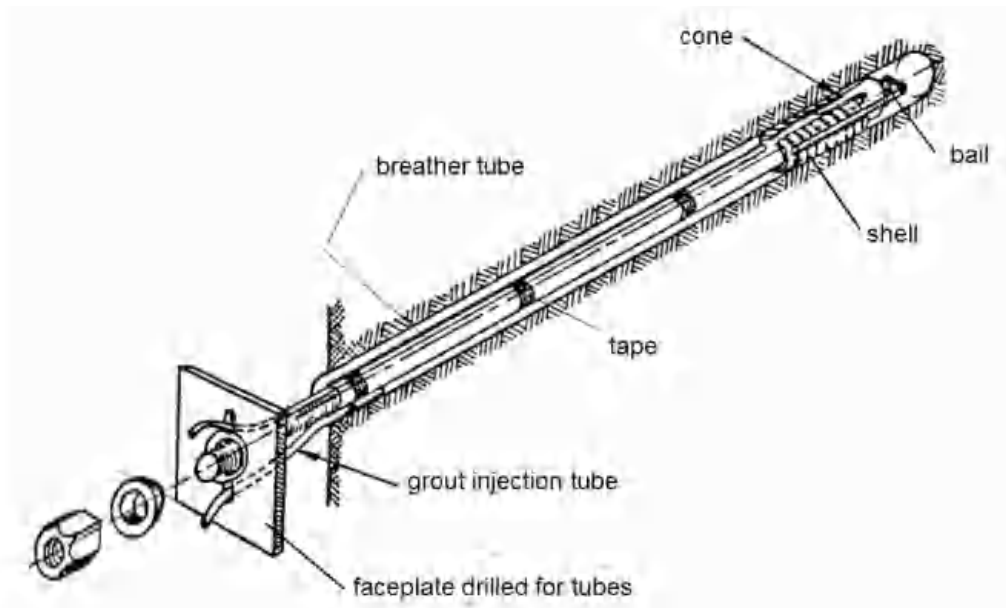
Algengasta styrkingaraðferð í heiminum í dag er sambland bergbolta og sprautusteypu. Sú aðferð er jafnframt notuð í öllum jarðgangaframkvæmdum á Íslandi. Þar sem óstöðugleiki er mikill er enn fremur notast við frekari styrkingar á borð við vírnet, sprautusteypuboga- og rif og jafnvel heilfóðringar úr steypu (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006).

Samkvæmt leiðbeiningum Vegagerðarinnar (2009) um styrkingar í göngum skal almennt notast við bergbolta og trefjastyrkta sprautusteypu en þar sem aðstæður eru erfiðar skal einnig nota sprautusteypuboga eða bergbönd. Við ákvörðun bergstyrkinga skal hafa hliðsjón af Q-kerfinu nema um annað hafi verið samið. Hér að neðan verða teknar til umfjöllunar þær styrkingaraðferðir sem Q-kerfið kveður á um og skapast hefur hefð fyrir í íslenskum veggöngum.

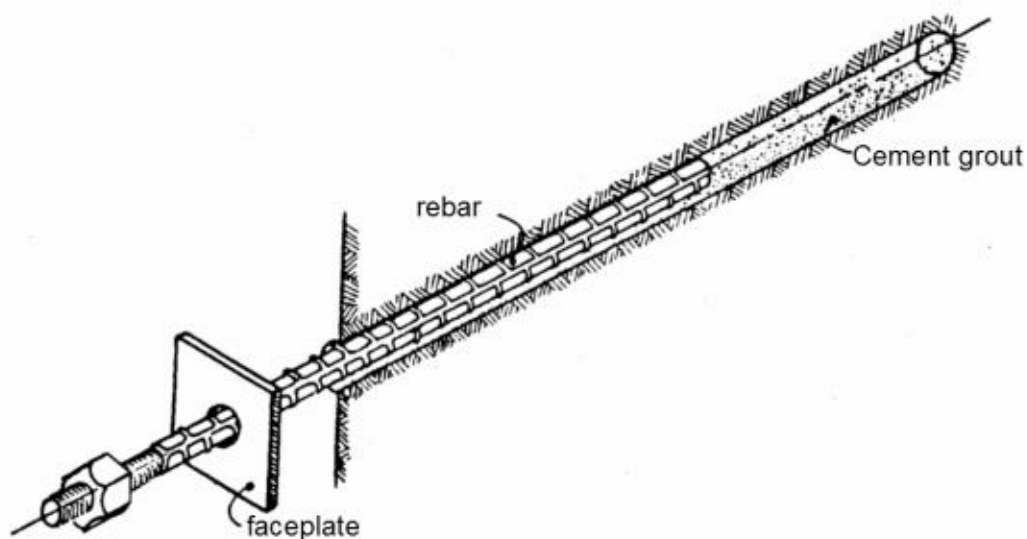
### 7.1 Bergboltar

Bergboltar eru langir stálteinar sem notaðir eru til þess að binda saman bergið í göngunum og koma þannig í veg fyrir hreyfingu bergmassans. Boltarnir eru ýmist endafestir með ankeri eða límpylsum (mynd 7.1) eða innsteyptir með fljótharðnandi múrblöndu (mynd 7.2). Kosturinn við endafesta bolta er sá að það tekur stuttan tíma að setja þá upp og þeir veita öryggi strax eftir uppsetningu en innsteyptir boltar virka ekki að fullu fyrr en múrblandan hefur harðnað. Fyrir vikið er algengara að nota endafesta bergbolta sem vinnustyrkingu en innsteypta bolta í endanlegar styrkingar. Ankerisfesta bergbolta má grauta eftir innsetningu og þannig ná fram auknum skúfstyrk á milli boltans og bergsins.

Grautunin getur einnig varið boltann fyrir ryði og tæringu af völdum grunnvatns (Brady & Brown, 1985).



Mynd 7.1 Ankerisfestur bergbolti. Endaskífan er götuð svo hægt sé að grauta boltann eftir innsetningu (Hoek, 2007).



Mynd 7.2 Innsteyptur bergbolti (Hoek, 2007).

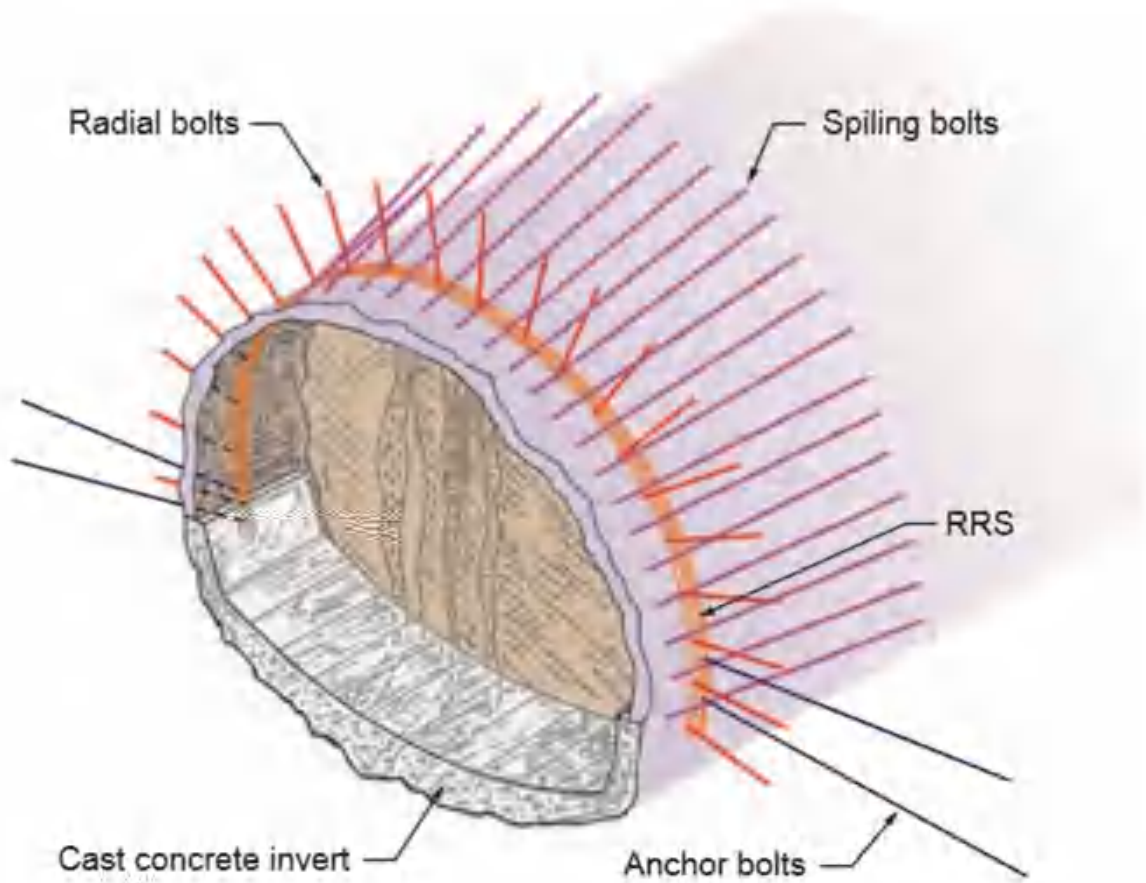
Innsetning bergbolta fer þannig fram að borvagnar eru notaðir til þess að bora holur í bergið þar sem koma á boltunum fyrir. Endafestum boltum er stungið í holurnar, festingin virkjuð, skífa sett á ytri endann og hert að þangað til ákveðinni togspennu er náð. Ef um innsteypta bolta er að ræða er holan fyrst fyllt með múrblöndunni, boltinn síðan rekinn í holuna og skífa sett á endann. Þegar múrblandan hefur harðnað er hert að skífunni þangað til réttri togspennu er náð. Algengt er að bergbolta séu 3 m langir en í stöku tilfellum eru þeir allt að 6 m (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006).



### 7.1.1 Forboltun

Við ákveðnar aðstæður getur reynst nauðsynlegt að nota sk. forbolta eða spælbolta (e. spiling bolts) til þess að tryggja stöðugleika og viðhalda réttu gangaþversniði áður en sprengt er. Boltarnir eru þá boraðir inn í stafninn, utan við eiginlegt þversnið ganganna og látnir mynda eins konar blævæng utan um göngin. Algengt er að boltarnir víki um  $15^\circ$  frá stefnu ganganna sjálfra (mynd 7.3). Bilið á milli bolta og umfang forboltunar ræðst af berggæðunum hverju sinni. Algengt er að notast við 6 m langa bolta með 30–70 cm millibili (Holmøy & Aagaard, 2002).

Forboltar hafa ekki verið taldir til endanlegra bergstyrkinga og eru því almennt ekki ryðvarðir. Engar rannsóknir hafa verið gerðar á burðargetu forbolta en Holmøy og Aagaard (2002) telja fulla ástæðu til þess að taka tillit til áhrifa þeirra á stöðugleika bergmassa. Í Q-kerfinu er gert ráð fyrir forboltun í bergi með mjög lágt Q-gildi þótt hún komi ekki fram í styrkingagrafinu. Forboltar eru almennt notaðir samhliða styttri sprengifærum og bergböndum eða sprautusteypubogum/-rifjum (NGI, 2013).

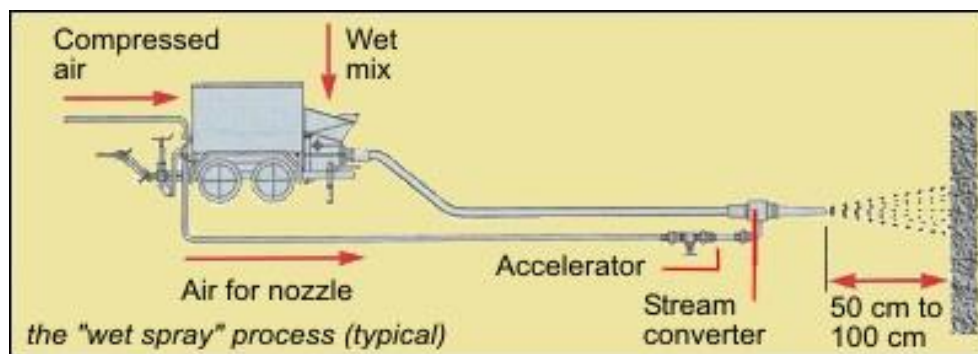


Mynd 7.3 Bergboltun við óstöðugar aðstæður. Forboltar víkja lítillega frá stefnu ganganna (NGI, 2013).

## 7.2 Sprautusteypa

Sprautusteypa hefur reynst mjög áhrifarík við að auka stöðugleika bergs og stöðva steinlos í göngum. Virkni og hegðun steypunnar er erfitt að útskýra til fulls þar sem samspil molnandi bergmassa, óreglulegs yfirborðs og misþykkjar steypu getur verið flókið. Sprautusteypan hefur þó margsannað gildi sitt og reynst mjög gagnleg með öðrum styrkingum. Með tilkomu bættrar tækni og aukinnar þekkingar hefur notkun sprautusteypu aukist á undanförunum áratugum á kostnað dýrari og tímafrekari styrkinga. Þannig hefur trefjastyrkt sprautusteypa dregið verulega úr þörfinni fyrir heilsteyptar fóðringar (Hoek, 2007; Komselis o.fl., 2012). Öll veggöng hér á landi frá og með Múlagöngum (1990) eru húðuð með sprautusteypu. Í nýlegum göngum er algeng þykkt hennar 40–60 mm en allt að 200–300 mm þar sem berg er lélegt (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006).

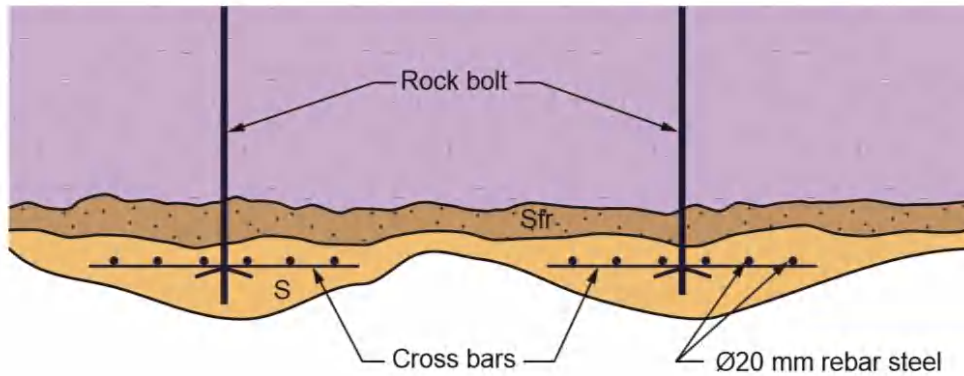
Steypuásprautun fer þannig fram að fínkornótttri steypu er sprautað með þrýstilofti á vegg og þekju ganganna. Við sprautustútinn er herði bætt í steypuna svo hún taki sig fljótt og ekki þurfi að stoppa og bíða eftir að hún harðni (Mynd 7.4). Í vinnustyrkingar er algengt að nota stál- eða plasttrefjar til að minnka sprungumyndun og gera steypuna seigari. Slíkar trefjar eru minna eða ekki notaðar í endanlegar styrkingar (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006). Rannsóknir sýna að lág massaprósenta (1–5%) trefja í sprautusteypu getur aukið togstyrk steypunnar um allt að 60% (Chanh, 2004).



Mynd 7.4 Dæmigerð aðferð við steypuásprautun. Tilbúinni steypublöndu er sprautað með þrýstilofti á vegg og þekju. Herði (e. accelerator) er bætt í steypuna við sprautustútinn (Rockcrete, 2015).

## 7.3 Sprautusteypurif

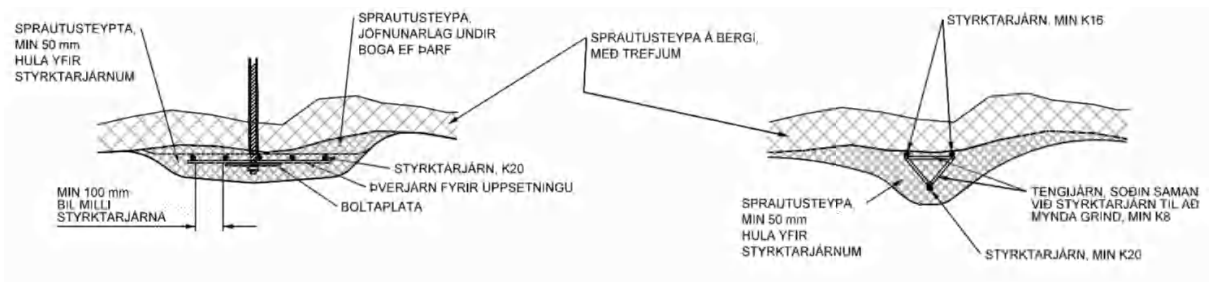
Í Q-kerfinu er kveðið á um að mjög lélegt berg ( $Q < 0,4$ ) skuli styrkja með sk. sprautusteypurifjum (e. reinforced ribs of sprayed concrete). Rifin samanstanda af 16–20 mm sverum steypustyrktarjárnnum sem fest eru saman með þverböndum (e. cross bars). Rifin eru löguð að gangaþversniðinu og fest með bergboltum í vegg og þekju ganganna. Þunnu lagi af trefjastyrktri sprautusteypu er sprautað undir rifin fyrir uppsetningu og þau síðan hulín alveg með sprautusteypu (mynd 7.5). Fjöldi járna í hverju rífi, bilið á milli rífa og fjöldi laga ræðst af umfangi framkvæmdarinnar og berggæðum (NGI, 2013).



Mynd 7.5 Sprautusteypurif (NGI, 2013).

## 7.4 Sprautusteypubogar

Á Íslandi hefur skapast hefð fyrir að nota sk. sprautusteypuboga (e. lattice girders) í stað rifja (mynd 7.6) á þeim svæðum þar sem bogavirkni verður ekki náð með bergboltun og steypuásprautun (Vegagerðin, 2009). Sprautusteypubogar eru alla jafna hannaðir og framleiddir fyrirfram í samræmi við kennisnið ganganna. Þeir eru áþekkir rifjum að lögun og virkni en rifin eru þó sveigjanlegri þar sem þau má laga að þversniði ganganna hverju sinni. Þar sem lögun ganganna vîkur mjög frá kennisniði þeirra fer því að jafnaði meira af trefjastyrktri sprautusteypu undir bogana en rifin (Holmøy & Aagaard, 2002). Sprautusteypubogar samanstanda ýmist af þremur eða fjórum steypustyrktarjárnnum sem soðin eru saman þannig að járnin mynda þrívíða grind (mynd 7.7). Í þríhyrndu grindinni eru sverari járnin að jafnaði 25–40 mm en mjórri járnin 20–32 mm. Járnin sem halda grindinni saman eru að jafnaði 10–20 mm. Í ferhyrndu grindinni eru járnin fjögur jafnsver, 20–40 mm (Komselis, Blayney & Hindle, 2012).



Mynd 7.6 Dæmi um uppsetningu sprautusteypurifja (t.v.) og sprautusteypuboga (t.h.) (Vegagerðin, 2013).



Mynd 7.7 Þríhyrnd (t.v.) og ferhyrnd (t.h.) grind sprautusteypuboga (Jörimann, 2013).

Sprautusteypubogar eru að jafnaði settir upp á undan öðrum styrkingum, annað hvort strax að útmokstri loknum eða þegar þunnu lagi af steypu hefur verið sprautað á óstöðug svæði til þess að koma í veg fyrir flögnun. Bogunum er komið fyrir eins nálægt stafni ganganna og framast er unnt. Þannig má lágmarka umfang þeirra svæða sem standa eftir óstyrkt auk þess sem boginn er notaður sem viðmið fyrir næstu sprengifæru (Komselis, Blayney & Hindle, 2012). Boginn er skorðaður af, annað hvort með bergboltum (ef hægt er að finna þeim festu) eða festur við síðasta boga. Á bak við bogann er sett vírnet, bæði til þess að auka togstyrk sprautusteypunnar sem umlykur allt virkið og til þess að flytja álagið frá berginu yfir á bogana. Boginn er síðan notaður sem vogarstöng fyrir forbolta áður en næsti salvi er sprengdur. Áður en boginn er endanlega kaffærður í sprautusteypu er næsti bogi festur við hann með boltum (Einar Hrafn Hjálmarsson, 2011).

## 7.5 Fræðileg virkni bergstyrkinga

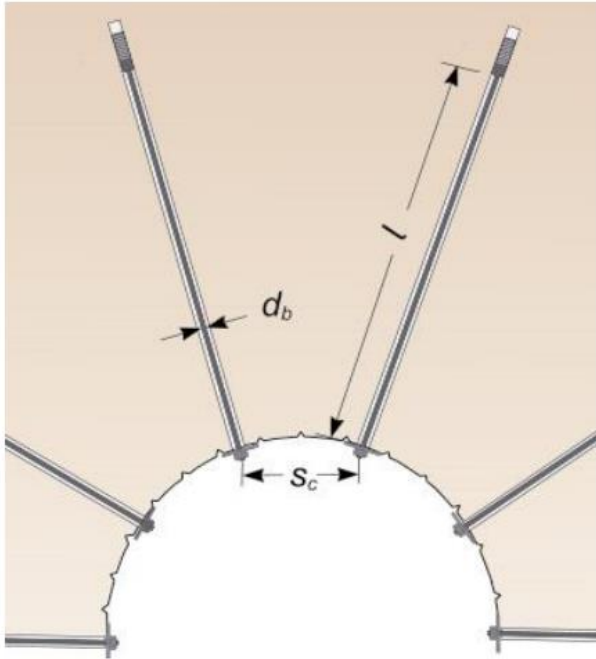
Á áttunda og níunda áratug síðustu aldar settu Hoek og Brown (1980b) og Brown og Brady (1985) fram einfaldar jöfnur til þess að lýsa virkni bergstyrkinga í göngum. Jöfnurnar gilda fyrir kringlótt göng í einsleitu bergi og einsátta spennusviði. Þær taka til virkni bergbolta og sprautusteypu, auk þess sem stálbogar eru teknir fyrir. Verulega einfölduð nálgun gerir það að verkum að jöfnurnar gefa aðeins grófa mynd af umfangi nauðsynlegra styrkinga en þær má engu að síður nota til glöggvunar og samanburðar. Flóknari bergmassa, gangaþversnið og spennuástand þarf að skoða í viðeigandi tölvuforritum (Hoek, 2007).

### 7.5.1 Bergboltar

Stífnistuðul (e. stiffness parameter) endafestra bergbolta má finna skv.

$$k_b = \frac{E_b \pi d_b^2}{4l_s s_c} \quad (7.1)$$

þar sem  $k_b$  er stífni stuðullinn í  $MPa/m$ ,  $E_b$  er fjaðurstuðull bergboltanna,  $d_b$  er þvermál bergboltanna,  $l$  er lengd boltanna að festingunni (mynd 7.8),  $s_l$  og  $s_c$  er bilið á milli bolta samsíða og þvert á gangastefnuna (Hoek, 2007).



Mynd 7.8 Inntaksstærðir stífni stuðuls fyrir endafesta bergbolta (Hoek, 2007).

Hámarksþrýstispennu (e. maximum support pressure) endafestra bergbolta má finna skv.

$$p_{b_{\max}} = \frac{T_{b_{\max}}}{s_l s_c} \quad (7.2)$$

þar sem  $p_{b_{\max}}$  er hámarksstuðningurinn sem vænta má frá tilteknu boltamynstri ( $s_l$  og  $s_c$ ) að teknu tilliti til hámarksfestu boltanna ( $T_{b_{\max}}$ ) sem fæst með togprófum (e. pull out test) (Hoek, 2007). Stuðningurinn getur þó aldrei orðið meiri en togstyrkur boltanna sjálfra:

$$p_{b_{\max}} = \frac{\sigma_s \pi d^2}{4 s_l s_c} \quad (7.3)$$

þar sem  $\sigma_s$  eru flotmörk (e. yield strength) bergboltanna (Sigurður Erlingsson, 2011).

Við ákvörðun á lengd bergbolta má hafa sprungutíðnina  $\lambda$  til hliðsjónar. Að því gefnu að RQD-gildi bergsins sé þekkt fæst sprungutíðni þess með jöfnu (4.12). Sé litið svo á að sprungur hafi Poisson-dreifingu má nota aðferð Poissons (e. Poisson process) til þess að finna líkurnar ( $P$ ) á því að tiltekin boltalengd ( $x$ ) fari í gegnum tiltekinn fjölda sprungna ( $k$ ). Jafna (7.4) lýsir sambandi breytanna (Burt & Barber, 1995).

$$P[k, x] = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^k}{k!} \quad (7.4)$$

Að sama skapi má nota jöfnu (7.4) til þess að ákvarða boltalengd út frá sprungutíðni og líkunum á því að boltinn skeri tiltekinn sprungufjöld. Í því skyni þarf að skilgreina ásættanlegar hlutfall bergbolta og þann sprungufjölda sem talið er nauðsynlegt að þeir skeri til þess að tryggja stöðugleika bergmassans.

### 7.5.2 Sprautusteypa

Stífnistuðul sprautusteypu ( $k_c$ ) má finna skv.

$$k_c = \frac{E_c [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c) [(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2]} \quad (7.5)$$

þar sem  $E_c$  og  $\nu_c$  eru fjaðurstuðull og Poisson's hlutfall steypunnar,  $r_i$  er radíus ganganna og  $t_c$  er þykkt sprautusteypunnar (Brady & Brown, 1985). Ef þykkt steypunnar er mjög lítil samanborið við radíus ganganna má einfalda jöfnuna (Sigurður Erlingsson, 2011) þ.a.

$$k_c \cong \frac{E_c t_c}{r_i^2} \quad (7.6)$$

Hámarksþrýstispennu sem steypa þolir má áætla skv.

$$p_{c_{\max}} = \frac{1}{2} \sigma_c \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (7.7)$$

þar sem  $\sigma_c$  er einása þrýstistyrkur sprautusteypunnar (Brady & Brown, 1985).

### 7.5.3 Bergboltar og sprautusteypa

Þegar notaðar eru tvær eða fleiri styrkingaraðferðir samhliða má líta svo á að stífnistuðull styrkinganna í heild sinni sé summa einstakra stífnistuðla (Sigurður Erlingsson, 2011). Þegar notast er við bergbolta og sprautusteypu verður stífnistuðull styrkinganna því:

$$k = k_b + k_c \quad (7.8)$$

Jafnan gildir þó aðeins eftir að báðum styrkingum hefur verið komið fyrir.

### 7.5.4 Sprautusteypubogar og -rif

Virkni sprautusteypuboga og -rifja verður ekki útskýrð með einföldum hætti. Notkun þeirra byggir á áralangri reynslu og þekkingu en að jafnaði eru þessar styrkingar settar upp án þess að fram fari greining á burðargetu eða þrýstispennu þeirra. Bogar og rif hafa sannað gildi sitt en ætla má að í mörgum tilvikum sé styrkingum nokkuð ofaukið við notkun þeirra. Þannig eru fá dæmi um hrun eða stjórnlausar færslur á boga- og rifjasvæðum í göngum (Grimstad o.fl., 2002). Bogar og rif eru ávallt notuð samhliða öðrum styrkingum, bæði bergboltum og sprautusteypu, auk þess sem forboltun er algeng í

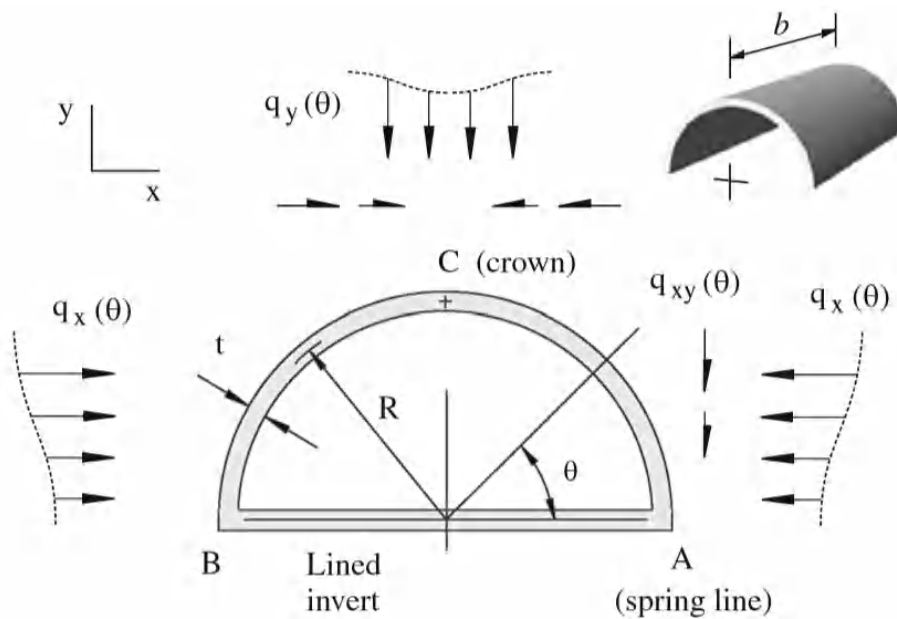
tengslum við uppsetningu þeirra (NGI, 2013). Fyrir vikið eru líkangerð og útreikningar nokkuð flókin.

Sé reynslujafna Bartons og féлага (1974) sem þeir settu fram í tengslum við hönnun Q-kerfisins (jafna (5.4)) yfirfærð á sprautusteypuboga- og rif þarf að draga frá þrýstispennu af völdum bergbolta og sprautusteypu (Grimstad o.fl., 2002). Spennan sem bogarnir og rifin þurfa að þola er því að lágmarki:

$$P_{bogi/rif} = P_{roof} - (P_b + P_c) \quad (7.9)$$

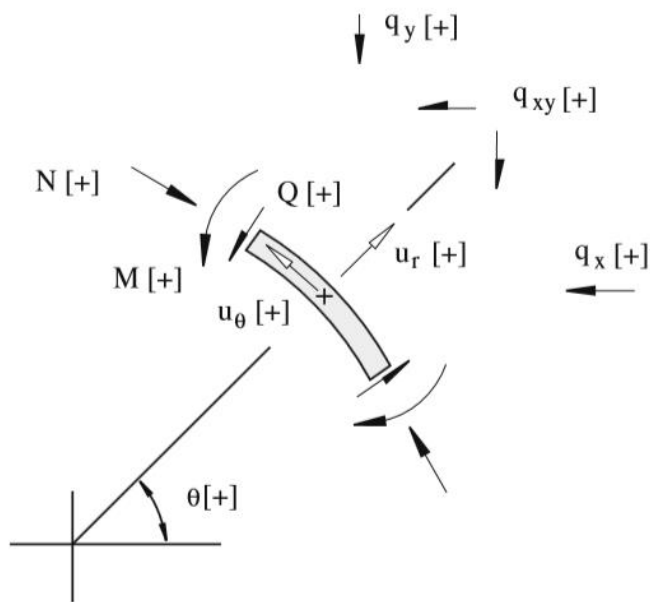
### 7.5.5 Stuðningsgeta fóðringa (e. liners)

Í því skyni að kanna hvort fóðringar í göngum, þ.e. sprautusteypa, sprautusteypurif- eða bogar, standist það álag sem þær verða fyrir samfara spennulosun og bergfærslum má meðhöndla fóðringarnar sem fjaðrandi sveigða bita (e. curved beams) við yfirborð ganganna (Carranza-Torres & Diederichs, 2009). Séu göngin skoðuð sem heilfóðraður hálfhringur (mynd 7.9) verður hver sveigður biti fyrir áslægum þrýstikrafti (N), beygjuvægi (M) og skúfálagi (Q) eins og mynd 7.10 sýnir.



Mynd 7.9 Álag á heilfóðraðan hálfhring í fjaðrandi bergi.  $b$  og  $t$  eru lengd og þykkt bitanna,  $q_y$ ,  $q_x$  og  $q_{xy}$  eru lóðrétt, lárétt og skúfálag á fjaðrandi fóðringuna (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).





Mynd 7.10 Álag á sveigðan bita í heilfóðruðum göngum sem mynda hálfhring.  $N$  er áslægur þrýstikraftur,  $M$  er beygjuvægi og  $Q$  er skúfálag (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Til þess að meta öryggi fóðringanna gagnvart álagsþáttunum á mynd 7.10 má útbúa sk. stuðningsgetugröf (e. support capacity plots) sem sýna samspil álagsþátta í hverjum bita. Inn á gröfin eru teiknaðir lokaðir ferlar sem marka öryggisstuðla (e. factor of safety) styrkinganna gagnvart hinu samþætta álagi.

Þegar samspil áslægs þrýstikrafts og beygjuvægis er skoðað í sveigðum bita eins og þeim á mynd 7.11 fást áslægu spennurnar  $\sigma_{max}$  (samþjöppun) og  $\sigma_{min}$  (tog) skv. jöfnu (7.10).

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} t / 2 \quad (7.10)$$

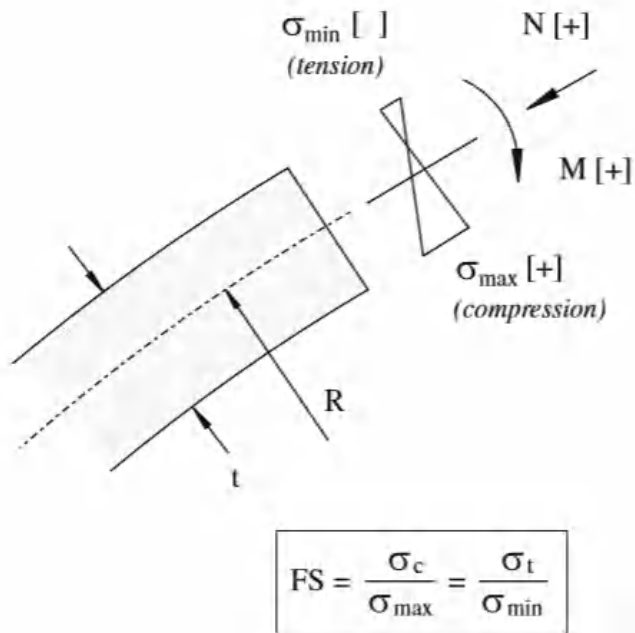
þar sem  $A$  er þverskurðarflatarmál bitans,  $I$  er hverfitregða hans og  $t$  er þykkt bitans (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Öryggisstuðlar ( $FS$ ) gagnvart þrýstibroti (e. compression failure) og togbroti (e. tensile failure) eru skilgreindir sem

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{min}} \quad (7.11)$$

þar sem  $\sigma_c$  er þrýstistyrkur bitans og  $\sigma_t$  er togstyrkur hans (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).





Mynd 7.11 Ákvörðun á öryggisstuðlum gagnvart þrýsti- og togbroti með hliðsjón af áslægum spennum í sveigðum bita.  $\sigma_c$  er þrýstistyrkur bitans og  $\sigma_t$  er togstyrkur hans (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

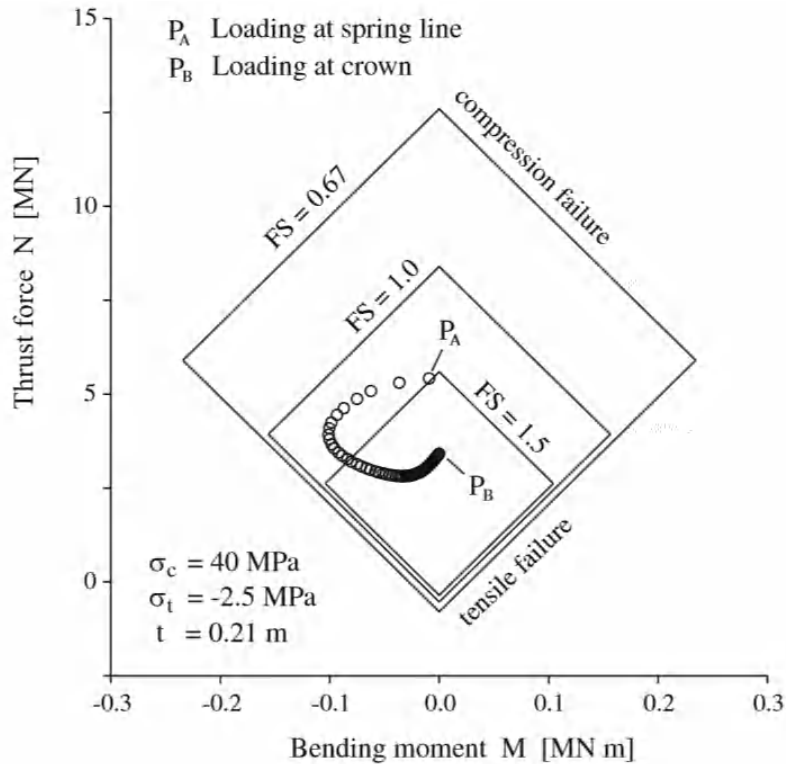
Að ákveðnum öryggisstuðlum gefnum má nota jöfnur (7.10) og (7.11) til þess að afmarka það samspil áslægs þrýstikrafts og beygjuvægis sem veldur þrýstibroti (jafna (7.12)) eða togbroti (jafna (7.13)). Að sama skapi má nota jöfnu (7.14) til þess að ákvarða hin kritísku gildi beygjuvægis ( $M_{cr}$ ) sem valda þrýsti- og togbroti samtímis.

$$N = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (7.12)$$

$$N = \frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (7.13)$$

$$M_{cr} = \pm \frac{I}{t} \cdot \frac{\sigma_c - \sigma_t}{FS} \quad (7.14)$$

Mynd 7.12 sýnir dæmigert stuðningsgetugraf byggt á jöfnum (7.12)–(7.14).



Mynd 7.12 Stuðningsgetugraf fyrir samspil áslægrar þrýstispenntu ( $N$ ) og beygjuvægis ( $M$ ) í fódningu ganga.  $P_A$  er álag í brotpunkti veggja og gólfs og  $P_B$  er álag í þekju (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Þegar samspil áslægs þrýstikrafts og skúfálags er skoðað í sveigðum bita eins og þeim á mynd 7.13 má gera ráð fyrir að skúfspennan sé mest ( $\tau_{max}$ ) um hlutlausa ásinn (e. neutral axis) sem verður hvorki fyrir samþjöppun né togi (Carranza-Torres & Diederichs, 2009). Skúfspennuna á þennan ás má reikna skv. jöfnu (7.15).

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (7.15)$$

Áslægi þrýstikrafturinn veldur hornrétttri spennu á bitann skv. jöfnu (7.16).

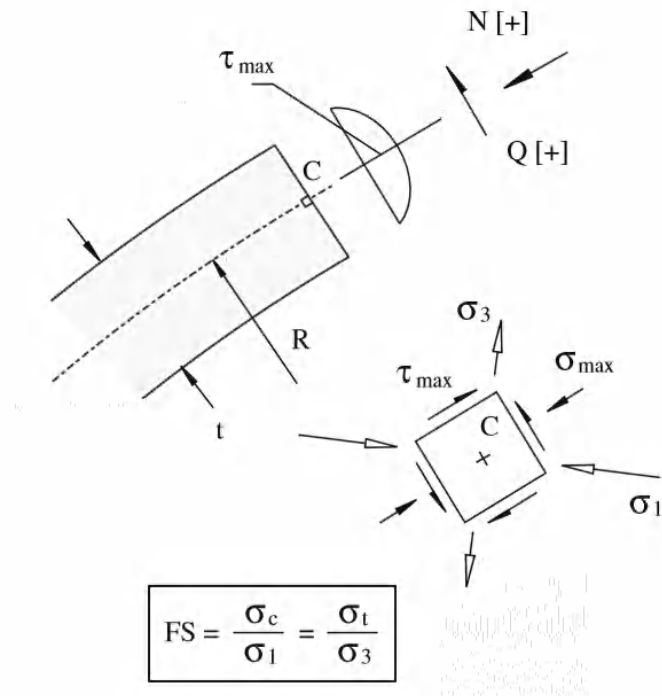
$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \quad (7.16)$$

Í punktinum C sem staðsettur er á hlutlausa ásnum má reikna höfuðspennurnar  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$  með jöfnu (7.17).

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{max}}{2}\right)^2 + \tau_{max}^2} \quad (7.17)$$

Öryggisstuðlar gagnvart þrýsti- og togbroti á hlutlausum ásum verða þá:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (7.18)$$



Mynd 7.13 Ákvörðun á öryggisstuðlum gagnvart þrýsti- og togbroti með hliðsjón af höfuðspennum í sveigðum bita.  $\sigma_c$  er þrýstistyrkur bitans og  $\sigma_t$  er togstyrkur hans (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

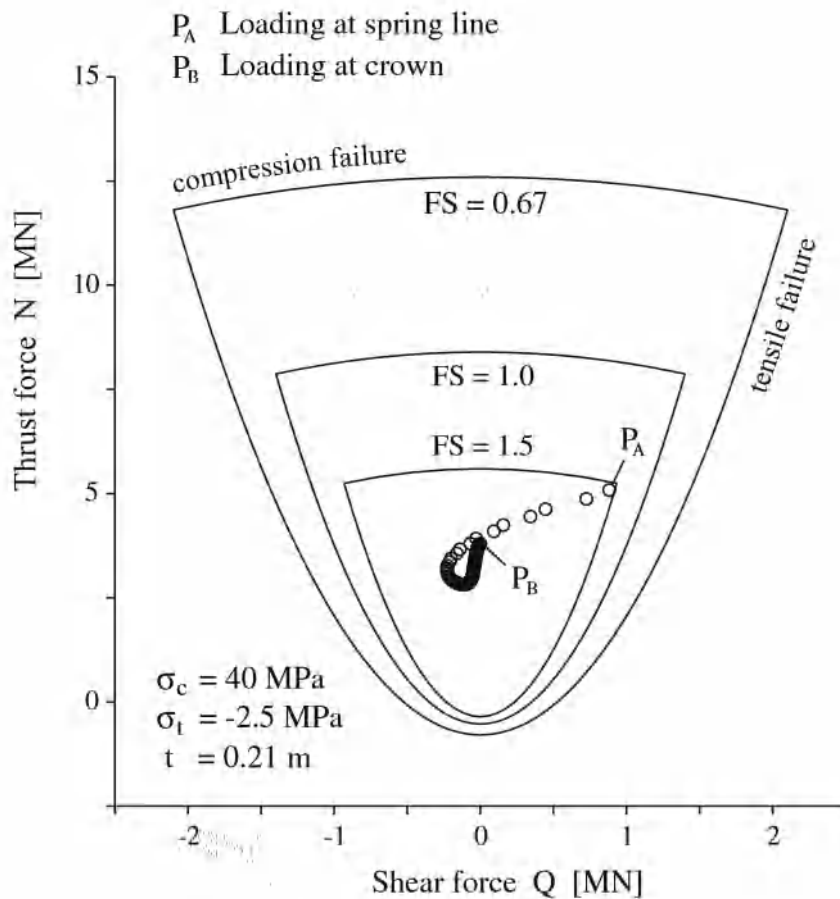
Nú má nota jöfnur (7.15) og (7.18) til þess að afmarka það samspil þrýsti- og skúfkrafts sem veldur þrýstibroti (jafna (7.19)) eða togbroti (jafna (7.20)) að gefnum ákveðnum öryggisstuðlum. Að sama skapi má finna hinn krítíska skúfkraft ( $Q_{cr}$ ) sem veldur samtímis þrýsti- og togbroti (jafna (7.21)). Jöfnurnar má síðan nota til þess að útbúa stuðningsgetugraf eins og á mynd 7.14 (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9}{4} \cdot \frac{Q^2 FS}{\sigma_c A} \quad (7.19)$$

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9}{4} \cdot \frac{Q^2 FS}{\sigma_t A} \quad (7.20)$$

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (7.21)$$

þar sem  $\sigma_t$  er neikvæð stærð í jöfnu (7.21).

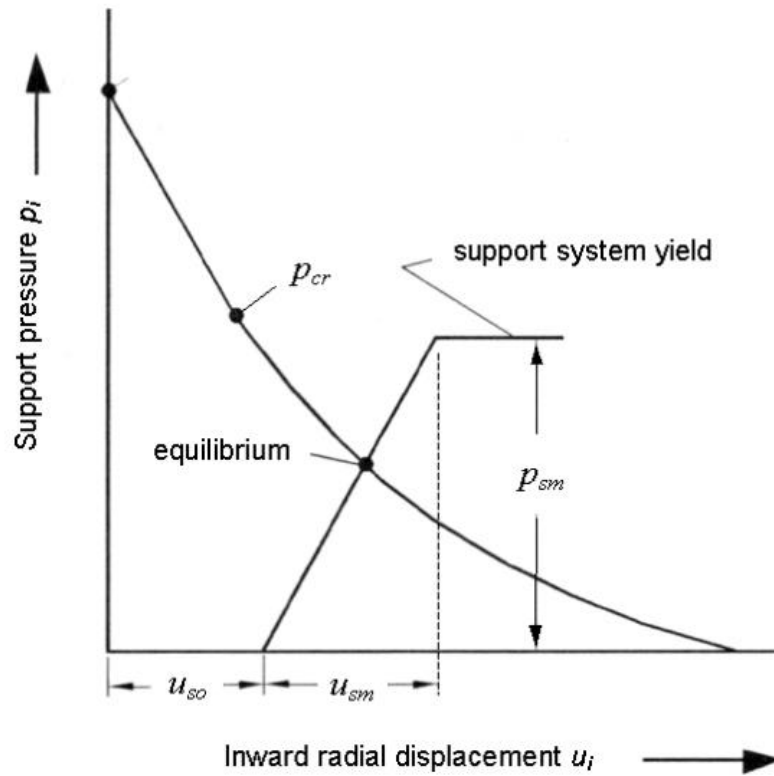


Mynd 7.14 Stuðningsgetugraf fyrir samspil áslægrar þrýstispennu ( $N$ ) og skúfkrafts ( $Q$ ) í fóðringu ganga.  $P_A$  er álag í brotpunkti veggja og gólfs og  $P_B$  er álag í þekju (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Þegar um samsettar fóðringar er að ræða, t.d. sprautusteypuboga eða stálgrindarboga með sprautusteypu, þarf að skilgreina jafnaðargildi fyrir þykkt og eiginleika efnanna og þá krafta sem verka á styrkingarnar. Nánari umfjöllun um blandaðar styrkingar má nálgast í grein Carranza-Torres og Diederichs frá árinu 2009.

## 7.6 Uppsetning bergstyrkinga

Til þess að bergstyrkingar skili tilætluðum árangri þarf þrennt að koma til. Uppsetningin þarf að fara fram áður en berfgærslur verða stjórnlausar, þ.e. fljótlega eftir að fjaðrandi aflögun bergsins lýkur (mynd 7.15). Stífnistuðull styrkinganna þarf að vera með þeim hætti að þær geti aflagast samfara aflögun bergsins áður en hámarksþrýstispennu styrkinganna er náð. Þá þarf hámarksþrýstispennan ( $p_{sm}$ ) að vera umtalsvert hærri en skurðpunktur ferlanna á mynd 7.15 til þess að tryggja lágmarksöryggi. Séu of stífar styrkingar settar inn of snemma er hætt við því að ferlarnir skerist ekki eða að öryggisstuðull styrkinganna verði of lágur (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995).

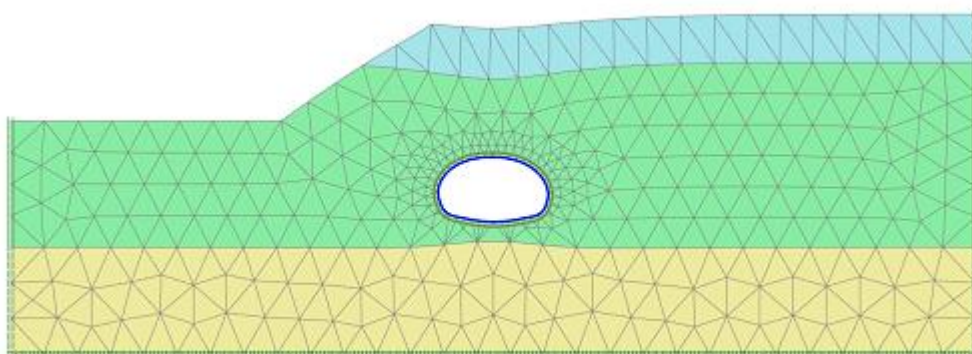


Mynd 7.15 Virkjun bergstyrkinga samfara bergfærslum. Rétt stífni og hámarksþrýstispenna bergstyrkinga ásamt heppilegri tímasetningu leiðir til jafnvægis bergmassa (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995).

## 8 Líkanreikningur með einingaraðferð

Flest tölvulíkon sem ætlað er að herma eftir hegðun bergs við gangagröft byggja á svokallaðri einingaraðferð (e. finite element analysis). Einingaraðferðin felur í sér tölulega greiningu (e. numerical analysis) þar sem berginu umhverfis göngin er skipt niður í smáar einingar sem tengdar eru saman í hnútpunktum. Greiningin felst í því að reikna hvernig punktarnir hreyfast hver miðað við annan og líkja þannig eftir hreyfingu í samfelldum bergmassa (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2013).

Þegar gera á líkan af bergi umhverfis göng þarf að skilgreina tæknilega eiginleika bergsins ásamt því spennuástandi sem ríkir fyrir framkvæmdir. Að jafnaði gefst kostur á að skilgreina eitt eða fleiri sprungukerfi (misfellur) og tvær eða fleiri berggerðir í massanum umhverfis göngin. Líkanið reiknar síðan þær breytingar sem verða á spennusviði hvernig einingar og aflögun þeirra miðað við eiginleika bergsins. Vegna þess hve aðstæður geta verið krítískar nálægt yfirborði ganganna eru einingarnar jafnan hafðar minnstar næst opinu (mynd 8.1).



Mynd 8.1 Dæmigert, tvívítt tölvulíkan af jarðgöngum. Berginu er skipt í einingar sem tengjast saman í hnútpunktum. Einingarnar eru minnstar næst göngunum (Plaxis, 2015).

Tölvulíkonin bjóða flest upp á þann möguleika að kanna áhrif bergstyrkinga á spennur og aflögun og geta því reynst gagnleg við ákvörðun á magni og eðli styrkinga. Þau má einnig nota til þess að fá tilfinningu fyrir því hvaða þættir hafa mest áhrif á stöðugleika þegar gangagerð og styrkingar eru annars vegar. Við líkangerð er mikilvægt að skilgreina sem nákvæmast þær inntaksstærðir sem mest áhrif hafa.

### 8.1 $RS^2$

Í rannsókninni sem hér fer á eftir verður notast við bergtækniforritið  $RS^2$  (áður *Phase<sup>2</sup>*) frá kanadíska fyrirtækinu *Rocscience*. Háskóli Íslands hefur tímabundið leyfi fyrir notkun forritsins og útskriftarnemendur geta fengið aðgang að forritinu í gegnum skólann.

Forritið býður upp á ýmsa greiningarmöguleika á sviðum berg- og jarðtækni, m.a. mat á spennum og bergfærslum umhverfis jarðgöng. Þá býður  $RS^2$  upp á könnun á virkni styrkinga, t.d. bergbolta, sprautusteypu og sprautusteypuboga. Forritið má því nota til þess að hanna styrkingar fyrir jarðgöng að því gefnu að raunsætt mat á helstu inntaksstærðum þess liggi fyrir.

Í  $RS^2$  má vinna tvívíða greiningu á bergmassa umhverfis jarðgöng á grundvelli einingaraðferðar og Mohr-Coulomb eða Hoek & Brown brotlíkans. Gangapversniðið getur verið í misleitum og sprungnum jarðlagastafla og efnið ýmist fullkomlega fjaðrandi, fjaðrandi-deigt eða deigt.

Í rannsókninni sem hér fer á eftir er bergmassinn skilgreindur sem fjaðrandi-deigt efni sem hefur ákveðna eiginleika fyrir brot en eftir að brotpoli er náð minnka berggæðin með kerfisbundnum hætti.

### 8.1.1 Inntaksstærðir $RS^2$

#### Bergspennur

Í  $RS^2$  er boðið upp á tvær aðferðir við ákvörðun á bergspennum fyrir framkvæmdir. Annars vegar má skilgreina stöðugt spennusvið þar sem höfuðspennurnar þrjár eru fastar, fyrirfram ákveðnar stærðir. Hins vegar má notast við bergþungaspennur og hlutfallsstuðulinn  $k$ . Hið síðarnefnda á þó einkum við þegar um framkvæmdir á eða við yfirborð er að ræða. Fyrir jarðgöng er því jafnan notast við stöðugt spennusvið. Þegar ekki er um spennumælingar að ræða þarf að styðjast við niðurstöður fyrri rannsókna á spennuástandi bergs á svæðinu.

#### Tæknilegir eiginleikar bergs

Sé notast við Hoek & Brown brotlíkinguna er nauðsynlegt að skilgreina eftir fremsta megni þær inntaksstærðir sem líkingin byggir á (jöfnur (4.5)–(4.8)), þ.e.  $\sigma_{ci}$ ,  $m_i$ ,  $GSI$  og  $D$  auk fjaðureiginleikanna  $E_i$  og  $\nu$ . Forritið *RocData* frá Rocscience má síðan nota til þess að teikna brotlíkan hvernar berggerðar sem gangapversniðið liggur um.

Þegar ekki er um prófanir að ræða má notast við töflur 8.1 og 8.2 við mat á  $\sigma_{ci}$  og  $m_i$  (Hoek, 2007). Gildin sem þar koma fram eru innbyggð í forritið *RocData*.  $GSI$ -gildið leggur að einhverju leyti mat á magn og eiginleika sprungna en í  $RS^2$  er einnig hægt að skilgreina tiltekin sprungukerfi og eiginleika þeirra. Við það verða líkönin hins vegar flóknari og keyrslur þeirra þyngrri auk þess sem nákvæmar mælingar á sprungukerfum liggja almennt ekki fyrir.  $GSI$ -gildið er því notað sem mælikvarði á sprungur. Þegar sprengingar eru vel útfærðar má gera ráð fyrir að röskunargildið  $D$  sé núll (Hoek, 2012).

Tafla 8.1 Mat á einásáþrýstistyrk mismunandi berggerða í felti (Hoek, 2007).

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	> 10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, granite, gneiss, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, tuff, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or pocked with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be pocked with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be pocked by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Soft fault gouge

\* Grade according to Brown (1981).

\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.



Tafla 8.2 Ákvörðun á gildi fastans  $m_i$  eftir berggerðum. Tölur í svigum byggja ekki á prófunum (Hoek, 2007).

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones (17 = 4)	Siltstones (7 = 2)	Claystones (4 = 2)
			Breccias (19 ± 3)		Greywackes (16 ± 1)	Slates (6 = 2), Muds (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 = 3)	Spartic Limestones (10 = 2)	Micritic Limestones (9 = 2)	Dolomites (9 = 3)
		Evaporites		Gypsum (8 = 2)	Anhydrite (12 = 2)	
	Organic				Chalk (7 = 2)	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble (9 = 3)	Hornfels (19 = 4)	Quartzites (20 = 5)	
	Slightly foliated		Migmatite (29 = 3)	Amphibolites (5 = 0)		
	Foliated**		Gneiss (28 = 5)	Schists (12 = 3)	Phyllites (7 = 2)	Slates (7 = 4)
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite (73 = 3)	Diorite (25 = 5)		
			Granodiorite (25 = 3)			
	Dark	Gabbro (27 = 3)	Dolerite (18 = 3)			
		Diorite (20 = 3)				
	Hypabyssal		Porphyries (26 = 5)		Diorite (19 = 5)	Peridotite (25 ± 5)
Volcanic	Lava		Rhyolite (25 = 5)	Dacite (23 = 5)	Obsidian (18 ± 3)	
			Andesite (25 ± 5)	Basalt (25 = 5)		
	Pyroclastic	Agglomerate (18 = 3)	Breccia (19 = 3)	Tuff (23 = 5)		

\* Conglomerates and breccias may present a wide range of  $m_i$  values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine-grained sediments.

\*\* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of  $m_i$  will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Á grundvelli tæknilegra eiginleika bergsins reiknar  $RS^2$  hvort bergeningarnar standist þær spennubreytingar sem gangagröfturinn felur í sér. Þær einingar sem yfirstíga brotmörk sín teljast hnignar (e. yielded) og búa því ekki lengur yfir þeim eiginleikum sem einkenna óbrotið berg.

## Eiginleikar bergs eftir brot

Erfitt getur reynst að líkja eftir hegðun bergs eftir að brotþoli þess er náð. Við líkangerð er engu að síður nauðsynlegt að skilgreina hvaða eiginleikum bergið er búið eftir brot. Þannig má nálgast hina fjaðrandi-deigu hegðun bergmassa. Við þróun *Phase*<sup>2</sup> (forvera *RS*<sup>2</sup>) leitaði *Rocscience* til leiðandi aðila á sviði bergtækni, sem höfðu reynslu af notkun forritsins, með það fyrir augum að tilgreina þá eiginleika bergmassa sem þyrftu að geta breyst við brot. Niðurstaðan var sú að mikilvægt væri að geta lækkað stuðlana  $m_b$ ,  $s$  og  $a$  í brotlíkingu Hoek & Brown (Crowder & Bawden, 2004).

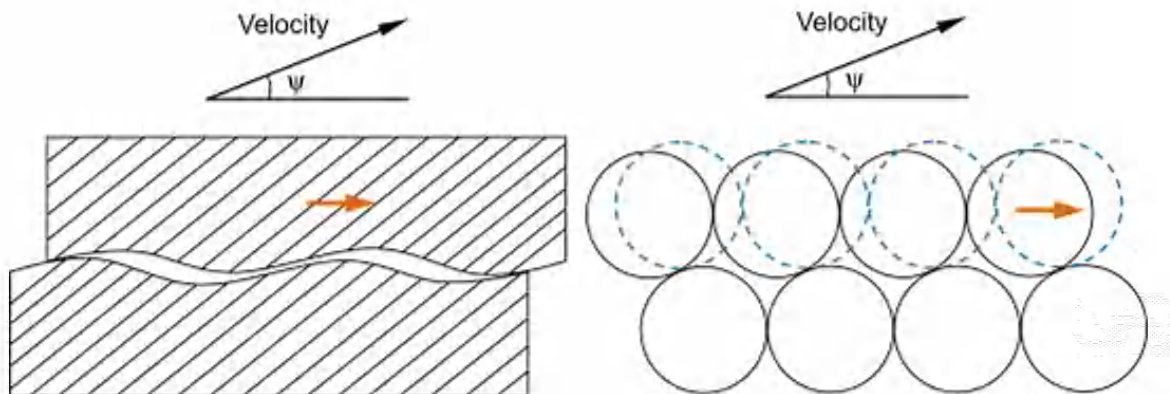
Í grein frá árinu 2007 (Cai, Kaiser, Tasaka & Minami) lýsa höfundar hegðun dæmigerðra bergmassa við brot. Þar má nálgast viðmið fyrir stuðla Hoek & Brown eftir að brotþoli bergs er náð.

Þar sem stuðlarnir  $m_b$ ,  $s$  og  $a$  eru allir háðir GSI-gildi bergsins er einfaldast að lækka þá með því að skilgreina nýtt GSI-gildi eftir brot. Í *RS*<sup>2</sup> er hægt að skilgreina gildið  $GSI_r$  og láta forritið reikna stuðlana  $m_r$ ,  $s_r$  og  $a_r$  sem gilda eftir brot. Ribacchi (2000) leiðir líkum að því að lækkun GSI-gildisins við brot megi almennt lýsa með jöfnu (8.1) sem nota má sem viðmið við líkangerð:

$$GSI_r = 0,7GSI \quad (8.1)$$

Í tengslum við þróun *Phase*<sup>2</sup> kynnti Dr. Evert Hoek þau viðmið sem hann hefur við líkangerð varðandi Hoek & Brown stuðlana ásamt viðmiðum sínum fyrir mat á sk. útvíkkunarstuðli (e. dilation parameter) sem í Mohr-Coulomb brotlíkani er skilgreindur sem útvíkkunarhornið  $\psi$ .

Útvíkkunarhornið eða -stuðullinn er mælikvarði á þenslu bergmassa við skúfálag (mynd 8.2). Reynslan sýnir að útvíkkunin hefur mikla þýðingu við líkangerð en erfitt getur reynst að leggja mat á þessa inntaksstærð (Alejano & Alonso, 2005; Hallgrímur Örn Arngrímsson og Þorri Björn Gunnarsson, 2009; Zhao & Cai, 2010).



Mynd 8.2 Útvíkkun bergs samfara skriði eftir örprungum og smáögnum. Útvíkkunarhornið ( $\psi$ ) er mikilvæg inntaksstærð líkanreikninga (Zhao & Cai, 2010).

Útvíkkunarstuðullinn er alla jafna lágur og iðulega 0 en fyrir sprungið sterkt berg ( $50 < GSI < 65$ ) notar Hoek jöfnu (8.2) við ákvörðun á stuðlinum (Crowder & Bawden, 2004):

$$\text{útvíkkunar stuðull} = 0,3m_r \quad (8.2)$$

Fyrir mjög veikt berg ( $GSI < 30$ ) miðar hann við að engin útvíkkun eigi sér stað. Þessi viðmið má hafa til hliðsjónar við líkangerð.

### Eiginleikar og hegðun bergstyrkinga

Við hönnun styrkinga og könnun á virkni þeirra þarf að skilgreina þær stærðir sem tilgreindar eru í jöfnum (7.1)–(7.3) og (7.5)–(7.7). Framleiðendur bergbolta, sprautusteypu og sprautusteypuboga geta gefið upplýsingar um aflfræðilega eiginleika styrkinganna auk þess sem notast má við dæmigerð gildi fyrir viðkomandi efni. Þá eru ýmsar gerðir styrkinga og eiginleikar þeirra innbyggð í  $RS^2$ . Upplýsingar um lengd bergbolta og boltabil, þykkt sprautusteypu og notkun sprautusteypuboga má nálgast hjá verktökum og eftirliti. Magn bergstyrkinga má einnig áætla með hliðsjón af berggæðamati.

Í  $RS^2$  er bergstyrkingum skipt upp í einingar rétt eins og berginu. Stærð eininganna ræðst af bergeiningunum sem styrkingarnar ná yfir. Hver bergbolti samanstendur því af einingum sem eru mislangar, annars vegar vegna misstórra bergeininga og hins vegar vegna stefnu boltans sem ræður því hvernig hann sker einingarnar. Stærð sprautusteypueininga ræðst hins vegar af þéttleika bergeininga við yfirborð ganganna. Þéttleikinn er mestur á krítískum stöðum við yfirborðið, þ.e. við sprungur og lagmót, og þar eru sprautusteypueiningarnar minnstar. Við líkanreikningana metur forritið hvort hver eining fyrir sig teljist hnigin með tilheyrandi deigri aflögun.

Grautaðar bergboltaeiningar hníga þegar hámarkstogstyrk bergboltanna (e. ultimate tensile strength) er náð. Eftir það teljast einingarnar geta borið álag sem nemur flotmörkum þeirra (e. yield strength) séu þau skilgreind. Bergboltarnir geta því veitt stuðning jafnvel þótt einstakir boltahlutar hafi hnigið (Rocscience, á.á.).

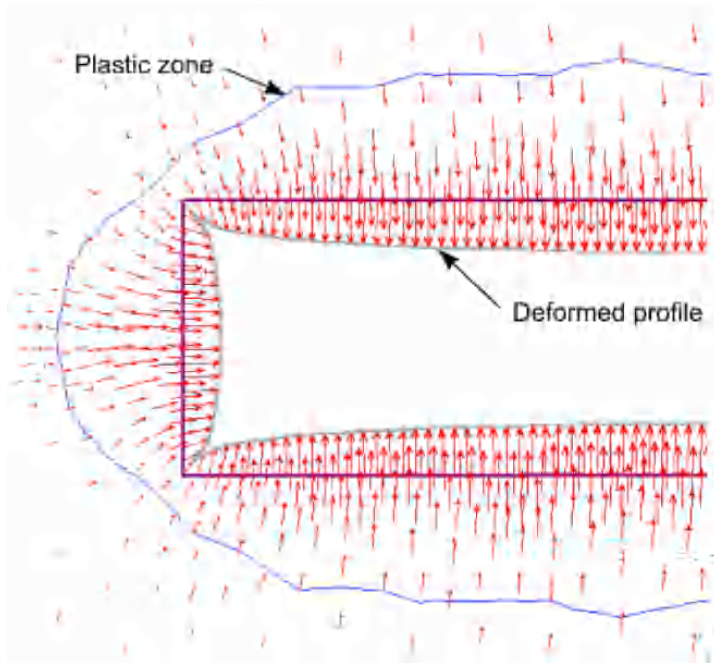
Í  $RS^2$  er hver sprautusteypueining skoðuð sem biti (e. beam) við yfirborð ganganna. Hverjum bita er skipt upp í 100 lög og spennuástand í hverju lagi reiknað. Ef samspil áslægrar þrýstispenntu og beygjuvægis eða skúfálags í einhverju laganna fer yfir þolmörk steypunnar telst sprautusteypueiningin hnigin jafnvel þótt önnur lög viðhaldi fjaðureiginleikum sínum. Fyrir vikið geta hnignar sprautusteypueiningar enn borið álag (Rocscience, á.á.).

Forritið býður upp á þann möguleika að skoða álagið sem einstakar einingar og styrkingarnar í heild sinni verða fyrir samfara spennulosun bergsins. Þannig má leggja mat á hvort bergstyrkingar teljist öruggar jafnvel þótt einstakar einingar hnígi. Í því skyni má skoða öryggisstuðla sprautusteypunnar ( $FS$ ) gagnvart samspili álagsþátta og togkraftinn í bergboltunum.

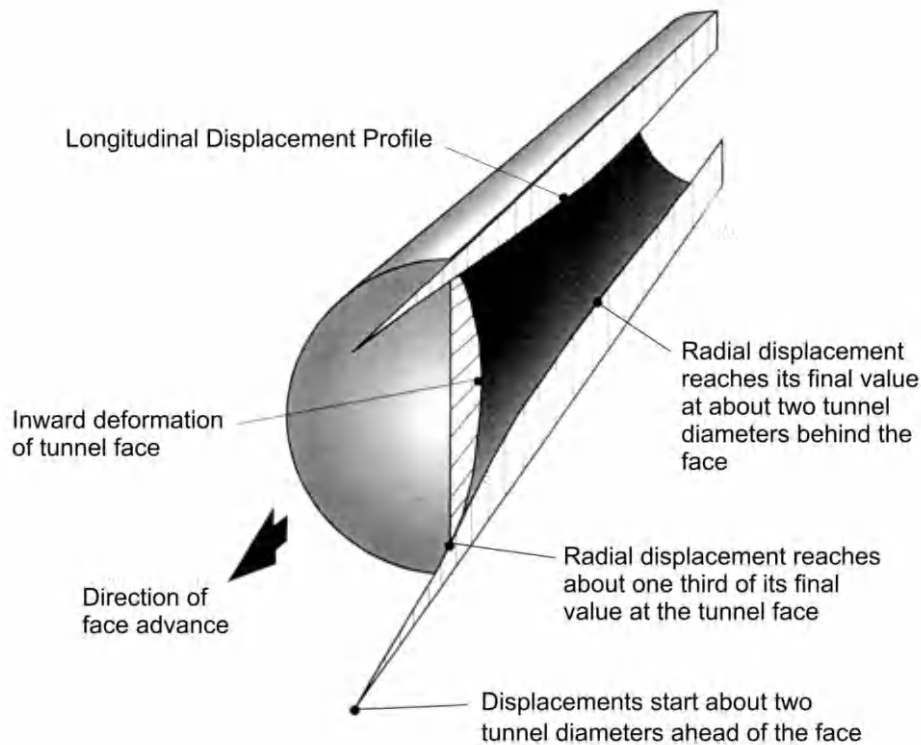
### Spennulosun og bergfærslur

Rannsóknir sýna að 20–30% af heildarbergfærslum eiga sér stað framan við stafn jarðganga, þ.e. áður en viðkomandi salvi er sprengdur (Gesta o.fl., 1993). Myndir 8.3 og 8.4 sýna bergfærslur umhverfis kringlótt göng í greftri. Tíminn sem líður frá því að

sprenningum lýkur þangað til uppsetningu vinnustyrkinga er lokið gerir það enn fremur að verkum að spennulosun í tengslum við gangagerð fer að mestu leyti fram í óstyrktu bergi. Miðað við 5 m salvalengd og 5 m gangaradíus má gera ráð fyrir að bergið hafi losað allt að 90% þeirra spennubreytinga sem göngin hafa í för með sér áður en styrkingar eru settar upp (Gesta o.fl., 1993). Við líkangerð er nauðsynlegt að reyna að herma sem best eftir þessu ferli.



Mynd 8.3 Langsnið úr þrívíðu einingarlíkani sem sýnir aflögun bergs við kringlótt jarðgöng. Miklar bergfærslur (rauðar örvar) eiga sér stað framan við stafn ganganna. Næst göngunum myndast deigt svæði (e. plastic zone) þegar bergið nær brotmörkum sínum (Hoek, 2007).



Mynd 8.4 Aflögun bergs umhverfis jarðgöng í greftri. Bergfærslur í hverjum salva ná yfir langt svæði sem nemur um fjórföldu þvermáli ganganna. Um þriðjungur hornréttra bergfærslna kemur fram framan við stafninn (Hoek, 2007).

$RS^2$  býður upp á þann möguleika að auka álagið á bergið og bergstyrkingarnar í þrepum. Að jafnaði er nóg að setja álagið á í tvennu lagi, þ.e. fyrir og eftir uppsetningu styrkinga. Í því skyni að greina betur aflögun bergsins samfara fallandi þrýstispennu á yfirborð ganganna og útbúa bergfærsluferil (e. ground reaction curve) eins og þann á myndum 6.12 og 7.9. má þrepaskipta spennufallinu eins og lýst er í kafla 24 í leiðbeiningum með forritinu (Rocscience, 2015).

Við líkangerðina þarf jafnframt að ákvarða ásættanlegar bergfærslur miðað við að þær styrkingar sem notaðar eru standist álagið. Þegar notaðar eru stífar eða hálfsvেigjanlegar (e. semi-flexible) styrkingar líkt og í Norðfjarðargöngum má gera ráð fyrir að styrkingarnar þoli bergfærslur allt að 12,5 mm miðað við 5 m gangaradíus (Gesta o.fl., 1993).

Engin ákveðin viðmið eru fyrir því hvað teljast ásættanlegar heildarbergfærslur í veggöngum en reynslan sýnir að fari aflögun gangaþversniðsins mikið yfir 2% er jafnan nauðsynlegt að grípa til sérstakra ráðstafana við bergstyrkingar. Þess eru dæmi að vel útfærðar styrkingar þoli streitu sem nemur allt að 10% af þvermáli ganganna (Hoek, 1999).

Í MSc-ritgerð sinni miðar Gunnar Arnar Gunnarsson (2008) við 10 mm heildarbergfærslur og byggir þar á reynslu íslenskra jarðgangaverkfræðinga. Af ofansögðu má ætla að um heldur varfærið gildi sé að ræða.

## 9 Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum

Rannsóknarverkefnið sem hér fer á eftir er þrjúþætt:

Fyrsti hlutinn felur í sér hönnun bergstyrkinga fyrir valda kafla í Norðfjarðargöngum út frá uppgefnum Q-gildum. Q-gildin eru fengin úr jarðfræðiskýrslum tékkneska verktakans Metrostav. Dæmi um jarðfræðiskýrslur má sjá í viðauka F. Hönnunin fylgir ítrustu viðmiðum Q-kerfisins eins og það birtist í leiðbeiningum norsku jarðtæknistofnunarinnar (NGI) frá árinu 2013.

Annar hluti verkefnisins felur í sér samanburð á hönnuðum styrkingum úr fyrsta hluta og uppsettum styrkingum í Norðfjarðargöngum skv. gögnum frá verktaka og eftirliti. Styrkingarnar eru bornar saman bæði m.t.t. heildarmagns og magns í hverjum salva fyrir sig.

Þriðji hlutinn felur í sér líkangerð með bergtækniforritinu  $RS^2$ . Inntaksstærðir líkanreikninga eru skilgreindar og samspil bergmassa og styrkinga kannað í völdum þversniðum ganganna. Áhrif tæknilegra eiginleika bergs á bergfærslur og öryggi styrkinga eru könnuð og reynt að meta hvaða eiginleika er mikilvægt að skilgreina sem réttast.

### 9.1 Rannsóknarsvæðin

Þrjú frumskilyrði voru sett fyrir vali á rannsóknarsvæðum:

- Í fyrsta lagi þurftu Q-gildi að vera skráð bæði í þekju og veggjum ganganna.
- Í öðru lagi þurfti jarðfræðin að vera svipuð á a.m.k. 20 m löngum kafla.
- Í þriðja lagi þurfti gangaþversniðið að vera einfalt, þ.e. án útskota eða annarra aukarýma.

Skráð Q-gildi í Norðfjarðargöngum fram í apríl 2015 eru á bilinu 0,05–11,7. Fyrstu mánuði framkvæmdatímans var Q-gildið eingöngu skráð í þekju ganganna og eru þau svæði ónothæf í rannsóknina. Þegar eingöngu er horft til svæða þar sem gildið er gefið fyrir bæði þekju og veggi fást Q-gildi á bilinu 0,05–7.

Til þess að unnt sé að magntaka styrkingar og bera saman teoríu og praksís þarf að taka til skoðunar nokkuð langa kafla með svipaða eiginleika. Þannig má koma í veg fyrir að jarðfræði aðlægra svæða hafi umtalsverð áhrif á val á styrkingum. Þar sem hver sprengisalvi er rúmir 5 m við bestu aðstæður þótti 20 m kafla ágætis viðmið í því skyni að lágmarka óvissu í meðaltalsgildum og magntöku. Í reynd urðu allir kaflarnir töluvert lengri en þetta viðmið.

Til þess að einfalda útreikninga og samanburð var jafnframt ákveðið að velja svæði með einföldu þversniði, þ.e. þar sem eingöngu er gert ráð fyrir akbraut. Þannig verða

hönnunarforsendur þær sömu fyrir öll svæðin auk þess sem aflestur af styrkingargrafi Q-kerfisins einfaldast mjög.

Til þess að rannsóknarsvæðin yrðu sem fjölbreyttust var ákveðið að leita að köflum með ólík Q-gildi skv. eftirfarandi viðmiðum:

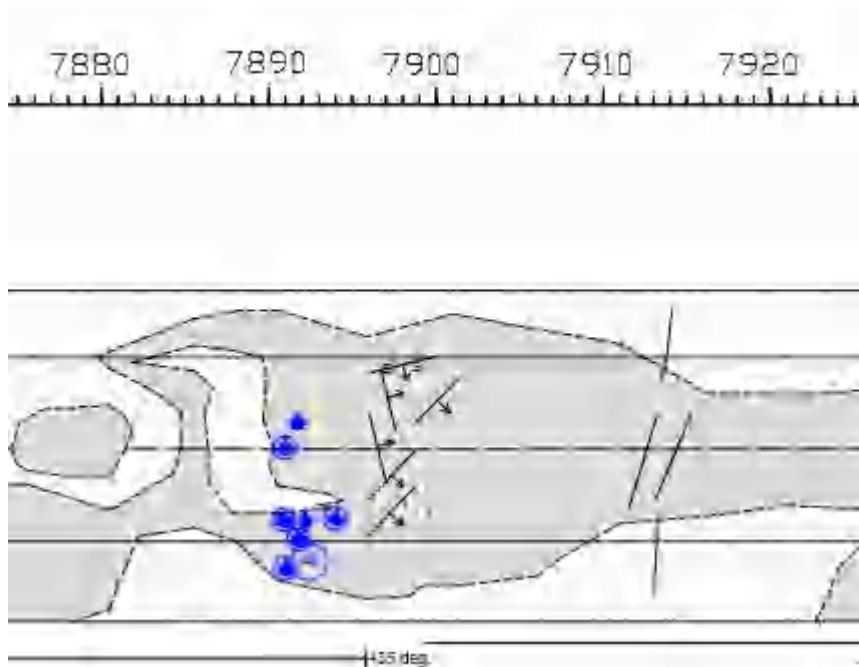
- hátt Q-gildi bæði í veggjum og þekju
- lágt Q-gildi bæði í veggjum og þekju (bogasvæði)
- lægra Q-gildi í veggjum en þekju
- hærra Q-gildi í veggjum en þekju (ekki bogasvæði)

Fyrir valinu urðu fjögur svæði sem lýst er hér á eftir. Ítarlegri upplýsingar með inntaksstærðum Q-gilda fyrir hvern salva má nálgast í viðauka G. Skýringar fyrir tákni á jarðfræðikortum er að finna í viðauka B.

### 9.1.1 Rannsóknarsvæði 1

Fyrsta rannsóknarsvæðið er á milli stöðva 7880,5 og 7916,3. Svæðið er Fannardalsmegin í göngunum og einkennist af lítillaga veðruðu basalti og basaltkarga með þremur sprungukerfum. Örlíttillar vætu gætir í berginu (mynd 9.1). Basaltið er grátt, fínkornótt og talið nokkuð sterkt. Karginn er dökkgrár, vel samlímður og smitaður rauðbrúnu seti á köflum. Aðstæður til gangagerðar eru stöðugar.

Q-gildi í veggjum eru á bilinu 5,6–5,9 og í þekju á bilinu 5,6–6,7 (tafla 9.1). Skv. Q-kerfinu telst bergið því sæmilegt (e. fair) m.t.t. gangagerðar. Eins og sjá má í viðauka G eru RQD-gildi í þekju jafnan örlítið lægri en í veggjum en hærri Q-gildi í þekju skýrast af minni ummyndun á sprunguflötum.



Mynd 9.1 Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 1. Gráu svæðin eru basalt en yrjóttu svæðin basaltkargi. Væta er táknuð með bláum dropum (Metrostav, 2015a).

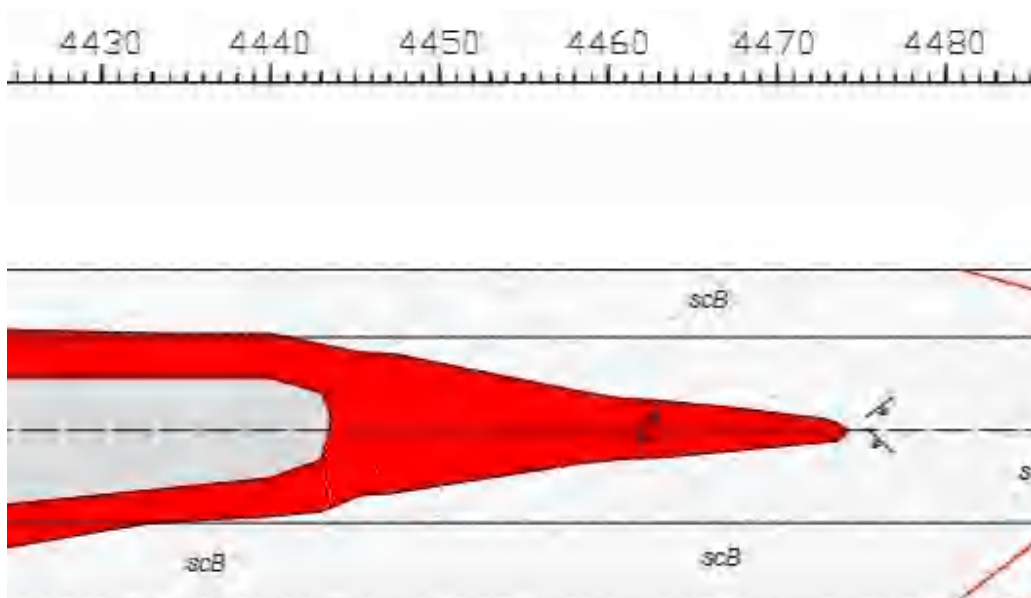
Tafla 9.1 Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 1.

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð [m]	Lengd salva [m]	Q-gildi þekju	Q-gildi vinstri	Q-gildi hægri
F374	7916.3	7911.0	5.3	6.67	5.56	5.56
F375	7911.0	7906.0	5.0	5.56	5.56	5.56
F376	7906.0	7901.0	5.0	5.56	5.56	5.56
F377	7901.0	7895.8	5.2	6.25	5.93	5.93
F378	7895.8	7890.5	5.3	6.25	5.93	5.93
F379	7890.5	7885.5	5.0	5.93	5.93	5.93
F380	7885.5	7880.5	5.0	5.93	5.93	5.93

### 9.1.2 Rannsóknarsvæði 2

Annað rannsóknarsvæðið er á milli stöðva 4435,0 og 4480,5. Svæðið er Eskifjarðarmegin í göngunum og einkennist af basaltkarga í veggjum og um 2 m þykku setlagi í þekju. Ofan við setlagið er sterkt basaltlag sem gengur upp úr þekjunni vegna jarðlagahalla. Setlagið gengur líka upp úr þekjunni og endar rétt ofan við gangaþversniðið (mynd 9.2). Basaltkarginn er gráleitur, lítillega veðraður en talinn nokkuð sterkur. Setlagið er töluvert veðrað, mjög lagskipt, sprungið og óstöðugt.

Q-gildi í þekju eru á bilinu 0,08–1,8 og í veggjum á bilinu 1,8–5,0 (tafla 9.2). Eins og sjá má í viðauka G skýrast lág Q-gildi setlagsins einkum af lágu RQD-gildi (25–30) og háu  $J_n$ -gildi (15–20) auk þess sem SRF-gildið er mun hærra (5) en í basaltkarganum. Basaltkarginn fær RQD-gildi á bilinu 60–70,  $J_n$ -gildið 9 og SRF-gildi á bilinu 1–2,5.



Mynd 9.2 Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 2. Gráa svæðið er basalt, yrjótta svæðið er basaltkargi og rauða svæðið er setlagið í þekju ganganna (Metrostav, 2015a).



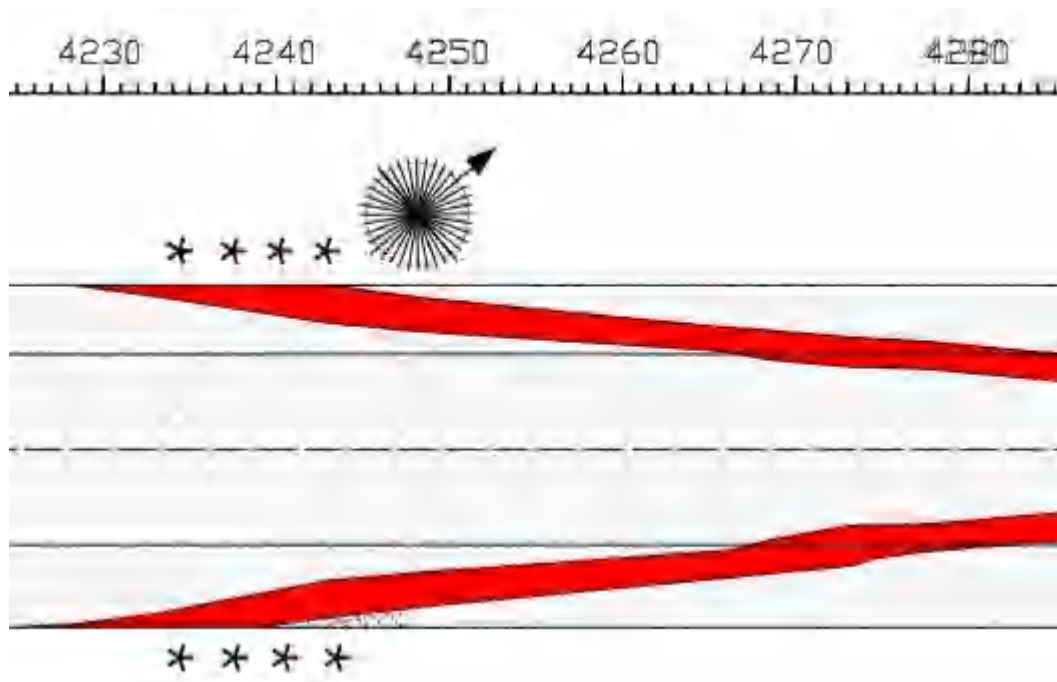
Tafla 9.2 Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 2.

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð [m]	Lengd salva [m]	Q-gildi þekju	Q-gildi vinstri	Q-gildi hægri
580	4435.0	4440.0	5.0	0.13	1.78	1.78
581	4440.0	4443.0	3.0	0.13	1.78	1.78
582	4443.0	4445.3	2.3	0.08	1.78	1.78
583	4445.3	4447.2	1.9	0.08	1.78	1.78
584	4447.2	4450.5	3.3	0.08	1.78	1.78
585	4450.5	4453.0	2.5	0.08	1.78	1.78
586	4453.0	4455.8	2.8	0.08	2.22	2.22
587	4455.8	4458.3	2.5	0.08	3.61	3.61
588	4458.3	4460.8	2.5	0.08	3.61	3.61
589	4460.8	4463.0	2.2	0.08	3.61	3.61
590	4463.0	4465.5	2.5	0.08	3.61	3.61
591	4465.5	4467.5	2.0	0.22	3.89	3.61
592	4467.5	4470.5	3.0	0.22	3.89	3.61
593	4470.5	4472.5	2.0	0.49	3.89	3.89
594	4472.5	4475.0	2.5	0.49	3.89	3.89
595	4475.0	4477.3	2.3	1.81	5.00	5.00
596	4477.3	4480.5	3.2	1.81	5.00	5.00

### 9.1.3 Rannsóknarsvæði 3

Þriðja rannsóknarsvæðið er á milli stöðva 4238,3 og 4277,5. Svæðið er Eskifjarðarmegin í göngunum og einkennist af basaltkarga í þekju og 1–2 m þykku setlagi sem gengur upp úr gólfinu (mynd 9.3). Setlagið samanstendur af lagskiptum, rauðleitum leir- og siltsteini. Einásabrotþol setsins var prófað á borkjarna og mældist 13 MPa skv. jarðfræðiskýrslu nr. 538 og er talið liggja á bilinu 10–25 MPa (Metrostav, 2014a). Setlagið veldur óstöðugleika vegna óhagstæðs spennu-styrk hlutfalls en bergþungaspenna á svæðinu er nálægt 15,5 MPa. Basaltkarginn er grár, vel samlímdur og holufylltur. Karginn er nokkuð smitaður af grá- eða grænleitu seti.

Q-gildi setlagsins er 0,5 en basaltkarginn fær Q-gildin 2,6 og 3,9 (tafla 9.3). Eins og sjá má í viðauka G skýrist lægra Q-gildi basaltkargans einkum af hærra SRF-gildi þegar setlagið færir upp í þekju ganganna.



Mynd 9.3 Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 3. Yrjóttu svæðin eru basaltkargi og rauðu svæðin eru setlagið í veggjum ganganna. Stjörnumerkt svæði eru talin til vandræða vegna óhagstæðs spennu-styrk hlutfalls (Metrostav, 2015a).

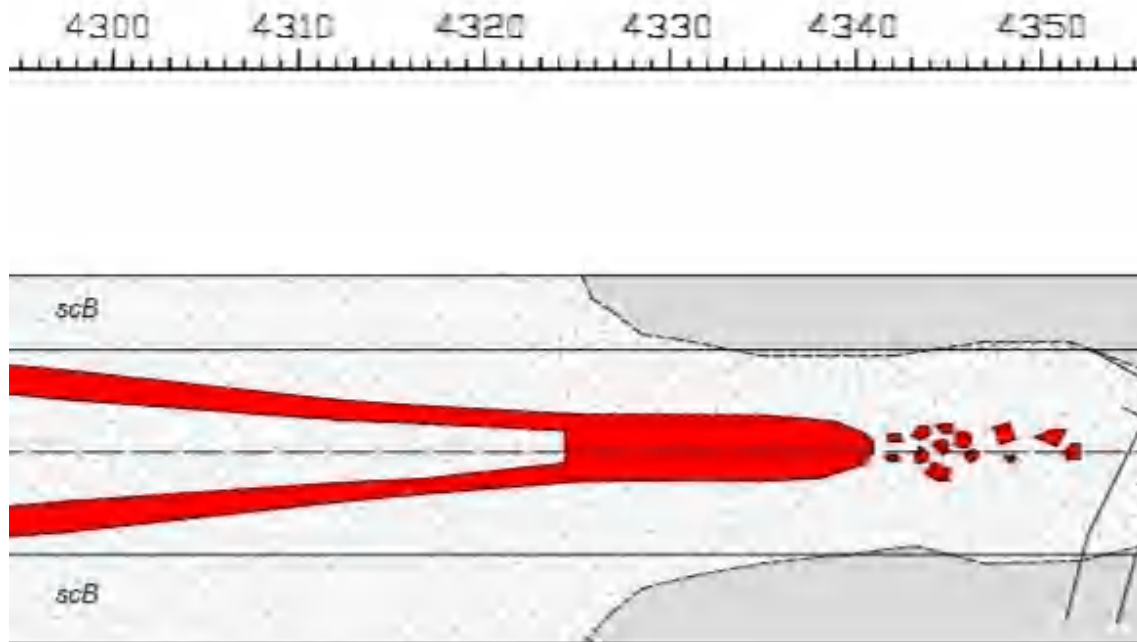
Tafla 9.3 Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 3.

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð [m]	Lengd salva [m]	Q-gildi þekju	Q-gildi vinstri	Q-gildi hægri
538	4238.3	4243.0	4.7	3.89	0.53	0.53
539	4243.0	4248.0	5.0	3.89	0.53	0.53
540	4248.0	4252.2	4.2	3.89	0.53	0.53
541	4252.2	4256.8	4.6	3.89	0.53	0.53
542	4256.8	4259.0	2.2	3.89	0.53	0.53
543	4259.0	4264.0	5.0	3.89	0.53	0.53
544	4264.0	4268.5	4.5	3.89	0.53	0.53
545	4268.5	4273.3	4.8	2.59	0.53	0.53
546	4273.3	4277.5	4.2	2.59	0.53	0.53

#### 9.1.4 Rannsóknarsvæði 4

Fjórða og síðasta rannsóknarsvæðið er á milli stöðva 4306,1 og 4342,0. Svæðið er Eskifjarðarmegin í göngunum og einkennist af þunnu setlagi í þekju og basaltkarga og basalti í veggjum (mynd 9.4). Setlagið og basaltkarginn eru þau sömu og á svæði þrjú. Á þessu svæði er setlagið um 1 m þykkt, rauð- og gráleitt úr nokkuð veðruðum silt- og leirsteini. Lagið gengur upp úr þekjunni vegna jarðlagahalla og veldur nokkrum óstöðugleika. Basaltkarginn er meðalsprunginn, alsettur holufyllingum og smitaður seti á köflum. Basaltið er sterkt og lítillega veðrað.

Q-gildi setlagsins er 0,7 og basaltkarginn og basaltið hafa Q-gildi á bilinu 2,6–3,0 (tafla 9.4). Eins og sjá má í viðauka G fær setlagið hærra  $J_r$ -gildi en á rannsóknarsvæði 3 sem skýrir hærra Q-gildi í sama lagi. Basaltið fær hærra RQD-gildi en basaltkarginn sem skýrir hækkingu Q-gilda í veggjum samfara hærri stöðvanúmerum.



Mynd 9.4 Jarðfræðikort af rannsóknarsvæði 4. Gráa svæðið er basaltið í veggjum ganganna, yrrjóttu svæðið er basaltkargi og rauða svæðið er setlagið sem gengur upp úr þekjunni (Metrostav, 2015a).

Tafla 9.4 Helstu inntaksstærðir rannsóknarsvæðis 4.

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð [m]	Lengd salva [m]	Q-gildi þekju	Q-gildi vinstri	Q-gildi hægri
553	4306.1	4312.0	5.9	0.71	2.59	2.59
554	4312.0	4316.5	4.5	0.71	2.78	2.78
555	4316.5	4321.5	5.0	0.71	2.78	2.78
556	4321.5	4324.8	3.3	0.71	2.78	2.78
557	4324.8	4328.5	3.7	0.71	2.78	2.78
558	4328.5	4331.8	3.3	0.71	2.78	2.78
559	4331.8	4335.0	3.2	0.71	2.78	2.78
560	4335.0	4338.0	3.0	0.71	2.78	2.78
561	4338.0	4342.0	4.0	0.71	2.96	2.96

## 9.2 Hönnunarforsendur

Við hönnun styrkinga er tekið mið af nýjustu leiðbeiningum NGI (2013) um notkun Q-kerfisins. Gera má ráð fyrir að mesta þvermál Norðfjarðarganga sé um 10 m með yfirbroti (Matthías Loftsson, 2015) og því miðast hönnun styrkinga við 10 m umfang. Með hliðsjón af kennisniði ganganna og styrkingaskýrslum (viðauki F) verður miðað við að lengd þekju sé 11 m og að hvor veggur sé 3,7 m.

Samfella í styrkingagrafi gerir það að verkum að sýna má fram á samband Q-gildis og hvernar gerðar styrkinga með línuritum. Jöfnur bestu lína má síðan nota við hönnun styrkinga.

### 9.2.1 Bergboltar

Fyrir 10 m umfang og ESR-gildið 1 gerir Q-kerfið almennt ráð fyrir 3 m löngum bergboltum. Lág Q-gildi kalla þó á lengri bolta. Þegar bilið á milli bergbolta með trefjastyrkti sprautusteypu er lesið af styrkingagrafinu fást gildin sem sjá má í töflu 9.5.

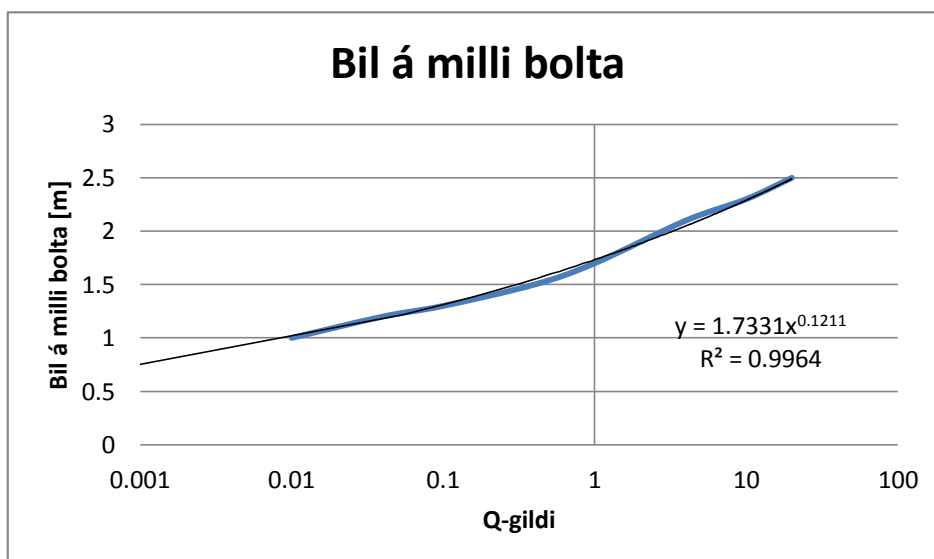
Tafla 9.5 Samband Q-gildis og bils á milli bergbolta skv. styrkingagrafi.

Q-gildi	Bil á milli bolta [m]
0.001	-
0.01	1
0.04	1.2
0.1	1.3
0.4	1.5
1	1.7
4	2.1
10	2.3
20	2.5

Þegar gildin eru sett upp í línurit fæst eftirfarandi graf (mynd 9.5) sem fellur mjög vel ( $R^2 = 0,9964$ ) að línu með jöfnuna

$$b = 1,7331 \cdot Q^{0,1211} \quad (9.1)$$

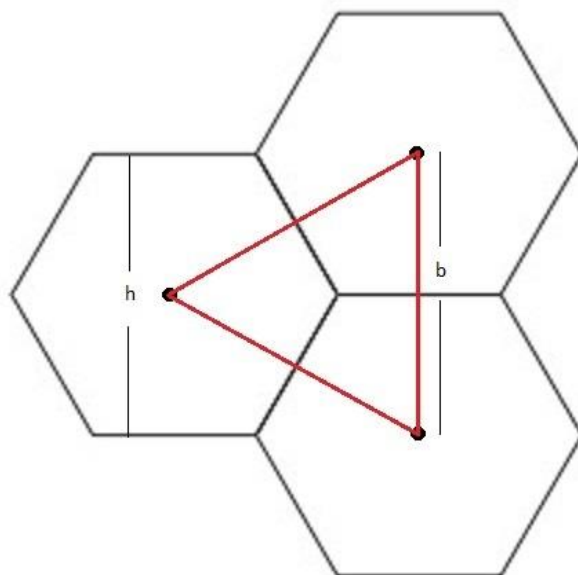
þar sem  $b$  er bilið á milli bolta í m.



Mynd 9.5 Samband  $Q$ -gildis og bils á milli bergbolta.

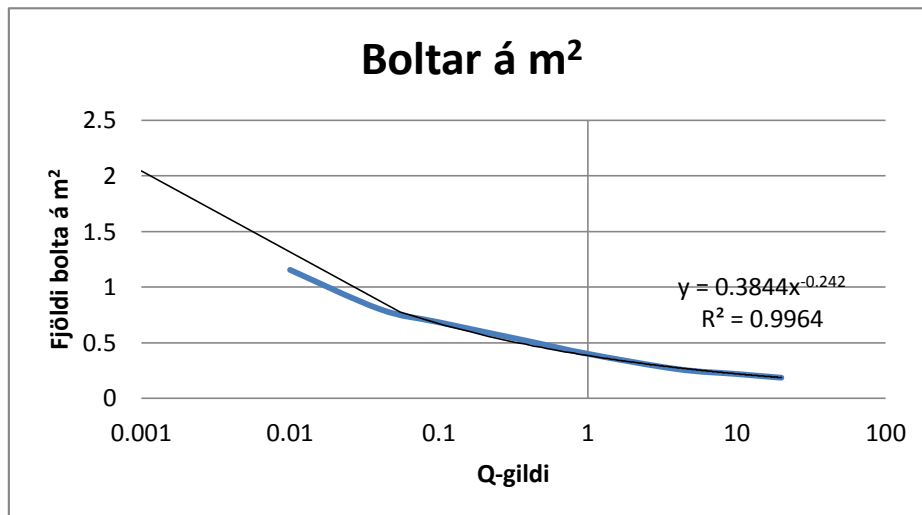
Þar sem uppgafið bil á milli bergbolta skv.  $Q$ -kerfinu er í raun mælikvarði á fjölda bergbolta (NGI, 2013) þarf að útfæra aðferð til þess að breyta bilinu í fjölda bolta á hvern fermetra. Til einföldunar má líta svo á að yfirborð ganganna samanstandi af reglulegum sexhyrningum eins og þeim á mynd 9.6. Hver bolti styður þá við sexhyrningslaga svæði með hæðina  $h$  og flatarmálið  $A$  sem finna má skv.

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} h^2 \quad (9.2)$$



Mynd 9.6 Stuðningur bergbolta við sexhyrningslaga svæði. Flatarmál sexhyrninganna má finna út frá bilinu á milli bolta.

Með þessari aðferð verður  $h$  einnig meðalbilið á milli bolta ( $b$ ) þegar sexhyrningunum hefur verið raðað upp í samfellt mynstur. Fyrir vikið verður samband  $Q$ -gildis og fjölda bolta á hvern fermetra eins og mynd 9.7 sýnir.



Mynd 9.7 Samband  $Q$ -gildis og fjölda bergbolta á fermetra.

Jafna bestu línu í gegnum safnið er þá

$$\frac{\text{boltar}}{m^2} = 0,3844 \cdot Q^{-0,242} \quad (9.3)$$

Flatarmál þekju og veggja má síðan nota til þess að reikna heildarfjölda bergbolta í hverjum salva og á hverju rannsóknarsvæði.

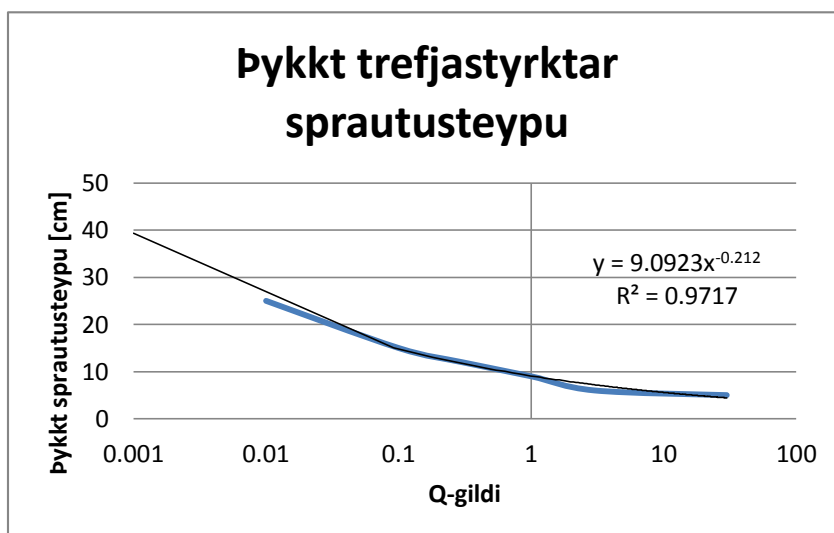
### 9.2.2 Trefjastyrkt sprautusteypa

Þegar þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu er lesin af grafinu fyrir 10 m umfang fást gildin sem sjá má í töflu 9.6.

Tafla 9.6 Samband  $Q$ -gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu skv. styrkingagrafi.

Q-gildi	Þykkt sprautusteypu [cm]
0.001	-
0.01	25
0.1	15
0.3	12
1	9
3	6
30	5

Þegar gildin eru sett upp í línurit fæst grafið á mynd 9.8.



Mynd 9.8 Samband  $Q$ -gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu.

Besta lína ( $R^2 = 0,9717$ ) í gegnum gagnasafnið hefur jöfnuna

$$\text{þykkt} = 9,0923 \cdot Q^{-0,212} \quad (9.4)$$

Rúmmál steypunnar fæst síðan með því að margfalda saman þykkt hennar og flatarmál þekju og veggja í hverjum salva.

### 9.2.3 Sprautusteypurif og -bogar

Fyrir mjög lélegt berg ( $Q < 0,4$ ) kveður styrkingagrafið á um að notuð skuli sprautusteypurif til viðbótar við bergbolta og trefjastyrkta sprautusteypu. Rifin á að staðsetja með ákveðnu millibili sem ræðst af gæðum bergsins og þau skulu kaffærð í sprautusteypu. Aflestur af styrkingagrafinu gefur eftirfarandi gildi fyrir sprautusteypurif (tafla 9.7):

Tafla 9.7 Samband  $Q$ -gildis, fjölda rifjalaga, bils á milli rifja og heildarþykktar sprautusteypu skv. styrkingagrafi.

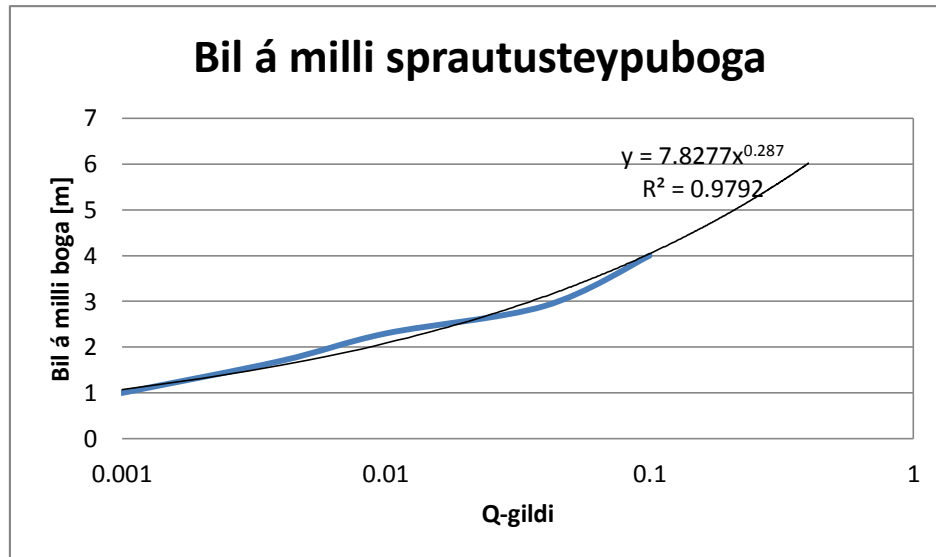
Q-gildi	Fjöldi laga	Bil á milli rifja [m]	Heildarþykkt sprautusteypu [cm]
0.001	2	1	55
0.004	2	1.7	55
0.01	2	2.3	45
0.04	2	2.9	45
0.1	1	4	30
0.4	1	-	30

Þar sem hefð hefur skapast fyrir notkun sprautusteypuboga á Íslandi í stað rifja á tafla 9.7 ekki við nema að takmörkuðu leyti. Virkni rifja og boga er lögð að jöfnu (Grimstad o.fl., 2002) en þar sem sprautusteypubogar hafa fyrirfram ákveðna lögun eiga viðmið um fjölda

rifjalaga og þykkt sprautusteypu ekki við. Fyrir vikið verður eingöngu stuðst við gildin úr töflunni við ákvörðun á bili milli sprautusteypuboga. Bilinu má lýsa með jöfnu (9.5)

$$bogabil = 7,8277 \cdot Q^{0,287} \quad (9.5)$$

sem fellur vel að gagnasafninu ( $R^2 = 0,9792$ ) eins og grafið á mynd 9.9 sýnir.



Mynd 9.9 Samband Q-gildis og bilsins á milli sprautusteypuboga.

Til þess að ákvarða fjölda sprautusteypuboga á tilteknu bogasvæði er einfaldast að reikna meðalbil á milli boga skv. Q-kerfinu með eftirfarandi jöfnu

$$\text{meðalbil á milli boga} = \frac{\sum \text{lengd salva} \cdot \text{bil á milli boga}}{\text{heildarlengd bogasvæðis}} \quad (9.6)$$

en þá fæst fjöldi sprautusteypuboga skv.

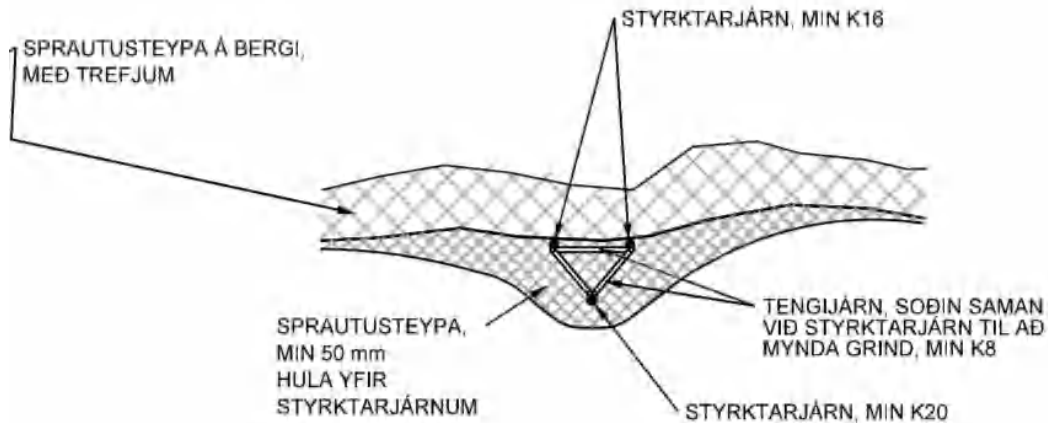
$$\text{fjöldi boga} = \frac{\text{heildarlengd bogasvæðis}}{\text{meðalbil á milli boga}} + 1 \quad (9.7)$$

að því gefnu að svæðið byrji og endi á sprautusteypuboga.

#### 9.2.4 Þykkt sprautusteypu á bogasvæðum

Við ákvörðun á heildarþykkt sprautusteypu við bogana má hafa töflu 9.7 til hliðsjónar. Þær upplýsingar sem þar koma fram eiga þó fyrst og fremst við um sprautusteypurif en þau eru mismunandi að lögun eftir berggæðum. Sprautusteypubogar hafa hins vegar sömu lögun óháð Q-gildi. Hér þykir því réttara að taka mið af þeim kröfum sem settar eru fram í hönnunarteikningum Norðfjarðarganga (Vegagerðin, 2013). Þar er kveðið á um að hylja skuli sprautusteypuboga með a.m.k. 50 mm þykkri steypu (mynd 9.10). Við mat á umfangi sprautusteypuhulu við hvern boga verður tekið mið af þessari þykkt.





Mynd 9.10 Hönnun sprautusteypuboga skv.útboðsgögnum Norðfjarðarganga (Vegagerðin, 2013).

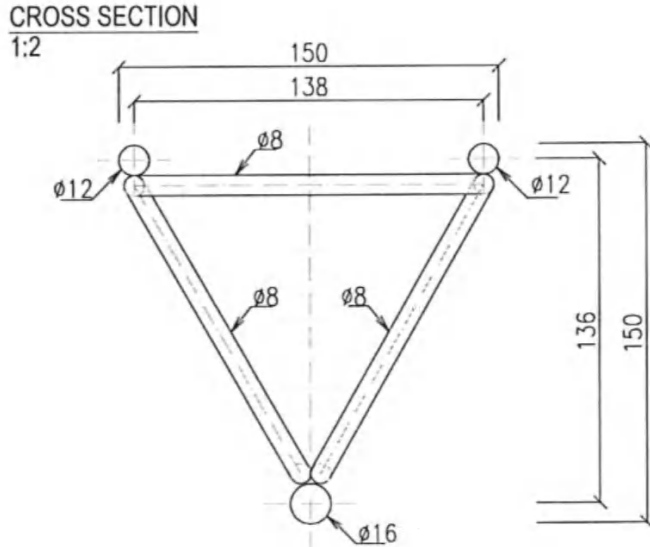
Til þess að áætla gróflega það steypumagn sem þarf til þess að hylja hvern boga má til einföldunar líta á huluna á mynd 9.10 sem trapisulaga svæði með hliðarlengdirnar  $b$  og  $6b$  og þykktina  $h + 50 \text{ mm}$ . Þversniðsflatarmál hulunnar sem fylgir hverjum boga er þá nálægt

$$A = \frac{b + 6b}{2} \cdot (h + 50 \text{ mm}) \quad (9.8)$$

þar sem  $b$  er mesta breidd þríhyrningsins á mynd 9.10 og  $h$  er hæð hans. Með þessu fæst ágæt nálgun á það steypumagn sem fylgir hverjum boga. Að auki er gert ráð fyrir trefjastyrktri sprautusteypu í samræmi við grafið á mynd 9.8.

Skv. teikningum af sprautusteypubogunum sem notaðir eru í Norðfjarðargöngum (mynd 9.11) er  $b = h = 150 \text{ mm}$  (Staňková, 2013). Þar sem litlu munar á innan- og utanmáli boganna skv. teikningum (sjá viðauka H) verður notast við utanmálið 20,8 m við útreikninga.

Þverskurðarflatarmál sprautusteypuhulunnar sem fylgir hverjum boga verður þá nálægt 0,11 fermetrum sem gefur rúmmál nálægt 2,2 rúmmetrum á hvern boga. Hér er um mjög gróft mat að ræða þar sem málsettar teikningar eru ekki tiltækar fyrir sprautusteypuhuluna auk þess sem ekki er tekið tillit til rúmmáls járnanna sem boginn samanstendur af.



Mynd 9.11 Þverskurðarmynd af sprautusteypubogum sem notaðir eru í Norðfjarðargöngum (Stañková, 2013).

## 9.3 Styrkingaþörf miðað við Q-kerfið

Áður en styrkingaþörf bergsins er metin með þeim aðferðum sem lýst er hér að framan þarf að aðlaga Q-gildi í veggjum í samræmi við töflu 5.1. Að því búnu má reikna magn styrkinga miðað við Q-kerfið fyrir rannsóknarsvæðin fjögur.

### 9.3.1 Rannsóknarsvæði 1

Rannsóknarsvæðið í Fannardal er 35,8 m langur kafli. Tafla 9.8 sýnir flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum Q-gildum fyrir hvern salva.

Tafla 9.8 Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum (\*) Q-gildum á rannsóknarsvæði 1.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Flatarmál [m <sup>2</sup> ]		Q-gildi		
		þekja	veggir	þekja	vinstri*	hægri*
F374	5.3	58.30	19.61	6.67	13.89	13.89
F375	5.0	55.00	18.50	5.56	13.89	13.89
F376	5.0	55.00	18.50	5.56	13.89	13.89
F377	5.2	57.20	19.24	6.25	14.81	14.81
F378	5.3	58.30	19.61	6.25	14.81	14.81
F379	5.0	55.00	18.50	5.93	14.81	14.81
F380	5.0	55.00	18.50	5.93	14.81	14.81

Samtals: 35.8

Töflur 9.9 og 9.10 sýna hannað magn bergbolta og sprautusteypu fyrir kaflann í Fannardal.

Tafla 9.9 Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1.

Nr. salva	Bil á milli bolta [m]			Fjöldi bolta			Boltar/m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
F374	2.18	2.38	2.38	14.2	4.0	4.0	4.18
F375	2.13	2.38	2.38	14.0	3.8	3.8	4.30
F376	2.13	2.38	2.38	14.0	3.8	3.8	4.30
F377	2.16	2.40	2.40	14.1	3.9	3.9	4.20
F378	2.16	2.40	2.40	14.4	3.9	3.9	4.20
F379	2.15	2.40	2.40	13.7	3.7	3.7	4.23
F380	2.15	2.40	2.40	13.7	3.7	3.7	4.23
Samtals:				98.07	26.70	26.70	

Tafla 9.10 Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu [cm]			Rúmmál sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]			m <sup>3</sup> /m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
F374	6.08	5.21	5.21	3.5	1.0	1.0	1.05
F375	6.32	5.21	5.21	3.5	1.0	1.0	1.08
F376	6.32	5.21	5.21	3.5	1.0	1.0	1.08
F377	6.17	5.13	5.13	3.5	1.0	1.0	1.06
F378	6.17	5.13	5.13	3.6	1.0	1.0	1.06
F379	6.24	5.13	5.13	3.4	0.9	0.9	1.07
F380	6.24	5.13	5.13	3.4	0.9	0.9	1.07
Samtals:				24.48	6.84	6.84	

Heildarfjöldi bergbolta fyrir svæðið er því um 152 boltar og heildarmagn sprautusteypu 38,2 m<sup>3</sup>.

### 9.3.2 Rannsóknarsvæði 2

Rannsóknarsvæði tvö er 45,5 m langt og einkennist af lágum Q-gildum eins og sjá má í töflu 9.11, einkum í þekju. Skv. Q-kerfinu þarf því að styrkja svæðið með sprautusteypubogum. Fræðilega ættu bogarnir eingöngu að vera í þekju ganganna en í Norðfjarðargöngum er notast við boga sem ná niður undir gólf og því miðast hönnunin við að bogarnir séu bæði í þekju og veggjum.

Tafla 9.11 Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum (\*) Q-gildum á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Flatarmál [m <sup>2</sup> ]		Q-gildi		
		þekja	veggir	þekja	vinstri*	hægri*
580	5.0	55.00	18.50	0.13	4.44	4.44
581	3.0	33.00	11.10	0.13	4.44	4.44
582	2.3	25.30	8.51	0.08	4.44	4.44
583	1.9	20.90	7.03	0.08	4.44	4.44
584	3.3	36.30	12.21	0.08	4.44	4.44
585	2.5	27.50	9.25	0.08	4.44	4.44
586	2.8	30.80	10.36	0.08	5.56	5.56
587	2.5	27.50	9.25	0.08	9.03	9.03
588	2.5	27.50	9.25	0.08	9.03	9.03
589	2.2	24.20	8.14	0.08	9.03	9.03
590	2.5	27.50	9.25	0.08	9.03	9.03
591	2.0	22.00	7.40	0.22	9.72	9.03
592	3.0	33.00	11.10	0.22	9.72	9.03
593	2.0	22.00	7.40	0.49	9.72	9.72
594	2.5	27.50	9.25	0.49	9.72	9.72
595	2.3	25.30	8.51	1.81	12.50	12.50
596	3.2	35.20	11.84	1.81	12.50	12.50

Samtals: 45.5

Í töflum 9.12 og 9.13 má sjá hannað magn bergbolta og trefjastyrktrar sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði tvö.

Tafla 9.12 Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Bil á milli bolta [m]			Fjöldi bolta			Boltar/m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
580	1.36	2.08	2.08	34.4	5.0	5.0	8.87
581	1.36	2.08	2.08	20.7	3.0	3.0	8.87
582	1.28	2.08	2.08	17.7	2.3	2.3	9.70
583	1.28	2.08	2.08	14.7	1.9	1.9	9.70
584	1.28	2.08	2.08	25.5	3.3	3.3	9.70
585	1.28	2.08	2.08	19.3	2.5	2.5	9.70
586	1.28	2.13	2.13	21.6	2.6	2.6	9.59
587	1.28	2.26	2.26	19.3	2.1	2.1	9.39
588	1.28	2.26	2.26	19.3	2.1	2.1	9.39
589	1.28	2.26	2.26	17.0	1.8	1.8	9.39
590	1.28	2.26	2.26	19.3	2.1	2.1	9.39
591	1.44	2.28	2.26	12.2	1.6	1.7	7.74
592	1.44	2.28	2.26	18.3	2.5	2.5	7.74

Tafla 9.12 frh.

Nr. salva	Bil á milli bolta [m]			Fjöldi bolta			Boltar/m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
593	1.59	2.28	2.28	10.1	1.6	1.6	6.68
594	1.59	2.28	2.28	12.6	2.1	2.1	6.68
595	1.86	2.35	2.35	8.4	1.8	1.8	5.21
596	1.86	2.35	2.35	11.7	2.5	2.5	5.21

Samtals: 301.91 40.61 40.69

Tafla 9.13 Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Nr. Salva	Þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu [cm]			Rúmmál steypu [m <sup>3</sup> ]			m <sup>3</sup> /m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
580	13.94	6.63	6.63	7.67	1.23	1.23	2.02
581	13.94	6.63	6.63	4.60	0.74	0.74	2.02
582	15.40	6.63	6.63	3.90	0.56	0.56	2.18
583	15.40	6.63	6.63	3.22	0.47	0.47	2.18
584	15.40	6.63	6.63	5.59	0.81	0.81	2.18
585	15.40	6.63	6.63	4.23	0.61	0.61	2.18
586	15.40	6.32	6.32	4.74	0.65	0.65	2.16
587	15.40	5.70	5.70	4.23	0.53	0.53	2.12
588	15.40	5.70	5.70	4.23	0.53	0.53	2.12
589	15.40	5.70	5.70	3.73	0.46	0.46	2.12
590	15.40	5.70	5.70	4.23	0.53	0.53	2.12
591	12.51	5.61	5.70	2.75	0.42	0.42	1.79
592	12.51	5.61	5.70	4.13	0.62	0.63	1.79
593	10.59	5.61	5.61	2.33	0.42	0.42	1.58
594	10.59	5.61	5.61	2.91	0.52	0.52	1.58
595	8.02	5.32	5.32	2.03	0.45	0.45	1.28
596	8.02	5.32	5.32	2.82	0.63	0.63	1.28

Samtals: 67.35 10.17 10.19

Heildarfjöldi bergbolta á svæði tvö ætti því að vera um 383 og heildarrúmmál sprautusteypu nálægt 87,7 rúmmetrum.

Miðað við að styrkt sé með bogum þegar Q-gildi í þekju eru undir 0,4 ætti bogasvæðið að vera 35.5 m langt. Í töflu 9.14 má sjá það bil sem ætti að vera á milli boganna skv. Q-gildum í þekju.

Tafla 9.14 Hannað bil á milli sprautusteypuboga á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Bil á milli boga [m]
580	5.0	4.39
581	3.0	4.39
582	2.3	3.84
583	1.9	3.84
584	3.3	3.84
585	2.5	3.84
586	2.8	3.84
587	2.5	3.84
588	2.5	3.84
589	2.2	3.84
590	2.5	3.84
591	2.0	5.08
592	3.0	5.08

Samtals: 35.5

Þegar meðalbilið á milli boga er reiknað skv. jöfnu (9.6) fást 4,14 m. Heildarfjöldi boga á rannsóknarsvæði tvö ætti því að vera 9,58 bogar skv. jöfnu (9.7) eða að hámarki 10 bogar.

Til viðbótar trefjastyrktri sprautusteypu ætti að koma sprautusteypa án trefja sem nemur um 2,2 rúmmetrum fyrir hvern boga, samtals 22 rúmmetrar.

### 9.3.3 Rannsóknarsvæði 3

Þriðja rannsóknarsvæðið er 39,2 m langt með hærri Q-gildum í þekju en veggjum. Tafla 9.15 sýnir flatarmál veggja og þekju ásamt aðlöguðum Q-gildum fyrir svæði 3.

Tafla 9.15 Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum (\*) Q-gildum á rannsóknarsvæði 3.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Flatarmál [m <sup>2</sup> ]		Q-gildi		
		þekja	veggir	þekja	vinstri*	hægri*
538	4.7	51.70	17.39	3.89	1.33	1.33
539	5.0	55.00	18.50	3.89	1.33	1.33
540	4.2	46.20	15.54	3.89	1.33	1.33
541	4.6	50.60	17.02	3.89	1.33	1.33
542	2.2	24.20	8.14	3.89	1.33	1.33
543	5.0	55.00	18.50	3.89	1.33	1.33
544	4.5	49.50	16.65	3.89	1.33	1.33
545	4.8	52.80	17.76	2.59	1.33	1.33
546	4.2	46.20	15.54	2.59	1.33	1.33

Samtals: 39.2

Töflur 9.16 og 9.17 sýna hannað magn bergbolta og sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði 3.

Tafla 9.16 Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.

Nr. salva	Bil á milli bolta [m]			Fjöldi bolta			Boltar/m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
538	2.04	1.79	1.79	14.3	6.2	6.2	5.70
539	2.04	1.79	1.79	15.2	6.6	6.6	5.70
540	2.04	1.79	1.79	12.8	5.6	5.6	5.70
541	2.04	1.79	1.79	14.0	6.1	6.1	5.70
542	2.04	1.79	1.79	6.7	2.9	2.9	5.70
543	2.04	1.79	1.79	15.2	6.6	6.6	5.70
544	2.04	1.79	1.79	13.7	6.0	6.0	5.70
545	1.95	1.79	1.79	16.1	6.4	6.4	6.01
546	1.95	1.79	1.79	14.1	5.6	5.6	6.01
Samtals:				122.15	52.00	52.00	

Tafla 9.17 Hannað magn treffjstyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.

Nr. salva	Þykkt treffjstyrktrar sprautusteypu [cm]			Rúmmál sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]			m <sup>3</sup> /m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
538	6.82	8.55	8.55	3.5	1.5	1.5	1.38
539	6.82	8.55	8.55	3.7	1.6	1.6	1.38
540	6.82	8.55	8.55	3.1	1.3	1.3	1.38
541	6.82	8.55	8.55	3.4	1.5	1.5	1.38
542	6.82	8.55	8.55	1.6	0.7	0.7	1.38
543	6.82	8.55	8.55	3.7	1.6	1.6	1.38
544	6.82	8.55	8.55	3.4	1.4	1.4	1.38
545	7.43	8.55	8.55	3.9	1.5	1.5	1.45
546	7.43	8.55	8.55	3.4	1.3	1.3	1.45
Samtals:				30.00	12.41	12.41	

Heildarmagn bergbolta á svæðinu er 226 og rúmmál sprautusteypu 54,8 rúmmetrar.

### 9.3.4 Rannsóknarsvæði 4

Fjórða rannsóknarsvæðið er 35,9 m langt með lágum Q-gildum í þekju en hærri í veggjum. Tafla 9.18 sýnir flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum Q-gildum fyrir svæðið.

Tafla 9.18 Flatarmál þekju og veggja ásamt aðlöguðum (\*) Q-gildum á rannsóknarsvæði 4.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Flatarmál [m <sup>2</sup> ]		Q-gildi		
		þekja	veggir	þekja	vinstri*	hægri*
553	5.9	64.90	21.83	0.71	6.48	6.48
554	4.5	49.50	16.65	0.71	6.94	6.94
555	5.0	55.00	18.50	0.71	6.94	6.94
556	3.3	36.30	12.21	0.71	6.94	6.94
557	3.7	40.70	13.69	0.71	6.94	6.94
558	3.3	36.30	12.21	0.71	6.94	6.94
559	3.2	35.20	11.84	0.71	6.94	6.94
560	3.0	33.00	11.10	0.71	6.94	6.94
561	4.0	44.00	14.80	0.71	7.41	7.41

Samtals: 35.9

Töflur 9.19 og 9.20 sýna hannað magn bergbolta og sprautusteypu fyrir fjórða rannsóknarsvæðið.

Tafla 9.19 Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 4.

Nr. salva	Bil á milli bolta [m]			Fjöldi bolta			Boltar/m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
553	1.66	2.17	2.17	27.1	5.3	5.3	6.40
554	1.66	2.19	2.19	20.7	4.0	4.0	6.37
555	1.66	2.19	2.19	23.0	4.4	4.4	6.37
556	1.66	2.19	2.19	15.2	2.9	2.9	6.37
557	1.66	2.19	2.19	17.0	3.3	3.3	6.37
558	1.66	2.19	2.19	15.2	2.9	2.9	6.37
559	1.66	2.19	2.19	14.7	2.8	2.8	6.37
560	1.66	2.19	2.19	13.8	2.7	2.7	6.37
561	1.66	2.21	2.21	18.4	3.5	3.5	6.34

Samtals: 164.85 31.98 31.98



Tafla 9.20 Hannað magn trefjastyrkrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 4.

Nr. salva	Þykkt trefjastyrkrar sprautusteypu [cm]			Rúmmál sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]			m <sup>3</sup> /m
	þekja	vinstri	hægri	þekja	vinstri	hægri	
553	9.77	6.12	6.12	6.3	1.3	1.3	1.53
554	9.77	6.03	6.03	4.8	1.0	1.0	1.52
555	9.77	6.03	6.03	5.4	1.1	1.1	1.52
556	9.77	6.03	6.03	3.5	0.7	0.7	1.52
557	9.77	6.03	6.03	4.0	0.8	0.8	1.52
558	9.77	6.03	6.03	3.5	0.7	0.7	1.52
559	9.77	6.03	6.03	3.4	0.7	0.7	1.52
560	9.77	6.03	6.03	3.2	0.7	0.7	1.52
561	9.77	5.95	5.95	4.3	0.9	0.9	1.52
Samtals:				38.60	8.02	8.02	

Heildarmagn bergbolta á svæði fjögur er um 230 boltar og rúmmál sprautusteypu 54,6 rúmmetrar.

## 9.4 Uppsettar styrkingar

Upplýsingar um uppsettar vinnustyrkingar og áætlaðar lokastyrkingar á rannsóknarsvæðunum eru fengnar frá verktökum og eftirliti. Engar lokastyrkingar verða settar upp í göngunum fyrir en gangagreftri er lokið en hönnun þeirra er langt komin í samvinnu verktaka, eftirlits og verkkaupa. Við magntöku á uppsettum styrkingum verður tekið mið af uppsettum vinnustyrkingum að viðbættum hönnuðum lokastyrkingum.

### 9.4.1 Vinnustyrkingar

#### Bergboltar

Upplýsingar um fjölda, staðsetningu og gerð bergbolta má nálgast í boltaskýrslum frá verktaka (Metrostav, 2014b). Dæmi um boltaskýrslu má sjá í viðauka F. Þar sem verktakinn gerir almennt ekki greinarmun á bergboltum sem settir eru í þekju annars vegar og vegg hins vegar verður eingöngu notast við heildarmagn bergbolta í hverjum salva enda byggir Q-kerfið frekar á fjölda bolta en nákvæmri staðsetningu þeirra. Allir bergboltar eru grautaðir (innsteyptir) og boltar í þekju eru ávallt forspenntir en boltar í veggjum sjaldnar. Enginn greinarmunur verður gerður á boltum eftir því hvort þeir eru forspenntir eður ei en lengd bergbolta verður tilgreind. Forboltar og boltar sem settir voru í stafn til þess að tryggja stöðugleika eru dregnir frá heildarfjölda bolta.

#### Sprautusteypa

Upplýsingar um notkun sprautusteypu má nálgast í sprautusteypuskýrslum frá verktaka (Metrostav, 2014c). Dæmi um sprautusteypuskýrslu má sjá í viðauka F. Öll sprautusteypa er trefjastyrkt að undanskilinni steypunni sem hylur sprautusteypuboga og bogasvæði. Í

flestum tilvikum er þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu í vinnustyrkingum sú sama á veggjum og þekju og hana má auðveldlega áætla út frá upplýsingum um flatarmál og rúmmál steypu í sprautusteypskýrslum. Á þeim svæðum þar sem steypu er sprautað við sérstakar aðstæður skv. steypuskýrslum gefur verktakinn ekki upp það flatarmál sem steypan nær yfir en tilgreinir aðeins rúmmál steypu. Við magntöku vinnustyrkinga verður því einungis horft til heildarmagns steypu í hverjum salva en ekki þykktar. Sprautusteypa sem notuð er á stafn til þess að tryggja stöðugleika er dregin frá heildarrúmmáli steypu. Öll ásprautun á þekju og vegg af öryggisástæðum er tekin inn í heildarmagn sprautusteypu.

### Sprautusteypubogar

Upplýsingar um bogasvæði má nálgast í sprautusteypskýrslum (Metrostav, 2014c). Bogasvæði verða skoðuð m.t.t. fjölda sprautusteypuboga, bilsins á milli þeirra og rúmmáls sprautusteypuhulu (án trefja). Vinnustyrkingar á bogasvæðum teljast endanlegar styrkingar, þ.e. svæðin verða ekki styrkt frekar.

#### 9.4.2 Lokastyrkingar

Upplýsingar um lokastyrkingar eru fengnar frá eftirliti. Eftirlitið gerir tillögur að lokastyrkingum sem bornar eru undir verkkaupa og hönnuð ganganna. Eftir þá rýni telst hönnun lokastyrkinga lokið og hana má nálgast í Excel-skjölum frá eftirliti (Ófeigur Örn Ófeigsson, 2015a; Ófeigur Örn Ófeigsson, 2015b).

### Bergboltar

Almennt er ekki gert ráð fyrir frekari bergboltun á rannsóknarsvæðunum fjórum þótt ætla megi að einstaka boltar bætist við. Í göngunum undir Almannaskarð voru um 97% bergbolta sett upp sem vinnustyrking (Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson, 2006). Með hliðsjón af því má ætla að fjöldi bergbolta aukist að hámarki um 3–5%.

### Sprautusteypa

Í hönnuðum lokastyrkingum er gefin upp endanleg þykkt sprautusteypu í þekju og veggjum ganganna. Þessi þykkt ásamt flatarmáli verður notuð til þess að reikna heildarrúmmál trefjastyrktrar sprautusteypu á hverju rannsóknarsvæði. Það rúmmál er samanburðarhæft við hannaðar styrkingar skv. Q-kerfi í kafla 9.3. Í fáeinum sölvum er þykkt sprautusteypu í vinnustyrkingum meiri en hönnuð þykkt lokastyrkinga. Þegar svo ber undir eru vinnustyrkingar látnar ráða við magntöku sprautusteypu.

#### 9.4.3 Rannsóknarsvæði 1

Á rannsóknarsvæði 1 var allri steypu í vinnustyrkingum sprautað í þykktarflokknum 60 mm. Sprautað var í þekju og allt að 2,5 m niður á vegg ef marka má flatarmálsútreikninga og teikningar í steypuskýrslum. Í töflu 9.21 er sýnt hve langt niður á vegg vinnustyrkingar ná að jafnaði í hverjum salva. Hannaðar lokastyrkingar gera hins vegar ráð fyrir 40 mm þykkri sprautusteypu í veggjum og 60 mm í þekju. Við magntöku sprautusteypu í lokastyrkingum þarf því að taka tillit til þess að hluti veggja er sprautaður með 60 mm þykkri steypu. Í töflu 9.21 er tekið mið af þessu við ákvörðun á heildarrúmmáli sprautusteypu í hverjum salva.

Tafla 9.21 Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 1. Í lokastyrkingum er gert ráð fyrir 40 mm þykkri sprautusteypu í veggjum en 60 mm þykkar vinnustyrkingar ná 0,3–2,5 m niður á vegg.

Nr. salva	Vinnustyrkingar			60 mm niður á vegg	Lokastyrkingar [m <sup>3</sup> ]		Lokastyrkingar heild m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	mm		60 mm	40 mm		
F374	70.0	5.0	71.4	1.1	4.20	1.10	5.30	1.00
F375	68.0	5.0	73.5	1.3	4.08	0.96	5.04	1.01
F376	80.0	6.0	75.0	2.5	4.80	0.48	5.28	1.06
F377	80.0	6.0	75.0	2.2	4.80	0.63	5.43	1.04
F378	75.0	5.5	73.3	1.6	4.50	0.90	5.40	1.02
F379	80.0	6.0	75.0	1.5	4.20	0.88	5.08	1.02
F380	70.0	5.0	71.4	0.3	3.45	1.38	4.83	0.97
Samtals:		38.5					36.4	

Eins og sjá má í töflu 9.21 reiknast magn lokastyrkinga minna en uppsettra vinnustyrkinga þrátt fyrir að enn eigi eftir að sprauta hluta veggja með 40 mm þykkri steypu. Þetta verður skoðað betur í kafla 9.4.7.

145 bergboltar voru settir upp á rannsóknarsvæði 1. Allir bergboltar voru 3 m langir að einum undanskildum í salva F379. Tafla 9.22 sýnir uppsett magn bergbolta á svæði 1.

Tafla 9.22 Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1.

Nr. salva	Bergboltar heild	Boltar/m
F374	19	3.6
F375	20	4.0
F376	21	4.2
F377	19	3.7
F378	21	4.0
F379	22	4.4
F380	23	4.6
Samtals:	145	

#### 9.4.4 Rannsóknarsvæði 2

Á rannsóknarsvæði 2 var allri trefjastyrktri steypu í vinnustyrkingum sprautað í þykktarflokknum 60 mm. Myndir í sprautusteypuskýrslum sýna að sprautað var í þekju og alveg niður að gangagólfi (3,7 m niður á vegg). Ekki er gert ráð fyrir frekari bergstyrkingum á svæðinu. Tafla 9.23 sýnir notað magn trefjastyrktrar sprautusteypu í vinnustyrkingar ásamt reiknuðu magni lokastyrkinga miðað við kennisnið ganganna.

Tafla 9.23 Magn trefjastyrktrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Vinnustyrkingar			Lokastyrkingar m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	mm		
580	131.0	8.0	61.1	5.5	1.1
581	75.0	6.0	80.0	3.3	1.1
582	76.0	6.0	78.9	2.5	1.1
583	76.0	6.0	78.9	2.1	1.1
584	75.0	5.5	73.3	3.6	1.1
585	75.0	5.5	73.3	2.8	1.1
586	85.0	6.0	70.6	3.1	1.1
587	85.0	6.0	70.6	2.8	1.1
588	85.0	6.0	70.6	2.8	1.1
589	85.0	7.0	82.4	2.4	1.1
590	85.0	5.5	64.7	2.8	1.1
591	85.0	5.0	5.88	2.2	1.1
592	70.0	5.0	7.14	3.3	1.1
593	70.0	5.0	7.14	2.2	1.1
594	70.0	5.0	7.14	2.8	1.1
595	70.0	5.0	7.14	2.5	1.1
596	70.0	6.0	8.57	3.5	1.1
Samtals:	98.5			50.2	

Eins og sjá má er notað magn sprautusteypu um tvöfalt meira en reiknað magn. Þetta verður tekið til umfjöllunar í kafla 9.4.7.

Almennt voru notaðir 3 m langir bergboltar á rannsóknarsvæði 2 en eins og sjá má í töflu 9.24 var tæplega þriðjungur bolta 4 m langir. Fimmtán sprautusteypubogar voru settir upp á 34,8 m löngum kafla á svæðinu. Meðalbil á milli boga er því 2,49 m. Yfir bogana og á milli boga var sprautað steypu án trefja. Heildarrúmmál sprautusteypu án trefja er 209 rúmmetrar. Yfirlit yfir bergbolta og sprautusteypuboga má sjá í töflu 9.24.

Tafla 9.24 Bergboltar, sprautusteypubogar og steypuhula á rannsóknarsvæði 2.

Nr. salva	Bergboltar vinnustyrkingar		Bergboltar heild	Boltar/m	Bogi í stöð nr.	Bil á milli boga [m]	Steypuhula m <sup>3</sup>
	3 m	4 m					
580	27	-	27	5.4	-	-	-
581	29	-	29	9.7	4441.8	-	5.0
582	12	6	18	7.8	4444.3	2.5	15.0
583	12	6	18	9.5	4446.8	2.5	14.0
584	12	6	18	5.5	4449.4	2.6	15.0
585	12	6	18	7.2	4452.0	2.6	15.0
586	15	6	21	7.5	4454.6	2.6	15.0
587	12	6	18	7.2	4457.1	2.5	15.0

Tafla 9.24 frh.

Nr. salva	Bergboltar vinnustyrkingar		Bergboltar heild	Boltar/m	Bogi í stöð nr.	Bil á milli boga [m]	Steypuhula m <sup>3</sup>
	3 m	4 m					
588	12	6	18	7.2	4459.6	2.5	15.0
589	12	7	19	8.6	4462.1	2.5	14.0
590	12	6	18	7.2	4464.5	2.4	15.0
591	12	6	18	9.0	4466.8	2.3	15.0
592	12	6	18	6.0	4469.4	2.6	15.0
593	12	6	18	9.0	4471.6	2.2	12.0
594	12	6	18	7.2	4474.2	2.6	15.0
595	6	8	14	6.1	4476.6	2.4	14.0
596	6	6	12	3.8	-	-	-
Samtals:	227	93	320			34.8	209.0

### 9.4.5 Rannsóknarsvæði 3

Á rannsóknarsvæði 3 er þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu í vinnustyrkingum almennt á bilinu 60–120 mm. Í hluta salva 544 reyndist nauðsynlegt að sprauta þrisvar sinnum í vegg og tvisvar í þekju sem gaf heildarþykkt upp á 140 mm í þekju og 160 mm í veggjum. Hannaðar lokastyrkingar gera hins vegar ráð fyrir 60–120 mm þykkri sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3. Tafla 9.25 sýnir uppsettar vinnustyrkingar ásamt hönnuðum lokastyrkingum að teknu tilliti til fráviks í einstökum sölvum. Til glöggvunar er salva 544 skipt í tvennt.

Tafla 9.25 Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 3. Salva 544 er skipt í tvennt vegna mismunandi steypuþykkjar.

Nr. salva	Lengd salva [m]	Vinnustyrkingar			Lokastyrkingar [mm]			Lokastyrkingar heild	m <sup>3</sup> /m
		m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	mm	þekja	hægri	vinstri	m <sup>3</sup>	
538	4.7	88.0	7.0	79.5	80	60	60	6.2	1.32
539	5.0	98.0	7.0	71.4	80	60	60	6.6	1.32
540	4.2	80.0	7.0	87.5	80	80	80	6.2	1.47
541	4.6	86.0	6.0	69.8	80	60	60	6.1	1.32
542	2.2	45.0	6.0	133.3	120	120	120	4.9	2.21
543	5.0	92.0	6.5	70.7	80	60	60	6.6	1.32
544a	2.0	37.6	4.0	106.5	80	120	120	3.5	1.77
544b	2.5	46.9	7.5	159.8	140	160	160	6.8	2.72
545	4.8	80.0	4.5	56.3	80	100	120	8.1	1.69
546	4.2	79.0	7.0	88.6	80	80	80	6.2	1.47
Samtals:			62.5					61.3	

Allir bergboltar sem settir voru upp á rannsóknarsvæði 3 voru 4 m langir, forspenntir boltar. Yfirlit yfir uppsetta bolta má sjá í töflu 9.26.

Tafla 9.26 Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.

Nr. salva	Bergboltar heild	Boltar/m
538	24	5.1
539	26	5.2
540	25	6.0
541	27	5.9
542	15	6.8
543	25	5.0
544	25	5.6
545	26	5.4
546	24	5.7

Samtals: 217

#### 9.4.6 Rannsóknarsvæði 4

Á rannsóknarsvæði 4 var allri steypu í vinnustyrkingum sprautað við sérstakar aðstæður skv. sprautusteypuskýrslum að síðasta salvanum undanskildum. Myndir í steypuskýrslum sýna glögglega að í öllum tilvikum var sprautað bæði á vegg og þekju ganganna en engar upplýsingar eru veittar um flatarmál og þykktir. Í töflu 9.27 eru flatarmál og þykkt vinnustyrkinga því reiknuð út frá kennistærðum gangaþversniðsins, þ.e. 11 m þekja og 3,7 m veggir. Í lokastyrkingum er gert ráð fyrir að þykkt sprautusteypu í þekju verði 100 mm og 60 mm í veggjum.

Tafla 9.27 Magn sprautusteypu í vinnustyrkingum og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 4. Tölur í svigum eru áætlaðar út frá kennistærðum gangaþversniðsins.

Nr. salva	Vinnustyrkingar			Lokastyrkingar	m <sup>3</sup> /m
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	mm	m <sup>3</sup>	
553	(108.6)	10.5	(96.7)	9.1	1.5
554	(82.8)	7.6	(91.2)	6.9	1.5
555	(92.0)	10.8	(116.8)	7.7	1.5
556	(60.7)	8.0	(131.8)	5.1	1.5
557	(68.1)	6.0	(88.1)	5.7	1.5
558	(60.7)	8.0	(131.8)	5.1	1.5
559	(58.9)	10.0	(169.8)	4.9	1.5
560	(55.2)	8.0	(144.9)	4.6	1.5
561	70.0	8.0	114.3	6.2	1.5

Samtals: 76.8

55.4

Eins og sjá má í töflu 9.27 er áætluð meðalþykkt sprautusteypu í vinnustyrkingum að jafnaði umtalsvert meiri en hannaðar lokastyrkingar gera ráð fyrir. Þetta ósamræmi verður tekið til frekari skoðunar í kafla 9.4.7.

Bergboltar á rannsóknarsvæði 4 voru almennt 4 m langir, forspenntir boltar, einkum í þekju. Í veggum hvers salva voru að auki settir 3 m langir, innsteyptir boltar. Í töflu 9.28 má sjá yfirlit yfir uppsett magn bergbolta á svæðinu.

Tafla 9.28 Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 4.

Nr. salva	Bergboltar vinnustyrkingar		Bergboltar heild	Boltar/m
	3 m	4 m		
553	7	23	30	5.1
554	7	20	27	6.0
555	7	19	26	5.2
556	7	13	20	6.1
557	6	15	21	5.7
558	7	17	24	7.3
559	6	13	19	5.9
560	6	21	27	9.0
561	6	17	23	5.8
Samtals:	59	158	217	

### 9.4.7 Margföldunarstuðull sprautusteypu

Eins og töflurnar í köflum 9.4.3–9.4.6 sýna er magn sprautusteypu í vinnustyrkingum að jafnaði nokkru meira en hannaðar lokastyrkingar gera ráð fyrir jafnvel þótt lokastyrkingar taki mið af meiri steypuþykkt. Þetta helgast af því að vinnustyrkingar miðast við notað steypumagn sem er að jafnaði umtalsvert meira en einfaldir rúmmálsreikningar gera ráð fyrir.

Almennt má búast við því að notað magn sprautusteypu sé 40–60% meira en reiknað magn, þar sem miðað er við kennisnið ganganna og tiltekna þykktarflokka. Þetta misræmi stafar af óreglulegu gangaþversniði vegna yfirbrots, hrjúfleika bergflata og frácasti (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson, Gísli Eiríksson, Björn A. Harðarson & Hlynur Guðmundsson, 2010). Jafnvel þótt þversnið ganganna sé reglulegt og bergfletir sléttir má gera ráð fyrir 5–15% frácasti við blauta steypuásprautun (King, 1996).

Ógerlegt er að meta það rúmmál sprautusteypu sem raunverulega verður notað í Norðfjarðargöngum. Út frá þeim svæðum sem ekki stendur til að styrkja frekar má þó áætla sk. margföldunarstuðul sprautusteypu, þ.e. hlutfall notaðrar steypu á móti reiknuðu steypumagni. Á rannsóknarsvæðum 1 og 2 var allri trefjastyrktri sprautusteypu í vinnustyrkingum sprautað í þykktarflokknum 60 mm og ekki stendur til að sprauta frekar

yfir þá steypu. Magntölur af þessum svæðum má því nota til þess að meta margföldunarstuðul 60 mm þykkrar sprautusteypu við mjög ólíkar aðstæður. Annars vegar stöðugar aðstæður og nokkuð há Q-gildi (>5) miðað við íslenskt berg og hins vegar óstöðugar aðstæður og mjög lág Q-gildi ( $\geq 0,08$ ).

Sé rúmmál vinnustyrkinga í töflu 9.21 borið saman við 60 mm dálkinn fyrir lokastyrkingar kemur í ljós að notað magn sprautusteypu ( $38,5 \text{ m}^3$ ) er að jafnaði um 28% meira en hið reiknaða magn í 60 mm dálknum ( $30,0 \text{ m}^3$ ). Séu vinnustyrkingarnar í töflu 9.23 ( $98,5 \text{ m}^3$ ) bornar saman við reiknaðar lokastyrkingar ( $50,2 \text{ m}^3$ ) kemur í ljós að notað magn sprautusteypu er 96% hærra en reiknað magn. Af þessu má ráða að umframmagn steypu aukist samfara lægra Q-gildi.

Steypuþykkt í Norðfjarðargöngum er mæld á um 50 m fresti. Að jafnaði eru boraðar fimmtán holur í sprautusteypunum í hverju sniði, fimm í þekju og fimm í hvorn vegg, og steypuþykktin mæld. Steypuþykkt er ekki mæld á bogasvæðum og fyrir vikið liggja eingöngu fyrir þykktarmælingar á einu rannsóknarsvæðanna, þ.e. í stöð 4251 á rannsóknarsvæði 3. Þar reynist steypuþykktin að jafnaði vera um 8% meiri en uppgefin þykkt skv. sprautusteypuskýrslum sem er óvenju lítið frávik miðað við aðrar mælingar verktakans. Algengt er að steypuþykktin sé allt að 1,5 cm meiri en uppgefin þykktarflokkur segir til um en þykktin getur einnig verið minni eða enn meiri (Metrostav, 2015b).

## 9.5 Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum

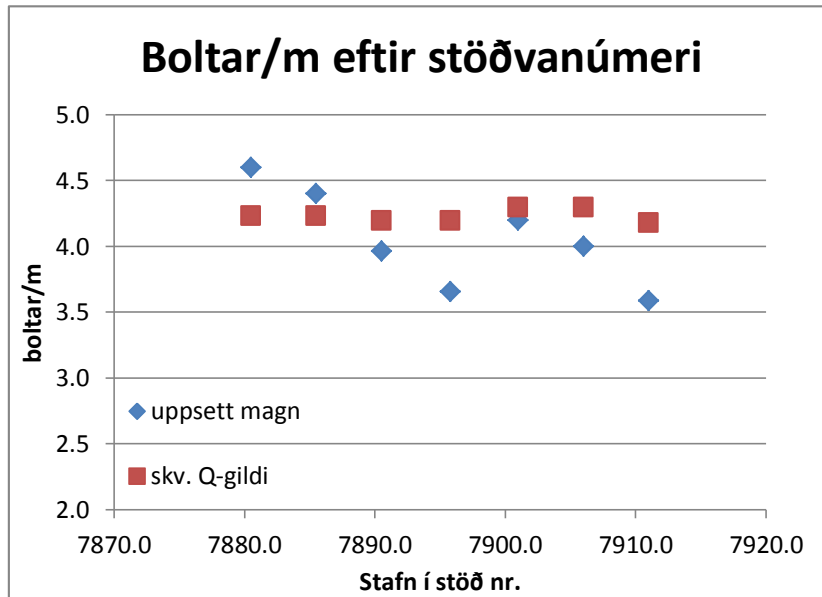
Töflur 9.29–9.35 sýna samanburð á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og uppsettu heildarmagni styrkinga fyrir hvert rannsóknarsvæði. Frávik uppsettra styrkinga frá Q-kerfinu eru sýnd í prósentum. Gröfin á myndum 9.12–9.19 sýna samanburð á magni bergbolta og trefjastyrktrar sprautusteypu fyrir hvern salva.

### 9.5.1 Rannsóknarsvæði 1

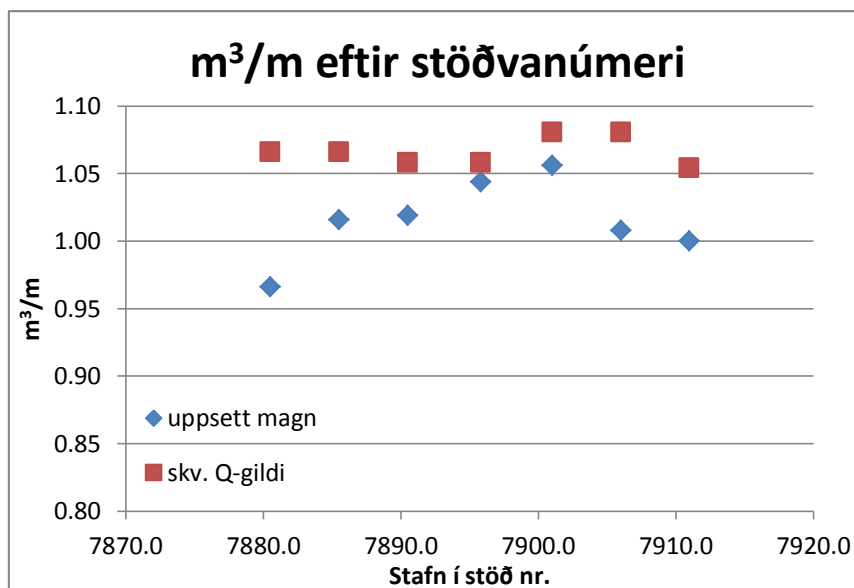
Tafla 9.29 Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 1.

Fjöldi bergbolta			Magn trefjastyrktrar sprautusteypu [ $\text{m}^3$ ]		
Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi	Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi
152	145	-4,6%	38,2	36,4	-4,7%





Mynd 9.12 Fjöldi bergbolta á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 1.



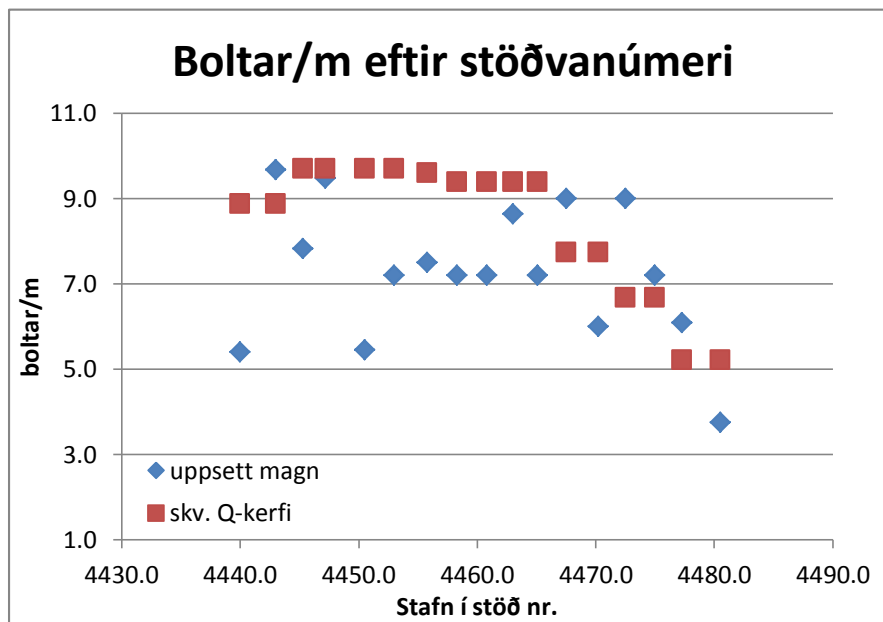
Mynd 9.13 Rúmmál sprautusteypu á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 1.

Á rannsóknarsvæði 1 eru uppsettar styrkingar í góðu samræmi við hönnun skv. Q-kerfi. Styrkingarnar víkja að jafnaði innan við 5% frá Q-kerfinu. Uppsett magn sprautusteypu er í öllum tilvikum minna en hannað magn skv. Q-kerfi og sama máli gegnir um fjölda bergbolta að tveimur sölvum undanskildum.

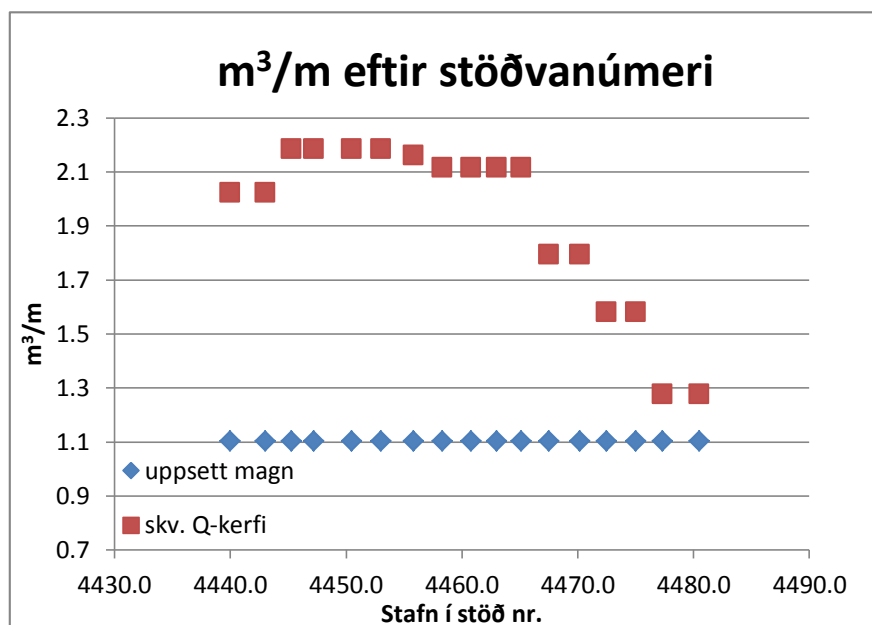
## 9.5.2 Rannsóknarsvæði 2

Tafla 9.30 Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 2.

Fjöldi bergbolta			Magn trefjastyrktrar sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]		
Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi	Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi
383	320	-16,4%	87,7	50,2	-42,8%



Mynd 9.14 Fjöldi bergbolta á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 2.



Mynd 9.15 Rúmmál sprautusteypu á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 2.

Á rannsóknarsvæði 2 er fjöldi bergbolta rúmum 16% minni en Q-kerfið gerir ráð fyrir og magn trefjastyrktrar sprautusteypu er tæpum 43% undir því magni sem Q-kerfið segir til um. Á móti kemur að fjöldi sprautusteypuboga er 50% yfir viðmiðum Q-kerfisins og þéttleiki þeirra um 40% meiri en Q-kerfið gerir ráð fyrir eins og sjá má í töflu 9.31.

Tafla 9.31 Samanburður á fjölda og þéttleika sprautusteypuboga skv. Q-kerfi og lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 2.

Fjöldi sprautusteypuboga			Meðalbil á milli sprautusteypuboga [m]		
Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi	Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi
10	15	+50%	4,14	2,49	-39,9%

Vegna frákasts má ætla að rúmmál sprautusteypuhulu á bogasvæðum sé a.m.k. 10% yfir því sem hönnunin í kafla 9.3.2 gerir ráð fyrir. Ætla má að lítið tillit þurfi að taka til yfirbrots og hrjúfleika bergflata þar sem yfirborð hefur þegar verið jafnað með trefjastyrktri sprautusteypu. Margföldunarstuðullinn í töflu 9.32 ætti því að vera af stærðargráðunni 1,1. Miðað við 10 sprautusteypuboga fæst steypumagnið 22 m<sup>3</sup> og margöldunarstuðullinn 9,5 en sé miðað við 15 boga fást 33 m<sup>3</sup> og stuðullinn 6,3. Í báðum tilvikum reynist magn uppsettrar steypuhulu langt yfir hönnunarviðmiðum.

Tafla 9.32 Samanburður á magni steypuhulu á bogasvæði m.v. hönnunarteikningar og lokastyrkingar.

Fjöldi sprautusteypuboga	Magn steypuhulu skv. hönnun [m <sup>3</sup> ]	Magn uppsettrar steypuhulu [m <sup>3</sup> ]	Margföldunarstuðull
10 (Q-kerfi)	22	209	9,5
15 (uppsett)	33	209	6,3

Sé heildarmagn sprautusteypu (trefjastyrkt steypa ásamt steypuhulu) á rannsóknarsvæði 2 borið saman við það heildarmagn sem hönnunin í kafla 9.3.2 gerir ráð fyrir fást margföldunarstuðlarnir 2,4 og 2,1 eins og sjá má í töflu 9.33.

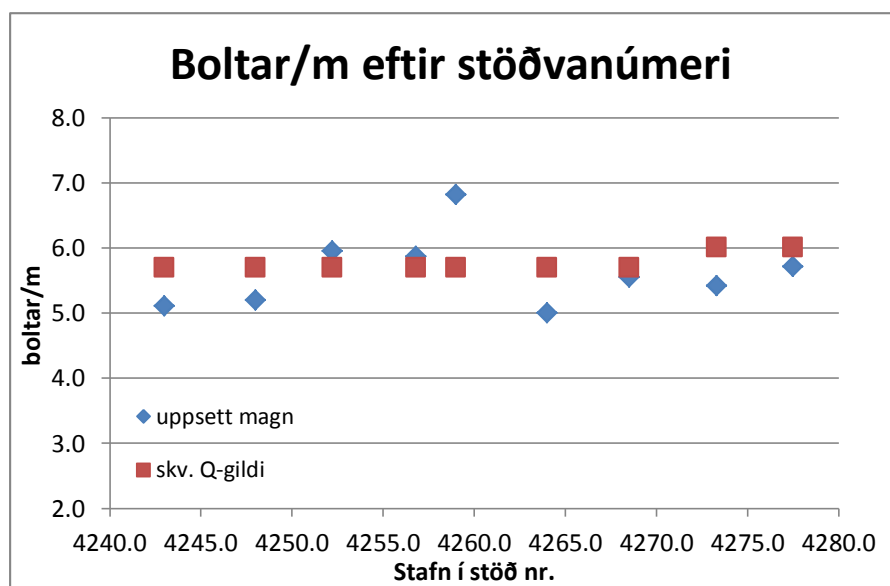
Tafla 9.33 Samanburður á heildarmagni sprautusteypu á bogasvæði m.v. hönnunarteikningar og lokastyrkingar.

Fjöldi sprautusteypuboga	Heildarmagn skv. hönnun [m <sup>3</sup> ]	Uppsett heildarmagn [m <sup>3</sup> ]	Margföldunarstuðull
10 (Q-kerfi)	22 + 87,7 = 109,7	209 + 50,2 = 259,2	2,4
15 (uppsett)	33 + 87,7 = 120,7	259,2	2,1

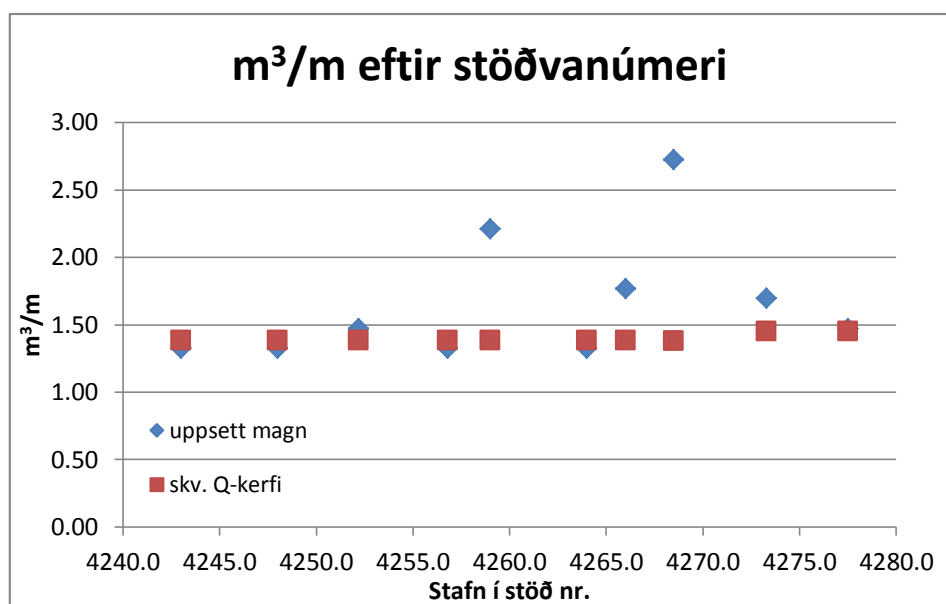
### 9.5.3 Rannsóknarsvæði 3

Tafla 9.34 Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 3.

Fjöldi bergbolta			Magn trefjastyrktrar sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]		
Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi	Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi
226	217	-4,0%	54,8	61,3	+11,9%



Mynd 9.16 Fjöldi bergbolta á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 3.



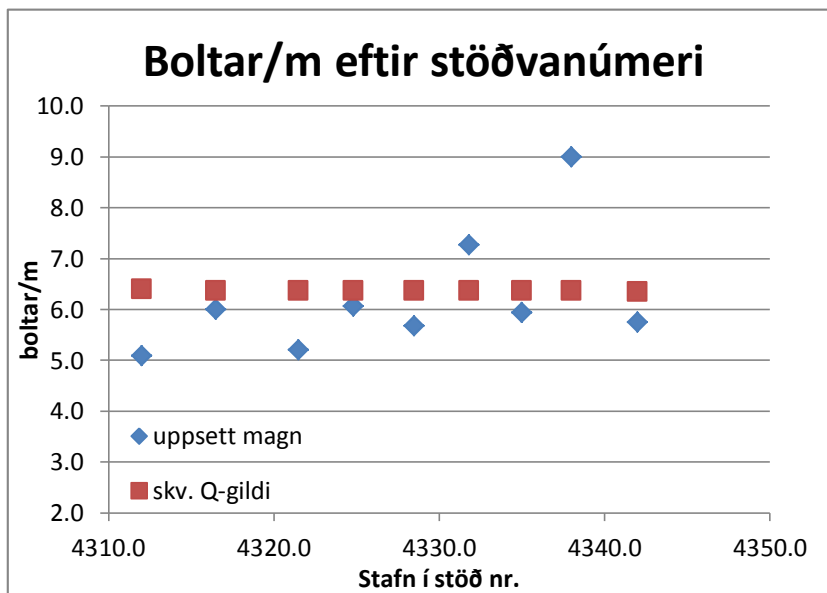
Mynd 9.17 Rúmmál sprautusteypu á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 3.

Á rannsóknarsvæði 3 er fjöldi uppsettra bergbolta í góðu samræmi við Q-kerfið. Í hverjum salva eru boltarnir ýmist örlítið fleiri eða færri en Q-gildið segir til um en heildarfjöldi bolta er 4% lægri. Heildarrúmmál sprautusteypu er um 12% meira en Q-kerfið kveður á um. Þar ræður mestu verulegt umframmagn í sölvum 542 (stafn í stöð nr. 4259,0) og 544b (stafn í stöð nr. 4268,5).

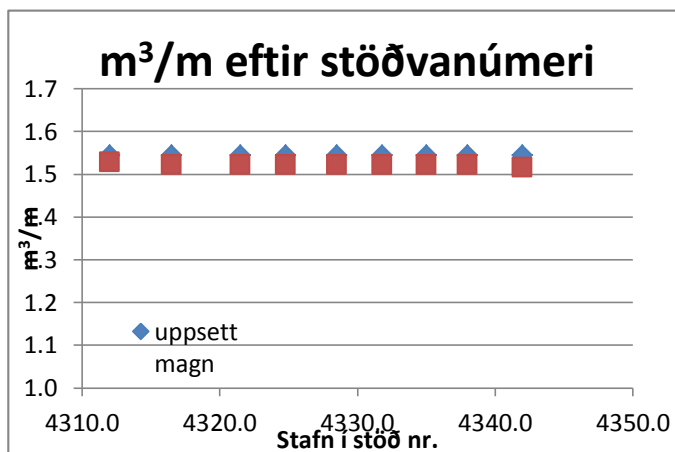
### 9.5.4 Rannsóknarsvæði 4

Tafla 9.35 Samanburður á styrkingaþörf skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum fyrir rannsóknarsvæði 4.

Fjöldi bergbolta			Magn trefjastyrktrar sprautusteypu [m <sup>3</sup> ]		
Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi	Skv. Q-kerfi	Loka-styrkingar	Frávik frá Q-kerfi
230	217	-5,7%	54,6	55,4	+1,5%



Mynd 9.18 Fjöldi bergbolta á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 4.

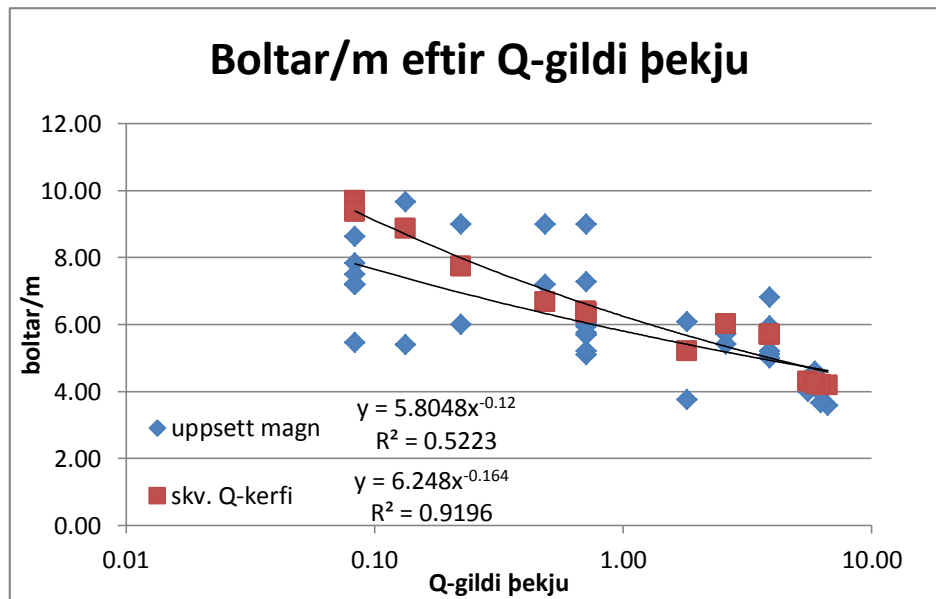


Mynd 9.19 Rúmmál sprautusteypu á metra skv. Q-kerfi og áætluðum lokastyrkingum á rannsóknarsvæði 4.

Á rannsóknarsvæði 4 er gott samræmi á milli uppsettra styrkinga og styrkinga skv. Q-kerfinu. Heildarfjöldi uppsettra bergbolta er 5,7% undir viðmiðum Q-kerfisins og magn sprautusteypu er 1,5% meira en Q-kerfið kveður á um. Eins og mynd 9.18 sýnir skera einstaka salvar sig nokkuð úr hvað boltamagn varðar, einkum salvi 560 (stafn í stöð nr. 4338,0) þar sem fjöldi bolta á hvern gangametra er 41% yfir viðmiði Q-kerfisins.

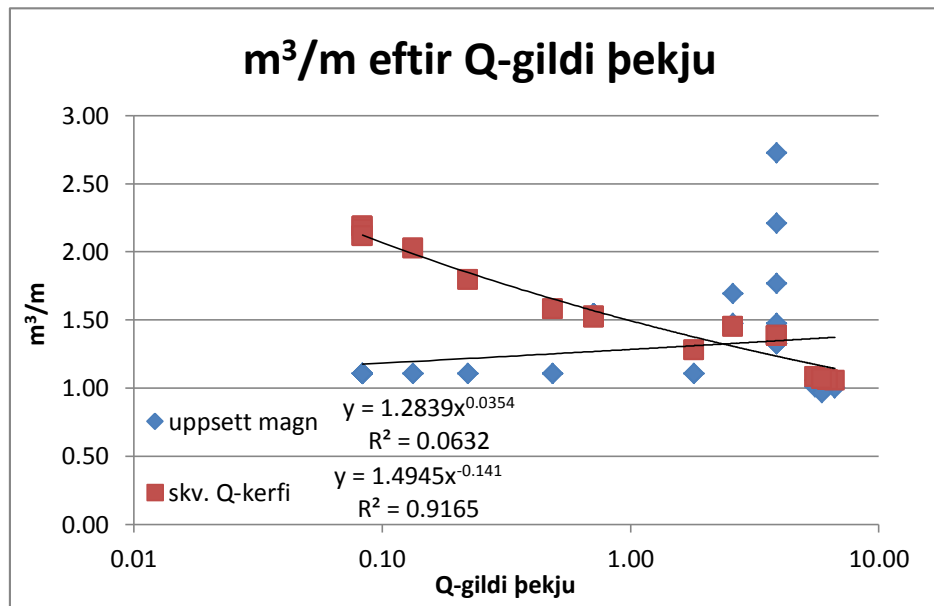
### 9.5.5 Fylgni styrkinga við Q-gildi í þekju

Þar sem berggæði í þekju ráða að jafnaði mestu um styrkingar hverju sinni (Rawlings & Simic, 1996) er ástæða til þess að kanna fylgni styrkinga við Q-gildi þekju. Gröfin hér að neðan sýna samanburð á fylgni hannaðra styrkinga skv. Q-kerfi og uppsettra styrkinga við Q-gildi þekju.



Mynd 9.20 Samanburður á sambandi Q-gildis þekju og fjölda bergbolta.

Af grafinu á mynd 9.20 má ljóst vera að Q-gildi þekju hefur töluvert vægi þegar magn bergbolta er annars vegar. Þetta helgast bæði af hrúnhættu úr þekju og því að umfang þekju er umtalsvert meira en veggja. Hönnunin skv. Q-kerfinu gefur mikla fylgni á milli Q-gildis og boltamagns ( $R^2 = 0,92$ ) á meðan uppsett boltamagn sýnir mun meiri dreifingu og minni fylgni ( $R^2 = 0,52$ ).



Mynd 9.21 Samanburður á sambandi Q-gildis þekju og magns sprautusteypu.

Grafið á mynd 9.21 sýnir glögglega að þegar styrkingar eru hannaðar skv. Q-kerfinu fæst mikil fylgni á milli magns trefjastyrkrar sprautusteypu og Q-gildis þekju ( $R^2 = 0,92$ ). Öðru máli gegnir um uppsettar styrkingar en þar virðist Q-gildi þekju litlu ráða um steypumagn. Í raun virðist magn trefjastyrkrar sprautusteypu aukast með hækkandi Q-gildi en fylgnin er þó hverfandi. Styrkingar á rannsóknarsvæðum 2 og 3 hafa mest áhrif á þessa niðurstöðu en þar vísar magn trefjastyrkrar sprautusteypu mest frá Q-kerfinu eins og fjallað er um í köflum 9.5.2 og 9.5.3.

### 9.5.6 Lengd bergbolta

Skv. Q-kerfinu má áætla lengd bergbolta út frá umfangi ganganna og ESR-gildi þeirra. Jafna (5.3) gefur þannig 3 m langa bolta fyrir Norðfjarðargöng. Í leiðbeiningum um notkun kerfisins er þess þó getið að lág Q-gildi krefjist að jafnaði lengri bergbolta.

Á rannsóknarsvæðunum fjórum eru notaðir 3 og 4 m langir bergboltar sem ætla má að sé í ágætu samræmi við Q-kerfið. Engu að síður er ástæða til þess að kanna hvernig boltalengdirnar samræmast jöfnu (7.4) enda mikilvægt að meirihluti bergbolta skeri ákveðinn lágmarksfjöldu sprungna.

Séu hæstu og lægstu RQD-gildin á hverju rannsóknarsvæði notuð til þess að finna sprungutíðnina ( $\lambda$ ) skv. jöfnu (4.12) fást gildin í töflu 9.36.

Tafla 9.36 RQD-gildi og sprungutíðni á rannsóknarsvæðum 1–4.

Svæði nr.	RQD <sub>max</sub>	RQD <sub>min</sub>	$\lambda_{\min}$ [m <sup>-1</sup> ]	$\lambda_{\max}$ [m <sup>-1</sup> ]
1	80	60	8.24	13.76
2	70	25	10.97	26.93
3	70	40	10.97	20.22
4	80	40	8.24	20.22



Sé tekið mið af hæstu og lægstu RQD-gildunum í töflu 9.36 og miðað við líkurnar ( $P$ ) 95% og 99% á því að bergboltar skeri að lágmarki fimm sprungur ( $k \geq 5$ ) gefur jafna (7.4) boltalengdirnar sem sjá má í töflu 9.37.

Tafla 9.37 Lengd bergbolta miðað við Poisson-dreifingu sprungna og 95% og 99% líkur á að boltar skeri fimm sprungur eða fleiri.

RQD	Boltalengd [m]	
	P = 0.95	P = 0.99
25	0.34	0.43
80	1.11	1.40

Frekari prófun með jöfnu (7.4) leiðir í ljós að nær allir (99,97%) 3 m langir bergboltar skera 10 sprungur eða fleiri þegar RQD-gildið er 80. Af þessu má draga þá ályktun að 3 og 4 m bergboltar séu nógu langir til þess að skera a.m.k. 10 sprungur.

## 9.6 Virkni styrkinga – FEM útreikningar

Jafnvel þótt samræmi sé á milli Q-gilda og uppsettra styrkinga er ekki þar með sagt að stöðugleiki bergsins umhverfis göngin sé tryggður. Eins og áður hefur komið fram er að jafnaði mælt til þess að fleiri en einni aðferð sé beitt við mat á styrkingaþörf bergs, einkum þegar um erfiðar aðstæður til gangagerðar er að ræða.

Í eftirfarandi umfjöllun verða tvö af rannsóknarsvæðunum tekin til skoðunar. Annars vegar rannsóknarsvæði 1 þar sem aðstæður til gangagerðar eru stöðugar og nokkuð dæmigerðar fyrir íslenskt berg. Hins vegar rannsóknarsvæði 4 þar sem tiltölulega þunnt setlag í þekju veldur óstöðugleika án þess þó að notkun sprautusteypuboga reynist nauðsynleg. Slík setlög eru nokkuð dæmigerð fyrir Norðfjarðargöng og þykkustu setlögin hafa kallað á notkun sprautusteypuboga. Á báðum rannsóknarsvæðum er bergið styrkt með bergboltum og trefjastyrktri sprautusteypu og uppsettar styrkingar eru í góðu samræmi við Q-kerfið. Við líkangerðina er því tekið mið af styrkingum skv. Q-kerfinu. Með því móti má einnig kanna hve vel hið empiríska Q-kerfi fellur að líkanreikningum.

### 9.6.1 Ákvörðun á inntaksstærðum líkanreikninga

#### Bergspennur

Engar bergspennumælingar eru framkvæmdar í Norðfjarðargöngum. Við mat á bergspennum í göngunum má líta til þeirra mælinga sem gerðar hafa verið á Austurlandi undanfarna áratugi og fjallað er um í kafla 6.2. Þar sem áreiðanleiki overcoring mælinga í Fáskrúðsfjarðargöngum hefur verið dreginn í efa þykir nærtækast að horfa til þeirra mælinga sem gerðar voru í tengslum við Kárahnjúkavirkjun og Fljótsdalsstöð. Jöfnur (6.4)–(6.6) eru því hafðar til hliðsjónar við ákvörðun bergspenna. Dýpið  $z$  er ákvarðað út frá þykkt jarðlagastafla á hverju rannsóknarsvæði. Þykktin er mæld á langsniði ganganna úr jarðfræðiskýrslu Ágústss Guðmundssonar (2012). Langsniðið má sjá í viðauka I.

## Aflfræðilegir eiginleikar berggerða

Þar sem prófanir á tæknilegum eiginleikum bergs í Norðfjarðargöngum eru af skornum skammti er notast við eldri rannsóknir á austfirskum jarðlögum við ákvörðun á helstu inntaksstærðum líkanreikninga.

Árið 2010 unnu Matthías Loftsson og Benedikt Óskar Steingrímsson skýrslu fyrir Vegagerðina þar sem teknar voru saman niðurstöður tæplega 6200 prófana á tæknilegum eiginleikum íslenskra berggerða. Prófanirnar voru gerðar á borkjörnum úr yfir 170 rannsóknarholum víðs vegar af landinu. Tæpur helmingur holanna var boraður í tengslum við framkvæmdir á Austurlandi og rannsóknir á þeim spanna hartnær þrjá áratugi. Í viðauka með skýrslunni eru niðurstöður prófana greindar eftir landshlutum sem gerir það mögulegt að greina austfirsku jarðlagastaflann sérstaklega. Í töflu 9.38 má sjá samantekt á niðurstöðum prófana á austfirsku basalti sem unnin var upp úr skýrslunni. Taflan sýnir meðaltalsgildi allra prófana fyrir hverja berggerð ásamt fjölda prófana (í sviga) og staðalfrávik hvers úrtaks (SD).

*Tafla 9.38 Tæknilegir eiginleikar austfirskis basalts. Taflan sýnir meðaltalsgildi prófana frá árunum 1983-2009. Fjöldi prófana er tilgreindur í sviga. SD = staðalfrávik. (unnið upp úr Matthías Loftsson & Benedikt Óskar Steingrímsson, 2010).*

Berggerð	Einásaprýstistyrkur [MPa]	Togstyrkur [MPa]	Fjaðurstuðull [MPa]	Poisson's hlutfall
Þóleiít	225,3 (83) SD. 86,4	13,5 (23) SD. 5,3	41996 (17) SD. 16419	0,227 (14) SD. 0,078
Ólivín-basalt	161,2 (104) SD. 67,3	12,3 (45) SD. 5,2	37488 (47) SD. 17849	0,233 (29) SD. 0,106
Kargi og kargaríkt basalt	24,7 (42) SD. 19,8	2,3 (17) SD. 1,5	6376 (31) SD. 4769	0,161 (17) SD. 0,037

Mikil breidd er í rannsóknarniðurstöðum og staðalfrávik að jafnaði há eins og taflan sýnir. Þetta gefur tilefni til frekari skoðunar.

Við jarðfræðikortlagningu í göngunum er ekki gerður greinarmunur á þóleiít- og ólivín-basalti. Skv. jarðfræðikortlagningu Ágúst Guðmundssonar (2012) liggja göngin í ólivín-basalti Eskifjarðarmegin en þóleiít-basalti Norðfjarðarmegin (sjá viðauka I).

Skv. jarðfræðikortlagningu verktaka er einásaprýstistyrkur basaltsins mikill (50–100 MPa) eða mjög mikill (100–250 MPa). Styrkur basaltkargans er sagður í meðallagi (25–50 MPa) eða mikill (Metrostav, 2014a). Engar prófanir eru gerðar á einásaprýstistyrk bergs í göngunum en ástæða er til þess að skoða áhrif einásaprýstistyrks á útkomu líkanreikninga.

Árið 2010 var jafnframt unnin rannsókn á eiginleikum setbergs í Norðfjarðargöngum þar sem prófanir voru gerðar á borkjörnum úr Eskifirði og Fannardal (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Haraldur Hallsteinsson, 2010). Niðurstöður allra prófana má sjá í töflu 9.39.

Tafla 9.39 Eiginleikar setbergs í Norðfjarðargöngum – allar prófanir. Fjöldi prófana er tilgreindur í sviga (Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Haraldur Hallsteinsson, 2010).

Eiginleiki	Meðalgildi (fjöldi prófana)
Einásaprýstistyrkur [MPa]	28,3 (34)
Togstyrkur [MPa]	2,9 (30)
Þanþrýstingur [kPa]	150,1 (11)
Fjaðurstuðull [MPa]	4793 (34)
Poisson's hlutfall	0,226 (5)

Þegar niðurstöður prófana eru skoðaðar betur kemur í ljós að eðli setlaga í Eskifirði og Fannardal er nokkuð ólíkt. Í Fannardal er setbergið yfirleitt völu- og þursaberg en í Eskifirði er einkum um túffríkt berg að ræða, blandað vikri, sylti og leir. Þar sem rannsóknarsvæðin fjögur ná eingöngu yfir setlög í Eskifirði þykir ástæða til þess að miða aðeins við prófanir á þeim setlögum við ákvörðun inntaksstærða líkanreikninga. Þá fæst sú niðurstaða sem tafla 9.40 sýnir.

Tafla 9.40 Eiginleikar setbergs Eskifjarðarmegin í Norðfjarðargöngum. Fjöldi prófana er tilgreindur í sviga. (unnið upp úr Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Haraldur Hallsteinsson, 2010).

Eiginleiki	Meðalgildi (fjöldi prófana)	Staðalfrávik
Einásaprýstistyrkur [MPa]	26,1 (13)	8,4
Togstyrkur [MPa]	2,4 (16)	2,0
Þanþrýstingur [kPa]	122,4 (5)	42,6
Fjaðurstuðull [MPa]	5039 (13)	1413
Poisson's hlutfall	0,28 (1)	-

## Bergstyrkingar

Við mat á tæknilegum eiginleikum bergstyrkinga er stuðst við þær efniskröfur sem gerðar eru til bergbolta og trefjastyrktrar sprautusteypu í Norðfjarðargöngum.

Í göngunum eru notaðar tvær gerðir bergbolta frá kínverska fyrirtækinu Pretec. Annars vegar innsteyptir boltar af gerðinni M20 úr B500NC kambstáli og hins vegar forspenntir og innsteyptir boltar af gerðinni M27 úr 40Cr stáli. Þvermál boltanna er 20 mm og lengd þeirra ýmist 3 eða 4 m (Pretec, 2013). Spennan á forspenntu boltunum er 50 kN við uppsetningu (Ófeigur Örn Ófeigsson, 2015c). Yfirlit yfir helstu eiginleika og kröfur til bergbolta má sjá í töflu 9.41.

Tafla 9.41 Yfirlit yfir helstu eiginleika bergbolta í Norðfjarðargöngum (Pretec, 2013; Ófeigur Örn Ófeigsson, 2015c). \*Almenn gildi fyrir stál.

Eiginleiki	Stærð
Þvermál ( $d$ )	20 mm
Lengd ( $l$ )	3–4 m
Togstyrkur ( $\sigma_t$ eða $p_{b_{max}}$ )	$\geq 600$ MPa
Flotmörk ( $\sigma_s$ )	$\geq 500$ MPa
Fjaðurstuðull ( $E$ )	200–210 GPa*
Poisson's hlutfall ( $\nu$ )	$\sim 0,3^*$
Spenna við uppsetningu	50 kN

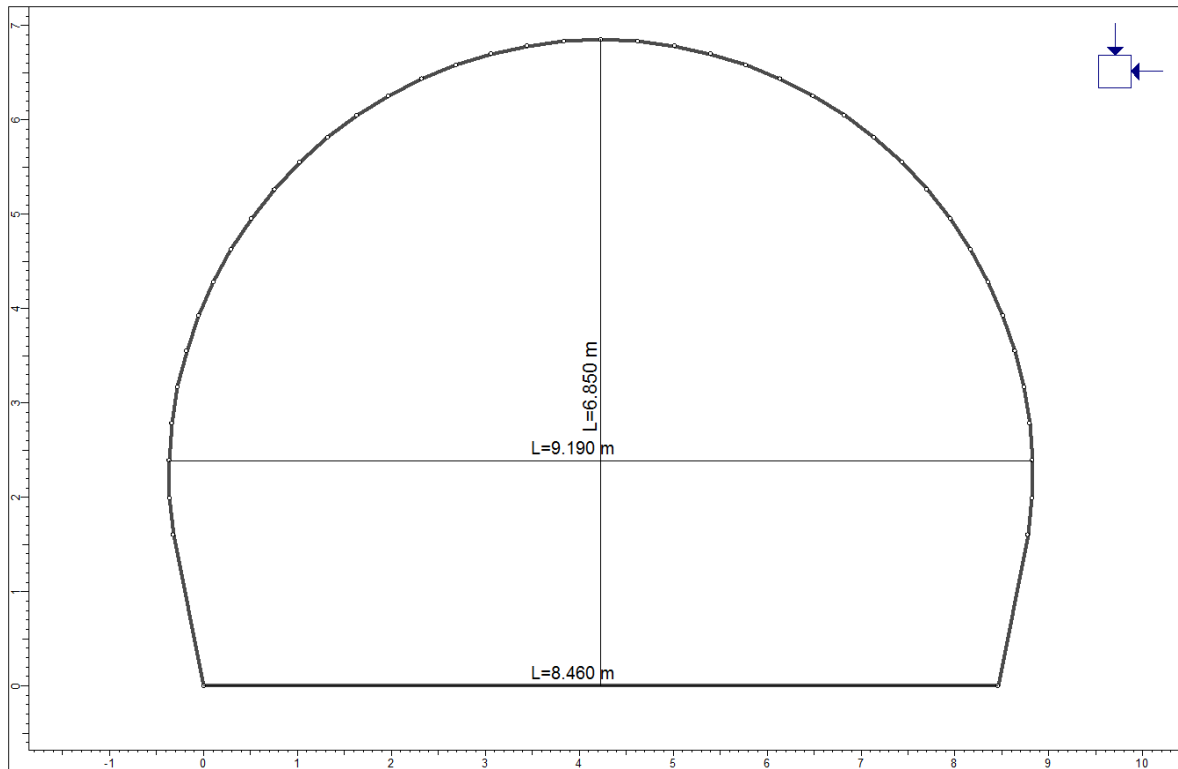
BM-Vallá framleiðir alla sprautusteypu sem notuð er í Norðfjarðargöngum. Steypan er framleidd í tveimur steypustöðvum, annars vegar á Reyðarfirði og hins vegar við Kirkjuból í Norðfirði. Í trefjastyrkta sprautusteypu eru notaðar plasttrefjar, að jafnaði  $5 \text{ kg/m}^3$  (BM-Vallá, 2013). Yfirlit yfir helstu eiginleika og kröfur til steypunnar má sjá í töflu 9.42.

Tafla 9.42 Yfirlit yfir helstu eiginleika trefjastyrktrar sprautusteypu í Norðfjarðargöngum (BM-Vallá, 2013). \*Almenn gildi fyrir steypu.

Eiginleiki	Stærð
Þrýstistyrkur ( $\sigma_c$ )	$\geq 30$ MPa
Beygjustyrkur (e. flexural strength)	$\geq 4,4$ MPa
Fjaðurstuðull ( $E$ )	14 000 MPa*
Poisson's hlutfall ( $\nu$ )	0,2*
Rúmþyngd	$\leq 0,0234 \text{ MN/m}^3$
Orkugleypniflokkur	E700

## Gangapversnið

Göngin eru teiknuð upp í samræmi við kennisniðið á mynd 2.3. Gangapversniðið sem notað er í líkanreikningum tekur mið af hönnunarmörkum graftrar en við það verður mesta breidd ganganna um 9,2 m. Til einföldunar eru göngin teiknuð án vatnshalla og lagnaskurði er sleppt. Mynd 9.22 sýnir málsett þversnið af Norðfjarðargöngum sem notað er í líkangerðinni. Öll jarðlagasnið eru einfölduð á þann hátt að lagmót eru höfð lárétt og einstök jarðlög hafa jafna þykkt.



Mynd 9.22 Einfaldað þversnið Norðfjarðarganga sem notað er við líkangerð.

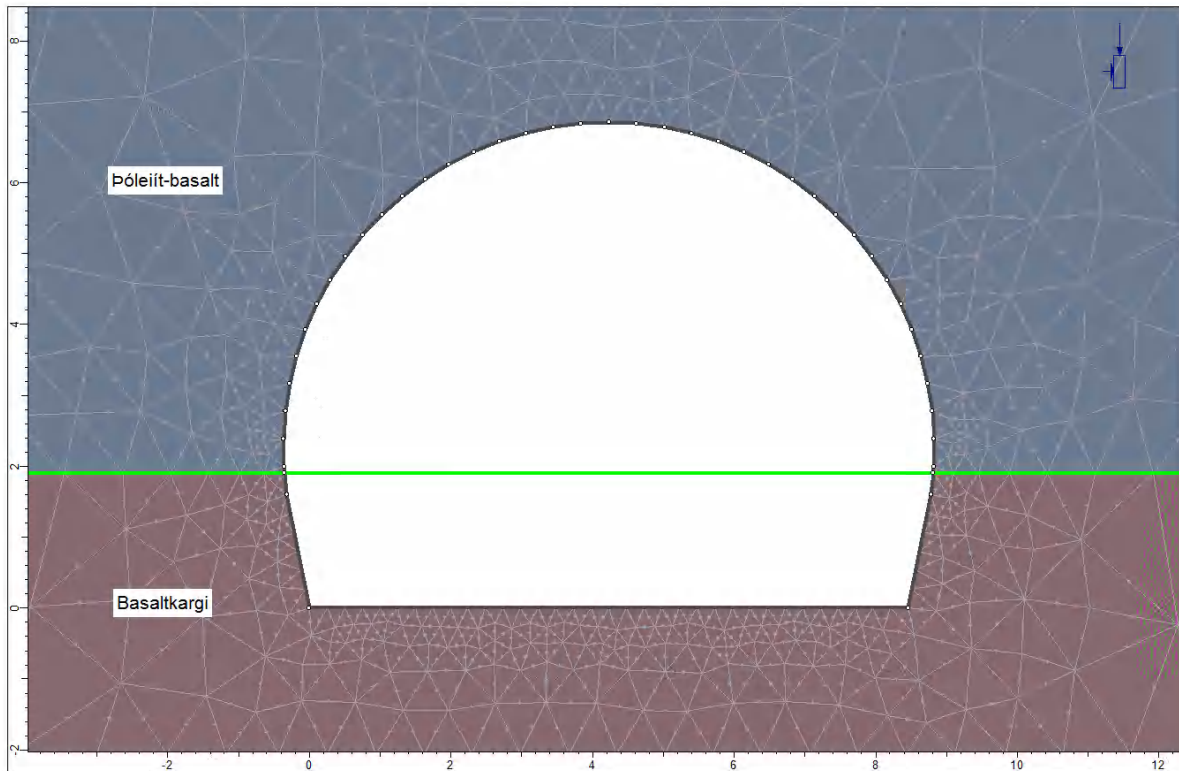
### 9.6.2 Líkan af salva F377

Á rannsóknarsvæði 1 er jarðlagabykktnin um 530 m. Jöfnur (6.4)–(6.6) gefa því bergspennurnar sem sjá má í töflu 9.43.

Tafla 9.43 Dýpi og bergspennur á rannsóknarsvæði 1.

$z$	350 m
$\sigma_v$	14,6 MPa
$\sigma_h$	5,34 MPa
$\sigma_H$	6,37 MPa

Rannsóknarsvæði 1 er Fannardalsmegin í göngunum og gangaþversniðið liggur í þóleiít-basalti og basaltkarga. Við líkangerðina er horft til salva F377 og basaltkarginn látinn ná frá botni ganganna upp á miðja vegg þar sem við tekur þóleiít-basalt (mynd 9.23).

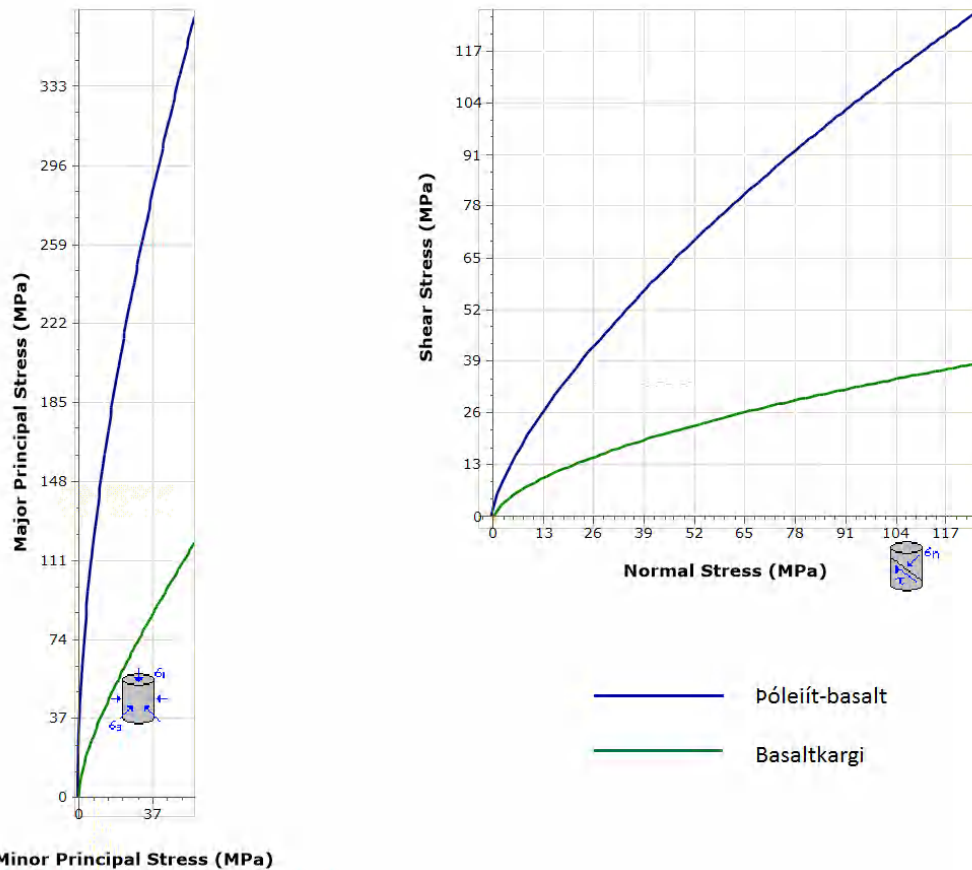


Mynd 9.23 Líkan af jarðlagaskipan á rannsóknarsvæði 1.

Við ákvörðun á tæknilegum eiginleikum berggerðanna er tekið mið af meðaltalsgildum í töflu 9.38. Við ákvörðun á GSI-gildum berggerðanna er horft til jarðfræðikortlagningar á salva F377 (sjá viðauka F) og leiðbeininga um notkun GSI-stuðulsins (Marinos, Marinos & Hoek, 2005). Á rannsóknarsvæði 1 eru tilgreind þrjú sprungukerfi og basaltkarginn er hóflega (e. moderately) veðraður en veðrun þóleiít-basaltsins telst örlítill (e. slightly). Fyrir vikið er GSI-gildi kargans lægra (sjá viðauka C). Í  $RS^2$  og  $RocData$  er gefið upp  $m_i$ -gildið  $25 \pm 5$  fyrir basalt og fordæmi eru fyrir því að nota  $m_i$ -gildið 13 fyrir basaltkarga (Sani, Moratti, Coli, Laureano, Rovero, Tonietti & Coli, 2012). Við líkangerð í Fáskrúðsfjardargöngum notaði Gunnar Arnar Gunnarsson (2008)  $m_i$ -gildið 10 sem má telja heldur lágt miðað við gildin í töflu 8.2. Inntaksstærðir berggerða fyrir líkan af rannsóknarsvæði 1 má sjá í töflu 9.44. Mynd 9.24. sýnir Hoek & Brown brotlíkon berggerðanna tveggja sem fengust með forritinu  $RocData$ .

Tafla 9.44 Inntaksstærðir berggerða fyrir líkan af rannsóknarsvæði 1.

Eiginleiki	Þóleiít-basalt	Basaltkargi
$\sigma_{ci}$	225,3 MPa	24,7 MPa
$GSI$	65	55
$m_i$	25	13
$D$	0	0
$E_i$	41996 MPa	6376 MPa



Mynd 9.24 Hoek & Brown brotlíkan þóleiít-basalts og basaltkarga á rannsóknarsvæði 1.

Við gerð brotlíkana reiknar *RocData* eftirfarandi Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðla fyrir þóleiít-basalt og basaltkarga (tafla 9.45).

Tafla 9.45 Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðlar úr *RocData* fyrir þóleiít-basalt og basaltkarga.

Eiginleiki	Þóleiít-basalt	Basaltkargi
$m_b$	7,163	2,606
$s$	0,0205	0,00674
$a$	0,5020	0,5040
$c$	18,122 MPa	1,437 MPa
$\varphi$	42,926°	34,252°
$\sigma_{rm}$	31,99 MPa	1,987 MPa
$E_{rm}$	26529,7 MPa	2603,2 MPa

Eiginleikar bergmassa eftir brot eru fengnir með því að lækka GSI-gildi berggerðanna í samræmi við jöfnu (8.1) og láta  $RS^2$  reikna nýja Hoek & Brown stuðla. Útvíkkunarstuðullinn er ákvarðaður með jöfnu (8.2). Í töflu 9.46 má sjá eiginleika berggerðanna tveggja eftir brot.

Tafla 9.46 Ákvörðun á eiginleikum þóleiit-basalts og basaltkarga eftir að brotþoli er náð.

Eiginleiki	Þóleiit-basalt	Basaltkargi
$GSI_r$	46	39
$m_r$	3,634	1,472
$s_r$	0,00248	0,00114
$a_r$	0,5076	0,5122
$E_r$	10028,3 MPa	950,6 MPa
útvíkkunarstuðull	1,0902	0,4415

Við ákvörðun á eiginleikum bergstyrkinga er tekið mið af gildum í töflum 9.41 og 9.42. Þar sem allir bergboltar eru grautaðir teljast þeir hafa fulla viðloðun (e. fully bonded). Við ákvörðun á magni bergstyrkinga er tekið mið af töflum 9.9 og 9.10, þ.e. því magni sem Q-kerfið kveður á um miðað við uppgefin Q-gildi í salva F377. Í  $RS^2$  þarf að skilgreina bilið á milli bergbolta bæði í þversniðinu (e. in-plane spacing) og í stefnu ganganna (e. out-of-plane spacing). Sé miðað við að hver bergbolti styðji við sexhyrningslaga svæði (mynd 9.6) og að meðalbilið á milli bolta í þversniðinu sé  $b$  fæst boltabilið  $0,866b$  í stefnu ganganna skv. reglu Pýþagórasar. Magn bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 1 má sjá í töflu 9.47.

Tafla 9.47 Magn bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 1.

Styrkingar	þekja	veggir
Meðalbil á milli bergbolta		
- í þversniði	2,16 m	2,40 m
- í stefnu ganganna	1,87 m	2,08 m
Lengd bergbolta	3 m	3 m
Forspenna bergbolta	50 kN	0 kN
Meðalþykkt sprautusteypu	6,17 cm	5,13 cm

### 9.6.3 Líkan af salva 554

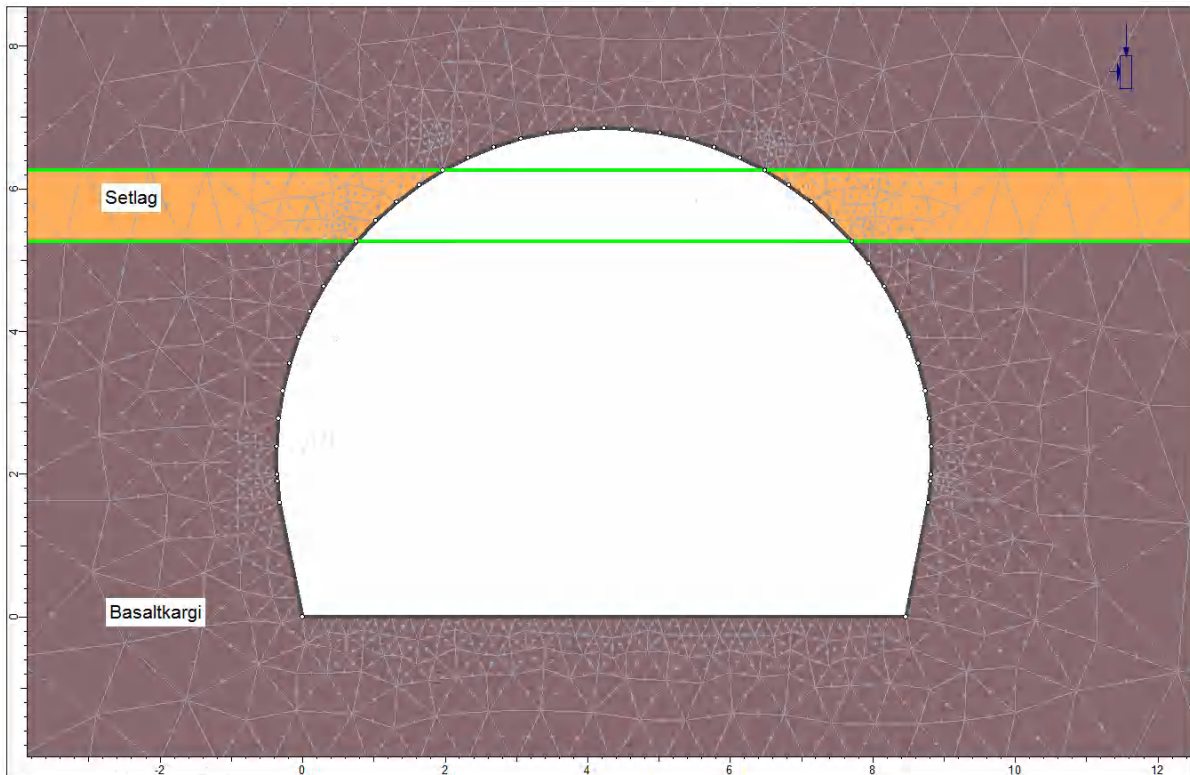
Á rannsóknarsvæði 4 er jarðlagabykktn um 575 m. Jöfnur (6.4)–(6.6) gefa því bergspennurnar sem sjá má í töflu 9.48.

Tafla 9.48 Dýpi og bergspennur á rannsóknarsvæði 4.

$z$	575 m
$\sigma_v$	15,8 MPa
$\sigma_h$	5,66 MPa
$\sigma_H$	6,51 MPa



Rannsóknarsvæði 4 er Eskifjarðarmegin í göngunum og liggur í basaltkarga, ólivín-basalti og setlagi. Við líkangerðina er tekið mið af salva 554 (sjá viðauka F) þar sem basaltkargi er í veggjum og upp í miðja þekju en þar tekur við um 1 m þykkt setlag með basaltkarga ofan á (mynd 9.25).

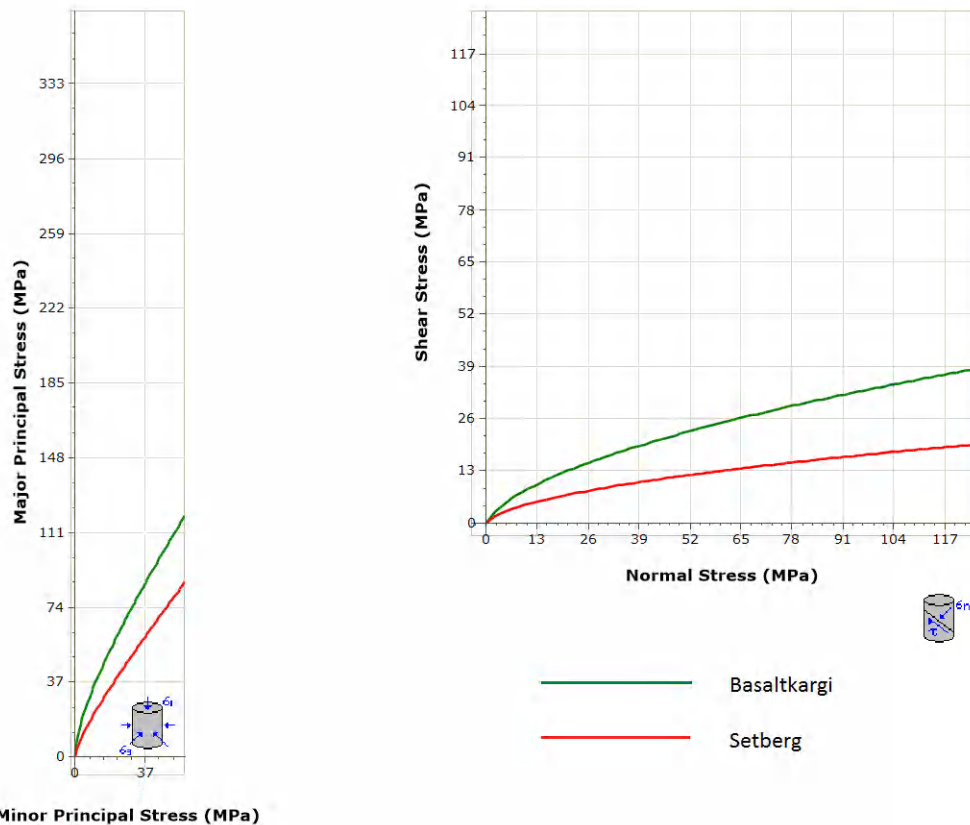


Mynd 9.25 Líkan af jarðlagaskipan á rannsóknarsvæði 4.

Gert er ráð fyrir að basaltkarginn sé búinn sömu eiginleikum og lýst er í kafla 9.6.2 enda niðurstöður jarðfræðikortlagningar sambærilegar. Við ákvörðun á tæknilegum eiginleikum setbergsins er tekið mið af meðaltalsgildum í töflu 9.40. Við ákvörðun á GSI-gildi þess er tekið mið af jarðfræðikortlagningu á salva 554 (sjá viðauka F) og leiðbeiningum um notkun GSI-stuðulsins. Í setlaginu koma fram a.m.k. fjögur sprungukerfi og bergið er hóflega eða mikið (e. highly) veðrað. Fyrir vikið verður GSI-gildi setlagsins lægra en basaltkargans (sjá viðauka C). Við ákvörðun á  $m_i$ -gildi setlagsins er tekið mið af innbyggðum gildum fyrir leir- og siltstein í  $RS^2$  og  $RocData$ . Inntaksstærðir setbergsins má sjá í töflu 9.49. Mynd 9.26 sýnir brotlíkon setbergs og basaltkarga úr  $RocData$ .

Tafla 9.49 Inntaksstærðir setbergs fyrir líkan af rannsóknarsvæði 4.

Eiginleiki	Setberg
$\sigma_{ci}$	26,1 MPa
$GSI$	35
$m_i$	6
$D$	0
$E_i$	5039 MPa



Mynd 9.26 Hoek & Brown brotlíkan basaltkarga og setbergs á rannsóknarsvæði 4.

Við gerð brotlíkana reiknar *RocData* eftirfarandi Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðla fyrir setbergið (tafla 9.50).

Tafla 9.50 Hoek & Brown og Mohr-Coulomb stuðlar úr *RocData* fyrir setberg.

Eiginleiki	Setberg
$m_b$	0,589
$s$	0,000730
$a$	0,5159
$c$	0,8453 MPa
$\varphi$	22,088°
$\sigma_m$	0,6285 MPa
$E_{rm}$	571,5 MPa

Eiginleikar setbergsins eftir brot eru ákveðnir með því að lækka GSI-gildi þess í samræmi við jöfnu (8.1) og láta  $RS^2$  reikna nýja Hoek & Brown stuðla. Útvíkkunarstuðullinn er ákvarðaður með jöfnu (8.2). Ætla má að útvíkkunin sé lítil fyrir veikt berg með lágt GSI-gildi og jafnvel engin (Crowder & Bawden, 2004). Lág  $m$ -gildi gera það að verkum að útvíkkunarstuðull setbergsins verður lágur með jöfnu (8.2). Engu að síður er ástæða til þess að kanna áhrif engrar útvíkkunar. Í töflu 9.51 má sjá ákvörðun á eiginleikum setbergsins eftir brot.

Tafla 9.51 Ákvörðun á eiginleikum setbergs eftir að brotþoli er náð.

Eiginleiki	Setberg
$GSI$	25
$m_r$	0,412
$s_r$	0,0002404
$a_r$	0,5313
$E_r$	301,6 MPa
útvíkkunarstuðull	0,1236

Við ákvörðun á eiginleikum bergstyrkinga er tekið mið af gildum í töflum 9.41 og 9.42. Við ákvörðun á magni bergstyrkinga er tekið mið af töflum 9.19 og 9.20, þ.e. því magni sem Q-kerfið kveður á um miðað við uppgefin Q-gildi í salva 554. Líkt og á rannsóknarsvæði 1 er miðað við að meðalbilið á milli bolta í þversniðinu sé  $b$  (sjá mynd 9.6) en þá verður boltabilið í stefnu ganganna  $0,866b$ . Magn og eiginleika bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 4 má sjá í töflu 9.52.

Tafla 9.52 Magn og eiginleikar bergstyrkinga í líkani af rannsóknarsvæði 4.

Styrkingar	þekja	veggir
Meðalbil á milli bergbolta		
- í þversniði	1,66 m	2,19 m
- í stefnu ganganna	1,44 m	1,90 m
Lengd bergbolta	4 m	3 m
Forspenna bergbolta	50 kN	0 kN
Meðalþykkt sprautusteypu	9,77 cm	6,03 cm

#### 9.6.4 Niðurstöður líkanreikninga

Bæði þversnið eru skoðuð m.t.t. mismunandi álagsdreifingar fyrir og eftir uppsetningu bergstyrkinga. Í fyrstu er miðað við að 80% álagsins komi fram áður en styrkingar eru settar upp en það gildi er væntanlega í nokkru samræmi við raunveruleikann. Til samanburðar var ákveðið að kanna áhrif þess að eingöngu helmingur álagsins kæmi fram fyrir uppsetningu bergstyrkinga.

Þar sem mikil breidd er í niðurstöðum prófana á einásaprýstistyrk berggerða þykir ástæða til þess að kanna áhrif  $\sigma_{ci}$  á niðurstöður líkanreikninga. Jarðfræðikortlagning verktaka gefur enn fremur til kynna að kargakennda basaltið í göngunum sé sterkara en meðalgildi prófana segja til um og að basaltið gæti verið veikara. Fyrir vikið var ákveðið að kanna áhrif sterkari basaltkarga ( $\sigma_{ci} = 50$  MPa) annars vegar og veikara basalts ( $\sigma_{ci} = 100$  MPa) hins vegar á niðurstöður líkanreikninga.

Niðurstöður prófana benda einnig til þess að fjaðurstuðlar bergs séu mjög breytilegir og því er ástæða til þess að kanna áhrif fjaðurstuðla á niðurstöður líkanreikninga. Þar sem

spennumælingar í berggrunni Íslands hafa gefið til kynna láréttan fjaðurstuðul á bilinu 10–25 GPa (mynd 6.5) er áhugavert að kanna áhrif þess að lækka fjaðurstuðul þóleiít-basalts niður í 20 GPa.

Takmarkaðar upplýsingar liggja fyrir um útvíkkunargildi mismunandi berggerða. Fyrir mjög veikt berg með lágt GSI-gildi má gera ráð fyrir að útvíkkunin sé lítil sem engin. Því var ákveðið að kanna áhrif mismunandi útvíkkunargilda fyrir setlagið í salva 554.

Áður hefur verið sýnt fram á áhrif GSI-gildis á niðurstöður líkanreikninga. Fyrir dæmigert íslenskt veggangapversnið skiptir GSI-gildið verulegu máli eins og sjá má í töflu 9.53 (Gunnar Arnar Gunnarsson, 2008). GSI-gildið ræður Hoek & Brown stuðlunum  $m$ ,  $s$  og  $a$  sem eru mikilvægar inntaksstærðir brotlíkana. Jarðfræðikortlagning verktaka þykir hins vegar gefa skýra mynd af GSI-gildinu og því er ekki talin ástæða til þess að kanna áhrif þess á breiðu bili. Þó má skoða hvaða niðurstöður fást fyrir  $GSI \pm 10$ .

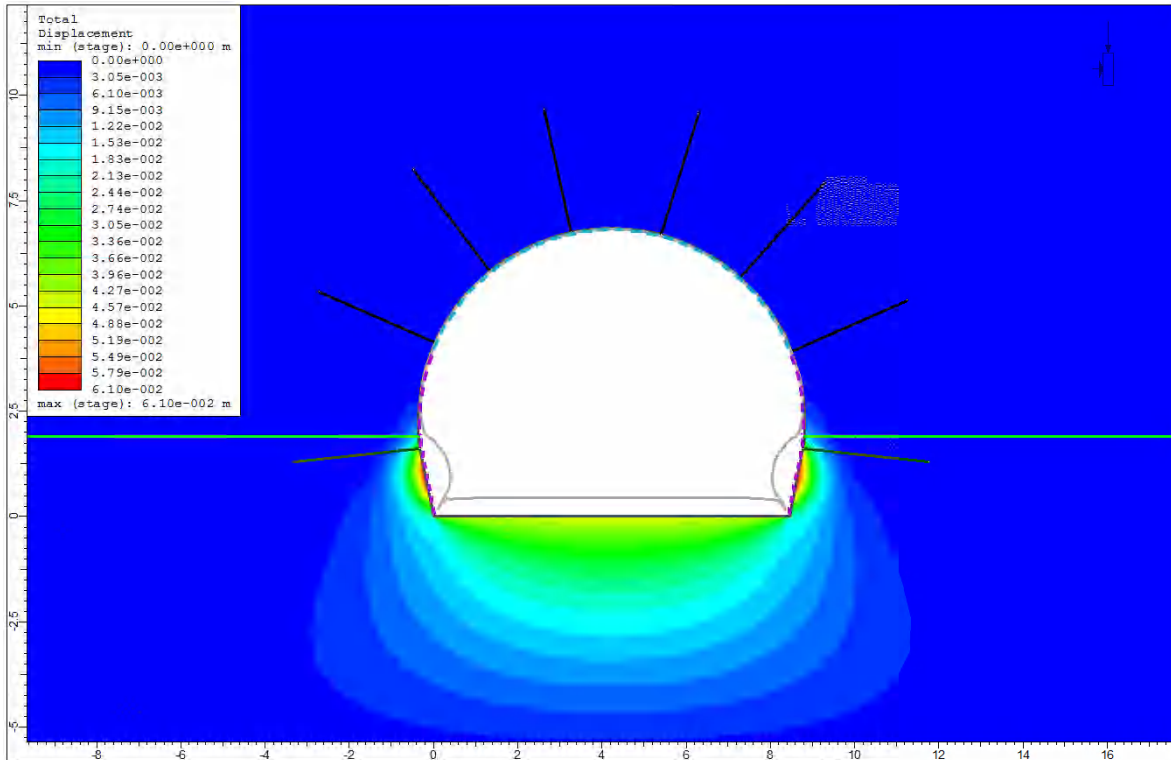
*Tafla 9.53 Áhrif GSI-gildis á bergfærslur í dæmigerðu íslensku veggangasniði (Gunnar Arnar Gunnarsson, 2008).*

GSI-gildi	Mestu bergfærslur
75	7,1 mm
50	19 mm
25	97 mm

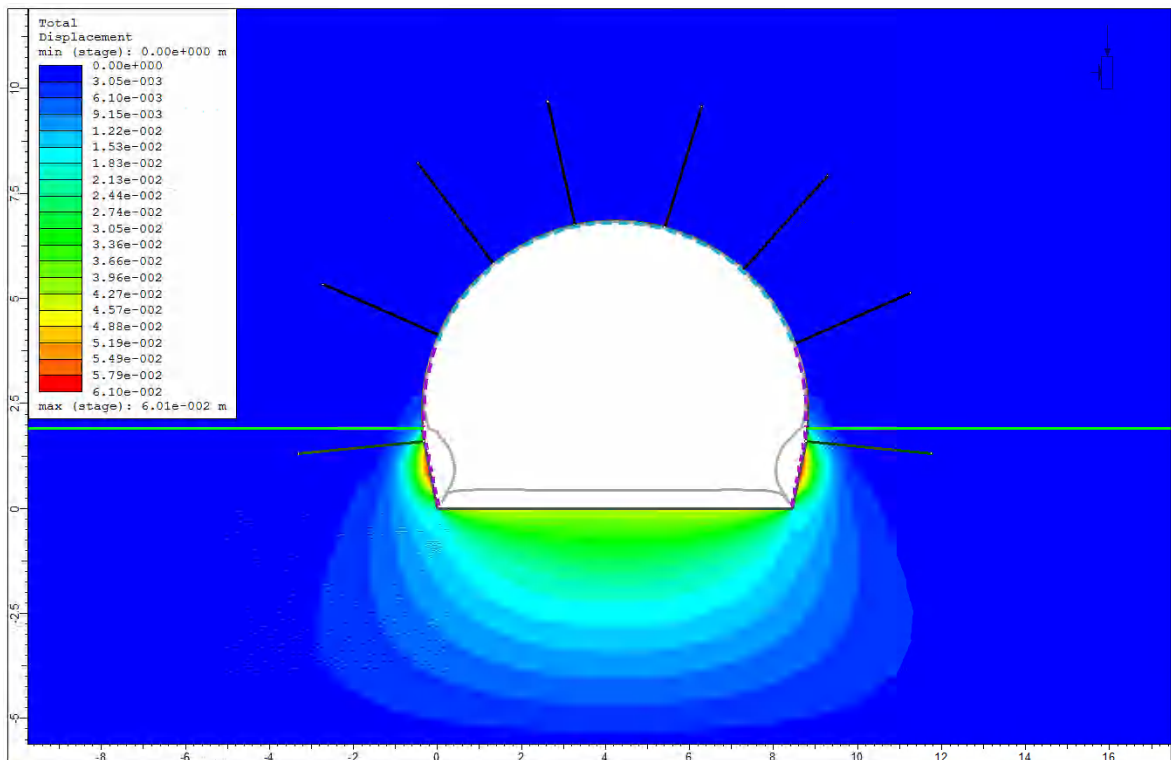
### Salvi F377

Myndir 9.27–9.33 sýna heildarbergfærslur fyrir salva F377 miðað við grunnlíkanið sem lýst er í kafla 9.6.2 og tilgreind frávik frá því. Reiknaðar bergfærslur eru á bilinu 31,4–134 mm en bæði öfgagildin fást þegar GSI-gildi bergsins er hækkað eða lækkað um 10. Önnur líkön gefa bergfærslur nálægt 60 mm að undanskildu líkaninu þar sem einásaþrýstistyrkur basaltkarga er hafður 50 MPa. Þá fást færslur nálægt 40 mm. Athygli vekur að áhrif þess að lækka styrk þóleiít-basaltsins um meira en helming eru vart merkjanleg. Eins og myndirnar sýna eru færslurnar nær eingöngu bundnar við basaltkargann.

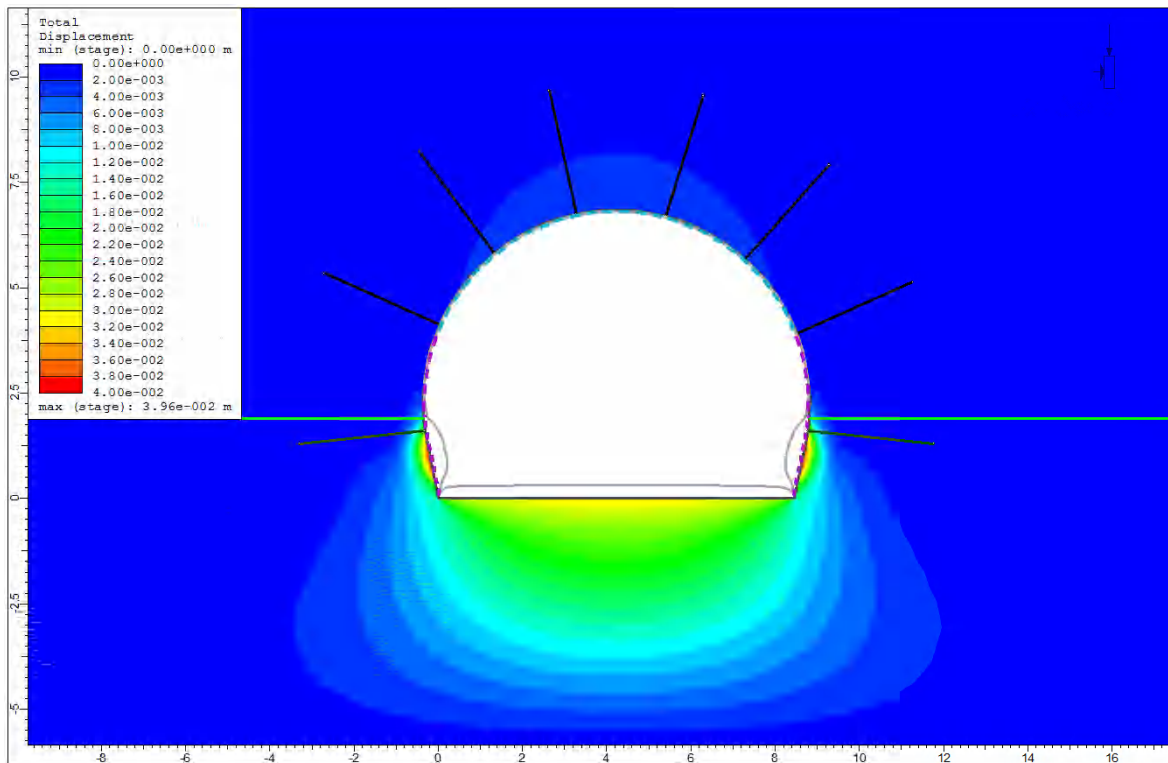
Sé miðað við að ásættanlegar bergfærslur séu 2% af radíus ganganna án þess að grípa þurfi til sérstakra ráðstafana má ætla að göngin þoli allt að 92 mm færslur. Öll líkönin reynast innan þeirra marka að undanskildu því sem gerir ráð fyrir lökkun GSI-gilda um 10.



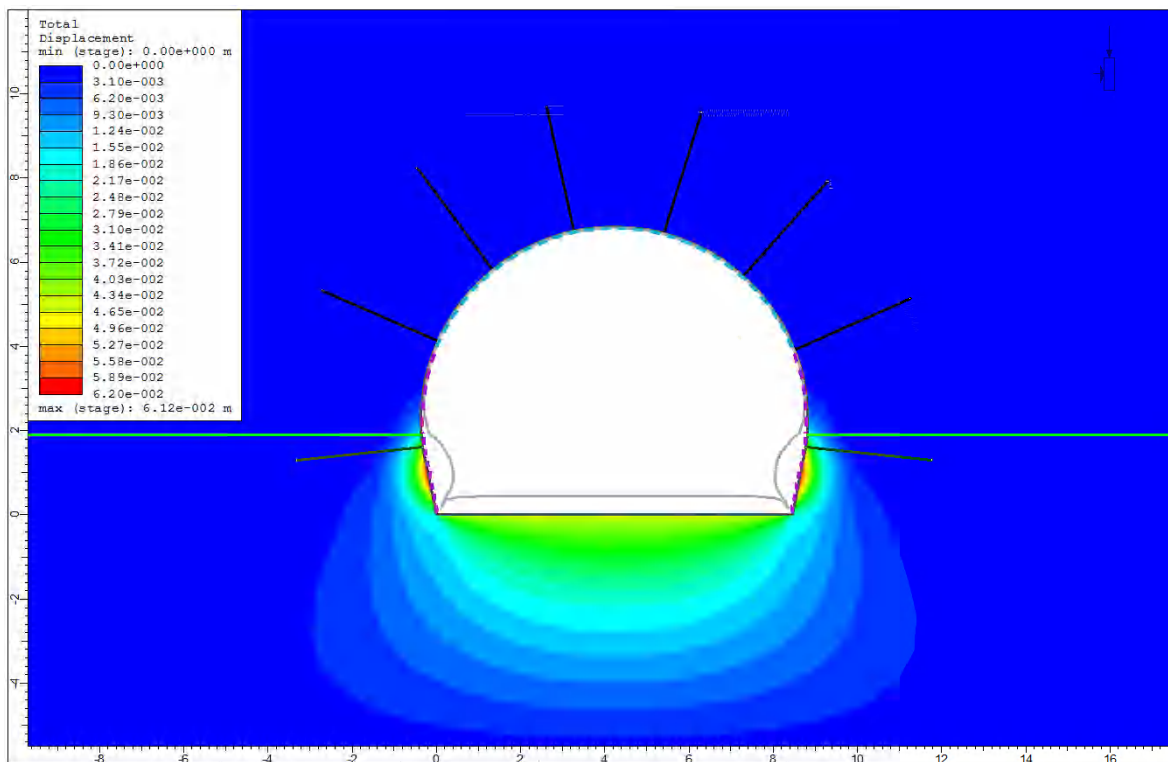
Mynd 9.27 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 61,0 mm.



Mynd 9.28 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 50-50 álagsdreifingu. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 60,1 mm.

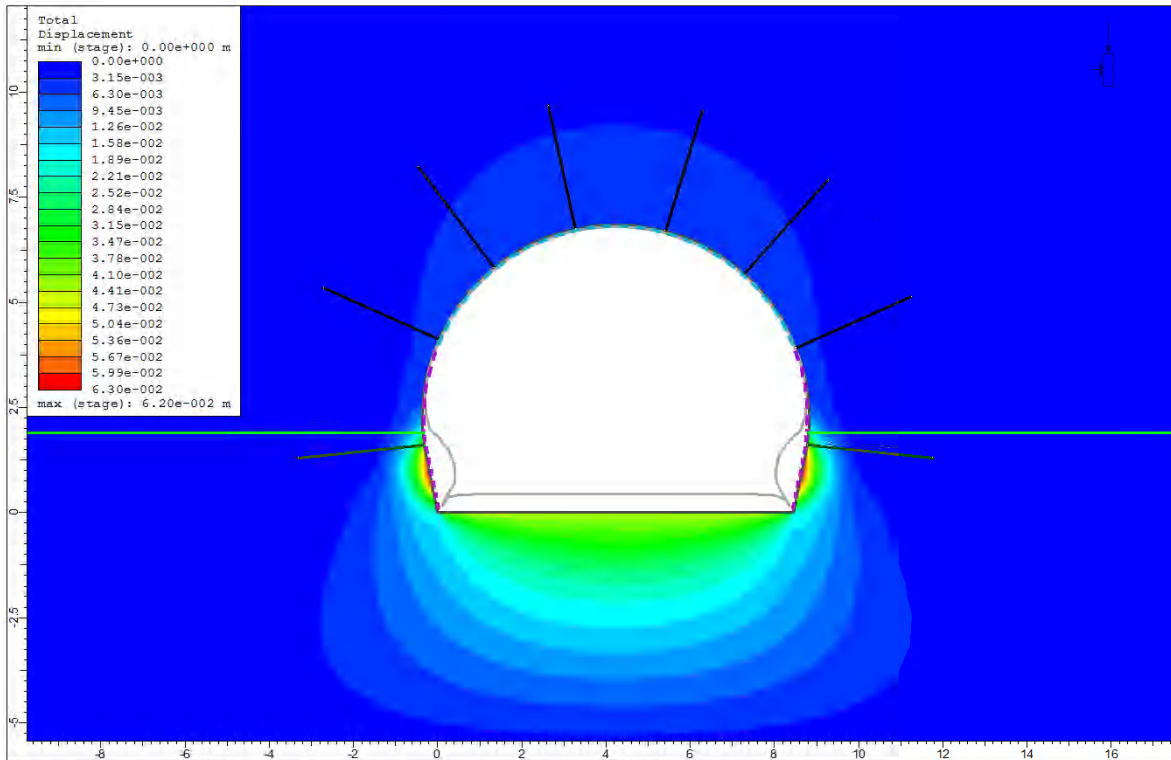


Mynd 9.29 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 39,6 mm.

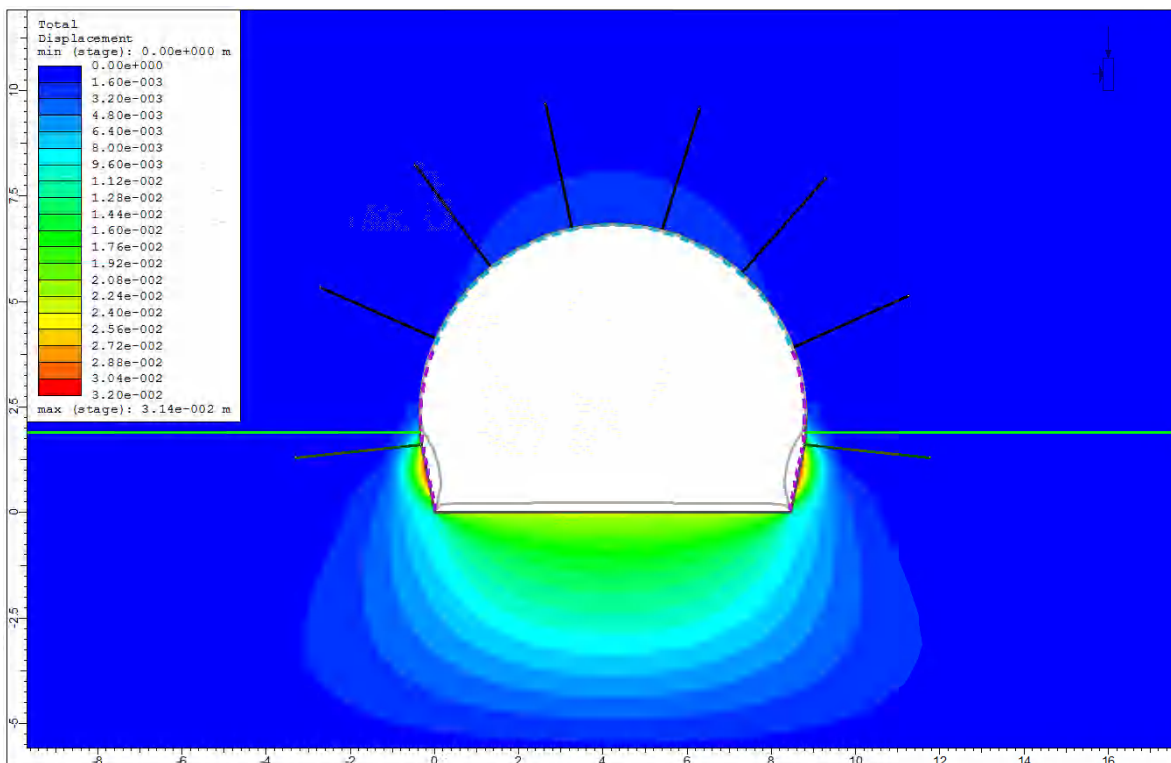


Mynd 9.30 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásaprýstistyrk basalts. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 61,2 mm.

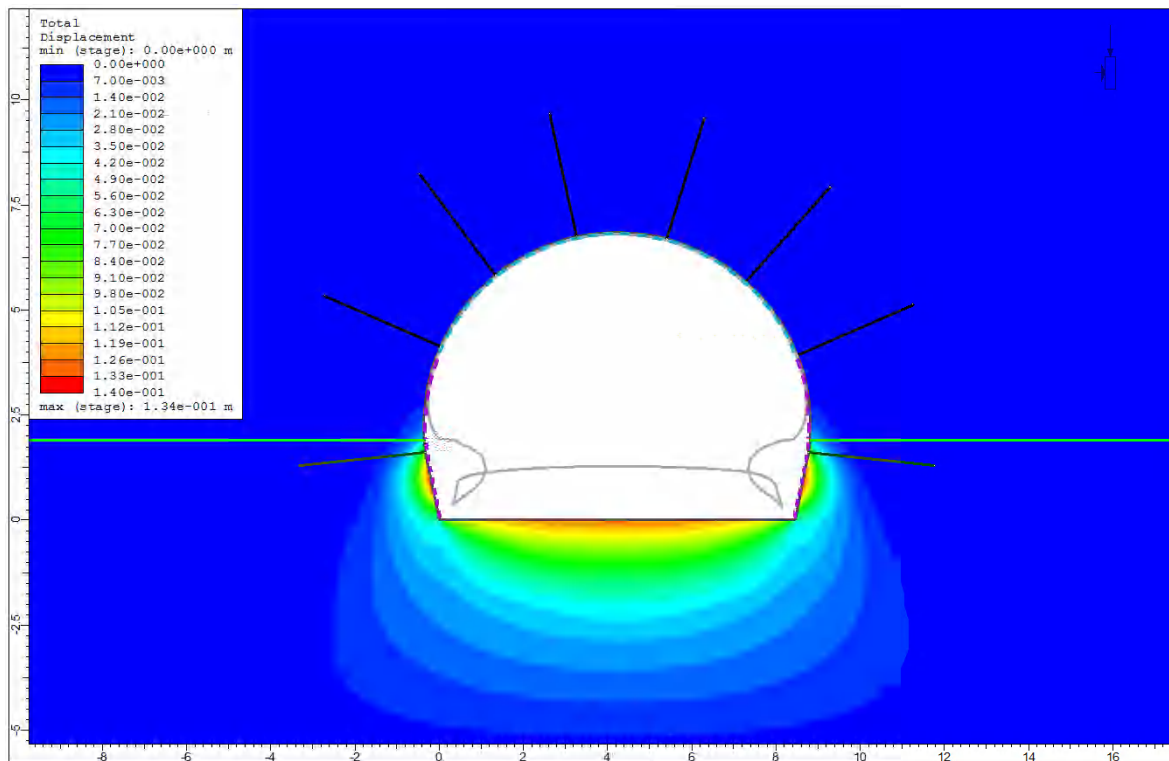




Mynd 9.31 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul basalts. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 62,0 mm.



Mynd 9.32 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi (basalt: GSI = 75, basaltkargi: GSI = 65). Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 31,4 mm.

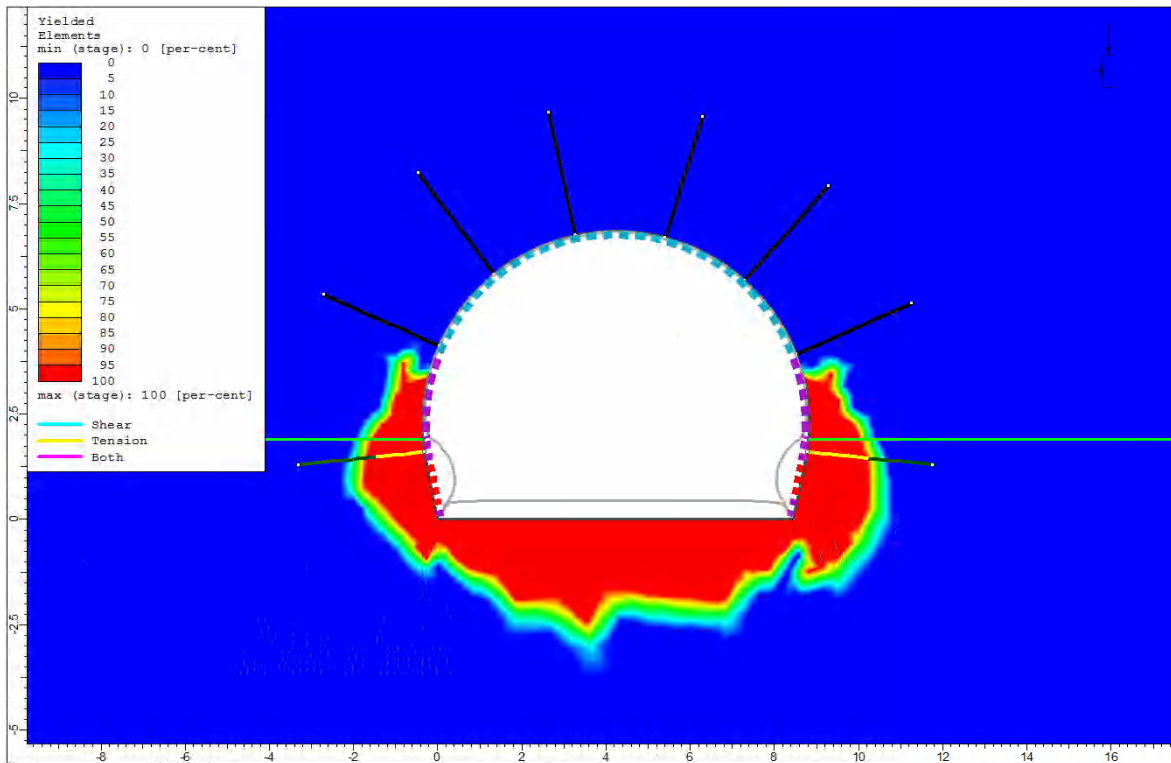


Mynd 9.33 Heildarbergfærslur í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi (basalt: GSI = 55, basaltkargi: GSI = 45). Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 134 mm.

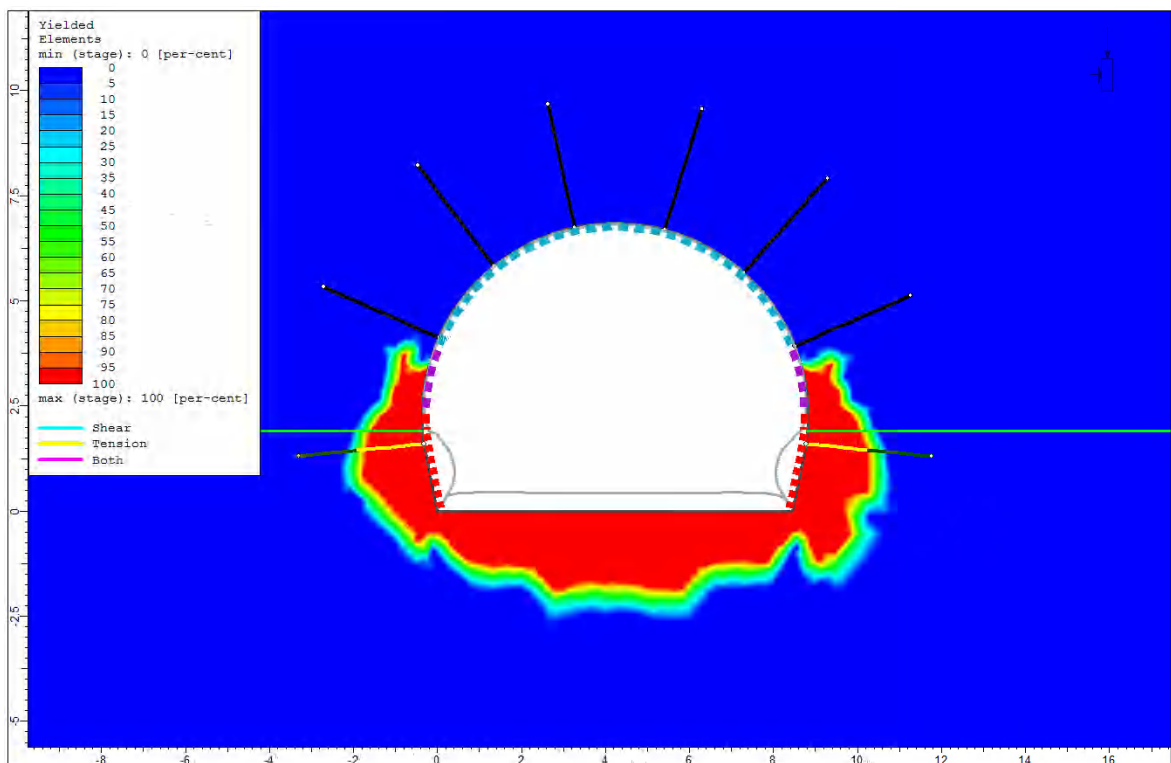
Myndir 9.34–9.40 sýna hnignar einingar í salva F377 miðað við þær forsendur sem tilgreindar eru í hverju líkani. Hlutfall hnigninna bergeininga er sýnt með litakvarða þar sem rauður litur táknar 100% hnig. Hnignar bergboltaeiningar eru sýndar með gulum lit og hnigin sprautusteypa með rauðum. Hnignum einingum fækkar mjög þegar einásaprýstistyrkur basaltkargans er aukinn (mynd 9.36) og þegar GSI-gildi bergsins er hækkað um 10 (mynd 9.39). Að sama skapi fjölgar hnignum einingum þegar GSI-gildið er lækkað (mynd 9.40) en lækkun á styrk þóleiít-basalts hefur nær engin áhrif (mynd 9.37).

Vert er að geta þess að hin fulla viðloðun bergbolta vegna grautunar gerir það að verkum að þeir veita berginu stuðning jafnvel þótt einstakir hlutar þeirra hnígi.

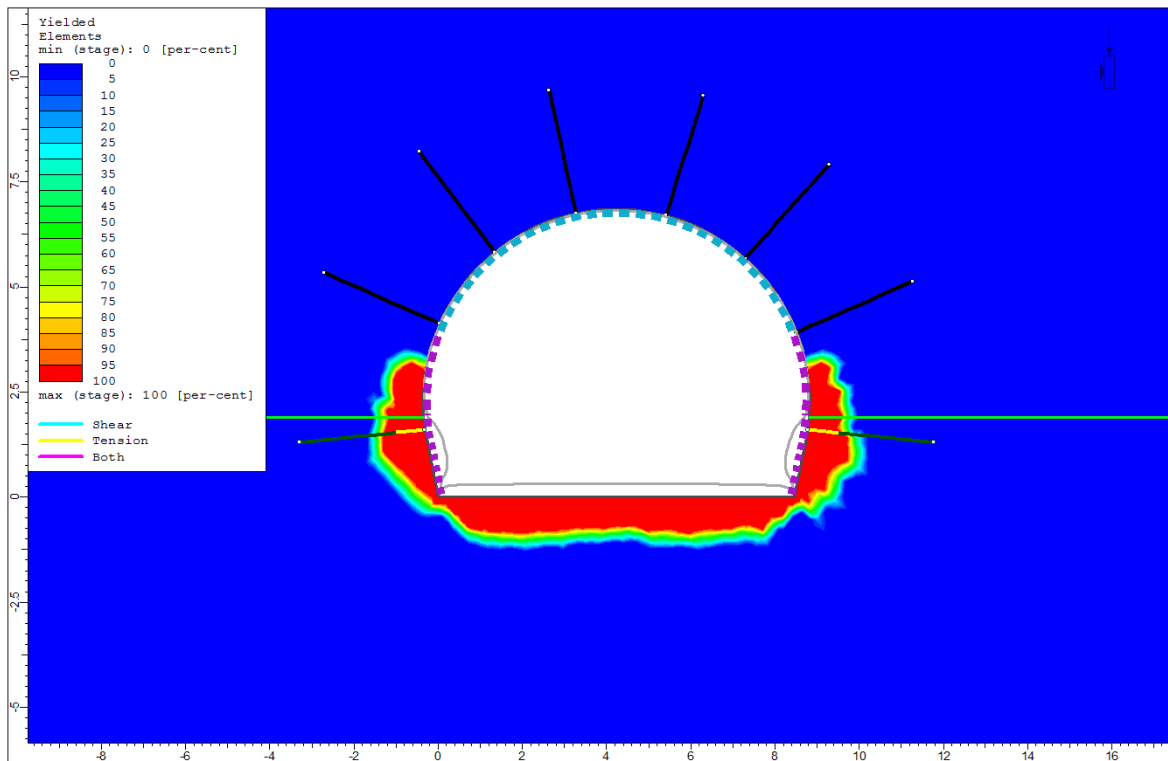




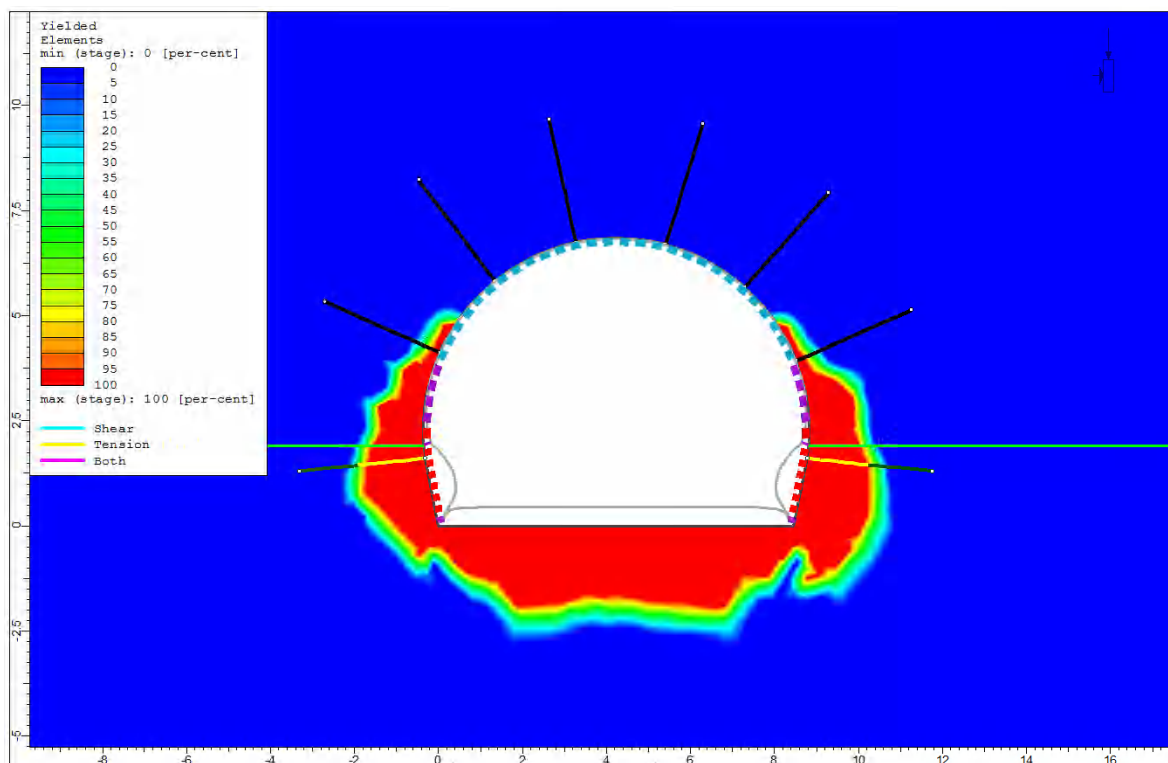
Mynd 9.34 Hnignar einingar í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Hnignir boltahlutar eru 17 (gulir) og hnignar sprautusteypuæiningar eru 9 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 428.



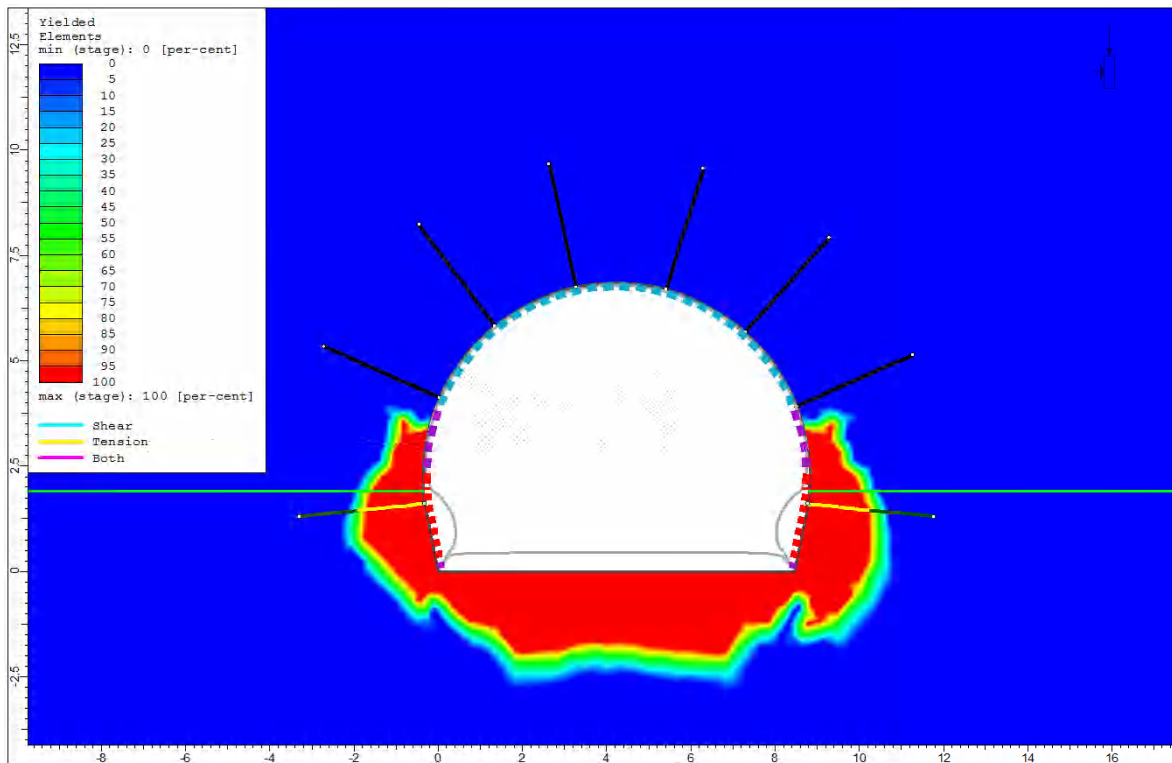
Mynd 9.35 Hnignar einingar í salva F377 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu. Hnignir boltahlutar eru 18 (gulir) og hnignar sprautusteypuæiningar eru 21 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 417.



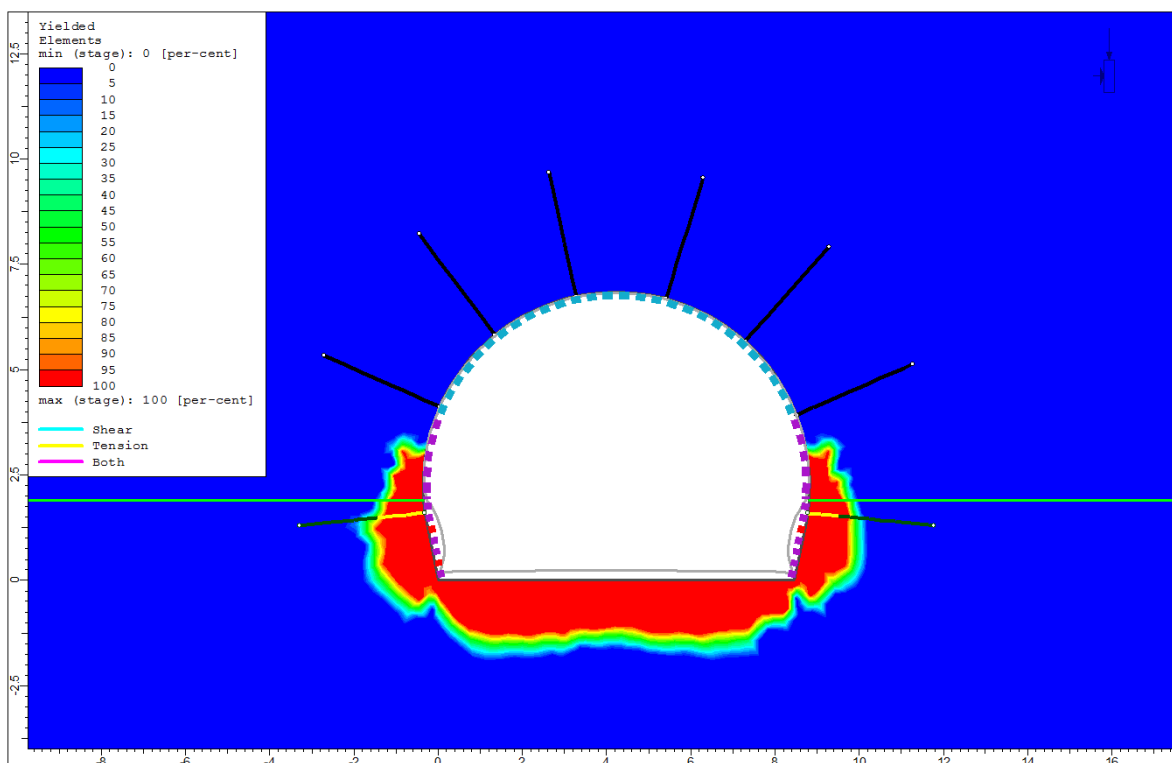
Mynd 9.36 Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Hnignir boltahlutar eru 9 (gulir) en sprautusteypan hnígur ekki. Hnignar bergeningar eru 313.



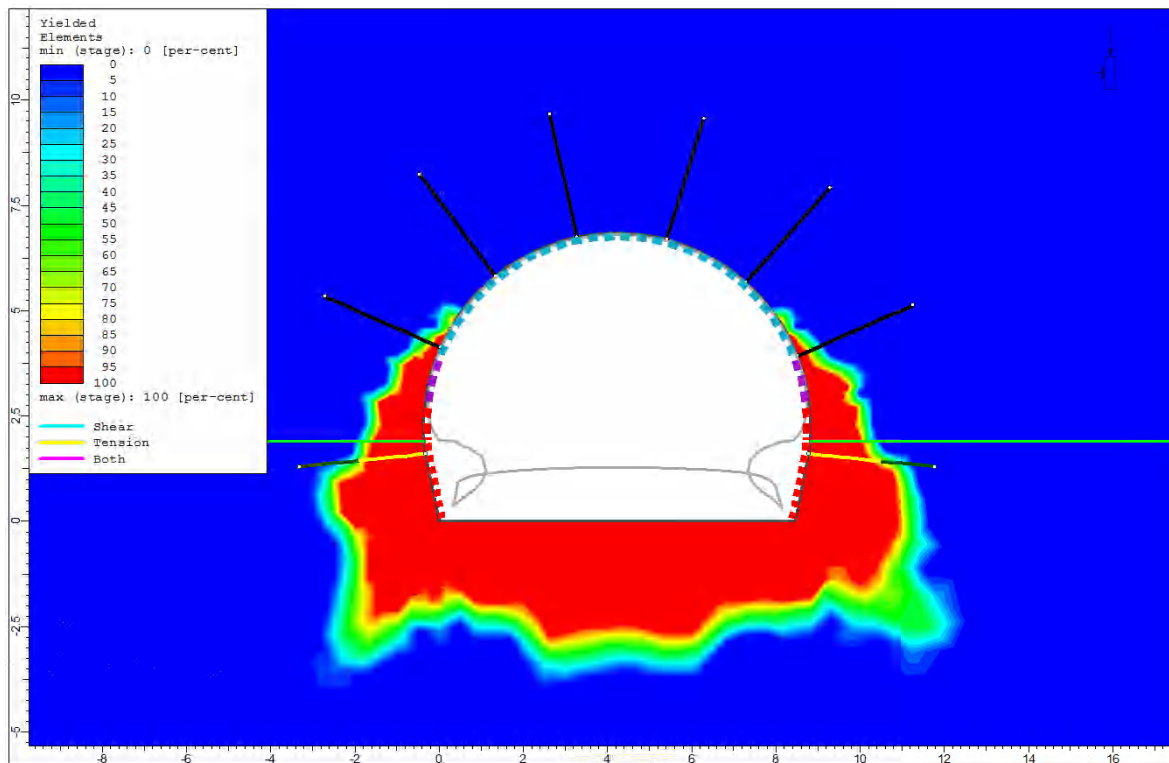
Mynd 9.37 Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásaprýstistyrk basalts. Hnignir boltahlutar eru 18 og hnignar sprautusteypueningar eru 16 (rauðar). Hnignar bergeningar eru 449.



Mynd 9.38 Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul basalts. Hnignir boltahlutar eru 18 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 19 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 424.

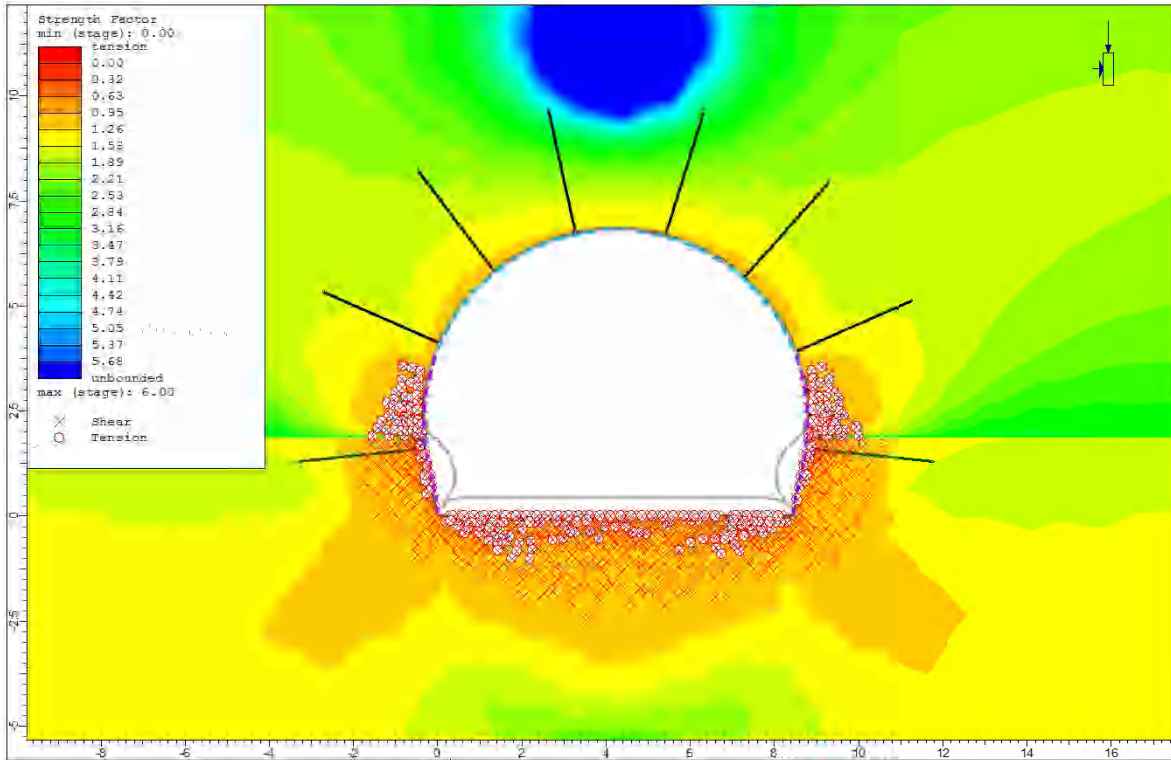


Mynd 9.39 Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi. Hnignir boltahlutar eru 11 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 5 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 359.

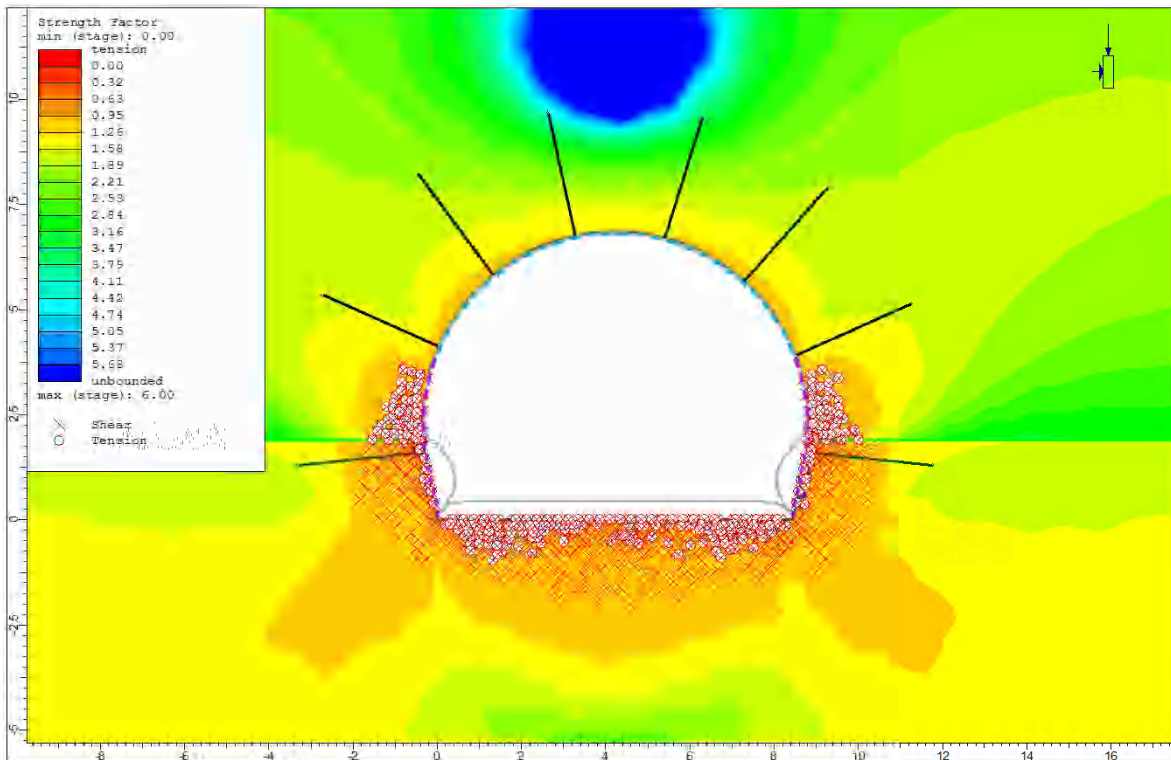


Mynd 9.40 Hnignar einingar í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi. Hnignir boltahlutar eru 19 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 24 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 501.

Myndir 9.41–9.47 sýna styrkstuðla bergsins (e. strength factor) og þá gerð álags sem veldur broti í hverri bergeiningu. Skúfálag er táknað með x og togálag með o. Gera má ráð fyrir að einingar sem hafa  $SF < 1$  hnígi. Greinilegt er að styrkstuðlar hækka með hærri einásaprýstistyrk basaltkarga og hærri GSI-gildum. Lækkun einásaprýstistyrks þóleítt-basalts hefur umtalsverð áhrif á styrkstuðla og þótt hnignum bergeiningum fjölgi aðeins um 5,4% frá grunnlíkaninu stækkar óstöðuga svæðið í veggjum ganganna töluvert.

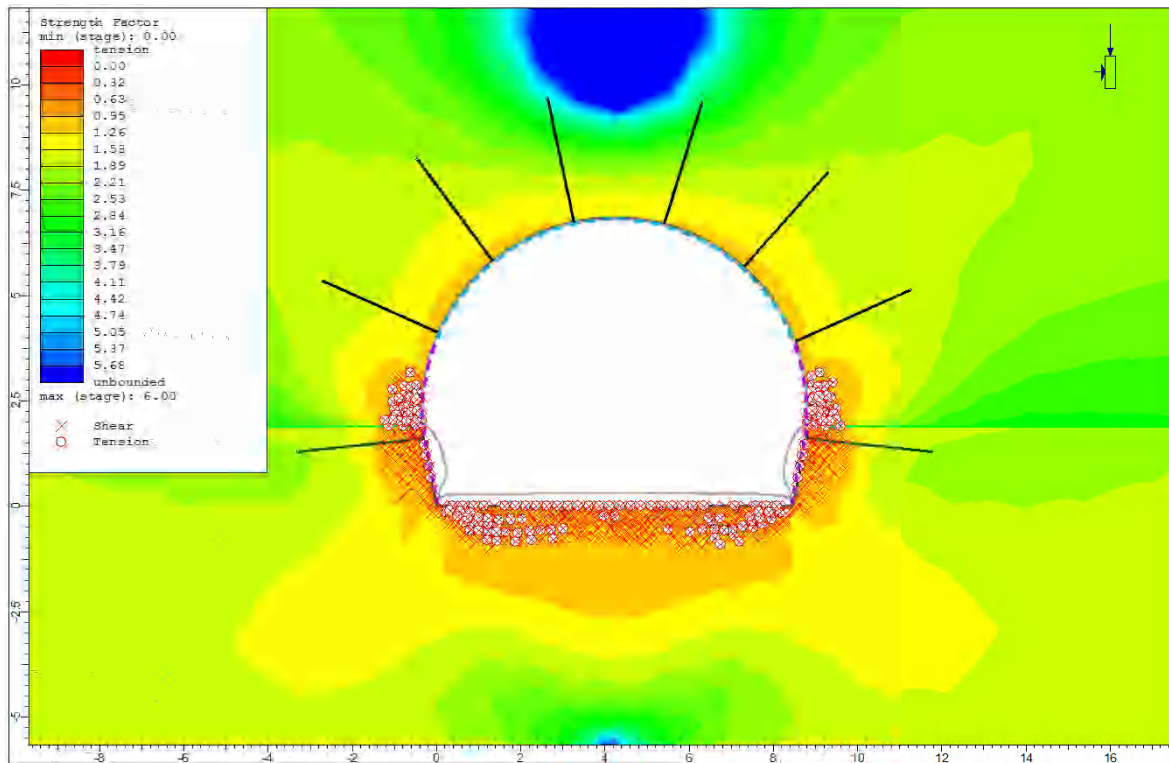


Mynd 9.41 Styrkstuduðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Gera má ráð fyrir að einingar með  $SF < 1$  hnígi. Skúfálag er táknað með  $x$  og togálag með  $o$ .

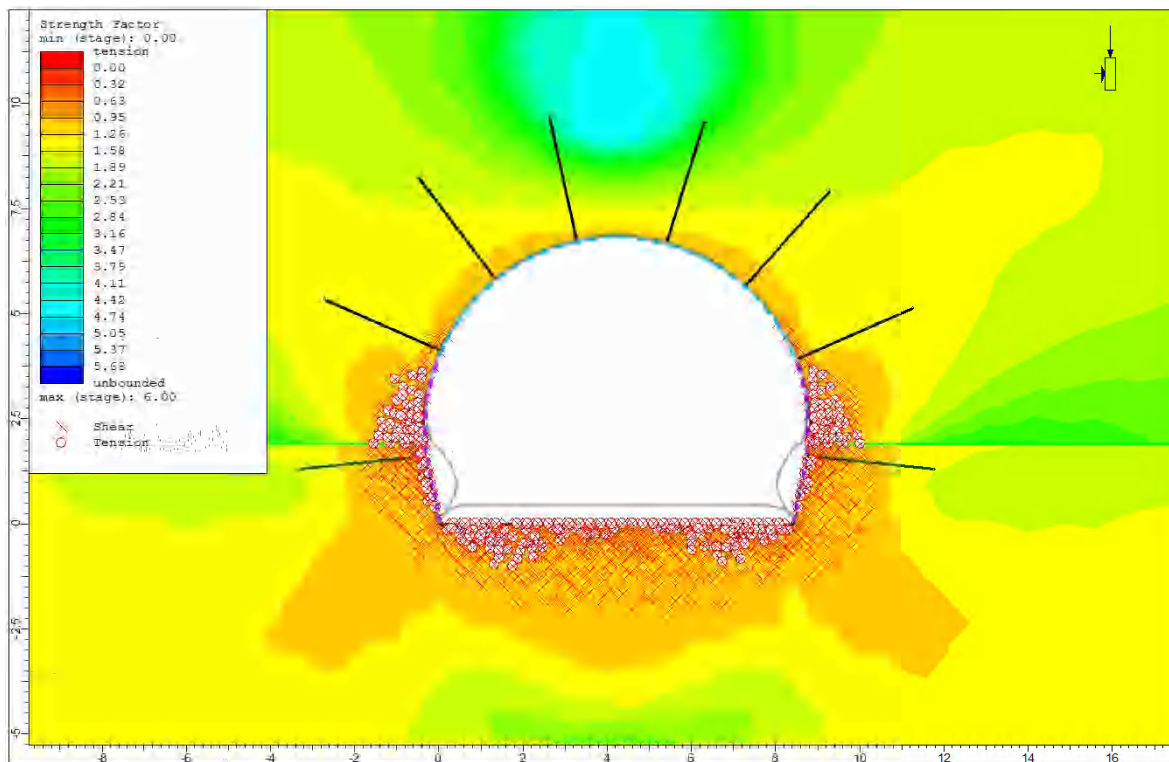


Mynd 9.42 Styrkstuduðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu. Gera má ráð fyrir að einingar með  $SF < 1$  hnígi. Skúfálag er táknað með  $x$  og togálag með  $o$ .

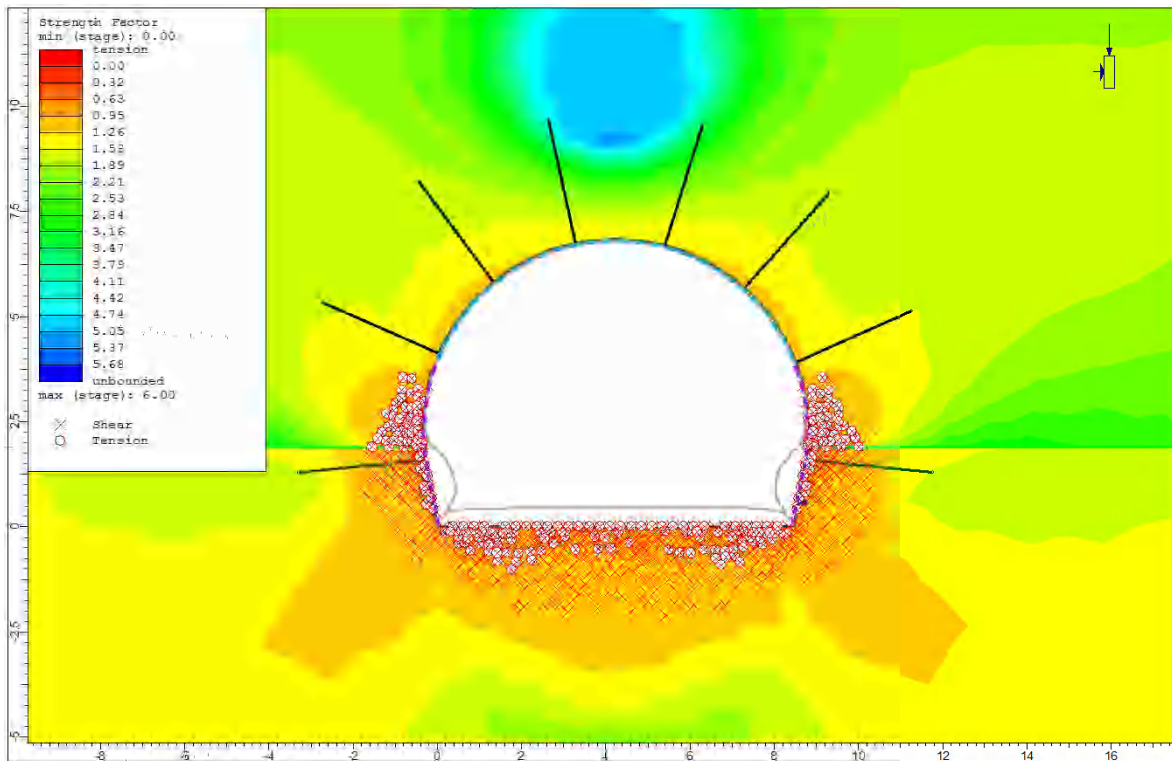




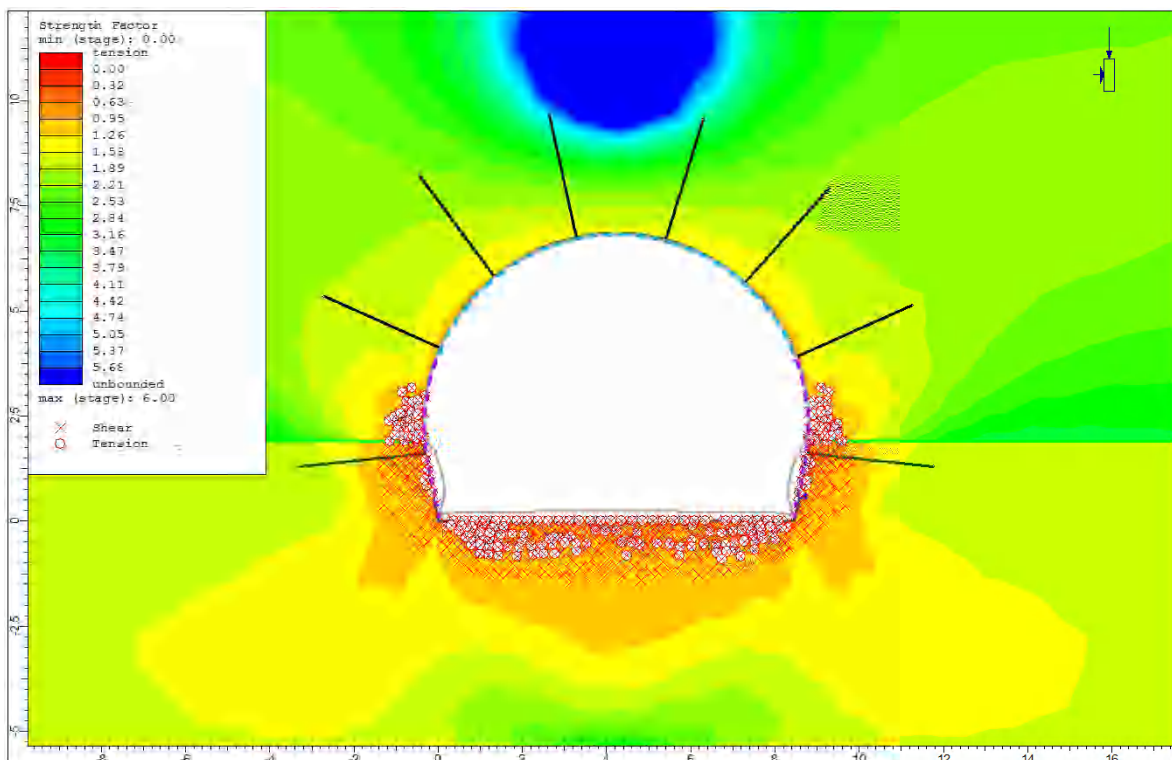
Mynd 9.43 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Gera má ráð fyrir að einingar með  $SF < 1$  hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.



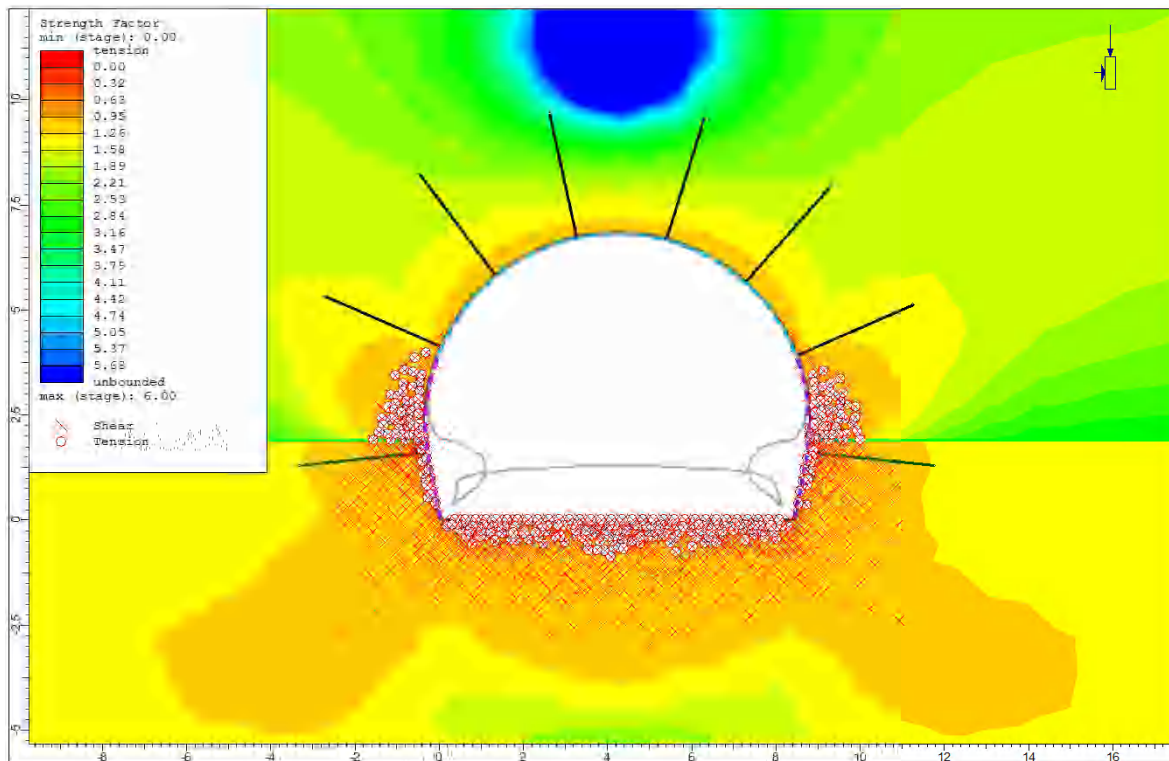
Mynd 9.44 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 100 MPa einásaprýstistyrk þóleiút-basalts. Gera má ráð fyrir að einingar með  $SF < 1$  hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.



Mynd 9.45 Styrkstuduðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 20 GPa fjaðurstuðul þóleitt-basalts. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.



Mynd 9.46 Styrkstuduðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.



Mynd 9.47 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.

Helstu niðurstöður líkanreikninga fyrir salva F377 eru teknar saman í töflu 9.54. Þar má einnig sjá þær færslur sem bergstyrkingarnar þurfa að þola skv. hverju líkani. Sé miðað við að styrkingarnar þoli að hámarki 12,5 mm færslur má gera ráð fyrir að styrkingar gefi sig í öllum tilvikum að undanskildu því þegar einásaprýstistyrkur basaltkargans er hækkaður í 50 MPa.

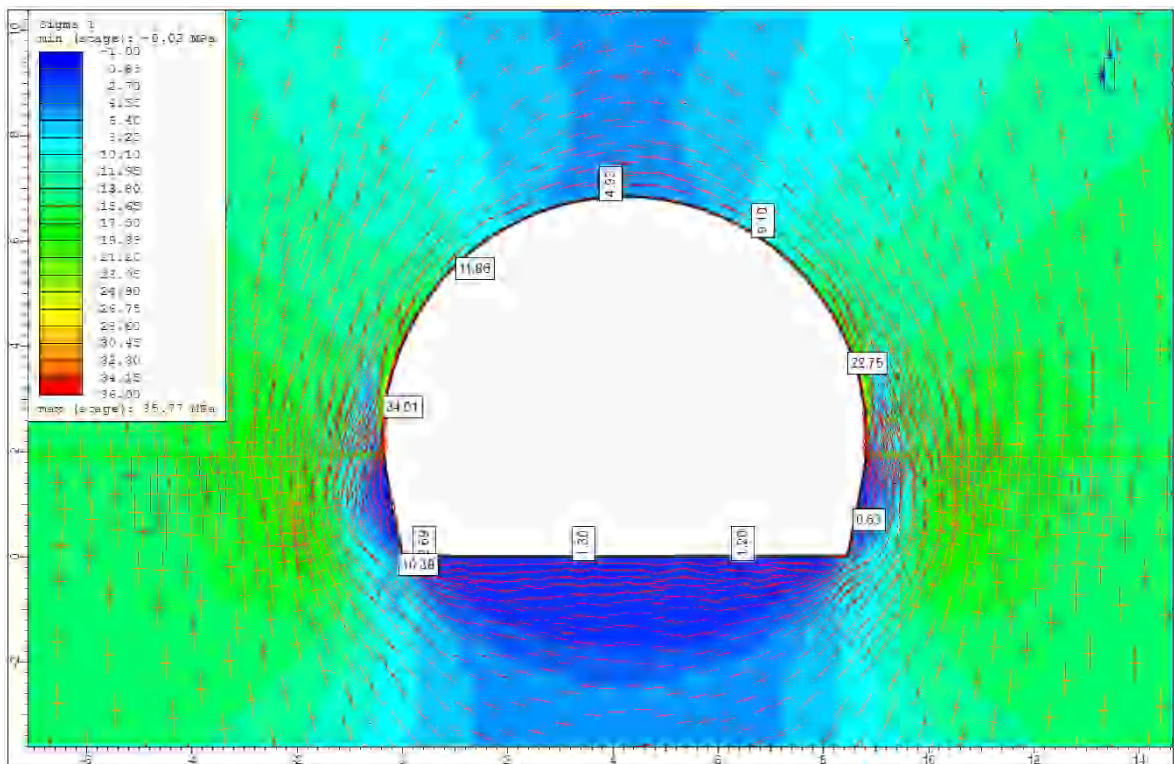
Tafla 9.54 Niðurstöður líkanreikninga fyrir salva F377. Fyrir og eftir miðast við uppsetningu bergstyrkinga.

Álagsdreifing [%]		Frávik frá grunnlíkani	Bergfærslur [cm]			Hnignar einingar		
fyrir	eftir		fyrir	eftir	heild	berg	boltar	steypa
80	20	grunnlíkan	4.16	1.94	6.10	428	17	9
50	50	grunnlíkan	2.04	3.97	6.01	417	18	21
80	20	kargi $\sigma_{ci} = 50$ MPa	2.91	1.05	3.96	313	9	0
80	20	basalt $\sigma_{ci} = 100$ MPa	3.50	2.62	6.12	449	18	16
80	20	basalt $E_i = 20$ GPa	3.57	2.63	6.20	424	18	19
80	20	GSI +10	1.82	1.32	3.14	359	11	5
80	20	GSI -10	7.85	5.55	13.4	501	19	24

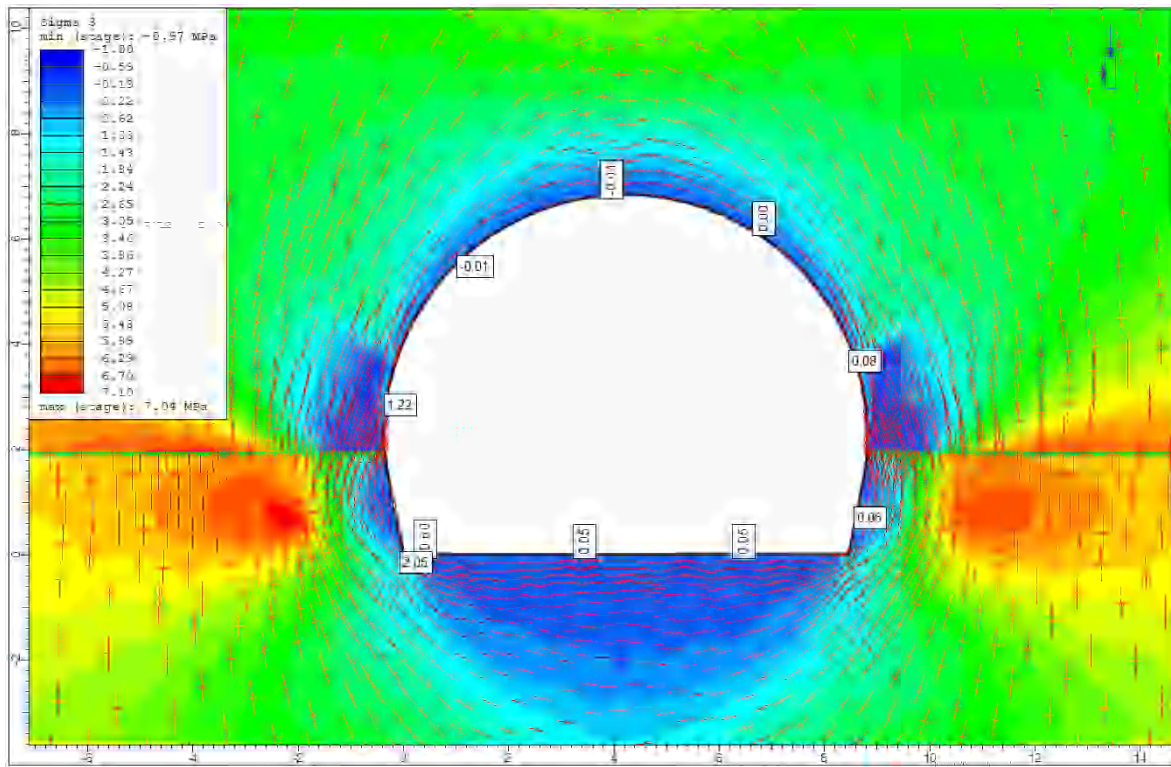


## Bergspennur í salva F377

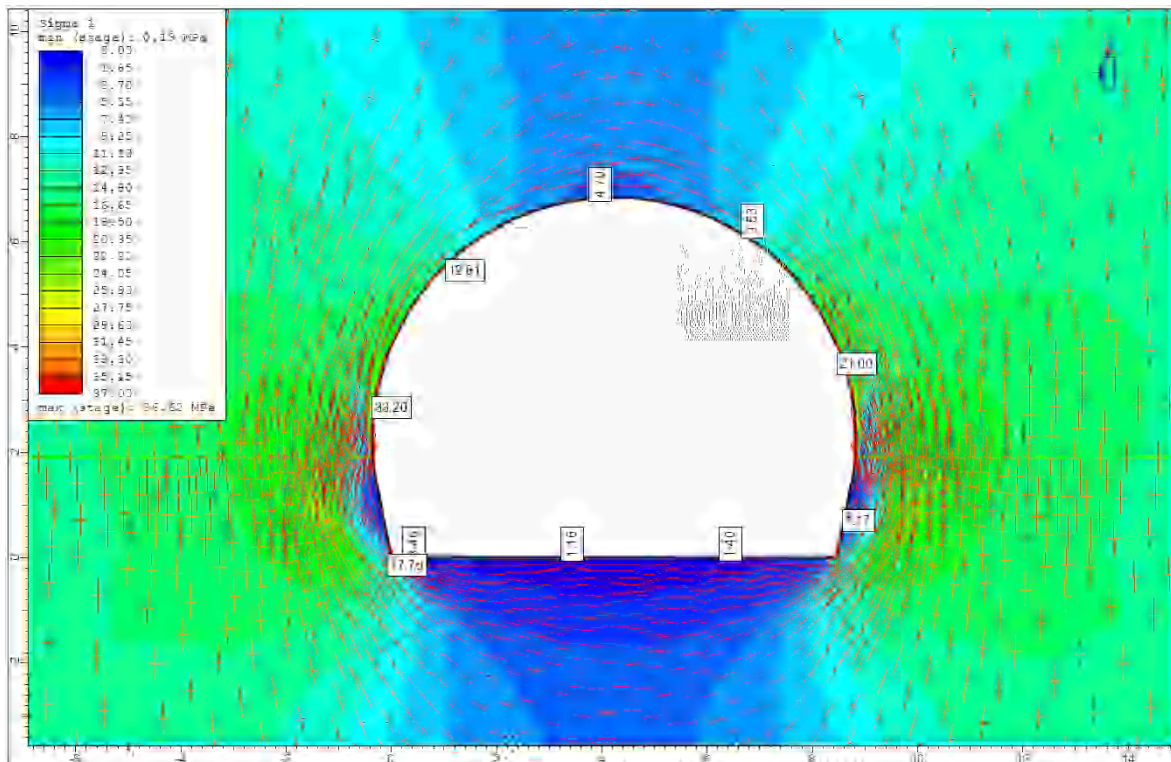
Í því skyni að kanna réttmæti líkanreikninga m.t.t. útreikninga á bergspennum má skoða hvort spennuástand bergsins eftir gangagröftrinn sé sambærilegt við það sem jöfnur (6.12)–(6.18) gefa. Myndir 9.48 og 9.49 sýna lóðréttar og láréttar spennur umhverfis göngin ásamt aflögun spennusviðsins miðað við óstyrkt grunnlíkan af salva F377. Á myndunum má einnig sjá spennugildi fyrir valda staði við yfirborð ganganna. Þegar einásáþrýstistyrkur basaltkargans er aukinn í 50 MPa fæst það spennuástand sem sjá má á myndum 9.50 og 9.51. Áberandi er hve háar láréttar spennur reiknast í basaltkarganum í um 2 m fjarlægð frá yfirborði ganganna.



Mynd 9.48 Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt grunnlíkan. Hæstu spennurnar (35,8 MPa) mælast í gangaveggjunum. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.

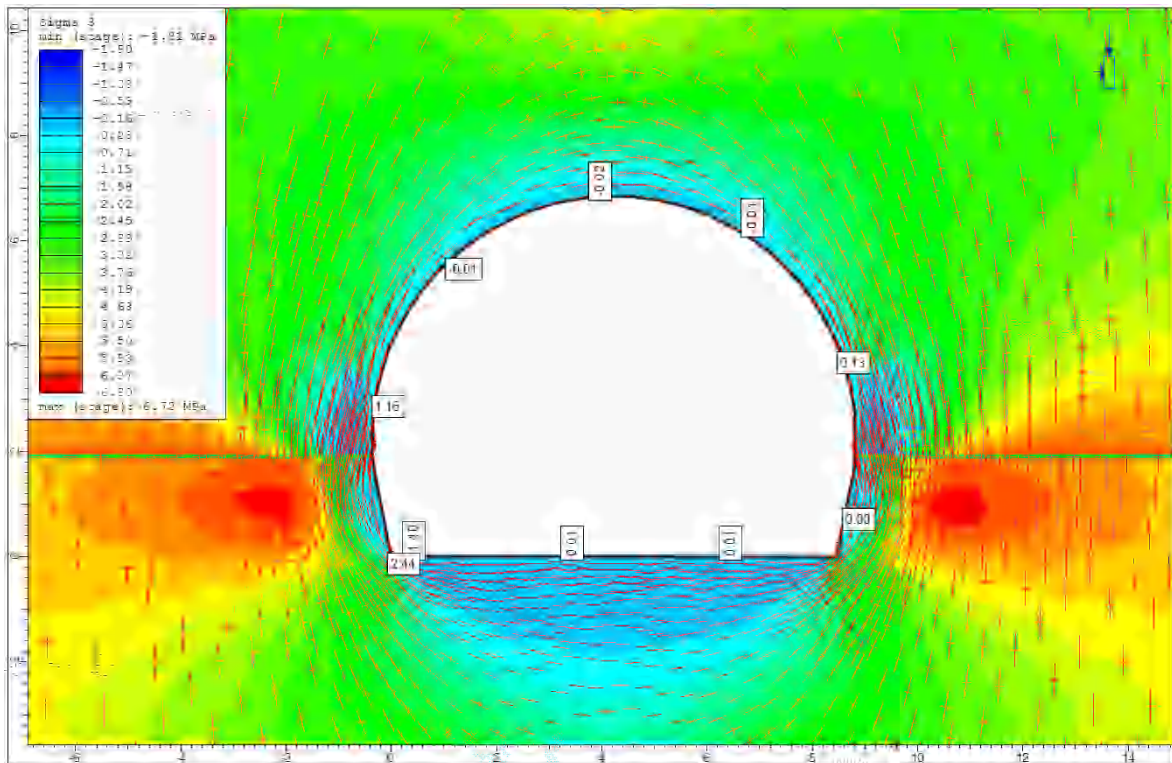


Mynd 9.49 Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt grunnlíkan. Spennurnar eru mjög lágar við yfirborð ganganna. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.



Mynd 9.50 Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Hæstu spennurnar (36,6 MPa) mælast í gangaveggjunum. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.





Mynd 9.51 Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva F377 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaþrýstistyrk basaltkarga. Spennurnar eru mjög lágar á yfirborð ganganna. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.

Tafla 9.55 sýnir samanburð á bergspennum miðað við líkanreikninga og miðað við jöfnur (6.12)–(6.18).  $k$ -gildi jarðlagastafans er reiknað með jöfnu (6.2) út frá spennugildum í töflu 9.43. Þá fæst  $k = 0,366$ . Miðað er við að  $W = 9,2$  m og  $H = 6,85$  m.

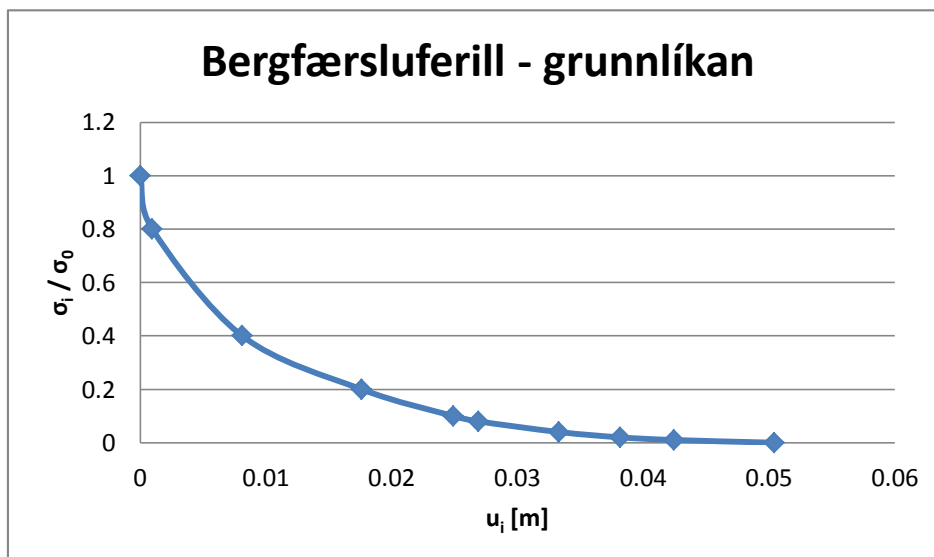
Tafla 9.55 Samanburður á bergspennum skv. grunnlíkani og jöfnum (6.12)–(6.18).

Viðmið við spennuútreikninga	$\sigma_r$ [MPa]		$\sigma_t$ [MPa]	
	veggir	þekja	veggir	þekja
Líkan	1,2	4,9	35,8	-0,0
Kirsch-jöfnur	0	0	38,5	1,4
Ellipsujöfnur	-	-	48,5	-1,3

Eins og taflan sýnir eru spennugildin af sambærilegri stærðargráðu þótt munurinn á einstökum gildum geti verið margfoldur. Þar sem jöfnurnar miðast við verulega einfölduð tilvik má ætla að spennurnar sem líkanið reiknar við yfirborð ganganna séu raunhæfar.

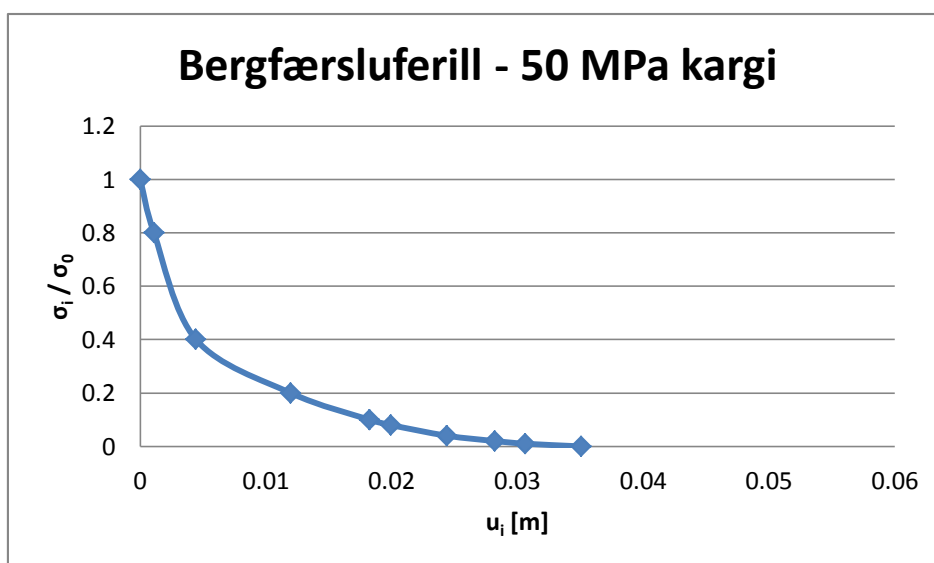
### Bergfærsluferlar (GRC) í salva F377

Eins og myndir 9.27–9.33 sýna eru bergfærslurnar mestar í basaltkarganum. Þegar hornrétt þrýstispenna á óstyrkt yfirborð ganganna ( $\sigma_i$ ) er látin falla í þrepum frá upprunalegri þrýstispennu ( $\sigma_0$ ) niður í núll fæst eftirfarandi bergfærsluferill fyrir grunnlíkanið í þeim punkti sem bergfærslur reiknast mestar. Bergfærsluferillinn eru útbúinn í samræmi við aðferðina sem lýst er kafla 24 í leiðbeiningum með  $RS^2$  (Rocscience, 2015).



Mynd 9.52 Bergfærsluferill grunnlíkans fyrir salva F377. Grafið sýnir hvernig bergfærslur aukast samfara lækkandi þrýstispennum á yfirborð ganganna.

Fyrir sama punkt fæst bergfærsluferillinn sem sýndur er á mynd 9.53 þegar einásapþrýstistyrkur basaltkargans er aukinn í 50 MPa.



Mynd 9.53 Bergfærsluferill miðað við 50 MPa einásapþrýstistyrk basaltkarga í salva F377. Grafið sýnir hvernig bergfærslur aukast samfara lækkandi þrýstispennum á yfirborð ganganna.

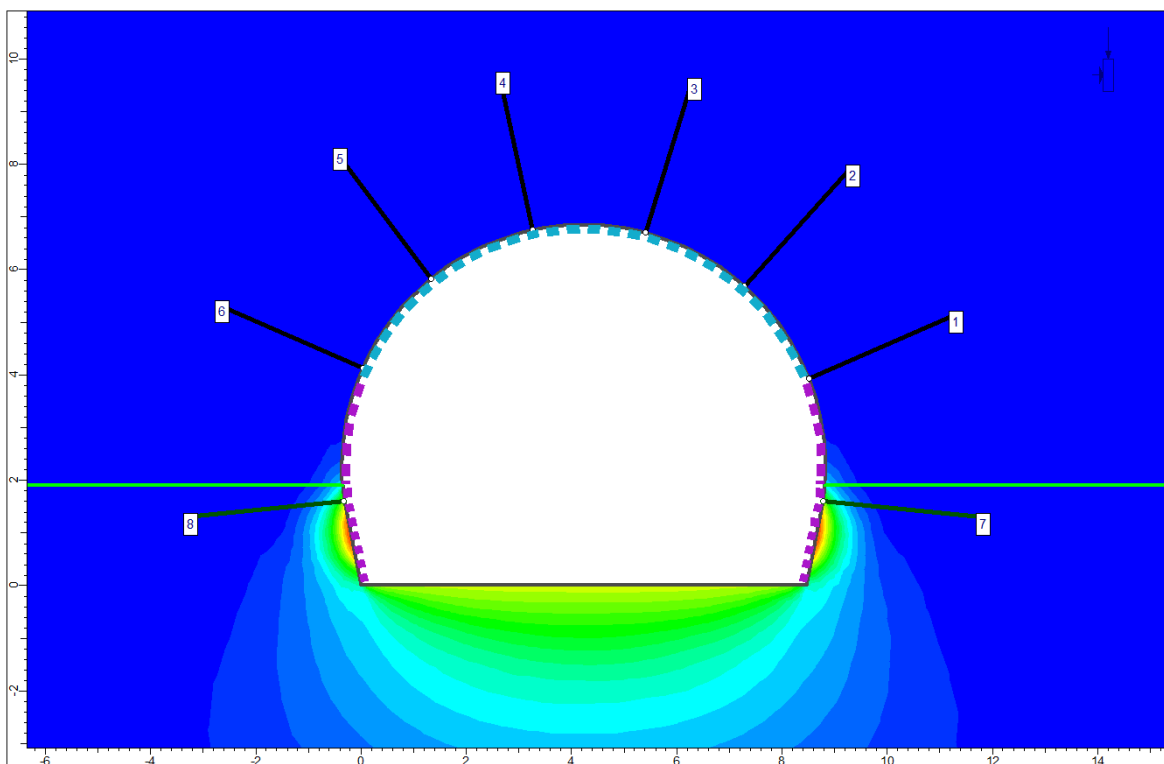
Þótt efri ferillinn sé nokkuð flatari má á báðum ferlum greina auknar bergfærslur eftir að þrýstispennan hefur fallið um 60%. Til þess að koma í veg fyrir óstöðugleika má ætla að bergstyrkingar þurfi að hafa náð fullri virkni áður en þrýstispennan hefur fallið um u.þ.b. 70%.

Athygli vekur að með þessari aðferð reiknast heildarbergfærslur lægri en gildin í töflu 9.54 gefa til kynna. Bergspennur á yfirborð ganganna eru hins vegar sambærilegar.

## Öryggi bergstyrkinga í salva F377

Í salva F377 er öryggi styrkinga skoðað fyrir þrjú líkön miðað við 80-20 álagsdreifingu. Í fyrstu er miðað við grunnlíkan, því næst líkan þar sem einásaprýstistyrkur basaltkarga er 50 MPa og að síðustu verstu líkanútkomuna þegar GSI-gildi eru lækkuð um 10.

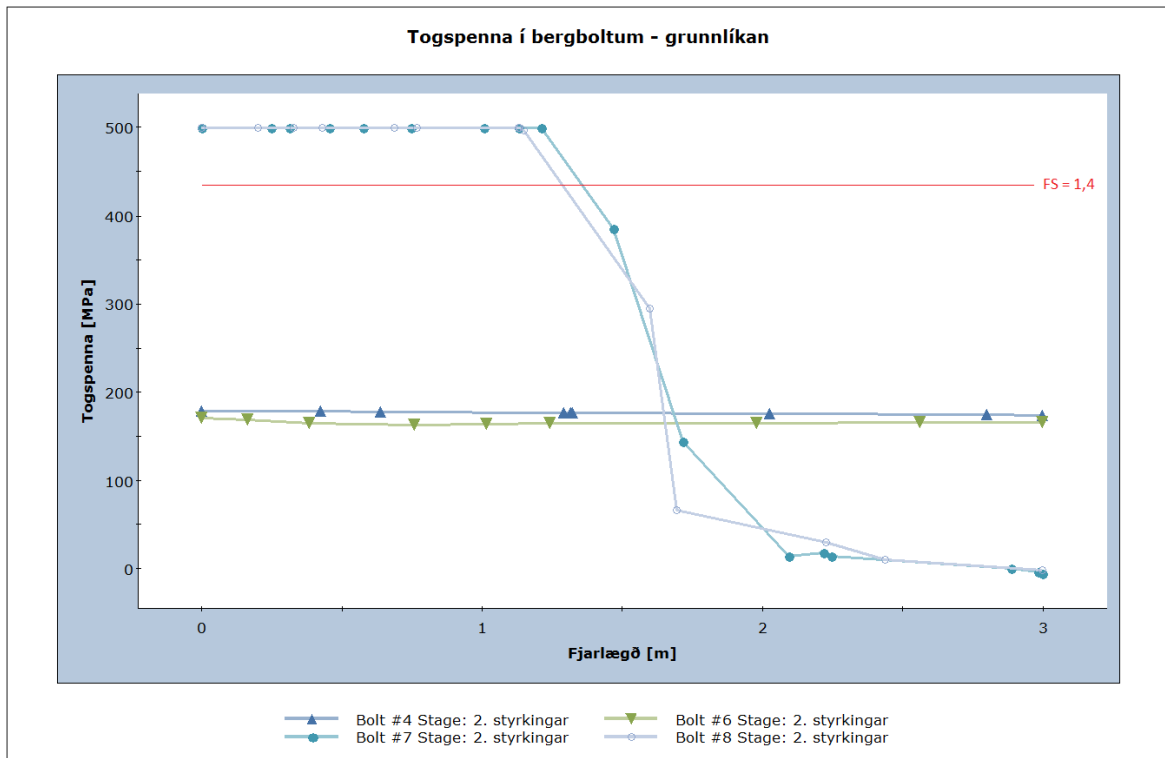
Ástæða er til að skoða togálagið á bergboltana í kargalaginu (nr. 7 og 8 á mynd 9.54) en þeir hníga að einhverju leyti í öllum líkönum. Til samanburðar verða boltar 4 og 6 teknir til skoðunar. Algeng viðmið fyrir öryggisstuðla gagnvart togálagi á bergbolta eru á bilinu 1,3–1,5 (Hoek, Kaiser & Bawden, 1995). Í kafla 24 í leiðbeiningum með  $RS^2$  (Rocscience, 2015) er miðað við öryggisstuðulinn 1,4 fyrir sprautusteypu og því er hann einnig hafður sem viðmið fyrir bergbolta. Til þess að bergboltar teljist öruggir ætti togálag því ekki að fara yfir 430 MPa miðað við 600 MPa togstyrk.



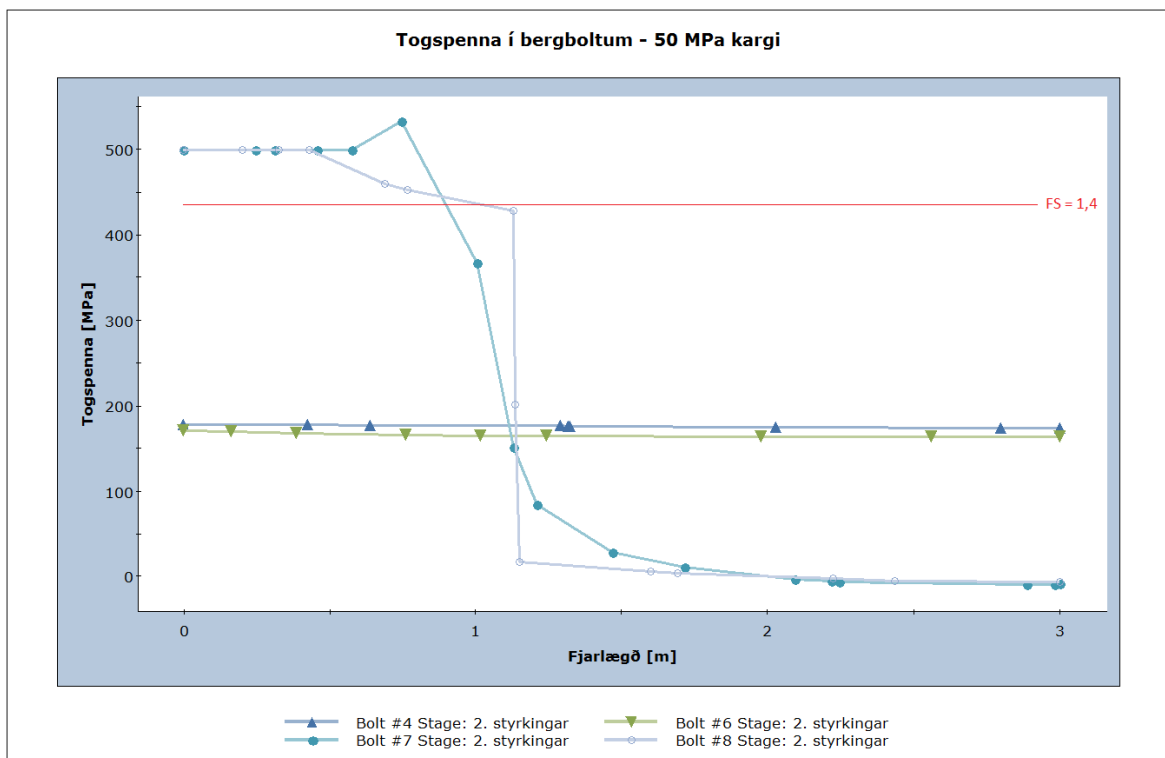
Mynd 9.54 Öryggi bergstyrkinga í salva F377 er kannað m.t.t. bergbolta 4, 6, 7 og 8 og sprautusteypu í veggjum (fjólubláar einingar) og þekju (bláar einingar).

Þegar togálagið sem bergboltar 4, 6, 7 og 8 verða fyrir samfara spennulosun bergsins er skoðað í salva F377 fást gröfin á myndum 9.55–9.57 fyrir líkönin þrjú. Í þeim einingum þar sem togspenna reiknast meiri en nemur togstyrk boltanna (600 MPa) miðast spennugildin við flotmörk boltanna og ferlarnir verða flatir í 500 MPa.

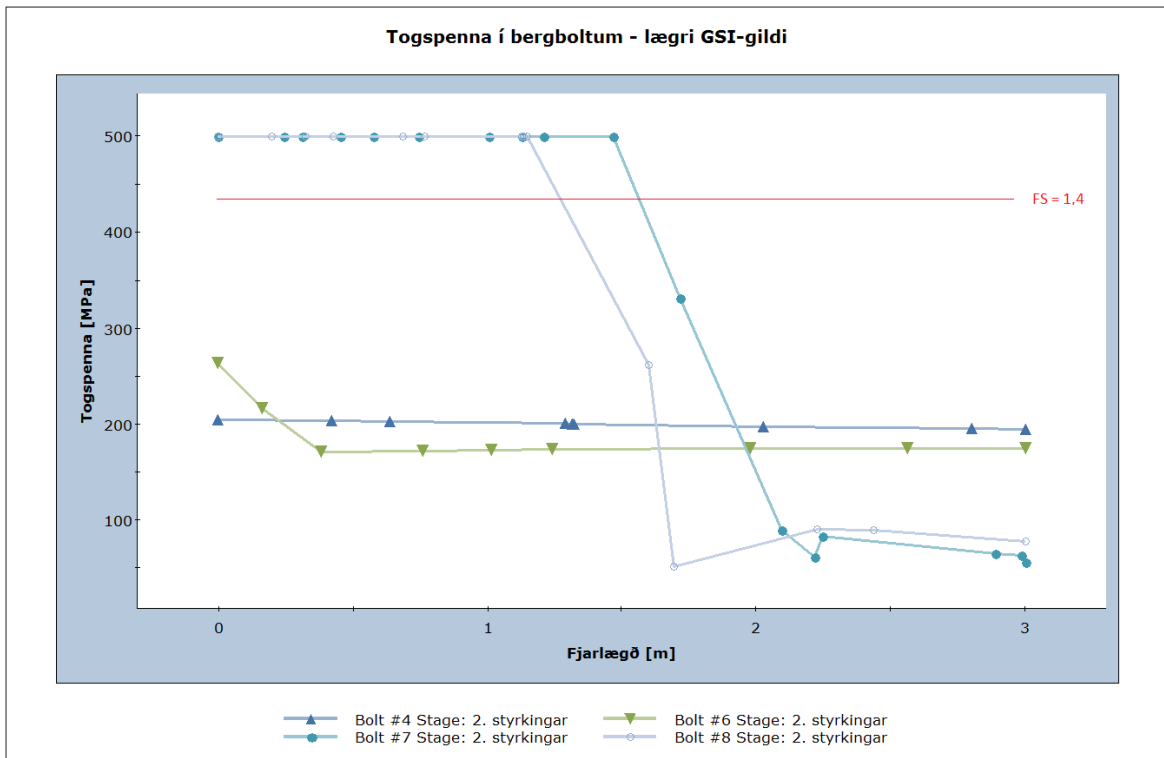
Greinilegt er að bergboltar 4 og 6 í þóleiít-basaltinu standast álagið mjög vel. Lægsti öryggisstuðullinn fyrir einstakar boltaeiningar er um 2,2 fyrir bolta nr. 6 í líkaninu þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10 (mynd 9.57). Bergboltar 7 og 8 í basaltkarganum hníga í öllum tilvikum næst yfirborði ganganna.



Mynd 9.55 Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 4, 6, 7 og 8 eru skoðaðir miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.



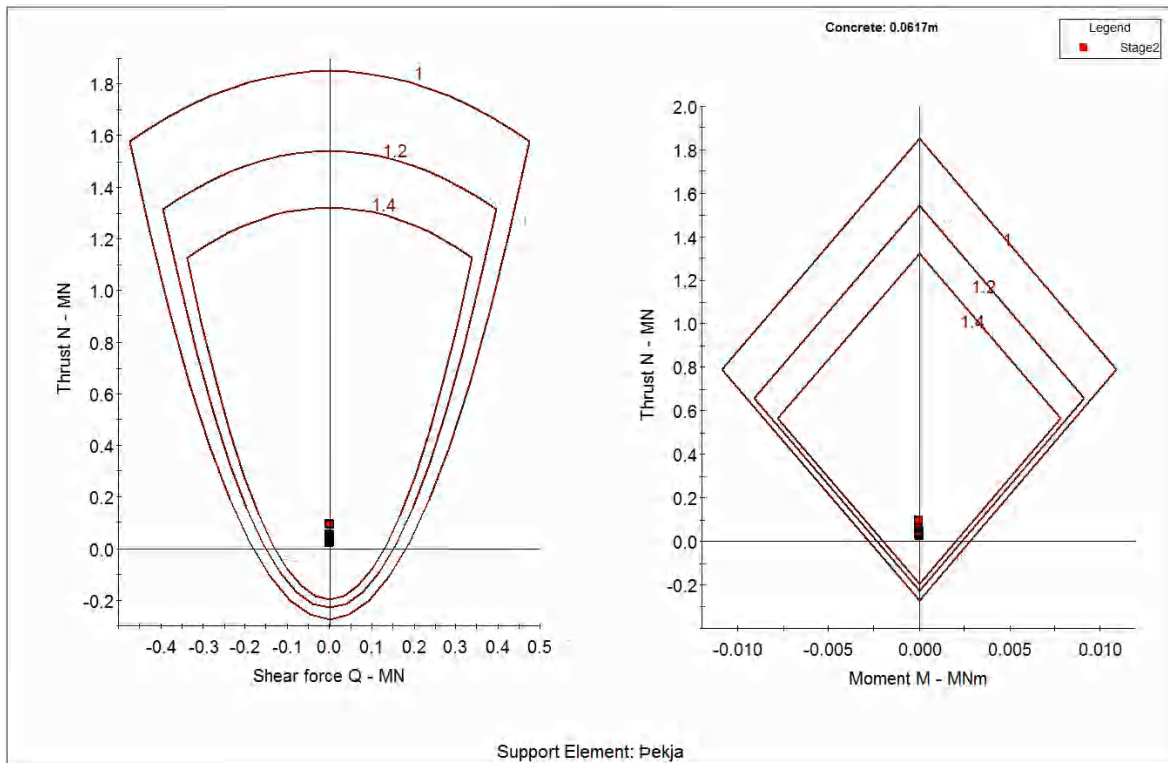
Mynd 9.56 Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 4, 6, 7 og 8 eru skoðaðir miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.



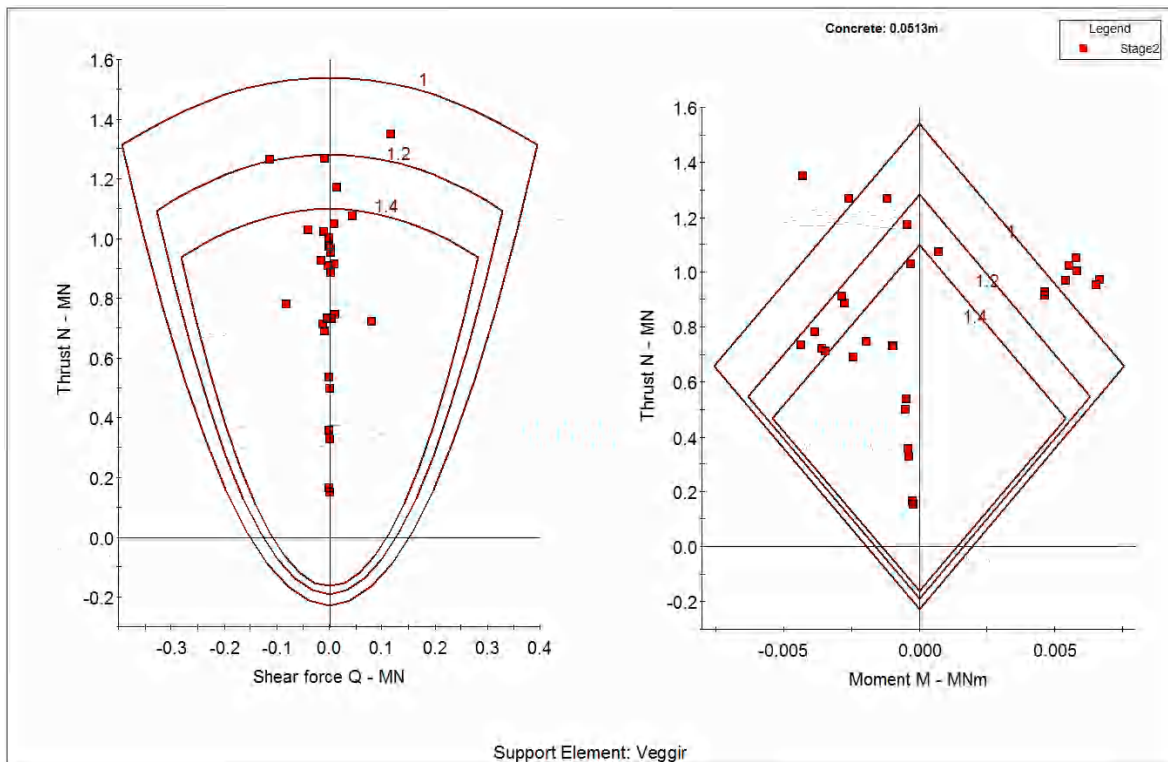
Mynd 9.57 Togspenna í bergboltum í salva F377 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 4, 6, 7 og 8 eru skoðaðir miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.

Sprautusteypueiningar eru greindar í samræmi við kafla 24 í leiðbeiningum með  $RS^2$  (Rocscience, 2015). Við greininguna er mikilvægt að skilgreina sprautusteypuna sem fjaðrandi efni en þannig fæst rétt mynd af öryggisstuðlum í stuðningsgetugröfum. Forritið teiknar upp skúfálag og beygjuvægi í hverri einingu á móti áslægum þrýstikrafti. Fari samband álagsþáttanna yfir þolmörk steypunnar í tiltekinni einingu telst hún hnigin. Við ákvörðun hniginna eininga miðar forritið við öryggisstuðulinn 1 en við mat á öryggi sprautusteypu þykir rétt að miða við stuðulinn 1,4. Myndir 9.58–9.63 sýna álag á sprautusteypu í þekju og veggjum í salva F377 ásamt lokuðum ferlum sem afmarka öryggisstuðla.

Í öllum tilvikum reynist sprautusteypa í þekju vel innan öryggisviðmiða. Í veggjum reynist öryggið minna, einkum gagnvart þrýstibroti vegna samspils beygjuvægis og áslægs þrýstikrafts. Í öllum líkönum lenda margar einingar fyrir utan rammann sem markar öryggisstuðulinn 1,4 gagnvart þess konar broti. Í líkaninu þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10 teljast mjög fáar einingar í veggjum öruggar.

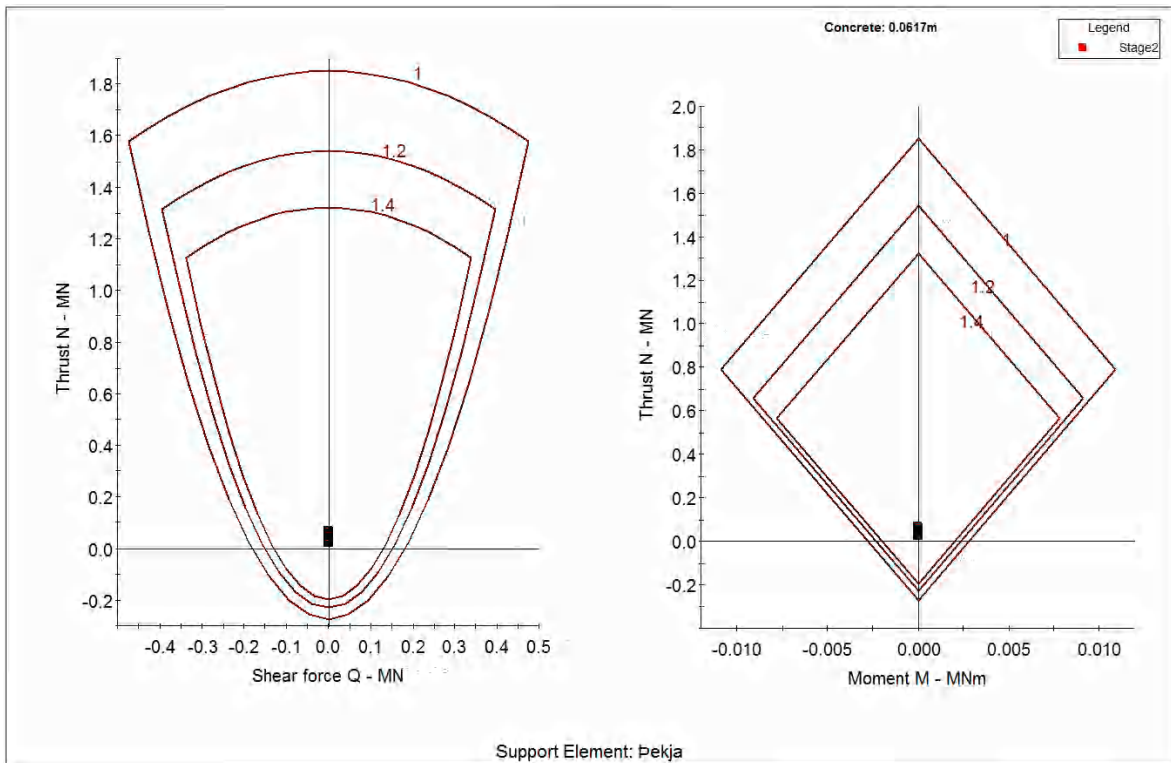


Mynd 9.58 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í þekju í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.

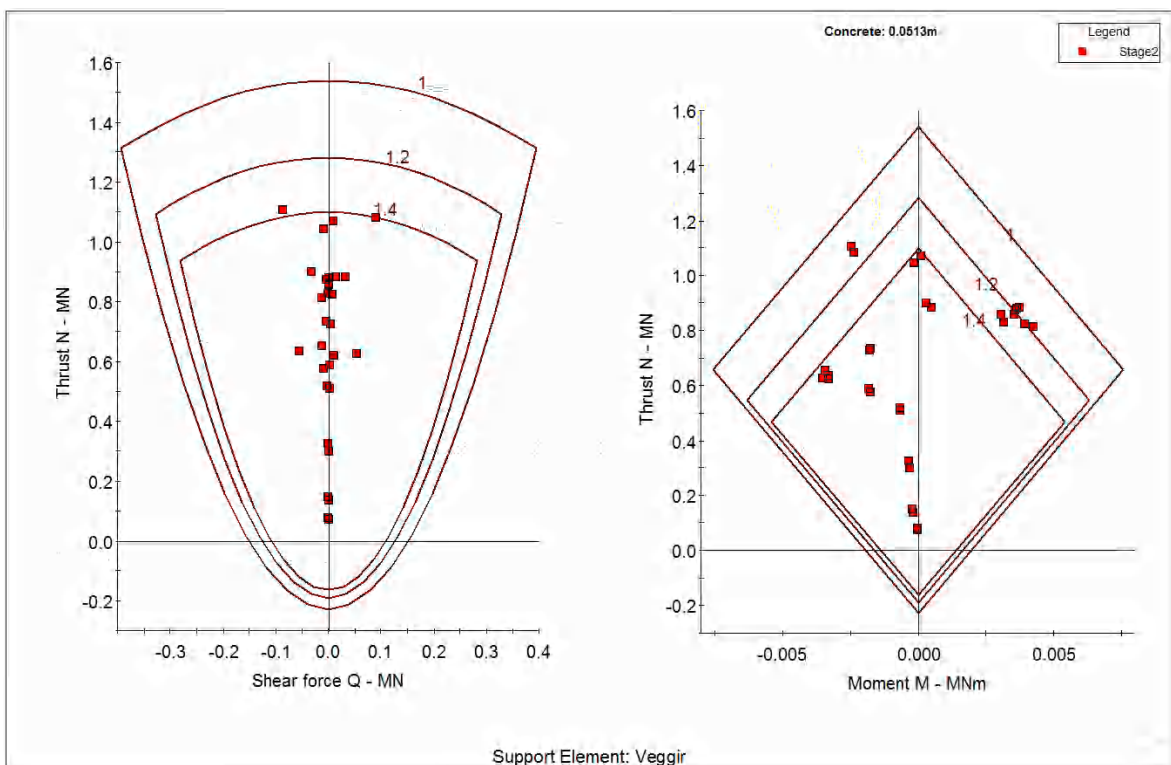


Mynd 9.59 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva F377 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.

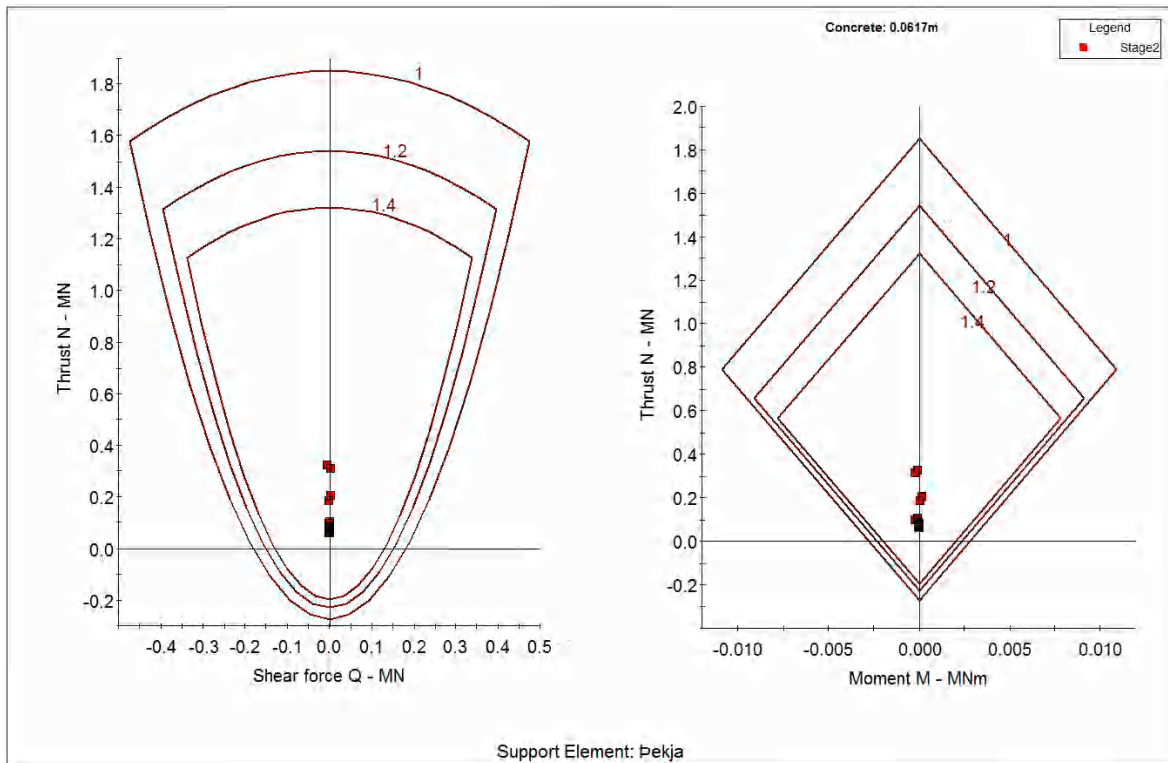




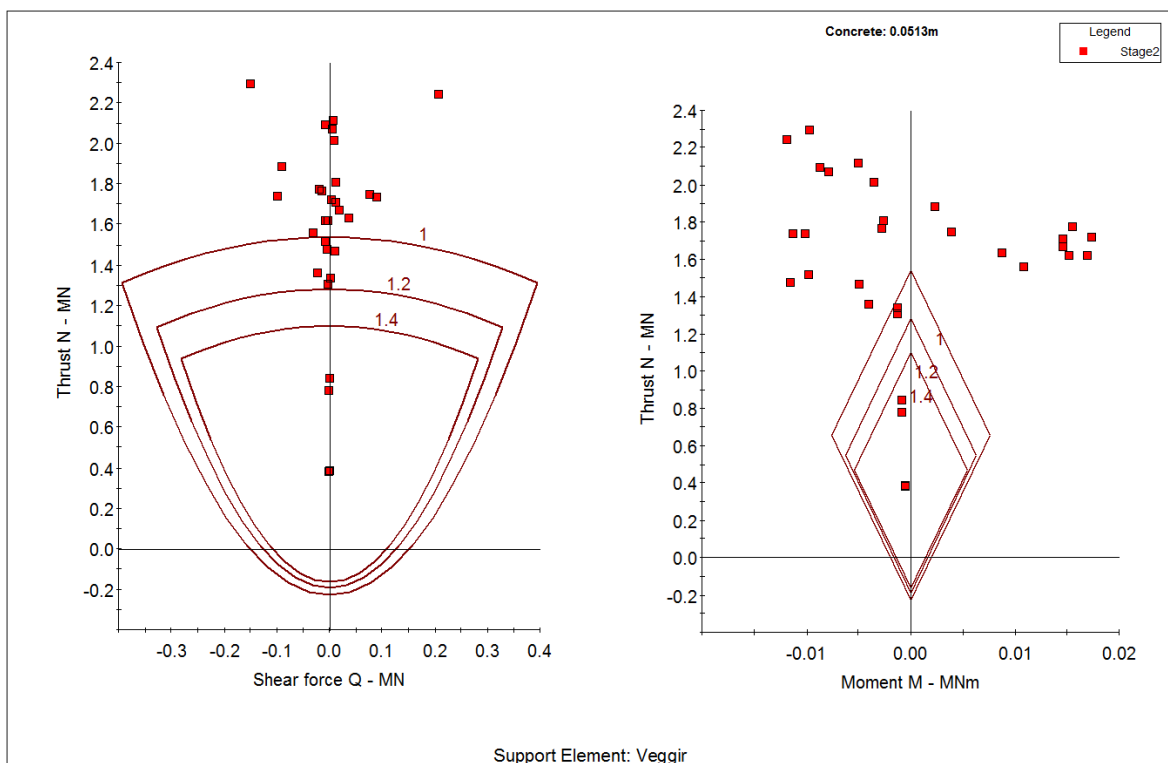
Mynd 9.60 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í þekju í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



Mynd 9.61 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



Mynd 9.62 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í þekju í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.

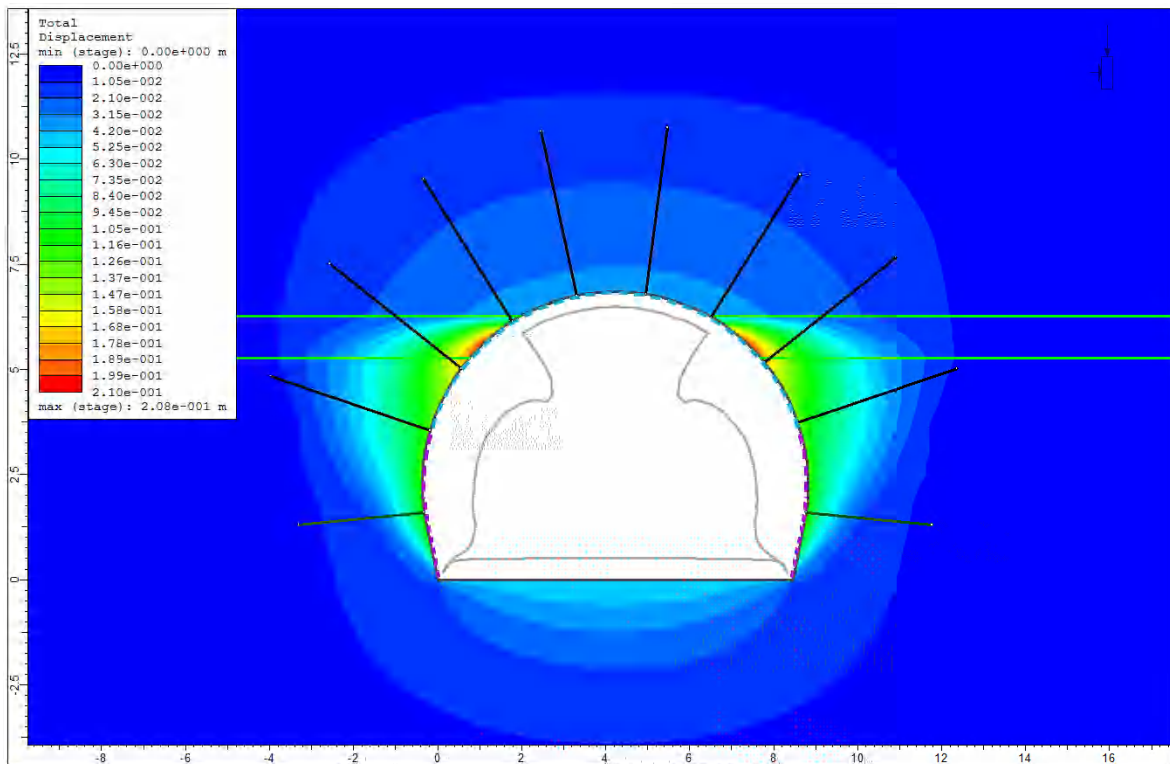


Mynd 9.63 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva F377 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.

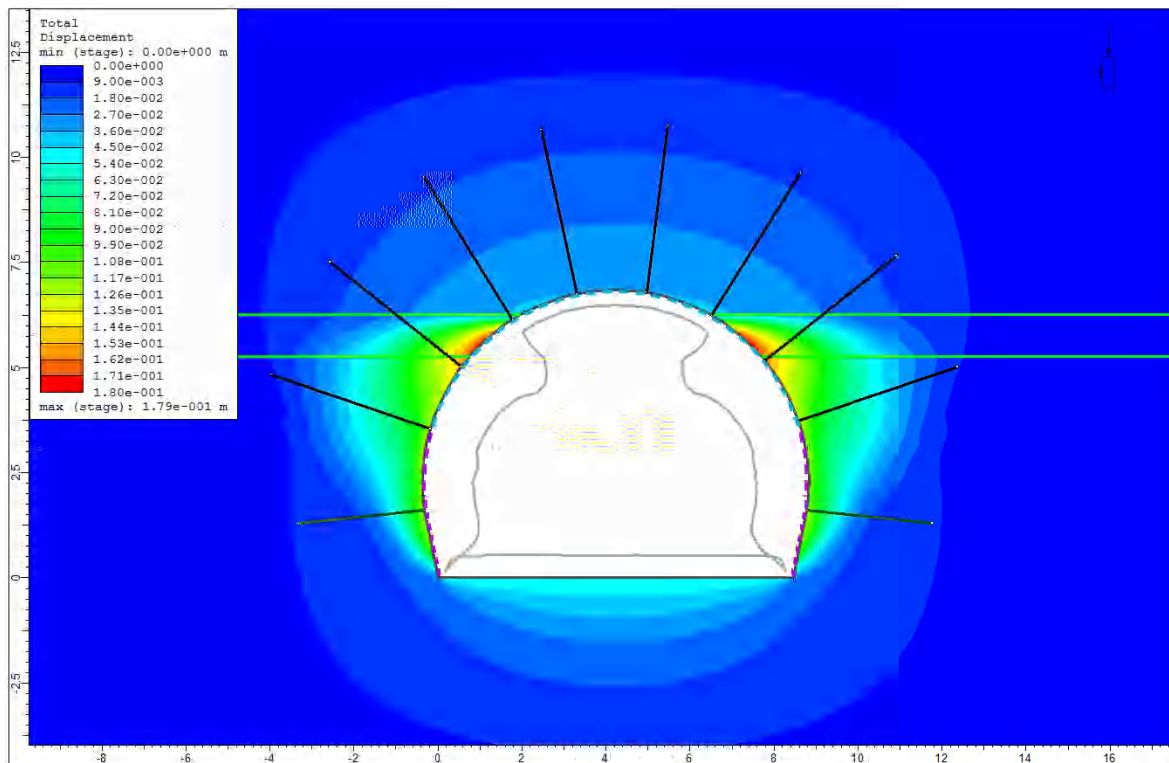
## Salvi 554

Myndir 9.64–9.69 sýna heildarbergfærslur fyrir salva 554 miðað við grunnlíkanið sem lýst er í kafla 9.6.3 og tilgreind frávik frá því. Reiknaðar bergfærslur eru á bilinu 9,75–50,1 cm en bæði öfgagildin fást þegar GSI-gildi bergsins er hækkað eða lækkað um 10. Önnur líkön gefa bergfærslur nálægt 20 cm að undanskildu líkaninu þar sem gert er ráð fyrir engri útþenslu setlagsins. Þá fást færslur nálægt 12 cm. Eins og myndirnar sýna eru bergfærslurnar mestar í setlaginu og í gangaveggjunum neðan við setlagið.

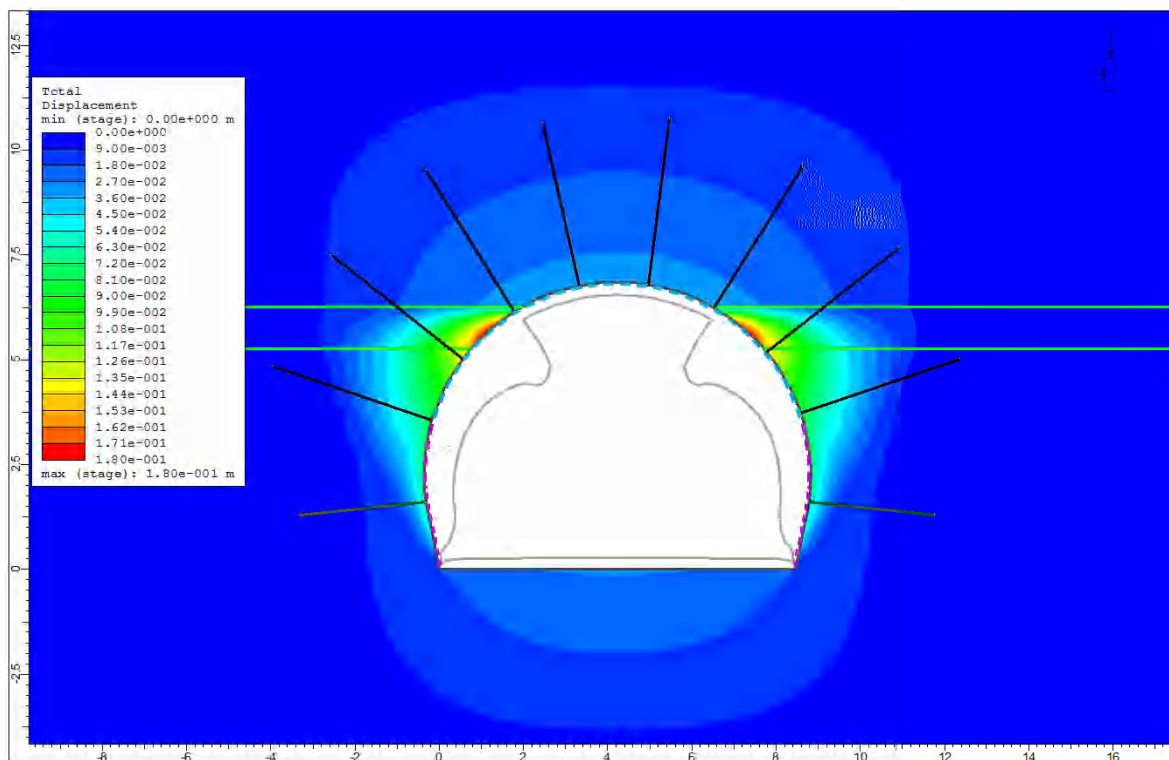
Þar sem aðstæður til gangagerðar teljast óstöðugar má ætla að bergstyrkingar taki mið af því og séu hannaðar til að þola meiri bergfærslur en 2% af radíus ganganna. Sé miðað við að ásættanlegar heildarfærslur séu 5% af radíus ganganna fást færslur upp á 23 cm. Öll líkönin reynast innan þeirra marka að undanskildu líkaninu þar sem GSI-gildið er lækkað um 10.



Mynd 9.64 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífoldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 20,8 cm.

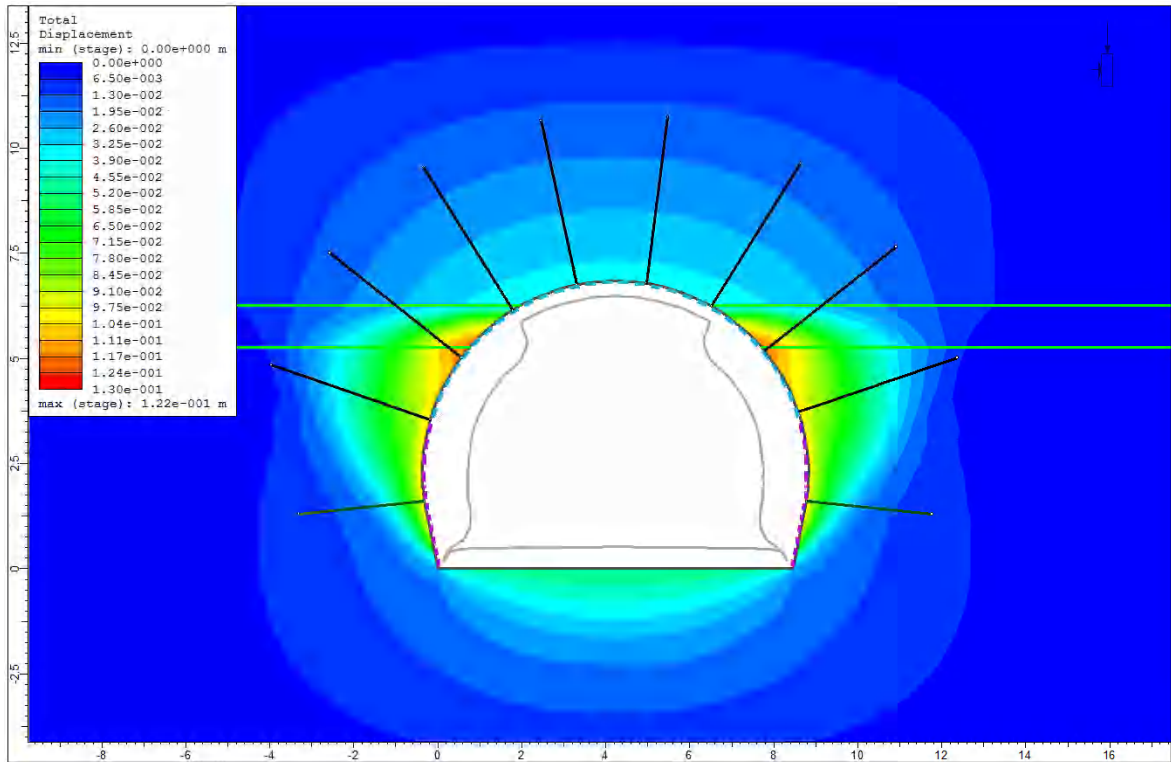


Mynd 9.65 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífaldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 17,9 cm.

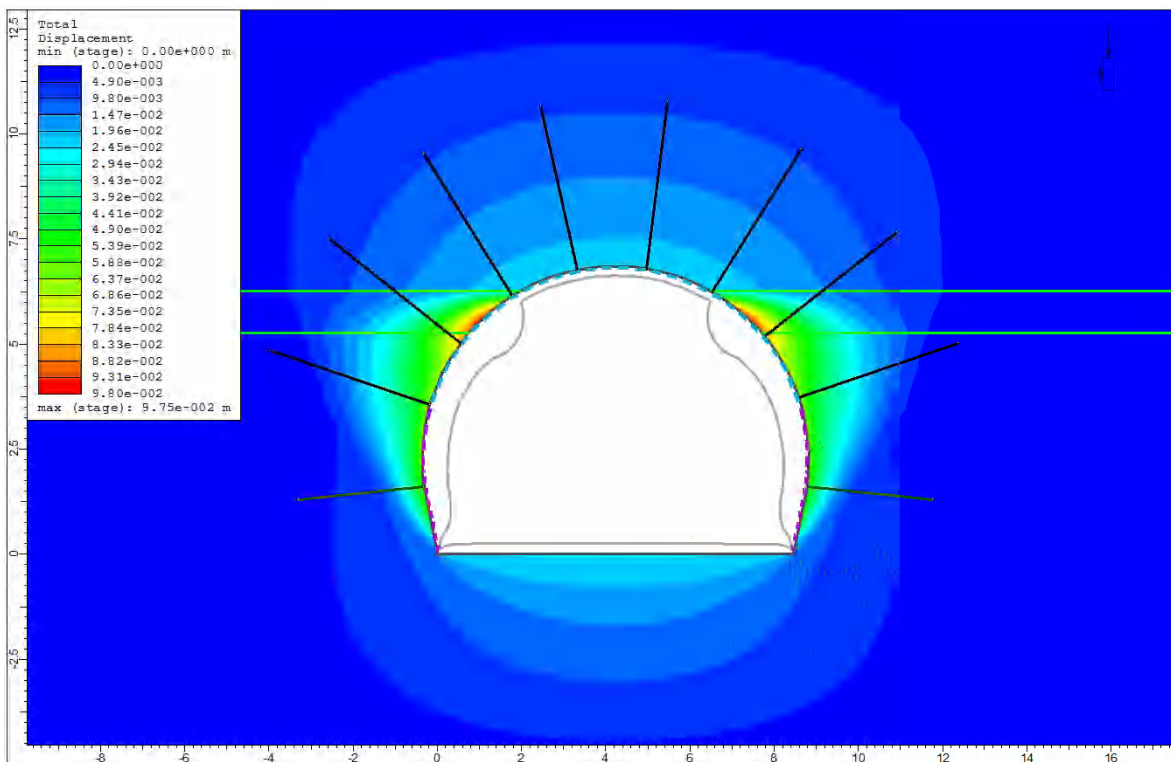


Mynd 9.66 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífaldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 18,0 cm.

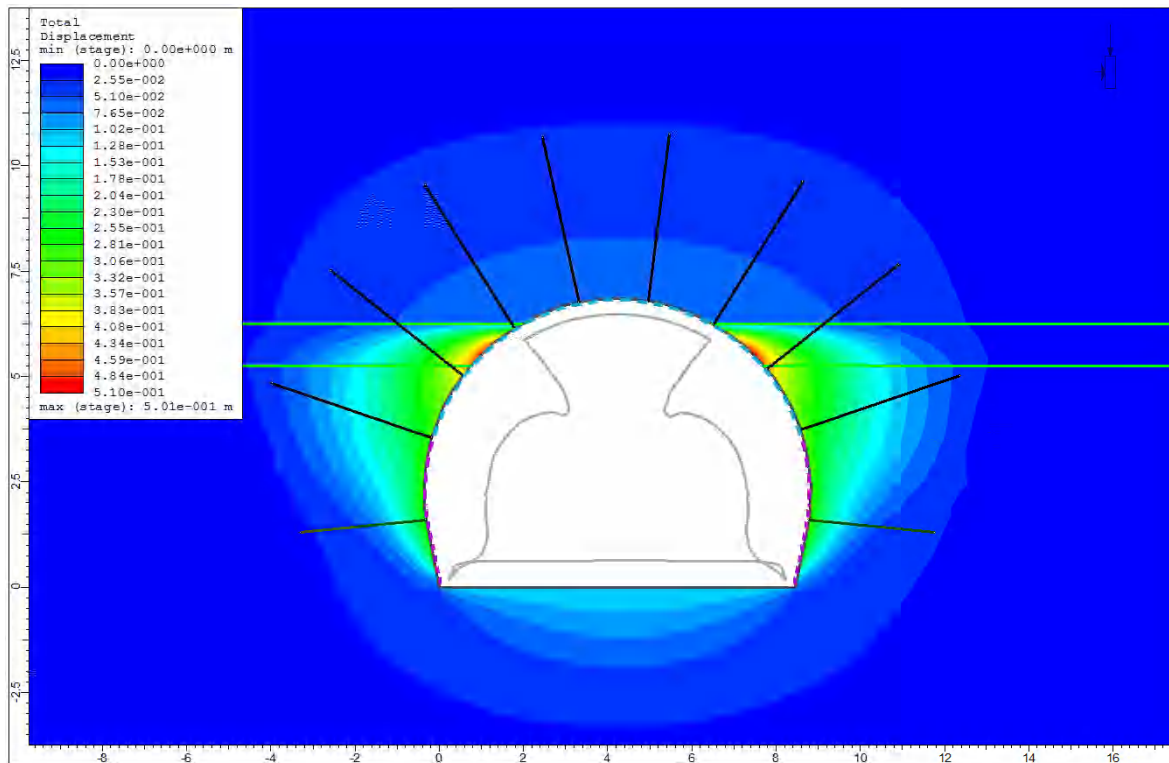




Mynd 9.67 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga útpenslu setlags. Myndin sýnir aflögun ganganna með tífaldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 12,2 cm.

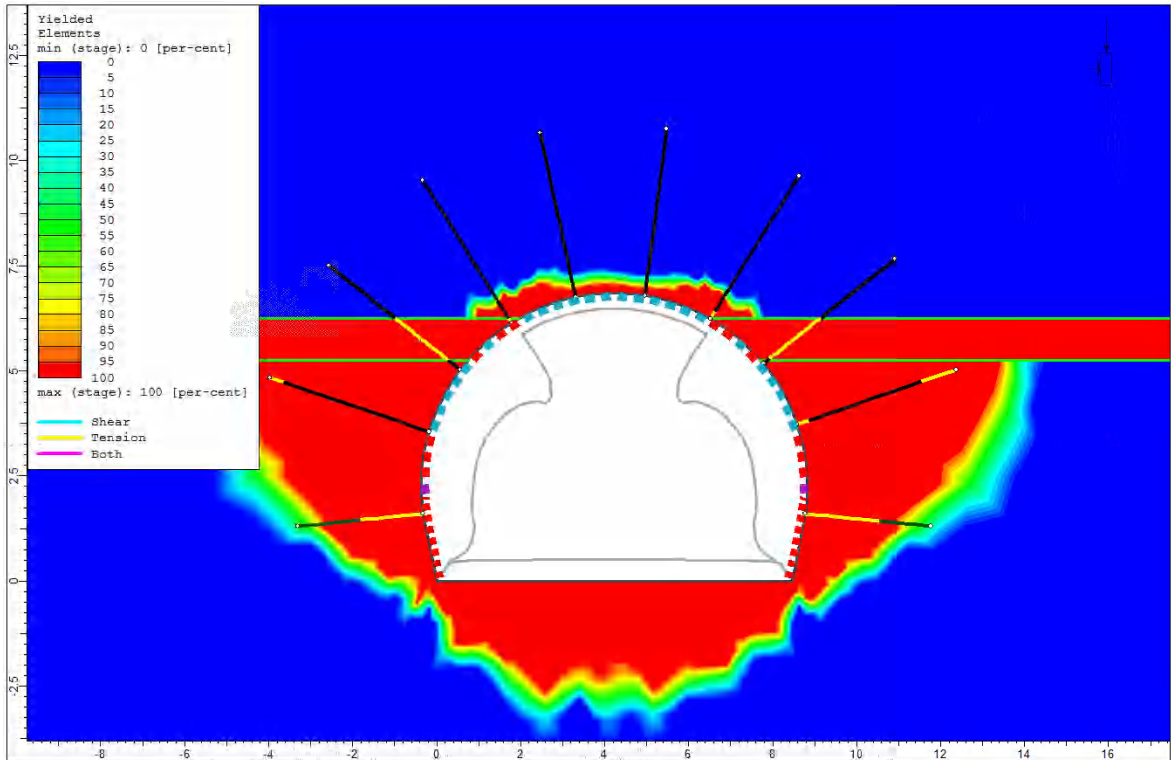


Mynd 9.68 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi (basaltkargi: GSI = 65, setlag: GSI = 45). Myndin sýnir aflögun ganganna með tífaldri stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 9,75 cm.

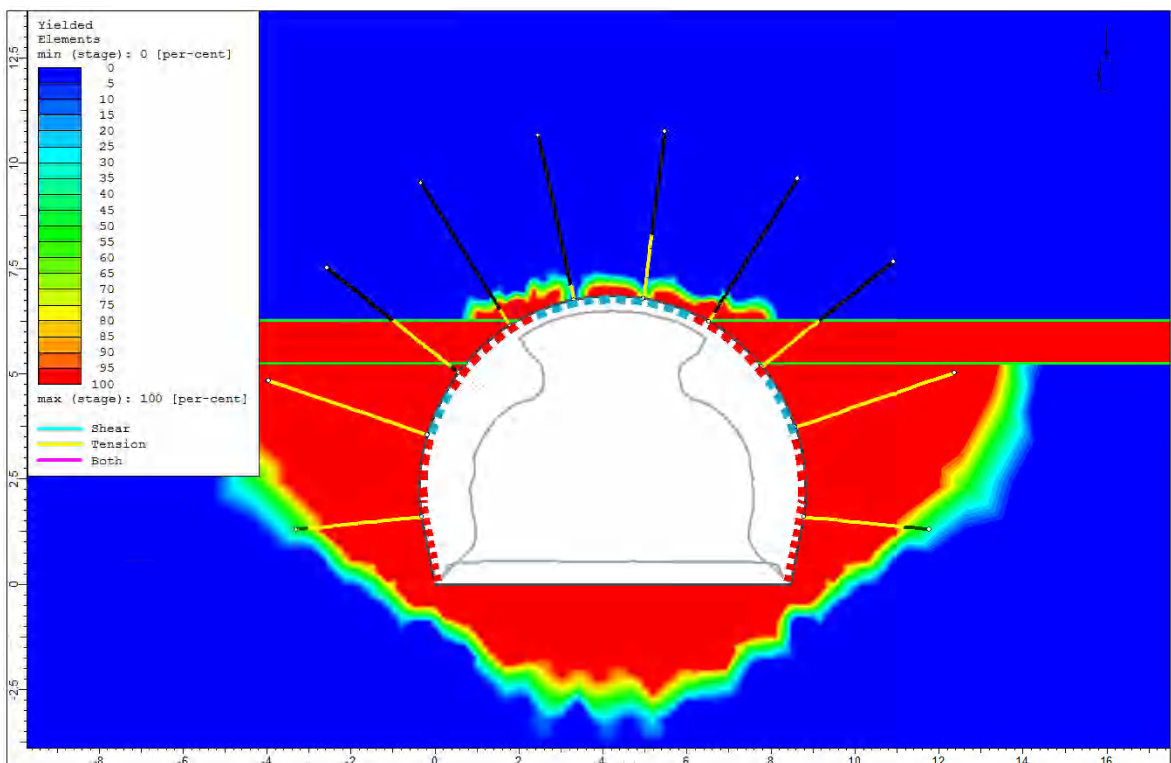


Mynd 9.69 Heildarbergfærslur í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi (basaltkargi: GSI = 45, setlag: GSI = 25). Myndin sýnir aflögun ganganna með **fimmfaldri** stækkun og heildarbergfærslur með litakvarða. Mestu færslur mælast 50,1 cm.

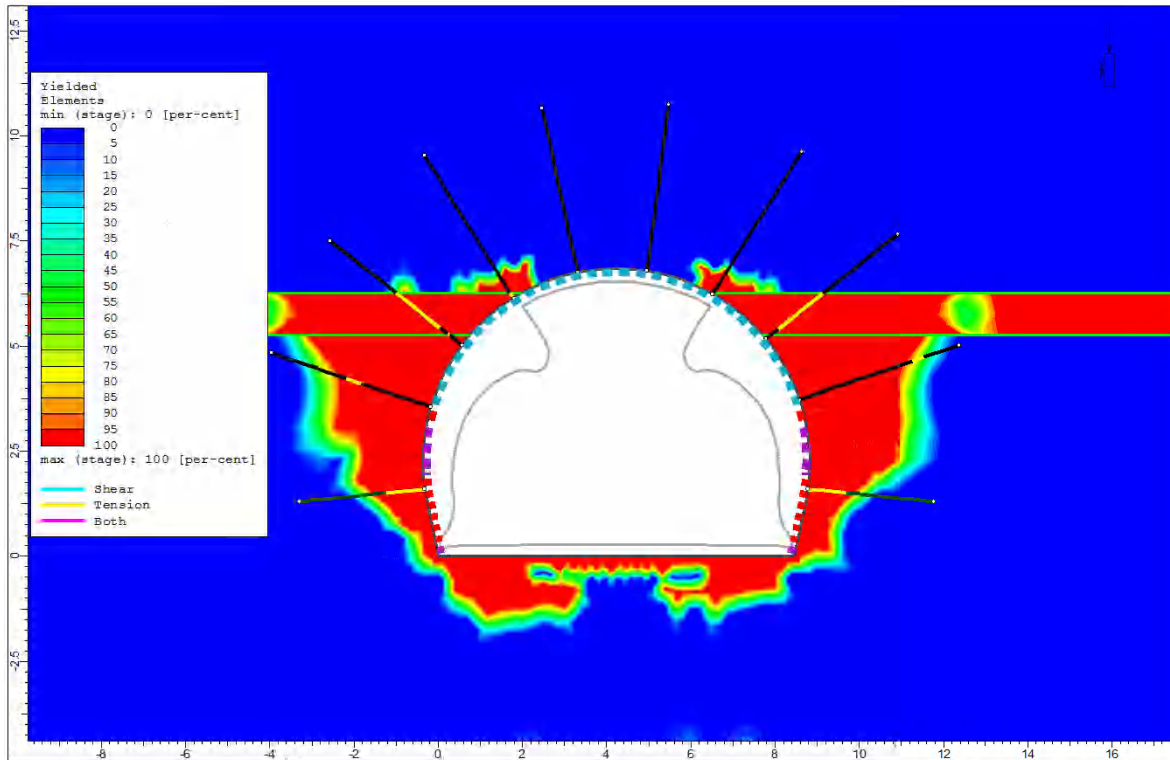
Myndir 9.70–9.75 sýna hnignar einingar í salva 554 miðað við þær forsendur sem tilgreindar eru í hverju líkani. Hlutfall hnigninna bergveininga er sýnt með litakvarða þar sem rauður litur táknar 100% hnig. Hnignar bergboltaeiningar eru sýndar með gulum lit og hnignin sprautusteypa með rauðum. Samanburður á myndum 9.70 og 9.71 sýnir mikilvægi þess að setja bergstyrkingar upp á réttum tíma. Séu bergstyrkingar settar upp of snemma líkt og á mynd 9.71 verður álagið á styrkingarnar of mikið og þær hníga. Hnignum einingum fækkar mjög þegar einásaprýstistyrkur basaltkargans er aukinn (mynd 9.72) og þegar GSI-gildi bergsins er hækkað um 10 (mynd 9.74). Að sama skapi fjölgar hnignum einingum þegar GSI-gildið er lækkað (mynd 9.75). Athygli vekur að lítil breyting verður á hnignum einingum þegar engin útpensla á sér stað í setlaginu þrátt fyrir verulega minnkun bergfærslna (mynd 9.73).



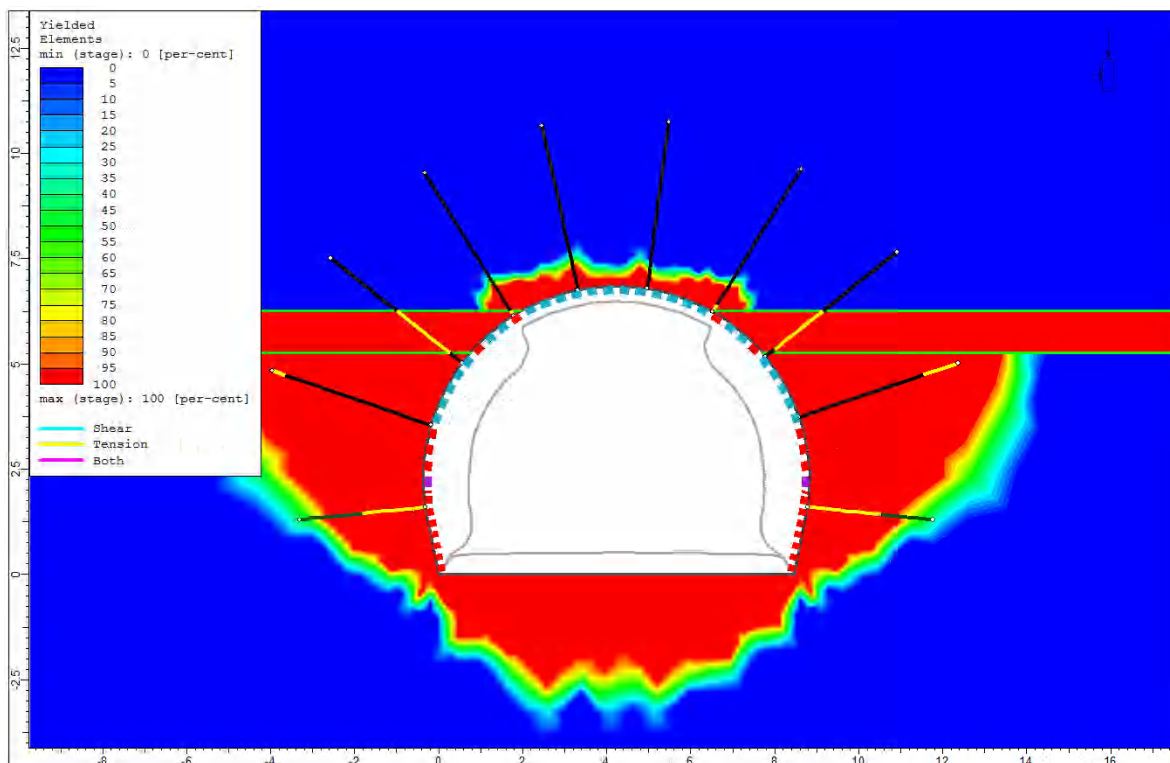
Mynd 9.70 Hnignar einingar í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Hnignir boltahlutar eru 45 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 32 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 804.



Mynd 9.71 Hnignar einingar í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu. Hnignir boltahlutar eru 84 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 43 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 785.

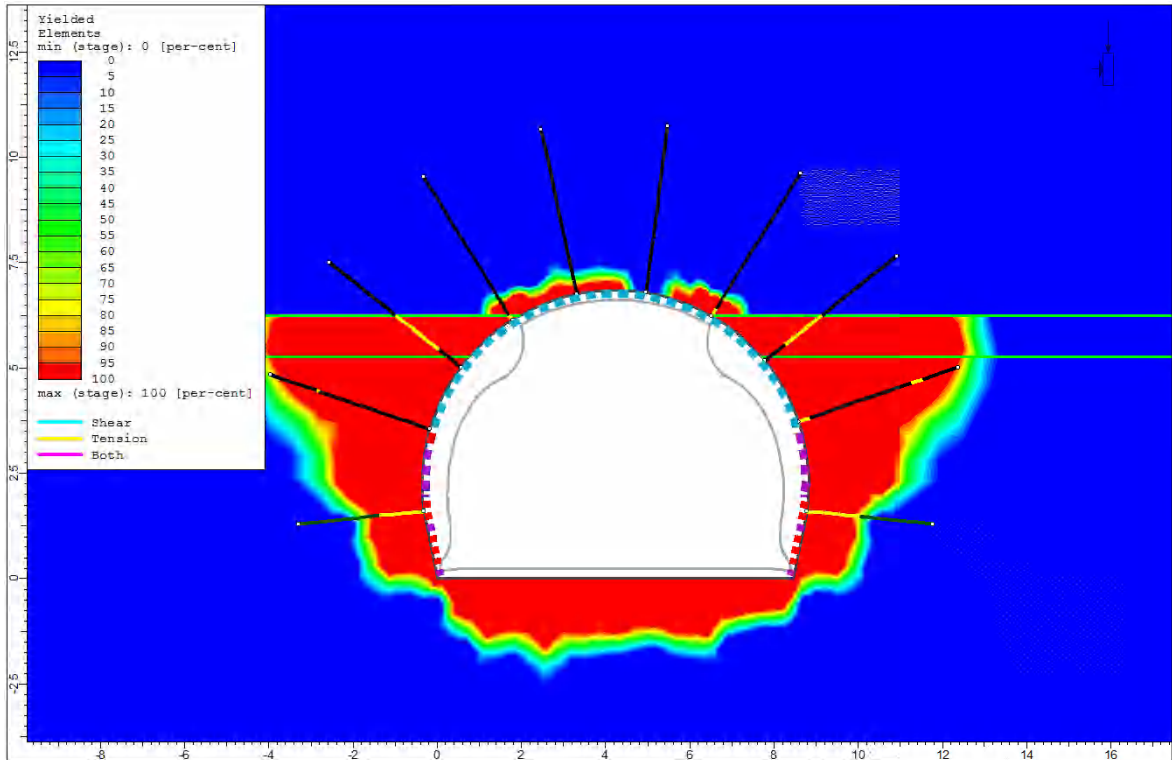


Mynd 9.72 Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Hnignir boltahlutar eru 31 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 16 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 634.

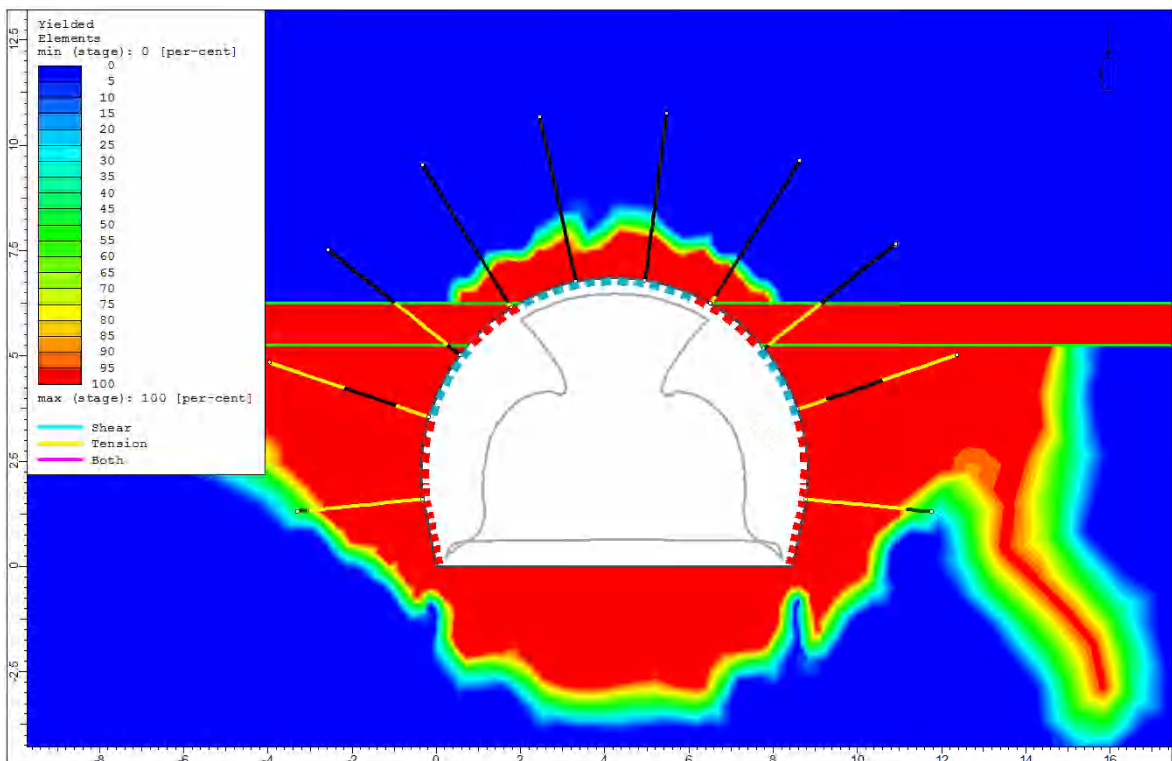


Mynd 9.73 Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga útpenslu setlags. Hnignir boltahlutar eru 43 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 29 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 812.



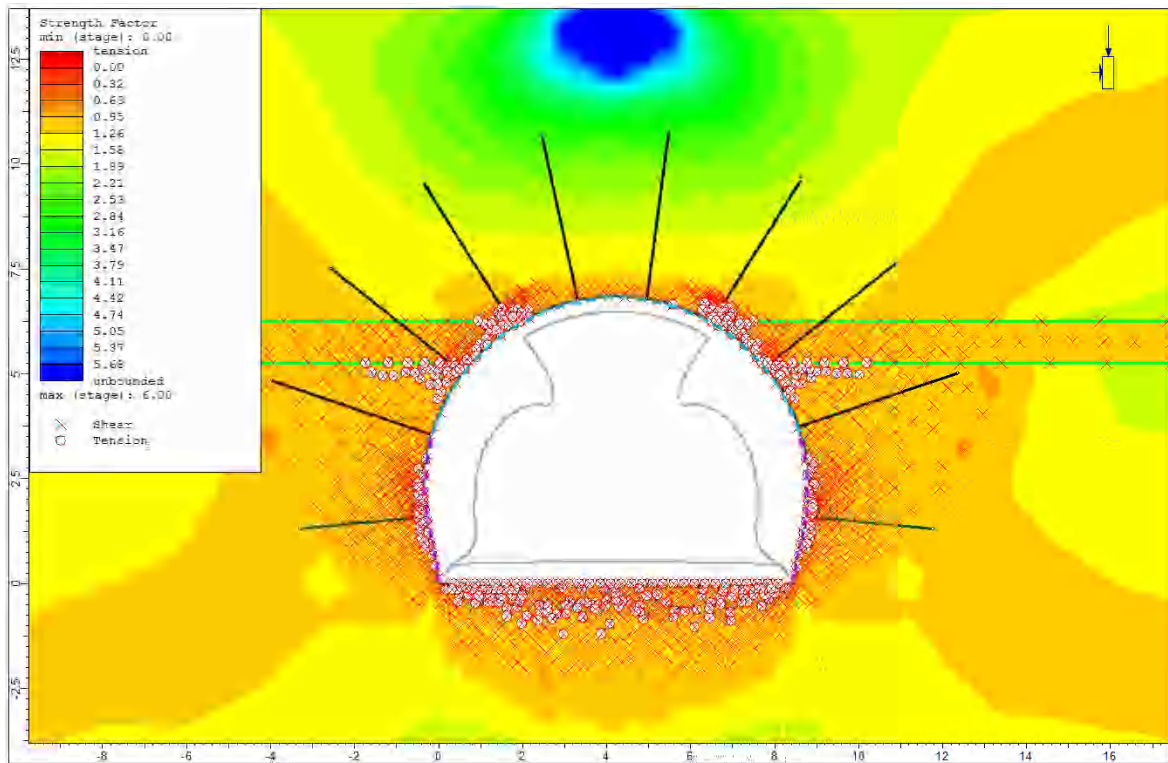


Mynd 9.74 Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi. Hnignir boltahlutar eru 34 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 12 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 693.

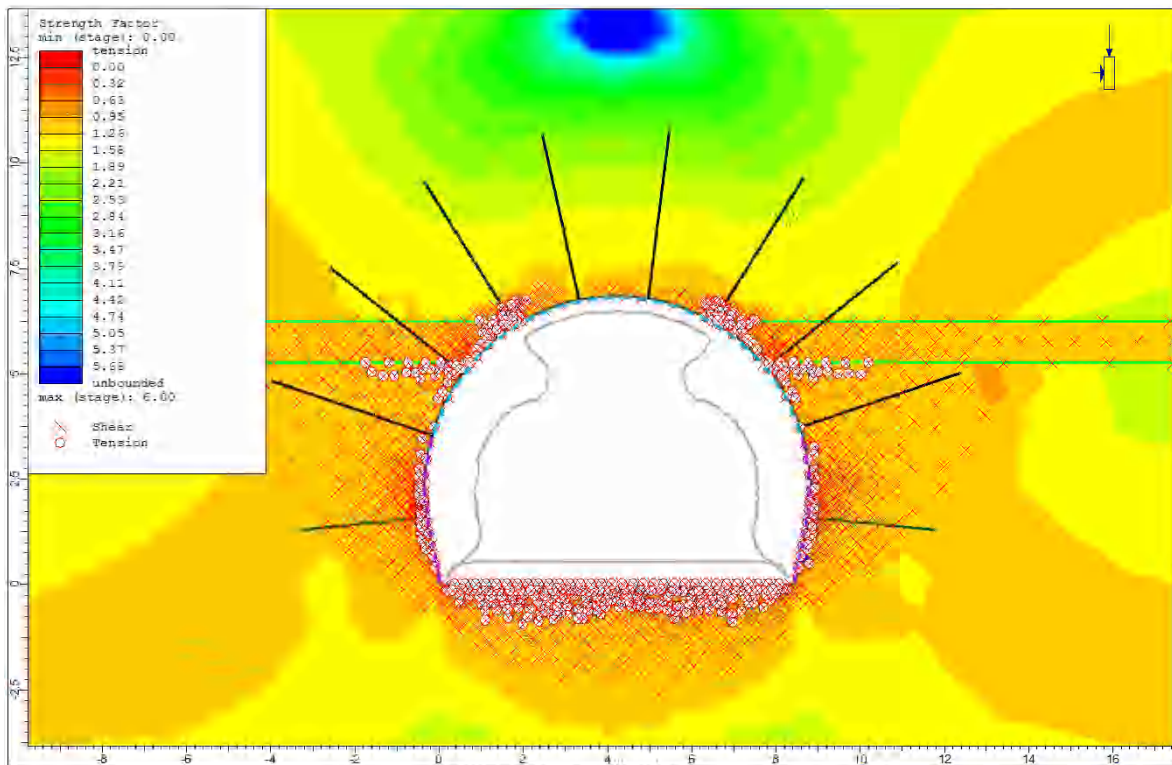


Mynd 9.75 Hnignar einingar í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi. Hnignir boltahlutar eru 60 (gulir) og hnignar sprautusteypueiningar eru 37 (rauðar). Hnignar bergeiningar eru 899. Aflögun er sýnd með fimmfaldri stækkun.

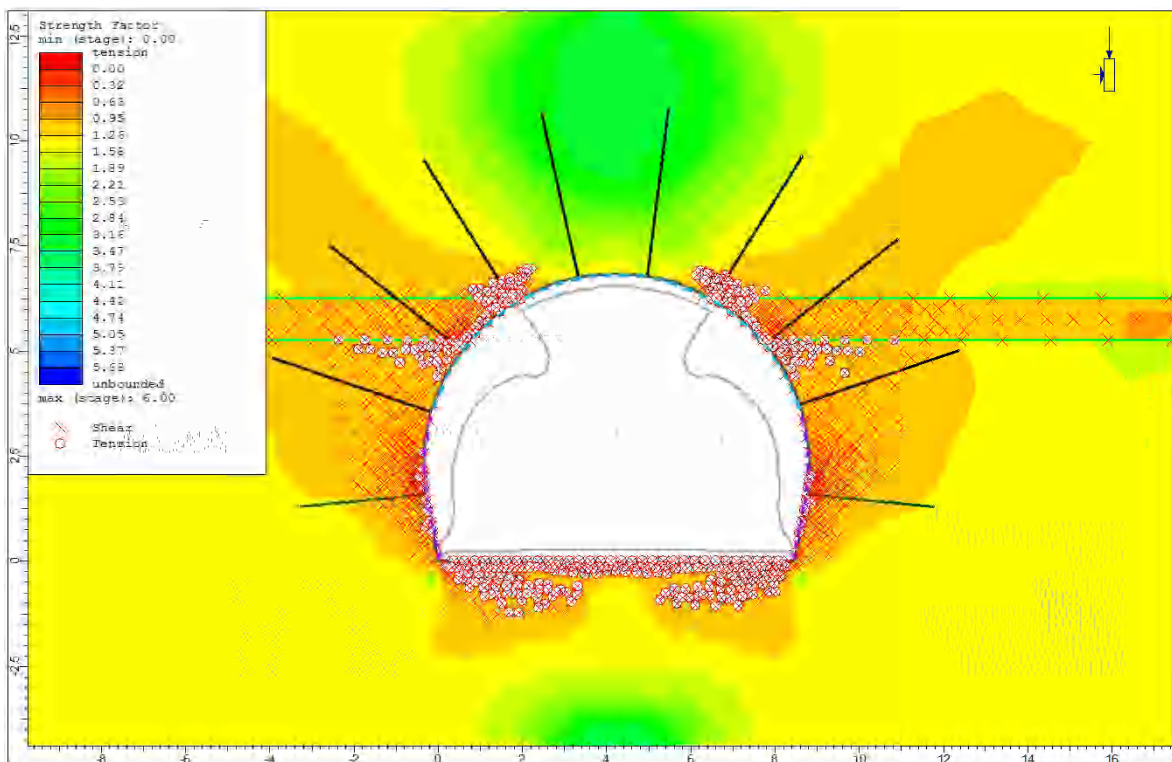
Myndir 9.76–9.81 sýna styrkstuðla bergsins og þá gerð álags sem veldur broti í hverri bergeiningu. Skúfálag er táknað með x og togálag með o. Gera má ráð fyrir að einingar sem hafa  $SF < 1$  hnígi. Augljóst er að hærri einásaprýstistyrkur basaltkarga og hærri GSI-gildi hækka styrkstuðla bergmassans.



Mynd 9.76 Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Gera má ráð fyrir að einingar með  $SF < 1$  hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.

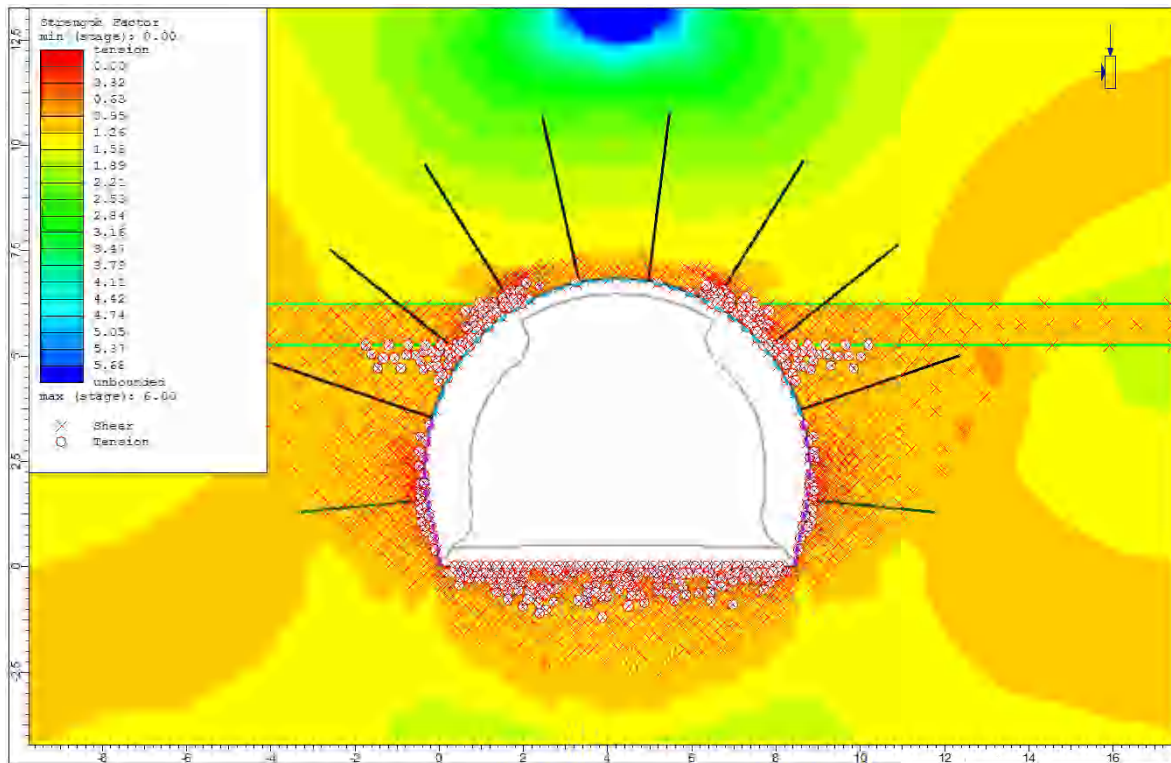


Mynd 9.77 Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við grunnlíkan og 50-50 álagsdreifingu. Gera má ráð fyrir að einingar með SF<1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.

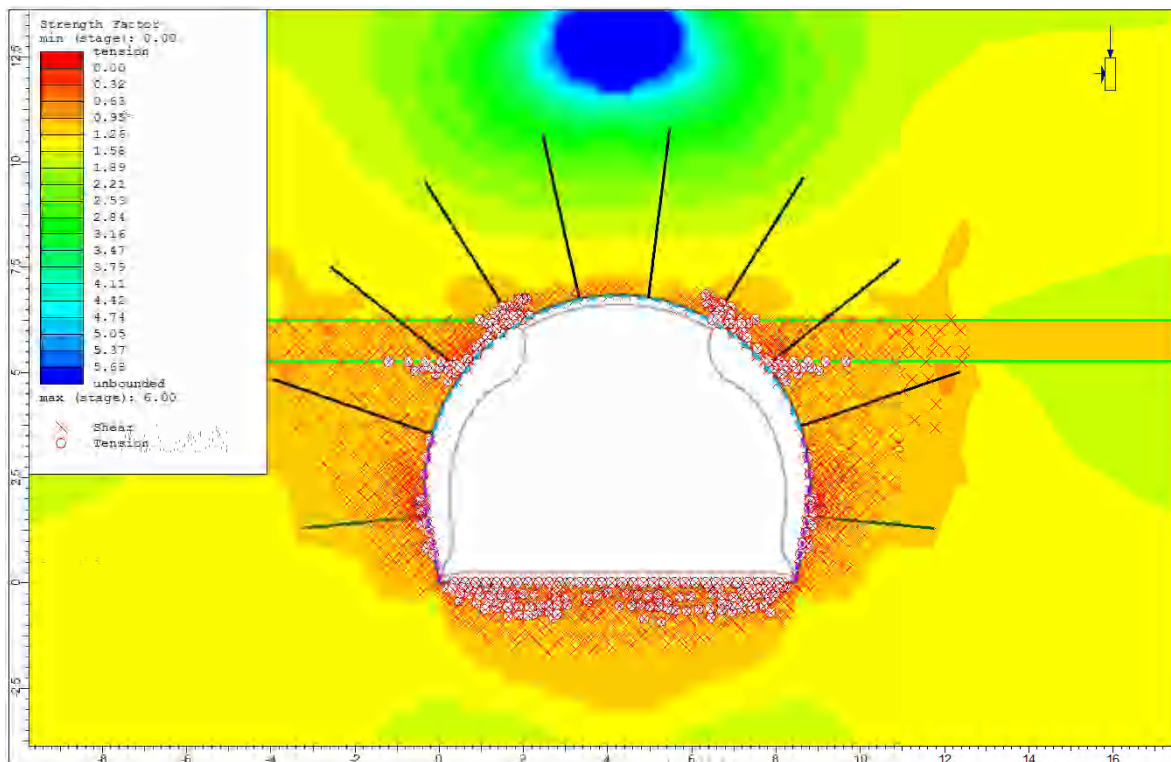


Mynd 9.78 Styrkstuðlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Gera má ráð fyrir að einingar með SF<1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o.

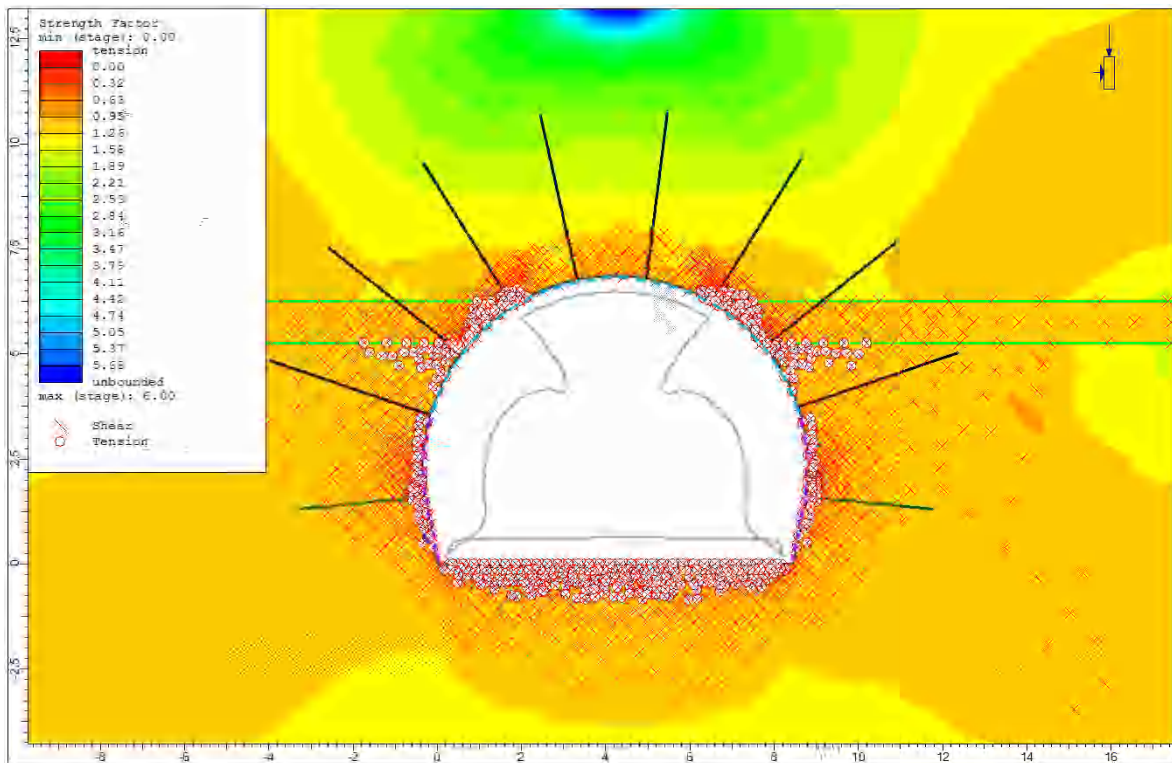




Mynd 9.79 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og enga úthenslu setlags. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnúgi. Skúfálag er táknnað með x og togálag með o.



Mynd 9.80 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og hærri GSI-gildi. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnúgi. Skúfálag er táknnað með x og togálag með o.



Mynd 9.81 Styrkstuddlar (SF) og gerð álags sem veldur broti í salva 554 miðað við 80-20 álagsdreifingu og lægri GSI-gildi. Gera má ráð fyrir að einingar með SF < 1 hnígi. Skúfálag er táknað með x og togálag með o. Aflögun er sýnd með fimmfaldri stækkun.

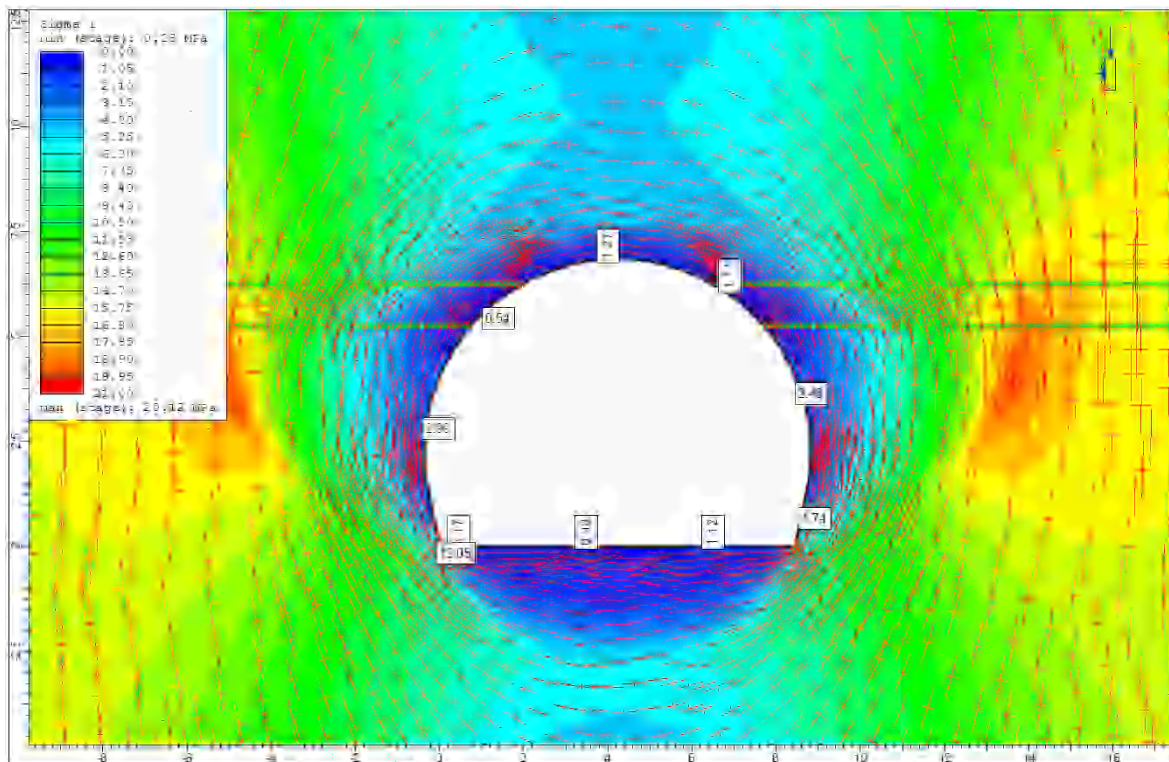
Helstu niðurstöður líkanreikninga fyrir salva 554 eru teknar saman í töflu 9.56. Þar má einnig sjá þær færslur sem bergstyrkingarnar þurfa að þola skv. hverju líkani. Sé miðað við að styrkingarnar þoli að hámarki 12,5 mm færslur má gera ráð fyrir að styrkingar gefi sig í helmingi líkananna.

Tafla 9.56 Niðurstöður líkanreikninga fyrir salva 554. Fyrir og eftir miðast við uppsetningu bergstyrkinga.

Álagsdreifing [%]		Frávik frá grunnlíkani	Bergfærslur [cm]			Hnignar einingar		
fyrir	eftir		fyrir	eftir	heild	berg	Boltar	steypa
80	20	grunnlíkan	19.5	1.30	20.8	804	45	32
50	50	grunnlíkan	9.11	8.79	17.9	785	84	43
80	20	kargi $\sigma_{ci} = 50$ MPa	17.1	0.90	18.0	634	31	16
80	20	engin úþpensla sets	11.1	1.10	12.2	812	43	29
80	20	GSI +10	8.94	0.81	9.75	693	34	12
80	20	GSI -10	45.9	4.20	50.1	899	60	37

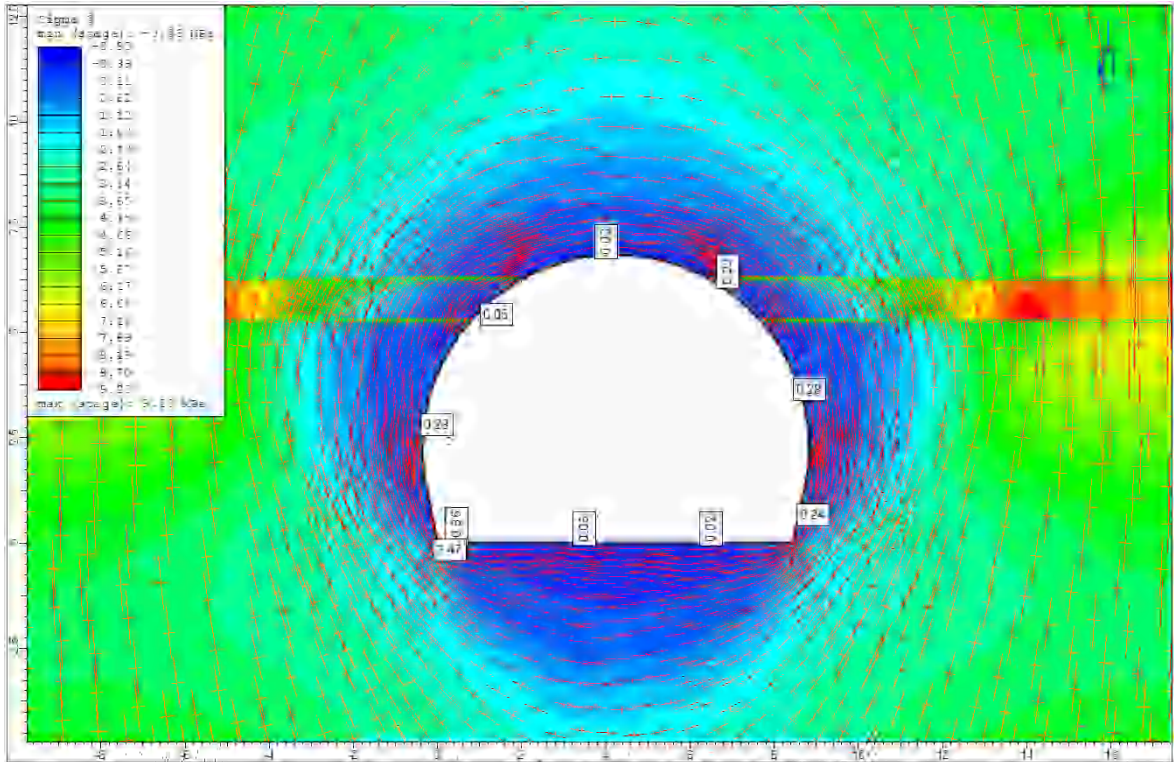
## Bergspennur í salva 554

Myndir 9.82 og 9.83 sýna lóðréttar og láréttar spennur umhverfis göngin ásamt aflögun spennusviðsins miðað við óstyrkt grunnlíkan af salva 554. Á myndunum má einnig sjá spennugildi fyrir valda staði á yfirborði ganganna. Þegar einásaprýstistyrkur basaltkargans er aukinn í 50 MPa fæst það spennuástand sem sjá má á myndum 9.84 og 9.85. Athygli vekur hve háar spennur mælast í og við setlagið í 4–5 m fjarlægð frá yfirborði ganganna. Spennur á yfirborð ganganna eru í öllum tilvikum lágar að undanskildum punktum þar sem gangagólf og -veggir mæstast.

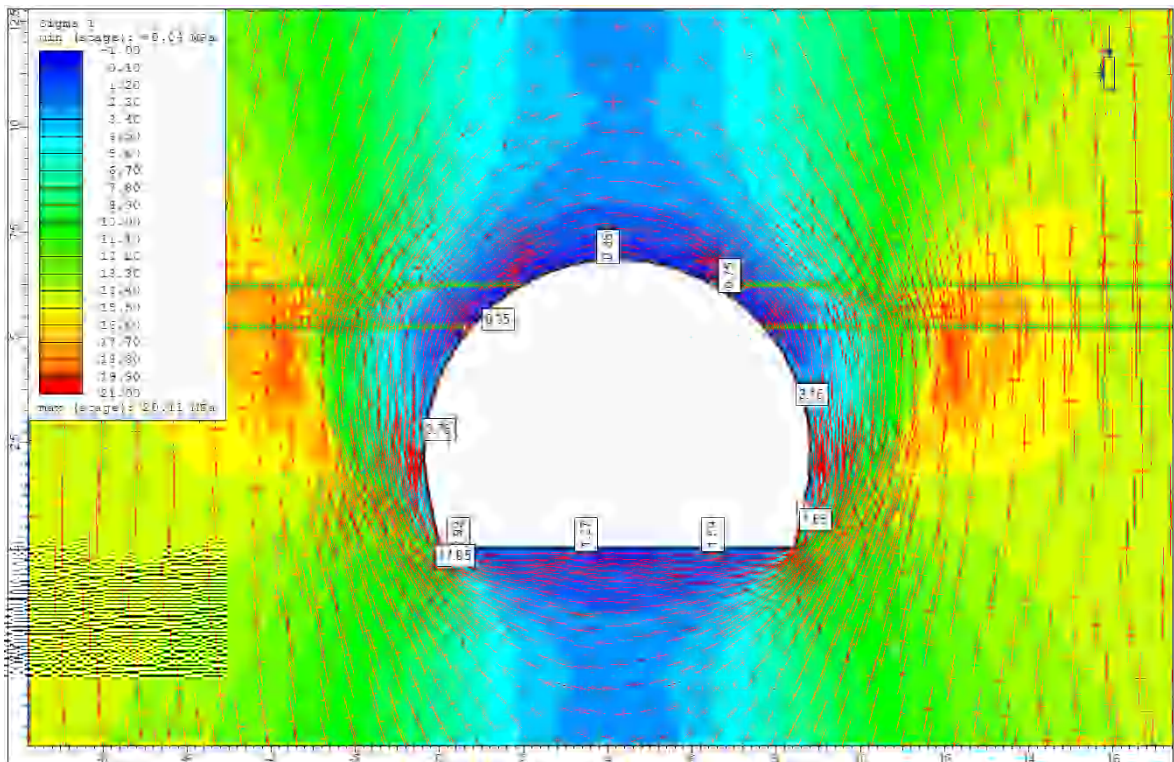


Mynd 9.82 Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt grunnlíkan. Lágur spennur mælast við yfirborð ganganna að undanskildum punktum þar sem gangagólf og -veggir mæstast. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.



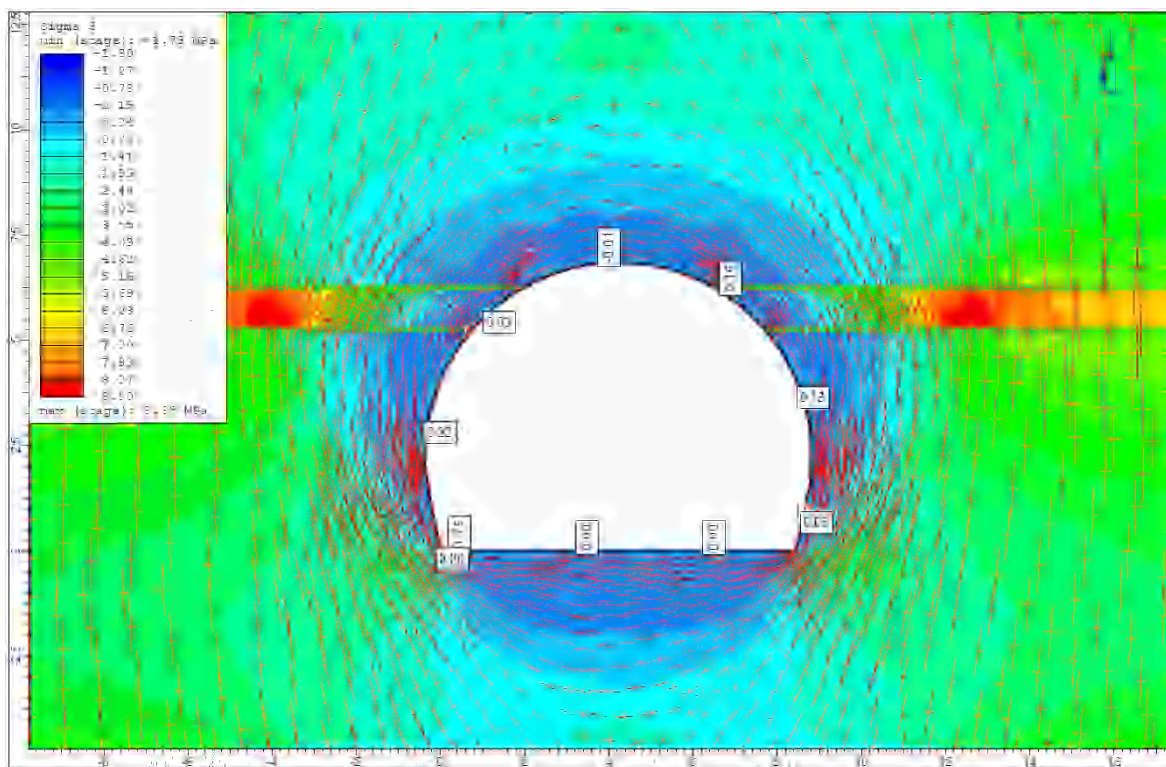


Mynd 9.83 Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt grunnlíkan. Lágar spennur mælast við yfirborð ganganna. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.



Mynd 9.84 Lóðréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásáþrýstistyrk basaltkarga. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.





Mynd 9.85 Láréttar spennur og aflögun spennusviðs í salva 554 miðað við óstyrkt líkan með 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Stefna höfuðspennanna umhverfis göngin er sýnd með rauðum krossum.

Samanburð á bergspennum skv. líkanreikningum og bergspennum skv. jöfnum (6.12)–(6.18) má sjá í töflu 9.57.  $k$ -gildi jarðlagastafans er reiknað með jöfnu (6.2) út frá spennugildum í töflu 9.48. Þá fæst  $k = 0,358$ . Miðað er við að  $W = 9,2$  m og  $H = 6,85$  m.

Tafla 9.57 Samanburður á bergspennum skv. grunnlíkani og jöfnum (6.12)–(6.18).

Viðmið við spennuútreikninga	$\sigma_r$ [MPa]		$\sigma_t$ [MPa]	
	veggir	þekja	Veggir	þekja
Líkan	0,3	1,3	3,0	+ 0,0
Kirsch-jöfnur	0	0	41,7	1,2
Ellipsujöfnur	-	-	52,6	-1,7

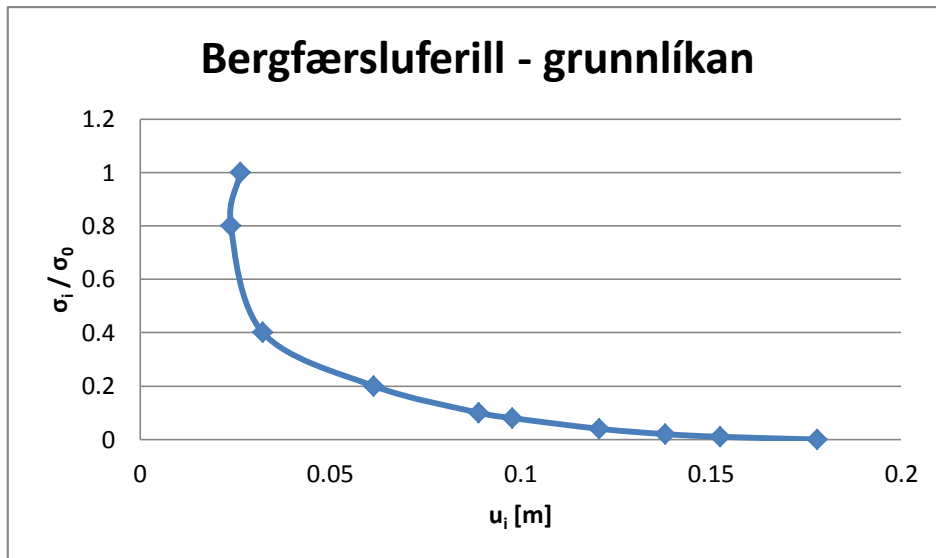
Verulegur munur kemur fram á milli líkans og jafna þegar snertilspennur á gangaveggina eru skoðaðar. Jöfnurnar gefa mjög háar spennur en líkanreikningar lágur. Skv. líkanreikningum eru lóðréttar spennur hæstar í um 5 m fjarlægð frá gangaveggjum rétt fyrir neðan setlagið þar sem þær reiknast um 20 MPa. Eðlilegt má telja að einfaldar jöfnur séu ekki lýsandi fyrir spennuástand í flóknu gangaþversniði þar sem einstaka veik jarðlög geta haft mikil áhrif. Hið mikla ósamræmi gefur þó tilefni til umhugsunar.

### Bergfærsluferlar (GRC) í salva 554

Eins og myndir 9.64–9.69 sýna eru bergfærslurnar mestar í neðri hluta setlagsins. Þegar hornrétt þrýstispennta á yfirborð ganganna ( $\sigma_i$ ) er látin falla í þrepum frá upprunalegri

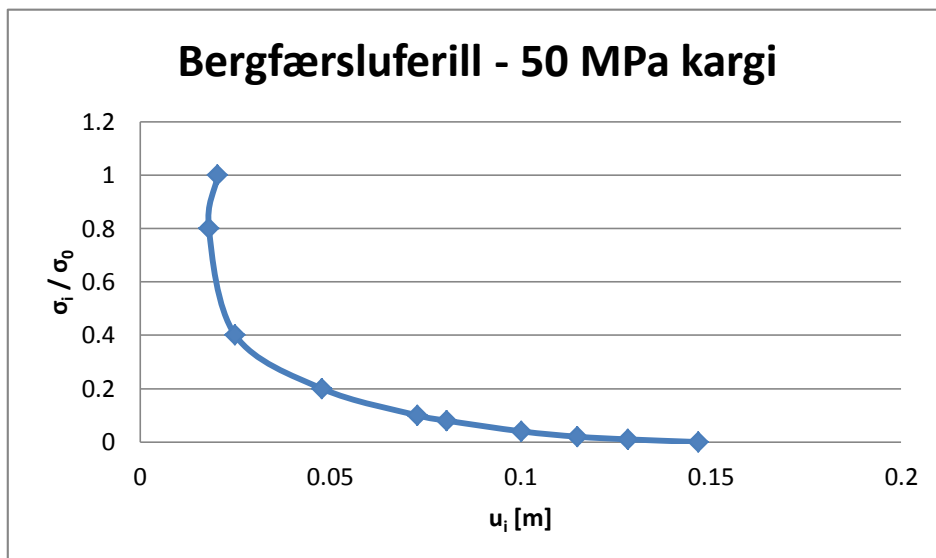


þrýstispennu ( $\sigma_0$ ) niður í núll fæst eftirfarandi bergfærsluferill fyrir grunnlíkanið í þeim punkti sem bergfærslur reiknast mestar. Bergfærsluferillinn er fenginn með þeirri aðferð sem lýst er kafla 24 í leiðbeiningum með  $RS^2$  (Rocscience, 2015).



Mynd 9.86 Bergfærsluferill grunnlíkans fyrir salva 554. Grafið sýnir hvernig bergfærslur aukast samfara lækkandi þrýstispennu á yfirborð ganganna. Athygli vekur að aflögun setlagsins hefst áður en þrýstispenna lækkar.

Fyrir sama punkt fæst bergfærsluferillinn sem sýndur er á mynd 9.87 þegar einásaþrýstistyrkur basaltkargans er aukinn í 50 MPa.



Mynd 9.87 Bergfærsluferill fyrir salva 554 m.v. 50 MPa einásaþrýstistyrk basaltkarga. Grafið sýnir hvernig bergfærslur aukast samfara lækkandi þrýstispennu á yfirborð ganganna. Athygli vekur að aflögun setlagsins hefst áður en þrýstispenna lækkar.

Athygli vekur að aflögun setlagsins virðist hefjast áður en hornrétt þrýstispenna byrjar að falla. Ekki er ljóst hverju þetta sætir. Eftir að þrýstispennan hefur fallið um 60% aukast

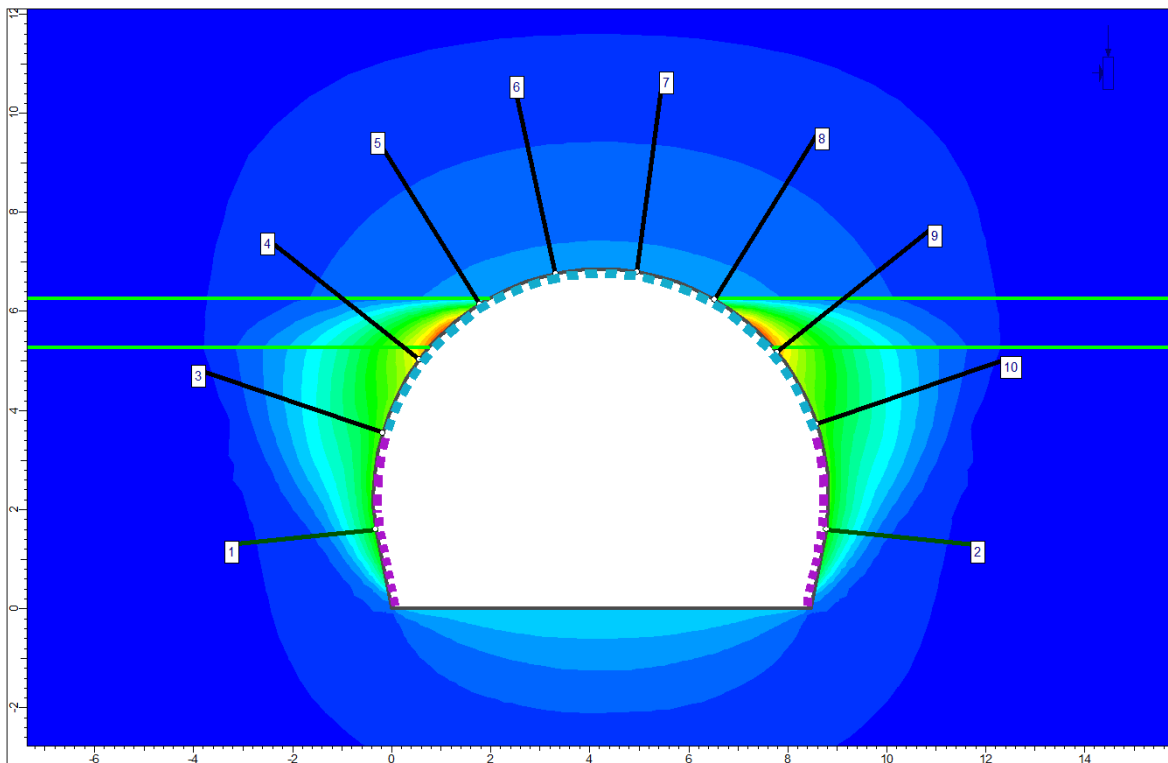
bergfærslur hratt. Af ferlunum að dæma þurfa bergstyrkingar að hafa náð fullri virkni áður en þrýstisþennan hefur fallið um 70–80% til þess að koma í veg fyrir óstöðugleika.

Líkt og í salva F377 fást minni heildarbergfærslur en gildin í töflu 9.56 gefa til kynna. Bergspennur á yfirborð ganganna verða hins vegar sambærilegar við það sem myndir 9.82–9.85 sýna.

### Öryggi bergstyrkinga í salva 554

Í salva 554 er öryggi styrkinga skoðað fyrir þrjú líkön miðað við 80-20 álagsdreifingu. Í fyrstu er miðað við grunnlíkan, því næst líkan þar sem einásaprýstistyrkur basaltkarga er 50 MPa og að síðustu líkan þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10.

Allir bergboltar hníga að einhverju marki í líkönunum þremur að undanskildum tveimur bergboltum í þekju. Ástæða þykir til að skoða togálagið á sem flesta bolta en til einföldunar verður álagið eingöngu kannað fyrir hægri helming líkansins, þ.e. bolta 2 og 7–10 á mynd 9.88. Öryggisstuðullinn 1,4 verður hafður til hliðsjónar fyrir bergbolta, þ.e. fari togálag yfir 430 MPa teljast boltarnir ekki öruggir.

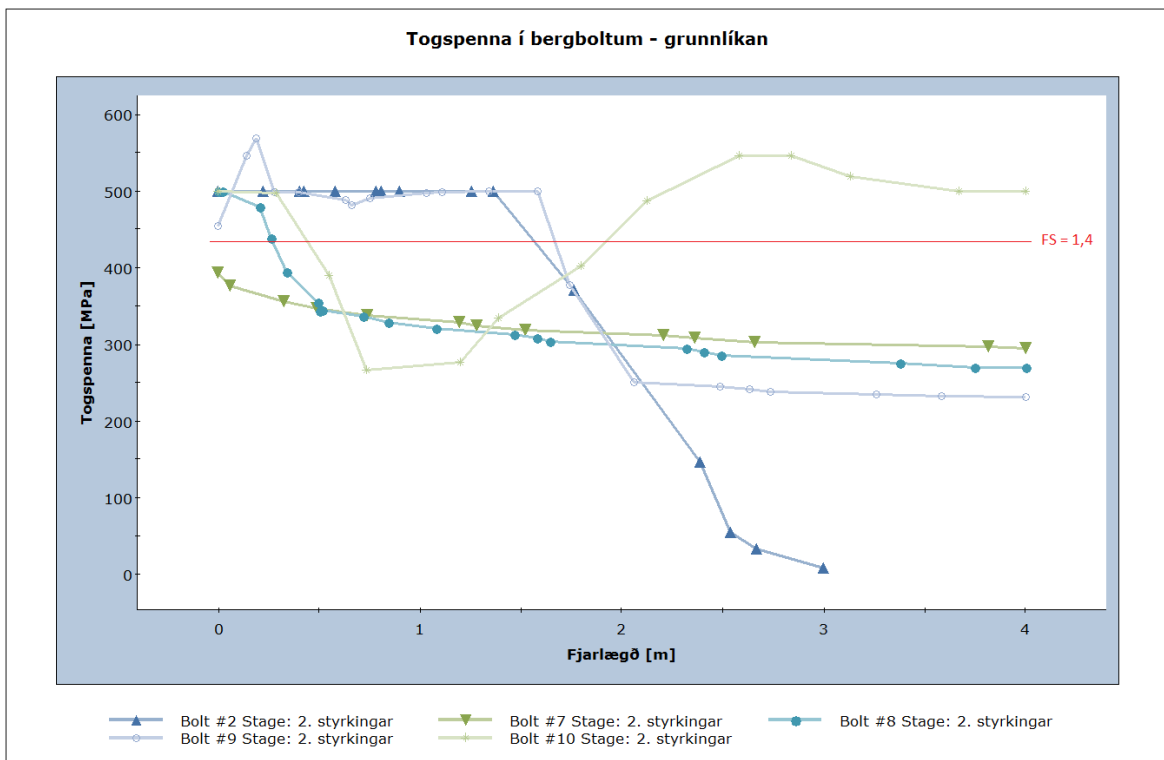


Mynd 9.88 Öryggi bergstyrkinga í salva 554 er kannað m.t.t. bergbolta 2, 7, 8, 9 og 10 og sprautusteypu í veggjum (fjólubláar einingar) og þekju (bláar einingar).

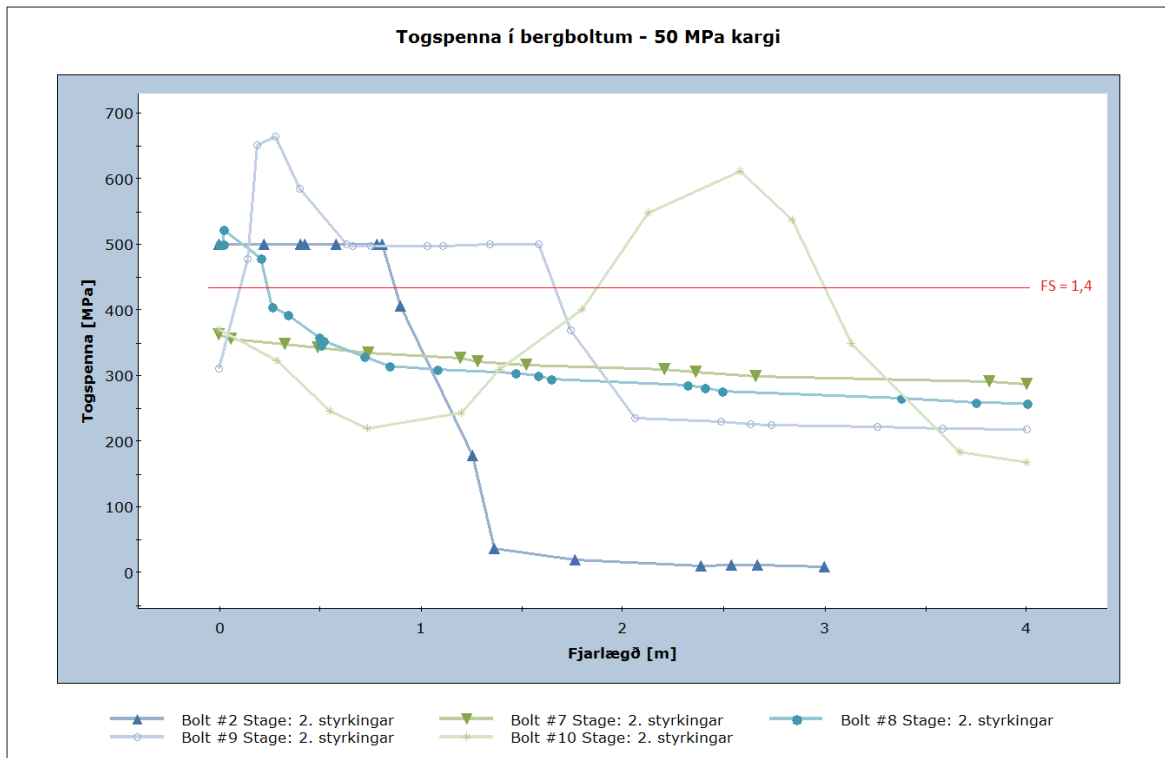
Þegar togálagið sem bergboltar 2, 7, 8, 9 og 10 verða fyrir samfara spennulosun bergsins er skoðað í salva 554 fást gröfin á myndum 9.89–9.91 fyrir líkönin þrjú. Í þeim einingum þar sem togspenna reiknast meiri en nemur togstyrk boltanna (600 MPa) miðast spennugildin við flotmörk boltanna og ferlarnir verða flatir í 500 MPa.

Greinilegt er að allir bergboltar verða fyrir nokkru álagi og enginn þeirra getur talist öruggur í öllum líkönum. Líkanið þar sem einásaprýstistyrkur basaltkargans er aukinn

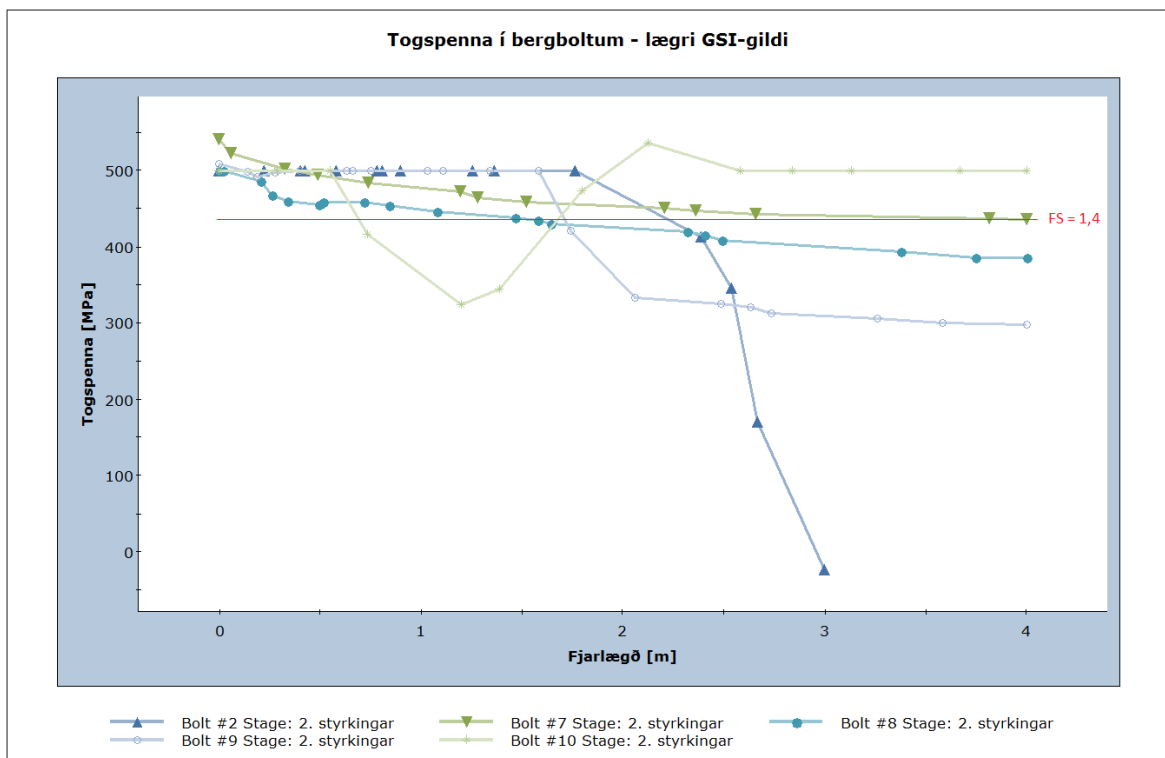
kemur sýnilega best út en þar má þó ætla að bolti 9 veiti takmarkað öryggi. Boltar 2 og 9 hníga að einhverju leyti í öllum líkönum. Þegar GSI-gildi eru lækkuð um 10 er um helmingur af lengd allra bolta með lægri öryggisstuðul en 1,4.



Mynd 9.89 Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 2, 7, 8, 9 og 10 eru skoðaðir miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.



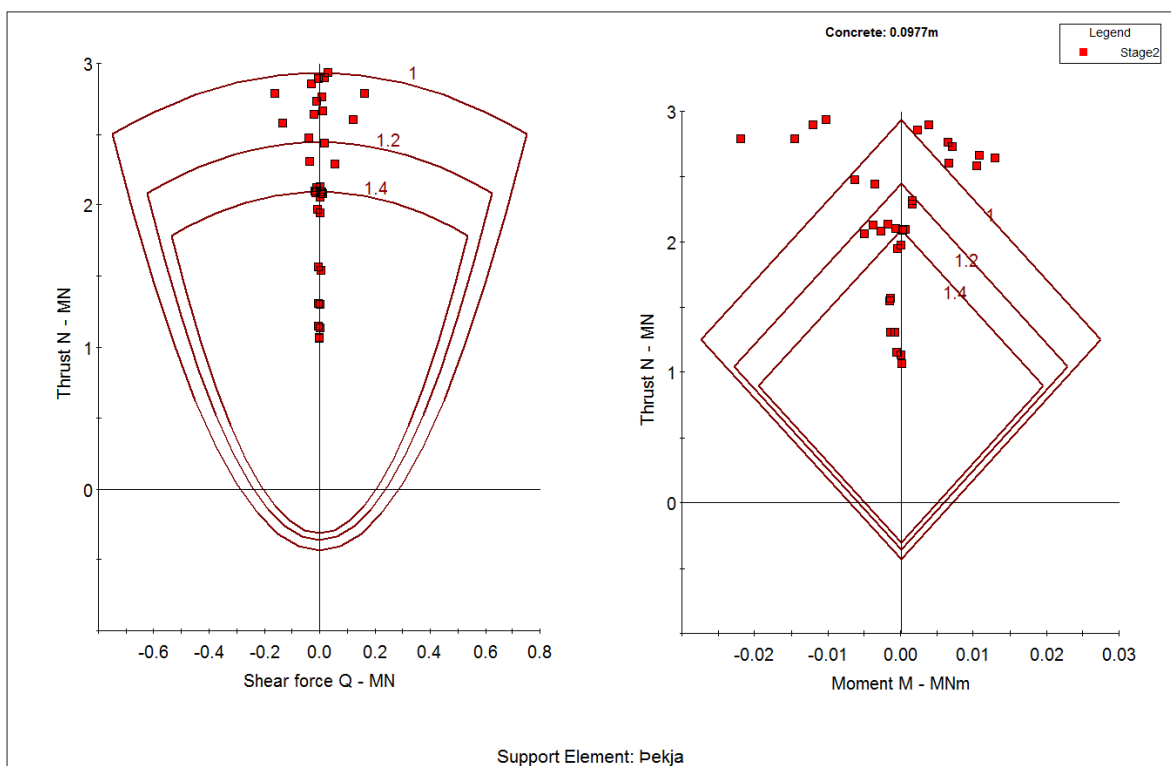
Mynd 9.90 Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 2, 7, 8, 9 og 10 eru skoðaðir miðað við 80-20 álagsdreifingu og 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.



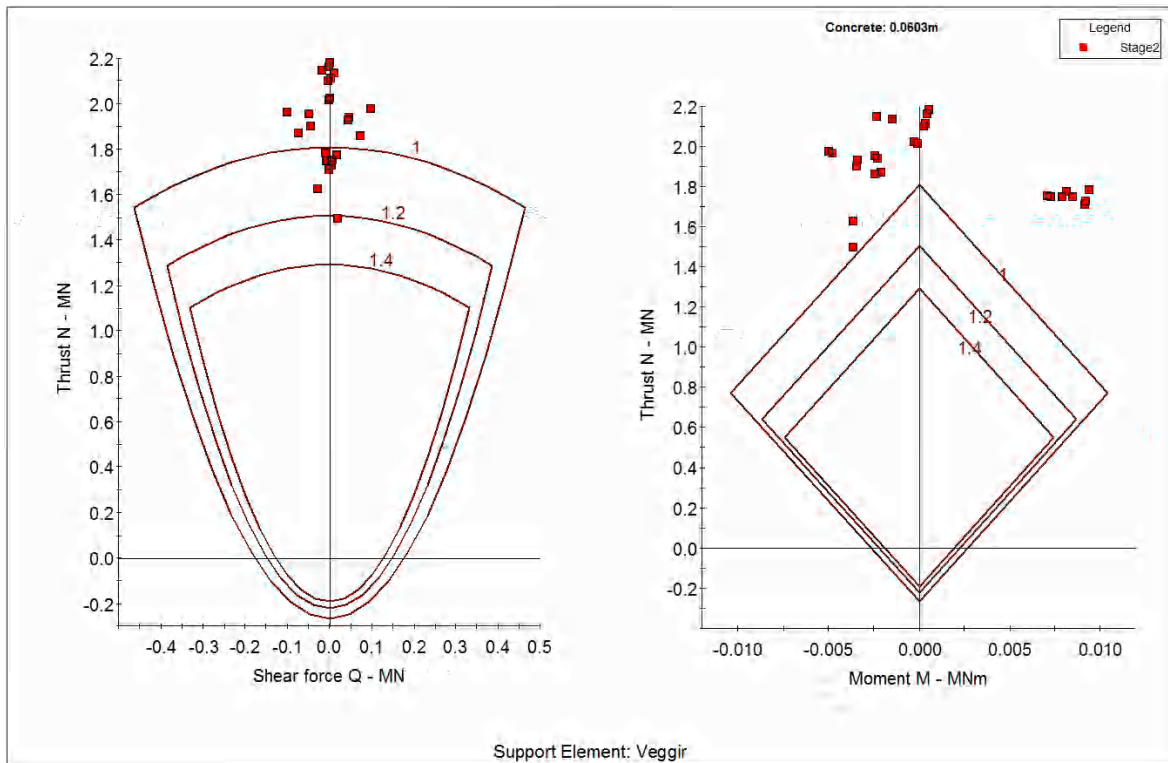
Mynd 9.91 Togspenna í bergboltum í salva 554 eftir fjarlægð frá gangayfirborði. Boltar 2, 7, 8, 9 og 10 eru skoðaðir miðað við 80-20 álagsdreifingu og lækun GSI-gilda um 10. Rauða línan markar öryggisstuðulinn 1,4.

Sprautusteypueiningar eru greindar með sama hætti og í salva F377, þ.e. öryggisstuðlar steypunnar kannaðir m.t.t. skúfálags og beygjuvægis á móti áslægri þrýstisþennu. Í því skyni að fá fram rétta mynd af öryggisstuðlum er steypa skilgreind sem fjaðrandi efni. Myndir 9.92–9.97 sýna álag á sprautusteypu í þekju og veggjum í salva 554 ásamt lokuðum ferlum sem afmarka öryggisstuðla. Einingar sem lenda innan við ferilinn sem markar öryggisstuðulinn 1,4 teljast öruggar en einingar sem lenda utan við ferilinn sem markar öryggisstuðulinn 1 teljast hnignar.

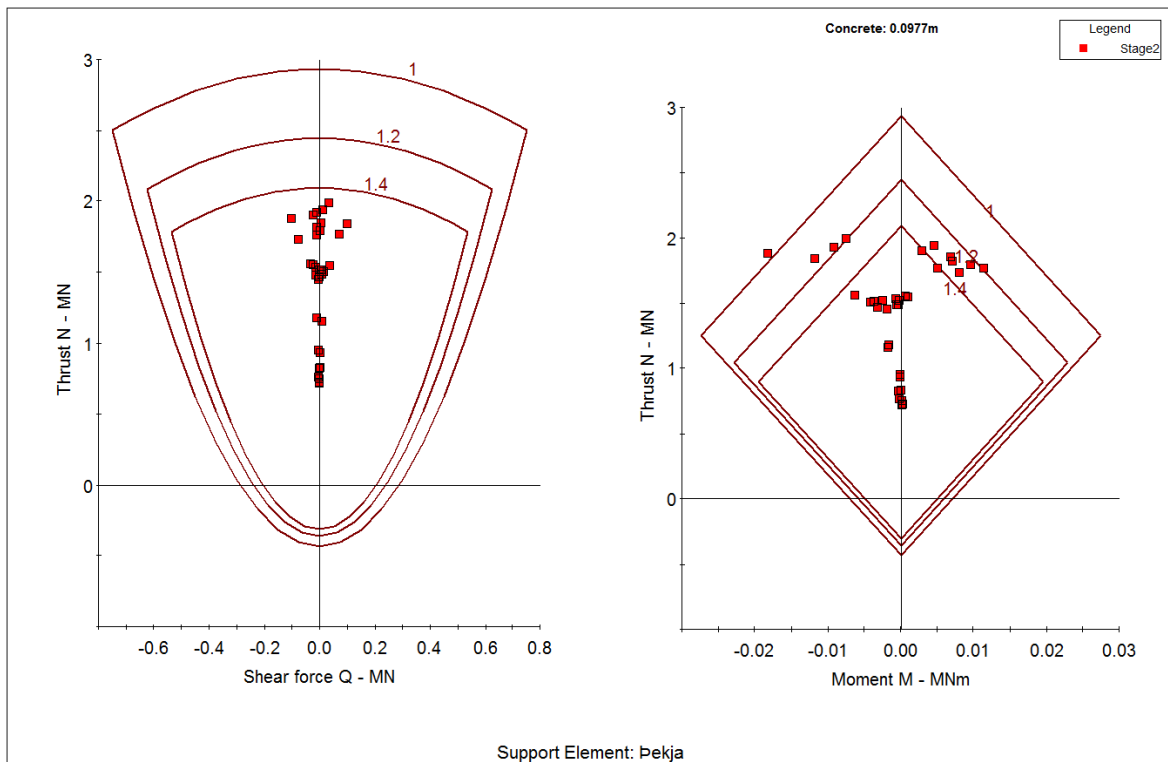
Stór hluti sprautusteypueininga lendir að jafnaði út fyrir ferilinn sem markar öryggisstuðulinn 1,4 gagnvart þrýstibroti. Hvorki grunnlíkanið né líkanið þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10 geta talist örugg enda hnígur mikill meirihluti eininga í veggjum og margar einingar í þekju. Þá kemur líkanið þar sem einásþrýstistyrkur basaltkarga er aukinn illa út í veggjum þar sem nær engar einingar teljast öruggar. Í þekju er enn fremur aukin hætt á þrýstibroti vegna samspils beygjuvægis og áslægs þrýstikrafts.



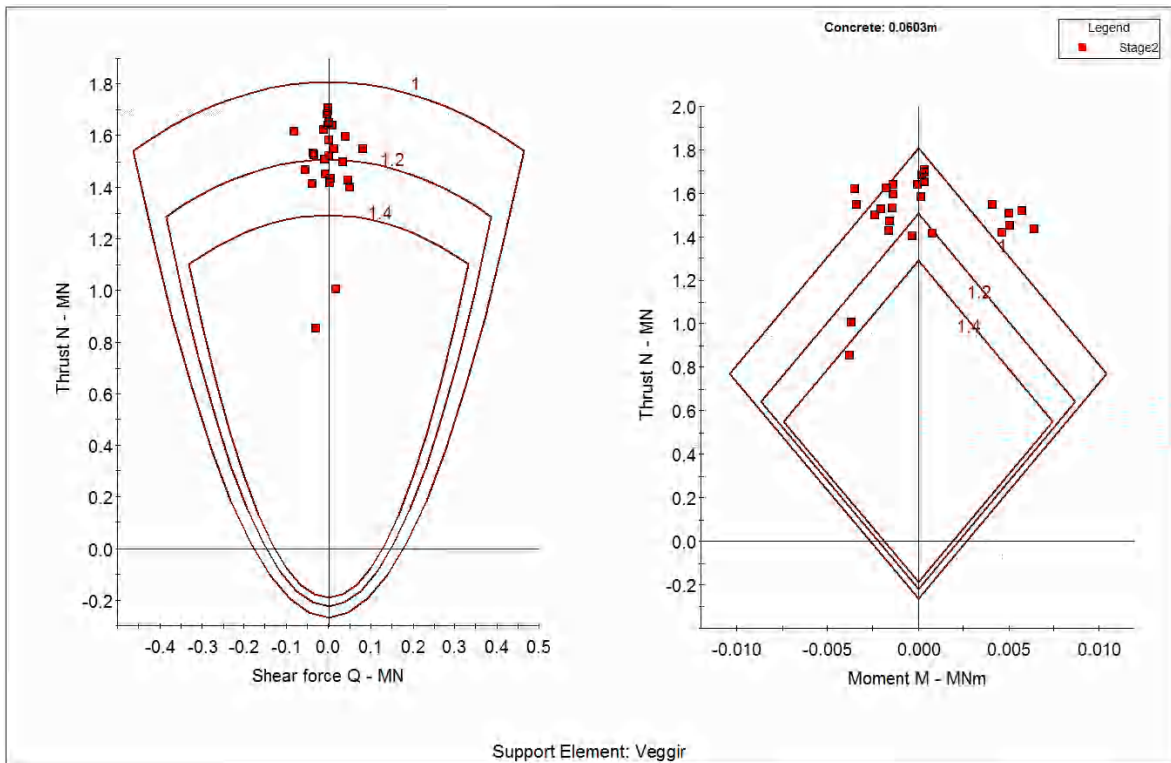
Mynd 9.92 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypueiningar í þekju í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



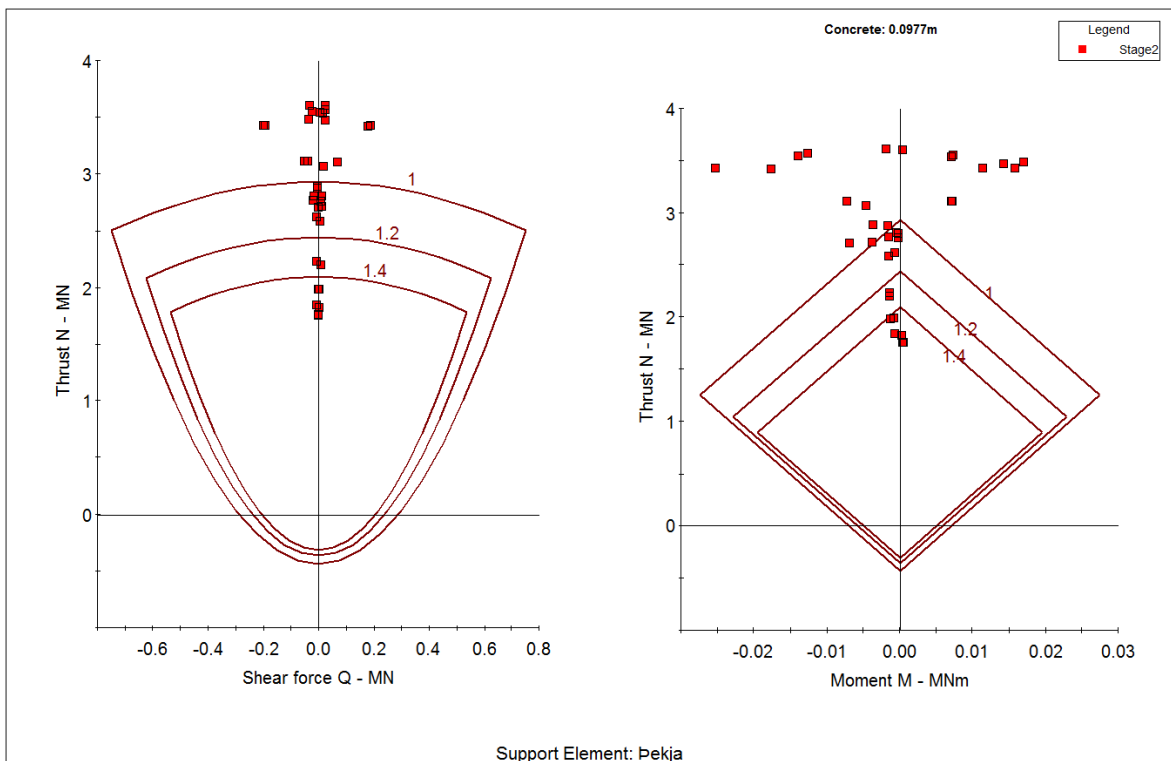
Mynd 9.93 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva 554 miðað við grunnlíkan og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



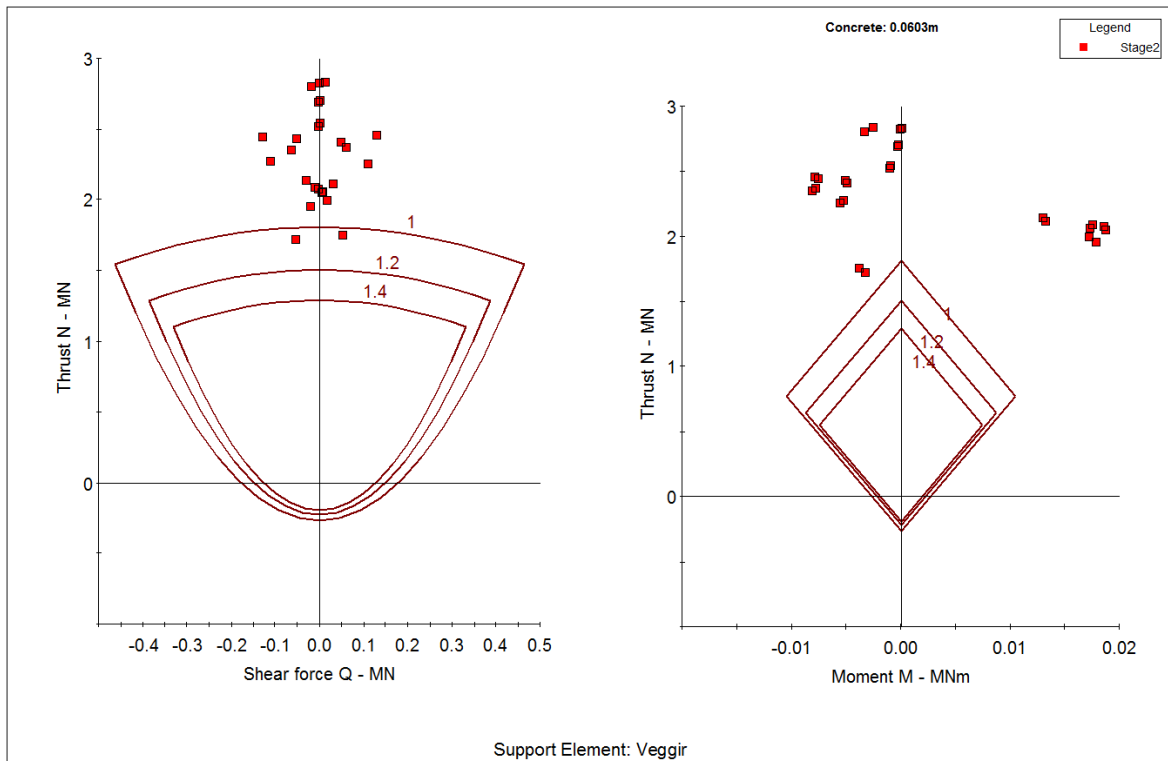
Mynd 9.94 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í þekju í salva 554 miðað við 50 MPa einásaprýstistyrk basaltkarga og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



Mynd 9.95 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva 554 miðað við 50 MPa einásapþrýstistyrk basaltkarga og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



Mynd 9.96 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í þekju í salva 554 miðað við lækun GSI-gilda um 10 og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



Mynd 9.97 Stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypuéiningar í veggjum í salva 554 miðað við lækkun GSI-gilda um 10 og 80-20 álagsdreifingu. Öryggisstuðlar eru afmarkaðir með rauðum ferlum.



## Samantekt

Notkun bergbolta og trefjastyrktrar sprautusteypu í Norðfjarðargöngum er almennt í góðu samræmi við Q-mat bergsins ef frá eru talin þau svæði þar sem sprautusteypubogar eru notaðir til bergstyrkinga. Á bogasvæðum eru notaðir færri bergboltar en Q-kerfið kveður á um en fjöldi sprautusteypuboga og magn sprautusteypu er umtalsvert meira en hönnun með hliðsjón af Q-kerfinu segir til um. Á rannsóknarsvæði 2 eru notaðir helmingi fleiri sprautusteypubogar en Q-kerfið kveður á um og heildarmagn sprautusteypu er a.m.k. tvöfalt meira en hannaðar styrkingar gera ráð fyrir.

Notað magn sprautusteypu er að jafnaði umtalsvert meira en reiknað magn skv. kennisniði og þykktarviðmiðum. Þannig er rúmmál sprautusteypu í vinnustyrkingum að jafnaði nokkru meira en hannaðar lokastyrkingar gera ráð fyrir jafnvel þótt lokastyrkingar taki mið af meiri steypuþykkt. Skv. þykktarmælingum er algengt að steypuþykktin sé allt að 1,5 cm meiri en uppgefinn þykktarflokkur segir til um en þykktin getur einnig verið minni eða enn meiri. Margföldunarstuðull sprautusteypu, þ.e. notað magn á móti reiknuðu magni miðað við sömu þykkt, virðist hækka samfara lægri Q-gildum. Á rannsóknarsvæði 1 þar sem aðstæður til gangagerðar teljast sæmilegar er margföldunarstuðullinn 1,28 en á rannsóknarsvæði 2 þar sem aðstæður eru óstöðugar er stuðullinn 1,96.

Q-gildi í þekju virðast ekki hafa afgerandi áhrif á heildarmagn styrkinga í Norðfjarðargöngum. Að jafnaði eykst fjöldi bergbolta samfara lækkandi Q-gildi í þekju en fylgni breytanna er aðeins í meðallagi. Magn sprautusteypu á rannsóknarsvæðunum fjórum virðist á engan hátt háð Q-gildi í þekju. Einstaka salvar gera það að verkum að steypumagn virðist aukast með hækkandi Q-gildum.

Þar sem styrkingar á rannsóknarsvæðum 1 og 4 reynast í mjög góðu samræmi við fyrirmæli Q-kerfisins er einn salvi af hvoru svæði valinn til skoðunar í  $RS^2$ . Uppsettar styrkingar miðast við Q-kerfið og eiginleikar styrkinganna taka mið af þeim efniskröfum sem gerðar eru til bergbolta og trefjastyrktrar sprautusteypu í Norðfjarðargöngum. Sjö líkön voru gerð af salva F377 á rannsóknarsvæði 1 og sex líkön af salva 554 á rannsóknarsvæði 4. Áhrif þess að breyta einásaprýstistyrk, GSI-gildum, fjaðurstuðli og útpenslustuðli ásamt álagsdreifingu voru könnuð.

Í öllum líkönum af sölvum F377 og 554 reiknast bergfærslur mestar neðan við lagmót þar sem veikari jarðlög síga inn í göngin. Í engu tilviki standast bergstyrkingar álagið fullkomlega, þ.e. án þess að einstakar einingar hnígi. Hnignar einingar í bergstyrkingum eru þó ekki einhlítur mælikvarði á öryggi styrkinganna.

Bergfærslur í salva F377 reynast ásættanlegar, þ.e. innan við 2% af radíus ganganna, í öllum líkönum nema einu. Sé miðað við að bergstyrkingar þoli að hámarki 12,5 mm bergfærslur má gera ráð fyrir að styrkingar gefi sig í öllum líkönum að einu undanskildu. Hækkun og lækkun GSI-gilda hefur mikil áhrif á bergfærslur. Hækkun GSI-gilda um 10 minnkar bergfærslur um helming á meðan bergfærslur tvöfaldast við lækkun GSI-gilda um

10. Einásaprýstistyrkur basaltkarga hefur mikla þýðingu fyrir bergfærslur og fjölda hniginna eininga. Styrkur og fjaðurstuðull þóleiít-basalts virðast hins vegar hafa hlutfallslega lítil áhrif á bergfærslur og hnignar einingar. Styrkstuðlar umhverfis göngin lækka þó greinilega þegar þessar stærðir minnka um meira en helming.

Bergfærslur í salva 554 reynast í öllum líkönum meiri en 2% af radíus ganganna. Vegna óstöðugra aðstæðna er eðlilegt að gera ráð fyrir meiri bergfærslum við hönnun og uppsetningu styrkinga og ásættanlegar bergfærslur verða að taka mið af því. Sé miðað við 5% af gangaradíusnum reiknast bergfærslur of miklar í einu líkani. Hækkun og lækun GSI-gilda hefur mest áhrif á bergfærslur. Bergfærslur minnka um helming við hækkun GSI-gilda um 10 og ríflega tvöfaldast við lækun GSI-gilda um 10. Styrkur basaltkarga hefur mikil áhrif á fjölda hniginna eininga en hlutfallslega lítil áhrif á bergfærslur. Útþenslustuðull setlagsins hefur veruleg áhrif á bergfærslur en óveruleg áhrif á fjölda hniginna eininga.

Bergspennur í líkönum af salva F377 eru í góðu samræmi við útreikninga úr Kirsch- og ellipsujöfnum. Öðru máli gegnir um salva 554 þar sem snertilspennur á gangaveggina reiknast a.m.k. tífalt lægri í líkönum heldur en útreikningar með jöfnum gefa til kynna. Þar virðist setlagið í þekju ganganna hafa áhrif á spennudreifingu umhverfis göngin.

Bergfærslur í báðum sölvum aukast hratt eftir að þrýstispenna á yfirborð ganganna hefur fallið um 60%. Af bergfærsluferlum að dæma má ætla að bergstyrkingar þurfi að hafa náð fullri virkni áður en þrýstispennan hefur fallið um u.þ.b. 70%. Eftir það dregur verulega úr stöðugleika bergsins. Séu bergstyrkingar hins vegar settar upp of snemma, þ.e. þegar 50% álagsins hafa komið fram, verður álagið á styrkingarnar of mikið.

Þegar þrýstispenna á yfirborð ganganna er látin falla í þrepum í því skyni að útbúa bergfærsluferil reiknast minni bergfærslur en líkönin gefa til kynna. Ekki er ljóst hverju þetta sætir. Hins vegar reynast bergstyrkingar hafa óveruleg áhrif á heildarbergfærslur þar sem litlu sem engu munar á bergfærslum í styrktum og óstyrktum líkönum. Bergboltar og sprautusteypa megna því ekki að halda aftur af bergspennuhreyfingum en með víðeigandi hönnun og uppsetningu geta þau hins vegar komið í veg fyrir að afspennt efni hrynji inn í göngin. Sé miðað við að bergstyrkingar þoli að hámarki 12,5 mm bergfærslur reynist álag á styrkingar of mikið í sex af sjö líkönum af salva F377 og helmingi líkana af salva 554.

Öryggi bergstyrkinga var kannað fyrir þrjú líkön í hvorum salva: grunnlíkan, líkan með hærri einásaprýstistyrk basaltkarga og líkan þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10. Í öllum tilvikum er miðað við að 80% álagsins hafi komið fram við uppsetningu styrkinga. Einingar með öryggisstuðul  $\geq 1,4$  teljast veita fullnægjandi öryggi.

Í salva F377 teljast bergboltarnir í basaltkarganum ekki öruggir í tveimur líkönum þar sem um eða yfir helmingur af lengd þeirra hefur lægri öryggisstuðul en 1,4 og meira en þriðjungur af lengd þeirra hnígur. Besta útkoman fæst þegar einásaprýstistyrkur basaltkargans er aukinn en verst er útkoman þegar GSI-gildi eru lækkuð um 10. Sprautusteypa í þekju er í öllum tilvikum örugg í salva F377 en öryggisstuðlar í veggjum eru lægri. Verst er útkoman þegar GSI-gildi eru lækkuð um 10 en meirihluti sprautusteypueininga hnígur við þau skilyrði. Þegar styrkur basaltkargans er aukinn reiknast ekkert hnig í steypueiningum í veggjum en samspil beygjuvægis og áslægs þrýstikrafts veldur aukinni hættu á þrýstibroti.

Í salva 554 verða allir bergboltar fyrir það miklu álagi að einhverjar einingar hníga í einhverju líkananna. 3 m langir boltar í veggjum ganganna hníga að einhverju leyti í öllum líkönum og það sama á við um boltana sem fara í gegnum setlagið. Þegar GSI-gildi eru lækkuð um 10 er um helmingur af lengd allra bolta með lægri öryggisstuðul en 1,4 og geta því vart talist öruggir. Stór hluti sprautusteypueininga í salva 554 lendir að jafnaði út fyrir ferilinn sem markar öryggisstuðulinn 1,4 gagnvart þrýstibroti. Hvorki grunnlíkanið né líkanið þar sem GSI-gildi eru lækkuð um 10 geta talist örugg enda hnígur mikill meirihluti eininga í veggjum og margar einingar í þekju. Þá kemur líkanið þar sem þrýstistyrkur basaltkarga er aukinn illa út í veggjum þar sem nær engar einingar teljast öruggar. Í þekju er enn fremur aukin hætta á þrýstibroti vegna samspils beygjuvægis og áslægs þrýstikrafts.

## Lokaorð

Ítarleg úttekt á fylgni styrkinga við Q-kerfið getur vart talist raunhæfur kostur á framkvæmdatíma. Til þess er verkið of tímafrekt og myndi því seint nýtast við hönnun og uppsetningu vinnustyrkinga. Hins vegar er full ástæða til þess að kanna hversu vel styrkingar samræmast Q-kerfinu enda er ætlast til þess að kerfið sé haft til hliðsjónar við val á styrkingum. Slíka úttekt má síðan nýta við frekari aðlögun Q-kerfisins að íslenskum aðstæðum og þannig bæta alla áætlanagerð og val á styrkingum við næstu gangaframkvæmdir. Á framkvæmdatíma og ekki síður rekstrartíma ganganna getur líkangerð gefið vísbendingar um helstu álagssvæði og öryggi uppsettra styrkinga og þannig nýst við ákvörðun á lokastyrkingum og viðhald ganganna.

Við ákvörðun á boltamagni skv. Q-kerfinu var litið svo á að hver bolti styddi við sexhyrningslaga svæði og meðalbil á milli bolta skilgreint eins og mynd 9.6 sýnir. Sé boltabilið miðað við tvær hornréttar stefnur þannig að hver bolti styðji við ferningslaga svæði verður flatarmálið á hvern bolta rúmlega 15% meira og fyrir vikið verður uppsett boltamagn í Norðfjarðargöngum yfir viðmiðum Q-kerfisins. Í  $RS^2$  var reynt að líkja eftir sexhyrningsnálgun við uppsetningu bergbolta en forritið miðast þó við tvær hornréttar stefnur. Ætla má að styrkingar hefðu komið verr út í líkönum hefði boltum verið fækkað um a.m.k. 10%. Áhugavert væri að skoða áhrif þessa á niðurstöður líkanreikninga.

Nokkur óvissa ríkir um spennuástand bergsins á rannsóknarsvæðunum þar sem engar spennumælingar eru gerðar í Norðfjarðargöngum. Ætla má að lóðréttar spennur sem notast er við í líkanreikningum séu nærri lagi en meiri óvissa ríkir um láréttar spennur og k-gildi. Bergspennur hafa mikla þýðingu við líkangerð en einnig við aðlögun Q-gilda í veggjum skv. Q-kerfinu. Ef bergspennur eru háar á að nota óbreytt Q-gildi í veggjum fyrir  $0,1 < Q < 10$ . Q-gildi á þessu bili voru í öllum tilvikum margfölduð með stuðlinum 2,5 áður en styrkingar í veggjum voru ákvarðaðar. Ljóst má vera að öll líkön hefðu notið góðs af lægri Q-gildum og þar með meiri styrkingum í veggjum. Hins vegar er ekki ljóst hvað teljast háar bergspennur skv. Q-kerfinu.

Engar athugasemdir eru gerðar við Q-mat verktakans þar sem allar jarðfræðiskýrslur hafa verið yfirfarnar og samþykktar af eftirliti. Q-matið getur hins vegar verið persónubundið sem hefur áhrif á hannað styrkingamagn og þ.a.l. niðurstöður líkanreikninga. Erfitt er að meta áhrif þessa en ætla má að á heildina litið hafi þau ekki úrslitapýðingu. Uppsett magn styrkinga er tekið úr sprautusteypu- og boltaskýrslum án athugasemda og hannaðar lokastyrkingar miðast við Excel-skjöl frá eftirliti. Ekki má útiloka þann möguleika að styrkingar séu rangt skráðar eða eigi eftir að taka breytingum á framkvæmdatímanum.

Erfitt er að meta tæknilega eiginleika bergs í Norðfjarðargöngum þar sem engar prófanir á efni úr göngunum liggja fyrir. Líklegt má þó telja að meðaleiginleikar þess séu í nokkru samræmi við fyrri prófanir á austfirsku bergi. Mikil breidd í prófunarniðurstöðum gefur þó tilefni til skoðunar, jafnvel umfram það sem hér er gert. Lítið er vitað um eiginleika bergsins eftir að brotþoli þess er náð. Fyrir vikið er með öllu óvíst hvort sú nálgun sem

beitt er við líkangerðina gefi raunsanna mynd af ástandi bergsins. Ljóst má vera að áreiðanleiki líkanreikninga líður fyrir skort á prófunum á einásaprýstistyrk, fjaðureiginleikum og útpenslustuðlum bergsins í göngunum. Útpenslustuðlar bergsins eru í raun með öllu óþekktir og því ríkir mikil óvissa um þau gildi.

Við líkangerðina var lögð áhersla á að kanna áhrif tæknilegra eiginleika bergs á bergfærslur og öryggi styrkinga. Í öllum tilvikum var miðað við fast styrkingamagn, ákvarðað af Q-gildi. Næsta skref væri að kanna áhrif meiri eða minni styrkinga og betri eða verri efniseiginleika þeirra. T.a.m. má ætla að raunveruleg þykkt sprautusteypu sé að jafnaði nokkru meiri en fyrirskrifuð þykkt skv. Q-kerfinu. Jafnvel allt að tvöfalt meiri. Áhugavert væri að kanna áhrif þykkari sprautusteypu á stöðugleika bergs umhverfis göng.

Líkönin taka í nær öllum tilvikum mið af 80-20 álagsdreifingu en bergfærsluferlar benda til þess að styrkingar þurfi að hafa náð fullri virkni þegar u.þ.b. 70% af álaginu hafa komið fram. Ástæða er til að kanna frekar áhrif álagsdreifingar á niðurstöður líkanreikninga.

Áhugavert væri að kanna öryggi styrkinga á bogasvæðum í göngunum.  $RS^2$  býður upp á þann möguleika að skilgreina sprautusteypuboga og greina það álag sem þeir verða fyrir. Þar sem styrkingar á bogasvæðum samræmast illa ákvæðum Q-kerfisins væri ástæða til þess að bera saman öryggi uppsettra styrkinga og styrkinga skv. Q-kerfi.

Með forrit á borð við  $RS^2$  í höndunum eru í raun engin takmörk fyrir því hvaða þætti má taka til skoðunar við líkangerð. Gæði líkananna takmarkast hins vegar við gæði þeirra inntaksstærða sem skilgreindar eru hverju sinni. Engu að síður er ljóst að líkanreikningar geta reynst gagnlegir við mat á mikilvægi inntaksstærða og þeim þáttum sem mest áhrif hafa á stöðugleika í göngum. Eiginleikar veikra jarðlaga virðast t.d. hafa meiri áhrif á niðurstöður líkanreikninga en eiginleikar sterkari jarðlaga og ljóst má vera að GSI-gildi hafa mikla þýðingu hvað öryggi styrkinga varðar.

---

Þegar þetta er skrifað er gangagreftri í Norðfjarðargöngum lokið. Ólöf Nordal, innanríkisráðherra, sprengdi lokahaft ganganna þann 25. september 2015. Vinna við lokastyrkingar og frágang er því hafin. Samkvæmt verksamningi á verkinu að vera lokið í september 2017 en vonir standa til þess að hægt verði að flýta opnun ganganna, jafnvel fram til ársloka 2016.

Hvað sem Q-gildum og niðurstöðum líkanreikninga líður má ljóst vera að öryggi vegfarenda er haft að leiðarljósi við lokafrágang Norðfjarðarganga. Allir þeir sem farið hafa þjóðveg 92 um Oddsskarð hljóta að átta sig á því hve mikilvæg samgöngubót Norðfjarðargöng eru. Þeir sem þurfa að sækja menntun, vinnu eða þjónustu yfir Oddsskarð geta glaðst yfir því að senn sér fyrir endann á langri sögu ófærðar, illviðra og erfiðra akstursskilyrða.

# Heimildir

Alejano, L.R. & Alonso, E. (2005). Considerations of the dilatancy angle in rocks and rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 42 (4), 481–507.

Austurfrétt (2015). Göngin: *Norðfjarðargöng: Ákveðið að grafa lengra Norðfjarðarmegin*. Skoðað 20. mars 2015 á <http://www.austurfrett.is/nordfjardargong/3123-nordfjardargong-akvedid-ad-grafa-lengra-nordfjardarmegin>

Ágúst Guðmundsson (2012). *Norðfjarðargöng: Jarðfræðilegar aðstæður til gangagerðar milli Eskifjarðar og Norðfjarðar*. Skýrsla, unnin fyrir Vegagerðina. Jarðfræðistofan ehf., nóvember 2012.

Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics* 6, 189–236.

Barton, N., Løset, F., Lien, R. & Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions. Í Bergman, M. (ritstj.) *Subsurface space* 2, 553–561. New York: Pergamon.

Barton, N. (2002). Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, 185–216.

Birgir Jónsson (1996). Geotechnical Field Classification of Basalts in Iceland. Í Sigurður Erlingsson & Haraldur Sigursteinsson (ritstj.) *Proc. Nordic Geotechnical Conference 1996*, 469–473.

Björn A. Harðarson (1984). *Jarðgöng á Íslandi – Berggæðamat*. OS-84080/VOD-21 B. Orkustofnun, Vatnsorkudeild, Reykjavík.

Björn A. Harðarson (1991). *Tunneling Quality of Icelandic Rock*. Reykjavík: JTS Geotechnical Services Ltd.

Björn A. Harðarson & Oddur Sigurðsson (2006). Bergstyrkingar í veggöngum á Íslandi. *Árbók VFÍ/TFÍ 2006*, 18 (1), 287–295.

BM-Vallá (2013). *Shotcrete for Norðfjarðargöng*. Upplýsingar um sprautusteypu sem notuð er í Norðfjarðargöngum.

Brady, B.H.G. & Brown, E.T. (1985). *Rock mechanics for underground mining*. London, George Allen and Unwin.

Burt, J.E. & Barber G.M. (1995). *Elementary Statistics for Geographers* (2. útgáfa). New York, Guilford Publications.

- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. & Minami, M. (2007). Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 247–265.
- Carranza-Torres, C. & Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, 506–532.
- Chanh, N.V. (2004). Steel fiber reinforced concrete. Í *Faculty of Civil Engineering Ho Chi Minh City University of Technology. Seminar Material*, 108–116.
- Crowder, J.J. & Bawden, W.F. (2004). Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research. *Rocnews*, Fall 2004.
- Deere, D.U. & Deere, D.W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. Í Kirkaldie, L. (ritstj.), *Rock Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*. Philadelphia, ASTM, 91–101.
- Efron, N. & Read, M. (2012). *Analysing International Tunnel Costs. An Interactive Qualifying Project*. Ástralía: Worcester Polytechnic Institute, febrúar 2012.
- Einar Hrafn Hjálmarsson (2011). *Tunnel Support – Use of Lattice Girders in Sedimentary Rock*. Óútgefin meistaraþrófsritgerð. Háskóli Íslands, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Reykjavík.
- Fjármála- og efnahagsráðuneytið (2004). *Ríkiskassinn. Hvað kostar ...?* Fjármála- og efnahagsráðuneytið, Reykjavík. Sótt 7. maí 2015 á [www.rikiskassinn.is/hvad-kostar/](http://www.rikiskassinn.is/hvad-kostar/)
- Franklin, J.A. & Dusseault, M.B. (1989). *Rock Engineering*. USA, McGraw-Hill.
- Friðleifur Ingi Brynjarsson (2012). *Umferðarspá um ný Norðfjarðargöng. Spá um þróun umferðar um ný Norðfjarðargöng 2017-2038*. Unnin fyrir Vegagerðina. Endurskoðuð 9. apríl 2013.
- Friðleifur Ingi Brynjarsson (2013). *Umferðarspá 2012-2060*. Umferðardeild Vegagerðarinnar 18. júlí 2013.
- Gesta, P. (1993). *Recommendations for use of convergence-confinement method*. AFTES, Groupe de Travail No.7: Tunnel Support and Lining, 206–222.
- Gibson, I.L., Kinsman, D.J.J. & Walker, G.P.L. (1966). Geology of the Fáskrúdsfjörður area, Eastern Iceland. *Soc. Sci. Islandica*, Greinar IV(2), 1–52.
- Gísli Eiríksson (2013). *Tilboðsskrá*. Excel-skjal dags. 6.2.2013.
- Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A.W. & Kaynia, A. (2002). Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption. Í *Proc. International Symposium on Sprayed Concrete*. Davos 2002, 134–142.

Guðmundur Valsson, Markus Rennen & Þórarinn Sigurðsson (2005). Campaign-ISNET2004. Remeasurement of the Icelandic reference network. *The 17th Nordic GIS Conference*. Reykjavík, 2005. Skoðað 10. apríl 2015 á [ftp://ftp.lmi.is/GPS/Data-Exchange/Rafn/ISN04\\_GInorden.pdf](ftp://ftp.lmi.is/GPS/Data-Exchange/Rafn/ISN04_GInorden.pdf)

Gunnar Arnar Gunnarsson (2008). *Rock Mass Characterisation and Reinforcement Strategies for Tunnels in Iceland. Fáskrúðsfjörður Tunnel*. Óútgefin meistaraþrófsritgerð. DTU-Byg og Háskóli Íslands, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Reykjavík.

Hallgrímur Örn Arngrímsson og Þorri Björn Gunnarsson (2009). *Tunneling in acidic, altered and sedimentary rock in Iceland. Búðarhálsvirkjun*. Óútgefin meistaraþrófsritgerð. DTU-Byg og Háskóli Íslands, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Reykjavík.

Helga Aðalgeirsdóttir, Magnús Björnsson & Sóley Jónasdóttir (2009). *Norðfjarðarvegur (92) um Norðfjarðargöng milli Eskifjarðar og Norðfjarðar. Mat á umhverfisáhrifum. Matsskýrsla*. Akureyri: Vegagerðin.

Hoek, E. (1999). Support for very weak rock associated with faults and shear zones. *International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining*, Kalgoorlie, Ástralía, 14.–19. mars, 1999 (opnunarfyrrilestur).

Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Sótt í september 2013 á [https://www.rocscience.com/education/hoeks\\_corner](https://www.rocscience.com/education/hoeks_corner)

Hoek, E. (2012). *Blast Damage Factor D*. Technical note for RocNews, Winter 2012 Issue, 2. febrúar 2012.

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980a). Empirical strength criterion for rock masses. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE 106 (GT9), 1013–1035.

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980b). *Underground excavations in rock*. London, Institution of Mining and Metallurgy.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, C. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. *Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium 1*, 267–273.

Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam.

Hoek, E. & Wood, D.F. (1987). Support in underground hard rock mines. Í Udd, J. (ritstj.), *Underground Support Systems* (35), 1–6.

Holmøy, K.H. & Aagaard, B. (2002). Spiling bolts and reinforced ribs of sprayed concrete replace concrete lining. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17, 403–413.

Hreggviður Norðdahl & Þorleifur Einarsson (2001). Concurrent changes of relative sea-level and glacier extent at the Weichselian-Holocene boundary in Berufjordur, Eastern Iceland. *Quaternary Science Reviews* 20, 1607–1622.



- Hreinn Haraldsson (1991). Breiðadals- og Botnsheiðargöng. *Vegamál* tímarit Vegagerðar ríkisins, 14 (2), 3–16.
- Hreinn Haraldsson & Björn A. Harðarson (1992). Jarðgöng í Ólafsfjarðarmúla. *Árbók VFI 1990/91*, 3 (1), 242–254.
- Hudson, J.A. & Priest, S.D. (1979). Discontinuities and rock mass geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16, 339–362.
- Jörimann (2013). *JB-Gitterträger*. Warenstadt, Jörimann Stahl- & Tunnelbau. Skoðað 10. apríl 2015 á [http://www.joerimann.com/informationen/jm-gittertraeger\\_1314017303.pdf](http://www.joerimann.com/informationen/jm-gittertraeger_1314017303.pdf).
- King, E.H. (1996). Shotcrete. Í Bickel, J.O., Kuesel, T.R. & King, E.H. (ritstj.), *Tunnel Engineering Handbook*, 220-230. USA: Chapman & Hall.
- Komselis, C., Blayney, N. & Hindle, D. (2012). The use of Lattice Girders in the Construction of Tunnels. *The Masterbuilder* 14 (4), 88–94.
- Kristján Sæmundsson (1979). Outline of the geology of Iceland. *Jökull* 29, 7–28.
- Lúðvík E. Gústafsson, Lapp B., Thomas L. & Lapp M. (1989). Tertiary Silicic Rocks in the Area of the Kækjuskörð Rhyolitic Volcano, Eastern Iceland. *Jökull* 39, 75–89.
- Marinos, P. & Hoek, E. (2000). GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proc. GeoEng2000 Conference*, Melbourne. 1422–1442.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 64, 55–65.
- Matthías Loftsson (2015). Tölvupóstur dags. 27. mars 2015.
- Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Ægir Jóhannsson (2006). In situ rock mass stresses in Iceland and rock mass deformation of underground caverns in the Kárahnjúkar and Blanda Hydroelectric Projects. Í Lu, M., Li, C.C., Kjörholt, H. & Dahle, H. (ritstj.), *In-situ Rock Stress. Measurement, Interpretation and Application* (bls. 289-296). Holland: Taylor & Francis/Balkema.
- Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson, Gísli Eiríksson, Björn A. Harðarson & Hlynur Guðmundsson (2010). *Sprautusteyptstyrkingar. Hagkvæmni mismunandi aðferða. Vegagerðin*, Rannsóknarskýrsla, nóvember 2010.
- Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson & Haraldur Hallsteinsson (2010). *Rannsóknir á eiginleikum setbergs í Norðfjarðargöngum og Óshlíðargöngum. Vegagerðin*, Rannsóknarskýrsla, júlí 2010.
- Matthías Loftsson & Benedikt Óskar Steingrímsson (2010). *Tæknilegir eiginleikar mismunandi berggerða. Vegagerðin*, Rannsóknarskýrsla, apríl 2010.

Matthías Loftsson, Ægir Jóhannsson & Einar Erlinsson (2005). Kárahnjúkar Hydroelectric Project – Powerhouse Cavern. Successful excavation despite complex geology and stress induced stability problems. Í Kristiansen, J., Hamre, L., Olsson, R. & Berg K.R. (ritstj.), *Fjellsprengningsteknikk, bergmekanikk, geoteknikk*, 26.1–26.25. Noregur, Oslo: Norsk Jord- og Fjellteknisk Forbund.

Metrostav (2015a). *Jarðfræðikortlagning í Norðfjarðargöngum (drög)*. Óútgefið jarðfræðikort af Norðfjarðargöngum. Metrostav, janúar 2015.

Metrostav (2015b). *Norðfjarðargöng. Measuring of thickness*. Óútgefnar þykktarmælingar fyrir sprautusteypu, skýrslur nr. 7 og 8.

Metrostav (2014a). *Norðfjarðargöng. Geological Tunnel Mapping*. Óútgefnar jarðfræðiskýrslur nr. F374–F380, 580–596, 538–546, 553–561.

Metrostav (2014b). *Norðfjarðargöng. Boltaskýrslur*. Óútgefnar boltaskýrslur nr. F428–F434, 614–630, 572–580, 587–595.

Metrostav (2014c). *Norðfjarðargöng. Sprautusteypuskýrslur*. Óútgefnar sprautusteypuskýrslur nr. F493–F499, 751–783, 705–714, 722–730.

NGI (2013). *Using the Q-system. Rock mass classification and design. Handbook*. Noregur, Oslo: Norwegian Geotechnical Institute, apríl 2013.

Ófeigur Örn Ófeigsson (2015a). *Nfjg – Lokast\_FA\_9626-6600*. Excel-skjal dags. 1.5.2015.

Ófeigur Örn Ófeigsson (2015b). *Nfjg – Lokast\_EF\_DRÖG-vinnuskjal*. Excel-skjal dags. 20.5.2015.

Ófeigur Örn Ófeigsson (2015c). Tölvupóstur dags. 23. september 2015.

Ólafur Jónsson (1976). *Berghlaup*. Akureyri: Ræktunarfélag Norðurlands.

Pacovský, J. (2002). Possibilities and Limits of Stress Measurements Performed on Geotechnical Constructions with the Use of Hydraulic Pressure Cells. *Proc. 30th Conf. Foundations*. Czech Republic, Brno: CERM.

Panet, M., Bouvard, A., Dardard, B., Dubois, P., Givet, O., Guilloux, A., Launay, J., Minh Duc, N., Piraud, J., Tournery, H. & Wong, H. (2001). *Recommendations on the Convergence-confinement Method*. AFTES, Frakkland.

Palmström, A. & Broch, E. (2006). Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21, 575–593.

Parker, H.W. (1996). Geotechnical Investigations. Í Bickel, J.O., Kuesel, T.R. & King, E.H. (ritstj.), *Tunnel Engineering Handbook*, 46-79. USA: Chapman & Hall.

Plaxis (2015). *PLAXIS 2D Tutorial Manual 2015*. Delft, Holland: Plaxis.

- Pretec (2013). *Inspection certificate for rockbolts*. Zhejiang Pretec Metal Products Co., Ltd.
- Rawlings, C.G. & Simic, M. (1996). Hvalfjörður – Iceland's first tunnel built under the sea. *Tunnels & Tunnelling*, October 1996, 16–18.
- Ribacchi, R. (2000). Mechanical Tests on Pervasively Jointed Rock Material: Insight into Rock Mass Behaviour. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 33(4), 243–266.
- Roaldset, E. (1983). Tertiary (Miocene-Pliocene) interbasalt sediments, NW- and W-Iceland. *Jökull* 33, 39–56.
- Rockcrete (2015). Wet Shotcreter. *Rockcrete Equipment (PTY) LTD*, Suður-Afríka. Sótt 6. maí 2015 á <http://www.rockcrete.co.za/wet.php>
- Rocscience (á.á.). *RS<sup>2</sup> Theory*. Rocscience Inc. Toronto, Ontario. Sótt í september og október 2015 á [https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp9/theory/Theory\\_Overview.htm](https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp9/theory/Theory_Overview.htm)
- Rocscience (2015). *RS<sup>2</sup> v. 9.0 Tutorial Manual*. Rocscience Inc. Toronto, Ontario. Sótt í september og október 2015 á <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2/resources/tutorials>
- Sani, F., Moratti, G., Coli, M., Laureano, P., Rovero, L., Tonietti, U. & Coli, N. (2012). Integrated geological-architectural pilot study of the Biet Gabriel-Rufael rock hewn church in Lalibela, northern Ethiopia. *Italian Journal of Geosciences*, 131(2), 171–186.
- Siegesmund, S. & Dürrast, H. (2014). Physical and Mechanical Properties of Rocks. Í Siegesmund, S. & Snethlage, R. (ritstj.). *Stone in Architecture – Properties, Durability*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sigurður Erlingsson (2011). *Rock Support Interaction Analysis*. Fyrirlestranótur í námskeiðinu BYG121F Engineering Rock Mechanics. Háskóli Íslands, Verkfræði- og náttúruvísindasvið.
- Sigurður Erlingsson (2013). *Engineering Rock Mechanics. Lecture Notes* (draft). Fyrirlestranótur í námskeiðinu BYG121F Engineering Rock Mechanics. Háskóli Íslands, Verkfræði- og náttúruvísindasvið.
- Staňková, Z. (2013). *Norðfjarðargöng, Norðfjörður. Tunnel lattice girder*. Metrostav, nóvember 2013.
- Vaðlaheiðargöng (2015). *Framvinda verks*. Sótt 5. maí 2015 á <http://www.vadlaheidi.is/is/frankvaemdin/framvinda-verks>
- Vegagerðin (á.á.). *Norðfjarðargöng*. Verkefnavefur Vegagerðarinnar. Sótt 23. mars 2015 á <http://www.vegagerdin.is/verkefnavefir/Nordfjardargong.nsf>
- Vegagerðin (2009). *Kortlagning á jarðfræði og styrkingum í jarðgöngum*. Vegagerðin, september 2009.

Vegagerðin (2012). *Framkvæmdafréttir Vegagerðarinnar* 16. tbl. 20. árg. nr. 594, 24. september 2012.

Vegagerðin (2013). *Útboðsteikningar af Norðfjarðargöngum*. Vegagerðin, febrúar 2013.

Walker, G.P.L. (1958). Geology of the Reydarfjörður area, Eastern Iceland. *Qart. J. Geol. Soc. London*, 114, 367–391.

Walker, G.P.L. (1962). Tertiary welded tuffs in eastern Iceland. *Quart. J. Geol. Soc. London* 118, 275–293.

Walker, G.P.L. (1974). The structure of Eastern Iceland. Í Leó Kristjánsson (ritstj.), *Geodynamics of Iceland and the North Atlantic Area* (bls. 177–188). Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.

Wikel, K. (2011). Geomechanics: bridging the gap from geophysics to engineering in unconventional reservoirs. *First Break* 29, 71–80.

Wikipedia (2015). Rock mass plasticity. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Skoðað 10. apríl 2015 á [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rock\\_mass\\_plasticity&oldid=640543303](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rock_mass_plasticity&oldid=640543303)

Zhao, X.G. & Cai, M. (2010). A mobilized dilation angle model for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47 (3), 368–384.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2013). *The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals* (7. útgáfa). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Þorleifur Einarsson (1991). *Myndun og móttun lands*. Reykjavík: Mál og menning.

# Viðaukar

Viðauki A: Langsnið og grunnmynd veglínu Norðfjarðarganga

Viðauki B: Kortlagning á jarðfræði Norðfjarðarganga ásamt skýringum

Viðauki C: GSI og D

Viðauki D: RSR og RMR berggæðamatskerfin

Viðauki E: Q-kerfið - inntaksstærðir og styrkingagraf

Viðauki F: Dæmi um jarðfræði-, bolta- og sprautusteypuskýrslur úr Norðfjarðargöngum

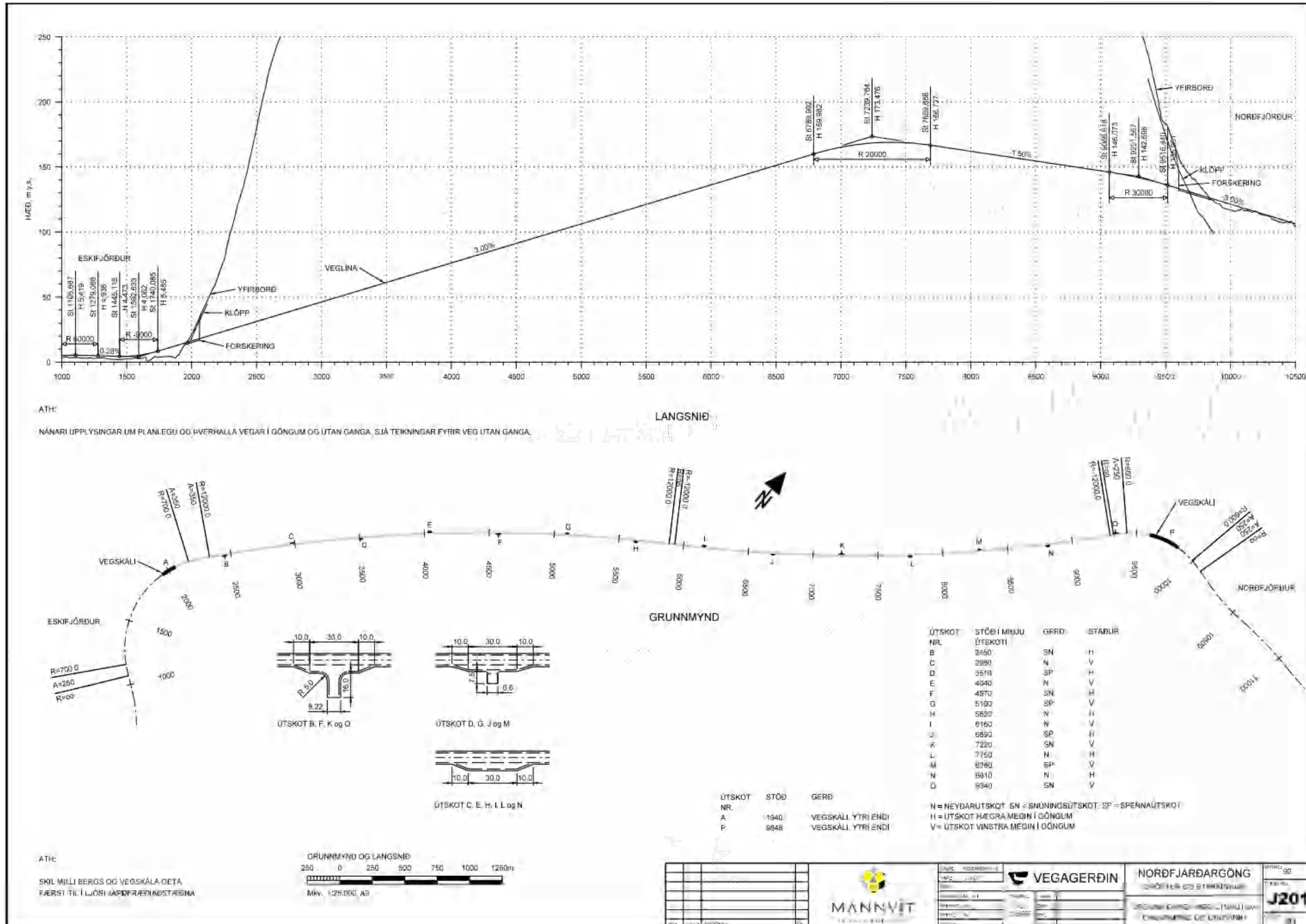
Viðauki G: Inntaksstærðir Q-gilda fyrir rannsóknarsvæði 1-4

Viðauki H: Hönnunarteikningar af sprautusteypubogum

Viðauki I: Langsnið jarðlaga og yfirborðslandslag á gangaleiðinni



# Viðauki A: Langsnið og grunnmynd veglínu Norðfjarðarganga







Viðauki B: Kortlagning á jarðfræði Norðfjarðarganga ásamt skýringum  
Skýringar með jarðfræðikortlagningu

	vesicular basalt
	ash tuff / pyroclastic rock
	scoria / sc, scoriaeous basalt (scB)
	scoria, sc basalt, thermal altered. (a/sc)
	sedimentary interbeds, tuffs, tuffaceous sediments
	agglomerate
	andesite/dacit
	ignimbrite
	silts/silt
	tectonic stressed rock
	altered rock
	columnar rock
	tectonic breccia
	volcanic breccia
	joints
	joints filled with clay...
	slickensided plane
	tectonic fault
	cracks, failures, weakness zone
	mylonitized belt
	zoned veins
	natural cavities, natural chimney
	water outflow
	dripping wet-damp/inflow limit
	wet areas on the lining
	signs of stress problems (sounds, cracking...)
	scaling, slabbing in the walls (after 1-2 rounds back)
	releasing of slabs from face due to stress problems
	explosive borehole
	Schmidt hammer test
	rock samples for PU or swelling
	rock sample (documentary)

	bolt - SN 3.0 m
	bolt - SN 4.0 m
	bolt - SN 5.0 m
	bolt - CT 3.0 m
	bolt - CT 4.0 m
	bolt - CT 5.0 m
	chemical bolt 3.0 m
	shotcrete
	glass fibre reinforced concrete
	steel mesh
	temporary plastic sheet
	safety concrete/safety concrete with fibres
	lattice girder
	upshot
	colling
	umbrella borehole



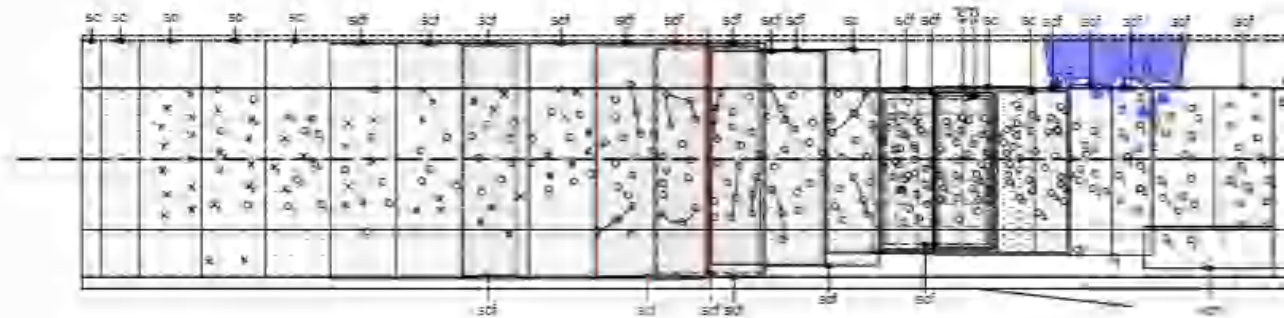
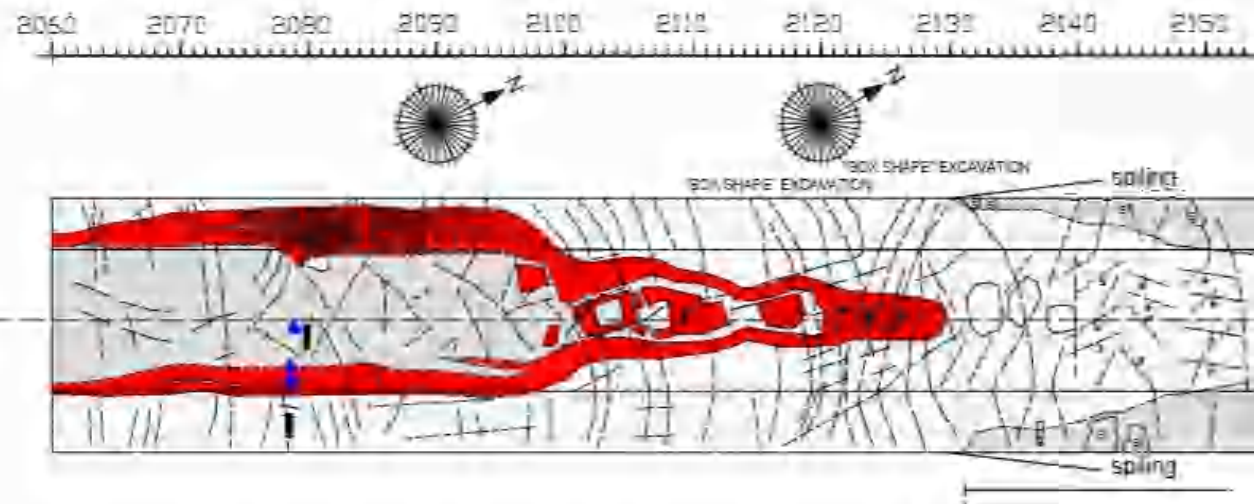
chainage (m)

# ESKIFJÖRDUR

Geological map and water inflows

Direction of excavation →

Initial support



Round No

Date

Rock Mass Quality (Q - values) - Wall

Rock Mass Quality (Q - values) - Crown

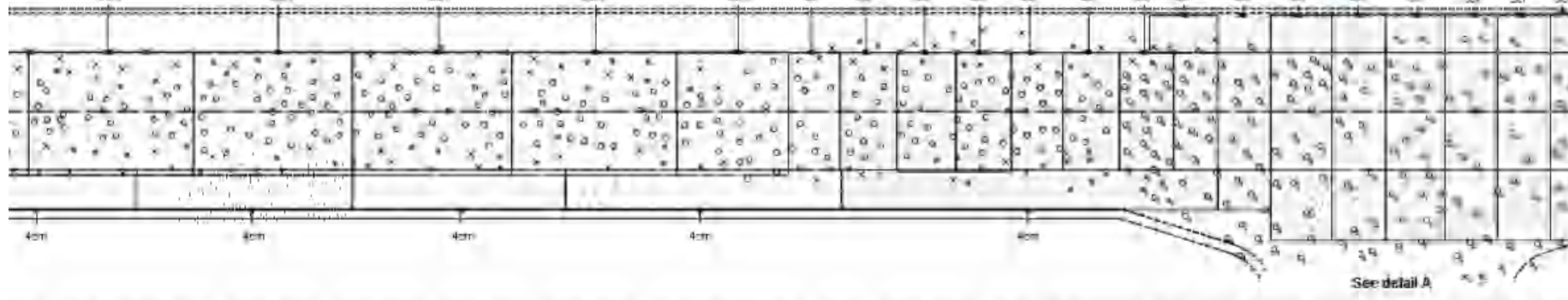
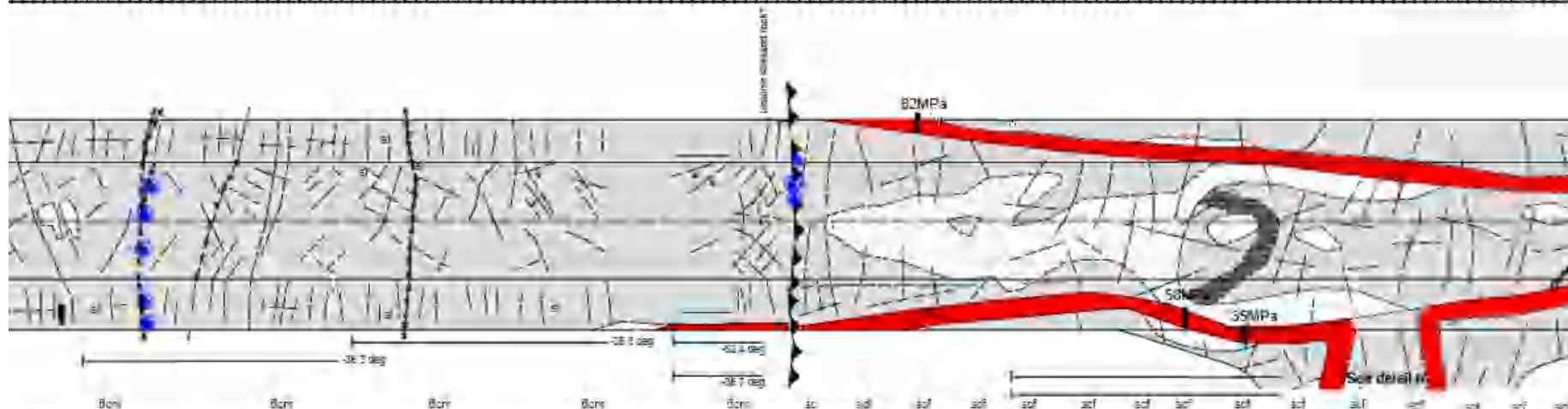
Rock Mass Quality (Q - values) - Wall

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
13.11.12	14.11.12	15.11.12		16.11.12	17.11.12	18.11.12	19.11.12	20.11.12	21.11.12	22.11.12	23.11.12	24.11.12	25.11.12	26.11.12	27.11.12	28.11.12	29.11.12	30.11.12			
6	6.6	6.5	4.3	4.4	3.2	4	5	3.8	3.6	2.6	2.5	2.5	2.2	2.2	4.7	1.7	1.7	1.6	2.0	4.6	5



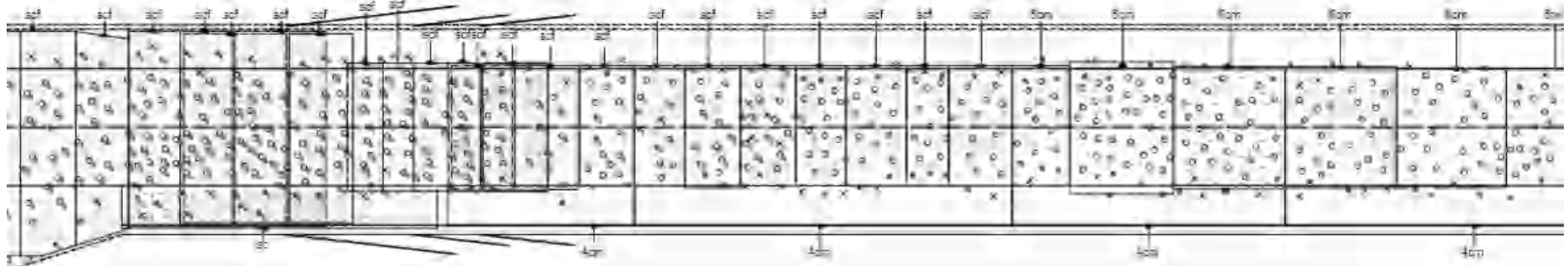


2300 2310 2320 2330 2340 2350 2360 2370 2380 2390 2400 2410 2420 2430 2440



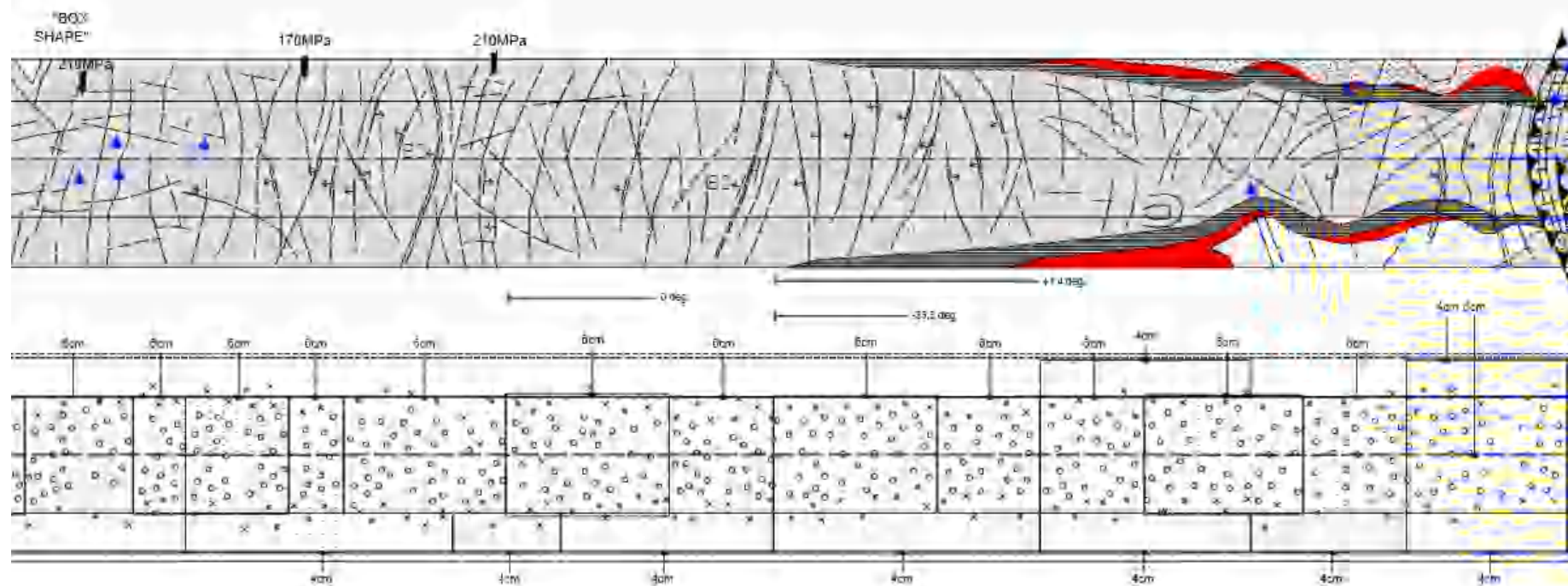
52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	
45.12.13	46.12.12	47.12.12		48.12.13		49.12.13		50.12.13		51.12.13		52.14		53.14		54.14		55.14		56.14		57.14		58.14		59.14		60.14
11.7	11.7	4.7	5	11.7	11.7	5	12.5	12.5	10	12.5	12.5	4.6	7.5	6.7	4.0	5.6	5.8	8.9	6.5	8.8	5.8	6.0	5	5.5	5.0	5.6		

40 2450 2460 2470 2480 2490 2500 2510 2520 2530 2540 2550 2560 2570 2580



90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	
8.14	17.14	18.14	19.14	20.14	21.14	22.14	23.14	24.14	25.14	26.14	27.14	28.14	29.14	30.14	31.14	32.14	33.14	34.14	35.14	36.14	37.14	38.14
3.3	3.3	2.2	2.2	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

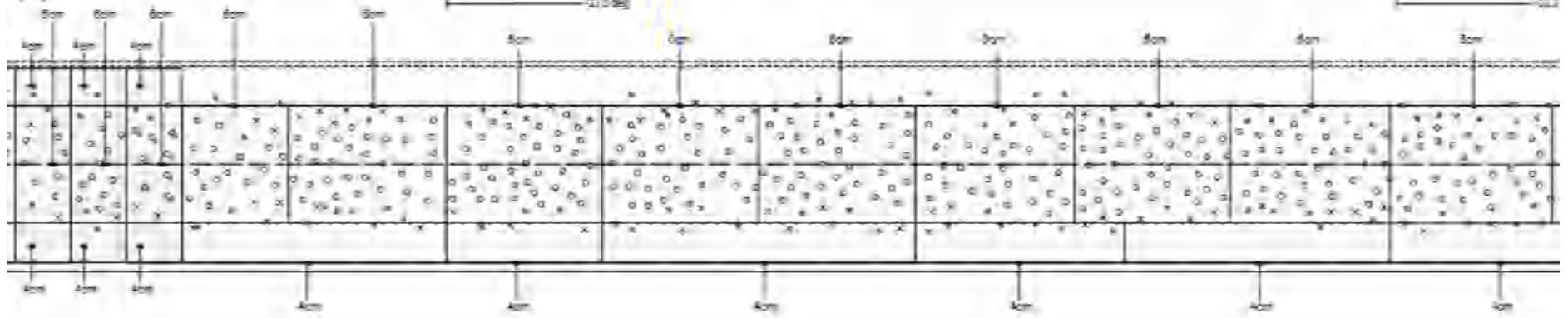
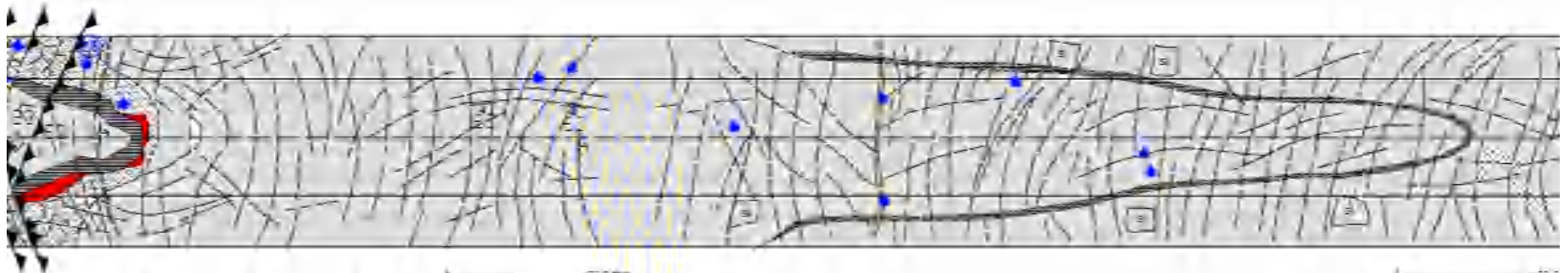
2590 2600 2610 2620 2630 2640 2650 2660 2670 2680 2690 2700 2710 2720



111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
32.14	7.214		8.214		18.214		11.214		12.214		19.214		14.214		15.214		17.214		13.214		16.214		18.214		21.214		22.214		23.214
4.2	4.8	8.7	7.2	11.5	11.7	11.7	4.3	4.1	8.2	6.7	6.7	5.3	8.8	8.8	5.7	8.8	5.8	5.3	3.3	3.6	6.2	5.0	4.6	4.5	4.5	4.5	5.5	3.7	4.8

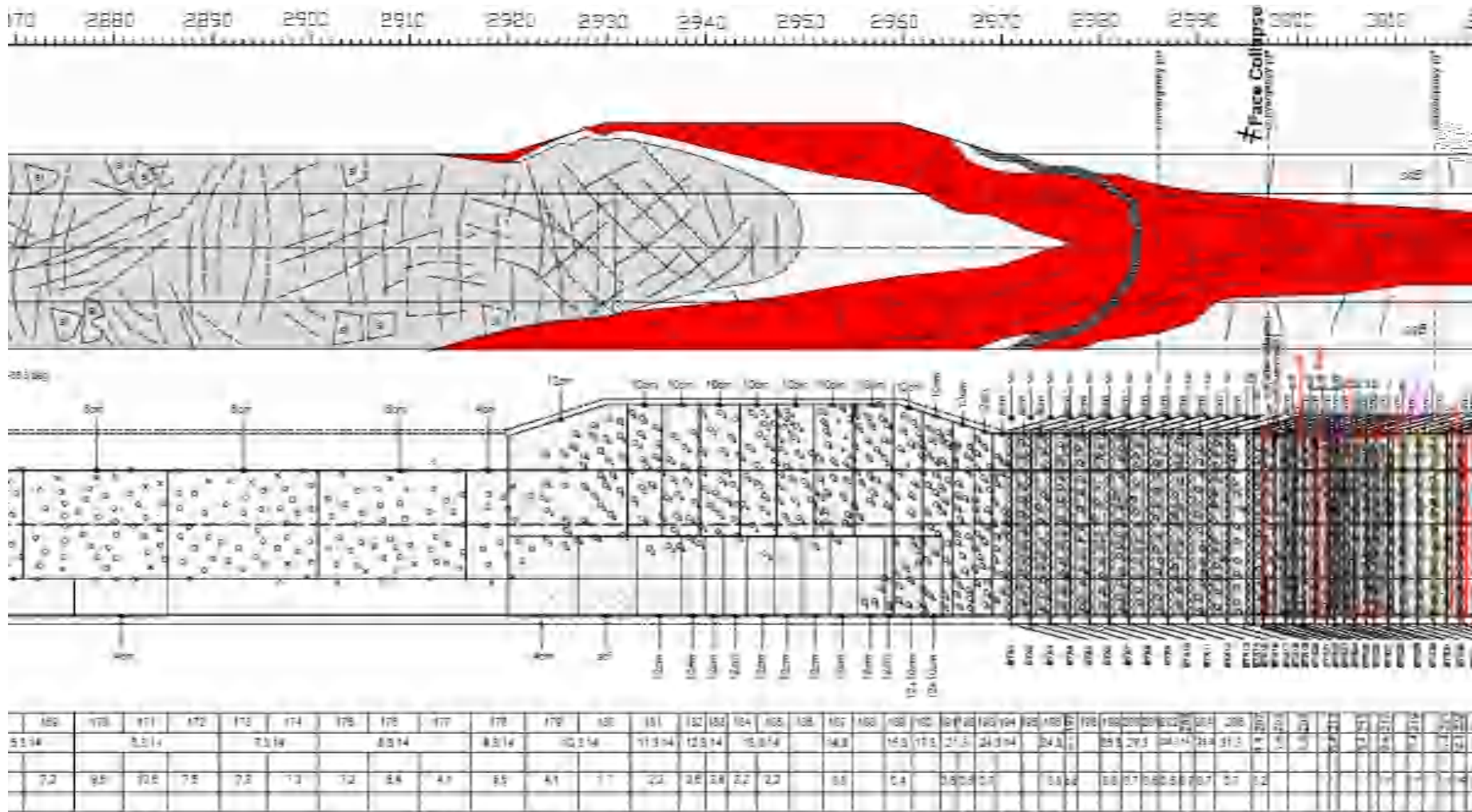


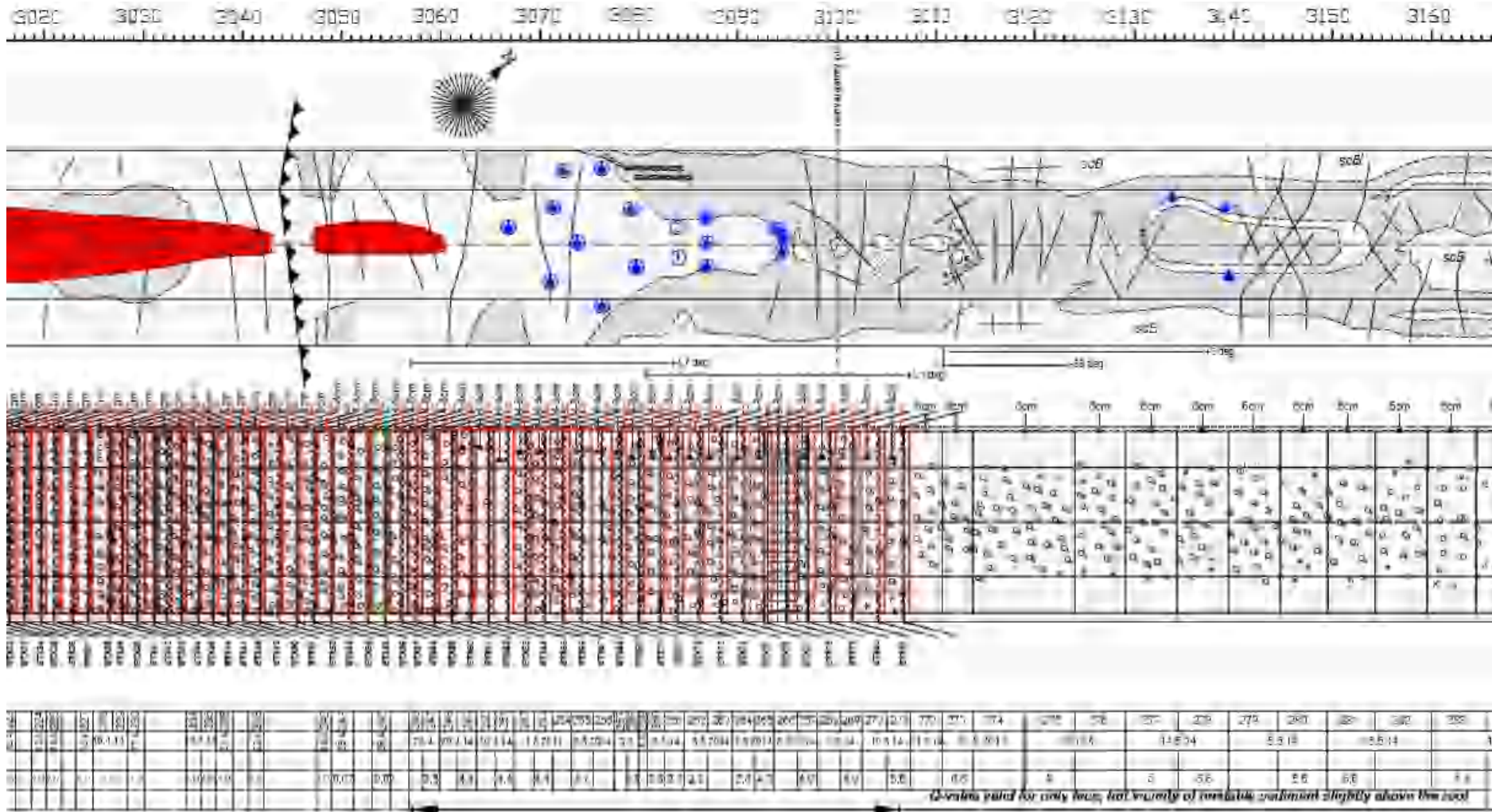
2730 2740 2750 2760 2770 2780 2790 2800 2810 2820 2830 2840 2850 2860 2870



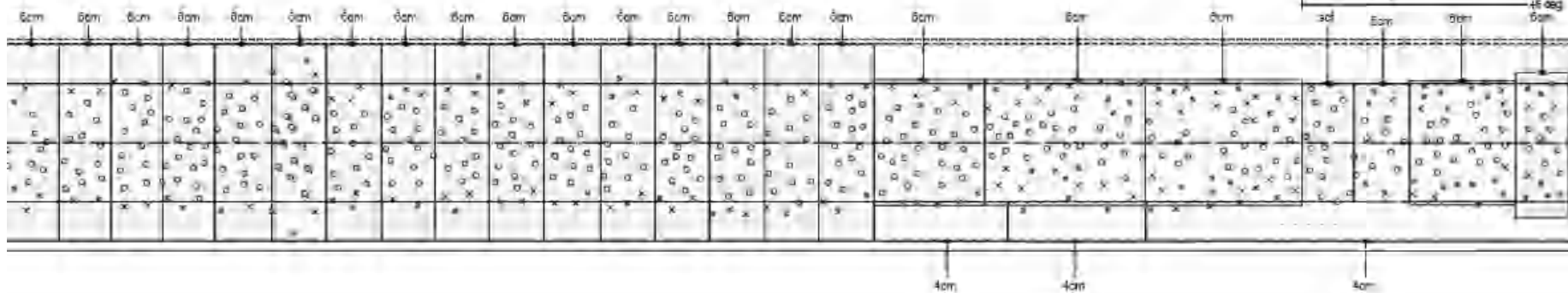
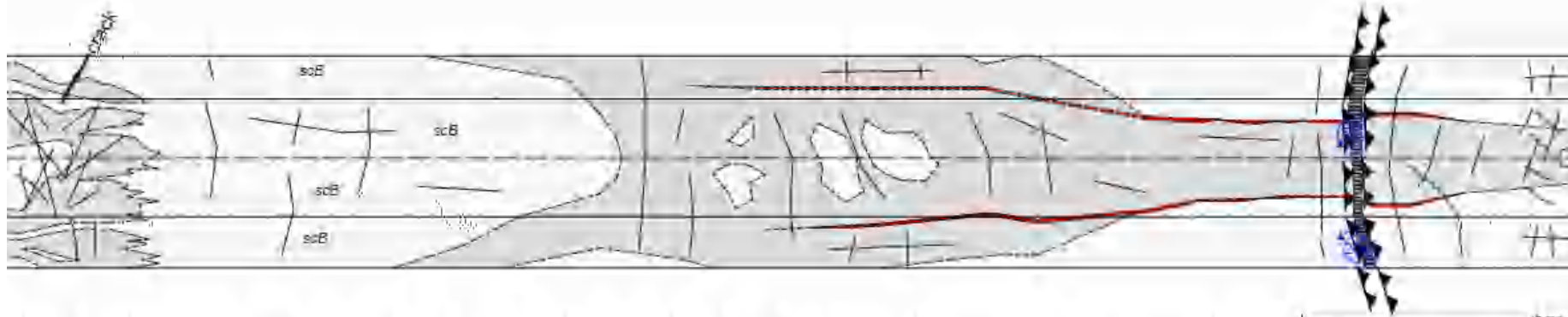
140	141	142	143	144	145	146	147	148	148	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168		
21.214		22.214			23.214			24.214			25.214			26.214			27.214			28.214			29.214		3.814		4.314		5.3	
1.2	2.3	4.8	5.2	7.2	7.2	10.6	10.0	7.2	6.1	5.8	5.6	5.4	5.4	7.6	5.8	5.0	12.8	7.6	10.1	7.5	7.5	7.5	7.2	8.1	7.5	7.5	9.0	7.2		





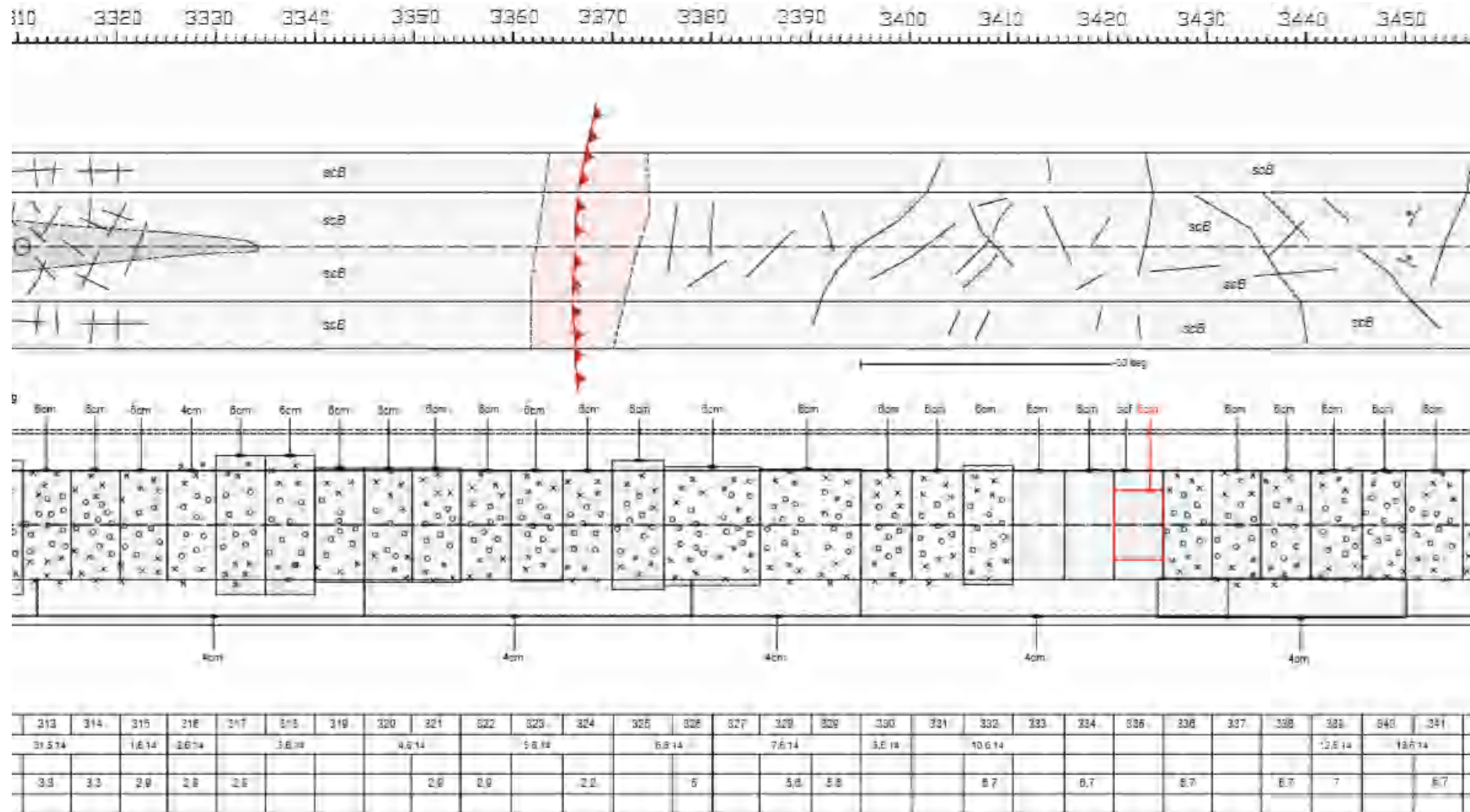


3170 3180 3190 3200 3210 3220 3230 3240 3250 3260 3270 3280 3290 3300 3310

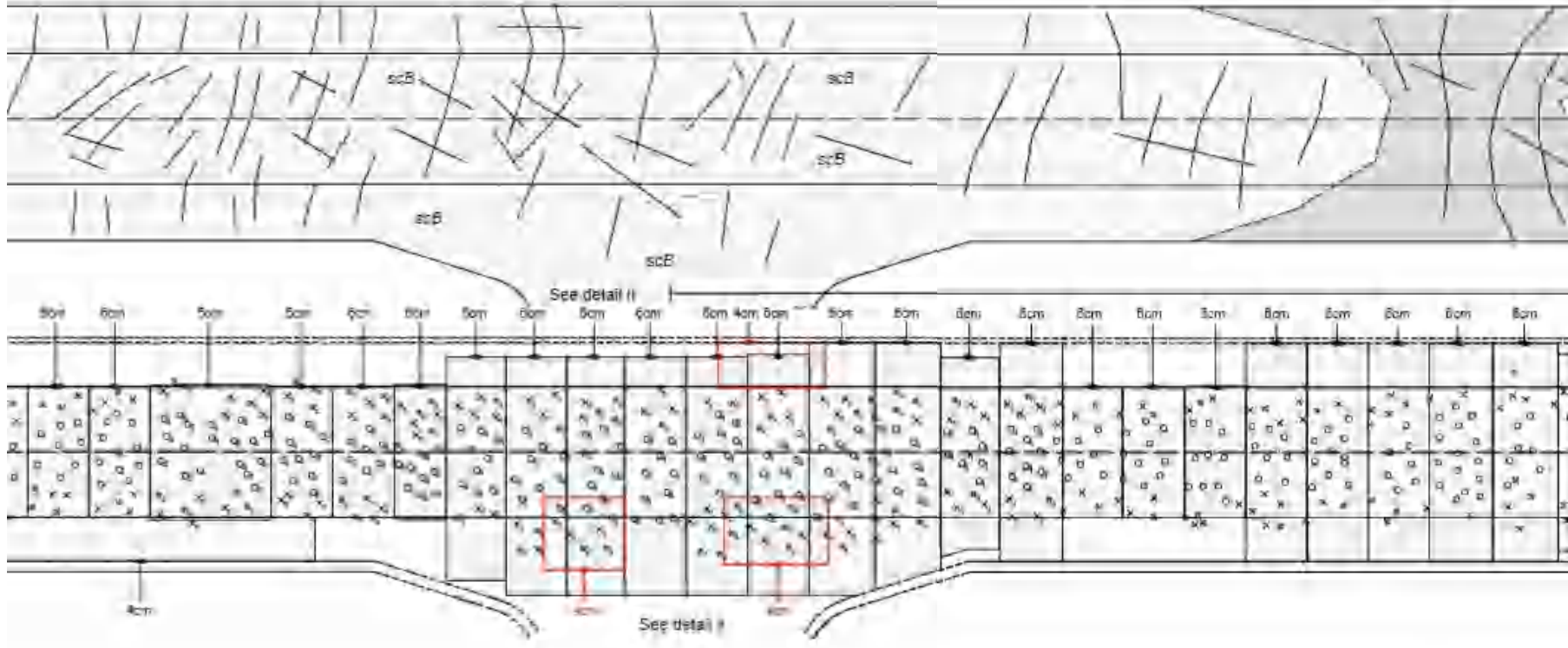


264	285	266	287	288	297	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312
17.5 14			19.5 14			20.5 14				22.5 14				23.5 14		24.5 14		25.5 14	26.5 14			27.5 14		28.5 14	29.5 14		30.5 14	
5.1	5.1		5.1			5.1				5.7			5.7		5.0		5.0	5.0		6.0			3.3	1.3	1.6		4.0	3.6

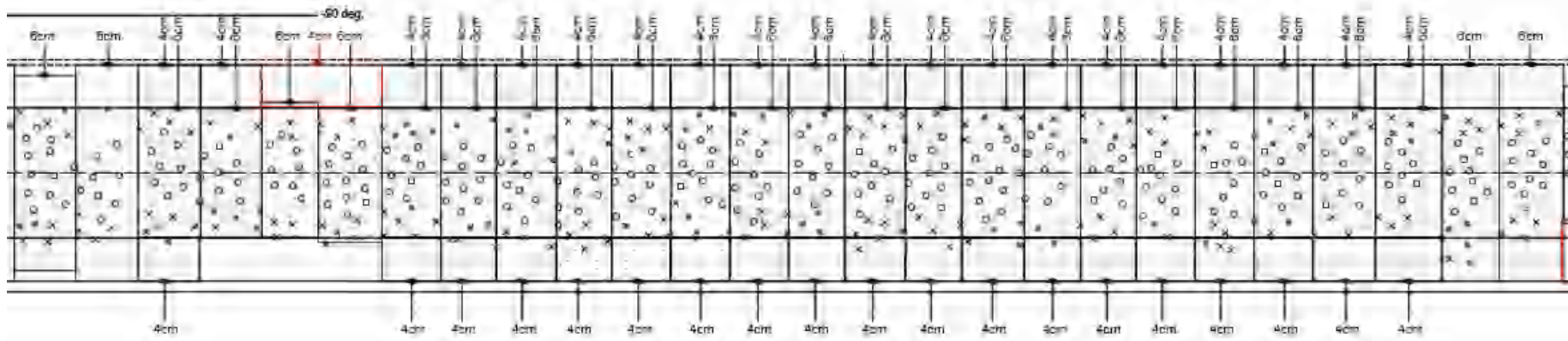
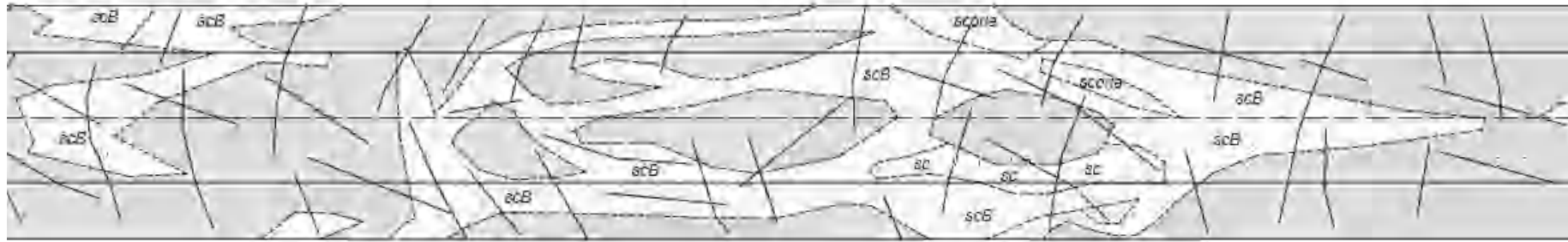




3450 3470 3480 3490 3500 3510 3520 3530 3540 3550 3560 3570 3580



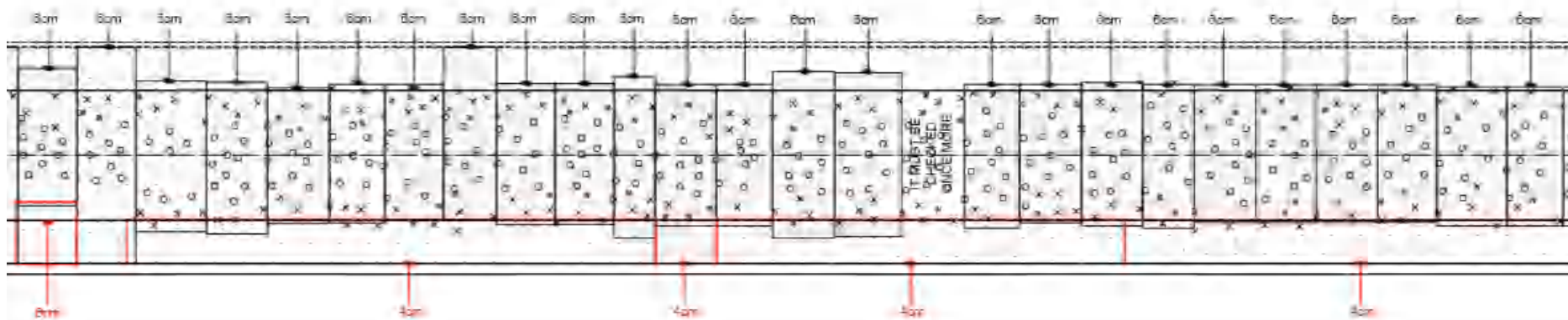
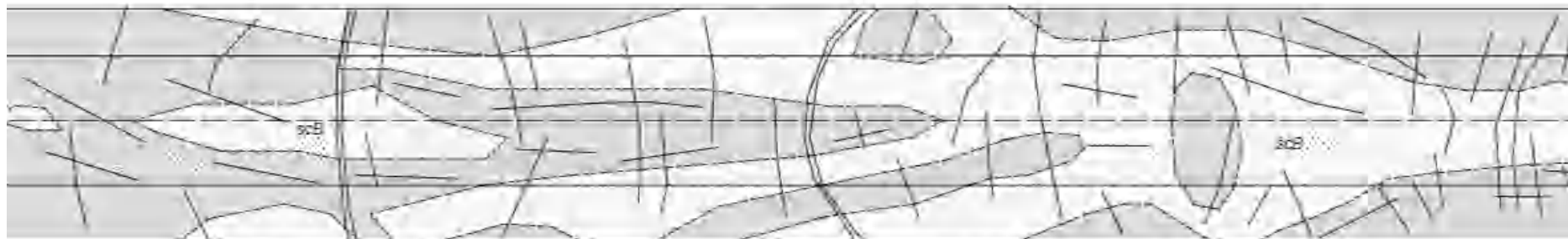
342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366
14.0		18.0		17.5		18.0		18.5		20.0		21.0		24.0	25.6		26.6						28.0	
	7	6	6		4		4		4		4		4		6		3							5
							4		7			8			6		-1							4



367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392
30.6.14		1.1.14	2.7.14			1.7.14		4.3.14		6.7.14		7.7.14			6.7.14		9.7.14			10.7.14		11.7.14		12.7.14	
		7.7		7.2		5.7	6.6	6.6	6.6		7.7		7.7		6.6	6.1	5.5	5.5		2.5		2.2		7.7	
																				7.7		7.7			

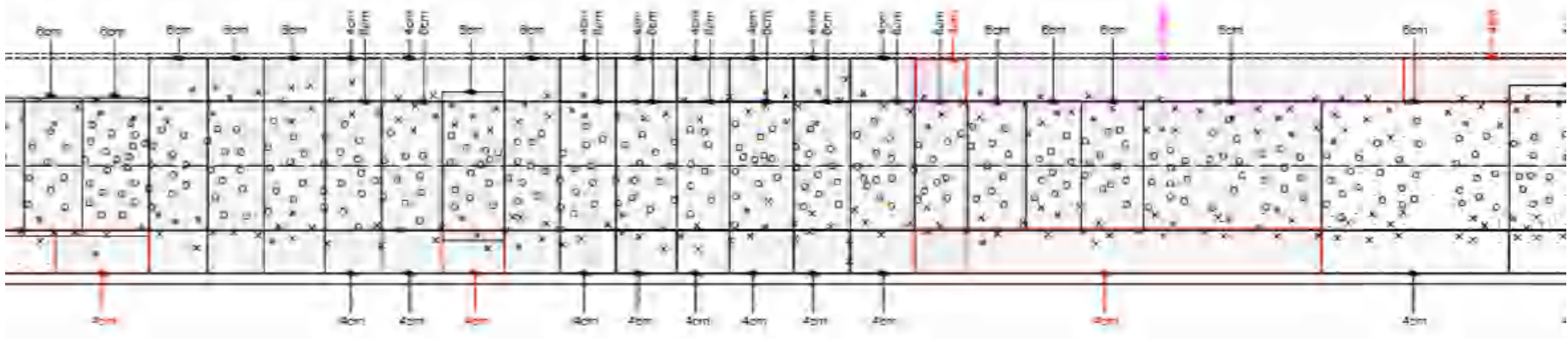
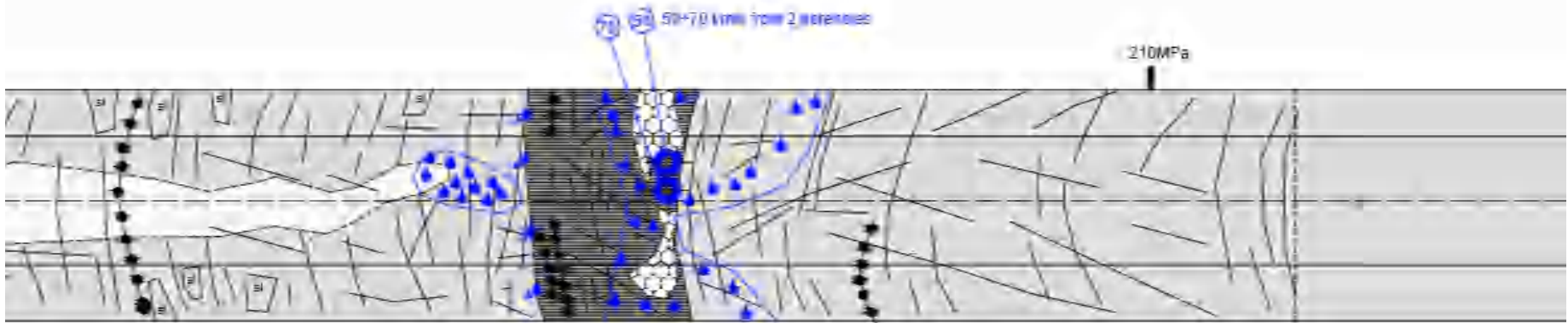


3720 3730 3740 3750 3760 3770 3780 3790 3800 3810 3820 3830 3840



393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419
14,7,14	15,7,14	16,7,14		16,7,14	17,7,14		17,7,14			19,7,14	20,7,14	21,7,14		22,7,14		23,7,14		24,7,14			25,7,14	26,7,14				28,7,14
8,8	8,8	5,0		5,0	5,0		5,5			4,4	4,4	2,8		2,0		3,7		3,3			2,6	3,8	3,3			0,2
																						4,4				

3250 3260 3270 3280 3290 3300 3310 3320 3330 3340 3350 3360 3370 3

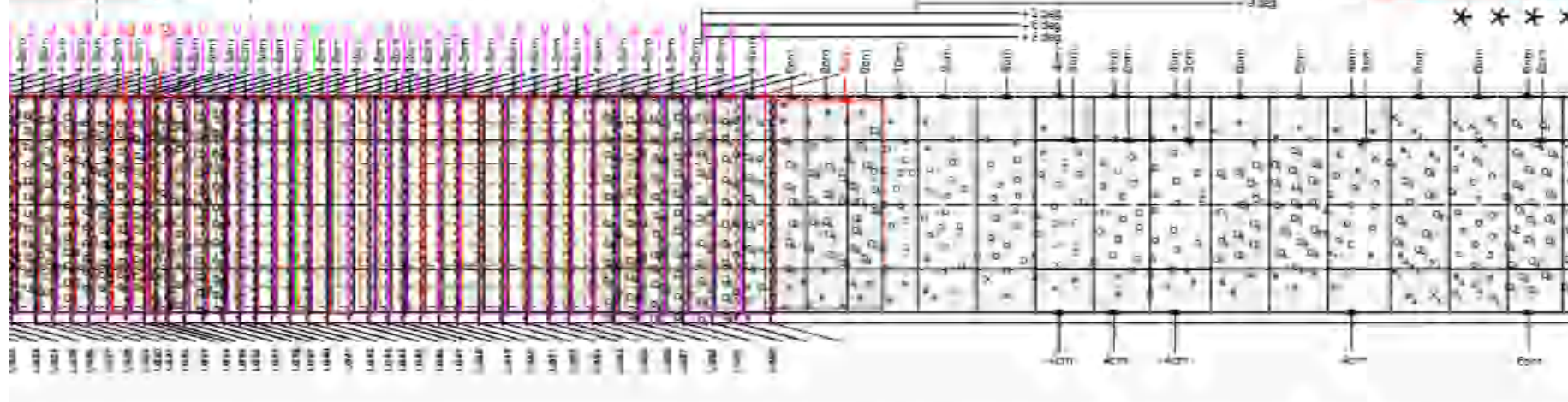
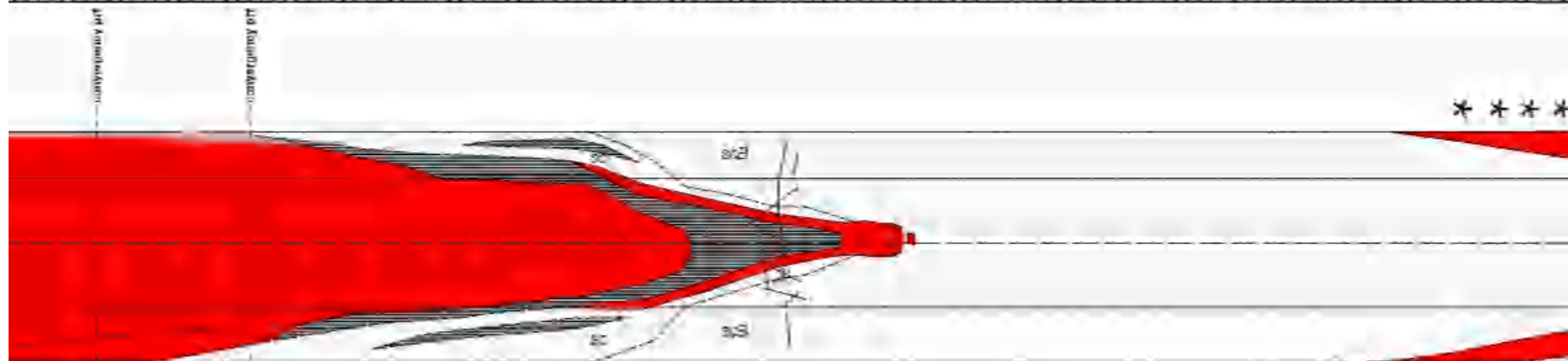


	400	421	422	423	424	425	426		426	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	
4	297.14		307.14				317.14		187.14	237.14		307.14			53.14		62.14			73.14			85.14			96.14	
	2.2	1.5	2.0	2.9			2.9	3.3	0.8	1.6	0.6	1.5	1.7		1.9		4.4			0.7	0.7			4.4		5.0	3.8





0 4120 4130 4140 4150 4160 4170 4180 4190 4200 4210 4220 4230 4240

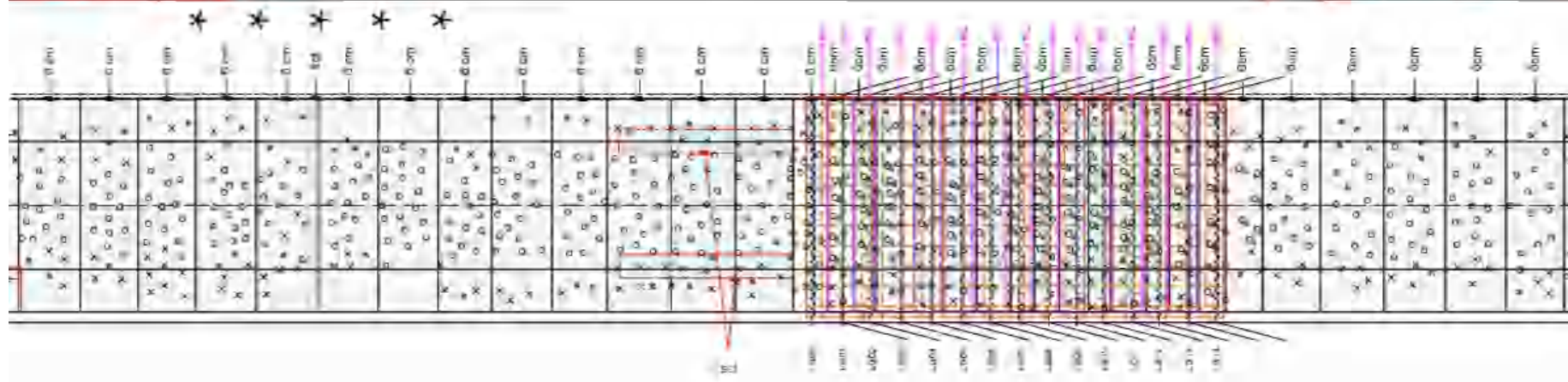
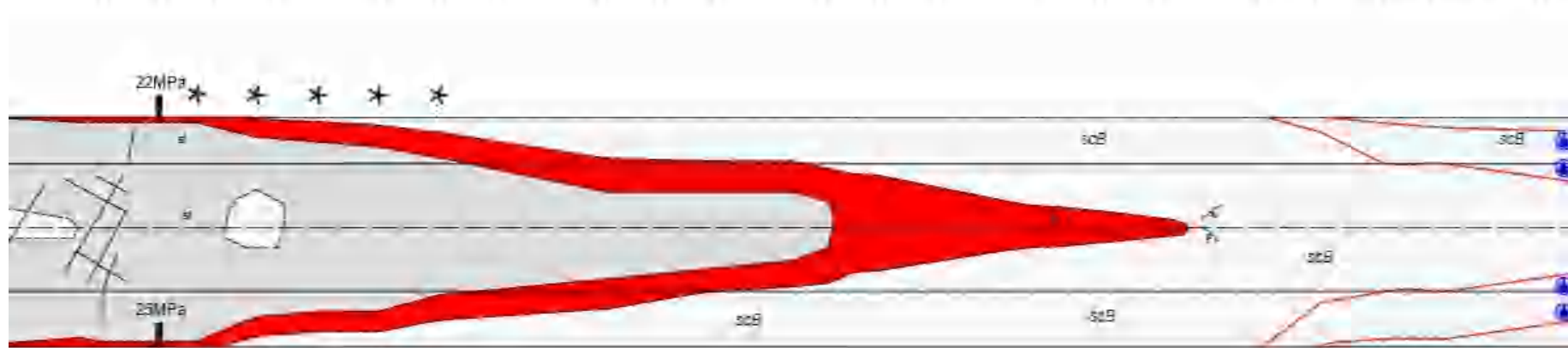


0	4120	4130	4140	4150	4160	4170	4180	4190	4200	4210	4220	4230	4240
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



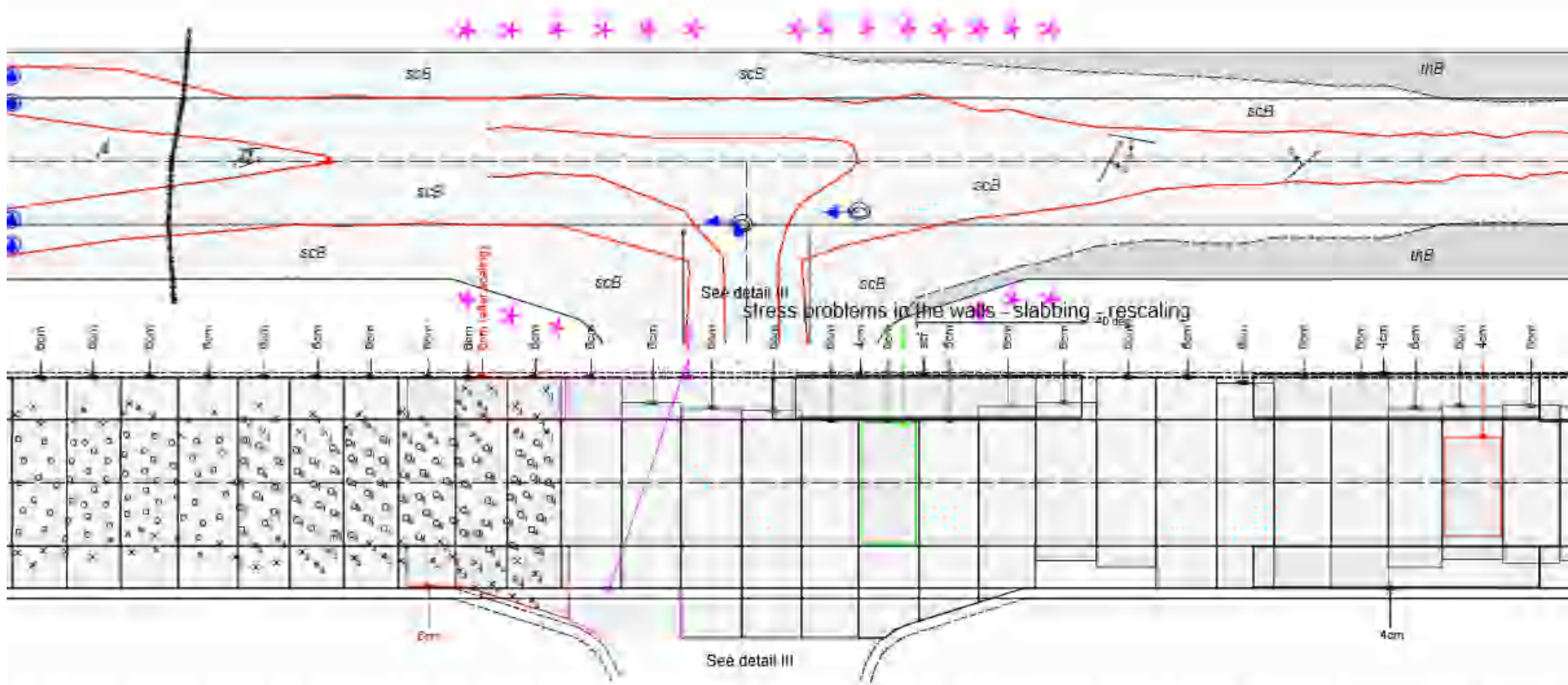


4380 4390 4400 4410 4420 4430 4440 4450 4460 4470 4480 4490 4500



568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601
20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14	20.11.14
5.0	11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7	1.8	1.8	1.8	1.8	2.2	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
5.0	10	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.7	0.7	0.7	0.1	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
5.0	11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7	1.8	1.8	1.8	1.8	2.2	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6

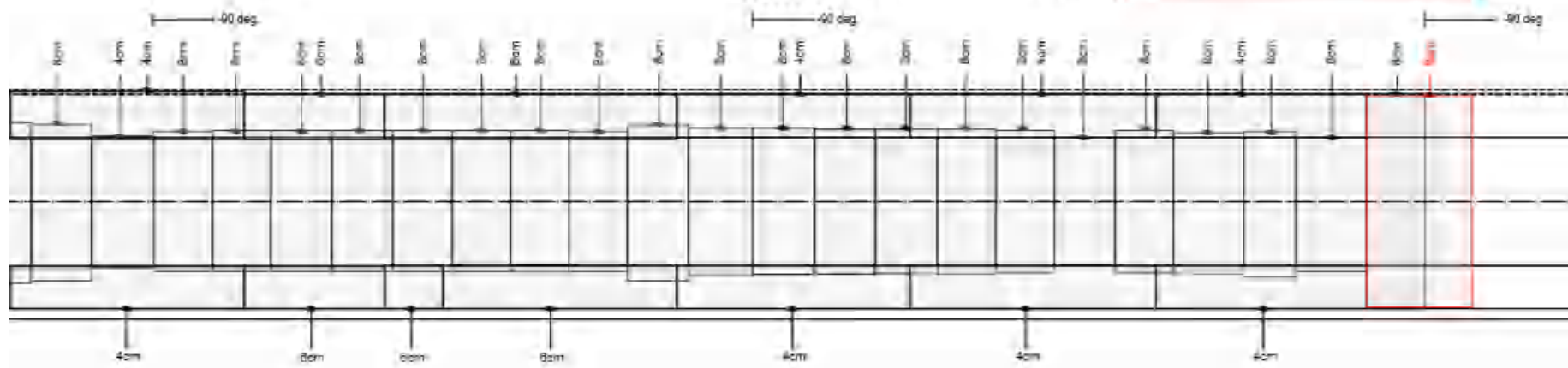
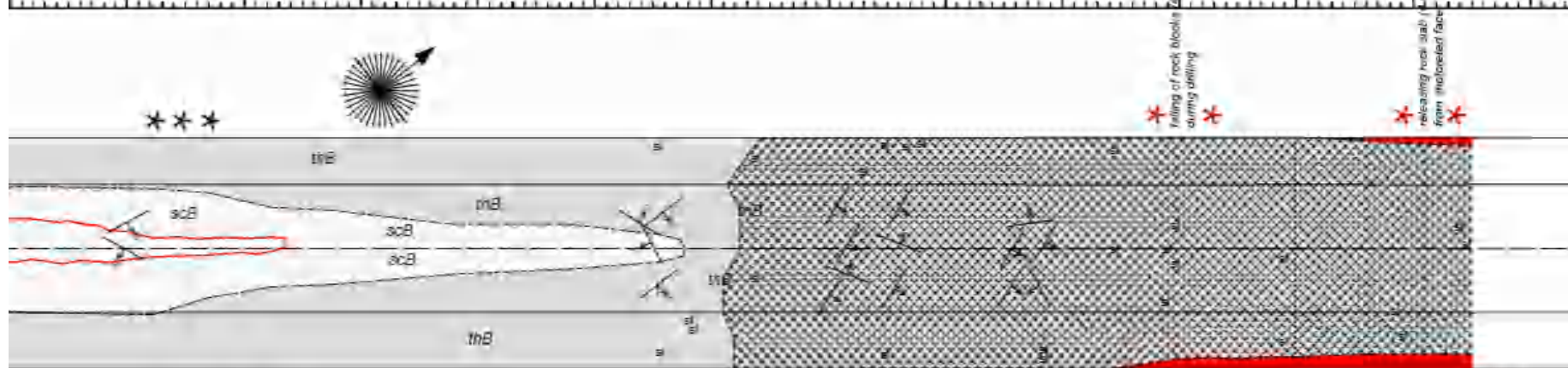
4510 4520 4530 4540 4550 4560 4570 4580 4590 4600 4610 4620 4630 4640



802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828
	17.11.14		18.11.14		19.11.14							22.11.14	24.11.14	25.11.14				27.11.14	28.11.14	29.11.14		1.12.14	2.12.14	3.12.14		4.12.14
	4,8		3,3	2,5		4,0		4,0				2,2	2,2	2,2	2,2			4,8	2,1	4,8		2,7	2,9	2,9		2,7
	4,8		2,0	3,0		2,7		2,7				2,8	2,8	2,8	2,8			2,8	2,8	3,5		4,4	4,4	4,4		5,2
	4,8		3,3	2,5		4,0		4,0				2,2	2,2	2,2	2,2			4,8	2,1	4,8		2,7	2,9	2,9		2,7

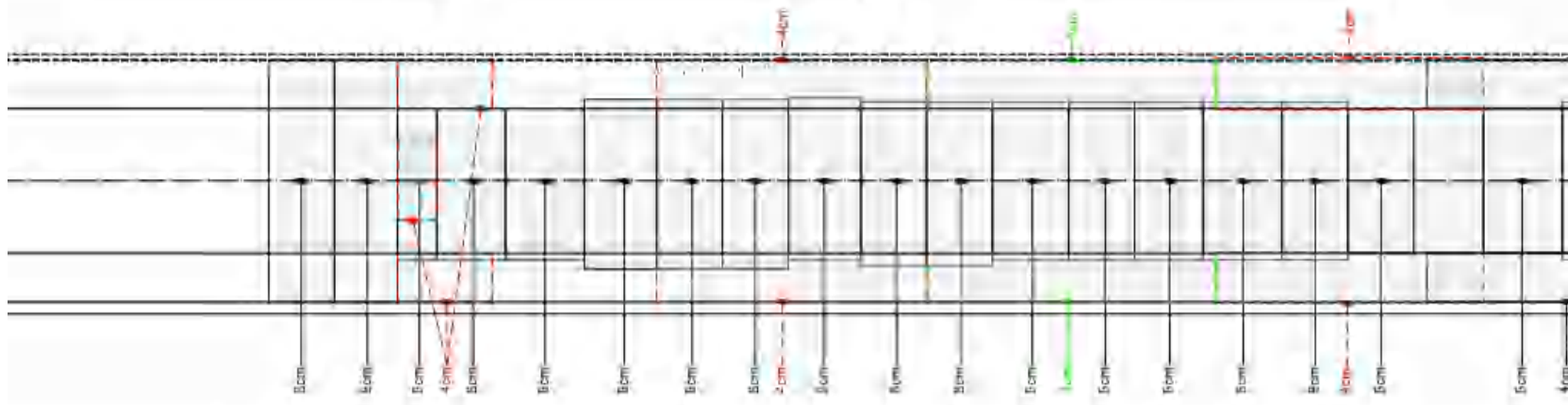
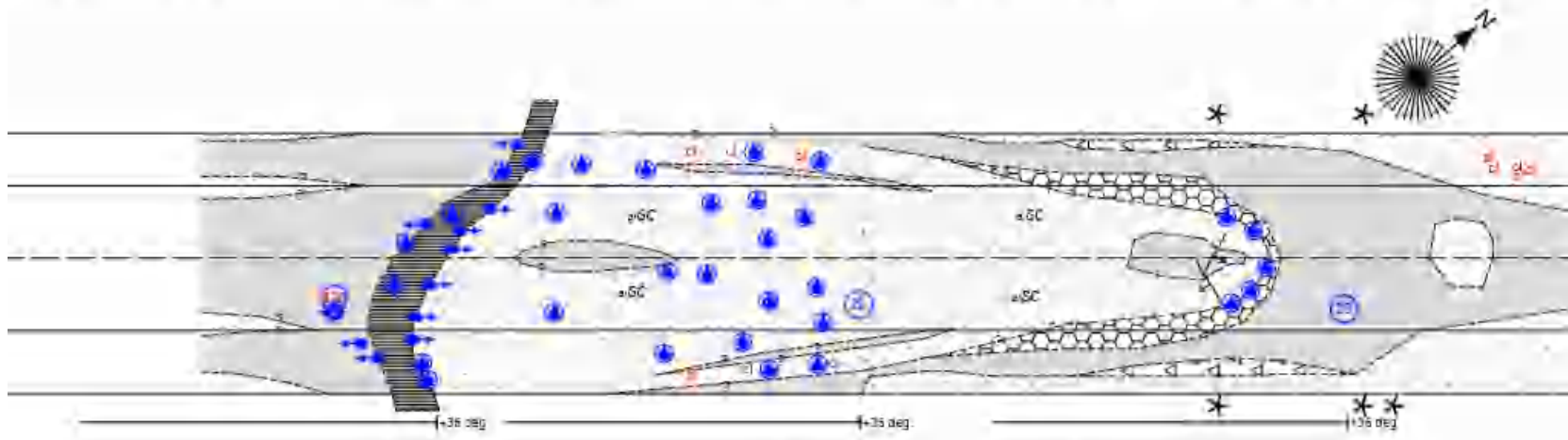


40 4650 4660 4670 4680 4690 4700 4710 4720 4730 4740 4750 4760 4770



	829	830	831	832	833	834	838	836	837	838	839	840	841	842	843	844	848	846	847	848	849	850	851	852
14	5.12.14			8.12.14	8.12.14	8.12.14			10.12.14				11.12.14	12.12.14	12.12.14		13.12.14	17.12.14			15.12.14			18.12.14
	2.7			2.7	2.2	5.7					2.2	2.2		2.2	2.2		2.2	2.2	2.2		2.2		1.0	1.1
	5.2			5.2	5.2						4.7	4.7		4.7	2.6		2.9	5.4	0.4		1.5		1.2	1.0
	2.7			2.7	2.2	5.7					2.2	2.2		2.2	2.2		2.2	2.2	2.2		2.2		1.0	1.1

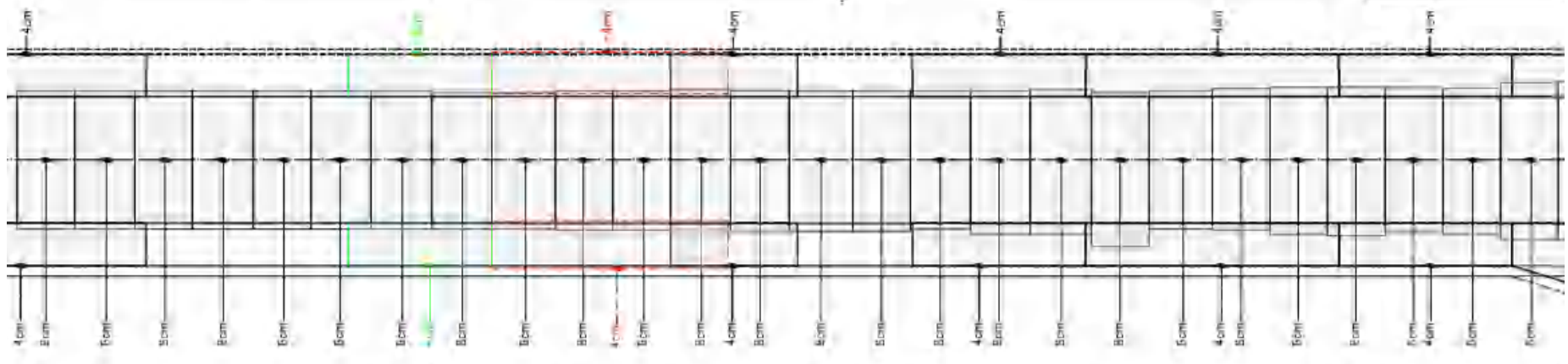
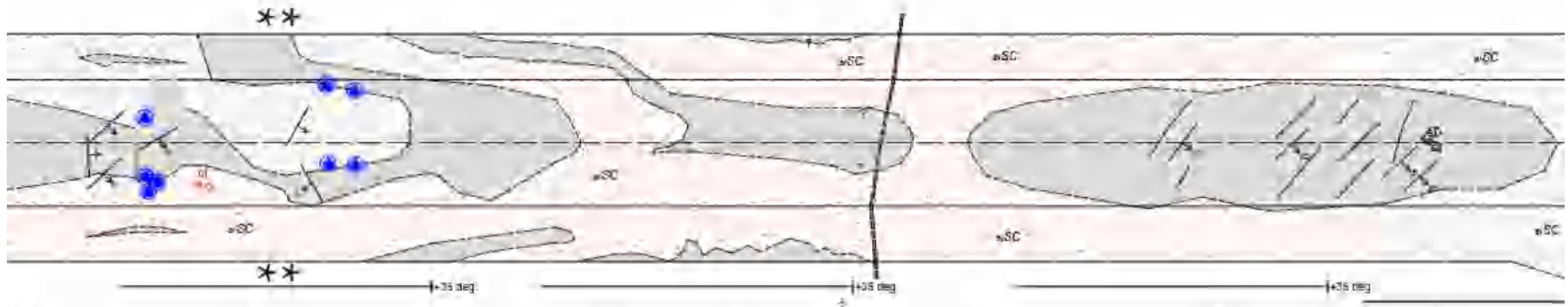
7480 7490 7500 7510 7520 7530 7540 7550 7560 7570 7580 7590



455	454	453	452	451	450	449	448	447	446	445	444	443	442	441	440	439	438	437	436
19.12.14		10.12.14		10.12.14		10.12.14				13.12.14		12.12.14			11.12.14		10.12.14		9.12.14
2.7		2.7		1.0		2.8				4.0		3.0			1.9		2.1		3.9
2.7		1.0		1.0		4.0				4.0		4.0			3.2		2.9		7.5
2.7		0.8		1.0		2.8				4.0		3.0			1.9		2.1		3.9

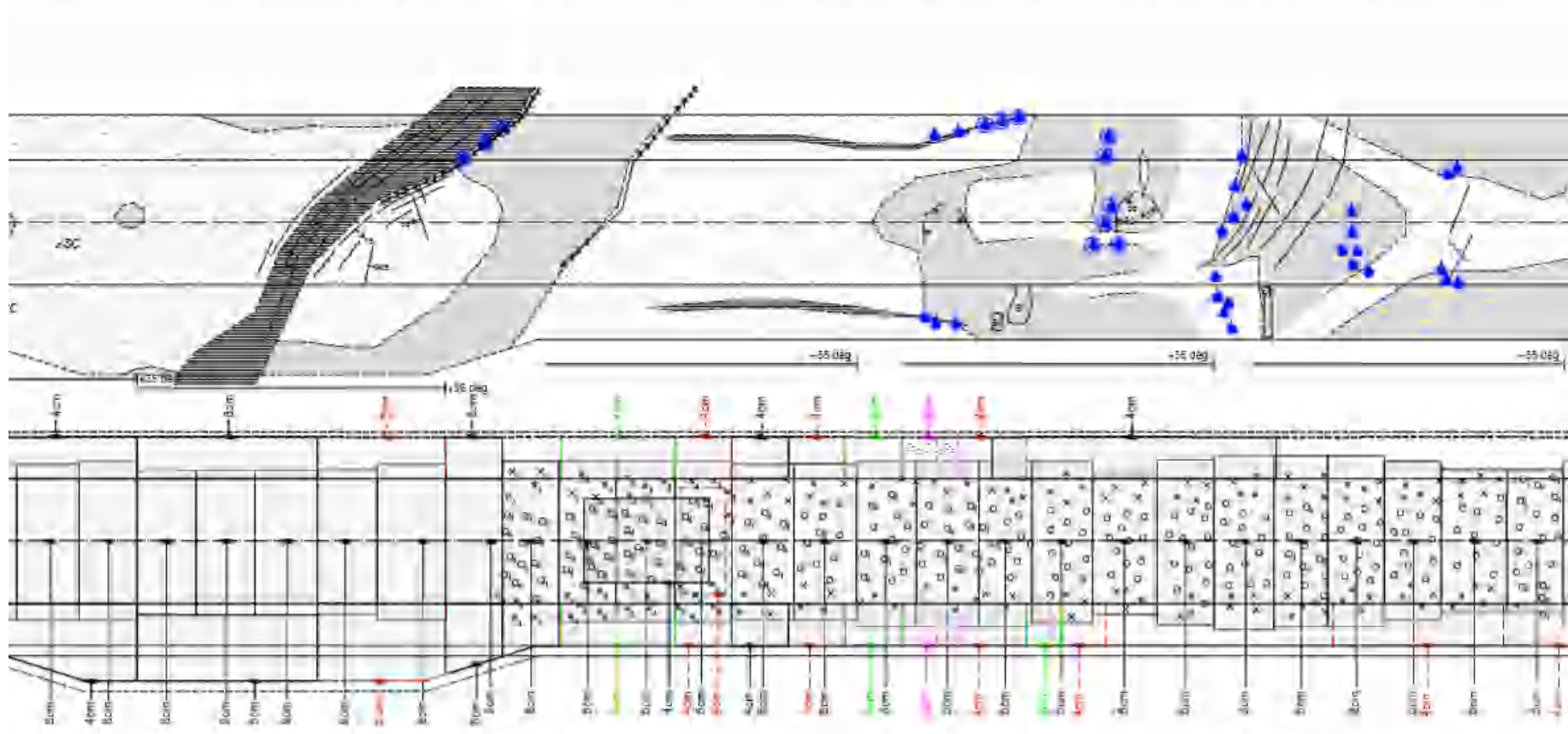


7600 7610 7620 7630 7640 7650 7660 7670 7680 7690 7700 7710 7720 77



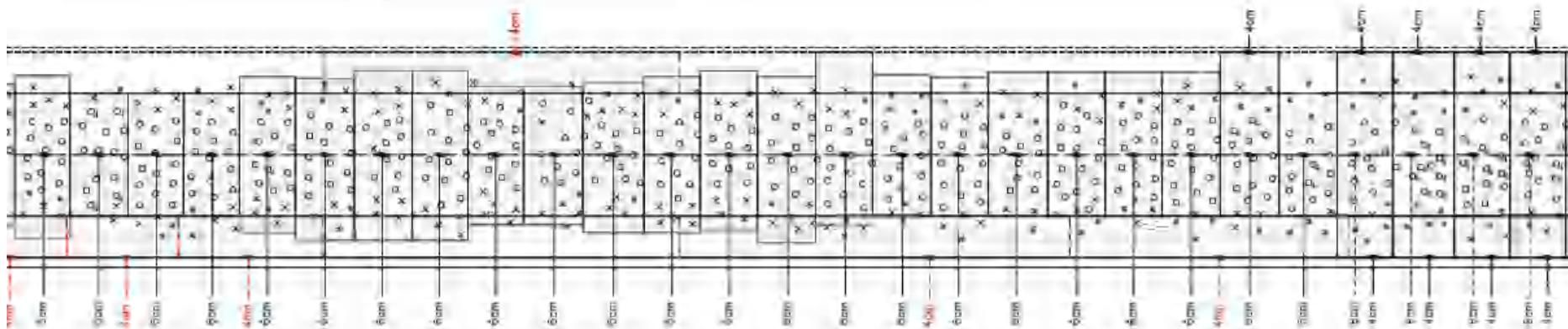
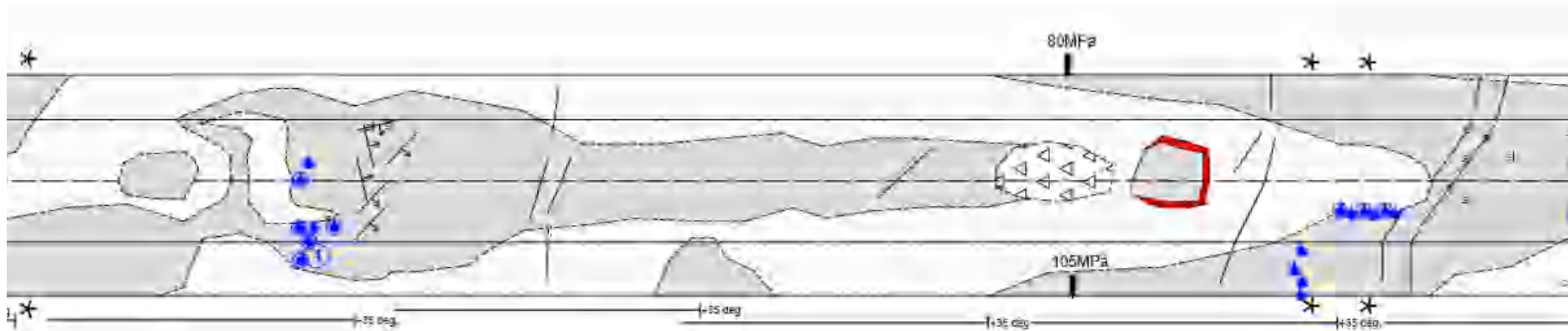
435	434	433	432	431	430	429	428	427	426	425	424	423	422	421	420	419	418	417	416	415	414	413	412	411	410
	8.12.14	8.12.14	5.12.14	5.12.14		4.12.14	3.12.14				2.12.14		1.12.14	1.12.14	30.11.14	30.11.14	29.11.14		28.11.14		27.11.14		26.11.14		25.11.14
	3,9	3,9	3,9	1,9	3,9		4,3	4,3	3,9		2,9		3,9											3,4	
	4,2	4,3	4,3	4,3	3,9		4,3	4,3	3,9		2,9		3,9											3,4	
	3,9	3,9	3,9	4,6	3,9		4,3	4,3	3,5		3,9		3,9											3,4	

7730 7740 7750 7760 7770 7780 7790 7800 7810 7820 7830 7840 7850 7860



408	408	407	406	405	404	403	402	401	400	399	398	397	396	395	394	393	392	391	390	389	388	387	386	385	384
		24.11.14		22.11.14	21.11.14		20.11.14	19.11.14		18.11.14		17.11.14		16.11.14		14.11.14		13.11.14	12.11.14					11.11.14	
3.4		4.0		3.3	3.3		2.3	3.1		2.8		3.2		2.4	2.4		3.7		3.4			5.2		2.5	
3.4		4.0		3.1	3.7		1.6	1.3		2.2		3.3		2.4	2.4		2.4		2.5			5.0		3.8	
3.4		4.0		5.3	3.3		3.1	3.1		2.2		3.3		2.4	1.6		3.7		1.5			5.0		3.5	

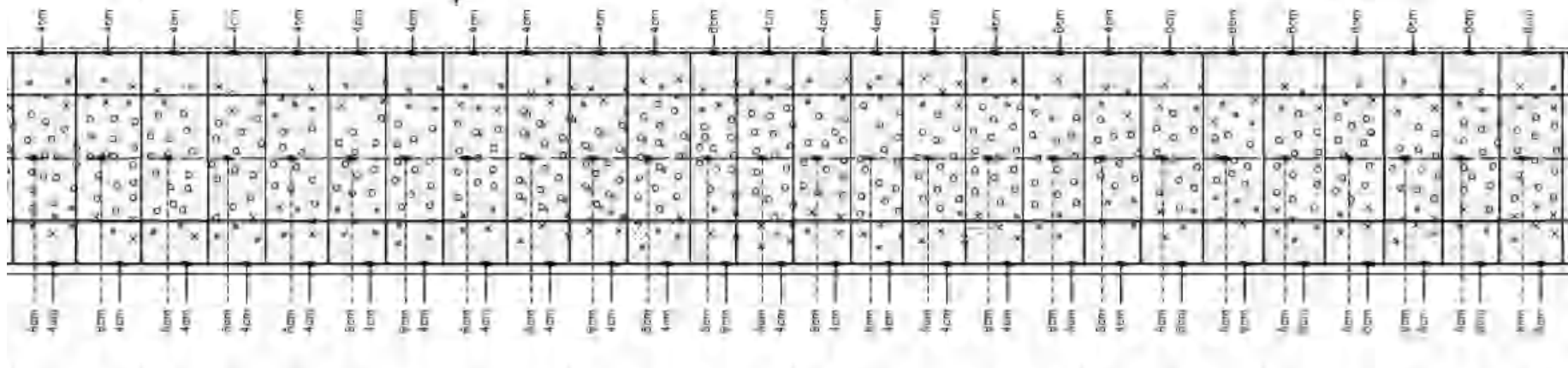
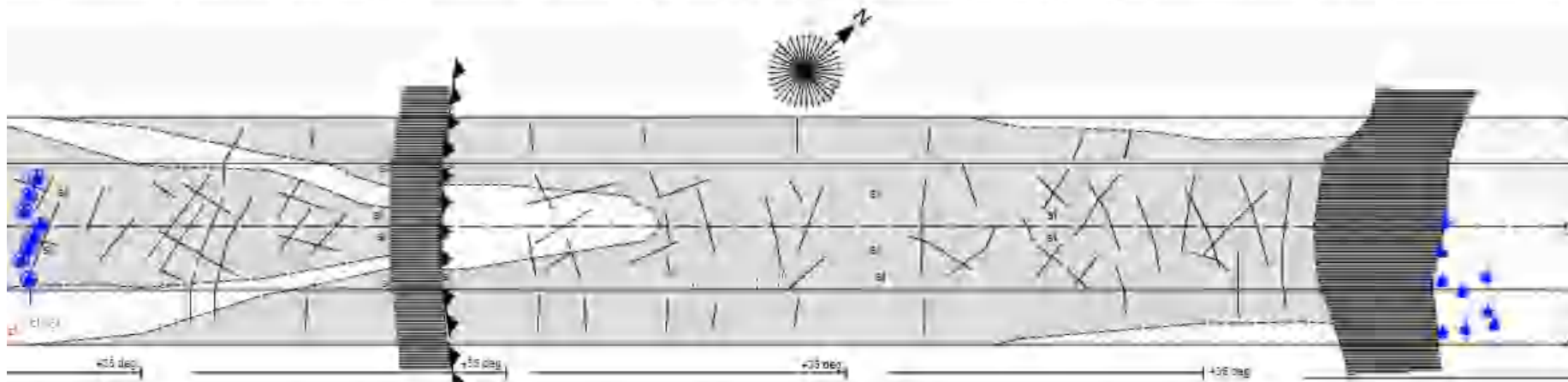
7870 7880 7890 7900 7910 7920 7930 7940 7950 7960 7970 7980 7990 8000



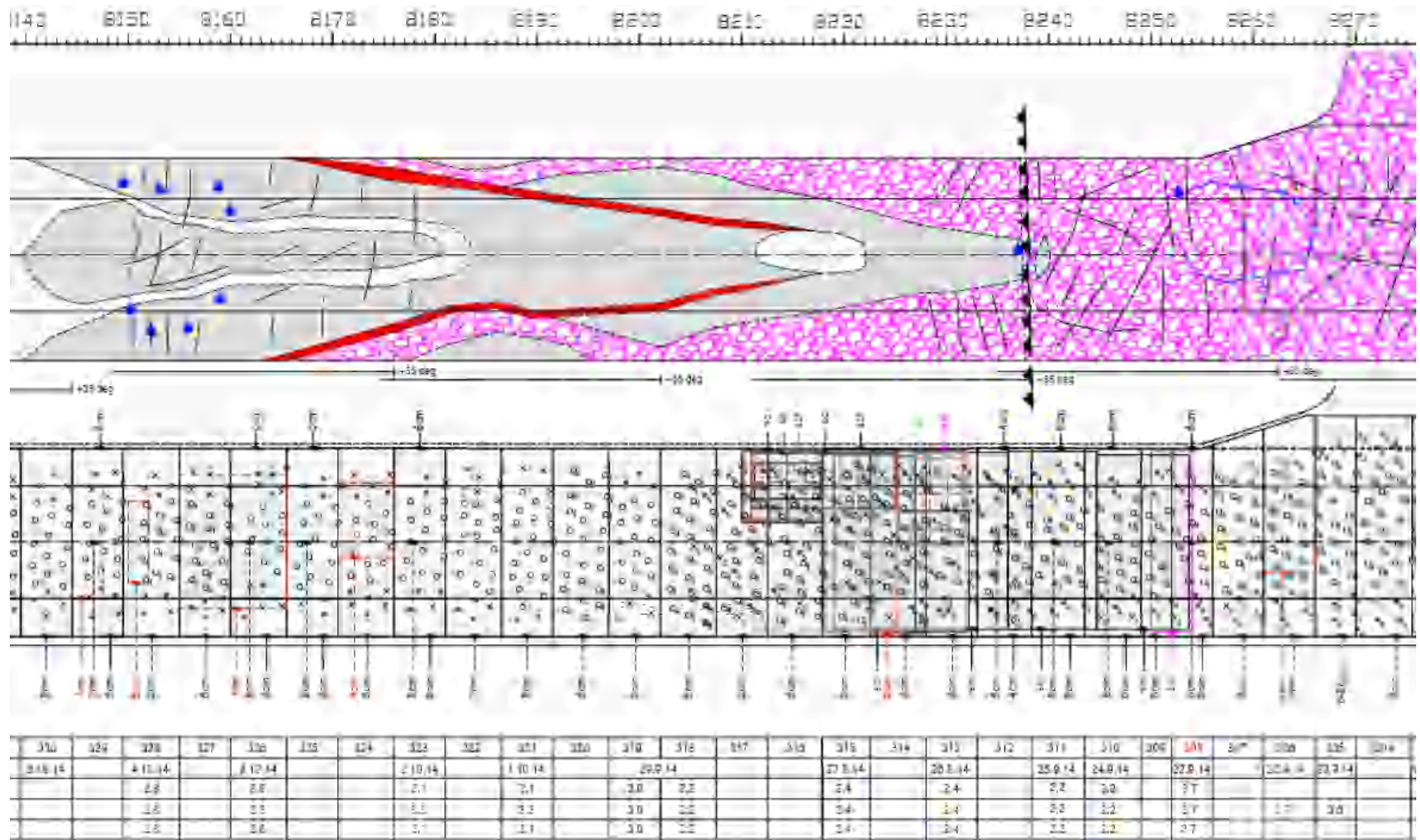
323	352	361	360	370	375	377	378	375	374	373	372	371	370	369	368	367	366	365	364	363	362	361	360	359	358	357
10.11.14	8.11.14		7.11.14		6.11.14		5.11.14		4.11.14			3.11.14			1.11.14			31.10.14		30.10.14		29.10.14		28.10.14		27.10.14
7.2			5.9	6.9	5.9	6.9		6.6	6.6	6.2			6.2		6.2			6.2		2.6	3.5	2.6	3.5			
1.7			5.9	5.9	6.1	6.3		6.6	6.7	5.0			5.0		5.0			4.4		4.4	4.4	4.4	4.4	2.5		
1.2			5.9	6.9	5.0	6.9		6.6	5.8	6.2			5.2		5.2			6.2		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5		



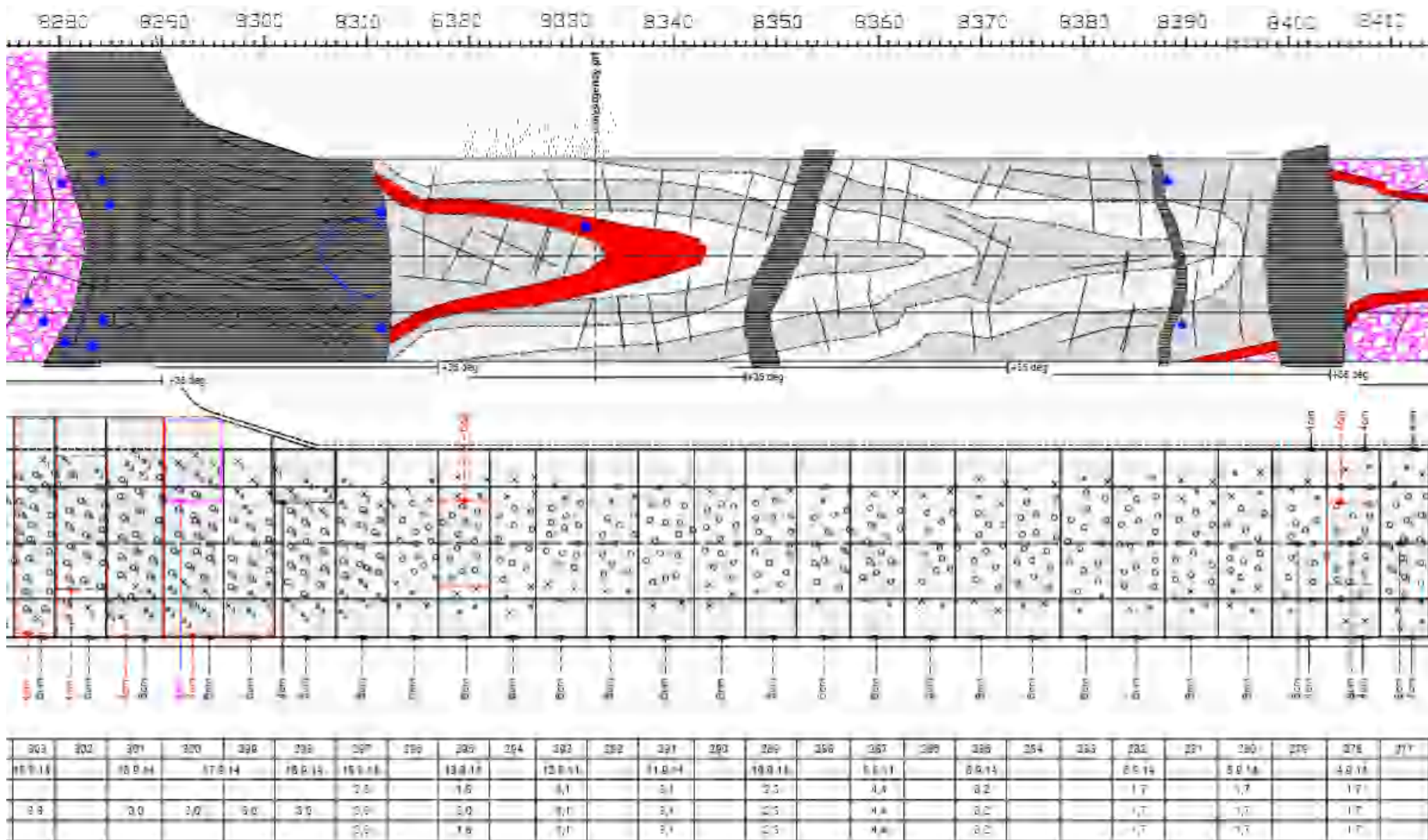
8010 8020 8030 8040 8050 8060 8070 8080 8090 8100 8110 8120 8130 8140



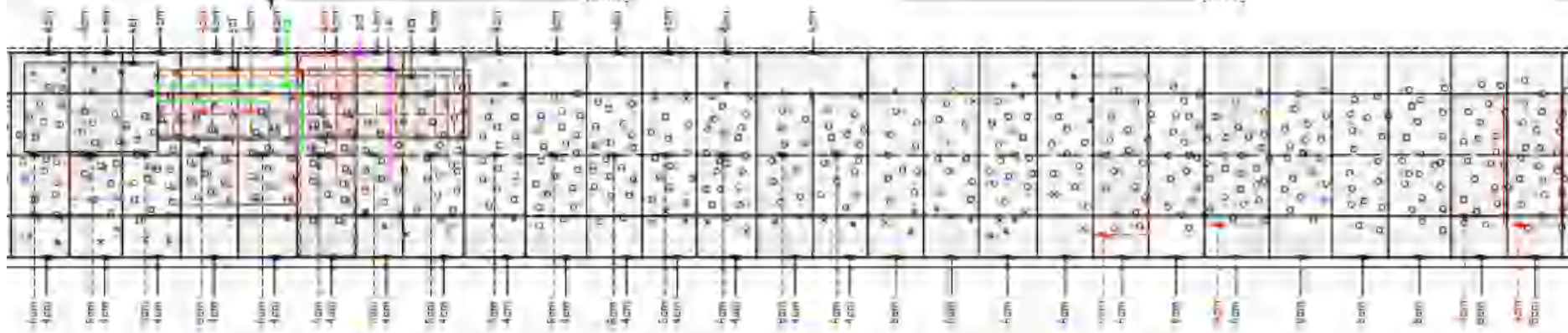
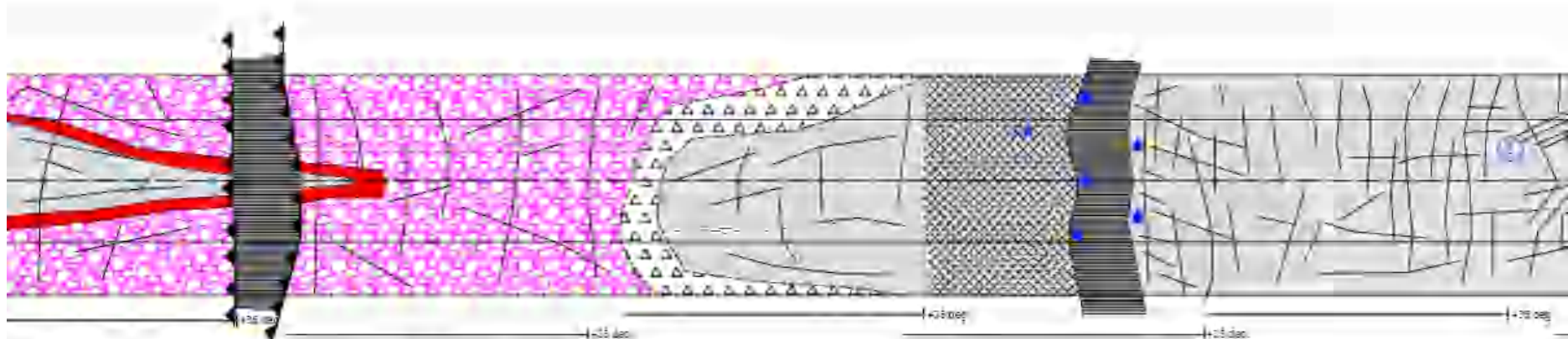
356	355	354	353	352	351	350	349	348	347	346	345	344	343	342	341	340	339	338	337	336	335	334	333	332	331
27.10.14		25.10.14		21.10.14		20.10.14		19.10.14		18.10.14		14.10.14		13.10.14		11.10.14		10.10.14		9.10.14		8.10.14		7.10.14	
4,2		3,3		3,0		1,5		1		4		4		3,4		4		4,2		3		5		1,3	
4,2		3,8		1,4		1,5		5,3		3,2		4		3,4		3		3,4		3		4		1,5	
3,2		3,2		3,8		1,5		1		4		4		3,4		4		1,2		3		3		3,2	







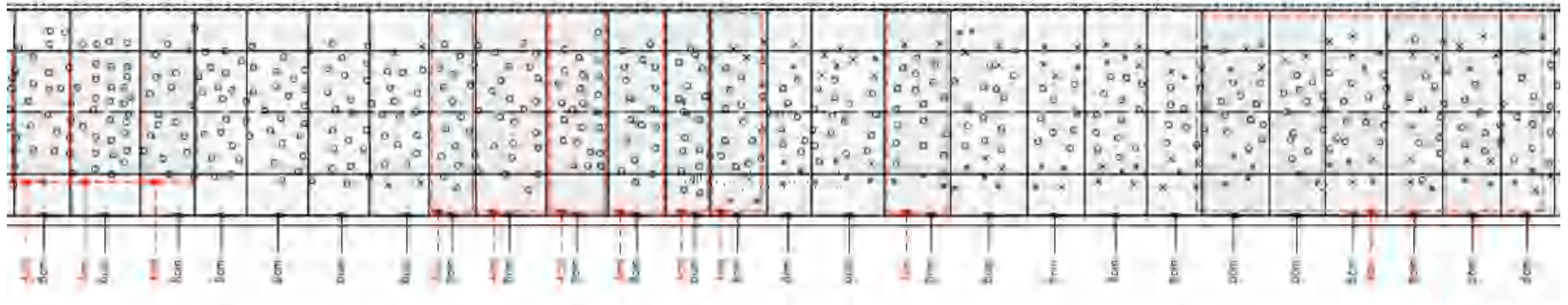
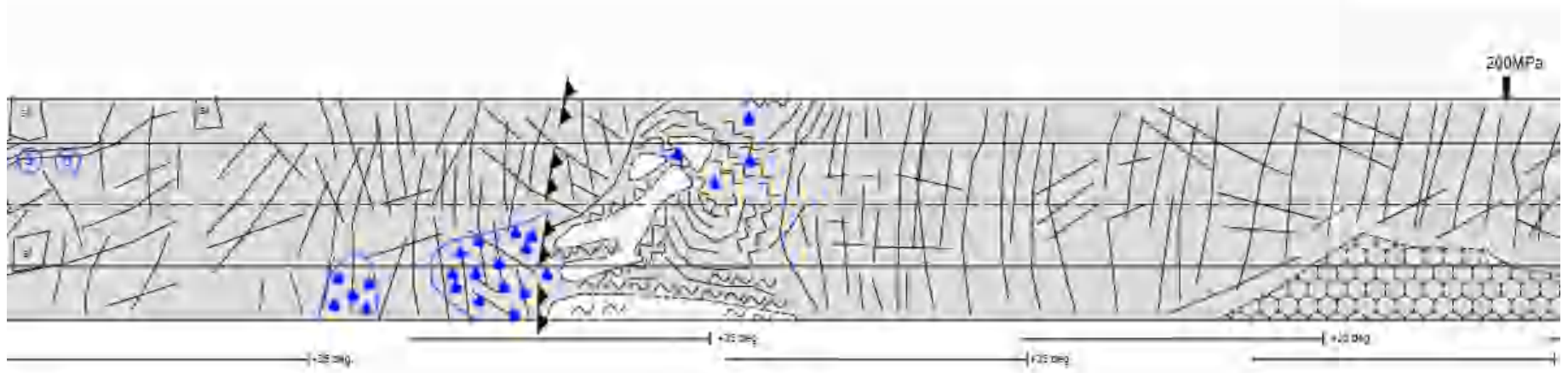
B420 B430 B440 B450 B460 B470 B480 B490 B500 B510 B520 B530 B540 B550



276	275	274	273	272	271	270	269	268	267	266	265	264	263	262	261	260	259	258	257	256	255	254	253	252	251	250
33.014		29.14	13.74							26.814	28.614			27.614		30.614	28.814	25.514		23.614		21.614				20.6
0.1		2.6	1.1							0.0	0.0			3.0			1.7	1.7		2.3		2.3				2.9
2.5		2.5	1.1							6.0	5.0	1.7		1.7		1.7	1.7			2.3		2.3				2.9
2.5		2.5	1.1							6.0	5.0	1.7		1.7		1.7	1.7			2.3		2.3				2.9



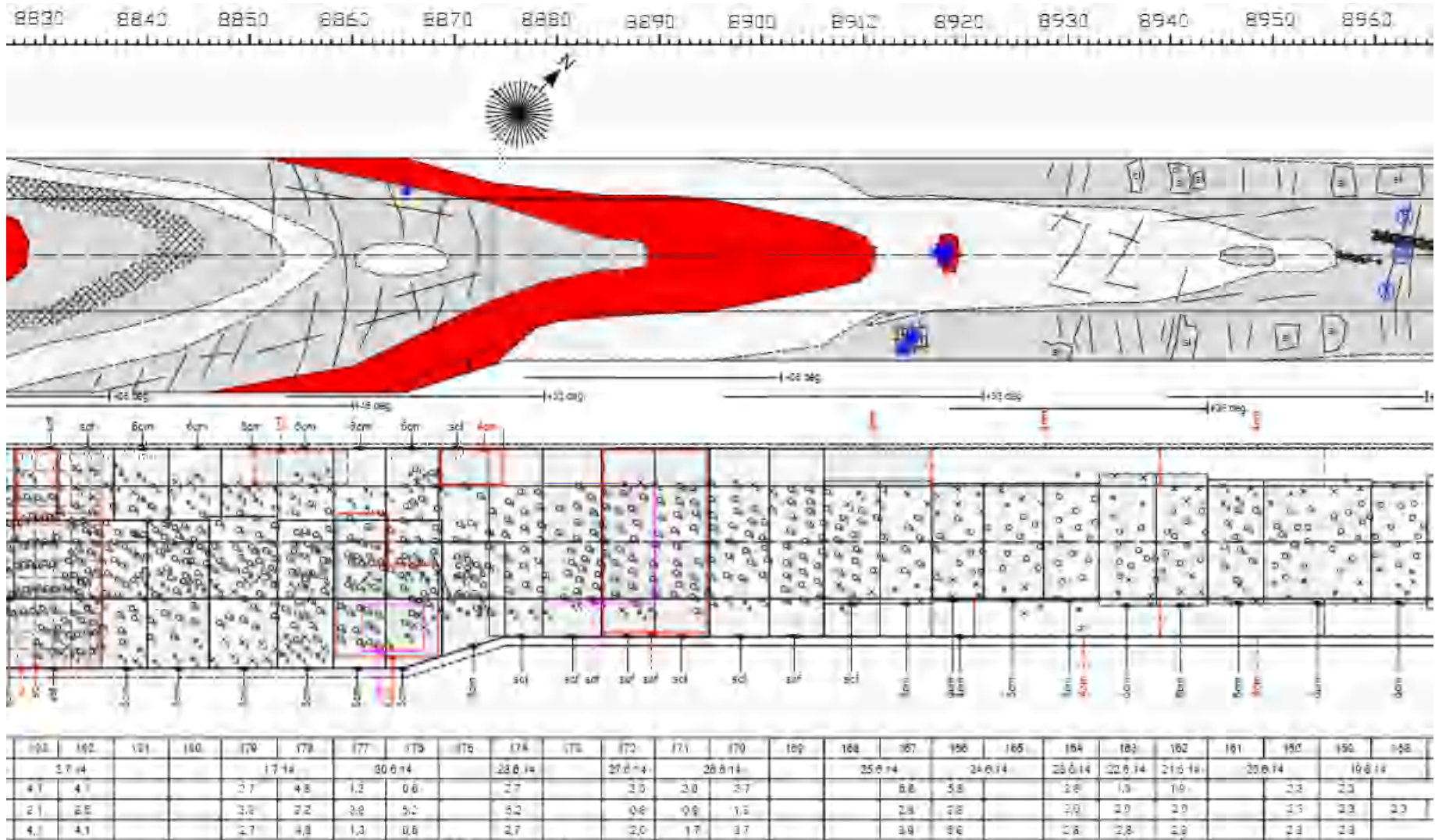
8550 8570 8580 8590 8600 8610 8620 8630 8640 8650 8660 8670 8680 869



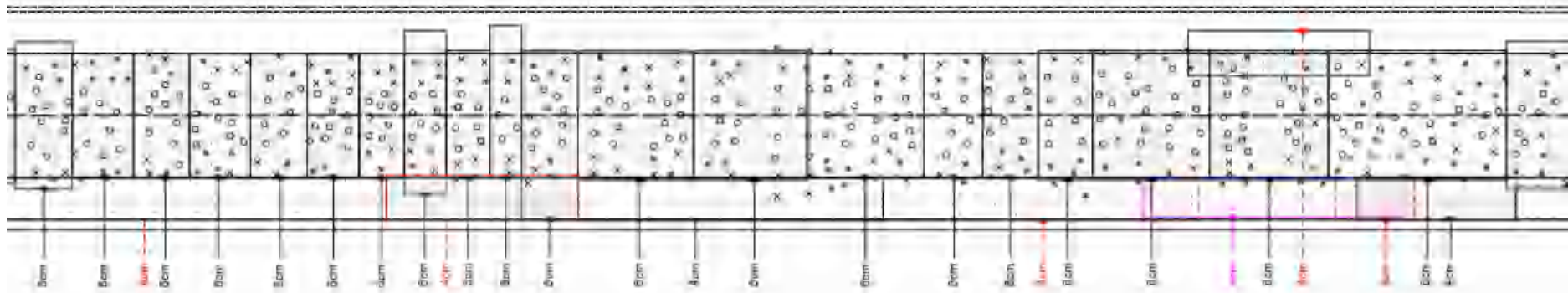
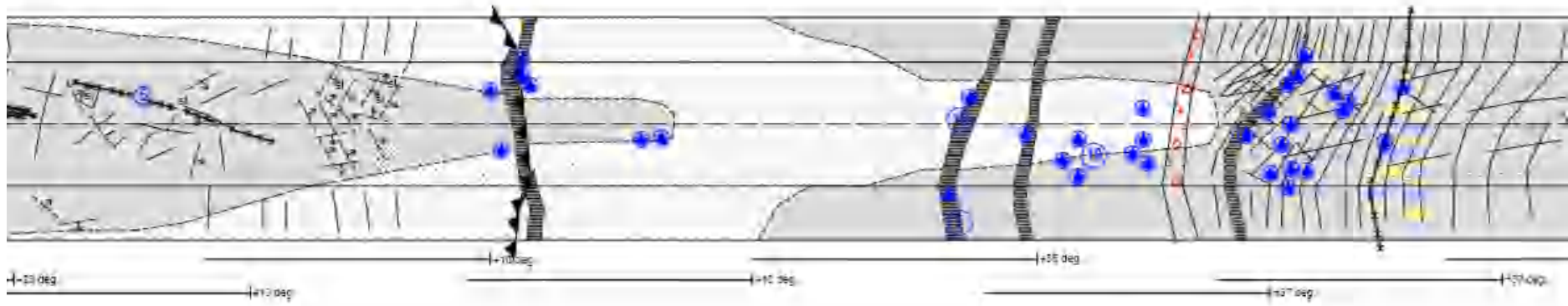
249	248	247	246	245	244	243	242	241	240	239	238	237	236	235	234	233	232	231	230	229	228	227	226	225	224
14.14	19.2 14		18.2 14		16.8 14	15.8 14		14.3 14		13.8 14		12.8 14	11.8 14			10.8 14		9.8 14		8.8 14		7.8 14		6.8 14	5.8 14
								2.5																	
3.3	3.3		2.2		3.0	3.0	2.1	1.4		2.8	3.5	2.5	2.8	1.8	2.5		2.8		3.3	3.9		3.0		3.7	
								5.1																	





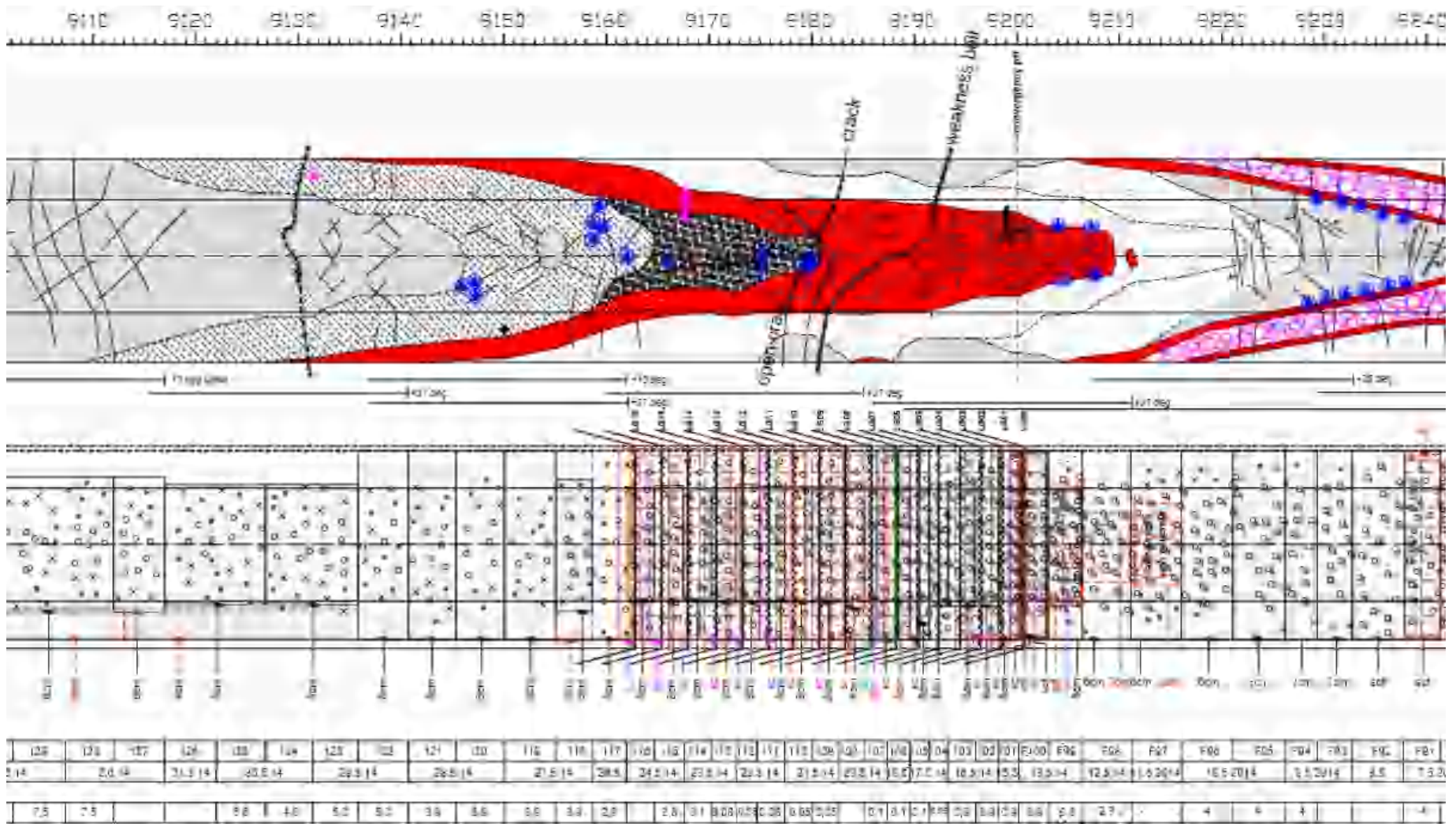


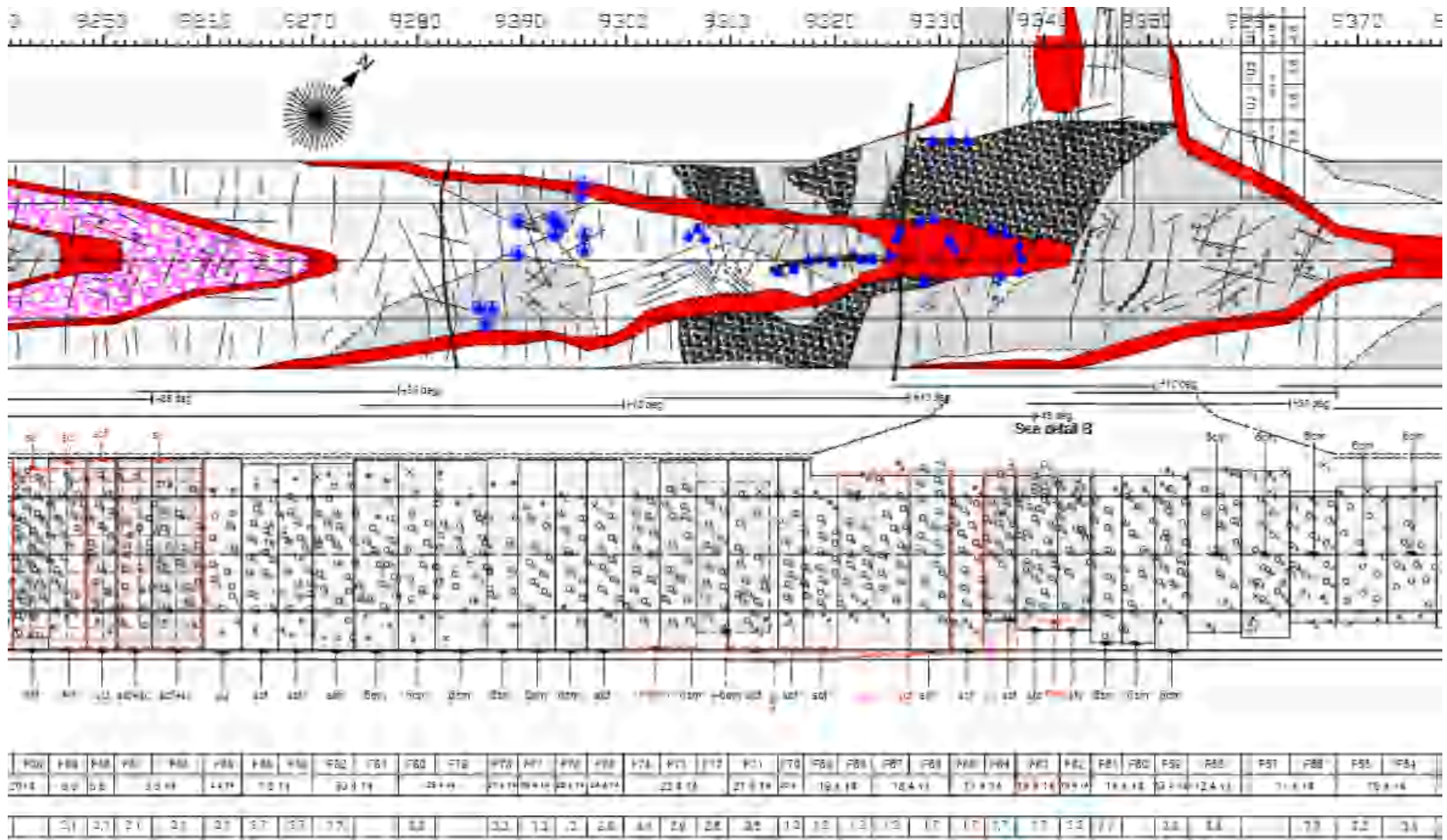
8970 8980 8990 9000 9010 9020 9030 9040 9050 9060 9070 9080 9090 9100



157	156	155	154	153	152	151	150	149	148	147	146	145	144	143	142	141	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131	130
19,0-14		17,8-14		16,6-14		14,8-14			13,5-14			11,0-14		10,2-14		9,0-14		8,0-14		7,6-14		6,6-14		5,6-14		4,5-14	1,0
2,6		2,6	2,5		2	3,2			0,8	0,2		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

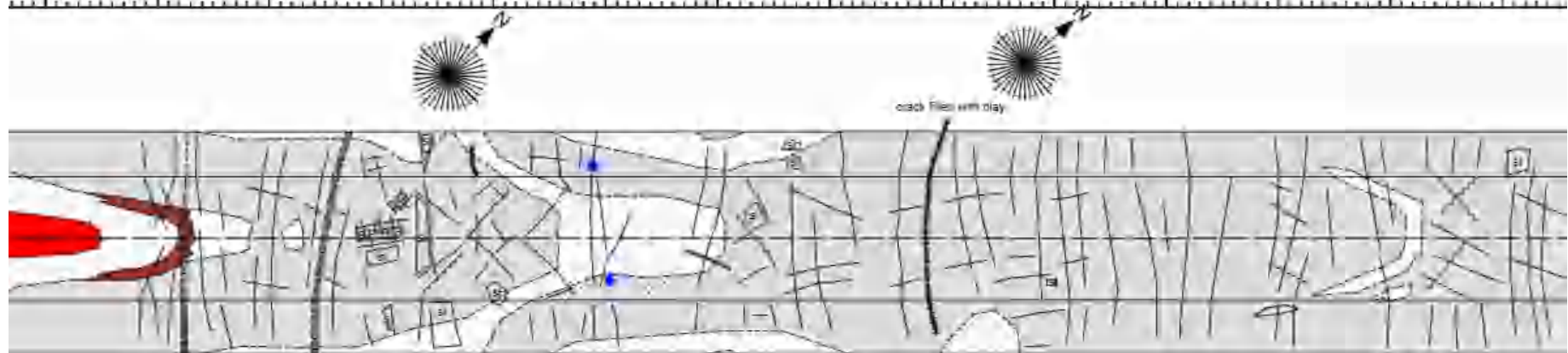




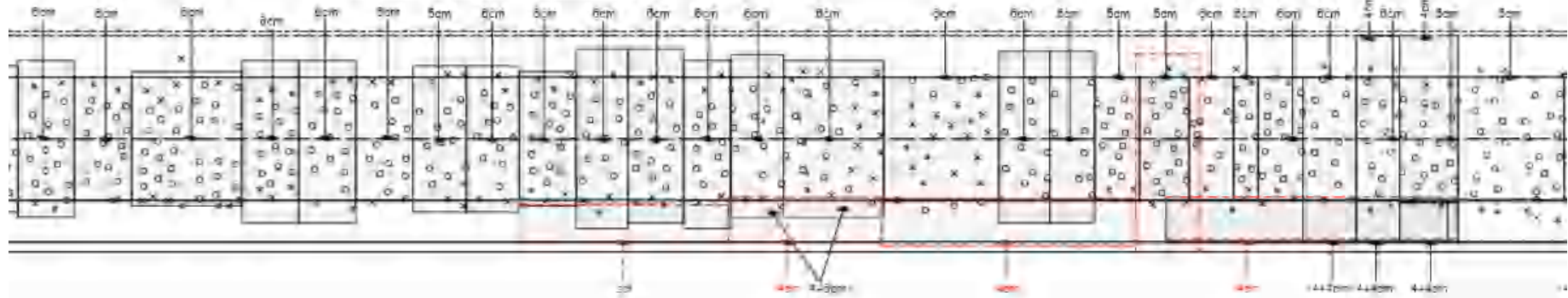




9380 9390 9400 9410 9420 9430 9440 9450 9460 9470 9480 9490 9500 9512



+10 deg +17 deg +17 deg +17 deg +17 deg +10 deg



F32	F32	F31	F30	F42	F43	F47	F48	F49	F44	F45	F46	F41	F40	F39	F38	F37	F36	F35	F34	F33	F32	F31	F30	F29	F27	F26	F25	F24
	94.14		54.14	74.14	84.14		64.14		44.14		34.14		24.14		14.14		51.3	31.3	21.3				27.3		27.9.14	28.1.14		29.1.14

3.4	2.3	5.6	5.6	5.5	6.6	6.6	7.7	4.6	3.6	3.8	3.5	2.6	3.6	7.5	7.5	4	7.5							4		2.2	2.3		5.6
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	-----	--	--	--	--	--	--	---	--	-----	-----	--	-----






Viðauki C: GSI og D

Viðmið fyrir mat á GSI fyrir sprungið berg.

<p><b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos 2000)</b>                      From the lithology, structure and surface condition of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 44 to 37 is more realistic than stating that GSI = 36. <u>Note that the table does not apply to structurally controlled failures.</u> Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very good categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS								
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY								
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	50	40	30	20	10
	BLOCKY - well-interlocked, undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	85	75	65	55	45	35	25	15	5
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	80	70	60	50	40	30	20	10	0
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - bedded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	75	65	55	45	35	25	15	5	0
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	70	60	50	40	30	20	10	0	0
	LAMINATED/SHEARED - lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	65	55	45	35	25	15	5	0	0
		VERY GOOD Very tough, fresh unweathered, with no	GOOD Fresh, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Silk-weathered, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Silk-weathered, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings				

(Marinos & Hoek, 2000)

Viðmið fyrir mat á röskunarstuðlinum D.

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of <i>D</i>
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.  Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$  $D = 0,5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0,8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0,7$ Good blasting  $D = 1,0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.  In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1,0$ Production blasting  $D = 0,7$ Mechanical excavation

(Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002)

## Viðauki D: RSR og RMR berggæðamatskerfin

Uppbygging RSR-kerfisins þar sem  $RSR = A + B + C$  (frá Hoek, 2007).

Table 1. Rock Structure Rating; Parameter A; General area geology

	Basic Rock Type				Geological Structure			
	Hard	Medium	Soft	Decomposed	Massive	Faulted	Faulted	Faulted
Igneous	1	2	3	4	Slightly Folded or	Moderately Folded or	Intensively Folded or	
Metamorphic	1	2	3	4				
Sedimentary	2	3	4	4				
Type 1					30	22	15	9
Type 2					27	20	13	8
Type 3					24	18	12	7
Type 4					19	15	10	6

Table 2. Rock Structure Rating; Parameter B; Joint pattern; direction of drive

Average joint spacing	Strike I to Axis					Strike II to Axis			
	Direction of Drive						Direction of Drive		
	Both	With Dip		Against Dip		Either direction			
	Dip of Prominent Joints <sup>a</sup>						Dip of Prominent Joints		
	Flat	Dipping	Vertical	Dipping	Vertical	Flat	Dipping	Vertical	
1. Very closely jointed, < 2 in	9	11	13	10	12	9	9	7	
2. Closely jointed, 2-6 in	13	16	19	15	17	14	14	11	
3. Moderately jointed, 6-12 in	23	24	28	19	22	23	23	19	
4. Moderate to blocky, 1-2 ft	30	32	36	25	28	30	28	24	
5. Blocky to massive, 2-4 ft	36	34	40	33	36	36	24	28	
6. Massive, > 4 ft	40	43	45	37	40	40	38	34	

Table 3. Rock Structure Rating; Parameter C; Groundwater, joint condition

Anticipated water inflow gpm/1000 ft. of tunnel	Sum of Parameters A + B					
	13 - 44			45 - 75		
	Joint Condition <sup>b</sup>					
	Good	Fair	Poor	Good	Fair	Poor
None	22	18	12	25	22	18
Slight, < 200 gpm	19	15	9	23	19	14
Moderate, 200-1000 gpm	15	22	7	21	16	12
Heavy, > 1000 gp	10	8	5	18	14	10

<sup>a</sup> Dip: flat: 0-20°; dipping: 20-50°; and vertical: 50-90°

<sup>b</sup> Joint condition: good = tight or cemented; fair = slightly weathered or altered; poor = severely weathered, altered or open



Uppbygging RMR-kerfisins (frá Hoek, 2007)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS							
Parameter		Range of values					For this low range - uniaxial compressive test is preferred
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	$\geq 10$ MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	
	Uniaxial compressive strength		$\geq 25$ MPa	10 - 25 MPa	5 - 10 MPa	2.5 - 5 MPa	$\geq 25$ MPa $\geq 10$ MPa $\geq 5$ MPa
	Rating		15	12	7	4	2 1 0
2	Drill core Quality (RQD)		80% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	$\leq 25\%$
	Rating		20	17	13	8	3
3	Spacing of		$\leq 2$ m	0.5 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	$\leq 60$ mm
	Rating		20	15	10	5	5
4	Condition of discontinuities (See E)	Very rough surfaces Water-filled No cohesion Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation $\leq 1$ mm Slightly steepened walls	Slightly rough surfaces Separation $\leq 1$ mm Highly weathered walls	Blockaded surfaces No Gouge $\leq 5$ mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge $> 5$ mm thick or Separation $> 5$ mm Continuous	
	Rating		20	25	20	10	0
5	Growth of	Integrator 10 m tunnel length (m)	None	$\leq 10$	10 - 25	25 - 125	$> 125$
		Moist water pressure (Major principal)	0	$< 0.1$	0.1 - 0.2	0.2 - 0.8	$> 0.5$
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing
		Rating		15	10	7	4

B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)					
Strike and dip orientations	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable
Ratings	Tunnels 5 m and less	-1	-2	-5	-10
	Foundations	-1	-2	-7	-15
	Bases	0	-5	-25	-50

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS					
Rating	100 - 101	80 - 99	65 - 79	45 - 59	$\leq 44$
Rock mass	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock

D. MEANING OF ROCK CLASSES					
Class number	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span	1 year for 15 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	50 min for 1 m span
Compression of rock mass (MPa)	$\geq 400$	300 - 400	200 - 300	100 - 200	$\leq 100$
Friction angle of rock mass (deg)	$\geq 45$	35 - 45	25 - 35	15 - 25	$\leq 15$

E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY SPHERES					
Discontinuity length (meters)	$\leq 1$ m	1 - 2 m	2 - 10 m	10 - 20 m	$\geq 20$ m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (mm)	None	$\leq 1$ mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	$\geq 5$ mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Blockaded
Rating	6	5	3	1	0
Filling (gouge)	None	Hard filling $\leq 5$ mm	Hard filling $\leq 5$ mm	Soft filling $\leq 5$ mm	Soft filling $\leq 5$ mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Highly weathered	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING*			
Strike perpendicular to tunnel axis		Strike parallel to tunnel axis	
Dip with dip - Dip 85 - 90°	Dip with dip - Dip 20 - 45°	Dip 45 - 90°	Dip 20 - 45°
Very favourable	Favourable	Very unfavourable	Fair
Dip against dip - Dip 45-85°	Dip against dip - Dip 20-45°	Dip 0-20 - irrespective of strike†	
Fair	Unfavourable	Fair	

\* Some conditions are mutually exclusive. For example, if filling is present, the roughness of the surface will be overruled by the influence of the gouge. In such cases use A-F directly.  
 † Modified after (Walther et al (1972))

Viðmið um gangagröft og bergstyrkingar miðað við RMR-kerfið (frá Hoek, 2007).

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR: 81-100	Full face 3 m advance	Generally no support required except spot bolting.		
II - Good rock RMR: 61-80	Full face 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh	50 mm in crown where required.	None
III - Fair rock RMR: 41-60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5 - 2 m in crown and walls with wire mesh in crown.	50-100 mm in crown and 30 mm in sides	None
IV - Poor rock RMR: 21-40	Top heading and bench 1.0-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required.
V - Very poor rock RMR: < 20	Multiple drifts 0.5-1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert





## Viðauki E: Q-kerfið - inntaksstærðir og styrkingagraf

Viðmið fyrir mat á inntaksstærðum Q-gildisins (NGI, 2013)

Table 1 RQD-values and volumetric jointing.

1 RQD (Rock Quality Designation)			RQD
A	Very poor	(> 27 joints per m <sup>3</sup> )	0-25
B	Poor	(20-27 joints per m <sup>3</sup> )	25-50
C	Fair	(13-19 joints per m <sup>3</sup> )	50-75
D	Good	(8-12 joints per m <sup>3</sup> )	75-90
E	Excellent	(0-7 joints per m <sup>3</sup> )	90-100

Note: i) Where RQD is reported or measured as  $\leq 10$  (including 0) the value 10 is used to evaluate the Q-value  
 ii) RQD-intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc., are sufficiently accurate

Table 2  $J_n$ -values.

2 Joint set number		$J_n$
A	Massive, no or few joints	0.5-1.0
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random heavily jointed "sugar cube", etc.	15
J	Crushed rock, earth like	20

Note: i) For tunnel intersections, use  $3 \times J_n$   
 ii) For portals, use  $2 \times J_n$

Table 3  $J_r$  – values.

3 Joint Roughness Number		$J_r$
<p>a) Rock-wall contact, and                      b) Rock-wall contact before 10 cm of shear movement</p>		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or Irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough, Irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1
G	Slickensided, planar	0.5
<p>Note: i) Description refers to small scale features and intermediate scale features, in that order</p>		
<p>c) No rock-wall contact when sheared</p>		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact when sheared	1
<p>Note: ii) Add 1 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m (dependent on the size of the underground opening)                      iii) <math>J_r = 0.5</math> can be used for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented in the estimated sliding direction</p>		

Table 4  $J_a$ -values.

4 Joint Alteration Number		$\Phi_r$ approx.	$J_a$
<i>a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings)</i>			
A	Tightly heeled, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote.		0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only.	25-35°	1
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	2
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening).	20-25°	3
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays.	8-16°	4
<i>b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)</i>			
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	4
G	Strongly over-consolidated, non-softening, clay mineral fillings (continuous, but <5mm thickness).	16-24°	6
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, but <5mm thickness).	12-16°	8
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, but <5mm thickness). Value of $J_a$ depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
<i>c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings)</i>			
K	Zones or bands of disintegrated or crushed rock. Strongly over-consolidated.	16-24°	6
L	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Medium or low over-consolidation or softening fillings.	12-16°	8
M	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Swelling clay. $J_a$ depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
N	Thick continuous zones or bands of clay. Strongly over-consolidated.	12-16°	10
O	Thick continuous zones or bands of clay. Medium to low over-consolidation.	12-16°	13
P	Thick continuous zones or bands with clay. Swelling clay. $J_a$ depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	13-20

Table 5.  $J_w$  - values.

5 Joint Water Reduction Factor		$J_w$
A	Dry excavations or minor inflow ( humid or a few drips)	1.0
B	Medium inflow, occasional outwash of joint fillings (many drips/"rain")	0.66
C	Jet inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure decaying with time, Causes outwash of material and perhaps cave in	0.2-0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay. Causes outwash of material and perhaps cave in	0.1-0.05
Note: 1) Factors C to F are crude estimates. Increase $J_w$ if the rock is drained or grouting is carried out 2) Special problems caused by ice formation are not considered		



Table 6 SRF-values

b Stress Reduction Factor		SRF		
a) Weak zones intersecting the underground opening, which may cause loosening of rock mass				
A	Multiple occurrences of weak zones within a short section containing clay or chemically disintegrated, very loose surrounding rock (any depth), or long sections with incompetent (weak) rock (any depth). For squeezing, see 6L and 6M		10	
B	Multiple shear zones within a short section in competent clay-free rock with loose surrounding rock (any depth)		7.5	
C	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth $\leq 50$ m)		5	
D	Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube", etc. (any depth)		5	
E	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth $> 50$ m)		2.5	
Note: 1) Reduce these values of SRF by 25-50% if the weak zones only influence but do not intersect the underground opening				
b) Competent, mainly massive rock stress problems		$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_1 / \sigma_c$	SRF
F	Low stress, near surface, open joints	$>200$	$\leq 0.01$	2.5
G	Medium stress, favourable stress condition	200-10	0.01-0.3	1
H	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability. May also be unfavourable to stability dependent on the orientation of stresses compared to jointing/weakness planes*	10-5	0.3-0.4	0.5-2 2-5*
J	Moderate spalling and/or slabbing after $> 1$ hour in massive rock	5-3	0.6-0.66	5-50
K	Spalling or rock burst after a few minutes in massive rock	3-2	0.65-1	50-200
L	Heavy rock burst and immediate dynamic deformation in massive rock	$<2$	$>1$	200-400
Note: 1) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured) when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ , reduce $\sigma_c$ to $0.75 \sigma_c$ . When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , reduce $\sigma_c$ to $0.5 \sigma_c$ , where $\sigma_c$ = unconfined compression strength, $\sigma_1$ and $\sigma_3$ are the major and minor principal stresses, and $\sigma_3$ = maximum tangential stress (estimated from elastic theory)				
2) When the depth of the crown below the surface is less than the span, suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see F)				
c) Squeezing rock: plastic deformation in incompetent rock under the influence of high pressure		$\sigma_1 / \sigma_c$	SRF	
M	Mild squeezing rock pressure	1-5	5-10	
N	Heavy squeezing rock pressure	$>5$	10-20	
Note: 1) Determination of squeezing rock conditions must be made according to relevant literature (i.e. Singh et al., 1992 and Bhasin and Grimstad, 1996)				
d) Swelling rock: chemical swelling activity depending on the presence of water				SRF
O	Mild swelling rock pressure			5-10
P	Heavy swelling rock pressure			10-15



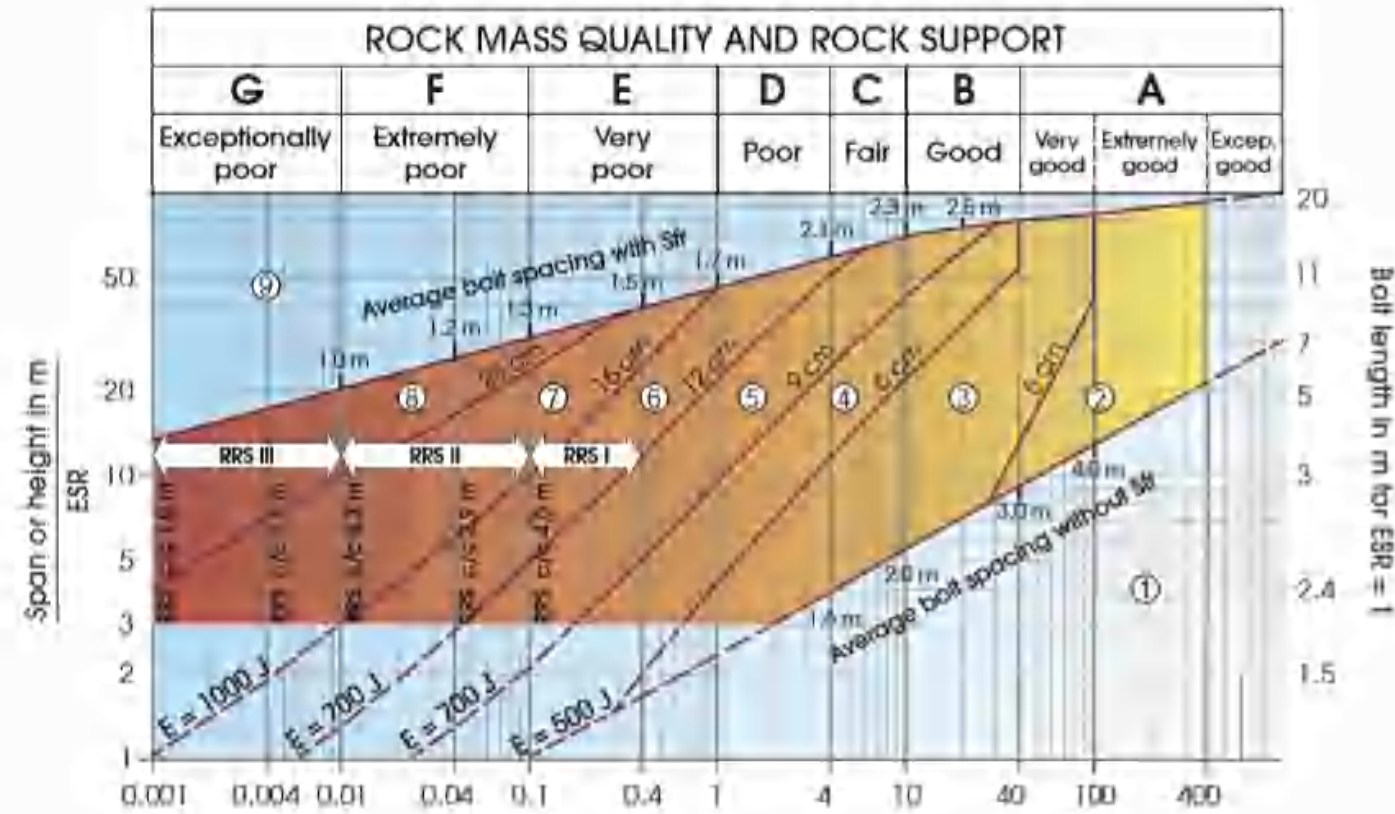
Table 7 ESR-values.

7 Type of excavation		ESR
A	Tempotary mine openings, etc.	ca. 3-5
B	Vertical shafts*: i) circular sections ii) rectangular/square section * Dependant of purpose. May be lower than given values.	ca. 2,5 ca. 2,0
C	Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (exclude high pressure penstocks) water supply tunnels, pilot tunnels, drifts and headings for large openings.	1,6
D	Minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels, sewage tunnels, etc.	1,3
E	Power houses, storage rooms, water treatment plants, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portals, intersections, etc.	1,0
F	Underground nuclear power stations, railways stations, sports and public facilities, factories, etc.	0,8
G	Very important caverns and underground openings with a long lifetime, = 100 years, or without access for maintenance.	0,5

Table 8 Conversion from actual Q-values to adjusted Q-values for design of wall support.

In rock masses of good quality	$Q > 10$	Multiply Q-values by a factor of 5.
For rock masses of intermediate quality	$0,1 < Q < 10$	Multiply Q-values by a factor of 2,5. In cases of high rock stresses, use the actual Q-value.
For rock masses of poor quality.	$Q < 0,1$	Use actual Q-value.

Styrkingagraf Q-kerfisins (NGI, 2013)



$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_f}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Support categories

- ① Unsupported or spot bolting
- ② Spot bolting, **SB**
- ③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm. **B+Str**
- ④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm. **Str (E500)+B**
- ⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm. **Str (E700)+B**
- ⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting. **Str (E700)+RRS I +B**
- ⑦ Fibre reinforced sprayed concrete >15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting. **Str (E1000)+RRS II+B**
- ⑧ Cast concrete lining, **CCA** or **Str (E1000)+RRS III+B**
- ⑨ Special evaluation

Bolts spacing is mainly based on Ø20 mm

E = Energy absorption in fibre reinforced sprayed concrete

ESR = Excavation Support Ratio

Areas with dashed lines have no empirical data

RRS - spacing related to Q-value

**I** S130/6 Ø16 - Ø20 (span 10m)

D40/6+2 Ø16-20 (span 20m)

S135/6 Ø16-20 (span 5m)

**II** D45/6+2 Ø16-20 (span 10m)

D55/6+4 Ø20 (span 20m)

D40/6+4 Ø16-20 (span 5m)

**III** D55/6+4 Ø20 (span 10 m)

D70/6+6 Ø20 (span 20 m)

S130/6 = Single layer of 6 rebars.  
30 cm thickness of sprayed concrete

D = Double layer of rebars

Ø16 = Rebar diameter is 16 mm

c/c = RSS spacing, centre - centre



## Viðauki F: Dæmi um jarðfræðiskýrslur, boltaskýrslur og sprautusteypuskýrslur úr Norðfjarðargöngum

Dæmi frá rannsóknarsvæði 1 á bls. 224–226

Dæmi frá rannsóknarsvæði 2 á bls. 227–230

Dæmi frá rannsóknarsvæði 3 á bls. 231–233

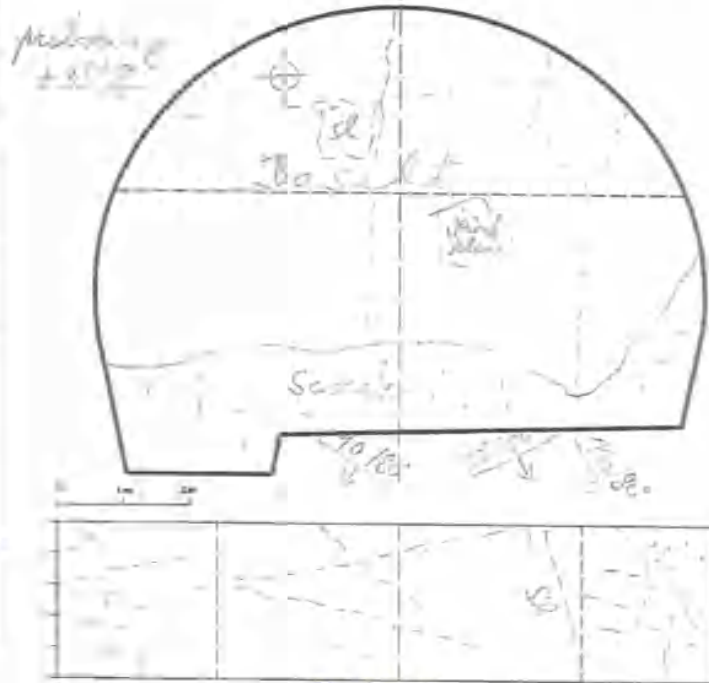
Dæmi frá rannsóknarsvæði 4 á bls. 234–236

# Geological Tunnel Mapping

$$Q = \frac{RQD}{100} \cdot \frac{R_c}{\sum \sigma_i} \cdot \frac{1}{\sum \frac{K_i}{SRF}}$$

STRUCTURE: Tunnel A route    DATE: 6.11.2014    TIME: 7:89.5,8    STATION: 8.55    ROUND No: 377    ROUND LENGTH 5/2 (m)

SAMPLE NO:		FOTO NO: <u>✓</u>		WATER TEMPERATURE															
<i>basalt scoria rock</i>																			
WEATHERING																			
unweathered W0	slightly W1	moderately W2	highly W3	completely W4	eluvium W5														
ROCK STRENGTH																			
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6													
VOLCANOCLASTICS, TUFFS																			
very soft	soft	firm	stiff	very stiff	hard														
WATER CONDITION																			
dry	damp	wet	dripping	seepage	flowing (Usec)														
CHARACTERISTICS OF DISCONTINUITIES																			
TYPE	ORIENTATION	ROUGHNESS	PERSISTENCE			SPACING (mm)					WIDTHS			FILLING					
			S	U	P	1-3	3-10	>10	<20	20-60	60-200	200-600	600-2000		>2000	<2mm	2-10	10-50	>50
	Dip Direction / Dip																		
J1	90/80°	X	X			X				X	X	X							
J2	30/75°	X		X		X					X	X							
J3	110/80°	X			X	X						X	X						



Type of Discontinuity		Persistence	Widths	Spacings
Fault	F	Very low < 1m	< 2mm	Extremely close < 20 mm
Joint	J	Low 1-3m	2-10mm	Very close 20-60 mm
Slickensided	Sl	Medium 3-10m	10-50mm	Close 60-200 mm
Fractured	Fr	High > 10m	> 50mm	Moderate 200-600 mm
Bedding Plane	B			Wide 600-2000 mm
Shear	Sh			Very wide > 2000 mm
Roughness		Type of filling	Rock strength	
STEPPED	S	rough	r	R 0 extremely strong > 250 MPa
		smooth	s	R 1 very strong 100-250 MPa
		slickensided	sl	R 2 strong 50-100 MPa
UNDULATING	U	rough	r	R 3 medium strong 25-50 MPa
		smooth	s	R 4 weak 5-25 MPa
		slickensided	sl	R 5 very weak 1-5 MPa
PLANAR	P	rough	r	R 6 brit. weak < 1 MPa
		smooth	s	
		slickensided	sl	

$Q_{roof} = \frac{25 \cdot 15 \cdot 1}{9 \cdot 2 \cdot 1} = 6,3$   
 $Q_{left\ wall} = \frac{80 \cdot 2 \cdot 1}{9 \cdot 3 \cdot 1} = 5,9$   
 $Q_{right\ wall} = \frac{80 \cdot 2 \cdot 1}{9 \cdot 3 \cdot 1} = 5,9$

<b>Lithological Properties:</b> Basalt: grey, fine, with nodules filled with black clay Scoria Rock - well compacted dark grey - brown Contractor: <i>Gayatri</i>	<b>Rock Mass Behaviour</b> Fixed Face Stable excavation Go ahead! Client: <i>OCG</i> Date: 6.11.2014
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

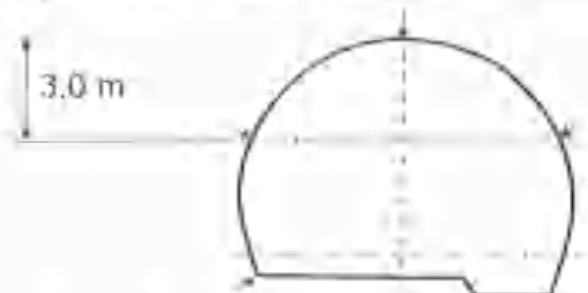


<b>METROSTAU</b> NORÐFJÁRDARÖNG - Fannarlabur portal	BOLTASKÝRSLA		Nr.	431
	(Výkaz osaz. svorníkó)		(Lí.)	Tunnal

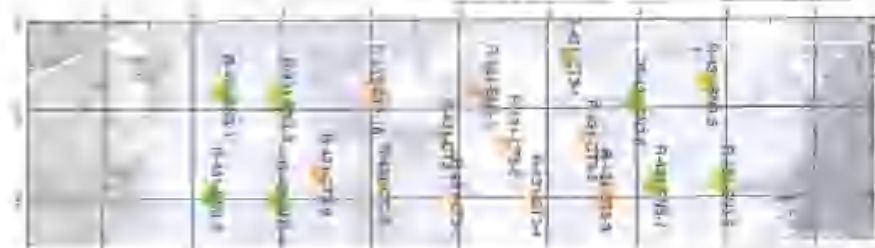
Stöð frá (Stanič.í od.)	7801	lí. (do.)	7895,8	Dagur (Dne)	6.11.2014
----------------------------	------	--------------	--------	----------------	-----------

Vakt (Sména)	Shift F	Day	YES	NO
--------------	---------	-----	-----	----

Liður (Pól.)	Gæð (Týp)	V. Veggur (Linné opñ)	Hvelking (Kalón)	H. Veggur (Þróað opñ)	Samtals (Gólfur)
37	3,0 m Innsteyplir bergboltar, D=20 mm (3,0 m SN svorník, D=20 mm)		8		8
38	4,0 m Innsteyplir bergboltar, D=20 mm (4,0 m SN svorník, D=20 mm)				
39	5,0 m Innsteyplir bergboltar, D=25 mm (5,0 m SN svorník, D=25 mm)				
40	5,0 m Innsteyplir bergboltar, D=25 mm (5,0 m SN svorník, D=25 mm)				
41	3 m Försp. innst. bergb. D=20 mm (3 m PG svorník, D=20 mm)		11		11
42	4 m Försp. innst. bergb. D=20 mm (4 m PG svorník, D=20 mm)				
43	5 m Försp. innst. bergb. D=25 mm (5 m PG svorník, D=25 mm)				
44	2,4 m Endafestir boltar, D=20 mm (2,4 m lepaný svorník, D=20 mm)				
45	3 m Boraðir bergboltar, D=32 mm (3 m Starozávitný svorník, D=32 mm)				
46	3 m Boraðir bergboltar, D=32 mm (3 m Starozávitný svorník, D=32 mm)				
47	6 m Boltar án ryðvarnar, D=32mm (6 m Bezpozichváð úpsný D=32 mm)				
48	Bergbönd [m] (Svorníkavý þús - Mátt stípus [m])				



$\sum$ Innsteyplir	8
$\sum$ Försp.	11
$\sum$ Endafestir	
$\sum$ Boraðir	



Stöð till (Stanič. do)	7895,8
---------------------------	--------

7801
Stöð frá (Stanič. od)

Afregasemdir	Botning after 377h blast
(Poznamka)	

Undirskrift		
(Fulgt)	Veikviki (Zubovskii)	Veikviki (Objektstafi)



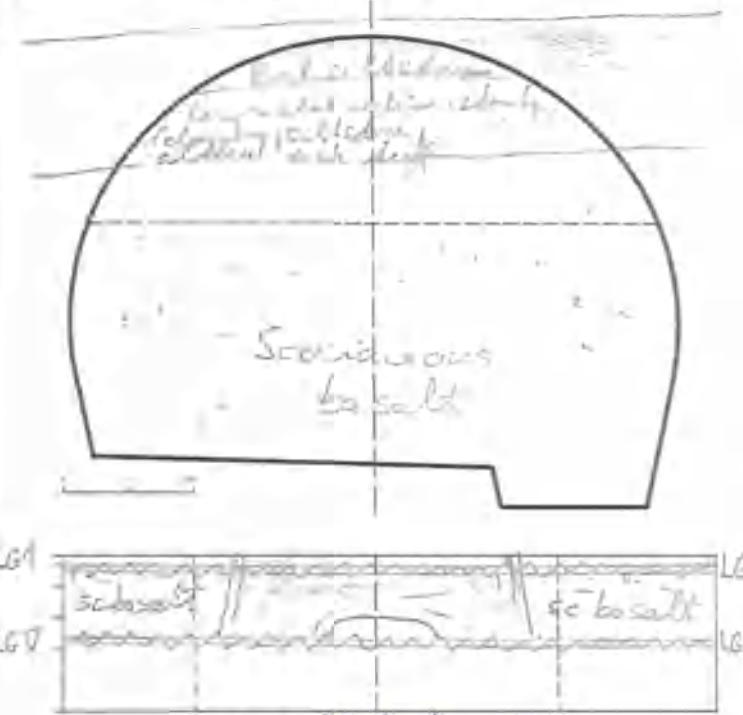
<b>metr&amp;stau</b>				SPRAUTUSTEYFUSKÝRSLA		Nr.	496		
NORÐFJARÐARGÖNG - Farnardalur portal				(Výhaz slóik.betonu)		(C:)	Tunnel		
Dags (Dne)	6.11.2014	Áspraution hefst kl (Zajíst zahájení)	9.00	Áspraution lýkur kl (Zajíst ukončení)	10.30				
Slafn: (Staničení/děly)	7895,8			Sprautar: (Neanřikáveć)	Skubal Jan				
Sprautusteypa (Sřitkový beton)	án tréfa (řev)			með tréfum (s dráky)			Stað lík (staničení/děly)	7901	
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>		kg	
40mm - ř. 48								Stað lík (staničení/děly)	
50mm - ř. 50				20,0	6,0	0,075	30,0		Beráttir (kg) - ř. 53
60mm - ř. 51								Beráttir (kg) - ř. 54	
100mm - ř. 52								(Děly/m <sup>2</sup> ) (kg)	
120mm - ř. 53								(Děly/m <sup>2</sup> ) (kg)	
140mm - ř. 54									
160mm - ř. 55									
<b>TOTAL</b>				20,0	6,0	0,09	30,0		
Afgreidslusadíl nr.									
Dóðaci listi									
Stað (Staničení)	$h_v$							$h_h$	Stað (Staničení)
7878									7876
7881									7881
7886									7886
7891									7891
7898									7896
7901									7901
Hraðari [kg]		Hraðari [kg]		Hraðari [kg]		Hraðari [kg]		Hraðing sprautusteypu [°C]	Sigmál steypu [mm]
Sæmeri [kg]	Hraðari [%]	Hraðari [kg]	Hraðing [°C]	Hraðing sprautusteypu [°C]		Hraðing sprautusteypu [°C]		(Teplota betonu [°C])	(Sednutí kůže [mm])
460	5,50%	152	22	21		21		S3	
Afhugasemdir	Shotcrating after 377th blast								
(Poznámka)									
Undirskrift									
(Podpis)	Verktaki (Zhotovitel)				Verkaufi (Objednatel)				

# Geological Tunnel Mapping

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{j_r}{J_a} \cdot \frac{j_w}{SRF}$$

STRUCTURE: Tunnel A route    DATE: 5/11/2014    TIME: 9:00    STATION: 44453    ROUND No: 582    ROUND LENGTH 23 (m)

SAMPLE NO:		FOTO NO: ✓		WATER TEMPERATURE		
<i>Scoriae basalt      red mudstone</i>						
WEATHERING						
unweathered W 0	slightly W 1	moderately W 2	highly W 3	completely W 4	extreme W 5	
ROCK STRENGTH						
R0	R1	R2	R3	R4	R5	
VOLCANOCLASTICS, TUFFS						
very soft	soft	firm	stiff	very stiff	hard	
WATER CONDITION						
dry	damp	wet	dripping	seepage	flowing (Vsec)	
CHARACTERISTICS OF DISCONTINUITIES						
TYPE	ORIENTATION	ROUGHNESS	PERSISTENCE	SPACING (mm)	WIDTHS	FILLING
	Dip Direction / Dip	S U P E R S I	< 1 1-3 3-10 > 10	< 20 mm 20-50 50-200 200-500 500-2000 > 2000	< 2mm 2-10 10-50 > 50 mm	
<i>Not over excavated under unstable excavation Revealing and hard breaking sediment. layers</i>						



Type of Discontinuity		Persistence	Widths	Spacing	Rock strength
Fault	F	Very low < 1m	< 2mm	Extremely close < 20 mm	> 250 MPa
Joint	J	Low 1-3m	2-10mm	Very close 20-50 mm	100-250 MPa
Slickensided	Sl	Medium 3-10m	10-50mm	Close 50-200 mm	25-50 MPa
Fractured	Fr	High > 10m	> 50mm	Moderate 200-500 mm	5-25 MPa
Bedding Plane	B			Wide 500-2000 mm	1-5 MPa
Shear	Sh			Very wide > 2000 mm	= 1 MPa
Roughness		Type of filling			
STEPED	S	rough	r		
		smooth	s		
		slickensided	sl		
UNDULATING	U	rough	r		
		smooth	s		
		slickensided	sl		
PLANAR	P	rough	r		
		smooth	s		
		slickensided	sl		

$Q_{\text{roof}} = \frac{25}{5} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5} = 0.08$   
 $Q_{\text{left wall}} = \frac{50}{4} \cdot \frac{2}{2} \cdot \frac{1}{25} = 1.0$   
 $Q_{\text{right wall}} = \frac{50}{4} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{25} = 1.67$

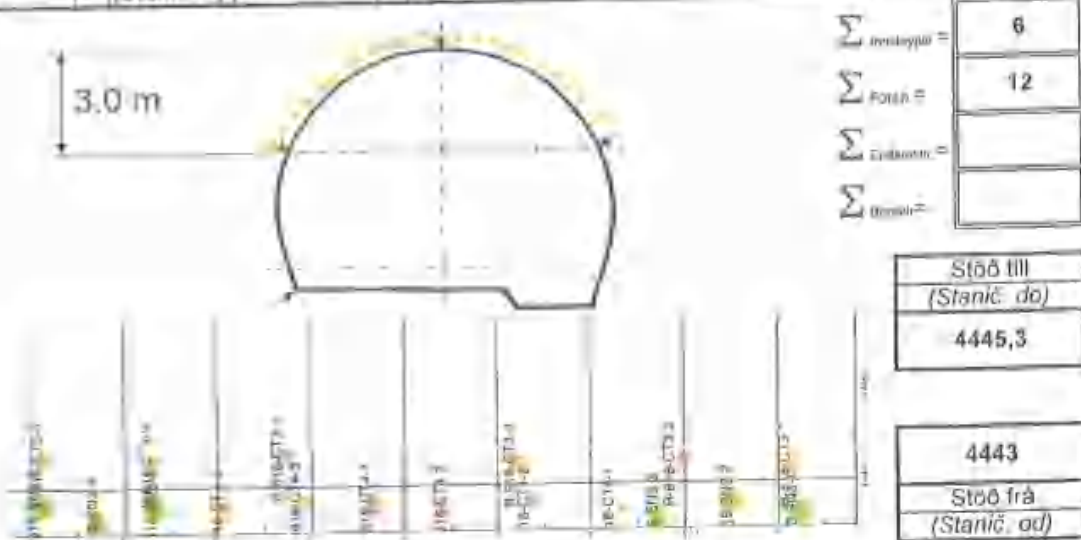
<b>Lithological Properties:</b> Scoriae basalt, slightly to mod. weathered red mudstone, argillaceous, reddish brown and thin medium and grey and greenish shales. Date: 5/11/2014, 11:00 AM, 11/11/2014	<b>Rock Mass Behaviour</b> Unstable excavation due to sediment. layers => strength loss problems Contractor: Red... Client: Perry Dist... Date: 7/11/2014
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>metróstau</b> NORDFJARÐARGÖMÚ · Eskiljartún þortel	<b>BÓLTASKÝRSLA</b>		Nr.	816
	(Výkað úrsl. svornika)		(Čís.)	Títtrel

Stöð frá: (Stanič od)	4443	Stöð (do)	4445,3	Dagur: (Dne)	5.11.2014
--------------------------	------	--------------	--------	-----------------	-----------

Vekt (Smætt)	SHR 0	Day	<input type="checkbox"/> YES	<input type="checkbox"/> NO
--------------	-------	-----	------------------------------	-----------------------------

Líður (Fol.)	Gerð (Typ)	V. Veggur (Levi opán)	Hvæfing (Ráðala)	H. Veggur (Pravi opán)	Samtals (Celkum)
37	3,0 m Innsléypir bergbolta, D=20 mm (3,0 m SN svornik, D=20 mm)		6		6
38	4,0 m Innsléypir bergbolta, D=20 mm (4,0 m SN svornik, D=20 mm)				
39	5,0 m Innsléypir bergbolta, D=25 mm (5,0 m SN svornik, D=25 mm)				
40	6,0 m Innsléypir bergbolta, D=25 mm (6,0 m SN svornik, D=25 mm)				
41	3 m Forsp. Innst. bergb. D=20 mm (3 m FG svornik, D=20 mm)		6		6
42	4 m Forsp. Innst. bergb. D=20 mm (4 m FG svornik, D=20 mm)		6		6
43	6 m Forsp. Innst. bergb. D=25 mm (6 m FG svornik, D=25 mm)				
44	7,4 m Endafestir boltar, D=20 mm (2,4m háttari svornik, D=20 mm)				
45	6 m Elgáðir bergbolta, D=32 mm (6m Samozdvrtny svornik, D=32 mm)				
46	8 m Elgáðir bergbolta, D=32 mm (8m Samozdvrtny svornik, D=32 mm)				
47	6 m Boltar án ryðvarnar, D= 32mm (6m Bezhriznikové úpravny D=32 mm)		28		28
48	Bergbónd (m) (Svornikový pás - Měra křeslá (m))				



Σ Innsléypir =	6
Σ Forsp. =	12
Σ Endafestir =	
Σ Elgáðir =	

Stöð til (Stanič do)	4445,3
-------------------------	--------

4443
Stöð frá (Stanič od)

Adugasemilr (Pozicijonka)	Bolting through 1st lattice girder Spilling bolts Bolting between 1st and 0 lattice girders				
Underskrift (Feriun)	<table border="0"> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>M. Bolund</td> <td>Verkefni (Ófjodmali)</td> </tr> </table>			M. Bolund	Verkefni (Ófjodmali)
M. Bolund	Verkefni (Ófjodmali)				



<b>metr@STAU</b> NORÐFJARÐARÞÓNG - Eskifjörður portar	SPRAUTUSTEYPUKYRSLA	Nr:	754
	(Výkað stírk betonu)	(Ó)	Tunnel

Dagur (Date)	5.11.2014	Asprautun hefst kl. (Začiatok odberu)	9.03	Asprautun lýkur kl. (Začiatok dokončeno)	9:55
-----------------	-----------	------------------------------------------	------	---------------------------------------------	------

Stöfn. (Staniční číslo)	4445,3	Sprautari (Nástřikovač)	Ferenc Róbert
----------------------------	--------	----------------------------	---------------

Sprautusteypa (Stříkaný beton)	Án trefja (bez)			með trefjum (s drátky)				Stöð frá staniðni frá	Stöð frá staniðni til
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	volúma	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	volúma	kg	4443	4445,3
40mm - II.49									
60mm - II.50				76,0	6,0	0,078	30,0		
80mm - II.51									
100mm - II.52									
120mm - II.53									
180mm - II.54									
sem. Abstrak. II. 55					4,0	0,044	20,0		
<b>TOTAL</b>				76,0	10,0	II. 69	50,0		

Berndísel [kg] - II. 63 (Údar síð [kg])	Berndísel [kg] - II. 64 (Údar síð [kg])
--------------------------------------------	--------------------------------------------

Afgreidslusedill nr.			
Dæðaf listy			
1791			
1792			



Hraðari [kg]				Hitaðig sprautusteypu [°C]	Sigmál sleypu [mm]
Sement [kg]	Hraðari [%]	Hraðari [kg]	Hitaðig [°C]	(Teplota betonu [°C])	(Sednutí kúžale [mm])
460	5,60%	253	21	17	S3

Athugasemdir: Shotcreting after 582nd blast - preparation for 1st lattice girder  
Shotcreting of face

(Poznámka)

Undirskrift

(Podpis)

Ing. Aleš Čížek  
Verktaki (Zhotovitel)

Fríður Ólaf Jónsson  
Verkaupi (Objednatel)

<b>metrOSTAU</b>		SPRÁUTUSTEYPUKÝRSLA	Nr.	755
MÖREIFJARÞARÐÓMG - Eskiljörðir portaf		(Výkka stílk. botnu)	(C)	Tunnel

Dags (Dni)	6.11.2014	Ásprautun hófst kl (Zaíst. rshájeta)	11:58	Ásprautun lýkur kl (Zaíst. dokanfeta)	13:09
Stafn. (Staniðni lísty)	4443,3		Sprautari (Nafn/ávané)	Ferenc Róbert	

Sprautusleypa (Stílkangur botni)	án tréða (bez)			með tréðum (s dráky)				Stöð km (staniðni lísty)	Stöð m (staniðni lísty)
	m2	m3	m3/m2	m2	m3	m3/m2	kg		
40mm - II.49									
60mm - II.50									
30mm - II.51									
100mm - II.52									
120mm - II.53									
180mm - II.54									
Min. Aðstoð - II.55		15,0	0,000						
<b>TOTAL</b>		15,0					II. 59		

Berndst (sg) - II. 53 (Clas. stílk. botn)	Berndst (sg) - II. 54 (Clas. lísty lísty)
108	273
Afgreidslusedill nr. (#)	
Dóðaci lísty č. (#)	
2793	
2794	

Stöð (Staniðni)	$h_v$	$h_h$	Stöð (Staniðni)
4469			4469
4464			4464
4459			4459
4454			4454
4449			4449
4444			4444

0,4m      0,9m

Hraðari [kg]				Hitasig sprautusleypu [°C]	Sigmál steypu [mm]
Sement [kg]	Hraðari [%]	Hraðari [kg]	Hitasig [°C]	[Teplota betonu [°C]]	[Sednutí kuželá [mm]]
460	5,50%	380	15	20	S3

Afhugasemir	Shotcreting between 0 and 1st lattice girder
(Poznámka)	Shotcreting over 1st lattice girder
	1st lattice girder

Undirskrift		
(Podpis)	Verktaki (Zhotovitel)	Verkkauþi (Objednatel)

# Geological Tunnel Mapping

STRUCTURE: Tunnel A route    DATE: 15.10.14    TIME: 7:35    STATION: 4256.9    ROUND No: 541    ROUND LENGTH: 7.7m

$$Q = \frac{RQD}{L_n} \cdot \frac{I_r}{L_s} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

SAMPLE NO:    FOTO NO:    WATER TEMPERATURE

WEATHERING  
 unweathered W 0    slightly W 1    moderately W 2    highly W 3    completely W 4    effluvium W 5

ROCK STRENGTH  
 R0    R1    R2    R3    R4    R5    R6

VOLCANOCLASTICS, TUFFS  
 very soft    soft    firm    **stiff**    very stiff    hard

WATER CONDITION  
 dry    damp    wet    dripping    seepage    flowing (l/sec)

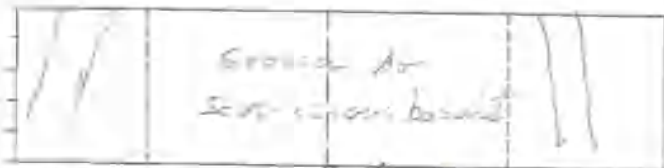
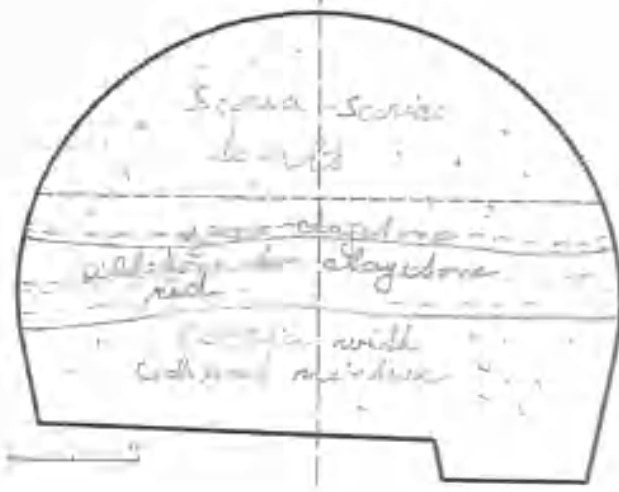
CHARACTERISTICS OF DISCONTINUITIES

TYPE	ORIENTATION Dip Direction / Dip	ROUGHNESS					PERSISTENCE					SPACING (mm)					WIDTHS					FILLING
		S	U	P	r	s	<1	1-3	3-10	>10	<20	20-60	60-200	200-600	600-2000	>2000	<2mm	2-10	10-50	>50		

red measured - unstable face  
 => large strength problem => locating  
 cautioning and splitting sediment layers

Type of Discontinuity

Fault	F																				
Joint	J																				
Slickensided	Sl																				
Fractured	Fr																				
Bedding Plane	B																				
Shear	Sh																				
<b>Roughness</b>																					
STEPPED	S	rough	r																		
		smooth	s																		
		slickensided	sl																		
UNDULATING	U	rough	r																		
		smooth	s																		
		slickensided	sl																		
PLANAR	P	rough	r																		
		smooth	s																		
		slickensided	sl																		



Q root =  $\frac{70}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = 39$

Q left wall =  $\frac{40}{15} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = 45$  (Sediment)

Q right wall =  $\frac{40}{15} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = 45$  (Sediment)

Lithological Properties:  
 best to calc. grey, medium  
 weathered  
 red - undulated - calc. red  
 calc. red

Rock Mass Behaviour  
 Mixed Face, Unfavourable  
 least - strength ratio  
 for sediment and partly

Contractor: *Guido*    Client: *[Signature]*

Date: 15.10.2014    Date: 22.10.14

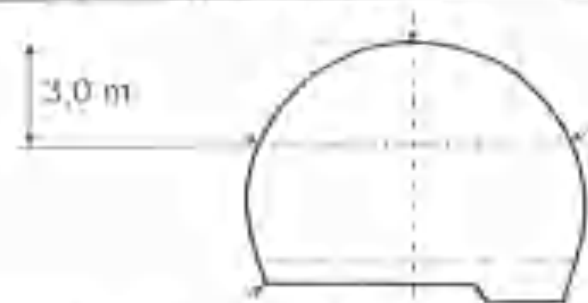


<b>METROSTAD</b> MORFJARHARÐARGING - líanifjórúð þorlat	BOLTASKÝRSLA	Nr.	676
	(Výkaz osar- svorník)	(G.)	Tunnal

Stað frá (Stanič. od)	4252,2	Stað til (Stanič. do)	4256,8	Dagur (Dne.)	15.10.2014
--------------------------	--------	--------------------------	--------	-----------------	------------

Vakt (Sména)	Shift A	Day	Þrátt fyrir þessum vaktum	YES	Þrátt fyrir þessum vaktum (þó veri)	NO
--------------	---------	-----	---------------------------	-----	-------------------------------------	----

Litur (Vgl.)	Gnrð (Tvp)	V. Veggur (Levó upúð)	Hvelling (Kallata)	H. Veggur (Prava upúð)	Samtals (Celkni)
37	REGULAR BOLTS 3,0 m Innsteypur bergbolta, D=20 mm (3,0 m SN svorník, D=20 mm)				
38	4,0 m Innsteypur bergbolta, D=20 mm (4,0 m SN svorník, D=20 mm)				
39	5,0 m Innsteypur bergbolta, D=25 mm (5,0 m SN svorník, D=25 mm)				
40	4,0 m Innsteypur bergbolta, D=25 mm (4,0 m SN svorník, D=25 mm)				
41	PG 3 m Forsp. innst. hærh. D=20 mm (3 m PG svorník, D=20 mm)				
42	4 m Forsp. innst. hærh. D=20 mm (4 m PG svorník, D=20 mm)		34		34
43	5 m Forsp. innst. hærh. D=25 mm (5 m PG svorník, D=20 mm)				
44	2,4 m Endastær boltar, D=20 mm (2,4 m íþen) svorník, D=20 mm)				
45	6 m Boraðir bergbolta, D=32 mm (6 m Samvæðing svorník, D=32 mm)				
46	8 m Boraðir bergbolta, D=32 mm (8 m Samvæðing svorník, D=32 mm)				
47	6 m Boltar án ryðvarnar, D= 32mm (6 m Boruvæðing upúð D=32 mm)				
48	Borgbæði (m) (Svorníki) pás - lían straps (m)				



$\Sigma$ Innsteypur	
$\Sigma$ Forsp.	34
$\Sigma$ Endastær	
$\Sigma$ Boraðir	

Stað til (Stanič. do)	4256,8
--------------------------	--------



4252,2
Stað frá (Stanič. od)

Athugasemdir (Poznámka)	bolting after 54 hrs blast 7 pcs CT bolts 4m into the face
----------------------------	---------------------------------------------------------------

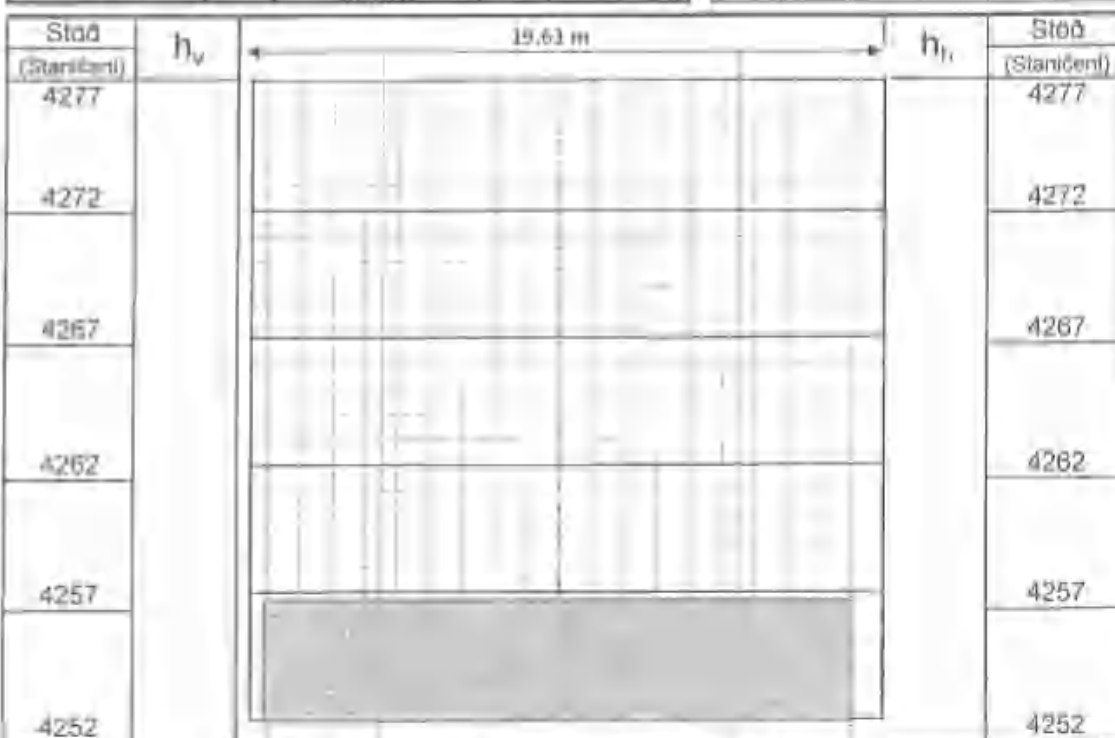
Línaskrá (Příloha)		
	Verisaki (Zrnčević)	Verkaupi (Ólafsson)

<b>METROSTAU</b>		SPRAUTUSTEYPUSKÝRSLA	Nr.	708
NORÐFJARÐARGÖNG - Eskifjarður portar		(Výkaz síðk. betonu)	(Č.)	Tunnal

Dags- (Dne)	15.10.2014	Ásprautun heiti kl (Zajíst. zahájení)	7:40	Ásprautun lýkur kl (Zajíst. dokončení)	8:00
----------------	------------	------------------------------------------	------	-------------------------------------------	------

Stað (Stanění celky)	4258,8	Sprautari (Nasměvatel)	Krausehvil Miroslav
-------------------------	--------	---------------------------	---------------------

Sprautustýpa (Sitrkaly betonu)	Án tréjja (bez)			með tréjum (s dróttum)				Stað li (Měření li)	Stað li (Měření li)
	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	erðv. (kg)	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	erðv. (kg)	kg		
40mm - f. 49			-	40,0	2,0	0,050	10,0	4252,2	4256,8
50mm - f. 50			-	86,0	6,0	0,070	30,0		
60mm - f. 51			-						
100mm - f. 52			-						
120mm - f. 53			-						
180mm - f. 54			-						
smá Abbaða - f. 55			-						
<b>TOTAL</b>				126,0	8,0	f. 59	40,0		



0,4m    3,7m    5,5m    5,5m    3,7m    0,9m

Hraðari [kg]				Hitasig sprautusteypu [°C]	Sigmál steypu [mm]
Sement [kg]	Hraðari [%]	Hraðari [kg]	Hitasig [°C]	(Teplota betonu [°C])	(Sednutí kužele [mm])
460	5,50%	202	23	22	S3

Afhugasemdir	shotcreting after 541st blast shotcreting of the face - 2m3
(Poznámka)	

Undirskrift		
(Podpis)	Verkkalahti (Zhotovitel)	Verkkalahti (Objednatel)

# Geological Tunnel Mapping

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

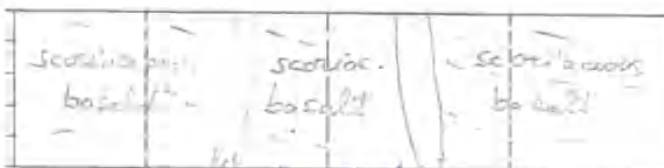
STRUCTURE: Tunnel A route    DATE: 22.10.14    TIME: 10:47    STATION: 4316.5    ROUND No: 554    ROUND LENGTH 46 (m)

SAMPLE NO:    FOTO NO: V    WATER TEMPERATURE:  
 WEATHERING: *scoria over basalt section - layers*  
 unweathered W 0    slightly W 1    moderately W 2    highly W 3    completely W 4    sluttum W 5  
 ROCK STRENGTH: R0    R1    R2    R3    R4    R5    R6  
*scoria layer*

VOLCANOCLASTICS, TUFFS:  
 very soft    soft    firm    **stiff**    very stiff    hard

WATER CONDITION:  
 dry    damp    wet    dripping    seepage    flowing (l/sec)

CHARACTERISTICS OF DISCONTINUITIES						
TYPE	ORIENTATION	ROUGHNESS	PERSISTENCE	SPACING (mm)	WIDTHS	FILLING
	Dip Direction / Dip	S U P T S S I	< 1 1-3 3-10 > 10	< 20 mm 20-60 60-200 200-600 600-2000 > 2000	< 2mm 2-10 10-50 > 50 mm	
<i>Not measured under unsupported excavation (weak scoria layer -&gt; breaking, crumbling)</i>						



$Q_{roof} = \frac{10}{15} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2.5} = 0.17$   
 $Q_{left\ wall} = \frac{7.5}{9} \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} = 2.8$   
 $Q_{right\ wall} = \frac{7.5}{9} \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} = 2.8$

Type of Discontinuity		Persistence	Widths	Spacing
Fault	F	Very low < 1m	< 2mm	Extremely close < 20 mm
Joint	J	Low 1-3m	2-10mm	Very close 20-60 mm
Slickensided	Sl	Medium 3-10m	10-50mm	Close 60-200 mm
Fractured	Fr	High > 10m	> 50mm	Moderate 200-600 mm
Bedding Plane	B			Wide 600-2000 mm
Shear	Sh			Very wide > 2000 mm

Roughness	Type of filling	Rock strength
STEPED S	r rough s smooth sl slickensided	R 0 extremely strong > 250 MPa R 1 very strong 100-250 MPa R 2 strong 50-100 MPa R 3 medium strong 25-50 MPa R 4 weak 5-25 MPa R 5 very weak 1-5 MPa R 6 extr. weak < 1 MPa
UNDULATING U	r Mn/Fe-mineralisations s mylonitic fault gouge sl slickensided	
PLANAR P	r rough s smooth sl slickensided	

**Lithological Properties:**  
*scoria over basalt, amygdale filled with calcite and sil. min.*  
*scoria layer - red*

**Rock Mass Behaviour:**  
 Mixed Face. Weak scoria and (breaking, crumbling) in top part of the face

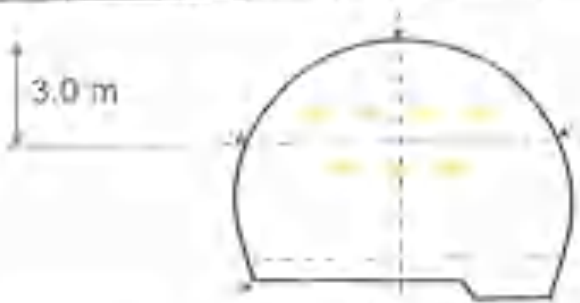
Contractor: *St. J. Silstone for claystone*    Client: *Berginjansen*  
 Date: *Gajdaj 22.10.14*    Date: *23/10 2014*

<b>metróSTAÚ</b>		<b>BOLTASKÝRSLA</b>		Nr.	588
MONDUFJANDARÍÐING - Bakkjardúr part 1		(Výkaf í suz. svorniku)		(C)	Tunnel

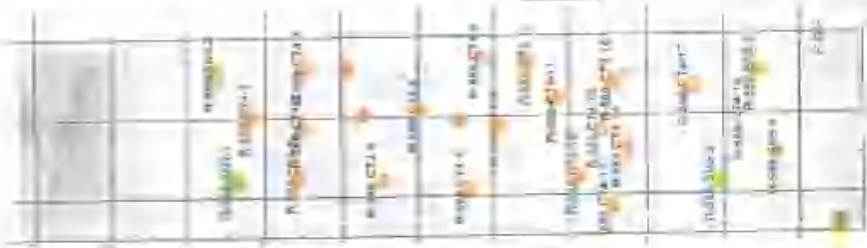
Stöð frá (Stanić. od)	4312	ÍR (Dó.)	4316,5	Dags. (Dag)	22.10.2014
--------------------------	------	-------------	--------	----------------	------------

Vaki (Sména)	SWH C	Day...	Stærðir og fjöldi ávinnu	YES	Stærðir og fjöldi ávinnu	NO
--------------	-------	--------	--------------------------	-----	--------------------------	----

Líður (Pól.)	Gerð (?)	V. Veggur (Lava opni)	Hvefing (Kanta)	H. Veggur (Flavi opni)	Samtals (Colkm)
37	3,0 m Innsteyptir bergboltar, D=20 mm (3,0 m SN svornik, D=20 mm)	4		3	7
38	4,0 m Innsteyptir bergboltar, D=20 mm (4,0 m SN svornik, D=20 mm)				
39	5,0 m Innsteyptir bergboltar, D=25 mm (5,0 m SN svornik, D=25 mm)				
40	6,0 m Innsteyptir bergboltar, D=25 mm (6,0 m SN svornik, D=25 mm)				
41	3 m Forsp. innst. bergb. D=20 mm (3 m PG svornik, D=20 mm)				
42	4 m Forsp. innst. bergb. D=20 mm (4 m PG svornik, D=20 mm)		27		27
43	5 m Forsp. innst. bergb. D=25 mm (5 m PG svornik, D=20 mm)				
44	2,4 m Endafestir boltar, D=20 mm. (2,4m ípeni svornik, D=20 mm)				
45	6 m Boraðir bergboltar, D=32 mm (6m Samzæmtu svornik, D=32 mm)				
46	8 m Boraðir bergboltar, D=32 mm (8m Samzæmtu svornik, D=32 mm)				
47	6 m Boltar án ryðvarnar, D= 32mm (6m Breyttu svornik úr D=32 mm)				
48	Bergbönd (m) (Svornikur pás - Mine klapp (m))				



$\sum$ Innsteyptir =	7
$\sum$ Forsp. =	27
$\sum$ Endafestir =	
$\sum$ Boraðir =	



Stöð III (Stanić. od)	4316,5
--------------------------	--------

4312	Stöð frá (Stanić. od)
------	--------------------------

Athugasemdir (Poznámka)	bolting after 554th blast
----------------------------	---------------------------

Undirskrift (Podpis)		
-------------------------	--	--



<b>METROSTAL</b>		SPRAUTUSTEYPIFRÝRSLA	Nr.	723
NORÐFJARGÖNG - Eskiljörður portal		(Výkaz stílk bítanu)	(Čís.)	Tunnel

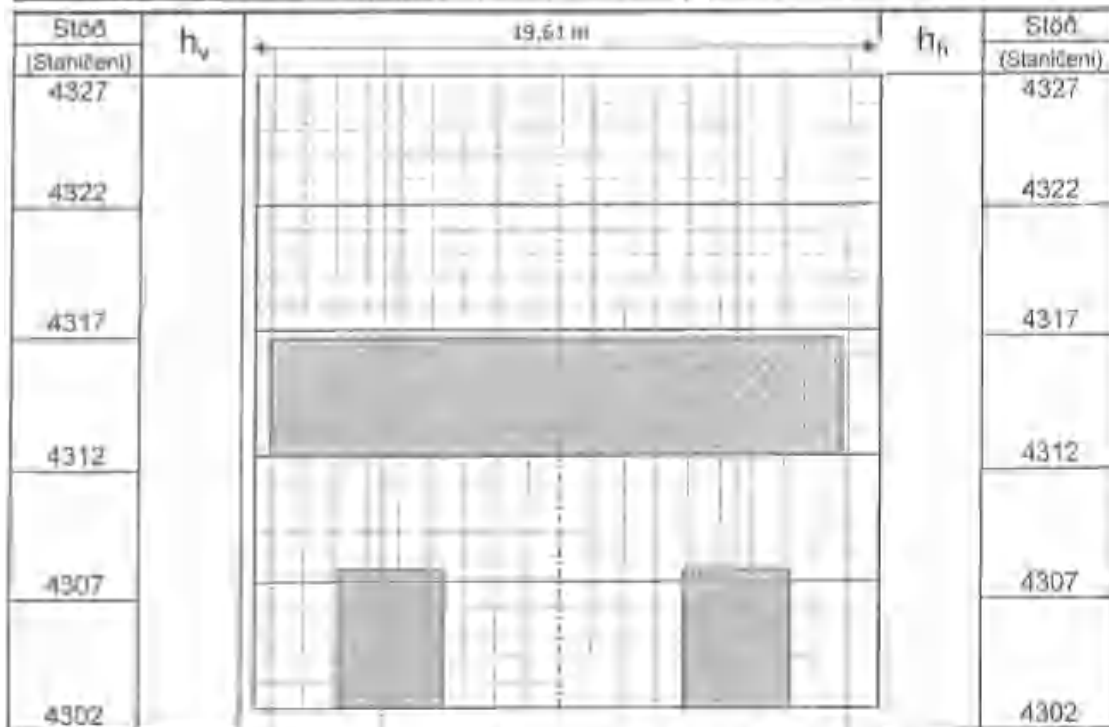
Dagur (Dni)	22.10.2014	Ásprautin hófst kl. (Začiatok zahŕňajúci)	11:00	Ásprautin lýkur kl. (Zhybné dokončeno)	12:21
----------------	------------	----------------------------------------------	-------	-------------------------------------------	-------

Stafn. (Stankani žalby)	4316,0	Sprautari. (Nastřikovač)	Ferenc Róbert
----------------------------	--------	-----------------------------	---------------

Sprausteypa (Střikový beton)	Án ítrejja (ber)			með brotum (x dráttir)			Stöð ís (stanízení) (m)	Stöð líl (stanízení) (m)
	m2	m3	cm3	m2	m3	m3m2		
40mm - íl. 48			-			-		
60mm - íl. 50			-			-		
80mm - íl. 51			-			-		
100mm - íl. 52			-			-		
120mm - íl. 53			-			-		
160mm - íl. 54			-			-		
óáfr. áhættu - íl. 55			-	12,0	####	60,0		
<b>TOTAL</b>				12,0	íl. 59	60,0		

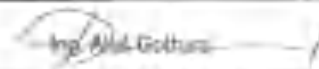

Ísstafréttir (kg) - íl. 63	Ísstafréttir (kg) - íl. 64
Ísstafréttir (kg)	Ísstafréttir (kg)

Afgreiddslusedill nr.					
Göðaci listir					
2743					
2742					
2741					



Hraðari [kg]				Hitasig sprautusteypu [°C]	Sigmál steypu [mm]
Semmi [kg]	Hraðari [%]	Hraðari [kg]	Hitasig [°C]	(Teplota betonu [°C])	(Sednutí kužela [mm])
460	5,50%	304	21	17	S3

Átlugasemdir	shotcreting under special condition after 554th blast
(Poznámka)	shotcreting under special condition in chernage 4302 - 4307

Undirskrift		
(Podpis)	Verktak (Zhotovitel)	Verkkauði (Objednatel)

Viðauki G: Inntaksstærðir Q-gilda fyrir rannsóknarsvæði 1-4

Rannsóknarsvæði 1

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð nr. [m]	Lengd salva				Þekja					Q-gildi þekju	Vinstri veggur					Q-gildi vinstri	RQD	J-n
			RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF	RQD	J-n	J-r		J-a	J-w	SRF					
374	7916.3	7911.0	5.3	60	9	2	2	1	1	6.67	75	9	2	3	1	1	5.56	75	9	
375	7911.0	7906.0	5.0	75	9	2	3	1	1	5.56	75	9	2	3	1	1	5.56	75	9	
376	7906.0	7901.0	5.0	75	9	2	3	1	1	5.56	75	9	2	3	1	1	5.56	75	9	
377	7901.0	7895.8	5.2	75	9	1.5	2	1	1	6.25	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	
378	7895.8	7890.5	5.3	75	9	1.5	2	1	1	6.25	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	
379	7890.5	7885.5	5.0	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	
380	7885.5	7880.5	5.0	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	2	3	1	1	5.93	80	9	

Rannsóknarsvæði 2

Nr. salva	Upphaf salva [m]	Stafn í stöð nr. [m]	Lengd salva				Þekja					Q-gildi þekju	Vinstri veggur					Q-gildi vinstri	RQD	J-n
			RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF	RQD	J-n	J-r		J-a	J-w	SRF					
580	4435.0	4440.0	5.0	30	15	1	3	1	5	0.13	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
581	4440.0	4443.0	3.0	30	15	1	3	1	5	0.13	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
582	4443.0	4445.3	2.3	25	20	1	3	1	5	0.08	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
583	4445.3	4447.2	1.9	25	20	1	3	1	5	0.08	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
584	4447.2	4450.5	3.3	25	20	1	3	1	5	0.08	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
585	4450.5	4453.0	2.5	25	20	1	3	1	5	0.08	60	9	2	3	1	2.5	1.78	60	9	
586	4453.0	4455.8	2.8	25	20	1	3	1	5	0.08	60	9	2	3	1	2	2.22	60	9	
587	4455.8	4458.3	2.5	25	20	1	3	1	5	0.08	65	9	2	2	1	2	3.61	65	9	
588	4458.3	4460.8	2.5	25	20	1	3	1	5	0.08	65	9	2	2	1	2	3.61	65	9	



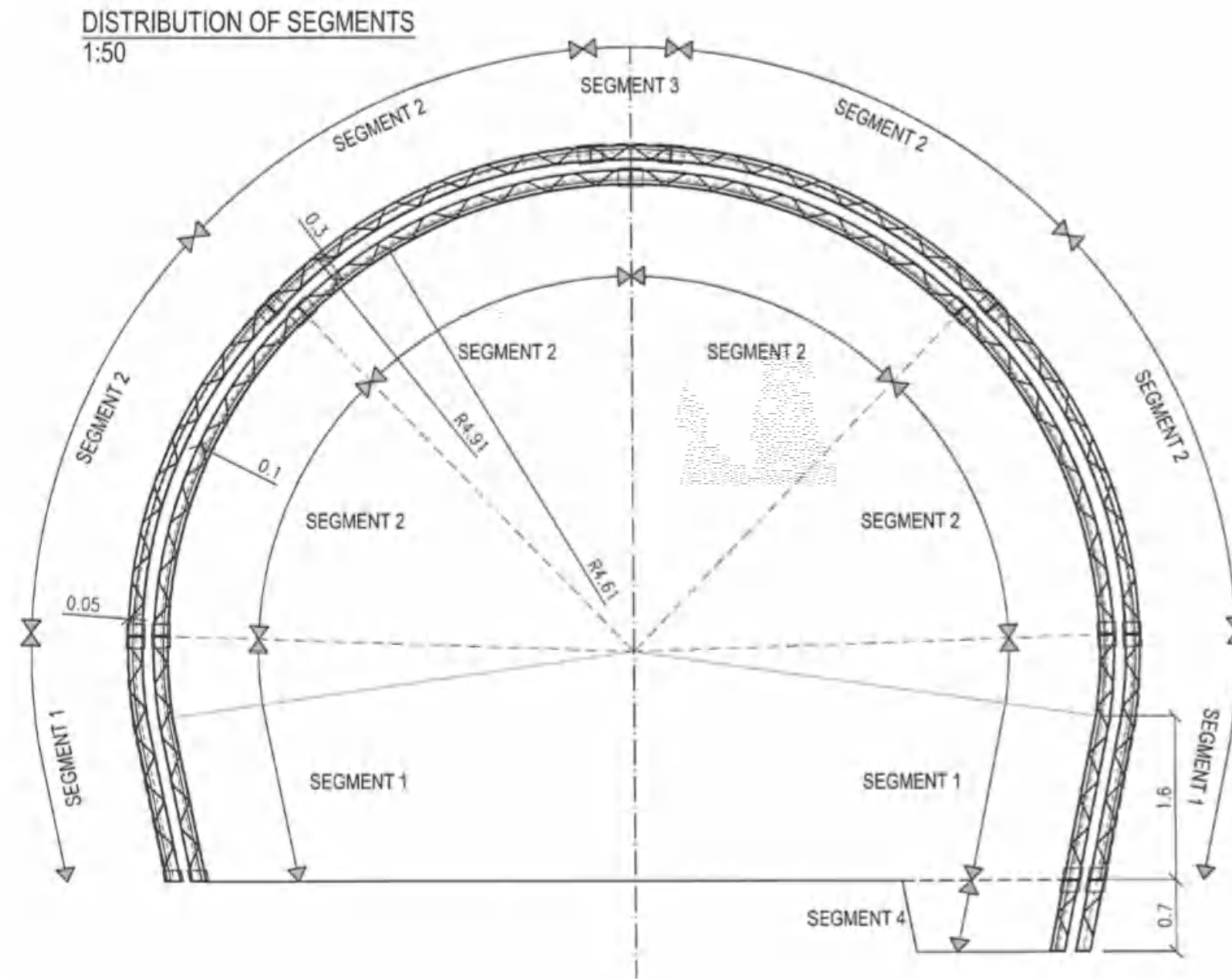
Rannsóknarsvæði 3

Nr. salva	Upphafsalva [m]	Stafn nr. [m]	Stöðsalva [m]	Lengd [m]	Þekja						Q-gildi þekju	Vinstri veggur						Q-gildi vinstri	Hægri veggur						Q-gildi hægri
					RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF		RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF		RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF	
538	4238.3	4243.0	4.7	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
539	4243.0	4248.0	5.0	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
540	4248.0	4252.2	4.2	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
541	4252.2	4256.8	4.6	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
542	4256.8	4259.0	2.2	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
543	4259.0	4264.0	5.0	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
544	4264.0	4268.5	4.5	70	12	2	3	1	1	3.89	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
545	4268.5	4273.3	4.8	70	9	2	3	1	2	2.59	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	
546	4273.3	4277.5	4.2	70	9	2	3	1	2	2.59	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	40	15	1.5	3	1	2.5	0.53	

Rannsóknarsvæði 4

Nr. salva	Upphafsalva [m]	Stafn nr. [m]	Stöðsalva [m]	Lengd [m]	Þekja						Q-gildi þekju	Vinstri veggur						Q-gildi vinstri	Hægri veggur						Q-gildi hægri
					RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF		RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF		RQD	J-n	J-r	J-a	J-w	SRF	
553	4306.0	4312.0	6.0	40	15	2	3	1	2.5	0.71	70	9	2	3	1	2	2.59	70	9	2	3	1	2	2.59	
554	4312.0	4316.5	4.5	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	
555	4316.5	4321.5	5.0	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	
556	4321.5	4324.8	3.3	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	
557	4324.8	4328.5	3.7	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	
558	4328.5	4331.8	3.3	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	
559	4331.8	4335.0	3.2	40	15	2	3	1	2.5	0.71	75	9	2	3	1	2	2.78	75	9	2	3	1	2	2.78	

# Viðauki H: Hönnunarteikningar af sprautusteypubogum



## MATERIAL REPORT

	Item	Length [mm]	No [pcs]
SEGMENT 1	Ø 12	2436	2
	Ø 16	2432	1
	Ø 8	483	10
	Ø 8	138	10
	angle 120x80x10	206	4
	welds (5 %)		
TOTAL WEIGHT			
SEGMENT 2	Ø 12	3613	2
	Ø 16	3509	1
	Ø 8	483	14
	Ø 8	138	14
	angle 120x80x10	206	4
	welds (5 %)		
TOTAL WEIGHT			
SEGMENT 3	Ø 12	797	2
	Ø 16	781	1
	Ø 8	483	4
	Ø 8	138	4
	angle 120x80x10	206	4
	welds (5 %)		
TOTAL WEIGHT			
SEGMENT 4	Ø 12	714	2
	Ø 16	714	1
	Ø 8	483	2
	Ø 8	138	2
	Ø 12	170	3
	angle 120x80x10	206	2
TOTAL WEIGHT			
BOLTS	Bolt M20 - 80		24
	Nut M20		24
	Washer 21		48
TOTAL WEIGHT OF THE FRAME			
ADJUSTING BOLTS	Bolt M20 - 180		4
	Nut M20		12
	Washer 21		16

**metr@stav**

Project: **NORDFJARÐARGÖNG, NORDFJÖRD**

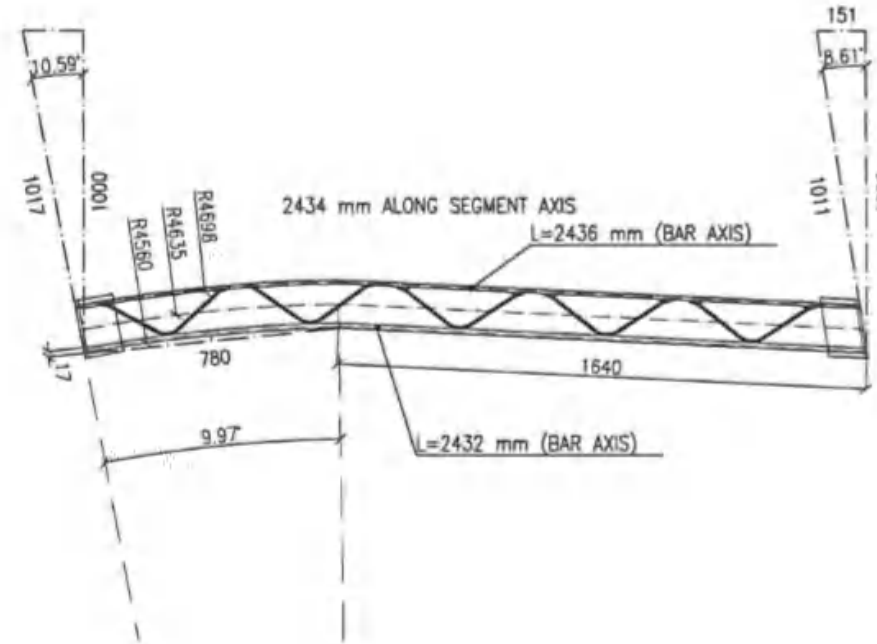
Drawing title: **TUNNEL LATTICE GIRDER**

Drawn: **Ing. Zdenka Staňková**

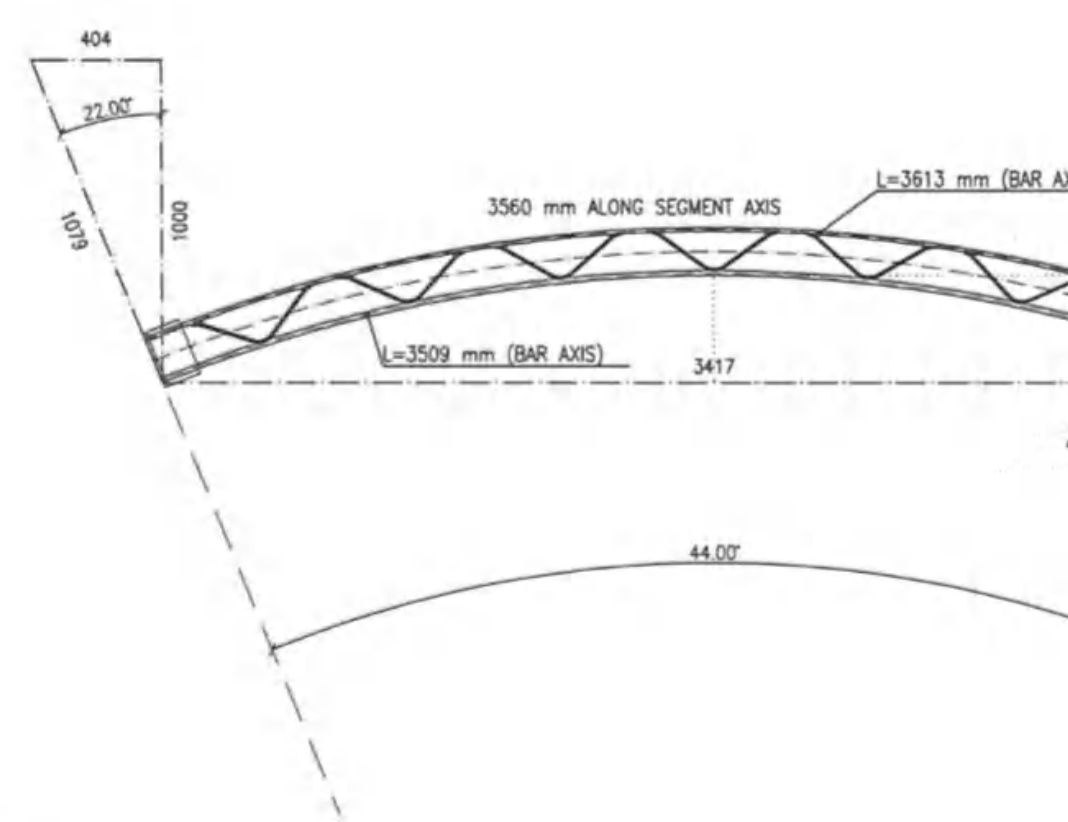
Checked: **Ing. Ladislav Terš**

DRG No: **01** Scale: **1:50** Date:

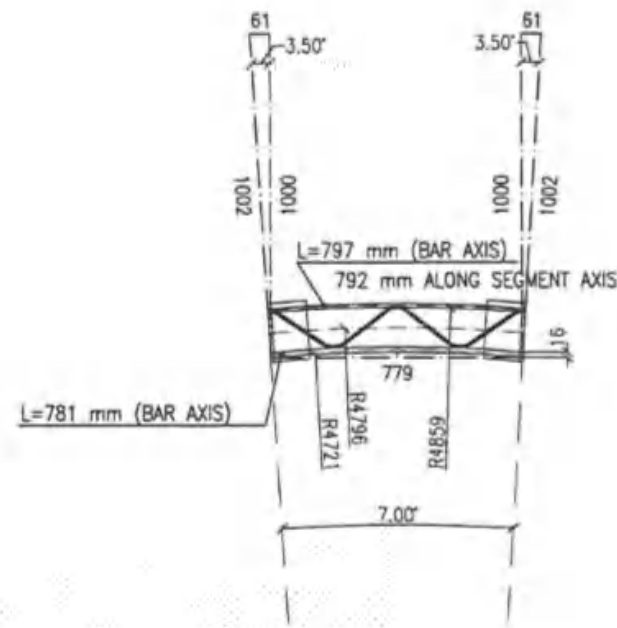
SEGMENT 1  
1:20



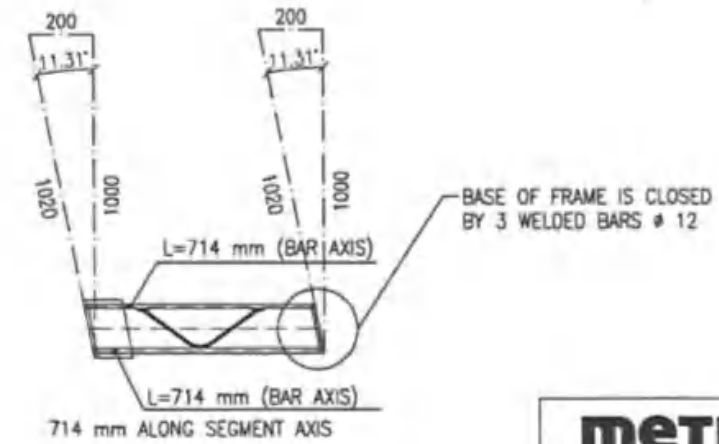
SEGMENT 2  
1:20



SEGMENT 3  
1:20



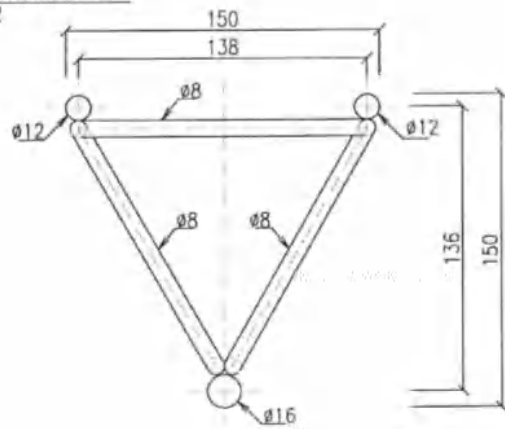
SEGMENT 4  
1:20



<b>METROSTAV</b>		
Project:	NORDFJARÐARGÖNG, NORDFJÖR	
Drawing title:	TUNNEL LATTICE GIRDER - SEGME	
Drawn:	Ing. Zdenka Staňková	
Checked:	Ing. Ladislav Terš	
DRG No:	02	Scale: 1:20

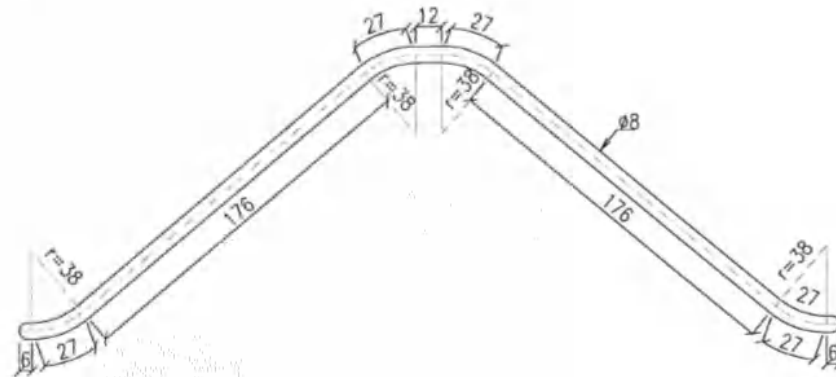
CROSS SECTION

1:2



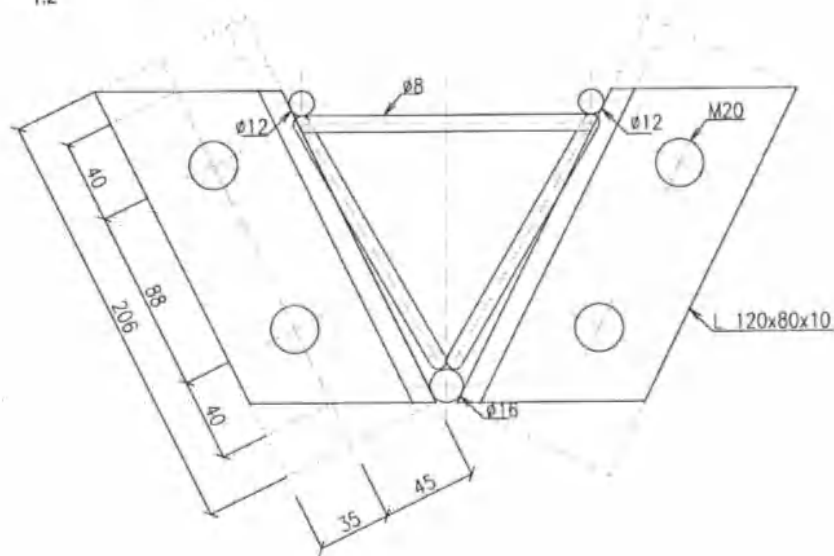
CROSSBEAM

1:2



JOINT CROSS SECTION

1:2



**METROSTAV**

Project:	NORDFJARÐARGÖNG, NORDFJÖRDUR		
Drawing title:	TUNNEL LATTICE GIRDER - DETAILS		
Drawn:	Ing. Zdenka Staňková		
Checked:	Ing. Ladislav Terš		
DRG No:	03	Scale:	1:2
Date:	11/2013		





# Viðauki I: Langsnið jarðlaga og yfirborðslandslag á gangaleiðinni milli Eskifjarðar og Norðfjarðar

