



Bergstyrkingar í Vaðlaheiðargöngum

Samanburður uppsettra bergstyrkinga við Q-kerfið

Vignir Val Steinarsson



Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands
2016

BERGSTYRKINGAR Í VAÐLAHEIÐARGÖNGUM

SAMANBURÐUR UPPSETTRA BERGSTYRKINGA VIÐ Q-KERFIÐ

Vignir Val Steinarsson

30 ECTS ritgerð sem er hluti af
Magister Scientiarum gráðu í byggingarverkfræði

Leiðbeinendur
Sigurður Erlingsson
Einar Hrafn Hjálmarsson

Prófdómari
Matthías Loftsson

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Reykjavík, júní 2016

Bergstyrkingar í Vaðlaheiðargöngum, Samanburður uppsettra bergstyrkinga við Q-kerfið.
Bergstyrkingar í Vaðlaheiðargöngum.
30 ECTS eininga ritgerð sem er hluti af M.Sc. gráðu í byggingarverkfræði.

Höfundarréttur © 2016 Vignir Val Steinarsson
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Sturlugata 7
101, Reykjavík
Ísland

Sími: 525 4000

Skráningarupplýsingar:
Vignir Val Steinarsson, 2016, Bergstyrkingar í Vaðlaheiðargöngum, Samanburður uppsettra bergstyrkinga við Q-kerfið, M.Sc. ritgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands.

Prentun: Háskólaprent, Fálkagata 2, 107 Reykjavík
Reykjavík, Ísland, júní 2016

Tómur bolli, tíminn kyrr,
taktfast skelfur hjartað
"Ég hefði átt að hefjast fyrr
handa - get ei kvartað."

Þótt að nemans birtist böl
og bés koti sjálfur greddast.
Þótt sýnist allt á vonarvöl.
Vinur þetta reddast!

-Dagbjartur Gunnar Lúðvíksson

Útdráttur

Framþróun í gerð jarðganga og aukinn skilningur á bergtækni hefur á seinustu öldum gert jarðgöng hagkvæmari og öruggari. Nú til dags eru bergstyrkingar settar upp í samræmi við berggæði, sem metin eru út frá jarðfræðirannsóknum sem gerðar eru áður en framkvæmdir hefjast og á meðan þeim stendur. Við uppsetningu bergstyrkinga í Vaðlaheiðargöngum, sem eru 7,2km löng veggöng á Norðurlandi, er tekið mið af berggæðamatskerfi Q-kerfisins eins og venja er við gerð vegganga á Íslandi. Q-kerfið byggir á áralangri reynslu af jarðgangagerð um allan heim þar sem heilleiki bergs og eiginleikar sprunga í bergmassanum hefur verið metinn og borinn saman við uppsettar styrkingar. Þannig eru mynduð tengsl milli berggæða og magns bergstyrkinga við mismunandi aðstæður.

Markmið þessarar ritgerðar er að skoða uppsettar bergstyrkingar á þrem köflum í Vaðlaheiðargöngum og bera þær saman við bergstyrkingar sem Q-kerfið mælir fyrir um. Þegar þessi ritgerð er skrifuð eru göngin enn í byggingu og endanlegt magn styrkingar liggur því ekki fyrir. Tekið verður tillit til þess í niðurstöðum á samanburði styrkingamagns. Auk þess eru gerð líkön af þrem mismunandi þversniðum á gangaleiðinni með bergtækni-forritinu RS^2 . Markmið líkangerðarinnar er annarsvegar að meta virkni bergstyrkinga skv. Q-kerfinu og hinsvegar að leggja mat á þá mismunandi þætti sem geta haft áhrif á mat á virkni bergstyrkinga í slíkri líkangerð. Í því samhengi er notkun GSI-stuðulsins og áhrif hans á eiginleika bergmassa í tölvulíkönunum rannsökuð.

Samanburður á uppsettu magni bergstyrkinga og fyrirskrifuðu magni skv. Q-kerfinu leiddi í ljós að á tveimur rannsóknarsvæðum voru færri bergboltar og meira af trefjastyrktri sprautusteypu notað heldur en mælt var fyrir um. Þessu var síðan öfugt farið á þriðja rannsóknarsvæðinu, en auk áður talinna styrkinga voru þar settir upp fleiri grindarbogar en Q-kerfið hafði mælt fyrir um. Magn uppsettra bergstyrkinga mun að öllum líkindum breytast þegar fram líða stundir en úttektir á bergstyrkingum eru nauðsynlegar til að sannreyna berggæðamatskerfi eins og Q-kerfið og aðlaga þau að íslenskum aðstæðum.

Líkanreikningar á bergstyrkingum sýndu að fyrirskrifaðar bergstyrkingar komust nálægt því að uppfylla öryggisskilyrði, en ákvarða þyrfti hvort frekari bergstyrkinga væri þörf á þessum svæðum. Breytingar í GSI-stuðli bergmassans hafði mikil áhrif á bergfærslur og virkni bergstyrkinga í öllum tilfellum. Við lækkuð GSI gildi var virkni bergstyrkinga minni svo mikilvægt er að inntaksstærðir í líkangerð séu valdar af skynsemi. Gerð og reikningur líkana eins og þeirra sem notuð eru í þessari ritgerð getur verið fljótleg og auðveld leið til að kanna virkni fyrirskrifaðra bergstyrkinga áður en þær eru settar upp, auk þess að gera má aðrar athuganir, en vanda þarf val á inntaksstærðum við gerð líkana þannig að niðurstöður gefi rétta mynd af göngunum.

Abstract

Advances in tunnelling technology and better understanding of rock mechanics has in the last century made tunnels and tunnelling safer and more practical. Today rock support is put in place in accordance with rock mass quality, which is estimated before and during construction. The installation of rock support in Vaðlaheiði-tunnel, which is a 7.2km long road tunnel in the North of Iceland, is done in accordance with the Q-system as has become normal in tunnel construction in Iceland. The Q-system is based on decades of tunnelling experience worldwide where the measured characteristics of rock mass in tunnels are linked to the amount of rock support used. Thereby establishing a relationship between rock mass quality and the amount of rock support needed to deal with various situations.

The objective of this thesis is to examine installed rock support in three areas of Vaðlaheiði-tunnel and compare them to the recommended support based on the Q-system. When this thesis is written the final amount of rock support in these three areas have not yet been decided and that is taken into consideration when comparing the amount of rock support. In addition a computer simulation is made using the finite element analysis program *RS²* to represent a short section of tunnel in each of the three areas. Using these simulations the aim is to estimate the effectiveness of rock support prescribed using the Q-system and look at the various factors that affect the effectiveness of rock support in computer simulations such as these. Special attention will be paid to the GSI factor for jointed rock and its effect on rock mass and support in computer analysis.

Comparison between installed rock support and prescribed rock support using the Q-system showed that in two of the analysed areas there were fewer rock bolts and more fibre reinforced sprayed concrete used than the Q-system recommended. In the third area the opposite was true, and in addition to rock bolts and sprayed concrete there were installed more lattice girders than the Q-system prescribed. The amount of installed rock support is expected to change as the final rock support is decided. Auditing the amount of rock support is vital to ensure that rock quality systems like the Q-system are correct and also to adapt systems like the Q-system to Icelandic conditions.

The modelling of the rock support interaction with the rock mass showed that prescribed rock support were very close to fulfilling safety requirements. However it is necessary to think about installation of different or extra rock support in some cases. The changes in the GSI factor of the rock mass had great affect on rock mass displacements and effectiveness of rock support in all cases. At lower GSI values the effectiveness of rock support was lower thus showing the need to choose factors like GSI with care to obtain a correct view of the situation, that is being modelled. Making computer analysis like that used in this thesis can be a relatively quick and easy way to get an estimate of the effect of prescribed rock support in a given situation, before they are installed. However the correct choice of input factors is paramount in obtaining reasonable results.

Efnisyfirlit

Myndaskrá	ix
Töfluskrá	xv
Pakkir	xix
1. Inngangur	1
2. Jarðgangagerð á Íslandi	3
2.1. Gangagerðaraðferðir	4
2.2. Vaðlaheiðargöng	5
3. Afifræðileg hegðun bergmassa	7
3.1. Sprungur í bergmassa	7
3.2. Hoek og Brown	8
3.3. Mohr-Coulomb	10
3.4. Spennur í bergmassa	12
3.5. Spennulosun og bergfærslur umhverfis jarðgöng	15
4. Mat á bergstyrkingu	17
4.1. Heilleikastuðull bergs (RQD)	17
4.2. Berggæðamat ($Q - Kerfið$)	18
4.3. Mat á styrkingum með Q -kerfinu	20
5. Um bergstyrkingu	23
5.1. Bergboltar	23
5.2. Mismunandi gerðir bergbolta	25
5.3. Sprautusteypa	28
5.4. Sprautusteypurif	30
5.5. Aðrar bergstyrkingar	33
5.6. Afifræðilegir eiginleikar bergstyrkinga	34
6. Jarð- og bergtækniforritið RS^2	41
6.1. Efniseiginleikar bergs í RS^2	41
6.2. Efniseiginleikar bergstyrkinga í RS^2	43
6.3. Spennulosun og bergfærslur með RS^2	44

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum	45
7.1. Hönnunarforsendur bergstyrkinga	45
7.2. Rannsóknarsvæði 1	52
7.3. Rannsóknarsvæði 2	56
7.4. Rannsóknarsvæði 3	60
8. Líkanreikningar	67
8.1. Líkan af svæði 1	72
8.2. Líkan af svæði 2	81
8.3. Líkan af svæði 3	90
9. Samantekt og umfjöllun	101
10. Lokaorð	105
Heimildir	107
A. Vaðlaheiðargöng	111
B. GSI og D	115
C. Viðmiðunargildi fyrir Q-kerfið	117
D. Dæmi um jarðfræðikortlagningu	125
E. Útreikningar fyrir hönnun styrkinga með Q-gildi	133

Myndaskrá

2.1. Berggrunnskort af Íslandi.	3
2.2. Staðsetning Vaðlaheiðarganga.	5
2.3. Kennisnið Vaðlaheiðarganga.	6
2.4. Planlega Vaðlaheiðarganga.	6
3.1. Ákvörðun á fjölda sprungukerfa í bergmassa.	8
3.2. Áhrif GSI á styrk bergs.	10
3.3. Brotlíkingar Mohr-Coulomb og Hoek og Brown.	11
3.4. Spennuástand í bergi umhverfis jarðgöng.	12
3.5. Samband láréttra og lódréttra spennumælinga og dýpis mælinga.	14
3.6. Bergfærslur í hringlaga gangaþversniði.	15
3.7. Dæmi um bergfærsluferil.	16
4.1. Dæmi um ákvörðun RQD.	18
4.2. Ráðlögð styrking bergmassa skv. Q-kerfinu.	21
5.1. Uppsetning bergbolta við mismunandni tilfelli.	24
5.2. Dæmi um notkun forboltunar í jarðgangagerð.	25
5.3. Endafestur bergbolti.	26
5.4. Innsteyptur bergbolti.	27

MYNDASKRÁ

5.5. Dæmigerð þversniðsteikning af sprautusteypubogum.	31
5.6. Dæmi um uppsettan sprautusteypuboga í Vaðlaheiðargöngum.	31
5.7. Algengustu þversnið grindarboga.	32
5.8. Uppsettir grindarbogar í Vaðlaheiðargöngum.	33
5.9. Lenging mismunandi bergbolta við togálag.	35
5.10. Inntaksstærðir fyrir útreikninga á affræðilegum eiginleikum bergbolta. . .	36
5.11. Hugmyndin bak við hönnun samsettra fóðringa til bergstyrkingar.	38
5.12. Stuðningsgetugraf áslægra krafta og beygjuvægis.	39
5.13. Stuðningsgetugraf áslægra krafta og skerkræfta.	40
6.1. Brotskilyrði fyrir innsteypta bergbolta í RS^2	43
7.1. Hönnunarmörk kennisniðs Vaðlaheiðarganga.	46
7.2. Samband Q-gildis og ráðlagðs bils milli bergbolta.	47
7.3. Samband Q-gildis og fjölda bergbolta á m^2	47
7.4. Samband Q-gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu.	48
7.5. Samband Q-gildis og bils milli grindarboga.	50
7.6. Þverskurður grindarbita í Vaðlaheiðargöngum	51
7.7. Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 1.	52
7.8. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergboltum á svæði 1.	55
7.9. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettu magni sprautusteypu á svæði 1. . .	55
7.10. Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 2.	56
7.11. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergboltum á svæði 2.	59
7.12. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettu magni sprautusteypu á svæði 2. .	59

7.13. Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 3.	60
7.14. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergboltum á svæði 3.	64
7.15. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettu magni sprautusteypu á svæði 3.	64
7.16. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum fjölda grindarboga á svæði 3.	65
7.17. Staðsetning grindarboga á rannsóknarsvæði 3.	65
8.1. Val á GSI-stuðli fyrir líkanreikninga.	69
8.2. Kennisnið Vaðlaheiðarganga sem notað við gerð líkana.	72
8.3. Líkan 1.	73
8.4. Heildarbergfærslur í líkani 1.	74
8.5. Bergfærslur í líkani 1.	75
8.6. Áhrif GSI á bergfærslur í líkani 1.	75
8.7. Hnignar einingar í líkani 1.	76
8.8. Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hniginna eininga í líkani 1.	76
8.9. Styrkstuðull bergmassans reiknaður fyrir líkan 1.	77
8.10. Áhrif GSI stuðulsins á styrkstuðul í líkani 1.	77
8.11. Tölusetning bergbolta í líkani 1.	78
8.12. Togkraftur í virkustu bergboltm líkans 1.	79
8.13. Stuðningsgetugraf sprautusteypu í þekju líkans 1	79
8.14. Líkan 2.	81
8.15. Heildarbergfærslur í líkani 2	82
8.16. Bergfærslur í líkani 2.	83
8.17. Áhrif GSI á bergfærslur í líkani 2.	83
8.18. Hnignar einingar í líkani 2.	84

MYNDASKRÁ

8.19. Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hnigna eininga í líkani 2.	84
8.20. Styrkstuduðull bergmassans reiknaður fyrir líkan 2.	85
8.21. Áhrif GSI stuðulsins á styrkstuduðul í líkani 2.	85
8.22. Tölusetning bergbolta í líkani 2.	86
8.23. Togkraftur í völdum bergboltum í líkani 2.	87
8.24. Áhrif GSI stuðulsins á stuðningsgetugröf sprautusteypu í líkani 2	89
8.25. Líkan 3.	90
8.26. Heildarbergfærslur í líkani 3	91
8.27. Bergfærslur í líkani 3	92
8.28. Áhrif GSI á bergfærslur í líkani 3.	92
8.29. Hnignar einingar í líkani	93
8.30. Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hnigna eininga í líkani 3.	93
8.31. Styrkstuduðull bergmassans reiknaður fyrir líkan 3.	94
8.32. Áhrif GSI stuðulsins á styrkstuduðul í líkani 3.	94
8.33. Tölusetning bergbolta í líkani 3.	95
8.34. Togkraftur í völdum bergboltum í líkani 3	96
8.35. Stuðningsgetugraf grindarbitans í grunntilfelli líkans 3	97
8.36. Stuðningsgetugraf grindarbitans fyrir lækkuð GSI gildi í líkani 3.	98
A.1. Kennisnið Vaðlaheiðarganga.	111
A.2. Lóðrétt og lárétt lega Vaðlaheiðarganga.	112
A.3. Þversnið í Vaðlaheiði.	113
B.1. Val á GSI stuðli.	115

B.2. Val á D stuðli.	116
C.1. RQD-gildi og fjöldi misfella.	117
C.2. J_n gildi.	117
C.3. J_r gildi.	118
C.4. J_w gildi.	118
C.5. J_a gildi.	119
C.6. SRF-gildi.	120
C.7. ESR-gildi.	121
C.8. Breytiþættir Q-gildis fyrir hönnun veggja.	121
C.9. Nánari upplýsingar um styrkingar miðað við Q-kerfið.	122
C.10. Styrking í bergi miðað við Q-kerfið.	123
D.1. Myndaskýringar fyrir jarðfræðikort.	125
D.2. Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 1.	126
D.3. Rannsóknarsvæði 1.	127
D.4. Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 2.	128
D.5. Rannsóknarsvæði 2.	129
D.6. Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 3.	130
D.7. Rannsóknarsvæði 3.	131

Töfluskrá

4.1. Margföldunargildi Q-gildis fyrir veggi jarðganga.	20
5.1. Dæmigerð uppskrift að sprautusteypu með plasttrefjum.	29
7.1. Samband Q-gildis og ráðlagðs bils milli bergbolta.	46
7.2. Samband Q-gildis og ráðlagðrar þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu. . .	48
7.3. Samband Q-gildis við lykilstærðir sprautusteypuboga.	49
7.4. Tafla með inntaksstærðum fyrir rannsóknarsvæði 1.	52
7.5. Hannað magn bergbolta fyrir rannsóknarsvæði 1.	53
7.6. Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði 1.	53
7.7. Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1.	53
7.8. Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 1.	54
7.9. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergstyrkingum á svæði 1. . .	54
7.10. Tafla með inntaksstærðum rannsóknarsvæðis 2.	56
7.11. Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.	57
7.12. Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.	57
7.13. Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.	57
7.14. Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.	58
7.15. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergstyrkingum á svæði 2. . .	58
7.16. Tafla með inntaksstærðum rannsóknarsvæðis 3.	60

7.17. Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.	61
7.18. Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.	61
7.19. Hannaður fjöldi grindarboga á rannsóknarsvæði 3.	61
7.20. Uppsettar bergstyrkingar á rannsóknarsvæði 3.	62
7.21. Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.	62
7.22. Uppsettir grindarbogar á rannsóknarsvæði 3.	63
7.23. Samanburður á styrkingarþörf og uppsettum bergstyrkingum á svæði 3. . .	63
8.1. Affræðilegir eiginleikar heils bergs á Íslandi.	67
8.2. Affræðilegir eiginleikar setbergs í Vaðlaheiðargöngum.	68
8.3. GSI-gildi bergmassa í líkanreikngum.	68
8.4. Spennur í bergi á hverju rannsóknarsvæði ásamt k-stuðlum.	70
8.5. Affræðilegir eiginleikar bergbolta í Vaðlaheiðargöngum.	71
8.6. Affræðilegir eiginleikar sprautusteypu í Vaðlaheiðargöngum.	71
8.7. Affræðilegir eiginleikar grindarboga.	71
8.8. Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 1.	73
8.9. Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 1.	73
8.10. Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 1.	80
8.11. Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 2.	81
8.12. Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 2.	82
8.13. Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 2.	88
8.14. Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 3.	90
8.15. Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 3.	91
8.16. Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 3.	99

9.1. Niðurstöður samanburðar á rannsóknarsvæðum.	101
9.2. Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir öll líkön.	103
E.1. Aðlöguð Q-gildi ásamt yfirborðsflatarmáli fyrir hverja færú svæðis 1.	133
E.2. Hannað magn bergbolta fyrir rannsóknarsvæði 1.	133
E.3. Hannað magn sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði 1.	134
E.4. Aðlöguð Q-gildi ásamt yfirborðsflatarmáli fyrir hverja færú svæðis 2.	134
E.5. Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.	135
E.6. Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.	135
E.7. Aðlöguð Q-gildi ásamt yfirborðsflatarmáli fyrir hverja færú svæðis 3.	136
E.8. Hannaður fjöldi grindarboga á rannsóknarsvæði 3.	136
E.9. Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.	137
E.10. Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.	137

Þakkir

Eftirfarandi aðilar fá sérstakar þakkir fyrir að hafa stutt við bakið á mér á meðan þessum ritgerðarskrifum stóð.

- Sigurður Erlingsson, prófessor
- Einar Hrafn Hjálmarsson
- Sigurjón Vídalín
- Sigrún Sif Sigurðardóttir
- Pétur Karl Hemmingsen
- Fjölskylda og vinir
- Vegagerðin
- Stefán Geir Árnason
- Sigurlaug Ásta Sigvaldadóttir

1. Inngangur

Framþróun í gerð jarðganga hefur á seinustu öldum greitt leið fyrir miklum samgöngubótum á landi. Lestar- og veggöng hafa gert ótal manns kleyft að fara undir eða í gegn um hindranir, sem hafa þótt torfærar, á fljótlegan og öruggan máta. Þrátt fyrir að gerð jarðganga eigi sér nokkuð langa sögu er skipulögð kortlagning og hönnun bergstyrkinga í samræmi við jarðfræðilegar aðstæður tiltölulega ný af nálinni. Berg er flókið byggingarefni og vegna takmarkaðs skilnings á eðli þess voru bergstyrkingar í jarðgöngum hannaðar til að halda aftur af bergmassanum og þar með reynt að tryggja að jarðgöngin væru örugg.

Skilningur á jarð- og bergtækni hefur aukist frá árdögum jarðgangagerðar og síðan um miðja síðustu öld hefur bylting orðið í hönnun jarðganga og bergstyrkinga. Jarðgöng eru nú til dags hönnuð með áherslu á það að reyna að vita sem mest um jarðfræði þess svæðis sem gera á göng í áður en lagst er í framkvæmdir. Jafnframt er hver hluti ganganna rannsakaður jafnóðum og göngin eru grafin og bergstyrkingar settar upp í göngunum eftir því sem styrkingarþörf ganganna kveður á um. Þrátt fyrir aukna þekkingu og tækni fylgja jarðgangagerð þó ennþá mikil vandamál sem skapast ekki síst vegna síbreytilegra jarðfræðilegra aðstæða.

Bergmassi er margleitt efni, samansett úr missprungnu bergi, vatni og jafnvel jarðvegi. Sprungur í bergmassanum hafa umtalsverð áhrif á styrk og þar með gæði bergmassans í heild til jarðgangagerðar. Síðan á seinasta fjórðungi síðustu aldar hafa verið í þróun kerfi þar sem reynt er að tengja beint saman gæði bergmassa og áætlað magn bergstyrkinga sem er nauðsynlegt hverju sinni.

Undanfarna áratugi hefur verið stuðst við hið norska Q-kerfi til að meta styrkingarþörf við gerð vegganga á Íslandi. Notkun kerfisins hefur gefið góða raun en vegna breytilegra og fjölbreyttra jarðfræðiaðstæðna er ekki sjálfgefið að endanleg styrkingarþörf fái eingöngu með notkun Q-kerfisins. Því þurfa hönnuðir jarðganga að geta beitt þekkingu sinni á hegðun bergmassa og reynslu til að meta endanlegt styrkingamagn. Q-kerfið er notað til þess að meta styrkingarþörf fyrir Vaðlaheiðargöng, sem eru veggöng undir Vaðlaheiði frá Eyjafirði yfir í Fnjóskadal. Áhugavert er að kanna hvort uppsettar bergstyrkingar í Vaðlaheiðargöngum eru í samræmi við niðurstöður Q-kerfisins og greina hvað veldur mismuni í styrkingarmagni, ef hann er til staðar.

1. Inngangur

Vegna fjölbreytileika í eiginleikum bergmassa og þeirra vandamála sem geta komið upp við gangagerð er ekki óalgennt að bergtækniforrit, sem byggja á einingarreikningum, séu notuð til að líkja eftir hegðun bergmassa. Þannig er hægt að leggja mat á virkni og þar með öryggi bergstyrkingana. Við notkun slíkra forrita þarf að hafa í huga að inntaksstærðir séu haglega valdar fyrir bæði bergmassa- og styrkingar. Rangt val inntaksstærða getur breytt niðurstöðum reikninga svo um munar og því gefið misvísandi niðurstöður um hvort styrkingarmagn er fullnægjandi eða ekki. Athugavert er því að skoða hvernig breytingar í inntaksstærðum fyrir bergmassa hafa áhrif á útkomu líkana byggðum á raunverulegum aðstæðum með fyrirskrifuðum styrkingum samkvæmt Q-kerfinu.

Í þessari ritgerð er fyrst stiklað á stóru í sögu- og gerð vegganga á Íslandi. Þar næst er farið yfir helstu þætti í affræðilegri hegðun bergs, mati á bergstyrkingum, mismunandi gerðir og eiginleika bergstyrkinga og bergtækniforritið RS^2 kynnt. Í síðustu köflum ritgerðarinnar eru svo rannsóknarefni hennar og niðurstöður kynntar.

Rannsóknarverkefni þessarar meistaritgerðar er tvíþætt. Fyrst eru valdir þrjú kaflar Vaðlaheiðarganga og bergstyrkingar hannaðar fyrir þá skv. Q-kerfinu. Upplýsingar um Q-gildi bergmassa á þessum svæðum í Vaðlaheiðargöngum eru gefin upp í jarðfræðirannsóknnum verktakans. Þessar fyrirskrifuðu styrkingar eru síðan bornar saman við uppsettar styrkingar á viðkomandi kafla ganganna. Upplýsingar um uppsettar bergstyrkingar eru fengnar úr samantekt eftirlits Vaðlaheiðarganga. Þegar þessi ritgerð er skrifuð á eftir að velja endanlegar bergstyrkingar fyrir rannsóknarsvæðin og verður tekið tillit til þess í rannsókn verkefnisins.

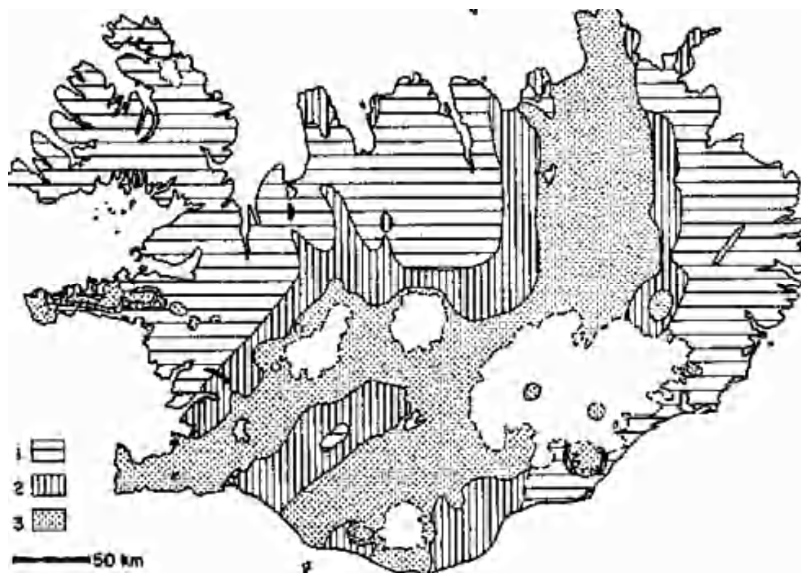
Seinni hluti rannsóknarverkefnisins felst í því að gera líkön af einum jarðfræðilega áhuga-verðum stað á hverju rannsóknarsvæði og reikna þar virkni fyrirskrifaðra bergstyrkinga með bergtækniforritinu RS^2 . Gerð verður grein fyrir vali á þeim inntaksstærðum sem þarf til líkanagerðarinnar og samspil bergmassa og bergstyrkinga verður skoðað. Áhersla verður lögð á að meta áhrif breytinga í tæknilegum eiginleikum bergs á bergfærslur og öryggi styrkinga.

Í þessu samhengi eru breytingar í vali á GSI stuðlinum sérstaklega athugaðar þar sem GSI stuðullinn á stóran þátt í reikningum á gæðum bergmassa með Hoek og Brown brotlíkingunni. Í lok ritgerðarinnar eru niðurstöður verkefnisins dregnar saman og reynt að varpa ljósi á hvernig nota megi berggæðamatskerfi og bergtækniforrit saman á áhrifaríkan hátt til jarðgangagerðar.

2. Jarðgangagerð á Íslandi

Saga vegganga á Íslandi er ekki löng miðað við það sem tíðkast annarstaðar í heiminum. Fyrstu jarðgöng á Íslandi voru boruð, sprengd og hoggin í gegnum berggang milli Ísafjarðar og Súðavíkur um miðja síðustu öld. Þessi göng voru einbreið og aðeins 30m að lengd. Í dag eru 10 veggöng í notkun á Íslandi og eru flest þeirra hönnuð með það í huga að sneiða hjá snjóþungum og torförunum fjallvegum og stytta vegalengdir milli staða. Lengstu veggöng á Íslandi eru göng undir Breiðdals- og Botnsheiði milli Ísafjarðar, Súgandafjarðar og Öfundarfjarðar en fjölförnustu veggöng á Íslandi eru Hvalfjarðargöng (Vegagerðin, 2016). Öll veggöng á Íslandi eru byggð með því að bora í bergið og sprengja jarðefninu frá (e. Drill and blast method), en mismunandi aðferðum við jarðgangagerð verður lýst í kafla 2.1.

Aðstæður til jarðgangagerðar á Íslandi mótast að miklu leyti af jarðfræði landsins. Berggrunnur Íslands er bæði fjölbreyttur, eins og sjá má á mynd 2.1, og tiltölulega ungur og óþéttur. Algengt er að finna fjölbreytt jarðlög, grunnvatn, sprungur og innskot, svo við hönnun styrkinga þarf sérstaklega að hafa þessa hluti í huga (Hallgrímur Örn Arngrímsson & Þorri Björn Gunnarsson, 2009).



Mynd 2.1: Berggrunnskort af Íslandi. 1) Blágrýtismyndun frá tertíer. 2) Grágrýtismyndun frá fyrri hluta ísaldar. 3) Móbergsmyndun frá síðari hluta seinustu aldar (Þorleifur Einarsson, 1985).

2. Jarðgangagerð á Íslandi

Ísland situr efst á möttulstrók er liggur á Mið-Atlantshafshryggnum sem aðskilur landreksfleka Evrasíu- og Norður-Ameríku. Þar sem flekarnir færast sundur verður til gliðnunarprunga þar sem möttulstrókurinn skilar upp efni og myndar Ísland. Öll eldvirkni á Íslandi liggur því á þessari sprungu, sem skiptir Íslandi frá norðri til suðurs. Af þessum sökum er elsta berg á Íslandi nyrst á Vestfjörðum og austast á Austfjörðum á meðan nýrra efni er að finna á miðju landinu (Ágúst Guðmundsson & Giuliani, 2007).

Berggrunnur umhverfis Eyjafjörð hlóðst upp að mestu á tímabilinu frá 12-4 milljónum ára. Jarðlagastaflinn er almennt frekar reglulegur og einkennist af blágrýti. Í grennd við fornar megineldststöðvar frá tertíer verður vart við staðbundna óreglu í jarðlagastaflanum. Á stöku stað er að finna setbergslög, en setbergið er gjóskuríkt, leirkennt, veikt og sýnir þenslubreytingar við breytilegt rakastig (Ágúst Guðmundsson, 2011).

2.1. Gangagerðaraðferðir

Í árdaga gangagerðar var skilningur á hegðun bergmassa takmarkaður og gangagerðartækni frumstæð. Bergstyrkingar í þessum fyrstu göngum voru oftast ekki erfið í uppsetningu og þar sem skilningur á bergtækni var takmarkaður voru bergstyrkingar oft afhannaðar og efnisfrekar. Af þessum sökum var gerð jarðganga tímafrek og dýr. Um miðja síðustu öld var þróuð aðferð til jarðgangagerðar þar sem magn bergstyrkinga var ákvarðað í samræmi við eiginleika bergmassans og mælingar á bergfærslum og spennum (de Vallejo & Ferrer, 2011). Þessar bergstyrkingar voru ekki settar upp til að halda aftur af bergmassanum, heldur til að nýta styrk bergmassans og vinna með honum. Þessi aðferð kallast New Austrian Tunneling Method (NATM) en með þróun hennar varð gangagerð fljótlegri og ódýrari. Öll nútíma gangagerð byggir á þeirri hugmyndafræði sem þróuð var með NATM aðferðinni, þar sem hönnun styrkinga fer eftir berggæðum (Palmström & Stille, 2015).

Vaðlaheiðargöng eru, eins og öll önnur veggöng á Íslandi, boruð og sprengd, en sú aðferð til gangagerðar hentar vel fyrir styttri göng og veggöng þar sem hún er frekar hagkvæm og auðvelt er að ráða þversniði jarðganganna. Þessi aðferð fer þannig fram að fyrst eru boraðar könnunarholur í stefnu ganganna til að fá hugmynd um berggæði og grunnvatnsstöðu sem er framundan. Þessar holur eru oftast ekki þéttar með þéttigraut til að þétta bergið framundan. Þar næst eru boraðar holur fyrir sprengiefni, sem notað er til að losa og fjarlægja berg úr stafni ganganna í svokallaðri færú. Eftir að bergið hefur verið sprengt er laust berg fjarlægt úr göngunum og bergstyrkingar settar upp (Vaðlaheiðargöng, 2014). Er svo hafist handa við næstu færú og svo koll af kolli þangað til göngin hafa verið grafin. Að lokum eru göngin síðan undirbúin fyrir umferð.

Hægt er að fara aðrar leiðir í gangagerð en að bora og sprengja þversnið ganganna. Í veikara bergi og jarðvegi er mögulegt að grafa út jarðgangaþversniðið með þar til gerðum vélum. Við gerð langra jarðganga er mögulegt að nota gangagerðarvélar (TBM). Þessar vélar geta unnið mjög hratt en uppsetning þeirra og notkun er kostnaðarsöm.

2.2. Vaðlaheiðargöng

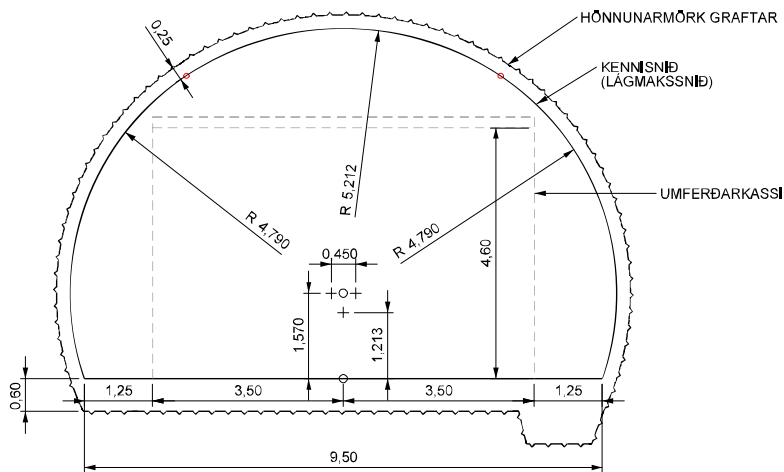
Vaðlaheiðargöng eru 7,2km löng veggöng sem verið er að grafa undir Vaðlaheiði milli Eyjafjarðar og Fnjóskadals (mynd 2.2). Með Vaðlaheiðargöngum styttest vegalengdin milli Akureyrar og Húsavíkur um 16km auk þess sem ekki þarf lengur að fara um Víkurskarð, sem flokkast sem fjallvegur. Að vetri til getur leiðin um Víkurskarð orðið illfær og því raskað samgöngum, vöru- og sjúkraflutningum milli eystri hluta Norðurlands og Akureyrar. Veggöng um Vaðlaheiði eru því ekki aðeins til að stytta vegalengdir og auka þægindi vegfarenda heldur einnig til að bæta umferðaröryggi og aðgengi íbúa þessa svæðis að þjónustu og stuðla að hagkvæmari og öruggari vöruflutningum á norðurlandi (Vaðlaheiðargöng, 2014).



Mynd 2.2: Staðsetning Vaðlaheiðarganga. Göngin og tengivegir eru merkt með rauðu.

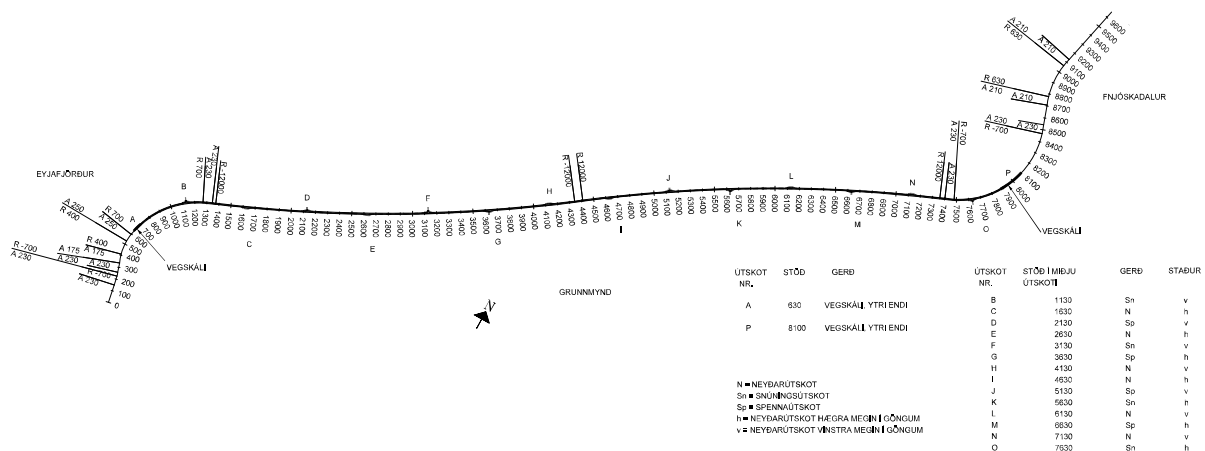
Við hönnun vegganga skal tekið mið af umferð bæði um þá vegi sem göngin leysa af hólmi auk umferðarspár fyrir væntanlega umferð um göngin. Umferðarspá segir til um árdagsumferð (ÁDU) þ.e. hversu mörg ökutæki fara um ákveðinn vegkafla að meðaltali á degi hverjum. Í umferðarspá fyrir Vaðlaheiðargöng er áætlað að árið 2050 aki 2350 ökutæki á dag um göngin (Fridleifur Ingi Brynjarsson, 2012). Þetta er rúmlega tvöföldun á umferðarmagni ársins 2011 um Víkurskarð. Helstu lykilstærðir Vaðlaheiðarganga t.d. þversnið ganganna, fjöldi neyðarútskota o.fl. var valið, með hliðsjón af þessu umferðarmagni, skv. leiðbeiningum norsku vegagerðarinnar um hönnun vegganga. Miðað við líklegustu umferðarspá og lengd ganganna eru þau hönnuð með kennisnið T9,5 (Statens Vegvesen, 2014a). Þversnið Vaðlaheiðarganga má sjá á mynd 2.3.

2. Jarðgangagerð á Íslandi



Mynd 2.3: Kennisnið Vaðlaheiðarganga (Mannvit & Vegagerðin, 2011).

Veghalli veglínu ganganna er 1,5% upp frá Eyjafirði þar sem gangamunninn er í 65 metra hæð yfir sjávarmáli. Seinasti hluti ganganna Fnjóskadalsmegin er með 2% halla niður í Fnjóskadal og er gangamunni þeim megin í 160m hæð yfir sjávarmáli. Veglína Vaðlaheiðarganga liggur í tveimur beygjum til vinstri og hægri en við sitthvorn enda ganganna er krappari beygja til að takmarka utanaðkomandi ljós inni í göngunum (mynd 2.4).



Mynd 2.4: Yfirlitsmynd yfir planlegu Vaðlaheiðarganga (Mannvit & Vegagerðin, 2011).

Jarðfræðirannsóknir í Vaðlaheiði sem framkvæmdar voru í tengslum við Vaðlaheiðargöng sýndu að vesturhluti gangaleiðarinnar einkenndist af þóleiit-basalti í svokallaðri Svalbarðssyrpu. Austurhluti ganganna einkenndist af ólivín-basalti og dílóttu basalti í svokallaðri Vatnsbólasyrpu. Erfitt reyndist að meta miðsvæði ganganna þar sem illmögulegt var að meta legu jarðefna utanfrá og þar sem engar borholur voru boraðar á því svæði (Ágúst Guðmundsson, 2011). Sjá má þverskurð af Vaðlaheiði, ásamt niðurstöðum rannsóknarborhola, á mynd A.3 í viðauka A.

3. Afifræðileg hegðun bergmassa

Við hönnun mannvirkis í bergmassa er nauðsynlegt að meta eiginleika og einkenni bergmassa með sem áreiðanlegustum hætti. Stór hluti þeirrar greiningar sem fer fram við hönnun slíkra mannvirkja byggir á einkennandi eiginleikum bergmassans. Hægt er að fá gagnlegar upplýsingar um berg með því að skoða og prófa borkjarna. Hins vegar er ekki hægt að meta styrk bergmassans í heild út frá þeim upplýsingum einum saman þar sem ósamfellur í bergmassanum gera það að verkum að styrkur hvers sýnis er meiri en styrkur bergmassans í heild (Hoek, 2007).

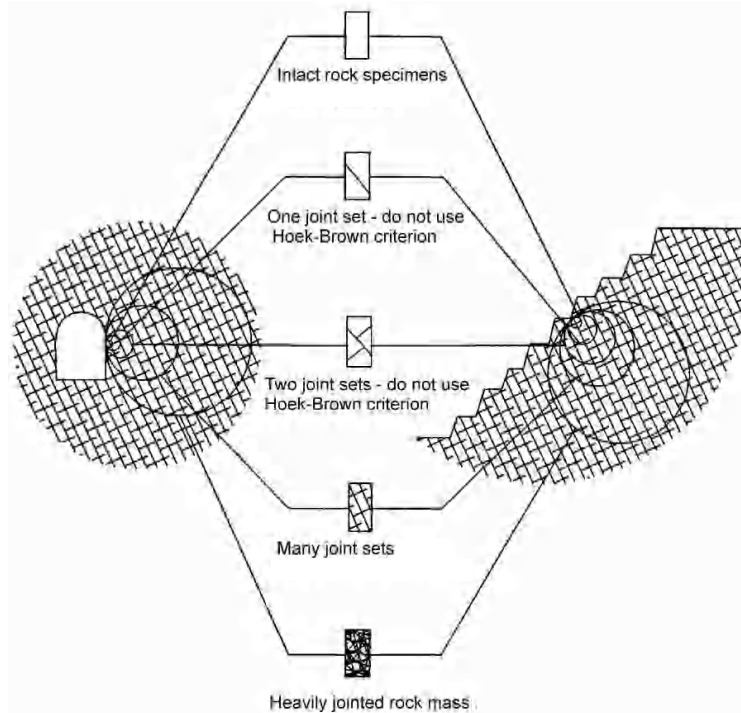
Ýmsar aðferðir eru til að meta afifræðilega eiginleika bergmassans út frá styrk bergsins og ósamfelldni (e. discontinuities) bergmassans. Þar má helst nefna brotlíkingar Hoek og Brown og Mohr-Coulomb, en báðar þessar aðferðir má nota til að skilgreina einkennandi styrk og formbreytingar bergmassa (Hoek, 2007).

3.1. Sprungur í bergmassa

Bergmassi er samansafn heilla bergeininga sem eru aðskildar með sprungum. Þetta skilur bergtækni að frá jarðtækni að því leiti að sprungur í bergmassa gera hann að misleitni og misátta (e. anisotropic) efni (de Vallejo & Ferrer, 2011). Fjöldi sprungukerfa og lega þeirra hefur talsverð áhrif á hvernig bergmassinn hegðar sér við breytingu á ytra spennuástandi auk þess að yfirborð sprunguflata hefur einnig áhrif á samloðun bergmassans. Einnig geta sprungur verið fullar af grunnvatni eða öðrum sprungufyllingum sem hafa áhrif á hegðun bergmassans (Palmström & Stille, 2015).

Hegðun bergmassa við ytra álagi er mjög háð því hversu sprunginn bergmassinn er. Því er hægt að flokka bergmassa eftir því hversu sprunginn hann er og þar með eftir því hversu stórar bergblokkir mynda bergmassann (Palmström & Stille, 2015). Sprungur í bergmassa má svo taka saman í sprungukerfi eftir því hvernig sprungurnar eru áttaðar. Fjöldi sprungukerfa bergmassans fer því ekki aðeins eftir því hversu sprungið bergið er heldur einnig hversu mörg sprungukerfi eru sjáanleg (mynd 3.1).

3. Afþræðileg hegðun bergmassa



Mynd 3.1: Ákvörðun á fjölda sprungukerfa í bergmassa fer m.a. eftir því hversu stórt svæði er athugað (Hoek, 2007).

3.2. Hoek og Brown

Árið 1980 settu Hoek og Brown fram aðferð til að meta styrk bergmassa til gangagerðar út frá mati á samlæsingu sprungna í bergmassanum og ástandi sprunguflatanna. Gerðar voru endurbætur á þessum brotlíkingum, eftir því sem þeim var beitt í víðara samhengi mannvirkjagerðar í bergi, síðast árið 2002. Auk þess var sett fram líking til að meta formbreytingarstuðull bergmassa árið 2006 (Hoek, 2007). Í þessum kafla verður almennri útgáfu brotlíkingar Hoek og Brown frá árinu 2002 gerð frekari skil (Hoek et al., 2002).

Til þess að hægt sé að draga ályktanir um bergmassa með aðferð Hoek og Brown þarf fyrst að skoða heil bergsýni og framkvæma á þeim þríása þrýstipólspóf. Þetta er gert til að finna stærstu og minnstu höfuðspennur í berginu við brot, σ_1 og σ_3 auk þess að hægt er að finna einása brotpól bergsins, σ_{ci} . Með því að endurtaka þríása prófanir á bergsýnum við mismunandi hliðarþrýsting og notkun brotlíkingar Hoek og Brown fyrir óbrotið berg, sem er eins og segir í jöfnu 3.1, má finna efnisstuðulinn m_i fyrir óbrotið berg, þ.e.:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad (3.1)$$

Þó að brotlíking Hoek og Brown gefi góða mynd af brotstyrk heils bergsýnis á tilraunastofu er það ekki fullnægjandi lýsing á styrk bergmassans sem finna má í mörkinni. Í kjölfar þess að brotlíking Hoek og Brown var birt voru gerðar tilraunir með að gera líkinguna almenna svo hún gæti lýst eiginleikum bergmassa. Líkingin er gefin sem:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.2)$$

þar sem stuðullinn m_b er Hoek og Brown stuðull til að lýsa eiginleikum bergmassa, en hann er reiknaður út frá m_i . Auk þessara stuðla eru stuðlarnir s og a notaðir til að lýsa einkennandi eiginleikum bergmassans. Jafna 3.1 er í raun jafna 3.2 þar sem stuðlarnir $s = 1$, $a = 0,5$ og $m_b = m_i$ lýsa eiginleikum óbrotins bergs. Til að hægt sé að fá almennari lýsingu á eiginleikum bergmassa þarf að taka til greina áhrif sem sprungur hafa á bergið með því að laga efnisstuðlana að bergmassanum eins og gert er í jöfnum 3.3 til 3.5.

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3.3)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (3.4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (3.5)$$

Stuðullinn GSI er notaður til að meta megi styrk bergmassa út frá heilum bergsýnum (sjá kafla 3.2.1). Röskunarstuðullinn, D , er stuðull sem er notaður til að meta hversu mikil áhrif framkvæmdir hafa haft á bergmassann (Hoek et al., 2002). Val á stuðlunum GSI og D er betur lýst í viðauka B.

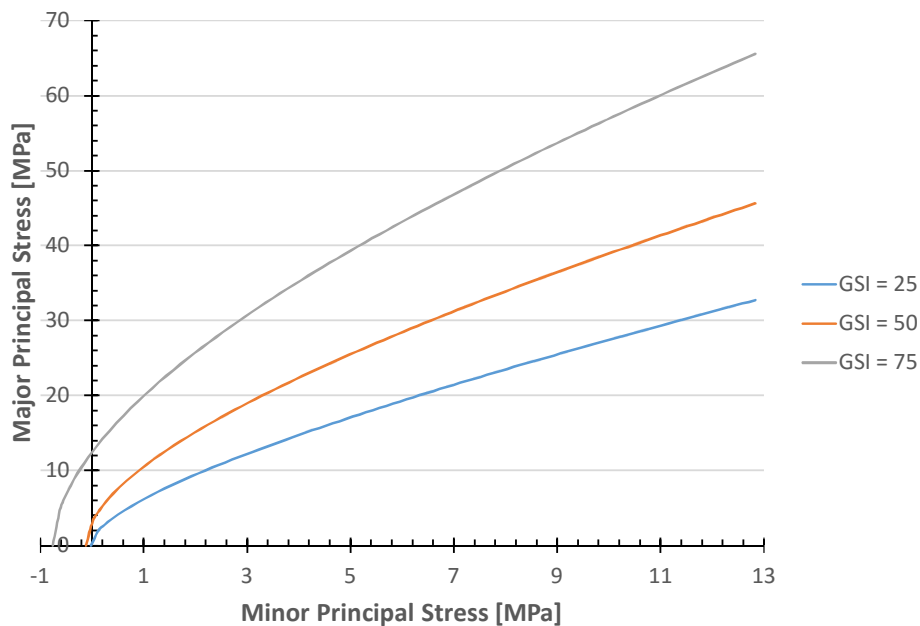
3.2.1. GSI

GSI stuðullinn (e. Geological Strength Index) var kynntur af Hoek og Brown til að tengja brotlíkingu þeirra við styrk bergmassa. Brotlíking Hoek og Brown er gerð til að meta styrk heils bergs svo nauðsynlegt var að þróa áreiðanlega leið til að meta eiginleika bergmassa út frá niðurstöðum brotlíkingarinnar auk athugana á umræddum bergmassa (Marinos et al., 2005).

Tilraunir með önnur kerfi gáfu ekki fullnægjandi niðurstöður fyrir annað en kjöraðstæður. Því var þróað kerfi sem byggðist meira á athugun jarðfræðilegra eiginleika heldur en mælingum á fjarlægð milli sprunga og slíku, eins og kerfi sem áður höfðu komið fram. GSI stuðullinn var því þróaður þannig að hægt væri að hugsa bergmassann sem heildstætt efni án þess að missa sjónar á jarðfræðilegum eiginleikum bergmassans (Marinos et al., 2005).

3. Affræðileg hegðun bergmassa

Mikilvægt er að nota GSI stuðullinn rétt og því voru gerðar leiðbeiningar fyrir notkun stuðulsins, sem finna má í viðauka B. Þrátt fyrir að mælingar á fjarlægð milli sprunga komi ekki beinlínis fyrir við val á GSI stuðlinum þarf að leggja mat á hversu sprunginn bergmassi er. GSI stuðullinn er tala á bilinu 0-100 þar sem gildið 0 er molnaður bergmassi (nánast jarðvegur) og 100 er samfelldur bergmassi með fáum, ótengdum sprungum. Við slíkt mat þarf að hafa leiðbeiningar um notkun stuðulsins í huga en stuðullinn veltur samt alltaf á mati mælingarmannsins. Auk þess þarf að hafa í huga hvort yfirborð sprunga er hrjúft eða slétt, hvernig sprungur eru fylltar og dýpi framkvæmdar. Rangt val GSI stuðuls við mat á berggæðum getur haft mikil áhrif á hversu hátt styrkur bergmassa er metinn (Marinos et al., 2005). Eins og sjá má á 3.2 verður talsverð breyting á styrk sama bergmassa við breytingar í GSI stuðli svo mikilvægt er að vanda val á stuðlinum.



Mynd 3.2: Áhrif GSI stuðulsins á styrk bergs skv. brotlíkingu Hoek og Brown.

3.3. Mohr-Coulomb

Aðferð Mohr-Coulomb er önnur aðferð sem nota má til að meta styrk í bergi. Aðferðin er notuð til að gera grein fyrir skerstyrk, viðnámshorni og viðnámsstyrk í bergi, þar sem erfitt getur reynst að skilgreina þessar stærðir aðferð Hoek og Brown (Hoek et al., 2002). Samband milli þessara aðferða er vel þekkt (mynd 3.3). Skerstyrkur samkvæmt aðferð Mohr-Coulomb fyrir ákveðið normalálag, σ þar sem c er viðnámsstuðull og ϕ er viðnámshorn bergmassans er gefinn sem (Hoek, 2007):

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (3.6)$$

Þegar útpensla verður í bergmassanum vegna skerkrafta er líking Mohr-Coulomb skrifuð á eftirfarandi hátt, þar sem $\phi + \psi$ tákna útvíkkunarhorn eða útvíkkunarstuðul bergmassans og viðnámsstuðullinn er $c = 0$:

$$\tau = \sigma \tan(\phi + \psi) \quad (3.7)$$

Skrifa má jöfnu Mohr-Coulomb einnig sem fall af höfuðspennum í bergi:

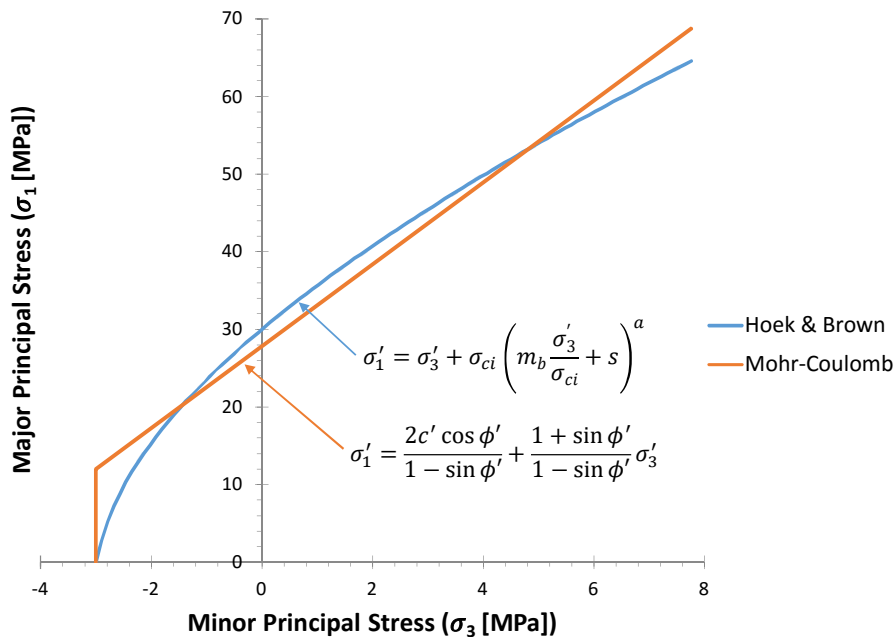
$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (3.8)$$

Út frá jöfnu 3.8 má einnig leiða út líkingar fyrir einása þrýsti- og togstyrk bergmassa á samskonar hátt og var gert fyrir jöfnu Hoek og Brown. Þrýstistyrkur bergmassa er fundinn með því að láta $\sigma_3 = 0$:

Þar sem togstyrkur bergmassa er sjaldnast jafn mikill og brotlíking Mohr-Coulomb gefur til kynna eru settar takmarkanir á togstyrk bergmassans (e. tension cutoff) (Sigurður Erlingsson, 2013a). Þessi takmörkun á togstyrk bergmassa í brotlíkingu Mohr-Coulomb fæst með því að láta $\sigma_1 = 0$ í jöfnu 3.8 svo:

$$\sigma_t = \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \quad (3.9)$$

Bera má saman brotlíkingar Hoek og Brown og Mohr-Coulomb fyrir sama efni eins og gert er á mynd 3.3. Sjá má að brotlíkingarnar fylgjast vel að fyrir sambærilega efniseiginleika.



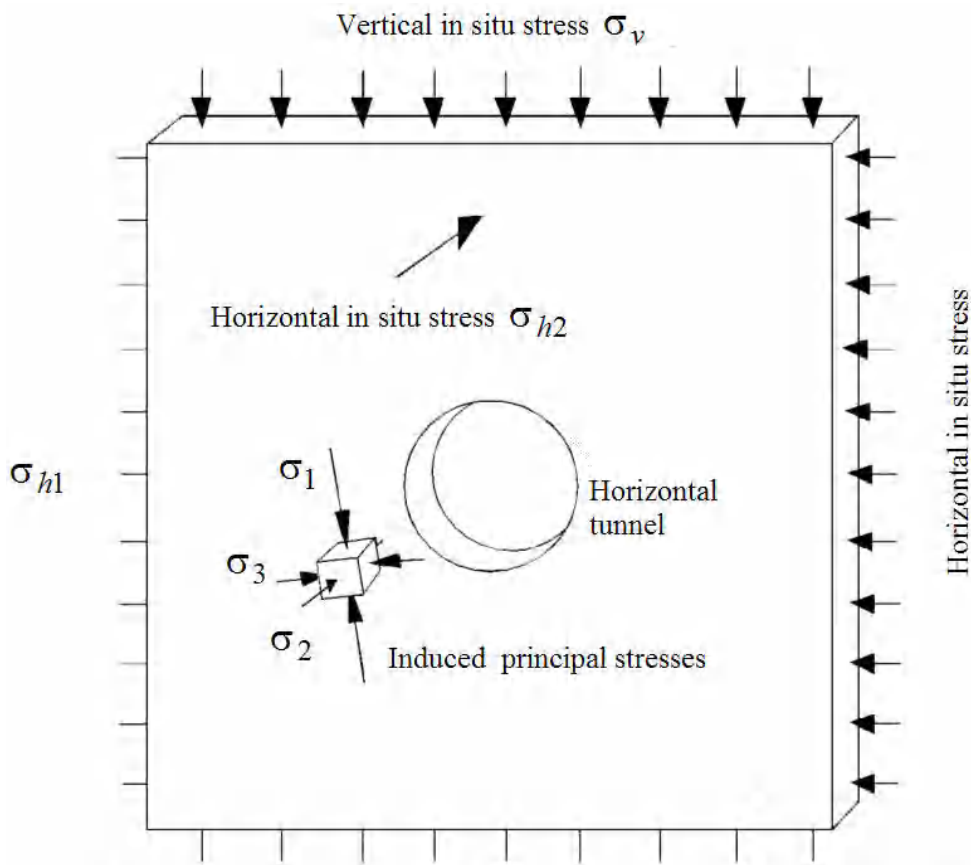
Mynd 3.3: Brotlíkingar Mohr-Coulomb og Hoek og Brown. Unnið eftir (Hoek, 2007).

3.4. Spennur í bergmassa

Innri spennur í bergmassa verða til vegna feringar frá efni sem liggur umhverfis tiltekinn athugunarstað eða vegna ytri krafta sem verka á yfirborði (de Vallejo & Ferrer, 2011). Lóðrétt spenna (σ_v) orsakast aðallega vegna fargs jarðlaga.

Láréttar spennur (σ_{h1} og σ_{h2}) orsakast vegna jarðskorpuhreyfinga, flekareks, hitabreytinga í jarðskorpunni auk landslagsbreytinga. Þessar mismunandi tegundir spenna kallast einu nafni staðbundnar spennur (e. *Natural stresses*). Spennur sem orsakast vegna framkvæmda ofan- eða neðanjarðar kallast framkallaðar spennur (e. *Induced stresses*) (Hegert, 1988).

Æskilegt er að þekkja spennuástand þeirra jarðlaga sem göng eiga leið um áður en framkvæmdir hefjast. Við gangaframkvæmdir verða síðan breytingar á spennum umhverfis göngin (mynd 3.4). Þetta getur leitt til þess að bergið umhverfis jarðgöngin verður óstöðugt og því er nauðsynlegt að fylgjast með spennudreifingu í berginu á meðan framkvæmdum stendur og styrkja bergmassann á viðeigandi hátt (Hoek, 2007).



Mynd 3.4: Spennuástand í bergi umhverfis jarðgöng (Hoek, 2007).

3.4.1. Staðbundnar spennur (e. In situ stress)

Staðbundnar spennur eru þær spennur sem finna má í bergi áður en framkvæmdir hefjast. Til staðbundinna spenna teljast spennur vegna þyngdar bergmassans, viðvarandi spennur, flekahreyfingar auk spenna sem myndast vegna hitabreytinga (Hegert, 1988).

Lóðréttur þáttur staðbundinnar spennu í bergi er reiknaður sem samband eðlisþyngdar bergmassa fyrir ofan ákveðinn punkt og dýptar hans frá yfirborði. Lóðréttar spennur í bergi (σ_v) eru því oftast ákvarðaðar með jöfnu 3.10, þar sem γ er rúmþyngd þess bergs sem liggur fyrir ofan mældan stað og z er dýpi undir yfirborði. Algengt er að eðlismassi bergmassa sé um 2700kg/m^3 svo rúmþyngd bergsins verður um $\gamma = 0,027\text{MPa/m}$ (Hoek, 2007).

$$\sigma_v = \gamma z \quad (3.10)$$

Staðbundnar láréttar spennur í bergi eru oftast ákvarðaðar út frá lóðréttnum spennum þar sem k er hlutfallið milli lóðrétts og lárétts álags (jafna 3.11). Í árdaga bergtækni var hlutfallið reiknað með jöfnu 3.12, þar sem ν er Poisson's hlutfall bergsmassans (Hoek, 2007).

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \quad (3.11)$$

$$k = \frac{\nu}{(1 - \nu)} \quad (3.12)$$

Með aukinni þekkingu og þróun bergtækni hefur það sýnt sig að jafna 3.12 er ekki nógu nákvæm, og því er hún ekki mikið notuð í dag (Hoek, 2007).

Mælingar á láréttnu álagi um allan heim gefa til kynna að hlutfallið k er hátt þegar dýpið er lítið og fer það svo minnkandi með aukinni dýpt. Sheorey (1994) setti fram jöfnu 3.13 til að meta mætti hlutfallið út frá dýpi, z í metrum og meðalgildi lárétts fjaðurstuðls bergmassans, E_h í GPa (de Vallejo & Ferrer, 2011).

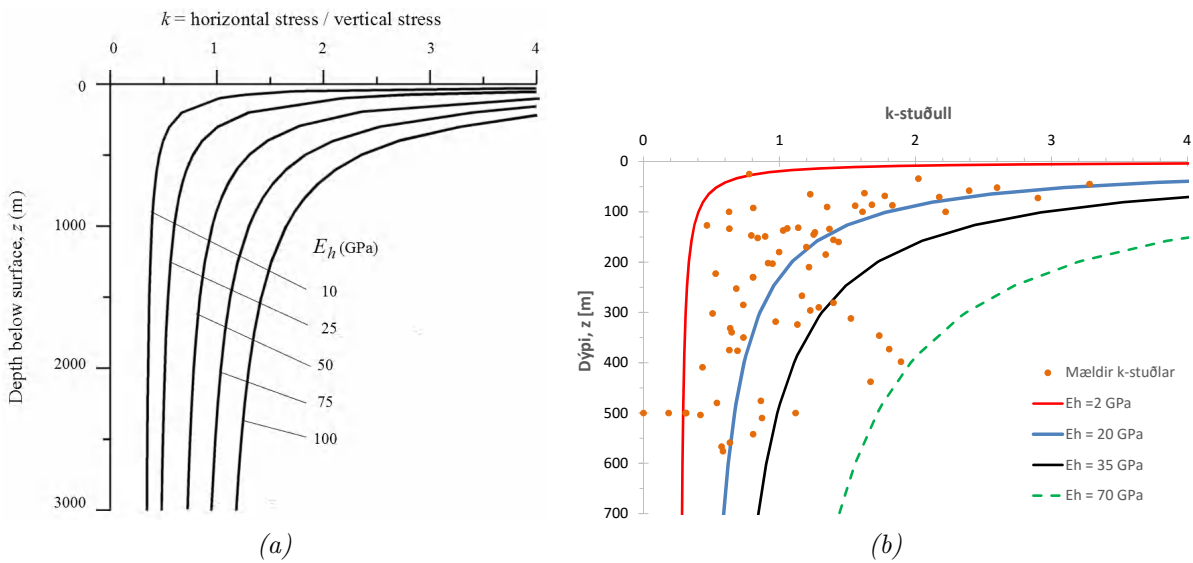
$$k = 0,25 + 7E_h \left(0,001 + \frac{1}{z} \right) \quad (3.13)$$

Sjá má á mynd 3.5a hvernig hlutfall láréttrar og lóðréttrar spennu er teiknað sem fall af dýpi út frá jöfnu 3.13 fyrir mismunandi gildi á E_h . Á litlu dýpi hafa utanaðkomandi þættir s.s. yfirborð landslags áhrif á staðbundna spennu bergmassans svo þar má búast við að k -stuðullinn fari yfir 1 (de Vallejo & Ferrer, 2011). Besta leiðin til að meta láréttar spennur í bergi er að framkvæma mælingar á staðnum. Þessar aðferðir eru oft tímafrekar og kostnaðarsamar en jafnframt æskilegar til að hægt sé að fá gott mat á ytri spennum í bergmassanum. Niðurstöður slíkra mælinga má svo teikna upp, eins og gert er á mynd 3.5b.

3. Affræðileg hegðun bergmassa

Á Íslandi hafa verið framkvæmdar bergspennumælingar á nokkrum stöðum í tengslum við framkvæmdir neðanjarðar. Út frá þessum mælingum má finna k -stuðul fyrir hverja mælingu og síðan áætla fjaðurstuðul bergmassans út frá því. Sjá má á mynd 3.5b hvernig niðurstöður mældra k -stuðla í íslensku bergi gefa til kynna bilið sem fjaðurstuðlar í íslensku bergi lenda á. Fjaðurstuðlar bergmassa eru reiknaðir með jöfnu 3.13. Að undanskyldum nokkrum jaðarmælingum gefa spennumælingar á Íslandi til kynna að fjaðurstuðull íslensks bergs er á milli 2 - 35GPa þó að hæstu mælingar bendi til að fjaðurstuðullinn geti farið upp í allt að 70GPa (Pétur Karl Hemmingsen, 2016).

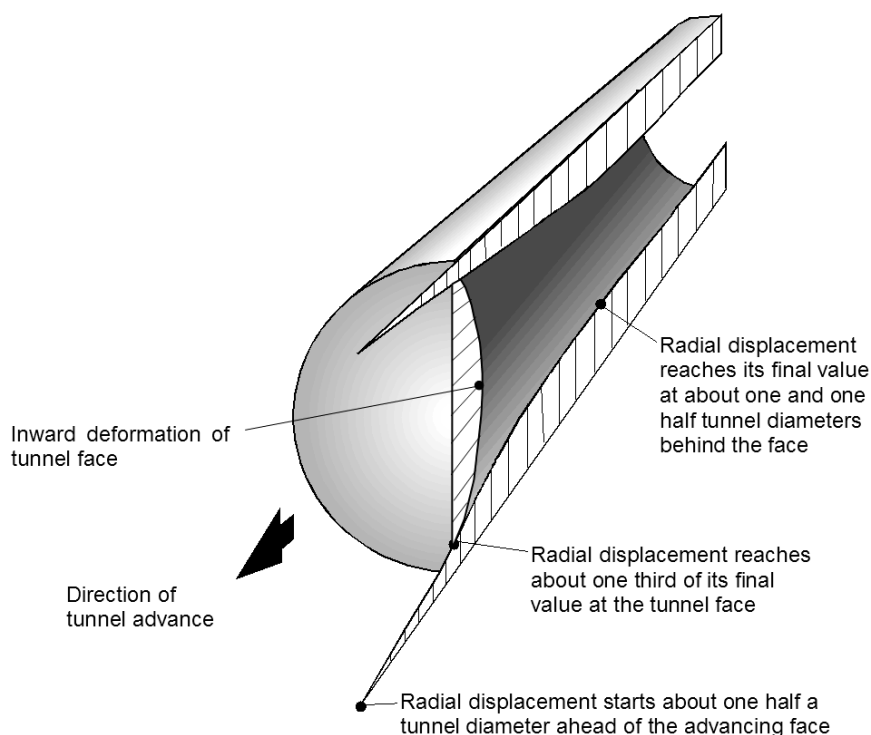
Síðar í þessu verkefni verður notaður fjaðurstuðull $E_h = 20\text{GPa}$ til að lýsa eiginleikum bergmassa í Vaðlaheiðargöngum en sjá má á mynd 3.5b hvernig sá fjaðurstuðull passar inn í mælingar á Íslandi. Frekari upplýsingar um niðurstöður bergspennumælinga á Íslandi má finna í meistararitgerð eftir Pétur Karl Hemmingsen (2016).



Mynd 3.5: (a) Samband láréttar- og lóðréttar spennu í bergmassa á móti dýpi m.v. mismunandi fjaðurstuðla bergmassa (Hoek, 2007). (b) Samband láréttar- og lóðréttar spennu í íslensku bergi á móti dýpi m.v. mismunandi fjaðurstuðla jarðefnis. Unnið eftir (Pétur Karl Hemmingsen, 2016).

3.5. Spennulosun og bergfærslur umhverfis jarðgöng

Þegar jarðgöng eru gerð og bergmassi fjarlægður minnkar spenna umhverfis jarðgöngin þar sem bergið leitast aftur við að komast í jafnvægisástand. Þessi spennulosun verður til þess að færslur verða umhverfis göngin og spennan dreifist um bergið er umlykur jarðgöngin. Stjórnun þessara bergfærslna verður því áhersluatriði við val á bergstyrkingum. Athuganir á bergfærslum gefa til kynna að milli 20 - 30% af færslum verða í berginu sem er ennþá á bak við stafn ganganna, þar sem ennþá á eftir að sprengja. Eftir að bergið er fjarlægt halda færslurnar áfram og verða því færslurnar eins og þær sem sjá má á mynd 3.6. Frekari athuganir á bergfærslum við gangagerð gefa til kynna að í kring um 70 - 80% allra færslna í jarðgangagerð eiga sér stað áður en mögulegt er að setja upp bergstyrkingar (Palmström & Stille, 2015).

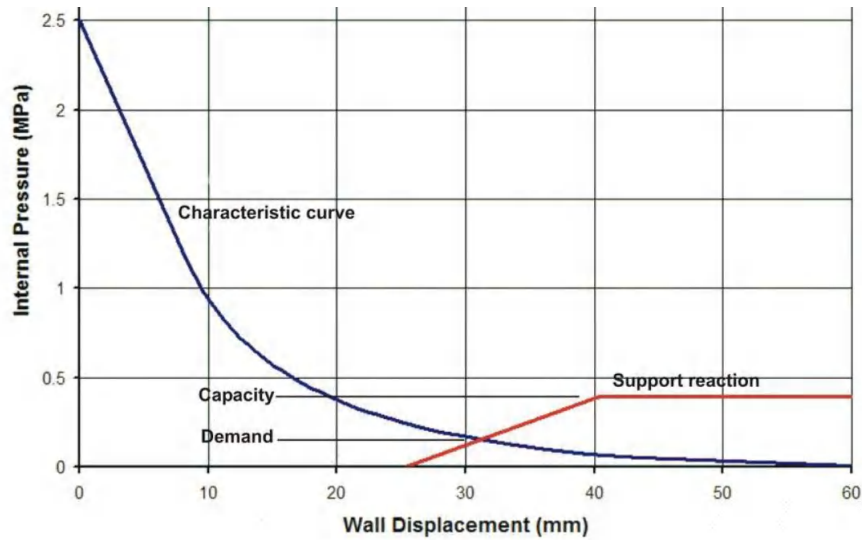


Mynd 3.6: Bergfærslur í hringlaga gangaþversniði (Hoek, 2007).

Við uppsetningu bergstyrkinga þarf að hafa í huga hvenær styrkingarnar eru settar upp auk þess að aflfræðilegir eiginleikar styrkinganna þurfa að standast það álag sem umlykjandi bergmassi mun óhjákvæmilega leggja á styrkingarnar. Þær bergstyrkingar sem eru valdar þurfa því að hafa styrk og stífni sem eru við hæfi í því bergi sem styrkja á. Einnig er rétt að taka inn í myndina að færslur hafa orðið í berginu áður en bergstyrkingum er komið fyrir. Því þurfa bergstyrkingar ekki að taka við öllum hreyfingum bergmassans heldur eru bergstyrkingar ætlaðar til að taka við bergfærslum sem myndu gera göngin óörugg og valda stórfelldum hreyfingum í bergmassanum (Hoek, 2007).

3. Affræðileg hegðun bergmassa

Á mynd 3.7 má sjá dæmigerðan bergfærsluferil þar sem færslur eru hafðar á x-ás og innri þrýstingur á vegg ganganna á y-ás. Einnig er sýnt þegar bergstyrkingar eru settar upp og hvernig þær taka við álagi eftir uppsetningu (Hoek, 2007).



Mynd 3.7: Dæmi um bergfærsluferil og hvernig styrkingar taka við álagi eftir uppsetningu (Hoek, 2007).

4. Mat á bergstyrkingu

Einn helsti galli tilrauna á bergi, sem framkvæmdar eru á tilraunastofu, er vegna smæðar sýna og vegna þess munu niðurstöðurnar aðeins gefa raunverulega mynd af örsmáum hluta þess bergmassa sem sýnið var tekið úr. Auk þess eru aðeins sýni sem þola sýnatöku og undirbúning prófuð svo niðurstöðum um styrk bergs þarf alltaf að taka með fyrirvara þar sem niðurstöðurnar þurfa ekki að vera lýsandi fyrir styrk alls bergmassans (Hoek, 2007).

Þróuð hafa verið kerfi sem byggja á berggæðamati til að lýsa eiginleikum bergmassa og þar með styrkingarþörf berggrunns. Þessi kerfi byggja á áratuga reynslu af jarðgangagerð. Fyrsta tilvísun í notkun berggæðamats til mats á bergstyrkingum við gangagerð er í grein Terzaghi frá 1946 (Hoek, 2007). Betur þróuð kerfi svo sem RMR (Rock Mass Rating), Q-gildið og RMI (Rock Mass Index) hafa verið í notkun og þróun síðan á sjötta áratug seinustu aldar. Allar aðferðir við mat á bergstyrkingum reyna að fá heildstæða mynd á styrk bergmassans út frá athugun á heilleika bergmassans, prófunum á bergi sem framkvæmdar voru á rannsóknarstofu eða báðum þessum þáttum (Palmström, 2009).

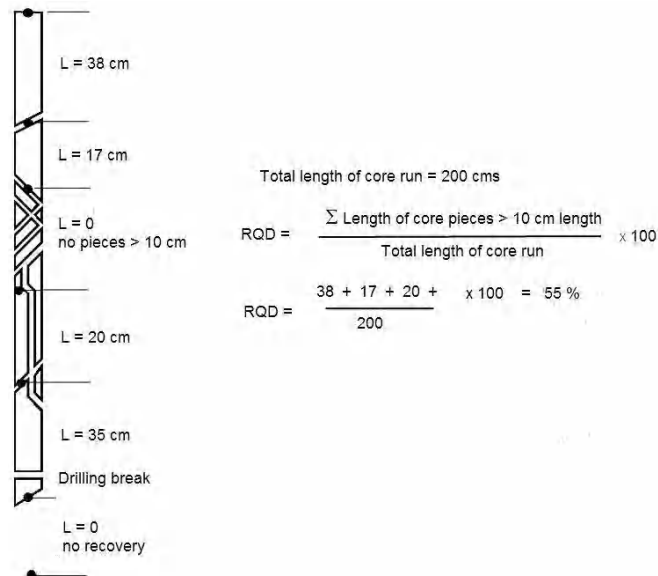
Undanfarna áratugi hefur Q-gildisaðferðin nær eingöngu verið notuð við mat á gæðum bergs og styrkingarþörf við gangagerð hér á landi (Gísli Eiríksson, 2009) og verður það kerfi því aðallega til umfjöllunar í þessu verkefni. Til að meta Q-gildi bergs þarf m.a. að meta RQD gildi bergmassans. Hér verður því RQD-gildi fyrst lýst og síðan í framhaldinu verður Q-kerfinu sjálfu lýst.

4.1. Heilleikastuðull bergs (RQD)

Heilleikastuðull bergs (e. Rock Quality Designation index) var þróaður á sjöunda áratugnum til að meta gæði bergmassa meginlega út frá borkjörnum. RQD stuðullinn er skilgreindur sem hlutfall heillegra hluta borkjarna, sem eru lengri en 100 mm, af heildarlengd borkjarnans (jafna 4.1) (Deere & Deere, 1989). Dæmi um notkun RQD kerfisins má sjá á mynd 4.1 (Hoek, 2007).

$$RQD = \frac{\sum \text{Lengd kjarnabrots} > 10\text{cm}}{\text{Heildarlengd borkjarna}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

4. Mat á bergstyrkingu



Mynd 4.1: Dæmi um hvernig heilleikastuðull bergs er ákvarðaður (Hoek, 2007).

RQD stuðullinn er mjög háður þeirri átt sem borholan er boruð í svo mismunandi niðurstöður geta fengist úr tveim holum sem boraðar eru í sama bergmassa, einungis vegna þess að stefna þeirra er mismunandi. Ef mögulegt er að horfa á bergmassann í þrívídd, til dæmis í helli eða annarskonar bergrúmi, má nota þrívíðan RQD stuðul. Þessu sambandi milli RQD gildis og ósamfelldni bergmassans má lýsa með jöfnu 4.2 (Palmström, 2005):

$$RQD = 110 - 2,5J_v \quad (4.2)$$

þar sem J_v táknar fjölda sprunga í bergmassanum á m^3 . Erfitt getur reynst að meta RQD gildi út frá sjónrænu mati þar sem sprungur geta leynst bak við sýnilega hlið bergsins. Því er ráðlegt að mæla RQD á nokkrum stöðum eftir berginu auk þess að mæla RQD gildið með mismunandi halla til að endanleg niðurstaða verið sem nákvæmest (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Kerfi og aðferðir til mats á gæðum bergmassa, sem þróuð hafa verið í kjölfar RQD kerfisins, nota RQD stuðulinn oft en ekki sem inntaksstærð. Sem dæmi um kerfi sem gera það eru RMR kerfið og Q-kerfið (Hoek, 2007).

4.2. Berggæðamat (Q – Kerfið)

Berggæðamat (Q-kerfið) var upphaflega þróað við Norsku jarðtæknistofnunina (NGI) á árunum 1971 til 1974 til að skilgreina þörf fyrir bergstyrkingu í jarðgöngum eftir berggæðum, sem var gefinn stuðullinn Q. Síðan kerfið var fyrst kynnt hefur orðið töluverð þróun á sviði jarðgangagerðar. Nýjar tegundir bergbolta hafa verið kynntar til sögunnar og notkun trefja í bergstyrkingum hefur á margan hátt breytt því hvernig styrkingar eru settar upp í jarðgöngum (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Umbætur voru gerðar á Q -kerfinu bæði árið 1993 og aftur árið 2002 til þess að niðurstöður fengnar með notkun kerfisins væru í samræmi við þróun í styrkingu jarðganga. Árið 1993 var niðurstöðum rannsókna á yfir 1050 jarðgöngum í Noregi bætt við Q -kerfið til að fá sterkari tengsl milli magns bergstyrkinga og Q -gildis bergmassa í ljósi þróunar á bergstyrkingum. Síðar, árið 2002, var niðurstöðum rannsókna á rúmlega 900 jarðgöngum í Noregi, Sviss og Indlandi bætt við Q -kerfið. Þessi uppfærsla aðlagði Q -kerfið að notkun styrktarrifja úr trefjastyrktri sprautusteypu og steypustyrktarjárnri (RRS) við sérstaklega erfiðar aðstæður í stað forsteyptra eininga (Grimstad & Barton, 1993; Grimstad et al., 2002; Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Eins og áður kom fram hefur Q -kerfið náð góðri fótfestu hér á landi og er nær eingöngu notað til að meta magn bergstyrkinga í jarðgöngum á Íslandi (Gísli Eiríksson, 2009). Q -gildi er lýsandi fyrir gæði bergmassa til gangagerðar. Q -gildið er fengið með því að meta sex þætti bergmassans og reikna þá saman í einni jöfnu þ.e:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SFR} \quad (4.3)$$

Þeir sex þættir, sem saman mynda Q -kerfið, eru eftirfarandi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013). Inntaksstærðum Q -gildisins er einnig lýst í viðauka C.

- **RQD** (Rock Quality Designation) er mælikvarði á heilleika bergmassans (sjá kafla 4.1). Í leiðbeiningum Norwegian Geotechnical Institute (2013) fyrir notkun Q -gildisins er mælt með því að ekki sé notað RQD gildi sem er minna en 10 þegar verið er að reikna Q -gildi.
- **J_n** (Joint set number) er mælikvarði á fjölda sprungukerfa í bergmassa.
- **J_r** (Joint roughness number) er mælikvarði á lögum og áferð sprunguflata í bergmassa.
- **J_a** (Joint alteration number) er mælikvarði á gerð sprunguyfirborðs og þykkt sprungufyllinga.
- **J_w** (Joint water reduction factor) er mælikvarði fyrir jarðvatnsástand í sprungum.
- **SFR** (Stress reduction factor) er mælikvarði á spennuástand í bergmassa og fer eftir styrk í heilu bergi.

Hver þessara sex þátta eru metnir út frá jarðfræðilegum rannsóknum og notkun tafla sem gefa tölulega niðurstöðu í samræmi við aðstæður. Sameina má þessa þætti í þrjá meginstuðla sem lýsa stöðugleika bergmassa umhverfis jarðgöng.

- **RQD/J_n** (Degree of jointing) er mælikvarði á stærð bergblokka í bergmassa.
- **J_r/J_a** (Joint friction) er mælikvarði á skerstyrk milli bergblokka.
- **J_w/SFR** (Active stress) er mælikvarði fyrir virka spennu.

4.3. Mat á styrkingum með Q-kerfinu

Til að hægt sé að meta hversu mikla bergstyrkingu þarf út frá gæðum bergmassans þarf að taka tvo þætti til viðbótar með í reikninginn. Annars vegar þarf að hafa í huga stærð gangaþversniðsins. Almennt séð verður þörfin fyrir styrkingu meiri eftir því sem gangaþversniðið hækkar og/eða breiðkar. Athuganir sýna að formbreytingar í bergmassanum verða meiri eftir því sem gangaþversniðið stækkar auk þess að meira álag verður á bergstyrkingar í veiku bergi. Athuganir sýna einnig að styrkur bergmassa virðist minnka eftir því sem álagssvæði stækkar, þar sem fleiri sprungur og veikir fletir koma í ljós í bergmassanum (Palmström & Stille, 2015).

Hins vegar þarf að hafa í huga öryggisstuðul sem byggir á fyrirhuguðu notagildi ganganna. Göng sem eru gerð til fólksflutninga krefjast meira öryggis heldur en göng sem flytja vatn eða eru til tímabundinnar námuvinnslu. Þessi öryggisstuðull ESR (e. Excavation Support Ratio) er þannig gerður að því lægri sem hann er þeim mun meiri áhersla er lögð á öryggi í hönnun styrkinga. Gildi á ESR öryggisstuðlinum fyrir mismunandi gerðir mannvirkja má finna í töflu ?? í viðauka C. Hægt er að sameina þessa tvo þætti til að fá mat á jafngildisumfangi ganganna (e. Equivalent dimension) (Jafna 4.4).

$$\frac{\text{Hæð eða breidd í } m}{\text{ESR}} = \text{Jafngildisumfang} \quad (4.4)$$

Í leiðbeiningum Norwegian Geotechnical Institute (2013) varðandi Q-kerfið er tekið fram að niðurstöður fengnar með aflestri af styrkingagrafinu (mynd 4.2) eigi aðallega við um þekju ganganna. Því eru gefin upp gildi til að aðlaga Q-gildið fyrir hönnun styrkinga í vegg ganga (tafla 4.1)

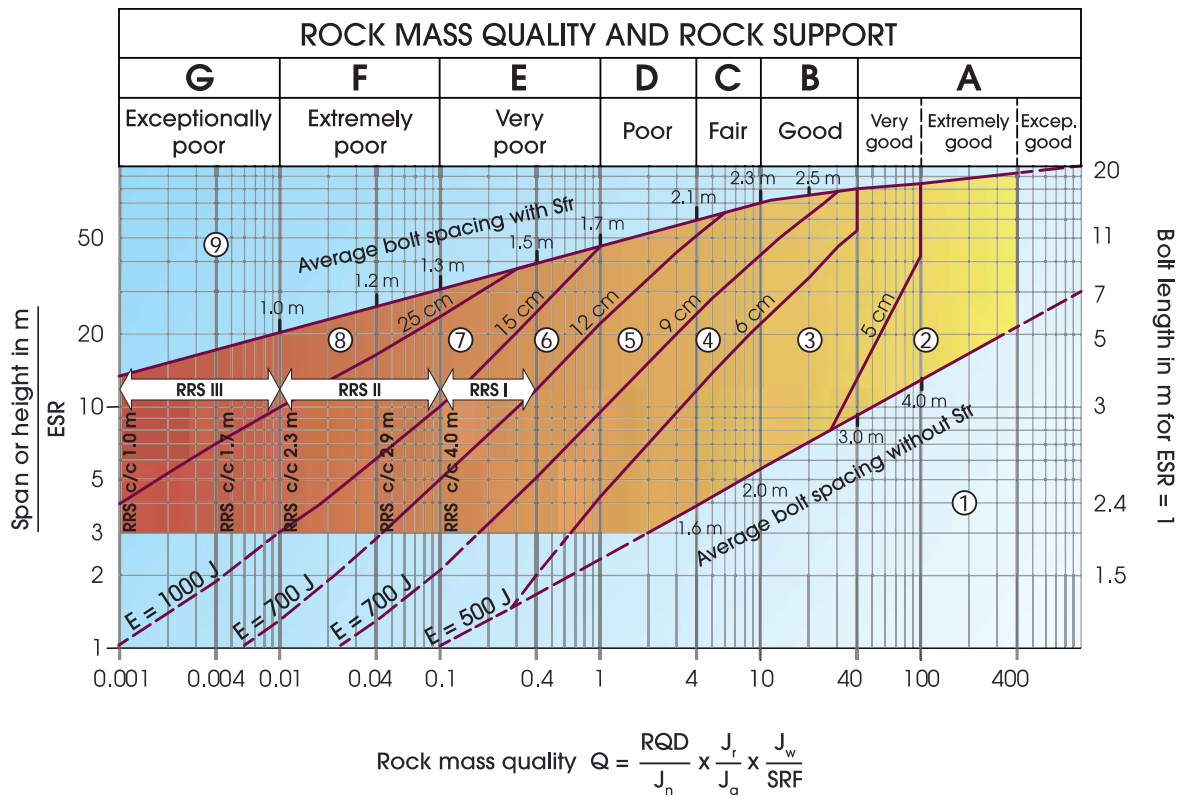
Tafla 4.1: Margföldunargildi Q-gildis fyrir vegg jarðganga (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Gæði bergmassa	Q-gildi	Margföldunarstuðull
Gott	$Q > 10$	5
Sæmilegt	$0,1 < Q < 10$	2,5
Slakt	$Q < 0,1$	1

Á mynd 4.2 má sjá hvernig finna má áætlað magn bergstyrkinga út frá Q-gildi, umfangi ganganna og ESR öryggisstuðlinum. Sjá má hvernig berggæði skiptast niður í flokka eftir því hversu hátt Q-gildið er. Þessir flokkar gefa síðan gerð og magn styrkingar sem þarf til að takast á við misgott berg. Aflestur af mynd 4.2 getur því gefið áætlaða þykkt sprautusteypu, lengd og fjölda bergbolta ásamt leiðbeiningum um notkun sprautusteypuboga.

Fyrir hluta ganga með $Jafngildisumfang = 10$, $ESR = 1$ og $Q = 4$ má því sjá að mælt er með notkun allt að 6cm þykks lags af sprautusteypu, 3m löngum bergboltum með 1,6 – 2,1m millibili eftir því hvort notuð er trefjastyrkt sprautusteypa (Sfr) eða ekki.

4.3. Mat á styrkingum með Q-kerfinu



Mynd 4.2: Ráðlögð styrking bergmassa samkvæmt Q-kerfinu (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

5. Um bergstyrkingu

Bergstyrking er samheiti yfir ýmsar leiðir sem notaðar eru til þess að auka stöðugleika í bergmassa eftir framkvæmdir. Sem dæmi eru bergstyrkingar notaðar ofanjarðar til að styrkja bergmassa í skeringum, við stoðveggi, námagerð og síðast en ekki síst neðanjarðar við gerð jarðganga. Óhjákvæmilegt er að færslur verði í bergmassa eftir framkvæmdir, en tilgangur bergstyrkinga er ekki að reyna að koma í veg fyrir þessar færslur. Tilgangur bergstyrkinga er að veita berginu stuðning svo hlutar bergmassans haldi við hvern annan og tryggja öryggi vegfarenda (de Vallejo & Ferrer, 2011).

Þar sem bergstyrkingar eru notaðar til að kljást við ýmis vandamál tengd framkvæmdum þurfa bergstyrkingar að vera fjölbreyttar og notkun þeirra sveigjanleg. Þessum sveigjanleika er hægt að ná fram með notkun bergbolta, sprautusteypu, vírnets og grindarboga svo eitthvað sé nefnt. Þessum styrkingaraðferðum er hægt að beita annaðhvort einum og sér eða saman (Palmström & Stille, 2015).

Uppsetningu bergstyrkinga má yfirleitt skipta í annars vegar vinnustyrkingu og hins vegar varanlega styrkingu (de Vallejo & Ferrer, 2011). Vinnustyrking er sett er upp strax að lokinni sprenginu í stafni ganganna. Þessar styrkingar eru til þess gerðar að auka vinnuöryggi þeirra sem starfa við göngin og eru ákveðnar eingöngu með það að leiðarljósi. Í þessu fyrsta skrefi er algengast að sprautusteypu og stökum bergboltum sé komið fyrir, auk þess sem minni lausar bergblokkir eru losaðar og fjarlægðar (e. scaling). Varanleg styrking er síðan sett upp til að mæta kröfum um styrkingar til frambúðar í göngunum. Þessi styrking vinnur með vinnustyrkingunni, enda er hún í flestum tilfellum látin yfir vinnustyrkinguna. Endanleg styrking er ákveðin í samvinnu milli eigenda ganganna og verktakans. Þegar styrkingin er valin reynir á jarðfræðilegt og verkfræðilegt mat á berggæðum og vandamálum og ákvarða þarf styrkinguna í samræmi við það (Palmström & Stille, 2015). Hér á eftir er helstu gerðum bergstyrkinga, sem notaðar eru í jarðgöngum, gerð skil.

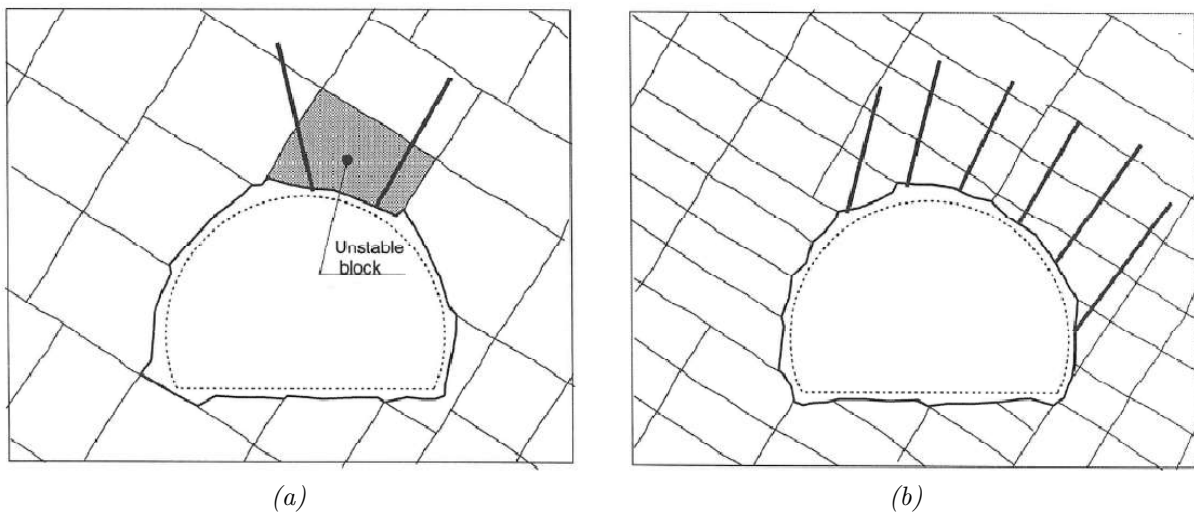
5.1. Bergboltar

Fyrstu dæmin um kerfisbundna notkun bergbolta til styrkingar í námagreftri má sjá í upphafi 20. aldar. Í upphafi fimmta áratugarins byrjuðu verkfræðingar að þróa endafesta bergbolta enn frekar til notkunar í náma- og gangagerð og árið 1947 var kallað eftir aukinni notkun bergbolta í námum og göngum þar sem tilkoma betri bergbolta hafði gert gangagerð mun öruggari (Luo, 1999).

5. Um bergstyrkingu

Bergboltar eru áhrifarík leið til bergstyrkingar við mismunandi aðstæður og eru lykilþáttur í bæði vinnu- og varanlegri styrkingu jarðganga. Bergboltar eru gjarnan fyrsta styrkingin sem sett er upp við stafn ganga til þess að hindra að lausar bergblokkir falli úr þekju eða veggjum ganganna.

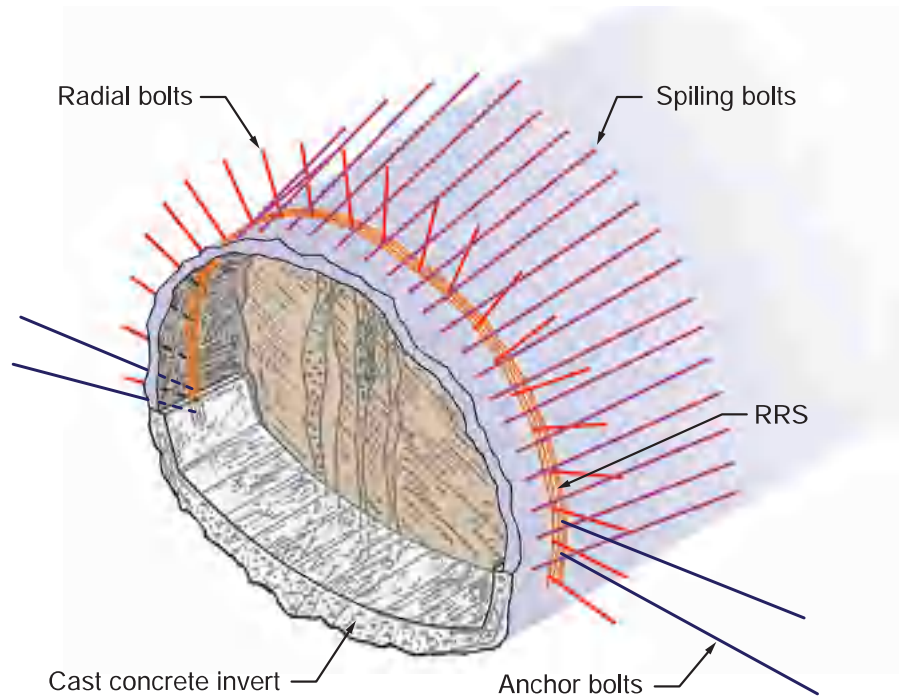
Staðsetning bolta, sem og gerð þeirra, fer mikið eftir því hver er tilgangurinn með bergboltanum. Eins og nefnt hefur verið eru bergboltar oft notaðir til að tryggja hreyfingar stakra blokka og hindra að þær falli úr lofti eða veggjum. Í þessum tilfellum eru oftast ekki notaðir stakir boltar (mynd 5.1a). Síðar í framkvæmdinni er hægt að bæta við boltum á kerfisbundinn hátt sé talin þörf þar á skv. Q-kerfinu eða öðrum megin leiðum til að ákveða magn styrkinga. Þessi kerfisbundna boltun stuðlar að stöðugleika í berginu, auk þess er kerfisbundin boltun góð þar sem ekki er alltaf augljóst hvar lausar blokkir eru í berginu (mynd 5.1b) (Palmström & Stille, 2015).



Mynd 5.1: (a) Stökum boltum er komið fyrir til að festa staka, lausa bergblokk.

(b) Kerfisbundin boltun er notuð til að styrkja óstöðug svæði þar sem ekki er ljóst hvaða bergblokk er óstöðugust (Palmström & Stille, 2015).

Ef búist er við því að göng liggja í gegnum óstyrkan eða óstöðugan bergmassa er algengt að bergboltar séu notaðir áður en færa er sprengd til að styrkja bergið umhverfis þann hluta ganganna með forboltun (e. spiling bolts). Þessir boltar eru því boraðir með 10-25° fláa út frá stefnu ganganna (einskonar blævængjaform) í átt að þeim jarðefnum sem líklegt er að verði til vandræða síðar meir. Forboltar eru venjulega boraðir með 30-80cm millibili eftir aðstæðum og festir með steypugraut til að auka samverkun bolta og bergmassa og mynda stöðuga heild (Hoek, 2007). Sjá má á mynd 5.2 dæmi um beitingu forboltunar í gangagerð.



Mynd 5.2: Dæmi um notkun forboltunar í jarðgangagerð (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

5.2. Mismunandi gerðir bergbolta

Nokkrar gerðir bergbolta eru notaðar við jarðgangagerð hér á landi. Þessir bergboltar búa yfir mismunandi eiginleikum, sem gerir það að verkum að þá má nota við fjölbreittar aðstæður. Bergboltum má skipta í tvo megin flokka, virka- og óvirka bergbolta.

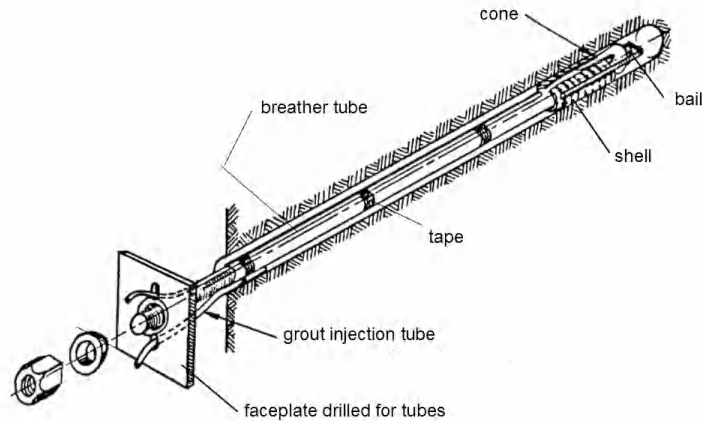
Virkir bergboltar eru boltar sem eru þandir út eða hertir eftir ísetningu þannig að þeir taka upp spennu í berginu stuttu eftir að vera komnir á sinn stað. Óvirkir boltar eru þeir sem eru festir með sementsgraut eða öðrum boltagraut s.s. polyestergraut. Í óvirkum boltum verður því ekki samverkun milli boltans og bergmassans fyrr en festigrauturinn er byrjaður að taka sig og harðna. Flestir boltar eru ryðvarðir með t.d. galvaniseringu eða epoxy-húð. Festigrautur getur einnig verið áhrifarík ryðvörn þar sem hann hindrar það að vatn komist að boltanum (Palmström & Stille, 2015).

Endafestir boltar

Endafestir bergboltar eru festir með þensluskel á innri enda boltans og endaplötu á hinum enda boltans, við yfirborð ganganna. Þessi gerð bolta er þeim kostum gædd að hún getur tekið við álagi strax eftir að boltanum hefur verið komið fyrir. Af þessari ástæðu eru endafestir boltar mikið notaðir við stakboltun við stafn ganga, stuttu eftir að færa hefur verið sprengd, og til að styrkja lausar blokkir yfir vinnusvæðinu.

5. Um bergstyrkingu

Endafestum bergboltum er komið fyrir í bergi þannig að borað er fyrir boltanum og hann látinn inn í bergið. Því næst er ró og endaplötu komið fyrir á enda boltans og róin hert. Við það dregst boltinn út úr gatinu og þenur út þensluskelina þannig að boltinn festist við endann sem er inni berginu og endaplatan við yfirborðið þrýstir á móti (Hoek, 2007).



Mynd 5.3: Endafestur bergbolti sem mögulegt er að fylla með graut eftir uppsetningu (Hoek, 2007).

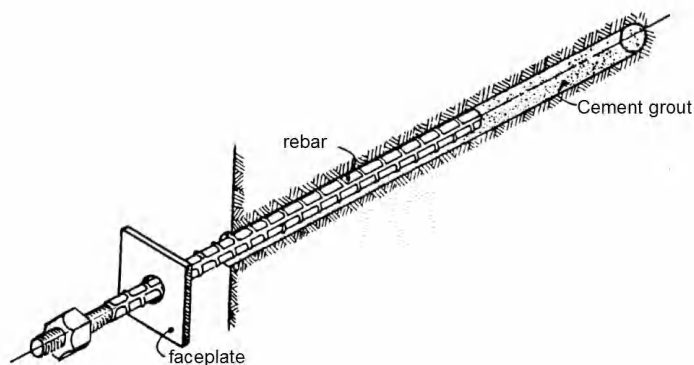
Innsteyptir boltar

Innsteyptir bergboltar eru í sinni einföldustu mynd steypustyrktarjárn sem fest er í bergið með boltagraut. Bindingin milli grautarins og járnsins verður síðan til þess að boltinn heldur við og bætir stöðugleika í lausu bergi. Grautaðir bergboltar ná því ekki endanlegum styrk fyrr en boltagrauturinn hefur harðnað og náð sínum eigin endanlega styrk. Af þessari ástæðu eru boltar sem þessir best til þess fallnir að styrkja göng fyrir aftan stafninn þar sem unnið er að kerfisboltun frekar en boltun stakra blokka af öryggisástæðum.

Grautuðum boltum er komið fyrir í bergi þannig að borað er gat fyrir bergboltann af heppi-legrri stærð og boltagraut sprautað í gatið. Þar næst er stálteinn rekinn inn í steypugrautinn eins langt og hann kemst, endaplatan er skrúfuð á og þar með er boltinn tilbúinn. Athuga skal að ekki gengur vel að nota bergbolta sem treysta á boltagraut til festingar ef holan sem er boruð fyrir boltann er ekki þurr. Þegar vatn kemst í holur fyrir grautaða bolta verður binding milli bergs, boltagrauts og stálteins minni en ella og getur jafnvel eyðilagst algjörlega vegna niðurbrots í stálteininum eða steypunni (Hoek, 2007).

Blandaðir boltar (e. combination bolts)

Blandaðir boltar eru endafestir bergboltar sem mögulegt er að sprauta boltagraut inn í til þess að gefa aukið hald. Þessa bolta má því nota til að styrkja berg strax eftir að færa hefur verið sprengd. Síðar meir má sprauta graut meðfram boltanum til að veita aukið og varanlegt hald. Boltar sem þessir eru oftast en ekki í hlífðarhulsum sem verndar boltann sjálfan fyrir tæringu vegna raka. Dæmi um bolta af þessari gerð eru svokallaðir CT boltar.



Mynd 5.4: Innsteyptur bergbolti (Hoek, 2007).

Blandaðir boltar eru tiltölulega stífir þar sem þeir eru bæði endafestir og innsteyptir með graut. Af þessum ástæðum er þessi tegund af bolta mjög hentug í bergi sem er mjög sprungið. Aukinn stífleiki boltans verður honum hins vegar að falli ef mikil hreyfing er í bergmassanum þvert á bergboltann (Palmström & Stille, 2015).

Aðrir bergboltar

Þensluboltar eru samheiti yfir alla bergbolta þar sem styrkgetan stafar af viðnámi við bergið eftir allri lengd boltans. Dæmi um þessa bolta eru svokallaðir Swellex boltar en þeir eru gerðir úr röri sem brotið er upp á svo þvermál þess verður minna. Eftir að Swellex bolta hefur verið komið fyrir í berginu er hann þaninn út með vatni, sem dælt er inn í rörið undir háum þrýsting.

Helsti kosturinn við þenslubolta er að þeir geta tekið við fullu álagi strax eftir ísetningu. Því eru þeir ákjósanlegir sem vinnustyrking við stafn ganganna strax eftir að færa hefur verið sprengdur. Hins vegar eru þanboltar ekki viðurkenndir sem langtíma styrking á Norðurlöndum þar sem hætta er á tæringu og í framhaldinu að boltarnir missi styrk. Því verður að nota kerfisbundna boltun, með boltum sem þola langtíma álag, samhliða þanboltum.

Sjálfborandi bergboltar eru hentugir ef bergið sem verið er að styrkja er það lélegt að göt sem boruð eru í bergið fyrir bergboltum eiga það til að falla saman þegar borinn er dreginn út til þess að unnt sé að koma hefðbundnum bergbolta fyrir. Eftir að sjálfborandi bolti hefur verið boraður í bergið er hann festur varanlega með boltagraut og er þrýstiplata síðan hert fremst á boltann. Einn helsti ókösturinn við sjálfborandi bergbolta er að notkun þeirra er kostnaðarsöm, þar sem ekki er hægt að endurnýta borkrónuna sem er á enda boltans þar sem hún steypist inn með boltanum (Statens Vegvesen, 2014b).

5.3. Sprautusteypa

Sprautusteypa er samheiti yfir steypu úr sementi, fínum fylliefnum auk íblendiefna, sem er sprautað undir þrýstingi og þjöppuð undir álagi vegna þess hraða sem verður á efninu vegna sprautunar. Sprautusteypa hefur verið notuð til styrkingar og til að varna ofanhruni úr bergi í göngum síðan á fjórða áratug síðustu aldar og þróaðist notkun sprautusteypu samhliða NATM hugmyndafræðinni við gangagerð í veiku bergi (Hoek, 2007).

Vinsældir sprautusteypu stafa af því að hún hefur marga eiginleika sem eru ákjósanlegir til gangagerðar s.s. háan þrýstistyrk. Jafnframt er auðvelt að bæta efnum s.s. trefjum og hröðurum við sprautusteypu til að bæta togstyrk og stytta þornunartíma svo fátt eitt sé nefnt. Megin kostir og gallar sprautusteypu til styrkingar í göngum eru (Palmström & Stille, 2015):

Kostir

- Auðvelt er að beita sprautusteypu í samvinnu við aðrar bergstyrkingaraðferðir.
- Auðvelt er að breyta styrkeiginleikum steypunnar til að hún henti mismunandi aðstæðum.
- Hægt er að reiða fram sprautusteypu með litlum fyrirvara.
- Lögum gangaþversniðs eða ójöfnur í þversniðinu skipta ekki máli.

Gallar

- Séu miklar þenslur í bergmassa eftir ásprautun geta þenslurnar orðið til þess að sprautusteypan bregst.
- Erfitt getur reynst að nota sprautusteypu á berg þar sem vatn flæðir um og setberg eða annað berg með litla samloðun.

Sprautusteypu er hægt að blanda á annars vegar þurran og hins vegar blautan máta. Þurrblandin sprautusteypa er blönduð þannig að þurrefnum steypunnar er blandað saman fyrst og vatni síðan bætt út í steypuna í þann mund er steypunni er sprautað út um stút sprautusteypublandarans. Með þessari aðferð getur sá sem sér um steypun ganganna stjórnað vatnsmagninu í blöndunni handvirkt. Þetta getur þó orðið til þess að vatnssements hlutfall steypunnar verður röng og eiginleikar steypunnar því ekki réttir. Auk þess reynist erfitt að nota trefjar með þurrblandinni sprautusteypu og mikið ryk og endurkast verður af notkun hennar.

Blautblandin sprautusteypa er fyrst blönduð sem venjuleg steypa með fínum fylliefnum og litla þjálmi. Þessari steypu er síðan sprautað á yfirborð ganganna með þrýstilofti. Með þessari aðferð er hægt að stjórna blöndun steypunnar betur en hægt er með þurrblöndun, auðveldara er að nota íblendiefni með steypunni auk þess sem auðveldara er að nota trefjar til styrkingar á steypunni. Einnig er endurkast af yfirborði ganganna og ryk minna svo vinnuáætlætur eru betri þegar blautsteypa er notuð. Nú til dags er blautblönduð sprautusteypa allsráðandi í gangagerð (Palmström & Stille, 2015). Dæmigerða uppskrift að sprautusteypu má finna í töflu 5.1.

Tafla 5.1: Dæmigerð uppskrift að sprautusteypu með plasttrefjum. Eftir (Hoek, 2007).

Efni	Magn
Sement	420 kg/m ³
Micro-silica	40 kg/m ³
Fylliefni	1600 kg/m ³
Plasttrefjar	4,7 kg/m ³
Hraðari (Accelerator)	13 kg/m ³
Superplasticizer	6 Ltr.
Vatnsminnkari	2 Ltr.
Loftblendi	Ef þörf er á kg/m ³
Vatn	180 kg/m ³

Ekki er óalgengt að magn sprautusteypu sem notuð er við styrkingu ganga geti verið 40-60% meiri en einfaldir rúmmálsreikningar gefa til kynna. Þessi munur skýrist að miklu leyti af því að meiri sprautusteypa er notuð á svæði þar sem yfirbrot verður í jarðgangabvernandiinu við framkvæmdir, endurkast verður af yfirborði jarðganganna og hrjúfleika yfirborðsins gerir yfirborð jarðganganna stærra (Matthías Loftsson et al., 2010). Auk þess er ekki óalgengt að þunnu sprautusteypulagi sé sprautað á stafn jarðganga til þess að styrkja stafninn tímabundið á meðan verið er að bora fyrir næstu færur (Sigurjón Vídalín, 2016c).

Sprautusteypa og trefjar

Hefðbundin sprautusteypa án trefja er, eins og hefðbundin útlögð steypa, gædd miklum þrýstistyrk samanborið við togstyrk. Af þessum ástæðum getur sprautusteypa virst brot hætt efni og auðveldlega sprungið verði hún fyrir togkröftum. Þróun trefja til notkunar í sprautusteypu hefur verið í gangi síðan á 6. áratug seinustu aldar. Notkun stál- eða plasttrefja í sprautusteypu eykur togstyrk sprautusteypu til muna. Sýnt hefur verið fram á að með viðbót 1% stáltrefja í 50MPa sprautusteypu getur togstyrkur steypunnar aukist sem nemur 85%. Auk þess var athugað að sveigjanleiki steypunnar jókst allt að 20 falt svo minni líkur voru á því að sprungur mynduðust í steypunni (Palmström & Stille, 2015).

Í dag er algengast að 25 - 35mm langar stál- eða plasttrefjar séu notaðar með sprautusteypu (Palmström & Stille, 2015). Plasttrefjar eru núorðið oftast notaðar í stað stáltrefja þar sem þær veita álíka styrkbætingu og stáltrefjar auk þess að vera fjárhagslega hagstæðari þar sem þær eru léttari og því ódýrari í flutningi. Plasttrefjar eru einnig sérstaklega nýtsamlegar þegar sprautusteypa er notuð til að hylja vatnsþéttingarlag, þar sem raki hefur ekki sömu áhrif á plast og stál (Einar Hrafn Hjálmarsson, 2015).

Með þessari þróun í notkun trefjastyrktrar sprautusteypu vinnur sprautusteypa betur með öðrum styrkingum. Trefjastyrkt sprautusteypa og bergboltar hafa að miklu leyti komið í stað staðsteyptrar gangaklæðningar. Staðsteyptar gangaklæðningar eru bæði dýrari og erfiðari í uppsetningu heldur en trefjabætt sprautusteypa og bergboltar. Nánar verður fjallað um staðsteyptar gangaklæðningar í kafla 5.5.

5.4. Sprautusteypurif

Notkun forsteypra styrktareininga hefur farið minnkandi með tilkomu styrktarrifja úr sprautusteypu og stáli (Norwegian Geotechnical Institute, 2013). Áður fyrr var sprautusteypa notuð óstyrkt, ásamt bergboltum, eða til að hylja stálboga, sem notaðir voru til styrkingar í sérstaklega veiku bergi. Með þróun betri sprautusteypu breyttist styrkur slíkra boga þannig að bróðurpart styrksins var að finna í sprautusteypuskelinni, og tengingu hennar við yfirborð ganganna, en ekki stálboganum. Þar með var hægt að nota minna stál í styrktarboga svo umfang bergstyrkinga minnkaði til muna. Þetta kom ekki bara til góðs við vinnu inni í göngunum heldur varð mun hagkvæmara að framleiða, flytja og geyma styrkingar sem bjuggu yfir jafn miklum, ef ekki meiri, styrk en fyrirrennarar þeirra (Komselis et al., 2012).

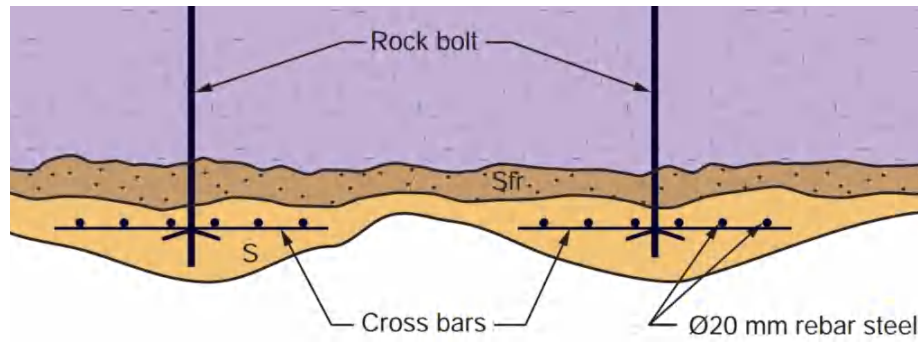
Tvær megin tegundir af sprautusteypurifjum hafa verið þróaðar. Annars vegar eru til sprautusteypubogar, þar sem steypustyrktarjárnur er komið fyrir eftir yfirborði jarðganganna og þau hulin sprautusteypu. Hins vegar eru notaðir samsettir grindarbogar, sem komið er fyrir á samskonar hátt. Þessar tvær mismunandi bergstyrkingaraðferðir kunna að virðast svipaðar en þó hafa þær hvor sína kosti og galla. Farið verður nánar í þessar mismunandi bergstyrkingar í köflum hér á eftir.

5.4.1. Sprautusteypubogar

Á svæðum þar sem um slök berggæði er að ræða ($Q \leq 0,4$) mælir Q-kerfið fyrir notkun sprautusteypuboga til bergstyrkingar. Sprautusteypubogar samanstanda venjulega af 16-20mm sverum steypustyrktarjárnnum sem fest eru saman með þverjárnnum. Sprautusteypubogar er síðan festir í bergið með bergboltum. Undir bergböndum er haft lag af trefjastyrktri sprautusteypu til að slétta yfirborð jarðganganna og veita frekari styrk á framkvæmdatíma. Eftir að bergbandi hefur verið komið fyrir er það hulið með hefðbundinni eða trefjastyrktri sprautusteypu. Samanlögð þykkt beggja sprautusteypulaganna telst til heildarþykktar bogans (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Afbrigði sprautusteypuboga, sem kallast bergbönd, eru notuð sem akkeri til að styðja við forboltun. Bergbönd eru gerð úr tveimur steypustyrktarjárnnum sem fléttuð eru saman og komið fyrir eftir þaki og veggjum gangaþversniðsins. Forboltarnir eru síðan festir við bergband við uppsetningu og síðan huldur með sprautusteypu (Einar Hrafn Hjálmarsson, 2016). Sjá má dæmi um uppsett bergband í Vaðlaheiðargöngum á mynd 5.6.

Q-kerfið mælir ekki aðeins fyrir um notkun sprautusteypuboga til styrkingar heldur er mælt með mismunandi samsetningu hvers sprautusteypuboga eftir berggæðum. Þar hafa berggæði og umfang framkvæmdar allt að segja um fjölda steypustyrktarjárna í lagi, fjölda laga af steypustyrktarjárnnum og þykkt sprautusteypuhulu bogans. Þar sem bergbönd eru sett saman á staðnum eru þau löguð að þversniði jarðganganna eftir að trefjastyrktu sprautusteypunni hefur verið sprautað á yfirborð jarðganganna (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).



Mynd 5.5: Dæmigerð þversniðsteikning af sprautusteypubogum (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).



Mynd 5.6: Dæmi um uppsettan sprautusteypuboga í Vaðlaheiðargöngum ásamt forboltum (Sigurjón Vídalín, 2016a).

5.4.2. Grindarbogar

Önnur aðferð til að ná fram bogavirkni í jarðgöngum er að nota grindarboga. Tvær megingerðir grindarboga hafa verið hannaðar til notkunar í jarðgöngum. Annars vegar eru bogar með þrjú langbönd úr steypustyrktarjárni, sem eru tengd saman með þynnri steypustyrktarjárnum (10-12mm) til að mynda þrívíða grind með þríhyrnt þversnið. Venja er að staka steypustyrktarjárnið sé á milli 25 og 40mm svert en hin tvö séu grennri (20-32mm).

Hins vegar eru til ferhyrðar grindur, sem hafa fjögur langbönd, og settar eru saman á sambærilegan hátt nema langböndin hafa öll sama sverleika (20-40mm). Sjá má á mynd 5.7 dæmigerð þversnið grindarbita (Komselis et al., 2012). Á Íslandi hefur tíðkast að nota grindarboga þegar aðstæður kalla eftir slíkum bogastyrkingum. Í Vaðlaheiðargöngum eru notaðir grindarbogar með ferkantað þversnið.

Hvernig sem þversnið grindarbogans er í laginu er hann hannaður og settur saman til að falla að kennisniði jarðganganna. Til að tryggja að grindarbogar standist kröfur um virkni og öruggar bergstyrkingar er nauðsynlegt að grindarbitinn sjálfur sé settur saman í verksmiðju þar sem framleiðsluferlinu er gæðastjórnað (Komselis et al., 2012). Af þessu leiðir að sprautusteypubogar eru mun sveigjanlegri valkostur en grindarbogar, þar sem þeir eru hannaðir og settir saman á staðnum svo hægt er að laga þau að þversniði ganganna sé það frábrugðið kennisniðinu. Þetta hefur einnig í för með sér að meiri sprautusteypa kann að fara á bak við sprautusteypuboga þar sem bil getur myndast milli bogans og yfirborðs jarðganganna (Palmström & Stille, 2015).



Mynd 5.7: Algengustu þversnið grindarboga (Joerimann Stahl- & Tunnelbau, 2013).
T.v. Þriggja banda grindarbogi. T.h. Fjöгурra banda grindarbogi.



Mynd 5.8: Uppsettir grindarbogar í Vaðlaheiðargöngum (Sigurjón Vídalín, 2016a).

5.5. Aðrar bergstyrkingar

Vírnet

Notkun vírnets til styrkingar í göngum er vel þekkt aðferð sem er notuð víða þar sem styrkja þarf mjög blaut eða laus berglög. Einnig er algengt að vírnet séu notuð þar sem sveigjanleiki, togþol eða viðloðun sprautusteypunnar við bergið er ekki nóg. Algengt er að vírnet sé notað í samvinnu við sprautusteypu- eða grindarboga til að styrkja stærra svæði.

Uppsetning vírnets til bergstyrkingar fer þannig fram að þunnu lagi af steypu er sprautað á yfirborðið og vírnet lagt ofan í blauta steypuna og boltað niður. Síðan er sprautusteypu sprautað yfir netið og frekari styrkingar látnar upp eftir þörfum. Síðan notkun trefjastyrktrar sprautusteypu varð algengari hefur notkun vírnets til styrkingar minnkað töluvert þar sem styrking sprautusteypunnar er í mörgum tilfellum talin nóg. Hins vegar koma reglulega upp tilfelli í veikari bergmassa þar sem nauðsynlegt er að nota vírnet, þar sem trefjastyrkt sprautusteypa er ekki nægileg styrking (Palmström & Stille, 2015).

Stað- og forsteyptar einingar

Staðsteyptar gangaklæðningar geta tekið við talsverðu álagi vegna þess hversu fullkomin bogalögun næst við gerð þeirra. Af þessum ástæðum hafa staðsteyptar gangaklæðningar aðallega verið notaðar þar sem mikið er af mjög slæmu bergi. Þetta er oft tilfellið þar sem misgengi eru og bergmassinn því mjög óstöðugur.

Í tilfellum þar sem þarf að setja upp staðsteypta klæðningu er fyrst notuð sprautusteypa og bergboltar sem vinnustyrking. Til þess að hægt sé að setja upp klæðninguna sjálfa þarf að notast við steypumót. Þessi steypumót eru oft höfð úr stáli ef ske kynni að setja þurfi upp slíka styrkingu nálægt stafni ganga, og steypumótin þurfi að þola sprenginu næstu færú. Eftir að steypumótin eru fjarlægð myndar sprautusteypan, bergboltarnir og gangaklæðningin varanlega styrkingu (Palmström & Stille, 2015).

Þessi aðferð til bergstyrkingar er samanborið við aðrar aðferðir afar dýr, tímafrek og erfið aðferð til bergstyrkingar. Í mörgum tilfellum eru stálbogar, bergbönd og/eða grindarbitar mjög æskilegir valmöguleikar. Því skal litið á staðsteyptar gangaklæðningar sem afarkost í gangagerð og notist þar sem berggæði eru einstaklega slæm.

Stálbogar

Segja má að stálbogar séu fyrirrennarar sprautusteypu- og grindarboga í gangagerð, en stálbogar eru þó notaðir ennþá við mjög slæmar gangagerðaraðstæður. Stálbogar eru annars vegar valsaðir í til þess gerðar einingar sem eru settar saman á staðnum. Hins vegar eru dæmi um að stálbogar séu beygðir úr venjulegum stálbitaþversniðum. Með bætingu í eiginleikum sprautusteypu og annarra styrkinga hefur þörf fyrir stálboga í gangagerð minnkað en stálbogar eru dýrir og erfiðir í notkun.

5.6. Aflfræðilegir eiginleikar bergstyrkinga

Við uppsetningu bergstyrkinga þarf að hafa í huga hvenær styrkingarnar eru settar upp auk þess að aflfræðilegir eiginleikar styrkinganna þurfa að standast það álag sem umlykjandi bergmassi mun óhjákvæmilega leggja á styrkingarnar. Þær bergstyrkingar sem eru valdar þurfa því að hafa styrk og stífni sem eru við hæfi í því bergi sem styrkja á. Hér verður gerð grein fyrir ákvörðun á áraun í þremur gerðum bergstyrkinga þ.e. bergboltum, sprautusteypu og fódningum.

Þessar þrjár gerðir bergstyrkinga eru teknar til umfjöllunar vegna þess að þær eru allar notaðar við líkanagerð síðar í þessari ritgerð og því vert að gera grein fyrir þeirri hugmyndafræði sem liggur að baki reikningum á aflfræðilegum eiginleikum styrkinganna.

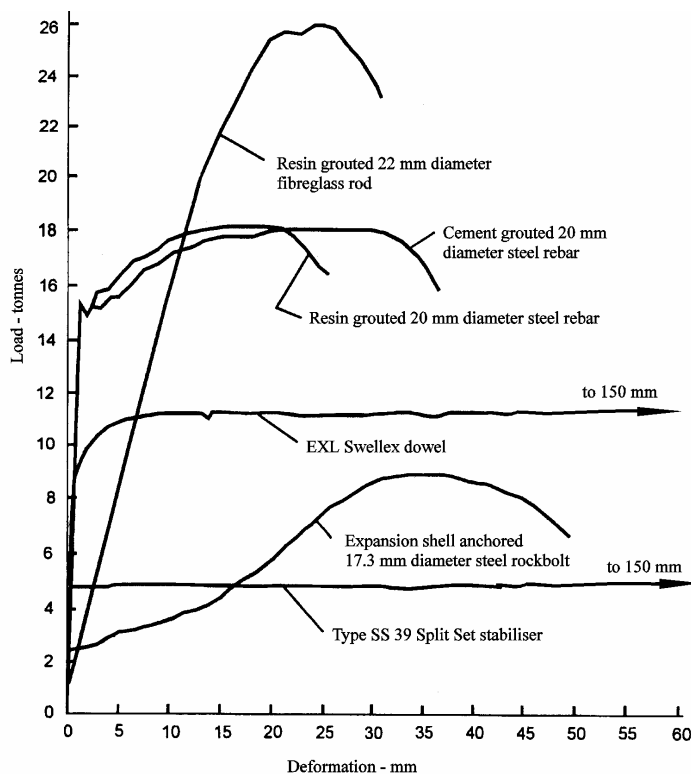
5.6.1. Bergboltar

Við hönnun og val á bergboltum þarf að ákvarðar hversu sterka og hversu langa bolta þarf til að bergstyrkingin verði áhrifarík. Þegar stakir boltar eru notaðir skiptir miklu máli að togþol boltans sé meira en nemur áætlaðri þyngd þeirrar bergblökka sem verið er að tryggja. Auk þess þarf að huga að því að lengd boltans sé næg til að hann geti fært kraft yfir í heillegra berg. Þessi lengd ákvarðast oft af þeim berggæðum/blokkarstærð sem talið er að bergmassinn hafi. Palmström (2000) gaf samband milli blokkarstærðar og lengdar bergbolta í þekju og veggjum þar sem D_t er spannganganna í metrum, D_b er þvermál bergblökkanna í metrum og W_t er hæð gangaveggjanna í metrum (Palmström & Stille, 2015).

$$L_{b,roof} = 1,4 + 0,175D_t \left(1 + \frac{0,1}{D_b}\right) \quad (5.1)$$

$$L_{b,wall} = 1,4 + 0,1(D_t + 0,5W_t) \left(1 + \frac{0,1}{D_b}\right) \quad (5.2)$$

Mynd 5.9 sýnir niðurstöður togprófana á nokkrum mismunandi gerðum bergbolta. Sjá má að mikill munur er á eiginleikum mismunandi bolta. Sumir boltar geta ekki tekið við miklu álagi en hafa mikla getu til formbreytinga á meðan aðrir boltar geta tekið við mun hærri álagi á kostnað getu til formbreytinga.



Mynd 5.9: Lenging mismunandi bergbolta við togálag (Hoek, 2007).

5. Um bergstyrkingu

Stífnistuðul k_b fyrir endafesta bergbolta með þvermál d og lengd l má áætla með líkingu 5.3 þar sem E_b er fjaðurstuðull stálsins í bergboltunum og s_c og s_l er bil milli bolta þvert á og í stefnu ganganna.

$$k_b = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{E_b}{l} \cdot \frac{1}{s_c \cdot s_l} \quad (5.3)$$

Togkraftur í innspenntum bergboltum er reiknaður í bergtækniforritinu RS^2 með líkingu 5.4 þar sem A er þverskurðarflatarmál bergboltans og lengd boltans L_b lengist um Δu_b (RocScience, 1985):

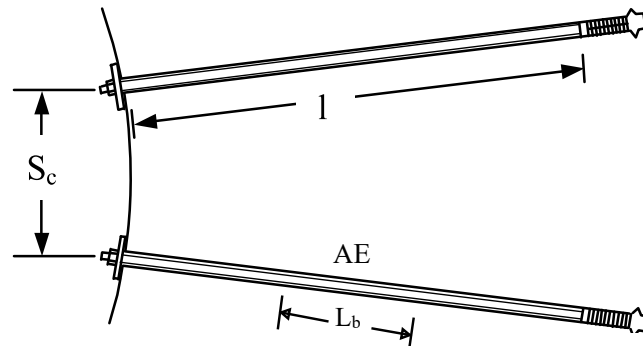
$$F_b = \frac{AE}{L_b} \Delta u_b = k_b \cdot \Delta u_b \quad (5.4)$$

Spennu í bergbolta má finna með eftirfarandi líkingu:

$$p_b = \frac{F_b}{s_c \cdot s_l} \quad (5.5)$$

Þessi togspenna getur þó aldrei orðið meiri heldur en hámarks togstyrkur bergboltanna sjálfra (jafna 5.6) þar sem σ_s er flotstyrkur stáls (Sigurður Erlingsson, 2013b).

$$p_{b,max} = \frac{\sigma_s \cdot \pi d^2}{4 s_c \cdot s_l} \quad (5.6)$$



Mynd 5.10: Inntaksstærðir fyrir útreikninga á aflfræðilegum eiginleikum bergbolta. Unnið eftir (RocScience, 1985; Sigurður Erlingsson, 2013b).

Til að meta öryggi bergbolta er hægt að setja fram öryggistuðul sem byggir á hlutfalli þeirrar spennu sem mælist í bergbolta og hámarksspennu sem bergboltinn þolir.

$$FS_b = \frac{p_{b,max}}{p_b} \quad (5.7)$$

5.6.2. Sprautusteypa

Stífnistuðul sprautusteypu k_c , fyrir steypulag með þykkt t_c í jarðgöngum með hringlaga þversnið, má reikna með líkingu 5.8 þar sem E_c er fjaðurstuðull steypu, ν_c er Poisson's stuðull steypu og r_i er geisli gangaþversniðsins.

$$k_c = \frac{E_c \cdot [r_i^2 - (r_i - t_c)^2]}{(1 + \nu_c)[(1 - 2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2] \cdot r_i} \quad (5.8)$$

Hámarksþrýstingur sem fódning úr sprautusteypu þolir má áætla með eftirfarandi líkingu 5.9 þar sem σ_c er einása þrýstistyrkur steypu.

$$p_{c,max} = \frac{1}{2}\sigma_c \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \quad (5.9)$$

Öryggisstuðul sprautusteypu má skilgreina á sama hátt og öryggisstuðul bergbolta.

$$FS_c = \frac{p_{c,max}}{p_c} \quad (5.10)$$

5.6.3. Fódningar

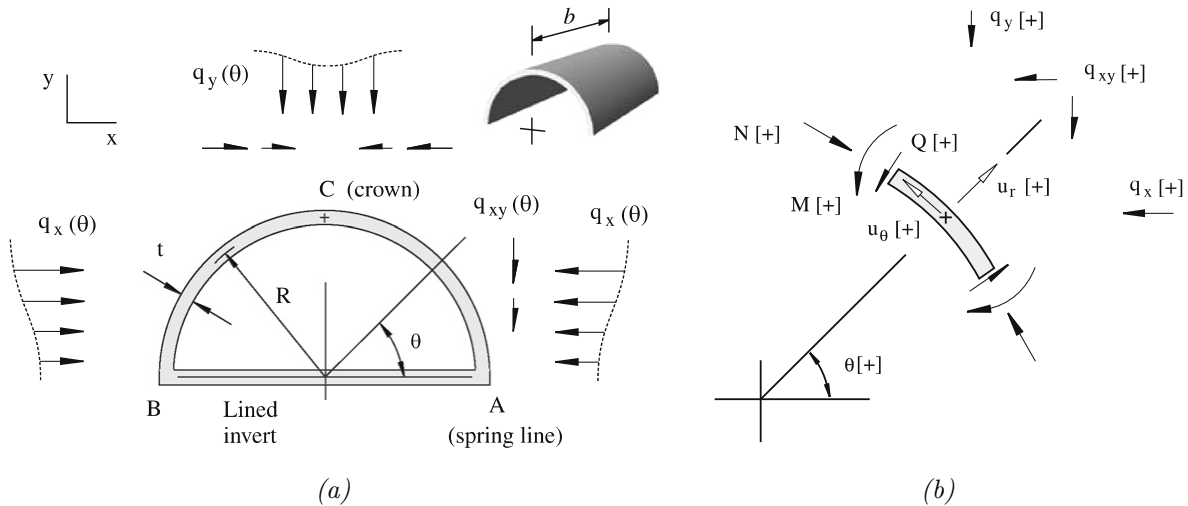
Til að meta áraun á samsettar (e. composite) fódningar í göngum (trefjastyrkt sprautusteypa, bergbönd og grindarvogar) má líta á fódningar sem sveigða, fjaðrandi bita þar sem álagið kemur frá bergfærslum (Carranza-Torres & Diederichs, 2009). Á mynd 5.11a sést hvernig kaffi jarðganga er skoðaður sem heilfóðraður hálfur sívalningur með breiddina $2R$ og þykktina t þar sem hver kaffi verður fyrir vissu álagi frá bergspennum. Á mynd 5.11b sést hvernig álag á hvern bita skiptist niður í áslægan þrýstikraft N , beygjuvægi M og skúfálag Q .

Setja má fram á myndrænan hátt samband þeirra álagsþátta sem verka á fódningar í göngum. Slík stuðningsgetugröf (e. Support Capacity Graph) innihalda lokaða ferla sem sýna hvernig öryggisstuðlar (e. Factor of Safety) marka ákveðið svæði þar sem talið er að styrkingin muni þola álagið. Utan við svæðið, sem er afmarkað af öryggisstuðlinum, er styrkingin talin ófullnægjandi. Stuðningsgetugröf, sem sýna samspil áslægs krafts N og beygjuvægis M annars vegar og áslægs krafts og skerkskrafts Q hins vegar, eru teiknuð fyrir fódningar í göngum (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Samspil áslægra krafta og beygjuvægis í sveigðum bita má setja fram á eftirfarandi hátt þar sem A er þverskurðarflatarmál, I er hverfitregða og t er þykkt bitans (jafna 5.11):

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot t/2 \quad (5.11)$$

5. Um bergstyrkingu



Mynd 5.11: (a) Álag vegna jarðvegs á heilfóðraðan hálfsválmning. (b) Formerkjahefð fyrir krafta og hreyfingar í fóðringum (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Gert er ráð fyrir að bitinn sé úr efni sem þólinn hámarks þrýstisþennur σ_c og hámarks (eða lágmarks) togþennur σ_t . Þá er öryggisstuðull bitans fyrir broti undir tog eða þrýstiáraun fenginn með jöfnu 5.12. Á mynd 5.12a má sjá hvernig hefðbundið er að hafa formerki þegar öryggisstuðull er ákveðinn.

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{min}} \quad (5.12)$$

Hægt er að sameina jöfnur 5.11 og 5.12 til að ákvarða hvar brotmörk fyrir áslægt álag og beygjuvægi liggja miðað við ákveðinn öryggisstuðul. Þetta á bæði við þegar þrýstisþenna σ_{max} er skoðuð sem og þegar togþenna σ_{min} í bitanum er skoðuð (jöfnur 5.13 og 5.14).

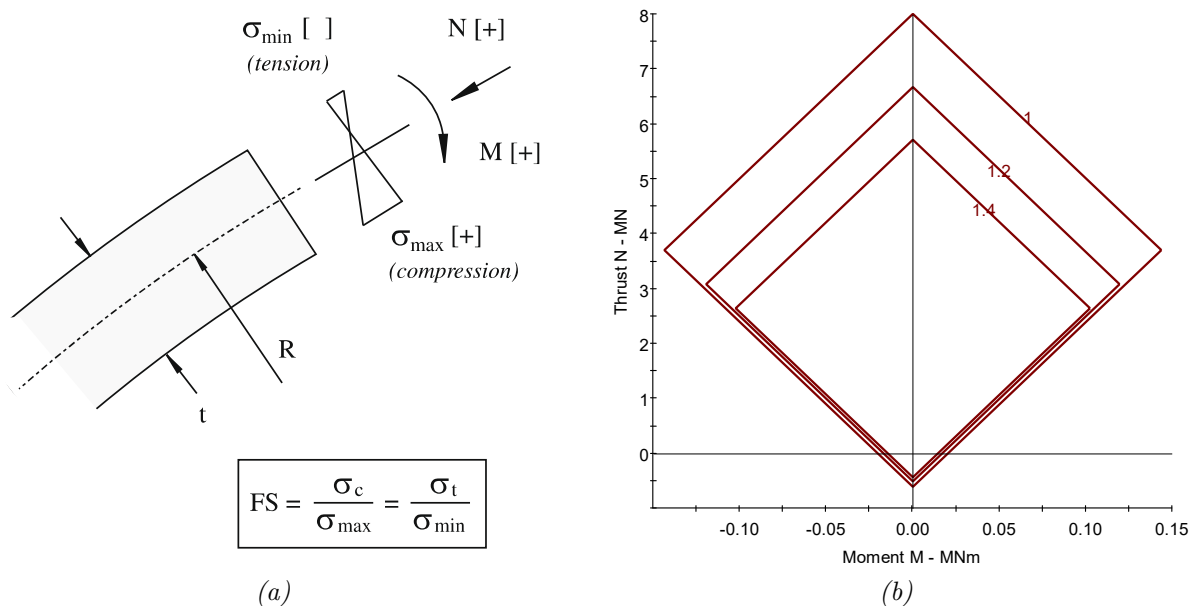
$$N_c = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (5.13)$$

$$N_t = -\frac{|M|At}{2I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (5.14)$$

Með því að sameina jöfnur 5.13 og 5.14 er mögulegt að finna hámarks beygjuvægi fyrir vissan öryggisstuðul gegn broti bæði vegna tog- og þrýstisþennu (jafna 5.15).

$$M_{cr} = \pm \frac{I}{t} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{FS} \quad (5.15)$$

Niðurstöður jafna 5.13 - 5.15 má setja fram á stuðningsgetugrafi (mynd 5.12b).



Mynd 5.12: a) FS skilgreindur með hámarks og lágmarks áslægum spennum. b) Stuðningsgetugraf fyrir áslæga krafta og beygjuvægi. Hver lína táknar ákveðinn öryggisstuðul (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Pegar skoða á stuðningsgetugraf fyrir áslægan þrýstikraft og skerkræft þarf að bera sig að á sambærilegan hátt og fyrir M-N gröfin sem lýst var áður. Líkt og í klassískum bitafræðum er gert ráð fyrir að stærsta skúfspennan í bitanum liggja á hlutlausu ás bitans, þar sem hvorki verður þrýsti- né togspenna og beygjuvægi er = 0. Stærstu skúfspennu í bita má reikna með jöfnu 5.16 (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

$$\tau_{max} = \frac{3Q}{2A} \quad (5.16)$$

Áslægi krafturinn sem verkar á bitann veldur normalspennu í bitanum (jafna 5.17).

$$\sigma_n = \frac{N}{A} \quad (5.17)$$

Finna má höfuðspennur bita í punkti C (sjá mynd 5.13a), sem staðsettur er á hlutlausu ás bitans. Til að finna höfuðspennur bita er jafna 5.18 notuð.

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{max}}{2}\right)^2 + \tau_{max}^2} \quad (5.18)$$

Öryggisstuðull Q-N grafs er fundinn á samskonar hátt og öryggisstuðull M-N grafs. Öryggisstuðlinum má því lýsa með jöfnu 5.19 hvort sem um ræðir brot vegna tog- eða þrýstispenntu.

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (5.19)$$

5. Um bergstyrkingu

Sameina má jöfnur fyrir höfuðspennur og öryggisstuðla (5.18 og 5.19) til að finna samband áslægs krafts og skerkskrafts við brot í efninu. Þetta á við bæði þegar þrýstispena σ_{max} er skoðuð sem og þegar togsþenna σ_{min} í bitanum er skoðuð (jöfnur 5.20 og 5.21).

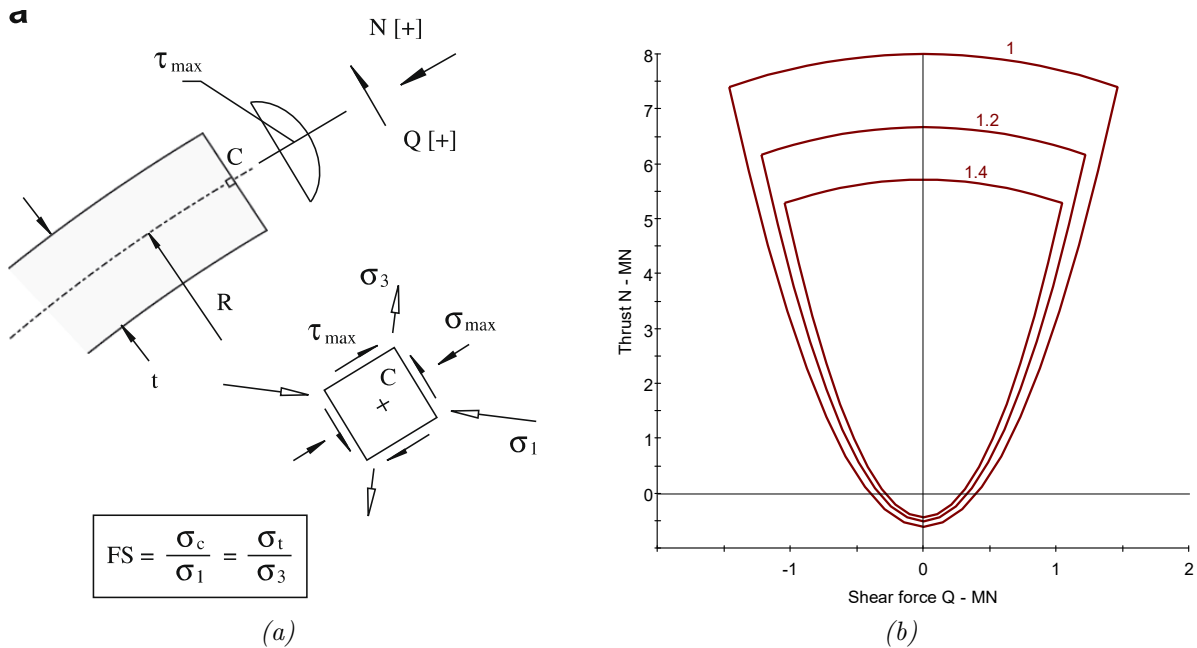
$$N_c = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9 Q^2 FS}{4 \sigma_c A} \quad (5.20)$$

$$N_t = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9 Q^2 FS}{4 \sigma_t A} \quad (5.21)$$

Með því að sameina jöfnur 5.20 og 5.21 er mögulegt að finna hámarks skerkskraft fyrir vissan öryggisstuðul gegn broti bæði vegna tog- og þrýstispena (jafna 5.22).

$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (5.22)$$

Athuga skal að í jöfnu 5.22 er σ_t neikvæð tala. Því næst má teikna upp stuðningsgetugraf fyrir áslæga krafta og skerkskrafta (mynd 5.13b).



Mynd 5.13: a) FS skilgreindur með hámarks og lágmarks höfuðspennum. b) Stuðningsgetugraf fyrir áslæga krafta og skerkskrafta. Hver lína táknar ákveðinn öryggisstuðul (Carranza-Torres & Diederichs, 2009).

Nánari upplýsingar um útreikning á styrk samsettra bergstyrkinga má nálgast í Carranza-Torres & Diederichs (2009).

6. Jarð- og bergtækniforritið RS^2

Hægt er að líkja eftir aðstæðum við gangagerð með forritum sem byggja á svokallaðri einingaraðferð (e. Finite Element Method). Einingaraðferðin byggir á því að skipta stórum eða flóknum hlutum niður í smærri og einfaldari einingar (e. elements) sem tengd eru saman á hnútpunktum (e. nodes). Greining með einingaraðferðinni felst í því að ákvarða hvernig þessir hnútpunktar hreyfast í samanburði við hvern annan. Þegar fjöldi eininga er ákveðinn skiptir máli hvaða staður er álitinn mikilvægastur. Eftir því sem einingarnar verða fleiri á hverjum stað verður greiningin nákvæmari. Reikningar byggja á efniseiginleikum þess efnis sem verið er að skoða og þannig má líkja eftir hegðun efnisins undir álagi (Morgan et al., 1981).

Í þessu meistaraverkefni verður bergtækniforritið RS^2 notað til þess að líkja eftir aðstæðum í Vaðlaheiðargöngum. RS^2 (áður *Phase²*) er jarð- og bergtækniforrit, hannað af kanadíska fyrirtækinu Rocscience. Með RS^2 má vinna tvívíða greiningu á hegðun bergmassa, jarðefna og bergstyrkinga við framkvæmdir með notkun einingaraðferðar.

Þar sem útreikningar á hegðun bergmassa vegna jarðgangagerðar geta verið flóknir og tímafrekir eru jarðtækniforrit sem nýta sér einingaraðferðina einkar heppileg til reikninga á spennu- og formbreytingum í bergmassa umhverfis framkvæmdir auk virkni bergstyrkinga. RS^2 getur reiknað færslur og hreyfingar sprunga í bergmassanum, þróun spennuástands við framkvæmdir, hreyfingu grunnvatns og öryggi bergstyrkinga. Greining á bergmassa í RS^2 er byggð á brotlíkingum Hoek og Brown og Mohr-Coulomb og geta jarðgöng legið í margskiptum og sprungnum jarðlögum. Til þess að greining með einingaraðferð skili árangri þarf þó að passa upp á að inntaksstærðir forritsins séu skilgreindar á skynsaman hátt (RocScience, 2016).

6.1. Efniseiginleikar bergs í RS^2

Áður en brotþoli er náð

Bergspennur má skilgreina á tvennan hátt í RS^2 . Annars vegar má skilgreina stöðugt spennusvið þar sem höfuðspennurnar eru fyrirfram ákvarðaðar með mælingum. Hins vegar má nota bergspennur vegna þyngdar bergmassa og stuðulinn k . Stöðugt spennusvið er mest notað til að skilgreina bergspennur við framkvæmdir á tiltölulega miklu dýpi. Við framkvæmdir nær yfirborðinu hentar betur að nota bergspennur vegna þyngdar bergmassa (RocScience, 2016).

6. Jarð- og bergtækniforritið RS^2

Í þessu verkefni er bergmassi skilgreindur sem fjaðrandi-deigt efni sem hefur mismunandi eiginleika fyrir og eftir brot og fer eftir brotlíkingu Hoek og Brown. Við skilgreiningu á efnisstuðlum verður að hafa í huga bæði þær inntaksstærðir sem brotlíkingin tekur inn (jöfnur 3.1-3.5) auk fjaður- og Poisson stuðla. Til að meta þessa stuðla er hægt að styðjast við rannsóknir á efniseiginleikum sem gerðar hafa verið á bergi á nærsvæðum eða styðjast við viðmiðunargildi á σ_{ci} og m_i , sem eru byggð inn í RS^2 (Hoek, 2007).

Frekari skilgreiningar á eiginleikum bergmassa svo sem val á GSI gildi bergmassa er innbyggt í RS^2 og má þannig meta hversu sprungið bergið er. Einnig er hægt að skilgreina stök sprungukerfi og eiginleika þeirra í líkönum forritsins en þetta gerir líkón erfiðari í keyrslu auk þess sem mælingar á eiginleikum sprungukerfa í gangagerð liggur yfirleitt ekki fyrir og því er GSI stuðullinn notaður til að lýsa sprungum í bergi. Annar stuðull sem er tekinn inn í líkanagerð á bergmassa er röskunarstuðullinn D. Þegar sprengingar í bergi eru framkvæmdar rétt má gera ráð fyrir að $D=0$ (Hoek, 2007). Þegar efniseiginleikar bergmassans hafa verið skilgreindir má teikna upp brotlíkingu hvers efnis með forritinu RocData, sem er einnig frá RocScience.

Eftir að brotþoli er náð

Þar sem líkt er eftir bergmassa með mismunandi eiginleika fyrir og eftir brot þarf að skilgreina hvernig eiginleikar bergmassans verða. Við þróun forritsins $Phase^2$, sem er fyrirrennari RS^2 , voru þróaðar leiðir til að ákvarða hvaða stuðlar brotlíkingar Hoek og Brown breyttust eftir að brot hafði orðið í bergmassanum. Eftir ráðfæringar milli fræðimanna í bergtækni og leiðandi aðila í notkun $Phase^2$ var af ráðið að nauðsynlegt væri að geta lækkað stuðlana m_b , s og a til að líkja eftir bergi sem hefur náð brotþoli (Crowder & Bawden, 2004).

Þar sem þessir stuðlar tengjast allir stuðlinum GSI lá beinast við að reikna breytingar á Hoek og Brown stuðlunum út frá breyttu GSI gildi eftir brot (Crowder & Bawden, 2004). Nú er það svo að RS^2 reiknar nýja Hoek og Brown stuðla út frá skilgreindum GSI gildum fyrir og eftir brot. Eftir frekari athuganir var talið ráðlegt að nýtt GSI gildi eftir brot væri skilgreint sem:

$$GSI_e = 0,7 \cdot GSI \quad (6.1)$$

Til að líkja eftir útpenslu bergmassa vegna skerálags var þróaður svokallaður útvíkkunarstuðull (e. dilation parameter). Í þróunarferli $Phase^2$ deildi Dr. Hoek sínum eigin viðmiðum við ákvörðun útvíkkunarstuðulsins við reikninga á hegðun bergmassa (Crowder & Bawden, 2004). Erfitt getur reynst að meta hver útvíkkunarstuðull bergs er svo í þessu verkefni verða viðmið Dr. Hoek notuð til gerðar efnismóðela. Útvíkkunarstuðull bergmassa er alla jafna lágur og fyrir berg með $GSI \leq 30$ er hann hafður 0 þar sem engin útvíkkun er talin verða við skerálag í svo lélegu bergi. Fyrir sprungið berg á bilinu $50 < GSI < 65$ er jafna 6.2 notuð við ákvörðun á útvíkkunarstuðli bergmassans.

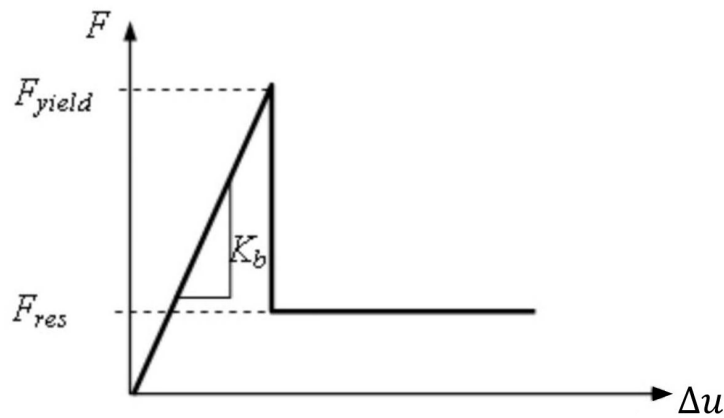
$$\text{Útvíkkunarstuðull} = 0,3m_r \quad (6.2)$$

6.2. Efniseiginleikar bergstyrkinga í RS^2

Til að líkja eftir bergstyrkingum í RS^2 þarf að skilgreina þá efniseiginleika bergstyrkinga sem greint er frá í kafla 5.6. Upplýsingar um eiginleika þeirra bergbolta, grindarbita og sprautusteypu sem líkja á eftir má nálgast hjá framleiðendum téðra bergstyrkinga auk þess sem dæmigerð gildi fyrir styrkingar eru byggð inn í RS^2 .

Í RS^2 er bergstyrkingum skipt upp í einingar, eins og bergmassanum. Stærð þessara eininga fer eftir stærð þeirrar bergveiningar sem styrkingin snertir ásamt þeirri stefnu sem styrkingin fer í gegn um bergið. Hver bergbolti og sprautusteypu eining samanstendur því af mismörgum og misstórum einingum. Einingar við yfirborð ganganna og á krítískum stöðum s.s. við lagskiptingar og sprungur eru minni en annarstaðar í líkaninu til að fá meiri nákvæmni við reikninga (RocScience, 2016).

Innsteyptir bergboltar í RS^2 eru taldir hafa náð fullri toggetu þegar togkraftur í boltanum nær flotstyrk og er þá styrkur bolta lækkaður niður í varastyrk (e. residual strength), sem í þessu verkefni er gert ráð fyrir að sé 10% af flotstyrk bergboltans. Þessi varastyrkur kemur til vegna bindingar boltans við bergmassann með boltagraut og því geta bergboltar enn tekið við álagi eftir að flotástand næst. Auk þess geta þær einingar boltans sem ekki fara í flotástand ennþá tekið við álagi þó hlutar boltans hnígi og að bolti sé ekki endanlega fallinn fyrr en öll lengd boltans er kominn í flotástand (RocScience, 1985).



Mynd 6.1: Brotskilyrði fyrir innsteypta bergbolta í RS^2 .

Sprautusteypueningar eru hugsaðar sem bitaeiningar sem skipt er í 100 lög. Ef samanlagt álag áslægra- og beygjukrafta fer yfir flotmörk efnisins í vissri einingu sprautusteypulagsins er sú eining talin vera farin í flot. Þetta á þó bara við þá einingu og geta því aðrir hlutar sprautusteypuskeljarinnar ennþá borið álag (RocScience, 1986).

6.3. Spennulosun og bergfærslur með RS^2

Til að líkja eftir raunverulegri spennulosun við gangagerð býður RS^2 upp á að líkja eftir fallandi þrýstispennu við yfirborð jarðganga og útbúa bergfærsluferla. Samskonar aðferðum er beitt til að líkja eftir því að um 80% af þrýstispennu á yfirborð jarðganganna hefur fallið áður en bergstyrkingar eru settar upp í göngunum (RocScience, 2015). Nánar er fjallað um spennulosun í bergmassa í kafla 3.5.

Ekki eru til nein viðmið fyrir ásættanlegar heildarbergfærslur í jarðgangagerð en reynsla sýnir að fyrir bergfærslur sem eru allt að 2% af þvermáli gangaþversniðsins dugi hefðbundnar styrkingar með bergboltum og sprautusteypu (Hoek & Marinos, 2000). Þegar um stærri bergfærslur er að ræða er algengt að taka þurfi til sérstakra ráðstafana í bergstyrkingum, s.s. notkun grindarboga.

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum

Við val á rannsóknarsvæðum voru nokkur atriði höfð að leiðarljósi. Í fyrsta lagi var leitað að svæðum þar sem Q-gildi var skráð og eiginleikar bergsins voru svipaðir á u.þ.b. 30m löngum kafla. Þetta var gert til að auðvelda samanburð fræða og hönnunar. Með því var reynt að koma í veg fyrir áhrif frá jarðlögum sitthvoru megin við rannsóknarsvæðin. Einnig var sú krafa gerð að þversnið ganganna á rannsóknarsvæðunum væri einsleitt með kennisnið T9,5 og að engin útskot eða önnur aukarými væru á rannsóknarsvæðum. Með því varð magntaka bergstyrkinga, samanburður milli mismunandi rannsóknarsvæða og ákvörðun og aflestur styrkinga með Q-kerfinu auðveldari.

Hér á eftir, í kafla 7.1, verður farið yfir hönnunarforsendur bergstyrkinga skv. Q-kerfinu. Í köflum 7.2, 7.3 og 7.4 verða svo rannsóknarsvæðin skoðuð og bornar saman uppsettar bergstyrkingar við fyrirskrifaðar bergstyrkingar skv. Q-kerfinu. Þau Q-gildi, sem notuð eru í þessari greiningu, eru fengin úr jarðfræðikortlagningarskýrslum verktakans Ósafi (Sigurjón Vídalín, 2016e). Dæmi um slíkar skýrslur má finna í viðauka D.

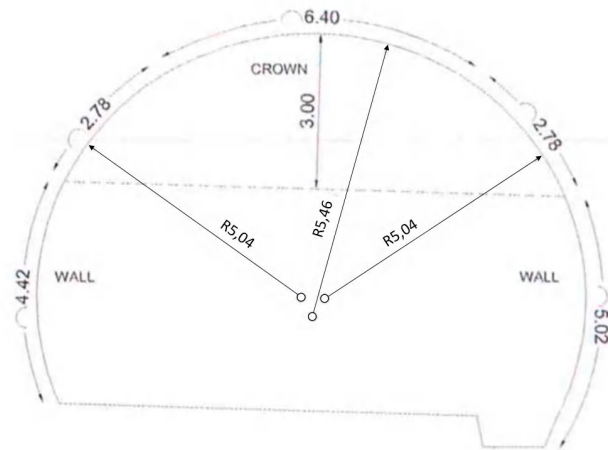
Upplýsingar um uppsettar bergstyrkingar eru fengnar úr samantekt eftirlits Vaðlaheiðarganga á bergstyrkingum (Stefán Geir Árnason, 2016) og jarðfræðiyfirlitum af Vaðlaheiðargöngum (Sigurjón Vídalín, 2016e). Athuga skal að á þeim tíma sem þessi ritgerð er skrifuð á eftir að ákveða lokastyrkingu á rannsóknarsvæðunum.

7.1. Hönnunarforsendur bergstyrkinga skv. Q-kerfi í Vaðlaheiðargöngum

Í þessari ritgerð fer hönnun bergstyrkinga í Vaðlaheiðargöngum eftir nýjustu leiðbeiningum norsku jarðtæknistofnunarinnar, Norwegian Geotechnical Institute (2013), um notkun Q-kerfisins. Auk þess er gert ráð fyrir að þvermál Vaðlaheiðarganga sé 10m þar sem alltaf er gert ráð fyrir einhverju yfirbroti við gangagerð. Raunþvermál ganganna miðað við hönnunarteikningar er 10,08m (mynd 7.1). Einnig verður gengið út frá ESR gildi 1 þar sem hér er um veggöng að ræða. Því verður jafngildisumfang ganganna 10m (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum

Til að geta ákvarðað magn styrkinga á m^2 yfirborðs ganga er nauðsynlegt að þekkja lengdir veggja og þekju, en þessar stærðir má sjá á mynd 7.1. Til að einfalda afllestur styrkingamagns eru sett upp gröf sem sýna hvernig styrkingamagn breytist með breytilegu Q-gildi, miðað við þær hönnunarforsendur sem gefnar hafa verið. Fundinn er besti ferill í gegnum hvert graf og farið eftir þeim ferli við ákvörðun styrkingamagnsins.



Mynd 7.1: Hönnunarmörk kennisniðs Vaðlaheiðarganga (Sigurjón Vídalín, 2016b).

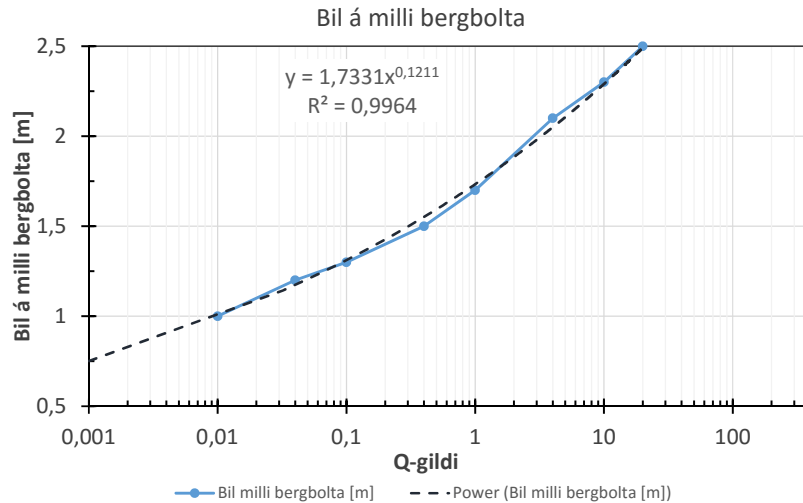
7.1.1. Bergboltar

Við þær forsendur sem gefnar eru um hönnun ganganna og jafngilt umfang = 10m gerir Q-kerfið ráð fyrir að notaðir séu 3m langir bergboltar til styrkingar. Q-kerfið mælir þó með notkun lengri bolta þegar Q-gildið lækkar og jafngilt umfang stækkar. Ef bilið milli bergbolta í trefjastyrktri sprautusteypu er lesið af mynd 4.2 fást þau gildi sem sýnd eru í töflu 7.1.

Tafla 7.1: Samband Q-gildis og ráðlagðs bils milli bergbolta (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Q-gildi	Bil milli bolta [m]
20	2,5
10	2,3
4	2,1
1	1,7
0,4	1,5
0,1	1,3
0,04	1,2
0,01	1

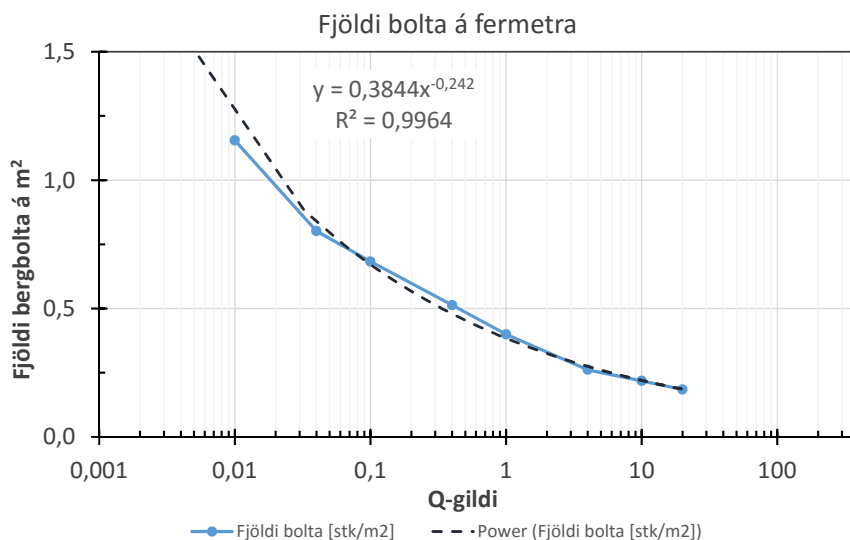
Út frá þessum gildum má setja upp graf og finna besta feril í gegnum gögnin og því einfaldast afllestur fyrir mismunandi Q-gildi (mynd 7.2).



Mynd 7.2: Samband Q-gildis og ráðlagðs bils milli bergbolta.

Q-kerfið gefur áætlað bil milli bergbolta en til að geta ákvarðað hversu marga bergbolta þarf á hvern fermetra þarf að ákvarða hversu mikið svæði hver bergbolti hefur til umráða. Þar af leiðandi verður gert ráð fyrir því hér að hver bergbolti sé í miðju sexhyrnings. Þar með helst áætlað bil, skv. Q-gildi, frá einum bolta í alla bolta umhverfis þann fyrsta. Jafna 7.1.1 er jafna fyrir flatarmál sexhyrnings, þar sem $h = b$ stendur bæði fyrir bil milli bergbolta og hæð sexhyrningsins. Þar með má setja fram samband Q-gildis og fjölda bergbolta á fermetra (mynd 7.3).

$$A = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot h^2 \quad (7.1)$$



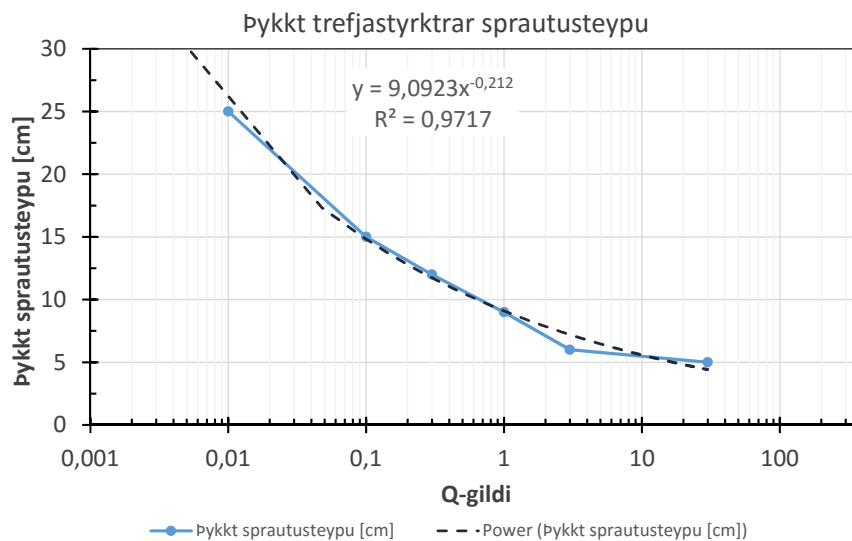
Mynd 7.3: Samband Q-gildis og fjölda bergbolta á m².

7.1.2. Trefjastyrkt sprautusteypa

Sömu hönnunarskilyrði gilda þegar hanna á þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu og þegar bil milli bergbolta var hannað. Þegar lesið er af hönnunargildum Q-kerfisins, fyrir jafngilt umfang = 10m, fæst eftirfarandi samband Q-gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu (tafla 7.2):

Tafla 7.2: Samband Q-gildis og ráðlagðrar þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

Q-gildi	Þykkt trefjastyrktrar sprautusteypu [cm]
30	5
3	6
1	9
0,3	12
0,1	15
0,01	25
0,001	-



Mynd 7.4: Samband Q-gildis og þykktar trefjastyrktrar sprautusteypu.

Út frá þessu grafi má því finna hversu þykkt lag af trefjastyrktri sprautusteypu þarf til styrkingar í göngunum. Til að finna rúmmál þeirrar sprautusteypu sem er notuð hverju sinni þarf aðeins að margfalda þykkt sprautusteypannar með því flatarmáli gangayfirborðsins sem hún þekur.

7.1.3. Sprautusteypu- og grindarbogar

Þegar berggæði verða mjög léleg (þ.e. $Q \leq 1$) mælir Q-kerfið með notkun sprautusteypuboga til viðbótar við notkun trefjastyrktrar sprautusteypu og bergbolta eins og lýst var í köflum hér á undan. Sprautusteypubogum er komið fyrir með vissu millibili, sem ræðst af berggæðum á hverjum stað, og þeir huldur sprautusteypu. Auk þess að bil milli sprautusteypuboga ræðst af berggæðum mælir Q-gildið einnig fyrir um hversu mörg lög af steypustyrktarstáli skal nota og hversu þykkt sprautusteypulag skal haft yfir rifjunum. Með aflestri af styrkingagrafi Q-gildisins fyrir sömu hönnunarforsendur og áður fást gildi sem gefin eru í töflu 7.3.

Tafla 7.3: Samband Q-gildis, bils milli sprautusteypurifja, fjölda laga af steypustyrktarjárnnum og heildarþykktar sprautusteypu (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

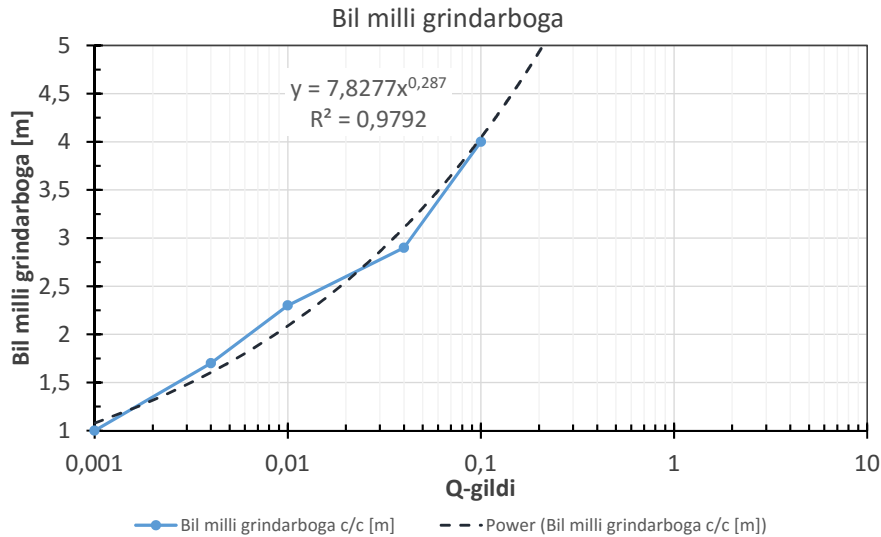
Q-gildi	Bil á milli rifja [m]	Fjöldi laga af steypustyrktarjárnnum	Þykkt sprautusteypu [cm]
0,4	-	1	30
0,1	4	1	30
0,04	2,9	2	45
0,01	2,3	2	45
0,004	1,7	2	55
0,001	1	2	55

Í leiðbeiningum með Q-gildinu er fjallað um notkun sprautusteypuboga til styrkingar í göngum. Á þeim rannsóknarsvæðum sem fjallað er um í þessu verkefni eru eingöngu notaðir grindarbogar en virkni þeirra er áþekkt sprautusteypubogum (Palmström & Stille, 2015).

Þar sem lögun grindarboga er fyrirfram ákveðin eiga gildi fyrir *fjölda laga af steypustyrktarjárnnum* og *þykkt sprautusteypu* í töflu 7.3 ekki við. Setja má upp graf til að auðvelda aflestur fyrir bil milli grindarboga eins og gert er á mynd 7.5. Í rannsókn þessarar ritgerðar verður gert ráð fyrir því að ef Q-kerfið mælir fyrir um notkun grindarboga sé allavega einn grindarbogi settur upp, þó að fyrirskrifað bil milli grindarboga sé stærra en lengd færunnar. Þar af leiðandi verður að lágmarki að vera einn grindarbogi í hverri færú þar sem þörf er á grindarboga. Til að reikna út fjölda grindarboga í hverri færú skal jafna 7.2 notuð.

$$\text{Fjöldi boga í færú} = \begin{cases} \frac{\text{Lengd færú}}{\text{Bil milli boga}} & \text{ef bil milli boga} < \text{lengd færú} \\ 1 & \text{ef bil milli boga} \geq \text{lengd færú} \end{cases} \quad (7.2)$$

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum



Mynd 7.5: Samband Q-gildis og bils milli grindarboga.

Á svæðum þar sem grindarbogar eru notaðir verður að gera sérstakar ráðstafanir varðandi magn sprautusteypu. Í Vaðlaheiðargöngum er notast við allt að 180mm þykkt lag af trefjastyrktri sprautusteypu undir grindarboga sem jöfnunarlag og vinnustyrkingu. Auk þess lags þarf að hylja grindarbogann í trefjastyrktri sprautusteypu en til þess að reikna steypumagn sem fer í það er gert ráð fyrir að þverskurður hvers grindarbita eftir uppsetningu sé trapísulaga. Eins og sést á mynd 7.6a eru grindarbogar sem notaðir eru í Vaðlaheiðargöngum með fjögur 20mm sver burðarjárn, sem tengd eru saman með 10mm sverum tengijárum.

Þverskurðarflatarmál sprautusteypu, sem notuð er í grindarbita í Vaðlaheiðargöngum, er reiknuð með jöfnu fyrir flatarmál trapísu (jafna 7.3). Gert er ráð fyrir að lágmarks steypuhula yfir grindarboganum sé 50mm en inntaksstærðir þverskurðarflatarmáls grindarboganna eru:

$$h = H + 50mm$$

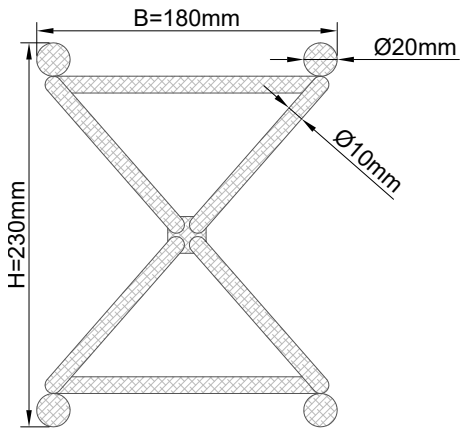
$$b_{topp} = B + 50mm$$

$$b_{botn} = 5 \cdot B + 50mm$$

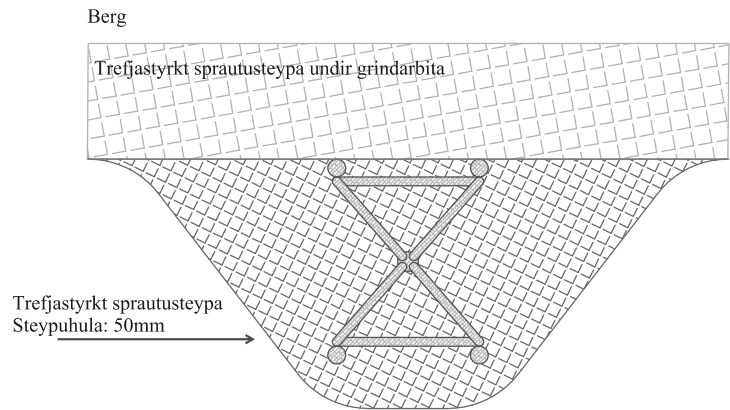
Athuga skal að þverskurðarflatarmál grindarinnar sjálfrar er ekki fjarlæggt úr flatarmálsreikningunum þar sem mikil skekkja er fyrir í reikningum á sprautusteypu, vegna ofanbrots og hrjúfleika yfirborðs jarðganganna.

$$A = \frac{b_{topp} + b_{botn}}{2} \cdot (h) \quad (7.3)$$

Samkvæmt þessu verður þverskurðarflatarmál hvers grindarbita fyrir utan undirlag nálægt $0,17m^2$ en út frá því má reikna með að fari rétt um $3,5m^3$ af sprautusteypu í hvern grindarbita. Sýnt er á mynd 7.6b hvernig trapísuform sprautusteypuhulunnar er ákvarðað. Vert er að athuga að hér er ekki um mjög nákvæmt mat að ræða.



(a) Fjögurra banda grindarbiti.

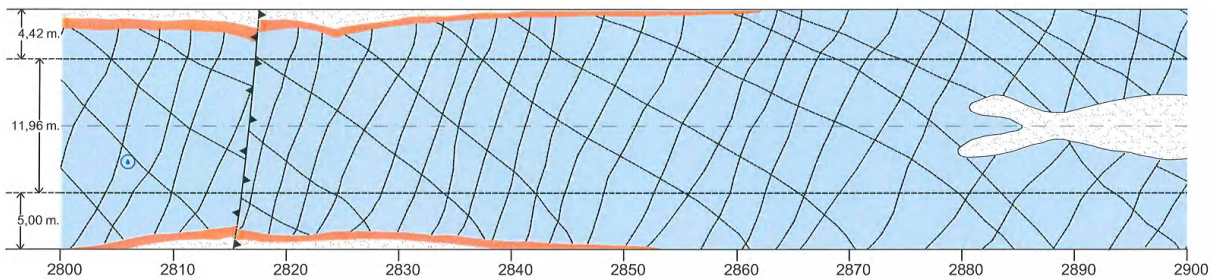


(b) Steypuhula grindarbita.

Mynd 7.6: a) Þverskurðarmynd af grindarbita eins og er notaður í Vaðlaheiðargöngum.
 b) Þverskurðarmynd af áætlaðri steypuhulu grindarbita í Vaðlaheiðargöngum.
 Myndir gerðar eftir (DYWIDAG-System International, 2004)

7.2. Rannsóknarsvæði 1

Rannsóknarsvæði 1 er 48,5m langur kaffi, staðsett milli stöðva 2839,5 og 2883,0 Eyjafjarðarmegin í Vaðlaheiðargöngum. Rannsóknarsvæðið einkennist af lítið ummynduðu basalti með tveimur sprungukerfum. Þó nokkuð er um að sprungur á rannsóknarsvæði 1 séu fylltar með sprungufyllingum. Í sitthvorum enda rannsóknarsvæðisins má finna annars vegar setberg, sem er rauðleitt og frekar veikt og hins vegar má finna karga sem er brúnleitur, þéttur og vel samlímdur. Engrar vætu var að gæta á þessum slóðum (Sigurjón Vídalín, 2016e).



Mynd 7.7: Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 1 (Sigurjón Vídalín, 2016e).

Q-gildi basaltsins er mælt 16,7 eftir öllu rannsóknarsvæðinu og því telst bergið gott (e. good) til gangagerðar. Q-gildi kargans er 10,8, sem telst ennþá nokkuð gott til gangagerðar, og Q-gildi setsins er 1,1 sem telst slakt (e. poor) efni skv. Q-kerfinu. Karginn og setið hafa örlítið áhrif í sitthvorum enda rannsóknarsvæðisins svo heildar Q-gildi lækkar örlítið á þessum stöðum. Þessi áhrif eru þó óveruleg þar sem rannsóknarsvæðið er mjög einsleitt og því þægilegt í útreikningi.

Tafla 7.4: Tafla með inntaksstærðum fyrir rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Upphaf [m]	Endir [m]	Lengd [m]	Meðaltal Q-gildis		
				Vinstri	Þekja	Hægri
1-7	2834,5	2868	33,5	15,0	16,7	15,6
8	2868	2873	5	16,7	16,7	16,7
9	2873	2878	5	16,7	16,7	16,7
10	2878	2883	5	16,7	15,9	16,7
		Σ	48,5			

7.2.1. Hönnun bergstyrkinga skv. Q-kerfi

Niðurstöður fyrir hannað magn bergstyrkinga skv. Q-kerfi má sjá annars vegar í töflu 7.5 fyrir bergbolta og hins vegar 7.6 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu. Tekið skal fram að töflurnar sem hér fylgja á eftir hafa verið styttað til að gefa áhugaverðum svæðum á gangaleiðinni frekari gaum, svo og þeim svæðum sem gerð hafa verið líkön af.

Þessar töflur, auk tafla þar sem Q-gildi eru aðlöguð fyrir notkun í veggjum ganga, má finna í viðauka E.

Tafla 7.5: Hannað magn bergbolta fyrir rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Meðalbil bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Meðaltal Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
1-7	3,0	2,5	3,0	7	81	7	2,8
8	3,0	2,5	3,0	1	12	1	2,8
9	3,0	2,5	3,0	1	12	1	2,8
10	3,0	2,5	3,0	1	12	1	2,8
	Σ			10	117	10	

Tafla 7.6: Hannað magn trefjastyrktrar sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Meðalþykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			Meðaltal m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
1-7	3,6	5,0	3,6	1,6	20,1	1,7	0,7
8	3,6	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
9	3,6	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
10	3,6	5,1	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
	Σ			2,3	29,1	2,5	

7.2.2. Uppsettar bergstyrkingar

Sjá má samantekt uppsettra bergstyrkinga annars vegar í töflu 7.7 fyrir bergbolta og hins vegar 7.8 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu. Allir bergboltar sem settir voru upp á rannsóknarsvæði 1 voru 3m langir innsteyptir bergboltar.

Tafla 7.7: Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Meðalbil milli bergbolta [m]	Fjöldi bolta [stk]	Meðaltal Boltar/m
1-7	2,1	91	2,7
8	2,1	13	2,6
9	2,1	13	2,6
10	2,1	13	2,6
	Σ		130

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum

Tafla 7.8: Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Meðalþykkt steypu [cm]		Magn steypu [m^3]		Meðaltal m^3/m
	Þekja	Veggir	Þekja	Veggir	
1-7	8	4	32,1	3,6	1,1
8	8	4	4,8	0,5	1,1
9	8	4	4,8	0,5	1,1
10	8	4	4,8	0,5	1,1
		Σ	46,5	5,3	

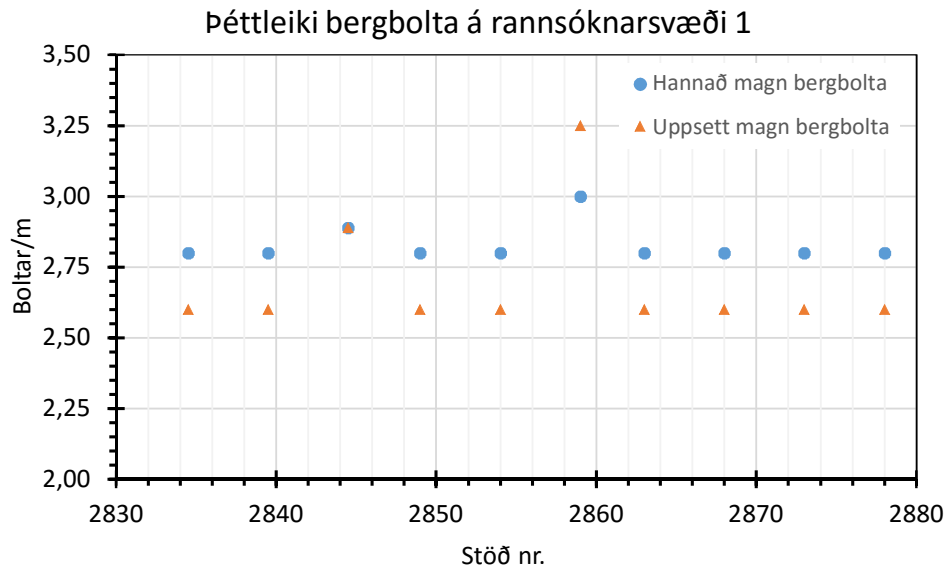
7.2.3. Samanburður

Samanburður á þörf fyrir bergstyrkingar skv. Q-kerfinu og uppsettum bergstyrkingum má sjá í töflu 7.9. Sjá má að góð fylgni er á milli fjölda uppsettra bergbolta og þess fjölda sem Q-kerfið gerir ráð fyrir að séu notaðir þó að færri bergboltar hafi verið settir upp í raun. Þar sem ekki er búið að ákveða endanlegt magn styrkinga á þessu svæði getur fjöldi uppsettra bergbolta aukist þegar fram líða stundir.

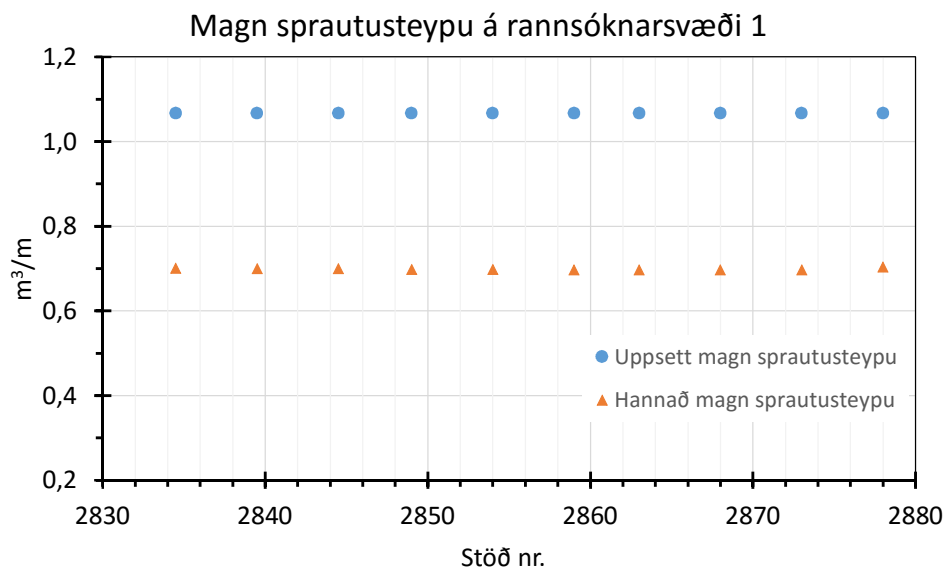
Tafla 7.9: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettum bergstyrkingum á rannsóknarsvæði 1.

	Bergboltar [stk]	Sprautusteypa [m^3]
Q-kerfi	137	33,9
Uppsett	130	51,8
Frávik frá Q-kerfi	-5,4%	34,5%

Samkvæmt þeim upplýsingum sem fengust um notkun sprautusteypu er um 34,5% meiri steypa notuð en áætlað er miðað við Q-kerfið. Þetta auka magn útskýrist að hluta til vegna þess að í vissum tilfellum er einnig sprautað á stafn ganganna til að tryggja að ekki hrynji úr honum þegar verið er að bora fyrir næstu færur ganganna (Sigurjón Vídalín, 2016c). Auk þess fer aukið magn sprautusteypu í frákast af yfirborði ganganna, sléttun á hrjúfu yfirborði bergsins og yfirbrot í jarðgangapversniðinu. Sjá má myndrænan samanburður á magni bergstyrkinga á rannsóknarsvæði 1 á myndum 7.8 og 7.9.



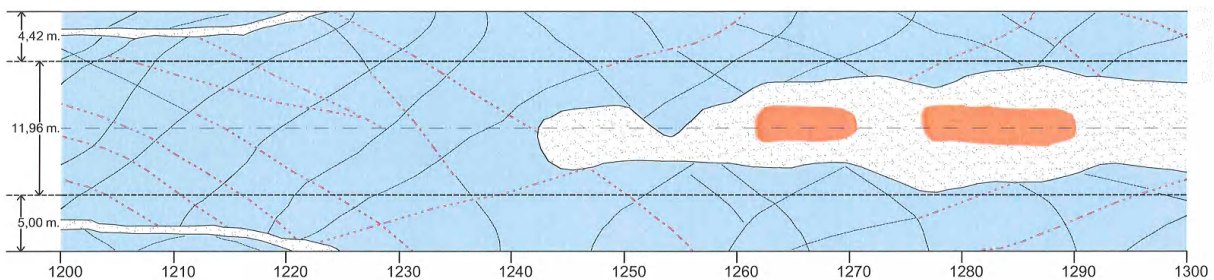
Mynd 7.8: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q -gildi og uppsettum bergboltum á rannsóknarsvæði 1.



Mynd 7.9: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q -gildi og uppsettu magni sprautusteypu á rannsóknarsvæði 1.

7.3. Rannsóknarsvæði 2

Rannsóknarsvæði 2 er 54m langur kafli, staðsett á milli stöðva 1248,5 og 1297,5, Eyjafjarðarmegin í Vaðlaheiðargöngum. Jarðfræði rannsóknarsvæðisins einkennist að mestu af fremur þéttu basalti með tveimur sýnilegum sprungukerfum. Þegar farið er eftir rannsóknarsvæðinu breytist bergið aðeins og því er lýst sem töluvert ummynduðu en nokkuð þéttu, með miklu af hvítum holufyllingum (Sigurjón Vídalín, 2016e). Sprungur í berginu eru fylltar með leir en einnig má finna leir á opnum sprunguflötum. Í þekju rannsóknarsvæðisins má finna lög af annars vegar seti og hins vegar karga. Karganum er lýst sem rauðleitum og vel samlímdum en hann inniheldur töluvert af hvítum holufyllingum á meðan setið er rauðleitt og mjög veikt (Sigurjón Vídalín, 2016e).



Mynd 7.10: Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 2 (Sigurjón Vídalín, 2016e).

Q-gildi basaltsins er mælt sem 5,6 frá stöð 1248,5 til 1267,5 en eftir það er Q-gildi basaltsins 4,8. Þarna kemur til að RQD gildi bergsins lækkar á meðan aðrir stuðlar haldast fastir. Basaltið er þó talið sæmilegt (e. fair) til gangagerðar, skv Q-kerfinu, eftir öllu rannsóknarsvæðinu. Karginn sem finna má í þekju gangaþversniðsins er mældur með Q-gildi upp á 7,2 en það kemur til vegna þess að yfirborð sprungna í karganum er grófara en í basaltinu. Karginn er því einnig flokkaður sem sæmilegt efni til gangagerðar. Q-gildi setsins er síðan 1,5 og því slakt (e. poor) efni til gangagerðar.

Tafla 7.10: Tafla með inntaksstærðum rannsóknarsvæðis 2.

Færa nr.	Upphaf [m]	Endir [m]	Lengd [m]	Meðaltal Q-gildis		
				Vinstri	Þekja	Hægri
138-145	1243,5	1277,5	34	5,4	5,6	5,4
146	1277,5	1282,5	5	4,8	4,5	4,8
147/148	1282,5	1287,5	5	4,8	4,5	4,8
149-151	1287,5	1297,5	10	4,8	6	4,8
			Σ	54		

7.3.1. Hönnun bergstyrkinga skv. Q-kerfi

Niðurstöður fyrir hannað magn bergstyrkinga á rannsóknarsvæði 2 skv. Q-kerfi má sjá annars vegar í töflu 7.11 fyrir bergbolta og hins vegar í töflu 7.12 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu. Þessar töflur má finna í fullri lengd í viðauka E.

Tafla 7.11: Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Meðalbil bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Meðaltal Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
138-145	2,4	2,2	2,4	14	108	14	4,0
146	2,4	2,1	2,4	2	17	2	4,2
147/148	2,4	2,1	2,4	2	17	2	4,2
149-151	2,4	2,2	2,4	4	30	4	3,8
				Σ	22	172	22

Tafla 7.12: Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			Meðaltal m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
138-145	5,2	6,3	5,2	2,3	25,8	2,5	0,9
146	5,4	6,6	5,4	0,4	4,0	0,4	0,9
147/148	5,4	6,6	5,4	0,4	4,0	0,4	0,9
149-151	5,4	6,2	5,4	0,7	7,5	0,8	0,9
				Σ	3,8	41,3	4,0

7.3.2. Uppsettar bergstyrkingar

Sjá má samantekt uppsettra bergstyrkinga annars vegar í töflu 7.13 fyrir bergbolta og hins vegar í töflu 7.14 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu. Allir bergboltar sem settir voru upp á rannsóknarsvæði 2 voru 3m langir, innsteyptir bergboltar með millibil ca. 2,5·2,5m (Sigurjón Vídalín, 2016d).

Tafla 7.13: Uppsett magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Meðalbil milli bergbolta [m]	Bergboltar [stk]	Meðaltal Boltar/m
138-145	2,5	72	2,1
146	2,5	11	2,2
147/148	2,5	11	2,2
149-151	2,5	20	2,2
		Σ	114

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum

Tafla 7.14: Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Magn sprautusteypu [m^3]	Meðaltal m^3/m
138-145	46	1,4
146	7	1,4
147/148	14	2,8
149-151	14	1,4
Σ	81	

7.3.3. Samanburður

Samanburður á þörf fyrir bergstyrkingar skv. Q-kerfinu og uppsettum bergstyrkingum má sjá í töflu 7.15. Sjá má að uppsett magn sprautusteypu er 40% meira en það magn sem mælt er fyrir skv. Q-kerfinu. Notað magn sprautusteypu er hærra en Q-gildið segir til um vegna yfirbrots í göngunum, frákasts af yfirborði ganganna og notkunar sprautusteypu til að varna hruni á óstöðugum svæðum og í stafni (Sigurjón Vídalín, 2016c). Því kemur ekki á óvart að notað sé meira magn sprautusteypu heldur en er fyrirskrifað.

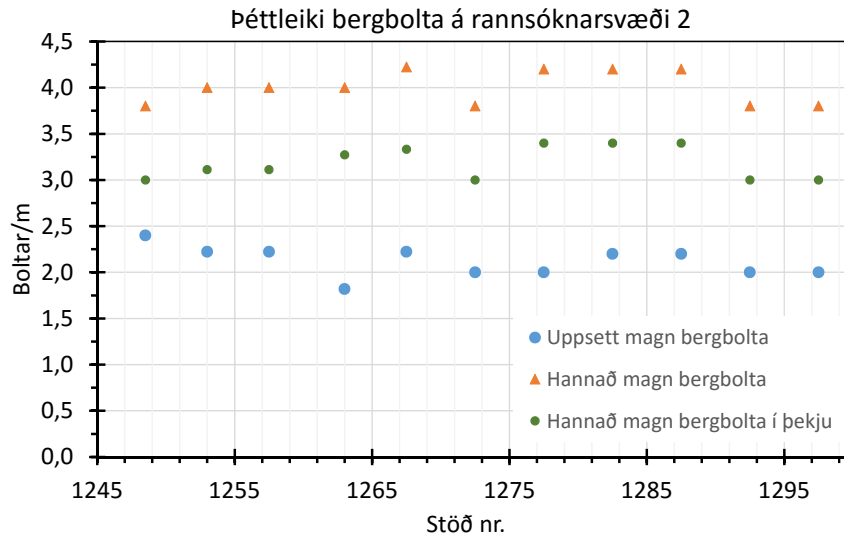
Athygli vekur hversu miklu munar á uppsettu magni bergbolta miðað við það magn sem fyrirskrifað er samkvæmt Q-gildi rannsóknarsvæðisins. Þessi munur skýrist að miklu leyti af því að ekki er búið að setja upp endanlegar bergstyrkingar á rannsóknarsvæði 2 og því á eftir að láta upp fleiri bergbolta þegar fram líða stundir.

Tafla 7.15: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettum bergstyrkingum á rannsóknarsvæði 2. Annars vegar er sýnt heildarmagn hannaðra bergbolta og hins vegar hannað magn bergbolta í þekju ganganna.

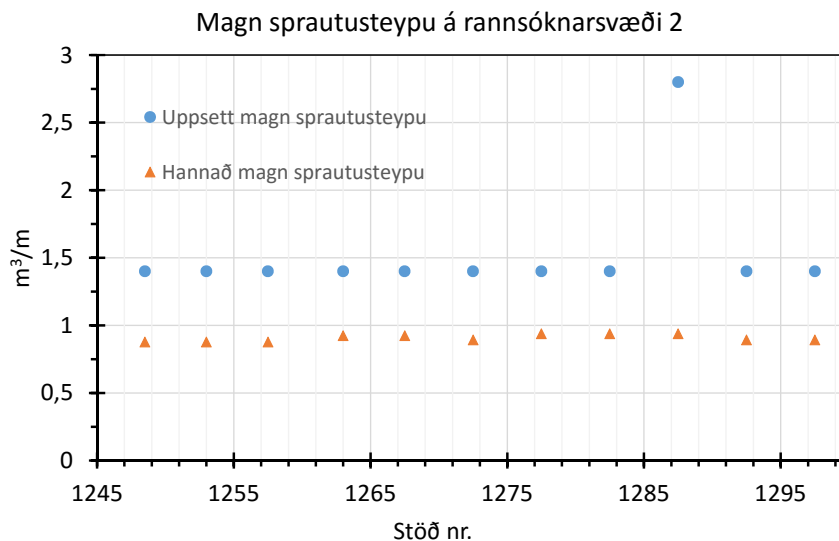
	Bergboltar [stk]	Bergboltar í þekju [stk]	Sprautusteypa [m^3]
Q-kerfi	216	172	48,9
Uppsett	114	114	81
Frávik frá Q-kerfi	-89%	-51%	40%

Þessi munur getur líka að einhverju leyti skýrst af muni í forsendum sem höfundur gerir við hönnun bergstyrkinga og gangagerðarmenn gera. Þær upplýsingar sem fengust um uppsetta bergbolta á þessu svæði í Vaðlaheiðargöngum gáfu til kynna að bil milli bergbolta væri um það bil 2,5m í báðar áttir. Þegar styrkingafjöldi er reiknaður út frá því Q-kerfi sem gefið er upp í jarðfræðiskýrslum fyrir þetta svæði Vaðlaheiðarganga fæst að meðalbil milli bolta í þekju ganganna sé 2,2m í báðar áttir.

Við hönnun bergbolta skv. Q-kerfinu er gert ráð fyrir að boltar séu hafðir á mörkum veggjar og þekju. Sé gert ráð fyrir að eingöngu boltar séu notaðir í þekju, eins og gert er í vinnustyrkingu í Vaðlaheiðargöngum, eru samt 51% færri bergboltar notaðir skv. skýrslum eftirlits Vaðlaheiðarganga. Sjá má myndrænan samanburð á magni bergstyrkinga á rannsóknarsvæði 2 á myndum 7.11 og 7.12.



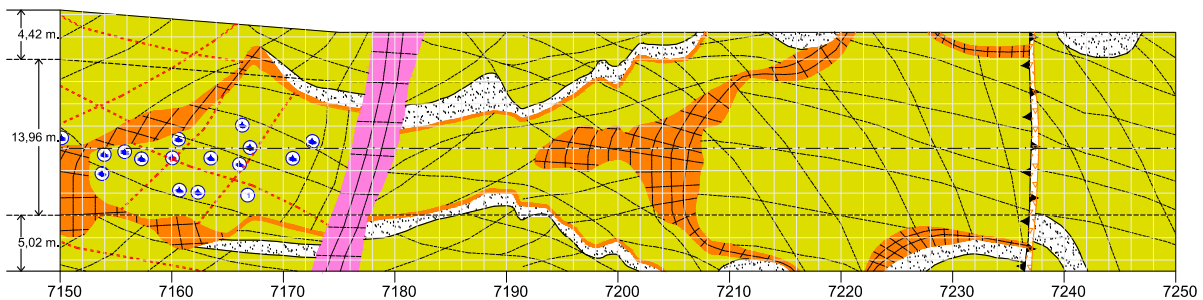
Mynd 7.11: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettum bergboltum á rannsóknarsvæði 2. Annars vegar er sýnt heildarmagn hannaðra bergbolta og hins vegar hannað magn bergbolta í þekju ganganna.



Mynd 7.12: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettu magni sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

7.4. Rannsóknarsvæði 3

Rannsóknarsvæði 3 er 43,5m langur kafli, staðsettur milli stöðva 7183,5 og 7227,0 Fnjóskaldsmegin í Vaðlaheidargöngum. Jarðfræði rannsóknarsvæðisins einkennist af meðalstórstuðluðu og þéttu ólivín-basalti með tveimur sýnilegum sprungukerfum. Basaltinu er lýst sem fersku og lítið ummynduðu. Á rannsóknarsvæðinu er að finna bæði karga og set. Karginn er rauðleitur, þéttur og vel samlímdur. Setbergið er ljósbrúnt og rauðleitt, lagskipt og mjög veikt (Sigurjón Vídalín, 2016e). Staðsetning rannsóknarsvæðis 3 varð fyrir valinu vegna þess að talsvert er af setbergi í þekju ganganna á rannsóknarsvæðinu sem styrkja þurfti sérstaklega.



Mynd 7.13: Jarðfræðikortlagning af rannsóknarsvæði 3 (Sigurjón Vídalín, 2016e).

Q-gildi ólivín-basaltsins er metið sem 8,9 í stöðvum 7202-7222 en lækkar í 7,8 eftir það vegna þess að RQD gildi bergsins lækkar. Basaltið er því talið sæmilegt til gangagerðar, skv. Q-kerfinu, á öllu rannsóknarsvæðinu. Karginn á rannsóknarsvæðinu er mældur með Q-gildi 8,3 eftir öllu rannsóknarsvæðinu, en karginn er þéttur og sæmilegur til gangagerðar. Q-gildi setbergsins er mælt 0,7 eftir öllu rannsóknarsvæðinu og því er það talið einkar slakt (e. very poor) til gangagerðar skv. skilgreiningum Q-kerfisins.

Tafla 7.16: Stytt tafla með inntaksstærðum rannsóknarsvæðis 3.

Færa nr.	Upphaf [m]	Endir [m]	Lengd [m]	Meðaltal Q-gildis		
				Vinstri	Þekja	Hægri
183-186	7227,0	7208,5	18,5	7,5	8,2	7,8
187	7208,5	7205,0	3,5	8,8	0,7	8,9
188/189	7205,0	7202,0	3,0	8,7	0,7	8,9
190-199	7202,0	7183,5	18,5	7,9	3,4	7,9
Samtals:			43,5			

7.4.1. Hönnun bergstyrkinga skv. Q-kerfi

Niðurstöður fyrir hannað magn bergstyrkinga á rannsóknarsvæði 3 skv. Q-kerfinu má sjá í töflu 7.17 fyrir bergbolta, töflu 7.18 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu og 7.19 fyrir grindarbita. Þessar töflur má finna í fullri lengd í viðauka E.

Tafla 7.17: Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Bil milli bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Meðaltal Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
183-186	2,5	2,3	2,5	7	53	7	3,6
187	2,6	1,7	2,6	1	18	1	5,7
188/189	2,6	1,7	2,6	1	16	1	6,0
190-199	2,5	2,0	2,5	11	69	11	5,5
			Σ	20	156	20	

Tafla 7.18: Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			Meðaltal m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
183-186	4,9	5,8	4,9	1,2	12,9	1,2	0,8
187	12	12	12	6,5	9,9	6,5	6,6
188/189	12	12	12	6,1	9,0	6,1	7,1
190	12	12	12	4,4	5,3	4,4	14,0
191	12	12	12	4,4	5,3	4,4	14,1
192	12	12	12	4,8	6,3	4,8	10,6
193	12	12	12	4,4	5,3	4,4	14,1
194-199	4,8	6,8	4,8	0,9	11,1	0,9	0,9
			Σ	32,6	65,2	32,6	

Tafla 7.19: Hannaður fjöldi grindarboga á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Q-gildi Þekja	Bil milli grindarboga [m]	Fjöldi grindarboga í færui	
183-186	8,2	-	-	-
187	0,7	3,5	1	1
188-189	0,7	3	1	1
190	0,8	1	1	1
191	0,9	1	1	1
192	0,9	1,5	1	1
193	0,9	1	1	1
194-199	5,2	-	-	-
		Σ	6	6

7.4.2. Uppsettar bergstyrkingar

Samantekt uppsettra bergstyrkinga má sjá í töflu 7.20 fyrir bergbolta, töflu 7.21 fyrir trefjastyrkta sprautusteypu og töflu 7.22 fyrir grindarbita.

Tafla 7.20: Uppsettar bergstyrkingar á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Bergboltar			Meðaltal Boltar/m
	Innsteyptir [stk]	Swellex [stk]	Aðrar gerðir [stk]	
183-186	61	-	2	4
187	19	6	4	8
188/189	18	6	12	12
190-199	79	27	0	7
Σ	177	39	18	

Auk innsteyptra bergbolta og þenslubolta eru notaðir endafestir-, sjálfborandi-, og blandaðir bergboltar á rannsóknarsvæði 3. Samtals magn þessara bolta er merkt *Aðrar gerðir* í töflu 7.20.

Tafla 7.21: Uppsett magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]		Magn steypu [m^3]			Meðaltal m^3/m
	Þekja	Veggir	Grindarbitar	Þekja	Veggir	
183-185	6	4		10,8	1,6	0,8
186	18	18		7,5	5,1	3,6
187	18	18		7,5	5,1	3,6
188/189	18	18	6,9	6,5	4,4	5,9
190	18	18	3,5	2,2	1,5	7,1
191	18	18		2,2	1,5	3,6
192	18	18		3,2	2,2	3,6
193	18	18	3,5	2,2	1,5	7,1
194	18	18	3,5	4,3	2,9	5,4
195	18	18	3,5	4,3	2,9	5,4
196	18	18	3,5	4,3	2,9	5,4
197	18	18	3,5	2,2	1,5	7,1
198	18	18		4,3	2,9	3,6
199	6	4		3,6	0,5	0,8
		Σ	27,8	65,1	36,7	

Tafla 7.22: Uppsettir grindarbogar á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Grindarbogi í stöð	Bil í næsta grindarboga [m]	Fjöldi grindarboga
183-187	-	-	-
188/189	7204 og 7203	1	2
190	7202	2,5	1
191	-	-	-
192	-	-	-
193	7199,5	1,5	1
194	7198	2	1
195	7196	1	1
196	7195	2	1
197	7193	-	1
198-199	-	-	-
		Σ	8

7.4.3. Samanburður

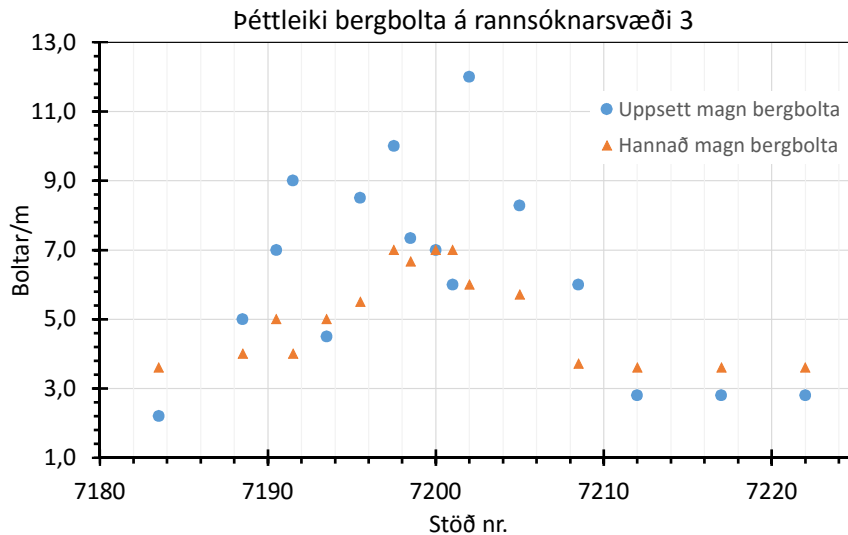
Samanburð á þörf fyrir bergstyrkingar skv. Q-kerfinu og uppsettum bergstyrkingum má sjá í töflu 7.23. Sjá má að góð fylgni er á milli uppsetts magns sprautusteypu og þess magns sem mælt var fyrir um skv. Q-gildinu. Ekkert er athugavert við það að hitta á það magn sem Q-kerfið mælir fyrir um í raun og veru en þar sem eftir á að ákveða lokastyrkingar á öllum rannsóknarsvæðum getur verið að magn sprautusteypu aukist. Meira er notað af bergboltum og grindarbogum heldur en Q-gildið segir til um á rannsóknarsvæði 3.

Tafla 7.23: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettum bergstyrkingum á rannsóknarsvæði 3.

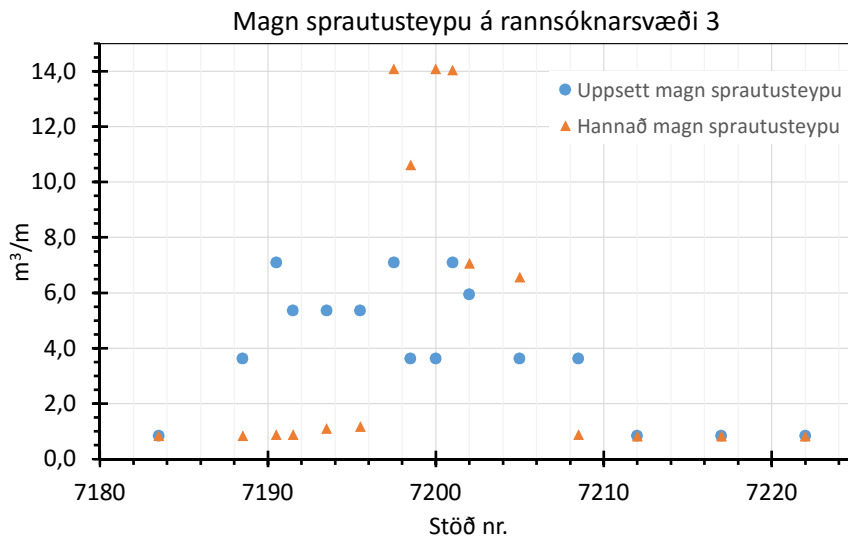
	Bergboltar [stk]	Sprautusteypa [m^3]	Grindarbogar [stk]
Q-kerfi	196	130,4	6
Uppsett	234	129,5	8
Frávik frá Q-kerfi	16%	-1%	25%

Aukinn fjöldi bergbolta á rannsóknarsvæði 3 helgast af aukinni vinnustyrkingu sem er sett upp á erfiðum svæðum. Sjá má á mynd 7.14 hvernig erfiða svæði þessa rannsóknarsvæðis liggur milli stöðva 7184 og 7212, en þar fer uppsettur fjöldi bergbolta yfir þann sem Q-kerfið leggur til. Rétt er að taka fram að í fjölda uppsettra bergbolta er forboltun ekki tekin með í reikninginn þar sem forboltun er ekki beint hluti af Q-kerfinu. Í leiðbeiningum fyrir notkun Q-kerfisins er mælt með notkun forboltunar í lélegu bergi án þess að tekið sé fram hversu mikið. Sjá má myndrænan samanburð á magni bergbolta og sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3 á myndum 7.14 og 7.15.

7. Samanburður á styrkingum skv. Q-kerfi og uppsettum styrkingum



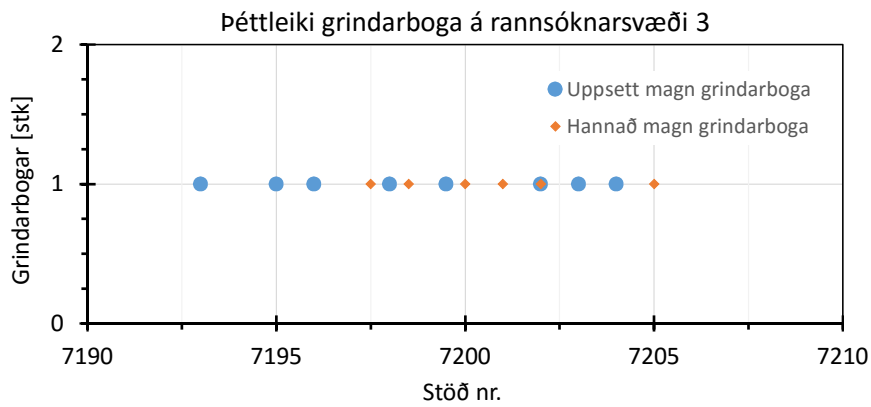
Mynd 7.14: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettum bergboltum á rannsóknarsvæði 3.



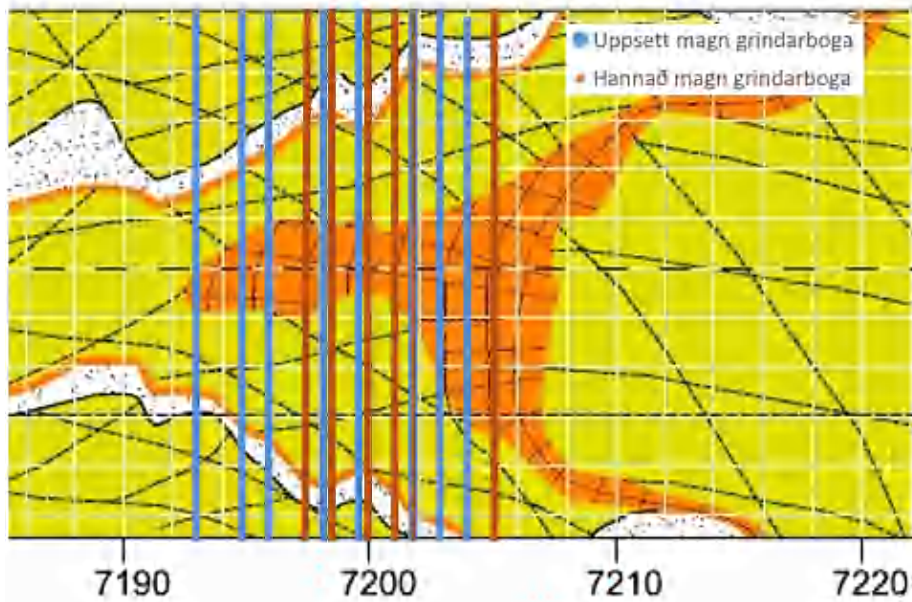
Mynd 7.15: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q-gildi og uppsettu magni sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.

Sjá má að notaðir eru fleiri grindarbogar á rannsóknarsvæði 3 heldur en gert er ráð fyrir skv. Q-kerfinu, þar sem uppsetning grindarboga fer eingöngu eftir Q-gildinu, svo fjöldi grindarboga í færni getur ekki verið ≤ 1 . Auk þess eru grindarbogar ekki aðeins notaðir til að styðja við bergmassa umhverfis bogann heldur einnig til að vera festipunktur fyrir forboltun. Eins og kom fram hér á undan tekur Q-kerfið ekki á forboltun sérstaklega. Fjöldi grindarboga skv. Q-kerfi verður því að teljast aðeins sem viðmið og því eðlilegt að fleiri grindarbogar séu notaðir, sé talin þörf fyrir frekari forboltun og styrkingu.

Myndrænn samanburður á staðsetningu grindarboga á rannsóknarsvæði 3 er á mynd 7.16. Athuga skal að farið er frá vinstri til hægri eins og stefna gangaframkvæmdarinnar er á svæði 3. Hver punktur á mynd 7.16 táknar einn grindarboga og í hvaða stöð hann lendir.



Mynd 7.16: Samanburður á styrkingarþörf skv. Q -gildi og uppsettum fjölda grindarboga á rannsóknarsvæði 3.



Mynd 7.17: Staðsetning grindarboga á rannsóknarsvæði 3. Annars vegar skv. Q -gildi og hins vegar uppsettum fjölda.

8. Líkanreikningar

Í þessum kafla verður gerð grein fyrir niðurstöðum af líkanreikningum með bergtækni-forritinu RS^2 . Bergstyrkingar í líkönunum verða byggðar á mati Q -kerfisins eins og unnt er. Niðurstöður líkanreikningana verða síðan greindar og skoðuð annars vegar hvort virkni bergstyrkinga er fullnægjandi og hins vegar hvernig breytingar í eiginleikum bergmassans hafa áhrif á niðurstöður líkansins. Í því samhengi verður GSI stuðullinn sérstaklega skoðaður þar sem val á honum byggist að miklu leyti á hlutlægu mati, en breytingar í vali á stuðlinum hefur mikil áhrif á eiginleika líkansins. Hvert líkantilfelli er þríþætt þar sem auk grunntilfellis er GSI stuðulinum breytt um ± 10 . Áður en farið verður yfir líkanreikningana sjálfa verður gerð grein fyrir þeim inntaksstærðum sem eru notaðar við líkangerðina.

Aflfræðilegir eiginleikar bergs

Ýmsar prófanir hafa verið gerðar á eiginleikum íslensks bergs í gegn um tíðina, bæði í tengslum við virkjanir, veggöng og ýmislegt fleira. Niðurstöður tæplega 6200 prófana á meira en 170 bergkjörnum voru teknar saman í skýrslu árið 2010, á tæknilegum eiginleikum mismunandi berggerða á Íslandi (Matthías Loftsson & Benedikt Óskar Steingrímsson, 2010).

Sumar þessara niðurstaðna eru úr borholum sem gerðar voru fyrir framkvæmdir í Vaðlaheiðargöngum en þar sem þær niðurstöður eru aðeins lítill hluti rannsóknarinnar og eiga að mestu við um setberg verða notaðar niðurstöður af landinu öllu til að lýsa eiginleikum þóleiít- og ólivín-basalts auk karga og kargaríks bergs (tafla 8.1).

Tafla 8.1: Aflfræðilegir eiginleikar heils bergs á Íslandi (niðurstöður úr prófunum á bergsýnum) (Matthías Loftsson & Benedikt Óskar Steingrímsson, 2010). Fjöldi mælinga er sýndur í sviga á eftir hverju gildi.

Berggerð	Einásabrotstyrkur [MPa]	Togstyrkur [MPa]	Fjaðurstuðull [Gpa]	Poisson's hlutfall [-]
Þóleiít-basalt	208 (59)	15,8 (11)	42 (17)	0,27 (13)
Ólivín-basalt	143 (105)	11,5 (33)	27 (52)	0,17 (20)
Kargi	22 (54)	2,3 (5)	7 (46)	0,18 (12)

8. Líkanreikningar

Árið 2011 var gerð rannsókn á eiginleikum setbergs í Vaðlaheiðargöngum. Prófanir voru framkvæmdar á kjörnum sem boraðir voru í tengslum við jarðfræðirannsóknir í Vaðlaheiði á árunum 2005 og 2010 (Haraldur Hallsteinsson & Matthías Loftsson, 2011). Niðurstöður þessara prófana má sjá í töflu 8.2.

Tafla 8.2: Aflfræðilegir eiginleikar setbergs í Vaðlaheiðargöngum (Haraldur Hallsteinsson & Matthías Loftsson, 2011). Fjöldi mælinga er sýndur í sviga á eftir hverju gildi.

Eiginleiki	Meðalgildi		
Einásabrotstyrkur	15,3	(21)	MPa
Togstyrkur	1,4	(61)	MPa
Fjaðurstuðull	3882	(21)	MPa
Poisson's hlutfall	0,31	(11)	

GSI-gildi bergmassa

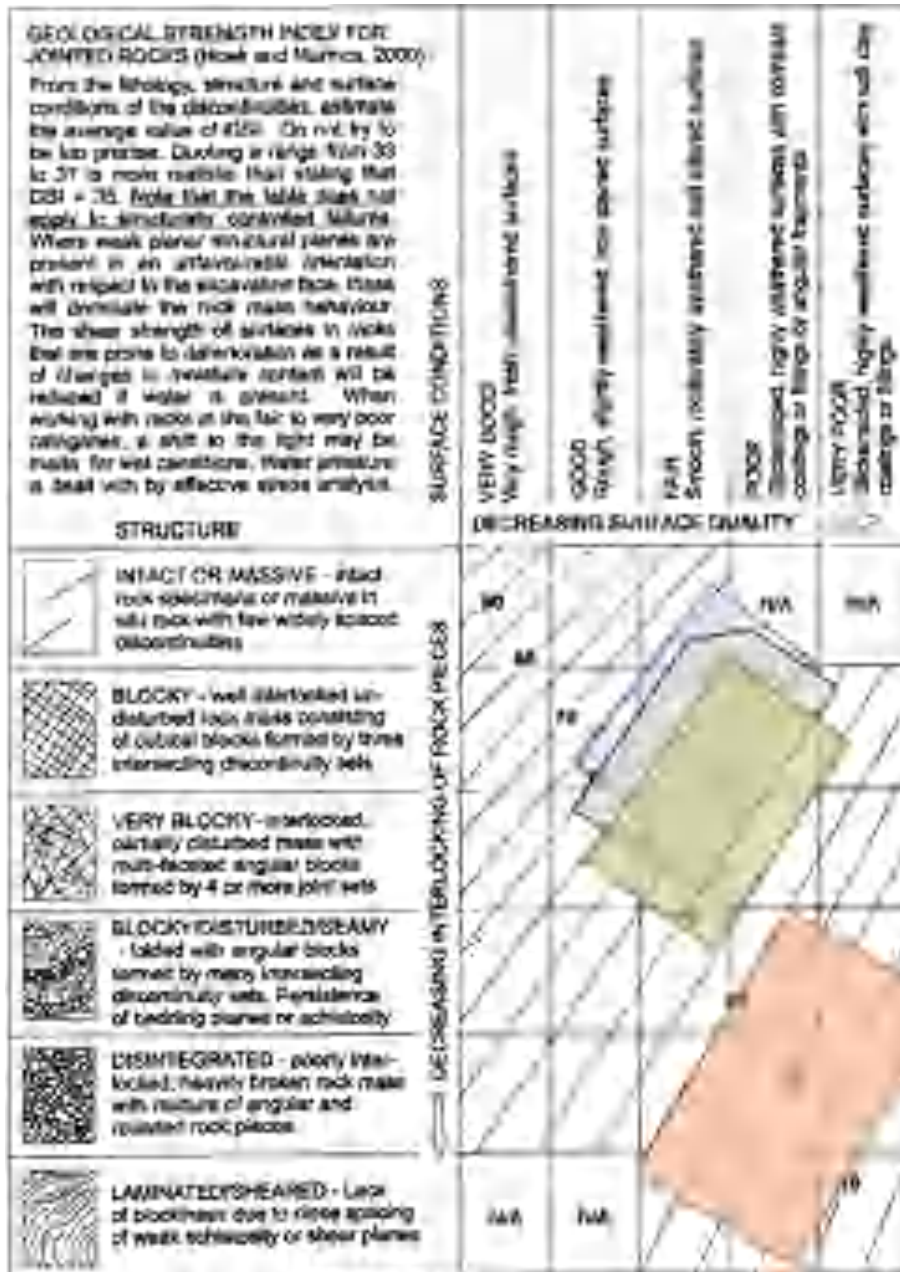
Valin eru GSI-gildi fyrir bergmassann í líkönunum út frá lýsingu á berginu, sem finna má í jarðfræðiskýrslum fyrir hverja færú ganganna. GSI-gildi er ekki hægt að velja sem eina algilda tölu en frekar skal nefna GSI-gildi fyrir bergmassa á ákveðnu bili. Til að athuga áhrif breytinga í GSI-gildinu á líkanreikninga verður notast við $GSI \pm 10$, þar sem erfitt getur verið að meta í hvaða flokk bergmassi lendir. Slíkt bil GSI-gilda er nokkuð stórt ef verið er að meta berg í mörkinni en þar sem hluti af rannsókn þessa verkefnis er að sjá hvaða áhrif breytingar í vali á GSI-stuðlinum hafa á virkni bergstyrkinga í líkanreikningum sem þessum og því er bilið sem GSI-stuðlarnir eru valdir á tiltölulega stórt. Sjá má GSI-gildi fyrir bergmassann sem notaður er við líkanagerð í töflu 8.3.

Tafla 8.3: GSI-gildi bergmassa, sem notaður er í líkanreikninga.

	GSI -10	Grunngildi	GSI +10
Þóleiít-basalt	45	55	65
Ólivín-basalt	35	45	55
Kargi	40	50	60
Setberg	10	20	30

Þóleiít basaltinu er lýst sem frekar þéttu og stórstuðluðu bergi með fylltum sprungum. Það má því túlka sem svo að GSI-gildi Þóleiít basaltsins í Vaðlaheiðargöngum sé á bilinu 45-65 eins og sjá má á mynd 8.1, en þeir flokkar sem bergmassinn fellur undir eru skyggðir með bláum lit. Ólivín-basaltinu er lýst sem meðalstórstuðluðu og þéttu. Það má því túlka sem svo að GSI-gildi ólivín-basaltsins séu lægri en gildin fyrir þóleiít-basaltið og því verða GSI-gildi bergmassans á bilinu 35-55. Á mynd 8.1 eru þeir flokkar sem ólivín-basaltið fellur undir skyggt með grænum lit.

Karga í Vaðlaheiðargöngum er lýst sem þéttum og vel samlímduðum og hefur hann oftast en ekki hærra Q-gildi heldur en Þóleiit- og ólívín-basalt á rannsóknarsvæðunum þremur. Því má túlka sem svo að GSI-gildi kargans sé á bilinu 50-60 eins og sjá má á mynd 8.1, en þeir flokkar sem karginn fellur undir eru skyggðir með gráu. Setbergi á rannsóknarsvæðunum þremur er lýst sem lagskiptu og mjög veikum. Því má túlka sem svo að GSI-gildi setbergsins sé á bilinu 10-30. Á mynd 8.1 eru þeir flokkar sem setbergið fellur undir skyggt með ljósbrúnum lit. Myndina, sem notuð er til að velja GSI stuðla fyrir bergmassann, má finna í viðauka B.



Mynd 8.1: Val á GSI stuðli fyrir líkanreikninga (Hoek, 2007). Skyggð svæði tákna þá flokka sem bergmassi notaður í líkangerð fellur undir.

Spennur í bergi

Engar mælingar á spennuástandi bergmassa hafa verið framkvæmdar á bergi í Vaðlaheiði í tengslum við gerð Vaðlaheiðarganga. Við útreikning á spennum er því notast við samantekt á íslenskum bergspennumælingum sem fjallað er um í kafla 3.4.1 til að fá raunhæft mat á k -stuðlum og fjadurstuðlum í Íslensku bergi (mynd 3.5b).

Fyrir hvert rannsóknarsvæði var reiknuð lóðrétt og lárétt bergspenna m.v. þykkt jarðlagastafans ofan við hvert rannsóknarsvæði. K -stuðull var reiknaður með jöfnu 3.13 miðað við að fjadurstuðull bergs væri $E_h = 20\text{GPa}$, lóðrétt spenna var reiknuð með jöfnu 3.10 og lárétt spenna var síðan reiknuð með jöfnu 3.11.

Tafla 8.4: Spennur í bergi á hverju rannsóknarsvæði ásamt k -stuðlum.

Rannsóknarsvæði	1	2	3	
Dýpi, z	500	100	200	m
k -stuðull	0,67	1,79	1,09	-
σ_v	13,50	2,70	5,40	MPa
$\sigma_h = \sigma_H$	9,05	4,83	5,89	MPa

Öll líkön eru hönnuð þannig að 80% af þrýstispennu á yfirborð jarðganganna hefur fallið áður en bergstyrkingar eru settar upp. Þetta gildi er notað þar sem athuganir á bergfærslum við gangagerð gefa til kynna að í kring um 70 - 80% allra færslna í jarðgangagerð eiga sér stað áður en mögulegt er að setja upp bergstyrkingar (Palmström & Stille, 2015). Betur er fjallað um spennulosun í bergmassa í kafla 3.5.

Til að fá frekari samanburð á virkni bergstyrkinga við mismunandi spennudreifingar og álag á bergstyrkingar mætti skoða önnur hlutföll þrýstispennumfalls en sá samanburður verður ekki gerður í þessari ritgerð.

Bergstyrkingar

Nokkrar mismunandi gerðir bergbolta eru notaðar í Vaðlaheiðargöngum. Mest er notað af 20mm sverum innsteyptum bergboltum en þegar aðstæður versna eru einnig notaðir 20mm sverir forspenntir og innsteyptir bergboltar auk þanbolta þar sem mikillar vinnustyrkingar er þörf. Eiginleika bergbolta má sjá í töflu 8.5.

Sú krafa er gerð á sprautusteypu, sem notuð er í Vaðlaheiðargöngum, að hún hafi þrýstistyrk C30/37. Sprautusteypan er trefjastyrkt með Grace Strux plasttrefjum, en notuð eru $4,7\text{kg/m}^3$ (Meranda, 2016). Eiginleika sprautusteypunnar má sjá í töflu 8.6.

Grindarbogar, sem notaðir eru í Vaðlaheiðargöngum, eru fjögurra banda grindarbogar með 20mm sver langjárn. Eiginleika grindarboga má sjá í töflu 8.7.

Tafla 8.5: Afþræðilegir eiginleikar bergbolta í Vaðlaheiðargöngum (Atlas Copco, 2009; DYWIDAG-System International, 2003, 2005).

Eiginleiki	SN	SW	
Þvermál (d)	20	24	mm
Lengd (l)	3-6	3	m
Togstyrkur	≥ 190	≥ 240	kN
Flotmörk	≥ 173	≥ 200	kN
Fjaðurstuðull (E)	210	210	GPa
Poisson's hlutfall (ν)	0,3	0,3	-

Tafla 8.6: Afþræðilegir eiginleikar sprautusteypu í Vaðlaheiðargöngum (Meranda, 2016).

Eiginleiki	Stærð	
Þrýstistyrkur (σ_c)	≥ 30	MPa
Beygjustyrkur (e. flexural strength)	$\geq 4,4$	MPa
Fjaðurstuðull (E)	14000*	MPa
Poisson's hlutfall (ν)	0,2*	-
Rúmþyngd	$\geq 0,0234$	MN/m ³
Orkugleypniflokkur	E700	-

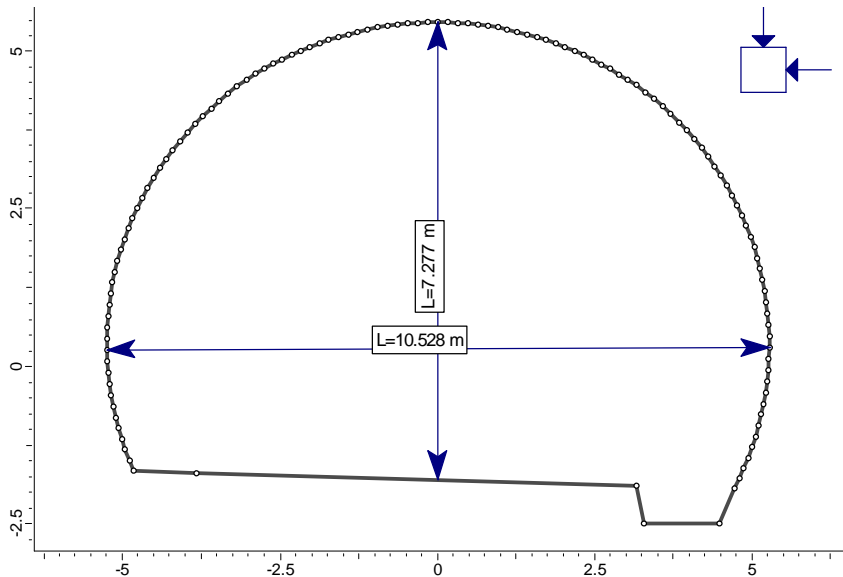
*Almenn gildi fyrir steypu

Tafla 8.7: Afþræðilegir eiginleikar grindarboga í Vaðlaheiðargöngum (DYWIDAG-System International, 2004).

Eiginleiki	Stærð	
Þvermál stanga	20	mm
Þvermál tengistanga	10	mm
Hæð boga	220	mm
Þverskurðarflatarmál	1256	mm ⁴
Fjaðurstuðull (E)	200	GPa
Tregðuvægi (I)	$12,6 \cdot 10^{-6}$	mm ⁴
Þrýstispenna	400	MPa
Togspenna	400	MPa

Gangapversnið

Þversnið ganganna, sem notað er við líkanagerð (mynd 8.2), er teiknað upp í samræmi við hönnunarmörk kennisniðs ganganna (mynd 2.3). Sjá má að hæð og breidd þversniðsins er merkt inn á myndina. Einnig sést að bæði vatnshalli og lagnaskurður er hafður með á þversniðinu, en einfalda hefði mátt þversniðið með því að hafa botn ganganna beinan og láréttan.

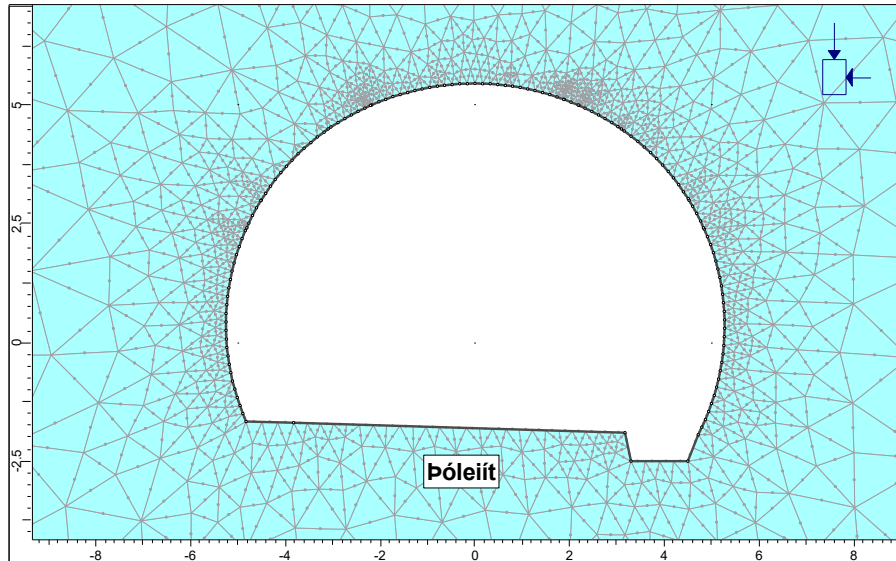


Mynd 8.2: Kennisnið Vaðlaheiðarganga sem notað við gerð líkana.

8.1. Líkan af svæði 1

Líkan 1 er staðsett í stöð nr. 2873 og mætti segja að það sé grunntilfelli þar sem bera má saman þær bergstyrkingar sem Q-gildið mælir með við einsleitaraðstæður. Á rannsóknarsvæði 1 er þykkt jarðlaga yfir svæðinu 500m og bæði lárétt og lóðrétt spennan er áætluð í töflu 8.4. Bergstyrkingarnar í líkani 1 eru hannaðar skv. Q-kerfinu og er gerð grein fyrir þeim í töflum 7.5 og 7.6. Gert er ráð fyrir því að bil milli bolta úr plani sé það sama og í plani.

Líkan 1 liggur að öllu leyti í basalti en lög af bæði seti og basaltkarga liggja ofan og neðan við rannsóknarsvæðið. Þessi lög eru þó ekki talin liggja nógu nálægt göngunum til að hafa áhrif á berggæðin og þar með styrkingarþörfina á þessum stað. Efniseiginleikar basaltsins sem notaðir eru í gerð líkansins eru í töflum 8.8 og 8.9.



Mynd 8.3: Líkan 1 (mælistikur eru í metrum).

Tafla 8.8: Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 1.

Eiginleiki	Þóleiit-basalt
σ_{ci}	208 MPa
GSI	55 -
m_i	25 -
D	0 -
E_i	42 GPa

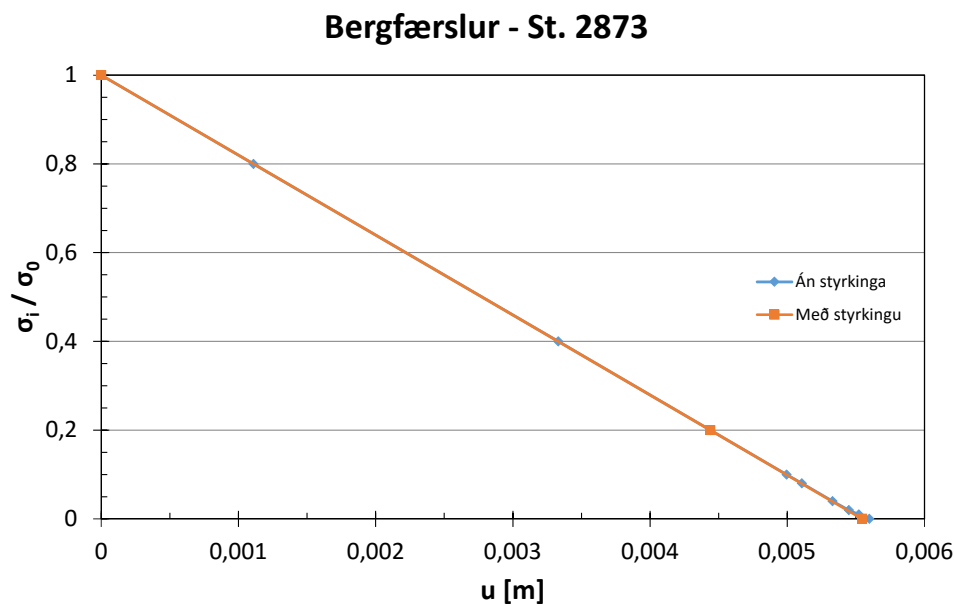
Tafla 8.9: Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 1.

Eiginleiki	Þóleiit-basalt
m_b	5,011 -
s	0,007 -
a	0,504 -
c	14,60 MPa
ϕ	40 °
σ_{cm}	62,54 MPa
E_{rm}	17,15 MPa
Útvíkkunarstuðull	0,82 -

8.1.1. Niðurstöður líkanreikninga

Heildarfærslur

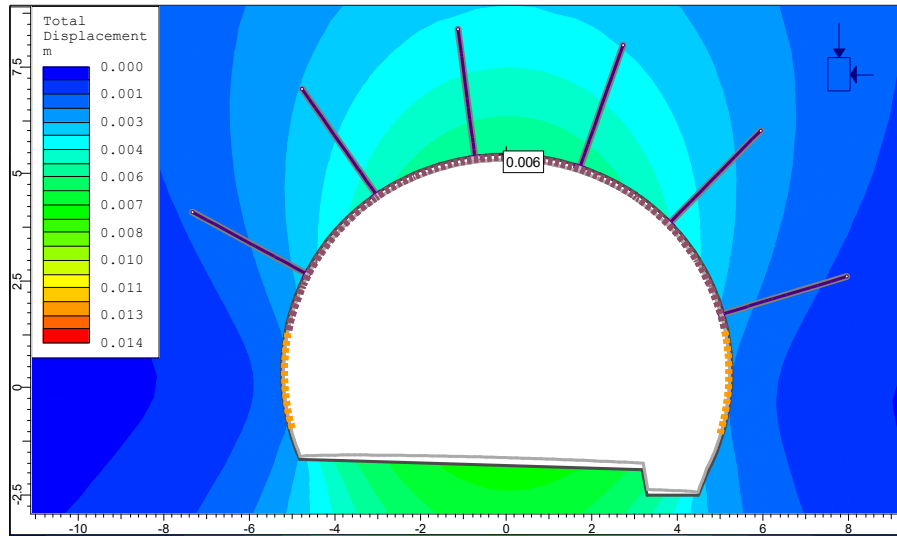
Bergfærslur í þekju líkans 1, með og án bergstyrkinga, eru sýndar á mynd 8.4. Athugavert er að bergfærsluferillinn er annars vegar nánast fullkomlega línulegur, enda líkanið af rannsóknarsvæðinu mjög einsleitt og í tiltölulega góðu bergi. Hins vegar er athyglisvert hversu litlar færslur bergstyrkingarnar taka, þó að þær séu láttnar upp þannig að þær byrji að virka eftir að um 80% þrýstispennu hefur fallið af yfirborði jarðganganna.



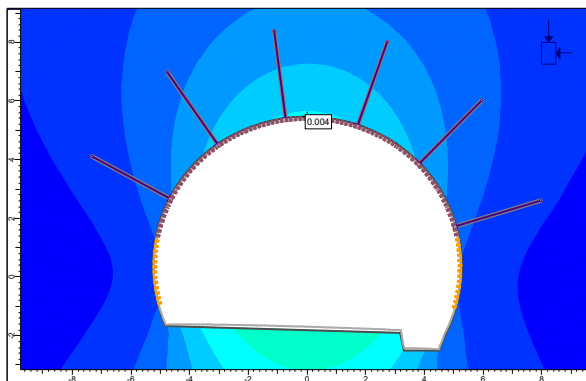
Mynd 8.4: Bergfærslur í þekju líkans 1. Ekki er mikill munur á milli færslna með og án bergstyrkinga.

Sjá má á mynd 8.5 hvernig færslur umhverfis gangaþvernsíðið eru mestar í gólfi þvernsíðsins. Færslurnar minnka upp með hliðum jarðganganna en aukast síðan í þekju ganganna. Færslur í þekju rannsóknarsvæðis 1, þegar GSI gildi eins og lýst er í töflu 8.8, eru 6mm. Þegar GSI gildi bergsins er aukið (mynd 8.6a) og minnkað (mynd 8.6b) um 10 breytast færslurnar nokkuð. Stærstu færslur verða þegar GSI stuðullinn er lækkaður um 10 en þá verða færslur í þekju ganganna 10mm.

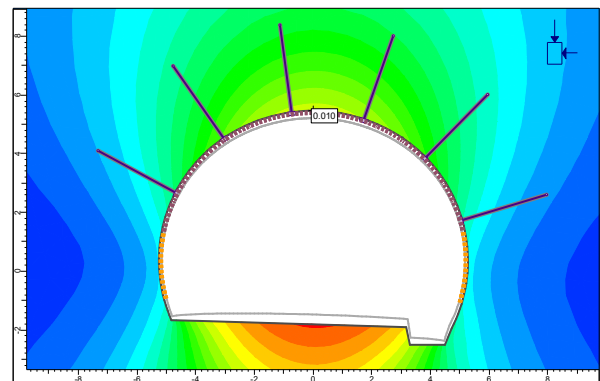
Færslur í bergmassanum eru sýndar með litakvarða sem er eins á öllum myndum. Afmyndað þversnið jarðganganna er stækkað 25-falt til að það sé sýnilegt og sýnt með grárri línu.



Mynd 8.5: Heildarbergfærslur í líkani 1. Stærstu færslur mældust $u_{max} = 7\text{mm}$ á meðan færslur í þekju mældust $u_{þekja} = 6\text{mm}$. Afmyndað þversnið ganganna er stækkað 25-falt og táknað með grárri línu (mælistikur eru í metrum).



(a) GSI +10, $u_{þekja} = 4\text{mm}$.

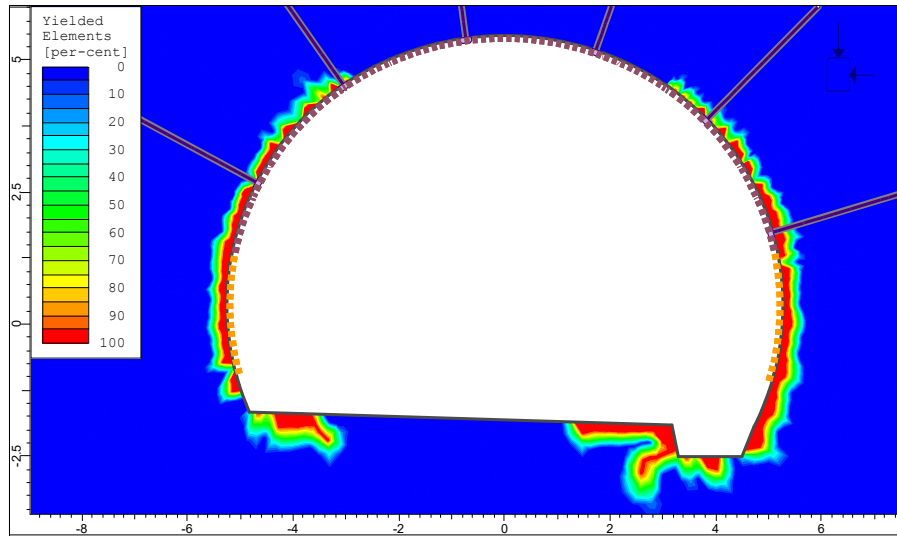


(b) GSI -10, $u_{þekja} = 10\text{mm}$.

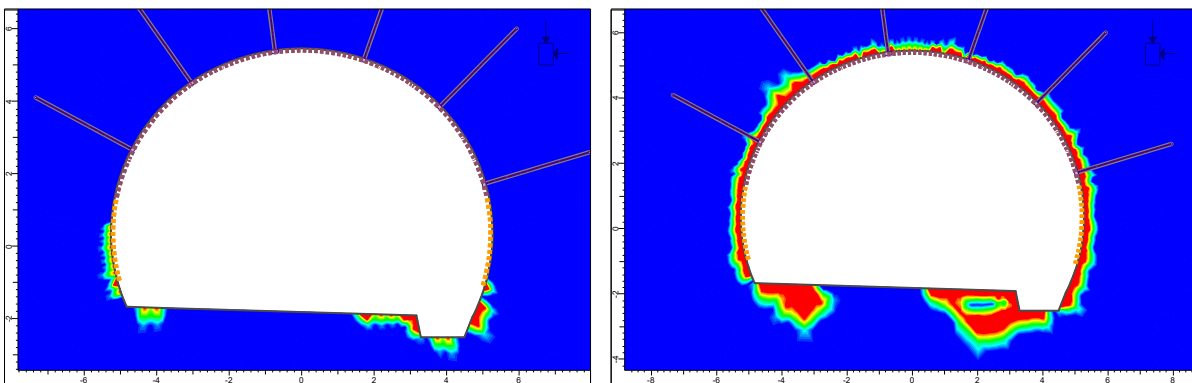
Mynd 8.6: Sjá má hvernig breytingar á GSI stuðli bergmassans hafa áhrif á bergfærslur í líkani 1.

Hnignar einingar

Á myndum 8.7 og 8.8 má sjá þær einingar sem hníga í hverju tilfalli. Hlutfall hniginna bergeininga er sýnt á myndum með litaskala, þar sem rauður litur tákna 100% fyrir algjörlega hnignar einingar. Hnignu einingarnar á þessu rannsóknarsvæði mynda þunna skán rétt við yfirborð ganganna. Sjá má að hnignum einingum fjölgar talsvert eftir því sem GSI-gildið minnkar. Athyglisvert er að engar bergstyrkingar hníga eða fara í flotástand á rannsóknarsvæði 1.



Mynd 8.7: Hnignar einingar í líkani 1. Heildarfjöldi hniginna bergeininga er 174. Engar bolta- eða steypueiningar fóru í flot (mælistikur eru í metrum).



(a) GSI +10, 33 einingar hnigu.

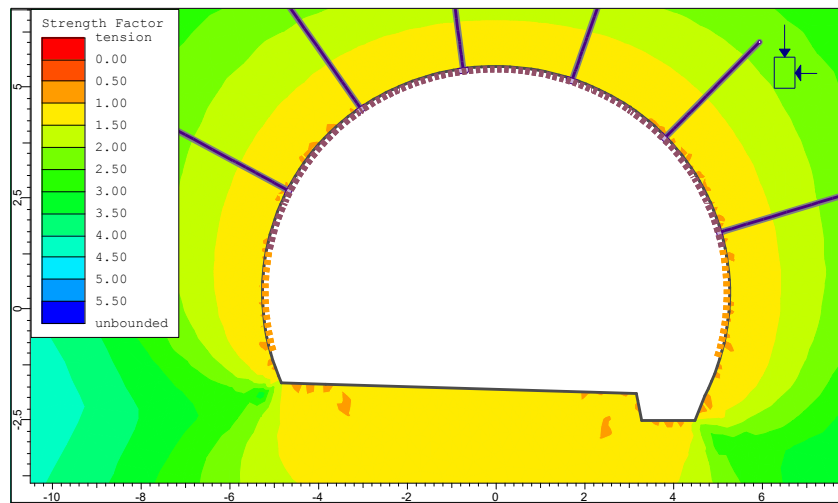
(b) GSI -10, 309 einingar hnigu.

Mynd 8.8: Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hniginna eininga í líkani 1. Við hærri GSI gildi hníga færri einingar.

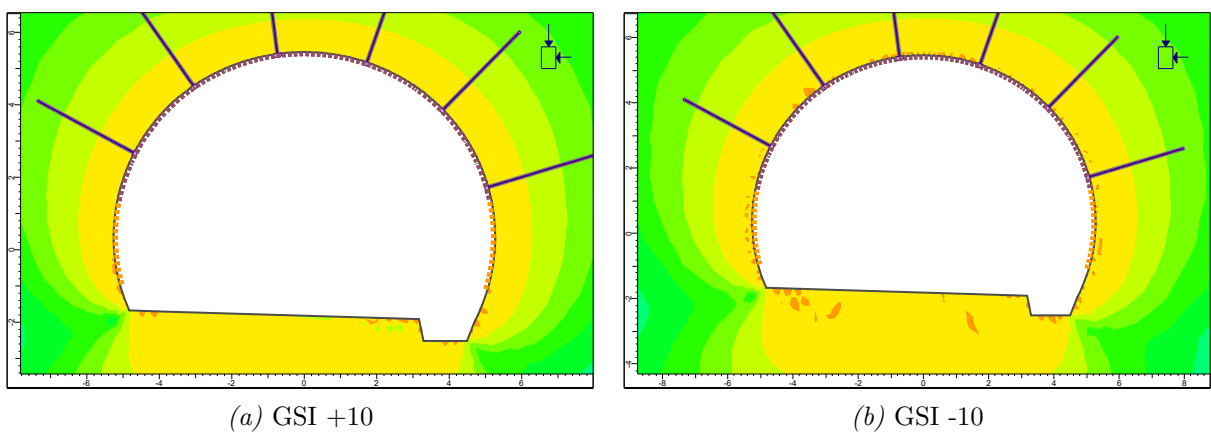
Styrkstuddull bergs

Á myndum 8.9 og 8.10 má sjá styrkstuddul bergmassans í kring um jarðgöngin. Styrkstuddullinn er táknaður með litaskala þar sem appelsínugulur og rauður litur tákna styrkstuddul ≤ 1 , sem er talinn óöruggur og berg á appelsínugulum svæðum því örugglega hnigið. Gul svæði tákna bergmassa þar sem styrkstuddullinn er $1 \leq SF \leq 1,5$.

Það berg sem hefur styrkstuddul $\leq 1,5$ er annaðhvort hnigið eða við það að hníga. Sjá má að aukning verður á svæðum þar sem styrkstuddullinn er ≤ 1 eftir því sem GSI studdullinn er lækkaður.



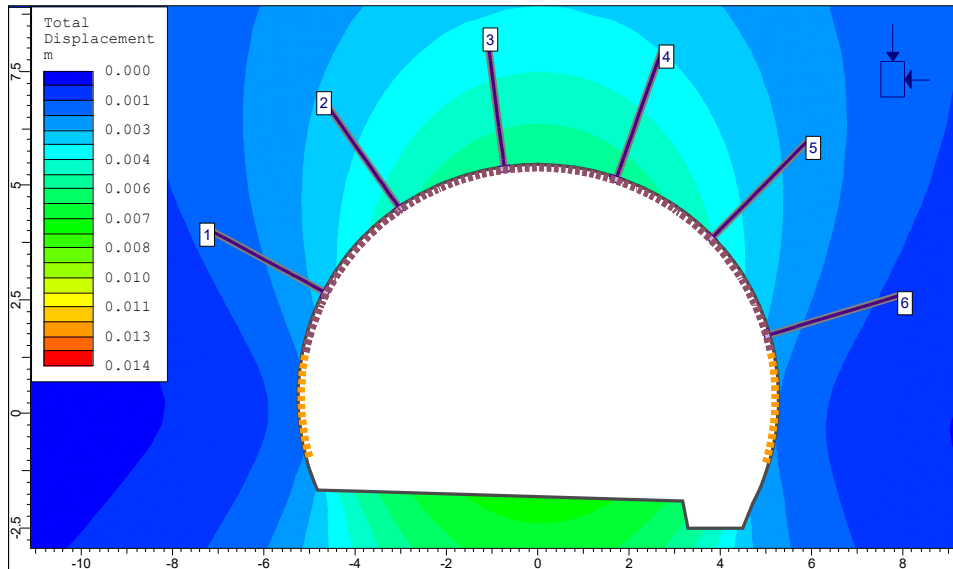
Mynd 8.9: Styrkstuddull bergmassans reiknaður fyrir líkan 1. Appelsínugul svæði tákna styrkstuddul sem er ≤ 1 , þar sem bergmassin er talinn vera hniginn (mælistikur eru í metrum).



Mynd 8.10: Áhrif GSI studdulsins á styrkstuddul bergmassa í líkani 1. Sjá má að fyrir lægri GSI gildi verður styrkstuddullinn lægri.

Öryggi bergstyrkinga

Til að leggja mat á virkni- og jafnframt öryggi bergstyrkinga í líkönum er áslægur kraftur í bergboltum skoðaður auk þess að skoðaðir eru ferlar áslægs krafts á móti skerkræfti (SN-graf) annars vegar og vægis (MN-graf) hins vegar fyrir sprautusteypunna. Sjá má hvernig bergboltar eru númeraðir á mynd 8.11.

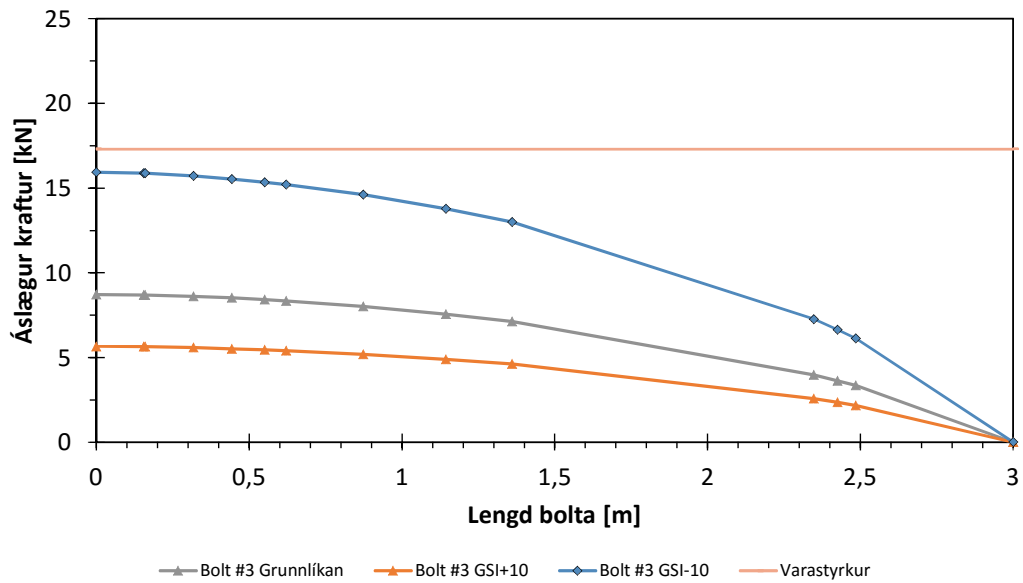


Mynd 8.11: Tölusetning bergbolta í líkani 1 (mælistikur eru í metrum).

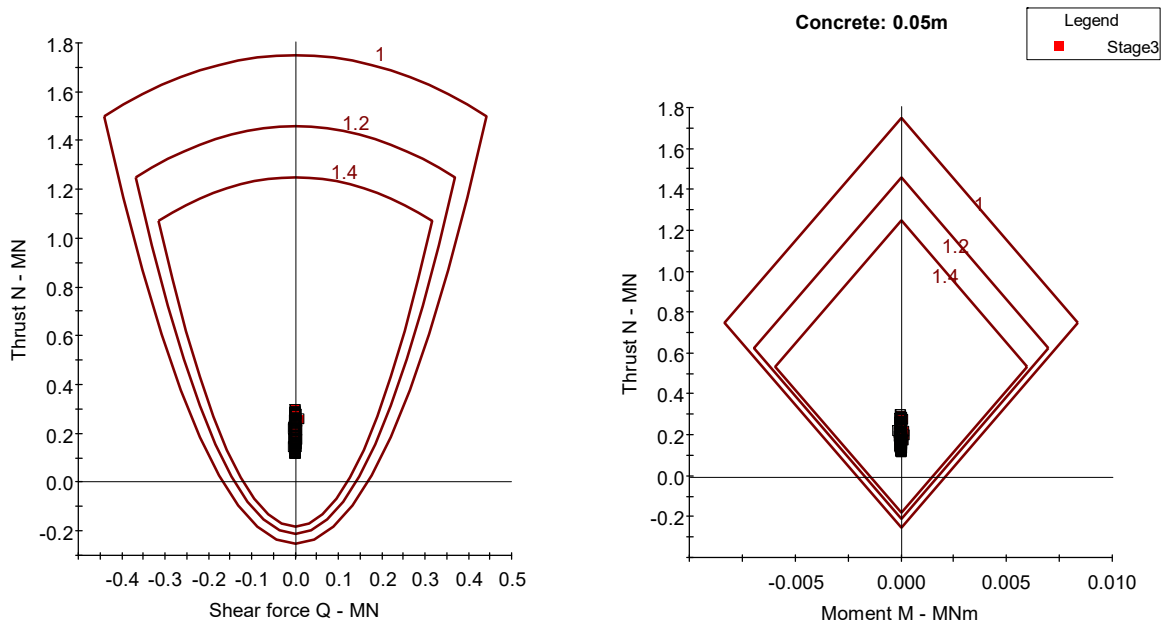
Það líkan bergbolta sem er notað er lýst í kafla 6. Á mynd 8.12 sést að í líkani 1 er stærsti togkraftur í bolta minni en nemur varastyrk innsteypra bergbolta svo allir boltar eru öruggir í líkani 1. Borin eru saman gildi fyrir bergbolta nr. 3 í öllum tilfellum.

Mynd 8.13 sýnir stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypulagið í þekju ganganna þegar GSI gildið er lækkað um -10. Hver punktur á stuðningsgetugrafinu tákna eina sprautusteypu-einingu. Hér í líkani 1 verður aðeins lakasta niðurstaðan sýnd þar sem lítið bar til tíðinda í stuðningsgetugröfum sprautusteypunnar. Sjá má að sprautusteypan þarf ekki að bera mjög mikinn þunga og er innan við brotskilyrði sem henni eru sett og öryggisstuðla sem lagðir eru á brotskilyrðin.

Togkraftur í bergboltum - St. 2873



Mynd 8.12: Togkraftur í virkasta bergboltum líkans 1. Sjá má þau áhrif sem breytingar í GSI stuðlinum hafa á virkni bergstyrkinga.



Support Element: 50mm - Trefjastyrkt sprautusteypa

Mynd 8.13: Stuðningsgetugraf fyrir sprautusteypu í þekju líkans 1, þegar GSI stuðullinn er lækkaður um 10

Samanburður

Eins og sjá má á töflu 8.10 eru bergfærslur ekki miklar og fáar bergeiningar hnigna í líkani 1. Einnig má sjá að engar bergstyrkingar hnigu í neinu tilfelli líkans 1. Það gefur til kynna að þessar bergstyrkingar séu fullnægjandi fyrir þær aðstæður sem eru í líkaninu og hönnun skv. Q-kerfinu því fullnægjandi.

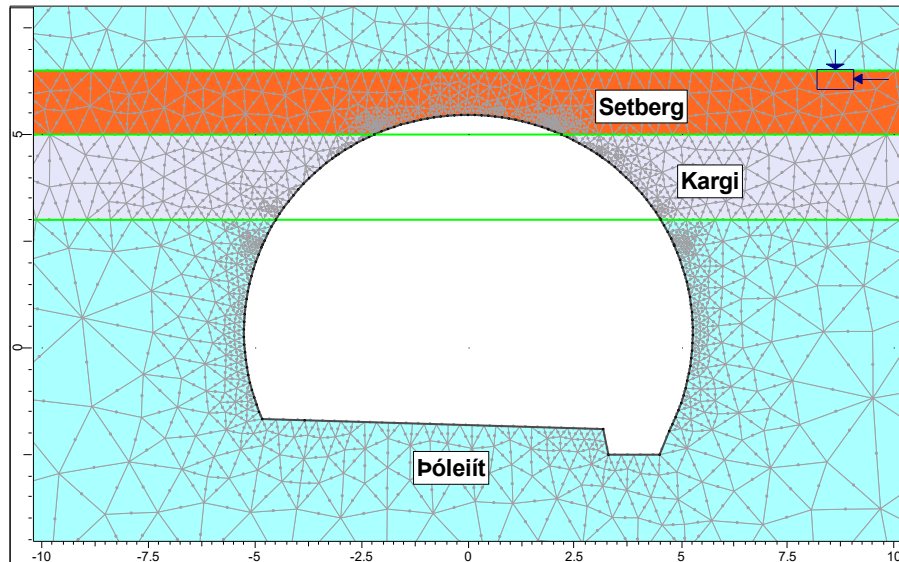
Þó að niðurstöðurnar séu mjög góðar fyrir öll tilfelli má þó einnig sjá á töflu 8.10 að breytingar í GSI-stuðli bergmassans hefur hlutfallslega mikil áhrif á fjölda hnigna bergeininga og bergfærslur.

Tafla 8.10: Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 1.

Líkan 1	GSI-10	Grunnlíkan	GSI+10
Færslur [mm]	10 (+67%)	6	4 (-33%)
Hnignar einingar			
- Berg	309 (+78%)	174	33 (-81%)
- Boltar	0	0	0
- Steypa	0	0	0

8.2. Líkan af svæði 2

Líkan 2 er staðsett í stöð nr. 1282,5 og er jarðlagabykkt yfir svæðinu 100m og spennur í bergmassanum ákvarðaðar í töflu 8.4. Bergstyrkingar í líkani 2 eru hannaðar út frá Q-kerfinu og er gert ráð fyrir að bil milli bergbolta sé það sama í og úr plani.



Mynd 8.14: Líkan 2 (mælistikur eru í metrum).

Líkan 2 liggur að mestu leyti í basalti en í þekju líkansins eru lög af basaltkarga og setbergi. Fyrir ofan þessi lög er síðan basaltlag. Kargalagið er 2m þykkt og setbergslagið er 1,5m þykkt. Efniseiginleika bergmassans er að finna í töflum 8.11 og 8.12.

Tafla 8.11: Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 2.

Eiginleiki	Þóleiit-basalt	Kargi	Setberg	
σ_{ci}	208	22	15,3	MPa
GSI	55	50	20	-
m_i	25	25	17	-
D	0	0	0	-
E_i	42	7	3,88	GPa

8. Líkanreikningar

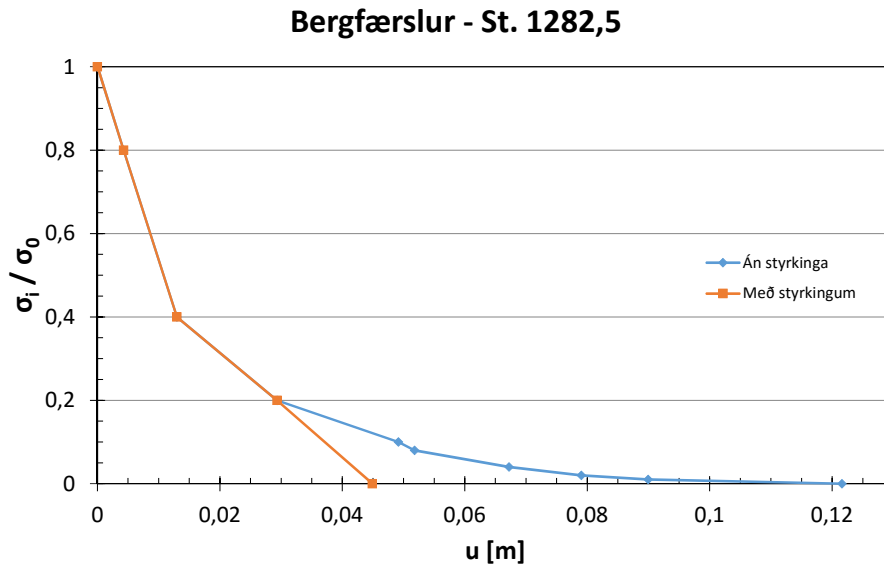
Tafla 8.12: Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 2.

Eiginleiki	Þóleiít-basalt	Kargi	Setberg	
m_b	5,011	4,19	1,395	-
s	0,007	0,004	0,0004	-
a	0,504	0,506	0,522	-
c	14,60	1,444	0,650	MPa
ϕ	40	38,450	29	°
σ_{cm}	62,54	5,980	2,206	MPa
E_{rm}	17,15	2,150	0,177	GPa
Útvíkkunarstuðull	0,82	0,74	0	-

8.2.1. Niðurstöður líkanreikninga

Heildarfærslur

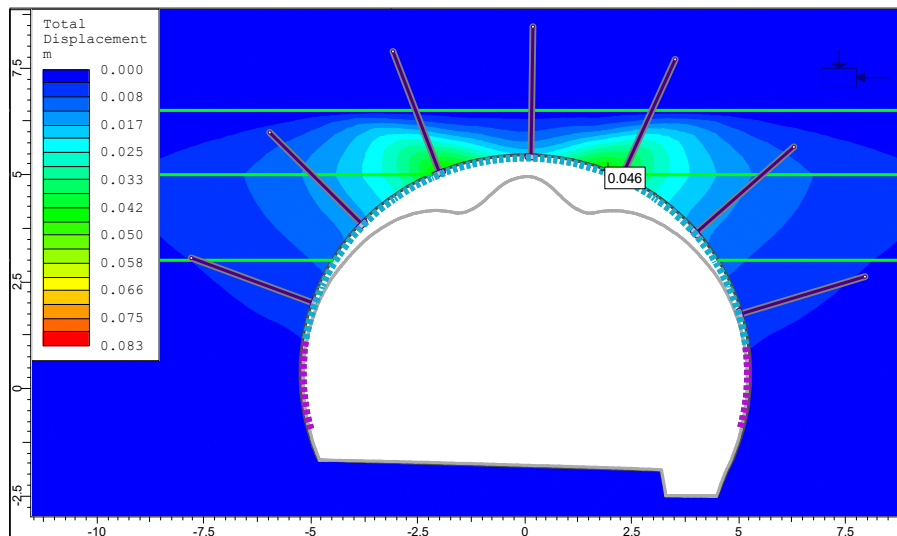
Bergfærslur í þekju líkans 2, með og án bergstyrkinga, eru sýndar á mynd 8.15. Sjá má hvernig bergfærslur í þekju ganganna fara upp í rúmlega 12cm án bergstyrkinga. Bergstyrkingar í göngunum eru settar upp þannig að þær byrja að virka eftir að 80% þrýstispennu hefur verið fjarlægð úr göngunum. Sjá má hvernig bergstyrkingarnar virka og styðja við bergið þannig að bergstyrkingar í grunntilfelli líkans 2 hindra hátt í 2/3 af færslum í þekju ganganna.



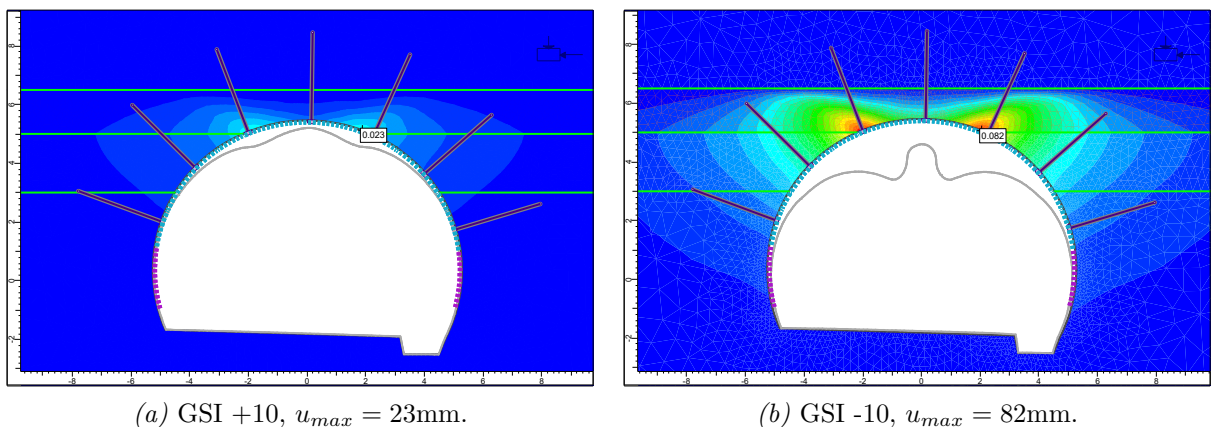
Mynd 8.15: Bergfærslur í þekju líkans 2. Sjá má hvar bergstyrkingar byrja að hafa áhrif á bergfærslur.

Á myndum 8.16 og 8.17 má sjá færslur í bergmassanum umhverfis gangaþversniðið. Færslur í berginu eru táknaðar með litaskala, sem er eins á öllum myndum til að auðvelda samanburð. Á myndunum má einnig sjá afmyndað þversnið jarðganganna, sem er stækkað 25-falt.

Stærstu færslurnar eru í þekju gangaþversniðsins á mörkum setlagsins og kargalagsins. Færslur í þekju líkans 2, þegar GSI gildi bergmassa eru eins og lýst er í töflu 8.11, mælast 46mm. Þegar GSI gildi í bergmassanum eru aukin (mynd 8.17a) og minnkuð (mynd 8.17b) um 10 breytast færslurnar nokkuð. Mestu færslur verða þegar GSI stuðullinn er lækkaður um 10, en þá verða færslur í þekju ganganna 82mm.



Mynd 8.16: Bergfærslur í líkani 2. Stærstu færslur mældust $u_{max} = 46\text{mm}$. Afmyndað þversnið ganganna er táknað með grárri línu og eru stækkaðar 25-falt (mælistikur eru í metrum).

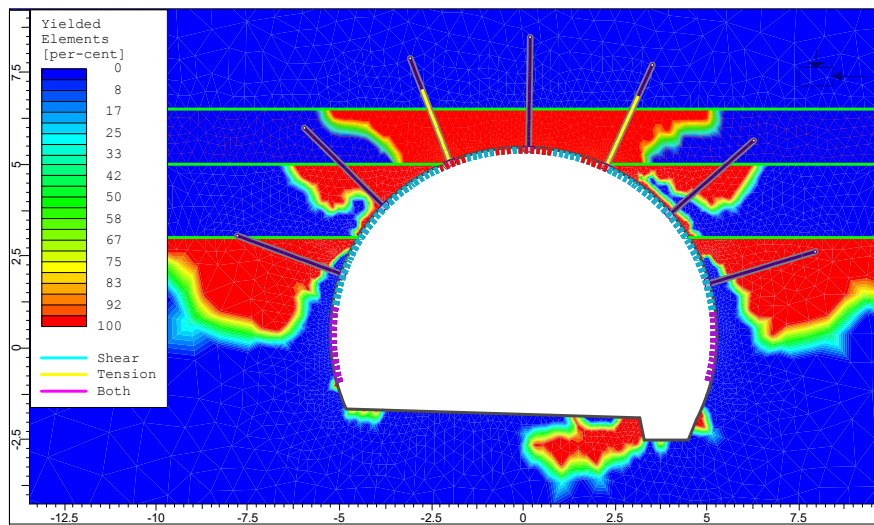


Mynd 8.17: Sjá má hvernig breytingar á GSI stuðli bergmassans hafa áhrif á bergfærslur í líkani 2.

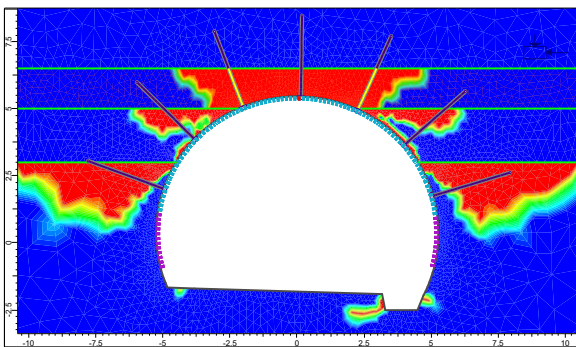
Hnignar einingar

Á myndum 8.18 og 8.19 má sjá þær einingar sem hníga í hverju tilfalli. Hlutfall hniginna bergeininga er sýnt á myndum með litaskala, þar sem rauður litur tákna 100% fyrir algjörlega hnignar einingar. Hnignar boltaeiningar eru merktar með ljósbláum, gulum eða bleikum lit eftir því hvers konar kraftur varð til að einingin fór í flotástand.

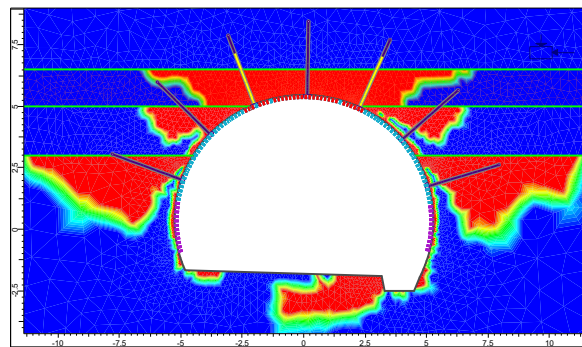
Hnignu einingarnar í þessu líkani eru að stórum hluta í setlaginu í þekju jarðganganna og síðan hnígur berg á mörkum karga og sets, og á mörkum karga og basalts. Bergboltar sem fara í flot eru þeir sem liggja hvað mest í gegnum setlagið og hnignun verður í sprautusteypunni í þekju gangaþversniðsins. Sjá má að hnignum einingum fjölgar talsvert eftir því sem GSI-gildið minnkar.



Mynd 8.18: Hnignar einingar í líkani 2. Heildarfjöldi hniginna bergeininga er 683, fjöldi hnigna boltaeininga er 29, fjöldi hnigna steypueininga er 22 (mælistikur eru í metrum).



(a) GSI +10. Berg: 587, boltar: 26, steypa: 1.



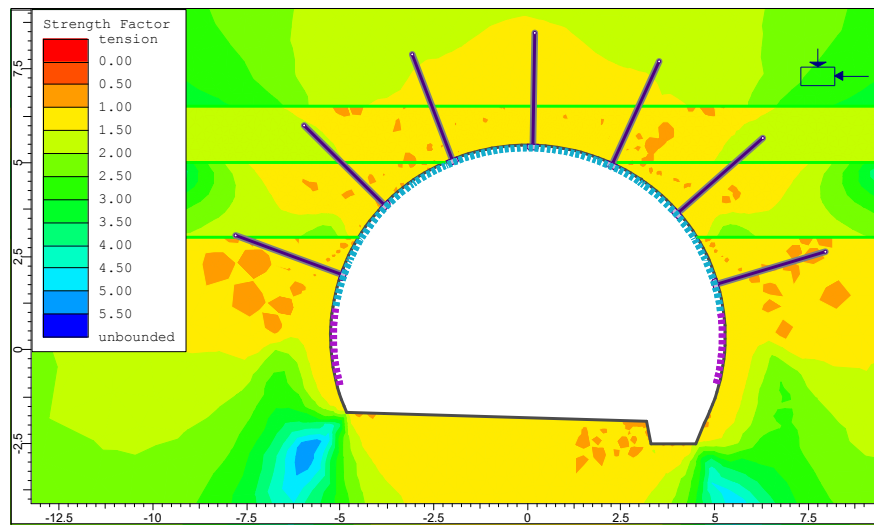
(b) GSI -10. Berg: 853, boltar: 31, steypa: 32.

Mynd 8.19: Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hnigna eininga í líkani 2. Við hærri GSI gildi hníga færri einingar.

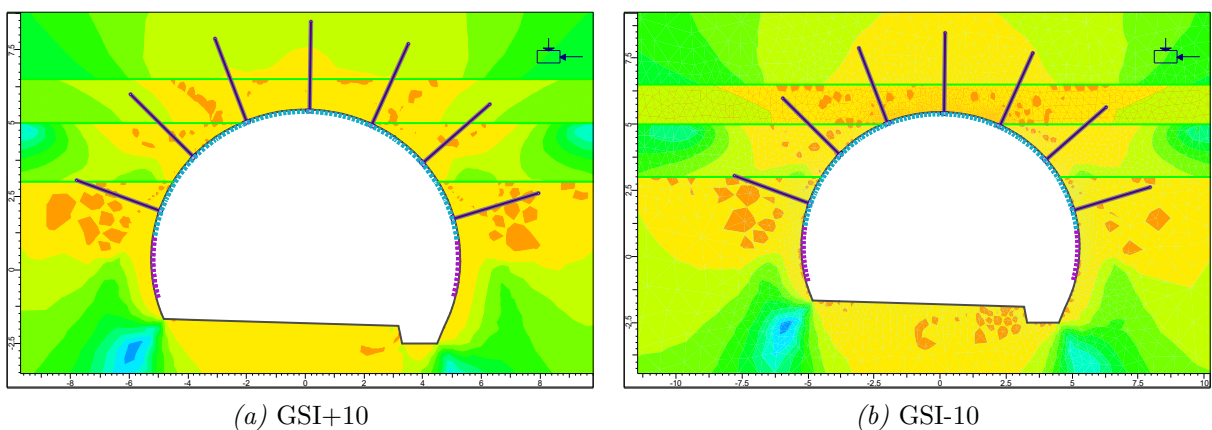
Styrkstuddull bergs

Á myndum 8.20 og 8.21 má sjá styrkstuddul bergmassans í kringum um jarðgöngin. Styrkstuddullinn er táknaður með litaskala þar sem appelsínugulur og rauður litur tákna styrkstuddul ≤ 1 , sem er talinn óöruggur og berg á appelsínugulum svæðum því örugglega hnigið. Gul svæði tákna bergmassa þar sem styrkstuddullinn er $1 \leq SF \leq 1,5$.

Það berg sem hefur styrkstuddul $\leq 1,5$ er annaðhvort hnigið eða við það að hníga. Sjá má að aukning verður á svæðum þar sem styrkstuddullinn er ≤ 1 eftir því sem GSI studdullinn er lækkaður.



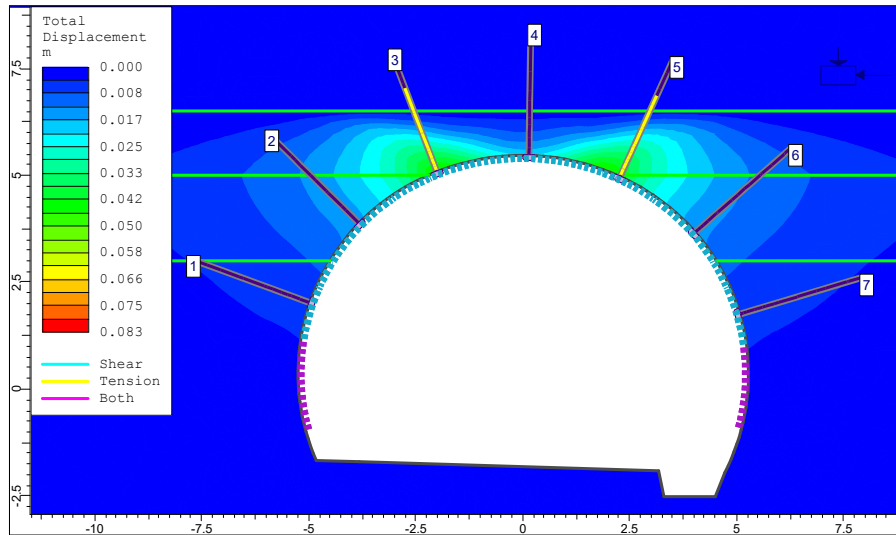
Mynd 8.20: Styrkstuddull bergmassans reiknaður fyrir líkan 2. Appelsínugul svæði tákna styrkstuddul sem er ≤ 1 , þar sem bergmassinn er talinn vera hniginn (mælistikur eru í metrum).



Mynd 8.21: Áhrif GSI studdulsins á styrkstuddul bergmassa í líkani 2. Sjá má að fyrir lægri GSI gildi verður styrkstuddullinn lægri.

Öryggi bergstyrkinga

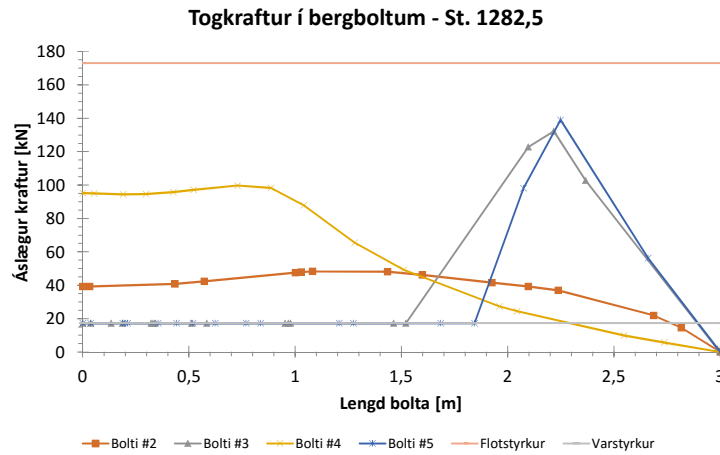
Til að leggja mat á virkni og jafnframt öryggi bergstyrkinga í líkönum er áslægur kraftur í bergboltum skoðaður auk þess að skoðaðir eru ferlar áslægs krafts á móti skerkræfti (SN-graf) annars vegar og vægis (MN-graf) hins vegar fyrir sprautusteypunum. Sjá má hvernig bergboltar eru númeraðir á mynd 8.22.



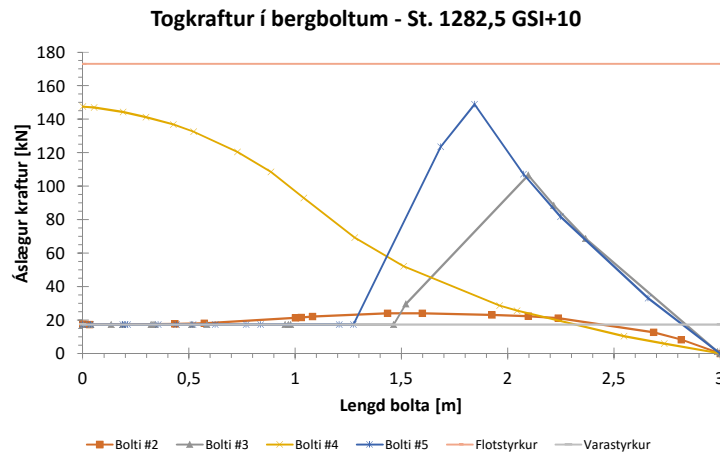
Mynd 8.22: Tölusetning bergbolta í líkani 2 (mælistikur eru í metrum).

Á myndum 8.23 sést hvernig breytingar í GSI stuðli hafa áhrif á þann togkraft sem verkar í bergboltum í líkani 2. Í öllum tilfellum fer togkraftur í boltum 3 og 5 yfir flotstyrk á einhverjum hluta þeirra og því styrkur eininganna festur í varastyrk boltans skv. boltamódeli. Þessir tveir boltar geta því ekki talist fyllilega öruggir og hafa jafnvel brugðist einhverstaðar á hnigna svæðinu. Þeir hlutar boltanna sem fara yfir flotstyrk boltanna eru næst gangaþversniðinu og liggja að mestu í gegnum setlagið. Sá hluti boltanna sem nær yfir í basaltið hefur ennþá burði til að taka við meiri togkrafti. Ef boltarnir væru lengri og næðu þar með lengra inn í basaltlagið gætu þeir tekið við meiri togkröftum á því svæði. Enginn bergbolti í líkani 2 hnígur eftir allri lengd boltans.

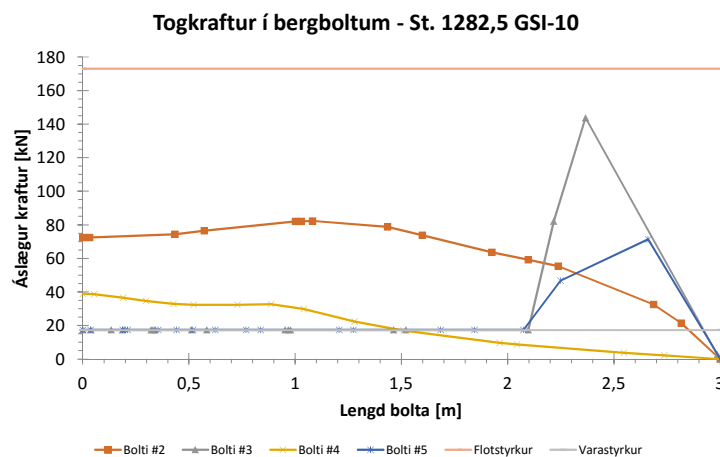
Sjá má einnig hvernig togkraftur í bergboltum sittthvoru megin við bolta 3 og 5 breytist með breytilegu GSI gildi. Þegar GSI gildið er hærra fær bolti 4 á sig meiri kraft en í grunntilfellinu á meðan boltar 2 og 6 fá á sig minni kraft. Þessu er síðan öfugt farið þegar GSI gildið er lækkað. Þá fá boltar 2 og 6 meiri kraft en bolti 4. Á myndum 8.23 er bolti 6 ekki sýndur þar sem krafturinn í honum er nánast sá sami og í bolta 2. Boltar 1 og 7 eru heldur ekki sýndir þar sem þeir bera ekki mikinn kraft.



(a) Grunnlíkan



(b) GSI +10



(c) GSI -10

Mynd 8.23: Togkraftur í völdum bergboltum í líkani 2. Sjá má hvernig breyting í GSI stuðli breytir kröftum sem verka á bergstyrkingar.

8. Líkanreikningar

Í líkani 2 reynir mest á sprautusteypu í þekju ganganna á meðan mun minni áraun er á sprautusteypu í veggjum ganganna. Á mynd 8.24 eru sýnd stuðningsgetugröf fyrir grunntilfellið og þegar GSI stuðlum er breytt um ± 10 . Sjá má að fleiri einingar lenda utan við þær brotlíkingar sem settar eru upp fyrir stuðning frá sprautusteypunni þegar GSI gildið er lækkað. Þær einingar sem lenda utan brotlíkinganna eru öll í þekju ganganna, þar sem færslur eru mestar.

Í því tilfelli sem GSI er hækkað um 10 hnígur aðeins ein sprautusteypueining. Þessi eining er staðsett í toppi þekju ganganna og er einingin merkt sérstaklega inn á mynd 8.24b með hring. Athygli vekur að sú eining sem hnígur er ekki komin utan við þau mörk sem skilgreind eru af öryggisstuðli 1. RS^2 virðist því meta sem svo að þessi ákveðna eining sé það nálægt falli að hún sé svo gott sem hnigin. Það er samt athugavert útaf fyrir sig þar sem aðrar einingar sprautusteypufóðringarinnar eru nær öryggisstuðlinum 1. Í hinum tilfellunum, þar sem sprautusteypan hnígur, má sjá að einingarnar eru komnar vel út fyrir öryggisstuðlana, sem merktir eru inn á stuðningsgetugrófin.

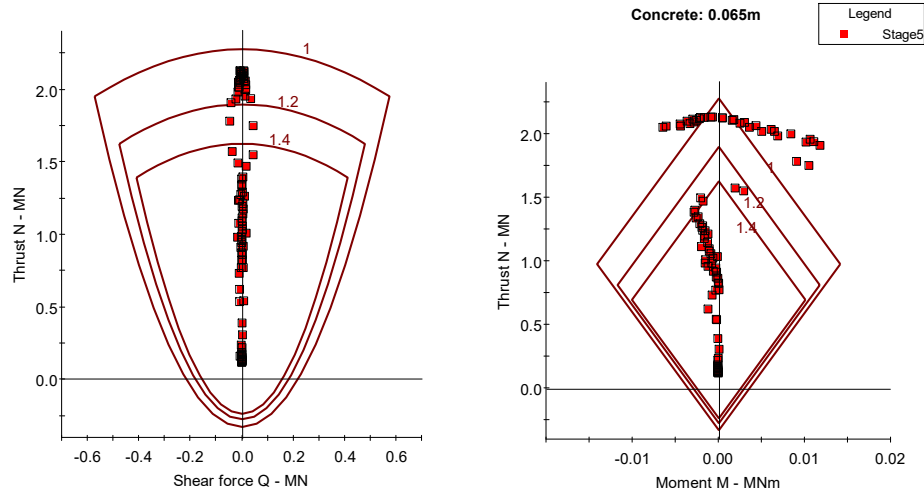
Samanburður

Eins og sjá má á töflu 8.13 eru bæði bergfærslur og fjöldi hnigna bergeininga og bergstyrkinga í líkani 2 meiri heldur en í líkani 1. Aukinn fjöldi hnigna bergeininga gefur til kynna að plastískar hreyfingar í berginu, vegna jarðgangagerðarinnar, verða á stærra svæði heldur en í líkani 1. Þar sem nokkur fjöldi bergbolta- og sprautusteypueininga hníga í líkani 2 gefur það einnig til kynna að frekari bergstyrkinga sé þörf áður en hægt er að kalla bergstyrkinguna varanlega. Fyrir þær aðstæður sem eru í líkaninu verður því að segjast að hönnun skv. Q-kerfinu er ekki fullnægjandi sem varanleg styrking.

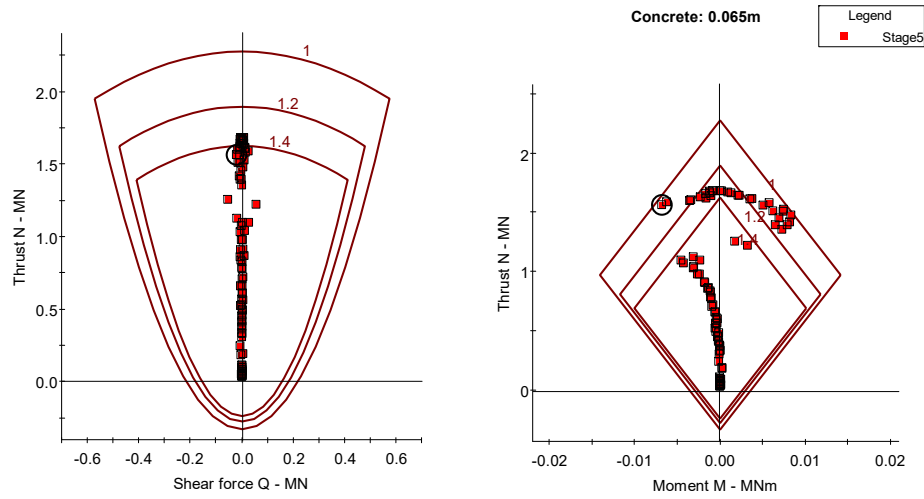
Í töflu 8.13 má sjá að breytingar í GSI-stuðli bergmassans hafa hlutfallslega mikil áhrif á fjölda hnigna eininga og bergfærslur. Þessi áhrif voru þó hlutfallslega meiri fyrir líkan 1. Athyglisvert er að minni munur er á hnignum boltaeiningum milli tilfella heldur en er á öðrum einingum. Einnig er áhugavert að ef GSI-stuðull bergmassans eykst hnígur aðeins ein sprautusteypueining. Sprautusteypulagið er því á mörkunum að vera fullnægjandi fyrir það tilfelli þó að hlutar sprautusteypunnar þoli ekki álagi í hinum tilfellunum.

Tafla 8.13: Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 2.

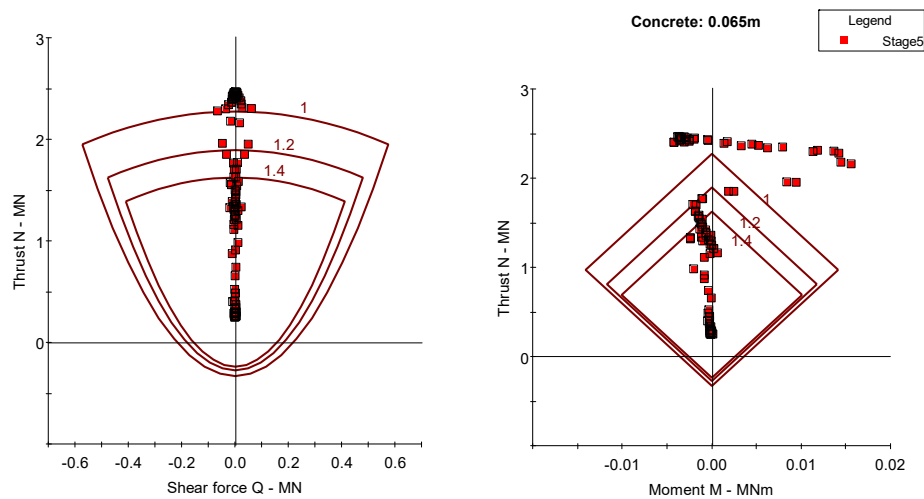
Líkan 2	GSI-10	Grunnlíkan	GSI+10
Færslur [mm]	82 (+78%)	46	23 (-50%)
Hnignar einingar			
- Berg	853 (+25%)	683	587 (-14%)
- Boltar	31 (+7%)	29	26 (-10%)
- Steypa	32 (+45%)	22	1 (-95%)



(a) Grunnlíkan.



(b) GSI +10, hnigna einingin er merkt með hring.

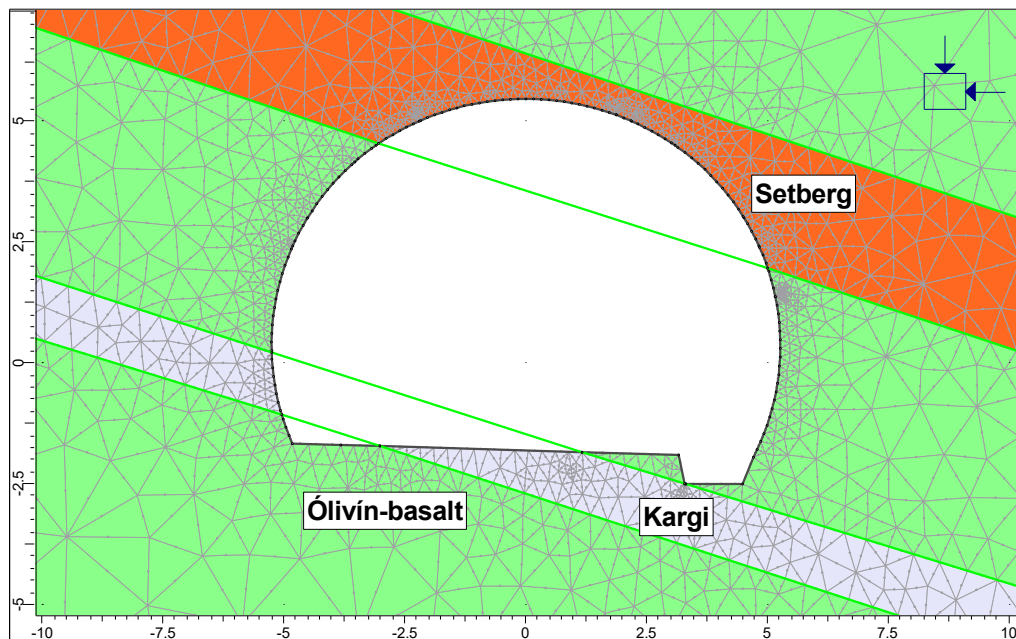


(c) GSI -10.

Mynd 8.24: Áhrif GSI stuðulsins á stuðningsgetugröf fyrir sprautusteypu í þekju gangaþversniðsins í líkani 2. Sjá má að fleiri sprautusteypuæiningar lenda utan brotlíkans þegar GSI gildi er lækkað.

8.3. Líkan af svæði 3

Líkan 3 er staðsett í stöð nr. 7205 Fnjóskadalsmegin í Vaðlaheiðargöngum. Þykkt jarðlaga yfir líkani 3 er 200m og spennur í bergmassanum eru ákvarðaðar í töflu 8.4. Bergstyrkingar í líkani 3 eru hannaðar út frá Q-kerfinu og gert er ráð fyrir að bil milli bergbolta sé það sama í og úr plani.



Mynd 8.25: Líkan 3 (mælistikur eru í metrum).

Líkan 3 liggur að miklu leyti í ólivín-basalti en jarðgöngin liggja í gegn um þykk, hallandi lög af setbergi í þekju ganganna og karga í botni gangaþversniðsins. Efniseiginleika bergmassans er að finna í töflum 8.14 og 8.15.

Tafla 8.14: Inntaksstærðir fyrir líkan af rannsóknarsvæði 3.

Eiginleiki	Ólivín-basalt	Kargi	Setberg	
σ_{ci}	143	22	15,3	MPa
GSI	45	50	20	-
m_i	25	25	17	-
D	0	0	0	-
E_i	27	7	3,88	GPa

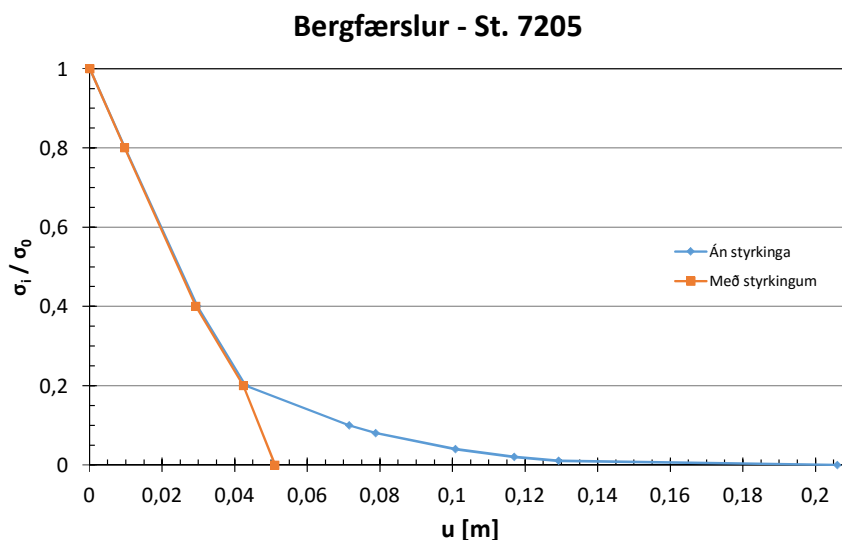
Tafla 8.15: Efnisstuðlar Hoek & Brown og Mohr-Coulomb fyrir líkan 3.

Eiginleiki	Ólivín-basalt	Kargi	Setberg	
m_b	3,506	4,192	0,976	-
s	0,002	0,004	0,00014	-
a	0,508	0,506	0,544	-
c	8,76	1,444	0,650	MPa
ϕ	37	38,450	29	°
σ_{cm}	35,10	5,980	2,206	MPa
E_{rm}	6,04	2,150	0,177	GPa
Útvíkkunarstuðull	0,64	0,74	0	-

8.3.1. Niðurstöður líkanreikninga

Heildarfærslur

Bergfærslur í þekju líkans 3, með og án bergstyrkinga, eru sýndar á mynd 8.26. Sjá má að bergfærslur í þekju ganganna fara uppfyrrir 20cm án bergstyrkinga, sem er í um 2% af umfangi ganganna. Bergstyrkingar í líkani 3 eru settar upp þannig að þær byrja að virka eftir að 80% þrýstisþennu hefur verið fjarlægð úr göngunum. Sjá má hvernig bergstyrkingarnar í grunntilfalli líkans 3 taka við rétt um 3/4 af færslum í þekju ganganna í sama punkti og tekið var mið af án bergstyrkinga. Með bergstyrkingum eru færslur í þessum punkti $u = 51mm$.

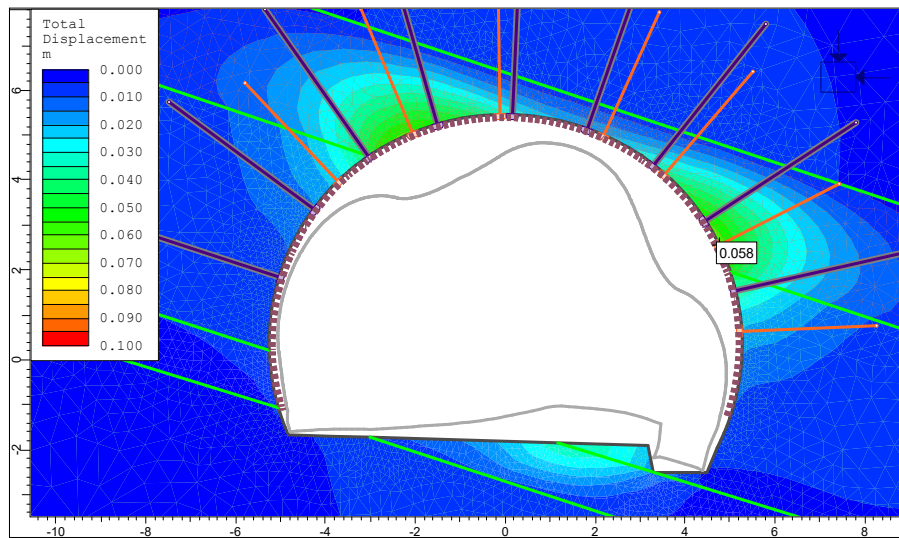


Mynd 8.26: Heildarbergfærslur í þekju líkans 3. Sjá má hvar bergstyrkingar byrja að hafa áhrif á bergfærslur.

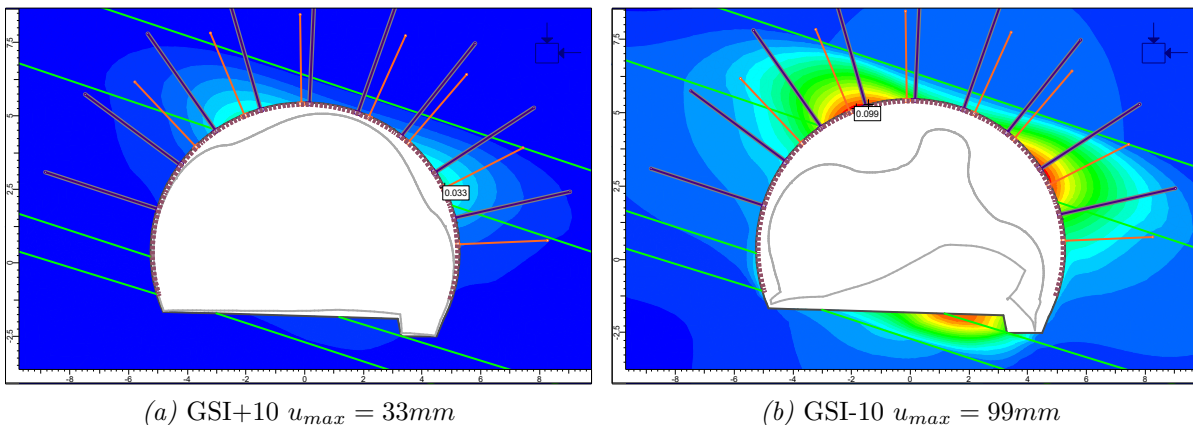
8. Líkanreikningar

Á myndum 8.27 og 8.28 má sjá færslur í bergmassanum umhverfis gangaþversniðið. Færslur í berginu eru táknaðar með litaskala, sem er eins á öllum myndum til að auðvelda samanburð. Á myndunum má einnig sjá afmyndað þversnið jarðganganna, sem er stækkað 25-falt.

Stærstu færslurnar eru í þekju gangaþversniðsins á mörkum setlagsins og kargalagsins. Færslur í þekju líkans 3, þegar GSI gildi bergmassa eru eins og lýst er í töflu 8.14, mælast 58mm. Þegar GSI gildi bergmassans eru aukin (mynd 8.28a) og minnkuð (mynd 8.28b) um 10 breytast færslurnar nokkuð. Mestu færslur verða þegar GSI stuðullinn er lækkaður um 10, en þá verða færslur í þekju ganganna 99mm.



Mynd 8.27: Bergfærslur í líkani 3. Stærstu færslur mældust $u_{max} = 58\text{mm}$. Afmyndað þversnið ganganna er táknað með grárri línu og eru stækkaðar 25-falt (mælistikur eru í metrum).

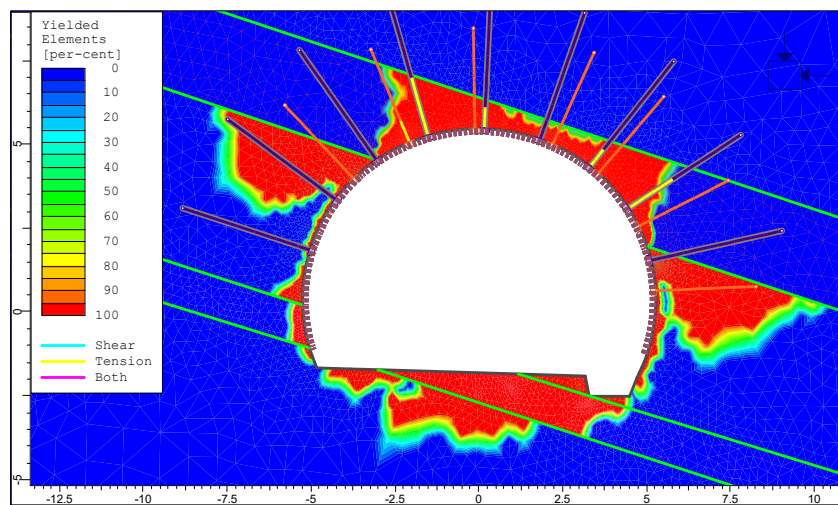


Mynd 8.28: Sjá má hvernig breytingar á GSI stuðli bergmassans hafa áhrif á bergfærslur í líkani 3.

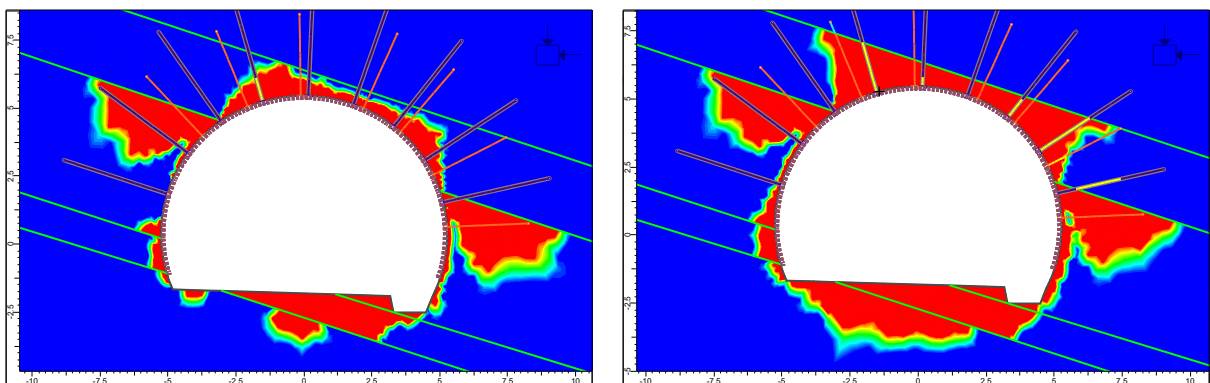
Hnignar einingar

Á myndum 8.29 og 8.30 má sjá þær einingar sem hníga í hverju tilfalli fyrir sig. Hlutfall hniginna bergeininga er sýnt á myndum með litaskala, þar sem rauður litur táknar 100% fyrir algjörlega hnignar einingar. Hnignar boltæiningar eru merktar með ljósbláum, gulum eða bleikum lit eftir því hvers konar kraftur varð til að einingin fór í flotástand.

Hnignar einingar í þessu líkani eru að stórum hluta í setlagi líkansins og á mörkum sets og ólivín-basalts. Einnig ber mikið á hnignum einingum í kargalaginu, við botn gangaþversniðsins, og á mörkum þess við basaltið. Bergboltar sem fara í flot eru þeir sem liggja hvað mest í gegnum setlagið. Sjá má að hnignum einingum fjölgar talsvert eftir því sem GSI-gildið lækkar. Engin grindarbogaening hnígur skv. útreikningum RS^2 á líkani 3.



Mynd 8.29: Hnignar einingar í líkani 3. Heildarfjöldi hniginna bergeininga er 1023, fjöldi hnigna boltæininga er 45 en engin grindarbogaening hneig (mælistikur eru í metrum).



(a) GSI +10. Berg: 857, boltar: 7

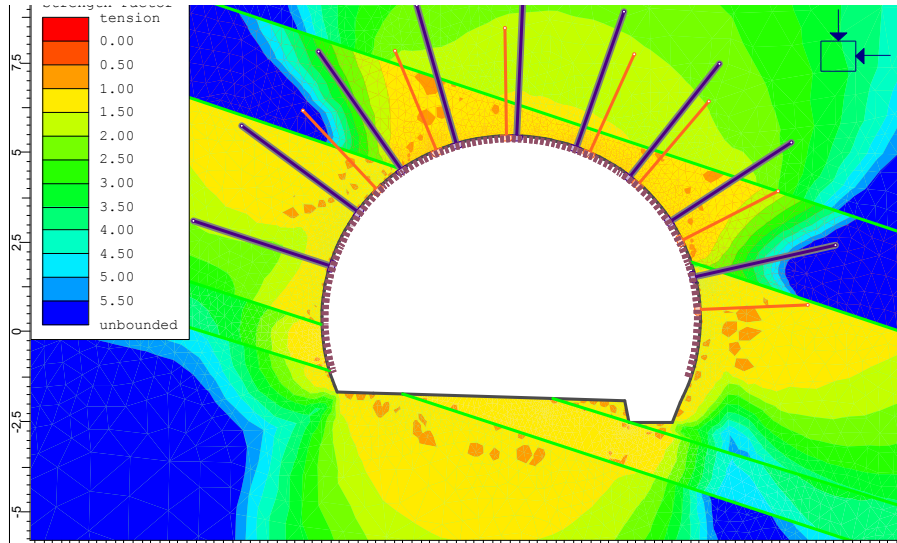
(b) GSI -10. Berg: 1125, boltar: 62

Mynd 8.30: Áhrif GSI stuðulsins á fjölda hniginna eininga í líkani 3. Við hærri GSI gildi hníga færri einingar.

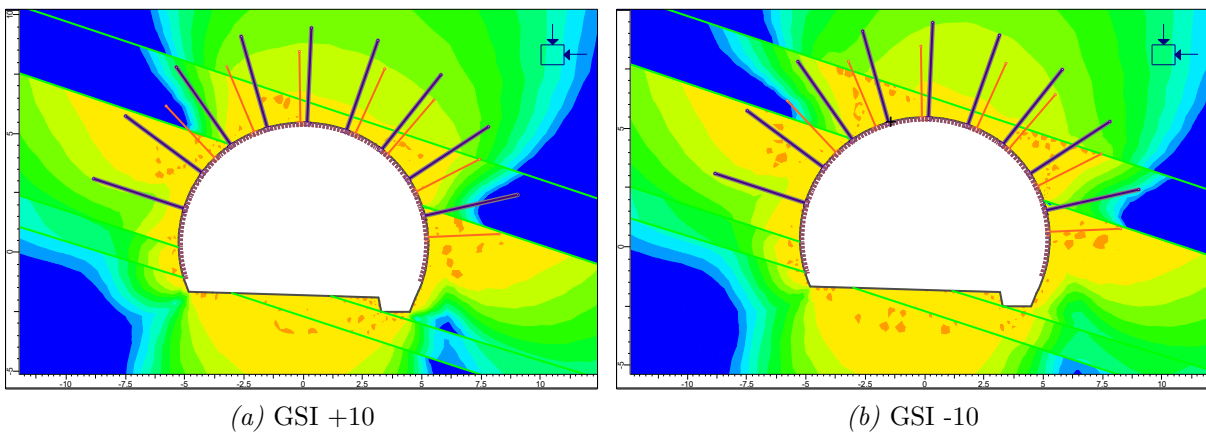
Styrkstuduðull bergs

Á myndum 8.31 og 8.32 má sjá styrkstuduðul bergmassans í kringum jarðgöngin. Styrkstuduðullinn er táknadur með litaskala þar sem appelsínugulur og rauður litur táknar styrkstuduðul ≤ 1 , sem er talinn óöruggur og berg á appelsínugulum svæðum því örugglega hnigið. Gul svæði tákna bergmassa þar sem styrkstuduðullinn er $1 \leq SF \leq 1,5$.

Það berg sem hefur styrkstuduðul $\leq 1,5$ er annaðhvort hnigið eða við það að hníga. Sjá má að aukning verður á svæðum þar sem styrkstuduðullinn er ≤ 1 eftir því sem GSI stuðullinn er lækkaður.



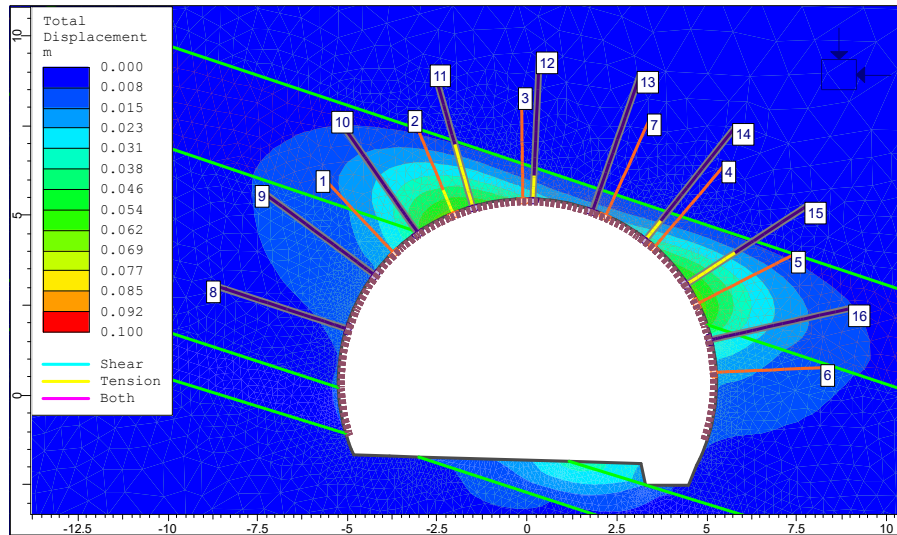
Mynd 8.31: Styrkstuduðull bergmassans reiknaður fyrir líkan 3. Appelsínugul svæði tákna styrkstuduðul sem er ≤ 1 , þar sem bergmassinn er talinn vera hniginn (mælistikur eru í metrum).



Mynd 8.32: Áhrif GSI stuðulsins á styrkstuduðul bergmassa í líkani 3. Sjá má að fyrir lægri GSI gildi verður styrkstuduðullinn lægri.

Öryggi bergstyrkinga

Til að leggja mat á virkni og jafnframt öryggi bergstyrkinga í líkönum er áslægur kraftur í bergboltum skoðaður auk þess að skoðaðir eru ferlar áslægs krafts á móti skerkræfti (SN-graf) annars vegar og vægis (MN-graf) hins vegar fyrir sprautusteypunna. Sjá má hvernig bergboltar eru númeraðir á mynd 8.33.

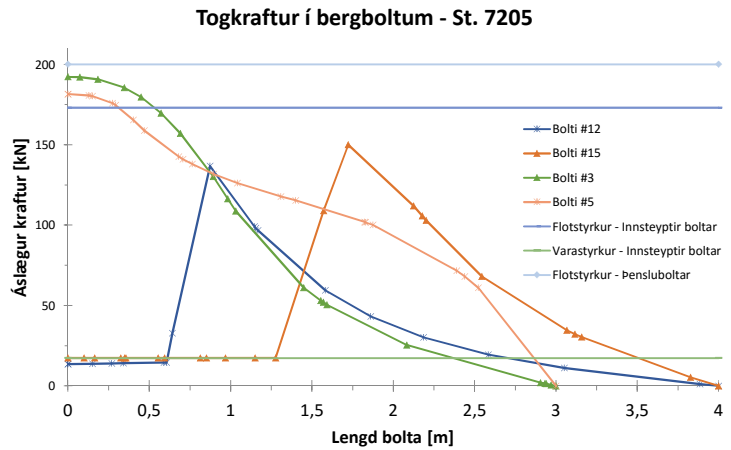


Mynd 8.33: Tölusetning bergbolta í líkani 3 (mælistikur eru í metrum).

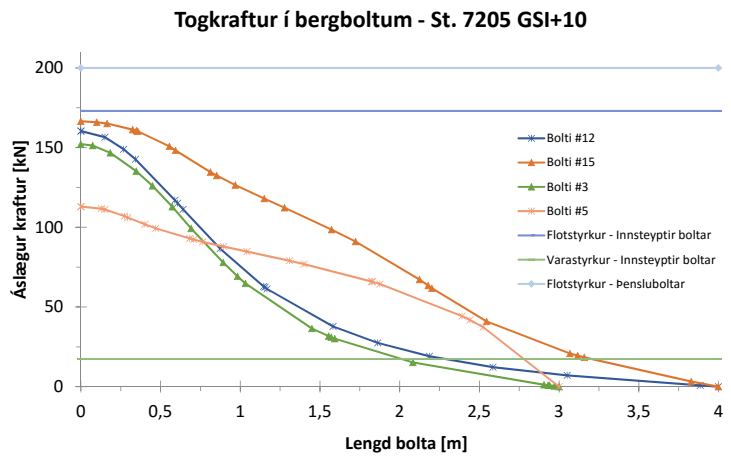
Á myndum 8.34 sést hvernig breytingar í GSI stuðli hafa áhrif á þann togkraft sem verkar í bergboltum í líkani 3. Í líkani 3 eru tvennskonar boltar notaðir, annars vegar 3m langir þensluboltar og hins vegar 4m langir innsteyptir bergboltar. Upplýsingar um þessa bergbolta er að finna í töflu 8.5.

Í öllum tilfellum fara einn eða fleiri bergboltar yfir flotmörk og geta þeir boltar því ekki talist fyllilega öruggir eftir það. Bergboltar 3, 5, 12 og 15 eru staðsettir á krítískum stöðum í líkaninu, þar sem miklar færslur verða í bergmassanum. Boltar 3 og 5 eru þensluboltar á meðan boltar 12 og 15 eru innsteyptir bergboltar. Þessir boltar eru gott dæmi um hvernig GSI stuðullinn hefur áhrif á virkni bergstyrkinga.

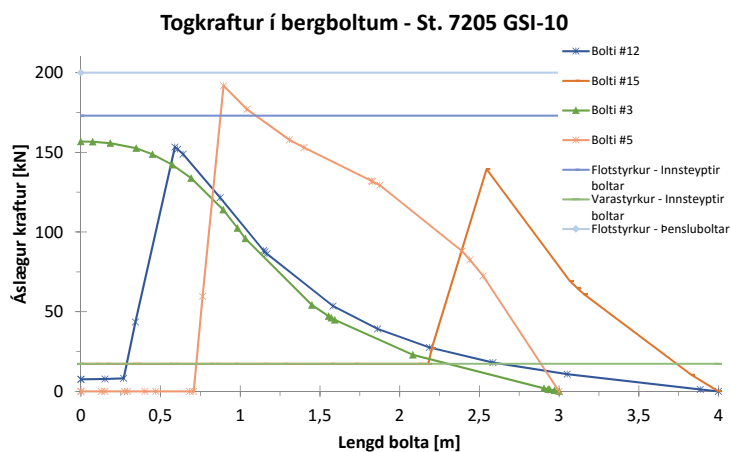
Þegar GSI gildi bergmassans eru aukið um 10 fer enginn af þessum fjórum boltum í flotástand. Þá þola allir bergboltarnir meiri togkraft, enda togkraftur í allri lengd boltanna undir flotstyrk (mynd 8.34b). Í grunnlíkaninu og tilfellinu þar sem GSI-stuðullinn er lækkaður (myndir 8.34a og 8.34b), eru innsteyptu bergboltarnir komnir í flotástand næst gangaþversniðinu, þar sem þeir liggja í setlaginu. Sá hluti boltanna sem liggur í basalti hefur ennþá burðargetu uppá að hlaupa.



(a) Grunntilfalli



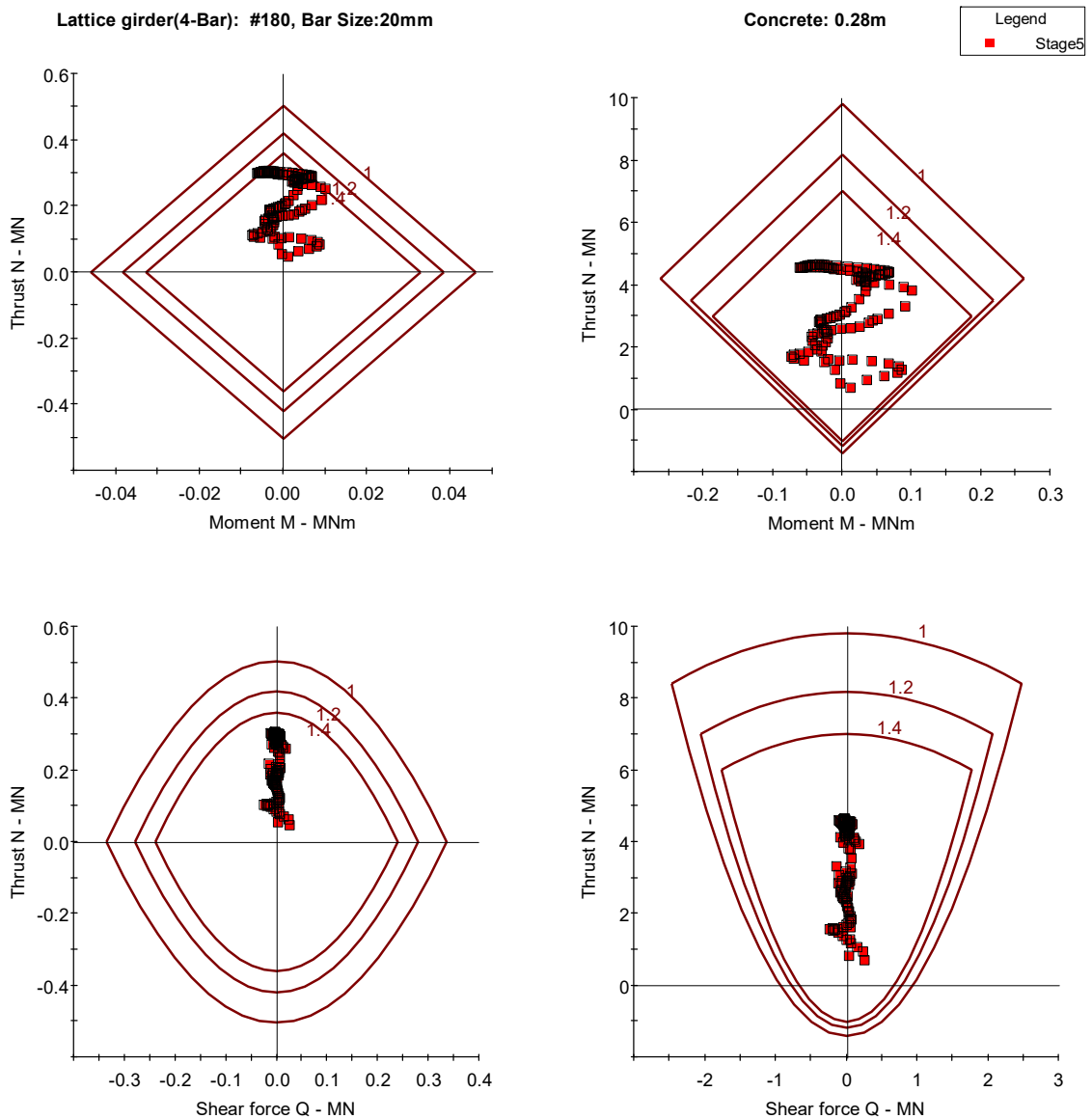
(b) GSI +10



(c) GSI -10

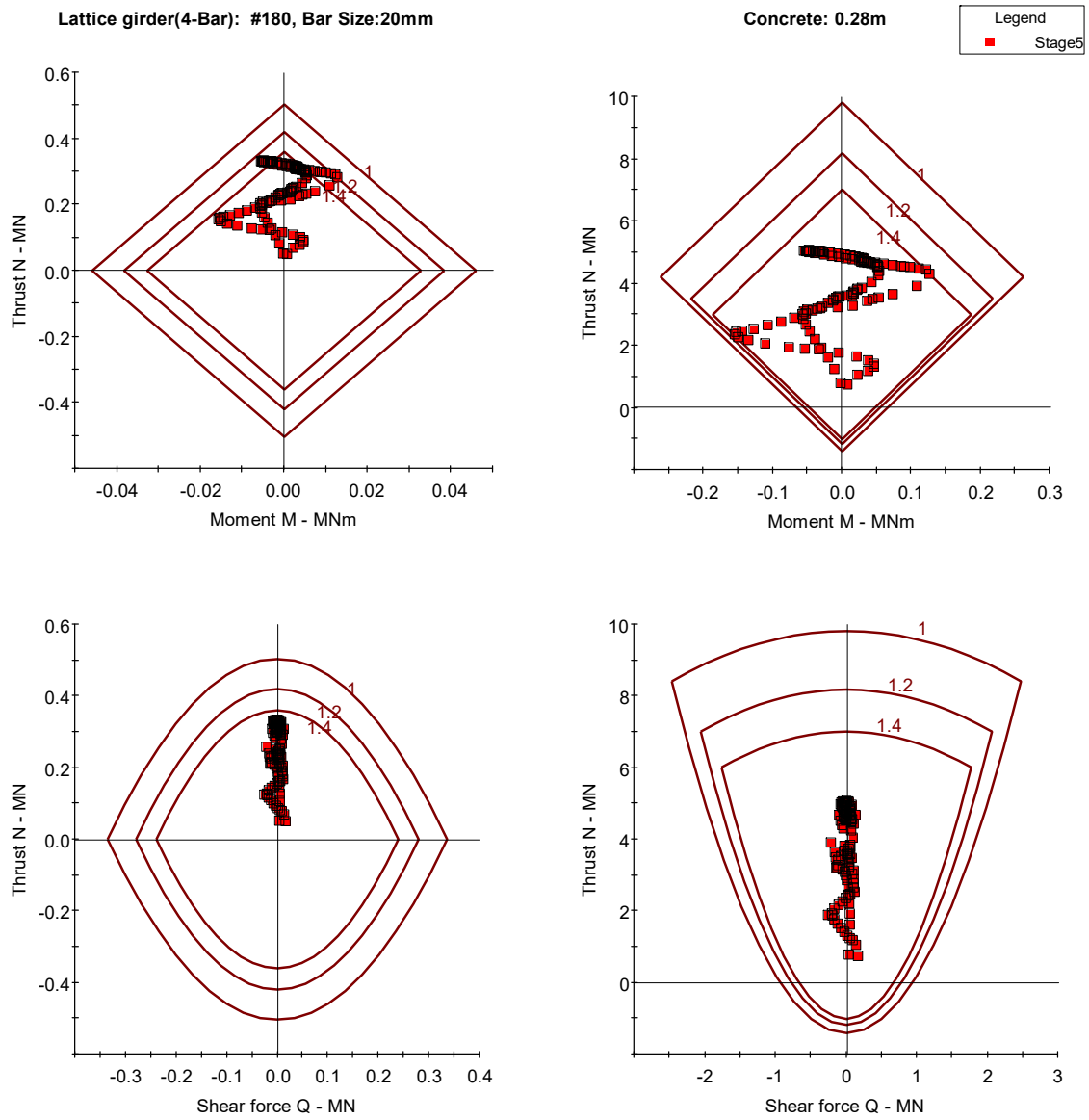
Mynd 8.34: Togkraftur í völdum bergboltum í líkani 3. Sjá má hvernig breyting í GSI stuðli breytir kröftum sem verka á bergstyrkingar.

Í líkani 3 reynir mest á grindarvogann í þekju ganganna á meðan mun minni áraun er á grindarvogann í veggjum ganganna. Á mynd 8.35 eru sýnd stuðningsgetugröf fyrir grindarbitann í grunntilfelli líkans 3 og á mynd 8.36 er sýnt stuðningsgetugraf fyrir grindarbitann þegar GSI stuðlar í líkaninu eru lækkaðir um 10. Sá má að kraftar sem verka á einingar grindarbitans eru stærri þegar GSI gildið er lækkað. Nokkrar einingar bogans lenda á mörkum öryggisstuðulanna 1,2 og 1,4 en annars lenda engar einingar utan brotlíkansins og er því grindarbitinn öruggur skv. útreikningum RS^2 .



Mynd 8.35: Stuðningsgetugraf grindarbitans sem notaður er í grunntilfelli líkans 3

8. Líkanreikningar



Mynd 8.36: Stuðningsgetugraf grindarbitans sem er notaður í líkani 3, þegar GSI gildi bergmassans eru lækkuð.

Samanburður

Eins og sjá má á töflu 8.16 eru bæði bergfærslur og fjöldi hnigna bergeininga og bergstyrkinga í líkani 3 meiri heldur en í líkönum 1 og 2. Aukinn fjöldi hnignanna bergeininga gefur til kynna að plastískar hreyfingar í berginu, vegna jarðgangagerðarinnar, verða á stærra svæði heldur en í fyrri líkönum og það kemur heim og saman við upphaflegt val á rannsóknarsvæði 3, þar sem vænst var eftir lakari gangagerðaraðstæðum.

Þar sem engin eining grindarboga hnígur í líkani 3 má draga þá ályktun að þeir grindarbogar sem notaðir voru við líkanagerðina séu nægilega sterkir fyrir þær aðstæður sem líkt var eftir. Þar sem nokkur fjöldi bergboltaeininga hníga í líkani 3 gefur það til kynna að frekari bergstyrkinga sé þörf áður en hægt er að kalla bergstyrkinguna varanlega. Enginn bergbolti hnígur þó eftir allri lengd boltans svo alltaf er eitthvað hald eftir í bergboltum í líkani 3. Einnig er rétt að athuga að ekki er gert ráð fyrir forboltun í líkani 3 en það er gert við raunverulegar aðstæður í Vaðlaheiðargöngum og myndi að öllum líkindum hafa jákvæð áhrif á hnignar boltaeiningar í líkani 3. Fyrir þær aðstæður sem eru í líkaninu verður því að segjast að hönnun skv. Q-kerfinu þyrfti að endurskoða áður en hægt væri að kalla hana varanlega styrkingu.

Í töflu 8.16 má sjá að breytingar í GSI-stuðli bergmassans hafa hlutfallslega mikil áhrif á fjölda hnigna styrkingaeininga og bergfærslur. Þessi munur er í raun mjög sambærilegur því sem sást í líkani 2. Athyglisvert er að minni munur er á hnignum bergeiningum milli tilfella heldur en er á öðrum einingum líkansins.

Tafla 8.16: Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir líkan 3.

Líkan 3		GSI-10	Grunnlíkan	GSI+10
Færslur	[mm]	99 (+71%)	58	33 (-43%)
Hnignar einingar				
- Berg		1125 (+10%)	1023	857 (-16%)
- Boltar		62 (+38%)	45	7 (-84%)
- Grindarbogar		0	0	0

9. Samantekt og umfjöllun

Samantekt á niðurstöðum samanburðar á hönnun bergstyrkinga skv. Q-kerfi og þeim bergstyrkingum sem hafa verið settar upp á völdum rannsóknarsvæðum í Vaðlaheiðargöngum (sjá töflur 7.9, 7.15 og 7.23) má sjá í töflu 9.1. Aflestur Q-kerfisins miðast við að bergboltar séu 3m langir og að notuð sé trefjastyrkt sprautusteypa hvort sem grindarbitar eru settir upp eða ekki. Athuga skal að á þeim tíma sem þessi ritgerð er skrifuð á eftir að ákveða lokastyrkingu á rannsóknarsvæðunum. Á rannsóknarsvæðum 1 og 2 eru notaðir 3m langir innsteyptir boltar og trefjastyrkt sprautusteypa. Á rannsóknarsvæði 3 eru notaðir 4 og 5m langir innsteyptir boltar og 3m langir þensluboltar auk endafestra-, sjálfborandi- og blandaðra bergbolta. Á rannsóknarsvæði 3 er einnig notast við fjögurra banda grindarboga með 20mm sver langjárn og trefjastyrkta sprautusteypu.

Tafla 9.1: Niðurstöðum fyrir samanburð á uppsettum bergstyrkingum og hönnun bergstyrkinga skv. Q-kerfinu.

Rannsóknarsvæði 1		Q-kerfi	Uppsett	Frávik frá Q-kerfi
Bergboltar	[stk]	137	130	-5,4%
Sprautusteypa	[m ³]	33,9	51,8	34,5%
Rannsóknarsvæði 2				
Bergboltar	[stk]	216	114	-89,5%
Bergboltar í þekju	[stk]	172	114	-51%
Sprautusteypa	[m ³]	48,9	81	40%
Rannsóknarsvæði 3				
Bergboltar	[stk]	196	234	16,2%
Sprautusteypa	[m ³]	130,4	129,5	-0,6%
Grindarbogar	[stk]	6	8	25%

Á rannsóknarsvæði 1 eru niðurstöðurnar eins og búast mátti við. Uppsettur fjöldi bergbolta er í góðu samræmi við Q-kerfið en 34,5% meira er notað af trefjastyrktri sprautusteypu heldur en Q-kerfið mælir fyrir um. Ekki er óalgengt að notað sé allt að 40% meira af sprautusteypu heldur en gert er ráð fyrir með einföldum rúmmálsútreikningum. Aukið magn uppsettrar sprautusteypu á rannsóknarsvæði 1 verður að hluta til vegna yfirbrots, hrjúfleika yfirborðs, styrkingu stafns og endurkasts af yfirborði jarðganganna. Ekki er búið að taka endanlega ákvörðun um uppsetningu lokastyrkinga en sé miðað við Q-kerfið þarf ekki mikla styrkingu til viðbótar til að fullnægja fyrirskrifuðu magni Q-kerfisins.

9. Samantekt og umfjöllun

Á rannsóknarsvæði 2 eru niðurstöðurnar ekki alveg eins og búist var við í upphafi. Sjá má að 40% meira er notað af sprautusteypu heldur en gert er ráð fyrir skv. Q-gildinu og skýrist það aftur af því að meira magn sprautusteypu er notað vegna yfirbrots, hrjúfleika yfirborðs, styrkingu stafns og endurkasts af yfirborði jarðganganna. Hins vegar sést að hingað til hafa verið notaðir 89,5% færri bergboltar á rannsóknarsvæði 2 en Q-kerfið mælir fyrir um sé miðað við að boltar séu settir upp á mörkum veggja og þekju ganganna. Sé miðað við að aðeins séu settir upp bergboltar í þekju ganganna eru notaðir 51% færri bergboltar heldur en Q-kerfið mælir fyrir um. Þessi munur orsakast aðallega af því að á rannsóknarsvæði 2 er ekki búið að setja upp endanlega bergstyrkingu og því á eftir að setja upp einhverja bergbolta.

Á rannsóknarsvæði 3 eru uppsettar bergstyrkingar aftur frábrugðnar því sem Q-kerfið kveður á um. Álíka magn trefjastyrktrar sprautusteypu er notað á rannsóknarsvæðinu og Q-kerfið mælir fyrir um ólíkt rannsóknarsvæðum 1 og 2. Hluti af þessari sprautusteypu er notaður af sömu ástæðum og hafa verið taldar upp áður til að styrkja óstöðug svæði og til að fylla upp í yfirbrot en að því sögðu er ekkert athugavert við það að setja upp sama magn bergstyrkinga og Q-kerfið segir til um. Hafa skal í huga að ekki er búið að ákvarða endanlegar bergstyrkingar.

Á rannsóknarsvæði 3 eru notaðir fleiri bergboltar og grindarbogar heldur en Q-kerfið segir til um. Eins og áður hefur verið nefnt fer magn bergstyrkinga ekki aðeins eftir því berggæðamatskerfi sem er notað hverju sinni heldur einnig eftir mati eftirlitsmanna á berggæðum. Rannsóknarsvæði 3 er mest krefjandi jarðfræðilega séð af öllum rannsóknarsvæðunum þar sem þykkt skáhallandi setlag nær yfir stóran hluta þekju ganganna. Því kemur ekki á óvart að notaðir séu fleiri bergboltar en Q-kerfið segir til um svo að vinnustyrking á svæðinu sé örugg áður en sett er upp lokastyrking.

Þetta á einnig við um grindarbogana, en þegar þeir eru notaðir sem akkeri fyrir forboltun verður að taka mið af því hvar forboltunar er þörf og það getur Q-kerfið ekki gert. Sú staðreynd að það er bara 2 grindarbogum meira á þessu rannsóknarsvæði heldur en Q-kerfið segir til um bendir til þess að viðmið Q-kerfisins sé góð nálgun á fjölda grindarboga. Hins vegar verður að athuga líka að staðsetning grindarboga skv Q-kerfinu og skv. því sem er talið þurfa á staðnum (sjá mynd 7.16) er allt önnur og því ekki hægt að segja að kerfið hafi fyllilega rétt fyrir sér.

Gerð voru líkön af einum stað á hverju rannsóknarsvæði og þau skoðuð með bergtækni-forritinu RS^2 til að skoða hvernig breytingar í inntaksstærðum fyrir bergmassa hefðu áhrif á virkni fyrirskrifaðra styrkinga. Fyrir hvert líkan var skilgreint grunntilfelli og síðan sitthvert tilfellið þar sem GSI stuðli bergmassans var breytt um ± 10 . Fyrsta líkanið var einsleitasta líkanið, en gangaþversniðið var í samfelldu lagi af sterku þóleiít-basalti. Annað líkanið var að mestu í þóleiít-basalti með lögum af basaltkarga og setbergi í þekju gangaþversniðsins. Þriðja líkanið var að stórum hluta í ólivín-basalti en í gegn um göngin liggja þykk, hallandi lög af setbergi í þekju ganganna og karga í botni gangaþversniðsins. Samantekt á niðurstöðum líkanreikninga fyrir hvert tilfelli (sjá töflur 8.10, 8.13 og 8.16) má sjá í töflu 9.2.

Tafla 9.2: Samantekt á bergfærslum og hnignum einingum fyrir öll líkön.

Líkan 1		GSI-10		Grunnlíkan		GSI+10	
Færslur	[mm]	10	(+67%)	6		4	(-33%)
Hnignar Einingar							
- Berg		309	(+78%)	174		33	(-81%)
- Boltar		0		0		0	
- Steypa		0		0		0	
Líkan 2							
Færslur	[mm]	82	(+78%)	46		23	(-50%)
Hnignar Einingar							
- Berg		853	(+25%)	683		587	(-14%)
- Boltar		31	(+7%)	29		26	(-10%)
- Steypa		32	(+45%)	22		1	(-95%)
Líkan 3							
Færslur	[mm]	99	(+71%)	58		33	(-43%)
Hnignar Einingar							
- Berg		1125	(+10%)	1023		857	(-16%)
- Boltar		62	(+38%)	45		7	(-84%)
- Steypa		0		0		0	

Breytingar á GSI-stuðlum bergmassa höfðu talsverð áhrif á bergfærslur í öllum líkönum. Þegar GSI-gildi bergmassans í líkanreikningunum var lækkað jukust bergfærslur milli 67 og 78% á meðan hækkun GSI-gilda bergmassa varð til þess að bergfærslur minnkuðu milli 33 og 50%. Breytingar á GSI-stuðlum höfðu einnig áhrif á fjölda bergeininga sem urðu fyrir varanlegum breytingum við gangaframkvæmdina. Í fyrsta líkani hnigu fæstar bergeiningar en hlutfallslegar breytingar urðu stærstar við breytingar á GSI-gildum. Í líkönum 2 og 3 hnigu mun fleiri bergeiningar en 10-25% fleiri einingar hnigu þegar GSI-stuðullinn var lækkaður og 14-16% færri einingar hnigu þegar GSI-stuðullinn var hækkður.

Í líkani 1 fór engin bergstyrking út fyrir sitt fjaðursvið og því stóðust bergstyrkingar skv. Q-kerfinu þær kröfur sem settar voru á þær í líkani 1. Í líkani 2 hnigu bæði bergbolta- og sprautusteypueningar í öllum tilfellum. Enginn bergbolti hneig eftir allri lengd sinni svo allir bergboltarnir höfðu meiri togstyrk upp á að hlaupa en þó þarf að íhuga möguleikann að setja upp fleiri bergbolta. Það að sprautusteypueningar hnigu gefur til kynna að setja mætti upp þykkara lag sprautusteypu heldur en Q-kerfið mælir fyrir um áður en kalla mætti styrkinguna varanlega. Í líkani 3 hníga bergboltaeiningar í öllum tilfellum en engin grindarbogaening hnígur. Eins og í líkani 2 hnígur enginn bergbolti eftir allri lengd sinni en að sama skapi þarf að íhuga að setja mætti upp fleiri eða lengri bergbolta áður en styrkingin mætti teljast varanleg. Það að engin hnignun verður í grindarboga líkans 3 bendir til þess að sú tegund grindarboga sem notuð var hafi fullnægjandi styrk fyrir þær aðstæður sem voru í líkaninu.

9. Samantekt og umfjöllun

Niðurstöður þessa verkefnis verður að skoða í ljósi þeirra takmarkana sem verkefninu eru sett. Einungis eru skoðuð þrjú rannsóknarsvæði og á hverju þeirra er aðeins skoðað eitt líkan svo niðurstöðurnar sýna aðeins lítinn hluta ganganna. Gera mætti mun ítarlegri samanburð á mismunandi GSI-gildum, inntaksstærðum bergmassa (einása styrk og fjaðurstuðul svo fátt eitt sé nefnt) og k-gildum fyrir hvert líkan og skoða mætti áhrif mismunandi þrýstispennu á jarðgöngin fyrir og eftir uppsetningu bergstyrkinga. Við gerð reiknilíkana var farið eftir jarðfræðiskýrslum sem gerðar eru við gerð Vaðlaheiðarganga um staðsetningu jarðlaga miðað við gangaþversniðið. Þessar skýrslur innihéldu engar mælingar á jarðlagabyggingum eða halla jarðlaga svo líkönin voru gerð eftir auganu til að líkjast því sem gangagerðarmenn sáu á hverjum stað.

Gerð líkana, samskonar þeim sem eru notuð hér í þessari ritgerð, þarf hvorki að vera erfið né tímafrek. Því mætti nota líkön sem þessi til að áætla á mjög fljótlegan hátt hvernig bergstyrkingar og berg á eftir að hegða sér á meðan gangagerð stendur. Erfiðast við líkangerð sem þessa er að ákvarða réttar inntaksstærðir fyrir bergmassa og bergstyrkingar. Notkun bergtækniþrýstis getur því komið að góðum notum til þess að meta helstu álags-
svæði og öryggi fyrirhugaðra bergstyrkinga á meðan göng eru gerð en þau koma ekki í staðin fyrir þekkingu á bergtækni og reynslu í gangagerð þegar hanna á örugg veggöng.

10. Lokaorð

Hönnun hagkvæmari og öruggari vegganga er ávallt markmið þeirra sem koma að gerð slíkra mannvirkja. Til þess að auðvelda hönnunarferli bergstyrkinga í jarðgöngum eru berggæðamatskerfi eins og Q-kerfið notuð með góðum árangri sem viðmið um hverskonar bergstyrkingar virka fyrir viss berggæði. Á Íslandi er hefur notkun Q-kerfisins gefið góða raun undanfarna áratugi og er ætlast til að Q-kerfið sé haft til hliðsjónar við hönnun bergstyrkinga í Vaðlaheiðargöngum. Þó ekki sé gert ráð fyrir ítarlegri úttekt á fylgni uppsettra bergstyrkinga og meðmælum Q-kerfisins á gangagerðartíma geta niðurstöður slíkra rannsókna hjálpað til við aðlögun berggæðamatskerfa s.s. Q-kerfisins að íslenskum aðstæðum og gert mat á bergstyrkingum og áætlanagerð nákvæmari fyrir næstu gangaframvkæmdir.

Við samanburð uppsettra bergstyrkinga í Vaðlaheiðargöngum við fyrirskrifaðar bergstyrkingar samkvæmt Q-kerfinu var stuðst við athuguð Q-gildi frá verktaka ganganna, Ósafi, sem og skýrslum um uppsettar bergstyrkingar frá eftirliti ganganna, Eflu og Geotek. Þegar þessi ritgerð er skrifuð hefur endanlegt magn styrkinga ekki verið ákvarðað svo reynt var að taka tillit til þess í samanburði bergstyrkinga eins og hægt var.

Niðurstöður samanburðar á bergstyrkingum voru að mestu leyti í samræmi við væntingar. Notkun bergbolta á rannsóknarsvæðum var minni en gert var ráð fyrir samkvæmt Q-kerfinu á rannsóknarsvæðum 1 og 2 á meðan meira var notað af bergboltum á svæði 3, þar sem skilyrði til gangagerðar voru hvað lökust. Athygli vakti hversu mikill munur var á fjölda uppsettra bergbolta og því magni sem hönnun skv. Q-kerfi skilaði. Þann mun má að hluta til skýra með því að uppsettar styrkingar hafa ekki verið endanlega ákvarðaðar en einnig geta forsendur um styrk setlags í þekju ganganna verið á skjön við það sem var í raunveruleikanum.

Á rannsóknarsvæðum 1 og 2 var meira notað af trefjastyrktri sprautusteypu heldur en Q-kerfið gerir ráð fyrir en sá munur skýrist að hluta til vegna frákasts af veggjum ganganna, hrjúfleika yfirborðs, yfirbrots og staðbundinna styrkinga í stafni ganganna. Á rannsóknarsvæði 3 var uppsett magn sprautusteypu í takt við það sem Q-kerfið fyrirskrifaði en svo gæti farið að við það magn bætist þegar endanlegar styrkingar eru valdar. Á rannsóknarsvæði 3 voru notaðar grindarbogar til að auka styrkingu og veita fastan punkt fyrir forboltun á rannsóknarsvæðinu. Notaðir voru tveim fleiri grindarbogar heldur en Q-kerfið mælti fyrir um svo segja má að nálgun Q-kerfisins hafi verið nokkuð góð.

10. Lokaorð

Gerðir voru líkanreikningar af einum stað á hverju rannsóknarsvæði með bergtækniforritinu RS^2 , sem byggir á einingaraðferð til útreikninga á hegðun bergmassa og bergstyrkinga. Í þessum líkönum var reynt að líkja eftir raunverulegum aðstæðum eins og hægt var og var líkt eftir þeim bergstyrkingum sem Q-kerfið mælti fyrir um. Við líkanreikninga voru áhrif breytinga á GSI-stuðli bergmassans skoðuð í hverju tilfelli og ákvarðað hvaða áhrif þessar breytingar höfðu á öryggi styrkinga og bergfærslur. Gert var grunntilfelli fyrir hvert líkan og GSI-stuðlinum breytt um ± 10 .

Breytingar á GSI-stuðli bergmassans um ± 10 hafði talsverð áhrif á hversu vel fyrirskrifaðar bergstyrkingar stóðu sig. Bergstyrkingar stóðu sig í öllum tilfellum betur fyrir hærri GSI gildi, enda styrkur bergsins meiri og því meira álag á bergstyrkingarnar. Við lægri GSI gildi voru síðan meiri líkur á að bergstyrkingar hnigu. Því sést að miklu máli skiptir að velja inntaksstærðir fyrir bergmassa vandlega til að val á bergstyrkinum sé rétt metið. Ekkert svæðanna varð þó fyrir því að útreikningarnir gæfu til kynna að bergstyrkingar gæfu sig í neinu líkananna svo því verða bergstyrkingarnar að teljast veita sæmilegt öryggi.

Reikningar þessara líkana gaf til kynna að fyrirskrifaðar bergstyrkingar með Q-kerfinu komast mjög nálægt því að uppfylla þau öryggisskilyrði sem sett eru á bergstyrkingar í veggöngum. Í fyrsta líkaninu stóðust bergstyrkingarnar álagið án þess að nokkur styrkingareining hnigi. Í líkönum 2 og 3 hnigu bergstyrkingareiningar í öllum tilfellum sem gefur til kynna að hugsa þurfi um hvort bæta þurfi við bergstyrkingum á þeim svæðum áður en kalla má styrkingarnar endanlegar.

Þegar gerð eru líkön með bergtækniforritum eins og RS^2 eru möguleikar til frekari rannsókna og athugana nánast endalausir. Gera mætti frekari athuganir á þeirri hegðun bergs og bergstyrkinga sem verður við breyttar inntaksstærðir fyrir berg og bergstyrkingar auk þess sem athuga mætti áhrif þess að breyta bergstyrkingum á þeim svæðum sem bergstyrkingar hníga.

Heimildir

- Ágúst Guðmundsson. (2011). *Vaðlaheiðargöng - Skýrsla um rannsóknarboranir 2010 og samantekin niðurstada jarðfræðirannsókna* (Tech. Rep.). Jarðfræðistofan Ehf. unnið fyrir Vegagerðina.
- Ágúst Guðmundsson, & Giuliani, G. W. (2007). *Vaðlaheiðargöng - Jarðfræðiskýrsla 2007* (Tech. Rep.). Reykjavík: Jarðfræðistofan Ehf. unnið fyrir Greið leið Ehf.
- Atlas Copco. (2009). *Swellex - Rock Bolts from Atlas Copco. Solutions from Materials Technology*. Retrieved from <http://minovaglobal.com/resources/res-documents/MinovaRSA-SwellexBrochure.pdf>
- 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(5), 506–532.
- Crowder, J., & Bawden, W. (2004). Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research. *Rocscience website*, 1–14.
- Deere, D. U., & Deere, D. W. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years* (Tech. Rep.). DTCI Document unnið fyrir US Army Corps of Engineers.
- de Vallejo, L. I. G., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. Leiden, NL.
- DYWIDAG-System International. (2003). *Mechanical Anchors and Rebar Rock Bolts*. Retrieved from <https://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI-ALWAG-Systems{ }Mechanical-Anchors-and-Rebar-Rock-Bolts{ }en.pdf>
- DYWIDAG-System International. (2004). *Pantex® Lattice Girders*. Retrieved from <https://www.dsicivil.com.au/uploads/media/DSI{ }ALWAG-Systems{ }Pantex-Lattice-Girders{ }en.pdf>
- DYWIDAG-System International. (2005). *CT-Bolt™ Combination Rock Bolt*. Retrieved from <https://www.dywidag.co.uk/uploads/media/DSI{ }ALWAG-Systems{ }CT-Bolt{ }Combination{ }Rock{ }Bolt{ }en{ }01.pdf>
- Einar Hrafn Hjálmarsson. (2015). *Fyrirlestur í Berg- og Sprengitækni*. Reykjavík.
- Einar Hrafn Hjálmarsson. (2016). *Tölvupóstur 11.03.2016*.
- Friðleifur Ingi Brynjarsson. (2012). *Endurskoðuð umferðarspá um Vaðlaheiðargöng 2016 - 2050*. Reykjavík.

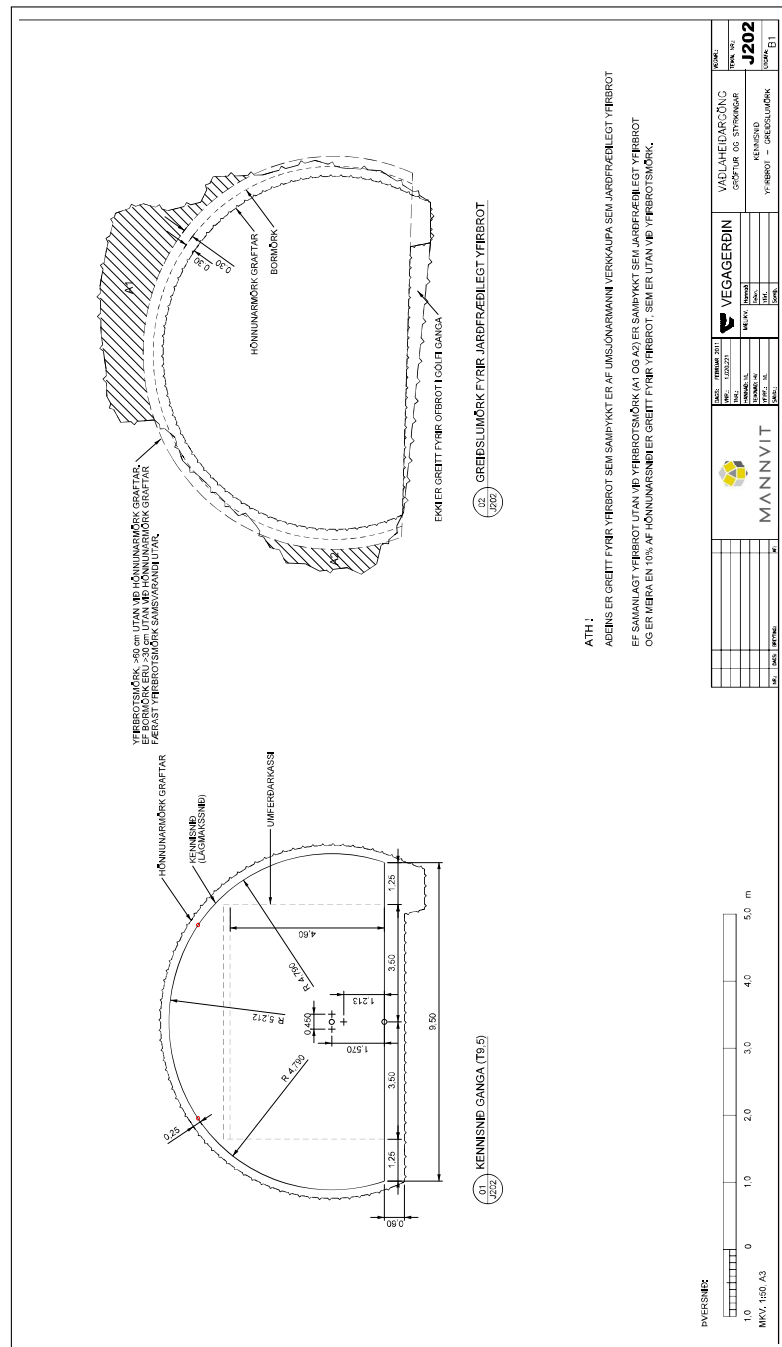
- Gísli Eiríksson. (2009). *Kortlagning á jarðfræði og styrkingum í jarðgöngum* (No. September 2009). Reykjavík. Retrieved from <http://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Kortlagning{ }bergs{ }i{ }gongum/{\protect\T1\textdollar}file/Kortlagningbergs{í}g{ö}ngum.pdf>
- Grimstad, E., & Barton, N. (1993). *Updating the Q-system for NMT*.
- 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.
- Hallgrímur Örn Arngrímsson, & Þorri Björn Gunnarsson. (2009). *Tunneling in Acidic , Atered and Sedimentary Rock in Iceland - Búðarhálsvirkjun* (M.sc. thesis). DTU.
- Haraldur Hallsteinsson, & Matthías Loftsson. (2011). *Rannsóknir á eiginleikum setbergs í Vaðlaheiði* (Tech. Rep.). Unnið af Mannvit fyrir Vegagerðina.
- Hegert, G. (1988). *Stresses in Rock*. Rotterdam, NL: A.A.Balkema.
- Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Vancouver, Canada: Evert Hoek Consulting Engineering Inc.
- Hoek, E., Carranza, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition. Retrieved from <https://rockscience.com/documents/hoek/references/H2002.pdf>
- Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunneling International, Part 1-2*(November), 1–20. Retrieved from <http://www.rockscience.com/hoek/references/H2000d.pdf>
- Jarðfræðistofan. (2013). *Vaðlaheiði - Langsnið eftir áformaðri jarðgangaleið*.
- Joerimann Stahl- & Tunnelbau. (2013). *JB-Gitterträger*. Retrieved from <http://www.joerimann.com/informationen/jm-gittertraeger{ }1314017303.pdf.pdf>
- Komselis, C., Blayney, N., & Hindle, D. (2012). The use of lattice girders in the construction of tunnels. *The Masterbuilder, India's Construction Magazine*, 14(4), 88–94.
- Luo, J. (1999). *A New Rock Bolt Design Criterion and Knowledge-Based Expert System for Stratified Roof* (Unpublished doctoral dissertation). Blacksburg, Virginia.
- Mannvit, & Vegagerðin. (2011). *Vaðlaheiðargöng - Yfirlitsmynd*.
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65. doi: 10.1007/s10064-004-0270-5
- Matthías Loftsson, Atli Karl Ingimarsson, Gísli Eiríksson, Björn A. Harðarson, & Hlynur Guðmundsson. (2010). *Sprautusteyptstyrkingar Hagkvæmni mismunandi aðferða* (Tech. Rep.). Unnið af Mannvit í samstarfi við Geotek fyrir Vegagerðina.

- Matthías Loftsson, & Benedikt Óskar Steingrímsson. (2010). *Tæknilegir eiginleikar mismunandi berggerða* (Tech. Rep.). Unnið af Mannvit fyrir Vegagerðina.
- Meranda, J. (2016). *Tölvupóstur 19.02.2016*.
- Morgan, K., Hassan, O., & Weatherill, N. P. (1981). Finite Element Method - The Basis (Volume 1). *Academy of Engineering Polish Academy of Science Chinese Academy of Sciences National Academy of Science Italy (Accademia dei Lincei)*, 35(4), 110–114.
- Norwegian Geotechnical Institute. (2013). *Using the Q-system - Rock mass classification and support design*. Oslo, Norway. Retrieved from <http://www.ngi.no/upload/Fagomr{å}der/Ingeni{T1\o}rgeologi{ }og{ }bergteknikk/Q-methodHandbook2013engweb-version.pdf>
- Porleifur Einarsson. (1985). *Jarðfræði. (5. útgáfa)*. Mál og Menning.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362–377. doi: 10.1016/j.tust.2005.01.005
- Palmström, A. (2009). Comparing the RMR, Q and RMI classification systems. (febrúar).
- Palmström, A., & Stille, H. (2015). *Rock Engineering* (2nd ed.). ICE Publishing.
- Pétur Karl Hemmingsen. (2016). *Spennur í íslensku bergi* (M.Sc.). Háskóli Íslands.
- RocScience. (1985). *Bolt Support Models*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/pdf{ }files/theory/Bolt{ }Formulation.pdf>
- RocScience. (1986). *Liner Yielding*. Retrieved from <https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp/pdf{ }files/theory/Liner{ }yielding.pdf>
- RocScience. (2015). *Tunnel Lining Design Guide*. Retrieved from <http://www.icevirtuallibrary.com/content/book/101071> doi: 10.1680/tldg.29866
- RocScience. (2016). *RS2 Web help*. Retrieved 2016-04-06, from <https://www.rocscience.com/help/phase2/webhelp9/phase2.htm{#}tutorials/Phase2{ }Tutorials.htm>
- Sigurjón Vídalín. (2016a). *Myndir af bergstyrkingum í Vaðlaheiðargöngum*.
- Sigurjón Vídalín. (2016b). *Rannsóknarsvæði í Vaðlaheiðargöngum*.
- Sigurjón Vídalín. (2016c). *Tölvupóstur 03.05.2016*.
- Sigurjón Vídalín. (2016d). *Tölvupóstur 11.01.2016*.
- Sigurjón Vídalín. (2016e). *Vaðlaheiðargöng - Jarðfræðikortlagning. Óútgefnar jarðfræðiskýrslur*.

HEIMILDIR

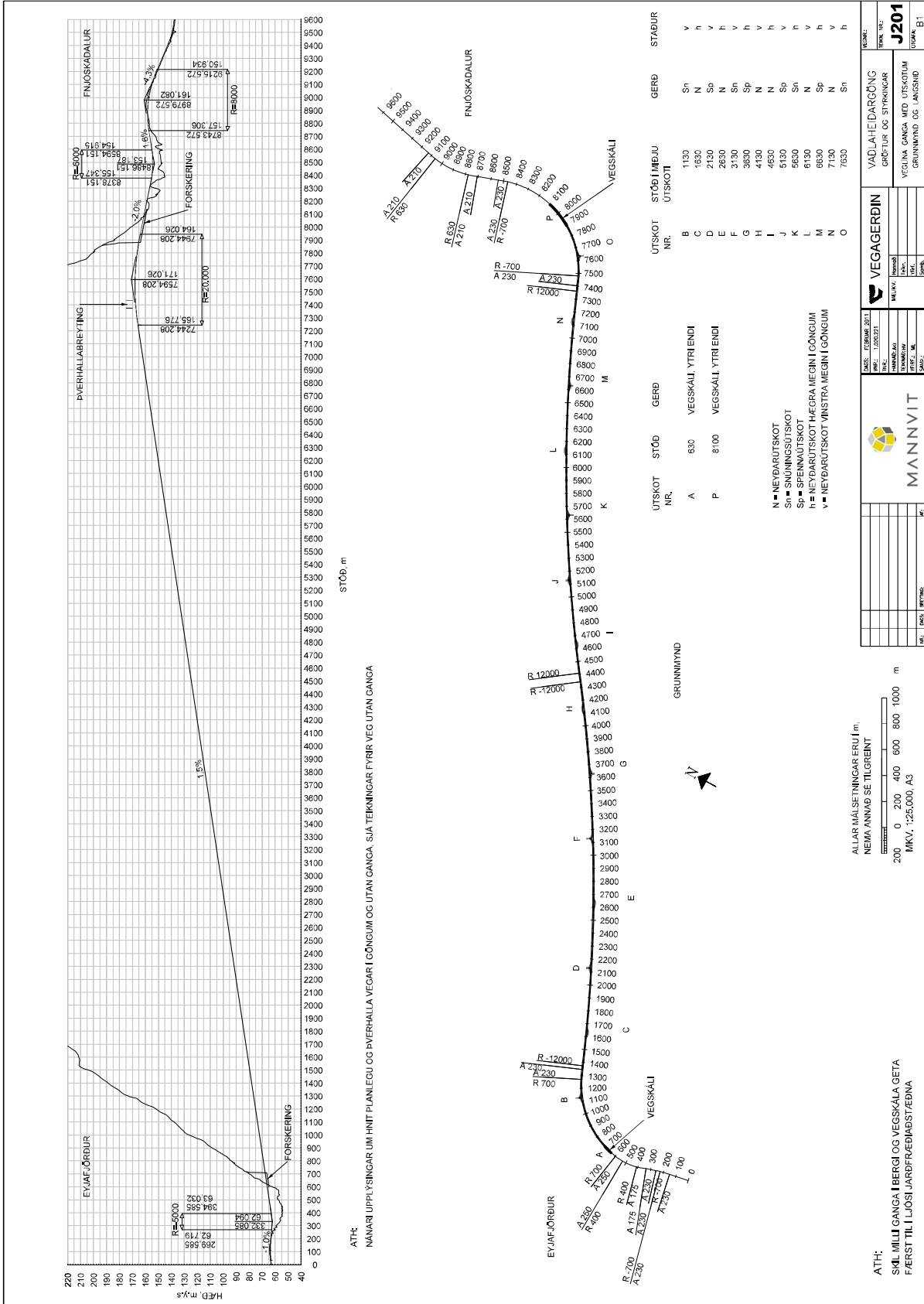
- Sigurður Erlingsson. (2013a). *Engineering Rock Mechanics. Lecture Notes (DRAFT)*. Fyrirlestrarnótur í námskeiðinu BYG121F Engineering rock mechanics. Háskóli Íslands. Verkfræði og náttúruvísindasvið.
- Sigurður Erlingsson. (2013b). *Rock Support Interaction Analysis*. Fyrirlestrarnótur í námskeiðinu BYG121F Engineering rock mechanics. Háskóli Íslands. Verkfræði og náttúruvísindasvið.
- Statens Vegvesen. (2014a). *Håndbok N500 - Vegtunneler (2010)*. Retrieved from http://www.vegvesen.no/{_}attachment/61913
- Statens Vegvesen. (2014b). *Håndbok V224 - Fjellbolting (2000)*. Retrieved from http://www.vegvesen.no/{_}attachment/69898/binary/964020
- Stefán Geir Árnason. (2016). *Samantekt á notuðum bergstyrkingum á rannsóknarsvæðum í Vaðlaheiðargöngum*.
- Vaðlaheiðargöng. (2014). *Um göngin* (Vol. 2015). Retrieved from <http://www.vadlaheidi.is/is/um-gongin/um-gongin>
- Vegagerðin. (2016). *Jarðgöng á Íslandi*. Retrieved from <http://www.vegagerdin.is/vegakerfid/jardgong/jardgvegakerf/>

A. Vaðlaheiðargöng

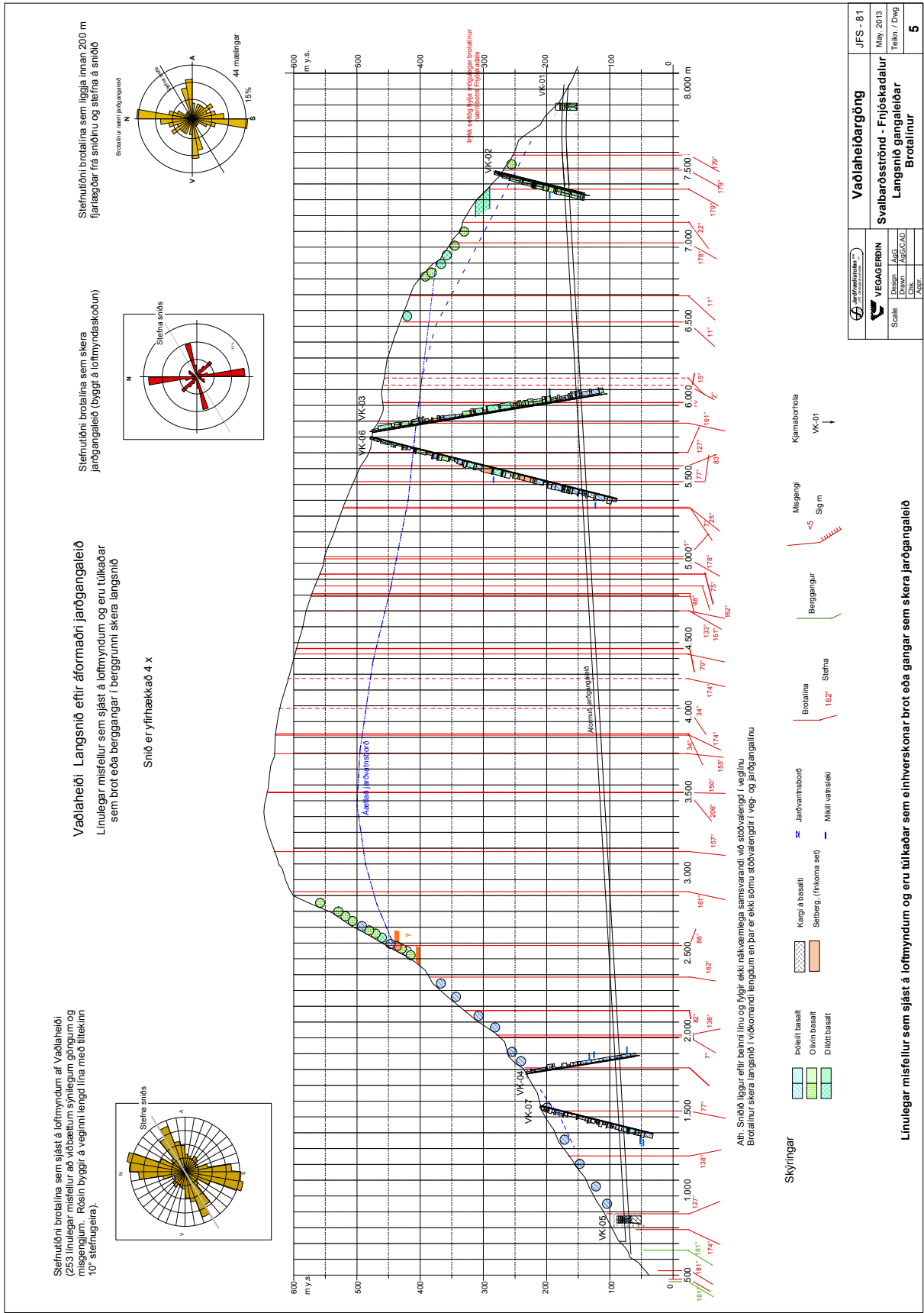


Mynd A.1: Kenniþversnið Vaðlaheiðarganga (Mannvit & Vegagerðin, 2011).

A. Vadlaheiðargöng



Mynd A.2: Lóðrétt og lárétt lega Vadlaheiðarganga (Mannvit & Vegagerðin, 2011).









Mynd A.3: Þversnið í Vaðlaheiði (Jarðfræðistofan, 2013).

		Vaðlaheiðargöng		JFS - 81
SVEINUR JÓHANSSON DRÖGMAÐUR		SVEINUR JÓHANSSON DRÖGMAÐUR		Maí, 2013
Scale: 1:500		Scale: 1:500		Techn. / Drawn
Scale: 1:500		Scale: 1:500		5






Línulegar misfellur sem sjást á loftmyndum og eru túlkaðar sem einhverskonar brot eða gangar sem skera jarðgangaleið

B. GSI og D

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. 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 poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Mynd B.1: Val á GSI stuðli (Hoek, 2007).

B. GSI og D

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	<p>Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.</p>	<p>D = 0</p>
	<p>Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.</p> <p>Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.</p>	<p>D = 0</p> <p>D = 0.5 No invert</p>
	<p>Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.</p>	<p>D = 0.8</p>
	<p>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.</p>	<p>D = 0.7 Good blasting</p> <p>D = 1.0 Poor blasting</p>
	<p>Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.</p> <p>In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.</p>	<p>D = 1.0 Production blasting</p> <p>D = 0.7 Mechanical excavation</p>

Mynd B.2: Val á D stuðli (Hoek, 2007).

C. Viðmiðunargildi fyrir Q-kerfið

1 RQD (Rock Quality Designation)			RQD
A	Very poor	(> 27 joints per m ³)	0-25
B	Poor	(20-27 joints per m ³)	25-50
C	Fair	(13-19 joints per m ³)	50-75
D	Good	(8-12 joints per m ³)	75-90
E	Excellent	(0-7 joints per m ³)	90-100

Note: i) Where RQD is reported or measured as ≤ 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

Mynd C.1: RQD-gildi og fjöldi misfella (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

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 $2 \times J_n$

Mynd C.2: J_n gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

C. Viðmiðunargildi fyrir Q-kerfið

3 Joint Roughness Number		J_r
a) Rock-wall contact, and b) Rock-wall contact before 10 cm of shear movement		
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
Note: i) Description refers to small scale features and intermediate scale features, in that order		
c) No rock-wall contact when sheared		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact when sheared	1
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) $J_r = 0.5$ can be used for planar slickensided joints having lineations, provided the lineations are oriented in the estimated sliding direction		

Mynd C.3: J_r gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

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: i) Factors C to F are crude estimates. Increase J_w if the rock is drained or grouting is carried out ii) Special problems caused by ice formation are not considered		

Mynd C.4: J_w gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

4 Joint Alteration Number		Φ_r approx.	J_a
a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings)			
A	Tightly healed, 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
b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)			
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
c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings)			
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

Mynd C.5: J_a gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

C. Viðmiðunargildi fyrir Q-kerfið

6 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 ≤ 50m)		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 > 50m)		2,5	
Note: i) 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		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	SRF
F	Low stress, near surface, open joints	>200	<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	0,5-0,65	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: ii) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$, where σ_c = unconfined compression strength, σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses, and σ_θ = maximum tangential stress (estimated from elastic theory)				
iii) 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		σ_θ / σ_c	SRF	
M	Mild squeezing rock pressure	1-5	5-10	
N	Heavy squeezing rock pressure	>5	10-20	
Note: iv) 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	

Mynd C.6: SRF-gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).




7 Type of excavation		ESR
A	Temporary 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, \approx 100 years, or without access for maintenance.	0.5

Mynd C.7: ESR-gildi (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

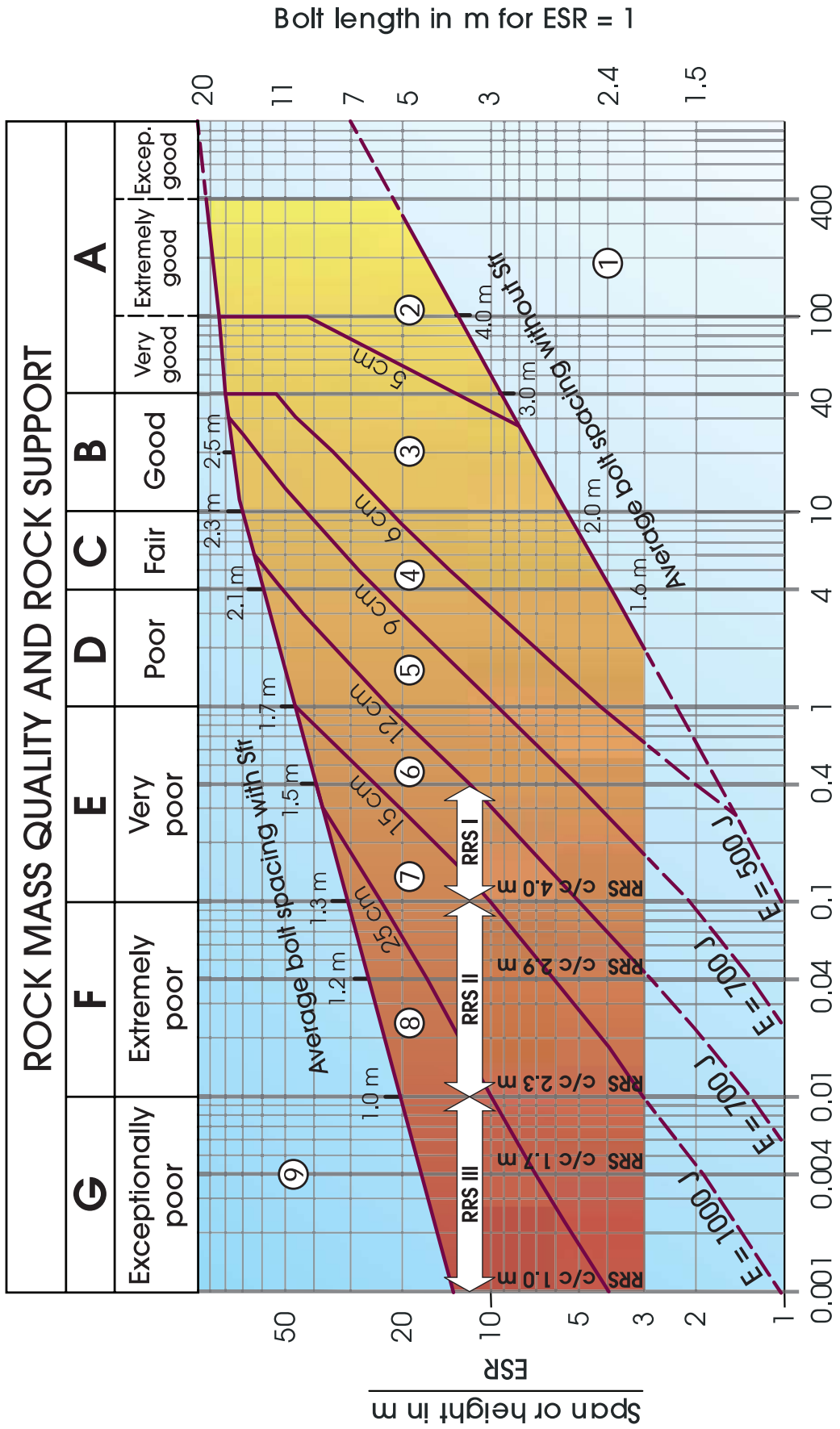
In rock masses of good quality	$Q > 10$	Multiply Q-values by a factor of 5.
For rock masses of intermediate quality	$0.1 < Q < 10$	Multiply Q-values by a factor of 2.5. In cases of high rock stresses, use the actual Q-value.
For rock masses of poor quality	$Q < 0.1$	Use actual Q-value.

Mynd C.8: Breytibættir Q-gildis fyrir hönnun veggja (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

C. Viðmiðunargildi fyrir Q-kerfið

Support categories	RRS - spacing related to Q-value
① Unsupported or spot bolting	
② Spot bolting, SB	
③ Systematic bolting, fibre reinforced sprayed concrete, 5-6 cm, B+Sfr	
④ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 6-9 cm, Sfr (E500)+B	 Si30/6 Ø16 - Ø20 (span 10m) D40/6+2 Ø16-20 (span 20m)
⑤ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 9-12 cm, Sfr (E700)+B	 D45/6+2 Ø16-20 (span 10m) D55/6+4 Ø20 (span 20m)
⑥ Fibre reinforced sprayed concrete and bolting, 12-15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, Sfr (E700)+RRS I +B	 D40/6+4 Ø16-20 (span 5 m) D55/6+4 Ø20 (span 10 m) D70/6+6 Ø20 (span 20 m)
⑦ Fibre reinforced sprayed concrete > 15 cm + reinforced ribs of sprayed concrete and bolting, Sfr (E1000)+RRS II+B	
⑧ Cast concrete lining, CCA or Sfr (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	
	<p>si30/6 = Single layer of 6 rebars, 30 cm thickness of sprayed concrete</p> <p>D = Double layer of rebars</p> <p>Ø16 = Rebar diameter is 16 mm</p> <p>c/c = RSS spacing, centre - centre</p>

Mynd C.9: Nánari upplýsingar um styrkingar miðað við Q-kerfið (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).



















$$\text{Rock mass quality } Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Mynd C.10: Styrking í bergi miðað við Q-kerfið (Norwegian Geotechnical Institute, 2013).

















D. Dæmi um jarðfræðikortlagningu

Legend

Geology

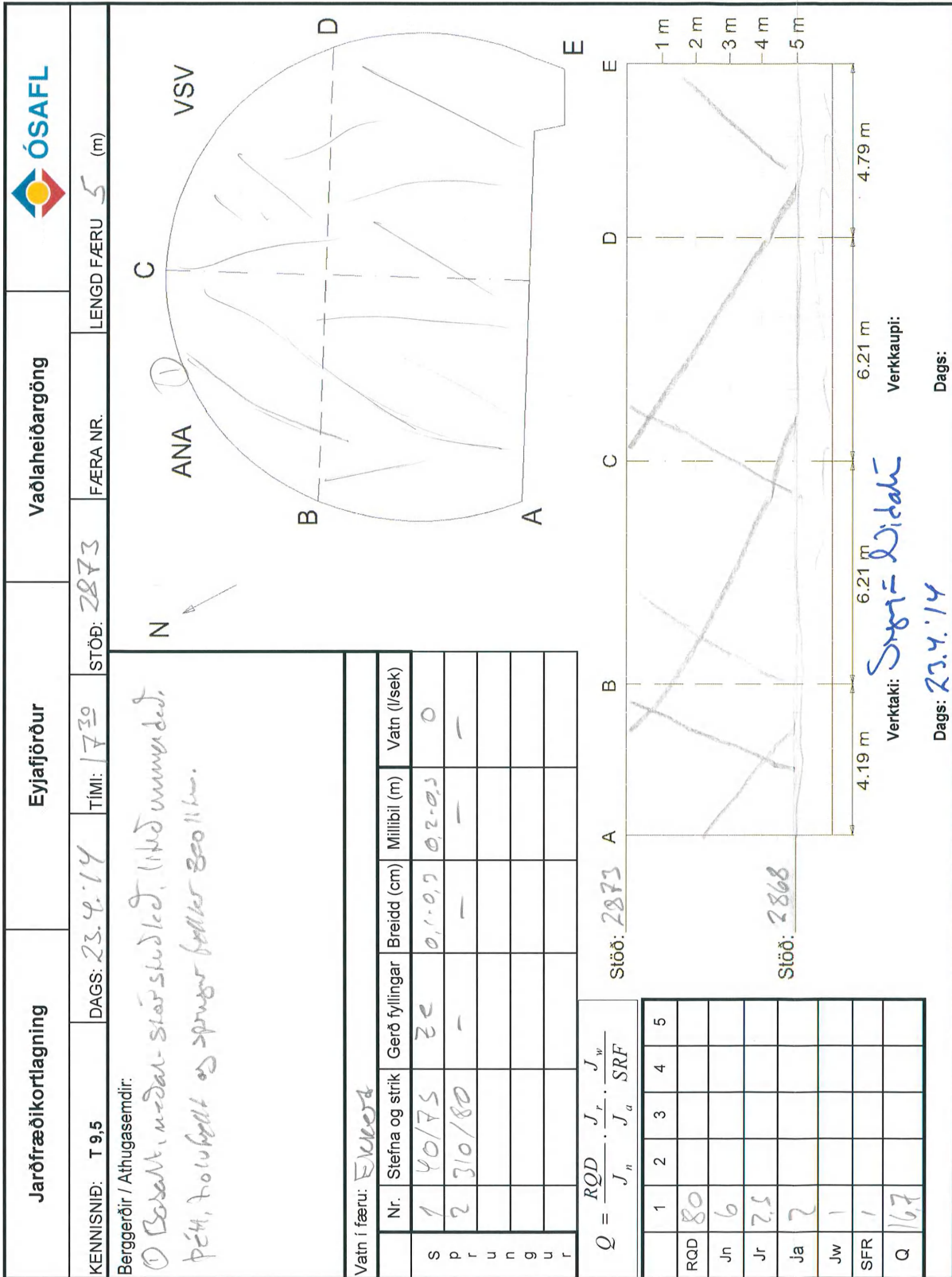
	Tholeiite		Porphyritic Basalt
	Olivine Basalt		Dyke intrusions
	Clay and silt sediment		Sedimentary layers
	Scoria		Breccia
	Small joints		Open joints with clay/silt fillings
	Open joints		Fault with Silt or Breccia fillings
	Closed joints		Water dripping
	Water dripping		Water outflow (L/s)

Rock reinforcements

	Bolt - SN 3,0m
	Bolt - SN 4,0m
	Bolt - SN 5,0m
	Bolt - CT 3,0m
	Bolt - CT 4,0m
	Bolt - CT 5,0m
	Bolt - Swellex 3,0m
	Bolt - FIN 4,0m
	Bolt - IBO 8,0m self drilling
	Shotcrete, fibre reinforced
	Shotcrete, special conditions
	Rock strap
	Lattice girders
	Steel mesh
	Spiling bolts (32mm)
	Probe drilling

Mynd D.1: Myndaskýringar fyrir jarðfræðikort (Sigurjón Vídalín, 2016b).

D. Dæmi um jarðfræðikortlagningu



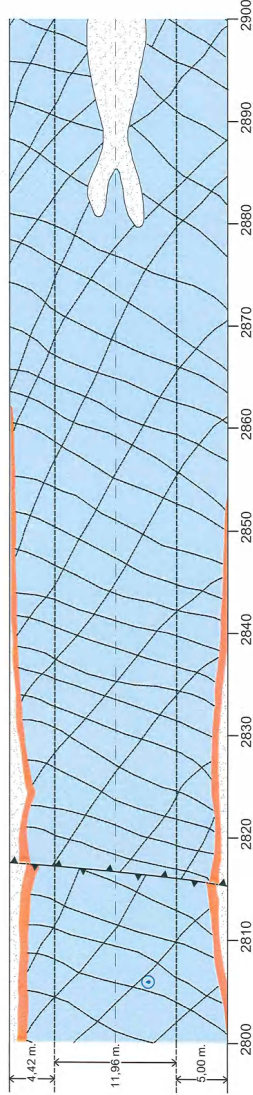
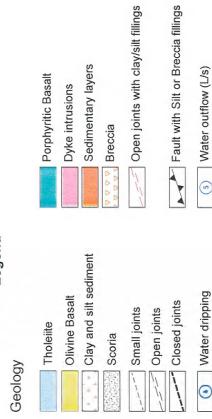
Mynd D.2: Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 1 (Sigurjón Vídalín, 2016e).

VADLAHEIÐARGÖNG

Geological map

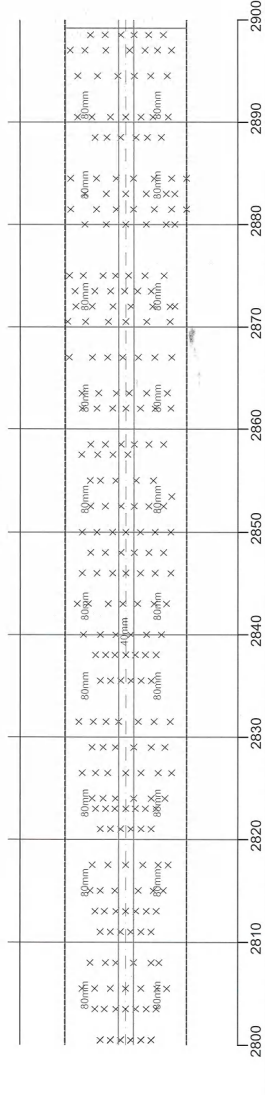
Fnjóskadalur

Eyjafjörður

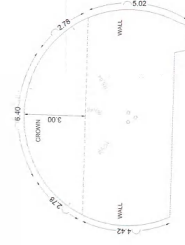


Requested thickness	Walls	Other
150 mm		
120 mm		
100 mm		
80 mm		
60 mm		
40 mm		
180 mm		
150 mm		
100 mm		
80 mm		
40 mm		

Rock support map



Round nr:	
Date:	
Q-value crown:	
Shotcrete m ² :	
Probe drilling:	
Grouting m ² :	
Other:	



ÓSAFL	
Performed:	Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Drawn:	Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Date:	April 2014
Client:	Vadlaheirargöng hf.
Title:	Vadlaheirði tunnel - Geological map
Station:	2800 - 2900
Drawing No.:	
Scale:	1 : 400

Mynd D.3: Rannsóknarsvæði 1 (Sigurjón Vídalín, 2016b).

D. Dæmi um jarðfræðikortlagningu

Jarðfræðikortlagning	Eyjafjörður	Vaðlaheirðargöng	ÓSAFL																																																
KENNISNÍÐ: T 9.5	DAGS: 14.9.13	TÍMI: 2 ⁰⁰	STÖÐ: 1282.S																																																
Bergerdír / Athugasemdir:	FÆRA NR. 146																																																		
① Setberg, sandteitur, mjós veikt. ② Kersi, sandteitur, vel samliður. ③ Basalt, föluvert umgræddur og þétt berg. Föluvert á hvíttum holusýllingum & úti og dreif. Frekar veikt berg. Þrum leir í sprungum og leirskurri á opnum sprunguflokkum	LENGD FÆRU S (m)																																																		
Vatn í færur: FUKORT																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Stefna og strik</th> <th>Gerð fyllingar</th> <th>Breidd (cm)</th> <th>Millibíl (m)</th> <th>Vatn (l/sek)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>30/80</td> <td>Leir þrum</td> <td>0-10</td> <td>0.5-1.0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>320/80</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Nr.	Stefna og strik	Gerð fyllingar	Breidd (cm)	Millibíl (m)	Vatn (l/sek)	1	30/80	Leir þrum	0-10	0.5-1.0	0	2	320/80	—	—	—	0																																	
Nr.	Stefna og strik	Gerð fyllingar	Breidd (cm)	Millibíl (m)	Vatn (l/sek)																																														
1	30/80	Leir þrum	0-10	0.5-1.0	0																																														
2	320/80	—	—	—	0																																														
$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$ <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>RQD</td> <td>40</td> <td>65</td> <td>65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>J_n</td> <td>9</td> <td>9</td> <td>9</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>J_r</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>J_a</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>J_w</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>SFR</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q</td> <td>1.5</td> <td>7.2</td> <td>4.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		1	2	3	4	5	RQD	40	65	65			J _n	9	9	9			J _r	1	3	2			J _a	3	3	3			J _w	1	1	1			SFR	1	1	1			Q	1.5	7.2	4.8			Verktaki: Sigurjón Vídalín Verkkaupi: Dags: 14.9.13		
	1	2	3	4	5																																														
RQD	40	65	65																																																
J _n	9	9	9																																																
J _r	1	3	2																																																
J _a	3	3	3																																																
J _w	1	1	1																																																
SFR	1	1	1																																																
Q	1.5	7.2	4.8																																																

Mynd D.4: Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 2 (Sigurjón Vídalín, 2016e).

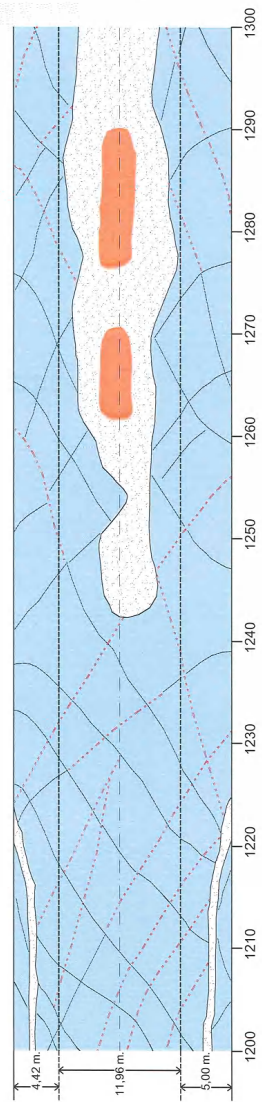
VADLAHEIÐARGÖNG

Geological map

Fniðskadalur

Eyjafjörður

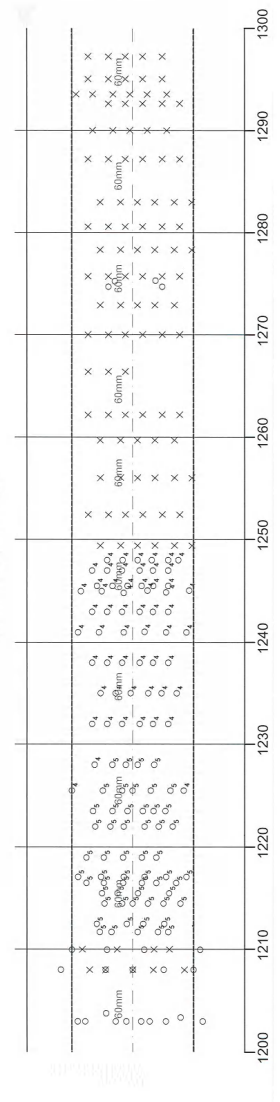
- Legend**
- Geology**
- Tholeiite
 - Olivine Basalt
 - Clay and silt sediment
 - Scoria
 - Small joints
 - Open joints
 - Closed joints
 - Water dripping
- Other**
- Porphyritic Basalt
 - Dyke intrusions
 - Sedimentary layers
 - Breccia
 - Open joints with clay/silt fillings
 - Fault with Silt or Breccia fillings
 - Water outflow (Ls)



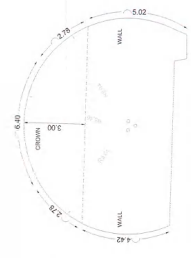
Rock reinforcements

X	Belt - SN 3.0m
X ₄	Belt - SN 4.0m
X ₅	Belt - SN 5.0m
O	Belt - CT 3.0m
O ₄	Belt - CT 4.0m
O ₅	Belt - CT 5.0m
△	Belt - Swellex 3.0m
△ ₄	Belt - FIN 4.0m
△ ₅	Belt - iBo 8.0m self drilling
▨	Shotcrete, fibre reinforced
▨	Shotcrete, special conditions
▨	Rock strap
▨	Lattice girders
▨	Steel mesh
▨	Spalling bolts (32mm)
▨	Probe drilling

Rock support map



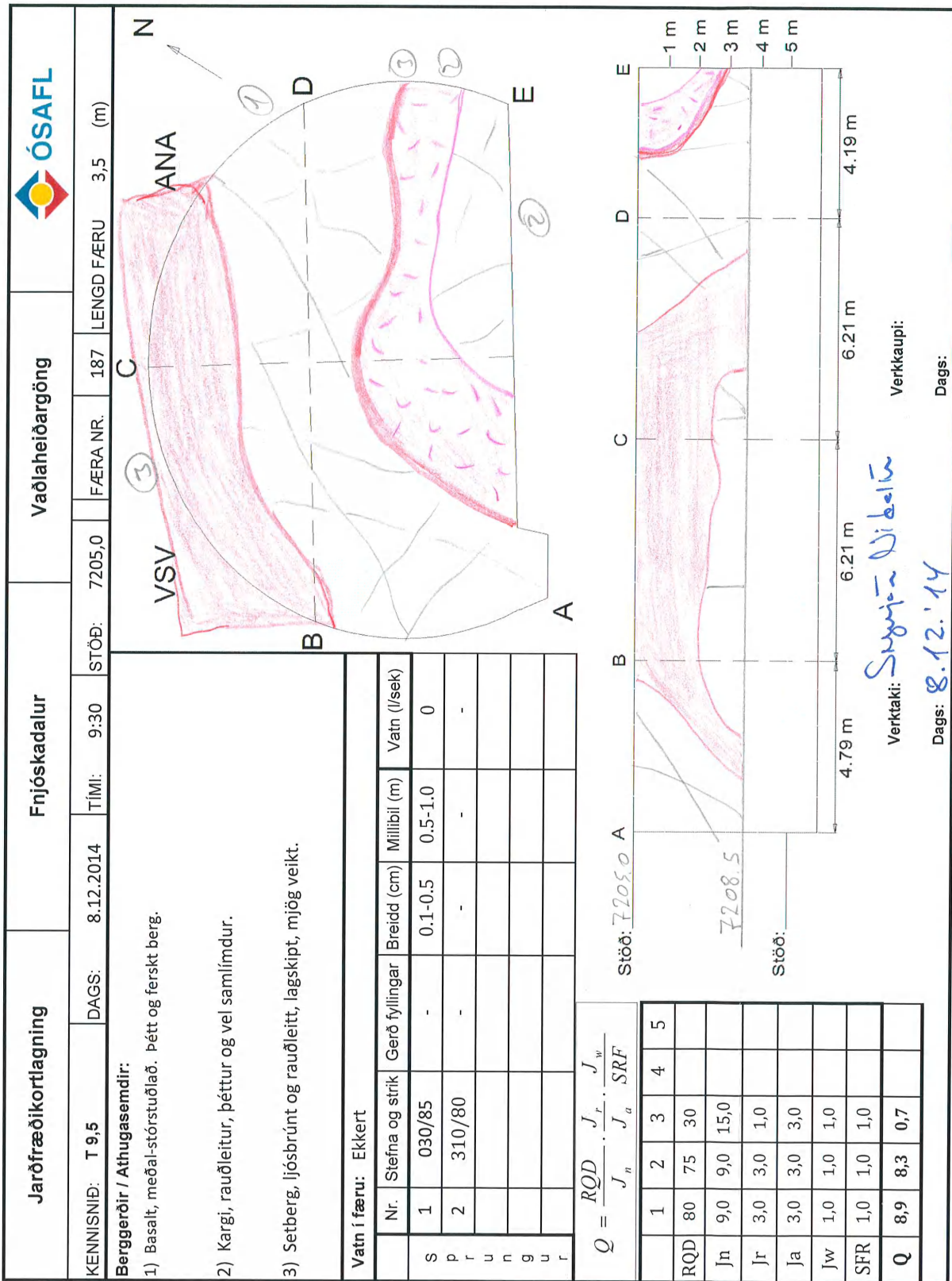
- Round nr:
- Date:
- Q-value crown:
- Shotcrete m²:
- Probe drilling:
- Grouting m²:
- Other:



ÓSAFL
Performed: Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Drawn: Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Date: September 2013
Client: Vadalshéiðargöng hf.
Title: Vadalshéið túnnel - Geological map
Station: 1200 - 1300
Drawing No.:
Scale: 1 - 400

Mynd D.5: Rannsóknarsvæði 2 (Sigurjón Vídalín, 2016b).

D. Dæmi um jarðfræðikortlagningu



Mynd D.6: Dæmi um jarðfræðiskýrslu á rannsóknarsvæði 3 (Sigurjón Víðalín, 2016e).

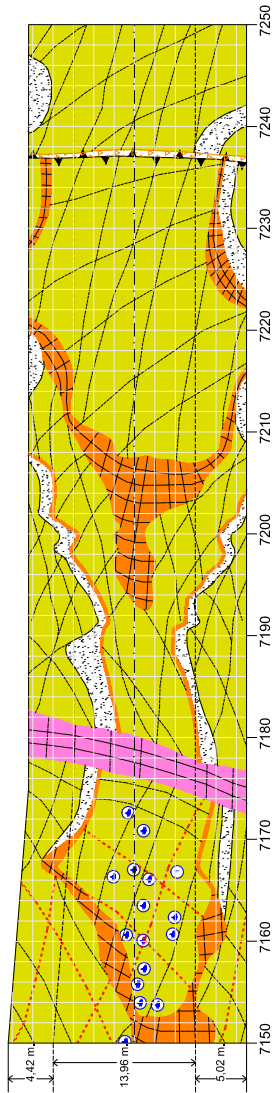
VADLAHEIÐARGÖNG
Geological map

Eyjafförður

Friðskadalur

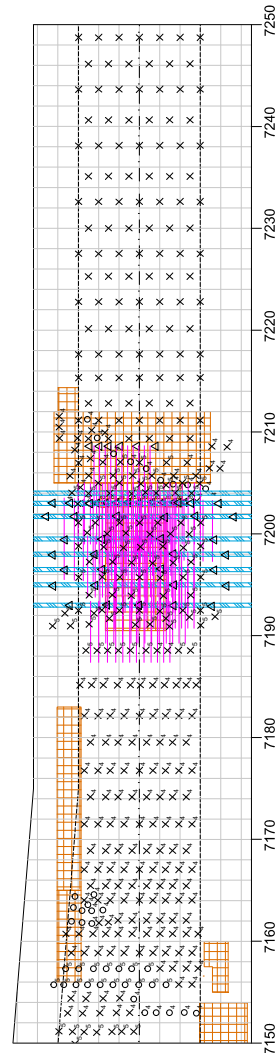
Legend

- | | | |
|------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Geology | Tholeiite | Porphyritic Basalt |
| Olivine Basalt | Dike intrusions | Sedimentary layers |
| Clay and silt sediment | Breccia | Open joints with day/silt filling |
| Scoria | Small joints | Fault with Silt or Breccia filling |
| Open joints | Closed joints | Water outflow (L/s) |
| Water dipping | | |



180 mm	120 mm	100 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Crown					
180 mm	120 mm	100 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Requester					
thickness					
150 mm	120 mm	100 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Walls					

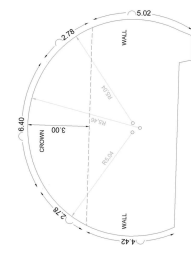
Rock support map



Round nr:	19	208	207	206	205	204	203	202	201-200	199	198	196	195	194	187	186	185	184	183	182	181	180	179	
Date:	15.10.15	10.11.15	9.11.15	8.11.15	7.1.15	6.1.15	6.1.15	7.1.15	7.1.15	6.1.15	5.1.15	4.1.15	3.1.15	2.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	1.1.15	
Overalls crown:	10	16.0	15.0	16.0	12.0	14.0	8.0	8.0	16.0	12.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
Shotcrete m ² :																								
Probe drilling																								
Grouting m ³ :																								
Other:																								

Rock reinforcements

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Bolt - SN 3.0m | Shotcrete, special conditions |
| Bolt - SN 4.0m | Rock strap |
| Bolt - SN 5.0m | Lattice girders |
| Bolt - CT 3.0m | Steel mesh |
| Bolt - CT 4.0m | Spiling bolts (32mm) |
| Bolt - CT 5.0m | Probe drilling |
| Bolt - Swellex 3.0m | |
| Bolt - FIN 4.0m | |
| Bolt - IBO 8.0m self drilling | |
| Shotcrete, fibre reinforced | |



	Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Performet:	Sigurjón Vídalín Guðmundsson
Drawn:	January - December
Date:	Vadlaheiðargöng hf.
Client:	Vadlaheið tunnel - Geological map
Title:	7150 - 7250
Station:	DRAFT
Drawing No.:	Scale: 1 : 400

Mynd D.7: Rannsóknarsvæði 3 (Sigurjón Vídalín, 2016b).

E. Útreikningar fyrir hönnun styrkinga með Q-gildi

Rannsóknarsvæði 1

Tafla E.1: Aðlöguð Q-gildi (*) ásamt yfirborðsflatarmáli fyrir hverja færurannsóknarsvæðis 1.

Færa nr.	Lengd [m]	Flatarmál [m^2]		Q-gildi		
		Þekja	Veggir	Vinstri*	Þekja	Hægri*
1	5,0	59,9	40,9	67,9	16,7	67,9
2	5,0	59,9	40,9	70,5	16,7	70,5
3	4,5	53,9	36,8	72,4	16,7	72,4
4	5,0	59,9	40,9	72,4	16,7	83,5
5	5,0	59,9	40,9	73,8	16,7	83,5
6	4,0	47,9	32,7	83,5	16,7	83,5
7	5,0	59,9	40,9	83,5	16,7	83,5
8	5,0	59,9	40,9	83,5	16,7	83,5
9	5,0	59,9	40,9	83,5	16,7	83,5
10	5,0	59,9	40,9	83,5	15,86	83,5
Samtals:	48,5					

Tafla E.2: Hannað magn bergbolta fyrir rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Bil bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
1	2,96	2,49	2,96	1	12	1	2,8
2	2,97	2,49	2,97	1	12	1	2,8
3	2,98	2,49	2,98	1	11	1	2,9
4	2,98	2,49	3,03	1	12	1	2,8
5	2,98	2,49	3,03	1	12	1	2,8
6	3,03	2,49	3,03	1	10	1	3,0
7	3,03	2,49	3,03	1	12	1	2,8
8	3,03	2,49	3,03	1	12	1	2,8
9	3,03	2,49	3,03	1	12	1	2,8
10	3,03	2,48	3,03	1	12	1	2,8
			Σ	10	117	10	

E. Útreikningar fyrir hönnun styrkinga með Q-gildi

Tafla E.3: Hannað magn sprautusteypu fyrir rannsóknarsvæði 1.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
1	3,7	5,0	3,7	0,2	3,0	0,3	0,7
2	3,7	5,0	3,7	0,2	3,0	0,3	0,7
3	3,7	5,0	3,7	0,2	2,7	0,2	0,7
4	3,7	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
5	3,7	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
6	3,6	5,0	3,6	0,2	2,4	0,2	0,7
7	3,6	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
8	3,6	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
9	3,6	5,0	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
10	3,6	5,1	3,6	0,2	3,0	0,3	0,7
			Σ	2,3	29,1	2,5	

Rannsóknarsvæði 2

Tafla E.4: Aðlöguð Q-gildi (*) fyrir veggj auk yfirborðsflatarmáli hvernar færú rannsóknarsvæðis 2.

Færa nr.	Lengd [m]	Flatarmál [m^2]		Q-gildi		
		Þekja	Veggir	Vinstri*	Þekja	Hægri*
138	5,0	59,9	13,6	14,0	6,4	14,0
139	4,5	53,9	12,3	14,0	6,4	14,0
140	4,5	53,9	12,3	14,0	6,4	14,0
141	5,5	65,9	15,0	14,0	4,8	14,0
142/143	4,5	53,9	12,3	14,0	4,8	14,0
144	5,0	59,9	13,6	12,0	6,0	12,0
145	5,0	59,9	13,6	12,0	4,5	12,0
146	5,0	59,9	13,6	12,0	4,5	12,0
147/148	5,0	59,9	13,6	12,0	4,5	12,0
149	5,0	59,9	13,6	12,0	6,0	12,0
150/151	5,0	59,9	13,6	12,0	6,0	12,0
Samtals:	54,0					

Tafla E.5: Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Bil bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
138	2,4	2,2	2,4	2	15	2	3,8
139	2,4	2,2	2,4	2	14	2	4,0
140	2,4	2,2	2,4	2	14	2	4,0
141	2,4	2,1	2,4	2	18	2	4,0
142/143	2,4	2,1	2,4	2	15	2	4,2
144	2,4	2,2	2,4	2	15	2	3,8
145	2,4	2,1	2,4	2	17	2	4,2
146	2,4	2,1	2,4	2	17	2	4,2
147/148	2,4	2,1	2,4	2	17	2	4,2
149	2,4	2,2	2,4	2	15	2	3,8
150/151	2,4	2,2	2,4	2	15	2	3,8
			Σ	22	172	22	

Tafla E.6: Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 2.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
138	5,2	6,1	5,2	0,3	3,7	0,4	0,9
139	5,2	6,1	5,2	0,3	3,3	0,3	0,9
140	5,2	6,1	5,2	0,3	3,3	0,3	0,9
141	5,2	6,5	5,2	0,4	4,3	0,4	0,9
142/143	5,2	6,5	5,2	0,3	3,5	0,3	0,9
144	5,4	6,2	5,4	0,4	3,7	0,4	0,9
145	5,4	6,6	5,4	0,4	4,0	0,4	0,9
146	5,4	6,6	5,4	0,4	4,0	0,4	0,9
147/148	5,4	6,6	5,4	0,4	4,0	0,4	0,9
149	5,4	6,2	5,4	0,4	3,7	0,4	0,9
150/151	5,4	6,2	5,4	0,4	3,7	0,4	0,9
			Σ	3,7	41,2	4,0	

Rannsóknarsvæði 3

Tafla E.7: Aðlöguðu Q-gildi (*) ásamt yfirborðsflatarmáli fyrir hverja færú rannsóknarsvæðis 3.

Færa nr.	Lengd [m]	Flatarmál [m^2]		Vinstri*	Q-gildi	
		Þekja	Veggir		Þekja	Hægri*
183	5,0	59,9	13,6	22,3	8,9	22,3
184	5,0	59,9	13,6	11,3	8,9	22,3
185	5,0	59,9	13,6	19,3	8,9	17,9
186	3,5	41,9	9,5	22,3	6,2	15,4
187	3,5	41,9	9,5	22,1	0,7	22,3
188/189	3,0	35,9	8,2	21,7	0,7	22,3
190	1,0	12,0	2,7	20,0	0,8	20,0
191	1,0	12,0	2,7	20,0	0,9	20,0
192	1,5	18,0	4,1	20,0	0,9	20,0
193	1,0	12,0	2,7	20,0	0,9	20,0
194	2,0	24,0	5,4	20,0	1,3	20,0
195	2,0	24,0	5,4	20,0	1,8	20,0
196	2,0	24,0	5,4	19,5	6,0	19,5
197	1,0	12,0	2,7	19,5	6,0	19,5
198	2,0	24,0	5,4	19,5	7,9	19,5
199	5,0	59,9	13,6	19,5	7,9	19,5
Samtals:	43,5					

Tafla E.8: Hannaður fjöldi grindarboga á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Q-gildi Þekja	Bil milli grindarboga [m]	Fjöldi grindarboga í færú
183-186	8,2	-	-
187	0,7	3,5	1
188-189	0,7	3	1
190	0,8	1	1
191	0,9	1	1
192	0,9	1,5	1
193	0,9	1	1
194-199	5,2	-	-
		Σ	6

Tafla E.9: Hannað magn bergbolta á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Bil milli bergbolta [m]			Fjöldi bolta [stk]			Boltar/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
183	2,58	2,31	2,58	2	14	2	3,6
184	2,38	2,31	2,58	2	14	2	3,6
185	2,54	2,31	2,51	2	14	2	3,6
186	2,58	2,21	2,47	1	11	1	3,7
187	2,58	1,70	2,58	1	18	1	5,7
188/189	2,57	1,70	2,58	1	16	1	6,0
190	2,55	1,73	2,55	1	5	1	7,0
191	2,55	1,75	2,55	1	5	1	7,0
192	2,55	1,75	2,55	1	8	1	6,7
193	2,55	1,75	2,55	1	5	1	7,0
194	2,55	1,83	2,55	1	9	1	5,5
195	2,55	1,90	2,55	1	8	1	5,0
196	2,54	2,20	2,54	1	6	1	4,0
197	2,54	2,20	2,54	1	3	1	5,0
198	2,54	2,28	2,54	1	6	1	4,0
199	2,54	2,28	2,54	2	14	2	3,6
			Σ	20	156	20	

Tafla E.10: Hannað magn sprautusteypu á rannsóknarsvæði 3.

Færa nr.	Þykkt steypu [cm]			Magn steypu [m^3]			m^3/m
	Vinstri	Þekja	Hægri	Vinstri	Þekja	Hægri	
183	4,7	5,7	4,7	0,3	3,4	0,3	0,8
184	5,4	5,7	4,7	0,4	3,4	0,3	0,8
185	4,9	5,7	4,9	0,3	3,4	0,3	0,8
186	4,7	6,2	5,1	0,2	2,6	0,2	0,9
187	12,0	12,0	12,0	6,5	9,9	6,5	6,6
188/189	12,0	12,0	12,0	6,1	9,0	6,1	7,1
190	12,0	12,0	12,0	4,4	5,3	4,4	14,0
191	12,0	12,0	12,0	4,4	5,3	4,4	14,1
192	12,0	12,0	12,0	4,8	6,3	4,8	10,6
193	12,0	12,0	12,0	4,4	5,3	4,4	14,1
194	4,8	8,6	4,8	0,1	2,1	0,1	1,2
195	4,8	8,0	4,8	0,1	1,9	0,1	1,1
196	4,8	6,2	4,8	0,1	1,5	0,1	0,9
197	4,8	6,2	4,8	0,1	0,7	0,1	0,9
198	4,8	5,9	4,8	0,1	1,4	0,1	0,8
199	4,8	5,9	4,8	0,3	3,5	0,3	0,8
			Σ	32,6	65,2	32,6	